

DOI:10.13870/j.cnki.stbxc.2024.04.009

王宏宇, 吴福忠, 张耀艺, 等. 降雨季节亚热带常绿阔叶林透冠雨对土壤可溶性有机质的迁移作用[J]. 水土保持学报, 2024, 38(4): 181-189, 197.

WANG Hongyu, WU Fuzhong, ZHANG Yaoyi, et al. Effects of throughfall on the migration of soil dissolved organic matter in subtropical evergreen broad-leaved forest during rainfall season[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(4): 181-189, 197.

降雨季节亚热带常绿阔叶林透冠雨对土壤可溶性有机质的迁移作用

王宏宇¹, 吴福忠^{1,2}, 张耀艺¹, 郑旭灵¹, 吴捷录¹, 张雪¹, 张欣影^{1,2}

(1. 福建师范大学地理科学学院, 湿润亚热带生态—地理过程教育部重点实验室, 福州 350117;

2. 福建三明森林生态系统国家野外科学观测研究站, 福建 三明 365002)

摘要: [目的] 作为森林土壤中活性最高的组分, 可溶性有机质(DOM)不仅可以直接被微生物利用, 还是生态系统中C、N、P等元素迁移的主要载体, 其迁移过程受到透冠雨驱动的水力作用和溶解过程的影响。[方法] 通过野外原位控制透冠雨输入试验, 以亚热带常绿阔叶林的砂质红壤为对象, 对照林窗降雨, 分析降雨季节森林透冠雨对不同土层土壤可溶性有机碳(DOC)、可溶性有机氮(DON)和可溶性有机磷(DOP)动态变化的影响。[结果] (1) 相对于林窗降雨, 整个降雨季节以透冠雨为载体输入到土壤的DOM显著增加($p < 0.01$), DOC、DON和DOP浓度分别增加37.00%, 93.47%, 85.12%, DOC、DON和DOP通量分别增加20.76%, 49.93%, 61.55%, 但通过40 cm深土壤后, 其输出通量差异并不显著, 表明土壤对透冠雨中DOM具有较强的吸收能力。(2) 相较于林窗降雨, 透冠雨显著降低土壤表层输入C/N的29.19%, C/P的26.00%, 而无明显改变N/P, 而经过40 cm深土壤后, 透冠雨显著降低土壤40 cm深度输入C/N的19.35%, C/P的13.35%和N/P的7.45%。表明透冠雨DOM增加主要是因为吸收冠层中的DON与DOP, 而在土壤中DOM减少部分主要集中在DOC与DOP。(3) 土壤DOC与DOP表现为截留减少, 而DON表现为富集增加。相较于林窗降雨, 透冠雨显著增加0—40 cm土壤对DOC截留量的39.93%和DOP截留量的72.42%, 显著减少对DON释放量的32.37%。[结论] 研究结果充分证明亚热带常绿阔叶林透冠雨能促进DOM的输入, 有利于土壤各层次对DOM的吸收, 对于生态系统可持续经营和管理具有一定的科学意义。

关键词: 亚热带森林; 砂质红壤; 可溶性有机质; 林冠截留; 林窗降雨

中图分类号: S715.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)04-0181-09

Effects of Throughfall on the Migration of Soil Dissolved Organic Matter in Subtropical Evergreen Broad-leaved Forest During Rainfall Season

WANG Hongyu¹, WU Fuzhong^{1,2}, ZHANG Yaoyi¹, ZHENG Xuling¹,

WU Jielu¹, ZHANG Xue¹, ZHANG Xinying^{1,2}

(1. School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Key Laboratory for Humid Subtropical Eco-Geographical Processes of the Ministry of Education, Fuzhou 350117, China; 2. Fujian Sanming Forest Ecosystem National

Observation and Research Station, Sanming, Fujian 365002, China)

Abstract: [Objective] As the most active component in forest soil, dissolved organic matter (DOM) can not only be directly utilized by microorganisms, but also be the main carrier for the migration of C, N, P and other elements in the ecosystem. The migration process is influenced by the hydraulic interactions and dissolving processes driven by throughfall. [Methods] Using soil column microcosm in situ culture to analyze the effects of forest throughfall on the dynamics of dissolved organic carbon (DOC), dissolved organic nitrogen (DON), and dissolved organic phosphorus (DOP) across varying layers of sandy red soil during the rainy season. The study focused on a subtropical evergreen broad-leaved forest with rainfall as a control.

收稿日期: 2024-01-02

修回日期: 2024-02-07

录用日期: 2024-02-17

网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-04-19

资助项目: 国家自然科学基金项目 (32171641, 32101509, 32271633)

第一作者: 王宏宇 (2000—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事森林土壤研究。E-mail: whyfjnu@163.com

通信作者: 张欣影 (1994—), 女, 副教授, 主要从事森林土壤研究。E-mail: xyzhang@fjnu.edu.cn

http://stbxc.alljournal.com.cn

[Results] (1) During the rainfall season, the DOM input of throughfall into soil increased significantly compared with rainfall ($p < 0.01$). The concentrations of DOC, DON and DOP increased by 37.00%, 93.47%, and 85.12%, respectively, and the fluxes of DOC, DON and DOP also increased by 20.76%, 49.93%, and 61.55%, respectively. However, there was no significant difference in output fluxes after passing through the 40 cm deep soil, indicating a strong capacity of the soil to absorb DOM from throughfall. (2) Compared to rainfall, throughfall reduced the C/N and C/P ratios of the soil surface by 29.19% and 26.00%, respectively, without significantly affecting N/P ratios. After passing through 40 cm of soil, throughfall reduced the input C/N, C/P and N/P ratios of the soil by 19.35%, 13.35% and 7.45%, respectively. The increase in DOM in throughfall was mainly due to the absorption of DON and DOP in the canopy, while the decrease in soil DOM was mainly concentrated in DOC and DOP. (3) Soil DOC and DOP showed a reduction in interception, while DON showed an increase in enrichment. Throughfall increased the interception of DOC and DOP in the 0–40 cm soil by 39.93% and 72.42%, respectively, and significantly reduced the release of DON by 32.37%. **[Conclusion]** These results demonstrate that throughfall in a subtropical evergreen broad-leaved forest can promote the input of DOM and facilitate its uptake at different soil depths, with implications for the sustainable management of ecosystems.

Keywords: subtropical forest; sandy red soil; dissolved organic matter; canopy interception; rainfall

Received: 2024-01-12

Revised: 2024-02-07

Accepted: 2024-02-17

Online (www.cnki.net): 2024-04-19

土壤可溶性有机质(dissolved organic matter, DOM)主要由植物和动物的残骸、排泄物及微生物的代谢产物等有机物质组成,包括可溶性有机碳(DOC)、可溶性有机氮(DON)和可溶性有机磷(DOP),可直接被土壤微生物利用,是土壤中最活跃的组分之一,也是氮磷等养分的重要迁移载体^[1]。作为反映土壤肥力和环境情况的基本指标,DOM是土壤和陆地水体之间养分运输的重要途径,其迁移转化动态能直接影响陆地生态系统的能量流动及碳平衡^[2]。由于DOM易溶于水,土壤中的DOM极易随降雨水力作用的迁移而流失,但降雨过程同时也可以通过淋洗和溶解作用增加土壤DOM含量^[3]。森林透冠雨是指雨水降落在森林树冠层上,然后通过树冠间隙和枝叶,最终到达地面的降水,约占全球森林降雨总量的73%。森林透冠雨是“森林—土壤”环节营养物质循环主要和最便捷的途径之一,通过该途径输入地表的养分是以凋落物为载体的5~6倍^[4]。一方面,森林透冠雨与树冠表面的枝叶和其他植物部分相互作用,将DOM从植物枝叶直接带入土壤,既可以增加土壤DOM含量,也可能通过激发微生物活性,促进土壤DOM释放^[5];另一方面,通过林冠的遮挡或集流,透冠雨降落到土壤的雨量、持续时间及水力作用均有所改变,可进一步通过对土壤颗粒的溶解、破碎、吸附影响土壤DOM含量^[6]。此外,作为DOM的组成部分,DOC、DON、DOP是森林生态系统中关键的土壤养分和碳储存组分,它们对土壤肥

力、植物生长和生态系统健康起着重要作用^[7],但DOM中所携带的碳、氮和磷等元素由于性质差异,可能随着透冠雨的迁移过程表现出不同的变化特征^[8],使得透冠雨通过地表和不同土层后DOM可能具有较大的变化,但缺乏一致的认识。

我国亚热带地区降雨充沛、雨热同季,分布着全球北回归线上面积最大的常绿阔叶林^[9]。丰富的降雨导致强烈的淋溶作用,使得土壤有机质保存困难,但增加了土壤DOM的迁移和流通。这些高通量的土壤DOM可能对于生态系统结构和功能更为重要。然而,作为森林水文过程重要的驱动因子^[10],森林透冠雨对土壤DOM的迁移与转化过程的影响仍不清楚。因此,以典型亚热带常绿阔叶林为研究对象,对照林窗降雨,设置野外原位控制试验,研究透冠雨对地表、不同层次土壤可溶性有机碳(DOC)、氮(DON)和磷(DOP)含量的影响,以期通过深入认识透冠雨与土壤DOM迁移的生态关联,为降雨格局改变情景下亚热带森林生态系统可持续经营管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究样地位于福建三明森林生态系统国家野外科学观测研究站陈大观测点(26°19′26″–26°19′48″N, 117°35′53″–117°36′36″E),属于典型的中亚热带季风气候,具有冬冷夏热、雨热同期的特点。年平均气温19.3℃,年平均降水量1610mm,降雨主要集

中在3—8月。研究区域以低山丘陵为主,平均海拔约300 m,坡度 $25^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 。土壤为花岗岩发育而来的砂质红壤,平均容重为 1.04 g/cm^3 。区域内分布着大面积的常绿阔叶林,物种多样性丰富,研究对象选取以米槠(*Castanopsis carlesii*)为建群种的天然林,林龄为45年,林分密度为 $3\ 788\text{ 株/hm}^2$,郁闭度为0.8。样地平均坡度为 31.7° ,平均树高15.8 m,平均胸径21.99 cm。研究期间的平均气温为 $27.02\text{ }^{\circ}\text{C}$,透冠雨总量为 $(610.98\pm 227.33)\text{ mm}$,林窗降雨总量为 $(829.66\pm 156.74)\text{ mm}$ (图1)。研究区基本情况见图2。

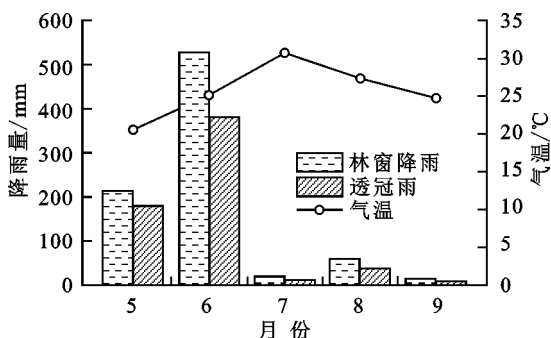


图1 研究样地降雨量和气温动态

Fig. 1 Dynamic of precipitation and air temperature in sample plots

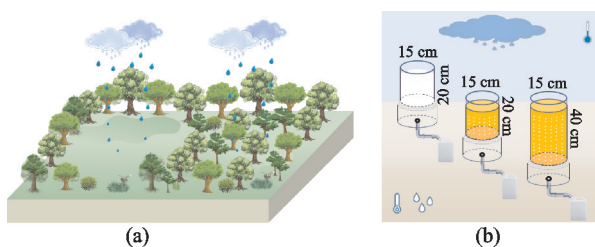


图2 研究样地试验设计

Fig. 2 Sample plot experimental design diagram

1.2 设计采样和试验分析

在充分调查样地情况后,于2021年9月在以米槠为建群种的天然林选取3个坡度、坡向及面积相近(约 50 m^2)的林窗样地作为对照,并在每个林窗样地旁选择对应的林下样地(林冠结构茂密)。为避免样地间相互干扰,样地距离保持200 m以上。先去除样方内土壤表层的植物和凋落物,为保证控制试验土壤的均一性,将0—20,20—40 cm土层的土壤分别挖出,将林下样地内的不同土层土壤分别混合均匀。混合均匀的土壤依次装入直径15 cm、高度20,40 cm的PVC管中,PVC管底部用孔径2 mm的尼龙网包裹,防止土壤淋失的同时保证水气交换。为了尽可能地保证PVC管内环境与外界环境一致,每个PVC管壁上均匀布设小孔。将装好土壤的PVC管放回样地内,四周用样方内土壤回填,静置半年以恢复土壤结构。在20,40 cm的土柱底部设计渗漏水收集装置,为计算输入的雨量及其有机组分,设置其他条件和土

柱一样的无土装置,主要用于收集林窗降雨和透冠雨。样地共放置渗漏水装置42个(18个20 cm:6样地 $\times$ 3重复;18个40 cm:6样地 $\times$ 3重复;6个无土)。为避免地表径流的影响,在样方小区外设立排水沟。在2022年5—9月,每月收集1次在自然状态下产生的透冠雨,记录雨量数据,将水样先过滤纸,再过 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 滤膜,供测定。使用TOC分析仪(TOC-LCPH, Japan)测定DOC^[11],使用连续流动分析仪(SKALAR SAN++, Netherlands)测定DON,使用钼锑抗比色法^[12]测定DOP。

1.3 数据处理与统计分析

1.3.1 DOM通量 在不同月份下土壤渗漏水中的DOC、DON、DOP在不同土壤层次输入或输出的通量计算公式为:

$$F_i = \frac{VMW * Vol}{S} \quad (1)$$

式中: F_i 为DOC、DON、DOP通量(mg/cm^2);VWM为特定元素的浓度(mg/L);Vol为对应的水量(L);S为单位土壤的面积(cm^2)。

1.3.2 DOM在不同土壤层次截留比 DOC、DON、DOP以渗漏水的方式在土壤中迁移,在不同土壤层次DOC、DON、DOP的截留比计算公式为:

$$I = \frac{F_{i1}}{F_{ib}} \quad (2)$$

式中: I 为DOC、DON、DOP在不同土层的截留比; F_{i1} 为经过土层后DOC、DON、DOP输出量(mg/cm^2); F_{ib} 为经过土层前DOC、DON、DOP输入量(mg/cm^2)。

1.3.3 DOM对透冠雨的响应程度 相较于林窗降雨,DOC、DON、DOP对透冠雨响应程度计算公式为:

$$R_D = \frac{F_1 - F_2}{F_2} \quad (3)$$

式中: R_D 为DOC、DON、DOP降雨响应比; F_1 为透冠雨DOC、DON、DOP通量(mg/cm^2); F_2 为大气降雨DOC、DON、DOP通量(mg/cm^2)。

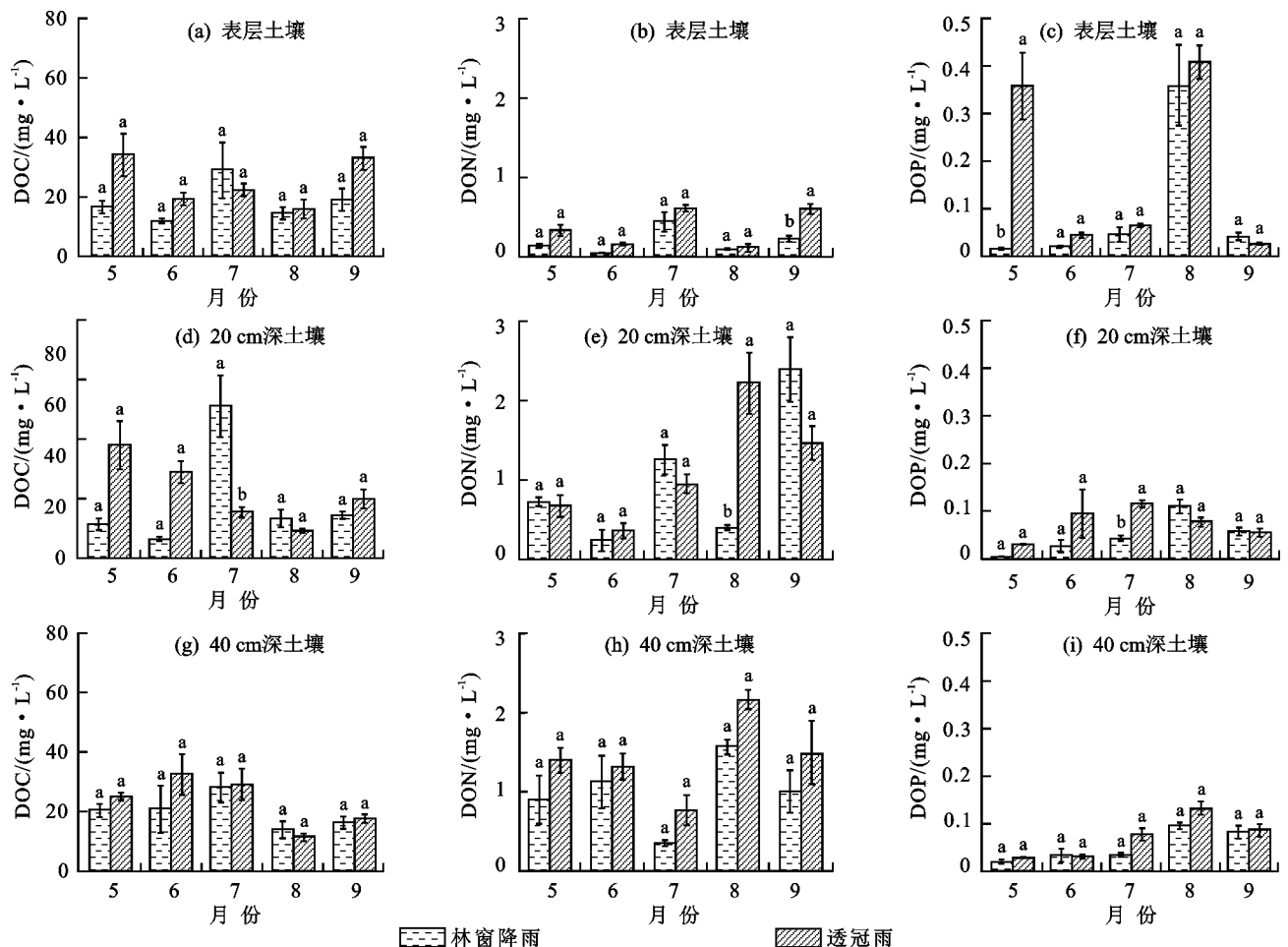
1.3.4 统计分析 采用重复测量方差(repeated measures ANOVA)分析月份、土层深度、处理及三者之间的交互作用对DOM浓度、化学计量比、通量的影响,其中,组间因素为月份,组内因素为土层深度及处理;采用配对样本 t 检验(Paired Samples t -test)分析2种处理(透冠雨、林窗降雨)在同一月份、同一土层的差异性;采用Pearson法进行各因子之间的相关性分析($\alpha=0.05$)。所有分析统计均应用SPSS 20软件完成,相关图表采用Origin 2022软件绘制。

2 结果与分析

2.1 DOM 的浓度与化学计量比

对比林窗降雨,透冠雨显著增加土壤表层的 DOM 输入浓度,DOC 输入浓度增加 37.00%,DON 输入浓度增加 93.47%,DOP 输入浓度增加 85.13% (图 3)。经过 0—20 cm 土层后,透冠雨显著增加 20 cm 土层 DOC 输出浓度的 15.53%、DON 输出浓度的 13.19%和 DOP 输出浓度的 53.07%。经过 20—40 cm 土层后,相较于林窗降雨,透冠雨显著增加 40 cm

土层 DOC 输出浓度的 16.31%、DON 输出浓度的 44.23%和 DOP 输出浓度的 34.23%。由图 4 可知,对比林窗降雨,透冠雨显著降低土壤表层输入 C/N 的 29.19%,C/P 的 26.00%,而无明显改变 N/P。经过 0—20 cm 土层后,透冠雨显著降低土壤 20 cm 深度输入 C/P 的 24.53%,N/P 的 26.05%,而无明显改变 C/N。经过 20—40 cm 土层后,相较于林窗降雨,透冠雨显著降低土壤 40 cm 深度输入 C/N 的 19.36%,C/P 的 13.35%和 N/P 的 7.45%。



注:图柱上方不同小写字母表示相同月份不同处理间的差异显著($p < 0.05$)。下同。

图 3 林窗降雨与透冠雨在不同土层深度的 DOM 浓度

Fig. 3 DOM concentration of rainfall and throughfall at different soil depths

2.2 DOM 的通量与降雨季节总量

对比林窗降雨,透冠雨显著增加土壤表层的 DOM 输入量,DOC 输入量增加 20.76%,DON 输入量增加 49.93%,DOP 输入量增加 61.55%(图 5)。在土壤中,DOC 与 DOP 的迁移是一个吸收减少的过程,而 DON 的迁移是一个富集增加的过程;经过 0—20 cm 土层后,透冠雨显著增加 0—20 cm 土层对 DOC 截留量的 10.35%和 DOP 截留量的 70.41%,透冠雨显著减少 0—20 cm 土层对 DON 释放量的 84.19%;经过 20—40 cm 土层后,相较于林窗降雨,

透冠雨显著增加 20—40 cm 土层对 DOC 截留量的 44.37%和 DOP 截留量的 88.08%,未显著减少 20—40 cm 土层对 DON 的释放。而在经过 40 cm 深土层后,透冠雨与林窗降雨运输的 DOM 输出量基本没有差异。在 5—9 月透冠雨和林窗降雨 DOM 通量的迁移变化趋势基本一致,在 6 月达到最大值,在 9 月达到最小值。整体来看,林下透冠雨与林窗降雨输入进入土壤的 DOM 通量有显著差异但这种差异随土层深度加深而减小,土层到 40 cm 深后 DOM 的输出量与林下林窗无关(图 6)。

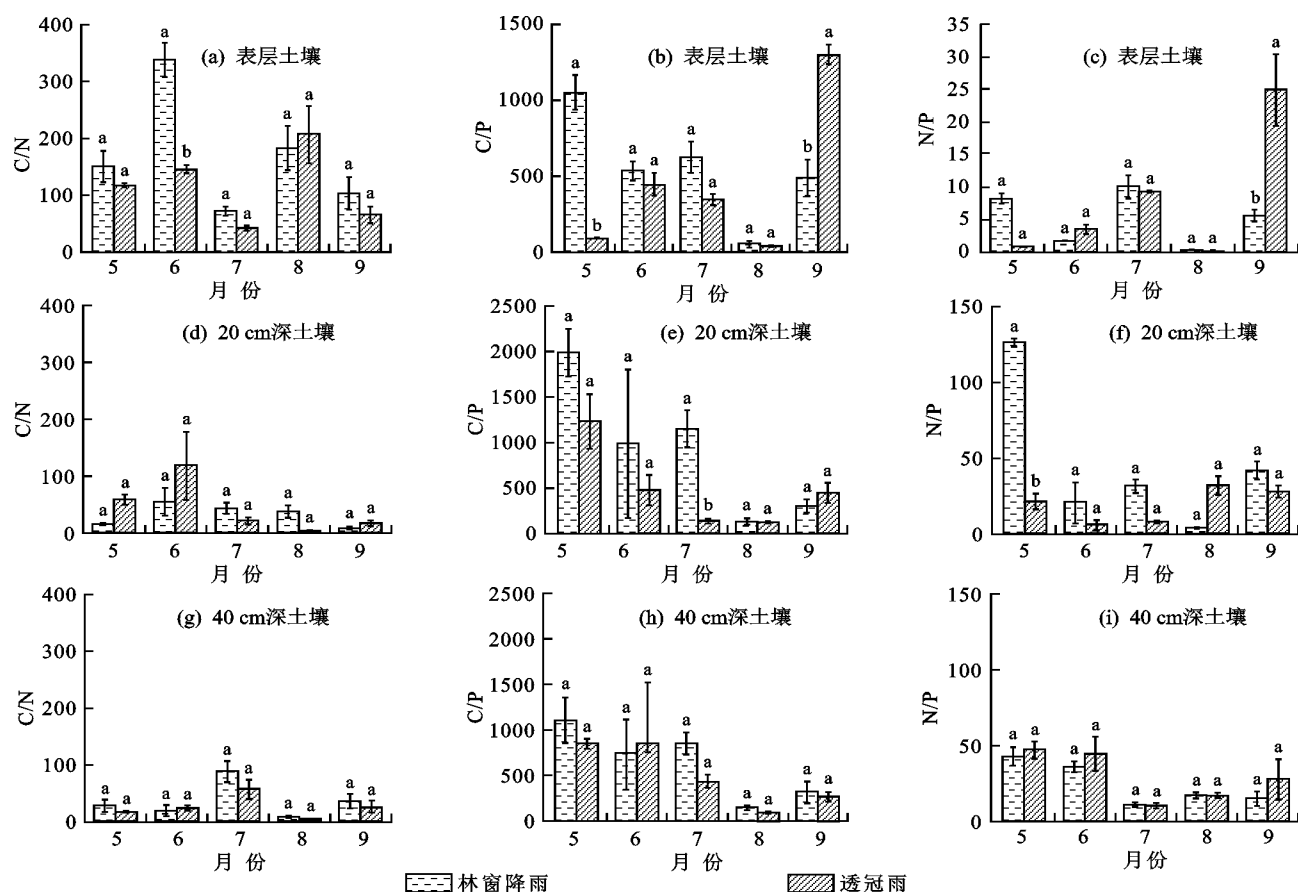


图4 林窗降雨与透冠雨在不同土层深度的DOM化学计量比

Fig. 4 DOM stoichiometric ratios of rainfall and throughfall at different soil depths

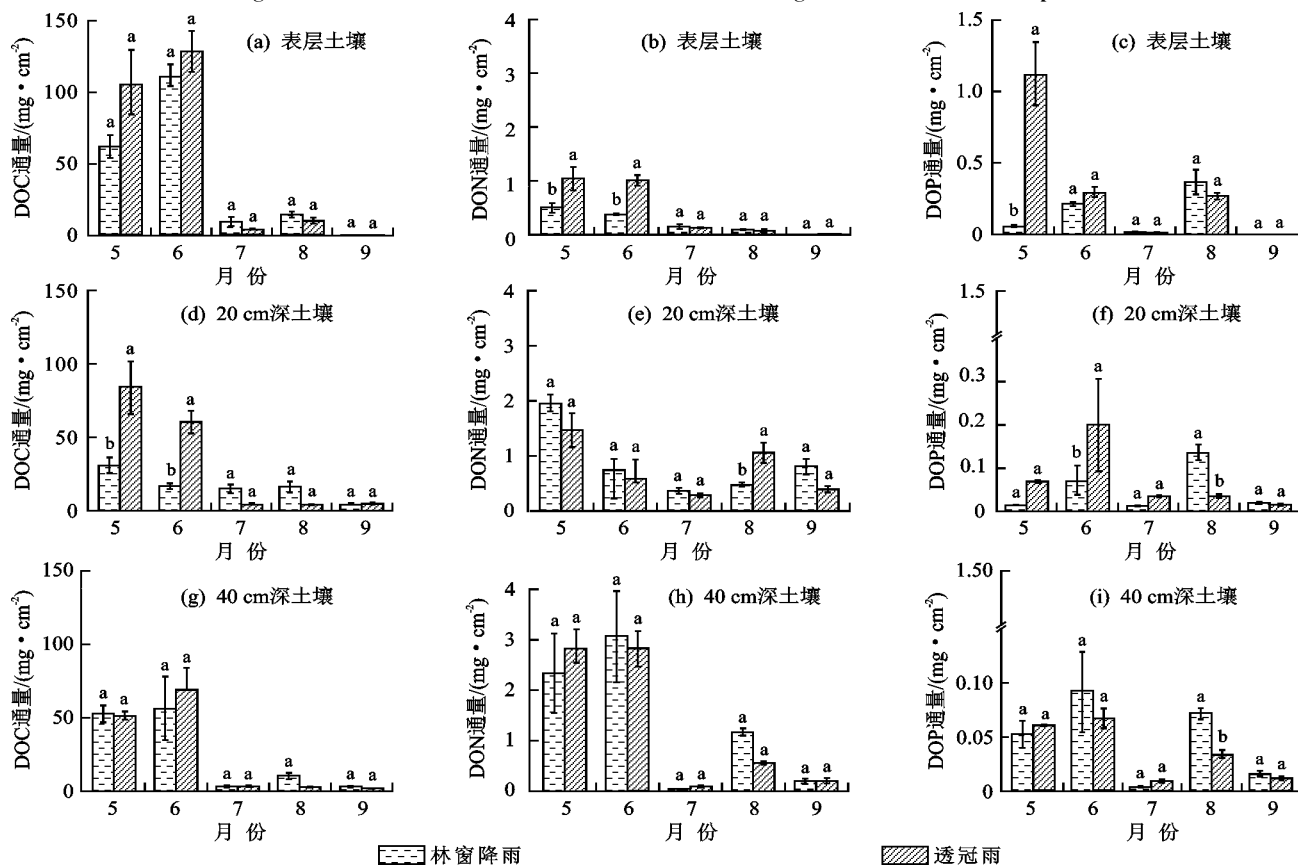


图5 林窗降雨与透冠雨在不同土层深度的DOM通量

Fig. 5 DOM flux of rainfall and throughfall at different soil depths

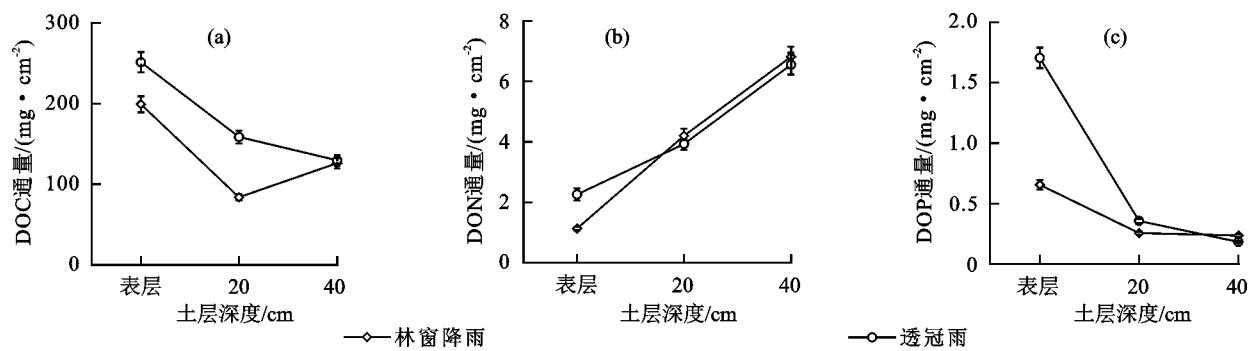


图 6 降雨季节林窗降雨与透冠雨在不同土层深度的 DOM 总通量

Fig. 6 Total DOM flux of rainfall and throughfall at different soil depths during rainfall season

2.3 DOM 截留比与响应比

相对于林窗降雨,透冠雨的 DOC 截留比在土壤 0—20 cm 降低 33.29%,在土壤 20—40 cm 增加 83.92%,在土壤 0—40 cm 增加 22.68%;透冠雨的 DON 截留比在土壤 0—20 cm 增加 113.75%,在土壤 20—40 cm 降低 2.84%,在土壤 0—40 cm 增加 107.69%;透冠雨的 DOP 截留比在土壤 0—20 cm 增加 87.19%,在土壤 20—40 cm 增加 78.63%,在土壤 0—40 cm 增加 234.36%(图 7)。DOM 截留比与月份相关性较大,相对于 5—8 月 DOM 截留比,9 月截留比更大且受到透冠雨的影响也更大。整体来看,DOM 通量对降雨的响应受土层与时间的影

响效应明显,土层深度越深,DOM 通量对降雨的响应越弱(图 8)。相较于 7—9 月,5,6 月 DOM 通量对降雨的响应更强,且不同土层深度响应比差异更大。DOC 通量对降雨的响应强度在时间上表现为 6 月>5 月>8 月>7 月>9 月,在土层中表现为 0—20 cm 土层>地表>20—40 cm 土层;DON 通量对降雨的响应强度在时间上表现为 6 月>7 月>5 月>8 月>9 月,在土层中表现为地表>20—40 cm 土层>0—20 cm 土层;DOP 通量对林冠的响应强度在时间上表现为 6 月>5 月>7 月>8 月>9 月,在土层中表现为地表>0—20 cm 土层>20—40 cm 土层。

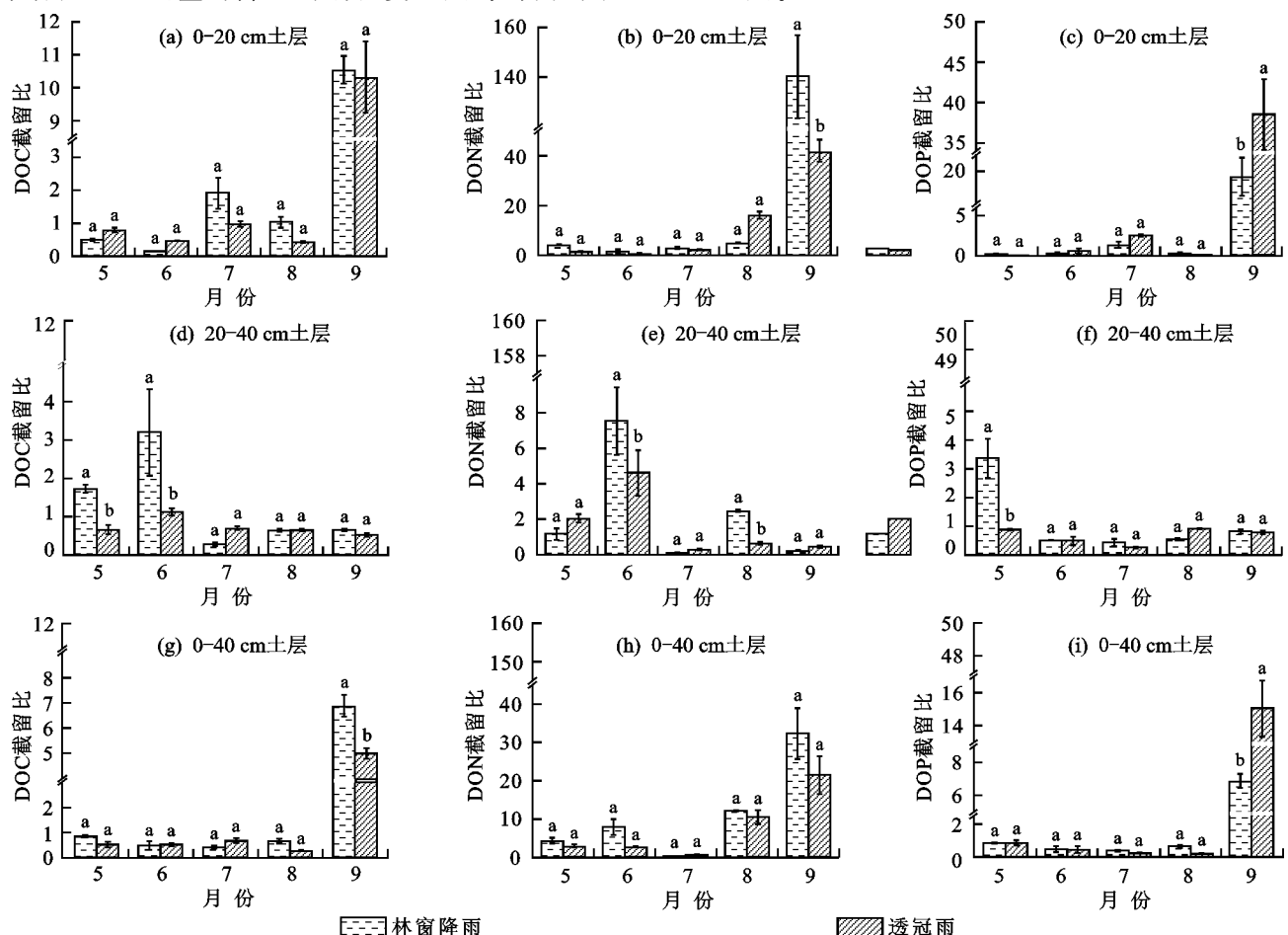


图 7 林窗降雨与透冠雨影响下 DOM 不同土层截留比

Fig. 7 DOM interception ratio under the influence of rainfall and throughfall at different soil depths

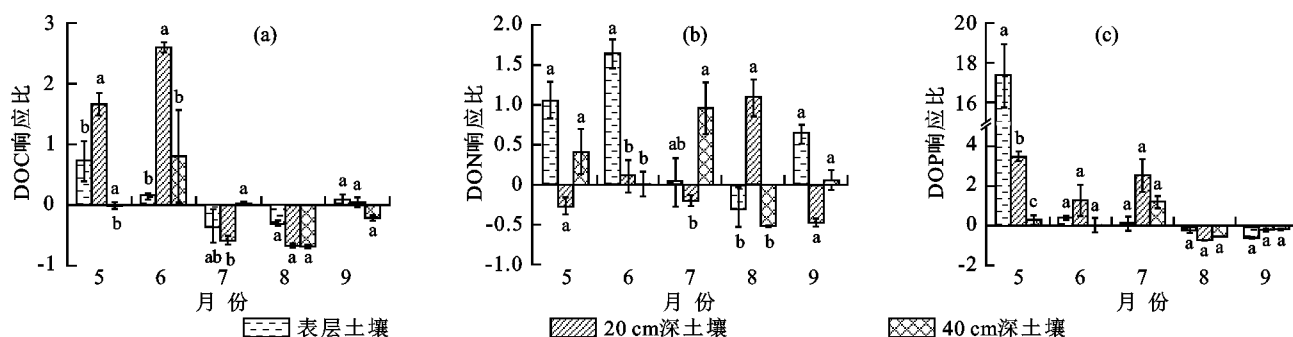


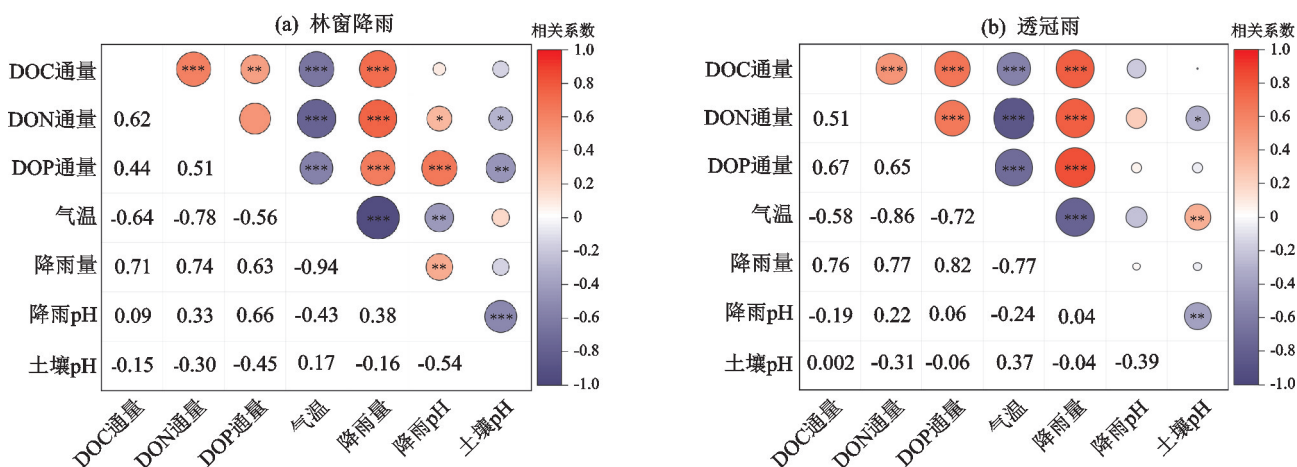
图8 林窗降雨与透冠雨影响下的 DOM 不同土层响应比

Fig. 8 DOM response ratio under the influence of rainfall and throughfall at different soil depths

2.4 DOM 通量与环境因子的相关性

相较于林窗环境,产生透冠雨的林下环境温度降低,降雨量降低,降雨 pH 降低,土壤 pH 基本不变。由图 9 可知,通过 Pearson 分析,气温与 DOM 通量呈显著负相关,林下环境减弱 DOC 通量与气温的负相关关系,而增强 DON 通量、DOP 通量与气温的负相关关系;降雨量与 DOM 呈显著正相关,林下环境

增强 DOM 通量与降雨量的正相关关系;透冠雨 pH 与 DOM 通量和其他环境因子均无显著相关关系,但林窗降雨 pH 与 DON 通量和 DOP 通量表现为显著正相关关系,与其他环境因子也表现出显著相关关系;在林窗和林下,土壤 pH 与 DON 通量均呈显著负相关关系,而林窗下的土壤 pH 与 DOP 通量呈显著负相关。



注:***表示相关性在 0.001 级别显著;**表示相关性在 0.01 级别显著;*表示相关性在 0.05 级别显著。

图9 林窗降雨和透冠雨驱动的 DOM 通量与环境因子的相关关系

Fig. 9 Correlation between DOM fluxes and environmental factors driven by rainfall and throughfall

3 讨论

林冠截留是森林生态系统养分循环的重要环节,降水经过林冠截留后以透冠雨的形式进入林地,该过程淋洗林冠层的枝叶的养分元素,使透冠雨中可溶性有机质含量发生较大变化,影响土壤中微生物和酶的活性^[13]。同时,由于林冠遮挡,削弱降雨的水力作用,延长降雨历时,使透冠雨输入进土壤中的 DOM 迁移更稳定。本研究中透冠雨驱动的 DOM 在土壤各个层次的截留比均小于林窗降雨也充分证明这一理论。尽管降雨量与 DOM 通量表现出显著正相关关系,但透冠雨输入的 DOC、DON、DOP 通量均高于林窗降雨,随土层加深,这种差异越来越小,在 40 cm 深的土层,林下土壤与林窗土壤所输出的 DOM 通量基本一致。表明亚热带常绿阔叶林透冠雨输入有利于林下土壤吸收更多的 DOM。

土壤是生态系统中 DOM 迁移的重要层次,直接影响着养分输送、土壤肥力的维持及生态系统的能量平衡^[14],但 DOC、DON、DOP 由于不同的组成和浓度,往往在土壤中有不同的迁移特征^[15]。本研究发现,相较于林窗降雨,透冠雨输入进土壤的 DOM 含量更高,主要表现为输入 DON 与 DOP 含量的增加,这可能与林冠的截留效应有关,透冠雨冲刷、淋洗叶片上的 DON 与 DOP,并将其输入土壤^[16];在土壤表层,透冠雨引入的 DOM 显著降低 C/N 和 C/P,这表明 DOC 相对富集,但 DON 和 DOP 的相对含量较低。随着土层深度的增加,C/N、C/P 和 N/P 比例均呈现降低趋势,这种趋势可能与土壤的吸附、交换作用有关^[17],而且 DOM 吸附作用也可能随着土层深度而增加^[18]。

DOM 通量是生态系统碳循环的重要组成部分,

可帮助揭示土壤肥力与环境情况,对维持生态系统健康和可持续发展至关重要^[19]。在土壤中,DOC、DOP 通量表现为截留减少的过程,而 DON 表现为富集增加的过程,一般来说,植物吸收土壤中的养分以供其生长发育,而土壤主要从穿透雨输入的壤中流补给养分,本研究中 DOC、DOP 均能作为土壤养分而被吸收利用,但 DON 浓度却在土壤的各个层次均有所上升,这可能是因为亚热带常绿阔叶林具有更高的 N 转化速率^[20],淋溶作用强烈^[21]。在土壤表层,透冠雨为载体输入进土壤的 DOC、DON、DOP 通量均显著高于林窗降雨,然而,随土层加深,这种差异越来越小,在 40 cm 深的土层,透冠雨与林冠降雨输出的 DOC、DON、DOP 通量基本一致,说明土壤存在一种自调节机制,控制输出 DOM 的通量的差异,减少养分的流失,这种调节可能通过增加地下蓄水或是增加低水位有机质浓度实现^[22]。

DOM 截留比反映土壤对 DOM 的吸附或截留程度。本研究结果表明,在浅层土壤透冠雨的 DOC、DON、DOP 截留少于林窗降雨,但在深层土壤透冠雨的 DOC、DON、DOP 截留高于大气降雨。有研究^[23]指出,在浅层土壤,有机质更容易收到温度和降水的影响,使土壤中原有的团聚体破碎损失 DOM,相较于透冠雨,林窗降雨强烈的水力作用使土壤能释放更多的 DOM;另一方面,在深层土壤,透冠雨的 DOM 截留高于大气降雨可能是由于透冠雨通过减小降雨强度和延长降雨历时,有助于减缓水分和 DOM 在土壤中的运动速度,增加 DOM 在深层土壤中的截留机会^[24]。

DOM 响应比描述 DOM 对透冠雨与林窗降雨响应的差异。DOC、DON、DOP 对降雨的响应比受土层与雨量的影响效应明显,土层深度越深,DOC、DON、DOP 通量对降雨的响应越弱,这可能是源于浅层土壤有机质含量更为丰富,微生物活动也非常活跃,导致在浅层 DOM 的生成和释放过程强烈^[25]。而 5、6 月 DOM 通量对降雨的响应强于 7、8、9 月,这可能是因为本研究选取的降雨季节为 5—9 月,存在明显的季节特征,5、6 月处于雨季,林窗降雨的降雨历时、降雨强度与透冠雨有显著差异,因此,透冠雨通过减小降雨强度和延长降雨历时,能减缓土壤 DOM 的迁移过程,维持土壤中的 DOM 储备,并减少 DOM 的流失,这与吕茂奎等^[26]对中亚热带人工林的研究结果一致。

相较于林窗降雨,透冠雨也通过改变林内的环境情况进一步影响 DOM 迁移过程^[27]。林冠截留 DOM 通量受到降雨量特征与环境因素的影响,土层中的 DOM 通量也受到温度、生物、养分和理化性质

等影响,使得不同地区不同时间的研究结果也出现诸多差异^[28-29]。基于此,本研究将 DOM 通量与环境因子进行相关性分析发现,DOC 通量与温度的相关性更小,DON、DOP 通量与温度的相关性更大,杨智榕等^[30]的研究结果也能证实此观点。另外,DOM 通量与温度呈负相关,与雨量呈正相关,而林窗与林下相比,林下的雨量温度都更低,这使得在林下 DOM 通量与雨量的相关性更大,水的运动促进土壤有机质的运输过程^[31]。

4 结论

(1)相较于林窗降雨,透冠雨主要增加土壤中 DON、DOP 的输入与 DOC、DOP 的截留。DON 输入增加 49.93%,DOP 输入增加 61.55%,DOC 截留增加 39.93%,DOP 截留增加 72.42%。

(2)DOM 对降雨的响应受土层的影响效应显著。通过透冠雨输入土壤的 DOM 浓度比林窗降雨高 37.00%,但从土壤输出的 DOM 通量无显著差异,表明透冠雨有利于土壤对 DOM 的吸收。

(3)DOM 的迁移通量与气温呈负相关,与降雨量呈正相关。相较于林窗降雨,水力作用更小、对 DOM 迁移过程作用更缓和的透冠雨,进一步促进土壤对 DOM 的吸收。

参考文献:

- [1] HU A, CHOI M, TANENTZAP A J, et al. Ecological networks of dissolved organic matter and microorganisms under global change[J]. *Nature Communications*, 2022, 13: e3600.
- [2] LØNBORG C, CARREIRA C, ABRIL G, et al. A global database of dissolved organic matter (DOM) concentration measurements in coastal waters (Coast DOM v1) [J]. *Earth System Science Data*, 2024, 16(2): 1107-1119.
- [3] 江明华,程建中,李心清,等.生物炭对农田土壤 CO₂ 排放的影响研究进展[J]. *地球与环境*, 2021, 49(6): 726-736.
- [4] JIANG M H, CHENG J Z, LI X Q, et al. The effect of biochar on the farmland soil CO₂ emission: A review [J]. *Earth and Environment*, 2021, 49(6): 726-736.
- [5] PARKER G G. Throughfall and stemflow in the forest nutrient cycle [J]. *Advances in Ecological Research*, 1983, 13: 57-133.
- [6] 尚妍萌,张杰,孟会生,等.不同施肥处理下采煤矿区复垦土壤微生物功能多样性与共现性特征[J]. *生态学杂志*, 2023, 42(2): 386-394.
- [7] SHANG Y M, ZHANG J, MENG H S, et al. Soil microbial functional diversity and co-occurrence under different fertilization treatments in a reclaimed coal mining area [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2023, 42(2): 386-394.
- [8] 黄家辉,刘苑秋,许青,等.不同降雨强度下庐山日本柳杉林冠层透冠雨延滞效应[J]. *中国水土保持科学*, 2023,

- 21(1):29-36.
- HUANG J H, LIU W Q, XU Q, et al. Time lag effects of throughfall on the canopy of *Cryptomeria japonica* in Lushan Mountain under different rainfall intensity[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2023, 21(1):29-36.
- [7] NIU G X, YIN G G, MO X H, et al. Do long-term high nitrogen inputs change the composition of soil dissolved organic matter in a primary tropical forest? [J]. Environmental Research Letters, 2022, 17(9):e095015.
- [8] VAN STAN J, STUBBINS A. Tree-DOM: Dissolved organic matter in throughfall and stemflow[J]. Limnology and Oceanography Letters, 2018, 3(3):199-214.
- [9] 张楠, 储安婷, 杨红强. 碳交易机制下林业碳汇产品类别比较与价值核算模型甄别[J]. 中国人口·资源与环境, 2022, 32(11):146-155.
- ZHANG N, CHU A T, YANG H Q. Forestry carbon sequestration products and their value accounting models under carbon trading mechanism[J]. China Population, Resources and Environment, 2022, 32(11):146-155.
- [10] 王淑春, 程然然, 杜盛. 黄土丘陵区 2 种典型林分降雨分配特征及其主要影响因素[J]. 水土保持学报, 2022, 36(3):173-180.
- WANG S C, CHENG R R, DU S. Characteristics and main influencing factors of rainfall partitioning in two typical forests in the Loess Hilly Region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(3):173-180.
- [11] 郑旭灵, 魏文涛, 张潇月, 等. 亚热带山地森林源头溪流米槠凋落叶分解的水溶性碳氮磷动态[J]. 水土保持学报, 2022, 36(6):309-315.
- ZHENG X L, WEI W T, ZHANG X Y, et al. Dynamics of water-soluble carbon, nitrogen and phosphorus content during litter decomposition of *Castanopsis carlesii* in headwaters of subtropical mountain forest[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(6):309-315.
- [12] 魏文涛, 倪祥银, 岳楷, 等. 中亚热带不同类型米槠林凋落枝溶解性有机质动态及光谱学特性[J]. 应用生态学报, 2022, 33(8):2121-2128.
- WEI W T, NI X Y, YUE K, et al. Dissolved organic matter dynamics and spectral characteristics of twig litter from different *Castanopsis carlesii* forests in the middle subtropical region, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(8):2121-2128.
- [13] HUANG W G, KUZYAKOV Y, NIU S L, et al. Drivers of microbially and plant-derived carbon in topsoil and subsoil[J]. Global Change Biology, 2023, 29(22):6188-6200.
- [14] HAN B J, CHEN L Y, XIAO K, et al. Characteristics of dissolved organic matter (DOM) in Chinese farmland soils under different climate zone types: A molecular perspective[J]. Journal of Environmental Management, 2024, 350:e119695.
- [15] BRÖDLIN D, KAISER K, HAGEDORN F. Divergent patterns of carbon, nitrogen, and phosphorus mobilization in forest soils[J]. Frontiers in Forests and Global Change, 2019, 2:e66.
- [16] 张捷, 刘洋, 张健, 等. 马尾松人工林林冠层对氮、磷、硫的截留效应[J]. 水土保持学报, 2014, 28(4):37-43.
- ZHANG J, LIU Y, ZHANG J, et al. Effect of canopy interception on nitrogen, phosphorus and sulfur in *Pinus massoniana* plantations[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(4):37-43.
- [17] HUI D F, YANG X T, DENG Q, et al. Soil C : N : P stoichiometry in tropical forests on Hainan Island of China: Spatial and vertical variations[J]. Catena, 2021, 201:e105228.
- [18] LIANG K, BI Y F, HE B H, et al. Changes in quantity and quality of dissolved organic carbon in purple soil: Roles of land use and soil depth[J]. Land Degradation and Development, 2023, 34(2):327-337.
- [19] ROTH V N, LANGE M, SIMON C, et al. Persistence of dissolved organic matter explained by molecular changes during its passage through soil[J]. Nature Geoscience, 2019, 12:755-761.
- [20] LUO X Z, HOU E Q, CHEN J Q, et al. Dynamics of carbon, nitrogen, and phosphorus stocks and stoichiometry resulting from conversion of primary broadleaf forest to plantation and secondary forest in subtropical China[J]. Catena, 2020, 193(16):e104606.
- [21] 宣美林, 廖姝, 岳楷, 等. 亚热带不同林龄次生林与杉木林土壤氮淋溶损失特征[J]. 水土保持学报, 2023, 37(6):283-289, 297.
- XUAN M L, LIAO S, YUE K, et al. Soil nitrogen leaching loss characteristics of subtropical secondary forests of different ages and *Cunninghamia lanceolata* plantations[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(6):283-289, 297.
- [22] MC DONOUGH L K, ANDERSEN M S, BEHNKE M I, et al. A new conceptual framework for the transformation of groundwater dissolved organic matter[J]. Nature Communications, 2022, 13:e2153.
- [23] WANG M M, GUO X W, ZHANG S, et al. Global soil profiles indicate depth-dependent soil carbon losses under a warmer climate[J]. Nature Communications, 2022, 13:e5514.
- [24] 张雪, 王冬梅, 温文杰, 等. 青藏高原—黄土高原过渡带人工林土壤生态化学计量特征[J]. 中国水土保持科学, 2020, 18(6):81-89.
- ZHANG X, WANG D M, WEN W J, et al. Ecological stoichiometric characteristics of plantation soil in the Tibetan Plateau—Loess Plateau transition zone[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2020, 18(6):81-89.

- terrace and conventional systems in a sub-humid climate of India [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2015, 98: 30-40.
- [31] SCHIEDUNG M, TREGURTHA C S, BEARE M H, et al. Deep soil flipping increases carbon stocks of New Zealand grasslands[J]. *Global Change Biology*, 2019, 25(7): 2296-2309.
- [32] ZHANG C, LIU G B, XUE S, et al. Soil organic carbon and total nitrogen storage as affected by land use in a small watershed of the Loess Plateau, China[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2013, 54: 16-24.
- [33] MORADI A, TEH BOON SUNG C, GOH K J, et al. Effect of four soil and water conservation practices on soil physical processes in a non-terraced oil palm plantation[J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, 145: 62-71.
- [34] 杨阳, 窦艳星, 王宝荣, 等. 黄土高原土壤有机碳固存机制研究进展[J]. *第四纪研究*, 2023, 43(2): 509-522.
- YANG Y, DOU Y X, WANG B R, et al. Advances in soil organic carbon sequestration mechanisms on the Chinese Loess Plateau[J]. *Quaternary Sciences*, 2023, 43(2): 509-522.
- [35] LIU Q, XU H W, YI H J. Impact of fertilizer on crop yield and C : N : P stoichiometry in arid and semi-arid soil[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18(8): e4341.
- [36] LIU C A, LI F R, ZHOU L M, et al. Effect of organic manure and fertilizer on soil water and crop yields in newly-built terraces with loess soils in a semi-arid environment[J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 117: 123-132.
- [37] LIU C A, ZHOU L M. Soil organic carbon sequestration and fertility response to newly-built terraces with organic manure and mineral fertilizer in a semi-arid environment[J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, 172: 39-47.
- (上接第189页)
- [25] 马利芳, 熊黑钢, 孙迪, 等. 不同干扰程度下土壤有机质空间最优插值法研究[J]. *生态学报*, 2019, 39(19): 7153-7160.
- MA L F, XIONG H G, SUN D, et al. Research on a spatial optimal interpolation method of soil organic matter under different degrees of disturbance[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(19): 7153-7160.
- [26] 吕茂奎, 谢锦升, 林廷武, 等. 降雨对米槎次生林和杉木人工林林冠可溶性有机碳迁移的影响[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(5): 134-138.
- LÜ M K, XIE J S, LIN T W, et al. Effects of rainfall on dissolved organic carbon of canopy transport in a secondary forest of *Castanopsis carlesii* and *Cunninghamia lanceolata* plantation[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(5): 134-138.
- [27] STUBBINS A, GUILLEMETTE F, VAN STAN II J T. Throughfall and stemflow: The crowning headwaters of the aquatic carbon cycle[M]. Cham: Springer, 2020: 121-132.
- [28] LIU H F, XU H W, WU Y, et al. Effects of natural vegetation restoration on dissolved organic matter (DOM) biodegradability and its temperature sensitivity [J]. *Water Research*, 2021, 191: e116792.
- [29] 焦宏哲, 李欢, 陈惠, 等. 增温、施氮对中亚热带杉木林土壤可溶性有机质的影响[J]. *土壤学报*, 2020, 57(5): 1249-1258.
- JIAO H Z, LI H, CHEN H, et al. Effects of soil warming and nitrogen addition on soil dissolved organic matter of *Cunninghamia lanceolata* plantations in subtropical China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(5): 1249-1258.
- [30] 杨智榕, 林伟盛, 蒲晓婷, 等. 土壤增温对杉木幼林不同深度土壤溶液 DOM 的影响[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2015, 10(1): 91-94.
- YANG Z R, LIN W S, PU X T, et al. Effect of soil warming on DOM of soil solution at different depths of Chinese fir young forest[J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2015, 10(1): 91-94.
- [31] VÉDÈRE C, LEBRUN M, HONVAULT N, et al. How does soil water status influence the fate of soil organic matter: A review of processes across scales[J]. *Earth Science Reviews*, 2022, 234: e104214.