

岩溶区不同植被演替过程中土壤元素及其有效态

周晓东, 邓艳

(中国地质科学院 岩溶地质研究所, 国土资源部 岩溶生态系统与石漠化治理重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘要: [目的] 探讨岩溶区不同植被演替过程中土壤元素及其有效态变化规律, 为岩溶区石漠化治理提供依据。[方法] 采用空间代替时间序列的方法, 选取立地条件相似的草地、灌草丛、灌丛、乔幼林和顶级乔林 5 个植被恢复阶段进行分析。[结果] 同一植被类型条件下有机质的含量浅层大于深层; 元素的迁移能力在垂向上: 在植被演替的早期阶段浅层大于深层, 后期深层土大于浅层; 在横向上: 乔幼林 > 顶级乔林 > 灌草丛 > 草地 > 灌丛; 随着植被的演替土壤中有机质呈波浪式的增加, 并在顶级乔林阶段达到最大值; 土壤有机质含量与 Mn, Zn, Cu 元素有效态含量呈明显的正相关。受此影响, 浅层土壤元素有效率明显高于深层土壤。[结论] 石漠化治理过程中应针对石漠化地区土层厚度、地形、土壤元素分布特征, 选择合理的植被进行恢复。

关键词: 植被类型; 植被演替; 元素迁移; 土壤有机质; 分布特征

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2017)05-0040-06

中图分类号: Q948.113

文献参数: 周晓东, 邓艳. 岩溶区不同植被演替过程中土壤元素及其有效态[J]. 水土保持通报, 2017, 37(5): 40-45. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20170519.001; Zhou Xiaodong, Deng Yan. Soil elements level and availability in different vegetation succession stages in karst area[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(5): 40-45. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20170519.001

Soil Elements Level and Availability in Different Vegetation Succession Stages in Karst Area

ZHOU Xiaodong, DENG Yan

(Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Key Laboratory of Karst Ecosystem and Rocky Desertification Treatment, Ministry of Land and Resources, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract: [Objective] To explore the variations of soil elements and their availabilities in different vegetation successional stages in karst region in order to provide a certain basis for the treatment of rocky desertification. [Methods] Method of investigation in different spatial sites instead of time-series sampling was used. Sites at five different vegetation stages as grass, grass-shrub, shrub, earlier arbor, arbor climax with the same geological backgrounds were investigated and sampled. [Results] The organic matter contents of five vegetation types in shallow soil are all higher than that in deep soil. The elements migration in the vertical direction showed that in shallow soil horizons are all higher than that in deep soil horizons at the early vegetation successional stage and indicate the opposite trend at the late stage. Meanwhile, the elements migration in the horizontal direction indicate the order of earlier arbor stage, climax arbor stage, grass-shrub stage, grass stage, and shrub stage. The soil organic matter showed wavy increase with the vegetation succession and reached the maximum value at climax arbor stage. The availabilities of Mn, Zn, Cu had positive correlations with soil organic matter. Therefore, the soil elements availabilities in shallow soil were higher than that in deep soil. [Conclusion] To deal with the rocky desertification, items of soil thickness, topography and soil element distribution characteristics should be concerned to select reasonable revegetation measures.

Keywords: vegetation types; vegetation succession; element migration; soil organic matter; distribution

收稿日期: 2017-02-17

修回日期: 2017-03-04

资助项目: 国家重点研发计划课题“断陷盆地石漠化综合治理模式与技术集成”(2016YFC0502506); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金“西南典型岩溶关键带生态格局/过程对表层岩溶水的响应”(YWF201401)

第一作者: 周晓东(1991—)男(汉族), 河南省郑州市人, 硕士研究生, 主要研究方向为岩溶水环境以及岩溶地球化学。E-mail: 641268414@qq.com。

通讯作者: 邓艳(1978—)女(汉族), 广西省贵港市人, 硕士, 副研究员, 主要从事岩溶生态与石漠化研究。E-mail: dydesk@karst.ac.cn。

西南岩溶地区是世界上连片分布面积最大的岩溶区,西南 8 省(市、区)土地面积 $1.05 \times 10^6 \text{ km}^2$,岩溶面积 $5.197 \times 10^5 \text{ km}^2$,石漠化面积 $1.296 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。区内碳酸盐岩是岩溶发育的物质基础。碳酸盐岩风化形成石灰土,其理化性质有别于地带性土壤,表现为富钙、偏碱性,有效元素供给不足且不平衡。碳酸盐岩成土速率缓慢、土层薄、造成土壤极易侵蚀流失,加之近年来经济和社会的发展中,一些人为不合理的开发岩溶区因素,造成该区石漠化问题日趋严重,一经破坏很难恢复,治理形势更加严峻。因此,探索碳—水—钙循环对岩溶环境元素迁移的驱动机制和特征^[1],岩溶环境元素有效态富集亏损特征,对促进当地农业持续发展和维持生态平衡有着十分重要的理论和现实意义。

在岩溶区以植被的演替为基础,前人研究了峰丛洼地不同土地利用条件下的土壤的肥力特征^[1];土壤水分的时空变化^[2];土壤微生物群落、有机碳以及养分特征^[2-5];土壤元素变异特征^[6]。在岩石溶蚀方面,探讨了峰丛洼地地区不同土地利用方式下岩溶溶蚀速率^[7];亚高山区不同土地利用方式下土壤各因素对岩溶溶蚀速率的影响^[8-9];气候因素对不同土地利用方式对岩溶作用的影响;不同植被演替阶段土壤因子和溶蚀率对比研究^[10]。但是在植被演替过程中,土壤元素及有效态的变化相对较少。本文拟采用空间代替时间系列的方法,以位于广西壮族自治区马山县弄拉屯典型岩溶区不同植被恢复阶段为研究对象,选取立地条件相似的草地、灌草丛、灌丛、乔幼林和顶级乔林 5 个植被恢复阶段,对其土壤状况进行分析,初步总结不同植被演替阶段土壤元素特征、有机质、土壤全氮含量以及各种元素的有效态的差异,掌握西南岩溶区自然演替中土壤有效态微量元素的演变趋势,以期对岩溶区石漠化治理提供依据。

1 研究区概况和方法

1.1 研究区概况

弄拉位于广西壮族自治区马山县古零镇,地理坐标为东经 $108^\circ 19'$,北纬 $23^\circ 39'$,属亚热带季风气候,多年平均气温 $19.84 \text{ }^\circ\text{C}$,多年平均降雨量为 1700 mm ,4—12 月份降雨量占年降雨量的 82%,年平均相对湿度 85%。为典型的峰丛洼地地貌,弄拉屯的地质背景位泥盆系东岗岭组中段(D_2d^2),岩性以含硅质的白云岩为主^[11]。其植被为人为破坏后多年封山育林形成的次生林,到 20 世纪 80 年代重新形成了以常绿阔叶林为主的茂密乔木次生林。主要组成中既有次生树种如黄荆(*Vitex negundo*)、老虎刺(*Pterolobium punctatum*)等,又存在大量的原始植被建群

种及优势种,如青冈(*Cyclobalanopsis glauca*)、圆果化香(*Platycarya longipes*)、石山樟(*Cinnamomum saxatile*)等^[1]。弄拉植被为人为破坏后的次生植被,有封山 10,20,40 a 的和仍受严重会干扰的植物群落,这样在小范围内形成了演替的系列群落。本文选取了立地条件相似的草地、灌草丛、灌丛、乔幼林、顶级乔林 5 种植被类型作为研究对象,样地基本情况见表 1。

表 1 研究区各样地地理状况

植被类型	东经	北纬	海拔/ m	坡向	坡度	土厚/ cm
草地	$108^\circ 19' 03.02''$	$23^\circ 38' 39.00''$	448	南	35°	65
草灌丛	$108^\circ 18' 58.09''$	$23^\circ 38' 52.08''$	440	南	33°	62
灌丛	$108^\circ 19' 000.3''$	$23^\circ 38' 41.03''$	445	南	34°	65
乔幼林	$108^\circ 19' 56.05''$	$23^\circ 39' 26.03''$	451	南	35°	64
顶级乔林	$108^\circ 19' 25.08''$	$23^\circ 29' 24.01''$	444	南	36°	66

1.2 样品采集及测定

土壤样品的主要采集方法:选取立地条件相似的 5 种植被类型的土壤,去掉表层土即 0—20,20—40,40—60 cm 取土装入事先称好重量的铝土盒中,土壤有机质、有效氮、有效磷和有效钾等在中国地质科学院岩溶地质研究所测定;有机质采用重铬酸钾—硫酸消化法测定;有效氮采用锌—硫酸亚铁还原—蒸馏法测定;有效磷采用碳酸氢钠浸提—磷钼蓝分光光度法测定;有效钾采用醋酸铵浸提—火焰光度法测定。分析土壤中不同深度有机质以及不同取样地土壤中各元素及其有效态的含量(表 2)。

2 结果与分析

2.1 土壤元素迁移与富集特点

土壤是一开放系统,具有输入输出 C,N 以及其他矿质元素的功能,成土过程的实质是后生地球化学过程中元素的离析、迁移和富集的过程。因此不同生态条件下发育的土壤必然会导致土壤元素迁移行为的差异^[12]。仅比较同一元素在岩石、母岩层或土壤内部含量的变化,不能反映元素在土壤发生和发育过程中的迁移和变化量。质量平衡法(mass-balance)是目前研究元素迁移的最有效和最常用的方法^[13-14]。研究元素在风化和成土过程中移动和在分布以非移动元素作为计算基础,由于铝在元素迁移中具有惰性,常假定为不移动元素,并以此来进一步分析土壤元素的风化淋溶度。

$$\Delta T = \left(\frac{x_s \times I_r}{I_s \times x_r} - 1 \right) \times 100\%$$

式中: x_s , x_r —— x 元素在土壤和岩石中的含量

($\mu\text{g/g}$); I_s ——铝元素在土壤中的含量 ($\mu\text{g/g}$); 该元素在成土过程中发生富集, $\Delta T < 0$ 则为亏损或
 I_r ——铝元素在岩石中的含量 ($\mu\text{g/g}$); $\Delta T > 0$ 表示 迁移。根据表 2, 带入淋溶公式, 得出结果(表 3)。

表 2 弄拉基岩及不同植被土壤化学性质

样地	深度/ cm	元素含量												
		Si/%	Al/%	Fe/%	Ca/%	Mg/%	K/%	Na/%	P/%	Mn/%	Zn/ ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	Cu/ ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	Co/ ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)	Pb/ ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)
硅质白云岩	—	0.091	0.088	0.033	16.572	7.200	0.090	0.022	0.003	0.019	22.00	72.00	1.00	—
	0—20	18.203	14.215	8.610	0.596	2.346	1.668	0.047	0.070	0.092	151.90	11.55	19.44	40.27
草地	20—40	18.250	14.469	8.596	0.604	2.406	1.702	0.041	0.062	0.092	157.00	10.23	19.47	37.64
	40—60	18.631	14.835	8.617	0.398	2.364	1.710	0.043	0.057	0.077	156.60	9.10	19.90	40.45
灌草丛	0—20	18.828	13.626	7.917	1.484	2.352	1.868	0.036	0.048	0.146	318.80	24.12	18.48	35.30
	20—40	19.204	14.448	8.211	0.398	2.424	1.926	0.035	0.035	0.123	173.70	15.32	19.02	51.05
灌丛	40—60	18.880	14.363	8.190	0.675	2.562	1.942	0.033	0.037	0.116	157.70	15.06	17.36	29.44
	0—20	18.499	14.405	8.750	0.412	2.064	1.851	0.045	0.070	0.131	158.00	24.93	19.01	38.07
灌丛	20—40	18.480	14.501	8.757	0.291	2.016	1.892	0.041	0.053	0.116	157.70	16.34	19.89	37.85
	40—60	18.697	14.888	8.729	0.249	2.052	1.892	0.035	0.048	0.116	158.20	15.03	18.28	33.03
乔幼林	0—20	19.345	13.197	7.749	0.959	2.586	0.158	0.021	0.044	0.085	96.30	0.05	14.76	33.22
	20—40	20.060	13.854	7.854	0.845	2.808	0.116	0.022	0.025	0.085	102.20	0.44	15.70	26.17
顶级乔林	40—60	19.999	13.854	7.903	0.916	2.820	0.141	0.024	0.024	0.092	104.40	1.16	16.51	26.94
	0—20	18.137	14.755	9.072	0.490	1.950	0.623	0.041	0.036	0.092	123.00	3.05	15.62	30.27
顶级乔林	20—40	18.485	14.951	8.918	0.518	1.974	0.631	0.044	0.036	0.092	128.80	1.90	16.15	30.88
	40—60	18.607	15.110	8.862	0.405	1.956	0.672	0.047	0.030	0.100	137.10	2.09	16.86	30.63

表 3 弄拉土壤元素富集与迁移特征

样地	深度/ cm	元素含量										
		Si/ %	Fe/ %	Ca/ %	Mg/ %	K/ %	Na/ %	P/ %	Mn/ %	Zn/ %	Cu/ %	Co/ %
草地	0—20	23.84	61.52	-99.98	-99.80	-88.52	-98.69	-85.47	204.27	327.45	-90.07	1 103.49
	20—40	21.97	58.43	-99.98	-99.80	-88.50	-98.85	-87.51	198.92	334.03	-91.36	1 084.16
	40—60	21.45	54.90	-99.99	-99.81	-88.73	-98.84	-88.69	142.96	322.25	-92.50	1 080.48
灌草丛	0—20	33.62	54.94	-99.94	-99.79	-86.60	-98.96	-89.58	402.56	835.84	-78.37	1 093.46
	20—40	28.54	51.55	-99.99	-99.79	-86.97	-99.04	-92.94	299.15	380.90	-87.04	1 058.49
	40—60	27.11	52.06	-99.98	-99.78	-86.78	-99.07	-92.45	276.41	339.18	-87.18	963.62
灌丛	0—20	24.18	61.98	-99.98	-99.82	-87.44	-98.75	-85.66	325.34	338.72	-78.85	1 061.29
	20—40	23.24	61.04	-99.99	-99.83	-87.24	-98.86	-89.32	272.83	335.01	-86.23	1 107.05
	40—60	21.44	56.35	-99.99	-99.83	-87.57	-99.07	-90.46	263.14	325.05	-87.66	980.52
乔幼林	0—20	41.76	56.58	-99.96	-99.76	-98.83	-99.37	-90.32	200.42	191.88	-99.95	884.22
	20—40	40.02	51.17	-99.97	-99.75	-99.18	-99.36	-94.69	186.17	195.07	-99.61	897.24
	40—60	39.59	52.12	-99.96	-99.75	-99.00	-99.29	-94.88	212.19	201.42	-98.98	948.69
顶级乔林	0—20	17.31	61.81	-99.98	-99.84	-95.93	-98.89	-92.92	189.28	229.07	-97.51	819.36
	20—40	19.56	59.06	-99.98	-99.84	-95.87	-98.83	-93.01	189.28	244.59	-98.45	850.55
	40—60	19.08	56.40	-99.99	-99.84	-95.65	-98.77	-94.11	210.09	262.93	-98.31	881.90

2.2 不同植被类型条件下植被对土壤元素迁移规律

从表 2 可以看出, 弄拉白云岩元素的分布是: 弄拉白云岩中元素的分布是 $\text{Ca} > \text{Mg} > \text{Si} > \text{K} > \text{Al} > \text{Fe} > \text{Na} > \text{P} > \text{Mn} > \text{Cu} > \text{Zn}$ 。为了便于进行分析, 将这 5 种植被类型中土壤元素不同深度富集亏损值平均后做出雷达图(图 1), 从图 1 可以看出同一元素在不同的植被演替过程中富集亏损程度不同。此次所测得的元素总体上富积亏损序列为: $\text{Co} > \text{Zn} > \text{Mn} > \text{Fe} > \text{Si} > \text{P} > \text{K} > \text{Cu} > \text{Na} > \text{Mg} > \text{Ca}$, 说明同一植被类型对

不同的元素的迁移影响能力不同。同一种元素在不同的植被类型土壤含量不同, 说明不同的植被演替阶段植被对土壤的同一元素的迁移能力影响不同。从表 3 可以看出在成土过程中草地、灌草丛、灌丛、乔幼林、顶级乔林都表现出 Co, Zn, Mn 强富集, Fe, Si 的相对富集, P, K, Cu, Na, Mg, Ca 表现出不同程度的亏损。为了进一步的研究元素在不同植被类型条件下的迁移特征, 将所测得的元素分为 4 类: ①强富集元素: Co, Zn, Mn; ②相对富集元素: Fe, Si; ③相对

亏损,但是各种植被类型条件下差异几乎为零的元素:P, K, Cu, Na; ④相对亏损,但是各种植被类型条件下差异相对较大的元素 Mg, Ca。

弄拉是典型的岩溶峰丛山区,岩石为泥硅质白云岩,不但富含 Ca, Mg, 而且 Al, Fe, Si, P, K 等常量元素 Mn, Zn, Cu, Co 等微量元素背景值也比较高^[7,15-16]。土壤中 Ca, Mg 元素含量与岩溶动力条件正相关, Ca 表现出强富积,这是因为 Ca, Mg 的大量迁移使土壤偏碱性,由此制约着很多元素,尤其 Mn, Zn 等微量元素的存在状态^[14],致使其大量富积。而 Cu 表现出亏损,且亏损强度仅次于 Ca, Mg, Na, 这与蒋忠诚^[11]在弄拉测得元素亏损序列较为相似,说明碱性环境促使 Cu 的迁移。

为了进一步研究不同植被演替条件下元素的迁移能力,将不同植被类型条件下各元素迁移能力对比排序。图 1 中 1—5 从内到外表示其元素由富集到亏损的序列,可以看出所测得的土壤元素迁移能力由强到弱的顺序为:乔幼林>顶级乔林>灌草丛>草地>灌丛。这表明不同植被演替阶段元素的迁移能力不同,灌丛能力最强,灌丛草地次之,乔幼林的最差。

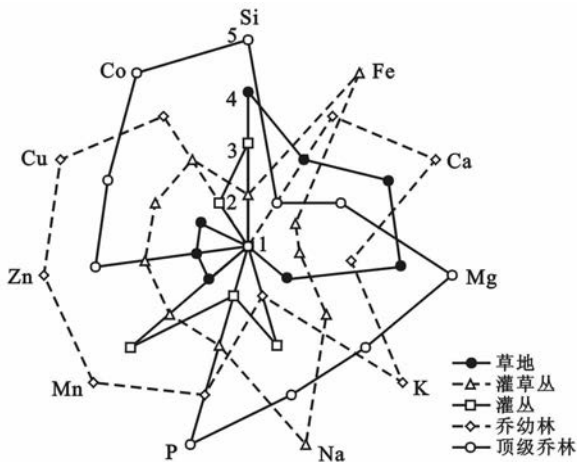


图 1 不同元素在不同植被类型土壤中的分布特征

另外,同一植被类型不同深度层元素富集对比表明:草地、灌草丛、灌丛阶段从浅层到深层元素的富集能力逐渐减弱;而乔幼林和顶级乔林阶段的富集能力却逐渐增强,这说明植被的演替可以影响元素在土壤不同深度富集状态。草地、灌草丛、灌丛的影响主要是集中在土壤表层,乔幼林、顶级乔林的影响主要集中在土壤的深层。在岩溶区不同的地区、不同的地形,表层土壤的厚度不同,因此在保持土壤水土方面应根据各地区不同的条件选择合适的植被类型进行石漠化治理。

2.3 不同植被恢复阶段土壤有机质含量变化

有机质含量对比表明(图 2),各植被类型条件下

土壤有机质的含量依次为:顶级乔林>乔幼林>草地>灌草丛>灌丛。顶级乔林和乔幼林阶段植被能产生大量的枯枝落叶,故其土壤中的有机质含量较高。兰雪指出土壤结构破坏率是用来衡量土壤抗蚀性质的一个重要值标^[17],土壤结构破坏率为大小依次为:灌草>灌木>乔木>坡草>乔灌;王韵等^[18]谈到植被演替对土壤表层物理性质影响,不同各样地土壤黏粒含量:灌丛>灌草地>草地>乔木。解释为随着植被演替,植被种类和覆盖度一方面影响了土壤的结构破坏率;另一方面影响了土壤颗粒的组成。土壤中有有机质主要来源于枯枝落叶,土壤中的有机质有助于形成土壤团粒结构,增加土壤通气性、疏松性和透水性,改善土壤物理性质。随着土壤有机质含量的不断丰富,土壤结构也得到了不断的改善,从而增强了土壤的抗蚀抗冲性。顶级乔林和乔幼林阶段土壤有机质含量较高,植被在此演替阶段对保持水土具有较好的效果。但是土壤有机质的变化并不是随之植被演替逐渐增加,说明土壤中有有机质还受其他因素的影响。

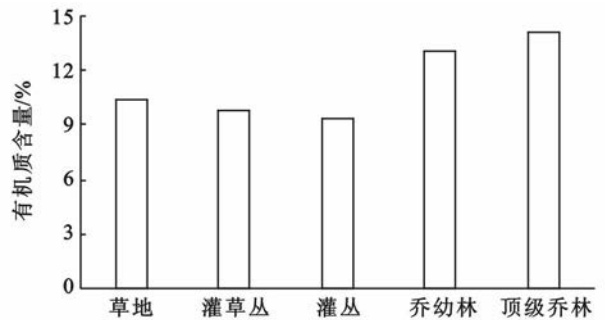


图 2 研究区不同植被演替阶段土壤有机质的含量

2.4 不同植被类型条件下各元素的有效态

植被演替阶段土壤 9 种元素的有效态分析结果(表 4)表明:土壤元素有效量与全量总体排序十分相似,说明土壤元素有效量总体上受元素丰度所控制。土壤有效态含量普遍低于全量,除了 P, K, Fe 元素有效率较低,其他各元素的有效率相对都较大。Cu 元素的有效率最大,在乔幼林阶段,0—20 cm 深度最大值达 46%。且在乔幼林和顶级乔林阶段 Cu 元素的有效率是其他植被类型条件下 Cu 元素有效率的 6~10 倍。表明在乔幼林和顶级乔林阶段植被对土壤中 Cu 元素的利用效率较高。有效态 Mn, Zn, Cu 与土壤的有机质含量关系密切,对比土壤中 Mn, Zn, Cu 有效率和其对应的植被演替条件有机质的含量可以知道二者呈明显的正相关关系。在不同的植被类型条件下土壤元素有效态呈波动变化,这表明植被类型的演替可以对土壤各元素有效态的有效率造成影响,且不同的演替阶段土壤元素有效态变化不同。Fe 元素在

所有的元素中有效率最低,最大值还未达到 0.02%。一方面是因为 Fe 元素是本身就属于比较难溶的元素,其元素在土壤中的含量较低;另一方面岩溶区富钙形成的碱性环境降低了元素的有效性。

表 4 研究区土壤有效态

样地	深度/cm	元素状态	N	P	K	Fe	Mn	Zn	Cu	Co	Pb
草地	0—20	全量/ $(\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$	3 190	704	16 683	86 100	924	151.9	11.55	19.44	40.27
		有效态/ $(\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$	257	1.31	34.38	2.42	122.3	3.37	0.54	0.56	1.75
		有效率/%	8.06	0.19	0.21	0.00	13.24	2.22	4.68	2.88	4.35
	20—40	全量/ $(\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$	2 580	616	17 015	85 960	924	157	10.23	19.47	37.64
		有效态/ $(\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$	231	0.65	25.98	2.1	104.3	2.37	0.54	0.45	1.41
		有效率/%	8.95	0.11	0.15	0.00	11.29	1.51	5.28	2.31	3.75
	40—60	全量/ $(\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$	2 030	572	17 098	86 170	770	156.6	9.1	19.9	40.45
		有效态/ $(\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$	179	0.22	24.26	4.55	71.88	2.24	0.99	0.48	3.15
		有效率/%	8.82	0.04	0.14	0.01	9.34	1.43	10.88	2.41	7.79
灌草丛	0—20	全量/ $(\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$	2 840	484	18 675	79 170	1 463	318.8	24.12	18.48	35.3
		有效态/ $(\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$	309	0.65	53.75	5.51	141.3	3.14	1.52	0.56	2.06
		有效率/%	10.88	0.13	0.29	0.01	9.66	0.98	6.30	3.03	5.84
	20—40	全量/ $(\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$	2 150	347.6	19 256	82 110	1 232	173.7	15.32	19.02	51.05
		有效态/ $(\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$	196	0.22	32.18	13.41	62.08	2.05	1.21	0.4	5.87
		有效率/%	9.12	0.06	0.17	0.02	5.04	1.18	7.90	2.10	11.50
	40—60	全量/ $(\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$	2 010	369.6	19 422	81 900	1 155	157.7	15.06	17.36	29.44
		有效态/ $(\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$	193	0.65	37.59	3.3	56.58	1.14	0.84	0.25	1.02
		有效率/%	9.60	0.18	0.19	0.00	4.90	0.72	5.58	1.44	3.46
灌丛	0—20	全量/ $(\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$	2 890	704	18 509	87 500	1 309	158	24.93	19.01	38.07
		有效态/ $(\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$	228	1.53	38.47	3.91	155.1	3.36	1.11	0.59	1.57
		有效率/%	7.89	0.22	0.21	0.00	11.85	2.13	4.45	3.10	4.12
	20—40	全量/ $(\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$	2 140	528	18 924	87 570	1 155	157.7	16.34	19.89	37.85
		有效态/ $(\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$	193	1.09	27.93	5.92	68.98	1.3	1.47	0.43	2.49
		有效率/%	9.02	0.21	0.15	0.01	5.97	0.82	9.00	2.16	6.58
	40—60	全量/ $(\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$	1 720	484	18 924	87 290	1 155	158.2	15.03	18.28	33.03
		有效态/ $(\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$	150	0.87	25.66	7.97	65.38	1.18	1.4	0.49	3.19
		有效率/%	8.72	0.18	0.14	0.01	5.66	0.75	9.31	2.68	9.66
乔幼林	0—20	全量/ $(\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$	4 780	435.6	1 577	77 490	847	96.3	0.05	14.76	33.22
		有效态/ $(\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$	430	4.36	29.56	1.63	170.5	5.84	0.23	0.82	1.06
		有效率/%	9.00	1.00	1.87	0.00	20.13	6.06	460.00	5.56	3.19
	20—40	全量/ $(\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$	1 820	250.8	1 162	78 540	847	102.2	0.44	15.7	26.17
		有效态/ $(\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$	185	1.53	13.49	1.78	84.38	1.22	0.2	0.27	1.25
		有效率/%	10.16	0.61	1.16	0.00	9.96	1.19	45.45	1.72	4.78
	40—60	全量/ $(\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$	1 600	242	1 411	79 030	924	104.4	1.16	16.51	26.94
		有效态/ $(\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$	159	0.22	16.2	0.9	80.93	1.44	0.22	0.19	0.87
		有效率/%	9.94	0.09	1.15	0.00	8.76	1.38	18.97	1.15	3.23
顶级乔林	0—20	全量/ $(\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$	2 870	360.8	6 225	90 720	924	123	3.05	15.62	30.27
		有效态/ $(\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$	289	2.84	56.75	6.61	145.7	3.84	0.38	0.84	2.81
		有效率/%	10.07	0.79	0.91	0.01	15.77	3.12	12.46	5.38	9.28
	20—40	全量/ $(\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$	2 670	356.4	6 308	89 180	924	128.8	1.9	16.15	30.88
		有效态/ $(\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$	257	1.53	34.98	5.52	104.1	2.41	0.4	0.51	2.18
		有效率/%	9.63	0.43	0.55	0.01	11.27	1.87	21.05	3.16	7.06
	40—60	全量/ $(\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$	2 150	303.6	6 723	88 620	1 001	137.1	2.09	16.86	30.63
		有效态/ $(\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$	228	1.09	31.1	10.97	86.43	1.95	0.63	0.44	2.87
		有效率/%	10.60	0.36	0.46	0.01	8.63	1.42	30.14	2.61	9.37

另外,同一植被类型条件下不同深度土壤有效态统计对比表明:各元素的有效态在不同深度上总体上表现出从浅层0—20 cm到深层40—60 cm,各元素有效率总体上表现出深层元素低于浅层。一方面土壤中的无效态元素可以通过化学风化作用或有机质的矿化作用转化为有效态元素,表层土壤风化作用比较强烈,致使其元素有效率大于深层;另一方面植被的枯落物直接覆盖在表层土壤,致使表层土壤有机质含量比较高,有机质与元素有效态正相关性,使得表层土壤元素有效率比较高。

3 结论与讨论

(1) 土壤分析表明:环境中元素迁移是一个复杂的过程,其迁移特性不仅受自身性质的影响,同时还受植被演替过程中环境因素的影响。同一植被对不同的元素的吸收能力不同,不同的植被类型条件对土壤中同一元素的迁移能力影响不同。

(2) 植被的演替可以影响元素在土壤不同深度富集亏损状态。草地、灌草丛、灌丛的影响主要是在土壤表层,乔幼林、顶级乔林阶段的影响主要集中在土壤的深层。

(3) 枯枝落叶是土壤有机质的主要来源,土壤中的有机质受植被演替的影响逐渐增加,有机质在顶级乔林阶段达到最大值。

(4) Mn, Zn, Cu 元素有效态与土壤的有机质含量关系密切,土壤的有效态普遍低于土壤全态含量,有机质的影响致使浅层土壤的元素有效率明显大于深层土壤的。富钙的岩溶环境导致土壤中碱性元素的有效率降低。但是在南方岩溶区强烈的岩溶作用弥补了土壤元素有效态的含量。因此,在石漠化治理过程中要综合考虑多方面的因素,针对不同的石漠化地区土层厚度、地形、土壤元素分布特征,选择合理的植被进行恢复。

[参 考 文 献]

[1] 蒋忠诚. 岩溶动力系统中的元素迁移[J]. 地理学报, 1999, (5): 438-444.
 [2] 宋希娟, 王克林, 刘淑娟, 等. 桂西北喀斯特地区不同土地利用方式土壤的有机碳含量及养分特征[J]. 湖南农

业大学学报:自然科学版, 2013, 39(6): 655-659.

- [3] 陈高起, 傅瓦利, 沈艳, 等. 岩溶区不同土地利用方式对土壤有机碳及其组分的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(3): 123-129.
 [4] 沈艳, 傅瓦利, 蓝家程, 等. 岩溶山地不同土地利用方式土壤颗粒有机碳和矿物结合态有机碳的分布特征[J]. 水土保持研究, 2012, 19(6): 1-6.
 [5] 沈艳. 岩溶区不同土地利用方式土壤碳形态特征的研究[D]. 重庆: 西南大学, 2013.
 [6] 唐成, 杜虎, 宋同清, 等. 喀斯特峰丛坡地不同土地利用方式下土壤 N、P 空间变异特征[J]. 生态学杂志, 2013, 32(7): 1683-1689.
 [7] 蓝家程, 傅瓦利, 彭景涛, 等. 不同土地利用方式下岩溶溶蚀速率及影响因素[J]. 生态学报, 2013, 33(10): 3205-3212.
 [8] 王冬银, 章程, 谢世友, 等. 亚高山不同植被类型区的雨季岩溶溶蚀速率研究[J]. 地球学报, 2007, 28(5): 488-495.
 [9] 刘文, 张强, 贾亚男. 气象要素及土壤理化性质对不同土地利用方式下冬夏岩溶作用的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(6): 1418-1428.
 [10] 李恩香, 蒋忠诚, 曹建华, 等. 广西弄拉岩溶植被不同演替阶段的主要土壤因子及溶蚀率对比研究[J]. 生态学报, 2004, 24(6): 1131-1139.
 [11] 蒋忠诚. 广西弄拉白云岩环境元素的岩溶地球化学迁移[J]. 中国岩溶, 1997, 16(4): 24-32.
 [12] 仇荣亮, 李贞. 小流域森林生态系统土壤发生与元素地球化学特性[J]. 热带亚热带土壤科学, 1995, 4(3): 134-140.
 [13] 王景华, 饶莉丽. 华北平原化学元素的表生迁移[M]. 北京: 科学出版社, 1990.
 [14] Marschner H. 高等植物矿质营养[M]. 曹一平等, 译. 北京: 北京大学出版社, 1985.
 [15] 邓艳, 蒋忠诚, 罗为群, 等. 不同岩溶生态系统中元素的地球化学迁移特征比较: 以广西弄拉和弄岗自然保护区为例[J]. 中国岩溶, 2006, 25(2): 168-171.
 [16] 蒋忠诚. 论南方岩溶山区生态环境的元素有效态[J]. 中国岩溶, 2000, 19(2): 22-27.
 [17] 兰雪. 黔中地区不同植被恢复阶段土壤质量分析[J]. 吉林农业, 2016(9): 87.
 [18] 王韵, 王克林, 邹冬生, 等. 广西喀斯特地区植被演替对土壤质量的影响[J]. 水土保持学报, 2007, 21(6): 130-134.