

喀斯特森林表层土壤持水能力空间分布特征及其影响因素

袁冬梅, 杨 曼, 严令斌, 刘 锋, 张慧敏, 曹秀刚, 喻理飞

(贵州大学 生命科学学院/农业生物工程研究院 山地植物资源保护与种质创新教育部重点实验室, 贵州 贵阳 550025)

摘 要: [目的] 探究喀斯特森林表层土壤持水能力空间分布特征及其影响因素, 为提升该地区森林土壤水源涵养能力提供科学参考。[方法] 以贵州省茂兰喀斯特原始森林表层土壤(0—10 cm)为研究对象, 采用环刀法与室内浸泡法对土壤物理结构和持水特性进行测定, 并利用方差分析、RDA 分析等方法探究不同地形部位土壤持水能力空间分布差异及其影响因素。[结果] ①土壤物理特征呈高异质性, 土壤容重、土壤含水量、孔隙度、机械组成等在不同坡向、坡位和海拔间均具有显著性差异。②土壤持水率在不同坡向间差异最显著, 土壤持水量在不同岩石裸露等级间差异最显著。土壤最大持水率、毛管持水率、饱和持水量与毛管持水量均随着坡位和海拔的增加而增加, 且随着岩石裸露等级的下降而增加。土壤综合持水能力在低裸露、低海拔地区较好。③相关分析表明, 地形特征、土壤物理特性与土壤持水率的相关性更强, 林分特征与持水量的相关性更强, 林分密度与持水量显著负相关, 平均胸径、平均树高与持水量显著正相关。④PCA 分析结果表明, 土壤持水量是表征茂兰喀斯特森林表层土壤持水性能的第一主要因子, 土壤持水率为第二主要因子, 主成分一、二累计贡献率为 77.5%。RDA 分析结果表明, 土壤孔隙度、岩石裸露等级是茂兰喀斯特森林表层土壤持水能力的主要影响因素。[结论] 茂兰喀斯特森林土壤持水能力具有高异质性, 在不同地形部位间差异显著, 非毛细孔隙度(P_{nc})是影响土壤持水能力的主要因子。

关键词: 土壤物理性质; 土壤持水能力; 影响因素; 喀斯特

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)02-0057-13

中图分类号: S714

文献参数: 袁冬梅, 杨曼, 严令斌, 等. 喀斯特森林表层土壤持水能力空间分布特征及其影响因素[J]. 水土保持通报, 2024, 44(2): 57-69. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.02.007; Yuan Dongmei, Yang Man, Yan Lingbin, et al. Spatial distribution of surface soil water-holding capacity in karst forests and its influencing factors [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(2): 57-69.

Spatial Distribution of Surface Soil Water-Holding Capacity in Karst Forests and Its Influencing Factors

Yuan Dongmei, Yang Man, Yan Lingbin, Liu Feng, Zhang Huimin, Cao Xiugang, Yu Lifei

[Key Laboratory of Plant Resource Conservation and Germplasm

Innovation in Mountainous Region (Ministry of Education), College of Life

Sciences/Institute of Agro-bioengineering, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China]

Abstract: [Objective] The spatial distribution characteristics and influencing factors of surface soil water-holding capacity were explored in a karst forest in order to provide scientific references for improving the water conservation capacity of forest soil in the region. [Methods] The surface soil (0—10 cm) of a primary Maolan karst forest in Guizhou Province was taken as the research object, and the physical structure and water-holding characteristics of soil were measured by the ring knife method and the indoor soaking method. The spatial distribution differences and influencing factors of soil water-holding capacity in different terrain locations were investigated by using variance analysis and RDA analysis. [Results] ① Soil physical

收稿日期: 2023-11-08

修回日期: 2024-01-12

资助项目: “十三五”国家重点研发计划项目“喀斯特高原石漠化综合治理与生物医药产业技术与示范”(2016YFC0502604); 贵州省生物学一流学科建设项目(GNYL[2017]009); 贵州省高等学校创新能力提升计划项目(黔教合协同创新字[2014]01); 贵州大学人才引进科研项目(Guigengji[2020]27)

第一作者: 袁冬梅(1998—), 女(汉族), 贵州省开阳县人, 硕士研究生, 研究方向为喀斯特生态修复。Email: yuan_dm936@163.com。

通信作者: 喻理飞(1963—), 男(汉族), 江西省南昌市人, 教授, 博士生导师, 主要从事退化植被生态系统修复理论与技术研究。Email: lfyu@gzu.edu.cn。

characteristics showed high heterogeneity, and soil bulk density, soil water content, porosity, and mechanical composition had significant differences in different slope directions, slope positions and altitudes. ② Soil water retention had the most significant difference in different slope direction, and soil water retention had the most significant difference in different rock exposed grades. The maximum soil water-holding capacity, capillary water-holding capacity, saturated water-holding capacity, and capillary water-holding capacity increased with increasing slope position and elevation, and with decreasing rock exposure grade. The comprehensive water-holding capacity of soil was greater in the area of low exposure and low elevation. ③ Correlation analysis showed that topographic characteristics and soil physical characteristics were more strongly correlated with soil water-holding capacity; stand characteristics were more strongly correlated with water-holding capacity; stand density was significantly negatively correlated with water-holding capacity; and average DBH (diameter at breast height) and average tree height were significantly positively correlated with water-holding capacity. ④ The results of PCA analysis showed that soil water retention was the first main factor to represent the surface soil water retention performance of the Maolan karst forest, and soil water retention rate was the second main factor. The cumulative contribution rate of principal components I and II was 77.5%. RDA analysis results showed that soil porosity and rock exposure grade were the main factors affecting the water-holding capacity of surface soil in the Maolan karst forest. [Conclusion] The soil water-holding capacity of the Maolan karst forest exhibited high heterogeneity and significant differences among different terrain locations, and non-capillary porosity (P_{nc}) was the main factor affecting soil water-holding capacity.

Keywords: soil physical properties; soil water-holding capacity; influencing factors; karst

土壤层作为森林水源涵养与水土保持的重要主体之一,森林土壤对于森林水源涵养功能的贡献达到了 60% 以上,直接影响生态系统水文过程^[1]。森林土壤持水能力强弱受到土壤物理特性^[2]、地上植被^[3-4]与地形条件等^[5]因素的影响。土壤物理特性反映了土壤结构状况与持水特征,土壤机械组成、土壤容重、土壤孔隙度等与土壤持水性能密切相关,是评价森林土壤水源涵养能力的重要指标^[6]。地上植被类型和林分结构通过改善土壤理化性状,提高土壤持水与蓄水性能,该作用在土壤表层最为明显^[7]。地形条件的差异会影响地上植被群落对光照和养分的吸收与利用,改变森林结构与地表土壤层次,直接或间接的对土壤持水能力产生影响^[8]。目前,土壤持水能力的研究多集中于非喀斯特地貌区域,对于非地带性的森林土壤持水能力的研究依旧不够明确,有些研究虽然反映了自然含水量的变化情况,但对于土壤的持水性能关注较少^[9-14]。

喀斯特地区成土母质主要为可溶性岩石(碳酸盐岩),酸不溶物少,且频繁的岩石裸露分裂了土被的连续性,导致喀斯特地区土壤量少而薄,水土流失和土地石漠化严重^[15]。茂兰喀斯特森林作为土壤、地形顶极的常绿落叶阔叶林群落,较大程度上受到土壤结构与地形条件的影响,其土壤水源涵养的机制与常态地貌森林土壤不同^[14]。张继光等^[10]通过半变异函数模型得出,喀斯特地区峰丛洼地表层土壤含水量受

到地形、微地貌、降雨和植被及其空间分布格局的重要影响。土壤分布与地形地貌特征的差异,导致坡面土壤水分在横向上的变异要强于纵向。冉景丞等^[16]对茂兰喀斯特森林土壤持水率初步研究发现,喀斯特地区腐殖土持水性比矿质土高 12%~22%。程星与於芳^[13]对土壤自然含水率的研究发现,在喀斯特不同地貌部位土壤含水率不同,半坡地区土壤含水率要高于坡脚与坡顶。在喀斯特森林的不同小生境中,土壤含水量高低表现为:土面>石洞>石槽>石缝>石沟;水分丧失率和丧失程度在温度变化剧烈的正地形生境(如土面、石面)最甚^[17]。裸岩在旱季具有遮阴作用,明显影响其周围的土壤含水量,随岩石高度增加,土壤含水量而增加^[18]。在喀斯特草坡中,土壤水分在雨季最主要受到降雨量的控制,在旱季主要受到温度的控制^[19]。李孝良等^[20]在喀斯特土壤水分库容研究中发现,土壤厚度、土壤有机质含量、土壤颗粒组成与 0.3~0.03 mm 孔隙度是影响水分库容的重要因素。喀斯特地区植被恢复有助于提高土壤含水量,天然原始林土壤含水量要高于人工林与次生林^[11]。虽然已有不少学者^[21-23]对喀斯特地区土壤水分开展研究,希望通过土壤水分的视角来反映喀斯特地区水源涵养功能,但大部分的研究集中于微地貌、不同植被类型、不同土地利用方式、空间变异格局等方面,而对于演替后期的顶极状态相对较少。所以,开展喀斯特地区顶极群落森林土壤水源涵养功能的研究具有重要意义。

贵州省茂兰国家级自然保护区作为贵州南部临时性干旱频发地区的重要绿色生态屏障和水源涵养地带,具有集中连片、原生性较强的喀斯特顶极森林群落(非地带性常绿落叶阔叶混交林),在贵州的社会经济发展与生态安全等方面具有十分重要的地位,被誉为“地球腰带上的绿宝石”。顶极森林群落是生态演替的最终阶段,群落最稳定,同环境相适应度达到最高,该阶段的土壤持水能力反映了森林土壤层水源涵养能力的最优状态。基于此,本研究为探索地形和土壤条件对喀斯特顶极森林群落土壤持水能力的影响,以贵州省茂兰国家级自然保护区内喀斯特森林表层土壤(0—10 cm)为研究对象,通过方差分析与冗余分析等方法,阐明喀斯特森林土壤持水能力特征及其影响因素,为提升喀斯特地区森林土壤水源涵养能力提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

茂兰国家级自然保护区位于贵州省黔南布依族苗族自治州荔波县境内,是喀斯特植被顶极群落分布区,其地理位置为东经 107°52′10″—108°45′40″,北纬 25°09′20″—25°20′50″。保护区为典型的中亚热带季风湿润气候,年均温为 15 ℃ 左右,年降水量约为 1 320.5 mm,年平均相对湿度 83%,森林覆盖率达到

87%^[24]。保护区位于贵州高原南部向广西丘陵平原过渡带,地势走向为西北高东南低;属于典型的喀斯特地貌,具备峰丛漏斗、峰丛洼地、峰丛槽谷等多种地貌组合类型;成土母质主要为纯质石灰岩和白云岩,土壤以黑色石灰土为主^[25]。由于喀斯特地区岩石裸露率较高、土壤分布不连续、土层浅薄、生境破碎化严重以及小生境种类复杂等原因,土壤常存在于土面、石沟、石面、石缝等多种小生境中^[26]。保护区植被类型主要为中亚热带非地带性常绿落叶阔叶林,乔木层主要优势种为化香树(*Platycarya strobilacea*)、黄梨木(*Boniodendron minus*)、柯(*Lithocarpus glaber*)和齿叶黄皮(*Clausena dunniana*)等;灌木层主要优势种为香叶树(*Lindera communis*)、光皮柞木(*Cornus wilsoniana*)、巴东荚蒾(*Viburnum henryi*)、十大功劳(*Mahonia fortunei*)等;草本层主要优势种为翠云草(*Selaginella uncinata*)、镰叶冷水花(*Pilea semisessilis*)、细辛(*Asarum heterotropoides*)、常春藤(*Hedera nepalensis*)等^[27-28]。

2022 年,贵州省林业局、茂兰国家级自然保护区管理局与贵州大学合作,在该保护区内参照美国热带雨林研究中心(CTFS)技术规范建设了 25 hm² (500 m×500 m)的固定永久森林动态监测样地——中国南方喀斯特森林生态系统茂兰动态监测样地。本研究区位于该监测样地内(图 1)。

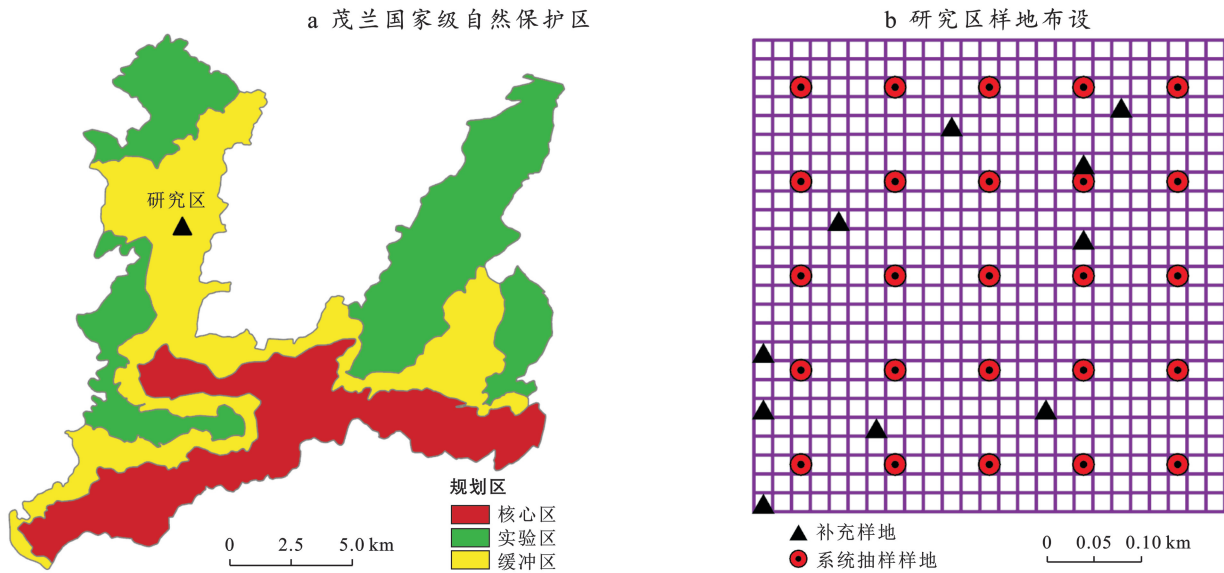


图 1 研究区位置及样地布设

Fig.1 Location of study area and layout of sample plots

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置与群落调查 2023 年 7—8 月,在对茂兰大样地的地形地貌、植被类型等因素进行野外调

查的基础上,采用系统取样法对样方进行选取,保证采样样方的均匀性;其取样规则为 80 m 距离为间隔抽取一个采样样方。图 1 中每个紫色小格代表一个

20 m×20 m 的小样方,红圈黑点标注地为系统抽样样方。然后,对系统抽样样地进行地形特征分析后,依据代表性原则,继续设置补充样地,即图 1 中黑色三角标注样方,使得所有采样样方大致涵盖大样地内存在的所有地形因子类别。共计选择 35 个 20 m×20 m 的森林样地进行土壤试验工作,采样点如图 1 所示。利用群落学方法,对采样样方内所有木本植物(DBH>1 cm)记录其物种名、树高、胸径、枝下高、冠幅以及存活状态等基础信息,通过基础信息获取统计各样方的林分密度(S_D ,株/m²)、平均树高(MTH,m)、平均胸径(MDBH,cm)等林分特征。同时,利用实时动态载波相位差分技术(RTK, real-time kinematic)测量系统(北斗海达 TS7)对所调查的植物个体进行投影坐标位置标定。

1.2.2 地形因子获取 地形因子包括坡度、坡向、坡位、海拔、岩石裸露率等,依据各地形因子的分类等级划分不同的地形部位。利用茂兰大样地的数字高程模型(DEM)提取采样样方坡向信息,根据坡向数值划分为 5 类坡向,北坡(292.5°~67.5°)、东坡(67.5°~112.5°)、南坡(112.5°~247.5°)、西坡(247.5°~292.5°)以及无坡向(平坡,-1)。坡位根据样方所在山体的相对位置分为上坡位、中坡位、下坡位等 3 类。岩石裸露率利用踏查法在样方内估算得到,岩石裸露率等级参考喀斯特石漠化强度分级标准^[29]后划分为 3 类:低裸露(岩石裸露率<40%)、中裸露(岩石裸露率为 40%~80%)、高裸露(岩石裸露率>80%)。茂兰大样地中涵盖了多个小山体,虽然样方处于同一相对位置,但海拔具有差异,样方的最高海拔为 1 024 m,最低海拔为 876 m,因此以样方海拔高差值均分为 3 类海拔梯度,分别为高海拔(976~1 026 m)、中海拔(926~976 m)、低海拔(876~926 m)。

1.2.3 样品采集与处理 土壤样品采集于 2023 年 7 月,采样时天气晴朗。由于喀斯特地区生境异质性强,土壤多存在于石沟、石缝中,土壤层较浅等原因,土壤样品收集难度高,在样方内按照 S 形采样方法随机设置 3 个土壤采样点。采样前,去除枯落物层与腐殖质层,然后采集表层(0—10 cm)土壤样品(35 个样地×3 重复),土壤样品包括原状土环刀以及 1 kg 左右原状土样。采用特制环刀(规格 60 cm³,内径 61.8 mm,高度 20 mm)收集环刀样品,用于测定土壤容重、土壤含水量、土壤孔隙度等土壤物理特征,以及土壤持水率、土壤持水量等土壤持水特征。

将采集的 1 kg 原状土样带回实验室,自然风干后去除植物根系、石砾及动植物残体,并过 2 mm 筛后,用于土壤粒径分析。土壤粒径组成利用激光衍射

法(Bettersize 2600 激光粒度分析仪)测定,并根据土壤粒度分级标准^[30]计算砂粒($S>50\ \mu\text{m}$)、粗粉粒($C_s, 50\sim20\ \mu\text{m}$)、细粉粒($F_s, 20\sim2\ \mu\text{m}$)和黏粒($C_p, <2\ \mu\text{m}$)含量。

1.3 数据统计与分析

1.3.1 土壤物理性质与土壤粒径概率密度 土壤含水量(C_w ,%)、土壤容重(B_D ,g/cm³)、土壤总孔隙度(P_s ,%)、毛管孔隙度(P_c ,%)、非毛管孔隙度(P_{nc} ,%)等土壤物理性质采用环刀法^[31]测定并计算。土壤粒径概率密度为土壤粒径在百分位点上的粒径特征在总土壤粒径总范围内的分布状态。

1.3.2 土壤持水率与土壤持水量 土壤持水率包括最大持水率(R ,%),毛管持水率(R_c ,%)和非毛管持水率(R_{nc} ,%),计算公式为:

$$R = \frac{M_{\max} - M_0}{M_0} \quad (1)$$

$$R_c = \frac{M_c - M_0}{M_0} \quad (2)$$

$$R_{nc} = \frac{M_{nc} - M_0}{M_0} \quad (3)$$

式中: M_{\max} 为环刀饱和重(g); M_0 为环刀重加烘干土重(g); M_c 为毛管持水重(g); M_{nc} 为非毛管持水重(g)。

喀斯特地区石漠化严重,土被割裂,土壤分布极其不稳定,其容量的确定是造成喀斯特地区与常态地貌地区土壤持水能力差异的主要原因。根据喀斯特岩石裸露较多的特点,应除去岩石裸露的面积,根据各标准样地实测的岩石裸露率对土壤持水量 W 修正^[32],修正后计算公式为:

$$W = (1 - P) \times R \times B_D \times 1000 \quad (4)$$

式中: W 为持水量(t/hm²); P 为岩石裸露率(%); R 为单位持水率(%); B_D 为土壤容重(g/cm³)。

1.3.3 土壤综合持水能力 通过主成分分析法,对土壤最大持水率、土壤毛管持水率、土壤非毛管持水率、土壤饱和持水量、土壤毛管持水量、土壤非毛管持水量等表征土壤持水能力的指标进行权重分析,得到各主成分得分系数与贡献率,计算各地形的土壤综合持水能力(SCS),计算公式为:

$$SCS = \sum_i^n S_i \left(\sum_e^m F_e \times W_e \right) \quad (5)$$

式中: S_i 表示第 i 个主成分的方差贡献率; F_e 表示第 i 主成分中第 e 个成分因子的成分得分系数; W_e 表示第 i 主成分中第 e 个成分因子的实测值。将 SCS 值参照 3 级评价法^[33],将茂兰喀斯特森林土壤持水地区分为高度持水地区($SCS>30$),中度持水地区($10\leq SCS\leq 30$),低度持水地区($SCS<10$)。

1.3.4 数据处理 采用 Excel 2019 和 SPSS 21.0 对数据进行基础统计分析。采用 R 语言中的“ggplot2”包^[34]的“desity”函数进行土壤粒径大小的概率密度分析。采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)检验不同地形部位下各类持水量、持水率、土壤物理结构的差异。采用 Pearson 相关性分析检验土壤结构、地形因子、林分特征与土壤持水能力的相关性。土壤持水性能指标排序利用 SPSS 软件进行 PCA 分析。采用 R 语言中的“vegan”包^[35]对土壤持水能力影响因素进行冗余分析。所有图表制作采用 Excel 2019, Origin 2021 和 R 4.3.2 完成。

2 结果与分析

2.1 土壤物理特性

由表 1 可知,坡向对 B_D 有显著影响($F=5.054$, $p=0.003$),西坡 B_D 值最高,达到 1.13 g/cm^3 。坡位对 B_D ($F=3.303$, $p=0.05$)具有显著影响,对 C_w ($F=13.429$, $p=0.000$); P_c ($F=8.294$, $p=0.001$); P_s ($F=8.254$, $p=0.001$)等存在极显著影响。随坡位下降, C_w 分别升高 24.7%和 101.0%, P_c 分别升高 5.4%和 29.3%, P_s 分别升高 3.0%和 25.2%; B_D 和

P_n 随坡位的下降而降低, B_D 分别下降 3.1%和 13.3%, P_n 分别下降 22.9%,18.8%。海拔对 C_w ($F=7.669$, $p=0.002$); P_c ($F=6.150$, $p=0.005$)与 P_s ($F=5.500$, $p=0.009$)具有极显著性影响。随海拔升高, B_D 分别增加了 5.2%,14.1%, P_n 分别增加了 15.5%,39.3%, C_w 分别降低了 29.8%和 50.5%, P_c 分别降低了 17.8%和 23.6%, P_s 分别降低了 16.2%和 20.6%。

对于土壤机械组成而言(表 1),坡向对 C_s 含量具有显著影响($F=2.759$, $p=0.046$), C_s 含量最低为无坡向部位(31.4%),最高为北坡(35.91%)。坡位对 S 含量($F=9.219$, $p=0.001$); F_s 含量($F=18.895$, $p=0.000$)和 C_p 含量($F=6.813$, $p=0.003$)具有极显著影响。随坡位下降, S 和 C_s 含量升高, F_s 和 C_p 含量降低。海拔对 S 含量($F=7.495$, $p=0.002$); F_s 含量($F=11.300$, $p=0.000$)具有极显著影响,对 C_p 含量($F=3.326$, $p=0.049$)具有显著影响。随海拔下降, S 和 C_s 含量升高, F_s 和 C_p 含量降低。总体而言, S 含量变化范围为 16.0%~31.6%, C_s 含量变化范围为 31.0%~38.3%, F_s 含量变化范围为 27.6%~44.2%, C_p 含量变化范围为 4.8%~8.0%。根据土壤粒径大小的概率密度分布发现(图 2),茂兰喀斯特土壤粒径大小以 2~50 μm 颗粒为主。

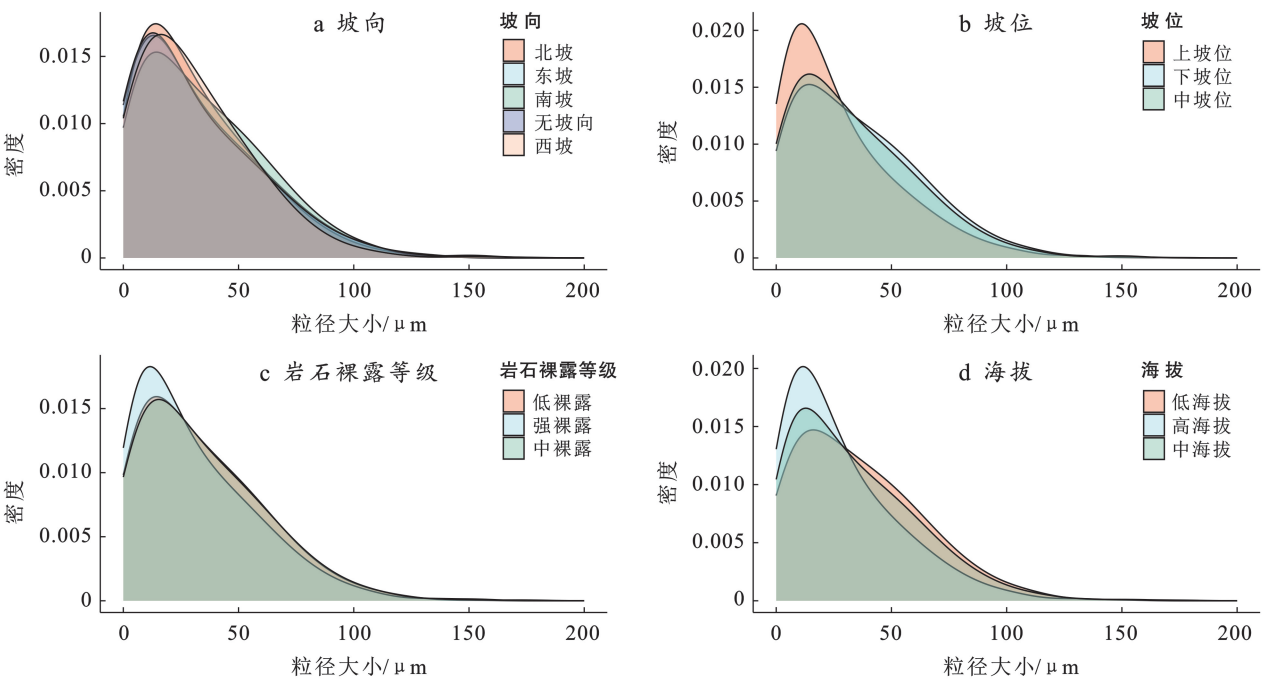


图 2 不同地形部位茂兰喀斯特森林表层土壤粒径密度分布

Fig.2 Distribution of particle size density in surface soil of Maolan karst forest in different topographic sites

2.2 土壤持水能力特征

2.2.1 土壤持水率 由图 3 可知,坡向梯度上, R 变化范围为 19.0%~32.2%, R_c 变化范围为 17.1%~

30.2%;西坡 R 和 R_c 与其他坡向具有显著性差异,具有最低的 R 值(19.0%)和 R_c 值(17.1%)。坡位梯度上, R 和 R_c 都随着坡位的下降而降低,坡位对 R 和

R_c 产生显著影响; R 变化范围为 23.7%~34.6%, R_c 变化范围为 21.7%~32.7%。海拔梯度上, R 和 R_c 都随着海拔的下降而升高, 海拔对 R 和 R_c 产生显著影响; R 变化范围为 24.1%~35.5%, R_c 变化范围为 22.1%~33.8%。

R_{nc} 在各地形的不同部位间不具有显著差异, 变化幅度较小, 总体区间为 1.6%~2.2%。总体来看, R 和 R_c 最高值表现在低海拔 ($R=35.5\%$, $R_c=33.8\%$) 地区, R 和 R_c 低值表现在西坡 ($R=19.0\%$, $R_c=17.1\%$) 地区。

表 1 供试土壤样品物理特性
Table 1 Soil physical characteristics of tested samples

类型	分类	样本量	C_w	B_D	P_{nc}	P_c	P_s	S	C_S	F_S	C_P
坡 向	北 坡	33	18.86±7.48 ^{ab}	0.97±0.12 ^a	1.69±0.50	24.09±4.05	25.79±4.26	24.55±8.43	35.91±3.56 ^a	33.18±5.62	5.45±1.13
	东 坡	15	24.06±10.85 ^a	0.93±0.16 ^{ac}	1.67±0.85	25.79±5.29	27.46±4.49	24.80±11.17	32.20±3.7 ^{ab}	35.60±9.81	6.60±1.82
	南 坡	33	24.85±8.86 ^a	0.82±0.09 ^{bc}	1.67±0.91	24.55±5.02	26.16±5.08	28.27±5.26	35.18±2.09 ^{ab}	30.18±3.66	5.36±1.12
	西 坡	9	8.79±7.22 ^{ab}	1.13±0.09 ^b	2.11±1.05	19.41±3.45	21.51±3.01	21.00±4.36	34.88±4.49 ^{abc}	33.67±4.04	6.00±1.00
	无坡向	15	24.29±10.68 ^a	0.87±0.13 ^a	1.56±0.55	24.99±6.69	26.55±6.26	25.60±13.72	31.40±6.35 ^{bd}	35.20±13.55	6.80±3.03
坡 位	上坡位	30	14.23±8.01 ^a	0.98±0.09 ^a	1.97±0.74	21.21±5.28 ^{ab}	23.18±4.95 ^{ab}	18.10±4.91 ^a	33.00±4.99	40.80±6.34 ^a	7.20±1.81 ^a
	中坡位	30	17.75±7.83 ^a	0.95±0.16 ^a	1.52±0.70	22.37±2.65 ^{ab}	23.88±2.83 ^{ab}	26.00±6.62 ^b	35.70±2.91	31.90±4.82 ^b	5.40±1.17 ^b
	下坡位	45	28.62±6.39 ^b	0.85±0.14 ^b	1.60±0.73	27.43±4.00 ^{abc}	29.03±3.91 ^{abc}	30.27±8.17 ^b	35.20±3.71	28.33±4.06 ^{bc}	5.20±1.21 ^{bc}
岩石裸露等级	低裸露	33	22.71±11.05	0.93±0.18	1.66±0.62	24.66±5.20	26.32±5.00	28.45±8.81	35.18±4.33	30.00±6.74 ^a	5.36±1.50
	中裸露	24	24.82±6.43	0.91±0.11	1.62±0.69	26.12±3.79	27.74±3.92	27.00±8.4	35.75±3.54	31.00±5.45 ^a	5.25±1.04
	高裸露	48	18.80±9.66	0.92±0.14	1.73±0.84	22.94±5.09	24.66±4.87	22.81±7.88	33.88±3.98	35.88±7.41 ^b	6.44±1.79
海 拔	低海拔	27	29.51±5.92 ^a	0.87±0.17	1.43±0.58	28.38±3.36 ^a	29.81±3.01 ^a	30.89±9.02 ^a	35.22±4.32	27.78±4.02 ^a	5.11±1.05 ^a
	中海拔	51	20.71±8.91 ^b	0.91±0.14	1.65±0.74	23.33±4.10 ^b	24.98±4.33 ^b	26.71±7.03 ^a	34.82±3.91	31.82±6.00 ^a	5.65±1.66 ^a
	高海拔	27	14.62±8.40 ^c	0.99±0.09	1.99±0.79	21.68±5.37 ^{bc}	23.67±4.99 ^{bc}	18.11±5.21 ^b	34.00±4.09	40.11±6.31 ^b	6.89±1.62 ^b

注:表中数据为平均值±标准差。不同小写字母表示各指标在各地形的不同部位中差异达到显著水平($p\leq 0.05$)。 B_D 为土壤容重(g/cm^3); P_s 为土壤总孔隙度(%); P_c 为毛管孔隙度(%); P_{nc} 为非毛管孔隙度(%); C_w 为土壤含水量(%); S 为砂粒含量($>50\text{ }\mu\text{m}$, %); C_S 为粗粉粒含量($50\sim 20\text{ }\mu\text{m}$, %); F_S 为细粉粒含量($20\sim 2\text{ }\mu\text{m}$, %); C_P 为黏粒含量($<2\text{ }\mu\text{m}$, %)。

2.2.2 土壤持水量 由图 4 可知,除坡向外,其他各地形对土壤持水量均具有显著影响;各持水量指标在岩石裸露等级下的不同部位间达到极显著差异。 W_{\max} , W_c 和 W_{nc} 均随坡位、海拔、岩石裸露等级的下降而升高。坡向梯度上, W_{\max} 变化范围为 83.4~147.0 t/hm², W_c 变化范围为 78.4~140.1 t/hm², W_{nc} 变化范围为 5.1~8.3 t/hm²。坡位梯度上, W_{\max} 变化范围为 63.0~144.7 t/hm², W_c 变化范围为 57.5~136.9 t/hm², W_{nc} 变化范围为 5.0~7.7 t/hm²。岩石裸露梯度上, W_{\max} 变化范围为 42.9~182.92 t/hm², W_c 变化范围为 40.0~171.66 t/hm², W_{nc} 变化范围为 3.0~11.3 t/hm²。海拔梯度上, W_{\max} 变化范围为 66.8~161.68 t/hm², W_c 变化范围为 61.0~153.7 t/hm², W_{nc} 变化范围为 5.8~8.0 t/hm²。

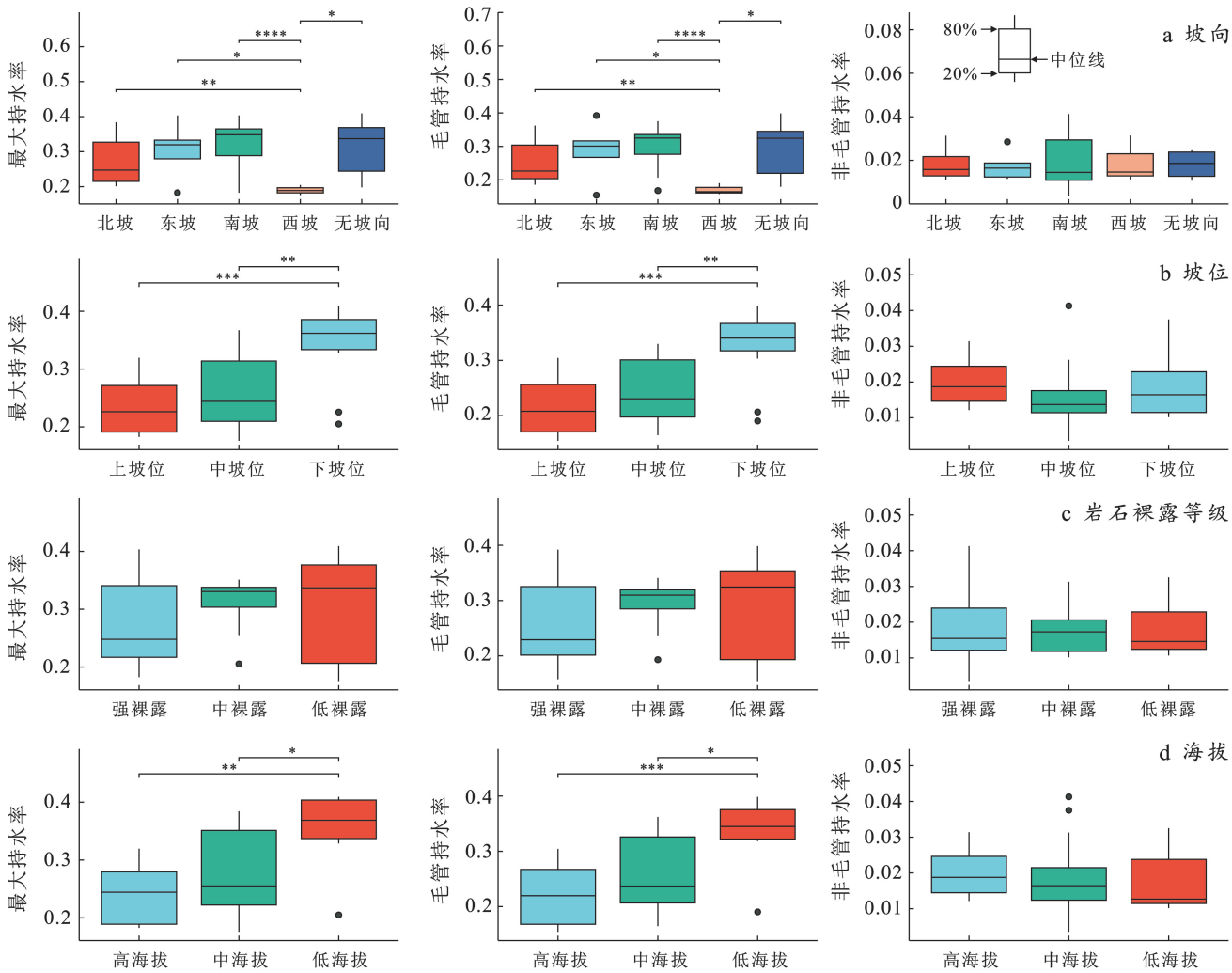
2.3 土壤持水能力的相关关系

由于受到环境条件的影响,土壤持水能力具有明显的异质性。通过对表征土壤持水能力各指标与表征土壤物理性质、地形特征、林分结构等因素的各指标之间进行相关分析,结果表明(表 2), R , R_c 与坡位、

C_w , P_c , P_s , S 含量等因子显著正相关,与海拔、 B_D 值、 F_S 含量、 C_P 含量、 S_D 显著负相关。 R_{nc} 与 P_{nc} 显著正相关。 W_{\max} , W_c 与坡位、 C_w , P_c , P_s , $MDBH$, MTH 显著正相关,与岩石裸露等级、 F_S 含量、 C_P 含量、 S_D 显著负相关。 W_{nc} 与 R_{nc} 显著正相关,与岩石裸露等级显著负相关。

2.4 土壤综合持水能力

为准确表征土壤持水能力,对土壤持水性能指标(R_c , R_{nc} , R , W_{\max} , W_c , W_{nc})进行主成分分析。结果表明(表 3),表征茂兰喀斯特森林表层土壤持水能力的因子可综合为 3 个主成分, PC_1 , PC_2 与 PC_3 对土壤持水能力解释的累计贡献率达到 98.03%。第一主成分方差贡献率为 42.71%, W_{\max} 和 W_c 对此主成分的贡献率最大;第二主成分的方差贡献率为 34.79%, R_c 和 R 对此主成分的贡献最大;第三主成分方差贡献率为 20.52%, R_{nc} 对此主成分贡献率最大。说明表征茂兰喀斯特森林表层土壤持水能力的第一因子为持水量(W_{\max} 和 W_c),第二因子为持水率(R_c 和 R),第三因子为 R_{nc} 。



注:图中组间差异不显著的数据不做标记;*表示差异显著, $p<0.05$;**表示差异极显著, $p<0.01$;***表示差异极显著, $p<0.001$ 。
***表示差异极显著, $p<0.0001$ 。下同。

图 3 不同地形部位茂兰喀斯特森林表层土壤持水率
Fig.3 Surface soil water holding rate of Moulant karst forest in different topographic sites

表 2 茂兰喀斯特森林土壤持水能力与地形、土壤结构、林分特征的相关性
Table 2 Correlation of soil water holding capacity with topography, soil structure and stand characteristics of Moulant karst forest

类 型	因 子	R	R_c	R_{nc}	W_{\max}	W_c	W_{nc}
地形特征	坡 向	0.074	0.070	0.045	0.136	0.142	-0.003
	坡 位	0.621**	0.631**	-0.030	0.515**	0.523**	0.231
	岩石裸露等级	-0.138	-0.143	0.036	-0.886**	-0.872**	-0.810**
	海 拔	-0.535**	-0.555**	0.128	-0.497**	-0.508**	-0.181
土壤物理性质	土壤含水量	0.955**	0.958**	0.061	0.455**	0.468**	0.121
	土壤容重	-0.760**	-0.739**	-0.258	-0.080	-0.086	0.043
	非毛管孔隙	-0.127	-0.235	0.930**	-0.132	-0.167	0.429*
	毛管孔隙	0.815**	0.841**	-0.157	0.483**	0.503**	0.046
	总孔隙	0.822**	0.833**	-0.020	0.479**	0.493**	0.113
	砂 粒	0.519**	0.528**	-0.033	0.300	0.306	0.107
	粗粉粒	-0.002	0.021	-0.202	0.278	0.290	0.009
	细粉粒	-0.519**	-0.538**	0.116	-0.429*	-0.441**	-0.115
	黏 粒	-0.436**	-0.460**	0.174	-0.342*	-0.357*	-0.019
林分特征	林分密度	-0.555**	-0.559**	-0.013	-0.626**	-0.630**	-0.367*
	平均胸径	0.311	0.311	0.028	0.506**	0.511**	0.276
	平均树高	0.087	0.094	-0.055	0.446**	0.448**	0.271

注: R 为最大持水率; R_c 为毛管持水率; R_{nc} 为非毛管持水率; W_{\max} 为饱和持水量; W_c 为毛管持水量; W_{nc} 为非毛管持水量。* 表示在 $p<0.05$ 水平显著相关; ** 表示在 $p<0.01$ 水平显著相关。

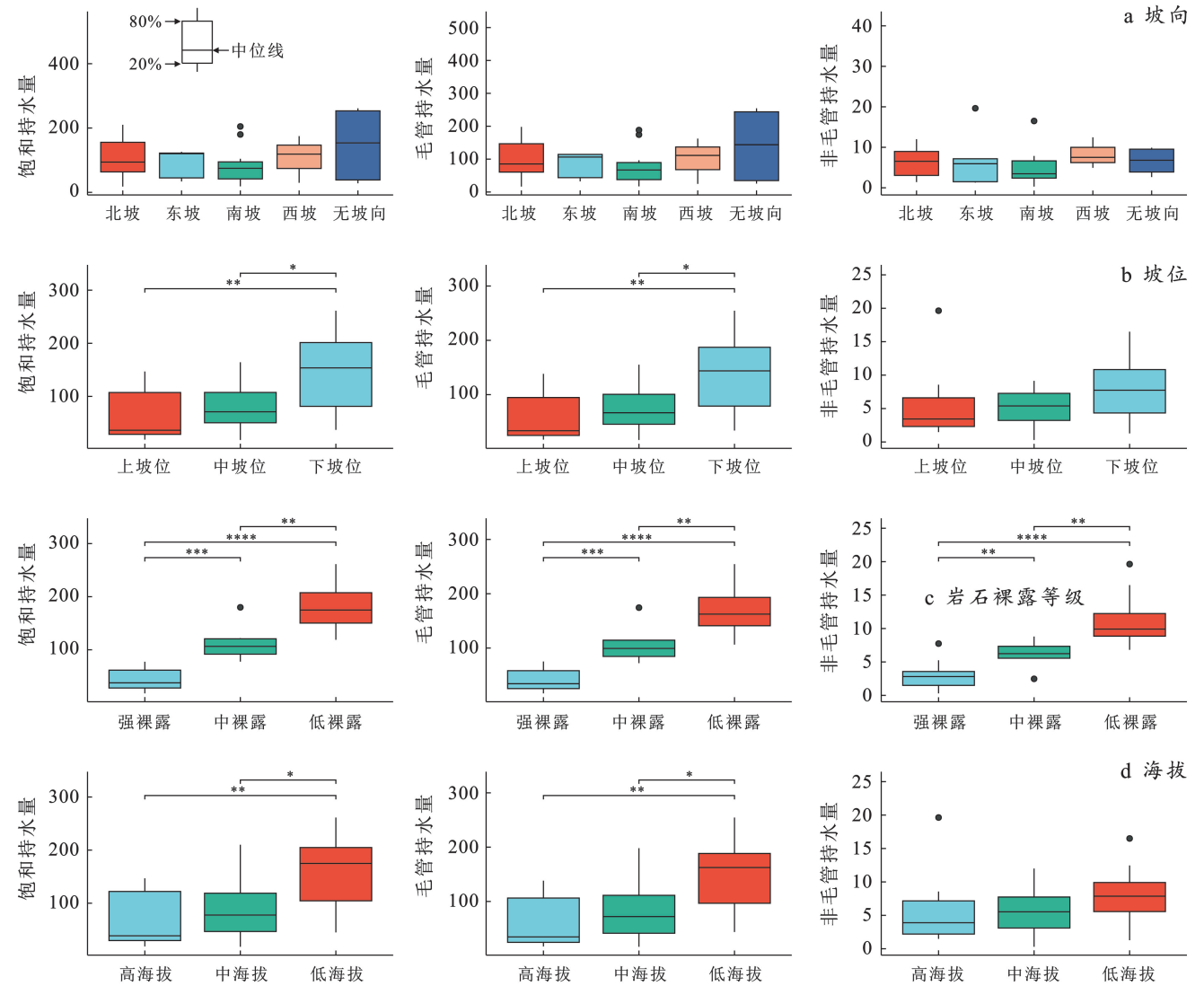


图 4 不同地形部位茂兰喀斯特森林表层土壤持水量

Fig.4 Surface soil water holding capacity of Maolan karst forest in different topographic sites

表 3 茂兰喀斯特森林土壤持水能力主成分分析			
Table 3 Principal component analysis of soil water holding capacity of Maolan karst forest			
变 量	PC ₁	PC ₂	PC ₃
特征值	2.563	2.087	1.231
方差/%	42.713	34.791	20.523
贡献率/%	42.713	77.504	98.027
土壤饱和持水量 W_{\max}	0.956	0.256	-0.089
土壤毛管持水量 W_c	0.944	0.274	-0.125
土壤非毛管持水量 W_{nc}	0.838	-0.093	0.476
毛管持水率 R_c	0.165	0.984	-0.021
最大持水率 R	0.161	0.982	0.091
非毛管持水率 R_{nc}	-0.018	0.069	0.986

对各地形土壤持水能力综合得分(表 4),排序前 5 的分别为低裸露、低海拔、无坡向、下坡位等地区,土壤综合持水能力相较于其他地区更好;而对于强裸露、上坡位、高海拔等地区,土壤综合持水能力明显较差。

表 4 茂兰喀斯特森林不同地形部位土壤综合持水能力评价					
Table 4 Evaluation of soil comprehensive water holding capacity in different terrain areas of Maolan karst forest					
排序	分类	得分	排序	分类	得分
1	低裸露	48.54	8	中海拔	23.99
2	低海拔	42.88	9	东 坡	23.82
3	无坡向	38.97	10	南 坡	22.20
4	下坡位	38.38	11	中坡位	21.05
5	中裸露	29.61	12	高海拔	17.83
6	西 坡	28.66	13	上坡位	16.80
7	北 坡	28.20	14	强裸露	11.46

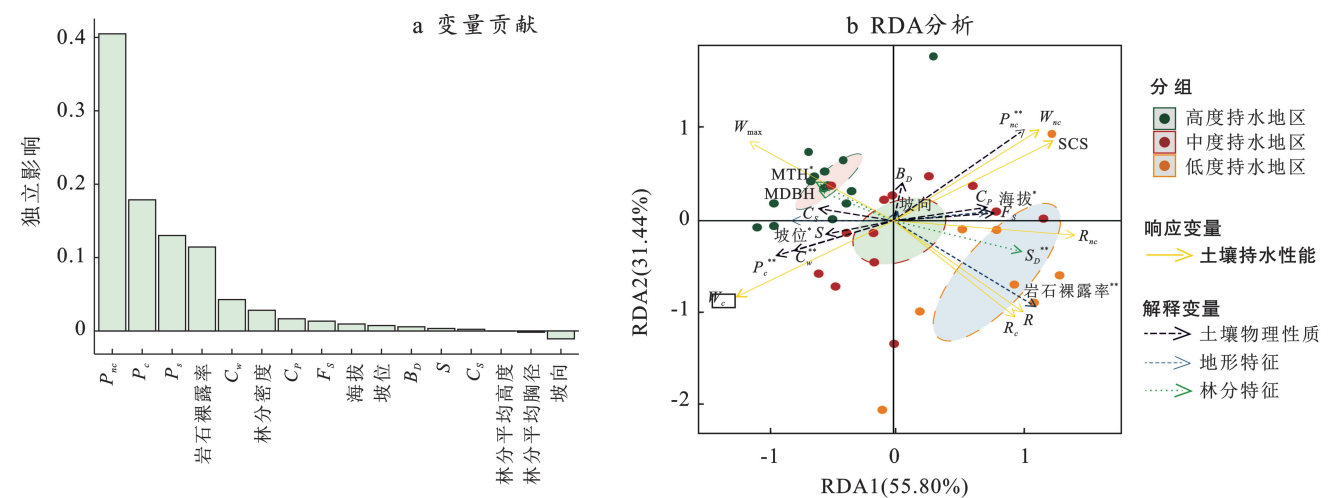
注:得分值为各类地形综合得分均值。

2.5 土壤持水能力的影响因素

以反映土壤持水性能指标(R_c , R_{nc} , R , W_{\max} , W_c , W_{nc} , SCS)为响应变量,以地形特征(坡向、坡位、岩石裸露等级、海拔)、土壤物理性质(C_w , B_D , P_c , P_s , P_{nc} , S , C_S , F_S , C_P)与林分特征(S_D , MTH, MDBH)为解释变量进行 RDA 分析。结果表明(图

5b),轴1轴2分别占总变异的55.8%和31.4%,累计方差贡献率达到87.9%,可以较好地反映土壤持水能力与土壤物理特性、地形特征和林分特征间的关系。RDA1轴主要反映岩石裸露等级, S_D , P_{nc} , F_S ,海拔, C_P 的变化,随着岩石裸露等级, S_D , P_{nc} , F_S ,海拔, C_P 的升高, R_c , R_{nc} , R , W_{nc} ,SCS均增加,而 W_{max} , W_c 均减小。RDA2轴主要反映 P_{nc} ,MTH, B_D 和MDBH的变化,随着 P_{nc} 的升高, R_c , R_{nc} , R , W_{nc} ,

SCS均增加, W_{max} , W_c 均降低;随着MTH,MDBH的升高, W_{max} , W_c 均升高, R_c , R_{nc} , R , W_{nc} ,SCS均降低;随着 B_D 的升高, W_{max} , W_{nc} ,SCS, R_{nc} 均增加, W_c , R_c , R 均减小。层次分割变量贡献(图5a)结果表明, P_{nc} 是影响土壤持水能力的主要土壤因子,贡献率为42.9%;岩石裸露等级是影响土壤持水能力的主要地形因子,贡献率为12.1%; S_D 是影响土壤持水能力的主要林分因子,贡献率为3.0%。



注:图5a中 B_D 为土壤容重; P_s 为土壤总孔隙度; P_c 为毛管孔隙度; P_{nc} 为非毛管孔隙度; C_w 为土壤含水量; S 为砂粒含量; C_S 为粗粉粒含量; F_S 为细粉粒含量; C_P 为黏粒含量。图5b中 R 为最大持水率; R_c 为毛管持水率; R_{nc} 为非毛管持水率; W_{max} 为饱和持水量; W_c 为毛管持水量; W_{nc} 为非毛管持水量;SCS为土壤综合持水能力;MDBH为林分平均胸径;MTH为林分平均树高; S_D 为林分密度。*,**分别表示在 $p<0.05$ 和 $p<0.001$ 水平显著相关。

图5 茂兰喀斯特森林表层土壤持水能力的主要影响因素

Fig.5 Main factors influencing water-holding capacity of surface soils in Maolan karst forest

3 讨论

3.1 茂兰喀斯特森林表层土壤持水能力的空间分布特征

地形部位的不同会使得土壤持水能力产生异性差异,土壤持水能力主要通过持水率和持水量体现。在本研究中,PCA分析结果表明,反映茂兰喀斯特森林表层土壤持水能力的第一因子为持水量(W_{max} 和 W_c),第二因子为持水率(R_c 和 R)。茂兰喀斯特森林表层土壤 R , R_c , W_{max} , W_c , W_{nc} 均随着坡位、海拔的下降以及岩石裸露等级的降低而升高。 W_{max} , W_c 在不同坡位、岩石裸露等级、海拔间均存在显著差异,而 W_{nc} 仅在岩石裸露等级间存在显著性差异。有研究表明在上坡位和高海拔地区,蒸发作用和根系耗水作用的双重影响增强了土壤水分的丧失^[36]。在茂兰喀斯特森林的上坡位、高海拔地区通常来说也具有更高岩石裸露率,太阳辐射强度的直接影响强度高,进而导致森林表层土壤水分蒸发度高,使得土壤持水

量与持水率低。在茂兰喀斯特森林中, R 在西坡具有最低值,且与其他坡向差异显著,而持水量却没有显著性差异。一般而言, B_D 与土壤孔隙是影响土壤水源涵养能力的重要参数,土壤孔隙度为土壤水分提供了贮存空间和流动通道, B_D 越小,孔隙度越高,持水能力越强^[37]。茂兰喀斯特森林 R , R_c 与 C_w , P_c , P_s , S 显著正相关,与 B_D , F_S , C_P 显著负相关。西坡地区具有最低的 C_w 值与 B_D 值,其可能是导致西坡地区 R 低值的原因之一。另一方面,潮湿气流的自东向西的运行状态影响土壤水分吸收,山谷风运行到山脊顶部时,已成为极度缺水的干冷空气,当再次进行西坡下行时,海拔降低而温度增高,形成干热空气,会进一步从坡面上吸收水分,从而使得西坡持水率降低,更加缺水干旱^[38]。虽然坡向影响太阳辐射强度,可以对能量吸收产生差异,影响了喀斯特森林土壤持水速率,但对持水量的影响并不重要^[39]。茂兰喀斯特森林 R_{nc} 在不同地形部位间不具有明显的变化性和差异性。其原因可能是 R_{nc} 与 P_{nc} 显著相关,而在茂

兰喀斯特森林表层土壤中,从各个地形分类维度上, P_{nc} 值均相接近且不具有明显差异。有研究^[4]表明, P_c 影响动态水调节能力, P_{nc} 影响静态蓄水能力。茂兰喀斯特森林表层土壤 P_{nc} 在各地形部位差异变化不明显,而 P_c 差异较大。表明茂兰喀斯特森林表层土壤静态水源涵养能力较差;动态水源调节能力在纵向由于土壤漏失作用可能较强,横向由于岩石阻隔可能较差。

从土壤综合持水能力来看,在低裸露、低海拔、无坡向、下坡位等地区,茂兰喀斯特森林表层土壤综合持水能力较高,强裸露地区土壤综合持水能力较低。这与李芹^[22]、安明志等^[12]人在喀斯特区土壤水分格局研究结果相似。说明喀斯特森林土壤综合持水能力在不同地形部位间具有差异。但其土壤持水能力与非喀斯特地貌森林^[40]相比较低。其原因可能是喀斯特土壤矿质养分元素含量、土壤总量少、酸不溶物少等原因限制了植物生长^[41],凋落物量低于常态地貌森林,土壤有机质输入量少,土壤结构不利于水分维持。例如,喀斯特森林树种多为深根系树种,增强了土壤孔隙^[42],但茂兰喀斯特森林 B_D 值、土壤孔隙度均较低,土壤以粗砂砾与细粉粒($2\sim 50\ \mu\text{m}$)颗粒为主,土壤砂粒化程度高,影响了土壤持水的有效容量。

3.2 茂兰喀斯特森林表层土壤持水能力的影响因素

相关性分析结果表明,茂兰喀斯特森林表层土壤持水量与岩石裸露等级、林分特征的相关性更高, MDBH, MTH 与 W_{\max} , W_c 显著正相关, S_D 、岩石裸露等级与 W_{\max} , W_c , W_{nc} 显著负相关。研究表明,森林空间结构完整性的提高有益于提高土壤服务能力^[43]。一方面,较高的 MDBH, MTH 说明森林成熟度高,郁闭度较大,其林下可能具备较厚的枯枝落叶层,进而导致土壤蒸发量小,提高土壤持水量。另一方面,喀斯特森林植物根系粗壮繁茂,根系活动或根系死亡增大了 P_{nc} ,改善了土壤结构,进而提高土壤持水。而土壤持水率与地形特征、土壤物理特性的相关度更高, R , R_c 与坡位, C_w , P_c , P_s , S 含量等因子显著正相关,与海拔, B_D 值、 F_s 含量、 C_P 含量、 S_D 显著负相关。研究^[44]表明, B_D , C_w , 土壤孔隙度,土壤机械组成等影响土壤透气状况、生物活动、物质循环和水源涵养等功能。在喀斯特植被恢复地区, B_D 值的减小与孔隙度增大有益于增强土壤持水^[45]。茂兰喀斯特森林属于植被恢复的顶极阶段,说明到了喀斯特顶极阶段,土壤结构越来越有利于空气与水分的吸收和运输,土壤透气性高。根据冗余分析结果,茂兰喀斯特森林土壤持水能力受到地形因子、土壤物理性质、林分结构的显著影响。岩石裸露等级是影响茂兰

喀斯特森林表层土壤持水能力的主要地形因素,林分密度是影响茂兰喀斯特森林表层土壤持水能力的主要林分因素;土壤孔隙度是主要土壤影响因素,其中 P_{nc} 的影响作用最高,贡献率达到了 42.9%。这与常态地貌森林中非毛管孔隙对土壤水分涵养能力贡献较大的研究结果一致^[46]。

4 结论

茂兰喀斯特森林表层土壤持水能力在不同地形特征部位具有显著性差异,西坡持水率最低,持水量随坡位、海拔的升高和岩石裸露等级的降低呈现明显的上升趋势,综合持水能力以低裸露、低海拔地区较好。这表征茂兰喀斯特森林表层土壤综合持水能力的第一因子为持水量(W_{\max} 和 W_c),第二因子为持水率(R_c 和 R)。土壤持水率与地形特征与土壤物理特性的相关性强,而对持水量与林分特征的相关性更强。 P_{nc} 是影响茂兰喀斯特森林表层土壤持水能力的主要因素。

致谢:感谢茂兰国家级自然保护区管理局提供的帮助与支持。

参考文献 (References)

- [1] 吴溪. 中国大陆森林水源涵养空间格局及其影响因素 [D]. 山东 青岛: 山东科技大学, 2019.
Wu Xi. Spatial distributions and factors affecting of forest water conservation in Mainland China [D]. Qingdao, Shandong: University of Science and Technology, 2019.
- [2] 付鹏程, 胡广录, 巩炜, 等. 河西走廊沙漠—绿洲过渡带固沙植物根区土壤物理性质及持水特性 [J]. 土壤通报, 2021, 52(4): 811-820.
Fu Pengcheng, Hu Guanglu, Gong Wei, et al. Soil physical properties and water retention characteristics of the sand-fixing plant root zone in the desert-oasis transition area of Gansu corridor [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2021, 52(4): 811-820.
- [3] 于忠亮, 付世萃, 王梓默, 等. 吉林省辽河流域不同植被类型土壤水源涵养能力分析 [J]. 中国水土保持, 2022(7): 51-55.
Yu Zhongliang, Fu Shicui, Wang Zimo, et al. Water conservation capacity of different vegetation types in Liaohe River basin of Jilin Province [J]. Soil and Water Conservation in China, 2022(7): 51-55.
- [4] 王明慧, 黄来明, 陈翠柏. 西藏高寒区不同土地利用方式下土壤持水能力差异及其影响因素 [J]. 应用生态学报, 2022, 33(12): 3287-3293.
Wang Minghui, Huang Laiming, Chen Cuibai. Difference of soil water holding capacity and its influencing

- factors under different land use types in the alpine region of Tibet, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019,33(12):3287-3293.
- [5] Yang Jing, Chen Hongsong, Nie Yunpeng, et al. Dynamic variations in profile soil water on karst hillslopes in Southwest China [J]. Catena, 2019,172:655-663.
- [6] 郭海云,王根绪,孙守琴.氮添加对亚高山针叶林土壤结构及水分入渗性能的影响[J].水土保持学报,2023,37(1):238-245.
- Guo Haiyun, Wang Genxu, Sun Shouqin. Effects of nitrogen addition on soil structure and water infiltration of subalpine coniferous forest [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023,37(1):238-245.
- [7] 张甜,李龙龙.中条山不同森林类型土壤和枯落物的水文性能分析[J].森林工程,2022,38(3):32-39.
- Zhang Tian, Li Longlong. Hydrological characteristics of soil and litter of different forest types in Zhongtiao Mountain [J]. Forest Engineering, 2022,38(3):32-39.
- [8] 徐亚莉,张明芳,李强,等.基于植被和环境因子的亚高山森林土壤水源涵养功能空间尺度上推模型构建:以岷江上游杂谷脑流域为例[J].生态学报,2023,43(13):5614-5626.
- Xu Yali, Zhang Mingfang, Li Qiang, et al. Upscaling subalpine forest soil water-holding capacity based on vegetation and environmental factors: An example of the Zagunao River watershed in the upper reach of the Minjiang River in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(13):5614-5626.
- [9] 张继光,陈洪松,苏以荣,等.喀斯特峰丛洼地坡面土壤水分空间变异研究[J].农业工程学报,2006,22(8):54-58.
- Zhang Jiguang, Chen Hongsong, Su Yirong, et al. Spatial variability of soil moisture on hillslope in clusterpeak depression areas in Karst Region [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(8):54-58.
- [10] 张继光,陈洪松,苏以荣,等.喀斯特地区典型峰丛洼地表层土壤水分空间变异及合理取样数研究[J].水土保持学报,2006,20(2):114-117,134.
- Zhang Jiguang, Chen Hongsong, Su Yirong, et al. Spatial variability of soil moisture content and reasonable sampling number in cluster-peak depression areas of Karst Region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006,20(2):114-117.
- [11] 宋同清,彭晚霞,曾馥平,等.喀斯特峰丛洼地不同植被类型土壤水分的空间异质性分析:以广西环江毛南族自治县西南峰丛洼地地区为例[J].中国岩溶,2010,29(1):6-11.
- Song Tongqing, Peng Wanxia, Zeng Fuping, et al. Spatial heterogeneity of soil moisture under different vegetation types in peak-cluster depression: A case study in southwest cluster peak depressions region of Maonan Autonomus County, Guangxi [J]. Carsologica Sinica, 2010,29(1):6-11.
- [12] 安明态.喀斯特森林土壤水分和养分格局及其植物物种多样性维持机制研究[D].贵州 贵阳:贵州大学,2019.
- An Mingtai. Soil water and nutrient patterns and maintenance mechanisms of plant species diversity in karst forest [D]. Guiyang, Guizhou: Guizhou University, 2019.
- [13] 程星,於芳.喀斯特土壤水分变化研究[J].地球与环境,2005(增刊1):139-143.
- Cheng Xing, Yu Fang. The studies of soil moisture change in the Karst Area [J]. Earth and Environment, 2005,33(Suppl.1):139-143.
- [14] 王耀鑫,高家勇,张玉珊,等.喀斯特流域水源涵养功能时空分异及其对景观格局的响应[J].水土保持学报,2023,37(2):169-178.
- Wang Yaixin, Gao Jiayong, Zhang Yushan, et al. Spatial and temporal differentiation of water conservation function in karst basin and its response to landscape pattern [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023,37(2):169-178.
- [15] Sheng Maoyin, Xiong Kangning, Wang Linjiao, et al. Response of soil physical and chemical properties to rocky desertification succession in South China Karst [J]. Carbonates and Evaporites, 2018,33(1):15-28.
- [16] 朱守谦.喀斯特森林生态研究(Ⅲ)[M].贵州 贵阳:贵州科技出版社,2003.
- Zhu Shouqian. Research on Forest Ecology in Karst (Ⅲ) [M]. Guiyang, Guizhou: Guizhou Science and Technology Press, 2003.
- [17] 朱守谦.喀斯特森林生态研究(I)[M].贵阳:贵州科技出版社,1993.
- Zhu Shouqian. Research on Forest Ecology in Karst(I) [M]. Guizhou Guiyang: Guizhou Science and Technology Press, 1993.
- [18] 李生,任华东,姚小华.西南喀斯特石漠化地区旱季土壤水分对裸岩的响应[J].生态学杂志,2012,31(12):3174-3178.
- Li Sheng, Ren Huadong, Yao Xiaohua. Responses of soil moisture to bare rocks in dry season in karst rocky desertification region of Southwest China during dry season [J]. Chinese Journal of Ecology, 2012,31(12):3174-3178.
- [19] 王玉娟,杨胜天,温志群,等.贵州典型喀斯特灌丛草坡类型区土壤水分及其影响因子研究[J].北京师范大学学报(自然科学版),2008,44(5):529-532.
- Wang Yujuan, Yang Shengtian, Wen Zhiqun, et al. Soil moisture and its contributing factors at the shrub-grass zone in Karst regions [J]. Journal of Beijing Normal

- University (Natural Science), 2008,44(5):529-532.
- [20] 李孝良,陈效民,周炼川,等.西南喀斯特石漠化过程对土壤水分特性的影响[J].水土保持学报,2008,22(5):198-203.
- Li Xiaoliang, Chen Xiaomin, Zhou Lianchuan, et al. Soil moisture characteristics and their affecting factors in the rocky desertification process of karst regions, Southwest China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008,22(5):198-203.
- [21] 程燕芳,王嘉学,许路艳,等.云南高原喀斯特山原红壤退化中的表层土壤水分变异[J].江苏农业科学,2015(11):433-436,437.
- Cheng Yanfang, Wang Jiaxue, Xu Luyan, et al. Variation of surface soil water in red soil degradation of karst mountains in Yunnan Plateau [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2015(11):433-436,437.
- [22] 李芹.白云岩喀斯特山地生境特征与植物物种多样性:以贵州施秉世界自然遗产地为例[D].贵州 贵阳:贵州师范大学:2020.
- Li Qin. Habitat characteristics and plant species diversity of dolomite karst mountain: A case study of Shibing World Natural Heritage Site, Guizhou Province [D]. Guiyang, Guizhou: Guizhou Normal University, 2020.
- [23] 蒋太明.贵州喀斯特山区黄壤水分动态及其影响因素[D].重庆:西南大学,2007.
- Jiang Taiming. Water dynamics and influencing factors of yellow soil in karst mountainous area of Guizhou [D]. Chongqing: Southwest University, 2007.
- [24] 朱守谦,陈正仁,魏鲁明.退化喀斯特森林自然恢复的过程和格局[J].贵州大学学报(农业与生物科学版),2002,21(1):19-25.
- Zhu Shouqian, Chen Zhengren, Wei Luming. The process and pattern of natural restoration in degraded karst forest [J]. Journal of Guizhou University (Agricultural and Biological Sciences Edition), 2002,21(1):19-25.
- [25] 周政贤.茂兰喀斯特森林科学考察集[M].贵州 贵阳:贵州人民出版社,1987.
- Zhou Zhenxian. Collection of Scientific Investigation of Maolan Karst Forest [M]. Guiyang, Guizhou: Guizhou People's Publishing House, 1987.
- [26] 刘方,王世杰,罗海波,等.喀斯特森林生态系统的小生境及其土壤异质性[J].土壤学报,2008,45(6):1055-1062.
- Liu Fang, Wang Shijie, Luo Haibo, et al. Micro-habitats in Karst forest ecosystem and variability of soils [J]. Acta Pedologica Sinica, 2008,45(6):1055-1062.
- [27] 余江洪,安明志,张央,等.茂兰喀斯特森林植物物种丰富度的垂直分布特征及环境解释[J].西北植物学报,2023,43(2):326-334.
- Yu Jianghong, An Mingtai, Zhang Yang, et al. Vertical distribution characteristics and environmental interpretation of plant species richness in Maolan karst forest [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2023,43(2):326-334.
- [28] 王俊丽.西南喀斯特森林植物多样性和功能性状的纬度格局研究[D].广西 南宁:南宁师范大学,2020.
- Wang Junli. Latitudinal pattern of plant diversity and functional traits in southwest karst forest [D]. Nanning, Guangxi: Nanning Normal University, 2020.
- [29] 魏兴琥,徐喜珍,雷俐,等.石漠化对峰丛洼地土壤有机碳储量的影响:以广东英德市岩背镇为例[J].中国岩溶,2013,32(4):371-376.
- Wei Xinghu, Xu Xizhen, Lei Li, et al. The effect of rocky desertification on the soil's organic carbon storage in karst peak-cluster: A case study in Yanbei Town, Yingde City, Guangdong Province [J]. Carsologica Sinica, 2013,32(4):371-376.
- [30] 徐昕,马伟胜,代静玉,等.增温条件下不同土壤粒级有机碳和全氮的分布[J].水土保持通报,2018,38(5):77-82.
- Xu Xin, Ma Weisheng, Dai Jingyu, et al. Distribution of organic carbon and total nitrogen in different soil grain sizes under temperature increase [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018,38(5):77-82.
- [31] 刘一霖,温娅檬,张玉,等.川西亚高山 6 种彩叶林群落土壤持水动态特征[J].应用与环境生物学报,2021,27(3):648-656.
- Liu Yilin, Wen Yameng, Zhang Yu, et al. Soil water-holding dynamic characteristics of six colored-leaf forest communities in the subalpine region of Western Sichuan [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2021,27(3):648-656.
- [32] 陈萍,周运超.高原喀斯特土壤养分容量及其林木持续性研究[J].地球与环境,2017,45(1):32-37.
- Chen Ping, Zhou Yunchao. Soil nutrient capacity and forest tree sustainability in Plateau Karst Region [J]. Earth and Environment, 2017,45(1):32-37.
- [33] 王旭,韩天宇,阮璐坪,等.板根对海南岛吊罗山热带低地雨林土壤理化性质的影响[J].应用与环境生物学报,2022,28(3):751-758.
- Wang Xu, Han Tianyu, Ruan Luping, et al. Effects of buttressed roots on soil physical and chemical properties of soil in lowland rainforests of Diaoluoshan, Hainan, China [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2022,28(3):751-758.
- [34] Steenwyk J L, Rokas A. Ggpubfigs: colorblind friendly color palettes and ggplot 2 graphic system extensions for publication quality scientific figures [J]. Microbiol-

- ogy Resource Announcements, 2021,10(44):e87121.
- [35] Oksanen J. Vegan: ecological diversity [J]. R Project, 2013,368(1):11.
- [36] Fan Jun, Wang Quanjiu, Jones S B, et al. Soil water depletion and recharge under different land cover in China's Loess Plateau [J]. Ecohydrology, 2016,9(3): 396-406.
- [37] 刘西刚,王勇辉,焦黎.夏尔希里自然保护区典型植被土壤水源涵养功能探究[J].水土保持学报,2019,33(3): 121-128.
- Liu Xigang, Wang Yonghui, Jiao Li. Study on soil water conservation function of typical vegetation in Xialxili nature reserve [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019,33(3):121-128.
- [38] Mei Xuemei, Zhu Qingke, Ma Lan, et al. The spatial variability of soil water storage and its controlling factors during dry and wet periods on loess hillslopes [J]. Catena, 2018,162:333-344.
- [39] 张晓梅.陇东黄土高原中沟小流域刺槐人工林土壤水分特征研究[D].甘肃 兰州:甘肃农业大学:2019.
- Zhang Xiaomei. Study on soil water characteristics of *Robinia acacia* plantation in Zhonggou Small Watershed of Longdong Loess Plateau [D]. Lanzhou, Gansu: Gansu Agricultural University, 2019.
- [40] 姜霞,吴鹏,郭金鹏,等.雷公山自然保护区森林土壤的持水性能及其海拔响应[J].江苏农业科学,2019,47(4):273-277.
- Jiang Xia, Wu Peng, Guo Jinpeng, et al. Water holding capacity and altitudinal response of forest soil in Leigongshan Nature Reserve [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019,47(4):273-277.
- [41] 韩美荣,宋同清,彭晚霞,等.喀斯特峰丛洼地土壤矿物质的组成特征与作用[J].应用生态学报,2012,23(3): 685-693.
- Han Meirong, Song Tongqing, Peng Wanxia, et al. Compositional characteristics and roles of soil mineral substances in depressions between hills in Karst Region [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012,23(3): 685-693.
- [42] 杜姣姣,周运超,白云星,等.阔叶树种引入后马尾松人工林土壤水文物理性质研究[J].水土保持研究,2021, 28(4):105-112.
- Du Jiaojiao, Zhou Yunchao, Bai Yunxing, et al. Research of soil hydrophysical properties of pinus massoniana plantation after the introduction of broad-leaved tree species [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021,28(4):105-112.
- [43] Xiong Kangning, Kong Lingwei, Yu Yanghua, et al. The impact of multiple driving factors on forest ecosystem services in karst desertification control [J]. Frontiers in Forests and Global Change, 2023, 6(6): 1220436.
- [44] Xiang Ting, Qiang Fangfang, Liu Guangquan, et al. Soil quality evaluation of typical vegetation and their response to precipitation in loess hilly and gully areas [J]. Forests, 2023,14(9).
- [45] 杨牧蓉.滇东南喀斯特地区石漠化植被恢复过程中的生态效应研究[D].云南 昆明:云南大学,2022.
- Yang Muron. Ecological effects of vegetation restoration in karst area of Southeast Yunnan Province [D]. Kunming, Yunnan: Yunnan University, 2022.
- [46] 吴庆贵,邹利娟,吴福忠,等.涪江流域丘陵区不同植被类型水源涵养功能[J].水土保持学报,2012,26(6): 254-258.
- Wu Qinggui, Zou Lijuan, Wu Fuzhong, et al. Water conservation capacity of five main forest in the hilly area of Fujiang River Basin [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012,26(6):254-258.

(上接第 56 页)

- [25] 刘畅,王海龙,孙婧.铁路沿线联合沙障阻风固沙机理的数值模拟研究[J].铁道学报,2023,45(7):178-184.
- Liu Chang, Wang Hailong, Sun Jing. Numerical simulation study on the wind prevention and sand fixation mechanism of combined sand barriers along the railway line [J]. Journal of the China Railway Society, 2023, 45(7):178-184.
- [26] 李选民,辛国伟,宋彦宏,等.铁路沿线不同沙害区域机械防沙措施设计研究[J].铁道勘察,2023,49(4): 82-89.
- Li Xuanmin, Xin Guowei, Song Yanhong, et al. Study on design of mechanical sand prevention measures in different sand damage areas along railway [J]. Railway Investigation and Surveying, 2023,49(4):82-89.
- [27] Britannica, The Editors of Encyclopaedia. "Beaufort scale" [OL]. Encyclopedia Britannica, 3 (2023-03-03) [2023-05-19]. <https://www.britannica.com/science/Beaufort-scale>. Accessed 19 May 2023.
- [28] 王元,张鸿雁.大气表面层与风沙现象相似参数的研究[J].中国沙漠,1994,14(1):10-16.
- Wang Yuan, Zhang Hongyan. The study on similapity parameters of the atmospheric surface layer and phenomena of drift sand [J]. Journal of Desert Research, 1994,14(1):10-16.