《天文学与天体物理学》 稿件编号：主文
2026年11月25日
©ESO 2026

arXiv:2611.32950v1 [astro-ph.EP] 24 Nov 2026

致编辑的信

使用詹姆斯·韦布空间望远镜观测的亚海王星中雾霾存在情况的比较分析

A. Y. Jaziri[1,2], T. Drant[3] 和 M. Turbet[4,2]

[1] LATMOS/IPSL，巴黎萨克雷大学UVSQ、索邦大学、法国国家科学研究中心，吉扬库尔，法国[2] 波尔多天体物理实验室、波尔多大学、法国国家科学研究中心，B18N，Geoffroy Saint-Hilaire 小巷，33615 佩萨克，法国[3] 苏黎世联邦理工学院、生命起源与普遍性中心、地球与行星科学系，8092 苏黎世，瑞士。[4] 动力气象学实验室/IPSL、法国国家科学研究中心、索邦大学、巴黎高等师范学院、PSL研究大学、巴黎综合理工学院，75005 巴黎，法国 电子邮箱：yassin.jaziri@latmos.ipsl.fr

收稿日期 ??；接受日期 ??

摘要

光化学霾被认为可以解释亚海王星透射光谱的多样性，早期哈勃空间望远镜观测显示，气溶胶不透明度可能随温度变化。然而，詹姆斯·韦布空间望远镜的观测呈现出更加多样的图景。本文使用实验测得的霾光学性质，对詹姆斯·韦布空间望远镜观测到的八颗中等辐照亚海王星——LP 791-18 c、TOI-1231 b、TOI-732 c、TOI-270 d、GJ 1214 b、GJ9827 d、GJ3090 b 和 TOI-421b——进行一致的大气反演分析。我们将无雾霾模型与两种实验室霾模拟物进行比较，以评估霾的证据及其光谱特征。我们发现，LP 791-18 c、TOI-732 c 和 GJ 3090 b 存在显著的霾证据，但 LP 791-18 c 和 GJ 3090 b 的证据可能受到凌星光源效应（TLS）的偏差影响。除 TOI-732 c 外，支持霾的解主要由短波长光谱斜率驱动，而非实验室模拟物的典型红外吸收特征。我们未发现反演得到的 CH_4 丰度与对霾的偏好之间存在明确相关性，这表明霾的形成还取决于大气成分和光化学条件。对于 TOI-270 d，推断的霾性质会随 MIRI 仪器间偏移和温度参数化方式而变化，但并未显示出显著的霾证据，这凸显了多维反演简并性。总体而言，我们的结果不支持詹姆斯·韦布空间望远镜亚海王星样本中普遍存在霾趋势，而是呈现出多样化的图景；不过，随着对宿主恒星特征的刻画得到改进、TLS校正更加准确，并考虑不同霾类型，这一图景仍可能逐渐趋向哈勃空间望远镜所揭示的趋势。更广泛的霾实验测量和多波长观测（包括相位曲线）对于区分大气气溶胶、恒星污染及其他反演简并性至关重要。

关键词。系外行星 – 大气 — 霾 – 詹姆斯·韦布空间望远镜

1. 引言

亚海王星是数量最多的系外行星类别之一，但在太阳系中没有对应的天体。它们介于类地行星与气态巨行星之间的特性，使其成为研究行星形成、大气演化和化学多样性的关键实验室（Beanetal. 2021）。透射光谱观测揭示了大气光谱的广泛多样性，从显著的分子特征到近乎平坦的光谱皆有（Madhusudhanetal. 2025）。这种多样性的一个主要解释是气溶胶的存在（Gaoetal. 2021）。由平衡凝结形成的云层，以及由非平衡光化学生成的霾，均能遮蔽分子特征并改变表观大气标高，但它们源于不同的物理过程，因此能为大气化学提供不同的见解。

早期哈勃空间望远镜透射光谱揭示了气溶胶不透明度在总体层面上的趋势：较温暖的亚海王星通常表现出更弱的光谱特征（Yu 等人 2021；Estrela 等人 2022；Edwards 等人 2023；Brande 等人 2024）。这些结果促使人们认为，雾霾形成可能普遍存在于温暖的富氢大气中，并可能取决于温度、金属丰度和组成等参数。此后，詹姆斯·韦布空间望远镜的观测揭示了更为多样化的图景（Roy 等 2026），这引发了关于霾是否普遍存在，以及哈勃空间望远镜所揭示的趋势是否部分源自观测局限、反演假设或简化的气溶胶模型等问题。雾霾形成预计取决于大气成分、辐照、氧化还原条件、金属丰度和垂直输运之间复杂的相互作用（Yu 等人 2021；Lavvas 和 Arfaux 2021；Gao 等人 2023；Drant 等人（2026）；Lavvas 等人 2026；Li 等人 2026）。近期实验室实验进一步表明，气溶胶能够在比传统烃类光化学预测范围更广的大气条件下形成，其光学性质也可能与常用参数化方案有显著差异

(He等人（2024）；Drant 等人（2026）)。

Jaziri 和 Drant (2025) 将 Drant 等人 (2026) 实验测得的系外行星霾的光学性质纳入大气反演分析。将这一框架应用于詹姆斯·韦布空间望远镜对 K2-18 b 的观测后，他们发现，气溶胶不透明度可能使标准反演假设难以重现的光谱行为得到协调，而且气溶胶特征可能在分子特征中显现。他们的结果表明，以实验为依据的气溶胶建模可以显著改变对大气成分的解读。

受这些结果启发，我们将这一方法扩展至对八颗受辐照程度中等的亚海王星进行统一的重新分析——

利用詹姆斯·韦布空间望远镜观测的海王星类行星：LP 791-18 c（Roy 等 2026）、TOI-1231 b（Sarkar 等 2026）、TOI-732 c（Rigby 等 2025）、TOI-270 d（Holmberg 与 Madhusudhan 2024；Constantinou 等 2026；Holmberg 等 2026）、GJ 1214 b（Schlawin 等人 2024）、GJ 9827 d（Piaulet-Ghorayeb 等 2024）、GJ 3090 b（Ahrer 等人 2025）和 TOI-421 b（Davenport 等人 2025）。我们将样本限定为詹姆斯·韦布空间望远镜观测波长范围延伸至 2.5 µm 以下的行星，因为这样才能约束波长依赖的霾斜率；GJ 1214 b 除外，已有独立研究为其存在雾霾提供了证据（Kempton 等人 2023；Ohno 等人 2025）。我们的目标有两个：第一，检验在 K2-18 b 上发现的气溶胶特征和光谱行为能否在更广泛的亚海王星群体中重现；第二，探究对气溶胶进行这种一致处理，能否为控制雾霾形成的物理机制提供新的认识。通过在统一的反演框架下分析这一样本，我们旨在重新评估詹姆斯·韦布空间望远镜时代有关雾霾趋势的观测证据，并判断能否形成关于亚海王星大气中气溶胶形成的统一图景。

2. 方法

我们使用了此前詹姆斯·韦布空间望远镜分析中的透射光谱（见表 A.3）。我们使用 `TauREx3`[1]（Al-Refaie 等，2021）和 `TauREx-PyMieScatt`[2] 模块（Changeat 等，2025）进行大气反演。该模块依照 Jaziri 与 Drant （2025）处理光化学霾。模块假设粒子为球形，并以实验室测得的折射率为输入，使用米氏理论计算其光学性质；不考虑分形聚集体。遵循 Jaziri 与 Drant（2025），我们将分析限定于 exo1 和 exo2 两种霾类似物（表 1）。与其他类似物不同，exo1的特点是缺乏含氮官能团，且仅呈现 C-H$_x$振动特征。在 K2-18 b 的反演中，研究人员更倾向于采用它，因为其吸收特征与观测光谱中的分子特征重叠，同时不会引入与数据不符的强额外特征。exo2 同样不含氮，但具有更明显的芳香结构，因此会产生更强的 C=C 相关吸收特征；这些特征与 K2-18 b 光谱的一致性较低，因此其受青睐程度不如 exo1。因此，我们将 exo1 和 exo2 用作互补的霾测试。

表1：Drant等人（2026）所考虑的不同雾霾折射率数据汇总

托林	气体组成	实验装置
exo1	95 % 氩 - 5% CH_4	PAMPRE
exo2	95 % 氩 - 5% CH_4	COSmIC

我们对原始观测研究进行了补充分析，重点评估具有实验依据的雾霾模型相对于无雾霾大气的重要性。因此，对于每个合并数据集，我们进行了三种反演：无雾霾模型、exo1 雾霾模型和 exo2 雾霾模型（详见附录 A ）。这些反演包含一组广泛的分子吸收体，与此前发表的针对这些 JWST 数据集的分析以及 ExoMol不透明度数据库中适用于富氢大气的分子一致（Chubbetal. 2021）：CH_4，一氧化碳$_2$,CO、H_2O、NH_3,C_2H_2,H_2S、SO_2,和羰基硫。我们注意到，其他物种（如 CS_2 和 C_2H_6,）也可能具有相关性，因为它们可能已在 TOI-270 d 或 K2- 18 b 中被探测到。不过，我们选择继续仅使用 ExoMol 数据库，同时限制包含实验衍生的雾霾光学性质的反演所带来的高昂计算成本。

3. 光化学霾的统计证据

无雾霾、exo1 和 exo2 反演得到的贝叶斯证据汇总于表B.1中，相应的贝叶斯因子 $\ln(B)$（Benneke 和 Seager 2013）则作为行星和大气参数的函数展示于图1、C.1 和E.1中。我们发现，实验结果所支持的雾霾模型并未普遍占优：只有部分行星存在显著的雾霾证据，而若干目标用无雾霾大气模型描述同样出色，甚至效果更好。未发现与平衡温度相关的趋势（图1）。

最强的雾霾证据来自 LP 791-18 c：与无雾霾反演相比，exo1 和 exo2 均显著更受支持；这与 $_4$ 的探测结果以及 Roy 等(2026) 报告的强霾层一致。尽管 Roy 等(2026) 发现凌星光源效应 effect (TLSe) 有限，但近期观测表明，他们的合成恒星光谱可能无法准确再现主恒星在 1 µm（Murray 等人 2026）以下的光谱。我们还发现 GJ 3090 b 存在显著的雾霾证据。然而，NIRISS 光谱可能受到显著 TLSe 的影响（Ahrer 等人 2025）。该目标的雾霾偏好是基于光谱斜率最有利的一次观测得到的，因此这一探测结果对所采用的数据集尤其敏感。因此，这两颗行星的雾霾探测结果均不确定。最后，TOI-732 c 与 K2-18 b 类似，探测到雾霾 exo1，但未探测到 exo2。

对于 TOI-1231 b、GJ 1214 b、GJ 9827 d 和 TOI-421 b，均未发现对任一雾霾模型有显著偏好。对于 GJ 1214 b，这与先前支持云层或霾存在的证据相悖（Kempton 等人 2023；Ohno 等人 2025），不过我们的反演与 Ohno 等人 (2025) 的结果一致，支持霾层上方存在高金属丰度、以一氧化碳$_2$为主的大气（图1），反映了霾—金属丰度简并。类似地，GJ9827 d 允许存在显著的气溶胶不透明度，而无需霾；TOI-421 b 则未显示雾霾模型带来任何改进，这与 Davenport 等人(2025) 的结果一致。对于 TOI-270 d，无论 MIRI 偏移如何，均没有统计证据支持任一雾霾模型（附录 H 和 G）。总体而言，考虑到 LP 791-18 c 和 GJ 3090 b 中可能存在有偏差的探测结果，以及结果对霾类型的依赖性，图1 初步显示出类似于哈勃空间望远镜观测结果的抛物线趋势，尽管统计证据仍不确定。

这些结果凸显了反演霾解与发现支持雾霾存在的统计证据之间的区别。允许存在气溶胶和温度变化（附录 D）可以提供额外的灵活性，以再现观测光谱并获得受约束的霾参数，但这并不一定意味着数据要求必须存在气溶胶。特别是，倾向于霾层的反演通常会收敛到比其无雾霾对应方案更高的温度（图 D.1），这表明二者存在影响大气标高的简并性。因此，以下各节将考察哪些光谱区域推动了推断出的霾解，以及它们如何与其他大气情景相互竞争。

[1] https://github.com/ucl-exoplanets/taurex3[2] https://github.com/groningen-exoatmospheres/taurex-pymiescatt

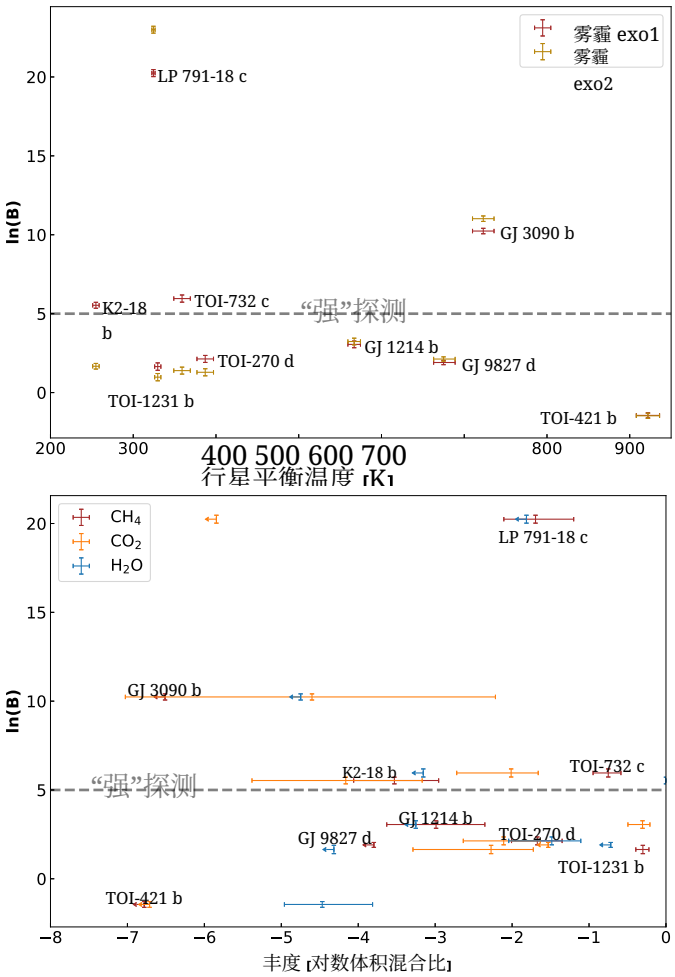

图 1：exo1（棕色）和 exo2（金色）雾霾模型的贝叶斯因子与平衡温度（上图）的关系，以及仅针对 exo1 的贝叶斯因子与反演得到的 CH_4, 一氧化碳$_2$, 和 H_2O 丰度（下图）的关系。“强”探测阈值 ln(B) = 5 (Benneke 和 Seager（2013）)，以灰色水平虚线表示。贝叶斯因子表明在给定数据、拟合参数和先验分布的情况下模型的相对偏好，并不能确定霾是否存在。图中仅显示 MIRI 偏移量为 0 ppm 时 TOI-270 d 的结果。ff。

4. 反演得到的霾的光谱特征和性质

不同反演解所对应的光谱见图F.1、F.2和F.3；所有反演得到雾霾 exo1 光谱的行星汇总见图B.1。霾偏好解的一个共同特征是，推断出的气溶胶不透明度主要影响透射光谱的短波长部分。相比之下，与实验室雾霾类似物（Drant 等人（2026））相关的特征性红外吸收特征通常对整体拟合的贡献较小。

对于 LP 791-18 c，两个雾霾模型相较于无雾霾情形均获得了强有力的统计学偏好，同时反演出的雾霾性质在物理上具有一致性（图 E.1）。雾霾位于高空，其中值压力约为 1 帕。在无雾霾模型中，只有 CH_4 受到约束；而对于 exo2 模型，雾霾参数与 CH_4和 H_2S 一同受到约束；在 exo1 情形下，NH_3 也受到额外约束。雾霾反演结果还表明，大气平均分子量更高（图 C.1），从无雾霾解中的 6.85 增加到 exo1 中的 11.7，但与此同时，温度升高了 200 K，以增加尺度高度。因此，雾霾反演通过改变大气尺度高度和组成，补偿了额外的高空气溶胶不透明度。尽管雾霾模型具有强烈的统计学偏好，但反演结果中没有显著的红外雾霾特征；相反，雾霾特征主要表现为短波长不透明度增强，而这一特征受到 TLSe 的偏差影响。

这种行为与ffJaziri 和 Drant对 K2-18 b 的研究结果不同 (2025）。在该研究中，实验测得的光学性质提供了更多灵活性，既能再现短波长光谱形状，也允许霾模拟物的红外吸收带可能产生贡献。因此，与 LP 791-18 c 的比较表明，与直接探测其特征性红外振动特征相比，光谱斜率可能是识别这些霾解更重要的观测量。相反，TOI-732 c 具有与 K2-18 b 相同的光谱行为（图 F.3）和反演得到的大气性质（图 C 和 E），这再次令人质疑 TLSe 是否会使 LP 791-18 c 的光谱产生偏差，从而影响霾反演。

对于 GJ 3090 b，支持雾霾的解同样由短波长光谱斜率驱动（图 F.2），其中存在一层光学厚度较高的高空霾层，位于 ~0.1 帕处（图 E.1），使透射光谱变平，并削弱分子特征（图 1）。在没有雾霾的情况下，一氧化碳$_2$ 的丰度受到较高约束，从而产生一种能够降低大气尺度高度并削弱分子特征的高金属丰度解。纳入雾霾后，一氧化碳和高空气溶胶部分地承担了这一作用。两种解都没有显示出明显的红外分子或雾霾特征，这与 Ahrer 等人 (2025) 报告的平淡光谱一致。因此，表面上的雾霾探测是由宽带光谱斜率驱动的，而该斜率受 NIRISS 数据中强烈的 TLSe影响。

其余目标表明，平淡的透射光谱并不一定意味着存在光化学雾霾。对于 GJ 1214 b，两种雾霾模型都未得到受约束的气溶胶解（图 E.1），相反，该光谱由一种富含一氧化碳$_2$和 CH_4的高金属丰度大气再现（图 1）。然而，Kempton 等人 (2023) 的相位曲线分析揭示了该行星的反照率，支持存在云或雾霾。要区分这些情形，需要对短波长斜率施加更好的约束；在高金属丰度、云主导和雾霾主导的大气之间，该斜率可能存在显著差异。现有的 HST/WFC3 数据（Kreidberg 等人 2014）无法消除这一歧义，因为 HST 和 JWST 光谱之间未知的偏移会影响推断出的斜率。

GJ 9827 d 还展示了分子组成与气溶胶不透明度之间的简并性。在无雾霾反演中，H_2O 受到约束，这与Piaulet-Ghorayeb 等(2024) 的结果一致，而 SO_2 也被反演出较高丰度。后者会提高大气平均分子量并降低光谱振幅，但不会产生明显的 NIRISS 特征。纳入雾霾后，这些约束会减弱，因为气溶胶同样能够削弱光谱。exo1 模型还表明，除了 NIRSpec G395H 中的 CO_2 特征外，可能还存在薄雾贡献；exo2 则没有这一结果，但从统计上看，两种模型均无优先性。因此，需要更宽波长范围的观测来区分这些情景。云层仍是解释光谱减弱的另一种可能，但水云不受支持（Turbet 等 2023）。

有趣的是，TOI-270 d 可与 K2-18 b、TOI-732 c 和 LP 791-18 c 进行有益的比较；这些行星具有相似的反演 CH_4 丰度，但雾霾更受青睐（图

）。较高的 CH_4 丰度可能为光化学霾生成提供重要的碳源，但雾霾形成的效率还取决于大气化学环境。特别是，具有较高一氧化碳$_2$ 丰度的氧化性大气可能会抑制或改变导致复杂烃类气溶胶形成的途径（Trainer 等，2004）。LP 791-18 c 反演得到的一氧化碳$_2$ 丰度相对较低，而 K2-18 b 和 TOI-732 c 的 CH_4与一氧化碳$_2$ 丰度与 TOI-270 d 相当，同时仍显示出雾霾证据。反演得到的 CH_4 丰度（或 C/O 比值，见图C.1）与统计上对雾霾的偏好之间缺乏明确相关性，因此表明，仅凭大气中 CH_4 丰度不足以充分解释我们样本中观测到的雾霾特征多样性。相反，雾霾生成很可能由大气成分、氧化还原状态和光化学途径共同控制，而恒星紫外辐射可能还会发挥额外作用。因此，研究恒星紫外辐射与反演得到的雾霾性质之间的关系，将成为未来工作的重要方向；但还需要对 LP 791-18 c、TOI-270 d、GJ 3090 b 和 TOI-421 b 进行更多紫外测量。尽管如此，仍应通过考虑由恒星污染引起的其他退化因素，进一步研究这些趋势。

5. 结论

我们采用来自实验推导的雾霾光学性质，对八颗经詹姆斯·韦布空间望远镜观测的亚海王星进行了统一的重新分析，这些光学性质来自 Drant等人 (2026)，并遵循 Jaziri &Drant (2025）为 K2-18 b 开发的反演框架。通过比较无雾霾、exo1 和 exo2 反演，我们研究了为 K2-18 b 确定的霾解是否代表更广泛的行星群体，以及是否能够解释早期哈勃空间望远镜观测所提示的雾霾趋势。

我们的结果不支持詹姆斯·韦布空间望远镜亚海王星样本中普遍存在光化学雾霾。LP 791-18 c、TOI-732 c 和 GJ 3090 b 存在雾霾证据，但 LP 791-18 c 和 GJ 3090 b 的证据可能受到 TLSe 的偏置。对于 TOI-1231 b、GJ 1214 b、GJ 9827 d、TOI-421 b 或 TOI-270 d，没有发现显著的雾霾证据；这些行星的光谱减弱可以由高金属丰度、分子组成或云层等其他气溶胶情景解释。在雾霾受到支持时，反演主要由宽带短波斜率驱动，而非实验性霾类比物的红外吸收特征；TOI-732 c 的情况除外，其表现与 K2-18 b 相同。由于短波斜率也可能由 TLSe 产生，红外特征提供了重要的互补诊断。若干获得雾霾支持的案例中缺少这些特征，凸显了探索更广泛的实验推导雾霾光学性质，并更为详细地检验其与 TLSe 之间简并性的必要性。

我们发现，反演得到的CH_4 丰度与对雾霾的统计偏好之间没有明确相关性，这表明雾霾的产生取决于大气成分与光化学条件的共同作用，而非仅取决于CH_4 丰度。对TOI-270 d的分析进一步表明，MIRI偏移量的变化可以显著改变所推断的雾霾性质，但并不会产生具有统计显著性的雾霾证据。结合为K2-18 b和TOI-732 c反演得到的 ~7 μm雾霾特征，这些结果凸显了MIRI数据对于约束霾的重要性，并促使我们利用即将开展的詹姆斯·韦布空间望远镜对LP 791-18 c、GJ 3090 b和GJ 9827 d的MIRI观测进行进一步再分析。

总体而言，我们的结果表明，由早期哈勃空间望远镜观测推断出的雾霾趋势并不意味着亚海王星中存在一种普遍的雾霾形成机制。相反，詹姆斯·韦布空间望远镜的观测指向一幅异质性图景，其中雾霾特征取决于大气成分和光化学条件。然而，这一结论仍然对恒星污染和气溶胶不透明度敏感，我们也不能排除抛物线形哈勃趋势。进一步同时考虑雾霾和TLSe的联合反演、未来的宽波段观测、对恒星非均匀性更严格的约束，以及覆盖更广大气成分范围和雾霾形成条件的实验室测量，对于确定是否存在一种共同机制支配整个亚海王星群体的雾霾形成将至关重要。

致谢。本项目获欧洲研究理事会（ERC）ERC OxyPlanets项目资助（资助协议编号：101053033）。本项目感谢欧洲研究理事会（ERC）通过欧盟地平线2020研究与创新计划提供的资助（资助协议编号：679030/WHIPLASH）。T.D.感谢2024年NOMIS-ETH博士后奖学金项目的支持。T.D.感谢NOMIS基金会和苏黎世联邦理工学院通过2024年奖学金项目提供资助。本研究获得法国国家空间研究中心的支持，重点支持詹姆斯·韦布空间望远镜上的NIRISS、NIRSpec和MIRI仪器。本文所呈现的部分数据取自空间望远镜科学研究所的Mikulski空间望远镜档案库（MAST）。所分析的具体观测数据可通过以下链接访问：doi:10.17909/c8z7-r590，doi:10.17909/1hrx- cn31，doi:10.17909/tqa7-th94，doi:10.17909/sx19-8852，doi:10.17909/dvqh- 2r48，doi:10.17909/r2bz-wb41，doi:10.17909/91wj-dt23，doi:10.17909/3ds1- 8z15和doi:10.17909/rx29-yw62。

参考

Ahrer, E.-M., Radica, M., 等. 2025，《天体物理学杂志》，985，L10 Al-Refaie, A. F., Changeat, Q., 等. 2021，《天体物理学杂志》，917，37 Bean, J. L., Raymond, S. N., & Owen, J. E. 2021，《地球物理学研究杂志：行星》，126，e06639 Benneke, B., Roy, P.-A., 等. 2024，arXiv电子印本，arXiv:2403.03325 Benneke, B. & Seager, S. 2013，《天体物理学杂志》，778，153 Bonfanti, A., Brady, M., 等. 2024，《天文学与天体物理学》，682，A66 Brande, J., Crossfield, I. J. M., 等. 2024，《天体物理学杂志》，961，L23 Burt, J. A., Dragomir, D., 等. 2021，《天文杂志》，162，87 Changeat, Q., Bardet, D., 等. 2025，《天文学与天体物理学》，699，A219 Chubb, K. L., Rocchetto, M., 等. 2021，《天文学与天体物理学》，646，A21 Constantinou, S., Madhusudhan, N., & Holmberg, M. 2026，《天文学与天体物理学》，705，A25 Davenport, B., Kempton, E. M.-R., 等. 2025，《天体物理学杂志》，984，L44 Drant, T., Sciamma-O'Brien, E., 等. 2026，《天文学与天体物理学》，706，A167 Edwards, B., Changeat, Q., 等. 2023，《天体物理学杂志增刊》，269，31 Estrela, R., Swain, M. R., & Roudier, G. M. 2022，《天体物理学杂志》，941，L5 Gao, P., Piette, A. A. A., 等. 2023，《天体物理学杂志》，951，96 Gao, P., Wakeford, H., 等. 2021，《地球物理学研究杂志：行星》，126 He, C., Radke, M., 等. 2024，《自然·天文学》，8，182 Holmberg, M. & Madhusudhan, N. 2024，《天文学与天体物理学》，683，L2 Holmberg, M., Madhusudhan, N., 等. 2026，arXiv电子印本，arXiv:2607.00950 Jaziri, A. Y. & Drant, T. 2025，《天文学与天体物理学》，702，L20 Kempton, E. M.-R., Zhang, M., 等. 2023，《自然》，620，67 Kreidberg, L., Bean, J. L., 等. 2014，《自然》，505，69 Krenn, A. F., Kubyshkina, D., 等. 2024，《天文学与天体物理学》，686，A301 Lamontagne, P., Weisserman, D., 等. 2026，《天文学与天体物理学》，706，A278 Lavvas, P. & Arfaux, A. 2021，《皇家天文学会月刊》，502，5643 Lavvas, P., Liu, R., 等. 2026，《天文学与天体物理学》，709，A272 Li, J., Bergin, E. A., 等. 2026，《天体物理学杂志》，997，L29 Madhusudhan, N., Holmberg, M., 等. 2025，arXiv电子印本，arXiv:2509.19247 Mahajan, A. S., East man, J. D., & Kirk, J. 2024，《天体物理学杂志快报》，963，L37 Murray, C. A., Garcia, L., 等. 2026，《天体物理学杂志》，1003，L45 Ohno, K., Schlawin, E., 等. 2025，《天体物理学杂志》，979，L7 Piaulet-Ghorayeb, C., Benneke, B., 等. 2024，《天体物理学杂志快报》，974，L10 Rigby, F. E., Madhusudhan, N., 等. 2025，《天体物理学杂志》，995，L70 Roy, P.-A., Benneke, B., 等. 2026，《自然·天文学》，10，371 Sarkar, S., Madhusudhan, N., 等. 2026，《天体物理学杂志》，1005，L52 Schlawin, E., Ohno, K., 等. 2024，《天体物理学杂志》，974，L33 Sing, D. K., Fortney, J. J., 等. 2016，《自然》，529，59 Trainer, M. G., Pavlov, A. A., 等. 2004，《天体生物学》，4，409 Turbet, M., Fauchez, T. J., 等. 2023，《天文学与天体物理学》，679，A126 Van Eylen, V., Astudillo-Defru, N., 等. 2021，《皇家天文学会月刊》，507，2154 Yu, X., He, C., 等. 2021，《自然·天文学》，5，822

附录A：反演设置

我们的分析仅限于自由反演，其中大气成分通过每种化学物种在垂直方向恒定的体积混合比进行参数化。这种方法不施加化学平衡或自洽化学条件，因此分子丰度可以独立变化，而不受假定的化学网络约束。不过需要注意的是，对于具有微弱或未探测到光谱特征的分子物种，反演丰度可能仍会高度依赖先验。

对于所有反演，行星半径均作为自由参数处理，并对每个目标采用相同的先验范围。鉴于样本中各行星的半径相对相近，采用统一先验既能涵盖所有数值，又能避免引入依赖于目标的假设。大气温度廓线采用TauREx 3中实现的四点温度剖面进行参数化。我们采用这种参数化方式，是因为它代表了允许热反演并评估气溶胶对上层大气热结构影响所需的最低复杂度水平。所采用的温度先验列于表A.1中。每次反演均在Multinest采样算法中使用750个活跃点完成。

反演对表A.1中列出的所有分子物种均采用了垂直方向恒定的丰度。这些分子对应于以往富氢亚海王星大气层研究中最常考察的物种，并且在 Ex-oMol 数据库中具有高质量的不透明度数据（Chubb 等人（2021））。分子丰度和气溶胶参数所采用的先验分布汇总于表A.1。N_2未被纳入反演物种，以缩减参数空间和计算时间，因为在此处考虑的波长范围内，它不会产生显著的分子吸收特征。然而，N_2会影响透射光谱，其作用是通过平均分子量间接产生的。这一影响与反演中已设为自由参数的其他参数存在部分简并，尤其是参考半径、温度剖面以及整体 H_2/He 组成。因而，省略 N_2 可能会影响所推断的大气绝对组成和平均分子量，但我们预计这不会在雾霾探测和表征方面造成显著偏差。

表 A.1：反演的自由参数和先验分布。

参数	边界
共同	
T_{top} [K]	50 至 1500
T_{bot} [K]	300 至 2000
T_1 [K]	50 至 1500
T_2 [K]	50 至 1500
$\log_{10}(P_1)$ [帕]	2 至 6
$\log_{10}(P_2)$ [帕]	-2 至 5
半径 [R_{jup}]	0.1 至 0.3
化学	
$\log_{10}(H_2O)$	-12 至 -0.15
$\log_{10}$(一氧化碳)	-12 至 -0.15
$\log_{10}(CH_4)$	-12 至 -0.15
$\log_{10}$(一氧化碳$_2$)	-12 至 -0.15
$\log_{10}$(羰基硫)	-12 至 -0.15
$\log_{10}(NH_3)$	-12 至 -0.15
$\log_{10}(C_2H_2)$	-12 至 -0.15
$\log_{10}(SO_2)$	-12 至 -0.15
$\log_{10}(H_2S)$	-12 至 -0.15
气溶胶	
$\log(\mu)$ [μm]	-2 至 1
$\log(\chi)$ [分子.m^{-3}]	4 到 13
log(P) [帕]	-2 到 5
$\log(\Delta P)$ [帕]	0 到 5

我们未将凌星光源效应（TLSe）作为反演中的自由组分。将 TLSe 作为额外的自由组分纳入，会显著增加反演的维度，并引入与大气半径、温度结构和气溶胶性质之间的额外简并性，尤其是在短波长处。因此，对整个样本联合开展 TLSe 和雾霾的系统反演，需要大幅扩展当前的计算框架。相反，我们将针对预计最相关的各个目标，讨论恒星污染对雾霾解释的潜在影响，并强调，基于短波长斜率得出的雾霾约束应谨慎解读。根据各自的分析，在此分析的透射光谱中，对超过 100ppm 凌星光源效应振幅敏感的只有 LP 791-18 c 和 GJ 3090 b，而其他目标的凌星光源效应振幅均小于 30ppm。LP 791-18 c 和 GJ 3090 b 的 TLSe 振幅与较短波长处表观斜率的量级相同，这会对雾霾反演造成偏差。尽管 Roy 等 （2026）发现 LP 791-18 c 的 TLSe 为 ~50ppm，达到 5.36σ 达到 3.54σ 在纳入 TLSe 的雾霾探测中，Murray 等人（2026）指出，他们的合成恒星光谱可能无法准确再现主恒星在 1 μm 以下的光谱，因此我们推测 TLSe 可能会增大到超过 100ppm。

采用的行星和恒星参数列于表 A.2中，而本研究使用的 JWST 数据集汇总于表 A.3中。为评估雾霾的存在，我们尽可能采用了从 NIRSOSS 到 MIRI 的更大光谱覆盖范围（0.6 至 15 μm）。我们未纳入 GJ 1214 b 的 HST/WFC3 观测数据。通常，人们会将其与 JWST 数据结合，以约束云层的存在；但 HST 和 JWST 光谱之间未知的偏移量可能会使我们对雾霾特征的研究产生偏差。对于结合多个 JWST 仪器的数据集，我们采用了原始分析中报告的仪器间偏移量。唯一的例外是 TOI-270 d，因为最近发表的 MIRI 观测数据尚未与 NIRISS 和 NIRSpec 数据进行联合分析。因此，对于该目标，我们探讨了三种可能的 MIRI 偏移量（0 和 ±50 ppm），以评估未知绝对偏移量对结论的影响。

数据可用性 检索数据：Zenododoi:10.5281/zenodo.22282544

表 A.2：本文采用的行星和恒星参数汇总。

行星	R_p [R_{Jup}]	M_p [M_{Jup}]	a [天文单位]	R_s [$R_\odot$]	T_s [K]	参考
LP 791-18 c	0.220	0.022	0.0315	0.182	2960.	Roy 等 (2026)
TOI-1231 b	0.326	0.0485	0.1288	0.476	3553.	Burt 等(2021)
TOI-732 c	0.213	0.0253	0.0757	0.380	3358.	Bonfanti 等(2024)
TOI-270 d	0.1903	0.0150	0.07210	0.378	3506.	Van Eylen 等 （2021）
GJ 1214 b	0.2438	0.0265	0.01505	0.2162	3101.	Mahajan 等 （2024）
GJ 9827 d	0.177	0.00950	0.053	0.58	4236.	Piaulet-Ghorayeb 等 (2024)
GJ 3090 b	0.194	0.0142	0.0316	0.516	3707.	Lamontagne 等 (2026)
TOI-421 b	0.236	0.021	0.0554	0.866	5291。	Krenn 等（2024）

表 A.3：本研究采用的透射光谱汇总。

行星	JWST 仪器（偏移量）	参考
LP 791-18 c	NIRSpec PRISM	Roy 等（2026）
TOI-1231 b	NIRISS SOSS + NIRSpec G395H（+79.38ppm）	Sarkar 等 (2026)
TOI-732 c	NIRISS SOSS (-112ppm) +NIRSpec G395H + MIRI (-112ppm)	Rigby 等 (2025)
TOI-270 d	NIRISS SOSS (+32 ppm) + NIRSpec G395H +MIRI (0, ±50 ppm)	Holmberg 与 Madhusudhan (2024); Constantinou 等(2026); Holmberg 等 (2026)
GJ 1214 b	NIRSpec G395H +MIRI（+50ppm）	Schlawin 等 (2024)
GJ 9827 d	NIRISS SOSS	Piaulet-Ghorayeb 等 （2024）
GJ 3090 b	NIRISS SOSS exoTEDRF +NIRSpec G395H exoTEDRF!	Ahrer 等人 （2025）
TOI-421 b	NIRISS SOSS exoTEDRF +NIRSpec G395H（+20ppm）Eureka!	Davenport 等人（2025）

附录 B：检索证据和透射光谱摘要

表 B.1：所有观测的反演结果

模型	ln(Z)	ln(B)	ln(Z)	ln(B)	ln(Z)	ln(B)	ln(Z)	ln(B)
	LP 791-18 c		TOI-270 d +50ppm（MIRI）		GJ 1214 b		TOI-421 b	
无雾霾	2389.71	参考	1296.02	参考	594.76	参考	587.22	参考
exo1	2409.96	20.25	1298.25	2.23	597.82	3.06	585.78	-1.44
exo2	2412.71	23.00	1297.86	1.84	598.00	3.24	585.75	-1.47
	TOI-1231 b		TOI-270 d		GJ 9827 d			
无雾霾	13041.07	参考	1301.91	参考	1300.04	参考		
exo1	13042.72	1.65	1304.04	2.13	1301.94	1.90		
exo2	13042.05	0.98	1303.20	1.29	1302.16	2.12		
	TOI-732 c		TOI-270 d -50ppm（针对 MIRI）		GJ 3090 b			
无雾霾	17996.81	参考	1296.59	参考	1016.87	参考		
exo1	18002.77	5.96	1299.44	2.85	1027.10	10.23		
exo2	17998.20	1.39	1299.01	2.42	1027.89	11.02		

图 B.1 以大气标高的单位表示光谱，$H_{eq} = kT_{eq}/(\mu g)$，根据行星特定的平衡温度估算，并假设大气由 H/He 组成，平均分子量为 $\mu = 2$。3 原子质量单位，遵循 Sing 等人 (2016）。光谱根据行星的平衡温度由蓝色到橙色着色，温度从最低到最高。为清晰起见，根据其 ln(B) 值（见表 B.1）对光谱进行垂直平移，垂直位置越高表示存在雾霾的统计证据越强。以相对高度表示的平移值为：K2-18 b：35，LP 791-18 c：82，TOI-1231 b：10，TOI-732 c：51，TOI-270 d：26，GJ 1214 b：38，GJ 9827 d：19，GJ 3090 b：72，以及 TOI-421b：0。

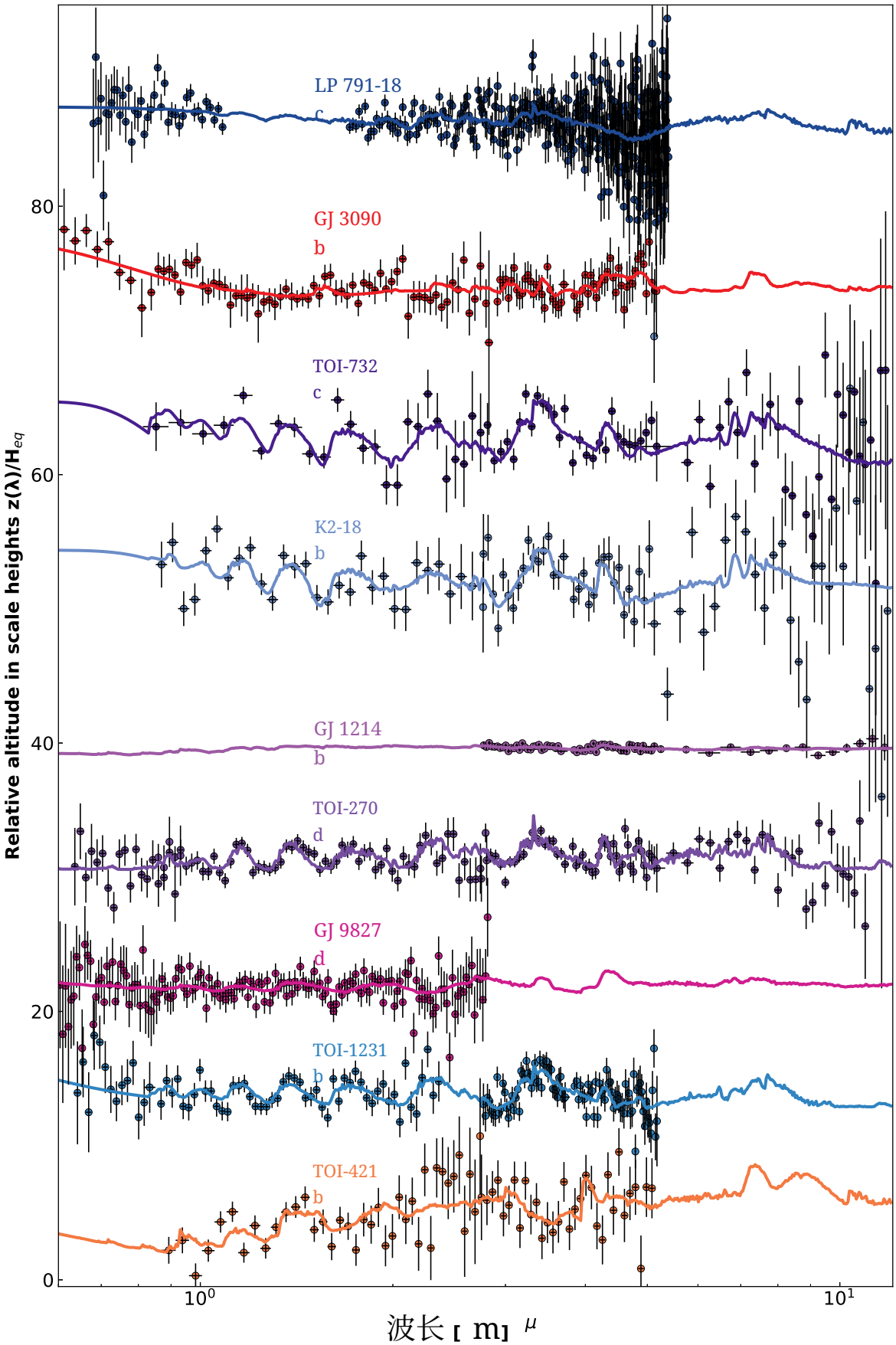

图 B.1：表中列出的观测光谱A.3，使用 TOI-270 d 的 MIRI 0 ppm 偏移光谱，并与 Jaziri 和 Drant (2025) 的 K2-18 b 结果一起展示。每颗行星的检索光谱均包括 exo1 雾霾。

附录 C：贝叶斯因子随派生参数的变化

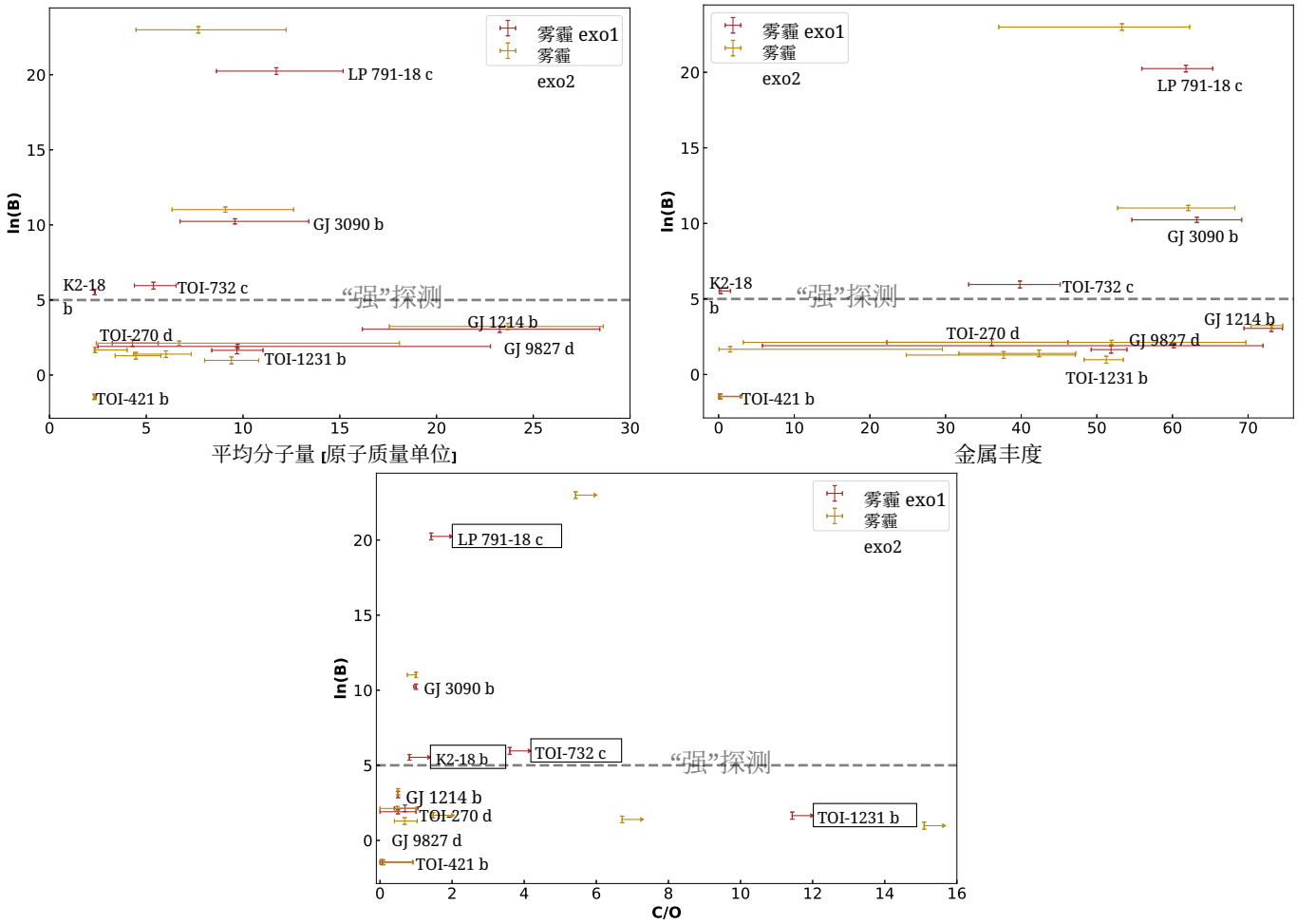

图 C.1：exo1（棕色）和 exo2（金色）两种霾的贝叶斯因子随派生参数的变化。ln(B) = 5 (Benneke 和 Seager（2013）) 中强探测的界限以灰色水平虚线标出。这并非对是否存在霾的最终结论，而是根据数据、拟合参数及其先验分布对模型的偏好。反演得到上限或下限时，会用箭头标示。误差条较大且大致居中，表示该参数未受到约束。此处仅展示 MIRI 观测偏移 0 个 off 的 TOI-270 d 结果。C/O 比值大于或可能大于 1 的情况以方框标出。如此高的比值是由于 CH_4 的反演丰度较高，而氧化分子（如一氧化碳$_2$ 和 H_2O）受到的约束较弱或未受约束，导致这些值产生偏差。要推断实际的 C/O 比值并将其与雾霾的存在联系起来，需要对氧化分子施加更好的约束。

附录 D：雾霾与温度相互作用

倾向于霾层的反演通常会收敛到比相应无霾解更高的温度，并且温度会向高层大气方向升高（图 D.1）。这一行为在定性上与Jaziri&Drant（2025）对K2-18 b所得的结果一致。

这一行为可以从大气标高的角度加以理解。较高的温度会增大大气标高，使分子吸收特征即使在高空存在光学显著霾时仍能保持可见。随后，霾可以抑制较短波长处的光谱振幅，而增大的大气标高则会维持较长波长处的分子特征。因此，反演可以通过高空霾与相对扩展的大气相结合来再现观测光谱。

这些结果凸显了仅凭透射光谱解读气溶胶性质的内在局限性。光谱振幅降低可能源于高大气金属丰度、云层、光化学霾或温度结构变化的共同作用。因此，即使数据没有对霾提供具有统计显著性的证据，允许额外气溶胶参数的反演仍可能找到合理的霾解。

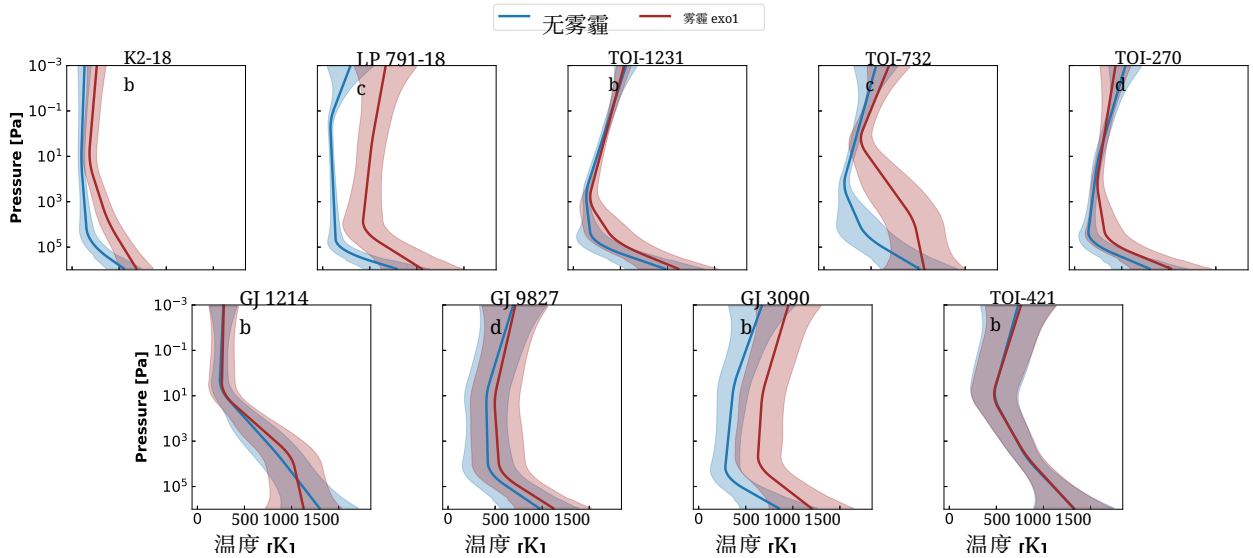

图 D.1：为每颗行星反演得到的温度廓线。蓝色曲线对应无雾霾模型，棕色曲线对应雾霾 exo1 模型。阴影区域表示反演温度廓线的不确定性。该比较展示了纳入雾霾不透明度对推断大气温度结构的影响。

附录 E：贝叶斯因子随雾霾反演参数的变化

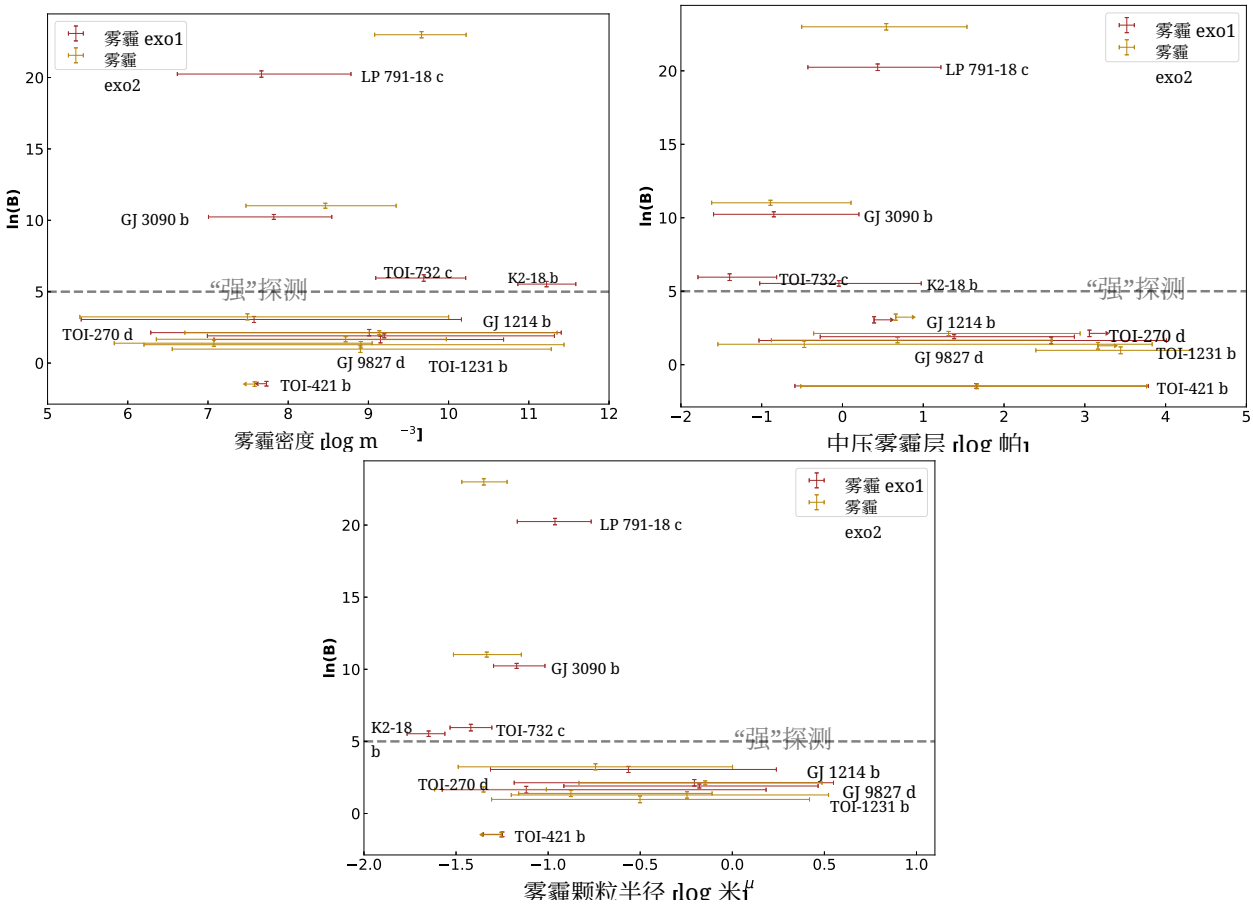

图 E.1：exo1（棕色）和 exo2（金色）雾霾的贝叶斯因子随雾霾反演参数的变化。在 ln(B) = 5 （Benneke 与 Seager（2013））处，以水平灰色虚线标出强探测的界限。这并非关于存在或不存在雾霾的最终结论，而是在考虑数据、拟合参数及其先验分布后对模型的偏好。当反演得到上限或下限时，会用箭头标记。大致居中的较大误差条表示该参数未受到约束。仅展示 TOI-270 d 的结果，且 MIRI 观测的偏移量为 0 ff。

附录 F：反演得到的含雾霾贡献的行星光谱

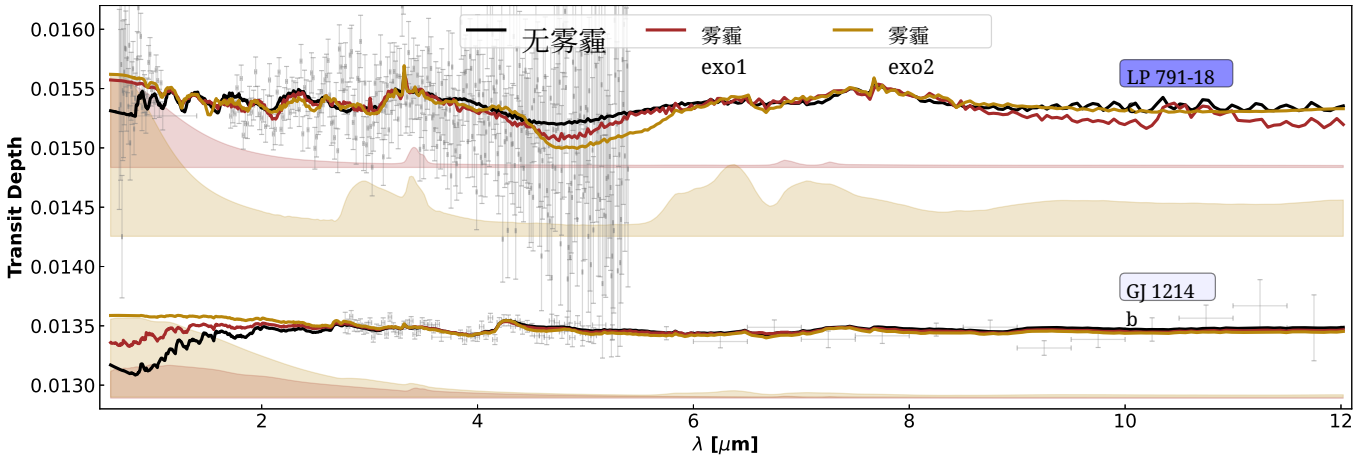

图 F.1：LP 791-18 c 和 GJ 1214 b 的观测光谱，以及无雾霾（黑色）、雾霾 exo1（棕色）和雾霾 exo2（黄色）反演结果的最佳拟合模型（实线）及其薄雾贡献。

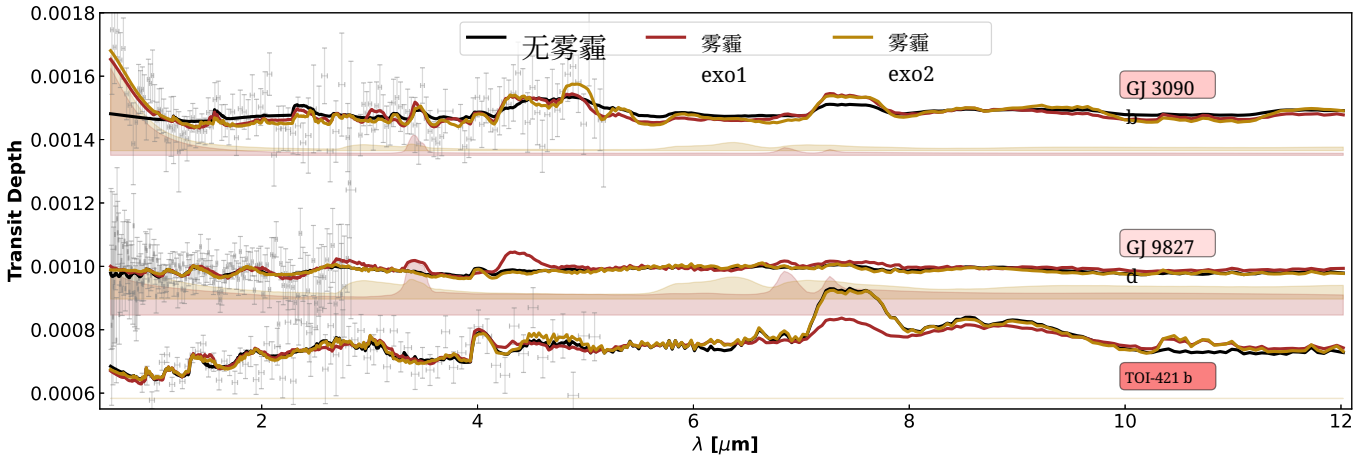

图 F.2：GJ 3090 b、GJ 9827 d 和 TOI-421 b 的观测光谱，以及无雾霾（黑色）、hazeexo1（棕色）和hazeexo2（黄色）反演结果的最佳拟合模型（实线）及其薄雾贡献。

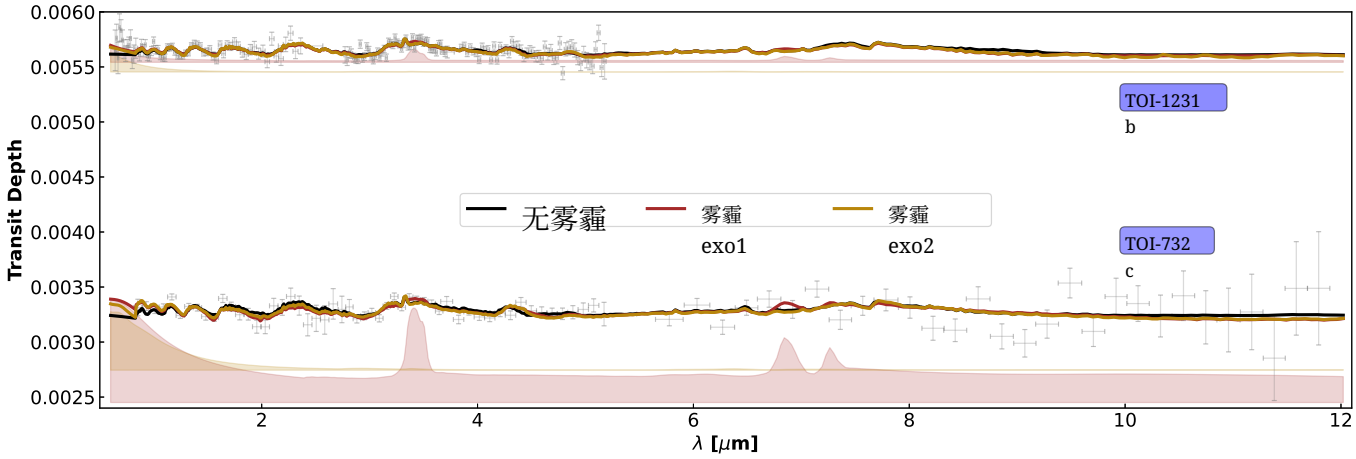

图 F.3：以下天体的观测光谱：TOI-1231 b 和 TOI-732 c，以及无雾霾条件下的最佳拟合模型（实线）（黑色）、雾霾 exo1（棕色）和 雾霾 exo2（黄色）反演结果，以及它们的薄雾贡献。

附录 G：未使用 MIRI 观测数据的 TOI-270 d 分析

我们使用附录A中描述的相同设置，对 TOI-270 d 进行了额外的反演。我们采用了 Benneke 等人 (2024) 提供的 NIRISS SOSS 和 NIRSpec G395H 合并光谱，使用其原生光谱分辨率，且未进行任何仪器间偏移校正。

与纳入 MIRI 数据的反演相比，仅基于 NIRISS SOSS 和 NIRSpec G395H 的反演在 exo1 情形下得到的扩展大气较弱，且对霾参数的约束更严格。反演得到的雾霾位于相对高空，其对应的雾霾不透明度会显著影响透射光谱，尤其是约 3.5 μm 特征附近（图 G.1）。然而，与无雾霾模型相比，存在雾霾的模型在统计上并不占优，贝叶斯对数证据之差为 lnB = 1。1。因此，这些结果与纳入 MIRI 光谱时所得结果之间的差异，可能不仅源于 MIRI 提供了额外的波长覆盖范围，也源于光谱分辨率以及仪器间偏移处理方式的不同。这进一步凸显了推断出的气溶胶性质对光谱数据组合细节的敏感性，以及当前雾霾分析中由此产生的简并性。尽管如此，在本例中，数据并未为雾霾模型提供显著证据，因此不应将推断出的雾霾性质解读为可靠的探测结果。

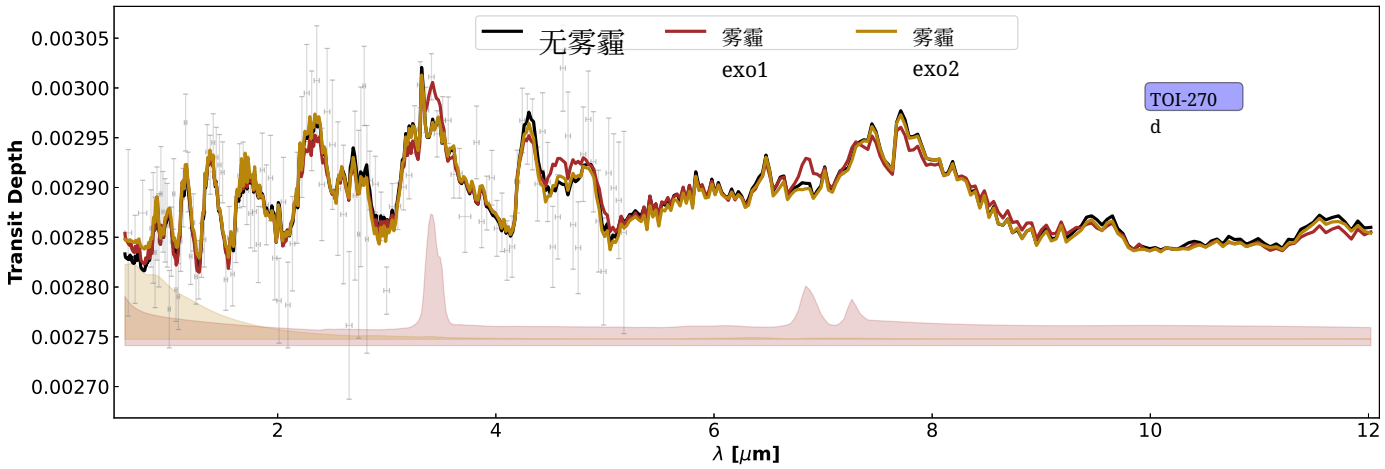

图 G.1：NIRISS SOSS/NIRSpec G395H 低分辨率数据（Benneke 等，2024）的组合光谱。图中还展示了无雾霾（黑色）、雾霾 exo1（棕色）和雾霾 exo2（黄色）反演结果的最佳拟合模型（实线），以及它们的薄雾贡献。

附录 H：TOI-270 d：对 MIRI 光谱的敏感性

TOI-270 d 为检验推断出的雾霾性质对 JWST 数据集的波长覆盖范围和相对标定的敏感性提供了一个有用案例。此前对 NIRISS SOSS 和 NIRSpec G395H 观测的分析报告了对 CH_4, CO_2,CS_2, 和 H_2O（Benneke 等，2024；Constantinou 等，2026）的探测。在纳入 MIRI 数据的联合反演中，我们在无雾霾情形下成功约束了 CH_4, CO_2, CO 和 H_2O。CO 在我们的分析中取代了 CS_2，因为 CS_2 不在反演设置所考虑的不透明度源之列。

纳入雾霾后，羰基硫受到的约束更强，但对于所研究的 MIRI 偏移量，exo1 和 exo2 模型在统计上均不优于无雾霾反演。偏。然而，反演得到的雾霾性质会随采用的 MIRI 偏移量而显著变化。对于 +50 ppm 偏移，霾层会被推向低压，并对透射光谱产生近乎均匀的贡献，从而有效地使短波长光谱变平。类似的行为也出现在其他偏移量下，不过薄雾贡献的大小有所不同；当 MIRI 数据未应用偏移时，薄雾贡献最大（图 H.1）。

附录G展示了仅使用 NIRISS SOSS 和 NIRSpec G395H 光谱进行的其他反演。这些反演进一步说明，推断出的霾参数对所采用的光谱数据集和分辨率十分敏感。然而，雾霾模型在统计上仍不受支持，这表明有无 MIRI 时得到的不同霾解，主要反映了反演的灵活性，而非对气溶胶不透明度的可靠探测。

总体而言，TOI-270 d 表明，纳入 MIRI 数据以及对仪器间偏移的选择，可能会改变首选的霾解，但不一定会改变关于存在雾霾的统计结论。与 LP 791-18 c 以及较为谨慎地说 GJ 3090 b 所发现的更强霾解相比，TOI-270 d 的数据并不要求存在气溶胶成分。这一比较进一步表明，在我们的样本中，短波长光谱斜率比与实验衍生的霾光学性质相关的红外光谱特征更能驱动雾霾探测。

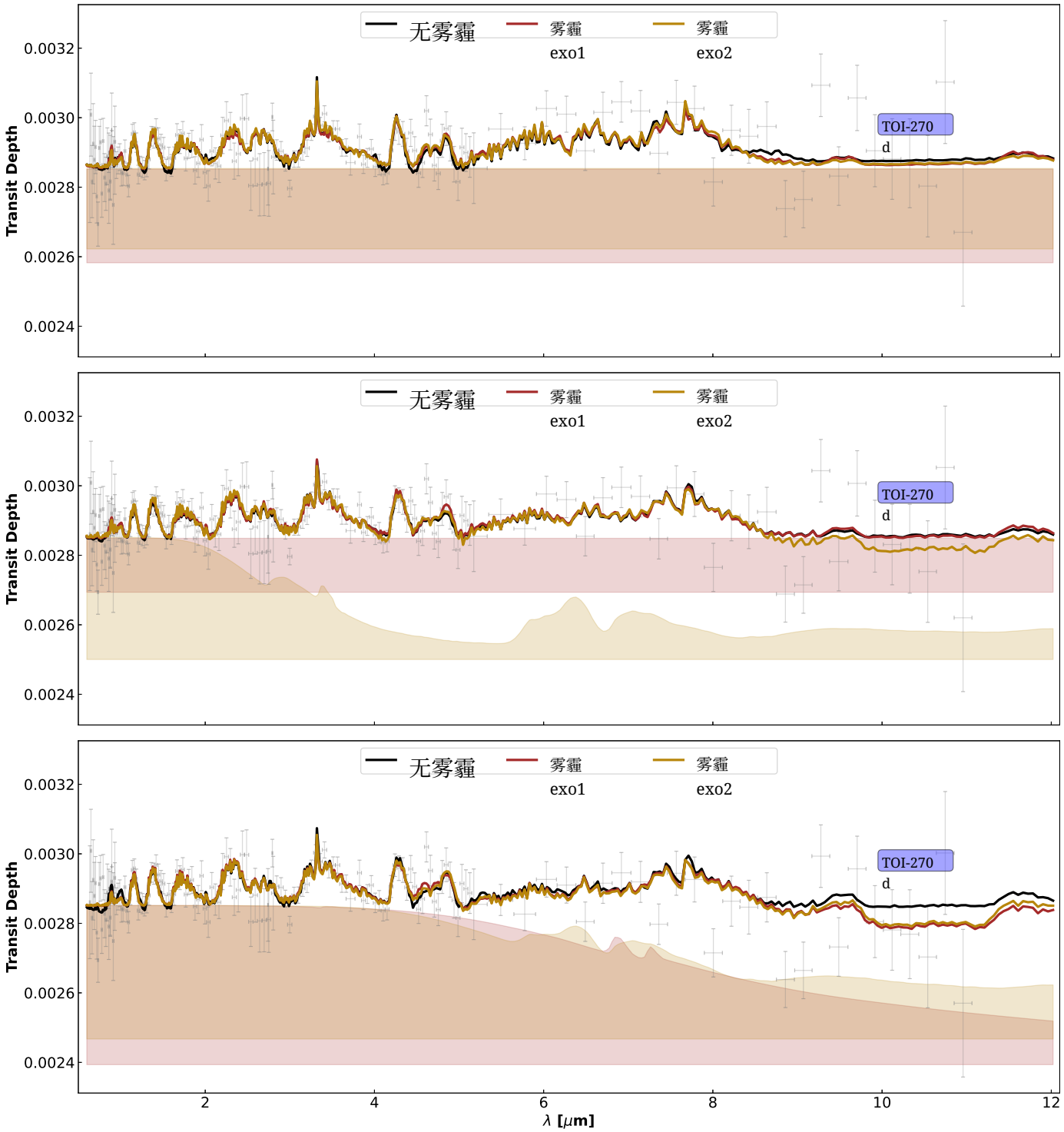

图 H.1：TOI-270 d 的观测光谱（MIRI 偏移量；顶部： +50ppm，中部：0ppm，底部：-50ppm），以及与之并列显示的最佳拟合模型（实线）：无雾霾（黑色）、hazeexo1（棕色）和 hazeexo2（黄色）反演及其薄雾贡献。