

张 冰, 杨丽雯, 张 峰, 等. 大同矿区煤矸石山土壤种子库及其与地上植被的关系[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(12): 344–350.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2015.12.108

# 大同矿区煤矸石山土壤种子库及其与地上植被的关系

张 冰<sup>1</sup>, 杨丽雯<sup>1</sup>, 张 峰<sup>2,3</sup>, 张钦弟<sup>4</sup>

(1. 山西师范大学地理科学学院, 山西临汾 041000; 2. 山西大学生命科学学院, 山西太原 030006;  
3. 山西大学黄土高原研究所, 山西太原 030006; 4. 山西师范大学生命科学学院, 山西临汾 041000)

**摘要:**采用野外调查取样与实验室分析相结合的方法, 对大同矿区煤矸石山土壤种子库与地上植被的物种组成、数量特征、物种多样性、相似性以及相互之间的关系进行研究。结果表明: 种子萌发试验共记录 9 科 24 种植物, 共 446 株, 土壤种子库密度为  $835 \sim 2\,873$  粒/ $\text{m}^2$ ;  $0 \sim 5$  cm 土层种子密度大于其他土层, 种子在土壤剖面上具有垂直递减的分布特征; 种子库密度随着时间演替不断增大; 黄花蒿和虎尾草的种子密度最大, 是矸石山土壤种子库的先锋物种和优势种。地上植被调查共记录到植物 18 科 39 种, 物种数是土壤种子库的 1.63 倍; 土壤种子库与地上植被的相似性普遍较低 ( $0.28 \sim 0.49$ ), 无论是同一地域还是不同地域之间的变异性都较高; 随着演替的推进, 土壤种子库与地上植被之间的相似性逐渐增大, 说明土壤种子库为植被的恢复演替提供了种源基础。随着演替的进行, 土壤种子库对矸石山地表植被恢复的影响越来越大。

**关键词:**煤矸石山; 种子库; 植被恢复; 物种多样性; 大同矿区

**中图分类号:** S731.6; X171.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2015)12-0344-06

土壤种子库是指存在于土壤上层凋落物和土壤中具有生命活力的种子的总和, 被认为是土壤潜在的植物群落<sup>[1-3]</sup>。种子库是植物群落最重要的组成部分, 植被恢复依靠土壤种子库, 种子的存在为植被的重建提供了保证<sup>[2]</sup>。通过对土壤种子库特征的系统调查和研究, 可以了解植物群落结构、种类组成及植物物种多样性变化的机理<sup>[3]</sup>。因此, 土壤种子库的研究对矿区植被的更新和恢复、演替和扩散以及生物多样性的维护具有不容忽视的作用。近年来对土壤种子库的研究成为生态学等学科研究的一个热门方向, 其理论和实践上的研究对恢复和保护生态环境都具有重要意义<sup>[2-3]</sup>。我国对土壤种子库的研究起步较晚, 但是近年来不少专家学者对不同地域内不同植被类型的土壤种子库进行了大量研究, 研究范围涉及从热带雨林到温带落叶阔叶林的广大地域, 研究对象主要为森林<sup>[4]</sup>、草原<sup>[5]</sup>、沙漠<sup>[6]</sup>、湿地<sup>[7]</sup>等自然生态系统。出现了一定数量的对于废弃地等退化生态系统土壤种子库的研究, 如韩丽君等对安太堡露天煤矿排土场土壤种子库的研究<sup>[8]</sup>、莫爱等对天山北坡煤矿废弃地土壤种子库特征的研究等<sup>[9]</sup>, 但相关研究所占比例较低, 尤其是对煤矿开采区排土场和矸石山种子库的研究则更少。有关土壤种子库的研究已成为我国矿区土地复垦与植被重建领域优先关注的关键问题之一<sup>[10-11]</sup>。

山西省是煤炭资源大省, 煤矿区遍布全省各地。大同矿区地处黄土高原东北部的干旱、半干旱生态脆弱区, 是国内最

大的优质动力煤供应基地。大同煤田内有矿井 54 对, 主要集中在口泉沟和云冈沟。自建矿以来, 大同煤田内已堆积有 61 座煤矸石山, 大都分布在矿区的支沟和山坡上, 其中使用年限较长、排矸量较大的矸石山及处置场有 35 座, 累计堆存量超过 0.8 亿 t, 占地面积约  $270 \text{ km}^2$ , 分别占全国、全省累计堆存量的 3.33%、10%, 并以每年 350 万 t 的速度在继续增加<sup>[12]</sup>。大量堆积的煤矸石自燃现象时有发生, 燃烧过程中排放出大量的  $\text{CO}$ 、 $\text{SO}_2$  等有害气体, 严重污染矿区生态环境。本研究以大同矿区煤矸石山为研究对象, 采用野外调查和实验室分析相结合的方法, 对该地区进行地表植被实地调查和土壤种子库的萌发试验, 分析土壤种子库物种组成、密度特征、物种的多样性等, 以期对矿区矸石山生态恢复和生态环境管理提供理论依据。

## 1 研究区概况

大同市位于山西省北部, 晋冀蒙 3 个省(区)的交界处, 地处黄土高原东北边缘, 地理位置为  $112^\circ 34' \sim 114^\circ 33' \text{E}$ 、 $39^\circ 03' \sim 40^\circ 44' \text{N}$ , 海拔高度  $1\,000 \sim 1\,500 \text{ m}$ , 地势西北高、东南低, 地貌主要是中低山和黄土丘陵, 冲沟极为发育, 水土流失严重。本区属温带半干旱大陆性季风气候, 年均降水量约 400 mm, 年均气温  $6^\circ \text{C}$ , 无霜期约 125 d。地带性土壤以栗钙土为主, 肥力差。植被类型主要有沙棘(*Hippophae rhamnoides*)灌丛、虎榛子(*Ostryopsis davidiana*)、三裂绣线菊(*Spiraea trilobata*)灌丛等, 草本植物群落主要有长芒草(*Stipa bungeana*)草原、大针茅(*Stipa grandis*)草原、铁杆蒿(*Artemisia sacrorum*)草原等<sup>[12]</sup>。

## 2 研究方法

### 2.1 野外调查取样

研究区域及采样点分布如图 1 所示。2013 年 10 月通过实地调查, 确定永定庄矿( $40^\circ 00' 49.05'' \text{N}$ ,  $113^\circ 06' 15.63'' \text{E}$ )、

收稿日期: 2015-06-01

基金项目: 国家科技基础性工作专项(编号: 2011FY110300); 山西省自然科学基金(编号: 2013011030-1); 山西省回国留学人员科研项目(编号: 20100012)。

作者简介: 张 冰(1990—), 男, 山东济南人, 硕士研究生, 主要从事生态环境恢复研究。E-mail: cqyzzhangbing@126.com。

通信作者: 杨丽雯, 博士, 副教授, 主要从事矿区植被恢复和土壤重金属修复方面的研究。E-mail: beautifulife2133@163.com。



表 1 土壤种子库物种组成及种子密度

科名	植物	生活型	种子密度(粒/m <sup>2</sup> )		
			A 矿区	B 矿区	C 矿区
菊科	小飞蓬( <i>Conyza canadensis</i> )	一年生草本	—	—	22
	黄花蒿( <i>Artemisia annua</i> )	一年生草本	265	16	769
	大籽蒿( <i>A. sieversiana</i> )	一年生草本	—	—	11
	野艾蒿( <i>A. lavandulifolia</i> )	多年生草本	—	—	11
	铁杆蒿( <i>A. sacrorum</i> )	多年生草本	76	—	—
	茵陈蒿( <i>A. capillaris</i> )	多年生草本	—	—	22
	白莲蒿( <i>A. sacrorum</i> )	半灌木	—	—	11
	禾本科				
禾本科	虎尾草( <i>Chloris virgata</i> )	一年生草本	114	2 357	1 408
	狗尾草( <i>Setaria viridis</i> )	一年生草本	114	281	152
	野燕麦( <i>Avena fatua</i> )	一年生草本	—	94	22
	毛秆野古草( <i>Arundinella hirta</i> )	多年生草本	—	—	11
	白羊草( <i>Bothriochloa ischaemum</i> )	多年生草本	—	—	32
莎草科	黄背草( <i>Themeda japonica</i> )	多年生草本	76	—	—
	三棱草( <i>Pinellia ternata</i> )	多年生草本	—	16	11
	羊胡子草( <i>Eriophorum</i> )	多年生草本	—	—	32
十字花科	大披针薹草( <i>Carex lanceolata</i> )	多年生草本	—	31	22
	涩芥( <i>Malcolmia africana</i> )	一年生草本	38	—	—
	独行菜( <i>Lepidium apetalum</i> )	一年生草本	—	—	43
藜科	地肤草( <i>Kochia scoparia</i> )	一年生草本	114	16	32
	灰绿藜( <i>Chenopodium glaucum</i> )	一年生草本	—	62	11
萝藦科	鹅绒藤( <i>Cynanchum chinense</i> )	多年生草本	—	—	65
车前科	车前( <i>Plantago asiatica</i> )	多年生草本	—	—	11
百合科	薤白( <i>Allium macrostemon</i> )	多年生草本	38	—	—
罂粟科	博落回( <i>Macleaya cordata</i> )	多年生草本	—	—	11
总计			835	2873	2 709

注:“—”表示无。表 6 同。

表 2 种子库多样性、丰富度、均匀度和生态优势度指数

矿区	多样性指数	丰富度指数	均匀度指数	生态优势度
A	1.90	2.26	0.91	0.14
B	0.74	1.35	0.35	0.67
C	1.51	3.45	0.50	0.36

库密度最小,萌发数量最少,但物种数达到了 8 种,而且 8 个物种的种子库密度相对均匀;生态优势度指数从大到小依次为 B 矿区>C 矿区>A 矿区,B 矿区达到了 0.67,说明该矿区种子库内物种数量分布不均匀,优势种虎尾草(2 357 粒/m<sup>2</sup>)的地位相当突出;从演替角度来考虑,C 矿区的丰富度指数高于 A 矿区、B 矿区,说明随着演替的进行,矿区种子库物种丰富程度提高,相较于 B 矿区,优势种虎尾草的地位也趋于下降,群落逐渐达到相对稳定状态。

3.1.3 土壤种子库垂直分布特征 由表 3 可知,3 个矿区土壤种子库萌发的科数、种数在各层土壤中差异较小,最大值均出现在 0~5 cm 土层;从萌发植物的株数来看,各矿区均表现

为 0~5 cm 土层>5~10 cm 土层>10~15 cm 土层。0~5 cm 土层土壤种子库的密度从大到小依次为 B 矿区>C 矿区>A 矿区,B 矿区种子库密度约为 A 矿区的 3.7 倍,C 矿区种子库密度约为 A 矿区的 3.1 倍。由图 2 可知,随着土层深度增加,种子库密度呈递减趋势;A 矿区 0~5 cm 土层种子密度约为 5~10、10~15 cm 土层的 1.9 倍,B 矿区 0~5 cm 土层种子密度约为 5~10 cm 土层的 1.7 倍,约为 10~15 cm 土层的 2.0 倍,C 矿区 0~5 cm 土层种子密度约为 5~10 cm 土层的 1.1 倍,约为 10~15 cm 土层的 1.6 倍。由此可见,大同矿区土壤种子库具有明显的垂直结构,种子在土壤剖面上具有垂直递减的分布特征。

3.1.4 土壤种子库的相似性特征 由表 4 可知,0~5 cm 土层与 5~10 cm 土层的相似性指数随着演替时间的延长逐渐增大,其他土壤层之间相似性指数变化范围为 0.27~0.80 之间,表现出较大的异质性。根据相似性指数的评价指标分析结果(表 5)可知,B 矿区与 C 矿区种子库相似性指数最大,说

表 3 各土层种子库组成及种子密度

矿区	0~5 cm				5~10 cm				10~15 cm			
	科数 (科)	种数 (种)	株数 (株)	密度 (粒/m <sup>2</sup> )	科数 (科)	种数 (种)	株数 (株)	密度 (粒/m <sup>2</sup> )	科数 (科)	种数 (种)	株数 (株)	密度 (粒/m <sup>2</sup> )
A	4	7	17	1 003	3	3	3	531	2	2	2	531
B	3	6	105	3 715	2	3	41	2 176	3	5	32	1 887
C	7	13	101	3 153	4	8	91	2 841	4	9	54	1 911

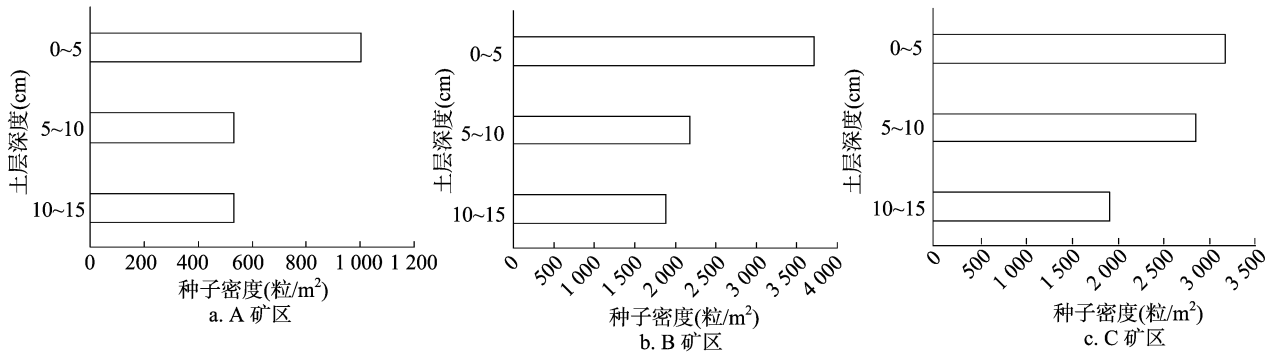


图2 3个矿区样地土壤种子库的垂直分布

表 4 A、B、C 等 3 个矿区不同土层间种子库的相似性指数			
矿区	相似性指数		
	0~5 cm 土层与 5~10 cm 土层	0~5 cm 土层与 10~15 cm 土层	5~10 cm 土层与 10~15 cm 土层
A	0.40	0.44	0.80
B	0.44	0.72	0.50
C	0.48	0.27	0.59

表 5 A、B、C 等 3 个矿区种子库的相似性指数				
矿区	相似性指数			
	整体	0~5 cm 土层	5~10 cm 土层	10~15 cm 土层
A 与 B	0.50	0.62	0.33	0.29
A 与 C	0.29	0.30	0.36	0.36
B 与 C	0.57	0.42	0.36	0.43

明随时间演替,种子库间的相似性增大;A 矿区与 B 矿区种子库相似性指数小于 B 矿区与 C 矿区的相似性指数;A 矿区与 C 矿区种子库不相似,相似性指数最小,这是因为 A 矿区与 C 矿区矸石山时间跨度较大。不同样地相同土层之间的相似性指数变化范围为 0.29~0.62,表现出较大的异质性,仅出现 1 个相似,其他均为不相似。由此可见,3 个矿区虽然都处于大同市境内,但由于土壤状况、坡度差异等小尺度的地域分异和时间分异的影响,均未达到极相似的程度。

3.2 地上植被分析

由表 6 可知,3 个矿区地上植被共统计到 18 科 39 种植物,分属禾本科 10 种,菊科 8 种,藜科、豆科各 3 种,莎草科 2 种,萝藦科、车前科、大戟科、景天科、茄科、瑞香科、石竹科、卫矛科、苋科、旋花科、亚麻科、榆科、鸢尾科各 1 种,其中以禾本科和菊科种类最多,占总种数的 46.2%。生活型分析结果表明,地上植被主要由草本植物组成,有 34 种,占总种数的 87.2%;灌木有胡枝子、河朔堇花和小卫矛 3 种;乔木有槐和榆树 2 种。就不同矿区的地上植被组成来看,A 矿区共统计到 12 科 28 种植物,B 矿区 8 科 18 种,C 矿区 12 科 25 种,可见随着演替的进行和矿区生境的变化,植物群落的结构也发生相应的变化,一些不能适应的物种数量逐渐减少甚至消失而被其他物种取代,如画眉草、芨芨草、披碱草、白羊草、鬼针草、长裂苦苣菜、地肤草、猪毛菜、曼陀罗、女娄菜、小卫矛、野亚麻等,同时伴随外来物种的入侵也出现了一些新的物种,如野黍、灰绿藜、胡枝子、八宝景天、田旋花、鸢尾等,群落演替明显<sup>[17]</sup>。A 矿区统计到较多的是莎草科羊胡子草和禾本科狗尾草,分别占总数的 43.6% 和 33.8%;B 矿区、C 矿区出现最

多的是禾本科的虎尾草(11 257、3107 株),占各矿区总数的 56.9% 和 71.1%。

由图 3 可知,地上植被的 Shannon-wiener 多样性指数从大到小依次为 A 矿区>C 矿区>B 矿区,Margalef 丰富度指数从大到小依次为 A 矿区>C 矿区>B 矿区,Peilow 均匀度指数从大到小依次为 A 矿区>C 矿区>B 矿区,可见随着演替的进行和矿区生境的变化,植物生长对空间和养分的竞争加剧,多样性指数、丰富度指数、均匀度指数先表现减小,此后随着演替的进行和矸石山生境的改善,地上植被的物种多样性又逐步提高。地上植被生态优势度指数从大到小依次为 C 矿区>B 矿区>A 矿区,说明 C 矿区地上植被物种分布极不均匀,生境适应能力强的物种大量繁殖,优势种虎尾草的地位相当突出。

3.3 土壤种子库与地上植被的关系

3.3.1 土壤种子库与地上植被的物种组成比较 土壤种子库共萌发了 9 科 24 种植物,分属菊科 7 种、禾本科 6 种、莎草科 3 种、十字花科、藜科各 2 种,其余 4 科各 1 种。地上植被调查共发现 18 科 39 种植物,分属禾本科 10 种、菊科 8 种、藜科 3 种、豆科 3 种、莎草科 2 种,其余 13 科各 1 种。由此可见,地上植被物种数多于土壤种子库的物种数,是土壤种子库的 1.63 倍,这是因为地上植被更容易受外界因素的干扰,而土壤种子库相对来说稳定性更强。二者物种组成中草本植物都占了相当大的比例,多年生草本和一年生草本所占比例相当,均以菊科和禾本科植物为主。土壤种子库中出现半灌木 1 种,地上植被出现灌木 3 种、乔木 2 种。土壤种子库和地上植被中出现频率都较高的物种有虎尾草、狗尾草和黄花蒿。

A 矿区中,从地上植被和土壤种子库中共统计到 31 种物种,共有种为虎尾草、狗尾草、黄花蒿、铁杆蒿、地肤草 5 种;B 矿区共统计到 22 种物种,共有种为虎尾草、狗尾草、黄花蒿、野燕麦 4 种;C 矿区共统计到 34 种物种,共有种为虎尾草、狗尾草、野燕麦、黄花蒿、小飞蓬、茵陈蒿、灰绿藜、大披针藜草、羊胡子草、鹅绒藤、车前 11 种。Whipple 等的研究结果说明这些物种的种子在当地的生境下能够顺利地自然更新和生存,从而出现在地上植被中<sup>[18]</sup>。由图 4 可知,C 矿区的地上植被与土壤种子库的共有物种最多,共有种所占比例最大;A 矿区、B 矿区的地上植被与土壤种子库的共有物种相对较少,说明随着演替的推进,共有种所占比例逐渐增大。在地上植被与土壤种子库的共有物种中同时出现在 3 个矿区的有黄花蒿、虎尾草、狗尾草,3 个物种在 3 个矿区的地上、地下都能检测到,说明这 3 个物种在该地为广泛存在的物种,植株及其种

表 6 3 个矿区地上植被物种组成

科名	种名	生活型	株数(株)		
			A 矿区	B 矿区	C 矿区
禾本科	虎尾草( <i>Chloris virgata</i> )	一年生草本	15	11 257	3 107
	狗尾草( <i>Setaria viridis</i> )	一年生草本	2 909	5 913	217
	画眉草( <i>Eragrostis pilosa</i> )	一年生草本	22	68	—
	野黍( <i>Eriochloa villosa</i> )	一年生草本	—	—	1
	小画眉草( <i>Eragrostis minor</i> )	一年生草本	2	1 889	15
	野燕麦( <i>Avena fatua</i> )	一年生草本	15	11	8
	芨芨草( <i>Achnatherum splendens</i> )	多年生草本	345	—	—
	芦苇( <i>Phragmites australis</i> )	多年生草本	94	401	305
	披碱草( <i>Elymus dahuricus</i> )	多年生草本	50	—	—
	白羊草( <i>Bothriochloa ischaemum</i> )	多年生草本	15	—	—
	鬼针草( <i>Bidens pilosa</i> )	一年生草本	12	—	—
	黄花蒿( <i>Artemisia annua</i> )	一年生草本	250	104	64
菊科	小飞蓬( <i>Conyza canadensis</i> )	一年生草本	28	1	10
	长裂苦苣菜( <i>Sonchus brachyotus</i> )	一年生草本	229	—	—
	蒲公英( <i>Taraxacum mongolicum</i> )	多年生草本	—	25	38
	铁杆蒿( <i>Artemisia sacrorum</i> )	多年生草本	269	35	177
	阿尔泰狗娃花( <i>Heteropappus altaicus</i> )	多年生草本	156	1	4
	茵陈蒿( <i>Artemisia capillaris</i> )	多年生草本	270	5	204
	地肤草( <i>Kochia scoparia</i> )	一年生草本	1	—	—
	灰绿藜( <i>Chenopodium glaucum</i> )	一年生草本	—	—	1
藜科	猪毛菜( <i>Salsola collina</i> )	一年生草本	118	—	—
	胡枝子( <i>Lespedeza bicolor</i> )	灌木	—	—	1
豆科	槐( <i>Sophora japonica</i> )	乔木	—	—	1
	苦马豆( <i>Sphaerophysa salsula</i> )	多年生草本	—	1	39
莎草科	大披针藎草( <i>Carex lanceolata</i> )	多年生草本	2	—	4
	羊胡子草( <i>Eriophorum</i> )	多年生草本	3 750	3	14
萝藦科	鹅绒藤( <i>Cynanchum chinense</i> )	多年生草本	3	—	3
车前科	车前( <i>Plantago asiatica</i> )	多年生草本	—	4	5
大戟科	地锦( <i>Euphorbia humifusa</i> )	一年生草本	—	15	—
景天科	八宝景天( <i>Hylotelephium spectabile</i> )	多年生草本	—	—	76
茄科	曼陀罗( <i>Datura stramonium</i> )	多年生草本	1	—	—
瑞香科	河朔莢花( <i>Wikstroemia chamaedaphne</i> )	灌木	16	—	64
石竹科	女娄菜( <i>Silene aprica</i> )	一年生草本	16	—	—
卫矛科	小卫矛( <i>Euonymus nanoides</i> )	灌木	2	—	—
苋科	苋( <i>Amaranthus tricolor</i> )	一年生草本	5	33	—
旋花科	田旋花( <i>Convolvulus arvensis</i> )	多年生草本	—	—	3
亚麻科	野亚麻( <i>Linum stelleroides</i> )	一年生草本	1	—	—
榆科	榆树( <i>Ulmus pumila</i> )	乔木	13	1	7
鸢尾科	鸢尾( <i>Iris tectorum</i> )	多年生草本	—	—	1
总计			8 609	19 767	4 369

注:“—”表示无。

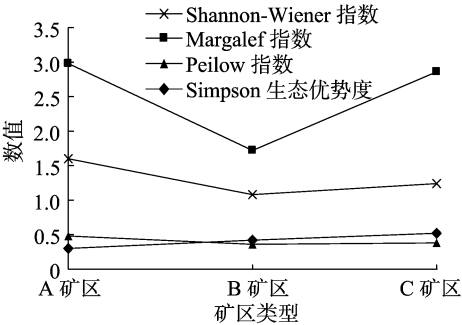


图3 地上植被多样性、丰富度、均匀度和生态优势度指数

3.3.2 土壤种子库与地上植被的相似性分析 统计各矿区土壤种子库与地上植被的共有种数,计算其 Jaccard 相似性指数、Sørenson 相似性指数和 Mountford 相似性指数,发现 3 个矿区土壤种子库与地上植被的相似性普遍比较低,变异性比较高,说明煤矸石山土壤种子库与地上植被在演替的各阶段都表现出较大的差异。由图 5 可知,以上 3 个相似性指数都存在一个共同特征,即 C 矿区>B 矿区>A 矿区,这说明随着演替的推进,土壤种子库与地上植被之间的相似性逐渐增大,这也表明土壤种子库在煤矸石山植被恢复与更新中的潜能作用随演替时间的延长而逐渐提高<sup>[17]</sup>。

4 结论与讨论

对大同矿区煤矸石山土壤种子库进行种子萌发试验,共

子的生境适应能力较强,空间生态位较广,同时具有较强的耐受能力<sup>[17,19]</sup>。

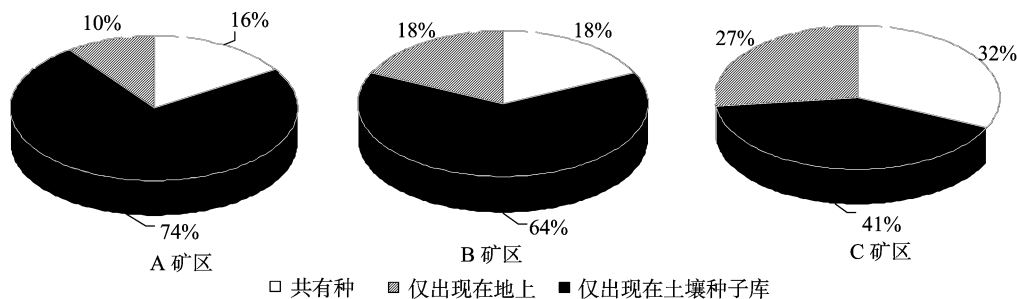


图4 3个矿区地上植被与土壤种子库物种组成

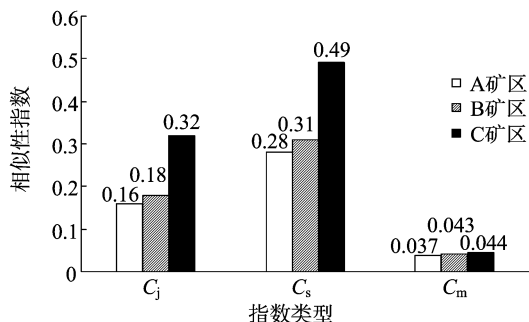


图5 不同矿区地上植被与土壤种子库的相似性

统计到 446 株植物,分属 9 科 24 种,其中以菊科和禾本科为主,二者占 54.2%;生活型以一年生和多年生草本植物为主,比例达 95.8%。随着覆土年限的增加,种子库的科数、种数和萌发株数都呈增加趋势,但仍然以草本植物种为主,说明矸石山有生态适应性广的种子存在,但贫瘠的生境还不适合大量灌木种和木本植物种的生存。这些广泛存在且生态适应性广的种子为矸石山植被恢复和生态改善奠定了基础。

土壤种子库密度大小为 835 ~ 2 873 粒/m<sup>2</sup>,种子密度随着时间演替不断增大,远低于该区自然生境下土壤种子库密度(1 388 ~ 9 853 粒/m<sup>2</sup>)<sup>[17]</sup>;土壤种子库具有明显垂直结构,种子在土壤剖面上具有垂直递减的分布特征,这与国内外许多学者的研究结果<sup>[19-20]</sup>一致。本研究中,0 ~ 5 cm 土层种子密度为 5 ~ 10 cm 土层的 1.1 ~ 1.9 倍,为 10 ~ 15 cm 土层的 1.6 ~ 2.0 倍。黄花蒿和虎尾草的种子密度最大,是矸石山土壤种子库的优势种。

矸石山土壤种子库的多样性分析结果表明,随着演替的进行,矿区种子库物种丰富程度随之提高,群落逐渐达到相对稳定的状态,生态优势度指数逐渐下降,优势种趋向不明显。土壤种子库的相似性研究结果表明,土壤种子库相似性指数变化范围为 0.29 ~ 0.62,表现出较大的异质性,说明各矿区以及各土层之间种子库差异显著。

对矿区矸石山地上植被进行调查,共统计到 18 科 39 种植物,以禾本科和菊科为主,生活型以草本植物为主;羊胡子草、狗尾草和虎尾草统计数量最多,占有重要地位。与土壤种子库相比,地上植被物种数多于土壤种子库的物种数,是土壤种子库的 1.63 倍。土壤种子库和地上植被中出现频率都较高的物种有虎尾草、狗尾草和黄花蒿。本研究中土壤种子库与地上植被的相似性普遍比较低,为 0.28 ~ 0.49,变异性比较高,这是因为植被和种子库之间的关系是微弱的,地上植被与种子库产生差异的可能因素包括传播、演替、干扰等<sup>[21-22]</sup>。

本研究结果表明,随着演替的推进,土壤种子库与地上植被之间的相似性逐渐增大,这与张智婷等的研究结论<sup>[23-24]</sup>相同,而与程积民等的结论<sup>[17,25]</sup>不同。由此可见,关于土壤种子库和地上植被的关系这一问题还没有形成统一的结论,还需要进行大量深入的研究。

#### 参考文献:

- [1] Thompson K, Grime J P. Seasonal variation in the seed banks of herbaceous species in ten contrasting habitats[J]. *Journal of Ecology*, 1979, 67: 893 - 921.
- [2] 于顺利, 蒋高明. 土壤种子库的研究进展及若干研究热点[J]. *植物生态学报*, 2003, 27(4): 552 - 560.
- [3] 张玲, 李广贺, 张旭. 土壤种子库研究综述[J]. *生态学杂志*, 2004, 23(2): 114 - 120.
- [4] 唐勇, 曹敏, 张建侯, 等. 西双版纳热带森林土壤种子库与地上植被的关系[J]. *应用生态学报*, 1999, 10(3): 24 - 27.
- [5] 王刚, 梁学功. 沙坡头人工固沙区的种子库动态[J]. *植物学报*, 1995, 37(3): 231 - 237.
- [6] 曾彦军, 王彦荣, 南志标, 等. 阿拉善干旱荒漠区不同植被类型土壤种子库研究[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(9): 1457 - 1463.
- [7] 侯志勇, 陈心胜, 谢永宏, 等. 洞庭湖湿地土壤种子库特征及其与地表植被的相关性[J]. *湖泊科学*, 2012, 24(2): 287 - 293.
- [8] 韩丽君, 白中科, 李晋川, 等. 安太堡露天煤矿排土场土壤种子库[J]. *生态学杂志*, 2007, 26(6): 817 - 821.
- [9] 莫爱, 周耀治, 杨建军. 天山北坡煤矿废弃地土壤种子库特征研究[J]. *中国水土保持*, 2014(7): 47 - 50, 73.
- [10] 李洪远, 莫训强, 郝翠. 近 30 年来土壤种子库研究的回顾与展望[J]. *生态环境学报*, 2009, 18(2): 731 - 737.
- [11] 常青, 张大维, 李雪, 等. 中国矿区土壤种子库研究的必要性与挑战[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(5): 1343 - 1350.
- [12] 王佳. 大同矿区煤矸石山自然植被数量生态研究[D]. 太原: 山西大学, 2012.
- [13] 马克平. 生物群落多样性的测度方法 I.  $\alpha$  多样性的测度方法(上)[J]. *生物多样性*, 1994, 2(3): 162 - 168.
- [14] 马克平, 刘玉明. 生物群落多样性的测度方法 I  $\alpha$  多样性的测度方法(下)[J]. *生物多样性*, 1994, 2(4): 231 - 239.
- [15] 张金屯. 数量生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 86 - 94.
- [16] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志: 第一卷[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [17] 程积民. 黄土高原植被恢复与土壤种子库[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 177 - 179.
- [18] 白文娟, 焦菊英, 张振国. 黄土丘陵沟壑区退耕地土壤种子库与地上植被的关系[J]. *草业学报*, 2007, 16(6): 30 - 38.

李慧丽,徐德福,李映雪,等. 紫外辐射增强对人工湿地氮形态及去除的影响[J]. 江苏农业科学,2015,43(12):350-352.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2015.12.109

# 紫外辐射增强对人工湿地氮形态及去除的影响

李慧丽, 徐德福, 李映雪, 管益东

(江苏省大气环境监测与污染控制高新技术研究重点实验室/南京信息工程大学, 江苏南京 210044)

**摘要:**通过构建人工湿地,模拟 UV-B 增强 10%、20%,研究人工湿地质基中氮的形态,硝化与反硝化强度及氮去除率的变化。结果表明:UV-B 辐射下,基质的氨态氮、硝态氮含量增加,与对照相比,UV-B 增强 10%、20% 处理下人工湿地质基中平均氨态氮含量分别增加 201%、220%,硝态氮含量也分别增加 26%、52%。UV-B 促进了人工湿地质基的硝化强度,但抑制了反硝化强度;UV-B 增强降低了人工湿地对氮的去除率,其原因可能与 UV-B 增强促进凋落物分解导致氮释放和 UV-B 抑制反硝化强度有关。

**关键词:**紫外辐射;人工湿地;氮形态

**中图分类号:** X52 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2015)12-0350-03

人工湿地生态系统是人为建造的用于污水处理的系统,因其具有投资少、能耗低、管理方便、无二次污染、生态效益显著、可美化环境等优点,在国内外得到广泛应用<sup>[1]</sup>。其中表面流人工湿地因建设成本低、运行维护方便而被广泛采用<sup>[2]</sup>。人工湿地脱氮的途径有多种:植物和其他生物吸收作用,微生物氨化、硝化和反硝化作用以及氨气的挥发作用<sup>[3]</sup>,其中,微生物硝化、反硝化作用是湿地氮去除的主要途径,但是其脱氮效果受气候、植物种类、负荷及立地条件等因素的影响<sup>[4-5]</sup>。本研究分析紫外辐射对表面流人工湿地的硝化反硝化强度,探讨紫外辐射对湿地脱氮机制及硝化反硝化的作用,旨在为人工湿地系统在中国的推广应用奠定基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

采用长 80 cm、宽 60 cm、高 60 cm 的铁箱模拟表面流人工湿地,用纱网将每个池子垂直隔成 3 个区域,分别在相应的区域种植菖蒲 6 棵、茭白 5 棵、黄花鸢尾 6 棵。同时在每个人工湿地中加入 10 条泥鳅。紫外辐射强度设 3 个处理:对照人

工湿地(自然光)、UV-B 增强 10%、UV-B 增强 20%。UV-B 辐射增强通过在人工湿地上架设 UV-B 紫外灯(40 W,峰值 310 nm,上海华德电光源厂)来供给,并通过调节紫外灯的高度来实现紫外辐射增强 10%、20%。试验污水由人工配制而成,总氮(TN)浓度 13.9~30.0 mg/L,氨态氮浓度 10.9~17.4 mg/L。2014 年 3 月 20 日开始试验,先往每个箱子里加入相同质量的基质,3 月 28 日种植植物,开始放水,人工湿地初建成,4 月 10 日往每个箱子中加入等量的泥鳅,4 月 20 号开紫外灯,开灯时间为 08:00—16:00,阴雨天除外。采用间歇进水,每次加入污水后停留 2 d,分析水质变化。

### 1.2 方法

2014 年 7 月初,对人工湿地每种植物种植区表层(0~10 cm)基质进行取样,一部分基质用于分析硝化强度与反硝化强度;一部分基质经风干,过 2 mm 筛测基质的氨态氮、硝态氮含量。同时在 7 月初取样分析进出水的氨态氮、TN 浓度变化。

**1.2.1 硝化强度测定**<sup>[6]</sup> 硝化培养液配制方法:0.2 mg/L 磷酸二氢钾溶液、0.2 mg/L 磷酸氢二钾溶液、0.05 mg/L 硫酸铵溶液,按体积比 3:7:30 配制,用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 或 NaOH 稀溶液调至培养液 pH 值为 7.2。分别称取 10 g 基质置于 150 mL 三角瓶中(每个样品取 3 个平行样),加入 100 mL 硝化培养液,用脱脂棉塞住瓶口,置于 20 ℃ 水浴恒温振荡器中,基质硝化作用计算公式如下:

$$W_1 = (C_2 - C_1) \times (V_1 + V_2) \times k / (t \times m) \quad (1)$$

式中:W<sub>1</sub> 为单位时间内单位质量土壤所产生的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N,

收稿日期:2014-12-12

基金项目:江苏省自然科学基金(编号:BK20141477);江苏省农业气象重点实验室开放基金(编号:KYQ1206)。

作者简介:李慧丽(1987—),女,河南商丘人,硕士研究生,主要从事污染水体生态修复研究。E-mail:lihuili\_1124@163.com。

通信作者:徐德福,博士,教授,主要从事人工湿地污水净化研究。

E-mail: defuxu1@163.com

[19]李红艳,杨晓晖,蒋凤玲,等. 我国干旱区草场种子库研究进展[J]. 河北林果研究,2005,20(2):124-127.

[20]刘旭,程瑞梅,肖文发. 土壤种子库研究进展[J]. 世界林业研究,2008,21(1):27-33.

[21]Falinska K. Seed bank dynamics in abandoned meadows during a 20-year period in the Białowieża National Park [J]. Journal of Ecology, 1999, 87(3):461-475.

[22]吕正文. 青藏高原东缘弃耕地的土壤种子库及其与地上植被关

系的研究[D]. 兰州:兰州大学,2008:35.

[23]张智婷,宋新章,肖文发,等. 长白山森林不同演替阶段采伐林隙土壤种子库特征[J]. 应用生态学报,2009,20(6):1293-1298.

[24]罗辉,王克勤. 元谋干热河谷山地植被修复区土壤种子库研究[J]. 中国水土保持科学,2006,4(1):87-91.

[25]周先叶,李鸣光,王伯荪,等. 广东黑石顶自然保护区森林次生演替不同阶段土壤种子库的研究[J]. 植物生态学报,2000,24(2):222-230.