

喀斯特区浅层岩溶裂隙土壤水分调蓄功能

杨影^{1,2}, 严友进^{2,3}, 戴全厚²

(1. 贵州大学 林学院, 贵阳 550025; 2. 贵州大学 土壤侵蚀与生态修复研究中心, 贵阳 550025;
3. 南京林业大学 生态文明建设与林业发展研究所南方可持续林业协同创新中心, 南京 210037)

摘要: [目的] 明确喀斯特区浅层岩溶裂隙土壤水分变化特征, 探究不同深度浅层岩溶裂隙土壤水分调蓄功能, 为该地区水文调控及生态恢复提供科学依据。[方法] 以喀斯特浅层岩溶裂隙土壤为研究对象, 基于原位监测数据, 系统分析土壤水分的垂直分布特征、降雨响应规律及储水能力, 以揭示浅层岩溶裂隙土壤的水分调蓄机制。[结果] (1) 季节性降雨影响浅层岩溶裂隙土壤水分垂直分异, 旱季条件下土壤水分稳定性随土层深度增加而增强; 雨季条件下各土层水分变异系数(C_v)表现为S层(19.1%)>U₃层(14.6%)>U₁层(9.3%)>U₂层(8.9%), 表明浅层土壤水分动态变化更为显著。(2) 4种典型降雨条件下, 小雨事件仅触发S层水分变化, 中雨事件显著影响U₃层, 而大雨和暴雨则导致各土层均产生响应, 且浅层(S, U₁)的响应程度显著高于深层(U₂, U₃)。(3) 受土层厚度影响, 平均储水量表现为U₃层(314.6 mm)>U₂层(220.3 mm)>U₁层(128.7 mm)>S层(54.8 mm), 其中旱季深层土壤(U₂, U₃)储水量变化较浅层(S, U₁)更为稳定。[结论] 喀斯特浅层岩溶裂隙土壤水分调蓄功能受土壤水分垂直分异与对降雨响应的协同调控: 旱季期间, 深层土壤(U₂, U₃)通过稳定储水维持区域水平衡; 雨季期间, 浅层土壤(S, U₁)通过快速水分动态响应实现高效调蓄。不同土层的储水能力分异显著, 其中U₃层较高储水能力不仅对区域水资源供给具有关键支撑作用, 同时也能够为喀斯特区植被恢复提供重要的水分保障。

关键词: 喀斯特; 浅层岩溶裂隙土壤; 水分调蓄

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)03-0247-10

Soil water storage and regulation functions of shallow karst fissures in karst areas

Yang Ying^{1,2}, Yan Youjin^{2,3}, Dai Quanhou²

(1. College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2. Research Center of Soil Erosion and Ecological Restoration, Guizhou University, Guiyang 550025,

China; 3. Collaborative Innovation Center of Sustainable Forestry in Southern China, Ecological Civilization

Construction and Forestry Development Research Institute, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: [Objective] This study aims to determine the characteristics of soil moisture changes in shallow karst fissures in karst areas and to explore the soil moisture regulation and storage functions at different depths, providing a scientific basis for hydrological regulation and ecological restoration in these regions. [Methods] In this study, shallow karst fissure soils in the karst area were taken as the research object. Based on in-situ monitoring data, the vertical distribution characteristics of soil moisture, rainfall response patterns, and water storage capacity were systematically analyzed to reveal their water regulation and storage mechanisms. [Results] (1) Seasonal rainfall affected the vertical differentiation of soil moisture in shallow karst fissures. Under dry season conditions, soil moisture stability increased with soil depth. Under rainy season conditions, the coefficients of variation (C_v) of soil moisture in each layer followed the order of S layer (19.1%)>U₃ layer (14.6%)>U₁ layer (9.3%)>U₂

收稿日期: 2025-06-03

修回日期: 2025-08-16

接受日期: 2025-09-14

资助项目: 国家自然科学基金“草海流域水文地质特征及面源污染响应机制”(42467045); 国家自然科学基金“喀斯特碳酸盐与碎屑岩交互区坡面土壤侵蚀过程与机理”(42167044)

第一作者: 杨影(2000—), 男, 贵州镇远人, 硕士研究生, 主要研究方向为水土保持。E-mail: 2230825853@qq.com

通信作者: 戴全厚(1969—), 男, 陕西长武人, 博士, 教授, 主要研究方向为水土保持。E-mail: gzudjj@163.com

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

layer (8.9%), indicating that moisture dynamics were more significant in the shallow layers. (2) Under four typical rainfall conditions, light rain triggered moisture change only in the S layer, moderate rain significantly affected the U_3 layer, and heavy rain and rainstorms led to responses across all soil layers. Shallow layers (S, U_1) exhibited much stronger responses than deeper layers (U_2 , U_3). (3) Influenced by soil layer thickness, average water storage followed the order of U_3 layer (314.6 mm) > U_2 layer (220.3 mm) > U_1 layer (128.7 mm) > S layer (54.8 mm). During the dry season, water storage in deep soil layers (U_2 , U_3) was more stable than in shallow soil layers (S, U_1). [Conclusion] The soil water regulation and storage functions of shallow karst fissure soils in karst areas are jointly regulated by soil moisture vertical differentiation and rainfall response. During the dry season, deep soil layers (U_2 , U_3) maintain regional hydrological balance through stable water storage. During the rainy season, shallow soil layers (S, U_1) achieve efficient water regulation and storage through rapid dynamic moisture response. Water storage capacity varies significantly across soil layers, with the U_3 layer showing higher storage capacity. This layer not only plays a key role in regional water supply but also provides important moisture support for vegetation restoration in karst areas.

Keywords: karst; shallow karst fissure soil; water regulation and storage

喀斯特地区作为全球典型的生态脆弱区,其岩—土结构特征显著影响着区域水文循环过程,浅层岩溶裂隙作为地表水—土壤水—岩溶水交互的关键界面,在维系喀斯特生态系统水文功能中具有特殊地位^[1-2]。其中浅层岩溶裂隙土壤作为该区特殊二元结构的物质基础,与发育的孔隙网络和裂隙系统构成了独特的“土壤—裂隙”复合介质^[3]。这种独特的组合通过动态调节降水入渗、径流分配与地下水补给,深刻影响着岩溶石漠化区生态水文格局^[4]。尤其在极端气候频发背景下,高敏感性和脆弱性使得喀斯特生态系统在面临极端气候事件时存在巨大的风险灾害^[5]。因此,喀斯特裂隙土壤水文过程引起广大学者的关注。

浅层岩溶裂隙土壤是喀斯特区水文过程的核心,主导降水资源的快速入渗与再分配,维系岩溶生态系统水分供给、缓解季节性干旱胁迫并驱动表层岩溶发育过程。研究表明,其独特的孔隙—裂隙网络通过对降雨进行再分配可将70%以上的降水迅速转化为裂隙储水与土壤持水等^[6],这种动态调蓄机制在西南喀斯特区尤为关键。Yan等^[7]表明岩溶裂隙土壤水文调蓄功能与土壤性质、裂隙形态等因素有关;Peng等^[8]提出植被类型显著影响裂隙储水能力,植被为应对干旱胁迫通过调整根系构型适应性来影响裂隙土壤储水;Yu等^[9]发现裂隙填充土壤使根系水分利用效率提升23%~41%,而Luo等^[10]发现的“根系—裂隙”空间耦合策略,进一步解释了基岩裸露区植物对裂隙土壤储水的影响;当前研究仍存在系统性局限:现有研究多基于深层裂隙土壤(80—260 cm)的稳态水分特征^[11],深层裂隙土壤水分变化对降雨量响应特征^[12];却忽视浅层(0—80 cm)因优先流主导的剧烈时空异质性^[13]。相较于深层裂隙土壤,

浅层岩溶裂隙土壤在自然降雨作用于地表后直接参与到“土壤—植被—大气”水文过程^[14]。除受土壤性质及岩溶裂隙形态因子影响外,岩—土界面优先流的存在使得浅层岩溶裂隙土壤水分过程难以预测^[15-17]。因此,对深入分析浅层岩溶裂隙土壤的水分调蓄机制,对进一步破解岩溶石漠化区水土资源配置失衡、石漠化治理等生态难题具有重要科学价值。

本文通过原位监测,探究喀斯特浅层岩溶裂隙不同深度土壤水分垂直特征,降雨响应特征以及储水量特征,揭示不同深度浅层岩溶裂隙土壤水分调蓄功能。研究不仅可深化对喀斯特生态水文过程的理解,也能为脆弱石漠化生态系统的可持续管理提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于贵州省安顺市镇宁县双龙山街道新发社区新发小流域(105°49′30″—105°49′51″E,26°6′53″—26°7′23″N)。新发小流域属于典型的喀斯特石漠化流域,总面积约0.33 km²。研究区内岩石裸露,生境破碎,浅层岩溶裂隙发育,无落水洞、地下暗河、天窗等分布。地层岩性主要为三叠系中统关岭组第三段(T_2g^3)的白云质灰岩。研究区内表层土壤较薄(平均20 cm),呈钙质特性,主要以黏壤土构成,土壤类型以石灰土为主。土地利用类型包含坡耕地、撂荒地、草地、灌木林地和次生林地。研究区海拔1 281~1 393 m,年均气温14.03℃。

1.2 试验设计

1.2.1 样地布置 喀斯特浅层岩溶裂隙存在高度的形态异质性,课题组前期的野外调查结果表明裂隙

形态可以划分为矩形型、金字塔形型、漏斗形型、网型和菱形型,其中漏斗型裂隙在喀斯特浅层岩溶裂隙中占比最大(37.5%)。此外,裂隙倾角主要在 $60^{\circ}\sim 90^{\circ}$ (76.39%),迹线长度主要在 $80\sim 160$ cm(76.39%)^[7,18]。为此,本研究选取了3条表层土壤厚度(22 ± 3 cm)、倾角($85^{\circ}\sim 90^{\circ}$)和迹长($90\sim 100$ cm)相似,且分布距离较近的,垂直剖面形态为漏斗型的裂隙开展监测工作。为排除植被冠层及根系对裂隙土壤水文过程的影响,本研究选取的浅层岩溶裂隙地表无植被生长和遮挡。三条裂隙间的高差约为5 m,间距约30 m,呈品字形围绕气象站(图1)。每个裂隙内由上自下将浅层岩溶裂隙土壤划分为4层,地表S层(0—20 cm), U_1 层(20—40 cm), U_2 层(40—60 cm), U_3 层(60—80 cm)。研究采用TDR(建大仁科)土壤水分监测系统监测土壤含水率变化情况,TDR

土壤水分监测仪探头布设位置分别为20 cm,40 cm,60 cm和80 cm分别对应以上4个土壤分层,埋置时间为2018年3月1日,待扰动土层自然沉降2个月后再开始正式采集数据。

1.2.2 数据采集 本研究监测时段为2018年5月1日至12月31日,研究区雨季为5月至10月,监测期涵盖了研究区的雨季与旱季,且该监测年份为非极端气象年。所监测到的降雨事件基本涵盖研究区中发生的主要降雨类型。降雨事件按照中国气象局降雨分级标准进行分类^[19],共分5类,分别为小雨(<10 mm/d)、中雨($10\sim 25$ mm/d)、大雨($25\sim 50$ mm/d)和暴雨($50\sim 100$ mm/d)、大暴雨($100\sim 250$ mm/d)。TDR土壤水分监测系统每10 min获取一次土壤含水率数据。降雨量数据通过新发小流域中心位置的小型气象站每10 min获取一次。

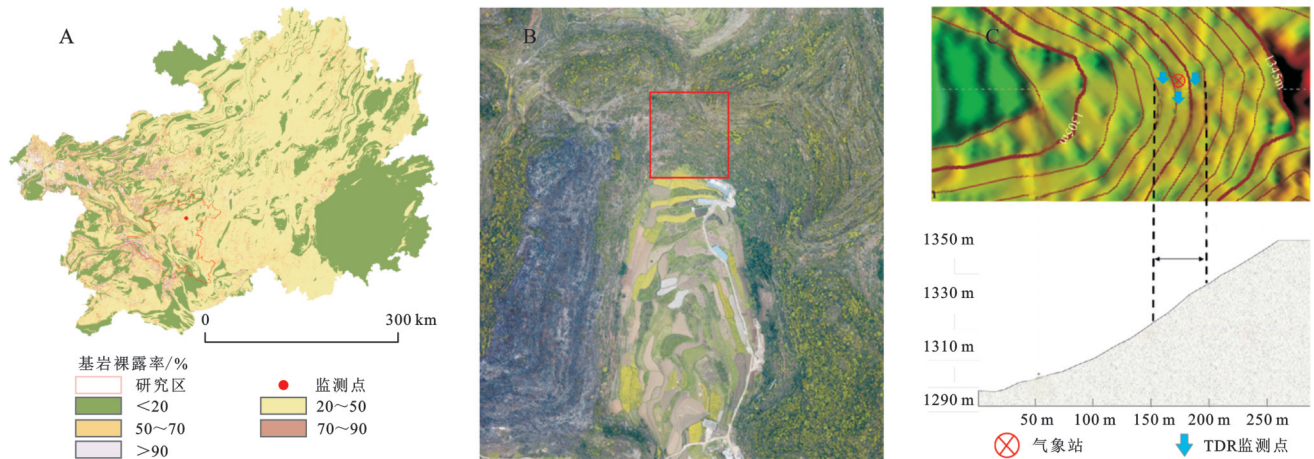


图1 研究区域与监测站点布设

Fig. 1 Study area and layout of monitoring sites

1.3 数据分析

使用Excel 2013处理数据,SPSS 18.0进行统计分析,并Origin 2022软件中进行绘图。按不同层次计算土壤储水量^[20],计算公式为:

$$S_i = 10\theta_i \times h_i \quad (1)$$

式中: S_i 为第*i*土壤储水量(mm); θ_i 为土壤体积含水率(cm^3/cm^3); h_i 为土层厚度(cm)。

2 结果与分析

2.1 降雨特征

由图2可知,研究区发生的降雨事件以小雨(<10 mm/d)为主,占总降雨次数的71.7%,但其总降雨量仅为258.58 mm,占总降雨量的18.28%,主要集中在11—12月(旱季)。相比之下,中雨($10\sim 25$ mm/d)及以上的降雨事件主要集中在5—10月(雨季),其中大雨、暴雨和大暴雨事件虽然次数较少,但对总降雨量的贡献较高,尤其是暴雨事件,总降雨量达到430.00

mm。2018年监测期内,累计降雨量为1 414.33 mm,其中雨季降雨量累计1 269.25 mm,占总降雨量的89.74%。这表明研究区的降雨量季节性变化明显,雨季降雨量集中且强度较大,而旱季则以小雨为主,降雨量相对较少。

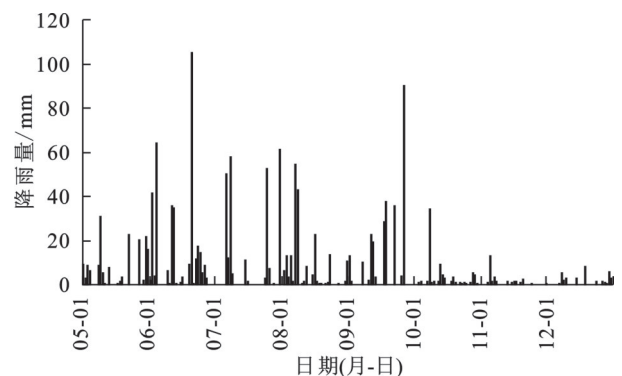


图2 2018年监测期间次降雨事件降雨量

Fig. 2 Precipitation per rainfall event during monitoring period in 2018

2.2 浅层岩溶裂隙土壤水分垂直变化特征

由图3可知,研究期间喀斯特浅层岩溶裂隙土壤含水率随深度增加呈显著递增趋势($p < 0.01$),且土壤含水率变化受季节性因子影响呈现显著差异($p <$

0.05)。雨季各土层(S, U_1 , U_2 , U_3)含水率分别为30.5%, 34.2%, 38.1%和40.6%,显著高于旱季对应层的21.1%, 28.3%, 34.0%和35.8%。

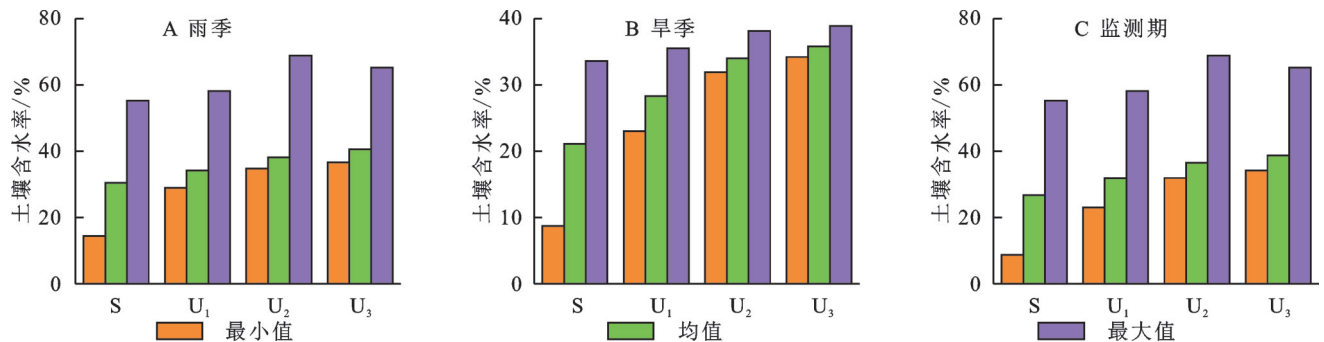


图3 浅层岩溶裂隙土壤含水率垂直分布特征

Fig. 3 Vertical distribution characteristics of soil moisture content in shallow karst fissures

土壤水分垂直变化一般取决于降雨和蒸发过程的相互作用,季节性变化、地形地貌和土壤自身性质等因素也是重要的影响因子。在研究岩溶裂隙土壤水分垂直变化过程中,通常采用标准差(SD)和变异系数(C_v)两个指标,将剖面土壤水分垂直变化划分为4个层次:速变层($C_v \geq 30\%$ 和 $SD \geq 4\%$)、活跃层($C_v: 20\% \sim 30\%$ 和 $SD: 3\% \sim 4\%$)、次活跃层($C_v: 10\% \sim 20\%$ 和 $SD: 2\% \sim 3\%$)和相对稳层($C_v \leq 10\%$ 和 $SD \leq 2\%$)。在实际划分过程中,受地形地貌、土地利用等因素的影响,难以同时满足标准差(SD)和变异系数(C_v)的划分标准,此时按照变异系数划分岩溶裂隙土壤水分的垂直变化^[21]。

由表1可知,根据监测期、雨季和旱季的日平均土壤含水率变异系数,对浅层岩溶裂隙土壤含水率垂直变化分层发现:整个监测期内,浅层岩溶裂隙地表S层为活跃层, U_2 层表现为相对稳定层,其余层次表现为次活跃层;雨季S层和 U_3 层为次活跃层, U_1 层和 U_2 层为相对稳定层;旱季S层 C_v 达33.2%,显著高于雨季同层位的19.1%($p < 0.01$),20 cm以下均为相对稳定层。

整体而言,速变层($C_v > 30\%$)仅存在于旱季表层,次活跃层主要分布 U_1 , U_3 层($C_v: 12.8\% \sim 19.1\%$),相对稳定层主要集中于旱季($C_v: 2.4\% \sim 8.5\%$), U_3 层 C_v 最低(2.4%)。

表1 浅层岩溶裂隙土壤含水率垂直变化分层

Table 1 Vertical variation stratification of soil moisture content in shallow karst fissures

时期	土层深度/cm	平均值/%	最大值/%	最小值/%	标准差/%	变异系数/%	土层划分
监测期	S	26.8	55.2	8.7	7.8	29.2	活跃层
	U_1	31.8	58.1	23.0	4.1	12.8	次活跃层
	U_2	36.5	68.8	31.9	3.4	9.3	相对稳定层
	U_3	38.7	65.2	34.2	5.2	13.4	次活跃层
雨季	S	30.5	55.2	14.4	5.8	19.1	次活跃层
	U_1	34.2	58.1	29.0	3.2	9.3	相对稳定层
	U_2	38.1	68.8	34.7	3.4	8.9	相对稳定层
	U_3	40.6	65.2	36.6	5.9	14.6	次活跃层
旱季	S	21.1	33.6	8.7	7.0	33.2	速变层
	U_1	28.3	35.5	23.0	2.4	8.5	相对稳定层
	U_2	34.0	38.1	31.9	0.9	2.7	相对稳定层
	U_3	35.8	38.9	34.2	0.9	2.4	相对稳定层

2.3 浅层岩溶裂隙土壤水分动态变化特征

2.3.1 浅层岩溶裂隙土壤含水率动态变化特征 由图4可知,在整个监测期内,土壤含水率变化特征总体上受外界降雨条件驱动呈显著波动性变化。S层土壤含水率对降雨事件响应最为敏感,其波动幅度

与降雨量呈显著相关性。尤其在旱季,受降雨中断影响,S层含水率由28.2%骤降至8.9%,降幅达68.4%,表明表层土壤水分运移受气候季节性调控作用显著。 U_3 层土壤含水率在雨季初期(5—6月)表现出强烈的降雨响应特征,其波动幅度显著高于其他

土层,推测与深层土壤在雨季初期水分入渗速率加快有关;而旱季期间该层含水率趋于稳定,表现出土壤水分滞留时间延长。 U_2 层动态变化最为平缓,仅在极端降雨事件发生时出现短暂波动,说明该层具备较强的水分缓冲能力。 U_1 层与S层变化趋势相近,但对降雨事件的响应存在滞后性。综合表明,土壤水分垂向分异特征与降雨强度时序变化密切耦合,不同土层的水文功能具有显著的空间异质性和时间动态性。

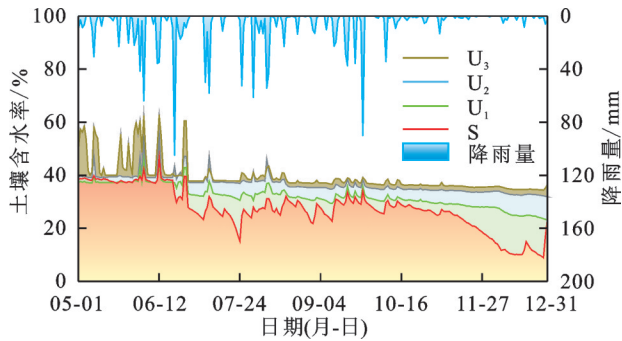


图 4 监测期内浅层岩溶裂隙土壤含水率随降雨的动态变化特征

Fig. 4 Dynamic change characteristics of soil moisture content in shallow karst fissures with rainfall during monitoring period

2.3.2 浅层岩溶裂隙土壤水分对典型降雨事件的响应 研究选取监测期内单场前期连续无降雨天数为4日的小雨、中雨、大雨和暴雨的4次典型降雨事件,其中小雨事件总降雨量 8.33 mm,总降雨历时 270 min,平均雨强 1.85 mm/h;中雨事件总降雨量 20.33 mm,总降雨历时 310 min,平均雨强 3.94 mm/h;大雨事件总降雨量 35.75 mm,总降雨历时 250 min,平均雨强 8.58 mm/h;暴雨事件总降雨量 91.92 mm,总降雨历时 540 min,平均雨强 10.21 mm/h。

如表 2 和图 5A 所示,在小雨事件整个降雨过程中,仅地表S层土壤含水率对降雨过程表现出明显响应, U_1 层含水率变化不明显,土壤含水率增幅仅有 2.88%,而 U_2 、 U_3 层含水率始终维持稳定(波动幅度 $<0.1\%$)。在持续降雨 60 min后,地表S层土壤含水率开始上升,随后 110 min 达到第一个含水率峰值(14.4%),持续 20 min,进入衰退期 120 min后随着降雨开始土壤含水率上升,经过 110 min 的上升期含水率达到本场降雨事件峰值(16.7%),相较于降雨前,土壤含水率增幅达 63.73%。总体而言,浅层岩溶裂隙土壤含水率对小雨的响应不显著,岩溶区对小雨资源利用效率低。

表 2 各土层土壤含水率对典型降雨事件响应特征

Table 2 Response characteristics of soil moisture content in each soil layer to typical rainfall events

降雨类型	监测位点	响应时间/min	上升期/min	平台期/min	衰退期/min	增幅/%	滞后距/min
小雨	S	10	220	20	160	63.73	—
	U_1	10	10	—	—	2.88	—
	U_2	—	—	—	—	—	—
	U_3	—	—	—	—	—	—
中雨	S	70	100	40	270	7.08	—
	U_1	200	10	90	210	3.76	130
	U_2	210	20	140	290	1.78	140
大雨	U_3	180	20	40	1530	51.56	110
	S	10	40	30	1870	24.31	—
	U_1	10	40	20	1110	21.9	—
暴雨	U_2	10	40	20	1440	12.99	—
	U_3	30	20	40	—	5.66	20
	S	120	110	10	240	19.97	—
暴雨	U_1	120	90	30	2490	21.77	—
	U_2	130	50	10	560	11.52	10
	U_3	310	10	920	—	6.47	190

在整个中雨降雨过程中,浅层岩溶裂隙各土层下的含水率都有显著变化,各土层对中雨事件降雨的响应特征存在明显分异(图 5B)。降雨开始后,各土层对降雨的响应不同,其中地表S层响应最为迅速,响应时间仅为 70 min;各土层土壤含水率峰值随着降雨历时不断变化, U_2 层维持土壤最高含水率时间最长(140 min);随着降雨结束, U_3 层土壤含水率衰

退时间最长,长达 1 530 min,而S层、 U_1 层、 U_2 层分别为 270,210,290 min。

降雨前后, U_3 层土壤含水率增幅变化显著高于其余各层,含水率增幅为 51.56%(U_3),显著高于 7.08%(S),3.76%(U_1),1.78%(U_2)。总体来说,各浅层岩溶裂隙土壤均对中雨事件做出响应, U_3 层对降雨事件的响应最显著。

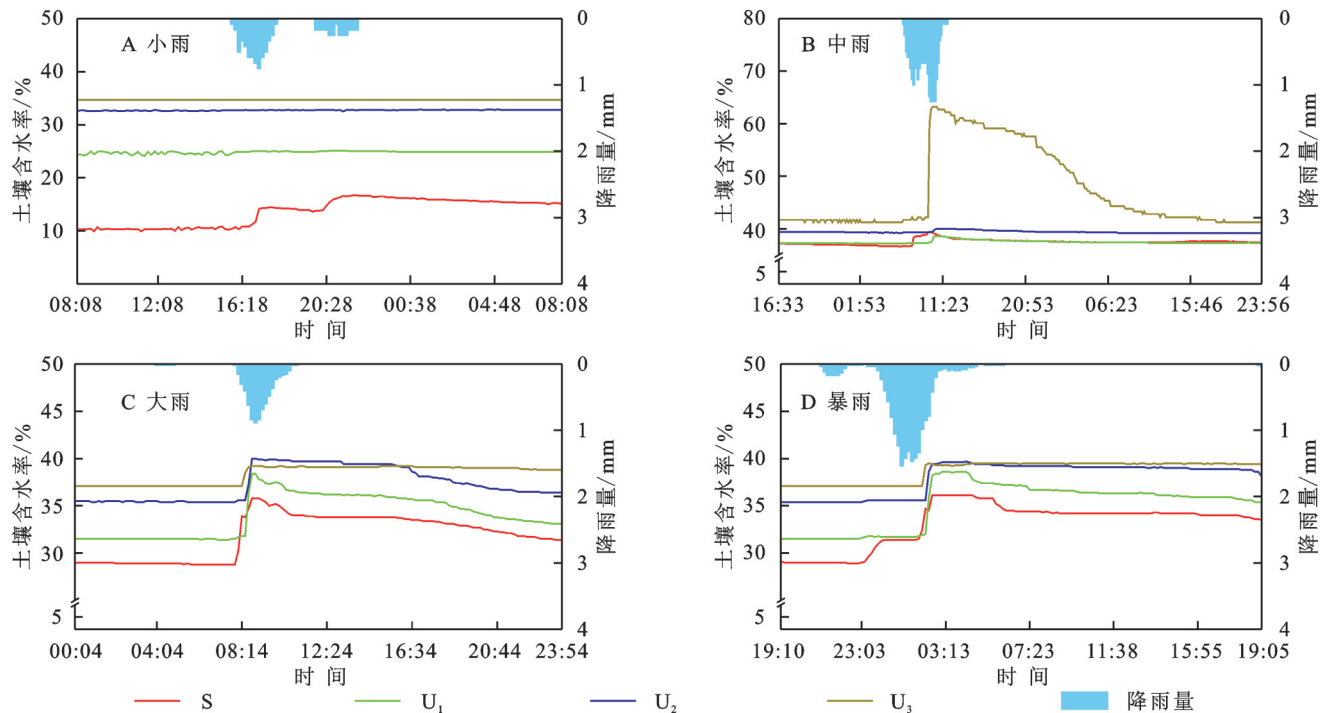


图5 浅层岩溶裂隙土壤含水率对不同典型降雨事件过程的响应

Fig. 5 Responses of soil moisture content in shallow karst fissures to different typical rainfall events

图5D展示了浅层岩溶裂隙土壤不同深度(S, U_1 , U_2 , U_3 层)含水率对暴雨事件的动态响应特征。观测数据显示,各土层对降雨的响应均存在显著滞后现象: U_1 和 U_2 层土壤含水率在降雨开始120 min后首次出现变化,而 U_3 层的响应时间进一步滞后至190 min,可能与其深层裂隙介质中水分垂直渗透速率较低有关。值得注意的是, U_3 层虽响应最晚,但其含水率最先达到峰值(39.5%),且S, U_1 和 U_2 层的峰值时间分别滞后100, 80, 40 min。 U_3 层表现出独特的持水特性,其平台期长达920 min,显著长于其他土层,且未呈现明显衰退现象,表明该层土壤具有较强的水分滞留能力。相比之下, U_2 层含水率变化波动最为显著,峰值达39.7%(高于其他土层),且衰退期长达2 490 min,该层土壤水分运移过程受裂隙结构

或优先流路径的显著影响。综上,浅层岩溶裂隙土壤不同深度的含水率对暴雨事件表现出分异化的响应模式,深层土壤(U_3)以滞后但稳定的持水特征为主,而中层土壤(U_2)则呈现高动态性和长衰退期。

2.4 浅层岩溶裂隙土壤储水量变化特征

降雨是土壤水分的主要补给来源,土壤储水量变化受降雨量和植物蒸腾等因素共同影响^[21]。由表3可知,各层次浅层岩溶裂隙土壤储水量随深度增加呈阶梯式上升趋势,其中S层储水量最低(93.8 mm), U_3 层储水量最高(500.8 mm),呈现出深层土壤(U_2 和 U_3)具有更强的水分保持能力。最小储水量同样随深度递增, U_3 层最小值(275.2 mm)约为S层(17.8 mm)的15.5倍,表明浅层土壤更易受外部环境(如蒸发、植被消耗)影响。

表3 浅层岩溶裂隙土壤各层储水量

Table 3 Water storage in each soil layer of shallow karst fissures

监测点	S	U_1	U_2	U_3	合计
计算土层深度范围/cm	0—20	20—40	40—60	60—80	80
最大储水量/mm	93.8	182.8	335.4	500.8	1112.8
最小储水量/mm	17.8	92.4	191.4	275.2	576.8
平均储水量/mm	54.8	128.7	220.3	314.6	718.3
最大储水增量/mm	76.0	90.4	144.0	225.6	536.0

如图6所示,根据各土层储水量动态变化特征,结合降雨季节性分配规律,将浅层岩溶裂隙土壤储水量变化划分为3个典型阶段:相对稳定期、补给期及消耗期^[22]。具体表现为S层储水量对降雨响应最为敏感,其

变化特征呈现显著阶段性。5月为相对稳定期(储水量变幅 $<10\%$);6—11月进入消耗期(最大变幅可达208.6%);水分补给期(12月),土壤储水量因气温降低,植被生长活动减弱,土壤水分活性减弱而缓缓上升,土

壤储水增加量由降雨量大小决定。 U_1 层土壤储水量动态响应模式与S层高度相似,但消耗期滞后约15 d。深层土壤中, U_2 层储水量年际变幅较缓($<12\%$),表现出较强的水分缓冲能力。值得注意的是, U_3 层在雨

季(5—7月)受集中降雨驱动,储水量激增至峰值500.8 mm,较早季最大储水增量可达225.6 mm,其变化幅度显著高于其他土层。结果表明,土壤储水动态的垂直分异特征与岩溶裂隙土层深度及降雨量密切相关。

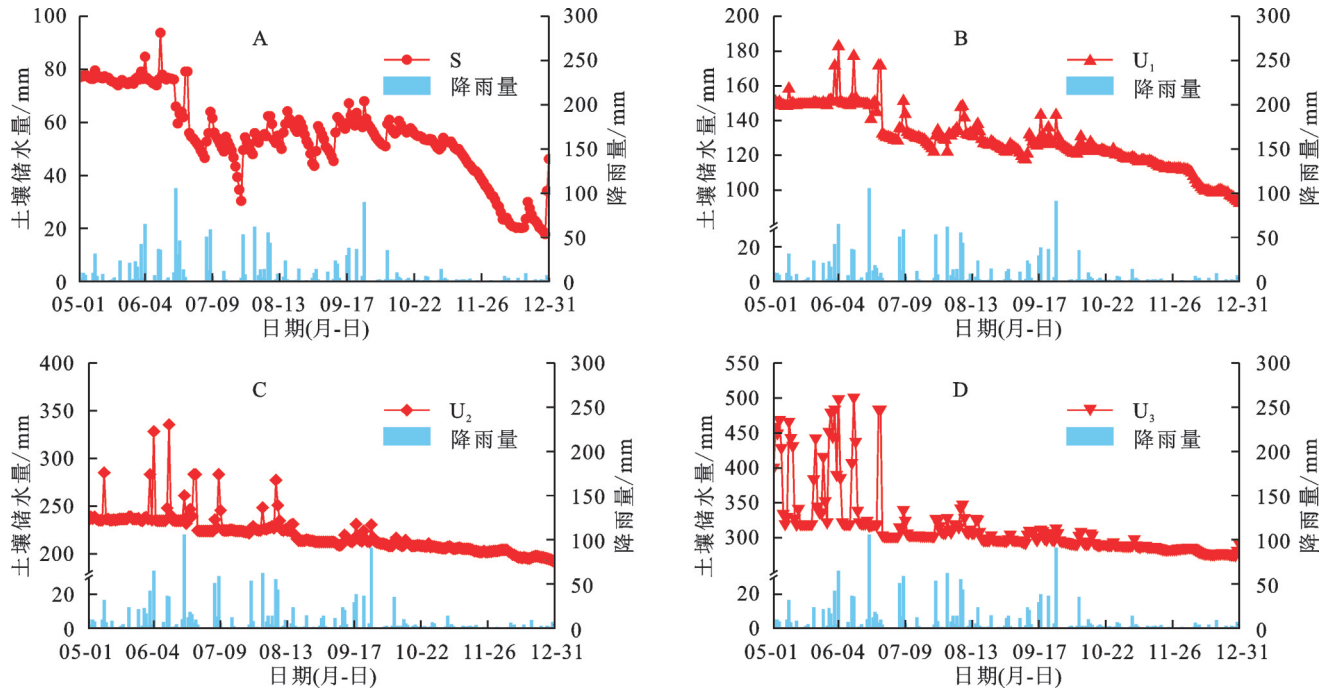


图6 各土层储水量随降雨动态变化特征

Fig. 6 Dynamic change characteristics of water storage in each soil layer with rainfall

3 讨论

3.1 浅层岩溶裂隙土壤水分时空动态垂直分异与降雨响应

本研究显示,浅层岩溶裂隙土壤水分季节变化显著,土壤平均含水率随土层深度的增加而增加,这与张君等^[12]的研究结果相同。雨季各土层平均含水率S(30.5%)、 U_1 (34.2%)、 U_2 (38.1%)、 U_3 (40.6%)远高于旱季平均含水率(21.1%, 28.3%, 34.0%, 35.8%)(图4)。陈洪松等^[21]基于喀斯特地区洼地剖面土壤含水率变化研究指出,与非喀斯特区相比,喀斯特洼地体积含水率垂直变化分层较少,只包括活跃层、次活跃层和相对稳定层,没有速变层。但本研究发现,在喀斯特浅层岩溶裂隙土壤水分垂直变化分层中有速变层的划分。由表2可知,受季节因子影响,S层土壤在旱季土壤含水率垂直变化分层表现为速变层($C_V: 33.2\% > 30\%$),这可能与喀斯特区地质背景的不同略有差异。本研究发现,浅层岩溶裂隙土壤水分存在时空动态垂直分异。监测期内,各土层(S— U_2)土壤含水率垂直变化表现为随土层深度增加而逐渐稳定,但深层次(U_3)土壤含水率垂直变化表现为中等变异(表1)。随时间变化各层土壤含水率变化有所差异:在雨季内,地表(S)和深层(U_3)土壤含水率表

现为中等变异(次活跃层),其余各层相对稳定,这可能与雨季降雨充沛和浅层岩溶裂隙独特的“土壤—裂隙”复合介质密切相关^[3];在旱季,随土层加深土壤含水率垂直变化趋势相对稳定,这与高阿娟等^[23]研究结果一致。

喀斯特浅层土壤水分变化是一个受降雨、季节变化、植被类型、土壤结构和裸露基岩影响的复杂过程,且与非喀斯特区具有更强的空间时间异质性^[11,16,24]。研究显示,在降雨条件下,浅层岩溶裂隙不同深度土壤水分的降雨响应显著不同。根据监测期内浅层岩溶裂隙土壤含水率随降雨的动态变化特征(图4), U_3 层土壤水分在雨季初期对降雨变化波动较大,季节变化显著,而 U_2 层土壤水分季节变化相对稳定,土壤水分保持时间较长;浅层土壤(S和 U_1)水分在雨季初期对降雨变化相对稳定,季节变化显著,但S层土壤水分对降雨响应较快,干湿交替明显。

本研究发现喀斯特浅层岩溶裂隙不同深度土壤水分的降雨响应显著不同(图5)。小雨事件(总降雨量8.33 mm)仅触发S层土壤水分响应(增幅63.73%),深层(U_2, U_3)无显著变化,表明喀斯特区对小雨资源的低效利用^[24]。中雨事件(20.33 mm)则显著影响各土层,尤其深层(U_3)含水率增幅达51.56%,衰退期长达1 530 min(表2,图5B),说明中等强度降雨通过缓慢

渗透有效补给深层水分,与 Yan 等^[25]关于岩溶区水分恢复机制的结论相似。大雨(35.75 mm)和暴雨(91.92 mm)事件下,水分动态呈现“表层滞水—中层过渡—深层速排”的梯度特征:大雨时 S 层含水率增幅最大(24.31%),但深层(U_3)因优先流路径发育导致响应滞后且衰退迅速(5.66%增幅,20 min 滞后);暴雨中 U_3 层虽响应最晚(190 min),却最早达到峰值(39.5%)并维持长平台期(920 min),而 U_2 层(峰值 39.7%)因裂缝网络影响呈现剧烈波动与超长衰退期(2 490 min)。此外,岩溶裂隙与裂隙土壤共同构成的岩-土界面,因土壤-基岩界面形成渗透差,形成优先流路径,这不仅加快壤中流的出发,也提高土壤垂直入渗速率^[15,17]。本研究得出,小雨事件中 U_1 层土壤对降雨的响应时间与 S 层土壤水分响应时间相似,其原因为降雨过程中,水分优先沿岩-土界面迅速下渗,形成优先流通道使得 U_1 层土壤对降雨响应更加迅速。在中雨事件中, U_3 层土壤相较于 U_1 、 U_2 层土壤对降雨响应分别提前 30 min,20 min,深层土壤对降雨响应更迅速,与曾红等^[16]研究结果相似。即距离出露基岩越近的土壤优先流发育程度更弱,使得岩-土界面优先流对于深层土壤的影响更显著。总之,在喀斯特地区中雨是深层岩溶裂隙土壤水分恢复的关键驱动力,强降雨事件(大雨、暴雨)则通过裂隙结构加剧水分垂向迁移的异质性。降雨事件对喀斯特区裂隙土壤水分变化具有重要影响,本研究对极端降雨事件的研究较浅,未来研究将增加长时间的监测以及极端降雨事件的捕捉,以加深降雨事件对裂隙土壤水分影响的理解。

3.2 浅层岩溶裂隙土壤储水量特征及其水分调蓄特征研究

本研究显示喀斯特浅层岩溶裂隙土壤的储水量特性显著受土层深度和季节性降雨的共同影响,呈现出鲜明的垂直分异特征与动态响应规律。由表 3 可知,土壤储水量呈显著垂向阶梯式分异特征。平均储水量特征变化为 $S(54.8 \text{ mm}) < U_1(128.7 \text{ mm}) < U_2(220.3 \text{ mm}) < U_3(314.6 \text{ mm})$,S 层最大储水量仅 93.8 mm,而 U_3 层高达 500.8 mm,增幅达 433.9%(图 6)。深层土壤(U_2 和 U_3 层)的最小储水量(191.4~275.2 mm)约为浅层(S, U_1)的 5.1~15.5 倍。这表明深层岩溶裂隙土壤具有较强的水分储存能力,能有效缓冲外界环境(如蒸发、植物蒸腾)的短期扰动。这可能与岩溶裂隙土壤水分调蓄功能有关:一方面,在降雨后延缓深层土壤水分下渗,增加土壤水分滞留时间;另一方面,在水分匮乏时期对深层土壤水分的补给。相比之下,浅层土壤储水量波动剧烈,尤其

在 S 层,其最小储水量极低,印证了表层土壤对气候因素的高度敏感性^[26]。不同土层对降雨的季节性响应存在显著差异。S 层储水量变化呈现出“稳定期—衰退期—补给期”三阶段模式,其中在水分消耗期(6—11月)最大变幅达 208.6%,表明浅层土壤水分补给与流失速率极快。 U_1 层虽响应模式相似,但衰退期滞后约 15 d,这与水分向下迁移的时间滞后有关。深层土壤中, U_2 层年际变幅 $< 12\%$,凸显其作为“水分缓冲区”的功能;而 U_3 层在雨季受集中降雨驱动,储水量峰值达 500.8 mm,增量显著(225.6 mm),表现出深层裂隙对降水的快速吸纳与储存能力。

总而言之,在浅层岩溶裂隙土壤水分变化过程中,相邻两土层土壤水分变量之间的相关性相对较高:在时间序列中,土壤层越深,相邻土壤层的水分时间稳定性越强^[24]。例如在各土层土壤含水率随降雨的动态变化特征中(图 4),深层土壤 U_2 和 U_3 层土壤水分变化相似性较高。在典型降雨事件响应中,尽管各土层水分对大雨和暴雨事件响应显著,但深层土壤水分变化相对浅层较小(图 5),裂隙土壤整体对大雨和暴雨水利用效率不高;此外,中雨事件带来的降雨量较少,但 U_3 层土壤水分变化相较于其他土层极其显著,水分增幅大,较长衰退期(表 2)。Yang 等^[18]分析 3 个岩溶裂隙中填充物水力特性得出,其水力性质和水文生态功能取决于裂隙填充物的理化性质和层状结构。Yan 等^[7]进一步研究了不同取样位置及裂隙形态对裂隙土壤性质的影响,发现浅层岩溶裂隙土壤的容重和黏粒含量随土层深度增加而显著增加,且漏斗状裂隙垂直剖面的土壤容重明显高于其他裂隙类型。深层土壤较高的黏粒含量以及漏斗状裂隙的结构特征共同导致土壤内部压力增大、孔隙度降低,从而促进了土壤水分向下运移,有利于更多水分的储存。这一现象与本研究 U_3 层土壤表现出的较强持水性结果相一致。此外,研究发现 U_1 、 U_2 层土壤水分在降雨事件后的消退期较长,这主要受裂隙形态控制:随着土层加深,裂隙与土壤形成的优先流通道减少,导致土壤水分向下运移速率减缓,延长了水分滞留时间。整体而言,浅层岩溶裂隙土壤 S 层处于土壤-大气界面,土壤水分受气候变化影响,对降雨响应敏感,土壤储水增量较低(76.0 mm),水分调蓄能力差; U_1 和 U_2 层是土壤水分的缓冲区,一方面补给上层土壤水分消耗,另一方面慢速渗透补给下层土壤; U_3 层位于岩-土界面深处,能够收集来自不同路径(入渗流、岩土界面流、地下水)的水源^[27],土壤储水增量(225.6 mm),对中等及以上降雨显著,且水分衰退期较长,拥有较好的水分调蓄能力。

Nie等^[28]研究表明,喀斯特地区植物根系主要分布于表层疏松土壤中,呈横向发育特征,其对土壤结构的影响主要集中于浅层。植被根系在浅层土壤中不仅增加土壤孔隙度,提升土壤持水能力,还促使降水入渗后土壤水分更多地发生水平流动,从而改变了优先流的运移路径。此外,不同植被类型对土壤水分动态及优先流特征具有显著影响。对比草地与林地发现,林地优先流发生频率(22.92%)显著高于草地(14.92%),且林地深层土壤对水分的响应更为明显,其土壤储水能力也显著优于草地^[29]。植被覆盖还会改变降雨的再分配过程,影响地表土壤对降雨的响应,提高水分入渗率,并减缓浅层土壤水分蒸发^[30]。同时,植物生长发育过程中的水分消耗也会影响土壤的储水功能。因此,在喀斯特浅层岩溶裂隙环境中,植被因素可能对裂隙土壤水分响应降雨的机制及其自身的储水性能产生重要影响。由于本研究重点在于探索浅层岩溶裂隙土壤储存及其对降雨的响应规律,研究结果初步揭示该部分土壤的水分调蓄能力,证实了裂隙土壤具备为喀斯特坡地植被提供水源的能力。本研究内容没有考虑植被的影响,而裂隙土壤作为喀斯特坡地植被重要的根系生境,植被因素对裂隙土壤储水能力的影响不容忽视,在今后的研究中可以进一步探索植被因素对裂隙土壤水文过程的作用,以加深对喀斯特浅层岩溶裂隙土壤水分运移特征与水文功能的理解。

4 结论

(1) 自然降雨监测内,喀斯特浅层岩溶裂隙土壤含水率随深度递增且雨季显著高于旱季。本研究中,S土壤旱季水分变异显著,其余各层相对稳定,U3土壤水分变化在雨季为中等变异。浅层岩溶裂隙土壤水分垂直分异特征与季节性降雨有关。

(2) 不同降雨强度下,岩溶裂隙土层的水分响应特征呈现差异性。在小雨事件中,表层(S层)土壤对降雨响应最为敏感。中雨事件则促使优先流沿岩-土界面加速发展,显著提高水分向深层迁移的速率,导致深层(U3层)土壤含水率响应加快,并呈现显著提升(增幅达51.56%)。强降雨事件期间,各土壤层对降雨过程均表现出显著响应。同时,垂向水分分异性增强,其中U1和U2层土壤水分在降雨停止后表现出较长的衰退期。

(3) 浅层岩溶裂隙土壤水分最大储水增量为U3(225.6 mm) > U2(144.0 mm) > U1(90.4 mm) > S(76.0 mm),裂隙土壤储水增量随土层深度变化显著变大。受季节性降雨、降雨强度以及裂隙形态等因

素影响,深层(U2, U3)较浅层(S, U1)具有更强的储水能力和环境缓冲能力。

参考文献(References):

- [1] 张君,陈洪松,聂云鹏,等.西南喀斯特关键带结构及其水文过程研究进展[J].应用生态学报,2024,35(4):985-996.
Zhang J, Chen H S, Nie Y P, et al. Research progress on structure and hydrological processes in the karst critical zone of southwest China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(4): 985-996.
- [2] 安迪,彭旭东,戴全厚,等.石漠化区岩-土与非岩-土界面土壤孔隙变异及入渗对干湿变化的响应[J].农业工程学报,2024,40(11):139-149.
An D, Peng X D, Dai Q H, et al. Response of soil pore variation and infiltration to dry-wet changes at rock-soil and non-rock-soil interface in rocky desertification areas [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(11): 139-149.
- [3] Yan Y J, Dai Q H, Wang X D, et al. Response of shallow karst fissure soil quality to secondary succession in a degraded karst area of southwestern China [J]. Geoderma, 2019, 348: 76-85.
- [4] 徐子凡,陈喜,刘维翰,等.表层岩溶带土岩结构对降雨-径流响应特征的影响[J].中国岩溶,2024,43(4):863-875.
Xu Z F, Chen X, Liu W H, et al. Effect of soil-rock structures on the characteristics of rainfall-runoff responses in epikarst zones [J]. Carsologica Sinica, 2024, 43(4): 863-875.
- [5] Liu M X, Xu X L, Sun A Y, et al. Why do karst catchments exhibit higher sensitivity to climate change? Evidence from a modified Budyko model [J]. Advances in Water Resources, 2018, 122: 238-250.
- [6] Fu Z Y, Chen H S, Xu Q X, et al. Role of epikarst in near-surface hydrological processes in a soil mantled subtropical dolomite karst slope: implications of field rainfall simulation experiments [J]. Hydrological Processes, 2016, 30(5): 795-811.
- [7] Yan Y J, Dai Q H, Jin L, et al. Geometric morphology and soil properties of shallow karst fissures in an area of karst rocky desertification in SW China [J]. Catena, 2019, 174: 48-58.
- [8] Peng X D, Dai Q H, Ding G J, et al. The role of soil water retention functions of near-surface fissures with different vegetation types in a rocky desertification area [J]. Plant and Soil, 2019, 441(1): 587-599.
- [9] Yu S Z, Ni Z Y, Yang Z D. Biomass allocation, root spatial distribution, and the physiological response of *dalbergia odorifera* seedlings in simulated shallow karst fissure-soil conditions [J]. Sustainability, 2022, 14(18): 11348.
- [10] Luo J, Luo W X, Liu J T, et al. Karst fissures mitigate

- the negative effects of drought on plant growth and photosynthetic physiology [J]. *Oecologia*, 2024, 205(1): 69-80.
- [11] Li Y, Liu Z Q, Liu G H, et al. Dynamic variations in soil moisture in an epikarst fissure in the karst rocky desertification area [J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 591:125587.
- [12] 张君,付智勇,陈洪松,等.西南喀斯特白云岩坡地土壤-表层岩溶带结构及水文特征[J].应用生态学报, 2021,32(6):2107-2118.
Zhang J, Fu Z Y, Chen H S, et al. Soil-epikarst structures and their hydrological characteristics on dolomite slopes in karst region of southwest China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(6):2107-2118.
- [13] Potts D L, Scott R L, Bayram S, et al. Woody plants modulate the temporal dynamics of soil moisture in a semi-arid mesquite savanna [J]. *Ecohydrology*, 2010, 3(1):20-27.
- [14] 陈喜,董建志,王礼春,等.全球变化下生态水文学发展与展望[J].地学前缘,2025,32(3):52-61.
Chen X, Dong J Z, Wang L C, et al. Development and prospect of ecohydrology under global change [J]. *Earth Science Frontiers*, 2025, 32(3):52-61.
- [15] 曾麻,彭旭东,戴全厚,等.石漠化区露石岩-土界面流形成过程模拟试验[J].农业工程学报,2022,38(17):110-117.
Zeng X, Peng X D, Dai Q H, et al. Simulation test on the formation of rock-soil interface flow from outcrops in the rocky desertification areas [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(17):110-117.
- [16] 曾红,董天富,杨静,等.喀斯特区裸露基岩对土壤水分入渗过程的影响[J].水土保持学报,2025,39(2):144-154.
Zeng H, Dong T F, Yang J, et al. Effect of exposed bedrock on soil water infiltration in karst region [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2025, 39(2): 144-154.
- [17] 吴瑶琴,蒋超华,徐勤学,等.西南喀斯特地区不同岩面形态下岩面径流特征[J].水土保持研究,2024,31(1):10-17.
Wu Y Q, Jiang C H, Xu Q X, et al. Runoff characteristics of rock surface under different rock surface morphology in southwest karst area [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024, 31(1):10-17.
- [18] Yang J, Nie Y P, Chen H S, et al. Hydraulic properties of karst fractures filled with soils and regolith materials: Implication for their ecohydrological functions [J]. *Geoderma*, 2016, 276:93-101.
- [19] 张心印,戴全厚,严友进,等.裸露基岩形态及空间分布对喀斯特坡地水土流失的影响[J].水土保持学报, 2025,39(2):21-29.
Zhang X Y, Dai Q H, Yan Y J, et al. Influence of the morphology and spatial distribution of exposed bedrock on soil erosion on karst slopes [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2025, 39(2):21-29.
- [20] 杨志成,柯奇画,马芊红,等.喀斯特地区黄壤坡面土壤水分对降雨的响应[J].水土保持学报,2021,35(2):75-79.
Yang Z C, Ke Q H, Ma Q H, et al. Response of soil moisture to rainfall on karst yellow soil slope [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(2):75-79.
- [21] 陈洪松,傅伟,王克林,等.桂西北岩溶山区峰丛洼地土壤水分动态变化初探[J].水土保持学报,2006,20(4):136-139.
Chen H S, Fu W, Wang K L, et al. Dynamic change of soil water in peak-cluster depression areas of karst mountainous region in northwest guangxi [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(4):136-139.
- [22] 张川,陈洪松,聂云鹏,等.喀斯特地区洼地剖面土壤含水率的动态变化规律[J].中国生态农业学报,2013,21(10):1225-1232.
Zhang C, Chen H S, Nie Y P, et al. Dynamics of soil profile water content in peak-cluster depression areas in karst region [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(10):1225-1232.
- [23] 高阿娟,刘子琦,李渊,等.喀斯特峡谷区不同经济林地土壤水分变化特征:以贵州花江示范区为例[J].中国岩溶,2020,39(6):863-872.
Gao A J, Liu Z Q, Li Y, et al. Study on soil moisture variation characteristics of different economic forest lands in karst gorge area: a case study of Huajiang demonstration area in Guizhou Province [J]. *Carsologica Sinica*, 2020, 39(6):863-872.
- [24] Zhao Z M, Shen Y X, Wang Q H, et al. The temporal stability of soil moisture spatial pattern and its influencing factors in rocky environments [J]. *Catena*, 2020, 187:104418.
- [25] 颜蒙蒙,周洲,王济,等.喀斯特地区土壤水分随降雨的动态变化研究:以贵阳市花溪区为例[J].中国岩溶, 2016,35(4):446-452.
Yan M M, Zhou Z, Wang J, et al. Study on the dynamic change of soil moisture in karst area: a case of Huaxi district in Guiyang City [J]. *Carsologica Sinica*, 2016, 35(4):446-452.
- [26] 熊小锋,李建鸿,蒲俊兵,等.典型岩溶石漠化区土壤剖面水分和温度动态规律及传输特征[J].水土保持研究,2020,27(5):59-66,71.
Xiong X F, Li J H, Pu J B, et al. Dynamics rules and coupling transfer characteristics of soil moisture and temperature on soil profile in typical karst rocky desertification area [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(5):59-66,71.
- [27] Fu Z Y, Chen H S, Zhang W, et al. Subsurface flow in a soil-mantled subtropical dolomite karst slope: a field rainfall simulation study [J]. *Geomorphology*, 2015, 250:1-14.