

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

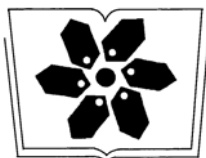
Acta Ecologica Sinica



第 33 卷 第 20 期 Vol.33 No.20 **2013**

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 33 卷 第 20 期 2013 年 10 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 中小尺度下西北太平洋柔鱼资源丰度的空间变异..... 杨铭霞,陈新军,冯永玖,等 (6427)
- 水分和温度对若尔盖湿地和草甸土壤碳矿化的影响..... 王 丹,吕瑜良,徐 丽,等 (6436)
- 荒漠啮齿动物群落对开垦干扰的响应及其种群生态对策..... 袁 帅,付和平,武晓东,等 (6444)
- 转 Bt 基因棉花对烟粉虱天敌昆虫龟纹瓢虫的影响 周福才,顾爱祥,杨益众,等 (6455)
- 微地形改造的生态环境效应研究进展..... 卫 伟,余 韵,贾福岩,等 (6462)

个体与基础生态

- 丹顶鹤春迁期觅食栖息地多尺度选择——以双台河口保护区为例..... 吴庆明,邹红菲,金洪阳,等 (6470)
- 新疆石河子南山地区表土花粉研究..... 张 卉,张 芸,杨振京,等 (6478)
- 鄱阳湖湿地两种优势植物叶片 C、N、P 动态特征 郑艳明,尧 波,吴 琴,等 (6488)
- 基于高分辨率遥感影像的森林地上生物量估算..... 黄金龙,居为民,郑 光,等 (6497)
- 异质性光照下匍匐茎草本狗牙根克隆整合的耗益..... 陶应时,洪胜春,廖咏梅,等 (6509)
- 湘潭锰矿废弃地栎树人工林微量元素生物循环..... 罗赵慧,田大伦,田红灯,等 (6517)
- 接种彩色豆马勃对模拟酸沉降下马尾松幼苗生物量的影响 陈 展,王 琳,尚 鹤 (6526)
- 生物炭对不同土壤化学性质、小麦和糜子产量的影响 陈心想,何绪生,耿增超,等 (6534)
- 延河流域植物功能性状变异来源分析 张 莉,温仲明,苗连朋 (6543)
- 榆紫叶甲赤眼蜂基础生物学特性及其实验种群生命表..... 王秀梅,臧连生,林宝庆,等 (6553)
- 几种生态因子对拟目乌贼胚胎发育的影响 彭瑞冰,蒋霞敏,于曙光,等 (6560)

种群、群落和生态系统

- 海南铜鼓岭灌木林稀疏规律..... 周 威,龙 成,杨小波,等 (6569)
- 青海三江源区果洛藏族自治州草地退化成因分析..... 赵志平,吴晓蕾,李 果,等 (6577)
- 模拟氮沉降对华西雨屏区苦竹林凋落物基质质量的影响..... 肖银龙,涂利华,胡庭兴,等 (6587)
- 基于光合色素的钦州湾平水期浮游植物群落结构研究 蓝文陆,黎明民,李天深 (6595)
- 基于功能性状的常绿阔叶植物防火性能评价..... 李修鹏,杨晓东,余树全,等 (6604)
- 北京西山地区大山雀与其它鸟类种群间联结分析..... 董大颖,范宗骥,李扎西姐,等 (6614)
- 被动式电子标签用于花鼠种群动态研究的可行性 杨 慧,马建章,戎 可 (6634)

景观、区域和全球生态

- 华北冬小麦降水亏缺变化特征及气候影响因素分析..... 刘 勤,梅旭荣,严昌荣,等 (6643)
- 基于 FAHP-TOPSIS 法的我国省域低碳发展水平评价 胡林林,贾俊松,毛端谦,等 (6652)
- 河漫滩湿地生态阈值——以二卡自然保护区为例..... 胡春明,刘 平,张利田,等 (6662)
- 应用 Le Bissonnais 法研究黄土丘陵区植被类型对土壤团聚体稳定性的影响 刘 雷,安韶山,黄华伟 (6670)
- 不同人为干扰下纳帕海湖滨湿地植被及土壤退化特征..... 唐明艳,杨永兴 (6681)

资源与产业生态

近 10 年北京极端高温天气条件下的地表温度变化及其对城市化的响应 李晓萌,孙永华,孟 丹,等 (6694)

三峡库区小江库湾鱼类食物网的稳定 C、N 同位素分析 李 斌,徐丹丹,王志坚,等 (6704)

研究简报

北京奥林匹克森林公园绿地碳交换动态及其环境控制因子..... 陈文婧,李春义,何桂梅,等 (6712)

植被恢复对洪雅县近 15 年景观格局的影响 王 鹏,李贤伟,赵安玖,等 (6721)

高盐下条斑紫菜光合特性和 S-腺苷甲硫氨酸合成酶基因表达的变化 ... 周向红,易乐飞,徐军田,等 (6730)

学术信息与动态

生态系统服务研究进展——2013 年第 11 届国际生态学大会 (INTECOL Congress) 会议述评 房学宁,赵文武 (6736)

生态系统服务评估——2013 年第 6 届生态系统服务伙伴国际学术年会述评 巩 杰,岳天祥 (6741)

回顾过去,引领未来——2013 年第 5 届国际生态恢复学会大会 (SER 2013) 简介..... 彭少麟,陈宝明,周 婷 (6744)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 320 * zh * P * ¥ 90.00 * 1510 * 33 * 2013-10



封面图说: 荒漠旱獭——旱獭属啮齿目、松鼠科、旱獭属,是松鼠科中体型最大的一种。旱獭多栖息于平原、山地和荒漠草原地带,集群穴居,挖掘能力甚强,洞道深而复杂,多挖在岩石坡和沟谷灌丛下,从洞中推出的大量沙石堆在洞口附近,形成旱獭丘。荒漠啮齿动物是荒漠生态系统的重要成分,农业开垦对功能相对脆弱的荒漠生态系统的干扰极大,往往导致栖息地破碎化,对动植物种产生强烈影响,啮齿动物受到开垦干扰后对环境的响应及其群落的生态对策,是荒漠生态系统生物多样性及其功能维持稳定的重要基础。

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

DOI: 10.5846/stxb201304280866

罗赵慧, 田大伦, 田红灯, 徐露燕, 李雄华. 湘潭锰矿废弃地栎树人工林微量元素生物循环. 生态学报, 2013, 33(20): 6517-6525.

Luo Z H, Tian D L, Tian H D, Xu L Y, Li X H. Biological cycling of *Koelreuteria paniculata* plantation microelements in Xiangtan Manganese Mine wasteland. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(20): 6517-6525.

湘潭锰矿废弃地栎树人工林微量元素生物循环

罗赵慧^{1,2}, 田大伦^{1,2,*}, 田红灯^{1,2}, 徐露燕^{1,2}, 李雄华^{1,2}

(1. 中南林业科技大学, 长沙 410004; 2. 南方林业生态应用技术国家工程实验室, 长沙 410004)

摘要:对湘潭锰矿废弃地 5 年生栎树人工林中 8 种微量元素的含量、积累、空间分布和生物循环进行了研究。结果表明:林地土壤中,各微量元素含量顺序为:Fe>Mn>Zn>Pb>Ni>Cu>Co>Cd,且 Fe、Mn、Co、Cd 含量随土层深度的增加而增加。枯枝落叶层中,仅 Mn 和 Co 从半分解到已分解阶段向土壤中转移,其他元素在分解过程中都出现了不同程度的富集。栎树各器官微量元素含量顺序为:叶>枝>细根>皮>粗根>大根>根头>干,各微量元素总含量顺序为:Mn>Fe>Zn>Pb>Cu>Cd>Ni>Co。林分微量元素总贮量为 15.272kg/hm²,其中干和枝贮存量最高,占总贮存量的 54.204%,各器官微量元素贮存量顺序为:枝>干>叶>皮>根头>大根>粗根>细根;林分微量元素吸收量为 5.255kg·hm⁻²·a⁻¹,存留量为 2.504kg·hm⁻²·a⁻¹,归还量 2.751kg·hm⁻²·a⁻¹,总利用系数为 2.394,循环系数为 3.138,周转期为 11.203a。栎树对土壤中 Mn 的吸收和富集能力强,维持生长所需量较多,循环强度较大和周转期较短,而且林分对养分的稳定性和自我调节能力强有利于林地生产力维持。因此,栎树可作为锰矿区废弃地植被修复的优选树种。

关键词:湘潭;锰矿废弃地;栎树人工林;微量元素;生物循环

Biological cycling of *Koelreuteria paniculata* plantation microelements in Xiangtan Manganese Mine wasteland

LUO Zhao-hui^{1,2}, TIAN Dalun^{1,2,*}, TIAN Hongdeng^{1,2}, XU Luyan^{1,2}, LI Xionghua^{1,2}

1 Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China

2 National Engineering Lab for Applied Technology of Forestry & Ecology in South China, Changsha, 410004, China

Abstract: Plants have been used to mitigate pollutant concentrations in contaminated soils. In order to understand and evaluate the possibility of *Koelreuteria paniculata* species in Phytoremediation, a study was conducted in an abandon manganese mine wasteland in Xiangtan to examine the characteristics of concentration, accumulation, spatial distribution and biological cycling of 8 microelements (Fe, Mn, Cu, Zn, Pb, Co, Ni, Cd) in a 5-year old *Koelreuteria paniculata* plantation. The results showed that the concentration of 8 microelements in the plantation soils was in an order Fe>Mn>Zn>Pb>Ni>Cu>Co>Cd, and the concentration of Fe, Mn, Co and Cd were increased with soil depth. On the litterfall layer, the concentrations of all microelements were enriched except the elements of Mn and Co. The concentration of Mn and Co was decreased in both semi-decomposed and complete-decomposed litterfall parts. The concentration of microelements in different organs of *Koelreuteria paniculata* species was ranked as: Leaves>Branch>Fine root>Bark>coarse root>Large root>Stump>Stem and the concentration of 8 microelements were in the order of Mn>Fe>Zn>Pb>Cu>Cd>Ni>Co. The total storage of 8 microelements in the plantation was 15.27kg/hm², the storage of the microelements was the highest in branch and stem, which accounted for 54.2% of the total storage of the microelements. The storage of microelements in organs was ranked as: Branch>Stem>Leave> Bark>Stump>Large root>Coarse root>Fine root. The annual absorption, annual retention

基金项目: 国家林业公益性行业科研专项(201104009);湖南省教育厅项目(湘财教字[2010]70号);长沙市科技局创新平台项目(K1003009-61)

收稿日期: 2013-04-28; **修订日期:** 2013-08-19

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: csuft_tiantalun@126.com

and annual return amount of microelements were $5.26\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, $2.50\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, and $2.75\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ in the studied plantation, respectively. The utilization coefficient, cycling coefficient and recycling period were 2.39, 3.14 and 11.20a, respectively. Our study indicated that *Koelreuteria paniculata* plantation had a high ability to absorb and enrich Mn, The plantations had high requirements of Mn for maintaining growth, a high intensity of cycle, and short turnover time. In addition, *Koelreuteria paniculata* plantation had a relative high ability to stabilize the nutrient contents and to adapt the changed environment, which provides benefit for maintaining forest productivity. The results suggested that *Koelreuteria paniculata* tree species could be selected as a prioritize tree species in phytoremediation in abandon manganese mine regions.

Key Words: Xiangtan; manganese mine wasteland; *Koelreuteria* plantations; microelements; nutrient cycling

对矿产资源开发形成的废弃地是一种典型的退化生态系统^[1], 矿区废弃地修复及其土壤生态稳定已成为国内外生态和环境工作者关注的重大科学问题之一。植物修复以低成本、来源广、无二次污染、绿色生态等优点, 已成为矿区废弃地较为理想的修复治理途径。湖南因有色金属矿山引起的铅、镉、汞、砷等重金属污染面积达 2.8 万 km^2 , 占全省总面积的 13%^[2]。20 世纪 80 年代以来, 我国矿区废弃地的生态修复工作已受到科技工作者的高度重视, 并获得了较多的成果, 特别是在经济发达的东南地区, 矿区废弃地的复垦利用已受到普遍的关注。目前有关矿区废弃地植被修复过程中形成的人工林生态系统的研究主要集中在: 植被修复过程与特征^[3-6], 林分生物量^[7-8]及生长规律^[9], 土壤动物、微生物和酶活性^[10-12]及理化性质^[13]等方面, 而该类型人工林生态系统的养分循环研究的仍较少, 仅田大伦等^[14]对锰矿区栎树与杜英混交林生物循环进行了研究。由于养分循环是森林生态系统中一个非常复杂和重要的功能过程之一, 直接影响着林地生产力和肥力水平^[15-16], 对森林生态系统的稳定、功能的发挥和生态效益的表现具有重要的意义^[17]。因此, 有必要对矿区废弃地修复植物的养分循环作进一步的研究。为此, 本文以湘潭锰矿 5 年生栎树人工林为研究对象, 分析了栎树与土壤中重金属含量及生物循环, 探讨了它们作为锰污染区修复和锰矿区生态恢复备选植物群的可行性, 为提高系统的养分利用率和最大限度地提高生产力, 丰富矿区植被恢复理论与实践提供参考, 以期对矿区废弃地植被恢复与重建的物质循环机制的揭示提供科学依据。

1 试验地概况

湘潭锰矿矿渣废弃地矿区位于湖南省湘潭市北部约 14km 处, 年均气温 17.4°C ; 年均降水量 1431.4mm。区域内由矿石废弃物、矿渣和选矿后的尾矿泥、煤气灰、城市生活生产垃圾等形成的一种特殊的退化生态系统, 主要是草本植物种类, 如艾蒿 (*Lavandulaefolia*)、灯心草 (*Juncus effusus*)、五节芒 (*Miscanthus floridulu*)、一年蓬 (*Erigeron annuns*) 等。2008 年在矿区的矿渣废弃地采用 2 年生栎树 (*Koelreuteria paniclata*) (苗高 1.3 m, 地径 1.5 cm) 实生苗, 挖穴 ($0.5\text{m}\times0.5\text{m}\times0.5\text{m}$), 客土 1.0kg, 苗木根系蘸黄土浆进行人工造林恢复, 株行距为 $1.0\text{m}\times1.3\text{m}$ 。目前植物生长状况良好。2011 年 10 月在造林地设置标准地测定林木胸径和树高, 并计算林分的平均胸径、平均树高、单株生物量、林分生物量和林分生产力 (表 1)。

表 1 样地林分特征

Table 1 Characteristics of the investigated stands

林龄 Age /a	林分密度 Stand density /(株/ hm^2)	平均胸径 Average DBH /cm	平均树高 Average height /m	单株生物量 individual biomass/kg						林分生物量 Stand biomass /($\text{t}\cdot\text{hm}^2$)	林分生产力 productivity /($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)
				干 Stem	皮 Bark	叶 Leaf	枝 Branch	根 Root	合计 Total		
5	2566	6.12 (1.13)	5.81 (0.51)	5.51 (2.03)	1.15 (0.94)	1.18 (0.80)	2.36 (1.95)	3.09 (1.00)	13.30 (4.93)	34.11	6.22

括号内数据为标准误

2 研究方法

2.1 林分生物量测定

在研究区林分内,设置固定标准地 2 块,样地面积 667m²。在样地林分内林木按克拉夫特分级法进行每木调查,求算林分平均测树因子。然后依据林木各生长级的 I 至 V 级和平均木的测树因子各选择其标准木 1 株,共 6 株,在现场将标准木从树干基部伐倒,用分层切割法,按 1m 区分段,测定标准木枝、叶、干(包括树皮)和根的鲜重,根系采取全挖法,分层分级(根头、大根($d>0.5\text{cm}$)、粗根($0.2<d<0.5\text{cm}$)、细根($d<0.2\text{cm}$))测定鲜重。然后按各器官分别采取小样本 1.0kg,置于 80℃ 烘箱中烘至恒重,求出各器官的干重^[16]。林木单株生物量由 6 株标准木的平均值求得;林分生物量由林木单株生物量乘以林分株数求得;林分生产力采用年平均生长量估算。

2.2 林分枯枝落叶层现存量测定

在样地内随机设置 4 个 1m×1m 的小样方,按未分解、半分解和已分解 3 个层次全收获测定鲜重,再抽取亚样本 1.0 kg,置于 80℃ 烘箱中烘至恒重。

2.3 土壤样品采集

在植被恢复地和距样地 400m 外空旷对照地各设置 4 个样地,每个样地设置 3 个采样点,每个采样点按 0—15、15—30、30—45cm 层次,分别取土样 1kg,共采土样 72 个。去除石砾与杂物,风干后过 20 目和 100 目筛,备用。在取样地采取环刀法,取各点各层土样,用于测定土壤容重,用小铝盒取土测定土壤含水量。

2.4 化学分析方法

植物和土壤中 Cu、Fe、Zn、Mn、Cd、Ni、Pb、Co 全量均采用 AA-7000 型原子吸收仪测定。

2.5 数据处理

数据用 Excel2003 和 SPSS13.0 软件处理。

采用利用系数、循环系数和周转时间等生物循环系数来分析微量元素循环特征,其中利用系数为吸收量与贮存量的比值,表明林木维持其生长所需的元素量;循环系数为归还量与吸收量的比值,表明元素的循环强度;周转时间为微量元素经历一个循环周期所需的时间,由微量元素的总贮量与归还量的比值来表示^[17]。

生物循环过程可用吸收量=存留量+归还量来进行表达^[17]。

生物吸收系数=(鲜叶中某元素的含量/表土中相应元素含量)×100

生物迁移系数=(鲜叶中某元素养分含量/落叶中相应元素含量)×100

生物分解系数=(鲜叶中某元素含量/凋落物中相应元素的含量)×100

生物返还系数=(凋落物中某元素含量/表土层相应元素含量)×100^[19]

3 结果与分析

3.1 栎树林微量元素分布特征

3.1.1 林地土壤中微量元素含量

栎树人工林土壤各微量元素的含量如表 2 所示,在栎树人工林土壤中,Fe 含量最高,Mn 次之,Cd 最低。各微量元素含量的顺序为:Fe>Mn>Zn>Pb>Ni>Cu>Co>Cd。其中,Mn、Fe 含量存在数量级差异,Co、Cd 含量与 Fe、Mn、Zn、Pb 均有数量级差异。各元素在土壤层中的垂直分布,Fe、Mn、Co、Cd 含量随深度增加而增加,表明这四种元素易被雨水淋溶而向下迁移。其他元素的含量随深度的变化未表现出一致的规律性,表明这几种元素被淋溶向下迁移不明显。林地土壤各微量元素含量均比对照地低,其中 Mn 与对照地相比降低量最多,达 78.578%。说明栎树对该尾矿废弃地中的土壤重金属元素具有一定的改良作用,尤其是对 Mn 的改良更为显著。经过 4a 的植物修复,除 Fe 以外的其他几种重金属元素的含量仍超过湖南省土壤背景值,但除 Cd 以外,土壤中其他重金属元素都有不同程度的下降。这可能是因为土壤本身重金属含量高,植物修复时间较短,但也与植物对重金属富集能力有限有关。

3.1.2 林地枯枝落叶层微量元素含量

表 3 列出了栎树林枯枝落叶层中不同元素在不同分解阶段的元素含量。可以看出,栎树林地枯落物在分

解过程中除 Mn 和 Co 从未分解到半分解阶段分别增加了 0.186% 和 17.518%, 但从半分解到已分解阶段含量分别减少 0.194% 和 57.543% 以外, 其余元素随时间的推移含量均呈增加趋势, 说明仅有 Mn 和 Co 从半分解到已分解阶段向土壤中迁移, 其余各元素在不同分解过程中均出现了不同程度的积累和富集, 其中, Pb 和 Ni 元素增加量最多, 分别为 75.381% 和 73.495%。由此可见, 不同的微量元素在不同的分解阶段其含量不完全相同, 同一种微量元素在不同的分解阶段含量也不相同。此外, 各元素在不同阶段含量没有显著差异, 在分解过程中, Mn 元素含量均高于其他元素, 与 Cu、Pb、Co、Ni、Cd 均存在数量级差异。

表 2 林地土壤微量元素含量

Table 2 Microelements concentration in the forest soil

土层深度 Soil depth/cm	Fe /(mg/kg)	Mn /(mg/kg)	Cu /(mg/kg)	Zn /(mg/kg)	Pb /(mg/kg)	Co /(mg/kg)	Ni /(mg/kg)	Cd /(mg/kg)
0—15	28735.149 (28.868)	1539.229 (34.666)	48.867 (5.345)	221.885 (4.697)	238.836 (4.518)	16.276 (5.210)	40.223 (3.220)	6.276 (0.384)
15—30	28759.925 (35.079)	1396.493 (18.896)	64.385 (1.392)	221.002 (4.278)	218.098 (1.086)	17.351 (3.542)	39.307 (4.233)	16.846 (0.639)
30—45	28769.000 (42.604)	1420.413 (22.604)	56.298 (6.081)	224.714 (4.262)	225.966 (5.052)	18.320 (2.614)	39.351 (6.327)	17.193 (0.383)
平均值 Average	28754.892 (19.268)	1420.413 (22.604)	56.517 (3.128)	222.533 (2.356)	227.634 (2.495)	17.315 (2.072)	39.627 (2.495)	17.193 (0.383)
对照地 CK	32474.777 (3.376)	6630.527 (46.385)	67.332 (1.554)	630.096 (1.553)	625.204 (0.795)	35.392 (0.708)	213.872 (1.370)	15.126 (0.445)
湖南省背景值 ^[18] Background value	34000	441	27	95	27	14	32	0.126

括号内数据为标准误

表 3 林地枯枝落叶层微量元素含量

Table 3 Microelements concentration in the litter floor/(mg/kg)

层次 Layer	Fe /(mg/kg)	Mn /(mg/kg)	Cu /(mg/kg)	Zn /(mg/kg)	Pb /(mg/kg)	Co /(mg/kg)	Ni /(mg/kg)	Cd /(mg/kg)
未分解 Litter	217.497 (1.809)	536.766 (0.461)	2.320 (0.03)	71.434 (0.2567)	14.727 (0.593)	0.678 (0.091)	2.025 (0.172)	0.685 (0.028)
半分解 Fermentation	238.976 (1.627)	538.650 (0.351)	2.365 (0.043)	72.312 (2.465)	25.124 (1.501)	0.822 (0.062)	3.337 (0.170)	0.745 (0.040)
已分解 Humus	277.586 (3.906)	516.635 (19.392)	2.405 (0.031)	73.166 (1.560)	59.820 (3.355)	0.349 (0.152)	7.640 (0.595)	1.135 (0.321)
平均 Average	244.686 (8.890)	530.684 (6.616)	2.363 (0.023)	72.304 (1.149)	33.224 (6.901)	0.616 (0.089)	4.334 (0.868)	0.855 (0.117)

括号内数据为标准误

3.1.3 林木中微量元素含量的变化规律

表 4 给出了栎树各组分微量元素的含量, 可以看出, 枝中 Fe 含量最高, 与粗根、细根和叶中 Fe 含量没有显著差异, 但与干、皮、根头和大根均有显著差异, 说明 Fe 主要集中在枝、叶和细根中; 叶中 Mn 含量与枝、细根没有显著差异, 与其他器官都有显著差异, 说明 Mn 主要集中在叶中; 由显著性检验可以看出 Cu 元素主要集中在干中; Zn 主要集中在干和叶中; Pb 主要集中在叶中, 而皮和根头中 Pb 含量不及其他器官; 枝、叶、粗根和细根中 Co 的含量要高于干、皮、根头和大根, 且前者与后者含量存在显著差异; Ni 主要集中在叶和枝中, 且其他组分 Ni 含量没有显著差异; 枝和叶总 Cd 含量存在差异, 而与其他器官均无显著差异, 说明 Cd 主要集中在枝中, 叶中较少, 其他器官中 Cd 含量比较均匀。从各组分微量元素总量来看, 叶与其他器官都有显著差异, 由此可以看出, 叶作为主要的呼吸器官, 对微量元素的需求量和积累量要高于其他器官。说明, 因器官对元素需求量和富集能力的差异, 同一种元素在不同器官的含量存在差异。各器官元素含量顺序为: 叶>枝>细根>皮>粗根>大根>根头>干。表明林木各器官微量元素含量的差异是随器官的结构和功能而变化的。林木

中各元素总量依次为: $Mn > Fe > Zn > Pb > Cd > Cu > Ni > Co$ 。值得注意的是, Pb 一般被视为重金属元素, 对植物生长有毒害作用, 但栎树林木中 Pb 的高含量并没有对林木生长产生危害, 而且能够正常生长, 一方面是由于干材和根头对 Pb 的富集以及叶以凋落物的形式将部分 Pb 转移到植物体外, 降低了 Pb 对植物体的毒害, 另一方面也与栎树林木对 Pb 具有耐性等有关。

表 4 林木各组分中微量元素含量

Table 4 Microelements concentration in different organs of *Koelreuter paniculata* trees

组分 Organs	Fe /(mg/kg)	Mn /(mg/kg)	Cu /(mg/kg)	Zn /(mg/kg)	Pb /(mg/kg)	Co /(mg/kg)	Ni /(mg/kg)	Cd /(mg/kg)	合计 Total
干 Stem	73.544a (3.662)	89.671a (3.035)	11.016a (3.227)	65.945a (10.241)	33.708ab (8.577)	0.761a (0.153)	0.757a (0.104)	3.265a (0.118)	278.667a (83.297)
枝 Branch	253.872b (11.693)	325.745bc (90.183)	6.626b (0.245)	57.487b (10.358)	57.734ab (2.107)	3.713b (0.212)	3.209a (0.163)	8.250ba (0.625)	716.636b (94.865)
叶 Leaf	228.360b (18.322)	545.195c (16.969)	2.925b (0.590)	73.683a (7.104)	53.842a (1.126)	1.815b (0.216)	2.833b (0.223)	2.256ca (0.296)	910.908c (37.369)
皮 Bark	115.896a (8.147)	351.821b (83.377)	2.479b (0.579)	20.817b (10.291)	29.541b (9.444)	1.071a (0.168)	0.937a (0.213)	2.681a (0.325)	525.243d (74.137)
细根 Fine root	229.983b (21.209)	357.705bc (84.263)	4.600b (1.613)	33.744ab (15.526)	34.851ab (10.230)	1.922b (0.202)	2.386b (0.626)	3.451a (0.230)	668.644b (61.851)
粗根 Coarse root	209.685b (3.207)	195.278a (20.124)	3.838b (1.062)	21.422b (9.426)	37.556ab (8.478)	1.725b (0.155)	1.831ab (0.550)	3.258a (0.226)	474.592d (10.788)
大根 Large root	99.969a (4.602)	112.656a (2.7501)	3.490b (1.048)	25.006b (9.981)	33.983ab (9.486)	1.224a (0.164)	1.002a (0.095)	3.235a (0.153)	280.568a (6.302)
根头 Stark	96.094a (6.7722)	95.886a (1.837)	3.201b (0.876)	53.381ab (8.553)	27.380b (4.492)	1.167a (0.131)	0.997a (0.210)	2.733a (0.183)	280.480a (10.096)
总计 Total	1427.701 (24.709)	2073.956 (60.362)	38.175 (1.380)	351.485 (10.354)	308.596 (6.206)	13.399 (0.195)	13.953 (0.347)	29.129 (0.309)	4256.395 (81.381)

括号内数据为标准误; 同列不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)

3.2 栎树林微量元素贮存

从表 5 可以看出栎树林微量元素总贮量为 15.272 kg/hm^2 。不同微量元素总贮量中以 Mn 最高, 为 6.783 kg/hm^2 , Fe 其次, 为 4.781 kg/hm^2 , Ni 最低, 为 0.050 kg/hm^2 。各微量元素总贮量高低顺序为: $Mn > Fe > Zn > Pb > Cu > Cd > Co > Ni$ 。从各器官的分配情况来看, 树干和枝的生物量最大, 为 20.202 t/hm^2 , 占林分总生物量的 59.203% , 贮存的微量元素占林分总贮量的 54.204% 。树叶和树皮的生物量为 5.969 t/hm^2 , 占林分总生物量的 17.493% , 贮存的微量元素占 30.474% 。从微量元素贮存总量的分配来看: 干、枝、叶的贮存量与其他器官存在显著差异, 这是因为贮存量大小是生物量和含量共同作用的结果。

表 5 栎树林微量元素的贮存量

Table 5 The storage and distribution of microelements in *Koelreuter paniculata* plantation

组分 Organs	生物量 Biomass /(t/hm ²)	Fe /(kg/hm ²)	Mn /(kg/hm ²)	Cu /(kg/hm ²)	Zn /(kg/hm ²)	Pb /(kg/hm ²)	Co /(kg/hm ²)	Ni /(kg/hm ²)	Cd /(kg/hm ²)	合计 Total
干 Stem	14.154	1.041a	1.269a	0.156a	0.933a	0.477a	0.011ab	0.011a	0.046a	3.944a
枝 Branch	6.048	1.535a	1.970a	0.040b	0.348ade	0.195b	0.022a	0.019ac	0.050bd	4.334a
叶 Leaf	3.020	0.690bc	1.646ab	0.009b	0.223be	0.163bc	0.005bc	0.009ac	0.007cd	2.751ab
皮 Bark	2.949	0.696c	1.038ca	0.007b	0.061bd	0.087bc	0.003c	0.003bc	0.008cd	1.903c
细根 Fine root	0.157	0.036cd	0.056c	$0.7 \times 10^{-3}b$	0.005cd	0.006c	$0.3 \times 10^{-3}c$	$0.4 \times 10^{-3}bc$	$0.5 \times 10^{-3}c$	0.105c
粗根 Coarse root	0.239	0.050cd	0.047c	$0.9 \times 10^{-3}b$	0.005d	0.009c	$0.4 \times 10^{-3}c$	$0.4 \times 10^{-3}bc$	$0.8 \times 10^{-3}c$	0.114c
大根 Large root	1.898	0.190c	0.214ca	0.007b	0.047d	0.064bc	0.002c	0.002bc	0.006cd	0.532c
根头 Stark	5.658	0.544c	0.543ca	0.018b	0.302e	0.155bc	0.007abc	0.006c	0.015d	1.589bc
合计 Total	34.123	4.781	6.783	0.239	1.925	1.310	0.052	0.050	0.134	15.272

同列不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)

3.3 栎树林微量元素生物循环特征

3.3.1 存留量

微量元素年存留量指植物各器官在单位时间(1a)内积累的微量元素总量,其数值大小由林分生产力和微量元素含量共同决定。表6列出了栎树林微量元素的年存留量。可以看出,栎树林年存留量为 $2.504\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,其中,地上部分年存留量为 $2.036\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,占林分年总存留量的81.310%。地下部分年存留量为 $0.468\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,占林分年总存留量的18.690%。可见,栎树林中微量元素主要存留于地上部分。

表6 栎树林微量元素的年净积累量

Table 6 The annual net accumulation of microelements in <i>Koelreuter paniculata</i> plantations										
组分 Organs	林分生产力 Productivity	Fe $/(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1})$	Mn $/(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1})$	Cu $/(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1})$	Zn $/(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1})$	Pb $/(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1})$	Co $/(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1})$	Ni $/(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1})$	Cd $/(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1})$	合计 Total
干 Stem	2.831	0.208	0.254	0.031	0.187	0.095	0.002	0.002	0.009	0.789
枝 Branch	1.210	0.307	0.394	0.008	0.070	0.070	0.004	0.004	0.010	0.867
皮 Bark	0.590	0.139	0.208	0.001	0.012	0.017	0.001	0.001	0.002	0.381
细根 Fine root	0.031	0.007	0.011	0.14×10^{-3}	0.001	0.001	0.6×10^{-4}	0.8×10^{-4}	0.11×10^{-3}	0.021
粗根 Coarse root	0.048	0.010	0.009	0.18×10^{-3}	0.001	0.002	0.8×10^{-4}	0.9×10^{-4}	0.16×10^{-3}	0.023
大根 Large root	0.380	0.038	0.043	0.001	0.009	0.013	0.001	0.38×10^{-3}	0.001	0.106
根头 Stark	1.132	0.109	0.109	0.004	0.060	0.031	0.001	0.001	0.003	0.381
合计 Total	6.221	0.818	1.027	0.046	0.340	0.229	0.009	0.008	0.025	2.504

3.3.2 生物循环特征

从表7可以看出,栎树林微量元素年吸收量为 $5.255\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。且微量元素不同,吸收量也有差异,对各元素的吸收量以Mn最高,Fe其次,Co最低,各微量元素的吸收量顺序为:Mn>Fe>Zn>Pb>Cu>Cd>Ni>Co。

表7 微量元素的生物循环

Table 7 Biological cycling of microelements in <i>Koelreuter paniculata</i> plantation									
项目 Item	Fe	Mn	Cu	Zn	Pb	Co	Ni	Cd	合计 Total
贮存量(kg/hm^2) Storage	4.781	6.783	0.239	1.925	1.310	0.052	0.050	0.134	15.272
吸收量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$) Absorption	1.508	2.674	0.055	0.563	0.392	0.015	0.017	0.032	5.255
存留量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$) Retention	0.818	1.027	0.046	0.340	0.229	0.009	0.008	0.025	2.504
归还量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$) Return amount	0.690	1.646	0.009	0.223	0.163	0.006	0.009	0.007	2.751
利用系数 Utilization coefficient	0.315	0.394	0.230	0.392	0.299	0.285	0.337	0.241	2.394
循环系数 Cycling coefficient	0.457	0.616	0.161	0.395	0.415	0.373	0.509	0.212	3.138
周转时间 Recycling period/a	6.934	4.120	27.007	8.651	8.056	9.398	5.820	19.637	11.203
生物吸收系数 Bio-absorption coefficient	0.795	40.111	5.985	33.208	22.543	11.151	7.044	13.492	
生物迁移系数 Bio-migration coefficient	217.497	536.766	2.32	71.434	14.727	0.678	2.025	0.685	
生物分解系数 Bio-decomposition coefficient	93.328	102.734	123.765	101.907	162.057	294.634	65.370	263.815	
生物返还系数 Bio-return coefficient	0.852	39.043	4.836	32.586	13.911	3.785	10.775	5.114	
生物富集系数 Bioconcentration coefficient	0.050	1.460	0.675	1.579	1.356	0.774	0.352	1.694	

鉴于栎树为落叶阔叶树种,林木叶所含微量元素,当年形成,当年归还,故在林分微量元素存留量中不予计算,而将它们列入归还量中^[19]。从表7可知,总归还量为 $2.751\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,其中,Mn元素归还量最高,为

$1.646 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, Co 元素归还量最低,为 $0.006 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,两者相差 329.2 倍。各微量元素归还量的顺序为 $\text{Mn} > \text{Fe} > \text{Zn} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{Cd} > \text{Co}$ 。因本次研究未将降水茎流和林冠流归还量及死根的归还量计入,仅计算了栎树叶的归还量,故其结果比实际值稍低。

从表 7 还可以看出,林分各元素的总利用系数为 2.394,其中, Mn 元素最高, Cu 元素最低,这主要是因为土壤中 Mn 含量高,也可能与林木在生长过程中对 Mn 的需求量高有关; Cu 和 Cd 的周转期较长,表明流动性较小。

再从表 7 中看出,栎树林对 Mn 元素的吸收能力最强, Zn 其次,最弱为 Fe,表明栎树林对土壤中的 8 中微量元素的吸收能力存在差异。

栎树对 Fe、Pb、Ni 的返还系数要高于吸收系数,而其他元素的返还系数要低于吸收系数; 8 种元素的分解系数都高于返还系数,表明栎树对土壤中微量元素具有自我调节能力,有助于保持和稳定林地养分。

4 结论与讨论

4.1 栎树人工林土壤微量元素含量

湘潭锰矿尾矿废弃地栎树人工林土壤中 8 种微量元素含量 Fe 最高, Mn 次之, Cd 最低。各微量元素含量的顺序为: $\text{Fe} > \text{Mn} > \text{Zn} > \text{Pb} > \text{Ni} > \text{Cu} > \text{Co} > \text{Cd}$ 。Fe、Mn、Co、Cd 含量随深度增加而增加,其他元素的含量随深度的变化未表现出一致的规律性,与马尾松人工林土壤微量元素含量的研究结果一致^[17]。枯枝落叶层中,微量元素不同,在分解过程中含量不同,同一微量元素,因分解阶段不同,其含量也不相同。

4.2 栎树人工林各器官微量元素含量

栎树人工林各器官微量元素含量存在较大差异,同一器官也因微量元素不同,其含量也存在一定差异。林木中各器官微量元素含量的差异是随器官的结构和功能而变化^[19],其含量表现为叶>枝>细根>皮>粗根>大根>根头>干。赵广亮等^[20]研究发现,油松林各组分养分含量的变化趋势为:叶最高,树干最低,与本研究结果相一致。各微量元素含量最高的是 Mn,其次为 Fe,依次排序为: $\text{Mn} > \text{Fe} > \text{Zn} > \text{Pb} > \text{Cd} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{Co}$ 。王凌晖等^[21]对南宁马占相思人工林微量元素分布与生物循环的研究结果表明,不同林龄马占相思各器官中微量元素含量多数以 Mn 最高,其次是 Fe;方晰等^[22]研究结果表明,杉木人工林微量元素含量 Mn 最高,Fe 其次。均与本研究结果相同。表明 Mn、Fe 是植物生长所必须的微量元素,且需求量较大。

4.3 栎树人工林微量元素循环特征

栎树人工林微量元素贮存量为 $15.272 \text{ kg} / \text{hm}^2$,其中以 Mn 最高,达到 $6.783 \text{ kg} / \text{hm}^2$, Fe 其次,为 $4.781 \text{ kg} / \text{hm}^2$, Co 最低,为 $0.050 \text{ kg} / \text{hm}^2$ 。树干和树枝的贮存量最大,为 $8.278 \text{ kg} / \text{hm}^2$,贮存的微量元素占林分总贮量的 54.204%。地上部分生物量为 $16.171 \text{ t} / \text{hm}^2$,占林分总生物量的 76.696%,贮存的微量元素占林分总贮量的 84.678%,地下部分生物量为 $7.952 \text{ t} / \text{hm}^2$,占林分总生物量的 23.304%,贮存的微量元素占林分的 15.322%。由此可以看出,微量元素主要集中在地上部分的干和枝中,且以 Mn 和 Fe 为主,说明栎树不仅能较好的将各种微量元素由地下转移到地上,而且对 Mn 和 Fe 表现出较强的富集能力和较高的耐性,可作为锰、铁矿区土壤修复的树种。

栎树人工林微量元素年存留量为 $2.504 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,年归还量为 $2.751 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,在生物循环过程中,能直接补给土壤较多的养分,供林木重新吸收和利用,有利于林地养分的维持。栎树林微量元素年吸收量为 $5.255 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,且微量元素不同,吸收量也有差异。

林分微量元素总循环系数为 3.138,周转时间为 11.203a。其中 Fe、Mn、Ni 的循环系数较大,周转时间较短,流动性也较大,而 Cu 和 Cd 的周转时间较长,流动性较小。栎树对 Mn 的吸收能力最强。栎树对各元素的吸收能力为: $\text{Mn} > \text{Zn} > \text{Pb} > \text{Cd} > \text{Co} > \text{Ni} > \text{Cu} > \text{Fe}$,说明林木在生长过程中对微量元素的利用具有选择性。8 种元素的分解系数要高于返还系数,表明栎树林分自我调节养分的能力和培肥土壤的能力强,有利于林地生产力的维持。可作为锰矿废弃地生态恢复过程中的优选树种。

References:

- [1] Chen F Q, Zhang L P, Xie Z Q. Vegetation restoration of wasteland in Three Gorges area. Resources and environment in the Yangtze Basin, 2004, 13 (3): 286-291.
- [2] Guo Z H, Zhu Y G. Contamination and available contents of heavy metals in soils in the typical mining and smelting circumjacent districts. Ecology and Environment, 2004, 13(4): 553-555.
- [3] Yang X, Gao L. A study on re-vegetation in mining wasteland of Dexing Copper Mine, China. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(11): 1932-1940.
- [4] Bradshaw A. Restoration of mined lands-Using natural processes. Ecological Engineering, 1997, 8: 255-269.
- [5] Wang K H, Liu S N. The Eco-restoration on Metal Mine waste Tailing Dumps. Sichuan Environment, 2003, 22(1): 13-17.
- [6] Wang Z H, Li A G. Amelioration of soil media during ecological restoration in the mining wasteland. China Mining Magazine, 2005, 14(3): 22-25.
- [7] Tian D L, Kang W X. Studies of the Biomass of *Koeleria paniculata* Mixed Stand Growing on a Mine Abandoned Land. Journal of Central South Forestry University, 2006, 26(5): 1-4.
- [8] Du Y X, Pan G X, Li L Q, Hu Z L, Wang X Z. Partitioning of vegetation biomass, nutrient storage and cycling of degraded ecosystems from mountainous Karst region, central Guizhou, China. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(23): 6338-6347.
- [9] Yang H Q, Duan Q M, Huang G P, Zhang Y F, Li G Y, Cheng Z L. Study on the law of growth of *Quercus variabilis* in abandoned mining area. Henan Science, 2002, 20(2): 157-159.
- [10] Wang Y C, Li Y L, Wang H, Guo J, Wang Y, Zhang L L, Yuan Y X. Effects of vegetation restoration pattern on microbial quantity and enzyme activity in iron tailings. Chinese Journal of Ecology, 2008, 27(10): 1826-1829.
- [11] Long J, Huang C Y, Teng Y, Yao H Y. The microbial biomass and enzyme activities of reclaimed mine soils in the heavy metal pollution area. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2004, 12(3): 146-148.
- [12] Wang H Y, Gong Y B, Chen L W. Study on soil microorganism and soil enzyme activity of different vegetation restoration in the upper reaches of Jialing River. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(3): 172-177.
- [13] Wang L, Meng L, Zhang J C, Zhang X Q, Li M, Wang R Y, Zhang B. Studies on physical property of soil water in Mine Waste Land in Different vegetation recovery mode. Soil and Water Conservation in China, 2010, (3): 54-57.
- [14] Tian D K, Xiang W H, Yan W D, Kang W X, Deng X W, Zhu F. Biological Cycles of Mineral Elements in a Yong Mixed Stand in Abandoned Mining Soils. Journal of Integrative Plant Biology, 2007, 49(9): 1284-1293.
- [15] Zhao C M, Jiang J S, Cao J H, Xiong D Q, Xie Y G, Li X B. Feature and flux of nutrient cycling in rubber plantation. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(7): 3782-3789.
- [16] Tian D L, Shen Y, Kang W X, Xinag W H, Yan W D, Deng X W. Characteristics of nutrient cycling in first and second rotations of Chinese fir plantations. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(17): 5025-5032.
- [17] Tian D L, Xiang W H, Kang W X. Study on biological cycling of microelements in *Pinus Massoniana* plantations. Scientia Silvae Sinicae, 2003, 39(4): 1-8.
- [18] Pan Y M, Yang G Z. Soil Background value and study methods in Hunan Province. Beijing: China Environmental Science Press, 1988: 159-285.
- [19] Wang X K, Tian D L, Yan W D, Ning X B, Liang X C, Li S Z. Contents and cycling of microelements in Karst urban poplar plantations. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(13): 3691-3699.
- [20] Zhao L G, Wang J X, Wang X Z, Sheng Y B, Zhou J C. Nutrient element cycling and density effect in *Pinus tabulaeformis* plantations. Journal of Beijing Forestry University, 2006, 28(4): 39-44.
- [21] Wang L H, He B. Microelements Distribution and Biological Cycling of *Acacia mangium* plantation in Nanning, Guangxi. Scientia Silvae Sinicae, 2009, 45(5): 27-33.
- [22] Fan X, Tian D L. Accumulation, distribution and biological cycling of microelements in a second rotation Chinese fir plantation. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(7): 1313-1320.

参考文献:

- [1] 陈芳清, 张丽萍, 谢宗强. 三峡地区废弃地植被生态恢复与重建的生态学研究. 长江流域资源与环境, 2004, 13(3): 286-291.
- [2] 郭朝晖, 朱永官. 典型矿冶周边地区土壤重金属污染及有效性含量. 生态环境, 2004, 13(4): 553-555.
- [3] 杨修, 高林. 德兴铜矿矿山废弃地植被恢复与重建研究. 生态学报, 2001, 21(11): 1932-1940.
- [5] 王克华, 刘胜祥. 金属尾矿废弃地的生态恢复. 四川环境, 2003, 22(1): 13-17.
- [6] 王志宏, 李爱国. 矿山废弃地生态恢复基质改良研究. 中国矿业, 2005, 14(3): 22-25.

- [7] 田大伦,康文星.生长在矿区废弃地的栎树混交幼林生物量研究.中南林学院学报,2006,26(5):1-4.
- [8] 杜有新,潘根兴,李恋卿,胡忠良,王新洲.黔中喀斯特山区退化生态系统生物量结构与 N、P 分布格局及其循环特征.生态学报,2010,30(23):6338-6347.
- [9] 杨红旗,段群迷,黄桂平,张勇富,李广宇,陈志林.矿区废弃地栓皮栎生长规律研究.河南科学,2002,20(2):157-159.
- [10] 王艳超,李玉灵,王辉,郭江,王颖,张丽丽,袁玉欣.不同植被恢复模式对铁尾矿微生物和酶活性的影响.生态学杂志,2008,27(10):1826-1829.
- [11] 龙健,黄昌勇,滕应,姚槐应.重金属污染矿区复垦土壤微生物生物量及酶活性的研究.中国生态农业学报,2004,12(3):146-148.
- [12] 王海英,宫渊波,陈林武.嘉陵江上游不同植被恢复模式土壤微生物及土壤酶活性的研究.水土保持学报,2008,22(3):172-177.
- [13] 王丽,梦丽,张金池,张小庆,李玥,王如岩,张波.不同植被恢复模式下矿区废弃地土壤水分物理性质研究.中国水土保持,2010,(3):54-57.
- [15] 赵春梅,蒋菊生,曹建华,熊代群,谢永贵,李晓波.橡胶人工林养分循环通量及特征.生态学报,2009,29(7):3782-3789.
- [16] 田大伦,沈燕,康文星,项文化,闫文德,邓湘雯.连载第 1 和第 2 代杉木人工林养分循环的比较.生态学报,2011,31(17):5025-5032.
- [17] 田大伦,项文化,康文星.马尾松人工林微量元素生物循环的研究.林业科学,2003,39(4):1-8.
- [18] 潘佑民,杨国治.湖南土壤背景值及研究方法.北京:中国环境科学出版社,1988:159-285.
- [19] 王新凯,田大伦,闫文德,宁晓波,梁小翠,李树战.喀斯特城市杨树人工林微量元素的生物循环.生态学报,2011,31(13):3691-3699.
- [20] 赵广亮,王继兴,王秀珍,沈应柏,周金池.油松人工林密度与养分循环关系的研究.北京林业大学学报,2006,28(4):39-44.
- [21] 王凌晖,何斌.南宁马占相思人工林微量元素分布与生物循环.林业科学,2009,45(5):27-33.
- [22] 方晰,田大伦.第 2 代杉木人工林微量元素的积累、分配及其生物循环特征.生态学报,2003,23(7):1313-1320.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.33, No.20 Oct., 2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Spatial variability of small and medium scales' resource abundance of *Ommastrephes bartramii* in Northwest Pacific YANG Mingxia, CHEN Xinjun, FENG Yongjiu, et al (6427)
- The effect of moisture and temperature on soil C mineralization in wetland and steppe of the Zoige region, China WANG Dan, LV Yuliang, XU Li, et al (6436)
- Response and population bionomic strategies of desert rodent communities towards disturbance of cultivation YUAN Shuai, FU Heping, WU Xiaodong, et al (6444)
- Effects of Bt-cotton on *Propylea japonica*, an Enemy Insect of *Bemisia tabaci* (Gennadius) ZHOU Fucui, GU Aixiang, YANG Yizhong, et al (6455)
- Research progress in the ecological effects of micro-landform modification WEI Wei, YU Yun, JIA Fuyan, et al (6462)

Autecology & Fundamentals

- A multi-scale feeding habitat selection of Red-crowned crane during spring migration at the Shuangtaihekou Nature Reserve, Liaoning Province, China WU Qingming, ZOU Hongfei, JIN Hongyang, et al (6470)
- Surface pollen research of Nanshan region, Shihezi City in Xinjiang ZHANG Hui, ZHANG Yun, YANG Zhenjing, et al (6478)
- Dynamics of leaf carbon, nitrogen and phosphorus of two dominant species in a Poyang Lake wetland ZHENG Yanming, YAO Bo, WU Qin, et al (6488)
- Estimation of forest aboveground biomass using high spatial resolution remote sensing imagery HUANG Jinlong, JU Weimin, ZHENG Guang, et al (6497)
- Cost-benefits of the clonal integration of *Cynodon dactylon*, a stolon herbaceous plant, under heterogeneous lighting condition TAO Yingshi, HONG Shengchun, LIAO Yongmei, et al (6509)
- Biological cycling of *Koeleria paniculata* plantation microelements in Xiangtan Manganese Mine wasteland LUO Zhaohui, TIAN Dalun, TIAN Hongdeng, et al (6517)
- Effects of ectomycorrhizal fungi (*tinctorius* (Pers.) Coker & Couch) on the biomass of masson pine (*Pinus massoniana*) seedlings under simulated acid rain CHEN Zhan, WANG Lin, SHANG He (6526)
- Effects of biochar on selected soil chemical properties and on wheat and millet yield CHEN Xinxiang, HE Xusheng, GENG Zengchao, et al (6534)
- Source of variation of plant functional traits in the Yanhe river watershed: the influence of environment and phylogenetic background ZHANG Li, WEN Zhongming, MIAO Lianpeng (6543)
- The general biology and experimental population life table about *Asynacta ambrostomae* WANG Xiumei, ZANG Liansheng, LIN Baoqing, et al (6553)
- Effect of several ecological factors on embryonic development of *Sepia lycidas* PENG Ruibing, JIANG Xiamin, YU Shuguang, et al (6560)

Population, Community and Ecosystem

- The thinning regular of the the shrubbery at Tongguling National Nature Reserve on Hainan Island, China ZHOU Wei, LONG Cheng, YANG Xiaobo, et al (6569)
- The cause of grassland degradation in Golog Tibetan Autonomous Prefecture in the Three Rivers Headwaters Region of Qinghai Province ZHAO Zhiping, WU Xiaopu, LI Guo, et al (6577)
- Effects of simulated nitrogen deposition on substrate quality of litterfall in a *Pleiblastus amarus* plantation in Rainy Area of West China XIAO Yinlong, TU Lihua, HU Tingxing, et al (6587)
- Phytoplankton community structure based on pigment composition in Qinzhou bay during average water period LAN Wenlu, LI Mingmin, LI Tianshen (6595)
- Functional trait-based evaluation of plant fireproofing capability for subtropical evergreen broad-leaved woody plants LI Xiupeng, YANG Xiaodong, YU Shuquan, et al (6604)
- Interspecific associations between *Parus major* and other bird communities in Beijing Xishan region DONG Daying, FAN Zhongji, LI Zhaxijie, et al (6614)

- Feasibility analysis of passive integrated transponders in population ecology studies of Siberian chipmunk
..... YANG Hui, MA Jianzhang, RONG Ke (6634)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Dynamic variation of water deficit of winter wheat and its possible climatic factors in Northern China
..... LIU Qin, MEI Xurong, YAN Changrong, et al (6643)
- Study on the levels' evaluation of provincial low-carbon development in China based on the FAHP-TOPSIS method
..... HU Linlin, JIA Junsong, MAO Duanqian, et al (6652)
- An investigation of the safety threshold of a floodplain wetland: a case study of the Er-Ka Nature Reserve, China
..... HU Chunming, LIU Ping, ZHANG Litian, et al (6662)
- Application of le bissonnais method to study soil aggregate stability under different vegetaion on the loess plateau
..... LIU Lei, AN Shaoshan, Huang Huawei (6670)
- Analysis of vegetation and soil degradation characteristics under different human disturbance in lakeside wetland, Napahai
..... TANG Mingyan, YANG Yongxing (6681)

Resource and Industrial Ecology

- Changes of land surface temperature and its response to urbanization under the extreme high-temperature background in recent
ten years of Beijing LI Xiaomeng, SUN Yonghua, MENG Dan, et al (6694)
- Stable isotope (^{13}C and ^{15}N) analysis of fish food web of the Xiaojiang Bay in Three Gorges Reservoir
..... LI Bin, XU Dandan, WANG Zhijian, et al (6704)

Research Notes

- Dynamics of CO_2 exchange and its environmental controls in an urban green-land ecosystem in Beijing Olympic Forest Park
..... CHEN Wenjing, LI Chunyi, HE Guimei, et al (6712)
- Effects of vegetation restoration on landscape pattern of Hongya Country in recent 15 years
..... WANG Peng, LI Xianwei, ZHAO Anjiu, et al (6721)
- Photosynthetic characteristics and SAMS gene expression in the red alga *Porphyra yezoensis* Ueda under high salinity
..... ZHOU Xianghong, YI Lefei, XU Juntian, et al (6730)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的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;新书评价和学术、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

本期责任副主编 宋金明

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 33 卷 第 20 期 (2013 年 10 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 20 (October, 2013)

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	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
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:100717	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 90.00 元