DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2026.06.046 CSTR:32311.14.rswc.2026.06.046
杨军, 孙雪姣, 刘韵. 黄土高原不同林龄油松林土壤理化性质及其耦合关系[J]. 水土保持研究,2026,33(6):130-137,149.
Yang Jun, Sun Xuejiao, Liu Yun. Soil physicochemical properties and their coupling relationships in *Pinus tabuliformis* plantations of different stand ages on Loess Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation,2026,33(6):130-137,149.

黄土高原不同林龄油松林土壤理化性质及其耦合关系

杨 军, 孙雪姣, 刘 韵
(山西农业大学 水土保持科学研究所, 030013 太原)

摘 要:[目的]探明不同林龄油松人工林土壤理化性质的变化特征及其协同关系,为黄土高原土石山区油松人工林土壤质量评价、经营管理及植被恢复优化提供科学依据。[方法]以黄土高原土石山区不同林龄(8 a,10 a,12 a和16 a)油松人工林为研究对象,分析了土壤物理性质、化学性质及其相关关系。[结果]不同林龄油松林最大持水量(132.38~265.87 g/kg)、毛管持水量(106.01~217.91 g/kg)、毛管孔隙度(18.55%~31.73%)和总孔隙度(22.95%~38.40%)总体呈升高—降低—升高的变化趋势,土壤容重(1.43~1.81 g/cm^3)则呈相反趋势,含水率在10 a林龄达到较高水平(12.10%~12.26%),同时阴坡持水能力和孔隙状况普遍优于阳坡。不同林龄及坡向条件下油松林土壤均呈弱碱性(7.72~8.83),阴坡有机质(14.06~20.24 g/kg)、全氮(0.70~0.97 g/kg)、全磷(0.32~0.48 g/kg)、速效磷(4.42~6.09 mg/kg)和碱解氮(58.95~71.26 mg/kg)均呈单峰分布,在10 a林龄达到最高值,阳坡有机质、全氮和碱解氮则呈现双峰分布,分别在10 a和16 a林龄达到峰值,同时阴坡更有利于土壤养分的积累。相关性分析表明,土壤容重与最大持水量、最小持水量、毛管持水量及各类孔隙度呈显著或极显著负相关,持水量与孔隙度之间呈显著或极显著正相关;有机质和全氮、全磷、碱解氮之间呈显著正相关,速效磷和速效钾与土壤容重呈负相关,与最大持水量、非毛管孔隙度和总孔隙度呈正相关;含水率与全磷、全钾呈显著负相关,而与速效磷、速效钾呈显著正相关。[结论]总体来看,10~12 a是黄土高原土石山区不同林龄油松人工林土壤质量改善较为明显的关键阶段,阴坡整体上更有利于土壤质量提升,疏松的土壤结构和较好的通气透水条件更有利于水分保持和养分积累。

关键词:油松林; 林龄; 理化性质; 黄土高原
中图分类号:S727.22; S714.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-3409(2026)06-0130-08

Soil physicochemical properties and their coupling relationships in *Pinus tabuliformis* plantations of different stand ages on Loess Plateau

Yang Jun, Sun Xuejiao, Liu Yun
(*Institute of Soil and Water Conservation Science, Shanxi Agricultural University, Taiyuan* 030013, *China*)

Abstract: [**Objective**] This study aims to investigate the variation characteristics and coupling relationships of soil physicochemical properties in *Pinus tabuliformis* plantations with different stand ages, thereby providing a scientific basis for soil quality evaluation, management, and optimization of vegetation restoration in these plantations in the loess rocky mountainous region of the Loess Plateau. [**Methods**] *P. tabuliformis* plantations located in the loess rocky mountainous region of the Loess Plateau with different stand ages (8, 10, 12, and 16 years) were selected as the study objects. Soil physical properties, chemical properties, and their correlations were analyzed. [**Results**] The maximum water-holding capacity (132.38~265.87 g/kg), capillary water-holding capacity (106.01~217.91 g/kg), capillary porosity (18.55%~31.73%), and total porosity (22.95%~38.40%) of soils in *P. tabuliformis* plantations with different stand ages generally exhibited an increasing-decreasing-increasing trend, whereas soil bulk density (1.43~1.81 g/cm^3) showed an opposite pattern. Soil moisture content

收稿日期:2026-05-23 **修回日期:**2026-06-26 **接受日期:**2026-07-06
资助项目:山西水利技术研究与推广项目(2024GM26);山西省基础研究计划项目(202503021212176)
第一作者:杨军(1983—),男,山西平陆人,硕士研究生,高级工程师.主要研究方向:水土保持。E-mail:sxndsbskyb@163.com
通信作者:刘韵(1994—),女,山西忻州人,博士,助理研究员,硕士研究生导师,主要研究方向:生态修复,水土保持。E-mail:l907y254_g@163.com

reached relatively high levels at the stand age of 10 years, ranging from 12.10% to 12.26%. In addition, the water-holding capacity and pore conditions of soils on shaded slopes were generally better than those on sunny slopes. Under different stand ages and slope aspects, the soils of *P. tabuliformis* plantations were weakly alkaline, with pH values ranging from 7.72 to 8.83. On shaded slopes, soil organic matter (14.06～20.24 g/kg), total nitrogen (0.70～0.97 g/kg), total phosphorus (0.32～0.48 g/kg), available phosphorus (4.42～6.09 mg/kg), and alkali-hydrolyzable nitrogen (58.95～71.26 mg/kg) all showed a unimodal distribution, reaching their maximum values at the stand age of 10 years. In contrast, soil organic matter, total nitrogen, and alkali-hydrolyzable nitrogen on sunny slopes exhibited bimodal distributions, with peaks occurring at the stand ages of 10 and 16 years. Overall, shaded slopes were more favorable for soil nutrient accumulation. Correlation analysis showed that soil bulk density was significantly or highly significantly negatively correlated with maximum water-holding capacity, minimum water-holding capacity, capillary water-holding capacity, and various porosity indices, whereas water-holding capacity was significantly or highly significantly positively correlated with porosity. Soil organic matter was significantly positively correlated with total nitrogen, total phosphorus, and alkali-hydrolyzable nitrogen. Available phosphorus and available potassium were negatively correlated with soil bulk density but positively correlated with maximum water-holding capacity, non-capillary porosity, and total porosity. Soil moisture content was significantly negatively correlated with total phosphorus and total potassium, but significantly positively correlated with available phosphorus and available potassium. [**Conclusion**] Overall, the stand age of 10 to 12 years is a critical stage during which soil quality improvement is relatively pronounced in *P. tabuliformis* plantations with different stand ages in the loess rocky mountainous area of the Loess Plateau. Shaded slopes are generally more favorable for soil quality improvement, and a loose soil structure with better aeration and water permeability is more conducive to water retention and nutrient accumulation.

Keywords: *Pinus tabuliformis*; stand age; physicochemical properties; Loess Plateau

油松(*Pinus tabuliformis*)是我国北方地区典型的乡土针叶树种,具有耐寒、耐旱、适应性强和生态防护功能显著等特点,在黄土高原及其周边地区水土保持林建设、生态修复和植被恢复中被广泛应用[1-2]。随着退耕还林(草)、天然林保护和区域生态治理等工程的持续推进,油松人工林已成为黄土高原植被恢复体系的重要组成部分,在减少水土流失、改善生态环境和提升区域生态系统稳定性方面发挥了重要作用[3-4]。人工林的恢复过程不仅表现为地上植被结构的逐步完善,也伴随着土壤结构、养分状况和土壤功能的持续演变,因此,从土壤角度评估不同林龄人工林的恢复效应,是认识植被恢复生态效益的重要内容。

土壤是森林生态系统的重要组成部分,也是维持林木生长和生态系统功能稳定的物质基础。土壤物理性质直接影响土壤的通气性、透水性、蓄水保水能力和根系生长环境,是衡量土壤结构状况和抗侵蚀能力的重要指标;土壤化学性质则反映土壤养分供应水平和肥力状况,是评价林地生产力和土壤质量的重要依据[5-7]。在人工林恢复过程中,随着林龄增加,林分郁闭度、凋落物输入、根系分布及微生物活动均会发生明显变化,从而引起土壤孔隙结构、容重、持水特征以及有机质和养分含量的改变[8-9]。特别是在黄土高原等生态脆弱区,土壤理化性质的改善程度在很大程度上决定了人工林生态恢复的质量与可持续性[10]。已有研究表明,森林植被恢复能够通过增加地表覆盖、减少土壤扰动、促进有机残体归还和增强根系固土作用,改善土壤物理结构,提升土壤持水性能,并在一定程度上促进土壤养分积累[10]。然而,不同林龄阶段人工林土壤恢复进程并不一致。幼龄林阶段,林分结构尚未完全形成,地表覆盖和有机物输入有限,土壤改良作用相对较弱;随着林龄增长,林木生长和凋落物积累增强,土壤孔隙度、持水能力和有机质含量可能逐渐提高;但在某些情况下,土壤性质的变化并非简单线性增加,而可能表现出阶段性波动或差异性响应[11]。因此,明确不同林龄油松人工林土壤理化性质的变化特征及其耦合影响,对于揭示人工林土壤恢复规律具有重要意义。

目前,围绕黄土高原人工林土壤容重、水分特征、有机质、养分含量等理化性质已开展了较多研究[5-7,12],但对黄土高原土石山区这一特殊立地条件下人工林土壤理化性质协同演变特征关注不足。土石山区土层浅薄、石砾含量较高、坡面侵蚀强烈,土壤结构发育和养分积累过程更易受林龄、坡向及水热条件共同影响,其土壤恢复规律可能不同于一般黄土丘陵区。基

于此，本文以黄土高原土石山区不同林龄油松人工林为研究对象，系统分析其土壤理化性质的变化特征，并进一步探讨各理化指标之间的相关关系，旨在揭示油松人工林恢复过程中土壤理化性质的演变规律及其内在联系，为评价油松人工林土壤恢复效应和优化人工林经营管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于黄河流域太行山区的和顺县（113°05′—113°56′ E，37°03′—37°36′ N），该县隶属山西省晋中市，位于山西省东陲，太行山中段，区域内水土保持综合治理工作开展得较为普遍。该区属温带大陆性气候，无霜期短，气候差别大，年均气温6.3 ℃，平均无霜期119 d，年均总日照时数2 634 h，年均降水量593 mm。该区地质石厚土薄，地面土质松散，夹杂石砾，是典型的土石山区。

1.2 样地设置

采用空间代替时间的方法，选取母岩、海拔、坡位、坡度等立地因子基本相同的不同林龄（8 a，10 a，12 a，16 a）油松人工林为研究对象，且采样期无降雨，于2024年6月在不同龄组的阴、阳两坡向分别布设3组重复样地，样地面积为20 m×20 m，共24个样地，样地情况见表1。

表1 研究区样地布设情况

Table 1 Layout of sample plots in study area

林龄/a	坡向	坡位	坡度/(°)	海拔/m	树高/m	胸径/cm	林分密度/(株·hm^{-2})	林下优势植被
8	阳坡	中下	20	1333	5.45	11.64	525	优势灌木：鸡眼草。优势草本：小蓬草、委陵菜
	阴坡	中下	16	1340	5.75	13.74	674	
10	阳坡	中下	20	1396	6.34	12.72	527	优势灌木：胡枝子、绣线菊。优势草本：黄春菊、白羊草、委陵菜
	阴坡	中下	15	1389	6.56	13.34	613	
12	阳坡	中下	14	1148	6.58	19.73	562	优势灌木：沙棘。优势草本：黄春菊、角蒿、南苜蓿
	阴坡	中下	20	1176	6.98	22.57	577	
16	阳坡	中下	17	1296	7.21	21.49	584	优势草本：黄春菊、野韭菜、北京隐籽草、大籽蒿
	阴坡	中下	21	1296	8.21	28.31	692	

1.3 样品采集与分析

在选定的样地内按照对角线交叉取样法，分别在交叉线中心与中心延伸线上找5个点，采用分层取样法获取不同深度的土体样本。由于研究区位于土石山区，土层较薄，且为了保证表层土壤采样的完整性，因此将取样层次划分为0—10 cm和10—20 cm两层。使用标准环刀获取各层原状土柱，用于测定土壤物理指标（土壤容重、含水率、最大持水量、最小持水量、毛管持水量、非毛管孔隙度、毛管孔隙度、总孔隙度等）和化学指标（pH、全氮、全磷、全钾、速效磷、速效钾、碱解氮、有机质等）。土壤含水率采用烘干法测定；土壤容重、非毛管孔隙度、毛管孔隙度、总孔隙度、毛管持水量和最大持水量采用环刀法测定；pH值采用电位法测定；有机质采用重铬酸钾氧化—外加热法测定；全氮采用半微量凯氏法测定；全磷采用碱熔—钼锑抗比色法测定；全钾采用碱熔—火焰光度法测定；碱解氮采用碱解—扩散法测定；速效磷采用盐酸—硫酸浸提法测定；速效钾采用乙酸铵浸提—火焰光度法测定。

1.4 数据处理

本研究采用Excel 2016软件统计不同林龄油松林土壤的各项指标值，使用SPSS 17.0软件对不同林龄土壤理化性质进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同林龄油松人工林土壤物理性质

油松林土壤物理性质随林龄增长呈波动变化趋势（图1）。不同林龄及坡向条件下，土壤容重和非毛管孔隙度整体波动较小，其中土壤容重分别在12 a林龄的阳坡和阴坡达到最高值（1.81 g/cm^3）和最低值（1.43 g/cm^3），而非毛管孔隙度则在12 a林龄的阳坡和阴坡分别达到最低值（4.39%）和最高值（15.02%），表明该阶段阳坡土壤结构相对紧实，非毛管孔隙发育较弱，而阴坡土壤结构较为疏松，通气透水条件较好。不同林龄及坡向条件下，油松林土壤含水率均呈先升高后降低的变化趋势，在10 a林龄达到最大值，其中阳坡和阴坡分别为12.26%和12.10%。此外，不同林龄阴坡含水率普遍高于阳坡，表明阴坡土壤水分条件整体优于阳坡。

不同林龄油松林阳坡的最大持水量随着林龄的增长，分别在10 a林龄（207.32 g/kg）和16 a林龄（264.04 g/kg）达到峰值，而阴坡则在12 a林龄达到峰值（265.87 g/kg）。除16 a林龄外，阴坡油松林的最大持

水量均普遍高于阳坡,说明阴坡土壤保水性能整体优于阳坡。阳坡最小持水量随林龄增加呈升高—降低—升高的变化趋势,分别在 12 a 和 16 a 林龄达到最低值(38.76 g/kg)和最高值(92.10 g/kg);阴坡则总体随林龄增加而升高。此外,10 a 和 12 a 林龄阴坡最小持水量高于阳坡,而 8 a 和 16 a 林龄阳坡高于阴坡。

不同林龄及坡向条件下,油松林土壤毛管孔隙度(18.55%～31.73%)、毛管持水量(106.01～217.91 g/kg)和总孔隙度(22.95%～38.40%)的变化规律较为一致,随林龄增加呈升高—降低—升高的变化趋势,在 16 a 林龄达到最高值;同时除 16 a 林龄外,阴坡土壤毛管孔隙度、毛管持水量和总孔隙度均高于阳坡。

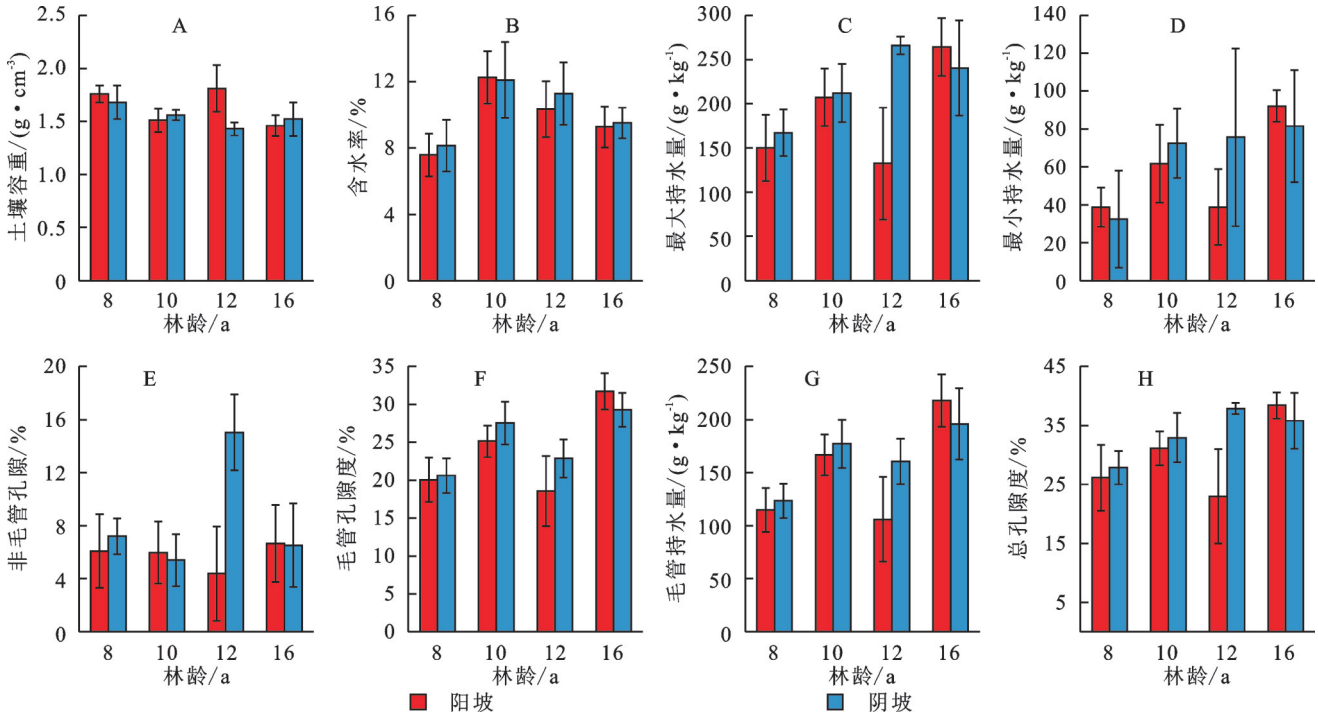


图 1　不同林龄油松人工林土壤物理性质

Fig. 1　Soil physical properties of *Pinus tabuliformis* plantations with different stand ages

2.2　不同林龄油松人工林土壤化学性质

不同林龄油松林土壤化学指标结果表明(图 2),不同林龄及坡向条件下油松林土壤均呈弱碱性(7.72～8.83)。阴坡有机质(14.06～20.24 g/kg)、全氮(0.70～0.97 g/kg)、全磷(0.32～0.48 g/kg)、速效磷(4.42～6.09 mg/kg)和碱解氮(58.95～71.26 mg/kg)均呈现单峰分布,在 10 a 林龄达到最高值;阳坡有机质、全氮和碱解氮则呈现双峰分布,分别在 10 a 和 16 a 林龄达到峰值。此外,除 16 a 林龄外,不同林龄油松林阴坡的有机质、全氮、全磷及碱解氮含量均普遍高于阳坡。不同林龄阴坡油松林土壤中全钾(7.88～12.52 g/kg)和速效钾(74.18～168.47 mg/kg)含量基本随林龄增长而降低;阳坡油松林土壤全钾随林龄增长先降后升,分别在 10 a 和 16 a 达到最低值(6.57 g/kg)和最高值(12.18 g/kg),速效钾则呈先升后降趋势,分别在 8 a 和 12 a 达到最低值(92.06 mg/kg)和最高值(127.79 mg/kg)。

2.3　不同林龄油松人工林土壤理化性质相关性

相关性分析结果表明,土壤物理性质之间存在较强的相关性(表 2)。土壤容重与最大持水量、最小持水量、毛管持水量和毛管孔隙度、非毛管孔隙度、总孔隙度均呈极显著负相关($p<0.01$),同时土壤持水量(最大持水量、最小持水量和毛管持水量)与孔隙度(毛管孔隙度、非毛管孔隙度和总孔隙度)间均呈极显著正相关,说明土壤孔隙结构和容重变化对土壤持水性能具有显著影响。

土壤化学性质之间也表现出较强的相关性。全氮与全磷、碱解氮和有机质均呈极显著正相关($p<0.01$);全磷与碱解氮和有机质呈极显著正相关($p<0.01$),说明土壤氮、磷养分及有机质之间具有较明显的协同积累特征。

土壤物理性质与有效养分之间存在一定的耦合关系。速效磷与土壤容重呈显著负相关($p<0.05$),与最大持水量($p<0.05$)、非毛管孔隙度($p<0.01$)和总孔隙度($p<0.05$)呈显著或极显著正相关。速效钾与土壤容重呈极显著负相关($p<0.01$),与最大持水量、非毛管孔隙度和总孔隙度均呈极显著正相关($p<0.01$),说明较疏松的土壤结构和较大的孔隙空间更有利于速效养分的形成与保持。含水率与全磷和全钾呈极显著负相关($p<0.01$),而与速效磷和速效钾呈显著正相关($p<0.05$),说明土壤水分变化可能显著影响磷、钾在土壤中的赋存状态及其有效性转化。

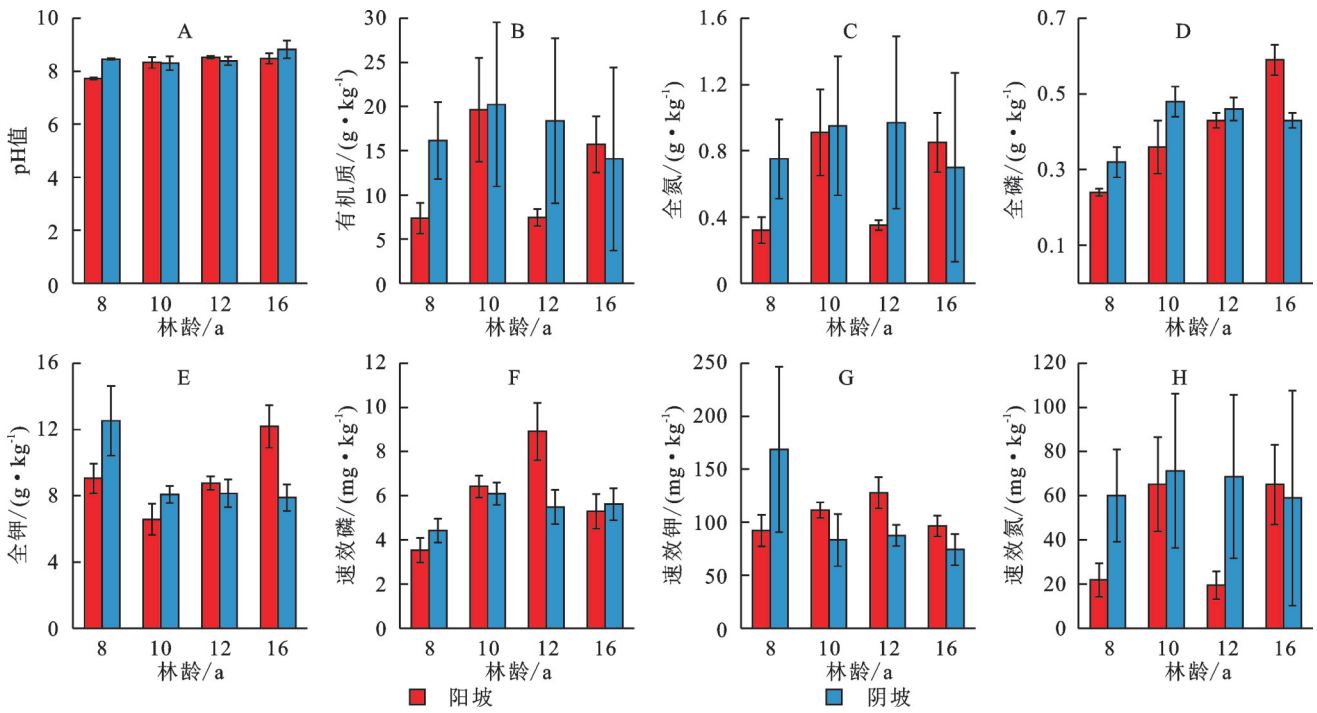


图 2 不同林龄油松人工林土壤化学性质

Fig. 2 Soil chemical properties of *P. tabuliformis* plantations with different stand ages

表 2 不同林龄油松人工林土壤理化性质相关性

Table 2 Correlations among soil physicochemical properties in *P. tabuliformis* plantations with different stand ages

指标	土壤容重	最大持水量	最小持水量	毛管持水量	毛管孔隙度	非毛管孔隙度	总孔隙度	含水率	pH	全氮	全磷	全钾	速效磷	速效钾	碱解氮	有机质
土壤容重	1															
最大持水量	−0.937**	1														
最小持水量	−0.599**	0.742**	1													
毛管持水量	−0.829**	0.888**	0.823**	1												
毛管孔隙度	−0.679**	0.773**	0.816**	0.965**	1											
非毛管孔隙度	−0.595**	0.644**	0.209	0.223	0.052	1										
总孔隙度	−0.879**	0.981**	0.757**	0.881**	0.807**	0.631**	1									
含水率	−0.467**	0.294	0.133	0.238	0.123	0.179	0.201	1								
pH值	0.318	−0.282	−0.132	−0.287	−0.245	−0.126	−0.264	−0.256	1							
全氮	−0.119	0.060	−0.089	0.121	0.109	−0.059	0.050	−0.039	−0.202	1						
全磷	0.246	−0.170	−0.234	−0.277	−0.267	0.136	−0.127	−0.567**	0.337*	0.482**	1					
全钾	0.250	−0.176	−0.261	−0.318	−0.303	0.195	−0.120	−0.592**	−0.098	0.191	0.250	1				
速效磷	−0.444*	0.448*	0.117	0.172	0.039	0.643**	0.410*	0.368*	0.220	0.183	0.429**	−0.173	1			
速效钾	−0.584**	0.561**	0.242	0.321	0.218	0.658**	0.558**	0.373*	−0.121	0.234	−0.082	0.604**	0.221	1		
碱解氮	−0.066	−0.005	−0.174	0.043	0.031	−0.065	−0.014	−0.084	−0.180	0.988**	0.470**	0.241	0.142	0.251	1	
有机质	−0.148	0.067	−0.084	0.131	0.115	−0.066	0.050	0.079	−0.232	0.987**	0.413**	0.150	0.185	0.260	0.977**	1

注：*表示 $p<0.05$；**表示 $p<0.01$。

3 讨 论

3.1 林龄对土壤理化性质的影响

不同林龄油松人工林土壤理化性质总体呈现波动变化，说明人工林土壤发育过程具有明显的阶段性和复杂性[13]。这一特征与林分生长、枯落物归还、根系活动以及坡向控制下的水热再分配密切相关。已有研究表明，油松林随着林龄推进，土壤质量、土壤碳氮磷生态化学计量特征以及土壤微生物群落都会发生显著变化，且这种变化通常并不是单向累积，而是表现为阶段性改善与再调整并存[2,6,14-16]。

从土壤物理性质看，最大持水量、毛管持水量、

毛管孔隙度和总孔隙度在不同林龄间整体表现为先升高后波动,而土壤容重与之相反,说明随着林分发育,土壤由相对紧实向相对疏松演变,表层孔隙结构逐步优化。有研究表明,油松人工林土壤质量随林龄变化而动态演变,土壤容重与孔隙结构、持水性能之间关系密切[15];此外,黄土高原植被恢复总体上能够显著提高土壤孔隙度、饱和导水率和持水能力,且这种改善会随恢复进程增强[10]。因此,本研究中 10～12 a阶段部分持水和孔隙指标升高,可能反映了根系穿插、团聚体形成以及枯落物输入共同促进的土壤结构优化过程[17-20]。有研究报道黄土高原地区土壤容重变化范围为 0.6～2.0 g/cm^3[21],而本研究土壤容重整体偏高(1.43～1.81 g/cm^3),这可能是因为黄土高原土石山区坡面侵蚀强,土层薄,石砾含量较高,且研究区蒸发强、土壤含水量低、植被覆盖和凋落物积累可能较差,因此土壤更容易紧实。

含水率在不同林龄中总体表现为先升后降,并在 10 a阶段达到较高水平,说明中幼龄向中龄过渡时期可能是土壤水分条件相对较优的阶段。这一阶段林分郁闭度提高,可减弱地表蒸发,同时孔隙结构改善有利于降水入渗和水分保持;但随着林龄进一步增加,林木蒸腾耗水增强,土壤水分可能重新下降。黄土高原植被恢复过程中,土壤水分与养分之间存在明显权衡,尤其乔木植被恢复常伴随较深层次的水分消耗[12];林分结构和密度调控会显著影响黄土高原造林地土壤水分状况[22-23]。因此,本研究中较大林龄阶段含水率下降,可能反映了林分耗水增强与土壤保水改善之间的动态平衡[16]。

坡向进一步强化了林龄效应的差异。总体上,阴坡不同林龄阶段的最小持水量、最大持水量、毛管持水量、毛管孔隙度和总孔隙度普遍高于阳坡,说明阴坡较弱的辐射和蒸发条件更有利于水分保持和土壤结构稳定。已有研究表明,植被恢复对土壤物理参数的改善程度明显受立地条件制约[10],且小流域尺度下水热环境差异会改变植被恢复后的水分—养分权衡关系[12,24]。因此,本研究中坡向差异本质上是通过调控热量输入、蒸散过程和土壤水分时空分配,进而影响不同林龄油松林土壤理化性质的演变节律。

从土壤化学性质看,有机质、全氮、全磷和碱解氮在阴坡多呈单峰变化,而阳坡部分指标表现为双峰分布,说明不同坡向条件下养分积累与释放并不同步。杨霞等[6]发现,油松人工林土壤有机碳和全氮随林龄增加表现为先增加后减少;Chen 等[25]也指出,不同龄级油松林植物—土壤连续体 C∶N∶P 化学计量总体较稳定,但元素交换仍会随林分发育呈动态调整;Dang 等[2]研究表明,林龄和土壤性质变化会共同重塑油松林土壤微生物群落结构。由此推测,本研究中 8～12 a阶段养分含量较高,可能与该阶段枯落物输入增强、微生物活跃、养分归还效率较高有关,而 16 a阶段部分指标下降,则可能与林木持续吸收和表层可分解有机物减少有关[26]。已有研究在黄土丘陵区油松林土壤质量评价中指出,土壤质量受地形、植被配置和多种理化因子共同驱动[27];且恢复过程中部分养分增加与土壤水分下降可能并存[12]。本研究发现阴坡中全钾和速效钾总体随林龄增长而降低,而阳坡则呈现更强波动性,这种差异性说明钾素变化除了受植物吸收影响外,还可能受到母质风化、水分迁移及坡向环境的共同制约。

3.2　土壤理化性质的协同演变规律

相关性分析表明,土壤物理性质与化学性质间表现出明显的协同演变规律,反映了人工林恢复过程中土壤结构、水分和养分之间相互制约、相互促进的生态过程。李国雷等[15]认为,土壤持水供水能力本质上是土壤结构性状的综合反映;张泽凡等[10]从区域尺度方面证实,植被恢复能够同步改善黄土高原土壤孔隙结构、导水性能和持水能力。这与本研究中土壤容重、孔隙度和持水指标之间的相关关系是一致的。

首先,土壤物理性质之间具有高度一致性。土壤容重与最大持水量、最小持水量、毛管持水量及各类孔隙度呈显著负相关,而持水指标与孔隙度指标呈显著正相关,说明土壤结构状况是决定水分保持能力的核心因素。已有研究表明,植被恢复能够显著提高黄土高原土壤孔隙度和持水能力[10],且适宜的树种配置和土壤结构的改善是提升土壤质量的重要基础[27]。因此,本研究结果表明,林龄推进过程中容重下降与孔隙发育共同推动了土壤持水性能增强,土壤结构改善是保水功能提升的重要前提。

其次,土壤养分之间具有明显的协同积累特征。全氮与碱解氮、有机质呈极显著正相关,全磷与全氮、碱解氮和有机质也呈显著或极显著正相关,说明有机质是连接氮、磷循环的重要纽带。已有研究表明,油松人工林不同林龄下土壤有机碳、全氮和全磷之间具有显著耦合关系[6];同时,油松林植物—土壤连续体中的元素交换会随林分发育保持动态平衡[24],且土壤性质变化可通过影响微生物群落而调节物质循环过程[2]。由此可见,本研究中氮、磷和有机质之间的高度一致性,实质上反映了枯落物输入、根系周转和微生物分解共同驱动下的养分协同积累[28]。

再次,土壤物理结构对养分有效性具有显著调节作用。速效磷和速效钾与土壤容重呈负相关,而与最大持水量、非毛管孔隙度和总孔隙度呈正相关,

表明较疏松的土壤结构和较好的通气透水条件更有利于养分迁移、扩散和释放。黄土高原植被恢复后，土壤水分与养分积累既存在权衡也存在协同，即油松林土壤质量的形成受多项理化指标共同驱动[12,27]。因此，本研究说明土壤结构改善不仅提升了保水能力，也为速效养分的形成和保持创造了更有利的物理环境。此外，含水率与全磷、全钾呈极显著负相关，而与速效磷、速效钾呈显著正相关，表明土壤水分更多影响磷、钾的活化和有效态转化，而不一定同步增加其总量。在黄土高原半干旱区，乔灌植被恢复常表现为较高水分亏缺和较高养分积累并存[12]；且林分结构变化会通过影响土壤含水量进一步改变生态过程[22]。结合本研究结果可以认为，较高含水率可能主要通过促进矿物风化、离子交换和养分扩散，提高土壤中植物可利用态磷、钾的比例。

4 结 论

本研究以黄土高原土石山区不同林龄油松人工林土壤为对象，系统分析了土壤物理性质、化学性质及其相关关系。结果表明，物理性质方面，不同林龄油松林最大持水量（132.38～265.87 g/kg）、毛管持水量（106.01～217.91 g/kg）、毛管孔隙度（18.55%～31.73%）和总孔隙度（22.95%～38.40%）总体呈升高—降低—升高的变化趋势，土壤容重（1.43～1.81 g/cm^3）则呈相反趋势，含水率在10 a林龄达到较高水平（12.10%～12.26%），表明幼龄向中龄过渡阶段土壤结构改善和保水能力增强较为明显。同时，多数林龄阴坡的持水能力和孔隙状况优于阳坡，表明阴坡更有利于土壤结构恢复和水分保持。化学性质方面，不同林龄及坡向条件下油松林土壤均呈弱碱性（7.72～8.83）；阴坡有机质（14.06～20.24 g/kg）、全氮（0.70～0.97 g/kg）、全磷（0.32～0.48 g/kg）、速效磷（4.42～6.09 mg/kg）和碱解氮（58.95～71.26 mg/kg）均呈现单峰分布，在10 a林龄达到最高值；阳坡有机质、全氮和碱解氮则呈现双峰分布，分别在10 a和16 a林龄达到峰值；同时阴坡更有利于土壤养分的积累。相关性分析进一步表明，土壤容重与各类持水指标和孔隙度指标呈显著负相关，而持水量与孔隙度之间呈显著正相关，说明孔隙结构是影响土壤保水能力的关键因素；有机质和全氮、全磷、碱解氮之间呈显著正相关，表明有机质是连接氮、磷循环的重要纽带；速效磷和速效钾与土壤容重呈负相关，而与最大持水量、非毛管孔隙度和总孔隙度呈正相关，说明较疏松的土壤结构和较好的通气透水条件更有利于养分活化和有效态养分保持；含水率与全磷、全钾呈显著负相关，而与速效磷、速效钾呈显著正相关，表明土壤水分更多影响磷、钾的活化和有效态转化过程。

参考文献（References）：

[1] 卫朝阳，张建军，赖宗锐，等.晋西黄土区油松人工林密度和立地对细根特征的影响[J].北京林业大学学报，2024，46(10)：22-32.
Wei Z Y, Zhang J J, Lai Z R, et al. Influence of density and site on fine root characteristics of *Pinus tabuliformis* plantations in loess area of western Shanxi Province, northern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(10): 22-32.

[2] Dang P, Yu X, Le H, et al. Effects of stand age and soil properties on soil bacterial and fungal community composition in Chinese pine plantations on the Loess Plateau[J]. PLoS One, 2017, 12(10): e0186501.

[3] 丁文斌，王飞.植被建设对黄土高原土壤水分的影响[J].生态学报，2022，42(13)：5531-5542.
Ding W B, Wang F. Effects of vegetation construction on soil moisture in Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(13): 5531-5542.

[4] 金钊.黄土高原小流域退耕还林还草的生态水文效应与可持续性[J].地球环境学报，2022，13(2)：121-131.
Jin Z. Ecohydrological effects and sustainability of the grain for green project on the Chinese Loess Plateau[J]. Journal of Earth Environment, 2022, 13(2): 121-131.

[5] 李世杰，魏天兴，于欢，等.晋西黄土区刺槐林群落结构与土壤理化性质的关系[J].水土保持研究，2025，32(6)：132-140，150.
Li S J, Wei T X, Yu H, et al. Relationship between community structure of *Robinia pseudoacacia* forests and soil physicochemical properties in loess region of western Shanxi Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(6): 132-140, 150.

[6] 杨霞，陈丽华，郑学良.不同林龄油松人工林土壤碳、氮和磷生态化学计量特征[J].中国水土保持科学(中英文)，2021，19(2)：108-116.
Yang X, Chen L H, Zheng X L. Ecological stoichiometry characterization of soil carbon, nitrogen, and phosphorus of *Pinus tabuliformis* plantations at different stand ages[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2021, 19(2): 108-116.

[7] 余锦亚南，张杰铭，宁晓梅，等.晋西北黄土区典型人工林草本多样性与土壤理化性质[J].水土保持学报，2025，39(4)：158-167.
Yu J Y N, Zhang J M, Ning X M, et al. Biodiversity of herbaceous plants and soil physicochemical properties in typical plantations in the loess area of northwestern Shanxi[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(4): 158-167.

[8] 高海燕，杨制国，张胜男，等.科尔沁沙地油松人工林林

龄对土壤酶活性及化学性质的影响[J].中南林业科技大学学报,2024,44(2):108-117.
Gao H Y, Yang Z G, Zhang S N, et al. Effects of stand age on soil enzyme activity and chemical properties of *Pinus tabulaeformis* plantation in Horqin sandy land[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2024,44(2):108-117.

[9] Wang J X, Gao J, Zhang H Q, et al. Changes in rhizosphere soil fungal communities of *Pinus tabuliformis* plantations at different development stages on the Loess Plateau[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2022,23(12):6753.

[10] 张泽凡,张学珍.黄土高原植被恢复对土壤物理参数的影响:基于已发表数据的荟萃分析[J].地理科学进展,2021,40(6):1012-1025.
Zhang Z F, Zhang X Z. Effects of vegetation restoration on soil physical parameters on the Loess Plateau: a meta-analysis based on published data[J]. Progress in Geography, 2021,40(6):1012-1025.

[11] 姜沛沛,曹扬,陈云明,等.不同林龄油松(*Pinus* tabulaeformis)人工林植物、凋落物与土壤C、N、P化学计量特征[J].生态学报,2016,36(19):6188-6197.
Jiang P P, Cao Y, Chen Y M, et al. Variation of C, N, and P stoichiometry in plant tissue, litter, and soil during stand development in *Pinus* tabulaeformis plantation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016,36(19):6188-6197.

[12] 王世军,杨磊,段兴武,等.黄土高原小流域植被恢复的土壤水分和养分权衡效应研究[J].土壤通报,2022,53(2):356-365.
Wang S J, Yang L, Duan X W, et al. Trade-off effects of soil moisture and soil nutrients under vegetation restoration in a small watershed on the Loess Plateau, China[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2022, 53(2): 356-365.

[13] Yang L, Wei W, Chen L D, et al. Response of temporal variation of soil moisture to vegetation restoration in semi-arid Loess Plateau, China[J]. Catena, 2014,115: 123-133.

[14] 白宇阳,何炎红,李雪慧,等.大青山油松林土壤酶与土壤微生物特征研究[J].环境科学与技术,2025,48(12):49-56,64.
Bai Y Y, He Y H, Li X H, et al. Research on soil enzyme activities and microbial community characteristics of *Pinus tabuliformis* forests in Daqingshan Mountain[J]. Environmental Science & Technology, 2025, 48(12):49-56,64.

[15] 李国雷,刘勇,李瑞生,等.油松人工林土壤质量的演变[J].林业科学,2008,44(9):76-81.
Li G L, Liu Y, Li R S, et al. Change of soil quality affected by forest age of *Pinus* tabulaeformis plantations[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2008,44(9):76-81.

[16] 陈洪松,王克林,邵明安.黄土区人工林草植被深层土壤干燥化研究进展[J].林业科学,2005,41(4):155-161.
Chen H S, Wang K L, Shao M A. A review on the effect of vegetation rehabilitation on the desiccation of deep soil layer on the Loess Plateau[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2005,41(4):155-161.

[17] 凤紫棋,孙文义,穆兴民,等.黄土高塬沟壑区植被恢复方式对小流域土壤水分的影响[J].中国水土保持科学(中英文),2023,21(4):1-10.
Feng Z Q, Sun W Y, Mu X M, et al. Effects of vegetation restoration methods on soil moisture in the small basins of Loess Plateau Gully Region[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2023,21(4):1-10.

[18] 张英豪,毛炎新,奉国强.不同密度控制下油松人工林的生态效益评估[J].中国水土保持科学,2015,13(4):80-85.
Zhang Y H, Mao Y X, Feng G Q. Evaluation of ecological benefits in *Pinus tabulaeformis* plantation with different stand densities[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2015,13(4):80-85.

[19] Gu C J, Mu X M, Gao P, et al. Influence of vegetation restoration on soil physical properties in the Loess Plateau, China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2019, 19(2):716-728.

[20] Qiu D X, Xu R R, Wu C X, et al. Vegetation restoration improves soil hydrological properties by regulating soil physicochemical properties in the Loess Plateau, China[J]. Journal of Hydrology, 2022,609:127730.

[21] 梁海斌,安枭旭,王佩将,等.黄土高原植被恢复对土壤有机碳的影响Meta分析[J].生态学报,2025,45(24):12148-12159.
Liang H B, An X X, Wang P J, et al. Effects of vegetation restoration on soil organic carbon in the Loess Plateau, China: a meta-analysis[J]. Acta Ecologica Sinica, 2025,45(24):12148-12159.

[22] Wei X, Liang W J. Regulation of stand density alters forest structure and soil moisture during afforestation with *Robinia pseudoacacia* L. And *Pinus tabulaeformis* Carr. on the Loess Plateau[J]. Forest Ecology and Management, 2021,491:119196.

[23] Zhao H F, Dong J Q, Yang Y, et al. Vegetation restoration increases the drought risk on the Loess Plateau[J]. Plants, 2024,13(19):2735.

[24] 董爽,贾玉华,樊向国,等.陕北六道沟流域地形破碎区土壤水分时空分布及其预测[J].土壤通报,2023,54(5):1032-1040.
Dong S, Jia Y H, Fan X G, et al. The spatial-temporal distribution of soil moisture and its prediction in the fragmented terrain of Liudaogou Catchment[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2023,54(5):1032-1040.

(下转第 149 页)