

干湿循环对土壤有机碳淋溶动态的影响研究

刘菁^{1,2} 钱永^{2*}

1. 长江大学资源与环境学院, 中国·湖北 武汉 430100
2. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 中国·河北 石家庄 050800

摘要: 以江汉平原土壤作为研究对象, 采用控制变量法分别探究不同淋溶时间和干旱时间对土壤有机碳淋溶分异的影响, 即设计不同淋溶时间和干旱时间的土壤批实验以模拟真实环境中降雨导致的淋溶过程。利用紫外-可见吸收光谱和三维荧光光谱, 并结合平行因子分析法, 分析了干湿交替条件下土壤 DOM 的物质组成、来源特征及其影响因素。结果表明, 土壤电导量随着淋溶次数的增加而减少, 电导与淋溶次数具有极显著负相关性, pH 维持在 7~8, 干湿交替的淋溶强度与干燥强度对土壤 EC 与 pH 的影响均不显著。DOM 利用平行因子分析法共解析出 3 个荧光组分, 其中 C1 和 C2 均为腐殖质组分, C3 为类色氨酸组分。根据光谱参数的分析结果, 富里酸为土壤 DOM 的主要构成物质; 本研究土壤的 DOM 同时受到外源作用, 腐殖化程度较弱且自生源特征不明显。

关键词: 干湿循环; 土壤; 淋溶; 影响

Research on the Impact of Dry Wet Cycle on Soil Organic Carbon Leaching Dynamics

Jing Liu^{1,2} Yong Qian^{2*}

1. Changjiang University College of Resources and Environment, Wuhan, Hubei, 430100, China
2. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang, Hebei, 050800, China

Abstract: Taking the soil of Jiangnan Plain as the research object, the controlled variable method was used to explore the effects of different leaching time and drought time on soil organic carbon leaching differentiation. Soil batch experiments with different leaching time and drought time were designed to simulate the leaching process caused by rainfall in real environments. Using UV visible absorption spectroscopy and 3D fluorescence spectroscopy, combined with parallel factor analysis, the material composition, source characteristics, and influencing factors of soil DOM under wet dry alternation conditions were analyzed. The results showed that soil conductivity decreased with increasing leaching times, and there was a significant negative correlation between conductivity and leaching times. pH was maintained at 7-8, and the effects of alternating wet dry leaching intensity and drying intensity on soil EC and pH were not significant. DOM used parallel factor analysis to analyze three fluorescent components, among which C1 and C2 are humic substances, and C3 is a tryptophan like component. According to the analysis of spectral parameters, fulvic acid is the main component of soil DOM; the DOM of the soil in this study was subjected to external influences, resulting in weak humification and unclear autochthonous characteristics.

Keywords: wet dry cycle; soil; leaching; influence

0 前言

碳循环是环境研究重点。土壤是关键碳库, 其有机碳可转化为 CO₂ 和 CH₄ 排入大气, 或以水溶性形式进入水体, 构成碳循环重要部分^[1]。土壤有机碳包括腐殖质、残体等, 对肥力和作物生长至关重要, 影响气候变化。溶解有机碳 (DOC) 占土壤碳小部分, 但生物活性高, 是活跃碳库, 对生态功能重要。淋溶作用^[2]使土壤有机碳迁移, 形成 DOC, 是土壤碳损失途径。长期淋溶导致肥力下降, 影响养分循环和生产力。降雨加剧淋溶, 不利肥力保持。溶解性有机质参与生物地球化学过程, 与碳循环密切相关^[3-4]。

江汉平原位于湖北省东南部, 由长江和汉江冲积而成, 地势低平, 属亚热带季风气候, 春秋多雨, 夏季易涝。该地区土壤干湿交替显著影响溶解性有机质 (DOM) 的组成和

特性, 干旱和湿润状态改变土壤溶液中有机质含量, DOM 迁移的关键环境过程。

目前, 土壤 DOC 淋溶研究已取得一定进展, 主要集中在 DOC 含量的时空变化及其影响因素^[5-6]。未来研究应加强对淋溶过程中 DOC 组分的研究, 尤其是在干湿交替条件下的淋溶特征, 这有助于科学理解降雨对土壤有机质淋溶分异过程的影响, 以及对农田土壤的影响。研究不同干湿交替频率下土壤微环境的变化, 可以为江汉平原表层土壤微环境对全球气候变化背景下降水格局改变的响应提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料制备

本研究中所使用的土壤是从武汉市蔡甸区的一块田地中收集的。土壤被风干并使用 100mm 的筛子手动筛选后装好保存,

之后用于土壤理化指标的测定以及 UV-vis 和 3D-EEM 测定^[7]。将 1g 田间土壤与 5mL 去离子水混合 1h 后, 测定土壤溶液的 pH 值和电导率, 分别为 7.85 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 和 173 $\mu\text{s}/\text{cm}$ 。

1.2 试验方案

取风干土 5g 于 50mL 试管中, 置于常温光照培养箱。每 24h 用小风扇给广口瓶进行通气。试验进行七次干湿交替, 共设置 16 组不同频率的干湿交替试验组, 所有组均设置 3 个重复。试验期中一次湿润后再干燥的过程视为一次干湿交替。干燥处理如下: 于试管口内悬挂小包干燥剂并每天更换一次使土壤含水量降低, 每天称重来记录土壤含水量。湿润处理如下: 加入 30mL 超纯水后摇晃混合, 置于振荡器中振荡 1h (振速为 200r·min⁻¹), 振荡结束后使用高速离心机离心 10min (转速为 5200r·min⁻¹), 最后取上清液用 0.45 μm 滤膜过滤, 得到 DOM 溶液, 以上干湿交替连续操作七次。干燥过程用滴管向土壤中滴加蒸馏水, 用称重法使其重量含水量保持一致, 每天适当滴加蒸馏水维持其土壤含水量恒定 (且各组统一)^[8]。淋溶四种处理分别是淋溶 1h、2h、3h 和 4h, 干燥同样四种处理分别是干燥 3h、6h、9h 和 12h。以上干燥淋溶处理两两组合, 共 16 组处理, 如淋溶 1h 干燥 3h 记为 DW1-3, 其余组别同上。

1.3 样品测定

1.3.1 土壤理化性质测定

土壤 pH 值采用 pH 计直接测定, 土壤电导率用电导计测定, 土壤含水率采用烘干法测定, 土壤有机碳由 TOC 仪测定。

1.3.2 土壤中 DOM 提取

土壤中 DOM 的提取采用振荡提取与离心相结合的方法。具体操作过程为: 称取 5g 过 100 目筛的土壤样品放入离心管中, 加入 30mL 超纯水后摇晃混合, 置于振荡器中振荡 1h (振速为 200r·min⁻¹), 振荡结束后使用低速离心机离心 10min (转速为 3600r·min⁻¹), 最后取上清液用 0.45 μm 滤膜过滤, 得到 DOM 溶液, 待光谱分析。

1.3.3 光谱测定

土壤中 DOM 的 UV-vis 通过紫外-可见分光光度计测定, 使用 1nm 光程的比色皿, 在 200~700nm 范围内以 10nm 间隔扫描。3D-EEM 荧光光谱则在激发波长 250~450nm (增量 4nm) 和发射波长 300~550nm (增量 2nm) 下测定, 扫描速度 12000nm/min, 狭缝宽 5nm。为消除内滤效应, 需根据 DOM 浓度稀释样品后测定。

1.4 数据处理与分析

1.4.1 紫外可见光谱特征参数分析

UV254 为波长 254nm 处的吸光度, 用于表示 DOC 的浓度及芳香性; 通过以下公式可获得相应波长下的吸收系数。 $\alpha\lambda=2.303A\lambda/L$ 式中, $\alpha\lambda$ 为波长 λ 下的吸收系数 (m^{-1}), $A\lambda$ 为吸光度, L 为光程路径 (m)。

吸光度比值 E2/E4 为波长 254nm 和 436nm 处吸光度的比值, 可表征 DOM 来源和有机物分子缩合度。该值较高为内源, 较低为外源, 且与分子缩合度呈负相关; E3/E4 为波

长 300nm 和 400nm 处吸光度的比值, 用于表征 DOM 的腐殖质化程度。该值越高, 腐殖质化程度越低, 当 E3/E4 < 3.5 时, DOM 以胡敏酸为主, 反之则以富里酸为主。

1.4.2 三维荧光光谱参数分析

本研究通过荧光指数 (FI、HIX、BIX) 分析了土壤 DOM 的特性和来源。FI 指数通过 Ex=370nm 时 Em450nm 与 500nm 的荧光强度比来指示 DOM 来源, FI > 1.9 表示内源性有机质, FI < 1.4 表示外源性有机质。HIX 指数通过 Ex=254nm 时 Em435~480nm 与 300~345nm 的积分面积比来衡量 DOM 的腐殖化程度, HIX 值高表示腐殖化程度强。BIX 指数通过 Ex=310nm 时 Em380nm 与 430nm 的荧光强度比来评估 DOM 自生源贡献, 0.6 < BIX < 0.7 表示自生源成分少, BIX > 1 表示主要为新产生的自生源有机质。

1.4.3 平行因子分析

采用 PARAFAC 对所得 3D-EEMs 数据进行模拟分析以提取 DOM 中荧光组分。各组分荧光峰处的荧光强度 Fmax 表示其浓度。通过比对输出的 Ex 和 Em 数据进行荧光组分鉴定。

1.4.4 数据统计分析

利用 Excel 2016 计算土壤 DOM 光谱数据的平均值、最值和标准差; 利用 Origin 2021 制作散点图和折线图; 以土壤理化指标为解释变量, 光谱参数为响应变量, 分析探讨淋溶对土壤 DOM 光谱特征的影响因素。

2 结果与讨论

2.1 土壤理化性质分析

实验监测淋溶溶液的 pH 和电导率, 以评估土壤淋溶中成分流失的稳定性, 并确保实验准确性, 减少错误。土壤经七次淋溶, 淋溶液 EC 变化主要由土壤盐分淋失引起。四组对照显示, 初次淋溶时土壤溶解大量易溶盐, EC 较高 (200 $\mu\text{s}/\text{cm}$), 随后随淋溶次数和盐分减少而逐渐降低, 直至淋溶完成。

2.2 DOC 浓度变化特征分析

DOC 浓度首次淋溶后迅速下降, 从 14mg/L 降至 9mg/L, 随后在第三次至第七次淋溶中逐渐降至 4mg/L。初期淋溶中, 溶液与土壤接触导致易解吸的有机物最先进入淋溶液, 因此 DOC 浓度较高。随着淋溶的继续, 较难解吸的有机物逐渐释放, 导致 DOC 浓度缓慢下降。DOC 随淋溶次数递减, 恒湿组与恒干组淋溶前后 DOC 含量比较显示, 首次与末次淋溶量差异小, 均值在 0 到 0.5mg/L 内。土壤七次淋溶 pH、EC 和 DOC 变化图如图 1 所示。

2.3 土壤 DOM 紫外-可见吸收光谱参数分析

DOM 的紫外-可见吸收光谱参数 (SUV254、E2/E4 及 E3/E4) 如图 2 所示。土壤淋溶液 DOM 的这些参数有波动, 但无显著性差异, 表明 DOM 的芳香度、来源、分子缩合度和腐殖化程度相似。不同处理下, E2/E4 值和 E3/E4 值变化一致, 无显著差异, 显示淋溶处理对 DOM 特性影响不大。所有条件下 E2/E4 值和 E3/E4 值大于 3.5, 表明 DOM 主要由富里酸组成。

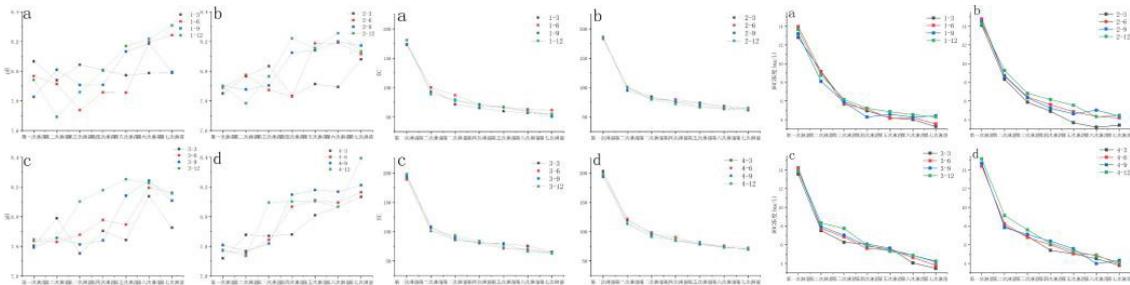


图 1 土壤七次淋溶 pH、EC 和 DOC 变化图

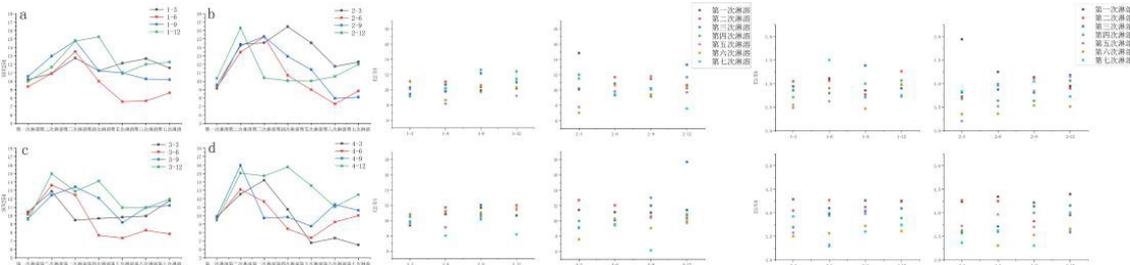


图 2 土壤 SUVA254 值、E2/E4 值和 E3/E4 值变化图

2.4 土壤 DOM 荧光光谱参数分析

本研究选取 3 个荧光参数 (FI、HIX 和 BIX) 对正定土壤 DOM 荧光光谱特性进行深入探究。七次淋溶过程中, 可以发现无论是不同淋溶时间还是不同干燥时间的土壤淋溶液体 DOM 的 FI 值都相差不大, 各平均值都位于 1.5 左右, 表明体系中绝大多数有机质为陆源输入成分, 其来源以外源为主。土壤溶 FI、HIX 和 BIX 分布图如图 3 所示。

统计分析结果显示, 不同淋溶时间或干燥时间土壤 DOM 的 HIX 值均不存在显著差异, 这说明不同处理淋溶条件下土壤 DOM 的腐殖化程度相似, 都显示出腐殖化程度较

弱的特点。可以发现, BIX 值总体处在小于 0.6, 呈现弱自生源特征, 土壤淋溶液中 DOM 的自生源贡献较少, 受陆源输入或人类活动影响强烈, 这与 FI 值所表征的意义一致。

2.5 土壤 DOM 荧光组分特征分析

利用 PARAFAC 模型对土壤 DOM 进行三维荧光光谱解析, 共解析出 3 个荧光组分。各组分的最大激发波长与发射波长 (Ex/Em) 如图 4 所示, 分别为 278 (358) nm/470nm (C1)、270 (322) nm/418nm (C2)、< 250nm/364nm (C3) 和 240nm/490nm (C4)。C1 与 C2 组分与腐殖质物质类似, 主要来自陆源输入, C3 属于类色氨酸物质。

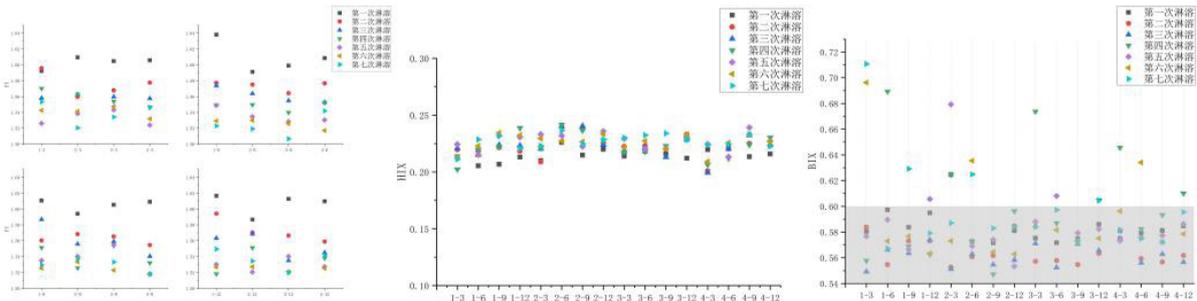


图 3 土壤溶 FI、HIX 和 BIX 分布图

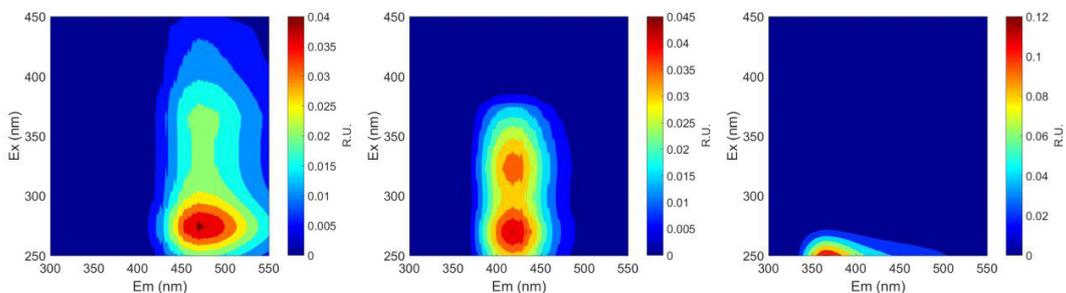


图 4 土壤 DOM 荧光组分分布图

3 讨论

在干湿交替条件下, 土壤中可溶有机碳的含量也发生了变化。干湿交替作用下, 土壤含水量的改变将引起土壤结构、物理特性的改变, 进而影响其稳定性。但在本试验中, 短干处理下, 土壤中可溶有机碳的含量发生了很大的改变, 这是因为短干土壤中的微生物活力不高, 不利于微生物降解等生化反应, 也有可能是因为短干后的降解时间不长, 无法反映出长期的差别可溶性有机物随淋滤次数的增多而降低。

干湿交替以及频繁的干湿交替会增加土壤中的水溶性有机碳, 大体因为土壤结构膨胀、团聚体破坏、微生物在干旱时期的死亡、水分对微生物活性的影响等过程导致水溶性有机碳增加。后续应更深入考虑设计干湿交替的时间长短。

4 结论

①土壤电导量随着淋溶次数的增加而减少, 电导与淋溶次数具有极显著负相关性, pH 维持在 7~8, 干湿交替的淋溶强度与干燥强度对土壤 EC 与 pH 的影响均不显著。

② DOM 利用 PARAFAC 共解析出 3 个荧光组分, 其中 C1 和 C2 均为腐殖质组分, C3 为类色氨酸组分。

③根据光谱参数 (SUV254、E2/E3、FI、HIX 及 BIX) 的分析结果, 富里酸为土壤 DOM 的主要构成物质; 本研究土壤的 DOM 同时受到外源作用, 腐殖化程度较弱且自生源

特征不明显。

参考文献:

- [1] 王艳丹,余建琳,张梦寅,等.施氮对干热河谷农田土壤有机碳及其组分的影响[J].中国土壤与肥料,2022(9):8-17.
- [2] 郭冬楠,臧淑英,赵光影,等.排水造林对小兴安岭湿地土壤溶解性有机碳生物降解和淋溶的影响[J].环境科学学报,2016,36(7):2631-2637.
- [3] 熊丽,杨玉盛,王巧珍,等.可溶性有机碳在米槠天然林土壤中的淋溶特征[J].亚热带资源与环境学报,2014,9(1):46-52.
- [4] 姜海超.吉林省主要土壤溶解性有机碳及其淋溶特性研究[D].长春:吉林农业大学,2016.
- [5] 杨继松,刘景双,于君宝,等.草甸湿地土壤溶解性有机碳淋溶动态及其影响因素[D].2006.
- [6] 夏品华,喻理飞,寇永珍,等.贵州高原草海湿地土壤有机碳分布特征及其与酶活性的关系[J].环境科学学报,2017,37(4):1479-1485.
- [7] 王燕,庞卓,贾月,等.生物炭对北京郊区砂土持水力和氮淋溶特性影响的土柱模拟研究[J].农业环境科学学报,2017,36(9):1820-1828.
- [8] 杨继松,刘景双.小叶章湿地土壤微生物生物量碳和可溶性有机碳的分布特征[J].生态学杂志,2009(8):1544-1549.

作者简介: 刘菁 (1999-), 女, 中国重庆人, 硕士, 从事环境保护与生态修复研究。