

黄土高原刺槐叶片生态化学计量学特征

马露莎¹, 陈亚南¹, 张向茹¹, 杨佳佳¹, 安韶山^{1,2}

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:对黄土高原区域尺度特定物种叶片生态化学计量的研究,有助于解释环境因素对植物元素及其化学计量学特征的影响。对我国黄土高原中部从南到北分布的 14 个样点的刺槐(*Robinia pseudoacacia*)叶片 C、N、P 的含量、地理分布格局及其与土壤含量的相关关系进行了研究。叶片 C、N、P 含量的算术平均数分别为 454.63, 21.38, 2.09 mg/g; 叶片 C/P、C/N、N/P 的算术平均值分别为 226.51, 21.61, 10.73。阴坡和阳坡的刺槐叶片三种元素含量差异性均不显著。阳坡和阴坡刺槐叶片 C、N、P 含量地理分布格局是基本一致的, C 随着纬度升高呈现先增加再减小的趋势, N 和 P 的含量均随纬度升高而增加, 但只有阴坡刺槐叶片的 C 含量随着纬度的升高呈现显著的先增加再减小的趋势($0.01 < P < 0.05$), 其他均未达到显著水平。刺槐叶片 C 含量与土壤 C 含量、土壤 N 含量之间有显著的负相关关系, 而叶片 N、P 含量不随土壤含量而显著变化, 说明刺槐叶片 N、P 元素含量具有保守性, 受环境因素影响较小。

关键词:生态化学计量学; 黄土高原; 刺槐; 叶片养分; 土壤养分; 地理格局

中图分类号: S154.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2014)03-0057-05

Characteristics of Leaf Ecological Stoichiometry of *Robinia pseudoacacia* in Loess Plateau

MA Lu-sha¹, CHEN Ya-nan¹, ZHANG Xiang-ru¹, YANG Jia-jia¹, AN Shao-shan^{1,2}

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The study of *Robinia pseudoacacia* leaf ecological stoichiometry in Loess Plateau can help to explain the effect of environmental factors on leaf nutrient and ecological stoichiometry. We determined contents of C, N, P and their ratios, spatial pattern in leaves of *Robinia pseudoacacia* and relationships between soil and leaf at 14 sites in Loess Plateau. The results show that the arithmetic means of leaf C, N, P contents were 454.63, 21.38, 2.09 mg/g, respectively. The arithmetic means of C/P, C/N, N/P were 226.51, 21.61, 10.73, respectively. There was no significant difference between the contents of these three elements in leaves on shade slope and those on sunny slope. Contents of C, N, P in leaves and their ratios had the same tendencies of geographic spatial pattern on shade slope and sunny slope. Leaf C increased at first and then decreased as latitude increased; leaf N, P increased as latitude increased and only leaf C was significantly correlated with latitude ($0.01 < P < 0.05$), others did not meet the significant level. In leaf nutrient content, only the C had a significant negative correlation relationship with soil C, N contents, N and P did not show significant changes with latitude and soil content. This illustrates that the leaf N, P element contents are conservative, and are less affected by environmental factors.

Key words: ecological stoichiometry; Loess Plateau; *Robinia pseudoacacia*; leaf nutrient; soil nutrient; geographic pattern

收稿日期: 2014-03-25

修回日期: 2014-04-22

资助项目: 国家自然科学基金面上项目(41171226); 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-12-0473); 西北农林科技大学“优秀青年人才科研专项”(QN2011049)

作者简介: 马露莎(1989—), 女(回族), 黑龙江哈尔滨人, 硕士生, 主要从事土壤生态和水土保持效益研究。E-mail: actorsha@163.com

通信作者: 安韶山(1972—), 男, 宁夏平罗人, 研究员, 博士生导师, 主要从事土壤生态和流域生态与管理方向的研究。E-mail: shan@ms.iswc.ac.cn

生态化学计量学结合了生态学和化学计量学的基本原理,是研究生物系统能量平衡和多重化学元素(通常是C,N,P,O,S)平衡的科学,为研究元素在生物地球化学循环和生态过程中的计量关系与规律提供了一种综合的方法^[1-2]。其中,C:N:P化学计量学是各种生态过程研究中的核心内容,已深入到生态学的各个层次(细胞、个体、种群、群落、生态系统)及区域等不同尺度^[3]。碳、氮和磷元素对植物的生长发育都起着非常重要的作用,它们含量的高低可以反映植物对相应元素的储存能力。氮磷比不仅是决定群落结构和功能的关键性指标,也可以作为对生产力起限制作用的营养元素的判断指标^[4-5]。碳氮比和碳磷比表述了植物对营养的利用效率^[2]。

目前国内针对黄土高原叶片养分化学计量特征及其空间分布格局有少量相关研究^[6-7],但是结论并不一致,对于刺槐(*Robinia pseudoacacia*)的研究更少^[7]。在这一方面,国外已经有一些研究^[8-10],虽然较国内的多,但至今仍缺乏对黄土高原小尺度范围刺槐单一物种的化学计量特征及空间分布的研究。

我国黄土高原总面积约60万km²,是我国生态环境最为脆弱的地区,也是我国乃至世界水土流失最为严重的地区之一。刺槐属豆科植物,具有抗旱、耐贫瘠等特点,是黄土高原植被建设、退耕还林和荒山造林中的主要树种,为改善该区的生态环境、防治水土流失发挥着重要的作用。研究表明,由于刺槐属于速生强耗水树种,水分成为影响黄土高原地区刺槐生长的最主要因素,随着由南向北降雨量的变化,刺槐的生长在不同地区表现不一^[11]。因此研究不同纬度下刺槐叶片的养分含量及其比值,有助于揭示环境因素对刺槐叶片含量的影响并可以对不同地区刺槐林的管理提出更加有针对性的建议。本研究对黄土高原14个样点刺槐叶片进行采样分析,研究刺槐林单一物种叶片碳、氮、磷生态化学计量学特征及其随纬度变化的空间变异性,有助于解释环境因素对植物元素化学计量比内稳性形成的作用,说明环境因素对刺槐叶片的影响程度,并为我国植物生态化学计量学特征的区域尺度变化研究提供数据支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于我国黄土高原的中部(33°43′—39°40′N, 107°28′—111°15′E),总面积约10万km²,本区地处中纬度内陆,具有大陆季风气候特点,区内的北部和西北部属半干旱季风气候类型,中南部属暖温带半干旱季风气候类型,地势西北高,东南低,北部为风沙、滩地,

中部为陕北黄土丘陵沟壑区,南部为渭北高原沟壑区,海拔800~1500m,温度和降雨量从东南到西北递减,具有明显的地域性差异。本实验由南向北选择泾阳、三原、淳化、耀州区、宜君、黄陵、洛川、富县、甘泉、延安、安塞、米脂、榆林区、神木14个采样点作为研究区,具体见图1。实际地理位置(34°42′39.79″—38°48′35.17″N, 108°40′31.6″—110°21′54.57″E)。

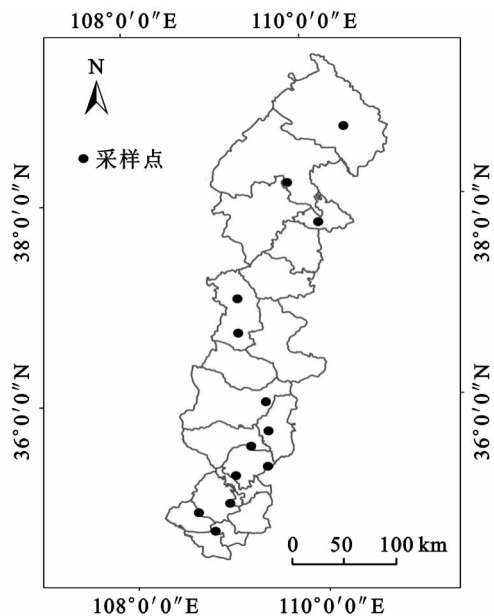


图1 采样点分布图

1.2 植物样品的采集

2011年8月末在研究区内选择临近的林相整齐、林木分布均匀、生长坡位相似的平均林龄约20a的刺槐人工林(刺槐的基因型均相同)作为研究对象,每个采样点设置阴阳两个坡面作为对照采集(除泾阳、榆阳区只设置有阳坡),每个坡面设置三个10m×10m的样方,样方内的每一棵刺槐分别设置东西南北方向采集树叶,然后将所取下的叶子混合均匀,用四分法取部分装入牛皮纸袋。后用水洗涤,自然风干后置60℃烘干,将植物叶片用粉碎机粉碎后备用。

1.3 植物养分的测定

2011年9月份对植物样品养分含量进行测定。叶片有机碳的测定采用外加热、重铬酸钾容量法;植物样品经浓硫酸—过氧化氢溶液消煮后的消煮液,用于叶片全氮、全磷的测定,全氮用凯式定氮仪,全磷用钒钼黄比色法。

1.4 数据分析

本文章中的数据于2012年3月采用Microsoft Office Excel和SPSS 17.0统计分析软件包对数据进行分析处理。对数据进行回归分析和偏相关分析。正态分布性检验采用K-S检验(One Sample Kolmogorov-Smirnov Test),如符合正态分布用算数平

均数表示总体的大小,符合对数正态分布用几何平均数表示总体的大小,采用 Excel 2013 制图。

2 结果与分析

2.1 刺槐叶片养分组成的生态化学计量学特征

阳坡刺槐与阴坡刺槐的 C,N,P 含量及其比值的范围和平均值分别如表 1 所示。由表 1 可知,阳坡刺槐叶片碳、氮、磷含量的变化范围分别为 428.88~485.16,17.84~28.69,1.56~3.04 mg/g,平均值分别为 423.89,20.96,2.17 mg/g。叶片 C : N 比为 16.10~24.78,平均值为 21.37;C : P 比为 144.52~

289.14,平均值为 214.42;N : P 比为 6.98~14.70,平均值为 10.19。阴坡刺槐叶片碳、氮、磷含量的变化范围分别为 417.74~487.63,18.59~24.86,1.53~2.67 mg/g,平均值分别为 454.02,21.16,1.99 mg/g。叶片 C : N 比为 17.58~24.11,平均值为 21.70;C : P 比为 163.32~318.92,平均值为 235.20;N : P 比为 8.70~16.26,平均值为 10.88。

通过对研究区域 12 个采样点(泾阳和榆阳区没有阴坡刺槐叶片样品)阴坡和阳坡的 C、N、P 含量进行两个独立样本的 T 检验分析,得出阴坡和阳坡的刺槐叶片三种元素含量差异性均不显著。

表 1 刺槐叶片 C,N,P,C/N,C/P,N/P 范围及平均值

项目	范围		平均值	
	阳坡	阴坡	阳坡	阴坡
C/(mg · g ⁻¹)	428.88~485.16	417.74~487.63	423.89	454.02
N/(mg · g ⁻¹)	17.84~28.69	18.59~24.86	20.96	21.16
P/(mg · g ⁻¹)	1.56~3.04	1.53~2.67	2.17	1.99
C/N	16.10~24.78	17.58~24.11	21.37	21.70
C/P	144.52~289.14	163.32~318.92	214.42	235.20
N/P	6.98~14.70	8.70~16.26	10.19	10.88

2.2 刺槐林土壤养分含量特征

表 2 为阳坡与阴坡刺槐林土壤的 C、N、P 含量及其比值的范围与平均值(刺槐林土壤养分含量数据来源于同一课题组、同一采样时间、相同研究区域的黄土高原刺槐林下土壤碳氮磷含量^[12])。

由表 2 可知,阳坡 0—10 cm 土层土壤碳、氮、磷含量的变化范围分别为 2.40~24.62,0.16~2.14,0.48~1.56 mg/g,平均值分别为 10.20,0.92,1.14 mg/g;10—20 cm 土层土壤碳、氮、磷含量的变化范

围分别为 1.48~13.3,0.18~1.18,0.53~1.53 mg/g,平均值分别为 5.95,0.57,1.06 mg/g。0—10 cm 土层土壤 C : N 比为 9.48~15.33,平均值为 12.92;C : P 比为 8.93~59.79,平均值为 22.85;N : P 比为 0.77~5.11,平均值为 1.88。10—20 cm 土层土壤 C : N 比为 9.13~13.57,平均值为 11.91;C : P 比为 7.85~37.69,平均值为 14.48;N : P 比为 0.44~3.19,平均值为 1.24。

表 2 刺槐林土壤 C,N,P,C/N,C/P,N/P 范围及平均值

项目	土层/cm	范围		平均值	
		阳坡	阴坡	阳坡	阴坡
C/(mg · g ⁻¹)	0—10	2.40~24.62	4.39~16.64	10.20	9.62
	10—20	1.48~13.3	2.93~9.74	5.95	6.01
N/(mg · g ⁻¹)	0—10	0.16~2.14	0.41~1.74	0.92	0.93
	10—20	0.18~1.18	0.31~1.28	0.57	0.62
P/(mg · g ⁻¹)	0—10	0.48~1.56	0.77~1.61	1.14	1.19
	10—20	0.53~1.53	0.70~1.45	1.06	1.10
C/N	0—10	9.48~15.33	8.58~13.75	12.92	12.53
	10—20	9.13~13.57	7.60~13.41	11.91	11.77
C/P	0—10	8.93~59.79	9.46~47.71	22.85	21.90
	10—20	7.85~37.69	5.99~31.28	14.48	14.72
N/P	0—10	0.77~5.11	0.76~3.63	1.88	1.78
	10—20	0.44~3.19	0.54~2.65	1.24	1.25

阴坡 0—10 cm 土层土壤碳、氮、磷含量的变化范围分别为 4.39~16.64,0.41~1.74,0.77~1.61 mg/g,

平均值分别为 9.62,0.93,1.19 mg/g;10—20 cm 土层土壤碳、氮、磷含量的变化范围分别为 2.93~9.74,

0.31~1.28,0.70~1.45 mg/g,平均值分别为 6.01,0.62,1.10 mg/g。0—10 cm 土层土壤 C:N 比为 8.58~13.75,平均值为 12.53;C:P 比为 9.46~47.71,平均值为 21.90;N:P 比为 0.76~3.63,平均值为 1.78。10—20 cm 土层土壤 C:N 比为 7.60~13.41,平均值为 11.77;C:P 比为 5.99~31.28,平均值为 14.72;N:P 比为 0.54~2.65,平均值为 1.25。

2.2.1 刺槐叶片养分含量的地理分布格局 如图 2 所示,刺槐叶片 C、N、P 含量在阳坡和阴坡随纬度变

化趋势是基本一致的,C 随着纬度升高呈现先增加再减小的趋势,N 和 P 的含量均随纬度升高而增加,只有阴坡刺槐叶片 C 含量随着纬度的升高呈现显著的先增加再减小的趋势,其他均未达到显著水平。

图 3 所示为刺槐叶片的养分含量比值的地理分布格局。刺槐叶片 C、N、P 含量比值在阳坡和阴坡随纬度变化趋势是基本一致的,C/N 和 C/P 随着纬度的升高而减小,N/P 均随着纬度的升高没有明显变化,但是均未达到显著水平。

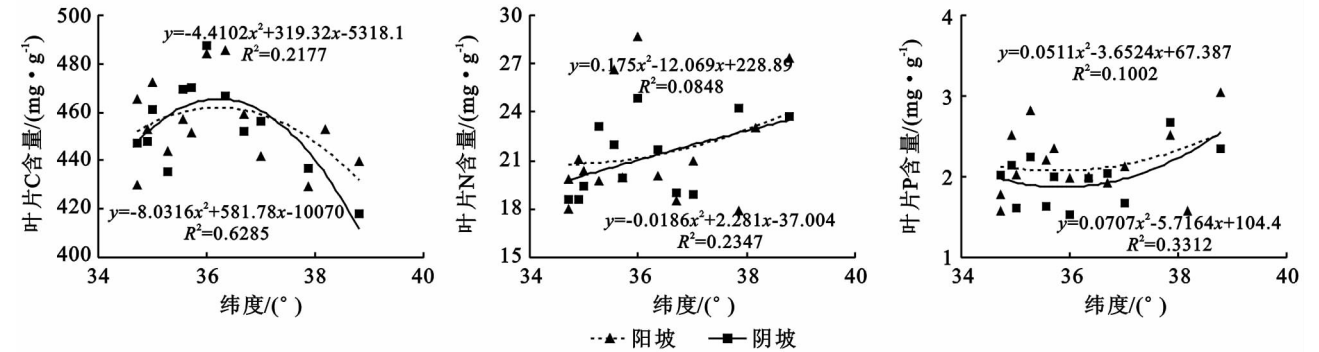


图 2 刺槐叶片 C、N、P 含量的地理分布格局

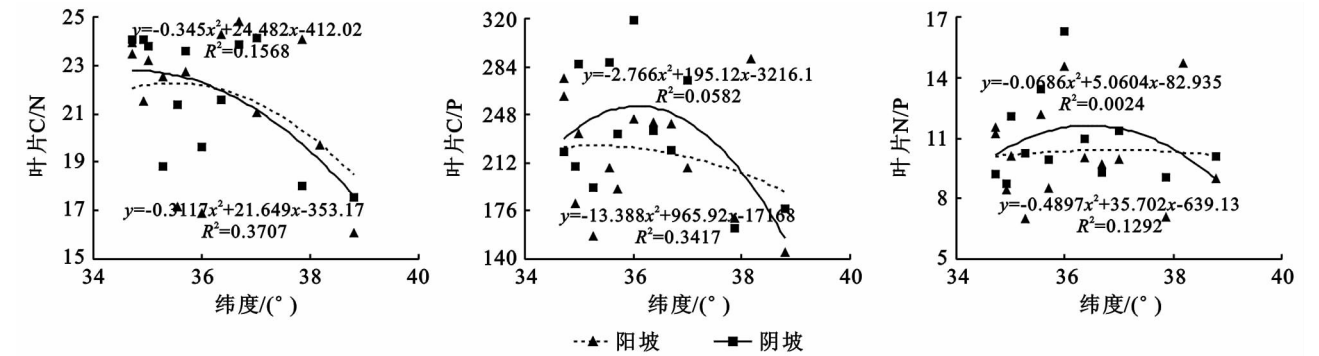


图 3 刺槐叶片 C/N、C/P、N/P 的地理分布格局

表 3 叶片—不同层次土壤间的 C、N、P、C/N、C/P、N/P 的相关性

项目		偏相关系数	
		阳坡	阴坡
C	叶片与 0—10 cm 土壤	-0.586*	-0.654*
	叶片与 10—20 cm 土壤	-0.674*	-0.841**
N	叶片与 0—10 cm 土壤	-0.270	-0.027
	叶片与 10—20 cm 土壤	-0.267	-0.061
P	叶片与 0—10 cm 土壤	0.375	0.217
	叶片与 10—20 cm 土壤	0.128	-0.007
C/N	叶片与 0—10 cm 土壤	-0.186	-0.382
	叶片与 10—20 cm 土壤	-0.245	0.079
C/P	叶片与 0—10 cm 土壤	-0.195	-0.299
	叶片与 10—20 cm 土壤	-0.080	-0.389
N/P	叶片与 0—10 cm 土壤	-0.275	-0.218
	叶片与 10—20 cm 土壤	-0.121	-0.377

注: * 表示 $P<0.05$, ** 表示 $P<0.01$ 。

2.2.2 刺槐叶片与土壤养分含量的相关关系 通过控制纬度因子的影响,分析了刺槐叶片与土壤养分含量之间的相关关系。在阴坡和阳坡叶片 C 与土壤 N 之间均有显著负相关关系($P<0.05$),其中阴坡叶片 C 与上下层土壤 N 呈现极显著的负相关关系,其相关系数分别为-0.809**和-0.816**。而叶片 C 与土壤 P 之间没有显著相关关系。其它分析结果见表 3,只有叶片 C 和两层土壤 C 在阴坡和阳坡均呈现显著的负相关关系($P<0.05$),其中阴坡叶片 C 和土壤 10—20 cm 的 C 之间有极显著的负相关关系($P<0.01$),而刺槐叶片其他养分含量和比值与土壤之间均没有显著相关关系。

3 讨论

3.1 刺槐叶片的养分生态化学计量学特征 通过对阴坡刺槐叶片和阳坡刺槐叶片养分含量

的差异性分析得出阴坡和阳坡的刺槐叶片三种元素含量及其比值差异性均不显著。但由于阳坡刺槐叶片的C、N、P含量算数平均值分别为423.89, 20.96, 2.17 mg/g, 阴坡刺槐叶片的C、N、P含量算数平均值分别为454.02, 21.16, 1.99 mg/g。整体来看阴坡刺槐叶片C和N含量高于阳坡, P则相反。在研究区域内阳坡刺槐叶片具有较高的储存C和N的能力, 阴坡刺槐叶片储存P的能力较高。

植物氮磷比不仅是决定群落结构和功能的关键性指标, 也可以作为对生产力起限制作用的营养元素的指示剂。Braakhekke等^[13]指出, 当N/P小于14时, 植物生长主要受N限制, 当N/P大于16时, 植物生长主要受P限制。N/P除了榆阳区 and 富县都在14以下, 表明陕西中部地区受N的限制, 由于黄土高原南北主要类型耕层土壤有机碳、全氮含量低于全国耕层土壤有机碳、全氮含量平均水平^[14], 所以这一结果也吻合黄土高原氮含量较低这一普遍认识。

3.2 刺槐叶片养分含量的地理分布格局及其与土壤含量的相关关系

植物叶片养分含量随纬度的变化规律受诸多因素的影响, 包括土壤、气候条件、刺槐的生理特征等。本研究发现, 只有阴坡的刺槐叶片C含量随着纬度升高呈现显著变化趋势, 而纬度的变化并没有显著影响N、P含量, 这说明了刺槐叶片N、P元素含量具有保守性, 受环境因素影响较小, 所以含量没有显著变化。

在控制纬度因子影响下, 刺槐叶片C含量与土壤N含量成显著负相关关系, 可能是由于植物在生长过程中会从土壤中吸收大量的氮素, 然后通过光合作用为自己制造足够的有机物质, 而由于刺槐的枯枝落叶凋落到土壤表面后分解的速度较慢, 所以有机质回归土壤的速率慢, 从而造成刺槐叶片从土壤中吸收足够的氮素后, 土壤氮含量降低而植物的有机物质含量增加。由于土壤全氮主要来源于土壤植物残体分解与合成所形成的有机质^[15], 所以刺槐叶片C和两层土壤C在阴坡和阳坡也均呈现显著的负相关关系。阴坡叶片C和土壤上下层N之间有极显著负相关关系, 可能是由于刺槐属于速生强耗水树种, 水分成为影响黄土高原地区刺槐生长的最主要因素, 阳坡接受的太阳辐射和日照时数大于阴坡, 因此地表水分蒸发较大, 无法供应刺槐的生长, 相比较下阴坡土壤的较高含水量更有利于刺槐的生长。此外有关观测结果证实阳坡的土壤侵蚀量一般大于阴坡^[16], 侵蚀过程中的土壤水分、养分等的流失必然影响刺槐的生长状况。所以在阴坡生长的刺槐吸收足够的氮素以供其生长。植物所利用的磷来源于土壤, 虽然土壤中全磷

含量非常充足, 但能够被植物吸收利用的有效态磷含量很少, 包括土壤水溶态磷和部分有机磷, 这可能导致刺槐叶片有机质含量与土壤全磷含量之间没有显著相关关系。

4 结论

刺槐叶片C含量随纬度升高呈现先增加后减小的显著趋势。刺槐叶片化学计量特征中, 只有C与纬度之间有显著的相关关系, 这说明了刺槐叶片N、P元素含量具有保守性, 受环境因素影响较小, 所以含量没有显著变化。刺槐叶片C与土壤N含量、土壤C含量之间有显著的相关关系, 这是由于植物利用大量营养元素数量较大, 这些元素通常在土壤中容易出现短缺, 并且凋落物的分解速率比较慢, 导致有机质不能及时归还土壤, 从而造成在土壤氮含量降低时刺槐叶片的有机物质含量增加。

刺槐叶片养分含量及其随纬度的变化规律受诸多因素影响, 包括土壤、气候条件、刺槐的生理特征, 人为因素等, 所以结合这些因子对刺槐叶片生态化学计量学特征和空间分布格局进行进一步研究是非常有必要的。

参考文献:

- [1] Elser J J, Sterner R W, Gorokhova E, et al. Biological stoichiometry from genes to ecosystems[J]. Ecology Letters, 2000, 3(6): 540-550.
- [2] 曾德慧, 陈广生. 生态化学计量学: 复杂生命系统奥秘的探索[J]. 植物生态学报, 2005, 29(6): 1007-1019.
- [3] 程滨, 赵永军, 张文广, 等. 生态化学计量学研究进展[J]. 生态学报, 2010, 30(6): 1628-1637.
- [4] Kang H Z, Zhuang H L, Wu L L, et al. Variation in leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry in *Picea abies* across Europe: An analysis based on local observations[J]. Forest Ecology and Management, 2011, 261(2): 195-202.
- [5] Adams M B, Campbell R G, Allen H L, et al. Root and foliar nutrient concentrations in loblolly pine: Effects of season, site and fertilization[J]. Forest Science, 1987, 33(4): 984-996.
- [6] 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.
- [7] 王凯博, 上官周平. 黄土丘陵区燕沟流域典型植物叶片C_NP化学计量特征季节变化[J]. 生态学报, 2011, 17(3): 4985-4991.
- [8] Harpole W S, Ngai J T, Cleland E E, et al. Nutrient co-limitation of primary producer communities[J]. Ecology Letters, 2011, 14(9): 852-862.

5 低扰动水土保持技术效果分析

通过对山西省输变电工程低扰动塔基设计、不落地放线技术、低扰动运输方式及低扰动水土保持防治措施的观测与分析,经过计算得出低扰动水土保持技

术与传统施工工艺相比可以减少占地面积 4.55%~34.42%,土石方量减少 7.81%~25.86%,土建投资减少 0.59%~22.49%,总投资减少 1.83%~17.50%。减少的数量与地形相关,山地及丘陵所占比例越大,效果越明显,见表 7。

表 7 低扰动技术与传统技术比较

	长度/ km	地形	传统施工工艺				低扰动技术				减少/%			
			工程占 地/hm ²	工程土 石方量/m ³	土建投 资/万元	工程总投 资/万元	工程占 地/hm ²	工程土 石方量/m ³	土建投 资/万元	工程总投 资/万元	占地	土石 方量	土建 投资	总投资
古交电厂送出工程	25.2	丘陵 11.90%,山地 68.2%,高山 19.8%	12.56	46016	1636	6422	8.2	34116	1268	5333	34.42	25.86	22.49	16.96
霍州电厂—霍州输变电工程	37.5	丘陵 14.70%,山地 68.00%,高山 17.30%	13.89	64665	2068	10672	10.1	51065	1459	8804	27.19	21.03	29.45	17.50
同煤二期送出工程	9.5	平地 100%	5.05	35901	3128	5514	4.82	33300	3110	5413	4.55	7.81	0.59	1.83
大同东输变电工程	49	平地 51.02%,丘陵 42.86%,河网 6.12%	15.90	80904	12139	18968	14.9	73459	11047	17474	6.04	9.20	9.00	7.88

6 结 论

(1) 掏挖式基础、岩石嵌固式基础、斜插基础及锚杆基础开挖面积较传统大开挖基础占地面积有效减少。不同基础型式施工所产生的临时堆土量和弃渣量表现为岩石锚杆式最少,岩石嵌固式和基础掏挖式次之,大开挖台阶式最多,因此在满足设计要求的情况下建议选择锚杆类基础型式。

(2) 采用长短腿配高低基础的组合型式施工中的扰动面积及弃渣量明显低于等长腿配等高基础、等长腿配高低基础、长短腿配等高基础等组合型式,采取长短退配高低基础可以有效降低施工中的水土流失。

(3) 不落地放线技术和索道运输方式的应用可有效减少施工中扰动地表面积,具有明显的生态效益和经济效益。

(4) 采取土工布覆盖和植被恢复措施代替表土剥离和人工种植乔灌木后可有效降低水土流失量,节约水土保持投资。

参考文献:

[1] 水利部,中国科学院,中国工程院. 中国水土流失防治与生态安全:水土流失数据卷[M]. 北京:科学出版社,2010:38-52.

[2] 郭索彦,赵永军.“十五”期间我国开发建设项目水土保持工作概况[J]. 中国水利,2009(7):12-14.

[3] 刘宪春. 浅论开发建设项目水土保持监测指标[J]. 水土保持通报,2007,27(4):67-70.

[4] 王卫. 输电线路杆塔及基础设计中的环境保护措施[J]. 西北水力发电,2005,21(6):25-26.

[5] 杨家旺. 输变电工程水土流失规律研究及防治对策[D]. 武汉:华中农业大学,2010:39-40.

[9] Richardson S J, Allen R B, Doherty J E. Shifts in leaf N:P ratio during resorption reflect soil P in temperate rainforest[J]. Functional Ecology, 2008, 22 (4): 738-745.

[10] Townsend A R, Cleveland C C, Asner G P, et al. Controls over foliar N:P ratios in tropical rain forests [J]. Ecology, 2007, 88(1):107-118.

[11] 薛敏,张文辉,杜盛. 黄土高原刺槐群落优势植物水分生理生态研究[J]. 西北林学院学报,2011,26(1):27-34.

[12] 张向茹,马露莎,陈亚南,等. 黄土高原不同纬度下刺槐林土壤生态化学计量学特征研究[J]. 土壤学报,2013, 50(4):818-825.

[13] Braakhekke W G, Hooftman D A P. The resource balance hypothesis of plant species diversity in grassland [J]. Journal of Vegetation Science, 1999, 10(2): 187-200.

[14] 党亚爱. 黄土高原南北主要类型土壤有机碳氮库分布特征究[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2008.

[15] 党亚爱,李世清,王国栋,等. 黄土高原典型土壤全氮和微生物氮剖面分布特征研究[J]. 植物营养与肥料学报,2007,13(6):1020-1027.

[16] 王礼先,朱金兆. 水土保持学[M]. 北京:中国林业出版社,2005.

(上接第 61 页)