

黄土高原子午岭辽东栎林植物和土壤碳氮磷化学计量学特征

陆媛¹, 陈云明^{2,3}, 曹扬^{2,3}, 宋超³

(1. 西北农林科技大学林学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学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; 3. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 选取黄土高原子午岭林区的幼龄林、近熟林和成熟林 3 个林龄阶段的辽东栎林为对象, 通过测定林内植物、枯落物和土壤的碳(C)、氮(N)、磷(P)含量, 研究不同生长阶段植株、枯落物及土壤的化学计量学特征。结果显示: 林内植物各器官(叶、枝、干和根)之间 C、N、P 含量均存在显著性差异, 分别在 245.3~492.6 g/kg, 1.57~20.6 g/kg 和 0.11~1.63 g/kg 之间; 枯落物 C、N 和 P 含量分别在 283.5~329.0 g/kg, 11.5~13.2 g/kg 和 0.73~1.06 g/kg 之间。在不同生长阶段, 植物 C 含量无显著性差异; 植物 N 和 P 含量, 枯落物和土壤 C、N 和 P 含量均存在显著性差异。具体表现为随着林龄的增加, 植物叶片 C:N 和 C:P 显著增加, N:P 先增加后减小; 枯落物 C:N、C:P 和 N:P 均显著增加; 土壤 C:N 显著减小, C:P 先增加后减小, N:P 无显著性差异。植物叶片和枯落物与土壤 N 和 P 含量和化学计量特征呈显著的线性相关, 说明土壤中 N、P 供应量影响植物体中的 N、P 含量。

关键词: 土壤 C、N、P; 生态化学计量特征; 辽东栎; 子午岭

中图分类号: S714.2 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2015)03-0196-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2015.03.036

C, N and P Stoichiometric Characteristics of Plants and Soil in *Quercus liaotungensis* Forest on Ziwuling Mountain of Loess Plateau

LU Yuan¹, CHEN Yunming^{2,3}, CAO Yang^{2,3}, SONG Chao³

(1. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: In this study, the contents of carbon(C), nitrogen(N) and phosphorus(P) in plants, litter and soil were determined at three different ages in *Quercus liaotungensis* forests (young, near-mature and mature forest) in Ziwuling area of Loess Plateau. The results showed that the contents of C, N and P varied in different plants organs, which were in the range of 245.3~492.6 g/kg, 1.57~20.6 g/kg and 0.11~1.63 g/kg, respectively. The contents of C, N and P in plant litter were in the range of 283.5~329.0 g/kg, 11.5~13.2 g/kg and 0.73~1.06 g/kg, respectively. There was no significant difference in plant C content among *Quercus liaotungensis* forests at different ages, while the contents of N and P in plants and the contents of C, N and P in litter and soil significantly differed with forest age. With the increasing forest age, the ratios of C:N and C:P in plant leaves and the ratios of C:N, C:P and N:P in plant litter significantly increased, N:P ratio in plant leaves, as well as C:P ratio in soil, increased at first and then decreased, C:N ratio in soil greatly decreased and N:P ratio in soil did not obviously change. Positive correlations existed between plant and soil for both N and P contents, showing that the supply of N and P in soil affected the contents of N and P in plant.

Key words: soil C, N and P; ecological stoichiometric characteristics; *Quercus liaotungensis*; Ziwuling

土壤是植物生长所需基本元素氮(N)和磷(P)的主要来源, N、P 的变化和分布对植物生长发育及行为都起着重要的作用。由于自然界中 N、P 元素供应往往受限, 所以其成为生态系统生产力的主要限制因素^[1-2]。根、茎和叶中养分含量取决于土壤养分供应

和植被养分需求间的动态平衡, 因此, 土壤养分供应量、植物养分需求量以及自身养分需求的自我调节、凋落物分解养分返还, 使得植物—凋落物—土壤系统中养分含量具有明显的时空变化, 也增加了植物—凋落物—土壤养分之间相关关系的复杂性^[3]。

收稿日期: 2014-12-08

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050203); 国家自然科学基金项目(41201088); 中国科学院“西部之光”项目

第一作者: 陆媛(1989—), 女, 江苏南通人, 硕士研究生, 主要从事流域生态研究。E-mail: luyuan19891107@163.com

通信作者: 陈云明(1965—), 男, 陕西渭南人, 博士, 研究员, 主要从事流域生态与水土保持研究。E-mail: ymchen@ms.iswc.ac.cn

生态化学计量学主要是研究生态系统能量平衡及其相关的化学元素(主要是 C、N、P)动态的科学,探索环境营养供应波动对种群动态、生态系统功能的影响^[4]。当前,国内外学者主要开展了植物或土壤 C、N、P 生态化学计量学特征的研究^[5-8]。在传统 N:P 营养限制理论的影响下,现有研究多以植物叶中 N、P 含量及其比值作为土壤中对生产力起限制性营养元素的指示剂,如当叶片 N:P<14 时,群落水平上植物生长主要受 N 限制,当 N:P>16 时,植物生长主要受 P 限制,当 14<N:P<16 时,植物生长受 N 和 P 共同限制^[9]。从植物生长不同阶段出发,对植物元素生态化学计量学的变化研究仍不足。植物 C:N、C:P 和 N:P 会随植物生长、林龄增加而变化,但目前尚未明确植物生态化学计量学的时间变异特征^[10]。此外,随林龄变化,受植物养分吸收、微生物代谢和枯落物分解等因素影响,土壤元素供应也会发生变化,这种变化是否会导致植物生态化学计量学呈现出时间上的变异性值得进一步研究。

辽东栎(*Quercus liaotungensis*)是黄土高原子午岭林区气候顶级群落的建群种,以辽东栎为优势种的森林群落对区域内的水源涵养、水土保持等方面具有重要作用。除肥力、气候、水分条件等因子外,辽东栎林长期生长过程中植物—枯落物—土壤系统的生态化学计量学特征的变异也可能是导致长期生长的辽东栎林更新困难和生产力退化的重要原因之一。由于辽东栎林内植物不同生长阶段养分需求和养分归还存在差异^[11],这必将导致不同林龄辽东栎林内植物—枯落物—土壤系统的生态化学计量学特征出现趋向性的变化。这种变异则可能限制了辽东栎特定营养器官的生长,从而影响植株的生物量积累。因此,对辽东栎林内植物—枯落物—土壤生态化学计量学特征在不同生长阶段的动态进行分析,可以揭示

C、N、P 在植物与土壤中的交换过程与格局,阐明林内 C、N、P 利用、贮存和转移的规律。本文以黄土高原子午岭地区幼龄林、近熟林和成熟林 3 个阶段的辽东栎林为对象,研究不同林龄植物、枯落物以及土壤化学计量学特征,分析林内植物不同生长阶段的限制性元素,并将林内植物—枯落物—土壤结合,探讨不同林龄下三者之间的相互关系,从化学计量生态学角度为调控辽东栎林的营林管理措施提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区自然概况

研究区位于陕西子午岭林区(107°30′—109°40′E, 33°50′—36°50′N),是黄土丘陵区现存比较完整的天然次生林区。该区属于暖温带半湿润地区,年均气温 7.4℃,无霜期 140~160 d,年降水量 587.6 mm,且多集中在 7—9 月份。土壤为原生(山坡)或次生(沟谷)黄土,厚度一般为 50~100 m。植被多分布于阴坡及半阴坡,主要树种有辽东栎、油松(*Pinus tabulaeformis*)、山杨(*Populus davidiana*)和白桦(*Betula platyphylla*)等。林下灌木以杭子梢(*Campylotropis macrocarpa*)、胡颓子(*Elaeagnus pungens* Thunb)、虎榛子(*Ostryopsis davidiana*)、绣线菊(*Spiraea pubescens*)、多花胡枝子(*Lespedeza floribunda*)、黄刺玫(*Rosa xanthina*)和丁香(*Syringa oblata*)为主,草本以披针苔草(*Carex lanceolata*)和铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)等为主。

1.2 样地选择及样品采集

样地设置与调查于 2011 年 8 月进行,依据 GB/T 1.1—2009《标准化工作导则》对天然辽东栎林龄进行划分,在子午岭林区选取生长健康、林相整齐、立地条件基本一致的辽东栎幼龄林(30~40 a)、近熟林(70~80 a)、成熟林(100~110 a)林地,每个林龄阶段设置 3 个样地重复,在每个样地设置 1 个标准样方(20 m×50 m)。所选样地的基本信息情况见表 1。

表 1 样地基本情况

| 林龄/a | 海拔/m | 坡向 | 坡度/(°) | 密度/(株·hm ⁻²) | 平均胸径/cm | 平均树高/m | 林下优势植被 |
|------|--------|----|--------|--------------------------|---------|--------|------------|
| 35 | 1097.2 | 东北 | 17 | 710 | 14.4 | 8.5 | 杭子梢—披针苔草 |
| 75 | 1467.7 | 西北 | 38 | 970 | 16.2 | 9.3 | 绒毛绣线菊—披针苔草 |
| 105 | 1305.2 | 东南 | 33 | 870 | 17.4 | 9.5 | 麻叶绣线菊—披针苔草 |

依据乔木平均胸径确定 5 株标准木,分叶、枝、干、根 4 个器官取样,均采集 300 g 左右。枝叶在树冠顶端向阳面取样,树干在 1.3 m 处取样,根不分级,取样深度为 40 cm。

在每个乔木标准样地内沿对角线设置灌木和草本样方各 3 个,灌木样方面积 2 m×2 m,草本样方面积 1 m×1 m,并将样方内的灌木和草本全部挖起,将灌木分叶、枝、根,草本分地上、地下部分,称其鲜重,并将 3 个样方内样品混合取样。同时,在采集草本样

品的同一标准样方,采集矿质土壤上所有直径<5 cm 的凋落叶片、枯枝、花果杂物及半分解状态的碎片。分层采集土壤样品(0—20 cm, 20—50 cm 和 50—100 cm)。每份样品均采集 300 g 左右,带回实验室备用。

1.3 样品测定

在实验室内,将乔木、灌木、草本、枯落物样品用烘箱于 85℃ 烘干至恒重,称重记录。土样自然风干,将所有样品磨碎,过 0.25 mm 筛,用塑封袋保存待测。植物和土壤样品的有机 C、全 N、全 P 含量分别

采用重铬酸钾硫酸氧化法、半微量开氏法、酸溶—钼锑抗比色法测定^[12]。

1.4 数据统计分析

利用 SPSS 18.0 软件进行数据统计分析。采用 Pearson 法对林内植物各器官、枯落物和土壤 C、N、P 化学计量比进行相关性分析。采用单因素方差分析(one-way ANOVA) 检验植物不同林龄之间及不同器官之间 C、N、P 含量和化学计量比差异显著性($\alpha=0.05$)。

2 结果与分析

2.1 乔木层 C、N、P 含量及化学计量学特征

辽东栎叶、枝、干和根 C 含量分别在 446.7~

463.6 g/kg, 431.7~462.5 g/kg, 441.6~470.1 g/kg 和 389.3~411.0 g/kg 之间, N 含量分别在 13.9~19.4 g/kg, 5.0~5.4 g/kg, 1.6~3.4 g/kg 和 2.6~5.8 g/kg 之间, P 含量分别在 1.18~1.48 g/kg, 0.51~0.57 g/kg, 0.11~0.15 g/kg 和 0.35~0.39 g/kg 之间。辽东栎各器官平均 C 含量以根最低, 干最高, 平均 N、P 含量以干最低, 叶最高。叶、枝、干和根 C 含量均不受林龄影响(表 2)。幼龄林叶 N 含量显著高于近熟林($P<0.05$), 近熟林 N 含量显著高于成熟林, 而枝、干和根 N、P 含量均不受林龄影响。幼龄林叶 P 含量显著高于成熟林($P<0.05$), 近熟林枝、干和根 P 含量和幼龄林以及成熟林差异不显著。

表 2 辽东栎林内植物、枯落物及土壤 C、N、P 含量

g/kg

| 林地组成 | C 含量 | | | N 含量 | | | P 含量 | | | |
|---------|--------|---------|----------|---------|--------|---------|--------|--------|---------|---------|
| | 幼龄林 | 近熟林 | 成熟林 | 幼龄林 | 近熟林 | 成熟林 | 幼龄林 | 近熟林 | 成熟林 | |
| 辽东栎 | 叶 | 454.6aA | 463.6aA | 446.7aA | 19.4aA | 16.8bA | 13.9cA | 1.48aA | 1.39abA | 1.418bA |
| | 枝 | 431.7aA | 457.9aA | 462.5aA | 5.4aB | 5.0aB | 5.4aB | 0.53aB | 0.5aB | 0.57aB |
| | 干 | 441.6aA | 457.1aA | 470.1aA | 1.6aB | 1.7aB | 3.4aB | 0.13aB | 0.11aB | 0.15aB |
| | 根 | 389.3aB | 400.6aB | 411.0aB | 2.6aB | 5.8aB | 4.2aB | 0.35aB | 0.38aB | 0.39aB |
| 灌木 | 叶 | 454.0aA | 460.6aA | 443.9aA | 20.6aA | 19.5abA | 18.0bA | 1.60aA | 1.20bA | 1.30bA |
| | 枝 | 459.0aA | 492.6aA | 452.6aA | 6.5aB | 7.7aB | 5.2aB | 0.58aB | 0.44aB | 0.66aB |
| | 根 | 420.7aB | 368.1aB | 405.4aB | 4.6aB | 5.1aB | 5.1aB | 0.58aB | 0.50aB | 0.52aB |
| 草本 | 草地上 | 452.7aA | 424.1aA | 444.6aA | 13.8aA | 11.9bA | 10.9bA | 0.89aA | 0.92aA | 1.36bA |
| | 草地下 | 457.1aA | 333.7abB | 245.3bB | 10.0aB | 8.3bB | 7.2bB | 0.98aA | 0.65bA | 0.54bB |
| | 枯落物 | 321.0a | 368.9b | 253.5c | 13.2a | 12.3ab | 11.5b | 1.06a | 0.83b | 0.73b |
| 土层深度/cm | 0—20 | 21.4aA | 14.6bA | 19.1aA | 1.7aA | 1.9bA | 2.6bA | 0.57aA | 0.39bA | 0.54bB |
| | 20—50 | 7.8aB | 7.9aB | 5.1aB | 0.9aB | 1.0aB | 0.9aB | 0.41aB | 0.34abA | 0.33bB |
| | 50—100 | 5.9aB | 7.2aB | 3.7aB | 0.5aC | 0.6aB | 0.6aB | 0.17aC | 0.15aC | 0.21aB |

注:不同小写字母表示不同林龄阶段的植物同一器官、枯落物和同一土层中的 C、N、P 含量差异显著;不同大写字母表示同一林龄阶段不同植物器官和不同土层中的 C、N、P 含量差异显著($P<0.05$)。

不同林龄辽东栎林乔木各器官 C : N、C : P 和 N : P 变化范围分别在 24.2~272.3, 302.4~4205.4 和 7.3~22.9 之间(表 3)。不同林龄下叶、枝、干和根 C : N 和 C : P 具有显著差异性($P<0.05$), 其中干 C : N 和 C : P 最大, 叶 C : N 和 C : P 最小, 叶、干和根之间 N : P 差异不显著。成熟林叶、枝和干 C : N 显著高于近熟林和幼龄林, 近熟林和幼龄林之间 C : N 差异不显著。而幼龄林根 C : N 则显著高于近熟林和成熟林, 成熟林叶 C : P 显著高于近熟林和幼龄林。近熟林枝和干 C : P 显著高于成熟林和幼龄林, 而根 C : P 受林龄影响不显著。近熟林叶 N : P 显著高于幼龄林和成熟林, 不同林龄内枝 N : P 差异不显著, 成熟林和近熟林干和根 N : P 显著高于幼龄林。

2.2 林下植物和枯落物 C、N、P 含量及化学计量学特征

不同林龄辽东栎林下灌草及枯落物之间 C、N、P 含量和化学计量比存在明显差异。辽东栎林灌木层叶、枝和根 C 含量分别在 443.9~460.6 g/kg, 452.6~492.6 g/kg 和 368.1~420.7 g/kg 之间, N 含量分

别在 18.0~20.6 g/kg, 5.2~7.7 g/kg 和 4.6~5.1 g/kg 之间, P 含量在 1.20~1.60 g/kg, 0.44~0.66 g/kg 和 0.50~0.58 g/kg 之间(表 2)。灌木各器官中 C 含量以根最低, 枝最高, N、P 含量以根最低, 叶最高。叶、干和根 C 含量不受林龄影响。幼龄林叶 N 含量显著高于成熟林($P<0.05$), 干、枝和根 N 含量不受林龄影响。幼龄林叶 P 含量显著高于近熟林和成熟林, 干、枝和根 P 含量不受林龄影响。不同林龄内灌木层 C : N、C : P 和 N : P 变化范围分别在 22.4~105.5, 301.2~117.6 和 7.9~16.9 之间(表 3)。不同林龄下灌木叶、枝和根之间 C : N 和 C : P 具有明显差异。3 种林龄内枝和根的 C : N 和 C : P 均显著高于叶, 枝和根 C : N 和 C : P 差异不显著。叶、枝和根 N : P 差异不显著, 成熟林灌叶和枝 C : N 均显著高于近熟林和幼龄林。近熟林叶和枝 C : P 显著高于幼龄林和成熟林, 灌根 C : N 和 C : P, 灌枝和根的 N : P 均不受林龄影响。辽东栎林草本层地上部分和地下部分 C 含量分别在 424.1~452.7 g/kg 和 245.3~457.1 g/kg 之间, N 含量在 11.0~13.8 g/kg 和 7.2~10.0 g/kg, P 含量在 0.89~1.36

g/kg 和 0.54~0.98 g/kg 之间(表 2)。不同林龄内,草地上部分 C、N、P 含量均高于草地下部分,草地上部分 C 含量不受林龄影响,幼龄林草地下部分 C 含量显著高于近熟林和成熟林($P < 0.05$)。幼龄林草地上部分和草地下部分 N 含量均显著高于近熟林和成熟林。成熟林草地上部分 P 含量显著高于近熟林和幼龄林,幼龄林草地下部分 P 含量显著低于近熟

林和成熟林。3 种林龄内,草本层草地上 C : N、C : P 显著低于草地下,幼龄林内草本层草地上和草地下之间 N : P 差异显著。C : N、C : P 和 N : P 分别在 33.1~46.1, 425.0~554.0 和 10.6~15.5 之间(表 3)。草地上 C : N 受林龄影响不显著,幼龄林 C : P 和 N : P 均显著高于成熟林,而幼龄林草地下 C : N 和 C : P 均显著高于成熟林。

表 3 辽东栎林内植物及枯落物 C : N : P 化学计量特征

| 林地组成 | C : N | | | C : P | | | N : P | | | |
|------|--------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|--------|---------|--------|
| | 幼龄林 | 近熟林 | 成熟林 | 幼龄林 | 近熟林 | 成熟林 | 幼龄林 | 近熟林 | 成熟林 | |
| 辽东栎 | 叶 | 24.2aA | 25.9aA | 28.7bA | 302.4aA | 334.6bA | 386.1cA | 13.2aA | 15.6bA | 12.1aA |
| | 枝 | 79.7aB | 85.6aB | 91.8bB | 813.3aB | 906.0bB | 805.6aB | 10.2aA | 9.9aB | 9.4aA |
| | 干 | 181.8aC | 139.7aC | 272.3bC | 3408.4aC | 4205.4bC | 3195.6aC | 12.1aA | 15.4bA | 22.9cB |
| | 根 | 149.8aC | 69.1bB | 97.6bB | 1099.2aB | 1065.3aB | 1052.9aB | 7.3aA | 14.4bA | 12.9bA |
| 灌木 | 叶 | 22.4aA | 25.2aA | 26.3bA | 301.2aA | 386.2bA | 340.8cA | 13.7aA | 16.9bA | 13.6aA |
| | 枝 | 73.5aB | 80.4aB | 105.5bB | 830.3aB | 1177.6bB | 766.4aB | 12.2aA | 11.5aA | 10.7aA |
| | 根 | 92.6aB | 74.5aB | 89.7aB | 733.0aB | 734.3aC | 839.1aB | 7.9aA | 10.4aB | 11.7aA |
| 草本 | 草地上 | 33.1aA | 36.1aA | 35.0aA | 511.9aA | 467.1abA | 425.0bA | 15.5aA | 12.9abA | 10.6bA |
| | 草地下 | 46.1aB | 40.5abB | 40.8bB | 554.0aB | 516.0abB | 461.9bB | 11.7aB | 12.7aA | 13.4aA |
| 枯落物 | 0—20 | 24.5a | 25.7a | 26.7b | 334.6a | 397.6b | 388.0b | 13.5a | 18.9b | 15.8b |
| | 20—50 | 8.4aA | 7.3aA | 11.4bA | 37.7aA | 37.6aA | 35.7aA | 3.0aA | 5.1aA | 4.8aA |
| | 50—100 | 8.6aA | 7.8aA | 5.5bB | 19.0aB | 22.9aA | 15.5bB | 2.2aA | 2.9aA | 2.8aA |
| | 50—100 | 13.0aB | 12.8aB | 6.1bB | 35.8aA | 49.9aB | 17.3bB | 2.8aA | 3.9aA | 2.9aA |

注:不同小写字母表示不同林龄阶段的植物同一器官、枯落物和同一土层中的 C : N、C : P 和 N : P 比差异显著,不同大写字母表示同一林龄阶段不同植物器官和不同土层中的 C : N、C : P 和 N : P 比差异显著($P < 0.05$)。

辽东栎林枯落物层 C、N、P 含量分别在 283.5~329.0 g/kg, 11.5~13.2 g/kg 和 0.73~1.06 g/kg 之间(表 2),近熟林 C 含量显著高于幼龄林和成熟林($P < 0.05$)。幼龄林枯落物 N 含量显著高于成熟林。幼龄林枯落物 P 含量显著高于近熟林和成熟林。辽东栎林内枯落物 C : N、C : P 和 N : P 平均值分别为 25.3, 373.4 和 14.7(表 3)。成熟林枯落物 C : N 显著高于幼龄林和近熟林,幼龄林 C : P、N : P 显著低于近熟林和成熟林。

2.3 土壤层 C、N、P 含量及化学计量学特征

土层和林龄的改变对土壤中 C、N、P 含量均有较大的影响,不同辽东栎林龄内各土层 C、N、P 含量分别在 3.71~21.39 g/kg, 0.46~2.58 g/kg 和 0.145~0.567 g/kg 之间(表 2),辽东栎各林龄 0—20 cm 土壤 C、N、P 含量均显著高于 20—50 cm 和 50—100 cm 土壤($P < 0.05$)。0—20 cm 土层,幼龄林内 C 含量最大,近熟林内 C 含量显著低于幼龄林和成熟林。幼龄林内 N 和 P 含量显著高于近熟林和成熟林。成熟林内 0—20 cm 土壤 N 含量较幼龄林降低。不同龄林内 20—50 cm 和 50—100 cm 土层 C 和 N 含量差异均不显著,成熟林内 20—50 cm 土层 P 含量显著低于幼龄林。

辽东栎林不同林龄内土层 C : N、C : P 和 N : P 变化范围分别在 5.5~13.0, 15.5~49.9 和 2.2~

5.1 之间(表 3)。0—20 cm 土层成熟林 C : N 显著高于幼龄林和近熟林($P < 0.05$), C : P 和 N : P 受林龄影响不显著。20—50 cm 土层成熟林 C : N 和 C : P 显著低于幼龄林和近熟林($P < 0.05$),不同林龄内 N : P 变化不显著。50—100 cm 土层成熟林 C : N 和 C : P 显著低于幼龄林和近熟林,不同林龄内 N : P 变化不显著。不同林龄内 N : P 变化受土层变化影响不显著,幼龄林内 20—50 cm 土层 C : P 显著低于 0—20 cm 和 50—100 cm 土层($P < 0.05$),而幼龄林内 50—100 cm 土层 C : N 显著高于 0—20 cm 和 50—100 cm 土层。近熟林内 50—100 cm 土层 C : N 和 C : P 显著高于 0—20 cm 和 20—50 cm 土层($P < 0.05$)。成熟林内 0—20 cm 土层 C : N 和 C : P 显著高于 20—50 cm 和 50—100 cm 土层。

2.4 林内植物与土壤 C、N、P 的关系

辽东栎林内乔木叶、灌木叶、草地上和枯落物与 0—20 cm 土壤 N、P 含量及 C : N、C : P 的相关性分析表明,乔木叶和土壤的 N、P、C : N、C : P 分别具有显著的正相关($P < 0.05$)(表 4),而乔木叶的 C、N : P 与土壤 C、N : P 以及乔木其他构件 C、N、P 化学计量比与土壤均无显著相关性。灌木叶的 N 和 C : N 与土壤 N 和 C : N 具有显著的线性正相关。草地上 P、C : P 与土壤 P、C : P 具有显著的线性负相关, C : N 与土壤 C : N 具有显著的线性正相关。枯落物

N、P、C : P 与土壤 N、P、C : P 具有显著相关性。

表 4 林内植物及枯落物与土壤 C、N、P 的关系

| 化学计量指标 | 回归公式 | R^2 | P 值 | |
|--------|-------|--------------------|-------|-------|
| 乔木叶 | N | $y=0.144x-0.296$ | 0.896 | 0.031 |
| | P | $y=0.630x-0.350$ | 0.917 | 0.032 |
| | C : N | $y=0.407x-1.816$ | 0.868 | 0.028 |
| | C : P | $y=0.212x-31.79$ | 0.903 | 0.012 |
| 灌木叶 | N | $y=0.274x-3.189$ | 0.810 | 0.038 |
| | C : N | $y=1.186x-18.66$ | 0.828 | 0.039 |
| 草地上 | P | $y=-0.355x+0.872$ | 0.837 | 0.042 |
| | C : N | $y=0.349x+3.439$ | 0.748 | 0.043 |
| 枯落物 | C : P | $y=-0.075x+72.122$ | 0.745 | 0.044 |
| | N | $y=0.481x-3.834$ | 0.907 | 0.028 |
| | P | $y=0.539x+0.027$ | 0.767 | 0.047 |
| | C : P | $y=0.3307x-86.377$ | 0.755 | 0.041 |

3 结论与讨论

植物 C、N、P 生态化学计量学具有时间变异性^[13],王冬梅等研究发现,随着生长进行,植物 C 含量变化不明显,N、P 含量呈下降趋势^[14],Hooker 等研究也发现,森林植物 C : N 随林龄增大而增大^[15],这与本研究中随林龄增加,辽东栎 N、P 含量显著降低,C : N 显著增大的结果相同。这可能与生物量主要组分由光合组织转变为结构组织有关,因为主干 C : N 显著高于叶片和树枝,而主干生物量随年际变化迅速积累,所以主干较多则植物 C : N 较大。土壤 C : N : P 是土壤有机质组成和质量程度的一个重要指标。本研究中随着林龄增加,土壤 C : N 显著降低,这与土壤有机质 C : N 与其分解速度成反比关系,C : N 可以作为预测有机质分解速率的一个很好的指标,可以推测幼龄林中有有机质分解速率和有效 N 含量低于近熟林和成熟林。

植物不同器官间的 N、P 化学计量存在明显差异(表 2),乔木和灌木的叶片 N、P 含量均高于枝、干和根,草地上部分 N、P 含量也高于草地下部分,而各器官 N : P 差异不显著。周鹏等在温带草地优势植物不同器官功能性状的研究中也发现,草本植物根的 N、P 浓度低于叶片,然而其 N : P 与叶片无差异^[16]。这可能是由于植物各器官养分储存及其功能差异性导致其 N、P 含量变化显著。叶片 C、N、P 比值变化能够反映植物生存过程中生长和防御策略之间的权衡^[17]。本研究不同林龄段辽东栎林中,幼龄林乔木叶和灌木叶 N 和 P 含量最高,成熟林最低,可能由于幼龄林乔木和灌木光合速率较强,生长速率快,植物叶片 N、P 含量高,C : N 低,对生长所需资源的竞争能力强。C : P 和 N : P 可以很好地反映植物的生长速率,低的 C : P 和 N : P 表征植物较快的生长速率^[18]。本研究中,随着林龄的增加,林内植物生长速率有下降趋势,叶片 N 和 P 含量随之下降,C : N 和 C : P 增加。有研究表明,随着植物林龄的增加,叶片 C

含量变化不明显^[19],本研究中不同林龄内辽东栎和灌木叶片 C 含量差异不显著。随着林龄的增加枯落物 C : N 和 C : P 显著提高,与植物叶片表现出一致规律,这与枯落物秉承了植物活体的特性密切相关^[3]。

N 和 P 是陆地生态系统中植物生长的主要限制性元素,其含量的高低影响植物的生长与群落动态^[20]。因此,植物叶片 N : P 比值可以作为判断环境对植物生长养分供应状况的指标^[21]。研究认为当叶片 N : P < 14 时,群落水平上植物生长主要受 N 限制,当 N : P > 16 时,植物生长主要受 P 限制,当 14 < N : P < 16 时,植物生长受 N 和 P 共同限制。本研究中辽东栎叶片 N : P 在不同林龄内平均值分别为 13.2,15.6 和 12.1,表明幼龄林和成熟林辽东栎生长主要受 N 限制,近熟林生长受 N 和 P 的共同限制。林内灌木叶片 N : P 在不同林龄内平均值分别为 13.7,16.9 和 13.6,表明幼龄林和成熟林内灌木生长主要受 N 限制,近熟林内灌木生长主要受 P 限制。草本植物 N : P 在不同林龄内平均值分别为 15.5,12.9 和 10.6,表明幼龄林内草本植物生长主要受 N 和 P 共同限制,随着林龄的增加,近熟林和成熟林内草本植物生长主要受 N 限制。运用 N : P 化学计量学原理,研究不同林龄群落 N : P 比值变化,发现不同林龄内限制植物生长的主要营养元素,对于营林管理提高生态系统生产力具有重要意义。

土壤中 C、N、P 元素供应的变化直接影响着植物体内各种生化反应和 C、N、P 化学计量比。植物和枯落物与土壤的 C、N、P 含量及其化学计量比具有偶联关系。本研究中,林内乔木叶、灌木叶、枯落物和土壤 N 和 P 含量随林龄的增加均显著降低(表 2),表现出完全的一致性,同时,乔木叶、灌木叶、枯落物与土壤 N 之间也存在显著正相关关系(表 4),这表明植物叶片、枯落物和土壤之间存在密切的关系。辽东栎林内土壤 N 和 P 含量主要来源于枯落物的归还,在幼龄林内由于林分郁闭度较低,光照条件好,温度上升,增加了林下及土壤中微生物的活性,使枯落物分解速率加快,枯落物 N 和 P 向土壤归还速度提高,土壤 N 和 P 含量随之增高。幼龄林内植物生长速度较快,高的生长速率需要的养分增加,林内枯落物分解速度下降,导致土壤 N 和 P 含量降低。植物、枯落物和土壤之间 C : N : P 的差异意味着总生长效率在元素中的变化,土壤 C、N、P 生态化学计量学的研究将有助于认识土壤—植物—微生物相互作用的养分调控因素,将植物—枯落物—土壤作为一个完整的系统加以研究,探讨 C、N、P 元素化学计量比在整个系统中的变化格局才能真正揭示 C、N、P 平衡的内在机制。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 王维奇,全川,贾瑞霞,等. 不同淹水频率下湿地土壤碳氮磷生态化学计量学特征[J]. 水土保持学报, 2010, 24(3): 238-242.
- [3] 王维奇,徐玲琳,曾从盛. 河口湿地植物活体—枯落物—土壤的碳氮磷生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2011, 31(23): 7119-7124.
- [4] 王晶苑,王绍强,李纫兰,等. 中国4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.
- [5] 张珍明,林绍霞,张清海,等. 不同土地利用方式下草海高原湿地土壤碳、氮、磷分布特征[J]. 水土保持学报, 2013, 27(6): 199-204.
- [6] 王凯博,上官周平. 黄土丘陵区燕沟流域典型植物叶片C、N、P化学计量特征季节变化[J]. 生态学报, 2011, 31(17): 4985-4991.
- [7] 阎恩荣,王希华,周武. 天童常绿阔叶林演替系列植物群落的N:P化学计量特征[J]. 植物生态学报, 2008, 32(1): 13-22.
- [8] Limpens J, Berendse F, Klees H. N deposition affects N availability in interstitial water, growth of Sphagnum and invasion of vascular plants in bog vegetation[J]. New Phytologist, 2003, 157, 339-347.
- [9] 闫道良,梅丽,夏国华,等. 山核桃林地土壤和叶养分生态化学计量变异及重吸收特征[J]. 东北林业大学学报, 2013, 41(6): 41-45.
- [10] 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.
- [11] 刘增文,陈凯,米彩虹,等. 陕西关中地区常见树种落叶前N、P、K养分回流现象的研究[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2009, 37(12): 98-104.
- [12] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社, 2000: 30-177.
- [13] 王振南,杨惠敏. 植物碳氮磷生态化学计量对非生物因子的响应[J]. 草业科学, 2013, 30(6): 927-934.
- [14] 王冬梅,杨惠敏. 4种牧草不同生长期C、N生态化学计量特征[J]. 草业科学, 2011, 28(6): 921-925.
- [15] Hooker T D, Compton J E. Forest ecosystem carbon and nitrogen accumulation ion during the first century after agricultural abandonment[J]. Ecological Applications, 2003, 13: 299-313.
- [16] 周鹏,耿燕,马文红,等. 温带草地主要优势植物不同器官间功能性状的关联[J]. 植物生态学报, 2010, 34(1): 7-16.
- [17] Poorter L, Bongers F. Leaf traits are good predictors of plant performance across 53 rain forest species[J]. Ecology, 2006, 87(7): 1733-1743.
- [18] Elser J J, Acharya K, Kyle M. Growth rate-stoichiometry couplings in diverse biota[J]. Ecology Letters, 2003, 6(10): 936-943.
- [19] 艾泽民,陈云明,曹扬. 黄土丘陵区不同林龄刺槐人工林碳、氮储量及分配格局[J]. 应用生态学报, 2014, 25(2): 333-341.
- [20] 刘万德,苏建荣,李帅锋. 云南普洱季风常绿阔叶林演替系列植物和土壤C、N、P化学计量特征[J]. 生态学报, 2010, 30(23): 6581-6590.
- [21] Güsewell S. N:P ratios in terrestrial plants: Variation and functional significance[J]. New Phytologist, 2004, 164: 243-266.
- (上接第195页)
- [6] 周兴,李再明,谢坚,等. 紫云英利用后减施化肥对水稻产量和产值及土壤碳氮含量的影响[J]. 湖南农业大学学报:自然科学版, 2014, 40(3): 225-230.
- [7] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业出版社, 1999.
- [8] 战秀梅,李亭亭,韩晓日,等. 不同施肥方式对春玉米产量、效益及氮素吸收和利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4): 861-868.
- [9] 张洪程,马群,杨雄,等. 水稻品种氮肥群体最高生产力及其增长规律[J]. 作物学报, 2012, 38(1): 86-98.
- [10] 鲁艳红,廖育林,黄铁平,等. 湖南稻—油、稻—稻—油轮作制施肥现状调查研究[J]. 湖南农业科学, 2012(17): 57-59, 63.
- [11] 王珊珊,黄庆海,徐明岗,等. 长期不同施肥条件下红壤性水稻土双季稻氮肥回收率的变化特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 297-303.
- [12] 王建红,曹凯,张贤. 紫云英还田配施化肥对单季晚稻养分利用和产量的影响[J]. 土壤学报, 2014, 51(4): 887-896.
- [13] 向秀媛,刘强,荣湘民,等. 有机肥和无机肥配施对双季稻产量及氮肥利用率的影响[J]. 湖南农业大学学报:自然科学版, 2014, 40(1): 72-77.
- [14] 刘威. 紫云英养分积累规律和还田腐解特性及其效应研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2010: 19-32.
- [15] 纪雄辉,郑圣先,鲁艳红,等. 施用尿素和控释氮肥的双季稻田表层水氮素动态及其径流损失规律[J]. 中国农业科学, 2006, 39(12): 2521-2530.
- [16] 唐栓虎,徐培智,陈建生,等. 一次性施用控释肥对水稻根系活力及养分吸收特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(4): 591-596.
- [17] 付建荣. 控释氮肥对水稻的增产效应及提高肥料利用率的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2001, 7(2): 145-152.