

# 晋西黄土区三种林地土壤养分随林分生长的变化

董秀群<sup>1</sup>, 王百田<sup>1\*</sup>, 武中鹏<sup>2</sup>, 王旭虎<sup>1</sup>

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 贵州大学喀斯特重点实验室, 贵州 贵阳 550025)

**摘要:** [目的] 研究不同林分类型以及林龄对晋西黄土区土壤养分的改良效应, 以为森林可持续经营提供参考、丰富该区域的生态服务评估资料。[方法] 采用林分调查、土壤取样和室内分析方法, 于2011年和2016年7—8月对3种不同林龄(山杨中龄林、油松幼龄林、侧柏中龄林)林地内的不同土层有机碳、全氮、全磷含量进行分析, 并研究林内各土层间的C、N、P化学计量关系。[结果] 表明: 各林地土壤养分都有极强的表聚性, 0~30 cm土层内有机质、全氮、全磷含量占0~100 cm土层的70%以上; 经过5年时间, 山杨、油松和侧柏林地0~50 cm土层内平均全氮含量分别增长了9.4%、7.4%、7.5%, 全磷含量分别增长了11.6%、12.2%、21.4%; 0~100 cm土层内碳储量分别增加了21.17、23.74、2.21 t·hm<sup>-2</sup>。不同林地之间土壤C:N值随土层深度逐渐减小, 而N:P、C:P值随土层变化并没有规律; 随着林龄的增加, 土壤表层(0~10 cm)的N:P和C:P值明显减小, 而C:N值变化不明显。[结论] 根据全国土壤养分分级标准, 试验林地内碳和氮含量较为丰富, 而全磷平均含量为0.36~0.46 g·kg<sup>-1</sup>、为4~5级标准。在试验林地内, 对土壤碳储量、全氮、全磷改良效果相对较好的分别为油松林、山杨林和侧柏林。

**关键词:** 晋西黄土区; 土壤养分; 林分生长; 化学计量

中图分类号: S714

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2018)02-0069-08

## Changes of Soil Nutrients with Stands Growth of Three Kinds of Forestlands in Loess Area of Western Shanxi

DONG Xiu-qun<sup>1</sup>, WANG Bai-tian<sup>1</sup>, WU Zhong-peng<sup>2</sup>, WANG Xu-hu<sup>1</sup>

(1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Karst Key Laboratory, Guizhou University, Guiyang 550025, Guizhou, China)

**Abstract:** [Objective] To explore the effects of different forest types and ages on soil nutrients in the loess area of western Shanxi province, so as to provide reference for sustainable forest management and enrich the ecological service assessment data. [Method] Forest investigation, soil sampling and laboratory analysis were used to analyze the contents of organic carbon, total nitrogen and total phosphorus in different soil layers at three plantations with different ages (mid-aged *Populus davidiana*, Young *Pinus tabulaeformis* and mid-aged *Platycladus orientalis*), and studied the C, N, and P stoichiometry in different soil layers in July and August of 2011 and 2016. [Result] The soil nutrients of different forest lands were accumulated in surface: the content of organic carbon, total nitrogen and total phosphorus in 0~30 cm soil layer accounted for more than 70% of the total in 0~100 cm soil layer, the soil nutrients decreased with soil depth. After 5 years, the average soil total nitrogen content of 0~50 cm in *Populus davidiana*, *Pinus tabulaeformis* and *Platycladus orientalis* forests increased by 0.26, 0.20, 0.17 g·kg<sup>-1</sup>, the total phosphorus content increased by 0.05, 0.06, 0.09 g·kg<sup>-1</sup>; the carbon storage of 0~100 cm layer increased by

收稿日期: 2017-04-25

基金项目: “十三五”国家科技支撑计划课题——困难立地植被恢复技术与示范(2015BAD07B02)

作者简介: 董秀群(1992—), 女, 山东临清人, 在读硕士研究生, 主要从事陡坡植被恢复研究。电话 13121371122, E-mail: dongxq1992@163.com, 地址: 北京市海淀区清华东路35号, 邮编 100083。

\* 通讯作者: 王百田(1958—), 男, 陕西富平人, 教授, 博士生导师, 主要从事林业生态工程与生态修复研究。

21.17, 23.74, 2.21 t · hm<sup>-2</sup> respectively. The C:N of soil in different forest lands decreased gradually with the depth of soil layer, while the N:P and C:P in different soil layers changed irregularly; the N:P and C:P of soil surface layer (0 ~ 10 cm) decreased significantly with forest age, while the change of C:N was not obvious. [ **Conclusion** ] According to the national soil nutrients classification standards, the carbon and nitrogen in the experimental forests are relatively rich. The total phosphorus content was 0.36 ~ 0.46 g · kg<sup>-1</sup>, which is at level 4 or 5. *Pinus tabulaeformis*, *Platycladus orientalis* and *Populus davidiana* perform better in improving soil organic carbon storage, total nitrogen and total phosphorus in the experimental forests.

**Keywords:** Loess area of West Shanxi; soil nutrient; stand growth; stoichiometry

土壤养分作为土壤最重要的属性之一,其含量及存在形态决定着土壤的肥力状况,进而影响着植被的生长及生理作用<sup>[1-2]</sup>;在植被演替过程中,土壤中C、N、P等元素的循环相互影响<sup>[3-4]</sup>,这必然会引起生态系统循环及其稳定性的变化。C:N和C:P反映了植物生长速度,C:N在植被演替过程中相对稳定而C:P呈逐渐减小趋势<sup>[5]</sup>,N:P可以定位对植物生长起限制性作用的营养元素<sup>[6]</sup>,经研究,在植被演替过程中,会由受到N素限制转变为P素限制<sup>[7]</sup>。据统计,黄土高原地区每年因水土流失损失约3 × 10<sup>7</sup> t N、P、K等养分,严重制约了农林业的发展<sup>[8]</sup>。据研究,植树造林在增加植被覆盖度的同时,还可以有效改善土壤内养分状况、提高土壤肥力<sup>[9]</sup>。目前,国内外学者对植被生长与土壤养分的关系做了大量研究并取得了显著成果<sup>[10-13]</sup>。杨佳佳<sup>[14]</sup>等研究了黄土高原地区不同坡向对槐树林土壤中C、N、P含量的影响,发现叶片、枯落物、土壤C:N、C:P和N:P在阴、阳坡均无显著性差异( $P < 0.05$ );张珂<sup>[15]</sup>等对阿拉善地区不同水分条件下的荒漠植物中C、N、P含量进行测定,探讨了C:N和N:P随水分梯度的变化规律;李玮<sup>[16]</sup>等通过对比不同年限的茶园表层土壤中养分含量,证明茶园年限越长养分含量越高,且差异显著;阎恩荣<sup>[17]</sup>等通过N:P值的变化分析了森林不同演替阶段的限制性元素;刘甲午<sup>[18]</sup>等综述了不同林龄华北落叶松林土壤的C、P、K变化特征,将林龄、坡度、降雨量等多种指标进行主成分分析,证明林龄对土壤养分含量的变化影响最大。但是,前人的研究多为单一林分下土壤的养分含量特征,或者仅仅对表层土壤中养分含量的变化规律进行定性研究,缺乏对林分在不同林龄条件下各土层间土壤养分含量变化的综合定量研究。

因此,本研究选取了黄土高原地区3种主要的人工植被(山杨、油松、侧柏),于2011年和2016年

分别对其林内各土层土壤有机碳、全N、全P含量进行了分析,研究了林分在不同林龄以及不同土层间的C、N、P化学计量关系,以期对该区域森林经营及管理进行一定的指导,也可以为树种立地条件的选择提供理论依据。同时,研究林分在不同林龄条件下养分含量的变化,可以更确切地衡量退耕还林工程对改善生态环境的成效如何。

## 1 研究区概况

试验地分布在临汾市吉县境内,地处黄河中游东岸,山西省西南部,地理坐标为东经110°30′~110°43′,北纬36°10′~36°19′。地势东高西低,海拔落差大,最高海拔(高天山)为1 820 m,最低海拔(黄河畔)为450 m,试验地海拔位于1 200~1 488 m。县境内山峦起伏、沟壑纵横、地形复杂,试验地土质主要是黄土和褐土。吉县境内气候四季分明,光照充足,日照时数约为2 538 h · a<sup>-1</sup>,大于10℃的有效积温为3 361.5℃。无霜期年平均172 d,年均气温10.2℃,年均日较差11.5℃,年均降水522.8 mm。属暖温带大陆性季风气候,全年降雨集中在夏季。试验地植物资源比较丰富,且大多为人工林,乔木以油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.)、落叶松(*Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen)、刺槐(*Robinia pseudoacacia* Linn.)、侧柏(*Platycladus orientalis* (L.) Franco)、山杨(*Populus davidiana* Dode.)、白皮松(*Pinus bungeana* Zucc.)、辽东栎(*Quercus liaotungensis* Koidz.)、榆树(*Ulmus pumila* Linn.)为主,灌木有小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla* Lam.)、三裂绣线菊(*Spiraea trilobata* Linn.)、山楂叶悬钩子(*Rubus crataegifolius* Bge.)等,草本植物主要包括画眉草(*Eragrostis pilosa* (L.) Beauv.)、铁杆蒿(*Artemisia sacrorum* Ledeb.)、黑麦草(*Lolium perenne* Linn.)等,试验地概况如表1。

表1 样地内不同林种的基本状况

Table 1 Basic state of different forest types in the sample plots

林种 Species	土壤类型 Soil type	密度 Density/ (株·hm <sup>-2</sup> )	坡度 Declivity /(°)	海拔 Altitude /m	调查时间 Time of investigation	林龄 Age of stand/a	平均树高 Mean tree height/m	平均胸径 Mean DBH/cm	郁闭度 Crown density
山杨 <i>P. davidiana</i>	褐土	1 125	2~8	1 385~1 452	2011	10	9.06	14.58	0.60
					2016	15	13.88	16.59	0.70
油松 <i>P. tabuliformis</i>	黄土	1 425	6~17	1 321~1 348	2011	15	8.09	12.98	0.70
					2016	20	9.52	14.68	0.75
侧柏 <i>P. orientalis</i>	褐土	1 650	10~25	1 225~1 240	2011	40	13.35	20.55	0.80
					2016	45	16.71	23.55	0.85

## 2 研究方法

### 2.1 野外样品采集

2011年和2016年7—8月分别对试验地林分进行调查取样。2011年,根据试验地的地形、林龄和植被类型特征,分别选取10 a生山杨林、15 a生油松林、40 a生侧柏林3个样地进行调查,其中,林内水源主要为自然降水、生长过程中未施肥。每个样地为1 000 m<sup>2</sup> (50 m×20 m),在每个样地对角线方向随机选取3个样点,按照剖面法在每个样点采取0~10、10~20、20~30、30~50和50~100 cm 5个土层的样品。2016年,用相同的方法对这3块林地进行调查,2011和2016年各取45个土壤样品。

### 2.2 指标测定方法

将采集的土样,及时带回实验室风干、研磨、过筛,称取一定质量的土样进行养分含量的测定。土壤有机碳、全氮、全磷分别采用重铬酸钾—硫酸氧化法<sup>[19]</sup>、H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>—H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>消解—凯氏定氮仪法测定<sup>[20]</sup>、H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>—H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>消煮—钼锑抗比色法测定<sup>[21]</sup>。

### 2.3 数据处理和分析

测定不同林龄的3种人工林内土壤各土层的碳、氮、磷含量并进行化学计量分析,利用Excel 2010进行数据整理和作图,利用SPSS 19.0进行显著性分析和多重比较。

## 3 结果与分析

### 3.1 林分生长对土壤N素和P素的影响

3.1.1 林分生长对土壤全N的影响 不同林分类型和林龄对土壤全N含量的影响程度不同,如图1所示。在0~100 cm土层中,各林地之间的平均土壤全N含量差异显著( $P < 0.05$ ),山杨林(10 a)、油松林(15 a)、侧柏林(40 a)分别为2.67、2.71、1.99 g·kg<sup>-1</sup>;5年后,山杨林(15 a)、油松林(20 a)、侧柏林(45 a)平均土壤全N含量分别为2.92、2.91、

2.14 g·kg<sup>-1</sup>,增长速率分别为0.05、0.04、0.03 g·kg<sup>-1</sup>·a<sup>-1</sup>。在0~50 cm土层中,山杨林(10 a)、油松林(15 a)、侧柏林(40 a)平均全N含量为分别为2.97、3.05、2.27 g·kg<sup>-1</sup>,山杨林(15 a)、油松林(20 a)、侧柏林(45 a)平均全N含量分别为3.23、3.25、2.44 g·kg<sup>-1</sup>,5年内山杨、油松和侧柏林地内平均全N含量分别增长了9.4%、7.4%、7.5%;显然,林内平均全N含量均随着林龄的增加而增加,且山杨林5年内全N增长速率大于油松林和侧柏林。

由图1可以看出,林内土壤N素集中在表层土壤:在山杨林(10 a)、山杨林(15 a)、油松林(15 a)、油松林(20 a)、侧柏林(40 a)、侧柏林(45 a)林地内,0~30 cm土层中全N含量分别占0~100 cm土层的75.3%、76.4%、73.9%、73.4%、72.4%、71.6%;而30~100 cm土壤含N量急剧减少,占比不到30%。同时,侧柏林(40 a)各土层土壤全N含量差异不显著,侧柏林(45 a)0~10 cm土层土壤全N含量仅与50~100 cm差异显著,而山杨和油松林内0~10 cm土层土壤全N含量与10~100 cm土层均有显著性差异( $P < 0.05$ )。

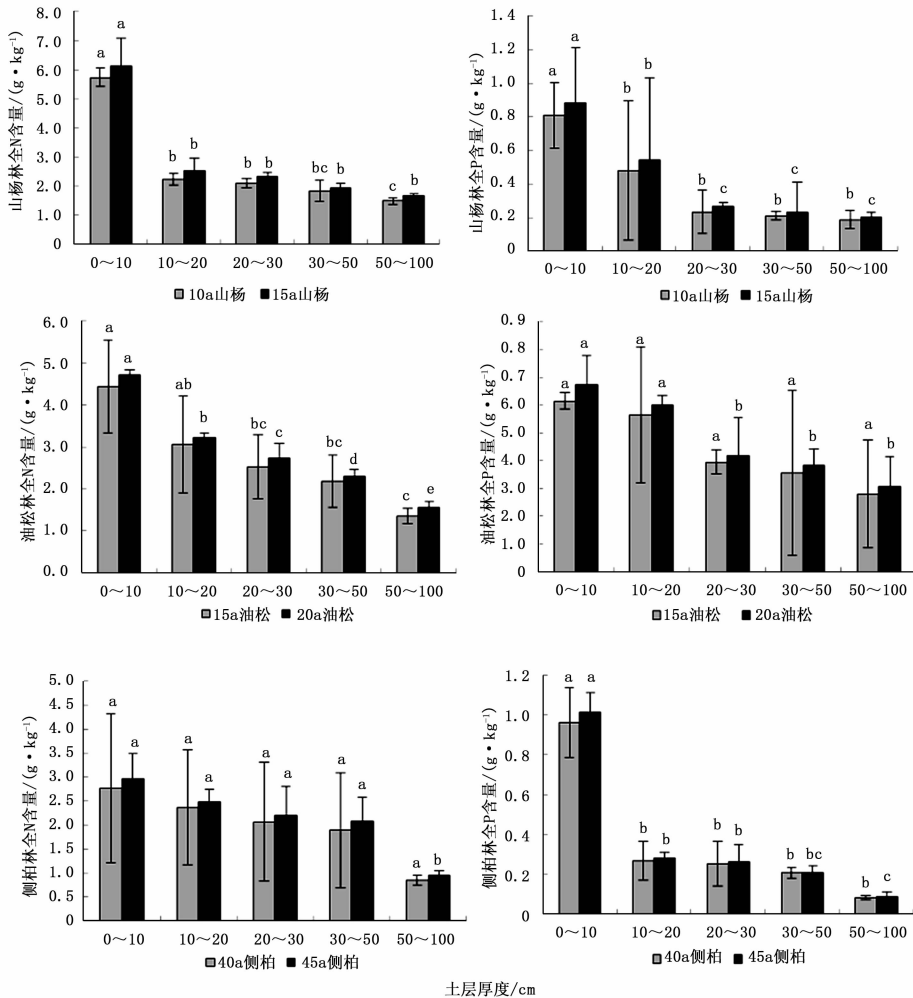
3.1.2 林分生长对土壤全P的影响 不同林种及林龄对土壤含P量的影响,如图1所示。在0~100 cm土层中,各林地之间土壤的平均全P含量差异显著( $P < 0.05$ ):山杨、油松、侧柏林内土壤全P含量平均值为0.40、0.46、0.36 g·kg<sup>-1</sup>,这与林地之间N素分布规律基本一致。在0~50 cm土层中,山杨林(10 a)、油松林(15 a)、侧柏林(40 a)平均全P含量分别为0.43、0.49、0.42 g·kg<sup>-1</sup>,5年后,山杨林(15 a)、油松林(20 a)、侧柏林(45 a)平均全P含量分别为0.48、0.55、0.51 g·kg<sup>-1</sup>,5年内山杨、油松、侧柏林地内0~50 cm土层中土壤全P含量分别增长了11.6%、12.2%、21.4%。即:土壤中含P含量随林龄增加而增加;0~100 cm土层侧柏林内全P含量最低,而0~50 cm土层侧柏林内全P含量增

长最快,说明侧柏主要增加中上层土壤中P素、对深层土壤基本没有影响。

林内土壤含P量随土层加深逐渐降低,也呈现出表层土壤集中分布的现象,如图1所示。山杨林(10 a)、山杨林(15 a)、油松林(15 a)、油松林(20 a)、侧柏林(40 a)、侧柏林(45 a) 0~30 cm 土层中全P含量占0~100 cm 土层的百分比分别为79.3%、79.5%、71.2%、71.0%、83.6%、83.9%,30 cm 以下土壤中P素极少。山杨和侧柏林地内0~10 cm 土层全P含量与10~100 cm 土层差异显著( $P < 0.05$ ),而油松林(20 a)中0~20 cm 与20~100 cm 间差异显著,油松林(15 a)各土层间无显著影响。就林内土壤全磷的P均值而言,各林地土壤含P量均较低,根据全国土壤普查结果的分级标准<sup>[22]</sup>,该试验区土壤P素处于4~5级水平。

### 3.2 林分生长对土壤有机碳的影响

3.2.1 林分生长对土壤有机碳含量的影响 由表2可以看出,各林地平均土壤有机碳含量差异显著( $P < 0.05$ ),且同一林分类型有机碳含量随着林龄增加而增加,在100 cm 土层内平均有机碳含量为:山杨林(15 a)( $17.51 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) > 山杨林(10 a)( $15.93 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) > 油松林(20 a)( $12.07 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) > 油松林(15 a)( $11.28 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) > 侧柏林(45 a)( $10.12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) > 侧柏林(40 a)( $9.63 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )。5年内,山杨、油松、侧柏林地0~100 cm 土层土壤平均有机碳含量分别增长了1.58、0.79、0.49  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,0~30 cm 土层含碳量分别增长了2.12、1.00、0.67  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,0~10 cm 土层平均碳含量分别增长了3.07、1.37、0.85  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,显然林分生长改良表层土壤碳含量效果好,但是对深层土壤影响较小。



注:不同小写字母表示同一林龄不同土层间养分含量有显著( $P < 0.05$ )差异。

图1 不同林地各土层土壤全N、全P含量比较

Fig.1 Comparison of total N and total P contents in different soil layers of forest lands

总体来看,林分对中上层土壤有机碳的改善能力为山杨>油松>侧柏。

林内有机碳的分布也具有表聚性,在0~30 cm土层内,山杨林(10 a)、山杨林(15 a)、油松林(15 a)、油松林(20 a)、侧柏林(40 a)、侧柏林(45 a)有机碳含量分别占0~100 cm土层的79.5%、79.6%、79.7%、74.5%、82.2%、82.3%,说明在30 cm以下有机碳累积速度缓慢,处于非常低的状态,这与土壤氮素和磷素含量的分布规律相一致,都呈现出由表层向深层逐渐迁移的动态过程。在0~100 cm土层内有机碳含量随着深度增加而减小;山杨和油松林内0~10 cm土层土壤有机碳含量显著( $P<0.05$ )高于10~100 cm土层;侧柏林0~20 cm土层内碳素分布较均匀,但明显高于30 cm以下土层碳含量。

3.2.2 林分生长对土壤有机碳储量的影响 如图2所示,不同林内土壤碳储量均随土层深度逐渐减小,各林分土壤50~100 cm土层碳储量占土壤剖面碳储量比例为山杨林(10 a)(26.9%)、山杨林

(15 a)(25.4%)、油松林(15 a)(24.9%)、油松林(20 a)(29.0%)、侧柏林(40 a)(17.1%)、侧柏林(45 a)(18.1%),均不超过0~100 cm土层土壤总碳储量的30%;表层(0~10 cm)土壤碳储量显著高于其他土层,各林分之间表现为山杨林(15 a)(56.42 t·hm<sup>-2</sup>)>山杨林(10 a)(51.36 t·hm<sup>-2</sup>)>油松林(20 a)(32.05 t·hm<sup>-2</sup>)>油松林(15 a)(26.69 t·hm<sup>-2</sup>)>侧柏林(45 a)(21.70 t·hm<sup>-2</sup>)>侧柏林(40 a)(21.69 t·hm<sup>-2</sup>),这与土壤含碳量分布规律相一致。

经过5年的时间,山杨林、油松林、侧柏林0~100 cm土层内土壤碳总储量分别由150.35、101.42、85.63 t·hm<sup>-2</sup>增加到171.52、125.15、87.84 t·hm<sup>-2</sup>,相当于山杨、油松、侧柏分别为该区固碳21.17、23.74、2.21 t·hm<sup>-2</sup>。0~30 cm土层内,山杨、油松、侧柏林地碳储量分别增加了12.58、10.05、0.97 t·hm<sup>-2</sup>,所以试验区山杨和油松比侧柏更有利于土壤中有有机碳含量的提高。

表2 不同林地各土层土壤有机碳含量

Table 2 Soil organic carbon content in different soil layers of forest lands

土层厚度 Soil thickness / cm	有机碳含量 Organic carbon content/(g·kg <sup>-1</sup> )					
	山杨林(10a) <i>Populus davidiana</i>	山杨林(15a) <i>Populus davidiana</i>	油松林(15a) <i>Pinus tabulaeformis</i>	油松林(20a) <i>Pinus tabulaeformis</i>	侧柏林(40a) <i>Platycladus orientalis</i>	侧柏林(45a) <i>Platycladus orientalis</i>
0~10	37.06 ± 2.35a	40.14 ± 3.44a	21.52 ± 6.21a	22.90 ± 1.82a	16.07 ± 7.22a	16.92 ± 5.40a
10~20	13.89 ± 1.27b	15.82 ± 1.95b	13.49 ± 6.85b	14.49 ± 1.62b	13.35 ± 7.78a	14.18 ± 1.41ac
20~30	12.33 ± 4.19bc	13.69 ± 1.53bc	9.94 ± 3.21bc	10.58 ± 0.48bc	9.85 ± 5.81ac	10.47 ± 2.48bc
30~50	10.27 ± 1.53bc	10.91 ± 0.46bc	6.97 ± 5.35c	7.54 ± 0.23c	6.41 ± 4.34bc	6.64 ± 3.60bd
50~100	6.08 ± 0.72c	6.99 ± 0.48c	4.47 ± 4.04c	4.84 ± 0.08c	2.16 ± 0.05b	2.39 ± 0.06d
平均	15.93 ± 2.01A	17.51 ± 1.57B	11.28 ± 5.13C	12.07 ± 0.85D	9.63 ± 5.04E	10.12 ± 2.59F

注:表中数据为平均值±标准差;同列数据后不同小写字母表示同一林地不同土层间有机碳含量差异显著( $P<0.05$ ),不同大写字母表示不同林地之间平均有机碳含量差异显著( $P<0.05$ )。

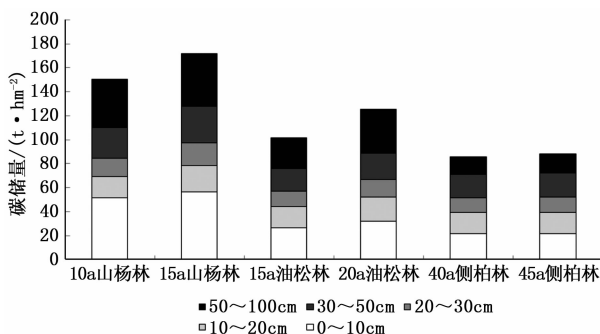


图2 各林地内土壤碳储量

Fig. 2 Soil carbon storage in different forest lands

度变化规律如图3所示。山杨林的C:N值为4.14~6.71,均值为5.72,变异系数为15.5%;油松林的C:N值为3.10~4.85,均值为3.90,变异系数为18.0%;侧柏林的C:N值为2.51~6.14,均值为4.40,变异系数为31.6%,3种林分类型都是中等变异。研究0~10 cm土层土壤C:N值,可知山杨林(15 a)(6.71)>山杨林(10 a)(6.46)>侧柏林(40 a)(6.14)>侧柏林(45 a)(5.67)>油松林(20 a)(4.85)>油松林(15 a)(4.83),表明山杨林和油松林表层土壤C:N值随林龄增大而增大,侧柏林则相反,且差异显著( $P<0.05$ )。

山杨林的N:P值为4.71~10.71,均值为7.89,变异系数为19.9%;油松林的N:P值为5.41~8.45,均值为6.62,变异系数为14.0%;侧柏林的

### 3.3 林分生长对土壤化学计量特征的影响

不同林地土壤中C:N、N:P、C:P值随着土层深

N:P 值为 2.96 ~ 10.43, 均值为 8.01, 变异系数为 34.5%。侧柏林(45 a) 土壤 N:P 值随着土层加深逐渐增大且 0 ~ 10 cm 土层 N:P 值显著低于 10 ~ 100 cm 土层, 山杨和油松林内 N:P 值在不同土层之间差异不显著。随着林龄的增加, 山杨林、油松林、侧柏林土壤表层(0 ~ 10 cm) 的 N:P 值分别减少了 0.36、0.10、0.12, 表明在养分循环的过程中, 林分有利于改善晋西黄土区磷素严重缺乏的状况。

山杨林的 C:P 值为 29.34 ~ 67.87, 油松林的 C:P 值为 17.40 ~ 35.02, 侧柏林的 C:P 值为 18.03 ~ 50.43, 总体来看山杨林土壤 C:P 值显著高于油松林和侧柏林。在 0 ~ 10 cm 土层中, C:P 值为山杨林(10 a)(47.03) > 山杨林(15 a)(45.49) > 油松林(15 a)(35.02) > 油松林(20 a)(34.69) > 侧柏林(40 a)(18.03) > 侧柏林(45 a)(16.99), 即随着林龄增加 C:P 值逐渐减小, 这也说明林分生长对改善晋西黄土区养分循环以及缓解其磷素严重缺乏的状况有明显作用。

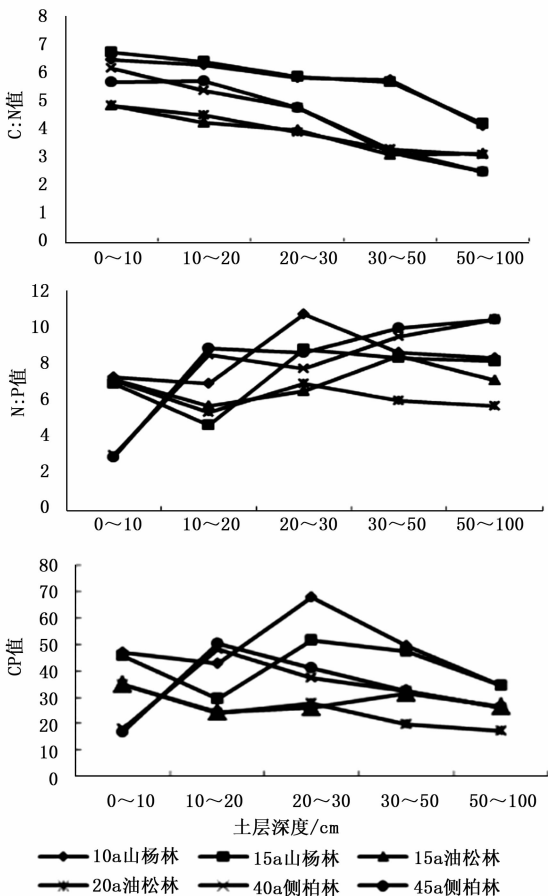


图3 不同林地各土层土壤化学计量比

Fig. 3 Soil stoichiometry in different soil layers of forest lands

## 4 讨论

土壤对调节植物生长及生理活动起关键作用<sup>[23]</sup>, 其中的 N 和 P 不仅是植物生长所需的重要养分, 还是蛋白质和遗传物质的重要组成元素, 对植物生长至关重要<sup>[24]</sup>。森林土壤中的 N、P 含量主要决定于气候条件、土壤质地和植被类型<sup>[25]</sup>, 研究区山杨林龄仅为 10 余年, 植株个体较小, 消耗养分较少, 更有利于养分积累; 油松根浅且生长较缓慢, 林下基本没有林草植被生长, 减少了林地内养分消耗; 侧柏侧根发达, 且林龄已达 40 余年、植株高大, 需要从土壤中吸收更多的养分供给自身生长, 这可能是山杨林内 N 素含量最高、油松次之、侧柏最低的原因之一。同时, 林内土壤 N 素的动态转移是由表层缓慢向深层过度的一个过程<sup>[26]</sup>, 所以 N 素分布也呈现出表聚性, 且山杨和油松林内 0 ~ 10 cm 显著 ( $P < 0.05$ ) 高于 10 ~ 100 cm 土层; 侧柏林内 N 素含量也随土层逐渐降低, 但垂直分布不明显, 0 ~ 100 cm 土层内差异不显著, 这是因为凋落物的分解产生养分与植物吸收养分是一个复杂而缓慢的过程, 且凋落物质量与分解速率共同影响着 N 素在土壤各土层中的分布, 使得 N 素含量与土层不具有显著的相关性<sup>[27-28]</sup>。P 素主要受成土母质和枯落物腐解的双重影响, 而枯落物分解后养分主要被植被吸收利用, 土壤中 P 素则大多来自矿化速度极慢的母质中, 所以土壤 P 含量变化较慢<sup>[28]</sup>。研究结果显示, P 素主要分布在土壤表层, 且林地中 0 ~ 10 cm 含量显著高于 50 ~ 100 cm。这与前人的研究结果一致: 巩杰<sup>[29]</sup>等人发现黄土高原土壤养分具有明显的垂直分布特性—表层含量明显高于深层; 罗歆<sup>[30]</sup>等在其他地区对不同植被类型下土壤养分含量进行研究, 也表明了土壤养分含量的表层集中分布特征, 本研究着重考虑林分对全量养分的影响, 今后可探索林分生长过程中林内速效养分的变化规律, 更全面地评价退耕还林工程的意义。

C 是构成植物体内干物质的最主要元素, 植物枯落物和根系是土壤 C 的重要来源。在本研究中, 3 种林分类型有机碳平均含量为山杨林 > 油松林 > 侧柏林, 主要是受到树种、立地和林分结构的强烈影响: 油松为浅根性乔木, 能够有效地改善表层土壤养分状况, 但是油松林土壤为黄土, 极易受到侵蚀而影响有机质的积累; 山杨林和侧柏林土质为褐土, 其腐殖质层以下有褐色粘化层、风化度低, 可以减少土壤

养分的流失;试验地内侧柏种植密度为  $1\ 650\ \text{株} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,可以获得较多木材量但不利于土壤质量的提高,较大的栽植密度使得植被在生长过程中养分竞争激烈,且针叶作为主要凋落物分解缓慢,返还到土壤中的有机质非常少,所以侧柏林内土壤有机质含量相对最低;同时山杨为阔叶树,林内枯落物年归还量比油松林和侧柏林多,而且容易分解进入土壤,所以山杨林内积累了更多的有机质。同时,侧柏林内表层土壤有机质含量还不足  $20\ \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,在全国土壤养分划分中为 4~6 级标准,所以碳储量随林龄的增加也相当缓慢。结果中侧柏林内有机碳含量与山杨林和油松林相差甚远,在今后的研究中,有必要继续探索海拔、坡向等地形条件与固碳能力的相关性。随着林龄的增长,土壤 C 含量以及 C 储量均有所增加,表明林分生长能够提高土壤肥力,这与 Pregitzer, Kurt S<sup>[31]</sup> 等人的研究结果一致。研究区 0~20 cm 土层内碳储量为  $39.06 \sim 78.54\ \text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,明显高于全国森林土壤的平均值  $26.7\ \text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ <sup>[32]</sup>,说明研究区土壤含碳量较为丰富,为 1~3 级标准,李慧<sup>[33]</sup> 等人的研究中也得出了相同的结论。

化学计量比作为评价土壤质量的重要指标,对植物生长有着重要的影响。结果显示,随着林龄增加,林分 C:N 上下波动但变化不大,林内 C:N 值远小于全球土壤 C:N 平均值 13.33<sup>[34]</sup>,所以在养分循环过程中,N 素富足能够将多余的 N 素释放到土壤中。随着土层深度的增加,土壤 C:N 值逐渐减小,这与王绍强<sup>[11]</sup> 等人的研究结果一致。林内平均 C:P 和 N:P 与林龄呈负相关且各林龄间差异显著,一方面是因为林分生长增加了研究区含 P 量,另一方面是 N 与 C 在供应植物吸收方面互相促进,滞留土壤中的 P 相对较多引起的<sup>[35]</sup>。土壤 C:N:P 比值综合了生态系统功能的变异性,能够有效反映土壤内部 C、N、P 循环的指标,成为判定养分平衡的一个重要参数<sup>[36]</sup>,研究区土壤的 C:N:P 值为山杨林(42:7:1)、油松林(25:6:1)、侧柏林(27:6:1),远小于全球尺度下土壤中的 C:N:P 平均值 186:13:1<sup>[37]</sup>。目前,有研究表明植物叶片中  $N:P < 14$ ,则存在 N 素限制; $N:P > 16$ ,则存在 P 限制<sup>[38]</sup>,而判断 N、P 限制元素的土壤 N:P 值还有待确定,只能通过 N、P 含量进行级别划分。侧柏林 C:P 和 N:P 值随林龄变化最大,说明林分稳定性不如山杨林和油松林;而山杨林和油松林内 N:P、C:P 值显著大于侧柏林内 N:P、C:P 值,表明在养分循环过程中侧柏更有利于提高 P

素含量。研究中 3 种林分类型在不同林龄下 C:N 值变化都不大,说明土壤内 C、N 养分循环较为稳定、可供植被吸收利用并有效改良土壤。

研究表明,山杨、油松和侧柏的生长都能够提高土壤养分含量、改良土壤理化性质,它们分别对 N 素、有机质和 P 素有很好的促进作用,在林业发展中可以根据不同土壤状况进行林种选择。在今后的研究中,选择相同林龄的主要树种,探索植被和土壤中养分含量的耦合关系,对衡量林分种植的可行性更有意义。

## 5 结论

(1) 不同林分类型土壤养分均具有明显表聚性,有机质、全氮和全磷含量随土层加深而递减,0~30 cm 内土壤有机质、全氮、全磷含量占 0~100 cm 土层的 70% 以上,且表层(0~10 cm)土壤养分含量显著( $P < 0.05$ )高于 30 cm 以下各土层;经研究,研究区有机质和全氮含量较为丰富,大多为 1~3 级标准,而全磷含量普遍较低,主要集中在 4~5 级标准范围内。

(2) 林内养分含量与林龄呈正相关,3 种林分类型各土层有机质、全氮、全磷含量均随着林龄的增长不断增加。5 年内,山杨、油松、侧柏林地内中上层(0~50 cm)土壤全氮含量分别增长了 9.4%、7.4%、7.5%,全磷含量分别增长了 11.6%、12.2%、21.4%,在 0~100 cm 土层内内固碳量分别为 21.17、23.74、2.21  $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。即:山杨和油松对中上层土壤中氮素和有机质含量的改善效果比侧柏好,而侧柏在生长过程中更有利于磷素的积累。

(3) 随着林龄的增加,林内 C:N 变化不大,C:P 和 N:P 均有所降低且差异显著,说明林分内 C、N 循环较为平衡,能够保证植物生长所需养分,且林分生长可以改善研究区磷素缺乏的现状。随着土层加深,山杨和油松林内 N:P 无显著变化,而侧柏林内 N:P 显著增大,说明侧柏林内磷素的表聚性强于山杨和油松林。

通过对 3 种林分类型下土壤养分含量的变化研究可知,山杨、油松和侧柏的种植都能够改善黄土高原地区土壤贫瘠的现状,但是对不同养分的改良效果有所差别,这为林分的立地条件选择提供了理论支撑,也可以利用不同树种的优良特性来促进晋西黄土区生态环境的修复。

## 参考文献:

- [1] LIU X M, LI X Y, YUAN Y, *et al.* Review of soil nutrients of forest nature reserve[J]. *Agricultural Science & Technology*, 2016, 17(6): 1412-1421.
- [2] Elser J J, Bracken M E, Cleland E E, *et al.* Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems[J]. *Ecology Letters*, 2007, 10(12):1135.
- [3] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. *Science*, 2004, 304(5677):1623-1627.
- [4] Schipper L A, Percival H J, Sparling G P. An approach for estimating when soils will reach maximum nitrogen storage[J]. *Soil Use & Management*, 2004, 20(20):281-286.
- [5] Göran I. Ågren. The C: N: P stoichiometry of autotrophs-theory and observations[J]. *Ecology Letters*, 2004, 7(7):185-191.
- [6] Liu J, Huang W, Zhou G, *et al.* Nitrogen to phosphorus ratios of tree species in response to elevated carbon dioxide and nitrogen addition in subtropical forests[J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(1):208.
- [7] Vitousek P M, Farrington H. Nutrient limitation and soil development: experimental test of a biogeochemical theory[J]. *Biogeochemistry*, 1997, 37(1):63-75.
- [8] Zhang L, Li J, Fan P, *et al.* Distribution of soil NPK nutrient content in deep soil profile of typical apple orchards on the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(6):1907-1915.
- [9] De Graaff M, Van Groenigen K, Six J, *et al.* Interactions between plant growth and soil nutrient cycling under elevated CO<sub>2</sub>: a meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2006, 12(11):2077-2091.
- [10] 李少华, 王学全, 高琪, 等. 植被恢复对高寒沙区土壤性质的影响[J]. *林业科学研究*, 2016, 29(4):553-559.
- [11] 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.
- [12] 杨阔, 黄建辉, 董丹, 等. 青藏高原草地植物群落冠层叶片氮磷化学计量学分析[J]. *植物生态学报*, 2010, 34(1):17-22.
- [13] 杨菁, 谢应忠, 吴旭东, 等. 不同种植年限人工苜蓿草地植物和土壤化学计量特征[J]. *草业学报*, 2014, 23(2):340-345.
- [14] 杨佳佳, 张向茹, 马露莎, 等. 黄土高原刺槐林不同组分生态化学计量关系研究[J]. *土壤学报*, 2014, 51(1):133-142.
- [15] 张珂, 何明珠, 李新荣, 等. 阿拉善荒漠典型植物叶片碳、氮、磷化学计量特征[J]. *生态学报*, 2014, 34(22):6538-6547.
- [16] 李玮, 郑子成, 李廷轩. 不同植茶年限土壤团聚体碳氮磷生态化学计量学特征[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(1):9-16.
- [17] 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.
- [18] 刘甲午, 葛兆轩, 田晓敏, 等. 华北落叶松人工林各龄级土壤肥力研究[J]. *安徽农业科学*, 2015, 43(2):156-158,161.
- [19] 姚志杰. 黄土丘陵区植物篱对坡地土壤理化性状的影响研究[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学, 2014.
- [20] 李宇庆, 陈玲, 赵建夫. 土壤全氮测定方法的比较[J]. *广州环境科学*, 2006, 21(3):28-29.
- [21] 文衍秋, 郭焯, 张国庆. 土壤全磷测定中显色方法的研究[J]. *安徽农业科学*, 2013, 41(6):2442-2444.
- [22] 全国土壤普查办公室. 中国土壤[M]. 北京:中国农业出版社, 1998.
- [23] Chang C W. Near infrared reflectance spectroscopy-Principal components regression analyses of soil properties[J]. *Agricultural and Biosystem Engineering*, 2001, 65(2):480-490.
- [24] Xiang W H, Huang Z H, Yan W D, *et al.* Review on coupling of interactive functions between carbon and nitrogen cycles in forest ecosystems[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(7):2365-2372.
- [25] 肖安序. 亚高山不同植被土壤有机碳、氮素及其影响因素研究[D]. 四川雅安:四川农业大学, 2015.
- [26] Templer P H, Arthur M A, Lovett G M, *et al.* Plant and soil natural abundance delta (15)N: indicators of relative rates of nitrogen cycling in temperate forest ecosystems[J]. *Oecologia*, 2007, 153(2):399-406.
- [27] 曹裕松, 吴风云, 肖宜安, 等. 退耕还林对土壤养分含量及其垂直分布的影响[J]. *生态环境学报*, 2016, 25(2):196-201.
- [28] 王春香. 晋西黄土区人工林下植物多样性与土壤养分研究[D]. 北京:北京林业大学, 2014.
- [29] 巩杰, 陈利顶, 傅伯杰, 等. 黄土丘陵区小流域植被恢复的土壤养分效应研究[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(1):93-96.
- [30] 罗歆, 代数, 何丙辉, 等. 缙云山不同植被类型林下土壤养分含量及物理性质研究[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(1):64-69,91.
- [31] Pregitzer K S, Euskirchen E S. Carbon cycling and storage in world forests: biome patterns related to forest age[J]. *Global Change Biology*, 2004, 10(12):2052-2077.
- [32] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 等. 不同植被下中国土壤有机碳的储量与影响因子[J]. *土壤学报*, 2004, 41(5):687-699.
- [33] 李慧, 王百田, 曹远博, 等. 吕梁山区3种人工林植被、凋落物生物量差异特征及其与土壤养分的关系[J]. *植物研究*, 2016, 36(4):573-580.
- [34] Post W M, Pastor J, Zinke P J, *et al.* Global patterns of soil nitrogen storage[J]. *Nature*, 1985, 317(6038):613-616.
- [35] 路翔, 项文化, 刘聪. 中亚热带4种森林类型土壤有机碳氮贮量及分布特征[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(3):169-173.
- [36] Clarke A. Ecological stoichiometry in six species of Antarctic marine benthos[J]. *Marine Ecology Progress*, 2008, 369(01):25-37.
- [37] Cleveland Cory C, Liptzin Daniel. C: N: P stoichiometry in soil: is there a "Redfield ratio" for the microbial biomass? [J]. *Biogeochemistry*, 2007, 85(3):235-252.
- [38] Tessier J T, Raynal D J. Use of Nitrogen to Phosphorus Ratios in Plant Tissue as an Indicator of Nutrient Limitation and Nitrogen Saturation? [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2003, 40(3):523-534.