应用与环境生物学报 2010, 16(1): 023~027
Chin J Appl Environ Biol=ISSN 1006-687X
2010-02-25
DOI: 10.3724/SP.J.1145.2010.00023

苔藓植物监测机动车尾气中元素排放量研究——以九寨沟世界自然遗产地原始林景点为例*

饶 瑶[1,2] 包维楷[1**] 闫晓丽[1]
([1]中国科学院成都生物研究所 生态恢复重点实验室 成都 610041)
([2]中国科学院研究生院 北京 100049)

摘 要 为评估利用苔藓监测旅游景点内机动车尾气中元素排放量的可行性并筛选适宜的敏感苔藓生物监测物种, 对九寨沟世界自然遗产地原始林景点停车场的(该景点机动车尾气排放中心)中心及其向外辐射区域(半径为0 m/120 m/1 000 m)共3条带, 采集了两种地表乡土苔藓(大羽藓*Thuidium cymbifolium*和青藓*Brachythecium piligerum*)植株样品, 利用微波消解–等离子体发射光谱(ICP-AES)方法测定了机动车排放尾气中13种元素含量, 分析了距离梯度上元素含量的差异性, 比较了两藓种对元素的累积能力. 发现: (1) 在青藓中测定的13种元素中, 不同距离上的Al、Ca、Cu、Fe、Mg、Zn、P和S 8种元素含量差异显著, 不同距离上的K、Mn、Pb、Ni和Cd 5种元素含量差异不显著. (2) 青藓较大羽藓可检测出更多的元素; 对于被检测出的元素, 青藓的累积量大于大羽藓, 其中累积量最大的元素是Ca, 为10 874.286 μg g^{-1} a^{-1}, 最小的是Cu, 为5.438 μg g^{-1} a^{-1}. (3) 元素在南、北向上的累积量大于东向上的累积量. 研究表明, 苔藓生物监测方法可有效监测旅游景点停车场机动车排放尾气中的典型元素(如Cu、Pb、Ni、Zn、Cd等)含量, 青藓较大羽藓能更可靠地监测九寨沟景点机动车尾气中元素种类及排放量, 因此是理想的监测藓种. 图1 表4 参26

关键词 苔藓; 机动车尾气排放; 元素; ICP-AES; 生物监测
CLC X831 : Q949.352.08 (271)

Monitoring of Tail Gas from Vehicles Using Mosses in the Jiuzhaigou World Natural Heritage Site in Northern Sichuan, China*

RAO Yao[1,2], BAO Weikai[1**] & YAN Xiaoli[1]
([1]*ECORES Lab, Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences*, Chengdu 610041, China)
([2]*Graduate Unversity of Chinese Academy of Sciences*, Beijing 100049, China)

Abstract Mosses have been reliably used as a bio-indicator for monitoring the heavy metals in atmosphere, but it is unknown whether they can also be sensitively used in monitoring the elements in tail gas from vehicles in and around any scenic spots with relatively low traffic flow. Therefore, a parking lot in the Jiuzhaigou World Natural Heritage Site was selected, which was divided into three monitoring belts arranged outwards in different directions at distance intervals of 0 m, 120 m and 1 000 m, and two ground mosses *Brachythecium piligerum* and *Thuidium cymbifolium* were collected on each strip. Totally, thirteen elements (A1, S, Ca, P, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Pb, Ni, Zn, Cd) were determined by ICP-AES analysis method. The results indicated: (1) K, Mn, Pb, Ni and Cd could not be detected by *B. piligerum*, while A1, S, Ca, P, Cu, Fe, K and Zn had significant differences in concentration with the distances from the parking lot, the shorter the distance, the larger the accumulation was; (2) Comparing to *T. cymbifolium*, *B. piligerum* could detect more elements, the contents showed the significant correlation with the distance, and *B. piligerum* had greater accumulation of elements than *T. cymbifolium*; (3) The accumulation of elements by the mosses in the directions of north and south was much larger than that in the east. This study proved that mosses could reliably monitor the elements in the tail gas from vehicles in scenic spots, and *B. piligerum* was found an ideal moss for this purpose. Fig 1, Tab 4, Ref 26

Keywords moss; traffic emission; element; ICP-AES; biomonitoring
CLC X831 : Q949.352.08 (271)

近年来我国城市机动车数量以每年约13%的速度急剧增长, 从1995年的1 050万辆机动车保有量已攀升到2006年底的1.44亿辆, 导致机动车尾气污染日益严重, 已成为我国城镇大气污染的主要来源, 使得部分大城市的污染类型已从煤烟型污染转变为机动车尾气污染[1]. 机动车排放尾气中的元素种类多样, 含量具有累积性, 往往会对环境与人体健康造成较大的潜在危害, 监测并查明机动车尾气元素排放类型、排放量及其时空差异已成为当前机动车尾气污染防治的重要任务; 然而短期内机动车尾气中的元素排放含量不高, 排放时间也具有较大的随机性或偶然性, 采用常规的大气采样方法进行采样、分离与测定, 不仅工作繁琐、困难, 监测成本也较高. 因此, 寻找可靠方便的、成本低廉的机动车尾气元素排放量监测手段仍然是当前环境监测需要解决的一个技

收稿日期: 2009-01-16 接受日期: 2009-03-10
*国家科技支撑计划项目(No. 2006BAC01A15-0102)和国家自然科学基金项目(No. 30570333)资助 Supported by the National S & T Pillar Program of China (No. 2006BAC01A15-0102) and the National Natural Science Foundation of China (No. 30570333)
**通讯作者 Corresponding author (E-mail: baowk@cib.ac.cn)

术问题.

国内外利用苔藓植物体内重金属含量来监测大气污染方面的研究较多[2~4], 并取得了比较可靠的效果. Glooschenko利用锈色泥炭藓作为指示植物, 研究了加拿大大气中Cd的含量, 结果发现, 植物体内Cd含量超过0.2 mg/g的苔藓仅在金属冶炼厂附近出现[5]. Poikolainen等利用苔藓植物监测了芬兰的大气重金属沉降并对1985年至2000年的监测结果进行了比较, 结果表明, 工业和交通发达的南部地区污染物含量较高, 其它地区重金属元素含量很低, 各种重金属元素浓度与以前的监测结果相比均有明显下降[6]. Schilling利用细枝羽藓为生物指示物, 对美国阿巴拉契亚山脉南部的大气重金属沉降进行了监测[7]. 曹同等利用苔藓植物监测了鞍山市内和市郊5个样点苔藓植物体内Pb、Zn、Cu、Cd和全S等污染物的含量, 结果与大气污染程度具有一致性[8]. 实践表明. 苔藓植物作为生物指示剂, 已经被广泛用于重金属污染的生物监测.

苔藓植物结构简单, 对环境变化敏感, 对元素的耐受量与耐受能力决定着监测的可行性、可靠性与灵敏性, 高剂量的污染物排放将直接导致苔藓植物生长衰退或死亡, 而过低的污染物排放条件下, 由于环境背景值的干扰, 苔藓可能因此无法有效监测[9]. 当前对苔藓能检测到的元素最大与最小排放量并不清楚, 不同苔藓物种间的差异也不明确. 风景旅游区主要分布在自然保护区或森林公园中, 旅游交通活动带来的机动车尾气排放对景区环境健康的潜在影响肯定存在, 但影响程度和范围还不清楚. 旅游景点中机动车流量远比高速公路低, 因此尾气排放强度低, 苔藓植物能否有效用于这种低排放强度条件下的旅游景区中机动车尾气元素排放及其空间格局监测还缺乏必要的研究.

本研究选择九寨沟世界自然遗产地原始林景点, 在停车场(该景点机动车尾气排放中心)中心及其向外辐射区域(半径为0 m/120 m/1 000 m), 采集乡土苔藓植物样品, 测定了机动车尾气中相关元素含量, 分析了距离梯度上的差异性, 探讨了利用苔藓监测景点机动车尾气元素排放的方法, 以及苔藓监测较低尾气元素排放量的可行性、可靠性与灵敏性. 聚焦的基本问题是: (1) 乡土苔藓能否测定出机动车尾气中的典型元素(如Cu、Mn、Pb、Ni、Zn、Cd等)含量及空间格局? 苔藓监测方法用于监测自然遗产地内机动车尾气中元素的排放是否可行可靠? (2) 九寨沟自然遗产地原始林景点机动车尾气元素排放量有多大? 九寨沟自然遗产地管理科学, 采用环保燃料动力机动车时间较长, 金属元素排放量较小, 如果苔藓能监测九寨沟机动车尾气元素排放量, 也将适用于大多数其它热点景区的监测, 这对保护地(保护区/森林公园/自然遗产地)环境监测、旅游持续管理与生态保护具有重要的现实意义.

1 材料与方法

1.1 取样地点与机动车尾气排放情况

取样地点选择在九寨沟世界自然遗产地(32°54′~33°16′N, 103°46′~104°3′E)的原始林景点, 海拔高度约3 060 m. 该地为温和、降水适中的冷凉季风气候, 年均气温7.1 ℃, 最高温度30.3 ℃, 最低温度–17 ℃, 年降雨量696.6~957.5 mm, 积雪期从10月至次年4月[10]. 取样点围绕原始林景点停车场, 停车场面积约1 hm^2, 大多为水泥混凝土面, 中间有一大小500 m^2的植被岛(图1), 主要为自然草丛、散生幼树和灌木, 草本盖度78%~80%, 幼树和灌木盖度不足50%, 苔藓植物盖度约30%~50%, 主要为喜光耐旱的种类, 包括大羽藓(*Thuidium cymbifolium*)和青藓(*Brachythecium piligerum*); 停车场周围为岷江冷杉(*Abies faxoniana*)原始林所覆盖, 林下灌木种类丰富但稀疏, 地表苔藓植物发达, 优势种有塔藓(*Hylocomium splendens*)、锦丝藓(*Actinothuidium hookeri*)、大羽藓、提灯藓(*Mnium* sp.)和曲尾藓(*Dicrancum* sp.)等, 盖度一般可达90%~98%. 停车场的植被岛与岷江冷杉原始林下的土壤均为山地棕壤, 腐殖质含量较高.

九寨沟是我国自然风光旅游地之一, 其中原始林景点是其最重要的景点之一. 自1984年开放以来, 九寨沟的游客量不断增长, 为避免景区机动车尾气可能的污染, 1999年3月起九寨沟内禁止一切外来车辆进入沟内观光行驶, 而以石油液化气为动力燃料的绿色旅游观光车则成为景区内唯一的交通工具, 同时沟内旅游管理水平也在不断优化. 达到欧III标准的绿色旅游观光车良好的尾气净化装置能将氮氧化合物、CO和碳氢化合物转化为无害的气体, 但尾气中的重金属颗粒物却很难处理. 非旅游旺季九寨沟人数限制在1.6万/d, 旅游旺季限制在2.4万/d. 以淡季的1.6万/d来计算, 按80%的人(根据现场调查确定的比例)乘坐旅游观光车(载客量约45人/车)到原始林景点游览, 每天有约280趟车经停原始林景点. 九寨沟内景点的机动车尾气元素排放究竟如何, 一直缺乏监测和评估.

1.2 取样设计与方法

以原始林景点停车场为中心, 根据距离划分出3个采样带(图1). I为停车场植被小岛, 向外约120 m半径为II带, 再向外距离约1 000 m为III带. 每带分北、东、南3个方向(西向为陡峭山壁)各采集1个样品, 作为重复. 每个点采集共同存在的藓种: 大羽藓(*T. cymbifolium*)和青藓(*B. piligerum*). 采集时间为2007年9月14~18日, 采集分种进行; 为排除生长环境、生活基质对苔藓监测的影响, 全部样品均采自无乔木和灌木直接覆盖的地表.

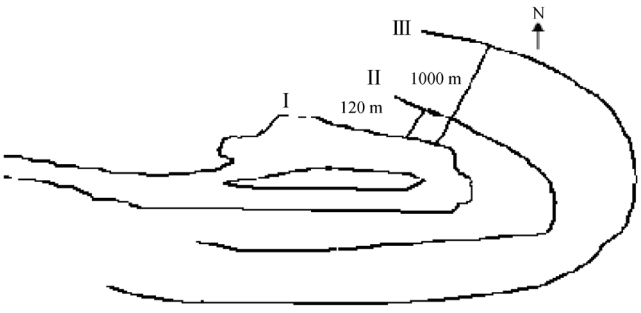


图1 苔藓样品采集示意图

Fig. 1 Map showing the sampling sites of mosses in and around a parking lot

为使分析的苔藓植物样品在大气污染物中暴露的时间趋于一致, 以减少误差[11], 对采回的大羽藓、青藓样品进一步处理, 只摘取枝顶端最幼嫩的绿色部分(1.5~2.4 cm), 除去其中杂物, 自来水冲洗干净, 并用去离子水冲洗3次, 放进

烘箱，65 ℃烘 8~9 h，坩埚研磨，过0.25 mm尼龙筛，密封保存，待测. 根据野外观察和前期定位监测[12]，顶生1.5~2.4 cm的生长大致是1 a，因此样品的分析结果基本反映的是2006年秋末至2007年夏之间的机动车尾气元素累积量.

1.3 样品测定方法

所测定的元素指标为机动车尾气排放的典型元素，包括A1、S、Ca、Cu、Fe、K、Mg、Mn、Pb、Ni、Zn和Cd 共13种. 样品分析选择微波消解（ICP-AES）法[13]进行. 所采用的微波消解条件是：泵速1 000 r/min，泵流量1.85 mL/min，气流量1.0 L/min，射频功率为1 150 W，积分时间为2 s；ICP-AES法是选取光谱干扰最小、灵敏度高的元素谱线，具体是A1 396.1 nm，S 180.7 nm，Ca 317.9 nm，Cu 324.7 nm，Fe 259.9 nm，K 766.4 nm，Mg 285.2 nm，Mn 257.6 nm，Pb 283.3 nm，Ni 231.6 nm，Zn 213. 8 nm，Cd 228.8 nm，P 177.4 nm.

称取标准茶树叶和苔藓植物样品0.500 0 g于消解罐中，选用HNO_3-H_2O_2的消解体系. 加入8 mL硝酸和2 mL过氧化氢，密封后放入微波消解仪中. 经历以下5个阶段进行消解：室温85~70 ℃，消解3 min；保持在160~80 ℃，消解7 min；200~160 ℃，消解8 min；210~160 ℃，消解2 min；保持在210 ℃，消解10 min. 其中5个阶段的功率均为1 000 W. 消解后冷却取出，移入50 mL容量瓶中定容. 将溶液放置，取上清液测定. 同时做3个重复，3个空白[14].

对标准茶树叶GBW08513样品进行测定，各元素含量的RSD结果在区间0.641%~4.612%，说明本方法的准确度和精密度均令人满意，可以对苔藓植物进行测定. 以青藓样品为例进行加标回收率试验（在样品中加入各元素的标准液进行回收实验），测定结果表明其加标回收率为94.53%~102.27%，说明测定方法可靠.

1.4 数据整理与分析

采用单因素方差分析（ANOVA）比较大羽藓和青藓13种元素含量在不同样带间的差异（距离作为控制因素，同一距离上3个方向作为3个重复处理）. 将距离停车场1 000 m的点作为无机动车尾气排放对照，计算和分析停车场机动车尾气排放元素1 a时间内在苔藓中的累积量，直接比较累积量的大小来分析苔藓监测该元素的能力大小以及灵敏性高低. 由于本实验样品都为一年生部分，因此某元素的累积量 = (PS−D1000)/年（PS表示核心区带Ⅰ的元素含量，D1000表示最远端带III的元素含量）. 同种苔藓中同种元素在不同方向上的累积量不同，根据公式累积量 = PS_{-x}含量−DS_{-x}含量/年，x=1、2、3，分别表示南、东和北，计算元素在不同方向上的累积量，直接比较累积量的大小来分析元素在不同方向上的差异. 所有分析在SPSS 12.0软件下进行.

2 结果与分析

2.1 两种苔藓植株中13种元素含量及其在不同样带间的差异

不同样带间大羽藓植株当年生部分中的13种元素含量如表1所示. 13种元素中有8种元素（Mn、Ni、Pb、S、K、Fe、Pb、Mg）含量在离停车场的距离间没有显著差异；有5种元素（Al、Ca、Cu、Zn和P）含量在距离间差异显著，其中Zn含量在3个样带间差异显著（P<0.05），除P、Ca外，其它3种元素含量随着距离的增加而减少.

不同采样带上青藓植株1年生部分13种元素的含量见表2，有8种元素（Al、Ca、Cu、Zn、Fe、Mg、P、S）含量在采样距离间差异显著：其中除Cu、Zn外，其它各元素含量均随距离的增加而减少.

表1 不同样带上大羽藓中13种元素含量
（平均值±标准误差，N=3）

Table 1 Contents of thirteen elements detected in *T. cymbifolium* at different belts (mean±SE, N= 3)

元素 Element	含量 Content (w/μg g^{-1})		
	Belt Ⅰ (0 m)	Belt II (120 m)	Belt III (1000 m)
Al	1461.247 ± 189.512 ^{b}	1086.622 ± 115.804^b	915.702 ± 85.283^a
Ca	10089.774 ± 135.645^a	7699.445 ± 268.124^b	8159.944 ± 666.685^a
Cu	7.634 ± 0.166^b	3.817 ± 0.498^a	3.345 ± 0.512^a
K	6472.011 ± 107.342^a	6688.548 ± 89.105^a	7154.332 ± 197.494^a
Mn	67.930 ± 14.139^a	93.267 ± 13.315^a	46.191 ± 23.792^a
Zn	35.042 ± 1.101^c	26.211 ± 2.025^b	22.320 ± 1.346^a
Cd	0.179 ± 0.080^a	0.1598 ± 0.120^a	0.113 ± 0.290^a
Fe	1097.015 ± 120.437^a	978.531 ± 101.021^a	809.547 ± 26.026^a
Mg	1661.276 ± 665.821^a	2557.632 ± 386.115^a	1777.627 ± 527.885^a
Ni	1.296 ± 0.561^a	2.154 ± 0.995^a	2.110 ± 0.309^a
P	3089.943 ± 385.497^a	1915.451 ± 392.165^b	2746.179 ± 117.018^a
Pb	6.976 ± 0.218^a	5.762 ± 0.802^a	6.985 ± 1.522^a
S	1224.332 ± 21.474 ^{a}	1095.836 ± 22.080 ^{a}	1170.850 ± 85.624 ^{a}

不同字母表示元素含量与距离之间存在显著性差异（P<0.05）. 下同
Different letters in the same column indicate significant difference at 0.05 level. The same below

表2 不同样带上青藓植株中13种元素含量
（平均值±标准误差，N=3）

Table 2 Contents of thirteen elements detected in *B. piligerum* at different belts (mean±SE, N= 3)

元素 Element	含量 Content (w/μg g^{-1})		
	Belt Ⅰ (0 m)	Belt II (120 m)	Belt III (1000 m)
Al	1318.509 ± 137.637 ^{b}	653.527 ± 36.411^b	726.152 ± 76.752 ^{a}
Ca	18852.472 ± 3470.146^b	8626.325 ± 250.502^b	7978.186 ± 448.406^a
Cu	12.478 ± 3.395 ^{b}	3.549 ± 0.50 ^{a}	7.04 ± 3.70 ^{b}
K	11497.473 ± 2932.944^a	9329.504 ± 641.397^a	1001.131 ± 76.589 ^{a}
Mn	75.433 ± 12.716^a	64.429 ± 11.001^a	73.835 ± 14.765^a
Zn	79.624 ± 14.86 ^{b}	60.656 ± 1.512 ^{a}	66.834 ± 12.434 ^{b}
Cd	0.237 ± 0.143^a	0.195 ± 0.054^a	0.189 ± .0892^a
Fe	1166.886 ± 106.855^b	802.880 ± 54.223^b	609.537 ± 19.937^a
Mg	3804.202 ± 640.695^b	1344.483 ± 165.261^b	1379.875 ± 814.655^a
Ni	2.009 ± 0.678^a	0.919 ± 0.360^a	1.882 ± 1.002^a
P	6116.356 ± 1029.862^b	2901.366 ± 441.4^b	2031.180 ± 59.820^a
Pb	8.195 ± 3.91^a	6233 ± 0.342^a	6.627 ± 0.139^a
S	2280.488 ± 442.828^b	1234.129 ± 73.862^b	1144.46 ± 22.940^a

2.2 苔藓中的元素累积量

同种元素在不同苔藓中累积量存在差异（表3）. 青藓能检测出不同距离上的Al、Ca、Cu、Zn 、Fe、Mg、S和P 8种元素含量的差异性；大羽藓则只检测出5种，未检测出Fe、Mg和S 3种元素含量不同距离间的差异性. 在这两种藓都能共同检测出的5种元素（Al、Ca、Cu、Zn和P）中，青藓植株的累积量大于大羽藓的累积量. 因此，青藓较大羽藓能测出更多元素，对于同种元素也可测出更大累积量.

青藓中元素含量在不同方向上存在差异（表4）：Al、

Fe和Mg在不同方向上的累积量为南>北>东，Zn和S为东>南>北，Ca为南>东>北，Cu为北>东>南，P为东>北>南. 总的说来，大多数元素在南和北向上的累积量大于东向上的累积量.

表3 两种苔藓中具有差异性的8种元素累积量（*N*=3）
Table 3 Cumulation amount of eight elements with significant difference detected in the two mosses (*N*=3)

元素 Element	累积量 Accumulation (w/μg g^{-1} year^{-1})	
	大羽藓 *T. cymbifolium*	青藓 *B. piligerum*
Al	545.545	592.357
Ca	1929.83	10874.286
Cu	4.289	5.438
Zn	12.722	12.79
Fe	ns	557.349
Mg	ns	2424.327
P	343.764	4085.176
S	ns	1136.028

ns：未检验出差异性 no: Significant difference found

表4 青藓中8种具有差异性元素在不同方向上的累积量（*N*=3）
Table 4 Cumulation amount of eight elements with significant difference detected in *B. piligerum* growing in the places from different directions (*N*=3)

元素 Element	累积量Accumulation (w/μg g^{-1} year^{-1})		
	南 Sourth	东 East	北 North
Al	2462.29	1397.585	1636.66
Ca	8964.765	7506.955	6866.015
Cu	5.11	8.03	10.585
Zn	22.63	36.865	13.14
Fe	1352.325	865.415	1118.36
Mg	678.9	448.95	661.745
P	2029.4	4702.66	3854.4
S	393.835	528.52	325.215

3 讨 论

3.1 苔藓方法监测汽车尾气中元素含量的可靠性（苔藓植物种间差异性）

由于藓类植物结构、生境、体内含水量和pH值、生长率及生物量和生长季节等差异[15~17]，苔藓不同种对污染敏感度及富集能力不同，即使是在同一样地内，不同种类的苔藓植物体内所富集的重金属物质也有一定的区别，因此苔藓监测能力的种间差异客观存在. 由于金属元素之间的变化具有共向性，两种藓体内重金属元素的变化随环境差异而变化. 对于相同环境而言，能监测出含量与距离间存在差异性的元素种类多少以及累积量的大小能反映出苔藓监测能力的大小. Carballeira等利用大绢藓和灰藓对西班牙西北部加利西亚地区大气重金属污染中的Al、As、Be、Cd、Co、Cr、 Cu、Fe、Hg、Mn、Ni、Pb、Se、V和Zn元素含量进行了监测，发现两种苔藓在监测能力上有所差异[18]. Salemaa等在芬兰的研究表明，黄丝瓜藓对重金属富集、忍耐的能力明显高于同一地区的其它试验藓种[19]. 从表1、2、3可看出，大羽藓与青藓都能监测九寨沟自然遗产地原始林景点的机动车尾气元素含量，方法可行可靠. 然而，在监测能力上两种苔藓是有差异的：大羽藓能监测出Al、Ca、Cu、Zn、P元素含量距离间明显的差异性，青藓则能检测出Al、Ca、Cu、Zn、Fe、Mg、P、S元素含量距离间差异显著，且监测到的元素在青藓中的累积量都高于在大羽藓中的累积量. 这表明，无论从监测出的元素种类还是元素累积量来看，青藓都比大羽藓的监测能力更好.

3.2 机动车尾气元素排放空间格局与影响因素

苔藓植物对重金属的忍受能力同时受污染程度和原先生境的金属含量影响[20]. 从监测到的元素累积量来看，A1、S、Ca、P、Cu、Fe、Mg和Zn含量较多，监测效果明显. 而传统观念上认为机动车尾气排放的重要元素Cd、Ni、Pb和Mn虽然也是目前机动车尾气排放的元素，但是随着九寨沟自然遗产地绿色旅游车排放标准的不断严格、燃料的不断进步，已不能监测出明显的差异. 在监测到元素中，Ca、K、Al和Mg含量很高，特别是Ca、K含量，这与九寨沟地区特殊地质地貌、岩石成分及地化特征使得扬尘中的Ca、K和Mg的含量高有关.

Zechmeister等利用苔藓监测并评估了公路沿线汽车尾气排放污染物包括重金属与多环芳烃化合物（PAHs）的排放状况及分布格局，发现交通流量（Traffic flow）、道路的爬坡高以及距离是金属元素沉降最显著的影响因素，交通污染物排放的金属元素有Cr、Mo、Sb、Zn、As、Fe、V、Cu、Ni和Co等，排放一般不超过路侧250 m距离，只有高频率高流量的公路上其排放距离才达到1 000 m [21~23]. 污染物的扩散能力很强，可随信风长距离传播[24]. 本项研究中，汽车起步、停车方向上（南向和北向）的尾气排放强度较行驶途中方向上排放强度大（表4）. 尾气排放中的A1、S、Ca、P、Cu、Fe、Mg和Zn元素含量与距离间都呈现出随距离增加其元素含量降低的趋势，即离公路越近，苔藓监测出的尾气排放的元素含量越高，受到的污染越大. 这与Zechmeister等利用苔藓对公路沿线上的重金属元素含量与距离间相关性的研究结论相一致[22]. 机动车尾气排放中金属元素的扩散距离与元素自生的原子（或者分子）大小有密切的关系[25]. 原子越小传递的距离越远，这就解释了为什么P、Cu和Zn等元素含量呈样带Ⅰ、III无差异而与样带II有显著差异. 汽车尾气中，原子相对小的元素主要来源于汽车的启动和燃烧过程，而原子大的元素则多来自刹车和摩擦等过程[[26]，也就体现在汽车的起步、停车等不同的状态，揭示元素含量的空间差异性还需要考虑元素来源问题.

4 结 论

苔藓生物监测方法能够有效监测九寨沟世界自然遗产地机动车尾气中排放出的典型元素（如Cu、Pb、Ni、Zn、Cd等）含量，因此可用于景点/交通道路尾气金属元素排放监测. 但是不同藓种的生物监测能力有差异，青藓较大羽藓更能敏感监测九寨沟自然遗产地景点机动车尾气金属元素种类及其排放量，因此是更理想的监测藓种.

致 谢 感谢庞学勇、张宁轩、苏维维协助采集藓样品，感谢九寨沟旅游管理局科研处在采样过程中的支持和帮助以及冷俐、陈建中和裴健在实验过程中的指导和帮助. 本研究得到中国科学院山地生态恢复与生物资源利用重点实验室、生态恢复与生物多样性保育四川省重点实验室的支持.

References

1 Deng FR (邓芙蓉), Guo XB (郭新彪). Research progress on vehicle emission related health effects in China. *J Environ Health* (环境与健康杂志), 2008, **25** (2): 174~176

2 Angel Fernandez J, Aboala JR, Real C, Carballeira A. A new moss biomonitoring method for detecting sources of small scale pollution. *Atmos Environ*, 2007, **41**: 2098~2110

3 Gerdol R, Bragazza L. Effects of altitude on element accumulation in alpine moss. *Chemosphere*, 2006, **64**: 810~816

4 Harmensa H, Norrisa DA, Koerbera GR, Busea A, Steinnesb E, Ruhlingc A. **Temporal trends in the concentration of arsenic, chromium, copper,** iron, nickel, vanadium and zinc in mosses across Europe between 1990 and 2000. *Atmos Environ*, 2007, **41**: 6673~6687

5 Glooschenko WA. Moss as an indicator of atmospheric cadmium deposition across Canada. *Environ Poll*, 1989, **57** (1): 27~33

6 Poikolainen J, Kubin E, Piispanen J, Karhu J. Atmospheric heavy metal deposition in Finland during 1985-2000 using mosses as bioindicators. *Sci Total Environ*, 2004, **318** (1): 171~185

7 Schilling JS, Lehman ME. Bioindication of atmospheric heavy metal deposition in the Southeastern US using the moss *Thuidium delicatulum*. *Atmos Environ*, 2002, **36**: 1611~1618

8 Cao T, Lu Y, Wu YH, Xie W. Bio-indication of bryophytes to environmental pollution in Anshan city. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 1998, **9** (6):635~639

9 An L (安丽), Cao T (曹同), Yu YH (俞鹰浩). Heavy metals contents in Hap-cladium and their relationships with Shanghai City environment. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 2006, **17** (8):1490~1494

10 Zhu Z (朱珠), Bao WK (包维楷), Pang XY (庞学勇), Yan XL (闫晓丽), Li YW (李玉武). Tourism effect on species composition and diversity of understory plants in *Abies fargesii* var. *faxoniana* forest in Jiuzhaigou, Sichuan. *Biodiv Sci* (生物多样性), 2006, **14** (4): 284~289

11 Schilling JS, Lehman ME. Bioindication of atmospheric heavy metal deposition in the Southeastern US using the moss *Thuidium delicatulum*. *Atmos Environ*, 2002, **36**: 1611~1618

12 Wang Q (王乾), Wu N (吴宁), Luo P (罗鹏), Yi SL (易绍良), Bao WK (包维楷), Shi FS (石福孙). Moss growth rate and its environmental determinants in sub-apline coniferous forest and clear-cut land in eastern Tibetan Plateau, China. *J Plant Ecol* (植物生态学报), 2007, **31** (3): 464~469

13 Wu HY (吴虹玥), Bao WK (包维楷), Wang A (王安), Chen JZ (陈建中), Lei B (雷波), Pei J (裴健). Measuring chemical elements in bryophytes by microwave digestion and ICP-AES. *China Environ Sci* (中国环境科学), 2004, **24** (5): 565~567

14 Chen YE (陈洋尔), Wang L (王丽), Weng Zhou (翁周). Application of ICP-AES and AAS in measuring the contents of heavy metal in bryophytes. *J Sichuan Univ* (四川大学学报自然科学版), 2007, **44** (1): 195~198

15 Otvos E, Pazmandi T, Tuba Z. First national survey of atmospheric heavy metal deposition in Hungary by the analysis of mosses. *Sci Total Environ*, 2003, **309**: 151~160

16 Zechmeister HG, Hohen WD , Riss A , Hanus-Illnar.Variations in heavy metal concentrations in the moss species *Abietinella abietina* (Hedw.) Fleisch, according to sampling time, within site variability and increase in biomass. *Sci Total Environ*, 2003, **301**: 55~66

17 Wu YH (吴玉环), Gao Q (高谦), Cheng GD (程国栋), Yu XH (于兴华), Cao Tong (曹同). Response of bryophytes to global change and its bioindicatortation. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 2002, **13** (7): 895~900

18 Carballeira CB, Aboal JR, Fernandez JA, Carballeira A. Comparison of the accumulation of elements in two terrestrial moss species. *Atmos Environ*, 2008, **42**: 4904~4917

19 Salemaa M, Derome J, Helmisaari HS, Nieminen Tiina, Vanha-Majamaa I. Element accumulation in boreal bryophytes, lichens and vascular plants exposed to heavy metal and sulfur deposition in Finland. *Sci Total Environ*, 2004, **324**: 141~161

20 Shaw AJ. Metal tolerances and cotolerances in the moss *Funaria hygrometrica* Hcdw. *Can J Bot-revue Canadierme de Botanique*, 1990, **68** (11): 2275~2282

21 Zechmeister HG, Hagendorfer H, Hohenwallner D, Hanus-Illnar A, Riss A. Analyses of platinum group elements in mosses as indicators of road traffic emissions in Austria. *Atmos Environ*, 2006a, **40**: 7720~7732

22 Zechmeister HG, Hohenwallner D, Riss A, Hanus-Illnar A. Estimation of element deposition derived from road traffic sources by using mosses. *Environ Poll*, 2005, **138**: 238-249

23 Zechmeister HG, Dullinger S, Hohenwallner D, Riss A, Hanus-Illnar A, Scharf S. Pilot study on road traffic emissions (PAHs, heavy metals) measured by using mosses in a tunnel experiment in Vienna, Austria. *Environ Sci & Poll Res*, 2006b, **13** (6): 398~405

24 Rühling A, Rasmussen L, Pilegaard K, Mkinen A, Steinnes E. Survey of atmospheric heavy metal deposition in the Nordic countries in 1985. *Copenhagen Nord*, 1987, **21**: 1~44

25 Zechmeister HG, Hohenwallner D, Riss A, Hanus-Illnar A. Estimation of element deposition derived from road traffic sources by using mosses. *Environ Poll*, 2005, **138**: 238~249

26 Abu-Allaban M, Gillies JA, Gertler AW, Clayton R, Proffitt D. Tailpipe, resuspended road dust, and brake-wear emission factors from on-road vehicles. *Atmos Environ*, 2003, **73**: 5283~5293