

锰化厂土壤重金属含量及景观植物吸收特征

熊云武, 林晓燕*, 裴东辉, 黄雷, 李红艳, 周巍, 梁鹏, 翟晓峰, 许建新

(深圳市铁汉生态环境股份有限公司, 广东深圳 518040)

摘要 [目的]为 Mn 污染场地的植物修复提供理论依据。[方法]调查锰化厂污染场地植物, 分析场地植物物种组成、土壤和主要优势景观植物体内重金属含量。[结果]锰化厂场地所记录的高等植物共有 33 种, 隶属 22 科 31 属, 优势种共有 8 种, 分别为木薯、银合欢、类芦、鬼针草、金叶假连翘、马缨丹、水茄、杉木; 土壤重金属 Cu、Zn、Pb、Cd、Mn 均不同程度的污染, 与重金属污染场地土壤修复标准(DB43-T-1125-2016)相比, 类芦土、金叶假连翘土、杉木土 Mn 含量均远超修复标准值, 为标准限值的 3.63~40.52 倍, 污染严重; 5 种景观优势植物中, 杉木对 Mn 具有超富集能力, 为 Mn 超富集植物, 金叶假连翘对强酸性土壤适应性强, 可应用于酸污染土壤修复。[结论]在场地植物修复时, 可根据土壤污染特征, 合理配置植物, 实现场地“修复+景观+经济效益”修复模式。

关键词 重金属; 锰; 土壤; 景观植物; 植物修复

中图分类号 X53 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2017)11-0063-04

Heavy Metal Concentrations in Soils and Absorption Characteristics of Landscape Plants of Manganese Chemical Factory

XIONG Yun-wu, LIN Xiao-yan*, PEI Dong-hui et al (Shenzhen Techand Ecology & Environment Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518040)

Abstract [Objective] The aim of the study was to provide the theory basis for landscape phytoremediation of heavy metal contaminated site. [Method] The study surveyed plants species composition and growth status and analyzed heavy metal contents in soil and landscape dominant plants of manganese chemical factory, Guangdong. [Result] There were 33 species plants belonging to 31 genera in 22 families, and the dominant species with a total of 8 kinds, were *Manihot esculenta* Crantz, *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit, *Neyraudia reynaudiana* (kunth.) Keng, *Bidens pilosa* L., *Duranta erecta* Linnaeus cv. Golden Leaves, *Lantana camara* L., *Solanum torvum* Swartz, *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook, respectively. Soil Cu, Zn, Pb, Cd and Mn were differently degree polluted, and Mn contents of *Neyraudia reynaudiana* (kunth.) Keng soil, *Duranta erecta* Linnaeus cv. Golden Leaves soil, and *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook soil were more than repair standard for contaminated site by heavy metal (DB43-T-1125-2016), with ratio of 3.63 to 40.52 times, seriously polluted. Five landscape dominant plants, *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook. could hyperaccumulate Mn, was Mn hyperaccumulation plant. *Duranta erecta* Linnaeus cv. Golden Leaves was strongly adapted to strongly acidic soil which pH was 2.58, could be applied to acid soil remediation. [Conclusion] Contaminated site phytoremediation could rationally configurate plant according to soil pollution characters, in order to implement repair mode of repair, landscape and economic efficiency.

Key words Heavy metals; Manganese; Soil; Landscape plant; Phytoremediation

植物修复是指利用自然生长的植物或培育植物及其根系微生物群落对污染土壤、沉积物、地下水和地表水中的污染物进行清除, 是一种有效的绿色技术。根据其作用过程和机理, 植物修复可以分为植物提取^[1]、植物稳定^[2]、植物挥发^[3]、植物过滤^[4]。植物修复技术成本低、环保日益受到关注, 但目前主要应用于农田修复中, 因其修复周期长、范围有限, 常难以用于时间要求高的城市污染场地修复。但随着现代生态城市建设的大力推进, 越来越多的污染场地将建设成为城市公园、绿地, 因此, 筛选和培育出兼具景观效果的耐重金属植物至关重要。耐重金属植物一般是长期生长在重金属含量较高的土壤上, 在自然选择的作用下, 经过不断地生物进化而形成, 对重金属污染具有较强的耐性^[5]。近年来, 学者对重金属污染场地(含尾矿区)耐性植物进行筛选并取得了一定成果。叶文玲等^[6]对铜陵铜尾矿库进行植被调查发现, 续断菊对 Cd 具有较强的富集能力和转运能力, 可用于 Cd 污染严重地区的生态修复。赵甲等^[7]通过对万山梅子溪地区 Hg 耐受植物采样调查发现, 悬钩子单株植物生物量

较大, 且对 Hg 的富集能力较强, 属于 Hg 富集植物。何东等^[8]对湖南下水湾铅锌尾矿库进行调查发现, 地枇杷对 Pb 具有较强的富集能力和转运能力, 地上部分 Pb 含量为正常含量上限值的 4.01 倍, 富集系数达到 14.4, 转运系数达到 3.91。杨晓庆等^[9]对泰州某电镀污染区 12 种优势植物进行重金属含量分析测定, 结果表明, 香樟对 Cd, 三叶草、蒲公英对 Pb 表现出修复潜力。目前发现的耐 Mn 污染的景观植物种类较少, 因而筛选新的耐 Mn 或富集 Mn 的景观植物种类具有很高的理论意义和应用价值, 可以指导 Mn 污染场地植物修复中基质改良、植物配置等。笔者对广东省某锰化厂进行植被组成调查, 分析了主要优势景观植物体内重金属含量, 及其所在区域土壤重金属含量和 pH, 研究了锰化厂生长的景观植物对重金属的富集和迁移转化特征, 以筛选耐 Mn 景观植物, 为 Mn 污染场地生态修复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 调查区概况 锰化厂位于广东省境内, 属亚热带气候, 受东南季风影响明显, 且处于低纬度地区, 太阳辐射强, 冬短夏长, 日照充足, 温和潮湿。年均最高气温 21.8℃, 最低气温 20.5℃; 年均降雨量 1 410 mm, 无霜期 350 d。工厂历史悠久, 在过去的生产历史中由于种种原因未能采取有效的环保措施控制有害废物的排放, 导致了严重的重金属泄露。

1.2 样品采集 2016 年 11 月对广东某锰化厂进行了植被调查和采样, 记录场地所有自然生长的植物, 植物的丰富度

基金项目 广东省产业技术研究与开发资金项目(粤发改高技术[2015]162号); 深圳市战略性新兴产业发展专项(深发改[2016]1023号)。

作者简介 熊云武(1987—), 男, 江西南昌人, 助理工程师, 从事土壤污染与修复研究。* 通讯作者, 工程师, 硕士, 从事土壤污染与修复研究。

收稿日期 2017-03-10

按目测估计^[10],分为优势种、常见种和偶见种3级。同时采集主要优势景观植物的地上部分和根部及其所在区域的土壤。每种植物采集3~5株组成混合样,同步采集3个平行样。土壤样品采集每种植物所在区域0~30 cm的表土,将3~5个采样点土样组成1个混合样,同步采集3个平行样。所有样品采集后立即装入塑料密封袋,做好标记,运回实验室。

1.3 分析测定 将采集的土壤样品室内自然风干,除去土壤中的石块、植物根系和凋落物等,并研磨过20目、100目尼龙筛,包装登记后保存备测。土壤的Cu、Zn、Pb、Cd、Mn全量均采用HCl-HNO₃-HF-HClO₄消煮-原子吸收光谱法测定(GB/T 17138-1997),重金属有效态含量采用DTPA浸提法^[11],pH参照《土壤农业化学分析方法》^[12]。

将运回实验室的植物样品用自来水和去离子水洗净,吸水纸吸干表面水。将样品置于烘箱内105℃杀青30 min,然后65℃、48 h烘干。干样用万能粉碎机磨细,过0.25 mm尼龙筛,待测重金属含量。植物重金属采用HNO₃-HClO₄联合消煮(GB/T 5009.11-15-2003),且用原子吸收光谱法

测定Cu、Zn、Pb、Cd、Mn含量。

计算主要景观优势植物生物富集系数(BCF)、转位系数(TF)。草本植物:富集系数=植物地上部重金属含量/土壤重金属含量,转运系数=植物地上部分重金属含量/植物根部重金属含量;木本植物(含乔、灌木)由于叶重金属的含量大于茎重金属含量,因此富集系数=植物叶重金属含量/土壤重金属含量,转运系数=植物叶重金属含量/植物根部重金属含量。

1.4 数据处理 数据用Excel 2007处理。

2 结果与分析

2.1 场地植被物种组成及特征 对锰化厂进行植被调查,共记录高等植物33种,隶属22科31属(表1)。从物种组成来看,以豆科为主,共有6种,占总种数的18.18%,其次为大戟科,占总种数12.12%。从植物生活型来看,覆盖乔木、灌木(小乔木)、草本、藤本,且以前3种生活型为主,分别占总种数的27.27%、30.30%、33.33%。通过对植物的丰富度进行调查,优势种共有8种,分别为木薯、银合欢、类芦、鬼针草、金叶假连翘、马缨丹、水茄、杉木。

表1 场地主要植物种类
Table 1 Main plant species of site

序号 No.	种名 Species	拉丁名 Latin name	科名 Family	属名 Genus name	丰富度 Richness	生活型 Life form
1	木薯	<i>Manihot esculenta</i> Crantz	大戟科	木薯属	D	直立亚灌木,高1.5~3.0 m
2	银合欢	<i>Leucaena leucocephala</i> (Lam.) de Wit	豆科	银合欢属	D	小乔木,高达8.0 m
3	类芦	<i>Neyraudia reynaudiana</i> (kunth.) Keng	禾本科	类芦属	D	多年生草本
4	鬼针草	<i>Bidens pilosa</i> L.	菊科	鬼针草属	D	一年生草本
5	金叶假连翘	<i>Duranta erecta</i> Linnaeus cv. Golden Leaves	马鞭草科	假连翘属	D	常绿灌木,株高0.2~0.6 m
6	马缨丹	<i>Lantana camara</i> L.	马鞭草科	马缨丹属	D	直立或半藤状灌木
7	水茄	<i>Solanum torvum</i> Swartz	茄科	茄属	D	灌木,高1.0~3.0 m
8	杉木	<i>Cunninghamia lanceolata</i> (Lamb.) Hook.	杉科	杉木属	D	常绿乔木,高30.0~35.0 m
9	葛	<i>Pueraria montana</i> (Loureiro) Merrill	豆科	葛属	F	藤本
10	三裂叶野葛	<i>Pueraria phaseoloides</i> (Roxb.) Benth.	豆科	葛属	F	藤本
11	三点金	<i>Desmodium triflorum</i> (L.) DC.	豆科	山蚂蝗属	F	草本
12	蜈蚣草	<i>Pteris vittata</i>	凤尾蕨科	凤尾蕨属	F	多年生草本
13	楝	<i>Melia azedarach</i> L.	楝科	楝属	F	落叶乔木,高达15.0~20.0 m
14	臭鸡矢藤	<i>Paederia foetida</i> L.	茜草科	鸡矢藤属	F	藤状灌木
15	少花龙葵	<i>Solanum photeinocarpum</i>	茄科	茄属	F	草本
16	鲫鱼胆	<i>Maesa perularius</i> (Lour.) Merr.	紫金牛科	杜茎山属	F	灌木,高1.0~3.0 m
17	罗勒	<i>Ocimum basilicum</i> L.	唇形科	罗勒属	O	一年生草本
18	白饭树	<i>Flueggea virosa</i> (Roxb. ex Willd.) Voigt	大戟科	白饭树属	O	灌木,高1.0~6.0 m
19	飞扬草	<i>Euphorbia hirta</i> L.	大戟科	大戟属	O	一年生草本
20	乌柏	<i>Sapium sebiferum</i>	大戟科	乌柏属	O	乔木
21	台湾相思	<i>Acacia confusa</i> Merr.	豆科	金合欢属	O	常绿乔木,高达16.0 m
22	蔓草虫豆	<i>Cajanus scarabaeoides</i> (L.) Thouars	豆科	木豆属	O	多年生缠绕状草质藤本
23	长春花	<i>Catharanthus roseus</i> (L.) G. Don	夹竹桃科	长春花属	O	直立多年生草本或半灌木,高达0.6 m
24	臭椿	<i>Ailanthus altissima</i> (Mill.) Swingle	苦木科	臭椿属	O	落叶乔木,高达20.0 m
25	落葵	<i>Basella alba</i> L.	落葵科	落葵属	O	一年生缠绕草本
26	构树	<i>Broussonetia papyifera</i>	桑科	构属	O	落叶乔木
27	高山榕	<i>Ficus altissima</i> Bl.	桑科	榕属	O	大乔木,高5.0~30.0 m
28	商陆	<i>Phytolacca acinosa</i>	商陆科	商陆属	O	多年生草本
29	青葙	<i>Celosia argentea</i> L.	苋科	青葙属	O	一年生草本
30	白花泡桐	<i>Paulownia fortunei</i>	玄参科	泡桐属	O	乔木高达30.0 m
31	苎麻	<i>Boehmeria nivea</i>	荨麻科	苎麻属	O	半灌木,高1.0~2.0 m
32	黄樟	<i>Cinnamomum parthenoxylon</i> (Jack) Meisner	樟科	樟属	O	常绿乔木
33	白背枫	<i>Buddleja asiatica</i> Lour.	醉鱼草科	醉鱼草属	O	灌木或小乔木,高2.0~6.0 m

注:D为优势种;F为常见种;O为偶见种

Note: D. Dominant species; F. common species; O. Occasional species

2.2 景观植物土壤 pH 和重金属含量 对主要优势景观植物根际土壤重金属(Cu、Zn、Pb、Cd、Mn) 全量进行分析测定可知(表 2),不同采样点土壤重金属含量差异较大,除木薯土、银合欢土 Cu、Zn、Pb 含量符合国家土壤环境质量三级标准(为保障农林业生产和植物正常生长的土壤临界值)外,其他土壤中 Cu、Zn、Pb、Cd 含量均超过国家土壤环境质量三级标准,

分别为三级标准限值的 1.16~2.47 倍、1.39~12.15 倍、4.27~13.13 倍、1.12~28.85 倍。由于三级标准中未对土壤 Mn 含量进行限制,与重金属污染场地土壤修复标准(DB43-T-1125-2016)相比,除木薯土、银合欢土符合标准外,其他 3 个采样点土壤 Mn 含量均远超重金属污染场地土壤修复标准,为标准限值的 3.63~40.52 倍,污染严重。

表 2 土壤重金属全量
Table 2 Heavy metals in soil

采样点 Sampling point	Cu	Zn	Pb	Cd	Mn
木薯土 Soil of <i>Manihot esculenta</i> Crantz	158.71	199.02	134.24	3.11	2 755.70
银合欢土 Soil of <i>Leucaena leucocephala</i> (Lam.) de Wit	72.05	186.80	278.44	1.12	2 737.35
类芦土 Soil of <i>Neyraudia reynaudiana</i> (kunth.) Keng	610.92	6 076.70	5 253.70	28.85	202 620.00
金叶假连翘土 Soil of <i>Duranta erecta</i> Linnaeus cv. Golden Leaves	988.11	2 452.50	3 037.90	19.88	60 205.00
杉木土 Soil of <i>Cunninghamia lanceolata</i> (Lamb.) Hook.	463.26	693.80	1 707.90	3.45	18 150.00
国家土壤环境质量三级标准 Three national standards for soil environmental quality(GB 15618-1995)	400.00	500.00	500.00	1.00	—
重金属污染场地土壤修复标准 Standard for soil remediation of heavy metal contaminated sites(DB43-T-1125-2016)	500.00	700.00	600.00	20.00	5 000.00

由表 3 可知,5 个采样点土壤重金属(Cu、Zn、Pb、Cd、Mn) DTPA 提取态含量与全量类似,变化范围较大,分别为 3.22~63.22、2.84~58.11、0.15~29.85、0.17~1.29、20.48~703.90 mg/kg,但并不是土壤重金属全量越高,DTPA 提取态含量就越高,这主要与土壤的 pH 有关,pH 越低,重金

属越活跃,相同重金属全量下其 DTPA 提取态含量越高。除金叶假连翘土 pH 为 2.58,为强酸性土壤外,其他 4 种植物生长的土壤呈弱酸性,这表明金叶假连翘除可用于重金属污染土壤修复外,还可用于强酸性土壤修复。

表 3 土壤 pH 和重金属 DTPA 提取态含量
Table 3 pH and DTPA extractable content of heavy metals in soil

采样点 Sampling point	pH	DTPA 提取态含量 DTPA extractable content//mg/kg				
		Cu	Zn	Pb	Cd	Mn
木薯土 Soil of <i>Manihot esculenta</i> Crantz	5.04	51.16	38.16	4.97	0.21	391.75
银合欢土 Soil of <i>Leucaena leucocephala</i> (Lam.) de Wit	5.72	3.22	2.84	2.23	0.16	20.48
类芦土 Soil of <i>Neyraudia reynaudiana</i> (kunth.) Keng	6.33	10.98	54.28	0.15	0.36	703.90
金叶假连翘土 Soil of <i>Duranta erecta</i> Linnaeus cv. Golden Leaves	2.58	63.22	58.11	29.85	1.29	575.20
杉木土 Soil of <i>Cunninghamia lanceolata</i> (Lamb.) Hook.	6.33	45.71	33.70	12.00	0.17	341.45

2.3 景观植物重金属含量 一般来说,当土壤中 Cu、Zn、Pb、Cd 全量分别为 150~400、70~400、100~400、3~8 mg/kg 时,即认为对植物产生毒性。锰化厂中 5 种主要景观优势植物除木薯土、银合欢土 Cu、Zn、Pb、Cd 全量超出该范围外,其他 3 种植物根际土 Cu、Zn、Pb、Cd 全量均超该毒性阈值,尤其是类芦土、金叶假连翘土 Zn、Pb、Cd 全量远超该毒性阈值,是毒性阈值的 6.13~15.19 倍、7.59~13.13 倍、2.49~3.61 倍,属急性致死浓度,说明该场地所调查的 5 种优势景观植物对 Zn、Pb、Cd 均具有较强的耐性。另外,该场地土壤 Mn 全量高达 2 737.35~202 620.00 mg/kg,能在 Mn 严重污染的土壤上生长,证明该锰化厂植物对 Mn 也均具有较强的耐性。而不同的耐性机制使植物对重金属的吸收、转运、累积特征表现出较大差异。通过采集 5 种优势景观植物植株进行重金属含量分析(表 4、5)可知,木薯、杉木对土壤中的 Zn、Mn 富集能力及转运能力均较强,BCF 和 TF 均 > 1.000。且杉木叶片中 Mn 含量达到 24 682.00 mg/kg > 10 000.00 mg/kg(超富集植物 Mn 的限值^[13]),对 Mn 具有超富集的能力,在 Mn 污染土壤植物修复时可以利用其超富集 Mn 的能力,提取土

壤中的 Mn,以达到修复目的。

另外,杉木是一种常绿乔木,树高可达 30~40 m,胸径可达 2~3 m,除作为园林景观植物外,还具有较高的经济利用价值,是我国最普遍而重要的商品材,广泛用于建筑、桥梁、造船、电杆、家具等方面,可用于生产纤维板、胶合板、刨花板、重组木等人造板。因此,场地污染植物修复时可优先使用。

而银合欢、类芦、金叶假连翘虽不具有超富集能力,但在污染土壤植物修复时,可以根据土壤污染特征,搭配超富集草本植物或灌木或乔木,如与杉木一起进行修复,利用银合欢的固氮功能、类芦和金叶假连翘的观赏功能,合理配置,打造场地“修复+景观+经济效益”修复模式。

3 结论

(1)通过对锰化厂场地进行植被调查,共记录高等植物 33 种,隶属 22 科 31 属。以乔木、灌木(小乔木)、草本为主,分别占总种数的 27.27%、30.30%、33.33%。且优势种共有 8 种,分别为木薯、银合欢、类芦、鬼针草、金叶假连翘、马缨丹、水茄、杉木。

表 4 主要景观优势植物重金属含量

Table 4 Heavy metal contents of dominant landscape plants

mg/kg

植物名称 Plant name	组织 Tissue	含量 Content				
		Cu	Zn	Pb	Cd	Mn
木薯 <i>Manihot esculenta</i> Crantz	叶	19.36	568.98	9.94	0.89	2 835.10
	茎	123.61	515.04	44.47	0.65	1 363.70
	根	135.32	342.17	35.21	1.01	1 678.20
银合欢 <i>Leucaena leucocephala</i> (Lam.) de Wit	叶	23.85	49.05	3.83	0.22	485.60
	茎	14.77	35.31	0.88	0.57	257.20
	根	5.60	7.75	0.27	0.43	46.50
类芦 <i>Neyraudia reynaudiana</i> (kunth.) Keng	地上部	10.83	242.87	10.05	1.01	1 671.80
	根部	99.88	262.67	104.01	3.11	3 594.30
金叶假连翘 <i>Duranta erecta</i> Linnaeus cv. Golden Leaves	叶	23.77	674.06	6.55	1.22	751.40
	茎	26.23	189.95	7.89	0.69	278.10
	根	30.21	237.12	8.32	1.46	290.40
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i> (Lamb.) Hook.	叶	11.94	1 443.00	9.48	0.88	24 682.00
	茎	10.25	820.13	3.23	1.38	9 770.20
	根	36.17	193.16	18.72	1.56	3 757.60

表 5 主要景观优势植物生物富集系数(BCF)和转运系数(TF)

Table 5 Bioconcentration factor(BCF) and transfer factor(TF) of dominant landscape plants

植物名称 Plant name	Cu		Zn		Pb		Cd		Mn	
	BCF	TF	BCF	TF	BCF	TF	BCF	TF	BCF	TF
木薯 <i>Manihot esculenta</i> Crantz	0.122	0.143	2.859	1.663	0.074	0.282	0.286	0.881	1.029	1.689
银合欢 <i>Leucaena leucocephala</i> (Lam.) de Wit	0.331	4.259	0.263	6.333	0.014	14.185	0.196	0.512	0.177	10.439
类芦 <i>Neyraudia reynaudiana</i> (kunth.) Keng	0.018	0.108	0.040	0.925	0.002	0.097	0.035	0.325	0.008	0.465
金叶假连翘 <i>Duranta erecta</i> Linnaeus cv. Golden Leaves	0.024	0.787	0.275	2.843	0.002	0.787	0.061	0.836	0.012	2.587
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i> (Lamb.) Hook.	0.026	0.330	2.080	7.470	0.006	0.506	0.255	0.564	1.360	6.569

(2)土壤重金属 Cu、Zn、Pb、Cd、Mn 均不同程度的污染,与重金属污染场地土壤修复标准(DB43-T-1125-2016)相比,类芦土、金叶假连翘土、杉木土 Mn 含量均远超修复标准值,为标准限值的 3.63~40.52 倍,污染严重。

(3)5 种景观优势植物中,杉木对 Mn 具有超富集能力,可应用于 Mn 污染土壤修复,金叶假连翘对强酸性土壤适应性较强,可应用于酸污染土壤修复。

参考文献

[1] KUMAR P B A N, DUSHENKOV V, MOTTO H, et al. Phytoextraction: The use of plants to remove heavy metals from soils[J]. Environmental science and technology, 1995, 29(5): 1232-1238.

[2] SALT D E, BLAYLOCK M, KUMAR P B A N, et al. Phytoremediation: A novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants[J]. Bio-technology, 1995, 13(5): 468-474.

[3] WATANABE M E. Phytoremediation on the brink commercialization[J]. Environmental science and technology News, 1997, 31(4): 182-186.

[4] DUSHENKOV V, KUMAR P B A, MOTTO H, et al. The use of plants to remove heavy metals from aqueous streams[J]. Environmental science and technology, 1995, 29(5): 1239-1245.

[5] PIERRE M, NATHALIE V I. Heavy metal tolerance and accumulation in metallicolous and non-metallicolous populations of *Thlaspi caerulescens* from continental Europe[J]. Plant ecology, 1997, 133(2): 221-231.

[6] 叶文玲, 陈增, 徐晓燕. 铜菱铜尾矿库优势植物对重金属富集特征研究[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(5): 11-20.

[7] 赵甲亭, 李云云, 高愈希, 等. 贵州万山汞矿区耐汞野生植物研究[J]. 生态毒理学报, 2014, 9(5): 881-887.

[8] 何东, 邱波, 彭尽晖, 等. 湖南下水湾铅锌尾矿库优势植物重金属含量及富集特征[J]. 环境科学, 2013, 34(9): 3595-3600.

[9] 杨晓庆, 柏亮, 程涛. 电镀污染区植物重金属积累特征研究[J]. 环境保护科学, 2015, 41(2): 114-117.

[10] BROOKS R R. Plants that hyperaccumulate heavy metals[M]. Wallingford: CAB International, 1998.

[11] LINDSAY W L, NORVELL W A. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper[J]. Soil science society of america journal, 1978, 42(3): 421-428.

[12] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999.

[13] BAKER A J M, BROOKS R R, PEASE A J, et al. Studies on copper and cobalt tolerance in three closely related taxa within the genus *Silene* L. (Caryophyllaceae) from Zaïre[J]. Plant and soil, 1983, 73(3): 377-385.

(上接第 62 页)

[24] FAO. Sustainable Management of Tropical Forests in Central African Search of Excellence[Z]. 2005.

[25] IAN B. Placing money values on the unpriced benefits of forestry[J]. Quarterly journal of forestry, 1991, 85(3): 152-165.

[26] 孔繁文, 戴广翠. 瑞典、芬兰森林资源与环境核算考察报告[J]. 林业经济, 1995(1): 76-80.

[27] 陈瑜, 崔国发, 谷建才, 等. 内蒙古汗马国家级自然保护区森林资源动态变化[J]. 东北林业大学学报, 2013, 41(3): 26-29.

[28] 甘敬, 张振明, 余新晓, 等. 森林健康监测与评价研究[J]. 水土保持研究, 2006, 13(3): 177-180.

[29] COSTANZA R, D'ARCE R, GROOT R D, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 1997, 387: 253-260.

[30] 甘敬, 朱建刚, 张国祯, 等. 基于 BP 神经网络确立森林健康快速评价

指标[J]. 林业科学, 2007, 43(12): 1-7.

[31] 张桓. 华北地区自然保护区森林健康评价研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2010

[32] TIEDEMANN A R, KLEMMEDSON J O, BULL E L. Solution of forest health problems with prescribed fire: Are forest productivity and wildlife at risk? [J]. Forest ecology and management, 2000, 127(1/2/3): 1-18.

[33] TANG Z Y, FANG J Y, SUN J Y, et al. Effectiveness of protected areas in maintaining plant production[J]. Plos one, 2011, 6(4): 1-8.

[34] 侯元兆, 王琦. 中国森林资源核算研究[J]. 世界林业研究, 1995(3): 51-56.

[35] 欧阳志云, 王如松, 赵景柱. 生态系统服务功能及其生态经济价值评价[J]. 应用生态学报, 1999, 10(5): 635-640.

[36] 宗雪. 森林类型自然保护区生态系统服务价值评估[D]. 北京: 北京林业大学, 2008.