

贵州黄壤地区植物营养元素来源的 Sr 同位素示踪

郑厚义^{1,2} 刘丛强¹ 王中良¹ 杨成^{1,2} 谌书^{1,2} 朱书法³

(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 2 中国科学院研究生院 3 河南科技大学化工与制药学院)

摘要:为研究植物营养元素来源,对贵州龙里地区黄壤上生长的12种主要植物的部分营养元素含量及Sr同位素特征进行了分析。结果表明:喀斯特地区黄壤上的植物具有高钙含量,营养元素含量由高到低排序为Ca > K > Mg;研究区植物的Ca、K、Sr平均含量均高出报道的陆生植物的平均含量,但比贵州地区同样以灰岩为母质发育而来的石灰土上生长的植物低;植物样品的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr同位素比值变化范围在0.708 56~0.711 45之间。基于铈同位素组成的端员模式计算结果表明,除了苔藓、石松的营养元素主要来源于大气输入外,其他植物的营养元素主要来源于土壤风化。

关键词:喀斯特;黄壤;植物;营养元素;铈同位素

中图分类号:S718.53 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-1522(2008)04-0072-05

ZHENG Hou-yi^{1,2}; LIU Cong-qiang¹; WANG Zhong-liang¹; YANG Cheng^{1,2}; CHEN Shu^{1,2}; ZHU Shu-fa³.

Strontium isotopes as a tracer of plant nutrition element source in yellow soil region of Guizhou Province. *Journal of Beijing Forestry University* (2008) 30(4) 72-76 [Ch,24 ref.]

1 State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang, 550002, P. R. China;

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, P. R. China;

3 School of Chemical Engineering and Pharmaceutics, Henan University of Science and Technology, Luoyang, 471003, P. R. China.

The strontium isotopic compositions and nutrition element concentrations of 12 plant species collected from yellow soil region in Guizhou Province of China were measured to investigate the source of plant nutrition elements. The results show that the plants growing in yellow soils of karstic areas have the characteristic of high concentration of Ca. The concentrations of nutrient elements were Ca > K > Mg. The mean concentrations of Ca, K and Sr in this region were higher than that of other terraneous plants in the world, but lower than that of the plants which grow in limestone soils from other karstic areas of Guizhou Province. The range of ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr ratios was from 0.708 56 to 0.711 45. Based on end-member models of ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr isotopes, the results indicate that the nutrient elements present in plants are mainly derived from soil weathering except for *Lycopodium cernuum* and *Moss*.

Key words karstic; yellow soil; plant; nutrition element; strontium isotope

钙、镁是植物生长所必需的主要营养元素,在植物生长和发育过程中起着重要的作用^[1-4]。钙在土壤养分贫瘠的森林中起到直接或间接控制树木物种分布的重要作用^[2]。然而,当前世界上很多森林都受到不同程度人为因素的影响,特别是受到大气污染和酸沉降的影响^[3-4]。酸沉降可加快森林土壤中易交换态阳离子流失,导致土层中Ca²⁺、Mg²⁺和K⁺

等阳离子的亏损,难以满足植被生长的正常需要,进而引起植物营养失衡^[1-2,4]。

喀斯特区域占地球总面积的10%,喀斯特土壤具有土层薄、pH值高、土壤-植被系统钙和镁含量高、生态系统脆弱等特征^[5-6]。贵州喀斯特地貌分布占全省面积70%左右,是我国乃至世界热带、亚热带喀斯特分布面积最大、发育最强烈的地区,同时也

收稿日期:2007-01-05

<http://www.bjfujournal.cn>, <http://journal.bjfu.edu.cn>

基金项目:“973”国家重点基础研究发展计划项目(2006CB403205)、中国科学院重要方向项目(KZCX3-SW-140)、中国科学院海外合作伙伴计划项目。

第一作者:郑厚义,博士生。主要研究方向:环境地球化学、生物地球化学。Email:zhenghouyi1@163.com 地址:550002 贵阳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。

是我国严重酸雨区之一^[7]。由于受亚热带湿润季风气候影响,该地区土壤淋溶作用强烈,碳酸盐岩上覆土壤以黄壤分布最广,属于亚热带常绿阔叶林黄壤地带。在酸沉降胁迫下,喀斯特生态环境中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 K^+ 等阳离子的贮存、迁移、平衡能否满足植物的生长需求,是喀斯特森林生态系统研究的热点^[3-4]。利用 Sr 同位素示踪植物中钙等营养元素来源在生态系统中已做了很多研究^[2,8-13]。本研究对喀斯特地区植被的营养元素及 Sr 同位素地球化学特征进行研究,是为了探讨碳酸盐岩地区植物中钙、镁和钾等营养元素的来源及形成机理,加深酸沉降对植被影响的认识,为喀斯特生态环境质量评价及其环境保护提供科学依据。

1 样品采集与分析

1.1 研究区概况

研究区位于贵州省中部龙里县西南一森林小流域,基岩为泥盆系白云质灰岩夹燧石团块。研究区海拔 1 100 ~ 1 300 m,为喀斯特景观地貌;亚热带季风湿润型气候,年平均气温 14.8℃,年平均降雨量 1 100 mm。该地区发育的土壤类型以黄壤为主(约占 90%),土壤层厚度 50 ~ 170 cm。植被以马尾松 (*Pinus massoniana*)、蕨 (*Pteridium aquilinum* var. *latiusculum*)、火棘 (*Pyracantha fortuneana*)、芒 (*Miscanthus sinensis*)、石松 (*Lycopodium cernuum*) 等为主,覆盖率为 70% ~ 90%。

1.2 样品采集

2005 年 7 月,在研究区内选择 1 块 100 m × 100 m 样地。采集植物为群落建群种和优势种。草本植物采集地上部分;木本植物以枝叶为主。在样地内采集典型的土壤剖面样品(0 ~ 10 cm、50 ~ 70 cm)研究该区土壤基本性质。

采集研究区内的 12 种主要植物:盐肤木 (*Rhus chinensis*)、火棘、马桑 (*Coriaria sinica*)、马尾松、大叶胡枝子 (*Lespedeza davidii*)、小叶连翘 (*Forsythia suspensa*)、火绒草 (*Echinops gmelini*)、芒、蕨、渐尖毛蕨 (*Cyclosorus acuminatus*)、石松、苔藓 (*Moss*) 的枝叶样品作为研究对象。

为保证样品的代表性,在 10 m² 样方内采集 5 株相同的植物混合为一个样品。样品先用去离子水冲洗干净,然后置于烘箱内保持 70℃ 烘干,再经不锈钢小型粉碎机粉碎至 80 目。

1.3 样品分析

1) 样品消解:称取 0.5 g 植物样品,在马弗炉内 550℃ 温度下保持 3 h 灰化,然后用 HClO_4 和 HNO_3 对灰化样品完全消解,用 2% HNO_3 定容到 15 mL。

2) 离子含量的测定:将样品溶液酸化到 pH < 2,用电感耦合等离子体发射光谱仪 (ICP-OES) 测定 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 和 Sr^{2+} 等的含量,结果以占样品干重的百分含量表示。

3) Sr 同位素比值的测定:取 10 mL 酸化后的样品溶液在特弗龙烧杯中蒸干,经 200 ~ 400 目的 Dowex 50W × 8 阳离子交换树脂分离纯化收集后,在多接收电感耦合等离子体质谱仪 (MC-ICP-MS) 上测试 Sr 同位素比值 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)。在测试期间 NBS987 锶标准的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值为 $0.710\,25 \pm 2$ (2σ , $n = 24$)。

2 结果与讨论

植物营养元素含量及锶同位素组成分析结果列于表 1,土壤化学分析结果列于表 2。

表 1 贵州龙里地区植物营养元素含量及锶同位素比值
TABLE 1 The nutrition element concentrations and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios of plants in Longli County, Guizhou Province

植物名称	样品编号	Ca/ %	K/ %	Mg/ %	Sr/ ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
苔藓	A1	1.56	0.18	0.27	17.0	0.708 56 ± 1
石松	A2	0.35	1.06	0.13	4.9	0.709 00 ± 1
芒草	A3	1.02	0.66	0.23	20.8	0.711 45 ± 2
蕨	A4	1.06	0.92	0.21	221.6	0.711 44 ± 1
渐尖毛蕨	A5	1.59	1.05	0.50	23.3	0.710 59 ± 1
火绒草	A6	1.31	1.00	0.20	83.3	0.710 79 ± 1
盐肤木	A7	1.96	0.96	0.54	58.6	0.710 41 ± 2
马桑	A8	1.88	0.39	0.42	19.4	0.711 07 ± 2
火棘	A9	1.90	0.76	0.39	58.9	0.711 07 ± 1
大叶胡枝子	A10	0.77	0.40	0.11	48.8	0.711 20 ± 1
小叶连翘	A11	1.08	0.65	0.18	41.7	0.711 01 ± 2
马尾松	A12	1.14	1.10	0.20	18.2	0.711 07 ± 1
平均		1.30	0.76	0.28	51.4	
陆生植物平均 ^[14]		0.5	0.3	0.5	2	

表 2 贵州龙里地区黄壤土壤化学组成

TABLE 2 The chemical compositions of yellow soils in Longli County, Guizhou Province

土壤类型	土壤深度/cm	pH	土壤化学组成/ %									
			SiO ₂	CaO	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	P ₂ O ₅	烧失量
黄壤	0 ~ 10	4.4	74.01	0.27	0.38	0.21	0.21	6.7	4.58	0.025	0.049	13.06
黄壤	50 ~ 70	4.7	77.98	0.43	0.52	0.28	0.25	7.2	5.91	0.034	0.34	6.83
中国土壤平均 ^[15]				1.3	2.26	1.23	1.5	12.6	4.25	0.07		

2.1 植物部分主要营养元素含量特征

从表 1 可以看出,作为植物主要的营养元素,研

究区内植物不同物种间的钙、镁和钾含量变化较大。单因素方差分析表明钙、镁和钾在这些植物之间均

存在显著差异 ($P < 0.05$)。本次研究的 12 种植物样品中,钙镁含量的和最高的是盐肤木(2.50%),最低的是石松(0.48%)(图 1)。反映出不同植物物种对土壤中 Ca^{2+} 等营养阳离子的有效性利用存在差异。与其他植物比较,石松具有异常低的钙、镁含量,这可能与其自身的生物学特性有关——石松是铝的累积体。Caldwell^[10] 研究表明,铝在细胞壁和质膜蛋白质及磷脂的结合位点上可与钙发生竞争作用,铝的胁迫可以影响植物对钙的吸收。

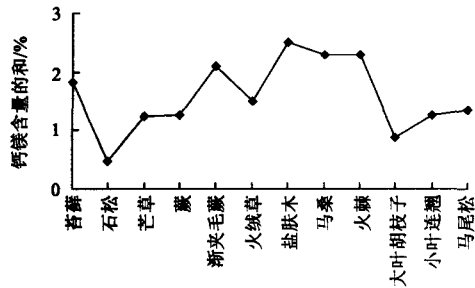


图 1 物种间植物钙镁含量和的变化

FIGURE 1 Changes of the sum of Ca and Mg concentration in different plant species

周运超^[6]和贺生等^[11]的研究结果表明,喀斯特地区的植物营养元素含量特点是 $\text{Ca} > \text{K} > \text{Mg}$ 型。本次研究的 12 种植物除了石松外,都符合 $\text{Ca} > \text{K} > \text{Mg}$ 型的特点。尽管在其他非喀斯特地区^[12-13]也得出 $\text{Ca} > \text{K} > \text{Mg}$ 的结果,但本研究区的 12 种植物中有 11 种植物的钙含量高于 1%。而其他地区,如新疆乌鲁木齐河源区^[12]的 35 种高寒冰缘植物中,只有 29% 植物的钙含量高于 1%。说明喀斯特地区植被具有植物高钙的特征。与侯学煜所报道^[14]的陆生植物中的元素含量相比较,研究区黄壤上生长的植物钙、钾、锶的平均含量均高出陆生植物的平均含量(表 1),但比贵州地区同样以灰岩为母质发育来的石灰土上生长的植物低^[6,16]。杨成等^[16]研究结果表明:贵阳花溪石灰土上植物的钙平均值为 1.79%,镁平均值为 0.48%。周运超^[6]研究也表明,喀斯特区石灰土上生长的植物钙、镁含量较之酸性土上的含量要高些。这可能反映了植被的化学组成受区域环境条件和生物种类的制约作用^[17]。

2.2 植物锶同位素特征

2.2.1 不同来源的锶同位素计算方法

土壤风化和大气沉降是森林生态系统中钙、镁、钾、钠等营养元素的两个主要来源,二者对不同生态环境下不同植物生长的贡献不同。确定了这两个端员及其混合物的锶同位素比值的情况下,利用锶同位素可以将两种不同来源的钙区分开来。

由于锶和钙在元素周期表中处于同一族,因此有极其相似的地球化学行为。在化学和生物化学过

程中,锶不会产生同位素分馏。不同来源的锶的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值不同,根据各端员锶同位素比值,结合同位素端员混合模型就可以定量估算植被中不同来源营养元素的比例^[3]。

根据上述理论,假设土壤风化端员组分对植物所吸收营养元素的贡献 X 为:

$$X = (\text{Sr}_B - \text{Sr}_D) / (\text{Sr}_W - \text{Sr}_D) \quad (1)$$

$\text{Sr}_X = [^{87}\text{Sr} / (^{87}\text{Sr} + ^{86}\text{Sr})]_X$, Sr_X 泛指 Sr_B 、 Sr_W 、 Sr_D , 它们分别表示植物体、土壤风化和大气沉降的 $[^{87}\text{Sr} / (^{87}\text{Sr} + ^{86}\text{Sr})]$ 比值。

端员的确定是保证计算结果可靠的关键。一般选取雨水样品代表大气输入端员^[2],本次研究中大气输入端员的数据,采用的是研究区内 2005 年连续 1 年的雨水锶同位素比值的质量平均值 0.708 12。Han 和 Liu^[18] 研究结果表明贵阳城区雨水锶同位素比值在 0.707 93 与 0.709 08 之间变化,因此本研究区的大气输入端员 Sr_D 取值 0.708 12 是恰当的。土壤风化端员一般选择土壤剖面中有机质含量少的土壤样品的可交换态提取液^[2]。Zhu 和 Liu^[19] 研究表明,龙里地区土壤剖面中 50 ~ 70 cm 处有机质含量相对于表层土壤(0 ~ 10 cm)可以忽略不计,因此本次研究以该处土壤样品的可交换态提取液代表土壤风化端员,其锶同位素比值为 0.712 01。

利用式(1)计算得出土壤风化和大气输入对植物体营养元素的相对贡献(见表 3)。

表 3 植物营养元素不同来源的相对贡献 %

TABLE 3 Relative contributions of different nutrient element sources

样品号	$X_{\text{大气输入}}$	$X_{\text{土壤风化}}$	样品号	$X_{\text{大气输入}}$	$X_{\text{土壤风化}}$
A1	88.63	11.37	A7	41.12	58.88
A2	77.21	22.79	A8	23.99	76.01
A3	14.36	85.64	A9	24.02	75.98
A4	14.65	85.35	A10	20.66	79.34
A5	36.29	63.71	A11	25.67	74.33
A6	31.22	68.78	A12	24.15	75.85

2.2.2 植物营养元素钙、镁来源的锶同位素地球化学

本次研究的 12 个植物样品的锶同位素比值在 0.708 56 与 0.711 45 之间变化,变化幅度较大。表 3 显示了不同植物物种生长过程中所吸收利用的营养阳离子的来源不同,这可能与不同植物根系发育及叶片生理结构的差异有关。苔藓和石松属于比较低等的植物,其根系属于不定根,不具备发达的输导组织,因此二者吸收的营养阳离子主要来自大气沉降,苔藓可以达到 88.6%,石松则为 77.2%。其他植物物种间差异不大,其营养阳离子主要来自土壤风化,介于 58.88% ~ 85.64% 之间,这与世界其他地区的研究结果相似。Dijkstra 等^[2,20] 关于美国西北部地区

的研究结果表明,该地区由于酸雨的影响,植物所吸收 Ca^{2+} 的 39% ~ 63% 来自土壤风化。比利时森林的研究结果^[21]表明,大气输入是钙等营养离子的主要来源,酸性土壤上的生态环境对大气环境的化学变化反应敏感。锶同位素计算结果显示,该地区生态系统中高达 26% 的 Ca^{2+} 来自大气沉降。随着土壤风化程度的不断加强,热带雨林生态系统中营养离子主要来自基岩、土壤风化逐渐过渡到以大气沉降为主^[9]。对缺乏营养离子的敏感性土壤来说,大气沉降来源的 Ca^{2+} 甚至占离子总量的一半以上。

土壤风化作用是森林生态系统营养成分的一个重要来源,可交换态阳离子通过风化过程释放同时可被植物吸收而进入生物圈^[8-9]。大气沉降作为另一个重要来源将大气中的化学物质输入森林生态系统;同时降水也通过淋洗作用促进了森林-土壤系统的生物物质循环。由于人为活动的影响,贵州省自 20 世纪 80 年代以来酸沉降频繁发生,土壤中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等阳离子释放、流失严重。高尚玉等^[3]研究发现,虽然碳酸盐岩富 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} ,但是发育其上的黄壤贫 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} ,出现不能满足植物需求的可能。Han 和 Liu^[18]研究表明,贵阳地区雨水与世界其他地区比较具有高 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量特点, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 是雨水最主要的阳离子,二者之和占了阳离子组成的 78% ~ 96%。雨水中高含量的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等营养阳离子为植物吸收利用提供了可能。在研究区内,雨水的 Ca^{2+} 含量年平均为 2.5 mol/L, pH 值低于 5 的降雨次数超过 70%,属于典型的酸雨区。酸沉降还可以导致土壤中 Al^{3+} 的活化, Lawrence 等^[22]的研究表明,森林表层土壤中的植物可利用性 Ca^{2+} 的减少与矿质土层中 Al^{3+} 的活化有关。从表 2 可以看出,研究区内土壤的 CaO、 K_2O 、MgO 的含量明显低于全国平均含量,并且表层土壤的含量低于深层土壤的。这表明了在持续酸沉降的胁迫下,研究区表层土壤中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等营养离子大量流失^[22-24]。当土壤不能给植物提供足够的营养离子时,植物可能需要通过从雨水中获得 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等营养离子来满足其生长需要。

从本次研究的植物样品相关数据可以看出,除了苔藓和石松,龙里地区的大多数植物样品的钙、镁主要来源于土壤风化所产生的可交换态营养阳离子,大气沉降可以为森林生态系统输入一定量的营养阳离子,但所占份额相对较小。

3 结 论

1) 龙里地区植物的营养元素组成表明,喀斯特地区黄壤上生长的植被具有高钙的特征,但比贵州

其他地区同样以灰岩为母质发育来的石灰土上生长的植物低,符合 $\text{Ca} > \text{K} > \text{Mg}$ 型的特点。

2) 不同来源的相对贡献的锶同位素计算方法的计算结果表明,喀斯特地区黄壤上大多数植物生长所需的 58.88% ~ 85.64% 的营养元素钙、镁来自土壤风化所产生的可交换态阳离子,大气输入部分所占份额相对较小。

参 考 文 献

- [1] LIKENS G E, DRISCOLL C T, BUSO D C, et al. The biogeochemistry of calcium at Hubbard Brook[J]. *Biogeochemistry*, 1998, 41: 89-173.
- [2] DIJKSTRA F A, VAN BREEMEN N, JONGMANS A G, et al. Calcium weathering in forested soil and the effect of different tree species[J]. *Biogeochemistry*, 2003, 62: 253-275.
- [3] 高尚玉, 毕坤. 喀斯特农业生态环境钙镁补偿研究[J]. 贵州地质, 1995, 12(1): 61-68.
GAO S Y, BI K. Study of Ca-Mg compensation for agricultural ecology in karst region of Guizhou[J]. *Guizhou Geology*, 1995, 12(1): 61-68.
- [4] 冯宗炜. 酸雨对生态系统的影响——西南地区酸雨研究[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1993.
FENG Z W. *The effect of acid rain on ecosystem—Study of acid rain in south-west China* [M]. Beijing: Chinese Science and Technique Press, 1993.
- [5] 欧阳自远. 中国西南喀斯特生态脆弱区的综合治理与开发脱贫[J]. 世界科技研究与发展, 1998, 20(2): 53-56.
OUYANG Z Y. On the comprehensive management, development and breaking away from poorness of the ecologically fragile karst area in south-west China [J]. *World Sci-technology Research and Development*, 1998, 20(2): 53-56.
- [6] 周运超. 贵州喀斯特植被主要营养元素含量分析[J]. 贵州农学院学报, 1997, 16(1): 11-16.
ZHOU Y C. A study on the part plants' main nutrient elements content of Guizhou karst region[J]. *Journal of Guizhou Agricultural College*, 1997, 16(1): 11-16.
- [7] LARSEN T, CARMICHAEL G R. Acid rain and acidification in China: The importance of base cation deposition[J]. *Environmental Pollution*, 2000, 110: 89-102.
- [8] MILLER E K, BLUM J D, FRIEDLAND A J. Determination of soil exchangeable-cation loss and weathering rates using Sr isotopes[J]. *Nature*, 1993, 362: 438-441.
- [9] KENNEDY M J, CHADWICK O A, VITOUSEK P M. Changing sources of base cations during ecosystem development[J]. *Geology*, 1998, 26(11): 1 015-1 018.
- [10] CALDWELL C R. Analysis of aluminum and divalent cation on binding to wheat root plasma membrane protein using terbium phosphorescence[J]. *Plant Physiol*, 1989, 91: 233-241.
- [11] 贺金生, 陈伟烈, 王其兵. 长江三峡地区优势植物的化学元素含量特征[J]. 植物学报, 1998, 40(5): 453-460.
HE J S, CHEN W L, WANG Q B. Studies on the characteristics of element contents in the dominant plant species of the Three-Gorges region in China[J]. *Acta Botanica Sinica*, 1998, 40(5): 453-460.

- [12] 安黎哲,刘艳红,冯虎元,等. 乌鲁木齐河源区高寒冰缘植物化学元素的含量特征[J]. 西北植物学报, 2000, 20(6): 1 063-1 069.
AN L Z, LIU Y H, FENG H Y, *et al.* Studies on the characteristics of element contents of alitrigetic subnival vegetation at the source area of Urumqi river[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2000, 20(6): 1 063-1 069.
- [13] 杜占池,钟华平. 川东红池坝地区红三叶和鸭茅人工草地土壤和植物营养元素含量特征的研究[J]. 植物生态学报, 1998, 22(4): 350-355.
DU Z C, ZHONG H P. Nutrient element contents in soil and plants in the *Trifolium pratense* and *Dactylis glomerata* artificial grassland in the Hongchiba area, eastern part of Sichuan Province[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 1998, 22(4): 350-355.
- [14] 侯学煜. 中国植被地理及优势植物化学成分[M]. 北京: 科学出版社, 1982.
HOU X Y. *Vegetation geography of China and chemical composition of their dominant plants*[M]. Beijing: Science Press, 1982.
- [15] 陈怀满. 环境土壤学[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
CHEN H M. *Soil environment*[M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [16] 杨成,刘丛强,宋照亮,等. 贵州喀斯特山区植物营养元素含量特征[J]. 生态环境, 2007, 16(2): 503-508.
YANG C, LIU C Q, SONG Z L, *et al.* Characteristics of the nutrient element contents in plants from Guizhou karst mountainous area of China[J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(2): 503-508.
- [17] 袁可能. 植物营养元素的土壤化学[M]. 北京: 科学出版社, 1983.
YUAN K N. *Soil chemistry of plants' nutrient element*[M]. Beijing: Science Press, 1983.
- [18] HAN G L, LIU C Q. Strontium isotope and ion chemistry of the rainwaters from Guizhou Province, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 364: 165-174.
- [19] ZHU S F, LIU C Q. Vertical patterns of stable carbon isotope in soils and particle-size fractions of karst areas, southwest China [J]. *Environment Geology*, 2006, 364: 165-174.
- [20] DIJKSTRA F A, SMITS M M. Tree species effects on calcium cycling: The role of calcium uptake in deep soils[J]. *Ecosystems*, 2002, 5: 385-398.
- [21] DTOUET T, HERBAUTS J, GRUBER W, *et al.* Strontium isotope composition as a tracer of calcium sources in two forest ecosystems in Belgium[J]. *Geoderma*, 2005, 126: 203-223.
- [22] LAWRENCE G E, DAVID M B, SHORTLE W C. A new mechanism for calcium loss in forest-floor soils[J]. *Nature*, 1995, 378: 162-165.
- [23] 廖柏寒,蒋青. 我国酸雨中盐基离子的重要性[J]. 农业环境保护, 2001, 20(4): 254-256.
LIAO B H, JIANG Q. Importance of base cations of acid precipitation in China[J]. *Agro-environmental Protection*, 2001, 20(4): 254-256.
- [24] 李霁,刘征涛,舒俭民,等. 中国中南部典型酸雨区森林土壤酸化现状分析[J]. 中国环境科学, 2005, 25(1): 77-80.
LI J, LIU Z T, SHU J M, *et al.* Analysis on the forest soil acidification status quo in typical acid rain areas of central and south China[J]. *China Environmental Science*, 2005, 25(1): 77-80.

(责任编辑 赵 勃)

本刊 2008 年第 5 期要目预告

- 谢寅峰等: 镉对鹅毛竹开花后光合特性的影响
- 夏江宝等: 美国凌霄光合生理参数对水分与光照的响应
- 周宇峰等: 木荷林分可燃物载量空间分布的研究
- 李国雷等: 油松叶凋落物分解速率、养分归还及组分对间伐强度的响应
- 吴明山等: 度量误差对材积模型的影响及参数估计研究
- 刘秀萍等: 黄土高原造林边坡应力应变特征及其稳定性分析
- 孟春玲等: 响应面法优化超声波辅助提取沙棘籽油的工艺研究
- 于丽丽等: 通风条件对 ACQ-D 处理杉木中铜固着的加速作用
- 刘镇波等: 云杉木材钢琴共振板振动特性的研究
- 赵红英等: 出土梓木形态结构及物理力学性质研究