一种现实评估气溶胶对太阳能潜力影响的方法

Robert Blaga[1], Delia Calinoiu[2], Marius Paulescu[1], *

[1]罗马尼亚蒂米什瓦拉西部大学物理学院，V. Parvan 4，300223 蒂米什瓦拉[2]罗马尼亚蒂米什瓦拉理工大学工程师基础物理系，V. Parvan 2，300223 蒂米什瓦拉

*通讯作者：marius.paulescu@e-uvt.ro

摘要

大气气溶胶负荷可能对太阳能发电的性能产生显著影响。这种影响在空间上（即使是很短的距离内）和时间上（包括短期波动和长期趋势）都可能差异很大。为确保研究具有较强的普适性，本文聚焦于气溶胶对可获取太阳能的影响。因此，研究结果不受太阳能电站特性的影响。本文提出一种新方法，用于估算气溶胶导致的太阳能潜力日均、月均和年均损失。为突出总体太阳能潜力的损失，本文定义了一种新的理想情景，作为大气气溶胶背景的参照。本文提出一个新方程，用于计算太阳能潜力损失并修正可能存在的偏差。与类似研究不同，本文分析所依据的是地面测量数据（BSRN 和 AERONET），其准确性始终高于卫星遥感数据。本文还考察了鲜少讨论的气溶胶类型影响。总体而言，研究估算了全球分布的 12 个地点因气溶胶导致的太阳能潜力月度和年度降幅，损失幅度从 0.6% 到 7.2% 不等。

关键词：太阳能损失；太阳能潜力；气溶胶；参考情景；

1. 引言

光伏（PV）发电的长期评估通常基于尽可能准确地估算太阳能潜力。在太阳能电站的设计阶段，对太阳能潜力的估算出现错误可能会显著改变项目收益。例如，参考文献 [1], 针对巴西安装的住宅光伏系统投资资本回报率进行研究，结果表明，在使用不同太阳能资源数据评估住宅项目时，投资回收年限的变化幅度可能达到30%。与光伏系统不同，聚光太阳能发电（CSP）电站仅将正常入射到集热器表面的太阳通量转换为热能和/或电能。因此，准确估算法向直射太阳辐照度（DNI）是估算太阳能发电量以及设计CSP电站的必要条件（例如参见 [2]）。

普遍认为，在太阳辐照度模型中纳入云影，是太阳能潜力估算中不确定性的主要来源。然而，不确定性也可能源于无法准确预判大气柱含量。有时，对大气参数了解有限，可能导致估算的太阳能发电量与实测值之间出现巨大差异。例如，文献 [3]表明，在一年时间内，CPV 电站的晴空能量产出，在使用所有可用大气参数的情况下，与仅考虑大气气团这一最基本情况下相比，差异最高可达 75%。这种能量产出差异可能使平准化能源成本（LCOE）提高最多 25% [3]。

气溶胶是影响大气透射率的最重要因素，同时也是大气中最易变化的成分。因此，大气气溶胶负荷在空间（即使是相近的地点）和时间（短期波动及长期趋势）上的差异，会对太阳能发电表现产生不同影响。基于耦合气溶胶—气候模拟（该模拟考虑了欧洲—地中海区域内自然和人为气溶胶的时空分布），一项重要研究 [4] 表明，受影响最显著的区域是中欧，该地区光伏发电对气溶胶的敏感性更高。例如，在荷兰，气溶胶导致的年发电量损失从毫无影响到16%不等。在非洲和叙利亚—伊拉克部分地区，夏季光伏发电量损失甚至可达20% [4]。此外。

已有多项研究致力于研究光伏发电中的气溶胶影响，其中一些研究随后在 [5-17] 中得到介绍。

气溶胶导致太阳能损失的主要原因是：

- 光伏组件的积尘（例如 [5]）。这种气溶胶的存在肉眼可见。如果不对光伏组件进行适当清洁，积聚的尘埃可能会显著影响光伏性能（例如，东京暴露一年后影响为 4%，而卡塔尔多哈暴露 140 天后影响竟高达 80% [6]）。大气气溶胶负荷与尘埃沉积密切相关。近期一项关于这一主题的研究 [7], 分析了两种再分析产品（MERRA-2 和 CAMS）捕捉澳大利亚上空气溶胶时间变化周期及其对尘埃沉积影响的能力。

- 尘埃颗粒撞击导致的太阳能转换器表面侵蚀，有助于其性能的下降（参见例如 [8]）。由尘埃导致光伏组件表面粗糙度增加所造成的能源生产下降，目前仅得到有限研究。

- 气溶胶消光会降低可获取太阳能，尤其会减少直接法向分量，并增加散射分量。大气中的气溶胶负载可能大幅降低光伏发电。严重事件造成的光伏发电损失，甚至可能达到积尘所报告的水平。[9]报告了一项关于中国大气气溶胶负荷导致的平面太阳辐照度12年平均减幅的研究。结果显示，与非污染条件相比，中国北部和东部——污染最严重的地区——平面太阳辐照度的年平均值每天最多降低1.5 kWh/m^2 (35%) [9]。在世界某些地区，气溶胶对太阳辐射的影响与云相当。例如，冬季阿拉伯半岛北部的云，以及夏季阿拉伯半岛中部和南部的沙漠尘埃，是造成太阳散射辐照度变化的主要因素 [10]。

大气气溶胶负荷及气溶胶性质（例如，参见 [11] 了解气溶胶分类）同样可能影响光伏发电。为实现准确的情景预测并改善电网并网，光伏发电评估 [12]应将气溶胶的数量和类型都考虑在内。大气气溶胶有两个主要来源，它们可扩散至广阔区域，并影响可获取太阳能和光伏发电：沙漠尘埃，例如 [13] ；以及生物质燃烧，例如 [14]。尽管许多研究关注气溶胶对光伏发电的影响，但只有少数研究探讨污染物类型对光伏

性能 [15]的影响。人为雾霾至少部分由苏门答腊（印度尼西亚）的森林和农业用地清理火灾造成，偶尔会导致新加坡出现空气质量问题。新加坡位于这些“热点”区域大多数地点以东150–300公里处。对2013年6月新加坡一次重大雾霾事件的评估（该事件由150–300公里外的苏门答腊（印度尼西亚）火灾引起）显示，光伏发电损失约为15–25% [16]。[17] 所报告的研究探讨了非洲半干旱地区萨赫勒晴空日大气气溶胶（尘埃）对光伏发电的影响，并指出日全球太阳辐照量和光伏发电分别减少了13%和14%。在沙尘暴等极端事件中，光伏发电可能会减半。

毫无疑问，有大量研究聚焦于气溶胶影响对光伏发电的作用。相关结果描绘了气溶胶可能造成的能源损失。然而，这一图景通常伴随着一定程度的主观性，或多或少会受到作为研究对象的太阳能电站具体特性的影响。不同的是，本研究聚焦于气溶胶影响对可获取太阳能的作用。研究结果不受太阳能电站特性的影响，因此具有高度的普适性和适用性。

本研究提出了一种新方法，用于估算气溶胶导致的太阳能潜力日均、月均和年均损失。不同于类似研究，本研究的分析依赖地面测量——其准确度始终高于太阳能潜力研究中最常用的卫星遥感数据。与卫星遥感数据相比，地面站的测量数据也具有更高的空间粒度（点状数据，而非以 km^2 为边长的网格）和时间分辨率（分钟级，而非小时级或更粗）。其不足之处在于，设有专业监测站的地点数量有限。本研究利用了两个公共数据仓库，分别提供气溶胶数据和太阳能数据。两个网络中有一部分地点重合，这意味着同一地点以高质量记录了太阳辐照度和气溶胶光学厚度（AOD），这对开展此类研究至关重要。为单独分析气溶胶对可获取太阳能的影响，本研究仅保留晴空日的数据。

简而言之，本研究报告的创新之处包括：(i) 定义了一种新的理想情景，作为大气气溶胶背景的参考；(ii) 提出了一种用于计算太阳能潜力损失的新方程，以校正可能存在的偏差；(iii) 考虑了鲜少讨论的气溶胶类型影响；(iv) 完全依赖地面测量。

本文结构如下。第 2 节介绍数据库的构建流程，并提出评估太阳能潜力损失的算法。第 3 节计算不同地点在日、月、年尺度上的气溶胶引起的损失，并研究气溶胶类型的影响。结论部分总结研究结果，并探讨进一步的研究方向。

2. 数据库与方法

2.1. 数据集

本研究使用的数据集由来自两个公共档案的地面测量数据组成：基准地表辐射网络 - BSRN [18] 和气溶胶机器人网络 - AERONET[19]。BSRN由71个过去及现有站点组成，这些站点以1分钟或3分钟分辨率测量太阳辐照度的各个分量。AERONET是一个由600多个站点组成的网络，通常以15分钟分辨率记录气溶胶的光学、微物理和辐射特性。AERONET数据有多个可用版本。1.5级数据会自动筛查云的存在，而进一步的人工检查则用于获取2级数据。

本研究使用了2010-2020年期间在同时纳入AERONET和BSRN的地点记录的数据。这些站点的位置并不总是完全重合。筛选时要求AERONET与BSRN站点的设置位置在纬度和经度上的间隔均小于0.1°。为了充分利用测量数据，我们从AERONET 1.5级数据中反演单次散射反照率。其他所有参数均采用质量最高的数据（2级，版本3）。BSRN数据依据[21, 22]中的BSRN建议，使用 [20]，提出的算法进行质量控制。该算法详见[23]。删除了任何相关参数存在缺失值的数据行。对BSRN数据进行了晴空条件筛选。天空状态采用作者在2019 [24]中开发的量化指标I进行分类。指标I基于晴空指数增量的累积分布函数。计算I只需要知道全球太阳辐照度和水平面大气外辐照度。使用阈值I = 0.995来识别晴空日。AERONET数据在测量时刻已筛选为晴空数据。

至此，已对两个数据库完成所有预处理操作。接下来需要合并两个数据集。合并使用瞬时值进行，即不对任何参数进行平均处理。为了合并两个数据集，仅保留两个档案中都有数据的时间戳。所得数据集继承AERONET数据的时间分辨率，即15分钟。BSRN与AERONET数据集的拼接流程详见[11]。最终数据集包含来自两个网络、时间段重叠且在晴空条件下记录的数据。

该算法确保所有选定日期全天晴朗且几乎无云，因此测量数据中的缺口相对较少。对于某些站点，两个档案的重叠时间区间非常短，导致有效数据数量较少。因此，规定每个站点至少须有 4000 行数据。最终数据集包含分布于世界各地的 12 个地点，概述见表1。经过进一步筛选后的最终数据集见第3.1节。

表1. 本研究开展所依据的数据来源，标明主要的柯本–盖革气候分类及汇总统计（me an, 各站点 Ångström 浑浊度参数 β 数据集的第一四分位数 Q1 和最大值。N 为每个站点的数据条目数。

No	位置（国家）	BSRN 索引	BSRN 站点			气候	N	β_{Q1}	β_{mean}	β_{max}
			Lat. [度]	长。[度]	Alt. [m]					
1	博尔德（美国）	BOS	40.125	-105.237	1689	BSk	15506	0.011	0.023	0.310
2	Cener（西班牙）	CNR	42.816	-1.601	471	Cfb	8404	0.015	0.036	0.499
3	达尔文（澳大利亚）	DAR	-12.425	130.891	30	Aw	8141	0.035	0.054	0.214
4	福冈（日本）	FUA	33.582	130.376	3	Cfa	11649	0.062	0.133	0.887
5	戈巴贝布（纳米比亚）	GOB	-23.561	15.042	407	Bwh	77952	0.019	0.040	0.436
6	伊萨尼亚（西班牙）	IZA	28.309	-16.499	2373	Csb	54441	0.006	0.043	1.065
7	兰利研究中心（美国）	LRC	37.104	-76.387	3	Cfa	9314	0.015	0.030	0.462
8	帕莱索（法国）	PAL	48.713	2.208	156	Cfb	9476	0.027	0.054	0.514
9	苏福尔斯（美国）	SFX	43.730	-96.620	473	Dfa	6153	0.022	0.036	0.223
10	塔曼拉塞特 (阿尔及利亚)	TAM	22.790	5.529	1385	Bwh	16300	0.033	0.109	1.382
11	托拉韦雷（爱沙尼亚）	TOR	58.254	26.462	70	Dfb	6606	0.028	0.055	0.839
12	香河（中国）	XIA	39.754	116.962	32	Dwa	15674	0.075	0.278	1.744

2.2 量化太阳能潜力中的气溶胶引起的损失

为了量化大气气溶胶导致的太阳能潜力损失，必须将特定地点测得的太阳辐照度与参考情景下估算的相应值进行比较。气候学值基本上代表给定参数的长期平均值，通常被用作参考值。这种基准有助于显示偏差，或量化偏离平均状况的极端偏离。为了突出整体太阳能潜力的损失，使用某种理想情景作为参考更为恰当。最直接的选择是考虑无气溶胶的大气，或采用大陆背景值。然而，对于特定地点而言，这两种选项都不能代表现实的基准，尤其是对于安装在靠近城市环境区域的光伏电站。下文将对此进行解释。

气溶胶对太阳光束穿过大气时消光的贡献可通过气溶胶光学厚度（气溶胶光学厚度）来表征。在《太阳能》应用中，气溶胶光学厚度还可通过 Ångström方程表示为入射光束波长的函数：

$$AOD(\lambda) = \beta\lambda^{-\alpha}, \tag{1}$$

其中，α 和β 为安格斯特朗系数，波长λ 以 μm 表示。安格斯特朗指数α 与气溶胶动态直径呈负相关，而 Ångström 浑浊度β虽然与任何可测量量都没有直接关联，却包含有关粒子数密度的信息。

图 1 展示了所研究数据集的 Ångström 浑浊度参数直方图（对数刻度）。可以看出，该分布呈双峰形态，自然分为两个准对数正态分布，这一特征在气溶胶中很常见。沙漠尘埃和城市工业气溶胶集中在较高的峰中。较低的峰则包含局地气溶胶背景等成分。需要指出的是，测量不确定性的量级也与此相当 [25]。

目视检查图 1 可见，使用气候值（定义为多年测量值的算术平均值：β_{mean}）只能反映气溶胶分布的一小部分，因此不足以量化太阳能潜力的损失。更基于物理的选择是取图 1 所示分布中两个众数之间的最小值。对于整个数据集，最小值为 β_{Q1} = 0.01 （与 β_{mean} = 0.054 比较；见图 1 中的虚线），按数据分布来看，该值大致位于第一四分位数处。

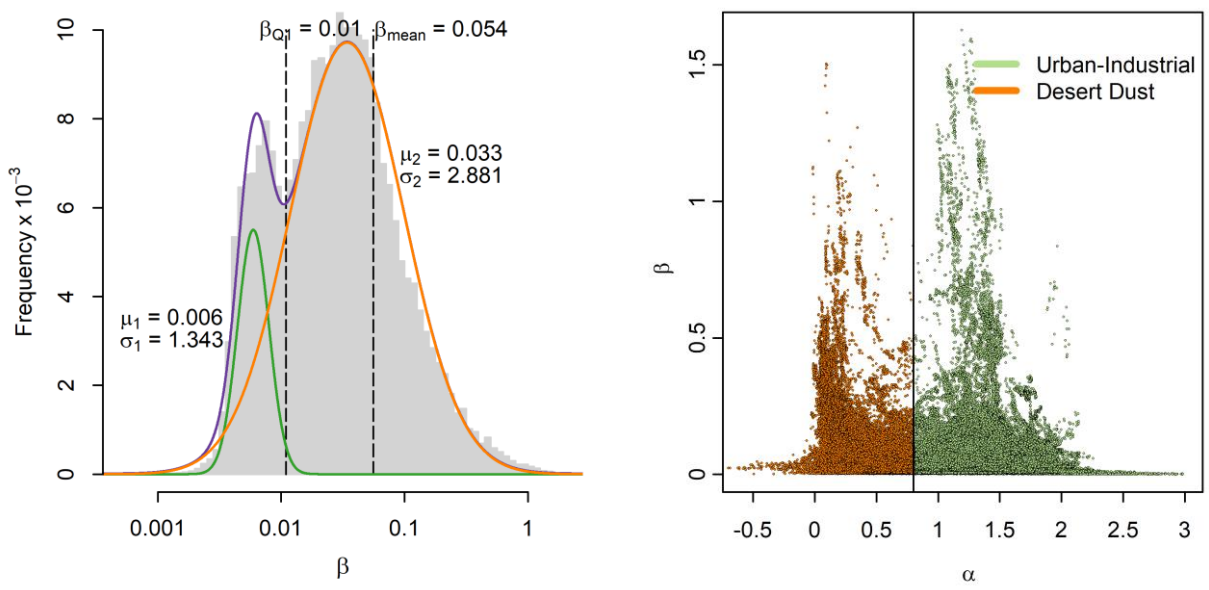
Ångström浑浊度。以中心最小值的确切位置作为每个站点的参考时，会出现两个障碍：1）对于某些地点，还会出现其他较小的最大值，这使得最小值的定义并不直接；2）并非总能获得多年数据，从而为每个地点形成具有统计代表性的分布。因此，这里采用了一种折中方案，旨在简化实施。

本研究选取各站点测量所得 Ångström 浑浊度参数的第一四分位数（Q1） 作为理想条件的代表值。阈值的选择在一定程度上具有主观性，旨在展示该方法。在实际研究中，应根据研究目标，通过分析长期气溶胶趋势和/或气溶胶成分来设定阈值，以区分各种影响因素。图 1 显示，这一参考值大致将两种模式区分开来。换言之，我们评估的是气溶胶存在所导致的太阳能潜力损失，并将其与仅存在局地气溶胶背景时的预期值进行比较。

由于阈值是根据瞬时值确定的，且气溶胶具有显著的季节性，因此这种设置仅适用于开展多年研究，以便对季节变化取平均。在长期气溶胶状况发生变化的站点，这一条件并未得到严格满足。例如，正如许多研究所探讨的，由于污染水平不断上升，中国部分地区过去几十年间地表平均太阳辐照度持续下降[26], ，而在2013 [27]实施清洁空气行动后，太阳辐照度又出现了前所未有的上升。事实上，本文介绍的方法可以模拟这种气溶胶背景的变化。不过，本研究旨在展示所提方法的功能，因此暂不考虑长期气溶胶趋势变化和复杂气溶胶成分的影响。

我们数据集中所代表的气溶胶主要分为城市工业（UI）和沙漠尘埃（DD）两类。通常也会考虑一个介于两者之间的“混合”类别（有关更详细的讨论，请参见 [11], [28], [29] ）。根据遥感获取的气溶胶光学性质对气溶胶类型进行分类，在某种程度上具有主观性，可能导致结果不可靠 [30]。尽管如此，这仍是太阳能领域文献中的现行做法。本文采用一种非常简单的划分方式，即依据安格斯特朗指数分类：DD：$\alpha < 0.8$，UI：$\alpha > 0.8$（见图 1）。

分析燃烧及其他燃烧过程产生的气溶胶的影响时，还应格外谨慎。α 值高于 1.5 且单次散射反照率较低，通常表明存在生物质燃烧产物。另一方面，城市工业气溶胶的单次散射反照率范围很广，从较低（即黑烟）到很高（即白烟）均有。由于单次散射反照率会显著影响气溶胶对太阳光束的衰减，因此，为提高精确度，还应依据单次散射反照率对 UI 类进一步分类。此外，在气溶胶光学厚度较低时，安格斯特朗指数无法很好地区分不同的气溶胶类型。尽管如此，鉴于本研究仅为初步研究，我们仍采用简单的分类方式，根据 α 将气溶胶划分为 DD 和 UI 两类，大致区分尘埃与燃烧产物。按照这一界定，UI 类包括所有燃烧过程产生的气溶胶，无论其来源是人为还是生物过程。在所分析的各个站点中，海洋气溶胶均不是主要的气溶胶类型。



（a） （b）

图1 （a）整个数据集的 Ångström 浑浊度参数直方图。数据上叠加显示了两种模态的对数正态曲线。μ 和σ 代表对数正态分布的两个参数，即数据的中位数和几何标准差[31]。（b）整个数据集中 Ångström 浑浊度参数随安格斯特朗指数变化的散点图。图中突出显示了按主要气溶胶类型进行的分类。

在晴空条件下，日太阳能潜力的损失可定义为：

$$\Delta H = H_{m,ref} - H_m = \int_{t_{sr}}^{t_{ss}} G_{m,ref}\,dt - \int_{t_{sr}}^{t_{ss}} G_m dt\,, \tag{2}$$

其中 G_m 是测得的太阳辐照度，而 $G_{m,\ ref}$ 表示相同的量，但处于参考条件下。 t_{sr} 和 t_{ss} 分别定义日出和日落时间。由于 无法通过实验获取，因此必须对其进行建模。尽管 $G_{m,ref}$ 是的自然替代量，但该量可能高度依赖模型。如果晴空模型系统性地低估/高估太阳辐照度，就会导致损失被低估/高估。因此，理想情况下应采用一种对晴空模型依赖较小的量。

在本研究中，我们提出以下程序来评估每日太阳辐照度中的气溶胶引起的损失：

$$\begin{aligned}\Delta H &= \int_{t_{sr}}^{t_{ss}} G_{ref} k_{cs} dt - \int_{t_{sr}}^{t_{ss}} G_m dt \\ &= \int_{t_{sr}}^{t_{ss}} G_m \left(\frac{G_{ref}}{G_\beta} - 1 \right) dt,\end{aligned} \tag{3}$$

其中 表示晴空指数。G_β 和 G_{ref} 分别是以实测值和参考值的 Ångström 浑浊度参数 β为输入，采用参数化晴空模型估算的全球水平太阳辐照度。被提议作为公式（2）中的估计值。公式（3）第二项中加入晴空指数，旨在校正可能存在的模型偏差。众所周知，参数模型会随气溶胶负载而产生系统性偏差，在浑浊度较高时尤为显著[32]。根据定义，在 Ångström 浑浊度系数的不同取值下，该偏差的符号相同。如果模型在 β_{Q1}时低估了测量值，k_{cs} （在 β_m处计算）也会大于 1，从而通过提高估算辐照度来抵消模型偏差。模型高估时则情况相反；加入晴空指数后，估算结果总会更准确。如果太阳辐照度模型完全准确，那么晴空指数将为 1（k_{cs}= 1），此时这项操作便是多余的。

公式（3）中的分数项通过晴空模型估算如下：

$$\frac{G_{ref}}{G_{\beta}} = \frac{G_{\text{model}}\left(h, l_i, \phi_j, \beta_{\text{Q1}}\right)}{G_{\text{model}}\left(h, l_i, \phi_j, \beta_m\right)}, \quad \begin{matrix} l_i = \{l_w, l_{\text{O3}}, l_{\text{NO2}}, l_g, l_R, \ldots\} \\ \phi_j = \{\alpha, \tilde{\omega}, g, \ldots\} \end{matrix} \tag{4}$$

其中，h为太阳高度角，l_i 为除气溶胶外主要大气成分的柱浓度（可降水汽、臭氧、二氧化氮、混合气体、瑞利散射等），而ϕ_j 为气溶胶光学性质（安格斯特朗指数、单次散射反照率、不对称因子等）。考虑到G_{β} 和G_{ref}的所有输入参数（Ångström浑浊度β除外）均为相同的实测值，因此公式（3）单独凸显了气溶胶的影响。此外，安格斯特朗指数 α、单次散射反照率，以及决定气溶胶类型的所有其他物理量也都保持不变。因此，尽管β 无法直接与粒子数密度（可测量量）关联，但基于上述假设，我们将β 的变化完全解释为气溶胶粒子数变化所致。由此，按照这一解释，公式（3）量化了大气气溶胶负荷变化造成的气溶胶相关太阳辐照度损失，同时保持气溶胶类型不变。

相对损失计算如下：

$$\Delta H_r = \frac{\Delta H}{H_{ref}} \times 100 \tag{5}$$

如果需要计算法向直射（或任何其他）太阳能潜力的损失，则可直接将式（2）至（5）中的全球水平辐照度替换为所需的量来获得。

3. 结果与分析

3.1. 代表性月份

通过按月份汇总数据，可以获得我们数据集的整体结果概况，即统计每个站点所有年份中的数据。太阳辐照度的季节性变化显然比所考察的10年期间内的长期变化更为显著。表2显示了每个站点符合第2.1节所述标准的天数。仅纳入测量次数超过20次的天数。对于15分钟分辨率而言，该阈值意味着每天至少有5小时包含测量数据。数据条目较少的日期必然包含至少一些云量较大的时段，因此会被剔除。

表2列出了每个站点的有效天数，并按月份进行了细分。可以看出，在研究期间，大多数站点的有效天数介于10至30天之间。大多数站点

各月份的分布较为均衡，只有少数站点（如 DAR 和 TOR）出现部分月份有效天数较多、而其他月份未达到 7 天门槛的情况。GOB 和 IZA 站点的有效天数异常偏多，反映出这些地点的云量相对较少（进一步讨论见第 3.5 节和附录 A 中的表A1）。

在10年期间，对于给定站点的某个月份，结果至少需要一定数量的天数才能被视为具有最低限度的代表性。如果这个数量过小，异常效应可能会影响我们对结果的解读。如果这个数量过大，则会使数据集中的很大一部分无法得到利用。经过权衡，我们将阈值设为7天。达到阈值的月份在表2中以高亮标出。请注意，由于阈值天数较少，其数值确实会对结果产生影响。只有有效天数较多的月份，才能被视为能充分代表某一地点。

表2。10年期间每个月各站点的有效天数。超过/未达到筛选阈值（见第3.1节）的月份以绿色/橙色突出显示。

月份 1		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
BOS	13	20	21	7	11	26	11	10	30	31	28	22
CNR	11	6	12	5	4	25	26	34	20	20	7	12
DAR	-	-	3	5	17	62	45	51	11	5	-	-
FUA	5	6	18	18	15	1	9	12	4	25	14	4
GOB	28	38	42	61	94	78	67	57	45	41	67	63
IZA	117	82	113	109	166	232	226	195	139	71	57	97
LRC	20	14	18	16	10	3	9	7	4	24	34	16
PAL	2	9	27	22	10	12	14	14	22	21	5	-
SFX	6	16	18	15	12	13	16	10	12	17	16	4
TAM	6	18	-	7	7	6	24	5	19	22	4	29
TOR	-	2	21	27	25	9	6	5	4	9	-	-
XIA	42	13	24	26	14	6	12	7	11	23	13	14

3.2. 晴空模型：REST2v5

本研究选用 REST2v5 模型作为晴空太阳辐照度模型[33],，该模型采用两个宽波段。REST2v5 被广泛认为是文献中最可靠的晴空模型之一[34, 35]。第 2 节所述的 AERONET 地面数据。

2.1. 用于 REST2v5 所有输入参数的数据为：臭氧柱含量 l_{O3}、水汽柱含量 w、Ångström 浑浊度参数β、安格斯特朗指数α 和单次散射反照率 SSA。SSA 通过天顶环带法获得，且每天仅记录少数几次。本文采用基于现有测量值计算的日平均 SSA。其他参数均未进行平均处理。地面反照率ρ 也取自 AERONET。

提醒读者，AERONET 数据的时间分辨率为 15分钟，且有时较为稀疏。为了评估每日太阳辐照度值，模型输入变量和 k_{cs} 均被插值到更精细的时间网格上。图 2 展示了这种简单的线性插值。在时间区间的两端，对每个变量均使用最接近的测量值，直至日出/日落。

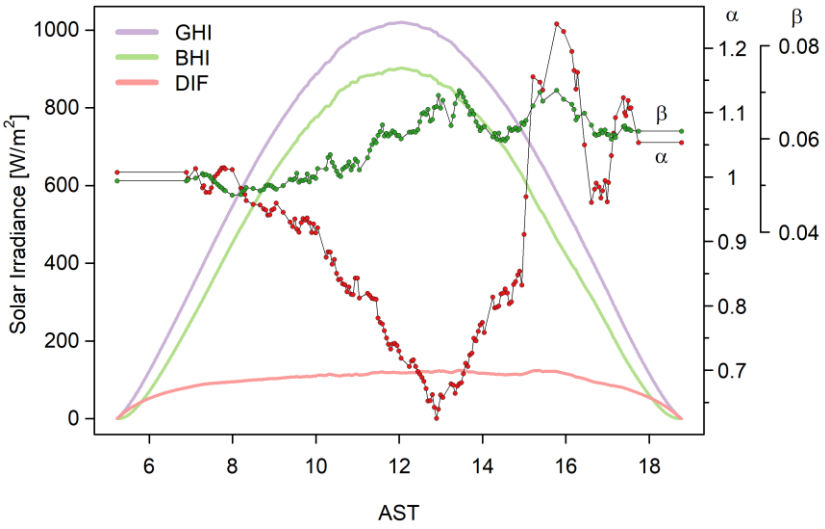


图 2.Ångström浑浊度系数β 和安格斯特朗指数α 相对于表观太阳时（AST）的测量值（点）和插值值（黑色实线），以数据集中的一个典型晴空日为例（LRC，2018-05-01）。同时还显示了三个水平太阳辐照度分量的估算值——全球水平辐照度（GHI）、直射辐照度（BHI）和散射辐照度（DIF）。

3.3. 平均每日损失

如第2.2节和第3.2节所述，利用REST2v5获得的太阳辐照量值是在假设天空始终晴朗的情况下对太阳辐照度的估算。换言之，基于这些估算计算出的每日值和每月值，代表在整个时段都没有云的情况下地面所测得的太阳能量。估算的每日损失

如公式（3）所述的太阳能潜力，即估算参考值减去实测全球水平太阳辐照量（GHI）值，列于表3中。

表3. 使用 REST2v5，根据Ångström 浑浊度参数的实测值和基准值估算的每日全球水平辐照度之间的差值 ΔH [Wh/m^2] (Eq. 3)。还列出了相对于每日全球水平辐照度参考值计算的相对损失 ΔH_r [%] (Eq. 5)。单元格按百分比区间由浅至深着色：低于 0%；[0%，2.5%）；[2.5%，5%）；[5%，10%）；[10%，25%）；高于 25%。缺失值标记为不适用。

月份		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
BOS	ΔH	-7.3	9.53	45.71	89.51	59.25	97.25	81.13	29.29	76.82	20.52	-2.53	-0.83
	ΔH_r	-0.24	0.21	0.75	1.18	0.67	1.09	0.97	0.4	1.26	0.43	-0.07	-0.03
CNR	ΔH	12.78	NA	67.16	NA	NA	132.53	93.52	67.48	61.61	-16.69	1.82	-0.77
	ΔH_r	0.5	NA	1.3	NA	NA	1.56	1.13	0.91	1.09	-0.42	0.07	-0.03
DAR	ΔH	NA	NA	-66.43 -		20.62	72.86	64.22	NA	NA	NA	NA	NA
	ΔH_r	NA	NA	-0.97	-0.48	0.35	1.3	1.13	NA	NA	NA	NA	NA
FUA	ΔH	NA	NA	452.87	279.06	235.2	NA	156.34	239.81	NA	34.6	14.44	NA
	ΔH_r	NA	NA	7.12	3.72	3.02	NA	2.01	3.24	NA	0.69	0.36	NA
GOB	ΔH	113.71	78.97	19.3	14.57	14.85	7.7	32.99	124.58	175.03	139.5	73.77	53.72
	ΔH_r	1.26	0.92	0.26	0.24	0.29	0.16	0.67	2.14	2.45	1.74	0.82	0.58
IZA	ΔH	29.43	4.85	21.56	43.31	28.77	78.94	197.44	159.38	29.74	9.76	4.71	7.43
	ΔH_r	0.58	0.08	0.29	0.5	0.31	0.83	2.12	1.83	0.38	0.15	0.09	0.16
LRC	ΔH	-2.04	17.49	46.11	54.48	138.63	NA	110.64	119.87	NA	33.44	5.64	13.25
	ΔH_r	-0.06	0.38	0.75	0.72	1.67	NA	1.54	1.62	NA	0.7	0.16	0.46
PAL	ΔH	NA	70.81	165.17	168.46	76.53	35.5	107.46	78.4	18.87	65.02	NA	NA
	ΔH_r	NA	2.33	3.67	2.57	0.96	0.42	1.3	1.14	0.36	1.73	NA	NA
SXF	ΔH	NA	-6.04	21.4	63.86	60.8	46.23	89.35	52.32	89.55	3.77	-3.15	NA
	ΔH_r	NA	-0.15	0.4	0.89	0.73	0.53	1.09	0.79	1.55	0.09	-0.11	NA
TAM	ΔH	NA	114.05	316.5	291.76	NA	629.67	NA	630.53		NA	138.79	NA
	ΔH_r	NA	2.08	5.46	4.83	NA	10.17	NA	8.64	5.78	NA	2.86	NA
TOR	ΔH	NA	-14.18	11.33	88.91	29.85	NA	NA	NA	162.18	NA	NA	NA
	ΔH_r	NA	-0.67	0.32	1.54	0.39	NA	NA	NA	4.28	NA	NA	NA
XIA	ΔH	136.69	646.33	447.38	850.6	586.84	NA	261.26	115.29	191.08	515.74	188.84	253.44
	ΔH_r	4.71	17.44	8.35	11.71	7.41	NA	3.21	1.64	3.36	11.98	6.74	12.42

表 4. 使用实测值和参考值作为 Ångström 浑浊度参数，通过 REST2v.5 估算的每日 DNI 之间的差值 ΔH [Wh/m²]（公式 3）。同时列出相对于基准日辐照量计算的相对损失 [ΔH_r (%)]（公式 5）。单元格按百分比区间由浅至深着色：低于 0%；[0%，2.5%）；[2.5%，5%）；[5%，10%）；[10%，25%）；高于 25%。缺失值标记为 NA。

月份		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
BOS	ΔH	-70.09	72.39	513.46	947.07	585	959.81	763.97			177.18	-50.69	-15.96
	ΔH_r	-0.89	0.77	4.76	8.12	4.74	7.73	6.53	9.54	7.39	1.88	-0.6	-0.21
CNR	ΔH	137.6	NA	700.32	NA	NA	1028.48		610.01	454.78	434.27	-74.19	-146.36
	ΔH_r	2.09	NA	7.64	NA	NA	8.75	6.08	5.63	4.81	5.38	-1.13	-2.4
DAR	ΔH	NA	NA	-347.01	-276.82	129.13	418.92	399.33	NA	NA	NA	NA	NA
	ΔH_r	NA	NA	-3.87	-3.14	1.54	5.16	4.94	NA	NA	NA	NA	NA
FUA	ΔH	NA	NA	2332.55	1592.85	1442.04	NA	855.62	1315.94	NA	215.41	31.73	NA
	ΔH_r	NA	NA	26.8	17.15	15	NA	9.6	15.26	NA	2.93	0.48	NA
GOB	ΔH	1037.72		289.41	155.5	183.93	72.74	273.21	921.29	1120.9	1236.8	868.04	712.13
	ΔH_r	9.04	6.73	2.91	1.73	2.23	0.91	3.32	10.45	11.45	11.9	7.54	6.07
IZA	ΔH	184.25	82.75	306.46	490.4	407.96	727.96	1780.81	1528.96	368.28	93.79	66.27	75.43
	ΔH_r	1.8	0.76	2.59	3.88	3.1	5.5	13.68	12.38	3.15	0.85	0.65	0.77
LRC	ΔH	-15.97	231.86	515.9	626.22	1380.53	NA	1042.71	1042.82	NA	404.95	62.87	166.1
	ΔH_r	-0.21	2.65	5.13	5.68	12.14	NA	9.78	10.03	NA	4.68	0.82	2.4
PAL	ΔH	NA	707.86			774.13	422.39	764.72	724.72	205.84	525.96	NA	NA
	ΔH_r	NA	10.12	16.13	12.79	6.78	3.58	6.61	7.02	2.28	6.86	NA	NA
SXF	ΔH	NA	-120.38	261.24	694.71	698.38	554.52	671.99	733.31	762.36	52.48	-46.99	NA
	ΔH_r	NA	-1.49	2.83	6.41	5.98	4.68	6.03	7.46	8.18	0.65	-0.69	NA
TAM	ΔH	NA	710.5	2110.83		NA	4074.72	NA	3512.5	2442.43	NA	949.71	NA
	ΔH_r	NA	7.57	21.77	21.01	NA	37.73	NA	32.71	24.78	NA	11.13	NA
TOR	ΔH	NA	-82.3	-110.6	762.68	292.05	NA	NA	NA	1284.8	NA	NA	NA
	ΔH_r	NA	-1.42	-1.43	7.33	2.4	NA	NA	NA	15.47	NA	NA	NA
XIA	ΔH	622.09	2535.87	1637.57	3350.36	2571.47	NA	795.17	576.11	897.25	1911.76	867.23	1418.84
	ΔH_r	11.01	39	20.73	35.25	26.11	NA	8.37	6.56	11.36	27.75	16.07	32.01

总体而言，大多数情况下，全球水平辐照度（GHI）的日损失低于 2–3%，不过某些月份的损失可能高得多。少数站点因气溶胶而长期出现较高损失，分别是阿尔及利亚塔曼拉塞特（TAM）、中国香河（XIA），以及损失程度较轻的日本福冈（FUA）。最大日损失出现在 XIA 的 4 月，为 850.6 Wh/m^2, ；而相对损失最高值出现在同一站点的 2 月，为 17.4%。XIA 的其他月份（4 月、10 月和 12 月）以及 TAM 的 6 月也观测到超过 10 % 的损失。

对于聚光太阳能发电系统，相关的太阳辐照度指标是直接法向辐照度（DNI）。表 4 列出了直接法向辐照度的损失。我们发现，总体而言，这些损失明显高于全球水平辐照度（GHI）的损失，部分站点的损失超过 25%。损失最高值出现在 TAM 的 6 月（4074.7 Wh/m^2），而相对损失最高值出现在 XIA 的 2 月（39%）。总体来看，TAM 和 XIA 是损失最大的地点；不过，即使在 FUA，损失也可高达参照值的四分之一（3 月为 26.8%）。TAM（3 月、4 月、8 月和 9 月）以及 XIA（3 月、4 月、5 月、10 月和 12 月）也有其他月份的潜力损失超过 20%。XIA 的气溶胶成分复杂且大气负荷较高，尤其值得关注，并且已在文献中得到深入研究 [36]。

全球水平辐照度（GHI）和直接法向辐照度（DNI）的损失差异相当显著。我们可以这样理解：从直接法向辐照度中损失的部分太阳光束会向下散射，仍对全球水平辐照度有所贡献。因此，单次散射反照率较高的气溶胶（如沙漠尘埃）在全球水平辐照度中的相对损失小于在直接法向辐照度中的相对损失；而吸收比例较高的气溶胶（如城市工业气溶胶）在全球水平辐照度和直接法向辐照度中都会造成更大的损失。因此，研究气溶胶的影响时，必须考虑气溶胶类型。

3.4. 气溶胶类型的影响

上述两个站点TAM和XIA 的情况存在明显差异。TAM站点位于阿尔及利亚撒哈拉沙漠的北缘，其主要气溶胶为沙漠尘埃，损失反映了沙尘暴的季节性。另一方面，XIA 站点位于中国北京和天津的城市中心附近，其主要气溶胶为城市工业霾，而这种霾的形成受人为活动控制 [37]。

根据安格斯特朗指数的变化，我们在这些站点获得的数据的气溶胶光学厚度如图3所示。根据第2.2节的分类，可以清楚地识别出每个站点的主要气溶胶类型（另见图1）。

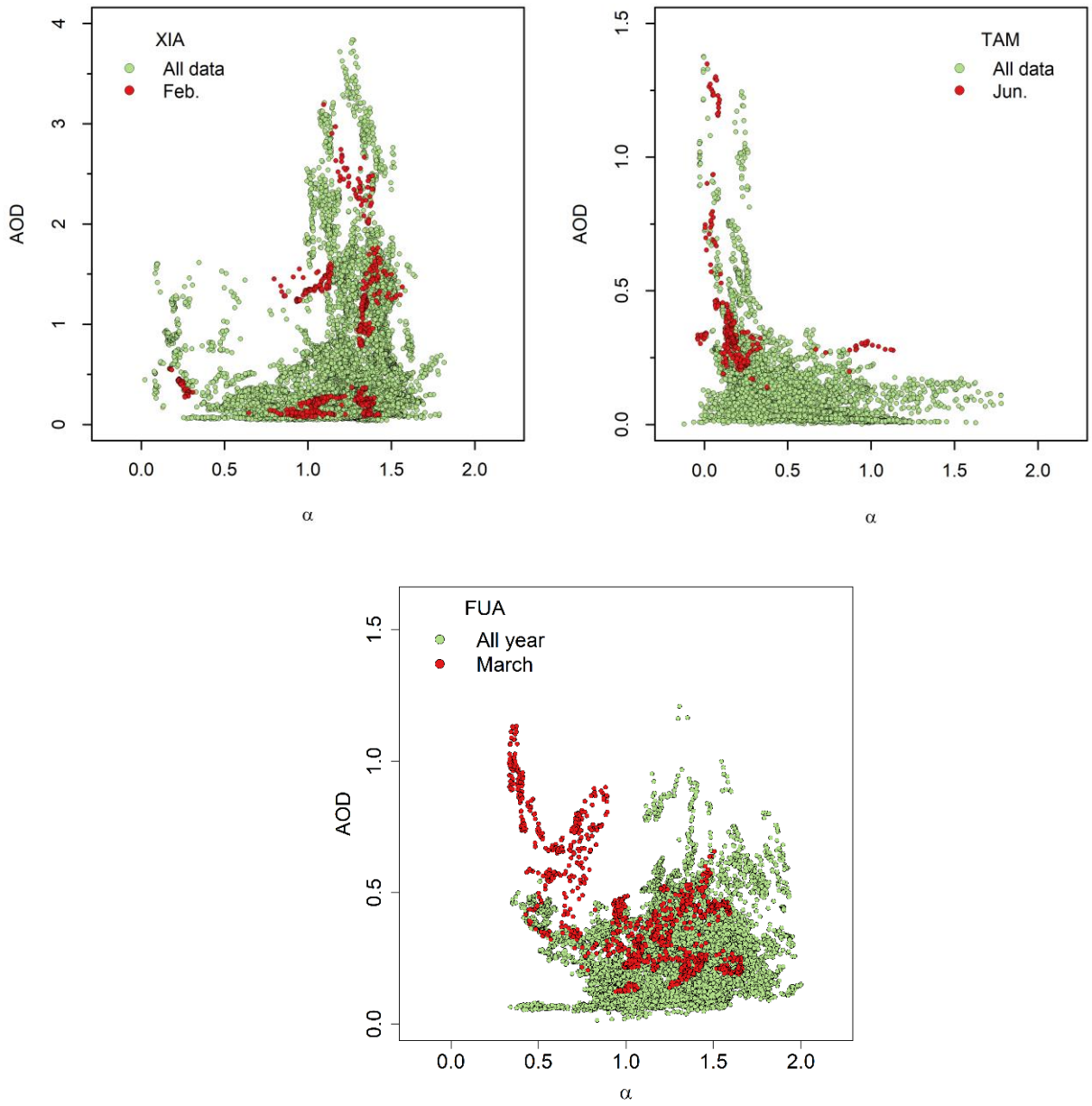


图 3. 我们数据集中塔曼拉塞特（TAM）、香河（XIA）和福冈（FUA）各站点的气溶胶光学厚度随安格斯特朗指数的变化。每个站点太阳能潜力日损失最高月份的数据已突出显示（见表 3 和表 4）。请注意，按照第 2.2 节的分类，$\alpha = 0.8$ 是 DD 型与 UI 型气溶胶之间的阈值。

对于沙漠尘埃造成的损失，实际上没有办法加以避免。值得注意的是，在最坏的情况下，气候变化将伴随大范围荒漠化[38]，，因此未来此类情况可能会更加常见。另一方面，对于以城市工业气溶胶为主的地点，损失完全是人为造成的。全球快速发展地区的城市中心周边普遍存在极高的污染水平，例如中国的部分地区；这些污染对太阳能潜力的影响显然很大，在 XIA 站点，多个月份的直接法向辐照度潜力损失超过 20%（见表 4）。

FUA 站点的情况介于两者之间，颇为特别。福冈市位于日本西南部，属于高度工业化地区，这一点从图 3 所示的高水平城市工业污染中可见一斑。与此同时，日本也会周期性受到来自戈壁沙漠的尘埃羽流影响。尤其是 3 月份，该月的平均气溶胶含量最高。由图 3 中突出显示的数据点可知，FUA 在 3 月份的高气溶胶光学厚度，实际上是沙漠尘埃与高水平城市工业污染共同作用的结果。

比较 TAM 8 月和XIA5 月的情况很有启发性。就 GHI而言，TAM的损失为[630.5 Wh/m^2 (8.6%)]，XIA的损失为[586.8 Wh/m^2 (7.4%)]，二者相近；而就DNI 而言，两种情况下相差近 1000 Wh/m^2 [TAM：3512.5 Wh/m^2 (32.7%)，而XIA：2571.5Wh/m^2 (26.1%)]。如上一节所述，这一差异源于两个站点中占主导地位的气溶胶具有不同的单次散射反照率。通过采用更详细的气溶胶分类方案，可以对不同气溶胶类型的辐射影响进行更复杂的分析；这一任务留待未来开展（有关 XIA 站点此类分析的示例，参见文献 [39] ）。

3.5. 月平均和年平均损失

当然，鉴于我们的估算仅针对晴空条件，因此只有极少数月份的估算值能够代表实际测得的辐照度。实际上，在大多数月份中，相当多的日子会出现局部多云或阴天。

要同时考虑云和气溶胶的影响极具挑战性，因为云和气溶胶的效应会以非线性方式叠加。气溶胶会作为云

凝结核，促进云的形成，从而直接影响云量 [31]。气溶胶的存在还会影响云的其他特性，例如反照率和寿命 [40]。另一方面，云通过增加水汽，增强吸湿性增长，进而影响气溶胶的特性 [41]。

尽管如此，通过将我们的方法与Ångström方程相结合，以考虑云覆盖情况，仍可进行非常粗略的估算。Ångström类型方程将测得的太阳辐照量与日照时长相关联σ 在给定的时间间隔内，通过如下形式的相关关系。在本研究中，采用了[42] 所提出的经验方程，即：

$$H / H_{cs} = f(\sigma)$$

$$H = H_{cs}(0.368 + 0.623\sigma). \tag{6}$$

σ 根据BSRN 存档中的实测直接法向辐照度进行估算——使用给定时段内的全部测量数据，而非经过晴空筛选的最终数据集——采用以下关系式：

$$\sigma(\Delta T) = \int_{\Delta T} \xi(t)dt \tag{7}$$

$$\xi(t) = \begin{cases} 1 & \text{IF} \quad DNI > 120\ \text{W/m}^2 \\ 0 & \text{OTHERWISE} \end{cases} \tag{8}$$

二值量ξ(t) 称为日照数，用于跟踪在时刻 t [43, 44]太阳圆面是否被云覆盖。公式(8) 根据 WMO 日照标准定义了 ξ 。每日相对日照时数的月平均值列于附录 A 的表A1中。

每个站点的月度辐照损失估算值通过第 3.3 节中计算的日损失结合公式（6）获得，具体如下：

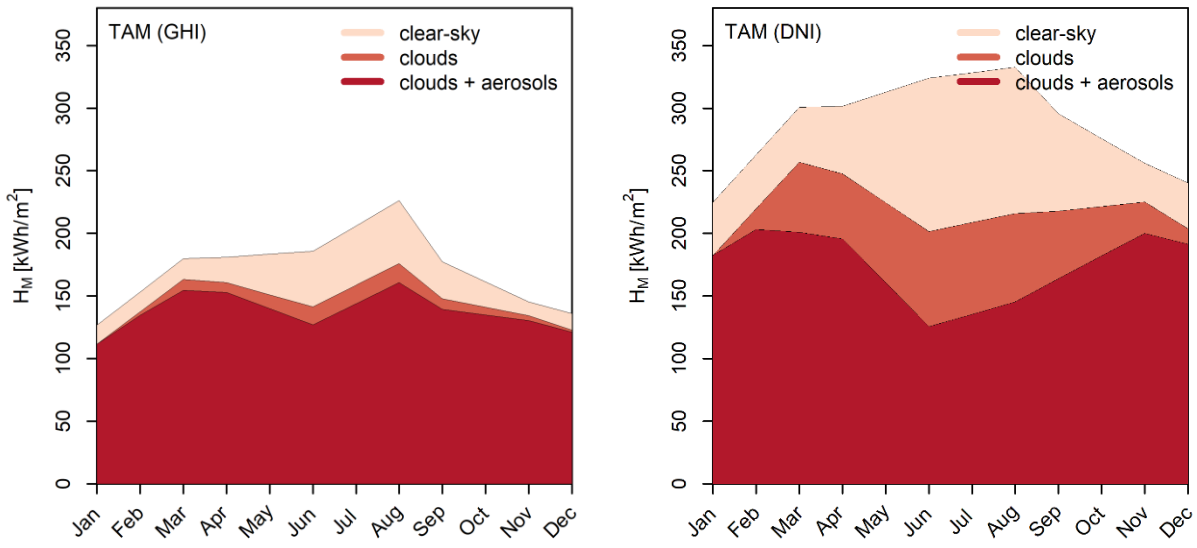
$$H_M^{cl+ae} = H_M^{ref} f(\sigma)(1 - \Delta H_r) = H_M^{cl}(1 - \Delta H_r), \tag{9a}$$

$$\Delta H_M^{ae} = H_M^{cl} - H_M^{cl+ae} = H_M^{ref} f(\sigma)\Delta H_r. \tag{9b}$$

标签 *cl* 和 *ae* 表示云和气溶胶。因此，符号 表示在云和气溶胶共同存在的情况下估算的月份辐照度，而 表示完全由气溶胶导致的太阳能潜力月份损失。请注意，公式 (9) 假设云和气溶胶对太阳辐射的消光过程彼此独立，但严格来说，在

如上所述的实际情况。尽管如此，对于月份和年份的时间尺度而言，就本研究的目的来说，这仍被认为是合理的近似。

结果如图4所示，展示了TAM和XIA站点的情况，这两个站点是我们的数据集中平均浑浊度最高的站点。由于云造成的月损失自然始终最大。然而，气溶胶引起的损失也不可忽略，其数量级可能与云造成的损失相当。例如，在TAM的3月和6月，由气溶胶造成的月损失分别为8.9kWh/m^2 和14.4kWh/m^2, ，而由云造成的损失分别为16.5 kWh/m^2 和44.3 kWh/m^2 。



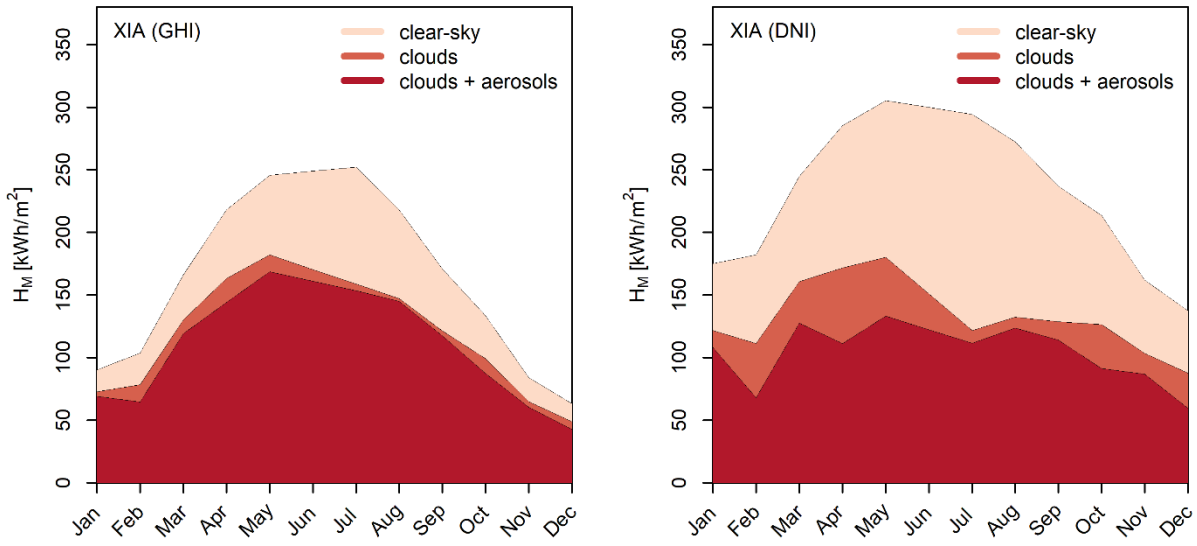


图4. 根据我们的数据集，对站点TAM和XIA 的月平均全球水平太阳辐照量和直接法向太阳辐照量的估算：i）在参考晴空条件下，ii）存在云时，根据公式（6）计算；以及 iii）同时存在云和气溶胶时，根据公式（9a）估算。

$_{M}H^{clae}$

$_{M}H^{cl}$

$_{M}H^{\text{参考}}$

所有地点的月损失列于表A2中。表中显示了有云条件下的太阳能潜力以及气溶胶引起的损失。为了最大限度地提高结果的实用性，采用简单的线性插值（依次使用中心差分、左差分和右差分）来估算缺失值。插值进行了两次。因此，大多数缺失月份都得到了填补，尽管结果的可信度有所降低。表A2中的插值数值以斜体显示。插值后，仅站点DAR和TOR仍包含缺失值。对于其他站点，还列出了年度总量。站点GOB和IZA具有较高的太阳能潜力，这是由于这些站点达到的相对日照时数较高所致，如表A1所示。

以有云条件下太阳能潜力的百分比表示的年度气溶胶引起的损失如图5所示。在FUA、TAM和 XIA记录到的损失最高，分别占各地点年度太阳能潜力的3.8%、5.2% 和7.2%；而在其他站点，损失介于0.6%至1.2% 之间。此外，用于填补缺失月度数值的线性插值只能捕捉气溶胶季节性趋势，遗漏了特别高的

大气负荷。这可能会导致对实际气溶胶损失的低估。总之，在许多地点，气溶胶导致的太阳能潜力下降是相当可观的，而在光伏项目的可行性研究期间忽略或低估这种影响，可能会造成严重问题。

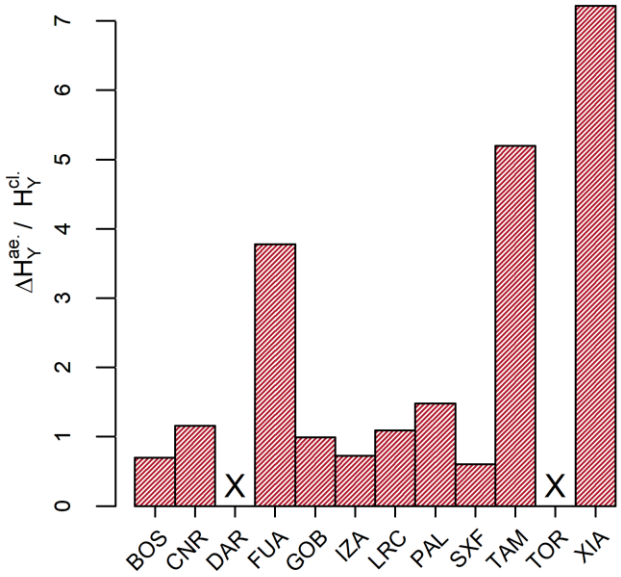


图5. 表1所列12个站点中，气溶胶导致的太阳能潜力年均降幅。损失以有云条件下太阳能潜力的百分比表示。由于缺少月度数值而无法计算年值的地点以 X 标记。

3.6 讨论

在现实的室外环境中，气溶胶导致的太阳能潜力降低量无法直接测量。因此，只能通过控制估算程序中不同要素引入的误差来评估结果的质量。在本案例中，结果的准确性受两个因素控制，即所用数据的准确性和估算模型的准确性。此外，还存在参考情景的选择与所评估损失类型之间的一致性问题。在本研究中，我们采用了目前最可靠的数据形式——地面观测数据（通常被视为“地面真值”）[45]。我们选择基于物理原理的REST2晴空模型进行估算

太阳辐照度，因为已有文献证实其具有较高的性能 [46，47]。然而，如文献[48]所示，即使是REST2有时也会在直接法向辐照度的估算中产生伪影。因此，使用晴空模型会引入一定的不确定性。选择参考情景的目的，是单独识别尘埃或燃烧产物气溶胶相对于当地背景的影响。以当地测得的气溶胶数据（即Ångström浑浊度）的Q1作为参考情景，这种临时确定参考情景的方法是该方法的一个明显局限。对于拥有详细且长期气溶胶数据的地点，可以基于数据分析选择更符合物理原理的参考情景。对于没有此类数据的地点，Q1是一种合理的折中方案。

在所研究的 12 个地点估算的气溶胶损失，与文献中的其他研究结果一致。例如，参考文献 [9], 发现，在中国污染最严重的地区，气溶胶导致太阳能潜力损失 1.5kWh/m^2。这一结果与我们的方法估算的损失一致：从月份最低到最高，损失范围为 0.5 至 3.3kWh/m^2，全年平均损失为 1.56kWh/m2。

这项研究接下来的自然步骤，是将本文开发的方法应用于卫星数据，为不同情景生成全球气溶胶损失分布图。为此，必须首先根据 AERONET 或其他来源的地面数据，以适配我们方法的方式校准卫星产品。另一条研究方向是估算气溶胶混合物中不同来源对柱状气溶胶消光的贡献。例如，可以像参考文献 [49], 中的研究一样，研究单次极端事件的辐射影响，例如撒哈拉沙尘暴席卷南欧。

4. CONCLUSION

本文提出了一种用于估算不同时间尺度上气溶胶导致的太阳能潜力降低程度的方法。不同于通常采用卫星数据的做法，本文使用了来自两个监测网络的地面测量数据。文中介绍了一种算法，用于合并 AERONET 和 BSRN 两个数据存储库中的数据，这些数据类型各异，时间分辨率也不同。研究评估了分布在五大洲的 12 个站点的损失。

为确保研究具有高度普适性，本研究聚焦于气溶胶对可获取太阳能的影响。因此，研究结果不受太阳能电站特性的影响。本文提出了一种新方法，用于估算气溶胶导致的太阳能潜力日均、月均和年均损失。为突出太阳能潜力总体损失，本文定义了一种新的理想情景，作为大气气溶胶背景的参照。该情景以各站点记录的 Ångström 浑浊度系数数据集的第一四分位数为基础。采用这一方法，只需一年的局地测量数据，且该参照易于实施。研究根据实际大气条件下测得的太阳能潜力，评估其损失，并将其与仅存在局地气溶胶背景时的预期值进行比较。此外，研究还考察了气溶胶类型（尘埃与燃烧气溶胶）的具体影响。

在大气中富含沙漠尘埃和/或城市工业气溶胶的地区，记录到的损失最高：福冈（日本）、塔曼拉塞特（阿尔及利亚）和香河（中国）的损失分别达到太阳能潜力的3.8%（57.4 kWh/m^2/年）、5.2%（90.7 kWh/m^2/年）和7.2%（103.7 kWh/m^2/年）。这些影响非常显著，如果在光伏项目的规划阶段被忽略或低估，可能会造成巨额成本。目前全球在运行的最大太阳能发电厂的额定容量已超过1GW，占地面积达数十平方公里。对于这样一座发电厂，即使将可获取太阳能低估1%，也会造成巨大的能源和经济损失。

附录 A

表 A　1. 表1所列站点的每日相对日照时数月平均值。

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
BOS	0.675	0.667	0.661	0.631	0.601	0.750	0.727	0.711	0.721	0.695	0.686	0.653
CNR	0.343	0.315	0.408	0.551	0.527	0.642	0.735	0.757	0.673	0.572	0.347	0.403
DAR	0.437	0.492	0.530	0.712	0.790	0.937	0.913	0.944	0.873	0.777	0.640	0.523
FUA	0.374	0.388	0.510	0.525	0.541	0.339	0.460	0.541	0.485	0.522	0.456	0.342
GOB	0.830	0.792	0.863	0.903	0.964	0.952	0.939	0.895	0.850	0.850	0.872	0.850
IZA	0.857	0.840	0.834	0.848	0.940	0.970	0.969	0.925	0.871	0.741	0.750	0.797
LRC	0.500	0.465	0.523	0.625	0.600	0.648	0.688	0.661	0.543	0.613	0.580	0.475
PAL	0.241	0.306	0.386	0.510	0.471	0.502	0.548	0.526	0.535	0.408	0.258	0.290
SXF	0.510	0.583	0.538	0.585	0.578	0.673	0.782	0.707	0.695	0.629	0.612	0.465
TAM	0.898	0.836	0.855	0.821	0.717	0.622	0.668	0.648	0.737	0.835	0.879	0.880
TOR	0.169	0.261	0.373	0.494	0.574	0.514	0.541	0.505	0.390	0.222	0.112	0.143
XIA	0.694	0.612	0.656	0.602	0.590	0.479	0.413	0.486	0.543	0.593	0.639	0.637

表A2. 有云条件下估算的月全球水平辐照度 $_{M}H^{ae}\Delta$ 以及各地点完全由气溶胶导致的太阳能潜力月损失 $_{M}^{cl}$氢 。缺失值采用线性插值法估算（斜体标示）。

		月度												年度
	月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
BOS	$_{M}^{cl}$氢	76.5	100.6	149.2	175.1	205.2	225.9	214.1	184.2	150.2	119	82.4	67.1	1749.6
	$_{M}H^{ae}\Delta$	-0.2	0.2	1.1	2.1	1.4	2.5	2.1	0.7	1.9	0.5	-0.1	0	12.2
CNR	$_{M}^{cl}$氢	46.3	*73.3*	100.3	*140.4*	*180.6*	197.3	214.1	194	134.2	90.1	45.7	43.5	1459.8
	$_{M}H^{ae}\Delta$	0.2	*0.8*	1.3	*2.5*	*3.7*	3.1	2.4	1.8	1.5	-0.4	0	0	16.9

DAR	$M氢^{cl}$	*131.4*	*140.4*	149.3	158.3	160.4	161.3	166.2	*171.1*	*175.9*	NA	NA	NA	NA
	$MH\Delta^{ae}$	*-2.8*	*-2.1*	-1.4	-0.8	0.6	2.1	1.9	*1.7*	*1.4*	NA	NA	NA	NA
FUA	$M氢^{cl}$	*82.3*	*114.7*	136.1	157.6	171.6	*165.3*	158.9	162.8	*135.3*	107.8	78.9	*50*	1521.2
	$MH\Delta^{ae}$	*6.7*	*13.5*	9.7	5.9	5.2	*4.2*	3.2	5.3	*3*	0.7	0.3	*-0.2*	57.4
GOB	$M氢^{cl}$	249.9	208	210	174.2	156	136.1	146.7	168.2	193.8	225.3	247.8	258.9	2374.9
	$MH\Delta^{ae}$	3.1	1.9	0.5	0.4	0.4	0.2	1	3.6	4.8	3.9	2	1.5	23.5
IZA	$M氢^{cl}$	143.8	153.2	207.1	235.7	280.5	280.7	283.5	256.6	213.2	168	131.8	126.3	2480.5
	$MH\Delta^{ae}$	0.8	0.1	0.6	1.2	0.9	2.3	6	4.7	0.8	0.3	0.1	0.2	18
LRC	$M氢^{cl}$	73.5	85.1	132.5	173.2	192.3	*185.8*	179.3	180.2	*146*	111.8	78.7	59.8	1598.2
	$MH\Delta^{ae}$	0	0.3	1	1.2	3.2	*3*	2.8	2.9	*1.9*	0.8	0.1	0.3	17.4
PAL	$M氢^{cl}$	*9.9*	47.6	85.4	135.7	164.3	174.5	183.6	149.4	111.4	72.8	*34.3*	*22.1*	1191
	$MH\Delta^{ae}$	*-0.9*	1.1	3.1	3.5	1.6	0.7	2.4	1.7	0.4	1.3	*2.1*	*0.6*	17.6
SXF	$M氢^{cl}$	*45.8*	81.4	117	158.7	190.1	208.9	219.1	167	139.6	97.3	64.6	*31.8*	1521.2
	$MH\Delta^{ae}$	*-0.7*	-0.1	0.5	1.4	1.4	1.1	2.4	1.3	2.2	0.1	-0.1	*-0.2*	9.2
TAM	$M氢^{cl}$	*111.5*	137.4	163.3	160.6	*151*	141.4	*158.7*	176	147.8	*141*	134.3	*122.9*	1746
	$MH\Delta^{ae}$	*-3.2*	2.9	8.9	7.8	*11.1*	14.4	*14.8*	15.2	8.5	*6.2*	3.8	*0.3*	90.7
TOR	$M氢^{cl}$	*-3.6*	31.8	67.2	117.6	171.7	*225.8*	*279.9*	NA	69.9	NA	NA	*-39*	NA
	$MH\Delta^{ae}$	*-0.6*	-0.2	0.2	1.8	0.7	*-0.5*	*-1.6*	NA	3	NA	NA	*-1.1*	NA
XIA	$M氢^{cl}$	72.6	78.3	130	163.2	182	*170.3*	158.7	147.3	121.5	99.1	64.9	48.8	1436.7
	$MH\Delta^{ae}$	3.4	13.7	10.9	19.1	13.5	*9.3*	5.1	2.4	4.1	11.9	4.4	6.1	103.7

参考文献

[1] C. Lacchini, A.F. Antoniolli, R. Rüther. 不同辐照数据库对评估在巴西不同地点安装的住[illegible] Schl[illegible] 载于 Woodhead 出版社能源系列丛书《聚光太阳能发电技术》（第2版）。编辑：Keith Lovegrove，Wes Stein。Woodhead 出版社，2021：第99-125页。[3] N. L. A. Chan, H. E. Brindley, N. J. Ekins-Daukes. 单个大气参数对 CPV 系统功率、能量产出和能源成本的影响。《光伏[illegible]》2014年；22：1080-1093。[4] C. Gutierrez, S. Somot, P. Nabat, M. Mallet, M.A. Gaertner, O. Perpinan. 气溶胶对欧洲—地中海地区光伏能源生产时空变异性的影响。《太阳能》2018年；174：1142-1152。[5] Fernandez-Solas A, Montes-Romero J, Micheli L, Almonacid F, Fernandez EF. 通过解析方法估算不同技术光伏组件的积尘损失。《能源》2022年；244：123173。[6] You S, Lim YI, Yanjun Dai, Wang C-H. 太阳能光伏积尘的时间建模：七座城市的能源与经济影响。《应用能源》2018年；228：1136-1146。[7] 利用多个数据集研究澳大利亚影响太阳能减产的生埃循环与积尘问题。《应用能源》2022年，310：118626。[8] Wiesinger F, Sutter F, Fer[illegible] 朝[illegible] Ya[illegible] 气污染导致中国太阳能资源减少。《美国国家科学院院刊》2017年；114(45)：11867-11872。[10] Dasari HP, Desamsetti S, Langodan S, Attada R, Kunchala RK, Viswanadhapalli Y, Knio O, Hoteit I. 阿拉伯半岛太阳能资源的高分辨率评估。《应用能源》2019年；248：354-371。[11] R. Blaga, D. Calinoiu, M. Paulescu. 适用于不同气溶胶类型的晴空太阳辐照度模型单参数族。《可再生与可持续能源杂志》2021年；13(2)：023701。[12] Kaldellis JK, Kapsali M. 基于实验测量模拟[illegible]

[13] Conceição R, Silva HG, Mirão J, Gostein M, Fialho L, Narvarte L, Collares-Pereira M. 撒哈拉尘埃向欧洲输送及其对光伏性能的影响：葡萄牙积尘案例研究。《太阳能》2018年；160：94-102。[14] M. Perry, A. Troccoli. 火灾对太阳辐照度和光伏功率的影响。《太阳能》2015年；114：167-173。[15] Darwish ZA, Kazem HA, Sopian K, M.A. Al-Goul MA, Alawadhi H. 尘埃污染物类型对光伏性能的影响。《可再生与可持续能源评论》2015年；41：735-744。[16] Nobre AM, Karthik S, Liu H, Yang D, Martins FR, Pereira EB, Rüther R, Reindl T, Peters IM. 霾对新加坡光伏系统发电量的影响。《可再生能源》2016年；89：389-400。[17] Neher I, Buchmann T, Crewell S, Evers-Dietze B, Pfeilsticker K, Pospichal B, Schirrmeister C, Meilinger S. 大气气溶胶对光伏能源生产的影响：萨赫勒地区情景。《能源 Procedia》2017年；125：170-179。[18] 基准地表辐射网络（BSRN）。https://bsrn.awi.de/ [访问日期：9月2022]。[19] 气溶胶机器人网络（AERONET）。https://aeronet.gsfc.nasa.gov/ [访问日期：9月2022]。[20] C.A. Gueymard, J.A. Ruiz-Arias. 基于1分钟全球辐照度对直接辐照度预测进行广泛的全球验证和气候敏感性分析。《太阳能》2016年；128：1-30。[21] C.N. Long, Y. Shi. 一种用于地表辐射测量的自动化质量评估与控制算法。《开放大气科学杂志》

CN ng T. 对 BSRN 辐射记录进行评估以计算月平均值。《大气测量技术》2011年；

用于估算1分钟散射辐射比例。《太阳能》2019年；180：75-84。[24] R. Blaga, M. Paulescu. 太阳辐照度变异性的量化指标：一种新视角。《太阳能》2018年；174：606-616。[25] Sinyuk A, Holben BN, Eck TF, Giles DM, Slutsker I, Korkin S, Schafer JS, Smirnov A, Sorokin M, Lyapustin A. AERONET 第3版气相版及模算法、相关不确定性及与第2版的比较。《大气测量技术》2020年；13(6)：3375-3411。

[26] Fang,H., Qin, W.,Wang,L., Zhang,M.和Yang, X.,2020年。中国大陆上空的太阳变亮/变[illegible]
H., [illegible] J., Liu, M.,Bian,Y.,Fu, D. 和 Gu,Y. 2021。自2013年实施清洁空气行动以来中国东部和中部的地表变亮：原因及影响。《地球物理研究快报》，48(3)，第e2020GL091105页。[28] GilesDM, HolbenBN, Eck TF,Sinyuk A, Smirnov A, Slutsker I, DickersonRR,ThompsonAM,Schafer JS。代表气溶胶源区的AERONET气溶胶吸收特性与分类分析。《地球物理研究杂志》2012年，11[illegible] Hamill P, GiordanoM, Ward C,GilesD, Holben B。基于

Liu [illegible]
影响。《遥感》，14(9)，第2058页。[31] Seinfeld JH, Pandis SN。大气化学与物理学：从空气污染到气候变化。John Wiley& Sons（2016年）。[32] R Blaga 2022。通过参数模型模拟的太阳散射辐照度的偏差校正。《帝术什瓦拉四部大学年刊·物理学系列》，64，第95-107页。[33] Gueymard CA。REST2：用于晴空辐照度、照度和光合有效辐射的高性能[illegible]
Su [illegible]分析对全球

11[illegible]M, GueymardCA, BaiX,AcordB, WangP。使用主成分分析对全球95个晴空直射和散射辐照度模型进行性能评估。《可再生与可持续能源评论》2021；135:110087。[36] Xia, X., Li, Z, Wang P., Chen, H.和Cribb M. 2007年。基于中国北方侧量结果和辐射传输模型模拟估算气溶胶对地表辐照度的影响。《地球物理研究杂志：大气》，112(D22)。

[37] Li, Z., Xia, X., Cribb, M., Mi, W., Holben, B., Wang, P., Chen, H., Tsay, S.C., Eck, T.F [illegible]
球物理研究杂志：大气》，113(D22)。[38] Guiot, J. 和 Cramer, W., 2016年。气候变化：2015年《巴黎协定》的阈值与地中海分地生态系统。《科学》，354(6311)，第465-468页。[39] Xia, X., 2014年。对不同气溶胶类型对地表全球辐射及其分量的直接辐射效应进行批判性评估。《定量光谱学与辐射传输杂志》，149，第72-80页。[40] Christensen MW, Jones WK, Stier P. 《[illegible]云的[illegible]》[illegible]。《[illegible]
Cu[illegible]晶。《云的热力学、动力学与微物理学》。剑桥大学出版社，英国剑桥，2014，第547-570页。[42] Stefan N. Bagiu, M. Blanco, D. Calinoiu, D. Ben N. Boata, B. Paulescu, E. Ångström方程的理论框架：其在太阳能估算中的优点与局限。《能源转换与管理》2016;112:236-245。[43] Badescu V, Paulescu M. 以罗马尼亚蒂米什瓦拉的测量数据为例说明日照数的统计特性。《天气研究》2011,101(1-2):194-204。[44] Paulescu M, Badescu V. 测量太阳辐射状况稳定性的新方法。《[illegible]》2011,[illegible]:459-470。[45] Gueymard, C.A. 和 Yang, D., [illegible]品[illegible]
Gu[illegible] P. 和 Engerer, N.A., 2019年。采用主成分分析对75种全球晴空辐照度模型进行全球性能评估。《可再生与可持续能源评论》，111，第550-570页。[47] Sun, X., Bright, J.M., Gueymard, C.A., Acord, B., Wang, P. 和 Engerer, N.A., 2019年。采用主成分分析对75种全球晴空辐照度模型进行全球性能评估。《可[illegible]与可持续能源评论》，111，第550-570页。[48] Yang, D., 2021。国家太阳辐射[illegible]生与可持续能源杂志》，13(1)。

[49] Monteiro, A., Basart, S., Kazadzis, S., Votsis, A., Gkikas, A., Vandenbussche, S., To
20[illegible]
p.156861