

工业废弃地的植物修复演替过程研究

高雁鹏¹, 石平¹, 魏欣茹²

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110004; 2. 辽宁省城乡建设规划设计院, 辽宁 沈阳 110004)

摘要:工业废弃地土壤重金属污染严重, 研究忍耐型或超累积植物对重金属的富集机理, 并且针对某种或某些重金属的特征, 筛选合适的重金属忍耐型或超累积植物对提高植物修复的效率有着重要的现实意义。该文在阐述重金属忍耐型或超累积植物富集重金属机理及植物筛选标准的基础上, 根据群落演替理论, 以葫芦岛杨家杖子钼矿区的尾矿库为研究对象研究了工业废弃地植物修复演替过程。结果表明: 该区域植被恢复演替过程是从草本先锋植物的引入开始, 地带性植被是针阔叶混交林, 从裸地开始的进展演替大致经过裸地→草丛→灌丛→针叶林→针阔叶混交林阶段。为了实现群落的快速演替, 迅速恢复地带性植被, 以土壤改良和植被演替各阶段之间的迅速转化为原则, 在各演替阶段都积极地引进下一演替阶段的植物种类。通过实地试验表明, 现存的植物恢复模式: 沙棘×柠条×(高羊茅、早熟禾、黑麦草), 恢复效果显著。

关键词:工业废弃地; 土壤重金属污染; 植物修复; 演替规律

中图分类号:TU 985.12⁺6 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2013)12-0078-04

工业废弃地植被恢复与重建的基础在于重金属忍耐型或超累积植物的筛选与土壤基质的改良, 二者缺一不可。

第一作者简介:高雁鹏(1976-), 男, 吉林松原人, 博士, 讲师, 研究方向为城市生态与城市建设规划。E-mail:ddcsgh@163.com.

基金项目:国家“973”重大基础研究资助项目(2012CB416800-G)。

收稿日期:2013-01-15

不可。单一的土壤改良措施只是一个将污染减少到一定限度的措施, 仅仅改变了重金属在土壤中的存在状态, 但它们仍然保留在土壤中^[1]。所以说, 添加改良剂并不能根治土壤重金属污染, 要想使废弃地生态系统获得全面恢复, 就必须尽可能使植物在废弃地环境中成功定居, 直至出现相当数量的植物群落。因此工业废弃地

[8] 王名金, 刘克辉, 伍寿彭, 等. 林木引种驯化概论[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1990: 92.

[9] 吴中伦. 国外树种引种概论[M]. 北京: 科学出版社, 1983: 102-103.

[10] 谢孝福. 植物引种学[M]. 北京: 北京科学出版社, 1994.

[11] 郭翎, 张佐双. 极端气候与北京地区植物引种[J]. 北京园林, 2011, 28(3): 39-43.

[12] 郑勇奇, 张川红. 外来物种生物入侵研究现状与进展[J]. 林业科学, 2006, 42(11): 114-122.

Introduction Evaluation of Four Ornamental Conifers in Beijing

SUN Jing-shuang¹, TAO Xia-juan¹, JIA Gui-xia², SUN Chang-zhong¹

(1. North China Research Center of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 102300; 2. National Floriculture Engineering Research Center, School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University, Beijing 100083)

Abstract: In order to enrich the ornamental conifer resources in China, and develop urban forestation and landscape, four foreign ornamental conifer species were introduced from Belgium to Beijing, that were *Juniperus chinensis* 'Plumosa Aurea', *J. communis* 'Gold Cone', *J. × media* 'Pfitzeriana Aurea', *J. squamata* 'Blue Star'. Morphologic characters, phenology, ornamental and adaptability of four conifers in Beijing were studied. The results showed that four conifers grew well, and had shorter fast-growth duration and the color of leaves changed earlier compared with *Sabina vulgaris* Ant., ornamental of 'Gold Cone' had reduced, since changes had taken place in plant form; Conifers were doing well during summer and keep ornamental value including leaf color, plant type among 'Plumosa Aurea', 'Pfitzeriana Aurea' and 'Blue Star' should be protected in advance, and further studied on cold acclimation in Beijing.

Key words: ornamental conifer; introduction; phenology; adaptability

的生态系统修复工作除了需要改善土壤质量状况外,还有待于植物群落的修复,这是最为关键性的一步。只有建立丰富的植物群落才能从根本上解决废弃地的土壤重金属污染问题。然而开展植物修复工作,关键在于找到合适的超累积植物,掌握超累积植物的富集机理,增加超累积植物的生物量,进而提高超累积植物对重金属的富集,再确定出特定区域理想的植被配置模式,提高植物群落的生态效益,这些对于修复重金属严重污染的工业废弃地具有重要的意义^[2]。其中,重中之重就是需要筛选和培育特种植物,特别是对重金属具有超常规吸收和富集能力的植物,种植在污染的土壤上,通过植物对污染物的吸收富集然后直接处理植物的方式,将收获到的重金属元素加以回收利用。实际上,可以考虑首先种植那些富集能力超强的先锋草类植物,在最短的时间内将废弃裸地覆盖,形成草丛群落,提高废弃地的自我修复能力,为灌木、乔木的生长提供充足的营养物质条件,进而形成乔灌木搭配的复层植物群落,最终形成结构完整、功能完善的生态系统。

1 重金属忍耐型或超累积植物富集重金属的机理

无论是重金属重度污染还是弱污染的土壤中,重金属忍耐型或超累积植物富集重金属的能力要比普通植物高几十倍甚至上百倍,是较理想的修复土壤重金属污染的植物品种。因此,深入研究忍耐型或超累积植物对重金属的富集机理,对植物的超积累特性的开发利用和修复效率的提高具有重大意义。

1.1 根部的提取与酸化

忍耐型或超累积植物根系发达,主动向污染区伸展,根毛稠密,直接接触土壤颗粒,这些都有利于根部从污染的土壤中有效渗透与提取重金属,从而增加对重金属离子的吸收与累积。忍耐型或超累积植物根系分泌物可以酸化土壤环境,促进植物对土壤中重金属离子的活化和吸收^[3]。

1.2 离子载体的转运

忍耐型或超累积植物的根部与根毛对营养成分的短程转运是需要很多内在的载体的,大多数金属离子也就是通过离子载体进入根细胞内的。这些转运 Fe、Cu、Zn、P 等营养成分的离子载体也可同时转运 Hg、As 等重金属离子,从而有利于忍耐型或超累积植物积累更高浓度的重金属。离子载体对运输的金属离子具有很高的选择性,因而忍耐型或超累积植物选择性地吸收其中一种或几种特殊性金属^[4]。

1.3 化学沉降

忍耐型或超累积植物根系能够分泌有机酸与硫醇等螯合剂,这些重要的化学沉降物,可以促使 Fe、Zn、Cu、S 和 P 等营养成分在植物体内大量贮存,促使重金属离

子的转移率达到最高^[5]。

1.4 木质部的转移

忍耐型或超累积植物体内的营养成分与毒性成分从木质部到叶片的远程转运需要根部木质部具有高效的转移率,而地上部木质部具有较低的转移率,这样才能使重金属有效地向地上部转移^[6]。

1.5 物理沉降

重金属在忍耐型或超累积植物的叶片中呈区室化分布在质外体和液泡内,表皮细胞、亚表皮细胞和表皮毛状体细胞与死亡的导管细胞等都是物理沉降物,它们备有较大的空间来储存某些毒性污染物,从而使重金属在忍耐型或超累积植物体内的含量达到最大^[7]。

2 重金属忍耐型或超累积植物的筛选标准

针对某种或某些重金属的特征,筛选合适的重金属忍耐型或超累积植物对提高植物修复的效率有着极其重要的现实意义。所谓重金属忍耐型植物是指土壤中虽然具有很高的重金属毒性但仍然能正常生长、定居乃至繁殖后代的植物。它对重金属忍耐程度的大小可以通过测定植物的生长或活力指标来进行评价。超累积植物(Hyperaccumulator),又称超积累植物、超富集植物,往往是长期生长在重金属含量较高的土壤上,经过不断的生物进化而形成的,或者是通过遗传工程或基因工程培育、诱导而成的能超量吸收重金属并将其不断运送、转移到地上部分,在地上部分能够累积普通植物 10~500 倍以上某种重金属的植物^[8]。超累积植物必然是重金属耐性植物,但重金属耐性植物只有在耐受高浓度重金属毒害的同时,其地上部分也能够富集大量重金属的情况下,才被称为超累积植物。超累积植物的界定需要满足以下几个主要条件:一是植物叶片或地上部分(干重)富集 Cd 达到 100 mg/kg,Co、Cu、Ni、Pb、As 达到 1 000 mg/kg,Mn、Zn 达到 10 000 mg/kg 以上;二是满足植物地上部分的重金属含量应高于根部的条件;三是能够忍耐较高浓度重金属的毒害^[9]。

理想的超累积植物应该具有生长速度快、周期短、地上部生物量大、能同时富集 2 种或 2 种以上重金属的特点,但在现实应用中还是有一定的局限性的,符合上述条件的超累积植物很少见。纵然是有可能获得很低的生物量,但在枝叶中重金属含量却很高,因而也能够获得大量的重金属。可是,这样的超累积植物并非普遍存在于废弃地中,野外实地考察时很难寻找到合适的品种。因此,重金属忍耐型植物的发现同样具有重要的现实意义,它虽然有可能在枝叶中重金属的含量不高,但它对某种重金属没有吸收的专一性,又有大量的生物量,因此也能吸收大量的重金属。而且它不仅能忍耐严重的重金属毒性,富集高浓度的重金属,还能够适应废弃地的极端贫瘠、极端恶劣的环境条件,因而也被广泛

应用于重金属污染区域的植被恢复工程中。

筛选重金属忍耐型或超累积植物的基本标准如下^[10]:一是植物在重金属含量高的土壤以及在重金属含量低的非污染或弱污染土壤上都要有很强的吸收富集能力;二是植物能将所吸收的重金属元素大量转移至地上部分的器官中;三是植物的地上部分可收割的器官必须能够忍耐和积累高含量的重金属;四是植物具有发达的根系组织;五是植物在野外条件下生长速度快、周期短,而且生物量高;六是植物对土壤改良措施反应积极,如施肥等能使植物生长量迅速增长好几倍,这样经过反复种植多次收割之后才具有重要开发推广价值。此外,由于重金属忍耐型或超累积植物的富集和转移能力与植物体本身的生理、生化特征和遗传、变异关系密切,因此在筛选重金属忍耐型或超累积植物时还需要考虑植物品种的特性以及当地的种植条件和经济效益等因素。

3 工业废弃地的植物修复演替过程

几乎所有的自然生态系统的恢复都是以植被恢复为重要前提,因此植被恢复成为废弃地生态恢复的关键所在。但是实际上植物在这些废弃地的极端生境上的自然定居过程极其缓慢,要想形成良好的植被群落往往需要几十年、甚至数百年时间。从本质上来说,工业废弃地生态系统的恢复演替过程也是土壤基质的缓慢改良和耐性物种的逐渐形成过程。废弃地的植被恢复就是复制其自然演替,并加快其自然演替的过程。在演替过程中,首要的掌控因子是土壤因子,即土壤养分和水分状况及重金属污染得到改善的速度。按照群落演替理论,废弃地植被恢复的过程是从先锋植物的引入开始,经过一系列演替阶段,最终达到中生性的顶极群落。而这种在人为干预下有目标的植被演替,不受种子来源的限制,并且能够人工调控植被组成及相应的辅助管理措施,能够使废弃地的恶劣生境得到迅速改善,大大加速演替进程。也就是说,应该遵从自然植被演替规律,人为地向这些需要修复的区域植入更多的重金属耐性植物,并给予适当的抚育管理措施,增大植物物种的多样性及地面覆盖度,最终形成完善的人工生态系统。然而,寻找和筛选重金属忍耐型或超累积植物是开展植物修复工作的重要前提,选取合适的植被配置模式、培育重金属忍耐型或超累积植物、提高植物对重金属的吸收量以及植物地上部分的累积量则是一项十分重要而艰巨的任务。

对于环境条件极端恶劣的工业废弃地来说,寻找和筛选乔灌木类重金属超累积植物就显得异常艰难,所以草本植物成为该地区植物修复的首要选择;其次,由于草本植物的地上部分形成的落叶,每年凋落在土壤表面上的物质高达 15~25 t/hm²。这些物质一旦遭遇湿润的环境条件,就会以飞快的速度形成土壤有机质,加速土

壤中有机质的积累。再者,随着土壤有机质含量的提高,整合、吸附作用在重金属迁移中所占的比例必定会越来越大,进一步减轻或消除了土壤中的重金属污染;此外种植能增加土壤有机质含量的植物,或增加有机肥料的施用量来增加土壤有机质含量,能减轻土壤中一些种类的重金属污染,这在生产实际中的确是一个可行的措施。

根据研究需要,选定葫芦岛杨家杖子钼矿区的尾矿库作为研究对象^[11]。研究区域的地带性植被是针阔叶混交林,从裸地开始的进展演替大致经过裸地→草丛→灌丛→针叶林→针阔叶混交林阶段。这种演替的目的主要是林业利用,但在不同的演替阶段为了某种目的(如经济效益)可以人为干预使其停止向下演替。如果为了发展草坪业,可以在草丛阶段发展优质草坪草,阻止灌丛出现;如果为了发展条编,可以使其停留在灌丛阶段,发展紫穗槐、柠条等;如果为了提供薪材,可使其停留在混交林阶段,发展薪炭林。为了实现群落的快速演替,迅速恢复地带性植被,应以土壤改良和植被演替各阶段之间的迅速转化为原则,在各演替阶段都积极地引进下一演替阶段的植物种类^[12]。

钼矿区的尾矿库,植物配置模式主要有 4 种:模式 1:沙棘×(野谷草、狗尾草等乡土草种);模式 2:柠条×(野谷草、狗尾草等乡土草种);模式 3:沙棘×柠条×(高羊茅、早熟禾、黑麦草);模式 4:沙棘×柠条。单一树种采用行列式栽植模式,株行距为 1 m×1 m,间种杂草;灌木混交林采用 4 行沙棘 2 行柠条的栽植方式,株行距为 1 m×1 m,间种草本植物。模式 3 的配置方式当年的生长状况很好,但是随着乡土杂草的逐渐侵入,草坪草的长势越来越差,如果不采取人为干预手段,最终可能会被完全替代。植物配置效果调查详见表 1。

从表 1 可以看出,植物配置模式 3 表现最好,其次是模式 4,再次是模式 1,最后是模式 2。说明单一树种的生态效益比较差,实践中需要注意植物品种的多样性。此外,植物恢复初期适宜多栽植些先锋草类植物,迅速形成草丛群落,以确保在短时间内提高地面覆盖度,为灌木、乔木植物的生长提供充足的营养物质。

表 1 尾矿库的试验小区内植被恢复调查

Table 1 The questionnaire of revegetation in the experimental plot of the tailing pond

植物配置模式	盖度/%	灌木平均高度/m	成活率/%
模式 1	32.4	0.9	76.7
模式 2	29.5	0.7	73.4
模式 3	42.9	1.2	86.1
模式 4	37.1	1.0	81.2

由于研究区域的环境条件非常恶劣,不利于植物定居,尤其是木本植物极难生长。为了改善这些区域的生态环境状况,植被恢复初期阶段适宜种植一些对重金属

污染和贫瘠土壤条件抗性强的先锋草类,如紫花苜蓿、沙打旺、草木樨、稗草等,使植物迅速覆盖尾砂裸地,形成草本植物群落,逐步改良土质。再者,由于植被的覆盖,减少了土壤水分蒸发,进一步调节了温、湿度变化,随之而来的是土壤中真菌、细菌和小动物的活动也逐渐增强,土壤质量获得明显改善,更加有利于植物生长。之后,当草本植物群落发展到一定阶段时,可以更换那些价值相对较低的草类,人为地引入经济价值较高的草坪草类、观赏性地被植物或土壤改良作用较强的绿肥植物如沙打旺、沙棘等新物种,使群落具有更高的价值和更好的土壤改良作用。随后,土壤的改良程度能够适宜木本灌木生长时,应该及时引进先锋灌木如沙棘、柠条、紫穗槐、胡枝子等植物品种,使草本植物群落向草-灌群落转化,并逐渐增加灌木数量,促进灌丛群落的出现。最后,在灌木群落形成之后,生境开始逐渐适宜阳性先锋乔木树种生长,植物群落逐步转化为针叶林、针阔混交林。随着林下郁闭环境的渐渐形成,耐荫树种得以定居,数量慢慢增加,群落结构开始复杂化,土地生产力得到提高,土壤和小气候条件进一步改善,最后形成稳定的植物群落。由于演替过程受多方面因素的影响以及人为干预的差异性,植被恢复演替过程及各阶段所持续的时间长短也不一。

参考文献

- [1] 龙新宪,杨肖娥,倪吾钟. 重金属污染土壤修复技术研究的现状与展望[J]. 应用生态学报,2002,13(6):757-762.
- [2] 亢希然,范稚莲,莫良玉,等. 超富集植物的研究进展[J]. 安徽农业科学,2007,35(16):4895-4897.
- [3] Maxted A P, Black C R, West H M, et al. Phytoextraction of cadmium and zinc from arable soils amended with sewage sludge using *Thlaspi caerulescens*: Development of a predictive model[J]. Environmental Pollution, 2007, 150(3):363-372.
- [4] Verbruggen N, Hermans C, Schat H. Molecular mechanisms of metal hyperaccumulation in plants[J]. New Phytologist, 2009, 181(4):759-776.
- [5] 戴媛,谭晓荣,冷进松. 超富集植物修复重金属污染的机制与影响因素[J]. 河南农业科学,2007(4):10-13.
- [6] Yang X, Feng Y, He Z, et al. Molecular mechanisms of heavy metal hyperaccumulation and phytoremediation[J]. J Trace Elem Med Biol, 2005, 18(4):339-353.
- [7] Callahan D, Baker A, Kolev S, et al. Metal ion ligands in hyperaccumulating plants[J]. Journal of Biological Inorganic Chemistry, 2006, 11(1):2-12.
- [8] 周琼. 我国超富集·富集植物筛选研究进展[J]. 安徽农业科学, 2005, 33(5):910-912, 916.
- [9] Baker A, Brooks R, Pease A, 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.
- [10] 董社琴,李冰雯,周健,等. 超积累植物对土壤中重金属元素吸收机理的探讨[J]. 太原科技,2004(1):64-66.
- [11] 石平,付艳华,吕安才,等. 植物修复技术在城市工业废弃地中的应用研究[J]. 北方园艺,2013(4):76-80.
- [12] 杨修,高林. 德兴铜矿矿山废弃地植被恢复与重建研究[J]. 生态学报,2001,21(11):1932-1940.

[1] 龙新宪,杨肖娥,倪吾钟. 重金属污染土壤修复技术研究的现状与展

Study on the Succession Rules of Phytoremediation in Industrial Wasteland

GAO Yan-peng¹, SHI Ping¹, WEI Xin-ru²

(1. School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110004; 2. Liaoning Urban and Rural Construction and Planning Design Institute, Shenyang, Liaoning 110004)

Abstract: The pollution degree of soil heavy metal is rather serious in the industrial wasteland. It is necessary to do some research on bioaccumulation mechanism of resistant plants or hyperaccumulator for heavy metal ions and determination of the perfect cultivars and patterns of forest vegetation. According to community succession theory, this paper took Yangjiazhangzi molybdenum mine area in Huludao city as research area to carry out field vegetation survey. The succession of a natural community in the area began with the introduction of pioneer herbaceous plants. The zonal vegetation was coniferous and broadleaved mixed forest. The progressive succession began with bare land roughly experiences the stages of bare land→hassock→shrub→coniferous forest→coniferous and broadleaved mixed forest. In order to improve the efficiency of vegetation community succession, it was needed to introduce the vegetation for the succession period ahead in each phase. The restoration in tailing pond aims at centering on protection and considering utilization as well by adopting the plant restoration measure of the combination of shrub and herb plants. The optimum plant disposition mode was: sea buckhorn×caragana×(tall fescue, bluegrass and ryegrass).

Key words: industrial wasteland; heavy mental soil pollution; phytoremediation; succession rules