

岩溶山区岩石—土壤—牧草系统中矿质元素的分布、迁移和富集特征

蓝芙宁^{1,2}, 蒋忠诚¹, 谢运球¹, 张 敏³, 宁良丹^{1,4}

(1. 中国地质科学院 岩溶地质研究所, 广西 桂林 541004; 2. 南京大学 生命科学学院, 江苏 南京 210093;
3. 中国地质调查局 水文地质环境地质调查中心, 河北 保定 071051; 4. 广西师范大学 生命科学学院, 广西 桂林 541004)

摘要: 对我国南方 3 个典型岩溶石山区岩石、土壤和牧草中 14 种矿质元素的分布、迁移和富集特征进行了研究。结果表明, 岩溶山区土壤与成土母岩矿质元素含量的多少顺序具有相似性, Al、Fe、Ca、Mg、K 含量普遍较高, 而 Pb、Cu、Mo、Cd 含量较低。岩溶山区在成土过程中, Fe、Al、Mn、K 元素富集而其他元素相对淋失, 矿质元素在土壤各层位的富集表现为 A> B> C。Ca、Mg、K 等元素主要富集在牧草的叶片中, 而 Fe、Al、Mn 元素主要富集在牧草的根部。牧草根部分与土壤之间相同元素的相关性最大, 其次是茎部, 叶片部分与土壤各层位矿质元素的相关性最差, 岩石、土壤、牧草之间矿质元素相关性具有非共轭关系, 在土壤中含有量较高的元素, 其与牧草体内矿质元素的相关性不一定高, 而牧草体内相对富集的矿质元素, 如 Ca、Mg、K 元素与土壤中的矿质元素也未表现出显著的相关性。

关键词: 岩溶山区; 岩石; 土壤; 牧草; 分布; 迁移; 富集; 矿质元素

中图分类号: P595 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-3268(2011)07-0067-06

Distribution, Migration and Accumulation of Mineral Elements in the Rock-Soil-Forage Grass System in Karst Mountainous Area

LAN Fu-ning^{1,2}, JIANG Zhong-cheng¹, XIE Yun-qiu¹, ZHANG Min³, NING Liang-dan^{1,4}

(1. Institute of Karst Geology, CAGS, Guilin 541004, China;

2. School of Life Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China;

3. Centre for Hydrogeology and Environmental Geology, CGS, Baoding 071051, China;

4. School of Life Science, Guangxi Normal University, Guilin 541004, China)

Abstract: The contents of 14 mineral elements in samples taken from the rock-soil-forage grass system (R-S-F) in karst mountainous area in south China were tested for analysis of their distribution, migration and accumulation. Results showed that the gradation of element contents in the rock was parallel to that in the soil, which presented high content of Al, Fe, Ca, Mg, K and low content of Pb, Cu, Mo, Cd. In the process of forming soil, Fe, Al, Mn and K were accumulated, while the other elements were eluviated and lost. The enrich order of all tested elements in the soil layers were A> B> C. Ca, Mg and K were mainly accumulated in the leaves, while Fe, Al and Mn were mainly accumulated in the roots. The correlation of element contents between the roots of grasses and every layer in the soil was biggest, followed by stems and leaves. The correlation of element contents among rock, soil and forage grasses showed unconjugated. Mineral elements that had higher contents in the soil did not always show higher correlation with those in the

收稿日期: 2010-12-08

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划项目(2006BAC01A10); 中国地质调查局地质调查项目(水[2010]矿评03-07-03); 中国地质科学院岩溶地质研究所基本科研业务费项目(2010003, 200709, 2008008)

作者简介: 蓝芙宁(1977-), 男, 广西河池人, 助理研究员, 在读博士研究生, 主要从事岩溶区牧草生态学研究。

E-mail: lanfuning@karst.ac.cn

grasses. The elements accumulated in the grasses such as Ca, Mg and K did not present significant correlation with those in the soil.

Key words: Karst mountainous areas; Rock; Soil; Forage grass; Distribution; Migration; Accumulation; Mineral element

我国岩溶面积 344 万 km², 占全国国土面积的 1/3 以上, 其中岩溶山区面积约 54 万 km², 主要集中在我国西南地区的云南、贵州、四川、广西以及广东省西北部和湖南省西部地区^[1]。岩溶山区岩石裸露、缺土缺水、生存条件恶劣、生态环境十分脆弱。由于长期以来产业结构落后、草地利用不合理、过渡放牧、毁草开荒等原因, 岩溶山区草地退化严重, 牧草资源迅速减少, 单位草地载畜能力日益低下, 严重阻碍了岩溶山区草地畜牧业的发展^[2-3]。随着近年来生态环境建设政策的实施, 水热条件丰富的南方岩溶山区实施种草恢复生态和发展草地畜牧业已经成为产业结构调整的重要方向之一^[4-6]。而岩溶山区由于生态地质条件的区域差异具有显著性, 不同地层岩性背景所发育的土壤, 其理化性状和水肥条件等会有所区别^[7-8]。受生态地质环境的影响, 生长在不同岩性背景区的牧草, 其生长发育及营养品质也存在显著的差别^[9-10], 同时, 牧草体内的矿质营养元素对地球环境也具有一定的表征作用。因此, 选择广西典型的岩溶山区, 深入分析具有不同碳酸盐岩背景区的矿质营养元素在岩石-土壤-牧草之间的分布、迁移及富集特征, 探索牧草与地球环境之间的物质交换过程及其相互关系, 为岩溶区草地畜牧业的生产、开发和管理提供科学指导, 同时为岩溶山区的生态恢复、社会经济发展提供理论依据。

1 研究区概况

选择具有不同地层岩性背景的广西桂林会仙岩溶生态示范基地、广西马山县古零镇弄拉屯和广西平果县果化镇龙何-布五屯 3 个岩溶石山区为研究区。

会仙研究区位于广西桂林临桂县的会仙镇, 地理坐标为东经 110°13′40″, 北纬 25°06′15″, 平均海拔 210 m, 属于亚热带季风气候区, 多年平均气温 18℃, 多年平均降雨量为 1915.2 mm, 降雨多集中于 3-8 月, 占全年总降雨量的 70% 以上, 多年平均蒸发量 1378.3 mm^[10]。岛状峰丛与孤峰平原地貌相结合。地层比较复杂, 西南端为石炭系下统岩关组(YC)二至四段, 东边为泥盆系上统东村组(DD₃)。岩性有纯白云岩、深灰-灰黑色灰岩、白云质灰岩等。土壤为黄色石灰土, 局部为红色石灰土, pH 值 6.6~7.1, 表层土有机质含量较低^[11]。植被以灌林地、刺灌丛、草坡为主, 遭人类破坏严重。常见的天然牧草品种有红背山麻杆(*Alchomea trewioides*)、画眉草(*Eragrostis*

pilosa)、雀稗(*Paspalum thunbergii*)、莠竹(*Microstegium vimineum*)等。

弄拉研究区位于广西南宁地区马山县的东南部, 地理坐标为东经 108°19′, 北纬 23°29′。海拔 600~750 m, 属于亚热带季风气候区, 气候特点是高温多雨、降雨集中、湿度大。据气象观测资料, 多年平均气温 19.84℃, 多年平均降雨量为 1700 mm, 4-10 月雨量占年降雨量的 82%, 年均相对湿度 85%。地层为泥盆系东岗岭组中段(D₂d²), 岩性比较复杂, 以含泥硅质的白云岩为主, 局部有纯的灰岩或纯白云岩出露, 西北部山坡白云岩夹钙质页岩, 区内很多地点的裂隙中充填有红色角砾^[12]。土壤以黄色石灰土为主, pH 值 6.8~7.2, 具黏性, 耕作层土壤肥力较高, 有机质含量大于 100 g/kg。常见的天然牧草有五节芒(*Miscanthus floridulus*)、画眉草、莠竹等。

龙何-布五屯研究区位于广西平果县果化镇, 地理坐标为东经 107°23′16″, 北纬 23°23′05″。海拔 300~500 m, 属中亚热带季风气候区, 年均气温 20℃, 全年降水集中在 6-9 月, 约为 1500 mm, 丰水期降雨占全年降雨量的 65% 以上, 日最大降雨量达 112 mm, 日平均湿度 72.06%。地层主要为二叠系下统西霞组(P_{1q})、二叠系上统(P₂)和石炭系上统(C₃), 岩性以质纯的碳酸盐岩为主。土壤为棕色石灰土、黄色石灰土, 中性偏碱性, 土层浅薄^[10]。常见的天然牧草有红背山麻杆、千里光(*Senecio scandens*)、画眉草、荩草(*Arthraxon hispidus*)等。

2 材料和方法

于 2003-2008 年分期分批在 3 个研究区分别选择具代表性地层岩性分布地段, 会仙研究区设 H1、H2、H3、H4 4 个取样点, 分别处在泥盆系上统东村组(DD₃)、石炭系下统岩关组第二段(YC1²)、石炭系下统岩关组第三段(YC1³)、泥盆系上统第一段(YD3¹) 4 种不同地层岩性的分布地段。弄拉研究区设 N1、N2 两个取样点, 分别为泥盆系东岗岭组中段(D₂d²)地层的白云岩和灰岩分布地段。龙何-布五屯研究区设 L1、L2、L3 三个取样点, 分别为二叠系下统栖霞组(P_{1q})、二叠系上统(P₂)、石炭系上统(C₃) 3 种不同地层岩性的分布地段。在每个取样点分别采集岩石、土壤和牧草根、茎、叶样品。其中, 岩石样品的采集方法是在每个采样点选择基岩裸露地段, 敲开岩面, 取基岩内部未风化的新鲜岩石样品, 每个取样点采集 5 块

岩样, 带回室内, 分别测定其中的元素含量。土壤样品的采集方法是在每个取样点选择具代表性的草地土层, 按 A、B、C 层分别挖取土壤样品, A 层取 5~30cm 深处土样, B 层取 30~50cm 深处土样, C 层取 50cm 深处以下的土样, 1a 分 4 次取样, 每季度 1 次, 最后将全年所采集的每个取样点 A、B、C 层土壤样品分别混匀, 测试其中的元素含量。牧草样品的采集方法是 1a 分 4 次, 每季度采样 1 次, 采样时按根、茎、叶分装, 取完样及时带回室内清理杂质, 自然风干, 最后将全年所采集的每个取样点牧草按根、茎、叶分别混匀, 测定其中的矿质元素含量。

以上所采集的岩石、土壤和牧草样品分别送交中国地质科学院岩溶地质研究所测试中心和广西农科院土壤肥力研究所进行矿质元素全量分析, 所测矿质元素为 Ca、Mg、K、Na、Fe、Al、P、Mn、Zn、Cu、Mo、B、Cd、Pb。测定方法严格按照各样品的相关分析技术规范进行, 测试数据取平均数+SD(标准差)。

用 SPSS 软件对各取样点岩石矿质元素含量进行平均数差异的显著性检验, 显著性水平取 0.05、0.001。为了说明牧草体内各矿质元素与土壤环境中矿质元素的关系, 对 3 个研究区牧草体内矿质元素与土壤环境中不同层位矿质元素含量进行了相关分析, 相关系数绝对值取 $|r| > 0.3$, $0.3 < |r| < 0.4$ 为低度相关, $0.4 \leq |r| < 0.7$ 为显著性相关, $0.7 \leq |r| < 1$ 为极显著相关。

为了解岩溶山区各种元素在土壤中的迁移和富集特征, 本研究采用质量平衡法(mass balance)计算 3 个研究区各土层元素的风化淋溶程度, 该方法研究元素在风化和成土过程中的移动和分布时以非移动元

素作为计算依据, 由于 Al 元素在元素迁移中具有惰性, 常假定为不移动元素, 并据此来计算进一步分析土壤元素的风化淋溶程度^[13-15]:

$$\Delta T = \left(\frac{X_s \times I_r}{I_s \times X_r} - 1 \right) \times 100\%,$$

其中 ΔT 为淋溶系数, X_s 、 X_r 分别为 X 元素在土壤和岩石中的含量, I_s 、 I_r 分别是 Al 在土壤和岩石中的含量。 $\Delta T > 0$ 表示该元素在成土过程中发生富集, $\Delta T < 0$ 则为亏损或迁移。

3 结果与分析

3.1 岩石中矿质元素的分布特征

由表 1 可以看出, 岩溶山区成土母岩中富含 Ca、Mg 元素, Ca 元素的含量除了 H3 采样点较低之外(23.910%), 其他 8 个点 Ca 元素的含量均超过了 30%, 极显著地大于其他元素的含量。白云岩或白云质灰岩分布的采样点(H3、N1), 其岩石中 Mg 元素的含量显著高于其他采样点的含量。总体上看, 3 个研究区岩石中元素含量从多到少依次为: 大量元素 $Ca > Mg > Al > Fe > K > Na > P > Mn$, 微量元素 $Cu > Zn > B > Pb > Cd > Mo$ 。表 1 的数据还显示, 各种元素在不同采样点之间的含量具有明显的差异性, 而利用 SPSS 软件对各种元素在不同采样点之间的差异性进行 One Way ANOVA 检验发现, Cd、Zn 元素在不同研究区之间含量的差异达极显著水平, Fe 元素在不同研究区之间含量的差异达显著水平。以上分析和表 1 数据显示出岩溶山区各种矿质元素在不同地质背景中的差异性和复杂性。

表 1 3 个研究区 9 个取样点岩石中矿质元素的含量

研究区	采样点	Ca	Mg	K	Na	Fe	Al	P	Mn	Zn	Cu	Mo	B	Cd	Pb
会仙	H1	38.640*	0.800	0.029	0.018	0.030	0.090	0.001	0.002	7.000	17.430	0.940	12.000	2.290*	6.650
	H2	38.790*	0.860	0.017	0.023	0.020	0.050	0.002	0.001	4.820	11.110	0.100	8.000	0.100	0.660
	H3	23.910*	11.650*	0.010	0.018	0.010	0.050	0.004	0.004	7.170	8.730	0.100	10.000	0.190	1.490
	H4	38.740*	1.100	0.025	0.018	0.020	0.050	0.003	0.001	4.190	12.780	0.100	14.000	0.100	2.380
弄拉	N1	30.060*	12.620*	0.013	0.018	0.080	0.160	0.001	0.001	90.090*	8.840	0.650	9.000	1.760*	2.150
	N2	33.710*	9.240	0.016	0.017	0.220*	0.330	0.002	0.003	45.710*	17.590	0.880	40.000*	0.090	2.340
龙何-布五	L1	36.540*	0.430	0.022	0.019	0.110*	0.260	0.004	0.002	19.880	11.410	0.100	6.000	1.140*	1.650
	L2	31.000*	0.310	0.024	0.013	0.080	0.140	0.004	0.002	14.520	14.410	0.100	10.000	1.340*	5.080
	L3	31.040*	0.570	0.014	0.017	0.100	0.180	0.001	0.004	26.730	10.670	0.100	8.000	1.240*	0.820

注: Ca、Mg、K、Na、Fe、Al 的单位为%, 其他元素的单位为 $\mu\text{g/g}$ 。下同

3.2 土壤中矿质元素的分布、迁移及富集特征

岩溶山区的土壤是碳酸盐岩长期岩溶地球化学过程中风化残积和淋溶、淀积形成的, 土壤中的元素与成土母岩密切相关, 对岩溶山区的岩溶地球化学过程具有一定的表征作用^[16-17]。从表 2 可以看出, 3 个研究区土壤剖面 A、B、C 各层位中的元素除了 Ca 和 Mg 元素含量小于成土母岩中的含量, 其他 12 种矿质

元素的含量均大于其在成土母岩中的含量。会仙和弄拉的 A、B、C 土层比较, 大部分元素在 C 层含量高于其在 A 层和 B 层中的含量, 而龙何-布五却是 Ca、P、Mn 等 7 种元素在 A 层中的含量高于其在 B 层和 C 层中的含量, 表明元素在不同研究区各土层当中的富集具有一定程度的差异性。通过对 3 个研究区土壤中不同元素的含量进行比较发现, 会仙土壤中不同

元素含量大小顺序为: 大量元素 Al> Fe> K> Mg> Ca> Mn> Na> P, 微量元素 Zn> Pb> B> Cu> Mo> Cd; 弄拉土壤中不同元素含量大小顺序为: 大量元素 Al> Fe> Ca> Mg> K> Mn> P> Na, 微量元素 Zn> Pb> B> Cu> Cd> Mo; 龙何- 布土壤中不同元素含量大小顺序为: 大量元素 Al> Fe> K> Mg> Ca> Mn> P> Na, 微量元素 Zn> Pb> B> Cu> Cd> Mo。3 个研究区的土壤中不同元素之间的含量大小顺序基本相似, 与成土母岩中一样, Al、Fe、Ca、Mg、K 含量普遍较高, 而 Pb、Cu、Mo、Cd 含量较低。

表 2 不同研究区自然土层矿质元素的含量

矿质元素	会仙			弄拉			龙何- 布五		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Ca	0.450	0.410	0.500	2.360	0.940	21.780	0.610	0.480	0.060
Mg	0.730	0.690	0.750	2.450	1.210	11.710	0.570	0.600	0.250
K	1.120	1.310	1.410	0.650	0.760	0.960	0.760	0.830	0.610
Na	0.077	0.084	0.083	0.042	0.088	0.017	0.061	0.072	0.022
Fe	6.520	6.620	7.000	6.710	7.770	8.490	6.240	6.700	5.230
Al	11.090	11.890	12.880	11.620	13.780	15.790	12.100	12.500	13.300
P	0.052	0.057	0.128	0.061	0.048	0.056	0.103	0.092	0.074
Mn	0.270	0.237	0.212	0.123	0.108	0.084	0.341	0.287	0.124
Zn	103.400	117.700	130.600	192.000	214.500	235.000	394.000	388.000	213.000
Cu	42.820	44.900	47.200	44.000	42.000	52.500	43.500	48.000	27.000
Mo	2.460	2.220	2.290	1.050	1.660	2.380	2.110	1.780	1.840
B	56.670	57.330	55.670	65.260	70.790	75.200	47.450	51.230	46.390
Cd	2.360	1.720	2.070	2.630	1.370	1.880	9.560	2.140	6.170
Pb	80.820	80.700	85.500	89.500	78.240	81.220	98.950	98.680	92.210

将表 1 和表 2 数据代入淋溶公式, 得出不同土层的元素淋溶系数, 结果见表 3, 会仙研究区土壤中不同元素淋溶系数大小顺序为: Fe> P> Mn> K> Pb> Zn> Mo> B> Na> Cu> Cd> Mg> Ca, 除了 Al 元素, 另外 13 种元素中, Ca、Mg、Na、Cu、Mo、Pb 6 种元素在 A、B、C 层之间的淋溶系数差别不大, 而 K、Fe、P、Mn、Zn、B、Cd 元素在 A、B、C 层之间的淋溶系数差别比较明显。Mn、Cu、Mo、B、Pb 5 种元素在不同层位的淋溶系数顺序为 A> B> C。弄拉研究区土壤元素淋溶顺序为: Mn> K> Fe> Pb> P> Cu> Zn> Cd> B> Mo> Na> Mg> Ca, 同种元素在不同

层位之间的淋溶系数相差较大, Na、Fe、P、Mn、Zn、B、Pb 7 种元素在不同层位的淋溶顺序为 A> B> C。龙何- 布五研究区土壤元素淋溶顺序为: Mn> Fe> Pb> K> P> Mo> Zn> B> Cd> Cu= Na> Mg> Ca, 同种元素在不同层位之间的淋溶系数的差异大于另外 2 个研究区, Ca、P、Mn、Zn、Pb 5 种元素在不同层位的淋溶顺序为 A> B> C, K、Na、Fe、Cu、B 5 种元素在不同层位的淋溶顺序为 B> A> C。从以上的比较可以看出, 岩溶山区在成土过程中 Fe、Al、Mn、K 元素相对富集, 而其他元素相对淋失, 尤其是 Ca、Mg 元素。

表 3 不同土层的矿质元素淋溶系数

矿质元素	会仙			弄拉			龙何- 布五		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Ca	- 99.99	- 99.99	- 99.99	- 99.85	- 99.95	- 98.94	- 99.97	- 99.98	- 100.00
Mg	- 99.89	- 99.90	- 99.90	- 99.53	- 99.80	- 98.34	- 97.97	- 97.93	- 99.19
K	- 69.70	- 66.95	- 67.16	- 8.63	- 9.92	- 0.70	- 40.33	- 36.92	- 56.43
Na	- 97.81	- 97.77	- 97.97	- 95.08	- 91.31	- 98.53	- 94.01	- 93.16	- 98.04
Fe	76.38	67.03	63.04	- 5.68	- 7.90	- 12.18	- 2.02	1.84	- 25.29
Al	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P	- 18.89	- 16.57	72.20	- 34.87	- 56.73	- 56.03	- 47.30	- 54.41	- 65.33
Mn	- 33.43	- 45.41	- 54.86	27.54	- 6.04	- 35.27	103.40	65.58	- 32.73
Zn	- 90.35	- 89.76	- 89.51	- 94.04	- 94.38	- 94.63	- 69.64	- 71.06	- 85.07
Cu	- 98.15	- 98.19	- 98.24	- 92.98	- 94.35	- 93.84	- 94.38	- 94.00	- 96.83
Mo	- 95.71	- 96.39	- 96.56	- 97.12	- 96.17	- 95.20	- 66.87	- 72.94	- 73.71
B	- 97.21	- 97.37	- 97.64	- 94.38	- 94.86	- 95.24	- 90.69	- 90.27	- 91.72
Cd	- 98.09	- 98.70	- 98.6	- 94.04	- 97.38	- 96.86	- 87.89	- 97.38	- 92.89
Pb	- 84.38	- 85.46	- 85.78	- 16.13	- 38.18	- 43.99	- 38.34	- 40.48	- 47.73

注:“-”表示迁移
© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3.3 牧草中矿质元素的分布和富集特征

为了查明各种元素被吸收后在牧草体内的分布和富集特征,对 3 个研究区草地牧草的根、茎、叶中的元素含量进行了分析,结果见表 4。从表 4 可以看出,同一种元素在牧草不同部位的含量差异比较明显,Ca、Mg、K、Na、P、Mo、B 元素在叶片中的含量大于茎、根中的含量,在叶片中富集,而 Fe、Al、Mn、Zn、Cu、Cd、Pb 元素在根部的含量大于叶、茎中的含量,在根部富集。元素在牧草体内的分布和富集,不仅取决于元素自身在牧草体内的移动性能,还与牧草各部位生理需要以及元素在牧草体内相互作用有

关。各种元素在 3 个研究区牧草体内的含量顺序大多数表现为:Ca> K> Mg> Al> Fe> P> Mn> Na, Zn> B> Cu> Pb> Cd> Mo,与成土母岩和土壤中元素含量顺序具有明显的差异,说明牧草体内的元素虽然来源于土壤和成土母岩中,但由于受到元素地球化学性质、草地类型、牧草生长发育及生理需要等因素的制约,致使岩溶山区牧草体内各种元素与地球背景中相应元素的含量没有形成很好的共轭关系,即成土母岩或土壤中含量较高的元素,其在牧草体内的含量不一定是高的,相反,成土母岩或土壤中含量较低的元素,其在牧草体内有可能出现较高的含量^[18-20]。

表 4 牧草中矿质元素的分布和富集特征

矿质元素	会仙			弄拉			龙何- 布五		
	根	茎	叶	根	茎	叶	根	茎	叶
Ca	1.74	2.10	2.88	1.11	0.84	1.77	1.35	0.97	1.62
Mg	0.08	0.09	0.37	0.38	0.21	0.46	0.10	0.12	0.40
K	4.71	2.345	5.53	3.14	3.42	7.44	2.16	3.43	8.32
Na	0.005	0.005	0.005	0.005	0.004	0.007	0.003	0.003	0.004
Fe	0.071	0.015	0.029	0.081	0.013	0.020	0.130	0.014	0.030
Al	0.183	0.032	0.040	0.037	0.020	0.022	0.318	0.022	0.065
P	0.317	0.263	0.666	0.389	0.301	0.557	0.411	0.136	0.419
Mn	0.031	0.005	0.022	0.020	0.004	0.015	0.036	0.008	0.029
Zn	27.32	11.15	31.31	39.80	23.81	35.26	50.16	8.23	30.26
Cu	6.21	3.88	6.54	8.90	8.55	8.09	19.60	8.55	16.72
Mo	0.10	0.11	0.17	0.12	0.26	0.37	0.08	0.15	0.11
B	13.55	10.29	18.76	18.4	10.73	20.25	4.58	5.27	24.99
Cd	6.33	1.87	4.28	5.16	0.46	2.15	14.32	3.56	10.22
Pb	12.35	5.33	8.50	9.53	3.28	3.66	10.46	0.85	1.18

3.4 土壤- 牧草之间元素的相关性分析

植被与其所生长的土壤环境之间是互相依存、互相制约的紧密关系^[21]。岩溶山区的牧草由于生长在富含钙镁地质环境中,其体内矿质元素应对特殊的岩溶土壤环境具有某种程度的表征作用。通过对 3 个研究区牧草体内元素与土壤环境中不同层位元素含量进行相关性分析可知,在牧草根部和 A 层土壤之间,Fe- P(前面元素为牧草体内元素,后面元素为土壤中元素,下同)为极显著正相关,Na- P 为极显著负相关,Mg- Ca、Mn- Mn、Zn- Al、Zn- Pb、Cu- P、B- Fe 为显著正相关,Ca- Cu、K- Al、Al- B、Mo- Mo、Cd- B 为显著负相关。在牧草根部和 B 层土壤之间,Mg- Fe、Cd- Pb 为极显著正相关,Mn- B 为极显著负相关,Mg- Ca、Mg- Al、Mn- Mn、Al- Cd 为显著正相关,Mo- Cd 为显著负相关。在牧草根部和 C 层土壤之间,Mg- Ca、Mg- Al、K- K、Mo- Fe、Cd- Cd 为显著正相关,Mn- B、Zn- K、Al- Fe、Cd- Mo 为显著负相关。

在牧草茎部与 A 层土壤之间,Mg- Mo 为极显著负相关,Fe- Na、Zn- Mn 为显著正相关,Na- Al、Cd- Fe、Pb- Al、Pb- Pb 为显著负相关。在牧草茎部与 B 层土壤之间,Cd- Cd 为极显著正相关,Mn- Na 为极显著负相关,Ca- K、Al- K、Al- Mo、Mn- P 为显著正相关,P- P、B- Pb 为显著负相关。在牧草茎部与 C 层土壤之间,Na- K 为极显著正相关,Cd- Fe 为极显著负相关,Al- Na、P- Cu、P- Mo、Cd- Pb 为显著正相关,Al- Zn、Mn- Cu、Cu- Na、B- Cd 为显著负相关。

在牧草叶片与 A 层土壤之间,Al- Fe 为极显著负相关,Na- B、Cu- P、B- P 为显著正相关,Fe- Mg、P- Pb、Mn- B 显著负相关。在牧草叶片与 B 层土壤之间,Fe- Mg、Cd- Na 为极显著负相关,Al- Cd、Mn- Cu、Zn- Mg、Cd- P 为显著正相关,Na- Cd、Zn- Mn 为显著负相关。在牧草叶片与 C 层土壤之间,Na- Fe 为显著正相关,Al- Fe、Mn- Fe、Cd- Cu 为显著负相关。

通过以上相关分析发现,牧草根部和茎部元素与各层土壤元素之间,呈极显著正相关的有 3 对,极显著负相

关有 2 对, 显著正相关有 15 对, 显著负相关有 10 对。牧草茎部元素与各层土壤元素之间, 极显著正相关有 2 对, 极显著负相关有 3 对, 显著正相关有 10 对, 显著负相关有 10 对。牧草叶片元素与各层土壤元素之间, 极显著负相关有 3 对, 显著正相关有 8 对, 显著负相关有 8 对。相关性达到显著和极显著的对数最多的是牧草根部分与各层土壤元素之间, 对数最少的是牧草叶片部分与各层土壤元素之间。牧草对环境元素的吸收除根据自身生理需要的主动吸收之外, 对某些元素还通过根部与土壤之间的渗透调节进行被动吸收^[22-23]。从前面土壤元素的富集特征可以看出, 岩溶山区的风化成土过程中普遍富集 Fe、Al、Mn、K 元素, 但土壤中除了 Fe 和 Al 元素与牧草体内元素相关性较高之外, K 元素与牧草体内元素并未表现出较高的相关性, Mn 元素与牧草体内元素的相关性甚至很小。由此, 可以进一步证实了岩溶山区牧草与土壤之间元素含量的非共轭性, 如土壤中含量较高的 Ca、Mg 元素与牧草体内元素的相关性就比较低, 而牧草选择性的富集 Ca、Mg、K 元素也不一定表现为在牧草各器官中的含量与土壤元素呈显著相关。

4 结论

1) 岩溶山区成土母岩中普遍富含 Ca、Mg 元素, 而由于地层岩性的差异性, 采集不同研究区的岩石, 其 Cd、Zn 元素的含量差异极为显著, 而 Fe、Al 元素含量存在显著差异。

2) 岩溶山区土壤中除了 Ca、Mg 元素含量小于成土母岩中含量之外, 其他大部分元素含量均大于成土母岩中的含量。土壤中元素含量大小与成土母岩相似, Al、Fe、Ca、Mg、K 含量普遍较高而 Pb、Cu、Mo、Cd 含量较低。在成土过程中 Fe、Al、Mn、K 元素相对富集, 而其他元素相对淋失, 尤其是 Ca、Mg 元素。在成土过程中元素主要在 A 层中富集, 其次是 B 层和 C 层。

3) Ca、Mg、K 等元素主要富集在牧草的叶片中, 而 Fe、Al、Mn 元素主要富集在牧草的根部, 元素在牧草不同器官部位的分布和富集除了取决于元素本身的移动性, 还与牧草生理需要有关。各种元素在岩石、土壤中、牧草体内含量顺序具有明显的差异性, 没有形成共轭关系, 牧草对岩溶山区地球环境中元素的吸收受到元素地球化学性质、草地类型以及牧草生长发育需要的制约。

4) 牧草根部分与土壤之间元素的相关性最大, 其次是茎部, 叶片部分与土壤各层位元素的相关性最差。在土壤中含量较高的元素, 其与牧草体内元素的相关性不一定高, 而牧草体内相对富集的元素如

Ca、Mg、K 元素与土壤中的元素也未表现出显著的相关性, 说明岩溶山区牧草与土壤之间元素含量具有非共轭性。

参考文献:

- [1] 袁道先, 曹建华. 岩溶动力学的理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 106-111.
- [2] Wang S J, Liu Q W, Zhang D F. Karst rocky desertification in southwestern of China: geomorphology, land use, impact and rehabilitation[J]. Land Degradation Development, 2004, 15(2): 115-121.
- [3] 马强, 任巧玲, 刘付玖, 等. 畜牧业可持续发展的制约因素及建议[J]. 河南农业科学, 2008(12): 134-136.
- [4] 刘自学. 中国草业的现状与展望[J]. 草业科学, 2002, 19(1): 6-8.
- [5] 李向林, 张新跃, 唐一国, 等. 日粮中精料和牧草比例对舍饲山羊增重的影响[J]. 草业学报, 2008, 17(2): 85-91.
- [6] 刘金祥. 中国南方牧草[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 15-19.
- [7] 曹建华, 袁道先, 潘根兴. 岩溶生态系统中的土壤[J]. 地球科学进展, 2003, 18(1): 37-44.
- [8] 曾群望, 杨双兰, 高宏光, 等. 云南生物地质环境研究[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2001: 119-152.
- [9] Dwayne R Buxton. Quality-related characteristics of forages as influenced by plant environment and agronomic factors[J]. Animal Feed Science and Technology, 1996, 59(3): 37-49.
- [10] 蒋忠诚, 李先琨, 曾馥平, 等. 岩溶峰丛洼地生态重建[M]. 北京: 地质出版社, 2007: 3-95.
- [11] 吴华英, 蒋忠诚, 罗为群, 等. 桂林会仙实验基地石灰土剖面化学组成分布的研究[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(20): 9598-9602.
- [12] 蓝芙宁, 蒋忠诚, 邓艳, 等. 岩溶峰丛洼地饲料植物元素富集特征研究[J]. 中国岩溶, 2006, 25(4): 297-307.
- [13] Brimhall G H, Lewis C J, Ague J J, et al. Metal enrichment in bauxites by deposition of chemically mature aedian dust[J]. Nature, 1988, 333: 819-824.
- [14] 彼列尔曼 A N. 后生地球化学[M]. 龚子同, 译. 北京: 科学出版社, 1975: 5-103.
- [15] 黄成敏, 龚子同. 海南岛北部玄武岩上土壤发生研究 III. 元素地球化学特征[J]. 土壤学报, 2002, 39(5): 643-652.
- [16] 蒋忠诚. 岩溶动力系统中的元素迁移[J]. 地理学报, 1999, 54(5): 438-444.
- [17] 袁道先. 中国岩溶学[M]. 北京: 地质出版社, 1993.
- [18] 邓艳, 蒋忠诚, 蓝芙宁, 等. 广西热带亚热带典型森林岩溶区土壤-植物系统元素分布特征[J]. 生态环境, 2008, 17(3): 1140-1145.
- [19] 曹建华, 袁道先, 章程, 等. 受地质条件制约的中国西南岩溶生态系统[J]. 地球与环境, 2004, 32(1): 1-8.
- [20] 田均良, 刘普灵, 李雅琦, 等. 西藏高原土壤-植物系统元素分布特征研究[J]. 环境科学学报, 1996, 16(1): 37-43.
- [21] 莫治新, 王冀平. 植被覆盖对土壤水盐空间分布规律的影响[J]. 河南农业科学, 2009(3): 43-46.
- [22] 宋瑜, 金樑, 曹宗英, 等. 植物对重金属镉的响应及其耐受机理[J]. 草业学报, 2008, 17(5): 84-91.
- [23] 蒋高明, 常杰, 高玉葆, 等. 植物生理生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 112-131.