

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2021.04.009

喀斯特白云岩坡地旱季不同植被类型 土壤水分空间变异性

武泽宇^{1,2,3}, 薛亮^{1,3}, 张显松⁴, 李金垚^{1,2,3}, 李生^{1,3*}, 王佳^{1,3*}

(1. 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 浙江 杭州 311400; 2. 南京林业大学, 江苏 南京 210037; 3. 贵州普定石漠生态系统国家定位观测研究站, 贵州 普定 562100; 4. 贵州省普定县林业局, 贵州 普定 562100)

摘要: [目的] 研究喀斯特白云岩区典型植被类型土壤水分的空间变化及分布规律, 为石漠化地区植被快速恢复和生态重建提供科学依据。[方法] 以贵州省普定县喀斯特白云岩草地、灌丛、人工林和天然次生林 4 种不同植被类型土壤为研究对象, 于 2019 年 11 月利用网格法分 0~10 cm 和 10~20 cm 土层进行土壤取样并分析, 利用经典统计学和地统计学方法分析土壤水分含量及其空间变异特征。[结果] (1) 除草地和人工林之间差异不显著外, 不同植被类型间土壤水分含量呈极显著差异 ($p < 0.01$), 土壤水分含量从高到低依次为: 天然次生林 > 草地 > 人工林 > 灌丛, 最大值 (40.22%) 是最小值 (18.59%) 的 2.16 倍, 变异系数为 5.34%~29.42%。(2) 草地和灌丛浅层土壤水分半变异函数的最优模型为高斯模型, 深层土壤为指数模型, 人工林和天然次生林均为指数模型, 草地变程最小 (4.24 m), 而人工林变程最大 (16.48 m), 灌丛基台值最大 (14.42), 天然次生林块金值最大 (1.27)。(3) 土壤水分含量最高值均发生于样地内上半部, 深层土壤水分含量高于浅层土壤, 且同种植被类型在 0~20 cm 土层有相似的空间分布格局。(4) 土壤水分含量与土壤总孔隙度成正相关, 与土壤密度成负相关, 植被类型也在一定程度上影响土壤水分含量, 但并非随植被的正向演替而增加。[结论] 不同植被类型土壤水分空间结构明显, 有强烈的空间自相关性, 4 种植被类型中天然次生林土壤水分含量最高, 草地土壤水分连续性最差, 人工林土壤水分连续性最好, 同种植被类型在 0~20 cm 土层水分分布相似。在相同气象条件下, 植被类型、坡位、土壤密度和孔隙度可能是影响土壤水分含量分布的重要因素。

关键词: 白云岩; 植被类型; 土壤水分含量; 地统计学; 空间变异

中图分类号: S718.51

文献标志码: A

文章编号: 1001-1498(2021)04-0074-10

喀斯特脆弱生态系统的退化是以强烈的人类干扰为驱动力、以植被减少为诱因、以土地生产力退化为本质、以出现类似荒漠化景观为标志的复合过程^[1]。我国西南喀斯特在全球三大集中连片分布区域中面积最大、发育类型最全^[2], 截止 2016 年底, 喀斯特地区石漠化总面积为 1007 万 hm^2 ^[3]。该区广泛分布着石灰岩和白云岩, 石灰岩区土粒容易聚集在岩体裂隙和地下孔隙中, 基岩裸露率高; 白云岩中溶蚀残余物质能相对均匀地分布于地表,

基岩裸露率低^[4]。白云岩的风化过程以物理风化为主, 而物理崩解的岩石更有利于化学风化的进行, 加上晶间孔隙均匀, 推动了溶蚀作用的整体进行, 导致白云岩土层厚度往往大于石灰岩区, 成土速率较快, 土体分布连续^[5]。二者在发育形态、岩石裂隙发育程度、持水性和风化产物在地表的堆积和丢失方式都存在差异, 这些因素影响着区域水土资源的空间配置, 从而影响植被变化, 相较于石灰岩地区, 白云岩区更有利于草丛和草灌的自然恢复^[6]。

收稿日期: 2021-01-08 修回日期: 2021-03-02

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0502605-3); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目 (CAFYBB2017MA001)

* 通讯作者: 李生. E-mail: lnlyls@163.com; 王佳. E-mail: vipmzone0601@126.com

植被恢复是石漠化地区生态修复的根本手段, 必须以蓄水、保土及造林为核心进行综合治理^[7]; 而喀斯特生态系统植被具有喜钙、石生、早生的特点, 一旦破坏很难恢复^[8]。土壤水分及其空间变化与植被密切相关, 充足的土壤水分是植物正常生长的必要条件, 影响着植物的存活和生长特性^[9-10]。此外, 土壤水分对土壤形成也有重要意义, 通过制约溶质的溶解和转移、土壤养分与微生物活动来影响土壤的物理性质, 也是评价土壤肥力的重要环境因素^[11]。虽然我国西南喀斯特地区降雨充沛, 但因该地区特殊的地上地下二元结构, 降雨大量入渗, 加之土壤总量少、土层浅薄且分布不连续, 储水能力低, 导致土壤水分成为喀斯特石漠化地区植被恢复的主要限制因子。因此, 展开喀斯特地区土壤水分的相关研究十分必要^[12]。

地统计学已被证明是分析土壤水分空间特征及其变异规律的有效方法之一, 不仅能有效地揭示属性变量在空间上分布和变异的相关特性, 还可有效地解释空间格局对于生态过程和功能的影响^[13], 而传统统计学方法只能描述土壤的全局性变化特征, 不能描述土壤局部的变化特征, 同时也忽略了每一个观测值的空间位置, 不能准确的描述空间变异特性^[14]。大量学者应用地统计学方法对土壤水分动态变化进行了研究, 发现土壤水分均存在不同程度的空间自相关, 如李春茂等^[15]对峰丛洼地不同土地利用方式坡面土壤水分的研究发现, 雨季土壤水分空间相关性较早季更好, 坡上未扰动的自然植被区明显高于坡下人为改造区; 徐慧芳等^[16]研究发现, 喀斯特峰丛洼地土壤含水量均较高, 呈现中等或强烈的空间自相关性。Castrignanò等^[17]结合地统计学方法提出了一种评估意大利南部森林地区表土水分耗竭水平的概率方法, 允许在土壤评估中剔除明显的无关因素, 可有效指导林区土壤水分敏感区的划分; Landrum等^[18]采用多因子协同克里金法

(Kriging) 确定了土壤性质和地形属性影响土壤水分格局的空间尺度, 利用遥感与多元地统计学结合可以更好地制定土壤水分管理策略, 但研究对象较为单一, 多为喀斯特石灰岩质地区, 且缺少乔灌木系统性研究。因此, 本研究以喀斯特白云岩区草地、灌丛、人工林和天然次生林 4 种典型植被类型为研究对象, 采用标准网格法, 利用经典统计学和地统计学相结合的方法研究不同植被类型坡地土壤水分的空间变化及分布规律, 结果有助于深入了解喀斯特白云岩石漠化地区坡地土壤水分变化过程, 为退化喀斯特生态系统植被恢复和生态重建提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于贵州省安顺市普定县, 其地理坐标为 105°7'49"~105°58'51" E, 26°9'36"~26°31'42" N, 东西宽 51.4 km, 南北长 40.0 km, 总面积 1 091.6 km²。全县地势南北高、中部低, 海拔高度为 1 044.0~1 846.0 m, 属北亚热带季风湿润气候区, 气候温和, 年平均气温 15.1℃, 年平均降水量 1 396.9 mm, 且降雨多集中在 5—9 月, 占全年降水量的 75% 以上, 年平均日照时数 1 202 h, 无霜期 289 d, 相对湿度 79%, 土壤主要以石灰土为主。

1.2 野外试验设计

在普定县喀斯特白云岩区选择 4 种典型植被类型——草地 (I)、灌丛 (II)、人工林 (III) 和天然次生林 (IV) 作为研究对象 (表 1), 选取坡位和坡向相近的区域设立标准样地, 草地和灌丛样地面积为 200 m², 人工林和天然次生林样地面积为 1 200 m²。草地植物主要以白茅 (*Imperata cylindrical* (L.) Beauv.)、荩草 (*Arthraxon hispidus* (Trin.) Makino)、委陵菜 (*Potentilla chinensis* Ser.) 为主, 样地中部有基岩出露 (基岩裸露率约为

表 1 不同植被类型样地基本信息

Table 1 Basic information of different plots

植被类型 Vegetation types	经度 (E) Longitude	纬度 (N) Latitude	坡位 Slope position	坡度 Slope/(°)	海拔 Altitude/m	土壤类型 Soil types	干扰程度 Disturb
I 草地	105°45'38"	26°16'44"	中	14	1 356	石灰土	中度
II 灌丛	105°50'2.91"	26°23'3.3"	中	19	1 340	石灰土	轻度
III 人工林	105°48'22.77"	26°16'40.43"	中	21	1 417	石灰土	轻度
IV 天然次生林	105°45'41.70"	26°16'40.05"	中	25	1 393	石灰土	轻度

12%)，偶有火棘 (*Pyracantha fortuneana* (Maxim.) Li) 分布；灌丛样地内主要植被有山鸡椒 (*Pyracantha fortuneana* (Lour.) Pers.)、滇鼠刺 (*Itea yunnanensis* Franch)、算盘子 (*Glochidion puberum* (L.) Hutch.)、红泡刺藤 (*Rubus niveus* Thunb.) 等，沿坡面中部向下有基岩出露 (裸露率约为 30%)，间生草本和藤蔓植物；人工林样地植被主要为 30 a 林龄滇柏 (*Cupressus duclouxiana* Hichel)，其平均胸径为 14.47 cm，平均树高为 15.42 m；天然次生林样地中乔木主要有光叶海桐 (*Pittosporum glabratum* Lindl.)、润楠 (*Machilus nanmu* (Oliver) Hemsley)、青冈栎 (*Cyclobalanopsis glauca* (Thunberg) Oersted) 和盐肤木 (*Rhus chinensis* Mill.) 等，草本植物稀疏。

于 2019 年 11 月利用网格法将土壤分为 0~10 cm (浅层) 和 10~20 cm (深层) 进行取样。草地和灌丛采用 2 m × 2 m 网格，人工林和天然次生林采用 5 m × 5 m 网格，在每个网格中心点附近用梅花型布点法布置 3 个点进行混合采样，每个样点采集土样约 500 g，用四分法取舍后分为两部分装袋带回实验室，一部分用来测定土壤水分含量，另一部分在阴凉处风干用来测定土壤养分。同时利用便携式 GPS 记录取样点中心坐标，由于取样点附近地表有岩石出露而无法取样，共计采样 188 个点 (草地、灌丛各 47 个，人工林 48 个，天然次生林 46 个)。为保持土壤水分处于相对稳定水平，

保证每次取样前 3 天均无降雨，每个样地内同样随机选择四点利用环刀取土来测定土壤密度及孔隙度。

1.3 测定方法

用烘干法测定土壤质量含水量 (%)，环刀法测定土壤密度和孔隙度，设环刀体积为 V ，在取样前先记录每个环刀的质量 M_0 ，取样后土壤和环刀的质量为 M_1 ，然后将其去掉顶盖、保留底网放在平底容器内，向容器内加水至环刀上沿 (水不漫过)，待环刀内土壤充分吸水至饱和后从容器中拿出，迅速擦干环刀外面的水分后加顶盖称质量为 M_2 ，称量完毕后将环刀放置在支架上静置 12 h 后称质量为 M_3 ，最后打开顶盖，将环刀放入 105℃ 烘箱中烘干 12 h 至恒质量，干燥后待温度降到室温加顶盖后称质量为 M_4 ，分别按照下列公式计算土壤密度、土壤总孔隙度、土壤毛管孔隙度和非毛管孔隙度。

$$\text{土壤密度} = (M_4 - M_0) / V$$

$$\text{土壤总孔隙度} = (M_2 - M_4) / V \times 100\%$$

$$\text{土壤毛管孔隙度} = (M_3 - M_4) / V \times 100\%$$

$$\text{土壤非毛管孔隙度} = (M_2 - M_3) / V \times 100\%$$

土壤有机质用重铬酸钾容量法测定，土壤 pH 值用 pH 计 (土水比为 1:2.5) 测定，全氮 (TN) 采用浓硫酸消煮-凯氏定氮法测定，全磷 (TP) 采用 $\text{HClO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4$ 氧化钼锑抗比色法测定，全钾 (TK) 采用 NaOH 熔融-火焰光度法测定，水溶性有机碳用 TOC 分析仪测定 (表 2)。

表 2 不同植被类型土壤基本理化性质

Table 2 The physical and chemical soil properties of different vegetation types

土层 Soil layer/cm	植被类型 Vegetation types	有机质 SOM/(g·kg ⁻¹)	水溶性有机碳 DOC/(mg·kg ⁻¹)	pH	全氮 TN/(g·kg ⁻¹)	全磷 TP/(g·kg ⁻¹)	全钾 TK/(g·kg ⁻¹)	土壤质地 Soil texture
0~10	I	112.00 ± 7.07	323.25 ± 11.73	7.75 ± 0.06	5.20 ± 0.77	1.12 ± 0.08	3.67 ± 1.00	轻壤土
	II	67.15 ± 6.76	201.50 ± 51.03	7.73 ± 0.42	2.91 ± 0.31	0.32 ± 0.02	8.09 ± 2.46	轻壤土
	III	68.10 ± 6.35	217.25 ± 27.00	6.63 ± 0.15	2.63 ± 0.76	0.32 ± 0.04	10.62 ± 0.93	重壤土
	IV	141.00 ± 18.46	229.75 ± 51.19	6.99 ± 0.36	5.78 ± 0.87	0.43 ± 0.06	19.08 ± 1.35	中壤土
10~20	I	96.90 ± 11.85	320.50 ± 68.56	7.78 ± 0.06	4.92 ± 0.53	1.07 ± 0.08	4.06 ± 0.54	轻壤土
	II	49.35 ± 2.78	180.50 ± 24.24	7.64 ± 0.09	2.24 ± 0.20	0.27 ± 0.03	8.98 ± 2.30	轻壤土
	III	55.25 ± 8.98	212.75 ± 60.00	6.63 ± 0.21	2.55 ± 0.33	0.30 ± 0.05	10.49 ± 1.32	重壤土
	IV	113.43 ± 17.59	232.50 ± 56.45	7.04 ± 0.51	4.65 ± 0.77	0.40 ± 0.06	19.15 ± 0.99	中壤土

1.4 数据处理

实验数据均采用域法^[5]进行处理，即利用样本均值加减 3 倍标准差来识别特异值，在此区间外的

数据均看成是特异值，分别用正常的最大和最小值代替，后续的计算均采用处理后的数据。利用 Excel 2016 进行数据的录入和初步整理，利用 DPS

18.0 进行单因素方差分析、相关性分析和半方差函数最优模型的拟合^[19], 利用 Sigma Plot 14.0 绘制直方图, 运用 ArcGIS 10.6 的地统计模块进行克里金插值的绘制。

2 结果与分析

2.1 不同植被类型土壤水分的描述性统计分析

不同植被类型土壤水分含量均值分布在 18.59%~40.22% 之间 (表 3), 灌丛浅层土壤水分含量最低, 天然次生林深层土壤水分含量最高, 是灌丛浅层土壤水分的 2.16 倍; 变异系数范围为 5.34%~29.42%, 其中, 人工林和天然次生林呈现弱变异特征 (变异系数 < 10.00%), 草地

和灌丛呈现中等程度变异 (10.00% < 变异系数 < 100.00%)^[20], 表现出较强的异质性。整体来看, 同种植被类型深层土壤水分含量高于浅层, 但仅有天然次生林呈极显著差异 ($p < 0.01$); 在 0~10 cm 和 10~20 cm 土层, 除草地和人工林外, 不同植被类型下土壤水分含量呈极显著差异 ($p < 0.01$), 其含量由高到低依次为: 天然次生林 > 草地 > 人工林 > 灌丛。通过对偏度和峰度的观察, 结合 Kolmogorov-Smirnov 法进行正态分布检验, 结果表明: 除灌丛浅层土壤水分不服从正态分布以外, 其余均服从正态分布, 将灌丛 0~10 cm 和 10~20 cm 土层土壤水分进行对数转化后服从正态分布, 可进行地统计分析。

表 3 不同植被类型土壤水分的描述性统计和正态性检验

Table 3 Descriptive statistics and normal test of soil moisture in different vegetation types

土层 Soil layer/cm	植被类型 Vegetation types	最大值 Max/%	最小值 Min/%	平均值 Mean/%	标准差 SD	变异系数 CV/%	偏度 Skew	峰度 Kurtosis	分布类型 Distribution types
0~10	I	29.79	13.62	23.08B	3.37	14.59	-0.751	1.368	N
	II	28.18	12.25	18.59C	4.26	22.93	0.406	-1.134	N*
	III	24.75	16.53	21.01B	2.08	9.94	-0.368	-0.507	N
	IV	43.92	28.20	35.22A	3.37	9.58	0.344	0.503	N
10~20	I	31.23	17.08	23.55B	2.99	12.69	0.164	0.032	N
	II	37.81	11.79	19.11C	5.62	29.42	0.887	0.788	N
	III	25.53	19.99	22.37B	1.18	5.34	0.328	0.052	N
	IV	47.60	31.79	40.22A	3.36	8.35	-0.121	0.326	N

注: 不同大写字母表示同一土层不同植被类型土壤水分含量差异极显著 ($p < 0.01$), N 表示服从正态分布, N* 表示经过对数转化后服从正态分布。

Notes: Different capital letters indicate significant difference ($p < 0.01$), and N means normal distribution, N* means data is normally distributed after the logarithmic transformation.

2.2 不同植被类型土壤水分的地统计学分析

采用普通克里金法对各土壤水分进行半变异函数拟合, 按照一定标准^[13] 分别对指数、高斯和球面模型进行验证选出最优半变异函数模型, 得到各水分空间变异特征 (表 4)。灌丛和草地浅层土壤水分为高斯模型, 人工林和天然次生林土壤水分为指数模型, 且各模型决定系数均较高 (0.559~0.977), 这说明模型有较好的拟合精度, 可以很好地反映土壤水分的空间结构特征。草地到天然次生林浅层土壤块金值依次为 0.84、0.29、0.82 和 1.27, 深层土壤分别为 0.10、0.35、0.28 和 0.98, 4 种植被类型的块金值均较小, 这表明随机变异在系统中所占的比例小。灌丛土壤浅层基台值最大 (14.42), 人工林土壤深层基台值最小 (2.05),

这表明土壤水分在研究范围内灌丛变异大而人工林变异小。块金系数 (块基比) 是块金值和基台值的比值, 能够确定空间自相关性, 表示随机部分引起的空间变异占系统总变异的的比例, 一般用 >25%、25%~75%、<75% 这 3 个区间来表示系统具有强烈、中等和较弱的空间相关性^[13]。4 种植被类型块金系数变化范围为 1.14%~16.73%, 最大值出现在人工林土壤浅层, 是最小值草地浅层土壤的 14.68 倍, 表明样地内土壤水分呈现强烈的空间自相关关系, 随机变异占总变异较小。变程表示具有相似性质斑块的空间连续性的范围, 在变程以内的取样点具有空间自相关性, 其余则不存在相关性^[15]。从变程来看, 变程随着植被的正向演替呈现先增加后减小的趋势, 草地最小 (4.24 m), 人工

表4 土壤水分半变异函数理论模型的相关参数

Table 4 Related parameters of semi-variogram theoretical model of soil moisture

土层 Soil layer/cm	植被类型 Vegetation types	模型 Model	块金值 Nuggets	基台值 Sill value	块金系数 Nugget sillRatio/%	变程 Range/m	决定系数 R^2
0~10	I	高斯	0.84	6.27	13.40	4.24	0.842
	II	高斯	0.29	14.42	2.01	6.37	0.977
	III	指数	0.82	4.90	16.73	16.48	0.781
	IV	指数	1.27	10.81	11.75	8.82	0.906
10~20	I	指数	0.10	8.77	1.14	5.66	0.890
	II	指数	0.35	7.83	4.47	5.79	0.801
	III	指数	0.28	2.05	13.66	15.06	0.559
	IV	指数	0.98	10.64	9.21	8.18	0.930

林最大 (16.48 m), 人工林土壤水分变程明显大于其它 3 种类型, 表明人工林内部空间自相关尺度较大, 土壤水分空间连续性较好。

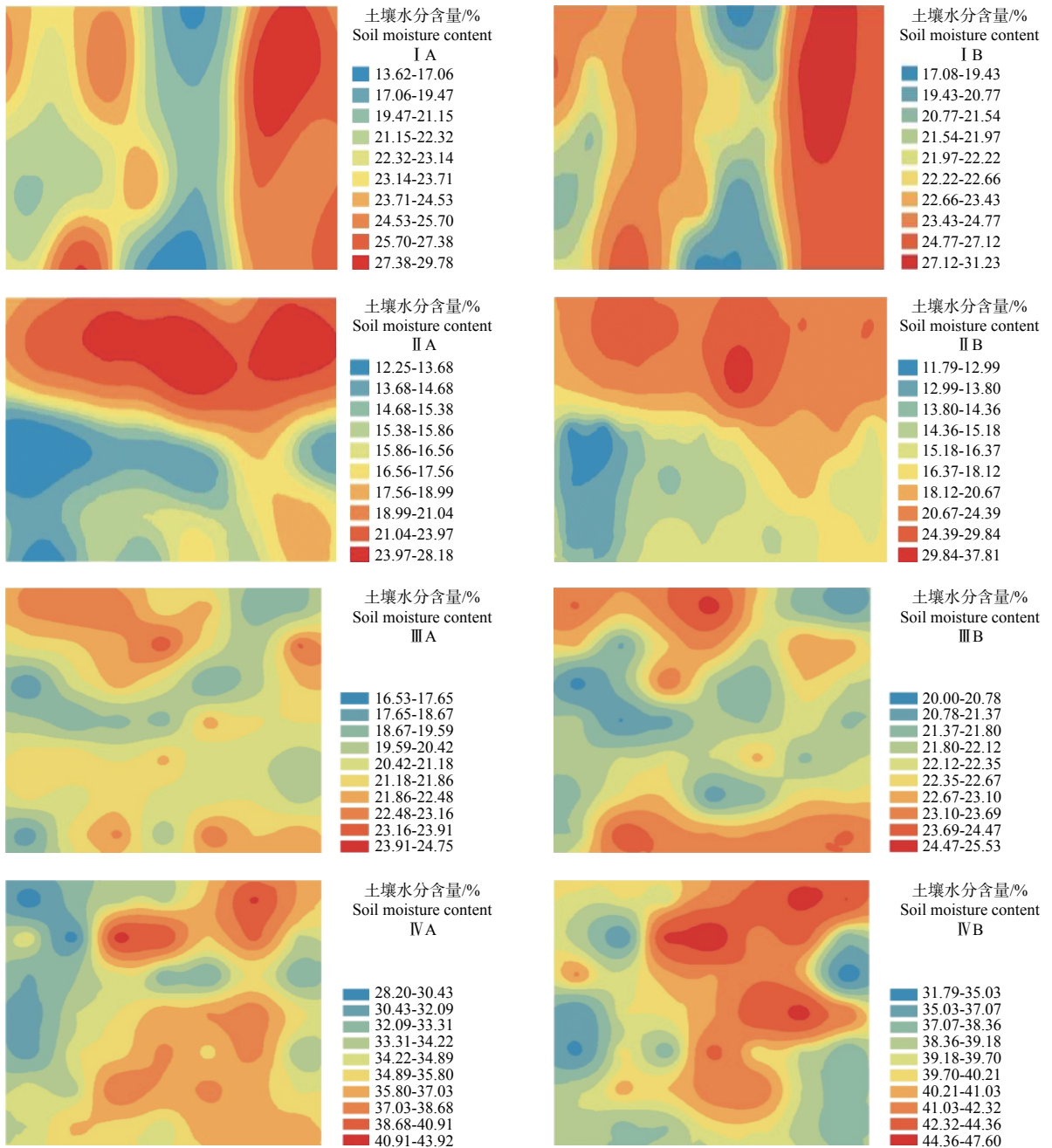
2.3 不同植被类型土壤水分的空间分布格局

为更直观、全面地了解不同植被类型坡面土壤水分含量的分布特征, 利用普通克里金法插值得出的预测图可以直接反映土壤含水量的空间分布格局, 由图 1 可知: 不同植被类型土壤水分空间分布不同, 但均呈不规则的斑块或条带状分布, 同一植被类型浅层、深层土壤水分具有较一致的空间分布格局。样地内浅层土壤水分空间结构复杂, 土壤水分大都呈斑块分布, 且草地和灌丛样地破碎化程度较高, 微地貌结构复杂, 导致空间连续性较差, 也形成了较小的变程; 样地内深层土壤水分呈条带状分布, 表明深层土壤水分结构变异小, 空间连续性较好。此外, 草地土壤水分含量自左向右呈现先减少后增加的趋势, 可能是因为样地中部基岩出露造成, 同时零星分布的灌木也对土壤水分有一定的影响; 灌丛土壤水分由上向下则呈递减趋势, 样地上半部分土壤水分含量明显高于下半部分, 这是因为样地内下半部相对于上半部有较多的裸岩分布, 土壤水分蒸发较快所致; 人工林土壤水分含量自上向下呈现先减少后增加的趋势, 天然次生林坡面土壤水分含量呈现两边低中间高的特征, 二者均随着样地内地势高低和植被分布情况发生波动。综上分析, 草地、灌丛和天然次生林土壤水分含量大体沿着坡面自上向下呈递减趋势, 人工林土壤水分含量自上而下沿坡面呈先减小后上升趋势, 4 种植被类型土壤水分最大值均出现在样地上半部, 草地、灌丛和天然次生林土壤水分最小值出现在样地下半部, 而人工林则出现在样地中部, 这可能与样地坡

度、植被和裸岩分布相关。

2.4 不同植被类型土壤物理性质差异

土壤密度和孔隙度反映了土壤密实程度, 密度低、孔隙度越大表明土壤越疏松, 土壤持水能力越强^[21]。不同植被类型土壤物理性质差异明显 (图 2), 土壤密度变化范围为 $0.78 \sim 1.30 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 由大到小依次为: 灌丛 > 人工林 > 草地 > 天然次生林, 且灌丛明显高于其它类型土壤, 与草地和天然次生林土壤密度差异显著 ($p < 0.05$), 同时浅层土壤密度小于深层, 但差异不显著。土壤总孔隙度与土壤密度呈相反的规律, 浅层大于深层, 整体来看, 土壤非毛管孔隙度随着植被正向演替呈现下降趋势, 草地深层土壤最高 (2.41%), 灌丛深层土壤最小 (0.99%), 且灌丛土壤深层、浅层非毛管孔隙度差异显著 ($p < 0.05$), 深层土壤非毛管孔隙度仅为浅层土壤的 59.2%, 其余植被类型土壤浅层均小于深层。土壤总孔隙度和毛管孔隙度呈现相同的变化趋势, 均随着植被正向演替方向而增加, 即草地 < 灌丛 < 人工林 < 天然次生林, 人工林和天然次生林显著高于另外 2 种植被类型 ($p < 0.05$), 同时其土壤总孔隙度和毛管孔隙度浅层均大于深层, 且差异显著 ($p < 0.05$)。由土壤水分与土壤孔隙度的相关性分析 (图 3) 可知: 土壤水分含量和土壤总孔隙度总体呈正比例趋势变化, 土壤总孔隙度越大, 土壤水分含量越高, 其中, 土壤浅层相关系数为 0.731, 深层相关系数为 0.737, 均表现出极显著的正相关关系 ($p < 0.01$)。土壤水分含量和土壤密度的相关性分析 (图 4) 表明: 二者呈负相关关系, 浅层土壤水分与密度的相关系数为 -0.820, 深层土壤水分与密度的相关系数为 -0.725, 且均为极显著负相关 ($p < 0.01$)。



注: 图中 A 为浅层土壤, B 为深层土壤。

Notes: A means shallow soil; B means deep soil.

图 1 土壤水分空间插值预测分布

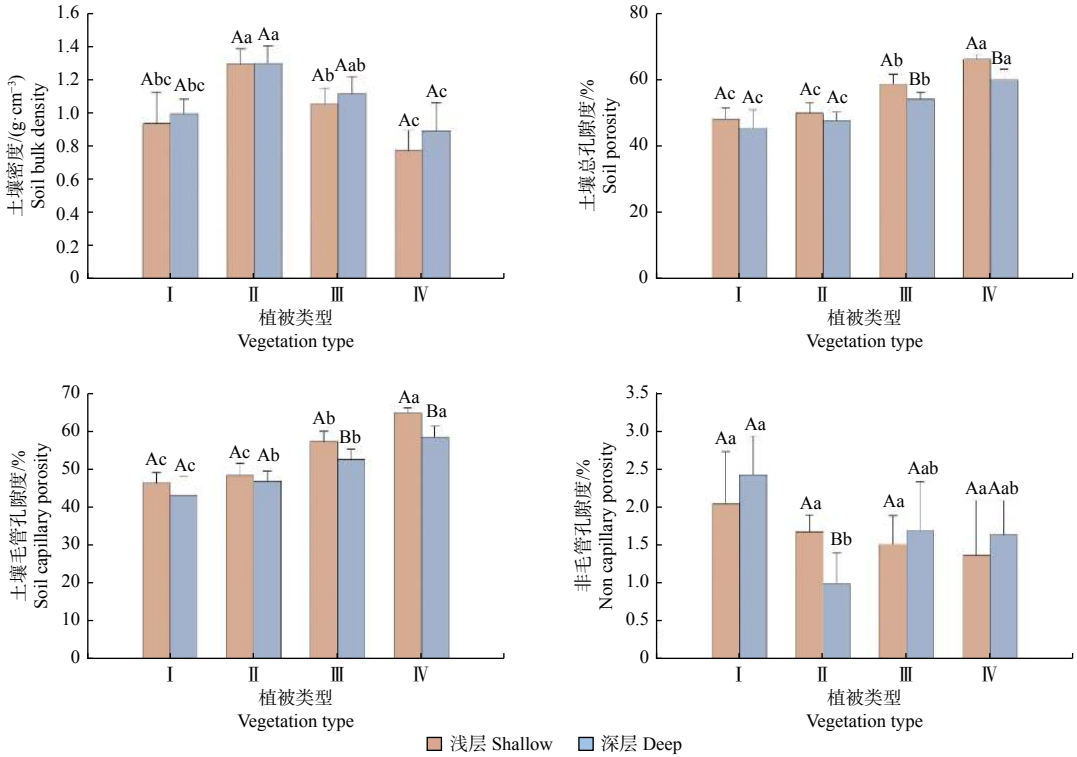
Fig. 1 Spatial interpolation prediction distribution map of soil moisture

3 讨论

3.1 不同植被类型土壤水分空间变化

本研究发现, 喀斯特白云岩不同植被类型土壤水分之间差异显著, 天然次生林土壤水分含量显著高于其它类型 ($p < 0.01$), 而 Zhou 等^[22]对裸地、草地、灌木和林地土壤水分的研究发现, 草地土壤平均水分含量最高, 且时间变异较小, 可能是

由于地表枯枝落叶层的存在可以留存水分且有效防止水分蒸发, 天然次生林冠幅较大可以减少太阳辐射从而降低土壤水分散失速率所致^[15]。相较于草地和灌丛, 人工林和天然次生林土壤水分含量均表现为较弱的变异程度, 这可能是因为不同样地之间地表破碎程度不同, 林下土壤覆盖较为连续, 草地和灌丛有基岩出露, 植被呈斑块状分布, 加之微地貌



注：不同大写字母表示深层、浅层差异显著 ($p < 0.05$)，不同小写字母表示相同深度下不同植被类型差异显著 ($p < 0.05$)。

Notes: different capital letters indicate significant difference in depth and shallow layer ($p < 0.05$), and different small letters indicate significant difference in different vegetation types at the same depth ($p < 0.05$).

图2 不同植被类型土壤密度和孔隙度差异

Fig. 2 Differences of soil bulk density and porosity among different vegetation types

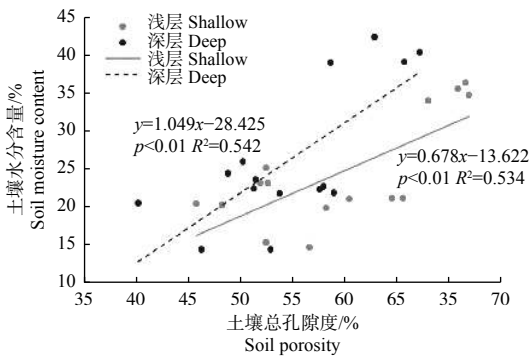


图3 土壤总孔隙度与土壤水分的相关关系

Fig. 3 Correlation between soil porosity and soil moisture

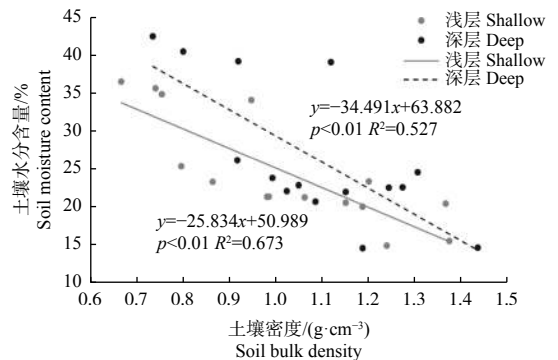


图4 土壤密度与土壤水分的相关关系

Fig. 4 Correlation between soil bulk density and soil moisture

形态比较复杂导致。赵文举等^[23]研究发现，土壤水分的变异性主要发生在含水量较低的区域，土壤含水量越低，其空间变异性就越大，这与本研究结果一致。整体来看，灌丛土壤水分变异系数最大，且除灌丛外浅层土壤水分变异系数均大于深层，分析其原因可能是由于灌丛的不规则分布影响了土壤水分的再分配，同时增大土壤颗粒分布的随机性从而加大水分的不确定性^[24]。

4种植被类型土壤水分均存在明显的空间相关性，半变异函数随滞后距的增加而增大，经过一定距离后趋于稳定。块金值表示随机变异程度的大小，本研究中，样地内土壤水分的块金值均较小，反映了4种植被类型土壤水分空间的平均变异尺度小。基台值通常表示系统内的总变异（包括结构性变异和随机性变异），本研究中，人工林的基台值

明显小于其它植被类型, 这反映出人工林土壤水分含量的总变异程度较低, 人工林样地内植物种类相比于其它植被类型样地较单一, 土壤水分含量空间变异性与植被类型有关。变程表示取样点之间的最大相关距离, 反映了土壤水分在空间上的连续程度, 本研究中, 人工林的变程最大, 草地的变程最小, 表明人工林的空间连续性尺度范围较广, 而草地空间连续性较差, 同时土壤平均密度越大, 表示该类型土壤水分垂直方向上的变程越小, 空间相关性也越强, 这与 Zhang 等^[25]的研究结果类似。块金系数可以表示空间自相关的强烈程度, 块金系数小于 25% 时表示有强烈的空间自相关, 本研究 4 种植被类型土壤水分块金系数均小于 25%, 这说明随机因素对于土壤水分的影响很小, 其空间变异可能由地形、土壤母质等自然因素造成。不同植被类型样地土壤水分的变程与块金系数的变化趋势大致相同, 这与 Zhang 等^[25]在喀斯特洼地表层土壤水分变程与块基比的变化趋势一致的结论相同, 灌丛与人工林之间差别较大, 可能是人工林土壤分布连续、植被覆盖较好导致。

3.2 不同植被类型土壤水分影响因子及时间变化

土壤水分不仅是影响坡面水文过程、水土流失过程和植被生长的重要因子, 也是土壤系统循环的基础, 对区域小气候有重要影响^[26]。在具有双重结构、岩石裸露率高、土壤生态条件恶劣的喀斯特山区, 水分的时空异质性与其它地区有显著差异。影响土壤水分含量的环境因素主要包括降水、土地利用、植被覆盖、地形地貌、土壤理化性质和土壤厚度等^[27]。Mei 等^[28]研究表明, 在严重干旱条件下坡向和坡度相较于植被类型对于土壤水分的影响更加重要, 而在正常干旱水平下, 植被类型对于土壤水分的影响起到了至关重要的作用。据国家气候中心气候系统监测数据显示, 本研究采样期间属于正常干旱条件, 故本研究中植被覆盖度是土壤水分空间变异的主要驱动因子之一。植物叶冠可拦截降水, 减少土壤水分的蒸发消耗, 增强蒸腾耗损; 其枯枝落叶覆盖地表后, 可增加下渗, 植物根系也能提高水分的垂直运动, 从而对土壤水分产生影响^[29]。本研究还发现, 土壤浅层孔隙度大于深层, 随着土壤孔隙度的增加, 土壤水分总体呈上升趋势; 而浅层土壤密度小于深层, 土壤水分含量整体上和土壤密度呈相反的变化趋势, 即土壤密度越

大, 水分含量越低, 这与张川等^[30]针对喀斯特白云质灰岩与纯灰岩洼地剖面土壤含水率的动态变化规律研究结果类似。此外, 张继光等^[31]研究表明, 土壤储水量旱季比雨季波动更显著, 且采样前 2 d 内的降水对 0~20 cm 土壤储水量的影响最大; 颜蒙蒙等^[32]研究发现, 土壤水分具有明显的季节性变化, 春季和冬季为土壤水分的补给期, 夏季和秋季为土壤水分的消耗期, 这说明采样时间、干湿条件以及季节变化也会对土壤水分产生一定的影响, 而本研究仅考虑了旱季不同植被类型土壤水分的空间变异情况, 在后续的研究中应增加不同季节土壤水分空间变异情况的监测。

4 结论

喀斯特白云岩区坡地土壤水分具有空间异质性, 土壤水分空间依赖性随植被类型不同而发生变化, 本研究利用 GIS 及相关统计学原理对白云岩地区草地、灌木林、人工林和天然次生林 4 种典型植被类型土壤水分空间分布格局进行分析, 揭示该区内不同植被类型土壤水分分布规律:

(1) 研究区典型植被类型土壤水分含量变化范围为 18.59%~40.22%, 变异系数为 5.34%~29.42%, 人工林和天然次生林表现出较弱的变异, 草地和灌丛表现出中等程度的变异, 土壤水分含量由高到低依次为: 天然次生林 > 草地 > 人工林 > 灌丛, 除草地和人工林之间差异不显著, 其余植被类型之间均呈极显著差异 ($p < 0.01$); 不同植被类型土壤水分含量最高值均发生在样地上半部, 整体沿坡面呈现自上而下递减趋势 (人工林除外), 人工林土壤水分连续性最好, 草地土壤水分连续性最差。0~20 cm 土层不同植被类型土壤含水量呈现相同的分布规律, 土壤水分含量与土壤深度成正比, 最大值出现在天然次生林深层土壤 (40.22%), 是最小值灌丛浅层土壤 (18.59%) 的 2.16 倍。

(2) 土壤水分具有明显的空间结构和强烈的空间自相关性。草地和灌丛浅层土壤水分半变异函数最优模型为高斯模型, 深层为指数模型, 人工林和天然次生林浅层、深层均为指数模型。土壤水分的块金系数为 1.14%~16.73%, 变程与变异系数的变化趋势相反, 而与块金系数的变化趋势则相同。土壤水分含量与土壤总孔隙度成正相关, 与土壤密度成负相关, 植被类型也影响土壤水分含量, 但并

非随着植被的正向演替进程而增加,在相似气象条件下,植被类型、土壤密度、孔隙度、土层深度和地表微地貌是影响土壤水分含量的重要因素。

参考文献:

- [1] 郭柯,刘长成,董鸣.我国西南喀斯特植物生态适应性与石漠化治理[J].植物生态学报,2011,35(10):991-999.
- [2] Jiang Z C, Lian Y, Qin X Q. Rocky desertification in Southwest China: Impacts, causes, and restoration[J]. Earth-Science Reviews, 2014, 132: 1-12.
- [3] 国家林业和草原局.中国·岩溶地区石漠化状况公报[N].中国绿色时报,2018-12-14(2).
- [4] 李阳兵,王世杰,李瑞玲.不同地质背景下岩溶生态系统的自然特征差异——以茂兰和花江为例[J].地球与环境,2004,32(1):9-16.
- [5] 李瑞玲,王世杰,周德全,等.贵州岩溶地区岩性与土地石漠化的相关分析[J].地理学报,2003,58(2):314-320.
- [6] 徐艳芳,王克林,祁向坤,等.基于TM影像的白云岩与石灰岩上喀斯特植被时空变化差异研究[J].生态学报,2016,36(1):180-189.
- [7] 杜文鹏,闫慧敏,甄霖,等.西南岩溶地区石漠化综合治理研究[J].生态学报,2019,39(16):5798-5808.
- [8] 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.
- [9] Ferreira J N, Bustamante M, Garcia-Montiel D C, et al. Spatial variation in vegetation structure coupled to plant available water determined by two-dimensional soil resistivity profiling in a Brazilian savanna[J]. Oecologia, 2007, 153(2): 417-430.
- [10] Peng W, Song T, Zeng F, et al. Spatial distribution of surface soil water content under different vegetation types in northwest Guangxi, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 69(8): 2699-2708.
- [11] 肖兴艳,刘方,姚斌,等.中国西南喀斯特土壤水分研究进展[J].云南农业大学学报:自然科学,2015,30(6):958-964.
- [12] Li S, Ren H D, Xue L, et al. Influence of bare rocks on surrounding soil moisture in the Karst rocky desertification regions under drought conditions[J]. Catena, 2014, 116(5): 157-162.
- [13] 宋同清,彭晚霞,曾履平,等.喀斯特木论自然保护区旱季土壤水分的空间异质性[J].应用生态学报,2009,20(1):98-104.
- [14] 刘晓林,李文峰,杨林楠,等.基于ArcGIS地统计分析模块的土壤养分空间变异分析——以云南省建水县为例[J].土壤通报,2012,43(6):1432-1437.
- [15] 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.
- [16] 徐慧芳,宋同清,黄国勤,等.喀斯特峰丛洼地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.
- [17] Castrignanò A, Buttafuoco G. Geostatistical stochastic simulation of soil water content in a forested area of South Italy[J]. Biosystems Engineering, 2004, 87(2): 257-266.
- [18] Landrum C, Castrignanò A, Mueller T, et al. An approach for delineating homogeneous within-field zones using proximal sensing and multivariate geostatistics[J]. Agricultural water management, 2015, 147(1): 144-153.
- [19] Tang Q Y, Zhang C X. Data Processing System (DPS) software with experimental design, statistical analysis and data mining developed for use in entomological research[J]. Insect Science, 2013, 20(2): 254-260.
- [20] 张诗祁,牛文全,李国春.关中平原田间土壤含水量的空间变异性[J].应用生态学报,2020,31(3):821-828.
- [21] 李红,范素芳,张光灿,等.黄土丘陵区退耕还林后不同林地土壤孔隙与贮水特性[J].水土保持通报,2010,30(1):27-30.
- [22] Zhou Q W, Sun Z Y, Liu X L, et al. Temporal soil moisture variations in different vegetation cover types in Karst Areas of Southwest China: A plot scale case study[J]. Water, 2019, 11(7): 1423-1447.
- [23] 赵文举,李晓萍,范严伟,等.西北旱区压砂地土壤水分的时空分布特征[J].农业工程学报,2015,31(17):144-151.
- [24] Hu W, Shao M A, Han F P, et al. Spatio-temporal variability behavior of land surface soil water content in shrub- and grass-land[J]. Geoderma, 2011, 162(3): 260-272.
- [25] Zhang J G, Chen H S, Su Y R, et al. Spatial variability and patterns of surface soil moisture in a field plot of Karst area in southwest China[J]. Plant Soil & Environment, 2011, 57(9): 409-417.
- [26] Zhu Y J, Shao M A. Variability and pattern of surface moisture on a small-scale hillslope in Liudaogou catchment on the northern Loess Plateau of China[J]. Geoderma, 2008, 147(3): 185-191.
- [27] Baroni G, Ortuani B, Facchi A, et al. The role of vegetation and soil properties on the spatio-temporal variability of the surface soil moisture in a maize-cropped field[J]. Journal of Hydrology, 2013, 489: 148-159.
- [28] Mei X M, Zhu Q K, Ma L, 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(3): 333-344.
- [29] 邱扬,傅伯杰,王军,等.土壤水分时空变异及其与环境因子的关系[J].生态学杂志,2007,26(01):100-107.
- [30] 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.
- [31] 张继光,苏以荣,陈洪松,等.典型喀斯特峰丛洼地土壤水分时空动态研究[J].农业环境科学学报,2007,27(4):1432-1437.
- [32] 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.

Spatial Variability of Soil Moisture under Typical Vegetation Types on Karst Dolomite Slope in Dry Season

WU Ze-yu^{1,2,3}, XUE Liang^{1,3}, ZHANG Xian-song⁴, LI Jin-yao^{1,2,3}, LI Sheng^{1,3}, WANG Jia^{1,3}

(1. Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Hangzhou 311400, Zhejiang, China; 2. Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China; 3. Puding Karst Rocky Desertification Ecosystem Research Station, Puding 562100, Guizhou, China; 4. Forestry Bureau of Puding County, Guizhou Province, Puding 562100, Guizhou, China)

Abstract: [Objective] To investigate the spatial variation and distribution of soil moisture with typical vegetation types in Karst dolomite area in order to provide data for rapid vegetation restoration and ecological reconstruction. [Method] Considering soil of karst dolomitic grassland, shrub, plantation and natural secondary forest in Puding County of Guizhou Province as research object, soil samples were collected in two layers (0-10 cm and 10-20 cm) by using grid method in November 2019 to determine the soil bulk density, porosity and water content. The soil moisture content and spatial variation characteristics were analyzed by using classical statistics and geostatistics. [Result] (1) Significant differences were found in soil moisture content among different vegetation types ($p < 0.01$), but there was no significant difference between grassland and plantation. The soil moisture content decreased in the order as followed: natural secondary forest > grassland > plantation > shrub. The maximum (40.22%) was 2.16 times of the minimum (18.59%) and the coefficient of variation ranged from 5.34% to 29.42%. (2) The optimal model of semi-variogram of soil moisture in shallow layer of grassland and shrub was Gaussian model, while the others were exponential models. The range of grassland was the smallest (4.24 m), while the range of plantation was the largest (16.48 m); the sill value of shrub was the largest (14.42), and the nugget value of natural secondary forest was the largest (1.27). (3) The highest soil moisture content occurred on the uphill slope in all plots, and the shallow soil moisture content was higher than the deep one. Furthermore, the same vegetation type had similar spatial distribution pattern in the vertical direction. (4) The soil moisture content was positively correlated with total soil porosity while negatively correlated with soil bulk density. Vegetation type also affected soil moisture content to a certain extent, but not with the positive succession of vegetation. [Conclusion] The spatial structure of soil moisture among different vegetation types is obvious, and there has a strong spatial autocorrelation. The soil moisture content of the natural secondary forest is the highest among the four types; the soil moisture continuity is the worst in grassland and the best in the plantation; the distribution of soil moisture in the same vegetation type is similar in the vertical direction. In the same weather conditions, the vegetation type, slope, soil bulk density and porosity might be the important factors affecting the distribution of soil moisture content.

Keywords: dolomite; vegetation types; soil moisture content; geostatistics; spatial variation

(责任编辑: 金立新)