

太岳山油松人工林土壤质量随林龄的演变特征

梁 洋¹, 邵 森², 马冰倩²

(1. 山西省太岳山国有林管理局, 山西 沁源 046501; 2. 北京林业大学 林学院, 北京 100083)

摘要: 为探讨土壤质量随林龄的演变特征, 以山西太岳山 40, 60, 80 年生油松 *Pinus tabuliformis* 人工林为研究对象, 采用综合指数评估相关的土壤质量状况。结果表明: 随着油松人工林龄增加, 土壤含水率显著增加, 而土壤容重则显著减小; 而 0~10 cm 土层的有机质、全氮、速效钾、铵态氮、硝态氮、有效磷质量分数增加最为显著; 80 年生油松林的土壤微生物碳氮质量分数分别在 10~30 cm 和 0~20 cm 土层显著大于 60 年生和 40 年生油松林, 而不同林龄油松人工林的土壤质量综合指数为 0.568(80 年生油松纯林) > 0.500(60 年生油松纯林) > 0.363(40 年生油松纯林)。说明随着林龄的不断增长, 土壤微生物量碳氮质量分数和理化性状得到了提高和改善, 太岳山油松人工林的土壤综合质量也不断提升。图 3 表 4 参 28

关键词: 土壤学; 土壤质量; 综合指数; 林龄; 油松人工林

中图分类号: S714.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2019)03-0581-09

Soil quality development in *Pinus tabuliformis* plantations with different forest ages on Taiyue Mountain

LIANG Yang¹, SHAO Sen², MA Bingqian²

(1. Taiyue Mountain National Forest Administration of Shanxi Province, Qinyuan 046501, Shanxi, China; 2. College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: To determine the soil quality of 40-(P₄₀), 60-(P₆₀), and 80-(P₈₀) year-old *Pinus tabuliformis* plantations on Shanxi Taiyue Mountain, analysis of variance and significance test were used to evaluate significant difference of soil factors, and a composite index were used to evaluate soil quality. Results showed that with an increase in age of the *P. tabuliformis* forest, soil water content increased markedly; whereas, soil bulk density decreased. The content of organic matter, total nitrogen, available potassium, ammonium nitrogen, nitrate nitrogen, and available phosphorus increased most in the 0–10 cm soil layer. Also, soil microbial biomass carbon in 10–30 cm layers and nitrogen content in 0–20 cm layers of 80-year-old *P. tabuliformis* forests were much higher than those of 60-year-old and 40-year-old *P. tabuliformis* forests. The composite indexes of soil quality were 0.568 (P₈₀) > 0.500 (P₆₀) > 0.363 (P₄₀). Thus, with an increase in forest age, soil microbial biomass carbon and nitrogen content as well as physical and chemical properties improved, and soil quality of *P. tabuliformis* plantations on Taiyue Mountain was enhanced. [Ch, 3 fig. 4 tab. 28 ref.]

Key words: soil science; soil quality; composite index; forest age; *Pinus tabuliformis* plantation

土壤环境是森林生态系统功能持续发挥的重要物质支撑, 不仅为森林中的生物提供了必要的生存场所, 而且也为地表植被的生长供应着各种必需养分^[1]。近年来, 以土壤载体为研究主题的地下生态学过程已成为森林生态学领域重要的探索方向之一。由于土壤内部各生物及非生物过程的复杂性, 土壤微生物环境高度的时空异质性, 森林生态学领域急需探索一种超越单一指标的综合属性, 来全面评价土壤环境变

收稿日期: 2018-05-07; 修回日期: 2018-06-12

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目(2016YFD060020506)

作者简介: 梁洋, 工程师, 从事森林经理研究。E-mail: 2109174871@qq.com。通信作者: 邵森, 从事森林生态学。E-mail: saychou418@163.com

化对地下生态学过程的影响。森林生物的生长既需要土壤中的无机养分,也需要适宜的土壤温度、土壤气液相物质组成比例等等,所有这些因子都与森林的土壤质量密切相关。土壤质量是土壤各理化因子和生物学因子的综合体现,对森林群落未来的演变进程具有重要的调控作用。以土壤质量变化特征为切入点,深入分析森林群落结构与土壤质量间的互作规律,对预测中国人工林未来的发展趋势具有十分重要的理论意义。土壤质量是土壤在自然生态系统边界内维持动植物生产力以及水、空气质量和支撑人类适宜居住环境的能力^[2],是土壤物理、化学及生物学性状的集中表现^[3-4]。前人对森林土壤的研究多集中在土壤理化性状、养分状况和土壤微生物等。近年来,研究者把重点转向土壤综合质量状况^[5-10]。油松 *Pinus tabulaeformis* 林是中国西北地区的地带性植被,主要分布在暖温带的干旱和半干旱气候区^[11],也是山西太岳山区域的主要森林类型之一。长期以来,因山区群落结构简单、种植密度过高以及后期经营管理措施不当,导致油松人工林的营养功能及生态服务功能都呈现衰退的迹象。同时,油松人工林的退化可能与林龄有关,因为该区域的油松人工林林龄不一,在不同的生长阶段,土壤质量又呈现出何种状态,对油松人工林功能持续是促进还是制约依然未知。因此,本研究基于不同发育阶段(40, 60 和 80 年生)的油松人工林为研究对象,分析土壤质量随森林群落的动态演变规律,以期对森林的经营、发展以及土壤资源的可持续利用提供有价值的借鉴意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究区位于国家林业局山西太岳山森林生态系统国家定位观测研究站,地处山西省长治市沁源县郭道镇(36°18'~37°05'N, 111°45'~112°33'E, 海拔 1 150~2 088 m),同时也是灵空山国家级自然保护区。该研究区为温带半湿润大陆性季风气候,年平均气温为 8.6 °C,1 月均温为-10.5 °C,7 月均温为 17.3 °C。该区年均降水量为 665.0 mm,主要集中在 7-9 月,无霜期约 100.0~150.0 d。研究区海拔约 1 280 ~ 1 810 m,西半部区域地势陡峭,东半部较为缓和。土壤类型主要为棕壤、褐壤等。山体基岩则以花岗岩、石灰岩、页岩和沙页岩为主。

该区域植被丰富,主要林分类型有油松林、华北落叶松 *Larix principis-rupprechtii* 纯林、华北落叶松-油松混交林、油松-辽东栎 *Quercus liaotungensis* 混交林等。油松是林区内主要的建群树种,其他树种有华北落叶松、辽东栎、山杨 *Populus davidiana* 和白桦 *Betula platyphylla* 等树种。灌木层植物种类主要有华北绣线菊 *Spiraea fritschiana*,毛榛 *Corylus mandshurica* 和胡枝子 *Lespedeza bicolor*,黄刺玫 *Rosa xanthina*,忍冬 *Lonicera japonica* 等;草本种类主要有薹草 *Carex*,莎草 *Cyperus rotundus*,薯蓣 *Dioscorea opposita*,活血丹 *Glechoma longituba*,蛇梅 *Duchesnea indica* 等。

1.2 样地设置与调查

2017 年 7 月,在林区内选取林龄为 40 年生(P_{40}),60 年生(P_{60})和 80 年生(P_{80})的油松人工林,这 3 种林地的前身都是天然油松林群落,在 20 世纪皆伐后补种油松幼苗后发育而成。各种林分面积约为 4 hm^2 ,在各种林分类型中,选择地势平坦且立地条件相似的区域设置 4 块 20 m × 20 m 的固定样地。调查林分的林龄、郁闭度、密度、胸径等。样地概况见表 1。

1.3 土样采集

于 2017 年 8 月,在 12 块样地里各按照“S”型,选取 5 个点采集土样,用于土壤物理、化学及生物学性状的测定。

1.3.1 土壤物理性质的测定 在每个样方中用环刀选取 5 个点采集土壤样本,采样土层深度为 0~10, 10~20, 20~30 cm 的土层,共有 20 个土样。将土样去除杂质,然后自然风干,进而过筛备用。土

表 1 油松人工林的基本特征

Table 1 Characteristics of *Pinus tabulaeformis* plantations

样地代号	树种	林龄/a	平均胸径/cm	平均树高/m	林分密度/(株· hm^2)	郁闭度	坡度/(°)
P_{40}	油松	40	13.6	14.9	2 780	87.5	15
P_{60}	油松	60	26.7	15.1	1 430	78.2	18
P_{80}	油松	80	36.4	13.8	520	71.7	16

壤含水量用烘干法测定; 土壤容重用环刀法测定。

1.3.2 土壤化学性质的测定 在各个固定样方中使用内径 8 cm, 筒长 40 cm 的根钻, 各个点按照 0~10, 10~20, 20~30 cm 不同土壤深度分次取样, 各种林分类型共 60 个土样, 放入写好编号的自封袋中, 带回实验室进行处理分析。首先剔除土壤中的杂质, 然后进行碾碎过筛, 筛孔为 1 mm。称取 100 g 土样进行风干处理, 时间为 1 周。风干后土样先用研钵研磨, 再通过孔径为 0.149 mm 的土筛子进行过筛, 干燥保存。土壤有机质用重铬酸钾氧化法测定; 土壤全氮用凯氏定氮-消煮法测定; 土壤铵态氮和硝态氮分别用靛酚蓝比色法和酚二磺酸比色法测定(1 mol·L⁻¹ 氯化钾溶液浸提); 土壤速效磷用钼锑抗比色法测定(碳酸氢钠溶液浸提); 土壤速效钾用火焰光度法测定(乙酸铵溶液浸提)。

1.3.3 土壤微生物性质的测定 在各个固定样方中按照“S”型选取 5 个点采集土样, 各个样点按照 0~10, 10~20, 20~30 cm 不同土壤深度分层取样, 共 60 个土样。剔除土壤中的杂质, 然后进行碾碎过筛, 置于 4 °C 冰箱中保存备用。土壤微生物生物量碳和生物量氮采用氯仿熏蒸提取-滴定法测定。

1.4 土壤质量评价

选取的测定指标有土壤容重、含水率、有机质、全氮、速效钾、铵态氮、硝态氮、速效磷以及土壤微生物量碳和土壤微生物量氮。

由于土壤因子测定值的变化具有不确定性和连续性, 因此利用隶属度函数的相同属性来对各土壤肥力指标测定值进行标准化处理。运用主成分分析得到的因子载荷量的值具有正负性, 以此来判断所使用的隶属度函数, 其中式(1)为降型函数, 式(2)为升型函数^[12]:

$$F(x) = (x_{\max} - x_{ij}) / (x_{\max} - x_{\min}); \quad (1)$$

$$F(x) = (x_{ij} - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min})。 \quad (2)$$

式(1)和式(2)中: x_{\min} 和 x_{\max} 分别代表测定土壤肥力数据的最小值和最大值; x_{ij} 为土壤肥力测定值。

因为土地利用类型、研究目的等的不同, 所选择的土壤质量指标具有不同的重要程度, 在数据处理过程中一般用权重系数来反映相应指标的影响程度。在本实验中, 运用主成分分析得到各肥力因子的载荷量和方差贡献率, 然后得到各指标的权重系数:

$$W_i = C_i / \sum_{i=1}^n C_i。$$

在确定了评价指标因子隶属度和权重之后, 运用加权方法来建立土壤质量的综合评价数学模型^[13]:

$$Q = \sum_{i=1}^n W_i F(x_i)。$$

其中: C_i 为第 i 项土壤肥力指标的因子载荷; Q 为土壤质量综合评价指数; W_i 为权重向量; $F(x_i)$ 为隶属度值。

1.5 数据处理

数据处理和图形建立采用 SPSS 19.0 和 Excel 2010 进行, 运用单因素方差分析(ANOVA)和最小显著差法(LSD)检验不同林分同一土层和同一林分不同土层土壤因子间的差异显著性($\alpha = 0.05$)。运用双变量相关分析得出不同林分的土壤质量指标间的相关性。

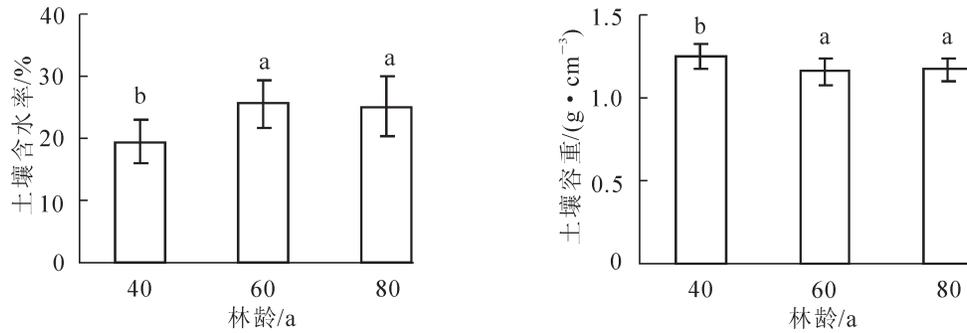
2 结果与分析

2.1 不同林龄油松人工林的土壤物理性状

油松林土壤的物理学特性显著受到林龄的影响(图 1), 60 年生和 80 年生的油松人工林土壤含水率均显著高于 40 年生的油松人工林, 60 年生和 80 年生油松人工林的土壤容重差异不明显, 但均显著小于 40 年生的油松人工林($P < 0.05$)。可见随着油松人工林的林龄增加, 土壤含水率呈增加趋势, 而土壤紧实度呈下降趋势, 土壤物理状况得到了改善。

2.2 不同林龄油松人工林的土壤化学性状

0~10 cm 土层中的全氮质量分数随着林分林龄的增加显著增大($P < 0.05$); 10~20 cm 土层中全氮质量分数也存在这种趋势。0~10 cm 土层的有机质质量分数随着林龄的增加逐渐增大, 且 60 年生和 80 年生的油松人工林土壤与 40 年生油松人工林土壤差异显著($P < 0.05$), 10~30 cm 土层的有机质质量分数无



不同字母表示不同林龄间差异显著($P < 0.05$)

图1 不同林龄油松人工林土壤物理性质

Figure 1 Soil physical properties of *Pinus tabulaeformis* plantations with different ages

明显的变化规律(表2)。

与40年生油松人工林土壤相比,60年生和80年生油松人工林土壤的0~10,10~20和20~30 cm土层的铵态氮分别增加77.78%和20.16%,82.20%和5.50%,38.53%和25.97%,硝态氮也呈类似的变化规律。

0~10 cm土层中的速效钾和有效磷质量分数随着林龄的增加显著增大($P < 0.05$);10~20 cm土层中的有效磷在3种林分间无明显差异;20~30 cm土层中的速效钾和有效磷则随着林龄的增加逐渐显著增大($P < 0.05$)(表2)。

2.3 土壤微生物随林龄的变化特征

随着油松人工林林龄的增加,土壤微生物量碳(MBC)质量分数有增大的趋势。在0~10 cm土层,土壤微生物量碳无显著差异;在10~20 cm土层,80年生油松人工林的土壤微生物量碳质量分数为231.49 mg·kg⁻¹,显著大于60年生和80年生油松人工林($P < 0.05$)。在20~30 cm土层,80年生油松人工林的土壤微生物量碳质量分数显著高于40年生和60年生油松人工林($P < 0.05$)。土壤微生物量氮(MBN)质量分数也随着林龄的增加逐渐提高。在0~10 cm土层,80年生油松人工林的土壤微生物量氮质量分数为55.17 mg·kg⁻¹,显著高于40年生和60年生油松人工林($P < 0.05$);在10~20 cm土层中,80年生油松人工林的土壤微生物量氮质量分数为36.08 mg·kg⁻¹,显著高于40年生和60年生油松人工林($P < 0.05$);在20~30 cm土层中,80年生油松人工林的土壤微生物量氮质量分数大于40年生和60年生的油松人工林。随着土层深度的增加,油松人工林土壤微生物量碳和土壤微生物量氮质量分数逐渐减少(图2)。

2.4 油松人工林土壤性状间的相关性分析

3种林分类型的土壤质量评价指标的相关性分析结果显示(表3):各指标基本符合正态分布特征,

表2 不同林龄油松人工林的土壤化学性状

Table 2 Soil chemical properties of *Pinus tabulaeformis* plantations with different ages

处理	$w_{\text{全氮}}/(g \cdot kg^{-1})$			处理	$w_{\text{铵态氮}}/(mg \cdot kg^{-1})$		
	0~10	10~20	20~30 cm		0~10	10~20	20~30 cm
P ₄₀	1.18 ± 0.07	0.76 ± 0.20	0.77 ± 0.08	P ₄₀	11.6 ± 3.0	9.4 ± 2.2	10.2 ± 0.9
P ₆₀	1.54 ± 0.40	0.96 ± 0.12	0.77 ± 0.13	P ₆₀	20.6 ± 8.4	17.2 ± 3.2	14.1 ± 1.8
P ₈₀	2.04 ± 0.37	1.06 ± 0.14	0.75 ± 0.15	P ₈₀	24.8 ± 3.4	18.2 ± 2.2	17.8 ± 3.3
处理	$w_{\text{有机质}}/(g \cdot kg^{-1})$			处理	$w_{\text{硝态氮}}/(mg \cdot kg^{-1})$		
	0~10	10~20	20~30 cm		0~10	10~20	20~30 cm
P ₄₀	17.72 ± 2.79	11.29 ± 2.48	11.00 ± 2.83	P ₄₀	17.0 ± 2.7	13.7 ± 3.5	17.4 ± 4.4
P ₆₀	27.95 ± 2.48	16.03 ± 2.77	13.00 ± 2.07	P ₆₀	16.6 ± 3.3	21.5 ± 8.9	22.5 ± 3.0
P ₈₀	28.86 ± 4.45	14.55 ± 2.02	9.08 ± 2.29	P ₈₀	23.5 ± 6.8	23.6 ± 4.6	30.1 ± 8.4
处理	$w_{\text{速效钾}}/(mg \cdot kg^{-1})$			处理	$w_{\text{有效磷}}/(mg \cdot kg^{-1})$		
	0~10	10~20	20~30 cm		0~10	10~20	20~30 cm
P ₄₀	227 ± 56	171 ± 62	164 ± 6	P ₄₀	2.6 ± 0.5	2.8 ± 0.5	2.0 ± 0.4
P ₆₀	244 ± 15	171 ± 15	169 ± 71	P ₆₀	3.4 ± 0.1	3.4 ± 0.4	2.9 ± 0.6
P ₈₀	297 ± 26	201 ± 22	208 ± 66	P ₈₀	5.4 ± 1.3	2.6 ± 0.6	3.0 ± 0.8

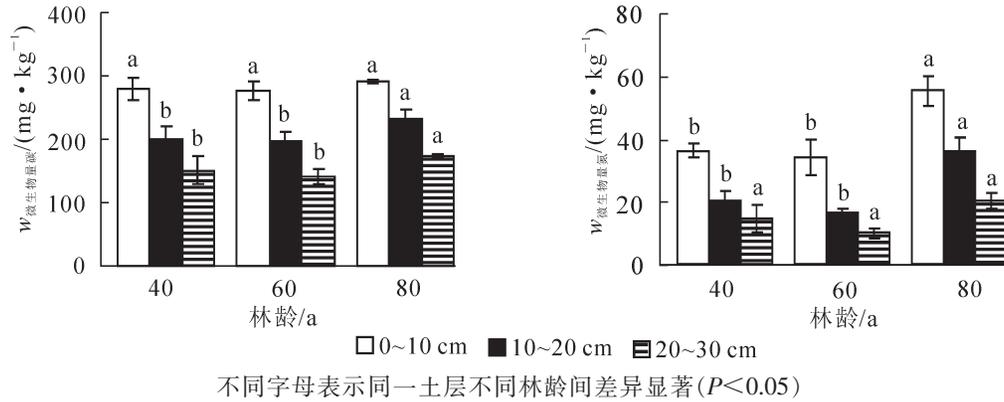


图 2 不同林龄不同土层下油松人工林土壤微生物量碳、微生物量氮质量分数

Figure 2 Contents of microbial biomass carbon and nitrogen in the soil under *Pinus tabulaeformis* plantation with different ages and different soil layers

其中土壤硝态氮仅与铵态氮呈显著负相关，与其他指标无显著相关关系；全氮、有机质、铵态氮、有效磷、速效钾和微生物量碳、微生物量氮相互之间均呈显著或极显著正相关。

表 3 不同土壤养分指标间的相关系数

Table 3 Correlation coefficient between different soil nutrients

项目	全氮	有机质	铵态氮	硝态氮	速效磷	速效钾	微生物量氮	微生物量碳
全氮	1							
有机质	0.899**	1						
铵态氮	0.661**	0.591**	1					
硝态氮	-0.151	-0.319	-0.442**	1				
速效磷	0.623**	0.435**	0.377*	0.163	1			
速效钾	0.652**	0.600**	0.534**	-0.287	0.504**	1		
微生物量氮	0.827**	0.702**	0.635**	-0.028	0.538**	0.494**	1	
微生物量碳	0.747**	0.763**	0.433**	-0.054	0.359*	0.483**	0.786**	1

说明：* 和 ** 表示差异分别达到 5% 和 1% 显著性水平

2.5 土壤质量评价体系

2.5.1 评价指标隶属度值及权重的确定 通过对各测定指标的主成分分析，产生各林龄油松人工林的土壤质量评价指标的隶属度值。在由各项数据所综合代表的土壤质量中，前 4 个组分的累计方差贡献率达 85.67%，符合主成分分析累计贡献率 $\geq 80\%$ 的条件^[14]。依据因子负荷矩阵得出，主成分 F_1 主要由全氮 (x_1)，有机质 (x_2)，微生物量碳 (x_3)，微生物量氮 (x_4)，含水率 (x_5) 构成；主成分 F_2 轴由速效钾 (x_6) 和速效磷 (x_7) 组成；主成分 F_3 由铵态氮 (x_8) 和硝态氮 (x_9) 组成；主成分 F_4 主要由容重 (x_{10}) 构成 (表 4)。

$$F_1 = 0.199x_1 - 0.048x_8 + 0.298x_2 + 0.097x_9 - 0.243x_6 - 0.189x_7 + 0.314x_4 + 0.499x_3 + 0.049x_5 + 0.057x_{10};$$

$$F_2 = 0.050x_1 + 0.210x_8 - 0.201x_2 + 0.122x_9 + 0.708x_6 + 0.491x_7 - 0.063x_4 - 0.365x_3 + 0.122x_5 + 0.129x_{10};$$

$$F_3 = -0.060x_1 + 0.363x_8 + 0.023x_2 - 0.690x_9 - 0.252x_6 + 0.241x_7 - 0.115x_4 - 0.131x_3 + 0.108x_5 + 0.165x_{10};$$

$$F_4 = -0.042x_1 + 0.188x_8 - 0.129x_2 - 0.068x_9 - 0.032x_6 + 0.212x_7 + 0.104x_4 + 0.068x_3 - 0.104x_5 + 1.010x_{10}。$$

2.5.2 不同林龄油松人工林的土壤质量综合评价 土壤质量综合评价的结果表明：40 年生、60 年生和 80 年生油松人工林的土壤质量综合指数分别为 0.363，0.500 和 0.568 (图 3A)，即 80 年生油松人工林土壤质量综合指数最大，60 年生油松人工林次之，40 年生油松林最低。由此可见，随着林龄增大，油松人工林土壤培肥作用增强，土壤质量评价指数也逐渐提升，不同林分同一土层的土壤质量综合指数也遵循上述的变化规律 (图 3B)。

3 讨论

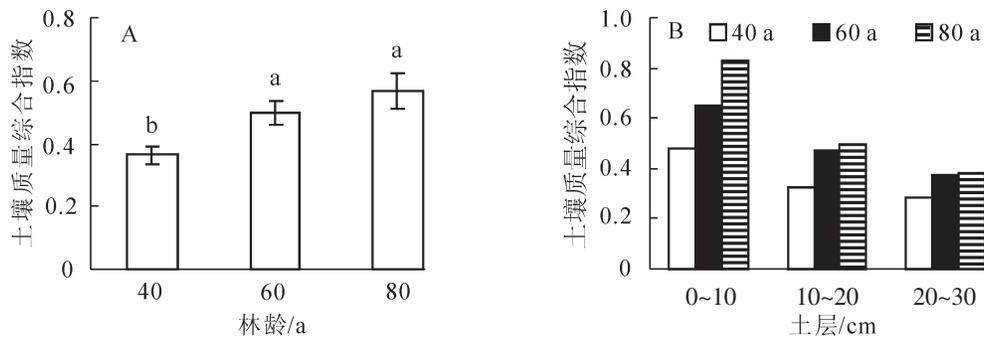
3.1 不同林龄油松人工林土壤性状特征

随着林分的不断发展以及林龄的增加，土壤的物理性状得到了改善。土壤容重与林龄之间呈负相关

表4 不同因子载荷、权重、特征根和方差贡献率

Table 4 Factor load, weight, characteristic root and variance contribution rate

土壤指标	主成分旋转因子载荷				权重
	1	2	3	4	
全氮	0.80	0.48	0.15	-0.19	0.100
铵态氮	0.46	0.44	0.57	-0.08	0.071
有机质	0.82	0.26	0.29	-0.26	0.103
硝态氮	-0.03	0.08	-0.93	0.18	0.116
速效钾	0.27	0.87	-0.22	-0.14	0.109
速效磷	0.35	0.67	0.38	-0.05	0.084
微生物量氮	0.84	0.35	0.02	0.01	0.105
微生物量碳	0.94	0.10	0.02	0.02	0.118
土壤含水率	0.60	0.48	0.36	-0.29	0.075
土壤容重	-0.10	-0.13	-0.18	0.95	0.119
特征根	2.367	1.198	0.936	0.806	
方差贡献率/%	0.560	0.144	0.088	0.065	
累计贡献率/%	0.560	0.704	0.792	0.857	



不同字母表示不同林龄间差异显著($P < 0.05$)

图3 不同林龄油松人工林的土壤质量综合指数

Figure 3 Composite index of soil quality of *Pinus tabulaeformis* plantation with different ages

关系^[15]。越成熟的林分郁闭度越小，而且本研究的3块研究样地坡度较缓，处于山地较为深入的位置，人为干扰较少，使得土壤容重随林龄的增加逐渐降低。赵伟红等^[15]在对辽河源自然保护区不同林龄油松天然次生林的土壤含水率测量时发现：在土壤表层，随着林龄的增加，土壤容重逐渐降低。土壤容重与土壤环境的通透程度有关，进而影响降水在土壤中的渗透和保水程度^[16]。本研究土壤含水率和林龄呈正相关关系，与赵伟红等^[15]的研究结果一致。主要原因是林龄较高的油松人工林的林分密度低，蒸腾作用散失的水分较少，因而含水量较高。此外，土壤容重的逐渐降低，使得土壤更加疏松，水分传输和通气效果更加显著，增加了土壤含水量^[16]。

本研究中表层土壤各养分质量分数随着林龄的增加而显著增大。这是由于随着林分林龄的增长，林分密度逐渐降低以及凋落物逐年累积，更多的光照使得林下凋落物分解速度加快，土壤微生物的活力增强^[5,17]，地表向地下有机物的输入量也逐渐增加，且最接近地表的土层养分差异最为显著^[18]。凋落物对土壤养分的影响也体现在马尾松 *Pinus massoniana* 的林分中。葛晓改等^[19]研究显示：马尾松林土壤养分受基质质量、凋落物产量、养分年归还量、养分周转率等因素影响，土壤表面养分含量与凋落物基质质量的变化规律一致。同时，土壤团聚体的粒径在一定程度上影响了土壤养分的含量。孙娇等^[20]在对陕北黄土丘陵区不同林龄刺槐 *Robinia pseudoacacia* 林的土壤养分调查时发现：0.25~2.00 mm 粒径的土壤团聚体提高了土壤全效养分的保持能力。此外，由于凋落物和根系聚集于地表附近^[16]，伴随养分的逐渐流失，各个林龄油松人工林的土壤养分随着土层深度的增加而显著减少。

随着林龄的增加，土壤微生物量氮、微生物量碳质量分数呈上升趋势。微生物量大小和活性均与土壤养分含量密切相关，地表的凋落物可以给微生物提供丰富的能源物质，对微生物量的变化至关重要^[21]。

有研究显示: 有机质是影响土壤微生物量的重要因素, 有机质能够为微生物在进行自身合成与代谢过程中提供足够的碳、氮物质来源以及能量来源^[22]。部分实验证实: 微生物量碳和微生物量氮与土壤养分存在正相关关系^[22-23]。本研究也体现出了这样的变化规律。同时也有相反的观点, 土壤微生物量和土壤养分之间并无相关关系, 微生物量还受到生长环境、凋落物数量和种类的影响^[24-25]。

3.2 土壤养分与土壤微生物量间的相关关系

本研究所选取的各项指标皆具有突出的代表性与易测性, 且各指标间相互作用显著, 能明确地反映土壤质量的综合情况, 所以将所有评价指标列入考虑范畴。从结果来看, 微生物量碳、微生物量氮和除硝态氮之外的所有评价指标呈显著相关性, 这说明本实验所选取的微生物量碳、微生物量氮 2 种生物因子能够真实反映研究区土壤的生物学特性, 并且和土壤的肥效以及土壤质量有密切的联系^[26]。

3.3 不同林龄油松人工林土壤质量综合评价

在本研究中, 林龄的增加可提高油松人工林土壤质量。依据土壤质量综合评价法对山西太岳山不同林龄的油松人工林土壤环境的状况进行分析, 量化评价了不同林龄的林分土壤质量。随着油松人工林林龄的不断增加, 逐年累积的地表凋落物量逐渐加大, 在一定程度上提升了土壤养分含量^[17]。80 年生油松人工林与 40 年生油松人工林相比, 林内环境逐步完善, 促进了顶极群落的形成, 与此同时, 地上植被的发展使得土壤物理、化学和生物学性状不断改善, 因此土壤质量得到提升^[27-28]。本研究可以在一定程度上促进太岳林区的土壤研究, 为林分的发展提供更多的参考意见。总之, 林分更替演变过程是一个发展变化的过程, 在林分经营的过程中, 依据其基本状况因地制宜地增加林分年限, 采取抚育措施促进林分发展, 改良土壤质量状况, 最终促进生态系统功能的完善。

4 参考文献

- [1] MAO Dingming, MIN Yiwei, YU Liaolan, *et al.* Effect of afforestation on microbial biomass and activity in soils of tropical China [J]. *Soil Biol Biochem*, 1992, **24**(9): 865 – 872.
- [2] KARLEN D L, MAUSBACH M J, DORAN J W, *et al.* Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1997, **61**(1): 4 – 10.
- [3] BADIANE N N Y, CHOTTE J L, PATE E, *et al.* Use of soil enzymes to monitor soil quality in natural and improved fallows in semi-arid tropical regions [J]. *Appl Soil Ecol*, 2001, **18**(3): 229 – 238.
- [4] 张贞, 魏朝富, 高明, 等. 土壤质量评价方法进展[J]. 土壤通报, 2006, **37**(5): 999 – 1006.
ZHANG Zhen, WEI Chaofu, GAO Ming, *et al.* Assessment methods for soil quality: a review [J]. *Chin J Soil Sci*, 2006, **37**(5): 999 – 1006.
- [5] 赵娜, 孟平, 张劲松, 等. 华北低丘山地不同退耕年限刺槐人工林土壤质量评价[J]. 应用生态学报, 2014, **25**(2): 351 – 358.
ZHAO Na, MENG Ping, ZHANG Jinsong, *et al.* Soil quality assessment of *Robinia pseudoacacia* plantations with various ages in the Grain-for-Green Program in hilly area of North China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2014, **25**(2): 351 – 358.
- [6] 张连金, 赖光辉, 孙长忠, 等. 北京九龙山土壤质量综合评价[J]. 森林与环境学报, 2016, **36**(1): 22 – 29.
ZHANG Lianjin, LAI Guanghui, SUN Changzhong, *et al.* Comprehensive evaluation of soil quality fertility in Jiulong Mountain, Beijing [J]. *J For Environ*, 2016, **36**(1): 22 – 29.
- [7] 赵建诚, 范少辉, 余林, 等. 不同密度毛竹林土壤质量综合评价[J]. 林业科学, 2015, **51**(10): 1 – 9.
ZHAO Jiancheng, FAN Shaohui, YU Lin, *et al.* Comprehensive evaluation of soil quality in *Phyllostachys edulis* stands of different stocking densities [J]. *Sci Silv Sin*, 2015, **51**(10): 1 – 9.
- [8] 李婕羚, 李朝婵, 胡继伟, 等. 典型喀斯特山区无籽刺梨基地土壤质量评价[J]. 水土保持研究, 2017, **24**(1): 54 – 60.
LI Jieling, LI Chaochan, HU Jiwei, *et al.* Soil quality assessment of *Rosa sterilis* S. D. Shi planting bases in typical karst mountain region of Guizhou, China [J]. *Res Soil Water Conserv*, 2017, **24**(1): 54 – 60.
- [9] 张子龙, 王文全, 缪作清, 等. 主成分分析在三七连作土壤质量综合评价中的应用[J]. 生态学杂志, 2013, **32**(6): 1636 – 1644.
ZHANG Zilong, WANG Wenquan, MIAO Zuqing, *et al.* Application of principal component analysis in comprehensive assessment of soil quality under *Panax notoginseng* continuous planting [J]. *Chin J Ecol*, 2013, **32**(6): 1636 –

1644.

- [10] 刘占锋, 傅伯杰, 刘国华, 等. 土壤质量与土壤质量指标及其评价[J]. 生态学报, 2006, **26**(3): 901 – 913.
LIU Zhanfeng, FU Bojie, LIU Guohua, *et al.* Soil quality: concept, indicators and its assessment [J]. *Acta Ecol Sin*, 2006, **26**(3): 901 – 913.
- [11] 陈云明, 梁一民, 程积民. 黄土高原林草植被建设的地带性特征[J]. 植物生态学报, 2002, **26**(3): 339 – 345.
CHEN Yunming, LIANG Yimin, CHENG Jimin. The zonal character of vegetation construction on loess plateau [J], *Acta Phytocool Sin*, 2002, **26**(3): 339 – 345.
- [12] 闫一凡, 刘建立, 张佳宝. 耕地地力评价方法及模型分析[J]. 农业工程学报, 2014, **30**(5): 204 – 210.
YAN Yifan, LIU Jianli, ZHANG Jiabao. Evaluation method and model analysis for productivity of cultivated land [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2014, **30**(5): 204 – 210.
- [13] 胡丰青, 郝萌萌, 王济, 等. 土壤质量模糊综合评价权重确定方法探讨[J]. 环境科学与技术, 2013, **36**(6L): 355 – 360.
HU Fengqing, HAO Mengmeng, WANG Ji, *et al.* Discussing on determination to weights in fuzzy comprehensive evaluation of soil quality [J]. *Environ Sci Technol*, 2013, **36**(6L): 355 – 360.
- [14] 刘广明, 吕真真, 杨劲松, 等. 基于主成分分析及 GIS 的环渤海区域土壤质量评价[J]. 排灌机械工程学报, 2015, **33**(1): 67 – 72.
LIU Guangming, LÜ Zhenzhen, YANG Jingsong, *et al.* Quality evaluation of soil in land along Bohai Sea Coast by principal component analysis and GIS [J]. *J Drain Irrig Mach Eng*, 2015, **33**(1): 67 – 72.
- [15] 赵伟红, 康峰峰, 韩海荣, 等. 冀北辽河源地区不同林龄油松天然次生林土壤理化特征的研究[J]. 西北林学院学报, 2014, **29**(3): 1 – 8.
ZHAO Weihong, KANG Fengfeng, HAN Hairong, *et al.* Physicochemical properties of the soils of *Pinus tabulaeformis* natural secondary stands with different ages in Liaoheyuan area of northern Hebei [J]. *J Northwest For Univ*, 2014, **29**(3): 1 – 8.
- [16] 周萍, 刘国彬, 文安邦, 等. 黄土丘陵区不同林龄乔灌林地土壤水分及持水性能研究[J]. 水土保持研究, 2010, **17**(1): 188 – 193.
ZHOU Ping, LIU Guobin, WEN Anbang, *et al.* Study on characters of soil water content and water conservation of arbor andshrub lands with different forest ages in the Loess Hilly-gullied Region [J]. *Res Soil Water Conserv*, 2010, **17**(1): 188 – 193.
- [17] 陈雪, 马履一, 贾忠奎, 等. 影响油松人工林土壤质量的关键指标[J]. 中南林业科技大学学报, 2012, **32**(8): 46 – 51.
CHEN Xue, MA Lüyi, JIA Zhongkui, *et al.* Study of key indexes affecting soil quality in *Pinus tabulaeformis* plantations [J]. *J Centr South Univ For Technol*, 2012, **32**(8): 46 – 51.
- [18] 王洪岩, 王文杰, 邱岭, 等. 兴安落叶松林生物量、地表枯落物量及土壤有机碳储量随林分生长的变化差异[J]. 生态学报, 2012, **32**(3): 833 – 843.
WANG Hongyan, WANG Wenjie, QIU ling, *et al.* Differences in biomasslitter layer mass and SOC storage changing with treegrowth in *Larix gmelinii* plantations in Northeast China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2012, **32**(3): 833 – 843.
- [19] 葛晓改, 肖文发, 曾立雄, 等. 不同林龄马尾松凋落物基质质量与土壤养分的关系[J]. 生态学报, 2012, **32**(3): 852 – 862.
GE Xiaogai, XIAO Wenfa, ZENG Lixiong, *et al.* Relationships between litter substrate quality and soil nutrients in different-aged *Pinus massoniana* stands [J]. *Acta Ecol Sin*, 2012, **32**(3): 852 – 862.
- [20] 孙娇, 赵发珠, 韩新辉, 等. 不同林龄刺槐林土壤团聚体化学计量特征及其与土壤养分的关系[J]. 生态学报, 2016, **36**(21): 6879 – 6888.
SUN Jiao, ZHAO Fazhu, HAN Xinhui, *et al.* Ecological stoichiometry of soil aggregates and relationship with soil nutrients of different-aged *Robinia pseudoacacia* forests [J]. *Acta Ecol Sin*, 2016, **36**(21): 6879 – 6888.
- [21] 涂玉, 尤业明, 孙建新. 油松-辽东栎混交林地表凋落物与氮添加对土壤微生物生物量碳、氮及其活性的影响[J]. 应用生态学报, 2012, **23**(9): 2325 – 2331.
TU Yu, YOU Yeming, SUN Jianxin. Effects of forest floor litter and nitrogen addition on soil microbial biomass C and N and microbial activity in a mixed *Pinus tabulaeformis* and *Quercus liaotungensis* forest stand in Shanxi Province of

- China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2012, **23**(9): 2325 – 2331.
- [22] 杨凯, 朱教君, 张金鑫, 等. 不同林龄落叶松人工林土壤微生物生物量碳氮的季节变化[J]. 生态学报, 2009, **29**(10): 5500 – 5507.
- YANG Kai, ZHU Jiaojun, ZHANG Jinxin, *et al.* Seasonal dynamics of soil microbial biomass C and N in two larch plantation forests with different ages in Northeastern China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2009, **29**(10): 5500 – 5507.
- [23] 金发会, 李世清, 卢红玲, 等. 石灰性土壤微生物量碳、氮与土壤颗粒组成和氮矿化势的关系[J]. 应用生态学报, 2007, **18**(12): 2739 – 2746.
- JIN Fahui, LI Shiqing, LU Hongling, *et al.* Relationships of microbial biomass carbon and nitrogen with particle composition and nitrogen mineralization potential in calcareous soil [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2007, **18**(12): 2739 – 2746.
- [24] 安然, 龚吉蕊, 尤鑫, 等. 不同龄级速生杨人工林土壤微生物数量与养分动态变化[J]. 植物生态学报, 2011, **35**(4): 389 – 401.
- AN Ran, GONG Jirui, YOU Xin, *et al.* Seasonal dynamics of soil microorganisms and soil nutrients in fast-growing populus plantation forests of different ages in Yili, Xinjiang, China [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2011, **35**(4): 389 – 401.
- [25] 时伟伟, 彭晚霞, 宋同清, 等. 不同林龄尾巨桉人工林土壤养分与微生物的耦合关系[J]. 西北植物学报, 2013, **33**(7): 1452 – 1458.
- SHI Weiwei, PENG Wanxia, SONG Tongqing, *et al.* Coupling relationships between soil microbe and soil nutrient in *Eucalyptus mrophylla* × *E. grandis* plantation at different stand ages [J]. *Acta Bot Boreal-Occident Sin*, 2013, **33**(7): 1452 – 1458.
- [26] MILLER F P, WALI M K. Soils, land use and sustainable agriculture: a review [J]. *Can J Soil Sci*, 1995, **75**(4): 413 – 422.
- [27] 李俊清, 王业莲. 天然林内红松种群数量变化的波动性[J]. 生态学杂志, 1986, **5**(5): 1 – 5.
- LI Junqing, WANG Yeju. Wave features of population changes of *Pinus koraiensis* in natural forest [J]. *Chin J Ecol*, 1986, **5**(5): 1 – 5.
- [28] 戴全厚, 薛莲, 刘国彬, 等. 侵蚀环境撂荒地植被恢复与土壤质量的协同效应[J]. 中国农业科学, 2008, **41**(5): 1390 – 1399.
- DAI Quanhou, XUE Sha, LIU Guobin, *et al.* The synergistic effect between vegetation recovery and soil quality on a abandoned arable land in eroded hilly Loess Plateau [J]. *Sci Agric Sin*, 2008, **41**(5): 1390 – 1399.