

城市常见树种凋落叶输入对水体可溶性 碳、氮、磷的影响

杨露洁, 冯娅瑛, 梁冰璇, 周娜娜, 曾睿菠, 韩珍

(贵州大学林学院, 贵阳 550025)

摘要: [目的] 探究不同城市树种凋落叶的初始化学特性, 明确其在水体中可溶性碳(DOC)、氮(DON)、磷(DOP)的释放动态、效率及调控机制, 为揭示城市森林—水生生态系统物质交换过程, 评估树种选择对水生态环境的影响提供重要科学依据。[方法] 以城市常见树种凋落叶为研究对象, 通过室内浸泡试验测定水体可溶性养分含量变化, 计算溶出率并采用米氏方程拟合释放效率, 进一步结合初始化学特性分析影响机制。[结果] 榆树初始C含量最高(413.39 g/kg)、构树初始N含量最高(11.79 g/kg)、法国梧桐初始P含量最高(2.26 g/kg)。可溶性养分释放动态因树种和元素而异, DOC随时间推移整体趋于平稳上升, DON和DOP呈波动上升趋势。米氏方程拟合得到4种树种凋落叶可溶性养分释放效率整体表现为DOP>DON>DOC, 凋落叶初始化学计量比、释放动力学参数与实际释放量存在显著关联性。[结论] 凋落叶的初始化学计量特性与养分释放动力学参数之间存在显著关联, 凋落叶输入能显著提升水中可溶性养分的含量, 其释放规律和效率受树种因素影响。

关键词: 凋落叶; 可溶性有机碳; 可溶性有机氮; 可溶性有机磷; 米氏方程

中图分类号: S718.5; X52

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)03-0103-09

Effects of leaf litter input from common urban tree species on dissolved organic carbon, nitrogen, and phosphorus in water bodies

Yang Lujie, Feng Yaying, Liang Bingxuan, Zhou Nana, Zeng Ruibo, Han Zhen

(College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: [Objective] This study aims to investigate the initial chemical properties of leaf litter from different urban tree species and clarify the release dynamics, efficiency, and controlling mechanisms of dissolved organic carbon (DOC), dissolved organic nitrogen (DON), and dissolved organic phosphorus (DOP) in water bodies, thereby providing a scientific basis for revealing the material exchange processes between urban forests and aquatic ecosystems and for evaluating the impact of tree species selection on the aquatic ecological environment. [Methods] Using leaf litter from common urban tree species as the study object, this study conducted laboratory soaking experiments to determine the changes in dissolved nutrient content in water. Leaching rates were calculated, and release efficiency was fitted using the Michaelis-Menten equation. Furthermore, the influencing mechanisms were analyzed in combination with the initial chemical traits. [Results] *Ulmus pumila* had the highest initial carbon content (413.39 g/kg), *Broussonetia papyrifera* had the highest initial nitrogen content (11.79 g/kg), and *Platanus orientalis* had the highest initial phosphorus content (2.26 g/kg). The release dynamics of dissolved nutrients varied depending on tree species and element. DOC exhibited a generally stable increasing trend over time, while DON and DOP showed fluctuating upward trends. Michaelis-Menten equation fitting revealed that the

收稿日期: 2025-07-25

修回日期: 2025-08-07

接受日期: 2025-08-19

资助项目: 国家自然科学基金项目“喀斯特坡地裸露根系特征及其对地表/地下侵蚀过程的影响”(42467043)

第一作者: 杨露洁(2002—), 女, 贵州松桃人, 硕士, 主要从事森林土壤水文过程研究。E-mail: yanglj1123@163.com

通信作者: 韩珍(1994—), 女, 陕西铜川人, 博士, 副教授, 主要从事土壤侵蚀及流域治理研究。E-mail: zhan@gzu.edu.cn

<https://stbeyj.publish.founderss.cn>

overall release efficiency of dissolved nutrients of leaf litter from the four tree species followed the order: DOP > DON > DOC. Significant correlations were observed among the initial leaf litter stoichiometric ratios, release kinetic parameters, and the actual released amounts. [Conclusion] The initial stoichiometric characteristics of leaf litter are significantly correlated with nutrient release kinetic parameters. Leaf litter input significantly increases the content of dissolved nutrients in water, and its release pattern and efficiency are affected by tree species.

Keywords: leaf litter; dissolved organic carbon; dissolved organic nitrogen; dissolved organic phosphorus; Michaelis-Menten equation

城市化作为环境变化的核心驱动因素之一,显著改变了生态系统过程的功能格局^[1]。在城市生态系统中,公园、绿地及道路绿化带等区域的遮荫树木所产生的凋落叶,往往成为邻近水体有机质输入的重要来源^[2]。而城市不透水路通过排水管网系统与周边水体形成直接的水力联系^[3],加之降雨冲刷、地表径流和风力搬运等过程^[4],共同增强了各类物质向邻近水体的迁移过程。

凋落叶进入水体后,通过淋溶和分解作用将其所含养分释放至水中,进而改变水体的养分含量,不同树种通过淋溶、微生物分解等过程释放的可溶性有机碳(Dissolved Organic Carbon, DOC)、可溶性有机氮(Dissolved Organic Nitrogen, DON)和可溶性有机磷(Dissolved Organic Phosphorus, DOP)等养分,不仅参与水生生态系统的生物地球化学循环,还可能影响水体富营养化程度、水质及水生生物群落结构^[5]。19世纪,德国学者Ebermayer就开展了凋落叶化学性质及养分特征的研究^[6],早期关于凋落叶的研究从单一或者不同树种分解速率变化与养分循环过程开展,随着时间的推移,学者们开始关注林型的变化、生境的变化以及水体的变化等多方面因素对凋落叶的影响^[7]。已有研究表明凋落叶的分解速率具有种间差异性^[8],凋落叶中元素(即DOC, DON和DOP在凋落叶C, N, P含量中的比例)的释放效率在不同树种可能存在差异。近年来随着城市的发展,城市环境逐渐被重视,但在城市常见绿化树种凋落叶输入水体后可溶性养分释放的动态特征及其与初始化学特性的定量关联研究等方面相对薄弱,尤其对释放过程的数学模型拟合及关键参数(如最大释放效率、半饱和时间)与初始化学特性的关联性探讨仍显不足。

基于此,本研究选取4种城市常见树种凋落叶,通过室内浸泡试验,结合动力学模型与相关性分析,揭示凋落叶输入水体后可溶性养分释放的动态变化规律,为城市植被管理及水生态环境保护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域

研究区位于贵州省贵阳市花溪区(26°24'51.8"N, 106°39'59.8"E),属于典型亚热带季风湿润气候,气温温和,雨量充沛,年平均降水量为1 469 mm左右,年平均气温15.7℃,冬无严寒,夏无酷暑,无霜期较长,年平均日照数1 270 h,植被覆盖率高。花溪区常见树种主要包括夹竹桃(*Nerium oleander*)、法国梧桐(*Platanus orientalis*)、榆树(*Ulmus pumila*)、构树(*Broussonetia papyrifera*)、香樟(*Cinnamomum camphora*)、银杏(*Ginkgo biloba*)、桂花(*Osmanthus fragrans*)、玉兰(*Magnolia denudata*)等。其中,夹竹桃、构树、榆树在公园绿化中普遍分布,是构成公园植被的主要树种,而法国梧桐是常见的行道树。

1.2 样品采集与处理

本试验选取落叶量大且易腐烂的4种常见树种—夹竹桃、法国梧桐、构树、榆树。收集其半分解的凋落叶并去除杂质,65℃烘干至恒重后称重,作为后续试验材料。为更好地了解凋落叶对水体养分的影响,选取纯水作为浸泡材料。

1.3 室内浸泡模拟试验

本试验确定水与凋落叶的配比为3 000 ml水对应6 g凋落叶,采用纯水浸泡,连续浸泡十天,每间隔24 h测量一次。分别量取3000 ml纯水倒入4个塑料桶,将装有约6 g凋落叶的尼龙袋放入桶中,保证叶片浸没水中,记录时间,按设置的时间梯度在桶中抽取水样,过0.45 μm滤膜后放入冰柜保存,用于后续样品指标的测定。

1.4 指标测定

各树种分别取约5 g凋落叶,粉碎后过100目筛,烘箱65℃烘至恒重,使用全自动分析仪测定凋落叶初始C, N, P元素的含量^[9],并计算C/N, N/P, C/P。凋落叶浸泡液通过真空抽滤瓶过滤,将其放入高压灭菌锅80℃灭菌消毒,浸泡液DOC使用总有机碳分析仪进行测定,氨态氮使用水杨酸盐法测定,硝态氮

使用氯化钒还原法测定,样品中总氮含量(Total Nitrogen, TN)使用镉柱还原法测定,再利用差减法测定DON, DOP使用分光光度法测定^[10]。

1.5 数据处理与分析

元素溶出率(D)表示试验结束后凋落叶元素的溶出情况,计算公式如下^[11]:

$$D_t = \frac{V \times E_t}{M \times F_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: D_t 为10 d后凋落叶的元素溶出率; E_t 为10 d后水体中可溶性元素浓度(mg/L); V 为水体体积(L); F_0 为凋落叶输入水体前的元素浓度(mg/g); M 为凋落叶总质量(g)。

相对于凋落叶中某一元素总含量的释放百分比作为释放效率(%),计算公式如下^[12]:

$$V_{E,t} = \frac{D_{E,t}}{E} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $V_{E,t}$ 凋落叶中某一元素总含量的释放百分比(%); $D_{E,t}$ 为第 t 天溶解元素DOC, DON, DOP的浓度(mg/L); E 为加入水中的凋落叶的元浓度(mg/L)。 E 的计算公式如下:

$$E = \frac{M \times F_0}{V} \quad (3)$$

每种凋落叶的释放效率 $V_{E,t}$ 和采样天数 t 拟合到米氏方程中,确定元素 E 的最大释放效率($V_{\max E}$)和半饱和时间(k),如下所示:

$$V_{E,t} = V_{\max E} \frac{t}{k + t} \quad (4)$$

式中: $V_{\max E}$ 为元素 E 的最大释放效率; t 为采样天数(d)。

通过方程4中观测 $V_{E,t}$ 和估计 $V_{E,t}$ 的相关系数

分析,估计出决定系数(r^2)利用 $V_{\max E}$ 和 F_0 进一步计算10 d试验中溶解 E 元素的最大总释放量(TRA):

$$\text{TRA}_E = V_{\max E} \times F_0 \quad (5)$$

式中:如果米氏方程拟合中的 $V_{\max E}$ 高于100%,使用试验中3个重复中实际观测到的 E 元素平均最大释放效率(max- V_E)来代替进一步分析。

采用单因素方差分析(One-way ANOVA)检验同一树种不同浸泡时长和同一浸泡时长不同树种浸泡液DOC, DON和DOP的净增加量是否存在显著性差异以及不同树种凋落叶C, N和P元素溶出率是否存在显著性差异,并结合多重比较(Least Significant Difference, LSD)结果进行字母标记。利用Origin 2024软件以及Excel进行数据统计分析和作图。

2 结果与分析

2.1 不同树种凋落叶初始化学特性的差异

由表1可知,4种树种凋落叶初始C含量均存在显著差异($p < 0.05$),表现为榆树(413.39 g/kg) > 法国梧桐(386.09 g/kg) > 夹竹桃(372.32 g/kg) > 构树(262.43 g/kg);法国梧桐N含量显著低于其他树种($p < 0.05$),整体表现为构树(11.79 g/kg) > 夹竹桃(10.25 g/kg) > 榆树(7.98 g/kg) > 法国梧桐(6.87 g/kg);P含量表现为法国梧桐(2.26 g/kg) > 构树(1.51 g/kg) > 夹竹桃(1.4 g/kg) > 榆树(1.19 g/kg),各树种间无显著差异。法国梧桐(56.46 g/kg)的C/N最高,构树(22.53 g/kg)最低,通常高C/N比意味着该凋落叶更难被分解;榆树(16.30 g/kg)的N/P显著高于其他树种;C/P表现为榆树(455.45 g/kg)最高,构树(176.94 g/kg)最低。

表1 不同树种凋落叶元素含量

Table 1 Element contents of leaf litter from different tree species

树种	C/(g·kg ⁻¹)	N/(g·kg ⁻¹)	P/(g·kg ⁻¹)	C/N	N/P	C/P
夹竹桃	372.32±7.97 ^c	10.25±0.28 ^a	1.40±0.03 ^a	36.32±1.00 ^b	7.24±0.01 ^b	267.13±1.78 ^a
法国梧桐	386.09±2.55 ^b	6.87±0.61 ^b	2.26±2.19 ^a	56.46±4.91 ^a	5.10±3.18 ^b	292.13a±193.58 ^a
构树	262.43±7.79 ^d	11.79±1.61 ^a	1.51±0.25 ^a	22.53±3.00 ^c	7.85±0.39 ^b	176.94±26.50 ^a
榆树	413.39±2.05 ^a	7.98±0.47 ^a	1.19±0.79 ^a	36.03±1.29 ^b	16.30±5.85 ^a	455.45±258.95 ^a

注:表中数据为平均值±标准差, $n=4$;同列不同小写字母表示不同树种同一初始性状之间的差异显著($p < 0.05$)。

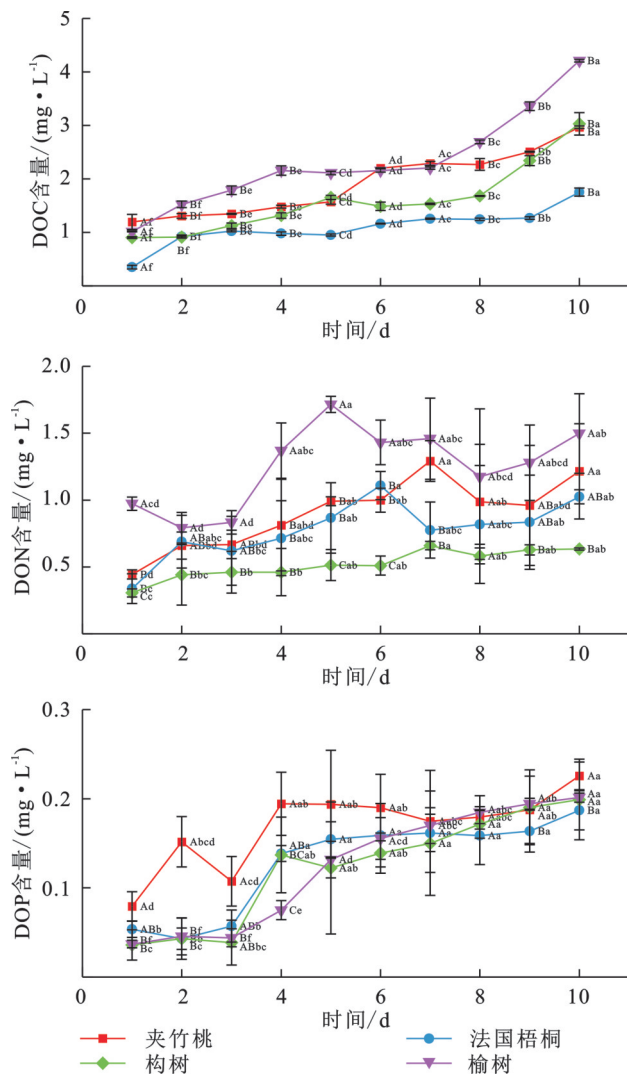
2.2 不同树种凋落叶输入后水体中可溶性养分含量的动态变化

2.2.1 不同树种凋落叶输入后可溶性养分随时间变化规律 由图1可知,4种树种凋落叶输入后,水体中DOC, DON, DOP含量随时间的动态变化均存在显著差异($p < 0.05$)。

从DOC含量变化来看,4种树种总体表现出随时间延长而上升的趋势,表明C的释放是一个积累过

程,这与DOC主要来源于相对稳定的结构性碳缓慢淋溶的分解特性相符。尽管4种树种整体趋势相似,但释放速率和最终的积累量在不同树种间还是存在显著差异,夹竹桃上升趋势整体呈平稳状态;榆树在各时间点的DOC含量均处于较高水平且持续增长至峰值,表明其C释放潜力大且持续性强;构树的DOC含量前期增长平缓,后期(8~10 d)增速显著加快,表现出延迟释放的特征;法国梧桐的DOC含量始终最

低且增幅最小,表明其C释放能力最弱。



注:不同小写字母表示同一树种不同浸泡时间水体中可溶性养分含量差异显著($p < 0.05$),不同大写字母表示相同浸泡时间下不同树种水体中可溶性养分含量差异显著($p < 0.05$)。

图1 不同树种凋落叶输入后水体中可溶性养分含量的动态变化

Fig. 1 Dynamic changes in dissolved nutrient content in water after leaf litter input from different tree species

DON含量变化比DOC更为复杂,整体表现出随时间延长波动上升的趋势,且树种间差异更为突出。夹竹桃、法国梧桐和榆树凋落叶在浸泡前期均出现DON含量快速上升的现象,表明存在易淋溶的N组分。值得注意的是榆树DON的释放不仅初期启动快,且各时间点DON含量普遍高于其他树种,波动也最剧烈,说明其N素释放启动更快、效率更高;而构树虽具有最高的初始N含量,但DON含量始终处于最低水平,释放过程也相对平缓,这可能是由于N素以稳定有机态存在,导致DON释放受限。

DOP含量的变化呈波动上升的趋势,与DON类似,但整体后期增长趋势更趋平稳,值得注意的是,所有树种DOP含量均显著高于DOC和DON,这与P

元素在植物组织中主要以水溶性较高的无机磷或小分子有机磷形态存在有关。榆树和夹竹桃的DOP含量随时间持续上升,10 d时显著高于法国梧桐($p < 0.05$),其中夹竹桃的DOP最高且含量在各时间点均保持较高水平,表明该树种P释放启动早、稳定性强;而法国梧桐和构树的DOP相较于其他两个树种含量始终较低且增长缓慢。

2.2.2 不同树种凋落叶输入后各元素溶出率 由图2可知,各树种间凋落叶C, N, P元素溶出率呈现显著的树种差异性,最明显的现象是P元素的溶出率远高于N和C元素,其次是N元素,而C元素的溶出率最低,这可能是因为P主要以易溶形态存在,易于快速浸出;N部分可溶但受形态限制较大;C则绝大部分为难溶的结构物质。不同树种凋落叶输入后C元素的溶出率表现为构树>榆树>夹竹桃>法国梧桐,且各树种间存在显著差异性($p < 0.05$),其中构树表现出最高值($5.77\% \pm 0.4\%$),显著高于法国梧桐($2.27\% \pm 0.1\%$)。这一结果与其初始化学特性密切相关,构树初始碳含量最低且C/N比最低,而低C/N比通常意味着凋落叶更易被分解,DOC更易释放。

N元素溶出率则呈现不同规律,不同树种凋落叶输入后N元素的溶出率表现为法国梧桐>榆树>夹竹桃>构树,其中法国梧桐($74.52\% \pm 3.80\%$)和夹竹桃($62.99\% \pm 7.40\%$)的N元素溶出率较高,构树虽初始N含量最高,但溶出率最低,这可能是由于构树凋落叶中的N元素更多以稳定的有机结合态存在,难以在短期浸泡中释放,而法国梧桐尽管初始N含量最低,但N元素形态可能更偏向可溶性,因此溶出率反而较高。

P元素溶出率的差异同样显著($p < 0.05$),不同树种凋落叶输入后P元素的溶出率表现为构树>夹竹桃>榆树>法国梧桐,榆树($84.59\% \pm 2.16\%$)和夹竹桃($80.74\% \pm 4.20\%$)的P元素溶出率显著高于法国梧桐($41.43\% \pm 4.88\%$),这与初始N/P比的特性高度吻合。

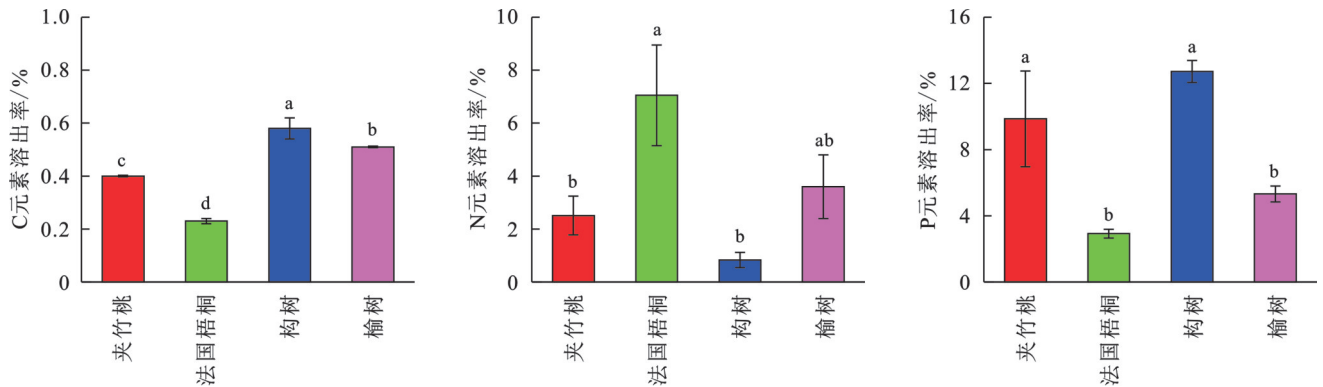
2.3 不同树种凋落叶可溶性养分释放效率及与初始性状的关联性

2.3.1 可溶性养分释放过程米氏方程拟合 由图3可知,4个树种凋落叶的释放效率随时间的变化均显著呈先快后慢的趋势,与米氏方程拟合的效果较好($0.7 < r^2 < 0.9$)。

由表2可知,DOC最大释放效率(V_{max})显著低于DON与DOP,表现为夹竹桃>榆树>构树>法国梧桐;而实际观察的最大释放效率($max-V_E$)表现为构树>榆树>夹竹桃>法国梧桐,与模型拟合的最大释放效率(V_{max})存在差异;DOC半饱和时间(k)最短的是

构树(1.58 d),最长的是榆树(13.23 d)。其次是DON的表现为法国梧桐>夹竹桃>榆树>构树,而实际观察的 $\max-V_E$ 表现为法国梧桐>榆树>夹竹桃>构树,与模型拟合的最大释放效率也存在一定差异,但最大值与最小值的树种是相同的,最大值是法国梧桐,最小值是构树;DON的 k 最长是夹竹桃的(2.29 d),最短是榆树的(0.35 d),整体表现显著短于DOC和DOP,说明各树种N元素的释放效率最高,可在短时间内达到释放饱和,特别是榆树。最后是3种可溶性元素里面平均释放效率最高的DOP,其中,构树和榆树凋落

叶的 V_{\max} 均超过100%,说明二者P元素的潜在释放能力更强,除法国梧桐的 V_{\max} 低于该树种DON的 V_{\max} 外,其余3个树种凋落叶DOP的 V_{\max} 均高于DOC和DON,整体表现为榆树>构树>夹竹桃>法国梧桐,同样实际观察的 $\max-V_E$ 与模型拟合的 V_{\max} 也存在差异,表现为榆树>夹竹桃>构树>法国梧桐;而由于构树与榆树的 V_{\max} 均超过100%导致该两种树种的 k 也达到所有树种和元素的最大值,其中榆树高达38.03 d,其次是构树的31.15 d,最小值则是夹竹桃的2.53 d,且 k 的整体表现与该元素的 V_{\max} 表现一致。



注:不同小写字母表示不同树种凋落叶浸泡十天后元素溶出率差异显著($p < 0.05$)。

图2 不同树种凋落叶输入后水体中各元素的溶出率

Fig. 2 Leaching rate of each element in water after leaf litter input from different tree species

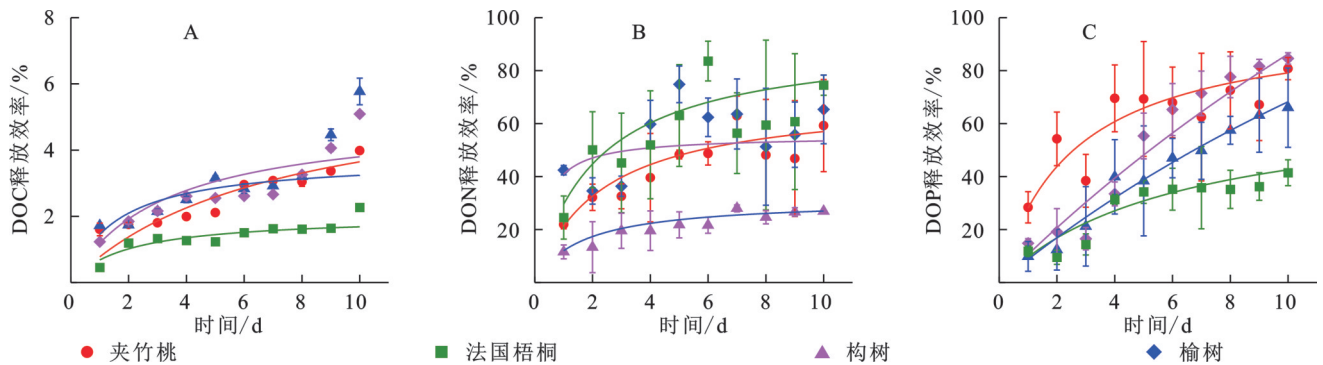


图3 米氏方程拟合不同树种凋落叶输入后水体中可溶性养分释放效率

Fig. 3 Dissolved nutrient release efficiency in water from leaf litter input of different tree species fitted using Michaelis-Menten equation

由图4可知,米氏方程拟合的最大释放效率(V_{\max})与10 d实际观察最大释放效率($\max-V_E$)存在差异($p < 0.05$)。DOC中除夹竹桃外,剩下3种树种的 V_{\max} 均低于 $\max-V_E$,其中榆树的 V_{\max} 与 $\max-V_E$ 几乎重合,这种现象也表明这3种树种在短期内就可以达到DOC的完全释放;在DON中除榆树的 $\max-V_E$ 高于 V_{\max} 外,剩余其他3种树种均是 V_{\max} 高于 $\max-V_E$ 。在DOP中构树和榆树的 V_{\max} 显著高于 $\max-V_E$,而剩余的夹竹桃和法国梧桐虽然也是 V_{\max} 高于 $\max-V_E$,但偏差较小。

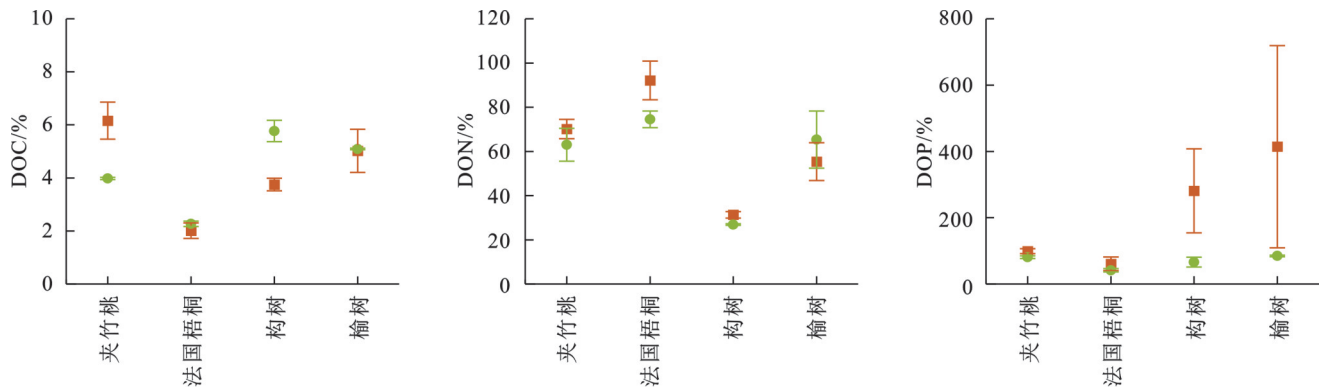
由图5可知,不同树种凋落叶的碳(TRA-C)、氮(TRA-N)、磷(TRA-P)预估最大释放量(TRA)

与实际观测最大释放量存在显著的元素和树种特性差异。C元素预估最大释放量与实际释放量偏差较大,夹竹桃的预估最大释放量远高于实际释放量,而法国梧桐和构树出现实际释放量高于预估最大释放量,榆树偏差最小预估最大释放量与实际最大释放量几乎重合;N元素预估最大释放量除榆树外普遍高于实际,但偏差都不大,其中法国梧桐偏差最小;P元素由于构树与榆树的预估最大释放效率 V_{\max} 高于100%,所以预估最大释放量计算过程都是使用实际最大释放效率 $\max-V_E$,剩余两种树种夹竹桃和法国梧桐均为预估最大释放量大于实际最大释放量。

表 2 采用米氏方程拟合的凋落叶最大释放效率 (V_{\max}) 与半饱和时间 (k), 以及实际观测的最大释放效率 ($\max-V_E$)
Table 2 Maximum release efficiency (V_{\max}), half-saturation time (k), and observed maximum release efficiency ($\max-V_E$) of leaf litter fitted using Michaelis-Menten equation

	可溶性有机碳(DOC)			可溶性有机氮(DON)			可溶性有机磷(DOP)		
	$V_{\max}/\%$	k/d	$\max-V_E/\%$	$V_{\max}/\%$	k/d	$\max-V_E/\%$	$V_{\max}/\%$	k/d	$\max-V_E/\%$
夹竹桃	6.16* (0.70)	6.98 (1.05)	3.98 (0.04)	70.1* (4.36)	2.29 (0.37)	62.99 (7.40)	99.17* (7.60)	2.53 (0.65)	80.74 (4.20)
法国梧桐	2.01* (0.19)	1.95 (0.72)	2.27 (0.10)	92.11* (8.79)	2.12 (0.86)	74.52 (3.80)	60.81* (20.53)	6.16 (3.22)	41.43 (4.88)
构树	3.75* (0.24)	1.58 (0.39)	5.77 (0.40)	31.34* (1.47)	1.61 (0.51)	26.90 (0.36)	280.86* (126.69)	31.15 (17.36)	66.04 (14.97)
榆树	5.02* (0.81)	13.23 (0.96)	5.09 (0.03)	55.34 (8.57)	0.35 (0.27)	65.33 (12.96)	414.29* (305.1)	38.03 (34.59)	84.59 (2.16)

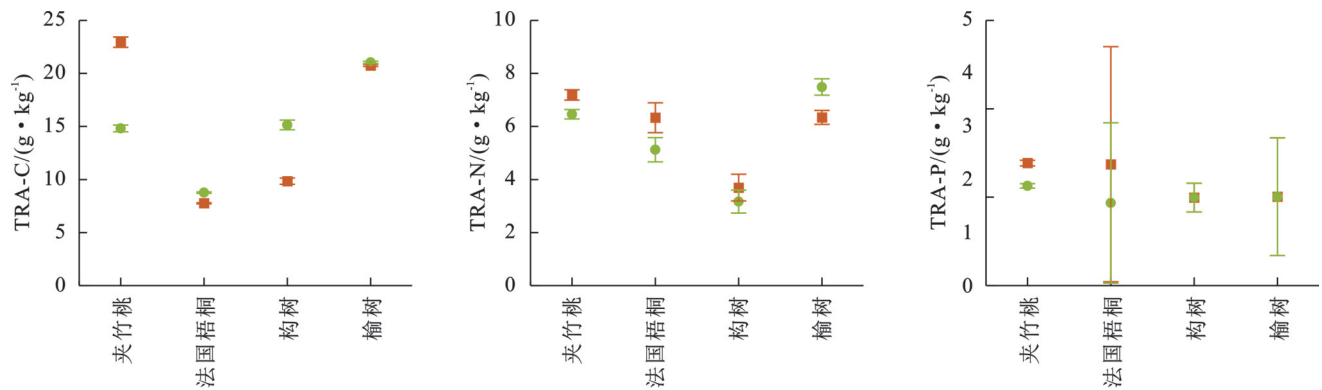
注: 括号内标注拟合 V_{\max} 与 k 的标准差及实测最大释放效率的标准差, 带* 参数表示在非线性回归中具有统计学显著性 ($p < 0.05$)。



注: 由米氏方程拟合估计 V_{\max} (红色方块) 与 10 d 浸泡试验实际观察到的最大效率 $\max-V_E$ (绿色圆圈)。

图 4 米氏方程拟合估计的 V_{\max} 与实际 V_{\max} 的差异

Fig. 4 Difference between V_{\max} estimated by Michaelis-Menten equation fitting and actual V_{\max}



注: 由米氏方程拟合估计 TRA (红色方块) 与 10 d 浸泡试验实际观察到的最大总释放量 TRA (绿色圆圈)。

图 5 米氏方程拟合估计的 TRA_{\max} 与实际 TRA_{\max} 之间差异

Fig. 5 Difference between TRA_{\max} estimated by Michaelis-Menten equation fitting and actual TRA_{\max}

2.3.2 可溶性养分模型拟合与凋落叶初始化学特性的关联 由图 6 可知, 结果显示, 凋落叶初始化学计量比、释放动力学参数与实际释放量之间存在显著的关联性。C 元素方面, C/N 比与拟合最大释放效率 $V_{\max}-N$ 呈显著正相关 ($p < 0.05$); N 元素方面, 初始氮含量与拟合最大释放效率 $V_{\max}-N$ 也呈显著负相关 ($p < 0.05$); P 元素方面, 初始 P 与预估最大释放量 $TRA-C/N$ 以及 $TRA-N/P$ 呈显著负相关 ($p < 0.05$)。除此之外预估最

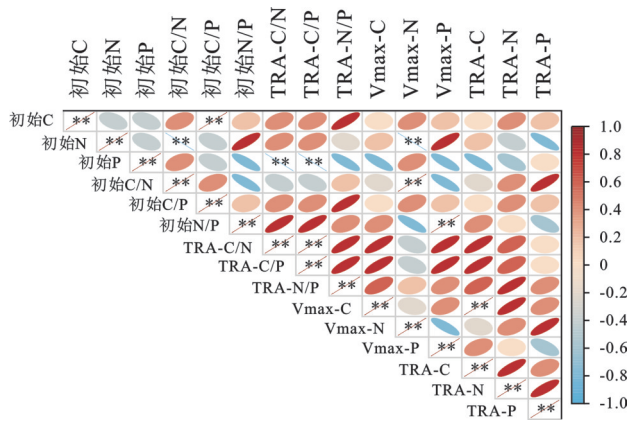
大释放量 $TRA-C/N$ 与预估最大释放量 $TRA-C/P$ 呈显著正相关以及拟合最大释放效率 $V_{\max}-C$ 与预估最大释放量 $TRA-C$ 也呈显著正相关。

3 讨论

3.1 不同树种凋落叶对水体可溶性养分的差异

DOC 作为影响水生生态系统的重要环境因子, 其过量累积会引发水质恶化甚至水体富营养化^[13]。本研

究发现不同树种凋落叶输入后水中DOC含量显著增加(图1),这与吴予彦^[14]研究结果吻合,表明凋落叶的DOC溶出会显著增加水体中DOC含量,从而潜在影响水体健康。凋落叶输入后,通过淋溶作用导致大量DOC溶出,且随时间不断增加,出现时间对C释放的累积效应,同时还出现轻微波动,表明除淋溶主导的释放过程外,凋落叶对水体DOC可能存在吸附—解吸动态平衡^[15]。本研究中,不同树种凋落叶输入水体后,C元素溶出率表现为构树>榆树>夹竹桃>法国梧桐(图2),这一结果与其初始化学特性密切相关,构树初始碳含量最低且C/N也是最低,而低C/N比通常意味着凋落叶更易被分解,可溶性碳更易释放。元素溶出率作为衡量元素可溶性的重要指标^[11],研究结果显示除构树外,剩余3种树种C元素溶出率与DOC含量表现基本相同(图1),这可能是由于植物体内C元素主要以纤维素、木质素等难溶性大分子有机物形式存在^[16],其可溶性组分含量成为控制碳释放的关键因子。



注: *表示 $p \leq 0.05$; **表示 $p \leq 0.01$ 。

图6 可溶性养分模型拟合与凋落叶初始化学特性的关联
Fig. 6 Association between dissolved nutrient model fitting and initial chemical traits of leaf litter

DON和DOP作为水体养分循环的重要组成部分,在水体生物地球化学循环过程中扮演着关键角色,但过量累积也会导致水体富营养化,进而威胁水生态环境和稳定^[17]。研究表明,不同树种凋落叶输入后,水体中DON和DOP含量显著增加,对水体富营养化具有一定促进作用。与DOC类似,凋落叶初始性状可能通过化学、物理以及生物分解等途径影响DON和DOP的溶出。元素溶出还与其在植物体内存在的形态有关^[18]。相比于P元素,凋落叶N元素大部分以蛋白质的形式存在^[19],水溶性较弱,而凋落叶中总磷的72%是水溶性的^[14]。本研究中,不同树种凋落叶P元素溶出率明显大于C、N元素(图2),与其他的研 究结果一致。不同树种凋落叶N元素溶出率表现为法国梧桐>榆树>夹竹桃>构树。构树虽

初始N含量最高,但其N素溶出率最低,这可能是由于构树凋落叶中的N素更多以稳定的有机结合态存在,难以在短期浸泡中释放,而法国梧桐尽管初始N含量最低,但N素形态可能更偏向可溶性,因此溶出率反而较高。不同树种凋落叶P元素溶出率表现为构树>夹竹桃>榆树>法国梧桐,榆树和夹竹桃的P元素溶出率显著高于法国梧桐,这与初始N/P比的特性高度吻合。树种间可溶性养分释放规律的差异性表明,城市水体周边绿化树种选择时,需考虑树种的养分释放问题。

3.2 凋落叶养分释放效率的动力学特征及与初始化学特性的关联

在本研究中,将 V_E 的时间过程拟合到米氏方程中。然而,榆树和构树DOP的估计值 V_{max} 均超过100%。在我们观察期内,这两树种凋落叶DOP的释放效率几乎呈线性增加,表明短时间的浸泡无法使这两种凋落叶DOP的释放效率达到饱和水平。而这两种凋落叶DOP的半饱和时间(k)明显大于DOC和DON的半饱和时间(k)。这一趋势也表明凋落叶DOC和DON的可溶部分比DOP更快释放到水中,因为在凋落叶中,尽管一些有机C种类,如糖、小分子碳水化合物和有机酸是水溶性的,但大多数是支持结构碳,例如木质素和纤维素是不溶于水的^[20],需要更多时间来分解^[21]。同样,凋落叶中的N生物量主要是结构蛋白。虽然有高度水溶性的N,如游离氨基酸,但他们质量相对较小^[22],大部分在叶片衰老脱落前被回收利用^[23]。因此,在浸泡试验中,除法国梧桐外,剩余树种DOP的最大释放效率明显高于DOC和DON。研究表明,在凋落叶浸泡过程中,DOP的释放效率最高,均>40%,其次是DON(26.9%~74.52%),DOC的释放效率最低(2.27%~5.77%),表明DOP在水体中分解初期迅速流失^[24]。DOP的高释放效率可能是源于磷主要以无机正磷酸盐或磷酸肌醇的形式存在于植物组织中^[23],他们具有高度水溶性,因此很容易从凋落叶中浸出。研究表明(图5)预估最大释放量(TRA)与实际观测最大释放量的显著差异,反映了凋落叶养分释放过程的复杂性及模型拟合与实际环境的动态适配性。除构树和榆树DOP的 V_{max} 超过100%,TRA-P计算采用的是实际 $\max-V_E$,剩余树种的TRA预估释放量和实际观察到的释放量表现与 V_{max} 一致。值得注意的是在TRA的计算过程中还涉及凋落叶的初始养分含量,图6的相关性分析进一步揭示了初始化学特性对释放过程的调控机制。C/N比与 V_{max-N} 的显著正相关($p < 0.05$)表明,高C/N的凋落叶虽初始N含量低,但氮素释放潜力更高,这可

能是因为低N含量下,氮素更易以游离态存在而非结合于结构性蛋白^[25],从而提升释放动力学效率。初始N含量与 V_{\max} -N的显著负相关($p < 0.05$)则印证了构树的特殊性。其初始N含量最高,但大量氮素结合于稳定有机态,导致释放潜力被抑制。P元素方面,初始P与TRA-C/N, TRA-N/P的显著负相关($p < 0.05$)暗示,可能通过抑制碳氮释放相关酶活性(如纤维素酶、蛋白酶),间接降低碳氮释放总量,这与生态化学计量学中“元素平衡调控分解过程”的理论一致^[26]。而TRA-C/N与TRA-C/P的显著正相关,表明碳氮与碳磷的释放量存在协同效应,可能源于碳的溶出为氮磷释放提供载体(如DOM结合态氮磷)。此外, V_{\max} -C与TRA-C的显著正相关($p < 0.05$)表明,碳的释放潜力(V_{\max} -C)是决定实际碳释放量的核心因素,这与碳释放主要依赖易溶组分的快速淋溶特性相符^[15]。而模型预估与实际释放量的偏差,本质上表明凋落叶养分释放是初始化学特性、时间动态及环境条件共同作用的结果。短期观测可能低估持续释放型树种(如构树、榆树磷释放)的潜力,而高估难溶组分占比高的树种(如夹竹桃碳释放)的效率。

4 结论

(1) 不同树种凋落叶初始C, N含量差异显著($p < 0.05$),其中榆树C含量最高(413.39 g/kg),构树N含量最高(11.79 g/kg), P含量无显著差异但数值存在波动,法国梧桐P含量最高(2.26 g/kg)。

(2) 不同树种凋落叶输入一段时间后水体中DOC, DON, DOP含量均增加,但随时间变化均出现波动且水体中各养分含量始终未达到稳定状态,其中DOC整体波动最小随时间持续上升,DON存在明显波动,呈先升后降再上升的趋势,DOP前期出现明显波动,后期逐渐平稳并持续增长。

(3) 米氏方程拟合结果表明,不同树种凋落叶输入水体养分释放过程中,DOP释放效率最高,DON释放效率次之,DOC的释放效率最低。研究发现DOC, DON, DOP的最大释放效率和释放量多数表现为预估值大于实际观察值,该偏差与初始化学计量特性有着显著相关。

参考文献 (References):

[1] Meyer S, Rusterholz H P, Salamon J A, et al. Leaf litter decomposition and litter fauna in urban forests: effect of the degree of urbanisation and forest size [J]. *Pedobiologia*, 2020, 78: 150609.

[2] Wallace T A, Ganf G G, Brookes J D. A comparison of phosphorus and DOC leachates from different types of

leaf litter in an urban environment [J]. *Freshwater Biology*, 2008, 53(9): 1902-1913.

[3] Paul M J, Meyer J L. Streams in the urban landscape [J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 2001, 32: 333-365.

[4] Walsh C J, Roy A H, Feminella J W, et al. The urban stream syndrome: current knowledge and the search for a cure [J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 2005, 24(3): 706-723.

[5] 胡鑫. 三峡库区消落带入侵植物对凋落物分解的效应研究[D]. 重庆: 西南大学, 2023.

Hu X, A study on effect of invasive plants on litter decomposition in the hydro-fluctuating zone of the three gorges reservoir [D]. Chongqing: Southwest University, 2023.

[6] 辛佳宁. 贺兰山西坡不同植被类型土壤和凋落物的水源涵养功能研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2024.

Xin J N, Water conservation function of soil and litter under different vegetation types on the western slope of Helan Mountains [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2024.

[7] 杨关吕. 森林枯落物分解研究进展[J]. 亚热带水土保持, 2021, 33(3): 30-35.

Yang G L, Study progress of the litter decomposition in forest [J]. *Subtropical Soil and Water Conservation*, 2021, 33(3): 30-35.

[8] 张喜亭, 朱敏蕊, 冯鹏, 等. 西南地区亚热带天然林树种多样性对土壤氮组分的影响[J]. 乐山师范学院学报, 2025, 40(4): 92-99.

Zhang X T, Zhu M R, Feng P, et al. Effects of tree species diversity on soil nitrogen components in subtropical natural forests, southwest China [J]. *Journal of Leshan Normal University*, 2025, 40(4): 92-99.

[9] Dhaliwal G S, Gupta N, Kukal S S, et al. Standardization of automated vario EL III CHNS analyzer for total carbon and nitrogen determination in plants [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2014, 45(10): 1316-1324.

[10] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.

The State Environmental Protection Administration. Water and wastewater monitoring and analysis method [M]. Fourth Edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.

[11] 豆鹏鹏, 王芳, 马瑜, 等. 叶凋落物碳、氮和磷元素对模拟淋溶的响应[J]. 科学通报, 2018, 63(30): 3114-3123.

Dou P P, Wang F, Ma Y, et al. Response of litter carbon, nitrogen and phosphorus to simulated leaching [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2018, 63(30): 3114-3123.

[12] Ho P C, Nakajima S, Urabe J. Stoichiometry of carbon, nitrogen, and phosphorus released from the leaf litter of various temperate tree species [J]. *Ecology and*

- Evolution, 2023, 13(7): e10372.
- [13] 陈吉吉, 郭婧, 徐苏士, 等. 北京密云水库流域水体夏季 DOC 和 DIC 质量浓度及同位素组成初探[J]. 环境科学, 2020, 41(11): 4905-4913.
Chen J J, Guo J, Xu S S, et al. Concentration and carbon isotope composition of DOC and DIC in the Miyun Reservoir watershed in summer[J]. Environmental Science, 2020, 41(11): 4905-4913.
- [14] 吴予彦, 王曼雅, 刘宇博, 等. 湖岸绿化景观树种凋落叶输入对水体可溶性碳、氮、磷的影响[J]. 环境科学学报, 2025, 45(4): 240-250.
Wu Y Y, Wang M Y, Liu Y B, et al. Effects of the input of leaf litter from lakeshore tree species on dissolved organic carbon, nitrogen, and phosphorus in the water[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2025, 45(4): 240-250.
- [15] 史琦, 焦锋, 陈莹, 等. 杭州西湖北里湖荷叶枯落物分解及其对水环境的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(18): 5171-5179.
Shi Q, Jiao F, Chen Y, et al. Decomposition of *Lotus* leaf litter and its effect on the aquatic environment of the Beili Lake in the Hangzhou West Lake[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(18): 5171-5179.
- [16] 郑兴蕊, 宋娅丽, 王克勤, 等. 滇中常绿阔叶林凋落物养分释放及生态化学计量特征对模拟 N 沉降的响应[J]. 应用生态学报, 2021, 32(1): 23-30.
Zheng X R, Song Y L, Wang K Q, et al. Response of nutrient release and ecological stoichiometry of litter to simulated nitrogen deposition in evergreen broad-leaved forest in central Yunnan, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(1): 23-30.
- [17] 王圣瑞, 张莉, 李大, 等. 高原湖泊溶解性有机氮生物地球化学: 以洱海为例[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2019.
Wang S R, Zhang L, Li D, et al. Biogeochemistry of Dissolved Organic Nitrogen in the Plateau Lakes of China[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2019.
- [18] 李艳晖, 王瑜, 李砧, 等. 二球悬铃木凋落叶分解初期对水体总氮和总磷的影响研究[J]. 生态科学, 2020, 39(6): 191-198.
Li Y H, Wang Y, Li Z, et al. Effects of early decomposition of *Platanus acerifolia* leaf litters on water TN, TP [J]. Ecological Science, 2020, 39(6): 191-198.
- [19] Noodén L D, Leopold A C. Senescence and aging in plants[M]. Amsterdam: Elsevier, 2012.
- [20] Kögel-Knabner I. The macromolecular organic composition of plant and microbial residues as inputs to soil organic matter [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2002, 34(2): 139-162.
- [21] Nykvist N. Leaching and decomposition of water-soluble organic substances from different types of leaf and needle litter[R]. Studia Forestalia Suecica, 1963.
- [22] Franklin H M, Carroll A R, Chen C R, et al. Plant source and soil interact to determine characteristics of dissolved organic matter leached into waterways from riparian leaf litter [J]. Science of the Total Environment, 2020, 703: 134530.
- [23] Chapin III F S, Schulze E D, Mooney H A. The ecology and economics of storage in plants [J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1990, 21: 423-447.
- [24] McComb A J, Qiu S, Bell R W, et al. Catchment litter: a phosphorus source mobilized during seasonal rainfall[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2007, 77(2): 179-186.
- [25] Cornelissen J H C, Pérez-Harguindeguy N, Díaz S, et al. Leaf structure and defence control litter decomposition rate across species and life forms in regional floras on two continents[J]. The New Phytologist, 1999, 143(1): 191-200.
- [26] Sterner Robert W, James J. Elser. Ecological stoichiometry: the biology of elements from molecules to the biosphere[M]. Princeton: Princeton University Press, 2002.

(上接第 102 页)

- [21] Bao T, Zhao Y, Yang X, et al. Effects of disturbance on soil microbial abundance in biological soil crusts on the Loess Plateau, China[J]. Journal of Arid Environments, 2019, 163: 59-67.
- [22] 秦福雯, 康澜月, 姜凤岩, 等. 生物土壤结皮演替对高寒草原植被结构和土壤养分的影响[J]. 生态环境学报, 2019, 28(6): 1100-1107.
Qin F W, Kang B Y, Jiang F Y, et al. Effects of biological soil crust succession on vegetation structure and soil nutrients in alpine steppe[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, 28(6): 1100-1107.
- [23] Song G, Li X R, Hui R. Effect of biological soil crusts on seed germination and growth of an exotic and two native plant species in an arid ecosystem[J]. Plos One, 2017, 12(10): e0185839.
- [24] 安乐, 何静, 刘艳梅, 等. 荒漠灌丛对生物土壤结皮下土壤养分的影响[J]. 水土保持研究, 2025, 32(2): 83-90.
An L, He J, Liu Y M, et al. Effects of desert shrubs on soil nutrients under biocrusts[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(2): 83-90.
- [25] 都军, 李宜轩, 杨晓霞, 等. 腾格里沙漠东南缘生物土壤结皮对土壤理化性质的影响[J]. 中国沙漠, 2018, 38(1): 111-116.
Du J, Li Y X, Yang X X, et al. Effects of biological soil crusts types on soil physicochemical properties in the southeast fringe of the tengger desert[J]. Journal of Desert Research, 2018, 38(1): 111-116.