

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.01.032.

赵敏, 戴全厚, 严友进, 等. 喀斯特山地典型植被类型凋落物和土壤水文效应[J]. 水土保持研究, 2024, 31(1): 241-249.

Zhao Min, Dai Quanhong, Yan Youjin, et al. Litter and Soil Hydrological Effects of Typical Vegetation Types in Karst Mountains[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(1): 241-249.

# 喀斯特山地典型植被类型凋落物和土壤水文效应

赵敏<sup>1,2,3</sup>, 戴全厚<sup>1,3</sup>, 严友进<sup>1,2,3</sup>, 姚一文<sup>1,2,3</sup>, 丁鹏玮<sup>1,2,3</sup>, 周红<sup>1,2,3</sup>

(1. 贵州大学 林学院, 贵阳 550025; 2. 贵州大学 喀斯特地质资源与环境教育部重点实验室, 贵阳 50025; 3. 贵州大学 土壤侵蚀与生态修复研究中心, 贵阳 550025)

**摘要:** [目的] 研究喀斯特山地典型植被类型凋落物以及土壤水文效应, 对该地区植被恢复具有重要意义。[方法] 通过野外调查与室内分析的方法, 选取喀斯特山地草地、草灌复合丛、灌丛、乔灌复合林和乔木林 5 种典型植被类型, 探索不同植被类型下凋落物及土壤水文效应特征。[结果] (1) 5 种典型植被类型凋落物蓄积量依次为乔灌复合林 (3.57 t/hm<sup>2</sup>)、乔木林 (3.00 t/hm<sup>2</sup>)、草灌复合丛 (2.18 t/hm<sup>2</sup>)、灌丛 (1.94 t/hm<sup>2</sup>)、草地 (1.8 t/hm<sup>2</sup>)。植被类型以及凋落物分解程度均与蓄积量呈极显著相关 ( $p < 0.01$ )。凋落物有效拦蓄量、最大拦蓄量均以乔木林最高、乔灌复合林及草地次之, 均随分解程度增加而降低, 二者分别与植被类型和分解程度呈极显著相关 ( $p < 0.01$ )。 (2) 土壤自然含水量、最大持水量、毛管持水量、最小持水量均以乔木林和乔灌复合林较大, 草地较小, 植被类型对土壤各持水指标影响均极显著 ( $p < 0.001$ )。 (3) 凋落物拦蓄量通过影响土壤容重, 改善土壤质地和孔隙状况, 提高土壤的水文效应。[结论] 结合喀斯特地区植被恢复的困难性, 采用乔灌植被开展植被恢复能够更好地改善凋落物及土壤水文条件, 提高植被恢复效益。

**关键词:** 喀斯特; 土壤物理性质; 凋落物持水特征

中图分类号: S715

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)01-0241-09

## Litter and Soil Hydrological Effects of Typical Vegetation Types in Karst Mountains

Zhao Min<sup>1,2,3</sup>, Dai Quanhong<sup>1,3</sup>, Yan Youjin<sup>1,2,3</sup>, Yao Yiwen<sup>1,2,3</sup>, Ding Pengwei<sup>1,2,3</sup>, Zhou Hong<sup>1,2,3</sup>

(1. College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Key Laboratory of Karst Georesources and Environment, Ministry of Education, Guizhou University, Guiyang 50025, China; 3. Soil Erosion and Ecological Restoration Research Center, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

**Abstract:** [Objective] It is of great significance to study the litter and soil hydrological effects of typical vegetation types in karst mountain areas for vegetation restoration in this area. [Methods] This study combined field investigation and indoor analysis, five typical vegetation types including karst mountain grassland, grass shrub complex, shrub, arbor shrub complex and arbor forest were selected to explore the characteristics of litter and soil hydrological effects under different vegetation types. [Results] (1) The litter volume of the five typical vegetation types were 3.57 t/hm<sup>2</sup> in arbor shrub composite forest, 3.00 t/hm<sup>2</sup> in arbor forest, 2.18 t/hm<sup>2</sup> in grass shrub composite forest, 1.94 t/hm<sup>2</sup> in shrub, 1.8 t/hm<sup>2</sup> in grassland. The vegetation type and the decomposition degree of litter were significantly correlated with the litter volume ( $p < 0.01$ ). The effective interception amount and maximum interception amount of litter were the highest in arbor forest, the second in arbor shrub composite forest and grassland, and both decreased with the increase of decomposition degree, which were significantly correlated with vegetation type and decomposition degree.

收稿日期: 2022-11-24

修回日期: 2023-01-05

资助项目: 国家自然科学基金 (42167044); 贵州大学培育项目 (贵大培育[2019]10 号)

第一作者: 赵敏 (1999—), 女, 湖南湘潭人, 硕士研究生, 主要从事水土保持与生态恢复重建研究。E-mail: 1376225458@qq.com

通信作者: 戴全厚 (1969—), 男, 陕西长武人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事喀斯特水力侵蚀与生态恢复重建研究。E-mail: qhdairiver@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

respectively ( $p < 0.01$ ). (2) The natural water content, maximum water holding capacity, capillary water holding capacity and minimum water holding capacity of soil were higher in arbor forest and arbor shrub composite forest, and smaller in grassland. The vegetation type had a very significant impact on each soil water holding index ( $p = 0$ ). (3) Litter holding capacity could improve soil texture and porosity by affecting soil bulk density, and improve soil hydrological effect. [Conclusion] Combined with the difficulty of vegetation restoration in karst area, the use of arbor and shrub vegetation for vegetation restoration can better improve the hydrological conditions of litter and soil, and improve the benefits of vegetation restoration.

**Keywords:** karst; physical properties of soil; water holding characteristics of litter

喀斯特地区是我国四大生态脆弱地区之一<sup>[1]</sup>。由于长期以来的植被破坏导致的石漠化使当地的生态环境问题愈发严重。故开展植被恢复,遏制和治理石漠化成为该地区各项工作的重中之重。地处亚热带的西南喀斯特地区降水资源丰富,但出于该地区独特的地上地下二元水文结构使得降雨到达地表后快速渗入地下岩溶管道,从而导致了地表土壤常处于干燥状态,难以为植物生长提供足够的水分,从而限制了植被恢复<sup>[2-3]</sup>。解决喀斯特工程性缺水限制植被恢复的问题,是该地区开展石漠化治理和生态修复亟待解决的问题。

凋落物层是补充土壤有机质的“仓库”,同时影响着生态系统的水源涵养和物种多样性<sup>[4-5]</sup>。一方面,凋落物层作为林下水源涵养主体的第二层,可截留超过林冠层 2~3 倍的降水量<sup>[6]</sup>。截留降水的同时防止雨滴溅蚀,保护表土结构的完整,较大程度上抑制地表径流的产生和下层土壤水分蒸发。另一方面,凋落物分解产生的有机酸和腐殖质影响着土壤蓄水及入渗能力,增加土壤疏松程度和孔隙度,进而改善整个森林生态系统的水文循环<sup>[7-8]</sup>。而土壤层作为森林生态系统的“蓄水库”,在森林生态系统水文循环过程中利用其特有的毛管孔隙结构促进降水及径流的下渗。植被作为森林中不可或缺的重要组成部分,其通过在林下形成不同的植被类型影响凋落物现存蓄积量、分解速率和拦蓄特征,影响凋落物层覆盖下土壤层持水特征,从而改变坡地水文过程。已有研究表明随着植被恢复,植被类型随之改变,凋落物覆盖率增加和土壤各理化性质逐渐优化,为植被恢复向着良性循环发展作出了有效贡献,现已经成为调控森林水文循环的关键环节<sup>[9-10]</sup>。且不同方式的植被恢复能在不同程度上改善喀斯特地区凋落物和土壤水文特征已经得到相关学者证实。周秋文<sup>[11]</sup>研究发现,在喀斯特地区种植持水效应更好的树种,可提升凋落物的水文效应。刘玉国等<sup>[12]</sup>通过对喀斯特森林凋落物水文作用的研究,认为随凋落物厚度增加,土壤水分蒸散速度减低。彭玉华等<sup>[13]</sup>通过研究桂西南喀斯特山地凋落

物,发现进行适宜且有效的林分改造,可增强土壤拦蓄能力。前人的研究均证实了植被类型会引发凋落物以及土壤差异,但对可能引起的水文效应差异尚不可知。且大多仅以凋落物或土壤为对象研究其持水性能,从喀斯特典型植被类型出发,研究凋落物和土壤水文效应及二者互作特征的鲜有。同时,针对喀斯特山地凋落物持水特性的研究,大多将林下凋落物视为一个整体开展,而不同分解程度凋落物的水文效应尚缺乏研究。

针对现有的不足,本研究以黔中典型喀斯特山地为研究区,探究 5 种典型植被类型不同分解程度凋落物蓄积和持水特征以及土壤物理和持水特征,同时分析二者的相关性,以期对喀斯特地区森林水文作用的改善以及植被恢复提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究于 2021 年 6 月—7 月在贵阳市花溪区芦荻村(26°26′25″—26°26′40″N, 106°34′6″—106°34′23″E)进行样地的调查和样品选取,研究区为典型的喀斯特地质地貌,亚热带季风湿润温和型气候,年均温 16.4℃,年总积温 5 984℃,年日照时数 1 344.9 h,无霜期约为 296 d,年平均降雨量 1 216 mm,全年平均相对湿度在 75%。土壤以碳酸盐发育成的石灰土为主。研究区主要的植被类型为草地、灌丛、草灌复合丛、乔灌复合林、以及乔木林。

### 1.2 样地设置与样品采集

本研究以研究区的 5 种主要植被类型为研究对象,每一植被类型分别布设 3 个 20 m×20 m 的样地。各样地间除了植被类型不同,其余环境条件基本相似,样地基本情况如表 1 所示。在每个样地内采用“五点采样法”选取 5 个 1 m×1 m 的小样方,样方内按不同分解程度采集凋落物,共计采集 225 个凋落物样。凋落物野外采集完立即使用精度为 0.01 g 的可携带式天平称其鲜重,用于计算凋落物含水量以及蓄积量。凋落物分成两部分,一部分用于持水特征测

定,一部分用蓄积量测定。同时在凋落物采集完的样方内采集 0—30 cm 土层的环刀土样用于测定土壤物理性质。每个土层深度为 10 cm,在每个土层中用 100 cm<sup>3</sup> 环刀采集原状土 3 个,共计 675 个原状土样。

表 1 样地基本情况

Table 1 A basic overview of sample plot

植被类型	坡度/(°)	海拔/m	坡向	植被特征	优势种
草地	30~40	1206	NW	群落层次单一,由草本组成,无或少量灌木,高 1 m 左右,盖度高达 90% 以上,伴随少量带刺灌木,凋落物厚度 3~5 cm	白茅、茅莓、蓬草
草灌复合丛	30~40	1182	NW	群落层次一层,由草本和灌木共同组成,盖度达 90% 以上,草本占其中 60% 左右,主要以茅草为主,有少量藤刺,群落下覆盖有 3~5 cm 枯枝落叶层	马桑、铁仔、白茅、茅莓
灌丛	30~40	1184	NW	林分垂直结构单一,主要以灌木层为主,有或无少量乔木,灌木层覆盖率达 70% 以上,灌木层高 1.5~2 m,有少数藤刺,群落下覆盖有 3~5 cm 左右凋落物层	马桑、茅莓、皱叶荚蒾、插田泡
乔灌复合林	30~40	1214	NW	林分层次结构分化,高 3~12 m,木本植物盖度达 80% 以上,林下草本覆盖度较低,混交少量马尾松,林下覆盖的枯枝落叶层厚 3~7 cm	有齿鞘柄木、泡桐、青冈
乔木林	40~50	1222	NW	林分层次分化明显,乔木层、灌木层比较发达,乔木层高 10~20 m,覆盖率高达 80%,灌木层占 10%~20%,群落中有少量基岩裸露,附生石生苔藓,林下覆盖有 3~6 cm 枯枝落叶层	青冈、朴树、杨树、樟

注:白茅(*Imperata cylindrica*)、蓬草(*Conyza canadensis*)、茅莓(*Rubus parvifolius*)、马桑(*Coriaria nepalensis*)、铁仔(*Myrsine africana*)、皱叶荚蒾(*Viburnum rhytidophyllum*)、插田泡(*Rubus coreanus*)、有齿鞘柄木(*Toricellia angulata*)、泡桐(*Paulownia*)、樟(*Cinnamomum camphora*)、杨树(*Populus*)、青冈(*Quercus glauca*)、朴树(*Celtis sinensis*)。

1.3 测定方法

采用称重法获取凋落物的蓄积量( $A$ )、自然含水率( $R_0$ )。另外采用浸泡法测定凋落物的持水量,记录持水量( $M$ ),同时计算最大拦蓄量( $L_{\max}$ )、最大持水率( $W_{\max}$ )、有效拦蓄量( $L_E$ )。各指标计算公式如下:

$$A=W_D/1/100$$

$$R_0=(W_0-W_D)/W_D$$

$$W_{\max}=(W_{24}-W_D)/W_D$$

$$L_{\max}=(W_{\max}-R_0)\times A$$

$$L_E=(0.85\times W_{\max}-R_0)\times A$$

式中: $A$  为枯落物单位面积蓄积量( $\text{t}/\text{hm}^2$ ); $W_D$  为枯落物干重( $\text{g}$ ); $W_0$  为枯落物鲜重( $\text{g}$ ); $R_0$  为自然含水率(%); $W_{24}$  为枯落物持水 24 h 后的重量( $\text{g}$ );0.85 为有效拦蓄系数。

土壤持水特征指标包括容重( $BD$ )、自然含水量( $C_n$ )、毛管持水量( $C_m$ )、最大持水量( $C_{\max}$ )、最小持水量( $C_{\min}$ )、非毛管孔隙度( $G_{\text{nm}}$ )、毛管孔隙度( $G_m$ )、总孔隙度( $G_z$ ),均使用环刀法进行测定,将野外采样回来的环刀立即置于水中浸泡 12 h,称重计算得  $C_{\max}$ ,然后放置在石英砂沙盘 2 h 称重计算得  $C_m$ ,继续浸水 24 h 得  $C_{\min}$ ,最后将环刀土置于 105℃ 恒温烘箱中烘干至恒重得  $BD$ , $C_n$ , $G_{\text{nm}}$  以及  $G_m$ , $G_{\text{nm}}$  和  $G_m$  之和即为  $G_z$ 。各指标计算公式如下:

$$BD=(G-G_0)/100$$

$$C_n=(M-G)/(M-G_0)$$

$$C_m=(G_{2\text{ h}}-G)/G$$

$$C_{\max}=(G_{12\text{ h}}-G)/G$$

$$C_{\min}=(G_{24\text{ h}}-G)/G$$

$$G_{\text{nm}}=(C_{\max}-C_m)\times BD$$

$$G_m=C_m\times BD$$

$$G_z=G_m+G_{\text{nm}}$$

式中: $G$  为烘干后环刀及土重( $\text{g}$ ); $M$  烘干前环刀及土样质量;100 为环刀体积 100 cm<sup>3</sup>;  $G_0$  为环刀重( $\text{g}$ ); $G_{2\text{ h}}$  为环刀放置沙盘 2 h 重( $\text{g}$ ); $G_{12\text{ h}}$  为环刀浸水 12 h 重( $\text{g}$ ); $G_{24\text{ h}}$  为环刀放置沙盘 24 h 重( $\text{g}$ )。

1.4 数据处理

采用 Excel 2016 对试验数据进行初步统计分析,SPSS 21.0 对数据进行平均值以及标准差的计算,Pearson 相关性分析,邓肯多重比较,双重显著性分析。利用 Statistical10.0 进行广义线性分析。利用 Origin 2021 进行图表的绘制。

2 结果与分析

2.1 不同植被类型凋落物水文效应

2.1.1 不同植被类型凋落物蓄积量 方差分析结果表明植被类型和分解程度对凋落物蓄积量均有极显

著影响( $p<0.01$ ),而植被类型和分解程度的交互作用对凋落物蓄积量的影响相对较弱(表 2)。由图 1A 可知,5 种植被类型凋落物蓄积量大小为乔灌复合林>乔木林>草灌复合丛>灌丛>草地。乔灌复合林的总蓄积量最大为  $3.57\text{ t/hm}^2$ ,而草地的总蓄积量最小为  $1.80\text{ t/hm}^2$ 。由此可以看出,凋落物蓄积量大小与植被类型差异相关,且群落组成越复杂,植株分布密度越高,蓄积量随之越大,反之越小。由图 1B 可知,不同植被类型凋落物未分解层、半分解层以及全分解层蓄积量,各层所占比例也有所不同,总体而言,5 种植被类型凋落物均以全分解层蓄积量占比最大,除草灌复合丛、乔灌复合林外,其余植被类型均以半分解层蓄积量占比最小。

2.1.2 不同植被类型凋落物持水特征 方差分析表明凋落物最大含水率受植被类型以及分解程度显著影响( $p<0.01$ ),最大拦蓄量仅受植被类型显著影响( $p<0.01$ ),有效拦蓄量则仅受分解程度显著影响( $p<0.01$ )(表 3)。如图 2 所示,5 种类型植被最大含水率、最大拦蓄量、有效拦蓄量均呈现出随分解程度增大而变小的趋势。不同植被类型凋落物之间持水性能均存在差异,最大含水率表现为草地( $314.10\%$ )>草灌复合丛( $252.56\%$ )>乔灌复合林( $236.29\%$ )>灌丛( $222.86\%$ )>乔木林( $207.38\%$ );最大拦蓄量和有效

拦蓄量变化规律类似,均表现为乔木林( $1.22\text{ t/hm}^2$ ,  $0.96\text{ t/hm}^2$ )>草地( $1.17\text{ t/hm}^2$ ,  $0.94\text{ t/hm}^2$ )>乔灌复合林( $1.17\text{ t/hm}^2$ ,  $0.80\text{ t/hm}^2$ )>草灌复合丛( $0.96\text{ t/hm}^2$ ,  $0.73\text{ t/hm}^2$ )>灌丛( $0.81\text{ t/hm}^2$ ,  $0.62\text{ t/hm}^2$ )。

表 2 基于方差分析的植被类型和分解程度对凋落物蓄积量和持水特性的显著性

Table 2 Two-factor ANOVAs of vegetation type, soil depth and their interactor on Litter volume and water holding characteristics

变量	源	F	Sig.
蓄积量	植被类型	5.225	0.003
	分解程度	8.655	0.001
	交互	1.485	0.204
最大持水率	植被类型	4.36	0.007
	分解程度	41.44	0
	交互	1.53	0.187
最大拦蓄量	植被类型	25.40	0
	分解程度	1.32	0.265
	交互	0.61	0.765
有效拦蓄量	植被类型	1.09	0.380
	分解程度	32.42	0
	交互	0.53	0.827

注:不同大写字母表示在不同植被类型上差异显著( $p<0.05$ );不同小写字母表示在不同分解程度上差异显著( $p<0.05$ )。

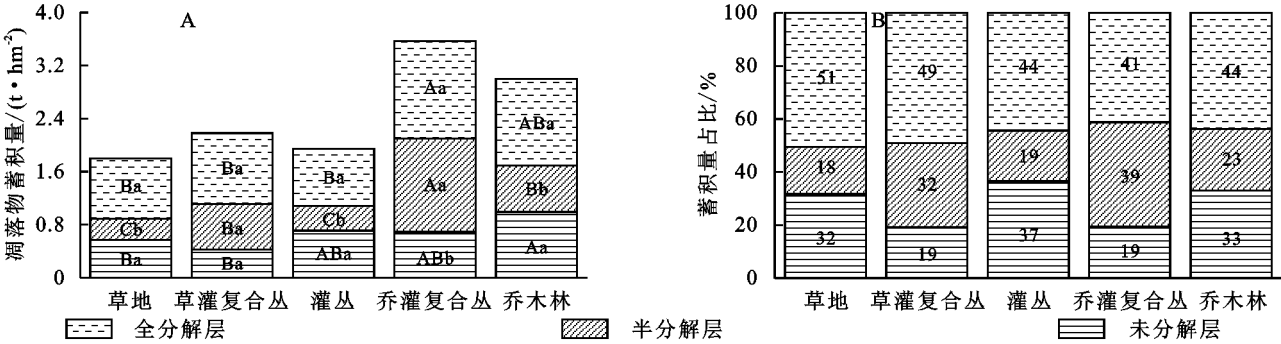
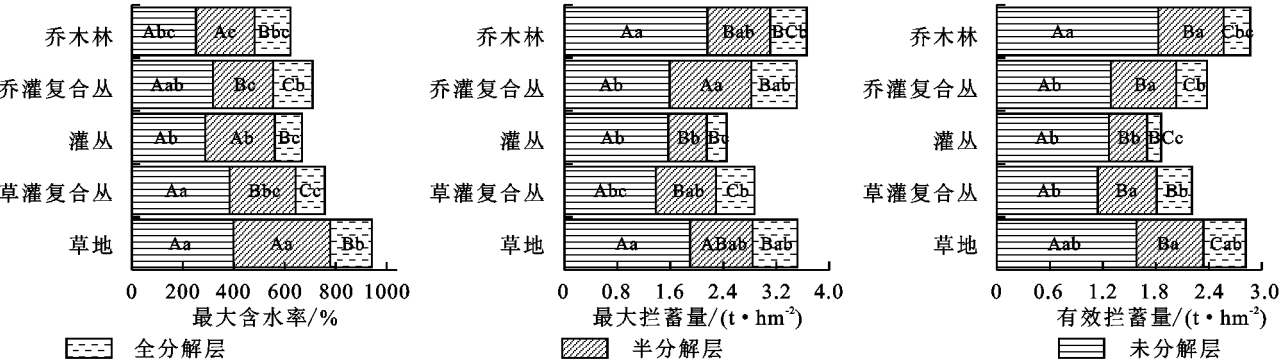


图 1 不同植被类型下调落物蓄积量

Fig. 1 Litter volume of different vegetation types



注:图中不同大写字母同一植被型,不同分解程度上差异显著( $p<0.05$ );不同小写字母表示同分解程度,不同植被类型差异显著( $p<0.05$ )。

图 2 不同植被类型凋落物持水性能

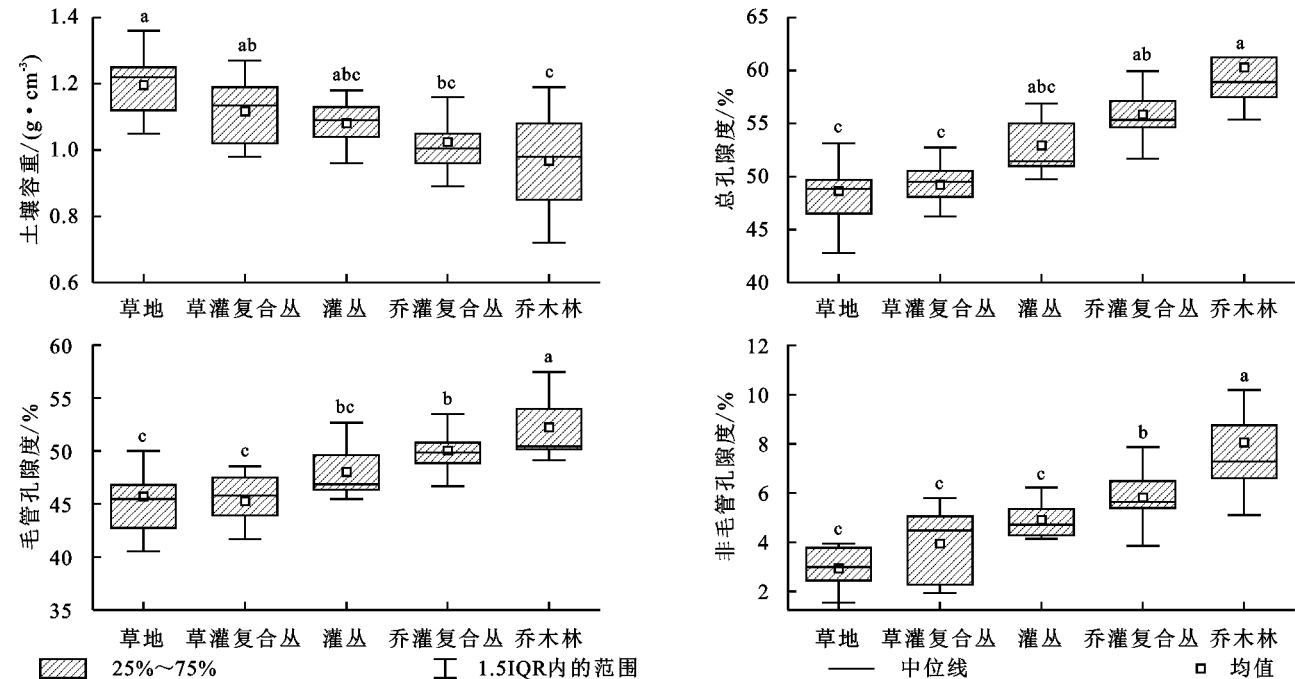
Fig. 2 Water holding capacity of litter in different vegetation types



2.2 不同植被类型土壤水文效应

2.2.1 不同植被类型土壤物理特征 图 3 表明:土壤容重表现为草地>草灌复合丛>灌丛>乔灌复合林>乔木林,总孔隙度整体表现为乔木林>乔灌复合林>灌丛>草灌复合丛>草地,其中乔木林的总孔隙

度为 57%,是最小草地的 1.14 倍。同时乔木林的毛管孔隙度也显著大于其他植被类型( $p<0.05$ ),为 51%,占总孔隙度的 89%。非毛管孔隙度也呈现同样规律,乔木林非毛管孔隙度显著大于其他植被类型,草地显著小于其他植被类型。



注:图中不同小写字母表示不同植被类型间差异显著( $p<0.05$ )。

图 3 土壤物理特性箱型图

Fig. 3 Soil physical properties

2.2.2 不同植被类型土壤持水特征 植被类型和土层深度对土壤各持水性能的影响进行方差分析,结果表明不同植被类型对土壤各持水指标均产生极显著影响( $p=0$ )(表 3)。由图 4 可以看出,乔木林表层土壤自然含水量和最小含水率显著高于其他植被类型( $p<0.05$ ),其平均值达到 45.01%,53.12%,分别是草地表层土壤的 1.22 倍、1.34 倍。毛管持水量和最大持水量呈现出相同规律,均表现为乔木林和乔灌复合林大于草灌复合丛以及灌丛,显著大于草地( $p<0.05$ )。综上,5 种植被类型中以乔木林土壤各物理性质以及持水性能最优,草地土壤最差。且这一结果与凋落物蓄积量呈现出类似规律,可见植被类型差异对凋落物层以及土壤层作用水文效应均有一定影响。

2.3 凋落物及土壤持水特性相关性分析

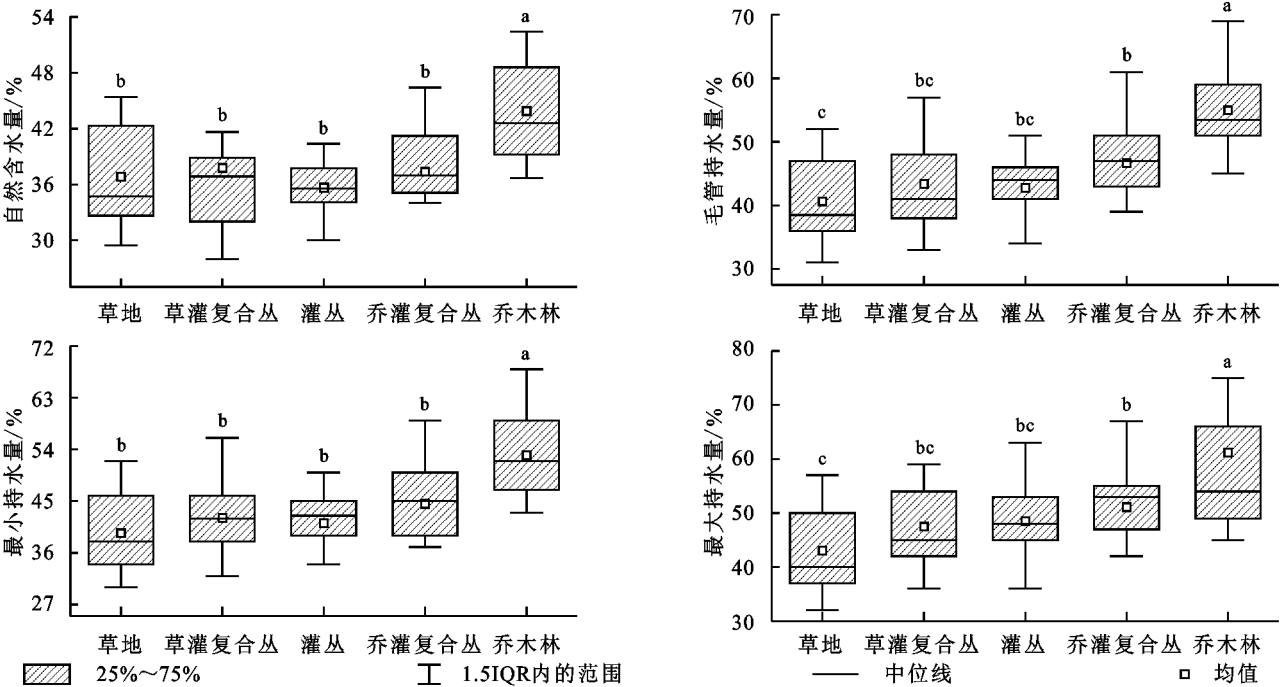
相关性分析结果可见,土壤最大持水量、最小持水量和毛管持水量与土壤容重存在显著的负相关关系,与孔隙特性以及凋落物的有效拦蓄量、最大拦蓄量均存在显著的正相关关系。其中,土壤最大持水量、最小持水量和毛管持水量与土壤孔隙指标的相关性较高。表明土壤持水性能主要受到土壤孔隙特性的影响。此外,土壤孔隙特性主要与土壤容重存在显著的负相关关系,

其与凋落物拦蓄特性相关性不明显,而土壤容重则显著的受到凋落物有效拦蓄量、最大拦蓄量的显著的削弱作用。可见,植物的凋落物对土壤持水性的影响是通过其有效拦蓄量和最大拦蓄量降低土壤容重,改善土壤孔隙特性,进而提高土壤的持水性。

表 3 基于方差分析的植被类型和土层深度对土壤持水特性的显著性

Table 3 Two-factor ANOVAs of vegetation type, soil depth and their interactor on soil water retention characteristics

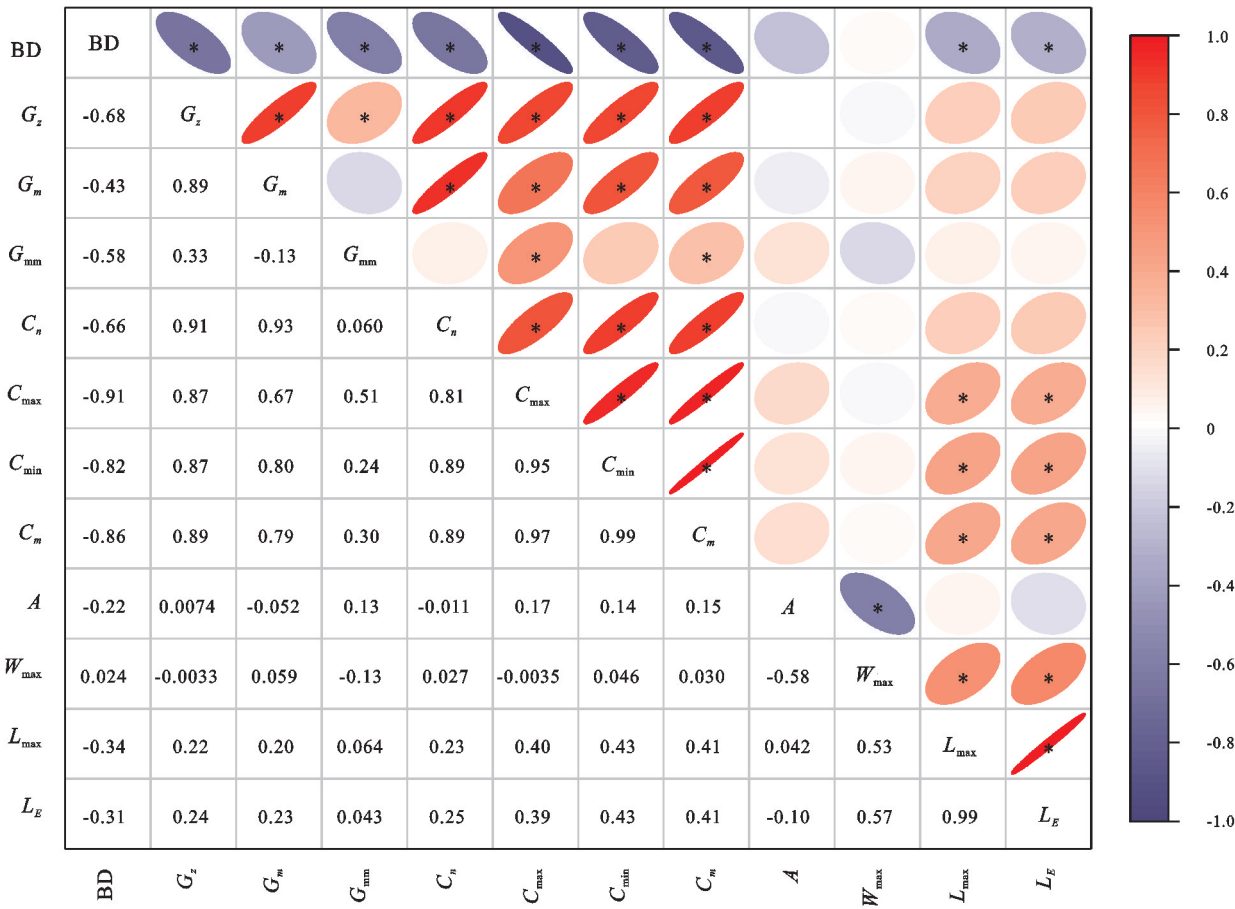
变量	源	F	Sig.
自然含水量	植被类型	14.02	0
土层深度	0.54	0.588	
交互	0.55	0.808	
毛管持水量	植被类型	42.11	0
土层深度	1.27	0.295	
交互	1.10	0.393	
最小持水量	植被类型	7.176	0
土层深度	4.601	0.018	
交互	0.935	0.503	
最大持水量	植被类型	26.67	0
土层深度	3.70	0.37	
交互	2.33	0.44	



注:图中不同小写字母表示不同植被类型间差异显著( $p < 0.05$ )。

图 4 土壤持水特性箱型图

Fig. 4 The characteristics of soil water retention



注:椭圆右倾表示正相关,左倾表示负相关, $p < 0.05$ 。

图 5 土壤持水性能相关性分析

Fig. 5 Correlation analysis of soil water holding capacity

### 3 讨论

#### 3.1 植被类型对凋落物水文效应的影响

林下调落物蓄积量是植被器官死亡凋落和分解动态平衡的结果,受植被自身性质、分解速率、人为活动、林木类型等多方面因素影响<sup>[14-15]</sup>,但植被类型仍是制约凋落物蓄积量的首要因子<sup>[16-17]</sup>,这是由于不同类型植被在叶面积指数、凋落物厚度、林木密度等方面存在差异<sup>[18]</sup>。本研究比较了5种喀斯特地区不同植被类型凋落物的蓄积量,结果表明植被类型和凋落物分解程度均对蓄积量影响显著(表2),乔灌复合林、乔木林凋落物的蓄积量明显大于其他类型凋落物,这可能是由于乔木凋落物大部分为面积较大落叶和较粗枝干,同时乔木林、乔灌复合林的生态系统相较更为成熟,养分输入量更大且循环过程更完整<sup>[19]</sup>,致使凋落物输入量更大。同时研究结果表明不同分解程度凋落物蓄积量占比也不一样,本研究结果5种植被凋落物均以全分解层占比最大,可能是因为全分解层受土壤以及上层凋落物分解输入的影响,同时全分解层破碎度以及组成结构更为复杂。本研究结果进一步论证了蓄积量会因植被类型以及凋落物分解程度不同而受到影响。

凋落物持水特征是评价森林水文效应的重要指标,常用有效拦蓄量来表示凋落物对雨水的实际拦截能力,最大含水率表征凋落物对雨水的最大拦截吸收能力<sup>[20]</sup>。本研究结果表明草地最大持水率最高,乔木林最低,但最大含水率是通过室内浸泡试验得出的理想持水指标,野外条件下,凋落物对雨水截留能力会受到其自身自然含水量以及蓄积量等因素的影响<sup>[15,21]</sup>。有效拦蓄量由凋落物蓄积量、自然含水量和最大含水率综合推算而成<sup>[22]</sup>,其结果可反映凋落物的持水能力,结果显示5种植被类型有效拦蓄量最大为乔木林(0.96 t/hm<sup>2</sup>),其次为草地(0.94 t/hm<sup>2</sup>),这与前人研究结果一致<sup>[18,23]</sup>,通过两指标的对比分析,自然含水量以及蓄积量等在较大程度上制约草地植被持水能力,这极可能与研究区草地植被优势种以叶面积指数较大的禾本科为主,王盛琦<sup>[24]</sup>对沙地枯落物研究也表明禾本科植被扣除自身含水率,其持水潜力以及拦蓄能力均大于乔灌木。同时本研究结果显示最大含水率以及有效拦蓄量均随分解程度增大而减小,主要是因为随着分解程度的增加,枯枝落叶破碎程度加大组成更加复杂,结构逐渐紧密间隙变小,凋落物部分或已腐烂变质<sup>[24]</sup>,从而吸水能力减弱。

#### 3.2 植被类型对土壤水文效应的影响

持水性能反映土壤对微生物活动以及酶促作用进行的支撑能力<sup>[25]</sup>,对土壤肥力改善起到至关重要的影

响,同时土壤持水是林地水源涵养的主体<sup>[26]</sup>。其中最大持水量是土壤含蓄水分的最大体现,反映土壤的蓄水能力。本研究中土壤最大含水量的最大值出现在乔木林以及乔灌复合林,说明这两种植被类型林分对于较大降水的截留和含蓄能力较优秀。毛管持水量反映土壤对外源水分输入调节和涵养的能力,关系到森林对降水储存能力,同时毛管孔隙中持有全部毛管水和少量膜状水,是可以全部为植物根系吸收利用以及土壤蒸腾作用的水分,对于植株生长和森林水分循环具有重要的生态学意义。本研究中的乔木林和乔灌复合林毛管持水量较草地植被而言,体现出绝对的优势,分析其原因可能一方面是因为乔木林植被凋落物蓄积量更大,更易在森林内形成防止雨滴溅蚀以及径流冲刷的缓冲层,创造土壤毛管孔隙形成的有利条件,另一方面可能是因为研究区中乔灌植被根系多为可在土壤中穿插纵横的粗根,具有较高的密度,而草地植被多为密度较小的浅根,不利于毛管孔隙的形成<sup>[27]</sup>。综上可知,群落物种组成较简单、植被盖度较低和地上生物量的较小草地和草灌复合丛土壤体现出了较差的水源涵养能力,而植被种类组成丰富,空间组成结构更复杂的乔灌复合林以及乔木林在土壤水源涵养能力上则表现出了明显优势。方差分析结果(表3)进一步说明科学调整植被类型,进行合理的植被恢复,可使土壤持水性能得到较大改善。

土壤持水性能受到土壤疏松程度、孔隙状况等多方面因素影响,明确不同因素对土壤持水性能改善的能力,可为土壤水源涵养效应的改善和调节提供依据。土壤容重、孔隙度通过影响土壤的通气和蓄水性能,是与林下土壤水源涵养以及导水能力的相关性较强的指标<sup>[28]</sup>。容重表征土壤紧实度,土壤容重越小说明更加疏松,其保水保肥能力更强,反之则表明土壤质地越紧实,蓄水储肥空间越小。孔隙度状况反映着土壤的透气和持水性,同时也是土壤蓄水能力的决定性因子。相关分析结果表明,土壤持水性能与容重、孔隙度呈现显著相关关系,这与李鹏等<sup>[29]</sup>的研究结果一致。有研究认为较好的土壤孔隙特征和较为疏松的土壤质地是土壤水运移的有利条件,同时也可有效抑制土壤水分蒸散并增加对地下水的补给<sup>[30]</sup>。凋落物覆盖在土壤表层,形成粗糙度较高、对径流拦截吸收量较大的土表保护层,相关研究表明凋落物的输入可显著改善土壤水文效应<sup>[29,31]</sup>,本研究中凋落物拦蓄量与土壤持水性能显著相关性佐证了这一点(图5)。综上,说明改善林分结构,增加物种多样性,通过增加土壤疏松孔隙状况以及增加凋落物拦蓄状况,可提升喀斯特地区林分土壤对水分的储蓄能力。

本文从不同植被类型出发研究了凋落物以及土壤的水源涵养效应,探究了凋落物对土壤持水性能的

影响,综合而言乔木林以及乔灌复合林土壤及凋落物水文涵养能相对较优,但由于喀斯特地区特殊的地质生态环境,直接选择乔木林为植被恢复模式可行性不高,为尽可能提高生态修复效益,可以乔灌复合型植被为该地区首要的植被恢复类型。

## 4 结论

(1) 乔木林以及乔灌复合林凋落物具有较大的蓄积量,乔木林持水性能更佳,在森林生态中将发挥较好的水文效应。

(2) 乔木林以及乔灌复合林土壤物理性质以及对水分的涵蓄能力更佳。

(3) 土壤物理及持水性能与凋落物拦蓄特征显著相关。凋落物通过降低土壤容重,改善土壤质地以及孔隙状况,对土壤持水性能产生影响。

### 参考文献:

- [1] 刘淑娟,张伟,王克林,等.桂西北喀斯特峰丛洼地土壤物理性质的时空分异及成因[J].应用生态学报,2010,21(9):2249-2256.  
Liu S J, Zhang W, Wang K L, et al. Spatiotemporal heterogeneity and its formation causes of soil physical properties in karst peak-cluster depression area of north-west Guangxi China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010,21(9):2249-2256.
- [2] Liu K, Guan X, Li G, et al. Publication characteristics, topic trends and knowledge domains of karst ecological restoration:a bibliometric and knowledge mapping analysis from 1991 to 2021[J]. Plant and Soil, 2022,475(1/2):169-189.
- [3] Lu Z, Wang P, Ou H, et al. Effects of different vegetation restoration on soil nutrients, enzyme activities, and microbial communities in degraded karst landscapes in southwest China[J]. Forest Ecology and Management, 2022,508:120002.
- [4] Bahnmann B, Mašínová T, Halvorsen R, et al. Effects of oak, beech and spruce on the distribution and community structure of fungi in litter and soils across a temperate forest[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2018,119:162-173.
- [5] Molina A J, Llorens P, Garcia-Estringana P, et al. Contributions of throughfall, forest and soil characteristics to near-surface soil water-content variability at the plot scale in a mountainous Mediterranean area[J]. Science of the Total Environment, 2019,647:1421-1432.
- [6] Gerrits A M J, Savenije H H G, Hoffmann L, et al. New technique to measure forest floor interception-an application in a beech forest in Luxembourg[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2007,11:695-701.
- [7] Xie J, Su D. Water-holding characteristics of litter in meadow steppes with different years of fencing in Inner Mongolia, China[J]. Water, 2020,12(9):2374.
- [8] Jourgholami M, Sohrabi H, Venanzi R, et al. Hydrologic responses of undecomposed litter mulch on compacted soil: Litter water holding capacity, runoff, and sediment[J]. Catena, 2022,210:105875.
- [9] 庞世龙,欧芷阳,申文辉,等.广西喀斯特地区不同植被恢复模式土壤质量综合评价[J].中南林业科技大学学报,2016,36(7):60-66.  
Pang S L, Ou Z Y, Shen W H, et al. Edaphic characteristics of different regeneration patterns in karst mountainous areas of Guangxi[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2016,36(7):60-66.
- [10] 欧芷阳,申文辉,庞世龙,等.平果喀斯特山地不同植物群落的土壤质量评价[J].生态学杂志,2015,34(10):2771-2777.  
Ou Z Y, Shen W H, Pang S L, et al. Assessment of soil quality of different plant communities in the Karst mountains of Pingguo County, Guangxi[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015,34(10):2771-2777.
- [11] 周秋文,罗雅雪,罗娅,等.喀斯特灌木林枯落物持水特性分析[J].水资源与水工程学报,2018,29(5):14-20.  
Zhou Q W, Luo Y X, Luo Y, et al. Water holding characteristics of litter in karst shrubs[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2018,29(5):14-20.
- [12] 刘玉国,刘长成,李国庆,等.贵州喀斯特山地5种森林群落的枯落物储量及水文作用[J].林业科学,2011,47(3):82-88.  
Liu Y G, Liu C C, Li G Q, et al. Litter mass of five karst forests and their hydrological effects in Guizhou[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2011,47(3):82-88.
- [13] 彭玉华,欧芷阳,曹艳云,等.桂西南喀斯特山地主要植被类型凋落物累积量及其持水特性[J].中南林业科技大学学报,2013,33(2):81-85.  
Peng Y H, Ou Z Y, Cao Y Y, et al. Litters accumulation under forests in karst mountain area in southwest Guangxi and theirs water-holding characteristics[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2013,33(2):81-85.
- [14] 杨霞,陈丽华,康影丽,等.辽东低山区5种典型水源涵养林枯落物持水特性[J].生态学杂志,2019,38(9):2662-2670.  
Yang X, Chen L H, Kang Y L, et al. Water-holding characteristics of litter in five typical water conservation forests in low mountainous areas of eastern Liaoning[J]. Chinese Journal of Ecology, 2019,38(9):2662-2670.
- [15] 陈波,孟成生,赵耀新,等.冀北山地不同海拔华北落叶松人工林枯落物和土壤水文效应[J].水土保持学报,2012,26(3):216-221.  
Chen B, Meng C S, Zhao Y X, et al. Hydrological



- effects of forest litters and soil of *Larix Larix principis-rupprechtii* plantations in the different altitudes of north mountain of Hebei [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012,26(3):216-221.
- [16] Zagyvai-Kiss K A, Kalicz P, Szilágyi J, et al. On the specific water holding capacity of litter for three forest ecosystems in the eastern foothills of the Alps [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2019,278:107656.
- [17] Zhu X, Liu W, Chen H, et al. Effects of forest transition on litterfall, standing litter and related nutrient returns: Implications for forest management in tropical China[J]. Geoderma, 2019,333:123-134.
- [18] 白云星,周运超,张薰元,等.马尾松针阔混交人工林凋落物和土壤水源涵养能力[J].林业科学,2021,57(11):24-36.
- Bai Y X, Zhou Y C, Zhang X Y, et al. Water conservation capacity of litter and soil in mixed plantation of *pinus massoniana* and broadleaved trees[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2021,57(11):24-36.
- [19] Zhu X, Zou X, Lu E, et al. Litterfall biomass and nutrient cycling in karst and nearby non-karst forests in tropical China: A 10-year comparison[J]. Science of the Total Environment, 2021,758:143619.
- [20] 张振明,余新晓,牛健植,等.不同林分枯落物层的水文生态功能[J].水土保持学报,2005,19(3):139-143.
- Zhang Z M, Yu X X, Niu J Z, et al. Ecohydrological functions of litter on different forest stands[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005,19(3):139-143.
- [21] 董辉,严朝东,苏纯兰,等.东莞 5 种生态公益林枯落物及土壤水文效应[J].水土保持学报,2021,35(5):144-149.
- Dong H, Yan C D, Su C L, et al. Litter and soil hydrological effects of five no-commercial forests in Dongguan[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021,35(5):144-149.
- [22] 杜雪,王海燕,耿琦,等.云冷杉针阔混交林枯落物持水性能[J].水土保持学报,2021,35(2):361-368.
- Du X, Wang H Y, Geng Q, et al. Water Holding Capacity of Litter in Spruce-fir Coniferous and Broad-leaved Mixed Forests[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021,35(2):361-368.
- [23] 吴雪铭,余新晓,陈丽华,等.间伐强度对坝上樟子松林下持水能力的影响[J].应用生态学报,2021,32(7):2347-2354.
- Wu X M, Yu X X, Chen L H, et al. Effects of thinning intensity on the understory water-holding capacity of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation in the Bashang area of north China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021,32(7):2347-2354.
- [24] 赵芳,李雪云,赖国桢,等.飞播马尾松林不同林下植被类型枯落物及土壤水文效应[J].中国水土保持科学,2016,14(4):26-33.
- Zhao F, Li X Y, Lan G Z, et al. Hydrological effects of forest litters and soil in different types of understory vegetation in aerially-seeded *Pinus massoniana* plantation[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2016,14(4):26-33.
- [25] 吴义远,董文渊,浦婵,等.筲竹构件生物量积累分配特征及其与土壤物理性质的关系[J].生态学报,2022,42(9):3516-3524.
- Wu Y Y, Dong W Y, Pu C, et al. Biomass of accumulation and allocation characteristics of *Qiongzhusia tumidinoda* components and its relationship with soil physical properties[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(9):3516-3524.
- [26] 薛立,梁丽丽,任向荣,等.华南典型人工林的土壤物理性质及其水源涵养功能[J].土壤通报,2008,39(5):986-989.
- Xue L, Liang L L, Ren X R, et al. Soil physical properties and water conservation function of model plantations in South China[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2008,39(5):986-989.
- [27] 王大力,尹澄清.植物根孔在土壤生态系统中的功能[J].生态学报,2000,20(5):869-874.
- Wang D L, Yin C Q. Functions of root channels in the soil system[J]. Acta Ecologica Sinica, 2000(5):869-874.
- [28] 李永宁,王忠禹,王兵,等.黄土丘陵区典型植被土壤物理性质差异及其对导水特性影响[J].水土保持学报,2019,33(6):176-181.
- Li Y N, Wang Z Y, Wang B, et al. Differences in soil physical properties of typical vegetation in loess hilly region and effects on water conductivity[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019,33(6):176-181.
- [29] 李鹏,陈璇,杨章旗,等.不同密度马尾松人工林枯落物输入对土壤理化性质的影响[J].水土保持学报,2022,36(2):368-377.
- Li P, Chen X, Yang Z Q, et al. Effects of litter input on soil physical and chemical properties of *pinus massoniana* plantations with different densities[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022,36(2):368-377.
- [30] Gao X, Li H, Zhao X, et al. Identifying a suitable revegetation technique for soil restoration on water-limited and degraded land: Considering both deep soil moisture deficit and soil organic carbon sequestration[J]. Geoderma, 2018,319:61-69.
- [31] 葛晓改,黄志霖,程瑞梅,等.三峡库区马尾松人工林凋落物和根系输入对土壤理化性质的影响[J].应用生态学报,2012,23(12):3301-3308.
- Ge X G, Huang Z L, Cheng R M, et al. Effects of litterfall and root input on soil physical and chemical properties in *Pinus massoniana* plantations in Three Gorges Reservoir Area, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012,23(12):3301-3308.