

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.04.013

引用格式:郑丁元,李富翠,沙梦溪,等.不同类型城市草地土壤可溶性有机碳的特征[J].草地学报,2026,34(4):1275—1287
ZHENG Ding-yuan, LI Fu-cui, SHA Meng-xi, et al. Characteristics of Soil Soluble Organic Carbon in Different Types of Urban Grassland[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(4):1275—1287

不同类型城市草地土壤可溶性有机碳的特征

郑丁元¹, 李富翠^{1,2*}, 沙梦溪¹, 邵亚龙¹, 谢军飞³, 李新宇^{3,4}, 张胜男^{1,2}, 李海涵^{1,2},
朱澎荃¹, 程钰楠¹, 闫雨欣⁵, 刘锡霖¹

(1. 北京林业大学草业与草原学院, 北京 100083; 2. 国家林业草原运动场与护坡草坪工程技术研究中心, 北京 100083; 3. 北京市园林绿化科学研究所, 北京 100102; 4. 北京城市生态系统定位观测研究站, 北京 100102; 5. 中国农业大学, 北京 100193)

摘要:为探究城市草地类型对土壤可溶性有机碳(Dissolved organic carbon, DOC)及其特征的影响,本试验以北京市城市绿地生态系统为研究对象,设置裸地、冷季型草坪、暖季型草坪和林下地被四种处理,测定土壤DOC含量,利用紫外可见光谱和三维荧光光谱分析土壤可溶性有机质(Dissolved organic matter, DOM)的光谱特征。结果显示:与裸地相比,冷季型草坪表层土壤DOC含量显著降低30% ($P < 0.05$),而暖季型草坪、林下地被差异均不显著。紫外光谱显示,各处理DOM的芳香性与疏水性无显著差异。荧光光谱表明,城市草地DOM具有一定混合来源特征,城市草地腐殖化进程较裸地增强但自生源贡献降低,城市草地微生物活动较强但生物可利用性弱。研究表明:城市草地DOC动态受植被类型、管理措施及微生物活动多因素协同调控,优化草坪的施肥管理,考虑所选草种固碳类型,可增强城市土壤碳固存功能及稳定性,为城市绿地生态功能提升提供理论支撑。

关键词:城市草地; 植被类型; 可溶性有机碳; 紫外-荧光吸收特征

中图分类号: S812.2

文献标识码: A

文章编号: 1007-0435(2026)04-1275-13

Characteristics of Soil Soluble Organic Carbon in Different Types of Urban Grassland

ZHENG Ding-yuan¹, LI Fu-cui^{1,2*}, SHA Meng-xi¹, SHAO Ya-long¹, XIE Jun-fei³, LI Xin-yu^{3,4},
ZHANG Sheng-nan^{1,2}, LI Hai-han^{1,2}, ZHU Peng-hui¹, CHENG Yu-nan¹, YAN Yu-xin⁵, LIU Xi-lin¹

(1. School of Grassland Science, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Engineering and Technology Research Center for Sports Field and Slope Protection Turf, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100083, China; 3. Beijing Academy of Forestry and Landscape Architecture, Beijing 100102, China; 4. Beijing Urban Ecosystem Positioning Observation and Research Station, Beijing 100102, China; 5. China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: To explore the influence of urban grassland types on soil DOC and its characteristics, this study took the urban green space ecosystem in Beijing as research object. Four treatments were established: bare land, cool-season grassland, warm-season grassland, and urban understory ground cover. The soil DOC content was measured, and the spectral characteristics of soil dissolved organic matter (DOM) were analyzed by using ultra-violet-visible spectroscopy and three-dimensional fluorescence spectroscopy. The results showed that compared to the bare land, the DOC content of the cool-season grassland surface soil was significantly decreased by 30% ($P < 0.05$), but there was no significant difference from warm-season grassland and urban understory ground. The UV spectra showed there was no significant difference between the aromaticity and the hydrophobicity of the DOM among the treatments. The fluorescence spectra showed that the DOM of urban grasslands had mixed source characteristics. In compared with the bare land, the humization process of the urban grasslands

收稿日期: 2025-07-25; 修回日期: 2025-10-16

基金项目: 国家级大学生创新创业训练计划(202410022119); 国家自然科学基金(32401493)资助

作者简介: 郑丁元(2004-), 男, 汉族, 河北衡水人, 本科生, 主要从事草地土壤碳氮循环方向研究, E-mail: 1571720185@qq.com; *通信作者
Author for correspondence, E-mail: li_fucui043@126.com

was enhanced but self-source contribution was decreased, with strong microbial activity but weak bio-availability. The results showed that the dynamic of DOC in urban grassland was regulated by vegetation type, management measures and microbial activity. The optimization of fertilization management and the consideration of carbon sequestration type of grass species could enhance the function and stability of urban soil carbon sequestration, which provided theoretical support for the improvement of urban green space ecological function.

Key words: Urban lawn; Vegetation types; Dissolved organic carbon; UV-fluorescence absorption characteristic

土壤碳库是陆地生态系统中最大的碳库,碳储量约为大气碳库的3.3倍、生物碳库的4.5倍^[1]。因此,土壤碳库被视为大气碳库重要的“源”和“汇”,其微小变化能够通过生态系统碳循环过程对大气CO₂浓度产生显著影响^[2]。可溶性有机质(Dissolved organic Matter, DOM)是指能够通过0.45 μm微孔滤膜的有机物质,广泛存在于土壤溶液及自然水体中,主要包括可溶性有机碳(Dissolved organic carbon, DOC)、可溶性有机氮和可溶性有机磷等组分^[3-5]。

尽管DOM在土壤有机质库中所占比例相对较小(通常<5%),但其作为活性有机质的关键组分,能及时捕捉土壤有机质的动态并作出响应,在土壤碳循环中发挥着重要调控作用^[1,6-7]。近期的研究表明,DOM不仅是微生物代谢的主要能量来源^[8],更是驱动有机碳“矿化-稳定化”双向过程的重要载体^[9]。因此,测定DOM组成特征及动态变化对于揭示土壤碳循环机制、评估土壤质量及预测全球气候变化具有重要意义。作为DOM的主要组分,DOC具有高迁移性和生物可利用性特征,这也使其成为指示土壤有机碳稳定性的敏感指标。一方面,DOC的快速周转能够放大土壤碳库对外界干扰,比如增温、土地利用变化等的响应^[10-12]。另一方面,DOC与土壤矿物表面的络合作用可促进持久性有机碳库的形成,该过程占全球土壤碳固存量的40%以上^[13-15]。这种“动态平衡”特性使得DOC通量监测成为评估土壤碳稳定性的关键生物地球化学指纹^[16]。因此,通过土壤DOC的测定能够更好反映土壤有机碳的稳定性^[17-18]。

最新研究表明,在未来全球变暖的背景下,土壤碳库的流失将显著削弱全球陆地生态系统碳汇在减缓大气CO₂上升的重要作用^[19]。草地生态系统贡献了陆地生态系统总生产力的30%,占全球有机碳储量的10%^[20]。然而Matthew等^[21]研究表明全球变暖引发的高温、干旱、强降水等极端天气事件对草地土壤有机碳矿化和CO₂释放的速率和强度产生显著影响,特别是提高了土壤有机碳的分解速率。孔凡婕等^[22]研究表明采取适宜的草地管理措施对于改善草地生态系统的碳汇功能作用显著。因此,深入探究草地生态系统中土壤有机碳含量及

稳定性对于应对气候变化和环境恶化具有不可替代的重要现实意义。目前,大量研究聚焦于生态因素对草地土壤有机碳及其稳定性的影响,包括氮沉降、增温、干旱等^[23-27]。然而,这些研究主要集中在天然草地生态系统,而对于城市绿地生态系统,特别是城市草地部分的研究尚属匮乏。

随着城市化进程加快,城市绿地面积的持续扩张,城市草地(也常被称作草坪)的建设日益增多^[28]。根据《中国城市统计年鉴》所发布的数据,截至2022年,中国城市人均公共绿地面积已增至14.7 m²,相较于2010年增长近50%。以北京为例,截至2025年,全市城市绿化覆盖率已达49.84%,人均公园绿地面积提升至17.09 m²,公园绿地500 m服务半径覆盖率达92.92%。城市草地不仅是服务城市居民的休闲娱乐空间,更是庞大的碳储存库,对全球碳循环具有重要影响。Canedoli等^[29]研究发现城市裸露草地、林下地被土壤有机碳储量存在显著差异,这与人类活动导致城市土地的不同利用方式相关。陈佳俐等^[30]研究表明,植被类型是导致城市草地土壤有机碳(SOC)、土壤可溶性有机碳(DOC)含量产生差异的重要因素。DOC作为活性有机碳的关键组分,在土壤碳循环中发挥着重要作用,因此,探究城市不同草地类型对土壤有机碳含量、DOC及其芳香结构和降解特性的影响,有助于指导城市草地建植时草坪类型的选择,为维护生态系统的平衡稳定与全球的碳循环提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本项目选择北京城市生态系统定位观测研究站作为试验区(东经116°43',北纬39°32'),该观测研究站占地面积34 000 m²,主要由草坪及槐(*Styphnolobium japonicum* (L.) Schott)、银杏(*Ginkgo biloba* L.)等植被构成的疏林地组成。该研究站所在的气候为典型的大陆性季风气候,年平均气温10℃~12℃,1月-7℃~-4℃,7月25℃~26℃,极端最低-27.4℃,极端最高42℃以上。年平均降雨量

600 mm 左右,全年降水的 80% 集中在夏季(1951—2011 年中国地面气候资料日值数据集)。

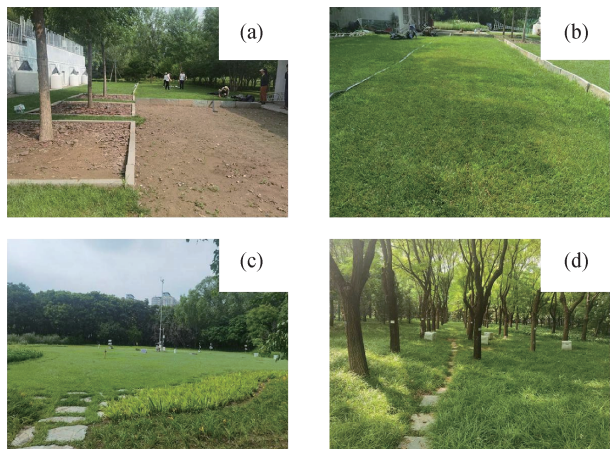


图 1 试验地点与小区

Fig. 1 The test sites and plots

注:a为裸地、b为冷季型草坪、c为暖季型草坪、d为林下地被
Note:a is bare ground, b is cool-season grassland, c is warm-season grassland, d is urban understory ground cover

试验共设置裸地(BS)、冷季型草坪(CT)、暖季型草坪(WT)和林下地被(UF)四个处理(图 1),所有处理均于 2016 年 5 月按照当地常规建植方法,通过旋耕法处理表层土壤后采用人工撒播的方式建立^[31]。裸地处理是指城市裸土未进行任何种植,在生长季有野草出现时,最大限度保证减少土壤扰动的前提下,人为拔除全部杂草。冷季型草坪由黑麦草(*Lolium perenne* L.)和草地早熟禾(*Poa pratensis* L.)混播建植,总播种量为 $30\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$,两草种均属于 C_3 植物,生长季 4~11 月,其中黑麦草属典型多年生草本植物,喜湿润温凉气候,最适宜生长温度在

27°C 以下;早熟禾则是禾本科早熟禾属,性喜光、耐旱、耐寒及耐阴性较强, -9°C 下仍能保持绿色。暖季型草坪由耐干旱的野牛草(*Buchloe dactyloides*)单一建植,播种量为 $30\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$,野牛草属于 C_4 植物,禾本科野牛草属,生长季 5~10 月,是多年生低矮草本种植物,具有耐干旱盐碱,长速较快的特点。城市林下地被上层乔木为栎树(*Koelreuteria paniculata* Laxm.),林下地被由耐阴的崂峪苔草(*Carex giraldiana giraldiana* Kük.)建成,播种量为 $30\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 。崂峪苔草也属于 C_3 植物,其地上部分平均长度可达 16~30 cm,具有较强的耐阴能力,是北京等地区大面积应用的地被植物,具体处理信息见表 1。

试验为单因素随机区组实验设计,四个处理重复三次,小区长 6 m,宽 4 m,面积为 24 m^2 ,每小区间隔 1 m。根据北京市园林绿化养护管理标准^[32],冷季型草坪、暖季型草坪以及林下地被均在每年 3 月和 10 月采用水肥一体化技术施用 $50\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ 的氮肥,即各样地在生长季均总共施入 $100\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ 的氮肥以保证植物营养充足。具体操作为将定量的尿素溶解于水中,随后均匀喷洒于草地表面。每次施肥后,均在 24 小时内以 5 mm 的水量进行灌溉,以促进氮肥的充分溶解并深入土壤底层,从而实现肥料利用效率的最大化。鉴于春季降雨量相对较少,为避免植物遭受干旱压力,每月对冷季型草坪和暖季型草坪进行 1 至 2 次灌溉,其余季节则根据干旱情况调整每月灌溉次数。林下地被所有季节均仅在出现干旱症状时灌溉。同时在生长季每月对冷季型和暖季型草地进行 1 至 2 次修剪,使用自动草坪修剪机将草坪高度维持在约 5 cm,林下地被不进行修剪。

表 1 试验处理信息表

Table 1 Test processing information

处理 Treatments	物种 Species	固碳类型 Carbon sequestration types	特征 Characteristics
城市裸土 Bare soil			未进行种植,生长季有野草出现时人为拔除 Without planting, wild grass is pulled out during the growing season
冷季型草坪 Cool-season grassland	黑麦草 <i>Lolium perenne</i> L. 草地早熟禾 <i>Poa pratensis</i> L.	C_3 植物 C_3 plant	喜湿润温凉气候,最适宜生长温度在 27°C 以下 This species thrives in cool, moist climates, with an optimal growth temperature below 27°C 喜光、耐旱、耐寒及耐阴性较强, -9°C 下仍能保持绿色 This species is highly tolerant to light, drought, cold, and shade, retaining its green coloration even at temperatures as low as -9°C
暖季型草坪 Warm-season grassland	野牛草 <i>Buchloe dactyloides</i> Engelm.	C_4 植物 C_4 plant	耐干旱盐碱,长速较快 This species exhibits strong tolerance to drought and saline-alkaline conditions, along with a relatively rapid growth rate
林下地被 Understory ground cover	崂峪苔草 <i>Carex giraldiana</i> <i>giraldiana</i> Kük.	C_3 植物 C_3 plant	耐阴,地上部分平均长度 16~30 cm,是北京市大面积应用的地被植物 As a shade-tolerant groundcover, its aboveground parts reach an average length of 16-30 cm, making it widely adopted for large-scale greening applications in Beijing

1.2 土壤样品采集

样品于 2024 年 7 月采集,采用“五点混合法”用直径 5 cm 土钻分别取 0~20 cm 和 20~40 cm 土层土壤。将五点采集的土壤样品混合为 1 个样品,装袋密封并贴好标签,除去石块、动植物残体

等杂质。取一部分新鲜土壤样品用于 DOC 含量和紫外、荧光表征,以及水分含量和无机氮含量测定。另一部分进行风干处理,风干土用于土壤有机碳和全氮含量的测定。土壤基本性状见表 2。

表 2 土壤基本性状

Table 2 Basic properties of the soil

土层深度 Soil depth/ cm	草坪类型 Grassland types	全氮 Total nitrogen/ (g·kg ⁻¹)	硝态氮 Nitrate nitrogen/ (mg·kg ⁻¹)	铵态氮 Ammonium nitrogen/ (mg·kg ⁻¹)	pH 值	土壤水分 Soil moisture/%
0~20	裸地 Bare soil	1.13±0.09 ^b	0.79±0.24 ^{ab}	21.32±9.86 ^a	6.44±0.04 ^a	16.58±0.39 ^b
	冷季型草坪 Cool-season grassland	1.28±0.06 ^{ab}	1.36±0.04 ^a	0.55±0.55 ^a	6.55±0.03 ^a	19.51±0.43 ^a
	暖季型草坪 Warm-season grassland	1.54±0.15 ^a	0.27±0.15 ^b	12.83±12.22 ^a	6.43±0.06 ^a	20.59±0.50 ^a
	林下地被 Understory ground cover	1.50±0.12 ^a	0.90±0.25 ^{ab}	10.76±10.76 ^a	6.45±0.02 ^a	19.45±0.83 ^a
20~40	裸地 Bare soil	0.10±0.07 ^b	0.86±0.05 ^a	3.28±0.72 ^a	6.50±0.04 ^a	16.11±0.21 ^{bc}
	冷季型草坪 Cool-season grassland	0.97±0.07 ^b	0.36±0.15 ^{ab}	26.41±0.45 ^a	6.50±0.05 ^a	18.10±0.37 ^{ab}
	暖季型草坪 Warm-season grassland	1.35±0.04 ^a	0.11±0.11 ^b	7.36±17.65 ^a	6.38±0.07 ^a	19.92±0.39 ^a
	林下地被 Understory ground cover	1.11±0.03 ^b	0.39±0.31 ^{ab}	8.36±0.63 ^a	6.51±0.01 ^a	14.58±1.56 ^c

注:各数值以平均值±标准误差表示。不同小写字母表示同一土层处理中,不同类型城市草地具有显著性差异($P<0.05$)

Note: All values are expressed as mean ± standard error. Different lowercase letters indicate significant differences between same soil layer and different types of urban grassland ($P<0.05$)

1.3 样品测定

1.3.1 土壤有机碳的测定 准确称取 20 mg 过 0.15 mm 筛孔的风干土壤样本,将其置于锡箔杯内并密封,随后利用碳氮元素分析仪(Vario MACRO cube,Elementer,Germany)进行测定。

1.3.2 土壤 DOC 溶液的提取及测定 采用水土震荡提取法对土壤 DOC 进行测定^[33]。称取 10.00 g 新鲜土壤样品,按照 5:1 的水土比例加入去离子水,在室温条件下以 180 r·min⁻¹ 的速度震荡提取 12 h。将悬浊液以 3500 r·min⁻¹ 的转速离心 25 min,取上清液通过预先用去离子水浸泡 12 h 的 0.45 μm 水系滤膜进行过滤。利用 TOC 分析仪(Vario TOC,Elementar,Germany)进行测定。

1.3.3 紫外可见光谱测定 采用紫外可见分光光度计(TU-1900 型,北京普析通用仪器有限责任公司,中国)对样品的吸光特性进行测定。使用超纯水对仪器进行校准,随后分别测定样品在 254 nm 和 260 nm 波长处的吸光度值(记为 SUVA₂₅₄ 和 SUVA₂₆₀)。根据公式(1)计算特定紫外吸光度(SUVA):

$$\text{SUVA}(\text{L}\cdot\text{mg}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}) = \frac{[\text{UV}(\text{cm}^{-1})/\text{DOC}(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})] \times 100}{1} \quad (1)$$

通过计算得到 SUVA₂₅₄ 和 SUVA₂₆₀ 两个指标,可以分别表征 DOC 的芳香性和疏水性特征。

1.3.4 三维荧光光谱测定 采用三维荧光分光光

度计(F97PRO 型,上海精密仪器仪表有限公司,中国)对 DOM 的荧光特性进行分析。实验参数设置:光电倍增管(PMT)电压为 750V,激发和发射单色仪的狭缝宽度均为 10 nm;激发波长(Ex)范围为 200~500 nm,波长间隔为 5 nm;发射波长(Em)范围为 250~600 nm,波长间隔为 1 nm。扫描速度为 3000 nm·min⁻¹。

获取 DOM 的三维荧光光谱数据后,计算了以下光谱特征参数:荧光指数(Fluorescence index, FI)、腐殖化指数(Humification index, HIX)、自生源指标(Index of recent autochthonous contribution, BIX)、新鲜度指数($\beta:\alpha$),相关光谱特征参数的计算方法及公式如下:通过计算得到 SUVA₂₅₄ 和 SUVA₂₆₀ 两个指标,可以分别表征 DOC 的芳香性和疏水性特征。

$$\text{FI}^{[34]}: \text{Ex}=370 \text{ nm}, \text{Em}=\text{f}470/\text{f}520 \quad (2)$$

$$\text{HIX}^{[35]}: \text{Ex}=254 \text{ nm}, \text{Em}=\text{f}(435-480)/[\text{f}(300-324)+\text{f}(435-480)] \quad (3)$$

$$\text{BIX}^{[36]}: \text{Ex}=310 \text{ nm}, \text{Em}=\text{f}380/\text{f}430 \quad (4)$$

$$\beta:\alpha^{[37]}: \text{Ex}=310 \text{ nm}, \text{Em}=\text{f}380/\text{fmax}(420-435) \quad (5)$$

1.4 统计分析

数据处理采用 Excel 2022 软件,数据统计分析则借助于 SPSS 22.0 统计软件包进行。运用单因素

方差分析(One-way ANOVA)进行推断统计,其中草地类型作为固定因子(Fixed Factor),土壤DOC含量、SUVA₂₅₄,SUVA₂₆₀,FI,HIX,BIX, β : α 分别作为因变量(Dependent variable)。在进行ANOVA之前,我们确保了数据均满足参数检验中正态性(Normality)和方差齐性(Homogeneity of variances)的基本前提。ANOVA分析后进一步采用事后检验中最小显著差异法(LSD)进行组间数据比较,其中 $P < 0.05$ 为显著差异, $P < 0.01$ 为极显著差异。此外,数据的图形化展示均通过Origin 2024软件绘制。

2 结果与分析

2.1 不同类型城市草地土壤有机碳和可溶性有机碳含量差异

不同类型城市草地对土壤SOC含量未产生显著影响(图2),0~20 cm和20~40 cm土层土壤SOC含量均介于19.95~22.79 g·kg⁻¹之间。然而在0~20 cm表层土壤中,不同类型城市草地对DOC含量产生显著影响(图2):较裸地相比,冷季型草坪土壤DOC含量显著降低30%($P < 0.05$),暖季型和林下地被均无显著差异。而在20~40 cm次表层土壤中,不同类型城市草地土壤DOC含量均无显著差异,其变化范围为19.95~21.41 mg·kg⁻¹。进一步分析DOC与SOC的比例发现,其呈现出与DOC含量基本一致的变化趋势(图2)。冷季型草坪土壤中DOC/SOC比例较裸地显著下降31.9%,而暖季型草坪和林下地被处理则未表现出显著变化。

不同类型城市草地对土壤有机碳(SOC)含量未产生显著影响,0~20 cm与20~40 cm土层的SOC含量介于19.95~22.79 g·kg⁻¹之间。然而,在表层土壤(0~20 cm)中,不同类型城市草地对可溶性有机碳(DOC)含量具有显著影响:与裸地相比,冷季型草坪土壤DOC含量显著降低30%($P < 0.05$),而暖季型草坪和林下地被处理则无显著差异;在20~40 cm次表层土壤中,各处理间DOC含量亦无显著差异,其变化范围为19.95~21.41 mg·kg⁻¹。进一步分析DOC占SOC的比例发现,其变化趋势与DOC含量基本一致,冷季型草坪土壤中DOC/SOC比例较裸地显著下降31.9%,而暖季型草坪和林下地被处理

则未表现出显著变化。

2.2 不同类型城市草地土壤中DOM的紫外可见吸收特性

本研究中,不同类型城市草地之间土壤SUVA₂₅₄和SUVA₂₆₀含量的差异均不显著(图3)。0~20 cm和20~40 cm土层土壤的SUVA₂₅₄含量在0.51~1.24 L·mg⁻¹·m⁻¹范围内,SUVA₂₆₀含量在0.52~1.21 L·mg⁻¹·m⁻¹范围内。

2.3 不同类型城市草地土壤中DOM的荧光特性

本研究中,各处理土壤DOM的荧光指数均在1.17~1.37之间,均小于1.4。三种不同类型城市草地表层0~20 cm土壤的FI值均显著高于裸地,次表层20~40 cm土壤也呈现相同趋势(图4a)。在0~20 cm表层土壤中,较裸地相比,冷季型草坪、暖季型草坪和林下地被土壤FI值分别显著增加11.8%,12.4%和20.5%($P < 0.01$)。在20~40 cm次表层土壤中,较裸地相比,冷季型草坪和林下地被FI值分别显著增加6%和7.8%($P < 0.05$),与暖季型相比无显著差异。

各处理的HIX值均小于1。较裸地相比,不同类型城市草地表层0~20 cm和次表层20~40 cm土壤的HIX值均显著升高(图4b)。在0~20 cm表层土壤中,与裸地相比,冷季型草坪、暖季型草坪和林下地被土壤HIX值均显著增加约5%($P < 0.01$)。在20~40 cm次表层土壤中,相较于裸地,冷季型草坪、暖季型草坪、林下地被的HIX值分别增加1.7%,1.5%,2.5%($P < 0.01$)。

在0~20 cm和20~40 cm两土层深度中不同城市草地类型的土壤DOM的BIX值均介于0.77~0.91之间。较裸地相比,不同类型城市草地显著降低表层0~20 cm土壤BIX值(图4c)。较裸地相比,冷季型草坪、暖季型草坪和林下地被土壤BIX值分别显著降低10.8%、10.0%和15.6%($P < 0.01$)。而在20~40 cm次表层土壤中,不同类型城市草地对土壤BIX值影响不大,范围在0.85~0.9之间,较裸地相比,仅林下地被0~20 cm土壤BIX值显著降低5.4%。

本研究中土壤DOM的 β : α 值在0.75~0.9之间,并且在0~20 cm和20~40 cm土层土壤中 β : α 均值范围和变化趋势与BIX基本一致(图4d)。

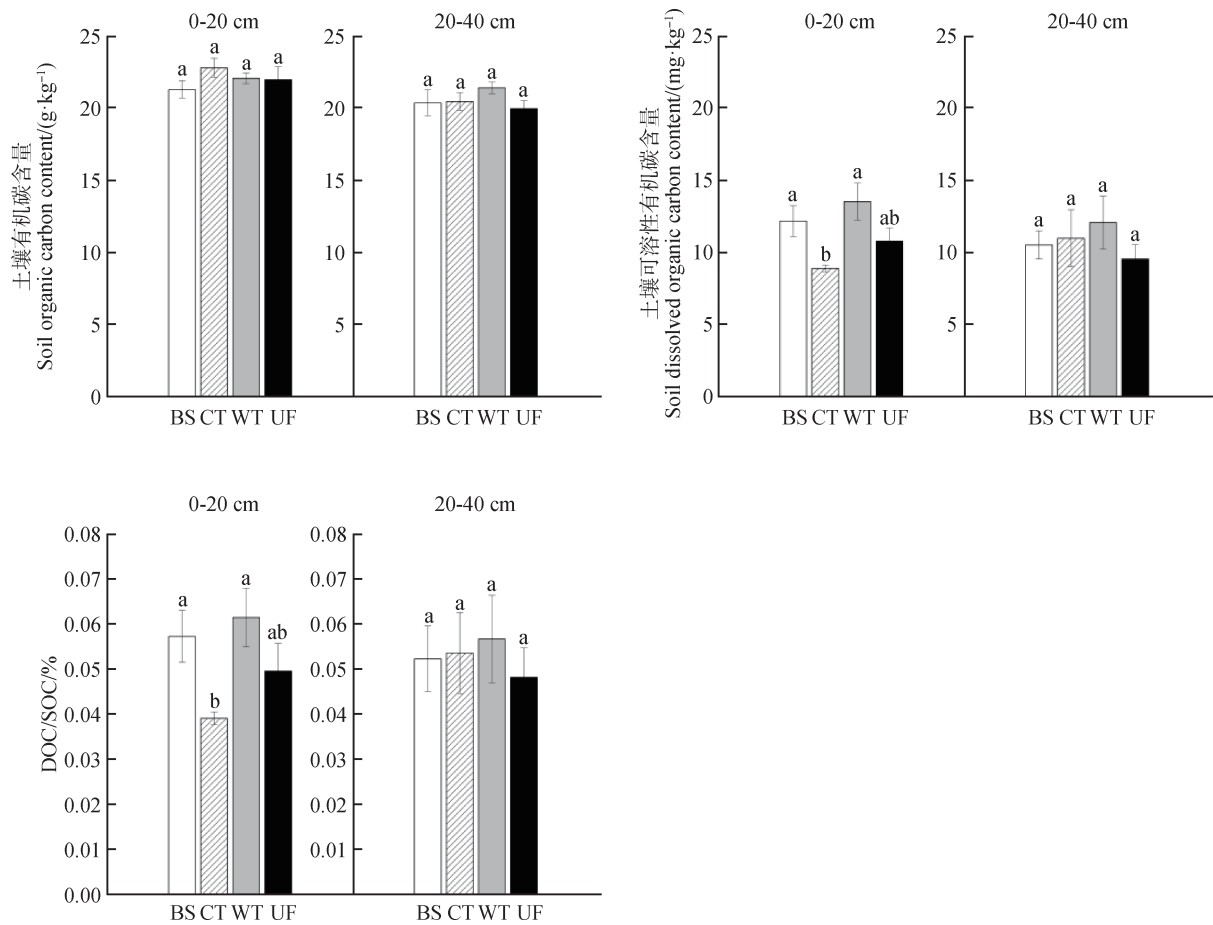


图2 不同类型城市草地土壤有机碳和可溶性有机碳含量及其占比

Fig. 2 SOC and soil DOC content and the ratio of soil DOC to SOC content in different types of urban grassland

注:BS,CT,WT和UF分别为裸地、冷季型草坪、暖季型草坪、林下地被。SOC,土壤有机碳;DOC,可溶性有机碳。不同小写字母表示同一土层处理中,不同类型城市草地具有显著性差异($P<0.05$)

Note:BS, CT, WT and UF are bare ground, cool-season grassland, warm-season grassland and urban understory ground cover. SOC, Soil organic carbon;DOC,Dissolved organic carbon. Different lowercase letters indicate significant differences between same soil layer and different types of urban grassland ($P<0.05$)

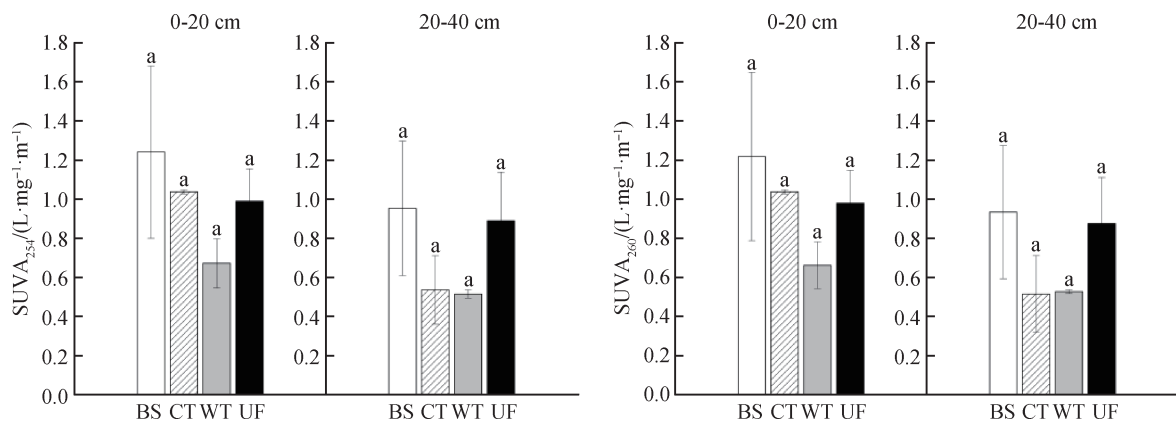


图3 不同类型城市草地土壤可溶性有机质紫外-可见光谱表征参数 SUVA₂₅₄及 SUVA₂₆₀

Fig. 3 SUVA₂₅₄ and SUVA₂₆₀ of dissolved organic matter in different types of urban grassland

注:BS,CT,WT和UF分别为裸地、冷季型草坪、暖季型草坪、林下地被。不同小写字母表示同一土层处理中,不同类型城市草地具有显著性差异($P<0.05$)

Note:BS, CT, WT and UF are bare ground, cool-season grassland, warm-season grassland and urban understory ground cover. Different lower-case letters indicate significant differences between same soil layer and different types of urban grassland ($P<0.05$)

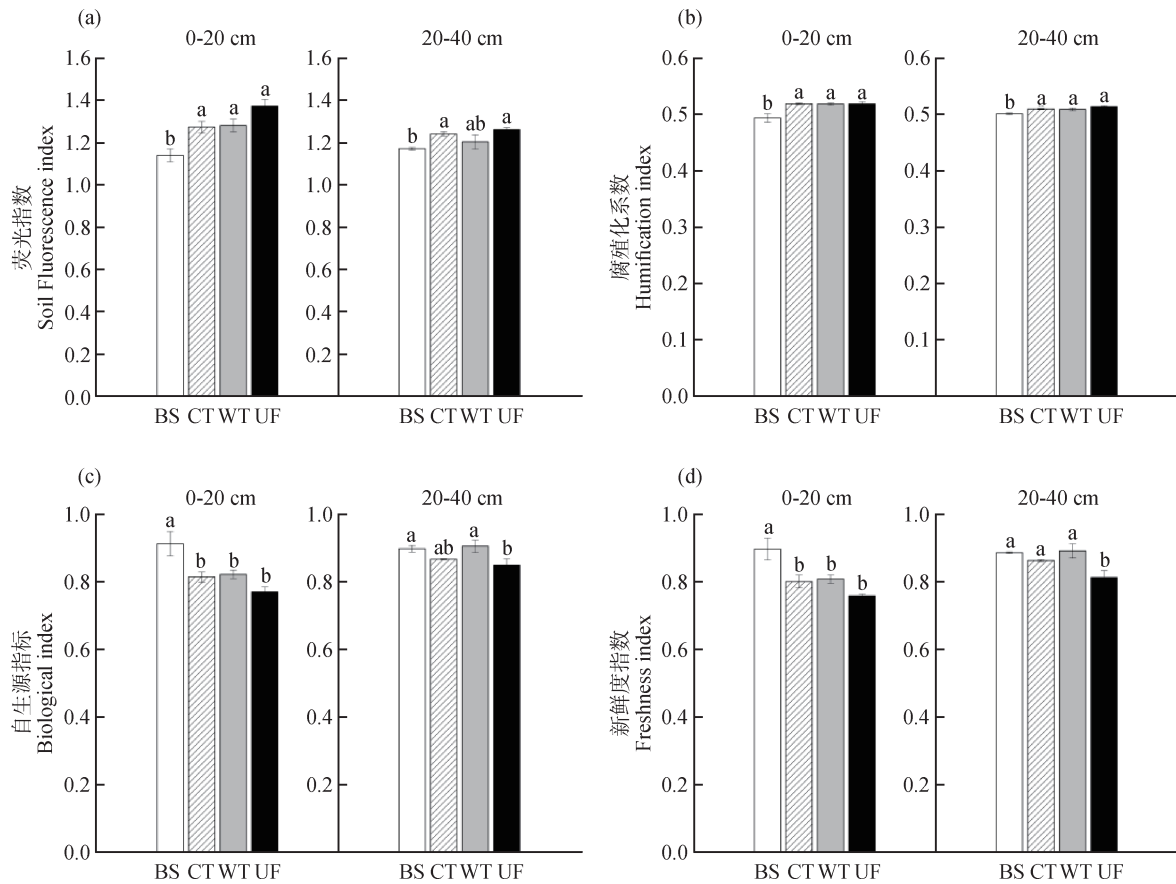


图4 不同类型城市草地土壤可溶性有机质荧光光谱表征参数FI, HIX, BIX及 $\beta:\alpha$

Fig. 4 FI, HIX, BIX and $\beta:\alpha$ of dissolved organic matter in different types of urban grassland

注:BS、CT、WT和UF分别为裸地、冷季型草坪、暖季型草坪、林下地被。不同小写字母表示同一土层处理中,不同类型城市草地具有显著性差异($P<0.05$)

Note:BS, CT, WT and UF are bare ground, cool-season grassland, warm-season grassland and urban understory ground cover. Different lower-case letters indicate significant differences between same soil layer and different types of urban grassland ($P<0.05$)

3 讨论

3.1 不同类型城市草地土壤可溶性有机碳含量差异

在表层0~20 cm土壤中,较裸地相比,冷季型草坪土壤DOC含量显著降低,而暖季型草坪则没有显著差异,这可能是由于两种草坪植物的固碳类型不同导致的。大量研究表明植物凋落物和根系分泌物是DOC的重要来源^[4,38-40]。植物固碳类型(C3、C4)是影响植物凋落物和根系分泌物水平的重要因素^[41]。根据固碳类型,暖季型草坪草狗牙根属C4植物,而冷季型草坪草黑麦草、早熟禾属C3植物。C3与C4的生理特性差异会影响有机碳分配模式和根际碳流^[42-45]。研究表明,C3和C4植物的根系分泌物中代谢物的种类存在显著差异,C3植物的根系分泌物中主要含有易分解的甘露糖、核糖和麦芽糖,而C4植物则主要分泌较

难分解肌糖、赤藓糖醇和核糖醇^[46]。因此,冷季型草坪由于早熟禾和黑麦草根系分泌易分解的糖类可在短期内被微生物利用,刺激微生物活性,加速微生物对DOC的消耗利用。而暖季型草坪由于根系分泌物更难以被土壤微生物利用,DOC消耗相对减缓。林下地被崂峪苔草虽也是C3植物,但相较于裸地,其土壤DOC含量却并未如冷季型草坪般降低。这可能主要由于林下地被受乔木遮荫影响,减缓了其微生物活性^[47],进而降低了微生物对DOC的利用和土壤有机质矿化分解速率,最终仍表现为对DOC的影响不显著。与李赟^[48]的研究结论一致。

除植物固碳类型差异外,冷季型草坪不合理的施肥管理也是导致其DOC降低的原因。大量研究表明土壤微生物缺乏足够氮源时会处于“氮饥饿”状态,更易增加土壤原有有机质的分解和激发强度^[49-50]。有研究表明,北京城市中暖季型草

坪所需氮肥量低于冷季型草坪,甚至可以耐受不施肥的管理^[51]。而本实验中冷季型草坪和暖季型草坪全年施肥总量均控制为 $100\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\text{N}$,该施肥量可能刚刚满足冷季型草坪植物对肥料的基本需求,但难以保证其土壤微生物有足够的可利用外源氮素。因此,由于冷季型草坪中土壤微生物因缺乏足够的外源氮素输入而处于“氮饥饿”状态^[52],这时微生物会更偏向于分解土壤原有有机质以获取氮源,有机质分解过程影响了DOC含量,这与王梁^[53]的研究结论一致。因此,关注城市草地的施肥量,制定合理施肥措施有助于提高土壤DOC含量。

综上所述,不同类型城市草地土壤DOC含量的差异是植物固碳类型、施肥管理及DOC自身稳定性等多因素协同作用的结果。城市草地DOC动态可能是植被特性、人为干预及土壤理化过程共同塑造的更为复杂的系统,需在管理中统筹植物配置、施肥量,以优化土壤碳固存功能。

3.2 不同类型城市草地土壤DOM的紫外可见吸收特性

SUVA₂₅₄主要用于评估土壤、沉积物及水环境中有机质的腐殖化进程,其数值变化直接反映DOM中芳香族化合物的构成特征^[18, 54, 55]。当该指标升高时,表明有机质的芳香环结构比例增加,同时腐殖质的形成程度更为显著。与之对应的SUVA₂₆₀则广泛用于表征DOM中疏水性物质的总量,其数值增长意味着DOM中疏水性有机组分的提高,这类物质在环境污染物迁移和生物地球化学转化过程中表现出更强的反应活性^[56]。

土壤中可溶性有机质的芳香度较高,表明其构成的化合物结构更为复杂,分子量较大,并且具有更高的稳定性^[57]。本研究结果显示,不同类型城市草地的土壤DOM的芳香和疏水组分以及腐殖化程度较裸地相比差异不显著,但有降低趋势,推测其土壤有机碳更不稳定。袁宏毅等^[58]以岩溶区河岸地为研究对象,张苗苗等^[59]以青海省主要草地为研究对象,结果均表明植被类型能够显著影响草地土壤的SUVA₂₅₄和SUVA₂₆₀值,与本研究结果不一致。这可能是本研究对象为城市草地,其与天然草地的管理强度不同。有研究表明,强烈的人类活动干扰会使农田土壤资源趋于均质化^[60-62]。因此,城市草

地施肥、灌溉等人为基质改良活动导致土壤更容易出现均质化效应,从而削弱了植被类型对DOM芳香度的影响。

Nishijima^[63]等研究认为,影响波长254 nm处紫外吸收的主要因素是芳香族化合物等具有不饱和C=C键的有机化合物。因此,0~20 cm表层土壤中冷季型草坪土壤DOC含量显著降低的原因可能是其含有具有较少不饱和C=C键的有机化合物,可溶性有机质稳定性较低。

3.3 不同类型城市草地土壤DOM的荧光特性

三维荧光光谱技术因其高灵敏度、良好的选择性以及对样品无损的特性,在近年来被广泛应用于水体和土壤DOM的表征及其去除过程的研究中^[64, 65]。本研究采用三维荧光光谱技术对土壤样本进行扫描分析,进一步揭示不同类型城市草地类土壤DOM来源及其降解过程。

荧光指数(FI)可表征DOM中腐殖质来源^[66]。作为DOM溯源的重要参数,通过量化芳香族氨基酸与非芳香类组分对荧光信号的贡献比例,可有效判别DOM的输入途径。研究指出,FI的数值范围具有明确的临界意义:当 $FI < 1.4$ 时,DOM主要来源于陆源有机质(如植物残体或土壤腐殖质);而当FI趋近于1.9时,则表明DOM以微生物代谢产物(如胞外分泌物或生物降解产物)为主^[34]。由图4得知,所有处理的FI在1.17~1.37之间,均小于1.4,预示土壤DOM主要来源于陆源有机质(如植物残体及根系分泌物)。与裸地相比,不同类型城市草地表层0~20 cm和次表层20~40 cm土壤的FI值呈现显著升高趋势,暗示城市草地微生物活动增强,DOM来源于微生物分解作用的比例增加,形成一定的混合来源特征。Murty等^[67]研究表明,较高的地上生物量和凋落物能够促进土壤微生物活动并加速表层土壤的腐殖化。此外,植物根系能够为微生物活动提供良好空间^[68]。因此,冷季型草坪、暖季型草坪和林下地被均因植被覆盖及高频修剪频率所带来的植物残体输入,促进了微生物活动,从而影响土壤DOM来源;而裸地因缺乏植被,微生物活动较弱,FI值因而较低。

本研究中各处理的HIX值均小于1,表明DOM腐殖化程度均较低。较裸地相比,不同类型城市草地表层0~20 cm和次表层20~40 cm土壤的HIX值均显著升高,反映出城市草地腐殖化程度较高。这

主要源于城市草地植被覆盖增加了根系分泌物和凋落物输入,进而提高了DOM中弱腐殖化组分比例^[67]。然而,受城市土壤频繁扰动其腐殖化进程仍处于较低水平^[69, 70]。

自生源指数(BIX)通常用于表征DOM中自生源组分的相对贡献及其生物可利用度^[71]。当BIX值大于1时,表明DOM主要来源于近期生物或细菌活动。而当该值介于0.7~1之间,则说明DOM含有中度至较强的自生源成分。本研究中各处理的BIX均在0.7~1之间,预示土壤生物活动较为强烈、存在中度至较强自生源特征^[72, 73],支持了FI具有一定混合来源特征的分析。与裸地相比,不同类型城市草地显著降低表层土壤的BIX值。新鲜度指数($\beta:\alpha$)可表征新产生的DOM在整体DOM中所占比例^[37]。本研究 $\beta:\alpha$ 的值均在0.75~0.9之间,说明城市草地土壤DOM以稳定态组分为主,新生成DOM占比较少。这表明,尽管不同类型城市草地的微生物活动有所增强,但其DOM的生物可利用性却较低。该现象产生的主要原因在于稳定态DOM通常具有结构复杂、分子量大等特性,难以被微生物直接利用^[74, 75],DOM的生物可利用性下降。DOM的光降解过程也可进一步解释该结论:裸地因无植被蔽荫,裸露的表层土接受更多太阳辐射,其DOM光降解作用强于草地,促使大分子DOM转化为小分子有机物^[76],从而提高其生物可利用性,导致BIX值高于草地。

不同类型城市草地的土壤DOM整体呈现“混合来源、弱腐殖化、低自生源”的特征。这反映出城市草地土壤DOM受植被覆盖、微生物活动、管理措施、人为干扰等多重因素的共同影响,其变化机制相对复杂。此外,城市草地对表层土壤DOM影响尤为显著,其较高FI值和较低BIX值共同反映出植被类型通过调控微生物-植物相互作用,深刻影响DOM组成与转化过程。

4 结论

本研究揭示了城市草地土壤DOC受到植被类型与人为管理的协同调控,冷季型草坪土壤DOC含量较裸地相比显著降低,反映出 C_3 植物可能通过根系分泌物与微生物作用加速DOC消耗。而暖季型草坪与林下地被DOC相对稳定,说明植被固碳

途径与微环境差异对碳保持具有重要影响。光谱特征表明,不同类型城市草地土壤DOM均呈混合来源特征;腐殖化进程因植被覆盖较裸地提高,但受城市频繁扰动仍处于较低水平;微生物活动较强但生物可利用性低。因此,城市草地DOC动态是植被特性、人为干预等共同塑造的复杂系统,需在管理中统筹植物配置、施肥量以优化土壤碳固存功能。城市草地管理中,应尤其关注冷季型草坪实际需肥量,采用“精准施肥”策略,以充分发挥其碳汇功能。

参考文献

- [1] LAL R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. *Science*, 2004, 304(5677): 1623-1627
- [2] SUNDQUIST E T. The global carbon dioxide budget[J]. *Science*, 1993, 259(5097): 934-941
- [3] OHNO T. Fluorescence inner-filtering correction for determining the humification index of dissolved organic matter[J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, 36(4): 742-746
- [4] KALBITZ K, SOLINGER S, PARK J H, et al. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: a review[J]. *Soil Science*, 2000, 165(4): 277-304
- [5] FLESSA H, LUDWIG B, HEIL B, et al. The origin of soil organic C, dissolved organic C and respiration in a long-term maize experiment in Halle, Germany, determined by ^{13}C natural abundance [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2000, 163(2): 157-163
- [6] LEHMANN J, KLEBER M. The contentious nature of soil organic matter[J]. *Nature*, 2015, 528(7580): 60-68
- [7] 元晓春, 林伟盛, 蒲晓婷, 等. 更新方式对亚热带森林土壤溶液可溶性有机质数量及化学结构的影响[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(6): 1845-1852
- [8] YUAN X C, LIN W S, PU X T, et al. Effects of forest regeneration patterns on the quantity and chemical structure of soil solution dissolved organic matter in a subtropical forest[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(6): 1845-1852
- [9] HORNBERGER G M, BENCALA K E, MCKNIGHT D M. Hydrological controls on dissolved organic carbon during snow-melt in the Snake River near Montezuma, Colorado[J]. *Biogeochemistry*, 1994, 25(3): 147-165
- [10] WIEDER W R, HARTMAN M D, SULMAN B N, et al. Carbon cycle confidence and uncertainty: exploring variation among soil biogeochemical models[J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(4): 1563-1579
- [10] LAVALLEE J M, SOONG J L, COTRUFO M F. Conceptu-

- alizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century [J]. *Global Change Biology*, 2020, 26(1):261-273
- [11] 向雪梅, 德科加, 林伟山, 等. 增温对青藏高原高寒草甸土壤微生物群落的影响[J]. *生态学杂志*, 2024, 43(6):1681-1690
XIANG X M, DE K J, LIN W S, et al. The impact of warming on soil microbial communities in an alpine meadow of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2024, 43(6):1681-1690
- [12] 韩会庆, 蔡广鹏, 张凤太, 等. 喀斯特地区土地利用变化对生态服务价值的影响——以贵州省绥阳县为例[J]. *水土保持研究*, 2013, 20(2):272-275
HAN H Q, CAI G P, ZHANG F T, et al. Analysis of influence of land use change on ecosystem service value—a case study of Suiyang County in Guizhou Province [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2013, 20(2):272-275
- [13] WANG Y, GUO Y D, WANG X W, et al. Mineral protection controls soil organic carbon stability in permafrost wetlands [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 869:161864
- [14] LEENHEER J A, CROUÉ J P. Peer reviewed: characterizing aquatic dissolved organic matter [J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, 37(1):18A-26A
- [15] 倪进治, 徐建民, 谢正苗. 土壤水溶性有机碳的研究进展[J]. *生态环境*, 2003, 12(1):71-75
NI J Z, XU J M, XIE Z M. Advances in soil water-soluble organic carbon research [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2003, 12(1):71-75
- [16] SCHMIDT M W I, TORN M S, ABIVEN S, et al. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property [J]. *Nature*, 2011, 478(7367):49-56
- [17] SCHRUMPF M, KAISER K, SCHULZE E D. Soil organic carbon and total nitrogen gains in an old growth deciduous forest in Germany [J]. *PLOS One*, 2014, 9(2):e89364
- [18] 陈琦, 李富翠, 彭钰梅, 等. 青藏公路对沿线草地生态系统土壤可溶性有机碳及其特征的影响[J]. *草地学报*, 2022, 30(8):2158-2166
CHEN Q, LI F C, PENG Y M, et al. Effects of the Qinghai-Tibet highway on soil dissolved organic carbon content and characteristics in grassland ecosystems along the route [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(8):2158-2166
- [19] REN S, WANG T, GUENET B, et al. Projected soil carbon loss with warming in constrained Earth system models [J]. *Nature Communications*, 2024, 15:102
- [20] HE N P, WANG R M, GAO Y, et al. Changes in the temperature sensitivity of SOM decomposition with grassland succession: implications for soil C sequestration [J]. *Ecology and Evolution*, 2013, 3(15):5045-5054
- [21] RODELL M, LI B L. Changing intensity of hydroclimatic extreme events revealed by GRACE and GRACE-FO [J]. *Nature Water*, 2023, 1(3):241-248
- [22] 孔凡婕, 应凌霄, 文雯, 等. 基于国土空间生态修复的固碳增汇探讨[J]. *中国国土资源经济*, 2021, 34(12):70-76
KONG F J, YING L X, WEN W, et al. Exploring carbon sequestration and sink enhancement based on ecological restoration of territorial space [J]. *Natural Resource Economics of China*, 2021, 34(12):70-76
- [23] SPOHN M, BAGCHI S, BIEDERMAN L A, et al. The positive effect of plant diversity on soil carbon depends on climate [J]. *Nature Communications*, 2023, 14:6624
- [24] WANG Y F, XIA A Q, XUE K. Cold and humid climates enrich soil carbon stock in the Third Pole grasslands [J]. *The Innovation*, 2024, 5(1):100545
- [25] LI W, LIU M Y, LI M K, et al. Influence of nitrogen water interaction on leaf functional traits of dominant species in warm temperate forest [J]. *Forestry Research*, 2024, 4:e009
- [26] 邱思慧, 林少颖, 王维奇. 中国东部地区不同海拔梯度土壤有机碳库特征及其影响因素综述[J]. *中国水土保持科学(中英文)*, 2022, 20(3):142-150
QIU S H, LIN S Y, WANG W Q. Characteristics of soil organic carbon pool at different altitude gradients in Eastern China and its influencing factors: A review [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2022, 20(3):142-150
- [27] 丁金梅, 王维珍, 米文宝, 等. 宁夏草地土壤有机碳空间特征及其影响因素[J]. *生态学报*, 2023, 43(5):1913-1922
DING J M, WANG W Z, MI W B, et al. Spatial characteristics of soil organic carbon in grassland of Ningxia and its influencing factors [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(5):1913-1922
- [28] 李睿杰, 张红娟, 王伟, 等. 冀西北城市绿地草坪土壤水分动态及蒸散耗水过程[J/OL]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1069.s.20250317.1357.002.html>, 2025-03-18/2025-07-25
LI R J, ZHANG H J, WANG W, et al. Soil water dynamics and evapotranspiration processes in urban turf in Northwest Hebei [J/OL]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1069.s.20250317.1357.002.html>, 2025-03-18/2025-07-25
- [29] CANEDOLI C, FERRÈ C, ABU EL KHAIR D, et al. Soil organic carbon stock in different urban land uses: high stock evidence in urban parks [J]. *Urban Ecosystems*, 2020, 23(1):159-171
- [30] 陈佳俐, 钟羨芳, 刘炜杰, 等. 福州江滨公园不同植被类型土壤可溶性有机碳含量的季节动态[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2016, 11(3):88-94
CHEN J L, ZHONG X F, LIU W J, et al. Seasonal dynamics of soil dissolved organic carbon content of urban park vegeta-

- tions in Fuzhou[J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2016, 11(3): 88-94
- [31] ZHAN Y, XIE J F, YAO Z S, et al. Characteristics of annual N_2O and NO fluxes from Chinese urban turfgrasses[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 290: 118017
- [32] 北京. 城市园林绿化养护管理标准[N]. 中国花卉报, 2004-03-04(4)
- Beijing. Urban Landscape Greening Maintenance Management Standard [N]. *China Flower News*, 2004-03-04(4)
- [33] LIU C, LI Z W, BERHE A A, et al. Characterizing dissolved organic matter in eroded sediments from a loess hilly catchment using fluorescence EEM-PARAFAC and UV - Visible absorption: insights from source identification and carbon cycling[J]. *Geoderma*, 2019, 334: 37-48
- [34] CORY R M, MCKNIGHT D M. Fluorescence spectroscopy reveals ubiquitous presence of oxidized and reduced quinones in dissolved organic matter[J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, 39(21): 8142-8149
- [35] FELLMAN J B, HOOD E, SPENCER R G M. Fluorescence spectroscopy opens new windows into dissolved organic matter dynamics in freshwater ecosystems: A review[J]. *Limnology and Oceanography*, 2010, 55(6): 2452-2462
- [36] HUGUET A, VACHER L, RELEXANS S, et al. Properties of fluorescent dissolved organic matter in the Gironde Estuary[J]. *Organic Geochemistry*, 2009, 40(6): 706-719
- [37] WILSON H F, XENOPOULOS M A. Effects of agricultural land use on the composition of fluvial dissolved organic matter[J]. *Nature Geoscience*, 2009, 2(1): 37-41
- [38] PANG D B, CUI M, LIU Y G, et al. Responses of soil labile organic carbon fractions and stocks to different vegetation restoration strategies in degraded karst ecosystems of southwest China[J]. *Ecological Engineering*, 2019, 138: 391-402
- [39] 肖烨, 黄志刚, 令玉林, 等. 赤水河流域不同植被恢复类型土壤有机碳储量特征及其影响因素[J]. *土壤通报*, 2024, 55(6): 1636-1646
- XIAO Y, HUANG Z G, LING Y L, et al. Characteristics and influencing factors of soil organic carbon storage in different vegetation restoration types in the Chishui River Basin[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2024, 55(6): 1636-1646
- [40] 张玉, 吴福忠, 艾灵, 等. 凋落物输入对土壤可溶性有机碳的影响[J]. *生态学杂志*, 2023, 42(9): 2107-2112
- ZHANG Y, WU F Z, AI L, et al. Litter input effects on soil dissolved organic carbon[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2023, 42(9): 2107-2112
- [41] PINTON R, VARANINI Z, NANNIPIERI P. The rhizosphere: biochemistry and organic substances at the soil-plant interface, second edition[M]. 2nd Edition. Boca Raton: CRC Press, 2007.
- [42] D T PATTERSON E P F. Potential effects of global atmospheric CO_2 enrichment on the growth and competitiveness of C_3 and C_4 weed and crop plants[J]. *Weed Science*, 1980, 28(1): 71-75
- [43] 张璐, 何新华. C_3 和 C_4 植物的氮素利用机制[J]. *植物学报*, 2020, 55(2): 228-239
- ZHANG L, HE X H. Nitrogen utilization mechanism in C_3 and C_4 plants[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2020, 55(2): 228-239
- [44] 艾超, 孙静文, 王秀斌, 等. 植物根际沉积与土壤微生物关系研究进展[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015(5): 1343-1351
- AI C, SUN J W, WANG X B, et al. Research progress on the relationship between plant rhizosphere deposition and soil microorganisms[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015(5): 1343-1351
- [45] 冯进. 青藏高原高寒草甸凋落物多样性对土壤有机质分解的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2017: 32-44
- FENG J. Effect of litter diversity on decomposition of soil organic matter in alpine meadow on the Qinghai-Tibet Plateau[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2017: 32-44
- [46] OLANREWaju O S, AYANGBENRO A S, GLICK B R, et al. Plant health: feedback effect of root exudates-rhizobiome interactions [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2019, 103(3): 1155-1166
- [47] 龙道屏. 草坪氮挥发对遮荫和氮肥的响应与源解析[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2024: 22-23
- LONG D P. Response and source analysis of ammonia volatilization in lawn to shading and nitrogen fertilizer[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2024: 22-23
- [48] 李赞. 模拟增温与氮富集对土壤激发效应的影响及相关微生物变化[D]. 北京: 北京林业大学, 2020: 43-47
- LI Y. Effects of simulated climate warming and nitrogen addition on soil priming effect and related microbial changes[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020: 43-47
- [49] KUZYAKOV Y. Priming effects: interactions between living and dead organic matter[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(9): 1363-1371
- [50] WILD B, LI J, PIHLBLAD J, et al. Decoupling of priming and microbial N mining during a short-term soil incubation[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 129: 71-79
- [51] 陈进勇, 程炜. 草坪的低养护和节约化管理[C]//北京市“建设节约型园林绿化”研讨会论文集. 2007: 309-314
- CHEN J Y, CHENG W. Low maintenance and economical management of lawn [C]//Proceedings of the Symposium on “Building a Thrifty Garden and Greening” in Beijing, 2007: 309-314
- [52] 王若斐, 刘超, 操一凡, 等. 不同碳氮比猪粪堆肥及其产品肥

- 效[J]. 中国土壤与肥料, 2017(6):127-134, 154
- WANG R F, LIU C, CAO Y F, et al. Research on the composting of pig manure and rice husk with different C/N and plant growth promotion effects of the products[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2017(6):127-134, 154
- [53] 王梁. 不同质量和数量杉木凋落物诱导的土壤激发效应及其对氮添加的响应[D]. 合肥:安徽农业大学, 2024:15-17
- WANG L. Priming effect induced by different quality and quantity of Chinese fir litter and its response to nitrogen addition[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2024:15-17
- [54] 刘堰杨, 秦纪洪, 刘琛, 等. 基于三维荧光及平行因子分析的川西高原河流水体 CDOM 特征[J]. 环境科学, 2018, 39(2):720-728
- LIU Y Y, QIN J H, LIU C, et al. Characteristics of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in rivers of western Sichuan Plateau based on EEM-PARAFAC analysis[J]. Environmental Science, 2018, 39(2):720-728
- [55] 贾汉忠, 刘子雯, 石亚芳, 等. 不同植被恢复类型的沙地土壤中溶解性有机质演变特征[J]. 科学通报, 2021, 66(34):4425-4436
- JIA H Z, LIU Z W, SHI Y F, et al. Spectral characteristics of soil dissolved organic matter under different vegetation types in sandy soil[J]. Chinese Science Bulletin, 2021, 66(34):4425-4436
- [56] 马琦琦, 李刚, 魏永. 城郊关键带土壤中溶解性有机质的光谱特性及其时空变异[J]. 环境化学, 2020, 39(2):455-466
- MA Q Q, LI G, WEI Y. Spectral characteristics and spatiotemporal variation of DOM in Peri-urban Critical Zone[J]. Environmental Chemistry, 2020, 39(2):455-466
- [57] 李美娟. 秦岭不同植被条件下土壤可溶性有机碳及其紫外—可见光谱特征[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2018:36-42
- LI M J. Soil dissolved organic carbon and its UV-Visible spectral characteristics under different vegetation conditions in Qinling Mountains[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2018:36-42
- [58] 袁宏毅, 覃方兴, 李琼芳, 等. 岩溶区河岸带土壤-植被-水体中可溶性碳的季节动态特征[J]. 应用与环境生物学报, 2025, 31(3):509-517
- YUAN H Y, QIN F X, LI Q F, et al. Seasonal dynamics of dissolved carbon in soil-vegetation-water system in Karst riparian zone[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2025, 31(3):509-517
- [59] 张苗苗. 青海省主要草地土壤理化性质和可溶性有机质光谱特性及其对利用方式的响应[D]. 兰州:甘肃农业大学, 2019:37-45
- ZHANG M M. Physicochemical properties and spectral characteristics of soluble organic matter of main grassland soils and their responses to the utilization patterns in Qinghai Province [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2019:37-45
- [60] DA C JESUS F S P. Conversion of the Amazon rainforest to agriculture results in biotic homogenization of soil bacterial communities[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, 110(3):988-993
- [61] 虞敏. 祁连山南坡土壤碳氮储量及影响因素研究[D]. 西宁:青海师范大学, 2020:41-49
- YU M. Study on soil carbon and nitrogen storage characteristics and influencing factors in the south slope of Qilian Mountain[D]. Xining: Qinghai Normal University, 2020:41-49
- [62] MA W K, BEDARD-HAUGHN A, SICILIANO S D, et al. Relationship between nitrifier and denitrifier community composition and abundance in predicting nitrous oxide emissions from ephemeral wetland soils [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40(5):1114-1123
- [63] NISHIJIMA W, SPEITEL G E. Fate of biodegradable dissolved organic carbon produced by ozonation on biological activated carbon[J]. Chemosphere, 2004, 56(2):113-119
- [64] SANCHEZ N P, SKERIOTIS A T, MILLER C M. A PARAFAC-based long-term assessment of DOM in a multi-coagulant drinking water treatment scheme [J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(3):1582-1591
- [65] OSBURN C L, HANDSEL L T, MIKAN M P, et al. Fluorescence tracking of dissolved and particulate organic matter quality in a river-dominated estuary [J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(16):8628-8636
- [66] LIN Y Y, HU E, SUN C S, et al. Using fluorescence index (FI) of dissolved organic matter (DOM) to identify non-point source pollution: the difference in FI between soil extracts and wastewater reveals the principle [J]. Science of the Total Environment, 2023, 862:160848
- [67] MURTY D, KIRSCHBAUM M U F, MCMURTRIE R E, et al. Does conversion of forest to agricultural land change soil carbon and nitrogen? a review of the literature [J]. Global Change Biology, 2002, 8(2):105-123
- [68] 武倩, 朱爱民, 鞠馨, 等. 增温和施氮对无芒隐子草非根际、根际及根鞘土壤细菌群落的影响[J]. 草地学报, 2025, 33(5):1345-1354
- WU Q, ZHU A M, JU X, et al. Effects of warming and nitrogen addition on soil bacterial communities in the non-rhizosphere, rhizosphere and rhizosheath of *Cleistogenes songorica* [J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(5):1345-1354
- [69] 张霞. 不同农田管理措施对渭北旱塬土壤有机碳库及稳定机制的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2022:15-30
- ZHANG X. Effects of agricultural management soil organic carbon pool changes and stabilization mechanism in Weibei highland [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2022:15-30
- [70] 白莹. 白云岩地区生态恢复的土壤有色溶解有机质(CDOM)响应过程及土壤质量评价[D]. 重庆:西南大学, 2022:52-60
- BAI Y. Response process of soil colored dissolved organic

- matter (CDOM) to ecological restoration in dolomite area and evaluation of soil quality [D]. Chongqing: Southwest University, 2022:52-60
- [71] 訾园园,孔范龙,郗敏,等. 胶州湾滨海湿地土壤溶解性有机质的三维荧光特性[J]. 应用生态学报, 2016, 27(12):3871-3881
- ZI Y Y, KONG F L, XI M, et al. Three dimensional fluorescent characteristics of soil dissolved organic matter (DOM) in Jiaozhou Bay coastal wetlands, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(12):3871-3881
- [72] 董浪生,张洪刚,刘凡,等. 利用悬浮颗粒物调控天然水体溶解性有机质特征及其环境效应[J]. 环境工程学报, 2024, 18(12):3454-3466
- DONG L S, ZHANG H G, LIU F, et al. Regulation of dissolved organic matter characteristics and related environmental effects in natural water bodies using suspended particulate matter [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2024, 18(12):3454-3466
- [73] GUERARD J J, MILLER P L, TROUTS T D, et al. The role of fulvic acid composition in the photosensitized degradation of aquatic contaminants [J]. Aquatic Sciences, 2009, 71(2): 160-169
- [74] 王杰琼. 近岸海水中溶解性有机质对有机微污染物光降解行为的影响[D]. 大连:大连理工大学, 2019:50-56
- WANG J Q. Effects of dissolved organic matter extracted from coastal seawaters on photodegradation behavior of organic micropollutants [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019:50-56
- [75] MAIZEL A C, LI J, REMUCAL C K. Relationships between dissolved organic matter composition and photochemistry in lakes of diverse trophic status [J]. Environmental Science & Technology, 2017, 51(17):9624-9632
- [76] DEWIL R, BAEYENS J, ROELANDT F, et al. The analysis of the total sulphur content of wastewater treatment sludge by ICP-OES [J]. Environmental Engineering Science, 2006, 23(6):904-907

(责任编辑 彭露茜)