

华北平原人工林地土壤质量评价及障碍因子分析

田鹏莹, 孙慧娟, 薛婧雯, 刘梦瑶, 李建菲, 范国强, 张志华

(河南农业大学 林学院, 河南 郑州 450002)

摘要: [目的] 定量评价华北平原人工林地的土壤质量, 为该地区土壤质量改善及障碍因素诊断提供科学依据和建议。[方法] 以不同密度(1 111, 833, 625, 555, 416 株/hm²)杨树人工林为研究对象, 于 2024 年 10 月底采集杨树林下 0—20 cm 土层土壤, 对土壤主要理化性质及酶活性进行分析。基于主成分分析(PCA)筛选出最小数据集(MDS), 通过土壤质量指数和障碍因素诊断对华北平原人工林土壤质量进行评价。[结果] ①基于总数据集的主成分分析, 构建了由土壤全碳、蔗糖酶活性、电导率、粉粒和速效磷组成的最小数据集。②不同密度杨树人工林的土壤质量指数排序为: 416 株/hm²(0.55) > 555 株/hm²(0.51) > 625 株/hm²(0.49) > 1 111 株/hm²(0.48) > 833 株/hm²(0.44)。林分密度显著影响了土壤含水量、pH 值、有机碳、全碳和速效养分等。③整个研究区土壤质量障碍以中度、轻度障碍为主, 土壤有机碳(15%)和土壤含水量(13%)是影响该研究区土壤质量的障碍因素。各密度杨树人工林均面临土壤养分和水分限制型障碍。[结论] 杨树人工林密度为 416 株/hm²时土壤质量最佳, 华北平原各杨树人工林均面临土壤养分不足、缺水的情况, 该地区应制定科学的施肥灌溉管理措施, 同时在人工林生产实践中确定适宜的造林密度, 以实现土壤可持续利用。

关键词: 土壤综合质量指数; 土壤质量评价; 评分法; 土壤障碍因素; 华北平原

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)04-0124-10

中图分类号: S714.5

文献参数: 田鹏莹, 孙慧娟, 薛婧雯, 等. 华北平原人工林地土壤质量评价及障碍因子分析[J]. 水土保持通报, 2025, 45(4): 124-133. Tian Pengying, Sun Huijuan, Xue Jingwen, et al. Soil quality assessment and constraining factor analysis in plantation forests of north China Plain [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(4): 124-133. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.04.001; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.04.001.

Soil quality assessment and constraining factor analysis in plantation forests of north China Plain

Tian Pengying, Sun Huijuan, Xue Jingwen, Liu Mengyao, Li Jianfei, Fan Guoqiang, Zhang Zhihua

(College of Forestry, Henan Agricultural University, Zhengzhou, Henan 450002, China)

Abstract: [Objective] Soil quality of plantation forests in the north China Plain was quantitatively evaluated, in order to provide a scientific basis and references for the related soil quality improvement and limiting factor diagnosis in the region. [Methods] *Populus* spp. plantations with different densities (i.e., 1 111, 833, 625, 555, and 416 trees/hm²) were taken as cases. Soil samples were collected from the 0—20 cm depth layer of the soil in poplar forests in late October, 2024. The main physicochemical soil properties and related enzymatic activities were analyzed. The minimum dataset was selected based on principal component analysis. Soil quality was evaluated using the soil quality index and limiting factor diagnosis. [Results] ① Based on the principal component analysis of the total dataset, a minimum dataset was established, consisting of soil total carbon, sucrase activity, electrical conductivity, silt content and available phosphorus. ② The soil quality indices of poplar plantations with different densities were ranked as follows (trees/hm², followed by values in brackets): 416 (0.55) > 555 (0.51) > 625 (0.49) > 1 111 (0.48) > 833 (0.44). Stand density significantly affected the soil water content, pH value, organic carbon, total carbon and available nutrient values. ③ Soil quality limitations in the study area

收稿日期: 2025-02-20

修回日期: 2025-03-18

采用日期: 2025-03-19

资助项目: 国家自然科学基金项目“砾石对华北土石山区坡面水分运移的影响”(41807174); 河南省高等学校重点科研项目(24A220004); 河南省科技攻关项目(232103810014)

第一作者: 田鹏莹(2001—), 女(汉族), 河南省新乡市人, 硕士研究生, 研究方向为土壤水文学。Email: tpy3263@163.com。

通信作者: 张志华(1984—), 女(汉族), 山东省菏泽市人, 博士, 副教授, 主要从事土壤水文学研究。Email: zhangzh@henau.edu.cn。

were primarily moderate and mild. Soil organic carbon (15%) and water contents (13%) were the most significant soil quality-affecting limiting factors. All poplar plantations faced limitations related to soil nutrient and water availabilities. [Conclusion] Soil quality was optimal in poplar plantations at a density of 416 trees/hm². All poplar plantations in the north China Plain face challenges of insufficient soil nutrients and water scarcity. Therefore, developing scientific fertilization and irrigation management practices and determining appropriate afforestation densities in plantation practices would be essential to achieve sustainable soil utilization.

Keywords: soil quality index; soil quality evaluation; scoring method; soil barrier factors; north China Plain

土壤质量是指土壤在生态系统范围内维持生物生产力,保护环境质量以及促进动植物健康的能力^[1],是陆地生态系统结构与功能的重要基础。通过对土壤质量进行全面系统地综合评估,有助于掌握土壤的实际状况,为诊断土壤质量障碍因素提供理论依据。

目前,土壤质量评价方法尚未形成统一标准,常用的评价方法有多种,例如多变量指标克立格法(MVIT)、土壤质量动力学方法以及土壤质量综合指数法(SQI)^[2]。其中SQI因简单实用、定量灵活等特点被广泛应用。构建SQI的关键步骤^[3]包括选择数据集和确定指标评分方法,常用数据集方法包括最小数据集(MDS)、敏感数据集(SDS)和总数据集(TDS),在确定数据集后,需采用线性或非线性评分方法对土壤指标进行标准化得分计算^[4]。由于土壤复杂性和土地利用方式的多样性,选择合适的评分方法是土壤质量评价的关键,以避免不同方法可能导致的矛盾结果^[5]。土壤障碍因素的识别是土壤质量评价的重要基础,其研究深化推动了土壤质量评价方法的改进^[6]。障碍度模型是在土壤质量综合评价基础上,通过引入“因子贡献度、障碍度”等指标构建障碍度模型,可有效筛选并确定影响土壤质量的关键障碍因子^[7],该方法已在农业生产领域(如盐碱地治理)得到广泛应用^[6]。然而,障碍度模型在人工林领域,尤其是林地上的研究与应用仍较为缺乏。

在全球生态与经济深度交织的背景下,森林资源需求激增与天然林面积锐减的矛盾日益凸显。人工林建设是缓解木材供需矛盾、保护生物多样性和恢复退化土地的重要手段。中国杨树(*Populus* spp.)人工林面积占总人工林面积11%,居于全球首位^[8]。华北平原杨树人工林以其速生丰产、短轮伐期和适应性强等特质而著称。杨树人工林不仅为造纸、人造板、家具制造等行业提供原料,还带动物流、生物质能源等行业的发展,成为社会经济的重要支柱。杨树人工林还具有多重生态功能,包括防风固沙、水土保持、空气净化、碳汇功能和生物多样性维护。植树造林是缓解全球气候变化的关键策略,因此,国内

外许多学者对人工林土壤质量方面开展了大量研究。研究表明,影响人工林土壤质量的因素主要是土壤利用类型^[9]、地形^[10]、海拔^[11]、林龄^[12]、林分类型等^[13],但是关于人工林土壤质量综合评价的研究较少。

近年来,随着社会经济的发展,木材需求急剧攀升,人们为追求短期经济效益最大化,采取了不合理的杨树密植策略。这导致了一系列生态问题,包括土壤养分严重消耗,地力衰退和水土保持能力弱化。密植使杨树过度摄取土壤养分,加速了养分流失,降低了土壤肥力和生产力,同时破坏了土壤结构,进一步加剧了土壤退化。健康的土壤是杨树生长的基础,土壤质量直接决定了人工林的生产力、生态功能和可持续性。土壤质量的优劣直接关乎杨树人工林的生态稳定与经济效益的提升。

本研究通过主成分分析法(PCA)计算土壤质量指数(SQI),确定最优数据集并选择合适评分方法,精准识别影响土壤质量的关键障碍因子。本文探索适宜的杨树人工林种植密度,为提升该地区土壤质量提供科学依据和实践参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于河南省开封市兰考县国有林场内(34°86'N,115°04'E),属于华北平原风沙治理区,地势辽阔平坦,平均海拔高度74.5 m。处于温带季风气候区,日照充足,雨热同季,无霜期较长。年平均气温为14.3℃,年均降水量为636.1 mm,其中6—8月的降水量占全年总降水量的56.7%。风沙大,年均风速为2.5 m/s。该区域的土地利用类型为农业用地和林地,土壤类型为黄绵土和沙壤土。

1.2 土壤样品采集与分析

在研究区域内,选择生长状况良好、林分结构一致且树龄为4 a的典型杨树人工林作为研究对象。这些杨树人工林采用统一的管理措施,且种植前的土地利用类型均为农田(花生)。选取5种(1 111, 833, 625, 555, 416株/hm²)造林密度,每种密度下选择海拔高度等基本相同的杨树样地均匀布设3个20 m×

20 m的样方,并使用每木检尺法调查样方内杨树的树高、胸径、冠幅。在每个样方周围设有5 m宽的缓冲带,以避免潜在的边缘效应。任意两个样方之间

的距离小于3 km,以尽量减少气候和土壤类型的差异,确保林分之间的差异主要由密度不同引起。详细的林分特征基本信息见表1。

表1 样地基本情况

Table 1 Basic survey of sample site

样地	林分密度/(株·hm ⁻²)	树龄/a	纬度	经度	树高/m	胸径/cm
Y ₁	1 111	4	34°86'31"N	114°99'31"E	8.85±1.04	13.43±2.10
Y ₂	833	4	34°86'39"N	114°99'71"E	10.45±1.05	16.67±3.68
Y ₃	625	4	34°86'20"N	114°08'19"E	9.24±0.94	13.22±1.88
Y ₄	555	4	34°86'88"N	114°08'29"E	10.16±1.17	15.46±3.28
Y ₅	416	4	34°86'87"N	114°08'93"E	9.19±0.73	14.53±1.83

于2024年10月底,在林分密度分别为Y₁,Y₂,Y₃,Y₄,Y₅的杨树人工林林地采集土壤样品并进行林木地上部分调查。采用“S”形取样与多点混合法,去除地表枯枝落叶层后,分别采集0—10 cm和10—20 cm土层的土样。土样均匀混合后分3份,分别用于土壤物理、化学和生物性质的测定。此外,每层用环刀取样,用于测定土壤容重和含水量。混合后的土壤样品在遮荫条件下密封保存,带回实验室风干后过筛,用于室内分析。将用于测定土壤酶活性的新鲜土样标记清楚,并放置在4℃冰箱中保存。

土壤含水量(SWC)和容重(BD)采用环刀法测定。将风干后的混合土样分别过2,0.25,0.149 mm筛,用于测定pH值、机械组成、电导率(EC)、全碳(TC)、全氮(TN)、有机碳(SOC)、速效磷(AP)、速效钾(AK)等基本理化性质。pH值使用pH计测定,电导率使用电导率仪测定,全碳、全氮使用元素分析仪测定,土壤有机碳、速效磷和速效钾分别使用重铬酸钾外加热法、钼锑抗比色法和火焰光度计法测定,土壤机械组成通过比重计法(美国制)测定,试验详细方法见《土壤农化分析》^[14]。土壤脲酶(URE)活性采用苯酚钠一次氯酸钠比色法测定,土壤蔗糖酶(SSC)活性通过3,5-硝基水杨酸比色法测定,碱性磷酸酶(ALP)活性采用磷酸苯二钠比色法测定^[15]。

1.3 建立土壤质量评价模型

1.3.1 数据集的建立

本研究将测定的17个土壤指标作为总数据集(TDS)。经标准化处理后的数据输入主成分分析(PCA)模型,并通过Norm值计算,筛选出进入最小数据集(MDS)的土壤相关指标。

(1) MDS指标建立的原则^[3]。①依据PCA结果,选择特征值大于1的主成分,并将同一主成分上载荷大于0.6的土壤指标归为一组。②如果某一指标在2个主成分上的载荷均大于0.6,则需要相关性分析,并将其归入与其他指标相关性较低的一

组。③在每组中,MDS选取最高土壤指标Norm值10%范围内的指标。④假如在一组中留有多个指标,则进行相关性分析。指标间相关性系数 $r>0.5$,则视为冗余,需要从MDS中去除该指标,剩下的土壤指标入选MDS。

(2) 敏感数据集(SDS)的建立原则。计算土壤指标的变异系数(C_v),并依据变异系数分类标准^[16]进行划分, $C_v\geq 90\%$ 为高敏感,当 C_v 满足 $40\%\leq C_v<90\%$ 时,为中敏感;若 $10\%\leq C_v<40\%$,则为低敏感;当 $C_v<10\%$ 时,为不敏感。去掉不敏感的土壤指标,其他土壤指标入选SDS。

Norm值计算公式为

$$N_{ik} = \sqrt{\sum_{i=1}^k (u_{ik}^2 e_k)} \quad (1)$$

式中: N_{ik} 表示第*i*个指标在特征值大于1的前*k*个主成分中的标准化值(Norm值); u_{ik} 是第*i*个指标在第*k*个主成分上的载荷系数; e_k 是第*k*个主成分的特征值。

1.3.2 评分法 本研究采用隶属度函数进行土壤障碍度计算,参考张俊华等^[6]方法。在确定土壤指标后,利用线性和非线性评分法将各指标数据转换为0~1的无量纲得分^[17]。根据指标对土壤的有利或不利影响,分别采用“越多越好”型或“越少越好”型评分函数进行得分计算^[4]。线性评分函数中,“越多越好”型如公式(2)所示,“越少越好”型如公式(3)所示。

$$S_N = \frac{X}{X_{max}} \quad (2)$$

$$S_N = \frac{X_{min}}{X} \quad (3)$$

式中: S_N 表示土壤指标的线性评分函数; X 是土壤指标的实际值; X_{max} 为各土壤指标的最大值; X_{min} 对应各土壤指标的最小值。

非线性评分函数使用S型函数,公式为

$$S_{NL} = \frac{a}{1 + (X/X_0)^b} \quad (4)$$

式中: S_{NL} 是介于0到1之间的土壤指标非线性评分函数; a 为最大得分,此处设定为1; X 是土壤指标的实际测量值; X_0 为相应的指标平均值; b 为方程的斜率,其中“越多越好”型指标取-2.5,“越少越好”型指标取2.5^[18]。

1.3.3 土壤指标权重与SQI计算

权重是各指标的公因子方差与所有指标公因子方差总和的比值^[19]。根据土壤指标的得分和权重计算SQI,其公式为

$$SQI = \sum_{i=1}^n W_i \times S_i \quad (5)$$

式中:SQI表示加权土壤综合质量指数, S_i 为第*i*个指标的得分; n 为指标数量; W_i 为第*i*个指标的权重值。

1.3.4 土壤质量障碍度因子诊断 本研究运用障碍度诊断模型,通过计算各影响因子的障碍值(O_{ij}),并对其进行重要性排序,以此确定各障碍因子的主次关系。依据Cui Xufeng等^[20]的计算方法进行计算,并根据土壤指标的障碍程度,将其划分为4个等级:无障碍(0)、轻度障碍(0%,10%]、中度障碍(10%,20%]和重度障碍(>20%)^[10]。其计算公式为

$$O_{ij} = \frac{(1 - F_{ij}) \times W_{ij}}{\sum_j [(1 - F_{ij}) \times W_{ij}]} \quad (6)$$

式中: O_{ij} 表示在第*i*研究区中第*j*个指标的障碍值; O_{ij} 值越大,说明该指标对系统目标实现的阻力越大; F_{ij} 代表因素的贡献程度; W_{ij} 为指标的权重。

1.4 数据分析

采用Excel 2010和SPSS 21.0软件对数据进行统计分析。采用单因素方差分析,用Pearson法对土壤指标和土壤质量指数之间进行相关分析。利用Excel 2010和Origin软件作图。

2 结果与分析

2.1 土壤指标描述性统计分析

由表2可以看出,华北平原杨树人工林土壤物理指标中,土壤含水量和黏粒含量均值表现为随林分密度减小,呈现出先降低后升高的变化趋势。土壤含水量的分布范围是6.74%~10.08%,其中: $Y_1(10.08\%) > Y_2(9.10\%) > Y_5(9.09\%) > Y_4(7.84\%) > Y_3(6.74\%)$ 。土壤砂粒均值表现为 $Y_3(46.16\%) > Y_4(39.19\%) > Y_2(38.34\%) > Y_5(35.62\%) > Y_1(34.60\%)$; Y_5 的土壤pH值和电导率显著低于其他4种林分。

表2 不同林分密度下土壤指标统计分析

Table 2 Statistical analysis of soil indexes under different stand densities

样地	土壤含水量/%	容重/ ($g \cdot cm^{-3}$)	砂粒/%	粉粒/%	黏粒/%	饱和导水率/ ($m \cdot s^{-1} \cdot 10^{-3}$)
Y_1	10.08±1.04 ^a	1.27±0.03 ^a	34.60±3.27 ^b	52.77±5.45 ^a	12.63±2.94 ^a	0.86±0.01 ^d
Y_2	9.10±1.03 ^{ab}	1.28±0.09 ^a	38.34±7.14 ^b	52.16±8.16 ^a	9.50±3.26 ^{ab}	1.72±0.04 ^b
Y_3	6.74±0.28 ^c	1.34±0.04 ^a	46.16±5.99 ^a	45.32±7.67 ^a	8.52±3.35 ^b	2.36±0.13 ^a
Y_4	7.84±1.5 ^{bc}	1.30±0.03 ^a	39.19±2.36 ^{ab}	48.21±0.98 ^a	12.60±2.21 ^a	1.53±0.06 ^c
Y_5	9.09±1.09 ^{ab}	1.28±0.04 ^a	35.62±5.46 ^b	50.97±4.12 ^a	13.42±2.21 ^a	0.88±0.03 ^d
样地	pH 值	电导率/ ($\mu s \cdot cm^{-1}$)	阳离子交换量/ ($cmol \cdot kg^{-1}$)	全氮/ ($g \cdot kg^{-1}$)	全碳/ ($g \cdot kg^{-1}$)	有机碳/ ($g \cdot kg^{-1}$)
Y_1	7.84±0.04 ^a	89.88±10.83 ^a	1.31±0.15 ^a	0.75±0.13 ^b	12.79±1.38 ^a	8.56±0.8 ^b
Y_2	7.67±0.06 ^b	79.70±10.65 ^a	1.38±0.15 ^a	0.97±0.12 ^a	12.77±0.97 ^a	9.78±0.69 ^a
Y_3	7.53±0.07 ^c	67.38±1.37 ^b	1.32±0.04 ^a	0.9±0.11 ^{ab}	9.90±1.02 ^b	8.05±0.59 ^b
Y_4	7.44±0.07 ^{cd}	65.57±5.13 ^b	1.41±0.26 ^a	1.06±0.18 ^a	13.06±0.71 ^a	9.81±0.68 ^a
Y_5	7.42±0.12 ^d	58.15±3.26 ^b	1.29±0.23 ^a	0.77±0.17 ^b	12.83±0.52 ^a	7.02±0.61 ^c
样地	速效钾/ ($mg \cdot kg^{-1}$)	速效磷/ ($mg \cdot kg^{-1}$)	蔗糖酶/ ($mg \cdot g^{-1}$)	脲酶/ ($mg \cdot g^{-1}$)	磷酸酶/ ($mg \cdot g^{-1}$)	
Y_1	94.14±4.65 ^b	35.86±11.1 ^a	6.33±1.16 ^c	0.96±0.08 ^a	1.14±0.28 ^{bc}	
Y_2	93.61±5.04 ^b	37.1±13.49 ^a	7.45±0.76 ^{bc}	1.00±0.10 ^a	1.55±0.32 ^a	
Y_3	75.90±3.11 ^c	41±14.27 ^a	6.91±0.65 ^{bc}	0.99±0.04 ^a	1.08±0.15 ^c	
Y_4	102.70±9.39 ^a	45.99±17.23 ^a	9.89±2.22 ^a	1.06±0.11 ^a	1.51±0.16 ^a	
Y_5	90.87±2.71 ^b	28.92±4.45 ^a	8.66±0.72 ^{ab}	0.97±0.06 ^a	1.47±0.3 ^{ab}	

注:数据为均值±标准差;同列不同小写字母表示不同林分密度之间的土壤指标在 $p < 0.05$ 水平上有显著差异。 Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5 分别代表林分密度为1 111, 833, 625, 555, 416株/hm²的杨树人工林。下同。

土壤饱和导水率呈先升高后降低的变化趋势,其中, Y_3 的饱和导水率显著高于其他密度($p < 0.05$)。在不同密度杨树人工林化学指标中, Y_4 的土壤全碳(13.06 g/kg)、有机碳含量(9.81 g/kg)最高,且表现为先升高后降低的趋势;土壤全氮的含量表现为先升高后降低的变化趋势,其中 Y_4 (1.04 g/kg)的全氮含量最高。 Y_4 的土壤速效磷含量为(45.99 mg/kg),明显高于其他密度。 Y_4 的土壤速效磷含量分别比其他4种林分密度高28.2%,24.0%,12.2%,59.0%; Y_4 的土壤速效钾含量为102.70 mg/kg,显著高于其他密度($p < 0.05$)。 Y_4 和 Y_5 的土壤蔗糖酶活性显著高于其他3种林分密度。土壤蔗糖酶和脲酶呈现随林分

密度降低逐渐升高的变化趋势。

2.2 数据集的确定

基于主成分分析,5个主成分的累计方差解释率为77.3%,有效地提取了原始数据集的主要信息特征(表3)。根据最小数据集构建原则,选择每个主成分中Norm值最高的指标及其在10%以内的指标,并比较指标间相关系数进行筛选(图1),最终在 PC_1 中选择全碳,在 PC_2 中选择蔗糖酶活性,在 PC_3 中选择电导率,在 PC_4 中选择粉粒含量,在 PC_5 中选择速效磷含量。最后将所筛选出的全碳、蔗糖酶活性、电导率、粉粒含量和速效磷含量5个指标进入最小数据集(表3)。

表3 土壤指标主成分载荷矩阵及Norm值

Table 3 Principal component load matrix and Norm value of soil indexes

土壤指标	主成分					分组	Norm值	$C_v/\%$
	PC_1	PC_2	PC_3	PC_4	PC_5			
土壤含水量SWC	0.743	-0.418	0.132	0.027	-0.034	1	2.458	17.92
容重BD	-0.588	-0.006	-0.337	0.275	0.303		1.980	4.28
砂粒Sand	-0.723	0.299	0.306	-0.497	0.053	1	2.523	16.30
粉粒Silt	0.566	-0.291	0.007	0.664	-0.332	4	2.202	12.32
黏粒Clay	0.333	-0.032	-0.600	-0.284	0.518	3	1.843	29.07
饱和导水率Ks	-0.773	0.314	0.324	0.282	-0.053	1	2.573	39.05
全氮TN	-0.055	0.616	0.270	0.470	0.054	2	1.908	20.08
全碳TC	0.842	0.266	-0.127	-0.138	0.156	1	2.604	12.27
有机碳SOC	0.242	0.540	0.597	0.208	0.260		2.121	14.47
速效钾AK	0.772	0.458	0.155	-0.111	0.114	1	2.599	11.21
速效磷AP	-0.136	0.286	0.087	0.161	0.666	5	1.198	35.07
阳离子交换量CEC	0.113	0.362	0.588	-0.439	-0.397		1.885	13.24
pH值	0.231	-0.490	0.637	-0.160	0.233	3	2.070	2.31
电导率EC	0.336	-0.412	0.676	0.039	0.312	3	2.137	18.47
蔗糖酶SSC	0.263	0.753	-0.277	-0.205	-0.151	2	2.231	22.22
脲酶SUE	0.029	0.645	0.055	0.151	0.016	2	1.704	8.40
磷酸酶ALP	0.494	0.607	-0.260	0.084	-0.099	2	2.230	22.90
特征值	4.327	3.376	2.521	1.539	1.371			
方差贡献率%	25.450	19.859	14.831	9.052	8.064			
累积贡献率%	25.450	45.309	60.140	69.192	77.256			

注:字体加粗表示被选入该组;下划线表示入选最小数据集;根据变异系数(C_v)原则,去除容重、pH和脲酶活性等不敏感指标,最终确定14个指标入选敏感数据集(SDS)。

2.3 土壤质量评价

2.3.1 土壤质量评价方法的选择

基于主成分分析结果,计算各数据集的公因子方差并确定指标权重(表4),采用线性和非线性评分法将总数据集、敏感数据集和最小数据集中的土壤指标转换为0~1的无量纲值。其中,砂粒、容重、电导率和pH采用“越少越好”型评分函数,其余13个指标采用“越多越好”型评分函数,最终通过综合加权

法计算基于不同数据集的土壤质量指数(SQI)。

由于不同土壤质量指数(SQI)构建方法可能会导致评价结果出现偏差,本研究系统比较了6种主要的SQI方法(基于TDS,SDS,MDS这3个数据集的线性和非线性评分方法得到的SQI方法),以期筛选出适宜华北人工林的SQI评估体系。由表5可知,线性评分方法(SQI-LT,SQI-LS,SQI-LM)的SQI值范围分别为0.483~0.511,0.452~0.520,0.438~0.546,

平均值分别为 0.501, 0.495, 0.492; 非线性评分方法 (SQI-NLT, SQI-NLS, SQI-NLM) 的 SQI 值范围分别为 0.488~0.501, 0.487~0.501, 0.484~0.502, 平均值分别为 0.495, 0.495, 0.494。其中, SQI-LM 与 SQI-LT 的相关系数高于 SQI-NLM 与 SQI-NLT, 且 SQI-LM 的变异系数最大(表 5), 使用 SQI-LM 法可以更敏感反映不同密度杨树人工林的土壤质量变化。

表 4 土壤指标的公因子方差及权重

Table 4 Common factor variance and weight of soil indexes

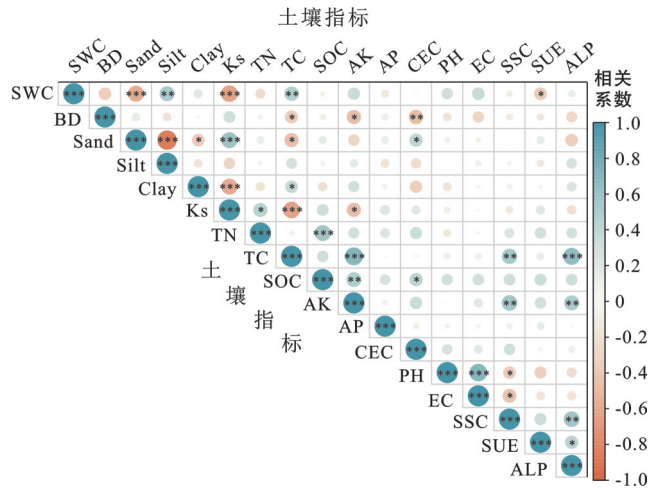
指标	总数据集 TDS		敏感数据集 SDS		最小数据集 MDS	
	公因子方差	权重	公因子方差	权重	公因子方差	权重
SWC	0.745	0.057	0.756	0.065		
BD	0.626	0.048				
Sand	0.956	0.073	0.951	0.082		
Silt	0.956	0.073	0.958	0.083	0.671	0.162
Clay	0.821	0.062	0.825	0.071		
Ks	0.884	0.067	0.896	0.077		
TN	0.680	0.052	0.694	0.060		
TC	0.839	0.064	0.844	0.073	0.872	0.210
SOC	0.818	0.062	0.800	0.069		
AK	0.856	0.065	0.868	0.075		
AP	0.577	0.044	0.698	0.060	0.880	0.212
CEC	0.840	0.064	0.839	0.072		
pH	0.779	0.059				
EC	0.838	0.064	0.867	0.075	0.827	0.199
SSC	0.778	0.059	0.835	0.072	0.902	0.217
SUE	0.443	0.034				
ALP	0.697	0.053	0.748	0.065		

根据 Pearson 相关性分析结果可知(表 6), SQI-LM 方法与 SQI-LS, SQI-LM 方法之间显著正相关 ($p < 0.01$), 基于 SQI-LM 方法计算出各密度人工林之间的 SQI 值差异显著(见图 1, $p < 0.01$), 这表明 SQI-LM 方法能够很好地替代其他 SQI 方法进行土壤质量评估。基于 SQI-LM 和 SQI-LT 的变化趋势基本一致(表 5), 表明本研究构建的 SQI-LM 法能够较好地体现全部土壤指标对不同密度杨树人工林土壤质量评价的信息。鉴于此, 本研究选择 SQI-LM 方法构建华北平原人工林土壤质量评价体系。

2.3.2 土壤质量指数

最小数据集中蔗糖酶活性和全碳平均值对不同密度下的土壤质量影响最大(图 2)。不同密度人工林的土壤质量指数为: $Y_5(0.55) > Y_4(0.51) > Y_3(0.49) > Y_1(0.48) > Y_2(0.44)$, 其中 416 株/hm² 的土壤质量指数显著高于其他密度 ($p < 0.05$)。杨树人工林栽植密

度为 416 株/hm² 时, 能更好地维持土壤质量可持续发展。



注: *为 $p < 0.05$, **为 $p < 0.01$, ***为 $p < 0.001$ 。

图 1 土壤质量指标相关性分析

Fig.1 Correlation analysis of soil quality indexes

表 5 土壤综合评价得分及变异系数

Table 5 Soil comprehensive evaluation scores and coefficient of variation

SQI 指数	不同林分密度样地					变异系数 $C_v/\%$
	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	
SQI-LT	0.511 ^a	0.483 ^a	0.496 ^a	0.504 ^a	0.509 ^a	5.06
SQI-LS	0.508 ^a	0.452 ^b	0.491 ^{ab}	0.506 ^a	0.520 ^a	8.17
SQI-LM	0.481 ^b	0.438 ^c	0.485 ^b	0.511 ^{ab}	0.546 ^a	8.92
SQI-NLT	0.492 ^a	0.488 ^a	0.493 ^a	0.501 ^a	0.501 ^a	3.32
SQI-NLS	0.490 ^a	0.487 ^a	0.495 ^a	0.501 ^a	0.501 ^a	3.99
SQI-NLM	0.491 ^a	0.484 ^a	0.492 ^a	0.499 ^a	0.502 ^a	6.84

注: ① SQI-LT 表示线性总数据集; SQI-LS 表示线性敏感数据集; SQI-LS 表示线性最小数据集; SQI-NLT 表示非线性总数据集; SQI-NLS 表示非线性敏感数据集; SQI-NLM 表示非线性最小数据集。② 不同小写字母表示各密度之间差异显著 ($p < 0.05$)。

表 6 SQI 得分的相关矩阵

Table 6 Correlation matrix of SQI scores

项目	SQI-LT	SQI-LS	SQI-LM	SQI-NLT	SQI-NLS	SQI-NLM
SQI-LT	1					
SQI-LS	0.559 ^{**}	1				
SQI-LM	0.487 ^{**}	0.529 ^{**}	1			
SQI-NLT	0.047	0.558 ^{**}	0.241	1		
SQI-NLS	0.051	0.542 ^{**}	0.205	0.970 ^{**}	1	
SQI-NLM	0.038	0.360	0.368 [*]	0.460 [*]	0.521 ^{**}	1

注: *, 在 0.05 级别相关性显著。**, 在 0.01 级别相关性显著。SQI-LT 代表线性总数据集; SQI-LS 代表线性敏感数据集; SQI-LS 代表线性最小数据集; SQI-NLT 代表非线性总数据集; SQI-NLS 代表非线性敏感数据集; SQI-NLM 代表非线性最小数据集。

2.4 土壤障碍因素

为了确定不同研究地的限制性土壤因子,需计算各土壤指标的障碍程度。结果表明,处于10%~20%中度障碍水平的土壤指标包括全氮、全碳、有机碳、速效钾、土壤含水量、饱和导水率和蔗糖酶活性,其障碍程度排序为:有机碳>全碳>速效钾>土壤含水量>蔗糖酶活性>全氮>饱和导水率(图3)。不同林分密度下,杨树人工林的障碍因子基本相同。 Y_5 的障碍因子是有机碳(14%)、全碳(11%)、全氮(11%)、速效钾(11%)和土壤含水量(10%)。 Y_4 的障碍因子是有机碳(15%)、全碳(13%)、土壤含水量(13%)以及速效钾(12%)。 Y_3 的障碍因子主要是饱和导水率(13%)、有机碳(11%)和土壤含水量(10%)。 Y_2 和 Y_1 的土壤障碍因子分别是有机碳(12%)和蔗糖酶活性(11%)。综合来看,在不同林分密度内土壤有机碳含量对土壤质量的障碍程度占主导地位。随林分密度下降,土壤全碳、全氮、土壤含水量和速效钾的障碍程度逐渐增大,蔗糖酶活性的障碍程度逐渐下降。

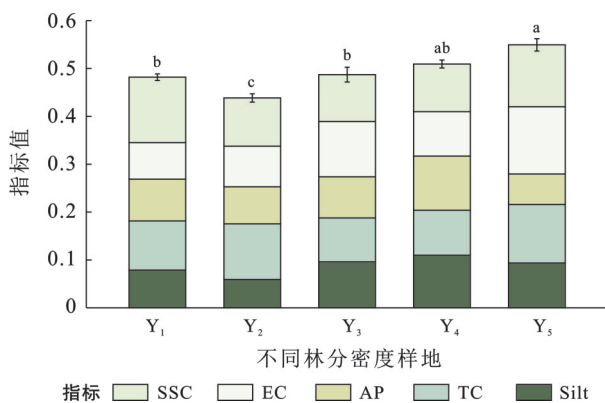


图2 不同密度人工林地土壤质量指数

Fig.2 Soil quality index of different density plantations

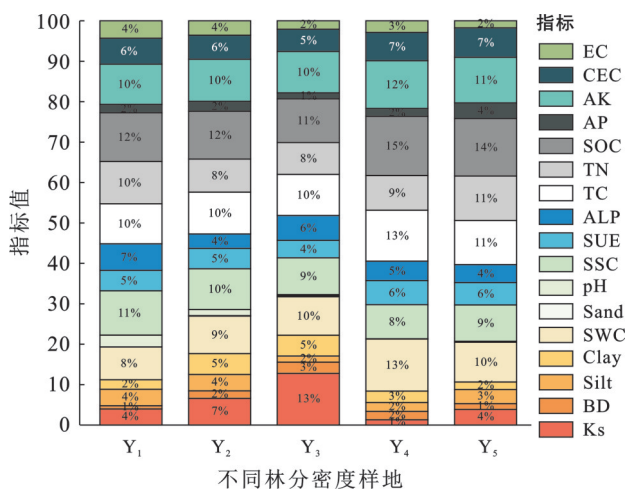


图3 不同密度人工林地土壤障碍度分析

Fig.3 Analysis of soil barrier degree of different density plantations

3 讨论

3.1 华北平原杨树土壤质量评价

评价指标体系是土壤质量评价的关键,影响评价结果的客观性和准确性。有研究表明,指标过多会模糊指标间的差异性,过少则会降低对质量变化的敏感性^[21]。最小数据集(MDS)因成本低和准确性高,是应用最广泛的评价方法。本研究从17个土壤指标构成的总数据集(TDS)中筛选出5个关键指标构建MDS,这些指标能够全面反映土壤质量的变化特征。在指标评分方法的选择上,学界存在不同观点。Yu Pujia等^[9]研究表明非线性评分法比线性评分法更接近实际情况,但其他研究^[18]证实两种方法在土壤质量指数(SQI)评价中均具有良好适用性。本研究发现,在华北平原杨树人工林地的应用场景中,线性评分法计算的SQI之间具有更强的相关性,与Yu Pujia等^[9]的研究结果不一致,可能是由于应用场景不同所致。

本研究采用SQI-LM方法进行了土壤质量评价。结果表明, Y_1 — Y_5 (1 111~416株/hm²)的SQI值差异显著($p < 0.05$),其中 Y_5 的SQI值显著高于其他密度,可能因为 Y_5 的密度较低,提高林内透光率,减少林冠截留,从而改善了林下土壤的水分和养分循环^[22]。此外,较低的林分密度有利于凋落物的分解和腐殖质的形成,促进土壤养分的积累^[22]。密度过高可能会加剧树木间的竞争,限制根系在土壤中的分布。密度较低减少树木间的竞争,促进林下植被的物种多样性,改善土壤的通气透水性,从而提升了土壤质量^[23]。本研究认为, Y_5 (416株/hm²)土壤质量最佳,同时是杨树人工林最适宜的栽植密度,本研究与杨豆等^[24]认为400株/hm²的杨树人工林能够提高土壤养分的研究结果一致。

土壤酶活性能够快速反应土壤环境的变化,但其活性易受外界因素影响。人工林密度的变化会改变土壤环境,可能会导致酶活性变化。本研究发现,随着杨树人工林密度降低,土壤脲酶活性呈现先升后降的变化趋势,在 Y_4 时达到最高值,这与刘慧敏等^[25]研究结果一致。这表明林分密度过高或过低均会对土壤微生物群落产生负面影响,适宜的林分密度提高土壤温湿度,能够加快凋落物的分解速率,有机质含量增加,从而增强酶活性。适宜密度下土壤微生物群落会更加活跃,微生物通过分解有机物质释放养分,促进土壤团粒结构的形成,提高了土壤的养分含量和保水保肥能力^[26]。综上所述,选择适宜

的造林密度对于维护土壤质量和森林生态系统的功能具有重要意义。

3.2 土壤障碍度分析

本研究发现有有机碳含量和土壤含水量是各密度杨树人工林主要的障碍因子。尽管各林分密度的障碍因子存在个体差异,但整体趋势一致,表明土壤作为复杂生态系统,受多种指标因素共同影响^[6]。杨树人工林地普遍存在肥力低下问题,主要表现为养分限制型障碍,并伴有干旱胁迫风险。

有机碳是各密度人工林的障碍因子,出现这一现象可能源于两方面原因:一方面是因为研究区土壤以沙壤土为主,通常砂粒含量较高,土壤质地疏松,导致土壤保水保肥能力较弱。林地土壤有机碳含量低是其成为障碍因子的原因之一。研究发现林分密度过高或过低都会影响杨树人工林的固碳能力^[27]。同时,抑制林下植被生长,降低植物多样性,减少枯落物总量,从而导致土壤碳输入不足。杨树作为早期速生树种,有机碳在初期的消耗多于前期积累,而且4 a的杨树处于快速生长阶段,其根系扩展增强了吸收有机质矿化产生的养分^[28],造成土壤碳输出过快,导致土壤有机碳含量下降^[29]。另一方面是因为杨树人工林在种植时,为追求经济效益而大面积采用单一树种连作的种植方式。随着连作经营年限和代数的增加,土壤大量养分被消耗或者随林木采伐而转移,因此土壤有机碳等养分缺乏是人工林连作地力的主要表现^[30]。而且,长期连作会导致土壤养分失衡,改变土壤微生物群落结构、抑制土壤微生物活性、抑制土壤呼吸速率和凋落物分解速率^[31],影响有机质分解转化过程^[32],降低土壤有机质稳定性,最终削弱了土壤养分供应能力。土壤有机碳含量低可能会导致土壤团聚体稳定性下降^[33]、土壤养分循环受阻^[34]、微生物多样性下降和抑制酶活性等^[13]一系列问题,从土壤物理结构到微生物活性,最终导致土壤生产力和地力衰退。

除有机碳障碍外, Y_3 和 Y_4 林地还存在土壤水分限制型障碍。这主要与研究区土壤砂粒含量高,质地疏松导致的保水能力不足有关,加之杨树叶片蒸腾作用强烈,根系发达,大量吸收土壤水分^[35],进一步加剧了土壤水分流失和障碍程度。

4 结论

研究表明,随着林分密度的增加,杨树人工林土壤质量呈显著下降趋势,其主要影响因子包括土壤全碳、蔗糖酶活性、电导率、粉粒和速效磷。主成分

分析结果显示,最小数据集可解释总被测土壤指标的77.3%,且线性评分法获得的SQI值具有较大变化范围,证实了线性最小数据集法(SQI-LM)在评价华北平原人工林土壤质量中的可靠性。研究结果表明,416株/hm²密度的杨树人工林土壤质量显著优于其他密度,而过高的栽植密度会导致土壤质量下降。华北平原各密度杨树人工林普遍存在土壤养分和水分限制型障碍,其中有机碳是最主要的限制因子。因此,该地区应该制定科学的施肥灌溉管理措施,提升土壤保水、保肥能力,同时在人工林生产实践中确定适宜的造林密度,以实现土壤可持续利用。

参考文献(References)

- [1] Doran J W, Parkin T B. Defining soil quality for a sustainable environment [M]. New York City: 1994: 1-21.
- [2] 赵其国,孙波,张桃林.土壤质量与持续环境: I.土壤质量的定义及评价方法[J].土壤,1997,29(3):113-120. Zhao Qiguo, Sun Bo, Zhang Taolin. Soil quality and sustainable environment: I. Definition and evaluation method of soil quality [J]. Soils, 1997, 29(3): 113-120.
- [3] Askari M S, Holden N M. Indices for quantitative evaluation of soil quality under grassland management [J]. Geoderma, 2014, 230: 131-142.
- [4] Yu Pujia, Liu Shiwei, Zhang Liang, et al. Selecting the minimum data set and quantitative soil quality indexing of alkaline soils under different land uses in northeastern China [J]. Science of The Total Environment, 2018, 616: 564-571.
- [5] Deng Yanlin, Wang Zhongcheng, Lu Sheng, et al. Soil quality assessment via the factor analysis of karst rocky desertification areas in Hunan, China [J]. Soil Use and Management, 2022, 38(1): 248-261.
- [6] 张俊华,黄华雨,丁启东,等.河套平原盐碱化耕地土壤质量评价与障碍因素诊断[J].环境科学,2025,50(1): 1-17. Zhang Junhua, Huang Huayu, Ding Qidong, et al. Soil quality evaluation and obstacle factor diagnosis of salinized cultivated land in the Hetao Plain [J]. Environmental Science, 2025, 50(1): 1-17.
- [7] 江娜,史东梅,曾小英,等.土壤侵蚀对紫色土坡耕地耕层障碍因素的影响[J].土壤学报,2022,59(1):105-117. Jiang Na, Shi Dongmei, Zeng Xiaoying, et al. Influence of soil erosion on the obstacle factors of cultivated layer in purple sloping farmland [J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(1): 105-117.
- [8] 国家林业局森林资源管理司.中国森林资源第七次清查结果及其分析[J].林业经济,2010,32(2):66-72. Department of Forest Resources Management, SFA.

- China's forest resources status and dynamic change: Based on analysis of the seventh national forest resource inventory results [J]. *Forestry Economics*, 2010, 32(2): 66-72.
- [9] Yu Pujia, Han Dongliang, Liu Shiwei, et al. Soil quality assessment under different land uses in an alpine grassland [J]. *Catena*, 2018, 171: 280-287.
- [10] Cambardella C A, Moorman T B, Andrews S S, et al. Watershed-scale assessment of soil quality in the loess hills of southwest Iowa [J]. *Soil and Tillage Research*, 2004, 78(2): 237-247.
- [11] 喻阳华, 王璐, 钟欣平, 等. 贵州喀斯特山区不同海拔花椒人工林土壤质量评价[J]. *生态学报*, 2018, 38(21): 7850-7858.
Yu Yanghua, Wang Lu, Zhong Xinping, et al. Evaluation of soil quality of chinese prickly ash artificial orchard at different altitudes in Guizhou karst mountainous area [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(21): 7850-7858.
- [12] 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 Keyi, Yang Jia, Jiang Shuna, 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.
- [13] 薛立, 邝立刚, 陈红跃, 等. 不同林分土壤养分、微生物与酶活性的研究[J]. *土壤学报*, 2003, 40(2): 280-285.
Xue Li, Kuang Ligang, Chen Hongyue, et al. Soil nutrients, microorganisms and enzyme activities of different stands [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(2): 280-285.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
Bao Shidan. *Soil and agricultural chemistry analysis* [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [15] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
Guan Songyin. *Soil enzyme and its research method* [M]. Beijing: Agriculture Press, 1986.
- [16] Zhang Zhiyong, Ai Ning, Liu Guangquan, et al. Soil quality evaluation of various microtopography types at different restoration modes in the loess area of northern Shaanxi [J]. *Catena*, 2021, 207: 105633.
- [17] Raiesi F. A minimum data set and soil quality index to quantify the effect of land use conversion on soil quality and degradation in native rangelands of upland arid and semiarid regions [J]. *Ecological Indicators*, 2017, 75: 307-320.
- [18] Zhang Chao, Xue Sha, Liu Guobin, et al. A comparison of soil qualities of different revegetation types in the Loess Plateau, China [J]. *Plant and Soil*, 2011, 347(1): 163-178.
- [19] Andrews S S, Karlen Douglas, Cambardella C A, et al. The soil management assessment framework: A quantitative soil quality evaluation method [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68.
- [20] Cui Xufeng, Cai Ting, Deng Wei, et al. Indicators for evaluating high-quality agricultural development: Empirical study from Yangtze River economic belt, China [J]. *Social Indicators Research*, 2022, 164(3): 1101-1127.
- [21] 田英, 许喆, 王娅丽, 等. 宁夏银川平原沙化土地不同人工林土壤质量评价[J]. *生态学报*, 2023, 43(4): 1515-1525.
Tian Ying, Xu Zhe, Wang Yali, et al. Soil quality evaluation for different forest plantation of sandy land in Yinchuan Plain, Ningxia [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(4): 1515-1525.
- [22] Qiu Xincui, Peng Daoli, Wang Haibin, et al. Minimum data set for evaluation of stand density effects on soil quality in *Larix principis-rupprechtii* plantations in north China [J]. *Ecological Indicators*, 2019, 103: 236-247.
- [23] 舒韦维, 卢立华, 李华, 等. 林分密度对杉木人工林林下植被和土壤性质的影响[J]. *生态学报*, 2021, 41(11): 4521-4530.
Shu Weiwei, Lu Lihua, Li Hua, et al. Effects of stand density on understory vegetation and soil properties of *Cunninghamia lanceolata* plantation [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(11): 4521-4530.
- [24] 杨豆, 刘超华, 李凤巧, 等. 苏北平原2个密度杨树人工林土壤团聚体及固碳差异[J]. *林业科学*, 2024, 60(10): 21-28.
Yang Dou, Liu Chaohua, Li Fengqiao, et al. Soil aggregates and carbon sequestration differences between two densities of poplar plantation forests in the north Jiangsu Plain area [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2024, 60(10): 21-28.
- [25] 刘慧敏, 韩海荣, 程小琴, 等. 不同密度调控强度对华北落叶松人工林土壤质量的影响[J]. *北京林业大学学报*, 2021, 43(6): 50-59.
Liu Huimin, Han Hairong, Cheng Xiaoqin, et al. Effects of different density regulation intensities on soil quality in *Larix principis-rupprechtii* plantation [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2021, 43(6): 50-59.
- [26] 丁凯, 张毓婷, 张俊红, 等. 不同密度杉木林对林下植被和土壤微生物群落结构的影响[J]. *植物生态学报*, 2021, 45(1): 62-73.

- Ding Kai, Zhang Yuting, Zhang Junhong, et al. Effects of chinese fir plantations with different densities on understory vegetation and soil microbial community structure [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2021, 45(1):62-73.
- [27] 刘钰,张艳华,方升佐.株行距配置和无性系对杨树人工林碳储量的影响[J].森林与环境学报,2024,44(3):242-249.
- Liu Yu, Zhang Yanhua, Fang Shengzuo. Effects of planting spacing configurations and clones on carbon storage in poplar plantations [J]. Journal of Forest and Environment, 2024,44(3):242-249.
- [28] 陈莉莎,张金池,陆茜,等.杨树多代连作对土壤养分特征和生物活性的影响[J].南京林业大学学报(自然科学版),2014,38(5):85-90.
- Chen Lisha, Zhang Jinchi, Lu Qian, et al. Effects of continuous planting of poplars on soil biological activity and nutrients [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2014,38(5):85-90.
- [29] 王心怡,周聪,冯文瀚,等.不同林龄杉木人工林土壤团聚体及其有机碳变化特征[J].水土保持学报,2019,33(5):126-131.
- Wang Xinyi, Zhou Cong, Feng Wenhan, et al. Changes of soil aggregates and its organic carbon in chinese fir plantations with different forest ages [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(5): 126-131.
- [30] 许婷婷,李红丽,王峰,等. I-107杨树连作对土壤有机碳和全氮的影响[J].水土保持学报,2014,28(5):182-186.
- Xu Tingting, Li Hongli, Wang Feng, et al. Effect of continuous cropping of I-107 poplar plantation on soil organic carbon and total nitrogen [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014,28(5):182-186.
- [31] 梁李欣.提质经营措施对杉木和马尾松人工林固碳增汇的影响[D].湖南长沙:中南林业科技大学,2023.
- Liang Lixin. Effects of quality improvement management measures on carbon sequestration in chinese fir and Masson pine plantations [D]. Changsha, Hunan: Central South University of Forestry & Technology, 2023.
- [32] 邱璇,赵建宁,李文亚,等.不同利用方式对小针茅荒漠草原土壤活性有机碳的影响[J].草业学报,2016,25(9):1-9.
- Qiu Xuan, Zhao Jianning, Li Wenya, et al. Effects of different land-use types on soil active organic carbon in the *Stipa klemenaii* desert steppe of Inner Mongolia [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2016,25(9):1-9.
- [33] 刘满强,胡锋,陈小云.土壤有机碳稳定机制研究进展[J].生态学报,2007,27(6):2642-2650.
- Liu Manqiang, Hu Feng, Chen Xiaoyun. A review on mechanisms of soil organic carbon stabilization [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007,27(6):2642-2650.
- [34] 王清奎,汪思龙,冯宗炜,等.土壤活性有机质及其与土壤质量的关系[J].生态学报,2005,25(3):513-519.
- Wang Qingkui, Wang Silong, Feng Zongwei, et al. Active soil organic matter and its relationship with soil quality [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005,25(3):513-519.
- [35] 莫康乐,陈立欣,周洁,等.永定河沿河沙地杨树人工林蒸腾耗水特征及其环境响应[J].生态学报,2014,34(20):5812-5822.
- Mo Kangle, Chen Lixin, Zhou Jie, et al. Transpiration responses of a poplar plantation to the environmental conditions on a floodplain in northern China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014,34(20):5812-5822.