

DOI: 10.20103/j.stxb.202201090079

王伟, 吕茂奎, 胥超, 陈光水. 亚热带常绿阔叶林和杉木人工林有机碳流失动态特征对降雨的响应. 生态学报, 2023, 43(18): 7474-7484.

Wang W W, Lü M K, Xu C, Chen G S. Responses of organic carbon loss dynamics to rainfall in the evergreen broad-leaved forest and *Cunninghamia lanceolata* plantation in subtropical China. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(18): 7474-7484.

亚热带常绿阔叶林和杉木人工林有机碳流失动态特征对降雨的响应

王伟¹, 吕茂奎¹, 胥超^{1,2,*}, 陈光水^{1,2}

1 福建师范大学地理研究所, 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, 三明 365002

摘要: 揭示亚热带森林土壤有机碳流失规律是制定相应措施以巩固和维持森林生态系统碳汇的关键。然而已有研究存在的监测对象单一、频率过低、时间过短等问题, 导致对这一规律的认识仍然不足。选择亚热带典型的常绿阔叶林和杉木人工林为研究对象, 每次降雨过后监测其径流量、泥沙量, 分析径流和泥沙中的可溶性有机碳(Dissolved organic carbon, DOC)含量以及颗粒有机碳(Particle organic carbon, POC)含量。旨在比较两种森林 DOC 和 POC 流失量的差异, 并分析二者与降雨量、降雨强度、5 min 最大雨强和降雨侵蚀力四个降雨特征值的关联。拟验证以下两个问题: (1) 杉木人工林的 DOC 和 POC 流失量是否高于常绿阔叶林; (2) 降雨侵蚀力对 DOC 和 POC 的解释是否优于降雨量、降雨强度和 5 min 最大雨强。研究结果发现常绿阔叶林径流量、泥沙量、径流水中 DOC 浓度和 POC 浓度、DOC 和 POC 流失量均显著高于杉木人工林。回归分析表明常绿阔叶林和杉木人工林 DOC 和 POC 流失量与降雨量、降雨强度和降雨侵蚀力呈显著的线性或幂函数相关, 其中降雨量与 DOC 和 POC 流失量之间的拟合关系最优。常绿阔叶林产流和产沙量高于杉木人工林可能与前者的林下植被生物量较低有关, 前者径流水中 DOC 浓度和 POC 浓度较高可归因于其较高的总生物量和土壤有机碳含量。在未来森林经营过程中应合理管理林下植被, 尽量减少和避免林下植被的抚育伐, 从而能够降低有机碳的水土流失, 达到巩固和维持森林碳汇的目的。在未来气候变暖导致降水变化背景下, 利用降雨量作为预测指标能够较好评估我国亚热带森林有机碳流失的风险。

关键词: 有机碳流失; 常绿阔叶林; 杉木人工林; 降雨特征

Responses of organic carbon loss dynamics to rainfall in the evergreen broad-leaved forest and *Cunninghamia lanceolata* plantation in subtropical China

WANG Weiwei¹, LÜ Maokui¹, XU Chao^{1,2,*}, CHEN Guangshui^{1,2}

1 School of Geographical Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350117, China

2 Fujian Sanming Forest Ecosystem National Observation and Research Station, Sanming 365002, China

Abstract: Unravelling the dynamics of soil organic carbon loss induced by soil erosion in subtropical forest is the key to formulate specific measures to maintain and improve forest carbon sink. Prior studies tend to measure the erosion-induced carbon loss of one specific forest type with a very low frequency over a short observing period, which fails us to comprehensively understand the erosion induced soil organic carbon loss in the forest. In this study, we measured runoff depth and sediment, and assayed dissolved organic carbon (DOC) concentration in the runoff and particle organic carbon (POC) concentration in the sediment in the evergreen broad-leaved forest and *Cunninghamia lanceolata* plantation. We tried to compare the differences of DOC and POC losses in the evergreen broad-leaved forest and *Cunninghamia lanceolata*

基金项目: 国家自然科学基金项目(32101495); 福建省公益类科研院所专项(2020R1002004)

收稿日期: 2022-01-09; **网络出版日期:** 2023-05-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chaoxu@fjnu.edu.cn

plantation, and to analyze the relation of the erosion-induced DOC and POC losses with rainfall depth, rainfall intensity, the maximum 5-minutes intensity, and rainfall erosivity? Our study tried to answer the following two questions: (1) are erosion-induced DOC and POC losses in the *Cunninghamia lanceolata* plantation higher than those losses in the evergreen broad-leaved forest? (2) is rainfall depth a better variable than rainfall intensity, the maximum 5-minutes intensity, and rainfall erosivity in explaining the variation of erosion-induced DOC and POC losses. Our results showed that the runoff depth, sediment, runoff DOC and sediment POC concentration, DOC and POC flux in the evergreen broad-leaved forest were all significantly higher than those in the *Cunninghamia lanceolata* plantation. Regression analysis showed that the DOC and POC flux in both evergreen broad-leaved forest and *Cunninghamia lanceolata* plantation were either linearly or exponentially associated with rainfall depth, rainfall intensity, and rainfall erosivity. The goodness-of-fit of those regressions in both the evergreen broad-leaved forest and *Cunninghamia lanceolata* plantation was the highest for rainfall depth. The higher runoff depth and sediment in the evergreen broad-leaved forest than *Cunninghamia lanceolata* plantation may be ascribed to its lower understory vegetation biomass. The higher runoff DOC and sediment POC concentration in the evergreen broad-leaved forest may be a result of higher overall aboveground biomass and soil organic carbon concentration. Our results highlight that future forest management should manage understory vegetation via avoiding or reducing slashing so that the erosion-induced carbon loss in the forest will decrease. Under the scenario of climate change-induced precipitation change, rainfall depth can be used as a predictive variable to evaluate and forecast future erosion-induced carbon loss in subtropical forests.

Key Words: organic carbon loss; evergreen broad-leaved forest; *Cunninghamia lanceolata* plantation; rainfall characteristics

提升和巩固我国现有森林碳汇是实现碳中和目标的重要措施之一^[1-2]。我国亚热带森林具有生产力高、碳汇当量大的特点^[3],在未来实现碳中和目标过程中具有举足轻重的作用。目前,学术界对于如何提升我国亚热带森林碳汇能力、总结其历史固碳量以及预测其未来固碳潜力等方面做了大量有益探索^[4-6]。然而,我们对如何巩固和维持我国亚热带森林现有碳汇却知之甚少。对于成熟林而言,巩固和维持其碳汇的稳定比提升其碳汇储量可能更具意义,因为成熟林的碳汇增长十分缓慢^[7-9]。

成熟生态系统有机碳的巩固与维持的关键在于知晓其可能存在的碳损失途径与风险,并制定相应的措施减少碳损失量。亚热带地区山高坡陡、暴雨频繁的自然条件决定了亚热带森林土壤有机碳容易在水土流失过程中损失^[10-12]。有研究报道,即使在郁闭的成熟林内,其林下水土流失仍不容小觑^[13-14],表明揭示亚热带森林土壤有机碳流失规律是制定相应措施以巩固和维持森林生态系统碳汇的关键。然而当前研究由于以下几方面的不足导致我们对亚热带森林土壤有机碳流失规律的认识仍不全面。首先,以往研究关注林下水土流失过程多集中在人工林^[13-14],而作为构成亚热带森林主体的常绿阔叶林却很少受到关注。常绿阔叶林与人工林在林分结构、树种组成以及生态系统服务功能方面有较大差异^[11],因而其各自土壤有机碳的流失规律可能截然不同。其次,已有的研究往往只侧重检测水土流失过程中可溶性有机碳(Dissolved Organic Carbon, DOC)的损失^[15],而颗粒态有机碳(Particle Organic Carbon, POC)在径流中的量往往数倍于DOC的量^[16],我国亚热带森林水土流失研究中鲜有报道POC。第三,我国现有对有机碳流失量进行长期监测的研究多以月尺度为观测频率^[17],缺乏基于每次降雨事件为观测频率的长期动态监测,从而不利于深入刻画降雨对有机碳流失量的影响规律。

有研究表明森林生态系统全年通过地表径流流失的DOC量的36%—50%是由某几次大暴雨事件造成的^[18-20],表明基于每次降雨事件的森林生态系统有机碳流失量观测十分必要。未来气候变化对降雨格局的改变主要表现为以下形式:(1)降雨总量的增加或减少(降雨总量改变);(2)极端降雨事件频发(降雨侵蚀力改变);(3)降雨总量不变,降雨的时间分布发生改变(降雨强度改变)^[21-23]。因此,建立降雨总量、降雨侵蚀

力以及降雨强度和有机碳流失量之间的关系,并筛选出解释有机碳流失量动态变化的最佳降雨特征变量,对于预测未来气候变化的主要情境下我国亚热带森林有机碳流失量至关重要。然而,目前尚无研究综合比较过降雨总量、降雨侵蚀力和降雨强度对我国亚热带森林有机碳流失的影响大小。

基于上述研究不足,本研究选择了我国亚热带典型的常绿阔叶林和杉木人工林为研究对象,开展基于每次降雨事件的 DOC 和 POC 流失量监测,旨在具体验证以下两个科学假设。由于常绿阔叶林完全由阔叶树组成,其冠层叶面积指数高于针叶型杉木人工林,而且郁闭度略高^[24],因而本研究假设杉木人工林通过水土流失而损失的 DOC 和 POC 量高于常绿阔叶林(假设 1)。降雨侵蚀力是描述降雨对土壤侵蚀能力的主要特征值,它既涵盖了某次降雨事件的降雨量在该时段内的分配信息,也能够反应降雨动能的大小^[25]。因此本研究假设,相比降雨总量和降雨强度,降雨侵蚀力能够更好地预测常绿阔叶林和杉木人工林 DOC 和 POC 流失量的变化(假设 2)。

1 研究方法

1.1 研究地概况

研究地位于福建三明森林生态系统国家野外科学观测研究站的陈大观测点(26°19'N,117°36'E)。该区域地貌特征以陡峭的低山丘陵为主,土壤以花岗岩发育的红壤和红黄壤为主。区域内地带性植被为常绿阔叶林,并分布有大面积的杉木人工林。受亚热带季风气候的影响,区域内典型气候特征表现为雨热同期、暴雨频繁。区域年平均气温为 17—19.4℃,试验观测期间(2013 年 1 月—12 月)年降雨量 1611 mm 与该区域历史(1959—2018 年)年平均降雨量(1639 mm)相当,其中 1 月、6 月和 10 月降雨量明显低于历史月均值,而 7 月、8 月、11 月和 12 月降雨量明显高于历史月均值(图 1)。

1.2 样地设置

选择福建三明森林生态系统国家野外科学观测研究站的陈大观测点内的常绿阔叶林和杉木人工林为研究对象。常绿阔叶林由原来的天然林于 1976 年经过“拔大毛”式强度择伐后封山育林而形成,林内乔木层以米槠(*Castanopsis carlessi*)形成单一优势,伴有闽粤栲(*Castanopsis fissa*)、木荷(*Schima superba*)、青冈(*Quercus glauca* Thunb)和新木姜子(*Neolitsea aurata*)等,林下有稀疏的黑莎草(*Gahnia tristis*)、千金子(*Leptochloa chinensis* (L.) Nees)和狗脊蕨(*Woodwardia japonica* (L. f.) Sm.)等。杉木人工林是 1976 年将天然林皆伐后建立的人工纯林,林下植被以茂密的铁芒萁(*Dicranopteris linearis*)为主,本研究开展期间,林下未经过任何抚育。常绿阔叶林和杉木人工林林龄和成土母岩一致,均为花岗岩发育的沙壤土,土层厚度约 1 m。两片森林相距不到 1 km。2012 年在常绿阔叶林和杉木人工林内各自建立 3 个重复的径流小区,径流小区尺寸为 20 m × 5 m。径流小区底部设置集水槽,集水槽出水口处连接一个不锈钢径流池用于收集径流和泥沙,径流池搭遮雨棚防止降水直接进入径流池。常绿阔叶林和杉木人工林主要林分特征如表 1 所示。

1.3 样品采集与分析

1.3.1 径流和泥沙样品的采集和处理

在每次降雨事件发生之后,先记录径流池中的水深以计算总径流量,然后用力搅拌径流池中的水使得水和泥沙均匀混合,用采样瓶采集 1.5 L 的径流和泥沙混合样品,根据采样瓶中的泥沙含量和总径流量计算总泥沙量。采样结束后把径流池清洗干净,用于收集下次径流和泥沙。

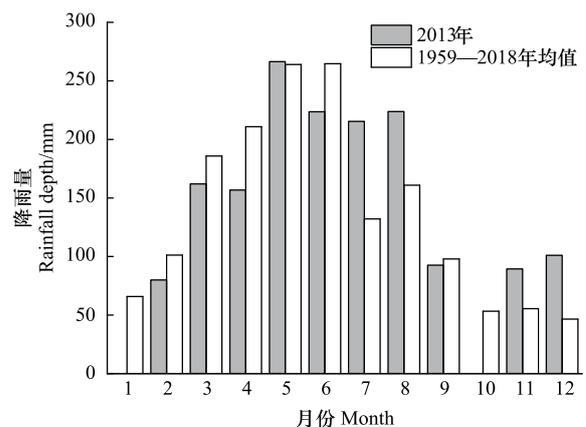


图 1 研究期间和历史月降雨量

Fig. 1 Monthly precipitation over the study period and in the past

表 1 试验地林分特征

Table 1 Forest characteristics of the experimental plot

林分类型 Forest type	坡度 Slope gradient/(°)	密度 Tree density/ (株/hm ²)	郁闭度 Canopy closure/%	平均树高 Mean height/m	平均胸径 Mean DBH/cm	土壤容重 Bulk density/ (g/cm ³)	土壤有机 碳含量 Soil organic carbon concentration/ (g/kg)
常绿阔叶林 Evergreen broad-leaved	32.6	3700	93.3	10.8	12.2	1.2	27.9
杉木人工林 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	32.0	2192	89.5	18.2	15.6	1.3	22.3

DBH: 胸径 diameter at breast height

1.3.2 径流和泥沙样品分析

每次流失事件径流水中的 DOC 浓度使用总有机碳分析仪 (Shimadzu TOC-VcPh, Japan) 测定, POC 含量采用碳氮元素分析仪 (Elemental Analyzer Vario EL III, Germany) 测定。

1.4 数据处理与分析

从自动监测雨量站 (雨根 RR1008) 获取时间分辨率为 1 min 的降雨量原始数据, 根据降雨量原始数据计算每次降雨事件的降雨量、平均雨强、最大 5 min 雨强和最大 30 min 雨强。每次降雨的降雨侵蚀力采用 EI_{30} 计算, 其中 E 是每次降雨的动能, I_{30} 是每次降雨的 30 min 最大雨强。降雨动能 E 利用每次降雨的原始资料根据章文波等^[26]的公式计算, 具体计算公式如下:

$$E = \sum_{n=1}^l (e_n \Delta P_n)$$

$$e_n = 0.29 \times [1 - 0.72 \exp(-0.05i_n)]$$

式中, i_n 为断点雨强 (mm/h), e_n 为单位降雨动能 ($\text{MJ hm}^{-2} \text{mm}^{-1}$), ΔP_n 为断点雨强对应时段的降雨量 (mm), l 为断数。采用双因素方差 (Two-way ANOVA) 分析检验林分、采样日期以及两者之间的交互作用对径流量、泥沙量、径流水 DOC 和 POC 浓度、DOC 流失量和 POC 流失量的影响。利用 POC 含量和土壤有机碳含量的比值来定量泥沙有机碳的富集系数。采用独立样本 T 检验分析常绿阔叶林和杉木人工林年产流量、产沙量、DOC 流失量以及 POC 流失量的差异。以上统计分析均在 SPSS 22.0 内完成, 图形制作在 Origin 2021 内完成。

2 结果与分析

2.1 降雨特征

常绿阔叶林和杉木人工林在 2013 年观测期间总共发生 38 次侵蚀性降雨, 全年降雨总量为 1611 mm, 发生林下有机碳流失所需的最小降雨量为 11 mm。观测期间, 降雨量、平均雨强、5 min 最大雨强和降雨侵蚀力具有明显的时间动态变化 (图 2)。如图 3 所示, 单次降雨量范围介于 11—120 mm 之间, 25 百分位数、中位数和 75 百分位数分别为 22 mm、36 mm 和 54 mm。平均雨强范围介于 0.4—24.9 mm/h 之间, 25 百分位数、中位数和 75 百分位数分别为 1.4 mm/h、2.9 mm/h 和 4.3 mm/h, 多数降雨为大暴雨。5 min 最大雨强范围介于 10—161 mm/h 之间, 25 百分位数、中位数和 75 百分位数分别为 25 mm/h、41 mm/h 和 57 mm/h。降雨侵蚀力范围介于 12—1654 $\text{MJ mm hm}^{-2} \text{h}^{-1}$ 之间, 中位数和 75 百分位数分别为 276 $\text{MJ mm hm}^{-2} \text{h}^{-1}$ 和 496 $\text{MJ mm hm}^{-2} \text{h}^{-1}$ 。观测期间历次降雨事件中, 发生大雨、暴雨和特大暴雨的次数分别占总降雨次数 26%、45% 和 11%。暴雨和特大暴雨的降雨总量占全年降雨量的 75%, 多数集中发生在 6 月至 8 月期间 (图 2)。

2.2 径流、泥沙量、DOC 和 POC 浓度的动态变化

观测期间, 常绿阔叶林单次流失事件产流量变化范围为 0.5—21.1 m^3/hm^2 之间, 杉木人工林产流量变化范围介于 1.1—13.8 m^3/hm^2 之间。常绿阔叶林单次流失事件产沙量变化范围为 0.3—6.8 kg/hm^2 之间, 而杉木

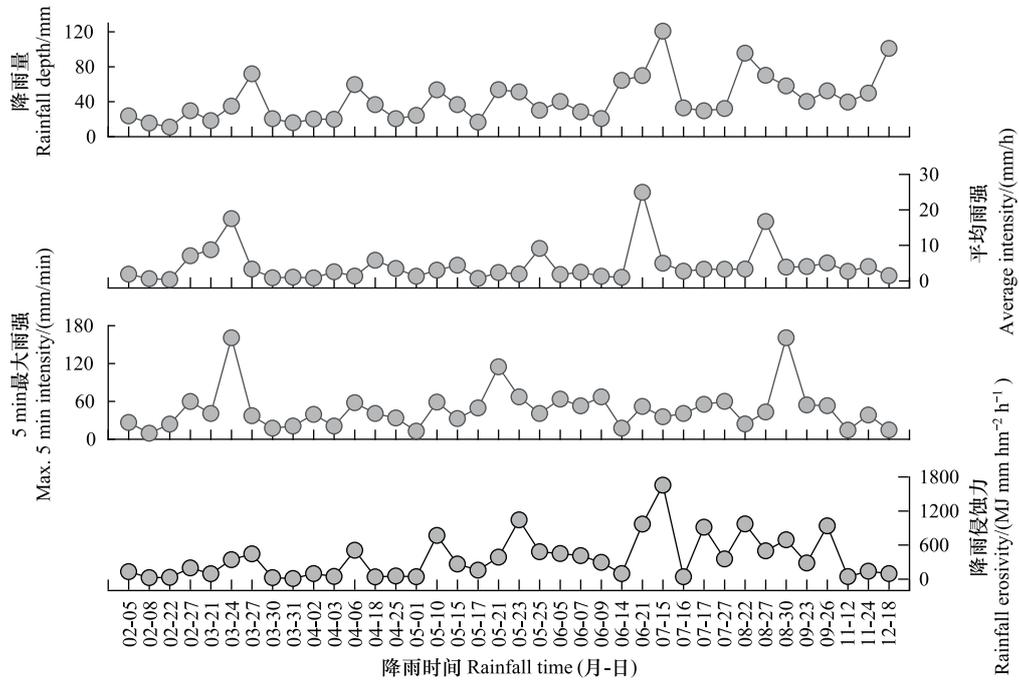


图2 降雨特征值的动态变化

Fig.2 Dynamic variation of rainfall characteristics

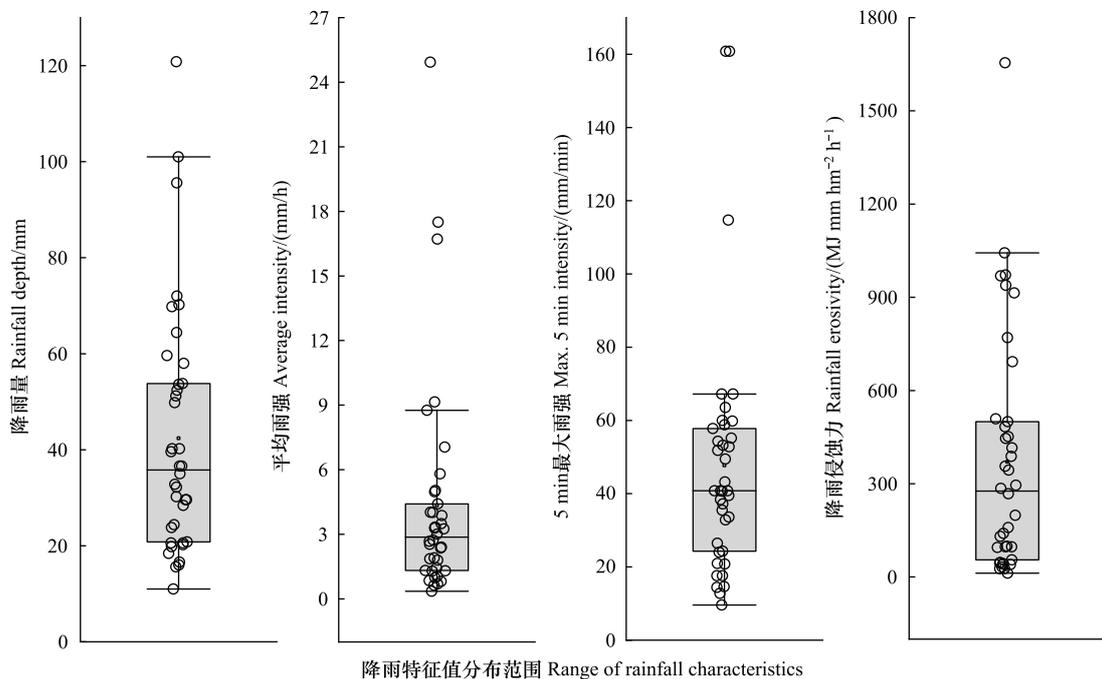


图3 降雨特征值箱线图

Fig.3 Box chart of rainfall characteristics

人工林则介于 0.2—4.5 kg/hm² 之间,常绿阔叶林单次产沙量平均值为 2.2 kg/hm²,是杉木人工林(0.9 kg/hm²)的 2.4 倍。统计分析显示整个观测期间林分类型和采样日期对产流量和产沙量有显著影响,而二者的交互作用对产流量和产沙量均无显著影响(图 4)。

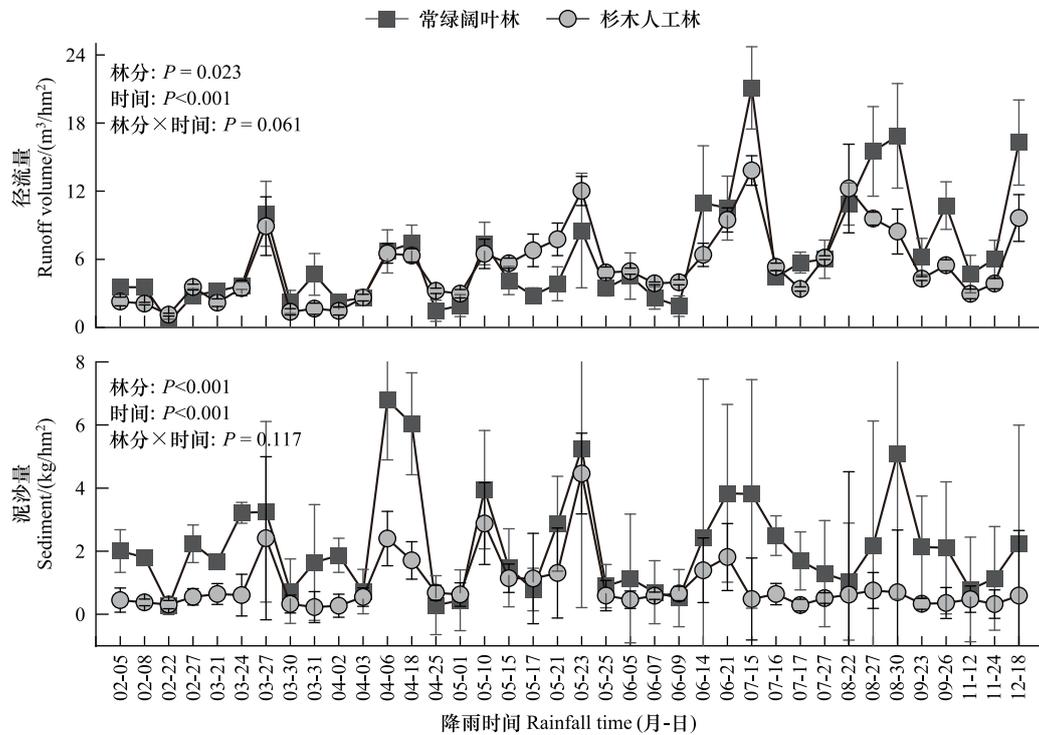


图4 常绿阔叶林和杉木人工林径流和泥沙量的动态变化

Fig.4 Dynamic variations of runoff and sediment in evergreen broad-leaved forest and *Cunninghamia lanceolate* plantation

常绿阔叶林径流水中 DOC 浓度取值范围介于 5.8—31.2 mg/L 之间,而杉木人工林则介于 2.8—15.3 mg/L 之间,均呈现明显的时间变异性。常绿阔叶林径流水中 DOC 平均浓度 (13.7 mg/L) 是杉木人工林 (6.9 mg/L) 的近两倍。常绿阔叶林径流水中 POC 浓度取值范围为 36—243 g/kg 之间,而杉木人工林的范围则介于 40—143 g/kg 之间。二者径流水中 POC 平均浓度分别为 82 g/kg 和 72 g/kg,相较于各自土壤而言,有机碳在泥沙颗粒物种出现了富集,富集系数分别为 3.0 和 3.4。统计分析显示林分类型、取样时间及二者的交互作用对径流水中 DOC 和 POC 浓度均有极显著影响(图 5)。

2.3 有机碳流失量的动态变化

两种森林土壤 POC 流失量有明显差异,而且具有明显的季节特征。常绿阔叶林单次 POC 流失量变化范围为 0.01—0.37 kg/hm² 之间,而杉木人工林则介于 0.01—0.17 kg/hm² 之间,流失量峰值出现在 4—5 月的梅雨季节和 6—8 月的台风雨季节。常绿阔叶林 POC 单次平均流失量 (0.15 kg/hm²) 是杉木人工林 (0.055 kg/hm²) 的 2.8 倍。常绿阔叶林单次 DOC 流失量变化范围为 0.01—0.28 kg/hm² 之间,而杉木人工林则介于 0.01—0.08 kg/hm² 之间,前者的均值是后者的 2.6 倍。统计分析表明林分类型、采样时间和二者的交互作用对单次流失的 DOC 和 POC 量均有显著影响(图 6)。

常绿阔叶林全年累积产流量略比杉木人工林高 14%,二者无显著差异,但是前者全年累积产沙量是后者的 2.4 倍(图 7)。常绿阔叶林 DOC 和 POC 全年累积流失量分别是杉木人工林的 2.8 和 2.6 倍。常绿阔叶林和杉木人工林有机碳流失均以颗粒态为主,两种森林类型 POC 流失量均占总有机碳(TOC)流失量的 64%(图 7)。

2.4 降雨特征对有机碳流失量影响

降雨量、平均雨强、5 min 最大雨强和降雨侵蚀力与 POC、DOC 和 TOC 流失量之间的回归分析表明降雨量是预测常绿阔叶林和杉木人工林不同形态有机碳流失量变化的最佳变量,其次是降雨侵蚀力(表 2)。相比降雨量和降雨侵蚀力而言,平均雨强和 5 min 最大雨强对常绿阔叶林和杉木人工林不同形态有机碳流失量的解释度更小,其中 5 min 最大雨强甚至无法解释 DOC 的变化(表 2)。

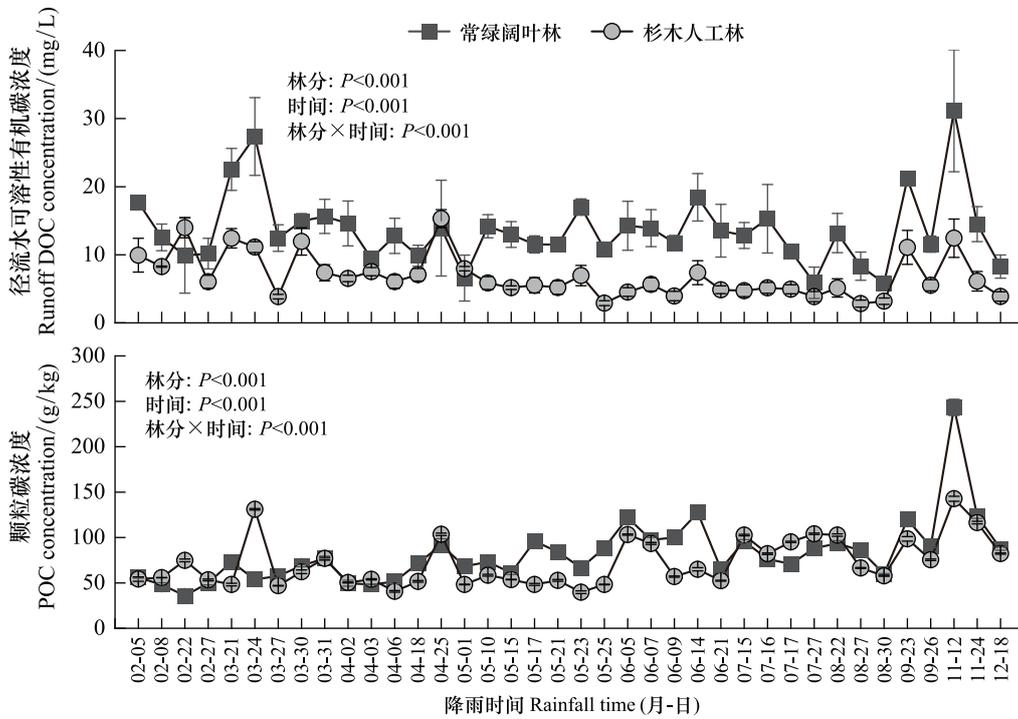


图5 常绿阔叶林和杉木人工林径流中 DOC 和 POC 浓度的动态变化

Fig.5 Dynamic variations of runoff DOC and POC concentration in evergreen broad-leaved forest and *Cunninghamia lanceolate* plantation

DOC: 可溶性有机碳 dissolved organic carbon; POC: 颗粒有机碳 particle organic carbon

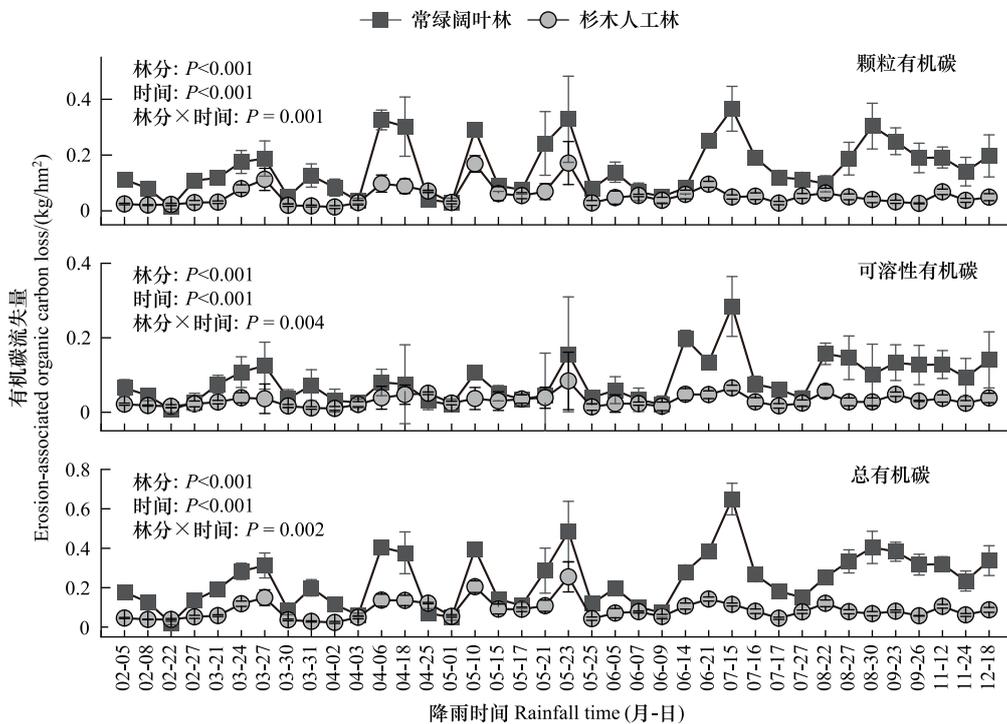


图6 常绿阔叶林和杉木人工林有机碳流失量的动态变化

Fig.6 Organic carbon loss dynamics in evergreen broad-leaved forest and *Cunninghamia lanceolate* plantation

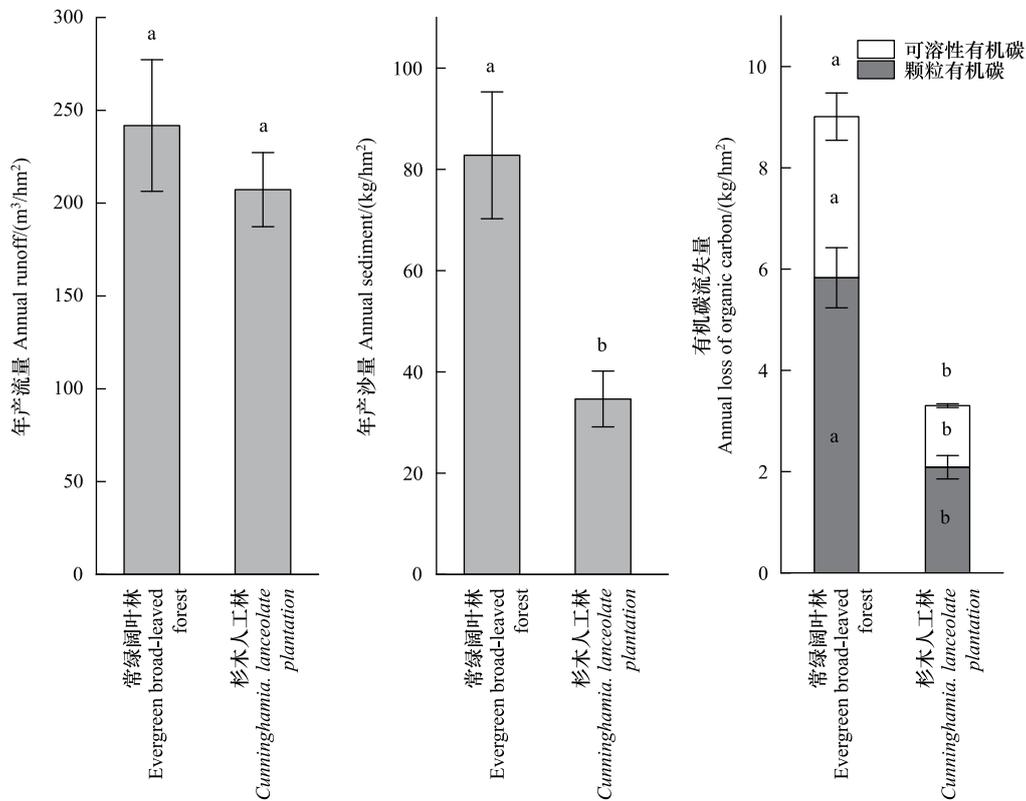


图 7 常绿阔叶林和杉木人工林年产量、产沙量和有机碳流失量

Fig.7 Annual runoff, sediment, and organic carbon loss in evergreen broad-leaved forest and *Cunninghamia lanceolate* plantation
相同字母表示各指标在不同森林类型间无显著差异 ($P>0.05$)

表 2 降雨特征值与有机碳流失量的回归分析

Table 2 Regression analysis of rainfall characteristics and organic carbon loss

降雨特征值 Rainfall characteristics	常绿阔叶林 Evergreen broad-leaved forest			杉木人工林 <i>Cunninghamia lanceolate</i> plantation		
	拟合方程 Equation	决定系数 R^2	显著性 Sig.	拟合方程 Equation	决定系数 R^2	显著性 Sig.
	降雨量 Rainfall	DOC $y = a \times x + b$	0.71	<0.0001	DOC $y = a \times x + b$	0.44
平均雨强 Average intensity	DOC $y = a \times x^b$	0.20	0.005	DOC $y = a \times x^b$	0.07	>0.05
5 min 最大雨强 Max. 5-min. intensity	DOC $y = a \times x^b$	0.01	>0.05	DOC $y = a \times x^b$	0.03	>0.05
降雨侵蚀力 Rainfall erosivity	DOC $y = a \times x + b$	0.38	<0.0001	DOC $y = a \times x + b$	0.27	0.001

POC: 颗粒态有机碳 particle organic carbon; DOC: 可溶性有机碳 dissolved organic carbon; TOC: 总有机碳 total organic carbon

3 讨论

3.1 常绿阔叶林和杉木人工林有机碳流失量差异

常绿阔叶林 DOC、POC 和 TOC 流失量均高于杉木人工林,与假设 1 相反。这种结果出现的主要原因可以

归为两类。首先,常绿阔叶林产生的径流量和泥沙量高于杉木人工林(图 4 和 7)。地表径流水来源于两个部分:一是林冠穿透雨,另一个是树干茎流^[27]。虽然常绿阔叶林郁闭度高于杉木人工林(表 1),但是二者林冠穿透雨量却相近^[28]。由于杉木林密度低、林冠更加疏散(表 1),林下芒萁茂密,杉木林龄下植被生物量显著高于常绿阔叶林(图 3),林下植被在减缓林冠降雨对地表的冲刷侵蚀方面发挥关键作用^[29]。因此,杉木人工林较高的林下植被生物量可能是其径流量和泥沙量较低的原因之一。而对林下植被进行抚育伐是我国人工林经营的一项传统措施^[30],这将不利于森林有机碳的维持。另外,由于杉木树皮开裂且粗糙,可吸收和截留大量树干茎流^[24],而阔叶树(本文以米槭为主)树皮光滑,导致常绿阔叶林树干茎流量在不同时期可高达杉木人工林的 2.6—5.9 倍之多^[28,31]。这可能是造成常绿阔叶林径流量和泥沙量高于杉木人工林的另一个重要原因。

其次,常绿阔叶林径流中的 DOC 和 POC 含量均高于杉木人工林(图 5)。径流水中 DOC 来源于植被和土壤两部分。常绿阔叶林乔木层生物量比杉木人工林高 34%(图 3),其穿透雨中的 DOC 浓度也显著高于杉木人工林^[24],穿透雨携带的这部分 DOC 可能是地表径流中 DOC 的一个重要构成部分。常绿阔叶林土壤有机碳含量也高于杉木人工林(表 1),地表径流对富碳土壤的漂洗过程中可能淋溶出更多的 DOC,这与其他研究的结果一致^[32]。

地表径流中所携带和搬运的泥沙来源于两个侵蚀过程:其一是雨滴击溅破坏土壤的团粒结构,将微小土粒从原来的位置剥离;另一是地表径流对表土层的冲刷,这两个过程所搬运的土壤都是质量轻且富含碳的微小颗粒^[33]。本研究结果发现径流携带的颗粒物碳含量明显高于原来土壤,表明有机碳在颗粒物中发生了富集^[34]。由于常绿阔叶林土壤有机碳含量高于杉木人工林,而且林下植被更少,土壤中富含碳的颗粒物更容易被径流冲刷搬运,这些因素共同构成了常绿阔叶林径流水 POC 含量高于杉木人工林的重要原因。

3.2 降雨特征对有机碳流失的影响

回归分析表明降雨量与常绿阔叶林和杉木人工林 DOC、POC 和 TOC 流失量的拟合度优于平均雨强、5 min 最大雨强和降雨侵蚀力(表 2),拒绝假设 2。李瑞等^[35]在贵州喀斯特地区开展降雨对不同植被模式下水土流失的影响,发现降雨对产沙量的拟合度要优于降雨强度,与本文研究结果类似。张晶晶等^[36]在不同覆盖度草地上的研究也证实降雨对径流和泥沙的影响大于降雨强度。亦有许多研究与本研究的结果不一致。大量在植被覆盖较差的地区开展的研究表明平均降雨强度与水土流失量之间的关系更加紧密^[37-39]。亦有研究发现 15 min 最大雨强与土壤流失量的相关性最强^[40]。而杨子生^[41]的研究则表明了降雨侵蚀力与水土流失量之间的密切联系。

不同的研究得出的结果大相径庭,可能与研究对象之间的差别有密切关系。对于下垫面植被覆盖较低、甚至无植被的地表而言,土壤容易板结、土壤孔隙度低、持水能力差^[42-43]。由于降水到达地表后难以入渗,在覆盖度较低的下垫面上很容易形成超渗径流^[37]。在这种情况下,短时间内的大降雨更有利于超渗产流的形成,因而降雨强度与水土流失量往往有较好的相关关系。在本研究中,植被茂密,土壤中根系密集,土壤孔隙发达、通透性好、持水量高,产流方式以蓄满产流为主^[44]。只有当累积降水量足够大,大于土壤的饱和持水量时,地表径流才能形成。因此,在本例中,总降雨量对 DOC 和 POC 流失量的解释度高于降雨强度。降雨侵蚀力原本是预测水土流失量较为可靠的指标之一^[45],在本研究中降雨侵蚀力与常绿阔叶林和杉木人工林有机碳的流失量均有极显著的相关关系,但是其对有机碳流失量的解释度仍低于降雨量(表 2)。降雨侵蚀力的推算基于美国通用流失方程^[25],该方程的建立又是基于美国农业部数百个径流小区(多为农田)的水土流失实测资料,其目的是用于预测农田水土流失^[46]。降雨侵蚀力是用于刻画降雨动能的良好指标^[25],但是本例中的常绿阔叶林和杉木人工林的植被覆盖度非常好,植被垂直结构复杂,起到了很好的消减降雨动能的作用^[47]。因此降雨侵蚀力对本文中有机碳流失量的影响可能因为复杂的森林植被对降雨动能的消减而减弱。

4 结论

常绿阔叶林的产流量、产沙量以及 DOC 和 POC 流失量均高于杉木人工林,杉木人工林较低的水土和有

机碳流失量可能归功于其较高的林下植被生物量。降雨量是预测常绿阔叶林和杉木人工林不同形态有机碳流失量变化的最佳变量,其次是降雨侵蚀力。因此,未来我国森林经营过程中若能对林下植被加以合理管理、减少对林下植被的抚育卫生伐,对于巩固和维持我国现有森林碳汇具有积极意义。在未来气候变化导致降水增加的背景下,我国亚热带森林有机碳流失量有增加的风险,以降雨量为预测指标可以较好地评估亚热带森林有机碳流失的风险。

参考文献(References):

- [1] 张颖, 李晓格, 温亚利. 碳达峰碳中和背景下中国森林碳汇潜力分析研究. 北京林业大学学报, 2022, 44(1): 38-47.
- [2] 李海奎. 碳中和愿景下森林碳汇评估方法和固碳潜力预估研究进展. 中国地质调查, 2021, 8(4): 79-86.
- [3] Fang J, Chen A, Peng C, Zhao S, Ci L. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science*, 2001, 292(5525): 2320-2322.
- [4] 杨玉盛, 陈光水, 谢锦升, 范跃新, 郭剑芬, 杨智杰. 中国森林碳汇经营策略探讨. 森林与环境学报, 2015, 35(4): 297-303.
- [5] 聂昊, 王绍强, 周蕾, 王晶苑, 张游, 邓泽文, 杨凤亭. 基于森林清查资料的江西和浙江森林植被固碳潜力. 应用生态学报, 2011, 22(10): 2581-2588.
- [6] Tong X W, Brandt M, Yue Y M, Ciais P, Jepsen M R, Penuelas J, Wigneron J P, Xiao X M, Song X P, Horion S, Rasmussen K, Saatchi S, Fan L, Wang K L, Zhang B, Chen Z C, Wang Y H, Li X J, Fensholt R. Forest management in Southern China generates short term extensive carbon sequestration. *Nature Communications*, 2020, 11: 129.
- [7] Chen G S, Yang Z J, Gao R, Xie J S, Guo J F, Huang Z Q, Yang Y S. Carbon storage in a chronosequence of Chinese fir plantations in Southern China. *Forest Ecology and Management*, 2013, 300: 68-76.
- [8] Gundersen P, Thybring E E, Nord-Larsen T, Vesterdal L, Nadelhoffer K J, Johannsen V K. Old-growth forest carbon sinks overestimated. *Nature*, 2021, 591(7851): E21-E23.
- [9] Poorter L, Craven D, Jakovac C C, van der Sande M T, Amissh L, Bongers F, Chazdon R L, Farrior C E, Kambach S, Meave J A, Muñoz R, Norden N, Rüger N, van Breugel M, Zambrano A M A, Amani B, Andrade J L, Brancalion P H S, Broadbent E N, de Foresta H, Dent D H, Derroire G, DeWalt S J, Dupuy J M, Durán S M, Fantini A C, Finegan B, Hernández-Jaramillo A, Hernández-Stefanoni J L, Hietz P, Junqueira A B, N'Dja J K, Letcher S G, Lohbeck M, López-Camacho R, Martínez-Ramos M, Melo F P L, Mora F, Müller S C, N'Guessan A E, Oberleitner F, Ortiz-Malavassi E, Pérez-García E A, Pinho B X, Piotto D, Powers J S, Rodríguez-Buriticá S, Rozendaal D M A, Ruíz J, Tabarelli M. Multidimensional tropical forest recovery. *Science: New York, N Y*, 2021, 374(6573): 1370-1376.
- [10] Xu C, Yang Z J, Qian W, Chen S D, Liu X F, Lin W S, Xiong D C, Jiang M H, Chang C T, Huang J C, Yang Y S. Runoff and soil erosion responses to rainfall and vegetation cover under various afforestation management regimes in subtropical montane forest. *Land Degradation and Development*, 2019, 30(14): 1711-1724.
- [11] Yang Y S, Wang L X, Yang Z J, Xu C, Xie J S, Chen G S, Lin C F, Guo J F, Liu X F, Xiong D C, Lin W S, Chen S D, He Z M, Lin K M, Jiang M H, Lin T C. Large ecosystem service benefits of assisted natural regeneration. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2018, 123(2): 676-687.
- [12] Chu S S, Ouyang J H, Liao D D, Zhou Y D, Liu S S, Shen D C, Wei X H, Zeng S C. Effects of enriched planting of native tree species on surface water flow, sediment, and nutrient losses in a *Eucalyptus* plantation forest in Southern China. *The Science of the Total Environment*, 2019, 675: 224-234.
- [13] Zhou G Y, Wei X H, Yan J H. Impacts of *Eucalyptus (Eucalyptus exserta)* plantation on sediment yield in Guangdong Province, Southern China—a kinetic energy approach. *CATENA*, 2002, 49(3): 231-251.
- [14] Sun D, Zhang W X, Lin Y B, Liu Z F, Shen W J, Zhou L X, Rao X Q, Liu S P, Cai X, He D, Fu S L. Soil erosion and water retention varies with plantation type and age. *Forest Ecology and Management*, 2018, 422: 1-10.
- [15] 胥超, 林成芳, 刘小飞, 熊德成, 林伟盛, 陈仕东, 谢锦升, 杨玉盛. 森林转换对地表径流可溶性有机碳输出浓度和通量的影响. 生态学报, 2017, 37(1): 84-92.
- [16] Dhillon G S, Inamdar S. Extreme storms and changes in particulate and dissolved organic carbon in runoff: entering uncharted waters? *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(7): 1322-1327.
- [17] Yan J H, Li K, Wang W T, Zhang D Q, Zhou G Y. Changes in dissolved organic carbon and total dissolved nitrogen fluxes across subtropical forest ecosystems at different successional stages. *Water Resources Research*, 2015, 51: 3681-3694.
- [18] Buffam I, Galloway J N, Blum L K, McGlathery K J. A stormflow/baseflow comparison of dissolved organic matter concentrations and bioavailability in an Appalachian stream. *Biogeochemistry*, 2001, 53(3): 269-306.
- [19] Hinton M J, Schiff S L, English M C. The significance of storms for the concentration and export of dissolved organic carbon from two Precambrian Shield Catchments. *Biogeochemistry*, 1997, 36(1): 67-88.
- [20] Inamdar S P, O'Leary N, Mitchell M J, Riley J T. The impact of storm events on solute exports from a glaciated forested watershed in western New York, USA. *Hydrological Processes*, 2006, 20(16): 3423-3439.

- [21] Pendergrass A G, Knutti R. The uneven nature of daily precipitation and its change. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(21): 11980-11988.
- [22] Zhang W X, Zhou T J. Increasing impacts from extreme precipitation on population over China with global warming. *Science Bulletin*, 2020, 65(3): 243-252.
- [23] Guo J L, Guo S L, Li Y, Chen H, Li T Y. Spatial and temporal variation of extreme precipitation indices in the Yangtze River Basin, China. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2013, 27(2): 459-475.
- [24] 吕茂奎, 谢锦升, 江森华, 罗水金, 曾少娟, 纪淑蓉, 万菁娟, 杨玉盛. 米楮常绿阔叶次生林和杉木人工林穿透雨和树干径流可溶性有机质浓度和质量的比较. *应用生态学报*, 2014, 25(8): 2201-2208.
- [25] 章文波, 谢云, 刘宝元. 利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究. *地理科学*, 2002, 22(6): 705-711.
- [26] 章文波, 谢云, 刘宝元. 用雨量和雨强计算次降雨侵蚀力. *地理研究*, 2002, 21(3): 384-390.
- [27] Sinun W, Meng W W, Douglas L, Spencer Tom. Throughfall, stemflow, overland flow and throughflow in the Ulu Segama rain forest, Sabah, Malaysia. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B: Biological Sciences*, 1992, 335(1275): 389-395.
- [28] Jiang M H, Lin T C, Lee Shaner P J, Lyu M K, Xu C, Xie J S, Lin C F, Yang Z J, Yang Y S. Understory interception contributed to the convergence of surface runoff between a Chinese fir plantation and a secondary broadleaf forest. *Journal of Hydrology*, 2019, 574: 862-871.
- [29] Liu Y F, Liu Y, Shi Z H, López-Vicente M, Wu G L. Effectiveness of re-vegetated forest and grassland on soil erosion control in the semi-arid Loess Plateau. *CATENA*, 2020, 195: 104787.
- [30] 吴亚丛, 李正才, 程彩芳, 刘荣杰, 王斌, 格日乐图. 林下植被抚育对樟人工林生态系统碳储量的影响. *植物生态学报*, 2013, 37(2): 142-149.
- [31] 赵泽敏, 吴福忠, 杨玉盛, 倪祥银, 胥超, 熊德成, 廖姝, 袁吉, 谭思懿, 岳楷. 中亚热带杉木人工林和米楮次生林树干茎流和穿透雨磷的动态特征. *水土保持学报*, 2021, 35(4): 129-134.
- [32] Shi P, Schulin R. Effects of soil organic residue amendment on losses of dissolved organic carbon, P, Cu and Zn via surface runoff from arable soils. *Soil and Tillage Research*, 2019, 195: 104352.
- [33] Chappell A, Sanderman J, Thomas M, Read A, Leslie C. The dynamics of soil redistribution and the implications for soil organic carbon accounting in agricultural south-eastern Australia. *Global Change Biology*, 2021, 18(6): 2081-2088.
- [34] 章明奎, 刘兆云. 红壤坡耕地侵蚀过程中土壤有机碳的选择性迁移. *水土保持学报*, 2009, 23(1): 45-49.
- [35] 李瑞, 李勇, 刘云芳. 贵州喀斯特地区降雨与坡面土壤侵蚀关系研究. *水土保持研究*, 2012, 19(3): 7-11.
- [36] 张晶晶, 王力. 坡面产流产沙影响因素的灰色关联法分析. *水土保持通报*, 2011, 31(2): 159-162.
- [37] 金雁海, 柴建华, 朱智红. 内蒙古黄土丘陵区次降雨条件下坡面土壤侵蚀影响因子研究. *水土保持研究*, 2006, 13(6): 192-194.
- [38] 朱湖根, 宋乐平, 王大齐. 土壤侵蚀量与其水动力因子间的灰关联分析. *中国水土保持*, 1992(5): 38-40.
- [39] 管新建, 张文鸽, 李勉, 申震洲. 模拟降雨侵蚀产沙量与其影响因子的灰关联分析. *水土保持通报*, 2011, 31(2): 168-171.
- [40] 王万忠, 焦菊英. 中国的土壤侵蚀因子定量评价研究. *水土保持通报*, 1996, 16(5): 1-20.
- [41] 杨子生. 滇东北山区坡耕地降雨侵蚀力研究. *地理科学*, 1999, 19(3): 265-270.
- [42] 高宇, 樊军, 彭小平, 王力, 米美霞. 水蚀风蚀交错区典型植被土壤水分消耗和补充深度对比研究. *生态学报*, 2014, 34(23): 7038-7046.
- [43] 魏晓明, 夏江宝, 孔雪华, 任加云, 杨吉华. 不同植被类型对黄河三角洲贝壳堤土壤水文功能的影响. *水土保持通报*, 2014, 34(4): 28-32, 38.
- [44] 闫俊华, 周国逸, 张德强, 王旭. 鼎湖山顶级森林生态系统水文要素时空规律. *生态学报*, 2003, 23(11): 2359-2366.
- [45] 赵文武, 傅伯杰, 陈利顶, 吕一河, 刘永琴. 黄土丘陵沟壑区集水区尺度土地利用格局变化的水土流失效应. *生态学报*, 2004, 24(7): 1358-1364.
- [46] 谢云, 林燕, 张岩. 通用土壤流失方程的发展与应用. *地理科学进展*, 2003, 22(3): 179-187.
- [47] 韦红波, 李锐, 杨勤科. 我国植被水土保持功能研究进展. *植物生态学报*, 2002, 26(4): 489-496