

DOI: 10.5846/stxb201603120437

吕金林, 闫美杰, 宋变兰, 关晋宏, 时伟宇, 杜盛. 黄土丘陵区刺槐、辽东栎林地土壤碳、氮、磷生态化学计量特征. 生态学报, 2017, 37(10): 3385–3393.

Lü J L, Yan M J, Song B L, Guan J H, Shi W Y, Du S. Ecological stoichiometry characteristics of soil carbon, nitrogen, and phosphorus in an oak forest and a black locust plantation in the Loess hilly region. Acta Ecologica Sinica 2017, 37(10): 3385–3393.

黄土丘陵区刺槐、辽东栎林地土壤碳、氮、磷生态化学计量特征

吕金林^{1,4}, 闫美杰^{1,2}, 宋变兰¹, 关晋宏¹, 时伟宇³, 杜盛^{1,2,*}

1 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, 杨凌 712100

2 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100

3 中国科学院地球环境研究所, 西安 710061

4 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 黄土高原中部的丘陵沟壑区位于半湿润、半干旱气候带, 生态环境脆弱, 水土流失严重, 植被恢复是该地区水土保持与生态重建的重要措施。辽东栎天然次生林和刺槐人工林是该地区典型的森林植被类型。以黄土丘陵森林分布区边缘的两种主要森林类型为对象, 通过采集林地不同深度土壤样品, 对比分析两种林地土壤中碳、氮、磷含量的计量关系及垂直分布特征, 旨在探究该区域土壤化学计量特征及主要影响因素。结果表明: (1) 在两种林地类型中, 土壤有机碳与全碳含量呈正相关关系, 两种林地可用同一曲线进行拟合, 说明特定土壤类型在同一区域其有机碳和无机碳相对含量基本稳定。(2) 土壤有机碳与全氮比值在 10 左右, 在不同土层深度无明显变化; 而土壤全碳与全氮比值则随土壤深度的增加而增加, 超过 1 m 以后呈现饱和曲线的变化趋势。(3) 土壤氮磷比随土壤深度的增加呈幂次型降低。

关键词: 黄土丘陵区; 土壤碳氮磷; 碳氮比; 氮磷比; 化学计量

Ecological stoichiometry characteristics of soil carbon, nitrogen, and phosphorus in an oak forest and a black locust plantation in the Loess hilly region

LÜ Jinlin^{1,4}, YAN Meijie^{1,2}, SONG Bianlan¹, GUAN Jinhong¹, SHI Weiyu³, DU Sheng^{1,2,*}

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

2 Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

3 Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China

4 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Carbon, nitrogen, and phosphorus are the major plant growth elements, and are mainly absorbed by the plant from the soil. Research on the relationships among these elements is critical for understanding the mechanisms driving the status and balance of these elements in various soils of different land use types. However, to date, there have been relatively few studies on the ecological stoichiometry characteristics of soil carbon, nitrogen, and phosphorus in the sub-humid and semiarid Loess hilly region, which is characterized by severe soil erosion and a fragile ecological environment. Vegetation restoration is one of the most important management approaches for controlling soil and water loss, and for improving soil quality. In the sub-humid and semiarid Loess hilly region, *Quercus liaotungensis* (oak), which dominates the secondary

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050202); 国家自然科学基金(41411140035, 41471440, 41171419, 41201258)

收稿日期: 2016-03-12; 网络出版日期: 2017-02-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shengdu@ms.iswc.ac.cn

<http://www.ecologica.cn>

forests, and *Robinia pseudoacacia* (black locust) plantations are the major natural and planted vegetation types, respectively. In this study, we investigated the soil organic carbon (SOC), soil total carbon (STC), soil inorganic carbon (SIC), total nitrogen (N), and total phosphorus (P) contents throughout the soil profiles of the two forest types. In addition, the relationships among the aforementioned fractions were analyzed to reveal the ecological stoichiometry of forests in the region. Three stands were selected for each forest type, and a 20 m × 40 m representative plot was surveyed in each stand. Soil samples were collected (using a soil auger with a 6 cm internal diameter) at three points diagonally across the plot at depths of 0–10, 10–20, 20–30, 30–50, 50–100, 100–150, and 150–200 cm. The cored samples from the same depth in each plot were mixed, and all samples were then transferred to the laboratory for further analyses. Prior to the analysis, samples were air-dried, ground to powder, and passed through a 0.25-mm sieve. The SOC content was determined using the potassium dichromate-sulfuric acid oxidation method. The N and P contents were determined using the perchloric acid sulfate cooking method. A FOSS-8400 fully automated Kjeldahl analyzer was used for N quantification. The STC and N contents were also determined using an elemental analyzer. The main results were as follows: (1) SOC and STC contents were linearly correlated ($P < 0.0001$), and the relationship between SOC and STC could be fitted using the same curve for the two forest types. The relative SOC and SIC contents were stable within a specific soil type from the same area, independent of forest type; (2) in general, the SOC:N ratio was approximately 10, but the STC:N ratio increased with increasing soil depth, and stabilized gradually (saturation curve); and (3) the soil N:P ratio decreased with an increase in soil depth (power law curve). These results provide basic information for the clarification of stoichiometry characteristics in relation to vegetation type and soil depth in this region.

Key Words: loess hilly region; soil carbon, nitrogen and phosphorus; C:N; N:P; phosphorus

近年来,生态系统中多重化学元素的平衡受到广泛关注,以强调系统中主要元素相对含量及其平衡关系为主要内容的生态化学计量学迅速发展并发挥着重要作用^[1-4]。碳(C)、氮(N)、磷(P)作为结构性元素和养分元素,在地球各圈层之间不断地循环传递,构成了碳、氮、磷元素的生物地球化学循环,保证了生态系统物质循环和能量流动顺利进行,对维持生态系统稳定性具有重要意义。土壤是陆地生态系统的重要组成部分,是植物生长发育所需营养元素的主要来源,土壤碳、氮、磷是主要的土壤养分成分。杨雪栋等^[5]对内蒙古荒漠草原带小针茅群落的研究发现不同地区土壤各养分计量比不同,随土壤深度的变化也不一致。王维奇等^[6]对不同淹水频率下的湿地土壤的研究发现远近潮沟区域土壤碳、氮、磷化学计量比对淹水频率的响应不同,且碳氮比的响应敏感性不及氮磷比。因此,土壤碳、氮、磷的化学计量学特征可能受土壤类型、群落特征和气候环境等多种因素影响,对生态系统生产力、碳汇潜力以及气候变化的响应机制具有重要作用。

黄土高原中部的丘陵沟壑区位于半湿润、半干旱气候带,生态环境脆弱,水土流失严重,植被恢复是该地区水土保持与生态重建的重要措施^[7]。自20世纪70年代后期以来,随着“三北”防护林建设和水土保持重点治理等生态工程的实施,该地区的人工林面积不断扩大。退耕还林还草工程和天然林保护工程实施以后,不仅人工植被覆盖度大幅度增加,天然林草植被也得到了有效的恢复,水土流失也明显减弱,生态环境得到极大改善^[8]。对天然林实施保护以促进其恢复并营造适宜的人工林树种是实现该地区林地植被恢复的主要措施。天然林中,辽东栎天然次生林是暖温带主要的落叶阔叶林之一,也是黄土高原半湿润区森林自然演替的顶级群落^[9]。在半湿润半干旱的黄土丘陵区,植被类型介于森林向森林草原的过渡区域,辽东栎顶级群落容易遭受间歇性干旱气候和人为干扰的影响,受到广泛关注。而刺槐是建国以来该区域的主要造林树种,在大面积黄土绿化中成效显著,特别是在水土流失区域发挥了十分有效的固土保水效果^[10-11]。辽东栎天然次生林和刺槐人工林作为黄土丘陵区的代表性森林植被类型,对该地区的水土保持和生态环境建设具有重要意义。森林土壤是森林生态系统的重要组分和元素储库,在全球气候变化和土地利用方式变化背景下,研究和了解森林土壤中元素的生态化学计量学特征,对进一步认识森林生态系统的营养元素循环过程、反馈机制和对各种干扰的响应,及实现森林生态系统服务功能的可持续管理均具有重大的理论和实践意义^[12-14],同时能够揭示碳、氮、磷等营养元素循环变化规律及其对全球变化的生态系统响应。近年来,国内学者关于土壤的生

态化学计量学研究多集中于不同植被区、林龄、纬度和立地条件等方面的差异性^[15-18], 针对黄土丘陵区主要森林植被类型的土壤碳、氮、磷含量及其分布规律的研究开展较少。此外, 针对黄土高原不同植被类型的土壤环境效应, 尤其是天然和人工植被类型对土壤性状的影响, 虽有不少研究, 但其研究结果存在较大差异, 有必要开展进一步研究^[19-26]。本研究以黄土丘陵森林分布区边缘的两种主要森林类型为对象, 旨在探明该区域林地土壤中碳、氮、磷的垂直分布规律、化学计量关系及其与植被类型的关系, 为科学评估植被恢复的生态功能和效益提供理论依据, 并为黄土高原区和国家范围内营养元素生物地球化学循环和森林生态系统源汇效应的深入研究提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省延安市南郊公路山林区, 地理坐标为 36°25.40'N, 109°31.53'E, 海拔 1245—1395 m。据位于试验地北约 15 km 处的延安市气象台资料, 1988—2007 的 20 a 间平均降雨量为 498 mm, 平均气温为 10.6℃, 雨季集中于 7—9 月份^[27]。该区域属于温带落叶阔叶林区向温带草原区的过渡地带, 暖温带半湿润半干旱季风气候, 地貌为梁峁状黄土丘陵沟壑区, 土壤类型主要为黄绵土。目前区域内植被破坏较为严重, 选取辽东栎(*Quercus liaotungensis*) 天然次生林和刺槐(*Robinia pseudoacacia*) 人工林进行研究。辽东栎群落远离村落, 人为干扰较少, 林分结构合理, 是该区典型的天然林类型, 伴生树种有山杏(*Ameniaca sibirica*)、大果榆(*Ulmus macrocarpa*)、水栒子(*Cotoneaster multiflorus*)、细裂槭(*Acer stenolobum*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)等; 刺槐群落为该区主要人工林类型, 林下灌草稀疏杂生。

1.2 样地设置与土壤样品采集方法

野外调查采样于 2013 年 8 月进行, 在公路山林区选取有一定代表性的近成熟辽东栎天然次生林群落和刺槐人工林群落, 设置标准样地各 3 个, 样地规格为 20 m×40 m, 样地间距在 0.5—1.5 km。各样地基本特征见表 1。在调查样地内沿一个对角线确定 3 个土壤取样点, 使用内径 6 cm 的土钻, 按 0—10、10—20、20—30、30—50、50—100、100—150、150—200 cm 7 个层次钻取土壤样品, 将相同土层土样等量混合作为该样地相应土层样品, 带回实验室分析。

表 1 研究区样地概况

Table 1 General information of study plots

样地 Plot	坡度 Slope/(°)	最大林龄 Max age/a	林分密度 Stand Density/ (DBH≥5 cm 株/hm ²)	平均胸径 Mean DBH/cm	平均树高 Mean height/m
辽东栎 1 <i>Quercus liaotungensis</i> 1	22	64	1325	13.2	6.6
辽东栎 2 <i>Quercus liaotungensis</i> 2	20	72	1363	13.0	8.6
辽东栎 3 <i>Quercus liaotungensis</i> 3	10	76	1800	14.8	9.5
刺槐 1 <i>Robinia pseudoacacia</i> 1	24.5	36	2925	10.2	8.5
刺槐 2 <i>Robinia pseudoacacia</i> 2	13.5	36	2325	11.3	9.7
刺槐 3 <i>Robinia pseudoacacia</i> 3	26	36	1475	11.0	8.9

林分密度按矫正坡度后的投影面积计算

1.3 土样样品处理及分析测试

新鲜土样混合均匀后, 风干, 研磨, 过 0.25 mm 筛后, 测定土壤有机碳(SOC)、全碳(STC)、全氮(N)、全磷(P)含量。有机碳的测定采用重铬酸钾—硫酸氧化法; 全碳的测定采用碳氮分析仪法(Vario EL III Elementar, 德国); 全氮的测定采用了两种方法, 分别是碳氮分析仪法和经硫酸-高氯酸消煮法处理后用 FOSS-8400 全自动凯氏定氮仪测定; 全磷的测定采用硫酸-高氯酸消煮法。

1.4 数据处理

土壤无机碳含量(SIC)依据全碳和有机碳含量的差值算得。采用 SPSS 16.0 统计分析软件对不同数据组

进行差异显著性检验, 并采用 Sigmaplot 12.5 对数据组之间的关系进行拟合和制图。

2 结果与分析

2.1 土壤有机碳和全碳含量的相关性及其垂直变化

2.1.1 有机碳和全碳的计量特征

由图 1 可见, 在刺槐人工林和辽东栎天然次生林中, 土壤有机碳和全碳之间存在着极显著的正相关关系, 且两种林地的土壤有机碳和全碳关系可用同一曲线拟合 ($y = 1.2153x - 2.0709$, $R^2 = 0.9794$, $P < 0.0001$)。在不同土层深度, 虽然有机碳和全碳含量发生了变化, 但是保持线性关系不变, 拟合曲线在 X 轴的截距显示, 该类型土壤中有十分可观的无机碳含量。

2.1.2 土壤深度和林地类型对土壤有机碳、无机碳相对含量的影响

由图 2 可见, 两种林地中 SOC/STC 随土壤深度的增加均呈下降的趋势, 而 SIC/STC 呈升高的趋势, 且 SOC/STC 和 SIC/STC 均在 0—100 cm 土层变化速率较大, 在 100—200 cm 土层变化速率较小并趋于稳定, 这应该与植物根系分布范围有关。表层土壤受环境因子影响大, 枯落物和腐殖质层对土壤有机碳积累的影响也集中于表层土壤, 因而表层土壤的有机碳储存较为显著^[16], 而深层土壤中无机碳占较大份额。

此外, 辽东栎林的土壤 SOC/STC 明显高于刺槐林, 辽东栎林各土壤深度 SOC/STC 值分别是刺槐林 SOC/STC 值的 1.50、1.44、1.44、1.16、0.86、0.90、1.01 倍。这与辽东栎天然林凋落物量明显高于刺槐人工林相吻合^[28-32]。与人工林相比, 天然次生林有大量地表凋落物及细根, 可向土壤中释放大量的营养物质, 使表层土壤蓄存较多的有机碳氮^[33]。

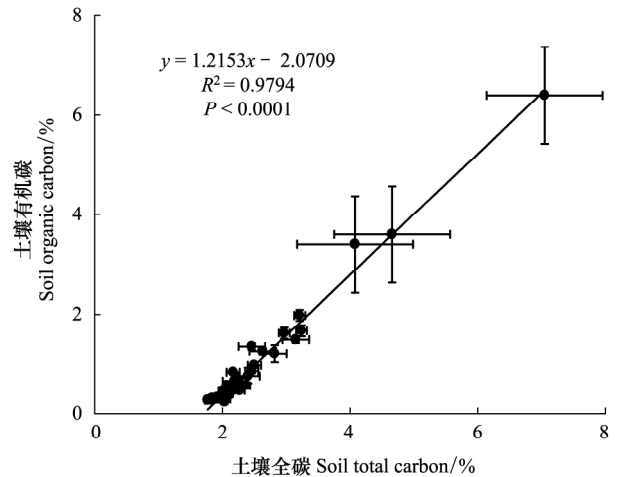


图 1 土壤有机碳 (SOC) 与全碳 (STC) 含量的关系

Fig.1 The relationship between SOC and STC

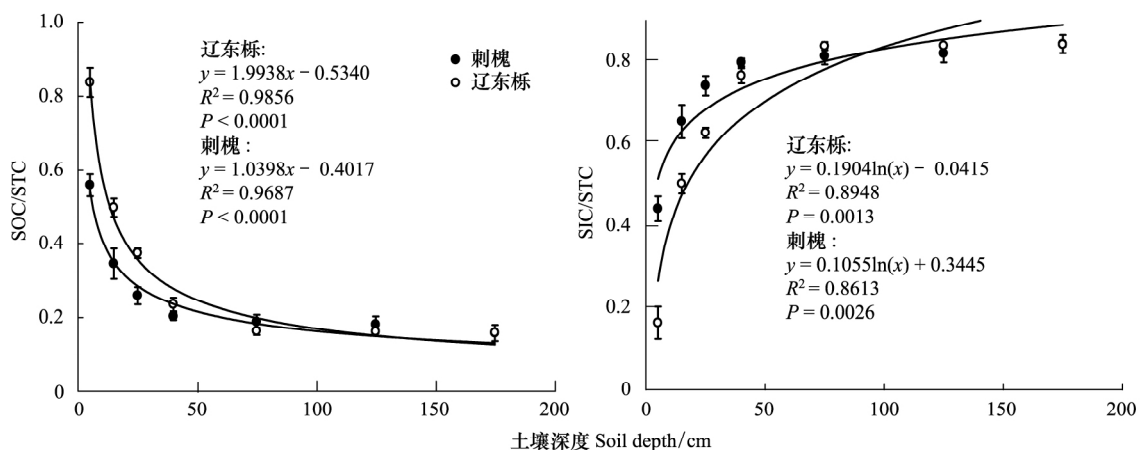


图 2 不同林地不同土层 SOC/STC、SIC/STC

Fig.2 SOC/STC and SIC/STC of different soil depth and different forests

2.2 两种林地土壤氮含量及垂直分布特征

2.2.1 基于两种测定方法的土壤全氮含量相关性分析

将凯氏定氮法和燃烧法测定得出的土壤全氮含量进行分析可见, 2 种方法测定的全氮含量呈极显著的线

性相关关系(图 3 $P < 0.0001$) ,趋势线斜率为 0.8865 ,接近 1 ,表明凯氏定氮法测定结果略低于燃烧法但无明显差异。这与之前有关报道相吻合^[34-35]。

2.2.2 土壤深度和林地类型对土壤全氮含量的影响

由图 4 可见 ,两种林地中土壤全氮含量均随土壤深度的增加呈降低趋势 ,在 0—100 cm 土层中下降幅度较大 ,在 100—200 cm 土层中趋于稳定。这种变化趋势同 SOC/STC 的变化趋势相似(图 2) ,林地之间表层土壤中全氮含量存在差异 ,辽东栎天然林高于刺槐人工林 ,各土壤深度辽东栎全氮含量分别是刺槐林的 2.03、1.43、1.44、1.19、0.88、0.80、0.89 倍 ,显示全氮含量同有机碳含量存在关联性 ,土壤表面凋落物的累积与分解是造成土壤有机碳和全氮含量差异的主要原因。

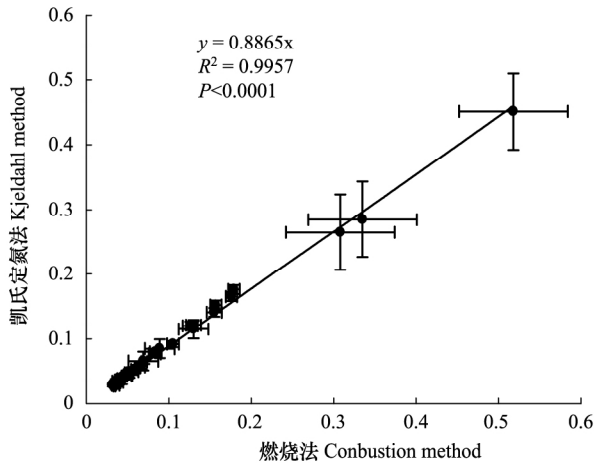


图 3 基于 2 种测定方法的土壤全氮含量比较

Fig.3 Comparison of two methods of N content determination

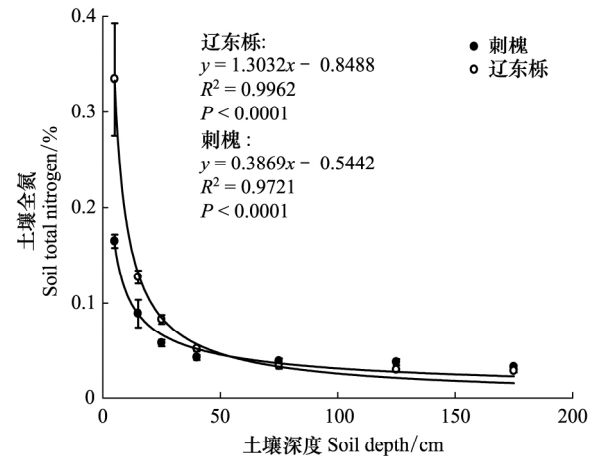


图 4 不同林地不同土层土壤 N%

Fig.4 N% different soil depth and different forests

2.3 两种林地土壤碳氮比及其垂直变化

土壤有机碳是土壤微生物活动的能源 ,氮是构成微生物细胞的要素。有机碳与全氮之比影响微生物的繁殖和活动 ,从而影响有机质矿化分解速度^[36] ,是评价土壤质量水平的一个重要指标^[37]。由图 5 可见 ,刺槐人工林中 ,不同土层深度的有机碳与全氮比值无明显差异($P > 0.05$) ,分别为 10.670、9.721、9.964、9.910、10.007、10.270、9.932 ,均在 10 左右。辽东栎天然次生林中 ,0—10 cm 土层的 SOC/N 值较高 ,为 13.201 ,与该土层较高的有机碳含量一致;其他土层的 SOC/N 值略低 ,分别为 10.716、10.697、9.762、9.387、10.117、10.121 ,但基本都在 10 左右。而全碳与氮的比值则随着土壤深度的增加而增加 ,在 0—100 cm 浅层土壤中变化速率较快 ,而在 100—200 cm 深层土壤中变化缓慢 ,呈现饱和和曲线的变化趋势 ,与土壤中无机碳的变化相关联。

2.4 两种林地土壤磷含量、氮磷比及其垂直变化

由图 6、图 7 可见 ,两林地中土壤磷含量随土壤深度变化幅度不大 ,但有一定差异($P < 0.05$) ,表层较高 ,随土壤深度增加而减少。而土壤 N/P 值在表层较大 ,随土壤深度的增加而降低 ,在 50 cm 以下逐渐趋于恒定 ,基本上同土壤全氮含量变化趋势相一致。氮磷比的差异主要来自于土壤中氮含量的变化 ,土壤氮磷比空间格局的形成可能还与土壤本身结构、质地和地形地貌有关^[38]。

3 讨论与结论

3.1 讨论

3.1.1 土壤碳、氮、磷含量对土壤深度和林分类型的响应

在黄土丘陵区土壤深度是决定土壤养分含量变化的重要因素。本研究中 ,土壤碳素和氮素随着土壤深度的增加而降低 ,而土壤磷素变化较为稳定 ,这与朱秋莲等^[39]的研究结果相一致。土壤碳素含量受土壤深度的

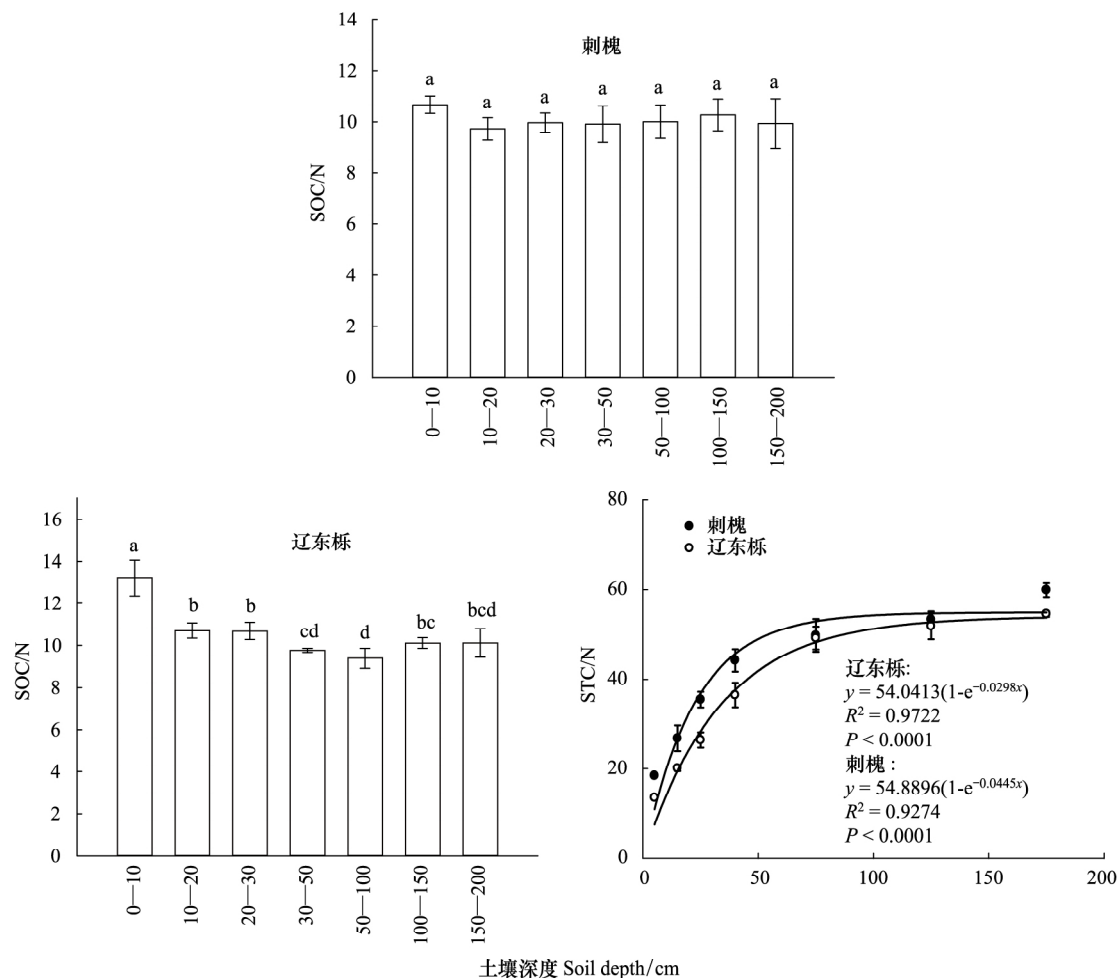


图5 SOC/N和STC/N变化

Fig.5 Variations of SOC/N and STC/N

字母不同表示各土层 SOC/N 之间差异显著性 相同字母表示未达到显著水平 ($P < 0.05$)

影响较明显,土壤表层与外界环境直接接触,地表凋落物、动植物残体、植物根系以及微生物作用等对有机碳在土壤表层的积累和向下转移起促进作用。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^[40],因此土壤氮素含量的变化与有机质变化具有一致性,也就是与土壤有机碳变化具有一致性。而土壤磷素是一种沉积性的矿物,在土壤中的迁移率很低,因此全磷的垂直变化较为稳定^[41]。

本研究中林分类型对土壤养分的影响并不明显,土壤碳、氮、磷含量在两种林地中均呈相同的变化趋势,且土壤有机碳和全碳关系可用同一曲线拟合。值得注意的是,固氮树种刺槐在 0—100 cm 土层中全氮含量却低于辽东栎,Tateno 等^[42]认为造成这种结果的原因可能是刺槐林中土壤表层的凋落物积累较少,受风等环境因子影响而流失。

3.1.2 土壤碳氮比和氮磷比的垂直变化特征

本研究中,黄土丘陵区土壤有机碳氮比在不同土壤深度和林分类型中基本都在 10 左右,在中国土壤的 C/N 的平均值内(中国土壤的 C/N 平均值在 10—12^[43])。虽然土壤碳、氮含量变化明显,但碳氮比维持相对稳定,Tian 等^[44]在研究全国土壤 C/N 时发现,虽然碳和氮含量具有较大的空间变异性,但 C/N 相对稳定,本研究结果基本符合这一规律,反映了碳、氮作为结构性成分,紧密相关,且二者的积累和消耗过程存在相对稳定的比值^[4]。而在辽东栎天然次生林中,0—10 cm 土层的 C/N 为 13.20,可能原因是表层有机碳、氮含量高,随土壤深度的增加,碳含量的减小幅度大于氮含量。而全碳氮比则随着土壤深度的增加而升高,并逐渐趋于

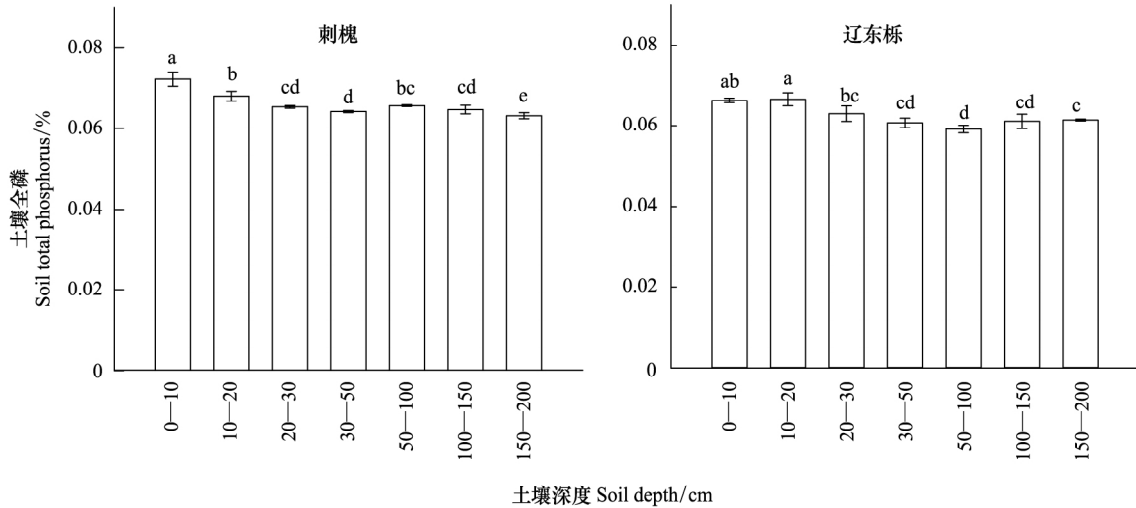


图 6 磷含量与土壤深度的关系

Fig.6 Relationship between phosphorus content and soil depth

字母不同表示各土层 P% 之间差异显著性 相同字母表示未达到显著水平 (P<0.05)

稳定。土壤全碳是由有机碳和无机碳组成,随着土壤深度的加深,有机碳所占比例逐渐下降而无机碳所占比例逐渐上升,土壤全碳含量趋于恒定,全氮含量却逐渐下降,导致土壤全碳氮比值处于升高趋势。同时,有机碳含量的减少很有可能引起无机碳含量的升高,而无机碳提高无疑会在一定程度上弥补有机碳的减少对区域碳平衡产生的影响^[45]。然而这方面的研究甚少,以后应多加关注无机碳与有机碳和土壤养分之间的关系。

土壤中的 N、P 是植物生长所必需的矿质营养元素和生态系统中最常见的限制性元素^[46],土壤 N/P 可以作为养分限制类型的有效预测指标^[13]。但由于植物除了从土壤中吸收养分外,还可以从老叶凋落之前的转移再分配以及空气中吸收部分养分,这表明土壤 N/P 并不能很好地反映生态系统养分限制状态^[47]。本研究中土壤 N/P 随着土壤深度的增加呈幂次型降低,辽东栎天然次生林和刺槐人工林中最大值分别为 5.02、2.28,均低于全国土壤 0—10 cm 土层土壤氮磷比的平均值 9.3^[44],这是因为黄土区的土壤偏碱性,全氮含量较低,而全磷含量与我国其他生态系统相比并不算低,氮、磷比远小于 15,黄土区的生态系统的养分限制表现为以氮限制为主或氮、磷共同限制^[48]。但进一步确定辽东栎和刺槐是受氮或者磷限制,还需要对植物的氮磷比做进一步研究^[49],以更好地管理辽东栎天然次生林和刺槐人工林。李英^[50]的研究表明土壤全氮含量与土壤深度呈指数关系,在本研究中通过拟合趋势线发现两者的指数关系达到了显著水平,而幂关系达到了极显著水平,因此在该研究中 N/P 与土壤深度呈幂关系。

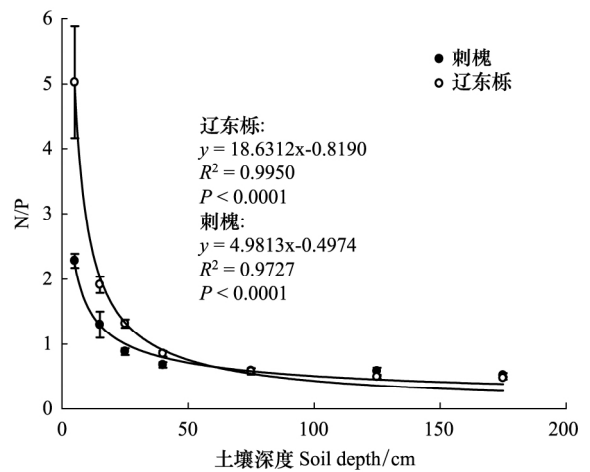


图 7 不同林地不同土层 N/P 比

Fig.7 N/P of different soil depth and different forests

3.2 结论

(1) 有机碳与全碳的计量关系与土壤深度有关,与同地区两种林地类型关系不明显。

(2) 燃烧法和凯氏定氮法两种方法测定的土壤全氮含量无明显差异,可以相互替代。

(3) 黄土丘陵区不同土壤深度的土壤有机碳氮比均在 10 左右,而全碳氮比随土壤深度的增加而增加,超过 1m 以后呈现饱和曲线的变化趋势。

(4) 黄土丘陵区不同土壤深度的土壤氮磷比随土壤深度的增加呈幂次型降低。

参考文献(References):

- [1] 周华坤,周立,赵新全,刘伟,李英年,古松,周兴民. 青藏高原高寒草甸生态系统稳定性研究. 科学通报, 2006, 51(1): 63-69.
- [2] Elser J J, Sterner R W, Gorokhova E, Fagan W F, Markow T A, Cotner J B, Harrison J F, Hobbie S E, Odell G M, Weider L J. Biological stoichiometry from genes to ecosystems. *Ecology Letters*, 2000, 3(6): 540-550.
- [3] Elser J J, Bracken M E S, Cleland E E, Gruner D S, Harpole W S, Hillebrand H, Ngai J T, Seabloom E W, Shurin J B, Smith J E. Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems. *Ecology Letters*, 2007, 10(12): 1135-1142.
- [4] Agren G I. Stoichiometry and nutrition of plant growth in natural communities. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2008, 39(1): 153-170.
- [5] 杨雪栋,孙卫国,宝音陶格涛. 内蒙古荒漠草原小针茅群落土壤养分的化学计量学特征. 中国草地学报, 2012, 34(5): 30-34.
- [6] 王维奇,仝川,贾瑞霞,曾从盛. 不同淹水频率下湿地土壤碳氮磷生态化学计量学特征. 水土保持学报, 2010, 24(3): 238-242.
- [7] 刘兴诏,周国逸,张德强,刘世忠,褚国伟,闫俊华. 南亚热带森林不同演替阶段植物与土壤中 N、P 的化学计量特征. 植物生态学报, 2010, 34(1): 64-71.
- [8] 贺金红,廖允成,胡兵辉,程天矫. 黄土高原坡耕地退耕还林(草)的生态经济效应研究. 农业现代化研究, 2006, 27(2): 110-114.
- [9] 朱志诚. 陕北黄土高原森林区植被恢复演替. 西北林学院学报, 1993, 8(1): 87-94.
- [10] 侯喜禄,曹清玉. 陕北黄土丘陵沟壑区植被减沙效益研究. 水土保持通报, 1990, 10(2): 33-40.
- [11] 朱显谟. 黄土高原国土整治“28 字方略”的理论与实践. 中国科学院院刊, 1998, 13(3): 232-236.
- [12] 曾德慧,陈广生. 生态化学计量学: 复杂生命系统奥秘的探索. 植物生态学报, 2005, 29(6): 1007-1019.
- [13] 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. 生态学报, 2008, 28(8): 3937-3947.
- [14] 钟庸. 不同林龄橡胶人工林磷循环特征的比较研究[D]. 海口: 海南大学, 2010.
- [15] 高三平,李俊祥,徐明策,陈熙,戴洁. 天童常绿阔叶林不同演替阶段常见种叶片 N、P 化学计量学特征. 生态学报, 2007, 27(3): 947-952.
- [16] 任书杰,于贵瑞,陶波,王绍强. 中国东部南北样带 654 种植物叶片氮和磷的化学计量学特征研究. 环境科学, 2007, 28(12): 2665-2673.
- [17] 张丽霞,白永飞,韩兴国. 内蒙古典型草原生态系统中 N 素添加对羊草和黄囊苔草 N:P 化学计量学特征的影响. 植物学报, 2004, 46(3): 259-270.
- [18] 黄从德,张健,杨万勤,张国庆,王永军. 四川森林土壤有机碳储量的空间分布特征. 生态学报, 2009, 29(3): 1217-1225.
- [19] Fu X L, Shao M A, Wei X R, Horton R. Soil organic carbon and total nitrogen as affected by vegetation types in Northern Loess Plateau of China. *Geoderma*, 2010, 155(1/2): 31-35.
- [20] 彭文英,张科利,陈瑶,杨勤科. 黄土坡耕地退耕还林后土壤性质变化研究. 自然资源学报, 2005, 20(2): 272-278.
- [21] 薛莲,刘国彬,戴全厚,党小虎,周萍. 不同植被恢复模式对黄土丘陵区侵蚀土壤微生物量的影响. 自然资源学报, 2007, 22(1): 20-27.
- [22] 王国梁,刘国彬,许明祥. 黄土丘陵区纸坊沟流域植被恢复的土壤养分效应. 水土保持通报, 2002, 22(1): 1-5.
- [23] 王国梁,刘国彬,周生路. 黄土丘陵沟壑区小流域植被恢复对土壤稳定入渗的影响. 自然资源学报, 2003, 18(5): 529-535.
- [24] 刘守赞,郭胜利,王小利,薛宝民. 植被对黄土高原沟壑区坡地土壤有机碳的影响. 自然资源学报, 2005, 20(4): 529-536.
- [25] 赵护兵,刘国彬,曹清玉. 黄土丘陵沟壑区不同植被类型的水土保持功能及养分流失效应. 中国水土保持科学, 2008, 6(2): 43-48.
- [26] 王凯博,时伟宇,上官周平. 黄土丘陵区天然和人工植被类型对土壤理化性质的影响. 农业工程学报, 2012, 28(15): 80-86.
- [27] 张建国,久米朋宣,大规模一,山中典和,杜盛. 黄土高原半干旱区辽东栎的树干液流动态. 林业科学, 2011, 47(4): 63-69.
- [28] Anderson J M, Swift M J. Decomposition in tropical forests. *Special Publications Series of the British Ecological Society*, 1983, 2: 287-309.
- [29] Takeda H. Decomposition processes of litter along a latitudinal gradient. *Environmental Forest Science*, 1998, 54: 197-206.
- [30] Attignon S E, Weibel D, Lachat T, Sinsin B, Nagel P, Peveling R. Leaf litter breakdown in natural and plantation forests of the Lama forest reserve in Benin. *Applied Soil Ecology*, 2004, 27(2): 109-124.
- [31] Yang Y S, Lin P, Guo J F, Lin R Y, Chen G S, He Z M, Xie J S. Litter production, nutrient return and leaf-litter decomposition in natural and monoculture plantation forests of *Castanopsis kawakamii* in subtropical China. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(7): 1278-1289.
- [32] 杨玉盛,郭剑芬,林鹏,何宗明,谢锦升,陈光水. 格氏栲天然林与人工林枯枝落叶层碳库及养分库. 生态学报, 2004, 24(2): 359-367.
- [33] 郭剑芬,陈光水,钱伟,杨少红,杨玉盛,郑群瑞. 万木林自然保护区 2 种天然林及杉木人工林凋落量及养分归还. 生态学报, 2006, 26(12): 4091-4098.

- [34] 段立珍. 两种测定土壤全氮量的方法比较. 安徽农业技术师范学院学报, 1997, 11(4): 57-58.
- [35] 郭晓旭, 郭望山, 任丽萍, 周振明, 孟庆翔. 饲料中硝态氮对燃烧法与凯氏法总氮含量测定结果的影响. 中国畜牧杂志, 2008, 44(21): 49-52.
- [36] 秦晓佳, 丁贵杰. 不同林龄马尾松人工林土壤有机碳特征及其与养分的关系. 浙江林业科技, 2012, 32(2): 12-17.
- [37] 许泉, 芮雯奕, 刘家龙, 刘智, 杨玲, 尹宇静, 张卫建. 我国农田土壤碳氮耦合特征的区域差异. 生态与农村环境学报, 2006, 22(3): 57-60.
- [38] 邬畏, 何兴东, 张宁, 王海涛, 马迪. 油蒿群落演替中的植物密度对土壤氮/磷比的响应. 土壤学报, 2009, 46(3): 472-479.
- [39] 朱秋莲, 邢肖毅, 张宏, 安韶山. 黄土丘陵沟壑区不同植被区土壤生态化学计量特征. 生态学报, 2013, 33(15): 4674-4682.
- [40] 党亚爱, 李世清, 王国栋, 邵明安. 黄土高原典型土壤全氮和微生物氮剖面分布特征研究. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(6): 1020-1027.
- [41] 张向茹, 马露莎, 陈亚南, 杨佳佳, 安韶山. 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. 土壤学报, 2013, 50(4): 818-825.
- [42] Tateno R, Tokuchi N, Yamanaka N, Du S, Otsuki K, Shimamura T, Xue Z D, Wang S Q, Hou Q C. Comparison of litterfall production and leaf litter decomposition between an exotic black locust plantation and an indigenous oak forest near Yan'an on the Loess Plateau, China. *Forest Ecology and Management*, 2007, 241(1/3): 84-90.
- [43] 黄昌勇. 土壤学. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [44] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, Melillo J M, Hall C A S. Pattern and variation of C: N: P ratios in China's soils: a synthesis of observational data. *Biogeochemistry*, 2010, 98(1): 139-151.
- [45] 祖元刚, 李冉, 王文杰, 苏冬雪, 王莹, 邱岭. 我国东北土壤有机碳、无机碳含量与土壤理化性质的相关性. 生态学报, 2011, 31(18): 5207-5216.
- [46] 程滨, 赵永军, 张文广, 安树青. 生态化学计量学研究进展. 生态学报, 2010, 30(6): 1628-1637.
- [47] 高三平. 天童常绿阔叶林不同演替阶段 N、P 化学计量学研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2008.
- [48] 杜盛, 刘国彬等. 黄土高原植被恢复的生态功能. 北京: 科学出版社, 2015: 64.
- [49] 邬畏. 土壤氮/磷比对植物影响的初步研究[D]. 天津: 南开大学, 2010.
- [50] 李英. 广西生态移民区土地利用变化对土壤质量的影响[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014.