

李焱秋, 彭韬, 周利, 桂钰翔, 徐少强, 曹乐, 翟奖, 王世杰. 喀斯特不同岩土组构土壤水分模拟研究[J]. 土壤学报, 2026,

LI Yanqiu, PENG Tao, ZHOU Li, GUI Yuxiang, XU Shaoqiang, CAO Le, ZHAI Jiang, WANG Shijie. Simulation Study on Soil Moisture Under Different Soil-Rock Structures in Karst Areas[J]. Acta Pedologica Sinica, 2026,

喀斯特不同岩土组构土壤水分模拟研究*

李焱秋^{1,2,3}, 彭韬^{1,3†}, 周利^{1,3}, 桂钰翔^{1,3}, 徐少强¹,
³, 曹乐^{1,3,4}, 翟奖^{1,3}, 王世杰^{1,3}

(1. 中国科学院地球化学研究所 喀斯特环境演变与生态安全实验室, 贵阳 550081; 2. 贵州省水利科学研究院, 贵阳 550002; 3. 贵州普定喀斯特生态系统国家野外科学观测研究站, 贵州普定 562100; 4. 贵阳学院 生物与环境工程学院, 贵阳 550005)

摘要: 西南喀斯特区高异质性岩土组构深刻影响土壤水文过程, 明晰其对土壤水分的控制作用及驱动因素, 对理解区域水文循环、完善石漠化生态治理具有重要意义。本研究以石灰岩和白云岩两种典型岩性为对象, 设计 12 个不同岩土组构模拟土槽, 基于 2023 年 3 月至 2024 年 2 月水文年的土壤水分 (10、20、40、70、100 cm 土层) 与降雨量、温度、湿度等气象监测数据, 结合统计分析与拟合方法, 探究不同岩土组构土壤体积含水量变化特征、单位体积土壤蓄水量差异受岩土组构与气象因素的影响。结果表明: 喀斯特不同岩土组构土壤体积含水量波动随土层深度增加呈减小趋势; 石灰岩各岩土组构雨季土壤体积含水量 (11.07%~43.21%) 及变异系数均高于旱季, 40~70 cm 土层土壤体积含水量最低, 而 100 cm 处较高, 单位体积土壤蓄水量受岩土比 (负相关) 和表层土壤厚度 (正相关) 共同控制, 拟合公式为 $Z = -24.48X + 0.88Y + 100.47$ ($R^2 = 0.9328$); 白云岩土壤体积含水量集中且低于石灰岩, 雨季均值 (18.36%~28.70%) 略高于旱季 (15.10%~25.53%), 旱季变异系数更高, 单位体积土壤蓄水量随土层厚度呈指数型上升, 拟合公式为 $Z = 13.85e^{(X/12.70)} - 13.26$ ($R^2 = 0.9958$); 石灰岩单位体积土壤蓄水量与降雨量、相对湿度显著相关, 白云岩仅与相对湿度显著相关。本研究揭示了岩性差异主导的岩土组构对喀斯特土壤水分变化特征与土壤水分含量的调控机制, 明确了岩土组构是喀斯特土壤水文研究的关键因子, 为区域生态水文研究及石漠化治理提供了数据支撑与理论参考。

关键词: 喀斯特; 岩土组构; 土壤水分; 石漠化; 碳酸盐岩

中图分类号: S157.1

文献标志码: A

Simulation Study on Soil Moisture Under Different Soil-Rock Structures in Karst Areas

LI Yanqiu^{1,2,3}, PENG Tao^{1,3†}, ZHOU Li^{1,3}, GUI Yuxiang^{1,3}, XU Shaoqiang^{1,3}, CAO Le^{1,3,4}, ZHAI Jiang^{1,3}, WANG Shijie^{1,3}

(1. Laboratory of Karst Environmental Evolution and Ecological Security, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; 2. Guizhou Hydraulic Research Institute, Guiyang 550002, China; 3. Puding Karst Ecosystem

* 贵州省科技厅科研项目 (KXJZ[2025]009、GCC[2023]059、QN[2025]433) 和贵州省水利科技项目 (KT202619) 共同资助
Supported by Research Projects of Guizhou Provincial Department of Science and Technology (Nos.KXJZ[2025]009, GCC[2023]059, QN[2025]433) and Guizhou Provincial Water Conservancy Science and Technology Project (No.KT202619)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: pengtao@mail.gyig.ac.cn

作者简介: 李焱秋 (1995-), 男, 贵州习水人, 博士, 工程师, 主要从事喀斯特土壤水文与农业节水研究。E-mail: liyanqiu@mail.gyig.ac.cn

收稿日期: 2025-12-19; 收到修改稿日期: 2026-06-23; 网络首发日期 (www.cnki.net):

Abstract: 【Objective】The highly heterogeneous soil-rock structure in the karst area of Southwest China influences soil hydrological processes. Understanding the controlling mechanisms and driving factors of soil moisture is therefore important for elucidating regional hydrological cycles and improving rocky desertification control.

【Method】This study focused on two representative lithologies, including limestone and dolomite, and 12 experimental soil tanks were simulated with different soil-rock structures. Based on soil moisture data (at 10, 20, 40, 70, and 100 cm soil depths) and meteorological monitoring data (precipitation, temperature, and humidity) during the hydrological year from March 2023 to February 2024, statistical analyses and regression fitting were conducted to investigate soil volumetric moisture content variation characteristics under different soil-rock structures and the effects of soil-rock structure characteristics and meteorological factors on soil water storage capacity per unit volume.

【Result】The results showed that the soil volumetric moisture content fluctuations under different karst soil-rock structures decreased with the increasing of soil depth, and the soil volumetric moisture content (11.07%-43.21%) and coefficient of variation of each limestone soil-rock structure in the rainy period were higher than those in the dry period. Also, the soil volumetric moisture content was the lowest in the 40-70 cm soil layer but relatively high at 100 cm, and the soil water storage capacity per unit volume was jointly controlled by the soil-rock ratio (negative correlation) and the thickness of the surface soil layer (positive correlation), with the fitting formula $Z = -24.48X + 0.88Y + 100.47$ ($R^2 = 0.9328$). The soil volumetric moisture content in dolomite showed a narrower variation range and remained lower than that in limestone, and the average value in the rainy period (18.36%-28.70%) was slightly higher than that in the dry period (15.10%-25.53%). In addition, the coefficient of variation in the dry period was higher, and the soil water storage capacity per unit volume increased exponentially with the increase of soil thickness, producing a fitting formula $Z = 13.85e^{(X/12.70)} - 13.26$ ($R^2 = 0.9958$). The soil water storage capacity per unit volume of limestone was significantly correlated with precipitation and relative humidity, while dolomite was only significantly correlated with relative humidity. **【Conclusion】**This study reveals the mechanisms by which lithology-dominated soil-rock structure configurations regulate karst soil moisture dynamics and content, clarifies that soil-rock structure is a key factor in karst soil hydrology research, and provides data support and theoretical reference for regional eco-hydrological research and rock desertification control.

Key words: Karst; Soil-rock structure; Soil moisture; Rock desertification; Carbonate rock

西南喀斯特区土壤入渗能力极强，且表层岩溶带中的复杂裂隙网络促使水分快速渗漏，难以有效供给植被；因此，该区关键带物质循环中的土壤水文研究长久以来都是热点^[1-3]。非喀斯特地区土壤水文主要受降水、土地利用方式、地貌等因素影响，东南红壤区关注季节性干旱对土壤水资源的影响，而西北黄土区则更多聚焦于降水缺乏以及土壤干层的变化^[4-6]。我国西南喀斯特地区则由于特殊地质背景与生态环境作用，学者们更多从裸露基岩、土壤高异质性、岩-土界面、渗漏等因素关注其土壤水分运移过程与特性。例如，Peng 等^[7]在野外调查与室内模拟实验基础上，论述了基岩出露的岩溶坡耕地土壤、水分、养分元素的地表流失与地下漏失情况。Fu 等^[8]以典型喀斯特小流域作为研究对象，分析了高异质性小流域内土壤饱和导水率空间变异特征及其影响因素，其结果表明喀斯特地区土壤具有较高渗透能力，容易产生径流且地形位置与土地利用类型对饱和导水率影响不显著 ($P > 0.05$)。虽然，针对喀斯特地区土壤水分相关研究虽已取得丰硕成果，但该地区高异质性的地表情况，尤其是裸露岩石与土壤厚度的空间分布尚无规律可循，地表与地下共同组成了复杂的表层岩溶带，让区域内水资源难以评估，这也加大了区域关键带水文循环过程的认知难度^[9-10]。这种极具特色的岩石非均匀风化特点以及岩石与土壤在空间中的相互组合排列方式被学者们借用地质学中“组构”一词，称为“岩土组构”^[11-12]。通常，岩土组构差异一方面是由同属碳酸盐岩

的石灰岩、白云岩风化差异所造成,另一方面则是由碳酸盐岩坡地岩土组成垂直分带性特点所导致^[10, 11, 13]。Liu 等^[14]研究指出岩性差异所导致的土壤分布方式差异是控制喀斯特区坡地土壤水分的关键因素, Yang 等^[15]研究也表明裸露岩石对岩土界面以及土壤水分含量有着显著影响,张君等^[16]研究则表明土壤浅薄的山坡相比土层厚的区域更容易受到蒸散发影响。综上,复杂地质背景下岩土组构在喀斯特区土壤水分相关研究中占据重要地位,其中岩石与土壤交错分布方式势必对区域内关键带的水文过程、水土流失、植被生长发育产生深远影响,如何明晰岩土组构在喀斯特土壤水文过程中的作用逐渐被国内外学者所关注。

岩石与土壤交错分布格局对喀斯特坡地水文过程、物质循环的影响已得到证实^[14, 17-18]。因此,学者们围绕喀斯特坡地土壤赋存、分布特征进行大量研究,尝试对岩土分布特征进行了定量分析。丁颖蕾等^[19]利用 2 775 个调查样点通过 ArcGIS 软件阐述了岩石裸露程度与坡度-土层厚度的耦合系数值呈正相关现象,较好地揭示了喀斯特地区坡度、土壤厚度与岩石裸露率三者的关系。张君等^[20]采用高密度电法指出喀斯特小流域中土壤集中分布在洼地,但受基岩出露情况影响,且土壤厚度与海拔呈显著 ($P<0.05$) 负线性关系。Peng 和 Wang^[21]在普定县陈旗小流域建立 6 处不同土地利用类型的坡面径流小区,其中各个小区岩土组构均有着很大的区别,而焦锡桦等^[22]在十年后重新对这几处径流小区进行分析,发现良好的自然植被恢复有效地降低了土壤侵蚀的发生且水源涵养功能提升,侵蚀性降雨阈值与坡地地面物质组成有关,尤其是土石比。这类研究虽指出岩土组构与喀斯特地区土壤总量、水文功能有关,但在喀斯特区高异质性环境中,尤其是石漠化治理过程中,量化岩石与土壤分布差异对物质循环的控制作用及驱动因素长久以来均为研究难点。因此,鉴于土壤水分变化特征受到岩土组构控制的机制尚不明确,通过模拟试验控制岩土分布特征以监测土壤水分响应,对深入理解高异质性的喀斯特土壤水文过程具有重要意义,并能为进一步完善喀斯特区石漠化生态治理中土壤水分潜力应用提供参考。

中国喀斯特区主要分布在西南地区,属于全球三大喀斯特集中连片区域之一,与另外两大喀斯特集中连片区(欧洲地中海沿岸、美国东部和东南亚)的区别在于,我国西南喀斯特区人口基数大且多为山区,外加历史、社会、经济等诸多因素,导致区域经济滞后,人地矛盾尖锐,水土流失、石漠化等土地退化问题突出,尤其是区域内分布不均的坡地土壤极大制约着水源涵养功能^[23-25]。区域内石灰岩与白云岩差异性风化作用明显,石灰岩具有发育较宽的土楔,大部分土壤易聚集于溶沟、溶槽和凹地内,呈镶嵌斑块状分布;而白云岩坡地土楔较少,其细小裂隙呈弥散性均匀分布,土层极薄,均匀覆盖^[10, 24]。不同的土壤分布方式控制着土壤水分的运移、变化特征,目前针对喀斯特土壤水分的相关研究均聚焦于土壤水分动态、水文路径及岩土界面水分运移等方面,对区域内岩土组构与土壤水分关系量化研究仅有 Chen^[12]、Liu 等^[26]几篇文献支撑。喀斯特高异质性地质-生态环境下,岩土组构如何定量调控土壤水分的运移、赋存及变化过程?气象因素对不同岩土组构土壤水分有何影响?这类问题尚未解决。鉴于此,本研究从岩性差异所产生的岩石、土壤分布差异角度出发,围绕关键带中岩土组构在调控土壤水分方面的作用,利用多对比岩土组构模拟水文试验场、观测场与气象数据,揭示不同岩土组构下土壤水分变化特征及影响因素,同时量化不同岩土组构下土壤水分的蓄存差异。本研究可为喀斯特生态水文与土壤水资源研究提供重要参考,并为西南喀斯特区关键带水文过程模型的构建提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

贵州普定喀斯特生态系统国家野外科学观测研究站(26°22'N, 105°45'E)位于中国贵

州省普定县城关镇陇财村，站区位于普定县城北方 5 km 处，距离夜郎湖水库约 400 m，海拔约 1 158 m，总占地面积约为 11.2 hm²。普定站地处亚热带季风湿润气候区，多年平均气温 15.1℃，降水量 1 396.9 mm，雨热同期，站内植物以退化的藤刺灌丛为主，兼有次生常绿-落叶阔叶林呈斑点状分布，属于建站后自然恢复的次生林，而站区周围农业以冬油菜-夏玉米或水稻为主要作物，一年两季。土壤类型以石灰土为主，普定站 2007 年建立时，地表无植被覆盖，属于重度石漠化坡地，经过近 20 年的自然恢复，现已成为云贵高原喀斯特山区退化的次生林生态系统类型的代表。

本研究 2023 年 3 月至 2024 年 2 月一个水文年的气温与降水特征，全年总降雨量为 1 152 mm，降雨主要集中于 2023 年 6 月至 2023 年 10 月，其中，2024 年 2 月累计降雨量最低（2.40 mm）；2023 年 8 月有着最高的累计降雨量（261.10 mm），同时 8 月降雨天数也是一年中最多（23 天）；6—10 月累计降雨量大于 50 mm，分别为 255.00、212.10、261.10、52.40、181.10 mm，由此可见，6、7、8、10 四个月的降水总量占全年降雨的 78.95%。其中 6 月虽然只有 11 天降水，低于 7、8 月，但总量达到 255.00 mm，这表明 6 月是研究区强降雨发生的主要时间段。在研究中，2024 年 1 月最低月平均气温为 9.00℃，是整个水文年中最低值，而 2023 年 7 月是整个水文年中最热的月份，最高月平均气温为 24.15℃（图 1）。

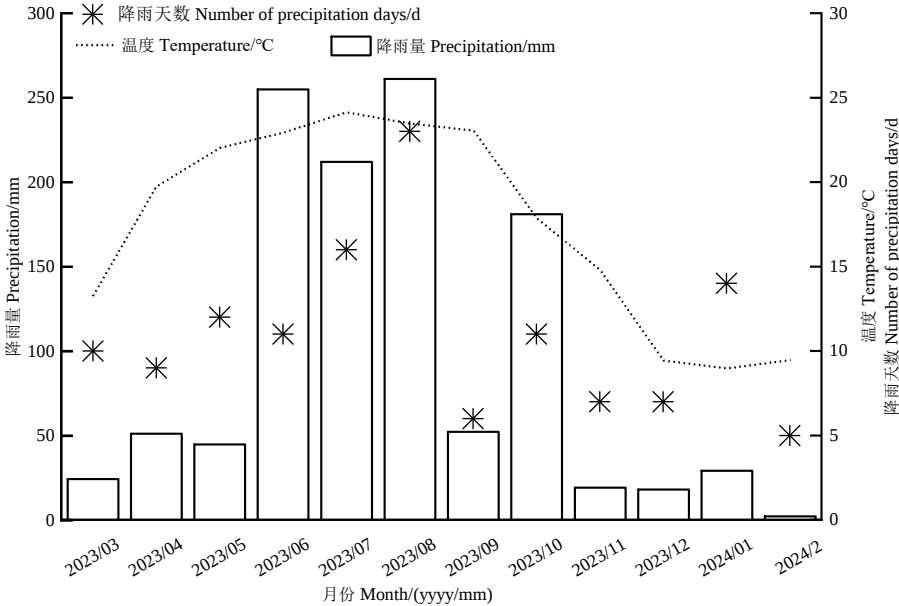


图 1 研究区月气候变化特征

Fig. 1 Characteristics of monthly climate change in the study area.

1.2 研究方法

本研究设计 12 个不同岩土组构模拟观测土槽（图 2），每个土槽长宽高均为 1 m×1 m×1.2 m，底部 20 cm 均铺设石英砂碎石作为过滤层。对于石灰岩土槽（1-9 号），在模拟基岩裸露（1-3 号土槽）情况，参照现有岩土组构定量研究成果^[10, 12, 17]，本研究中岩石与土壤比例分别为 2 : 1、4 : 1、8 : 1；模拟地表覆盖 10 cm 土壤，基岩不裸露（4-6 号土槽）情况，岩石与土壤比例分别为 2 : 1、4 : 1、8 : 1；模拟地表覆盖 20 cm 土壤、基岩不裸露（7-9 号土槽）情况，岩石与土壤比例分别为 2 : 1、4 : 1、8 : 1。对于白云岩土槽（10-12 号土槽），在底部 20 cm 厚的石英砂过滤层上均填装白云岩碎石以模拟风化均匀的白云岩坡地，而白云岩碎石上按照梯度依次填装 5、10、20 cm 厚的白云岩风化土壤。土槽三面为铁皮，只留一面安装钢化玻璃，便于直观观测不同岩土组构差异。本研究所收集的气象观测数据主要来自贵州普定喀斯特生态系统国家野外科学观测研究站内的自动气象站，该气象站可自动连续观测并记录降雨量、气温、风速等数据。

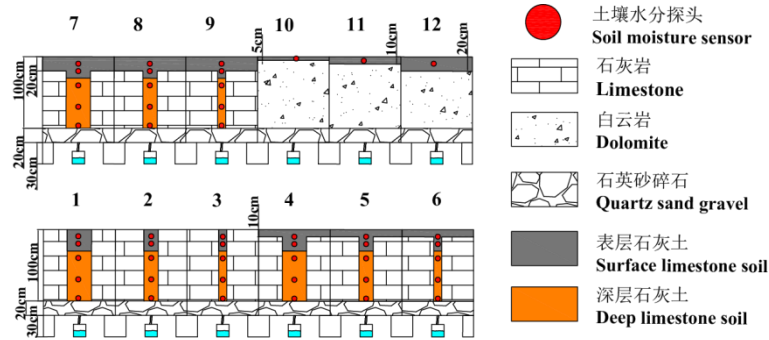


图2 模拟土槽示意图（以彩图发表）

Fig. 2 Schematic diagram of simulated soil column

土槽中石灰岩岩石来源于普定县天王旗村寨石灰岩坡地，坡地被当地农民用作玉米、油菜种植，距普定站直线距离约为 8 km；白云岩碎石来源于普定站附近的白云岩坡地，植被以白茅、野古草为主，石灰岩与白云岩元素测定结果详见表 1。

表 1 模拟土槽石灰岩、白云岩主量元素含量

Table 1 Content of major elements in limestone and dolomite of simulated soil tanks

岩石类型 Rock type	SiO ₂ /%	Al ₂ O ₃ /%	TiO ₂ /%	CaO/%	MgO/%	K ₂ O/%	Na ₂ O/%	MnO/%	P ₂ O ₅ /%	灼失量 Loss on ignition/%	总和 Total/%	TF _{Fe2O3} /%
石灰岩 Limestone	0.62	0.30	0.002	54.20	1.08	0.08	0.01	0.003	0.013	43.11	99.59	0.17
白云岩 Dolomite	0.25	0.25	0.01	30.97	21.73	0.03	0.05	0.01	0.01	46.63	99.99	0.07

土槽中土壤风干过筛后按照容重进行填装。野外样品采集与文献调研中均发现石灰土深层因排水不良和通气性差导致的氧化还原作用，以及因铁和腐殖质的淋溶和迁移会造成表土与下层土之间存在明显的颜色分异^[27]。因此，本研究在 0~30 cm 石灰岩土槽中所填装土壤为表层黑色的石灰土，30 cm 以下的石灰土则颜色偏黄。本研究所用土壤的物理性质详见表 2。

表 2 土槽填装土壤基本性质

Table 2 Properties of soil from the soil tank

岩土结构类型 Types of Geotechnical Structures	容重 Bulk density (g·cm ⁻³)	黏粒 Clay /%	粉粒 Silt /%	砂粒 Sand /%	有机碳 Soil organic carbon (g·kg ⁻¹)
石灰岩 Limestone	1.09±0.09	27.81±5.00	43.12±2.96	27.56±7.24	38.57±9.26
白云岩 Dolomite	0.91±0.15	29.85±2.33	48.61±4.93	21.54±3.50	68.00±5.71

模拟土槽中土壤水分监测采用美国 Campbell 公司生产的 CR1000X 主机与 TDR315H 多功能土壤监测探头开展监测工作，为与坡耕地中土壤水分监测系统匹配，数据采集频率同样设置为 5 min·次⁻¹，土壤水分探头埋设于 10、20、40、70、100 cm 五个层次，以兼顾表层快速响应层、中层过渡层和深层储水层的监测需求。

1.3 数据处理

不同土层土壤蓄水量和单位体积土壤蓄水量：

$$W_i = \text{VWC}_i \times h_i \quad (1)$$

$$S_p = \sum_{i=1}^5 K_i \times W_i$$

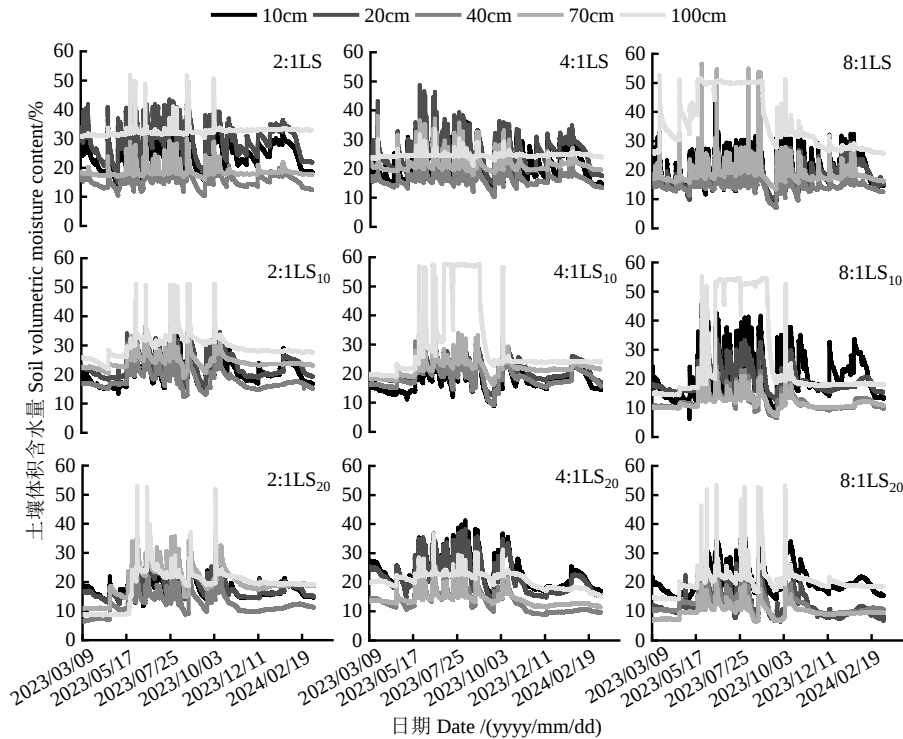
式中， W_i 为第*i*层土壤蓄水量（mm）； VWC_i 为第*i*层土壤体积含水量（%）； h_i 为第*i*层土层深度（mm）； S_p 为不同岩土组构单位体积内土壤蓄水量（mm）； K_i 为第*i*层土壤空间占比。

使用 Excel 2020、Origin 2022 进行数据整理、分析及绘图，相关性分析（Pearson）明确气象因素对不同岩土组构单位体积土壤蓄水量影响。

2 结果

2.1 石灰岩岩土组构模拟土槽土壤水分动态变化特征

不同岩土组构石灰岩模拟土槽土壤水分动态观测结果如图 3 所示，各石灰岩模拟土槽总体上受外界降雨条件变化的影响呈现波动性变化，各土层土壤体积含水量剧烈波动多集中于雨季。土壤体积含水量在 6 至 10 月处于高位且波动剧烈，11 月后含水量逐渐下降，符合 6 至 10 月为雨季的特征。同时，6 至 10 月的雨季，各土层土壤体积含水量均长期处于高位，其中 8:1LS、4:1LS₁₀ 以及 8:1LS₁₀ 三个模拟土槽 100 cm 处的土壤体积含水量在雨季甚至长期处于 50%左右。不同岩土组构下各土层雨季土壤体积含水量均值（11.07%~43.21%）均高于旱季（9.19%~32.42%），且土壤体积含水量随土壤深度先降低后增加的趋势，其中 40 与 70 cm 最低。此外，通过变异系数（CV）可知（图 4），雨季石灰岩不同结构的模拟土槽 CV 除少数土层外，均高于旱季土壤体积含水量 CV，且大部分石灰岩模拟土槽中 CV 随着土层的加深呈现逐渐降低的趋势，仅有 4:1LS₁₀、8:1LS₁₀ 以及 2:1LS₂₀ 三个土槽 CV 在 100 cm 的底层土壤突然增大的情况。



注：2:1LS、2:1LS₁₀、2:1LS₂₀ 分别表示岩土比为 2:1 基岩裸露、表层覆盖 10 cm 和 20 cm 土壤的石灰岩岩土组构；4:1LS、4:1LS₁₀、4:1LS₂₀ 分别表示岩土比为 4:1 基岩裸露、表层覆盖 10 cm 和 20 cm 土壤的石灰岩岩土组构；8:1LS、8:1LS₁₀、8:1LS₂₀ 分别表示岩土比为 8:1 基岩裸露、表层覆盖 10 cm 和 20 cm 土壤的石灰岩岩土组构。下同。Note: The notations 2:1LS, 2:1LS₁₀, and 2:1LS₂₀ represent limestone rock-soil configurations with a rock-to-soil ratio of 2:1, corresponding to bare bedrock, 10 cm

surface soil cover, and 20 cm surface soil cover, respectively; 4:1LS, 4:1LS₁₀, and 4:1LS₂₀ represent those with a ratio of 4:1; and 8:1LS, 8:1LS₁₀, and 8:1LS₂₀ represent those with a ratio of 8:1. The same below.

图3 不同岩土结构石灰岩土壤体积含水量动态变化

Fig. 3 Variation of soil volumetric moisture content in limestone with different soil-rock structures.

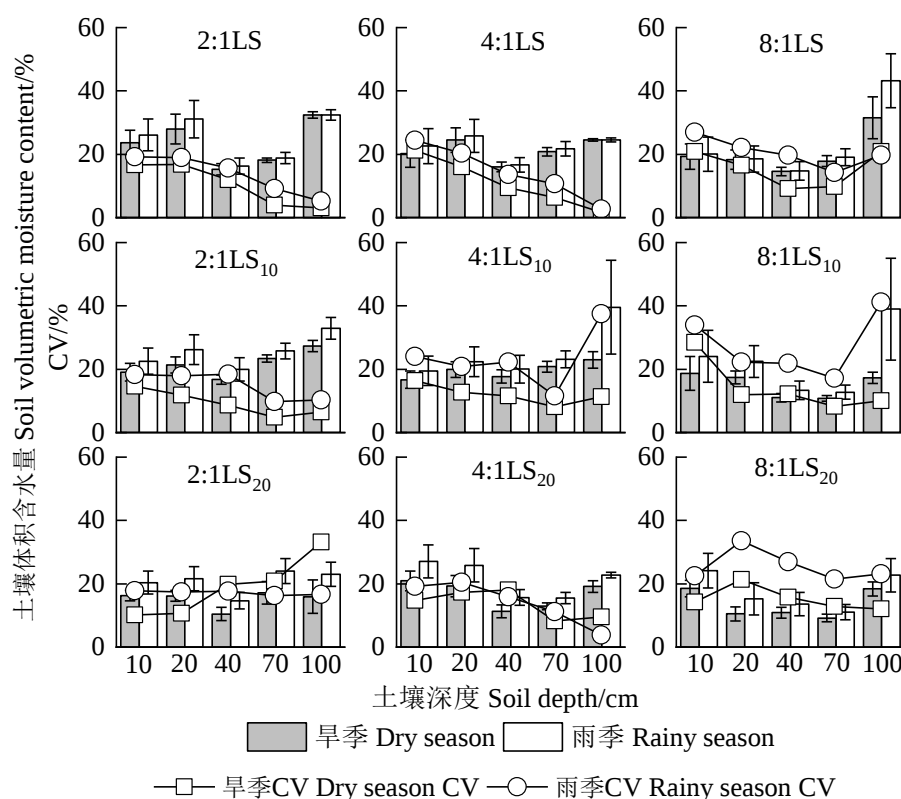
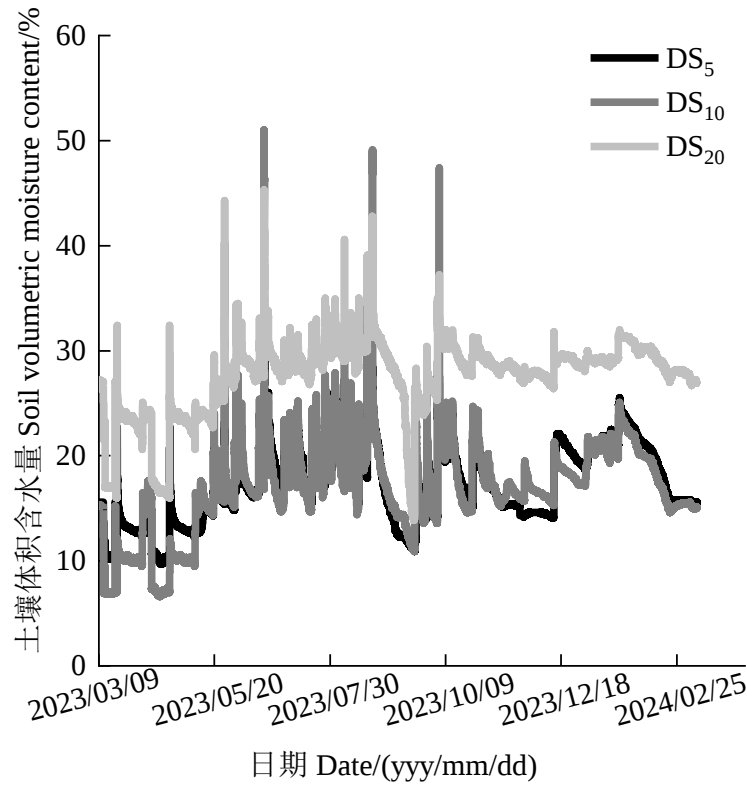


图4 不同石灰岩岩土结构雨季/旱季土壤体积含水量

Fig. 4 Rainy/dry season soil volumetric moisture content statistics for different soil-rock structures of limestone.

2.2 白云岩岩土结构模拟土槽土壤水分动态变化特征

研究中设置不同厚度表土覆盖的白云岩模拟土槽在一个水文年内土壤的水分动态变化如图5所示,三种岩土结构下的白云岩模拟土槽剧烈波动时段为6至10月,与雨季时间相重合。雨季时期白云岩土壤体积含水量高于其旱季时期(雨季均值18.36%~28.70%,旱季15.10%~25.53%),这表明白云岩土壤体积含水量相比于石灰岩较为集中且较低。此外,由图6可知,白云岩表层覆盖5 cm与10 cm土壤的岩土结构在雨季和旱季土壤体积含水量与CV差别不大,但20 cm土壤覆盖的白云岩岩土结构却有着较高的土壤体积含水量(旱季25.53%,雨季28.70%)和最小的CV(旱季19.60%,雨季10.24%)。



注：DS₅、DS₁₀和DS₂₀分别表示表层覆盖5 cm、10 cm和20 cm土壤的白云岩土组构。下同。Note: DS₅, DS₁₀, and DS₂₀ represent dolomite rock-soil configurations with surface soil cover of 5 cm, 10 cm, and 20 cm, respectively. The same below.

图5 不同岩土组构白云岩土壤体积含水量动态变化

Fig. 5 Variation of soil volumetric moisture content in dolomite with different soil-rock structures

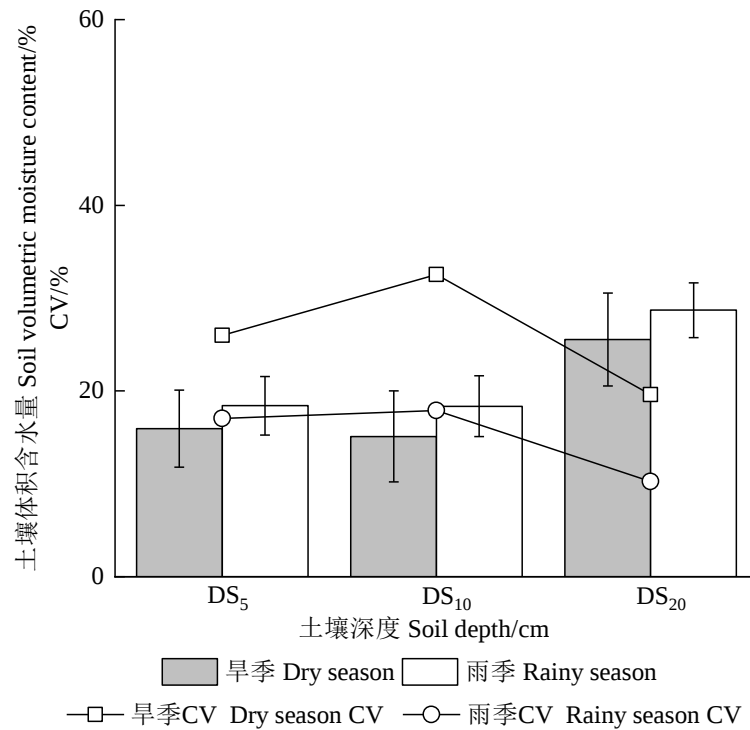


图6 白云岩不同岩土组构雨季/旱季土壤体积含水量

Fig. 6 Rainy/dry season soil volumetric moisture content statistics for different soil-rock structures of dolomite

2.3 岩土组构梯度变化下土壤水分特征

在考虑岩土比的影响下，结合土壤水分监测结果，表3展现了各模拟土槽不同土层土壤

蓄水量与单位体积土壤蓄水量。石灰岩模拟土槽在考虑单位体积中岩石占比的情况下土壤蓄水量急剧下降，且随着岩石占比的增加，同一土层土壤蓄水量呈递减趋势，而表层覆盖土壤的增加对单位体积模拟土槽土壤蓄水量起着促进作用。裸露基岩的石灰岩岩土组构，随着岩石占比的增加，岩土比为 4:1 与 8:1 的岩土组构单位体积土壤蓄水量仅为 2:1 岩土比的 54.50% 与 32.46%；在 10 cm 表土覆盖的情况下，4:1 与 8:1 的岩土组构单位体积土壤蓄水量为 2:1 岩土比的 64.09%与 40.70%；当表土覆盖达到 20 cm 后，4:1 与 8:1 的岩土组构单位体积土壤蓄水量可达到 2:1 岩土比的 85.75%与 55.26%。白云岩岩土组构也存在着相似的现象，在表土覆盖从 5 cm 提升至 20 cm 过程中，单位体积土壤蓄水量呈现出指数型上升趋势，DS₁₀ 是 DS₅ 约 1.94 倍；DS₂₀ 是 DS₅ 与 DS₁₀ 约 6.32 倍与 3.26 倍。

由图 7 可知，碳酸盐岩在梯度变化下的单位体积土壤蓄水量拟合结果。其中，石灰岩单位体积土壤蓄水量受到岩土比与表层土壤厚度两个自变量影响，通过拟合得出公式 $Z=-24.48X+0.88Y+100.47$ ($R^2=0.9328$)，其中 X 为岩土比， Y 为表层土壤厚度， Z 为 1 m³ 体积下土壤蓄水量。由拟合公式可知，岩土比与单位体积土壤蓄水量呈负相关关系，表层土壤则与土壤水分含量呈正相关关系。而白云岩则可通过指数函数进行拟合，公式为 $Z=13.85e^{(X/12.70)}-13.26$ ， R^2 为 0.9958，单位体积土壤蓄水量伴随土壤深度增加呈现上升趋势。

表 3 不同岩土组构单位体积土壤蓄水量

Table 3 Soil water storage capacity per unit volume for different soil-rock structures/mm

岩土组构 Soil-rock structure	土层深度 Soil depth/cm					总量 Total/mm
	0~10	10~20	20~40	40~70	70~100	
2:1LS	8.23	9.75	10.46	18.42	32.43	79.29
4:1LS	4.24	5.00	6.52	12.73	14.72	43.21
8:1LS	2.18	2.04	3.26	6.12	12.14	25.74
2:1LS ₁₀	20.55	7.80	12.07	24.39	29.66	94.47
4:1LS ₁₀	17.86	4.18	7.48	13.07	17.96	60.55
8:1LS ₁₀	20.94	2.17	2.67	3.88	8.79	38.45
2:1LS ₂₀	17.96	18.45	8.15	20.03	18.87	83.46
4:1LS ₂₀	23.48	22.03	5.26	8.41	12.39	71.57
8:1LS ₂₀	20.88	12.50	2.68	3.32	6.74	46.12
DS ₅	8.49					8.49
DS ₁₀	16.46					16.46
DS ₂₀		53.68				53.68

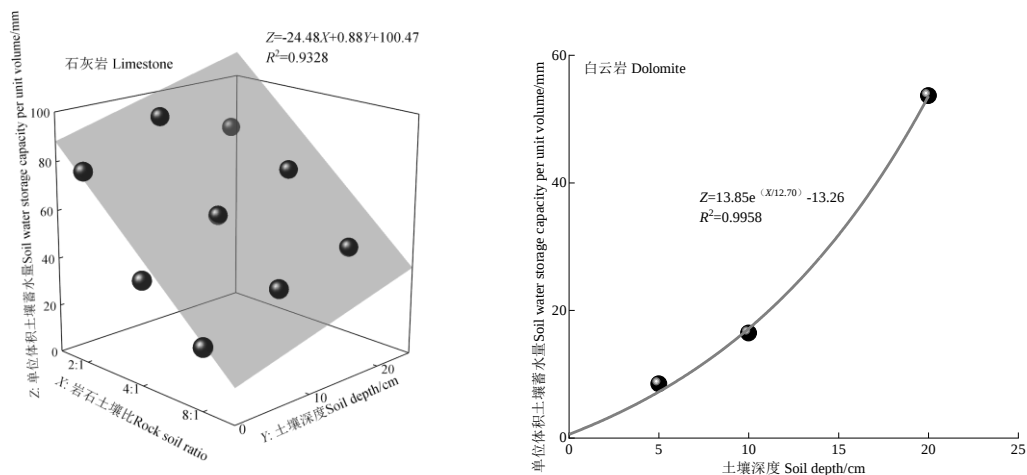


图 7 碳酸盐岩不同岩土组构单位体积土壤蓄水量梯度变化拟合

Fig.7 Fitting of soil water storage capacity per unit volume gradient changes in carbonate rocks with different soil-rock structures

2.4 土壤蓄水量气象影响因素

单位体积土壤蓄水量与气象因子的相关性分析结果表明（表 4），单位体积石灰岩岩土组构下土壤蓄水量与降水和相对湿度有着紧密联系，其中裸露基岩地表无土壤覆盖的三个石灰岩土槽与降水呈显著正相关，其余石灰岩模拟土槽均与降水呈极显著正相关；此外，石灰岩岩土组构除 8:1LS、4:1LS₂₀ 外，均与相对湿度存在显著相关性。不同于石灰岩，白云岩的模拟土槽仅与相对湿度存在显著性相关（0.643*、0.673*、0.604*）。

表 4 不同岩土组构单位体积土壤蓄水量与气象因子的相关性

Table 4 Pearson correlation analysis between soil water storage capacity per unit volume and meteorological factors in different soil-rock structures

岩土组构 Soil-rock structure	降雨量 Precipitation	气温 Temperature	辐射 Radiation	风速 Wind speed	相对湿度 Relative humidity
2:1LS	0.579*	-0.05	-0.271	-0.36	0.854**
4:1LS	0.581*	0.051	-0.141	-0.325	0.747**
8:1LS	0.870*	0.689*	0.522	-0.517	0.542
2:1LS ₁₀	0.863**	0.454	0.164	-0.547	0.761*
4:1LS ₁₀	0.859**	0.451	0.224	-0.407	0.684*
8:1LS ₁₀	0.909**	0.544	0.316	-0.508	0.733**
2:1LS ₂₀	0.799**	0.459	0.179	-0.434	0.684*
4:1LS ₂₀	0.899**	0.742**	0.554	-0.614*	0.48
8:1LS ₂₀	0.906**	0.583*	0.317	-0.590*	0.649*
DS ₅	0.441	-0.063	-0.248	-0.073	0.643*
DS ₁₀	0.413	0.016	-0.19	-0.155	0.673*
DS ₂₀	0.428	0.013	-0.191	-0.112	0.604*

注 Note: * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$.

3 讨论

3.1 不同岩性下土壤水分差异特征

不同岩性所风化形成的土壤在水文过程中存在着明显的不同,原因主要源于土壤内部物理、化学、生物性质差异^[14, 28-29]。喀斯特地区广泛分布的石灰岩与白云岩虽然均能风化为石灰土,但二者不同的风化方式导致土壤分布方式不同,进而控制着区域内关键带的物质循环过程。本研究中,石灰岩不同岩土组构模拟土槽中土壤体积含水量的 CV 均随土壤深度的增加呈减小趋势,且 100 cm 处土壤水分含量长期呈现出较高水平,表明石灰岩所风化形成的裂隙为土壤纵向分布提供空间,深层土壤受外界影响作用较弱,土壤体积含水量较为稳定,这与梁静等^[30]对深层土壤的研究结果相似。此外,石灰岩不同岩土组构的各土层在雨季的土壤体积含水量(11.07%~43.21%)与土壤体积含水量的 CV 均高于旱季(9.19%~32.42%),展现出石灰岩中土壤水分在雨季的高敏感性,可能是由于丰沛的雨季降水提升了土壤水分含量,同时,大量降水结合石灰土高渗透性和岩土界面快速流通道快速下渗,使水分在各土层快速通过,从而波动剧烈^[31]。同时,高渗透性石灰土与岩土界面快速流通道还导致了 40~70 cm 土层的土壤水分含量较低,而 100 cm 土层存在高含水量的特点,因为降水通过岩土界面以及岩石缝隙快速下渗,而 10~20 cm 深度的土壤虽更易受外界环境影响而导致水分蒸发,但降雨可及时补给,因而土壤体积含水量也高于 40~70 cm 土层。

与石灰岩的岩土组构不同,白云岩的均匀风化特征使其风化成土以浅薄、均匀的方式分布于白云岩上方,因而其土壤水分的变化与石灰岩有着极大差异。一方面,白云岩岩土组构雨季的土壤体积含水量均值虽然高于旱季,但旱季与雨季均低于 30%,且较为接近且集中;另一方面,浅薄土壤均匀覆盖的白云岩在本研究的不同土壤厚度下,雨季土壤体积含水量 CV 均低于旱季,与石灰岩的岩土组构结果相反。张君等^[16]指出,喀斯特地区浅薄土壤分布的区域,相比于土壤厚度较深的区域,其雨水的滞留时间更短,降水通过浅薄土壤和高渗透性的岩石缝隙快速渗漏,因而雨季大量降雨并未长期储存于白云岩浅薄的土壤中,所以白云岩不同岩土组构的土壤体积含水量相差不大。同时,白云岩岩土组构由于土壤分布浅薄,极易受蒸散发影响,所以旱季时长期处于低位的土壤含水量在少量降雨中响应迅速且剧烈,故而旱季的土壤体积含水量 CV 高于雨季^[1]。

3.2 量化不同岩土组构土壤水分差异

喀斯特地区土层不连续、土层浅薄、岩石裸露程度高的特点虽被广泛认知,但其中土壤分布方式规律性弱,相关定量研究较少,因而对喀斯特区岩土占比的定量研究逐渐成为热点。石灰岩与白云岩因岩性差异所产生的不同土壤分布方式控制着地表植被生长的同时,还存在岩石与土壤占比差异造成植被的不同^[17]。通过设定梯度变化下不同比例岩土组构模拟土槽观测可知,单位体积下岩石的占比压缩了土壤空间,导致土壤赋存量急剧减少,相应的单位体积内土壤蓄水量也随土壤体积占比减少而降低,进而控制着地表植被的分布。Liu 等^[14]就指出在碳酸盐岩分布地区,木本植物的覆盖度随宽度超过 1mm 的裂缝数量的增加而呈线性增加,而草本植物的覆盖度则呈相反趋势($P<0.01$)。另一方面,岩石占比的增加虽然会造成单位体积内土壤水分含量的减少,但 Chen 等^[12]研究还表明 80%裸露基岩的蒸渗仪较 50%裸露基岩的蒸渗仪蒸发量少 8%,这说明裸露岩石压缩土壤水分含量的同时还一定程度上抑制了水分的蒸发,这是因为裸露岩石对土壤存在遮阴作用的同时,不透水的岩石还将降水汇聚到土壤中^[32]。本研究通过梯度变化下岩土组构模拟试验结果发现,单位体积下白云岩岩土组构土壤蓄水量可通过指数函数 $Z=13.85e^{(X/12.70)}-13.26$ 进行拟合,展现出白云岩坡地土壤水分含量与土壤厚度呈指数型上升;而石灰岩岩土组构则受到表土覆盖深度与岩土比例的双重控制($Z=-24.48X+0.88Y+100.47$, Z 为土壤蓄水量, X 为岩土比, Y 为土壤深度)。虽然研

究结果很好地契合了现有相关研究结论,表明喀斯特地区土壤蓄水量的变化受到表土厚度与岩石占比的影响,但岩土组构对区域内土壤水分运移过程、赋存特征的影响机理还需进一步细化研究。

3.3 气象因素对不同岩土组构土壤水分的影响

西南喀斯特地区受西南季风气候影响,存在雨热同季现象,旱季与雨季差异十分明显,明确气象因素对土壤水分的控制作用,对水资源利用起着决定性作用。有研究通过同位素对碳酸盐岩坡地植被耗水观测提出,植被在旱季会向更深层裂隙中获取水分(90%以上,最高可达100%),而雨季则依赖土壤中水分^[31,33]。在本研究中,石灰岩与白云岩的不同岩土组构旱、雨季土壤含水量差异明显,旱季少量的降水补给,结合岩石对土壤赋存空间的压缩,共同导致单位体积内土壤水分供给能力弱,植被生长受限,一方面导致区域内降雨丰沛,但植被多以耐旱为主,另一方面导致喀斯特地区存在森林生产力和生物量远低于热带低纬度常绿阔叶林和水热条件相似的人工林,也远低于高纬度针叶、阔叶混交林和水热条件相似的高山针叶林的现象^[34-35]。

同时,本研究通过相关性分析发现单位体积下石灰岩不同岩土组构土壤蓄水量均与降雨呈现出较好的相关性,但同时也可看出随着岩石占比的增加,单位体积内土壤蓄水量与降雨相关性呈现递增趋势,表明石灰岩土壤赋存空间的减小导致水分含量受外界降水影响增加,这是由于不透水的岩石对下渗水分存在汇聚作用,岩石越多则对水分汇聚作用越强,对降水的响应越明显^[3,32,36]。不同土层厚度的白云岩单位体积土壤蓄水量与降水均无显著相关性,是由于浅薄土层对水分蓄存能力较弱,降雨经过浅薄土壤进入下层高渗透性岩石后快速渗漏,因而对降水响应能力弱,最终导致白云岩浅薄的土壤厚度水分条件较差^[4]。此外,相对湿度与石灰岩、白云岩的土壤蓄水量均有着显著的相关性,究其原因,相对湿度通过影响土壤表面的蒸发过程进而作用于土壤水分含量,当相对湿度较高时,空气水汽压差较小,土壤水分蒸发速率减缓^[37]。喀斯特地区高异质性的土壤特点加大了相关研究难度,通过梯度变化的模拟控制试验虽然可以很好地将复杂环境因子进行定量分析,但未来研究还需在此基础上进一步探索揭示喀斯特地区不同岩土组构土壤水分差异的机理。

4 结 论

喀斯特不同岩土组构模拟土槽中土壤水分波动随着土壤深度的增加呈减小趋势,石灰岩不同岩土组构雨季时期的土壤体积含水量均高于旱季,且雨季时体积土壤含水量 CV 高于旱季,白云岩模拟土槽则与之相反,表明岩性差异下不同土壤分布方式控制着喀斯特地区土壤水分的变化特征。石灰岩在 40~70 cm 土层的土壤体积含水量低于其余土层,而 100 cm 处土壤体积含水量较高,且单位体积内石灰岩岩土组构整体土壤蓄水量高于白云岩,表明石灰岩可为石漠化区木本植物恢复提供更多可靠水源。白云岩浅薄、均匀的土壤分布方式造成其水分含量低且与降雨相关性不显著,其旱季土壤含水量的高波动性也表明其对降雨的响应特点有别于石灰岩。石灰岩与白云岩土壤水分含量除与气象因子有关外,还与单位体积下土壤赋存量存在密切联系,通过数学公式拟合得出石灰岩公式为 $Z = -24.48X + 0.88Y + 100.47$ ($R^2 = 0.9328$),其中 X 为岩土比, Y 为表层土壤深度, Z 为 1 m^3 体积下土壤水分含量;白云岩则为 $Z = 13.85e^{(X/12.70)} - 13.26$, X 为土壤厚度。由此可见,岩土组构控制着喀斯特地区的土壤水分,应进一步整合多尺度监测数据,构建考虑岩土组构空间异质性的土壤水分耦合模型,以期对西南喀斯特地区石漠化治理与生态水文过程研究提供理论支撑。

参考文献 (References)

- [1] Chen H S, Zhang W, Wang K L, et al. Soil moisture dynamics under different land uses on karst hillslope in northwest Guangxi, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2010, 61(6): 1105-1111.
- [2] 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.
- [3] Luo Z D, Lian J J, Nie Y P, et al. Improving soil thickness estimations and its spatial pattern on hillslopes in karst forests along latitudinal gradients[J]. *Geoderma*, 2024, 441: 116749.
- [4] Sun B, Liang Y, Xu R K, et al. Long-term research on red soil degradation and remediation promotes development of ecological recycling agriculture in hilly region of southeast China[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33(7): 746-757. [孙波, 梁音, 徐仁扣, 等. 红壤退化与修复长期研究促进东南丘陵区生态循环农业发展[J]. *中国科学院院刊*, 2018, 33(7): 746-757.]
- [5] Peng X H, Wang Y Q, Jia X X, et al. Some key research fields of Chinese soil physics in the new era: Progresses and perspectives[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(5): 1071-1087. [彭新华, 王云强, 贾小旭, 等. 新时代中国土壤物理学主要领域进展与展望[J]. *土壤学报*, 2020, 57(5): 1071-1087.]
- [6] Wang Y Q, Zhang S K, Zhang P P, et al. Research progress and prospect of soil hydrological processes in critical zone of the Loess Plateau[J]. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(8): 1346-1360. [王云强, 张少康, 张萍萍, 等. 黄土高原关键带土壤水文过程研究进展与展望[J]. *地质通报*, 2024, 43(8): 1346-1360.]
- [7] Peng X D, Dai Q H, Ding G J, et al. Role of underground leakage in soil, water and nutrient loss from a rock-mantled slope in the karst rocky desertification area[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 578: 124086.
- [8] Fu T G, Chen H S, Zhang W, et al. Spatial variability of surface soil saturated hydraulic conductivity in a small karst catchment of southwest China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(3): 2381-2391.
- [9] Ford D, Williams P. *Karst Hydrogeology and Geomorphology*[M]. Chichester, West Sussex, England: Wiley, 2007.
- [10] Li Y Q, Wang S J, Peng T, et al. Hydrological characteristics and available water storage of typical karst soil in SW China under different soil-rock structures[J]. *Geoderma*, 2023, 438: 116633.
- [11] Luo W J, Yang K P, Wang Y W, et al. Influence of different rock-soil fabrics on carbonate weathering carbon sink flux in karst regions[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2022, 41(3): 208-214. [罗维均, 杨开萍, 王彦伟, 等. 喀斯特地区不同岩土组构对岩溶碳通量的影响[J]. *地质科技通报*, 2022, 41(3): 208-214.]
- [12] Chen J, Luo W J, Zeng G N, et al. Response of surface evaporation and subsurface leakage to precipitation for simulated epikarst with different rock-soil structures[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 610: 127850.
- [13] Zhang X B, Wang S J, Cao J H, et al. Characteristics of water loss and soil erosion and some scientific problems on karst rocky desertification in Southwest China karst area[J]. *Carsologica Sinica*, 2010, 29(3): 274-279. [张信宝, 王世杰, 曹建华, 等. 西南喀斯特山地水土流失特点及有关石漠化的几个科学问题[J]. *中国岩溶*, 2010, 29(3): 274-279.]
- [14] Liu H Y, Jiang Z H, Dai J X, et al. Rock crevices determine woody and herbaceous plant cover in the karst critical zone[J]. *Science China Earth Sciences*, 2019, 62(11): 1756-1763.
- [15] Yang W, Peng X D, Dai Q H, et al. Storage infiltration of rock-soil interface soil on rock surface flow in the rocky desertification area[J]. *Geoderma*, 2023, 435: 116512.
- [16] Zhang J, Feng N, Li J J, et al. Water stable isotope evidence reveals the impact of soil thickness on mobile water recharge in Karst Hillslopes, Southwest China[J]. *Scientia Sinica: Terrae*, 2025, 55(10): 3489-3500. [张君, 冯娜, 李嘉洁, 等. 西南喀斯特坡地土壤厚度对可移动水补给特征的影响: 基

于水稳定同位素的观点[J]. 中国科学(地球科学), 2025, 55(10): 3489-3500.]

- [17] 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.
- [18] Liu F, Wang S J, Luo H B, et al. Micro-habitats in karst forest ecosystem and variability of soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(6): 1055-1062. [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.]
- [19] Ding Y L, Zhou Y C. Coupling relationship between slope/soil thickness and rock exposure rate in the karst watershed[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2019, 50(5): 1053-1061. [丁颖蕾, 周运超. 喀斯特小流域坡度-土层厚度与岩石裸露率间耦合关系的研究[J]. 土壤通报, 2019, 50(5): 1053-1061.]
- [20] Zhang J, Chen H S, Fu Z Y, et al. Investigation on the aquifer structure of small watershed critical zone on karst dolomite in southwest China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60(4): 969-982. [张君, 陈洪松, 付智勇, 等. 西南喀斯特小流域关键带含水介质分布特征[J]. 土壤学报, 2023, 60(4): 969-982.]
- [21] Peng T, Wang S J. Effects of land use, land cover and rainfall regimes on the surface runoff and soil loss on karst slopes in southwest China[J]. *Catena*, 2012, 90: 53-62.
- [22] Jiao X H, Peng T, Li S H, et al. Preliminary research on the threshold of erosive rainfall on karst slopes[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(5): 57-63. [焦锡桦, 彭韬, 李社红, 等. 喀斯特坡地侵蚀性降雨阈值初探[J]. 水土保持学报, 2023, 37(5): 57-63.]
- [23] Bai X Y, Zhang S R, Ran C, et al. Ten problems and solutions for restoration of karst ecosystem in Southwest China[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2023, 38(12): 1903-1914. [白晓永, 张思蕊, 冉晨, 等. 我国西南喀斯特生态修复的十大问题与对策[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(12): 1903-1914.]
- [24] Zhou L, Peng T, Wang S J. Characteristics and ecological functions of water conservation in karst regions of southwest China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2025, 39(3): 1-14. [周利, 彭韬, 王世杰. 中国西南喀斯特水源涵养特点及其生态功能[J]. 水土保持学报, 2025, 39(3): 1-14.]
- [25] Wang A L, Xing Y X, Wang S S, et al. Spatial and temporal evolution trends of groundwater drought and its correlation with meteorological drought in Guizhou Province[J]. *Agricultural Water Management*, 2025, 318: 109682.
- [26] Liu W H, Chen X, Wang L C, et al. The role of karstic soil-rock structures on subsurface stormflow dynamics in southwest China[J]. *Journal of Hydrology*, 2025, 657: 133126.
- [27] Liu Y J. Study on occurrence characteristics and systematic classification of typical lime soil in limestone outcropping area of Guizhou Province[D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2022. [刘玉晶. 贵州省石灰岩出露区典型石灰土发生特性及系统分类研究[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2022.]
- [28] Li X, Li Y P, Zheng Y L, et al. Ageing characteristics of different types of microplastics in soil and their effects on earthworm toxicity [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2026, 63(2): 548-558. [李霞, 李彦霏, 郑亚兰, 等. 土壤中不同类型微塑料老化特征及其对蚯蚓毒性效应的影响[J]. 土壤学报, 2026, 63(2): 548-558.]
- [29] Zhou Q W, Zhu A X, Yan W H, et al. Impacts of forestland vegetation restoration on soil moisture content in humid karst region: A case study on a limestone slope[J]. *Ecological Engineering*, 2022, 180: 106648.
- [30] Liang J, Wang G L, Xu X Y, et al. Dynamics of soil moisture and its response to rainfall in *Caragana korshinskii* plantation in Loess Hilly Region[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2025, 62(4): 998-1009. [梁静, 王国梁, 徐肖阳, 等. 黄土丘陵区柠条人工林土壤水分动态及其对降水的响应[J]. 土壤学报, 2025, 62(4): 998-1009.]

-
- [31] Yan Y J, Dai Q H, Yang Y Q, et al. Epikarst shallow fissure soil systems are key to eliminating karst drought limitations in the karst rocky desertification area of SW China[J]. *Ecohydrology*, 2022, 15(2): e2372.
- [32] Zhao Z M, Wang Q H. Effect of rock film mulching on preferential flow at rock–soil interfaces in rocky karst areas[J]. *Water*, 2023, 15(9): 1775.
- [33] Rong L, Chen X, Chen X H, et al. Isotopic analysis of water sources of mountainous plant uptake in a karst plateau of southwest China[J]. *Hydrological Processes*, 2011, 25(23): 3666-3675.
- [34] Liu C C, Wei Y F, Liu Y G, et al. Biomass of canopy and shrub layers of karst forests in Puding, Guizhou, China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2009, 33(4): 698-705. [刘长成, 魏雅芬, 刘玉国, 等. 贵州普定喀斯特次生林乔灌层地上生物量[J]. *植物生态学报*, 2009, 33(4): 698-705.]
- [35] Liu Y G, Liu C C, Wei Y F, et al. Species composition and community structure at different vegetation successional stages in Puding, Guizhou Province, China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2011, 35(10): 1009-1018. [刘玉国, 刘长成, 魏雅芬, 等. 贵州省普定县不同植被演替阶段的物种组成与群落结构特征[J]. *植物生态学报*, 2011, 35(10): 1009-1018.]
- [36] Sohrt J, Ries F, Sauter M, et al. Significance of preferential flow at the rock soil interface in a semi-arid karst environment[J]. *Catena*, 2014, 123: 1-10.
- [37] Gui Y X, Peng T, Dai Q H, et al. Transpiration characteristics of common trees and their responses to meteorological factors in secondary forests on karst slopes[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2025, 39(1): 21-29. [桂钰翔, 彭韬, 戴全厚, 等. 喀斯特坡地次生林常见树木蒸腾特征及其对气象因子的响应[J]. *水土保持学报*, 2025, 39(1): 21-29.]

(责任编辑: 檀满枝)