

# 山西太行山区两种地衣——中国石黄衣和 黄烛衣的元素含量差异

贾晟菊<sup>1</sup> 张超<sup>1</sup> 罗治定<sup>2</sup> 张硕<sup>2</sup> 马会春<sup>2</sup> 王传华<sup>3</sup> 刘华杰<sup>1\*</sup>

(<sup>1</sup>河北大学生命科学学院, 河北保定 071002; <sup>2</sup>河北省地矿中心实验室, 河北保定 071051; <sup>3</sup>三峡大学生物与制药学院, 湖北宜昌 443002)

**摘要** 地衣在大气元素沉降的生物监测研究中应用广泛, 但地衣物种之间的元素组成差异会对元素的环境输入评估产生干扰。为摸清元素含量在 2 种叶状地衣(石生的中国石黄衣 *Xanthoria mandschurica*, XM; 树生的黄烛衣 *Candelaria fibrosa*, CAF) 之间的差异及其可能的生态学原因, 用电感耦合等离子体质谱法(inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)测试了采自山西太行山区长治盆地及其周边共 3 个地点的地衣样品中的 51 种元素。结果显示, 40 种元素的含量在地衣间差异较大, 其中 36 种元素(Al、Ba、Be、Bi、Ca、Ce、Cs、Dy、Er、Eu、Fe、Gd、Ge、Ho、La、Li、Lu、Mn、Na、Nb、Nd、Ni、Pb、Pr、Sc、Si、Sm、Sr、Tb、Th、Ti、Tm、U、V、Y 和 Yb)在 XM 中含量较高, 可能归因于其受大气干沉降更大且更易受本地岩石地球化学的影响, 而 CAF 受冠层截留作用的影响更大; 其中 4 种元素(K、P、S 和 Zn)在 CAF 中含量较高, 可能与冠层淋溶作用有关。另外 11 种元素(As、B、Cd、Co、Cu、Hg、Mg、Rb、Sb、Se、Tl)在 2 种地衣之间的含量差异较小。大气元素沉降的地衣监测法需考虑地衣物种、基物的地球化学特征和植被的影响。

**关键词** 大气元素沉降; 基物; 冠层淋溶; 冠层截留; 干沉降; 湿沉降

**Differences in element concentrations between two lichens *Xanthoria mandschurica* and *Candelaria fibrosa* from Taihang Mountains, Shanxi, China.** JIA Sheng-ju<sup>1</sup>, ZHANG Chao<sup>1</sup>, LUO Zhi-ding<sup>2</sup>, ZHANG Shuo<sup>2</sup>, MA Hui-chun<sup>2</sup>, WANG Chuan-hua<sup>3</sup>, LIU Hua-jie<sup>1\*</sup> (<sup>1</sup>College of Life Sciences, Hebei University, Baoding 071002, Hebei, China; <sup>2</sup>Hebei Center Laboratory of Geology and Mineral Resources, Baoding 071051, Hebei, China; <sup>3</sup>College of Life Science and Pharmacy, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, China).

**Abstract:** Lichens have been widely used in biomonitoring of atmospheric element deposition. However, assessment of environmental input of elements could be interfered by the differences in element concentrations among lichens. Two foliose lichen species, epilithic *Xanthoria mandschurica* (XM) and epiphytic *Candelaria fibrosa* (CAF), were collected from three sites around the Changzhi Basin, Shanxi Province, China. The concentrations of 51 kinds of elements in lichens were measured by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). The purpose was to compare element concentrations between the two lichens and to address the possible ecological reasons. The results showed that the concentrations of 40 elements differed greatly between XM and CAF, among which 36 elements (Al, Ba, Be, Bi, Ca, Ce, Cs, Dy, Er, Eu, Fe, Gd, Ge, Ho, La, Li, Lu, Mn, Na, Nb, Nd, Ni, Pb, Pr, Sc, Si, Sm, Sr, Tb, Th, Ti, Tm, U, V, Y and Yb) showed higher concentrations in XM than those in CAF, possibly due to the higher dry deposition on XM, higher susceptibility of XM to geochemistry of local rocks, but higher canopy interception on CAF. The concentrations of four elements (K, P, S and Zn) were significantly higher in CAF, probably due to the canopy leaching that carried more nutrients to the epiphytic

国家重点研发计划项目(2016YFC0500704)、国家自然科学基金项目(31370536)和河北省自然科学基金项目(C2014201032)资助。

收稿日期: 2017-09-01 接受日期: 2018-01-30

\* 通讯作者 E-mail: liuhua jie@foxmail.com

lichens. Little differences between lichens were found in the concentrations of other 11 elements (As, B, Cd, Co, Cu, Hg, Mg, Rb, Sb, Se, and Tl). Our results indicated that the variations of lichen species, geochemistry of substrate, and vegetation should be considered when we monitor atmospheric deposition using lichens.

**Key words:** atmospheric element deposition; substrate; canopy leaching; canopy interception; dry deposition; wet deposition.

大气元素,特别是大气重金属元素的传输和沉降对人类和生态系统健康已造成负面影响(Liu *et al.*, 2005; Lang *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2013; Zhao *et al.*, 2013; Tian *et al.*, 2015)。我国近年来正在构建的以物理和化学手段为主的环境污染监测体系,由于费用昂贵、技术水平要求高,在大气元素沉降监测方面存在着监测项目少、监测样点数量有限和地理分布不均匀的缺点。地衣监测法是廉价、高效和成熟的大气元素沉降监测方法,可作为这种物理化学监测手段的补充手段(Garty, 2001; Smodiš *et al.*, 2004; Nash, 2008)。

地衣监测法已被广泛用于大气元素沉降的时空格局、迁移规律和源解析研究。国外40余年的大量研究表明,地衣是大气质量评估的最佳监测生物之一,其元素组成特征与环境化学特征和地衣物种均有关(Nash *et al.*, 1995; Bari *et al.*, 2001; Nash, 2008)。地衣在大气元素沉降监测方面的适用性与其生物学和生态学特点有关:地衣的表面积/体积比值较大,缺乏蜡质层、真皮层和发达的根系,体内菌丝组织松散;地衣可将大量沉降元素固定于细胞壁上或菌丝之间;地衣的生长速度慢,凋落现象少;地衣的地理分布广泛,物种特有性低(Garty, 2001; Nash, 2008)。由于以上特点,大量文献指出:1)地衣具有对大气沉降物的高度通透性和高度养分依赖性;2)地衣对大气沉降元素具有极强的富集能力,既在很大程度上避免沉降元素的“稀释”和损失,又对过量积累元素具有极强的耐性;3)地衣可用于不同时空尺度上的大气沉降的多元素综合比较分析;4)地衣生物学和生态学特征的种间差异,可导致地衣元素组成对大气元素沉降响应的地衣种间差异(Bergamaschi *et al.*, 2007; Godinho *et al.*, 2009; Aprile *et al.*, 2010; Brunialti *et al.*, 2014; Malaspina *et al.*, 2014)。

与大气污染的严重性和监测工作的必要性相比,我国大气元素沉降的地衣监测法研究工作极少。少数零星工作见于新疆(张婷等, 2011; 艾尼瓦尔·吐米尔等, 2015)、内蒙古锡林浩特草原(Liu *et al.*,

2016a, 2017)和河北太行山(Liu *et al.*, 2016b; 刘华杰等, 2016; 赵良成等, 2016),这些研究工作确认了地衣在大气元素沉降监测方面的适用性,并指出地衣元素组成对大气元素沉降的响应在地衣物种之间的差异。

地衣元素组成是环境元素输入在地衣体内长期累积的结果,这种累积具有地衣物种特异性(Nash, 2008)。因此,在地衣监测法中,当不同物种混用时,元素组成的地衣物种间差异会对环境元素输入的评估产生干扰。我国地衣元素组成的物种间差异虽有研究,但涉及元素种类少(<25个; Liu *et al.*, 2016a, 2016b, 2017; 刘华杰等, 2016),对地衣元素化学的代表性有限。因此,我们在太行山区选择了两种叶状地衣:石生的中国石黄衣(*Xanthoria mandshurica*, XM)和树生的黄烛衣(*Candelaria fibrosa*, CAF),测试了51种元素(Al、As、B、Ba、Be、Bi、Ca、Cd、Ce、Co、Cs、Cu、Dy、Er、Eu、Fe、Gd、Ge、Hg、Ho、K、La、Li、Lu、Mg、Mn、Na、Nb、Nd、Ni、P、Pb、Pr、Rb、S、Sb、Sc、Se、Si、Sm、Sr、Tb、Th、Ti、Tl、Tm、U、V、Y、Yb和Zn),目的是探讨两种地衣的元素含量差异及其可能的生态学成因,为其在环境监测中的利用提供理论支撑。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 采样区域与样地

于山西长治盆地及其周边的太行山区,选择了黄烛衣CAF和中国石黄衣XM并存且个体生态分布和样品量满足分析的3个地点(图1)。这3个地点均为石灰岩山区(刘学勤, 1992);为暖温带大陆性季风气候,植物生长季为6个月(5月初至10月末),降雨量540~600 mm,多分布于6—9月。地点1和2相距约45 km,二者与地点3相距均约70 km。在上述每个地点选择1个1 km<sup>2</sup>的样地,各样地详细信息如下:

样地1:左权县辽阳镇李家埡村北0.5 km (113°29'36.19" E, 37°04'14.50" N)。调查区域海拔1400~1550 m,为森林自然保护区;核桃林(*Juglans*

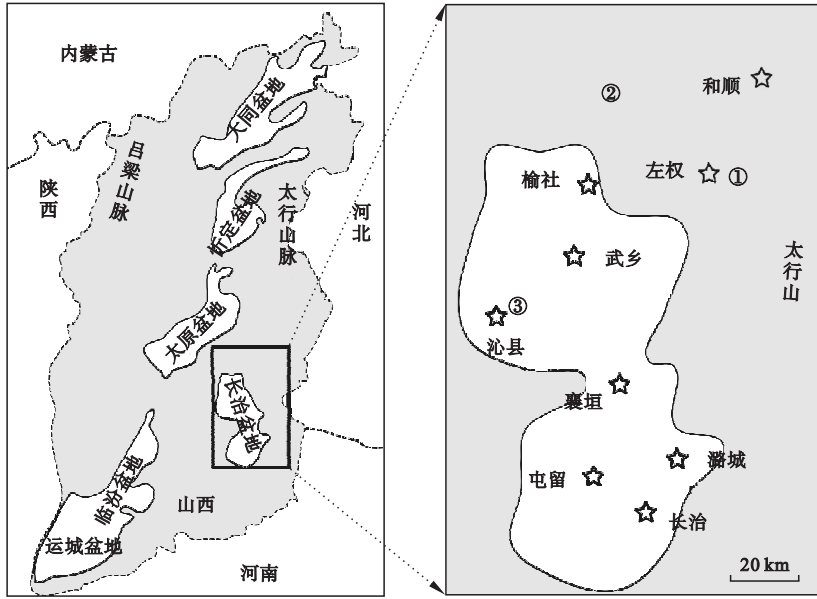


图 1 采集地点示意图

Fig.1 Maps showing the location of sampling sites

内标数字的空心圆圈为采集样地。断线为省界。在山西境内,灰色区域为山区,白色区域为盆地。五角星代表城市。

regia, 盖度约 90%) 与荆条 (*Vitex negundo* var. *heterophylla*)-酸枣 (*Ziziphus jujuba* var. *spinosa*) 灌丛交错分布。

样地 2: 榆社县北寨乡杏花庄村西北 1 km (113°04'53.06" E, 37°19'21.24" N)。调查区域海拔 1250~1350 m, 为草高约 30 cm 的轻度放牧山地草地; 分布有以杨树 (*Populus* sp.) 为优势种的林地。

样地 3: 沁县松村乡郭家岭 (112°45'20.76" E, 36°46'12.33" N)。调查区域海拔 1090~1120 m, 为国家级公益林保护区; 林地主要为盖度约 90% 的松林 (*Pinus* sp.) 和杂木林 (杨树 *Populus* sp.+柳树 *Salix* sp.), 林外为草高约 30 cm 的禾草草地。

## 1.2 样品采集

于 2015 年 8 月, 在上述样地中广泛采集地衣 CAF 和 XM。这两种地衣为外部形态相似的偏黄色叶状地衣。因为地衣体外部形态是影响地衣元素组成的重要因素 (Nash, 2008), 二者形态学上的相似性有利于地衣元素组成差异的生态成因探讨。事实上, 这种外部形态的相似性由黄烛衣属 (*Candelaria*) 的名称历史可见一斑: 黄烛衣属曾被处理为石黄衣属 (*Xanthoria*) 下的一个组 *Xanthoria* sect. *Candelaria*。

CAF 采自林地内优势阔叶树种的树干上。采集方法与 Liu 等 (2017) 相同: 选择 5~10 棵树, 于距地面 1.0~2.0 m 的树干上, 采集 15~30 个直径为

3~5 cm 的地衣个体作为 1 个混合样品。XM 采自林外开阔地带的岩石上, 采集方法与 Liu 等 (2016a, 2016b) 和刘华杰等 (2016) 相同: 于距地面 >0.5 m 高、距树木或灌丛 >5 m 的岩石表面, 采集 20~50 个直径为 3~5 cm 的地衣个体作为 1 个混合样品。两种地衣各自储存于纸袋中, 风干, 待处理。

## 1.3 样品前处理与元素测试

本研究中地衣样品的前处理和元素测试过程遵循赵良成等 (2016) 和 Zhao 等 (2017) 的方法。地衣前处理包括样品清理、粉碎、混匀、微波消解过程: 于体视显微镜下清除地衣体表面附着杂物和假根后, 于烘箱中 70 °C 烘干 72 h 至恒重; 用球磨仪 (Retsch MM400, 配备碳化钨罐) 将地衣样品粉碎和混匀至粉末状, 过 10 目筛; 用  $\text{HNO}_3\text{-H}_2\text{O}_2$  微波消解系统, 于聚四氟乙烯罐中消解 200~300 mg 的混匀后样品。

在河北省地矿中心实验室使用电感耦合等离子体质谱法 (inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS) 测试了 51 种元素 (Al、As、B、Ba、Be、Bi、Ca、Cd、Ce、Co、Cs、Cu、Dy、Er、Eu、Fe、Gd、Ge、Hg、Ho、K、La、Li、Lu、Mg、Mn、Na、Nb、Nd、Ni、P、Pb、Pr、Rb、S、Sb、Sc、Se、Si、Sm、Sr、Tb、Th、Ti、Tl、Tm、U、V、Y、Yb 和 Zn)。所用仪器为 Agilent 7700X (Agilent Technologies, Tokyo, Japan)。元素测试中使用了 4

种标准物质进行质量控制;由国际原子能组织机构提供的地衣标准物质 IAEA-336,由中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所提供的国家一级标准物质 GBW 10015 (菠菜)、GBW 10052 (绿茶) 和 GBW 10014(圆白菜)。

1.4 统计分析

采用配对样本 *T* 检验(Paired Samples *T* test) 分析每种元素在两种地衣之间的含量差异显著性。使用的分析软件为 SPSS 13.0 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA)。

由于条件所限,本研究中每种地衣的样本量为 3;低样本量使非参数检验分析的效能极低,其数据分布又不易满足参数检验分析方法的要求,导致多

数元素的地衣间含量差异在统计学上并不显著。例如,3 个配对样本中,CAF 的 36 个元素(组 I 和组 II 元素,图 2)在含量上均低于 XM,但配对样本的参数检验和非参数检验均未得出统计学上的含量差异显著性。因此,有必要使用 CAF/XM 值来衡量地衣间元素含量的差异大小。

1.5 CAF/XM 值的计算

在每个样地,每种元素的 CAF/XM 值为 CAF 和 XM 的该元素含量之商。根据研究经验,我们认为 CAF/XM 值平均值 $\leq 0.70$  时,CAF 的元素含量低于 XM;CAF/XM 值 $\geq 1.43$ (0.70 的倒数)时,CAF 的元素含量高于 XM;CAF/XM 值 $>0.70$  且 $<1.43$  时,两种元素的含量差异较小。此方法虽然较为主观,但可

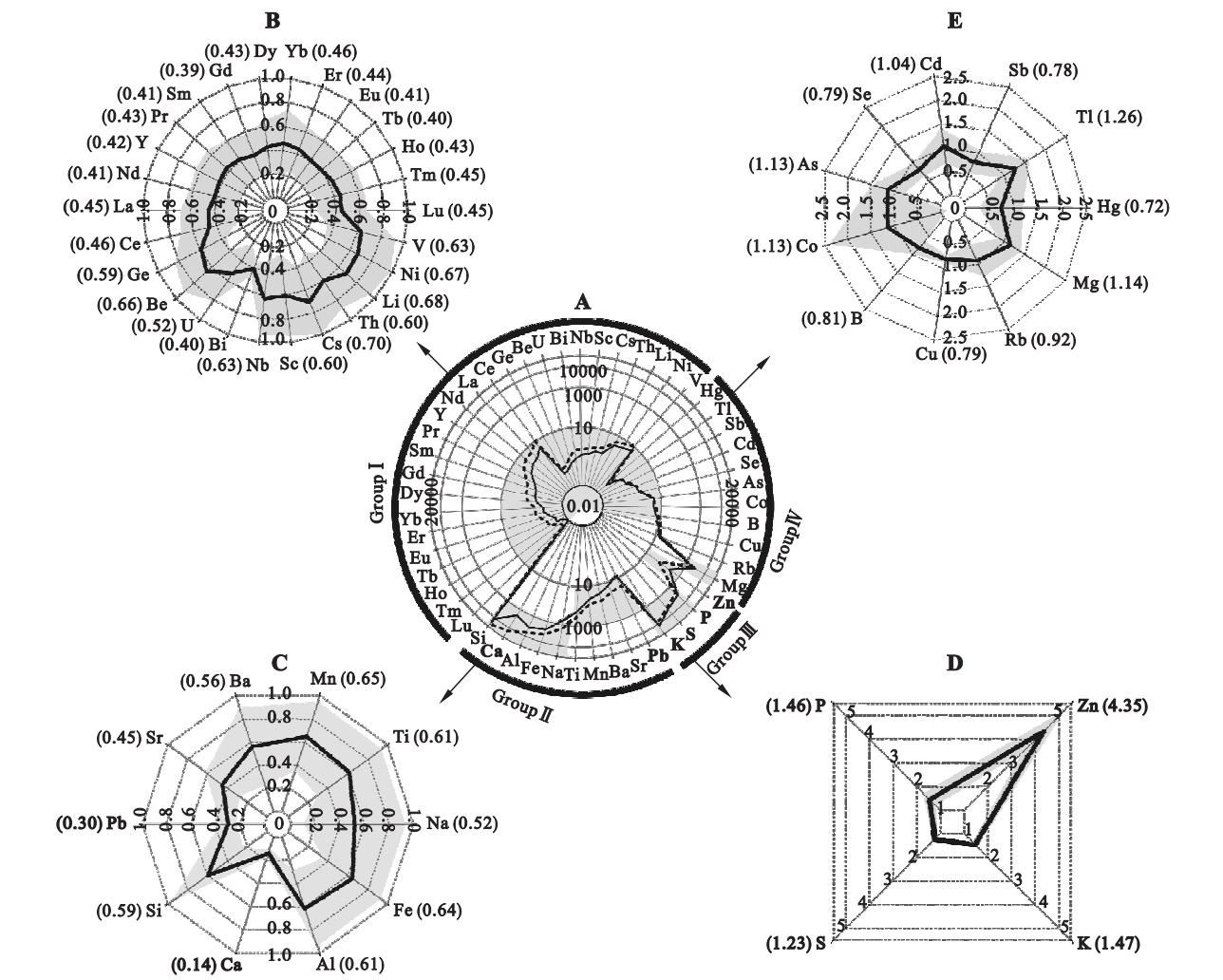


图 2 山西太行山区 3 个地点 2 种地衣的 51 种化学元素特征  
Fig.2 Characters of 51 chemical elements in 2 lichens from 3 sites in Taihang Mountains, Shanxi, China  
A. 平均含量( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ );B-E. CAF/XM 值。A 中,黑色虚线和实线分别为中国石黄衣 XM 和黄烛衣 CAF 的平均含量,阴影部分强调元素含量范围。B-E 中,黑色实线和括号内的数字表示 CAF/XM 值的平均值,灰色阴影表示 CAF/XM 值的标准差。加粗字体表示该元素的含量在两种地衣之间差异显著( $P<0.05$ ;配对样本 *T* 检验)。



用于判定元素含量是否差异较大。

## 2 结果与分析

两种地衣的 51 种元素含量见图 2A, 其 CAF/XM 平均值和标准差见图 2B-E。

图 2 显示, 51 种元素可分为 4 组。组 I 共 26 种元素, 包括 15 种镧系元素 (Ce、Dy、Er、Eu、Gd、Ho、La、Lu、Nd、Pr、Sm、Tb、Tm、Y 与 Yb) 与 11 种其他元素 (Be、Bi、Cs、Ge、Li、Nb、Ni、Sc、Th、U 和 V), 其含量均  $<10 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  (图 2A)。CAF 中这些元素的含量低于 XM (CAF/XM 平均值为 0.39~0.70; 图 2B), 但差异不显著。

组 II 包括 10 种元素 (Al、Ba、Ca、Fe、Mn、Na、Pb、Si、Sr 和 Ti), 其含量在 CAF 中较低 (CAF/XM 平均值为 0.14~0.65; 图 2C), 但仅 2 种元素在地衣之间差异显著, 即 CAF/XM 平均值最低的 Ca (0.14) 和次低的 Pb (0.30)。

组 III 包括 4 种元素 (K、P、S 和 Zn), 其含量在地衣之间差异显著 ( $P<0.05$ ; 图 2D) 且在 XM 中较高 (CAF/XM 值的平均值为 1.23~4.35)。

组 IV 包括 11 种元素 (As、B、Cd、Co、Cu、Hg、Mg、Rb、Sb、Se 和 Tl), 其含量在两种地衣之间差异较小 (CAF/XM 值的平均值为 0.72~1.26; 图 2E) 且不显著。

## 3 讨论

除组 IV 之外的 40 种元素在地衣间具有较大的含量差异, 其中 6 种元素的含量差异显著; 这种差异与元素的环境地球化学、地衣物种和植被均有关。具体而言, 石生地衣 XM 的元素组成受岩石和土壤的影响更大, 受森林冠层影响极小; 而树生地衣 CAF 受森林冠层的双重影响: 冠层截留作用 (canopy interception) 和冠层淋溶作用 (canopy leaching)。

### 3.1 岩石和土壤输入与冠层截留作用

组 I 和组 II 元素在两种地衣之间的含量差异极有可能归因于岩石和土壤的元素输入以及冠层截留作用对地衣元素组成的影响。这 2 组元素共 36 种, 虽然仅 2 种元素 (Ca 和 Pb) 在两种地衣之间含量差异显著 ( $P<0.05$ , 配对样本  $T$  检验; 图 2A), 但较低的 CAF/XM 平均值 (0.14~0.70; 图 2B, 2C) 显示, 它们在 XM 中的含量均高于 CAF。部分元素的地衣种间含量差异格局与其他相关研究相同, 如在内蒙古锡林浩特草原, 树生地衣 *Physcia aipolia* 的 Cs、Fe、

Na、Ni、Ti 和 V 也低于石生地衣 (Liu *et al.*, 2016a)。

这些元素含量的地衣间差异可能归因于岩石和土壤输入影响的原因是: 它们多为地壳源元素 (crustal elements), 且往往与出露岩石的风化物和土壤微尘的大气沉降有关 (Liu *et al.*, 2016a, 2016b, 2017; 刘华杰等, 2016); 可能归因于冠层截留影响的原因是: 冠层截留作用可降低抵达地衣表面的干沉降量 (Nash, 2008)。这在 Ca 元素上最为突出。Ca 在 XM 中的含量是 CAF 中的 7 倍, 是 CAF/XM 平均值 (0.14; 图 2C) 最低的元素。首先, 这应与本区域为石灰岩区的环境化学条件有关 (刘学勤, 1992): XM 为石生地衣, 石灰岩的岩屑微粒和石灰性土壤中富含的水溶性  $\text{Ca}^{2+}$  可因渗透作用进入 XM 地衣体内; 但 CAF 为树生地衣,  $\text{Ca}^{2+}$  不能直接从岩石或土壤中进入地衣体内。其次, 这也与 XM 更易截获大气干沉降物的生态学特点有关: XM 平铺于林外空旷地带的岩石上, 受冠层截留作用极少, 更易截获岩屑和土壤微尘的大气沉降; 而 CAF 多数贴生于与地面垂直的树干上, 较不易截获大气干沉降物, 且植物生长季 (5—10 月) 的林地盖度较高 (常达到 90%), 冠层截留作用会大大降低抵达地衣体表面的干沉降量。

Pb 含量的地衣间差异支持这种影响。Pb 在 XM 中的含量是 CAF 中的 3.3 倍, 其 CAF/XM 平均值 (0.30; 图 2C) 仅高于 Ca。Pb 在太行山区地衣体内的含量受大气沉降水平的显著影响, 与交通和工矿业等人类活动有关 (Liu *et al.*, 2016b)。冠层截留作用应是 CAF 中 Pb 含量低于 XM 的重要原因。

这种影响也受到稀土元素的支持。本研究中的 17 种稀土元素 (即 15 种镧系元素、Sc 和 Th) 在 XM 中的含量是在 CAF 中的 2.2~2.6 倍 (CAF/XM 平均值为 0.39~0.46; 图 2B)。稀土元素在世界绝大多数地区均为地壳源, 即使在人类污染严重的河北太行山区也是如此 (Liu *et al.*, 2016b), 它们应来源于岩屑和土壤的大气沉降, 或自石表风化壳进入地衣体。

这种影响也受到另外 17 种元素 (Al、Ba、Be、Bi、Cs、Fe、Ge、Li、Mn、Na、Nb、Ni、Si、Sr、Ti、U 和 V) 的支持。它们在 XM 中的含量是在 CAF 中的 1.4~2.5 倍 (CAF/XM 平均值为 0.40~0.70; 图 2B, 2C)。其中 10 种元素 (Al、Ba、Cs、Fe、Mn、Na、Ni、Sr、Ti 和 V) 在河北太行山区、内蒙古锡林浩特草原和内蒙古多伦县的相关研究中, 已被归为地壳源元素 (Liu *et al.*, 2016a, 2016b, 2017), 因此, 这些元素多源于岩屑和

土壤的大气沉降,和/或在岩石 Ca 的溶解并被地衣吸收的物理化学过程中进入地衣体。

### 3.2 冠层淋溶作用

本区域的组 III 元素(K、P、S 和 Zn)的地衣物种差异格局与河北太行山区相似。这些元素在 CAF 中含量显著高于 XM( $P<0.05$ ; 配对样本  $T$  检验;图 2A), CAF/XM 平均值最高(1.23~1.43;图 2D)。河北太行山区的相关研究也得出相似的结果: 树生地衣 *Phaeophyscia hispidula* 的 P、S 和 Zn 的累积水平高于 3 种石生地衣(刘华杰等, 2016)。这种地衣物种间的含量差异,可能与冠层淋溶有关。

元素的冠层淋溶作用是指冠层枝叶和树干附生生物的多种元素因降雨淋溶而使林内雨(由茎流 stemflow 和穿透雨 throughfall 组成)中多数元素的含量高于林外降雨的现象。在中国多种森林群落中,研究者发现林内雨中 K、P 和 S 等营养元素比林外雨中的含量更高(巩合德等, 2005; 闫文德等, 2005; 陈书军等, 2007)。这些营养元素随茎流流经树生地衣 CAF 时,可富集于地衣体内。而石生地衣 XM 生于无林内雨的林外,这很有可能是这些元素在 CAF 中含量显著高于 XM 的重要原因。

我们不太确定地将 Zn 在 CAF 中相对于 XM 的富集归因于冠层淋溶作用。事实上, Zn 的冠层淋溶作用研究较少,且林内雨(特别是茎流)中 Zn 含量相对于林外雨的富集/亏缺的研究结果并不一致(Moreno *et al.*, 2001; Silva *et al.*, 2001; Johnson *et al.*, 2006);在中国热带亚热带森林中, Zn 一般表现为负淋洗作用(闫文德等, 2005; 陈书军等, 2007);在太行山区,冠层 Zn 淋溶作用未见报道。

在欧美国家的相关研究中,多以树生地衣为大气元素沉降的监测生物(Nash, 2008)。但需注意的是,林内雨的营养元素含量在树种之间存在差异(闫文德等, 2005; Johnson *et al.*, 2006; 陈书军等, 2007),但树种的不同对树生地衣元素组成的影响尚不清楚。

### 3.3 与邻近地区的元素含量比较

通过与我国北方邻近地区相关研究的比较发现,本区域元素的大气沉降水平相对较低。组 I、组 II 和组 III 中的 20 种元素(Al、Ba、Ca、Ce、Cs、Fe、K、La、Mn、Na、Ni、P、Sc、Sm、Sr、Tb、Th、Ti、V 和 Zn)在河北太行山区和内蒙古草原的地衣中也有测试。本区域 CAF 中多数元素的含量低于内蒙古锡林浩特草原和多伦县的树生地衣的结果(Liu *et al.*, 2016a,

2017),这与后者更大的沙尘沉降有关。XM 的 Ca 含量与 150 km 外的河北太行山区的最高值相近,可能与后者亦多为石灰岩山区的地质条件有关;但其他多数元素的含量低于河北太行山区和内蒙古锡林浩特草原(Liu *et al.*, 2016a, 2016b; 刘华杰等, 2016)。

## 4 结 论

40 种元素在 2 种地衣之间的含量差异,与环境和地衣生态学特征差异有关:石生地衣 XM 中 36 种元素含量较高,可能归因于其受本地石灰岩环境化学条件和干沉降的影响更大,受冠层截留作用的影响更小;CAF 中 4 种营养元素的含量较高,可能主要归因于其受冠层淋溶作用的影响更大。因此,在大气元素沉降的地衣监测法的应用中,需特别注意地衣物种、基物化学和植被的影响。

## 参考文献

- 艾尼瓦尔·吐米尔, 夏莫夏提·帕尔哈提, 买买提·哈斯木, 等. 2015. 乌鲁木齐市 2014 年冬季空气质量的生物评价. 2015 年中国环境科学学会年会论文集: 3195–3200.
- 陈书军, 闫文德, 项文化, 等. 2007. 中亚热带地区几个树种树干茎流的养分特征研究. 林业科学研究, **20**(3): 408–414.
- 巩合德, 王开运, 杨万勤. 2005. 川西亚高山 3 种森林群落穿透雨和茎流养分特征研究. 林业科学, **41**(5): 14–20.
- 刘华杰, 刘四娃, 王 磊, 等. 2016. 物种和基物偏好对河北太行山区六种地衣的元素含量的影响. 菌物学报, **35**(10): 1258–1267.
- 刘学勤. 1992. 太行山西侧石灰岩山地抗旱造林技术研究. 北京: 中国科学技术出版社.
- 闫文德, 田大伦, 陈书军, 等. 2005. 4 个树种茎流养分特征研究. 林业科学, **41**(6): 50–56.
- 张 婷, 阿不都拉·阿巴斯, 艾尼瓦尔·吐米尔. 2011. 利用地衣监测大气污染研究进展. 环境保护科学, **37**(3): 5–12.
- 赵良成, 姜云军, 郭秀平, 等. 2016. 电感耦合等离子体发射光谱法/质谱法检测地衣样品中主次微量元素的方法优化. 光谱学与光谱分析, **36**(10): 3320–3325.
- Aprile GG, Di Salvatore M, Carratù G, *et al.* 2010. Comparison of the suitability of two lichen species and one higher plant for monitoring airborne heavy metals. *Environmental Monitoring and Assessment*, **162**: 291–299.
- Bari A, Rosso A, Minciardi MR, *et al.* 2001. Analysis of heavy metals in atmospheric particulates in relation to their bioaccumulation in explanted *Pseudevernia furfuracea* Thalli. *Environmental Monitoring and Assessment*, **69**: 205–220.

- Bergamaschi L, Rizzio E, Giaveri G, *et al.* 2007. Comparison between the accumulation capacity of four lichen species transplanted to a urban site. *Environmental Pollution*, **148**: 468–476.
- Brunialti G, Frati L. 2014. Bioaccumulation with lichens: The Italian experience. *International Journal of Environmental Studies*, **71**: 15–26.
- Garty J. 2001. Biomonitoring atmospheric heavy metals with lichens: Theory and application. *Critical Reviews in Plant Sciences*, **20**: 309–371.
- Godinho R, Verburg T, Freitas M, *et al.* 2009. Accumulation of trace elements in the peripheral and central parts of two species of epiphytic lichens transplanted to a polluted site in Portugal. *Environmental Pollution*, **157**: 102–109.
- Johnson MS, Lehmann J. 2006. Double-funneling of trees: Stemflow and root-induced preferential flow. *Ecoscience*, **13**: 324–333.
- Lang JL, Cheng SY, Li JB, *et al.* 2013. A monitoring and modeling study to investigate regional transport and characteristics of PM 2.5 pollution. *Aerosol and Air Quality Research*, **13**: 943–956.
- Liu HJ, Fang SB, Liu SW, *et al.* 2016a. Lichen elemental composition distinguishes anthropogenic emissions from dust storm input and differs among species: Evidence from Xilinhot, Inner Mongolia, China. *Scientific Reports*, **6**: 34694.
- Liu HJ, Zhao LC, Fang SB, *et al.* 2016b. Use of the lichen *Xanthoria mandschurica* in monitoring atmospheric elemental deposition in the Taihang Mountains, Hebei, China. *Scientific Reports*, **6**: 23456.
- Liu HJ, Zhao LC, Xia Y, *et al.* 2017. Elemental compositions of lichens from Duolun County, Inner Mongolia, China: Origin, road effect and species difference. *Scientific Reports*, **7**: 5598.
- Liu J, Diamond J. 2005. China's environment in a globalizing world. *Nature*, **435**: 1179–1186.
- Malaspina P, Giordani P, Modenesi P, *et al.* 2014. Bioaccumulation capacity of two chemical varieties of the lichen *Pseudevernia furfuracea*. *Ecological Indicators*, **45**: 605–610.
- Moreno G, Gallardo JF, Bussotti F. 2001. Canopy modification of atmospheric deposition in oligotrophic *Quercus pyrenaica* forests of an unpolluted region (central-western Spain). *Forest Ecology and Management*, **149**: 47–60.
- Nash III TH. 2008. Lichen Biology (2nd ed.). Cambridge: Cambridge University Press.
- Nash III TH, Gries C. 1995. The use of lichens in atmospheric deposition studies with an emphasis on the Arctic. *Science of the Total Environment*, **160**: 729–736.
- Silva IC, Rodriguez HG. 2001. Interception loss, throughfall and stemflow chemistry in pine and oak forests in northeastern Mexico. *Tree Physiology*, **21**: 1009–1013.
- Smodiš B, Pignata ML, Saiki M, *et al.* 2004. Validation and application of plants as biomonitors of trace element atmospheric pollution: A co-ordinated effort in 14 Countries. *Journal of Atmospheric Chemistry*, **49**: 3–13.
- Tian HZ, Zhu CY, Gao JJ, *et al.* 2015. Quantitative assessment of atmospheric emissions of toxic heavy metals from anthropogenic sources in China: Historical trend, spatial variation distribution, uncertainties and control policies. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **15**: 12107–12166.
- Wang LT, Yang J, Zhang P, *et al.* 2013. A review of air pollution and control in Hebei Province, China. *Open Journal of Air Pollution*, **2**: 47–55.
- Zhao LC, Wang L, Jiang YJ, *et al.* 2017. Determination of elemental concentrations in lichens using ICP-AES/MS. *Bio-protocol*, **7**: e2165.
- Zhao XJ, Zhao PS, Xu J, *et al.* 2013. Analysis of a winter regional haze event and its formation mechanism in the North China Plain. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **13**: 5685–5696.

---

作者简介 贾晟菊,女,1994年生,硕士研究生,研究方向为地衣生态学。E-mail: 953711099@qq.com

责任编辑 魏中青

---