

南极菲尔德斯半岛水生植物的生物地球化学特征研究

李小梅^{1,3}, 赵俊琳², 沙晋明³, 毛雪瑛⁴, 李世红⁴

(1. 福建师范大学环境科学研究所, 福州 350007; 2. 北京师范大学环境科学研究所, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100875; 3. 福建师范大学地理学院, 福州 350007; 4. 中国科学院高能物理研究所应用部, 北京 100080)

摘要:利用中子活化分析技术,得到南极西湖沉积岩芯中水生植物(镰刀藓)的 22 种化学元素含量,发现南极水生植物的地球化学元素含量范围变化较大,而且在沉积层次上,各个元素的变异系数也较大。水生植物吸收和累积元素的特征为:稀土元素、U、As 极容易为植物吸收同化,Ca、Co、Sc 为水生植物容易吸收的元素,Th、Hf、Na 为水生植物难以同化的元素。同时,研究发现水生植物的直接营养物源为湖水中的可溶性离子;对水生植物的 22 种化学元素进行聚类分析,发现稀土元素、Ca、Zn、U 之间、As、Fe、Co 之间共生关系密切,对水生植物具有相似的生理作用。

关键词:水生植物; 南极; 生物地球化学

Biogeochemical Characteristics of Aquatic Plant in Fields Peninsula, Antarctic

LI Xiao-Mei^{1,3}, ZHAO Jun-Lin², SHA Jin-Ming³, MAO Xue-Ying⁴, LI Shi-Hong⁴ (1. *Institute of Environmental Sciences, Fujian Teachers University, Fuzhou 350007, China*; 2. *Institute of Environmental Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*; 3. *Institute of Geography, Fujian Teachers University, Fuzhou 350007, China*; 4. *Institute of High Energy Physics Application, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China*). *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(12): 2111~2115.

Abstract: Amblystegiaceae, *Drepanocladus aduncus* (moss) was the main species of plants growing in Xihu Lake, Chinese Antarctica Great Wall Station. Through Neutron Activation Analysis(NAA), the contents of 22 chemical elements in the plant samples are measured respectively. Based on the results, the biogeochemical features including elements contents, accumulation, relationship and nutrient source are discussed in the paper.

Xihu lake core was 1.46 meters long, collected by Professor Zhao Junlin joining the 15th China Science Survey Team to Antarctic in 1998~1999. The core was directly picked into PVC tube with 12cm diameter and reserved under freezing condition. After describing the outward features of the core, the core was divided into samples at 1cm intervals. Under the super clean condition, the plant remains were selected out of the sediment samples with plastic tweezers. Then the plant samples were repeatedly washed in clean water and alcohol solution with different concentrations for getting rid of mud particles. Finally, the clean plant samples were analyzed with NAA technology by collaborators in the Institute of High Energy Application, Chinese Academy of Science.

The average content of chemical elements in order of abundance in the plant samples is: Fe>Ca>Na>Sr>Ba>Nd>Ce>Zn>La>As>Sc>Co>Cr>Sm>Yb>Eu>Tb>U>Lu>Hf>Sb>Th. The contents range of the abundant elements such as Fe、Ca、Na is 745.83mg/kg (2.67%); The middle

基金项目: 国家“九五”重点科技攻关资助项目 (98-927-01-04); 福建师范大学博士基金资助项目

收稿日期: 2001-10-10; 修订日期: 2002-06-03

作者简介: 李小梅(1964-), 女, 山西人, 硕士, 讲师。现主要从事环境科学、环境评价等方面的研究。E-mail: lixiaomei@263.net

abundant element Sr, its average content is 109.33mg/kg, while Ba is only 50.35mg/kg; For the trace elements of Nd, Ce, Zn, La, As, Sc, Co, Cr, their contents range is 10.97 ~ 49.65mg/kg; And the ultramicroelements such as Sm, Yb, Eu, Tb, U, Lu, Hf, Sb, Th, their contents changed in 0.12~8.14mg/kg. Meanwhile, It is found that on the vertical section of lake core, contents of chemical elements in plant change greatly, for instance, the variance coefficients of chemical contents are from 21.1% to 90.4%.

After calculating plant enrichment factors of the 22 chemical elements, It is concluded that the rare elements, U, As are the favor nutrient elements, Ca, Co, Sc are welcomed, and Th, Hf, Na are difficultly assimilated by the plant.

The results show no positive relationship between elements contents of aquatic plant and that of the sediment on the same deposit layer of lake core. For the soluble nutrient elements in lake water are more preferably assimilated by the plant than the mineral, adsorptive or exchangeable elements in sediment. Therefore, the lake soluble elements are the direct nutrients for plant.

Through cluster analysis to the elements, it is concluded that correlations among elements of rare elements, Ca, Zn, U or As, Fe, Co are intimate, and such elements take similar nutrient roles for the plant. Particularly, results show that eight rare elements are coexisted in aquatic plant as to terrestrial plants.

Key words: Aquatic plant; Antarctic; biogeochemistry

文章编号:1000-0933(2002)12-2111-05 中图分类号:Q948 文献标识码:A

苔藓、地衣和藻类为南极的主要植被类型。据报道,南极西湖沉积物中生长的植物种类系柳叶藓科镰刀藓属镰刀藓(Amblystegiaceae, *Drepanocladus aduncus*)^[1]。我国学者对南极沉积物中镰刀藓的生物地球化学特征及其环境意义有过初步研究^[2~4]。本研究利用中子活化分析技术,分析 146cm 长的西湖沉积岩芯中水生植物的 22 种化学元素含量,根据元素分析结果,讨论了南极水生植物的元素含量特征、元素累积特征、营养物源以及元素之间的相互关系,以期为南极生物的营养生态、水生植物对环境变化的响应等基础研究积累有用的资料。

1 材料与方法

研究所用的湖相沉积物岩芯长 146cm,采自南极长城站附近的西湖,为中国南极科学考察第十五次队的赵俊琳等采集。沉积物柱样直接采集于直径为 12cm 的 PVC 管内,空运回国后冷冻保存。打开 PVC 管,取出保存完好的样品,然后描述其岩性特征,按等间距分割样品,在超净工作环境下,用塑料镊子逐一挑出沉积物中的植物残体,并用清水和不同浓度的乙醇反复清洗植物残体携带的沉积物颗粒,之后对残体进行中子活化分析。中子活化分析由中国科学院高能物理研究所应用部完成。

植物残体中子活化分析 将样品置于干净的称量纸,小心揉碎,称量后用高纯 Al 箔包裹,在 200℃下烘干约 6h。然后将样品和化标(用标准化学物质配制而成)、标准参考物一起送入反应堆中接受中子辐照,中子注量率为 $5.7 \times 10^{13} \text{ n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$,照射时间为 8 h。

活化后的样品经一定冷却时间(第 1 轮为 8~9d,第 2 轮为 18~19d)后,拆去铝箔,样品转入塑料质地的测量小瓶中,用带高纯 Ge 探测器的多道 GAMMA 探测系统进行 GAMMA 谱的测量。再用名为 SPA 的解谱程序对数据进行分析。测得 22 个沉积层次的 La、Ce、Nd、Sm、Eu、Tb、Yb、Lu、Ca、Na、Fe、Cr、Co、Hf、Sc、U、Th、As、Zn、Sb、Ba 和 Sr 共 22 个元素含量。

2 结果与讨论

2.1 水生植物的化学元素含量

由表 1 可知,南极水生植物化学元素含量顺序为:Fe>Ca>Na>Sr>Ba>Nd>Ce>Zn>La>As>Sc>Co>Cr>Sm>Yb>Eu>Tb>U>Lu>Hf>Sb>Th。其中大量元素 Fe、Ca、Na 的含量范围为 745.83mg/kg(2.67%);中等元素 Sr 含量为 109.33mg/kg;中等元素 Ba 的含量较低,为 50.35mg/kg;微量元素 Nd、Ce、Zn、La、As、Sc、Co、Cr 的含量范围为 10.97~49.65mg/kg;超微量元素 Sm、Yb、Eu、Tb、U、Lu、Hf、Sb、Th 的含量范围为 0.12~8.14mg/kg。不同地球化学元素在水生植物体中的累积量差别较大,如 Fe 含量是 Th 含量的 222500 倍。同时,在沉积剖面上,水生植物元素含量变异系数较大,变异系数的范围

为 21.1~90.4%,尤其是 Co、Na、Zn 元素的变异系数最大。

表 1 南极西湖水生植物的化学元素含量(mg/kg)

Table 1 Chemical elements' content of aquatic plant from Xihu Lake, Antarctic											
元素 Element	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Tb	Yb	Lu	Ca(%)	Na	Cr
平均含量 Average	31.53	46.83	49.65	8.14	3.00	1.89	5.09	0.88	2.50	745.83	10.97
总标准差 Total SD	12.97	21.72	17.29	3.60	1.17	0.72	1.80	0.27	0.71	498.09	3.99
变异系数 Variance coefficient	41.12	46.38	34.82	44.24	38.89	38.40	35.30	30.49	28.59	66.78	36.36
元素 Element	Fe(%)	Co	Hf	Sc	Th	U	As	Zn	Sb	Ba	Sr
平均含量 Average	2.67	17.46	0.45	17.50	0.12	1.07	31.08	36.02	0.37	50.35	109.33
总标准差 Total SD	0.82	15.78	0.12	9.64	0.04	0.44	13.76	24.35	0.08	10.22	26.98
变异系数 Variance coefficient	30.55	90.40	26.80	55.07	31.87	40.71	44.29	67.60	21.10	20.29	24.68

2.2 水生植物的元素累积特征

水生植物(镰刀藓)对元素的富集规律,可以生物富集系数表示: $Ax=Lx/Nx$ 。
式中, Ax 为元素 x 的生物富集系数; Lx 为元素 x 在植物中的含量; Nx 土壤中元素的含量。
生物富集系数表示元素在水生植物和沉积物两种介质中的分配比例,反映了植物同化环境中化学元素的能力。西湖水生植物的生物富集系数见表 2。西湖水生植物吸收和累积元素的特征为:稀土元素、U、As 极容易被植物吸收同化,Ca、Co、Sc 为水生植物容易吸收的元素,Th、Hf、Na 为水生植物难以吸收的元素。

表 2 南极水生植物的元素富集系数

Table 2 Enrichment coefficient of chemical elements in aquatic plant from lake sediment, Antarctic											
元素 Element	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Tb	Yb	Lu	Ca(%)	Na	Cr
水生植物 Water plant	31.53	46.83	49.65	8.14	3.00	1.89	5.09	0.88	2.50	745.83	10.97
沉积物 Lake sediment	13.59	23.42	21.83	4.44	1.72	0.88	2.52	0.39	3.22	17000.00	33.26
富集系数 Enrichment coefficient	2.32	2.00	2.27	1.83	1.74	2.14	2.02	2.25	0.78	0.04	0.33
元素 Element	Fe(%)	Co	Hf	Sc	Th	U	As	Zn	Ba	Sr	
植物残体 Water plant	2.67	17.46	0.45	17.50	0.12	1.07	31.08	36.02	50.35	109.33	
沉积物 Lake sediment	5.47	22.41	3.22	29.81	1.32	0.60	17.18	88.53	173.87	363.10	
富集系数 Enrichment coefficient	0.49	0.78	0.14	0.59	0.09	1.79	1.81	0.41	0.29	0.30	

由于苔藓植物对元素的选择性并不强,因此水生植物对元素富集特征与元素的存在形态有关。植物可以利用的元素形态一般为离子态或交换态。稀土元素在土壤中的存在形态有残渣态、有机结合态、铁氧化物结合态、碳酸岩结合态和交换态,而交换态含量多少是稀土元素生物有效性的主要反映^[5]。研究发现在土壤-作物体系中,稀土元素极容易被作物累积^[5]。西湖周围土壤中的稀土元素,由于地表径流的作用汇集到湖泊中,一部分被淋滤出来以 3 价离子形态存在,为水生植物所同化。元素 U 具有很强的迁移能力,尽管在环境中的含量很低,但极容易被西湖湖底生长的镰刀藓累积。As 元素在酸性环境中,主要以可溶性的亚砷酸形态存在,从矿物中淋失,从而导致水生植物砷的累积。

2.3 水生植物的营养源

生活在湖底的水生植物,其营养元素可以直接来源于湖水中的可溶性离子,也可能是来自于湖泊沉积物中的交换态元素。本研究发现,相同沉积层次上的沉积物和水生植物的元素含量并没有相关性(图 1,表 3),其原因是生活在湖底的镰刀藓,更容易吸收累积湖水中的离子态元素,难以利用沉积物中矿物态、吸附态或交换态元素。因此可以认为,南极水生植物的直接营养源为湖水中可溶性离子,沉积物元素对水生植物的营养贡献率低。

2.4 水生植物化学元素之间的共生关系

对水生植物化学元素进行聚类分析,结果(见图 2)表明:稀土元素、Ca、Zn、U 为一类;As、Fe、Co 为一类;Na、Sc、Cr、Hf、Sr 为一类。由此可见,地球化学元素在水生植物中的分布具有一定的聚敛性,反映了同

种类型的化学元素对水生植物的生理生化作用具有一定的共性。

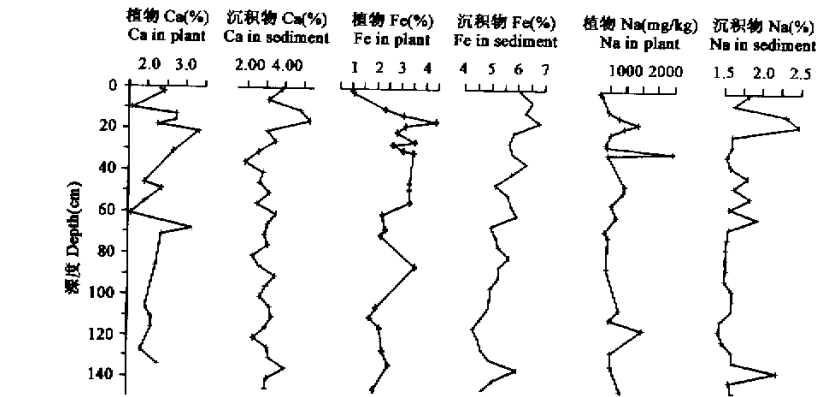


图 1 水生植物残体、沉积物元素含量对比

Fig. 1 Comparison of chemical elements between aquatic plant remains and lake sediment

表 3 沉积剖面上湖相沉积物与水生植物的地球化学元素相关系数

Table 3 Correlation of chemical elements between lake sediment and the aquatic plant on the vertical section of Xihu core, Antarctic

沉积物元素 Elements in sediment	水生植物元素 Elements in plant						
	Ca	Na	Fe	Co	Cr	As	Zn
Ca	0.15	0.21	0.02	0.44	0.01	-0.20	0.07
Na	0.03	0.26	0.22	0.43	-0.04	0.00	-0.02
Fe	0.29	-0.26	0.34	0.40	-0.63	0.32	0.25
Co	0.27	-0.02	0.52	0.62	-0.43	0.37	-0.07
Cr	-0.30	0.06	0.07	0.10	0.11	-0.08	-0.17
As	0.10	-0.22	-0.07	-0.07	-0.30	0.13	0.08
Zn	0.22	-0.25	0.01	0.01	-0.35	0.21	0.08

水生植物中 8 种稀土元素是伴生的,与高等植物中稀土元素的分布一致^[8]。稀土元素与 Ca、Zn、U 可以划成一类,它们之间的相关性较好,共生关系密切。因为不同配位数的钙离子在镧系系列中均能找到配位数相同、半径相似的离子^[8],所以这些配位数相同、半径相似的稀土元素离子可以在植物体中取代相应的钙离子,它们之间存在着相似的生理特征。Zn 元素为植物生长必需的微量元素,它容易转移到植物的生长中心。U 元素在环境中的含量很低,植物吸收 U 的能力很强。因此可以推断稀土元素、Ca、Zn、U 为南极水生植物体中活跃元素,容易被累积和同化;水生植物的 As、Fe、Co 元素相关性较好,Fe 为植物体中叶绿素的组成成分。在表生环境中,Fe 与 Co 共生,在植物体中 Fe、Co 也有较好的相关性,它们均为植物被动吸收的元素。As 被植物同化的效率也很高,主要原因是湖水环境中离子态的 As 含量较大;Na、Sc、Cr、Hf 和 Sr 等其余元素在植物残体中的分布较分散。

3 结论

(1) 南极水生植物化学元素含量顺序为:Fe>Ca>Na>Sr>Ba>Nd>Ce>Zn>La>As>Sc>Co>Cr>Sm>Yb>Eu>Tb>U>Lu>Hf>Sb>Th, 22 种化学元素的含量范围为 0.12mg/kg(2.67%),水生植物元素含量在沉积物剖面上的变异系数较大。

(2) 南极水生植物吸收和累积元素的特征为:稀土元素、U、As 极容易为植物吸收同化,Ca、Co、Sc 为水生植物容易吸收的元素,Th、Hf、Na 不易被水生植物同化。

(3) 南极水生植物的直接营养源为湖水中可溶性离子,沉积物元素对水生植物的营养贡献率低。

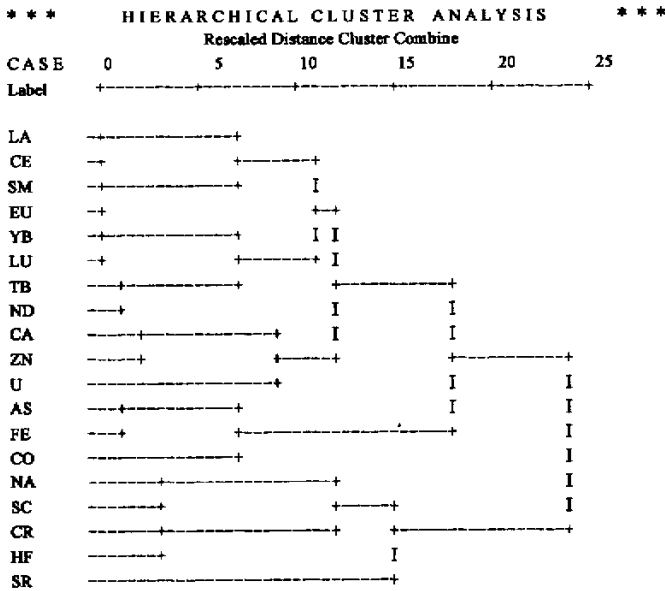


图 2 南极水生植物地球化学元素聚类图

Fig.2 Clusters graph of chemical elements in aquatic plant of Xihu, Antarctic

(4)对元素进行聚类分析,发现水生植物中 8 种稀土元素是伴生的;稀土元素与 Ca、Zn、U 之间、As 与 Fe、Co 之间共生关系密切,具有相似的植物生理作用。

参考文献

[1] Zhou Shanyuan,Zhou Yunlong,*et al.* Electron Microscopic Observation and Electron Microprobe Analysis of the Moss in the Water and Bed Sediments of the West Lake of the Great Wall Station in the South Pole Area. *Proceedings of the International Symposium on Antarctic Research*. Beijing,China Ocean Press,1989. 350~355.

[2] Zhao J L (赵俊琳) ed. *The characteristics of the modern environmental geochemistry and natural environmental evolution in the region of Antarctic Great Wall station*(in Chinese). Beijing:Science Press, 1991. 1~99.

[3] Zhao J L (赵俊琳). Biogeochemical research of environmental evolution in Chinese Antarctic great wall station area——reconstruction of paleo-rainfall and the last ice-cap melt. *Chinese Journal of Polar Research*(in Chinese) (南极研究). 1989,1(3):52~60.

[4] Li F (李锋), Li T J (李天杰). Distribution of chemical elements in the sediments of Xihu lake, Antarctica and its environmental significance. *Chinese Journal of Polar Research*(in Chinese)(极地研究). 1997,9(4):299~303.

[5] Hu A T (胡霭堂), Zhou Q S (周权锁), Zheng S J (郑绍建), *et al.* Ecological Effect of Rare Earth Elements. In: *Nuclear Analysis Techniques and Environmental Sciences*(in Chinese). Beijing: Atomic Energy Press, 1997. 182~194.

[6] Xie Y Y (谢又予), Guan P (关平), Yang S J (杨绍晋), *et al.* Geochemical behavior and environment of Xihu lake sediment, Chinese Antarctica Great Wall Station. *China Science(B)*(in Chinese)(中国科学),1991, 3:321~330.

[7] Zheng X S (郑祥身), Liu X H (刘小汉), Yang R Y (杨瑞英). The petrological characteristics of tertiary volcanic rocks near the Chinese Great Wall Station, West Antarctica. *Acta Petrologica Sinica*(in Chinese)(岩石学报). 1988,17(1):34~47.

[8] Ni J Z (倪嘉缙)edited. *Bioinorganic Chemistry of Rare Earth Elements*(in Chinese). Beijing, Science Press, 1995. 1~9.