

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.06.024.

杨璐, 刘小芳, 张秀敏, 等. 晋西北柠条长期种植对根系分布及土壤水碳的影响[J]. 水土保持研究, 2024, 31(6): 199-206, 212.

Yang Lu, Liu Xiaofang, Zhang Xiumin, et al. Impact of Long-Term *Caragana korshinskii* Plantation on Root Distribution and Soil Water-Carbon Dynamics in Northwestern Shanxi[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(6): 199-206, 212.

# 晋西北柠条长期种植对根系分布及土壤水碳的影响

杨璐, 刘小芳, 张秀敏, 巨佳敏, 常富强, 杨泽芃, 赵勇钢

(山西师范大学 生命科学学院, 太原 030031)

**摘要:** [目的] 探究晋西北不同种植年限人工柠条深层土壤水碳和根系的相互作用, 为黄土丘陵区人工植被恢复提供一定的理论基础。[方法] 以不同种植年限 (20, 40, 60 a) 柠条林为研究对象, 对 0—300 cm 土层水分、有机碳和根系特征参数进行测定, 分析了三者的相互关系。[结果] (1) 相较于荒草地, 柠条长期种植 (大于 40 a), 降低了剖面土壤水分含量, 但增加了剖面土壤有机碳含量。土壤水分亏缺现象主要集中在 0—60, 200—300 cm 土层中, 而有机碳含量主要分布在 0—60 cm 土层中。柠条种植显著增加了 0—60 cm 剖面根系特征参数, 其根系生物量占 0—300 cm 土层的 50%。 (2) 在 0—60 cm 土层, 有机碳与土壤水分显著负相关 ( $p < 0.01$ ), 与根体积密度显著正相关 ( $p < 0.05$ ); 在 60—200 cm 土层, 土壤水分与有机碳、根表面积密度和根体积密度显著负相关 ( $p < 0.05$ ); 在 200—300 cm 土层, 土壤水分与根系参数均显著正相关 ( $p < 0.05$ )。多元回归和通径分析结果表明根体积密度和土壤水分是影响有机碳的主要因素, 较高的根体积密度和较低的土壤水分有助于增加土壤有机碳。[结论] 晋西北黄土丘陵区长期种植柠条后, 对表层根系特征参数的增加促进了土壤有机碳积累, 但加剧了表层土壤水分消耗, 并促使根系向深层生长以适应水分条件。在区域进行植被建设时有必要综合考虑植被种植年限和土层深度对土壤水分、有机碳和根系特征的综合影响。

**关键词:** 柠条林; 根系特征参数; 水分亏缺效应; 土壤有机碳

中图分类号: S154.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)06-0199-08

## Impact of Long-Term *Caragana korshinskii* Plantation on Root Distribution and Soil Water-Carbon Dynamics in Northwestern Shanxi

Yang Lu, Liu Xiaofang, Zhang Xiumin, Ju Jiamin, Chang Fuqiang, Yang Zepeng, Zhao Yonggang

(College of Life Sciences, Shanxi Normal University, Taiyuan 030031, China)

**Abstract:** [Objective] This study aims to explore the interaction between deep soil water, carbon and roots of artificial *Caragana korshinskii* with different planting years in northwest Shanxi Province, and to provide a theoretical basis for artificial vegetation restoration in the loess hilly region. [Methods] *Caragana korshinskii* forests with different planting years (20, 40, 60 years) were used as the research objects. The water content, organic carbon and root characteristic parameters of the 0—300 cm soil layer were measured, and the relationship between the three was analyzed. [Results] (1) Compared to barren grasslands, long-term *Caragana korshinskii* cultivation (over 40 years) reduced soil moisture content across the profile while increasing soil organic carbon content. The deficit in soil moisture primarily occurred at depths of 0—60 cm and 200—300 cm, whereas the organic carbon content was predominantly distributed within the 0—60 cm depth. *Caragana korshinskii* planting significantly enhanced root characteristic parameters within the 0—60 cm profile, with root biomass accounting for 50% of the total in the 0—300 cm soil layer. (2) Within the 0—60 cm soil layer, organic carbon exhibited a significant negative correlation with soil moisture ( $p < 0.01$ ) and

收稿日期: 2024-01-05

修回日期: 2024-01-29

资助项目: 国家自然科学基金 (42007064); 山西省研究生教育创新项目 (2022Y486); 山西省自然科学基金面上项目 (202203021221133)

第一作者: 杨璐 (1998—), 女, 河南信阳人, 硕士研究生, 研究方向为土壤生态。E-mail: 1259352968@qq.com

通信作者: 刘小芳 (1980—), 女, 山西榆次人, 博士, 副教授, 主要从事植被恢复生态效应研究。E-mail: liuxiaofang04@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

a positive correlation with root volume density ( $p < 0.05$ ); in the 60—200 cm layer, soil moisture showed a significant negative correlation with organic carbon, root surface area density, and root volume density ( $p < 0.05$ ); in the 200—300 cm layer, soil moisture was significantly correlated positively with root parameters ( $p < 0.05$ ). Multivariate regression and path analysis indicated that root volume density and soil moisture were principal factors influencing organic carbon, with higher root volume density and lower soil moisture contributing to an increase in soil organic carbon. [Conclusion] After long-term planting of *Caragana korshinskii* in the loess hilly area of northwest Shanxi, the increase in surface root characteristic parameters promoted soil organic carbon accumulation, but aggravated the consumption of surface soil water and prompted the root system to grow deeper to adapt to water conditions. It emphasizes the necessity to consider the cumulative effects of vegetation planting duration and soil depth on soil moisture, organic carbon, and root characteristics in regional vegetation construction efforts.

**Keywords:** *Caragana korshinskii*; root characteristic parameters; water deficit effect; soil organic carbon

黄土高原水土流失严重,生态环境脆弱,为解决这些问题,国家实施了生态恢复工程<sup>[1]</sup>。植被恢复对土壤水分保持、根系生长和有机碳积累等方面起到了积极作用<sup>[2-3]</sup>。在植被恢复过程中,根系的生长加强了土壤的固结作用,从而有效地促进了水分的保持和侵蚀的防护。根系在土壤中的扩展还促进了土壤孔隙度的增加<sup>[4]</sup>,改善了土壤的通气性和水分渗透能力,进而提高了土壤对水资源的储存和利用效率。同时,植被恢复通过根系分泌物和植物残体的积累<sup>[5]</sup>,向土壤提供了丰富的有机碳资源,这不仅有助于土壤肥力的提升,也促进了土壤碳储存的增加。然而,随着植被恢复年限的增加,根系结构的深入扩张和密度增加可能会导致深层土壤水分的消耗超出降水的补给,形成土壤干层<sup>[6-7]</sup>。这一现象可能削弱土壤的水分传输和养分循环功能,对生态系统的长期恢复和可持续发展带来负面影响。此外,根系在土壤中的分布特性,诸如深度和密度,将直接决定土壤水分的利用效率和土壤有机碳的输入<sup>[8]</sup>,从而影响土壤有机碳的积累和分布模式。因此,植物根系吸水能力、根系发展状况以及土壤有机碳的输入之间存在密切的相互作用<sup>[9]</sup>,共同决定了深层土壤中物质和能量的可利用性,以及根系的生长潜力。尽管已有研究对植物根系生长、土壤水分动态以及土壤有机碳循环进行了广泛探索,但对三者相互作用仍缺乏深入的研究。

晋西北丘陵风沙区,是北方典型的农牧交错带,区域气候干燥,土地沙化严重,水资源短缺,植被覆盖薄,加上干旱的气候条件和人类活动的影响,使得该区水土流失、土地退化和风沙活动问题异常严重<sup>[10]</sup>。为了抵御风沙,保护水土,以及推动畜牧业的发展,自 20 世纪 80 年代开始,晋西北地区进行了大规模的人工造林,其中灌木以生长迅速、根蘖性强、耐干旱瘠薄的柠条(*Caragana korshinskii*)为主<sup>[11]</sup>。目前,有关

该地区不同植被类型下深层土壤水分分布特征的相关研究已有一些报道,但多针对单种因素所导致的土壤干燥化效应,缺乏深入阐明根系发育、水分胁迫和土壤碳输入三者之间交互影响的研究。鉴于此,本研究在晋西北丘陵地区以 3 种不同种植年限柠条地为对象,探究深层(0—300 cm)土壤水分、有机碳和根系参数之间的交互关系,以期为该区域人工植被恢复的持续发展和生态环境评价提供科学依据。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于山西省忻州市五寨县石咀头村(38°58′13.31″N, 111°48′113″E),该研究区属于晋西北黄土高原,寒温带半干旱大陆性季风气候,海拔在 1 400 m 以上,年平均气温为 4.9 °C,年均降雨量在 450~500 mm,降水集中在 7—9 月,约占全年降雨量的 65%,年均蒸发量 1 784.4 mm。研究区为典型的黄土丘陵区,地处干旱半干旱风沙过渡地带、风蚀水蚀发育地带和北方农牧交错带。土壤类型以淡栗褐土和黄绵土为主,风沙大,降雨少,透气性强,肥力低,土壤有机质含量低。研究区多年生草本代表性植物有早熟禾(*Poa annua*)、米蒿(*Artemisia dalai-lamae*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、百里香(*Thymus mongolicus*)等;人工植被有小叶杨(*Populus simonii*)林、柠条(*Caragana korshinskii*)灌丛、油松(*Pinus tabulaeformis*)林等。

### 1.2 样地选择与样品采集

经实地调查,选取研究区内撷荒 30 a 的草地(CK)、人工种植 20 a 柠条(N<sub>20</sub>)、人工种植 40 a 柠条(N<sub>40</sub>)和人工种植 60 a 柠条(N<sub>60</sub>)。各植被类型种植年限通过询问护林员和参考前人文献获得。本研究于 2022 年 9 月,在研究区各样地用根钻(内径 9 cm)采集 0—300 cm 深度包含根系的土样,土层间隔 20

cm 取样。每个样地取 3 个重复,重复之间的距离大于 20 m。灌木地随机设置 3 个 5 m×5 m 样方,草地随机设置 3 个 1 m×1 m 样方,进行样地调查,样地基本信息见表 1。

表 1 样地基本情况

Table 1 Basic information of sample land

样地类型	经纬度	海拔/m	株高/m	冠幅/m <sup>2</sup>	行距/m	密度/(株·hm <sup>-2</sup> )	主要植被
CK	38°57'49.13"N,111°46'50.94"E	1405.31					早熟禾、狗尾草、角蒿等
N <sub>20</sub>	38°58'07.63"N,111°46'27.20"E	1449.99	1.28	2.98	2	2400	早熟禾、米蒿等
N <sub>40</sub>	38°58'13.14"N,111°47'19.17"E	1442.83	1.58	5.40	2	2000	百里香、狗尾草等
N <sub>60</sub>	38°58'16.24"N,111°47'33.83"E	1449.34	2.06	7.67	2	1200	白羊草、大针茅等

1.2.1 根样的获取及处理 将野外采集的根系样品用镊子挑出后放入 0.5 mm 的洗根袋清洗。清洗的根系自然晾干后,用根系扫描仪(EPSON Perfection V700)扫描,并用 Win RHIZO 根系分析系统测定根系总根长、根表面积、根体积等参数。然后将扫描之后的根系装入信封放入 80 ℃烘箱烘至恒重。根系参数指标包括根长密度(RLD, m/m<sup>3</sup>)、根表面积密度(RAD, m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>)、根体积密度(RVD, cm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)和根生物量(RB, g/m<sup>2</sup>),计算公式如下<sup>[12]</sup>:

$$RLD = \frac{RL}{V} \quad (1)$$

$$RAD = \frac{RSA}{V} \quad (2)$$

$$RVD = \frac{RV}{V} \quad (3)$$

$$RB = \frac{RM}{RS} \quad (4)$$

式中:RL 为根系长度(m);RSA 为根系表面积(m<sup>2</sup>);RV 为根系体积(cm<sup>3</sup>);V 为根土体积(m<sup>3</sup>);RM 为平均每土芯根干质量(g);RS 为根钻横截面积(m<sup>2</sup>)。

1.2.2 土壤理化性质测定与计算 土壤含水量(SMC)采用烘干法(105~110 ℃,24 h)测定;土壤有机碳(SOC)采用重铬酸钾外加热法测定<sup>[13]</sup>。

以草地 CK 为对照,3 种人工林(N<sub>20</sub>, N<sub>40</sub> 和 N<sub>60</sub>)深层的土壤水分亏缺效应(soil moisture deficit, SMD)计算如下<sup>[14]</sup>:

$$SMD_{j,k} = \frac{SMC_{j,k} - SMC_{0,k}}{SMC_{0,k}} \quad (5)$$

式中:SMD<sub>j,k</sub> 和 SMC<sub>j,k</sub> 分别为第 k 个土层第 j 种柠条样地土壤水分亏缺效应和土壤含水量;SMC<sub>0,k</sub> 为对照草地第 k 个土层的土壤含水量。

1.2.3 数据统计及分析 各样地不同土层深度对土壤含水量、土壤有机碳和根系特征参数的影响采用单因素方差分析法(one-way ANOVA),并采用最小差异显著法(LSD)进行多重比较,显著性水平为 0.05。采用 Pearson 相关分析法,对不同土层土壤含水量、土壤有机碳和根系特征之间进行相关性分析,并通过

多元逐步回归分析,确定三者之间的关系。数据统计分析使用 SPSS 25.0 进行,绘图采用 Origin 2022。

## 2 结果与分析

### 2.1 柠条土壤水分垂直分布及亏缺评价

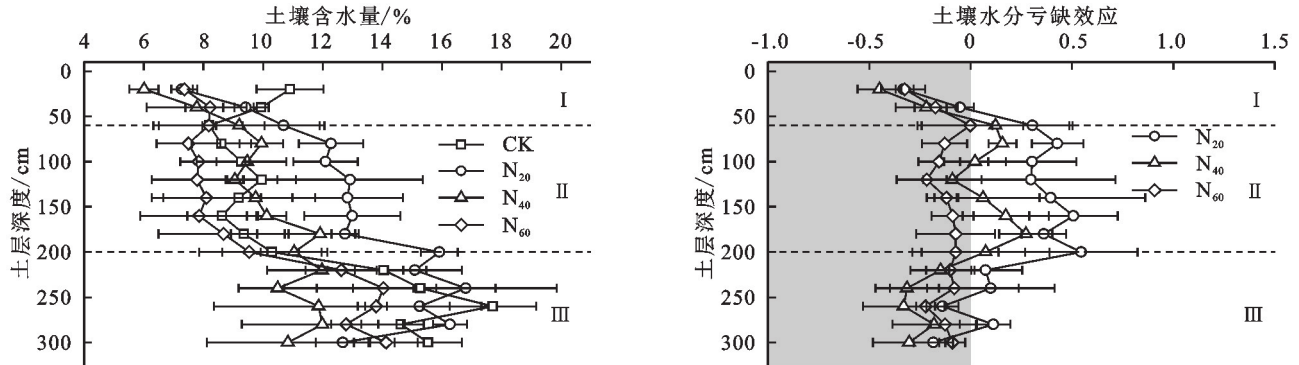
不同种植年限柠条 SMC 在不同土层的分布如图 1 所示。3 种植年限柠条土壤和对照草地的 SMC 在 0—300 cm 均随土层深度的增加表现为增加趋势,总体表现为:N<sub>20</sub>>CK>N<sub>40</sub>>N<sub>60</sub>。我们根据研究区土壤含水量在不同土层的分布情况,参考前人对黄土区深层土壤水分层次划分研究<sup>[15]</sup>,将 0—300 cm 土层划分为 I 层(浅层,0—60 cm)、II 层(过渡层,60—200 cm)和 III 层(相对稳定层,200—300 cm)。由表 2 可以看出,不同种植年限的柠条在 I 层与 III 层之间均存在显著差异( $p<0.05$ )。在 I 层,柠条地 SMC 随着土层深度的增加而快速增加,表现为 CK>N<sub>20</sub>>N<sub>60</sub>>N<sub>40</sub>;在 II 层,随土层深度的增加柠条地 SMC 保持相对的恒定,表现为 N<sub>20</sub>>N<sub>40</sub>>CK>N<sub>60</sub>;在 III 层,柠条地 SMC 随着土层深度的增加呈现出先增加后减少的趋势,表现为:CK>N<sub>20</sub>>N<sub>60</sub>>N<sub>40</sub>。以草地为对照,3 种植年限的柠条林 SMC 均存在不同程度的亏缺(图 2,表 2)。在 I 层,各样地之间 SMD 值没有显著差异,但均存在亏缺现象,N<sub>20</sub>, N<sub>40</sub>, N<sub>60</sub> 的 SMD 值分别为-0.03, -0.18, -0.17;在 II 层各样地 SMD 存在显著差异( $p<0.05$ ),N<sub>60</sub> 的 SMD 值为-0.12 表现出亏缺现象;在 III 层,各样地均表现出亏缺现象,且 N<sub>20</sub>(-0.01)与 N<sub>40</sub>(-0.25)之间存在显著差异( $p<0.05$ )。总体来说,在 0—300 cm 土层,N<sub>60</sub> 水分亏缺最为严重,N<sub>40</sub> 次之,N<sub>20</sub> 最轻。不同种植年限柠条林水分亏缺主要集中在 I 层和 III 层。

### 2.2 柠条土壤有机碳垂直分布

研究区柠条地 0—300 cm 土层的 SOC 含量为 1.71~6.6 g/kg。SOC 含量呈明显的表聚现象,I 层土壤与 II 层和 III 层土壤之间的 SOC 含量有显著差异(表 2)。各样地 SOC 在 0—20 cm 含量最高(5.43 g/kg),在

20—60 cm 含量降幅较大,60—300 cm 含量小幅度逐渐降低(图 2)。在 I 层,柠条与草地之间存在显著差异( $p<0.05$ ), $N_{60}$  的 SOC 含量最高;在 II 层, $N_{40}$  和  $N_{60}$  与  $N_{20}$  和 CK 之间存在显著差异, $N_{40}$  的 SOC 含量最

高;在 III 层,各样地 SOC 含量最低(表 2)。总体来看,各样地 SOC 含量均随土层深度的增加而降低,柠条地不同深度的 SOC 含量均高于草地,且在不同土层间均表现为  $N_{40}>N_{60}>N_{20}$ 。



注:图中阴影部分面积为各样地与空白对照相比的土壤水分亏缺值。

图 1 不同种植年限人工柠条 0—300 cm 剖面土壤水分含量(SMC)分布及亏缺特征(SMD)

Fig. 1 Distribution and deficiency characteristics of soil moisture content (SMC) in the 0—300 cm profile of artificial *caragana korshinskii* with different planting years (SMD)

表 2 不同土层土壤含水量、水分亏缺效应和土壤有机碳分布

Table 2 Soil moisture content, water deficit effect, and distribution of soil organic carbon in different soil layers

土壤性质	样地	土层深度		
		0—60 cm	60—200 cm	200—300 cm
土壤含水量/%	CK	9.68±1.12Ba	9.33±0.58Bb	15.44±1.25Aa
	$N_{20}$	9.13±1.41Ba	13.11±1.19Aa	15.22±1.42Aa
	$N_{40}$	7.66±1.31Ba	10.19±0.91Ab	11.43±0.64Ab
	$N_{60}$	7.92±0.40Ba	8.18±0.65Bc	13.47±0.64Ac
土壤水分亏缺效应	$N_{20}$	-0.03±0.26Ba	0.41±0.09Aa	-0.01±0.13Ba
	$N_{40}$	-0.18±0.23Ba	0.10±0.11Ab	-0.25±0.08Bb
	$N_{60}$	-0.17±0.13Aa	-0.12±0.05Ac	-0.12±0.05Aab
	CK	2.74±0.47Ab	2.20±0.18Bb	1.91±0.13Bb
土壤有机碳/(g·kg <sup>-1</sup> )	$N_{20}$	4.29±0.77Aa	2.39±0.26Bb	2.17±0.19Bb
	$N_{40}$	5.77±0.54Aa	3.76±0.21Ba	2.89±0.43Ca
	$N_{60}$	5.72±0.66Aa	3.70±0.48Ba	2.82±0.54Ba
	CK			

注:不同小写字母表示相同土层不同样地间差异显著( $p<0.05$ ),不同大写字母表示相同样地不同土层间差异显著( $p<0.05$ )。

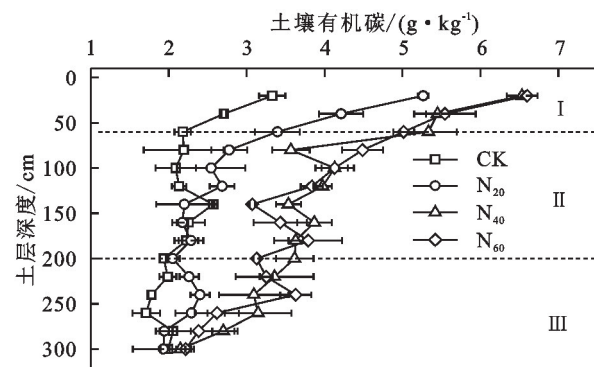


图 2 不同种植年限柠条土壤 0—300 cm 有机碳含量分布

Fig. 2 Distribution of organic carbon content in soil of *Caragana korshinskii* with different planting years at 0—300 cm

### 2.3 柠条根系特征参数垂直分布

不同种植年限人工柠条根系特征参数分布有较大差异(图 3)。RLD,RAD,RVD 和 RB 这 4 个根系指标值在 0—300 cm 土层深度下均随土层深度的增加而降低。各样地根系特征参数在 I 层与 II, III 层之间存在显著差异( $p<0.05$ ),表现为 I 层显著大于 II 和 III 层(表 3)。在 I 层,3 种植年限柠条地的 RB 值占 0—300 cm 土层深度的 50%,各样地根系参数间无显著差异, $N_{20}$  的 RLD,RAD 和 RB 值表现出最大值;在 II 层,3 种植年限柠条地的 RB 值占 0—300 cm 土层深度的 37%,根系参数指标值在  $N_{60}$  和 CK 之间均存在显著差异( $p<0.05$ ), $N_{60}$  的根系参数指标值表现出最大值;在 III 层,4 种植被类型的 RB



值占 0—300 cm 土层深度的 13%。各根系特征参数值在  $N_{20}$  与 CK 之间均存在显著差异,并且  $N_{20}$  与  $N_{40}$  和  $N_{60}$  的 RLD 和 RB 值之间也存在显著差异( $p < 0.05$ ), $N_{20}$  的 RLD,RAD 和 RB 值表现出最大值。总

体来看,在 0—300 cm 土层深度下,柠条地的根系特征参数值均高于草地,RLD 值和 RB 值在各样地表现为  $N_{20} > N_{60} > N_{40} > CK$ ,RAD 值和 RVD 值在各样地表现为  $N_{60} > N_{40} > N_{20} > CK$ 。

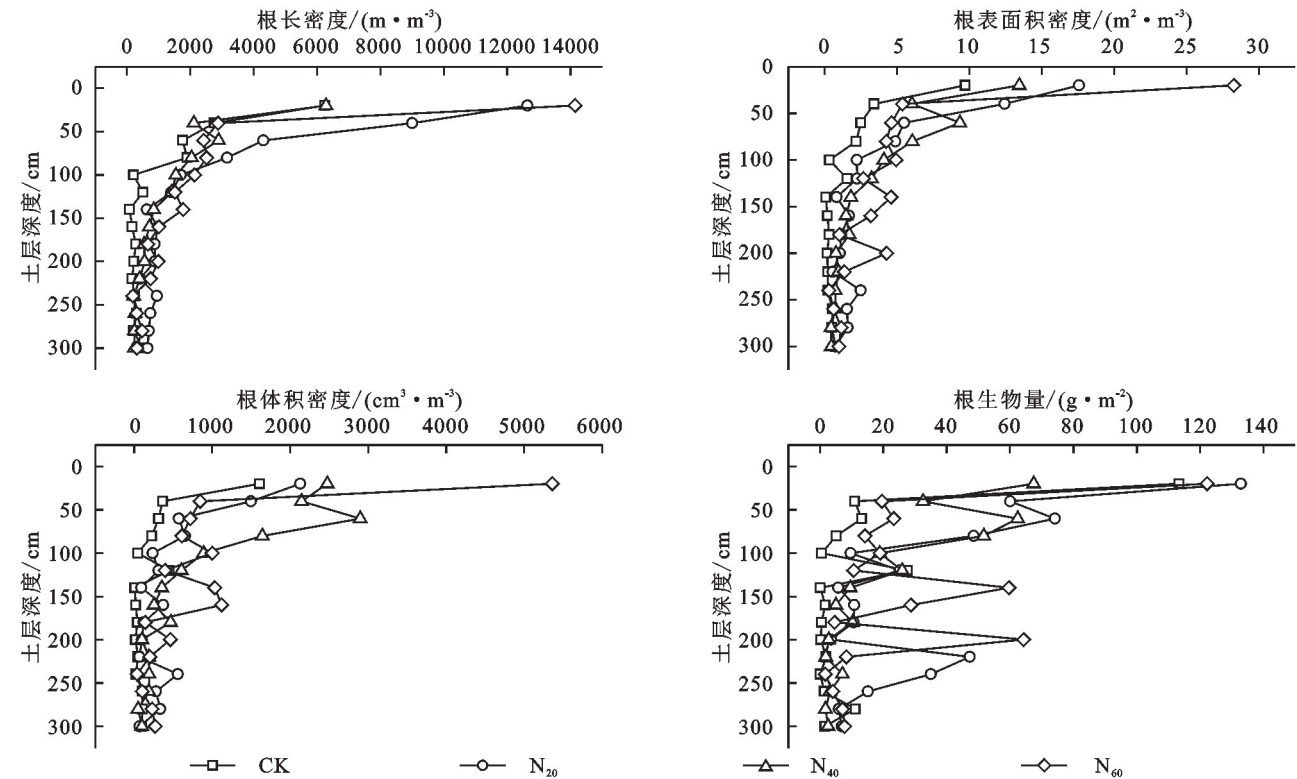


图 3 不同种植年限人工柠条 0—300 cm 剖面根系特征参数分布

Fig. 3 Distribution of root characteristic parameters of artificial *caragana korshinskii* with different planting years in the 0—300 cm profile

表 3 不同土层土壤根系特征参数分布

Table 3 Distribution of soil root characteristic parameters in different soil layers

土壤性质	样地	土层深度		
		0—60 cm	60—200 cm	200—300 cm
根长密度/( $m \cdot m^{-3}$ )	CK	3587.95±1920.19Aa	479.59±592.50Bb	277.35±113.64Bb
	$N_{20}$	8650.24±3409.64Aa	1377.50±802.86Ba	687.05±173.04Ba
	$N_{40}$	3764.66±1812.24Aa	1094.07±533.94Bab	268.24±68.56Bb
	$N_{60}$	6477.49±5425.52Aa	1514.43±623.43Ba	404.76±191.98Bb
根表面积密度/( $m^2 \cdot m^{-3}$ )	CK	5.22±3.20Aa	0.70±0.76Bb	0.45±0.20Bb
	$N_{20}$	11.84±4.95Aa	2.02±1.28Bab	1.40±0.70Ba
	$N_{40}$	9.62±3.03Aa	2.74±1.71Ba	0.68±0.19Bb
	$N_{60}$	12.76±10.96Aa	3.57±1.27Ba	0.89±0.38Bab
根体积密度/( $cm^3 \cdot m^{-3}$ )	CK	759.61±597.52Aa	114.47±153.61Bb	73.21±34.58Bb
	$N_{20}$	1398.91±638.73Aa	268.48±185.43Bb	259.89±183.69Ba
	$N_{40}$	2505.83±308.81Aa	615.67±481.84Bab	141.39±58.37Bab
	$N_{60}$	2307.76±2159.46Aa	679.78±348.01ABa	167.02±85.00Bab
根生物量/( $g \cdot m^{-2}$ )	CK	45.80±47.75Aa	5.11±9.32Bb	3.22±4.02Bb
	$N_{20}$	89.01±31.56Aa	16.31±14.64Bab	22.05±16.40Ba
	$N_{40}$	54.14±15.43Aa	17.76±15.72Bab	3.28±1.96Bb
	$N_{60}$	55.02±47.49Aa	28.72±22.15ABa	5.76±2.56Bb

注:不同小写字母表示相同土层不同样地间差异显著( $p < 0.05$ ),不同大写字母表示同一样地不同土层间差异显著( $p < 0.05$ )。

2.4 SMC,SOC 和根系各参数间的相关性

对不同土层 SMC,SOC 和根系参数进行 Pearson 相关性分析(表 4)。结果表明,在 0—60 cm 土层,SOC 与 SMC 显著负相关( $p<0.01$ ),与 RVD 显著正相关( $p<0.05$ );在 60—200 cm 土层,SMC 与 SOC,RAD 和 RVD 均有显著负相关( $p<0.05$ )关系;在 200—300 cm 土层,SMC 与 RLD,RAD,RVD,RB 有显著正相关( $p<0.05$ )关系。

表 4 柠条种植样地不同土层 SMC,SOC 和根系特征参数间的相关性分析

Table 4 Correlation analysis between SMC, SOC and root characteristic parameters across different soil layers in *Caragana korshinskii* plantation sites

参数关系	变量	0—60 cm	60—200 cm	200—300 cm
SMC 与 SOC	SOC	-0.884 **	-0.819 **	-0.384
	RLD	-0.310	-0.262	0.635 *
SMC 与根系参数	RAD	-0.441	-0.511 *	0.630 *
	RVD	-0.450	-0.518 *	0.562 *
	RB	-0.201	-0.277	0.583 *
	RLD	0.279	0.204	-0.373
SOC 与根系参数	RAD	0.544	0.388	-0.275
	RVD	0.699 *	0.394	-0.229
	RB	0.184	0.008	-0.317

注: \*\* 表示  $p<0.01$ , \* 表示  $p<0.05$ ; SMC 为土壤含水量; SOC 为土壤有机碳; RLD 为根长密度; RAD 为根表面积密度; RVD 为根体积极度; RB 为根生物量,下同。

将 SOC 作为因变量,SMC 与根系参数作为自变量进一步进行多元线性逐步回归分析,该分析基于最大似然估计,并采用了逐步选择的方法,以  $p<0.05$  作为变量保留在模型中的标准。最终的回归模型中包含了 RVD 和 SMC,它们对因变量的解释均达到统计学意义(RVD:  $p<0.01$ ,SMC:  $p<0.01$ ),模型的调整  $R^2$  为 0.695,表明能够解释因变量 69.5% 的变异。其方程如下:

$$SOC=4.477+0.001RVD-0.161SMC \quad (6)$$

根据逐步回归分析结果,将 SOC 与 SMC 和 RVD 进行通径分析(表 5)探究 3 个变量间的直接关系与间接关系,可以看出,SOC 与 SMC 之间呈显著的负相关关系( $p<0.01$ ),与 RVD 呈显著的正相关关系( $p<0.01$ )。RVD 对 SOC 的直接通径系数为 0.59,SMC 对 SOC 的直接通径系数较小,为 0.38。SMC 通过影响 RVD 进而对 SOC 的间接通径系数为 -0.28,RVD 对 SOC 的间接通径系数为 0.18。

3 讨论

3.1 柠条林地根系、水分和有机碳垂直分布

在本研究中,不同种植年限柠条根系参数在各个土层深度均超过荒草地,但这些特性随土层深度的增

加逐渐降低。具体来说,柠条的 RB 和根长在较浅的土层表现出显著的增加,而在深层土壤中,根系的数量和长度有所下降,柠条根系对表层土壤的生态功能有显著的增强作用<sup>[16]</sup>。本研究中,0—60 cm 土层 RB 占 0—300 cm 土层的 50%,表明柠条根系主要集中在土壤的表层区域。于晓燕等<sup>[17]</sup>对黄土丘陵区带状柠条林根系分布的研究中发现,柠条林地中大部分根系富集于表层 0—80 cm 土层之中。随着柠条种植年限的增加,不同土层的根系特征值在本研究中表现出差异性,其中 CK,N<sub>40</sub> 和 N<sub>60</sub> 在 200 cm 以下 RB 均下降到 3~10 g/m<sup>2</sup>,N<sub>20</sub> 在却达到了 20 g/m<sup>2</sup>。导致这种现象的原因可能是,随着柠条种植年限的增加,根系需要更多的能量来维持已有的生物量,而非用于进一步地生长扩展。此外,长期种植导致研究区域柠条植物的密度增加,植物之间的竞争更加激烈,较高的植物密度可能会限制每株柠条植物的生长,包括根系的扩展,从而减少了深层土壤中的生物量<sup>[18]</sup>。

表 5 SMC,RVD 和 SOC 的通径分析

Table 5 Path analysis of SMC, RVD and SOC

自变量	相关系数	直接通径	间接通径系数	
		系数	RVD	SMC
RVD	0.77	0.59		0.18
SMC	-0.66	0.38	-0.28	

本研究中相较于荒草地,柠条种植 20 a 增加了 SMC,然而随着柠条种植年限的增大,柠条地的 SMC 相较于荒草地,出现了不同层次的水分亏缺现象,尤其是 N<sub>40</sub> 和 N<sub>60</sub> 在 0—60 cm 和 200—300 cm 土层水分亏缺现象较为严重。这与梁海斌等<sup>[19]</sup>对不同林龄柠条林地 SMC 含量的研究结果相似。这可能是植物根系的生长、降水模式变化以及土壤性质的差异等多重因素共同影响的结果<sup>[20]</sup>。本研究中,一方面由于研究区域位于黄土高原丘陵风沙地带,浅层土壤水分波动较大,高温和强烈的蒸发可能导致 SMC 迅速减少。另一方面,随着柠条林龄的增加,浅层土壤水分消耗加剧,柠条根系会向较深的土层生长并消耗其所储存的水分,致使土壤剖面的深层部分出现水分亏缺现象<sup>[21-22]</sup>。

本文研究发现,柠条地 SOC 分布存在表聚现象,0—60 cm 土层的 SOC 含量明显高于深层。相较于荒草地,随着柠条种植年限的增加,SOC 含量先增加后减少。柠条地 RB 与 SOC 在土层中的分布大致相似,这表明柠条根系的持续增长对于提升 SOC 含量是有益的。在柠条林的生长过程中,土壤容重逐渐降低,进而提高了土壤的透气性,也有助于 SOC 的增加<sup>[23]</sup>。进一步分析表明,不同年限柠条对 SMC 和 SOC 含量的影响存在差异,其中 N<sub>60</sub> 的水分亏缺最为

严重,但其表层 SOC 含量相对较高,这可能是由于处于干燥土壤中的根系为防止根系脱水,合成更多的木质素和栓质并减少根系分泌物的释放量<sup>[24]</sup>。

### 3.2 根系、水分和有机碳之间的关系

柠条长期种植会对不同土层深度的根系、SMC 与 SOC 之间的关系产生影响。在 60—200 cm 的土层中,SMC 与 RAD 和 RVD 的显著负相关关系,表明柠条根系在此土层中的生长较为旺盛,导致了土壤水分的进一步消耗。然而,当深入到 200—300 cm 的较深土层时,土壤水分与根系特征参数之间有正相关关系,表明根系向深层生长以适应水分条件,这种向深层土壤扩展的根系生长策略可能是植物对水分胁迫的适应机制<sup>[25]</sup>,通过深根系以获取土壤剖面中较深层的水分资源。在分土层探讨时,我们发现,随着土层深度的增加,根系与 SOC 之间的相关性降低,但整体来说是显著正相关( $p < 0.01$ ),这可能因为根系对 SOC 的积累和稳定起着促进和抑制的复杂作用。这种看似矛盾的现象可以解释为:根系可以通过促进新碳的输入、有机-矿物络合物和土壤团聚体的形成来稳定 SOC,但同时也可能通过加速旧碳的分解来减少 SOC<sup>[26]</sup>。

本文通过多元回归分析进一步探究三者之间的相互关系,发现不同种植年限柠条土壤 SOC 与 RVD 之间存在显著的正相关关系( $p < 0.01$ ),与 SMC 之间存在显著的负相关关系( $p < 0.01$ ),SMC 与 RVD 之间呈显著的负相关关系( $p < 0.01$ )。这些结果支持了先前的研究<sup>[27]</sup>,认为植物根系通过其生物活动和根系分泌物能够增加土壤有机质的积累。柠条作为一种耐旱灌木,其根系的发展显著促进了 SOC 的增加,这可能是由于根系的增长和死亡为土壤提供了稳定的有机碳输入,增强了土壤的碳储存能力。然而,这一过程不利于 SMC 的积累,可能是由于根系的吸水作用增强,以及根系生物量的增加可能改变了土壤结构,影响了土壤的水分保持能力<sup>[28]</sup>。通径分析的结果揭示了 RVD 的增加通过提高 SMC 进而间接正向影响 SOC 的积累,而 SMC 的增加通过减少 RVD 进而间接负向影响 SOC。这反映了根系体积密度的增加能够通过改善土壤结构和增强土壤保水能力来间接促进有机碳的积累,而土壤水分含量的增加可能会通过限制根系生长降低土壤有机碳的积累。这可能是由于较高的水分含量会限制根系的扩展或生长,从而间接影响了土壤有机碳的积累。这表明根系与有机碳之间存在强烈的正向直接关系,而水分含量对 SOC 的直接和间接影响则更为复杂,土壤水分含量的变化不仅直接影响土壤的有机碳储存,还通过影响根系间接作用于有机碳的积累。因此,未来的土地管

理策略应当考虑到根系特征对土壤水分和有机碳动态的长期影响,并在干旱或水分受限的环境中采取适当的土壤和水管理措施,以促进土壤生态系统的健康和可持续发展。

## 4 结论

(1) 相比对照荒草地,柠条长期种植导致 0—300 cm 土层产生了水分亏缺现象,亏缺程度表现为柠条种植 60 a > 40 a > 20 a,且主要集中在 0—60 cm 和 200—300 cm 土层。土壤有机碳含量先增加(40 a)后降低(60 a),并存在表聚现象(0—60 cm)。柠条长期种植提高了根长密度、根表面积密度、根体积密度和根生物量,0—60 cm 土层根系生物量占 0—300 cm 土层深度的 50%。

(2) 在 0—60 cm 土层,土壤有机碳与含水量显著负相关( $p < 0.01$ ),与根体积密度显著正相关( $p < 0.05$ );在 60—200 cm 土层,土壤含水量与有机碳、根表面积密度和根体积密度均有显著负相关( $p < 0.05$ )关系;在 200—300 cm 土层,土壤水分与根系参数均有显著正相关( $p < 0.05$ )关系。多元回归分析和通径分析结果表明土壤有机碳与根体积密度和土壤水分的关系密切,根体积密度和土壤含水量对有机碳的直接通径系数分别为 0.59, 0.38, 对有机碳的间接通径系数分别为 0.18 和 -0.28,较高的根体积密度和较低的土壤水分有助于增加土壤有机碳。

### 参考文献 (References):

- [1] 王兴,钟泽坤,王佳懿,等.黄土高原撂荒地土壤碳库对两年增温增雨的响应[J].土壤学报,2023,60(2):523-534.  
Wang X, Zhong Z K, Wang J Y, et al. Responses of soil carbon pool of abandoned grassland on the Loess Plateau to two-years warming and increased precipitation [J]. Acta Pedologica Sinica, 2023,60(2):523-534.
- [2] 何永涛,郎海玲.植被建设在黄土高原水土保持中的意义及其对策[J].水土保持研究,2009,16(4):30-33,38.  
He Y T, Lang H L. Significance and strategies of vegetation construction on the Loess Plateau [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2009,16(4):30-33,38.
- [3] Xiao L, Xue S, Liu G B, et al. Soil moisture variability under different land uses in the Zhifanggou Catchment of the Loess Plateau, China [J]. Arid Land Research and Management, 2014,28(3):274-290.
- [4] Hao H X, Wei Y J, Cao D N, et al. Vegetation restoration and fine roots promote soil infiltrability in heavy-textured soils [J]. Soil and Tillage Research, 2020,198:104542.
- [5] Wang C, Ma Y L, Trogisch S, et al. Soil respiration is driven by fine root biomass along a forest chronosequence in subtropical China [J]. Journal of Plant Ecology,

- 2017,10(1):36-46.
- [6] 丁文斌,王飞.植被建设对黄土高原土壤水分的影响[J].生态学报,2022,42(13):5531-5542.
- Ding W B, Wang F. The effects of vegetation construction on soil moisture in the Loess Plateau of China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(13):5531-5542.
- [7] Wang Y Q, Shao M A, Shao H B. A preliminary investigation of the dynamic characteristics of dried soil layers on the Loess Plateau of China[J]. Journal of Hydrology, 2010,381(1):9-17.
- [8] Li H J, Si B C, Ma X J, et al. Deep soil water extraction by apple sequesters organic carbon via root biomass rather than altering soil organic carbon content[J]. The Science of the Total Environment, 2019,670:662-671.
- [9] 李会杰.黄土高原林地深层土壤根系吸水过程及其对水分胁迫和土壤碳输入的影响[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2019.
- Li H J. Root Water Uptake Process in Deep Soil for Forest Growing on the Loess Plateau and Its Effect on Water Stress and Soil Carbon Input [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2019.
- [10] 马改玲.晋西北丘陵风沙区人工林对土壤微生物群落的影响[D].山西太原:山西师范大学,2022.
- Ma G L. Effects of Artificial Forest on Soil Microbial Community in the Hilly and Sandy Area of Northwestern Shanxi[D]. Taiyuan, Shanxi: Shanxi Normal University, 2022.
- [11] 刘婧,缙倩倩,王国华,等.晋西北丘陵风沙区50年林龄人工柠条林植被群落及其土壤特性变化[J].水土保持学报,2022,36(1):219-230.
- Liu J, Gou Q Q, Wang G H, et al. Changes of vegetation community and soil characteristics of 50 years old artificial *Caragana korshinskii* in sandy-hilly region of northwest Shanxi Province [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022,36(1):219-230.
- [12] 苏宇,吴世磊,贺维,等.弓杠岭不同海拔云杉细根生物量及形态特征[J].西北植物学报,2022,42(1):138-144.
- Su Y, Wu S L, He W, et al. Fine root biomass and its morphological characteristics of *Picea asperata* along an elevation gradient of Gonggang Mountains[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2022,42(1):138-144.
- [13] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
- Bao S D. Soil and Agricultural Chemistry Analysis [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [14] 刘新春.晋西黄土区人工植被恢复细根与土壤水碳的耦合关系[D].山西临汾:山西师范大学,2019.
- Liu X C. The Coupling Relationships Between Fine Soots and Soil Moisture and Organic Carbon of Artificial Vegetations in Loess Region of Western Shanxi Province [D]. Linfen, Shanxi: Shanxi Normal University, 2019.
- [15] Fang X N, Zhao W W, Wang L X, et al. Spatial variations of deep soil moisture and the influencing factors in the Loess Plateau, China[J]. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 2016, 1-42.
- [16] 梁桑,刘亚斌,石川,等.黄土区不同龄期灌木柠条锦鸡儿根系的分布特征及其固土护坡效果[J].农业工程学报,2023,39(15):114-124.
- Liang S, Liu Y B, Shi C, et al. Evaluating soil conservation from root distribution of *Caragana Korshinskii* Kom in the Loess region of Xining Basin[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023,39(15):114-124.
- [17] 于晓燕,汪星,吕雯,等.黄土丘陵区带状柠条锦鸡儿林地深层土壤干化及根系分布[J].干旱区地理,2023,46(5):753-762.
- Yu X Y, Wang X, Lyu W, et al. Deep soil desiccation and root distribution of belted *Caragana korshinskii* forest in Loess Hilly Region[J]. Arid Land Geography, 2023,46(5):753-762.
- [18] 杨金贵.黄土丘陵区典型人工林深层细根分布及土壤水分消耗特征研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2021.
- Yang J G. Study on the Distribution of Fine Roots and Soil Water Consumption Characteristics of Typical Artificial Forest Lands in Loess Hilly Region [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2021.
- [19] 梁海斌,史建伟,李宗善,等.晋西北黄土丘陵区不同林龄柠条林地土壤干燥化效应[J].水土保持研究,2018,25(2):87-93.
- Liang H B, Shi J W, Li Z S, et al. Evaluation of soil desiccation intensity in different ages of *Caragana korshinskii* kom, in Loess Hilly Region, northwestern Shanxi[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018,25(2):87-93.
- [20] 高元亢,李婧,汪星,等.黄土丘陵苜蓿与柠条深层土壤干化状况及根系与养分特征[J].水土保持研究,2023,30(6):168-176.
- Gao Y K, Li J, Wang X, et al. Soil desiccation and root and nutrient characteristics of *Medicago sativa* L. and *Caragana korshinskii* in loess hilly area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023,30(6):168-176.
- [21] 赵传普,徐学选,高朝侠,等.黄土丘陵区不同植被类型下土壤水分动态[J].水土保持通报,2015,35(1):68-72.
- Zhao C P, Xu X X, Gao Z X, et al. Dynamics of soil moisture under different vegetation types in loess hilly area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015,35(1):68-72.



- Ning C C, Wang J W, Cai K Z. The effects of organic fertilizers on soil fertility and soil environmental quality: A review[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016, 25(1):175-181.
- [16] 许峰,蔡强国,吴淑安,等.三峡库区坡地生态工程控制土壤养分流失研究:以等高植物篱为例[J].地理研究, 2000,19(3):303-310.
- Xu F, Cai Q G, Wu S A, et al. A study on soil nutrient loss control by slope eco-engineering in the Three Gorges Reservoir Region: Taking the contour hedgerows as an example[J]. Geographical Research, 2000,19(3):303-310.
- [17] 焦平金,许迪,王少丽,等.自然降雨条件下农田地表产流及氮磷流失规律研究[J].农业环境科学学报,2010, 29(3):534-540.
- Jiao P J, Xu D, Wang S L, et al. Nitrogen and phosphorus runoff losses from farmland under nature rainfall[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010,29(3):534-540.
- [18] 张凯.畦灌均匀与非均匀撒施条件下水肥时空分布试验研究[D].郑州:华北水利水电大学,2016.
- Zhang K. Experimental Study on Water and Fertilizer Distribution of Irrigation Uniform and Non-uniform Application Conditions[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2016.
- [19] 陈云梅,赵欢,肖厚军,等.化肥氮减量配施生物炭和菜籽饼对玉米-白菜养分吸收、氮素利用及产量的影响[J].中国土壤与肥料,2022(6):115-122.
- Chen Y M, Zhao H, Xiao H J, et al. Effects of chemical fertilizer nitrogen reduction combined with biochar and rapeseed cake on nutrient absorption, nitrogen utilization, and yield of maize-cabbage[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2022(6):115-122.
- [20] 郭丽,王广恩,李义红,等.施氮对土壤养分特征及夏玉米养分吸收利用的影响[J].华北农学报,2023,38(3): 121-129.
- Guo L, Wang G E, Li Y H, et al. Effect of nitrogen on nutrient distribution in soil and nutrient accumulation and utilization in summer maize [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2023,38(3):121-129.
- [21] Behera S K, Panda R K. Effect of fertilization on crop responses and solute transport for rice crop in a sub-humid and sub-tropical region[J]. Paddy and Water Environment, 2013,11(1/4):227-239.
- [22] 雷金银,雷晓婷,周丽娜,等.耕作措施对缓坡耕地土壤养分分布及肥料利用率的影响[J].农业工程学报, 2020,36(18):127-134.
- Lei J Y, Lei X T, Zhou L N, et al. Effects of tillage measures on soil nutrients distribution and fertilizer use efficiency on gentle slope farmland[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(18):127-134.
- [23] 赵京考,纪德智,王端,等.黑土区坡耕地坡位与施肥对春玉米产量的影响[J].东北农业大学学报,2014,45(5):8-12.
- Zhao J K, Ji D Z, Wang D, et al. Effect of slope positions and fertilization on the corn yield in undulating regions of black soil[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2014,45(5):8-12

(上接第206页)

- [22] Gou Q P, Zhu Q K. Response of deep soil moisture to different vegetation types in the Loess Plateau of northern Shannxi, China[J]. Scientific Reports, 2021, 11(1):15098.
- [23] 曲卫东,陈云明,王琳琳,等.黄土丘陵区柠条人工林土壤有机碳动态及其影响因子[J].中国水土保持科学, 2011,9(4):72-77.
- Qu W D, Chen Y M, Wang L L, et al. Dynamics of soil organic carbon in *Caragana microphylla* forest and its relationship with environment factors in Loess Hilly Region[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2011,9(4):72-77.
- [24] Deng L, Yan W M, Zhang Y W, et al. Severe depletion of soil moisture following land-use changes for ecological restoration: Evidence from Northern China[J]. Forest Ecology and Management, 2016,366:1-10.
- [25] Védère C, Lebrun M, Honvault N, et al. How does soil water status influence the fate of soil organic matter: A review of processes across scales[J]. Earth-Science Reviews, 2022,234:104214.
- [26] Dijkstra F A, Zhu B, Cheng W X. Root effects on soil organic carbon: A double-edged sword[J]. The New Phytologist, 2021,230(1):60-65.
- [27] Zhao F B, Wu Y P, Hui J Y, et al. Projected soil organic carbon loss in response to climate warming and soil water content in a loess watershed[J]. Carbon Balance and Management, 2021,16(1):24.
- [28] McCormack M L, Dickie I A, Eissenstat D M, et al. Redefining fine roots improves understanding of below-ground contributions to terrestrial biosphere processes [J]. New Phytologist, 2015,207(3):505-518.