

DOI:10.12403/j.1001-1498.20220268

人为干预对太行山坡地核桃林土壤理化性质的影响

李鑫, 刘倩愿, 郭文芳, 王佳乐, 刘亚楠, 李涵聪, 陈艳梅*

(河北师范大学地理科学学院/河北省环境变化遥感识别技术创新中心/河北省环境演变与生态建设重点实验室, 河北 石家庄 050024)

摘要: [目的] 探究人为干预对山区坡地人工经济林土壤理化性质的影响, 为森林土壤恢复和可持续经营提供科学依据。[方法] 以太行山坡地未管理、清理灌草、清理灌草施肥这3种干预方式的核桃林为研究对象, 通过野外调查和室内实验比较分析3种干预对核桃林土壤理化性质影响, 并采用主成分分析法对土壤质量综合评价。[结果] (1) 不同人为干预的核桃林土壤理化性质差异明显, 未管理的土壤黏粒、粉粒、电导率、有机碳、全氮、全磷最高, 土壤砂粒、含水量最低; 清理灌草的土壤黏粒、粉粒、电导率、有机碳、全氮等较未管理显著降低 ($p<0.05$), 土壤砂粒、含水量则较未管理显著增加 ($p<0.05$); 清理灌草施肥的土壤黏粒、粉粒、电导率、含水量、全氮、全磷、全钾较清理灌草略有增加, 土壤砂粒、pH、有机碳等较清理灌草略有降低。(2) 各干预的核桃林土壤理化性质之间相关性显著, 土壤黏粒与砂粒在均呈极显著负相关 ($p<0.01$), 土壤有机碳与全氮均呈显著 ($p<0.05$) 或极显著 ($p<0.01$) 正相关, 其余土壤理化指标则在各干预、干预内部土层间呈不同程度的相关性变化。(3) 各干预的核桃林土壤理化性质存在一定程度变异, 土壤pH在均表现为弱变异性, 土壤有机碳、全氮均表现为中等变异性, 其余土壤理化指标在各干预、干预内部土层间处于弱变异性与中等变异性的动态变化。(4) 3种干预核桃林土壤质量综合评价结果依次为: 未管理 (2.120)>清理灌草施肥 (-0.820)>清理灌草 (-1.258), 表明未管理的核桃林土壤质量较好, 清理灌草的核桃林土壤质量最差, 清理灌草施肥的核桃林土壤质量改善效果不大。[结论] 人为干预显著影响太行山坡地核桃林土壤理化性质并造成土壤质量差异, 因此在经营核桃林时应注重人为干预的调控管理。

关键词: 人为干预; 核桃林; 太行山坡地; 土壤理化性质; 土壤质量评价

中图分类号: S714.2

文献标志码: A

文章编号: 1001-1498(2023)01-0154-12

人工经济林具有涵养水源、保持水土、提供产品等重要功能^[1], 因此在丘陵坡地广泛种植。土壤能为植物提供生长所需的养分和环境基础, 直接或间接影响森林健康发展^[2]。人为干预作为人工经济林形成、发育过程的重要因素, 不同干预方式、强度等能影响林地土壤环境^[3]。目前, 人为干预主要方式有清理灌草、清除枯落物、施肥、火烧等, 这些干预通过影响林地水热条件与养分循环, 使不同种经济林之间以及同种经济林内部土壤环境发生变化^[4]。因此, 研究人为干预对人工经济林土壤环境

的影响, 对丘陵坡地土壤质量改良、促进人工经济林健康发展等具有重要意义^[5-6]。

土壤理化性质是评价林地土壤环境的重要因素, 其变化能反映人为干预对森林土壤环境的影响状况^[7]。当前, 关于人为干预对山地森林土壤理化性质影响的研究较多, 但多集中在不同干预方式、强度等对原生林与次生林方面, 有关人工经济林土壤的研究成果不多。张姣等^[8]研究割脂、清除凋落物和火灾等干预下贵州山地马尾松 (*Pinus massoniana* Lamb) 林土壤特征, 发现上述干预

收稿日期: 2022-05-24 修回日期: 2022-08-12

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFB3901104)

* 通讯作者: 陈艳梅, 教授, 博士生导师。主要从事区域生态学和水土保持研究。电话: 13603398920。Email: 330896729@qq.com

方式使马尾松林土壤 pH、土壤密度、有机碳、全氮、全磷含量等产生显著变化。李翀等^[9]通过分析不同施肥、采伐留养强度对浙江低山丘陵的毛竹 (*Phyllostachys edulis* (Carriere) J. Houzeau) 林土壤有机碳含量影响,发现中等施肥、弱度采伐与大量施肥、强度采伐下土壤有机碳含量变化量差异极显著,提出不同施肥、采伐强度的干预能显著影响毛竹林土壤碳库。Awotoye 等^[10]研究不同强度伐木干预对尼日利亚山地人工林土壤性质影响,发现一定程度采伐干预能使土壤养分含量增加,但随着采伐强度增大,土壤养分含量降低。上述学者从人为干预角度研究了不同山地丘陵的森林土壤特征及变化。随着人工经济林种植规模扩大,在温带半湿润、半干旱的丘陵坡地出现多种干预方式的人工经济林,在产生经济效益的同时,也改变着坡地土壤环境。据此,一些学者研究后提出人为干预使人工经济林坡地土壤呈退化趋势,也有学者研究发现不同干预使人工经济林坡地土壤养分趋于改善,研究结果差异较大^[11-12]。总之,相关研究结论不一致,对一些典型生境内人工经济林土壤特征变化特征认识还不够深入,需要进一步研究人为干预下的人工经济林土壤变化特征与内在机制,从而为不同地区坡地人工经济林土壤质量的可持续性服务^[13]。

太行山丘陵坡地属于典型水土流失区域,其生态基底敏感脆弱,主要植被为灌木和草丛,土壤相对贫瘠^[14]。自本世纪初,为改善环境和发展农业,该区域陆续实施人工经济林种植工程,通过栽种核桃 (*Juglans regia* L.) 等经济树种,使植被覆盖率不断提升。随着大量坡地被改造,该区内出现多种人为干预的核桃林,其对太行山坡地核桃林土壤理化性质的影响,一直缺乏调查研究和深入认识。因此,本研究以太行山坡地 2003 年栽种核桃林为研究对象,分析 3 种干预对核桃林土壤理化性质的影响,并对各干预核桃林土壤质量综合评价,从而为太行山坡地核桃林的土壤恢复和可持续经营提供科学理论指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于河北临城县绿蕾农林科技有限公司的核桃基地 (114°29'16.00" E~114°30'1.40" E, 37°29'47.00" N~37°29'2.70" N), 该基地位于河北省西部、太行山东麓,属于丘陵地形的典型

小流域坡地,其整体海拔在 120~180 m 之间。该区属于暖温带大陆性季风气候,夏季炎热多雨,冬季干燥寒冷,年内温差较大,且降水集中。年平均气温在 12~14 °C,其中 1 月平均气温为 -2 °C,7 月平均气温为 27 °C;降水多集中在 7~9 月,年均降水量 605 mm。土壤类型多为棕壤和风化形成的山地褐土,土质中性偏碱,土壤沙性强,土层浅薄且易侵蚀。

1.2 样地设置与样品采集

根据资料查阅和野外实地调查,2021 年 8 月在基地西北部坡地的坡度 10°~12°、海拔 143~149 m 的位置,选取栽植于 2003 年的核桃林,其干预方式有 3 种,分别为:未管理 (LI)、清理灌草 (MI)、清理灌草施肥 (HI),将这 3 种人为干预的核桃林作为研究对象,并根据干预程度将 LI、MI、HI 样地分别划分为轻度干预、中度干预和高度干预。每种人为干预内设置 4 个重复,共设置 12 个样地,每个样地内设置 1 个 5 m × 5 m 调查样方内进行基本特征调查与土壤取样,研究样地基本概况见表 1。在各样地的 5 m × 5 m 调查样方内设置土壤采样点,进行 4 个重复,在每个采样点用土钻分层采集 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm 的土壤样品,将采集的所有土壤样品装入密封袋保存带回实验室。全部过 2 mm 孔径土筛除去土壤中动、植物残体及砾石后,将重复采样点的土壤样品按四分法均匀混为 1 份,后用于土壤理化性质的测定。

1.3 土壤理化性质测定

本研究选取了土壤颗粒组成、电导率 (EC)、含水量 (SWC)、pH、有机碳 (TOC)、全氮 (TN)、全磷 (TP)、全钾 (TK) 等指标进行分析测定。其中,土壤颗粒组成采用马尔文 MS-3000 激光粒度分析仪测定;土壤电导率 (EC) 采用电导率仪测定,土水比 1:5 浸提,静置后取上层澄清液测定;土壤含水量采用烘干称量法 (105°, 24h) 测定;土壤 pH 采用电极电位法测定,土水比为 1:2.5;土壤有机碳 (TOC)、土壤全氮 (TN) 含量采用 CN 元素分析仪测定^[15];土壤全磷 (TP) 含量采用钼锑抗比色法测定;土壤全钾 (TK) 含量采用原子吸收分光光度法测定。

1.4 数据处理与统计分析

用 Excel2010 软件对土壤理化性质数据进行

表1 研究样地基本概况
Table 1 Basic overview of the study plot

核桃林样地 Walnut forest sample plot	LI	MI	HI
树龄Tree age/a	18	18	18
平均树高 Mean height/m	2.67 ± 0.09	5.23 ± 0.16	5.85 ± 0.39
平均胸径Average DBH/cm	43.67 ± 7.54	46.29 ± 2.01	49.07 ± 5.71
平均冠幅Average crown width/m	3.02 ± 0.09	5.06 ± 0.29	5.19 ± 0.55
种植密度Planting density/(tree·hm ⁻²)	1 000	1 000	1 000
植被结构 Vegetation structure	乔木 + 灌木 + 草本	乔木 + 草本	乔木 + 草本
干预方式 Intervention mode	未管理	清理灌草	清理灌草施肥
干预措施 Intervention measures	1.每年秋季采集果实;	1.每年秋季采集果实; 2.每2年清除1次, 清除林下株高≥20~30 cm灌草植物;	1.每年秋季采集果实; 2.每2年清除1次, 清除林下株高≥20~30 cm灌草植物; 3.每2年施有机肥1次, 平均施肥量约为620~650 kg·hm ⁻²
干预程度 Degree of intervention	轻度干预	中度干预	高度干预

预处理;用 SPSS26.0 软件对土壤理化性质数据进行单因素方差分析和 LSD 法显著性检验 ($p < 0.05$);用双因素方差法分析人为干预、土层深度对土壤理化性质是否存在交互影响;用 Pearson 法对土壤理化性质相关性进行分析和显著性检验;用变异系数 (CV) 来分析土壤理化性质数据的变异性;用主成分分析法对各干预的土壤质量进行综合评价。用 Origin2019 软件绘制图表。

变异系数 (CV) 公式如下:

$$CV = \text{标准差} / \text{平均值} \times 100\% \quad (1)$$

式中, CV 为变异系数, 其中 $CV \leq 10\%$ 为弱变异性, $10\% < CV < 100\%$ 为中等变异性, $CV \geq 100\%$ 为强变异性^[16]。

此外, 主成分分析中由于各土壤理化指标量纲不同, 为排除其对结果影响, 需对原始数据进行标准化处理, 本研究采用了采用“S”型函数进行标准化^[17-18], “S”型函数分为升型和降型函数两种, 具体公式:

$$\text{升型: } f(x) = \begin{cases} 0.1, & x \leq a \\ 0.9x(x-a)/(b-a) + 0.1, & a < x < b \\ 1.0, & x \geq b \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{降型: } f(x) = \begin{cases} 0.1, & x \leq a \\ 0.9x(b-x)/(b-a) + 0.1, & a < x < b \\ 1.0, & x \geq b \end{cases} \quad (3)$$

式中, x 为土壤理化性质的某一指标值, a 和 b 分别为各个土壤理化指标的最小值和最大值。研

究选取的土壤理化性质指标中, 因土壤砂粒含量在一定范围内与土壤质量成负相关^[19], 故采取降型函数, 其余土壤理化指标均采取升型函数标准化。

2 结果与分析

2.1 土壤物理性质特征

土壤颗粒组成作为重要土壤物理参数, 影响土壤水分、养分和植被生长^[20]。由表 2 可知, 3 种人为干预的土壤颗粒体积百分比含量均以粉粒为主 (约占 61.31%), 砂粒次之 (约占 22.68%), 黏粒最少 (约占 16.02%)。其中, 0~30 cm 土层土壤粉粒含量均表现为 $LI > HI > MI$, 且 0~20 cm 土层粉粒含量 LI 显著高于 MI 、 HI ($p < 0.05$), 在 LI 内部 0~10 cm 土层粉粒含量显著高于 20~30 cm 土层 ($p < 0.05$)。0~30 cm 土层土壤砂粒含量均表现为 $MI > HI > LI$, 且 MI 、 HI 显著高于 LI ($p < 0.05$), 在 LI 、 MI 、 HI 内部不同土层间土壤砂粒含量变化不显著。土壤黏粒含量变化相对复杂, 0~10 cm 土层黏粒含量为 $HI > LI > MI$, 10~20 cm 土层黏粒含量为 $LI > HI > MI$, 20~30 cm 土层黏粒含量为 $LI > MI > HI$, 且 10~30 cm 土层黏粒含量 LI 显著高于 MI 、 HI ($p < 0.05$), 在 LI 内部 20~30 cm 土层黏粒含量显著高于 0~10 cm 土层 ($p < 0.05$)。表明在核桃林内, 清理灌草、清理灌草施肥的干预对土壤颗粒组成影响显著, 随着人为干预增加, 土壤粉粒、砂粒和黏粒含量分别呈先降低后略增、先增加后降低、先降低后略增的不同趋势, 但各土层间存在趋势差异。

表 2 不同人为干预的核桃林土壤颗粒组成、电导率和含水量特征

Table 2 Characteristics of soil particle composition, conductivity and water content of walnut forest under different anthropogenic interventions

样地 Sample plot	土层 Layer cm	土壤颗粒体积百分比含量/% Soil particle volume percentage content/%			电导率 Conductivity($\mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$)	含水量 Water content($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)
		黏粒 Clay(<0.002 mm)	粉粒 Silt(0.002~0.05 mm)	砂粒 Sand(0.05~2 mm)		
LI	0~10	14.01 ± 2.69 Ba	73.63 ± 1.44 Aa	12.36 ± 1.48 Ab	110.62 ± 7.55 Aa	80.59 ± 11.51 Ab
	10~20	22.86 ± 1.69 ABa	67.06 ± 1.15 ABa	10.08 ± 0.77 Ab	112.85 ± 7.64 Aa	81.41 ± 10.64 Ab
	20~30	29.44 ± 3.45 Aa	61.26 ± 3.23 Ba	9.30 ± 0.79 Ab	119.22 ± 6.64 Aa	80.34 ± 9.80 Ab
MI	0~10	13.31 ± 1.08 Aa	57.30 ± 1.66 Ab	29.39 ± 2.74 Aa	84.51 ± 5.02 Ab	171.93 ± 4.64 Aa
	10~20	12.37 ± 0.61 Ab	55.97 ± 0.26 Ab	31.66 ± 0.61 Aa	81.03 ± 4.98 Ab	170.96 ± 21.33 Aa
	20~30	12.38 ± 0.84 Ab	56.74 ± 0.77 Aa	30.89 ± 1.26 Aa	85.21 ± 5.89 Ab	183.91 ± 2.70 Aa
HI	0~10	14.09 ± 1.85 Aa	60.72 ± 1.88 Ab	25.20 ± 3.21 Aa	98.05 ± 1.70 Aab	179.72 ± 9.83 Aa
	10~20	13.48 ± 1.60 Ab	59.82 ± 2.19 Ab	26.71 ± 3.65 Aa	91.33 ± 3.54 ABb	190.73 ± 5.02 Aa
	20~30	12.20 ± 2.59 Ab	59.30 ± 1.75 Aa	28.50 ± 3.62 Aa	82.35 ± 4.84 Bb	214.41 ± 32.93 Aa

注: 表中数据为平均值 + 标准误; 同列不同大写字母表示同一样地不同土层间差异显著($p < 0.05$), 同列不同小写字母表示同一土层不同样地间差异显著($p < 0.05$); LI: 未管理, MI: 清除灌草, HI: 清除灌草施肥, 下同。

Note: The data in the table are the average value + standard error. Different capital letters in the same column indicate significant differences between different soil layers in the same soil layer ($p < 0.05$), and different small letters in the same column indicate significant differences between different soil layers in the same soil layer ($p < 0.05$). LI: Not managed, MI: Clearing shrub and grass, HI: Clearing shrub and grass and fertilizing. The following is the same.

土壤电导率对森林土壤变化存在一定程度响应, 可用其表征土壤盐分、质地结构等指标^[21]。由表 2 可知, 3 种人为干预下的土壤电导率存在差异, 其中, 在 0~20 cm 土层电导率为 LI>HI>MI, 20~30 cm 土层电导率为 LI>MI>HI, 且 LI 显著高于 MI、HI ($p < 0.05$), 在 HI 内部 0~10 cm 土层电导率显著高于 20~30 cm 土层 ($p < 0.05$), 表明在核桃林内, 清理灌草、清理灌草施肥的干预对土壤电导率影响显著, 随着人为干预增加, 土壤电导率整体呈先下降后增加的趋势, 但各土层间存在趋势差异。

土壤水分可以为植被光合作用提供原料, 并影响土壤内部生物有氧呼吸与土壤养分维持^[22]。由表 2 可知, 3 种人为干预下的土壤含水量存在差异, 其中, 0~30 cm 土层含水量均为 HI>MI>LI, 且 MI、HI 显著高于 LI ($p < 0.05$), LI、MI、HI 内部不同土层间土壤含水量变化不显著, 表明在核桃林内, 清理灌草、清理灌草施肥的干预对土壤含水量影响显著, 随着人为干预增加, 土壤含水量整体呈增加趋势。

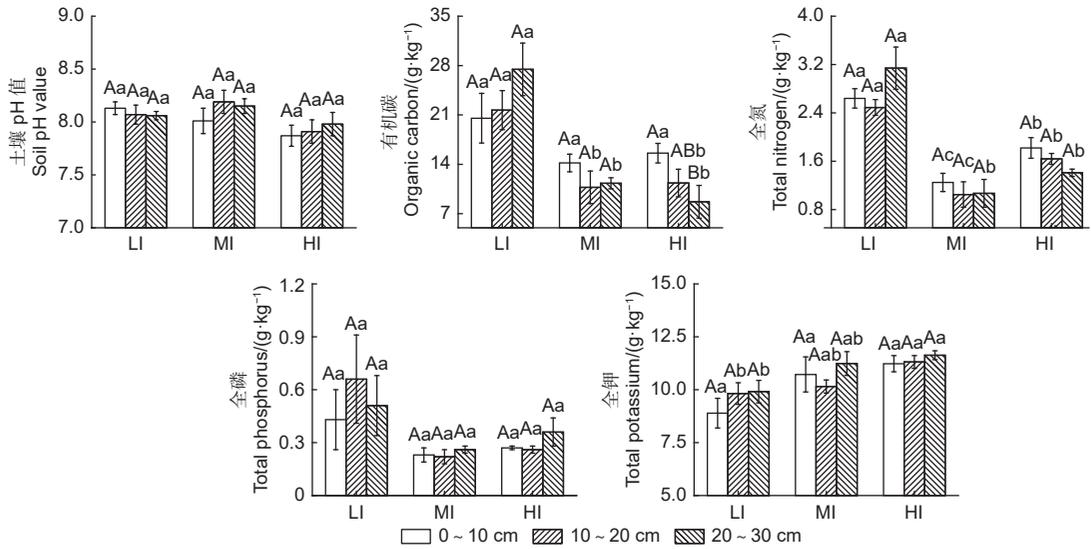
2.2 土壤化学性质特征

对核桃林土壤化学性质分析表明 (图 1), 3 种人为干预下的土壤 pH、有机碳、全氮、全磷和全

钾存在差异, 但差异程度不一致。其中, 土壤 pH 变化趋势较为稳定, 在 0~30 cm 土层 pH 平均值大小为 MI>LI>HI, MI 平均值分别比 LI、HI 高约 0.38%、2.47%, 表明在核桃林内, 清理灌草的干预使土壤 pH 略有升高, 而清理灌草施肥的干预则使土壤 pH 相对下降。

土壤有机碳含量变化趋势相对复杂, 其中, 0~20 cm 土层有机碳含量为 LI>HI>MI, 在 20~30 cm 土层有机碳含量为 LI>MI>HI, 且 10~30 cm 土层内 LI 均显著高于 MI、HI ($p < 0.05$), 在 HI 内部 0~10 cm 土层有机碳含量显著高于 20~30 cm 土层 ($p < 0.05$), 表明在核桃林内, 清理灌草、清理灌草施肥的干预对土壤有机碳含量影响显著, 土壤有机碳含量整体呈随人为干预增加而先下降后略增的趋势, 但各土层间存在趋势差异。

土壤全氮、全磷含量变化趋势较为一致, 二者在 0~30 cm 土层均表现为 LI>HI>MI, 但土壤全氮含量在 0~20 cm 土层内 LI 显著高于 MI、HI ($p < 0.05$), 且 MI 显著高于 HI ($p < 0.05$), 土壤全磷含量在各干预样地之间、各干预样地内部土层之间均无显著性差异, 表明在核桃林内, 清理灌草、清理灌草施肥的干预对土壤全氮含量影响显著, 对土壤全磷含量影响较小, 但二者均呈随人为干预增加



注：表中数据为平均值 + 标准误；不同大写字母表示同一样地不同土层间差异显著 ($p < 0.05$)，不同小写字母表示同一土层不同样地间差异显著 ($p < 0.05$)。

Notes: The data in the table are the average value + standard error. Different capital letters indicate significant differences between different soil layers in the same soil layer ($p < 0.05$), and different small letters indicate significant differences between different soil layers in the same soil layer ($p < 0.05$).

图 1 不同人为干预的核桃林土壤化学性质特征

Fig. 1 Characteristics of soil chemical properties of walnut forest under different human intervention

而先下降后略增的趋势。

土壤全钾含量变化趋势较为稳定，即 0~30 cm 土层全钾含量均表现为 $HI > MI > LI$ ，且 10~30 cm 土层内 HI 显著高于 LI ($p < 0.05$)，但各干预样地内部土层之间均无显著性差异，表明在核桃林内，清理灌草的干预对土壤全钾含量影响有限，清理灌草施肥的干预对土壤全钾含量影响显著，土壤全钾含量整体呈随人为人为干预增加而增加的趋势。

2.3 人为干预与土层深度对土壤理化性质影响

由双因素方差分析显示 (表 3)，人为干预显著影响核桃林土壤黏粒、粉粒、砂粒、电导率、含水量、pH、有机碳、全氮、全磷和全钾含量

($p < 0.05$)。土层深度仅显著影响核桃林土壤粉粒含量 ($p < 0.05$)，而对其余理化指标无显著影响。人为干预 × 土层深度的交互作用显著影响核桃林的土壤黏粒、粉粒含量 ($p < 0.05$)，对其余理化指标无显著影响。

2.4 土壤理化性质相关性

由表 4~6 可知，3 种人为干预的土壤理化性质之间相关关系存在明显差异。在未管理的 LI 样地内，土壤黏粒与粉粒呈极显著负相关关系 ($p < 0.01$)，土壤粉粒与砂粒呈显著正相关关系 ($p < 0.05$)，土壤电导率与全氮呈显著正相关关系、与全磷呈显著负相关关系 ($p < 0.05$)。在清理灌草的 MI 样地内，土壤黏粒与粉粒呈显著正相关

表 3 人为干预与土层深度对核桃林土壤理化性质影响方差分析

Table 3 Variance Analysis of influence of human intervention and soil depth on soil physical and chemical properties of walnut forest

项目 Project	黏粒 Clay	粉粒 Silt	砂粒 Sand	电导率 Conductivity	含水量 Water content	pH pH	有机碳 Organic carbon	全氮 Total nitrogen	全磷 Total phosphorus	全钾 Total potassium
人为干预 Human intervention	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.033	<0.001	<0.001	0.016	0.001
土层深度 Soil depth	0.054	0.010	0.948	0.829	0.430	0.681	0.548	0.482	0.742	0.291
人为干预 × 土层深度 Human intervention × Soil depth	0.002	0.022	0.685	0.300	0.823	0.713	0.095	0.126	0.812	0.672

关系 ($p<0.05$), 土壤粉粒与砂粒呈显著负相关关系、与全钾呈显著正相关关系 ($p<0.05$), 土壤砂粒与全钾呈显著负相关关系 ($p<0.05$), 土壤电导率与 pH 呈极显著负相关关系 ($p<0.01$)、与全氮呈显著正相关关系 ($p<0.05$), 土壤 pH 与有机碳呈显著负相关关系 ($p<0.05$)、与全氮呈极显著负相关关系 ($p<0.01$), 土壤全氮和全磷呈极显著正

相关关系 ($p<0.01$)。在清理灌草施肥的 HI 样地内, 土壤粉粒与砂粒呈极显著负相关关系 ($p<0.01$), 土壤 pH 与全钾呈显著负相关关系 ($p<0.05$), 土壤有机碳与全磷呈显著负相关关系 ($p<0.05$)。3 种人为干预下, 各干预样地间的土壤黏粒与砂粒均呈极显著负相关关系 ($p<0.01$), 土壤有机碳与全氮均呈显著或极显著正相关关系

表 4 未管理核桃林 LI 土壤理化性质相关系数

Table 4 Correlation coefficient of soil physical and chemical properties of unmanaged walnut forest (LI)

样地 Sample plot	土壤指标 Soil indexes	黏粒 Clay	粉粒 Silt	砂粒 Sand	电导率 Conductivit	含水量 Water content	pH pH	有机碳 Organic carbon	全氮 Total nitrogen	全磷 Total phosphorus	全钾 Total potassium
LI	黏粒 Clay	1									
	粉粒 Silt	-0.975**	1								
	砂粒 Sand	-0.781**	0.621*	1							
	电导率 Conductivit	0.047	-0.069	0.028	1						
	含水量 Water content	-0.103	0.085	0.124	0.530	1					
	pH pH	-0.267	0.338	-0.007	0.004	0.193	1				
	有机碳 Organic carbon	0.249	-0.229	-0.223	0.537	0.210	0.260	1			
	全氮 Total nitrogen	0.121	-0.111	-0.115	0.584*	0.142	0.413	0.822**	1		
	全磷 Total phosphorus	0.243	-0.109	-0.547	-0.668*	-0.484	-0.110	-0.304	-0.322	1	
	全钾 Total potassium	0.132	-0.100	-0.184	0.170	0.335	0.511	0.364	0.384	0.113	1

注: *表示显著相关($p<0.05$); **表示极显著相关($p<0.01$), 下同

Note: * indicates significant correlation ($p<0.05$), ** indicates extremely significant correlation ($p<0.01$), the same below

表 5 清理灌草核桃林 MI 土壤理化性质相关系数

Table 5 Correlation coefficient of soil physical and chemical properties of Walnut forest clearing, shrub and grass (MI)

样地 Sample plot	土壤指标 Soil indexes	黏粒 Clay	粉粒 Silt	砂粒 Sand	电导率 Conductivit	含水量 Water content	pH pH	有机碳 Organic carbon	全氮 Total nitrogen	全磷 Total phosphorus	全钾 Total potassium
MI	黏粒 Clay	1									
	粉粒 Silt	0.692*	1								
	砂粒 Sand	-0.901**	-0.937**	1							
	电导率 Conductivit	0.510	0.442	-0.513	1						
	含水量 Water content	-0.110	0.009	0.048	0.394	1					
	pH pH	-0.480	-0.463	0.511	-0.818**	-0.096	1				
	有机碳 Organic carbon	0.127	0.271	-0.225	0.440	-0.148	-0.634*	1			
	全氮 Total nitrogen	0.227	0.241	-0.255	0.705*	0.214	-0.778**	0.682*	1		
	全磷 Total phosphorus	-0.152	-0.011	0.080	0.393	0.331	-0.323	0.427	0.793**	1	
	全钾 Total potassium	0.531	0.606*	-0.622*	0.501	-0.063	-0.343	0.282	0.030	-0.098	1

表 6 清理灌草施肥核桃林 HI 土壤理化性质相关系数

Table 6 Correlation coefficient of soil physical and chemical properties of Walnut forest clearing, shrub grass and fertilization (HI)

样地 Sample plot	土壤指标 Soil indexes	黏粒 Clay	粉粒 Silt	砂粒 Sand	电导率 Conductivit	含水量 Water content	pH pH	有机碳 Organic carbon	全氮 Total nitrogen	全磷 Total phosphorus	全钾 Total potassium
HI	黏粒 Clay	1									
	粉粒 Silt	0.538	1								
	砂粒 Sand	-0.885**	-0.869**	1							
	电导率 Conductivit	-0.078	0.061	0.012	1						
	含水量 Water content	0.514	0.178	-0.401	-0.574	1					
	pH pH	0.334	0.434	-0.436	-0.248	0.347	1				
	有机碳 Organic carbon	0.443	0.550	-0.564	0.106	0.192	-0.130	1			
	全氮 Total nitrogen	0.350	0.502	-0.483	0.279	-0.017	-0.266	0.797**	1		
	全磷 Total phosphorus	-0.478	0.002	0.280	0.127	-0.276	0.171	-0.590*	-0.400	1	
	全钾 Total potassium	-0.193	-0.156	0.200	0.117	-0.013	-0.664*	-0.208	-0.041	0.258	1

($p < 0.05$ 、 $p < 0.01$)。

2.5 土壤理化性质变异性

由表 7 可知, 3 种人为干预的核桃林土壤表现出不同程度的变异性。在各干预样地之间, 未管理 LI 的土壤黏粒、砂粒、含水量、pH、全钾的变异性最大, 土壤电导率、有机碳、全氮、全磷的变异性最小; 清理灌草 MI 的土壤黏粒、粉粒、砂粒、含水量、全钾的变异性最小; 清理灌草施肥 HI 的土壤粉粒、电导率、有机碳、全氮、全磷的变异性最大, 土壤 pH 的变异性最小。3 种人为干预下, 各干预样地、样地内部土层之间的土壤 pH 均表现为弱变异性, 土壤有机碳、全氮均表现为中等变异性, 其余理化指标则在各样地、样地内部土层间处于弱变异性性和中等变异性的动态变化。

2.6 土壤质量综合评价

为对不同人工干预的核桃林进行土壤质量综合评价, 将土壤理化性质各指标作为评价指标, 进行主成分分析。将各土壤指标经 KMO 和 Bartlett 球形检验, KMO 值为 0.664, Bartlett 球形检验的相伴概率 $p < 0.01$, 说明本研究选取的评价指标间存在较强相关性, 适合采用主成分分析法评价各人为干预的核桃林土壤质量。对主成分进行提取时, 依据主成分特征值大于 1 的原则, 提取了前 2 个公因子, 其特征值分别为 5.335、1.316, 第 1 主成

分的总方差贡献率为 53.353%, 第 2 主成分的总方差贡献率为 13.158%, 累积方差贡献率达到 66.511% (表 8), 表明提取出来的 2 个主成分可作为土壤质量评价的参考。

将提取出来的 2 个主成分分别记作 FAC_1 、 FAC_2 , 得到土壤质量评价各指标的因子得分系数矩阵 (表 9), 其中土壤黏粒、粉粒、砂粒、电导率、含水量、有机碳、全氮、全磷在第一主成分 (FAC_1) 中发挥了重要作用, 土壤 pH、全钾在第二主成分 (FAC_2) 中发挥了重要作用。对应表 9 的 2 个主成分得分的表达式分别为:

$$FAC_1 = 0.135X_1 + 0.132X_2 - 0.177X_3 + 0.155X_4 - 0.154X_5 + 0.015X_6 + 0.158X_7 + 0.173X_8 + 0.091X_9 - 0.096X_{10} \quad (4)$$

$$FAC_2 = 0.057X_1 - 0.071X_2 + 0.007X_3 + 0.243X_4 + 0.151X_5 - 0.645X_6 + 0.116X_7 + 0.169X_8 - 0.063X_9 - 0.455X_{10} \quad (5)$$

将标准化处理后各土壤指标数值分别代入 2 个主成分的表达式, 计算得到不同样地各主成分的得分情况。最后, 根据 2 个主成分所对应的特征值所占提取主成分总特征值之和的比例作为权重, 得到土壤质量综合评价方程^[23], 具体公式如下:

$$P = \frac{53.353 \times FAC_1 + 13.158 \times FAC_2}{66.511} \quad (6)$$

表 7 不同人为干预的核桃林土壤理化性质变异系数

Table 7 Variation coefficient of soil physical and chemical properties of walnut forest under different human intervention

样地 Sample plot	土壤指标 Soil indexes	黏粒 Clay	粉粒 Silt	砂粒 Sand	电导率 Conductivity	含水量 Water content	pH	有机碳 Organic carbon	全氮 Total nitrogen	全磷 Total phosphorus	全钾 Total potassium	%
LI	0~10	38.41	3.9	23.87	13.66	28.56	1.4	34.25	12.18	78.38	15.84	
	10~20	16.18	5.81	18.61	11.88	26.13	2.96	17.56	24.2	33.74	15.47	
	20~30	26.21	6.19	25.51	3.48	24.4	2.52	17.9	18.47	8.29	6.82	
MI	0~10	14.79	3.43	15.22	13.54	5.4	2.24	25.49	10.32	75.99	10.44	
	10~20	9.94	0.93	3.83	12.3	24.96	2.68	43.05	39.95	35.12	6.2	
	20~30	23.8	7.33	27.33	7.76	2.93	2.66	34.37	10.97	15.67	5.27	
HI	0~10	23.44	10.54	17.01	11.14	10.94	1.08	27.13	22.41	68.09	10.66	
	10~20	13.5	2.71	8.16	13.83	5.26	1.82	13.71	43.04	80.02	9.89	
	20~30	42.54	5.91	25.4	11.75	30.72	2.69	53.42	8.33	45.13	3.62	

表 8 主成分分析的特征值与方差贡献率

Table 8 Eigenvalue and variance contribution rate of principal component analysis

成分 Component	初始特征值 Initial eigenvalue			提取载荷平方和 Extract the sum of squares of loads		
	总计 Total	总方差贡献率 Total variance contribution rate/%	累积贡献率 Cumulative contribution rate/%	总计 Total	总方差贡献率 Total variance contribution rate/%	累积贡献率 Cumulative contribution rate/%
黏粒 Clay	5.335	53.353	53.353	5.335	53.353	53.353
粉粒 Silt	1.316	13.158	66.511	1.316	13.158	66.511
砂粒 Sand	0.990	9.903	76.414			
电导率 Conductivity	0.830	8.297	84.711			
含水量 Water content	0.649	6.488	91.200			
pH	0.348	3.483	94.683			
有机碳 Organic carbon	0.273	2.731	97.414			
全氮 Total nitrogen	0.191	1.906	99.320			
全磷 Total phosphorus	0.068	0.679	99.999			
全钾 Total potassium	0.000	0.001	100.000			

表 9 土壤质量评价各指标的因子得分系数矩阵

Table 9 Factor score coefficient matrix of each index of soil quality evaluation

主成分 Principal component	黏粒 Clay (X ₁)	粉粒 Silt (X ₂)	砂粒 Sand (X ₃)	电导率 Conductivity (X ₄)	含水量 Water content (X ₅)	pH (X ₆)	有机碳 Organic carbon (X ₇)	全氮 Total nitrogen (X ₈)	全磷 Total phosphorus (X ₉)	全钾 Total potassium (X ₁₀)
FAC ₁	0.135	0.132	-0.177	0.155	-0.154	0.015	0.158	0.173	0.091	-0.096
FAC ₂	0.057	-0.071	0.007	0.243	0.151	-0.645	0.116	0.169	-0.063	0.455

土壤质量综合评价方程的计算结果表明(表 10), 在 3 种不同人为干预影响下的核桃林土

壤质量综合得分排序为: 未管理 LI (2.120) > 清理灌草施肥 HI (-0.820) > 清理灌草 MI (-1.258),

表 10 不同人为干预的核桃林土壤质量评价

Table 10 Evaluation of soil quality of walnut forest under different human intervention

样地 Sample plot	FAC ₁		FAC ₂		综合得分 Comprehensive score	
	得分 Score	贡献率 Contribution rate/%	得分 Score	贡献率 Contribution rate/%	得分 Score	排名 Ranking
LI	3.376	53.353	-2.971	13.158	2.120	1
MI	-0.368		-4.871		-1.258	3
HI	-0.159		-3.498		-0.820	2

表现出轻度干预核桃林土壤质量明显较好, 中度干预核桃林土壤质量最差, 而高度干预核桃林土壤质量较中度干预略有提升, 但改善效果不大。

3 讨论

人为干预影响人工经济林的形成、演替过程, 不同方式、强度的干预可以改变阳光、温度、水分等环境条件, 进而引起人工经济林土壤理化性质改变^[24]。

在未管理的干预下, 轻度干预的核桃林 LI 内土壤黏粒、粉粒、电导率、有机碳、全氮、全磷含量较高, 土壤含水量较低, 且含量水平与中度、高度干预林地存在一定显著性差异。原因可能是, 长期以来的未管理导致林地内部群落结构复杂, 同时存在乔木、灌木和大量草本植物, 群落结构的复杂性导致凋落物的增多和细根的密集增长, 一方面凋落物及细根分解是有机碳、全氮、全磷等土壤养分的主要来源^[25-26], 另一方面林下植物、凋落物和细根等有效减弱了降水、径流对坡面土壤的溅蚀和冲刷^[27], 同时土壤黏粒、粉粒作为土壤胶体组成部分, 因比表面积大且离子吸附力较强, 通常认为是氮、磷等养分元素的主要载体^[28], 而对土壤电导率的相关研究表明, 土壤电导率存在随土壤黏粒、全氮含量增加而增大的趋势^[29], 因此在林下灌草植物大量繁殖生长的生境下, 土壤黏粒、粉粒等细颗粒、土壤电导率以及土壤有机碳、全氮、全磷等土壤养分含量较高。这与 Trimble 等^[30]发现植被可以促进优质土壤颗粒含量增加, 进而改善土壤质地和提升土壤养分的研究结果基本一致。在未管理干预下土壤含水量较低, 原因之一可能是受林地内灌木、草本植物大量繁殖影响, 刺槐、酸枣等灌木较草本植物耗水能力较大, 在根系吸水和茎叶蒸腾作用下林地土壤水分消耗量较大。此外, 自 2003 年栽种核桃以来, 未管理干预下的核桃树生长较慢,

林内核桃树冠幅较小, 林地郁闭度较低, 林下土壤受太阳辐射影响较大, 其地表温度较高、蒸发较强, 表层土壤含水量相对较低。

在清理灌草的干预下, 中度干预的核桃林 MI 与轻度干预的核桃林 LI 相比, 其土壤黏粒、粉粒、电导率、有机碳、全氮等含量显著性降低, 土壤全磷含量非显著性降低, 而土壤砂粒、含水量显著性增加, 土壤 pH、全钾含量则非显著性增加。原因可能是, 土壤大部分养分来源于林下调落物和细根分解, 在清理灌草的干预后, 直接导致核桃林下灌草植被、凋落物的减少和细根的消亡, 坡面土壤对雨水冲刷的抗侵蚀力下降, 维持与调节土壤养分的微环境恶化, 造成土壤侵蚀和养分流失, 因此, 土壤黏粒、粉粒、电导率、有机碳和全氮等含量显著性降低。这与张景普等^[31]发现间伐能显著降低林地土壤碳、氮含量的研究结果基本一致。清理灌草使得林下植被减少, 林下植被对养分、水分需求减少^[32], 可能是造成全磷、全钾、pH 等非显著降低或增加、土壤含水量显著性增加的原因之一。此外, 在清理灌草干预下, 林地内土壤养分竞争减少, 核桃树长势较好, 林内核桃树冠幅较大, 林地郁闭度较高, 林下土壤接收太阳辐射较少, 其地表温度相对较低, 蒸发较弱, 表层土壤含水量相对较高。

在清理灌草施肥的干预下, 高度干预的核桃林 HI 与中度干预的核桃林 MI 相比, 其土壤黏粒、粉粒、电导率、含水量、全氮、全磷、全钾等非显著性增加, 土壤砂粒、pH、有机碳等非显著性下降。原因可能是施有机肥的干预, 一定程度提升了林地土壤养分含量, 但由于清理灌草的干预导致林下植被稀少, 且核桃林处于坡度 10~12° 的坡地地形, 受降水、径流影响坡面土壤颗粒侵蚀和土壤养分淋失严重, 因此, 土壤黏粒、粉粒等细颗粒和大部分土壤养分指标基本处于非显著性增加, 土

壤砂粒和少数土壤养分指标处于非显著性下降。

土壤中各因子存在复杂的相互作用, 其中土壤有机碳、全氮等影响土壤养分含量, 土壤黏粒、砂粒等颗粒影响土壤质地, 二者均在土壤质量评价中发挥重要作用^[33]。在 3 种人为干预的核桃林内, 土壤有机碳与全氮均呈显著或极显著正相关关系, 表明核桃林内部土壤碳、氮元素之间关系稳定, 这与 LUN 等^[34] 研究黄土高原发现, 林地土壤有机碳与全氮正相关的研究结果基本一致。同时, 核桃林内部土壤黏粒与砂粒含量均呈极显著负相关关系, 这与现有研究^[35] 发现土壤砂粒含量随黏粒含量增加而减少的研究结果相一致。

土壤变异性是土壤理化性质的综合体现^[36]。在 3 种人为干预的核桃林内, 土壤理化性质各指标的变异系数存在一定差异。现有研究表明^[18,37], 核桃林土壤理化指标多处于弱变异和中等变异性, 并且土壤有机碳、全氮、全磷的变异系数相对较高。本研究中不同人为干预的核桃林土壤 pH 变异系数均为弱变异性, 土壤有机碳、全氮等均为中等变异性, 大部分土壤理化指标则在各干预样地、样地内部土层间处于弱变异性、中等变异性的动态变化。

土壤质量是评价土壤健康质量、土壤肥力质量和环境质量的综合度量^[38], 本研究发现轻度干预的核桃林 LI 的土壤质量高于中度干预、高度干预的核桃林 MI、HI 的土壤质量, 表明自 2003 年在坡地栽种核桃林后, 未管理、清理灌草、清理灌草施肥的人为干预能显著影响坡地核桃林土壤质量, 这与刘慧敏等^[39] 研究发现不同调控强度下华北落叶松人工林土壤质量存在差异的研究结果相似。

4 结论

(1) 在未管理、清理灌草、清理灌草施肥的 3 种干预下, 太行山坡地核桃林土壤黏粒、粉粒、砂粒、电导率、含水量、有机碳、全氮、全磷、全钾等产生明显差异。未处理的核桃林比清理灌草、清理灌草施肥的核桃林能更有效积累土壤有机碳、全氮和全磷等养分, 并明显提高土壤黏粒、粉粒等土壤细颗粒含量。

(2) 各干预核桃林土壤理化性质之间相关性显著, 土壤黏粒与砂粒在各干预间均负相关, 土壤有机碳与全氮在各干预间均呈正相关。干预核桃林土壤理化性质存在一定程度变异, 土壤 pH 在各干预、干预内部土层间均为弱变异性, 土壤有机碳、

全氮在各干预、干预内部土层间均为中等变异性。

(3) 核桃林土壤质量综合评价结果依次为: 未管理>清理灌草施肥>清理灌草, 表明未管理的核桃林土壤质量较好, 清理灌草的核桃林土壤质量最差, 清理灌草施肥的核桃林土壤质量改善效果不大。人为干预通过影响太行山坡地核桃林土壤理化性质, 最终造成核桃林土壤质量差异。因此, 未来在经营太行山坡地核桃林时应注重人为干预的调控管理, 对坡地核桃林进行合理利用和土壤肥力恢复。研究成果对山区坡地人工林土壤改良和可持续经营提供了科学参考。

参考文献:

- [1] 徐雪蕾, 孙玉军, 周 华, 等. 间伐强度对杉木人工林林下植被和土壤性质的影响[J]. 林业科学, 2019, 55 (3): 1-12.
- [2] WAN J Z, YU J H, YIN G J, *et al.* Effects of soil properties on the spatial distribution of forest vegetation across China[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2019, 18: e00635.
- [3] KASSI N J K, DECOCQ G. Successional patterns of plant species and community diversity in a semi-deciduous tropical forest under shifting cultivation[J]. *Journal of Vegetation Science*, 2008, 19(6): 809-820.
- [4] 陈利顶, 傅伯杰. 干扰的类型、特征及其生态学意义[J]. 生态学报, 2000, 20 (4): 581-586.
- [5] SAVELLI S, CAVALLI R, BALDINI S, *et al.* Small scale mechanization of thinning in artificial coniferous plantation[J]. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2010, 31(1): 11-21.
- [6] 张青青, 周再知, 黄桂华, 等. 间伐强度对柚木林土壤质量及生长的影响[J]. 林业科学研究, 2021, 34 (3): 127-134.
- [7] J SAN-JOSÉ, MONTES R, C BUENDÍA, *et al.* Response of terrestrial-aquatic palm ecotone (Morichal) to anthropogenic disturbance in the Orinoco lowlands[J]. *Folia Geobotanica*, 2012, 47(2): 153-178.
- [8] 张 姣, 徐 明, 文春玉, 等. 黔中地区不同干扰对马尾松林土壤性质的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35 (6): 135-143.
- [9] 李 翀, 周国模, 施拥军, 等. 不同经营措施对毛竹林土壤有机碳的影响[J]. 林业科学, 2015, 51 (4): 26-35.
- [10] AWOTOYE O O, EKANADE O, AIROUHUDION O O. Degradation of the soil physicochemical properties resulting from continuous logging of *Gmelina arborea* and *Tectona grandis* plantations[J]. *African Journal of Agricultural Research*, 2019, 4(11): 1317-1324.
- [11] 田佳歆, 刘 盛, 刘冠兵, 等. 带状皆伐对长白落叶松林草本多样性和土壤养分的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2021, 27 (4): 901-907.
- [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.
- [13] 朱建佳, 戴尔阜, 郑 度, 等. 采伐影响下人工林木材生产与固碳功能权衡特征: 以湖南会同森林生态实验站为例[J]. 地理学报, 2018, 73 (1): 152-163.
- [14] 刘 洋, 侯占山, 赵 爽, 等. 太行山片麻岩山区造地边坡植被恢复过程中植物多样性与土壤特性的演变[J]. 生态学报, 2018, 38 (15): 5331-5339.
- [15] 王巧环, 任玉芬, 孟 龄, 等. 元素分析仪同时测定土壤中全氮和有机碳[J]. 分析实验室, 2013, 32 (10): 41-45.
- [16] 卜耀军, 朱清科, 包耀贤, 等. 陕北黄土区微地形土壤质量指标变异性及敏感性[J]. 水土保持学报, 2014, 28 (3): 153-157.
- [17] 董 茜, 王根柱, 庞丹波, 等. 喀斯特区不同植被恢复措施土壤质量评价[J]. 林业科学研究, 2022, 35 (3): 169-178.
- [18] 杨维鸽, 赵 培, 叶媛媛, 等. 秦岭山区典型人工林地土壤质量评价研究[J]. 辽宁农业科学, 2022 (1): 1-7.
- [19] 宛 倩, 王 杰, 王向涛, 等. 青藏高原不同草地利用方式对土壤粒径分形特征的影响[J]. 生态学报, 2022, 42 (5): 1716-1726.
- [20] LIU X, LI Z, LI P. Particle fractal dimension and total phosphorus of soil in a typical watershed of Yangtze River, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(10): 6091-6099.
- [21] 潘昭隆, 刘会芳, 赵翔翔, 等. 氮肥投入对不同土壤类型电导率变化的影响[J]. 福建农林大学学报:自然科学版, 2021, 50 (4): 533-537.
- [22] 熊瑛楠, 冯天骄, 王 平, 等. 晋西黄土区长期人工林恢复对土壤水分和养分性质的影响[J]. 水土保持学报, 2022, 36 (2): 228-237 + 246.
- [23] 袁星明, 朱宁华, 郭 耆, 等. 南亚热带不同人工林对土壤理化性质的影响及土壤质量评价[J]. 林业科学研究, 2022, 35 (3): 112-122.
- [24] ZHANG G J, LIN C, ZHANG W D, *et al.* Heterogeneity and optimal sampe size of soil physicochemical properties in subtropical forest[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(7): 2139-2148.
- [25] 彭 晓, 方 晰, 喻林华, 等. 中亚热带4种森林土壤碳、氮、磷化学计量特征[J]. 中南林业科技大学学报, 2016, 36 (11): 65-72.
- [26] 刘 倩, 郑 翔, 邓邦良, 等. 武功山草甸不同海拔对土壤和植物凋落物磷含量的影响[J]. 草业科学, 2017, 34 (11): 2183-2190.
- [27] 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.
- [28] 黄小芳, 丁树文, 柯慧燕, 等. 三峡库区植物篱模式对土壤理化性质和可蚀性的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35 (3): 9-15 + 22.
- [29] 常海涛, 刘任涛, 刘佳楠, 等. 草方格造林固沙过程中土壤性质变化及分形特征: 以腾格里沙漠东南缘为例[J]. 水土保持学报, 2018, 32 (6): 58-65+165.
- [30] TRIMBLE S W. LAND USE: U. S. Soil erosion rates-myth and reality[J]. *Science*, 2000, 289(5477): 248-250.
- [31] 张景普, 于立忠, 刘利芳, 等. 不同作业方式对落叶松人工林土壤养分及酶活性的影响[J]. 生态学杂志, 2016, 35 (6): 1403-1410.
- [32] 李常准, 陈立新, 段文标, 等. 凋落物处理对不同林型土壤有机碳全氮全磷的影响[J]. 中国水土保持科学, 2020, 18 (1): 100-109.
- [33] 刘晓微, 赵洋毅, 王克勤, 等. 坡耕地等高反坡阶整地年限对土壤改良和玉米产量的影响[J]. 水土保持学报, 2022, 36 (1): 307-315.
- [34] LU N, FU B, JIN T, *et al.* Trade-off analyses of multiple ecosystem services by plantations along a precipitation gradient across Loess Plateau landscapes[J]. *Landscape Ecology*, 2014, 29(10): 1697-1708.
- [35] 林立文, 邓羽松, 杨钙仁, 等. 南亚热带不同林分土壤颗粒分形与水分物理特征[J]. 生态学杂志, 2020, 39 (4): 1141-1152.
- [36] 申景昕, 刘广路, 范少辉, 等. 毛竹向撂荒地扩展过程中的土壤养分特征[J]. 林业科学, 2020, 56 (10): 26-33.
- [37] 王添乐, 郭青霞, 王海斌, 等. 岔口流域不同退耕还林地土壤养分分析[J]. 中国水土保持科学(中英文), 2021, 19 (2): 61-70.
- [38] 彭佳红, 王 华, 邹冬生, 等. 亚热带区域几种典型人工林生态系统林地土壤质量评价[J]. 土壤通报, 2010, 41 (1): 93-99.
- [39] 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.

Effects of Human Intervention on Soil Physical and Chemical Properties of Walnut Forest on Taihang Hillside

LI Xin, LIU Qian-yuan, GUO Wen-fang, WANG Jia-le, LIU Ya-nan, LI Han-cong, CHEN Yan-mei

(School of Geographical Sciences, Hebei Normal University / Hebei Technology Innovation Center for Remote Sensing Identification of Environmental Change / Laboratory of Environmental Evolution and Ecological Construction of Hebei Province, Shijiazhuang 050024)

Abstract: [Objective] To explore the impact of human intervention on the physical and chemical properties of the soil of artificial economic forest on mountain slopes, and to provide scientific basis for forest soil restoration and sustainable management. [Methods] Based on the walnut forests with three intervention methods: unmanaged, clearing of shrubs and grasses, and clearing of shrubs and grasses and fertilizing on Taihang Mountains, the effects of the three interventions on the soil physical and chemical properties of the walnut forest were compared and analyzed through field investigation and laboratory experiments, and principal component analysis was used for comprehensive evaluation of soil quality. [Results] (1) The physical and chemical properties of soil in walnut forests with different human intervention were significantly different. Soil clay, silt, electrical conductivity, organic carbon, total nitrogen and total phosphorus in the unmanaged forests were the highest, while soil sand and water content were the lowest; The soil clay, silt, electrical conductivity, organic carbon and total nitrogen in the clearing shrubs and grasses were significantly lower than those in the unmanaged forests ($p < 0.05$), while the soil sand and water content were significantly higher than those in the unmanaged forests ($p < 0.05$); The soil clay, silt, conductivity, water content, total nitrogen, total phosphorus and total potassium in the cleared shrub and grass for fertilization were slightly higher than those in the cleared shrub and grass, and the soil sand, pH and organic carbon were slightly lower than those in the cleared shrub and grass. (2) There was a significant correlation between the physical and chemical properties of walnut forest soil in each intervention. There was a very significant negative correlation between soil clay and sand ($p < 0.01$), a significant ($p < 0.05$) or very significant ($p < 0.01$) positive correlation between soil organic carbon and total nitrogen; and the other soil physical and chemical indicators showed different degrees of correlation changes in the internal soil layers of each intervention and drying. (3) There was a certain degree of variation in the physical and chemical properties of walnut forest soil under each intervention. The soil pH showed weak variability, the soil organic carbon and total nitrogen showed medium variability, and the rest of the soil physical and chemical indicators were in the dynamic changes of weak variability and medium variability between the soil layers within each intervention and intervention. (4) soil quality in the unmanaged forests was the best (2.120), followed by clean shrub and grass fertilization (-0.820) and clean shrub and grass (-1.258) The soil quality in clean shrub and grass fertilization walnut forest was not improved significantly. [Conclusion] Human intervention significantly affects the physical and chemical properties of soil in walnut forest on Taihang hillside and causes differences in soil quality. Therefore, the regulation and management of human intervention should be paid attention to in the management of walnut forest.

Keywords: human intervention; walnut forest; Taihang hillside; physical and chemical properties of soil; soil quality evaluation