

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201901023

毛圆圆, 郝俊, 龙水义, 等. 煤矸石山不同种植年限香根草生物量分配及异速生长分析 [J]. 广西植物, 2020, 40(6): 802–811.  
MAO YY, HAO J, LONG SY, et al. Biomass allocation and allometric analysis of *Vetiveria zizanioides* in different planting years on coal spoil-heaps [J]. *Guihaia*, 2020, 40(6): 802–811.

## 煤矸石山不同种植年限香根草 生物量分配及异速生长分析

毛圆圆<sup>1</sup>, 郝俊<sup>1</sup>, 龙水义<sup>1</sup>, 许钟丹<sup>1</sup>, 盛美群<sup>1</sup>, 程巍<sup>1,2\*</sup>

(1. 贵州大学 动物科学学院, 贵阳 550025; 2. 贵州大学 山地植物  
资源保护与种质创新省部共建教育部重点实验室, 贵阳 550025)

**摘要:** 香根草 (*Vetiveria zizanioides*) 是一种良好的矿业废弃地生态修复物种, 研究其生物量分配和异速生长关系, 有助于深入了解香根草在矿区的生存策略与生态功能。该研究以贵州省六盘水市大河煤矿煤矸石山种植年限为 4、5、8 和 15 a 的香根草为对象, 采用挖掘法和称重法对不同种植年限香根草的器官生物量、分配比例及异速生长关系进行了对比分析。结果表明: (1) 随种植年限的增加, 根、茎、叶生物量均呈现先增加后减少的趋势, 且均在种植年限为 5 a 时最大, 15 a 时最小。(2) 茎生物量分配比在种植年限 15 a 时最大 (37.3%), 叶生物量分配比在种植年限 5 a 时最大 (36.1%), 根生物量分配比不随种植年限的增加而发生变化, 基本保持在 30% 左右。(3) 种植年限为 4、5、8 a 时, 地上部总生物量与根生物量、叶生物量呈异速生长关系; 种植年限为 5 a 时, 叶面积与根、叶生物量呈异速生长关系, 与茎生物量呈等速生长关系。不同种植年限间的生物量分配及异速生长关系虽然没有一致规律, 但体现了香根草在煤矸石基质中生物量分配的特点, 且显示了其特别的生长方式和资源分配策略, 为今后香根草在煤矸石山生态治理方面提供了参考依据。  
**关键词:** 香根草, 煤矸石山, 种植年限, 生物量分配, 异速生长

中图分类号: Q945.3 文献标识码: A

文章编号: 1000-3142(2020)06-0802-10

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Biomass allocation and allometric analysis of *Vetiveria zizanioides* in different planting years on coal spoil-heaps

MAO Yuanyuan<sup>1</sup>, HAO Jun<sup>1</sup>, LONG Shuiyi<sup>1</sup>, XU Zhongdan<sup>1</sup>,  
SHENG Meiqun<sup>1</sup>, Cheng Wei<sup>1,2\*</sup>

收稿日期: 2019-04-03

基金项目: 国家自然科学基金(31500451); 贵州省科学技术基金(J [2014]2055); 贵州省科技合作计划项目(LH [2015]7667); 贵州省教育厅自然科学研究项目(KY [2014]303) [Supported by the National Natural Science Foundation of China (31500451); Science and Technology Fund of Guizhou (J [2014]2055); Guizhou Science and Technology Cooperation Program (LH [2015]7667); Guizhou Provincial Department of Education Natural Science Research Program (KY [2014]303)]。

作者简介: 毛圆圆(1993-), 女(彝族), 贵州兴仁人, 硕士研究生, 主要从事生态恢复方向的研究, (E-mail) 1778088024@qq.com。

\*通信作者: 程巍, 博士, 副教授, 主要从事生态恢复、植物生理和植物资源保护研究, (E-mail) wcheng@gzu.edu。

( 1. College of Animal Science, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Key Laboratory of Plant Resources Conservation and Germplasm Innovation in Mountainous Region, Guiyang 550025, China )

**Abstract:** *Vetiveria zizanioides* is a good ecological restoration species in mining wasteland. The study on relationship between biomass allocation and allometry will contribute to deepen understanding the survival strategy and ecological function of *V. zizanioides* in mining area. *V. zizanioides* planted on coal spoil-heaps of Dahe Coal Mine in Liupanshui City of Guizhou Province for 4, 5, 8, 15 a were used as research objects, the total biomass were obtained by using excavation and weight methods, and organ biomass, allocation ratios and the allometric relationships among the four different planting years were compared. The results were as follows: (1) The biomasses of roots, stems and leaves increased firstly and then decreased with the increase of planting years, and reached the maximum at 5 a of planting and the minimum at 15 a of planting. (2) Stem peaked in biomass distribution ratio in the 15 a of planting(37.3%), while leaf did in the 5 years of planting(36.1%), and the root did not change with the increase of planting years(30%). (3) In planting for 4, 5, 8 a, the total biomass of aboveground biomass was in allometric relationships with root and leaf biomasses. In planting for 5 a, the leaf area was in allometric relationships with root and leaf biomasses, and was in isometric growth relationship with stem biomass. There was no consistency between allocation pattern and allometric relationship in different planting years, but it reflected the characteristics of *V. zizanioides* biomass allocation on showed its special growth, and would provide theoretical reference for ecological management of *V. zizanioides* on coal spoil-heaps.

**Key words:** *Vetiveria zizanioides*, coal spoil-heaps, planting years, biomass allocation, allometric

煤矸石是在煤碳开采、掘进及洗煤过程中挑选后剩余的矸石固体废弃物,其含碳量较低、比煤坚硬,主要成分为  $Al_2O_3$ 、 $SiO_2$ ,具有养分贫乏、利用率低、对周围水体和土壤污染严重等特点(郭李凯,2017)。对煤矸石山进行生态修复,控制其对周围地区的污染已成为目前煤矿矿区生态恢复研究的重要内容之一,而基质的改良和耐性植物的筛选是煤矿废弃矿区生态环境修复成功的关键。许多学者研究表明,香根草对重金属污染尾矿废弃地具有一定的生态修复功能(简曙光等,2004; Barrutia et al., 2008;周少燕,2017)。

香根草(*Vetiveria zizanioides*),又称岩兰草,为禾本科多年生草本植物,具有生物量大、能适应各种土壤环境(如耐重金属、耐贫瘠等)等特性(刘晚苟等,2015)。被广泛应用于公路护坡(夏汉平等,2002a),退化生态系统的恢复(夏汉平等,2002b)以及对重金属污染和污染物的生物修复(杨兵等,2005)等方面。相关研究表明,香根草是一种良好的矿业废弃地生态修复植物(Shu et al., 2002;徐德聪等,2012)。

生物量是研究植物生物学特征和功能性状的基础,是能量积累的基本体现(闫建成等,2013;郝

婧等,2013)。其在根、茎、叶各器官间的分配是植物为了适应异质环境而形成的一种生态策略,是植物生殖与生存平衡的结果,对植物生长发育具有重要影响(王杨等,2017)。生物量分配与植物的个体生长发育、生长环境、群体大小相关(李旭东等,2012;梁飞等,2013)。大量研究表明,水分、土壤养分或光照等资源受限时,植物会改变生物量在不同器官间的分配(Mccartey & Enquist, 2010;Poorter et al., 2011)。目前,对生物量的研究大多数集中于随空间变化(李凯辉等,2007;平晓燕等,2007;郭东昱等,2011)、生育期变化的探讨(张文辉等,2003;韦兰英等,2009),而随种植年限变化的研究较少(郝婧等,2013)。异速生长关系是指植物各器官生物量与个体间的某种定量关系,常以幂函数形式表示(Niklas et al., 2005;陆霞梅等,2007)。在植物生长发育过程中,植物以异速生长的方式来获取所需资源和对环境的适应(李钰等,2013)。目前,异速生长分析主要应用在荒漠地区不同种类植物的研究(钟泽兵等,2014),而对尾矿废弃地恢复植物的研究鲜有报道。

目前,针对香根草的研究主要集中在引种(陈法扬等,1991)、生理生态(王兴明等,2018)、对重金

属富集(夏汉平和束文圣,2001)等,而对其生物量分配及异速生长关系的研究较少。为此,本研究以贵州省六盘水市大河煤矿煤矸石山上4个不同种植年限的香根草为研究对象,通过对不同种植年限香根草的生物学特性、生物量分配和异速生长关系进行分析,探讨不同种植年限香根草的生物量分配及异速生长关系之间的差异,并进一步了解香根草在不同煤矸石环境中的生存策略,以期为今后应用香根草对煤矸石山生态治理提供理论参考。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

试验地点位于贵州省六盘水市大河煤矿矿区(海拔1600 m),年平均温度12.3℃,年均降水量1182.8 mm,年均相对湿度81%,土壤类型主要为黄棕壤、黄壤和山地灌丛草甸土。

### 1.2 研究方法

于2017年5月至10月,共计6个月,在全面踏查的基础上,分别选择种植年限4、5、8和15 a 4个年限的香根草进行破坏性取样,每次每个种植年限随机取样3丛(每次取样避免之前的取样区域),每个年限共计18丛。利用全株挖掘法挖掘整个植株,并尽量保持植株的完整性,贴好标签带回实验室。将每株植株分成根、茎、叶3个部分,用清水将根冲洗干净,利用叶面积仪测量叶面积。将植株根、茎、叶分别装袋,在105℃杀青30 min

后在70℃条件下烘干至恒重,然后分别称重,记录。

### 1.3 数据分析

对香根草各器官生物量数据采用Excel 2010软件进行处理,并利用SPSS 17.0软件进行单因素(种植年限)差异显著性分析,将各指标值进行对数(以10为底)转换。用经典的异速方程 $Y = \beta X^\alpha$ 进行异速生长分析,经对数转化后,表达式为 $\lg Y = \lg \beta + \alpha \lg X$ 。式中: $X$ 和 $Y$ 分别为不同性状指标值; $\beta$ 为性状关系的截距; $\alpha$ 为两者关系的斜率(即相对生长指数)。当 $\alpha$ 等于1时,为等速生长;当 $\alpha$ 不等于1时,为异速生长。数据分析主要采用标准化主轴估计(standardized major axis estimation, SMA)的方法,由软件SMATR Version 2.0计算完成(李钰等,2013)。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同种植年限对香根草各器官的生物量的影响

由表1可见,随着种植年限的增加,香根草根、茎、叶、地上部和总生物量均呈先增加后减少的趋势,且均在种植年限5 a时最大,15 a时最小。其中,叶生物量在不同年限间差异达到显著水平( $P < 0.05$ );而根、茎、地上和总生物量在种植年限为5、4 a时差异不显著( $P > 0.05$ ),与种植年限8、15 a差异显著( $P < 0.05$ )。

表1 不同种植年限香根草各器官的生物量

Table 1 Biomass of different organs of *Vetiveria zizanioides* in different planting years

种植年限 Planting year (a)	根生物量 Biomass of root (g)	茎生物量 Biomass of stem (g)	叶生物量 Biomass of leaf (g)	地上部分生物量 Biomass of aboveground (g)	总生物量 Total biomass (g)
4	37.319±8.192ab	44.458±9.027a	42.580±10.793b	87.038±16.756a	124.357±23.849a
5	41.787±5.392a	47.019±12.595a	49.643±6.570a	96.662±18.212a	138.448±22.912a
8	33.616±9.314b	36.737±6.822b	35.098±9.248c	71.835±14.105b	105.451±22.369b
15	25.735±7.219c	30.925±7.782b	26.5855±6.949d	57.510±14.241c	83.245±20.239c

注:数据为平均值±标准差;同列不同字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。下同。

Note: Data =  $\bar{x} \pm s$ ; Different letters in the same row indicate significant differences ( $P < 0.05$ ). The same below.

表 2 不同种植年限香根草各器官的生物量分配比

Table 2 Biomass allocation ratio of different organs of *Vetiveria zizanioides* in different planting years

种植年限 Planting year (a)	根生物量分配比 Biomass of root allocation ratio (%)	茎生物量分配比 Biomass of stem allocation ratio (%)	叶生物量分配比 Biomass of leaf allocation ratio (%)	地上生物量分配比 Biomass of aboveground allocation ratio (%)
4	0.300±0.031a	0.359±0.044ab	0.341±0.051ab	0.700±0.031a
5	0.304±0.025a	0.335±0.043b	0.361±0.033a	0.696±0.025a
8	0.315±0.037a	0.354±0.049ab	0.332±0.045b	0.685±0.037a
15	0.307±0.040a	0.373±0.022a	0.321±0.033b	0.693±0.040a

## 2.2 不同种植年限各器官的生物量分配比

由表 2 可见,根生物量分配比、地上生物量分配比与种植年限不呈正比关系,其中根生物量分配比占 30%左右,地上生物量分配比占 70%左右 ( $P>0.05$ )。茎生物量分配比在种植年限 5 a 时达到最小。叶生物量分配比变化在种植年限 5 a 时达到最大,其次为种植年限 4 a 时 ( $P<0.05$ )。

## 2.3 不同种植年限地上部分总生物量与根、茎、叶生物量间的关系

由表 3 和图 1 可见,不同种植年限香根草地上部总生物量(AB)与各器官生物量(RB 为根生物量;SB 为茎生物量;LB 为叶生物量)均呈极显著正相关( $P<0.01$ )。从根生物量来看,4 个种植年限的 SMA 斜率与 1 差异显著,说明 4 个种植年限的根生物量与地上部总生物量之间均存在异速生长关系。从茎生物量来看,种植年限 5 a 的 SMA 斜率与 1 差异显著,说明种植年限为 5 a 的茎生物量与地上部总生物量之间存在异速生长;而种植年限 4、8、15 a 的 SMA 斜率与 1 差异不显著,说明种植年限为 4、8、15 a 的茎生物量与地上部总生物量之间不存在异速生长关系。从叶生物量来看,种植年限为 4、5、8 a 的 SMA 斜率与 1 差异显著,说明种植年限为 4、5、8 a 的叶生物量与总生物量存在异速生长关系;而种植年限为 15 a 的 SMA 斜率与 1 差异不显著,说明种植年限为 15 a 的叶生物量与地上部总生物量不存在异速生长关系。

## 2.4 叶面积与生物量间的关系

由表 4 和图 2 可见,从根生物量来看,种植年限 5 a 的 SMA 斜率与 1 差异显著,说明种植年限

为 5 a 的根生物量与总叶面积存在异速生长关系;而种植年限 4、8、15 a 的 SMA 斜率与 1 差异不显著,说明种植年限为 4、8、15 a 的根生物量与总叶面积不存在异速生长关系。从茎生物量来看,种植年限为 5 a 的茎生物量与总叶面积呈极显著正相关( $P<0.01$ ),且种植年限 5、15 a 的 SMA 斜率与 1 差异不显著,说明种植年限为 5、15 a 的茎生物量与总叶面积不存在异速生长关系;而种植年限 4、8 a 的 SMA 斜率与 1 差异显著,说明种植年限为 4、8 a 的茎生物量与总叶面积存在异速生长关系。从叶生物量来看,种植年限为 4、5 a 的叶生物量与总叶面积呈极显著正相关( $P<0.01$ ),且种植年限 5 a 的 SMA 斜率与 1 差异显著,说明种植年限为 5 a 的叶生物量与总叶面积存在异速生长关系;而种植年限 4、8、15 a 的 SMA 斜率与 1 差异不显著,说明种植年限为 4、8、15 a 的叶生物量与总叶面积不存在异速生长关系。从总生物量来看,种植年限为 4、5 a 的总生物量与总叶面积呈极显著正相关( $P<0.01$ ),且种植年限 4、5、8 a 的 SMA 斜率与 1 差异显著,说明种植年限为 4、5、8 a 的总生物量与总叶面积存在异速生长关系;而种植年限 15 a 的 SMA 斜率与 1 差异不显著,说明种植年限为 15 a 的总生物量与总叶面积不存在异速生长关系。

## 3 讨论与结论

### 3.1 不同种植年限对香根草各器官生物量及其分配的影响

植物不同器官生物量积累的高低,是光合作用



表 3 不同种植年限香根草地上部总生物量与根、茎、叶生物量关系的 SMA 分析结果  
Table 3 SMA analysis of relationship between total biomass of aboveground and biomasses of roots, stems and leaves of *Vetiveria zizanioides* in different planting years

指标 Index	年限 Year (a)	样本数 Sample number (n)	决定系数 R square (R <sup>2</sup> )	显著性 水平 Significance level (P)	斜率 Slope	斜率 95% 置信区间 Slope 95% confidence interval	截距 Intercept	截距 95% 置信区间 Intercept 95% confidence interval
AB-RB	4	18	0.622	<0.01	1.261a	0.915 ~ 1.737	-0.875	-1.670 ~ -0.081
	5	18	0.708	<0.01	0.682a	0.514 ~ 0.904	0.269	-0.117 ~ 0.655
	8	18	0.729	<0.01	1.500a	1.142 ~ 1.971	-1.265	-2.031 ~ -0.50
	15	18	0.711	<0.01	1.133a	0.856 ~ 1.501	-0.586	-1.150 ~ -0.022
AB-SB	4	18	0.666	<0.01	1.062a	0.785 ~ 1.436	-0.412	-1.041 ~ 0.217
	5	18	0.948	<0.01	1.473b	1.661 ~ 1.661	-1.256	-1.608 ~ -0.904
	8	18	0.679	<0.01	0.890a	0.662 ~ 1.197	-0.087	-0.581 ~ 0.407
	15	18	0.965	<0.01	1.015a	0.918 ~ 1.121	-0.296	-0.473 ~ -0.118
AB-LB	4	18	0.733	<0.01	1.366a	1.043 ~ 1.790	-1.025	-1.748 ~ -0.302
	5	18	0.830	<0.01	0.688a	0.554 ~ 0.854	0.332	0.0347 ~ 0.630
	8	18	0.866	<0.01	1.420a	1.172 ~ 1.722	-1.096	-1.605 ~ -0.587
	15	18	0.951	<0.01	1.030b	0.916 ~ 1.157	-0.388	-0.599 ~ -0.178

注: **AB.** 地上部总生物量; **RB.** 根生物量; **SB.** 茎生物量; **LB.** 叶生物量。同一列数据后小写字母不同表示不同种植年限之间斜率或截距差异显著( $P<0.05$ )。下同。

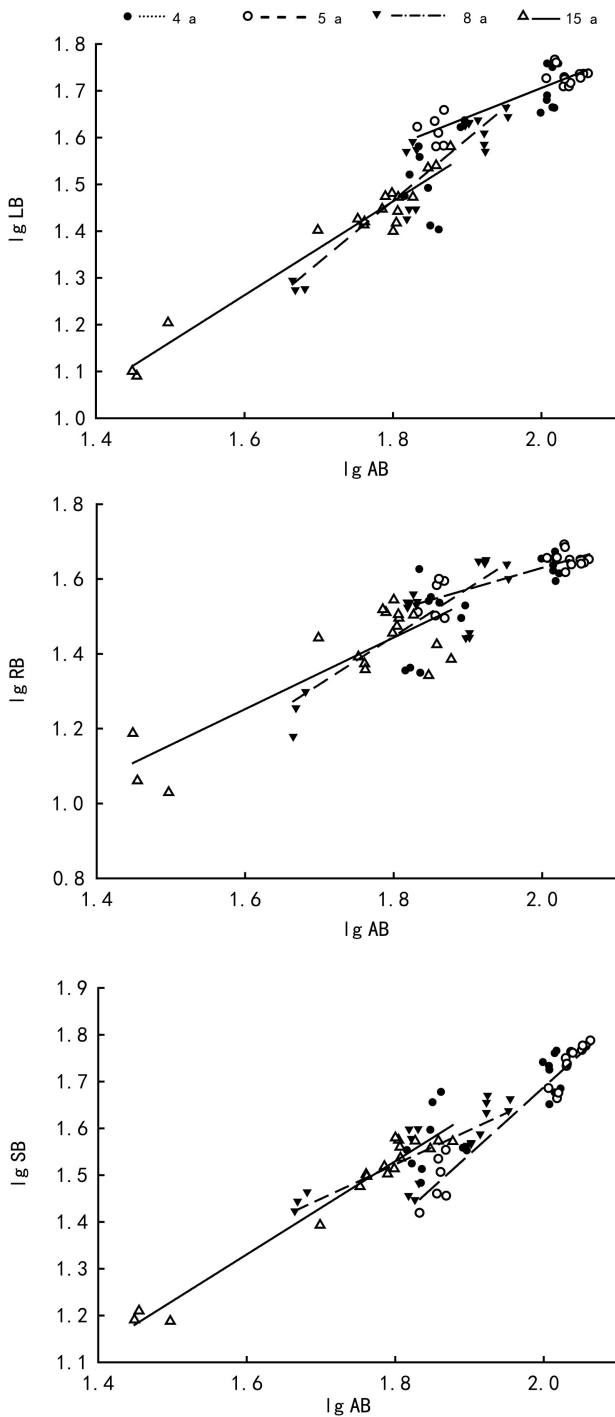
Note: **AB.** Total biomass of aboveground; **RB.** Biomass of root; **SB.** Biomass of stem; **LB.** Biomass of leaf. Different lowercase letters after the same column of data indicate significant differences in slope or intercept between different planting years( $P<0.05$ ). The same below.

用产物在各部分器官上分配积累的结果。随外界环境条件的改变,植物通过生物量的分配来适应环境,从而改变生物量的分配格局(Bonser & Aarssen, 2003; Cheplick et al., 2006)。本研究结果表明,在煤矸石山基质中,不同种植年限香根草积累能量的能力不同,随着种植年限的增加,生物量在香根草各器官的积累均呈先增加后减少的趋势。这与徐波等(2013)研究结果不一致,可能是随着种植年限的增加,香根草体内积累煤矸石基质中的重金属含量越来越多,当重金属含量在香根草体内达到一定量时,其重金属毒性抑制了香根草对营养元素的吸收,限制了香根草积累能量的能力(刘汉羽等,2017)。

植物地上和地下器官生物量的分配是通过通过对光照、养分和水分的竞争来实现的(黎磊等, 2011)。最优分配理论认为,光资源受到限制时,植物将增大地上器官生物量的分配;而当水分或

养分受限时,植物将增大根生物量的分配(杨昊天等,2013;范高华等,2017)。本研究中,随种植年限的增加,香根草地上和地下生物量分配基本保持不变,在30%和70%左右。这可能是因为本试验从第4年开始取样,而种植4a后煤矸石基质中的养分就已经得到初步改善,可以维持根的正常生长。徐德聪等(2012)研究结果表明随香根草种植时间的增加,基质中的养分、微生物及酶活性均得到改善。该研究结果一定程度上解释了本试验的上述结果。

茎、叶生物量及其分配比直接影响着植物的生长(Poorter et al., 2011)。本研究中,叶生物量分配比在种植年限5a时达最大,15a时达最小;而茎生物量在种植年限15a达最大,5a时达最小。钟泽兵等(2014)和王意锟等(2014)研究结果表明叶生物量的分配随着植物生活史的变化而变化,且在生长初期时叶生物量分配最高,而随后



AB. 地上部分总生物量; LB. 叶生物量; RB. 根生物量;  
SB. 茎生物量。

AB. Total biomass of aboveground; LB. Biomass of leaf; RB. Biomass of root; SB. Biomass of stem.

图 1 不同种植年限香根草地上部总生物量与根、茎、叶生物量之间的关系

Fig. 1 Relationship between total biomass of aboveground and biomasses of roots, stems and leaves of *Vetiveria zizanioides* in different planting years

逐渐减少,本研究结果与之类似。陈国鹏等(2016)研究结果表明茎生物量分配随着沙柳(*Salix psammophila*)的生长发育而减少,与本研究结果不一致,这可能是由于沙柳与香根草的生存环境导致的,沙柳生长在水分、养分缺乏的沙丘上,而本课题组陈超等(2016)研究结果表明,种植香根草基质中的重金属主要为 Cu、Zn,其含量均高于六盘水土壤重金属含量值,远高于中国土壤背景值,所以香根草生长在不仅水分、养分贫乏,而且重金属含量高的煤矸石山上。这种生物量及其分配特征,可能是不同种植年限香根草为适应煤矸石山基质环境而形成的一种生存策略(陈超等,2016)。

### 3.2 香根草各构件间生长特性的异速生长关系分析

在植物个体生长发育的过程中,植物个体不同器官的相互协调发展,是植物为维持其生长发育和繁殖的一个生活史对策。其在根、茎、叶等各器官中的分配方式受植株年龄、植物种类、植株大小、水分、温度及光照等外部环境的影响(梁艳等,2008;陈国鹏等,2016),最后以异速生长的形式表现出来。本研究结果表明,在 4 个种植年限中,根、茎、叶生物量与地上部总生物量之间均呈极显著正相关,并且在种植年限为 5 a 时,根、茎、叶生物量与地上部总生物量呈异速生长关系,其中茎的生长速度大于地上部总生物量生长速度,而根和叶生长速度小于地上部总生物量生长速度;在种植年限为 15 a 时,茎、叶生物量与地上部总生物量呈等速生长关系。这表明随种植年限的改变,植物的生长特性具有可塑性,而不同种植年限对植物可塑性的影响不同(刘汉羽等,2018)。植物体相关性状间的异速生长关系已通过代谢理论、分形的分配网络(或 WBE)模型等方法得到大量实测数据结果支撑和证明(Niklas & Enquist, 2001; Niklas, 2004)。异速生长不仅可以用相同年限而不同大小植株的静态数据来描述,也可以用不同年限植株的动态数据来描述(陆霞梅等,2007),能更好地分析和了解植物对异质环境的适应机制(李钰等,2013)。通常认为,异速生长关系与植株年龄、生活型、物种种类等无关(Niklas et al., 2004;韩文轩和方精云,2008)。然而,本研究的结果与这一结论不同。本研究中,4 个种植年限的香

表 4 不同种植年限香根草叶面积与生物量关系的 SMA 分析结果

Table 4 SMA analysis of the relationship between leaf area and biomass of *Vetiveria zizanioides* in different planting years

指标 Index	年限 Years (a)	样本数 Sample number (n)	决定系数 R square ( $R^2$ )	显著性 水平 P Significance level (P)	斜率 Slope	斜率 95% 置信区间 Slope 95% confidence interval	截距 Intercept	截距 95% 置信区间 Intercept 95% confidence interval
TLA-RB	4	18	0.248	0.035	0.825b	0.529~1.287	0.133	0.525~0.791
	5	18	0.308	0.0172	0.440a	0.287~0.675	0.845	0.503~1.1867
	8	18	0.067	0.299	0.987b	0.604~1.614	-0.268	-1.181~0.645
	15	18	0.123	0.153	1.070b	1.070~1.725	-0.549	-1.515~0.417
TLA-SB	4	18	0.111	0.177	0.695a	0.429~1.124	0.437	-0.166~1.040
	5	18	0.538	<0.01	0.950b	0.668~1.352	-0.013	-0.616~0.590
	8	18	0.021	0.570	0.586a	0.354~0.969	0.504	-0.051~1.060
	15	18	0.044	0.403	0.958b	0.583~1.575	-0.263	-1.167~0.641
TLA-LB	4	18	0.751	<0.01	0.894a	0.688~1.161	0.068	-0.342~0.479
	5	18	0.799	<0.01	0.444b	0.350~0.561	0.913	0.727~1.099
	8	18	0.317	0.015	0.934a	0.611~1.429	-0.153	-0.891~0.586
	15	18	0.035	0.459	0.972a	0.590~1.602	-0.355	-1.276~0.567
TLA-TB	4	18	0.464	<0.01	0.664a	0.455~0.970	0.938	0.491~1.385
	5	18	0.625	<0.01	0.564a	0.410~0.776	1.144	0.822~1.467
	8	18	0.147	0.115	0.730a	0.456~1.170	0.699	0.054~1.344
	15	18	0.071	0.284	0.947b	0.580~1.548	0.187	-0.693~1.068

注: TLA. 总叶面积; TB. 总生物量。

Note: TLA. Total leaf area; TB. Total biomass.

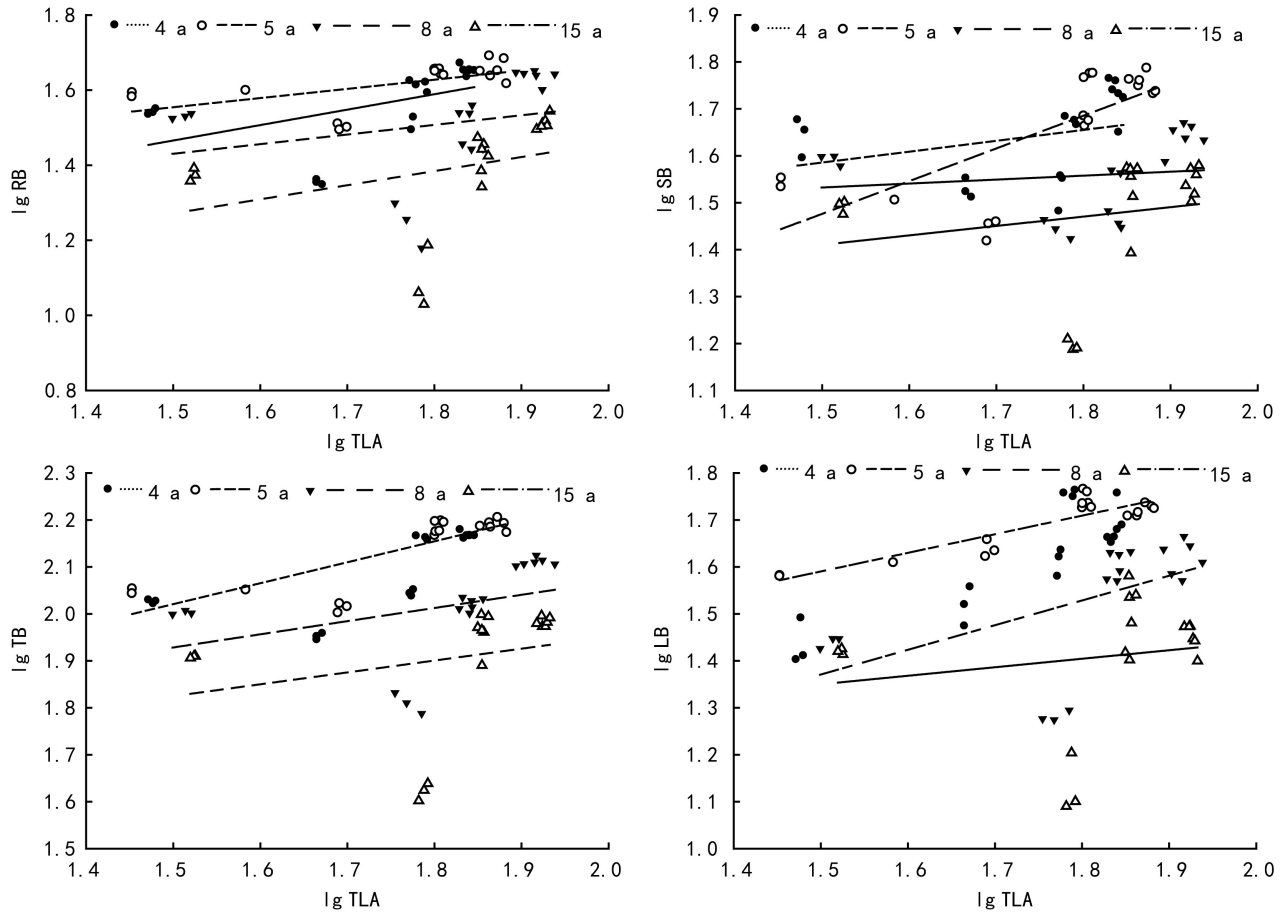
根草地上部总生物量与根生物量呈异速生长关系,这可能是由于种植年限导致煤矸石山基质发生变化所造成的。香根草叶面积是香根草在煤矸石山基质环境中物质和能量交换的基本指标之一,光合作用、呼吸速率等都与其有着密切的联系,且影响到香根草和外部环境的能量交换平衡(何炎红等,2005)。管道模型理论认为,叶片为满足对水分的需求,木质部的横截面积与它们所支持的叶面积呈正比,叶面积与茎干重、叶干重表现为等速生长关系(Pol et al., 1992)。本研究结果表明,在种植年限 5、15 a 时,香根草总叶面积与茎生物量呈等速生长关系;在种植年限 4、8 和 15 a 时,总叶面积与叶生物量呈等速生长关系,符合管道模型理论。

综上所述,由于种植年限及植物个体遗传特性的差异,香根草生物量分配及异速生长关系在

不同种植年限间存在较大差异,茎、叶生物量分配比在种植年限 5、15 a 高于种植年限 4、8 a,是香根草对煤矸石山这种特殊基质适应及生长发育的需要;种植年限 8 a 时,地上部总生物量和叶面积与根、叶生物量呈异速生长关系,是香根草在煤矸石山基质中特有的生长和资源分配方式,显示了其较强的环境适应能力。

#### 参考文献:

- BARRUTIA, EPEDE O, GARCIA-PLAZAOLA L, et al., 2008. Phytoextraction potential of two *Rumex acetosa* L. accessions collected from metalliferous and non-metalliferous sites: Effect of fertilization [J]. Chemosphere, 74 (2): 112-120.
- BONSER SP, AARSSSEN LW, 2003. Allometry and development in herbaceous plants: Functional responses of meristem allocation to light and nutrient availability [J]. Am J Bot, 90(3):



TLA. 总叶面积; AR. 根生物量; BS. 茎生物量; BL. 叶生物量; TB. 总生物量。

TLA. Total leaf area; AR. Biomass of root; BS. Biomass of stem; BL. Biomass of leaf; TB. Total biomass.

图2 不同种植年限香根草总叶面积与各器官生物量的关系

Fig. 2 Relationship between total leaf area and biomasses of different organs of *Vetiveria zizanioides* in different planting years

404-412.

CHEN C, LIU HY, HAO J, et al., 2016. Effect of different planting years of *Vetiveria zizanioides* L. on the distribution of heavy metals in coal spoil-heap soil [J]. *J Chin Coal Soc*, 41 (12): 3101-3107. [陈超, 刘汉羽, 郝俊, 等, 2016. 不同种植年限香根草对煤矸石山基质中重金属分布的影响 [J]. *煤炭学报*, 41(12): 3101-3107.]

CHEN FY, LI F, CHENG H, 1991. A study on introduction test of vetiver grass [J]. *Bull Soil Water Conserv*, 8 (3): 60-64. [陈法扬, 李凤, 程洪, 1991. 香根草引种试验研究 [J]. *水土保持通报*, 8(3): 60-64.]

CHEN GP, ZHAO WZ, HE SX, et al., 2016. Biomass allocation and allometric relationship in aboveground components of *Salix psammophila* branches [J]. *J Desert Res*, 36 (2): 357-363. [陈国鹏, 赵文智, 何世雄, 等, 2016. 沙柳 (*Salix psammophila*) 丛生枝生物量最优分配与异速生长 [J]. *中国沙漠*, 36(2): 357-363.]

LIU HY, CHENG W, HAO J, et al., 2017. Comparison on

total nitrogen content and its allocation proportion in different parts of *Vetiveria zizanioides* in different planting years and growth stages on coal spoil-heaps [J]. *J Plant Resour Environ*, 26(3): 78-83. [刘汉羽, 程巍, 郝俊, 等, 2017. 煤矸石山上不同种植年限和生长期香根草各部位全氮含量及其分配比例的比较 [J]. *植物资源与环境学报*, 26(3): 78-83.]

CHEPLICK GP, 2006. A modular approach to biomass allocation in an invasive annual (*Microstegium vimineum*; Poaceae) [J]. *Am J Bot*, 93(4): 539-545.

FAN GH, CUI Z, ZHANG JW, et al., 2017. Effects of population density on the biomass allocation and allometric growth of *Chenopodium acuminatum* [J]. *Acta Ecol Sin*, 37(15): 5080-5090. [范高华, 崔楨, 张金伟, 等, 2017. 密度对尖头叶藜生物量分配格局及异速生长的影响 [J]. *生态学报*, 37(15): 5080-5090.]

GUO DG, SHANGGUAN TL, BAI ZK, et al., 2011. The ecological responses of *Pinus tabulaeformis* forests in taiyue



- mountains of Shanxi to artificial harvesting [J]. *Acta Ecol Sin*, 31(12): 3296–3307. [郭东罡, 上官铁梁, 白中科, 等, 2011. 山西太岳山油松群落对采伐干扰的生态响应 [J]. *生态学报*, 31(12): 3296–3307.]
- GUO LK, 2017. The reconstruction of soil nutrients and heavy metal pollution of coal waste pilesoil profile in difference reclamation years [D]. Linfen: Shanxi Normal University. [郭李凯, 2017. 不同复垦年限煤矸山重构土壤养分和重金属污染状况研究 [D]. 临汾: 山西师范大学.]
- HAN WX, FANG JY, 2008. Review on the mechanism models of allometric scaling laws:  $3/4$  vs  $2/3$  power [J]. *Chin J Plant Ecol*, 32(4): 951–960. [韩文轩, 方精云, 2008. 幂指数异速生长机制模型综述 [J]. *植物生态学报*, 32(4): 951–960.]
- HAO J, ZHANG J, ZHANG PP, et al., 2013. A study on the biomass of herbs at the initial natural reclamation stage of plants in gangue fields [J]. *Acta Pratac Sin*, 22(4): 51–60. [郝婧, 张婕, 张沛沛, 等, 2013. 煤矸石场植被自然恢复初期草本植物生物量研究 [J]. *草业学报*, 22(4): 51–60.]
- HE YH, TIAN YL, YE DM, et al., 2005. Model of aboveground biomass of *Nitraria tangutorum* and relationship between biomass and leaf area [J]. *J Desert Res*, 25(4): 541–546. [何炎红, 田有亮, 叶冬梅, 等, 2005. 白刺地上生物量关系模型及其与叶面积关系的研究 [J]. *中国沙漠*, 25(4): 541–546.]
- JIAN SG, YANG ZY, JIAN WJ, 2004. Establishment and growth of *Lolium multiflorum* for phyto-remediation of Pb/Zn tailings [J]. *Chin J Appl Ecol*, 15(2): 255–260. [简曙光, 杨中艺, 简伟军, 2004. 多花黑麦草在酸化铅锌尾矿上的定植和生长 [J]. *应用生态学报*, 15(2): 255–260.]
- LI KH, HU YK, WANG X, et al., 2001. Relationships between aboveground biomass and environmental factors along an altitude gradient of alpine grassland [J]. *Chin J Appl Ecol*, 18(9): 2019–2024. [李凯辉, 胡玉昆, 王鑫, 等, 2007. 不同海拔梯度高寒草地地上生物量与环境因子关系 [J]. *应用生态学报*, 18(9): 2019–2024.]
- LI L, ZHOU DW, SHENG LX, 2011. Density dependence-determined plant biomass allocation pattern [J]. *Chin J Ecol*, 30(8): 1579–1589. [黎磊, 周道玮, 盛连喜, 2011. 密度制约决定的植物生物量分配格局 [J]. *生态学杂志*, 30(8): 1579–1589.]
- LI XD, ZHANG CP, FU H, 2012. Seasonal dynamics of root-shoot ratio and the effect of factors in grazed and ungrazed grasslands of the Loess Plateau [J]. *Acta Pratac Sin*, 21(4): 307–312. [李旭东, 张春平, 傅华, 2012. 黄土高原典型草原草地根冠比的季节动态及其影响因素 [J]. *草业学报*, 21(4): 307–312.]
- LI Y, ZHAO CZ, HOU ZJ, et al., 2013. Body size and stem-and leaf allometry of *Stellera chamaejasme* in degraded alpine grassland [J]. *Chin J Ecol*, 32(2): 241–246. [李钰, 赵成章, 侯兆疆, 等, 2013. 高寒退化草地狼毒种群个体大小与茎、叶的异速生长 [J]. *生态学杂志*, 32(2): 241–246.]
- LIANG F, TIAN CY, TIAN MM, et al., 2013. Effect of nitrogen topdressing on the growth of *Suaeda salsa* and the improvement of saline soil [J]. *Acta Pratac Sin*, 22(3): 234–240. [梁飞, 田长彦, 田明明, 等, 2013. 追施氮肥对盐地碱蓬生长及其改良盐渍土效果研究 [J]. *草业学报*, 22(3): 234–240.]
- LIANG Y, ZHANG XC, CHEN XL, 2008. Individual size and resource allocation in perennial *Gentiana* [J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 28(12): 2400–2407. [梁艳, 张小翠, 陈学林, 2008. 多年生龙胆属植物个体大小与花期资源分配研究 [J]. *西北植物学报*, 28(12): 2400–2407.]
- LIU HY, HAO J, CHEN C, et al., 2018. The morphological foraging behavior of *Vetiveria zizanioides* sown in different years in coal spoil-heaps soils [J]. *Grassl Turf*, 6(1): 57–62. [刘汉羽, 郝俊, 陈超, 等, 2018. 不同种植年限香根草在煤矸石山中的形态觅食行为 [J]. *草原与草坪*, 6(1): 57–62.]
- LIU WG, LI LX, XIE HR, et al., 2015. Effect of soil bulk density on root morphology and biomass of vetiver grass seedlings [J]. *Acta Pratac Sin*, 24(4): 214–220. [刘晚荷, 李良贤, 谢海容, 等, 2015. 土壤容重对野生香根草幼苗根系形态及其生物量的影响 [J]. *草业学报*, 24(4): 214–220.]
- LU XM, ZHOU CF, AN SQ, et al., 2007. Phenotypic plasticity, allometry and invasiveness of plants [J]. *Chin J Ecol*, 26(9): 1438–1444. [陆霞梅, 周长芳, 安树青, 等, 2007. 植物的表型可塑性、异速生长及其入侵能力 [J]. *生态学杂志*, 26(9): 1438–1444.]
- MCCARTHY MC, ENQUIST BJ, 2010. Consistency between an allometric approach and optimal partitioning theory in global patterns of plant biomass allocation [J]. *Funct Ecol*, 21(4): 713–720.
- NIKLAS KJ, 2004. Plant allometry: Is there a grand unifying theory? [J]. *Biol Rev*, 79(4): 871–889.
- NIKLAS KJ, 2005. Modelling below-and above-ground biomass for non-woody and woody plants [J]. *Ann Bot*, 95(2): 315–321.
- NIKLAS KJ, ENQUIST BJ, 2001. Invariant scaling relationships for interspecific plant biomass production rates and body size [J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 98(5): 2922–2927.
- PING XY, JIA BR, YUAN WP, et al., 2007. Biomass allocation of *Leymus chinensis* population: A dynamic simulation study [J]. *Chin J Appl Ecol*, 18(12): 2699–2704. [平晓燕, 贾丙瑞, 袁文平, 等, 2007. 羊草种群生物量分配动态模拟 [J]. *应用生态学报*, 18(12): 2699–2704.]
- POORTER H, NIKLAS KJ, REICH PB, et al., 2011. Biomass allocation to leaves, stems and roots: Meta-analyses of interspecific variation and environmental control [J]. *New*

- Phytol, 193(1): 30-50.
- ROL A, ENNOS, 1992. Plant biomechanics: An engineering approach to plantform and function by K. J. Niklas [J]. *Trend Ecol Evol*, 68(6): 261-312.
- SHU WS, XIA HP, ZHANG ZQ, et al., 2002. Use of vetiver and three other grasses for revegetation of Pb/Zn mine tailings: Field experiment [J]. *Int J Phytoremed*, 4(1): 47-57.
- WANG XM, WANG YM, CHU ZX, et al., 2018. Effects of coal gangue addition on the growth and physio-ecological characteristics of *Vetiveria zizanioides* L. growing in copper mine tailings [J]. *J Soil Water Conserv*, 32(2): 329-334. [王兴明, 王运敏, 储昭霞, 等, 2018. 矸石添加对铜尾矿中香根草生长及生理生态的影响 [J]. *水土保持学报*, 32(2): 329-334.]
- WANG Y, XU WT, XIONG GM, et al., 2017. Biomass allocation patterns of *Loropetalum chinense* [J]. *Chin J Plant Ecol*, 41(1): 105-114. [王杨, 徐文婷, 熊高明, 等, 2017. 檵木生物量分配特征 [J]. *植物生态学报*, 41(1): 105-114.]
- WANG YK, JIN AW, ZHU QG, et al., 2014. Effects of fertilization on the relations of diameter at breast height between different-aged ramets of *Phyllostachys edulis* population [J]. *Chin J Plant Ecol*, 38(3): 289-297. [王意锷, 金爱武, 朱强根, 等, 2014. 施肥对毛竹种群不同年龄分株间胸径大小关系的影响 [J]. *植物生态学报*, 38(3): 289-297.]
- WEI LY, YUAN WY, YOU YM, et al., 2009. Dynamic changes of the aboveground biomass of several forages in karst rocky desertification area [J]. *Pratac Sci*, 26(10): 73-79. [韦兰英, 袁维圆, 尤业明, 等, 2009. 岩溶石漠化区牧草植物地上部分生物量的动态变化 [J]. *草业科学*, 26(10): 73-79.]
- XIA HP, AO HX, LIU SZ, 2002a. Study on the benefit of vetiver ecological engineering in highway slope protection [J]. *Pratac Sci*, 1(1): 52-56. [夏汉平, 敖惠修, 刘世忠, 2002a. 香根草生态工程应用于公路护坡的效益研究 [J]. *草业科学*, 1(1): 52-56.]
- XIA HP, AO HX, LIU SZ, et al., 2002b. Study on restoration of garbage landfill and phytoremedy to garbage leachate by vetiver grass planting [J]. *Guangzhou Environ Sci*, 5(1): 34-37. [夏汉平, 敖惠修, 刘世忠, 2002b. 应用香根草对垃圾场进行植被恢复及净化垃圾污水的研究 [J]. *广州环境科学*, 8(1): 34-37.]
- XIA HP, SHU WS, 2001. Resistance to and uptake of heavy metals by *Vetiveria zizanioides* L. and *Paspalum notatum* from lead/zinc mine tailings [J]. *Acta Ecol Sin*, 21(7): 1121-1129. [夏汉平, 束文圣, 2001. 香根草和百喜草对铅锌尾矿重金属的抗性与吸收差异研究 [J]. *生态学报*, 21(7): 1121-1129.]
- XU B, WANG JN, SHI FS, et al., 2013. Adaptation of biomass allocation patterns of wild *Fritillaria unibracteata* to alpine environment in the eastern Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Chin J Plant Ecol*, 37(3): 187-196. [徐波, 王金牛, 石福孙, 等, 2013. 青藏高原东缘野生暗紫贝母生物量分配格局对高山生态环境的适应 [J]. *植物生态学报*, 37(3): 187-196.]
- XU DC, ZHAN J, CHEN Z, et al., 2012. Effects of *Vetiveria zizanioides* L. growth on chemical and biological properties of copper mine tailing wastelands [J]. *Acta Ecol Sin*, 32(18): 5683-5691. [徐德聪, 詹婧, 陈政, 等, 2012. 种植香根草对铜尾矿废弃地基质化学和生物学性质的影响 [J]. *生态学报*, 32(18): 5683-5691.]
- YAN JC, LIANG CZ, FU XY, et al., 2013. The responses of annual plant traits to rainfall variation in steppe and desert regions [J]. *Acta Pratac Sin*, 22(1): 68-76. [闫建成, 梁存柱, 付晓玥, 等, 2013. 草原与荒漠一年生植物性状对降水变化的响应 [J]. *草业学报*, 22(1): 68-76.]
- YANG B, LAN CY, SHU WS, 2005. Growth and heavy metal accumulation of *Vetiveria zizanioides* grown on lead/zinc mine tailings [J]. *Acta Ecol Sin*, 25(1): 45-50. [杨兵, 蓝崇钰, 束文圣, 2005. 香根草在铅锌尾矿上生长及其对重金属的吸收 [J]. *生态学报*, 25(1): 45-50.]
- YANG HT, LI XR, LIU LC, et al., 2013. Biomass allocation patterns of four shrubs in desert grassland [J]. *J Desert Res*, 33(5): 1340-1348. [杨昊天, 李新荣, 刘立超, 等, 2013. 荒漠草地4种灌木生物量分配特征 [J]. *中国沙漠*, 33(5): 1340-1348.]
- ZHANG WH, LI H, LI JX, et al., 2003. Individual and modular biomass dynamics of *Kingdonia uniflora* population in Qinling Mountain [J]. *Chin J Appl*, 14(4): 530-534. [张文辉, 李红, 李景侠, 等, 2003. 秦岭独叶草种群个体和构件生物量动态研究 [J]. *应用生态学报*, 14(4): 530-534.]
- ZHONG ZB, ZHOU GY, YANG LC, et al., 2014. The biomass allocation patterns of desert shrub vegetation in the Qaidam Basin, Qinghai, China [J]. *J Desert Res*, 34(4): 1042-1048. [钟泽兵, 周国英, 杨路存, 等, 2014. 柴达木盆地几种荒漠灌丛植被的生物量分配格局 [J]. *中国沙漠*, 34(4): 1042-1048.]
- ZHOU SY, 2017. Tolerance and phytoremediation potential of three *Leguminous* on copper tailings [D]. Nanchang: Jiangxi University of Finance and Economics. [周少燕, 2017. 三种豆科植物对铜尾矿矿砂的抗性修复潜力研究 [D]. 南昌: 江西财经大学.]