

DOI: 10.20103/j.stxb.202403250611

张梦棋, 王冬梅, 王彦辉, 云慧雅, 张莹莹, 王宇, 张鹏, 李志鑫, 刘亚玲. 黄土高原刺槐人工林土壤有机质含量的影响因子及其响应. 生态学报, 2024, 44(24): 11206-11219.

Zhang M Q, Wang D M, Wang Y H, Yun H Y, Zhang Y Y, Wang Y, Zhang P, Li Z X, Liu Y L. The main influencing factors and response functions of soil organic matter content of black locust plantations on the Loess Plateau of China. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(24): 11206-11219.

黄土高原刺槐人工林土壤有机质含量的影响因子及其响应

张梦棋¹, 王冬梅^{1,*}, 王彦辉², 云慧雅¹, 张莹莹¹, 王宇¹, 张鹏¹, 李志鑫³, 刘亚玲¹

1 北京林业大学水土保持学院, 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083

2 中国林业科学研究院森林生态环境与自然保护研究所, 国家林业和草原局森林生态环境重点实验室, 北京 100091

3 甘肃省平凉市泾川县官山林场, 泾川 744306

摘要: 探究黄土高原刺槐人工林土壤有机质含量变化的主要影响因子和响应关系, 为研究刺槐林土壤碳汇功能提供科学依据。从 1994—2022 年发表的 136 篇有关黄土高原刺槐人工林土壤有机质含量的国内外期刊和学位论文中收集了共 330 块样地数据, 利用外包线法及地理探测器法分析主要因子对土壤有机质含量的影响。外包线分析表明: 黄土高原刺槐人工林土壤有机质含量受到多个因子的非线性影响, 随海拔高度、年均气温和林龄增加均呈先增后减的变化, 随土层深度增加呈先快速降低后缓慢降低, 随年均降水量增大呈先快速增加后逐渐缓慢增加, 随坡度增加呈线性降低。地理探测器模型分析表明: 对土壤有机质含量变化的单因子贡献率依次为: 海拔高度 > 年均降水 > 年均气温 > 土层深度 > 林龄 > 坡度, 任何两个因子间交互作用的土壤有机质含量变化解释力均大于单一因子的解释力, 其中海拔高度与土层深度的交互作用增加效应最大。综合来看, 黄土高原刺槐人工林土壤有机质含量受到多个因子的非线性影响, 其中区域环境因子(海拔高度、年均降水、年均气温)的影响大于局地因子(土层深度、林龄、坡度)的影响, 需要考虑主要影响因子间的交互作用。

关键词: 黄土高原; 刺槐; 土壤有机质含量; 影响因子

The main influencing factors and response functions of soil organic matter content of black locust plantations on the Loess Plateau of China

ZHANG Mengqi¹, WANG Dongmei^{1,*}, WANG Yanhui², YUN Huiya¹, ZHANG Yingying¹, WANG Yu¹, ZHANG Peng¹, LI Zhixin³, LIU Yaling¹

1 School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating of Ministry of Education, Beijing 100083, China

2 Key Laboratory of Forest Ecology and Environment, National Forestry and Grassland Administration; Ecology and Nature Conservation Institute, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

3 Guanshan Forest Farm, Jingchuan County, Pingliang City, Jingchuan 744306, China

Abstract: This study was aimed to explore the main influencing factors and response functions of the soil organic matter (SOM) content of black locust (*Robinia pseudoacacia*) plantations on the Loess Plateau of northwest China, and to provide scientific basis for the studies on the carbon sequestration service of black locust plantations. In this paper, 136 papers published in domestic and foreign journals and academic dissertations in the period of 1994—2022 related on the topic of SOM content of black locust plantations in the Loess Plateau were collected, and the data of 330 plots were extracted, for

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFF0801803, 2022YFF1300404); 国家自然科学基金项目(U20A2085, U21A2005)

收稿日期: 2024-03-25; **网络出版日期:** 2024-09-09

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dmwang@bjfu.edu.cn

analyzing the effects of main factors on the SOM content using the upper boundary line method and geo-detector method. The upper boundary line method analysis showed that the SOM content was nonlinearly influenced by many factors. It first increased and then decreased with rising altitude, mean annual air temperature and forest age, but first rapidly and then slowly decreased with rising soil layer depth, first gradually and then slowly increased with rising mean annual precipitation, and decreased linearly with rising slope gradient. The geo-detector analysis showed that the contribution rate of single influencing factors to the variation of SOM content was: altitude>mean annual precipitation>mean annual air temperature>soil layer depth>forest age>slope gradient. The explanatory force of the interaction of any two factors to the variation of SOM content was greater than that of single factor, and the interaction effect between altitude and soil layer depth was the largest one (as high as 94.2%). In summary, the SOM content of black locust plantations on the Loess Plateau was non-linearly influenced by many factors. The influences of regional environmental factors (altitude, mean annual precipitation, mean annual air temperature) were higher than those of local factors (soil layer depth, forest age, slope gradient). The interaction between main influencing factors should be considered as well.

Key Words: the Loess Plateau; black locust; soil organic matter content; influencing factors

土壤有机质(SOM)是形成土壤团聚体的重要物质^[1],它影响土壤团聚体稳定、土壤微生物活动、植物生长,对农林业可持续发展有重要意义。全球约有 1.5×10^{15} kg 碳以有机质形态储存于土壤^[2],明确其含量随环境条件的变化,是理解全球碳平衡、管理生态系统功能和积极应对气候变化的关键^[3]。

我国西北黄土高原气候干旱,植被稀疏,是全球水土流失最严重的地区^[4]。自 20 世纪 80 年代以来,经过实施“三北”防护林、“退耕还林(草)”等大规模生态工程,植被覆盖得到显著恢复,水土流失问题得到显著改善,也对土壤碳库产生了重要影响^[5]。刺槐(*Robinia pseudoacacia*)由于抗干旱,耐贫瘠,适应性强,已成为黄土高原造林面积最大的树种。目前有关黄土高原刺槐的研究集中在土壤水分^[6]、养分^[7-8]等方面,对刺槐林土壤有机质含量受主要因子影响的研究主要涉及气候、地形、植被及土壤等方面。从气候因子来看,黄土高原年均降水量和年均气温等气候指标的巨大空间差异通过影响土壤水分而导致刺槐林生长和土壤有机质含量的空间差异,一般来说土壤有机质含量先随降水和气温增加而增大,但超过一定阈值后反而会减小^[9]。在地形方面,海拔等因子主要通过改变水热条件来间接影响土壤有机质含量,李佳佳等^[10]的研究显示,黄土高原刺槐林土壤有机碳含量与纬度、海拔呈显著负相关,而牛春梅等^[11]研究表明刺槐人工林生态系统碳密度与海拔、坡度均无显著相关。林龄或植被恢复年限也是一个重要影响因子,因为林龄增大表示着凋落物碳输入量增大和土壤有机质积累量增多^[12-14],但也有研究表明刺槐林土壤有机质含量随林龄增大而先增后减^[6]。土层深度与土壤有机质含量关系很大,部分研究表明黄土高原刺槐林土壤有机质含量在浅层土壤随土层加深而急剧下降^[6,15],但也有研究表明刺槐林土壤有机质含量在 0—30 cm 土层逐渐减少,在 30 cm 土层以下趋于稳定^[16]。

上述研究表明,土壤有机质含量的影响因子众多,其影响大小可能有时空变化,迄今为止的研究多限于局部区域或部分影响因子,不能完整反映整个黄土高原区域,因此需要全面了解黄土高原刺槐林土壤有机质含量变化的影响因子。有鉴于此,本文利用从黄土高原刺槐林土壤有机质研究文献收集的数据,系统分析了土壤有机质含量对气候、地形、土壤、植被等因子响应,为深入理解、准确预测、科学管理刺槐林土壤有机质提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄土高原位于我国西北,地处 $33^{\circ}41' - 41^{\circ}16'N$, $100^{\circ}52' - 114^{\circ}33'E$ 之间,面积 64 万 km^2 。属典型大陆性季风气候,海拔主要在 200—3000 m,年均降水量 466 mm,从东南部的 600—700 mm 递减到中部的 300—

400 mm 和西北部的 100—200 mm;地跨山西、陕西、甘肃、宁夏、内蒙古、青海、河北 7 省,地势由西北向东南倾斜;是全球土壤侵蚀最严重地区,长期侵蚀使得境内地貌类型多样,有塬、梁、峁等。

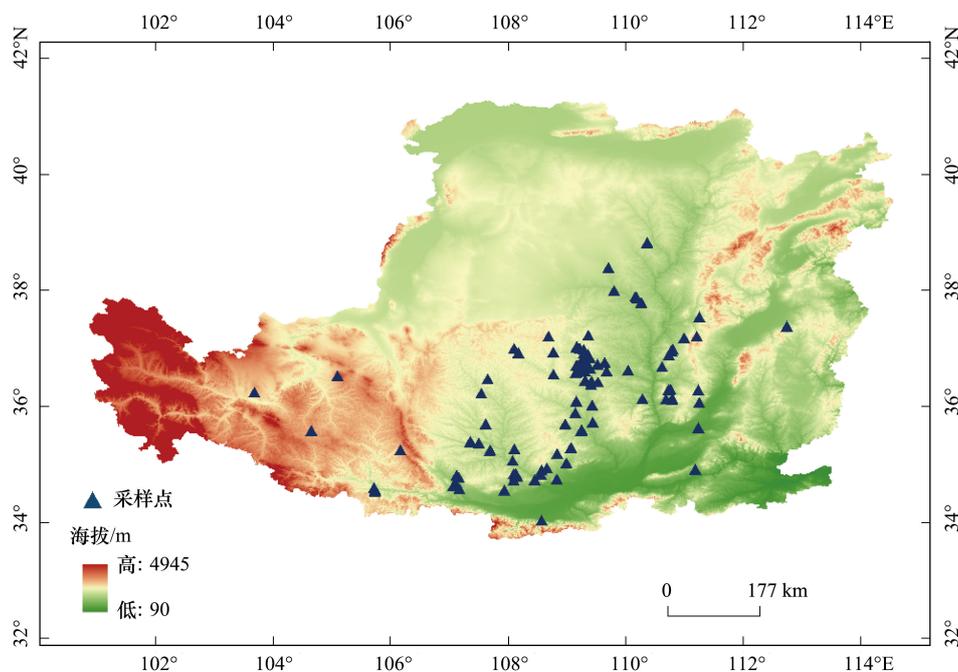


图 1 研究区概况及采样点分布

Fig.1 Overview of the study area and distribution of sampling points

1.2 数据收集

本文收集文献时,以“黄土高原”、“刺槐”、“土壤”、“有机质”、“有机碳”及其英文为关键词检索,逐一阅读检索到的文献,确保提取文献中含有年均气温、年均降水、土层深度、土壤有机质、土壤有机碳等信息。共收集发表于 1994—2022 年的关于黄土高原刺槐人工林土壤有机质的国内外期刊和学位论文 136 篇,总计 330 块样地数据(表 1)。

收集的国内外文献的研究地点集中在陕、甘、晋三省,具体地点及其气候、地形、林分主要特征见表 1,土壤以黄绵土或褐土为主,也有部分为黑垆土。研究地点集中于黄土丘陵沟壑区,土石山区和风沙区较少,这是因为黄土高原年均降水量仅 100—700 mm 且集中在夏季,无法达到刺槐原生地北美东部的高水平降水,并且气温和降水年际变化也更大,限制了刺槐在黄土高原西北部的分布。

1.3 数据分析及处理

从原文表格中或利用 plot_digitizer 软件将图形数值化后提取文献数据。文献的土壤有机质含量数据统一用百分比(%)单位,对有机碳含量数据则转化为有机质含量:

$$\text{SOM} = \text{SOC} \times 1.724$$

式中,SOM 为土壤有机质含量(%);SOC 为土壤有机碳含量(%)。

为在一定程度上消除待考察因子以外的其它因子的干扰,用上外包线法分析单因子影响^[153]。具体步骤是:(1)将所有土壤有机质含量数据除以数据集内的最大值,得到相对土壤有机质含量数据集,然后与重要性高的第一自变量做散点图,将自变量变化范围分成若干区段,在每区段内选取那些比每段数据均值至少高出一倍标准差的数据点,或在数据密度低的一些区段中直接选择最大数据点,用这些数据点拟合因变量响应单一因子的函数关系,能在一定程度上表征因变量响应应该单一因子的函数关系,籍此确定第一因子的影响函数类

型;(2)为确定第二因子的影响函数类型,需解耦第一因子以尽可能消除其影响,即使用第一步的相对土壤有机质含量数据除以对应第一因子外包线的计算值,形成新的数据集,与第二因子做散点图,并同样拟合外包线,确定第二因子的影响函数类型;(3)用相同方法,逐个消除前面各因子的影响,直到确定最后一个因子的影响函数类型。

表 1 文献中研究地点的样地基本情况

Table 1 Basic situation of sample sites and plots of the literature studies

研究地点 Study sites	海拔 Altitude/m	年均降水量 Mean annual precipitation/mm	年均气温 Mean annual air temperature/℃	林龄 Forest age/a	坡度 Slope/(°)	样地数 Plot quantity	收集文献 References
山西省							
吉县	953—1363	553—580	9.9—10.2	10—25	3—31	27	[17—34]
太谷县	767—1100	480—550	6.5	—	—	1	[35]
石楼县	1047—1251	465—485	8.8—9.8	4—12	15—16	14	[36—38]
中阳县	1201—1443	460—660	6—10	9—22	20—30	2	[39,40]
平陆县	623—645	600	13.8	4—17	18—21	12	[41]
陕西省							
安塞区	304—1731	350—650	7—9	5—45	8—45	109	[42—88]
千阳县	710—1545	627—653	8.7—11.8	5—30	10—25	10	[89—99]
淳化县	600—1808	601	9.8	10	—	4	[75,100—101]
吴起县	1233—1809	483	7.8	20—25	—	3	[102—104]
礼泉县	402—1467	537—546	13.0	—	—	2	[105,106]
永寿县	900—1370	578—610	10.8	7—45	5—15	12	[107—116]
彬州市	1150—1159	561	9.7	20	33—38	11	[115,117]
耀州区	1080—1170	571	12.5	12—42	15—25	8	[75,118]
志丹县	1311	450—490	7.8	18—19	19—20	6	[119—121]
黄陵县	750—1123	569—631	9.4	3—35	4—25	13	[75,122—123]
宝塔区柳林镇	1276—1352	505	8.8	10—40	16—20	4	[124]
长武县	940—1226	579—584	9.1	5—21	10—30	7	[125—129]
富县	990—1267	550—577	8—9.8	8—30	20—31	8	[75,115,130]
扶风县	1009	600	12.4	10—30	—	4	[115]
延安附近的公庐山	1318	505	10.1	36	21	1	[131]
延安羊圈沟	1050—1295	529—550	9.4—10.5	5—35	9—31	12	[132—138]
延安苏家沟	1276—1352	550	9.2	10—40	16—20	4	[139]
延安庙咀沟	1247—1265	478.3	7.8	20—40	23—26	2	[140]
延安燕沟和子午岭	1250	550—558	8—10	20	15—20	6	[141,142]
延安天河流域	1166—1204	511—535	9.4—10.8	23—36	16	2	[143,144]
三原、宜君、洛川、甘泉、宝塔区、米脂、神木	824—1384	350—650	7—9	16—24	13—34	31	[75,104,145,146]
甘肃省							
泾川县	1005—1351	515—553	10—10.1	12—18	22.5	5	[147,148]
合水县	1236	588	7.4	—	19	1	[149]
天水市吕二沟流域	1494—1532	605	10.7	5—56	—	8	[150,151]
天水市桥子东流域	1471.1	542.5	10.7	15	—	1	[152]

地理探测器作为驱动力和因子分析的有力工具,将连续性变量进行离散化处理后,通过建立自变量与因变量之间的模型,分别计算和比较各单因子 q 值及两因子叠加后的 q 值^[154],判断因变量对每个自变量的影响程度, q 值的值域为 $[0,1]$,值越大表明该自变量与因变量的空间分布越一致,影响力越强,反之越弱^[155]。本文运用地理探测器方法对黄土高原刺槐林人工土壤有机质含量的变化进行多因子定量分析,探索各因子对土

壤有机质含量的相对贡献率及交互作用。

本文所收集数据时间跨度较大,时间对土壤有机质含量的影响主要体现在有机质的长期积累和分解动态平衡、气候变化等方面,土壤有机质积累需要长期的植物生长和凋落物输入,时间越长积累的有机质通常越多,前提是环境条件相对稳定,且恢复自然植被如退耕还林则可能增加有机质,因此本文选择的文献大部分为退耕还林的刺槐林,此外,本文所引用的气象数据为论文研究时间研究地点的气象数据,并不是近期各地的气象数据,本文通过外包线法消除了降水、温度的影响,从而确保单一因子对土壤有机质含量的影响。

用 Excel 进行数据整理,用 SPSS 进行相关分析,用 GeoDetector_2015 Example 进行地理探测器分析各因子对有机质含量的相对贡献率及交互作用,用 origin 2022 软件作图。

2 结果与分析

2.1 土壤有机质含量的总体特征

将收集到的文献数据分为六个土层(图 2),表明黄土高原刺槐林土壤有机质含量在 0—10、10—20、20—40、40—60、60—80、80—100 cm 土层的均值(和主要分布范围)分别为 1.51% (0.75%—2.25%)、1.07% (0.75%—1.25%)、0.72% (0.30%—0.90%)、0.57% (0.30%—0.70%)、0.44% (0.25%—0.45%)、0.40% (0.25%—0.45%)。总体来看,有机质含量随土层加深而逐渐降低,除 60—80 cm 和 80—100 cm 土层间差异不显著外,其余土层间均呈差异显著。

刺槐林土壤有机质相对含量整体随纬度增大呈逐渐减小趋势(图 3),随经度减小逐渐减小,即刺槐林土壤有机质相对含量在黄土高原范围内由东南向西北逐渐降低。

2.2 各因子对土壤有机质含量的影响

为初步确定影响土壤有机质含量的主要因子,进行了相关分析,各因子相关系数依次为:土层深度 (-0.494**) > 海拔高度 (-0.121**) > 年均气温 (0.098*) > 林龄 (0.090*) > 坡度 (0.069*) > 年均降水量 (0.016)。表明土壤有机质含量与土层深度和海拔高度极显著负相关,与年均气温和林龄显著呈正相关。在后面将按相关系数大小的顺序,依次分析土壤有机质含量受各单一因子的影响。

外包线分析结果表明(图 4),刺槐林土壤有机质含量受土层深度影响极大,随土层加深在 0—40 cm 土层

快速减小但之后逐渐缓慢减小,响应函数为 $Y = \frac{116.38}{1 + \left(\frac{X}{0.2684}\right)^{1.47}} - 2.5, R^2 = 0.94$ 。

在去除土层深度影响后,土壤有机质相对含量随海拔高度增加呈先增后降的变化趋势,在海拔 1000 m 处左右最高,响应函数为 $Y = 9.70 \times 10^{-10} X^3 - 4.77 \times 10^6 X^2 + 0.007X - 1.68, R^2 = 0.83$ 。

年均气温是影响土壤有机质含量的重要因素,在本文数据集的年均气温变化范围(6—13.8℃)内,去除海拔高度等因子影响后的土壤有机质相对含量随年均气温升高呈先升后降的变化趋势,最高值在 10.7℃ 左右,最优区间是 10—12℃,响应函数为 $Y = -0.02 X^2 + 0.48X - 1.52, R^2 = 0.81$ 。

在去除年均气温等因子影响后,土壤有机质相对含量随林龄增加呈先增后减的变化,在林龄 < 15 a 时增加明显,15—25 a 期间变化平缓,> 25 a 后下降明显,拟合的响应函数为三次多项式关系 $Y = 2.44 \times 10^{-6} X^3 - 3.2 \times 10^4 X^2 + 0.0083X + 0.53, R^2 = 0.88$ 。

在去除林龄等因子的影响后,土壤有机质相对含量随坡度增大呈线性减小的变化趋势,响应函数为 $Y = 1.36 - 0.021X, R^2 = 0.79$ 。

在去除坡度等因子影响后,土壤有机质相对含量随年均降水量增加呈在 500 mm 以前先快速增加但之后

逐渐缓慢增加的变化,响应函数为逻辑斯蒂关系 $Y = 1.30 - \frac{1.53}{1 + \left(\frac{X}{445.35}\right)^{15.07}}, R^2 = 0.93$ 。

从外包线非线性分析结果来看,各因子的 R^2 大小依次为土层深度(0.94) > 年降水量(0.93) > 林龄(0.88) >

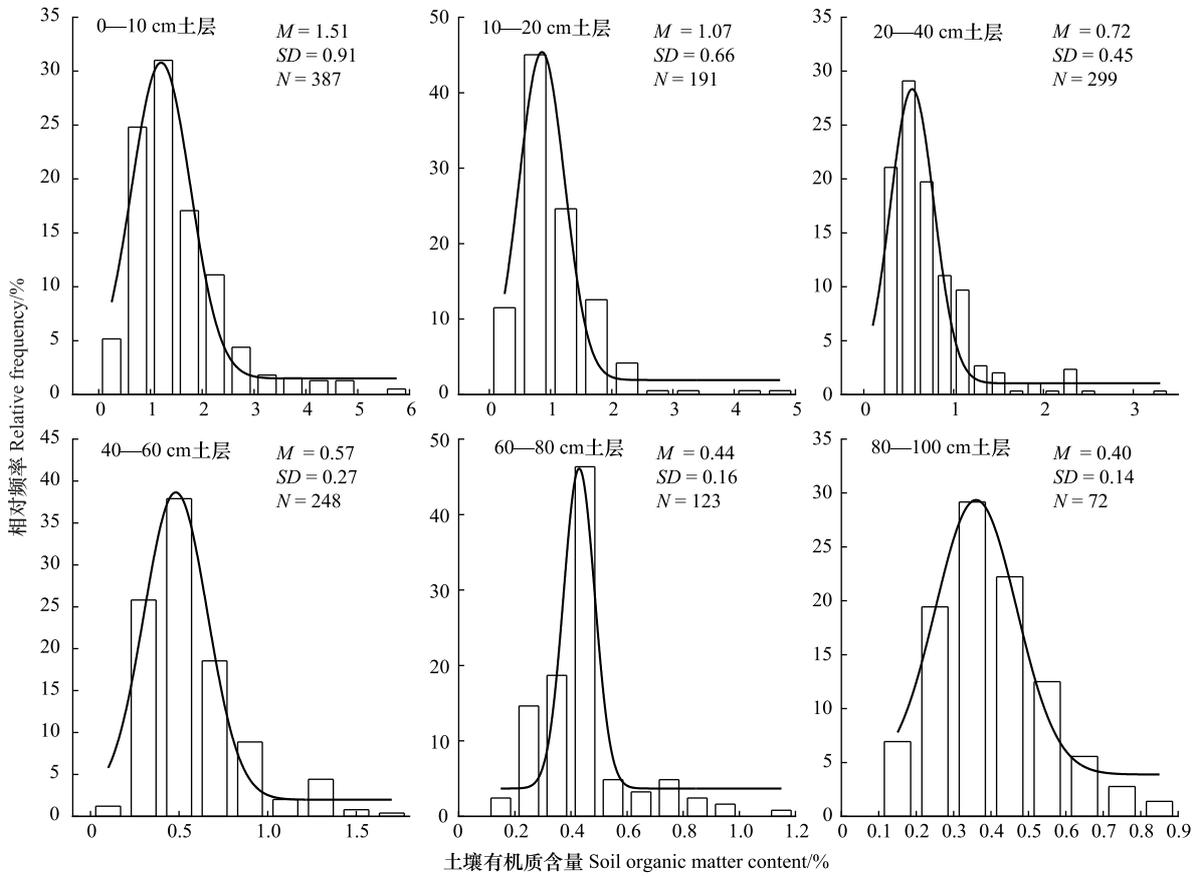


图 2 各土层的土壤有机质含量频率分布

Fig.2 Frequency distribution of soil organic matter content of different soil layers

M、SD 和 N 分别为平均值、标准差和样本量;曲线为拟合的高斯分布函数

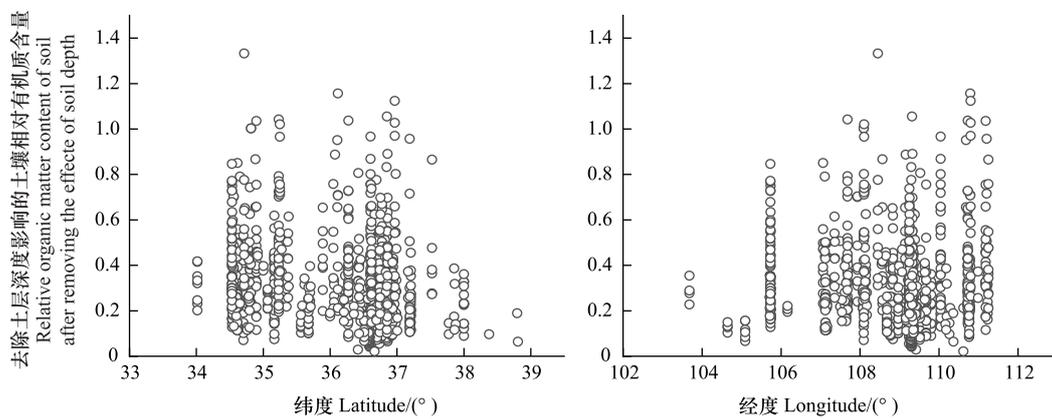


图 3 土壤有机质相对含量随经纬度的变化

Fig.3 Variation of relative content of soil organic matter with latitude and longitude

海拔高度(0.83)>年均气温(0.81)>坡度(0.79)。这个排序结果与简单的线性相关分析结果明显不同,说明考虑各因子的非线性关系对准确评价各因子的影响是很重要的。

2.3 各因子对土壤有机质含量的贡献率及交互作用

图 5 是采用地理探测器模型分析的各因子对土壤有机质含量的相对贡献率(%),依次为海拔高度(55.0)>

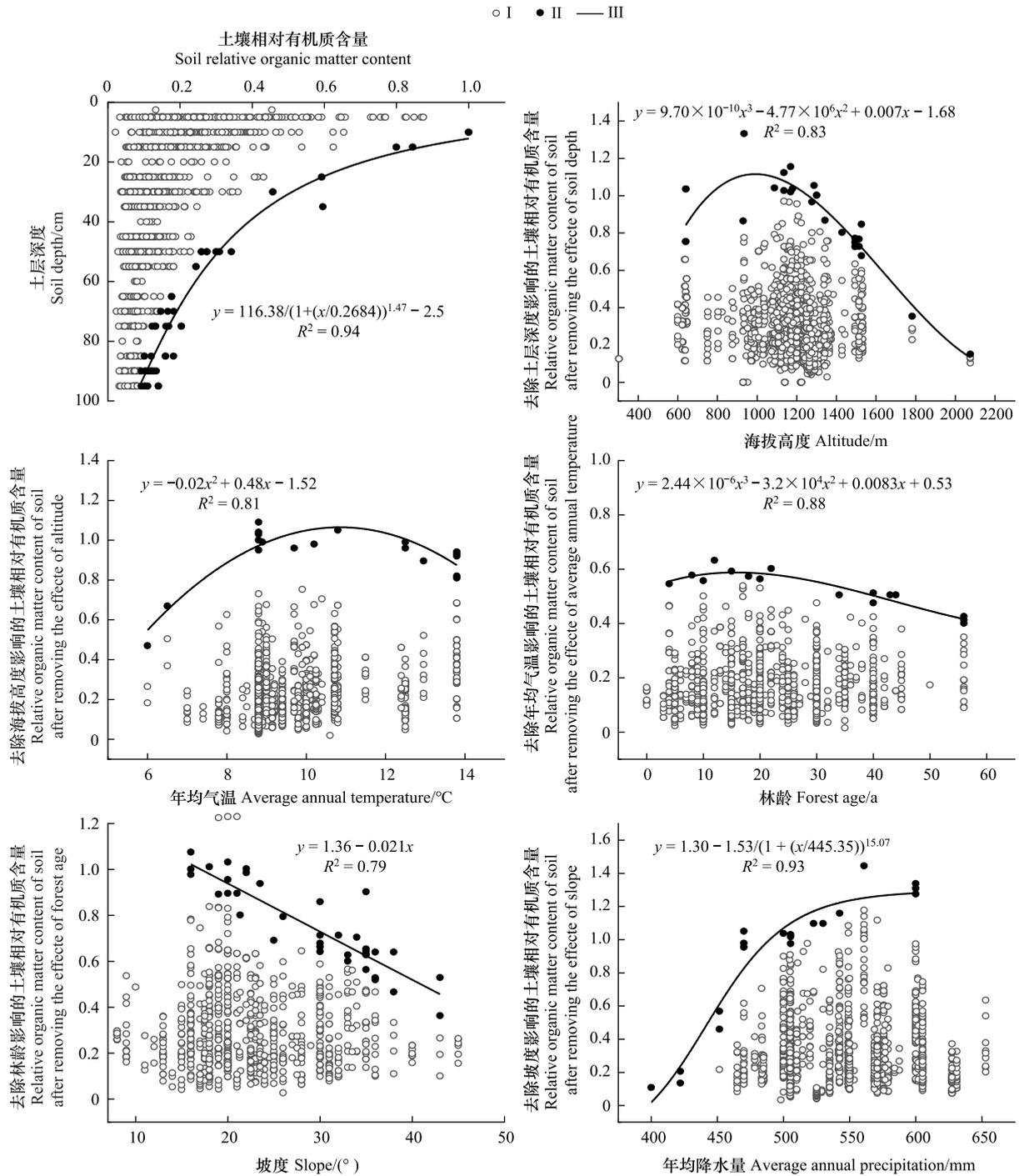


图4 土壤有机质相对含量随各单一因子变化的外包线及响应函数

Fig.4 Variation of relative soil organic matter content with single factors based on upper boundary line analysis and response functions

年均降水(44.6)>年均气温(37.1)>土层深度(30.0)>林龄(16.2)>坡度(13.4)。表明区域因子(海拔、气候)的贡献大于局域因子(土层、林龄、坡度)的贡献。

地理探测器模型交互作用分析结果表明,任意两个因子的交互作用均大于单一因子的作用,其中海拔高度与土层深度的交互作用对土壤有机质含量变化影响最大,达到 94.2%,影响第二大的是土层深度与年均降水的交互作用,达到 71.4%。

3 讨论

3.1 土层深度对土壤有机质含量的影响

土壤有机质含量随土层加深逐渐降低,这是一般规律^[6],本研究中也是如此,随土层加深呈明显减小趋势,有明显的表层富集作用^[156-157],这是因为土壤有机质的主要来源之一是地上凋落物,而且地下凋落物(枯死根系)也是表层土壤较高,因而表层和较浅土层更易获得较多有机质碳源^[158],深层土壤的有机质更多是随着淋溶作用从上层土壤向下层土壤逐渐进入的。

3.2 气候因子对土壤有机质含量的影响

温度和降水一方面通过影响林木和其它植物生长而影响形成土壤有机质的生物质来源,适宜的温度和降水有助于植物快速生长,增加土壤有机质输入,另一方面通过影响土壤微生物活性和有机质分解而影响土壤有机质含量^[159],随着温度升高,土壤微生物活动也随之加速,因而土壤有机质分解过程也加快,但温度过高或过低会抑制微生物活性,减缓有机质分解;过多的降水可能会导致土壤侵蚀,使有机质随着表层土壤流失而减少。

土壤有机质含量随年均气温升高而先增后减,在 10.7℃ 左右最高,原因是温度偏低会抑制植物生长和提供凋落物,也会抑制凋落物分解后形成土壤有机质^[160],温度过高则会通过干旱胁迫限制植物生长和促进有机质分解从而降低土壤有机质含量,而在年均气温 10.7℃ 左右时增加土壤有机质含量的效应与降低土壤有机质含量的作用之差最大,使土壤有机质含量最大。在本来就干旱缺水的黄土高原,年降水量大小是植物生长和土壤微生物活动的主要限制因素,因此表现为土壤有机质含量随年降水量增加而先快速增加后逐渐缓慢增加,这是因为在年降水量小于 500 mm 时,降水增加促进植物生长从而增加凋落物输入和土壤有机质形成的作用远高于促进土壤有机质分解的作用^[161],但在年降水量大于 500 mm 后继续增加时,其促进植物生长和凋落物输入及土壤有机质形成的作用因土壤干旱胁迫缓解而逐渐变小,而促进土壤有机质分解和淋溶的作用加大^[162],导致土壤有机质含量增加逐渐变缓。

3.3 地形因子对土壤有机质含量的影响

地形因子会通过影响坡面土壤的水、肥、气、热等因子而间接或直接影响土壤有机质的形成和分解,也会通过影响土壤侵蚀过程而影响有机质的径流流失^[163],从而支配着不同地形条件下的土壤有机质含量差异^[164]。在本研究中,受文献数据限制,仅考虑了坡度和海拔两个地形因子对土壤有机质含量的影响,未考虑坡向、地貌部位等其它地形因子的影响,需在未来研究中加强。

坡度作为重要的地形因子,会影响植物的群落组成、分布、物种丰富度,进而影响土壤有机质的输入和输出及含量,这是因为坡度增大会限制植物生长和凋落物输入、促进土壤侵蚀^[165-166]、加大地表枯落物和土壤有机质随径流的损失^[167],从而降低土壤有机质含量。

海拔高度主要是通过影响其它环境因子而间接影响土壤有机质含量^[168-169],例如海拔影响气候和土壤条件。在本研究中,土壤有机质含量随环境升高而先增后减,最大值出现在海拔 1000 m 处左右,和以往研究结果类似^[170]。但随着海拔继续增加,对土壤有机质含量的负面作用超过正面作用,导致土壤有机质含量逐渐降低。另外,整个黄土高原从东南向西北存在降水量随海拔增加而减少的变化(表 1),海拔 1000 m 以下属

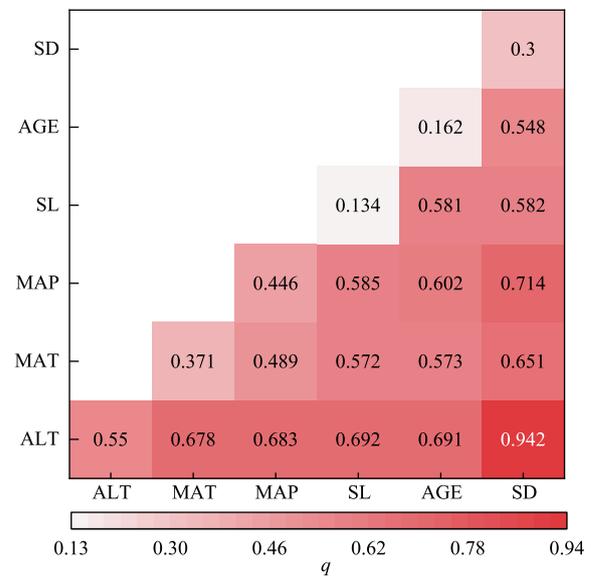


图 5 各因子对土壤有机质含量的贡献率及交互作用

Fig.5 Contribution rate and interaction of driving factors of soil organic matter content

SD: 土层深度 Soil depth; AGE: 林龄 Forest age; SL: 坡度 Slope gradient; MAP: 年均降水量 Mean annual precipitation; MAT: 年均气温 Mean annual air temperature; ALT: 海拔高度 Altitude

降水较多的黄土高原东部,海拔 1000—2000 m 属降水较少的黄土高原中部(六盘山以东和吕梁山以西),这导致了伴随海拔升高而发生的年降水量减少使植物生长和凋落物输入降低,从而限制了土壤有机质形成。

3.4 林龄因子对土壤有机质含量的影响

植被因子对土壤有机质含量也会造成一定程度的影响,凋落物对有机质含量影响突出,植被类型和生长状况直接决定了植物残体输入土壤的量,林龄不同导致林地植物残体、微生物残体及代谢产物等有机质输入输出不同,从而对土壤有机质含量造成影响。

土壤有机质含量一般会随植被恢复年限增加而非线性增大,本研究中体现为先增后减,最大值在林龄 20 a 左右。这是因为刺槐林恢复初期的土壤有机质含量本底较低,容易随凋落物输入增加而升高^[171],再则是随着林龄增加林木凋落物输入和地表枯落物蓄积增加,使土壤有机质增加^[172];但随着林龄超过最优值以后,一方面林木生长速度和凋落物输入开始减慢,另一方面林地深层土壤蓄水开始明显减少甚至是出现干层^[173-174]从而严重限制树木生长甚至是出现早衰,林地光照增强和土壤温度升高促进土壤有机质分解,从而使土壤有机质含量缓慢降低,造成了阈值现象^[175]。

3.5 各因子对土壤有机质含量的交互作用

土壤有机质含量变化是多个单一因子耦合驱动的结果,因此本文的地理探测器分析表明任意两个因子的交互作用均大于单一因子的作用,这与很多研究结果一致^[176-177],但本文未对多因子综合结果进行分析。另外,地理探测器分析表明,贡献率最大的单一因子为海拔高度,这与简单相关分析结果(第一因子为土层深度)不同,这是因后者基于线性关系而前者还包含非线性关系,但也与考虑非线性关系的外包线分析结果(土层深度)不同,可能还受到连续数据离散化处理方式的影响^[178]。但在所有的两因子交互作用分析中,海拔高度与土层深度交互作用的增加效应最大,这表明海拔高度和土层深度均是影响刺槐林土壤有机质含量的重要因子,与前人研究一致^[10,15,179]。

4 结论

研究表明,黄土高原刺槐林土壤有机质含量对各因子变化的响应多为非线性关系,其中随海拔高度、年均气温和林龄增加均表现为先增后减,最高值分别出现在 1000 m、10.7℃、20 a 左右;随土层深度增加表现为先快速降低后缓慢降低,阈值为 40 cm;随年均降水量增大表现为先快速增加后逐渐缓慢增加,阈值为 500 mm;随坡度增加表现为线性降低。对土壤有机质含量变化的贡献率依次为区域因子(海拔高度>年均降水>年均气温)>局域因子(土层深度>林龄>坡度),其中贡献率最大的海拔高度(55.0%)与土层深度的交互作用增加效应最大(达 94.2%),且任何两个因子交互作用的解释力均大于单一因子的解释力,因此未来研究中应考虑因子间交互作用对土壤有机质含量的影响。

参考文献(References):

- [1] 杨亚辉, 赵文慧, 木热提江·阿不拉, 蔺鹏飞, 于艺鹏, 陈利利, 张晓萍. 不同植被对土壤理化性质影响——以王东沟小流域为例. 水土保持通报, 2016, 36(1): 249-252.
- [2] 金峰, 杨浩, 赵其国. 土壤有机碳储量及影响因素研究进展. 土壤, 2000, 32(1): 11-17.
- [3] 董莉丽, 杨波, 李晓华, 王新芳. 陕西省土壤有机质含量及其与影响因素的关系. 水土保持通报, 2017, 37(4): 85-91.
- [4] Deng L, Shangguan Z P, Sweeney S. Changes in soil carbon and nitrogen following land abandonment of farmland on the Loess Plateau, China. *PLoS One*, 2013, 8(8): e71923.
- [5] 李志平, 苏印泉, 贺亮. 黄土丘陵区人工林土壤有机碳的垂直分布特征. 西北林学院学报, 2006, 21(6): 54-57.
- [6] 张波, 张建军, 李铁涛, 隋旭红, 郑芳, 芦倩. 黄土区刺槐林地土壤水分剖面的垂直分层. 中国水土保持科学, 2010, 8(4): 39-44.
- [7] 赵丹阳, 毕华兴, 侯贵荣, 崔艳红, 王宁, 王珊珊, 马晓至. 不同林龄刺槐林植被与土壤养分变化特征. 中国水土保持科学: 中英文, 2021, 19(3): 56-63.
- [8] Song X S, Shi S M, Lu S, Ren R X, He C X, Meng P, Zhang J S, Yin C J, Zhang X. Changes in soil chemical properties following afforestation of cropland with *Robinia pseudoacacia* in the southeastern Loess Plateau of China. *Forest Ecology and Management*, 2021, 487: 118993.
- [9] 衣鹏慧, 吴会峰, 胡保安, 温馨, 韩海荣, 程小琴. 黄土高原地区退耕还林后土壤有机碳储量变化特征及影响因素. 生态学报, 2023, 43

- (24): 10054-10064.
- [10] 李佳佳, 樊妙春, 上官周平. 黄土高原南北样带刺槐林土壤碳、氮、磷生态化学计量特征. 生态学报, 2019, 39(21): 7996-8002.
- [11] 牛春梅, 关晋宏, 程然然, 李国庆, 吴春荣, 程积民, 杜盛. 黄土高原中西部刺槐人工林生态系统碳密度及其影响因子. 生态学报, 2017, 37(15): 5049-5058.
- [12] 张富荣, 柳洋, 史常明, 赵云飞, 肖锦锦, 汪霞. 不同恢复年限刺槐林土壤碳、氮、磷含量及其生态化学计量特征. 生态环境学报, 2021, 30(3): 485-491.
- [13] 郝小玲, 周佳佳, 张咪咪, 吴洁, 张粉果, 王永吉. 晋南丘陵沟壑区不同退耕年限刺槐林土壤养分含量变化. 林业资源管理, 2020(6): 105-110, 115.
- [14] 刘愿, 陈云明, 梁思琦, 陈晨. 陕北黄土丘陵区刺槐人工林土壤生态化学计量特征. 水土保持研究, 2019, 26(4): 43-49.
- [15] 苟清平, 朱清科, 梅雪梅, 王雪峰, 吕东唯. 陕北黄土区不同林地土壤有机碳含量研究. 安徽农业大学学报, 2023, 50(3): 490-496.
- [16] 任璐璐, 张炳学, 韩凤朋, 张兴昌. 黄土高原不同年限刺槐土壤化学计量特征分析. 水土保持学报, 2017, 31(2): 339-344.
- [17] 魏安琪, 魏天兴, 刘海燕, 王莎. 黄土区刺槐和油松人工林土壤微生物 PLFA 分析. 北京林业大学学报, 2019, 41(4): 88-98.
- [18] 孙中峰, 张学培, 刘卉芳, 张晓明. 晋西黄土区坡面林地土壤持水性能研究. 干旱区研究, 2004, 21(4): 343-347.
- [19] 孙中峰, 周玉喜, 朱金兆, 张学培, 李玉琛. 晋西黄土丘陵区坡面刺槐林地土壤水分研究. 中国水土保持科学, 2007, 5(5): 43-49.
- [20] 黄艳章, 信忠保. 不同生态恢复模式对黄土残塬沟壑区深层土壤有机碳的影响. 生态学报, 2020, 40(3): 778-788.
- [21] 张鼎华, 翟明普, 贾忠奎. 刺槐油松混交林土壤肥力变化的研究. 林业科技通讯, 2001(12): 28-30.
- [22] 尹娜, 魏天兴, 张晓娟. 黄土丘陵区人工林土壤养分效应研究. 水土保持研究, 2008, 15(2): 209-211, 214.
- [23] 杨帆, 潘成忠, 鞠洪秀. 晋西黄土丘陵区不同土地利用类型对土壤碳氮储量的影响. 水土保持研究, 2016, 23(4): 318-324.
- [24] 张桐, 王玉杰, 王云琦, 张会兰, 王彬. 晋西黄土区不同森林群落类型植物多样性研究. 北京林业大学学报, 2015, 37(11): 82-88.
- [25] 李慧, 王百田, 刘涛. 晋西黄土区不同森林树种及其林地土壤养分含量的变化. 林业科学研究, 2016, 29(4): 587-595.
- [26] 胡亚伟, 施政乐, 刘畅, 徐勤涛, 张建军. 晋西黄土区刺槐林密度对林下植物多样性及土壤理化性质的影响. 生态学杂志, 2023, 42(9): 2072-2080.
- [27] 马雯静, 毕华兴, 云雷, 陈攀攀, 田晓玲. 晋西黄土区林草复合界面土壤水分养分分布规律研究. 水土保持研究, 2009, 16(5): 78-82.
- [28] 云雷, 毕华兴, 马雯静, 田晓玲, 崔哲伟, 周晖子, 朱悦. 晋西黄土区林草复合系统土壤养分分布特征及边界效应. 北京林业大学学报, 2011, 33(2): 37-42.
- [29] 田宁宁, 张建军, 茹豪, 李玉婷, 丁杨, 张艳婷. 晋西黄土区水土保持林地的土壤水分和养分特征. 中国水土保持科学, 2015, 13(6): 61-67.
- [30] 胡亚伟, 孙若修, 申明爽, 施政乐, 刘畅, 徐勤涛, 刘俊廷, 张建军. 晋西黄土区土地利用方式对土壤 C:N:P 化学计量特征及土壤理化性质的影响. 干旱区研究, 2021, 38(4): 990-999.
- [31] 田宁宁, 张建军, 李玉婷, 赵荣玮, 张艳婷. 晋西黄土区退耕还林地涵养水源和保育土壤功能评价. 水土保持学报, 2015, 29(5): 124-129.
- [32] 熊瑛楠, 冯天骄, 王平, 吴旭东. 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. 水土保持学报, 2022, 36(2): 228-237, 246.
- [33] 陈丽华, 鲁绍伟, 张学培, 余新晓, 孙中峰. 晋西黄土区主要造林树种林地土壤水分生态条件分析. 水土保持研究, 2008, 15(1): 79-82, 86.
- [34] Liang Y P, Li X, Zha T G, Zhang X X. Vegetation Restoration Alleviated the Soil Surface Organic Carbon Redistribution in the Hillslope Scale on the Loess Plateau, China. *Frontiers in Environmental Science*, 2021, 8.
- [35] 赵伟文, 梁文俊, 魏曦. 不同林分类型对土壤理化性质特征的影响. 山西农业大学学报: 自然科学版, 2019, 39(2): 61-68.
- [36] 于博威, 刘高焕, 刘庆生, 冯九梁, 王小平, 韩国忠, 赵忠贺, 杨军. 晋西黄土丘陵区不同退耕年限刺槐林土壤养分效应. 水土保持学报, 2016, 30(4): 188-193.
- [37] 韩国忠, 于博威, 刘高焕, 刘庆生, 冯九梁, 赵忠贺. 晋西黄土区不同退耕年限刺槐林对土壤水分和养分的影响. 水土保持通报, 2018, 38(5): 15-20.
- [38] 刘林, 韩国忠, 于博威. 晋西退耕地刺槐人工林水土保持效应研究. 中国水土保持, 2020(10): 54-56, 7.
- [39] 刘宇, 张洪江, 张友焱, 王月东, 程金花, 张东旭. 晋西黄土丘陵区主要人工林土壤饱和和导水率研究. 水土保持通报, 2013, 33(4): 131-135.
- [40] 祁生林, 姚晶晶. 山西典型人工林土壤团聚体分形特征及其与抗蚀性关系研究. 北京水务, 2015(2): 31-35.
- [41] 郝小玲, 周佳佳, 张咪咪, 吴洁, 张粉果, 王永吉. 晋南丘陵沟壑区不同退耕年限刺槐林土壤养分含量变化. 林业资源管理, 2020(6): 105-110, 115.
- [42] 孙娇, 赵发珠, 韩新辉, 杨改河, 白孙宝, 郝文芳. 不同林龄刺槐林土壤团聚体化学计量特征及其与土壤养分的关系. 生态学报, 2016, 36(21): 6879-6888.
- [43] 李慧, 许亚东, 王涛, 杨改河. 不同林龄刺槐人工林植物与土壤 C、N、P 化学计量特征演变. 西北农业学报, 2018, 27(11): 1651-1659.
- [44] 刘栋, 黄懿梅, 安韶山. 黄土丘陵区人工刺槐林恢复过程中土壤氮素与微生物活性的变化. 中国生态农业学报, 2012, 20(3): 322-329.
- [45] 黄婷, 刘政鸿, 王钰莹, 张伟, 何俊皓, 郝文芳. 陕北黄土丘陵区不同立地条件下刺槐群落的土壤质量评价. 干旱区研究, 2016, 33(3): 476-485.

- [46] 李慧, 许亚东, 王涛, 杨改河. 不同林龄刺槐人工林植物与土壤 C、N、P 化学计量特征演变. 西北农业学报, 2018, 27(11): 1651-1659.
- [47] 李航, 严方晨, 焦菊英, 唐柄哲, 张意奉. 黄土丘陵沟壑区不同植被类型土壤有效水和持水能力. 生态学报, 2018, 38(11): 3889-3898.
- [48] 马昕昕, 许明祥, 杨凯. 黄土丘陵区刺槐林深层土壤有机碳矿化特征初探. 环境科学, 2012, 33(11): 3893-3900.
- [49] 韩新辉, 佟小刚, 杨改河, 薛亚龙, 赵发珠. 黄土丘陵区不同退耕还林地土壤有机碳库差异分析. 农业工程学报, 2012, 28(12): 223-229.
- [50] 刘梦云, 寇宝平, 常庆瑞, 刘京. 安塞小流域土壤养分分布特征研究. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2002, 30(6): 21-24.
- [51] 吕海波, 梁宗锁. 刺槐林和柠条林土壤剖面理化性质对比及相关性分析. 中国水土保持, 2012(4): 28-31, 68.
- [52] 董扬红, 曾全超, 安韶山, 张宏. 黄土高原不同林型植被对土壤活性有机碳及腐殖质的影响. 水土保持学报, 2015, 29(1): 143-148.
- [53] 孙龙, 张光辉, 王兵, 栾莉莉. 黄土高原不同退耕年限刺槐林地土壤侵蚀阻力. 农业工程学报, 2017, 33(10): 191-197.
- [54] 邢肖毅, 黄懿梅, 安韶山, 张宏. 黄土高原沟壑区森林带不同植物群落土壤氮素含量及其转化. 生态学报, 2013, 33(22): 7181-7189.
- [55] 张宏, 黄懿梅, 安韶山, 邢肖毅. 黄土高原森林带植被群落下土壤活性有机碳研究. 水土保持研究, 2013, 20(3): 65-70, 77.
- [56] 王琳琳, 陈云明, 张飞, 王锋利, 李寰. 黄土丘陵半干旱区人工林细根分布特征及土壤特性. 水土保持通报, 2010, 30(4): 27-31.
- [57] 白文娟, 焦菊英, 马祥华, 焦峰. 黄土丘陵沟壑区退耕地人工林的土壤环境效应. 干旱区资源与环境, 2005, 19(S1): 135-141.
- [58] 马祥华, 焦菊英, 温仲明, 白文娟, 焦峰. 黄土丘陵沟壑区退耕地土壤速效 N 的分布特征及其与物种多样性的关系. 水土保持研究, 2005, 12(1): 13-16, 21.
- [59] 吴建平, 韩新辉, 任成杰, 杨改河, 任广鑫. 黄土丘陵区不同恢复年限退耕地土壤碳氮差异及其影响因素. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2017, 45(6): 123-133.
- [60] 艾泽民, 陈云明, 曹扬. 黄土丘陵区不同林龄刺槐人工林碳、氮储量及分配格局. 应用生态学报, 2014, 25(2): 333-341.
- [61] 马昕昕, 许明祥, 张金, 邱宇洁, 脱登峰. 黄土丘陵区不同土地利用类型下深层土壤轻组有机碳剖面分布特征. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(6): 1366-1375.
- [62] 张杨, 梁爱华, 王平平, 杨改河, 张笑培. 黄土丘陵区不同植被恢复模式土壤养分效应. 西北农业学报, 2010, 19(9): 114-118.
- [63] 吴建平, 韩新辉, 许亚东, 任成杰, 杨改河, 任广鑫. 黄土丘陵区不同植被类型下土壤与微生物 C、N、P 化学计量特征研究. 草地学报, 2016, 24(4): 783-792.
- [64] 范家伟, 朱广宇, 上官周平, 邓蕾. 黄土丘陵区刺槐林土壤团聚体稳定性和土壤可蚀性动态变化. 水土保持学报, 2023, 37(3): 19-26.
- [65] 赵萌捷, 陈云明, 艾泽民, 曹扬, 徐敬华. 黄土丘陵区典型人工林有机碳分布特征及其影响因素. 水土保持通报, 2013, 33(2): 270-275.
- [66] 韩新辉, 杨改河, 佟小刚, 冯永忠, 任广鑫, 赵发珠, 杜约翰. 黄土丘陵区几种退耕还林地土壤固存碳氮效应. 农业环境科学学报, 2012, 31(6): 1172-1179.
- [67] 王征, 刘国彬, 许明祥. 黄土丘陵区植被恢复对深层土壤有机碳的影响. 生态学报, 2010, 30(14): 3947-3952.
- [68] 赵路红, 李昌珍, 康迪, 任成杰, 韩新辉, 佟小刚, 冯永忠. 黄土丘陵区植被恢复对土壤可溶性氮组分的影响. 生态学报, 2017, 37(10): 3533-3542.
- [69] 杨丽霞, 陈少锋, 安娟娟, 赵发珠, 韩新辉, 冯永忠, 杨改河, 任广鑫. 陕北黄土丘陵区不同植被类型群落多样性与土壤有机质、全氮关系研究. 草地学报, 2014, 22(2): 291-298.
- [70] 刘愿, 陈云明, 梁思琦, 陈晨. 陕北黄土丘陵区刺槐人工林土壤生态化学计量特征. 水土保持研究, 2019, 26(4): 43-49.
- [71] 陈少锋, 韩新辉, 冯永忠, 杨改河, 任广鑫. 陕北黄土丘陵区土壤碳氮库对人工植被恢复的响应. 河北大学学报: 自然科学版, 2014, 34(5): 508-515.
- [72] 陈亚南, 马露莎, 张向茹, 杨佳佳, 安韶山. 陕西黄土高原刺槐枯落叶生态化学计量学特征. 生态学报, 2014, 34(15): 4412-4422.
- [73] 王涛, 马宇丹, 许亚东, 郭书娟, 王维钰, 韩新辉, 杨改河, 王晓娇. 退耕刺槐林土壤养分与酶活性关系. 生态学杂志, 2018, 37(7): 2083-2091.
- [74] 刘毅, 李世清, 李生秀. 黄土高原不同类型土壤团聚体中氮库分布的研究. 中国农业科学, 2007, 40(2): 304-313.
- [75] 陈亚南, 马露莎, 张向茹, 杨佳佳, 安韶山. 陕西黄土高原刺槐枯落叶生态化学计量学特征. 生态学报, 2014, 34(15): 4412-4422.
- [76] Zhang W, Liu W C, Xu M P, Deng J, Han X H, Yang G H, Feng Y Z, Ren G X. Response of forest growth to C: N: P stoichiometry in plants and soils during Robinia pseudoacacia afforestation on the Loess Plateau, China. Geoderma, 2019, 337: 280-289.
- [77] Xu M P, Gao D X, Fu S Y, Lu X Q, Wu S J, Han X H, Yang G H, Feng Y Z. Long-term effects of vegetation and soil on the microbial communities following afforestation of farmland with Robinia pseudoacacia plantations. Geoderma, 2020, 367: 114263.
- [78] Xu M P, Lu X Q, Xu Y D, Zhong Z K, Zhang W, Ren C J, Han X H, Yang G H, Feng Y Z. Dynamics of bacterial community in litter and soil along a chronosequence of Robinia pseudoacacia plantations. Science of the Total Environment, 2020, 703: 135613.
- [79] Wang J, Zhao W W, Wang G, Yang S Q, Pereira P. Effects of long-term afforestation and natural grassland recovery on soil properties and quality in Loess Plateau (China). The Science of the Total Environment, 2021, 770: 144833.
- [80] Wang B, Xue S, Liu G B, Zhang G H, Li G, Ren Z P. Changes in soil nutrient and enzyme activities under different vegetations in the Loess Plateau area, Northwest China. CATENA, 2012, 92: 186-195.
- [81] Wang B, Liu G B, Xue S. Effect of black locust (*Robinia pseudoacacia*) on soil chemical and microbiological properties in the eroded hilly area of China's Loess Plateau. Environmental Earth Sciences, 2012, 65(3): 597-607.
- [82] Deng J, Sun P S, Zhao F Z, Han X H, Yang G H, Feng Y Z, Ren G X. Soil C, N, P and its stratification ratio affected by artificial vegetation in subsoil, Loess Plateau China. PLoS One, 2016, 11(3): e0151446.

- [83] Wu X, Niu Y B, Xun M Y, Jin J Y, Tang Y K, Chen Y M. Soil carbon, nitrogen, and phosphorus storages and their stoichiometry due to mixed afforestation with *Hippophae rhamnoides* in the Loess Hilly Region, China. *Forests*, 2021, 12(12): 1718.
- [84] Li B B, Shen X J, Zhao Y J, Cong P J, Wang H Y, Wang A J, Chang S W. Sloping farmlands conversion to mixed forest improves soil carbon pool on the Loess Plateau. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 19(9): 5157.
- [85] Li H, Li J, He Y L, Li S J, Liang Z S, Peng C H, Polle A, Luo Z B. Changes in carbon, nutrients and stoichiometric relations under different soil depths, plant tissues and ages in black locust plantations. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2013, 35(10): 2951-2964.
- [86] Zhao F Z, Kang D, Han X H, Yang G H, Yang G H, Feng Y Z, Ren G X. Soil stoichiometry and carbon storage in long-term afforestation soil affected by understory vegetation diversity. *Ecological Engineering*, 2015, 74: 415-422.
- [87] Zhang C, Liu G B, Xue S, Sun C L. Soil organic carbon and total nitrogen storage as affected by land use in a small watershed of the Loess Plateau, China. *European Journal of Soil Biology*, 2013, 54: 16-24.
- [88] Zhao F Z, Yang G H, Han X H, Feng Y Z, Ren G X. Stratification of carbon fractions and carbon management index in deep soil affected by the Grain-to-Green Program in China. *PLoS One*, 2014, 9(6): e99657.
- [89] 王友生, 吴鹏飞, 侯晓龙, 岳辉, 彭绍云, 马祥庆. 稀土矿废弃地不同植被恢复模式对土壤肥力的影响. *生态环境学报*, 2015, 24(11): 1831-1836.
- [90] 张楠阳, 张景群, 杨玉霞, 王蕾, 王晓芳, 李年麒. 黄土高原不同人工生态林对土壤主要营养元素的影响. *东北林业大学学报*, 2009, 37(11): 74-76.
- [91] 张景群, 苏印泉, 康永祥, 徐喜明, 秦乐. 黄土高原刺槐人工林幼林生态系统碳吸存. *应用生态学报*, 2009, 20(12): 2911-2916.
- [92] 张景群, 苏印泉, 徐喜明, 温臻. 黄土高原刺槐人工林土壤碳汇. *东北林业大学学报*, 2010, 38(1): 50-53.
- [93] 张笑培, 杨改河, 王得祥, 冯永忠, 任广鑫. 黄土高原沟壑区不同植被恢复模式对土壤生物学特性的影响. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2008, 36(5): 149-154, 159.
- [94] 王蕾, 张景群, 王晓芳, 苏印泉. 黄土高原两种人工林幼林生态系统碳汇能力评价. *东北林业大学学报*, 2010, 38(7): 75-78.
- [95] 张笑培, 杨改河, 任广鑫, 冯永忠. 黄土高原南部植被恢复对土壤理化性状与土壤酶活性的影响. *干旱地区农业研究*, 2010, 28(6): 64-68.
- [96] 张景群, 苏印泉, 徐喜明, 温臻. 黄土高原人工刺槐林土壤有机碳动态监测研究. *西北林学院学报*, 2009, 24(5): 21-25.
- [97] 刘旦旦, 张鹏辉, 王健, 肖庆利. 黄土坡面不同土地利用类型土壤抗蚀性对比. *林业科学*, 2013, 49(9): 102-106.
- [98] 辛文杰, 苏印泉, 朱铭强, 胡瑞瑞, 刘艳, 黄帅. 千阳县不同林分土壤有机碳的分布特征. *中南林业科技大学学报*, 2014, 34(5): 66-69, 78.
- [99] 韩恩贤, 韩刚, 关红杰, 淮宗安, 李惠萍, 柳永强. 千阳县冉家沟流域不同生物措施治理水土流失区土壤水分养分的变化. *西北林学院学报*, 2009, 24(5): 16-20.
- [100] 方航空. 黄土高原主要人工林土壤养分与酶活性的研究. *陕西林业科技*, 2016(5): 7-10.
- [101] 张玉斌, 吴发启, 曹宁, 李飞敏. 泥河沟流域不同土地利用土壤养分分析. *水土保持通报*, 2005, 25(2): 23-26.
- [102] 白文娟, 焦菊英, 马祥华, 焦峰. 黄土丘陵沟壑区退耕地人工林的土壤环境效应. *干旱区资源与环境*, 2005, 19(S1): 135-141.
- [103] 郭鑫, 魏天兴, 陈宇轩, 沙国良, 任康, 于欢. 黄土丘陵区典型退耕恢复植被土壤生态化学计量特征. *干旱区地理*, 2022, 45(6): 1899-1907.
- [104] Lu N, Liski J, Chang R Y, Akujärvi A, Wu X, Jin T T, Wang Y F, Fu B J. Soil organic carbon dynamics of black locust plantations in the middle Loess Plateau area of China. *Biogeosciences*, 2013, 10(11): 7053-7063.
- [105] 董莉丽, 寇萌. 渭北黄土丘陵区人工林类型对土壤属性的影响. *土壤*, 2021, 53(4): 841-849.
- [106] Dong L L, Kou M. Soil aggregate stability and carbon density in three plantations in the Loess Plateau, China. *Forests*, 2022, 13(7): 1096.
- [107] 张俊华, 常庆瑞, 张佳宝. 不同林龄人工林对退化生态系统土壤肥力质量的影响. *土壤通报*, 2006, 37(3): 429-433.
- [108] 杨绒, 严德翼, 周建斌, 汪文霞, 马勤安. 黄土区不同类型土壤可溶性有机氮的含量及特性. *生态学报*, 2007, 27(4): 1397-1403.
- [109] 郑顺安, 常庆瑞. 黄土高原不同类型人工林对土壤肥力的影响. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2006, 34(2): 119-123.
- [110] 刘举, 常庆瑞, 张俊华, 陈涛, 贾科利. 黄土高原不同林地植被对土壤肥力的影响. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2004, 32(S1): 111-115.
- [111] 张景群, 许喜明, 王晓芳, 王蕾, 张婷婷, 赵晓春. 黄土高原刺槐、油松人工幼林生态系统碳汇研究. *干旱区地理*, 2011, 34(2): 201-207.
- [112] 宋西德, 叶彦辉, 张永, 曾德慧, 韩艳英. 黄土高原沟壑区林草景观界面土壤养分、水分和微生物的研究. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2007, 35(7): 55-60.
- [113] 叶彦辉, 宋西德, 张永, 刘莉丽, 曾德慧, 尤文忠, 赵阿妮. 黄土丘陵区林草景观界面土壤养分分布特征和空间变异性研究. *西北林学院学报*, 2007, 22(3): 1-6.
- [114] 张静, 常庆瑞. 渭北黄土高原不同林型植被对土壤肥力的影响. *水土保持通报*, 2006, 26(3): 26-28, 62.
- [115] Zhang Y, Wei L Y, Wei X R, Liu X T, Shao M G. Long-term afforestation significantly improves the fertility of abandoned farmland along a soil clay gradient on the Chinese Loess Plateau. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(10): 3521-3534.
- [116] Liu J L, Dang P, Gao Y, Zhu H L, Zhu H N, Zhao F, Zhao Z. Effects of tree species and soil properties on the composition and diversity of the soil bacterial community following afforestation. *Forest Ecology and Management*, 2018, 427: 342-349.

- [117] 赵妮, 金晶炜, 程光庆, 程积民. 渭北旱塬区不同坡向土地利用类型对土壤性质的影响. 水土保持学报, 2018, 32(3): 271-279, 288.
- [118] 张社奇, 王国栋, 张蕾. 黄土高原刺槐林对土壤养分时空分布的影响. 水土保持学报, 2008, 22(5): 91-95.
- [119] 赵满兴, 曹阳阳, 白二磊, 刘慧, 张晓曦. 黄土丘陵区不同植被恢复类型土壤游离氨基酸含量及其随季节动态分析. 西北林学院学报, 2019, 34(3): 43-49.
- [120] 赵满兴, 余光美, 白二磊, 刘慧, 曹阳阳. 陕北黄土高原植被恢复对土壤理化性状的影响. 中国农学通报, 2020, 36(25): 86-94.
- [121] 赵满兴, 余光美, 白二磊, 刘慧, 曹阳阳. 陕北黄土高原植被恢复区土壤酶活性研究. 土壤通报, 2020, 51(1): 105-114.
- [122] 宋青珍, 白海金, 刘艳, 苏印泉. 黄土高原刺槐人工林土壤有机碳动态研究. 陕西林业科技, 2015(2): 5-9.
- [123] 季志平, 苏印泉, 贺亮. 黄土丘陵区人工林土壤有机碳的垂直分布特征. 西北林学院学报, 2006, 21(6): 54-57.
- [124] 任璐璐, 张炳学, 韩凤朋, 张兴昌. 黄土高原不同年限刺槐土壤化学计量特征分析. 水土保持学报, 2017, 31(2): 339-344.
- [125] 杨光, 荣丽媛. 黄土高原沟壑区人工植被类型对土壤水分和碳氮的影响. 水土保持通报, 2007, 27(6): 30-33.
- [126] 李靖, 马永禄, 罗杰, 李红, 罗志斌. 黄土丘陵沟壑区不同林龄刺槐林养分特征与生物量研究. 西北林学院学报, 2013, 28(3): 7-12.
- [127] 丁康, 徐学选, 陈文媛, Shahmir Ali Kalhoro. 长武塬边坡不同植被下土壤团聚体及入渗特征. 北京林业大学学报, 2017, 39(12): 44-51.
- [128] Yang F, Huang M B, Li C H, Wu X F, Guo T Q, Zhu M Y. Changes in soil moisture and organic carbon under deep-rooted trees of different stand ages on the Chinese Loess Plateau. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2022, 328: 107855.
- [129] Qiu L P, Zhang X C, Cheng J M, Yin X Q. Effects of black locust (*Robinia pseudoacacia*) on soil properties in the loessial Gully Region of the Loess Plateau, China. Plant and Soil, 2010, 332(1): 207-217.
- [130] Song X S, Guo J W, Wang X, Du Z L, Ren R X, Lu S, He C X. Afforestation alters the molecular composition of soil organic matter in the central Loess Plateau of China. Forests, 2023, 14(7): 1502.
- [131] Song B L, Yan M J, Hou H, Guan J H, Shi W Y, Li G Q, Du S. Distribution of soil carbon and nitrogen in two typical forests in the semiarid region of the Loess Plateau, China. CATENA, 2016, 143: 159-166.
- [132] 胡婵娟, 刘国华, 傅伯杰, 靳甜甜, 郭雷, 苏常红. 黄土丘陵沟壑区典型人工林土壤 CO₂ 释放规律及其影响因子. 生态学报, 2009, 29(9): 4700-4709.
- [133] 胡婵娟, 傅伯杰, 刘国华, 靳甜甜, 刘宇. 黄土丘陵沟壑区典型人工林下土壤微生物功能多样性. 生态学报, 2009, 29(2): 727-733.
- [134] 胡婵娟, 傅伯杰, 靳甜甜, 刘国华. 黄土丘陵沟壑区植被恢复对土壤微生物生物量碳和氮的影响. 应用生态学报, 2009, 20(1): 45-50.
- [135] 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.
- [136] 胡婵娟, 刘国华, 陈利顶, 吴雅琼. 黄土丘陵区坡面尺度上不同植被格局下植物群落和土壤性质研究. 干旱区地理, 2012, 35(5): 787-794.
- [137] Hu C J, Liu G H, Fu B J, Chen L D, Lyu Y H, Guo L. Soil carbon stock and flux in plantation forest and grassland ecosystems in Loess Plateau, China. Chinese Geographical Science, 2014, 24(4): 423-435.
- [138] Liu Y, Li Y. Synergy and trade-off between carbon sequestration and soil water balance: impact of revegetation choices. Environmental Earth Sciences, 2019, 78(23): 651.
- [139] Luo C Y, Zhang B X, Liu J, Wang X X, Han F P, Zhou J H. Effects of different ages of *Robinia pseudoacacia* plantations on soil physiochemical properties and microbial communities. Sustainability, 2020, 12(21): 9161.
- [140] 高德新, 张伟, 任成杰, 戴银月, 乔文静, 陈正兴, 杨改河, 韩新辉. 黄土高原典型植被恢复过程土壤与叶片生态化学计量特征. 生态学报, 2019, 39(10): 3622-3630.
- [141] 郭胜利, 马玉红, 车升国, 孙文义. 黄土区人工与天然植被对凋落物量和土壤有机碳变化的影响. 林业科学, 2009, 45(10): 14-18.
- [142] 王凯博, 时伟宇, 上官周平. 黄土丘陵区天然和人工植被类型对土壤理化性质的影响. 农业工程学报, 2012, 28(15): 80-86.
- [143] Gao X D, Li H C, Zhao X N, Ma W, Wu P T. Identifying a suitable revegetation technique for soil restoration on water-limited and degraded land: considering both deep soil moisture deficit and soil organic carbon sequestration. Geoderma, 2018, 319: 61-69.
- [144] Wu W J, Chen G J, Meng T F, Li C, Feng H, Si B C, Siddique K H M. Effect of different vegetation restoration on soil properties in the semi-arid Loess Plateau of China. CATENA, 2023, 220: 106630.
- [145] Zhang W, Gao D X, Chen Z X, Li H, Deng J, Qiao W J, Han X H, Yang G H, Feng Y Z, Huang J Y. Substrate quality and soil environmental conditions predict litter decomposition and drive soil nutrient dynamics following afforestation on the Loess Plateau of China. Geoderma, 2018, 325: 152-161.
- [146] Wu H F, Gao T, Zhang W, Li G, Hao W F. Understorey vegetation composition and stand are mainly limited by soil moisture in black locust plantations of Loess Plateau. Forests, 2021, 12(2): 195.
- [147] 余新晓, 陈丽华. 黄土高原沟壑区土壤抗蚀性的初步研究. 北京林业大学学报, 1988, 10(1): 28-34.
- [148] 马涛, 贾志清, 于洋, 张峰, 董彦丽, 田晋华, 陈爱华. 土壤环境对陇东黄土高原刺槐林土壤碳通量的影响. 中国水土保持科学, 2017, 15(6): 97-105.
- [149] 申家朋, 张文辉, 李彦华, 何景峰, 张辉. 陇东黄土高原沟壑区刺槐和油松人工林的生物量和碳密度及其分配规律. 林业科学, 2015, 51(4): 1-7.
- [150] 张富荣, 柳洋, 史常明, 赵云飞, 肖锦锦, 汪霞. 不同恢复年限刺槐林土壤碳、氮、磷含量及其生态化学计量特征. 生态环境学报, 2021, 30(3): 485-491.

- [151] Zhou X H, Li J, Zhao Y F, Jiang S L, Liu H Y, Wang X. Effect of time since afforestation on soil organic carbon stock and turnover rate. *Sustainability*, 2022, 14(16): 10403.
- [152] Li Z W, Liu C, Dong Y T, Chang X F, Nie X D, Liu L, Xiao H B, Lu Y M, Zeng G M. Response of soil organic carbon and nitrogen stocks to soil erosion and land use types in the Loess hilly-gully region of China. *Soil and Tillage Research*, 2017, 166: 1-9.
- [153] Matsushita M, Takata K, Hitsuma G, Yagihashi T, Noguchi M, Shibata M, Masaki T. A novel growth model evaluating age-size effect on long-term trends in tree growth. *Functional Ecology*, 2015, 29(10): 1250-1259.
- [154] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134.
- [155] 王琦, 常庆瑞, 黄勇, 史博太, 落莉莉. 基于 Geo-D 的陕西省 STN 空间变异因子交互影响. *农业机械学报*, 2021, 52(11): 161-169.
- [156] 信忠保, 余新晓, 张满良, 李庆云, 李海光. 黄土高原丘陵沟壑区不同土地利用的土壤养分特征. *干旱区研究*, 2012, 29(3): 379-384.
- [157] 韩国忠, 于博威, 刘高焕, 刘庆生, 冯九梁, 赵忠贺. 晋西黄土区不同退耕年限刺槐林对土壤水分和养分的影响. *水土保持通报*, 2018, 38(5): 15-20.
- [158] 薛晓辉, 卢芳, 张兴昌. 陕北黄土高原土壤有机质分布研究. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2005, 33(6): 69-74.
- [159] 马涛, 贾志清, 于洋, 张峰, 董彦丽, 田晋华, 陈爱华. 土壤环境对陇东黄土高原刺槐林土壤碳通量的影响. *中国水土保持科学*, 2017, 15(6): 97-105.
- [160] Yuan Z Q, Fang C, Zhang R, Li F M, Javaid M M, Janssens I A. Topographic influences on soil properties and aboveground biomass in lucerne-rich vegetation in a semi-arid environment. *Geoderma*, 2019, 344: 137-143.
- [161] Deng L, Liu G B, Shanguan Z P. Land-use conversion and changing soil carbon stocks in China's 'Grain-for-Green' Program; a synthesis. *Global Change Biology*, 2014, 20(11): 3544-3556.
- [162] 林枫, 王丽芳, 文琦. 黄土高原土壤有机碳固存对植被恢复的动态响应及其碳汇价值. *水土保持研究*, 2021, 28(3): 53-58.
- [163] Schwanghart W, Jarmer T. Linking spatial patterns of soil organic carbon to topography—a case study from south-eastern Spain. *Geomorphology*, 2011, 126(1/2): 252-263.
- [164] 魏孝荣, 邵明安, 高建伦. 黄土高原沟壑区小流域土壤有机碳与环境因素的关系. *环境科学*, 2008, 29(10): 2879-2884.
- [165] 李凤英, 何小武, 周春火. 坡度影响土壤侵蚀研究进展. *水土保持研究*, 2008, 15(6): 229-231.
- [166] 杜明成, 王振龙, 姜翠玲, 王发信, 周超. 淮北平原黄潮土多雨强变坡度产流产沙规律试验模拟. *水土保持学报*, 2018, 32(6): 34-39.
- [167] 姜航, 高菲, 崔晓阳. 帽儿山次生林区土壤有机碳储量及地形因子的影响. *森林工程*, 2015, 31(3): 15-20.
- [168] Liu S L, Guo X D, Fu B J, Lian G, Wang J. The effect of environmental variables on soil characteristics at different scales in the transition zone of the Loess Plateau in China. *Soil Use and Management*, 2007, 23(1): 92-99.
- [169] 宋轩, 李立东, 寇长林, 陈杰. 黄水河小流域土壤养分分布及其与地形的关系. *应用生态学报*, 2011, 22(12): 3163-3168.
- [170] 孟国欣, 查同刚, 张晓霞, 张志强, 朱聿申, 周娅, 刘怡函, 林珠. 植被类型和地形对黄土区退耕地土壤有机碳垂直分布的影响. *生态学杂志*, 2017, 36(9): 2447-2454.
- [171] 李靖, 马永禄, 罗杰, 李红, 罗志斌. 黄土丘陵沟壑区不同林龄刺槐林养分特征与生物量研究. *西北林学院学报*, 2013, 28(3): 7-12.
- [172] Wang J J, Hu C X, Bai J, Gong C M. Carbon sequestration of mature black locust stands on the Loess Plateau, China. *Plant, Soil and Environment*, 2015, 61(3): 116-121.
- [173] Jia X X, Shao M A, Zhu Y J, Luo Y. Soil moisture decline due to afforestation across the Loess Plateau, China. *Journal of Hydrology*, 2017, 546: 113-122.
- [174] 王稳, 高晓东, 赵西宁, 杨孟豪. 黄土高原不同气候区刺槐林恢复年限对水、碳及植物多样性的影响. *生态学报*, 2023, 43(23): 9770-9783.
- [175] 董生健, 何小谦. 黄土丘陵区不同林龄人工刺槐林下植被及土壤系统演变特征. *水土保持通报*, 2016, 36(5): 20-27.
- [176] 李雨, 韩平, 任东, 罗娜, 王纪华. 基于地理探测器的农田土壤重金属影响因子分析. *中国农业科学*, 2017, 50(21): 4138-4148.
- [177] 胡李发, 谢元礼, 崔思颖, 周鹏, 李云梅, 孙韶启. 关中平原城市群夏季城市热岛特征及驱动力. *中国环境科学*, 2021, 41(8): 3842-3852.
- [178] 韩晶, 崔金芳, 杨威, 徐阳吉哲, 秦冬晖, 高凤杰. 基于 InVEST 模型的低山丘陵区土壤侵蚀变化与驱动因素分析. *水土保持研究*, 2022, 29(5): 32-39.
- [179] Wei X, Bi H X, Liang W J, Hou G R, Kong L X, Zhou Q Z. Relationship between soil characteristics and stand structure of *Robinia pseudoacacia* L. and *Pinus tabulaeformis* carr. mixed plantations in the Caijiachuan watershed; an application of structural equation modeling. *Forests*, 2018, 9(3): 124.