

自然植物群落对铜尾矿废弃地 土壤酶活性的影响*

孙庆业¹ 任冠举¹ 杨林章^{2†} 安树青¹

(1 南京大学生命科学院, 南京 210093)

(2 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘要 在铜陵铜矿区堆存着大量的不同时期弃置的尾矿废弃物, 形成大面积铜尾矿废弃地。为了解自然植物群落对铜尾矿废弃地酶活性的影响, 对铜陵铜矿区 6 处不同时期弃置的铜尾矿废弃地进行了调查。结果表明, 自然定居在尾矿废弃地上的植物群落类型能够显著影响表层尾矿中(0~5 cm)的脲酶、芳基硫酸酯酶、碱性磷酸酶和脱氢酶的活性。位于木贼-中华结缕草群落和白茅群落下尾矿中的几种土壤酶的活性高于位于狗牙根群落和中华结缕草群落下的尾矿中酶的活性。在所测定的 4 种土壤酶中, 碱性磷酸酶和脱氢酶的活性高于脲酶和芳基硫酸酯酶的活性。相关分析表明, 4 种土壤酶的活性与表层尾矿中的腐殖质、总氮、有效磷、速效钾含量以及电导率表现出显著正相关, 而芳基硫酸酯酶和脱氢酶与 pH 之间存在着显著负相关。强烈氧化的表层尾矿不仅具有极端贫瘠的养分条件, 同时也具有极低的土壤酶活性。

关键词 铜尾矿; 废弃地; 酶活性; 植物群落; 养分

中图分类号 Q948 **文献标识码** A

尾矿废弃地是堆积在尾矿库内的尾矿被弃置后形成的。这类废弃地一般具有非常严酷的基质条件, 如物理性质不良(极端的水湿条件和温度变化等)、贫瘠(有机质、N 含量极低或无)、极端的 pH(过酸或过碱), 有些矿业废弃地还含有较高的盐分或高浓度的有害物质(如重金属等)^[1, 2]。当尾矿被弃置后, 随着弃置时间的延长, 一些耐性植物开始在其上自然定居生长, 逐渐形成植物群落^[3]。Bradshaw 认为随着自然植被的形成和发展, 矿业废弃地的土壤逐渐形成, 废弃地本身的理化性质(特别是土壤有机质和氮素)逐渐得到改善^[4]。尾矿废弃地的生态恢复不仅表现在养分含量的增加方面, 同时尾矿废弃地的生物和生物化学性质也获得良性发展。目前, 矿业废弃地的生态恢复受到广泛的关注, 为了在矿业废弃地上建立稳定的、可持续的植被, 多种方法和措施被采用^[1, 2, 4, 5]。

土壤中的脲酶、磷酸酶、芳基硫酸酯酶和脱氢酶等是来自土壤微生物、土壤动物和植物根系的生物活性物质, 它们能够将生长基质中的尿素、有机磷和

有机硫转化为植物可以吸收利用的无机态氮、磷和硫, 对于生长基质中养分的转化和利用具有重要的意义^[6, 7]。土壤酶活性的研究不仅有助于了解土壤中养分的转化、循环过程, 也有助于了解土壤中所进行的生物过程和生物化学过程, 便于了解土壤质量状况^[8]。由于土壤酶具反应灵敏、测定方便等优点, 因此一些研究者认为土壤酶活性可以被用作土壤生态胁迫或土壤生态恢复等早期的敏感性指示^[8, 9], 尽管有时利用土壤酶作为土壤退化的量化指标可能存在一定的局限性, 但可以通过其他相关的土壤生物化学指标进行弥补^[10]。目前, 尾矿废弃地自然植被恢复过程中的土壤酶活性研究工作开展很少, 王友保等认为尾矿废弃地中的脲酶活性可作为废弃地复垦的一个指示指标^[11]。

本研究选择铜陵铜矿区 6 处不同时间弃置的铜尾矿废弃地作为研究对象, 研究随着尾矿废弃地上自然植物群落的形成和发展, 尾矿废弃地在酶活性方面所发生的变化, 初步探讨矿业废弃地生态恢复过程中植物群落-化学性质-酶活性之间的相互关系。

* 国家重大基础研究发展规划项目“土壤质量演变规律与持续发展”(G 1999011802)资助

† 通讯作者

作者简介: 孙庆业(1964~), 男, 汉族, 博士, 安徽合肥人, 主要从事环境生物学与恢复生态学方面研究

收稿日期: 2004-06-15; 收到修改稿日期: 2004-10-12

1 材料与方法

1.1 研究区概况

地处安徽省的铜陵铜矿是我国六大铜业基地之一,毗邻长江,具有很长的铜矿开采和冶炼历史,形成多处铜尾矿废弃地。该铜尾矿库属北亚热带季风气候,年降雨量1 346 mm,降雨主要集中于夏季,年平均温度 16.2 °C,1月的平均温度 3.2 °C,7月的平均温度 28.8 °C,无霜期 237~ 258 d。黑沙河尾矿库和五公里尾矿库地处城郊的农作区域,由铜尾矿堆积在低洼地而形成;铜官山早期弃置尾矿库、铜官山新近弃置尾矿库和杨山冲尾矿库为山谷型尾矿库,周围山坡植被主要为人工马尾松林;水木冲尾矿库(作为研究参照,无植物群落)目前仍在使用的。4个具有高等植物群落的尾矿库(尾矿废弃地)中除黑沙河尾矿库表面常年潮湿外,其余的表面均较干燥。在4个具有高等植物群落的尾矿库上自然定居生长着 140 余种高等维管植物,尾矿上自然定居的主要(优势)植物及植物群落见表 1。

表 1 6个尾矿库的植物群落

Table 1 Natural plant communities on six tailings dumps

尾矿库名称 Name of tailings dump	弃置年限 Discarded period (a)	植物群落类型 Types of plant communities
黑沙河尾矿库 Heishahe tailings Dump	> 40	芦苇群落 <i>Phragmites australis</i> community 狗牙根群落 <i>Cynodon dactylon</i> community 双穗雀稗群落 <i>Paspalum dis-</i> <i>tidium</i> community
铜官山早期弃置尾矿库 Old Tongguanshan Tailings Dump	~ 20	白茅群落 <i>Impreta cylindrica</i> community
杨山冲尾矿库 Yangshandong Tailings Dump	14	白茅群落 <i>Impreta cylindrica</i> community 中华结缕草群落 <i>Zoysia sinica</i> community 木贼-中华结缕草群落 <i>Hip-</i> <i>pochaete ramosissimum-Zoysia sini-</i> <i>ca</i> community 狗牙根群落 <i>Cynodon dactylon</i> community
五公里尾矿库 Wugongli Tailings Dump	13	狗牙根群落 <i>Cynodon dactylon</i> community 白茅群落 <i>Impreta cylindrica</i> community
铜官山新近弃置尾矿库 New Tongguanshan Tail- ings Dump	2	无 None
水木冲尾矿库 Shuimuchong Tailings Dump	0	无 None

1.2 样本采集

在去除尾矿表面的植物凋落物后,采集位于不同植物群落下的表层(0~ 5 cm)尾矿样本,采样面积为 20 cm × 20 cm,同时还采集目前正在使用的、尚无植物定居的水木冲尾矿库 4 个样本作为对照。样本风干后研磨、过筛,用于化学性质和酶活性分析。

1.3 分析测试

1.3.1 化学分析 pH 和电导率分别用酸度计和电导率仪测定($W_{\text{尾矿}}:V_{\text{水}}=1:5$);由于在尾矿废弃物中含有大量的还原性硫化物,直接采用常规的土壤有机质分析方法容易导致过高的估计有机质含量,在本研究中采用测定腐殖质的含量^[12];总氮含量通过凯氏定氮法测定;有效磷用碳酸氢钠溶液提取-钼蓝比色法测定;速效钾用醋酸铵提取-火焰分光光度计测定^[13]。尾矿废弃地化学性质见表 2。

1.3.2 土壤酶活性测定 尾矿废弃地中脲酶、芳基硫酸酯酶、碱性磷酸酶和脱氢酶活性测定按照 Dick 等^[14]的方法。脲酶活性以 $\text{NH}_4^+-\text{N mg g}^{-1} \text{h}^{-1}$ 表示,芳基硫酸酯酶和碱性磷酸酶活性以 $p\text{-Nitrophenol } \mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$ 表示,脱氢酶活性以 Triphenylfor-
 $\text{mazan (TPF) mg kg}^{-1} \text{d}^{-1}$ 表示。

1.4 数据分析

实验数据用 SPSS 统计软件分析。Tukey 检验被用来进行多重比较($p < 0.05$);双变量相关分析采用 Pearson 相关系数。

2 结果

2.1 裸露尾矿与植物群落下尾矿地中的酶活性变化

对于无植物定居的裸露尾矿而言,从正在使用的水木冲尾矿库到弃置时间已达 40 余年的黑沙河尾矿库,所测定的各种酶的活性均很低(表 3):脲酶活性仅为 $\text{NH}_4^+-\text{N } 0.69\sim 5.75 \text{ mg g}^{-1} \text{h}^{-1}$,芳基硫酸酯酶活性为 $p\text{-Nitrophenol } 0\sim 3.94 \mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$,碱性磷酸酶的活性虽高于前面两种酶,但其活性也仅为 $p\text{-Nitrophenol } 8.02\sim 72.21 \mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$,脱氢酶的活性在裸地尾矿中变化较大,从水木冲尾矿库的 TPF $0.12 \text{ mg kg}^{-1} \text{d}^{-1}$ 到黑沙河尾矿库的 TPF $37.19 \text{ mg kg}^{-1} \text{d}^{-1}$ 。另外从表 3 还可以看出,随着弃置时间的延长,裸地尾矿中 4 种酶的活性基本上表现为逐渐增加,仅杨山冲尾矿库的裸露废弃地表现出较低的碱性磷酸酶活性($p\text{-Nitrophenol } 8.02 \mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$)、铜官山早期弃置的尾矿库的裸地表现

表 2 铜尾矿废弃地的化学性质¹⁾

Table 2 Chemical properties of the copper mine tailings

尾矿库名称 Name of tailings dump	群落类型 Type of plant communities	腐殖质 Humus (g kg ⁻¹)	总氮 Total nitrogen (g kg ⁻¹)	有效磷 Available phosphorus (mg kg ⁻¹)	速效钾 Readily available potassium (mg kg ⁻¹)	电导率 Electrical conductivity (dS m ⁻¹)	pH
水木冲尾矿库 Shuimuchong Tailings Dump	裸地 ^①	- ²⁾	- ²⁾	- ²⁾	5.71±1.64	0.02±0.00	8.85±0.03
铜官山新近弃置尾矿库 New Tongguanshan Tailings Dump	裸地 ^①	- ²⁾	0.03±0.03	- ²⁾	5.94±2.95	0.12±0.01	8.49±0.08
五公里尾矿库 Wugongli Tailings Dump	隐花植物结皮 ^②	- ²⁾	0.05±0.02	0.47±0.18	32.61±19.90	0.20±0.06	8.27±0.13
杨山冲尾矿库 Yangshandong Tailings Dump	狗牙根群落 ^③	0.38±0.31	0.33±0.17	1.10±0.60	45.00±19.37	0.12±0.06	8.95±0.19
	白茅群落 ^④	0.78±0.20	0.74±0.42	0.90±0.26	66.31±22.88	0.10±0.04	8.69±0.28
	裸地 ^①	- ²⁾	0.05±0.01	6.76±5.57	15.50±2.43	0.13±0.01	7.87±0.07
	狗牙根群落 ^③	0.34±0.18	0.06±0.04	14.36±6.71	19.00±7.81	0.26±0.12	7.69±0.15
	中华结缕草群落 ^⑤	0.29±0.24	0.10±0.08	8.71±2.26	42.72±46.75	0.64±0.77	7.77±0.33
	白茅群落 ^④	0.45±0.31	0.18±0.15	15.82±8.46	48.50±33.47	0.44±0.49	7.58±0.34
	木贼-中华结缕草群落 ^⑥	0.78±0.07	0.53±0.24	14.28±5.35	67.33±11.54	1.67±0.10	7.14±0.10
铜官山早期弃置尾矿库 Old Tongguanshan Tailings Dump	裸地 ^①	0.19±0.05	0.26±0.15	- ²⁾	4.92±0.96	1.27±0.53	3.78±1.39
	白茅群落 ^④	0.57±0.08	0.93±0.24	1.25±0.44	77.78±24.15	0.13±0.08	7.21±0.51
黑沙河尾矿库 Heishaha Tailings Dump	裸地 ^①	3.53±2.56	0.45±0.41	4.24±1.63	40.19±16.82	2.62±1.94	4.35±1.11
	芦苇群落 ^⑦	15.44±10.94	2.86±1.91	5.60±1.67	155.2±83.13	1.16±0.51	4.66±0.29
	狗牙根群落 ^③	10.43±4.03	1.17±0.51	6.04±1.54	91.15±32.28	0.85±0.32	5.27±0.56
	双穗雀稗群落 ^⑧	10.42±7.12	1.22±1.32	8.22±1.66	76.32±51.36	1.45±0.49	5.05±1.17

1) 表中数据为平均数±标准差, $n = 4$ Data in the table are Mean ± S. D.; 2) 未检出 Nil; ① bare tailings; ② cryptogamic crusts; ③ *Cynodon dactylon* community; ④ *Imprata cylindrica* community; ⑤ *Zoysia sinica* community; ⑥ *Hippochaete ramosissima*-*Zoysia sinica* community; ⑦ *Phragmites australis* community; ⑧ *Paspalum distichum* community

表 3 不同植物群落下尾矿中土壤酶的活性¹⁾

Table 3 Soil enzyme activities in tailings under different plant communities

尾矿库名称 Name of tailings dump	群落类型 Type of plant communities	脲酶 Urase (NH ₄ ⁺ -N, mg g ⁻¹ h ⁻¹)	芳基硫酸酯酶 Arylsulfatase (<i>p</i> -Nitrophenol, μg g ⁻¹ h ⁻¹)	碱性磷酸酶 Alkaline Phosphatase (<i>p</i> -Nitrophenol, μg g ⁻¹ h ⁻¹)	脱氢酶 Dehydrogenase (TPF, mg kg ⁻¹ d ⁻¹)
水木冲尾矿库 Shuimuchong Tailings Dump	裸地 ^①	0.69±0.17	- ²⁾	14.54±1.95	0.12±0.10
铜官山新近弃置尾矿库 New Tongguanshan Tailings Dump	裸地 ^①	0.56±0.13	0.59±0.13	29.29±7.75	0.31±0.18
五公里尾矿库 Wugongli Tailings Dump	隐花植物结皮 ^②	1.30±0.91	2.03±0.78	34.76±20.76	3.38±1.87
	狗牙根群落 ^③	17.63±5.42	3.17±1.65	35.42±15.82	9.69±12.05
	白茅群落 ^④	9.58±4.31	3.31±0.64	58.53±2.04	19.38±5.54
杨山冲尾矿库 Yangshandong Tailings Dump	裸地 ^①	2.06±0.83	1.39±0.61	8.02±2.94	14.70±9.00
	狗牙根群落 ^③	3.67±1.34	3.22±2.06	44.41±30.74	32.94±23.20
	中华结缕草群落 ^⑤	11.07±11.83	8.85±10.91	107.5±155.8	48.03±58.96
	白茅群落 ^④	19.29±17.67	9.01±9.26	74.04±62.14	53.02±54.48
	木贼-中华结缕草群落 ^⑥	56.02±18.02	46.94±24.94	467.5±142.6	133.5±70.80
铜官山早期弃置尾矿库 Old Tongguanshan Tailings Dump	裸地 ^①	0.99±0.14	3.58±1.04	37.50±7.52	4.38±2.06
	白茅群落 ^④	7.92±6.72	28.38±7.69	49.32±20.95	42.81±35.01
黑沙河尾矿库 Heishaha Tailings Dump	裸地 ^①	5.75±4.74	3.94±2.20	72.21±3.89	37.19±22.99
	芦苇群落 ^⑦	36.88±24.84	14.29±12.01	38.34±18.06	80.63±53.94
	狗牙根群落 ^③	23.77±3.41	39.82±13.47	52.97±13.27	35.53±19.65
	双穗雀稗群落 ^⑧	5.35±0.84	11.21±8.08	64.54±1.58	75.63±47.66

1) 表中数据为平均数±标准差, $n = 4$ Data in the table are Mean ± S. D.; 2) 未检出 Nil; ① bare tailings; ② cryptogamic crusts; ③ *Cynodon dactylon* community; ④ *Imprata cylindrica* community; ⑤ *Zoysia sinica* community; ⑥ *Hippochaete ramosissima*-*Zoysia sinica* community; ⑦ *Phragmites australis* community; ⑧ *Paspalum distichum* community

出较低的脲酶活性(NH_4^+-N $0.99 \text{ mg g}^{-1} \text{ h}^{-1}$)和脱氢酶活性(TPF $4.38 \text{ mg kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$)。

对4个既有裸地又有植物群落的尾矿库(即铜官山新近弃置尾矿库、杨山冲尾矿库、铜官山早期弃置尾矿库和黑沙河尾矿库)来说,位于植物群落下的尾矿中酶的活性一般高于裸地处的酶的活性(除了黑沙河尾矿库的碱性磷酸酶外)。在弃置仅为2a的铜官山新近弃置的尾矿库中,位于隐花植物结皮下的尾矿与不具有植物生长的裸地处在4种酶的活性上就表现出一定差异,二者的比值分别达到2.3倍(脲酶)、3.4倍(芳基硫酸酯酶)、1.2倍(碱性磷酸酶)和10.9倍(脱氢酶),而在那些具有高等维管植物群落生长的尾矿库上,植物群落下的尾矿与裸地的尾矿之间酶活性差异更为显著。如在杨山冲尾矿库中木贼-中华结缕草群落下的尾矿与裸地处的尾矿之间酶活性的比值分别达到27.2倍(脲酶)、33.8倍(芳基硫酸酯酶)和58.3倍(碱性磷酸酶)。来自同一尾矿库的裸地与植物群落下的尾矿中酶活性比

较表明,植物的生长能够显著提高尾矿中的酶活性,但是不同植物群落对尾矿基质中酶活性的影响存在很大差异。

2.2 不同植物群落对尾矿中酶活性的影响

从图1可以看出,在黑沙河尾矿废弃地上,不同植物群落下的尾矿中的脲酶、芳基硫酸酯酶和碱性磷酸酶活性的差异是很明显的:位于芦苇群落下的尾矿具有较高的脲酶活性;狗牙根群落下的尾矿芳基硫酸酯酶的活性较高;而双穗雀稗群落生长处的尾矿具有最高的碱性磷酸酶活性。

对杨山冲尾矿废弃地上生长的4种类型植物群落而言,总是表现为木贼-中华结缕草群落下的表层0~5cm深度的尾矿中4种酶的活性最高,而狗牙根群落生长处的表层尾矿中4种酶的活性最低,白茅群落和中华结缕草群落下的表层尾矿中4种酶的活性介于二者之间(表3和图1)。这些结果表明了不同植物群落对于生长基质中酶活性具有明显的影响。

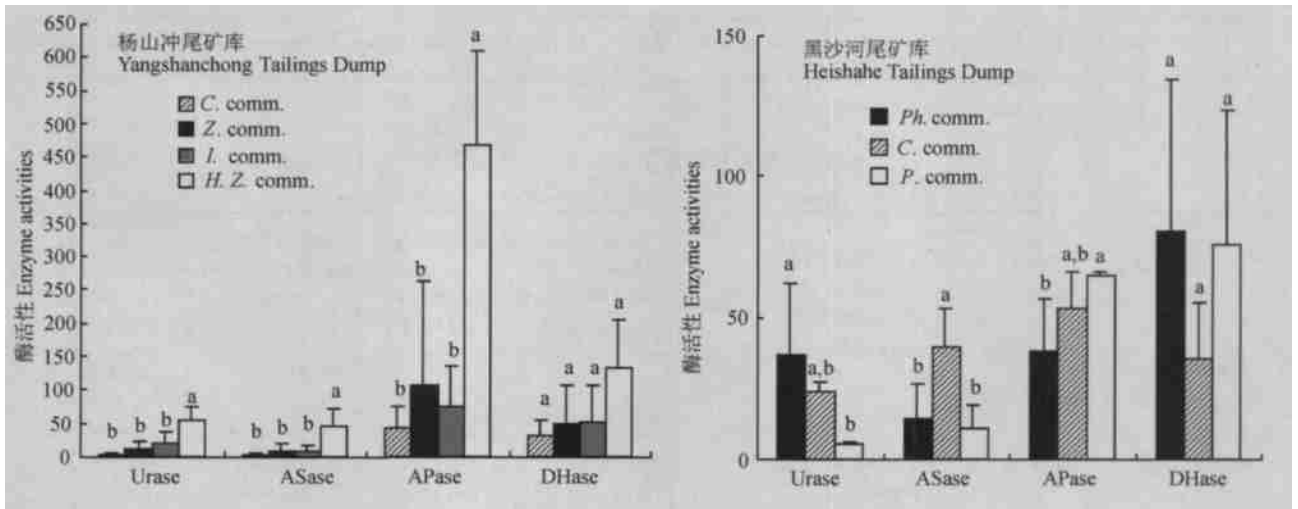


图1 不同植物群落下尾矿土壤酶活性的变化

Fig. 1 Changes in enzyme activities in tailings under different plant communities

C. comm. - 狗牙根群落 *Cynodon dactylon* community; Z. comm. - 中华结缕草群落 *Zoysia sinica* community; I. comm. - 白茅群落 *Impreta cylir draca* community; H. Z. comm. - 木贼-中华结缕草群落 *Hippohade ramosissmiiur Zoysia sinica* community; P. comm. - 双穗雀稗群落 *Paspalum distichum* community; Ph. comm. - 芦苇群落 *Phragmites australis* community; Urase- 脲酶 NH_4^+-N $\text{mg g}^{-1} \text{ h}^{-1}$; ASase- 芳基硫酸酯酶 Arylsulfatase , p -Nitrophenol $\mu\text{g g}^{-1} \text{ h}^{-1}$; APase- 碱性磷酸酶 $\text{Alkaline phosphatase}$, p -Nitrophenol $\mu\text{g g}^{-1} \text{ h}^{-1}$; DHase- 脱氢酶 Dehydrogenase , TPF $\text{mg kg}^{-1} \text{ d}^{-1}$. 具相同字母的同一酶表示无显著差异 (No significant difference ($p < 0.05$) between the four (or three) columns with the same letter for one soil enzyme

2.3 不同尾矿库相同植物群落下的尾矿中酶活性比较

在所调查的4个具有高等植物群落生长的尾矿库中,具有狗牙根群落和白茅群落生长的尾矿库均有3个。从图2可以看出:来自3个尾矿库的狗牙

根群落和白茅群落,仅芳基硫酸酯酶的活性存在显著差异($p < 0.05$),即弃置时间40a以上的黑沙河尾矿库和20a左右的铜官山早期弃置尾矿库中,芳基硫酸酯酶的活性显著高于弃置时间仅为13~14a的五公里尾矿库和杨山冲尾矿库。脲酶、碱性磷酸

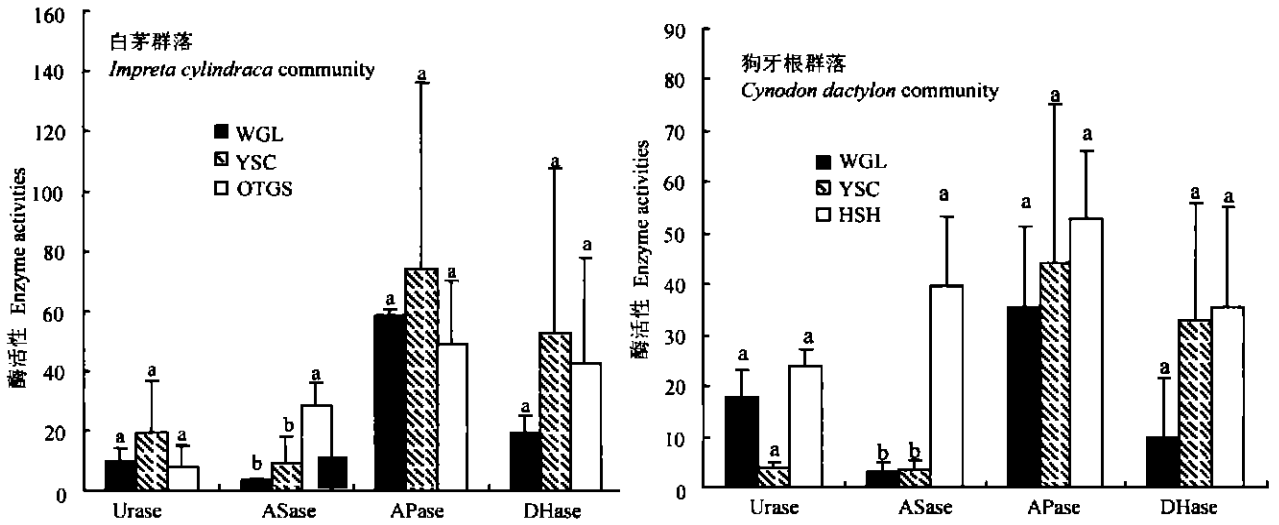


图2 不同尾矿库白茅群落和狗牙根群落下尾矿中的酶活性

Fig. 2 Enzyme activities in tailings under *Impretia cylindrica* community and *Cynodon dactylon* community from different tailings dumps

WGL- 五公里尾矿库 Wugongli Tailings Dump; YSC- 杨山冲尾矿库 Yangshanchong Tailings Dump; OTGS- 铜官山早期弃置尾矿库 Old Tongguangshan Tailings Dump; HSH- 黑沙河尾矿库 Heishahé Tailings Dump; Urase- 脲酶 NH_4^+-N $\text{mg g}^{-1} \text{h}^{-1}$; ASase- 芳基硫酸酯酶 Arylsulfatase, $\mu\text{g Nitrophenol } \mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$; APase- 碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase, $\mu\text{g Nitrophenol } \mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$; DHase- 脱氢酶 Dehydrogenase, $\text{TPF mg kg}^{-1} \text{d}^{-1}$. 具有相同字母的同一酶表示无显著差异 No significant difference ($p < 0.05$) between three columns with the same letter for one soil enzyme

酶和脱氢酶活性并无显著差异, 这表明弃置时间短对于酶活性的影响相对较小, 土壤酶活性的高低主要受到植物群落的有无以及植物群落类型的影响 (表 3, 图 2)。

另外, 从表 3 以及图 1 和图 2 还可以看出, 在所有的 6 个被调查的尾矿废弃地, 无论是裸地处的尾矿还是位于植物群落下的尾矿基本上表现为碱性磷酸酶和脱氢酶活性较高, 而脲酶和芳基硫酸酯酶则活性较低。

3 讨论

土壤酶在土壤养分循环以及植物生长所需养分的供给过程中扮演着重要角色, 酶活性的高低不仅表明了土壤的养分状况, 而且也在一定程度上反映了土壤生物的活动状况。与正常的肥沃土壤相比^[6], 本研究所调查的几处铜尾矿废弃地中 4 种土壤酶的活性都较低, 这与尾矿废弃地特定的理化性质和具体的植物群落的影响密切相关 (表 2, 表 3)。

由于本研究中的铜尾矿是选矿过程中所形成的矿业废弃物, 不仅具有极端恶劣的物理性质, 同时其养分状况也是极端贫瘠的^[1, 2]。从表 2 可以看出: 上述的几处铜尾矿废弃地, 表层尾矿中的腐殖质、总氮、有效磷和速效钾的含量总体来说非常低 (除了杨

山冲尾矿库的有效磷含量以及个别植物群落下的速效钾含量外), 同时过低或过高的电导率以及过酸的 pH 对生物在这些尾矿废弃地的生存也造成严重的胁迫作用。总体来说, 无植物生长的裸露尾矿与植物群落下的尾矿无论在腐殖质、总氮、有效性磷钾含量还是在 pH 和电导率等方面都存在着明显的差异, 尾矿中所含大量的金属硫化物的氧化作用所导致的 pH 下降和电导率的升高在黑沙河尾矿库和铜官山早期弃置尾矿库裸地处表现得十分明显。

从表 4 可以看出, 所测定的 4 种酶的活性与表层尾矿中腐殖质、总氮、有效性磷钾的含量之间存在着显著的正相关 (除碱性磷酸酶与腐殖质、总氮和速效钾之间无相关性外)。这就意味着随着植物群落生长, 表层尾矿中腐殖质、总氮、有效性磷钾含量的升高所测定的 4 种酶活性增加, 说明为什么裸地处的尾矿具有较低的酶活性 (甚至检测不出酶的活性)。而不同植物群落所导致的表层尾矿化学性质的差异 (表 2) 是造成不同植物群落下的表层尾矿中酶活性差异 (表 3 和图 1) 的主要原因之一。土壤养分状况与土壤酶活性之间的这种关系在许多研究中已经被证实^[7, 15-17], 在退化土地的生态修复过程中对基质进行改良处理引起酶活性的增加也有较多的报道^[9, 16, 17], 这是从另一个侧面说明土壤养分状况改善与土壤酶活性增加之间的关系。当然, 不同植

物群落下的表层尾矿中各种酶活性的差异可能还与不同植物根系所产生的各种酶的数量及植物群落对土壤动物和土壤微生物区系的影响有关, 因为土壤

酶主要来自于植物根系、土壤动物以及土壤微生物^[7]。

表 4 化学性质与酶活性的相关性

Table 4 Pearson correlation coefficients between chemical properties and enzyme activities

	pH	电导率 Electrical conductivity	总氮 Total nitrogen	腐殖质 Humus	速效钾 Readily available potassium	有效磷 Available phosphorus
脲酶 Urease	- 0.156	0.294*	0.478**	0.409**	0.464**	0.331**
芳基硫酸酯酶 Arylsulfatase	- 0.254*	0.260*	0.310*	0.286*	0.512**	0.292*
碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase	- 0.056	0.373**	0.016	- 0.045	0.200	0.415**
脱氢酶 Dehydrogenase	- 0.294*	0.512**	0.461**	0.456**	0.560**	0.504**

* $p < 0.05$; ** $p < 0.01$

从表 4 可知, pH 与所测定的几种酶活性之间呈现出负的相关性(尽管 pH 与脲酶和碱性磷酸酶活性之间的相关性并不显著), 这种负相关性表明了尾矿的氧化过程所导致的 pH 降低, 不利于酶活性的增加, 尤其是芳基硫酸酯酶和脱氢酶。例如, 在铜官山早期弃置的尾矿库和黑沙河尾矿库的裸地处, 表层尾矿已经表现出很低的 pH(分别为 3.78 和 4.35), 具有非常低的腐殖质、总氮、有效性磷钾含量, 并导致较高的水溶性盐分含量, 此两处具有较低的脲酶、芳基硫酸酯酶和脱氢酶活性(与同一尾矿库具有植物群落处相比)是完全可以理解的。

一般来说, 绝大多数土壤生物和植物的生长需要从土壤基质中获得生活所需的各种离子。对本研究所涉及的几处尾矿废弃地来说, 由于它们是选矿过程中所排放的石质粉末, 因此可供植物利用的各种离子的量在未发生严重氧化的尾矿上是非常有限的, 这一点从未氧化尾矿具有很低的电导率就可以看出(本研究中绝大部分尾矿的电导率小于 1.1 dS m^{-1})。在一定范围内, 尾矿基质的电导率上升意味着可供土壤生物和植物吸收利用的各种离子的绝对量增加, 这对土壤生物和植物的生长是有利的, 对于土壤酶活性的增加也可能是有益的。Cookson 和 Lepiece^[15]所进行的研究结果表明: 当电导率低于 1.1 dS m^{-1} 时, 随着电导率的增加土壤酶活性增加, 电导率与土壤酶活性之间存在着显著的正相关, 这与本研究的结果基本一致。

参考文献

[1] 蓝崇钰, 束文圣, 孙庆业. 采矿地的复垦. 见: 陈昌笃主编. 持续发展与生态学. 北京: 中国科学技术出版社, 1993. 132~

138. Lan C Y, Shu W S, Sun Q Y. The restoration of mining waste lands. In: Chen C D. ed. Sustainable Development and Ecology (In Chinese). Beijing: China Science and Technology Press, 1993. 132~ 138

- [2] 黄铭洪, 骆永明. 矿区土地修复与生态恢复. 土壤学报, 2003, 40(2): 161~ 169. Wong M H, Luo Y M. Land remediation and ecological restoration of mined land (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(2): 161~ 169
- [3] 孙庆业, 蓝崇钰, 黄铭洪, 等. 铅锌尾矿上自然定居植物. 生态学报, 2001, 21(9): 1457~ 1462. Sun Q Y, Lan C Y, Wong M H, et al. Natural colonized plants on the tailings of lead zinc mine (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(9): 1457~ 1462
- [4] Bradshaw A. Restoration of mined lands—Using natural processes. Ecological Engineering, 1997, 8: 255~ 269
- [5] 郝秀珍, 周东美, 王玉军, 等. 泥炭和化学肥料处理对黑麦草在铜矿尾矿砂上生长影响的研究. 土壤学报, 2004, 41(4): 645~ 648. Hao X Z, Zhou D M, Wang Y J, et al. Study of rye grass growth in copper mine tailing treated with peat and chemical fertilizer (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(4): 645~ 648
- [6] Li X, Sarah P. Enzyme activities along a climatic transect in the Judean Desert. Catena, 2003, 53: 349~ 363
- [7] Aon M A, Colaneri A C. Temporal and spatial evolution of enzyme activities and physicochemical properties in an agricultural soil. Applied Soil Ecology, 2001, 18: 255~ 270
- [8] Dick W A, Tabatabai M A. Significance and potential uses of soil enzymes. In: Blaine Metting F. ed. Soil Microbial Ecology. Application in Agricultural and Environmental Management. New York: Marcel Dekker, 1993. 95~ 127
- [9] Garcia C, Hernandez T. Biological and biochemical indicators in derelict soils subject to erosion. Soil Biol. Biochem., 1997, 29(2): 171~ 177
- [10] Trasar-Cepeda C, Leiros M C, Seoane S, et al. Limitation of soil enzymes as indicators of soil pollution. Soil Biol. Biochem., 2000, 32: 1867~ 1875

- [11] 王友保, 刘登义, 张莉, 等. 铜官山铜尾矿库植被及土壤酶活性研究. 应用生态学报, 2003, 14(5): 757~ 760. Wang Y B, Liu D Y, Zhang L, *et al.* Vegetation state and enzyme activities of copper tailing yard on Tongguan mountain (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(5): 757~ 760
- [12] Mehlich A. Photometric determination of humic matter in soil—A proposed method. Commun. Soil Sci. Plant Anal., 1984, 15: 1417~ 1422
- [13] 中国科学院南京土壤研究所编. 土壤理化分析. 上海: 上海科学技术出版社, 1978. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. ed. Method of Soil Analysis (In Chinese). Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1978
- [14] Dick R P, Breakwell D P, Turco R F. Soil enzyme activities and biodiversity measurements as integrative microbiological indicators. In: Doran J W, Jones A J. eds. Methods for Assessing Soil Quality. Madison, WI: SSSA Special Publication, 1996. 247~ 271
- [15] Cookson P, Lepiece A G. Urease enzyme activities in soils of the Batinah region of the Sultanate of Oman. J. of Arid Environments, 1996, 32: 225~ 238
- [16] Garcia Gil J C, Plaza C, Soler Rovira, *et al.* Long term effects of municipal solid waste compost application on soil enzyme activities and microbial biomass. Soil Biology & Biochemistry, 2000, 32: 1907~ 1913
- [17] Ros M, Hernandez M T, Garcia C. Soil microbial activity after restoration of a semiarid soil by organic amendments. Soil Biology & Biochemistry, 2003, 35: 463~ 469

EFFECT OF NATURAL PLANT COMMUNITIES ON SOIL ENZYME ACTIVITIES IN DESERTED COPPER MINE TAILINGS DUMPS

Sun Qingye¹ Ren Guanju¹ Yang Linzhang^{2†} An Shuqing¹

(¹ School of Life Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

(² Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract A large number of deserted copper mine tailings dumps of different age exist in Tongling, East China, covering a large area of land. In order to understand effect of natural plant communities on enzyme activities in the soil, six dumps different in age were investigated. The results show that the plant communities naturally colonizing on the wastelands markedly increased enzyme activities (urase, arylsulfatase, alkaline phosphatase and dehydrogenase) in the upper layer of the tailings (0~5 cm). But the effect varied with the type of the plant communities. Enzyme activities in tailings under the *Hippochaete ramosissima* *Zoysia sinica* community and *Impretia cylindracea* community were higher than under the *Cynodon dactylon* community and *Zoysia sinica* community. Of the 4 soil enzymes studied, alkaline phosphatase and dehydrogenase were higher than urase and arylsulfatase in activity. Data analysis indicates that there was a significantly positive correlation between enzyme activities and chemical properties (including humus, total nitrogen, available phosphorus, available potassium and electrical conductivity), but a significantly negative correlation between pH values of the tailings and activities of arylsulfatase and dehydrogenase. The surface layer of tailings heavily oxidized exhibited extreme infertility and extremely low activities of soil enzymes.

Key words Copper mine tailings; Deserted dump; Enzyme activities; Plant communities; Nutrients