

# 南极地区苔藓剖面中地球化学元素的营养运移特征

李小梅<sup>1</sup>, 赵俊琳<sup>1</sup>, 孙立广<sup>2</sup>

(1. 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; 2. 中国科技大学极地研究室, 合肥 230026)

**摘要:**对采自南极的苔藓剖面上各层苔藓的地球化学元素含量进行分析, 得到以下的初步结论: 地球化学元素在苔藓剖面上的分布具有很强的继承性; 不同地球化学元素在苔藓剖面上的分布特征不同, 这与元素在苔藓中的营养特征有关, 研究发现元素 Ca 在苔藓体内, 异常活跃, 它极易被累积在新鲜苔藓体内, Zn 也是苔藓易吸收的元素; 地球化学元素在老新苔藓中的转移能力不同: 底层苔藓的元素转移能力很低, 中层苔藓中元素维持在基本平衡的状态, 上层苔藓中元素的转移系数较大。

**关键词:**苔藓剖面; 地球化学元素; 转移系数

## Transferring feature of geochemical elements on the vertical section of moss in Antarctic

LI Xiao-Mei<sup>1</sup>, ZHAO Jun-Lin<sup>1</sup>, SUN Li-Guang<sup>2</sup> (1. Institute of Environmental Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Polar Research Laboratory, University of Science & Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract:** Based on the geochemical element analysis on the different layer of mosses in Antarctic the results are as follows: Along with the reproduction of new generation mosses. The nutrient elements in the old plants are migrated into the fresh ones. Geochemical elements distribute particularly in different depth of the vertical section of moss, for they have special functions in nourishing the plant. The study demonstrates that calcium is very active and is easily accumulated in the young moss. Similarly, zinc is easily absorbed by moss. Geochemical elements have different capacity in transferring from the old mosses to the young ones. Elements keep steadily in the middle depth of the vertical section, while they transport easily into the young ones.

**Key words:** vertical section of mosses; geochemical elements; transfer factor

文章编号: 1000-0933(2001)07-1079-05 中图分类号: Q948 文献标识码: A

南极由于其严峻的气候条件, 南极主要生长的植被为苔藓、地衣和藻类等<sup>[1]</sup>。苔藓和地衣常被生态学家誉为“大自然的拓荒者”<sup>[2]</sup>, 是因为它们可以生长在任何恶劣的条件下, 包括沙漠和两极。在菲尔德斯半岛地区的陆地生态系统中, 苔藓和地衣组成的群落在植被中占主导地位<sup>[3]</sup>。苔藓也常常被环境学家用作空气污染的指示植物, 用它来检测空气污染和重金属污染的程度。因此苔藓对所生活的环境有很强的依赖性, 环境的任何细微变化都可以被苔藓植物灵敏反映。但作为苔藓植物本身, 它的营养吸收和累积分解规律也不容忽视。所以, 研究极地条件下苔藓植物的营养运移特征, 对研究苔藓如何指示环境变化是一个不可缺少的基础。

基金项目: 国家“九五”重点科技攻关(98-927-01-04)专题资助项目

收稿日期: 2000-09-29 修回日期: 2001-02-16

作者简介: 李小梅(1969~), 女, 山西人, 硕士, 讲师。现主要从事南极环境科学方面的研究。

## 1 材料和方法

本研究中的苔藓样品为 1998 年中国南极科学考察队第 15 次队的赵俊琳教授采集。采样点位于距中国长城站以东 10km 左右的韩国站附近,此站是西南极乔治王岛上一个小岛的尖端,靠近柯林斯冰盖。本地区为海成阶地发育,新构造抬升比较强烈。本站区的岩石类型以第三纪火成岩(如玄武岩)为主。苔藓样品为一个长为 28cm 的苔藓剖面,剖面上全部由苔藓组成,按 1cm 为间距取样,对苔藓植物样品进行分析。根据采样人对苔藓的外观特征描述以及苔藓生长环境的特征,对照长城站附近地区苔藓种类的划分<sup>[4~6]</sup>,推测该苔藓可能为金发藓科(Polytrichaceae)。用 ICP 方法测定样品中的地球化学元素含量,样品前处理方法为:在 105℃ 下干燥样品,压碎混匀后称量,湿法消化后测定上清液,同时下部沉淀过滤后经 105℃ 干燥,用于校正样品重量。

## 2 结果与讨论

### 2.1 苔藓中元素含量特征

用 ICP 方法对苔藓植物样品分析,得到苔藓中 Fe、Mg、Ca、Mn、Ba、Zn、Sr、Co、Cr、Ni 含量,结果见表 1。

表 1 苔藓剖面上的地球化学元素含量分布(mg/kg)

Table 1 Density of geochemical elements on the section of moss

苔藓层次 Moss' depth(cm)	Fe	Mg	Ca	K	Cu	Mn	Ba	Zn	Sr	Co	Cr	Ni
1	18000	8200	37000	4100	480	270	130	280	830	13	3.9	6.1
2	11000	4300	21000	2900	450	190	120	230	690	16	3.3	8.1
3	8700	1900	9300	1300	300	45	28	36	170	14	9.8	4.2
4	10000	1300	4100	1400	420	59	46	35	100	23	5.1	6.3
5	9000	1100	3600	1300	310	54	40	34	76	15	2.1	4.6
6	14000	1900	2100	1300	400	120	47	40	35	13	3.3	4.1
7	21000	2600	2500	1400	470	150	54	41	38	18	3.8	4.2
8	18000	2000	2300	900	460	1100	36	36	29	15	6.3	5.5
9	24000	2700	2400	1100	520	160	46	38	34	15	5.8	4.1
10	30000	2800	2700	1100	560	180	59	45	31	15	5.2	3.4
11	24000	3200	2700	900	540	240	50	42	29	13	5	3.6
12	29000	3000	2900	1300	570	210	71	56	32	13	6.3	3.9
13	24000	3700	3700	980	570	220	42	47	30	10	11	5.8
14	27000	3700	3300	1100	560	190	55	38	31	11	11	6.9
15	30000	5400	3700	1100	600	270	63	44	35	12	8.4	6
16	27000	3500	3100	1100	600	190	59	37	31	10	6	3.5
17	26000	3700	3400	950	570	190	60	42	33	9.4	6.6	4.4
18	45000	8600	5000	1200	580	360	87	60	45	15	15	9.8
19	31000	4700	3600	1200	640	250	68	49	35	11	6.7	3.9
20	39000	6900	4900	1000	550	310	76	49	41	14	8	27
21	32000	5400	4000	1100	580	250	68	46	36	12	8.1	5.3
22	33000	4600	4000	1300	660	230	76	49	34	10	8.3	6.6
23	33000	6400	4300	1200	630	290	70	49	35	12	8.9	6.3
24	31000	5200	3900	1100	620	250	61	54	32	11	7.8	5.5
25	33000	5200	3900	880	620	240	62	40	32	10	7.5	4.4
26	45000	8300	4700	1200	520	350	92	79	39	14	10	7.5
27	80000	20000	8100	1800	570	720	162	120	67	27	19	19
28	86000	17000	6700	2000	630	650	188	140	67	24	18	15
上层 Upper layer (1~2cm)	14500	6250	29000	3500	465	230	125	255	760	14.5	3.6	7.1
中层 Middle layer (3~26cm)	26821	4075	3754	1142	535	246	59	45	44	13.1	7.3	6.1
下层 Low layer (27~28cm)	83000	18500	7400	1900	600	685	175	130	67	25.5	18.5	17.0
总平均值 Average	29954	5261	5818	1365	535	276	72	66	97	14.1	7.9	7.0

由表 1 可以得到地球化学元素在苔藓植物体内的含量序列为:Fe>Ca>Mg>K>Cu>Mn>Sr>Ba>Zn>Co>Cr>Ni。同一元素在不同层次中的含量有所差异,对某一元素而言,若下层的含量高,中层和上层的含量一亏劣数据此,可以比较各种元素在不同层次上的相对含量顺序为:下层 Fe>Mg>Ca>K>Mn>Cu>Ba>Zn>Sr>Co>Cr>Ni;中层 Fe>Mg>Ca>K>Cu>Mn>Ba>Zn>Sr>Co>Cr>Ni;上

层  $\text{Ca} > \text{Fe} > \text{Mg} > \text{K} > \text{Sr} > \text{Cu} > \text{Zn} > \text{Mn} > \text{Ba} > \text{Co} > \text{Cr} > \text{Ni}$ 。因此,可以发现中下层元素的含量顺序几乎完全一样,而上层元素的顺序与中下层也基本一致,只有个别元素有差异。究其原因,可以从剖面上苔藓的生殖和营养特征得到解释。由于南极大陆是地球上最寒冷、最多风和最干旱的大陆,在这样的生境下,苔藓的生长很慢,大多数种类都不能完成正常的世代交替,所以大多没有有性繁殖,常常用胞芽、植物体的碎片、珠芽等进行无性繁殖<sup>[6]</sup>。在这种营养生殖过程中,伴随着新生苔藓植物体的出现,营养元素也发生了转移,从老的植物体中流向顶端生长部位。而且,从苔藓剖面的形态和生长环境分析,可以知道此类苔藓为内导水型苔藓。因而,可以推断苔藓剖面上,营养元素在不同层次苔藓中有继承性。所以上、中、下层苔藓的元素相对含量顺序较一致。上层苔藓中元素含量与中下层之间的差异原因可以归结为:上层(1~2cm)苔藓为新鲜的苔藓植物体,所以它的元素含量顺序代表了正在生长着的苔藓中元素的分配状态;而中下层苔藓为已经老化或生长停止的植物,况且,它的部分元素已经供应了其上层苔藓的生长,或者它们还有一定的分解释放营养物质的过程,它们的元素含量顺序一致,说明苔藓中元素本身的继承性很强,同时反映出苔藓腐解释放一定量元素后,它自身残留的元素保持着相对稳定的状态,元素之间维持着相对的平衡和协调。

比较不同层次上元素在苔藓中的含量,发现直接发育于基岩或浅层风化壳上的苔藓(最下层)与最上层的新鲜苔藓中各种元素的含量都相对于中层高,如下层的镁含量是中层的 4.5 倍。 $\text{Fe}$ 、 $\text{Mg}$ 、 $\text{Cu}$ 、 $\text{Mn}$ 、 $\text{Ba}$ 、 $\text{Co}$ 、 $\text{Cr}$ 、 $\text{Ni}$  在最下层的含量高于上层,而  $\text{Ca}$ 、 $\text{K}$ 、 $\text{Zn}$ 、 $\text{Sr}$  在新鲜样品中的含量较下层高,中间层次(3~26cm)的苔藓中元素含量最低。这与地球化学元素在苔藓中的转移特征和植物对它们的吸收营养规律有关。

## 2.2 地球化学元素在苔藓剖面上的垂直运移特征

比较地球化学元素在苔藓剖面上的含量变化,可以找到元素在苔藓剖面上的垂直变异规律,元素的这种分布与苔藓植物体对元素的释放和营养特征有关。根据上述 12 个元素在苔藓中的垂直分布特征,可以将元素分为 5 种类型。

**2.2.1 活跃并易于转移的元素(包括  $\text{K}$ 、 $\text{Ca}$ 、 $\text{Zn}$  3 种元素)** 它们在苔藓剖面上的垂直分布特征为:新鲜苔藓样品中元素含量最高,生长于基岩或风化壳上的苔藓元素含量比中间层次的稍高。中间层次苔藓的元素含量较稳定,虽有一定程度的波动,但变化幅度很小。元素的垂直分布曲线呈凹型特征(图 1)。

这类元素的垂直分布特征与苔藓植物对它们的营养吸收和分解转移特征有关。 $\text{K}$ 、 $\text{Ca}$  是苔藓植物生长所必需的大量营养元素,可促进其原丝体的发育<sup>[2]</sup>。所以这两种元素极易富集到新鲜苔藓植物体中,而且  $\text{Ca}$  相对  $\text{K}$  而言,更容易富集,是因为  $\text{Ca}$  具有较高的阳离子交换能力。传统认为苔藓对  $\text{K}$ 、 $\text{Ca}$  的吸收方式不同, $\text{K}$  被苔藓植物吸收到细胞内,而  $\text{Ca}$  大部分结合在细胞外的可交换位点上<sup>[6]</sup>。但在苔藓剖面上, $\text{Ca}$  与  $\text{K}$  相比,每个层次上的含量都较高,说明这种条件下生长的苔藓更容易富集  $\text{Ca}$ (图 1)。这样可以推断苔藓剖面上  $\text{Ca}$  也许有多部分进入到细胞内。因而  $\text{Ca}$  在苔藓体内的活跃性并不比  $\text{K}$  弱,二者皆为苔藓的活跃营养元素。 $\text{Zn}$  为植物生长所必需的微量营养元素,它容易转移到植物的生长中心。 $\text{Zn}$  的这种分布特征或许与苔藓吸收空气或降水中大量的  $\text{Zn}$  有关。所以上层苔藓中这 3 种元素的含量最高。

中间层次 3 种元素的含量低,与苔藓植物对元素的释放分解有关。通常人们认为大气而非植物生长基质是苔藓植物矿质养分的来源<sup>[7]</sup>,但这里,从中下层苔藓植物中元素相对含量的顺序极其一致性分析,可见苔藓剖面上层元素的主要营养源为下层苔藓分解释放出的元素,当然不排除苔藓从降水中获取元素。 $\text{K}$ 、 $\text{Ca}$  为植物所大量必需和累积的元素,所以中层苔藓中这几种元素的含量必然很低。但中间层次元素的含量较稳定,说明这 3 种元素的分解释放速率稳定。中间元素含量的波动可能与所生活的环境条件(温度、降水等)的变化有关。

最下层元素的含量较高,一方面可以说明当时环境中苔藓植物本身的元素含量就很高,另一原因可能是上边苔藓腐解分解释放出的元素,会随水向下迁移,迁移到基岩上时,受到阻挡,大部分元素又重新被苔藓残体吸收。

**2.2.2 难移动的元素(包括  $\text{Fe}$ 、 $\text{Mg}$ 、 $\text{Ba}$ 、 $\text{Cr}$ 、 $\text{Mn}$  5 种元素)** 它们的垂直分布特征为:从底层到上层(除最上层外),苔藓中元素含量依次降低(图 1)而且下层元素远远高于其上层元素。其中  $\text{Fe}$ 、 $\text{Mg}$  在下层苔藓中的累积量最大,这与基岩有关,在第三纪火成岩或其上发育的土壤中,这两种元素的含量都很大<sup>[8]</sup>。因此

最下层苔藓中这 5 种元素的主要来源为基岩。根据元素的这种分布特征,可以看出 Fe、Mg、Ba、Cr、Mn 并非苔藓所需的大量营养元素,它们的吸收应以被动吸收为主。同时可以看出这 5 种元素在老的苔藓中很稳定。

**2.2.3 难转移但转移速率稳的元素 Cu** 垂直分布特征与 Fe、Mg、Ba、Cr、Mn 的分布特征不同之处在于,从下到上,元素浓度减缓速率较稳(图 1)。由此可以推断基岩上发育的苔藓中 Cu 自身的浓度并不高;苔藓分解释放 Cu 的总趋势并不高;但 Cu 在一定条件下,转移速率较稳,如在 9~28cm 剖面上,Cu 的浓度基本很稳定。有人曾把野外生长的苔藓(*Hylocomium splendens*)保温在含等克分子浓度的多种元素溶液中,得到的吸收顺序为:Cu、Pb>Ni>Co>Cd>Zn、Mn<sup>[6]</sup>,可见 Cu 在苔藓细胞壁上可交换点上的亲和力还是较强。所以它在新鲜苔藓中浓度较低的原因可能与环境提供的 Cu 较少有关。

**2.2.4 易转移元素 Ni 与 Co** 垂直分布特征为:上高下低。与 Ca、K 的分布特征相比,它的变化趋势较缓和(图 1)。由于这两种元素都不是苔藓生长所必需的营养元素,它们的累积应为完全的被动吸收,可见它们易于从老的苔藓体中释放转移出来。

**2.2.5 稳定元素 Sr** 垂直分布特征为:上层元素含量最高,但中下层元素含量波动很小,基本维持在同样的水平上,曲线特征为“L”型(图 1)。Sr 在苔藓体内的这种稳定性可以说明苔藓对它的累积受环境影响较小,同时它可以作为苔藓体内其他元素随环境变化的对照元素。在新鲜苔藓体内 Sr 的含量较高,可见苔藓较易累积这个元素,同时老的苔藓也易释放此元素。

**2.3 地球化学元素在苔藓剖面上移动能力的分析**

比较相邻层次间苔藓中元素的含量,可以反映出元素在苔藓剖面上的转移强度和转移效率。这里用转移系数表示上层元素含量与相邻下层的元素含量比值,即

$$T = E_i/E_{i+1}$$

其中  $E_i$ 、 $E_{i+1}$  为相邻两层间某种元素的含量, $T$  为元素转移系数。若  $T > 1$ ,说明某元素易于转移到上层,它的转移能力强。若  $T < 1$ ,说明元素不易被释放,转移能力差。若  $T = 1$ ,可见元素的转移能力稳定。

根据表 2,可以发现以下规律:上层苔藓元素的转移系数都较高(除 Co、Cr 外),可见地球化学元素易于转移到新鲜的苔藓中。根据转移系数的大小,可以推断苔藓对一些元素的选择吸收特点:Mg、Ca、K、Mn、Ba、Zn、Sr 是苔藓易于吸收的元素。特别是 Zn 元素,它的转移系数最高,尽管它的含量并不高,但新鲜苔藓对其有最强的选择吸收能力。Fe 元素尽管在苔藓中的含量最高,但它的转移系数并不太大。

比较中层元素的转移系数,发现:所有元素的转移系数基本都在 1 左右,可见元素从老苔藓转移到新苔藓后,老苔藓上残留的地球化学元素保持在稳定状态。当然,对转移系数较大的 Ni、Mn 而言,可以推断老苔藓对此元素的释放延迟于其他元素。下层各个元素的转移系数基本接近,说明直接生长于基岩上的苔藓所吸收的养分充足,它的养分也不易释放出来。同时也不能否认有这样的可能,就是已经分解出的元素离子或降水用的数据离子沿剖面向下流动,到达基岩时,被阻挡,这些离子重新吸附在老的苔藓残体上。

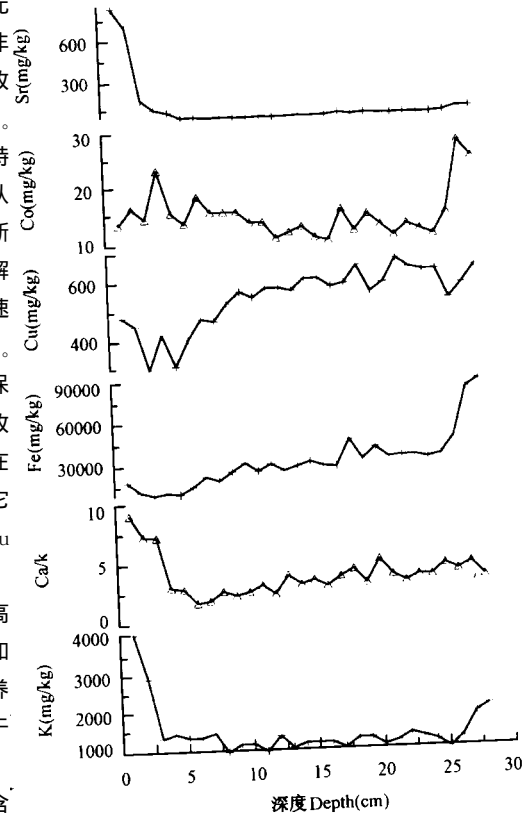


图 1 苔藓剖面上元素的分布

Fig. 1 Distribution of elements on the section of moss

表 2 地球化学元素在苔藓剖面上的转移系数  
Table 2 Trans-ratio of geochemical elements on the section of moss

苔藓层次 Moss layer	Fe	Mg	Ca	K	Cu	Mn	Ba	Zn	Sr	Co	Cr	Ni
上层 <sup>①</sup> (1~2cm)	1.45	2.09	2.01	1.82	1.29	2.82	2.69	3.81	2.63	0.98	0.76	1.34
中层 <sup>②</sup> (3~25cm)	0.96	0.99	1.07	1.02	0.98	1.17	0.98	0.99	1.10	1.03	1.09	1.20
下层 <sup>③</sup> (26~27cm)	0.75	0.80	0.90	0.79	0.91	0.80	0.72	0.76	0.79	0.83	0.80	0.83
总平均值 <sup>④</sup> (1~27cm)	0.98	1.06	1.13	1.06	1.00	1.26	1.09	1.18	1.19	1.01	1.04	1.18

① Upper layer; ② Middle layer; ③ Low layer; ④ Average

## 2.4 苔藓体内地球化学元素之间的相互关系

对苔藓体内的 12 种元素进行相关分析,得到相互关系(表 3)。可知,元素 Fe、Mg、Ba、Cr 之间, Ca、K、Zn、Sr 之间的相关系数较大。根据元素在植物体内的相互作用可以认为上述两组元素之间存在协同作用,从表中没有发现存在明显拮抗作用的元素对。

表 3 苔藓元素间的相关系数  
Table 3 Correlation between elements of moss

	Fe	Mg	Ca	K	Cu	Mn	Ba	Zn	Sr	Co	Cr	Ni
Fe	1.00											
Mg	0.92	1.00										
Ca	-0.10	0.24	1.00									
K	0.01	0.33	0.95	1.00								
Cu	0.58	0.40	-0.21	-0.20	1.00							
Mn	0.54	0.54	0.00	0.03	0.23	1.00						
Ba	0.76	0.89	0.49	0.62	0.32	0.42	1.00					
Zn	0.16	0.45	0.92	0.96	-0.05	0.16	0.73	1.00				
Sr	-0.25	0.08	0.96	0.93	-0.30	-0.08	0.40	0.91	1.00			
Co	0.48	0.57	0.10	0.29	-0.24	0.37	0.56	0.27	0.08	1.00		
Cr	0.85	0.81	-0.11	-0.07	0.42	0.49	0.57	0.05	-0.26	0.41	1.00	
Ni	0.61	0.66	0.11	0.12	0.16	0.39	0.56	0.23	0.02	0.47	0.54	1

## 3 结论

通过对来自南极的苔藓剖面样品进行地球化学元素分析,可以得出以下结论:

(1) 苔藓对所生活的环境依赖性很强,苔藓剖面上,地球化学元素的分布具有很强的继承性;(2) 不同的地球化学元素在苔藓剖面上的分布特征不同,归结起来有 5 种:活跃易转移型元素, K、Ca、Zn; 难转移元素, Fe、Mg、Ba、Cr、Mn; 难转移但转移速率稳的元素, Cu; 易转移元素: Ni、Co; 稳定元素, Sr; (3) 根据元素的分布特征,发现元素 Ca 在苔藓体内,异常活跃,它极易被累积在苔藓体内, Zn 也是苔藓易吸收的元素;(4) 地球化学元素在老新苔藓中的转移能力不同:底层苔藓的元素转移能力很低,中层苔藓中元素维持在基本平衡的状态,上层苔藓中元素的转移系数较大;(5) 从统计关系上发现,元素 Fe、Mg、Ba、Cr 之间, Ca、K、Zn、Sr 之间存在明显的协同作用,在 12 种元素中,没有发现存在拮抗作用的元素对。

## 参考文献

- [1] 李永良,周云龙,张正旺,等. 南极乔治王岛三种地衣体元素组成及其分布的测定分析. 极地研究, 1999, 11(1):69~73.
- [2] 胡人亮编著. 苔藓植物学. 北京:高等教育出版社,1987. 1:433~439.
- [3] 沈 静,徐汝梅,周国法,等. 南极菲尔德斯半岛陆地、淡水、潮间带、浅海各生态系统的结构及其相互关系的研究. 极地研究,1999, 11(2):100~112.
- [4] 陈阜东,李学东,神田启史,等. 南极长城站及附近岛屿的苔藓植物考察研究. 南极研究,1993, 5(1):46~49.
- [5] 胡舜土. 南极洲植物概况与研究展望. 植物学报, 1993, 35(11):868~876.
- [6] 吴鹏程主编. 苔藓植物生物学. 北京:科学出版社,1998. 104:258~259.
- [7] Brown D H. Mineral nutrition. In: Smith, A. J. E. ed. *Bryophyte Ecology*. London: Chapman & Hall, 1982. 383~444.
- [8] 赵俊琳. 南极长城站地区现代环境地球化学特征与自然环境演变. 北京:科学出版社,1991. 37.