

准格尔旗矿区不同植物叶片的生态化学计量学研究

陈红武, 杨晨旭, 汤利杰

(西北农林科技大学 园艺学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:以不同恢复年限下煤矿复垦区 3 种共有植物油松、沙棘、苜蓿的叶片作为研究对象,通过对其碳、氮、磷含量及生态化学计量学特征的研究,探讨退化生态系统植物内稳性、植物养分状况及不同植物与氮磷限制率的关系,以期为该复垦区植物的选择及复垦效果评价提供科学合理的建议与参考。结果表明:矿区植物叶片碳、氮、磷含量平均值分别为 488.33, 24.87, 1.39 g/kg, 三种植物叶片碳含量随着恢复年限的增加均有所增加,其中油松叶片碳含量显著高于沙棘和苜蓿叶片碳含量($p < 0.05$),沙棘和苜蓿叶片氮含量显著高于油松叶片氮含量($p < 0.05$);矿区植物叶片 C:N, C:P 和 N:P 平均值分别为 26.76, 374.72, 18.32, 在生活型方面三种植物叶片 N:P 大小表现为灌木>草本>乔木,油松生长受到氮元素的限制,沙棘和苜蓿生长受到磷元素的限制;植物叶片氮含量与磷含量、C:N, C:P 和 N:P 呈极显著相关($p < 0.01$)。该研究结果有助于进一步了解准格尔旗矿区碳、氮、磷元素在不同植物间的相互作用规律与机制,对指导矿区植被恢复中树种选择有一定意义。

关键词:生态化学计量学; 矿区植被恢复; 叶片; 复垦年限

中图分类号:Q945.12

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)06-0009-06

Ecological Stoichiometric Characteristics in Leaf Under Different Vegetation Types of Jungar Banner Opencast Coal Mining Area

CHEN Hongwu, YANG Chenxu, TANG Lijie

(College of horticulture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: We characterized the contents and eco-stoichiometric proportions of carbon (C), nitrogen (N) and phosphorus (P) in leaves of three dominant species of plants, i. e. *Pinus tabulaeformis*, *Hippophae rhamnoides*, *Medicago sativa* Linn., at different restoration stages in Jungar Banner colliery reclamation area and further to explore relationships of plant homeostasis of degraded ecosystems with vegetation type and NP limiting rate and plant nutrition status in an attempt to provide some reasonable suggestions and references for selection of plants and evaluation of the effect of reclamation of colliery reclamation area. Results showed that the average contents of carbon, nitrogen and phosphorus in leaves of the plants were 488.33, 24.87, 1.39 g/kg, respectively. The carbon content in the leaves of the three plants increased with the increase of the recovery time, among them, the carbon content of *Pinus tabulaeformis* leaf was significantly higher than that of *Hippophae rhamnoides* and *Medicago sativa* Linn. ($p < 0.05$), the nitrogen content of *Hippophae rhamnoides* and *Medicago sativa* Linn. leaf was significantly higher than that of *Pinus tabulaeformis* ($p < 0.05$). The average values of C:N, C:P and N:P in leaves of the plants were 26.76, 374.72, 18.32, respectively. The three types of vegetation followed an order: shrubbery>forest>grass, indicating that N is the major limiting factor for growth of *Pinus tabulaeformis*, P is the major limiting factor for growth of *Hippophae rhamnoides* and *Medicago sativa* Linn.. The nitrogen contents in leaves of the plants were extremely significantly negatively related with the P content, C:N, C:P and N:P ratio ($p < 0.01$). The findings of this study can help fully further understand rules and mechanisms of the interactions of carbon, nitrogen and phosphorus in different components of the reclamation area in the Jungar Banner colliery.

Keywords: ecological stoichiometry; vegetation restoration; leaf; reclamation history

碳(C)、氮(N)、磷(P)是植物生长的必需元素,对植物的生长发育及行为起到非常重要的作用^[1]。其中碳是生命的骨架元素,氮和磷是植物的基本营养元素和生长限制元素^[2],三者紧密联系,为植物的生长发育提供必需的营养元素。生态化学计量学结合了生态学和化学计量学的基本原理,是研究生态系统能量平衡和多重化学元素平衡的学科,也是研究植物营养元素分配的重要方法,其主要强调活有机体碳、氮、磷 3 种主要组成元素的关系,是一种分析多重化学元素的质量平衡对生态交互作用影响的理论^[3]。植物生态化学计量学特征既反映了植物在一定生境条件下从土壤中吸收和储存矿质养分的能力,也反映了植物对周围环境长期适应所形成的化学计量分布特征。加强对植物叶片碳、氮、磷元素特征及空间格局的研究,是准确评估生态系统初级生产力和碳、氮、磷元素生物地球化学循环对全球变化响应的基础^[4]。本试验以准格尔旗境内矿区为研究区域,以生态化学计量学的基本原理为依据,对植物的化学计量学特征进行研究,在时间尺度上探讨植物元素的分布规律及变化规律,以及不同植被利用方式对碳氮磷元素计量特征的影响。

植物叶片是植物进行光合作用的主要器官,叶片中化学元素含量的多少直接影响到植物的新陈代谢和生长发育。通过研究植物叶片碳、氮、磷含量及其比值的关系不仅能够解释植物自身的生长和发育状况,在一定程度上还能反映植物所处环境的群落间的关系、植物对外界环境的适应机制以及养分限制状况,尤其是氮磷元素含量的大小,可用来表征陆地生态系统的生产力,同时也可表明该植物受到哪种元素的限制作用,通过对 N:P 在植被恢复过程中养分限制的研究,为植被的合理配置提供科学依据。本研究通过对内蒙古鄂尔多斯准格尔露天煤矿不同恢复年限下 3 种常见植物,分别是油松、沙棘和苜蓿的叶片碳、氮、磷含量及其化学计量特征进行研究,意在揭示不同恢复措施对植物叶片碳、氮、磷化学计量特征的影响,从而更深入了解和认识不同恢复措施对植物生态化学计量特征的影响及其对环境的适应策略,并从另一侧面为该矿区生产实践和生态恢复提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于内蒙古自治区鄂尔多斯市准格尔旗内的永利煤矿(110°12'E, 39°43'N)和黑岱沟煤矿(111°14'E, 39°47'N),海拔 1 025~1 423 m。矿区气候属于典型的中温带半干旱大陆性气候,干旱少雨,年平

均气温 5.3~7.6℃,年降水量为 231~459 mm,多集中在 7—9 月,地貌为典型的黄土丘陵沟壑区,梁峁起伏,沟壑纵横,侵蚀活跃,水土流失严重;准格尔旗土壤贫瘠,渗透力差。由于受干旱、过牧、垦荒等自然灾害和人为活动的影响,天然木本植物所存无几。永利煤矿复垦年限为 5 a,复垦方式是在不同区域人工栽植乔木,主要树种是油松(*Pinus tabulaeformis*)、侧柏(*Platycladus orientalis* L. Franco)等;灌木主要是沙棘(*Hippophae rhamnoides* Linn.)、柠条(*Caragana korshinskii* Kom.)等;草本主要是沙打旺(*Astragalus adsurgens* Pall.)、苜蓿(*Medicago sativa* Linn.)等。黑岱沟煤矿自 1992 年开始复垦以乔灌草结合的原则种植了大量人工植被,乔木植物以杨树(*Populus* L.)为主,辅以生长能力强的油松(*Pinus tabulaeformis*),同时采用以沙打旺(*Erect milkvetch*)、苜蓿(*Medicago sativa* Linn.)为主的草本植物,灌木植物主要有耐旱沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、柠条(*Caragana korshinskii* Kom)、紫穗槐(*Amorpha fruticosa* Linn.)等,天然植被稀少而呈零星分布^[5]。

1.2 采样地设置与样品采集

植物样品于 2013 年 9 月在内蒙古准格尔旗永利煤矿复垦区和黑岱沟煤矿复垦区采集。两个矿区的恢复年限分别为 5 a 和 20 a,在两个煤矿均选择 3 种共有植物油松、沙棘、苜蓿作为研究对象(表 1),在复垦区选择坡度、坡向、海拔较为一致的 20 m×20 m 的样方 18 个,在每个 20 m×20 m 样方内采集生长良好的油松叶片;在每个 20 m×20 m 样方的几何中心分别选取一个 2 m×2 m 的样方,采集长势较好的沙棘叶片;在每个 20 m×20 m 样方内分别随机选取一个 1 m×1 m 的小样方采集苜蓿叶片。以上每项采集均有 3 个重复,每个样品重量大约为 300 g 左右,叶片于 105℃下杀青 15 min,然后 65℃烘干至恒重。

1.3 样品测定

用粉碎机将植物叶片磨成 0.15 mm 的粉末后测定其全碳、全氮、全磷含量。植物叶片的全碳采用重铬酸钾外加热法测定;全氮、全磷采用 H₂SO₄—H₂O₂ 消煮,消煮液分别用凯氏法测定全氮,钒钼黄比色法测定全磷^[6]。

1.4 数据处理与分析

采用 SPSS 20.0 统计分析软件对数据进行相关性分析、单因素方差分析(One-Way ANOVA)以及多重比较,运用 Excel 2013 进行统计分析和图型制作。C、N、P 采用质量含量,C:N,C:P,N:P 均采用质量比。

表 1 采样点信息

矿区名称	植物种	生活型	科	纬度	经度	海拔/m
永利煤矿	油松	乔木	松科	39°41′49.21″N	110°17′3.38″E	1402
	沙棘	灌木	胡颓子科	39°41′41.88″N	110°14′42.12″E	1429
	苜蓿	草本	豆科	39°41′20.78″N	110°16′10.48″E	1403
黑岱沟煤矿	油松	乔木	松科	39°47′11.01″N	111°17′32.38″E	1279
	沙棘	灌木	胡颓子科	39°47′15.04″N	111°18′0.18″E	1275
	苜蓿	草本	豆科	39°47′0.63″N	111°18′0.75″E	1274

2 结果与分析

2.1 不同植物叶片碳氮磷含量变化

由图 1 可以看出,三种植物叶片在恢复年限为 20 a 时的碳含量均高于 5 a 时相应植物叶片的碳含量,其中油松、沙棘、苜蓿叶片碳含量在恢复年限为 5 a 时均值分别为 518.21,492.73,406.87 g/kg,油松和沙棘叶片碳含量显著高于苜蓿叶片碳含量($p<0.05$)(图 1A);油松、沙棘、苜蓿叶片碳含量在恢复年限为 20 a 时均值分别为 557.19,495.01,482.11 g/kg,油松叶片碳含量显著高于沙棘和苜蓿叶片碳含量($p<0.05$)(图 1A),三种植物叶片碳含量大小关系表现为油松>沙棘>苜蓿。

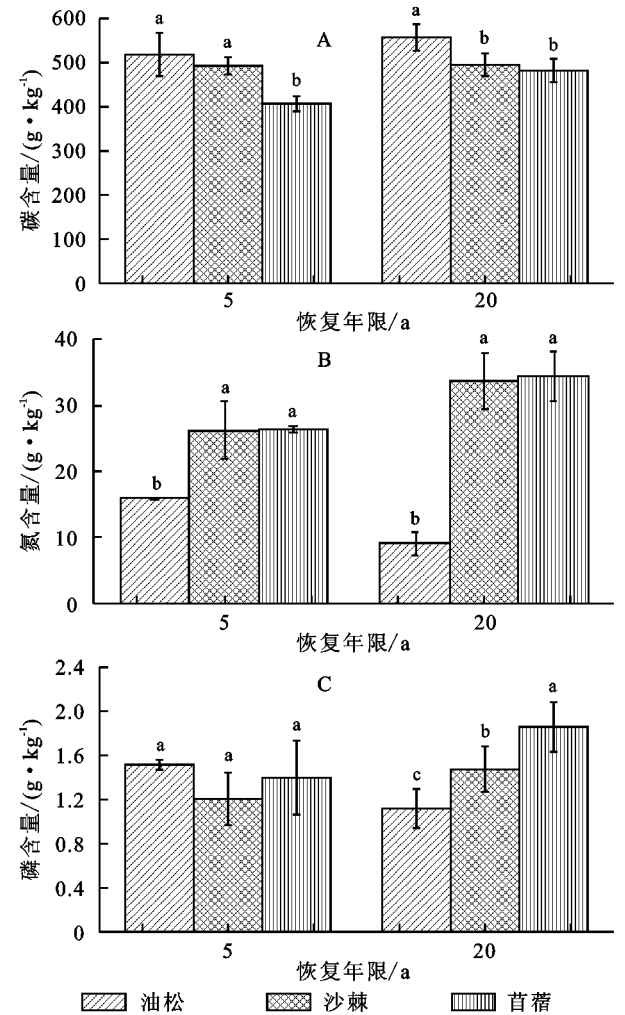
油松叶片氮含量在恢复年限为 20 a 时相比 5 a 时氮含量有所下降,沙棘和苜蓿叶片氮含量在恢复年限为 20 a 时相比 5 a 时氮含量上升。油松、沙棘、苜蓿叶片氮含量在恢复年限为 5 a 时均值分别为 15.96,26.17,26.33 g/kg,沙棘和苜蓿叶片氮含量显著高于油松叶片氮含量($p<0.05$)(图 1B);油松、沙棘、苜蓿叶片氮含量在恢复年限为 20 a 时均值分别为 9.05,33.68,34.45 g/kg,沙棘和苜蓿叶片氮含量显著高于油松叶片氮含量($p<0.05$)(图 1B),三种植物叶片氮含量大小关系表现为苜蓿>沙棘>油松。

油松叶片磷含量在恢复年限为 20 a 时相比 5 a 时磷含量有所下降,沙棘和苜蓿叶片磷含量在恢复年限为 20 a 时相比 5 a 时磷含量上升。油松、沙棘、苜蓿叶片磷含量在恢复年限为 5 a 时均值分别为 1.52,1.21,1.40 g/kg,油松、沙棘、苜蓿叶片磷含量差异不显著($p>0.05$)(图 1C);油松、沙棘、苜蓿叶片磷含量在恢复年限为 20 a 时均值分别为 1.12,1.47,1.86 g/kg,三种植物叶片磷含量差异显著($p<0.05$)(图 1C),磷含量大小关系表现为苜蓿>沙棘>油松。

2.2 不同植物叶片的生态化学计量学特征

由图 2 可以看出,油松叶片 C : N 在恢复年限为 20 a 时相比 5 a 时 C : N 升高,沙棘和苜蓿叶片 C : N 在恢复年限为 20 a 时相比 5 a 时 C : N 降低。油松、沙棘、苜蓿叶片 C : N 在恢复年限为 5 a 时均值

分别为 32.45,19.35,18.32,油松叶片 C : N 显著高于沙棘和苜蓿叶片 C : N($p<0.05$)(图 2A);油松、沙棘、苜蓿叶片 C : N 在恢复年限为 20 a 时均值分别为 64.04,14.99,12.08,油松叶片 C : N 显著高于沙棘和苜蓿叶片 C : N($p<0.05$)(图 2A),三种植物叶片 C : N 大小关系表现为油松>沙棘>苜蓿。



注:不同小写字母表示不同植物叶片碳、氮、磷含量差异显著($p<0.05$)。

图 1 不同植物叶片碳氮磷含量

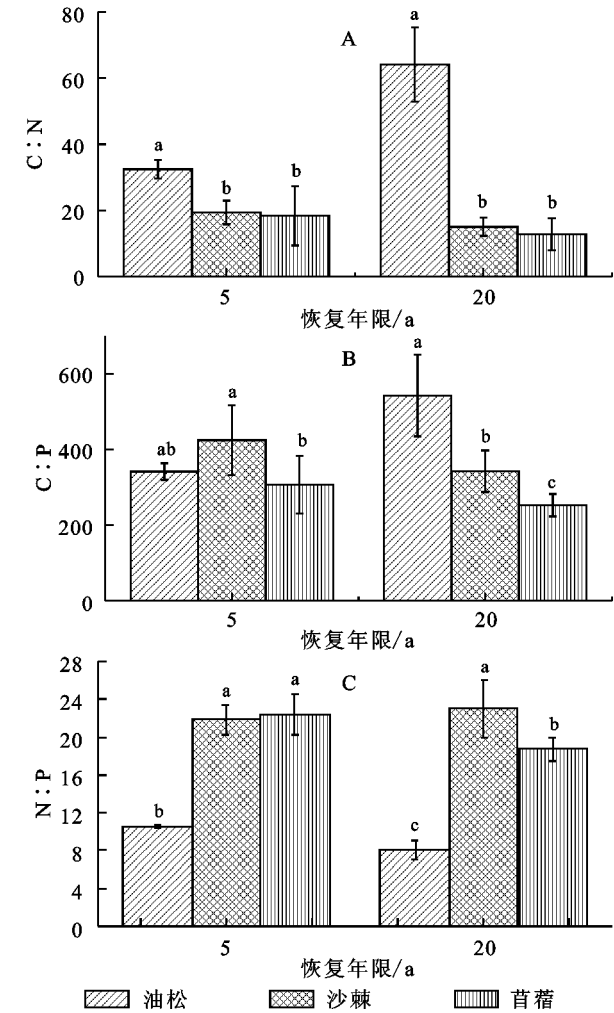
油松叶片 C : P 在恢复年限为 20 a 时相比 5 a 时 C : P 升高,沙棘和苜蓿叶片 C : P 在恢复年限为 20 a 时相比 5 a 时 C : P 降低。油松、沙棘、苜蓿叶片 C : P 在恢复年限为 5 a 时均值分别为 341.48,424.31,306.85,沙棘叶片 C : P 最高,显著高于苜蓿叶片 C : P

($p<0.05$)(图 2B);油松、沙棘、苜蓿叶片 C:P 在恢复年限为 20 a 时均值分别为 542.47,341.96,252.56,油松 C:P 显著高于沙棘和苜蓿叶片 C:P ($p<0.05$)(图 2B),三种植物叶片 C:P 大小关系表现为油松>沙棘>苜蓿。

油松和苜蓿叶片 N:P 在恢复年限为 20 a 时相比 5 a 时 N:P 降低,沙棘叶片 N:P 在恢复年限为 20 a 时相比 5 a 时 N:P 升高。油松、沙棘、苜蓿叶片 N:P 在恢复年限为 5 a 时均值分别为 10.54,21.85,22.38,苜蓿叶片 N:P 最大,与沙棘叶片 N:P 差异不显著($p>0.05$)(图 2C),油松叶片 N:P 显著低于苜蓿和沙棘叶片 N:P($p<0.05$);油松、沙棘、苜蓿叶片 N:P 在恢复年限为 20 a 时均值分别为 8.12,23.02,18.71,三种植物叶片 N:P 差异显著($p<0.05$)(图 2C),大小关系表现为沙棘>苜蓿>油松。

2.3 不同植物叶片碳氮磷含量与生态化学计量学特征的关系

由 2 表可以看出,植物叶片碳含量与氮含量和 N:P 呈极显著负相关($p<0.01$),与磷含量呈显著负相关($p<0.05$),与 C:N,C:P 呈显著正相关($p<0.05$);植物叶片氮含量与磷含量和 N:P 呈极显著正相关($p<0.01$),与 C:N,C:P 呈极显著负相关($p<0.01$);植物叶片磷含量与 C:N,C:N 呈极显著负相关($p<0.01$);C:N 与 C:P 呈极显著正相关($p<0.01$),与 N:P 呈极显著负相关($p<0.01$);C:P 与 N:P 呈显著负相关($p<0.05$)。



注:不同小写字母表示不同植物叶片生态化学计量差异显著($p<0.05$)。

图 2 不同植物叶片生态化学计量特征

表 2 植物叶片碳氮磷含量与生态化学计量学特征的相关性

项目	全碳	全氮	全磷	C : N	C : P	N : P
全碳	1					
全氮	-0.512**	1				
全磷	-0.314*	0.639**	1			
C : N	0.663**	-0.893**	-0.530**	1		
C : P	0.631**	-0.700**	-0.889**	0.722**	1	
N : P	-0.647**	0.749**	0.117	-0.842**	-0.370*	1

注: * 表示存在显著相关($p<0.05$), ** 表示存在极显著相关($p<0.01$)。

3 讨论与结论

3.1 不同植物叶片碳氮磷含量总体特征

植物是陆地生态系统的子系统,在调节整个系统的稳定性方面发挥着重要的作用。碳、氮、磷等元素是植物生长发育所必需的营养元素,直接控制植物的生长及其行为过程^[7]。碳是构成植物体干物质的最主要元素,氮和磷是生物体蛋白质和遗传物质的基本组成元素,对植物各种功能产生深刻的影响^[8],植物结构性元素碳和功能限制性元素氮和磷之间相互作用,调节着植物的生长^[9]。本研究中随着恢复年限的

增加,矿区植物叶片碳、氮、磷平均含量均有所增加,其中恢复年限为 20 a 的植物叶片碳平均含量较 5 a 的碳平均含量提高 1.16 倍,恢复年限为 20 a 的植物叶片氮平均含量较 5 a 的氮平均含量提高 1.06 倍,恢复年限为 20 a 的植物叶片磷平均含量较 5 a 的磷平均含量提高 1.15 倍。随着恢复年限的增加,三种植物叶片碳含量均有所增加,原因可能是在退耕初期天然草地受到人类过度放牧和生产活动的影响,植物碳含量较低;随着恢复年限的增加,减少放牧及人为干扰后,牧草得到修养生息,地上枯落物不断积累,并在微生物作用下不断腐熟与分解,加上植物及根系分

泌物对土壤和环境的修复作用^[10],促使矿区土壤养分和微生物量进一步增加^[11],生态环境也得到相应改善,从而使植物碳含量得以提高。矿区 3 种植物叶片碳平均含量为 488.33 g/kg,高于 Elser 等^[12]的研究中全球 492 种陆生植物叶片碳的平均含量 464 g/kg,也明显大于郑淑霞等^[13]调查的我国黄土高原植物叶片碳含量 438 g/kg,说明该研究区植物的有机质含量和碳储量较高。

氮和磷作为植物生长最重要的限制元素,共同参与了植物体的基本生理生化过程。三种植物叶片氮平均含量为 24.87 g/kg,高于全球植物叶片氮含量平均水平 20.1 g/kg^[14],也高于 Han 等^[15]研究的全国 753 种陆地植物得出的氮平均含量 20.24 mg/g,因为矿区所采集的植物一部分为豆科固氮植物苜蓿以及非固氮植物沙棘,沙棘虽然不是豆科植物,但可以与某些固氮菌共生,在沙棘的根系上生长形成根瘤,从而使沙棘具有较豆科植物更强的固氮能力,这种特性对于沙棘在恶劣境地生存具有重要意义。这部分固氮植物以及沙棘叶片的氮含量提高了矿区整体氮水平。三种植物叶片磷平均含量为 1.39 g/kg,低于全球水平叶片磷含量 1.99 g/kg^[16]或 1.80 g/kg^[14]以及我国植物叶片磷的平均含量 1.5 g/kg^[17]。这与国内很多研究表明植物叶片磷含量偏低的规律一致。Hedin 等^[18]认为叶片 P 含量与土壤 P 含量密切相关,而中国土壤 P 含量普遍低于全球平均水平的 2.8 g/kg^[19],本研究区域土壤 P 含量仅为 0.89~1.25 g/kg^[20],更是明显小于全球水平。研究结果说明在准格尔煤矿复垦区磷含量偏低,植物生长受到磷的限制。

叶片碳与氮磷的显著负相关性以及叶片氮与磷的正相关性,是高等陆生植物碳氮磷元素计量的普遍特征之一,也体现了叶片属性间的经济策略。张珂等对阿拉善典型植物叶片碳、氮、磷化学计量特征的研究验证了上述规律。而该研究区植物叶片碳与氮磷的关系符合上述特征,说明准格尔矿区植物在固定碳过程中对养分氮磷利用效率的权衡策略同于其他用于研究的植物类群;氮与磷的正相关性与上述特征符合,说明准格尔矿区植物体内氮磷两种营养元素变化的相对一致性,这是种群能够稳定生长发育的有力保障,也是植物最基本的特性之一^[21]。

3.2 不同植物叶片的生态化学计量学特征变化

碳、氮、磷生态化学计量比是生态系统过程及其功能的重要特征,不同组分碳、氮、磷比可以作为养分限制以及碳、氮、磷饱和诊断和有效的预测性指标,植物体内碳氮磷化学计量比体现了生态系统中碳积累动态及氮和磷养分限制格局^[22]。植物的 C:N 和 C:P 代表了植物固碳效率的高低,预示着植物在吸收营养过程中对碳的同化能力^[23],在一定程度上反映了植物的养分利用效率,具有重要的生态学意义。

N:P 在决定植物群落结构与功能上是关键性指标。通过研究植物碳氮磷含量及其比值的关系,可以揭示植被生长速率与养分分配的关系,也可以为植被生长的限制性养分元素的确定提供参考依据。

本研究对矿区不同恢复年限下三种植物的碳、氮、磷比值进行了分析,不同植物的 C:N、C:P 和 N:P 随恢复年限的增加表现出不同的变化规律及差异显著性。其中恢复年限为 20 a 的油松叶片 C:N 值是 5 a C:N 值的 1.97 倍,这是由于 20 a 油松叶片的碳含量较 5 a 的碳含量下降,叶片氮含量较 5 a 的氮含量升高导致;恢复年限为 20 a 时沙棘和苜蓿叶片 C:N 值较 5 a 的 C:N 值下降,说明沙棘和苜蓿氮含量随着恢复年限的增加有所增加且增加的幅度比碳增加的幅度大。矿区三种植物叶片 C:N 平均值为 26.76,大于全球尺度内植物 C:N 比 22.5,说明该研究区植物的养分利用效率相对较高,这与矿区的气候条件和水热状况有关,土壤养分富集作用较强,可供植物吸收利用的养分水平较高有关。恢复年限为 20 a 的油松叶片 C:P 值是 5 a 的 C:P 值的 1.59 倍,20 a 沙棘和苜蓿叶片 C:P 值较 5 a 的 C:P 值有所下降,说明油松叶片磷含量随着恢复年限的增加有所下降,而沙棘和苜蓿的磷含量随着恢复年限的增加有所上升,这是由于物种本身的生理特性及遗传物质决定植物叶片的氮磷含量。矿区三种植物叶片 C:P 平均值为 374.72,明显大于全球尺度内植物的 C:P 平均值 232。植物吸收氮、磷营养元素的途径和碳同化不同,一般情况下碳的含量比较稳定,变异较小,C:N 比和 C:P 比的变化主要由氮、磷的变化决定^[24]。本研究中植物叶片 C:N 和 C:P 随恢复年限的变化规律与氮、磷的变化规律相反,这说明氮、磷的变化决定了 C:N 比和 C:P 比的变化,与上述规律一致。从不同生活型方面来看,油松属于乔木植物,沙棘属于灌木植物,苜蓿属于草本植物,恢复年限为 20 a 时 3 种类型植物叶片 C:P 在不同生活型上表现为乔木叶片>灌木叶片>草本叶片,表明矿区生态系统中乔木叶建成效率最高,而草本叶片建成效率最低。

氮磷营养元素作为植物体内最容易发生短缺的元素,是陆地生态系统的重要限制因子。生态化学计量学应用的一个重要方面是可根据植物的 N:P 比判断环境对植物生长的养分供应状况,陆地植物器官中相对恒定的 N:P 是植物在地球上生存的重要适应机制。Koerselman 和 Meuleman^[25]通过施肥试验得出,N:P 比小于 14 表示植物生长受氮限制,N:P 比大于 16 表示植物生长受磷限制,N:P 比为 14~16 时,植物生长同时受氮和磷共同限制。本研究中三种矿区常见植物的 N:P 存在差异显著性,沙棘和苜蓿的 N:P 显著高于油松 N:P,这是因为苜蓿为豆科类固氮植物,沙棘的根系可以与固氮菌共生,形成根瘤,从而使

沙棘具有较豆科植物更强的固氮能力,致使这两种植物的氮含量均显著高于油松氮含量,从而沙棘和苜蓿叶片的 N:P 显著高于油松 N:P。油松叶片 N:P 平均值为 9.59,小于 14,表明研究区植物在受氮磷共同作用的同时更易受氮限制。沙棘和苜蓿叶片 N:P 平均值分别为 22.37,20.59,均大于临界值 16,植物生长主要受磷限制。在恢复年限为 20 a 时,三种植物叶片的 N:P 大小表现为沙棘>苜蓿>油松,不同生活型方面表现为灌木>草本>乔木,此结果说明即使在同一气候区,不同生活型植物养分适应策略也有差异。

4 结论

准格尔旗矿区油松、沙棘和苜蓿三种植物叶片碳含量随着恢复年限增加均有所增加,苜蓿叶片氮含量最高,油松叶片氮含量最低;矿区植物叶片 N:P 平均值为 18.32,植物生长受到磷元素限制,在生活型方面三种植物叶片 N:P 大小表现为灌木>草本>乔木;植物叶片氮含量与磷含量、C:N、C:P 和 N:P 呈极显著相关($p<0.01$)。该研究结果有助于进一步了解准格尔旗矿区碳、氮、磷元素在不同植物间的相互作用规律与机制,对指导矿区植被恢复中树种选择有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] Vitousek P M, Porder S, Houlton B Z, et al. Terrestrial phosphorus limitation: mechanisms, implications, and nitrogen-phosphorus interactions[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2010, 20(1): 5-15.
- [2] 邓斌. 高寒草地不同演替阶段植被变化和土壤碳氮磷的生态化学计量研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2012.
- [3] 贾晓妮, 程积民, 万惠娥. 云雾山本氏针茅草地群落恢复演替过程中的物种多样性变化动态[J]. *草业学报*, 2008, 17(4): 12-18.
- [4] 沈艳, 谢应忠, 甄研, 等. 不同恢复措施对典型草原优势植物碳、氮、磷化学计量特征的影响[J]. *农业科学研究*, 2013, 34(3): 5-9.
- [5] 李青丰, 曹江营. 准格尔煤田露天矿植被恢复的研究: 排土场植被自然恢复的观察研究[J]. *中国草地*, 1997(2): 23-25.
- [6] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [7] 马永跃, 王维奇. 闽江河口区稻田土壤和植物的 C、N、P 含量及其生态化学计量比[J]. *亚热带农业研究*, 2011, 7(3): 182-187.
- [8] 平川, 王传宽, 全先奎. 环境变化对兴安落叶松氮磷化学计量特征的影响[J]. *生态学报*, 2014, 34(8): 1965-1974.
- [9] Güsewell S. N:P ratios in terrestrial plants: variation and functional significance[J]. *New Phytologist*, 2004, 164(2): 243-266.
- [10] 旷远文, 温达志, 钟传文, 等. 根系分泌物及其在植物修复中的作用[J]. *植物生态学报*, 2003, 27(5): 709-717.
- [11] 樊文华, 白中科, 李慧峰, 等. 不同复垦模式及复垦年限对土壤微生物的影响[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(2): 330-336.
- [12] Elser J J, Sterner R W, Gorokhova E, et al. Biological stoichiometry from genes to ecosystems[J]. *Ecology Letters*, 2000, 3(6): 540-550.
- [13] 郑淑霞, 上官周平. 黄土高原地区植物叶片养分组成的空间分布格局[J]. *自然科学进展*, 2006, 16(8): 965-973.
- [14] Reich P B, Oleksyn J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, 101(30): 11001-11006.
- [15] Han W, Fang J, Guo D, et al. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China[J]. *New Phytologist*, 2005, 168(2): 377-385.
- [16] Elser J J, Sterner R W, Gorokhova E, et al. Biological stoichiometry from genes to ecosystems[J]. *Ecology Letters*, 2000, 3(6): 540-550.
- [17] 吴统贵, 陈步峰, 肖以华, 等. 珠江三角洲 3 种典型森林类型乔木叶片生态化学计量学[J]. *植物生态学报*, 2010, 34(1): 58-63.
- [18] Hedin L O. Global organization of terrestrial plant-nutrient interactions[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, 101(30): 10849-10850.
- [19] Ren S J, Yu G R, Tao B, et al. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 654 terrestrial plant species in NSTEC[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(12): 2665-2673.
- [20] 姚敏娟. 黑岱沟露天矿排土场不同植被配置对土壤养分和土壤水分影响研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2007.
- [21] 吴统贵, 吴明, 刘丽, 等. 杭州湾滨海湿地 3 种草本植物叶片 N、P 化学计量学的季节变化[J]. *植物生态学报*, 2010, 34(1): 23-28.
- [22] 栗忠飞, 郭盘江, 刘文胜, 等. 哀牢山常绿阔叶林幼树 C、N、P 生态化学计量特征[J]. *东北林业大学学报*, 2013(4): 22-26.
- [23] 羊留冬, 杨燕, 王根绪, 等. 短期增温对贡嘎山峨眉冷杉幼苗生长及其 CNP 化学计量学特征的影响[J]. *生态学报*, 2011, 31(13): 3668-3676.
- [24] Reich P B, Oleksyn J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, 101(30): 11001-11006.
- [25] Koerselman W, Meuleman A F M. The vegetation N:P ratio: A new tool to detect the nature of nutrient limitation[J]. *Journal of Applied Ecology*, 1996, 33(6): 1441-1450.