

青藏高原不同草地类型苔藓植物化学元素特征

金艳霞^{1,2}, 周华坤¹, 赵新全¹, 陈哲^{1,2}, 姚步青¹, 付京晶^{1,2}, 温军^{1,2*}, 李天才¹

(1. 中国科学院西北高原生物研究所, 青海 西宁 810001; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:为探讨青藏高原地区苔藓植物对重金属元素的积累状况,在海拔站和三江源站的灌丛及草甸采集苔藓植物样品,利用原子吸收光谱仪法(AAS)测定了这些苔藓植物体内 19 种化学元素的含量。结果表明:青藏高原海北和果洛的苔藓植物体内重金属元素 Hg, Cd, Zn 和 Cr 的含量不仅高于国内的贡嘎山原始森林地带,也高于国外的意大利、芬兰、挪威等地区;海北的沼泽化草甸和金露梅(*Potentilla fruticosa*)灌丛草甸,以及果洛的嵩草(*Kobresia humilis*)草甸和金露梅灌丛草甸的苔藓植物中化学元素的积累有明显差异。如除了 K 元素外,Ca 和 Mg 元素在海北草甸苔藓体内的含量略高于果洛草甸。此外,苔藓植物体内 Cd-Co, Cd-Ni, Cu-Se 等元素间存在显著正相关关系。

关键词:苔藓植物;青藏高原;草甸;化学元素含量

中图分类号:Q949.35;X171

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2013)01-0065-08

Chemical Element Characteristics of Moss from Different Alpine Meadows of Qinghai-Tibet Plateau

JIN Yan-xia^{1,2}, ZHOU Hua-kun¹, ZHAO Xin-quan¹, CHEN Zhe^{1,2},

YAO Bu-qing¹, FU Jing-jing^{1,2}, WEN Jun^{1,2*}, LI Tian-cai¹

(1. Northwest Plateau Institute of Biology, Chinese Academy of Science, Xining, Qinghai Province 810001, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In this study, moss samples were collected from the shrubs and meadows of Haibei station and 'Three-River Headwaters' station to explore moss accumulation capacity of heavy metals on Qinghai-Tibet Plateau. Nineteen elements in these moss samples were analyzed by means of the Atomic Absorption Spectrometry. Results of statistical analysis showed that the enrichment concentration of heavy metal elements such as Hg, Cd, Zn, Cr was higher than samples from Gongga mountain forests, especially higher than samples from similar areas of Italy, Finland, and Norway. The enrichment concentration of chemical elements had significant difference between alpine meadow of *Potentilla fruticosa* in Haibei and *Kobresia humilis* in Guoluo. In addition, these results also showed that there were significant positive correlations between Cd and Co, Cd and Ni, Cu and Se in tested moss samples.

Key word: Mosses; Qinghai-Tibet Plateau; Alpine meadow; Chemical element concentration

重金属污染已成为国际问题。近年来,重金属污染事件在国内外都频频发生,如最近广西柳州的镉污染、2010 年湖南儿童血铅超标及日本汞污染引发水俣病等。工矿企业排放的污水、烟尘;农药和化肥;化妆品、玩具等中都含有重金属。这使得重金属在人们的生活中无处不在,并严重威胁着人类的健康。

环境监测重金属污染的一般方法存在时空代表性差,不能反映监测前后污染物的变化情况,也不能反映综合污染情况的劣势。利用生物学监测可以克

服这些缺点,因为生物与环境相互依存,相互制约,生物长期生活在环境中,受环境各种因素的综合作用,生物的生活周期长,环境污染和环境破坏必然作用于生物体,能贮存整个生活时期内环境因素变化的各种信息。例如:生物个体数量和群落的变化,生物的结构和生理的变化,宏观和微观受害症状的观察,能综合反映大气污染对生态系统的影响强度,能较早地发现大气污染,能检测出不同的大气污染物,能反映一个地区的污染历史^[1]。

收稿日期:2012-08-15;修回日期:2012-10-30

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)课题(2009CB421102);国家自然科学基金项目(41030105)(31172247);中科院战略性先导科技专项子课题(XDA05070202);国家科技支撑课题专题(2011BAC09B06-02)资助

作者简介:金艳霞(1986-),女,甘肃定西人,硕士研究生,主要从事高寒草地生态学研究,E-mail:jinyanx526@163.com; * 通信作者 Author for correspondence, E-mail:qzhzhk1974@yahoo.com.cn

苔藓植物结构相对简单,能在高寒、高温、干旱和弱光等其他陆生植物难以生存的环境中生长繁衍。它没有真正的根和维管组织,表面积较大,对环境因子的反应敏感度是种子植物的 10 倍,因此是一类良好的生物指示植物,被世界各国广泛应用为环境变化的指示物^[2]。苔藓植物体表面有数量庞大的阳离子交换位点,主要通过吸收降尘和降水中的矿物元素作为营养物质^[3]。苔藓植物具有很强的从养分含量极低的环境中吸收并累积养分的能力,因此比其他植物更容易积累金属^[4]。

利用苔藓植物监测大气沉降重金属污染源于瑞典。1968 年,瑞典的 Rühling 和 Tyler^[5] 首先利用一种林地常见的塔藓(*Hylocomium splendens*)来监测挪威的纳维亚半岛的大气重金属沉降,并通过对苔藓体内重金属元素的分析,绘制了可反映芬兰、挪威、瑞典等国大气沉降中的 Cu, Hg, Fe, Cd, Ni, Pb, Zn 等重金属元素污染的区域性分布图。此后,该方法广泛应用于欧洲以及其他国家的大气沉降重金属污染研究^[5~8]。在国内,苔藓植物用于大气重金属污染的研究起步较晚,技术还不够成熟。近年来,苔藓植物监测重金属污染主要在国内的一些城市地区开展,如上海^[9-10]、抚顺^[11]、鞍山^[12]、金华^[13]等。还有些研究涉及原始森林以及采矿地区^[14-17];然而,青藏高原地区目前还没有以苔藓为监测材料的重金属调查。由于青藏高原和南极、中心北极一样占据冰冻圈的典型地理位置,具监测寒区和全球环境的突出优势^[18]。并且秦大河等^[18]科学家的研究表明,青藏高原地区 Pb 和 Cd 的来源并不是以自然来源为主。这一现象在青藏高原的南部和北部较突出。因此,在青藏高原地区调查苔藓植物体内化学元素的含量,特别是重金属的含量对于理解该地区重金属的现状和污染情况具有重要的科学理论价值。本研究主要测定了中科院海北高寒草甸生态系统定位站(简称海北站)的藏嵩草(*Kobresia tibetica*)沼泽化草甸、海北金露梅(*Potentilla fruticosa*)灌丛草甸,中科院西北高原生物研究所三江源草地生态系统观测研究站(简称三江源站)的果洛嵩草草甸、果洛金露梅灌丛草甸,共 4 种不同草地类型中苔藓植物体内 19 种重金属元素和微量金属元素的含量,试图了解其分布特征和规律,并对其现状进行评价。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

1.1.1 海北站 海北站地处青藏高原东北隅的青海

省海北藏族自治州门源回族自治县境内祁连山北支冷龙岭东段南麓坡地的大通河河谷西段,地理位置为 N 37°29′~37°45′, E 101°12′~101°23′,海拔 3200 m 左右,具有典型的高原大陆性气候特征,冷季漫长而寒冷,暖季短暂而湿润,年均温 -1.7℃,最冷月(1 月)均温 -17.4℃,最热月(7 月)均温 9.6℃,绝对最高温低于 25℃,绝对最低温为 -37℃。年降水量为 618 mm,主要集中于 6—8 月,占全年降水量的 80%左右。高寒草甸是该地区主要的植被类型之一,主要分布于山地阴坡、山麓洪积扇以及河流两岸低阶地,原生植物群落以矮嵩草(*K. humilis*)、金露梅、珠芽蓼(*Polygonum viviparum*)、紫羊茅(*Festuca rubra*)、线叶嵩草(*K. capillifolia*)、美丽风毛菊(*Saussurea superba*)、高山唐松草(*Thalictrum alpinum*)、纤弱银莲花(*Anemone demissa*)等为优势种,植物盖度 70%~80%,地表具有较厚的苔藓层和枯枝落叶层。灌丛内植被以多年生草本植物为主,植被盖度 40%~60%;部分地段优良牧草消失,鼠类活动增加,在风、水蚀作用下退化形成了次生裸地。灌丛、草地和裸地在该区的分布比例大致为 5:4:1;土壤为高山灌丛土,有机质丰富,呈中性反应。为地区夏季牧场^[19]。

1.1.2 三江源站 三江源站所用的苔藓植物采自青海省果洛州玛沁县境内的军牧场地区,地理位置为 N 34°20′~34°22′, E 100°29′~100°30′,平均海拔 4120 m,范围 3800~4800 m。该地区为典型的高原大陆性气候特点,无四季之分,仅有冷暖季之别,冷季漫长、干燥而寒冷,暖季短暂、湿润而凉爽。温度年差较小而日差悬殊,太阳辐射强烈。日照充足,日照时数平均在 2500 h 以上,年总辐射量 623.8~629.9 kJ·cm⁻²。冷季持续时间长达 7~8 个月,且风大雪多;暖季湿润,长 4~5 个月。平均气温在 0℃以下,全年无绝对无霜期。年降水量 420~560 mm,多集中在 5—10 月。土壤为高山草甸土和高山灌丛草甸土,土壤表层有机质含量丰富。矮嵩草草甸为该地区主要的冬春草地。建群种为矮嵩草,主要伴生种有:小嵩草(*K. pygmaea*)、二柱头蕨草(*Scirpus distigmaticus*)、垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、早熟禾(*Poa* spp.)、异针茅(*Stipa alliena*)、短穗兔耳草(*Lagotis brachystachya*)、矮火绒草(*Leontopodium nanum*)、细叶亚菊(*Ajania tenuifolia*)、兰石草(*Lancea tibetica*)、美丽风毛菊和甘肃马先蒿(*Pedicularis kansuensis*)等^[20]。

1.2 材料和方法

1.2.1 样品的采集 苔藓样品采自海北站海北沼

泽化草甸、海北灌丛草甸、三江源站果洛典型草甸、果洛灌丛草甸 4 个不同的高寒草地类型。每种草地类型取了 10 个点采集苔藓植物样品,样品采完后混匀测定 1 次重金属含量,作为该草地类型的重金属含量。

1.2.2 样品的处理 苔藓植物样品用水清洗,洗去苔藓植物上的颗粒物。再用去离子水冲洗 2~3 次。将冲洗好的样品放入干燥箱,在 60~80℃ 条件下干燥 8~10 h 至恒重。烘干后的样品研磨过筛(尼龙筛)。处理完的样品置于小样品袋中密封保存备用。准确称取预处理后的苔藓植物样品 1.0000 g,用 1:4 优级纯 HClO₄ 和 HNO₃ 混合溶液浸泡 48 h,再进行加热消化至灰白色沉淀物出现后,在通风橱内进行过滤,并将滤液在调温电热板上烘干至呈白色粉末状,加 2 次蒸馏水溶解,定容于 25 mL 容量瓶。

1.2.3 样品的分析 采用原子吸收光谱仪(atomic absorption spectrometry, AAS)、用标准曲线法分别测定苔藓植物样品中 As, Hg, Pb, Cd, Cu, Zn, Fe, Mn, Co, Ni, Cr 等 19 种化学元素的含量。其中 As, Hg 和 Pb 等重金属元素采用在线流动注射氢化法, Cd 采用石墨炉法,其余采用火焰原子吸收法测定。所用仪器为 TAB-986 原子吸收分光光度计(北京普析通用仪器有限责任公司), WHG-103A 流动注射氢化物发生器(北京瀚时制作所), GFH-986 石墨炉电源(北京普析通用仪器有限责任公司)。

1.3 数据处理

试验数据采用 Excel 2007 对苔藓植物体内化学元素的含量做柱状图。使用 SAS 9.2 统计软件对苔藓植物体内的化学元素含量做描述性统计以及 Pearson 相关性分析。

2 结果与分析

2.1 苔藓植物体内化学元素的分布特征

测定的海北沼泽化草甸、海北灌丛草甸、果洛典型草甸、果洛灌丛草甸等采样点苔藓植物体内化学元素的含量范围如表 1 所示。

依据吴虹明等^[21]对苔藓体内化学元素进行分类所给的最大监测含量范围,将所测定的苔藓植物体内的 19 种化学元素进行分类:4 种主要累积元素或主量元素:K, Ca, Mg, P(最大检测含量一般在 1000 μg·g⁻¹ 以上),5 种累积常量元素:Zn, Fe, Mn, Na, Sr(最大检测含量一般在 100~1000 μg·g⁻¹),7 种累积微量元素: Cd, Cu, Co, Ni, Cr, Se,

表 1 苔藓植物体内 19 种化学元素的含量

Table 1 Concentrations of 19 chemical elements in mosses

元素	含量	元素	含量
Elements	Concentration/μg·g ⁻¹	Elements	Concentration/μg·g ⁻¹
As	0.2985~0.6667	Cr	32.79~37.8
Hg	0.2865~0.3686	Se	1.446~2.486
Pb	0.5562~0.8440	K	652.7~1518
Cd	0.8502~2.635	Na	109.5~159.7
Cu	7.966~10.9	Ca	2594~3796
Zn	184.9~234.8	Mg	1681~2456
Fe	687.2~918.5	P	6323~14602
Mn	80.88~261.5	Li	7.648~8.174
Co	3.868~11.71	Sr	65.25~102.8
Ni	7.294~18.17		

Li(最大检测含量一般在 1~100 μg·g⁻¹),3 种痕量元素:As, Hg, Pb(最大检测含量一般在 1 μg·g⁻¹)。本研究得出的分类结果与吴虹明等^[21]的存在很大差异性:① Zn, Fe, Mn, Na 这 4 种元素在后者的分类中属于第 2 类,相当于青藏高原地区苔藓植物体内这几种元素的含量与一些研究地区的结果相差了 10 倍;而 K, Ca, Mg, P 这 4 种元素的分类具有一致性,主要是因为和其他高等植物一样,这 4 种元素是苔藓植物体内必需的营养元素;Sr 元素在 2 类分类中都属于累积常量元素,因此这种元素在青藏高原苔藓植物体内的含量与其他地区的差异很小。② Cr, Cu, Ni 这 3 种元素在青藏高原地区苔藓植物体内的含量属于是累积微量元素,在欧洲一些国家则属于累积常量元素。这种差异存在的原因可能是青藏高原地区土壤基质中这几种元素的背景值本身较低,或青藏高原地区这几种重金属元素在苔藓植物体内的含量是正常积累的结果,而欧洲一些国家的苔藓植物对这几种元素的积累是富集作用的结果。③ Hg 元素的分类结果表明,青藏高原地区与欧洲一些国家苔藓植物体内 Hg 的含量相差 10 倍左右。④ 在分类结果中差异最明显的是 As 和 Pb 这 2 种元素,其在青藏高原地区和欧洲一些国家苔藓植物体内的含量相差了 100 倍。可能是因为欧洲一些国家存在 As 和 Pb 污染的问题。相比较而言,在青藏高原地区除了苔藓植物必需的营养元素 K, Ca, Mg 和 P 外,其他 15 种元素在苔藓植物体内的含量都在 1000 μg·g⁻¹ 以下。由于苔藓植物体内化学元素含量的差异受到很多因素如空间、时间、苔藓种类、元素种类、海拔、生态系统类型等的影响^[21]。因此,该比较结果并不能完全说明青藏高原地区苔藓植物体内化学元素含量都是正常积累的结果。

由表 2 可知,As, Hg, Cr 这 3 种重金属元素在

青藏高原地区苔藓植物体内的含量比其他地区苔藓植物体内的要高。贡嘎山地处青藏高原向四川盆地的过度地带,与本研究在地理位置上具有相似性。相比较而言,青藏高原地区的 Hg, Cd, Cu, Zn, Fe, Mn, Ni, Cr 等元素在苔藓植物体内的含量均较贡嘎山地区高。说明与贡嘎山地区相比,青藏高原的海北和果洛地区可能受到上述几种重金属元素的污

染。与国内的城市如上海和浙江金华等地区相比较而言,青藏高原苔藓植物体内重金属元素 Pb, Cu, Zn 等的含量相对较低。青藏高原地区苔藓植物体内 As, Hg, Cd, Zn, Ni, Cr 等重金属元素的含量比国外其他一些地区的含量高。表明青藏高原的海北和果洛地区存在不同程度重金属污染问题。

由表 3 可知,虽然青藏高原地区 As, Hg, Cd,

表 2 世界上其他地区苔藓植物体内化学元素的含量

Table 2 Concentration of chemical elements in the mosses from other different regions

$\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$

地区 Region	As	Hg	Pb	Cd	Cu	Zn	Fe	Mn	Co	文献 Reference
青海 Qinghai	0.5215	0.3288	0.6918	1.4408	9.2953	214.72	768.77	161.92	6.489	本研究 This study
四川 Sichuan					38.18	51.97	2570	409		[22]
上海 Shanghai			47.259	0.913	34.213	432.83				[10]
贡嘎山 Gongga Mountain		0.09	1.78	0.11	0.32	3.99	33.20	3.19		[14]
浙江 Zhejiang			42.89	8.42	27.96	242	1135	155.5		[13]
意大利 Italy	0.28	0.11	12.4	0.35	13.5	68.8	280	68		[23]
加拿大 Canada	0.40			0.13	5.55	23	3059		1.62	[24]
挪威 Norway	0.36		14	0.19	7.1	42	640	350	0.39	[25]
葡萄牙 Portugal			21.77	0.79	9.10	52.48	1934.2	187.51		[26]
芬兰 Finland	0.19	0.048	3.37	0.12	3.96	28.8	259			[27]
匈牙利 Hungary			19.5	0.9	11.8	52	2070			[28]

地区 Region	Ni	Cr	Se	K	Na	Ca	Mg	P	Li	Sr	文献 Reference
青海 Qinghai	11.352	35.983	1.8433	1062	127.93	3222	1978	10186	7.9433	84.63	本研究 This study
四川 Sichuan	18.54	10.05		4547	142	13088	2747				[22]
上海 Shanghai		4.048									[10]
贡嘎山 Gongga Mountain	0.22	0.22									[14]
浙江 Zhejiang		15.97		6699		7136	1225				[13]
意大利 Italy	9.63	5.01									[23]
加拿大 Canada	4.90	4.8	0.09	4252	1475.3	9203			2.29	42.08	[24]
挪威 Norway	3.4	1.2			150	3100	1300		0.27	14	[25]
葡萄牙 Portugal	13.54	3.86									[26]
芬兰 Finland	1.83	1.25									[27]
匈牙利 Hungary	5.0	2.8									[28]

Cu 等 19 种化学元素(除了 P 和 Pb 元素)在苔藓植物体内含量的最小值均高于土壤元素背景值的最小值。但有一些元素,如 Pb, Cu, Mn, Co, Ni, Cr, Li, Sr 等在青藏高原地区苔藓植物体内含量的平均值要低于土壤背景值的平均值。Hg, Cd 和 Zn 元素在苔藓植物体内的平均含量要明显高于土壤元素背景值。青藏高原苔藓植物体内一些重金属元素,如 Hg, Cd 和 Zn 等元素的平均含量较土壤背景值高。而苔藓植物体内另外一些重金属元素,如 Pb, Cu, Mn, Ni, Cr 等元素的含量比土壤元素的背景值低。

2.2 不同草地类型中苔藓种植物体内 4 类元素含量的分析

海北草甸、海北灌丛、果洛草甸、果洛灌丛苔藓植物体内化学元素含量分为 4 类后比较各类化学元

素间的差异性。图 1~图 4 所示分别是 4 种不同类型草地中苔藓植物体内主量元素、累积常量元素、累积微量元素及痕量元素的含量。

由图 1 可知,海北草甸、海北灌丛、果洛草甸和果洛灌丛中苔藓植物体内主量元素的含量有很大差异。P 元素在不同草地类型苔藓植物体内的含量均较高。谢锦升等^[30]的研究也表明苔藓在群落的 P 贮量中居重要位置。K, Ca 和 Mg 元素在 4 个采样点的差异不明显。除了 K 元素外, Ca 和 Mg 元素在海北草甸苔藓体内的含量略高于果洛草甸。而 P 元素在海北草甸苔藓体内的含量明显高于果洛草甸。海北灌丛和果洛灌丛苔藓植物体内 4 种主量元素的贮存量排序均为 $P > Ca > Mg > K$ 。

由图 2 可知,在海北草甸、海北灌丛、果洛草甸、果洛灌丛地区苔藓植物体内累积常量元素中 Fe 含

量明显高于 Zn, Mn, Na, Sr 含量。Zn, Na 和 Sr 在这 4 种草地类型苔藓植物体内的含量差异不明显。除了 Mn 元素外,其他 4 种累积常量元素在海北草甸苔藓植物体内的含量均高于果洛草甸苔藓植物体内的含量。而海北灌丛苔藓植物体内累积常量元素

Zn, Fe 和 Mn 的含量高于果洛灌丛苔藓植物体内这几种元素的含量。这一结果表明不同的苔藓种类对同一种累积常量元素,如 Mn 元素的积累能力存在差异。

由图 3 可知,累积微量元素 Cr 在 4 类草地类型

表 3 全国土壤(A层)元素背景值与青藏高原地区苔藓植物体内化学元素的含量

Table 3 Background value of elements in the soil (A layer) of our country and concentration of chemical elements in mosses of Qinghai-Tibet Plateau

元素 Elements	土壤(A层)元素背景值 Background value of elements in A soil layer			本研究中 In this study		
	最小值 Minimum	平均值 Mean	标准差 Standard deviation	最小值 Minimum	平均值 Mean	标准差 Standard deviation
	$\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$					
As	0.01	11.2	7.86	0.2985	0.5215	0.1769
Hg	0.001	0.065	0.080	0.2865	0.3288	0.0420
Pb	0.68	26.0	12.37	0.5562	0.6918	0.1423
Cd	0.001	0.097	0.079	0.8502	1.4408	0.8131
Cu	0.33	22.6	11.41	7.966	9.2953	1.3372
Zn	2.60	74.2	32.78	184.9	214.725	21.6240
Fe	0.12	2.94	0.948	687.2	768.775	102.3576
Mn	1	583	362.8	80.88	161.92	77.5773
Co	0.01	12.7	6.40	3.868	6.489	3.5365
Ni	0.06	26.9	14.36	7.294	11.3515	4.7482
Cr	2.20	61.0	31.07	32.79	35.9825	2.2115
Se	0.006	0.290	0.255	1.446	1.8433	0.4702
K	0.03	1.86	0.463	652.7	1062	354.6529
Na	0.01	1.02	0.626	109.5	127.925	21.9123
Ca	0.01	1.54	1.633	2594	3222	512.3699
Mg	0.02	0.78	0.433	1681	1978	339.8024
P	—	—	—	6323	10186	4084
Li	2.00	32.5	15.48	7.648	7.9433	0.2279
Sr	6	167	147.6	65.25	84.63	16.9950

注:全国土壤(A层)元素背景值引自文献[29],“—”表示无数据,其中 K, Na, Ca, Mg, Fe 为百分含量。在全国土壤元素背景值的调查中,土壤剖面分为 A, B, C 三层, A 层表示 0~10 cm 的土层[29]

Note: The background value of elements in the soil (A layer) cited reference [29], “—” indicates no data. Concentration of elements like K, Na, Ca, Mg, Fe is showed by percentage. The soil profile is divided into A, B, C layers during the survey of national background value of elements in the soil. A layer means 0~10 cm soil thickness

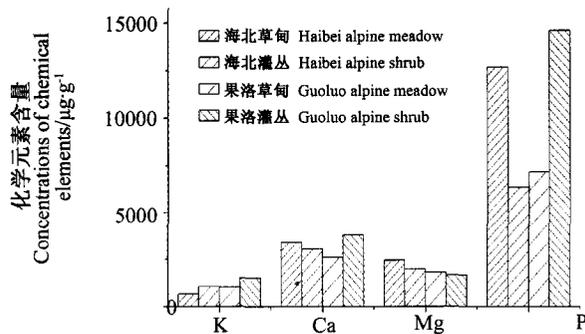


图 1 不同草地类型中苔藓植物体内主量元素的含量

Fig. 1 Concentration of major elements in mosses of different alpine meadows

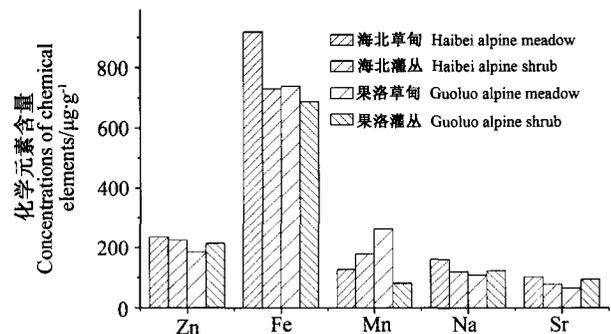


图 2 不同草地类型中苔藓植物体内累积常量元素的含量

Fig. 2 Concentration of cumulative micro-elements in mosses of different alpine meadows

苔藓植物体内的含量明显高于其他 6 种。累积微量元素 Li 和 Cu 在 4 类草地类型苔藓植物体内的含量基本相同。累积微量元素 Co 和 Ni 在果洛灌丛苔

藓体内的含量明显高于其他 3 类草地类型。在海北草甸、海北灌丛、果洛草甸、果洛灌丛的苔藓植物体内累积微量元素 Cd 和 Se 的含量均较低。累积微

量元素 Cu 和 Se 在海北草甸苔藓植物体内的含量均较果洛草甸苔藓植物体内的含量低。而海北灌丛苔藓植物体内累积微量元素 Cu, Se, Li 的含量均高于果洛灌丛苔藓植物体内的含量。

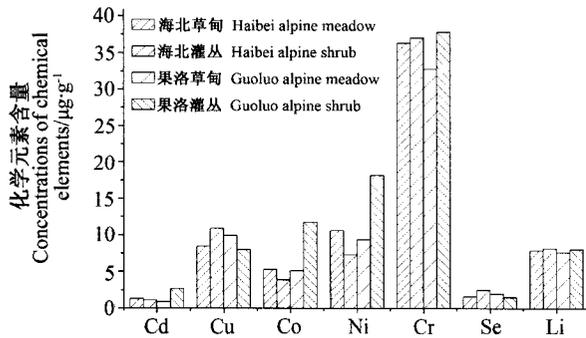


图 3 不同草地类型中苔藓植物体内累积微量元素的含量
Fig. 3 Concentration of cumulative micro-elements in mosses of different alpine meadows

由图 4 可知,痕量元素 Pb 和 Hg 在海北草甸和海北灌丛苔藓植物体内的含量较高,而痕量元素 As 在果洛草甸和果洛灌丛地带苔藓植物体内含量较高。痕量元素 Hg 在 4 类草地类型苔藓中含量的差异不明显。

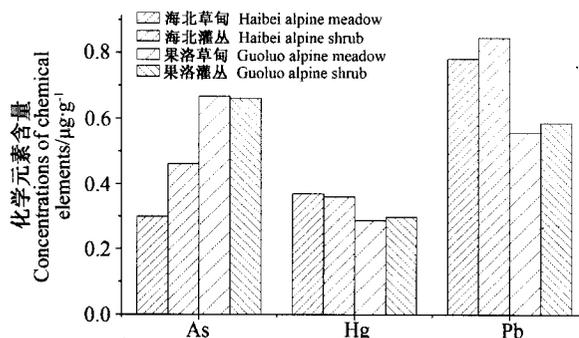


图 4 不同草地类型中苔藓植物体内累积痕量元素的含量
Fig. 4 Concentration of trace elements in mosses of different alpine meadows

总的来看,4 种草地类型中苔藓植物对主量元素 P 及重金属元素 Fe, Cr, As, Pb 的富集能力较强,这进一步说明苔藓植物无角质层、细胞数少的特点使其更容易富集重金属离子。苔藓对化学元素的积累不仅受到自身结构、生理特征影响,还与其生长基质、气候、海拔等有关^[31]。海北灌丛与果洛灌丛、海北草甸与果洛草甸的苔藓对化学元素积累存在差异性的主要原因是海北和果洛的气候以及地理环境有很大差异。且海北的草地处于未退化的状态,而果洛草地出现了不同程度的退化,这使得海北和果洛

分布的苔藓植物种类有很大差异。

2.3 苔藓植物体内 4 类元素的相关性分析

植物体中不同元素之间由于拮抗或协同作用而有相互促进或降低吸收量的可能,通过相关分析可大体反映出元素之间是否存在这种关系。若 2 元素之间成显著或极显著正相关,表明存在协同作用;若成显著或极显著负相关,则表明有拮抗作用^[32]。因此,分析苔藓植物体内元素间的相关性,可以了解苔藓植物对元素的吸收积累特性^[33]。表 4~表 7 所示为 4 种不同草地类型中苔藓植物体内主量元素间、累积常量元素间、累积微量元素间以及痕量元素间的 Pearson 相关分析。主量元素 K, Ca, Mg, P 的相关性分析结果如表 4 所示,它们之间的相关性均没有达到显著水平,说明苔藓植物对 K, Ca, Mg, P 的吸收是相互独立的。

表 4 苔藓植物体内主量元素间的 Pearson 相关分析

Table 4 Pearson correlation analysis of major elements in the mosses

元素 Elements	K	Ca	Mg	P
K	1.0000			
Ca	0.3786	1.0000		
Mg	-0.8952	0.0694	1.0000	
P	0.2625	0.8829	0.1088	1.0000

由表 5 可知,苔藓植物体内累积常量元素中 Mn 与 Zn, Fe, Na, Sr 元素之间存在负相关关系,但其相关性不显著。说明苔藓植物体内 Mn 的存在可能会抑制苔藓植物对 Zn, Fe, Na, Sr 的吸收,而 Zn, Fe, Na, Sr 之间则是正相关关系,相关性也不显著。

表 5 苔藓植物体内累积常量元素间的 Pearson 相关分析

Table 5 Pearson correlation analysis of cumulative macro-elements in the mosses

元素 Elements	Zn	Fe	Mn	Na	Sr
Zn	1.0000				
Fe	0.5348	1.0000			
Mn	-0.6852	-0.0991	1.0000		
Na	0.7813	0.9008	-0.5189	1.0000	
Sr	0.7696	0.5439	-0.8839	0.8459	1.0000

由表 6 可知,累积微量元素中 Cd 与 Co, Cd 与 Ni 以及 Cu 与 Se 之间均具有正相关关系,且相关性达到了显著水平($P < 0.05$),而 Co 与 Li 则具有极显著正相关关系($P < 0.01$)。结果表明,苔藓植物内的累积微量元素中 Cd, Cu 与 Co, Ni, Se 之间存在协同作用,同时 Co 与 Li 之间也存在协同作

用。这说明苔藓植物对 Cd 的吸收会促进其对 Co 和 Ni 的吸收,对 Cu 的吸收会促进其对 Se 的吸收。

而且,苔藓植物对 Co 的吸收会增加其对 Li 的吸收量。

表 6 苔藓植物体内累积微量元素间的 Pearson 相关分析

Table 6 Pearson correlation analysis of cumulative micro-elements in the mosses

元素 Elements	Cd	Cu	Co	Ni	Cr	Se	Li
Cd	1.0000						
Cu	-0.7457	1.0000					
Co	0.9701*	-0.7680	1.0000				
Ni	0.9646*	-0.8462	0.9911**	1.0000			
Cr	0.6604	-0.3222	0.4589	0.4598	1.0000		
Se	-0.6260	0.9759*	-0.6948	-0.778	-0.1081	1.0000	
Li	0.4016	0.1028	0.1885	0.1469	0.9057	0.3173	1.0000

注:*表示在0.05水平下显著相关;**表示在0.01水平下极显著相关;下同

Note: * indicates significant correlation at the 0.05 level, ** indicates significant correlation at the 0.01 level, the same as below

由表 7 可知,痕量元素 As 与 Hg 和 As 与 Pb 之间是负相关关系。且痕量元素 As 与 Hg 之间的负相关性达到显著水平($P < 0.05$)。Hg 与 Pb 元素之间则具有显著的正相关关系($P < 0.05$)。结果表明,痕量元素 Hg 与 Pb 之间存在协同作用。即苔藓植物对痕量元素 Hg 的吸收会促进对 Pb 的吸收,这一研究结果与刘荣相和张朝晖^[17]的研究结果一致。而痕量元素 Hg 与 As 之间存在拮抗作用,即苔藓植物对 Hg 的吸收会降低其对 As 的吸收量。

表 7 苔藓植物体内痕量元素间的 Pearson 相关分析

Table 7 Pearson correlation analysis of trace elements in the mosses

元素 Elements	As	Hg	Pb
As	1.0000		
Hg	-0.9544*	1.0000	
Pb	-0.8429	0.9629*	1.0000

3 讨论与结论

通过将苔藓植物的 19 种化学元素分为 4 类进行比较和相关分析发现,青藏高原海北和果洛地区苔藓植物对化学元素的积累与国内外的一些地区有明显不同。特别是累积微量元素 Cr 与痕量元素 As, Hg, Pb, 同时这几种元素也是典型的重金属元素。因此,有必要对这 2 个地区苔藓植物体内的累积微量元素 Cr 与痕量元素 As, Hg, Pb 做进一步调查。如痕量元素 Pb 在青藏高原地区苔藓植物体内的平均含量($0.6918 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$),不仅低于大都市如上海($47.259 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$),也低于土壤元素的背景值($26.0 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$),说明青藏高原海北和果洛地区还

没有受到重金属 Pb 的污染,这与该地区没有重工业以及交通不发达有密切的关系。而痕量元素 As 在海北和果洛地区苔藓植物体内的平均含量($0.5215 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)低于土壤元素的背景值($11.2 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$),但高于国外的一些地区,如意大利($0.28 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)、加拿大($0.40 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)、芬兰($0.19 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)。痕量元素 Hg 在海北和果洛地区苔藓植物体内的含量($0.3288 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)不仅高于土壤元素背景值($0.065 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$),也高于贡嘎原始森林($0.11 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)以及意大利($0.28 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)、芬兰($0.048 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)。表明海北和果洛地区受到痕量元素 Hg 的污染,由于 Hg 具有挥发性,2 个地区 Hg 的主要来源应是大气沉降。累积微量元素 Cr 的含量低于土壤环境的背景值,但是高于国内外的一些地区。

相关分析结果也表明,苔藓植物对痕量元素 Hg 的吸收会增加对痕量元素 Pb 的吸收量。而苔藓植物对痕量元素 Hg 的吸收会降低对痕量元素 As 的吸收。苔藓植物对累积微量元素 Cr 的吸收则是相对独立的,不受对其他元素吸收的影响。此外,苔藓植物对主量元素及累积常量元素的吸收都不受该类元素中其他元素的影响。

利用苔藓植物监测重金属的污染在国外已经发展的很成熟,有系统的研究方法和技术标准,在国内的发展还存在很多不足^[33-34]。通过对苔藓植物的分布和生长状况进行定期的调查,可以获得某一地区重金属以及其他污染物低浓度、大范围、长时期的污染综合效应和积累危害的资料^[11]。特别是在青藏高原地区,由于受到人类干扰较小,苔藓的分布范围广。利用苔藓植物监测重金属及其他污染物的状况是最经济有效的手段;同时也能填补青藏高原地区

苔藓植物调查和保护的空白。

参考文献

- [1] 奚旦立,孙裕生,刘秀英. 环境监测[M]. 北京:高等教育出版社,2004:305-309
- [2] Cameron A J, Nickless G. Use of mosses as collectors of airborne heavy metals near a smelting complex[J]. *Water Air Soil Pollution*,1977,7(1):117-125
- [3] Rühling Å, Tyler G. Sorption and retention of heavy metals in the woodland moss *Hylocomium splendens* (Hedw.) Br. Et Sch[J]. *Oikos*,1970,21(1):92-97
- [4] Fernández J A, Rey A, Carballeira A. An extended study of heavy metal deposition in Galicia (NW Spain) based on moss analysis [J]. *The Science of the Total Environment*,2000,254(1):31-44
- [5] Rühling Å, Tyler G. An ecological approach to the lead problem[J]. *Botaniska Notiser*,1968,121(3):246-342
- [6] Fernández J A, Carballeira A. Biomonitoring of metal deposition in northern Spain by moss analysis[J]. *The Science of the Total Environment*,2002,300(1/3):115-127
- [7] Maurizio Aceto, Ornella Abollino, Raffaele Conca, *et al.* The use of mosses as environmental metal pollution indicators[J]. *Chemosphere*,2003,50(3):333-342
- [8] Herpin U, Siewers U, Lieth H, *et al.* The distribution of heavy metals in a transect of the three states the Netherlands, Germany and Poland, determined with the aid of moss monitoring[J]. *The Science of the Total Environment*,1996,187(3):185-198
- [9] 安丽,曹同,俞鹰浩. 上海市小羽藓属植物重金属含量及其与环境的关系[J]. *应用生态学报*,2006,17(8):1490-1494
- [10] 安丽,曹同,俞鹰浩. 不同苔藓植物对重金属富集能力的比较[J]. *上海师范大学学报:自然科学版*,2006,35(6):64-70
- [11] 曹同,谢维,韩桂春,等. 苔藓植物对抚顺地区大气污染的指示作用研究[J]. *生态学杂志*,1999,18(3):1-5
- [12] 曹同,路勇,吴玉环,等. 苔藓植物对鞍山市环境污染生物指示的研究[J]. *应用生态学报*,1998,9(6):635-639
- [13] 黄朝表,郭水良,李斌海. 浙江金华市郊苔藓植物体内重金属离子含量测定与分析[J]. *上海交通大学学报:农业科学版*,2004,22(3):231-236
- [14] 梁鹏,杨永奎,何磊,等. 贡嘎山原始森林区苔藓植物重金属含量及其对汞的吸附特征[J]. *应用生态学报*,2008,19(6):1191-1196
- [15] 汪文云,张朝晖. 老万场金矿藓类重金属富集特性及其生态修复潜力研究[J]. *金属矿山*,2008(9):134-139
- [16] 江洪,张朝晖. 贵州晴隆老万场红土型金矿三种藓类植物及其土壤基质的重金属元素测定及相关性分析[J]. *广西植物*,2007,27(4):610-615
- [17] 刘荣相,张朝晖. 贵州东南部喀斯特汞金矿带苔藓植物及其重金属富集特征[J]. *中国岩溶*,2010,29(1):41-47
- [18] 效存德,秦大河,姚檀栋,等. 南、北极和青藏高原现代降水中 Pb,Cd 反映的全球大气污染[J]. *科学通报*,1999,44(23):2558-2563
- [19] 李东,曹广民,吴琴,等. 海北高寒灌丛草甸生态系统 CO₂ 释放速率的季节变化规律[J]. *草业科学*,2005,22(5):4-9
- [20] 柯君,王慧春,周华坤,等. 三江源区高寒草甸 43 种植物繁殖体质量比较[J]. *草业科学*,2010,27(3):15-20
- [21] 吴虹明,包维楷,王安. 苔藓植物的化学元素含量及其特点[J]. *生态学杂志*,2005,24(1):58-64
- [22] 吴虹明,包维楷,王安,等. 微波消解、ICP-AES 法测定苔藓植物中化学元素[J]. *中国环境科学*,2004,24(5):565-567
- [23] Genoni P, Parco V, Santagostino A. Metal biomonitoring with mosses in the surroundings of an oil-fired power plant in Italy[J]. *Chemosphere*,2000,41(5):729-733
- [24] Chiarenzelli J, Aspler L, Dunn C, *et al.* Multi-element and rare earth element composition of lichens, mosses, and vascular plants from the Central Barrenlands, Nunavut, Canada[J]. *Applied Geochemistry*,2001,16(2):245-270
- [25] Berg T, Røyset O, Steinnes E, *et al.* Atmospheric trace element deposition: Principal component analysis of ICP-MS data from moss samples[J]. *Environmental Pollution*,1995,88(1):67-77
- [26] Figueira R, Sérgio C, Sousa A J. Distribution of trace metals in moss biomonitors and assessment of contamination sources in Portugal[J]. *Environmental Pollution*,2002,118(1):153-163
- [27] Poikolainen J, Kubin E, Piispanen J, *et al.* Atmospheric heavy metal deposition in Finland during 1985-2000 using mosses as bioindicators[J]. *The Science of the Total Environment*,2004,318(1/3):171-185
- [28] Ötvös E, Pázmándi T, Tuba Z. First national survey of atmospheric heavy metal deposition in Hungary by the analysis of mosses [J]. *The Science of the Total Environment*,2003,309(1/3):151-160
- [29] 魏复盛,陈静生,吴燕玉,等. 中国土壤元素背景值[M]. 北京:中国环境科学出版社,1990:87-90
- [30] 谢锦升,杨玉盛,陈光水,等. 封禁管理对严重退化群落养分循环与能量的影响[J]. *山地学报*,2002,20(3):325-330
- [31] 朱秀敏. 丛藓科湿地藓属植物对环境的指示作用[J]. *北方园艺*,2010(22):27-30
- [32] 曾曙才,谢正生,陈北光. 几种林木植物体及枯落物的微量元素分析[J]. *华南农业大学学报*,2002,23(2):69-61
- [33] 方炎明. 苔藓与城市空气重金属污染:监测评价方法与新近应用[J]. *贵州师范大学学报:自然科学版*,2010,28(4):69-72
- [34] 王爱霞,方炎明. 苔藓监测空气重金属污染技术的研究进展[J]. *西南林业大学学报*,2011,31(5):87-90