晋西黄土区不同密度油松人工林保育土壤功能评价

兰道云[1]，毕华兴[1,2,3,4,5]，赵丹阳[1]，王 宁[1]，云慧雅[1]，王珊珊[1]，崔艳红[1]

(1.北京林业大学水土保持学院，北京 100083；2.山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站，北京 100083；3.水土保持国家林业局重点实验室(北京林业大学)，北京 100083；4.北京市水土保持工程技术研究中心(北京林业大学)，北京 100083；5.林业生态工程教育部工程研究中心(北京林业大学)，北京 100083)

摘要：研究晋西黄土区不同密度油松林保育土壤功能变化规律及差异性，评价其保育土壤功能，以加强林分管理和生态恢复建设。以山西吉县蔡家川流域 4 种不同密度(925，1 325，1 750，2 250 株/hm^2)油松人工林为研究对象，对其土壤容重、孔隙度等物理性质、有机质等化学性质以及坡面径流泥沙量进行测定和分析，确定了 12 项评价指标，采用熵权法(EWM)对各密度油松林地的保育土壤功能进行综合评价。结果表明：(1)4 种林分密度的油松人工林，土壤容重、总孔隙度、非毛管孔隙度、毛管孔隙度、全氮、全磷、氨氮、硝氮和速效磷均存在显著差异($P<0.05$)；(2)林分密度变化会不同程度地改变油松林土壤物理性质、土壤养分和径流泥沙量等 12 项指标，其中土壤容重、径流量、泥沙量均随林分密度增大呈现先下降后上升的趋势；土壤有机质、全氮、全磷、硝氮、速效磷，随林分密度增大呈先增加后减少的趋势；(3)不同密度油松林地的土壤物理结构、土壤肥力和产流产沙均随密度变化呈现一定的变化规律，随着林分密度增大，土壤结构改良状况和土壤肥力呈现先上升后下降的趋势；径流泥沙量表现为先减小后增大地趋势；(4)对不同密度油松人工林保育土壤功能评价表明，4 种密度油松林中，随着油松林林分密度的增加，保育土壤功能呈现先增强后减弱的趋势。密度为 1 750 株/hm^{2}的油松林地保育土壤功能相对较好。从保育土壤角度出发，建议将 1 750 株/hm^{2}作为晋西黄土区油松人工林经营密度，该密度油松林能较好保持水土，改善林地土壤质量。

关键词：保育土壤；熵权法；不同密度；油松人工林；晋西黄土区

中图分类号：S714 **文献标识码**：A **文章编号**：1009-2242(2022)02-0189-08

DOI：10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.02.025

Evaluation on Soil Conservation Function of *Pinus tabulaeformis* Plantation with Different Densities in the Loess Area of Western Shanxi Province

LAN Daoyun[1], BI Huaxing[1,2,3,4,5], ZHAO Danyang[1], WANG Ning[1], YUN Huiya[1], WANG Shanshan[1], CUI Yanhong[1]

(1.*College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing* 100083; 2.*Ji County Station, Chinese National Ecosystem Research Network (CNERN), Beijing* 100083; 3.*Key Laboratory of State Forestry Administration on Soil and Water Conservation (Beijing Forestry University), Beijing* 100083; 4.*Beijing Engineering Research Center of Soil and Water Conservation (Beijing Forestry University), Beijing* 100083; 5.*Engineering Research Center of Forestry Ecological Engineering, Ministry of Education (Beijing Forestry University), Beijing* 100083)

Abstract: This paper aimed to study the changing laws and differences of soil conservation functions of *Pinus tabulaeformis* forests with different densities in the loess area of western Shanxi Province, and to evaluate their soil conservation function, so as to strengthen forest stand management and ecological restoration. Four kinds of *P. tabulaeformis* plantations with different densities (925 plant/hm^2, 1 325 plant/hm^2, 1 750 plant/hm^2 and 2 250 plant/hm^2) in the Caijiachuan watershed of Jixian County, Shanxi Province were taken as the research objects. The soil bulk density, porosity and other physical properties, organic matter and other chemical properties as well as the amount of slope runoff and sediment were measured and analyzed, and 12 evaluation indicators were determined, and the entropy weight method (EWM) was used to evaluate comprehensively the soil conservation functions of each *P. tabulaeformis* forests. The results showed that: (1) There were significant differences in soil bulk density, total porosity, non-capillary porosity, capillary

收稿日期：2021-09-16

资助项目：国家自然科学基金项目“晋西黄土区水土保持林林分结构与功能耦合机理研究”(31971725)，“黄土区土壤—地表—地下水文多维耦合过程及植被调控机制”(U2243202)；国家重点研发计划项目(2016YFC0501704)

第一作者：兰道云(1996—)，男，硕士研究生，主要从事林业生态工程研究。E-mail：527663009@qq.com

通信作者：毕华兴(1969—)，男，教授，博士生导师，主要从事水土保持与林业生态工程研究。E-mail：bhx@bjfu.edu.cn

porosity, total nitrogen, total phosphorus, ammonia nitrogen, nitrate nitrogen and available phosphorus among the four kinds of *P. tabulaeformis* plantation ($P<0.05$). (2) The change of stand density would change the 12 indicators of soil physical properties, soil nutrients and runoff and sediment volume of the *P. tabulaeformis* forest. Among them, soil bulk density, runoff and sediment volume all decreased first and then increased with the increasing of forest density. Soil organic matter, total nitrogen, total phosphorus, nitrate nitrogen and available phosphorus showed the opposite tendency with the increasing of forest density. (3) The soil physical structure, soil fertility, runoff and sediment yield of different *P. tabulaeformis* forests all showed certain change laws with the change of density. The improvement of soil structure and soil fertility increased first and then decreased with the increasing of forest density. With the increasing of forest density, the amount of runoff and sediment decreased first and then increased. (4) The evaluation of soil conversation function of *P. tabulaeformis* plantations with different densities showed that the soil conservation function of *P. tabulaeformis* forest increased firstly and then decreased with the increasing of density. The conservation soil function of *P. tabulaeformis* forest land with a density of 1 750 plant/hm^2 was relatively good. From the perspective of soil conservation, it was recommended that 1 750 plant/hm^2 should be used as the management density of *P. tabulaeformis* plantations in the loess area of western Shanxi. This density could better maintain water and soil and improve the soil quality of forest land.

Keywords: soil conservation; entropy weight method; different densities; *Pinus tabulaeformis* plantation; loess area in western Shanxi Province

晋西黄土区严重的土壤侵蚀导致大量的土壤和养分流失,使该地区的自然土壤遭到破坏[1]。植被恢复是改善土壤环境最有效的方法。国内外研究[2-5]表明,植被的生长发育与土壤性状的演变之间是互馈作用,土壤为植物生长提供水分和养分,其含量不仅影响植被个体发育,也进一步决定植物群落的类型和分布,同时植被也是土壤有机质最主要的来源,对土壤理化性质有着深刻的影响。土壤是生态系统诸多生态过程的载体,植物的生长对土壤结构与养分状况起着关键作用[6]。

油松(*Pinus tabulaeformis*)是黄土区主要造林树种之一,具有保育土壤、涵养水源、固碳释氧等功能[7]。保育土壤功能是指森林中活地被物和凋落物截留降水、降低水滴对表土的冲击和地表径流的侵蚀作用;同时林木根系固持土壤,从而减少土壤肥力损失,以及改善土壤结构的功能[8],是森林生态系统中重要的服务功能之一。油松林地的固土保肥能力反映了油松林地抵抗水土流失、改善土壤肥力的能力。近年来诸多学者对林地的保育土壤功能进行了研究,田宁宁等[9]使用固土量公式和保肥量公式对晋西黄土区退耕还林地的保育土壤功能进行评价;张向峰等[10]使用模糊综合评价法对缙云山水源涵养林的保育土壤功能进行了评价。目前对林地保育土壤功能客观评价方法的研究还较少,熵权法是一种客观计算各指标权重的数学方法,能够剔除主观因素的影响,客观地判断评价指标的相对重要性。在面对土壤保育功能指标本身涉及到的数据多且复杂,熵权法解决了因各层次内涵不同、不能相加的弊端。近年来,熵权法已成功运用于土壤抗蚀性评价[11]和水源涵养评价[12],说明熵权法在保育土壤方面也同样具有可行性与科学性。

关于不同林分密度对林分土壤及其影响因素早有报道[13-15],主要集中在不同地区、不同植被类型对其土壤养分、物理性质或者土壤抗蚀性单独进行研究,缺少有关林分密度对保育土壤功能的影响及综合评价方面的研究。本文以晋西黄土区4种不同密度的油松人工林为研究对象,对研究区的土壤理化性质、坡面产流产沙进行分析,运用熵权法客观评价油松人工林的保育土壤功能,拟从林分密度对晋西黄土区油松人工林保育土壤功能角度出发,选择林分经营密度。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于山西省临汾市吉县蔡家川流域(36°14′27″—36°18′23″N,110°39′45″—110°47′45″E),流域面积40 km^2,海拔900~1 590 m,属黄土高原东南部暖温带半湿润区,年平均气温10 ℃,多年平均降水量574.8 mm,年平均蒸发量1 726.3 mm。属于典型的黄土残塬沟壑区,土壤类型为微碱性褐土,黄土母质。该地区主要乔木树种有油松(*Pinus tabuliformis* Carr.)、刺槐(*Robiniapseudoacacia* L.)、侧柏(*Platycladusorientalis* (L.) Franco)、山杨(*Populus davidiana* Dode)、辽东栎(*Quercus wutaishansea* Mary)等;主要灌木树种有沙棘(*Hippophae rhamnoides* Linn.)、虎榛子(*Ostryopsis davidiana* Decne.)、黄刺玫(*Rosa xanthina* Lindl)、胡枝子(*Lespedeza bicolor* Turcz.)等;主要的草本植物有艾蒿(*Artemisia argyi* H. Lév. &Vaniot)、草地早熟禾(*Poa*

pratensis L.)、黄花蒿(*Artemisia annua* Linn.)等。

1.2　研究方法

1.2.1　样地选择　研究区于 1991 年开始大面积栽植油松。基于大量实际调查,在研究区选择林龄为 29 年、成土母质基本相同、坡度、坡位、坡向等立地条件基本一致的油松林为研究对象,设置低密度(925 株/hm^2)、中密度(1 325,1 750 株/hm^2)和高密度(2 250 株/hm^2)3 个密度梯度,每个密度梯度 3 个重复。布设 20 m×20 m 标准样地,并对样地内的乔木每木检尺,记录样地内所有树木的胸径、树高等生长指标;根据"五点法"布设 5 m×5 m 灌木样方 5 个,1 m×1 m 草本样方 5 个,记录林下植被的生长情况。使用地质罗盘测定坡向和坡度;使用 GPS 数据采集仪定位测定海拔高度。不同密度油松人工林地基本特征见表 1。

表 1　不同密度油松人工林样地基本特征

林分密度/(株·hm^{-2})	平均树高/m	平均胸径/cm	平均冠幅/m	海拔/m	坡度/(°)	坡向	郁闭度/%	林龄/a
925	6.95±0.85	13.51±2.39	4.02±0.66	1130	29	半阴坡	40	29
1325	8.24±0.75	13.81±2.38	3.78±0.61	1140	30	半阴坡	45	29
1750	7.41±1.28	10.21±3.55	3.29±0.93	1120	27	半阴坡	55	29
2250	8.55±2.06	9.31±3.37	2.83±0.95	1090	31	阴坡	60	29

注:表中数据为平均值±标准差。

1.2.2　土壤取样与测定方法　在不同密度油松林地(各 3 块样地)中心点处选择 1 个土壤剖面采样点,沿着土壤剖面 0—10,10—20,20—30,30—40,40—50,50—60 cm 分层取样,每层 3 个重复,带回实验室,待其风干后研磨过筛装袋,用于测定土壤化学指标。土壤容重、孔隙度等采用环刀法测定;土壤化学性质的测定指标主要有土壤有机质、全氮、全磷、铵态氮、硝态氮和速效磷等。土壤有机质采用重铬酸钾—外加热法测定,土壤全氮采用半微量凯式法测定,土壤全磷采用硫酸—混合加速剂消煮—蒸馏法测定,土壤铵态氮、硝态氮采用碱解扩散法和氢氧化钠熔融—钼锑抗比色法测定,土壤速效磷采用 NH_4F—HCL 浸提—钼锑抗比色法测定。

在油松林地坡度相近的坡面布设 8 个标准径流小区(每种密度各 2 个),对 4 种密度油松林地进行天然降雨条件下产流产沙的观测,并记录场降雨条件下的降雨量(林内降雨)、径流量和泥沙含量。

1.2.3　数据处理与分析　试验取得的数据采用 Excel 2019 进行处理,各指标间数据分析采用 SPSS 26.0 软件分析,其中以林分密度为自变量,以不同层次容重、总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、有机质、全氮、全磷、铵态氮、硝态氮和速效磷作为因变量进行单因素方差分析(One-way Anova),采用 Duncan 多重比较进行差异性分析。

1.2.4　保育土壤功能评价方法　依据保育土壤功能的定义,结合前人的研究成果,按照科学性、可操作性的原则,选取能够反映油松人工林保育土壤功能(土壤结构改良、土壤肥力改善、截流减沙)的 12 指标,包括容重、总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、有机质、全氮、全磷、铵态氮、硝态氮、速效磷、径流量和泥沙量,建立油松人工林保育土壤功能评价体系。采用熵权法(the entropy weight method, EWM)评价林分保育土壤能力,该方法属于客观赋权法,通过调查数据结果提供的信息大小来确定权重。一般对于某项指标可以用熵值来判断其离散程度,其信息熵越小,离散程度越大,说明该指标的权重越大。利用信息熵计算出各指标的权重,为多指标综合评价提供依据。

(1)数据标准化处理。由于选取的评价指标单位不同,需要进行无量纲化处理,具体分为 2 种情况:

第 1 种情况是指标为正向指标(数据越大越优)时,其标准化公式为:$p_{ij}=\dfrac{x_{ij}-\min(x_{ij})}{\max(x_{ij})-\min(x_{ij})}$;第 2 种情况是当指标为逆指标(数据越小越优)时,其标准化公式为:$p_{ij}=\dfrac{\max(x_{ij})-x_{ij}}{\max(x_{ij})-\min(x_{ij})}$。

式中:x_{ij} 为第 i 个评价对象对应第 j 个指标;p_{ij} 为标准化后对应的指标值。

(2)计算第 i 个评价对象下第 j 个指标值的比重:$Y_{ij}=\dfrac{p_{ij}}{\sum_{i}^{m}p_{ij}}$。

(3)指标信息熵计算公式为:$e_j=-k\sum_{i=1}^{m}(Y_{ij}\ln Y_{ij})$,$k=\dfrac{1}{\ln m}$。式中:$m$ 为评价对象个数。

(4)信息熵冗余度计算公式为:$d_i=1-e_i$。

(5)指标权重计算公式为:$W_j=\dfrac{d_j}{\sum_{j=1}^{n}d_j}$。

式中:n 为指标个数。

(6)各密度油松林地保育土壤功能评价得分计算公式为:$S_{ij}=\sum_{i=1}^{n}W_j p_{ij}$。

2　结果与分析

2.1　不同密度油松林对土壤物理特性的影响

土壤容重和孔隙度是反映土壤物理结构的重要

参数，容重是土壤紧实度指标，反映土壤透水通气性的大小[16]。由表 2 可知，在垂直剖面上，随着土层深度增加，不同密度油松林地土壤容重均呈增大趋势，深层可达 1.30 g/cm³。在 0—60 cm 土层，油松林地土壤平均容重为 1.21 g/cm³，变化范围为 0.94～1.35 g/cm³。不同密度油松林地土壤平均容重从小到大依次为 1 750 株/hm²＜1 325 株/hm²＜2 250 株/hm²＜925 株/hm²。差异性检验结果表明，中密度(1 325，1 750 株/hm²)油松林地土壤容重与低密度(925 株/hm²)和高密度(2 250 株/hm²)油松林地间均存在显著差异(P＜0.05)。随着密度的增大，土壤容重的总体趋势表现为先减小后增大。

表 2 不同密度油松人工林地土壤容重

林分密度/(株·hm⁻²)	土壤容重/(g·cm⁻³)						
	0—10 cm	10—20 cm	20—30 cm	30—40 cm	40—50 cm	50—60 cm	平均值
925	1.01±0.01	1.29±0.01	1.26±0.02	1.29±0.02	1.29±0.01	1.31±0.01	1.24±0.01a
1325	1.15±0.03	1.09±0.07	1.15±0.01	1.15±0.01	1.27±0.03	1.37±0.01	1.20±0.02b
1750	0.94±0.02	1.07±0.01	1.19±0.09	1.26±0.08	1.29±0.06	1.33±0.02	1.18±0.01b
2250	1.20±0.03	1.13±0.01	1.20±0.01	1.20±0.03	1.29±0.06	1.35±0.01	1.23±0.02a

注：表中数据为平均值±标准差；不同字母表示不同密度油松人工林地差异显著(P＜0.05)。下同。

土壤孔隙可以为植物提供水和空气，包括毛管孔隙和非毛管孔隙 2 种，体现了土壤贮蓄和调节水分能力的大小。在垂直剖面上，不同密度油松林地土壤总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙孔隙度均随土层深度的增加而减小(表 3)。0—60 cm 土层土壤平均总孔隙度为 52.04%，变化范围为 49.41%～55.69%，不同密度油松林地土壤平均总孔隙度从小到大依次为 925 株/hm²＜1 750 株/hm²＜1 325 株/hm²＜2 250 株/hm²。差异检验结果表明，密度为 1 750 株/hm² 油松林地土壤平均总孔隙度与其他密度油松林地之间差异显著(P＜0.05)。0—60 cm 土层土壤平均毛管孔隙度为 48.13%，变化范围为 44.78%～51.83%，不同密度油松林地土壤平均毛管孔隙度从小到大依次为 925/hm²＜1 750 株/hm²＜1 325 株/hm²＜2 250株/hm²，差异检验结果表明，密度为 1 750 株/hm² 的油松林地土壤平均毛管孔隙度和 925 株/hm² 油松林地之间无显著差异，而与 1 325，2 250 株/hm² 油松林地之间差异显著(P＜0.05)。在 0—60 cm 土层土壤平均非毛管孔隙度为 3.91%，变化范围为 3.01%～4.64%，不同密度油松林地平均非毛管孔隙度从小到大依次为 925 株/hm²＜1 325 株/hm²＜2 250株/hm²＜1 750 株/hm²，差异检验结果表明，密度为 1 750 株/hm² 油松林地土壤平均非毛管孔隙度与其他林分密度之间差异显著(P＜0.05)。

2.2 不同密度对油松林土壤肥力的影响

表 4 为不同密度油松林地全量养分状况。土壤全量养分主要包括全氮和全磷，其含量主要受到森林生态系统植被养分循环过程和土壤成土母质的影响[17]。土壤有机质是土壤养分的主要来源，影响土壤的潜在生产力，是土壤肥力状况的重要指标，一般指存在于土壤中的所有含碳有机物。0—60 cm 土层不同密度油松林地土壤平均有机质含量为 7.29 g/kg，变化范围为 3.04～15.94 g/kg，且随着土层深度的增加而减少。不同密度油松林地土壤平均有机质含量从大到小依次是 1 325株/hm²＞1 750 株/hm²＞925 株/hm²＞2 250 株/hm²。差异性检验结果表明，密度为 1 750 株/hm² 的油松林地土壤平均有机质含量分别与 925，2 250株/hm² 油松林地差异显著(P＜0.05)。

表 3 不同密度油松人工林地土壤孔隙状况

林分密度/(株·hm⁻²)	土层深度/cm	总孔隙度/%	毛管孔隙度/%	非毛管孔隙度/%
925	0—10	49.51±0.18	46.50±0.23	3.01±0.05
	10—20	50.82±0.03	47.45±0.27	3.38±0.27
	20—30	50.00±0.17	46.00±0.28	4.00±0.43
	30—40	51.01±0.89	47.90±0.83	3.11±0.17
	40—50	50.07±0.84	47.52±0.74	3.23±01.2
	50—60	50.38±0.17	46.64±0.50	3.75±0.33
	平均值	50.41±0.21a	47.00±0.13a	3.41±0.09a
1325	0—10	54.16±0.44	50.25±0.40	3.91±0.06
	10—20	55.13±0.68	51.36±1.02	3.77±0.40
	20—30	53.40±0.61	49.90±0.60	3.59±0.44
	30—40	54.01±1.49	50.65±1.57	3.35±0.08
	40—50	50.16±1.90	46.19±2.39	3.97±0.49
	50—60	49.41±0.60	44.78±1.29	4.64±0.86
	平均值	52.73±0.22b	48.86±0.22b	3.87±0.09b
1750	0—10	50.70±1.00	46.37±0.99	4.33±0.40
	10—20	52.74±1.18	48.74±0.79	4.00±0.53
	20—30	52.28±1.83	48.10±1.79	4.18±0.04
	30—40	51.58±0.83	46.95±1.13	4.63±0.30
	40—50	50.30±0.23	45.59±0.40	4.72±0.17
	50—60	51.88±0.81	47.39±0.63	4.49±0.19
	平均值	51.58±0.13c	47.19±0.21a	4.40±0.09c
2250	0—10	53.97±0.99	49.53±0.67	4.44±0.41
	10—20	54.61±0.42	50.55±0.53	4.07±0.20
	20—30	55.69±0.68	51.83±0.83	3.86±0.15
	30—40	52.91±1.64	48.65±1.37	4.27±0.34
	40—50	51.19±2.12	46.67±1.38	4.52±0.76
	50—60	52.22±0.73	49.69±0.59	2.53±0.37
	平均值	53.44±1.04b	49.49±0.82b	3.95±0.24b

0—60 cm 土层土壤平均全氮含量为 0.32 g/kg,变化范围为 0.16～0.55 g/kg。不同密度油松林土壤平均全氮含量从大到小依次为 1 750 株/hm^2＞1 325 株/hm^2＞925 株/hm^2＞2 250 株/hm^2。差异检验结果表明,林分密度为 1 750 株/hm^2 油松林地土壤平均全氮含量与其他林分密度之间差异显著(P＜0.05)。0—60 cm 土层土壤平均全磷含量为 0.51 g/kg,变化范围 0.48～0.54 g/kg,不同密度油松林土壤平均全磷含量从大到小依次为 1 750 株/hm^2＞2 250 株/hm^2＞1 325 株/hm^2＞925 株/hm^2。差异检验结果表明,密度为 1 750 株/hm^2 油松林地土壤全磷含量与其他林分密度之间差异显著(P＜0.05)。土壤全量养分含量最大的为密度 1 750 株/hm^2 油松林地,且随着密度增大呈先增大后减少的趋势。

表 4　不同密度油松人工林地土壤全量养分状况

林分密度/(株·hm^{-2})	土层深度/cm	土壤有机质/(g·kg^{-1})	全氮/(g·kg^{-1})	全磷/(g·kg^{-1})
	0—10	8.88±0.56	0.55±0.01	0.50±0.01
	10—20	8.35±0.15	0.39±0.03	0.49±0.01
	20—30	7.63±0.19	0.34±0.01	0.48±0.01
925	30—40	7.35±0.13	0.27±0.06	0.50±0.01
	40—50	5.62±0.11	0.21±0.01	0.48±0.01
	50—60	3.04±0.13	0.25±0.10	0.49±0.01
	平均值	6.81±0.11a	0.33±0.01a	0.49±0.01a
	0—10	15.94±0.34	0.34±0.01	0.50±0.01
	10—20	9.76±0.22	0.34±0.01	0.50±0.01
	20—30	7.79±0.18	0.34±0.06	0.49±0.01
1325	30—40	5.15±0.32	0.38±0.01	0.50±0.01
	40—50	4.78±0.24	0.36±0.05	0.49±0.02
	50—60	3.94±0.13	0.30±0.02	0.51±0.01
	平均值	7.88±0.11b	0.34±0.01a	0.50±0.0a
	0—10	10.16±0.32	0.48±0.07	0.53±0.03
	10—20	8.24±0.74	0.39±0.02	0.52±0.01
	20—30	8.81±0.26	0.35±0.01	0.53±0.01
1750	30—40	8.47±0.31	0.38±0.01	0.53±0.01
	40—50	6.90±0.19	0.34±0.01	0.53±0.01
	50—60	4.72±0.39	0.35±0.04	0.52±0.01
	平均值	7.75±0.23b	0.38±0.01b	0.53±0.01b
	0—10	6.74±0.39	0.30±0.06	0.54±0.01
	10—20	6.57±0.34	0.17±0.01	0.51±0.01
	20—30	6.79±0.40	0.16±0.02	0.51±0.01
2250	30—40	8.14±0.36	0.27±0.03	0.50±0.01
	40—50	7.63±1.54	0.26±0.04	0.51±0.01
	50—60	4.47±0.11	0.23±0.01	0.51±0.02
	平均值	6.72±0.19a	0.23±0.02c	0.51±0.01c

土壤速效类养分(铵态氮、硝态氮、速效磷)含量高低直接关系土壤肥力的高低。0—60 cm 土层土壤铵态氮平均含量为 10.63 mg/kg,变化范围为 7.76～14.71 mg/kg(表 5)。不同密度油松林地土壤铵态氮平均含量从大到小依次为 2 250 株/hm^2＞1 325 株/hm^2＞1 750 株/hm^2＞925 株/hm^2。差异性检验结果表明,4 种不同密度油松林地之间土壤铵态氮平均含量差异显著(P＜0.05)。0—60 cm 土层土壤硝态氮平均含量为 13.33 mg/kg,变化范围为 7.76～18.03 mg/kg,不同密度油松林地土壤硝态氮平均含量从大到小依次为 1 750 株/hm^2＞1 325 株/hm^2＞925 株/hm^2＞2 250 株/hm^2,差异检验结果表明,密度为 1 750株/hm^2 油松林地土壤硝态氮平均含量与其他林分密度之间差异显著(P＜0.05)。0—60 cm 土层土壤速效磷平均含量为 2.89 mg/kg,变化范围为 2.19～3.42 mg/kg,各密度林分速效磷平均含量从大到小依次为 1 750 株/hm^2＞925 株/hm^2＞1 325 株/hm^2＞2 250 株/hm^2,密度为 1 750 株/hm^2 的油松林地分别与 1 325,2 250 株/hm^2 油松林地之间土壤平均速效磷差异显著(P＜0.05)。密度为 1 750 株/hm^2 油松林地土壤速效类养分含量最大。

表 5　不同密度油松人工林地速效养分状况

林分密度/(株·hm^{-2})	土层深度/cm	铵态氮/(mg·kg^{-1})	硝态氮/(mg·kg^{-1})	速效磷/(mg·kg^{-1})
	0—10	14.17±0.33	10.14±0.98	3.11±0.14
	10—20	10.07±0.17	10.91±2.88	3.16±0.23
	20—30	9.05±0.02	12.67±0.15	3.15±0.14
925	30—40	7.79±0.42	10.08±1.62	2.82±0.32
	40—50	7.91±0.28	12.58±1.50	2.87±0.04
	50—60	7.76±0.57	12.14±0.47	3.33±0.10
	平均值	9.46±0.12a	11.42±0.66a	3.08±0.03a
	0—10	11.77±0.17	18.03±1.48	3.17±0.05
	10—20	11.43±0.18	7.76±0.19	3.14±0.11
	20—30	11.49±0.30	11.81±1.11	2.66±0.37
1325	30—40	11.37±0.36	11.27±0.74	2.78±0.18
	40—50	8.49±0.11	14.23±1.90	2.42±0.09
	50—60	8.63±0.28	10.71±2.13	2.13±0.19
	平均值	10.53±0.01b	12.30±0.31a	2.72±0.03b
	0—10	11.47±0.14	17.82±2.37	3.14±0.06
	10—20	10.34±0.48	17.54±7.31	3.29±0.25
	20—30	10.91±0.27	14.23±1.34	3.42±0.13
1750	30—40	10.21±0.36	15.71±1.68	3.00±0.16
	40—50	9.52±0.17	17.20±3.10	2.92±0.15
	50—60	8.40±0.42	14.39±1.19	2.80±0.09
	平均值	10.14±0.05c	16.15±0.94b	3.09±0.04a
	0—10	11.3±0.76	11.87±0.54	3.17±0.28
	10—20	12.66±0.27	9.03±1.10	2.95±0.35
	20—30	13.64±0.43	8.82±0.90	2.53±0.14
2250	30—40	11.80±0.41	8.15±1.72	2.42±0.04
	40—50	12.31±1.00	10.68±1.02	2.57±0.31
	50—60	12.48±0.39	8.12±0.51	2.27±0.18
	平均值	12.37±0.31d	9.45±0.30c	2.65±0.06b

2.3 不同密度对油松林坡面产流产沙的影响

在林地上由于活地被物对降雨截流和枯落物的拦截,降雨并不能直接到达林地表面形成径流,只有满足活地被物截流量和枯落物的吸水量对降雨的再分配后,降雨才能到达土壤表面,对土壤表面产生冲击,当到达地面的净雨强度大于土壤的渗透强度,地表产生径流,对土壤产生侵蚀[18]。从表 6 可以看出,油松林地径流量总体表现为随着林分密度增大呈先减小后增大趋势。4 种不同密度油松人工林径流量为 7.90～9.01 L/100 m^2,不同密度油松林径流量从小到大依次为 1 750 株/hm^2<2 250 株/hm^2<1 325 株/hm^2<925 株/hm^2,其中 1 750 株/hm^2 油松林地的地表径流量最小。泥沙量表现为随着林分密度增大呈先减小后增大趋势,4 种不同密度油松林泥沙量为 38.49～121.88 g/100 m^2,不同密度油松林泥沙量从小到大依次为 1 750 株/hm^2<2 250 株/hm^2<1 325株/hm^2<925 株/hm^2,1 750 株/hm^2 密度的油松林地泥沙量最小。

表 6 不同密度油松人工林降雨径流泥沙含量

林分密度/(株·hm^{-2})	林内降雨/mm	径流量/(L·100 m^{-2})	泥沙含量/(g·L^{-1})	泥沙量/(g·100 m^{-2})
925	16.33	9.01	13.53	121.88
1325	15.35	8.70	8.36	72.76
1750	14.93	7.90	4.87	38.49
2250	14.53	8.10	5.38	43.59

2.4 不同密度油松林保育土壤功能评价

森林生态系统的保育土壤功能主要体现在活地被物对土壤结构改良、土壤肥力改善及截流减沙的能力,表征林分保育土壤能力的评价指标较多,指标间相互依赖或排斥,且林分保育土壤能力受到各指标的影响大小不同,因此综合采用多个指标评价林分保育土壤能力时需要对指标权重进行赋值,本研究运用熵权法对不同密度油松林地指标权重赋值(表 7)。

由表 7 可知,各项指标的权重为 0.059 9～0.110 1。通过熵权法计算得出的结果,结合权重与各指标标准化后数值,计算各密度林分保育土壤能力的综合评价结果为 1 750 株/hm^2(0.77)>1 325 株/hm^2(0.52)>2 250株/hm^2(0.45)>925 株/hm^2(0.25)。随着林分密度增大,油松林保育土壤的功能先增强后减弱,密度为 1 750 株/hm^2 的林地土壤结构、土壤肥力和林地截流减沙能力的效果较好。

3 讨 论

通过对晋西黄土区 4 种不同密度油松林地土壤物理特性进行研究发现,随着土层深度增加,土壤容重逐渐增大;随着林分密度增大,土壤容重先减小后增大,1 750 株/hm^2 密度下油松林地土壤容重最小。陈莉莉等[19]对秦岭不同密度油松土壤特性的研究表明,林分密度对土壤容重具有显著影响,且随林分密度增大土壤容重先减小后增大,与本研究结果相同。一般情况下,土壤中大小孔隙同时存在,总孔隙度在 50%左右,其中非毛管孔隙占 1/5～2/5 为最好,此种情况下土壤孔隙通透性比较协调[20]。本研究中 4 种林分密度林地土壤总孔隙度具有显著的差异性,且都在 50%左右,但非毛管孔隙度偏小(3.41%～4.40%),原因在于土壤孔隙状况除了受林分密度影响外,还可能与林下植被、土壤动物有关。过小或过大的林分密度均使土壤物理性质降低,这可能是由于土壤物理性质受土壤质地、结构和有机质等众多因素的影响,相较于低密度林分而言,中密度的林分植被根系对土壤结构具有更好的改善作用,林下水热条件适中,枯落物层丰厚,有利于水分和养分循环。但植被对土壤物理性质的改善作用有限,林分密度过大时,林木间竞争增强,反而不利于土壤发育。

表 7 不同密度油松人工林各指标权重

一级指标	权重	序号	二级指标	权重
土壤结构改良	0.3519	P1	土壤容重/(g·cm^{-3})	0.0896
		P2	总孔隙度/%	0.0840
		P3	毛管孔隙度/%	0.1101
		P4	非毛管孔隙度/%	0.0682
土壤肥力改善	0.5083	C1	有机质/(g·kg^{-1})	0.1097
		C2	全氮/(g·kg^{-1})	0.0599
		C3	全磷/(g·kg^{-1})	0.0673
		C4	铵态氮/(mg·kg^{-1})	0.0932
		C5	硝态氮/(mg·kg^{-1})	0.0834
		C6	速效磷/(mg·kg^{-1})	0.0949
截流减沙	0.1397	R1	径流量/(L·100 m^{-2})	0.0783
		R2	泥沙量/(g·100 m^{-2})	0.0615

不同密度油松林地间土壤养分含量均存在差异,且随着林分密度增大,土壤有机质和土壤氮、磷元素均表现为先增多后减少的趋势。其原因可能是林分密度通过改变光照和土壤微环境影响土壤有机质的输入输出,同时有机质的分解产生氮元素和磷元素,以供植物生长[21]。随着林分密度增大,枯落物增多,凋落物的腐殖化过程能分解更多的有机质、氮元素和磷元素,土壤养分含量也随之增加。但林分密度过大时,针叶凋落物分解较慢,土壤养分的消耗速率大于补偿速率,导致土壤养分含量减小,这与任丽娜等[22]的研究结果基本一致。土壤养分除全磷外,均存在表聚现象,即富集在 0—30 cm 土层,全磷含量随土层深度增加无明显变化,与王岩松等[23]的

研究结果一致。这可能是由于磷元素主要来自于岩石的风化淋溶,受到土壤母质的影响,在土壤中分布比较均匀;同时,林分密度还对坡面径流泥沙产生影响,王晓康等[24]的研究表明,径流泥沙量随林分密度的增大呈先减小后增大趋势,与本研究结果一致。林分密度增大,郁闭度也随之增大,因为林内生境状况改变,植物对光照、水分、养分条件的利用方式发生变化,从而导致林下物种组成和结构差异[25];林分密度过大时,灌草覆盖度不一定大,强降雨条件下对土壤侵蚀的防治作用较差。

保育土壤功能是森林生态系统重要的生态服务功能之一,卢妮妮等[26]对杉木及其混交林保育土壤功能研究时,以土壤养分的总含量作为林分保育土壤的指标,对土壤养分元素运用主成分分析法进行评价;贺山峰等[27]对科尔沁沙地小叶锦鸡儿群落保育土壤功能的研究中,通过对比栽植前后理化性质对保育土壤功能进行判断,但并未量化指标。与前 2 位学者的研究不同,本研究在土壤物理结构和土壤养分的基础上加入径流泥沙量这一新的监测指标,采用熵权法对土壤保育功能进行量化评价,为探究保育土壤功能的指标选取及量化评价提供了尝试。本研究结果显示,随着林分密度的增大,保育土壤功能先增强后减弱,与已有研究[28-30]结果一致。评价结果表明,中等种植密度(1 750 株/hm^2)比较适合作为研究的经营密度。也有研究[31-33]分别在土壤物理性质、养分循环、径流泥沙方面对不同密度的油松进行探索表明,中等密度(1 500,1 675 株/hm^2)有利于提高土壤物理结构和养分积累,与本研究结果一致。贺康宁等[34]的研究也表明,1 900 株/hm^2的油松林具有较好的拦蓄径流、固持土壤能力。综上所述,密度为 1 750 株/hm^2的油松人工林作为经营密度能够改善土壤结构,提高土壤肥力,减少径流泥沙,并且能为晋西黄土区的水土保持林经营管理提供一定参考。

4　结 论

(1)不同密度油松林地之间土壤容重、土壤孔隙度、有机质、土壤全量养分和速效养分含量均存在显著差异($P<0.05$),且林分密度变化不同程度地改变土壤理化性质和径流泥沙等 12 项指标。随着林分密度增大,土壤结构改良状况和土壤肥力整体呈先上升后下降的趋势,径流泥沙量呈先减小后增大趋势。

(2)通过熵权法分析评价认为,密度为 1 750 株/hm^2油松林地得分最高。中等种植密度是研究区比较合适的营林密度,有利于改善土壤结构,增强土壤肥力,提高林地截流减沙能力,使林地具有更好的保育土壤功能。针对研究区现状,建议在油松人工林管护过程中,对林分密度进行调控,以达到加强林分改良土壤、截流减沙的目的。

(3)保育土壤功能是多个因素的综合反映,其变化是一个长期的过程,受林分密度、林分生长、外界干扰等多因素影响。今后可进一步对林分保育土壤功能进行探究,进行长时间序列的定位观测,综合考虑多方面因素,找出影响林分保育土壤功能的关键因子。

参考文献:

[1] 甄倩,王百田,赵耀,等.基于土壤理化性质和植物多样性的晋西黄土区人工林质量评价[J].中国水土保持科学,2020,18(4):12-20.

[2] 李国旗,邵文山,赵盼盼,等.荒漠草原区 4 种植物群落土壤种子库特征及其土壤理化性质[J].生态学报,2019,39(17):6282-6292.

[3] 韩路,王海珍,彭杰,等.塔里木荒漠河岸林植物群落演替下的土壤理化性质研究[J].生态环境学报,2010,19(12):2808-2814.

[4] Lagomarsino A, De Meo I, Agnelli A E, et al. Decomposition of black pine (*Pinus nigra* J. F. Arnold) deadwood and its impact on forest soil components[J].The Science of the Total Environment, 2021,754:e142039.

[5] Guner S T, Erkan N, Karatas R. Effects of afforestation with different species on carbon pools and soil and forest floor properties[J].Catena,2021,196:e104871.

[6] 李婷婷,唐永彬,周润惠,等.云顶山不同人工林林下植物多样性及其与土壤理化性质的关系[J].生态学报,2021,41(3):1-10.

[7] 余新晓,吴岚,饶良懿,等.水土保持生态服务功能评价方法[J].中国水土保持科学,2007,5(2):110-113.

[8] 王顺利,刘贤德,王建宏,等.甘肃省森林生态系统保育土壤功能及其价值评估[J].水土保持学报,2011,25(5):35-39.

[9] 田宁宁,张建军,李玉婷,等.晋西黄土区退耕还林地涵养水源和保育土壤功能评价[J].水土保持学报,2015,29(5):124-129.

[10] 张向峰,王玉杰,王云琦,等.缙云山水源涵养林保育土壤的功能[J].水土保持通报,2013,33(1):68-73.

[11] 邱陆旸,张丽萍,陆芳春,等.基于熵权法的林下土壤抗蚀性评价及影响因素分析[J].水土保持学报,2016,30(4):74-79.

[12] 朱柱,杨海龙,黄乾,等.青海高寒黄土区典型水源涵养林健康评价[J].浙江农林大学学报,2019,36(6):1166-1173.

[13] 张勇强,李智超,厚凌宇,等.林分密度对杉木人工林下物种多样性和土壤养分的影响[J].土壤学报,2020,57(1):239-250.

[14] 周树平,梁坤南,杜健,等.不同密度柚木人工林林下植

被及土壤理化性质的研究[J].植物研究,2017,37(2):200-210.

[15] 王佩将,戴全厚,丁贵杰,等.退化喀斯特植被恢复过程中的土壤抗蚀性变化[J].土壤学报,2014,51(4):806-815.

[16] 侯贵荣,毕华兴,魏曦,等.黄土残塬沟壑区 3 种林地枯落物和土壤水源涵养功能[J].水土保持学报,2018,32(2):357-363.

[17] 张勇强,李智超,厚凌宇,等.林分密度对杉木人工林下物种多样性和土壤养分的影响[J].土壤学报,2020,57(1):239-250.

[18] 赵玉丽.人工降雨条件下林木对截留和产流产沙的影响[D].北京:北京林业大学,2013.

[19] 陈莉莉,王得祥,张宋智,等.不同密度油松人工林土壤特性及水源涵养功能研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2013,41(7):141-149.

[20] 冯宜明,李毅,曹秀文,等.甘肃南部不同密度云杉人工幼林的林分结构特征及土壤理化性质[J].林业科学,2018,54(10):20-30.

[21] 卜瑞瑛,梁文俊,魏曦,等.不同林分密度华北落叶松林的土壤养分特征[J].森林与环境学报,2021,41(2):140-147.

[22] 任丽娜,王海燕,丁国栋,等.林分密度对华北土石山区油松人工林土壤有机碳及养分特征的影响[J].干旱区地理,2012,35(3):456-464.

[23] 王岩松,马保明,高海平,等.晋西黄土区油松和刺槐人工林土壤养分及其化学计量比对林分密度的响应[J].北京林业大学学报,2020,42(8):81-93.

[24] 王晓康,张毓涛,张新平,等.天山中部不同林分对产流产沙影响的灰色关联分析[J].干旱区研究,2014,31(4):696-701.

[25] 吕婧娴,王得祥,张宋智,等.小陇山林区不同密度油松人工林林下物种多样性研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2010,38(11):49-56.

[26] 卢妮妮,许昊,廖文超,等.杉木及其混交林的结构与功能模型:以福建省将乐国有林场为例[J].中国水土保持科学,2016,14(2):74-80.

[27] 贺山峰,王娟,邱兰兰,等.科尔沁沙地小叶锦鸡儿群落保育土壤作用的研究[J].水土保持通报,2009,29(3):73-77.

[28] 余新晓,张晓明,武思宏,等.黄土区林草植被与降水对坡面径流和侵蚀产沙的影响[J].山地学报,2006,24(1):19-26.

[29] 王媚臻,毕浩杰,金锁,等.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[J].生态学报,2019,39(3):981-988.

[30] 董威,刘泰瑞,覃志杰,等.不同林分密度油松天然林土壤理化性质及微生物量碳氮特征研究[J].生态环境学报,2019,28(1):65-72.

[31] 周娅,陈宇轩,邹瑞,等.北京八达岭不同密度油松土壤团聚体特征研究[J].西南林业大学学报,2016,36(2):25-30.

[32] 李民义,张建军,郭宝妮,等.晋西黄土区不同密度油松人工林林下植物多样性及水文效应[J].生态学杂志,2013,32(5):1083-1090.

[33] 赵广亮,王继兴,王秀珍,等.油松人工林密度与养分循环关系的研究[J].北京林业大学学报,2006,28(4):39-44.

[34] 贺康宁,张建军,朱金兆.晋西黄土残塬沟壑区水土保持林坡面径流规律研究[J].北京林业大学学报,1997,19(4):3-8.

(上接第 188 页)

[23] 曹永强,宁月,李玲慧,等.基于 SPEI 指数的河北省多尺度旱涝特征分析[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2021,42(3):76-85.

[24] Zhang Q, Cui F Q, Dai L W, et al. Pastoralists' perception of and adaptation strategies for climate change: Associations with observed climate variability[J].Natural Hazards,2019,96(3):1387-1412.

[25] 柏庆顺,颜鹏程,蔡迪花,等.近 56 a 中国西北地区不同强度干旱的年代际变化特征[J].干旱气象,2019,37(5):722-728.

[26] 王学凤,路洁,曹永强.辽宁省近 54 年旱涝特征分析及其对大气环流响应研究[J].水利学报,2020,51(12):1514-1524.