DOI: 10.20103/j.stxb.202409202283

鲁雅雯,石正阳,高佳文,邹星晨,贺康宁.基于最小数据集的祁连山东部不同林分密度下白桦天然林土壤质量评价.生态学报,2025,45(15):

Lu Y W, She Z Y, Gao J W, Zhou X C, He K N. Evaluation of soil quality of natural *Betula platyphylla* forests under different stand densities in the eastern Qilian Mountains based on the minimum data set. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(15): - .

基于最小数据集的祁连山东部不同林分密度下白桦天 然林土壤质量评价

鲁雅雯^{1,2},石正阳^{1,2},高佳文^{1,2},邹星晨^{1,2},贺康宁^{1,2,*}

1 北京林业大学水土保持学院,北京 100083

2 北京林业大学林业生态工程教育部工程研究中心,北京 100083

摘要:白桦作为祁连山东部地区的关键先锋树种,正面临林分植被退化的严峻威胁。准确评估该地区白桦天然林土壤质量对于 维持祁连山生态平衡及推动区域可持续发展具有重要意义。基于此,本研究以不同林分密度(*D*₁:0—200 株/hm²;*D*₂:200—400 株/hm²;*D*₃:400—600 株/hm²;*D*₄:600—900 株/hm²;*D*₅:900—1500 株/hm²;*D*₆:1500—2100 株/hm²) 白桦天然林林下土壤作为 研究对象,通过测定其理化性质,分析不同林分密度白桦林下土壤理化性质差异,通过构建最小数据集评价林下土壤质量,结合 植物-土壤耦合与生态系统多功能性,深入探究了林分密度对祁连山东部白桦天然林土壤质量的影响机制。结果表明:(1)不同 林分密度下,土壤质量含水量、有机碳、全磷、全氮含量存在显著差异(*P*<0.05)。(2)基于最小数据集的构建发现,全氮、孔隙 度、碱解氮、粉粒、含水量、砂粒以及速效磷是影响白桦天然林下土壤质量的关键因素。(3) 白桦林不同林分密度土壤质量指数 介于 0.30—0.62,土壤质量综合排名为 *D*₄>*D*₂>*D*₁>*D*₆>*D*₅。(4) 土壤质量指数与物种丰富度和 Shannon-Wiener 多样性呈显 著正相关(*P*<0.01),白桦林下植物—土壤耦合度平均为 0.60,属于弱协调。(5)随着林分密度的增加,生态系统多功能性指数 逐渐降低,与土壤质量指数的变化趋势一致,验证了构建的最小数据集的科学性和实用性。综上,600—900 株/hm²的林分密度 下,白桦天然林下土壤质量最佳。本研究不仅为白桦天然林生态保护和恢复工作提供了有效的土壤质量评价模型及密度参考,也为祁连山东部的生态保护和恢复工作提供了理论支撑。

关键词: 白桦天然林; 土壤健康; 河湟谷地; 生态系统多功能性; 最小数据集

Evaluation of soil quality of natural *Betula platyphylla* forests under different stand densities in the eastern Qilian Mountains based on the minimum data set

LU Yawen^{1,2}, SHE Zhengyang^{1,2}, GAO Jiawen^{1,2}, ZHOU Xingchen^{1,2}, HE Kangning^{1,2,*}

1 Soil and Water Conservation College, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 Engineering Research Center of Forestry Ecological Engineering, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: *Betula platyphylla*, as a key pioneer species in the eastern Qilian Mountains, is facing severe threats from forest vegetation degradation. Accurately assessing the soil quality of natural *Betula platyphylla* forests in this region is crucial for maintaining ecological balance in the Qilian Mountains and promoting sustainable development in the area. Based on this, the study focused on the understory soil of natural *Betula platyphylla* forests under different stand densities (D_1 : 0–200 trees/hm²; D_2 : 200–400 trees/hm²; D_3 : 400–600 trees/hm²; D_4 : 600–900 trees/hm²; D_5 : 900–1500 trees/hm²; D_6 : 1500–2100 trees/hm²) as the research object. To investigate how stand density influences soil quality, we measured soil physicochemical properties in plots and analyzed soil quality differences across these stand densities. A minimum data

收稿日期:2024-09-20; 网络出版日期:2025-00-00

基金项目:青海省科技厅重点研发与转化项目(2022-SF-160)

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: hkn@ bjfu.edu.cn

set (MDS) was then developed to evaluate soil quality. By integrating plant-soil coupling and ecosystem multifunctionality, we explored the impact of stand density on soil quality and the mechanisms behind it. The results indicated: (1) Soil water content, organic carbon, total phosphorus, and total nitrogen content significantly differed among stand densities (P < 0.05). (2) Based on the MDS, total nitrogen, total porosity, alkaline hydrolysis of nitrogen, silt, soil water content, sand, and available phosphorus were key factors influencing soil quality. (3) The soil quality index ranged from 0.30 to 0.62, ranking of soil quality was $D_4 > D_2 > D_1 > D_3 > D_6 > D_5$. (4) The soil quality index was positively and significantly correlated (P < 0.01) with species richness and the Shannon-Wiener diversity index. The average plant-soil coupling degree was 0.60, indicating weak coordination between the two. (5) As stand density increased, the ecosystem multifunctionality index decreased, following a similar trend as the soil quality index. This pattern supported the validity of the MDS model. In conclusion, the best soil quality was found under natural *Betula platyphylla* forests with a stand density of 600—900 trees/ hm². This study provides an effective soil quality evaluation model and density reference for the ecological protection and restoration of natural *Betula platyphylla* forests by constructing a Minimum Data Set (MDS).

Key Words: natural *Betula platyphylla* forest; soil health; Huangshui Valley; ecosystem multifunctionality index; the minimum data set

土壤作为陆地生态系统的基础性要素,对是维系森林植被健康至关重要^[1]。森林土壤质量作为衡量土 壤在支撑森林生态系统生物生产力、促进水文循环以及林木生长与分布等方综合性能与潜力的指标^[2-4],其 准确评价对于森林的可持续性管理具有深远的理论和实践意义。

土壤质量是物理、化学和生物等多种土壤因子共同作用的结果,因此,综合分析这些指标是评价土壤质量 的关键。近年来,国内外学者在土壤质量评价领域开展了广泛研究,形成了多种理论框架和评价方法^[5-8]。 其中,基于最小数据集(Minimum data set,MDS)构建的土壤质量指数(Soil quality index,SQI)因其高效且易操 作的特点,已成为主流评价方法之一^[8]。然而,由于植被与土壤之间存在复杂的反馈机制^[9],且二者对林分 密度均表现出显著响应^[10-11],使单一指标难以全面揭示生态系统中的多重因素互作。因此,将植被特征与土 壤质量进行系统耦合分析,成为研究不同林分密度影响的重要途径。在此背景下,生态系统多功能性 (Ecosystem Multifunctionality, EMF)能够更好地表征两者之间的关系^[12-13],有助于深入理解不同林分类型下 的生态系统功能,更全面地反映土壤质量指数构建的生态学意义。

祁连山作为我国西北部重要的生态屏障及生物多样性保护区^[14-15],其东部的宝库林场区以白桦为优势 树种,在水源涵养和生态功能维持方面发挥着不可替代的作用^[16]。然而,20世纪80年代以来,尽管大通县通 过实施天然林保护与退耕还林工程,使得森林面积稳步增长,但白桦天然次生林地的植被结构优化未达预期, 呈现出空间分布不合理和结构性失衡等问题。这不仅阻碍了生态系统的正向演替进程,削弱了森林的自我更 新能力,还导致植被退化现象日益显著,对生态环境构成了潜在威胁^[17]。林地退化直接导致生态系统功能显 著下降^[18],特别是在水土保持^[19]、生物多样性维持^[20-21]、碳储存^[22]和养分循环^[23-24]等方面,严重制约了区 域生态系统的整体稳定性和健康水平,对白桦林的可持续发展构成了严峻挑战。

鉴于白桦林在区域生态系统中占据重要地位,以及目前对白桦天然林下土壤质量的综合评价研究的不足,构建基于最小数据集(MDS)的土壤质量评价模型,深入探讨林分密度对白桦天然林土壤质量的影响,分析土壤因子与植物多样性之间的耦合关系,以及土壤质量与生态系统多功能性之间的相互作用,具有重要的理论价值和实践意义。这不仅有助于优化林地管理策略、恢复植被结构、提高生态系统服务功能,还为祁连山东部的生态保护和恢复工作提供了理论支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于祁连山东部地区河湟谷地的宝库林场(37°60′—37°12′N,101°33′—101°36′E),平均海拔

2854.70 m。该区处于黄土高原与青藏高原之间的过渡带,属于典型的高原大陆性气候,年平均气温 1.24 ℃, 年平均降水量 505.60 mm,气温和降水在垂直方向上变化显著,太阳辐射强烈,昼夜温差大。研究区内物种资 源丰富,乔木以白桦(Betula platyphylla)为主,灌木主要有峨嵋蔷薇(Rosa omeiensis)、西北栒子(Cotoneaster zabelii)、小檗(Berberis amurensis)等,草本主要有黑麦草(Lolium perenne)、野草莓(Fragaria vesca)等;土壤类型 主要是山地草原栗钙土、山地森林灰褐土^[21]。

1.2 样地设置与调查

2023 年 5—9 月份在青海省西宁市大通县宝库林场区内开展野外调查,调查发现林场内白桦天然林的林 龄为 44—60 年,基于林场的林地小班资料,采用典型抽样法选取立地条件相近且林相整齐的白桦天然林样地 36 块,将其划分为 6 个密度等级 *D*₁(0—200 株/hm²)、*D*₂(200—400 株/hm²)、*D*₃(400—600 株/hm²)、*D*₄ (600—900 株/hm²)、*D*₅(900—1500 株/hm²)、*D*₆(1500—2100 株/hm²),每个密度等级设置 6 块样地,样地面 积设置为 24m×24m(其中边距 2m 宽为缓冲区,以消除边缘效应)。对样方内乔木进行每木检尺,并记录样地 的海拔、坡度、坡向等基本信息;采用五点取样法,在样地内设置 5 m×5 m 的灌木样方以及 1m×1m 的草本样 方进行调查,分种统计植物数量。在每个样方内随机挖取土壤剖面,对表层 0—20cm 的土层进行样品采集, 混合均匀后带回实验室进行土壤理化性质的测定分析。样地基本信息见表 1。

等级编号	林分密度	基本特征		变异系数
Grade number	Density/(株/hm ²)	Basic characteristics	Mean±Standard deviation	Coefficients/%
D ₁	0—200	平均胸径 Average DBH/cm	25.36±5.86	23.09
		平均树高 Average height/m	13.42 ± 4.80	35.73
		海拔 Altitude/m	2886.52±75.46	2.61
		坡度 Slope/(°)	26.78±5.02	18.74
		郁闭度 Canopy density	0.41±0.13	30.39
D_2	200—400	平均胸径 Average DBH/cm	25.33±4.16	16.41
		平均树高 Average height/m	16.00 ± 2.29	14.30
		海拔 Altitude/m	2821.88±49.66	1.76
		坡度 Slope/(°)	25.80±4.29	16.63
		郁闭度 Canopy density	0.54 ± 0.05	9.74
D_3	400—600	平均胸径 Average DBH/cm	25.10±3.20	12.76
		平均树高 Average height/m	15.30 ± 1.34	8.77
		海拔 Altitude/m	2820.14±31.07	1.10
		坡度 Slope/(°)	24.13±2.75	11.39
		郁闭度 Canopy density	0.52 ± 0.03	6.20
D_4	600—900	平均胸径 Average DBH/cm	16.84±3.51	20.83
		平均树高 Average height/m	14.20 ± 3.14	22.12
		海拔 Altitude/m	2829.36±29.33	1.04
		坡度 Slope/(°)	25.22±3.42	13.56
		郁闭度 Canopy density	0.51 ± 0.07	14.45
D_5	900—1500	平均胸径 Average DBH/cm	13.09 ± 3.92	29.97
		平均树高 Average height/m	10.99 ± 4.09	37.20
		海拔 Altitude/m	2927.72±57.06	1.95
		坡度 Slope/(°)	26.75±9.91	37.05
		郁闭度 Canopy density	0.59 ± 0.15	24.91
D_6	1500—2100	平均胸径 Average DBH/cm	10.94 ± 3.25	29.68
		平均树高 Average height/m	10.88 ± 4.46	41.03
		海拔 Altitude/m	2923.51±88.48	3.03
		坡度 Slope/(°)	24.83 ± 8.80	35.42
		郁闭度 Canopy density	0.56 ± 0.07	12.94

表1 研究样地基本概况

.....

Deate construction of the selected

1.3 土壤理化指标的测定

土壤容重(SBD)、含水量(SWC)、孔隙度(P)采用环刀法^[25];土壤 pH 值采用电位法;土壤有机碳(SOC) 采用重铬酸钾释热法测定;土壤全磷(TP)采用酸溶法测定;土壤全氮(TN)采用凯氏定氮法测定;土壤速效磷 (AP)采用比色法测定;土壤速效钾(AK)采用火焰光度计法测定;土壤碱解氮(AN)采用酸水解法测定^[26];土 壤机械组成利用激光粒度分析仪测定,粒度的划分方法采用国际制的土壤颗粒分级标准,将土壤颗粒组分划 分为砂粒(Sand,2.00—0.02mm)、粉粒(Silt,0.02—0.002mm)、粘粒(Clay,<0.002mm)^[27-28]。

1.4 数据处理方法

1.4.1 最小数据集的建立

依据研究区特性及实测结果,将 13 个土壤理化因子依次定义为 S 型函数(孔隙度 P、有机碳 SOC、全磷 TP、全氮 TN、速效磷 AP、速效钾 AK、碱解氮 AN、粉粒 Silt、粘粒 Clay),反 S 型函数(容重 SBD、砂粒 Sand、含水量 SWC、pH 值),建立隶属函数(表 2)^[28-29]。采用 PCA 法,将特征值≥1 的主成分中的载荷≥0.50 的指标分 为一组;对于可能进入不同组的指标,选择进入相关性较低的一组。各组内选取最高 Norm 值 10%范围内的指标,通过相关性分析最终确定进入 MDS 的指标。若高度相关(*r*>0.50),则 Norm 值最高的指标进入 MDS; 若相关性低(*r*<0.50),则全部进入 MDS^[30-31]。

Norm 值计算公式如下:

$$N_{ik} = \sqrt{\sum_{1}^{k} (\mu_{ik}^2 \times \lambda_k)}$$
(1)

式中: N_{ik} 为第 i 个变量在特征值 ≥ 1 的前 k 个主成分上的综合载荷; μ_{ik} 为第 i 个变量在特征值 ≥ 1 的第 k 个主成分上的载荷; λ_k 为第 k 个主成分的特征值。

1.4.2 土壤质量指数计算

将土壤各指标的隶属度值与无量纲标准化权重进行加权求和,计算土壤质量指数(SQI)^[32]。

$$SQI = \sum_{i=1}^{n} W_i F_i$$
(2)

式中:n表示土壤指标数量,W_i表示第*i*个指标的权重值,F_i表示第*i*个指标的隶属值。SQI值越大代表土壤质量越好。

表 2 土壤质量评价指标隶属函数

Table 2 Membership function of soil quality indexes						
指标	隶属函数类型	计算公式				
Indicators	Affiliate function type	Calculate formula				
总孔隙度 P/Total porosity/%	S型隶属函数	$(1, x \ge b)$				
土壤有机碳 SOC/Soil organic carbon/(g/kg)		$\mu(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{a}, a < x < b \end{cases}$				
土壤全磷 TP/Soil total phosphorus/(g/kg)		b-a, and b				
土壤全氮 TN/Soil total nitrogen/(g/kg)		$(0,x \leq a)$				
土壤速效磷 AP/Soil available phosphorus/(mg/kg)						
土壤速效钾 AK/Soil available potassium/(mg/kg)						
土壤嶼胜氮 AN/Soil alkaline hydrolysis of nitrogen/(mg/kg)						
上禄百八里 SwC/ Sont water content/ % 粉約 Sit/%						
粘粒 Clay/%						
	「 a 型 書 居 乙 粉					
土壤容重 SBD/Soil bulk density(g/cm ³)	反S型求禹凶奴	$1, x \leq a$				
砂粒 Sand/%		$\mu(x) = \begin{cases} \frac{x-b}{x-b}, a < x < b \end{cases}$				
рп		$\begin{bmatrix} a-b\\0 \\ x > b \end{bmatrix}$				
土壤速效磷 AP/Soil available phosphorus/(mg/kg) 土壤速效钾 AK/Soil available potassium/(mg/kg) 土壤碱解氮 AN/Soil alkaline hydrolysis of nitrogen/(mg/kg) 土壤含水量 SWC/Soil water content/% 粉粒 Silt/% 粘粒 Clay/% 土壤容重 SBD/Soil bulk density(g/cm ³) 砂粒 Sand/% pH	反S型隶属函数	$\mu(x) = \begin{cases} 1, x \leq a \\ \frac{x-b}{a-b}, a < x < b \\ 0, x \geq b \end{cases}$				

P:总孔隙度 Total porosity;SOC:土壤有机碳 Soil organic carbon;TP:土壤全磷 Soil total phosphorus;TN:土壤全氮 Soil total nitrogen;AP:土壤速 效磷 Soil available phosphorus;AK:土壤速效钾 Soil available potassium;AN:土壤碱解氮 Soil alkaline hydrolysis of nitrogen;SWC:土壤含水量 Soil water content;Silt:粉粒;Clay:粘粒;SBD:土壤容重 Soil bulk density;Sand:砂粒;pH:土壤 pH 值;µ(x)代表隶属函数,x 为评价指标实测值,a、b 表 示指标临界值的下限和上限,本研究分别取实测的最小值和最大值

1.4.3 土壤因子与植物群落多样性耦合

植物群落物种多样性的计算采用三个指标,分别为:物种丰富度指数 S(Species richness index)、Shannon-Wiener 多样性指数 H(Shannon-Wiener index)及均匀度指数 J(Pielou—evenness index $)^{[12]}$ 。

根据灰色关联度模型计算不同林分密度下植物与土壤的耦合关系和协调程度。对每个样点土壤指标 *r* 和植物群落多样性指标 *p* 标准化后,再计算两者之间的关联系数ξ_n和关联度γ_n,从而构建关联度耦合矩 阵^[33-35]。计算公式如下:

$$\xi_{rp}(i) = \frac{\min_{r} \min_{p} |x_{r}^{L}(i) - x_{p}^{L}(i)| + \rho \max_{r} \max_{p} |x_{r}^{L}(i) - x_{p}^{L}(i)|}{|x_{r}^{L}(i) - x_{p}^{L}(i)| + \rho \max_{r} \max_{p} |x_{r}^{L}(i) - x_{p}^{L}(i)|}$$
(3)

$$\gamma_{rp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \left[x_r^L(i) \, , x_p^L(i) \right] \tag{4}$$

式中: ρ 为分辨系数,取值 0.50。 γ_p 值越大代表关联性越强。

根据系统耦合模型,不同林分密度土壤与植物因子耦合程度(C)的计算公式为^[36]:

$$C = \frac{1}{mn} \times \sum_{r=1}^{m} \sum_{p=1}^{n} (\xi_{rp}(i))$$
(5)

式中: $1 \le r \le m, 1 \le p \le n_{\circ}$ 协调程度划分为 $0 \le C < 0.40 \setminus 0.40 \le C < 0.50 \setminus 0.50 \le C < 0.60 \setminus 0.60 \le C < 0.70 \setminus 0.70 \le C < 0.80 \setminus 0.80 \le C < 0.90 \setminus 0.90 \le C < 1,$ 分别代表严重、中度、轻度不协调以及弱、中度、良、优协调。

1.4.4 生态系统多功能性指数的计算

生态系统多功能性指数 EMF(Ecosystem Multifunctionality Index)基于样地的变量指标标准化平均值^[12]得到,计算公式如下:

$$\mathrm{EMF}_{i} = \frac{1}{N} \sum_{1}^{N} f_{ij} \tag{6}$$

式中:N为样地 i 包含的所有生态系统功能的数目;f_{ij}为样地 i 第 j 种生态系统功能变量标准化后的值。 1.4.5 生态系统多功能性与土壤质量的检验

为检验土壤质量与生态系统多功能性的关系,采用决定系数(*R*²)和模型效率(*E*)评价模型的预测能力。同时,采用总相对误差(*RS*)和平均相对误差(RMA)的绝对值、均方根误差(RMSE)和皮尔逊相关系数(Pearson's *r*)验证样本分析的实测值和估测值的拟合性^[6]。

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} (M_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^{n} (M_i - \overline{M})^2}$$
(7)

$$RS = \frac{\sum M_i - \sum S_i}{\sum S_i} \times 100\%$$
(8)

$$RMA = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^{n} \frac{|M_i - S_i|}{|S_i|} \times 100\%$$
(9)

RMSE =
$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (M_i - S_i)^2}{n}}$$
 (10)

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n} (M_i - \overline{M}) (S_i - \overline{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (M_i - \overline{M})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (S_i - \overline{S})^2}}$$
(11)

http://www.ecologica.cn

式中: M_i 为样本实测值; S_i 为样本估测值;n为验证样本数; \overline{M} 为M的平均值; \overline{S} 为S的平均值。 R^2 和E越接近 1,RMSE 越接近 0,r 趋于 1 或-1,当 RS 绝对值<20%,RMA 绝对值<30%时,模型性能越好,满足精度要求。

1.5 数据处理与分析

应用 Excel 2021、SPSS 27.0 进行数据处理、统计分析,不同林分密度下土壤理化因子与植物多样性指标 采用单因素方差分析(one—way ANOVA,LSD)和 Duncan 多重比较检验、Pearson 相关分析及主成分分析,绘制图表采用 Origin 2021。

2 结果与分析

2.1 不同林分密度下土壤理化性质

单因素方差分析结果(表 3)表明,研究区土壤整体呈弱酸性,各林分密度的土壤 pH 值变化范围在 6.50 至 6.75 之间,各组之间没有显著差异(P>0.05);土壤容重在 0.77 g/cm³至 0.93 g/cm³之间变化, D_4 容重最低, D_6 容重最高,各组之间差异不显著(P>0.05);SWC 在密度 D_4 最高(0.85%),显著高于 D_5 (0.54%,P<0.05); SOC 在不同林分密度间的差异显著(P<0.05), D_2 组的 SOC 含量最高(74.99 g/kg),而 D_6 最低(48.73 g/kg,P< 0.05);TP 含量在 D_2 和 D_5 较高(均为 0.70 g/kg),显著高于 D_3 和 D_4 (均为 0.59 g/kg,P<0.05);TN 含量在 D_1 和 D_2 组较高(分别为 5.57 g/kg 和 5.74 g/kg),显著高于 D_6 (3.97 g/kg,P<0.05);所有密度的 AP 含量都较高,且 未表现出显著差异(P>0.05);AK 含量为 161.01—241.64 mg/kg, D_3 最高, D_5 最低,各密度间差异未达到显著 水平(P>0.05);AN 含量在 0.51 至 0.69 mg/kg之间, D_2 最高, D_5 和 D_6 最低,且 D_2 显著高于 D_5 和 D_6 (P<0.05), 表明林分密度 D_2 有利于 AN 的积累;各组的 Silt、Clay 和 Sand 含量之间差异不显著(P>0.05)。

Table 3 Soil physical and chemical properties of different stand densities									
指标 Indicators	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6			
pH	6.50±0.23a	6.59±0.20a	6.53±0.23a	6.75±0.45a	6.60±0.23a	6.63±0.31a			
$SBD/(g/cm^3)$	0.84±0.12a	0.92±0.16a	0.91±0.17a	0.77±0.15a	0.90±0.09a	0.93±0.12a			
SWC/%	0.72±0.18ab	$0.64 \pm 0.39 \mathrm{ab}$	$0.66 \pm 0.24 \mathrm{ab}$	0.85±0.27a	$0.54 \pm 0.10 \mathrm{b}$	$0.57 \pm 0.09 \mathrm{ab}$			
P/%	57.30 ± 6.47 ab	52.61±12.22ab	54.85±11.37ab	61.16±8.12a	$47.13{\pm}7.03{\rm b}$	$52.17 \pm 3.64 ab$			
SOC/(g/kg)	$71.20{\pm}14.38{\rm ab}$	74.99±21.32a	$58.26 \pm 19.01 \mathrm{ab}$	68.93±18.51ab	56.01±12.23ab	$48.73{\pm}14.97\mathrm{b}$			
TP/(g/kg)	$0.63 \pm 0.07 \mathrm{ab}$	$0.70 \pm 0.08 a$	$0.59{\pm}0.07{\rm b}$	$0.59{\pm}0.09{\rm b}$	0.70±0.11a	$0.61 \pm 0.09 \mathrm{ab}$			
TN/(g/kg)	$5.57 \pm 0.78 a$	5.74±1.41a	$4.89 \pm 0.61 \mathrm{ab}$	$4.95{\pm}0.95{\rm ab}$	$4.65 \pm 0.89 \mathrm{ab}$	$3.97 \pm 0.96 \mathrm{b}$			
AP/(mg/kg)	10.81±7.33a	13.39±7.58a	12.25±7.18a	17.22±10.89a	14.86±10.91a	11.70±6.98a			
AK/(mg/kg)	230.72±48.34a	$202.80{\pm}47.85{\rm ab}$	241.64±67.29a	$189.68{\pm}47.68{\rm ab}$	$161.01{\pm}36.47\mathrm{b}$	209.72±75.58ab			
AN/(mg/kg)	$640.12{\pm}50.01{\rm ab}$	691.02±66.75a	$572.36{\pm}70.26{\rm ab}$	$580.85{\pm}65.45{\rm ab}$	$523.65{\pm}59.85{\rm b}$	$511.45{\pm}62.89\mathrm{b}$			
Silt/%	59.48±2.30a	58.70±1.80a	57.27±3.13a	59.28±2.18a	58.20±2.39a	59.75±2.40a			
Clay/%	17.82±1.30ab	$17.20{\pm}0.96\mathrm{b}$	$17.28 \pm 1.08 \mathrm{ab}$	$17.25 \pm 0.91 \mathrm{ab}$	$17.01 \pm 0.81 \mathrm{b}$	18.51±1.16a			
Sand/%	22.69±3.34a	24.10±2.33a	25.45±4.01a	23.47±2.81a	24.78±3.18a	21.73±2.91a			

表 3 不同林分密度下的土壤理化性质

表中数据为平均值±标准差;同行不同小写字母代表不同林分密度间显著差异(P<0.05)

2.2 土壤质量指数的构建

由表4可知,KMO=0.61>0.5 且 sig.<0.001,说明所 有选定数据可以进行主成分分析。林分密度下的土壤 理化性质主成分分析结果表明,特征值>1 的4 个主成 -分累计方差贡献率为 80.60%,其特征值分别为 3.95、 -3.32、2.10、1.11,对应方差贡献率分别为 30.42%、 25.53%、16.14%、8.52%(表5)。证明分析选取的主成 分可以解释原始指标的大部分信息,用于不同林分密度 白桦天然林土壤质量评价的结果是可靠的。

Table 4	Inspection of KMO an	d Bartlett					
KMO 取样适切性量数 0.61							
巴特利特球形度检验	近似卡方	907.18					
Bartlett sphericity test	自由度 df	78					
	显著性 Sig.	<0.001					

表 4 KMO 和巴特利特检验

SBD、P、SWC、pH、SOC、AP、TN、AN 在 PC1 上载荷均≥0.50,其中 TN、AN 在 PC2 上载荷≥0.50,SBD、P、 SWC 在 PC3 上载荷≥0.50, AP 在 PC4 上载荷≥0.50。根据相关性分析结果(图 1)将其归入与对应主成分载 荷最大相关性较低的指标所对应的组中,SBD、P、TN 被归入第 1 组, AN 被归入第 2 组,SWC 被归入第 3 组, AP 直接归入第 4 组;同理,Clay、Sand 被归入第 3 组。综上,第 1 组包含 SBD、P、pH、SOC、TN 5 个指标;第 2 组 指标为 TP、AK、AN、Silt;第 3 组为 SWC、Clay、Sand;第 4 组指标是 AP。



图 1 不同林分密度下的土壤性质相关性分析

Fig.1 Correlation analysis of soil properties of different stand densities

SBD:土壤容重;P:总孔隙度;SWC:土壤含水量;pH:土壤 pH 值;SOC:土壤有机碳;TP:土壤全磷;AK:土壤速效钾;AP:土壤速效磷;TN:土 壤全氮;AN:土壤碱解氮;Clay:粘粒;Silt:粉粒;Sand:砂粒

按照最小数据集指标筛选原则,减少数据冗余,每组中 Norm 值在最高分值 10%范围内的指标才能进入 最小数据集(表5)。第1组中,TN 的 Norm 值最大为 1.83,P、pH、SOC 均在其 10%范围内,但 TN 与 pH、SOC 之间相关性较强(r≥0.50),因此 TN、P 进入最小数据集。第2组中,AN 的 Norm 值最大为 1.77,Si 在其 10% 范围内且相关性较弱(r<0.50),因此 AN、Silt 进入最小数据集。同理第3组中 SWC、Sand 进入最小数据集。 第4组仅有 AP,直接进入最小数据集。最终,TN、P、AN、Silt、SWC、Sand、AP 7 个指标进入 MDS。

	表 5	不同林分密度下土壤质量指标主成分分析结果
--	-----	----------------------

Table 5	Results of principal component analysis (PCA)	of soil indexes under different stand densities

指标	主成分 Principal component				Norm 值	公因子方差	分组
Indicators	PC1	PC2	PC3	PC4	Norm value	Common variance	Group
$SBD/(g/cm^3)$	-0.65	0.35	-0.54	-0.05	1.64	0.84	1
P/%	0.54	-0.41	0.63	0.03	1.71	0.85	1
SWC/%	0.62	-0.35	0.66	-0.02	1.89	0.95	3
pH	-0.74	-0.18	0.26	0.48	1.68	0.87	1
SOC/(g/kg)	0.74	0.35	-0.11	0.35	1.766	0.81	1
TP/(g/kg)	0.21	0.62	-0.20	-0.02	0.95	0.47	2
AK/(mg/kg)	0.04	0.64	0.03	-0.16	0.86	0.43	2

歩主

次仏							
指标	主成分 Principal component			Norm 值	公因子方差	分组	
Indicators	PC1	PC2	PC3	PC4	Norm value	Common variance	Group
AP/(mg/kg)	-0.56	0.01	0.14	0.75	1.39	0.89	4
TN/(g/kg)	0.73	0.54	-0.14	0.30	1.83	0.94	1
AN/(mg/kg)	0.72	0.57	-0.14	0.23	1.77	0.91	2
Clay/%	0.19	-0.57	-0.53	0.08	0.95	0.63	3
Silt/%	0.42	-0.70	-0.47	0.11	1.67	0.90	2
Sand/%	-0.39	0.73	0.54	-0.11	1.84	0.98	3
特征值 Eigenvalue	3.95	3.32	2.10	1.11			
方差贡献率 Variance contribution rate/%	30.42	25.53	16.14	8.52			
累计贡献率 Cumulative contribution rate/%	30.42	55.94	72.08	80.60			

通过主成分分析获得 MDS 中各指标的公因子方差和权重(表 6),权重大小顺序为 Silt、Sand、AN、SWC、 $P_TN_AP_{\circ}$

	40 1								
	Table 6 Commo	6 Common factor variances and weights for MDS indictors							
指标 Indicators	TN	Р	AN	Silt	SWC	Sand	AP		
公因子方差 Common factor variance	0.93	0.94	0.95	0.96	0.95	0.96	0.32		
权重 Weight	0.15	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.05		

表 6 最小数据集指标的公因子方差及其权重

2.3 林分密度对土壤质量的作用

基于 MDS 指标构建的土壤质量指数介于 0.30—0.62,平均值为 0.46。林分密度等级为 D₄(600—900 株/ hm^2)时,土壤质量指数整体最高(图2)。稀疏林地的土壤质量指数整体较高,与密集的 D_5 、 D_6 林地之间的土 壤质量指数有显著差异(P<0.05)。

2.4 土壤质量与植物群落多样性

土壤质量指数与植物多样性指标线性拟合结果 (图 3)表明, SQI 与多样性指标 S 和 H 呈显著正相关 (P<0.01), 与均匀度指数相关性不显著(P>0.05)。

灰色关联度模型计算结果(表7)表明,各土壤因子 与多样性指数的关联度整体较为接近,其平均值为 0.63—0.70。MDS 中 SWC 与 Shannon-Wiener 多样性指 数关联度最高(0.69);P 与物种丰富度指数关联度最高 (0.70); AP 与 Shannon-Wiener 多样性和均匀度指数关 联度最高(0.69;0.69);TN 与物种丰富度和 Shannon-Wiener 多样性指数关联度最高(0.70;0.70); AN、Silt、 Sand 均与 Shannon-Wiener 多样性指数关联度最高,分 别为 0.71、0.68、0.71。

不同林分密度土壤因子与植物多样性耦合协调度 整体基本处于弱协调,范围为 0.60—0.62。林分密度 D_5 、 D_6 时耦合度(0.59、0.59)低于其他密度,属于轻度不协 调;密度 D_4 时耦合度最高(0.62),属于弱协调(表 8)。





Fig.2 Effect of stand densities on soil quality 不同小写字母代表不同林分密度下的差异显著(P<0.05)



图 3 土壤质量与植物多样性的线性回归拟合



	表 7 物种多样性与土壤因子耦合矩阵
Table 7	Coupling matrix between species diversity and soil factors

指标		平均值		
Indicators	物种丰富度指数 S	Shannon-Wiener 多样性 H	均匀度指数 J	Mean
pH	0.66	0.67	0.66	0.66
$SBD/(g/cm^3)$	0.67	0.63	0.71	0.67
SWC/%	0.68	0.69	0.67	0.68
P/%	0.70	0.59	0.62	0.64
SOC/(g/kg)	0.70	0.66	0.64	0.67
TP/(g/kg)	0.68	0.71	0.65	0.68
TN/(g/kg)	0.69	0.70	0.69	0.70
AP/(mg/kg)	0.64	0.69	0.69	0.66
AK/(mg/kg)	0.61	0.60	0.69	0.64
AN/(mg/kg)	0.66	0.71	0.66	0.68
Silt/%	0.64	0.68	0.63	0.65
Clay/%	0.68	0.66	0.62	0.65
Sand/%	0.53	0.71	0.66	0.63
平均值 Mean	0.66	0.67	0.66	0.66

2.5 土壤质量与生态系统多功能性的关系

由图 4 可以看出,随着林分密度的增加,生态多功能性指数逐渐降低,并呈现极显著负相关(P<0.001)。 林分密度等级为 D_4 时,生态系统多功能指数与土壤质量指数较为接近。利用林分密度等级为 D_1 、 D_2 、 D_3 的数 据做预测模型,土壤质量与生态系统多功能性呈极显著正相关(P<0.001)(图5);D₄、D₅、D₆数据做回归模型 评估检验(图 6), *E* = 0.67, *RS* = 1.94%, RMA = 6.43%, RMSE = 0.04, Pearson's *r* = 0.87, 表明模型的预测能力较强, 能够较好的拟合数据。

	Table 8	8 Coupling coo	ordination of soil fac	tor-plant divers	ity in different st	and densities	
等级编号 Grade number	林分密度 Density/ (株/hm ²)	耦合度 Coupling coordination	协调类型 Coordination type	等级编号 Grade number	林分密度 Density/ (株/hm ²)	耦合度 Coupling coordination	协调类型 Coordination type
D_1	0—300	0.60	弱	D_4	600—900	0.62	弱
D_2	300—400	0.60	弱	D_5	900—1500	0.59	轻度不
D_3	400-600	0.61	弱	D ₆	1500-2100	0.59	轻度不





林分密度 Density/(株/hm²)



Fig.4 Regression analysis of soil quality and ecosystem multifunctionality index







Fig.5 General linear model of soil quality-ecosystem multifunctionality





E:模型效率;RS:总相对误差;RMA:平均相对误差;RMSE:均方根 误差

http://www.ecologica.cn

3 讨论

3.1 林分密度对土壤质量的影响

本研究结果(表3)表明,不同林分密度对白桦林地的土壤理化性质具有显著影响。总体上,土壤 pH 值 在所有林分密度下保持在弱酸性范围内,这一结果与白桦生长特性相符。然而,土壤容重和土壤含水量在不 同林分密度下有所波动,尤其是较高密度的林分表现出较低的土壤水分保持能力,可能是由于高林分密度导 致土壤更加紧实,减少了土壤孔隙度,同时较高密度的树冠覆盖抑制了水分的渗透和储存,这与舒韦维^[37]、周 欧^[38]等研究结果一致。土壤有机碳的含量先增加后减少,中密度林分更有利于有机碳的积累,这一发现与前 人的研究结果相似^[39-40],导致这种情况可能是由于高密度植被导致林分郁闭,地表有机物的分解速度减缓, 进而影响了有机碳的储存,同时,高密度林分可能加剧了根系间的竞争,促进微生物的呼吸作用,从而加速了 土壤有机碳的分解^[41]。此外,在低密度林分下,土壤养分含量较高,可能是由于较低密度的林分光照条件良 好,土壤微生物群落活跃,共同促进了土壤中养分的积累和有效利用^[42]。土壤机械组成在各密度组间未表现 出显著差异(*P*>0.05),可能由于土壤质地主要由土壤母质和地质过程主导,而林分密度的变化不会显著改变 这些基础性质^[43]。一些土壤理化性质在不同林分密度下表现出双峰效应,王媚臻^[39]、Guo^[44]等的研究结果 也印证了这一点,这可能与林分密度对土壤有机质的积累、养分释放和水分保持能力,从而形成双峰效应。

基于 MDS 指标构建的土壤质量指数也表明(图 2),密度 D₄的土壤质量指数最高,高密度林分土壤质量显 著较低(P<0.05)。这一研究结果与前人的研究结果一致^[10,39],中等密度下,适度的植被覆盖减少了土壤表层 的水分蒸发,维持了较高的水分储存能力,同时较低的根系竞争使得植物能够充分利用土壤养分,从而提升了 整体土壤质量;高密度林分可能因过度的树冠层遮蔽,限制了地表光照,并抑制了地表植被的生长和凋落物等 有机质的输入,这些不利因素可能共同导致了高密度林地的土壤质量下降。此外,稀疏的林地土壤质量指数 虽高于高密度林分,但整体低于 D₄,这也进一步验证了适中的林分密度能够优化森林生态系统的功能,使其 在养分循环、水分保持和有机质积累方面表现出较高的效率。

3.2 林分密度对土壤—植物耦合的影响

土壤—植物反馈机制对探究林分密度对生态系统的影响有着重要意义^[6,9],不同林分密度下土壤因子与 植物多样性间的关联度差异(表7、表8),揭示了其在调节土壤—植物互作中的关键作用。本研究中6种林分 密度下基本属于弱协调,表明当前研究区内白桦天然林地土壤与植物之间难以继续相互促进,基本处于退化 前期,难以继续进行正向演替。协调度随着林分密度的增大先增加后减少(表8),这一现象与生态学理 论^[37-40]一致,反映了在土壤质量达到峰值时,土壤因子与植物群落多样性之间的关联性最强,且与土壤质量 指数的整体变化趋势基本一致。这可能与植物多样性和土壤因子之间的相互作用密切相关,植物的生长高度 依赖土壤理化性质,而过高的密度造成土壤理化性质的退化,并引发根系养分竞争的加剧,从而削弱了植物与 土壤间的正反馈机制^[42],最终对土壤和植被的耦合产生负面作用。相比之下,密度 *D*4的林分表现最高的协 调度,虽仍属于弱协调范围,但显著优于高密度林分。这表明,适中的林分密度可以增强土壤和植物之间的协 同效应,既有利于土壤养分的有效保存,又能够促进植物多样性的增加,从而提升生态系统的稳定性和功能 性。土壤—植物的耦合揭示了土壤因子与植物多样性间的相互关系,并深入探讨了林分密度对土壤质量的潜 在影响机制,这为研究生态系统多功能性进而验证基于 MDS 的土壤质量评价的准确性奠定基础。

3.3 林分密度下土壤质量和生态系统多功能性的关系

外界变化会导致生态系统中某些功能的相应调整或改变,林分密度不仅会影响土壤理化性质,还会导致 植物群落特征的改变^[37]。因此,评估林分密度对土壤质量的影响时,基从生态系统多功能性的角度进行综合 分析,有助于验证基于 MDS 的土壤质量评价结果的科学性以及准确性^[6]。本研究通过线性拟合分析结果表 明,随着林分密度的增加,生态系统多功能性指数显著下降(*P*<0.001)(图 4);生态系统多功能性指数作为一

45 卷

个综合性的衡量指标,囊括了系统内诸多因素的协同作用,而研究结果表明生态系统多功能性与土壤质量之间确实表现出紧密的相互映射与验证关系(图5、图6),这一发现不仅揭示了两者间深刻的内在联系,也从侧面证明了采用最小数据集法评估林分密度对土壤质量影响的科学性与可靠性。

相较于前人的研究,本文通过构建基于最小数据集(MDS)的土壤质量评价模型,将生态系统多功能性与 土壤质量相结合进而对祁连山东部不同密度下白桦天然林进行土壤质量评价,对于优化祁连山东部低效退化 白桦天然林地管理策略、恢复其植被结构、提高生态系统服务功能具有重要意义。但值得注意的是,在生态系统的研究中,微生物群落特征以及土壤酶活性的动态变化等也尤为重要。因此在今后的研究中,还需要引入 这些指标并结合生态系统多功能性的综合考量,构建起一个更加精准、立体的土壤质量评价体系。

4 结论

本研究通过对不同林分密度下白桦天然次生林的土壤理化指标进行分析,通过主成分分析并结合 Norm 值筛选出构建不同林分密度下白桦天然林的土壤质量评价的 7 个指标:全氮、土壤总孔隙度、碱解氮、粉粒、土 壤质量含水量、砂粒、速效磷。基于 MDS 计算得到不同林分密度 SQI 的排名为 D₄>D₂>D₃>D₁>D₆>D₅,表明林 分密度为 600—900 株/hm²的白桦天然林土壤质量较好,结合土壤—植物耦合度,量化了不同林分密度下协调 度,得到研究区内各林地基本属于弱协调,并利用生态系统多功能性指数进一步揭示了林分密度对土壤质量 的影响,同时通过线性拟合也间接证明构建的基于最小数据集(MDS)的土壤质量评价模型的科学性以及准 确性,从而可以减少土壤质量评价的工作量,进而为祁连山东部低效退化的白桦天然林林分结构调整以及功 能提升提供科学的理论依据。

参考文献(References):

- [1] Monger C, Michéli E, Aburto F, Itkin D. Soil classification as a tool for contributing to sustainability at the landscape scale and forecasting impacts of management practices in agriculture and forestry. Soil and Tillage Research, 2024, 244: 106216.
- [2] Vasu D, Tiwary P, Chandran P. A novel and comprehensive soil quality index integrating soil morphological, physical, chemical, and biological properties. Soil and Tillage Research, 2024, 244: 106246.
- [3] Zhang J C, Zhu S B, Liu Y, Yao B, Yu M X, Ma J Y, Yang X L, Xue J M, Xiang Y Z, Li Y, Shen Y Y, Zhu J X. Impact of mixed plantations on soil physicochemical properties: Variations and controlling factors in China[J\]. Forest Ecology and Management, 2024, 568: 122107.
- [4] 刘可意,杨佳,姜淑娜,谷会岩.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.生态学报,2024,44(9):3623-3635.
- [5] 唐祎欣,张伟,吴汉卿,胡培雷,肖丹,王克林. 植被恢复对西南喀斯特地区土壤气候韧性的提升作用. 生态学报, 2023, 43(20): 8430-8441.
- [6] 桑亚转,尤杨,李多才,安玉峰,侯扶江.放牧对祁连山高寒典型草原土壤质量的影响.生态学报,2023,43(15):6364-6377.
- [7] 刘占锋,傅伯杰,刘国华,朱永官.土壤质量与土壤质量指标及其评价.生态学报,2006,26(3):901-913.
- [8] Gan F L, Shi H L, Yan Y J, Pu J B, Dai Q H, Gou J F, Fan Y C. Soil quality assessment of karst trough valley under different bedrock strata dip and land-use types, based on a minimum data set. Catena, 2024, 241: 108048.
- [9] Yang C, Zhu F, Guo K, Feng X H, Liu X J, Bezemer T M. Spatial patterning and species coexistence: A case study using concentric circular vegetation patches in saline land. The Science of the total environment, 2024, 951: 175483.
- [10] 刘慧敏,韩海荣,程小琴,蔡锰柯,刘旭军,刘莉,张文雯,刘铭波.不同密度调控强度对华北落叶松人工林土壤质量的影响.北京林业 大学学报,2021,43(6):50-59.
- [11] Zhao M, Liu S H, Sun Y R, Chen Y M. Does stand density affect understory vegetation and soil properties of differently aged Robinia pseudoacacia plantations? Forest Ecology and Management, 2023, 548: 121444.
- [12] 江康威, 张青青, 王亚菲, 李宏, 杨永强, 丁雨, 吐尔逊娜依·热依木. 天山北坡中段草地生态系统多功能性对放牧的响应. 生态学报, 2024, 44(8): 3440-3456.
- [13] Prangel E, Reitalu T, Neuenkamp L, Kasari-Toussaint L, Karise R, Tiitsaar A, Soon V, Kupper T, Meriste M, Ingerpuu N, Helm A. Restoration of semi-natural grasslands boosts biodiversity and re-creates hotspots for ecosystem services. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2024, 374: 109139.
- [14] Yiwen Liu Y W, Chen R S, Han C T, Liu Z W, Zhao Y N, Yang Z W. Research on the characteristics, driving mechanism and spatial pattern of carbon sink in alpine ecosystem: A study case of Qilian Mountains. Agricultural and Forest Meteorology, 2024, 356: 110166.
- [15] Huang R C, Chen X, Hu Q, Jiang S S, Dong J Z. Impacts of altitudinal ecohydrological dynamic changes on water balance under warming climate in a watershed of the Qilian Mountains, China. Science of the Total Environment, 2024, 908: 168070.

- [16] 刘文婷,张金峰,刘琪璟.长白山东坡白桦-长白落叶松林优势种群结构与动态特征.生态学报, 2023, 43(18): 7462-7473.
- [17] 邹星晨, 王欣苗, 左亚凡, 张泽鑫, 贺康宁. 青海云杉不同演替阶段林下草本多样性特征及其环境解释.生态学报, 2023, 43(24): 10285-10294.
- [18] 苏军德,赵晓冏,李国霞,关海雯.祁连山国家自然保护区生境质量时空特征及驱动因素分析.中国环境科学,2024,44(5):2595-2605.
- [19] 李茂萍, 缪宁, 刘世荣. 固氮树种旱冬瓜对退化林地土壤修复和林下植被重建的生态驱动效应. 生态学报, 2022, 42(6): 2321-2330.
- [20] 李双雄,姚拓,王理德,韩江茹,宋达成,赵赫然,杨继杰,李雪梅,吉凌鹤,姬如欣.祁连山东段退化高寒草地修复过程中土壤微生物 生物量变化.草地学报,2023,31(12):3668-3675.
- [21] 张泽鑫,蔡有柱,赵丽娟,左亚凡,林莎,贺康宁.祁连山东部森林林分结构和环境因素对草本物种多样性的影响.生态学报,2024,44 (5):2089-2099.
- [22] 王娜,朱小叶,方晰,辜翔,陈金磊.中亚热带退化林地土壤有机碳及不同粒径土壤颗粒有机碳的变化.水土保持学报,2018,32(3): 218-225,234.
- [23] 刘根华, 查轩, 周文芳, 白永会, 康佩佩, 王庚, 黄少燕. 严重侵蚀退化马尾松林地植被恢复土壤养分的制约性因子. 水土保持通报, 2016, 36(5): 34-39.
- [24] Yuan N, Fang F, Tang X P, Lv S F, Wang T Y, Chen X, Sun T R, Xia Y Y, Zhou Y F, Zhou G M, Shi Y J, Xu L. Degradation-driven vegetation-soil-microbe interactions alter microbial carbon use efficiency in Moso bamboo forests. The Science of the total environment, 2024, 951: 175435.
- [25] 董立国. 原状土样测定多项土壤物理性质的方法. 宁夏农林科技, 2019, 60(4): 51-52.

15 期

- [26] Li H Y, Qiu Y Z, Ma L, Yao X N. Soil ecological stoichiometry reveals microbial nutrient limitation with alpine meadow degradation in northeastern Tibetan Plateau. Catena, 2024, 246: 108358.
- [27] 马作豪, 唐吴冶, 李文红, 王如海. 吸管法和比重计法测定土壤机械组成的比对研究. 中国无机分析化学, 2023, 13(6): 645-651.
- [28] 彭珏, 龙凌, 郭忠录, 王军光, 蔡崇法. 东北黑土区侵蚀农田土壤质量指数构建及其空间分异. 农业工程学报, 2024, 40(15): 54-64.
- [29] Zhu Z Y, Chen J Y, Hu H B, Zhou M J, Zhu Y, Wu C M, Zhu L, Jiang X Y, Wang J L. Soil quality evaluation of different land use modes in small watersheds in the hilly region of southern Jiangsu. Ecological Indicators, 2024, 160: 111895.
- [30] Andrews S S, Karlen D L, Mitchell J P. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2002, 90(1): 25-45.
- [31] Guo L L, Sun Z G, Ouyang Z, Han D R, Li F D. A comparison of soil quality evaluation methods for Fluvisol along the lower Yellow River. Catena, 2017, 152: 135-143.
- [32] Jia R, Zhou J, Chu J C, Shahbaz M, Yang Y D, Jones D L, Zang H D, Razavi B S, Zeng Z H. Insights into the associations between soil quality and ecosystem multifunctionality driven by fertilization management: a case study from the North China Plain. Journal of Cleaner Production, 2022, 362: 132265.
- [33] 陈维梁, 王树学, 齐统祥, 焦磊, 王聪, 买尔当·克依木, 李宗善, 傅伯杰. 黄土丘陵区不同恢复年限人工刺槐林土壤水分时空动态及其时间稳定性. 生态学报, 2021, 41(14): 5643-5657.
- [34] 易阿岚, 王钧. 上海市湿地景观格局时空演变与驱动机制的量化研究. 生态学报, 2021, 41(7): 2622-2631.
- [35] Ni X, Li J, Xu J Y, Shen Y, Liu X G. Grey relation analysis and multiple criteria decision analysis method model for suitability evaluation of underground space development. Engineering Geology, 2024, 338: 107608.
- [36] 薛鸥,魏天兴,刘飞,李英勇.公路边坡植物群落多样性与土壤因子耦合关系.北京林业大学学报,2016,38(1):91-100.
- [37] 舒韦维, 卢立华, 李华, 农友, 何日明, 陈海, 黄彪. 林分密度对杉木人工林林下植被和土壤性质的影响. 生态学报, 2021, 41(11): 4521-4530.
- [38] 周欧,古丽米热・依力哈木,祝维,王亚飞,曲冠博,李少然,贾黎明,席本野.不同密度和水分管理下毛白杨林分土壤水分特征.北京林 业大学学报,2024,46(1):55-67.
- [39] 王媚臻,毕浩杰,金锁,刘佳,刘宇航,王宇,齐锦秋,郝建锋.林分密度对云顶山柏木人工林林下物种多样性和土壤理化性质的影响. 生态学报,2019,39(3):981-988.
- [40] 刘少华,赵敏,王亚娟,孙亚荣,陈云明.黄土丘陵区林分密度对人工刺槐林土壤理化性质及酶活性影响.水土保持研究,2024,31(5): 123-129,138
- [41] 张祎,李鹏,肖列,赵宾华,时鹏.黄土高原丘陵区地形和土地利用对土壤有机碳的影响.土壤学报,2019,56 (5):1140-1150.
- [42] 刘悦,谢玲芝,张彦东,王政权,谷加存.不同密度水曲柳人工林细根生物量对邻近树木胸径和距离的响应.林业科学,2021,57(10): 15-22.
- [43] Harrison R B, Footen P W, Strahm B D. Deep soil horizons: contribution and importance to soil carbon pools and in assessing whole-ecosystem response to management and global change. Forest Science, 2011, 57(1): 67-76.
- [44] Guo G, Kong Y, Xu Y Y, Peng X Y, Niu M T, Zeng G R, Ouyang Z, Liu J, Zhang C, Lin J. Soil organic matter components and sesquioxides integrally regulate aggregate stability and size distribution under erosion and deposition conditions in southern China. Journal of Hydrology, 2024, 639: 131588.