

Moorhead, D.L., K.E. Todd-Brown, A.C. Besser, D.E. Bloom, A. Bonner, A. Cueva, J. Li, S.C. Reed, I. Torres, and H.L. Throop. 2025. [Photodegradation of plant litter – reinterpreting data from Mendez et al., \(2022\)](#). *New Phytologist* doi:10.1111/nph.70320

植物凋落物中木质纤维素的光降解——重新解读Mendez et al. (2022)的数据

分解中的植物物质（以下简称“凋落物”）是陆地生物地球化学循环中的一个重要库。地表落叶在旱地生态系统中至关重要，因为它的消失速度远超传统的温度、湿度和凋落物质量控制所预测的速度 (Whitford et al., 1981)。一种可能的解释是长时间暴露于太阳辐射导致刺激分解 (Zlotin, 1979)，尤其是在旱地生态系统当中 (Austin & Vivanco, 2006; Austin & Ballaré, 2024)。Méndez et al. (2022) 最近开展的一项研究分别评估了不同阳光照射 (> 290 nm vs > 550 nm 波长) 对非生物条件下凋落物化学性质和质量损失的直接影响，随后评估了这种照射对潮湿和阴凉田间条件下生物介导腐烂的后续影响。最初的非生物步骤表明，在经过 80 天的 > 290 nm 的太阳照射（包括紫外线和蓝绿波长）后，凋落物质量（4-16%）和木质素（23-39%）浓度会损失。总碳水化合物浓度变化不大（变化 < 2%），但纤维素的酶降解性（糖化）显著增加（37-135%）。需要注意的是，总碳水化合物包括结构性碳水化合物和非结构性碳水化合物，其中纤维素可能是主要成分。在田间条件下，经过 60 天的生物介导分解，凋落物随后的质量损失与田间培养开始时的木质素含量成反比。这项新颖的研究设计独特地区分了生物和非生物过程，对这些结果的解释是，木质素的光降解直接导致了随后由于纤维素糖化增加而导致的生物质量损失 (Méndez 等人, 2022 年)。这与木质素光解解释干旱地区凋落物腐烂率高于预期的假设一致 (Zlotin, 1979; Austin 等人, 2016)，也与木质素对凋落物腐烂影响的传统模型一致 (Meentemeyer, 1978; Berg & McClaugherty, 2022)。

我们同意这些结论，并认为这些结果可以为光降解提供更多见解。糖化作用是通过测量与纤维素酶孵育的垫料样品中葡萄糖的产生量来测量的。该指标表明，阳光照射增加了酶的可用结合位点，而没有增加可用的纤维素相对量（以总碳水化合物浓度近似）。这种反应有几种可能的解释。首先，木质素的光解可能通过减少木质素对纤维素的酶屏蔽来增加酶对纤维素的利用 (Lin & King, 2013; Keiser et al., 2021)。其次，太阳辐射可以直接氧化纤维素键，并产生活性自由基和氧化基团，进而破坏纤维素链 (Potthast et al., 2004; Botti et al., 2024)。第三，木质素光解的反应产物 (Deng et al., 2024) 也可以催化纤维素链的降解 (Austin & Ballaré, 2024)。因此，光降解会产生一系列可能同时发生的级联反应，这些反应可能会增加纤维素的糖化作用并增强其分解 (Baker & Allison, 2015; Day et al., 2018)。

Méndez 等人 (2022) 报告的糖化作用和木质素浓度的相对变化表明了多糖的光降解作用。例如，在最大辐射暴露 (> 290 nm, 持续 80 d) 后，黑杨 (*Populus nigra*)、小麦 (*Triticum aestivum*) 和玉米 (*Zea mays*) 的平均糖化作用分别增加了 73、77 和 177 mg g⁻¹,

而平均木质素浓度分别下降了 43、23 和 20 mg g⁻¹。Méndez 等人 (2022) 认为, 少量的木质素损失可能导致糖化作用的大幅增加。然而, 我们发现糖化作用的增加与木质素损失成反比, 并且是木质素损失的 1.7 到 8.9 倍, 这表明通过纤维素光解产生的结合位点比通过去除先前起屏蔽作用的木质素而暴露的结合位点更多。

我们分析了 Méndez 等人 (2022) 报告的质量损失数据, 包括日光照射前碳水化合物浓度和照射前后木质素浓度。Méndez 等人 (2022) 没有报告现场分解后的凋落物化学成分, 也没有报告任何时间点的纤维素含量, 而只报告了初始和日光照射 80 天后处理的平均总碳水化合物浓度。认识到化学键对特定波长敏感, 我们分别检查了两种日光处理方法, 换句话说, 分别检查了累计暴露于波长 > 290 nm 和波长 > 550 nm (后者省略了紫外线和蓝绿光) 的情况, 以避免将光谱质量与接收到的辐射量混淆。结合所有凋落物类型 (n = 60), 对生物质量损失进行最佳拟合回归分析 (图 1), 发现阳光照射前后的初始碳水化合物浓度而非木质素浓度是质量损失的重要预测因子 (表 1)。所有物种之间的关系掩盖了物种间关系的变化 (图 1)。每个物种和阳光处理 (n = 20) 的最佳拟合回归分析仅包括累积辐射暴露而非木质素作为质量损失的重要预测因子 (表 1), 但暴露于 > 550 nm 辐射的 *P. nigra* 凋落物除外, 该凋落物也没有受到辐射的影响。虽然无法获得阳光照射后的碳水化合物浓度来分析单个物种的反应, 但这些回归的截距从 *P. nigra* 增加到 *Z. mays*, 初始碳水化合物浓度也是如此。

生物活动造成的凋落物质量损失与碳水化合物的关系比与木质素浓度的关系更为密切, 这与传统的凋落物腐烂模型一致, 该模型预测分解最初以微生物对易降解碳水化合物的快速利用为主 (Berg & McClaugherty, 2022)。当木质素含量增加到总木质纤维素的 40% 左右时, 木质素的抑制作用变为主导 (Herman et al., 2008; Moorhead et al., 2013)。然而, Méndez et al. (2022) 报告称, 在田间试验结束时, 凋落物中最高的木质素含量在最大日照 (80 天) 后仅为约 70-270 mg g⁻¹。例如, *Z. mays* 凋落物的平均木质素含量为 31 mg g⁻¹ (波长 > 290 nm), 随后在田间培养过程中损失了 54% 的质量, 如果所有初始木质素都保留下来, 则最终木质素含量限制为 68 mg g⁻¹。同样, *P. nigra* 田间腐烂后的最高木质素含量为 270 mg g⁻¹ (波长 > 550 nm)。凋落物中的纤维素含量从未被报道过, 当使用总碳水化合物作为替代时, 在田间培养开始时, 木质素占 *P. nigra* 木质碳水化合物质量的 34-41%, 但在其他物种中这一比例不到 20%。这些值可能足以抑制黑松 (*P. nigra*) 的纤维素降解, 但无法抑制普通小麦 (*T. aestivum*) 或玉米 (*Z. mays*) 的纤维素降解 (Melillo et al., 1982; Moorhead et al., 2013)。支持这一结论的观察结果是, 酚氧化酶和β-葡萄糖苷酶活性之间不存在关联 (Méndez et al., 2022)。只有当木质素超过木质纤维素复合物的约 40% 时, 这些酶的活性才会发生机械耦合 (Margida et al., 2020)。

Méndez et al. (2022) 的研究表明，在分解过程中，光促进作用对凋落物腐烂的调控存在一个复杂的连续过程，这与其他研究（例如 Day et al., 2015; Yang et al., 2024）的结果相似。在腐烂早期，当木质素含量较低时，总碳水化合物浓度和纤维素的糖化作用可能更为重要，而随着腐烂的进行和相对木质素分数的增加，木质素的光解作用可能变得更加重要 (Berg & McClaugherty, 2022)。当然，木质素的光解作用增加了纤维素被微生物降解的可及性，促进了糖化作用，并延缓了木质素浓度最终抑制分解的作用。因此，光降解的非生物机制和生物机制之间存在许多协同作用，驱动变量之间存在许多相关性，这使得解释更加复杂。

Méndez 等人 (2022) 的独特研究设计创造性地将生物过程和非生物过程区分开来。进一步开展更精细的凋落物化学分辨率的创新研究、将有助于进一步阐明阳光照射对凋落物腐烂模式的影响，尤其是在干旱地区生态系统特有的时空异质性条件下 (Throop & Belnap, 2019)。对暴露于阳光下的凋落物进行更长时间的田间培养，也能阐明光解作用对木质纤维素相互作用模式的影响，而木质纤维素相互作用模式是传统分解模型的一个基本特征。从更广阔的视角来看，光解作用已被确定为多种陆地生态系统中分解的控制因素 (Austin & Ballaré, 2024)，这表明光降解很可能是全球分解过程中不可或缺的一部分，尽管除了干旱地区（普遍存在的水分限制加剧了其贡献）外，其他地区长期以来都忽视了光降解作用 (Baker & Allison, 2015)。