

贵州贞丰—关岭花江喀斯特石漠化地区土壤厚度的空间分布特征

邓大鹏, 刘琦, 卢耀如, 闫钊全

Spatial distribution characteristics of soil thickness in the Zhenfeng-GuanlingHuajiang karst rocky desertification area in Guizhou Province

DENG Dapeng, LIU Qi, LU Yaoru, and YAN Yiquan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202111005>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

雄安新区土壤重金属和砷元素空间分布特征及源解析

Sources and spatial distribution of heavy metals and arsenic in soils from Xiongan New Area, China

董燕, 孙璐, 李海涛, 张作辰, 张源, 李刚, 郭小彪 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 172-181

基于地质建造探索承德市土地利用优化路径

Exploration of land use optimization path based on geological formation in Chengde City

卫晓锋, 王京彬, 孙厚云, 殷志强, 何泽新, 贾凤超, 李霞, 刘宏伟, 张竞 水文地质工程地质. 2020, 47(6): 15-25

承德市土壤重金属空间结构与分布特征

Spatial structure and distribution characteristics of heavy metals in the soil in Chengde

安永龙, 万利勤, 李霞, 殷志强, 卫晓峰, 何泽新, 贾凤超 水文地质工程地质. 2020, 47(6): 119-131

内蒙古西辽河平原植被指数时空变化及其影响因素研究

Spatial and temporal variations in vegetation index and its impact factors in the West Liaohe Plain in Inner Mongolia

高萌萌, 刘琼, 王轶, 李小磊, 石鹏 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 175-182

毛乌素沙地裸地与植被覆盖下非冻结期土壤水分时空分布特征

Spatial and temporal distribution characteristics of soil moisture in the non-freezing period under the bare land and vegetation cover in the Mu Us desert

高佳, 王文科, 赵明, 马稚桐, 侯昕悦, 李婉歆 水文地质工程地质. 2022, 49(6): 34-42

基于MODIS蒸散量数据的淮河流域蒸散发时空变化及影响因素分析

Spatio-temporal change and influencing factors of evapotranspiration in the Huaihe River Basin based on MODIS evapotranspiration data

郭晓彤, 孟丹, 蒋博武, 朱琳, 龚建师 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 45-52



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202111005

邓大鹏, 刘琦, 卢耀如, 等. 贵州贞丰—关岭花江喀斯特石漠化地区土壤厚度的空间分布特征 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(1): 197-206.

DENG Dapeng, LIU Qi, LU Yaoru, *et al.* Spatial distribution characteristics of soil thickness in the Zhenfeng-GuanlingHuajiang karst rocky desertification area in Guizhou Province[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(1): 197-206.

贵州贞丰—关岭花江喀斯特石漠化地区土壤厚度的空间分布特征

邓大鹏¹, 刘琦^{1,2}, 卢耀如¹, 闫钺全¹

- (1. 同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092;
2. 岩土及地下工程教育部重点实验室(同济大学), 上海 200092)

摘要: 土壤厚度与石漠化发展程度有着密切的关系, 土壤也是石漠化地区生态恢复以及农业生产的基础。为了研究典型高原峡谷中-强度石漠化地区的土壤厚度空间分布规律, 在土壤厚度野外调查的基础上, 利用地统计学方法分析了贵州典型石漠化地区——贞丰—关岭花江小流域土壤厚度空间分布特征及主要影响因素。结果表明: (1) 研究区土壤平均厚度仅为 26 cm, 土壤平均厚度表现为坡耕地>荒地>林地; (2) 土壤厚度空间变异性以强度为主, 荒地的土壤厚度空间分布连续程度优于林地和坡耕地, 林地的土壤厚度空间分布有明显突变性, 坡耕地的土壤厚度具有点状分布特征, 有耕作物附近土壤厚度较大; (3) 土壤厚度与海拔、基岩裸露率、坡度之间均有明显负相关关系; (4) 自然和人为因素综合影响下的土壤强侵蚀是研究区土壤厚度分布极为不均的主要原因, 对该区域石漠化的治理可以采用工程措施与生物措施相结合的方法。研究结果对研究区石漠化因地制宜地防治及其他地区水土流失防治、生态恢复、农业合理生产具有一定的参考价值。

关键词: 石漠化; 高原峡谷; 土地利用类型; 土壤厚度; 空间分布

中图分类号: X171.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)01-0197-10

Spatial distribution characteristics of soil thickness in the Zhenfeng-GuanlingHuajiang karst rocky desertification area in Guizhou Province

DENG Dapeng¹, LIU Qi^{1,2}, LU Yaoru¹, YAN Yiquan¹

- (1. Department of Geotechnical Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education(Tongji University), Shanghai 200092, China)

Abstract: Soil thickness is closely related to the development degree of rocky desertification, and soil is the basis of ecological restoration and agricultural production in karst rocky desertification areas. In order to examine the spatial distribution law of soil thickness in typical plateau rocky desertification areas, by combining field investigation of soil thickness with geostatistic methods, this paper analyzes the spatial distribution characteristics

收稿日期: 2021-11-02; 修订日期: 2021-12-15

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(41772292); 国家重点研发计划(2016YFC0502603)

第一作者: 邓大鹏(1992-), 男, 博士研究生, 主要从事岩溶石漠化方面的研究。E-mail: 1910362@tongji.edu.cn

通讯作者: 刘琦(1980-), 女, 博士, 副研究员, 主要从事水文地质工程地质方面的教学和研究。E-mail: liuqi472@163.com

of soil thickness and its influencing factors in the karst plateau gorge area of the Zhenfeng-Guanling Huajiang small watershed in Guizhou. The results show that the average soil thickness in the study area is only 26 cm, and the average thickness of soil is: Slope farmland > wasteland > forest land. The spatial variability of soil thickness in the study area is mainly intensity. The spatial distribution continuity of soil thickness in wasteland is better than that of forest land and slope farmland. The spatial distribution of soil thickness in forest land has obvious mutation. The soil thickness in slope farmland is characterized by point distribution, and the soil thickness near crops is large. There are significant negative correlations between soil thickness and altitude, bedrock exposure rate and slope. Serious soil erosion under natural and man-made effect is the main reason for the uneven distribution of soil thickness in the study area, and the combination of engineering measures and biological measures can be used to control rocky desertification in the study area. The results are of guiding significance for the control of rocky desertification in the study area and control of soil erosion, ecological restoration and rational agricultural production in other similar areas.

Keywords: karst rocky desertification; plateau canyon; land use; soil thickness; spatial distribution

石漠化是我国西南岩溶地区最严重的生态环境问题之一^[1-3],严重制约着西南地区的经济社会发展^[4]。岩溶地区特有的地形地貌、岩性和气候等因素造成该地区母岩成土速率慢且水土流失严重,地表土被不连续是土壤厚度空间分布不均的主要原因^[5-6],而土壤浅薄、持水能力差的地区更易于发生干旱和石漠化^[7-8],且土壤肥力严重下降^[9]。有研究指出石漠化从轻度向重度发展的过程中土壤厚度呈显著下降的趋势,轻度石漠化地区土壤厚度在 30~50 cm,中度石漠化地区土壤厚度在 20~40 cm,重度石漠化地区土壤厚度一般小于 20 cm,石漠化的发展程度和等级与土壤厚度有着密切的关系^[10-11],两者相辅相成。因此,对石漠化地区土壤厚度及其空间分布特征的研究有助于石漠化的有效控制以及水土流失防治等生态修复。

岩溶地区土壤厚度的空间分布特征受地形地貌、海拔、土地利用类型等多种因素的影响。周运超等^[12]通过研究指出岩溶地区特殊的地表地下二元水文结构以及复杂的地貌形态导致土壤流失极易发生,进而导致土壤厚度水平和纵向分布异质性。尹辉等^[13]利用 GIS 技术研究发现广西典型岩溶区土壤厚度空间分布不均匀,表现出斑状和带状分布等特征,梯度分布较为明显。李程程等^[14]研究了岩溶区域的土壤厚度与山体海拔高度的关系,结果表明由于重力和水力侵蚀等因素的影响,土壤的平均厚度随着山体高度的增高而减少。Huang 等^[15]研究表明贵州后寨河流域盆地土壤具有高度的空间异质性,地势凸起部分的土壤厚度明显比洼地和平地上的土壤薄。尹亮等^[16]研究表明石漠化地区土壤厚度具有中等强度变异性,不同土地利用方式下土壤厚度分布规律差异明显。对

于我国西南岩溶地区而言,土地利用率低、基岩裸露率高、山体海拔高差大、坡面较陡等状况是该地区的典型特征,也是影响区域土壤厚度空间分布的重要因素^[17],以往的研究较少从自然和人为因素综合分析石漠化地区土壤空间分布变异性的主要原因,特别对于中-强度石漠化地区的土壤厚度空间分布研究鲜有报道,难以为石漠化地区因地制宜地治理提供参考。

本文以贵州贞丰—关岭花江高原峡谷中-强度石漠化治理示范区为研究区域,通过野外土壤厚度调查并结合统计学等方法,分析研究区土壤厚度空间分布特征及关键影响因素,定量研究典型中-强度石漠化地区关键性人为因素(土地利用状况)和自然因素(海拔高度、基岩裸露率、坡度)综合对土壤厚度空间分布特征的影响,为石漠化地区土地合理利用和水土流失防治提供参考。

1 研究区概况

研究区位于贵州省关岭县与贞丰县交界处的北盘江峡谷花江段流域(图 1),该地区年均降水量约 1 100 mm,降雨主要分布在每年的 5—10 月。由于河流的下切作用,研究区海拔在 446~1 359 m,海拔高差大,是典型的喀斯特高原峡谷区域(图 2),岩性以石灰岩和白云岩为主,土壤主要是以黄色石灰土类型为主,结构松散、易形成干旱状态。主要土地利用类型为林地与坡耕地,此外还有大量无法耕种的荒地,其中林地面积约 2 244 km²,约占研究区总面积的 43%;耕地面积约 1 672 km²,约占总面积的 32%^[18]。研究区石漠化程度以中度和强度为主,石漠化面积约占研究区总面积的 49%。区内土地已被大量开垦,由于人类活动

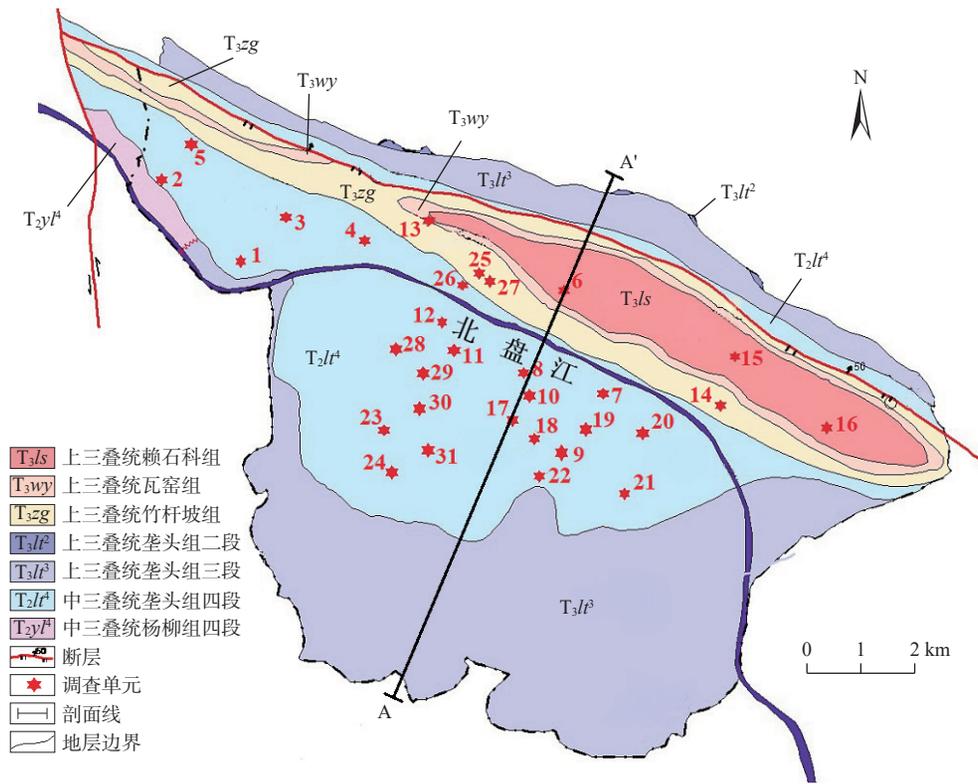


图 1 平面地质图及研究区土壤厚度调查单元分布

Fig. 1 Geological map and distribution of soil thickness survey units in the study area

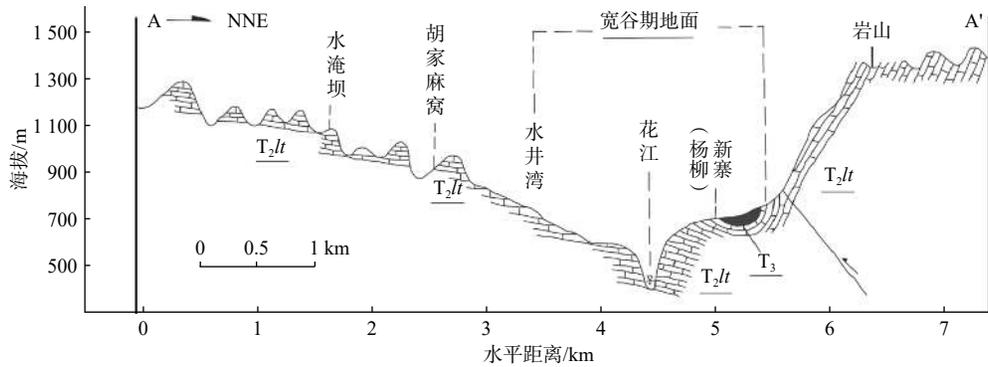


图 2 花江喀斯特峡谷地质剖面图

Fig. 2 Geological profile of the Huajiang karst gorge

的干扰, 土地植被覆盖度较低, 极易发生水土流失。

2 研究方法

2.1 采样方法与样点布设

采取抽样调查方式在研究区北盘江两岸选取了 31 个典型石漠化区域的抽样单元, 调查单元位置分布情况如图 1 所示。其中, 21 个调查单元选定 10 m×10 m 的正方形区域作为一般调查单元, 其内均匀布设 9 个土壤厚度采样点; 10 个调查单元选定为 20 m×20 m 的正方形区域作为详细调查单元, 均匀布设 25 个土壤厚度采样点, 样点布设如图 3 所示。为便于调查,

用钢钎法测定土壤厚度, 特制长度为 1.3 m, 直径为 12 mm 的尖端打磨的钢钎, 钢钎上每 5 cm 做一个刻度标记。

2.2 空间变异分析方法

在空间中土壤厚度的分布是区域化变量, 具有随机性和结构性, 是空间距离的函数, 可以用半方差函数进行描述^[16,19-20], 公式为:

$$R(s) = \frac{1}{2N(s)} \sum_{i=1}^{N(s)} (Z(x_i) - Z(x_i + s))^2 \quad (1)$$

式中: $R(s)$ ——间距等于 s 的半方差, 其随 s 的增加而增加;

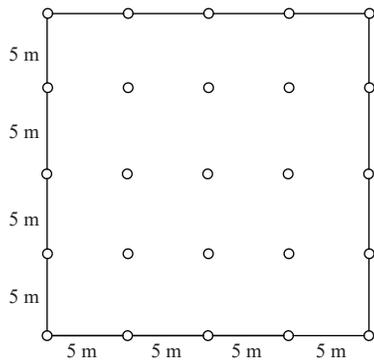


图 3 调查单元样点布设示意图

Fig. 3 Sampling points layout of investigation unit

$N(s)$ ——距离等于 s 时的点对数;
 $Z(x_i)$ ——样点 Z 在位置 x_i 的实测值;
 $Z(x_i+s)$ ——与 x_i 距离为 s 处样点的值。

土壤厚度的无偏最优估计采用点状克里格插值法。一定范围内, 变量在位置 x_0 处的估测值为 $Z(x_0)$, 周围一段距离内的实测值为 $Z(x_i)(i = 1, 2, \dots, n)$, 则变量在位置 x_0 处的估计值可以用 $Z(x_0)$ 的线性组合表示^[21], 即:

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (2)$$

式中: λ_i ——实测点位值的加权系数。

3 土壤厚度调查结果

31 个调查单元土壤厚度信息统计见表 1, 本次调查共有 439 个土壤厚度调查数据, 按照土地利用类型分为坡耕地、荒地和林地, 其中坡耕地的主要植被为

表 1 各采样单元土壤厚度

Table 1 Soil thickness information of the investigation units

调查单元编号	土地利用类型	主要植被	海拔 /m	基岩裸露率 /%	斜坡倾向 /($^{\circ}$)	坡度 /($^{\circ}$)	土壤厚度描述性统计				
							最大值/cm	最小值/cm	平均值/cm	标准差	变异系数/%
Plot 1	坡耕地	仙人掌、花椒	744	84.1	65	15	40	10	28	9.57	34
Plot 2	坡耕地	花椒	820	60.0	11	29	100	15	44	24.74	57
Plot 3	荒地	乔木、杂草	702	60.0	30	16	50	10	36	16.99	48
Plot 4	坡耕地	仙人掌、花椒	665	79.2	0	20	25	10	18	6.87	37
Plot 5	坡耕地	花椒、玉米	676	85.6	334	18	58	10	36	19.80	55
Plot 6	坡耕地	花椒	618	73.0	330	15	40	0	33	14.97	58
Plot 7	林地	柚木	542	63.8	255	15	45	5	18	14.04	77
Plot 8	荒地	杂草	677	80.9	18	16	35	20	27	5.10	19
Plot 9	坡耕地	玉米	871	72.8	10	17	50	10	33	14.62	44
Plot 10	坡耕地	金银花、花椒	774	75.1	30	12	50	18	37	11.68	32
Plot 11	坡耕地	花椒、仙人掌	689	63.4	60	16	50	20	33	9.95	30
Plot 12	坡耕地	火龙果	537	18.5	225	19	55	15	37	13.61	37
Plot 13	荒地	无	612	26.8	140	15	37	0	19	13.45	72
Plot 14	林地	柚木	555	83.7	210	11	62	15	32	15.62	49
Plot 15	坡耕地	大豆、花椒、玉米	767	61.1	15	16	80	25	59	16.41	28
Plot 16	坡耕地	花椒	717	71.9	30	18	40	15	28	7.07	25
Plot 17	坡耕地	花椒	813	64.2	258	14	8	5	6	1.41	24
Plot 18	坡耕地	花生、花椒	547	66.6	5	14	55	20	36	11.58	32
Plot 19	坡耕地	花椒	737	66.2	34	13	45	5	25	15.67	63
Plot 20	坡耕地	花椒	685	65.9	196	14	30	5	18	8.06	45
Plot 21	坡耕地	玉米、花椒	749	67.6	230	16	32	5	21	10.87	51
Plot 22	荒地	杂草	826	72.0	223	17	30	8	23	7.80	34
Plot 23	坡耕地	荒草、花椒	775	74.2	121	17	40	10	23	10.80	46
Plot 24	林地	灌木、荒草	1 189	0.0	40	20	15	15	15	0.00	0
Plot 25	坡耕地	火龙果、杂草	596	12.3	130	15	73	0	18	18.22	62
Plot 26	荒地	杂草	654	0.0	140	15	40	0	25	10.20	41
Plot 27	荒地	杂草	596	55.5	170	22	42	0	15	10.51	69
Plot 28	坡耕地	花椒、玉米	692	33.3	60	20	49	0	18	15.10	82
Plot 29	坡耕地	花椒	866	40.2	75	28	35	0	11	11.48	100
Plot 30	坡耕地	核桃、石榴	726	19.5	170	16	50	0	21	16.21	77
Plot 31	坡耕地	仙人掌、红薯	932	60.2	130	19	53	0	17	14.87	85

花椒、玉米和火龙果等; 荒地的主要植被为杂草; 林地的主要植被为灌木和柚木。调查单元分布的海拔高度从 537 ~ 1 189 m 不等, 占据了研究区海拔高度约 70% 的区间。从土壤厚度统计特征来看, 不同调查单元的土壤厚度平均值为 6 ~ 59 cm, 研究区的平均土壤厚度约为 26 cm。根据变异系数 (C_v) 的值可大致估测数据的变异程度^[22-23]: $C_v < 10\%$, 变异性较弱; $C_v = [10\%, 100\%]$, 变异性中等; $C_v > 100\%$, 变异性较强, 由表 1 中各调查单元的土壤厚度变异系数可知, 研究区土壤厚度变异性以中等变异为主。

由表 1 可知, 研究区土壤厚度在 0 ~ 100 cm, 以每 10 cm 为一个统计区间, 绘制了土壤厚度分布比例图 (图 4)。土壤厚度占比最多的区间为 [20, 30) cm, 占比约为 26%; 其次为区间 [10, 20) cm 和 [0 ~ 10) cm, 占比分别为 23% 和 16%。由土壤厚度累计比例可见, [0 ~ 30) cm 区间内的土壤厚度占比约为 66%, 即研究区土壤厚度普遍较低, 约 2/3 的土壤厚度低于 30 cm。

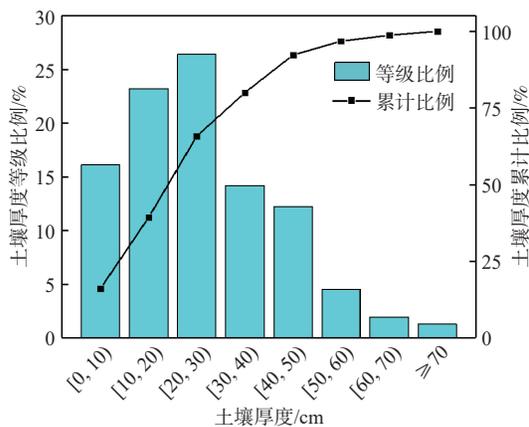


图 4 土壤厚度分布比例

Fig. 4 Proportion of soil thickness distribution

研究区山高坡陡且土壤厚度分布不连续, 土地难以大面积开垦利用。为了进一步分析不同土地利用类型的土壤厚度分布特征, 分别统计了林地、荒地和坡耕地的土壤平均厚度及分布区间, 得到不同土地利用类型土壤厚度分布情况 (图 5)。结果显示, 坡耕地的土壤平均厚度最大, 为 27.3 cm; 荒地、林地的土壤平均厚度依次降低, 分别为 24.2 cm 以及 21.7 cm, 表明经济作物的土壤较厚, 人为因素对其产生了重要作用。荒地的主要植被为杂草, 其土壤平均厚度大于以柚木和灌木为主的林地, 表明在研究区杂草由于有广布根系, 其固土作用可能强于高大的林木。从不同土地利用类型土地的土壤厚度分布区间来看 (图 5), 坡耕地的土壤厚度区间范围最大, 为 0 ~ 100 cm, 人为因素

使得土壤厚度的平均值较高, 但存在土壤厚度分布极为不均的弊端。林地、荒地的土壤厚度区间分别为 5 ~ 62 cm, 0 ~ 50 cm, 即林地的土壤最大厚度大于荒地, 这是因为林地的植物根系附近土壤厚度比荒地厚, 这也表明虽然在自然状态下林地和荒地的土壤平均厚度略低于坡耕地, 但具有土壤分布相对连续的优点。

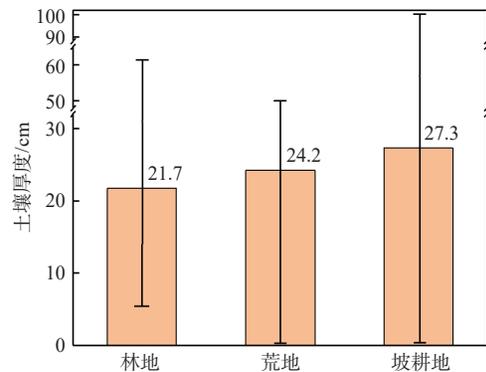


图 5 不同土地利用类型土壤厚度分布

Fig. 5 Soil thickness distribution of different land uses

4 分析及讨论

4.1 不同土地利用类型影响下的土壤厚度空间变异特征

以 3 种典型土地利用类型的样地 (荒地、林地、坡耕地) 进行半方差函数分析, 每种样地均选取 3 个典型调查单元, 根据决定系数 (R^2) 最大, 残差平方和 (RSS) 最小的原则, 得到 3 种典型样地土壤厚度半方差分析参数如表 2 所示。3 种土地利用类型样地土壤厚度的空间变异特征分别对应了不同的理论模型, 3 个荒地土壤厚度调查单元的土壤厚度分布理论模型表现出了良好的稳定性, 均为高斯模型; 林地的土壤厚度分布理论模型以球状模型为主, 其中 Plot 24 调查单元由于既存在灌木也有部分杂草, 导致其土壤厚度分布表现出线性模型; 而 3 个坡耕地调查单元的土壤厚度分布理论模型呈现出 3 种不同的模型 (球状模型、线性模型、指数模型), 反映出其土壤厚度空间分布的不确定性。

块金值与基台值的比值 (块基比) 表示随机部分引起的空间异质性占系统总变异的比, 块基比小于 0.25 时, 表明空间变异性较强; 块基比在 0.25 ~ 0.75 之间时, 具有中等程度的空间变异性; 块基比大于 0.75 时, 表明空间变异性相对较弱^[16]。由表 2 可知, 大部分样地的块基比小于 0.25, 表明研究区土壤厚度空间变异性以强度为主, Plot 29 坡耕地花椒地调查单元的块

表 2 典型样地土壤厚度半方差分析参数表

Table 2 Parameters of semi-variance analysis of soil thickness in typical plots

编号	土地利用类型	理论模型	块金值	基台值	块金值/基台值	变程	R ²	RSS
Plot 8	荒地	高斯模型	177.0	664.9	0.27	31.40	0.519	21 732
Plot 13	荒地	高斯模型	40.0	284.6	0.14	12.64	1.000	1.65
Plot 27	荒地	高斯模型	71.6	354.1	0.20	43.00	0.629	1 451
Plot 7	林地	球状模型	166.0	742.9	0.22	29.25	0.607	26 464
Plot 14	林地	球状模型	11.2	284.6	0.04	7.20	0.715	313
Plot 24	林地	线性模型	71.0	71.0	1.00	14.14	0.929	632
Plot 9	坡耕地	球状模型	25.0	459.3	0.05	7.93	0.509	3 922
Plot 12	坡耕地	线性模型	199.8	199.8	1.00	11.77	0.855	18 301
Plot 29	坡耕地	指数模型	98.6	342.9	0.29	183.00	0.528	240

基比介于 0.25 ~ 0.75 之间, 通过野外调研查明该样地附近常有人为农业施肥, 即人与自然作用同时影响导致该样地具有中等空间变异性。以柚木为主的林地调查单元 Plot 14 的块基比最小, 因此这种样地具有强空间变异性, 结构性因素(自然因素)是导致土壤厚度空间变异性的主导因子。

按照每种土地利用类型分别选取 3 个样地, 通过 GS+ 软件利用克里格插值法获得了 3 种土地利用类型样地的土壤厚度空间分布等值线图(图 6、图 7、图 8)。从整体上看, 在研究区内不同土地利用状况土壤厚度的空间分布有明显差异, 荒地的土壤厚度连续程度优于林地和坡耕地, 即空间变异性相对更小。从荒地的

土壤厚度分布情况(图 6)可以看出, 有杂草覆盖的荒地 Plot 8 和 Plot 27 的土壤厚度空间连续性好于无植被覆盖的荒地 Plot 13。从林地的土壤厚度分布情况(图 7)可以看出, 林地的土壤厚度分布变异程度较大, 个别点位土壤厚度达到 40 cm 以上, 而一半以上面积的土壤厚度低于 10 cm, 甚至多处土壤厚度为 0 cm, 部分土地无植被覆盖使得水土流失程度和岩石裸露情况具有明显随机性。其中, Plot 14 柚木林地较大的基岩覆盖率使得其土壤平均厚度偏低, 土壤厚度空间分布有明显突变性; 从坡耕地的土壤厚度分布情况(图 8)可以看出, 由于存在植被生长和人为活动的共同影响, 在一定程度内, 土壤厚度分布呈现有作物附近土壤厚

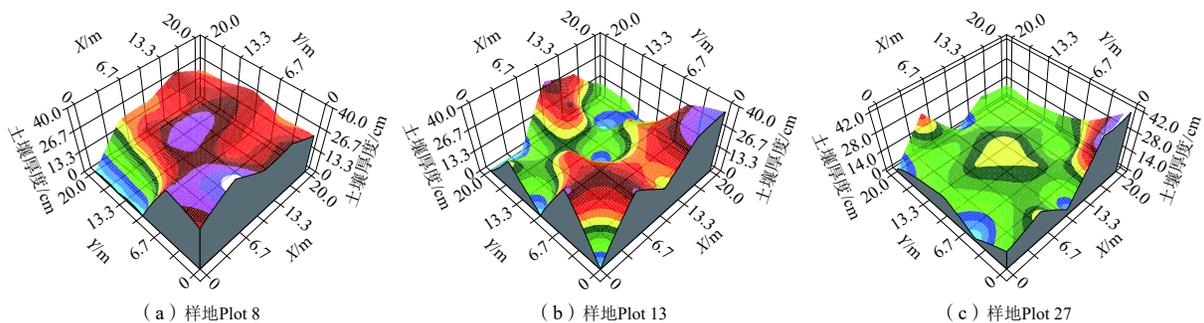


图 6 荒地土壤厚度分布等值线图

Fig. 6 Contour maps of soil thickness distribution in wasteland

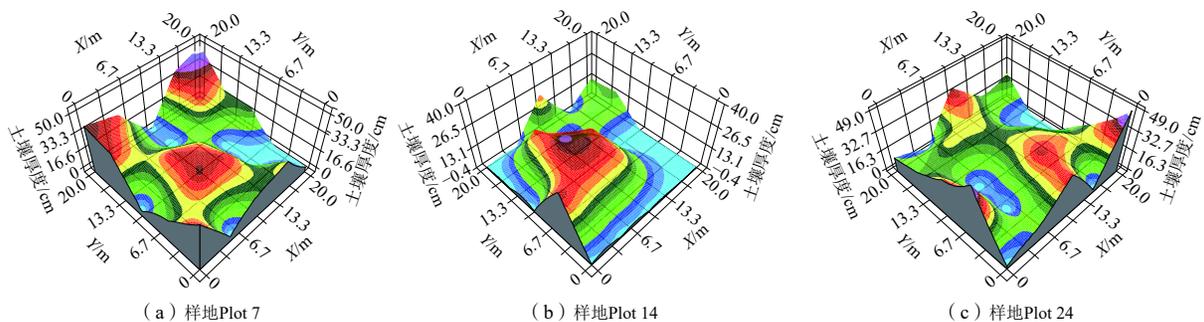


图 7 林地土壤厚度分布等值线图

Fig. 7 Contour maps of soil thickness distribution in forest land

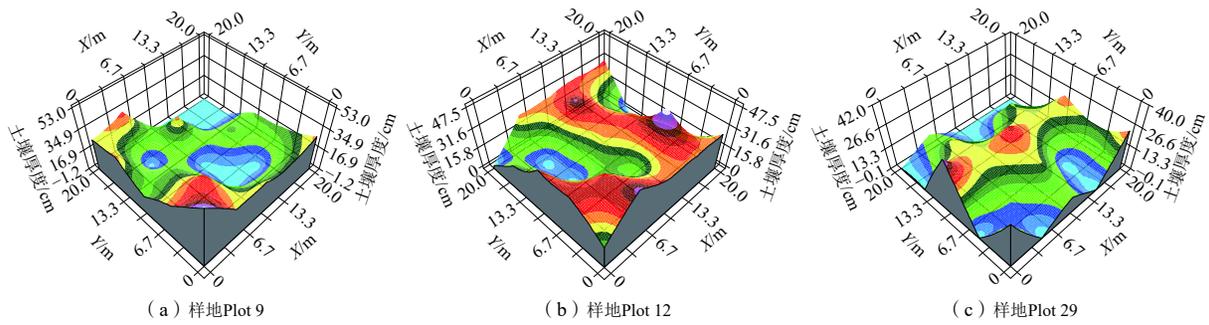


图 8 坡耕地土壤厚度分布等值线图

Fig. 8 Contour maps of soil thickness distribution in sloping farmland

度较大, 无植物地方土壤较为浅薄的特征, 但不同位置处土壤厚度的差值相对较小。

4.2 关键性自然影响因素分析

由于研究区属于典型的岩溶高原峡谷地貌, 地貌条件复杂, 影响土壤厚度分布情况的因素较多, 包括自然因素和人为因素。结合现场调研和资料收集, 发现海拔高度、基岩裸露率、坡度是对土壤厚度分布特征影响的关键性自然因素。因此本文主要分析海拔高度、基岩裸露率、坡度三种因素对研究区土壤厚度的空间分布影响规律。

4.2.1 海拔高度

研究区地形高差大, 海拔高度是造成土壤厚度空间分布不均的主要原因之一, 在海拔高的地方, 土壤在重力以及降雨的作用下, 会向海拔低的地方堆积。野外调查中, 31 个调查单元的海拔为 537 ~ 1 189 m, 其中大部分为石灰岩地区, 石灰岩地区调查单元海拔为 537 ~ 871 m。将相近海拔的土壤厚度求取平均值, 得出该海拔位置的土壤厚度平均值, 进而得到不同海拔高度与土壤厚度关系 (图 9)。

对海拔高度与土壤厚度数据点进行非线性拟合, 得到研究区内土壤厚度 (t) 与海拔 (h) 呈二次函数的负

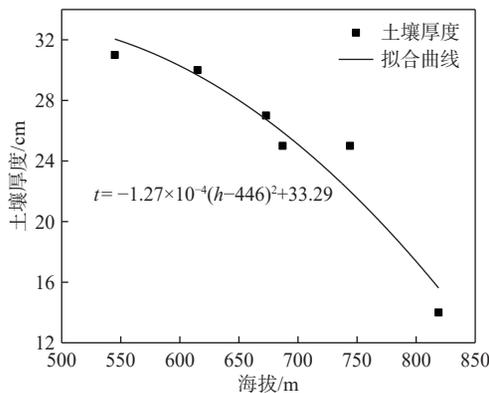


图 9 海拔与土壤厚度关系

Fig. 9 Relationship between soil thickness and altitude

相关关系 (图 9), 土壤的平均厚度随着山体海拔的增加而减小, 当海拔较高时, 曲线的斜率较大, 表明随着山体海拔的增大, 土壤厚度降低速率明显加快。在重力作用下, 土壤在高陡处常被侵蚀, 低洼处常形成堆积。即在岩溶石漠化地区, 土壤厚度随着距离山顶远近的变化而变化, 离山顶越近的地方, 土壤厚度越小; 反之, 离山顶越远的地方, 即山脚低洼处, 土壤厚度越大。野外调查发现, 山顶周围很少有高大的植物, 一般以野草为主, 土壤层十分浅薄, 甚至几乎没有土壤, 植物难以生长。

4.2.2 基岩裸露率

有大量的基岩裸露是岩溶石漠化地区的主要特点, 基岩裸露率是指单位调查单元内, 基岩出露的面积占一个调查样地总面积的百分比。一般情况下, 岩石裸露率越高, 表明土壤流失越严重, 石漠化程度越高。本文的调查单元是 10 m × 10 m 和 20 m × 20 m, 根据在毫米方格纸中绘制调查单元土壤分布简易图, 经 Mapgis 数值化后计算得到调查单元的基岩裸露率为 18.5% ~ 85.6%, 大部分采样单元基岩裸露率在 60% ~ 90%, 平均值为 66.8%。

为了分析基岩裸露率对土壤厚度的影响, 将相近基岩裸露率的调查单元土壤厚度求取平均值, 并绘制了基岩裸露率与土壤厚度的关系图 (图 10)。拟合曲线表明土壤厚度 (t) 与基岩裸露率 (r) 呈明显的线性负相关关系, 基岩裸露率越大, 土壤层越薄。此规律与野外调查情况相同, 基岩裸露率越大, 即石漠化程度越高, 土壤层就更加浅薄。

4.2.3 坡度

在土壤流失过程中坡度是较为重要的影响因子。坡度大的地方在降雨冲刷作用下, 极易产生土壤流失, 因此, 坡度大的地方土壤累积较少, 土层浅薄。为了研究坡度对土壤厚度的影响, 将 31 个调查单元中坡度相同的土壤厚度求取平均值, 作为该坡度的平

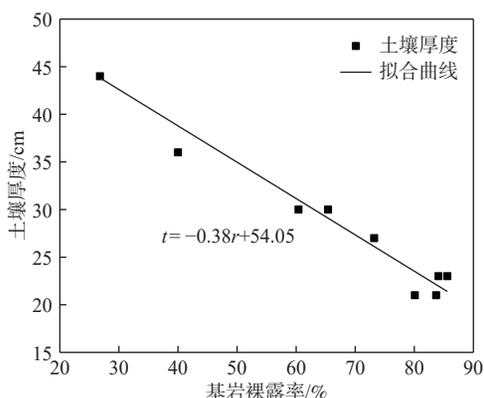


图 10 基岩裸露率与土壤厚度关系

Fig. 10 Relationship between soil thickness and bedrock exposure rate

均土壤厚度,得到了坡度与土壤厚度相关关系(图 11)。拟合曲线表明土壤厚度(t)与坡度(s)之间有明显线性负相关关系,即当坡度不断增大,研究区土壤厚度不断变小,二者呈现线性相关关系。即坡度较大区域的土壤会通过重力以及降雨侵蚀向平缓处积累,进而影响土壤厚度。随着坡度的增大,土壤侵蚀程度逐渐增强,土壤厚度逐渐降低。

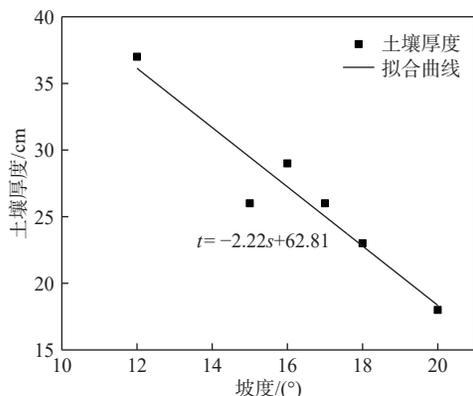


图 11 坡度与土壤厚度关系图

Fig. 11 Relationship between soil thickness and slope

4.3 讨论

研究区属于典型中-强度石漠化地区,具有海拔高差大、坡面较陡、基岩裸露率高的特点。随着海拔的升高,地理气候环境逐渐恶劣,植物生长愈发困难,如在研究区发现山底生长乔木,随着海拔升高逐渐变为灌木,到较高的山顶时则生长的是草本植物,植被固土能力越来越弱,降雨带来的土壤流失逐渐加重,土壤厚度就会降低;当基岩裸露率较高时,反映出深层土壤与母岩结合能力较弱,植被覆盖率一般较低,不利于植物、土壤和基岩的有机结合,土壤流失更容易发生,即土壤厚度相对较低;对于坡度而言,随着坡度

的增大,外力作用下坡面土壤侵蚀更容易发生,土壤中有机质流失较快,不利于植物生长,进一步加剧了土壤的侵蚀,造成土壤厚度随坡度增加而降低的现象;此外,研究区具有显著的地表地下“二元”水文特征,因此研究区土壤的重力侵蚀和水力侵蚀均极易发生,导致大面积的土壤地表流失和地下漏失,这也是造成土壤空间分布极为不均的主要原因之一。

研究区自然植被种类较为单一,缺少集中连片的大型灌木以减少降雨对土壤的冲刷侵蚀,经济作物的过度种植导致土地被大量开垦,人为因素对土壤空间分布影响明显。因此,对于研究区土壤流失的控制可以通过工程措施和生物措施共同实施。工程措施可以利用坡改梯减缓坡度^[24],减少土壤流失的原动力,起到减缓土壤流失的作用。生物措施包括退耕还林还草^[25]、灌木与草套种、矮化密植^[26]等,对于基岩裸露率较大、土壤厚度较小的区域,种植根系较大草本植物,进行人工干预下的生态修复;对于土壤厚度较大,基岩裸露率低的区域,可以开展适当的农业耕种,维持区域经济发展和生态修复的平衡。

5 结论

(1)研究区土层较为浅薄,土壤平均厚度仅为 26 cm;土壤厚度主要集中在 20~30 cm,约 2/3 的土壤厚度低于 30 cm;土壤平均厚度表现为坡耕地>荒地>林地,且坡耕地的土壤厚度区间最大。

(2)通过半方差函数分析和土壤厚度分布等值线图,得到研究区土壤厚度空间变异性以强度为主;荒地的土壤厚度空间分布连续程度优于林地和坡耕地;林地土壤流失程度和岩石裸露情况具有明显随机性,土壤厚度空间分布的变异程度较大;坡耕地的作物根系附近土壤厚度较大,无植物地方土壤较为浅薄。

(3)通过分析关键性自然因素对土壤厚度空间分布的影响,得到土壤厚度与海拔之间存在二次函数的非线性负相关关系,与基岩裸露率、坡度之间均有明显的线性负相关关系,并建立了相应的数学关系式。

(4)研究区土壤空间分布变异性较大是由于复杂的自然条件和人为因素的综合作用结果,该区域石漠化的治理可以采用工程措施和生物措施共同实施,以达到经济发展和生态修复的平衡。

参考文献 (References) :

- [1] 卢耀如,张凤娥,刘长礼,等.中国典型地区岩溶水资源及其生态水文特性[J].地球学报,2006,27(5):393-

402. [LU Yaoru, ZHANG Fenge, LIU Changli, et al. Karst water resources in typical areas of China and their eco-hydrological characteristics[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2006, 27(5): 393 – 402. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 姚邦杰, 刘琦, 任标, 等. 典型石漠化地区岩溶水系统循环演化分析[J]. 工程地质学报, 2019, 27(5): 1179 – 1187. [YAO Bangjie, LIU Qi, REN Biao, et al. Analysis of cyclic evolution of karst water system in typical karst rocky desertification area[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2019, 27(5): 1179 – 1187. (in Chinese with English abstract)]
- [3] LIU Qi, DENG Dapeng, YAO Bangjie, et al. Analysis of the karst springs' supply sources in rocky desertification area of Guanling –Huajiang, Guizhou, China[J]. *Carbonates and Evaporites*, 2020, 35(3): 1 – 11.
- [4] 闫利会, 周忠发, 陈全, 等. 高原峡谷区喀斯特石漠化演变过程研究[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(2): 112 – 117. [YAN Lihui, ZHOU Zhongfa, CHEN Quan, et al. A study of the evolution process of karst rocky desertification in a karst canyon area[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2016, 43(2): 112 – 117. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 张信宝, 刘再华, 王世杰, 等. 锥峰和塔峰溶丘地貌的表层喀斯特带径流溶蚀形成机制[J]. *山地学报*, 2011, 29(5): 529 – 533. [ZHANG Xinbao, LIU Zaihua, WANG Shijie, et al. Dynamic mechanism of runoff corrosion in the epikarst zone on the formation of cone and tower karst landforms[J]. *Journal of Mountain Science*, 2011, 29(5): 529 – 533. (in Chinese with English abstract)]
- [6] WANG Miaomiao, CHEN Hongsong, ZHANG Wei, et al. Soil nutrients and stoichiometric ratios as affected by land use and lithology at county scale in a karst area, southwest China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 619/620: 1299 – 1307.
- [7] CAO Shixiong. A win-win path for institutional change[J]. *Time and Society*, 2016, 25(3): 493 – 512.
- [8] FENG Qi, MA Hua, JIANG Xuemei, et al. What has caused desertification in China?[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 15998.
- [9] 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 Chunheng, FU Zhiyong, WU Liping, 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. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 魏兴琥, 李森, 罗红波, 等. 粤北石漠化过程土壤与植被变化及其相关性研究[J]. *地理科学*, 2008, 28(5): 662 – 666. [WEI Xinghu, LI Sen, LUO Hongbo, et al. Changes and correlation of soil and vegetation in process of rock desertification in northern Guangdong Province[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2008, 28(5): 662 – 666. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 李森, 董玉祥, 王金华. 土地石漠化概念与分级问题再探讨[J]. *中国岩溶*, 2007, 26(4): 279 – 284. [LI Sen, DONG Yuxiang, WANG Jinhua. Re-discussion on the concept and classification of rocky desertification[J]. *Carsologica Sinica*, 2007, 26(4): 279 – 284. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 周运超, 罗美. 喀斯特小流域土壤厚度的影响因素[J]. *山地农业生物学报*, 2017, 36(3): 1 – 5. [ZHOU Yunchao, LUO Mei. Influencing factors of soil thickness in karst small watershed[J]. *Journal of Mountain Agriculture and Biology*, 2017, 36(3): 1 – 5. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 尹辉, 李晖, 蒋忠诚, 等. 基于“3S”的广西典型岩溶区土壤厚度空间格局研究[J]. *水土保持研究*, 2014, 21(6): 25 – 29. [YIN Hui, LI Hui, JIANG Zhongcheng, et al. Study on spatial pattern of soil thickness in typical karst area in Guangxi based on ‘3S’ technology[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2014, 21(6): 25 – 29. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 李程程, 程星, 杨士超. 岩溶山区植物生长的土壤厚度因素研究: 以贵州相宝山为例[J]. *贵州师范学院学报*, 2012, 28(9): 38 – 41. [LI Chengcheng, CHENG Xing, YANG Shichao. Study on the soil thickness factor of plant growth in karst mountains: Take the Guizhou Xiangbao Mountain as an example[J]. *Journal of Guizhou Normal College*, 2012, 28(9): 38 – 41. (in Chinese with English abstract)]
- [15] HUANG Xianfei, ZHANG Zhenming, ZHOU Yunchao, et al. Spatial heterogeneity of soil thickness and factors controlling it in a karst basin[J]. *Eurasian Soil Science*, 2021, 54(4): 478 – 486.
- [16] 尹亮, 崔明, 周金星, 等. 岩溶高原地区小流域土壤厚度的空间变异特征[J]. *中国水土保持科学*, 2013, 11(1): 51 – 58. [YIN Liang, CUI Ming, ZHOU Jinxing, et al. Spatial variability of soil thickness in a small watershed of karst plateau[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2013, 11(1): 51 – 58. (in Chinese with English abstract)]

- English abstract)]
- [17] 梁桂星,覃小群,崔亚莉,等. 分布式水文模型在岩溶地区的改进与应用研究[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(2): 60 – 67. [LIANG Guixing, QIN Xiaoqun, CUI Yali, et al. Improvement and application of a distributed hydrological model in karst regions[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(2): 60 – 67. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 王涵,刘琦,任标,等. 典型喀斯特石漠化地区降雨产流产沙特征[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2019, 37(3): 6 – 12. [WANG Han, LIU Qi, REN Biao, et al. Characteristics of rainfall runoff and sediment yield in typical karst rocky desertification area[J]. *Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences)*, 2019, 37(3): 6 – 12. (in Chinese with English abstract)]
- [19] ROBERTSON G P, CRUM J R, ELLIS B G. The spatial variability of soil resources following long-term disturbance[J]. *Oecologia*, 1993, 96(4): 451 – 456.
- [20] 高峻,何春霞,张劲松,等. 太行山干瘠山地土壤厚度空间变异及草灌群落分布特征[J]. 生态学报, 2020, 40(6): 2080 – 2089. [GAO Jun, HE Chunxia, ZHANG Jinsong, et al. Spatial variability of soil thickness and the distribution characteristics of herb and shrub communities in the arid and barren areas of Taihang Mountains[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(6): 2080 – 2089. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 易湘生,李国胜,尹衍雨,等. 土壤厚度的空间插值方法比较:以青海三江源地区为例[J]. 地理研究, 2012, 31(10): 1793 – 1805. [YI Xiangsheng, LI Guosheng, YIN Yanyu, et al. Comparison on soil depth prediction among different spatial interpolation methods: A case study in the Three-River Headwaters Region of Qinghai Province[J]. *Geographical Research*, 2012, 31(10): 1793 – 1805. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 尹亮. 西南岩溶高原石漠化地区小流域土壤厚度空间分异规律研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2012. [YIN Liang. Spatial variability of soil thickness in a watershed of highland areas in karst region[D]. Changsha: Hu'nan University, 2012. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 代希君,彭杰,张艳丽,等. 基于光谱分类的土壤盐分含量预测[J]. 土壤学报, 2016, 53(4): 909 – 918. [DAI Xijun, PENG Jie, ZHANG Yanli, et al. Prediction on soil salt content based on spectral classification[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(4): 909 – 918. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 陈小强,张寿鹏,张连根,等. 岩溶石漠化区吉科小流域治理效果评价[J]. 中国水土保持, 2015(6): 21 – 23. [CHEN Xiaoqiang, ZHANG Shoupeng, ZHANG Liangen, et al. Evaluation of treatment effect of Jike small watershed in karst rocky desertification area[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2015(6): 21 – 23. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 张军以,戴明宏,王腊春,等. 西南喀斯特石漠化治理植物选择与生态适应性[J]. 地球与环境, 2015, 43(3): 269 – 278. [ZHANG Junyi, DAI Minghong, WANG Lachun, et al. Plant selection and their ecological adaptation for rocky desertification control in karst region in the southwest of China[J]. *Earth and Environment*, 2015, 43(3): 269 – 278. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 喻阳华,闵芳卿,盈斌. 顶坛花椒矮化密植方法: CN109168865A[P]. 2019-01-11. [YU Yanghua, MIN Fangqing, YING Bin. Zanthoxylum bungeanum dwarfing and dense planting method; CN109168865A[P]. 2019-01-11. (in Chinese)]

编辑: 宗 爽