

喀斯特高原峡谷石漠化治理过程中土壤理化性质的变化

崔高仰^{1,4} 容 丽^{2*} 李晓东³ 檀 迪^{1,4}

(¹中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081; ²贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵阳 550001; ³天津大学表层地球系统科学研究院, 天津 300072; ⁴中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要 采用时序研究法,对 2006—2013 年喀斯特高原峡谷石漠化治理过程中 5 种石漠化阶段的土壤理化性质进行动态监测,研究土壤理化性质的时空演变规律,为石漠化的进一步治理提供科学依据。结果表明:随着治理时间增加,土壤理化性质整体上得到改善,主要体现在土壤毛管孔隙度、总孔隙度、田间-毛管持水量、渗透速率、pH 值、全 K、速效 K 及全 P 含量增加;随着时间增加,土壤理化性质表现出前期(2006—2010 年)平稳、波动甚至恶化,后期(2010—2013 年)大幅改善的非线性变化特点,说明一方面土壤质量对植物群落结构优化和小气候改善的响应存在滞后效应,另一方面也受到 2009—2010 年西南大旱的影响;空间尺度上,无石漠化环境土壤理化性质表现最好,其余 4 种石漠化阶段之间的理化性质多年均值差异不明显,说明经过长期治理,不同石漠化阶段之间的土壤理化性质差异缩小,同时“空间指示时间”手段在此并不适用;潜在-轻度石漠化环境部分土壤理化指标表现不佳,应成为今后石漠化防治的工作重点。

关键词 石漠化; 土壤理化性质; 时空演变; 滞后效应; 干旱

Changes of soil physicochemical properties during rocky desertification control in karst mountain-canyon region. CUI Gao-yang^{1,4}, RONG Li^{2*}, LI Xiang-Dong³, TAN Di^{1,4} (¹State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Science, Guiyang 550081, China; ²School of Geography and Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China; ³Institute of Surface-Earth System Science, Tianjin University, Tianjin 300072, China; ⁴University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China).

Abstract: Physical and chemical properties of soils at five stages in the process of karst rocky desertification in 2006–2013 were investigated with chronosequence method in karst plateau-canyon region in Guizhou. This work aims to study the spatial and temporal evolution of soil physicochemical properties, and provide a scientific basis for further control of rocky desertification. The results showed that controlling of karst rocky desertification had generally improved the soil physicochemical properties, such as capillary porosity, total porosity, field moisture capacity, capillary moisture capacity, saturated permeability, pH, total potassium content, available potassium content and total phosphorous content. As time went on, change trends of soil physicochemical properties were stable or fluctuant at early stage and became better subsequently, which appeared as a non-linear pattern. These changes illustrated that there was a lag-effect between the improvements of soil physicochemical properties and plant community structure and microclimate, and they were probably affected by the heavy drought in southwest China in 2009–2010. At the spatial scale, soil physicochemical properties in stage of no rocky desertification had the best performance, and there were no significant differences among the other four stages of rocky desertification. This

贵州省社会发展科技攻关计划项目(黔科合 SY 字[2012]3011 号)和国家重大科学研究计划项目(2013CB956703)资助。

收稿日期: 2016-10-08 接受日期: 2017-02-17

* 通讯作者 E-mail: ronglit@163.com

study demonstrated that the differences of soil physicochemical properties among different stages of rocky desertification became indistinct after long-term control, while “space instead of time” method was inapplicable in the current work. The poor performance of soil properties in stages of potential and slight rock desertification suggested that more attention should be paid to these two stages in the future practice.

Key words: rocky desertification; soil physicochemical properties; spatial-temporal evolution; lag effect; drought.

喀斯特石漠化是与脆弱生态地质背景和人类活动相关联的土地退化过程,造成土地生产力下降、地表植被覆盖率锐减、系统涵养水源能力削弱、地表水源枯竭,土地资源丧失及粮食减产(Wang *et al.*, 2004a, 2004b)。它以土地生产力退化为本质特征,以出现石漠化景观为标志(李阳兵等,2004;龙健等,2005)。作为中国南方喀斯特的中心,贵州省石漠化面积比重居我国首位,其石漠化研究、治理在全国都具有很强的代表性(熊康宁等,2012)。近年来,通过退耕还林、封山育林、改良土壤、开发岩溶水、发展沼气、种植适生经济作物、生态移民等措施,部分地区的石漠化治理工作取得了一定成效,但石漠化恢复和治理是一个长期、缓慢的过程,石漠化依然是制约我国喀斯特地区经济社会发展的一个重大生态环境问题(王世杰等,2007;Li *et al.*,2009;Wang *et al.*,2013;Jiang *et al.*,2014)。

土壤是陆地生态系统的重要组成部分,是生态系统诸多生态过程的载体,是植物群落更替过程中不可或缺的研究内容。石漠化不仅能够引起地表形态、植被等变化,其本质是使土壤的物质组成、理化性质和生产性能发生变化(龙健等,2005),并且这种变化由于治理时间长短及石漠化程度不同而异。目前本领域很多相关研究采用空间代替时间方法,主要涉及:石漠化等级划分与评价方法(熊康宁等,2002;Zhang *et al.*,2014),石漠化过程中土壤质量变化(王德炉等,2003;刘方等,2005),水土流失方式与机制(Zhang *et al.*,2011;熊康宁等,2012),岩性与石漠化分布的空间相关性(Wang *et al.*,2004a,2004b),石漠化防治与恢复重建技术(苏维词,2002),石漠化的遥感-GIS研究(熊康宁等,2002;Bai *et al.*,2013),裸岩土壤水分变化(李生等,2012;Li *et al.*,2014),石漠化地区植物多样性及土壤理化性质(盛茂银等,2015)等,对石漠化长期治理过程中土壤理化性质的时空演变研究较少。因此,本文对喀斯特高原峡谷石漠化区2006—2013年5种程度石漠化环境的土壤理化性质进行连续监测,研究其时

空演变机制,为西南喀斯特石漠化生态系统恢复重建提供理论依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于贵州安顺市北盘江峡谷花江段,地貌类型为典型的喀斯特高原峡谷,地势起伏大,海拔450~1450 m,相对高差1000 m。该区出露地层主要为中、上三叠统地层,碳酸岩占95%以上。土壤以黄壤、黄色石灰土为主。冬春温暖干旱,夏秋湿热,热量资源丰富;年均温18.4℃,年均降水量1100 mm,5—10月降水量占全年总降水量的83%。由于人为破坏,现存植被以耐旱的次生先锋树种为主。野生植被是以龙须藤(*Bauhinia championii*)、鸡矢藤(*Paederia scandens*)、铁线莲(*Clematis uncinata*)、葎草(*Arthraxon hispidus*)等为主的藤、刺、灌丛和零星分布的青冈(*Cyclobalanopsis blakei*)、盐肤木(*Rhus chinensis*)、油桐(*Vernicia fordii*)等。

1.2 研究方法

1.2.1 样方设置及采样方法 结合小流域内植被及土壤分布情况,选取石漠化演替过程中的5个典型阶段为研究对象:强度石漠化(strong,ST)、中度石漠化(moderate,M)、轻度石漠化(slight,SL)和潜在石漠化(potential,L)、无石漠化(non,N),划分标准参考熊康宁等(2002)的方法。针对5个研究对象各设立面积为20 m×20 m重复样地3个,各样地除石漠化演替阶段不同外,其他因子大致相同(表1)。在样地中心按蛇形方式选3个采样点,各点间距在5 m之内。监测数据从2006年开始积累,除2007年没有采样外,2006—2013年每年4月(雨季来临之前)用环刀在各样地取表层土样(0~15 cm),3次重复,作为物理性质测试样品;各采样点另取3个土样混合均匀后取1.0 kg混合样品装入土壤袋,作为化学性质测试样品。石漠化地区土层浅薄,因此只取0~15 cm土壤层作为研究对象。

1.2.2 土壤物理性质测定 容重、田间持水量、自

表1 样方基本信息表

Table 1 Basic features of the sampling plots

石漠化程度及样地编号	平均海拔 (m)	平均坡度 (°)	最大土壤厚度 (cm)	植被盖度 (%)	治理措施	植被配置
强度石漠化 (I1-3)	824	25	15~20	15~25	封山育林, 尽量杜绝人为干扰	仙人掌 (<i>Opuntia stricta</i>)、悬钩子 (<i>Rubus corchorifolius</i>)、马桑 (<i>Coriaria nepalensis</i>)、火棘 (<i>Pyracantha fortuneana</i>)、金银花 (<i>Lonicera japonica</i>)、构树 (<i>Broussonetia papyrifera</i>)
中度石漠化 (I4-6)	796	25	20~25	25~50	水保林	香椿 (<i>Toona sinensis</i>)、复羽叶栎树 (<i>Koelreuteria bipinnata</i>)、乌桕 (<i>Sapium sebiferum</i>)、棕榈 (<i>Trachycarpus fortunei</i>)、车桑子 (<i>Dodonaea viscosa</i>) 等
轻度石漠化 (I7-9)	710	30	25~30	50~75	坡改梯+经果林	花椒 (<i>Zanthoxylum bungeanum</i>)、金银花 (<i>Lonicera japonica</i>)、火龙果 (<i>Hylocereus undulatus</i>)、脐橙 (<i>Citrus sinensis</i>)、六月李 (<i>Prunus salicina</i>)、构树、杂草等
潜在石漠化 (I10-12)	745	0	25~35	60~80	经果林+林下种植	花椒、金银花、脐橙、玉米 (<i>Zea mays</i>)、花生 (<i>Arachis hypogaea</i>)、皇竹草 (<i>Pennisetum sinense</i>)、杂草等
无石漠化 (I13-15)	810	25	35~40	>80	无	复羽叶栎树、香椿、油桐、盐肤木、青冈栎、构树等

同一阶段石漠化样地坡度差值 $\leq 5^\circ$, 所有样地坡向均为 SE 或 NW。

然含水量、毛管持水量用环刀法; 总孔隙度用 $p_t = 93.947 - 32.995b$ 计算 b 为容重 p_t 为总孔隙度; 毛管孔隙度采用环刀法; 非毛管孔隙度用 $p_o = p_t - p_c$ 计算, p_o 为非毛管孔隙度 p_c 为毛管孔隙度; 渗透特性测定采用双环渗透法(马雪华, 1994)。

1.2.3 土壤化学性质测定 pH 值用 2.5 : 1 水土比, 用电位计法测定; 有机质测定用硫酸重铬酸钾氧化法; 全氮用硒粉-硫酸铜-硫酸消化法测定; 水解氮用碱解扩散法测定; 全磷用高氯酸-浓硫酸-钼锑抗比色法测定; 全钾用氢氟酸-高氯酸消煮, 火焰光度计法测定; 速效钾用中性乙酸铵提取, 火焰光度计法测定(鲁如坤, 2000)。

1.3 数据处理

采用 Origin 8.0 软件进行绘图, SPSS 19.0 软件进行方差分析、相关分析、回归分析等统计分析。

2 结果与分析

2.1 石漠化治理过程中的土壤物理性质

2.1.1 土壤容重 土壤容重是土壤紧实度的敏感性指标, 表征土壤的疏松程度与通气性, 是土壤质量的一个重要参数, 影响土壤养分的有效性和植物生长(Zhao *et al.*, 2012; 崔宁洁等, 2014)。研究发现(图1、表2、表3): 时间尺度上, 2013年($1.07 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)土壤容重显著小于2010年($1.25 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, $P < 0.05$), 其余年份之间无显著差异。空间尺度上, 无石漠化($0.90 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)土壤容重显著小于强度($1.15 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)及中度石漠化($1.13 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$), 中度石漠

化显著小于轻度($1.22 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)及潜在石漠化($1.26 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$), 强度石漠化显著小于潜在石漠化。

2.1.2 土壤孔隙度 土壤孔隙状况直接影响土壤的通气透水性及根系穿插的难易程度, 对土壤中水、肥、气、热及生物活性等发挥着一定作用(刘鸿雁等, 2005)。研究发现(图1、表2、表3), 时间尺度上, 2013年(38.73%)土壤毛管孔隙度显著大于2009、2010、2011及2012年($P < 0.05$), 毛管孔隙度最小值出现在2010年(32.15%), 显著低于2006、2008和2013年。2006(16.81%)和2013年(17.31%)土壤非毛管孔隙度显著低于其他年份。2011年(57.62%)土壤总孔隙度显著大于2010年(53.01%)。

空间尺度上, 土壤毛管-非毛管孔隙度年际变化不显著($P > 0.05$), 总孔隙度中度石漠化(57.73%)显著高于潜在石漠化(53.22%), 可能与随机取样、潜在石漠化受到一定程度的人为干扰有关。

2.1.3 土壤自然含水量及持水状况 土壤水分是土壤肥力的重要促进因素, 影响土壤溶解矿物元素的能力, 并直接影响植被恢复的进程(康冰等, 2010)。研究表明(图1、表2、表3): 时间尺度上, 土壤自然含水量年际变化无明显规律。空间尺度上, 不同程度石漠化环境土壤自然含水量差异亦不显著($P > 0.05$)。

时间尺度上, 2012和2013年(40.73%和41.97%)土壤田间持水量显著高于2006年(35.75%, $P < 0.05$), 2006年又显著高于2009和

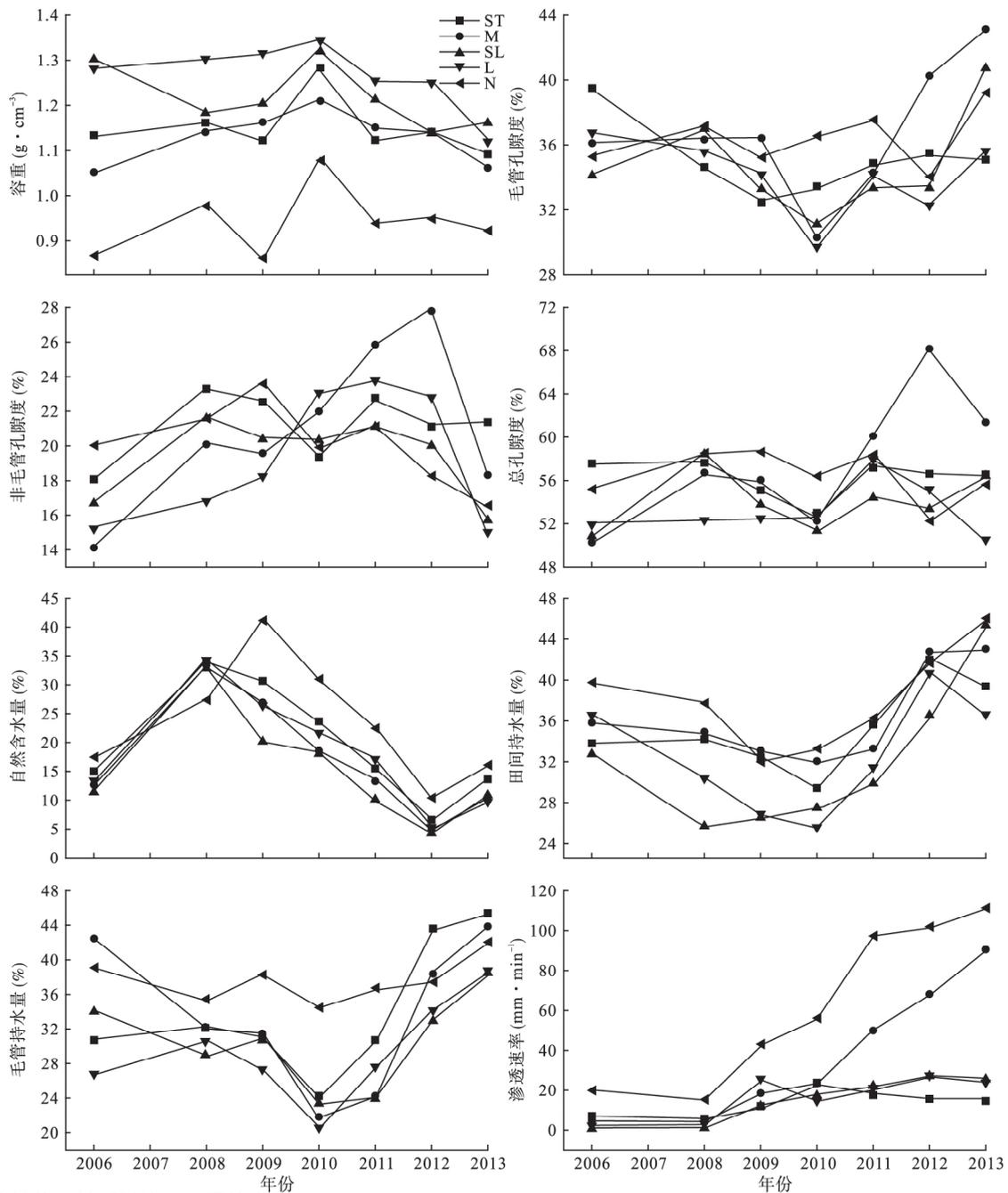


图1 土壤物理性质随治理年限的变化
Fig.1 Changes of soil physical properties with time of treatment

2010年(30.17%和29.46%),随时间增加土壤田间持水量先显著降低(2006—2010年),后显著升高(2010—2013年)。空间尺度上,无石漠化环境(38.07%)土壤田间持水量显著大于轻度石漠化(31.94%)。

土壤毛管持水量随时间增加的变化趋势与土壤田间持水量类似,2013年(41.53%)土壤毛管持水量显著大于2006、2008和2009年(34.59%、31.78%和29.78%),后三者又显著大于2010年(24.79%)。

空间尺度上,无石漠化环境(37.53%)土壤毛管持水量显著大于潜在(29.33%)及轻度石漠化(30.36%)。

2.1.4 土壤渗透速率 土壤渗透性是土壤理水调洪功能极为重要的特征参数之一,是将地表径流转化为壤中流、地下径流的能力,对土壤水土保持和水源涵养发挥着重要作用(吴钦孝等,2004)。研究表明(图1、表2、表3):时间尺度上,2011、2012和2013年(41.28、47.51和53.07 $mm \cdot min^{-1}$)土壤渗

表2 不同治理年限的土壤理化性质

Table 2 Changes of soil physical-chemical properties with time of treatment

因子	2006	2008	2009	2010	2011	2012	2013
X1	1.13±0.18 ab	1.15±0.11 ab	1.13±0.17 ab	1.25±0.11 a	1.13±0.12 ab	1.12±0.11 ab	1.07±0.09 b
X2	36.35±1.97 ad	36.13±1.07 ad	34.35±1.51 bd	32.15±2.77 bc	34.80±1.59 bd	35.07±3.13 bd	38.73±3.36 a
X3	16.81±2.30 a	20.64±2.40 b	20.81±2.17 b	20.86±1.49 b	22.83±1.95 b	21.97±3.62 b	17.31±2.57 a
X4	53.16±3.07 ab	56.77±2.58 ab	55.17±2.37 ab	53.01±1.96 a	57.62±2.03 b	57.04±6.36 ab	56.05±3.83 ab
X5	13.94±2.25 a	32.31±2.83 b	29.11±7.80 b	22.59±5.17 c	15.83±4.70 a	6.26±2.50 d	12.18±2.63 a
X6	35.75±2.71 a	32.54±4.69 ab	30.17±3.24 b	29.46±3.13 b	33.23±2.74 ab	40.73±2.54 c	41.97±4.00 c
X7	34.59±6.24 a	31.78±2.37 ab	29.78±4.00 ab	24.79±5.55 c	28.62±5.14 bc	37.22±4.07 ad	41.53±3.08 d
X8	7.08±7.50 a	5.62±5.32 a	21.85±12.83 ab	26.71±16.50 ab	41.28±33.49 b	47.51±35.79 b	53.07±43.88 b
X9	7.37±0.19 ac	7.61±0.12 ab	7.65±0.03 bd	7.32±0.21 c	7.39±0.29 abc	7.53±0.33 abc	7.92±0.21 d
X10	49.76±22.46 a	47.54±20.40 a	46.19±25.43 a	42.52±25.32 a	49.50±18.11 a	59.35±21.20 a	62.45±14.69 a
X11	1.79±0.30 a	2.31±0.83 ab	2.87±1.19 ab	2.42±1.04 ab	4.16±1.49 b	7.59±2.55 c	7.06±2.30 c
X12	0.99±0.16 a	1.12±0.10 ab	1.42±0.23 c	1.29±0.12 bc	1.34±0.14 bc	1.44±0.34 c	2.24±0.30 d
X13	3.82±2.09 a	3.76±2.00 a	4.24±2.18 a	4.26±1.34 a	3.54±1.78 a	2.74±1.64 a	3.64±1.28 a
X14	0.20±0.13 ab	0.23±0.10 ab	0.31±0.11 a	0.29±0.07 a	0.22±0.10 ab	0.11±0.12 b	0.12±0.10 b
X15	0.11±0.03 a	0.13±0.06 a	0.15±0.06 a	0.17±0.05 a	0.58±0.23 b	0.92±0.36 c	0.77±0.32 bc

X1: 容重; X2: 毛管孔隙度; X3: 非毛管孔隙度; X4: 总孔隙度; X5: 自然含水量; X6: 田间持水量; X7: 毛管持水量; X8: 渗透速率; X9: pH值; X10: 有机质; X11: 全钾; X12: 全磷; X13: 全氮; X14: 水解氮; X15: 速效钾。同一行不同字母表示在 $P<0.05$ 水平下差异显著,下同。

透速率显著大于 2006 ($7.08 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$) 及 2008 年 ($5.62 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, $P<0.05$)。空间尺度上,无石漠化环境 ($62.97 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$) 土壤渗透速率显著大于强度 ($13.08 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$)、轻度 ($15.24 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$) 及潜在石漠化 ($16.54 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$)。

2.2 石漠化治理过程中的土壤化学性质

2.2.1 土壤 pH 值

研究表明(图 2、表 2、表 3):时间尺度上,2013 年(7.92)土壤 pH 值显著高于除 2009 年(7.65)外的其余年份,最小值出现在 2010 年(7.32),显著小于 2008(7.61)、2009(7.65)、2013 年($P<0.05$)。大体上,前期(2006—2010 年)土壤酸碱度表现为波动式变化,后期(2010—2013 年)则显著呈碱性增强趋势。空间尺度上,不同程度石漠化环境间的土壤 pH 值无明显变化。

2.2.2 土壤有机质

土壤有机质是土壤固相部分的重要组分,与土壤矿物质共同作为林木营养的来源,对土壤物理、化学和生物学性质有着深刻的影响(Schmidt *et al.*, 1996)。研究发现(图 2、表 2、表 3):时间尺度上,各年份土壤有机质无显著差异($P>0.05$)。空间尺度上,无石漠化环境 ($62.97 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 土壤有机质含量显著高于其余石漠化环境。

2.2.3 土壤氮素

全 N 是土壤 N 素养分的储备库,在一定程度上说明了 N 的供应能力,水解 N 能反映出短期内土壤 N 的供应状况和释放速率(孙向阳 2005)。研究表明(图 2、表 2、表 3):时间尺度上,不同年份土壤全 N 无显著差异($P>0.05$)。空间尺度上,无石漠化环境 ($6.78 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 土壤全 N 显

著高于其余石漠化环境。

时间尺度上,2012 ($0.11 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 及 2013 年 ($0.12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 土壤水解 N 含量显著低于 2009 ($0.31 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和 2010 年 ($0.29 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。整体上,随时间增加,土壤水解 N 呈现先略微增加,后明显下降的变化趋势。空间尺度上,无石漠化环境 ($0.38 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 土壤水解 N 显著高于其他石漠化环境。

2.2.4 土壤磷素

土壤全 P 是衡量土壤中各种形态磷总和的一个指标,其值大小受到土壤母质、pH 值、有机质等因素的影响(魏强等, 2012)。研究发现(图 2、表 2、表 3):时间尺度上,2013 年 ($2.24 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 土壤全 P 含量显著高于其余各年份 ($P<0.05$)。随着时间增加,土壤全 P 含量大致出现前期平稳,后期显著增加趋势。空间尺度上,不同程度石漠化环境之间土壤全 P 无显著差异。

2.2.5 土壤钾素

土壤 K 素是植物光合作用、淀粉合成和糖类转化所必需的元素,也是土壤肥力的重要体现。土壤全 K 反映了土壤 K 素的潜在供应能力,速效 K 则是土壤 K 素的现实供应指标。研究发现(图 2、表 2、表 3):2012 ($7.59 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 及 2013 年 ($7.06 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 土壤全 K 含量显著高于其余年份 ($P<0.05$)。2011 年 ($4.16 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 土壤全 K 含量显著高于 2006 年 ($1.79 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。随着时间增加,土壤全 K 含量呈现前期小幅增加,后期显著增加的变化趋势,时间节点在 2010 年 ($2.42 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。空间尺度上,无石漠化环境土壤全 K 含量显著低于轻度石漠化。

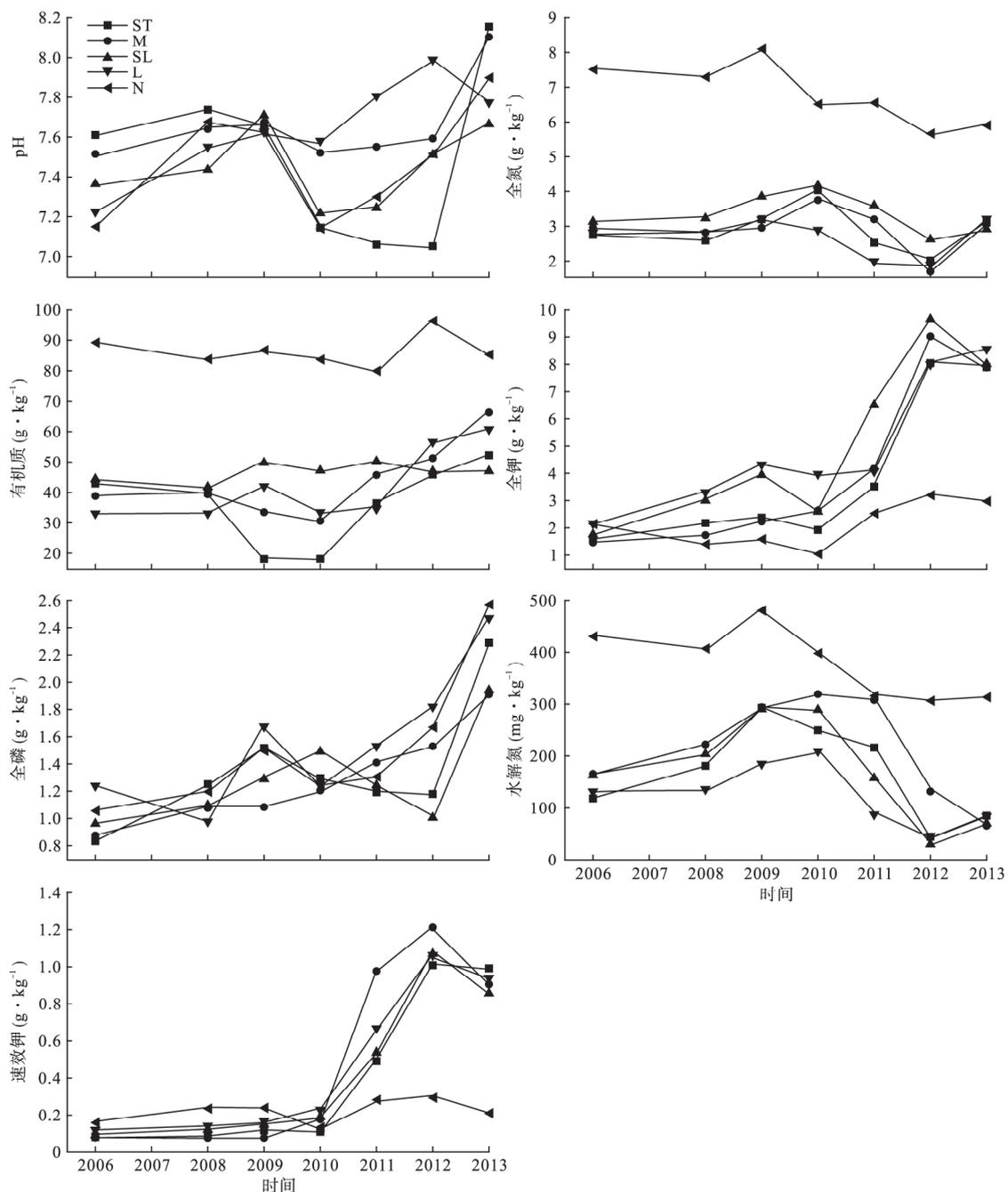


图2 土壤化学性质随治理年限的变化
 Fig.2 Changes of soil chemical properties with time of treatment

土壤速效 K 随时间增加的变化趋势与全 K 类似,前期变化不大(2006—2010年),后期增加迅速,2011(0.58 g·kg⁻¹)、2012(0.92 g·kg⁻¹)和2013年(0.77 g·kg⁻¹)土壤速效 K 含量显著高于其余年份。空间尺度上,不同程度石漠化环境之间土壤速效 K 无显著差异。

2.3 土壤理化性质相关性分析

如表 4 所示,土壤物理性质的容重、田间持水

量、毛管持水量、渗透速率与其他多数理化因子相关性明显,土壤化学性质的有机质、氮素、全磷、钾素与其他绝大多数理化因子相关性明显,说明文中选取的多数指标之间具有良好的相关性,这些因子在改善土壤物理结构和促进养分循环方面均具有比较重要的作用,且彼此间互相影响、关系密切。

2.4 石漠化治理过程中土壤理化性质-时间回归分析

将土壤理化性质的各个因子与治理时间(*t*)建

表3 不同程度石漠化环境的土壤理化性质

Table 3 Soil physical-chemical properties of different degrees of rocky desertification environment

因子	ST	M	SL	L	N
X1	1.15±0.06 ab	1.13±0.06 a	1.22±0.07 bc	1.26±0.07 cd	0.90±0.07 e
X2	35.02±2.20 a	36.70±4.08 a	34.73±3.15 a	34.01±2.40 a	36.39±1.74 a
X3	21.17±1.88 a	21.04±4.60 a	19.39±2.27 a	19.20±3.82 a	20.09±2.27 a
X4	56.18±1.82 ab	57.73±5.98 a	54.12±2.74 ab	53.22±2.37 b	56.48±2.36 ab
X5	19.82±9.77 a	17.18±9.83 a	15.47±9.47 a	18.26±10.07 a	23.71±10.45 a
X6	35.24±4.26 ab	36.53±4.59 ab	31.94±7.00 a	32.57±5.57 ab	38.07±4.85 b
X7	33.86±7.61 ab	33.42±8.54 ab	30.36±5.38 a	29.33±5.78 a	37.53±2.49 b
X8	13.68±6.09 a	36.66±33.10 ab	15.24±10.74 a	16.54±10.32 a	62.97±39.81 b
X9	7.48±0.42 a	7.65±0.21 a	7.45±0.19 a	7.64±0.24 a	7.47±0.28 a
X10	36.32±13.29 a	43.73±12.18 a	46.83±3.25 a	41.94±11.81 a	86.40±5.31 b
X11	3.93±2.84 ab	4.14±3.07 ab	5.05±3.01 a	4.90±2.44 ab	2.11±0.82 b
X12	1.36±0.46 a	1.30±0.35 a	1.29±0.34 a	1.56±0.49 a	1.51±0.51 a
X13	2.88±0.65 a	2.91±0.63 a	3.35±0.54 a	2.66±0.56 a	6.78±0.90 b
X14	0.17±0.09 a	0.22±0.10 a	0.17±0.10 a	0.13±0.06 a	0.38±0.07 b
X15	0.41±0.42 a	0.49±0.50 a	0.43±0.40 a	0.47±0.40 a	0.22±0.06 a

表4 石漠化环境土壤理化性质相关性

Table 4 Correlation of soil physical-chemical properties in rocky desertification environment

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13	X14	X15
X1	1.000														
X2	-0.421*	1.000													
X3	-0.010	-0.263	1.000												
X4	-0.342*	0.570**	0.643**	1.000											
X5	-0.081	-0.097	0.128	0.032	1.000										
X6	-0.541**	0.590**	-0.155	0.336*	-0.519**	1.000									
X7	-0.666**	0.609**	-0.248	0.272	-0.237	0.759**	1.000								
X8	-0.544**	0.382*	-0.064	0.358*	-0.209	0.505**	0.368*	1.000							
X9	-0.091	0.237	0.023	0.207	-0.029	0.255	0.321	0.173	1.000						
X10	-0.777**	0.320	-0.051	0.210	-0.040	0.463**	0.549**	0.651**	0.078	1.000					
X11	0.124	0.155	0.114	0.220	-0.666**	0.418*	0.316	0.154	0.329	-0.014	1.000				
X12	-0.197	0.203	-0.101	0.075	-0.249	0.447**	0.386*	0.491**	0.580**	0.317	0.473**	1.000			
X13	-0.704**	0.057	-0.048	0.004	0.388*	0.061	0.201	0.399*	-0.181	0.769**	-0.470**	0.054	1.000		
X14	-0.493**	-0.166	0.200	0.039	0.576**	-0.219	-0.133	0.227	-0.265	0.448**	-0.699**	-0.149	0.832**	1.000	
X15	-0.011	0.186	0.295	0.399	-0.676**	0.511**	0.347*	0.238	0.296	0.078	0.913**	0.451**	-0.382*	-0.572**	1.000

*、**、*** 分别表示在 $\alpha=0.05$ 、 0.01 水平上的显著性。

表5 土壤理化因子-时间回归方程

Table 5 Regression equation of soil physical-chemical properties and time

因子	曲线方程	R^2	P
X2	$X_2 = 40.215 - 3.556t + 0.469t^2$	0.792	0.043
X3	$X_3 = 13.045 + 4.385t - 0.52t^2$	0.783	0.047
X5	$X_5 = 49.282t - 13.652t^2 + 1.044t^3 - 22.103$	0.969	0.009
X6	$X_6 = 45.916 - 12.026t + 2.632t^2 - 0.139t^3$	0.919	0.038
X7	$X_7 = 43.148 - 8.53t + 1.194t^2$	0.814	0.034
X8	$X_8 = 10.538 - 9.274t + 5.163t^2 - 0.426t^3$	0.982	0.004
X9	$X_9 = 6.761 + 0.865t - 0.273t^2 + 0.025t^3$	0.902	0.041
X10	$X_{10} = 56.595 - 7.571t + 1.236t^2$	0.897	0.011
X11	$\ln(X_{11}) = \ln 1.311 + \ln 1.278t$	0.877	0.002
X12	$X_{12} = 0.173 + 1.04t - 0.303t^2 + 0.028t^3$	0.949	0.019
X15	$X_{15} = 0.612 - 0.642t + 0.205t^2 - 0.016t^3$	0.908	0.046

立回归方程 结果显示 除土壤容重、总孔隙度、全 N 及水解 N 与治理时间关系不显著外,其余各因子 (X_n) 均与时间 (t) 建立了良好的拟合曲线 ($R^2 \geq 0.8$),且达到显著水平,说明随着治理时间增加,土壤理化性质整体上得到改善(表5)。

3 讨论

土壤是在气候、植被、地形、母质等因子综合作用下形成的,为植物生长提供必需的矿质营养和水分,并随着植被演替的进行不断地发生变化(Lugo, 1997; 李阳兵等,2004; 盛茂银等,2013)。植物的生长发育以及群落的进展演替也是土壤养分不断积累、物理性能不断改善的过程(Mishra *et al.*, 2003;

康冰等 2010; 王宏星等 2012; 欧芷阳等 2015)。一般认为, 随着治理时间增加和石漠化程度下降, 植物群落结构逐渐改善, 树冠对降水的截流作用显著, 地表径流减少, 加之树冠对太阳辐射的遮蔽作用, 使地表温度降低, 地表水蒸发缓慢, 土壤水分增加, 增强渗透性并改善持水状况; 同时凋落物增加和植物根系生长发育会增加有机质积累, 增强有机质赋存 N、P、K 等营养元素的能力, 土壤理化性质得到改善(刘方等 2005; 容丽等 2006)。研究区由于治理时间较长, 加上喀斯特高原峡谷独特的自然环境和一定程度的人为干扰, 表现出了土壤理化性质随时空演变的独特性。

3.1 喀斯特高原峡谷石漠化治理过程中的土壤理化性质时间变化

石漠化地区土壤理化性质受到喀斯特环境独特的二元结构、地貌特征及人为土地利用等多重因素的影响, 时空演变机制非常复杂(曹建华等 2003; 丁绍兰等 2010)。时间尺度上, 经过长期的石漠化治理和环境恢复, 土壤水分状况、质地、结构和孔性得到优化, 营养元素如全 K、速效 K 及全 P 含量增加, 土壤质量整体上得到改善。

土壤 pH 值随着治理时间增加大体表现出碱性增强趋势, 原因与植物根系对土壤中氮素的吸收有关, NO_3^- -N 是植物速效养分和土壤溶液的主要成分, 植物对 NO_3^- -N 的吸收需要根系分泌 OH^- 来维持细胞膜外的电荷平衡, 根系增加导致土壤溶液的 pH 值上升(吴钦孝等 2004)。随着治理时间增加, 土壤全 N 含量无明显变化、水解 N 含量下降, 可能与本地固氮植物较少、其他植物对水解 N 的吸收较多有关; 也可能与氮肥施用频率、强度有关。另外, 土壤内源 N 素供应水平主要受有机质含量制约, 而随着治理时间增加土壤有机质并无显著变化 ($P>0.05$)。土壤自然含水量随时间增加的演变趋势不明显, 因为制约表层土壤水分来源和消耗的因素较多, 如降水、凝结、地下水、蒸发、渗漏和植物蒸腾等, 表层土壤自然含水量非常容易发生波动。

多数土壤理化因子在治理前期出现平稳、波动甚至退化趋势(2006—2009 或 2010 年), 后期逐渐得到改善(2010—2013 年)。原因包括: ①土壤理化性质的改善是一个长期、缓慢的过程, 对植物群落结构的优化和小环境改善的响应存在“滞后效应”。再者, 治理初期林分郁闭度不够、凋落物输入较少、林下草本和灌木数量不足、植物群落结构不够优化,

导致土壤物理结构没有根本性变化, 养分积累量也较少。②2009 年 7 月—2010 年 5 月, 贵州省发生自有气象观测记录以来最严重的夏秋连旱叠加冬春大旱, 干旱范围和强度均突破气象记录历史极值(王仙攀等 2011; 熊红福等 2011; 俞筱押等 2011), 这应该是 2009—2010 年土壤质量退化的主要原因。

3.2 喀斯特高原峡谷石漠化治理过程中的土壤理化性质空间变化

从强度石漠化到潜在石漠化环境, 大多数土壤理化因子的多年均值差异不显著 ($P>0.05$)。原因包括: ①随着石漠化治理时间增加, 土壤理化性质整体上得到改善, 特别是强-中度石漠化环境经过封禁处理和水保林建设, 植物群落正向演替, 群落结构得到优化, 地下-地上生物量增加, 根系对土壤的改造作用增强, 加上人为干扰极少, 土壤质量得到改善, 与其他石漠化阶段之间的土壤质量差距缩小, 在多年算术平均值上则表现为无显著差异。②强-中度石漠化土壤的养分集聚效应(王德炉等 2003; 盛茂银等 2013), 改善了强-中度石漠化环境的土壤质量, 这也进一步解释了为何经过长期演替, 喀斯特裸岩石山会出现顶极地带性群落。

另外, 轻度-潜在石漠化环境部分土壤理化指标表现不佳(如: 土壤总孔隙度较小, 容重较大, 全 N 含量较低), 原因是潜在-轻度石漠化样地的植被配置主要以花椒林+金银花、花椒+玉米(花生)等经济林和农作物为主, 存在难以避免的人为干扰, 如农作物种植、翻耕、除草及施肥等。尽管很多研究已经证实, 花椒林对土壤理化性质的改善、土壤肥力的增加、养分的积累以及土壤微生物活性的增强都有促进作用(何腾兵等 2000; 龙健等 2006; 彭熙等 2007; 周玮等 2008), 但研究区花椒林老龄化趋势明显, 随着林龄的增加, 花椒林对土壤质量的改造程度也会大大减弱(廖洪凯等 2015), 加上一定程度的人为干扰, 造成潜在-轻度石漠化环境土壤容易恶化。人为干扰活动对土壤性质有着深远影响(Grieve 2001), 因此, 今后石漠化的防治重心应更多的向轻度-潜在石漠化环境转移; 同时也要注意环境-经济-社会的协调发展, 将生态意识、生态工程和生态经济三者协调起来(Sabine *et al.* 2001)。

3.3 研究局限性

随着治理时间增加, 研究区土壤理化性质整体上得到改善。但在空间尺度上这种变化却不明显, 从强度到潜在石漠化环境, 大多数土壤理化因子的

多年均值无显著差异 ($P>0.05$)。可见,“空间指示时间”方法在此并不完全适用,这也证明了经过多年的石漠化治理,不同程度石漠化环境之间的土壤质量差异缩小,石漠化治理是有成效的。

土壤理化性质的演变是一个长期过程,短期内的研究结果往往是片面的,今后一方面需要将石漠化防治重心向轻度-潜在石漠化环境转移;另一方面,还需要通过更长时间的连续监测来深入研究石漠化治理过程中土壤理化性质动态演变的科学规律。

4 结 论

随着治理时间增加,研究区的土壤理化性质整体上得到改善,尤其是治理后期改善明显。在较长时间尺度上,土壤理化性质的改善是缓慢和非线性的,前期(2006—2009或2010年)平稳、波动甚至出现短期退化,后期(2010—2013年)得到持续改善,时间节点在2009—2010年。空间尺度上,土壤理化性质最好的是无石漠化环境,其余4种石漠化环境之间土壤理化性质的多年均值差异不显著。

参考文献

- 崔宁洁,张丹桔,刘洋,等. 2014. 不同林龄马尾松人工松林林下植物多样性与土壤理化性质. 生态学杂志, 33(10): 2610-2617.
- 曹建华,袁道先,潘根兴. 2003. 岩溶生态系统中的土壤. 地球科学进展, 18(1): 37-44.
- 丁绍兰,杨宁贵,赵串串,等. 2010. 青海省东部黄土丘陵区主要林型土壤理化性质. 水土保持通报, 30(6): 1-6.
- 何腾兵,刘元生,李天智,等. 2000. 贵州喀斯特峡谷水保经济植物花椒土壤特性研究. 水土保持学报, 14(2): 56-59.
- 康冰,刘世荣,蔡道雄,等. 2010. 南亚热带不同植被恢复模式下土壤理化性质. 应用生态学报, 21(10): 2479-2486.
- 龙健,江新荣,邓启琼,等. 2005. 贵州喀斯特地区土壤石漠化的本质特征研究. 土壤学报, 42(3): 419-427.
- 龙健,李娟,江新荣,等. 2006. 喀斯特石漠化地区不同恢复和重建措施对土壤质量的影响. 应用生态学报, 17(4): 615-619.
- 廖洪凯,龙健,李娟,等. 2015. 花椒 (*Zanthoxylum bungeanum*) 种植对喀斯特山区土壤水稳性团聚体分布及有机碳周转的影响. 生态学杂志, 34(1): 106-113.
- 刘方,王世杰,刘元生,等. 2005. 喀斯特石漠化过程土壤质量变化及生态环境影响评价. 生态学报, 25(3): 640-644.
- 刘鸿雁,黄建国. 2005. 缙云山森林群落次生演替中土壤理化性质的动态变化. 应用生态学报, 16(11): 2041-2046.
- 李生,任华东,姚小华. 2012. 西南喀斯特石漠化地区旱季土壤水分对裸岩的响应. 生态学杂志, 31(12): 3174-3178.
- 李阳兵,王世杰,容丽. 2004. 西南岩溶山地石漠化及生态恢复研究展望. 生态学杂志, 23(6): 84-88.
- 鲁如坤. 2000. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社
- 马雪华. 1994. 森林生态系统定位研究方法. 北京: 中国科学技术出版社
- 欧芷阳,申文辉,庞世龙,等. 2015. 平果喀斯特山地不同植物群落的土壤质量评价. 生态学杂志, 34(10): 2771-2777.
- 彭熙,钱晓刚,杨滨. 2007. 贵州省喀斯特峡谷花椒林地土壤水分特征研究. 水土保持通报, 27(6): 170-173.
- 容丽,王世杰,杜雪莲. 2006. 喀斯特低热河谷石漠化区环境梯度的小气候效应. 生态学杂志, 25(9): 1038-1043.
- 孙向阳. 2005. 土壤学. 北京: 中国林业出版社
- 苏维词. 2002. 中国西南岩溶山区石漠化的现状成因及治理的优化模式. 水土保持学报, 16(2): 29-32.
- 盛茂银,刘洋,熊康宁. 2013. 中国南方喀斯特石漠化演替过程中土壤理化性质响应. 生态学报, 33(19): 6303-6313.
- 盛茂银,熊康宁,崔高仰,等. 2015. 贵州喀斯特石漠化地区植物多样性与土壤理化性质研究. 生态学报, 35(2): 1-23.
- 王世杰,李阳兵. 2007. 喀斯特石漠化研究存在的问题与发展趋势. 地球科学进展, 22(6): 573-582.
- 王德炉,朱守谦,黄宝龙. 2003. 石漠化过程中土壤理化性质变化的初步研究. 山地农业生物学报, 22(3): 204-207.
- 王宏星,孙晓梅,陈东升,等. 2012. 甘肃小陇山日本落叶松人工林不同发育阶段土壤理化性质的变化. 林业科学研究, 25(3): 294-301.
- 王仙攀,陈许,熊康宁. 2011. 气候干旱对贵州喀斯特高原山区土壤动物群落的影响——以毕节石桥小流域为例. 热带地理, 31(4): 357-361.
- 魏强,凌雷,柴春山,等. 2012. 甘肃兴隆山森林演替过程中的土壤理化性质. 生态学报, 32(15): 4701-4713.
- 吴钦孝,韩冰,李秧秧. 2004. 黄土丘陵区小流域土壤水分入渗特征研究. 中国水土保持科学, 2(2): 1-5.
- 熊康宁,李晋,龙明忠. 2012. 典型喀斯特石漠化治理区水土流失特征与关键问题. 地理学报, 67(7): 878-888.
- 熊康宁,黎平,周忠发. 2002. 喀斯特石漠化的遥感-GIS典型研究——以贵州省为例. 北京: 地质出版社.
- 熊红福,王世杰,容丽,等. 2011. 极端干旱对贵州省喀斯特地区植物的影响. 应用生态学报, 22(5): 1127-1134.
- 俞筱押,李玉辉,黄金,等. 2011. 2010年春季干旱对石林喀斯特植物群落的影响. 生态学杂志, 30(7): 1441-1448.

- 周 玮, 周运超, 田 春. 2008. 花江喀斯特地区花椒人工林的土壤酶转变. *中国岩溶*, **27**(3): 240-245.
- Bai XY, Wang SJ, Xiong KN. 2013. Assessing spatial-temporal evolution processes of karst rocky desertification Land: Indications for restoration strategies. *Land Degradation & Development*, **24**: 47-56.
- Grieve IC. 2001. Human impacts on soil properties and their implications for the sensitivity of soil systems in Scotland. *Catena*, **42**: 361-374.
- Jiang ZC, Lian YQ, Qin XQ. 2014. Rocky desertification in Southwest China: Impacts, causes, and restoration. *Earth Science Reviews*, **132**: 1-12.
- Li YB, Shao JG, Bai XY. 2009. The relations between land use and karst rocky desertification in a typical karst area, China. *Environmental Geology*, **57**: 621-627.
- Li S, Ren HD, Xue L, et al. 2014. Influence of bare rocks on surrounding soil moisture in the karst rocky desertification regions under drought conditions. *Catena*, **116**: 157-162.
- Lugo AE. 1997. The apparent paradox of reestablishing species richness on degraded lands with tree monocultures. *Forest Ecology and Management*, **99**: 9-19.
- Mishra A, Sharma SD, Khan GH. 2003. Improvement in physical and chemical properties of sodic soil by 3, 6 and 9 years old plantation of *Eucalyptus tereticomis*: Biorejuvenation of sodic soil. *Forest Ecology and Management*, **184**: 115-124.
- Sabine M, Samuel W. 2001. Endogenous development in Swiss mountain communities: Local initiatives in Umaseh and Schamserberg. *Mountain Research & Development*, **21**: 236-242.
- Schmidt MG, Macdonald SE, Rothwell RL. 1996. Impacts of harvesting and mechanical site preparation on soil chemical properties of mixed-wood boreal forest sites in Alberta. *Canadian Journal of Soil Science*, **76**: 531-540.
- Wang SJ, Liu QM, Zhang DF. 2004a. Karst rocky desertification in southwest China: Geomorphology, land-use, impact and rehabilitation. *Land Degradation & Development*, **15**: 115-121.
- Wang SJ, Li RL, Sun CX, et al. 2004b. How types of carbonate assemblages constrain the distribution of karst rocky desertification in Guizhou Province, P. R. China: Phenomena and mechanisms. *Land Degradation & Development*, **15**: 123-131.
- Wang F, Pan XB, Wang DF, et al. 2013. Combating desertification in China: Past, present and future. *Land Use Policy*, **31**: 311-313.
- Zhao XQ, Ding N, Yan P. 2012. Changing rules of physical and chemical properties of *Eucalyptus uraphylla* spp. forest at different ages in Southwest of Yunnan Province. *Agricultural Science and Technology*, **13**: 1298-1302.
- Zhang X, Shang K, Cen Y, et al. 2014. Estimating ecological indicators of karst rocky desertification by linear spectral unmixing method. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **31**: 86-94.
- Zhang XB, Bai XY, He XB. 2011. Soil creeping in the weathering crust of carbonate rocks and underground soil losses in the karst mountain areas of Southwest China. *Carbonate Evaporites*, **26**: 149-153.
-
- 作者简介 崔高仰,男,1990年生,博士研究生,研究方向为土壤-水环境化学与同位素地球化学。E-mail: cuigaoyang@mail.gyig.ac.cn
责任编辑 魏中青
-