太阳黑子数重新校准：状态报告

F. Clette[a], L. Lefèvre[a], T. Chatzistergos[b], H. Hayakawa[c], V.M. Carrasco[d], R. Arlt[e], E.W. Cliver[f], T. Dudok de Wit[g], T. Friedli[h], N. Karachik[j], G. Kopp[j], M. Lockwood[k], S. Mathieu[l], A. Muñoz-Jaramillo[m], M. Owens[k], D. Pesnell[n], A. Pevtsov[f], L. Svalgaard[o], I.G. Usoskin[p], L. van Driel-Gesztelyi[q], J.M. Vaquero[d]

[a] SILSO世界数据中心，比利时皇家天文台，Circulaire大道3号，1180 布鲁塞尔，比利时

[b] 马克斯·普朗克太阳系研究所，Justus-von-Liebig-weg 3号，37077 哥廷根，德国

[c] (1) 名古屋大学空间地球环境研究所，日本名古屋，4648601；(2) 名古屋大学高等研究院，日本名古屋，4648601；(3) 英国科学技术设施委员会卢瑟福·阿普尔顿实验室RAL Space空间物理与运行部，哈维尔牛津，迪德科特，牛津郡，OX11 0QX，英国；(4) 理化学研究所仁科中心，日本和光市，3510198

[d] 埃斯特雷马杜拉大学物理系，西班牙巴达霍斯，E-06006

[e] 波茨坦莱布尼茨天体物理研究所，An der Sternwarte 16，14482 波茨坦，德国

[f] 国家太阳天文台，3665 Discovery Drive，3楼，博尔德，CO 80303，美国

[g] (1) LPC2E，法国国家科学研究中心/法国国家空间研究中心/奥尔良大学，45067 奥尔良，法国；(2) 国际空间科学研究所，Hallerstrasse 6，3012 伯尔尼，瑞士

[h] 鲁道夫·沃尔夫学会，Ahornweg 29，3123 贝尔普，瑞士

[i] 乌鲁格·贝格天文研究所，乌兹别克斯坦科学院，Astronomicheskaya 街 33 号，100052 塔什干，乌兹别克斯坦

[j] 大气与空间物理实验室，科罗拉多大学，Discovery Dr. 3665 号，博尔德，CO 80303，美国

[k] 气象系，雷丁大学，Earley Gate，PO Box 243，雷丁 RG6 6BB，英国

[l] ISBA/LIDAM，新鲁汶大学，Pl. de l'Université 1，1348 奥蒂尼-新鲁汶，比利时

[m] 太阳系科学部，西南研究院，博尔德，CO，美国

[n] 代码 671，美国国家航空航天局戈达德太空飞行中心，格林贝尔特，马里兰州 20771，美国

[o] 汉森实验物理实验室，斯坦福大学，斯坦福，加利福尼亚州 94305，美国

[p] 空间物理与天文学研究部及索丹屈莱地球物理观测站，奥卢大学，90014 奥卢，芬兰

[q] (1) 伦敦大学学院，马拉德空间科学实验室，霍姆伯里圣玛丽，多金，萨里，RH5 6NT，英国；(2) 巴黎天文台，巴黎文理研究大学，法国国家科学研究中心，索邦大学，巴黎狄德罗大学，索邦巴黎西岱大学，朱尔·扬森广场 5 号，F-92195 默东，法国；(3) 孔科伊天文台，天文学与地球科学研究中心，孔科伊·特格街 15-17 号，H-1121，布达佩斯，匈牙利

摘要： 我们报告了自2015年太阳黑子数（S_N）2.0版发布以来，沃尔夫太阳黑子数（S_N）和群体太阳黑子数（G_N）持续重新校准工作的进展。本报告既更新了《太阳物理学》2016年专题特刊中所报告的工作，也总结了

国际空间科学研究所（ISSI）于2017年组建的国际团队的工作。该团队致力于开发最佳的S_N和G_N重建方法，同时继续扩充历史太阳黑子数数据库。数据库方面已取得显著进展，但仍需进一步完善提出的各种S_N重建方法以及（主要是）G_N重建方法。待这些方法更加成熟后，便可将新的重建结果（或其组合）与以下内容进行比较：（a）任何归一化方案的"基准"预期（例如，观测者归一化因子随时间回溯而普遍增大）；（b）独立的代理数据序列，例如F10.7和地球未扰动磁场变化的日变化范围。S_N和G_N的底层数据库新版即将推出，涵盖截至2022年的年份；我们预计这两个时间序列的下一版将于2024年发布。

1. 引言

太阳黑子数（S_N；Clette等，2014，2015；Clette和Lefèvre，2016）是一个时间序列（1700年至今），记录了太阳活动及空间天气的11年周期变化和长期变化，因此，S_N是对日益依赖技术的社会至关重要的参数（例如，Baker等人，2008；Cannon等人，2013；Rozanov等人，2019；Hapgood等人，2021）。尽管现代观测或许能提供更好的参数来表征空间天气效应，S_N却是最古老的太阳活动直接观测，因此是连接过去与现在太阳活动行为不可或缺的桥梁。因此，太阳黑子数是重建1940年以前总太阳辐照度（TSI）的主要输入（Wang等人，2005；Krivova、Balmaceda和Solanki，2007；Kopp，2016；Kopp等人，2016；Wu等人，2018年；Coddington等人，2019；Wang和Lean，2021）。

鲁道夫·沃尔夫（1816-1893；Friedli，2016）提出的单个观测者日太阳黑子数原始公式为

$$S_N = k\,[(10 \times G) + S] \qquad (1)$$

（Wolf，1851，1856），其中，G表示给定日期太阳圆面上的太阳黑子群数量，S表示这些太阳黑子群中单个太阳黑子的总数，而k是将不同观测者统一到同一尺度上的归一化因子（k是主要参考观测者的日太阳黑子数S_N与次要观测者日太阳黑子数之比的时间平均值）。由于$S \approx 10\,G$平均而言（Waldmeier，1968；Clette等，2014），这两个参数在S_N中所占权重基本相等。

由于望远镜、视力和环境条件存在差异，不同观测者的G和S计数可能有所不同。这些因素既可能发生渐变（例如视力变化），也可能发生突变（与设备有关）。此外，正如我们将在下文看到的，G和S的工作定义也随着时间发生了变化。在跨越数个世纪的时间跨度内，准确获得多个重叠观测者组之间随时间变化的尺度关系（k系数）–，同时还要应对由于天气造成的单个观测者频繁数据缺口以及偶尔出现的所有观测者之间均无重叠观测时段–，是任何重建方法都面临的艰巨任务。最后，为这一过程增添不可避免噪声的是：不同地点的日G和S观测值存在差异，而这些差异与仪器、环境、观测者敏锐度及观测习惯无关，仅反映世界时上的时间差异；其原因可能是太阳自转（太阳黑子出现在太阳东缘和/或从西缘消失），也可能是太阳本身的变化，即黑子和黑子群的演化。

为了说明两次太阳黑子观测之间可能出现的差异，图1展示了两个不同观测站在同一天绘制的图像。图1 (a) 是来自

瑞士洛迦诺的提契诺太阳天文台，展示了2000年3月14日、太阳活动周第23周（1996年—2008年）峰值附近对太阳黑子群的划分及太阳黑子的计数。图1 (b)展示了同一天约7小时后在美国新墨西哥州太阳黑子市的萨克拉门托峰美国国家太阳天文台拍摄的太阳黑子图（Carrasco 等人，2021a）。尽管这些绘图有显著相似之处，但太阳黑子和太阳黑子群的总数存在差异。

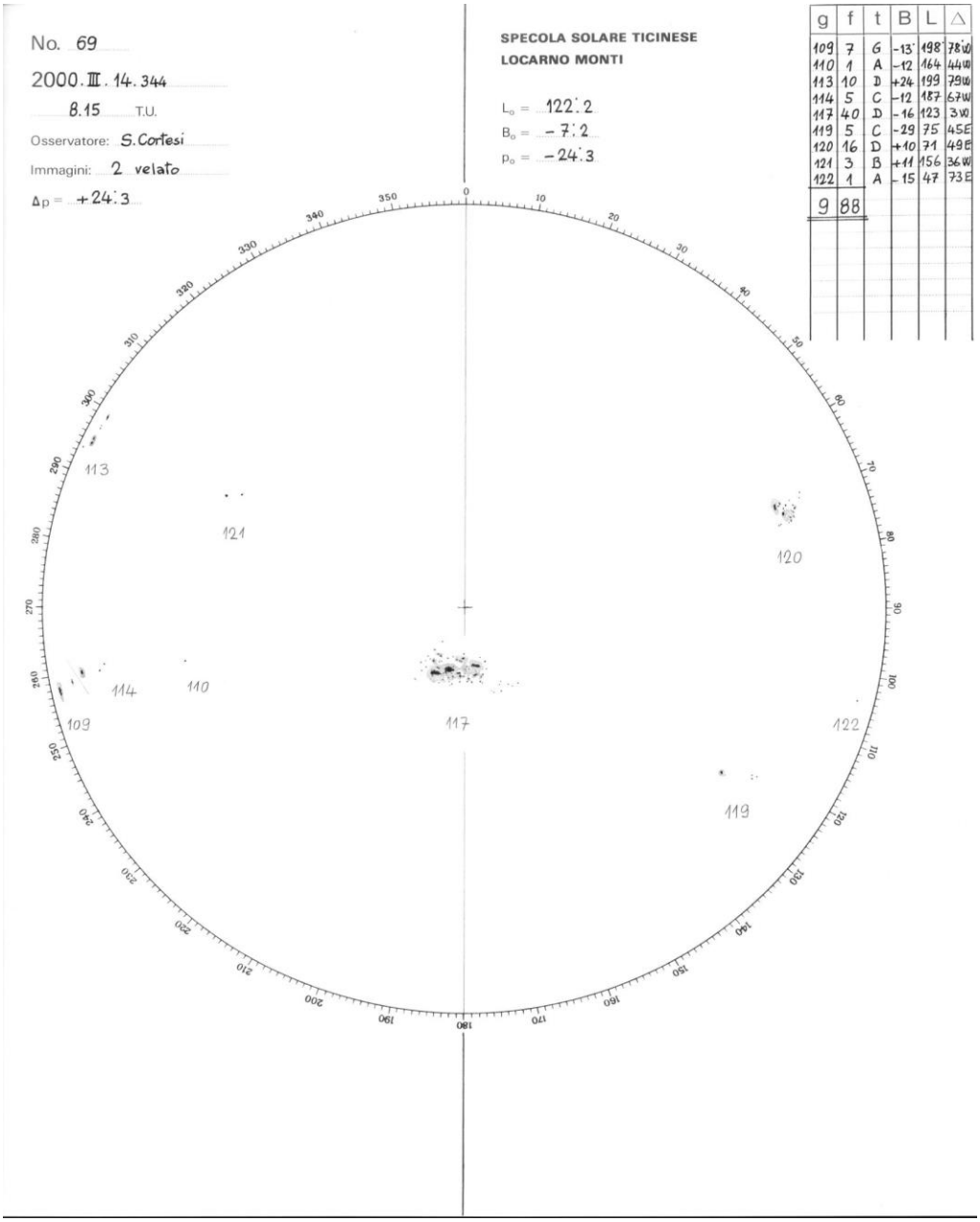

图1。（a）塞尔吉奥·科尔特西于2000年3月14日在提契诺太阳天文台绘制的太阳黑子图。观测到9个太阳黑子群和88个单个太阳黑子（右上角表格中标记为“flecken”，德语意为“太阳黑子”），得出太阳黑子数（洛迦诺）=178。（https://www.specola.ch/e/drawings.html）

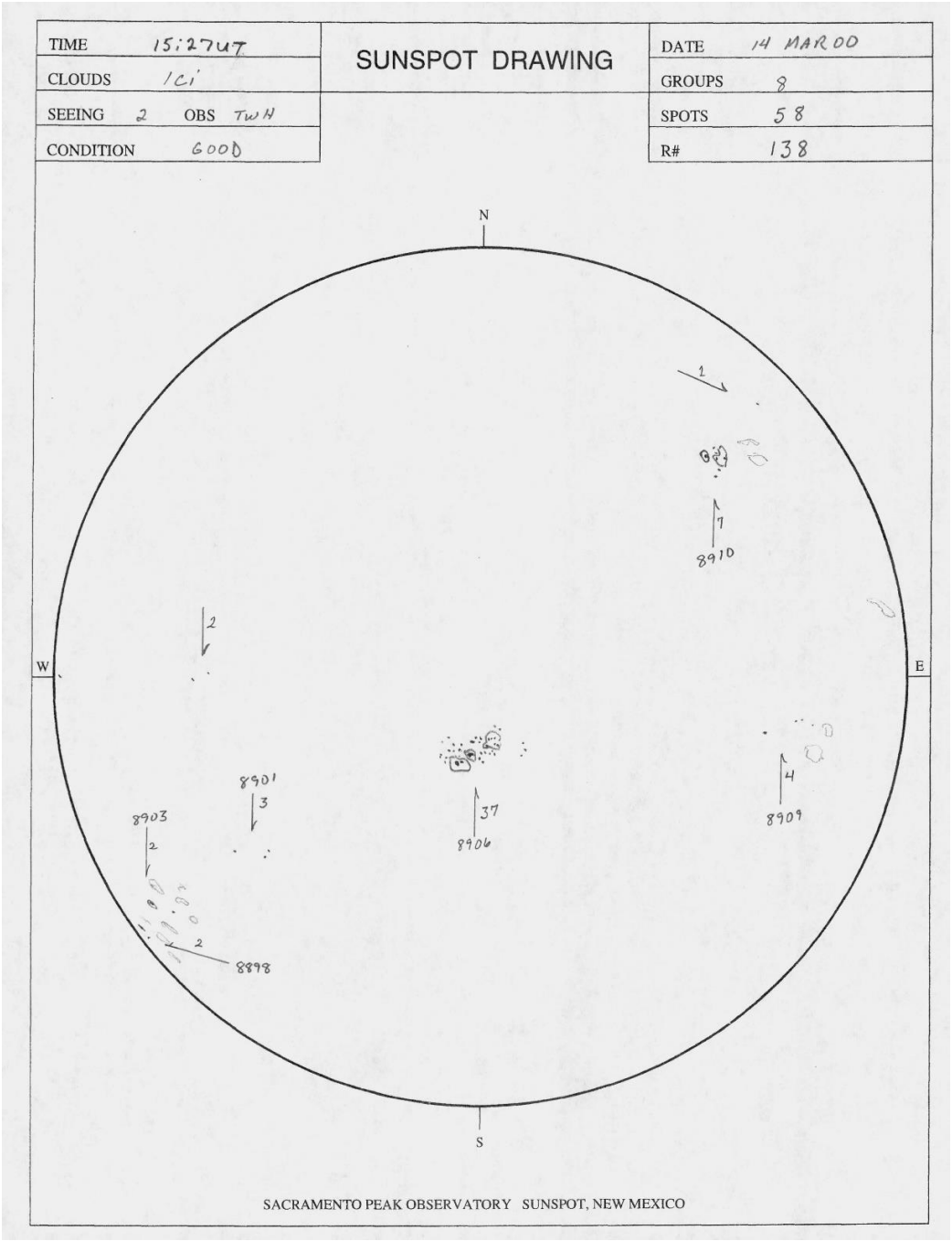

图1。（b）2000年3月14日，Tim Henry 在萨克拉门托峰的美国国家太阳天文台绘制的太阳黑子图，时间约为图1（a）中洛迦诺观测之后7小时。观测到8个太阳黑子群和58个太阳黑子，得出太阳黑子数（萨克峰）= 138。较淡的轮廓勾勒出光球光斑，在太阳边缘附近可见。（https://ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solar-data/solar-imagery/photosphere/sunspot-drawings/sac-peak/）

尽管两幅绘图中的太阳黑子群数差异很小（8 对 9），但还有其他几处差异：例如，洛迦诺观测中显示的第 113 和第 122 群，在萨克拉门托峰的绘图中缺失；而 AR 8910 西北方一个由单个孔洞组成的未编号群，则未出现在洛迦诺绘图中。仅这一个太阳黑子就使太阳黑子数相差 11_{No}。第 113 和第 122 群，以及 AR 8910 西北方的未编号群，都位于靠近太阳边缘的位置，那里可能受到最强的可见性效应影响。因此，这类差异可能源于观测时间不同，也可能 是太阳本身的变化所致，即太阳黑子的出现或消失、生长或衰减，以及太阳自转。对太阳黑子数随机噪声的研究（Dudok de Wit 等，2016年）表明，对于同一日期的观测之间的差异，太阳活动区的随机演化比观测误差影响更大。总体而言，在本例中，太阳黑子数（洛迦诺；2000年3月14日）= 178 而太阳黑子数（萨克峰；2000年3月14日）= 138。

Wolf在1893年去世前，曾多次修订自己创立的S_N 时间序列，但修订仅涉及1848年以前的数据；1848年是他开始观测的年份，也就是说，修订的是根据早期观测者的数据重建的记录（参见Clette等，2014年第2.1节）。作为Wolf的继任者，Wolfer接任苏黎世天文台台长后，于1902年对S_N 作了最后一次修订（针对1802—1830年这一时段），依据是新增的克雷姆斯明斯特观测数据。此后，苏黎世天文台一直维护这一S_N 序列，直至1980年；随后，位于布鲁塞尔的比利时皇家天文台（ROB）接手维护。该序列此后未再更改，只是不断追加新数据，持续更新至今。

直到1998年，S_N 仍是唯一一条直接追踪太阳活动的长期时间序列。那一年，Hoyt和Schatten（1998a、b）构建了群体太阳黑子数（G_N）

$$G_N = k'G \qquad (2)$$

其中，k'为台站归一化因子。这个较简单的指数不计入单个太阳黑子的数量；这一数量反映了太阳黑子群大小的变化，但在早期观测中往往缺失。

太阳黑子群数$_N$ 序列的一项关键优势是，Hoyt 和 Schatten（1998a、b）能够将其重建至约1610年伽利略等人首次通过望远镜观测太阳黑子的时期；相比之下，Wolf 的太阳黑子数S_N 序列起始于1700年。新的太阳黑子群数$_N$ 因此涵盖了1645—1715年太阳黑子活动极其微弱的时期，即蒙德极小期（Eddy，1976；Spörer，1887、1889；Maunder，1894、1922）。直到最近，太阳黑子群数$_N$ 的另一项重要优势在于，所有原始源数据都以开放数字数据库的形式提供；而太阳黑子数$_N$ 的源数据规模大得多（超过~800,000条观测），直到1981年才以数字格式提供（布鲁塞尔时期）。更早的太阳黑子数$_N$ 数据仅以原始纸质形式留存，甚至长期以来被认为部分遗失（见下文第2.1.1节）。由于无法获得这些核心数据，迄今仍无法从基本要素出发，对原始太阳黑子数$_N$ 序列进行完整的端到端重建。

Wolf在方程1中定义的S_N 参数，由于包含S（太阳黑子）分量，因此需要比G_N更详细的观测。然而，早期观测往往含糊不清，因为许多观测者没有明确区分太阳黑子与太阳黑子群，而是对两者都使用同一个名称“sunspot”或“kernel”。此外，如图1所示，大型太阳黑子外围包裹着半影，其中可能包含一个或多个暗色本影。视观测者和观测时期而定，每个半影在S计数中可能计为1，不论其中包含多少个本影；也可能将所有本影分别计数，从而得到更高的S值。S计数和G计数都会受到每位观测者所面临的分辨力阈值问题的影响，即难以辨认最小的太阳黑子，尤其是

对于由单个太阳黑子构成的小型太阳黑子群（此时G = 1、S = 1和S_N = 11），以及没有太阳黑子的情况（G、S和S_N = 0）。最后，G变量本身也有其难点：如何根据星团形态及其演化，将一簇磁偶极子划分为一个或多个不同的太阳黑子群。这种太阳黑子群的拆分取决于个人习惯以及不同时期的科学知识；当太阳黑子众多、接近太阳活动周峰值时，这一问题尤为棘手。

1.1 重新校准太阳黑子数的 ISSI国际团队动机

如果假设 S 与 G 平均而言成正比，且比例常数不随时间变化，则可以认为序列 G_N 和 S_N[1] 是等效的。在这种情况下，G_N 和 S_N 时间序列形态之间的差异将表明一个或两个时间序列存在校准漂移。然而，太阳活动行为可能发生长期变化，这意味着 S/G 比值可能发生变化，而这将是导致 G_N 偏离 S_N 的另一种原因。Clette 等人（ 2016b ）以及 Svalgaard 、 Cagnotti 和 Cortesi （ 2017）实际上发现，S/G 比值受到太阳活动周的调制，这表明两个指数之间存在非线性关系，而且这种关系在时间上似乎是稳定的。因此，在二者重叠的时期，可以认为 S_N 和 G_N 是近似等效的，但具有不同的具体特性和校准方式。

尽管原始苏黎世太阳黑子数$_N$ （本文称为太阳黑子数$_N$ （1））与 Hoyt 和 Schatten（1998a,b；HoSc98）的太阳黑子群数$_N$序列在其 1874—1976年归一化区间内相当吻合，但在此之前的极大值处，HoSc98 显著偏低~1880 （见 Clette 等，2015年中的图1(a)，以及图2（下文））。这一情况令人费解，甚至难以接受。分歧的原因是什么？这两个序列能否协调一致？这些问题促使太阳物理学界投入十年之久，致力于构建更加均一且可信的太阳黑子数$_N$ 和太阳黑子群数$_N$ 时间序列；这一工作始于 2011—2014年的四次太阳黑子数研讨会（Cliver、Clette 和 Svalgaard，2013a年；Cliver 等人，2015年）。这项工作促成了对太阳黑子数$_N$ （1）的重大重新校准：Clette 和 Lefèvre（2016年）将其修订为太阳黑子数$_N$ （2）；Svalgaard 和 Schatten（2016年）则重新校准了 HoSc98，得到 SvSc16。

这些重新校准消除了 S_N (1) 与 HoSc98 之间明显的分歧，时间早于 ~1880 （见 Clette 等，2015 年的图 1(b)），并缩小了 18th 世纪期间的差异（Clette 等，2015 年）。然而，人们对所用方法的有效性提出了质疑（Usoskin 等，2016a 年；Lockwood 等，2016 年），并出现了重新校准的新思路。Wolf 的 S_N 序列和 HoSc98 的 G_N 序列修订的同时，S_N 也进行了独立修订／延长（Lockwood，Owens 和 Barnard，2014a、b；Lockwood 等人，2016年；LEA14），而 Usoskin 等人（2016a 年；UEA16）和 Chatzistergos 等人（2017年；CEA17）则提出了新的 G_N 重建。Willamo 等人（2017年；WEA17）发表了对 UEA16 的修改版，随后 WEA17 又基于 Vaquero 等人（2016年；本文简称 V16；16 表示发布年份）的新数据库进行了修改[2] ，而非采用 Hoyt 和 Schatten（1998年）的原始数据库（Usoskin 等人，2021年；UEA21）。这一结果记录于《太阳物理学》的专题专刊（Clette 等人，2016a），与促成太阳黑子数研讨会的情况相似，但规模更大（Cliver，2017年；

[1] 在本次更新中，我们将分别用 S_N 和 G_N 泛指太阳黑子数和群数的复合时间序列，不论采用何种校准方法。

[2] Vaquero 等人（2016年；V16）用于重建太阳黑子群数$_N$ 的数据库，以及 Hoyt 和 Schatten（1998a、b）原始的观测者数据库，均可在 https://www.sidc.be/silso/groupnumberv3 查阅。

Cliver 和 Herbst，2018）：多个独立构建的序列在 ~1880 之前出现分歧（图2），其范围大致由 SvSc16 和 HoSc98 的结果所界定。这一现状促成了国际空间科学研究所（ISSI）于2017年成功通过一项团队提案，题为“太阳黑子数序列的重新校准”，由 Matt Owens 和 Frédéric Clette 提出。团队会议分别于2018年1月和2019年8月在伯尔尼举行。该提案尚未实现的最终目标，是提供太阳黑子数$_N$ 和太阳黑子群数$_N$ 的共识“最佳方法”重建结果，并给出定量的时间相关不确定性，供科学界使用。本文报告这项工作的成果，并更新2016年专题刊的内容。

在第2节中，我们依次介绍太阳黑子数$_N$ 和太阳黑子群数$_N$相关数据恢复工作的重点，并讨论太阳黑子数重建方法方面的工作。在第3节中，我们讨论太阳黑子数重新校准的两项“基准”（太阳黑子数与太阳黑子群数之比随时间近乎恒定，以及越往过去，k值和k'值越大）。在第4节中，我们回顾了太阳活动独立长期测量指标方面的相关工作。宁静太阳射电辐射、太阳引起的地磁变化和宇宙成因放射性核素浓度等代理指标，可用于验证新版太阳黑子数$_N$ 和太阳黑子群数$_N$。不过我们强调，迄今为止，追溯至1610年的太阳黑子数和群数仍完全独立于这些代理指标。在第5节中，我们讨论了如何在1800—1825年这一数据稀缺时期，将主要观测者Schwabe和Staudacher的观测衔接起来，以及太阳黑子数$_N$ 和太阳黑子群数$_N$ 时间序列最初~140 几年（1610—1748年）所面临的挑战。第6节和第7节分别总结了ISSI团队的研究成果，并展望了正在进行的重新校准工作。

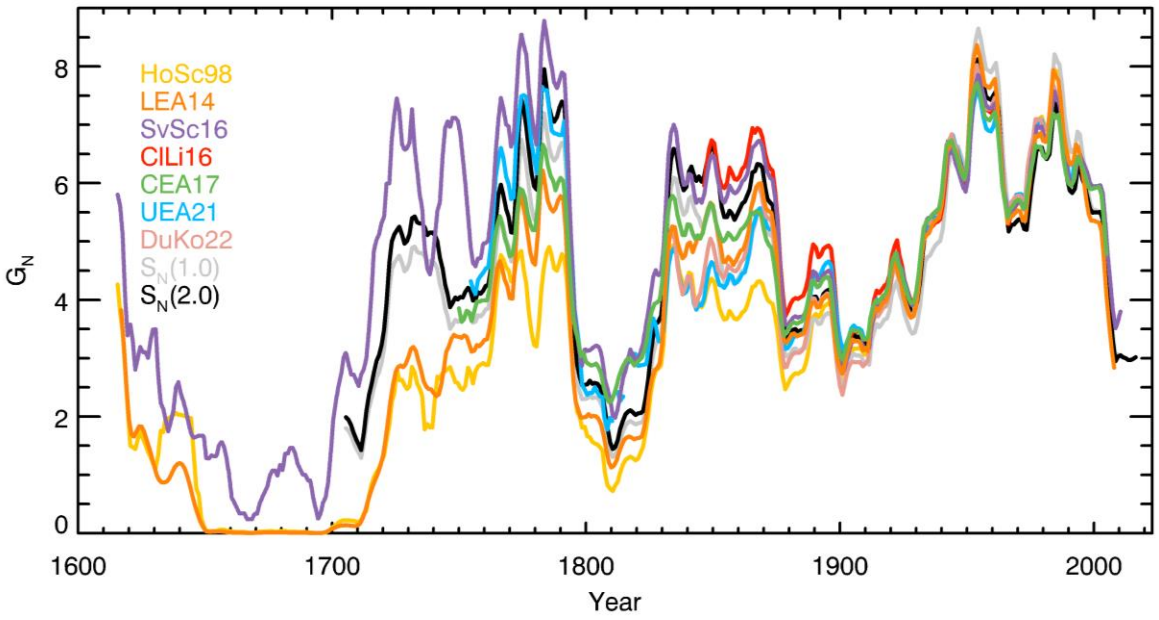

图2。八个太阳黑子序列的11年滑动平均值：原始Wolf S_N (S_N(1.0))序列、Hoyt 和 Schatten（1998a、b）的G_N (HoSc98)序列、Lockwood 等人（2014年a、b）的S_N (LEA14)序列、Clette和Lefèvre（2016年）校正后的S_N (S_N (2.0))序列、Svalgaard 和 Schatten（2016年）重建的G_N (SvSc16)序列、Cliver和Ling（2016年）的G_N (ClLi16)序列、Chatzistergos 等人（2017）的G_N (CEA17)序列，以及Usoskin等人（2021a）的G_N (UEA21)序列，其前身序列见Usoskin等人（2016a；UEA16）和Willamo等人（2017；WEA17）。所有记录均按照1920—1974年期间的平均S_N(2.0)序列进行缩放。

2.《太阳物理学》专题专刊进展／ISSI团队报告

2.1 沃尔夫太阳黑子数（S_N）

2.1.1 数据恢复：太阳黑子数数据库

数据恢复是一项永无止境的工作，太阳黑子序列未来也会作为持续升级过程的一部分，不定期进行修订。过去几年里，太阳黑子数$_N$ 时间序列底层数据的恢复和数字化工作取得了显著进展，尤其是在2019—2021年ISSI团队合作期间。本节重点讨论这样一些太阳黑子观测：这些观测要么是在苏黎世、后来在洛迦诺和布鲁塞尔进行的，用于编制太阳黑子数$_N$；要么由苏黎世天文台台长从外部天文台收集并存档；自1981年以来，世界太阳黑子指数与长期太阳观测数据中心（WDC-SILSO）也在布鲁塞尔为此收集并存档观测数据。

Wolf及其继任者在1700—1980年间编制的苏黎世太阳黑子数，基于三类数据：(1) 1848—1980年苏黎世观测员（台长和助理）的原始计数；(2) 外部辅助观测者发送给苏黎世天文台的相应计数；(3) 1849年以前的历史观测，主要由Wolf收集，也有部分由其继任者A. Wolfer收集。这些资料中有许多年来陆续发表于苏黎世天文台公报《苏黎世联邦天文台通讯》（以下简称《通讯》）。这是未来重新计算S_N的重要基础资源。

直到最近，这批规模庞大的印刷数据集仍完全无法以数字形式获取。2018—2019年，WDC-SILSO在布鲁塞尔将《通讯》数据表从印刷原件完整录入，作为太阳黑子数数据库的初始时段。其中包括1849年至1944年间发表的所有数据（图3中的黑色曲线）；1944年，苏黎世天文台最后一任台长马克斯·瓦尔德迈尔决定停止发布原始数据。该数据库现收录了20.5万条独立的每日太阳黑子计数（Clette等人，2021）：目前包括1849年至1944年间苏黎世观测员和辅助观测者的数据，以及早期历史阶段中从1749年至1849年由R. Wolf当时发现并收集的所有长期数据序列。（注：零星散布于不同时期的孤立观测较难利用，之后将予以补充。）除太阳黑子和太阳黑子群的每日计数外，数据库还包含元数据，尤其是观测者或仪器的变更信息。

尽管已发表的数据在全球范围内相当全面，但仍有部分缺失。《Mittheilungen》仅从1871年起才提供苏黎世团队自身的全部观测数据；那一年，Wolf开始分别刊载他本人及其助手的数据，以及从外部观测者处收到的数据（Friedli，2016年）。1871年之前，Wolf每年只发表一张表，其中列出他自己的全部观测数据；来自外部观测者或助手的数据则仅用于填补零星缺失日期。第一次世界大战后，阿尔弗雷德·沃尔弗增加了许多外部观测者，建立了真正的国际网络。然而，鉴于收集到的数据量大幅增加，出于经费考虑，他大幅减少了已发表的原始数据，仅限于苏黎世观测员的数据和~10 外部观测者的数据。1926年，威廉·O·布鲁纳接替沃尔弗出任苏黎世天文台台长后，便停止发表外部观测者的数据。此后，仅发表苏黎世天文台本身以及卡尔·拉普（瑞士洛迦诺）的观测数据。1945年，马克斯·瓦尔德迈尔出任新任台长后，源数据的发表彻底停止，每年只提供一份贡献数据的观测站名单。

苏黎世时期收集的所有这些未发表数据，都保存在苏黎世天文台的纸质档案中；这些档案原本应包含完整的资料，尽管查阅起来不那么直接

方便。遗憾的是，1980年苏黎世天文台关闭后，太阳黑子数的管理权移交给ROB，这些未发表的档案便遗失了。图3（棕色和蓝色曲线）显示了保存下来的原始数据中由此造成的主要 ~60年缺口（1919—1979年）。1919—1979年间大量太阳黑子数据的缺失，在早期苏黎世时期与自1981年起在布鲁塞尔编制、所有数据均保存在数字数据库中的现代国际太阳黑子数之间，形成了关键的缺失环节[3]。具体而言，这一时期涵盖了苏黎世序列中确认的主要尺度不连续现象之一，即1947年的"瓦尔德迈尔跃变"（Clette等，2014年；Lockwood， Owens和Barnard， 2014年a；Clette和Lefèvre，2016年；Svalgaard，Cagnotti和Cortesi，2017年）。

在一项重要进展中，1919—1980年间缺失数据的数量于2018年末和2019年初大幅减少。当时，提契诺太阳天文台的工作人员在洛迦诺意外发现了一批资料，随后又在苏黎世和布鲁塞尔进行搜寻，最终找回了完整的瓦尔德迈尔数据档案（1945—1979年）（Clette等人，2021年）。找回的瓦尔德迈尔数据档案以逐年手写表格的形式，收录了苏黎世时期最后35年的数据，直至过渡到布鲁塞尔的WDC-SILSO。这些数据因此补上了完整的过去苏黎世序列与当前SILSO S_N 产出及其完整输入数据档案之间至关重要的缺失环节。找回的纸质原件现已由苏黎世联邦理工学院大学档案馆制成数字图像（苏黎世联邦理工学院目录条目：Hs1304.8），并可通过瑞士e-manuscripta门户（https://www.e-manuscripta.ch）在线查阅。

这项数据恢复工作已就此前在1947年发现的 S_N 序列主要不连续性提供了重要解释（Clette等人，2021年；见下文），但要扩充 S_N 数据库，对海量观测数据（超过30万个日值）进行数字化既耗时，又需要更多资源和时间。与此同时，研究人员仍在努力恢复1919年至1944年间辅助观测站的最后一批缺失数据。图3显示，最近从未发表的《Mittheilungen》源数据中数字化得到的数据，仅约占苏黎世天文台从第一次世界大战结束到1980年间从外部来源获取并收集的观测数据的一半。

[3] 1980 苏黎世天文台经历了动荡的一年。苏黎世工作人员没有编制标准年度源数据表，因此太阳黑子数只能以粗略的打字稿形式发表，而非像往常一样刊印于《Mittheilungen》。不过，所有辅助观测站寄往苏黎世的原始报告均已找回，并于2007年转交给布鲁塞尔的SILSO世界数据中心。2015年，在编制修订版序列S_N V2.0时，这些原始报告得到了利用，为衔接苏黎世序列与国际太阳黑子数在1980—1981年从苏黎世移交至布鲁塞尔期间的数据发挥了重要作用。由于1980年的管理混乱，标准苏黎世原始数据表的收集工作因此止于1979年。苏黎世观测员1980年的所有内部数据，以及有关月度S_N 处理的文档，均由苏黎世天文台的助理在亲赴苏黎世和布鲁塞尔访问时交给了布鲁塞尔的新团队。

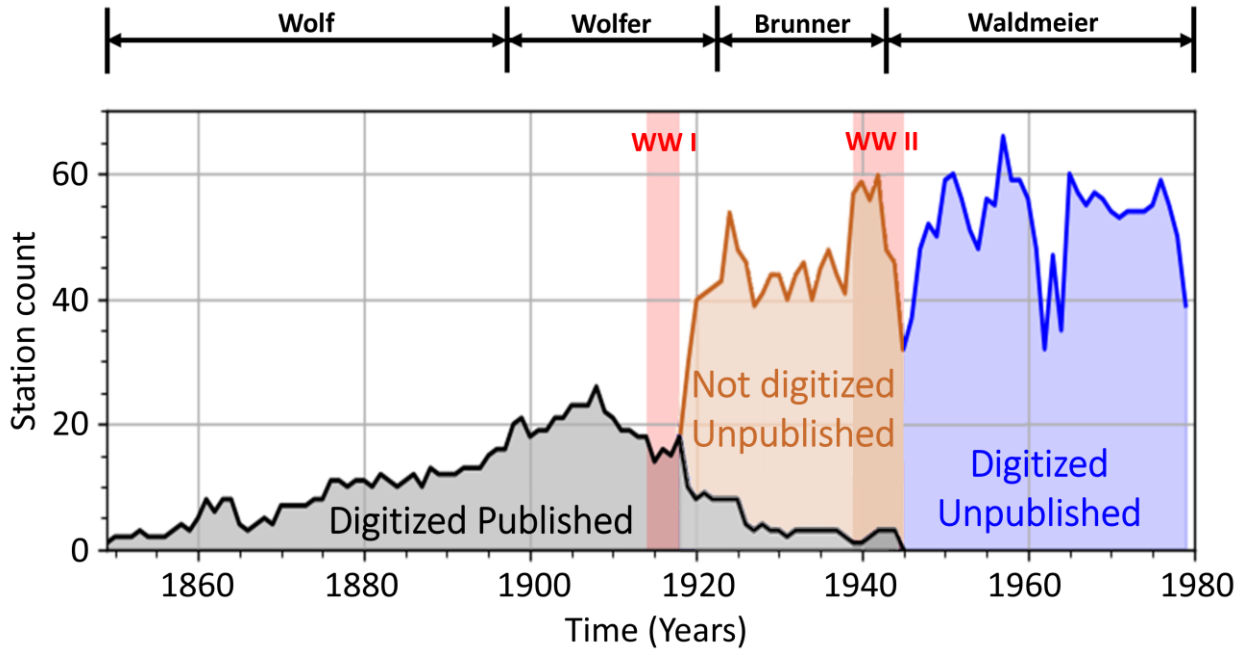

图3. 苏黎世每年收集的贡献数据的观测站数量变化。此前刊载于苏黎世天文台《Mittheilungen》中的原始源数据（灰色曲线）现已数字化并录入一个新数据库。1918年之后，外部观测站的数量显著增加，但苏黎世天文台不再公布全部源数据，并在1945年之后彻底停止发布。这些此前未发表、保存在手写档案中但直到最近才被发现的数据，以棕色和蓝色阴影曲线表示。2019年，1945—1979年的档案终于重见天日（蓝色部分），原始数据表也已扫描，但仍需提取其中的数值以填入数据库。1919—1944年的档案源数据（棕色部分）仍未找到，后续搜索将以此为目标。两条垂直阴影带标示两次世界大战，它们都在苏黎世数据集中留下了清晰的印记。面板顶部标出了苏黎世天文台台长的任期。（图改编自Clette等人，2021年。）

最后，还有两份重要的源文件为Wolf时期早期，即1849年至1877年间的情况提供了关键信息：Wolf的手写原始记录簿，以及最初由Wolf、后来由Wolfer维护、记录输入数据的表格集，直至1908年（Friedli，2020年）。这两份文件均保存在苏黎世联邦理工学院大学档案馆，如今已全部扫描并在线公开。Wolf的原始记录簿提供了年度数据表，并包含关于每日太阳黑子数计算方式的宝贵信息，这些信息从未在《Mittheilungen》上发表过；例如，在Wolf和Schwabe于1849年至1868年间的观测有重叠时，对两人日数值的区分，以及每位外部观测者的年度k系数。原始数据表内容更为全面，列出了所有观测者的全部原始计数，时间可追溯至1610年，其中还包括从未用于计算太阳黑子数的数据。目前，Rudolph Wolf协会已将部分原始记录簿（1849—1877年）转录成数字文本，并在线公开（Friedli，2016年；www.wolfinstitute.ch）。这些原始数据补充了《Mittheilungen》上发表的数据表，对于更好地理解多种

Wolf在其漫长职业生涯中引入的方法变更–尤其是1849—1868年Schwabe与Wolf之间，以及1877—1893年Wolf与Wolfer之间的尺度转换（Friedli 2020，见下文；Bhattacharya等人，2022，已投稿）。

2.1.2 S_N的重建方法

2.1.2.1 新的 $S_N(2.0)$ 序列

迄今已构建了两个主要的太阳黑子数$_N$ 时间序列：Wolf构建的原始序列太阳黑子数$_N$（1.0版；1700—2014年，Wolf，1851年、1856年），以及其首个修订版太阳黑子数$_N$（2.0；1700年至今）（Clette和Lefèvre，2016年）。太阳黑子数$_N$（1.0版）和太阳黑子数$_N$（2.0版）分别提供始于1818年的日值、始于1749年的月值，以及始于1700年的年平均值。两个序列均可在 http://www.sidc.be/silso/ 获取。此外，Lockwood、Owens 和 Barnard（2014年a、b）构建了一个太阳黑子数$_N$ 序列（LEA14；1610—2012年）：他们将经过放大的Hoyt 和 Schatten（1998a,b）太阳黑子群数$_N$ 序列附加到太阳黑子数$_N$（1.0版）中，覆盖1749年以前的年份，并在约1850年和1950年进行了修正，同时以地磁指数作为外部参照。Friedli（2016年、2020年；F（太阳黑子数$_N$（1.0版）$_{COR}$）重建了太阳黑子数$_N$（1.0版）中1877—1893年的时段，在此期间Wolf和Wolfer的观测存在重叠。这四个序列的具体信息汇总于表1。

表1. S_N 时间序列

参考文献	缩写	年份	采样频率	来源	校准	拼接
1	$S_N(1.0)$*	1818-2015	每日	苏黎世/SILSO 基准观测者（单站），线性缩放、链式传递和1848年之前的外部指数		
2	$S_N(2.0)$	1818—2020年	每日	苏黎世/SILSO基准观测者数据（单站及多站），线性缩放		
3	LEA14	1818—2014年		Lockwood 等人（2014年b；线性缩放，外部指数（作为补充信息）暂定**		
4	$F(S_N(1.0)_{COR})$	1877—1893年		Friedli（2020年；表2）将 Wolf 线性缩放至 Wolfer，限时修正至 $S_N(1.0)$		

参考文献：1 = （Wolf，1851年，1856年；关于 Wolf 后续的发展，见 Clette 等人（2014年）中第2.1节，涉及 $S_N(1.0)$），Wolfer（1902年）、Waldmeier（1961年）、麦金农（1987年））；2 = Clette和Lefèvre（2016年）；3 = Lockwood、Owens 和 Barnard（2014a、b）；4 = Friedli（2016年、2020年）

* 在1849—1980年期间，沃尔夫太阳黑子数序列由苏黎世编制，曾分别称为 R_W （Wolf 数）或 R_Z （苏黎世数），其中 R 表示相对标度，而非绝对标度。1980年之后，沃尔夫序列通常称为 R_i （国际数）。本状态报告中泛指沃尔夫太阳黑子数序列所使用的 S_N（版本）记法由 Clette和Lefèvre（2016年）引入，当时他们发布了首个重新校准的序列 S_N（2.0）。

** 暂定的 i 仅供参考，并非旨在为太阳黑子数的重建提供处方或方法 N

太阳黑子数$_N$ 时间序列的2.0版（Clette和Lefèvre，2016年；太阳黑子数$_N$(2.0)）包含三项针对不同时间区间的修正。按时间倒序排列，分别是：（1）洛迦诺漂移修正（1981—2015年）；（2）瓦尔德迈尔跃变（1947—1980年）；（3）“Schwabe-Wolf”修正（1849—1863年）。这三项修正基于该序列中诊断出的三个最大异常。

此外，采用了新的约定标度，以 Wolfer 而非 Wolf 作为参考观测者。这一做法取消了传统上对1893年之后所有现代数据施加的0.6标度因子，并使 $S_N(2.0)$ 与现代仪器在太阳上实际观测到的情况一致。由于这一0.6下调因子部分以未充分记录的早期观测为参考，且依据的假设和解释未来可能受到质疑（见下一节），因此将其应用于这段记录较不完整的早期时期之后的数据并不恰当。在 $S_N(2.0)$ 中，1894年以来所有数据的标度现保持不变；相反，对1894年以前的序列早期部分应用倒数因子 1/0.6（= 1.667）。实际上，这一部分的计数并不完整，需要补偿因子。

上述 S_N(2.0) 的三项修正中，只有第一项基于原始输入数据对 S_N 进行了全面重新计算；自1981年以来，这些原始输入数据已由 SILSO 以数字形式完整存档（Clette等人，2016a，2016b）。另外两项修正则是在每项已诊断出的非均匀性所影响的时间区间内，对原始 S_N(1.0) 苏黎世序列应用校正因子（Clette和Lefèvre，2016年）。事实上，在1981年以前的苏黎世系统中，发表于《Mittheilungen》和 Waldmeier（1961年）的多数每日太阳黑子数，只是苏黎世天文台主要观测员记录的原始沃尔夫数（k 系数固定为1），没有经过任何统计处理（Clette等人，2014年；Friedli，2016年、2020年）。在这种做法中，外部辅助观测站的数据仅在太阳无法于苏黎世观测的日子使用（平均不到所有日数的20%），因此只发挥次要作用。因此，这种方法完全依赖各参考观测者个人终身保持稳定的假定，也依赖这样一种"按设计而成"的等效性假定：先后接任的观测者在同一地点、使用大致相同的仪器进行观测，所得结果彼此等效。因此，任何修正都意味着需要使用替代观测者。不幸的是，如上一节所述，直到最近，苏黎世源数据才以数字形式提供，而且部分档案甚至已经遗失，这使得无法基于多个替代观测者的大量源数据进行重建。

因此，重建1980年之前整个苏黎世时期的太阳黑子数据库，将是未来升级太阳黑子数$_N$ 序列的关键一步。正如上一节和第 2.2.1 节所述，过去几年相关工作都聚焦于此。尽管目前数据库仍不完整，尚无法进行完整的端到端重建，但迄今收集的数据已足以厘清太阳黑子数$_N$ 序列中的两个主要尺度转换。

2.1.2.2 沃尔夫–沃尔费尔尺度转换

S_N(1.0)时间序列中采用的沃尔费尔至沃尔夫换算系数0.6，是因为沃尔夫的继任者沃尔费尔在长达17年的同步观测（1877—1893年）中，记录的太阳黑子群和太阳黑子都比沃尔夫多。这些较高的计数是由两个同时发生的原因造成的。首先，沃尔费尔使用苏黎世天文台的标准望远镜（口径：83 mm；放大倍率64倍），而在其观测生涯的这一阶段，沃尔夫使用的只是小得多的便携式望远镜（口径：40 mm，放大倍率：20倍）。因此，沃尔费尔能够看到并计数单个小孔状黑子（没有半影、面积为太阳半球的0.5–4百万分之一的小型太阳黑子（μsh）；Tlatov 等人，2019年），而沃尔夫的小型望远镜无法探测到这些黑子。此外，正如Clette等人（2007年）所写："1882年，A. Wolfer……对计数方法作出了一项重要改动（Hossfield，*2002 [*另见Wolf 1857；Wolfer 1895；Kopecký、Růžičková-Topolová 和 Kuklin，*1980]*）。为了使自己的计数更好地符合早期的历史观测，沃尔夫决定不计数仅在观测条件良好时才能看到的最小太阳黑子，也不计入复杂延展半影中的多个本影；而新的指数则纳入了所有小型太阳黑子和多个本影。*[*图1说明，在S_N中，太阳黑子计数较少的小型群与太阳黑子众多的大型群的影响相互抵消。*]* 通过消除个人主观因素，这一做法使S_N 的定义稳健得多，并以此作为1882年以后所有已发表计数的基准。为完成这一过渡，A. Wolfer在16年的沃尔夫–沃尔费尔重叠时期（1877–1892年）内，确定了新计数与沃尔夫太阳黑子数序列之间的缩放比。由此得出了固定的苏黎世折算系数（$K_Z = 0.6$）*[*，该系数曾被用于*]* 将……*[*S_N(1.0)*]* 缩放至1882 年前的沃尔夫太阳黑子计数。"（然而，这一改动并不影响群数G_N ，因为同一半影内的多个本影不会改变太阳黑子群的数量。）不过，早在沃尔费尔的原始研究（Wolfer 1895）中，沃尔夫–沃尔费尔年度平均比值就显示，在1877—1883年间存在明显漂移，随后趋于稳定（图 4，左图），这使人们对这一平均系数0.6的准确性产生怀疑，并

表明应重新确定该系数。早期研究证实了这一转变的特殊性（Svalgaard，2013年；Cliver和Ling，2016年；Cliver，2017年； Bhattacharya等人，2021年）。

最近，在 ISSI团队的研究框架下，Friedli（2020）重新考察了这一重要过渡，并使用了未发表的源数据表。这些表格由Wolfer（1912）在其学生Elsa Frenkel（1913）的博士论文研究框架下编制（导师为阿尔伯特·爱因斯坦）。表格包含同一时间区间内多位观测者的数据，因此可以追溯Wolf或Wolfer数据中的任何漂移（图 4，右图）。Friedli得出结论，在这一重叠时段内，Wolfer保持稳定，而Wolf的序列相对于所有其他观测者都发生了变化，这可能是由于年龄增长导致视力逐渐衰退。特别是，他发现平均因子应下调至0.55，这意味着第12太阳活动周（1884年）和第13太阳活动周（1893年）的极大值——它们落在1877—1893年的时间区间内——应比原始Wolf序列中的数值~10%高；Cliver和Ling（2016）也提出了这一看法，这意味着太阳黑子数S_N(2.0)也应作类似修正。

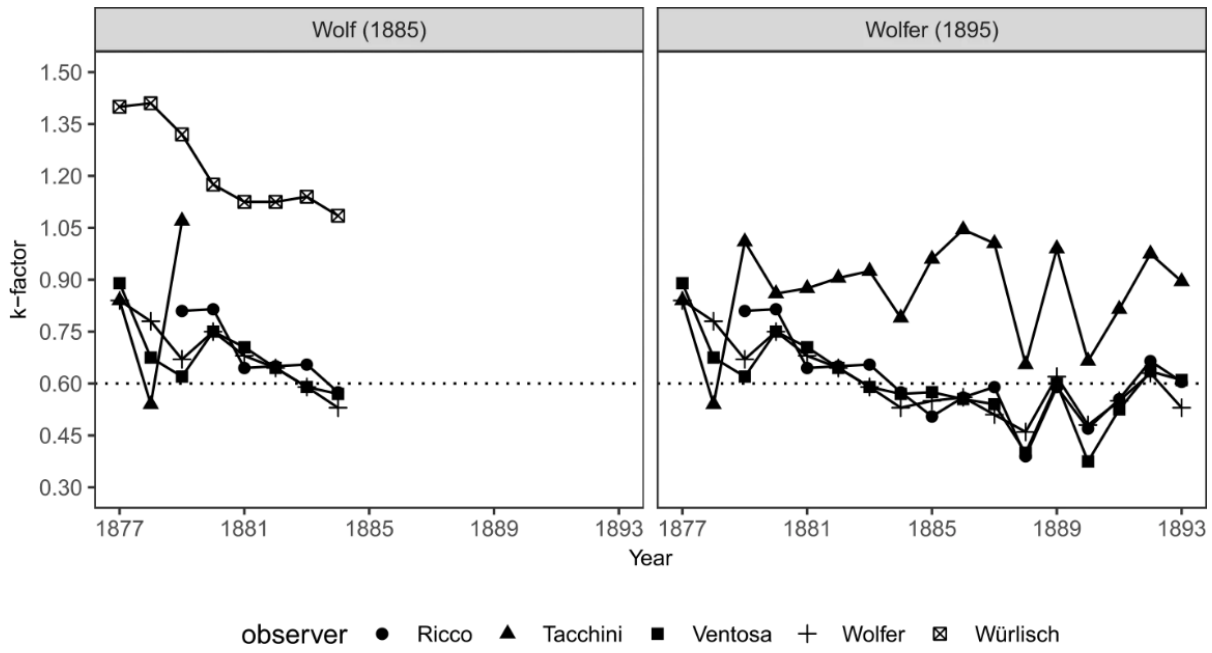

图 4。左图：Wolfer（1895年）给出的 Riccó、Tacchini、Ventosa 相对于 Wolf 的年度 k因子，显示1884年之前存在明显漂移。右图：Frenkel（1913年）以 Wolfer 为参照给出的 Riccó 和 Ventosa 的年度 k因子。在整个时间区间内，k因子保持稳定，表明所有观测者都很稳定。相比之下，图上方所示的鲁道夫·沃尔夫使用小型便携式折射望远镜所得数值，相对于 Wolfer 使用 83 毫米标准苏黎世折射望远镜所得数值（方块）的年度 k因子，在 1877年到 1884年间呈现相同趋势，同时还存在随太阳活动周变化的调制（1879年和 1890年为极小值，1884年和 1894年为极大值）（引自 Friedli，2020年）。

此外，在这一时间段的前期，即 1877年 至 1883 年，标度因子比后期（1890年 之后）低，最多低至后者的 0.76 倍。这意味着，1877年 之前的所有 S_N 值相对于 1894年 之后的所有 S_N 值，可能最多被高估了25%。不过，这一时间段最初几年处于第11太阳活动周与第12太阳活动周之间的极小期。比值的不确定性

因此，观测者之间的比值具有很大的不确定性，这是由于该时期的太阳黑子计数较低。此外，Friedli 的分析表明，个人 k 系数相差很大的观测者之间的比较结果会随太阳活动周显著变化，这可能是两位使用截然不同仪器的观测者之间的计数存在非线性关系所致。Wolf 的情况正是如此：他只使用自己的小型便携式望远镜，而其他观测者使用的仪器都大得多，口径至少为 80 毫米。因此，本文用线性模型诊断出的 Wolf 漂移，至少部分可能包含虚假的太阳活动周变化（图 4，右图）。在这种情况下，第12太阳活动周上升阶段（1877—1883年）发现的漂移，实际上可能在 1877年 之前发生逆转并消失；当时第11太阳活动周以及此前的其他太阳活动周都达到了更高的太阳活动水平。这些可能的影响尚未得到分析，而 Friedli（2020年）恰当地总结道：*“1877*年之前，鲁道夫·沃尔夫使用的 *40/700* 毫米巴黎折射望远镜与阿尔弗雷德·沃尔弗使用的 *83/1320* 毫米夫琅和费折射望远镜之间的标度转换 仍需进一步分析。”

*2.1.2.3 1947*年跃变与太阳黑子加权效应

通过与马德里和格林尼治天文台的数据进行比较，Svalgaard（2012、2013）发现，苏黎世太阳黑子数在1945—1947年前后出现了明显的跃升。人们很快找到了这一跃升的可能原因：苏黎世观测员在观测实践中引入了一种加权方法，根据太阳黑子的大小对太阳黑子计数进行加权（Svalgaard，2013；Svalgaard、Cortesi 和 Cagnotti，2017；Clette等，2014）。图1（a）中的黑子群114（观测到3个太阳黑子；列出5个）和121（观测到2个；列出3个）展示了这种加权的影响。为验证加权假设，提契诺太阳天文台于洛迦诺启动了一项系统性的双重计数计划。该天文台自1957年以来一直是苏黎世天文台的辅助站，至今仍沿用这种加权计数法，因此保留了苏黎世观测员在1945年的工作方式的鲜活记忆（Cortesi等人，2016；Ramelli等人，2018）。根据同时进行的加权计数和常规计数（沃尔夫原始公式），Svalgaard、Cagnotti 和 Cortesi（2017）发现，在研究时段（2012—2014年）内，加权方法平均造成约17%的增幅。因此，这一效应的幅度与1947年跃变的幅度十分接近，强烈表明这种加权方法的引入导致1945年之后整个时期的S_N(1.0)被高估，并一直延续至今；1981年太阳黑子数的生产工作从苏黎世转移到布鲁塞尔后，Specola天文台仍继续担任基准站。

然而，1947年跃变的幅度最初估计为20%（Svalgaard 2012年、2013年），这一估计很快便受到质疑。Lockwood、Owens 和 Barnard（2014年a）比较了S_N(1.0)与独立序列（格林尼治太阳黑子面积和群数、日间变异（IDV）地磁指数）之间的平均比值，发现在1875—1945年和1946—2012年这两个较长时段内，平均比值之间的跃变幅度要小得多，仅为11.5%。Clette和Lefèvre（2016年）阐明了这一差异。首先，作为参考数据之一的原始格林尼治群数在1900年以前存在未经校正的非均匀性；其次，选取1945年作为分界年份（即一个太阳活动周极小值出现的时间）与序列中实际跃变发生的时间并不吻合。仅校正这两个缺陷，同样的分析便得出约16%的更大跃变幅度。此外，通过对Specola天文台开展的双重计数进行更细致的分析，Clette和Lefèvre（2016年）以及随后Svalgaard、Cagnotti 和 Cortesi（2017年）发现，膨胀因子会随太阳活动水平变化：在低活动水平下接近1，随后逐渐增加，最终达到约在S_N= 50附近出现的渐近平台。在超过这一限值后，膨胀因子趋于稳定，接近1.177的平均值。对于非常高的S_N，这种轻微的上升依赖性可能仍然存在，这或许可以解释为何会出现更接近1.2的更大数值；Svalgaard（2013年）在非常

强的太阳活动周的极大值中发现了这种数值，因为该分析应用于第24太阳活动周，而该活动周的强度比20世纪中叶的太阳活动周弱了一半。同样，膨胀因子对太阳活动的依赖性，以及由此导致的每个太阳活动周过程中膨胀因子在1至1.177范围内的变化，也解释了为何在对完整太阳活动周或多个太阳活动周取平均时，会得到约1.15这一较低的平均膨胀值，例如Lockwood、Owens 和 Barnard （ 2014 年 a ）的分析。ISSI 团队对这些要素进行了综合，从而得出结论：关于幅度的问题目前已基本解决。图5给出了S_N 约1947年的不连续性幅度各种测定结果的图示总结。

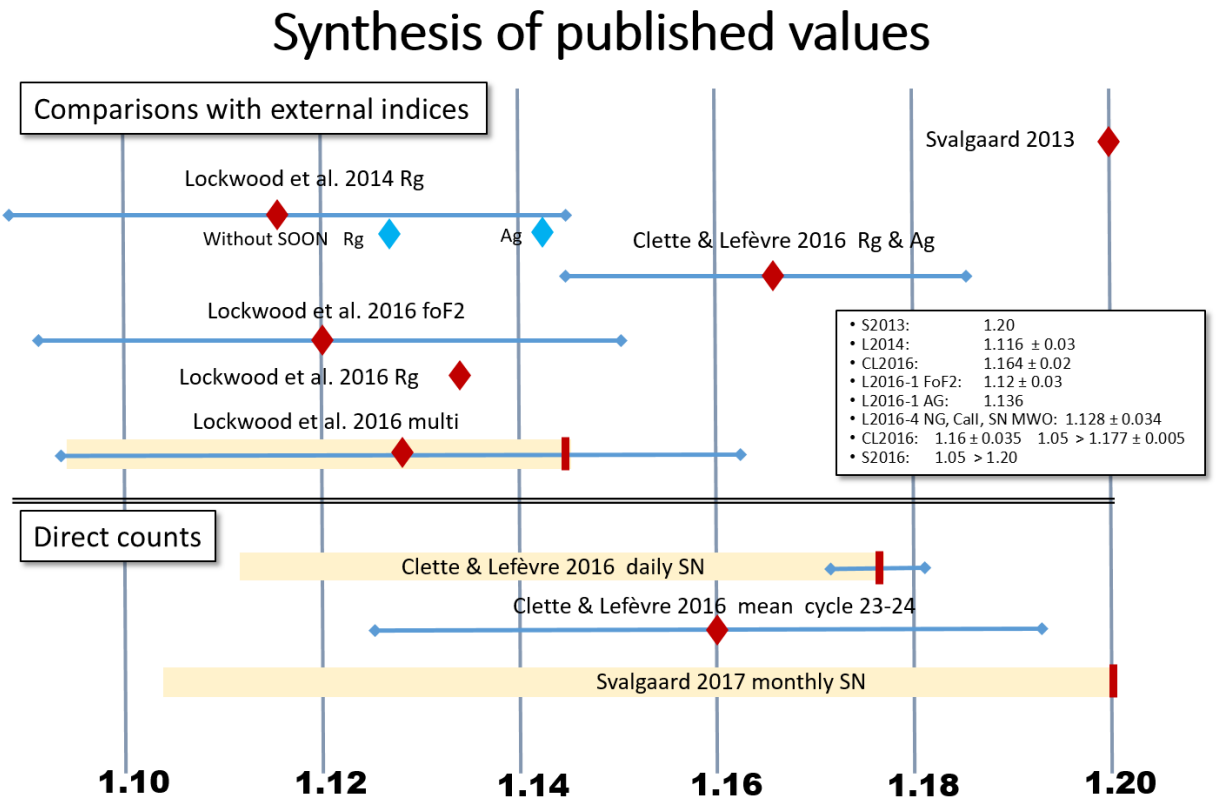

图5。已发表的1947年跃变幅度（上部）以及根据加权和未加权直接计数同时推导出的膨胀因子的汇总。红色和蓝色菱形表示平均值，不确定性范围以蓝色箭头标示。黄色条带表示因子被发现具有可变性时的取值范围。红色竖线表示上限，通常出现在太阳活动周峰值附近。Rg = 相对群组太阳黑子数（G_N）和Ag = 群组面积。

这一跃变发生的日期也引出了另一个问题，前提是苏黎世加权法确实是造成跃变的主要原因。事实上，不同的证据表明，加权法是在20世纪初实施的，比1947年早了数十年（Cortesi等人，2016年；Svalgaard、Cagnotti 和 Cortesi，2017年）。《Mittheilungen》和苏黎世档案中的记载表明，这种方法是由 Wolfer 为苏黎世助理观测员引入的，显然是为了帮助他们获得与他作为主要观测员所做的计数（不加权）更为接近的结果。通过查阅苏黎世

天文台的原始太阳黑子图绘，也证实在20世纪上半叶使用过加权法。然而，令人惊讶的是，Broger 和 Brunner 的计数并未出现显著膨胀；他们分别是 Wolfer 的主要助理和继任者，而且两人都使用了加权法，只有太阳黑子数低于25时例外（Svalgaard、Cagnotti、Cortesi，2017年；见其图19）。因此，对于这种早已存在的加权法为何过了如此漫长时间才产生所谓影响，必须作出解释。此外，数据表明，明显的尺度跃变最终发生于1947年；而 Waldmeier 早在1945年就已出任苏黎世天文台台长和主要观测员。因此，这一苏黎世太阳黑子数构建史上的重大变化，甚至与这一异常发生的确切时间都不相符。因此，要证明加权法发挥了作用，还需要提供苏黎世系统发生另一项关键转变的额外证据。

在建立 S_N 数据库并于近期找回 1945年至1980年期间的所有源数据后，Clette等人（2021）全面调查了自 Wolf 开始招募助手和辅助观测者以来，直至 Waldmeier 时期结束苏黎世太阳黑子数（S_N）的苏黎世时期、其全球辅助观测站网络扩大的这段时间内（参见第2.1.1节）所有贡献数据的观测站。由此绘制的时间线揭示，第二次世界大战结束后不久，苏黎世太阳黑子数的历史上几乎同时发生了两次独特的中断。由于战争，1945年之后的几年里，原有的贡献数据观测站群被一个全新的、更大的国际辅助观测站网络所取代。与此同时，在苏黎世，Brunner 和他的主要长期助手继续观测到1946年底，之后由 Waldmeier 和新的助手接替；其中最早加入的几位只在天文台待了很短时间（图6）。这两个因素都导致苏黎世系统的连续性中断，因为几乎所有新的内部和外部参与者此前从未作出过贡献，也没有与原来的观测者并行工作。这一独特事件意味着苏黎世系统突然失去了对过去的记忆。我们可以通过统计某一年活跃的所有观测者累计的过去观测年数，对这一情况进行量化。将这一数值随时间绘制成图，可见1947年出现大幅骤降（图7）；在整个1849年至1980年期间，这是独一无二的急剧转变。Clette等人（2021）现已表明，这一急剧转变与 Brunner 团队离开相吻合；该团队自1926年起一直进行观测，而且这一转变发生在1947年，恰好是原始 S_N 序列中诊断出跃变的时间。这终于为这一跃变的发生及其时间提供了明确的历史依据。

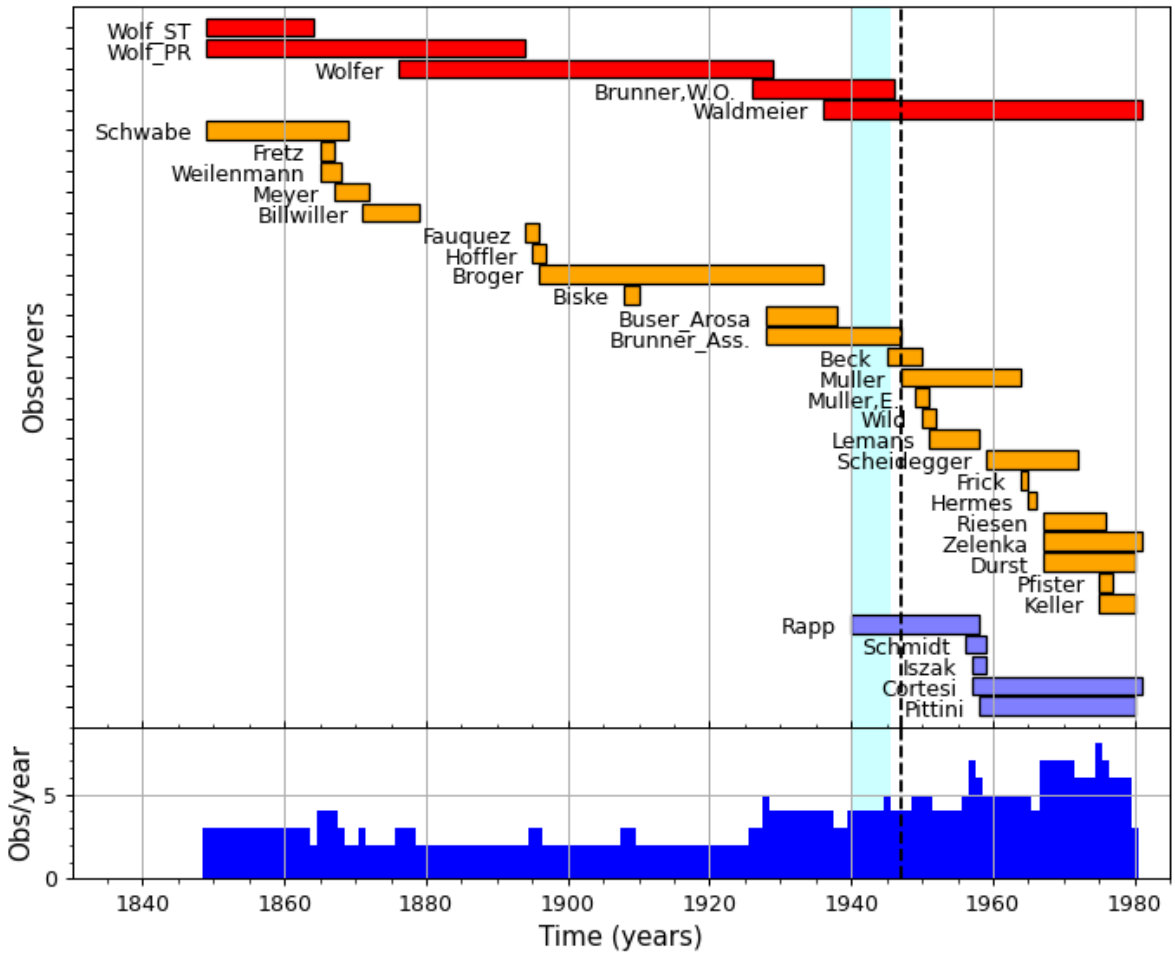

图 6. 所有苏黎世观测员活跃观测时段的时间线。红色（上方组）表示主要观测员，橙色（下方组）表示助理。紫色表示洛迦诺辅助观测站的观测员，他们被视为苏黎世核心团队成员。垂直阴影带标示第二次世界大战，垂直虚线表示原始太阳黑子数序列中出现 1947年尺度跃变的时间。底部图表显示每年活跃的苏黎世观测员人数（引自 Clette 等，2021）。

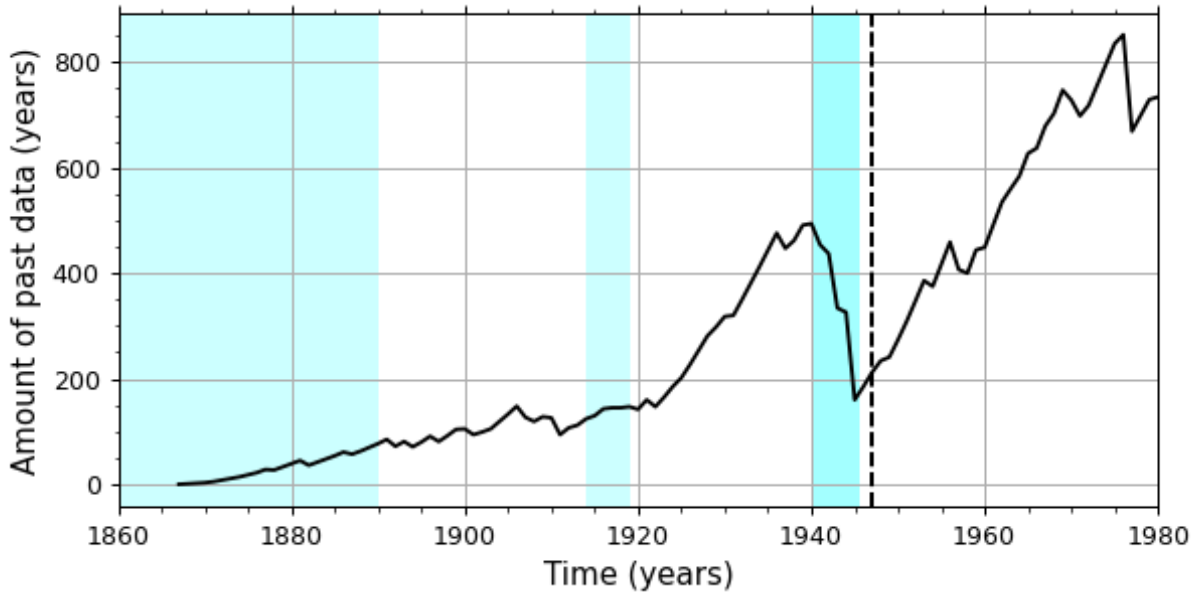

图7。所有为苏黎世 S_N 提供数据且在相应年份开展观测的外部台站，其此前累计观测年数总和。该计数是一个全球性指标，衡量对于任意给定年份，S_N 校准可依据的过去信息量。在几乎持续增加之后，第二次世界大战刚结束不久便骤降了两倍多。阴影竖带标示了早期沃尔夫时期以及第一次和第二次世界大战。竖直虚线标示1947年跃变的位置，该跃变伴随着Brunner最后一批观测数据的加入（引自Clette 等，2021）。

2.1.3 未来进展的方向

如果能够恢复完整的苏黎世观测数据集，包括1919年至1944年的观测数据，就可以完全构建 $S_N(3.0)$时间序列，而无需直接使用 $S_N(1.0)$，只需像构建 $S_N(2.0)$时那样，在特定时期进行重新缩放。$S_N(3.0)$序列的构建方法尚未确定，但鉴于过去几年获得的方法学方面的最新进展，目前已有多种可行方案。

例如，这种重建可以基于WDC-SILSO自1981年起实施的基于k的方法。迄今为止为群数开发的非线性概率分布函数（Usoskin等，2016a；Chatzistergos等人，2017）（见第2.2.2节）经过调整后，也可以应用于太阳黑子数。另一项显而易见的改进，是用一组依据系统统计质量标准选出的参考站，取代单一的预先选定基准观测者（Clette和Lefèvre，2016年）。这类方法的各项要素目前已基于SILSO网络的实际数据完成开发和训练。ISSI团队成员提出的这种新型先进方法（Mathieu等，2019年、2021年）采用先进的统计技术，推导出一种非参数测量方法，用于评估每位观测者或天文台团队的短期和长期稳定性；同时还引入了适当的非正态不确定性分布，尤其适用于S_N 接近零且受到非负性约束的特殊情况。除了创建新的时间序列外，这些工具还可作为永久性质量监测流程的基础，既适用于过去的重建，也适用于WDC-SILSO当前和未来的S_N 生产。

然而，收集足够的基础数据仍是取得任何进展的必要前提。因此，需要找回更多历史数据并修订现有数据序列；这些数据序列往往是通过过去的数据检索间接继承而来，有时距今已相当久远。对于20th 世纪，除了1919年至1944年间遗失的苏黎世档案外，我们目前已经拥有较为合理的数据覆盖。不过，即使在这一较近的时期，苏黎世天文台此前未知或未收集的数据序列，仍有助于完善S_N 数据库：既可以纳入其他观测者的全新序列，也可以扩展和修订部分在苏黎世收集的原始序列。例如，可以列举马德里天文台的太阳黑子目录（Aparicio等人，2018年），以及专门从事观测的日本观测者所记录的太阳黑子计数序列，如Hisako Koyama（Hayakawa等人，2020年）、Hitoshi Takuma（Hayakawa等人，2022b）或三泽胜卫（活跃于1921年至1934年）。

正如 Muñoz-Jaramillo 和 Vaquero（2019年）所清楚展示的，主要挑战在于19世纪最初几十年和18世纪的数据稀疏。对于19th 世纪，我们可以根据对施瓦贝绘图的检查，纳入重新统计的施瓦贝每日太阳黑子数（Arlt 等人，2013年；R. Arlt，个人通信，2022年），以更好地填补道尔顿极小期太阳黑子稀少所造成的空缺，并阐明1849—1863年"施瓦贝—沃尔夫"尺度转换的有效性。19世纪中叶，尽管 Wolf 生成了唯一一组长期连续的序列，但其方法在1861年（引入k系数）至1877年（Wolfer 开始参与）之间经历了几次重大变化，Friedli（2016年，2020年）对此作了总结。因此，要全面理解上述沃尔夫—沃尔弗过渡之前（第2.1.2.2节）的尺度稳定性，就需要修订并扩展已知数据序列，例如近期根据理查德·卡林顿1853—1861年间绘制的原始高质量日面图重新统计太阳黑子（Bhattacharya等人，2021年）。一个重要目标是校准 Schwabe（历史观测的最后一环）与 Wolfer（首位现代长期太阳黑子观测者）之间的尺度转换。

在18th 世纪，数据恢复工作在很大程度上与群数数据恢复工作合并（见下文第 2.2.1 节）；此外，对于 S_N，除了 G_N 数据库中已经收集的群数之外，我们还需要黑子计数（Vaquero 等人，2016年）。由于许多早期观测者没有提供如此详细的计数，或者往往没有区分太阳黑子与太阳黑子群，因此这一时期的研究进展需要查阅原始资料，尤其是太阳黑子图绘，遵循 Svalgaard（2017年）重新统计 Staudacher 绘图的做法。目前，De Plantade 的绘图序列也正在进行此类重新统计；该序列曾被认为已经遗失（Hoyt 和 Schatten，1998a,b），而这项工作得益于早川尚史找回 De Plantade 的手稿。De Plantade 的手稿涵盖18th 世纪最初几十年（1705—1726年），因此涉及蒙德极小期结束时太阳活动周重新启动的关键时期。

2.2 群体太阳黑子数 (G_N)

2.2.1 数据恢复与修订

对于 G_N 序列长达~400年的时间跨度，Muñoz-Jaramillo 和 Vaquero（2019）将其划分为两个性质不同的时期。第一个时期大致对应望远镜太阳黑子观测的前两个世纪（1610—1825），这一时期的观测数量较少，且难以进行观测者之间直接重叠时段的比较。第二个时期从~1825 延续至今，此时的时间覆盖更完整，也形成了一个由彼此相关、可相互比较的观测者构成的清晰网络。

历史太阳黑子绘图在空间气候研究中正发挥着日益重要的作用（例如 Muñoz-Jaramillo 和 Vaquero，2019），因为它们构成了真实原始数据，直接呈现太阳圆面上太阳黑子及太阳黑子群的形状、大小和分布。它们还提供了更精细的诊断信息，有助于了解观测是如何进行的，以及由此产生的数据质量。对于现代时期，带注释的绘图显示了太阳黑子群拆分是如何完成的。如今，恢复太阳黑子观测资料，尤其是太阳黑子图绘，已至关重要，因为当前的修订工作正从修正现有时间序列转向依据原始数据进行完整重建。

Hoyt 等人（1994）以及 Hoyt 和 Schatten（1998a、b）编制群数时间序列的工作，伴随着太阳黑子群数$_N$ 数据库的建立；该数据库后来由 Vaquero 等人（2016年）修订和更新。开放源代码的 V16 数据使人们能够采用不同的方法编制太阳黑子群数$_N$ 时间序列。与此同时，在过去十年间，José M. Vaquero 在埃斯特雷马杜拉大学建立了太阳黑子观测历史档案（HASO；http://haso.unex.es/）（Clette等，2014；Cliver 等人，2015；Vaquero 等人，2016）。HASO 的目标是"收集并保存所有包含太阳黑子观测、且可用于计算历史时期太阳黑子数的各种格式（原件、复印件、照片、缩微胶片、数字副本等）的文献，或相关文献。"关于历史太阳黑子记录及近期相关改进的全面综述，请参阅 Arlt 和 Vaquero（2020年）。

自2016年以来，已有30多篇论文发表，探讨太阳黑子数据的恢复，其中ISSI团队成员担任主要作者或共同作者。本文回顾这些研究的一些关键成果，重点关注群数的恢复/修订，这些成果已纳入V16。近期发现并分析的许多数据集（例如，Carrasco 等人（2018a；关于Hallaschka）、Arlt（2018；关于Wargentin）、Nogales 等人（2020；关于Oriani）；Hayakawa等人（2021d；关于Johann Christoph Müller））提供了太阳黑子数和/或太阳黑子群数的计数和/或绘图信息，因此既可用于修订太阳黑子数$_N$，也可用于修订太阳黑子群数$_{No}$。随着对太阳黑子图绘的恢复和档案整理日益重视，近期有多项研究为历史观测者绘制了蝴蝶图（例如，Leussu 等人，2017年；Neuhäuser、Arlt 和 Richter，2018年；Hayakawa等人，2020a年；Hayakawa等人，2022a；Vokhmyanin、Arlt 和 Zolotova，2021d；见下文图9）。

（*a*）最早的太阳黑子观测：*1610—1645*年

托马斯·哈里奥特于1610年记录了最早基于望远镜观测绘制的太阳黑子图。Vokhmyanin 等人（2020年）根据其原始手稿的副本，修订了哈里奥特的太阳黑子群数，并重建了蝴蝶图。不久之后，1611年，伽利略和沙伊纳开始观测太阳黑子。贝内代托·卡斯泰利发明了将太阳圆面投影到白纸上的方法后，伽利略的数据质量大幅提高。这种方法上的改进已在伽利略数据与哈里奥特数据的比较中得到证实（Carrasco、Vaquero 和 Gallego，2020a年）。Vokhmyanin 等人（2021年）对伽利略及其同时代人的太阳黑子数据进行了全面分析。

克里斯托夫·沙伊纳是蒙德极小期之前最活跃的观测者。他在`《Rosa Ursina》和`《Prodomus》中发表了自己的太阳黑子观测结果（Scheiner，1630，1651）。基于这些观测，Arlt 等人（2016）推导出了他在1611—1630年间太阳黑子观测中的太阳黑子位置和面积。Carrasco、Vaquero 和 Gallego（2022a）将沙伊纳的太阳黑子群数与 V16 及 Arlt 等人（2016）的结果进行了比较，并得出两项重要结论：（i）望远镜时代第二个太阳活动周的形态与标准施瓦贝周期相似；（ii）这一太阳活动周的振幅（根据原始数据）明显低于前一个太阳活动周。这一最后的结果支持一种渐进的

过渡，即从正常太阳活动逐步过渡到蒙德极小期的低迷太阳活动（例如参见 Vaquero 等人，2011）。

Charles Malapert 是约在 1618—1626 年间的重要太阳黑子观测者。在 V16 太阳黑子群数数据库中，他是 ~60% 的观测日（共 185 天）里唯一的观测者。Carrasco 等人（2019a；2019b）通过检视 Malapert 于 1620 年和 1633 年的报告，将 Malapert 的每日观测记录总数增加到 251 条。此外，他们发现，Malapert 有时在绘图中只画出一个太阳黑子群，但有时实际观测到多个太阳黑子群。因此，如今已知根据绘图得出的 Malapert 群数只是下限。

Jean Tardé 和 Jan Smogulecz 于 1615 – 1617 年及 1621 – 1625 年记录了太阳黑子观测。他们在关于太阳黑子的著作中，以太阳黑子图绘和文字描述的形式记录了观测结果（Arlt 和 Vaquero，2020）。这些记录使人们能够推导并比较这些时期的太阳黑子群数和太阳黑子位置，以及其他观测者的相关数据（Carrasco 等人，2021e）。

Daniel Mögling 是 1626–1629 年间另一位重要的太阳黑子观测者。Hayakawa等人（2021b）利用其保存在达姆施塔特大学暨州立图书馆的原始手稿，确认了他对太阳黑子的134天观测。本研究修订了 Mögling、Hortensius 和 Schickard 的太阳黑子群数，并推导出 Mögling 记录的太阳黑子位置，以绘制蝴蝶图。这些结果填补了太阳活动周 -12 衰减阶段的数据缺口，显示太阳黑子群数的减少以及所记录的太阳黑子群向赤道迁移。

Pierre Gassendi 在 1631—1638 年间进行了太阳黑子观测。Vokhmyanin 等人（2019）分析了他的出版物，修订了太阳黑子群数并推导出太阳黑子位置。

Hevelius（1647年）在蒙德极小期之前，完成了天文学家所进行的最后一批已知系统性太阳黑子记录，观测时段为1642–1645年。Carrasco 等人（2019c）修订了这份文献资料中收录的太阳黑子绘图以及文字报告，表明 Hevelius 所作的太阳黑子记录质量良好。Carrasco 等人（2019c）根据活动日比例（每年太阳上至少出现一个太阳黑子的日数所占百分比）确定，蒙德极小期前夕计算得出的太阳活动水平显著高于蒙德极小期期间的水平。此外，Carrasco 等人（2019c）确认 Hevelius 观测到太阳两个半球都有太阳黑子群；与此相反，蒙德极小期期间的观测显示出显著的半球不对称性（Ribes 和 Nesme-Ribes，1993年）。

（*b*）蒙德极小期：*1645—1715*年

蒙德极小期（1645—1715年）是近代史上一个非同寻常的时期。在多个太阳活动周期间，太阳黑子活动极其微弱，而出现的太阳黑子呈现出显著的半球不对称性，偏向太阳南半球（Eddy，1976年；Ribes 和 Nesme-Ribes，1993年；Usoskin等人，2015年；Riley等人，2015年）。近年来，人们为加深对这一特殊时期太阳活动的认识作出了巨大努力。例如，Carrasco 等人（2018年）计算了蒙德极小期记录到的太阳黑子的本影—半影面积比。该比值与根据现代数据计算出的比值相近，因此，蒙德极小期太阳黑子的缺失无法用这一参数的变化来解释。另一方面，与同时期日食绘图的比较显示，蒙德极小期似乎缺少显著的日冕流，与现代太阳活动周的情况不同（Hayakawa等人，2021c），这为Eddy（1976年）提出的推测提供了支持。

Hoyt 和 Schatten（1998a、b）的太阳黑子群数$_N$ 数据库中，Martin Fogelius 和 Heinrich Siverus（两人均来自汉堡）的观测时段合计涵盖1661—1690年，约占蒙德极小期核心时期（1645—1700年）的一半（Vaquero 和 Trigo，2015年）。从Hoyt 和 Schatten数据库中剔除Fogelius和Siverus连续数年报告无太阳黑子日的记录后（鉴于汉堡当地的天气状况，这些记录不合情理），这两位观测者仍分别是V16中1610年至1715年间13th和 7th 最活跃的观测者：Fogelius的观测时段为1661—1671年（318次观测），Siverus的观测时段为1671–1690年（1040次观测）。Hayakawa等人（2021a）查阅了Ettmüller（1693年）的著作，并将其与英国皇家学会档案中Fogelius的通信进行比较，据此提出对V16数据库作如下修订：（1）将Fogelius的活动日数从26天减至3天，并相应地将Siverus的活动日数净减5天（从20天减至15天）；（2）将若干观测日期从儒略历改为格里高利历；（3）删除两位观测者所有"虚构"的无太阳黑子日（即未明确记录太阳黑子观测、却被解释为无太阳黑子日的日期），这些日期占其观测记录的98%—99%。

Hayakawa等人（2021d）分析了纽伦堡 Eimmart 天文台的太阳黑子记录，部分依据是 Chiaki Kuroyanagi 的档案整理探测任务。该天文台的原始日志簿保存在俄罗斯国家图书馆（圣彼得堡；馆藏号 998）的 Eimmart 档案馆中。对这些手稿的分析剔除了"幽灵"无黑子日，并与 V16 相比，缩减了每日巡查覆盖范围。Hayakawa等人（2021d）修订了 Eimmart 天文台 78 天的太阳黑子群数、Altdorf 天文台 4 天的太阳黑子群数，以及 Johann Heinrich Hoffmann 和 Johann Bernhard Wideburg 分别 22 天和 25 天的太阳黑子群数。在 Eimmart 档案馆中，Johann Heinrich Müller 的日志簿明确记录了无太阳黑子日，使我们能够推导出可靠的活动日比例，并计算出他在 1709 年的可靠 S_N，从而证实其太阳活动水平显著低于其他较弱的太阳活动周，例如第 14 和第 24 周，甚至低于道尔顿极小期（Carrasco 等人，2018a；Hayakawa等人，2020a；Carrasco 等人，2021c）。这些记录还使 Hayakawa等人（2021c）得以推导太阳黑子位置，并证实太阳南半球存在显著的半球不对称性。

William Derham 在蒙德极小期末期记录了太阳黑子观测。Derham（1710）在一张表格中列出了他于1703年至1707年的观测记录，除1707年11月15日记录了两个太阳黑子群外，他每天只记录一个太阳黑子群。Carrasco 等人（2019a）指出，这不可能是 Derham 在该时期观测到的太阳黑子群真实数量，并展示了一幅由匿名观测者于1706年11月30日至12月2日绘制的太阳黑子图，其中记录了三个太阳黑子群。（请注意，Derham 绘图的质量优于匿名观测者的绘图。）因此，应谨慎使用 V16 中归于 Derham 的群数，并根据他的原始记录相应修订 Derham 的计数。

Carrasco、Vaquero 和 Gallego（2021b）介绍并分析了 Gallet 在蒙德极小期中期记录的两个太阳黑子。除了 Gallet 于1677年4月9日至15日观测到的太阳黑子（其他天文学家也有记录）外，Gallet 还报告了同年10月1日至6日观测到的一个黑子群，但没有其他人的观测记录。该太阳黑子的纬度为~ 10° S，与蒙德极小期后半段观测到的大多数太阳黑子相当。

（*c*）*18*世纪太阳活动周期：*1715*年至*1795*年

太阳活动周期-3（~1711-~1723）被视为蒙德极小期之后的第一个太阳活动周。Hayakawa等人（2021e）研究了Johann Christoph Müller在这一周期绘制的太阳黑子图绘，以修订其太阳黑子群数（G），并推导出单个太阳黑子数（S）。他的太阳黑子群数

与Rost的当代观测数据有显著差异。例如，1719年6月15日，Johann Christoph Müller记录了3个太阳黑子群（Hayakawa等人，2021e），而根据V16，Rost的报告记载了30个“太阳黑子群”。对比分析显示，Rost的数据最可能描述的不是太阳黑子群数（G），而是单个太阳黑子数（S）。这份手稿还使Hayakawa等人（2021e）得以推导出太阳南北半球的太阳黑子位置。该结果显示，1719—1720年的太阳黑子活动与蒙德极小期期间的活动形成对比；在蒙德极小期，太阳黑子主要出现在南半球（Ribes 和 Nesme-Ribes，1993年；Hayakawa等人，2021c）。另一位重要观测者François de Plantade（1670—1741）在1705年至1726年蒙德极小期结束期间，也相当系统地记录了太阳黑子，这将成为一项即将开展的研究的主题。

如图8所示（改编自 Vaquero 等人，2016年），1721—1748 年间可用的太阳黑子记录很少。这是整个太阳黑子数时间序列中最薄弱的一环。近期，人们发现并记录了这一时期几位观测时长相对较短的观测者。Hayakawa 等人（2018年）对 Johann Beyer 于 1729—1730 年的太阳黑子记录进行了考察和修订。V16 中，1747 年唯一列出的观测者是 Pehr Wargentin，其有绘图可查的 17 天记录了群数。Arlt（2018年）记录了该观测者另外 32 天的群数（以及单个太阳黑子的计数），但没有绘图。

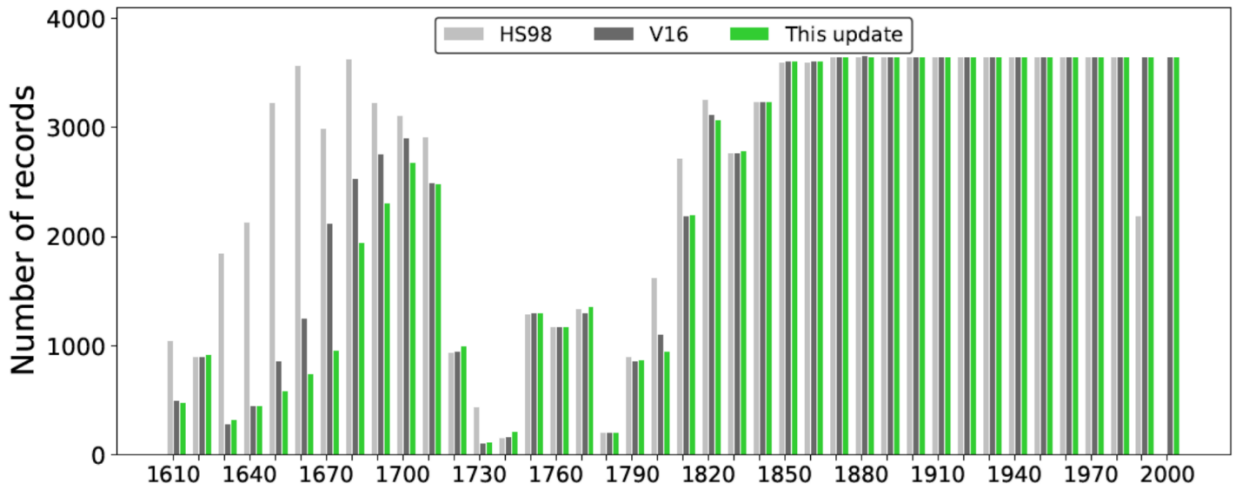

图8. Hoyt 和 Schatten（1998a、b）数据库（灰色柱）与 Vaquero 等人（2016年）修订版（黑色柱）中每十年的记录天数。绿色柱表示此后截至目前对 V16 数据库所[illegible]1850 年以前各十年的记录数较少，是因为从 Hoyt 和 Schatten（1998a、b）数据库中移除了那些没有太阳黑子的日期的虚假记录。（改编自 Vaquero 等人，2016年。）

包括这些数据在内，Hayakawa等人（2022a）全面审查并修订了1727—1748年的太阳黑子观测。Hayakawa等人（2022a）修订了已知观测者的群数，例如Krafft在1729年的记录，以及Winthrop和Muzano在1739—1742年的记录；还补充了此前未知的数据，例如Van Coesfeld在1728—1729年的记录、Duclos在1736年的记录，以及Martin在1738年的记录。这些结果改善了太阳活动周–2（~1723—1733年）、–1（1733—1743年）和0（1743—1755年）的形态，证实了1727—1748年间存在规律的太阳活动周。Hayakawa等人（2022a）从

同期记录中推导出太阳黑子位置，填补了这一时期现有蝴蝶图中的数据缺口，证实了太阳黑子出现在两个太阳半球，并在每个太阳活动周内向赤道迁移。

东亚方面也获得了更多数据。Hayakawa等人（2018年a、b）报告称，伏见和江户（今东京）的日本天文学家分别于1793年进行了1天的太阳黑子观测，并于1749—1750年进行了15天的太阳黑子观测。这些数据填补了“失落周期”附近的数据缺口；据推测，该周期发生于1784—1798年太阳活动周期4衰退期间（Usoskin等人，2009年；另见Karoff等人，2015年；参见Zolotova和Ponyavin，2011年；Owens等人，2015年），以及太阳活动第0周（1743—1755年）峰值附近的数据缺口。

Barnaba Oriani于1778—1779年在意大利米兰的布雷拉天文台进行了太阳黑子观测。Nogales等人（2020年）发现，V16未收录Oriani于1779年（近极大年，峰值出现在1778年）进行的52条太阳黑子日观测记录。另有三位观测者报告了1779年的群数，合计覆盖19个活动日。在这19天中，只有8天与Oriani的观测重合；因此，在目前已知的1779年63个活动日中，Oriani的记录覆盖了44天。此外，Nogales等人确定，对于V16收录的Oriani在1778年进行的97条日观测记录，其群数平均应上调80%。1878年共观测到117个活动日，其中91天只有Oriani提供了观测记录。

Christian Horrebow关于太阳黑子记录的原始日志簿现藏于奥胡斯大学。这些记录尤为重要，因为他的团队在1761—1776年间观测太阳黑子，并预示了Schwabe的太阳黑子周期发现（Jørgensen等人，2019）。Karoff等人（2

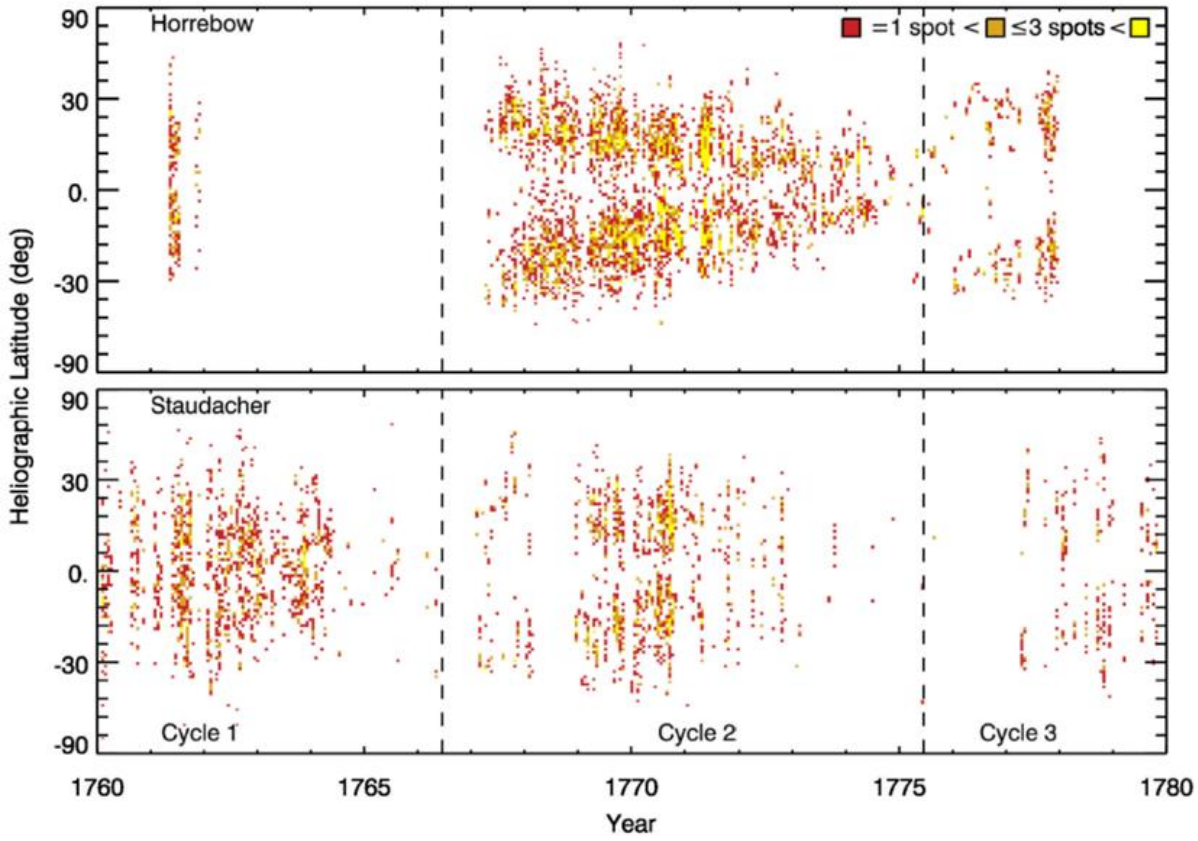

图9。上图：根据Horrebow的太阳黑子观测绘制的蝴蝶图。下图：根据Staudacher（Horrebow的同时代人）在同一时段的观测绘制的蝴蝶图。虚线表示太阳活动极小期的时间。（引自Karoff等人，2019年。）

（*d*）对一位关键观测者的重新分析改善了道尔顿极小期（*1798—1833*年）期间的太阳黑子群数$_N$记录

道尔顿极小期是太阳活动相对较低的一个时期，始于1798年，止于1833年；它以约翰·道尔顿命名，他注意到这一时期极光频率显著降低（Silverman和Hayakawa，2021）。道尔顿极小期与约1900年和2010年开始的太阳黑子极小值相似（尽管其太阳活动周峰值黑子数更低）（Feynman和Ruzmaikin，2011）。这三次太阳黑子活动长期衰退被称为百年变化或格莱斯贝格变化（得名于Gleissberg，1965年），其间穿插着持续时间更长、活动增强的时期，峰值约在~1855 和~1970 附近（图2）。这些太阳黑子活动的长期消退与起伏，不及蒙德极小期期间严重的太阳黑子低潮（Usoskin等人，2015），也不及从~1945至2008年间持续出现强太阳活动周的漫长序列；后者被称为现代大极大期（Solanki等人，2004；Clette等，2014；Usoskin，2017）。

克雷姆斯明斯特天文台台长 Thaddäus Derfflinger 在1802至1824年的太阳黑子观测，涵盖了道尔顿极小期最深的阶段。Hayakawa等人（2020a）分析 Derfflinger 的绘图及相关元数据后得出结论：太阳黑子图绘是太阳高度角测量的次要内容，因此并非必需。于是，他们剔除了归于 Derfflinger 的无太阳黑子日观测记录，使他的日记录数量从789条减少到487条。此外，Hayakawa等人根据 Derfflinger 的观测绘制了蝴蝶图（Carrington，1858年；Spörer，1880年；Maunder，1904年），展示太阳黑子在太阳活动周中的纬度变化。该图显示，在这一时期，太阳黑子分布大致以太阳赤道为对称轴，而这与

蒙德极小期深处的情况形成对比：当时太阳黑子的形成主要发生在南半球（Ribes 和 Nesme-Ribes，1993）。Stephan Prantner 于1804至1844年在维尔滕修道院绘制的太阳黑子图绘也证实了这些结果（Hayakawa等人，2021f）。道尔顿极小期开始前不久，太阳黑子更倾向于出现在北半球（Usoskin等人，2009）。这些结果表明，有必要进一步探测道尔顿极小期以及其初期假设存在的"失落周期"（Usoskin等人，2009；Karoff等人，2015；参见 Krivova 等人，2002；Zolotova 和 Ponyavin，2011；Owens 等人，2015）。

（*e*）*19*世纪的太阳活动周

从 19th 世纪开始，尤其是到了 20th 世纪，太阳黑子数据通常会分别清楚地记录太阳黑子群和单个太阳黑子的计数。因此，这些数据既适用于S_N ，也适用于G_N 重建，以下所有数据集也因此都纳入了第2.1.1节所述的S_N数据库。

道尔顿极小期结束后，Toubei Kunitomo在1835年至1836年间进行了157天的太阳黑子观测。尽管现有数据集中已有他的太阳黑子记录（Hoyt 和 Schatten，1998a,b；Vaquero 等人，2016年），但对原始文献的初步分析发现，1835年还有17天、1836年还有1天的Kunitomo观测记录。Fujiyama 等人（2019年）修订了Kunitomo的太阳黑子群数，并测量了太阳黑子面积。这些记录填补了现有数据集中的数据缺口，且与其他太阳黑子观测者的数据（例如Schwabe的观测数据）一致（Fujiyama 等人，2019年）。

从帕尔马大学气象台（意大利）的气象学家兼天文学家 Antonio Colla 的记录中发现了新的资料。Colla 的记录涵盖道尔顿极小期之后的1830年至1843年（Carrasco 等人，2020年）。在共同观测日，Colla 记录的太阳黑子群数量与同时代的太阳黑子观测者相近。不过，与 Hallaschka 的情况一样，Colla 记录的太阳黑子位置和面积似乎不切实际，不应将其用于科学研究。

19世纪中叶，William Cranch Bond 担任哈佛大学天文台台长。Bond 在1847年至1849年间绘制了太阳黑子图。根据 V16，Bond 是第9太阳活动周期中观测到的日太阳黑子群数最高的观测者（1848年12月26日观测到18个太阳黑子群）。然而，Carrasco 等人（2020年）发现这些计数存在错误。这些误差是由于使用了太阳黑子位置表，而非太阳绘图。此次修订表明，根据原始数据，第9太阳活动周期的太阳活动此前被高估了；Schmidt 才是日群数最高的观测者（1849年2月14日观测到16个太阳黑子群）。对 Bond、Wolf 和 Schwabe 的太阳黑子观测进行比较（使用共同观测日）后发现：（i）Bond 和 Wolf 记录的太阳黑子群数量相近；（ii）Schwabe 记录的太阳黑子群多于 Bond，因为他能够观测到较小的太阳黑子群。

理查德·卡林顿在英国雷德希尔天文台进行了太阳黑子观测，并以目录的形式发表（卡林顿，1863年）。现今WDC-SILSO网络的一位观测者（英国的T.H. Teague）重新分析了他的观测（Bhattacharya等，2021年），通过重新统计卡林顿原始图稿中的太阳黑子群和单个太阳黑子。Bhattacharya等人（2021年）将卡林顿自己的计数（卡林顿，1863年；Casas和Vaquero，2014年；Lepshokov等，2012年）与当代观测、鲁道夫·沃尔夫自己的观测，以及卡林顿在《Mittheilungen》上的列表进行了比较。他们得出结论，卡林顿的太阳黑子群计数方法（卡林顿，1863年）

与现代方法相当，但用于统计单个太阳黑子的方法则导致了显著的漏计。另一方面，沃尔夫自己的计数以及他对卡林顿图稿的重新统计，所得数值都与现代方法非常接近。关键在于，卡林顿的目录实际上是位置目录，因此只记录了最大的太阳黑子和太阳黑子群；而他的绘图更为精确，由沃尔夫在19世纪60年代或160年后的T.H. Teague进行统计时，所得结果都与现代观测相当。

安杰洛·塞基于1871年至1875年间观测了太阳黑子和日珥。Carrasco 等人（2021d）根据塞基的著作《Le Soleil》（Secchi，1875）制作了机器可读表格。塞基的原始图稿表明，他最早于1858年便开始进行太阳黑子观测（Hayakawa等人，2019；Ermolli和Ferrucci，2021）。这些成果促使研究人员进一步探查罗马天文台保存的塞基原始笔记本中的太阳黑子记录；这将成为一项即将开展的研究的重点。

（*f*）现代长期观测者

尽管在20th 世纪，尤其是第二次世界大战之后，观测者人数大幅增加，但许多序列的持续时间相当短，而且一些专业天文台的序列因仪器或观测者更换而存在非均匀性。因此，找回此前从未收集和利用、或仅部分收集和利用的长期序列，有助于完善S_N 和G_N 记录最新部分的稳定性（例如Clette 等，2021发现的苏黎世1947年不连续性），并使其与当代观测无缝衔接。

关于这一点，目前尚未纳入 V16 的较近期长期机构观测者和个人观测者的太阳黑子观测，仍在持续处理和数字化。科英布拉大学天文台发布了一份目录，收录了1929年至1941年的太阳黑子观测（包括群数和太阳黑子数）（Lourenço 等人，2019年）。此外，Carrasco 等人（2021a）最近对一组1947年至2004年在萨克拉门托峰天文台（SPO）绘制的太阳黑子图进行了数字化。这项工作是发布完整 SPO 太阳黑子目录的第一步，该目录将包含太阳黑子位置和面积的信息。Carrasco 等人（2018年）将该目录数字化，并利用科英布拉数据重建了相应的总太阳黑子数和南北半球太阳黑子数序列$_N$ 。

Hisako Koyama（Koyama，1985年；Knipp、Liu、Hayakawa，2017年）在东京科学博物馆（后更名为国立自然科学博物馆（NMNS））任职期间（1947年至1985年）发布的太阳黑子计数，曾被用作 Svalgaard 和 Schatten（2016年）群黑子数重建的一条骨干序列。近期对筑波 NMNS 档案的调查发现了 Koyama 1945年至1996年的太阳黑子图和日志簿（Hayakawa 等人，2020年）。Hayakawa 等人（2020年）介绍并分析了 Koyama 太阳黑子观测的完整数字数据库（由 Toshihiro Horaguchi 和 Takashi Nakajima 编码），并诊断出此前未被发现的非均匀性，影响了太阳黑子计数序列在1983年之后的后期部分。Hayakawa 等人（2022b）分析了川口博物馆所藏的 Hitoshi Takuma 1972年至2013年的太阳黑子图绘。与同期记录的比较表明，在这一长达~40年的时段内，Takuma 的观测属于最稳定的数据集之一。

2.2.2 太阳黑子群数的重建方法$_N$

自Hoyt和Schatten（1998a、b）首次编制此类序列以来，已有多个太阳黑子群数时间序列问世。这些序列，包括Hoyt和Schatten（1998a、b）的序列，列于表2中。

表2. 生成群体太阳黑子数时间序列的研究列表

参考文献*	缩写**	年份	采样频率	数据库	校准	拼接
1	HoSc98[a]	1610-2013	每日	HoSc98	链式传递、	有限骨干序列、线性缩放
2	SvSc16[a]	1610-2015	每年	V16(1.0)	链式传递、	骨干序列、线性缩放
3	ClLi16[a]	1841-1976	每日	HoSc98	链式传递、	骨干序列、线性缩放***
4	UEA16[a]	1749-1995	每日	HoSc98	活动日、	合成参考序列、非线性
5	CEA17[b]	1739-2010年	日尺度	V16(1.12)	链式传递、	骨干序列、非线性
6	WEA17[c]	1749-1996年	月尺度	HoSc98	活动日、	合成参考序列、非线性
7	UEA21[d]	1749-1996年	月尺度	V16(1.21)	活动日、	合成参考序列、非线性
8	DuKo22[e]	1825-1995	日尺度	V16(1.21)	并列排名、	线性

* 参考文献：(1) Hoyt和Schatten（1998a、b）；(2) Svalgaard 和 Schatten（2016）；(3) Cliver和Ling（2016）；(4) Usoskin等人（2016a）；(5) Chatzistergos 等人（2017）；(6) Willamo、Usoskin和Kovaltsov（2017）；(7) Usoskin、Kovaltsov和Kiviaho（2021）；(8)Dudok de Wit 和 Kopp（2022）

** 时间序列可在以下地址获取：[a] https://www.sidc.be/silso/groupnumberv3；[b] http://cdsarc.u- strasbg.fr/viz-bin/qcat?J/A+A/601/A109；[c] https://www.aanda.org/articles/aa/full_html/2017/05/ aa29839-16/ T2.html；[d]https://link.springer.com/article/10.1007/s11207020 -01750-9#Sec9；[e] 待发表。

*** 仅为暂定结果，并非旨在规定 G_N 的重建方案或方法；该方法基于 Hoyt 和 Schatten（1998a、b）的 G_N 构建方法，但将 1874—1915 年间经调整的 RGO 时间序列，以及 1874 年以前按调整后的 RGO 序列进行缩放的 Schmidt 数据用作主要观测者

表2所列的 G_N 序列基于四种基本方法：

1. 线性菊花链法：对连续重叠的观测者进行线性缩放（串联法），或使用“观测者骨干”（Hoyt 和 Schatten，1998a、b；Svalgaard 和 Schatten，2016；Cliver和Ling，2016）。

2. 活动日比例：相对于理想观测者（基于 RGO目录）对所有观测者分别进行缩放。通过质量因子或阈值（S_S；类似于方程 2中的 k'）逐日生成合成的不完美观测者；该因子或阈值由观测到太阳黑子的天数比例（活动日比例）确定（Usoskin等，2016a；Willamo、Usoskin和Kovaltsov，2017；Usoskin、Kovaltsov和Kiviaho，2021）。此外，缩放还基于互相关矩阵，即理想观测者与合成观测者之间的概率分布函数（PDF），从而实现非参数转换。

3. 概率分布函数：基于相关矩阵，对连续重叠观测者进行非线性非参数标定（Usoskin等，2016a）；按日使用主要（骨干序列）观测者（Chatzistergos 等人，2017）。

4. 并列排名：针对给定日期的群数，依据其秩次排序而非实际数值的并列排名方法（Kendall，1945）（Dudok de Wit 和 Kopp，2022）。

在以下小节中，我们将更详细地介绍这些方法，包括其优点和不足之处，这些内容总结于表3。

表3. 太阳黑子时间序列重建方法概要

方法	需要重叠 的观测者	固有地 计算 不确定性	需要 参数化 假设	成熟度 关于太阳黑子 序列
串联法	Yes	No	Yes	High
活动日比例	No	No	No	Low
概率 分布 函数	Yes	Yes	No	中等
并列排名	Yes	Yes	No	Low

2.2.2.1 线性雏菊链式法

Hoyt 和 Schatten（1998a、b）采用此方法，沿用了 Wolf 首先使用的归一化方法，将自己的观测与 1848年之前苏黎世以外观测者的观测联系起来。Hoyt 和 Schatten 没有采用 Wolf 或其他任何一位苏黎世台长作为主要观测者，而是将基于摄影的皇家格林尼治天文台（RGO）1874—1976年群数序列（Willis 等人，2013a、b；Erwin 等人，2013年）作为主要参考。不过，对于在1874年之前开始观测的观测者，他们在归一化方案中采用了由个人观测者组成的"雏菊链"，有时还使用多条链，这使得此类观测者的 k' 因子难以复现，甚至根本无法复现（Cliver和Ling，2016年；Cliver，2017年）。Hoyt 和 Schatten（1998a、b）率先以有限的方式使用"骨干序列"（Svalgaard 和 Schatten，2016年）：将1874—1976年RGO序列、指定Horrebow为1730—1800年的主要观测者，并由伽利略担任17th 世纪最早期观测者的这一角色。Svalgaard 和 Schatten（2016年）对四位主要观测者的连续"骨干序列"采用了线性缩放。

由于链中连续连接的数量越多，出错的可能性就越大，Svalgaard 和 Schatten（2016）通过连接彼此独立（大多不重叠）的观测者"骨干序列"，减少了雏菊链中的连接数量。每条骨干序列都在有限的时间区间内，以同一位共同参考观测者为基准进行定标；而在1874年之前，Hoyt和Schatten（1998a、b）采用的是个人观测者组成的单个或多个序列。此外，他们仅使用目视观测者作为主要参考，而不采用 RGO 照相群数。Svalgaard 和 Schatten（2016）通过计算重叠时段内观测者计数与主要观测计数年度平均值之间的相关性，来确定 k' 因子（Hoyt 和 Schatten（1998a、b）则采用在有一个或多个太阳黑子群的共同观测日内日计数总和之比），并将拟合强制通过原点，以满足严格正比关系。图10改编自 Chatzistergos（2017），展示了串联法与骨干法的区别。

Dudok de W it 和 Kopp（2022年）指出了对雏菊链法的以下一般性批评：

1. 骨干观测者的初始选择具有主观性，而这一选择可能显著影响结果并引入偏差；2. 该方法没有利用所有可能的重叠时段，因此并非最优；3. 最终结果会受到记录拼接顺序的影响；4. 误差在每次拼接时都会单调累积（Lockwood 等，2016），不过该方法本身并不能确定时间相关不确定性；5. 该方法无法跨越数据缺口（Usoskin 等，2016）除外的所有方法均存在这一问题）。

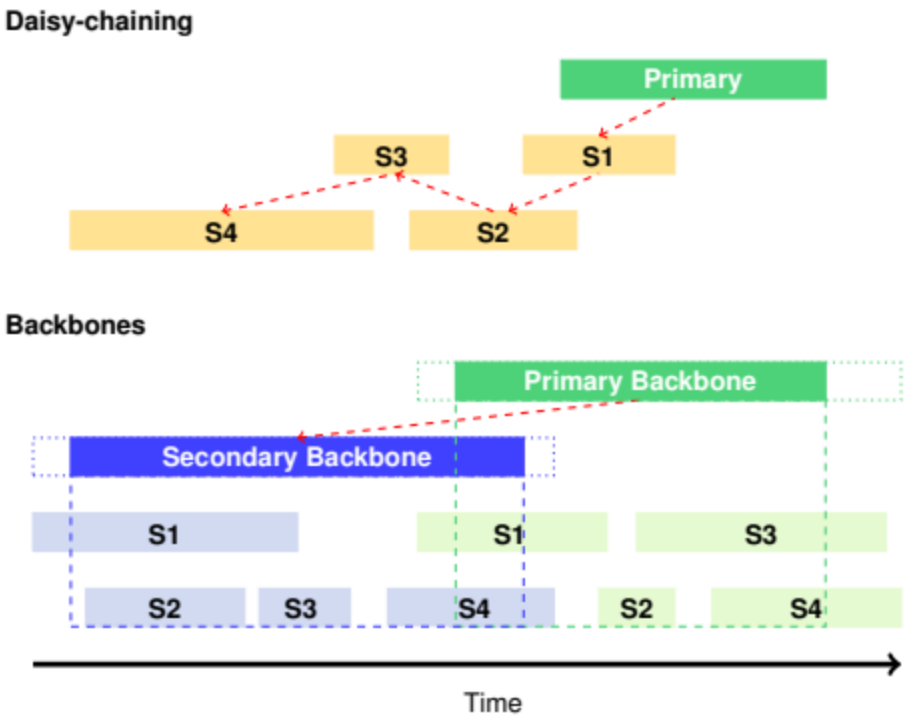

图10。展示串联法与骨干方法之间差异的示意图。在串联法中，主要观测员（绿色）和次要观测者（棕褐色）根据各自的重叠时段依次相互校准。在骨干法中（Svalgaard 和 Schatten（2016）），若干次要观测者（浅绿色和浅蓝色）根据各自的重叠时段与多个骨干观测者进行校准，然后将与每位主要观测员相连的连续骨干序列相互校准。尽管串联法（例如 Hoyt 和 Schatten，1998a,b）和骨干法都采用串联法，但骨干法的优势在于减少链中的连接数量，从而降低误差累积。有关 Svalgaard 和 Schatten（2016）与 Chatzistergos 等人（2017）所采用的骨干方法之间的差异，请参阅正文。（改编自 Chatzistergos，2017年。）

在 Svalgaard 和 Schatten（2016）的骨干方法中，四个骨干连接中有三个的主要观测者之间没有重叠；而 Chatzistergos 等人（2017）的九个此类连接中有四个没有重叠。对于没有重叠的情况，交叉校准完全基于骨干序列虚线延伸段的重叠部分（图10）。Svalgaard 和 Schatten（2016）重建中骨干观测者之间没有重叠的一个例子是 Schwabe（骨干序列长度：1794—1883年）和 Wolfer（1841—1944年）；Schwabe 在1867年后停止观测，而 Wolfer 的首次观测（见 Svalgaard 和 Schatten，2016）始于1878年。这种方法的优点是只需较少的骨干序列便可涵盖较长的重叠时段，但这样做依赖于延伸骨干序列中不确定性较大的部分进行交叉校准。Svalgaard 和 Schatten（2016）与 Chatzistergos 等人（2017）的骨干方法还有另一处不同：SvSc16序列中的次要观测者可以同时与两条骨干序列进行缩放，例如图10中的浅绿色 S1观测者；而 CEA17 中则不可以。

此外，Svalgaard 和 Schatten（2016）序列中对1940年之后的年份应用了7%的太阳黑子群数扣减，原因是怀疑苏黎世的群组拆分技术发生了变化；这一做法需要独立验证。

SvSc16 与 CEA17 的第三个关键差异——第2.2.3节讨论了这一点——在于尺度转换程序：前者对年平均值进行线性缩放，后者则对一对观测者的日值进行非参数映射。后者允许一对观测者的计数之间存在非线性关系，并避免时间平均带来的副作用（观测日期在一年中的分布不同，以及时间平均的线性化效应）。虽然这两个序列在 ~1880 之后相当吻合，但在此之前则出现分歧（图2）。

最近，Velasco Herrera等人（2022年）宣布，他们利用小波和机器学习技术重建GN序列，结果支持原始HoSc98序列的有效性。然而，他们并未重新校准G_N 序列，也没有利用近期修订的G_N 数据库（Vaquero 等人，2016年），而只是根据有限的一组可变周期分量，为原始HoSc98序列构建了一个谐波模型；这实质上只是复现了输入序列的特征。这类方法也受太阳活动随机性的影响（例如，Cameron 和 Schüssler，2019年；Charbonneau，2020年；Petrovay，2020年）。基于周期性假设，这项技术或许有助于对数据稀少或无太阳黑子日占主导的区间进行插值，但无法诊断原始序列中可能存在的缺陷。另一方面，本文并未处理上述串联原则中指出的任何问题，也未涉及RGO照相目录早期部分的均匀性问题。. 鉴于上述原因，且Velasco Herrera等人（2022年）的G_N序列 并非对实际数据的重新校准，而只是一个模型，因此本文不再进一步讨论该序列。

2.2.2.2 基于活动日比例、相对于退化的理想观测者进行个体非线性尺度转换

Usoskin等人（2016a；另见Willamo、Usoskin和Kovaltsov，2017，以及Usoskin、Kovaltsov和Kiviaho，2021）提出了一种具有若干新颖特点的归一化程序。他们没有直接使用群数，而是考察了个人观测者的相对群数与其报告有太阳黑子（即活动日）的天数占观测总天数（包括无太阳黑子日）的比例之间的系统性统计关系，这一比例即所谓的活动日比例（ADF）。利用这一个体指标，可以独立确定每位观测者的尺度，从而避免任何形式的串联法。这种方法的一个潜在关键优势是，在关联任意两位观测者时，无需依赖重叠观测，因此即使跨越较长时间范围（甚至观测中断的时期），其准确度也可与短时间范围相当。不过，该方法确实依赖于太阳活动在多个世纪的时间尺度上保持一致，因为RGO通用观测者的观测时段相对 有限（1900—1976年；Willamo等人，2017）。

为在多个观测者之间建立这一尺度，必须将ADF统计数据与一位理想参考观测者进行比较；假定该观测者能够观测到所有太阳黑子群，直至最小孔斑的大小。为此，研究者假定，1900—1976年的RGO摄影目录可作为通用参考，无论其他观测者的观测时间是否涵盖RGO数据的1900—1976年时间范围，都可以与之比较。作为相对于通用RGO观测者的缩放因子，他们通过将每位观测者各自的ADF统计数据与对通用（假定为理想）RGO观测者进行合成退化后得到的ADF相匹配，为每位观测者确定了质量因子S_S；该因子实际上是视力阈值（即个人观测者开始观测到太阳黑子/太阳黑子群时所对应的太阳黑子面积阈值）。

这一做法基于以下假设：不完美观测者的计数会因其敏锐度有限而偏低，也就是说，他们无法探测到最小的太阳黑子。研究者通过从RGO数据中剔除面积低于某一阈值S_S 的所有太阳黑子群来模拟这一情况，该阈值以太阳圆面的百万分之一为单位（μsd）。能使阈值化的RGO数据与某位观测者实际ADF A最佳匹配的阈值S_S，是通过一组累积分布函数（概率分布函数）P(A, S_S)推导得出的；这组函数描述了不同退化程度下RGO的ADF（图11）。确定基于ADF的S_S 值后，便可根据与该S_S对应的退化RGO数据集的群数和代表理想观测者的完整RGO数据集的参考群数之间的关系，借助二者的交叉概率密度分布，推导出对目标观测者群数的校正。在最后这一步中，研究者没有回归拟合数学模型，而是以非参数方式实施校正：利用RGO交叉概率密度函数，直接重新映射相应观测者每日的原始群数，从而得到校正后的群数（给定原始G_N 值处概率分布函数的峰值）及其不确定性（该G_N 值处概率分布函数的宽度）。

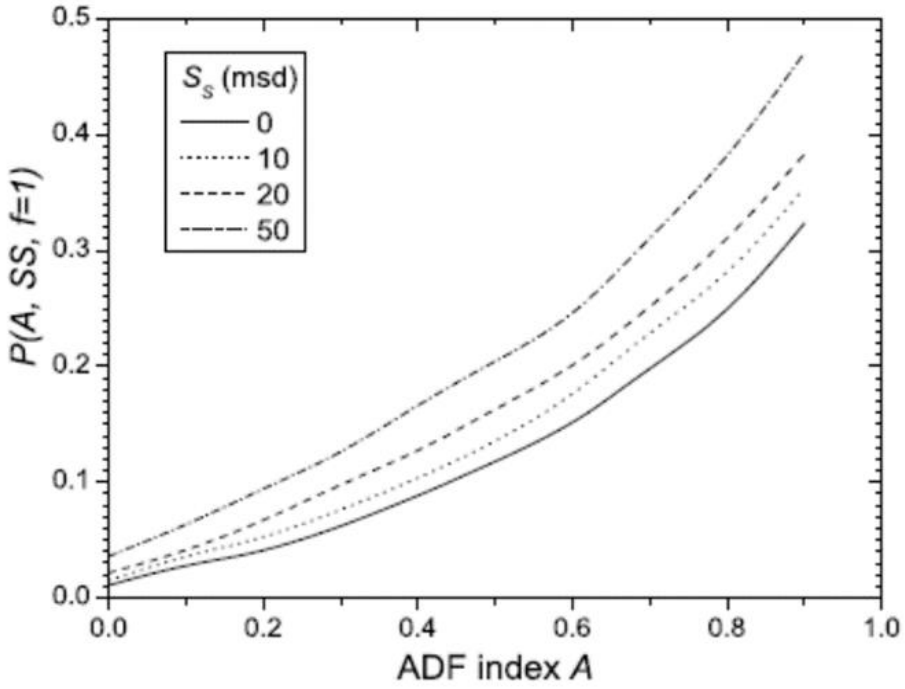

图11. 参考数据集的累积概率分布 P(A, S_S)（对应不同的阈值观测面积（S_S）和完整数据覆盖率（f = 1））。S_S = 0 对应完整的RGO数据集。（引自 Usoskin等，2016a。）

迄今开发的基于面积分布函数的通用观测者方法存在以下困难/不足：

(1) 在太阳活动较低的时期，可能存在未报告的无太阳黑子日，导致面积分布函数被高估，并使某些观测者的修正值偏低（Svalgaard 和 Schatten，2017年）。

(2) 不同时期的观测者对黑子群定义的差异（群拆分规则不断演变），并未被视为观测者敏锐度之外的另一种个人因素。当太阳活动周峰值临近时，太阳活动旺盛，

太阳圆面上密布着许多太阳黑子群，而且大型太阳黑子群所占比例相较于微小太阳黑子群（即敏锐度会产生影响的太阳黑子群）较高，此因素可能发挥重要作用，甚至可能占主导地位。它适用于所有涉及群数计数的序列，因此 G_N 和 S_N均适用。

(3) 观测者群数对 S_S 因子的相对不敏感性（Cliver，2016年；Svalgaard 和 Schatten，2017年）。

(4) ADF方法仅在 ADF 为 <0.8 时适用，因此只适用于太阳活动周的低活动阶段。因此，活动周极大值对应的校正后 G_N 值是通过外推得到的，超出了为观测者校准 ADF 的范围。

(5) S_S 阈值对活动水平的敏感性存在差异（Usoskin、Kovaltsov 和 Chatzistergos，2016b），也就是说，如果目标观测者所处时期与参考RGO数据所处时期的总体活动水平不同，S_S 可能会被高估或低估。（假设太阳活动水平一致。）因此，该方法在中等活动水平下效果良好，但往往会轻微低估高活动水平（<10%），并大幅高估低活动水平（~30%）。总体而言，鉴于19th 世纪较弱的活动周期出现频率高于RGO数据集20th 世纪的基准时间段，该方法会略微高估活动水平（Willamo、Usoskin 和 Kovaltsov，2018年）。这种差异效应可能是上述第（4）点所述对活动周极大值进行外推的结果。

(6) RGO 与观测者的观测时段不同（仅用报告太阳黑子群的天数与观测总天数之比，无法充分反映这一差异）。

(7) 参考观测者（在本例中为 RGO目录）显然并非"完美"。按照 Usoskin 等人（2016a）所用的方法进行简单分析，但选取 RGO目录中的不同部分（选择不同的长期时间段），结果表明，得到的 S_S 与 Usoskin 等人（ 2016a ）报告的误差棒并不一致（ L. Lefèvre 私人通信）。

上述 ADF 方法在适用性和准确性方面的局限性（1–4、6 和 7）未在 Usoskin 等人（2016a）、Willamo、Usoskin 和 Kovaltsov（2017年）或 Usoskin、Kovaltsov 和 Kiviaho（2021年）中得到讨论。上述列表中的因素（5）由 Willamo、Usoskin 和 Kovaltsov（2018年）以及 Usoskin、Kovaltsov 和 Kiviaho（2021年）进行了量化，但因素 1–3 可能导致更大的误差和偏差。

在 ISSI 研讨会上，Muñoz-Jaramillo 提出了一种分段式 ADF 方法，以改进 Usoskin 等人（2016a）发表的方法。这种新方法的总体思路是以相同方式确定阈值，但通过根据不完美观测者的数据覆盖范围应用时间窗口来补偿第（5—7）点，并使该窗口相对于参考数据集在时间上移动，以考虑 "不完美观测者"数据中的活动水平。然后，将这一阈值应用于参考数据，以统计太阳黑子群。在这里，实际的群数再次发挥作用，与 ADF 本身并列。此外还需注意，参考数据集经过了轻微修改，以考虑最初几年中可能存在的漂移。与用于群数重建的原始 ADF 方法论一样，这种改进后的分段式 ADF 方法仍有待进一步完善，并且仍需要进行端到端验证。

Willamo、Usoskin 和 Kovaltsov（2017年）还指出，ADF 原理在极小期内并不适用。与串联法一样，这种方法在稀疏数据的时段也会失效。不过，串联法无法跨越此类数据缺口，因此会在早期 19th 世纪遇到的第一个稀疏数据连接处止步；而 ADF 则有望（尽管尚未

得到验证）为这些缺口之间任意一个“数据较为丰富”的时段提供校准基准点，例如 Carrasco 等人（2021c）所示的 18th 世纪。因此，采用 ADF 方法跨越数据缺口，并在连续观测时段使用串联法的混合方法，可能是一种创建比单独使用串联法覆盖更长时段的时间序列的策略。

2.2.2.3 通过非参数概率分布函数进行非线性缩放的骨干序列 s

Chatzistergos 等人（2017）沿用了 Svalgaard 和 Schatten（2016）的方法，通过一系列主要“骨干”观测者重建 G_N，但在几个方面改进了这一原始概念，以避免其初始版本的一些缺陷：

1. 使用日值而非年平均值。

2. 增加更多主要观测者，使他们之间都能直接实现时间重叠，而不是使用次要观测者来弥合彼此不连续的主要观测者之间的时间间隙。（不过，每增加一个环节，误差累积概率都会上升。）

3. 基于一对观测者各自数值的概率分布函数（PDF），采用非参数映射，从而允许进行非线性校正，取代对纯线性关系进行最小二乘拟合。（非参数映射方法最初由 Usoskin 等人（2016a）提出，作为上一节所述 ADF 方法的一部分。）线性缩放存在高估强周期的偏差，而非参数方法往往会高估极小值并略微低估极大值。

4. 能够直接估算重建的不确定性。在这种非参数方法中，他们利用每个 G 值对应的 G* 概率分布函数，将次要观测者的群数 G 换算为主要观测者的群数（G*）。图12展示了一个校准矩阵示例，其数据来自高质量的次要观测者 Koyama 和主要观测者 RGO。该过程不对 G 与 G* 之间的关系类型（例如线性关系）作任何假设，误差估算也很直接。对于每条骨干序列，Chatzistergos 等人（2017）通过对每天所有可用观测的概率分布函数取平均，构建合成序列，从而得到基于所有可用观测者的分布。当数据点很少时（例如 G_N 值的高值范围），在创建时间序列时，可对成对观测者的概率分布函数应用蒙特卡罗技术来估算不确定性。

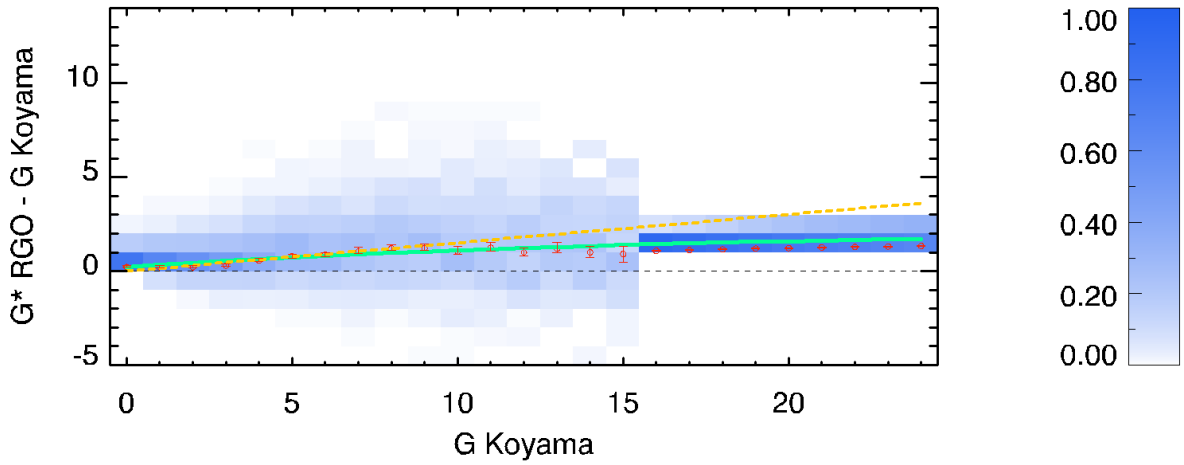

图12. 校准矩阵，显示1947—1976年期间RGO（主要观测员G*）与Koyama（次要观测员G）之间残差差值的概率分布随G的变化。为补偿高值范围内数据点数量较少的问题，> 15 列填入了蒙特卡洛模拟的结果。带误差棒的红色圆点表示每个G列对应的G*平均值及其1σ 不确定度。红色/黄色虚线表示Hoyt和Schatten（1998a、b）给出的k'因子，绿色线为指数拟合，显示出轻微的非线性。（参见Chatzistergos等，2017中的类似图）

尽管这种基于日观测记录的概率分布函数方法，相较于 Svalgaard 和 Schatten 的骨干法（见 2.2.2.1）能够进行更稳健的误差分析，但它也有其他局限性，包括群数较高时，由于统计数据比群数较低时少，概率分布函数的准确性有限；这对于校准太阳活动周的极大值尤其重要。

2.2.2.4 并列排名

并列排名（Kendall，1945年）是一种新的太阳黑子数重新校准方法（Dudok de Wit 和 Kopp，2022年），它并不基于GN值本身，而是基于由观测者对测得的GN值分布。对于给定观测者，并列排名以该观测者变量相对于该变量所有其他值的顺序（“排名”）替代GN变量。通过使用排名值而非原始值，该方法绕过了对个人观测者进行非线性响应校正的需要，而这正是所有合并方法面临的主要困难之一。然而，只有当排名记录涵盖相同的时间区间时，才能对其进行有意义的比较。为填补数据缺口，采用期望最大化方法（Dempster、Laird 和 Rubin，1977年；Rubin，1996年；Little 和 Rubin，2002年）。从这个意义上说，该方法是骨干序列法和接力法的强力推广，因为它利用所有可能的重叠来填补数据缺口，避免了主观选择重叠时段和骨干序列。最终综合序列是特定日期所有可用排名的平均值（不包括插值），随后使用特定观测者将组合排名转换回群数。Dudok de Wit 和 Kopp（2022年）建议，G_N 序列的绝对标度可以通过一种互补方法确定，例如ADF（Usoskin等，2016a）。

并列排名法可能存在的局限包括：(1) 校准取决于时间区间（太阳活动周的阶段、数据涵盖区间内的活动水平）；(2) 该方法无法考虑观测者自身的趋势。（后一局限是所有方法的共同问题。）在此方法中，会依次使用若干数学技术，而每个步骤的输出可能如何影响后续步骤及最终结果，仍有待充分理解。为此，需要单独分析中间 步骤，并创建具有已知特征和缺陷的合成“基准测试”输入数据集。因此，仍需开展大量工作，才能全面验证这一源自 ISSI团队研究成果的全新方法。

2.2.3 重建方法的结论

理想情况下，重建问题应分为两个部分：科学选择（如何将不同的信息转化为可处理的数值？）以及统计或分析选择（考虑到这些数值的不确定性，采用什么方法将它们合并为一个综合序列？）。之所以要将两者分开，是因为综合序列的生成不应影响对原始数据的解读，也不应影响将其整理成源数据序列的方式。

从 ISSI团队的经验中得到的教训之一是，在现阶段，这种分离很难实现，因为所有这些问题都密切相关。处理这类问题最合适的总体框架是概率框架：将每位观测者的太阳黑子数据记录视为一个条件分布，该分布取决于不同的已观测或未观测参数。例如，这些参数可能是某一天的太阳黑子数（考虑到望远镜的分辨率、观测者的视力等），或者是观测者没有报告任何信息这一事实，因为他/她那一周可能没有看到太阳黑子。因此，核心目标是确定在给定各种已观测或未观测参数的情况下，真实太阳黑子数为某个特定值的概率：p(data|parameters)。

这种概率方法自然而然地引向贝叶斯推断 [Gelman et al., 2013] 它为估计此类概率提供了一种自然方法，例如，可以通过对未观测变量进行积分将其消去。贝叶斯思维也为在出现新证据时更新结果提供了一种自然方法。尽管贝叶斯推断已被证明在构建综合序列方面非常有效（例如 [Tingley et al., 2012]），但要将太阳黑子估计和重建问题表述为条件概率分布，仍有很长的路要走。然而，即使不作近似就无法实现这一点，它也促使我们将类型迥异的观测纳入一个统一且严谨的框架，而针对该框架已有成熟的方法可供使用。

3. 太阳黑子数时间序列构建的基准

基准是一些经验法则或预期，可用于检验任何基于太阳黑子的太阳活动重建，或作为需要考虑的要点。它们与代理指标不同，因为它们完全基于太阳黑子数据。

3.1 预期（1）：S_N 和 G_N 时间序列的相似性

正在进行的太阳黑子数重新校准工作，源于这样一种预期：Wolf 的 S_N(1.0) 与 Hoyt 和 Schatten（1998a、b）的 G_N 时间序列在太阳活动范围广泛的20th 一个世纪中始终密切吻合，因此在它们共同的时间区间内也应如此，而不应像约1880年那样突然分道扬镳 （见 Clette等，2014年的图1，以及 Clette等，2015年的图1(a)）。这一预期同样适用于当前各组 G_N 时间序列：它们在20th 世纪与 S_N 序列吻合得相当好，但对~1880 之前的年度值重建结果则存在很大差异（图2）。目前，对于 G_N 和 S_N 序列在这一时期出现分歧，最可能的解释是 Wolfer 决定（他于1876年成为苏黎世的一名助理时）将单个小孔斑计作太阳黑子群（见第2.1.2.2节）。另一种解释——太阳内部运作发生变化，导致太阳活动极大期太阳黑子与太阳黑子群的相对数量出现差异——似乎不太可信。显然，从图2中各序列的数值自约1880年起明显分散来看，约1880年前后是太阳黑子数重建面临的一项挑战。

图 13 展示了经过11年滑动窗口平滑后，各种 G_N 序列与 S_N(2.0) 的比值，并将其缩放为在1920—1974年间取值为1.0。我们发现，整个20世纪所有太阳黑子序列的 S_N/G_N 比值大致保持恒定（与 Svalgaard，2020年的结果一致），而各序列在1900年之前则出现分歧。鉴于~100年区间~1900—2010年间活动水平变化范围很广，我们预计在~1900 – 年之前，任意 G_N 序列的 S_N/G_N 也应保持近似恒定，CEA17和 SvSc16序列的情况正是如此。我们注意到，计算比值时排除了 $S_N < 11$的年份。

阈值的选择会影响计算得出的比值；阈值越高，除 HoSc98 外，所有序列的 S_N/G_N比值也越高，而 SvSc16 的序列比值则更接近1。我们注意到，有研究报告称太阳黑子群数与太阳黑子数之间存在非线性关系，这表明太阳黑子群与太阳黑子之间的关系可能会略微受到活动水平的影响（Clette等人，2016年）。

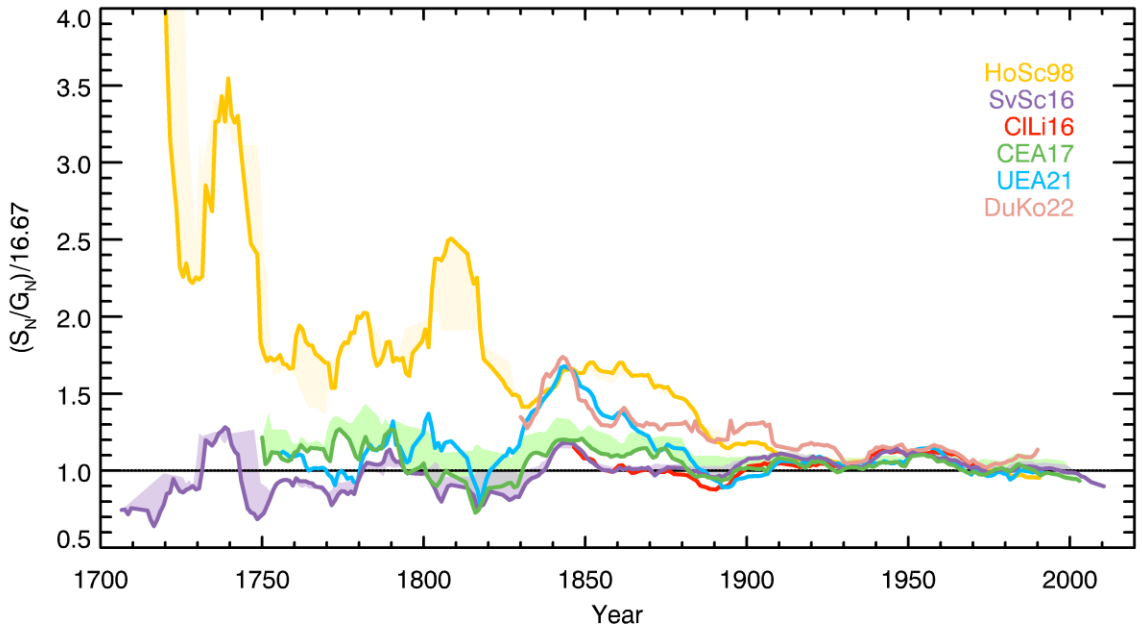

图 13。经过 11年滑动窗口平滑后，各种 G_N 序列与 $S_N(2.0)$ 的比值，并将 1920—1974年期间的数值缩放为 1.0。计算比值时忽略了 $S_N < 11$ 的年份。为说明 S_N 阈值对比值的影响，我们还以阴影区域表示了忽略 S_N 小于 50 的年份时的情况（仅针对 SvSc16、HoSc98 和 CEA17）。

3.2 预期（2）：随着时间推移，观测者应不断改进，校正因子应逐渐降低

Cliver（2016年）为给定的 G_N 时间序列定义了一个“校正因子”时间序列 [CF_i]（公式（3））。该序列通过将年度群数 [G_{Ni}] 除以所有观测者原始群数 [G_{Nraw}]相应的年度平均值获得，可用于评估新的 G_N 和 S_N 重建的可靠性。因此，G_{Nraw} 代表完全未经校正的群数，不包含对观测技术整体改进的任何补偿。

$$CF_i = G_{Ni}/G_{Nraw} \qquad (3)$$

[Cliver（2016）中的太阳黑子群数$_{Nraw}$] 由V16数据库中的所有观测者生成，并在方程 3中应用于各种太阳黑子群数$_N$序列，而不论这些序列是基于哪个数据库（Hoyt 和 Schatten（1998a、b）或 Vaquero 等人（2016））以及这些数据库中的哪些观测者构建的。在此，我们通过考虑各序列所使用的数据及其原始计数对应的数据库，生成了校正因子（本质上是给定年份观测者的集成平均 k 和 k' 因子）。具体而言，我们查阅了Cliver和Ling（2016）、Chatzistergos 等人（2017）、Usoskin等人（2021a）以及Dudok de Wit 和 Kopp （2016）所列出的观测者表，并通过对每种情况下所使用数据库中这些特定观测者的原始计数取平均，生成了[太阳黑子群数$_{Nraw}$] 序列。对于HoSc98，我们使用了Hoyt 和 Schatten（1998a、b）数据库中所有可用的观测者；而对于SvSc16（v1.12）和DuKo22（v1.21），我们

使用了V16数据库中的所有观测者，但在所有情况下，我们都排除了源自威尔逊山太阳圆面中心的时间序列。

我们预期，总体而言，所有序列的校正因子值都会从20世纪的数值 ~1 大致单调地增加到更高的数值 ≳ 2 ，随着时间回溯至19 世纪初及更早时期（见第5.1节）。这是因为：(1) 早期世纪的望远镜技术较为落后；(2) 太阳黑子计数方法从Wolf改为Wolfer（见第2.1.2.2节）。这两项变化都会使现代太阳活动水平相同时的计数更高，相应地，校正因子也会随着时间回溯而增加——图14中几乎所有时间序列都体现了这一点。大多数GN序列在不同程度上呈现出预期的下降趋势，但原始HoSc98序列的这一趋势非常有限，因此与观测已取得的已知进步不相符。

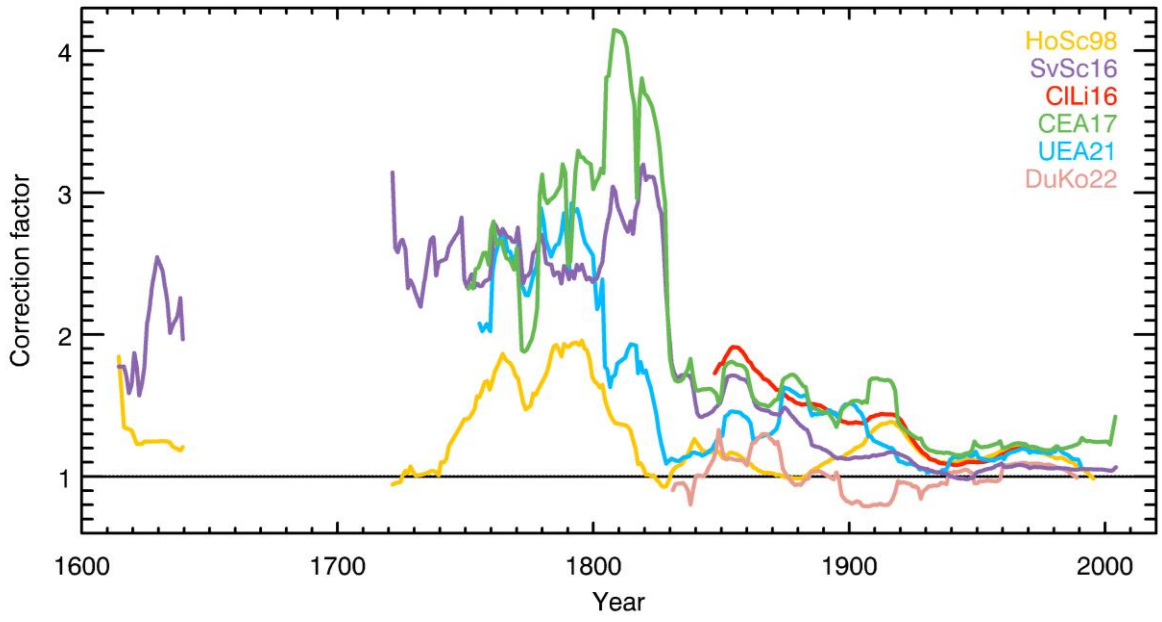

图 14. 图例所示各太阳黑子序列在1600年至2010年间的校正因子时间序列的11年滑动平均值。

另一种测试方法是利用当代数据，确定不完善观测造成的损失。在这方面，Wolf和Wolfer对G和S的定义差异，背后存在仪器原因，这一原因超出了Wolf希望忠实沿用早期观测者方法的考量。1860年之后，Wolf主要使用两台小口径便携式望远镜（40毫米/700毫米焦距和42毫米/800毫米）；而从1876年开始，Wolfer则使用苏黎世天文台的标准83毫米/1320毫米望远镜（Friedli，2016年，2020年）。正如Karachik、Pevtsov和Nagovitsyn（2019年）所示，他们对太阳动力学观测台（SDO；Pesnell等，2012年）航天器上搭载的日球层与磁成像仪（HMI；Scherrer等，2012年）拍摄的高分辨率光球图像进行数值降质处理（如图15所示），结果表明，口径为< 80 毫米的望远镜无法分辨相当数量的小孔，因此很可能低估群数。口径更大的望远镜

能够充分分辨最小的孔洞，从而更准确地呈现G。这与第2.2.2.2节中讨论的观点一致：应通过视力阈值量化观测者的观测质量，而不是使用恒定的缩放因子。

Karachik、Pevtsov 和 Nagovitsyn（2019年）也指出，太阳黑子数与太阳黑子群数之比存在非太阳活动引起的变化（见第3.1节），并写道："我们的结果表明，望远镜口径会影响太阳黑子数$_N$/太阳黑子群数$_N$之比；将现代比值与早期使用小口径仪器并以人眼作为探测器所得的观测进行比较时，应当牢记这一点。"18世纪未经校正的原始 G_N 序列中太阳黑子数与太阳黑子群数之比偏高，是因为小太阳黑子群难以观测到，也就是说，难以观测到只有一个或两个小太阳黑子的太阳黑子群（见第5节）；这是由于望远镜使用了小口径（<80 毫米）或不完善的物镜。

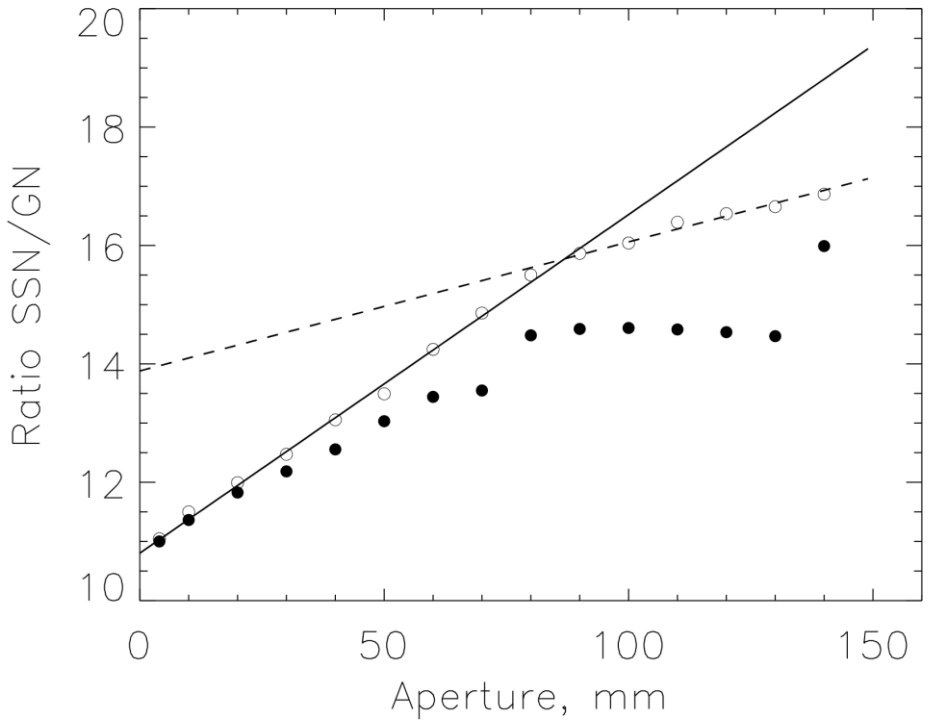

图15。根据 HMI 数值退化图像得出的太阳黑子数$_N$/太阳黑子群数$_N$ 之比与望远镜口径的关系。空心圆——无散射光；实心圆——添加了 5% 的散射光；实线——针对口径小于 80 毫米时的比值拟合的线性函数；虚线——针对口径大于 80 毫米时的比值拟合的线性函数。实心圆在 130–140 毫米范围内出现的阶梯式变化，是由 SDO/HMI 的有效口径为 140 毫米所导致的伪影。（根据 Karachik、Pevtsov 和 Nagovitsyn，2019年。）

4. 代理指标：作为 S_N 和 G_N交叉核验的独立长期时间序列

太阳黑子数校准的不同方法都包含复杂的假设，这些假设未必正确。将它们与其他太阳活动测量指标进行比较十分重要，这些指标既可以是直接测量的（例如太阳射电辐射，如 F10.7；或色球层指数，如 Ca II 光斑区面积），也可以是间接测量的（例如宇宙成因核素和地磁响应）。由于在19th世纪及更早时期，S_N 和 G_N 存在很大的不确定性，因此可以使用代理数据集来佐证对过去太阳黑子数的估算。

代理数据集通过太阳活动对地球环境的影响来衡量太阳磁场变化，具体而言，太阳紫外辐照度影响电离层，太阳风影响磁层，而行星际磁场调制的宇宙射线通量则影响大气层。这些代理指标不受太阳黑子本身的影响，但它们都是太阳发电机在对流区产生的太阳表面磁活动的不同表现形式（Charbonneau，2020）。我们预期太阳黑子数与这些参数之间的物理关系随时间变化相对较小（Svalgaard，2016；Cliver，2017），尤其是采用年度平均值时，因为这可以消除昼夜和季节变化。然而，近期研究表明，真实关系可能是卷积关系（Preminger 和 Walton，2006；Dudok de Wit 等人，2018；Yeo、Solanki 和 Krivova，2020；Krivova 等人，2021），也就是说，不能仅仅假定两者之间存在瞬时线性（或非线性）关系，就将一种太阳指数／代理指标转换为另一种。事实上，太阳代理指标可能是对主要太阳输入的延迟、累积或微分响应。这可以解释为：基于色球层或日冕辐射的太阳指数，也包含了活动区消退过程持续较长时间所带来的大量贡献，而太阳黑子则与初始磁通量浮现的联系要直接得多。因此，采用至少三个月的时间平均值预计能改善比较效果。

代理数据只应在构建太阳黑子数时间序列时作为最后手段使用，也就是说，当基于太阳黑子观测来弥补太阳黑子记录缺口的方法不可靠时，或用于1610年以前的时间段（该时期的代理S_Ns基于宇宙成因核素数据，例如Usoskin等人，2021年）。一般而言，代理数据既可用于佐证S_N 和G_N 时间序列，也可用于质疑其有效性；尤其是当太阳黑子数时间序列与代理参数时间序列之间出现突变间断，将两个延续较长的稳定时期（跃变）分隔开来时。如果将同一太阳黑子数据序列与多个互不相关的代理指标或基准进行比较，发现相同的偏移量，那么这种诊断结论会更加可靠。

4.1 2.8 GHz太阳射电辐射（F10.7）

首次报告探测到太阳射电波后不久（Southworth，1945年；Hey，1946年），人们发现太阳每日背景2.8 GHz辐射（因波长以厘米计而标记为F10.7）与太阳黑子活动有关（Pawsey、Payne-Scott和McCready，1946年；Covington，1947年）。Covington和Medd（1954年）报告称，F10.7能够追踪太阳黑子数 – ，两者之间的强相关性此后经过多次研究和证实（图16），最近一次由Clette（2021年）确认。这种良好的相关性可以用10.7厘米处存在显著的陀螺同步辐射贡献来解释，该辐射产生于太阳黑子上方的低日冕。自1947年开始、经过精心校准且跨度近75年的F10.7记录（Tapping，2013年），为现代时期的S_N 和G_N 序列提供了一种直接的核验方式。F10.7与太阳黑子数时间序列之间的一致性，印证了S_N 和G_N的物理意义。

Yeo、Solanki和Krivova（2020）将包括F10.7在内的各种光斑指数与太阳黑子数据进行了比较，发现幂律函数结合有限脉冲响应最能代表这些数据。在最近一项深入研究太阳黑子数与F10.7之间关系的研究中，Clette（2021）得出结论：对于原始日值，在整个取值范围内，这两个指数之间的关系完全呈线性。人们早已发现，使用月平均值或年平均值时，太阳黑子数S_N< 30在低值范围内存在非线性；这一现象完全可以用时间平均与两种因素的共同作用来解释：宁静太阳的F10.7背景通量非零最低值（67太阳通量单位），以及S_N定义中第一个太阳黑子对应的0到11的跃变。

这一全静背景F10.7通量本身曾是多项研究的主题，但各项研究得出的结果范围不一、彼此矛盾。Clette（2021）发现，这一最低值实际上取决于无太阳黑子时段的持续时间：对于观测到的最长时段（30天），最低值为67太阳通量单位；而对于单个无太阳黑子日，最低值则增至74太阳通量单位，从而解释了此前发表的结果为何看似相互矛盾。

此外，通过追踪S_N/F10.7关系的时间演化，本研究表明，除1981年出现一次10.5%的跃变外，该关系在整个70年间隔内完全稳定（图17）。多项测试确定，这次尺度跃变是由F10.7序列中的非均匀性所致，并且与该射电指数业务化生产过程中唯一一次重大的历史转变相吻合（负责该指数的两位主要科学家唯一一次交接，同时生产方式也从最初的人工处理转为目前的计算机化生产）。

Clette（2021）的分析支持S_N 2.0版的均匀性（Clette和Lefèvre，2016年）。与个别长期太阳黑子观测者的观测结果进行比较，也证实了这种均匀性，其中包括一些未纳入2015年SN 2.0版汇编的其他观测者（Clette，2021；Hayakawa等人，2022b）。将F10.7与原始S_N 1版序列及2版序列进行类似比较后发现，两条序列之间的一致性在1981年后显著提高，也就是说，S_N 2.0版中由完整重建得出的部分一致性有所提升。此前报告的若干偏差（Yeo、Solanki和Krivova，2020年；Clette等人，2021年）已在很大程度上消除。1981年前较大的残差表明，1980年前的苏黎世序列部分仍存在较大的误差和暂时性偏差；未来版本仍有望显著提高该部分序列的准确性。

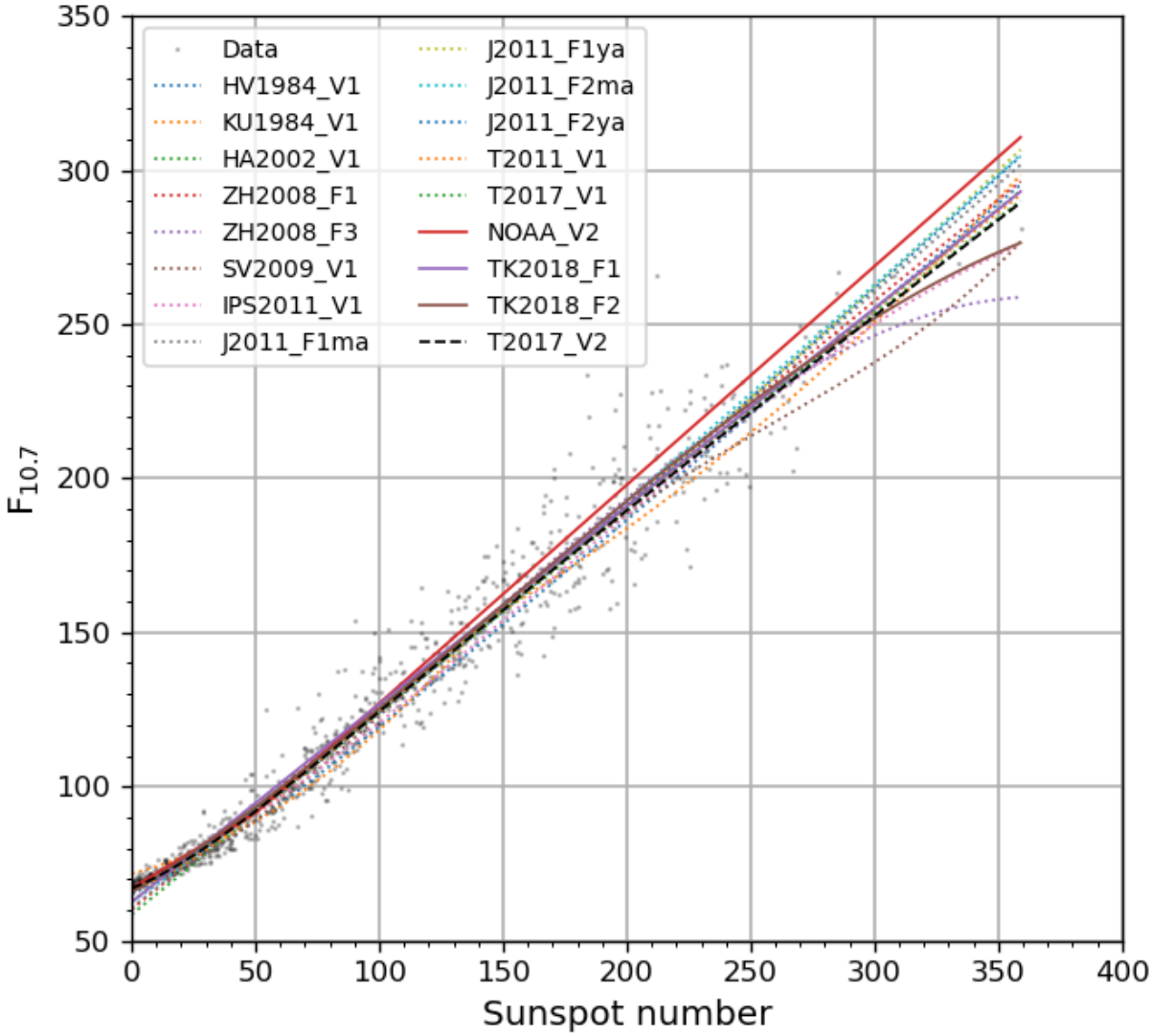

图16. 1984—2018年各项研究中 F10.7 与 S_N (2.0) 的关系图。（引自 Clette，2021年。）

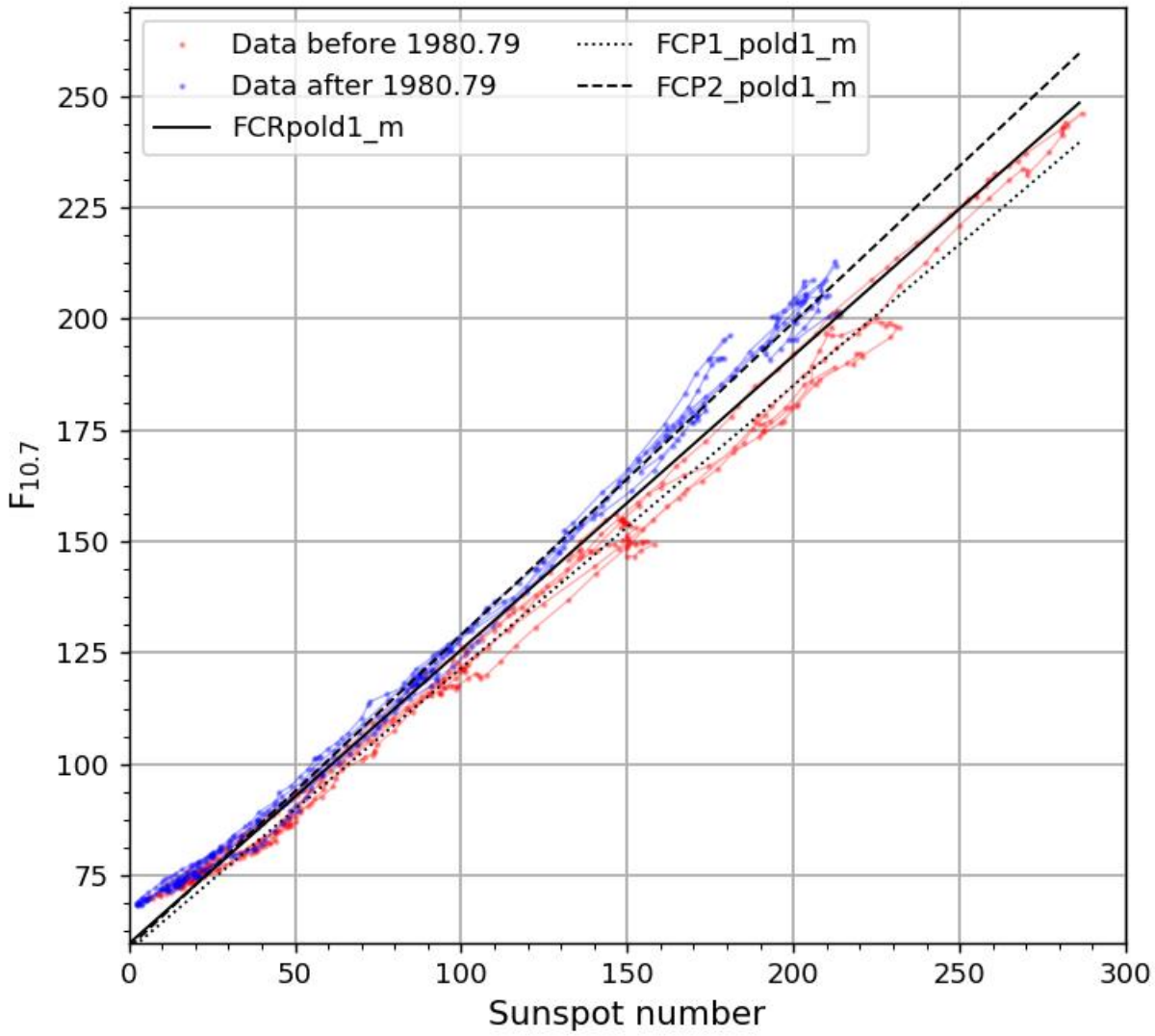

图17。F10.7与S_N (2.0)的12个月平滑月平均值关系图，显示出两个指数之间基本呈线性关系，以及1981年之前（红色）和此次转变之后（蓝色）不同的斜率（F10.7/S_N 比值）。相应的线性拟合（黑色点线和虚线）表明，1981年之后的比值提高了10.5%。黑线表示覆盖整个70年序列的整体拟合结果（图引自Clette，2021年）。

4.2 钙 II K谱斑面积

谱斑面积序列是另一种与太阳黑子数序列相关的光斑指数。谱斑面积是根据全日面钙 II K（393.367纳米）观测确定的（Chatzistergos 等人，2022b）。自1892年以来，人们一直在进行此类观测，并且目前仍在全球许多地点开展（Chatzistergos 等人，2022b），因此它是历史最悠久的直接太阳数据集之一。多项研究将太阳黑子数序列与光斑面积进行了比较（例如，Kuriyan等人，1982年；Foukal，1996年；Fligge和Solanki，1998年）。最近，Chatzistergos 等人（2022a）将来自38个档案的谱斑面积序列，以及由所有可用数据合成的谱斑面积序列（Chatzistergos 等人，2020年），与S_N(1.0)、SN(2.0)、SvSc16和CEA17太阳黑子序列进行了比较。谱斑面积与太阳黑子数序列之间的幂律关系

被发现最能代表这些数据，同时研究还报告了这种关系对活动水平存在轻微依赖。研究还发现，与S_N(1.0)相比，谱斑面积与S_N(2.0)的一致性更好，这进一步支持了对S_N(1.0)所作的修正。

4.3 地磁代理指标

4.3.1 地磁活动日际变化（*IDV*）

近地太阳风对地球磁层的能量注入程度，取决于以下因素（按重要性大致排序）：日球层磁场的方向和强度、太阳风速度以及太阳风质量密度（Vasyliunas 等人，1982年；Pulkkinen，2007年）。因此，地磁指数作为定量指标，基于预先指定的一组地面磁力仪测量全球磁层扰动，可用于重建近地太阳风状况（Feynman 和 Crooker，1978年）。鉴于地球轨道和相对于太阳的轴倾角所带来的几何效应不断变化，重建通常限于年尺度，因为这些效应在这一尺度上会相互抵消（Lockwood 等人，2013年）。不同地磁指数对近地太阳风状况的依赖各不相同。因此，可以利用成对的指数分离特定的太阳风参数，并估算近地磁场强度（B）、速度（V）以及开放太阳磁通量（OSF）（Svalgaard 等人，2003年；Lockwood、Owens 和 Barnard，2014年b）。在这方面尤其有价值的是日际变化（IDV）指数（Svalgaard 和 Cliver，2005年、2009年），它与 B 高度相关，而对 V 相对不敏感。利用 IDV，可以较有把握地将 B 的重建追溯至1845年。图 18 显示，地磁 B 估算值（红线）与原位探测航天器直接观测值（黑线）相当吻合。

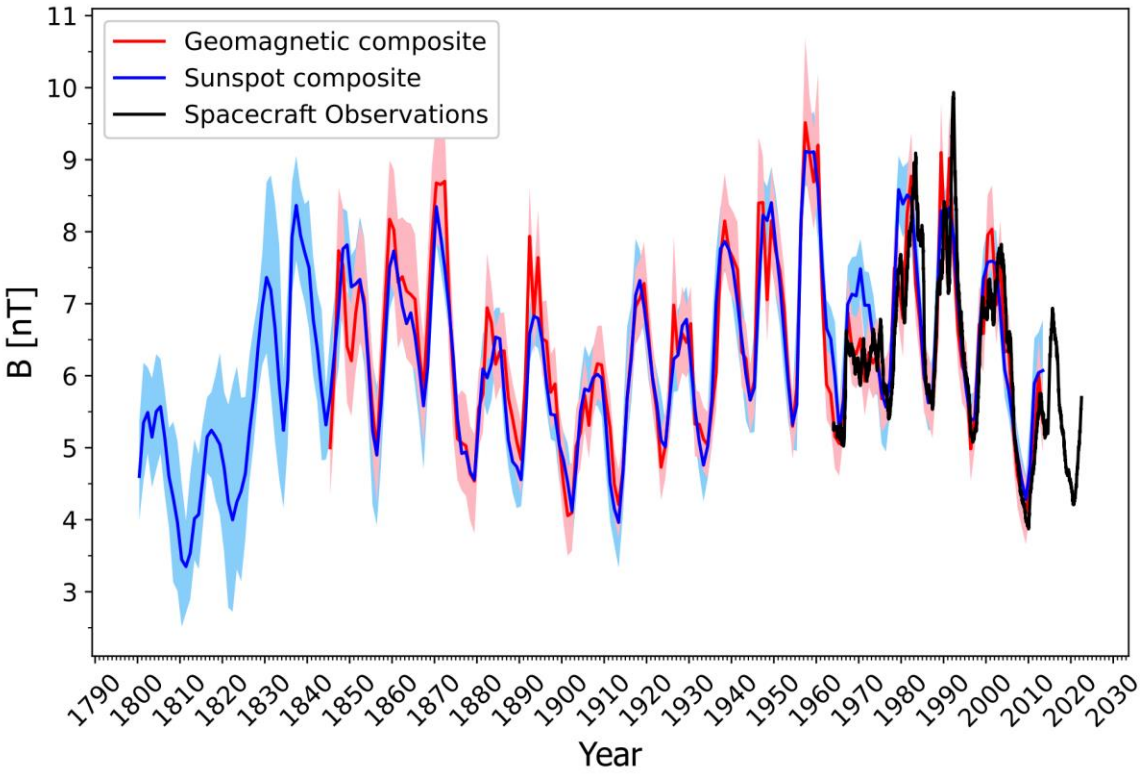

图 18. 采用不同方法估算的近地日球层磁场强度 B 的时间序列。所有数据均为年平均值。自1964年以来由原位探测航天器获得的 B 直接观测值以黑色表示。加权地磁 B 估算值的综合序列以红色表示。采用一系列 S_N 和 G_N 时间序列（Clette和Lefèvre，2016年；(S_N(2.0))；Lockwood、Owens 和 Barnard（2014年a、b；LEA14）；Svalgaard 和 Schatten（2016年；SvSc16）；以及 Usoskin等人（2016年；UEA16）），并使用两种将太阳黑子数转换为 B 的方法得到的加权基于太阳黑子的估算值综合序列以蓝色表示。阴影区域表示 1σ 不确定性范围。（图改编自 Owens 等人，2016年。）

为了将地磁估算值与 S_N进行比较，必须将 S_N 转换为 B 或开放太阳磁通量（OSF）。Owens 等人（2016）考虑了两种方法。第一种采用 B 与 $S_N^{1/2}$ 之间的经验关系（Wang 和 Sheeley，2003；Wang、Lean 和 Sheeley，2005；Svalgaard 和 Cliver，2005）。第二种采用受物理约束的开放太阳磁通量模型（Owens 和 Lockwood，2012），该模型假设太阳黑子可作为开放太阳磁通量产生的代理指标（Solanki、Schüssler 和 Fligge，2000，2002；Krivova 等人，2007）。假设太阳风速度恒定后，基于 S_N得出的开放太阳磁通量估算值随后可以转换为 B。

Owens 等人（2016）将这两种方法应用于多种 S_N 和 G_N 记录（S_N（2.0）、LEA14、SvSc16、UEA16）。所得合成序列在图 18 中以蓝色显示。它与地磁序列总体上吻合良好，最明显的偏差是在第20太阳活动周（约1970年）高估了 B 的幅值，以及在1900年以前持续低估了 B（但仍在不确定性范围内）。所有单独的太阳黑子序列都高估了第20太阳活动周（1964—1976年）的活动水平，这表明这种差异可能是由于用太阳黑子测量全球太阳活动，而地磁观测和航天器观测反映的是地球附近固有的局部测量。相反，1900年以前从地磁记录推断出的较高 B 值，与图2中"高"S_N 和 G_N 记录更为吻合，与原始的"低"太阳黑子记录（即 HoSc98、LEA14 和 UEA16）则较不一致。

4.3.2 地磁活动日振幅（*rY*）

1852年，地球磁场的日变化首次被认为与太阳黑子活动的准十年变化有关（Schwabe，1844）（Wolf，1852；Gautier，1852）。在19th世纪下半叶，这种相关性为地球表面的磁场受到太阳影响提供了最有力的证据（Ellis，1880，1898）。

Svalgaard（2016年）对太阳黑子活动与地磁场日变化之间的物理联系作了如下描述：*"*太阳磁性（直接观测所得以及由其代理指标——太阳黑子数——推导所得）会产生*……*超出太阳黑体辐射预期水平的极紫外线（*EUV*）辐射*……*进入地球大气层的太阳辐射受天顶角控制，并会引起热风；热风与太阳（及月球）潮汐共同作用，使大气跨越地磁场线移动。波长足够短的辐射会使大气成分（主要是分子氧）电离；离子形成与随后快速复合之间达到平衡，从而形成*……*由电子和离子构成的电离层导电层*[*电离层*E*层*]*。该导电层因碰撞而随中性大气的风跨越*……*地磁场移动。由此产生的感应发电机维持着电流，其磁效应可在地面观测到（*Svalgaard*、*Cliver*和*Le Sager*，*2004*年；*Nusinov*，*2006*年）。昼夜循环造成磁效应的*……*日变化，这种变化已有数百年的观测记录。*……*其

整个过程的结果是磁变的……总日变幅，这种变化可以在很宽的纬度范围内轻易观测到。”

Svalgaard（2016）重建并制表了年日变化，该变化以地球磁场东向分量（非磁暴）[rY] 的日变幅为参数，并追溯至1840年（图19）。需要指出的是，1840年之前已有这类日变化的测量值，但由此得到的rY指数可能不够准确，无法与G_N 和S_N进行可靠比较。事实上，正如Yamazaki和Maute（2017）所示，当源数据不完整时（1840年之前的情况即如此），rY会受到季节效应的影响，因为rY涉及对全年和各经度数据求平均。

图2展示了1840年—2010年间，各种经过缩放的S_N 和G_N 序列与rY指数之比的变化。在20th世纪，11年平滑比值从~1900逐渐升至~1975 ，这与此期间S_N 和G_N 重建值的整体增长趋势相符，也反映了~2000之后的急剧下降。比值随太阳活动周振幅而变化，可能表明存在尚未得到充分考虑的非线性关系。尽管如此，既然这种关系预期在任何时期都相同，那么1900年—2000年间这种大致一致的情况应当在该时间段之外也成立。图中考察的九个S_N 和G_N 时间序列中，CEA17的G_N/rY时间序列在不同时期相应太阳活动极值时的数值最为一致，也就是说，在18th 和19th 的峰值，以及20th 和21st 世纪初的谷值处均如此。其比值最接近1。另一方面，HoSc98或DuKo22这类较低的重建值在1900年以前明显偏向较低比值，因此与其他结果的一致性最差。

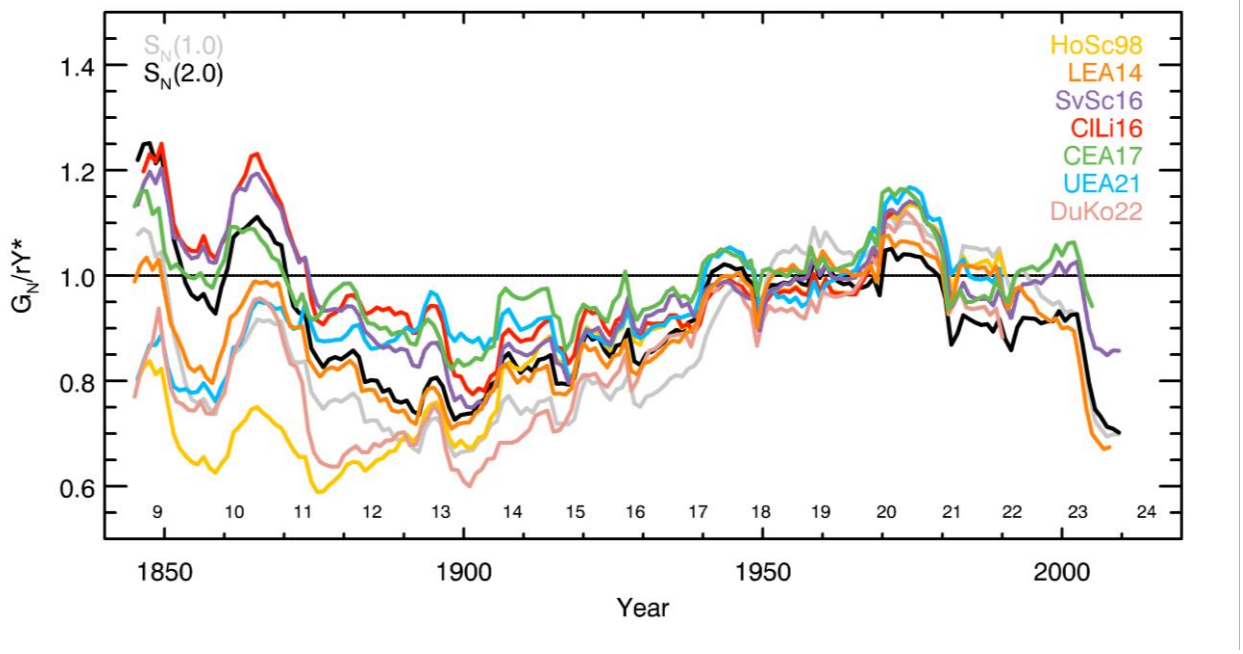

图19. 年平均群太阳黑子数与年平均rY变幅之比（单位：纳特），经11年滑动平均窗口平滑。太阳黑子数序列在1920—1974年期间归一化为S_N(2.0)。rY经过线性缩放，与CEA17 G_N 序列相匹配，使比值（G_N/rY*）约为

1. 面板下方的数字表示传统的太阳活动周编号，大致标注在太阳活动周峰值出现的时间。

4.4 宇宙成因放射性核素

宇宙成因核素是放射性同位素。通常认为，由于固体地球的天然放射性，地球系统中不会存在这类核素；它们也不可能从行星系统形成之时一直留存至今。这类同位素唯一（或主要）的来源，是持续撞击地球的高能宇宙射线粒子；这些粒子会在大气层中引发核子—电磁—μ子级联。作为级联的副产物，某些特定放射性核素会以可检测的微量产生，并储存在天然可定年档案中，例如树干、冰盖或湖泊/海洋沉积物。

日地研究中最常用的宇宙成因同位素是 ^{14}C（放射性碳）和^{10}Be（Beer、McCracken和von Steiger，2012年；Usoskin，2017年）。树轮年代学测定的年轮中 ^{14}C的浓度，以及冰川学测年确定的极地（南极洲和格陵兰）冰芯中^{10}Be的浓度，可用来衡量过去对流层中这些同位素的丰度。地球附近银河宇宙射线的通量受太阳磁活动调制（Potgieter，2013年；Cliver，Richardson和Ling，2013b），通常通过太阳风和日球层磁场的调制势来量化（Caballero-Lopez和Moraal，2004年；Usoskin等人，2005年）；计算时还需考虑地球缓慢变化的地磁场所产生的额外宇宙射线屏蔽效应（Usoskin、Solanki和Korte， 2006年；Snowball和Muscheler，2007年）。Webber和Higbie（2003年）、Usoskin和Kovaltsov（2008年）、Webber、Higbie和McCracken （2007年）以及Kovaltsov、Mishev和Usoskin（2012年）计算了各同位素的产额表。Poluianov等人（2016年）给出了最新且准确的计算结果，这些结果与测量值吻合良好，绝对值也不例外（Asvestari和Usoskin，2016年）。首个基于宇宙成因同位素数据的基于物理的太阳活动重建发表于~20 年前（Usoskin等人，2003年；Solanki等人，2004年），而最新的重建采用贝叶斯多指标方法（Wu等人，2018年），涵盖了《全新世》最近一万年。这类重建在此之前的不确定性不断增大，因为在冰期条件下，大气层中同位素的输运与沉积模式鲜为人知。

对宇宙成因核素数据进行解卷积，以推断太阳调制势，并最终得出1610年以前各年的代理太阳黑子数，是一项艰巨但必要的任务，因为宇宙成因同位素是望远镜时代之前太阳活动唯一的定量信息来源（Beer、McCracken 和 von Steiger，2012年；Usoskin，2017年）。发起本次太阳黑子数重建工作的太阳黑子数研讨会（Cliver、Clette 和 Svalgaard，2013a年；Cliver 等人，2015年）的目标之一，是提供可靠的~400年太阳黑子序列，以确定1610年之前一万年间基于宇宙成因核素的太阳黑子数水平。正如 Cliver 等人（2015年）所写：*然而，由于地球磁场、地球气候以及可能的火山活动会导致宇宙成因核素浓度发生变化，对这类时间序列进行校准十分复杂[，而且原始数据的噪声水平很高]。因此，我们需要尽可能长且准确的太阳活动记录，以确定这些其他变量对长期基于宇宙成因核素的 [太阳黑子数]的影响。*”宇宙成因记录在表征太阳活动的总体相对水平方面表现尚可，并且能够区分现代大极大期（Usoskin 等人，2003年；Solanki 等人，2004年；Usoskin，2017年）以及 Maunder 和 Spörer 极小期（Eddy，1976年；

Usoskin、Solanki 和 Korte， 2006年；Usoskin，2017年；Asvestari 等人，2017年），但它能否作为可靠的判据，辨别新近建立的太阳黑子$_N$ 数与太阳黑子群数$_N$ 序列之间那些细微差异所体现的不连续性，仍有待证实。

直到最近，宇宙成因同位素数据的质量和时间分辨率还不足以可靠地重建公元1600年之前的太阳黑子周期（Muscheler 等人，2016）。2021年，Brehm 等人（2021）报告了对公元970年之后年份的橡树档案中^{14}C浓度进行的高精度测量。这一新数据集与改进后的半经验模型相结合，该模型描述了太阳总磁通量和开放磁通量的演变（Krivova 等人，2021），从而首次实现了高分辨率、跨千年（970—1900年）的太阳黑子周期重建（Usoskin等，2021b）。图20将Usoskin等人（2021b）基于 ^{14}C的太阳黑子数在1610—1900年的变化（灰色阴影表示67%的置信区间）与S_N(2.0)、HoSc98、SvSc16、CEA17和UEA21时间序列进行了比较。随着时间回溯，太阳黑子时间序列与基于^{14}C的时间序列在振幅和时序上的差异逐渐增大。请注意，约1780年$^{14}CS_N$ 记录中的极小值偏高。在活动极小期，无法通过这种方法可靠地确定各个太阳活动周的特性（Usoskin等，2021b），但平均S_N水平与零一致，这表明蒙德极小期的S_N 非常低（另见Carrasco等人，2021c）。

另一种可用于追踪长期太阳活动演变的宇宙成因核素，是在历经岁月坠落地球的陨石中测得的^{44}Ti同位素（Taricco等，2006年）。它的精度低于地球上的同位素，只能表明在蒙德极小期宇宙射线水平相对较高（相应地，太阳活动较弱）（Asvestari等，2017年）。

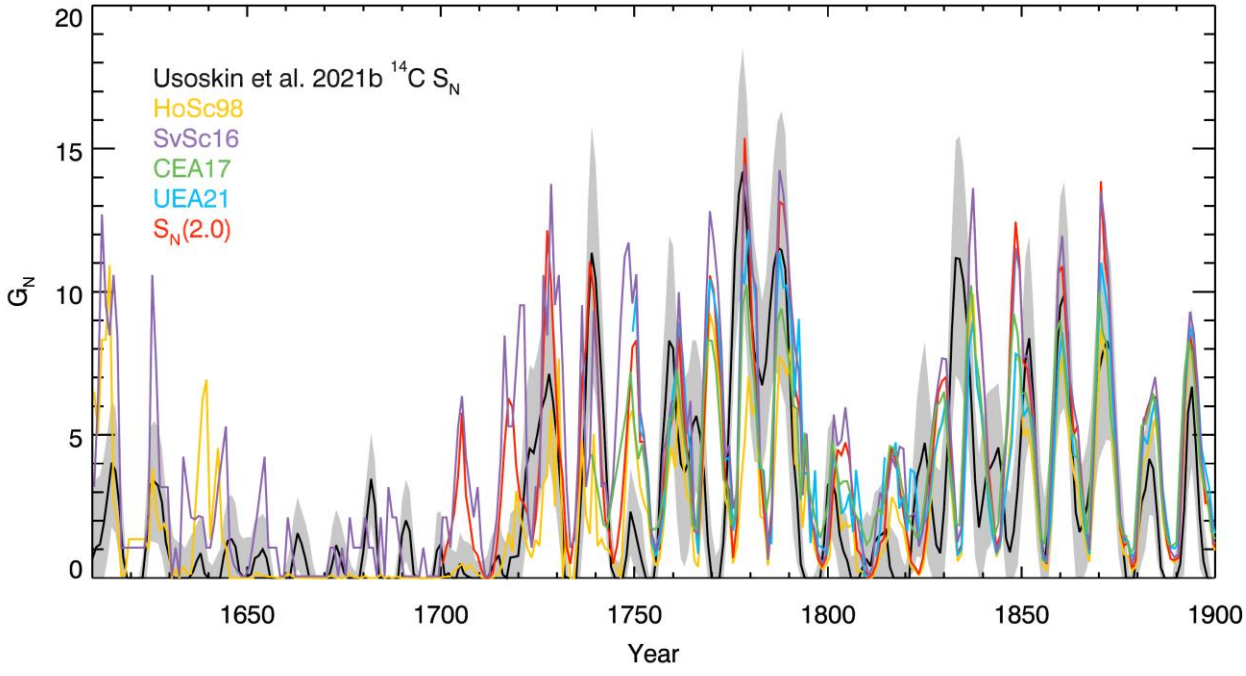

图20。1610年—1900年期间，^{14}C 基太阳黑子数（黑色曲线，±1σ 灰色阴影表示不确定性）与 S_N(2.0)（红色）、HoSc98（黄色）、SvSc16（紫色）、CEA17（绿色）和 UEA21（浅蓝色）时间序列的对比。图中显示的是年值，而 S_N(2.0) 和 ^{14}C 基太阳黑子数则

除基于^{14}C的太阳黑子数外，所有序列均除以16.67，使其大致与GSN序列处于同一尺度。所有序列均经过缩放，使其在1920—1974年期间相匹配。（改编自Usoskin等，2021b。）

关于19th 世纪重建太阳活动周的振幅（表4），上述诊断可总结如下。除宇宙成因放射性核素外，大多数检验都完全排除了最低的重建结果，其中包括最初的G_N 序列（HoSc98）。中等重建结果是唯一与大多数外部判据相符的结果，不过吻合程度从未达到最佳（要么处于可接受范围的下限，要么处于上限）。

表4. 根据第3节和第4节所述基准和代理指标得出的诊断汇总。三个类别（横向排列：低、中、高）将19th 世纪G_N 和S_N重建结果的总体范围等分为三档。第二列列出落入这些大致类别的重建序列（S_N 序列以斜体标示）。“最佳”表示最接近的匹配，而“无”表示完全不相容。若吻合度为“尚可”，则重建结果在不确定性范围内与相应代理指标（各列）相符，但通常相较于代理指标而言偏低或偏高，具体情况以括号标示。

	太阳黑子群数$_N$ 和太阳黑子数$_N$ **序列**	**观测者校正因子（图 14）**	太阳黑子数$_N$(2.0)/太阳黑子群数 **（图13）**	**地磁IDV指数（图18）**	**日变化 rY 调制（图 19）**	**同位素 ^{14}C，^{44}Ti（图 20）**
HIGH	SvSc16 ClLI16 太阳黑子	BEST	BEST	BEST	BEST	NO
中等	CEA17 DuKo22 UEA21 *SN V1.0* *LEA14*	一般（低）	一般（低）	一般（低）	一般（低）	尚可（较高）
LOW	HoSc98	NO	NO	NO	NO	BEST

因此，这些比较得出的总体结论仍有部分模糊之处。由于所有这些外部检验和代理指标目前尚未完全相互吻合，因此仍有必要进一步改进这些太阳活动的间接太阳示踪指标，并阐明尚存的分歧，之后它们才能为S_N 和G_N 序列提供完全稳健且独立的基准。

5. G_N 和S_N 数据序列中的断层

5.1 穿越道尔顿极小期：从Staudacher到Schwabe（1798—1833年）

正如 Muñoz-Jaramillo 和 Vaquero（2019年）所指出的，1825年以前太阳黑子数据的质量和数量都显著下降（图8，图21）。要跨越数据稀缺时期的

道尔顿极小期，将1749—1799年统计太阳黑子的 Staudacher 与 1826—1867年的 Schwabe 衔接起来，是任何太阳黑子数序列面临的一项关键挑战。近期恢复的道尔顿极小期数据集将有助于解决这一问题（Hayakawa等人，2020a年，2021f）。总的来说，有必要考察和评估各种重建方法在稀疏数据环境下的相对表现和准确性（例如 Usoskin、Mursula 和 Kovaltsov，2003年）。

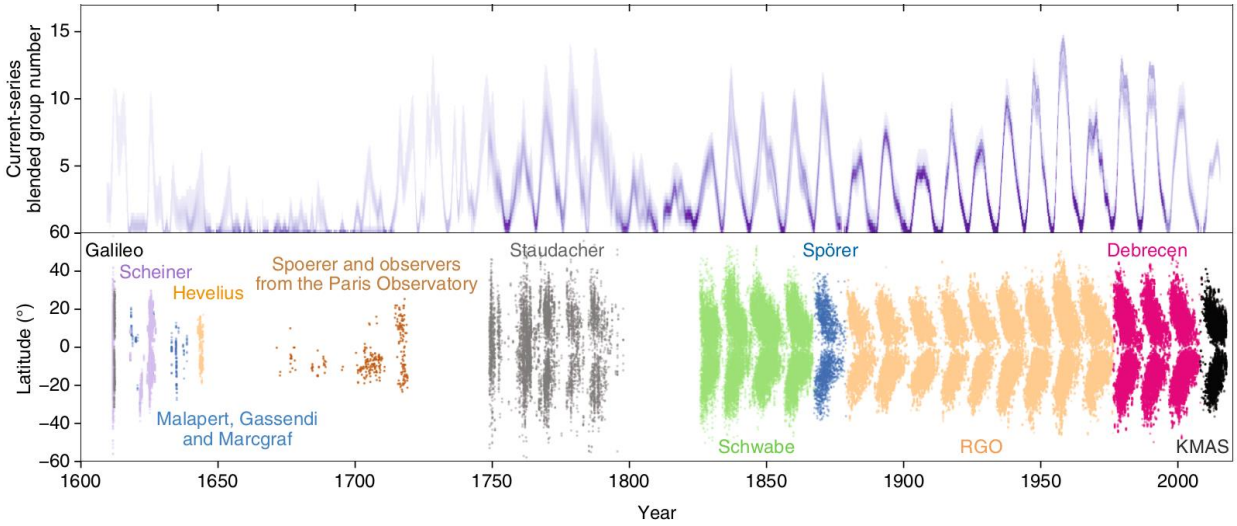

图21。（上）各种太阳黑子群数$_N$时间序列的综合序列。（下）综合蝴蝶图，显示将太阳黑子覆盖时期划分为 Schwabe 开始巡测之前和之后的区间。（改编自 Muñoz-Jaramillo 和 Vaquero，2019年。）

业余天文学家约翰·卡斯帕·施陶达赫在1749年至1799年间绘制了1146幅带有太阳黑子的太阳圆面图。引用 Svalgaard（2020年）的话："哈泽（*1869*年）……审阅了 *Staudach* 的材料，并报告说使用的是一架*4*英尺望远镜，但质量并不特别好，尤其似乎没有消除色差，因为他引用了 *Staudach* 本人对*1761*年金星凌日观测的评论：'就行星的大小和颜色而言，没有清晰的边缘，反而是从中心内部的同样黑褐色逐渐褪变为仍然很深的棕色、浅红色，继而变成浅蓝色，然后变成高饱和的绿色，最后变为黄色。'因此，我们可以假定这架望远镜存在球差和色差。我们可以制作具有相同光学缺陷的复制品，模拟*18*世纪业余爱好者能够获得且负担得起的望远镜。*2016*年*1*月*16*日，我们开始使用这类复制品观测太阳黑子。三名观测者（"古董望远镜学会"的专家成员，*http://webari.com/oldscope/*）通过将太阳投影到纸张上，绘制了太阳圆面图。我们既计数单个太阳黑子的数量，也计数它们形成的太阳黑子群数量。将我们的计数与现代观测者报告的同日结果进行比较后发现，根据现代观测者计数计算出的太阳黑子数，是我们勇敢的观测者所看到数量的三倍……而太阳黑子群数量则是其*2.5*倍。这表明，我们可以利用上述倍数，将*18*世纪的观测结果按照现代太阳活动水平进行校准。*[*太阳黑子数$_N$（*2.0*）*]*除以*3*……与根据 *Staudach* 的绘图计算出的太阳黑子数相当吻合（*Svalgaard*，*2017*年），

[4] 在文献中，这位观测者既被称为 Staudacher，也被称为 Staudach。本文通常称其为 Staudacher（例如图 9 和图 22），但直接引用 Svalgaard 时除外。

因此大致验证了修订后的 *SILSO* 数值，且与 *[Hoyt* 和 *Schatten 1998 (a,b)]* 重建中的低数值不相符*……”*

Svalgaard 和 Schatten（2016）此前曾采用 ~2.5 这一系数（该系数通过他们所称的“创新（有人可能会说，或许略有可疑）分析”得出，分析比较了从 ~1750 到 ~1850 的“高计数”和“低计数”观测者），以此将 Staudacher 的观测缩放到 Wolfer 的水平，用于其 G_N 序列。基于古董望远镜的研究（Svalgaard，2020）为这一系数提供了更坚实的依据。我们还注意到，2.5 这一数值与19th 世纪之前若干 G_N 重建所得的校正因子相符（图 14）。

望远镜口径和光学质量并非影响太阳黑子群计数的唯一因素，太阳黑子群拆分也会产生影响。在 Hale 于 1908年发现太阳黑子磁性之前，人们通常会把彼此靠近的群归并为非常大的群，有时经度跨度超过 40°；当时人们尚不了解太阳黑子群的双极性，也不知道活动区可能达到的最大尺寸（~25°）。早期观测所用的放大倍率较低、绘图尺寸较小，可能也助长了这种将群划分得过大的倾向。到了20th 世纪中叶，Waldmeier（1938）引入了一套群组分类系统，将太阳黑子簇中双极结构的时间演化纳入考量，不再把彼此接近作为识别太阳黑子群的唯一或主要标准（Friedli，2009；Svalgaard 和 Schatten（2016））。因此，过去被计作单个群的太阳黑子簇，如今可以被划分（拆分）为两个或更多群（此类拆分示例见图 1(b)），从而使群数增加。

Arlt（2008；Arlt 和 Vaquero，2020）指出，Staudacher 使用其 18 世纪望远镜时，漏掉了所有小型 A 型和 B 型黑子群（按 Waldmeier 分类法划分）；这些黑子群占当今观测到的所有太阳黑子群的 30–50%（Clette等，2014）。群数减少意味着 Staudacher 的 k' 因子（方程 2）介于 ~1.4 至 2.0 之间。Svalgaard（2017）通过分析 Staudacher 的太阳黑子绘图发现，采用 Waldmeier 分类法会使 V16 中 Staudacher 的群数增加 25%。将仪器校正因子（1.43–2.0）与太阳黑子群拆分的校正因子（1.25）相结合，得到 Staudacher（相对于 Wolfer）的群组缩放因子（k'）范围为 ~1.8 至 2.5，这与上述使用历史望远镜复制品进行重建所得的结果相当吻合。

5.2 从伽利略到 Staudacher：涵盖蒙德极小期

图8显示，1730年代和1740年代是太阳黑子数时间序列中最薄弱的一环。Hayakawa等人（2022a）对这一数据匮乏的时段（第 2.2.1 节(c)）给予了大量关注；这一时段对于连接 Staudacher 与蒙德极小期（第 2.2.1 节(b)；这是总太阳辐照度重建和气候变化研究中杠杆臂的低端）以及所有更早的年份至关重要，其中包括必须依据宇宙成因放射性核素推断太阳黑子记录的年份。

要准确确定太阳黑子数序列最初 ~140 年的数值，难度之大可从以下事实看出：目前只有两种系统性重建延伸至1610年：(1) Hoyt和Schatten（1998a、b）的G_N 序列，将平均k因子 1.255（略高于20th 世纪后半叶观测者的平均校正因子；见图 14）赋予171位施瓦贝之前、且与其他观测者没有任何共同观测日的观测者中的78位；其余93位观测者的中位数为1.002（RGO为1.000）；(2) Svalgaard和Schatten（2016）的G_N 序列，其中施瓦贝之前的年份在很大程度上依据高计数／低计数观测者比较方案，将Staudacher的观测结果调整到与Schwabe一致（第5.1节）

以及一种有些相关的“最亮恒星”方法，即采用任一观测者在某一年记录到的最高日群数。要获得1610—1748年的年度数值，可能不得不采用这类推测性方法，并依赖代理指标进行佐证。活动日比例（Kovaltsov 等人，2004年；Vaquero 等人，2015年；Usoskin，2017年）已被用于估算蒙德极小期期间的总体活动水平（Carrasco 等人，2021c、2022b）；该时期的观测相对充分（见图8）。在等待更多历史数据重见天日之际，这一指标或有助于提高早期序列其他部分估算值的可靠性。

6. 进展总结

ISSI太阳黑子数重新校准团队的主要成果，是由 Arlt、Carrasco、Clette、Friedli、Hayakawa 和 Vaquero 牵头开展的数据恢复工作，重点在于识别、数字化并分析原始记录，尤其是图像。这类数据有助于弥补太阳黑子记录早期（施瓦贝之前）时段之间的空缺。（第2.1.1节和第2.2.1节）

团队会议的一项重点，是由 Chatzistergos、Dudok de Wit、Kopp、Lefèvre、Mathieu、Muñoz-Jaramillo、Svalgaard 和 Usoskin 介绍并探讨新的太阳黑子群数$_N$ 重建方法，着重介绍现代统计方法的应用和不确定性的确定（例如 Mathieu 等，2019年），相关总结见表2和表3。

团队会议期间，在代理时间序列方面取得的进展较少；不过，此前 Svalgaard、Usoskin、Lockwood、Owens 等人已在长期地磁和基于宇宙成因核素的时间序列方面取得了相当大的进展，而 Clette 则在团队会议讨论的基础上，对 F10.7 和太阳黑子数$_N$(2.0)进行了全面比较。这些代理指标可用于佐证新的时间序列，也可用于识别其潜在不足。（第4节）

在 ISSI团队会议期间，Clette 为重建项目引入了基准这一概念。例如，随着望远镜技术的改进，以及太阳黑子和太阳黑子群定义的变化（最小尺寸缩小，划分方式从合并改为拆分），人们预期现代观测者计数的太阳黑子会比 Wolfer 之前的观测者更多（对于给定的太阳黑子活动水平，校正因子或归一化因子会随时间变小）。然而，Hoyt 和 Schatten 的太阳黑子群数$_N$ 序列并未符合这一预期。（第3节）

基于旧望远镜（Svalgaard）和新望远镜（Karachik、Pevtsov 和 Nagovitsyn，2019年）开展的“逆向工程”实验，有助于评估望远镜技术的进步对太阳黑子随时间可观测性的影响。这些研究与 Staudacher 的标度调整有关；Staudacher 是18th 世纪后半叶的关键观测者，而 Schwabe 则是18th 世纪前半叶的主要观测者。（第3.2节和第5.1节）

在团队会议上，Pesnell 代表空间预报界，Van Driel-Gesztelyi 担任报告员，Kopp 则审阅了“三项成果”（见下文），并规划了后续工作。

ISSI团队会议期间最重要的进展标志，或许是各利益相关方的关键成员齐聚一堂，就S_N 和G_N 数时间序列的重建展开争论、辩论和讨论，并致力于利用现有数据和当前最佳实践分析方法，生成最佳序列。正如Clette和Lefèvre（2016年）所写，目前对太阳黑子数的关注“标志着一个根本性转变：从早期不可更改、无人质疑的数据序列，转变为真正的

测量序列，就像其他任何物理数据序列一样。对于任何其他测量而言，随着新的数据源和新的分析方法不断出现，对其进行修订是很自然的。”

7. 展望与前景

太阳黑子数被称为科学领域中持续时间最长的实验（Owens，2013年）。人们重新重视这一时间序列，反映了太阳对日益依赖技术的社会所产生的影响，以及更准确量化随时间变化的太阳输入对地球气候影响的需要。

这项工作始于2011年，历经2016年的专题专刊以及2018年和2019年的ISSI团队会议，持续至今，其最终目标始终未变：为过去~400 年建立一个经学界审定的序列（Cliver、Clette和Svalgaard，2013年），并量化其时间相关不确定性（例如Dudok de Wit、Lefèvre和Clette，2016年）。这样的基础参考序列可用于锚定一个以千年为尺度、基于宇宙成因核素的太阳变化时间序列，该序列可追溯至末次冰期；同时还可用于检验和验证描述过去太阳输入与观测到的地球系统响应之间耦合关系的物理模型。

过去十年的经验表明，通过应用多种方法并进行讨论，随后评审其结果，以此达成共识的过程不能操之过急。Hoyt 和 Schatten（1998a、b）的时间序列颇具价值：它不仅引入了可追溯至1610年的太阳黑子群数 G_N 序列，还创建了首个公开的数字化数据库；同时也让人们认识到，对太阳黑子数 S_N进行修改或修订时，必须审慎尽责。Hoyt 和 Schatten 的太阳黑子群数 G_N 时间序列如今已显现出一些问题，但这些问题在十多年里都未得到独立审查（Cliver和Ling，2016）；其间，该序列逐渐站稳脚跟，成为太阳黑子数 S_N的替代方案，部分原因在于它延伸到了蒙德极小期。在 Hoyt 和 Schatten（1998a、b）的附录1中，Wolf（1.117）和 Wolfer（1.094）的 k' 因子相差不到2%，尽管 Wolfer 记录的太阳黑子群比 Wolf 多65%（Svalgaard，2013年；Cliver、Clette、Svalgaard 等人，2013a年）。如果在 Hoyt 和 Schatten（1998a、b）的序列问世时就注意到这一反常之处，那么他们当时推出的新太阳黑子群数 G_N序列就不太可能获得如今仍保有的一定影响力和使用度（例如，Coddington 等人，2019年；Wang 和 Lean，2021年；Krivova 等人，2021年）。为确保所有新的太阳黑子数 S_N 和太阳黑子群数 G_N 时间序列都受到审查，在组建 ISSI团队之前，曾由彼此独立的“三人小组”对每个新的太阳黑子数时间序列进行非正式复核；每个小组由一名支持者、一名批评者和一名调解者组成。这种形式让昔日的竞争者能够携手合作，– 既促进了批判性分析，也有助于团队建设，为 ISSI 的工作做好准备。

那么，接下来该怎么做？ISSI团队成员之间的交流表明，太阳黑子数的重建是一项多方面且高度跨学科的问题。从更概念性的层面来看，这个问题在于收集各种类型、来源各异的信息；这些信息以不同方式与我们关注的主要观测量相关联，即太阳黑子或太阳黑子群的数量。理想情况下，应将这类问题分解为两部分：科学选择和统计或分析选择（第2.2.3节）。这项工作的主要益处之一，是促使我们以概率的方式思考，也就是说，绝不将观测结果与其不确定性分开。

铭记这一点，由观测者、分析人员和建模人员组成的扩充版 ISSI太阳黑子团队将继续通过电子方式保持联系（并期待日后能够真正会面），当前的目标是完善为各个序列提出的方法，并创建具有合理不确定性的相应太阳黑子数$_N$ 和太阳黑子群数$_N$ 时间序列。一旦新的／修订后的时间序列开发完成，

就需要利用基准和代理序列对其进行独立重现和评估。有些方法可能更适用于数据稀疏环境，因此可能需要采用综合方法。这需要时间。

我们预计，到2023年初将有新的数据库可供使用或发布，关键的重建方法也将趋于成熟，并在当年年底前创建相应的序列。届时，由SILSO主任担任主席的评估团队将选定S_N和G_N的后续版本，提交国际天文学联合会（IAU）的审查机构批准，正式发布计划与2024年国际天文学联合会大会同期进行。即使发布了S_N(3.0)和达成共识的G_N(3.0)，鉴于更广泛的不确定性，以及对这些早期年份所需的更复杂、更间接的验证，这两个序列在1750年以前的年份仍可能不是完整的重建。然而，对于这两个序列，我们将提供截至1610年的早期年份数据及其适当的不确定性，以涵盖蒙德极小期这一杠杆区间。新序列将标志着一项如今已成为永久性工作的改进和质量保证流程迈出的下一步。通过与一组高质量观测者，以及代理指标和基准进行比较，新序列将受到持续监测。随着新数据、新知识和新的数学工具不断涌现，我们将定期发布后续版本；当积累了足够多的材料，足以对序列进行稳健且实质性的修改时，便每隔3年至10年发布一次。我们的目标是为科学界提供一个独特且值得信赖的参考，总结我们关于太阳活动长期演化的最佳认识（这种演化可通过太阳黑子追踪），并为1610年以前的年份提供与宇宙成因核素数据之间的可靠联系。

致谢
本研究得益于国际空间科学研究所（ISSI）于2017年遴选的第417号国际团队项目“太阳黑子数序列校准”，该项目由 Matt Owens 和 FrédéricClette 组织。感谢 ISSI 对该团队的支持。感谢 John Leibacher 鼓励我们利用这份状态报告，更新由 F. Clette、E.W. Cliver、L. Lefèvre、J.M. Vaquero 和 L. Svalgaard 主编的《太阳物理学》2016年太阳黑子数重新校准专题刊。

本研究使用了美国国家航空航天局的天体物理数据系统。国家太阳天文台（NSO）由天文学研究大学协会（AURA）运营，并根据与美国国家科学基金会签订的合作协议开展工作。

F. Clette 和 L. Lefèvre 获得比利时科学政策办公室资助的比利时太阳—地球卓越中心（STCE）的支持。L. Lefèvre 感谢比利时联邦科学政策办公室（BELSPO）通过 BRAIN VAL-U-SUN项目（BR/165/A3/VALU-SUN）提供的资助。
T. Chatzistergos 感谢德国联邦教育与研究部的支持（项目编号：01LG1909C）。

H. Hayakawa 感谢日本学术振兴会科研补助金 JP20K22367、JP20K20918、JP20H05643 和 JP21K13957，日本学术振兴会青年研究人员海外挑战计划，以及 ISEE 2021财年主任领导基金、名古屋大学青年领袖培养（YLC）计划、研究大学强化促进计划（日本文部科学省）旗下青年研究人员战略性专业发展计划的东海全球卓越之路（名古屋大学），以及名古屋大学高等研究院用于推动新兴及未开发领域发展的青年研究人员单位所提供的经费支持。

H. Hayakawa 感谢 Chiaki Kuroyanagi 对圣彼得堡艾马特收藏开展档案整理调查，并感谢 NIHU/NINJL 公民科学项目支持他对三泽的太阳黑子记录开展研究。

I. Usoskin 感谢芬兰科学院对其研究的部分资助（ESPERA 项目，编号 321882）。L. van Driel-Gesztelyi 感谢匈牙利国家研究、开发与创新办公室提供的 OTKA K-131508 项目资助。

参考文献

Aparicio, A.J.P., Lefèvre, L., Gallego, M.C., 等：2018年，《1952—1986年马德里天文台观测太阳黑子目录》。《太阳物理学》 **293**，文章编号 164。数字对象标识符 10.1007/s11207-018-1387-1

Arlt, R.：2008年，Staudacher 于 1749—1796 年绘制的太阳黑子图数字化。《太阳物理学》

Arlt, R., Senthamizh Pavai, V., Schmiel, C., Spada, F.：2016年，根据克里斯托夫·沙伊纳的观测，1611年至1631年的太阳黑子位置、面积和群倾角。《天文学与天体物理学》 **595**, A104。数字对象标识符 10.1051/0004-6361/201629000

Asvestari, E., Usoskin, I.G.：2016，长期尺度日球层宇宙射线调制的经验模型。《空间天气与空

Brehm, N., Bayliss, A., Christl, M., 等：2021，从年轮中的放射性碳揭示过去一个千年的十一年

Carrasco, V.M.S., Vaquero, J.M., Gallego, M.C.: 2021b，《蒙德极小期一段被遗忘的太阳黑子

Chatzistergos, T., Krivova, N.A., Solanki, S.K., Ermolli, I.: 2022b，全日面Ca II K观测——了解过去太阳磁性的窗口，《天文学与空间科学前沿》，*9*。 数字对象标识符

Coddington, O., Lean, J., Pilewskie, P., 等：2019，太阳辐照度变化：模型与测量值的比较。地

阳黑子
Coving
405. Covington, A.E., Medd, W.I.：1954，10.7厘米太阳短射日平均强度的变化。加拿大皇家天

Friedli, T.K.：2009，《沃尔夫太阳黑子相对数序列。结构状态空间模型中同质性检验的改进似

F., Horiuchi, T., Iju, T., Knipp, D.J., Liu, H., Nakajima, T.：2020b，Hisako Koyama的太阳黑子观测：1945—1996年。《皇家天文学会月报》 **492**, 4513. 数字对象标识符 10.1093/mnras/stz3345 Hayakawa, H., Iju, T., Uneme, S., Besser, B.P., Kosaka, S., Imada

Hayakawa, H., Iju, T., Murata, K., Besser, B.P.: 2021b，《Daniel Mögling 于 1626—1629年记

Karoff, C., Jørgensen, C.S., Senthamizh Pavai, V., Arlt, R.: 2019，《Christian Horrebow 的太

快报》 **337**，114。DOI 10.1016/j.epsl.2012.05.036 Koyama H.: 1985，《1947–1984年太阳黑子观测》。Kawade Shobo Shinsha，东京 Krivova, N.A., Solanki, S.K., Beer, J.: 2002，《18世纪是否真的失去了一个太阳黑子周期？》。《天文学与天体物理学》**396**，235。DOI 10.1051/0004-6361:20021340 Krivova, N.A., Balmaceda, L., Solanki, S.K.: 2007，《基于表面磁通量重建1700年以来的太阳总辐照度》，《天文学与天体物理学》 **467**，335。DOI

6361/201629533 Little, R.J.A., Rubin, D.B.: 2002，《缺失数据的统计分析》，第2版，Wiley 概率与统计丛书（纽约：Wiley）Lockwood, M.: 2013，《开放太阳磁通量与行星际条件变化的重建和预测》。《太阳物理学生活评论》 **10**，4。DOI 10.12942/lrsp-2013-4

Lockwood, M., Barnard, L., Nevanlinna, H., Owens, M.J., Harrison, R.G., Rouillard, A.P.,

Owens, M.J., Cliver, E., McCracken, K.G., et al.: 2016，1750年以来的近地日球层磁场强度：

Spörer, F.W.G.：1887，关于自1618年以来太阳黑子的周期性，特别是其日面纬度，并论及这一

Svalgaard, L., Schatten, K.H.：2016，太阳黑子群数重建：骨干法。《太阳物理学》 **291**,

Usoskin, I.G., Arlt, R., Asvestari, E., 等：2015年，蒙德极小期（1645—1715年）确实是一次大

R.M.：2015年，重新界定蒙德极小期的起止日期。新天文学 **34**, 120. 数字对象标识符 10.1016/j.newast.2014.06.002 Vaquero, J.M., Gallego, M.C., Usoskin, I.G., Kovaltsov, G.A.：2011年，重新审视太阳黑子数据：关于蒙德极小期开始的新设想。《天体物理学杂志》 **731**, L24. 数字对象标识符 10.1088/2041-8205/731/2/L24 Vaquero, J.M., Kovaltsov, G.A.

Waldmeier, M.：1961年，1610—1960年的太阳黑子活动（Schulthess & Co., 瑞士联邦天文台，

Kovaltsov, G.A.：2018年，太阳黑子群数校准中活动日比例法的检验：对太阳活动水平的依赖，《太阳物理学》 **293**, 69. 数字对象标识符 10.1007/s11207-018-1292-7 Willis, D.M., Coffey, H.E., Henwood, R., Erwin, E.H., Hoyt, D.V., Wild, M.N., Denig, W.F.：2013a年，格林尼治太阳

R. Wolf：1857年，《关于太阳黑子的通讯》，IV. 苏黎世瑞士天文台通讯 **1**，51。A. Wolfer：1895年，《天文通讯》，LXXXVI. 苏黎世瑞士天文台通讯 **2**，187。Wolfer, A.：1902年