

# 子午岭林区人工与天然油松林 (*Pinus tabulaeformis*) 养分库和碳库特征

邓 娟, 上官周平\*

(1. 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 杨陵 712100;

2. 中国科学院水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100)

**摘要:**为了揭示黄土高原地区人工油松林自然化发育过程中的植物叶片与土壤养分库和碳库的变化规律,采用典型样地法,以子午岭林区天然油松群落为参照,选择了不同立地条件的人工油松林,分别对其土壤的氮库、碳库及植物叶片养分库和碳库进行了分析。结果表明,该区油松针叶 C、N、P 的含量平均值分别为  $(499.5 \pm 63.75)$  mg/g,  $(8.53 \pm 0.50)$  mg/g 和  $(0.94 \pm 0.64)$  mg/g, 叶片 C 含量大小依次为阳坡天然林 > 阴坡天然林 > 阴坡人工林 > 阳坡人工林, 阳坡人工林叶片 N、P 含量显著高于阳坡天然林。不同立地条件下油松林叶片 C/N、C/P 差异显著, 叶片 N、P 和 N/P 均达到极显著水平, 但是叶片 C 含量差异不显著。油松叶片 C 含量与 N、P 含量均呈极显著负相关, N 和 P 之间的呈显著正相关。不同立地的油松林除 40~60cm 土层土壤 C、N 含量无显著差异外, 0~20cm 和 20~40cm 两个土层的人工林土壤 C、N 含量显著高于天然林, 同时阳坡人工林土壤 C、N 含量显著高于阴坡人工林。0~20cm、20~40cm 两个土层土壤 C 含量与 N 含量均呈极显著正相关, 与植物 N、P 均呈显著正相关。子午岭林区阳坡的人工油松林不仅叶片养分含量较高, 而且林地土壤是该区土壤的最大养分库和碳库。

**关键词:**油松林; 养分库; 碳库; 土壤; 子午岭; 黄土高原

文章编号: 1000-0933 (2009) 06-3231-10 中图分类号: Q145, Q948. S718. 5 文献标识码: A

## Nutrient and carbon pools in both natural and artificial *Pinus tabulaeformis* in Ziwuling Region

DENG Juan<sup>1,2</sup>, SHANGGUAN Zhou-Ping<sup>1,2,\*</sup>

1 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling Shaanxi 712100, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29 (6): 3231 ~ 3240.

**Abstract:** Plot-sampling method was used to determine the influence of different site conditions on the plants and soil organic nutrients and carbon pools of the natural *P. tabulaeformis* and artificial *P. tabulaeformis* in Ziwuling region. With the natural *P. tabulaeformis* community as the control standard, artificial *P. tabulaeformis* communities Under different site conditions were investigated to study their soil nitrogen pools, soil carbon pools and plant nutrient pools, plant carbon pools. The study showed that in the region the average C, N and P contents of *P. tabulaeformis* needles were  $(499.5 \pm 63.75)$  mg/g,  $(8.53 \pm 0.50)$  mg/g and  $(0.94 \pm 0.64)$  mg/g, respectively. The C contents of plant leaves decreased in the order of natural forest on sunny slope > natural forest on shade slope > plantation on shade slope > plantation on sunny slopes. The N and P content of plantation leaves in sunny slopes were obviously higher than that of the natural forest in sunny slope. There were significant differences in leaf C/N, C/P, N, P and N/P among the four types of *P. tabulaeformis* communities under different site conditions. The leaf C contents were negatively correlated with the leaf N and P contents. And the leaf N contents were observably positively correlated with the leaf P contents. There was no significant difference in

基金项目: 中国科学院西部行动计划资助项目 (KZCX2-XB2-05); 长江学者和创新团队发展计划资助项目 (RT0749)

收稿日期: 2007-09-07; 修订日期: 2008-01-07

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

<http://www.ecologica.cn>

C and N content in 40—60 cm soil, but in the other soil layers, the C and N contents in the plantation soil was significantly higher than those in the soil of the natural forest. The C and N content of the plantation on sunny slope soil was significantly higher than that on shade slope soil. Soil C both in 0—20 cm soil and 20—40 cm soil were positively correlated with soil N, and plant N and P. The leaf nutrient content were the maximum in the plantation sunny slope, the soil communities in this region were the greatest soil nutrient pools and carbon pools. The obvious correlation of soil C and N with the C, N and P in *P. tabulaeformis* leaves showed that there were interactive relations between *P. tabulaeformis* and soil.

**Key Words:** *Pinus tabulaeformis* forest; nutrient pool; organic carbon pool; soil; Ziwuling; the Loess Plateau

黄土高原子午岭林区是泾河和洛河两大水系的发源地,是该区惟一保存较完整的次生林区,在区域水土保持与经济建设发挥着巨大的生态作用。子午岭林区目前幸存的天然林资源经过自然和人为因素的双重影响,森林植被的面积逐渐缩小,林分质量也呈降低趋势<sup>[1]</sup>。黄土高原地区的水土流失与生态环境到目前还没有得到有效治理,森林植被覆盖率仍较低,生态环境还十分脆弱,其主要原因在于对该区退耕还林还草应该遵循的基本科学规律认识不够,致使造林成活率不高、造林质量较差<sup>[2]</sup>。

油松为我国暖温带森林主要建群种,在陕西秦岭、黄龙山和子午岭有较大面积天然次生林及人工纯林,油松对大陆性气候及大气干旱有较强的适应性,生长速度中等,是北方地区主要的造林树种之一。油松除具有水土保持与水源涵养等生态功能外,还可培育成用材林,被认为是黄土高原地区退耕还林工程中的优良树种<sup>[3]</sup>,但目前该区域人工油松林管理中还存在着密度偏大、地力衰退、土壤干燥化等生态问题<sup>[4]</sup>。

土壤碳和全氮是土壤肥力的重要因子,并在土壤生产力、环境保护和农业可持续发展等方面有着重要的作用<sup>[5]</sup>。对土壤养分的研究集中在土壤 C、N<sup>[5,6]</sup>、不同土地利用类型下的土壤 C、N及其组分<sup>[7-9]</sup>、不同经营方式对土壤 C、N及其组分的影响<sup>[10-12]</sup>等方面。叶片是陆地生态系统的基本结构和功能单位,其生理活动和养分状况可反映林分和土壤质量的优劣,也是人工林养分管理的重要依据。薛立等对暖温带和热带 9种阔叶树种的叶片养分研究后认为不同树种叶片对 N、P、K的需求和选择吸收存在差异<sup>[13]</sup>。目前对叶片养分的研究主要集中于叶片养分元素再分配与再吸收,更多的情况下,叶片养分作为森林养分循环的重要环节而受到广泛关注<sup>[14-17]</sup>。

植物叶片的养分浓度和含量取决于其遗传特性和土壤条件<sup>[13]</sup>,针对黄土高原地区人工造林优势种油松来说,其起源和立地条件的差异对叶片和土壤碳库及养分库产生了怎样的影响,一直以来缺乏详细而系统的研究。本文利用典型样地法,通过对子午岭林区不同立地条件下人工油松林和天然油松林碳储量和养分储量的研究,以揭示黄土丘陵区人工油松林和天然油松林植物与土壤养分库和碳库的变化特征,为油松林的天然化抚育与林分质量的改善提供科技依据。

## 1 研究方法

### 1.1 研究地概况

研究区位于黄土高原中部子午岭林区南端的甘肃正宁县中湾林场,地理坐标为 108°27' E, 35°17' N,属黄土堆积与河流侵蚀的不断交替而形成的黄土丘陵沟壑地貌,海拔 1246~1756m,坡度大多在 15°~35°之间,多年平均气温 9.3℃,降水量 588.2mm,其中 7~9月份降水占到 63%,空气相对湿度 60%~70%,年日照时数 2200~2400h, 10月积温 2645.3℃,土壤以森林灰褐土为主。阳坡荒山主要分布有山地黄土,沟谷地带为红胶土;阴坡、半阴坡以栗钙土为主,黑垆土主要分布于残塬和川台地上;梁峁、沟壑坡面的农田和荒地主要是黄绵土。由于受自然地理和气候条件的影响,该区森林植被及其资源的分布在阴阳坡差异很大。一般阳坡、梁峁少林或无林,多为灌木林或草本,阴坡和沟谷多为天然次生林。由于相对高差不大,森林植被的垂直分布不明显,但因地形受长期流水的侵蚀而形成很多的沟谷,导致生态环境的不断变化,使森林植被的水平分布变得较为复杂<sup>[16]</sup>。

该区油松林分化明显,天然油松林常形成单优群落,主林层主要由油松占据,但混有一定数量的演替先锋树种,如山杨 (*Populus davidiana*)、辽东栎 (*Quercus wutaishanica*)、杜梨 (*Pyrus betulaefolia*) 等。同时随林龄阶段的变化亦出现由幼苗组成的更新层和幼树组成的更替层,并出现了大量的辽东栎、漆树 (*Toxicodendron veniciflunum*) 等阔叶树种,表现出良好的正向演替趋势。林下灌木层有虎榛子 (*Q. stryopsis davidiana*)、胡枝子 (*Lespedeza bicolor*)、黄刺玫 (*Rose xanthina*)、柔毛绣线菊 (*Spiraea pubescens*)、毛樱桃 (*Prunus montosa*)、胡颓子 (*Elaeagnus umbellata*)、陕西荚蒾 (*Viburnum schensianum*)、虎榛子、紫丁香 (*Syringa oblata*) 等;草本层主要有披针苔草 (*Carex lanceolata*)、白草 (*Bothriochloa ischaemum*)、甘草 (*Glycyrrhiza uralensis*) 等。

## 1.2 样地设置与取样

### 1.2.1 植物样品的采集

于 2006 年 7 月中旬,按照不同坡向,在立地条件基本一致的阴坡人工油松林和天然油松林内分别设置 20 m × 20 m 的样地各 10 块,阳坡人工油松林和天然油松林设置 20 m × 15 m 样地各 10 块,共设置样地 20 块。在每个样地内进行植被的环境因子和群落学特征调查:物种数、物种个体数、高度、盖度、频度、物种丰富度和郁闭度;用便携式 GPS、罗盘仪、生长锥等测定各样地坡度、坡向、坡位、海拔及林龄等。样地的基本特征如表 1 示。在样地内选择生长状况良好的油松,分别于东、西、南、北 4 个方位在冠中采集生长良好的多年生叶片各 10 簇,每一样品由 8 ~ 10 株不同油松个体的叶片混合而成,用于叶片养分测定。

### 1.2.2 土壤样品采集

在人工油松林阴阳坡和天然油松林阴阳坡的样地内,按照四分法取土壤样品,采样时先除去地面凋落物,用直径 3 cm 的土钻取 0 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm 和 40 ~ 60 cm 的土壤样品,重复 3 次,共获得样品 36 个。土样风干后按照常规方法研磨粉碎、过 0.149 mm 筛,然后装入保鲜袋待测定有机碳 (C) 和全氮 (N)。

表 1 子午岭林区油松样地特征

Table 1 Site descriptions of the selected natural *Pinus tabulaeformis* and artificial *Pinus tabulaeformis* in Ziuling

类型 Types	代码 No.	林龄 Forest age (a)	海拔 Altitude (m)	样地面积 Plot area (m <sup>2</sup> )	坡向 Slope direction	坡位 Slope position	坡度 Slope (°)	平均胸径 Average stem (cm)	平均树高 Average height (m)	植物种数 Numbers of species	郁闭度 Canopy closure
人工油松林 <i>P. tabulaeformis</i> plantation	Asu	30	1592	300	阳坡	上坡位	22	14.8	10.70	33	0.7
人工油松林 <i>P. tabulaeformis</i> plantation	Ash	30	1606	400	阴坡	上坡位	20	17.4	11.70	43	0.7
天然油松林 <i>P. tabulaeformis</i> forest	Nsh	28 ~ 54	1610	400	阴坡	上坡位	22	18.1	12.83	33	0.6
天然油松林 <i>P. tabulaeformis</i> forest	Nsu	27 ~ 50	1610	300	阳坡	上坡位	24	16.5	12.07	30	0.5

## 1.3 室内化学分析

将采集的植物样品于 105 °C 下杀青 10 min, 70 °C 下烘干至恒重,同一样品的叶片混合粉碎后过 100 目筛制成供试样品。植物有机碳 (C) 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,用于植物全氮 (N)、全磷 (P) 的测定,全氮用 Kjeldahl 定氮法 (2300 全自动定氮仪, Sweden) 测定;全磷用钼锑钒比色法 (6505 紫外分光光度计, UK) 测定。土壤全氮采用凯氏法测定,土壤碳用外加热法测定。每一样品重复 3 次测定,测定结果用单位质量的养分含量 (mg/g) 表示。

## 1.4 数据处理和统计分析

采用 SAS 统计分析软件包对数据进行统计分析,进行相关分析与 One-Way ANOVA 方差分析。首先判断各组数值是否满足正态分布以及方差是否具有齐性,如果不满足,则对相应数值进行 Log 转换以满足单因素方差分析的假定条件。多重比较时,首先进行方差齐性检验,若方差为齐性,用 LSD 法进行多重比较;若方差为非齐性,则用 Tamhane's T2 法进行多重比较。正态分布检验采用 UNVARATE 过程进行检验。上述分析

通过 SAS统计软件完成,同时,也利用 SPSS软件对该统计过程进行验证。

## 2 结果分析

### 2.1 油松林叶片养分库与碳库的变化

#### 2.1.1 油松林叶片养分分布

油松林叶片碳含量变化范围在 462.3~580.1mg/g,阳坡的天然油松林叶片碳含量较高,阳坡的人工油松林叶片碳含量较低(表 2)。油松针叶中氮的分布区间为 7.94~9.18 mg/g,分布在阳坡的人工油松林针叶含氮量较高,阳坡的天然油松林针叶氮含量较低。油松林针叶全磷含量也是分布在阳坡的人工林较高(1.01±0.04) mg/g,阳坡的天然油松林较低,P的分布区间为 0.84~1.01mg/g,4种林分针叶 N、P含量的大小依次为阳坡人工林 >阴坡人工林 >阴坡天然林 >阳坡天然林。

林区油松叶片 C/N和 C/P比 N/P变异范围要大,C/N比变化范围为 46.44~79.12,平均值为 59.03±10.44;C/P变化范围为 416.12~679.19,平均值为 537.19±83.12;N/P变化范围为 8.21~9.91,平均值为 9.14±0.52。油松针叶 C、N、P、C/N、C/P和 N/P偏度值均小于 1,经 UNVAR IATE过程统计检验,油松针叶养分 W值分布区间为 0.91~0.97,Pr<W分布区间为 0.24~0.89,均服从正态分布(表 2)。

表 2 子午岭油松针叶养分组成的描述性统计

Table 2 The descriptive Statistics of nutrient composition in the leaves of *Pinus tabulaeformis* in Ziuling

养分组成 Nutrient element	样本数 Sample	平均值 Mean (mg/g)	中位数 Med (mg/g)	最小值 Min (mg/g)	最大值 Max (mg/g)	标准偏差 Std	变异系数 CV	偏度 Skew-ness	峰度 Kurto-sis	Pr<W	W
C	12	499.50	490.36	419.90	630.50	65.75	13.15	0.81	0.042	0.31	0.92
N	12	8.53	8.52	7.81	9.35	0.50	5.89	0.23	-1.15	0.74	0.96
P	12	0.94	0.95	0.84	1.03	0.64	6.80	-0.17	-0.66	0.24	0.91
C/N	12	59.03	56.01	46.44	79.12	10.44	17.69	0.77	-0.44	0.28	0.92
C/P	12	537.19	509.61	416.12	679.19	83.12	15.47	0.48	-0.82	0.47	0.94
N/P	12	9.14	9.17	8.21	9.91	0.52	5.71	-0.22	-0.68	0.89	0.97

#### 2.1.2 油松林叶片养分组成比较

试验区处于不同坡向的人工油松林和天然油松林 4种林分针叶 N、P含量之间的差异均达极显著水平,C/N、C/P差异达到显著水平(表 3)( $P < 0.0001$ )。不同的立地条件对油松针叶 C储量没有显著影响(ANOVA,  $df = 8$ ,  $F = 3.5$ ,  $P > 0.05$ )。而不同立地条件不仅导致了油松针叶 N含量的极显著差异(ANOVA,  $df = 8$ ,  $F = 48.94$ ),而且使得油松针叶 P含量显著不同(ANOVA,  $df = 8$ ,  $F = 27.63$ ,  $P < 0.0001$ )。针叶 N、P大小依次为阳坡人工林 >阴坡人工林 >阴坡天然林 >阳坡天然林。

不同的起源方式和不同的水热条件使得 4种林分的 C/N差异显著(ANOVA,  $df = 8$ ,  $F = 7.85$ ,  $P < 0.05$ ),C/P差异显著(ANOVA,  $df = 8$ ,  $F = 4.57$ ,  $P < 0.05$ ),N/P差异达到极显著水平(ANOVA,  $df = 8$ ,  $F = 30.18$ ,  $P < 0.0001$ )。针叶 N、P含量大小依次为阳坡人工林 >阴坡人工林 >阴坡天然林 >阳坡天然林,C/N和 C/P大小依次为阳坡天然林 >阴坡天然林 >阴坡人工林 >阳坡人工林,N/P大小依次为阳坡天然林 >阴坡人工林 >阳坡人工林 >阴坡天然林。

不同坡向的天然油松针叶 N含量差异显著(ANOVA,  $df = 4$ ,  $F = 11.91$ ,  $P < 0.05$ ),大小依次为阴坡 >阳坡;不同坡向的天然油松林 P含量差异极显著(ANOVA,  $df = 4$ ,  $F = 196$ ,  $P < 0.001$ ),大小依次为阴坡 >阳坡。不同坡向的人工林除了 N含量有显著差异以外(ANOVA,  $df = 4$ ,  $F = 11.91$ ,  $P < 0.05$ ),针叶 P、C含量均没有显著差异。不同的坡向除了对天然油松针叶 N/P影响极显著外(ANOVA,  $df = 4$ ,  $F = 103.56$ ,  $P < 0.001$ ),对两种林分的 C、C/P和 C/N比均没有显著影响。

不同的起源方式使得同一坡向的人工油松林 N、P显著高于天然油松林( $P < 0.05$ ),同时使得阳坡的天然油松林针叶 C、C/N和 C/P均显著高于人工油松林( $P < 0.05$ );而阴坡人工林针叶的 N/P显著高于天然林

(ANOVA,  $df = 4$ ,  $F = 10.43$ ,  $P < 0.05$ ), 针叶 C、C/N和 C/P比均没有显著差异。

表 3 子午岭油松叶片养分组成比较

Table 3 The comparison of nutrient composition in the leaves of *Pinus tabulaeformis* forest stands in Ziwuling

林型 Types	C (mg/g)	N (mg/g)	P (mg/g)	C/N	C/P	N/P
阳坡人工油松林 <i>P. tabulaeformis</i> plantation	462 ±35.82b	9.18 ±0.19a	1.01 ±0.04a	50.43 ±4.7b	458.86 ±50.79c	9.09 ±0.15b
阴坡人工油松林 <i>P. tabulaeformis</i> plantation	468 ±30.55b	8.73 ±0.09b	0.95 ±0.03b	53.67 ±3.2b	494.69 ±20.00bc	9.23 ±0.22b
阴坡天然油松林 <i>P. tabulaeformis</i> forest	486.94 ±65.78ab	8.26 ±0.11c	0.94 ±0.01c	54.94 ±8.53b	518.55 ±75.46ab	8.79 ±0.08a
阳坡天然油松林 <i>P. tabulaeformis</i> forest	580.07 ±61.05a	7.94 ±0.12d	0.85 ±0.01b	73.02 ±6.84a	685.22 ±73.16a	9.38 ±0.19c
显著性检验 Sig	$P > 0.05$	$P < 0.001$	$P < 0.001$	$P < 0.05$	$P < 0.05$	$P < 0.001$

\* 不同立地条件下油松林的多重比较中,同一列数值后的不同小写字母代表同一测定指标在 0.05水平上差异显著 In the multiple comparison of *Pinus tabulaeformis* forest in the different site conditions, values within a column followed by the same letter are not significantly different at  $P < 0.05$  according to LSD's tests

\*\* Sig 表示同一测定指标在不同坡向的天然油松林和人工油松林之间的差异显著性检验 Sig denotes significant tests of the same parameter among natural and artificial *Pinus tabulaeformis* in different site conditions

## 2.2 油松林地土壤养分库与碳库的变化

### 2.2.1 油松林土壤养分分布

试验区油松林 0~20cm 土壤碳含量变化范围在 18.43~26.57mg/g,阳坡人工油松林表层土壤 C含量较高,阳坡天然油松林土壤 C含量较低;20~40cm 土层 C含量变化范围为 5.91~12.84 mg/g,阳坡人工林土壤 C含量较高;40~60 cm 土层土壤有机碳含量分布区间为 3.88~8.02 mg/g,在 3个土层中,阳坡人工油松林土壤 C含量均较高,而阳坡天然油松林土壤 C含量较低,土壤 C含量在各土层中分布的大小依次为阳坡人工林 >阴坡人工林 >阴坡天然林 >阳坡天然林。

子午岭地区天然油松林表层(0~20cm)土壤 N含量分布区间为 1.58~2.02mg/g,人工油松林土壤 N分布区间为 1.83~2.36 mg/g,阳坡人工林土壤 N含量较高,阳坡天然林土壤 N含量较低;20~40 cm 层土壤 N含量变化范围在天然林为 0.82~1.00 mg/g,人工林为 0.88~1.30 mg/g,阳坡的人工林土壤 N含量较大;40~60cm 土层土壤 N含量在天然林分布范围为 0.59~0.78 mg/g,人工林为 0.59~1.01mg/g,阳坡人工林 N含量较大,四种林分大小依次为阳坡人工林 >阴坡人工林 >阴坡天然林 >阳坡天然林。

试验区油松林 40~60cm 土壤 N偏度值大于 1,经 UNVAR IATE过程统计检验,不符合正态分布。试验区油松土壤养分 W值分布区间为 0.81~0.94,  $Pr < W$  值分布区间为 0.16~0.47,土壤 N、C和 C/N偏度值均小于 1,经 UNVAR IATE过程统计检验,服从正态分布(表 4)。

### 2.2.2 油松林土壤养分组成比较

油松林地表层土壤(0~20cm) C含量显著高于 20~40cm 和 40~60cm 两个土层( $P < 0.05$ )。在不同立地条件下,4种林分的 0~20cm 和 20~40cm 两个土层中,阳坡人工林土壤 C含量最高,土壤 C由高到低依次为阳坡人工林、阴坡人工林、阴坡天然林和阳坡天然林;40~60cm 土层中,土壤 C含量由高到低依次为阳坡人工林、阴坡天然林、阴坡人工林和阳坡天然林。

同一坡向、不同起源方式对阳坡的油松林 0~20cm 土层 C影响达到极显著水平(ANOVA,  $df = 4$ ,  $F = 28.66$ ,  $P < 0.01$ ),大小比较为人工林大于天然林,对阳坡的油松林 20~40cm 土层 C影响也达到极显著水平(ANOVA,  $df = 4$ ,  $F = 117.97$ ,  $P < 0.001$ ) (表 5)。

4种林分中,在 0~20cm、20~40cm 和 40~60cm 3个土层中,阳坡人工林土壤 N含量较高,阳坡天然林土壤 N含量较低。土壤 N含量从高到低依次均为阳坡人工林 >阴坡人工林 >阴坡天然林 >阳坡天然林。

表 4 子午岭油松林土壤养分组成的描述性统计

Table 4 The descriptive Stat of nutrient composition in the different soil layers of *Pinus tabulaeformis* in Ziwlǐng

养分组成 Nutrient element	土层 Soil layer	样本数 Sample	平均值 Mean (mg/g)	中位数 Med (mg/g)	最小值 Min (mg/g)	最大值 Max (mg/g)	标准偏差 Std	变异系数 CV	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	$P_{r<W}$	W
N	0~20	12	2.01	1.98	1.58	2.36	0.24	11.70	-0.02	-0.67	0.47	0.94
	20~40	12	1.008	0.97	0.82	1.3	0.15	15.42	0.68	-0.7	0.32	0.92
	40~60	12	0.73	0.71	0.59	1.01	0.13	17.33	1.03	1.04	0.19	0.91
C	0~20	12	22.05	21.37	18.43	26.57	2.73	12.36	0.42	-1.05	0.32	0.92
	20~40	12	8.54	7.41	5.91	12.84	2.62	30.66	0.49	-1.35	0.16	0.81
	40~60	12	5.92	6.15	3.88	8.02	2.61	18.40	-0.23	0.75	0.29	0.90
C/N	0~20	12	10.92	10.98	9.37	11.92	0.67	6.18	-0.88	1.42	0.28	0.92
	20~40	12	8.32	7.99	5.78	10.08	1.39	16.7	-0.24	-0.86	0.37	0.93
	40~60	12	8.25	8.19	6.21	10.57	1.5	18.17	0.005	-1.15	0.50	0.94

表 5 子午岭油松林土壤养分组成比较

Table 5 The comparison of nutrient composition in the different soil layers of *Pinus tabulaeformis* forest stands in Ziwlǐng

林型 Types	C (mg/g)			N (mg/g)		
	0~20cm	20~40cm	40~60cm	0~20cm	20~40cm	40~60cm
阳坡人工油松林 <i>P. tabulaeformis</i> plantation	25.00 ±0.82a	12.07 ±0.78a	6.41 ±0.14a	2.31 ±0.05a	1.21 ±0.09a	0.78 ±0.21a
阴坡人工油松林 <i>P. tabulaeformis</i> plantation	21.48 ±4.44a	8.47 ±3.16a	5.77 ±1.95a	2.00 ±0.21b	1.01 ±0.14a	0.73 ±0.14a
阴坡天然油松林 <i>P. tabulaeformis</i> forest	21.45 ±0.28a	7.66 ±1.31a	6.08 ±0.16a	1.97 ±0.08b	0.91 ±0.09a	0.68 ±0.1a
阳坡天然油松林 <i>P. tabulaeformis</i> forest	20.28 ±1.289a	6.87 ±0.30a	5.38 ±1.34a	1.76 ±0.156b	0.90 ±0.05a	0.68 ±0.08a
显著性检验 Sig	$P=0.15 > 0.05$	$P=0.84 > 0.05$	$P=0.35 > 0.05$	$P=0.009 < 0.01$	$P=0.93 > 0.05$	$P=0.84 > 0.05$

\* 不同立地条件下油松林的多重比较中,同一列数值后的不同小写字母代表同一测定指标在 0.05 水平上差异显著 In the multiple comparison of *Pinus tabulaeformis* forest in the different site conditions, values within a column followed by the same letter are not significantly different at  $P < 0.05$  according to LSD's tests

\*\* Sig 表示同一测定指标在不同坡向的天然油松林和人工油松林之间的差异显著性检验 Sig denotes significant tests of the same parameter among natural and artificial *Pinus tabulaeformis* in different site conditions

子午岭林区同一坡向、不同起源方式对阳坡的油松林 0~20cm、20~40cm 土层中土壤 N 影响比较显著(表 5), 0~20cm 土层中, 同处于阴坡的人工林和天然林没有显著差异, 而阳坡的人工林土壤 N 含量显著高于天然林 (ANOVA,  $df=4$ ,  $F=33.41$ ,  $P < 0.01$ ); 20~40cm 土层中, 不同的起源方式使得阳坡的人工林土壤 N 含量显著高于阳坡的天然林 (ANOVA,  $df=4$ ,  $F=27.20$ ,  $P < 0.01$ )。

### 2.3 油松林叶片养分与土壤养分之间的关系

子午岭地区油松林土壤 C 含量对油松针叶 C 含量没有显著影响, 但是对植物 N、P 影响明显。表层土壤 C 含量与油松针叶 N 含量呈显著正相关, 20~40cm 土壤 C 含量与油松针叶 N 含量相关性达到极显著水平(图 1)。0~20cm 土壤 C 含量与油松针叶 P 含量呈显著正相关, 20~40cm 土壤 C 含量与针叶 P 含量呈极显著正相关。

土壤 N 含量不仅对油松针叶 N 含量影响显著, 而且对叶片 P 含量影响也达显著水平, 对叶片 C 含量也有显著影响。0~20cm、20~40cm 土壤 N 含量与叶片 N、P 含量均呈极显著正相关, 其中以 0~20cm 土壤 N 和植物 P 的相关性最强, 而 20~40cm 土壤 N 和针叶 C 含量之间呈显著负相关(图 2)。

### 3 讨论

在本实验条件下, 子午岭林区油松针叶 C 含量平均为 499.5mg/g, 高于郑淑霞和上官周平<sup>[18]</sup>对黄土高原

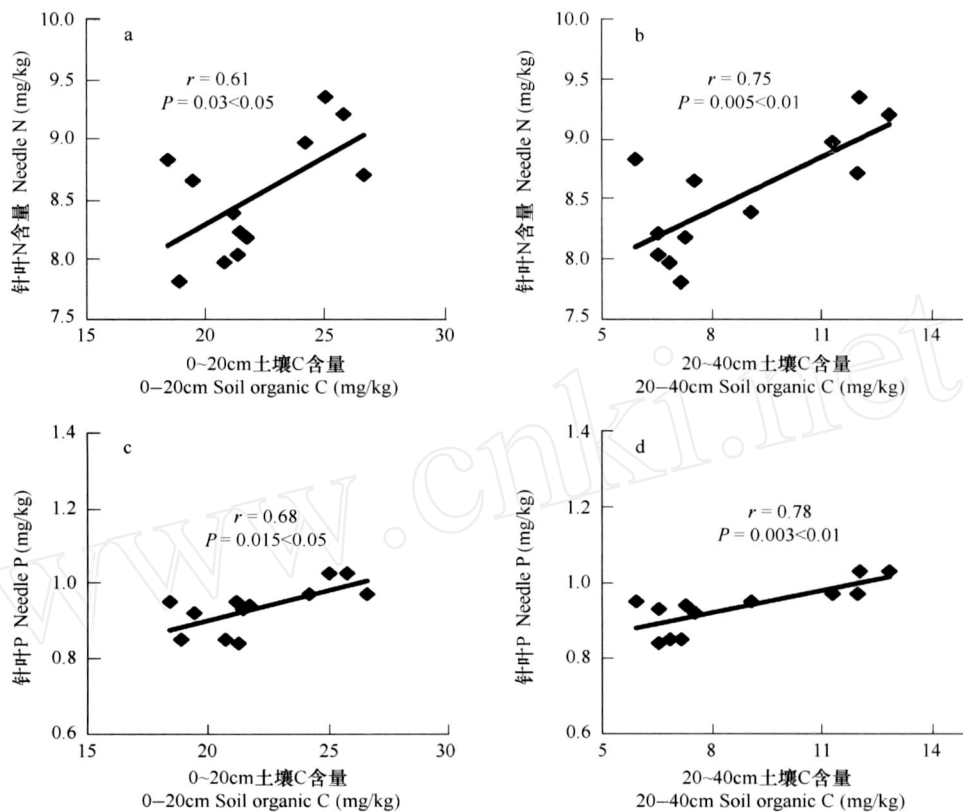


图 1 子午岭林区油松林土壤 C 和叶片养分之间的关系

Fig 1 Relationship between soil C and leaf nutrient of *Pinus tabulaeformis* in ZiWuling

126种植物叶片 C 的测定值 438mg/g;油松林针叶 N 含量明显高于高甲荣等<sup>[19]</sup>对黄土高原桥山人工油松针叶 N 含量 (7.61mg/g), 低于郑淑霞和上官周平<sup>[18]</sup>对黄土高原植物叶片 N 的测定值 24mg/g;人工油松林针叶 P 含量 (1.01mg/g) 低于郑淑霞和上官周平<sup>[18]</sup>对黄土高原植物叶片 P 的测定值 1.6mg/g, 表明该区油松叶片的 C 和 N 含量较高, 而油松针叶 P 含量相对较低, 同时人工油松林针叶 N、P 含量均明显高于天然油松林。这可能因天然林和人工林自身的遗传背景差异、林龄不同而致。随着林龄的增加, 天然林内光照减弱、水分条件变差, 凋落物分解难度增加, 林内小生境发生变化, 针叶养分含量低与土壤中 N 和 P 含量降低有关<sup>[20]</sup>。人工林中 C/N 显著低于天然林, 可能由于天然油松林和人工油松林针叶不同的分解速率, 分解天然油松针叶速度比人工林慢, 导致二者的营养状况产生差异<sup>[15]</sup>。同时, 在低养分环境下生长的大多数植物会产生长寿的叶子, 因为没有足够的养分供给支持快速的叶片养分转移<sup>[21]</sup>。叶片得以存活更长时间, 有更多的细胞结构以经受住不利条件和其它次生代谢物。Zhu<sup>[15]</sup>认为, 高养分循环和高养分利用效率诱导人工林生长速度高于天然林, 所以, 在天然林中树木的增长和环境因素间很可能有一个很好的养分平衡。

子午岭林区阳坡的人工油松林土壤 C、N 含量均显著高于阳坡的天然油松林, 说明不同性质的人为干扰方式、土地利用历史、凋落物的生产与分解对土壤 C 影响更为显著。张鼎华等<sup>[22]</sup>和王克勤等<sup>[23]</sup>认为, 通过适当的人工抚育措施, 可有效地改变林内的光照、温度等生境条件, 减少植物种内对养分的和水分的竞争, 改善土壤肥力状况。由于研究区中湾林场的人工油松林林地是经过整地后造林, 再加上人工抚育措施, 所以造成该区土壤物理性质、有机碳和养分的主要化学转化环节发生改变, 与封山育林的天然林土壤差异显著。阎恩荣等<sup>[24]</sup>认为砍伐、植物种类组成不同、土壤物理性质的改变以及盐分和有机碳的主要生化转化环节发生改变是导致土壤 C、N 含量变化的主要因素; 而且林业管理措施和人为驱动机制引起的土壤有机质、C 和 N 含量的长期变化会直接影响森林的生产力和生态功能的恢复<sup>[25]</sup>。

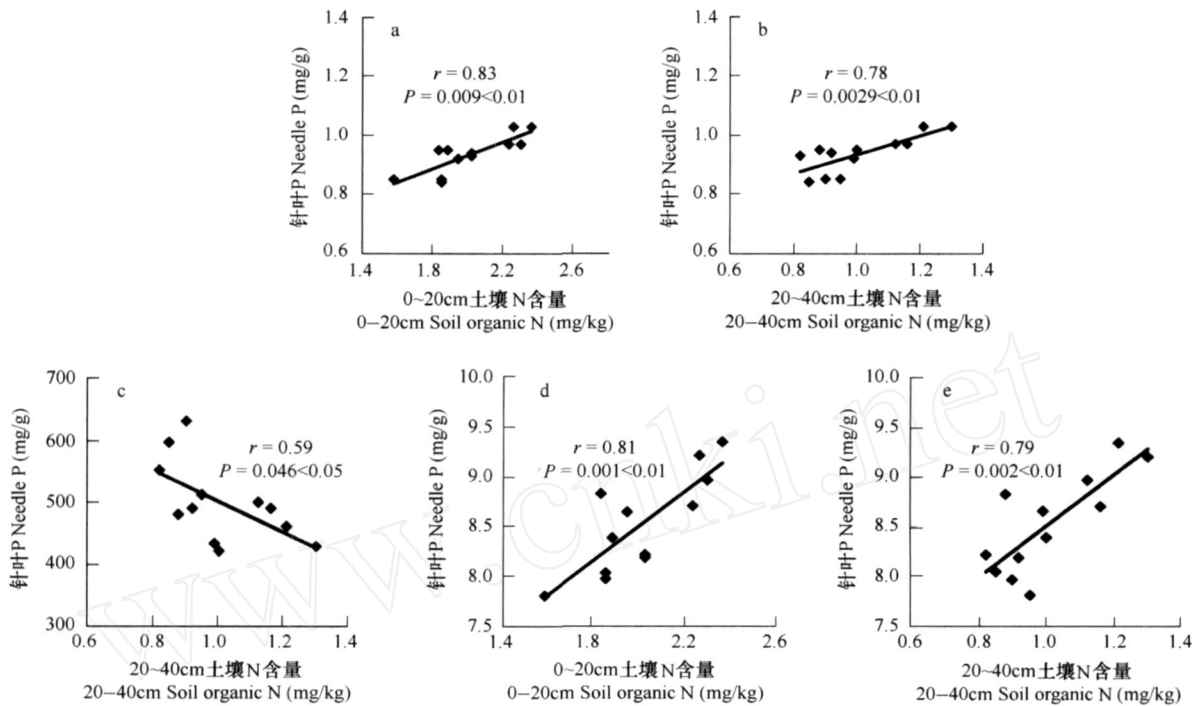


图 2 子午岭林区油松林土壤 N 和油松针叶养分之间的关系

Fig. 2 Relationship between soil N and leaf nutrient of *Pinus tabulaeformis* in Ziwuling

子午岭林区油松林 0~20cm、20~40cm 土壤 C 对植物针叶 C 含量没有显著影响,但与油松针叶 N、P 含量成显著正相关 ( $P < 0.05$ ),而且 0~20cm、20~40cm 土壤 N 含量与油松针叶 N 含量成极显著正相关 ( $P < 0.01$ ),充分体现了油松与土壤之间的互动关系。土壤养分库的大小受不同性质的人为干扰、植被根系的吸收、凋落物的生产和分解及土壤养分的淋溶等多种因素影响<sup>[24,26,27]</sup>,但在环境相对一致条件下,叶片的养分再分配能力则与土壤的养分状况密切相关<sup>[28]</sup>。

从以上分析可以看出,叶片中营养元素的分布特征一方面反映了植物自身的生理特性和遗传特性,是植物长期演化的综合结果;另一方面,植物受所处生境条件的影响,生境中的土壤肥力状况是影响其生长发育及元素分布的重要因素<sup>[20]</sup>。在天然林中,油松随着林龄的增加而郁闭度增大,林下植物稀少,凋落物的分解速率和周转期均较人工林慢,导致有机物和养分逐渐累积于凋落物层,处于难利用的状态。同时,由于油松纯林为主的单层林对土壤中同一养分单向吸收,凋落物分解慢,归还土壤凋落物数量和养分含量少,使得天然油松林养分循环减慢、周转期长;而人工林随林龄的增加,早期自身养分利用率低,但其归还率快,周转期短,土壤肥力较高,油松林生长迅速,林分达到成熟期,养分的周转期较长,归还给林地的养分速率较慢,消耗更多的林地养分用于自身的生长,致使土壤肥力迅速下降。所以,当人工油松林生长到一定阶段,通过外部输入养分、适当林业管理措施和人为抚育措施,对于提高土壤肥力、改善林分结构、增加生物生产力具有积极的现实意义。

#### References:

- [ 1 ] Zhang P D. Biodiversity protection in natural protected sections of Ziwuling in Gansu. *Journal of Gansu Forestry Science and Technology*, 2005, 30 (2): 46—48.
- [ 2 ] Chen Y M, Liang Y M, Cheng J M. The zonal character of vegetation construction on Loess Plateau. *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, 26 (3): 339—345.
- [ 3 ] Wang B, Wang H, Yang J L, *et al*. Study on regeneration of *Pinus tabulaeformis* forest gaps in Ziwu mountains. *Forest Resources Management*,



- 2007, 2: 60—65.
- [ 4 ] Li GL, Liu Y, Xu Y, *et al* Effects of thinning intensity on the development of undergrowth in *Pinus tabulaeformis* plantations Journal of Beijing Forestry University, 2007, 29(2): 70—75.
- [ 5 ] Kucharik C J, Foley J A, Delire C, *et al* Testing the performance of a dynamic global ecosystem model: Water balance, carbon balance and vegetation structure Global Biogeochem Cycle, 2000, 14 (3): 795—825.
- [ 6 ] Dalal R C, Chan K Y. Soil organic matter in rainfed cropping systems of the Australian Cereal Belt Australian Journal of Soil Research, 2001, 39: 435—464.
- [ 7 ] Layese M F, Clapp C E, Almaraz RR, *et al* Current and relic carbon using natural abundance carbon-13 Soil Science, 2002, 167 (5): 315—326.
- [ 8 ] Lepistö A, Andersson L, Arheimer B, *et al* Influence of catchment characteristics, forestry activities and deposition on nitrogen export from small forested catchments Water Air Soil Pollut, 1995, 84: 81—102.
- [ 9 ] Wang X L, Guo S L, Ma Y H, *et al* Effects of land use type on soil organic C and total N in a small watershed in less hilly-gully region Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18 (6): 1281—1285.
- [ 10 ] Li M F, Dong Y D, Qi Y C, *et al* Effect of land use change on the content of C & N in temperate grassland soils Grassland China, 2005, 27 (1): 1—6.
- [ 11 ] Shi Y, Zhang L, Chen X, *et al* Effect of different management patterns on the fraction of water stable aggregates and accumulation and distribution of particulate organic matter in black soil Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2005, 13 (2): 122—124.
- [ 12 ] Chen F S, Hu X F. Effect of residues, fertilization and cultivation on soil carbon Scientific and Technical Information of Soil and Water Conservation, 2003, (3): 5—7.
- [ 13 ] Xue L, Wei R P, Tan T Y, *et al* Nutrient characteristics in leaves of broadleaved seedlings in south China Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14 (11): 1820—1824.
- [ 14 ] Sun S C, Chen L Z. Leaf nutrient dynamics and resorption efficiency of *Quercus liaotungensis* in the Dongling mountain region Acta Phytocologica Sinica, 2001, 25 (1): 76—82.
- [ 15 ] Zhu J J, Tan Hui, Kang H Z, *et al* Comparison of foliar nutrient concentrations between natural and artificial forests of *Pinus sylvestris* var *mongolica* on sandy land, China Journal of Forestry Research, 2006, 17 (3): 177—184.
- [ 16 ] Zhang X B, Shangguan Z P. Nutrient distributions and bio-cycle patterns in both natural and artificial *Pinus tabulaeformis* forests in Hilly Loess Regions Acta Ecologica Sinica, 2006, 26 (2): 373—382.
- [ 17 ] Yan C R, Chen L Z, Huang J H, *et al* A study on nutrient cycling of pine stands in eastern part of China Acta Phytocologica Sinica, 1999, 23 (4): 351—360.
- [ 18 ] Zheng S X, Shangguan Z P. Spatial distribution patterns of leaf nutrients composition on the Loess Plateau Progress in Natural Science, 2006, 16 (8): 956—973.
- [ 19 ] Gao J R, Xiao B. Nutrient distribution and accumulation pattern of Chinese pine plantations in Qiaoshan forested region Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12 (5): 667—671.
- [ 20 ] Liu G Q, Tu X N, Zhao S D, *et al* Distributional characteristics on biomass and nutrient elements of *Pine-Quercus liaotungensis* forest in MT Qinling Scientia Silvae Sinica, 2001, 37 (1): 28—36.
- [ 21 ] Chapin F S III The mineral nutrition of wild plants Ann Review of Ecology System, 1980, 11: 233—260.
- [ 22 ] Zhang D H, Ye Z F, Fan B Y, *et al* Influence of thinning on soil fertility in artificial forests Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12 (5): 672—676.
- [ 23 ] Wang K Q, Wang B R. Study on thinning to *Robinia pseudoacacia* forest on the Loess Plateau Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13 (1): 11—15.
- [ 24 ] Yan E R, Wang X H, Chen X Y. Impacts of evergreen broad-leaved forest, degradation on soil nutrients and carbon pools in Tiantong, Zhejiang Province Acta Ecologica Sinica, 2007, 27 (40): 1646—1655.
- [ 25 ] Jennifer D K, Wayne T S. Forest management effects on surface carbon and nitrogen Soil Science Society of America Journal, 1997, 61: 928—935.
- [ 26 ] Laclau J P, Amaud M, Bouillet J, *et al* Spatial distribution of Eucalyptus roots in a deep sandy soil in the Congo: relationships with the ability of the stand to take up water and nutrients Tree Physiological, 2001, 21: 129—136.
- [ 27 ] Laclau J P, Ranger J, Nzila J D, *et al* Nutrient cycling in a clonal stand of *Eucalyptus* and an adjacent savanna ecosystem in Congo . Chemical composition of soil solutions Forest Ecology and Management, 2003, 180: 527—544.
- [ 28 ] Helmisaari H S. Nutrient retranslocation in three *Pinus sylvestris* stands Forest Ecology and Management, 1992, 51: 347—367.

## 参考文献:

- [ 1 ] 张培栋. 甘肃子午岭自然保护区生物多样性保护. 甘肃林业科技, 2005, 30(2): 46~48.
- [ 2 ] 陈云明, 梁一民, 程积民. 黄土高原植被建设的地带性特征. 植物生态学报, 200, 26(3): 339~345.
- [ 3 ] 王彬, 王辉, 杨军珑, 等. 子午岭油松林林隙更新特征研究. 林业资源管理, 2007, 4(2): 60~65.
- [ 4 ] 李国雷, 刘勇, 徐杨, 等. 间伐强度对油松人工林植被发育的影响. 北京林业大学学报, 2007, 29(2): 70~76.
- [ 9 ] 王小利, 郭胜利, 马玉红, 等. 黄土丘陵区小流域土地利用对土壤有机碳和全氮的影响. 应用生态学报, 2007, 18(6): 1281~1285.
- [ 10 ] 李明峰, 董云社, 齐玉春, 等. 温带草原土地利用变化对土壤碳氮含量的影响. 中国草地, 2005, 27(1): 1~6.
- [ 11 ] 史奕, 张璐, 陈欣, 等. 不同经营方式对黑土水稳性团聚体组成及微粒有机质积累分布的影响. 中国生态农业学报, 2005, 13(2): 122~124.
- [ 12 ] 陈伏生, 胡小飞. 残茬和施肥管理及犁耕对土壤碳的影响. 水土保持科技情报, 2003, (3): 5~7.
- [ 13 ] 薛立, 韦如萍, 谭天泳, 等. 华南阔叶树种幼苗叶片的养分特征. 应用生态学报, 2003, 14(11): 1820~1824.
- [ 14 ] 孙书存, 陈灵芝. 东灵山地区辽东栎叶养分的季节动态与回收效率. 植物生态学报, 2001, 25(1): 76~82.
- [ 16 ] 张希彪, 上官周平. 黄土丘陵区油松人工林与天然林养分分布和生物循环比较. 生态学报, 2006, 26(2): 373~382.
- [ 17 ] 严昌荣, 陈灵芝, 黄建辉, 等. 中国东部主要松林营养元素循环的比较研究. 植物生态学报, 1999, 23(4): 351~360.
- [ 18 ] 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. 自然科学进展, 2006, 16(8): 965~973.
- [ 19 ] 高甲荣, 肖斌. 桥山林区油松人工林营养元素分配与积累的研究. 应用生态学报, 2001, 12(5): 667~671.
- [ 20 ] 刘广全, 土小宁, 赵士洞. 秦岭松栎林带生物量及营养元素的生物循环特征研究. 林业科学, 2001, 37(1): 28~36.
- [ 22 ] 张鼎华, 叶章发, 范必有, 等. 抚育间伐对人工林土壤肥力的影响. 应用生态学报, 2001, 12(5): 672~676.
- [ 23 ] 王克勤, 王斌瑞. 黄土高原刺槐林间伐改造研究. 应用生态学报, 2002, 13(1): 11~15.
- [ 24 ] 闫恩荣, 王希华, 陈小勇. 浙江天童地区常绿阔叶林退化对土壤养分库和碳库的影响. 生态学报, 2007, 27(4): 1646~1655.