

北京平原地区不同造林树种林下土壤化学计量特征

郑永林, 王海燕*, 解雅麟, 秦倩倩, 李翔

(北京林业大学林学院, 北京 100083)

摘要: 土壤有机碳、氮和磷浓度及其比例对林木的生长发育具有重要影响, 探究树种-土壤养分之间的关系, 可为平原地区人工林规划和管理以及土壤肥力恢复提供科学指导。以北京市大兴区平原造林区域 5 种人工纯林(国槐、毛白杨、银杏、油松和榆树)为研究对象, 对林下 0~20 cm 和 20~40 cm 土壤有机碳、全氮和全磷浓度, 以及生态化学计量特征和相关性进行研究。结果表明: (1) 在 0~20 cm, 树种对土壤有机碳、全氮和全磷浓度均存在显著影响 ($P<0.05$); 在 20~40 cm, 树种对土壤全氮浓度影响显著。随土层加深, 各树种林下土壤有机碳、全氮和全磷总体上呈下降趋势。研究区土壤有机碳、全氮和全磷浓度均低于全国平均值, 尤其以缺氮最为严重。(2) 在 0~20 cm, 不同树种之间土壤 C:N、C:P 和 N:P 均存在显著差异。榆树林土壤 C:N 显著大于毛白杨林、油松林和银杏林, 银杏林土壤 C:P 显著高于毛白杨林和榆树林, 而银杏林土壤 N:P 显著高于国槐林和榆树林。随着土层加深, 土壤 C:N、C:P 和 N:P 变化各异。土壤 C:P 和 N:P 均远低于全国土壤均值。(3) 相关分析表明, 土壤全氮主要影响 C:N 和 N:P, 土壤有机碳主要影响 C:P。国槐林和油松林在改善土壤养分方面有较好的效果。北京市平原造林区域的氮可能是影响林木生长的主要限制性元素, 建议在后期的抚育管理过程中施用适量的氮肥, 为造林树种提供良好的生长环境。

关键词: 平原造林; 土壤养分; 生态化学计量; 相关性分析; 限制元素

中图分类号: S718.5

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2019)06-0968-06

Soil chemical stoichiometry characteristics under different afforestation species in plain area, Beijing

ZHENG Yonglin, WANG Haiyan, XIE Yalin, QIN Qianqian, LI Xiang

(College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083)

Abstract: Soil organic carbon (C), nitrogen (N) and phosphorus (P) concentrations and their ratios have important impacts on tree growth and development. Exploring the relationship between tree species and soil nutrients will provide guidance for plantation planning and management and soil fertility restoration in the plains. In this study, five kinds of pure plantations (*Sophora japonica*, *Populus tomentosa*, *Ginkgo biloba*, *Pinus tabulaeformis* and *Ulmus pumila*) in the plain afforestation area, Daxing District, Beijing, were selected to study soil organic carbon, total nitrogen, total phosphorus, their ecological stoichiometry and relationship at depths of 0-20 and 20-40 cm. The results showed that: 1) At 0-20 cm, the tree species had significant effects on the soil organic carbon, total nitrogen and total phosphorus ($P<0.05$), while a significant difference was just observed for the soil total nitrogen between the tree species at 20-40 cm. With the increase of the soil depth, soil organic carbon, total nitrogen and total phosphorus concentrations showed decreasing trends for all tree species. Soil organic carbon, total nitrogen and total phosphorus in the study area were lower than the average of China, and especially nitrogen shortage was the most serious. 2) At 0-20 cm, there were significant differences in soil C:N, C:P and N:P ratios. The soil C:N in *Ulmus pumila* plantation was significantly higher than plantations of *Populus tomentosa*, *Pinus tabulaeformis* and *Ginkgo biloba*. Soil C:P in *Ginkgo biloba* plantation was significantly higher than *Populus tomentosa* and *Ulmus pumila*. Soil N:P in *Ginkgo biloba* plantation was significantly higher than *Populus tomentosa* and *Sophora japonica*. With the increase of the soil depth, its C:N, C:P and N:P ratios varied differently. The C:P and N:P ratios of the soil were lower than the national average. 3) The correlation analysis showed that C:N

收稿日期: 2019-05-09

基金项目: 典型类型平原造林地多功能经营试验监测项目资助。

作者简介: 郑永林, 硕士研究生。E-mail: zhengyonglin95@126.com

* 通信作者: 王海燕, 博士, 副教授。E-mail: haiyanwang72@aliyun.com

and N:P ratios in the plantation soils of the study area were mainly affected by the soil total nitrogen, while its C:P was mainly affected by the organic carbon. *Sophora japonica* and *Pinus tabulaeformis* had better effects in improving soil nutrient concentrations. Nitrogen may be the main limiting element for the tree growth in the plain afforestation area of Beijing. Proper amount of nitrogen fertilizer should be applied in the later tending and management process to provide good growth environment for afforestation tree species.

Key words: plain afforestation; soil nutrients; ecological stoichiometry; correlation analysis; limiting element

随着人口与经济的高密度聚集, 以及中心城区的持续性外扩, 约占北京市面积 1/3 的平原区域面临的生态与环境问题日趋严重。为了解决这一现状, 北京市政府于 2012 年发起了平原造林工程。6 年来, 共在平原区新增森林面积 6.67 万 hm^2 。造林工程结束后, 北京市平原地区森林覆盖率增加了 10.75%。平原造林意义重大, 从工程的规划到实施都引起了不少学者的关注。目前关于平原造林工程主要的研究都聚集在生态系统服务价值评估^[1-2]、居民满意度^[3]和造林效果评价^[4]等方面, 还鲜见对平原造林地区林木生长现状和土壤养分评估方面的研究^[5]。

生态化学计量学主要用来分析多重化学元素(主要是碳、氮、磷)的质量平衡对生态交互作用的影响^[6], 并越来越多地应用于研究森林生态系统中林木对土壤养分的响应中。研究人工林土壤化学计量特征, 有助于我们发现限制人工林生长的土壤肥力因子, 对土壤养分循环和平衡也有重要意义^[7]。生态系统生产力由所处环境中的氮和磷等的有效量控制, 植物 C:N 和 C:P 值的大小在一定程度上由土壤氮和磷调节^[8]。李占斌等^[9]通过对黄土丘陵区的研究发现, 氮是 C:P 与 N:P 的主要控制因子, 在生产力限制因素中氮的响应比磷敏感。李张敏等^[10]研究红壤丘陵区杉木林土壤化学计量特征, 发现杉木林地区为磷限制, 氮相对丰富。何琴飞等^[11]研究钦州湾红树林土壤化学计量特征, 结果表明 C:N 远高于中国土壤均值, 该区泥质土生态化学计量高于沙质或沙泥质土。李慧等^[12]研究黄土丘陵区刺槐人工林的化学计量特征, 结果表明土壤中磷是限制刺槐生长的主要因子, C:P 对土壤-凋落物-植物的养分转化关系最为敏感。土壤碳、氮和磷生态化学计量比反映植物和生态系统的养分平衡^[13]。纵观已有的文献, 发现在北京平原地区开展不同树种人工林土壤养分含量及化学计量特征研究较少。为了深入探究树种-土壤养分之间的关系, 找出限制北京平原地区人工林生长发育的主要元素, 笔者选取北京市大兴区 5 种典型的平原造林树种, 对其林地土壤养分元素进行生态化学计量分析, 以期为平原地区人工林规划和管理以及土壤肥力恢复提供科学指导。

1 研究区概况

研究区位于北京市大兴区平原造林地区 ($39^{\circ}38'39'' \sim 39^{\circ}4'44'' \text{N}$, $116^{\circ}13'12'' \sim 116^{\circ}13'38'' \text{E}$), 属于永定河洪积区, 具有坡度小、地势平坦的特点。河道全年干涸, 导致水资源匮乏, 鲜有植被。距离村镇较远, 人为干扰少, 土壤养分变异较小。该区属暖温带亚湿润气候区。年平均气温为 11.6°C ; 年平均均降水为 556 mm, 降雨主要集中在 7—9 月。土壤类型以通透性好但保肥蓄水能力差的砂质潮土和壤质潮土为主特点。主要树种为榆树 (*Ulmus pumila*)、国槐 (*Sophora japonica*)、银杏 (*Ginkgo biloba*)、油松 (*Pinus tabulaeformis*) 和毛白杨 (*Populus tomentosa*) 等, 林下草本主要有反枝苋 (*Amaranthus retroflexus*)、狗尾巴草 (*Setaria viridis*)、蒺藜 (*Tribulus terrester*)、裂叶牵牛 (*Pharbitis nil*) 和灰绿藜 (*Chenopodium glaucum*) 等。

2 材料与方法

2.1 样地调查与土样采集

该区于 2015 年造林, 2017 年春季进行抚育, 主要包括浇水和修枝。2017 年 7 月, 在该区域设置立地条件相似的人工林样地 16 块, 其中国槐林 4 块, 毛白杨林 2 块, 银杏林 3 块, 油松林 3 块, 榆树林 4 块。在每个样地内随机选取 5 个样点, 用土钻分别取 0~20 cm 和 20~40 cm 土层土壤样品, 制成混合土样, 土壤经过风干、去杂后, 过 0.25 mm 筛测定土壤养分。样地调查采用每木检尺的方法, 调查因子有树高、胸径、株数密度、枝下高和冠幅等, 样地位置图和人工林样地概况参见文献^[5]。

2.2 土壤养分测定^[14]

采用外加热重铬酸钾氧化-容量法测定土壤有机碳; 土样经硫酸-高氯酸消煮后, 采用半微量凯氏定氮法测定土壤全氮, 钼锑抗比色-紫外分光光度法测定土壤全磷。

2.3 数据处理

单因素方差分析、多重比较、*t* 检验和相关性分析采用 Excel 2013 和 SPSS 24 完成。化学计量比采用质量比。

3 结果与分析

3.1 树种对土壤养分状况的影响

不同造林树种下 0~20 和 20~40 cm 土壤有机碳、全氮和全磷浓度如图 1 所示。

北京平原地区 5 种林分有机碳、全氮和全磷均随土层的加深而降低。在 0~40 cm, 国槐林、毛白杨林、银杏林、油松林和榆树林有机碳含量分别为 4.74~7.79、3.67~5.51、3.71~7.62、4.41~6.58 和 3.92~6.74 g·kg⁻¹。除毛白杨林外, 其余 4 种林分不同土壤深度间有机碳含量均存在显著差异 (P<0.05)。在 0~20 cm, 不同林分间有机碳含量存在显著差异 (P<0.05), 银杏林和国槐林显著高于榆树林和毛白杨林 (P<0.05)。在 20~40 cm, 不同林分下有机碳无显著差异 (P>0.05)。

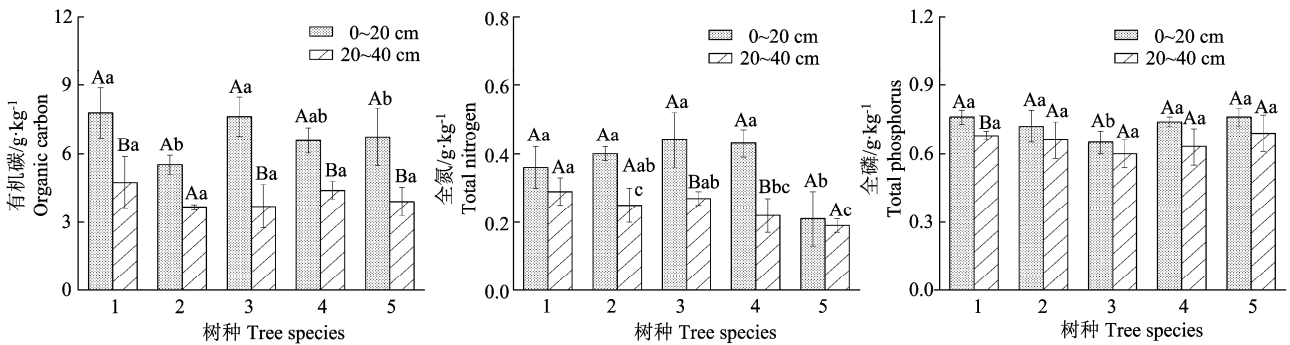
在 0~40 cm, 国槐林、毛白杨林、银杏林、油松林和榆树林土壤全氮浓度分别为 0.29~0.36、0.25~0.40、0.27~0.44、0.22~0.43 和 0.19~0.21g·kg⁻¹。银杏林和油松林土壤全氮浓度在 0~20 cm 与 20~40 cm 存在显著差异 (P<0.05), 而国槐林、毛白杨林和榆树林不同土壤深度间均无显著差异 (P>0.05)。在 0~20 cm, 国槐林、毛白杨林、银杏林和油松林土壤全氮显著高于榆树林 (P<0.05)。在 20~40 cm, 国槐林和银杏林土壤全氮显著高于榆树林 (P<0.05)。

土壤全磷与有机碳、全氮的变化趋势类似。国槐林不同土壤深度间土壤全磷浓度存在显著差异 (P<0.05), 而其余 4 种林分不同土壤深度间均无显著差异 (P>0.05)。在 0~20 cm, 银杏林土壤全磷显著低于国槐林、毛白杨林、油松林和榆树林 (P<0.05)。在 20~40 cm, 5 种林分土壤全磷无显著差异 (P>0.05)。

3.2 树种对土壤化学计量的影响

不同树种人工林在 0~20 cm 和 20~40 cm 土壤深度的 C:N、C:P、N:P 变化趋势各不相同 (见图 2)。各林分不同土壤深度间土壤 C:N 差异不显著 (P>0.05)。国槐林、银杏林和油松林不同土壤深度间土壤 C:P 差异显著 (P<0.05), 而毛白杨林和榆树林不同土壤深度间的 C:P 则无显著差异 (P>0.05)。银杏林和油松林不同土壤深度间土壤 N:P 差异显著 (P<0.05), 其余 3 种林分不同土壤深度间则无显著差异 (P>0.05)。

在 0~20 cm, 榆树林土壤 C:N 显著高于毛白杨林、银杏林和油松林 (P<0.05), 银杏林土壤 C:P 显著高于毛白杨林和榆树林 (P<0.05), 银杏林土壤 N:P 显著高于国槐林、榆树林 (P<0.05)。在 20~40 cm, 5 种林分土壤 C:N、C:P 均无显著差异 (P>0.05), 而银杏林下土壤 N:P 显著高于毛白杨林、油松林和榆树林 (P<0.05)。



1. *S. japonica*; 2. *P. tomentosa*; 3. *G. biloba*; 4. *P. tabuliformis*; 5. *U. pumila*。图中误差线为标准差, 大写字母表示相同树种的养分浓度在不同土层差异显著 (P<0.05), 小写字母表示不同树种的养分浓度在同一土层差异显著 (P<0.05)。下同

The error line is the standard deviation in the figure. Different capital letters are significantly different at the 0.05 level among different depths at the same tree species; different lowercase letters are significantly different at the 0.05 level between different tree species for the same depth. The same below

图 1 不同树种人工林土壤养分浓度

Figure 1 Soil nutrient concentrations under different tree species plantations

3.3 土壤化学计量特征与各元素之间的关系

在 0~20 cm, 土壤化学计量特征与各元素含量关系密切 (表 1), 土壤碳、氮和磷两两之间没有显著相关性 (P>0.05)。C:N、C:P 和 N:P 两两之间,

N:P 与 C:N 呈极显著负相关 (P<0.01), N:P 与 C:P 呈显著正相关 (P<0.05)。有机碳与 C:P 极显著正相关 (P<0.01); 土壤全氮与 C:N 极显著负相关 (P<0.01), 与 N:P 极显著正相关 (P<0.01); 土壤全

磷与 C:P 显著负相关 ($P < 0.05$); 其余元素与化学计量特征之间均无显著相关性 ($P > 0.05$)。20~40 cm 土壤各元素与化学计量比之间的相关系数与 0~20

cm 基本一致, 但有机碳与 C:N 呈显著正相关 ($P < 0.05$), C:N 与 C:P 显著正相关 ($P < 0.05$), N:P 与 C:P 间无显著相关性 ($P > 0.05$)。

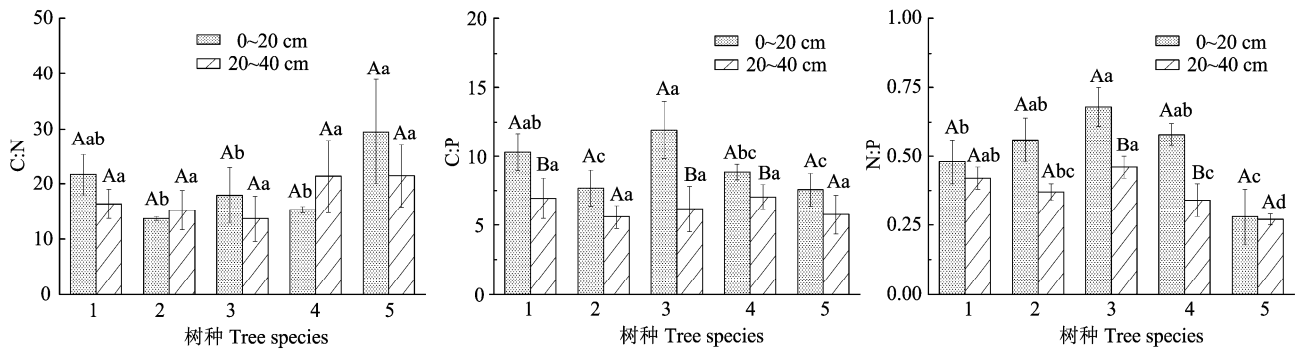


图 2 不同树种人工林土壤 C、N、P 计量特征

Figure 2 Soil C, N and P stoichiometry characteristics under different tree species plantations

表 1 土壤肥力评价因子的相关系数 ($n=16$)

Table 1 Correlation coefficients between soil fertility assessment factors ($n=16$)

土壤深度 Soil depth		OC	TN	TP	C:N	C:P	N:P
0~20 cm	OC	1					
	TN	0.445	1				
	TP	-0.137	-0.218	1			
	C:N	-0.116	-0.875**	0.125	1		
	C:P	0.910**	0.458	-0.529*	-0.147	1	
	N:P	0.470	0.964**	-0.462	-0.815**	0.584*	1
20~40 cm	OC	1					
	TN	0.173	1				
	TP	0.105	0.175	1			
	C:N	0.521*	-0.724**	-0.147	1		
	C:P	0.880**	0.021	-0.368	0.603*	1	
	N:P	0.067	0.895**	-0.270	-0.680**	0.132	1

注: “*” 和 “**” 分别表示显著相关 ($P < 0.05$) 和极显著相关 ($P < 0.01$)

Note: “*” and “**” indicate significant correlation at the 0.05 level and very significant correlation at the 0.01 level, respectively. OC, organic carbon; TN, total nitrogen; TP, total phosphorus

4 讨论

土壤氮和磷在植物生长过程中发挥着重要作用, 是植物生长发育所必需的营养, 同时也影响着植物体内营养元素含量及其组成^[15-16]。人工林的树种选择及配置影响着林下凋落物的数量和质量以及分解速率, 不同树种对土壤有机碳库数量和质量的影响不同^[17]。参照中国第二次土壤普查养分分级标准^[18], 在 0~20 cm, 5 种树种人工林有机碳均处于中下 (4 级) 水平, 全氮处于极缺 (6 级) 水平, 全磷处于中等 (3 级) 水平。0~20 cm 有机碳在 5.51~7.79 g·kg⁻¹ 间, 低于全国有机碳均值 24.56 g·kg⁻¹^[19], 显著低于陕西落叶松人工林^[20]、喀斯特

峰丛洼地^[21]、东北东部森林^[22]和小兴安岭白桦林^[23]等森林群落。这可能是由于有机碳形成和分解受植被类型、温度、降水、成土母质和土壤性质等的综合影响, 且造林地为永定河河套地区, 造林前植被稀少, 土壤贫瘠, 这些因素限制了土壤中有有机物质的积累、分解和迁移, 导致有机碳较低。5 种林分土壤全氮远远低于全国土壤平均水平 (1.88 g·kg⁻¹)^[19]。这说明造林虽然会改变当地土壤全氮浓度, 但其中土壤全氮浓度最高的银杏 (0.43 g·kg⁻¹) 与最低的榆树 (0.21 g·kg⁻¹) 均处于极度缺乏状态, 氮是影响北京平原地区人工林生长的主要限制因素。因此, 在植被恢复过程中, 应注重添加适量氮肥。本研究中土壤全磷与长白山温带针阔混交林 (0.7 g·kg⁻¹)^[24]和全国水

平 ($0.78 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[19]相当, 高于广东鼎湖山亚热带常绿阔叶林 ($0.4 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[24]。土壤磷来源相对固定, 基本不能被植物直接吸收利用, 仅有少量水溶性磷和弱酸溶性磷可以被吸收, 且磷具有移动性差的特点, 不易由表面移动到根系附近供植物吸收, 永定河套地区土壤 pH 值偏高, 属于中强碱性土壤, 土壤中的磷易沉淀、被吸附而降低了其有效性。

土壤 C:N 通常用来衡量土壤质量, 也可以表现土壤碳、氮平衡状况, 进而对有机碳和全氮的循环产生影响^[25]。有研究表明, 土壤 C:N 与凋落物分解速率呈反比^[26]。本研究中 5 种林分土壤 C:N 在 13.65~29.52 之间, 低于陈印平等^[27]在黄河三角洲测得各人工林土壤 C:N 31.30~44.77, 高于全国森林土壤平均值 14.60^[28]和全球土壤平均值 13.33^[29]。土壤表层的 C:N 较高, 表明有机质矿化作用较慢。这可能是由于北京平原地区造林时间短、林龄小、凋落物等返还土壤的比例少及人为干扰较大等因素造成。在 0~20 cm, 榆树林土壤 C:N 显著高于毛白杨林、银杏林和油松林。由于造林前期榆树林生长迅速消耗了较多的氮素, 故榆树林土壤全氮浓度较低, 使得榆树林土壤具有较高的 C:N。在 20~40 cm, 林木对土壤的影响较小, 故土壤 C:N 没有显著差异。

土壤 C:P 是衡量微生物矿化土壤有机物质释放磷或从环境中吸收固持磷潜力的一种指标, 是土壤磷矿化能力的标志^[30]。较低的土壤 C:P 是土壤磷有效性高的标志, 这是因为 C:P 较低时, 微生物分解有机质释放养分, 对土壤有效磷有促进效果; 当 C:P 较高时, 微生物与植物竞争土壤的无机磷, 抑制植物的生长^[31]。在 0~20 cm, 土壤 C:P 从大到小依次是银杏林 (11.92) > 国槐林 (10.30) > 油松林 (8.85) > 毛白杨林 (7.68) > 榆树林 (7.56), 远低于全国土壤平均值 73:1^[28], 说明该地区有机质较低。5 种林分在 0~20 cm 土壤 C:P 均大于 20~40 cm, 这是由于 0~20 cm 与 20~40 cm 土壤全磷差异不大, 而有机碳却有显著差异所致。在 0~20 cm, 毛白杨林和榆树林土壤 C:P 显著低于银杏林和国槐林 ($P < 0.05$)。各树种形成了不同林下土壤微生境, 对有机碳的吸收消耗量不同, 导致了土壤 C:P 有较大的差异。

土壤 N:P 反映土壤对林木氮磷养分的供应比例, 从而诊断出限制树木生长发育的主要元素。本研究中, 土壤 N:P 值分别为银杏林 (0.68)、油松林 (0.58)、毛白杨林 (0.56)、国槐林 (0.48) 和榆树林 (0.28), 远远低于全国森林土壤平均值 (5.0)^[28], 表明研究区在一定程度上受到氮的制约, 如黄河三

角洲土壤 N:P 为 0.76, 为显著的氮缺乏^[27]。N:P 随着土壤深度的增加而减少, 可能是由于全氮在不同土壤深度的变异大, 而全磷则由于自身的生物地球化学循环特征, 受季节变化和土层影响较小的缘故。由于榆树林的快速生长消耗了大量的土壤氮素, 而对于土壤磷素的需求各树种较为平均, 导致榆树林在 0~20 cm 和 20~40 cm 土壤 N:P 均最低。值得注意的是土壤 N:P 反映的是土壤全氮与全磷的计量比, 而能被植物吸收的却是有效氮和有效磷; 因此 N:P 在土壤养分限制诊断方面有一定的局限性。

土壤 C:N 与全氮的相关性大于与有机碳的相关性, C:P 与有机碳的相关性大于与全磷的相关性, N:P 与全氮的相关性大于与全磷的相关性, 表明研究区人工林土壤 C:N 和 N:P 主要受土壤全氮的影响, C:P 主要受有机碳的影响。因此, 在北京平原地区对人工林进行抚育时应注意氮肥的使用, 以保证人工林地可以发挥其相应的生态功能。今后研究北京市平原地区林下土壤碳、氮和磷浓度以及化学计量时, 应结合各树种的细根或叶片养分浓度及其化学计量比进行分析, 并辅以长期的监测, 揭示树种对土壤养分的影响, 以及养分在土壤-根系-叶片之间的转化动态, 为北京市平原造林地区森林经营、碳循环和低效林改造提供参考。

参考文献:

- [1] 黄杰龙, 幸绣程, 彭秋原, 等. 基于生态文明视角的北京平原造林工程绩效评价[J]. 林业经济, 2017, 39(9): 37-42.
- [2] 唐秀美, 潘瑜春, 高秉博, 等. 北京市平原造林生态系统服务价值评估[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2016, 52(2): 274-278.
- [3] 幸绣程, 张超群, 黄杰龙, 等. 北京平原造林工程效果居民满意度模糊综合评价[J]. 林业经济问题, 2017, 37(5): 18-22, 100.
- [4] 冯雪, 马履一, 蔡宝军, 等. 北京平原百万亩造林工程建设效果评价研究[J]. 西北林学院学报, 2016, 31(1): 136-144.
- [5] 郑永林, 王海燕, 解雅麟, 等. 北京平原地区造林树种对土壤肥力质量的影响[J]. 中国水土保持科学, 2018, 16(6): 89-98.
- [6] ELSER J J, STERNER R W, GOROKHOVA E, et al. Biological stoichiometry from genes to ecosystems[J]. Ecol Lett, 2008, 3(6): 540-550.
- [7] 王建林, 钟志明, 王忠红, 等. 青藏高原高寒草原生态系统土壤碳磷比的分布特征[J]. 草业学报, 2014, 23(2): 9-19.
- [8] HOGAN E J, MINNULLINA G, SMITH R I, et al. Effects of nitrogen enrichment on phosphatase activity and nitrogen: phosphorus relationships in *Cladonia portentosa*[J]. New Phytol, 2010, 186(4): 911-925.

- [9] 李占斌, 周波, 马田田, 等. 黄土丘陵区生态治理对土壤碳氮磷及其化学计量特征的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(6): 312-318.
- [10] 李张敏, 陈伏生, 方向民, 等. 残落物去除对杉木林 4 种林下植物养分含量和化学计量比的影响[J]. 生态学杂志, 2018, 37(7): 2092-2099.
- [11] 何琴飞, 申文辉, 彭玉华, 等. 钦州湾红树林土壤肥力及其 C、N、P、K 化学计量特征[J]. 西北林学院学报, 2017, 32(6): 119-124, 149.
- [12] 李慧, 许亚东, 王涛, 等. 不同林龄刺槐人工林植物与土壤 C、N、P 化学计量特征演变[J]. 西北农业学报, 2018, 27(11): 1651-1659.
- [13] 李从娟, 徐新文, 孙永强, 等. 不同生境下三种荒漠植物叶片及土壤 C、N、P 的化学计量特征[J]. 干旱区地理, 2014, 37(5): 996-1004.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [15] CURIEL YUSTE J, BALDOCCHI D D, GERSHENSON A, et al. Microbial soil respiration and its dependency on carbon inputs, soil temperature and moisture[J]. *Global Change Biol*, 2007, 13(9): 2018-2035.
- [16] TRESEDER K K, VITOUSEK P M. Effects of soil nutrient availability on investment in acquisition of N and P in Hawaiian rain forests[J]. *Ecology*, 2001, 82(4): 946-954.
- [17] QUIDEAU S A, CHADWICK O A, TRUMBORE S E, et al. Vegetation control on soil organic matter dynamics[J]. *Org Geochem*, 2001, 32(2): 247-252.
- [18] 全国土壤普查办公室. 中国土壤普查技术[M]. 北京: 农业出版社, 1992.
- [19] TIAN H Q, CHEN G S, ZHANG C, et al. Pattern and variation of C: N: P ratios in China's soils: a synthesis of observational data[J]. *Biogeochemistry*, 2010, 98(1/2/3): 139-151.
- [20] 白小芳, 徐福利, 王渭玲, 等. 华北落叶松人工林土壤碳氮磷生态化学计量特征[J]. 中国水土保持科学, 2015, 13(6): 68-75.
- [21] 杜虎, 彭晚霞, 宋同清, 等. 桂北喀斯特峰丛洼地植物群落特征及其与土壤的耦合关系[J]. 植物生态学报, 2013, 37(3): 197-208.
- [22] 杨金艳, 王传宽. 东北东部森林生态系统土壤碳贮量和碳通量[J]. 生态学报, 2005, 25(11): 2875-2882.
- [23] 韩莹莹, 黄唯, 孙涛, 等. 不同林龄白桦天然次生林土壤碳通量和有机碳储量[J]. 生态学报, 2015, 35(5): 1460-1469.
- [24] 王晶苑, 王绍强, 李勿兰, 等. 中国四种森林类型主要优势植物的 C: N: P 化学计量学特征[J]. 植物生态学报, 2011, 35(6): 587-595.
- [25] 张春华, 王宗明, 居为民, 等. 松嫩平原玉米带土壤碳氮比的时空变异特征[J]. 环境科学, 2011, 32(5): 1407-1414.
- [26] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. 生态学报, 2008, 28(8): 3937-3947.
- [27] 陈印平, 夏江宝, 赵西梅, 等. 黄河三角洲典型人工林土壤碳氮磷化学计量特征[J]. 土壤通报, 2017, 48(2): 392-398.
- [28] ZHANG J H, ZHAO N, LIU C C, et al. C: N: P stoichiometry in China's forests: From organs to ecosystems[J]. *Funct Ecol*, 2018, 32(1): 50-60.
- [29] POST W M, PASTOR J, ZINKE P J, et al. Global patterns of soil nitrogen storage[J]. *Nature*, 1985, 317(6038): 613-616.
- [30] 敖伊敏. 不同围封年限下典型草原土壤生态化学计量特征研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2012.
- [31] 王建林, 钟志明, 王忠红, 等. 青藏高原高寒草原生态系统土壤氮磷比的分布特征[J]. 应用生态学报, 2013, 24(12): 6678-6691.