

文章编号:1004-8227(2005)01-0088-06

铜陵铜尾矿废弃地定居植物及基质理化性质的变化

田胜尼^{1,2}, 孙庆业³, 王铮峰¹, 彭少麟^{1*}, 夏汉平¹

(1. 中国科学院华南植物园, 广东 广州 510650;

2. 安徽农业大学生命科学学院, 安徽 合肥 230036; 3. 安徽大学生命科学学院, 安徽 合肥 230036)

摘 要:通过野外调查与室内分析,研究了铜陵铜尾矿废弃地上可定居的植物及几种优势植物群落基质的理化性质。研究结果表明:在铜陵各尾矿(库)场上,共有 30 科 96 属 122 种植物。禾本科、菊科与豆科中的草本植物,是铜陵铜尾矿废弃地自然定居的先锋植物,具匍匐茎或地下茎的植物或具固氮能力或具种子小、易传播的特性植物,适宜在铜尾矿废弃地定居成活;几种优势植物群落基质的理化性质较未复垦区及酸化区得到明显的改善,其 pH 值得到缓和, N、P、有机质营养成分含量增加,重金属铜的含量下降。

关键词:铜尾矿;定居植物;理化性质;复垦

文献标识码:A

安徽铜陵是我国重要的铜矿开采和冶炼基地,它为人类提供大量金属铜的同时,留下了对当地居民和动植物有害的固体废弃物——尾矿(tailings)。目前在铜陵市有大小面积不等的尾矿库(场)累计 36 处,其中面积较大、停用的尾矿库有五公里尾矿场、黑沙河尾矿场、铜官山尾矿库、凤凰山尾矿库、狮子山尾矿库,占地总面积达 280 hm²。尾矿长期堆置不仅占用了大量的土地,也破坏了景观环境,对周围的生态系统产生严重的影响^[1~4]。同时因其粒径较小,产生严重的“尾沙风暴”,对周边地区带来严重的环境污染,居民为此叫苦不迭,因此尾矿废弃地的治理引起各部门及有关专家的重视^[2]。

目前关于尾矿废弃地治理措施主要有三种:物理法、化学法和植被法^[5]。物理法和化学法的优点是快速,但投入大而且并不能改变原有的景观。植被重建(复垦)是尾矿废弃地治理最好方式之一^[6,7]。有关铅锌尾矿废弃地定居植物及理化性质等方面已有过大量的研究^[8~12]。本文通过对铜陵几个大型停用铜尾矿的基本特征、可定居的植物进行调查,同时就铜尾矿废弃地复垦区的芦苇、白三叶、天南苜蓿、狗牙根基质,以及未复垦区与酸化区的基质理化性质进行测定与分析,为矿业废弃地的后继复垦工作提供理论依据和实践经验。

1 自然概况^[13]

铜陵市位于安徽省南部,地处长江中下游南岸,北纬 30°56'42",东经 117°43'28"。春夏秋冬四季明显,春季较短,气候温和,雨量充沛,夏季多雨炎热,伏热干旱。年平均气温 16.2℃,夏季平均气温 27.4℃,无霜期平均为 230 d,年平均降水量 1 390 mm,全年平均湿度为 75%~81%,常年主导风向为东北风,其次为西南风,大气稳定度高。

2 研究方法

2.1 植物调查及样品采集

1999 年 3 月至 2003 年 6 月,对五公里等 5 个尾矿库上的植物种类及群落进行 10 余次调查研究。根据植被的有无及尾矿的化学性质,将尾矿废弃地分为三个不同的区域即酸化区、未复垦区、复垦区。本文选取狮子山尾矿库复垦区生长较好的狗牙根、白三叶、天南苜蓿、芦苇基质、未复垦区及酸化区基质,每种基质选取 5 个点,用竹签挖出深为 0~20 cm 土样,混合后用四分法留下 1/4,装入袋中,带回室内自然风干后,用木棒研碎,过尼龙筛后供理化性质

收稿日期:2003-09-04;修回日期:2004-04-19

基金项目:国家自然科学基金项目(30170147,30270282)、广东省团队基金项目(003031)、安徽省教育厅高校青年教师基金及安徽农业大学青年基金资助项目

作者简介:田胜尼(1971~),男,安徽省枞阳人,博士生,主要从事植物生态与恢复生态学研究。

*通讯联系人

分析测试用^[14]。

2.2 尾矿化学性质测定方法^[14,15]

土壤样品采用常规分析方法测定;全铜:硝酸—高氯酸—氢氟酸消化;速效铜:0.1 HCL 浸提,WFX—1F2 原子吸收分光光度计测定。

3 结果与分析

3.1 铜陵主要尾矿库基本特征分析

铜陵铜矿资源丰富,开采铜的历史悠久,目前堆置停用的大型尾矿库五公里尾矿场、黑沙河尾矿场、铜官山尾矿库、凤凰山尾矿库、狮子山尾矿库。另有一些小型的尾矿库,约有 30 余处,分布于铜陵市郊区。铜陵市主要尾矿库表层的基本状况如表 1 所示。

铜尾矿是矿石经粉碎、浮选精矿后余下的固体废弃物,粒径较小。由于缺乏粘粒物质,因而矿物颗粒多呈分散状态,难以形成一定的结构。从表 1 可知,各尾矿表面状况整体表现为有植物定居的区域,表面状况较好,基质结构得到一定的改善,持水肥的能力逐渐增强;没有植物定居的区域,表面裸露,风蚀水蚀现象明显,稳定性差,容易发生移动,持水肥能力差或较差。同时在裸露的表面,受太阳光的直接照射,表层温度剧烈,不利于植物的定居或成活。

表 1 铜陵主要尾矿库表层的基本状况

Tab.1 Surface Status of the Main Tailings Ponds in Tongling City

地点	弃置时间(年)	表面状况	基质结构	持水肥能力	植被状况
五公里尾矿场	> 15	复垦区稳定,未复垦区极不稳定,风蚀水蚀严重	较差	较差	人工复垦区植被尚可,未复垦区裸露
铜官山尾矿库	> 35	比较稳定,无风蚀水蚀现象	较差	差	盖度约 50 %
狮子山尾矿库	> 25	不稳定,风蚀水蚀严重	很差	很差	盖度 < 35 %
凤凰山尾矿库	> 30	较稳定	较好	较好	盖度约 55 %
黑沙河尾矿场	> 40	稳定	很好	较好	盖度约 90 %

在自然状况下,铜尾矿基质随着弃置时间的增加,表面稳定性增加,风蚀水蚀现象也减弱。如在五公里尾矿未复垦尾矿库上,由于排放停置时间不长,表面裸露、干燥、无结构可言,风蚀水蚀极其明显。停置约 35 年的铜官山尾矿,尽管植被稀疏,但表面相对稳定,持水肥能力也有所提高。黑沙河尾矿场,停用时间在 40 年以上,表面结构最佳,基质最为稳定。一方面与时间停放较长,另一方面是由于其位于长江入口,地势低洼,在每年夏季汛期,江水上涨将其淹没,水体中夹有大量的污泥,沉积其上,这也是其表面结构非常稳定、持水肥能力增强因素之一。

3.2 尾矿上可定居的植物种类及特征分析

通过对 5 个大型铜尾矿废弃地上植物调查,发现共有 122 种高等植物,隶属于 30 科 96 属,如表 2 所示。除了豆科植物白三叶(*Trifolium repens*)为人工引种的外来种外,其余的为乡土广布种。在所有植物中,有蕨类植物 3 科 3 属 4 种,占有植物种类的 3.27 %。它们是节节草(*Equisetum ramosissimum*),蕨(*Pteridium aquilinum* Var. *latiusculum*)

和蜈蚣草(*Pteris vittata*)和井口边草(*P. multifida*)。研究发现,在凤凰山尾矿库、狮子山尾矿边缘区、铜官山尾矿库 3 种山谷型尾矿库中,有大片节节草群落的存在。从山脚尾矿库边缘逐渐向尾矿中央区域延伸,植株高度可达到 120 cm,成为铜陵尾矿废弃地先锋植物群落。野外调查研究发现,在安庆月山 2 号尾矿库及贵池黄山岭铅锌矿 1 号尾矿中,也出现大量的节节草群落。在有节节草存在的尾矿库周围,为亚热带常绿阔叶与落叶混交林,植被群落处于较为稳定状态,在林下或尾矿库周边地带都没有发现节节草的存在。在铅锌尾矿废弃地,没有报道有节节草的存在^[9]。因此,从尾矿库上节节草的存在及分布来看,节节草可能具有对重金属及不良基质的特殊适应机制或耐性机制,是尾矿废弃地上自然定居的特有植物之一。因此,对于山谷型尾矿库,若选用节节草复垦可能会取得满意的复垦效果。

单子叶植物 5 科 35 属 41 种,占有所有定居植物的 33.61 %。单子叶植物主要集中在禾本科,共有 27 属 29 种,占单子叶植物总数 70.73 %。通过历

束文圣. 铅锌尾矿地的植被重建. 博士学位论文. 广州:中山大学,1997.

表 2 铜陵铜尾矿上的定居植物

Tab.2 Colonization Plant Species on the Copper Tailings in Tongling City

中文名	学名(Latin name)	中文名	学名(Latin name)	中文名	学名(Latin name)
凤毛蕨科	Pteridaceae	鸭跖草科	Commelinaceae	杨柳科	Saliceae
蜈蚣草	<i>Pteris vittata</i>	鸭跖草	<i>Commelina communis</i>	旱柳	<i>Salix matsudana</i>
井口边草	<i>P. multifida</i>	菊科	Compositae	簸箕柳	<i>S. suchowensis</i>
蕨科	Pteridiaceae	小飞蓬	<i>Conyza canadensis</i>	加杨	<i>Populus canadensis</i>
蕨	<i>Pteridium aquilinum</i>	一年蓬	<i>Erigeron annuus</i>	响叶杨	<i>P. adenopoda</i>
木贼科	Equisetaceae	野艾蒿	<i>Artemisia annua</i>	石竹科	Caryophyllaceae
节节草	<i>Equisetum ramosissimum</i>	苍耳	<i>Xanthium siairium</i>	繁缕	<i>Stellaria media</i>
禾本科	Gramineae	大狼把草	<i>Bidens frodoosa</i>	安徽繁缕	<i>S. anhuiensis</i>
白茅	<i>Impreta cylindraca</i>	凤毛菊	<i>Saussurea japonica</i>	霞草	<i>Gysophila oldhamiana</i>
芦苇	<i>Phragmites australis</i>	华泽兰	<i>Eupatorium chinensis</i>	大戟科	Euphorbiaceae
狗牙根	<i>Cynodon dactylon</i>	黄花蒿	<i>Artemisia lavandulaefolia</i>	地锦	<i>Euphorbia humifosa</i>
鹅观草	<i>Roegneria ischaemum</i>	牡蒿	<i>Artemisia japonica</i>	乌柏	<i>Sapium sebiferum</i>
结缕草	<i>Zoysia japonica</i>	艾蒿	<i>Artemisia argryi</i>	蓖麻	<i>Ricinus communis</i>
鬼蜡烛	<i>Phleum paniculatum</i>	青蒿	<i>Artemisia caruifolia</i>	苋科	Amaranthaceae
光头稗	<i>Echinoochloa colonum</i>	苦苣菜	<i>Sonchus oleraceus</i>	刺苋	<i>Amaranthus spinous</i>
狗尾草	<i>Setaria vilitalis</i>	马兰	<i>Kalimeris indica</i>	绿穗苋	<i>A. hybridus</i>
荩草	<i>Arthraxon hispidus</i>	千里光	<i>Senecio scandens</i>	喜旱莲子草	<i>Alternathera philoxeriodes</i>
五节芒	<i>Miscanthus floridulus</i>	山莴苣	<i>Pterosypsula indica</i>	马鞭草科	Verbenaceae
芒	<i>M. sinensis</i>	泥胡菜	<i>Hemistepta iyrata</i>	马鞭草	<i>Verbena officinallis</i>
双穗雀稗	<i>Paspalum districhum</i>	野菊花	<i>Dengranthema indicum</i>	牡荆	<i>Vitex negundo</i>
早熟禾	<i>Poa annua</i>	山苦荬	<i>Ixeris chinensis</i>	唇形科	Labiatae
橘草	<i>Cymbopogon fugax</i>	鼠曲草	<i>Gnaphalium affine</i>	石芥宁	<i>Mosla scabra</i>
狼尾草	<i>Pennisetum alopecuroides</i>	竹叶菊	<i>Tripolium valgare</i>	益母草	<i>Leonurus japonicus</i>
画眉草	<i>Eragrostis pilosa</i>	美丽艾纳香	<i>Blumea fomosana</i>	桑科	Moraceae
毛马唐	<i>Digitaria chrysoblephra</i>	黄鹌菜	<i>Yaungia japonica</i>	律草	<i>Humulus scandens</i>
牛筋草	<i>Eleusine indica</i>	豆科	Leguimnosae	构树	<i>Broussonetia papyrifera</i>
雀稗	<i>Paspalum thumbergii</i>	截叶铁扫帚	<i>Lespedeza cuneata</i>	车前草科	Plantaginaceae
雀麦	<i>Bromus japonicus</i>	多花胡枝子	<i>L. floribunda</i>	北美车前草	<i>Plantago virginica</i>
山类芦	<i>Neyraudia montana</i>	马棘	<i>Indigfera pseudotintoria</i>	车前草	<i>P. asiatica</i>
鼠尾粟	<i>Sporobolus fertilis</i>	葛	<i>Pueraria lobata</i>	藜科	Chenopodiaceae
金茅	<i>Elaria speciosa</i>	草木樨	<i>Melilotus suaveolens</i>	藜	<i>Chenopodium alum</i>
京芒草	<i>Achnatherun thumbergii</i>	天蓝苜蓿	<i>Medicago lupulina</i>	土荆芥	<i>C. ambrosiodes</i>
野古草	<i>Arundinella anomala</i>	小苜蓿	<i>Medicago minima</i>	伞形科	Umbelliferae
野青茅	<i>Deyraudia arundinacea</i>	小巢菜	<i>Vicia hirsuta</i>	野胡萝卜	<i>Daucus carota</i>
高羊茅	<i>Festuca arundinacea</i>	大巢菜	<i>Vicia ativa</i>	窃衣	<i>Torilis scabra</i>
棒头草	<i>Polypogon fugax</i>	鸡眼草	<i>Kummerowia striata</i>	罂粟科	Papaveraceae
白羊草	<i>Bothriochloa ischaemum</i>	白三叶	<i>Trifolium repens</i>	博落回	<i>Macleaya cordata</i>
莎草科	Cyperaceae	紫穗槐	<i>Amorpha fruticosa</i>	茄科	Solanaceae
扁杆荆三棱	<i>Bolboschoenus planiculmis</i>	蔷薇科	Rosaceae	龙葵	<i>Solanum nigrum</i>
荆三棱	<i>Bolboschoenus yagara</i>	木莓	<i>Rubus swinhoei</i>	茜草科	Rubiaceae
镰莞	<i>Schoenoplectus triqueter</i>	小果蔷薇	<i>Rosa cymosa</i>	麦仁珠	<i>Galium tricornne</i>
矮莎草	<i>Cyperus pymaeus</i>	朝天萎陵菜	<i>Potentilla supina</i>	旋花科	Convolvulaceae
高杆莎草	<i>C. exaltatus</i>	蓼科	Polygonaceae	篱打碗花	<i>Calystegia sepium</i>
香附子	<i>C. rotundus</i>	羊蹄	<i>Rumex japonicus</i>	菟丝子	<i>Cuscuta austras</i>
水虱草	<i>Fimbristylis miliacea</i>	水蓼	<i>Polygonum hydropiper</i>	牻牛儿科	Geraniaceae
砖子苗	<i>Mariscus sumatrensis</i>	腋花蓼	<i>P. lebeiium</i>	野老鹳草	<i>Geranium carolianum</i>
香蒲科	Typhaceae	扁蓄	<i>P. aviculare</i>	防己科	Menispermaceae
长苞香蒲	<i>Typha angustata</i>	虎仗	<i>P. cuspidatum</i>	千金藤	<i>Stephania japonica</i>
水蜡烛	<i>T. angustifolia</i>	酸模	<i>Rumex acetosa</i>	远志科	Polygalaceae
百合科	Liliaceae	商陆科	Phytolaccaceae	日本远志	<i>Polygala japonica</i>
山蒜	<i>Allium macrostemon</i>	商陆	<i>Phytolacca acinosa</i>		

年对尾矿废弃地植物自然定居调查发现,白茅、狗牙根、结缕草、五节芒、芦苇、水蜡烛等植物,是铜尾矿废弃地上先锋植物,在尾矿废弃地上长势良好。在铜陵各尾矿中形成了稳定群落,如白茅群落、狗牙根群落等。在有水的地方则出现芦苇、水蜡烛群落。这些先锋植物的成活定居后,尾矿基质理化性质在外观上可以看出有一定程度的改善。尾矿裸地生境的改善,为新物种的入侵定居创造了良好小气候环境。因此,从铜尾矿库上自然定居单子叶植物种类来看,禾本科植物占有绝对优势,对铜尾矿具有较强的耐性适应机制,具有较强耐贫瘠、耐旱、耐金属毒害的能力,能适应这种特殊的基质,是尾矿复垦的先锋植物。在尾矿废弃地复垦中,应作为优先选择的对象。在铅锌尾矿库上可定居植物调查发现,禾本科植物狗牙根、双穗雀稗是铅锌尾矿废弃地上优势物种,两种类型的金属尾矿库,狗牙根同属优势植物,但在其它物种方面表现出差异,如双穗雀稗在安徽铜陵地区也属于广布种,在铜尾矿废弃地只有个别植株存在,这应与尾矿金属种类不同因素有关^[7]。

在铜陵尾矿废弃地上,双子叶植物有 74 种,隶属于 23 科,60 属。从种类组成来看,绝大多数均为广布种,占尾矿上定居植物的 62.71 %。其中菊科植物有 18 属 22 种,其次为豆科植物,9 属 12 种,蓼科植物 2 属 6 种。其它科属植物相对较少,而且多为 1 属 2 种或 1 属 1 种植物。因此在铜尾矿废弃地上,双子叶植物中,菊科植物具有较好的适应性,如小飞蓬、一年蓬、苍耳、野艾蒿等。豆科植物中天蓝苜蓿、马棘、小苜蓿及人工复垦播种定居的白三叶等在尾矿地上长势良好。如在狮子山尾矿上天南苜蓿在群落中占有较大的比例,五公里尾矿场上白三叶已形成了几处较大的斑块。豆科植物能在尾矿废弃地上处于优势地位,这与豆科植物具有天然的固氮能力及一定较强的耐贫瘠性有关^[16~18]。蓼科植物

如酸模、扁蓄等植物个体数目较多,这可能是该科植物与非菌根依赖性植物有关^[22],也值得进一步研究。

3.3 铜尾矿废弃地不同区位化学性质的差异

根据植被的有无,将尾矿废弃地分为三个不同的区域,分别为酸化区、未复垦区、复垦区。酸化区是随尾矿弃置时间的推移,由于尾矿中含有 S 元素,长期堆放于露天环境下,发生氧化从而形成酸化区。未复垦区是介于酸化区与复垦区之间的地带,目前尚没有植物定居于其上,但还没有酸化的区域。复垦区指尾矿堆放一定的时间后,一些耐性较强的植物定居的区域或人工复垦后有植被的区域。狗牙根、白三叶、天南苜蓿为生长在干涸铜尾矿上的定居优势植物群落,芦苇是生长在积水区(边缘)铜尾矿上的优势植物群落。表 3 为狗牙根、白三叶、天南苜蓿、芦苇优势植物定居尾矿基质的理化性质及未复垦区及酸化区尾矿基质的理化性质。

从表 3 可以发现,各区位 pH 值的变化关系从小到大依次为:酸化区、未复垦区、复垦区。如酸化区 pH 值为 2.62,这种过高的酸性基质严重抑制着植物的生长,成为植被重建的主要胁迫因子之一。在铜官山、狮子山尾矿库均已出现大面积的酸化处。未复垦区基质 pH 值为 5.78,略呈酸性,明显高出酸化处的 pH 值。就该区域 pH 值,通过人工复垦或耐性植物自然入侵定居,若植被恢复后,其 pH 值会得到提高。复垦区尾矿 pH 值接近中性,如白三叶基质 pH 值为 7.51,天南苜蓿基质 pH 值为 7.20,狗牙根基质 pH 值为 6.52,芦苇基质 pH 值为 6.90,这可能与植被的存在有关。

土壤中与植物生长关系密切的营养成份主要为有机质、全 N、全 P、全 K、速效 P、速效 K。营养成份含量的高低是尾矿废弃地种子萌发和植物定居的限制因子之一。从表 3 中可以看出,不论是复垦区、未复垦处还是酸化区,尾矿基质营养成份明显低于正

表 3 不同基质尾矿区域的理化性质

Tab.3 Physio-chemistry Properties of Substrate About the Different Tailings Areas

基质类型	pH	EC μs/cm ×10 ³	有机质 g/kg	全氮 g/kg	全磷 g/kg	速效磷 mg/kg	全钾 g/kg	速效钾 mg/kg	全铜 mg/kg	速效铜 mg/kg
狗牙根区	6.52	1.34	2.16	0.33	72.38	2.455	3.606	68.398	940.58	37.05
白三叶区	7.51	1.40	2.12	0.513	1.38	1.206	1.618	35.80	732.97	31.92
天南苜蓿区	7.20	1.11	2.24	1.117	4.12	4.443	2.321	49.413	860.68	29.78
芦苇区	6.90	1.42	1.538	0.69	1.56	2.207	3.763	57.412	906.98	57.96
未复垦区	5.78	1.58	0.381	0.058	1.21	1.039	1.803	49.445	1 204.45	99.24
酸化区	2.62	3.20	0.104	0.013	0.55	2.009	2.854	27.480	1 022.69	145.9

常土壤中各种营养成分的含量^[22]。从有机质及全 N 含量看,各基质含量由高到低表现为:天南苜蓿区、狗牙根区、白三叶区、芦苇区、未复垦区、酸化区。对于复垦区而言,基质的营养成分得到了一定程度的提高,特别是豆科植物白三叶、天南苜蓿基质,有机质比未复垦区分别高出 82.03 %、82.99 %,全 N 含量比未复垦处高出 88.69 %、94.80 %。禾本科植物狗牙根和芦苇有机质的全 N 也得到了一定程度的提高。因此,尾矿废弃地的复垦有利于改善尾矿的营养成份,特别是豆科植物具有天然的固 N 能力,对提高废弃地的理化性质有一定的促进作用。

从表 3 看出,尾矿基质中全铜的含量 $732.98 \sim 1\,204.45 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效铜的含量为 $29.78 \sim 145.9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,高出普通土壤铜的含量^[22]。过高的重金属铜是尾矿基质中植物定居的主要胁迫因子,它抑制植物根的生长和伸长,通过根系吸收到植物体内,使植物体内各种酶的活性遭到破坏,新陈代谢紊乱,具有一定耐性的植物能适应成活,不能适应的则死亡^[1]。基质中全铜的含量变化表现为:未复垦区 > 酸化区 > 复垦区。对复垦区而言,几种优势植物基质全铜的含量表现为:狗牙根 > 芦苇 > 天南苜蓿 > 白三叶,植物体内重金属 Cu 的含量为白三叶 > 天南苜蓿 > 狗牙根 > 芦苇。芦苇基质有效铜含量较高,由于其在尾矿库中所处的位置较低, Cu^{2+} 随着雨水的淋溶而导致较高的因素所致。重金属含量的变化除了尾矿排放前选矿工艺存在差异外,与植被的有无有着密切关系^[11]。

4 结论

通过对铜陵不同主要尾矿库的表面状况特征、可定居的植物种类调查及优势植物基质的理化性质测定可以得出:

(1) 尾矿库(场)随着堆置时间的延长,表面稳定性增加,基质结构及持水肥的能力也逐渐增强,风蚀水蚀现象逐渐下降;

(2) 铜陵尾矿废弃地可定居的植物共有 122 种,隶属 96 属 30 科。禾本科、菊科和豆科的草本植物是尾矿废弃地先锋植物。适宜在铜尾矿上定居的先锋植物常具有匍匐茎、地下茎、具固氮能力或具有种子小、易传播的特性;

(3) 通过尾矿上不同区位的理化性质测定结果表明:重金属元素铜含量高,营养成份有机质、N、含量很低,极端贫瘠是限制植物在尾矿定居的主要胁

迫因子;

(4) 以豆科植物或禾本科植物为优势群落基质的理化性质与未复垦区和酸化区理化性质相比,营养成分增加,重金属的含量略低。

参考文献:

- [1] 格尔默著. 工业废弃地上的植物定居[M]. 倪彭年,等,译. 北京:科学出版社,1987.
- [2] 蓝崇钰,束文圣,孙庆业. 采矿地的复垦[A]. 见:陈昌笃主编. 持续发展与生态学[C]. 北京:中国科学技术出版社,1993. 132 ~ 138.
- [3] 徐嵩龄. 采矿地的生态重建和恢复生态学[A]. 见:陈昌笃主编. 持续发展与生态学[C]. 北京:中国科学技术出版社,1993. 145 ~ 150.
- [4] 孙庆业,田胜尼. 土壤污染与几种土壤酶的活性[J]. 土壤, 2000, 32(1): 54 ~ 56.
- [5] 蓝崇钰,束文圣. 矿业废弃地植被恢复中的基质的改良[J]. 生态学杂志,1996, 15(2): 55 ~ 59.
- [6] 孙庆业,蓝崇钰,廖文波. 尾矿植被法治治理初探[J]. 国土与自然资源研究,1999, (3): 58 ~ 60.
- [7] Tordoff G M A, Baker J M, Wills A J. Current approaches to revegetation and reclamation of metalliferous mine wastes[J]. Chemosphere, 2000, 41: 219 ~ 228.
- [8] 束文圣,蓝崇钰,张志权. 凡口铅锌尾矿植物定居的主要因素分析[J]. 应用生态学报,1997, 8(3): 314 ~ 318.
- [9] 孙庆业,蓝崇钰,潘根兴,等. 铅锌尾矿库上自然定居植物[J]. 生态学报,2001, 21(9): 1 457 ~ 1 462.
- [10] 孙庆业,蓝崇钰,杨林章. 铅锌尾矿废弃地化学性质研究[J]. 农村生态环境,2000, 16(4): 36 ~ 39, 44.
- [11] 黄铭洪. 环境污染与生态恢复[M]. 北京:科学出版社,2003, 136 ~ 178.
- [12] 彭少麟. 热带亚热带恢复生态学研究与实践[M]. 北京:科学出版社,2003. 399 ~ 428.
- [13] 铜陵市计划委员会,安徽省计划委员会编. 安徽国土资源——铜陵市篇[J]. 北京:中国计划出版社. 1990.
- [14] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海:上海科学技术出版社,1977.
- [15] 南京农学院. 土壤农化分析[M]. 北京:农业出版社,1980.
- [16] 张志权,束文圣,廖文波,等. 豆科植物与矿业废弃地的植被恢复[J]. 生态学杂志,2002, 21: 47 ~ 52.
- [17] 刘登义,田胜尼,杨世勇,等. 尾矿对五种豆科植物种子萌发和幼苗生长的初步研究[J]. 应用生态学报, 2002, 13(5): 596 ~ 600.
- [18] Marrs R H, Bradshaw A D. Nitrogen accumulation, cycling and the reclamation of China clay wastes[J]. Journal of Environmental Management, 1982, 15: 139 ~ 157.
- [19] Smith R A H, Bradshaw A D. The use of metal tolerant plant populations for the reclamation of metalliferous wastes[J]. Appl Ecol, 1979, 16: 595 ~ 612.
- [20] Baker A J M. Metal tolerance of plant[J]. Newphytol, 1987,

106(suppl):93~111.

- [21] 方治国,陈 欣.丛枝菌根在退化土壤恢复中的生态学应用[J].生态学杂志,2002,21(2):61~63.

[22] 中国环境监测总站.中国土壤元素背景值[M].北京:中国环境科学出版社,1990.

PLANT COLONIZATION ON COPPER TAILINGS AND THE CHANGE OF THE PHYSIO-CHEMISTRY PROPERTIES OF SUBSTRATE IN TONGLING CITY, ANHUI PROVINCE

TIAN Sheng-ni^{1,2}, SUN Qing-ye³, WANG Zheng-feng¹, PENG Shao-lin¹, XIA Han-ping¹

(1. South China Botanical Garden, The Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China;

2. School of Life Sciences, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China;

3. School of Life Sciences, Anhui University, Hefei 230036, China)

Abstract : By field investigation and laboratory analysis, the natural colonizing plants on the copper tailings and the physio-chemistry properties of substrate where several pioneer communities were colonized on copper tailings derelict land in Tongling City were studied by the authors. The results showed that there were 122 species of plants, belonging to 96 genera, 30 families, which colonized on the several main copper tailings ponds. The herb plants of Gramineae, Compositae and Leguminosae are the natural pioneer plant colonizing on the copper tailings, with characteristics of stoloniferous or subterraneous stems or nitrogen fixation ability or with little seeds propagated to colonize and grow successfully on the copper tailings. The physio-chemistry properties of the substrates for the plant dominant communities were improved obviously than the spots of the non-reclamation and acid areas, namely the pH values were ameliorated and the concentration of nutrient matters such as total N, total P and organic matter increased and the concentration of the heavy metals such as Cu decreased.

Key words : copper tailings; colonizing plant; physio-chemistry property; reclamation