

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.04.027

田卓,张帅普,徐勤学.石漠化坡地不同整地措施下表层土壤水分空间分布特征[J].水土保持学报,2024,38(4):335-345.

TIAN Zhuo, ZHANG Shuaipu, XU Qinxue. Spatial distribution characteristics of surface soil moisture content in the rocky desertification slope under different land preparation measures[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(4): 335-345.

石漠化坡地不同整地措施下表层土壤水分空间分布特征

田卓^{1,2}, 张帅普^{2,3}, 徐勤学^{2,3}

(1. 河海大学农业科学与工程学院, 南京 210098; 2. 桂林理工大学广西环境污染控制理论与技术重点实验室, 广西 桂林 541004;
3. 桂林理工大学岩溶地区水污染控制与用水安全保障协同创新中心, 广西 桂林 541004)

摘要: [目的] 分析石漠化坡地不同整地措施下表层土壤水分的空间分布特征, 为提高石漠化坡地的水资源利用效率和农业管理水平提供参考依据。[方法] 以石漠化坡地中反坡、斜坡和平地 3 种整地措施下的柑橘林地为研究对象, 采用经典统计学、地统计学和多重分形理论研究土壤水分的空间分布特征。[结果] (1) 反坡的土壤含水量显著高于平地 and 斜坡 ($p < 0.05$), 平地土壤含水量的空间连续性和聚集性以及总变异和结构性变异强于斜坡和反坡。(2) 不同整地措施下的土壤含水量均具有中等强度变异性 ($10.00\% \leq CV \leq 100.00\%$)、强空间自相关性 [$C_0/(C_0 + C) \leq 0.25$] 和极显著 ($p < 0.01$) 的空间聚集性。(3) 不同整地措施下的土壤含水量分布具有多重分形特征, 旱季时反坡的土壤含水量分布区间最窄, 斜坡的土壤含水量分布更离散; 雨季时平地的土壤含水量分布区间最窄, 反坡的土壤含水量更不均匀。[结论] 土壤机械组成是影响土壤含水量的主要因素, 反坡整地措施更有利于改善石漠化坡地的土壤水分条件。

关键词: 石漠化坡地; 整地措施; 土壤水分; 空间分布

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)04-0335-11

Spatial Distribution Characteristics of Surface Soil Moisture Content in the Rocky Desertification Slope Under Different Land Preparation Measures

TIAN Zhuo^{1,2}, ZHANG Shuaipu^{2,3}, XU Qinxue^{2,3}

(1. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Guangxi Key Laboratory of Environmental Pollution Control Theory and Technology, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China; 3. Collaborative Innovation Center for Water Pollution Control and Water Security in Karst Region, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract: [Objective] The objective of this study was to analyze the spatial distribution characteristics of surface soil moisture content in the rocky desertification slope under different land preparation measures and to provide references for improving water resources utilization efficiency and agricultural management level on rocky desertification slopes. [Methods] The citrus forest under three land preparation measures of reverse slope, flat terrace, and natural slope on rocky desertification slope were chosen as the research objects. Classical statistics, geostatistics and multifractal theory were used to analyze the spatial distribution characteristics of soil moisture content. [Results] (1) The soil moisture content of the reverse slope was significantly higher than that of the flat terrace and the natural slope ($p < 0.05$). The spatial continuity, aggregation, total and structural variability of soil moisture content on the flat terrace were stronger than those on the reverse slope and the natural slope. (2) The soil moisture content of different land preparation measures showed moderate variability ($10.00\% \leq CV \leq 100.00\%$), strong spatial autocorrelation [$C_0/(C_0 + C) \leq 0.25$], and extremely significant ($p < 0.01$) spatial aggregation. (3) The distribution of soil moisture content under different land preparation measures has multi-fractal characteristics. During the dry season, the

收稿日期: 2024-02-28 修回日期: 2024-04-05 录用日期: 2024-04-08 网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-05-22

资助项目: 国家自然科学基金项目 (42267045); 广西重点研发计划项目 (桂科 AB22035058)

第一作者: 田卓 (1998—), 男, 博士研究生, 主要从事土壤物理与生态水文研究。E-mail: 17371336919@163.com

通信作者: 张帅普 (1989—), 男, 博士, 副教授, 主要从事土壤—植被—水文耦合过程研究。E-mail: shuaipuzhang@glut.edu.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

distribution range of soil moisture content was narrowest on the reverse slope, and more discrete on the natural slope. During the rainy season, the distribution range of soil moisture content was narrowest on the flat terrace, and more uneven on the reverse slope. [Conclusion] Soil mechanical composition was the main factor that affected soil moisture content, and the reverse slope was more conducive to improved soil moisture conditions on rocky desertification slopes.

Keywords: rocky desertification slope; land preparation measure; soil moisture; spatial distribution

Received: 2024-02-28

Revised: 2024-04-05

Accepted: 2024-04-08

Online(www.cnki.net): 2024-05-22

我国西南地区喀斯特地貌集中分布,是世界上三大喀斯特集中分布区中连片裸露碳酸盐面积最大、岩溶发育最强烈的地区^[1-3]。喀斯特地区土层浅薄、水土流失严重、土地承载力低、水土资源匮乏且时空分布不均,人地矛盾突出^[4-5]。为了扩大农产效益,当地村民自发开垦坡地,增加农业种植面积,高强度的农业活动使该地区生态系统退化,岩石逐渐裸露,石漠化问题严重^[6-7]。作为水资源的重要组成部分,土壤水分是石漠化坡地生态恢复重建和持续性耕作的关键限制因子,充分掌握石漠化坡地土壤水分的空间分布特征可以了解坡地整体的土壤水分条件,对石漠化坡地的生态恢复和持续性耕作具有重要意义。

土壤是具有时空变异的连续体,贮存于土壤中的水分因受气候条件、土壤质地、土层深度、植被状况和人类活动等多种因素影响,具有复杂的空间变异特征^[8-12]。由于地质背景的特殊性和地形地貌的复杂性,石漠化坡地土壤水分的运移过程与其他地区显著不同,同一坡地内的土壤水分运移规律也存在明显差异,土壤水分空间变异特征明显^[13]。徐慧芳等^[14]在研究石漠化坡地不同土地利用方式下土壤水分的时空变异特征时发现,同一土地利用方式下旱季和雨季的表层土壤水分空间分布格局相似,不同土地利用方式下空间分布格局则不同;张川等^[15]研究桂西北喀斯特地区典型灌丛与草灌 2 种植被类型坡地的土壤水分空间变异特征发现,2 种植被类型坡地的土壤水分均具有明显的空间依赖性和空间结构,且表层土壤水分含量整体均沿坡面自上而下呈递增趋势。整地措施对土壤水分含量也存在显著影响,在斜坡上修建反坡和平地台阶能通过改变地表形态减少坡面径流发生而提高坡地对水分的蓄集效果。陈雪等^[16]研究了等高反坡台阶整地措施对坡耕地土壤贮水量的影响,结果表明,等高反坡台阶能有效拦截坡面径流、增加水分入渗,提高坡地的土壤贮水能力;费喜亮等^[11]在研究土壤水分垂直分布规律时发现,梯田整地措施下的土壤水分含量在不同土层深度均高于坡地。此外,李春茂等^[17]研究表明,修建梯田的田坎对土壤水分的空间分布影响显著,土壤含水量与距田坎的距离

呈极显著负相关,且随着尺度的增加逐渐接近梯田的平均水平。

当前,对石漠化坡地土壤水分空间分布的研究多针对于不同的土地利用方式,而在耕作过程中,为了石漠化坡地的生态恢复和持续性耕作,采取不同的整地措施,对于整地措施不同的石漠化坡地,土壤水分空间分布特征的研究同样需要进一步深入。为此,本文在石漠化坡地中选择反坡、斜坡和平地 3 种整地措施下的柑橘林地作为研究对象,利用经典统计学、地统计学和多重分形理论研究不同整地措施下石漠化坡地的土壤水分空间分布特征,以期对石漠化坡地水土保持和农业耕作管理提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于广西桂林市灵川县(25°04'40"—25°04'50"N, 110°29'30"—110°29'55"E),海拔 280~330 m,为典型的岩溶峰丛地貌(图 1)。该区域属亚热带季风气候,四季分明、雨量充沛、阳光充足、热量丰富、夏长冬短、雨热同期,年平均日照时间 1 614.7 h,年平均无霜期 320 天,年平均气温 18.7℃,年平均降水量 1 785.2 mm^[17]。坡地内为人工柑橘林地,植被单一,土层浅薄,植被覆盖度约为 53%,坡度约为 27°。参考熊康宁^[18]的石漠化分级标准,本研究所选坡地属轻度石漠化。

1.2 数据采集与样品测定

在反坡、斜坡和平地状态下的柑橘林地中分别划定 20 m×20 m 的样方,利用网格状布点方式(2 m×2 m)采集表层土壤(0—20 cm)的含水量数据,土壤含水量采用土壤水分仪(SK-100)测定,每种整地措施下布设土壤水分监测样点 121 个。整个试验分雨季(2022 年 6 月 26 日)和旱季(2022 年 12 月 26 日)2 次进行,为保证表层土壤水分处于稳定状态,测试前 3 天研究区均未发生降雨。同时,在不同整地措施下的柑橘林地中分别划定 3 个 5 m×5 m 的样方,采集 0—20 cm 土层的原状土和扰动土样,每个样品设置 3 个重复。原状土用容积为 100 cm³的环刀采集,扰动

土用铁铲采集并用自封袋封装,样品带回实验室用于测定土壤基本理化性质。土壤容重、饱和含水量、田间持水量采用环刀法^[19]测定;土壤总孔隙度通过土壤容重计算得到^[20];土壤 pH 利用酸度计(Sartorius PB-10)进行测定,测定溶液的土水比为 1 : 5^[21]。土

壤颗粒粒径和比表面积采用马尔文激光粒度仪(Mastersizer 3000)测定,测定完成后根据国际制标准将土壤颗粒组成为黏粒(0~0.002 mm)、粉粒(0.002~0.020 mm)和砂粒(0.020~2.000 mm)^[22]。不同整地措施下表层土壤(0—20 cm)基本理化性质见表 1。

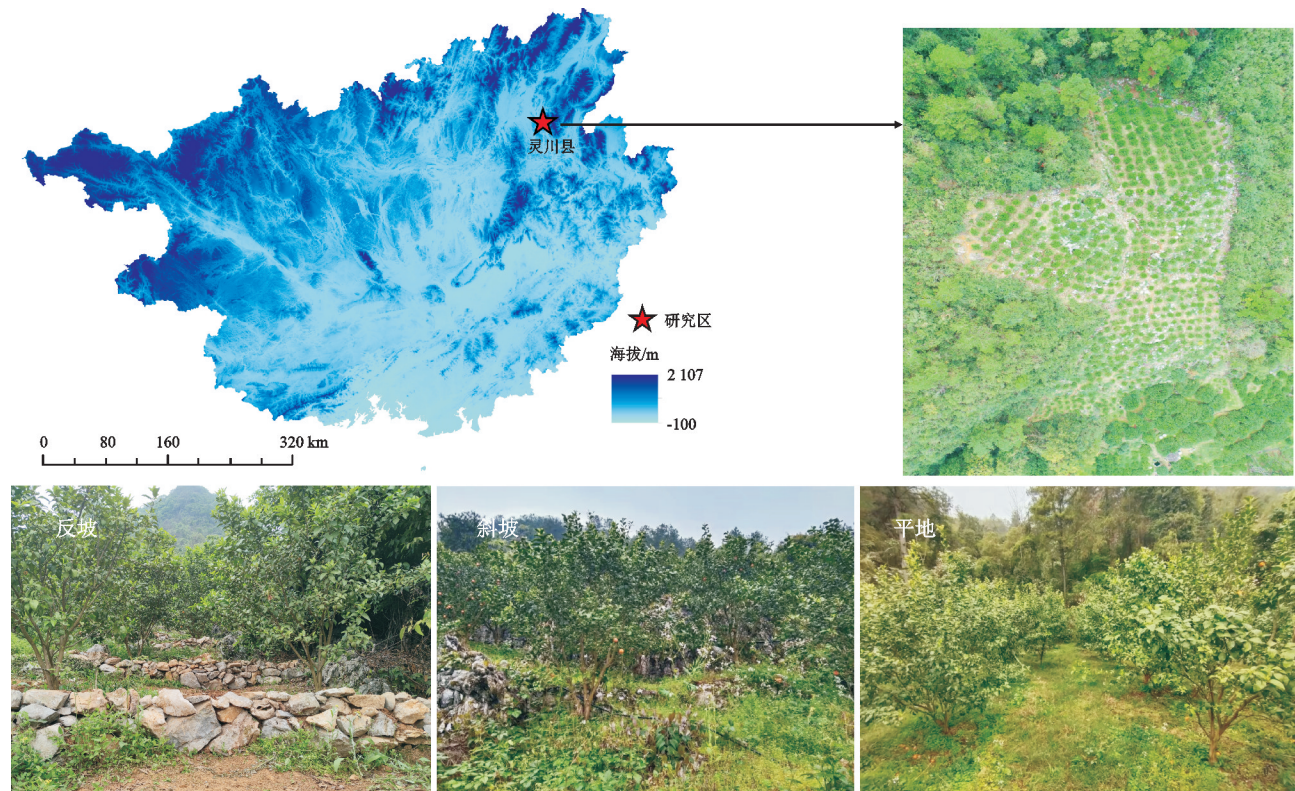


图 1 研究区地理位置及样地概况

Fig. 1 The geographical location and sample plot overview of the study area

表 1 不同整地措施下表层土壤基本理化性质

Table 1 Basic physicochemical properties of surface soil under different land preparation measures

整地措施	土壤颗粒比表面积/ (10 ⁴ cm ² · cm ⁻³)	土壤容重/ (g · cm ⁻³)	孔隙度/ %	田间持水量/ %	饱和含水量/ %	pH	黏粒含量/ %	粉粒含量/ %	砂粒含量/ %
反坡	9 510.33±131.63a	1.15±0.03c	56.67±1.17a	40.88±1.68a	44.65±1.58a	5.19±0.03b	33.03±0.25a	36.40±0.08c	30.57±0.25b
斜坡	9 526.33±89.31a	1.28±0.04b	51.75±1.36b	35.42±1.38b	37.60±0.72b	4.85±0.01c	31.09±0.13b	41.05±0.08a	27.87±0.20c
平地	4 553.42±11.01b	1.43±0.04a	46.02±1.46c	28.78±1.22c	31.04±1.62c	5.75±0.01a	17.04±0.04c	38.22±0.07b	44.75±0.10a

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示不同整地措施下差异显著($p<0.05$)。

1.3 数据处理

1.3.1 经典统计学分析 采用经典统计学参数最大值、最小值、平均值、中位数、标准差和变异系数来描述土壤含水量的基本统计特征。其中,变异系数可用来描述样本数据数值变化的剧烈程度^[23],计算公式为:

$$CV = \frac{S}{\bar{X}} \times 100\%$$

(1)

式中:CV 为土壤含水量变异系数(%);S 为土壤含水量标准差(%); $\bar{X}$ 为土壤含水量平均值(%).当 $CV \leq 10.00\%$ 时,为弱变异; $10.00\% < CV \leq 100.00\%$ 时,为中等变异; $CV > 100.00\%$ 时,为强变异。

1.3.2 地统计学分析 土壤水分空间结构分析采用半方差函数和全局莫兰指数^[24-27]。半方差函数是地统计学的基本工具,计算公式为:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2$$

(2)

式中: h 为步长; $\gamma(h)$ 为半方差函数值; $N(h)$ 为间隔 h 的采样点对数; i 为采样点编号; $Z(x_i)$ 和 $Z(x_i + h)$ 为区域化变量 Z 在空间采样点 x_i 和 $x_i + h$ 处的实测值。常见的半方差函数模型有 高斯模型、球状模型、指数模型和线性模型,本研究选取对柑橘林地土壤含水量空间分布整体拟合效果较好地球状模型对半方差函数进行拟合,计算公式为:

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C \left[1.5 \left(\frac{h}{\alpha} \right) - 0.5 \left(\frac{h}{\alpha} \right)^3 \right] & 0 \leq h \leq \alpha \\ C_0 + C & h > \alpha \end{cases} \quad (3)$$

式中: α 为变程(m); C_0 为块金值; C 为偏基台值; $C_0 + C$ 为基台值; $C_0 / (C_0 + C)$ 为块金系数。变程越大表示空间分布平稳性越好, 变程以内的空间变量具有空间自相关性, 以外不存在空间自相关性; 块金值和基台值越大表示随机变异和总变异越强, 偏基台值越大表示在采样尺度上变异源引起的变异越强; 块金系数反映空间自相关强度, 一般认为块金系数小于 0.25 表示空间自相关性强, 块金系数 0.25~0.75 表示空间自相关性中等, 块金系数大于 0.75 表示空间自相关性弱。模型拟合精度采用决定系数 R^2 判断。

全局莫兰指数用以描述研究区域内对象间的空间关联与聚集程度, 其计算公式为:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} [F(x_i) - \bar{F}] [F(x_j) - \bar{F}]}{\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} \right) \sum_{i=1}^n [F(x_i) - \bar{F}]^2} \quad (4)$$

式中: I 为全局莫兰指数; i 和 j 为采样点编号; W_{ij} 为空间权重系数; $F(x_i)$ 和 $F(x_j)$ 分别为区域化变量 F 在空间采样点 x_i 和 x_j 处的实测值; $\bar{F}$ 为区域化变量 F 的平均值。 $I > 0$ 表示空间正相关, $I < 0$ 表示空间负相关, $I = 0$ 表示不存在空间相关性。

1.3.3 多重分形分析 多重分形是定义在分形结构上的有无穷多个标度指数所组成的一个集合, 是从系统的局部出发来研究其整体的特征^[28]。在本研究中, 采用盒计数法来分析石漠化坡地土壤含水量分布的多重分形特征。用尺度为 ϵ 的“盒子”对样本数据的跨度进行覆盖, 用 $\mu_i(\epsilon)$ 表示每个子区间内样本数据分布的概率密度, 并构造分配函数族^[29-30]:

$$X(\epsilon) = \sum_{i=1}^{N(\epsilon)} \mu_i(\epsilon)^q \quad (5)$$

$$\mu_i(q, \epsilon) = \frac{\mu_i(\epsilon)^q}{\sum_{i=1}^{N(\epsilon)} \mu_i(\epsilon)^q} \quad (6)$$

式中: $X(\epsilon)$ 为配分函数; $\mu_i(q, \epsilon)$ 为第 i 个子区间的 q 阶概率; q 为实数。

多重分形广义维数 $D(q)$ 的计算公式为:

$$D(q) = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{1}{q-1} \frac{\lg \left[\sum_{i=1}^{N(\epsilon)} \mu_i(\epsilon)^q \right]}{\lg \epsilon} \quad (q \neq 1) \quad (7)$$

$$D(1) = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^{N(\epsilon)} \mu_i(\epsilon) \lg \mu_i(\epsilon)}{\lg \epsilon} \quad (q = 1) \quad (8)$$

多重分形奇异性指数 $\alpha(q)$ 和谱函数 $F[\alpha(q)]$

的计算公式为:

$$\alpha(q) = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^{N(\epsilon)} \mu_i(q, \epsilon) \lg \mu_i(\epsilon)}{\lg \epsilon} \quad (9)$$

$$f[\alpha(q)] = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^{N(\epsilon)} \mu_i(q, \epsilon) \lg \mu_i(q, \epsilon)}{\lg \epsilon} \quad (10)$$

以 1 为步长在 $-10 \leq q \leq 10$ 范围内计算多重分形广义维数谱 $D(q)$, 多重分形奇异性指数 $\alpha(q)$ 和多重分形谱函数 $f[\alpha(q)]$ ^[31-32]。其中, $D(0)$ 为容量维, 值越大样本数据分布范围越宽; $D(1)$ 为信息维, 值越大样本数据分布越集中; $D(2)$ 为关联维, 值越大样本数据测量间隔越均匀; $D(1)/D(0)$ 表示样本数据分布的离散程度, 值接近于 1 表明样本数据多分布在密集区, 值接近于 0 表明多分布在稀疏区。 $\alpha(q)$ 和 $f(\alpha(q))$ 共同描述样本数据分布的详细局部特征。 $\Delta\alpha$ 为奇异谱谱宽, 值越大表明样本数据分布越不均匀; Δf 为奇异谱对称度, $\Delta f < 0$ 表明样本数据分布小概率子集占主要地位, $\Delta f > 0$ 表明大概率子集占主要地位。

1.3.4 统计分析 利用 GS+7.0 软件对土壤含水量数据进行半方差函数分析, 并采用 ArcGIS 10.4 软件进行 Kriging 插值和全局莫兰指数计算; 利用 MATLAB 2018 软件进行分形参数计算; 利用 SPSS 22.0 软件进行单因素方差分析 (One-way ANOVA); 利用 Origin 2021 软件进行 Pearson 相关分析和数据绘图。

2 结果与分析

2.1 土壤含水量基本统计特征

由表 2 可知, 在雨季, 反坡、斜坡和平地的土壤含水量分别为 24.2%~52.6%, 19.1%~37.6%, 24.3%~44.9%, 平均含水量依次为 42.24%, 29.72%, 31.83%, 反坡的土壤含水量依次显著高于平地 and 斜坡; 反坡、斜坡和平地的土壤含水量变异系数分别为 22.03%, 16.88%, 17.34%, 均属于中等变异, 但反坡的土壤含水量变异系数依次高于平地 and 斜坡。在旱季, 反坡、斜坡和平地的土壤含水量分别为 20.7%~39.9%, 10.5%~30.2%, 12.1%~32.4%, 平均含水量为 29.57%, 18.56%, 19.93%, 反坡的土壤含水量依次显著高于平地 and 斜坡; 反坡、斜坡和平地的土壤含水量变异系数分别为 18.77%, 14.02%, 15.54%, 均属于中等变异, 但反坡的土壤含水量变异系数依次高于平地 and 斜坡。旱季时反坡、斜坡和平地的土壤含水量均显著小于雨季, 其中斜坡的土壤含水量下降最为明显, 降低 37.55%, 其次为平地, 降低 37.39%, 反坡的土壤含水量下降最少, 为 30.00%。并且在旱季时, 反

坡、斜坡和平地的土壤含水量变异系数均明显低于雨季,其中斜坡的土壤含水量变异系数下降最为明显,降低 16.94%,其次为反坡,降低14.80%,平地下降最少,为 10.38%。

表 2 土壤含水量基本统计特征
Table 2 Basic statistical characteristics of soil moisture content

季节	整地措施	最小值	最大值	平均值	中位数	标准差	变异系数
雨季	反坡	24.2	52.6	42.24Aa	42.7	9.30	22.03
	斜坡	19.1	37.6	29.72Ca	30.5	5.02	16.88
	平地	24.3	44.9	31.83Ba	31.4	5.52	17.34
旱季	反坡	20.7	39.9	29.57Ab	30.1	5.55	18.77
	斜坡	10.5	30.2	18.56Cb	18.5	2.60	14.02
	平地	12.1	32.4	19.93Bb	19.6	3.10	15.54

注:同列不同大写字母表示同一季节不同整地措施下土壤含水量差异显著($p<0.05$);同列不同小写字母表示同种整地措施下不同季节土壤含水量差异显著($p<0.05$)。

2.2 土壤含水量地统计学特征

表 3 为不同整地措施下土壤含水量半方差函数的拟合效果和结构参数,整体上拟合效果较好, R^2 为 0.87~0.99。在雨季,斜坡的块金值(0.15)依次大于反坡(0.07)和平地(0.02);偏基台值与之相反,表明斜坡的土壤含水量随机性变异最强、结构性变异最弱,平地的随机性变异最弱、结构性变异最强。平地的基台值(2.06)依次大于斜坡(1.15)和反坡(1.11),表明平地的土壤含水量总变异性最强,反坡的最弱。斜坡、反坡和平地的块金系数分别为 0.13,0.07,0.01,表明其土壤含水量均具有强空间自相关性,且不同整地措施下土壤含水量的结构性变异均强于随机性变异。平地的变程(33.75 m)依次大于斜坡(12.27 m)和反坡(10.33 m),表明平地的土壤水分空间连续性最好,反坡的最差。

在旱季,平地的块金值(0.22)依次大于斜坡(0.15)和反坡(0.03),偏基台值(1.75)依次大于反坡(1.08)和斜坡(0.91),表明平地的土壤含水量随机性变异和结构性变异均最强,反坡的随机性变异和斜坡

的结构性变异最弱。平地的基台值(1.97)依次高于反坡(1.11)和斜坡(1.06),表明平地的土壤含水量总变异性最强,斜坡的总变异性最弱。反坡、斜坡和平地的块金系数分别为 0.03,0.14,0.11,表明其土壤含水量均具有强空间自相关性,且不同整地措施下土壤含水量的结构性变异均强于随机性变异。平地的变程(35.69 m)依次大于反坡(9.87 m)和斜坡(7.05 m),表明平地的土壤水分空间连续性最好,斜坡的最差。

雨季时斜坡的块金值与旱季相同,偏基台值大于旱季,表明斜坡雨季的土壤含水量随机性变异和旱季一致,但结构性变异更大。雨季时反坡的块金值大于旱季,偏基台值小于旱季,表明反坡雨季的土壤含水量随机性变异更大,旱季的结构性变异更大,平地与之相反。雨季时不同整地措施下基台值均大于旱季,表明雨季时土壤含水量的总变异性更大。雨季时反坡的块金系数大于旱季,表明旱季时土壤含水量的空间自相关性更强,斜坡和平地与之相反。雨季时反坡和斜坡的变程大于旱季,表明其雨季的土壤含水量空间连续性强于旱季,平地则与之相反。

表 3 土壤含水量半方差函数的结构参数
Table 3 Semi-variogram function structural parameters of soil moisture content

季节	整地措施	块金值(C_0)	偏基台值(C)	基台值(C_0+C)	块金系数 [$C_0/(C_0+C)$]	变程(α)/m	模型拟合度 (R^2)
雨季	反坡	0.07	1.04	1.11	0.07	10.33	0.99
	斜坡	0.15	1.00	1.15	0.13	12.27	0.95
	平地	0.02	2.03	2.06	0.01	33.75	0.99
旱季	反坡	0.03	1.08	1.11	0.03	9.87	0.98
	斜坡	0.15	0.91	1.06	0.14	7.05	0.87
	平地	0.22	1.75	1.97	0.11	35.69	0.98

由图 2 可知,对于不同的整地措施,土壤含水量空间分布格局呈现出明显的差异性;对于同种整地措施,雨季和旱季的土壤含水量空间分布格局基本一致。由表 4 可知,不同整地措施下雨季和旱季的全局莫兰指数均为正值,表明其土壤含水量在空间上均具有正自相关关系,其相应的 Z 值均高于临界值 2.58,

具有统计学意义($p<0.01$),表明其土壤含水量均具有极显著的空间聚集性,而非随机分布。平地的全局莫兰指数在雨季和旱季均高于斜坡和反坡,表明平地的土壤含水量空间聚集性更强。反坡旱季的全局莫兰指数高于雨季,斜坡和平地与之相反,表明反坡旱季的土壤含水量空间聚集性更强,斜坡和平地雨季的更强。

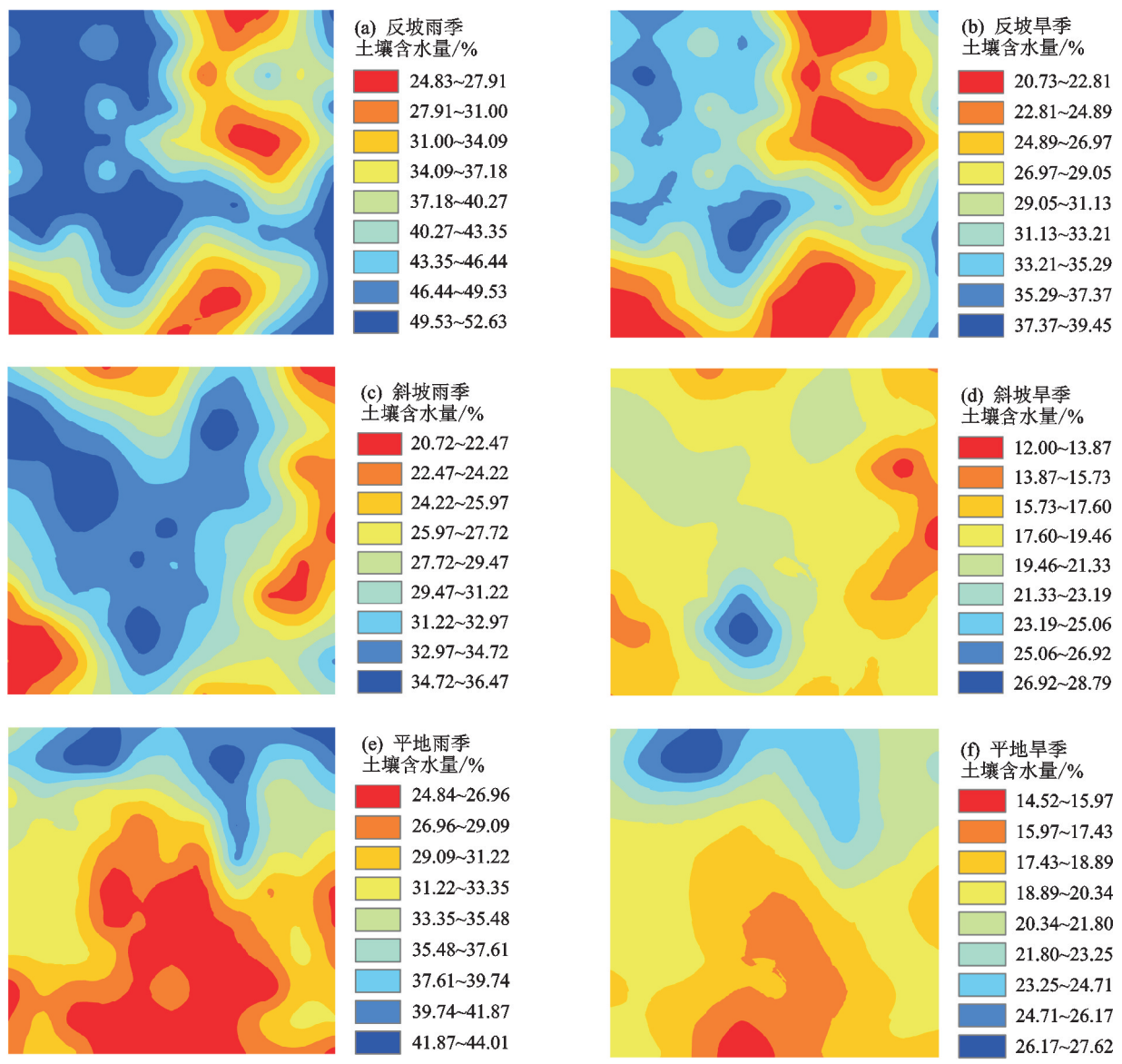


图 2 土壤含水量空间分布

Fig. 2 Spatial distribution map of soil moisture content

表 4 土壤含水量空间自相关指数

季节	整地措施	全局莫兰指数	预期指数	方差	Z 值	p 值
雨季	反坡	0.62	-0.01	<0.01	9.48	<0.01
	斜坡	0.63	-0.01	<0.01	9.55	<0.01
	平地	0.75	-0.01	<0.01	11.47	<0.01
旱季	反坡	0.65	-0.01	<0.01	9.82	<0.01
	斜坡	0.53	-0.01	<0.01	8.23	<0.01
	平地	0.68	-0.01	<0.01	10.55	<0.01

2.3 土壤含水量多重分形特征

由图 3 可知,当 q 由 -10 向 10 变化时,配分函数 $X(\epsilon)$ 与尺度因子 ϵ 的双对数线性拟合情况均较好, $R^2 \geq 0.94$,表明该土壤含水量分布具有多重分形特征。

由图 4 可知,不同整地措施下土壤含水量的广义维数谱 $q-D(q)$ 曲线均呈 $D(q)$ 值随 q 值增加而递

减的反“S”形减函数。在旱季, $q > 0$ 时 $D(q)$ 的递减程度小于 $q < 0$ 时 $D(q)$ 的递减程度,表明土壤含水量分布稀疏区域的土壤含水量对整地措施的影响更敏感;在雨季,反坡 $q > 0$ 时 $D(q)$ 的递减程度大于 $q < 0$ 时 $D(q)$ 的递减程度,表明土壤含水量分布密集区域的土壤含水量对整地措施的影响更敏感,斜坡和平地与之相反。不同整地措施下雨季和旱季的容量维 $D(0)$ 、信息维 $D(1)$ 、关联维 $D(2)$ 均满足 $D(0) > D(1) > D(2)$, $D(1)/D(0)$ 更接近于 1 (表 5),表明土壤含水量分布具有各异性,且多分布在密集区域。在旱季,反坡的 $D(0)$ 值最小,表明其土壤含水量分布范围相对较窄;斜坡的 $D(1)$ 、 $D(2)$ 值最小,表明其土壤含水量分布更离散。而在雨季,平地的 $D(0)$ 、 $D(1)$ 值最小,反坡的 $D(2)$ 值最小。

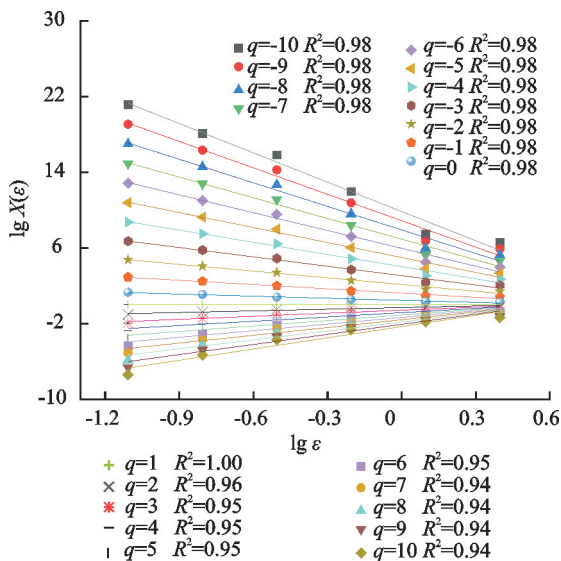


图 3 配分函数与尺度因子的双对数线性拟合
Fig. 3 Double logarithmic linear fitting figure of the partition function and the scale factor

在雨季,反坡的奇异谱函数 $\alpha-f(\alpha)$ 呈右钩状上凸曲线(图 5), $\Delta f < 0$, 表明土壤含水量分布小概率子集占主要地位,斜坡和平地与之相反;在旱季,反坡的奇异谱函数 $\alpha-f(\alpha)$ 呈左钩状上凸曲线, $\Delta f > 0$, 表

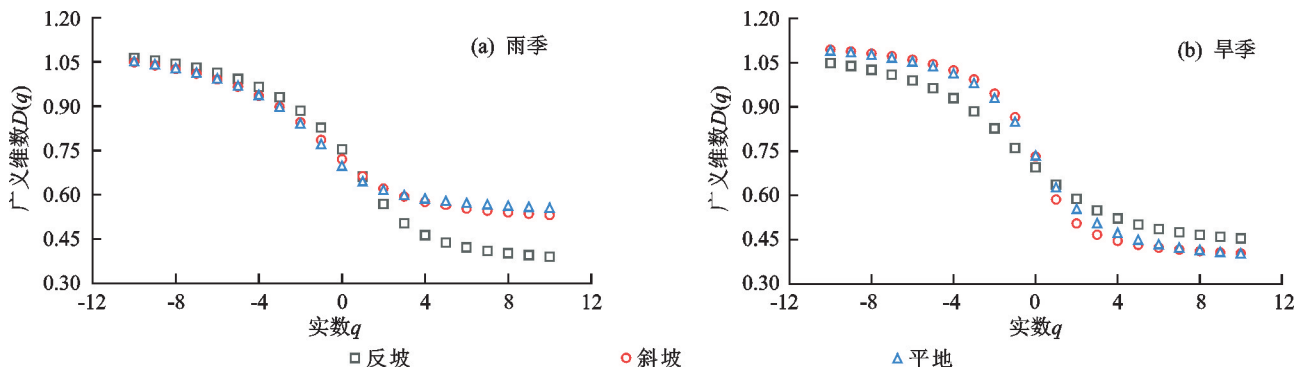


图 4 广义维数谱曲线
Fig. 4 Generalized dimensional spectral curves
表 5 土壤含水量分形参数
Table 5 Fractal parameters of soil moisture content

季节	整地措施	$D(0)$	$D(1)$	$D(2)$	$D(1)/D(0)$	$\Delta\alpha$	Δf
雨季	反坡	0.75	0.66	0.57	0.88	0.80	-0.17
	斜坡	0.72	0.66	0.62	0.92	0.65	0.20
	平地	0.69	0.64	0.61	0.92	0.63	0.29
旱季	反坡	0.69	0.64	0.59	0.92	0.74	0.02
	斜坡	0.73	0.59	0.51	0.80	0.78	-0.37
	平地	0.73	0.62	0.55	0.85	0.79	-0.43

3 讨论

石漠化坡地土壤含水量与大气降雨、植被类型及土壤理化性质等自然因素密切相关,同时受耕作管理方式影响,空间变异特征明显^[33-35]。在本研究中,反坡的土壤含水量在雨季和旱季均依次显著高于平地

和斜坡,可能与反坡台阶的土壤蓄水保墒效果更好及

2.4 环境因子与土壤含水量的相关分析

由图 6 可知,土壤平均含水量与土壤颗粒比表面积、土壤黏粒含量呈极显著正相关,与土壤砂粒含量呈显著负相关(其中与土壤黏粒含量相关性最密切),与土壤容重、总孔隙度、田间持水量、饱和含水量和土壤 pH 相关性不显著。土壤黏粒含量与土壤颗粒比表面积呈极显著正相关,与土壤砂粒含量呈极显著负相关,表明土壤颗粒粒径越小,黏粒含量越高,砂粒含量越低,土壤颗粒比表面积越大,土壤平均含水量越高。且在研究区内,土壤容重、总孔隙度、田间持水量、饱和含水量及土壤 pH 的变化未对土壤平均含水量产生显著影响。可见,土壤机械组成是影响土壤平均含水量的主要因素。

更有利于接受降雨补给有关^[36]。反坡台阶能减缓石漠化坡地坡面径流流速,并对径流进行拦蓄,增加水分入渗,而斜坡在接受降雨补给时,大部分雨水会沿坡面流失,致使土壤水分含量较低^[36-37]。此外,反坡台阶能有效减少坡面土壤细颗粒的流失,相较于斜坡和平地,土壤持水能力更强^[34]。斜坡状态下石漠化

坡地的岩石裸露率更高,裸露岩石对光照强烈的漫反射加剧土壤水分的蒸发,降低土壤水分含量^[38]。反坡的土壤含水量变异系数在雨季和旱季也均依次大于平地 and 斜坡,同时,不同整地措施下雨季土壤含水量的变异系数均大于旱季,表明土壤含水量越高其变

异系数越大,这与刘继龙等^[39]对农田土壤水分的研究结果不同。农田土层较厚、土壤连续性较好,而石漠化坡地土层浅薄、岩石裸露、土壤连续性差,这可能是导致石漠化坡地和农田土壤含水量与其变异系数关系不同的主要原因。

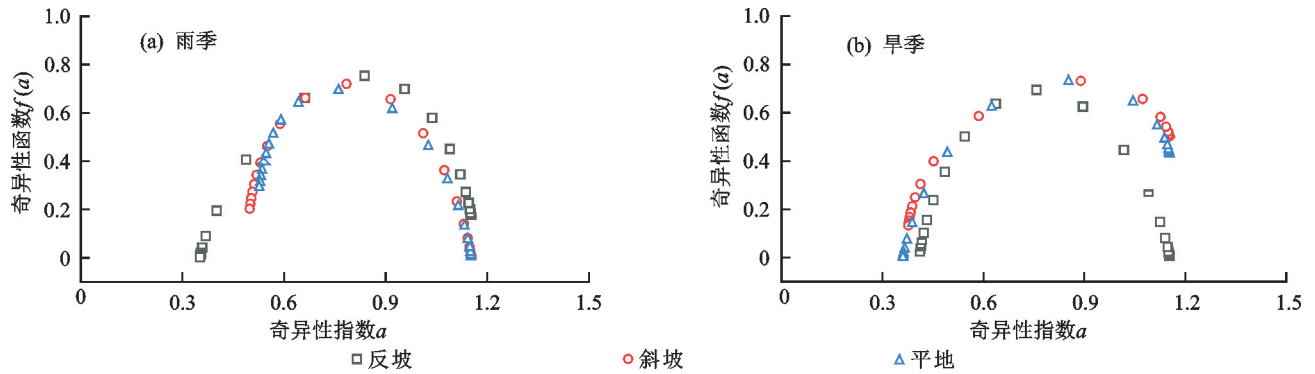


图 5 奇异谱曲线

Fig. 5 Singular spectral curves

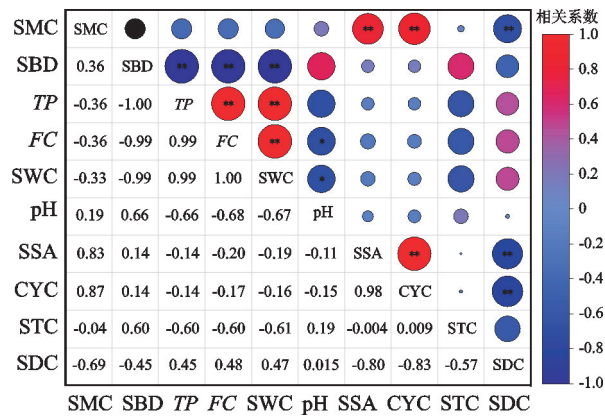


图 6 环境因子与土壤含水量的相关性分析

Fig. 6 Correlation analysis between environmental factors and soil moisture content

注:SMC 为土壤平均含水量;SBD 为土壤容重;TP 为总孔隙度;FC 为田间持水量;SWC 为饱和含水量;pH 为土壤 pH;SSA 为土壤颗粒比表面积;CYC 为黏粒含量;STC 为粉粒含量;SDC 为砂粒含量;* 表示显著相关($p < 0.05$);** 表示极显著相关($p < 0.01$)。

同种整地措施下雨季和旱季的土壤水分空间分布格局基本一致,但不同整地措施下土壤水分的空间分布格局差异明显,这与李春茂等^[17]的研究结果基本一致。李春茂等^[17]研究了石漠化坡地土壤水分的空间分布规律,结果表明,坡改梯的整地措施虽然在一定程度上能提高土壤水分含量,但用于坡改梯的石坎能显著影响坡地土壤水分的空间分布格局。在本研究中,平地和反坡均用石坎修建而成,并且平地和反坡土壤含水量的结构性变异在雨季和旱季时均强于斜坡,表明修建平地和反坡台阶能显著影响石漠化坡地土壤水分的空间分布格局。此外,平地的表层土壤能更均匀的接受降雨补给和大气蒸发,土壤质地空间分布也更均匀,因此其土壤水分的空间连续性相对更好。

配分函数 $X(\epsilon)$ 与尺度因子 ϵ 双对数拟合是否呈线性关系是判断研究对象在研究尺度内是否具有多重分形特征的关键指标,如果不满足线性关系则不能进行多重分形分析^[40-42]。在本研究中, $X(\epsilon)$ 与 ϵ 双对数线性拟合情况较好, $R^2 \geq 0.94$,表明不同整地措施下土壤水分的分布具有多重分形特征,可进行多重分形分析。反坡的保水保墒能力相对更强、斜坡最弱,平地能更均匀地接受降雨补给^[43]。因此,旱季时反坡的土壤含水量分布区间最窄,斜坡的土壤含水量分布更离散;雨季时平地的土壤含水量分布区间最窄,反坡的更不均匀。

Pearson 相关分析的结果表明,土壤含水量与土壤砂粒含量显著负相关,与土壤颗粒比表面积和粘粒含量极显著正相关,土壤机械组成是影响土壤含水量的主要因素,这与李源等^[44]的研究结果类似。石漠化坡地土层浅薄、地表裸露率高、水土流失严重,部分细颗粒随雨水的冲刷而流失,影响土壤质地的空间分布,不利于土壤水分的蓄集和均匀分布^[45]。持续的农业活动将进一步加剧水土流失,加深石漠化程度,不利于石漠化坡地的生态恢复。而作为坡地水土保持的重要整地措施之一,修建反坡台阶可有效蓄集坡面产生的径流和泥沙,达到减少水土流失和增加土壤水分入渗的目的^[46]。为此,在对石漠化坡地进行耕作时,可依据坡面的地形地貌特征修建反坡台阶,以减少坡地水土流失,增加土壤水分含量,改善石漠化坡地的农业种植条件。

4 结论

(1)反坡的土壤含水量显著高于平地和斜坡,平地土壤含水量的空间连续性和聚集性以及总变异和

结构性变异强于斜坡和反坡。不同整地措施下的土壤含水量均属于中等变异,且具有空间正自相关关系和极显著的空间聚集性。

(2)不同整地措施下的土壤含水量分布具有多重分形特征。旱季时反坡的土壤含水量分布区间最窄,斜坡的土壤含水量分布更离散;雨季时平地的土壤含水量分布区间最窄,反坡的更不均匀。

(3)同种整地措施下雨季和旱季的土壤水分空间分布格局基本一致,但不同整地措施下土壤水分的空间分布格局差异明显。土壤机械组成是影响土壤含水量的主要因素,反坡整地措施更有利于改善石漠化坡地的土壤水分条件。

参考文献:

- [1] DU H, HU F, ZENG F P, et al. Spatial distribution of tree species in evergreen-deciduous broadleaf Karst forests in southwest China[J].Scientific Reports,2017,7:e15664.
- [2] JIANG Z C, LIAN Y Q, QIN X Q. Rocky desertification in Southwest China: Impacts, causes, and restoration[J].Earth-Science Reviews,2014,132:1-12.
- [3] 周春衡,付智勇,吴丽萍,等.喀斯特坡地土层厚度及养分含量空间分布特征[J].农业现代化研究,2020,41(3):539-548.
- ZHOU C H, FU Z Y, WU L P, et al. Spatial distribution characteristics of soil thickness and soil nutrient content in Karst slopes[J].Research of Agricultural Modernization,2020,41(3):539-548.
- [4] 俞月凤,彭晚霞,宋同清,等.喀斯特峰丛洼地不同森林类型植物和土壤C、N、P化学计量特征[J].应用生态学报,2014,25(4):947-954.
- YU Y F, PENG W X, SONG T Q, et al. Stoichiometric characteristics of plant and soil C, N and P in different forest types in depressions between Karst hills, southwest China[J].Chinese Journal of Applied Ecology,2014,25(4):947-954.
- [5] 敖利满,蒋超华,徐勤学,等.岩土覆被格局对西南喀斯特坡地产流产沙的影响[J].水土保持学报,2023,37(1):90-96.
- AO L M, JIANG C H, XU Q X, et al. Influence of rock-soil cover pattern on runoff and sediment yield on Karst slopes in southwest China[J].Journal of Soil and Water Conservation,2023,37(1):90-96.
- [6] 王克林,岳跃民,陈洪松,等.喀斯特石漠化综合治理及其区域恢复效应[J].生态学报,2019,39(20):7432-7440.
- WANG K L, YUE Y M, CHEN H S, et al. The comprehensive treatment of Karst rocky desertification and its regional restoration effects[J].Acta Ecologica Sinica,2019,39(20):7432-7440.
- [7] 钱前,章润阳,刘坤平,等.喀斯特不同土地利用方式和生态恢复模式的土壤磷素特征[J].生态学杂志,2022,41(11):2128-2136.
- QIAN Q, ZHANG R Y, LIU K P, et al. Soil phosphorus characteristics of different land use types and ecological restoration modes in Karst region[J].Chinese Journal of Ecology,2022,41(11):2128-2136.
- [8] BROCCA L, TULLO T, MELONE F, et al. Catchment scale soil moisture spatial: Temporal variability[J].Journal of Hydrology,2012,422/423:63-75.
- [9] DARI J, MORBIDELLI R, SALTALIPPI C, et al. Spatial-temporal variability of soil moisture: Addressing the monitoring at the catchment scale[J].Journal of Hydrology,2019,570:436-444.
- [10] LI H D, SHEN W S, ZOU C X, et al. Spatio-temporal variability of soil moisture and its effect on vegetation in a desertified aeolian riparian ecotone on the Tibetan Plateau, China[J].Journal of Hydrology,2013,479:215-225.
- [11] 费喜亮,张新民,景凌云,等.半干旱黄土区土壤水分垂直分布规律的研究:以甘肃省兰州市孙家岔流域为例[J].土壤学报,2013,50(4):652-656.
- FEI X L, ZHANG X M, JING L Y, et al. Vertical variability of soil moisture content in semiarid loess region: A case study of Sunjiacha Basin of Lanzhou in Gansu Province[J].Acta Pedologica Sinica,2013,50(4):652-656.
- [12] SCHNEIDER K, LEOPOLD U, GERSCHLAUER F, et al. Spatial and temporal variation of soil moisture in dependence of multiple environmental parameters in semi-arid grasslands[J].Plant and Soil,2011,340(1):73-88.
- [13] 陈洪松,聂云鹏,王克林.岩溶山区水分时空异质性及植物适应机理研究进展[J].生态学报,2013,33(2):317-326.
- CHEN H S, NIE Y P, WANG K L. Spatio-temporal heterogeneity of water and plant adaptation mechanisms in Karst regions: A review[J].Acta Ecologica Sinica,2013,33(2):317-326.
- [14] 徐慧芳,宋同清,黄国勤,等.喀斯特峰丛洼地区坡地不同土地利用方式下土壤水分的时空变异特征[J].生态学报,2014,34(18):5311-5319.
- XU H F, SONG T Q, HUANG G Q, et al. Spatiotemporal variation of soil moisture under different land use types in a typical Karst hill region[J].Acta Ecologica Sinica,2014,34(18):5311-5319.
- [15] 张川,张伟,陈洪松,等.喀斯特典型坡地旱季表层土壤水分时空变异性[J].生态学报,2015,35(19):6326-6334.
- ZHANG C, ZHANG W, CHEN H S, et al. Temporal and spatial variation in surface soil moisture content of Karst slopes in the dry season[J].Acta Ecologica Sinica,2015,35(19):6326-6334.
- [16] 陈雪,宋娅丽,王克勤,等高反坡阶措施对滇中红壤坡耕

- 地土壤贮水量的影响[J].水土保持研究,2019,26(6):92-99.
- CHEN X, SONG Y L, WANG K Q. Effect of contour reverse-slope terrace measures on soil water storage in sloping farmland of red soil in central Yunnan Province [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26 (6):92-99.
- [17] 李春茂,陈洪松,徐勤学,等.典型岩溶峰丛洼地坡面土壤水分空间变异性[J].中国岩溶,2018,37(2):159-167.
- LI C M, CHEN H S, XU Q X, et al. Spatial variability of soil moisture on hillslope in typical Karst peak-cluster depression areas [J]. Carsologica Sinica, 2018, 37 (2): 159-167.
- [18] 熊康宁.喀斯特石漠化的遥感—GIS 典型研究:以贵州省为例[M].北京:地质出版社,2002.
- XIONG K N. The typical study on RS-GIS of karst desertification: With a special reference to Guizhou Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002.
- [19] 程东娟,张亚丽.土壤物理实验指导[M].北京:中国水利水电出版社,2012.
- CHENG D J, ZHANG Y L. Soil physics experiment instruction[M]. Beijing: China Water Power Press, 2012.
- [20] HUANG Z, TIAN F P, WU G L, et al. Legume grasslands promote precipitation infiltration better than graminaceous grasslands in arid Regions[J]. Land Degradation and Development, 2017, 28(1):309-316.
- [21] 徐海军,姚琴,孙宇峰,等.大庆地区不同土地利用下土壤空间异质性研究[J].中国土壤与肥料,2020(1):24-30.
- XU H J, YAO Q, SUN Y F, et al. Spatial heterogeneity of soil properties under different land use patterns in Daqing area, China [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2020(1):24-30.
- [22] 田卓,何建华,张师普,等.龙脊梯田典型坡面表层土壤水分的空间变异特征[J].西南农业学报,2021,34(10):2197-2203.
- TIAN Z, HE J H, ZHANG S P, et al. Spatial variation characteristics of surface soil water content in typical slope of Longji Terrace [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2021, 34(10):2197-2203.
- [23] 王琦,常庆瑞,落莉莉,等.陕西省农田土壤有机质时空变异与驱动因子定量研究[J].农业机械学报,2022,53(11):349-359.
- WANG Q, CHANG Q R, LUO L L, et al. Spatiotemporal variation and driving factors for cultivated soil organic matter in Shaanxi Province [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53 (11):349-359.
- [24] ZHANG S P, SHAO M A, LI D F. Prediction of soil moisture scarcity using sequential Gaussian simulation in an arid region of China [J]. Geoderma, 2017, 295:119-128.
- [25] 姚玲,杨洋,孙贯芳,等.基于地统计分析的河套灌区地下水埋深与矿化度时空变异规律研究[J].灌溉排水学报,2020,39(8):111-121.
- YAO L, YANG Y, SUN G F, et al. Spatiotemporal variation in depth of groundwater table and water salinity in Hetao irrigation district estimated using geostatistics [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(8): 111-121.
- [26] WANG D, ZHOU Q B, YANG P, et al. Design of a spatial sampling scheme considering the spatial autocorrelation of crop acreage included in the sampling units [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2018, 17 (9): 2096-2106.
- [27] 吴泽宁,黄硕俏,狄丹阳,等.黄河流域农业系统水资源价值及其空间分布研究[J].灌溉排水学报,2019,38(12):93-100.
- WU Z N, HUANG S Q, DI D Y, et al. Study on the value and spatial distribution of water resources in agricultural system of the Yellow River Basin [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(12):93-100.
- [28] 高雅宁,廖李容,王杰,等.禁牧对黄土高原半干旱草地土壤粒径多重分形特征的影响[J].水土保持学报,2021,35(6):310-318,326.
- GAO Y N, LIAO L R, WANG J, et al. Effects of grazing exclusion on the fractal characteristics of soil particle size in semi-arid grassland on the Loess Plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35 (6): 310-318,326.
- [29] GROUT H, TARQUIS A M, WIESNER M R. Multifractal analysis of particle size distributions in soil [J]. Environmental Science and Technology, 1998, 32 (9): 1176-1182.
- [30] EVERTSZ C J G, MANDELBROT B B. Multifractal measures [M]. New York: Springer-Verlag, 1992.
- [31] 茹豪,张建军,李玉婷,等.黄土高原土壤粒径分形特征及其对土壤侵蚀的影响[J].农业机械学报,2015,46(4):176-182.
- RU H, ZHANG J J, LI Y T, et al. Fractal features of soil particle size distributions and its effect on soil erosion of Loess Plateau [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4):176-182.
- [32] 闵祥宇,李新举,李奇超.机械压实对复垦土壤粒径分布多重分形特征的影响[J].农业工程学报,2017,33(20):274-283.
- MIN X Y, LI X J, LI Q C. Influence of mechanical compaction on reclaimed soil particle size distribution multifractal characteristics [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(20): 274-283.
- [33] 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.
- [34] 王思砚, 苏维词, 范新瑞, 等. 喀斯特石漠化地区土壤含水量变化影响因素分析: 以贵州省普定县为例[J]. 水土保持研究, 2010, 17(3):171-175, 180.
- WANG S Y, SU W C, FAN X R, et al. Influence factors of soil moisture in Karst rocky desertification region: A case study of Puding County, Guizhou Province [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2010, 17(3):171-175, 180.
- [35] 蒋光毅, 黄先智, 史东梅, 等. 石漠化区桑树地埂的土壤水分特征研究[J]. 水土保持学报, 2015, 29(6):215-221.
- JIANG G Y, HUANG X Z, SHI D M, et al. Characteristics of soil moisture in mulberry terrace embankments in Karst rocky desertification area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(6):215-221.
- [36] 王帅兵, 王克勤, 宋娅丽, 等. 不同时间尺度反坡台阶红壤坡耕地土壤水分动态变化规律[J]. 农业工程学报, 2019, 35(8):195-205.
- WANG S B, WANG K Q, SONG Y L, et al. Dynamic variation of soil moisture at different temporal scales in red soil sloping farmland under reverse-slope terrace[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(8):195-205.
- [37] 于洋, 卫伟, 陈利顶, 等. 黄土丘陵区坡面整地和植被耦合下的土壤水分特征[J]. 生态学报, 2016, 36(11):3441-3449.
- YU Y, WEI W, CHEN L D, et al. Coupling effects of different land preparation and vegetation on soil moisture characteristics in a semi-arid Loess Hilly Region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(11):3441-3449.
- [38] 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 S, REN H D, YAO X H. Responses of soil moisture to bare rocks in Karst rock desertification region of Southwest China during dry season[J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(12):3174-3178.
- [39] 刘继龙, 任高奇, 付强, 等. 秸秆还田下土壤水分时间稳定性与玉米穗质量的相关性[J]. 农业机械学报, 2019, 50(5):320-326.
- LIU J L, REN G Q, FU Q, et al. Relationship between temporal stability of soil water and corn ear weight under straw returning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5):320-326.
- [40] MENEVEAU C, SREENIVASAN K R, KAILASNATH P, et al. Joint multifractal measures: Theory and applications to turbulence[J]. Physical Review A, Atomic, Molecular, and Optical Physics, 1990, 41(2):894-913.
- [41] 刘超凡, 夏伟, 王继保, 等. 向家坝水电站过机泥沙的多重分形特性[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021, 19(3):581-589.
- LIU C F, XIA W, WANG J B, et al. Multifractal characteristics of sediment pass by the Xiangjiaba Hydropower Station[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science and Technology, 2021, 19(3):581-589.
- [42] 白一茹, 汪有科. 黄土丘陵区土壤粒径分布单重分形和多重分形特征[J]. 农业机械学报, 2012, 43(5):43-48, 42.
- BAI Y R, WANG Y K. Monofractal and multifractal analysis on soil particle distribution in hilly and gully areas of the Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(5):43-48, 42.
- [43] 闫腾云, 王克勤, 赵洋毅, 等. 等高反坡台阶整地对坡耕地农田耗水及水量平衡的影响[J]. 水土保持研究, 2020, 27(4):93-98, 104.
- YAN T Y, WANG K Q, ZHAO Y Y, et al. Effect of contour reversed terrace preparation on water consumption and water balance in the sloping farmland[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(4):93-98, 104.
- [44] 李源, 宋维峰, 马建刚. 中国西南水梯田土壤水分特性研究: 以哈尼梯田为例[J]. 水土保持学报, 2021, 35(2):160-169.
- LI Y, SONG W F, MA J G. Soil moisture characteristics of water terrace in southwest China: A case study of Hani Terraces[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(2):160-169.
- [45] 涂娜, 严友进, 戴全厚, 等. 喀斯特石漠化区典型生境下石生苔藓的固土持水作用[J]. 生态学报, 2021, 41(15):6203-6214.
- TU N, YAN Y J, DAI Q H, et al. Soil fixation and water retention of rocky moss under typical habitat in a Karst rocky desertification area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(15):6203-6214.
- [46] 陈雪, 宋娅丽, 王克勤, 等. 基于 Van Genuchten 模型的高反坡阶下土壤水分特征[J]. 水土保持研究, 2019, 26(5):45-52.
- CHEN X, SONG Y L, WANG K Q, et al. Moisture characteristics under contour reverse-slope terrace based on van genuchten model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(5):45-52.