Version November 24, 2026年使用 LaTeX 样式
openjournal v.09/06/15 排版的预印本

arXiv:2611.31181v1 [astro-ph.EP] 23 Nov 2026

利用詹姆斯·韦布空间望远镜和极大望远镜进行大气特征表征：温带系外行星的概率性、观测设施特定优先级排序

Effy Viridis独立研究者，萨尔
瓦多*Version November 24, 2026*年

摘要

决定优先观测哪些温带系外行星，对詹姆斯·韦布空间望远镜的凌星光谱观测以及计划中的极大望远镜反射光仪器都至关重要，但信噪比指标忽略了宜居性，相似性指数则忽略了可观测性。我们提出一个开放的蒙特卡洛框架（UHI v6.1），分别针对每种观测设施和成分类别构建概率优先列表，而非给出单一排名。对于 NASA 系外行星档案中的 6,112 颗行星，我们进行 10,000 次抽样，将目录不确定性贯穿气候、累积恒星XUV大气留存、每次抽样所得的岩石行星、海洋行星或富气体类别，以及詹姆斯·韦布空间望远镜（凌星）或 ELT/PCS（非凌星）探测模型，进而为每颗行星计算存活概率、条件得分和前 N 名概率。在 5σ，仍有 255 颗岩石行星和 71 颗海洋行星候选体符合条件。对 32 项假设（$N = 512$）进行 Saltelli–Sobol分析显示，XUV 海岸线的位置和宽度主导岩质行星列表，其总阶指数在 5σ 分别为 0.22 和 0.12（在 3σ 分别为 0.25 和 0.14），且前十个主要指数的 95% 自助法半宽均低于 0.05。对于海洋行星，多数输出存在简并，分析未能收敛，因此该分支的结果仅供参考。这些列表的成员资格主要取决于行星能否通过宜居性否决条件：在 5σ，名义詹姆斯·韦布空间望远镜和极大望远镜岩质行星前 10 名目标中，分别有 3 颗和 4 颗至少在一半抽样中进入前 10 名；然而，对于其中每一颗行星，在其存活的抽样中，超过半数仍将其列入前 10 名。代码、逐行星后验汇总、敏感性表和地图均已公开，观测人员可根据自己的仪器假设重新运行这些列表，并查看哪些输入最可能改变某一目标的优先级。

主题标题： 系外行星 (498) — 宜居行星 (695) — 系外行星大气 (487) — 透射光谱 (2133) — 直接成像 (387) — 天文统计学 (1882) — 计算方法 (1965)

1. 引言

用于研究小型温带行星大气层的望远镜观测时间十分有限，未来也将持续紧缺。太空望远镜科学研究所（STScI）的系外行星战略倡议工作组预测，詹姆斯·韦布空间望远镜（JWST）在其整个运行期间可用于观测系外行星的时间约为 30,000 小时，并建议设立一项 500 小时的台长自由支配观测计划，专门研究围绕 M 型矮星运行的岩石行星，明确目标是确定宇宙海岸线（Redfield 等人 2024年）。在地面观测方面，极大望远镜（ELT）的行星相机与光谱仪（PCS）概念旨在以反射光成像附近的岩石行星（Kasper 等人 2021），其科学论证已依赖于围绕最近恒星运行的已知径向速度法发现的行星列表。在这两种情况下，申请者或评审委员会都必须回答同一个实际问题：在所有可观测的行星中，哪些应当优先获得观测时间?

现有工具解决了这一问题的部分方面。Kempton 等人Kempton等人(2018提出的透射与发射光谱指标（TSM 和 ESM）估算凌星行星对詹姆斯·韦布空间望远镜所产生的信号，并已用于按半径和平衡温度将候选天体分类，以便进行提案规划（Hordetal. 2024）。这些指标有意不涉及行星是否温和，或其是否可能留存了大气层。宜居性指数则着眼于相反的问题。地球相似性指数（Schulze-Makuch et al.2011）将整体性质与地球进行比较；系外行星宜居性统计似然指数 SEPHI（Rodr´iguez-Mozos& Moya 2017）则综合多个物理判据的似然函数。其最新扩展版本 SEPHI 2.0（Rodr´iguez-Mozos & Moya 2025）纳入了偏心率、更新后的质量—半径关系、估算的磁场，以及对热（Jeans）和非热（恒星风）大气逃逸的综合处理；它以限制最严的判据作为最终指数，通过蒙特卡洛循环传播输入不确定性，并提供一款旨在帮助确定后续观测优先级的公开工具。这些指数旨在评估宜居潜力，并且对此进行了审慎处理；但它们不会对累积 XUV 通量驱动的大气流失建模，也并非用于判断特定仪器能否探测到某颗行星的大气层。设施专用恒星列表，例如 NASA ExEP 为宜居世界天文台编制的 164 颗恒星列表（Mamajek & Stapelfeldt 2024），展示了明确的观测目的如何让目标筛选更加精准。与本研究最接近的是，Ih 等人(2026将詹姆斯·韦布空间望远镜岩质行星目标的选择视为组合优化问题，即“背包”问题，并展示了如何通过精心挑选样本来

以统计方式检验宇宙海岸线假说。他们的框架针对总体层面问题优化巡天设计，而本文所列清单则对单个行星进行排名，并揭示每个排名背后的假设，因此这两种方法具有互补性。

本文介绍了一个以 UHI（统一宜居性指数）之名发布的开放框架的版本 6.1，

该框架将这些思路整合为大气后续观测的概率优先级列表。该代码的早期简化版本 v5.2 已与一篇简短的研究说明一同存档于 Zenodo（v5.2；Viridis 2026a）。版本 6.1 是一种不同的模型：它以累积极紫外辐射保留判据取代总辐射海岸线，在每次蒙特卡洛抽样中都指定一个成分类别；最重要的是，就输出结果的用途而言，它分别针对每个观测设施和每个成分类别报告列表。我们绝不会将按詹姆斯·韦布空间望远镜评分和按极大望远镜评分的行星合并到同一列表中，因为这两种观测设施要回答的问题不同，其探测概率也不在同一尺度上。评分也不应被解读为生命存在的概率，而且 v5.2 与 v6.1 的数值不应逐行比较。W

e state t h e 预期用途，因为这些用途决定了应如何解读输出结果 :

UC1 詹姆斯·韦布空间望远镜温和气候岩质行星候选名单。 提案人和评审小组在制定岩质行星发射光谱或透射光谱观测计划时，可使用詹姆斯·韦布空间望远镜岩质行星列表权衡信号强度与目标属于温和气候行星且保有大气层的可能性；此类观测计划正是 Redfield 等人 (2024年) 所建议的（第 5.2 节）。

UC2 极大望远镜非凌星行星预备名单。 筹备使用 ELT/PCS 进行反射光成像的团队，可利用极大望远镜岩质行星列表，决定哪些已知的径向速度法发现的行星值得开展前期工作，例如轨道精化和恒星表征（第5.3 节）。

UC3 岩石行星与海洋行星的筛选。 对于中等大小的温和气候行星，各次抽样得到的类别概率显示目标应归入岩质行星大气观测计划还是海洋行星观测计划，以及这一判断在多大程度上取决于所采用的海洋氢气行星气候判据。此分支在 v6.1 中仅作次要且指示性用途（第 5.4 节）。

UC4 哪项假设最为重要。 全局 Saltelli–Sobol分析确定了最能改变列表的模型输入参数，从而确定了最可能改变目标优先级的测量结果或理论约束。在本文中，UC4 仅在全局层面进行研究；针对每个目标的信息价值分析留待未来工作完成（第 6节）。

第 2 节介绍模型，第3 节介绍输入目录，第 4 节介绍我们开展的检查，第 5 节介绍 UC1–UC3 的列表，第 6 节介绍敏感性分析和 UC4，第7节介绍局限性。第8节说明如何重新运行这些列表，第 9 节进行总结。

2. FRAMEWORK

2.1. 分数、否决条件和排名统计

对于每颗行星，我们生成 $n = 10{,}000$ 个蒙特卡洛实现（抽样）。在每个实现中，分数是 $[0, 1]$ 中七个子评分的加权几何平均数：物理（大小和质量）、气候、大气保留、恒星活动、地质状态、磁保护和可观测性，

$$U = \prod_{i=1}^{7} S_i^{\,w_i}, \qquad (w_1, \ldots, w_7) \sim \mathrm{Dirichlet}(2, 2, 2, 2, 1, 1, 2), \tag{1}$$

每次实现都会重新抽取权重，因此子评分的相对重要性本身也存在不确定性。狄利克雷分布是概率单纯形上的自然先验（$w_i \geq 0$，$\sum_i w_i = 1$）。其浓度向量为五个约束较好的项（物理、气候、大气保留、恒星活动和可观测性）赋予 $\alpha_i = 2$（期望权重 $1/6$），并为地质状态和磁保护赋予 $\alpha_i = 1$（期望权重 $1/12$）；这两项缺乏系外行星的直接观测约束，因而依赖较宽泛的先验。总浓度适中（$\sum_i \alpha_i = 12$），使权重先验保持宽泛，而非高度集中。这是一种务实的先验选择，并非由第一性原理推导而来；对狄利克雷浓度参数进行敏感性检验将留待未来工作。当子分数小于或等于 10^{-12} 时，该项即作为否决条件，并将该次实现的 $U = 0$ 设为零。与 SEPHI 2.0 的最严格标准规则不同（Rodr´iguez-Mozos & Moya 2025），这种做法保留了可补偿的均值：致命缺陷会被否决条件剔除，从而降低 P_{alive}；较弱但非零的子分数则会通过因子 U 降低 $S_i^{w_i}$，但不会单独决定结果，因此某一项的部分不足可以由其他子评分中的优势弥补。由于每次实现都会重新抽取权重，列表统计量会对子评分的相对重要性取平均，而不是依赖一组固定权重。由于存在这些否决条件，行星的 U 分布由零点处的点质量和连续部分混合而成，单一汇总统计量会掩盖这种结构。因此，我们为每颗行星和每个列表报告三个量：存活概率 P_{alive}，即 $U > 0$的实现所占比例；条件得分，即存活实现中 U 的中位数；以及列表得分

$$\mathrm{UHI}_{\mathrm{rank}} = P_{\mathrm{alive}} \times \mathrm{median}(U \mid U > 0), \tag{2}$$

这是名义列表所采用的排序方式。此外，对于每个列表，我们都会记录每次实现中哪些行星位列前 N （第5.1节）。

2.2. 气候与向同步自转的过渡

对于未潮汐锁定的行星，气候项依据一维能量平衡计算（North 等（1981）），其中反照率取决于恒星有效温度（Shields 等（2013）），并在吸收通量达到 282 W m^{-2} 时采用失控温室否决条件；该热辐射上限由 Goldblatt 等 (2013) 计算得出。

5.2 版改用了一个分 同步自转行星在某一固定恒星温度下的参数化界限。在 v6.1 中，该界限被替 换为同步自转概率的平滑函数，

$$p_{\rm sync} = \sigma\left(\frac{M_{\rm lock} - M_\star}{0.05\,M_\odot}\right)\sigma\left(\frac{a_{\rm lock} - a}{0.03\,{\rm au}}\right), \tag{3}$$

其中 σ 是逻辑斯蒂函数， $M_{\rm lock} \sim U(0.55, 0.65)\ M_\odot$ 和 $a_{\rm lock} \sim U(0.15, 0.25)$ 天文单位按每次实现抽取。这是一项假设：它是对早期规则进行平滑处理后的形式，而非潮汐锁定时间尺度。在同步自转的实现中，依据 Yang 等人（2013）和 Kopparapu 等人（2016）的大气环流结果，内边界会向外扩展；其效能 $e(P)$ 随轨道周期增加而线性上升：轨道周期低于 $P_{\rm lo} \sim U(4, 6)$ 天时为零，高于$P_{\rm hi} \sim U(15, 25)$ 天时为一。这一设定的依据是 Haqq-Misra 等人（2018）所确认的环流状态，以及 Kopparapu 等人（2016）讨论的慢自转转变。线性形式同样是我们的假设。在这些实现中，不采用一维模型的失控筛除条件；对于 M 型矮星行星，外边界允许 CO_2 分压达到抽样得到的最大值，这一设定依据 Turbet 等人（2018）的气候模拟。

2.3. 基于累积 *XUV* 通量的大气保留

保留项是 v6.1 与 v5.2 差异最大的部分。它没有采用总辐射海岸线（Zahnle 和 Catling 2017），而是使用寿命期积分 X 射线与极紫外通量。对于全对流恒星，我们遵循 Pass 等人（2025）的方法：饱和活动水平取自 $\log\ R_{\rm sat} \sim \mathcal{N}(-3.05, 0.06)$，饱和时间为 $t_{\rm sat}$ =$(5.9-15.4\,M_\star/M_\odot)$ 十亿年，再乘以宽度为 0.3 的对数正态因子（下限为 0.01 十亿年）；前主序修正根据其表1进行插值；耀斑增强 $f_{\rm flare} \sim U(1, 1.5)$ 则涵盖其采用的 1.25 值。对于高于 $0.35\,M_\odot$ 的恒星，我们使用 Mors 自转演化模型的累积 X 射线输出（Johnstone 等人 2021），该模型基于 Spada 等人（2013）的恒星演化轨迹运行；初始自转百分位数在 5 到 95 之间均匀抽取，且轨迹会按观测到的光度重新缩放。两种方案以权重 $\sigma[(M_\star - 0.35\,M_\odot)/0.03\,M_\odot]$ 进行对数混合。辐照量 I 按照 Pass 等人（2025）的方法，以 $I_E = 2.0 \times 10^{18}$ erg cm^{-2} 归一化，其大气保留指标，

$$\mathrm{ARM} = 4\log v_{\rm esc} - \log\left(I/I_E\right) - 3.16, \tag{4}$$

其中 $v_{\rm esc}$ 以 km s^{-1}为单位， 衡量行星与 XUV 海岸线之间的距离。大气保留子评分 i s

$$S_{\rm atm} = \Phi\left[\frac{(\mathrm{ARM} + c)\ln 10}{s}\right], \tag{5}$$

其中 Φ 为标准正态累积分布函数， c为海岸线偏移量，单位为 dex，而 s为其宽度，单位为自然对数单位。名义值 $c = 0$ 和 $s = 1$ 均为假设；在敏感性分析中，我们分别改变这两个值，结果发现它们是对岩质行星列表影响最大的两个输入参数（第6节）。XUV 环境仅在评分中纳入一次：恒星活动子评分保留当前的应力项和耀斑项，而地质项不再包含单独的侵蚀标记。当前应力项将入射辐照度乘以相对 XUV 光度；该光度在饱和年龄 $t_{\rm sat}$ 之前保持恒定，之后按 $(t/t_{\rm sat})^{-1.23}$衰减，其中Ribas 等人(2005)给出的太阳类似星拟合斜率，以太阳在 4.6 十亿年时的值为基准进行归一化。我们取 $t_{\rm sat} = 0.1$ 十亿年作为 $M_\star \geq 0.6\,M_\odot$的值，与Lopez 等人(2012)一致； $t_{\rm sat} = 1$ 对于质量较小的恒星，采用十亿年的值；将该关系应用于所有光谱类型，以及将应力水平设为当前地球值十倍时的 50%（xuv mid），均为我们的假设。

2.4. 组成类别与分支

每次实现都会将行星归入三种类别之一：R（无 H_2 包层；岩石行星或富水行星）、H（海洋行星；富水内部之上覆盖着富 H_2的大气层，Madhusudhan 等人 2021）或 G（富气亚海王星）。类别的判定路径取决于可用证据。

- 密度判定路径（实测半径和 $M/\sigma_M > 3$）。采用Zeng 等人（2019）的质量–半径曲线：当行星半径不超过该行星质量和平衡温度所对应的50% 含水曲线时，与 R 类相容；当半径高于纯硅酸盐曲线且低于海洋行星最大半径时 $R_{H,\ \max}(M)$时，与 H 类相容；当半径高于硅酸盐曲线时，与 G 类相容。$R_{H,\ \max}$ 在 $\log\ M$空间中，根据3 $R_\oplus$ 在 $5\,M_\oplus$ 处为 2.6 $R_\oplus$ 在 $10\,M_\oplus$ 处为 2.的数值进行线性插值，这些数值由Madhusudhan 等人（2021）给出。随后，按照与各相容类别的先验权重成比例的概率，从中抽取一个类别；如果没有相容类别，则将该行星归为 R 类。选择50% 含水线和硅酸盐曲线作为边界，是我们的假设。
- 半径判定路径 （半径已知但没有可用质量数据）。氢$_2$ 包层的概率为 $\sigma[\,(R_p - R_v)\,/w]$，半径谷位置为 $R_v = 1.8197\ (M_\star/M_\odot)^{\ 0.14}\,R_\oplus$，取自Venturini 等人 （2024年）以及 $w \sim U$（0。08，0。20）$R_\oplus$。未测得的质量根据 Otegi 等人 Otegi 等人 （2020）提出的类别相关关系抽取，系数则在其不确定性范围内进行采样。
- 质量路径 （质量或最小质量，不含半径）。 $P\ (R)\ = \sigma[\,(\ln\ M_v - \ln\ M)\ /0.3]$ 采用 $M_v \sim U$（3，6）$M_\oplus$作为完全假定的过渡；随后根据Otegi 等人（2020）为所抽取的类别确定半径。

名义类别先验为 $\pi_R:\ \pi_H:\ \pi_G = 1:\ 1:\ 1$，并一致地应用于全部三条路径。对于径向速度法发现的行星，倾角按各向同性分布抽取；物理下限 $R_\star \geq 0.5\,R_{\rm MS}(M_\star)$，结合Demircan & Kahraman （1991）的主序关系，可为目录半径与主序相符的宿主剔除不符合物理规律的恒星半径抽取值。

随后沿两个分支评估得分。在岩石行星分支中，物理项没有半径上限，因为类别分配已区分这一点；保留项则采用上述 XUV 判据。在海洋行星分支中，物理项是质量方向上的梯形，其拐角位于 1、2、10 和 $15\,M_\oplus$ （一项假设）；气候项要求入射辐照度低于 $f_{\rm cl} \sim U$（1、2）倍的失控极限，该极限由Innes等人（2023）针对所采样的 H_2 压力（$\log P_{\rm H_2} \sim U$（0、2）bar）和恒星类型制成表格，并根据邦德反照率进行校正；保留项则将能量限制逃逸（Owen & Wu 2017）的包层损失时间与 1 Gyr 进行比较。当前的极紫外辐射根据Sanz-Forcada等人（2011）的关系由 X射线光度估算，或取自 Mors模型。Innes等人（2023）提出的海洋氢气行星气候判据是主要情形；Madhusudhan 等人（2021）提出的较宽松判据则作为变体保留（第5.4节）。只有在某次实现中被归为 R 类的行星，才会计入岩质行星列表；只有在某次实现中被归为 H 类的行星，才会计入海洋行星列表。

2.5. 设施特定可观测性

可观测性项表示适合观测该行星的单一观测设施的探测概率。对于凌星行星，使用詹姆斯·韦布空间望远镜进行评分：透射信号根据 TSM 缩放，发射信号根据 ESM 缩放（Kempton等人，2018）；每个预测信噪比都带有对数正态模型不确定性（自然对数下宽度为 0.5）；透射信号乘以一个从 0.5 到 1 之间抽取的云因子；此外，采用 Greene等人（2016）为近红外成像仪和无缝隙光谱仪所取的每个光谱通道 20 ppm 系统噪声底，并假设其在十个通道间相互独立，因此将 $20/\sqrt{10}$ppm 与光子噪声按平方和开根号合并。对于阈值 k，探测概率为 $1-[1-\Phi(\mathrm{SNR}_{\rm tr}-k)][1-\Phi(\mathrm{SNR}_{\rm em}-k)]$。对于非凌星行星，使用 ELT/PCS 在 0.75 μm 波段的光子噪声反射光模型进行评分：对于几何反照率为 $A_g = \frac{2}{3}A_B$ 的朗伯球，正交位时的对比度为 $A_g(R_p/a)^2/\pi$ ；若某次实现中行星的最大角距落在从 2 到 $4\,\lambda/D$ 抽取的内工作角范围内，则无法探测到该行星；其探测概率为 $\Phi(\mathrm{SNR}-k)$。我们将 $k=5$ 作为主要阈值，并将 $k=3$ 作为代表更深度观测计划的备选阈值。这些可观测性模型刻意保持简单，不能替代曝光时间计算。

2.6. 随机数与可复现性

主随机序列（种子 42）的消耗顺序与 v5.2 相同；新的 v6.1 抽样则来自一个以行星名称校验和为种子的独立生成器，因此每颗行星在所有变体中看到的随机数都相同。在相同的软件环境中重新运行，结果在位级别完全一致。

3. 数据

输入数据是行星系统综合参数表（`pscomppars`）的快照，该表来自 NASA系外行星档案（Christiansen 等，2025），下载于 2026年11月18日。在其 6,470 行中，有 6,112 行包含评分所需的参数。非对称不确定性按分裂正态分布进行抽样。该快照随发布版本一同提供，并附有其 MD5校验和（`f2f70b24e67a9054940267e8081c81e8`），因此可以精确地重新生成这些列表，也可以基于更新的快照重新计算。

4. 验证

在生成任何列表之前，我们进行了六项检查。

1. **向后兼容性**。 关闭所有 v6 模块后，代码对全部 6,112 颗行星复现了已发布的 v5.2 结果，最大差异为 9.2×10^{-15}。在相同的软件环境中重新运行 v5.2 代码，其结果相对于存档输出也呈现相同差异，因此残余差异源于数值环境，而非新代码。

2. **合成太阳系行星**。 将地球、金星和火星的复制体放置在 10 秒差距处后，其表现符合预期，在5σ：地球孪生行星在 99%（非凌日）和 100%（凌日）的实现中得以保留，其评分分布位于第 99.87 百分位数；而金星和火星孪生行星在每次实现中都被否决。3.**独立重新计算**。 针对 GJ 273 b、Proxima Cen b 和 TRAPPIST-1 d，使用独立脚本重新计算了入射辐照度、累积 XUV 通量及其第 16–84 百分位数、保留指标、 $p_{\rm sync}$ 以及类别概率。连续变量的结果相差不超过 1.4%，类别概率的绝对差异不超过 0.007，与蒙特卡洛噪声相符。4. **保留指标**。 重新计算 Pass 等人 (2025) 修正后的 XUV 通量，得到 $0.108/a^2$ 和 $0.379/a^2$（其中 a 的单位为天文单位），对应 0.10 和 $0.30\,M_\odot$；与其表列的 $0.11/a^2$ 和 $0.38/a^2$相比，针对 14 颗行星计算的保留指标与依据其方程进行的手动计算结果相差不超过 0.01。5. **敏感性分析代码**。 使用 Ishigami 函数（Ishigami 与 Homma，1990）对 Sobol估计量和报告进行了检验，该函数的指数具有解析解。

6. **自动化测试**。发布的代码通过了完整的测试套件，其中包括针对 v6.1 的 21 项单元测试和回归检查，以及在整个目录上进行的 v5.2 兼容性运行。

TABLE 1JWST (TRANSITING) ROCKY LIST AT 5σ: THE TEN PLANETS WITH THE HIGHEST LIST SCORE. $P_{\rm alive}$ IS THE SURVIVAL PROBABILITY; P（前 10 名）IS COMPUTED OVER ALL REALISATIONS AND P（前 10 | 个宜居） OVER SURVIVING REALISATIONS, WITHIN THE JWST LIST ONLY.

Rank	行星	统一宜居性指数$_{\rm rank}$	$P_{\rm alive}$	P（前 10 名）	P（前 10 | 个宜居）
1	TRAPPIST-1 e	0.082	0.817	0.621	0.760
2	Kepler-442 b	0.067	0.782	0.514	0.658
3	TRAPPIST-1 f	0.061	0.382	0.333	0.870
4	TRAPPIST-1 d	0.054	0.966	0.559	0.579
5	TOI-1452 b	0.045	0.566	0.383	0.677
6	Gliese 12 b	0.043	0.824	0.464	0.562
7	Kepler-452 b	0.040	0.480	0.308	0.641
8	Kepler-1544 b	0.040	0.452	0.294	0.649
9	Kepler-1649 c	0.037	0.724	0.387	0.535
10	TRAPPIST-1 g	0.036	0.192	0.171	0.889

5. 按用途分类的结果

在两个阈值下，岩石分支中有 255 颗行星至少在一次实现中通过筛选（167 颗凌日行星，按詹姆斯·韦布空间望远镜评分；88 颗非凌日行星，按 ELT/PCS 评分），海洋行星分支中则有 71 颗（分别为 26 颗和 45 颗）。要求 $P_{\rm alive} \geq 0.01$ 后，符合条件的有 130 颗岩石行星和 22 颗海洋行星。在 5σ 和 3σ 下，符合条件的行星数量相同；阈值会改变得分以及各列表中的排序。两个观测设施的绝对列表得分存在系统性差异（在 5σ 下，ELT 的最高得分是詹姆斯·韦布空间望远镜最高得分的三倍多），因此还有一个理由是：只应在各自的观测设施内比较列表。

5.1. 前 N 名成员资格

由于名义排序掩盖了行星实际进入其列表前列的频率，我们在 10,000 次实现中逐次记录了各观测设施列表中哪些行星位列前 5 名和前 10 名，并将被否决的实现计为未入选。 P(前 N 名)表示该行星进入前 N 名的实现所占比例，而 P(前 N | 名存活) $=P$(前 N 名)$/P_{\rm alive}$表示在该行星存续的实现中，同一比例的值。这些逐次抽样得分与已发布的列表统计数据的吻合度达到 10^{-16}，因此它们来自已发布的实现，而非一次新的运行。

5.2. *UC1*：詹姆斯·韦布空间望远镜岩质行星列表

表1 列出了列表得分最高的十颗凌星行星，得分见 5σ。排名靠前的依次是 TRAPPIST-1 e、Kepler-442 b、TRAPPIST-1 f、TRAPPIST-1 d 和 TOI-1452 b。十颗行星中，有三颗（TRAPPIST-1 e、Kepler-442 b 和 TRAPPIST-1 d）在至少一半的所有实现中进入前 10 名，其中 TRAPPIST-1 e 的比例最高，为 0.62。在它们得以保留的实现中，这十颗行星进入前 10 名的比例都超过一半。因此，能否进入榜单主要取决于能否保留：例如，Kepler-1649 c 在 72% 的实现中得以保留，而在这些实现中，它有 54% 的时间进入前 10 名。前 5 名的稳定性要低得多：没有任何行星在一半的所有实现中进入前 5 名，排名第三至第十的行星也经常互换位置。在 3σ中，偏好信号在 5σ处于临界状态的行星。此时，排名前五的行星变为 Kepler-442 b、TRAPPIST-1 e、Kepler-452 b、Kepler-1544 b 和 Gliese 12 b；有一颗行星（Kepler-442 b，0.63）在超过一半的所有实现中进入前 10 名。

对于詹姆斯·韦布空间望远镜的提案撰写者而言，排名旁边各列中的信息最有用。 $P_{\rm alive}$ 较高但条件得分一般的行星，是稳妥但不出众的选择；条件得分较高而 $P_{\rm alive}$较低的行星，例如 TRAPPIST-1 g，则是在海岸线边缘的一场赌博。由于保留项基于的正是海岸线调查旨在检验的同一 XUV 通量，因此调查结果（是否探测到大气层）可与保留概率进行比较，从而直接检验模型。

5.3. *UC2*：极大望远镜岩质行星列表

对于非凌星行星，透射光谱度量和发射光谱度量均未定义，相似性指数也未考虑角距离或对比度。表2 列出了 5σ处的主要 ELT/PCS 目标：GJ 273 b、Wolf 1061 c、GJ 1061 d、Proxima Cen b 和 GJ 3378 b 位居榜首，且排名前五的行星在 3σ时也相同。四颗行星（GJ 273 b、GJ 1061 d、Proxima Cen b 和 Ross 128 b）在至少一半的所有实现中进入前十，其中 GJ 273 b 的比例最高，为 0.55。若以存活为条件，极大望远镜列表相当稳定：十颗行星中有九颗在存活的实现中，至少 80% 位列前十。限制因素在于它们本身能否存活，五颗领先行星的 $P_{\rm alive}$ 介于 0.48 至 0.61 之间，这反映出这些最小质量行星的保留情况和类别仍存在多大的不确定性。这些行星均无实测半径，因此全部通过质量路径进行分类；相比改进极大望远镜模型，确定半径约束或真实质量会更直接地改变它们的排名。

5.4. *UC3*：岩石行星与海洋行星的筛选（示意）

类别概率表示，对于每颗中等大小的行星，在所有实现中，它被判定为岩石行星、海洋行星或富气体行星的比例，并显示得出该判定所采用的证据路径。海洋氢大气分支本身的结果则较为脆弱。按照 Innes等人(2023) 的标准，有 71 颗行星至少在一次实现中通过筛选，但没有任何一颗在超过约 15% 的实现中通过（比例最高的是詹姆斯·韦布空间望远镜名单中的 Kepler-1630 b， $P_{\rm alive} = 0.152$）；而且，在任一观测设施名单中，每次实现通过筛选的海洋行星都不超过五颗，因此每颗通过筛选的行星自然都位列前 5 和前 10 名， P(排名 N)

TABLE 2ELT/PCS (NON-TRANSITING) ROCKY LIST AT 5σ, AS IN TABLE 1.

Rank	行星	统一宜居性指数$_{rank}$	$P_{\rm alive}$	P（前10名）	P（前 10 | 名宜居）
1	GJ 273 b	0.287	0.569	0.548	0.964
2	Wolf 1061 c	0.249	0.482	0.480	0.996
3	GJ 1061 d	0.222	0.605	0.541	0.894
4	Proxima Cen b	0.202	0.549	0.543	0.989
5	GJ 3378 b	0.164	0.544	0.428	0.786
6	Ross 128 b	0.163	0.611	0.534	0.874
7	GJ 251 b	0.146	0.382	0.339	0.889
8	GJ 682 b	0.137	0.288	0.280	0.973
9	GJ 433 d	0.105	0.191	0.188	0.984
10	Gl 725 B c	0.099	0.190	0.189	0.993

两者均为 $P_{\rm alive}$ 时， $N = 5$ 和 $N = 10$的排名都不包含超出是否通过筛选之外的信息。按照更宽松的 Madhusudhan 等人 (2021) 标准，有 1,021 颗行星通过筛选，而两个海洋行星前 10 名名单在 5σ 时没有共同行星，在 3σ时则有一颗。位列 5σ 前列的海洋行星候选者包括：詹姆斯·韦布空间望远镜对应的 Kepler-1630 b 和 Kepler-441 b，以及 ELT/PCS 对应的 Kapteyn c 和 Wolf 1061 d。我们列出这些名单以供参考，并指出它们仅供指示：名单成员由气候设定而非数据决定，第 6 节表明，其敏感性分析无法收敛。

5.5. 对类别先验和质量—半径选项的稳健性

我们逐项改变一个因素，重新运行主要配置：采用偏向岩石行星（2:1:1）或挥发性行星（0.5:1:1）的类别先验；采用 Chen & Kipping (2017)的转变质量、根据快照拟合的两个经验转变质量、将最小质量视为真实值或使用Howard 等人 (2010)的质量函数重新加权；以Chen &Kipping (2017)的质量—半径关系取代Otegi 等人 (2020)的关系；以及在密度判定路径上采用两个备选的岩质边界。在5σ中，主要运行结果排名最高的十颗岩石行星里，有 8 至 10 颗在十种变体中的八种情况下仍位居前十；而在偏向挥发性行星的先验和采用Chen & Kipping (2017)转变质量的情况下，分别只有 4 颗和 5 颗留在前十。所有变体中，存续行星的排名相关性均不低于 0.93。因此，岩石行星列表对大多数质量—半径选项都具有稳健性，但对于没有实测半径的行星，其结果会受到类别先验影响；这是当前目录所能支持的真实局限。

6. 全局敏感性分析（UC4）

6.1. 设计

我们采用 Saltelli 方案（Saltelli 2002；Saltelli et al. 2010），并使用 SALib（Herman & Usher 2017）中的实现，对 $D = 32$ 个模型假设（附录 A 中的表 4）进行抽样；基础样本量为 $N = 512$，且不包含二阶项，因此每个探测阈值对应 $N\,(D + 2) = 17{,}408$ 次模型评估。对于设定某个量中心值的参数，如果该量仍在每次实现中抽取，则每次评估都会在围绕抽样中心、半宽固定的窗口内抽取该量（表 4）。这些窗口不同于第 2 节主运行所用的先验：半径谷宽度的窗口更窄（$\pm 0.03\,R_\oplus$，而非 $U(0.08, 0.20)\ R_\oplus$）、log $P_{\rm H_2}$（± 0.3，而非 $U(0, 2)$）、初始自转百分位数（± 20，截断至 5–95，而非 $U(5, 95)$）以及 $f_{\rm cl}$（± 0.25，而非 $U(1, 2)$）的窗口更窄；而 $f_{\rm flare}$ 在每次评估中保持固定，不再从 $U(1, 1.5)$ 中抽取。每次评估均运行生产代码，对固定敏感性样本中的 1,214 颗行星分别进行 100 次实现，并使用共同随机数。对于每个分支，我们计算 17 项输出：前 10 名与基准运行结果的重合度、与基准结果的斯皮尔曼相关系数、存续行星数量，以及 14 颗参考行星的列表得分。对于恒定、近乎恒定（与众数不同的评估少于 10%）或数值不稳定（$S_T > 1.5$）的输出，不纳入分析。我们使用 Jansen 估计量（Jansen 1999）估算总阶指数（Sobol' 2001），并对其在其余输出上的结果取平均；均值的 95 % 区间通过 500 个自助重抽样样本计算。我们的闭合准则以半宽表示：某分支的十个领先参数各自的 95% 区间半宽均低于 0.05 时，即认为该分支已收敛。由于采用更严格的解读 —— 要求区间全宽低于 0.05—— 同样有其合理性，因此我们也报告满足这一条件的领先参数数量。

6.2. 结果

图1 和表3 总结了结果。岩石分支的17个输出中有15个可用，且全部10个主要指数在两个阈值下均符合半宽判据；按照全宽解读，每个阈值下有9个指标通过，例外的是海岸线位置，其区间在 5σ 下宽0.055，在 3σ下宽0.059。XUV海岸线的位置影响最大，在 $S_T = 0.22$ 下为 5σ，在 3σ下为0.25；其次是其宽度（0.12和0.14），以及质量路径的转变质量（0.11和0.13）。组合分支也符合半宽判据（16个可用输出；两个阈值下均为10项中10项通过），而全宽解读在 5σ 下有10项中7项通过，在 3σ下有10项中8项通过；影响最大的仍是海岸线位置（在$S_T = 0.20$ 下为 5σ）。海洋氢大气分支不符合该判据：其10个主要指数中，两个阈值下均只有6项满足半宽要求；满足全宽要求的分别为2项（5σ）和3项（3σ）。其17个输出中有11个退化，这是因为海洋星得分在几乎所有评估中都为零，因此估算依据是剩余的6个输出。排名靠前的参数依次为H_2 包层压力（$S_T = 0.71$，95%区间为0.60–0.87）、Innes失控极限的容差（0.38）和海洋星邦德反

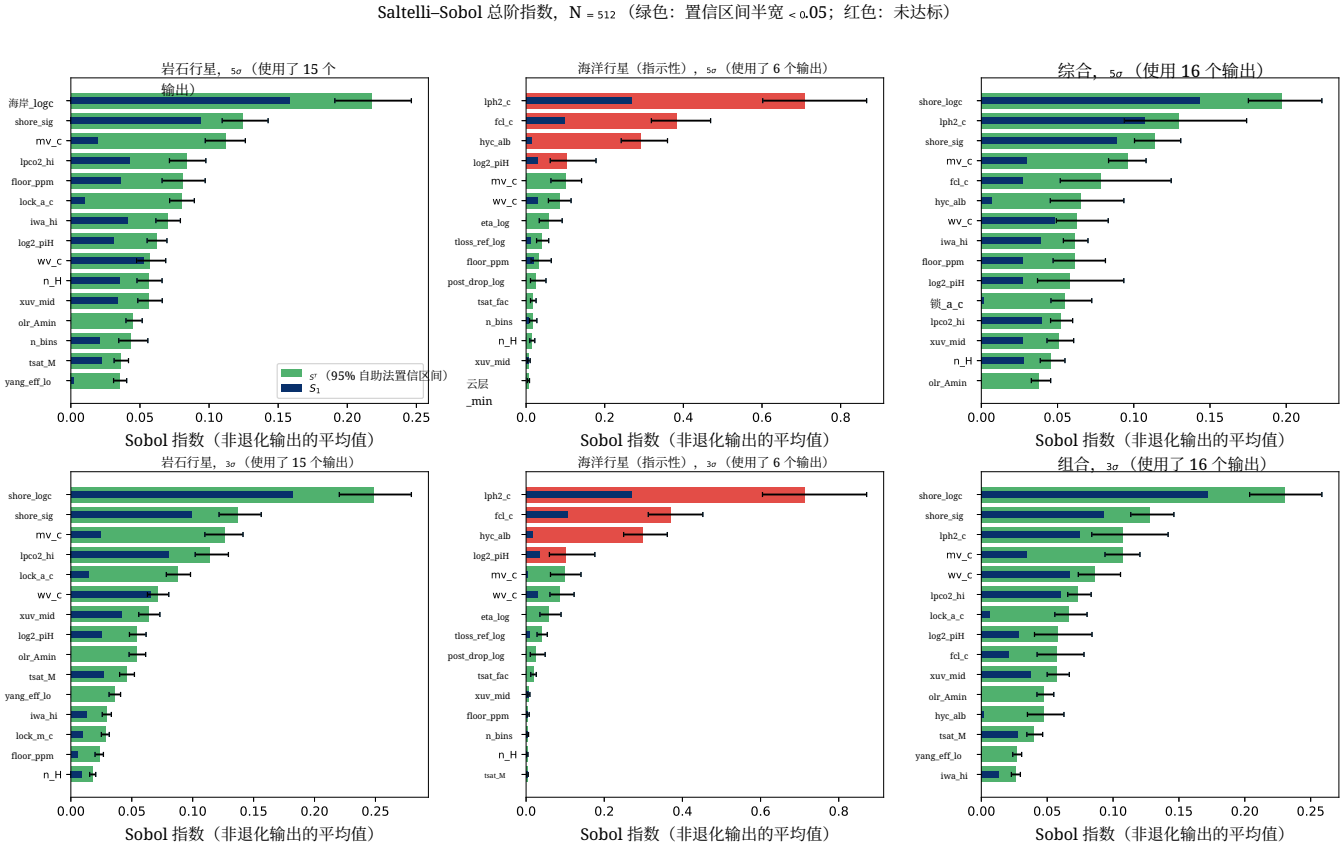


FIG. 1.— 总阶 Sobol 指数 S_T（柱形，带有 95% 自助法区间）和一阶指数 S_1（深色内柱），针对影响最大的 15 项假设，并分别对各分支的非退化输出取平均，结果见 5σ（上图）和 3σ（下图）。绿色柱形符合采用的闭合准则（区间半宽小于 0.05）；红色柱形则不符合。更严格的全宽解读（区间宽度小于 0.05）下，在每个阈值处，岩石型参数中排名前 10 的有 9 个达标；组合分支中有 7 个和 8 个达标；海洋行星分支中有 2 个和 3 个达标，分别对应 5σ 和 3σ 。岩石分支的完整宽度列于表3。参数名称定义见表4。

TABLE 3
TEN LEADING TOTAL-ORDER INDICES FOR THE ROCKY BRANCH , WITH 95% BOOTSTRAP INTERVALS AND THE FULL WIDTH OF EACH INTERVAL.

	5σ			3σ	
参数	S_T [95% 置信区间]	宽度	参数	S_T [95% 置信区间]	宽度
shore_logc	0.218 [0.191, 0.246]	0.055	shore_logc	0.249 [0.220, 0.280]	0.059
显著岸线	0.124 [0.110, 0.143]	0.033	显著岸线	0.137 [0.122, 0.156]	0.035
mv_c	0.112 [0.097, 0.126]	0.029	mv_c	0.126 [0.110, 0.141]	0.031
高二氧化碳分压	0.084 [0.071, 0.098]	0.026	高二氧化碳分压	0.114 [0.102, 0.129]	0.027
最低百万分率	0.081 [0.066, 0.097]	0.031	lock_a_c	0.088 [0.078, 0.098]	0.020
lock_a_c	0.080 [0.072, 0.089]	0.018	wv_c	0.071 [0.063, 0.080]	0.018
iwa_hi	0.070 [0.062, 0.079]	0.018	xuv_中值	0.064 [0.056, 0.073]	0.017
log2_piH	0.062 [0.055, 0.070]	0.014	log2_piH	0.054 [0.048, 0.062]	0.014
wv_c	0.057 [0.048, 0.069]	0.021	olr_Amin	0.054 [0.048, 0.061]	0.014
n_H	0.057 [0.048, 0.066]	0.018	tsat_M	0.046 [0.040, 0.052]	0.012

照率（0.29）。增大基础样本无法挽回这11个退化输出，因为它们的退化源于模型而非抽样噪声，不过可能会缩窄保留的6个输出的区间。在该分支通过判据之前，我们仅将其排名作为参考。

6.3. 敏感性图对后续观测的启示

在全局层面，UC4 的答案很明确：最能改变岩质行星优先级列表的因素并非仪器因素，而是物理因素，即 XUV 海岸线的位置及其陡峭程度。因此，对岩质 M 矮星行星的大气保留情况进行约束的观测，将直接影响这些列表；这正是 Redfield 等人 (2024年) 推荐的海岸线调查的目标，而 Ih 等人 (2026年) 对其进行了建模。第三项输入是仅知最小质量时所采用的转变质量，这指向了另一个影响因素：主导 ELT 列表的附近非凌星行星的半径或真实质量。仪器方面的假设（JWST 噪声底限、透射光谱探测到的标高数、ELT 内工作角）也很重要，但影响程度都较低。这项分析着眼于全局：它揭示了哪些假设会整体改变列表，而非某项针对特定目标的具体测量会产生多大影响

行星会改变其排名。 要回答每个目标的具体问题，需要对该目标单独进行信息价值计算
现有实现，并且被推 迟至后续论文。

7. 局限性

主要局限来自敏感性分析和验证。

- XUV 海岸线的位置和宽度主导着岩质行星列表，而它们本身也存在不确定性；随着海岸线观测不断累积，这些列表应及时更新。
- 对于没有实测半径的行星，类别先验很重要（第 5.5节）。
- 海洋氢大气分支取决于所采用的气候判据，并且在敏感性分析中未能收敛；其结果仅具有指示性。
- 同步自转概率是一条平滑化规则，而不是潮汐锁定时间尺度。与 Gladman 等人 （1996）所给出的锁定时间进行比较，并采用 Barnes （2017）所使用的形式，表明该规则较为保守，计划对其进行替换。
- 可观测性模型经过简化，不能替代仪器模拟器或曝光时间计算器。
- 目录参数具有异质性，一些行星仅因恒星半径分布尾部较宽才得以保留；将 $P_{\text{存活}} \geq 0.01$ 与 $P_{\text{存活}} > 0$ 一并报告，可限制此类情况的影响。
- 仅对詹姆斯·韦布空间望远镜和 ELT/PCS 进行了建模。将该框架扩展至宜居世界天文台和 LIFE 等未来任务，留待今后研究。

8. 如何使用和更新列表

该发布版本为每颗行星和每份列表提供 P_{alive}、条件得分及其四分位数， P（前 10 名）、类别概率、证据路径以及每个子分数的中位数值，使用户能够追溯列表中任何排名背后的原因。詹姆斯·韦布空间望远镜用户选择岩石行星分支结果中的凌星行星，极大望远镜用户则选择非凌星行星。探测阈值、海洋氢气行星气候判据、类别先验和质量—半径选项均为命令行选项；在单个核心上，以一个探测阈值运行完整流程并生成所有列表，耗时不到三分钟。发布内容还包含固定环境和测试套件，且可根据随附的输出重新生成 Sobol 报告。遵循Chen 等人（2022）的建议，本文中的每项结果都关联到一个带版本号且可引用的发布版本。

9. 结论

我们介绍了开放蒙特卡洛框架的版本 6.1，该框架可将目录不确定性转化为针对温带系外行星大气特征表征的观测设施专属优先级列表。列表分别按詹姆斯·韦布空间望远镜和 ELT/PCS，以及岩石行星和海洋行星列出；每个条目都包含存活概率、条件得分和前 N 概率。对于作为主要成果的岩石分支，全局敏感性分析表明，XUV 海岸线的位置和宽度决定了列表。排名前十的岩石行星总阶指数在两个阈值下均符合我们的闭合准则（95% 半宽小于 0.05），其中 10 个指数中的 9 个也符合更严格的全宽解读。前 N 名的入选情况主要取决于行星能否通过宜居性否决条件。海洋氢大气分支的结果仅供参考。我们希望这些列表及生成列表的开放代码，能帮助观测者决定如何最好地分配稀缺的望远镜观测时间，以及哪些测量最可能改变这一决策。

数据与代码可用性

代码（MIT 许可证）、输入快照、每个变体的逐行星结果、Sobol 输出和图表（知识共享署名 4.0 国际许可协议）已作为版本 6.1.1 存档于 Zenodo（数字对象标识符：10.5281/zenodo.24431744；Viridis2026b），并在 https://github.com/effywhitedva-ops/uhi-habitability-index开发。版本 6.1.1 以英文记录了代码，并新增了 top-N membership 脚本，但其数值结果与版本 6.1 完全相同（数字对象标识符：10.5281/zenodo.24430693；Viridis 2026c）。较早的 v5.2 发布版本仍可作为概念 DOI 10.5281/zen- odo.24358421 下的一个版本获取（Viridis 2026a）；该 DOI 始终指向最新版本，因此必须从记录的版本列表中选择 v5.2。

致谢

本研究使用了 NASA系外行星档案。该档案由加州理工学院根据与美国国家航空航天局签订的合同，在系外行星探索计划下运营。

生成式人工智能的使用。 本研究使用了两个基于大语言模型的定制软件代理。Shoggoth- sito 根据作者的建模决策使用 Python 实现模型，执行蒙特卡洛和 Saltelli–Sobol 计算，编写测试套件，通过脚本生成表格和图表，并保存运行日志。Aetherios 根据引用文献审核方法和代码，并提出修正建议。两者均协助进行文献检索，且 Shoggothsito

在作者指导下起草并进行语言编辑，完善稿件文本。没有任何建模决策由智能体作出：每项更改均由作者提出、审核并批准后才纳入代码，批准记录及日期见版本发布变更日志。由于智能体参与了计算、分析和可视化，其输出按第 4 节所述进行了验证：在全部 6,112 颗行星和合成太阳系行星上重现归档的 v5.2 结果；对三颗行星的关键量进行独立重新计算；根据Pass 等人 (2025) 检查保留指标；使用 Ishigami 函数测试敏感性代码；并通过自动化测试套件。每条参考文献均依据其数字对象标识符或 arXiv 记录进行了核查。作者审查了每个步骤，并对全部内容负责。

软件：Python、NumPy（Harris 等人2020年）、SciPy（Virtanen 等人 2020年）、pandas、SALib（Herman & Usher 2017）、Matplotlib、Mors（Johnstone 等人 2021年）。

参考文献

Barnes, R. 2017, 《天体力学与动力天文学》, 129, 509, 数字对象标识符: 10.1007/s10569-017-9783-7 Chen, J., & Kipping, D. 2017, 《天体物理学杂志》, 834, 17, 数字对象标识符: 10.3847/1538-4357/834/1/17 Chen, T. X., Schmitz, M., Mazzarella, J. M., 等人 2022, 《天体物理学杂志增刊系列》, 260, 5, 数字对象标识符: 10.3847/1538-4365/ac6268 Christiansen, J. L., McElroy, D. L., Harbut, M., 等人 2025, 《行星科学杂志》, 6, 186, 数字对象标识符: 10.3847/psj/ade3c2 Demircan, O., & Kahraman, G. 1991, 《天体物理学与空间科学》, 181, 313, 数字对象标识符: 10.1007/bf00639097 Gladman, B., Quinn, D., Nicholson, P., & Rand, R. 1996, 《伊卡洛斯》, 122, 166, 数字对象标识符: 10.1006/icar.1996.0117 Goldblatt, C., Robinson, T. D., Zahnle, K. J., & Crisp, D. 2013, 《自然·地球科学》, 6, 661, 数字对象标识符: 10.1038/ngeo1892 Greene, T. P., Line, M.R., Montero, C., 等人 2016, 《天体物理学杂志》, 817, 17, 数字对象标识符: 10.3847/0004-637x/817/1/17 Haqq-Misra, J., Wolf, E. T., Joshi, M., Zhang, X., & Kopparapu, R. K. 2018, 《天体物理学杂志》, 852, 67, 数字对象标识符: 10.3847/1538-4357/aa9f1f Harris, C. R., Millman, K. J., van der Walt, S. J., 等人 2020, 《自然》, 585, 357, 数字对象标识符: 10.1038/s41586-020-2649-2 Herman, J., & Usher, W. 2017, 《开放源代码软件杂志》, 2, 97, 数字对象标识符: 10.21105/joss.00097 Hord, B. J., Kempton, E. M.-R., Evans-Soma, T. M., 等人 2024年, 《天文学杂志》, 167, 233, 数字对象标识符: 10.3847/1538-3881/ad3068 Howard, A. W., Marcy, G. W., Johnson, J. A., 等人 2010, 《科学》, 330, 653, 数字对象标识符: 10.1126/science.1194854 Ih, J., Kempton, E. M.-R., Diamond-Lowe, H., 等人 2026 年, 《天文学杂志》, 172, 59, 数字对象标识符: 10.3847/1538-3881/ae71c1 Innes, H., Tsai, S.-M., & Pierrehumbert, R. T. 2023, 《天体物理学杂志》, 953, 168, 数字对象标识符: 10.3847/1538-4357/ace346 Ishigami, T., & Homma, T. 1990, 载于《第一届不确定性建模与分析国际研讨会论文集》（IEEE计算机学会出版社）, 398–403, 数字对象标识符: 10.1109/isuma.1990.151285 Jansen, M. J. 1999, 《计算机物理通讯》, 117, 35, 数字对象标识符: 10.1016/s0010-4655(98)00154-4 Johnstone, C. P., Bartel, M., & G¨udel, M. 2021, 《天文学与天体物理学》, 649, A96, 数字对象标识符: 10.1051/0004-6361/202038407 Kasper, M., Cerpa Urra, N., Pathak, P., 等人 2021, 《信使》, 182, 38, 数字对象标识符: 10.18727/0722-6691/5221 Kempton, E. M.-R., Bean, J. L., Louie, D. R., 等人 2018, 《太平洋天文学会出版物》, 130, 114401, 数字对象标识符: 10.1088/1538-3873/aadf6f Kopparapu, R. k., Wolf, E. T., Haqq-Misra, J., 等人 2016, 《天体物理学杂志》, 819, 84, 数字对象标识符: 10.3847/0004-637x/819/1/84 Lopez, E. D., Fortney, J. J., & Miller, N. 2012, 《天体物理学杂志》, 761, 59, 数字对象标识符: 10.1088/0004-637X/761/1/59 Madhusudhan, N., Piette, A. A. A., & Constantinou, S. 2021, 《天体物理学杂志》, 918, 1, 数字对象标识符: 10.3847/1538-4357/abfd9c Mamajek, E., & Stapelfeldt, K. 2024年, arXiv 预印本, arXiv:2402.12414. https://arxiv.org/abs/2402.12414 North, G. R., Cahalan, R. F., & Coakley, J. A. 1981, 《地球物理学评论》, 19, 91, 数字对象标识符: 10.1029/rg019i001p00091 Otegi, J. F., Bouchy, F., & Helled, R. 2020, 《天文学与天体物理学》, 634, A43, 数字对象标识符: 10.1051/0004-6361/201936482 Owen, J. E., & Wu, Y. 2017, 《天体物理学杂志》, 847, 29, 数字对象标识符: 10.3847/1538-4357/aa890a Pass, E. K., Charbonneau, D., & Vanderburg, A. 2025, 天体物理学快报, 986, L3, 数字对象标识符: 10.3847/2041-8213/adda39 Redfield, S., Batalha, N., Benneke, B., et al. 2024, arXiv 预印本, arXiv:2404.02932. https://arxiv.org/abs/2404.02932 Ribas, I., Guinan, E. F., G¨udel, M., & Audard, M. 2005, 《天体物理学杂志》, 622, 680, 数字对象标识符: 10.1086/427977Rodr´ıguez-Mozos, J. M., & Moya, A. 2017, 皇家天文学会月刊, 471, 4628, 数字对象标识符: 10.1093/mnras/stx1910 —. 2025, 《天体物理学杂志》, 987, 85, 数字对象标识符: 10.3847/1538-4357/adddbf Saltelli, A. 2002, 《计算机物理通讯》, 145, 280, 数字对象标识符: 10.1016/s0010-4655(02)00280-1 Saltelli, A., Annoni, P., Azzini, I., et al. 2010, 《计算机物理通讯》, 181, 259, 数字对象标识符: 10.1016/j.cpc.2009.09.018 Sanz-Forcada, J., Micela,G., Ribas, I., et al. 2011, 《天文学与天体物理学》,532, A6, 数字对象标识符: 10.1051/0004-6361/201116594 Schulze-Makuch, D., M´endez, A., Fair´en, A. G., et al. 2011, 天体生物学, 11, 1041, 数字对象标识符: 10.1089/ast.2010.0592 Shields, A. L., Meadows, V. S., Bitz, C. M., et al. 2013, 天体生物学, 13, 715, 数字对象标识符: 10.1089/ast.2012.0961 Sobol', I. M. 2001, 数学与计算机模拟, 55, 271, 数字对象标识符: 10.1016/s0378-4754(00)00270-6 Spada, F., Demarque, P., Kim, Y. C., & Sills, A. 2013, 《天体物理学杂志》, 776, 87, 数字对象标识符: 10.1088/0004-637x/776/2/87 Turbet, M., Bolmont, E., Leconte, J., et al. 2018, 《天文学与天体物理学》, 612, A86, 数字对象标识符: 10.1051/0004-6361/201731620 Venturini, J., Ronco, M. P., Guilera, O. M., et al. 2024, 《天文学与天体物理学》, 686, L9, 数字对象标识符: 10.1051/0004-6361/202349088 Viridis, E. 2026a, 统一宜居性指数（UHI）, v5.2, Zenodo, 数字对象标识符: 10.5281/zenodo.24358421 —. 2026b, UHI v6.1.1：面向詹姆斯·韦布空间望远镜和极大望远镜的温带系外行星特定设施的概率优先级列表（代码、数据和 Sobol N=512 敏感性）, v6.1.1, Zenodo, 数字对象标识符: 10.5281/zenodo.24431744 —. 2026c, UHI v6.1：面向詹姆斯·韦布空间望远镜和极大望远镜的温带系外行星特定设施的概率优先级列表（代码、数据和 Sobol N=512 敏感性）, v6.1, Zenodo, 数字对象标识符: 10.5281/zenodo.24430693 Virtanen, P., Gommers, R., Oliphant, T. E., et al. 2020, 自然·方法, 17, 261, 数字对象标识符: 10.1038/s41592-019-0686-2 Yang, J., Cowan, N. B., & Abbot, D. S. 2013, 《天体物理学杂志》, 771, L45, 数字对象标识符: 10.1088/2041-8205/771/2/145 Zahnle, K. J., & Catling, D. C. 2017, 《天体物理学杂志》, 843, 122, 数字对象标识符: 10.3847/1538-4357/aa7846 Zeng, L., Jacobsen, S. B., Sasselov, D. D., et al. 2019, 美国国家科学院院刊, 116, 9723, 数字对象标识符: 10.1073/pnas.1812905116

附录

PARAMETERS OF THE SENSITIVITY ANALYSIS

本文使用《开放天体物理学期刊》LaTeX 模板编写。OJA 是一本期刊，为 arXiv 的astro-ph版块中的新论文提供快速、便捷的同行评审，让作者和审稿人都能更轻松地完成评审流程。了解更多信息，请访问 http://astro.theoj.org。

TABLE 4The 32 assumptions sampled in the Saltelli–Sobol analysis, with nominal values and sampled ranges. Where a parameter isthe centre of a range, the range half-width given in parentheses is kept fixed; the flare enhancement (fflare c) is held fixed within each evaluation.

Name	描述	标称值	范围
最低百万分率	詹姆斯·韦布空间望远镜系统噪声底（ppm）	20	10–50
n_H	透射信号中的标高数	2	1–5
iwa hi	上限内工作角，极大望远镜（λ/D）	4	3–6
iwa lo	较小的内工作角，极大望远镜（λ/D）	2	1.5–3
n 个区间	对下限取平均的光谱通道	10	1–30
xuv 中值	恒星应力为 50% 时的现今XUV通量（现今地球 $= 1$）	10	3–30
饱和时间 M	恒星活动项中的饱和时间，$M_\star < 0.6\,M_\odot$（十亿年）	1	0.5–3
高二氧化碳分压	最大对数 $_{10}\,P_{\mathrm{CO_2}}$（bar），M矮星气候	2	0–2
OLR 最小值	最小 OLR 系数 A(W m^{-2})	150	120–190
耀斑较晚	耀斑惩罚，$M_\star < 0.35\,M_\odot$	0.5	0.2–0.8
云层最小值	透射中的最小云因子	0.5	0.1–1
sig_模型	预测信噪比的模型不确定性（ln）	0.5	0.2–1
yang 效率下限	最小三维气候效能（快速自转）	0.5	0–1
lock m c	M_{lock} 的中心（$M_\odot$；±0.05）	0.60	0.50–0.70
lock a c	a_{lock} 的中心（天文单位；±0.05）	0.20	0.12–0.30
prot lo c	三维效能的 P_{lo} 中心（d；±1）	5	3–7
prot hi c	三维效能的 P_{hi} 中心（d；±5）	20	12–30
log rsat	$\log_{10} R_{\mathrm{sat}}$	-3.05	-3.20 到 -2.90
tsat 因子	系数基于Pass 等人(2025) 的饱和时间	1	0.5–2
耀斑 c	XUV 通量的耀斑增强	1.25	1.0–1.5
后下降对数	$\log_{10}$ 后饱和下降（完全对流）	-2	-3至 -1.5
初始旋转百分位中心	初始旋转百分位中心（±20）	50	25–75
shore logc	海岸线偏移 c (dex)	0	-1 至 1
显著岸线	海岸线宽度 s (ln)	1	0.5–2
wv_c	半径谷宽度（$R_\oplus$；±0.03）	0.14	0.05–0.25
mv_c	质量路径的转变质量 M_v（$M_\oplus$；±1.5）	4.5	2–8
log2 piH	$\log_2$ 海洋氢大气行星类别的相对先验	0	-1 比 1
lph2 c	对数中心 $_{10}\,P_{\mathrm{H_2}}$（巴；±0.3）	1	0.3–1.7
fcl c	对Innes等人(2023) 限值的容差 (±0.25)	1.5	0.8–2.5
eta log	对逃逸效率的 $\log_{10}$ 因子	0	-1 至 1
参考包层损失时间对数	$\log_{10}$ 参考包层损失时间（十亿年）	0	-1 至 0。65
海洋行星反照率	海洋星邦德反照率	0.12	0.05–0.60