

DOI:10.13870/j.cnki.stbcb.2026.02.020

CSTR:32310.14.stbcb.2026.02.020

陈雅轩,艾昌奇,陈艳梅,等.不同林龄人工林根系性状、枯落物特性对土壤质量的影响[J].水土保持学报,2026,40(2):287-298.

CHEN Yaxuan, AI Changqi, CHEN Yanmei, et al. Effects of root traits and litter characteristics on soil quality of artificial plantations of different stand ages[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(2): 287-298.

不同林龄人工林根系性状、枯落物特性对土壤质量的影响

陈雅轩,艾昌奇,陈艳梅,王爽,刘倩愿

(河北师范大学地理科学学院,河北省环境演变与生态建设重点实验室,石家庄 050024)

摘要: [目的] 探讨不同林龄人工林根系性状与枯落物特性对土壤质量的影响及其驱动作用,明确影响土壤质量随林龄增加而变化的关键植物因素。[方法] 以不同林龄毛白杨(*Populus tomentosa*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)和国槐(*Styphnolobium japonicum*)人工林为研究对象,测定其土壤理化性质、根系性状、枯落物碳氮质量分数与持水特性,并探讨根系与枯落物对土壤质量的驱动作用及其随林龄变化的规律。[结果] 1) 随林龄增加,人工林土壤质量指数均增大,相对高龄人工林土壤质量指数在树种间无显著差异。2) 影响土壤质量指数的主要因素包括枯落物氮质量分数(贡献率为39.8%)、根系碳质量分数(21.3%)、根直径(12.4%)和枯落物自然水体积分数(8.3%)。3) 毛白杨和侧柏人工林土壤质量指数主要受枯落物(72.1%和56.9%)影响,国槐人工林土壤质量指数主要受根系性状(56.7%)影响。4) 枯落物对土壤质量指数的影响随林龄增加而减小(83.0%~52.9%),而根系性状的影响则增大(17.0%~47.1%)。[结论] 不同林龄和树种人工林根系性状、枯落物特性对土壤质量的影响不同,其土壤管理策略应根据根系和枯落物的特性进行优化,研究可为实践中基于林龄和树种差异的人工林生态系统理想群落构建提供依据。

关键词: 树种; 林龄; 根系性状; 枯落物持水性; 土壤质量指数

中图分类号: S714.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)02-0287-12

Effects of Root Traits and Litter Characteristics on Soil Quality of Artificial Plantations of Different Stand Ages

CHEN Yaxuan, AI Changqi, CHEN Yanmei, WANG Shuang, LIU Qianyuan

(Hebei Key Laboratory of Environmental Change and Ecological Construction, School of Geographical Sciences, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, China)

Abstract: [Objective] To explore the influence of root traits and litter characteristics of artificial plantations of different stand ages on soil quality and their driving effects, and to identify the key plant factors that affect the variation of soil quality with increasing stand age. [Methods] In this study, *Populus tomentosa*, *Platycladus orientalis*, and *Styphnolobium japonicum* plantations of different stand ages were taken as the research objects. The soil physicochemical properties, root traits, and the carbon and nitrogen contents and the water-holding capacity of the litter were determined, and the driving effects of roots and litter on soil quality and their variation patterns with increasing stand age were explored. [Results] 1) The soil quality index of plantations increased with increasing stand age. There was no significant difference in the soil quality index among tree species in relatively old plantations. 2) The main factors affecting the soil quality index were the nitrogen content of litter (with a contribution rate of 39.8%), the carbon content of root (21.3%), root diameter (12.4%), and natural water content of litter (8.3%). 3) The soil quality indices of *P. tomentosa* and *P. orientalis* plantations were mainly affected by litter (72.1% and 56.9%), while the soil quality index of *S. japonicum* plantations was mainly affected by root traits (56.7%). 4) The impact of litter on the soil quality index decreased with increasing stand age

收稿日期: 2025-09-08

修回日期: 2025-10-16

录用日期: 2025-10-21

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-12-31

资助项目: 国家自然科学基金项目(32301569)

第一作者: 陈雅轩(2001—), 女, 硕士研究生, 主要从事森林生态研究。E-mail: cyx15933626222@163.com

通信作者: 刘倩愿(1990—), 女, 博士, 副教授, 主要从事森林生态研究。E-mail: qianyuan@hebtu.edu.cn

http://stbcb.alljournal.com.cn

(83.0%—52.9%), while that of root traits increased (17.0%—47.1%). **[Conclusion]** The effects of root traits and litter characteristics on soil quality in plantations of different stand ages and tree species are different, and the soil management strategies should be optimized according to the characteristics of roots and litter. This study can provide a theoretical basis for constructing the ideal community of plantation ecosystems based on differences in stand age and tree species.

Keywords: tree species; stand age; root traits; water-holding capacity of litter; soil quality index

Received: 2025-09-08

Revised: 2025-10-16

Accepted: 2025-10-21

Online(www.cnki.net): 2025-12-31

近年来,我国人工林面积显著增加,是世界人工林面积最大的国家。但随着种植年限的增长,人工林相继出现不同程度的退化现象。土壤是人工林生长发育的重要载体,土壤质量是土壤管理水平与生产能力的直接体现,目前有从林分类型、林分密度和植被恢复类型等角度对土壤质量变化进行广泛且深入的研究,但基于林龄梯度的土壤质量研究仍存在不足,例如,缺乏跨树种对比研究、林龄梯度较小难揭示长期演替规律、土壤质量评价指标体系尚不统一等问题。为实现人工林生态效益可持续发展,研究林龄梯度下不同树种人工林土壤质量变化具有重要意义。

土壤质量随林龄增加而发生变化,但其规律因树种而异。刘可意等^[1]研究表明,随着林龄增加,小黑杨(*Populus simonii* × *P. nigra*)人工林的土壤质量不断提升;张和芬等^[2]研究表明,橡胶林土壤质量指数随种植年限的增长呈先降后增的变化趋势,并非单调增加。不同树种林龄梯度下的土壤质量差异可能与植物特性密切相关,通过根系固持与枯枝落叶拦截等方式减少土壤侵蚀可以提升土壤质量,进而维持土壤生态系统的稳定^[3]。

植物主要依靠根系来完成养分的吸收与供应,通过调节根系形态、结构等性状来适应环境变化,并对土壤性质产生影响。在树木生长发育的过程中,根系的生长和凋亡使土壤疏松多孔,从而改变土壤的物理性质,增加土壤持水能力,促进树木生长,进而形成更多的凋落物。根直径影响土壤的密度,较大的根系增加根附近的土壤体积质量,而较细的根通过增加土壤孔隙度来降低土壤体积质量。同时,根系的扩展及枯枝落叶的分解,也促进土壤结构的改良和养分循环,从而影响土壤质量。植物根系通过机械加固与生化黏结作用共同提升土壤的结构稳定性^[4]。周志勇等^[5]研究发现,油松(*Pinus tabulaeformis*)林土壤质量指数与根系生物量呈较强的正相关;金晓等^[6]研究发现,根长密度、根表面积密度、根体积密度等增加会显著提升土壤的抗冲性。

另外,根系分解是土壤有机碳的重要来源,细根残体在土壤微生物介导下经一系列分解与转化过程形成有机质,可在土壤中长期保存^[7]。因此,根系输入被认为是影响土壤养分质量分数与土壤质量的重要因素。根系分解受根系性状的调控,例如,直径较粗的根系寿命较长,不易被分解,而直径较细的根系分解速率较快。根氮质量分数越大,细根呼吸速率越高,周转越快^[8],而根碳质量分数越大,分解速率越慢。然而,随着林龄的增加,植物根系性状发生变化,进而调控根系分解与周转,根系与土壤相互作用更为复杂。根系性状(如根生物量、根直径、根组织密度、比根长、比表面积等)更趋向于适应土壤理化性质,土壤质量是否受根系性状的调控,二者之间的相互关系随着林龄增加如何变化仍需深入研究。

枯落物(如树叶、枝条、果实等)是影响土壤质量变化的另一个重要因素。枯落物覆盖于土壤表层,有助于减少水土流失,调节地表径流,降低土壤蒸发,发挥重要的水文功能。同时,枯落物输入是土壤养分含量的另一重要来源,枯落物分解增加土壤有机质,促进土壤团聚体的形成,改善土壤结构特征,增强土壤的抗侵蚀能力^[9]。随着人工林林龄的增加,土壤表面枯落物层的蓄积量通常增加^[10],使土壤层的水文效应发生相应的变化。较高的枯落物蓄积量与养分储备可有效削减地表径流,改善土壤的保水性和孔隙结构,减少速效养分损失,从而有利于根系的生长与延展^[11]。李鹏等^[12]研究发现,枯落物蓄积与养分储存的增加能够显著提升土壤粉粒比例、持水能力和孔隙度,同时促进有机质、全磷及碱解氮的积累。枯落物持水能力随林龄增大而增大^[13]或是衰退^[14]。枯落物蓄积量、持水性因树种不同而具有差异,阔叶树种比针叶树种具有更大的枯落物蓄积量和更好的持水性。而林龄梯度下,枯落物持水特性的变化又如何影响土壤质量仍缺乏认知。

太行山地区是京津冀地区重要的水源涵养与生态屏障区,但因长期的滥伐、陡坡开垦和过度放牧加剧水土流失,亟需通过人工林建设改善生态环境。

邢台市临城县是太行山国家级水土流失重点治理区、人工林培育示范区,毛白杨、侧柏和国槐是太行山人工林培育中的代表性树种。本文以临城县不同林龄毛白杨、侧柏和国槐为研究对象,测定与分析土壤理化性质、土壤质量指数、根系性状与枯落物持水特性的变化及相互关系,筛选出影响土壤质量变化的关键因素。研究不同林龄人工林植物特性(根系和枯落物)与土壤质量的关系,对人工林生态效益与可持续发展具有现实指导意义。

1 材料与方法

1.1 研究样地与试验设计

研究样地位于河北省邢台市临城县林区。临城县(37°20'~37°36'N, 114°02'~114°38'E)位于太行山东麓,海拔在38~1474 m,平均海拔为313 m,年平均气温为13℃(2020—2024年),年极端最高气温42℃,极端最低气温-12℃,年平均降水量605 mm,属暖温带亚湿润大陆性季风气候区,是华北地区典型的人工林培育与生态恢复区。人工林自建立以来一直处于最低限度的管理之下,没有重大的造林干预措施(无施肥、疏林或其他造林干预措施)。2023

年7月,在实地调查的基础上,选择立地条件类似、树木长势良好、较为均一的毛白杨、侧柏和国槐等人工林作为试验样地,样地概况见表1。使用生长锥获取树芯后,通过数年轮确认树木年龄,每个树种分别选择3个林龄,共9个人工林样地。在每个人工林样地内,选择长势良好、具有代表性的4棵树进行采样,即4个重复。在每棵树周围除去土壤表面的凋落物及杂质后,采用内径为4 cm的土钻随机采集0~15 cm土壤,共取3钻混合形成1个复合样品,每样地收取4份土壤样品。收集的土壤样品经2 mm筛网筛分后,将筛网上残留的根系收集并置于自封袋中,通过筛网的土壤样品均匀铺展于白色托盘上,使用镊子仔细拣出细小根系。该操作需重复多次,以确保根系被收集完整。取一部分土样风干后用于测定土壤理化性质。以目标树木为中心,采用钢制环刀在树干周围采集原状土壤样品,用于测定土壤水分体积分数(%)、土壤体积质量(g/cm³)和总孔隙度(%)。每个人工林样地设置4个50 cm×50 cm的样方,将样方内土壤表面用硬毛刷沿单一方向清扫表层枯落物,去除石子等杂质后装袋保存,立即称量枯落物鲜重。

表1 林地基本概况

Table 1 Basic information of forest stands

人工林树种	林龄/a	北纬(N)	东经(E)	海拔/m	郁闭度/%	平均胸径/cm	平均树高/m	林分密度/(trees·hm ⁻²)
毛白杨 (<i>Populus tomentosa</i>)	10	37°29'09"	114°22'56"	169	15	6.5	4.6	1 037
	16	37°28'51"	114°23'04"	174	20	10.5	7.2	1 365
	30	37°29'58"	114°23'09"	157	25	22.3	13.4	1 476
侧柏 (<i>Platycladus orientalis</i>)	12	37°29'36"	114°23'26"	165	10	2.4	2.5	2 381
	19	37°29'44"	114°23'10"	185	60	6.8	5.5	4 707
	36	37°31'08"	114°23'20"	246	80	18.1	7.2	1 659
国槐 (<i>Styphnolobium japonicum</i>)	9	37°27'00"	114°24'31"	99	10	4.0	3.7	4 062
	13	37°27'02"	114°24'29"	47	40	10.1	9.5	2 973
	16	37°30'20"	114°23'09"	199	65	12.5	7.1	1 111

1.2 植物功能性状测定

将根系用蒸馏水洗涤后使用Epson Expression 10000 XL台式扫描仪进行扫描,分辨率为300 dpi。通过WinRHIZO软件(Regent Instruments Inc., Quebec City, QC,加拿大)进行图像分析,获得根系直径、总长度、表面积和体积等数据,之后将根系于65℃下干燥48 h以上,称量根干质量,使用元素分析仪(EA3000, Eurovector, Pavia,意大利)测定根碳和氮质量分数。根长密度为单位土壤体积的根总长度,根表面积密度为单位土壤体积的根总表面积,比根长

和比表面积为总根长和总表面积除以根干重,根组织密度(g/cm³)为根干重与根体积的比值。

采用烘干法测定枯落物的自然含水量和蓄积量,采用室内浸泡法测定枯落物持水性^[15]。将烘干并称重的枯落物分别装入尼龙网袋中,在水中浸泡0.5、1、2、4、6、8、10、12、24 h,分别取出后静置至不再滴水后立即称重并记录。枯落物中全碳和全氮质量分数(%)使用元素分析仪测定。枯落物蓄积量、自然水分体积分数、最大持水量、最大拦蓄量和有效拦蓄量计算公式参照文献[16]。

1.3 土壤理化性质测定

土壤水分体积分数、土壤体积质量、总孔隙度等采用环刀法测定。将土壤样品按土水比1:5浸提,静置后取上层澄清液,用DDS-11A电导率仪测定土壤电导率。土壤pH采用电极电位法测定,土水比为1:2.5。将土壤风干后过2 mm筛,取一部分过筛后的土壤样品,适当研磨并过0.15 mm筛,用盐酸溶液进行无机碳去除处理后,采用元素分析仪测定总有机碳(TOC)和全氮(TN)。土壤全磷质量(TP)采用氢氧化钠碱熔—钼锑抗比色法测定。采用Malvern Mastersizer-3000激光粒度仪测量土壤粒径,土壤粒径划分依据国际统一分级标准。

1.4 土壤质量指数(SQI)计算

利用SQI土壤综合质量指数来评价土壤质量。

1)构建评价指标的判断矩阵:

$$R=(r_{ij})_{m \times n} \quad (1)$$

该矩阵中: m 为评价对象; n 为评价指标,其中($i=1,2,3,\dots,m;j=1,2,3,\dots,n$)。

2)在参考和借鉴前人^[17]研究方法的基础上,本研究采用熵值法来确定各级指标的权重值。对土壤质量评价指标进行相关性分析,根据指标正负关系选择极差标准化函数类型。对原始指标数据的量纲差异采用极差标准化方法进行标准化处理:

$$X_{ij}=(x_{ij}-x_{\min})(x_{\max}-x_{\min}) \quad (2)$$

$$X_{ij}=(x_{\max}-x_{ij})(x_{\max}-x_{\min}) \quad (3)$$

式中: X_{ij} 为各指标的标准化值; x_{ij} 为各指标的原始数据值; x_{\min} 和 x_{\max} 分别为同一指标不同评价对象的最小值和最大值。当指标为正效应数据时采用升型分布函数(2),当指标为负效应数据时采用降型分布函数(3)。

各评价指标的熵(e_j)为:

$$e_j=-k \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} \quad (4)$$

$$P_{ij}=\frac{y_{ij}}{\sum_{i=1}^m y_{ij}} \quad (5)$$

$$k=\frac{1}{\ln n} \quad (6)$$

式中: y_{ij} 为各指标的标准化值经过平移后得到的数值。

各评价指标的权重(w_j)和土壤质量指数(SQI)为:

$$w_j=\frac{(1-e_j)}{\sum_{j=1}^n (1-e_j)} \quad (7)$$

$$SQI=\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (w_j \times X_{ij}) \quad (8)$$

1.5 数据处理

各土壤指标权重分别为0.161 2(土壤水分体积分数)、0.054 8(土壤体积质量)、0.056 9(总孔隙度)、

0.025 0(pH)、0.069 5(电导率)、0.102 6(全氮)、0.053 9(总有机碳)、0.017 4(全磷)、0.203 2(黏粒)、0.126 2(粉粒)和0.129 4(砂粒)。利用Microsoft Excel 2019软件对数据进行预处理。用SPSS 27软件对根系性状、枯落物功能属性、土壤理化性质进行单因素方差分析(ANOVA)和显著性检验;采用双因素方差分析(Two-way ANOVA)检验林龄、树种及其交互作用对土壤理化性质和植物性状的影响。用Origin 2021软件进行作图。利用Spearman相关性分析法分析植物性状与土壤理化性质、土壤质量指数的相关关系。排除具有共线性的变量后使用Canoco5软件进行冗余分析。使用R Studio(4.3.3,R Development Core Team,2024)基于glm.hp包进行广义线性混合模型的层次分割分析,分析环境因子对土壤质量指数的相对重要性并排序。

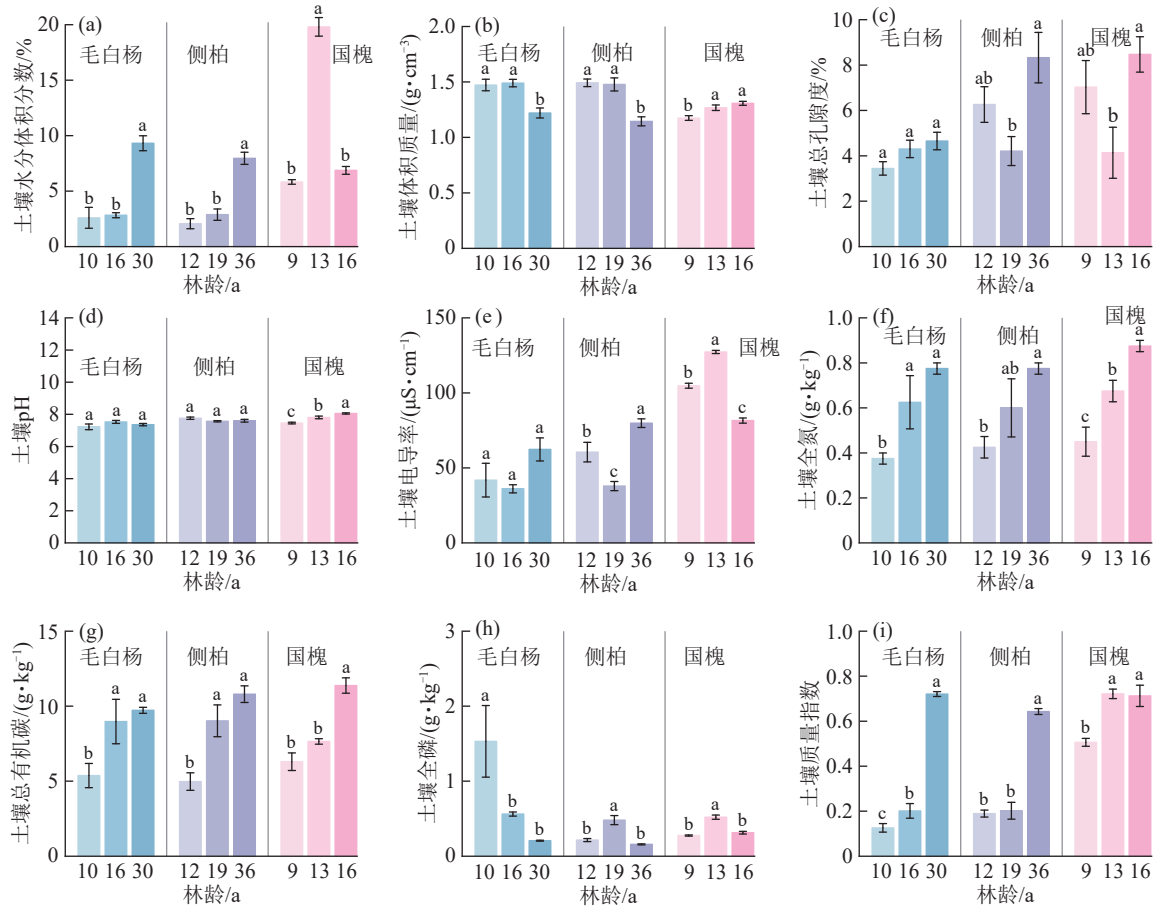
2 结果与分析

2.1 土壤性质与土壤质量变化特征

在不同林龄样地,不同树种人工林土壤理化性质变化具有显著差异(图1、表2和表3)。方差分析表明,除电导率外,林龄对土壤理化性质均具有显著影响($p<0.05$),树种对部分指标亦存在显著影响,而林龄与树种的交互影响在土壤总孔隙度、全氮和总有机碳中不显著,说明不同树种土壤理化性质对林龄变化的响应存在一定差异(表3)。在不同林龄样地,土壤全氮、总有机碳、黏粒、粉粒质量分数、毛白杨与侧柏人工林土壤的水分体积分数、国槐人工林土壤的体积质量与pH均随林龄的增加而显著增加($p<0.05$),而所有树种的土壤砂粒质量分数、毛白杨与侧柏土壤的体积质量及毛白杨土壤全磷呈减小趋势。侧柏人工林土壤的电导率、侧柏与国槐人工林土壤总孔隙度随林龄增加呈先减小后增加的变化趋势,而侧柏与国槐人工林土壤全磷、国槐土壤的水分体积分数和电导率呈现先升后降的变化趋势($p<0.05$)(图1)。毛白杨、侧柏与国槐人工林土壤质量指数均随林龄增加而显著增加($p<0.05$),30 a毛白杨、36 a侧柏与16 a国槐人工林土壤质量指数在树种间没有显著差异。

2.2 植物功能性状变化

方差分析结果表明,林龄对根系直径、根长密度、比根长、根氮和根碳质量分数具有显著影响($p<0.05$),树种对根生物量、根直径、根长密度、根表面积密度、根氮质量分数具有显著影响($p<0.05$),除根组织密度和根碳质量分数外,林龄与树种的交互作用对根系性状具有显著影响($p<0.05$)(表4)。



注:图柱上方不同小写字母表示同一树种不同林龄之间存在显著差异($p < 0.05$)。下同。

图 1 不同林龄人工林土壤理化性质与土壤质量指数变化

Fig.1 Variations in soil physicochemical properties and soil quality index in plantations of different stand ages

表 2 不同林龄人工林土壤粒径组成变化

Table 2 Variations in soil particle size composition of plantations of different stand ages

树种	林龄/a	黏粒/%	粉粒/%	砂粒/%
毛白杨	10	0.10±0.10b	11.98±3.84b	87.43±3.86a
	16	0.06±0.03b	12.75±1.03b	86.44±0.78a
	30	5.64±0.29a	77.01±1.43a	17.35±1.68b
侧柏	12	0.29±0.06b	15.78±1.48b	83.64±1.36a
	36	3.27±0.28a	64.76±2.92a	31.97±3.18b
国槐	9	2.13±0.35b	63.93±3.35a	33.94±3.22a
	13	3.41±0.50ab	70.86±1.97a	25.74±1.71ab
	16	4.22±0.75a	74.89±4.60a	20.90±5.34b

注:表中数据为平均值±标准误差;同列不同字母表示不同树种人工林在林龄之间差异显著($p < 0.05$)。

毛白杨与侧柏人工林根系直径、毛白杨人工林根氮质量分数随林龄的增加而显著增加($p < 0.05$) (图 2)。毛白杨人工林根生物量、根长密度与根表面积密度和侧柏人工林根氮质量分数随林龄的增加呈先减后增的变化规律,而侧柏人工林根生物量、根长密度和根表面积密度与国槐人工林根系比根长、比表面积和根

氮质量分数呈先增后减的变化趋势。随着林龄增加,侧柏人工林根系的比根长、比表面积和根碳质量分数与国槐人工林根碳质量分数显著减小($p < 0.05$)。

表 3 土壤理化性质与土壤质量指数受林龄和树种影响的双因素方差分析

Table 3 Two-way ANOVA of soil physicochemical properties and soil quality index affected by stand ages and tree species

指标	林龄	树种	林龄×树种
土壤质量指数	<0.001	<0.001	<0.001
水分体积分数	<0.001	<0.001	<0.001
土壤体积质量	<0.001	<0.001	<0.001
土壤总孔隙度	<0.001	0.002	0.082
土壤 pH	0.032	<0.001	0.001
土壤电导率	0.228	<0.001	<0.001
全氮	<0.001	0.351	0.971
总有机碳	<0.001	0.802	0.263
全磷	0.007	0.002	<0.001
黏粒	<0.001	<0.001	<0.001
粉粒	<0.001	<0.001	<0.001
砂粒	<0.001	<0.001	<0.001

注:表中数据为显著性 p 。下同。

表 4 根系性状与枯落物持水性受林龄和树种影响的双因素方差分析

Table 4 Two-way ANOVA of root traits and litter water-holding capacity affected by stand ages and tree species

组别	指标	林龄	树种	林龄×树种
根系	根生物量	0.880	0.033	<0.001
	根直径	<0.001	0.002	<0.001
	根长密度	0.002	0.006	<0.001
	根表面积密度	0.159	0.006	<0.001
	比根长	0.020	0.715	0.018
	比表面积	0.052	0.430	0.009
	根组织密度	0.147	0.707	0.256
	根氮质量分数	<0.001	<0.001	<0.001
	根碳质量分数	<0.001	0.197	0.249
枯落物	枯落物氮质量分数	<0.001	<0.001	<0.001
	枯落物碳质量分数	0.292	<0.001	0.103
	枯落物蓄积量	<0.001	<0.001	<0.001
	枯落物自然含水量	0.865	0.007	<0.001
	枯落物最大持水量	<0.001	<0.001	<0.001
	枯落物最大拦蓄量	<0.001	<0.001	<0.001
	枯落物有效拦蓄量	<0.001	<0.001	<0.001

注:表中数据为显著性 p 。

林龄对人工林枯落物氮质量分数、枯落物蓄积量、最大持水量、最大拦蓄量、有效拦蓄量具有显著影响($p<0.05$),树种对枯落物持水性均具有显著影响($p<0.05$),除枯落物碳质量分数外,林龄与树种的交互作用对枯落物持水性均具有显著影响($p<0.05$)(表4)。在不同林龄样地间,毛白杨和侧柏人工林枯落物最大持水量、最大拦蓄量与有效拦蓄量随林龄增加呈现先增后减趋势,而国槐人工林则呈现逐渐增加趋势(图3)。在不同林龄样地间,随林龄的增加,毛白杨人工林枯落物氮质量分数、毛白杨与国槐人工林枯落物蓄积量、侧柏人工林枯落物自然含水量先升高后降低。毛白杨人工林枯落物碳质量分数、水分体积分数、侧柏人工林枯落物全氮质量分数与枯落物储量随林龄增加而显著增高($p<0.05$)。

2.3 土壤质量与植物性状之间的相互关系

相关性分析与冗余分析表明,根系直径与土壤体积质量、全磷,根长密度与土壤总孔隙度、电导率呈显著负相关($p<0.05$)(图4)。根长密度与土壤全磷质量分数,比根长与土壤体积质量呈显著正相关($p<0.05$)。土壤pH与枯落物蓄积量、最大持水量、最大拦蓄量和有效拦蓄量呈极显著正相关($p<0.01$),而与枯落物自然水分体积分数呈极显著负相关($p<0.001$)。

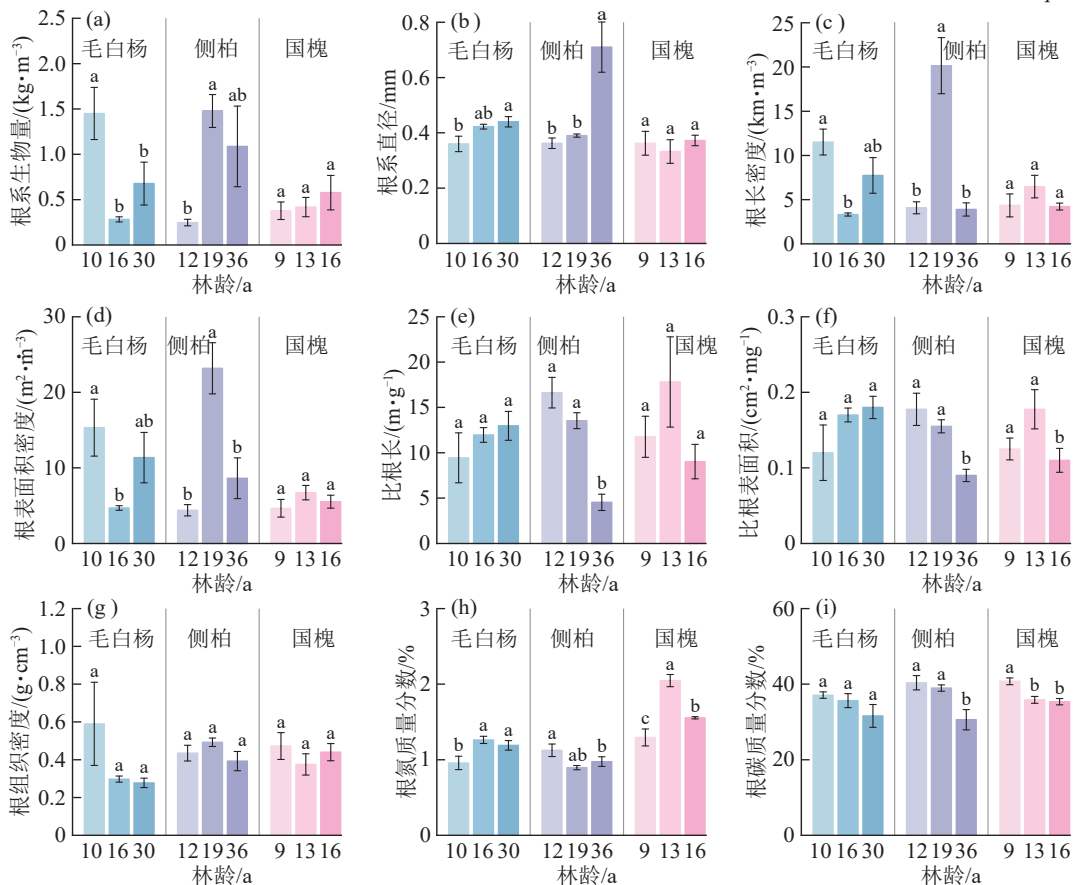


图 2 不同林龄人工林根系性状变化规律

Fig. 2 Variation patterns of root traits in plantations of different stand ages

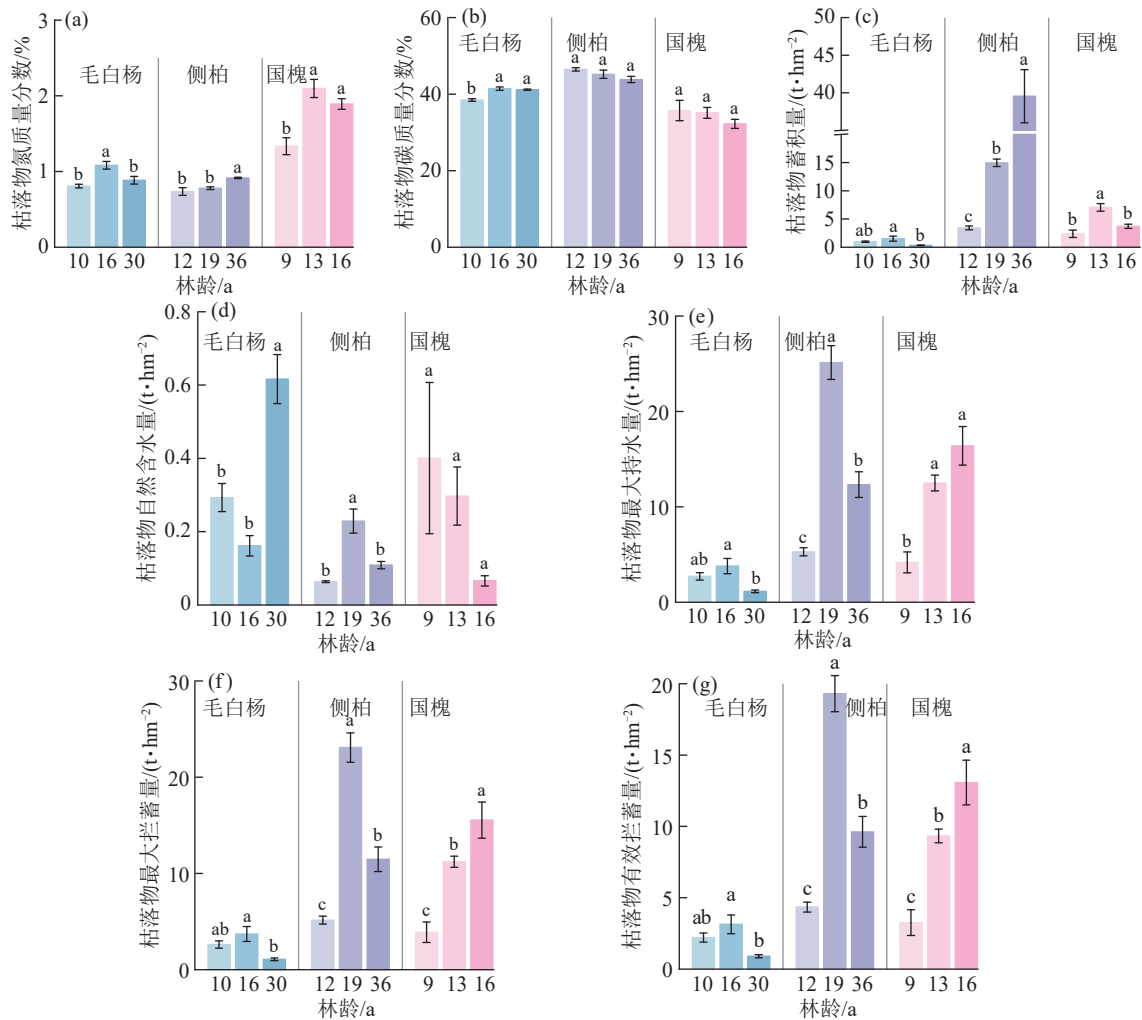


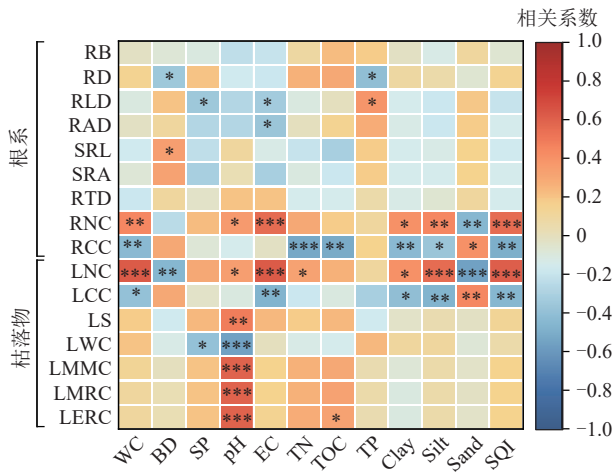
图 3 不同林龄人工林枯落物持水性变化

Fig. 3 Variations in litter water-holding capacity of plantations of different stand ages

根系和枯落物全氮质量分数与土壤水分体积分数、pH、电导率、黏粒、粉粒质量分数和土壤质量指数呈显著正相关,而根系和枯落物总有机碳质量分数与之相反(图4、图5)。影响土壤质量的主要因子有枯落物全氮质量分数、根系碳质量分数、根系直径与枯落物水分体积分数等,其贡献率分别为39.8%、21.3%、12.4%和8.3%(图5)。

基于广义线性混合模型的层次分割法对土壤质量指数的影响因素进行相对重要性排序(图6)表明,10 a毛白杨、12 a侧柏与9 a国槐人工林土壤质量指数的显著影响因子为枯落物氮质量分数(相对重要性为54.0%,图6a)。枯落物氮质量分数(33.6%)和枯落物储量(2.7%)对16 a毛白杨、19 a侧柏与13 a国槐人工林土壤质量指数具有显著影响(图6b)。影响30 a毛白杨、36 a侧柏与16 a国槐人工林土壤质量指数的主要因子有枯落物碳质量分数(19.7%)、枯落物蓄积量(18.8%)、枯落物氮质量分数(9.3%)与根组织密度(3.2%,图6c)。影响毛白杨人工林土壤质量指数的主要因素为枯落物

自然水分体积分数(42.9%)、根氮质量分数(15.4%)、枯落物碳质量分数(10.3%)、根碳质量分数(8.4%)、枯落物氮质量分数(5.4%)和根直径(4.5%,图6d)。影响侧柏人工林土壤质量的主要因素为根直径(23.2%,图6e)。影响国槐人工林土壤质量的主要因素为根碳质量分数(32.2%)、枯落物氮质量分数(30.0%)、根氮质量分数(12.9%)、根组织密度(10.1%)和枯落物蓄积量(7.0%,图6f)。10 a毛白杨、12 a侧柏与9 a国槐人工林的根系性状和枯落物对土壤质量的影响相对重要性分别为17.0%和83.0%。16 a毛白杨、19 a侧柏与13 a国槐人工林根系性状和枯落物对土壤质量的影响相对重要性分别为40.2%和59.9%。30 a毛白杨、36 a侧柏与16 a国槐人工林根系性状和枯落物对土壤质量的影响相对重要性为47.1%和52.9%。根系性状对毛白杨、侧柏与国槐人工林土壤质量指数的相对重要性分别为27.9%、43.1%、56.7%。枯落物对毛白杨、侧柏与国槐人工林土壤质量指数的相对重要性分别为72.1%、56.9%、43.3%。



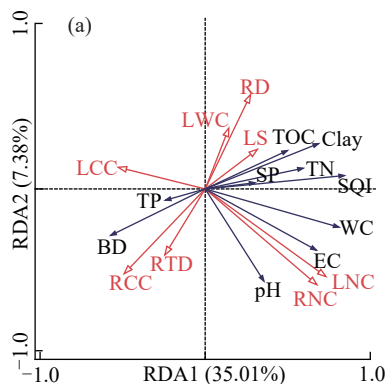
注: *表示 $p < 0.05$; **表示 $p < 0.01$; ***表示 $p < 0.001$; RB 为根系生物量, kg/m^3 ; RD 为根系直径, mm ; RLD 为根长密度, km/m^3 ; RAD 为根表面积密度, m^2/m^3 ; SRL 为比根长, m/g ; SRA 为比表面积, cm^2/mg ; RTD 为根组织密度, g/cm^3 ; RNC 为根氮质量分数, %; RCC 为根碳质量分数, %; LNC 为枯落物氮质量分数, %; LCC 为枯落物碳质量分数, %; LS 为枯落物蓄积量, t/hm^2 ; LWC 为枯落物自然含水量, t/hm^2 ; LMMC 为枯落物最大持水量, t/hm^2 ; LMRC 为枯落物最大拦蓄量, t/hm^2 ; LERC 为枯落物有效拦蓄量, t/hm^2 ; WC 为土壤水分体积分数, %; BD 为土壤体积质量, g/cm^3 ; SP 为土壤总孔隙度, %; pH 为土壤 pH; EC 为土壤电导率, $\mu\text{S}/\text{cm}$; TN 为土壤全氮, g/kg ; TOC 为土壤总有机碳, g/kg ; TP 为土壤全磷, g/kg ; Clay 为土壤黏粒质量分数, %; Silt 为土壤粉粒质量分数, %; Sand 为土壤砂粒质量分数, %; SQI 为土壤质量指数。下同。

图 4 植物性状、土壤理化性质与土壤质量指数的相关性分析
Fig. 4 Correlation analysis among plant traits, soil physicochemical properties, and soil quality index

3 讨论

3.1 不同林龄人工林土壤质量变化

土壤含水率与孔隙度是影响土壤质量的重要指标。在不同林龄样地间,毛白杨和侧柏人工林土壤含水率随林龄的增长逐渐增加,原因可能为树冠随树木生长发育而逐渐增大,郁闭度增大,使直射在土壤上的阳光减少,地表水蒸发降低,土壤含水率增大。



注: *表示 $p < 0.05$; **表示 $p < 0.01$ 。

图 5 植物性状、土壤理化性质与土壤质量指数的冗余分析和指标贡献率

植物根系生长使土壤松懈,微生物的分解根系有助于有机质的转化和团聚体的形成,增加土壤的透气性与渗透性^[18],因此相对高龄林土壤体积质量显著减小,孔隙度增大。而侧柏与国槐人工林土壤孔隙度随林龄增加而呈现先降后增的变化趋势,与李树宝等^[19]的研究结论一致:华北落叶松林下土壤的总孔隙度与毛管孔隙度随林龄变化呈中龄林最低、幼龄林与成熟林较高。

土壤 pH 是衡量土壤酸碱性的指标,影响土壤中养分的溶解度和有效性。本研究发现,侧柏人工林土壤 pH 随林龄的增加而降低,针叶林土壤有酸化的情况^[20],其原因可能为林龄增加促进枯落物堆积,微生物分解过程中释放的酸性产物在降水淋溶下渗入土壤,从而引起 pH 下降。土壤养分是衡量土壤肥力和生产力的重要指标,毛白杨人工林土壤全磷随林龄的增加呈逐渐下降的趋势。植物磷吸收与土壤磷供应之间的平衡随林龄的变化而变化^[21]。土壤全磷含量主要来源于岩石风化,难以在短期内补充被植物吸收利用的磷素,从而使土壤磷含量降低。随着林龄的增加,植被覆盖和根系的生长与深扎减少土壤侵蚀的风险,凋落物等有机物质被微生物分解形成有机质,增加土壤养分质量分数,改善土壤质地。土壤质量指数随林龄增加而增大^[1,22],与本文研究结果一致,主要归因于随着林龄增加,枯落物分解、根系生长等活动引起土壤质量的变化,其变化特征与影响程度因树种而异。

3.2 不同林龄人工林植物性状变化特征

根系功能性状如根长密度、根表面积密度、比根长和比表面积等均能反映细根获取空间养分的能力,是衡量植物获取资源的重要指标^[23]。具有较大获取资源能力的根系表现为较大的比根长、比根表面积和较细的根直径。

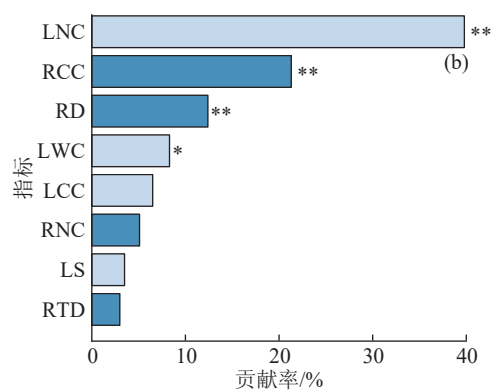
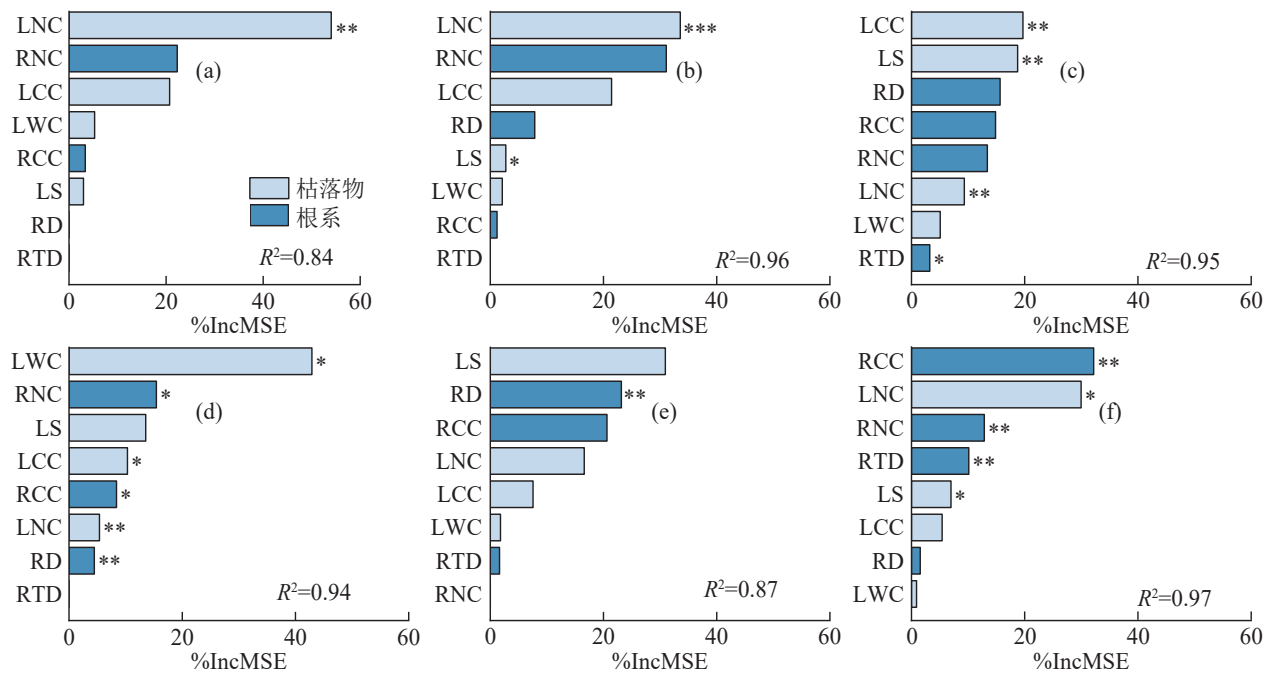


Fig. 5 Redundancy analysis of plant traits, soil physicochemical properties, and soil quality index and contribution rate of indicators



注: *表示 $p < 0.05$; **表示 $p < 0.01$; ***表示 $p < 0.001$; (a) 分图为 10 a 毛白杨、12 a 侧柏与 9 a 国槐人工林植物性状对土壤质量指数的相对重要性排序; (b) 分图为 16 a 毛白杨、19 a 侧柏与 13 a 国槐人工林植物性状对土壤质量指数的相对重要性排序; (c) 分图为 30 a 毛白杨、36 a 侧柏与 16 a 国槐人工林植物性状对土壤质量指数的相对重要性排序; (d)、(e) 和 (f) 分图分别为毛白杨、侧柏与国槐植物性状对土壤质量指数的相对重要性排序。

图 6 人工林植物性状对土壤质量指数影响的层次分割分析

Fig. 6 Hierarchical partitioning analysis of influence of plant traits on soil quality index in artificial plantations

本研究中,侧柏人工林根系比根长和比表面积随林龄的增加而下降,与 LIU 等^[24]对塞罕坝华北落叶松根系研究的结果类似; LI 等^[25]对水曲柳 (*Fraxinus mandshurica*) 的研究同样发现,细根比根长与比表面积随林龄增大呈减小趋势,而根平均直径增加。可能是因为在林分发育初期,细根通常具有较强的养分吸收能力,比根长和比表面积较大,根组织密度和根平均直径较低,而在林分发育后期则可能出现相反的情况。根氮和碳质量分数与细根代谢活动密切相关, HAN 等^[8]研究发现,根氮质量分数越大,细根呼吸速率越高,周转越快,而根碳质量分数越大,分解速率越慢。毛白杨与国槐人工林根系氮质量分数均随林龄增加呈现先增后减的变化规律,其原因可能为早期毛白杨与国槐人工林处于生长发育的快速时期,根系活动较为活跃,而成熟树木生长缓慢,根系活动下降。

一般来说,随着树木年龄的增加,为确保对水分和养分的需求,根系生物量通常会增加。然而树种不同,地下生物量的变化也有差异。本研究中,19 a 侧柏人工林根系生物量最大,为 1.48 kg/m^3 。在树木发育中前期,植物通过增加根生物量以尽可能的吸收土壤中的养分以保证自身生长,而随着林龄的增长,树木发育后期林分生产力出现下降趋势,表层土壤内根生物量减少。

枯落物性状随林龄增加而发生显著变化,因树种而异。随林龄的增加,毛白杨与国槐人工林枯落物氮质量分数先增后减,其原因可能为树木快速生长需要消耗大量养分如氮元素以供光合作用消耗,分解过程中生物量的损耗及养分向土壤的转移,可能使植物生长后期枯落物的氮质量分数下降。已有研究^[13]表明,随着林龄增长,枯落物的蓄积量呈增加趋势,而本研究中毛白杨与国槐人工林枯落物蓄积量却随林龄增加而呈先增后减的变化规律,与刘琳等^[26]对不同林龄(12、15、19、27、32 a)拉萨河谷杨树人工林的研究结论基本一致。随着树木生长发育,林分结构逐渐完善,枯落物储量增加,但随着林分进入过熟阶段,林木逐步老化,更新受限。枯落物最大持水量与有效拦蓄量是表征枯落物持水性的重要指标。本研究中,国槐人工林枯落物最大持水量与有效拦蓄量随林龄增加而逐渐增长,毛白杨与侧柏人工林枯落物最大持水量与有效拦蓄量随林龄增加呈现先增后减的变化规律。毛白杨人工林林分稀疏,导致枯落物蓄积量及水分保持能力(最大持水量和有效拦蓄量)显著低于侧柏和国槐林。侧柏人工林枯落物蓄积量显著高于毛白杨与国槐,推测原因可能为,针叶枯落物含有大量难分解的木质素、纤维素等物质,导致枯落物大量累积,另外侧柏人工林郁闭度高,林分密度大,因此枯落物蓄积量大。

3.3 驱动土壤质量变化的主要因素

本研究中枯落物碳质量分数、根碳质量分数、根直径与枯落物自然水分体积分数对土壤理化性质和土壤质量指数的影响较为显著。人工林通过枯落物返还补充土壤养分,改善土壤质量。枯落物氮与土壤氮质量分数呈正相关,体现枯落物输入对土壤氮积累的驱动作用。样地土壤全氮处于较低水平,总有机碳适中。植物在资源相对缺乏的环境中可能投资更多的碳(如木质素和纤维素)去繁殖构建更多的细根以提高养分获取能力^[27],而根碳质量分数、枯落物碳质量分数与土壤养分和土壤质量指数呈负相关,说明植物根系生长消耗的土壤养分远高于根系残体被微生物分解的速率。根系直径是影响土壤物理性质的重要因素,根生长挤压土壤,形成较大的孔隙体积^[28],有助于提高土壤的透气性和排水性。本研究发现,枯落物自然含水量与土壤含水率呈正相关,表明枯落物层能够有效减缓土壤水分的蒸发,减少土壤水分流失,提高土壤的持水能力,有效提高土壤质量。

枯落物与植物根系均影响土壤质量,与根系性状相比,枯落物对土壤质量指数的影响程度更大。枯落物覆盖土壤表面,减缓土壤水分流失,作为土壤的主要养分来源,能够更快速地为土壤提供碳源、养分和有机质^[8],而根系作用相对较弱且范围局限,因此枯落物对土壤质量的影响程度比根系性状更大。随着林龄的增加,根系性状对土壤质量指数的影响逐渐增加(17.0%~47.1%),而枯落物的影响减小(83.0%~52.9%)。在植物生长发育过程中,枯落物输入量逐渐增大,为土壤提供丰富的养分,对土壤质量的改善更加直接。根系不断扩展,根系生物量、密度增加,对土壤质量的影响不断加深。随着林龄增长,高龄林木生长速度减慢,枯落物碳质量分数降低(图3),可能与凋落物分解速率有关^[29],其堆积量大于分解量,根系输入对土壤养分的补充尤为关键,根系对土壤的影响逐渐凸显。

林龄与树种及其交互作用对土壤质量均具有显著影响,表明根系性状与枯落物对不同树种土壤质量的影响具有差异,且随林龄增加而发生变化。其中,根系性状对毛白杨、侧柏与国槐人工林土壤质量指数的相对重要性分别为27.9%、43.1%和56.74%;枯落物对毛白杨、侧柏与国槐人工林土壤质量指数的相对重要性分别为72.1%、56.9%和43.3%。毛白杨人工林枯落物蓄积量较小,但由于其较高的生产力,枯落物在林分初期和中期能够较快地分解并为

土壤提供丰富的有机质,短期内能够对土壤质量产生较大影响。侧柏枯落物较难分解,因此枯落物蓄积量大,对侧柏人工林土壤水土保持具有积极影响。因此,毛白杨与侧柏土壤质量主要受枯落物影响。国槐虽然属于豆科树种,但根系固氮能力目前尚无明确共识,有研究将其归类为缺乏固氮能力的豆科树种^[30]。本研究中根系对国槐人工林土壤质量指数影响的占比更高,可能是因为本研究国槐人工林林龄较小,根系活动发达,但枯落物氮质量分数和枯落物蓄积量仍是影响土壤质量指数的重要因素。

4 结论

1)根系性状和枯落物持水性对土壤质量的影响与林龄和树种密切相关。

2)随林龄增加,人工林土壤质量指数均增大,与根系性状相比,土壤质量指数受枯落物的影响更大,影响土壤质量指数的主要因素包括枯落物与根系养分含量、根直径、枯落物自然水分体积分数等。

3)枯落物对土壤质量指数的影响随林龄增加而减小(83.0%~52.9%),而根系性状对土壤质量的影响则相反(17.0%~47.1%)。

4)毛白杨、侧柏人工林土壤质量指数主要受枯落物(72.1%,56.9%)影响,国槐人工林土壤质量指数主要受根系性状(56.7%)影响。

因此,不同树种的土壤管理策略应根据根系和枯落物的特性进行优化。研究区人工林发育前期应保持足够的枯落物覆盖,而在发育中后期则在保证枯落物蓄积量的同时通过调控林分密度、间伐等措施促进树木根系分布更广、更深。然而,本研究仍存在一定的局限性,土壤粒径组成、林分密度的差异可能对土壤质量评价结果产生影响,未来应在严格控制土壤初始条件与林分管理的前提下,结合长期定位监测以更准确地揭示林龄演替过程中土壤质量变化的内在机制。

参考文献:

- [1] 刘可意,杨佳,姜淑娜,等.基于最小数据集的典型黑土区不同林龄小黑杨土壤质量差异[J].生态学报,2024,44(9):3623-3635.
LIU K Y, YANG J, JIANG S N, et al. Evaluation of differences in soil quality of *Populus simonii*×*P. nigra* (*P. Xiaohei*) of different stand ages in typical black soil areas based on a minimum data set [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(9): 3623-3635.
- [2] 张和芬,孙瑞,杨川,等.基于最小数据集的云南橡胶林土壤质量评价[J].西北林学院学报,2025,40(1):59-69.

- ZHANG H F, SUN R, YANG C, et al. Soil quality evaluation of rubber plantations in Yunnan Province based on minimum data set[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2025, 40(1):59-69.
- [3] ABBAS F, HAMMAD H M, ISHAQ W, et al. A review of soil carbon dynamics resulting from agricultural practices [J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 268:e110319.
- [4] 徐华,袁海莉,王歆宇,等.根系形态和层次结构对根土复合体力学特性影响研究[J]. *岩土工程学报*, 2022, 44(5):926-935.
- XU H, YUAN H L, WANG X Y, et al. Influences of morphology and hierarchy of roots on mechanical characteristics of root-soil composites [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, 44(5):926-935.
- [5] 周志勇,徐梦瑶,王勇强,等.山西太岳山油松林土壤质量与有机碳稳定性随林龄的演变特征[J]. *北京林业大学学报*, 2022, 44(10):112-119.
- ZHOU Z Y, XU M Y, WANG Y Q, et al. Evolutionary characteristics of soil quality and organic carbon stability with forest stand age for *Pinus tabulaeformis* forests in the Taiyue Mountain of Shanxi Province, northern China[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2022, 44(10):112-119.
- [6] 金晓,陈丽华.晋西黄土区不同植被类型土壤抗冲性及表层根系分布特征[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(6):120-126.
- JIN X, CHEN L H. Soil anti-scourability and root distribution characteristics in surface soil under different vegetation types in the loess region of western Shanxi Province[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(6):120-126.
- [7] 王瑞,曲晓宇,林芳馨,等.不同造林密度杉木幼林生物量及碳储量空间结构研究[J]. *江西农业大学学报*, 2025, 47(4):992-1003.
- WANG R, QU X Y, LIN F X, et al. Spatial structure of biomass and carbon stock in young *Cunninghamia lanceolata* forests with different afforestation densities [J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2025, 47(4):992-1003.
- [8] HAN M G, ZHU B. Linking root respiration to chemistry and morphology across species [J]. *Global Change Biology*, 2021, 27(1):190-201.
- [9] 王丹丹,许海超,单志杰,等.黄土高原刺槐林地根系与枯落物对土壤侵蚀的影响[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(2):83-89.
- WANG D D, XU H C, SHAN Z J, et al. Effects of *Robinia pseudoacacia* litter cover and roots on soil erosion in the Loess Plateau, China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(2):83-89.
- [10] 范金花,谢汶天,曹球铤,等.川西亚高山森林苔藓与枯落物持水特征[J]. *山地学报*, 2024, 42(1):1-13.
- FAN J H, XIE W T, CAO Q Y, et al. Water holding capacity of bryophytes and litter in subalpine forest in western Sichuan, China[J]. *Mountain Research*, 2024, 42(1):1-13.
- [11] SU S P, LIU X E. The water storage function of litters and soil in five typical plantations in the northern and southern mountains of Lanzhou, northwest China [J]. *Sustainability*, 2022, 14(14):e8231.
- [12] 李鹏,陈璇,杨章旗,等.不同密度马尾松人工林枯落物输入对土壤理化性质的影响[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(2):368-377.
- LI P, CHEN X, YANG Z Q, et al. Effects of litter input on soil physical and chemical properties of *Pinus massoniana* plantations with different densities[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(2):368-377.
- [13] 张淑兰,韩勇,杨盼,等.汉江上游不同林龄麻栎林枯落物的水文功能评价[J]. *生态环境学报*, 2022, 31(1):44-51.
- ZHANG S L, HAN Y, YANG P, et al. Evaluation of hydrological function of litter of *Quercus acuvarius* at different ages in the upper reaches of Han River[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022, 31(1):44-51.
- [14] 耿琦,王海燕,张美娜,等.森林枯落物持水特性影响因素研究进展[J]. *生态科学*, 2020, 39(5):220-226.
- GENG Q, WANG H Y, ZHANG M N, et al. Review on factors affecting water-holding characteristics of forest litter[J]. *Ecological Science*, 2020, 39(5):220-226.
- [15] 吴晓光,刘龙,张宏飞,等.砒砂岩区主要造林树种枯落物持水性能及土壤物理性质[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(4):137-144.
- WU X G, LIU L, ZHANG H F, et al. Litter water-holding capacity and soil physical properties of main afforestation tree species in sandstone area [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(4):137-144.
- [16] 张轶超,乌艺恒,周梅,等.内蒙古大兴安岭南段山杨纯林与白桦纯林的枯落物层水文效应[J]. *林业科学研究*, 2022, 35(2):187-193.
- ZHANG Y C, WU Y H, ZHOU M, et al. Hydrological effects of the humus layer of pure forest of *Populus davidiana* and *Betula platyphylla* in southern section of Daxing'anling Mountains, Inner Mongolia, China [J]. *Forest Research*, 2022, 35(2):187-193.
- [17] 郭文芳,李鑫,陈艳梅,等.太行山坡地不同管理措施植被-土壤系统耦合关系[J]. *生态学报*, 2023, 43(15):6170-6181.

- GUO W F, LI X, CHEN Y M, et al. Evaluation of the coupling relationship between vegetation and soil system under different management measures in Taihang Mountains [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(15): 6170-6181.
- [18] 安花, 蒙仲举, 李浩年, 等. 库布齐沙漠不同林龄沙柳林对土壤酶活性的影响[J]. *水土保持通报*, 2024, 44(4): 77-85.
- AN H, MENG Z J, LI H N, et al. Effects of different ages of *Salix psammophila* forest on soil enzyme activity in hobq desert [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2024, 44(4): 77-85.
- [19] 李树宝, 张丽娜, 王树森, 等. 森林经营方式对不同林龄落叶松林枯落物及土壤水源涵养能力的影响[J]. *森林工程*, 2023, 39(2): 12-21.
- LI S B, ZHANG L N, WANG S S, et al. Effects of forest management methods on litter and soil water conservation capacity of *Larix principis-rupprechtii* plantation of different ages [J]. *Forest Engineering*, 2023, 39(2): 12-21.
- [20] 史丽娟, 吕海涛, 张树梓, 等. 白洋淀上游典型林分类型土壤理化性质及其化学计量特征[J]. *土壤通报*, 2024, 55(4): 960-967.
- SHI L J, LÜ H T, ZHANG S Z, et al. Soil physico-chemical properties and stoichiometric characteristics of typical stand types in the upstream of Baiyangdian Lake [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2024, 55(4): 960-967.
- [21] XU Y W, GE X G, ZHOU B Z, et al. Variations in rhizosphere soil total phosphorus and bioavailable phosphorus with respect to the stand age in *Pinus massoniana* Lamb [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: e939683.
- [22] 刘可意. 黑土区不同林龄小黑杨与大豆间作对土壤质量与微生物群落的影响[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2024.
- LIU K Y. The effects of intercropping between different ages of *Populus simonii* × *P. nigra* and soybean on soil quality and microbial community in black soil areas [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2024.
- [23] 孙佳慧, 史海兰, 陈科宇, 等. 植物细根功能性状的权衡关系研究进展[J]. *植物生态学报*, 2023, 47(8): 1055-1070.
- SUN J H, SHI H L, CHEN K Y, et al. Research advances on trade-off relationships of plant fine root functional traits [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2023, 47(8): 1055-1070.
- [24] LIU Q Y, CHEN Y X, CHEN Y M. Nitrogen acquisition strategy shifts with tree age depending on root functional traits and soil properties in *Larix principis-rupprechtii* plantations [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2024, 15: e1358367.
- [25] LI Z W, LIU Z, GAO G Q, et al. Shift from acquisitive to conservative root resource acquisition strategy associated with increasing tree age: A case study of *Fraxinus mandshurica* [J]. *Forests*, 2021, 12(12): e1797.
- [26] 刘琳, 熊东红, 张宝军, 等. 拉萨河谷杨树人工林枯落物蓄积特征及持水性能[J]. *干旱区研究*, 2021, 38(6): 1674-1682.
- LIU L, XIONG D H, ZHANG B J, et al. Litter storage and its water-holding capacity of *Populus* plantations in Lhasa River valley [J]. *Arid Zone Research*, 2021, 38(6): 1674-1682.
- [27] 刘倩愿, 俞振东, 张微微. 河北坝上乔灌木植物根系无机和有机氮吸收速率及其偏好[J]. *植物生态学报*, 2024, 48(10): 1361-1373.
- LIU Q Y, YU Z D, ZHANG W W. Uptake rate and preference of inorganic and organic nitrogen in roots of tree and shrub plants in Bashang, Hebei, China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2024, 48(10): 1361-1373.
- [28] KOCHIIERU M, LAMORSKI K, FEIZA V, et al. Quantification of the relationship between root parameters and soil macropore parameters under different land use systems in Retisol [J]. *International Agrophysics*, 2020, 34(3): 301-308.
- [29] ZHAO K, YUE Y J, QIN F C, et al. Carbon storage and carbon pool characteristics of *Larix gmelinii* forest in Daxing'anling, Inner Mongolia, China [J]. *Frontiers in Forests and Global Change*, 2024, 7: e1419023.
- [30] 雷威肖. 国槐基因组及芦丁生物合成研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2023.
- LEI W X. Genome sequence and rutin biosynthesis of *Sophora japonica* [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2023.