

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

刘汉羽^a, 程巍^{a,b,①}, 郝俊^a, 陈超^a, 汪瑞^a

(贵州大学: a. 动物科学学院, b. 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, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 为了探明香根草 [*Vetiveria zizanioides* (Linn.) Nash] 在尾矿生态系统恢复中的作用机制, 以贵州省六盘水市大河煤矿煤矸石山种植 3、6、8 和 13 a 的香根草为研究对象, 分别在返青期、快速生长期、成熟期和枯黄期对香根草根、茎、叶和全株的全氮含量及其分配比例进行了比较。结果表明: 在种植 3、6、8 和 13 a, 香根草根、茎、叶和全株的全氮含量均在快速生长期最高, 并显著高于其余生长期。随种植年限增加, 返青期、成熟期和枯黄期根的全氮含量, 枯黄期茎的全氮含量以及返青期全株的全氮含量均逐渐升高; 返青期茎和叶的全氮含量逐渐降低; 快速生长期的全氮含量, 快速生长期和成熟期茎的全氮含量以及快速生长期、成熟期和枯黄期叶和全株的全氮含量先升高后降低, 并在种植 8 a 最高。在种植 6、8 和 13 a, 快速生长期根的全氮含量分配比例最低, 而快速生长期叶的全氮含量分配比例却最高。随种植年限增加, 返青期根的全氮含量分配比例逐渐升高, 而返青期茎和叶的全氮含量分配比例却逐渐降低; 在种植 8 a, 快速生长期、成熟期和枯黄期根的全氮含量分配比例以及枯黄期茎的全氮含量分配比例最低或较低, 而快速生长期和成熟期茎的全氮含量分配比例以及快速生长期、成熟期和枯黄期叶的全氮含量分配比例最高。在相同种植年限和生长期, 香根草茎的全氮含量及其分配比例明显低于根和叶; 总体来看, 返青期、成熟期和枯黄期根的全氮含量及其分配比例高于叶, 而快速生长期根的全氮含量及其分配比例却低于叶。研究结果显示: 随着种植年限增加和生长期推移, 香根草能够合理分配氮素资源, 使其在煤矸石山立足, 据此认为, 香根草可用于煤矸石山的生态恢复和植被重建, 但种植年限不宜超过 8 a。

关键词: 香根草; 煤矸石山; 种植年限; 生长期; 部位; 氮利用

中图分类号: Q945.3; S543+.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-7895(2017)03-0078-06

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2017.03.10

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 LIU Hanyu^a, CHENG Wei^{a,b,①}, HAO Jun^a, CHEN Chao^a, WANG Rui^a (Guizhou University: a. College of Animal Science, b. Key Laboratory of Plant Resources Conservation and Germplasm Innovation in Mountainous Region, Ministry of Education, Guiyang 550025, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2017, 26(3): 78-83, 108

Abstract: To figure out the action mechanism of *Vetiveria zizanioides* (Linn.) Nash in ecological restoration of tailings, *V. zizanioides* planted on coal spoil-heaps of Dahe Coal Mine in Liupanshui City of Guizhou Province for 3, 6, 8, and 13 a were used as research objects, total nitrogen content and its allocation proportion in root, stem, leaf, and whole plant of *V. zizanioides* at returning green stage, rapid growth stage, mature stage, and withered yellow stage were compared. The results show that in planting for 3, 6, 8, and 13 a, total nitrogen content in root, stem, leaf, and whole plant of *V. zizanioides* is the highest at rapid growth stage, and is significantly higher than that at other growth stages. With increasing

收稿日期: 2017-01-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31500451); 贵州省科学技术基金项目(黔科合J字[2014]2055); 贵州省科技合作计划项目(黔科合LH字[2015]7667); 贵州省教育厅自然科学研究项目(黔教合KY字[2014]303); 贵州大学引进人才科研项目(贵大人基合字[2013]29); 贵州大学研究生创新基金项目(研农2017005)

作者简介: 刘汉羽(1992—), 女, 土家族, 贵州贵阳人, 硕士研究生, 主要从事煤矸石山生态恢复方面的研究。

①通信作者 E-mail: wcheng@gzu.edu.cn

of planting year, total nitrogen content in root at returning green stage, mature stage, and withered yellow stage, that in stem at withered yellow stage, and that in whole plant at returning green stage all increase gradually; that in stem and leaf at returning green stage decreases gradually; while that in root at rapid growth stage, that in stem at rapid growth stage and mature stage, and that in leaf and whole plant at rapid growth stage, mature stage, and withered yellow stage increase firstly and then decrease, and are the highest in planting for 8 a. In planting for 6, 8, and 13 a, the allocation proportion of total nitrogen content in root at rapid growth stage is the lowest, while that in leaf at rapid growth stage is the highest. With increasing of planting year, the allocation proportion of total nitrogen content in root at returning green stage increases gradually, while that in stem and leaf at returning green stage decreases gradually. In planting for 8 a, the allocation proportion of total nitrogen content in root at rapid growth stage, mature stage, and withered yellow stage, and that in stem at withered yellow stage are the lowest or relatively low, while that in stem at rapid growth stage and mature stage, and that in leaf at rapid growth stage, mature stage, and withered yellow stage are the highest. In the same planting year and growth stage, total nitrogen content and its allocation proportion in stem of *V. zizanioides* are obviously lower than those in root and leaf. In general, total nitrogen content and its allocation proportion in root at returning green stage, mature stage, and withered yellow stage are higher than those in leaf, while those in root at rapid growth stage are lower than those in leaf. It is suggested that with increasing of planting year and prolonging of growth stage, *V. zizanioides* can reasonably allot nitrogen resource to adapt to coal spoil-heaps, accordingly, *V. zizanioides* can be used for ecological restoration and revegetation of coal spoil-heaps, but its planting year should not exceed 8 a.

Key words: *Vetiveria zizanioides* (Linn.) Nash; coal spoil-heaps; planting year; growth stage; part; nitrogen utilization

煤矸石是在煤矿掘进、回采、洗煤等过程中排放出来的一种含碳量低、比煤坚硬的黑色岩石^[1],具有立地条件恶劣、养分贫乏、植物生长困难、严重污染周围环境等特点^[2]。张明亮等^[3]的研究结果表明:煤矸石周边土壤受到重金属污染,且表层土壤的重金属含量最高,增大了重金属危害人体健康的风险。目前,对煤矸石山的生态修复已经成为研究尾矿治理的热点之一。

香根草 [*Vetiveria zizanioides* (Linn.) Nash] 又名岩兰草,隶属于香根草属 (*Vetiveria* Bory), 为多年生草本植物,具有适应能力强、生长繁殖快、根系发达、耐旱、耐瘠等特点,被誉为“世界上具有最长根系的草本植物”。相关研究结果表明:香根草能够在生境十分恶劣的尾矿煤矸石山上正常生长,且对重金属污染土壤具有较好的净化和修复能力^[4]。目前,关于香根草对尾矿煤矸石山的生态恢复研究主要集中在抗逆生理^[5]、水土保持^[6]和响应重金属胁迫^[7]等方面,而关于香根草对重金属胁迫环境主动适应机制的研究却鲜有报道。

养分贫乏是煤矸石山最主要的限制因子之一^[8]。在自然条件下,氮素贫乏通常是生态系统生产力的主要限制因子之一^[9-10]。武冬梅等^[11]认为,煤矸石山的有效氮和有效活性物质含量均极其贫乏,

是限制植物生长的首要养分因子。鉴于此,本研究拟从煤矸石山种植的香根草的养分利用(营养学)角度出发,将时间因子(即种植年限和生长期)与生态学相结合,从一个新角度来探讨香根草对煤矸石山生态恢复的作用机制。

为此,作者以贵州省六盘水市大河煤矿煤矸石山上种植 3、6、8 和 13 a 的香根草为研究对象,对返青期、快速生长期、成熟期和枯黄期香根草根、茎、叶和全株的全氮含量及其分配比例进行比较分析,以期探究不同种植年限和生长期香根草的氮利用策略,从而从氮利用角度阐释香根草作为煤矸石山生态恢复先锋植物的营养学机制;在此基础上,明确种植年限对香根草在煤矸石山生长的影响。

1 研究地概况和研究方法

1.1 研究地概况

研究地位于贵州省六盘水市大河煤矿,具体地理坐标为东经 104°33' ~ 105°10'、北纬 26°26' ~ 26°64'。该区域地势为西北高、东南低,平均海拔 1 600 m;属亚热带湿润季风气候,年均温 12.2 °C,最热月(7月)均温 19.6 °C,最冷月(1月)均温 2.9 °C,年均降水量 1 234.7 mm,年均日照时数 1 253 h,无霜期 242 d。

区域内的土壤类型主要为山地黄棕壤、黄壤和山地灌丛草甸土等。

1.2 研究方法

1.2.1 取样及预处理方法 于2015年4月(返青期)、6月(快速生长期)、8月(成熟期)和10月(枯黄期),在大河煤矿煤矸石山上分别选择种植3、6、8和13 a 香根草的地块作为样地,样地面积分别约为300、200、80和100 m²,采用五点式取样法^[12]在各样地内取样。采样时,每个样地各取样点均选取1株香根草样株,编号后,贴好标签,带回实验室,共采集样株80株。

在每个样地同一时间采集的5株样株中选择3株大小一致的样株,清除杂质后每个单株分成根、茎、叶3个部分;于105℃杀青30 min,并于70℃烘干至恒质量;将单株的根、茎和叶干样粉碎,过筛(孔径0.5 mm),分别装入自封袋中,备用。

1.2.2 全氮含量测定 分别取各部位干样粉末约1 g,精密称量后,参照鲁如坤^[13]的方法,经H₂SO₄-H₂O₂消煮后,使用Kjeltec™ 8100凯氏定氮仪(丹麦Foss公司)测定单株根、茎、叶的全氮含量,重复测定3次。根据测定结果计算全株的全氮含量及根、茎、叶的全氮含量分配比例。

1.3 数据处理和统计分析

采用EXCEL 2003、SPSS 18.0和SigmaPlot 10.0统计分析软件对实验数据进行处理、分析和作图;采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和邓肯氏多重比较(Duncan's multiple comparison)对相关数据进行差异显著性分析。

2 结果和分析

2.1 不同种植年限和生长期香根草各部位全氮含量的比较

在种植3、6、8和13 a,煤矸石山上返青期、快速生长期、成熟期和枯黄期香根草根、茎、叶和全株的全氮含量见表1。

2.1.1 不同种植年限的比较 由表1可见:在返青期,香根草根的全氮含量随种植年限增加呈逐渐升高的趋势,且种植13 a根的全氮含量显著($P<0.05$)高于种植3和6 a;而茎和叶的全氮含量则随种植年限增加呈逐渐降低的趋势,且各种种植年限茎和叶的全氮含量无显著差异。在快速生长期,香根草根、茎和叶

的全氮含量均随种植年限增加呈先升高后降低的趋势,并在种植8 a达到最高值。其中,种植8 a根的全氮含量显著高于种植3 a,但与种植6和13 a的差异不显著;而种植8 a茎和叶的全氮含量显著高于种植3、6和13 a。在成熟期,香根草根的全氮含量随种植年限增加呈逐渐升高的趋势,且在种植6、8和13 a间无显著差异,但均显著高于种植3 a;茎和叶的全氮含量随种植年限增加呈先升高后降低的趋势,并在种植8 a达到最高值,总体显著高于种植3、6和13 a。在枯黄期,香根草根和茎的全氮含量随种植年限增加呈逐渐升高的趋势,且在各种种植年限间无显著差异,仅种植3 a根的全氮含量显著低于种植6、8和13 a;而叶的全氮含量则随种植年限增加呈先升高后降低的趋势,并在种植8 a达到最高值,显著高于种植3、6和13 a。

由表1还可见:在种植3 a,返青期、快速生长期、成熟期和枯黄期香根草全株的全氮含量均达到最低值,分别为9.78、41.24、9.72和9.03 g·kg⁻¹。在返青期,香根草全株的全氮含量随种植年限增加呈持续升高的趋势,而快速生长期、成熟期和枯黄期全株的全氮含量均随种植年限增加呈先升高后降低的趋势,并在种植8 a达到最高值(分别为110.33、14.12和11.98 g·kg⁻¹),且显著高于种植3 a。

2.1.2 不同生长期的比较 由表1可见:在种植3、6、8和13 a,香根草根、茎和叶的全氮含量随生长期推移的变化规律大致相同,总体表现为在快速生长期急剧升高、在成熟期快速降低、在枯黄期缓慢降低的趋势。不同种植年限香根草根、茎和叶的全氮含量均在快速生长期达到最高值,且显著高于返青期、成熟期和枯黄期,而最低值则多出现在枯黄期。

由表1还可见:在种植3、6、8和13 a,快速生长期香根草全株的全氮含量达到最高值,分别为41.24、95.20、110.33和87.07 g·kg⁻¹,显著高于返青期、成熟期和枯黄期。不同种植年限香根草全株的全氮含量随生长期推移的变化规律与根、茎和叶的全氮含量变化一致,均表现为在快速生长期急剧升高、在成熟期快速降低、在枯黄期缓慢降低的趋势。其中,在种植8 a,香根草全株的全氮含量变化幅度最大,其在快速生长期较返青期升高了9.19倍,在成熟期较快速生长期降低了87.20%;在种植3 a,香根草全株的全氮含量变化幅度最小,其在快速生长期较返青期仅升高了3.22倍,在成熟期较快速生长期降低

了 76.43%。

2.1.3 不同部位的比较 由表 1 可见:在相同种植年限和生长期,香根草茎的全氮含量明显低于根和叶。在种植 3 a,各生长期香根草根的全氮含量均高于叶;在种植 6 和 8 a,返青期和枯黄期根的全氮含量

也高于叶,而快速生长期和成熟期根的全氮含量却低于叶;在种植 13 a,返青期、成熟期和枯黄期根的全氮含量均高于叶,而快速生长期根的全氮含量却低于叶。

表 1 煤矸石山上不同种植年限和生长期香根草根、茎、叶和全株全氮含量的比较 ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

Table 1 Comparison on total nitrogen content in root, stem, leaf, and whole plant of *Vetiveria zizanioides* (Linn.) Nash in different planting years and growth stages on coal spoil-heaps ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

种植年限/a Planting year	不同生长期根的全氮含量/g·kg ⁻¹ Total nitrogen content in root at different growth stages			
	返青期 Returning green stage	快速生长期 Rapid growth stage	成熟期 Mature stage	枯黄期 Withered yellow stage
3	4.46±0.28Cb	18.72±1.12Ba	4.30±0.35Bb	3.99±0.52Bb
6	5.27±0.30BCb	36.91±2.48Aa	5.52±0.49Ab	5.39±0.54Ab
8	5.88±0.42ABb	37.29±0.47Aa	5.61±0.35Ab	5.49±0.27Ab
13	6.76±0.73Ab	35.23±0.89Aa	6.23±0.66Ab	5.93±0.53Ab

种植年限/a Planting year	不同生长期茎的全氮含量/g·kg ⁻¹ Total nitrogen content in stem at different growth stages			
	返青期 Returning green stage	快速生长期 Rapid growth stage	成熟期 Mature stage	枯黄期 Withered yellow stage
3	1.81±0.03Ab	7.44±1.21Ca	1.76±0.08Bb	1.60±0.08Ab
6	1.79±0.04Ab	15.67±1.31Ba	2.29±0.35Bb	1.66±0.02Ab
8	1.75±0.01Ac	22.28±0.92Aa	2.85±0.21Ab	1.67±0.36Ac
13	1.69±0.12Ab	14.34±0.60Ba	2.29±0.37Bb	1.73±0.28Ab

种植年限/a Planting year	不同生长期叶的全氮含量/g·kg ⁻¹ Total nitrogen content in leaf at different growth stages			
	返青期 Returning green stage	快速生长期 Rapid growth stage	成熟期 Mature stage	枯黄期 Withered yellow stage
3	3.51±0.24Ab	15.08±1.00Da	3.65±0.09Cb	3.44±0.23BCb
6	3.49±0.27Ac	42.62±1.45Ba	5.12±0.57ABb	3.99±0.26Bbc
8	3.20±0.30Ac	50.76±0.69Aa	5.65±0.17Ab	4.83±0.47Ab
13	3.19±0.50Ab	37.50±1.99Ca	4.93±0.23Bb	2.93±0.32Cb

种植年限/a Planting year	不同生长期全株的全氮含量/g·kg ⁻¹ Total nitrogen content in whole plant at different growth stages			
	返青期 Returning green stage	快速生长期 Rapid growth stage	成熟期 Mature stage	枯黄期 Withered yellow stage
3	9.78±0.05Cb	41.24±1.54Da	9.72±0.48Bb	9.03±0.38Cb
6	10.54±0.54Bc	95.20±2.96Ba	12.93±0.81Ab	11.03±0.64ABbc
8	10.83±0.50Bc	110.33±0.91Aa	14.12±0.18Ab	11.98±0.60Ac
13	11.65±0.26Ac	87.07±0.91Ca	13.45±0.51Ab	10.58±0.37Bc

¹⁾ 同列中不同的大写字母表示相同生长期同一部位全氮含量在不同种植年限间差异显著 ($P<0.05$) Different capitals in the same column indicate the significant difference in total nitrogen content in the same part and growth stage among different planting years ($P<0.05$); 同行中不同的小写字母表示相同种植年限同一部位全氮含量在不同生长期间差异显著 ($P<0.05$) Different lowercases in the same row indicate the significant difference in total nitrogen content in the same part and planting year among different growth stages ($P<0.05$).

2.2 不同种植年限和生长期香根草各部位全氮含量分配比例的比较

在种植 3、6、8 和 13 a,煤矸石山上返青期、快速生长期、成熟期和枯黄期香根草根、茎和叶的全氮含量分配比例见表 2。

2.2.1 不同种植年限的比较 由表 2 可见:在返青期,香根草根的全氮含量分配比例随种植年限增加呈逐渐升高的趋势,且种植 13 a 根的全氮含量分配比例显著 ($P<0.05$) 高于种植 3 和 6 a;而茎和叶的全氮

含量分配比例则随种植年限增加呈逐渐降低的趋势,且种植 13 a 茎和叶的全氮含量分配比例显著低于种植 3 a,略低于种植 8 a。在快速生长期和成熟期,香根草根的全氮含量分配比例随种植年限增加呈先降低后升高的趋势,并在种植 8 a 达到最低值;茎的全氮含量分配比例随种植年限增加呈“降低—升高—降低”的趋势;叶的全氮含量分配比例随种植年限增加呈先升高后降低的趋势,并在种植 8 a 达到最高值。其中,种植 8 a 快速生长期和成熟期根的全氮含

量分配比例显著低于种植3、6和13 a;种植8 a快速生长期茎的全氮含量分配比例显著高于种植6和13 a,而种植8 a成熟期茎的全氮含量分配比例仅略高于种植3、6和13 a;种植8 a快速生长期叶的全氮含量分配比例略高于种植6和13 a,但显著高于种植3 a,而种植8 a成熟期叶的全氮含量分配比例仅略高于种植3、6和13 a。在枯黄期,香根草根的全氮含量分配比例随种植年限增加呈“升高—降低—升高”的

趋势,并在种植13 a达到最高值,显著高于种植3、6和8 a;茎的全氮含量分配比例随种植年限增加呈先降低后升高的趋势,并在种植8 a达到最低值,仅略低于种植3、6和13 a;而叶的全氮含量分配比例则随种植年限增加呈“降低—升高—降低”的趋势,并在种植8 a达到最高值,显著高于种植13 a,但略高于种植3和6 a。

表2 煤矿石山上不同种植年限和生长期香根草根、茎和叶全氮含量分配比例的比较($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

Table 2 Comparison on allocation proportion of total nitrogen content in root, stem, and leaf of *Vetiveria zizanioides* (Linn.) Nash in different planting years and growth stages on coal spoil-heaps ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

种植年限/a Planting year	不同生长期根的全氮含量分配比例/% Allocation proportion of total nitrogen content in root at different growth stages			
	返青期 Returning green stage	快速生长期 Rapid growth stage	成熟期 Mature stage	枯黄期 Withered yellow stage
3	45.59±2.65Ca	45.37±1.07Aa	44.25±1.58Aa	44.07±4.15Ba
6	49.95±0.31BCa	38.76±2.00Bc	42.65±0.60ABb	48.74±2.57Ba
8	54.26±2.43ABa	33.80±0.29Cd	39.74±1.19Cc	45.82±1.23Bb
13	57.96±5.25Aa	40.47±1.47Bb	46.28±3.24Ab	55.92±3.10Aa
种植年限/a Planting year	不同生长期茎的全氮含量分配比例/% Allocation proportion of total nitrogen content in stem at different growth stages			
	返青期 Returning green stage	快速生长期 Rapid growth stage	成熟期 Mature stage	枯黄期 Withered yellow stage
3	18.52±0.33Aa	18.03±2.69ABa	18.13±0.84Aa	17.81±1.56Aa
6	17.00±1.15ABa	16.44±0.88Ba	17.78±3.10Aa	15.08±0.84Aa
8	16.11±0.82BCb	20.19±0.82Aa	20.18±0.92Aa	13.88±2.62Ab
13	14.57±1.35Ca	16.48±0.77Ba	17.07±3.31Aa	16.35±2.98Aa
种植年限/a Planting year	不同生长期叶的全氮含量分配比例/% Allocation proportion of total nitrogen content in leaf at different growth stages			
	返青期 Returning green stage	快速生长期 Rapid growth stage	成熟期 Mature stage	枯黄期 Withered yellow stage
3	35.90±2.56Aa	36.59±2.77Ba	37.62±0.92Aa	38.12±3.27Aa
6	33.06±0.86ABc	44.80±2.11Aa	39.57±2.66Ab	36.18±2.04Abc
8	29.56±2.30Bc	46.01±2.11Aa	40.08±2.03Ab	40.29±3.63Ab
13	27.47±4.57Bb	43.05±1.75Aa	36.66±0.47Aa	27.74±3.12Bb

¹⁾ 1) 同列中不同的大写字母表示相同生长期同一部位全氮含量分配比例在不同种植年限间差异显著 ($P<0.05$) Different capitals in the same column indicate the significant difference in the allocation proportion of total nitrogen content in the same part and growth stage among different planting years ($P<0.05$); 同行中不同的小写字母表示相同种植年限同一部位全氮含量分配比例在不同生长期间差异显著 ($P<0.05$) Different lowercases in the same row indicate the significant difference in the allocation proportion of total nitrogen content in the same part and planting year among different growth stages ($P<0.05$).

2.2.2 不同生长期的比较 由表2可见:在种植3 a,随生长期推移,香根草根的全氮含量分配比例呈逐渐降低的趋势,叶的全氮含量分配比例呈逐渐升高的趋势;并且,根和叶的全氮含量分配比例在不同生长期间无显著差异。在种植6和13 a,香根草根的全氮含量分配比例在快速生长期显著降低、在成熟期明显升高、在枯黄期显著升高,叶的全氮含量分配比例变化规律与根恰好相反。在种植8 a,香根草根的全氮含量分配比例变化规律与种植6和13 a一致,叶的全氮含量分配比例均在快速生长期达到最高值,并显著高于返青期和枯黄期。另外,在种植3、6、8和

13 a,香根草茎的全氮含量分配比例在各生长期的变化无明显规律。

2.2.3 不同部位的比较 由表2可见:在相同种植年限和生长期,香根草茎的全氮含量分配比例明显低于根和叶。在种植3 a,各生长期香根草根的全氮含量分配比例均高于叶;在种植6和13 a,快速生长期根的全氮含量分配比例低于叶,而返青期、成熟期和枯黄期根的全氮含量分配比例均高于叶;在种植8 a,返青期和枯黄期根的全氮含量分配比例均高于叶,而快速生长期和成熟期根的全氮含量分配比例却低于叶。

3 讨论和结论

相关研究结果表明:香根草叶片中的主要营养元素(包括氮、磷、钾等)含量低于一般高等植物或与一般高等植物体内的营养元素含量水平相当^[14]。周强等^[15]的检测结果表明:11月末香根草叶片的全氮含量为 $7.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;与之相比,本研究测定的返青期、成熟期和枯黄期香根草叶的全氮含量偏低($2.93 \sim 5.65 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$),这可能是由于周强等^[15]的实验是在肥力中等的实验地进行,而本研究供试的香根草均生长在养分贫乏、有机质含量低、重金属含量高的煤矸石山上,植株根系能够直接吸收利用的营养成分(包括氮素)较少。

通常情况下,植物对氮素的吸收主要有2种途径:一种途径为利用微生物的固氮作用增加根系周围氮的总量和有效态含量;另一种途径为利用植物自身的生长代谢活动及根系的分泌活动改变根系周围环境,从而提高植物高效吸收和利用氮的能力^[16]。赵现伟等^[17]认为,香根草体内含有遗传多样性丰富的联合固氮菌,能够进行生物固氮,这可能是其能够在养分贫乏的煤矸石山上正常生长的重要原因之一。本研究中,种植3a各生长期香根草全株的全氮含量均最低,这可能是因为种植年限相对较短,香根草体内尚未积累较多的氮。快速生长期、成熟期和枯黄期香根草全株的全氮含量均在种植8a达到最高值,这可能是因为种植年限越长,香根草植株的茎基越粗,能够获取土壤中更广泛区域内的氮素;全株的全氮含量在种植13a降低,这可能是因为全株的全氮含量变化受微生物固氮作用、自身生长代谢和根系分泌活动等的综合影响,并且,香根草植株富集的重金属主要集中在根部,随种植年限增加,根部富集的重金属越来越多,高浓度的重金属势必导致香根草的生物量、含水量、叶绿素含量、可溶性蛋白质含量及根系活力均不同程度下降,致使其根系的某些生理活动受到影响,阻碍根系对氮素的吸收,最终导致全株的全氮含量下降^[18]。总体来看,快速生长期香根草根、茎和叶的全氮含量及其分配比例,成熟期茎和叶的全氮含量及其分配比例,以及枯黄期叶的全氮含量及其分配比例均在种植8a达到最高值,这可能是因为种植8a的香根草对重金属的富集程度最高,种植年限继续增

加势必导致香根草植株受到一定的重金属毒害,致使其对氮素的调节能力下降。陈超等^[19]的研究结果也表明:在利用香根草对煤矸石山进行生态治理时,种植8a的香根草对Cu和Zn的富集作用最强。成熟期香根草根的全氮含量以及枯黄期根和茎的全氮含量均随种植年限增加呈逐渐升高的趋势,说明当受到重金属胁迫时,香根草通过将氮素固定在根部的方式来维持植株的正常生长。

李志安等^[20]认为,为了达到生存或繁殖的目的,植物会在不同生长期将体内养分进行不断的转移、再分配和再利用,本研究结果也证实了这一点。总体来看,在种植6和8a,返青期和枯黄期香根草根的全氮含量及其分配比例均高于叶,而快速生长期和成熟期香根草根的全氮含量及其分配比例则低于叶;在种植3和13a,返青期、快速生长期、成熟期和枯黄期根的全氮含量及其分配比例高于叶,推测一方面是因为在营养贫乏的煤矸石山上,种植3a的香根草将大量的氮素分配到根中,另一方面是因为种植13a的香根草已经受到重金属的毒害,自身的理化性质受到明显影响^[21]。

综上所述,在养分贫乏的煤矸石山上,随种植年限增加和生长期推移,香根草能够合理分配氮素在根、茎和叶间的含量和比例,使其能够在煤矸石山立足,因此,可利用香根草对煤矸石山进行生态恢复和植被重建,但种植年限不宜超过8a。

参考文献:

- [1] 赵方莹,刘飞,巩潇.煤矸石山危害及其植被恢复研究综述[J].露天采矿技术,2013(2):77-81.
- [2] 杨主泉,胡振琪,王金叶,等.煤矸石山复垦的恢复生态学研究[J].中国水土保持,2007(6):35-36.
- [3] 张明亮,岳兴玲,杨淑英.煤矸石重金属释放活性及其污染土壤的生态风险评价[J].水土保持学报,2011,25(4):249-252.
- [4] TRUONG P N V, FOONG Y K, GUTHRIE M, et al. Phytoremediation of heavy metal contaminated soils and water using vetiver grass [M] // WANG L K, TAY J-H, TAY S T L, et al. Environmental Bioengineering: Vol. 11. New York: Humana Press, 2010: 233-275.
- [5] GULEN H, ERIS A. Some physiological changes in strawberry (*Fragaria × ananassa* 'Camarosa') plants under heat stress [J]. Journal of Horticultural Science and Biotechnology, 2003, 78: 894-898.
- [6] 刘金祥,张莹.香根草在我国的研究简史及应用进程[J].草原与草坪,2012,32(5):70-74.