

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 23 期 Vol.32 No.23 **2012**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 23 期

2012 年 12 月 (半月刊)

目 次

中国石龙子母体孕期调温诱导幼体表型:母体操纵假说的实验检测	李 宏,周宗师,吴延庆,等 (7255)
同种或异种干扰对花鼠分散贮藏点选择的影响	申 圳,董 钟,曹令立,等 (7264)
曝气充氧条件下污染河道氨挥发特性模拟	刘 波,王文林,凌 芬,等 (7270)
贵州草海越冬斑头雁日间行为模式及环境因素对行为的影响	杨延峰,张国钢,陆 军,等 (7280)
青藏高原多年冻土区积雪对沼泽、草甸浅层土壤水热过程的影响	常 娟,王根绪,高永恒,等 (7289)
长沙城市斑块湿地资源的时空演变	恭映璧,靖 磊,彭 磊,等 (7302)
基于模型数据融合的干烟洲亚热带人工林碳水通量模拟	任小丽,何洪林,刘 敏,等 (7313)
农田氮素非点源污染控制的生态补偿标准——以江苏省宜兴市为例	张 印,周羽辰,孙 华 (7327)
用 PFU 微型生物群落监测技术评价化工废水的静态毒性	李朝霞,张玉国,梁慧星 (7336)
京郊农业生物循环系统生态经济能值评估——以密云尖岩村为例	周连第,胡艳霞,王亚芝,等 (7346)
基于遥感的夏季西安城市公园“冷效应”研究	冯晓刚,石 辉 (7355)
海南岛主要森林类型时空动态及关键驱动因子	王树东,欧阳志云,张翠萍,等 (7364)
不同播种时间对吉林省西部玉米绿水足迹的影响	秦丽杰,靳英华,段佩利 (7375)
黄土塬区不同品种玉米间作群体生长特征的动态变化	王小林,张岁岐,王淑庆,等 (7383)
密植条件下种植方式对夏玉米群体根冠特性及产量的影响	李宗新,陈源泉,王庆成,等 (7391)
沙地不同发育阶段的人工生物结皮对重金属的富集作用	徐 杰,敖艳青,张璟霞,等 (7402)
增强 UV-B 辐射和氮对谷子叶光合色素及非酶促保护物质的影响	方 兴,钟章成 (7411)
不同产地披针叶茴香光合特性对水分胁迫和复水的响应	曹永慧,周本智,陈双林,等 (7421)
芦芽山林线华北落叶松径向变化季节特征	董满宇,江 源,王明昌,等 (7430)
地形对植被生物量遥感反演的影响——以广州市为例	宋巍巍,管东生,王 刚 (7440)
指数施肥对楸树无性系生物量分配和根系形态的影响	王力朋,晏紫伊,李吉跃,等 (7452)
火烧伤害对兴安落叶松树干径向生长的影响	王晓春,鲁永现 (7463)
山地梨枣树耗水特征及模型	辛小桂,吴普特,汪有科,等 (7473)
两种常绿阔叶植物越冬光系统功能转变的特异性	钟传飞,张运涛,武晓颖,等 (7483)
干旱胁迫对银杏叶片光合系统 II 荧光特性的影响	魏晓东,陈国祥,施大伟,等 (7492)
神农架川金丝猴栖息地森林群落的数量分类与排序	李广良,丛 静,卢 慧,等 (7501)
碱性土壤盐化过程中阴离子对土壤中镉有效态和植物吸收镉的影响	王祖伟,弋良朋,高文燕,等 (7512)
两种绣线菊耐弱光能力的光合适应性	刘慧民,马艳丽,王柏臣,等 (7519)
闽楠人工林细根寿命及其影响因素	郑金兴,黄锦学,王珍珍,等 (7532)
旅游交通碳排放的空间结构与情景分析	肖 潇,张 捷,卢俊宇,等 (7540)
北京市妫水河流域人类活动的水文响应	刘玉明,张 静,武鹏飞,等 (7549)
膜下滴灌技术生态-经济与可持续性分析——以新疆玛纳斯河流域棉花为例	范文波,吴普特,马枫梅 (7559)
高温胁迫及其持续时间对棉蚜死亡和繁殖的影响	高桂珍,吕昭智,夏德萍,等 (7568)
桉树枝瘿姬小蜂虫瘿解剖特征与寄主叶片生理指标的变化	吴耀军,常明山,盛 双,等 (7576)
西南桦纯林与西南桦×红椎混交林碳贮量比较	何友均,覃 林,李智勇,等 (7586)
长沙城市森林土壤 7 种重金属含量特征及其潜在生态风险	方 晰,唐志娟,田大伦,等 (7595)
专论与综述	
城乡结合部人-环境系统关系研究综述	黄宝荣,张慧智 (7607)
陆地生态系统碳水通量贡献区评价综述	张 慧,申双和,温学发,等 (7622)



封面图说: 麋鹿群在过河——麋鹿属于鹿科,是中国的特有动物。历史上麋鹿曾经广布于东亚地区,到 19 世纪时,只剩下在北京南海子皇家猎苑内一群。1900 年,八国联军攻陷北京,麋鹿被抢劫一空。1901 年,英国的贝福特公爵用重金从法、德、荷、比四国收买了世界上仅有的 18 头麋鹿,以半野生的方式集中放养在乌邦寺庄园内,麋鹿这才免于绝灭。在世界动物保护组织的协调下,1985 年起麋鹿从英国分批回归家乡,放养到北京大兴南海子、江苏省大丰等地。这是在江苏省大丰麋鹿国家级自然保护区放养的麋鹿群正在过河。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201111031658

徐杰, 敖艳青, 张璟霞, 姚一平, 高天云, 骆洪. 沙地不同发育阶段的人工生物结皮对重金属的富集作用. 生态学报, 2012, 32(23): 7402-7410.

Xu J, Ao Y Q, Zhang J X, Yao Y P, Gao T Y, Luo H. Heavy metal contaminant in development process of artificial biological Soil Crusts in sand-land. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(23): 7402-7410.

沙地不同发育阶段的人工生物结皮对 重金属的富集作用

徐 杰^{1,*}, 敖艳青², 张璟霞¹, 姚一平³, 高天云³, 骆 洪³

(1. 内蒙古师范大学生命科学与技术学院, 呼和浩特 010021; 2. 内蒙古商贸职业学院工程系, 呼和浩特 010050;

3. 内蒙古农业科学院测试研究中心, 呼和浩特 010031)

摘要: 生物结皮广泛存在于沙地生态系统, 具有重要的生态功能。通过对位于库布齐沙漠腹地达拉特旗火力发电厂附近沙地中不同年代人工生物结皮及物理结皮中重金属含量的测定, 旨在分析不同类型生物结皮及物理结皮在不同的发育阶段对重金属富集的影响和重金属污染的指示程度。通过分析和比较, 得出以下结论: 不同年代生物结皮和物理结皮各种重金属含量均表现为随着发育时间的增加而增加的趋势, 生物结皮重金属含量多数类型表现为: $Zn > Cr > Ni > Pb > Cu > As > Co > Cd > Hg$ 的顺序关系, 少数类型表现为: $Cr > Zn > Ni > Pb > Cu > As > Co > Cd > Hg$ 的顺序关系。通过单因素方差分析 (ANOVA), 不同年代藓结皮中各种元素差异显著性 ($P < 0.05$) 明显低于藻结皮和物理结皮。相同年代生物结皮和物理结皮重金属含量都表现为同样地规律: 藓结皮 > 藻结皮 > 物理结皮, 表明相同背景条件下, 藓结皮对各种重金属的富集能力明显比藻结皮和物理结皮的富集能力强。通过单因素方差分析 (ANOVA), Hg 和 Ni 元素含量在所有相同年代样地的生物结皮和物理结皮均无差异, Cr, Zn, Cu, Co 元素含量均存在差异 ($P < 0.05$), 但差异有的表现在藓结皮和藻结皮之间, 而有的表现为藻结皮和物理结皮之间, 而 Pb, As, Cd 元素含量则表现为有的年代有差异, 有的年代无差异。通过污染因子 CF 值分析, 藓结皮对污染的指示作用要明显比藻结皮和物理结皮敏感。同时生物结皮对于重金属的富集具有一定的选择性, 像 Hg, Ni, Zn, Cu, Pb, Co 等元素生物结皮相对富集较少, 而像 Cr, Cd, As 等元素相对富集较多。

关键词: 藓结皮; 藻结皮; 物理结皮; 重金属; 富集作用

Heavy metal contaminant in development process of artificial biological Soil Crusts in sand-land

XU Jie^{1,*}, AO Yanqing², ZHANG Jingxia¹, YAO Yiping³, GAO Tianyun³, LUO Hong³

1 College of Science and Technology, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010021, China

2 Inner Mongolia International Trade College, Hohhot 010050, China

3 Inner Mongolia Academy of Agricultural Science, Hohhot 010031, China

Abstract: In sand-land ecological systems, there are wide-spread biological soil crusts which have an important function in the ecological systems. In this study, the heavy metal element contents in artificial biological and physical crusts of different stages were measured in the vicinity of Dalate Thermal Power Plant in Kubuqi Desert to analyze the influence of physical soil crusts and different types of biological soil crusts in different developmental stages upon the ability to accumulate heavy metal and indication of their pollution. The results showed that the contents of various heavy metals increased each year with the increasing of the developmental time of biological and physical crusts of different stages. For most of types of heavy

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (30860063, 30660027); 内蒙古教育厅基金项目 (NJzy08202); 内蒙古师范大学青年基金项目 (QN06014) 资助

收稿日期: 2011-11-03; 修订日期: 2012-07-23

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xujie@imnu.edu.cn

metals in soil crusts, the contents displayed the following sequence as $\text{Zn} > \text{Cr} > \text{Ni} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{As} > \text{Co} > \text{Cd} > \text{Hg}$, and for a few of types, the contents showed one as $\text{Cr} > \text{Zn} > \text{Ni} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{As} > \text{Co} > \text{Cd} > \text{Hg}$. One factor analysis of variance (One-way ANOVA) demonstrated that the difference significance ($P < 0.05$) of the various heavy metal contents in moss crusts of different stages was greatly lower than that in the algal and physical crusts. Comparing of the heavy metal contents in the biological crust and physical crusts of the same stage revealed that moss crusts $>$ algal crusts $>$ physical crusts, suggesting that the heavy metal enrichment of moss crusts was greater than that of algal crusts and physical crusts. Through one-way ANOVA, the contents of Hg and Ni in all kinds of biological crusts and physical crusts of the same stage were no significant difference, while the contents of Cr, Zn, Cu and Co were significantly different ($P < 0.05$) in between moss crusts and algae crusts, or in between algae crusts and physical crusts. As for Pb, As and Cd, their contents did not vary significantly with the development stages of different crusts ($P < 0.05$). The contaminant factor (CF) analysis showed that moss crusts were more sensitive than algal crusts and physical crusts for the role of indicating pollution. Meanwhile, biological crusts accumulated the heavy metals selectively. They less likely accumulated Hg, Ni, Zn, Cu, Pb and Co and more likely enriched Cr, Cd and As.

Key Words: moss crusts; algae crusts; physical crusts; heavy metals; contaminant

目前,环境污染已成为制约我国经济发展的瓶颈,环境污染问题(特别是工业重金属污染)成为当前环境科学研究领域的热点。鄂尔多斯地区作为我国新兴的能源地区,为发展火力发电提供了便利的条件,但火力发电厂所排放的尘烟含有大量的污染重金属,污染重金属沉降对电厂周边居民生活和脆弱的沙地生态系统可能会导致一系列的生态环境问题,因此利用生物指示作用监测重金属污染成为当务之急。在欧美一些国家利用地衣、苔藓植物来研究重金属富集作用和污染监测,已经成为一种成熟的技术手段^[1-4],并且取得很多研究成果,成为当今国际环境科学研究的热点之一^[5-15]。从20世纪60年代末开始,欧洲、美洲国家开始利用苔藓植物指示监测和研究环境重金属的沉降污染,并且研究方法也在不断改进^[16-17]。通过研究苔藓植物对各国工业地区、采矿区及火力电厂大气沉降重金属的富集,绘出地区和国家的大气沉降重金属污染指示图,并长期监测,观察重金属随时间的推移,在苔藓植物体内的含量变化^[18-22],以及对比不同种苔藓植物间对重金属的富集和耐受作用^[23],同时通过人工迁移栽培实验观察本地原有种与外来迁移种大气沉降污染重金属富集和耐受作用,也有了一些方法和手段^[24]。利用苔藓植物监测技术在亚洲一些国家也有了起步^[25]。国内有关苔藓植物对大气重金属污染研究起步较晚,研究的系统性较差。先前主要是从生态学角度研究苔藓植物对大气重金属污染的指示作用,化学方法报道较少。近几年发表研究综述和实验性研究成果逐渐增多^[26]。曹同^[27]和 Shou-Qin Sun^[28]分别利用苔藓植物的吊袋技术监测鞍山市和重庆市不同污染区域大气中重金属含量变化。邵晶^[29]对比北京和浙江天目山地区苔藓植物中重金属含量,并利用种间校正的方法,得出不同地区不同种苔藓植物污染指示比较。黄朝表^[30]测定了金华市分布的苔藓植物体内10种重金属含量,探讨了体内富集的重金属间的相关性。上述所有研究均利用体型较大的苔藓植物种为研究材料,但是对于干旱半干旱区沙漠生态系统,由于苔藓植物生长矮小,采集苔藓植物非常困难,因此限制了利用苔藓植物监测大气沉降重金属的监测手段,但生物结皮广泛存在于干旱半干旱地区沙漠生态系统,生物结皮主要由藻类、菌类、地衣、苔藓植物共同形成的一个复合生物土壤层^[31-33],生物结皮的形成是大气降尘和生物综合作用的结果,生物结皮对防风固沙、防止水土流失及土壤营养元素积累具有重要作用^[34-36],因此能否利用生物结皮监测重金属污染成为一项新的研究内容。本文试图利用不同类型生物结皮和物理结皮作为监测材料,通过对生物结皮重金属含量的监测,研究生物结皮对重金属的富集规律以及对环境污染的指示作用。

1 研究区域概况

研究区位于鄂尔多斯高原的北缘,库布齐沙漠的南缘的达拉特旗火力发电厂附近,地理位置在北纬 $40^{\circ} 21' 30''$ — $22^{\circ} 30'$,东经 $109^{\circ} 50' 30''$ — $51^{\circ} 50'$ 。属于黄河以南的二级阶地,平均海拔 1040 m,属中温带大陆性季风

气候,年均降水量 240—360 mm,蒸发量 2160 mm,极端最高气温 40.2 °C,最低温度-34.5 °C,沙面最高温度 66 °C,最低温度-39 °C。大于或等于 10 °C 年均积温为 3197.4 °C,无霜期为 130—140 d,年风速大于 5 m/s 的时日有 180 d,8 级以上大风日 27 d,扬沙日数 58 d,多出现在 3—5 月。年均风速 3.3 m/s,最大瞬时风速可达 30 m/s。地势南高北低,起伏不平。立地类型主要有流动沙地,固定、半固定沙地和丘间低地。

2 研究方法

2.1 野外样地的选择和调查

研究样地设在中国科学院水生生物研究所和内蒙古林业科学院共建研究基地,位于达拉特火力发电厂西部,距离电厂直线距离 8 km,研究区域属于沙丘地,无居民定居,不存在人为污染。该研究基地主要从事荒漠藻的研究及纯化技术,并且利用纯化的藻液大规模培养后,人工喷施在流动沙丘上发育成人工生物结皮,以达到防沙固沙的目的。研究样地选择在不同年代(2002、2003、2004、2007、2008 年)接种的人工生物结皮区。野外调查的标本采集于 2010 年 8 月进行,调查发现在所有年代接种样地均形成大面积藻结皮,2002、2003、2004 年接种样地出现了大面积真藓属植物和小面积对齿藓属植物形成的藓结皮,在 2007 年接种样地藓结皮形成的面积较小,只有真藓属植物没有对齿藓属植物,而在 2008 年接种样地没有出现藓结皮。

2.2 苔藓植物物种鉴定和生物结皮实验材料的采集

在试验区域内采集苔藓植物标本,经实验室鉴定,发现试验区域内分布最广的苔藓植物是真藓(*Bryum argenteum*),构成了大面积的真藓结皮,其次是土生对齿藓(*Didymodon vinealis*),聚集成片形成土生对齿藓结皮,镶嵌在真藓结皮中。标本中还发现盐土藓(*Pterygoneurum subsessile*)和绿色流苏藓(*Crossidium chloronotos*)属于稀有种,零星分布在真藓结皮中,芦荟藓(*Aloina rigida*)也属于稀有种,零星分布在土生对齿藓结皮中。取样于 2011 年 6 月中旬至 6 月底完成。取样分别在不同年代接种样地的样方内按五点采样法分别采集藻结皮、藓结皮和物理结皮作为测定重金属的实验材料,根据鉴定结果,藓结皮选取代表性的真藓结皮。

2.3 大气降尘的收集

2010 年 8 月在研究样地设置 3 个简易的沉降缸,2011 年 6 月底收集近 1a 的大气降尘。

2.4 样品的重金属含量测定

生物结皮、物理结皮和降尘的重金属含量测定在内蒙古农牧业科学院测试中心(国家测试认证机构)完成。利用 AAS-ICP 测定,实验步骤参照国家标准 GB/T5009 系列进行,每个样本重复 3 次。测得的数据用 SPSS18.0 软件进行数据分析。

3 结果分析

3.1 不同年代人工生物结皮对重金属的富集

不同年代人工生物结皮发育过程中,结皮组分相应发生系列变化,表现在苔藓植物的定居和种类数量的增加,样地中除了 2008 年接种样地只有藻结皮而未出现藓结皮外,其他年代样地不同程度出现了藓结皮。表 1 和图 1 显示,不同年代藓结皮各种重金属含量均表现为随着年代的增加而增加,藓结皮重金属含量表现为:Zn>Cr>Ni>Pb>Cu>As>Co>Cd>Hg 的顺序关系。通过单因素方差分析(ANOVA)可以看出,不同年代藓结皮中 Zn、Ni、Pb、As、Cd、Hg 等 6 种元素无差异,其他 3 种元素 Cr、Cu、Co 不同程度存在差异($P<0.05$),具体差异参见表 1。不同年代藻结皮各种重金属含量也均表现为随着年代的增加而增加的趋势(图 1),2002—2004 年接种的藻结皮重金属含量表现为:Cr>Zn>Ni>Pb>Cu>As>Co>Cd>Hg 的顺序关系,而 2007 年和 2008 年接种的藻结皮重金属含量顺序则与藓结皮相同。通过单因素方差分析(ANOVA)可以看出(表 1),不同年代藻结皮中除了 Pb 元素无差异,其他 8 种元素不同程度存在差异($P<0.05$)。不同年代物理结皮各种重金属含量除个别元素 Hg 和 Zn 在 2007 年样地比 2008 年样地含量稍大外,其他元素均表现为随着年代的增加而增加的趋势(表 1),2002、2004、2007 年样地的重金属含量顺序与 2002—2004 年接种样地的藻结皮表现相同,而 2003 年和 2008 年样地重金属含量顺序则与藓结皮相同。通过单因素方差分析(ANOVA)可以看出(表 1),不同年代物理结皮中除了 Hg 和 As 元素无差异,其他 7 种元素不同程度存在差异($P<0.05$)。由此可见,

表 1 不同年代人工生物结皮、物理结皮重金属含量特征值与土壤重金属环境背景值的比较/(mg/kg)

含量 Concentration	汞 Hg	铬 Cr	铅 Pb	镉 Cd	锌 Zn	铜 Cu	钴 Co	镍 Ni	砷 As
内蒙古土壤元素背景值 ^[37]	0.040 ± 0.045	41.40 ± 20.42	17.20 ± 10.18	0.053 ± 0.039	59.10 ± 37.65	14.40 ± 6.70	10.10 ± 6.03	19.50 ± 9.07	7.50 ± 4.56
风沙土元素背景值 ^[37]	0.016 ± 0.017	24.80 ± 13.23	13.80 ± 4.89	0.044 ± 0.025	29.80 ± 19.96	8.80 ± 4.84	8.30 ± 4.50	11.50 ± 5.78	4.30 ± 1.90
SD	0.047 ± 0.0124	26.60 ± 0.518	16.40 ± 0.549	0.056 ± 0.0035	62.60 ± 3.014	18.15 ± 0.674	7.687 ± 0.453	15.72 ± 0.793	2.33 ± 0.242
2002MC	0.024 ± 0.002ad	47.5 ± 1.359ad	16.9 ± 0.660ad	0.129 ± 0.018ad	51.9 ± 4.832ad	15.2 ± 1.105ad	7.70 ± 0.539ad	21.2 ± 2.876ad	8.30 ± 0.311ad
2002AC	0.023 ± 0.003ad	43.97 ± 2.836ad	15.9 ± 1.030ad	0.114 ± 0.010ad	42.0 ± 2.693bd	11.7 ± 0.820bd	5.51 ± 0.437bd	18.2 ± 0.988ad	6.50 ± 0.340bde
2002PC	0.017 ± 0.004ad	39.12 ± 2.574bd	15.5 ± 0.691ad	0.109 ± 0.004ad	35.82 ± 2.706bd	11.2 ± 0.892bd	5.18 ± 0.163bd	16.82 ± 0.915ad	6.21 ± 0.655bd
2003MC	0.022 ± 0.003ad	47.0 ± 1.285ad	16.54 ± 0.564ad	0.120 ± 0.012ad	51.6 ± 4.186ad	13.6 ± 0.903ade	7.49 ± 0.681ad	19.8 ± 1.931ad	7.50 ± 0.378ad
2003AC	0.019 ± 0.002ad	41.7 ± 1.683bd	15.7 ± 1.282ad	0.102 ± 0.009abde	38.83 ± 2.989bd	10.0 ± 0.742bde	5.31 ± 0.178bd	17.9 ± 1.002ad	6.92 ± 0.393ad
2003PC	0.016 ± 0.001ad	30.71 ± 1.864ce	15.5 ± 0.319ad	0.085 ± 0.007be	34.1 ± 1.625bde	9.39 ± 0.684be	5.18 ± 0.148bd	16.8 ± 0.686ad	6.20 ± 0.543ad
2004MC	0.018 ± 0.002ad	40.2 ± 1.630ae	16.5 ± 0.635ad	0.116 ± 0.006ad	44.5 ± 3.119ad	13.4 ± 0.639ade	5.683 ± 0.366ae	17.1 ± 0.111ad	7.13 ± 0.458ad
2004AC	0.014 ± 0.002ae	36.7 ± 1.425be	15.8 ± 1.002ad	0.095 ± 0.008abe	32.3 ± 1.891be	9.08 ± 0.311be	4.693 ± 0.298bd	16.11 ± 1.202ade	6.47 ± 0.434ade
2004PC	0.012 ± 0.001ad	32.3 ± 0.916ce	15.1 ± 0.382ad	0.073 ± 0.008ce	29.93 ± 2.724bef	8.88 ± 0.535be	4.507 ± 0.174be	15.8 ± 0.686ad	6.18 ± 0.530ad
2007MC	0.018 ± 0.002ad	34.07 ± 1.676af	16.2 ± 0.625ad	0.104 ± 0.015ad	42.6 ± 1.508ad	12.4 ± 0.552ae	5.16 ± 0.491ae	16.9 ± 1.198ad	6.73 ± 0.738ad
2007AC	0.016 ± 0.004ade	30.3 ± 0.436bf	9.38 ± 0.698bd	0.087 ± 0.007bde	37.7 ± 0.949bd	10.3 ± 0.454bde	4.84 ± 0.219ad	15.4 ± 0.778ae	5.66 ± 0.516aef
2007PC	0.014 ± 0.001ad	29.2 ± 1.478be	13.5 ± 0.422bd	0.070 ± 0.007be	26.5 ± 0.975cf	8.60 ± 0.706ce	3.14 ± 0.085bf	15.2 ± 0.772ad	5.59 ± 0.407ad
2008AC	0.018 ± 0.002de	28.7 ± 0.887♦f	12.7 ± 0.845♦de	0.085 ± 0.007e	37.9 ± 0.797♦d	10.02 ± 0.840de	3.60 ± 0.379e	14.6 ± 0.384♦e	4.90 ± 0.249f
2008PC	0.016 ± 0.001d	23.2 ± 0.814f	9.49 ± 0.657f	0.065 ± 0.008e	34.3 ± 0.651f	8.55 ± 0.614e	2.74 ± 0.425f	12.9 ± 0.356e	4.61 ± 0.575d

内蒙古土壤背景值 Element background value in soil of Inner Mongolia; 风沙土元素背景值 Element background value in sandy soil; SD 代表背景值; AC 代表物理结皮; PC 代表生物结皮; 表中数值为平均数±标准差, 单因素方差分析 (ANOVA), 同列下不同小写字母 a—c 表示同一年代各项差异显著 ($P < 0.05$), 同列下不同小写字母 d—f 表示不同年代同项差异显著 ($P < 0.05$); ♦ 代表 2008 年样地 (T -test) 藻结皮和物理结皮差异显著 ($P < 0.05$)

随着人工藻结皮发育年代的增加,无论是藻结皮本身还是其上发育的藓结皮以及物理结皮,其各种重金属的含量均呈现出随着发育时间的增加,重金属含量富集越高。

3.2 相同年代人工生物结皮和物理结皮对重金属的富集

通过对相同年代人工生物结皮和物理结皮重金属含量的分析比较,发现所有年代重金属含量均表现为:藓结皮>藻结皮>物理结皮(图1)。说明相同背景下,藓结皮对各种重金属的富集能力明显比藻结皮和物理结皮的富集能力强,而藻结皮也相应比物理结皮的富集能力强。通过对2002—2007年相同年代样地的生物结皮和物理结皮的重金属含量的单因素方差分析(ANOVA)和2008年样地T-test分析可知,Hg和Ni元素含量在生物结皮和物理结皮均无差异,Cr、Zn、Cu、Co元素含量在生物结皮和物理结皮均存在差异($P<0.05$),但差异有的表现为藓结皮和藻结皮存在差异,而有的表现为藻结皮和物理结皮存在差异。例如Cr元素,2002年样地表现为藓结皮和藻结皮无差异,藓结皮、藻结皮与物理结皮存在差异($P<0.05$),2003年和2004年样地均表现为藓结皮、藻结皮与物理结皮之间均存在差异($P<0.05$),2007年样地则表现为藓结皮和藻结皮、物理结皮存在差异($P<0.05$),而藻结皮和物理结皮没有差异,2008年样地表现为藻结皮和物理结皮存在差异($P<0.05$),其他3种元素具体差异见表1。Pb、As、Cd元素在相同年代样地的生物结皮和物理结皮表现为有的年代有差异,有的年代无差异,如Pb元素只有2007年和2008年样地存在差异($P<0.05$),其他年代没有,As元素只有2002年样地存在差异($P<0.05$),其他年代没有,Cd元素2002和2008年样地没有差异,其他年代均存在差异($P<0.05$),具体差异详见表1。通过以上分析,发现生物结皮对于重金属的吸附具有一定的选择性,像Hg、Ni、Zn、Cu、Pb等元素生物结皮相对富集较少,而像Cr、Cd、As等元素相对富集较多。

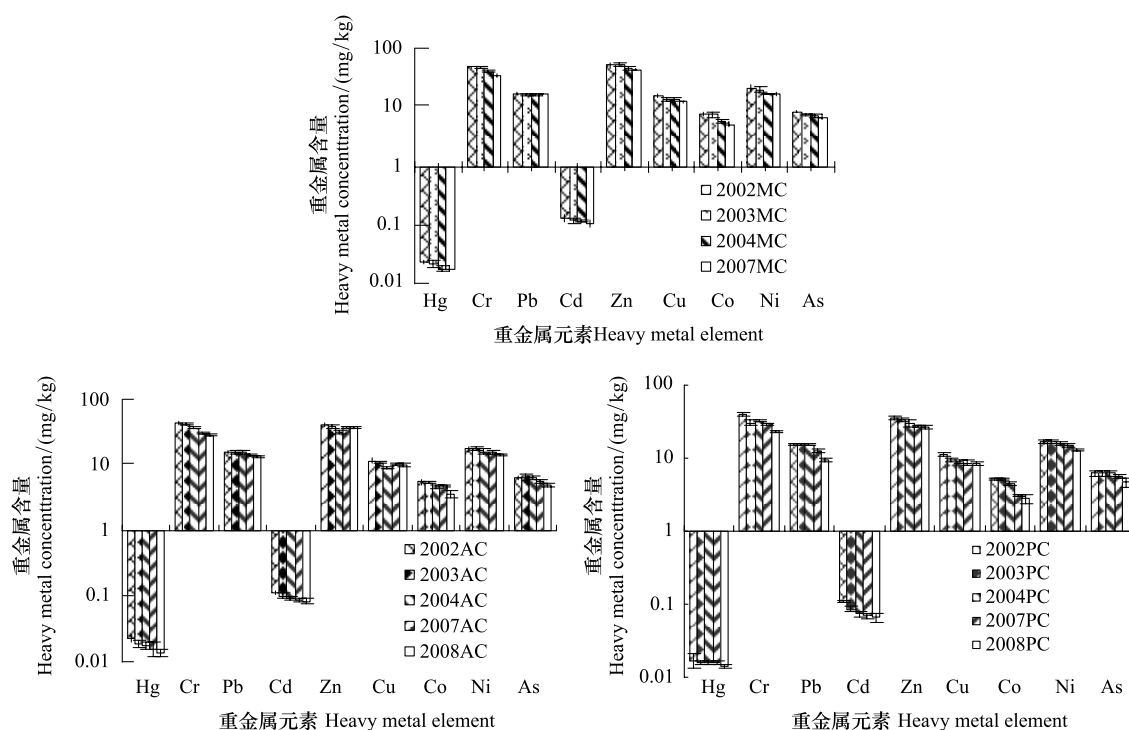


图1 生物结皮和物理结皮中重金属含量特征

Fig.1 The comparisons of heavy metal concentration in biological and physical crusts

3.3 不同年代人工促成生物结皮大气沉降重金属污染评价

污染因子常常作为评价一个地区受到污染程度的一个重要指标^[2],其计算公式为 $CF=X/X'$ (X 为样品中 X 元素含量, X' 为 X 元素在该地区的环境背景值)。

具体分级标准见表2。

表 2 污染因子指数分级^[15]

Table 2 The contamination factor indexes

污染因子 Contamination factor CF						
污染因子 CF Contamination factor	CF<1	1<CF<2	2<CF<3.5	3.5<CF<8	8<CF<27	27<CF
污染程度 Contamination degree	无污染	极轻污染	轻度污染	中度污染	严重污染	极严重污染

由于研究区域属于风沙土质,因此,选用风沙土背景值^[37]作为数据分析背景值。表 3 给出的是人工生物结皮和物理结皮在不同样地的污染因子(CF 值)以及试验区域内降尘的 CF 值。从表 3 中可以看出,该区域大气降尘中只有 Hg、Zn、Cu 三种元素其 CF 值($2<CF<3.5$)属于轻度污染,Co 和 As 元素其 CF 值($CF<1$)属于无污染,而其他 4 种元素 CF 值($1<CF<2$)均属于极轻度污染。对比降尘的数据,发现该区域生物结皮和物理结皮中 Co 元素在所有样地均表现为无污染水平,但随着时间的推移,CF 值在增加,同样表现出 CF 值物理结皮<藻结皮<藓结皮的趋势,而 Cd 元素在不同年代藓结皮样地均表现为轻度污染,藻结皮样地则表现为随年代增加,污染水平由极轻度污染向轻度污染的变化趋势,说明藓结皮对 Cd 元素的吸附能力明显比藻结皮高,因此藓结皮对污染的指示作用更敏感。对于 As 元素,由于降尘中含量较低,CF 值只有 0.54,属于无污染水平,但在藓结皮中,CF 值在 2002、2003 藓结皮样地分别达到 1.93 和 1.74,属于极轻污染水平,因此 As 元素在生物结皮的富集作用也十分明显,这种现象同样出现在 Cr 元素上,说明生物结皮对 Cd、As、Cr 等元素具有一定的选择吸收性。对于 Hg、Zn、Cu 等元素,虽然在降尘中含量较高,CF 属于轻度污染水平,但是在生物结皮和物理结皮的含量均显著低于降尘中的含量(T -test, $P<0.05$),说明生物结皮对 Hg、Zn、Cu、Ni、Co 等元素没有特定的选择吸收性,同样情况还表现在 Pb 元素含量上。

表 3 生物结皮、物理结皮和该区域降尘的 CF 值以及污染级

Table 3 CF values and contamination degree of different biological and physical crusts and settled dusts in local region

污染程度 Pollution degree			汞 Hg	铬 Cr	铅 Pb	镉 Cd	锌 Zn	铜 Cu	钴 Co	镍 Ni	砷 As
CF<1 无污染 None	MC	2002	1.50S	1.92S	1.22S	2.93L	1.74S	1.73S	0.92N	1.84S	1.93S
		2003	1.38S	1.90S	1.20S	2.73L	1.73S	1.55S	0.90N	1.72S	1.74S
		2004	1.13S	1.62S	1.20S	2.64L	1.08S	1.52S	0.68N	1.49S	1.65S
		2007	1.13S	1.37S	1.17S	2.36L	1.43S	1.41S	0.62N	1.47S	1.57S
1<CF<2 极轻污染 Suspected	AC	2002	1.44S	1.77S	1.15S	2.59L	1.41S	1.33S	0.66N	1.58S	1.51S
		2003	1.19S	1.68S	1.14S	2.32L	1.30S	1.14S	0.64N	1.56S	1.61S
		2004	0.88N	1.48S	1.14S	2.16L	1.08S	1.03S	0.57N	1.40S	1.50S
		2007	1.02S	1.22S	0.68N	1.98S	1.27S	1.17S	0.58N	1.34S	1.32S
2<CF<3.5 轻度污染 Slight	PC	2002	1.13S	1.16S	0.92N	1.93S	1.27S	1.14S	0.43N	1.27S	1.14S
		2002	1.06S	1.58S	1.12S	2.48L	1.20S	1.27S	0.62N	1.46S	1.44S
		2003	1.01S	1.24S	1.12S	1.93S	1.14S	1.07S	0.62N	1.46S	1.44S
		2004	0.75N	1.30S	1.09S	1.66S	1N	1.01S	0.54N	1.37S	1.44S
	SD	2007	0.88N	1.18S	0.98N	1.59S	0.89N	0.98N	0.38N	1.32S	1.30S
		2008	0.99N	0.94N	0.69N	1.48S	1.15S	0.97N	0.33N	1.12S	1.07S
			2.94L	1.07S	1.19S	1.27S	2.10L	2.06L	0.93N	1.37S	0.54N

4 结论与讨论

利用苔藓植物对重金属的富集作用研究重金属污染是当今世界各国学者普遍采用的方法,并且是一种成熟的技术手段。但是对于沙地生态系统,由于分布的苔藓植物属于旱生类型,植株个体较小,很难分离,因此利用苔藓植物作为污染指示生物往往受到方法和试验材料的局限。而生物结皮作为一个整体的生态功能单位广泛存在于沙地生态系统,并且其组分苔藓植物、藻类植物、地衣是很好的污染指示生物,因此对于沙地生

态系统生物结皮是非常好的自然环境污染指示生物。根据内蒙古土壤环境背景值和风沙土元素背景值^[37]比较,可以看出风沙土各元素背景值远低于内蒙古土壤环境背景值(表1),说明风沙土本身土壤重金属含量很低,根据污染因子指数分级指标,属于无污染土壤类型($CF < 1$)。通过对研究区域收集的大气降尘中重金属含量的测定,发现降尘中 As 元素含量(2.33 ± 0.242) mg/kg 低于风沙土背景值(4.30 ± 1.90) mg/kg,其他元素含量均高于背景值。As 元素含量较低主要与当地电厂燃煤中的 As 元素含量有关,王再岚研究发现当地燃煤中 As 元素含量范围在 3.0—4.5 mg/kg 之间,由于不能完全释放到大气中,因此降尘中 As 元素含量较低^[38]。研究区域没有河流,并且远离居民区,没有其他污染源,在这种环境背景下,生物结皮富集的重金属可能来源于火力发电厂释放的大气降尘。由于研究区域多大风、降雨少等特殊的气候条件,使降尘落地后很容易被风力吹散而不易固着在沙地土壤表面。生物结皮由于特殊的结构,特别是藓结皮,很容易捕获大气中的降水和降尘颗粒,从而被结皮生物所富集^[39-40]。因此在沙地生态系统,生物结皮作为天然监测重金属污染的指示生物是非常理想的试验材料。本文利用生物结皮作为研究材料,并且选择非常典型的人工发育不同阶段梯度的生物结皮研究样地,通过测试分析,得出以下结论:(1)不同年代生物结皮和无结皮表土各种重金属含量均表现为随着年代的增加而增加的趋势,生物结皮重金属含量多数类型表现为:Zn>Cr>Ni>Pb>Cu>As>Co>Cd>Hg 的顺序关系,少数类型表现为:Cr>Zn>Ni>Pb>Cu>As>Co>Cd>Hg 的顺序关系。通过单因素方差分析(ANOVA),不同年代藓结皮中各种元素差异显著性($P < 0.05$)明显低于藻结皮和物理结皮。(2)相同年代生物结皮和物理结皮重金属含量都表现为同样地规律:藓结皮>藻结皮>物理结皮,表明相同背景条件下,藓结皮对各种重金属的富集能力明显比藻结皮和物理结皮的富集能力强。通过单因素方差分析(ANOVA),Hg 和 Ni 元素在所有同年代样地的生物结皮和物理结皮均无差异,Cr、Zn、Cu、Co 元素均存在差异($P < 0.05$),但差异有的表现在藓结皮和藻结皮之间,而有的表现为藻结皮和无结皮表土之间,而 Pb、As、Cd 元素则表现为有的年代有差异,有的年代无差异。(3)通过污染因子 CF 分析,藓结皮对污染的指示作用要明显比藻结皮和物理结皮敏感。同时生物结皮对于重金属的富集具有一定的选择性,像 Hg、Ni、Zn、Cu、Pb、Co 等元素生物结皮相对富集较少,而像 Cr、Cd、As 等元素相对富集较多。

References:

- [1] Onianwa P C. Monitoring atmospheric metal pollution: a review of the use of mosses as indicators. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2001, 71(1): 13-50.
- [2] Fernández J A, Carballeira A. A comparison of indigenous mosses and topsoils for use in monitoring atmospheric heavy metal deposition in Galicia (northwest Spain). *Environmental Pollution*, 2001, 114(3): 431-441.
- [3] Ermakova E V, Frontasyeva M V, Steinnes E. Air pollution studies in Central Russia(Tula Region) using the moss biomonitoring technique, INAA and AAS. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2004, 259(1): 51-58.
- [4] Lucaciui A, Culicov O, Timofte L, Culicov O, Frontasyeva M V, Oprea C, Cucu-Man S, Mocanu R, Steinnes E. Atmospheric Deposition of Trace Elements in Romania Studied by the Moss Biomonitoring Technique. *Journal Atmospheric Chemistry*, 2004, 49(1/3): 533-548.
- [5] Samecka-Cymerman A, Marczonek A, Kempers A J. Bioindication of Heavy Metals in soil by Liverworts. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 1997, 33(2): 162-171.
- [6] Fernández J A, Rey A, Carballeira A. An extended study of heavy metal deposition in Galicia (NW Spain) based on moss analysis. *Science of the Total Environment*. 2000, 254(1): 31-44.
- [7] Fernández J A, Carballeira A. Evaluation of Contamination, by Different Elements, in Terrestrial Mosses. *Arch. Environ. Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2001, 40(4): 461-468.
- [8] Ölmez E E, Topcuoğlu S, Knt D, Kırbasoglu Ç, Esen N. Heavy metals and radionuclides in lichens and mosses in Thrace, Turkey. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2003, 70(3): 502-508.
- [9] Ugur A, Özden B, Saç M M, Yener G, Altınbaş Ü, Kurucu Y, Bolca M. Lichens and mosses for correlation between trace elements and ²¹⁰Po in the areas near coal-fired power plant at Yatağan, Turkey. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2004, 259(1): 87-92.
- [10] Aboal J R, Couto J A, Fernandez J A, Carballeira A. Definition and number of subsamples for using mosses as biomonitors of airborne trace elements. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2006, 50(1): 88-96.

- [11] Wu Y H, Huang G H, Gao Q, Cao T. Research advance in response and adaptation of bryophytes to environmental change. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(6): 943-945.
- [12] Fernández J A, Aboal J R, Couto J A, Carballeira A. Moss bioconcentration of trace elements around a Fesi smelter: Modeling and cellular distribution. *Atmospheric Environment*, 2004, 38(26): 4319-4330.
- [13] Coşkun M, Yurukova L, Cayir A, Coşkun M, Gecheva G. Cross-border response of mosses to heavy metal atmospheric deposition in Southeastern Bulgaria and European Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, 157(1/4): 529-537.
- [14] Mariet C, Gaudry A, Ayrault S, Moskura M, Denayer F, Bernard N. Heavy metal bioaccumulation by the bryophyte *Scleropodium purum* at three French sites under various influences: rural conditions, traffic, and industry. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011, 174(1/4): 107-118.
- [15] Barandovski L, Cekova M, Frontasyeva M V, Pavlov S S, Stafilov T, Steinnes E, Urumov V. Atmospheric deposition of trace element pollutants in Macedonia studied by the moss biomonitoring technique. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2008, 138(1/3): 107-118.
- [16] Fernández J A, Aboal J R, Carballeira A. Testing differences in methods of preparing moss samples. Effect of washing on *Pseudoscleropodium purum*. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, 163(1/4): 669-684.
- [17] Aboal J R, Fernández J A, Couto J A, Carballeira A. Testing differences in methods of preparing moss samples. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2008, 137(1/3): 371-378.
- [18] Ivan Suchara, Julie Sucharová. Current atmospheric deposition loads and their trends in the czech republic determined by mapping the distribution of moss element contents. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 2004, 49(1/3): 503-519.
- [19] Ruhling A, Tyler G. Changes in atmospheric deposition rates of heavy metals in Sweden. A summary of nationwide swedish surveys in 1986/70—1995. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2001, 1(3/4): 311-323.
- [20] Frontasyeva M V, Galinskaya T Ye, Krmar M, Matavuly M, Pavlov S S, Povtoreyko E A, Radnovic D, Steinnes E. Atmospheric deposition of heavy metals in northern serbia and bosnia-herzegovina studied by the moss biomonitoring, neutron activation analysis and GIS technology. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2004, 49(1): 533-548.
- [21] Schröder W, Holy M, Pesch R, Zechmeister H, Harmens H, Ilyin I. Mapping atmospheric depositions of cadmium and lead in Germany based on EMEP deposition data and the European Moss Survey 2005. *Environmental Sciences Europe*, 2011, 23(1): 19-33.
- [22] Holy M, Pesch R, Schröder W, Ilia I, Renate A, Yuliya A, Oleg B, Mahmut C, Maria D, De Ludwig T, Natalia F, Rui Figueira, Marina F, Marina F, Natalia G, Laura G M, Krystyna G, Zvonka J, Szymon K, Miodrag K, Eero K, Kestutis K, Martin L, Sébastien L, Siiri L, Sigurður M, Blanka M, Raluca M, Juha P, Åke R, Jesus S, Eiliv S, Ivan S, Lotti T, Gábor T, Viktor U, Bert W, Lilyana Y, Harald G Z. First thorough identification of factors associated with Cd, Hg and Pb concentrations in mosses sampled in the European Survey 1990, 1995, 2000 and 2005. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 2009, 63(2): 109-124.
- [23] Thöni L, Schnyder N, Krieg F. Comparison of metal concentrations in three species of mosses and metal freights in bulk precipitations. *Fresenius Journal of Analytical Chemistry*, 1996, 354(5/6): 703-708.
- [24] Fernández J A, Carballeira A. Differences in the responses of native and transplanted mosses to atmospheric pollution: a possible role of selenium. *Environmental Pollution*, 2000, 110(1): 73-78.
- [25] Nguyenviet H N, Frontasyeva M V, Thi T M T, Gilbert D, Bernard N. Atmospheric heavy metal deposition in Northern Vietnam: Hanoi and Thaingugen case study using the moss biomonitoring technique, INAA and AAS. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, 17(5): 1045-1052.
- [26] An L, Cao T, Yu Y H. Bryophytes and environmental heavy metal pollution monitoring. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(2): 201-206.
- [27] Cao T, Lu Y, Wu Y H, Xie W. Bio-indication of bryophytes to environmental pollution in Anshan city. *Chinese Journal Applied Ecology*, 1998, 9(6): 635-639.
- [28] Sun S Q, Wang D Y, He M, Zhang C. Monitoring of atmospheric heavy metal deposition in Chongqing, China-based on moss bag technique. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, 148(1/4): 1-9.
- [29] Shao J, Zhang Z h, Chai Z F, Stan O, Frontasyeva M V, Wu P C. Study on concentration of heavy metals deposited from atmosphere by mosses. *Journal Nuclear and Radiochemistry*, 2002, 24(1): 6-10.
- [30] Huang C B, Guo S L, Li H B. Determination and analysis of heavy metal elements in plant of bryophytes in Jinhua Suburb, Zhejiang Province. *Journal of Shanghai Jiaotong University: Agricultural Science*, 2004, 22(3): 231-236.
- [31] Xu J Bai X L, Yang C, Zhang P. Study on Diversity and binding-sand effect of moss on biotic crusts of fixed dunes. *Journal Plant Ecology*, 2003, 27(4): 545-551.
- [32] Xu J, Bai X L, Tian G Q, Huang J, Zhang D, Feng X H. Ecological function of mosses in biotic crusts on fixed dunes on Tengger Desert and its relation with soil factors. *Journal of Desert Research*, 2005, 25(2): 234-242.

- [33] Belnap J, Williams J, Kaltenecker J. Structure and function of biological soil crusts Meurisse R T, Ypsilantis W G, Seybold C, eds. Pacific Northwest Forest and Rangeland Soil Organism Symposium. Portland, OR; USDA Forest Service, Pacific Northwest Research Station, Corvallis, OR; Oregon State University, 1998: 161-178.
- [34] Xu J, Bai X L, Tian G Q, Yao Y P, Gao T Y. Study on moss: the content of amino acid, the feature of nutritive elements and its resistance to draught in the biotic crusts in arid and semi-arid regions. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(6): 1247-1255.
- [35] Li X R, Wang X P, Li T, Zhang J G. Microbiotic soil crust and its effect on vegetation and habitat on artificially stabilized desert dunes in Tengger Desert, North China. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 35(3): 147-154.
- [36] Li X R, Zhou H Y, Wang X P, Zhu Y G, O'Conner P J. The effects of sand stabilization and revegetation on cryptogam species diversity and soil fertility in the Tengger Desert, Northern China. *Plant and Soil*, 2003, 251(2): 237-245.
- [37] China National Environmental Monitoring Center Eds. The Element Background Values of Chinese Soil. Beijing: Chinese Environmental Science Press, 1990.
- [38] Wang Z L, He J, Liu Y H, Zhi Y B, Wang Z S, Wang L X, Lu Z Y, Deng Z F. Characteristics of Heavy Metal Pollution in the Soil Along the Highway of Erdos. *Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition*, 2006, 30(2): 15-19.
- [39] Steinnes E, Rambaek J P, Hanssen J E. Large-scale multi-element survey of atmospheric deposition using naturally growing moss as biomonitor. *Chemosphere*, 1992, 25(5): 735-752.
- [40] Fernández J A, Aboal J R, Carballeira A. Use of native and transplanted mosses as complementary techniques for biomonitoring mercury around an industrial facility. *Science of the Total Environment*, 2000, 256(2/3): 151-161.

参考文献:

- [11] 吴玉环, 黄国宏, 高谦, 曹同. 苔藓植物对环境变化的响应及适应性研究进展. *应用生态学报*, 2001, 12(6): 943-945.
- [26] 安丽, 曹同, 俞鹰浩. 苔藓植物与环境重金属污染监测. *生态学杂志*, 2006, 25(2): 201-206.
- [27] 曹同, 路勇, 吴玉环, 谢维. 苔藓植物对鞍山市环境污染生物指示的研究. *应用生态学报*, 1998, 9(6): 635-639.
- [29] 邵晶, 张朝晖, 柴之芳, 鲁毅强, 斯坦·O, 弗罗塔斯耶娃·M·V, 吴鹏程. 苔藓对大气沉降重金属元素富集作用的研究. *核化学与放射化学*, 2002, 24(1): 6-10.
- [30] 黄朝表, 郭水良, 李海斌. 浙江金华市郊苔藓植物体内重金属离子含量测定与分析. *上海交通大学学报: 农业科学版*, 2004, 22(3): 231-236.
- [31] 徐杰, 白学良, 杨持, 张萍. 固定沙丘生物结皮层藓类植物多样性及固沙作用研究. *植物生态学报*, 2003, 27(4): 545-551.
- [32] 徐杰, 白学良, 田桂泉, 黄洁, 张镛, 冯晓慧. 腾格里沙漠固定沙丘结皮层藓类植物的生态功能及与土壤环境因子的关系. *中国沙漠*, 2005, 25(2): 234-242.
- [34] 徐杰, 白学良, 田桂泉, 姚一萍, 高天云. 干旱半干旱地区生物结皮层藓类植物氨基酸和营养物质组成特征及适应性分析. *生态学报*, 2005, 25(6): 1247-1255.
- [37] 中国环境监测总站编. 中国土壤元素背景值. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [38] 王再岚, 何江, 刘玉虹, 智颖颀, 王中生, 王立新, 路战远, 邓自发. 鄂尔多斯地区公路两侧土壤重金属污染特征. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2006, 30(2): 15-19.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 23 December, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

Maternal thermoregulation during gestation affects the phenotype of hatchling Chinese skinks (<i>Eumeces chinensis</i>): testing the maternal manipulation hypothesis	LI Hong, ZHOU Zongshi, WU Yanqing, et al (7255)
Effects of conspecific and interspecific interference competitions on cache site selection of Siberian chipmunks (<i>Tamias sibiricus</i>)	SHEN Zhen, DONG Zhong, CAO Lingli, et al (7264)
Characterization of ammonia volatilization from polluted river under aeration conditions: a simulation study	LIU Bo, WANG Wenlin, LING Fen, et al (7270)
Diurnal activity patterns and environmental factors on behaviors of Bar-headed Geese <i>Anser indicus</i> wintering at Caohai Lake of Guizhou, China	YANG Yanfeng, ZHANG Guogang, LU Jun, et al (7280)
Impacts of snow cover change on soil water-heat processes of swamp and meadow in Permafrost Region, Qinghai-Tibetan Plateau	CHANG Juan, WANG Gengxu, GAO Yongheng, et al (7289)
Spatial-temporal changes of urban patch wetlands in Changsha, China	GONG Yingbi, JING Lei, PENG Lei, et al (7302)
Modeling of carbon and water fluxes of Qianyanzhou subtropical coniferous plantation using model-data fusion approach	REN Xiaoli, HE Honglin, LIU Min, et al (7313)
Ecological compensation standard for controlling nitrogen non-point pollution from farmland: a case study of Yixing City in Jiang Su Province	ZHANG Yin, ZHOU Yuchen, SUN Hua (7327)
Static toxicity evaluation of chemical wastewater by PFU microbial communities method	LI Zhaoxia, ZHANG Yuguo, LIANG Huixing (7336)
Emergy evaluation of an agro-circulation system in Beijing suburb: take Jianyan village as a case study	ZHOU Liandi, HU Yanxia, WANG Yazhi, et al (7346)
Research on the cooling effect of Xi'an parks in summer based on remote sensing	FENG Xiaogang, SHI Hui (7355)
The dynamics of spatial and temporal changes to forested land and key factors driving change on Hainan Island	WANG Shudong, OUYANG Zhiyun, ZHANG Cuiping, et al (7364)
Impact of different sowing dates on green water footprint of maize in western Jilin Province	QIN Lijie, JIN Yinghua, DUAN Peili (7375)
The dynamic variation of maize (<i>Setaria mays</i> L.) population growth characteristics under cultivars-intercropped on the Loess Plateau	WANG Xiaolin, ZHANG Suiqi, WANG Shuqing, et al (7383)
Effect of different planting methods on root-shoot characteristics and grain yield of summer maize under high densities	LI Zongxin, CHEN Yuanquan, WANG Qingcheng, et al (7391)
Heavy metal contaminant in development process of artificial biological Soil Crusts in sand-land	XU Jie, AO Yanqing, ZHANG Jingxia, et al (7402)
Effects of enhanced UV-B radiation and nitrogen on photosynthetic pigments and non-enzymatic protection system in leaves of foxtail millet (<i>Setaria italica</i> (L.) Beauv.)	FANG Xing, ZHONG Zhangcheng (7411)
Photosynthetic response of different ecotype of <i>Illicium lanceolatum</i> seedlings to drought stress and rewating	CAO Yonghui, ZHOU Benzhi, CHEN Shuanglin, et al (7421)
Seasonal variations in the stems of <i>Larix principis-rupprechtii</i> at the treeline of the Luya Mountains	DONG Manyu, JIANG Yuan, WANG Mingchang, et al (7430)
Influence of terrain on plant biomass estimates by remote sensing: a case study of Guangzhou City, China	SONG Weiwei, GUAN Dongsheng, WANG Gang (7440)
Effects of exponential fertilization on biomass allocation and root morphology of <i>Catalpa bungei</i> clones	WANG Lipeng, YAN Ziyi, LI Jiyue, et al (7452)
Effects of fire damages on <i>Larix gmelinii</i> radial growth at Tahe in Daxing'an Mountains, China	WANG Xiaochun, LU Yongxian (7463)
A model for water consumption by mountain jujube pear-like	XIN Xiaogui, WU Pute, WANG Youke, et al (7473)
Specificity of photosystems function change of two kinds of overwintering broadleaf evergreen plants	ZHONG Chuanfei, ZHANG Yuntao, WU Xiaoying, et al (7483)

- Effects of drought on fluorescence characteristics of photosystem II in leaves of *Ginkgo biloba* WEI Xiaodong, CHEN Guoxiang, SHI Dawei, et al (7492)
- Numerical classification and ordination of forest communities in habitat of Sichuan Snub-nosed Monkey in Hubei Shennongjia National Nature Reserve LI Guangliang, CONG Jing, LU Hui, et al (7501)
- Impact of inorganic anions on the cadmium effective fraction in soil and its phytoavailability during salinization in alkaline soils WANG Zuwei, YI Liangpeng, GAO Wenyan, et al (7512)
- Photosynthetic adaptability of the resistance ability to weak light of 2 species *Spiraea* L. LIU Huimin, MA Yanli, WANG Baichen, et al (7519)
- Fine root longevity and controlling factors in a *Phoebe Bournei* plantation ZHENG Jinxing, HUANG Jinxue, WANG Zhenzhen, et al (7532)
- Analysis on spatial structure and scenarios of carbon dioxide emissions from tourism transportation XIAO Xiao, ZHANG Jie, LU Junyu, et al (7540)
- The hydrological response to human activities in Guishui River Basin, Beijing LIU Yuming, ZHANG Jing, WU Pengfei, et al (7549)
- Socio-economic impacts of under-film drip irrigation technology and sustainable assessment: a case in the Manas River Basin, Xinjiang, China FAN Wenbo, WU Pute, MA Fengmei (7559)
- Effects of pattern and timing of high temperature exposure on the mortality and fecundity of *Aphis gossypii* Glover on cotton GAO Guizhen, LÜ Zhaozhi, XIA Deping, et al (7568)
- Physiological responses of *Eucalyptus* trees to infestation of *Leptocybe invasa* Fisher & La Salle WU Yaojun, CHANG Mingshan, SHENG Shuang, et al (7576)
- Carbon storage capacity of a *Betula alnoides* stand and a mixed *Betula alnoides* × *Castanopsis hystrix* stand in Southern Subtropical China: a comparison study HE Youjun, QIN Lin, LI Zhiyong, et al (7586)
- Distribution and ecological risk assessment of 7 heavy metals in urban forest soils in Changsha City FANG Xi, TANG Zhijuan, TIAN Dalun, et al (7595)
- Review and Monograph**
- The relationship between humans and the environment at the urban-rural interface: research progress and prospects HUANG Baorong, ZHANG Huizhi (7607)
- Flux footprint of carbon dioxide and vapor exchange over the terrestrial ecosystem: a review ZHANG Hui, SHEN Shuanghe, WEN Xuefa, et al (7622)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 23 期 (2012 年 12 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 23 (December, 2012)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:1000717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元