

荒漠草原人工柠条引入后土壤大孔隙 拓扑结构演变特征

杨志强^{1,2,3}, 孟晨^{2,3,4}, 王兴^{2,3,4}, 朱志昊^{2,3,4}, 宋乃平^{2,3,4}, 杜灵通^{2,3,4}

(1.宁夏大学 农学院, 银川 750021; 2.宁夏大学 西北土地退化与生态系统恢复国家重点实验室培养基地, 银川 750021;
3.西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 银川 750021; 4.宁夏大学 生态环境学院, 银川 750021)

摘要:[目的] 认识人工柠条种植对土壤生态过程的影响, 从而为人工植被的管理提供科学依据。[方法] 以宁夏盐池县典型荒漠草原区风沙土生境的草地(0 a)及 9, 14, 24, 35 a 生人工柠条林为对象, 分别进行原状土柱采集、CT 扫描及图像处理分析, 获取土壤大孔隙几何分布特征, 量化大孔隙表面积、等效直径和连接度等拓扑结构参数, 研究了柠条生长过程中土壤大孔隙演变特征。[结果] 通过三维图像可以看出, 和 0 a 样地相比, 随着林龄增加, 各样地在 0—200 mm 土层大孔隙数量明显增多且结构更加复杂。定量分析表明, 和 0 a 样地相比, 不同林龄柠条林地在同一土层, 大孔隙数量密度、长度密度、等效直径、连接度之间差异显著($p < 0.05$), 而表面积密度、体积密度无显著差异($p > 0.05$)。具体表现为在 0—100 mm 和 100—200 mm 土层大孔隙数量密度、长度密度均显著增加($p < 0.05$), 且随着林龄增加, 表层土壤(0—100 mm)增幅要大于深层土壤(100—200 mm); 等效直径在 0—100 mm 土层显著减小, 在 100—200 mm 土层显著增加($p < 0.05$), 而连接度变化规律恰好相反。进一步分析发现, 林龄与大孔隙数量密度、长度密度、表面积密度呈显著正相关($p < 0.05$), 与大孔隙等效直径呈显著负相关($p < 0.01$), 与大孔隙体积密度差异不显著($p > 0.05$)。[结论] 人工柠条林的引入会促进土壤大孔隙致密网络状结构形成, 改善大孔隙表面积、连接度等拓扑结构, 且随着林龄增加, 对土壤改良效果越明显。

关键词:荒漠草原; 人工柠条; 土壤大孔隙; 拓扑结构; CT 扫描

中图分类号:S152.5

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2024)02-0092-09

Evolution of Soil Macropore Topological Structure After the Artificial Introduction of *Caragana korshinskii* in Desert Steppe

Yang Zhiqiang^{1,2,3}, Meng Chen^{2,3,4}, Wang Xing^{2,3,4}, Zhu Zhihao^{2,3,4}, Song Naiping^{2,3,4}, Du Lingtong^{2,3,4}

(1.College of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2.State Key Laboratory of

Land Degradation and Ecosystem Restoration in Northwest China, Ningxia University, Yinchuan 750021,

China; 3.Key Laboratory of Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in Northwest China, Ministry of Education, Yinchuan 750021, China; 4.College of Ecology and Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract:[Objective] The aims of this study are to understand the effects of planted *Caragana korshinskii* on soil ecological processes, and to provide a scientific basis for the management of artificial vegetation. [Methods] This study focused on the planted *C. korshinskii* forest with ages ranging from 9 years to 35 years in a typical desert grassland area of Yanchi County, Ningxia. The changes in the geometric distribution and topological structure of macropores in soil after the introduction of *C. korshinskii* were studied. Computed tomography (CT) scanning and image processing were applied to soil samples collected from the undisturbed

收稿日期:2023-01-19

修回日期:2023-04-11

资助项目:宁夏重点研发计划项目(2021BEB04012, 2022BEG02003, 2019BFG02010); 宁夏自然科学基金(2022AAC03012, 2021AAC05005)

第一作者:杨志强(1996—), 男, 甘肃通渭人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持与荒漠化防治。E-mail:17690618395@163.com

通信作者:孟晨(1990—), 男, 宁夏石嘴山人, 博士, 副研究员, 主要从事水土保持与土壤水文研究。E-mail:mengchen@nxu.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

soil column to identify the geometric distribution of soil macropores and their topological parameters. These parameters included macropore surface area, equivalent diameter, and connectivity. [Results] The three-dimensional (3D) CT images indicated a relatively small number of macropores in the 0—200 mm soil layer of plots 0 a, whereas those in the 0—200 mm layer of other plots were significantly higher and showed a more complex structure with stand age. Quantitative analysis showed the significant differences in the quantities, lengths, equivalent diameters, and connectivity of macropores of the same soil layers between different ages of *C. korshinskii* forest ($p < 0.05$), although there were no significant differences in surface area density and volume density ($p > 0.05$). The quantity density and length density of macropores in the 0—100 mm and 100—200 mm soil layers significantly increased ($p < 0.05$) with the increase of forest age, with that in surface soil (0—100 mm) exceeding that in deep soil (100—200 mm). The equivalent macropore diameters for different ages of *C. korshinskii* forest decreased and increased significantly in 0—100 mm and 100—200 mm soil layers, respectively ($p < 0.05$). In contrast, macropore connectivity increased and decreased significantly in the 0—100 mm and 100—200 mm soil layers, respectively ($p < 0.05$). Further analysis showed positive correlations between stand age and the number density, length density, and surface area density of macropores ($p < 0.05$), but a negative correlation with the equivalent diameter of macropores ($p < 0.01$), whereas there was no significant relationship with the volume density of macropores ($p > 0.05$). [Conclusion] The artificial introduction of *C. korshinskii* forest can promote a complex and compact macropore network structure, thereby improve the topological structure of macropores and increase soil connectivity. These effects on soil increase with increase of forest age. The results of this study can inform the use of artificial vegetation for restoration and management of aeolian soil in arid and semi-arid areas.

Keywords: desert steppe; planted *Caragana korshinskii*; soil macropore; topological structure; computed tomography (CT) scan

仅占土壤体积1%的大孔隙,可传导90%的水流通量^[1],是影响水分、养分运移与分布的主要因素,会导致农药及化肥等进入并污染地下水及河流、影响植被对养分的吸收利用等一系列生态问题^[2]。异质性土壤环境下大孔隙的三维几何分布及拓扑结构特征是决定上述生态过程的主要因素^[3]。因此,量化并分析土壤大孔隙几何分布及拓扑结构特征对于认识水分或养分分布、维护生态安全至关重要^[4]。

以往研究表明,土壤大孔隙的形成和演变在很大程度上取决于农业管理、土壤特性、气候条件和其他非生物因素^[5]。土壤类型和土地利用方式^[6]、人为干扰、土壤动物和冻融等^[7-9]因素都会影响大孔隙的形态分布特征。此外,人工植被建设同样是影响土壤大孔隙特征的重要因素,例如,Wang等^[10]研究不同林龄人工柠条林地和天然草地的土壤大孔隙结构发现,柠条林地土壤大孔隙平均直径在30 a生林地达到最大;Cui等^[11]发现柠条林地的平均孔径和面积远高于果树人工林地和苜蓿地;Meng等^[3]发现人工混交林地的土壤大孔隙数量密度及长度密度显著高于纯林地;华瑞^[12]以退耕10 a,25 a林地和草地为研究对象,发现植被建设导致土壤大孔隙数量增加,且增加幅度随着退耕年限的

增加而愈加显著。可见,人工植被建设是影响土壤大孔隙几何分布及拓扑结构的重要因素,认识人工植被建设及恢复过程中的土壤大孔隙演变特征,对于指导植被的可持续恢复具有重要意义。

荒漠草原属于草原向荒漠的过渡带,是我国北方生态屏障的前沿,在国家生态格局中具有极其重要的作用^[13]。柠条作为沙地造林的理想树种,以其根系发达、固土能力强、耐旱等诸多优势,不仅能够有效提高造林的整体质量,而且对改善生态环境起着积极的作用^[14]。然而,随着柠条生长过程中根系吸水、蒸发蒸腾作用耗水,加上荒漠草原地区降水不能得到及时补充,土壤水分下降导致土壤干层在11~20 a阶段开始出现,直到深部土壤水分接近 ≥ 30 a阶段的枯萎系数,从而造成植被的萎蔫或者永久衰败^[15],影响了自然植被恢复过程中土人工林的稳定性和可持续性。了解柠条生长过程中土壤大孔隙演变特征,可为认识柠条林地下水、土、生过程及柠条林精细化管理提供科学依据及理论支撑^[16]。本研究利用CT扫描技术和深度学习的图像处理技术,提取孔径当量 > 0.1 mm的孔隙作为大孔隙,对荒漠草原不同林龄柠条林地土壤大孔隙几何分布及拓扑结构特征进行分析,以

期理解人工柠条林生长对地下生态过程的影响,为区域人工林恢复管理提供科学依据。

1 研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于宁夏回族自治区吴忠市盐池县(37°57′23″—37°83′47″N,106°77′99″—107°50′70″E),北部与毛乌素沙地相邻,东南部衔接黄土高原,地势南高北低^[17]。研究区平均海拔 1 600 m,近 30 a 间平均气温为 8.34℃,年均降水量约为 296.99 mm,属于典型的温带大陆性季风气候^[18]。夏季高温多雨,冬季寒冷干燥,两季平均温差 28℃左右,一年中无霜期为 150 d。降雨集中分布在 7—9 月份,可达全年的 60%以上,年均蒸发量为 2 710 mm。受蒙古西伯利亚气流的影响,全年主要风向为西风和西北风,多发生在春季。研究区内主要土壤类型为灰钙土和风沙土,主要植被有牛枝子(*Lespedeza potaninii*)、草木樨状黄耆(*Astragalus melilotoides*)、苦豆子(*Sophora alopecuroides*)、猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)、阿尔泰狗娃花(*Aster altai-cus*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、短花针茅(*Stipa breviflora*)、绵蓬(*Corispermum hyssopifolium*)、老瓜头(*Cynanchum komarovii*)等。

1.2 样地选取与取样方法

试验在宁夏盐池县荒漠草原区内进行,实地调查后在坡度较为平缓的地带设置 200 m×200 m 的研

究区,共在研究区设置 4 个样地,每个样地设置 5 m×5 m 的试验区,另外选取 1 种草地作为对照,4 种在草地上人工种植的不同年限的柠条林作为试验样地,即 9 a 生样地(2011 年种植)、14 a 生样地(2006 年种植)、24 a 生样地(1996 年种植)、35 a 生样地(1985 年种植),样地基本情况见表 1。

表 1 试验点样地信息

Table 1 Information of test sites

样地	海拔/m	纬度(N)	经度(E)
9 a	1497	37°49′	107°29′
14 a	1489	38°27′	106°13′
24 a	1491	37°49′	107°29′
35 a	1519	37°49′	107°30′
0 a	1511	37°49′	107°29′

通过对样地进行调查后,在人工引入的 9 a,14 a,24 a,35 a 的 4 种柠条样地各选取 4 个重复样点,草地样地(0 a)选取 2 个重复样点。由于 CT 扫描设备精度限制,为确保土壤大孔隙分析的精确性,每个扫描样品的高度需要控制在 65 mm 以内,所以用高度为 65 mm、内径为 50 mm 的自制环刀在每个样点的 0—10 cm,10—20 cm 土层处各取 2 个环刀样品,用于分析土壤大孔隙特征,即共有(4 个林龄×4 个重复+1 个对照×2 个重复)×2 层土壤=共计 36 个环刀样品。采样方法同 Meng 等^[3]一致。另外,每个样地分别用普通环刀、铝盒和自封袋各取 3 个土壤样品带回实验室,测定样地土壤基本理化性质(表 2)。

表 2 样地土壤基本性质

Table 2 Basic properties of soil in sample plots

样地	土层深度/cm	大孔隙度/%	土壤容重/(g·m ⁻³)	稳渗速率/(mm·min ⁻¹)	土壤含水量/%
9 a	0—10	2.22	1.44±0.02	2.23±0.06	9.47±0.26
	10—20	1.84	1.48±0.01	2.57±0.21	8.84±0.65
14 a	0—10	2.78	1.29±0.07	2.73±0.06	8.85±1.36
	10—20	5.34	1.34±0.01	3.00±0.10	12.23±2.98
24 a	0—10	1.58	1.32±0.01	2.67±0.15	6.60±4.55
	10—20	1.33	1.27±0.03	3.00±0.26	7.58±1.75
35 a	0—10	1.80	1.31±0.07	3.53±0.25	11.65±1.88
	10—20	1.66	1.32±0.05	3.37±0.32	10.05±1.96
0 a	0—10	1.63	1.31±0.03	2.70±0.20	7.98±1.11
	10—20	1.32	1.36±0.01	3.20±0.30	7.80±0.35

1.3 数据分析

1.3.1 CT 扫描与图像处理 CT 扫描所用仪器为三英精密有限公司生产的 nanoVoxel-5000 系列双射线源 CT 系统(相关参数为:空间分辨率、像素细节分辨能力 200 nm,供测样品尺寸直径×高度<600 mm×600 mm)。扫描用自制环刀所取的 36 个原状土柱,每个土柱会得到 2 094 张横向切层图像。首先利用

Image J 软件对扫描得到的所有横向切层图像进行预处理,得到二值化图像。然后在 Avizo 2019.1 图像处理软件中导入二值化图像,通过对每个土柱的所有横切图像进行三维重构,可得到每个原状土样的三维可视化图像。具体方法如下:用 Non-Local Means 模块滤波,整合处理后设置阈值分割,为了使重构模型接近真实试件,还需要通过裁剪功能修改单位,利

用 Volume-edit 模块截取圆柱并生成 mask,最终得到像素为 0.137 mm/pixel(X 方向)×0.137 mm/pixel(Y 方向)×0.2 mm/pixel(Z 方向)的三维立体图像。

1.3.2 参数分析 由于在采样过程中,土柱边缘会产生反向的土壤压力,导致边缘土壤结构发生改变,因此在三维重建后,需要去除这种边缘效应带来的误差。经观察分析后决定去除土柱上下两端和圆周各 1 mm 的数据。利用 Avizo 2019.1 软件中的 ROI 工具,去除上下两端 1 mm 及边缘 1 mm 的图像数据。最终得到 X, Y 轴 -24~24 mm, Z 轴 -32~32 mm 的土柱三维立体图像数据。对图像进一步解析,提取所有孔径>0.1 mm 的孔隙,计算相关参数及其在图像中的位置,构建土壤大孔隙分布特征。大孔隙的阈值选取方法及各项特征参数的具体计算方法如下:

通过预制空气管法确定根系的阈值范围^[3],在确定阈值范围后对选出的大孔隙进行视觉直观检查,以确保阈值设置的合理,没有大面积的错误。确定阈值后分别勾画出土柱三维结构中的根系及大孔隙,使得土柱根系、大孔隙三维可视化,利用 Avizo2019.1 软件的 Label analysis 模块对根系及大孔隙的参数分别进行计算,通过 Label analysis 模块分析可以得到

每个孔隙的等效直径、体积、表面积、直线长度、平滑度、异质性及空间位置。

利用 Excel 对所得数据进行分析总结,由于大孔隙及细根数量较多,不能逐一分析,因此计算各原状土柱每层(1 mm/层)大孔隙的平均等效半径、体积密度、表面积密度(表面积之和除以总体积)、长度密度(直线长度之和除以总体积)、总数量、及连接度。

1.4 数据分析

运用 SPSS 26 的 one-way ANOVA 分析不同处理间的差异显著性($p \leq 0.05$),用 Origin 2021 绘制大孔隙各项拓扑结构参数的土壤垂直分布图及等效直径分布柱状图,并进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同林龄柠条林土壤大孔隙三维结构特征

利用 CT 扫描及图像处理技术,对人工灌丛恢复过程中 35 a, 24 a, 14 a, 9 a, 0 a 土壤进行取样测定,分析土壤大孔隙三维结构特征(图 1)。可以看出,0 a 样地中土壤大孔隙分布更为分散,孔径小且连接度差。35 a 样地土壤中形成的大孔隙数量多、连通性高,形成了致密的网络状结构。

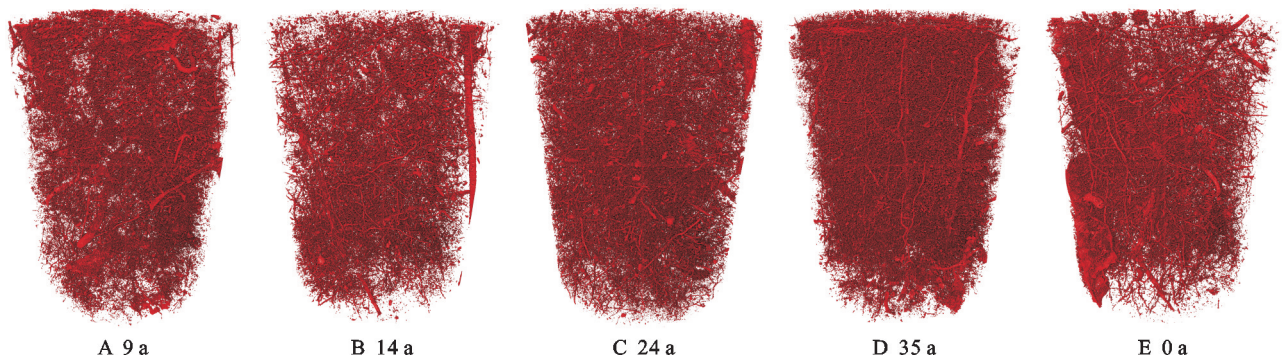


图 1 0—200 mm 土壤大孔隙几何分布特征

Fig. 1 Characterization of the geometric distribution of 0—200 mm soil macropores

2.2 不同林龄柠条林土壤大孔隙数量及长度分布特征

由图 2A 及表 3 可以看出,不同林龄柠条林地同一土层土壤大孔隙数量密度之间差异显著($p < 0.05$)。在柠条引入后,土壤大孔隙数量密度随之增加,且随着林龄增加大孔隙数量密度增幅越大。其中,0—100 mm 土层柠条引入后土壤大孔隙数量的增大幅度高于 100—200 mm 土层。在 0—100 mm 土层内,9 a, 14 a, 24 a, 35 a 样地中土壤大孔隙数量密度和 0 a 相比,分别增加了 48.7%, 66.3%, 74.8%, 197.9%,而在 100—200 mm 土层,9 a, 24 a, 35 a 样地较之 0 a 分别增加了 41.5%, 63.3%, 69.5%, 14 a 样地减少了 18.5%。可见,柠条的种植及持续生长会导致土壤大孔隙数量显著增加,其中表层(0—100 mm)土壤增加幅度要大于深层土壤。此外,随着土层深度的增加,草地及柠条林地土壤大

孔隙数量密度均表现为先升高(0—40 mm 土层)后降低(40—165 mm 土层)的趋势。

由图 2B 及表 3 可以看出,不同林龄柠条林地同一土层土壤大孔隙长度密度之间差异显著($p < 0.05$)。随着柠条的引入及林龄的增加,土壤大孔隙长度密度呈现增加趋势。其中,在 0—100 mm 土层中,9 a, 14 a, 24 a, 35 a 样地大孔隙长度密度分别是 0 a 的 1.3, 1.5, 1.6, 2.4 倍,而在 100—200 mm 土层中,9 a, 24 a, 35 a 样地大孔隙长度密度分别为 0 a 的 2.2, 1.7, 1.6 倍,表层土壤(0—100 mm)中的增加幅度随林龄增加而增大,而深层土壤(100—200 mm)中的大孔隙长度密度增加幅度随林龄增加而减小。另外,除了 9 a 样地外,其他各样地大孔隙长度密度均表现为 0—100 mm 土层大于 100—200 mm 土层。

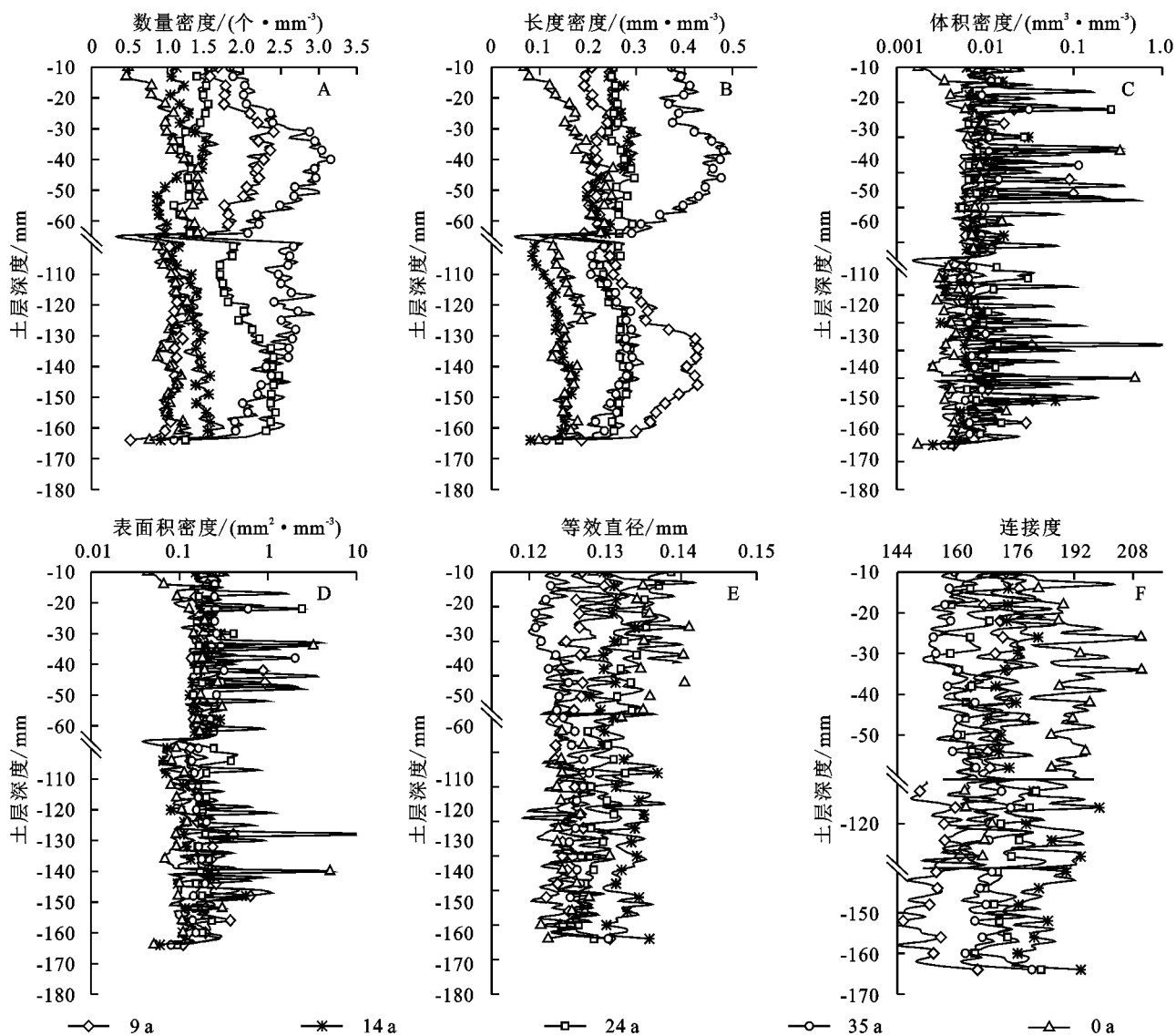


图2 不同林龄柠条林不同土层深度大孔隙拓扑结构

Fig. 2 Macropore topology of *Caragana korshinskii* forest at different soil depths of different ages

2.3 不同林龄柠条林土壤大孔隙体积及表面积分布特征

从图 2C 及表 3 可以看出,不同林龄柠条林地同一土层土壤大孔隙体积密度之间差异不显著($p>0.05$)。但分析发现在柠条引入后,土壤大孔隙体积密度随之增加,且随着林龄增加增幅增大。在 0—100 mm 土层中,和 0 a 相比,14 a,24 a,35 a 样地土壤大孔隙体积密度分别增加了 11.0%,37.8%,71.9%,9 a 样地中减少了 2.7%,而在 100—200 mm 土层中,14 a,24 a,35 a 样地土壤大孔隙体积密度分别增加了 5.0%,39.5%,216.8%,9 a 样地减少了 5.0%。可见,土壤大孔隙体积密度在柠条引入后的变化幅度表现为深层土壤(100—200 mm) > 表层土壤(0—100 mm)。另外,除了 35 a 样地,其他各样地大孔隙体积密度均表现为 0—100 mm 土层大于 100—200 mm 土层。

由图 2D 及表 3 可以看出,不同林龄柠条林地同一土层土壤大孔隙表面积密度之间差异不显著($p>0.05$)。但分析发现在柠条引入后,大孔隙表面积密度均增大,且增幅随着林龄增加而增大。在 0—100 mm 土层中,9 a,14 a,24 a,35 a 样地大孔隙表面积密度分别为 0 a 的 1.0 倍、1.4 倍、1.3 倍、1.7 倍,而在 100—200 mm 土层中,9 a,24 a,35 a 样地大孔隙体积密度分别为 0 a 的 1.2 倍、1.3 倍、2.3 倍,可见在 0—100 mm 及 100—200 mm 土层的大孔隙表面积在柠条生长过程中的变化幅度相同。另外,除了 35 a 样地,其他各样地大孔隙表面积密度均表现为 0—100 mm 土层大于 100—200 mm 土层。

2.4 不同林龄柠条林土壤大孔隙等效直径及连接度分布特征

由图 2E 及表 3 可以看出,不同林龄柠条林地同一土

层土壤大孔隙等效直径之间差异显著($p<0.05$)。柠条引入后,土壤大孔隙等效直径整体表现为增大趋势。其中在 0—100 mm 土层,9 a,14 a,35 a 样地中土壤大孔隙平均等效直径较 0 a 分别减少了 5.6%,2.8%,7.9%,而在 100—200 mm 土层中,14 a,24 a,35 a 样地土壤大孔隙等效直径较 0 a 分别增加了 6.1%,3.1%,0.6%,表现为随着林龄增幅减小的趋势。对比大孔隙等效直径分布(图 3),发现草地等效直径分布频率无显著规律,而在柠条引入后呈现正态分布,且随着林龄的增加,大孔径孔隙比例呈现出先增高(9~14 a)后降低(24~35 a)的趋势。

由图 2F 可以看出,不同林龄柠条林地同一土层土壤大孔隙连接度之间差异显著($p<0.05$)。随着柠条林龄增加,0—100 mm 土层中土壤大孔隙连接度呈减小趋势,且降幅逐渐增大,而在 100—200 mm 土层中,随着林龄增加,土壤大孔隙连接度呈增加趋势,且增幅逐渐减小。其中,在 0—100 mm 土层,9 a,14 a,24 a,35 a 样地土壤大孔隙连接度相比 0 a 分别减少了 7.8%,7.1%,12.1%,14.5%;10—20 cm 土层,9 a,14 a,24 a,35 a 样地大孔隙连接度相比 0 a 分别增加了 17.7%,39.7%,33.7%,27.9%。

表 3 不同林龄柠条林地不同土层深度大孔隙拓扑结构特征
Table 3 Macro-pore topological characteristics of *Caragana korshinskii* forest with different ages at different soil depths

样地	深度/mm	数量密度/ (个·mm ⁻³)	长度密度/ (mm·mm ⁻³)	体积密度/ (mm ³ ·mm ⁻³)	表面积密度/ (mm ² ·mm ⁻³)	等效 直径/mm	连接度
9 a	0—100	1.4814±0.0186c	0.2128±0.0026c	0.0142±0.0024a	0.2264±0.0257a	0.1263±0.0002c	172.0643±0.7372b
	100—200	1.5106±0.0362B	0.3371±0.0083A	0.0113±0.0019A	0.2227±0.0173A	0.1247±0.0002D	153.6138±0.6261D
14 a	0—100	1.6562±0.0270b	0.2468±0.0039b	0.0162±0.0039a	0.2484±0.0361a	0.1301±0.0002b	173.5338±0.5115b
	100—200	0.8707±0.0185D	0.1354±0.0031D	0.0125±0.0033A	0.1624±0.0230A	0.1327±0.0003A	182.3694±0.8778A
24 a	0—100	1.7411±0.0155b	0.2621±0.0024b	0.0201±0.0068a	0.2875±0.0637a	0.1340±0.0003a	164.2163±0.5910c
	100—200	1.7435±0.0209A	0.2584±0.0028B	0.0166±0.0024A	0.2422±0.0181A	0.1289±0.0002B	174.5990±0.5400B
35 a	0—100	2.9669±0.0441a	0.4040±0.0064a	0.0251±0.0091a	0.3789±0.0706a	0.1232±0.0002d	159.7698±0.5123d
	100—200	1.8098±0.0322A	0.2510±0.0044B	0.0377±0.0278A	0.4110±0.2202A	0.1258±0.0002C	166.9928±0.4865C
0 a	0—100	0.9961±0.0427d	0.1669±0.0079d	0.0146±0.0052a	0.2179±0.0499a	0.1338±0.0011a	186.7975±1.8094a
	100—200	1.0677±0.0177C	0.1555±0.0027C	0.0119±0.0075A	0.1799±0.0755A	0.1251±0.0003D	130.5558±5.1063E

注:表中大、小写字母分别表示 0—64 mm,100—164 mm 土层不同林龄柠条林地土壤大孔隙各项参数存在显著性差异($p<0.05$)。

3 林龄对大孔隙参数的影响

从图 4 可以看出,在所有大孔隙特征参数中,除了大孔隙体积、连接度与部分特征参数之间无显著相关外,其余特征参数之间均存在显著相关($p<0.05$)。其中,林龄与大孔隙数量密度、长度密度、连接度之间相关程度更高($p<0.01$),呈极显著正相关,而林龄与大孔隙等效直径显著负相关($p<0.01$)。其中林龄与大孔隙连接度的相关程度最高($r=0.78^{**}$, $p<0.01$),表明林龄对土壤大孔隙的数量密度影响显著。

4 讨论

本研究发现,柠条引入后,0—100 mm 和 100—200 mm 土层中土壤大孔隙数量密度、长度密度、体积密度、表面积密度变化规律基本一致,均表现为随着土层深度增加而增加,且随着林龄增大,增幅越来越大,这与前人的研究结果一致^[19]。柠条根系生长会影响土壤大孔隙发育程度,一方面植物根系尖端可

以克服土壤渗透阻力进入致密的土壤基质中,导致孔隙空间重组,并在腐烂之后留下生物孔,另一方面根系会沿着阻力最小的路径生长,从而进入大孔隙^[20]。但是无论哪种方式,根系进入土壤后都会改变土壤理化性质,从而促进土壤中大孔隙的形成和发育。本研究发现 9 a,14 a,24 a,35 a 这 4 个柠条样地中大土壤因孔隙等效直径最大分布范围不超过 0.14 mm,而石辉等^[21]研究发现林地土壤大孔隙半径范围集中在 0.3~2.4 mm,吕刚等^[22]发现大孔隙半径范围分布在 0.5~2.3 mm。这是因为本研究对象为风沙土,而已有研究多为天然林地,有较好的土壤发生层次。本研究发现 0—100 mm 土层大孔隙数量密度、长度密度、体积密度等均大于 100—200 cm 土层,而大孔隙等效直径相反,表现为 100—200 mm 土层大于 0—100 mm 土层。这是因为坡位、气候等对表层(0—100 mm)土壤表面积密度和长度密度等影响显著,且直径小于 2 mm 的孔隙对地形差异高度敏感,润湿和干燥循环促进了表层土壤中较小孔隙(0.7~1 mm)的形成,从而降低了大孔隙的平均直径^[23]。

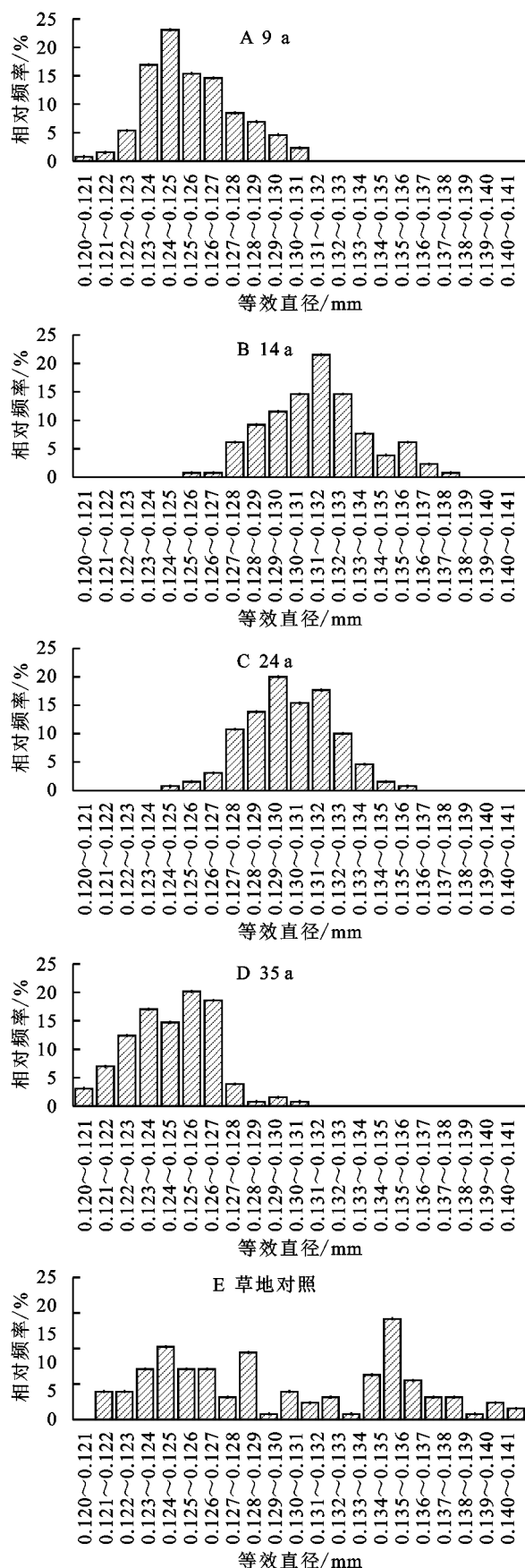
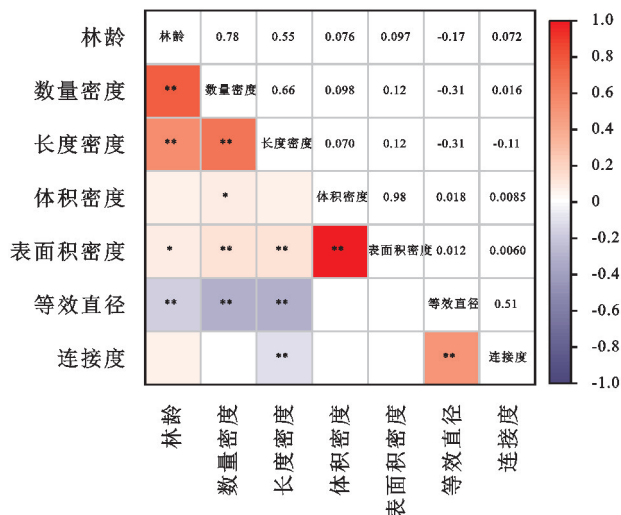


图 3 不同林龄土壤大孔隙平均等效直径分布

Fig. 3 Distribution of average equivalent diameter of soil macropores at different forest ages



注: * 代表 $p \leq 0.05$, ** 代表 $p \leq 0.01$ 。

图 4 柠条林龄与土壤大孔隙结构参数相关关系

Fig. 4 Correlation between the age of *Caragana korshinskii* stand and soil macropore structure parameters

通过对土壤空间内孔隙的连接点以及端点进行计算,可以量化土壤孔隙结构连接度,土壤孔隙的连接度越高,说明孔隙体之间以及土壤孔隙通道连接程度越密切。本研究发现 0 a 和 9 a 样地 0—100 mm 土层大孔隙连接度要大于 0—200 mm 土层,而随着柠条林龄增加 14 a, 24 a, 35 a 样地大孔隙连接度相反,表现为 100—200 mm 土层连接度大于 0—100 mm 土层。这主要与土壤孔隙数量、体积以及在空间中的分布情况有关^[24],一定程度上,土壤孔隙数量的增加可以提高土壤中孤立孔隙之间的连接程度,改善土壤结构使得原本较为紧实的土壤土体变得宽松,从而增加了孤立孔隙间的连接点密度,进而提高该深度的土壤孔隙连接度。另外,土壤孔隙数量密度的增加有利于提高柠条根系的伸展延伸空间,提高大孔隙之间的连接度,这也是在 100—200 mm 土层深度中大孔隙数量分布减少的情况下,土壤孔隙的连接度仍出现增加的主要原因。

土壤孔隙结构是土壤孔隙的形态大小、数量搭配和空间分布状况的综合反映,其结构的复杂性和异质性决定着土壤水分迁移、气体扩散和生物活动等过程^[25]。因此,量化孔隙几何特征(体积、表面积等)和拓扑特征(连接度等)有助于我们更好地认识这一过程。而相比于传统法对土壤破坏程度较大,所获取数据不能很好地反映土壤理化性质的局限性^[26],CT 扫描结合深度学习的图像处理技术可以在不破坏土壤结构的前提下,快速高效地获取人工柠条土壤大孔隙几何分布图像,为量化其拓扑结构参数奠定基础,从而精确认识人工柠条生长年限增加和土壤大孔隙演

变特征之间的关系。以往研究^[27]证明土壤大孔隙的发育会引起土壤水分优先入渗及土壤水分格局的改变,本研究发现柠条的种植及生长会导致土壤大孔隙几何分布及拓扑结构分布格局的变化,形成不同土层间的异质性分布。这些变化最终会导致柠条种植及生长过程中土壤水分格局的变化,从而影响植物的生长与恢复。

5 结论

(1) 通过 CT 扫描结合图像处理技术,可以明显看出柠条引入年限对大孔隙三维结构的影响。和 0 a 样地相比,9 a,14 a 样地 0—200 mm 土层大孔隙数量整体较少,而 24 a,35 a 样地在 0—200 mm 土层大孔隙数量明显增多且结构更加复杂。

(2) 不同林龄柠条林地同一土层,大孔隙数量密度、长度密度、等效直径、连接度之间差异显著($p < 0.05$),而表面积密度、体积密度无显著差异($p > 0.05$)。和 0 a 样地相比,9 a,14 a,24 a,35 a 样地在 0—100 mm 和 100—200 mm 土层大孔隙数量密度、长度密度均显著增加($p < 0.05$),且随着林龄增加,表层土壤(0—100 mm)增幅要大于深层土壤(100—200 mm);和 0 a 相比,不同林龄柠条林地大孔隙等效直径在 0—100 mm 土层显著减小,在 100—200 mm 土层显著增加($p < 0.05$);不同林龄柠条林地大孔隙连接度恰好相反,表现为在 0—100 mm 土层显著增加,而在 100—200 mm 土层显著减小($p < 0.05$)。

(3) 通过相关性分析发现,林龄与大孔隙数量密度、长度密度呈极显著正相关($p < 0.01$),与表面积密度显著正相关($p < 0.05$),与大孔隙等效直径显著负相关($p < 0.01$),与大孔隙体积密度差异不显著($p > 0.05$),其中林龄与大孔隙连接度的相关程度最高($r = 0.78^{**}$, $p < 0.01$)。表明柠条林龄对土壤大孔隙的结构及几何分布影响显著。

参考文献(References):

- [1] 贾昂元,张勇勇,赵文智,等.干旱区绿洲农田土壤大孔隙与水分入渗特征[J].土壤学报,2022,59(2):486-497.
Jia A Y, Zhang Y Y, Zhao W Z, et al. Characteristics of Soil macropores and water infiltration in oasis croplands in an arid region[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022,59(2):486-497.
- [2] 祁子寒,王云琦,王玉杰,等.根系对浅表层土大孔隙分布特征及饱和渗透性的影响[J].水土保持学报,2021,35(5):94-100,107.
Qi Z H, Wang Y Q, Wang Y J, et al. Effect of root

- system on macropores distribution and saturated permeability of surface soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021,35(5):94-100,107.
- [3] Meng C, Niu J Z, Li X, et al. Quantifying soil macropore networks in different forest communities using industrial computed tomography in a mountainous area of North China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2017,17(9):2357-2370.
- [4] Li T C, Shao M A, Jia Y H, et al. Using the X-ray computed tomography method to predict the saturated hydraulic conductivity of the upper root zone in the Loess Plateau in China[J]. Soil Science Society of America Journal, 2018,82(5):1085-1092.
- [5] Wendel A S, Bauke S L, Amelung W, et al. Root-rhizosphere-soil interactions in biopores[J]. Plant and Soil, 2022,475(1):253-277.
- [6] Kochiieru M, Lamorski K, Feiza V, et al. The effect of soil macroporosity, temperature and water content on CO₂ efflux in the soils of different genesis and land management[J]. Zemdirbyste, 2018,105(4):291-298.
- [7] Yang Z G, Hu X, Li X Y, et al. Soil macropore networks derived from X-ray computed tomography in response to typical thaw slumps in Qinghai-Tibetan Plateau, China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2021,21(8):2845-2854.
- [8] Gao Z, Hu X, Li X Y, et al. Effects of freeze-thaw cycles on soil macropores and its implications on formation of hummocks in alpine meadows in the Qinghai Lake watershed, northeastern Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Soils and Sediments, 2021,21(1):245-256.
- [9] Leuther F, Schlüter S. Impact of freeze-thaw cycles on soil structure and soil hydraulic properties[J]. Soil, 2021,7(1):179-191.
- [10] Wang J, Zhao W W, Wang G, et al. Effects of long-term afforestation and natural grassland recovery on soil properties and quality in Loess Plateau(China)[J]. Science of the Total Environment, 2021,770:144833.
- [11] Cui Z, Huang Z, Liu Y, et al. Natural compensation mechanism of soil water infiltration through decayed roots in semi-arid vegetation species[J]. Science of the Total Environment, 2022,819:151985.
- [12] 华瑞.黄土丘陵区不同退耕年限林草地土壤结构及大孔隙研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2016.
Hua R. The Research of Soil Structure and Macro-pores of Forestlands and Grasslands Under Different Vegetation Restoration Years in Loess Hilly Area[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2016.
- [13] 张玉萍,宋乃平,王兴.宁夏荒漠草原短花针茅丛“肥

- 岛”效应研究[J].宁夏大学学报:自然科学版,2022,43(1):81-84.
- Zhang Y P, Song N P, Wang X. Study on “Fertilizer Island” effect of *Stipa breviflora* in desert grassland in Ningxia[J]. Journal of Ningxia University: Natural Science Edition, 2022, 43(1):81-84.
- [14] 张小菊, 每杭, 沈艳. 平茬方式对宁夏荒漠草原人工柠条林土壤物理性质及持水能力的影响[J]. 草原与草坪, 2020, 40(4):73-79.
- Zhang X J, Mei H, Shen Y. Effects of stubble on soil physical properties and water holding capacity of artificial *Caragana* in Ningxia Desert steppe[J]. Grassland and Turf, 2020, 40(4):73-79.
- [15] 王松伟, 郭忠升. 多年生人工柠条林生长对土壤水分的影响[J]. 水土保持研究, 2020, 27(3):70-75.
- Wang S W, Guo Z S. Effects of perennial *Caragana korshinskii* kom on soil moisture[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(3):70-75.
- [16] 张茹, 李建平, 彭文栋, 等. 柠条枝条覆盖对宁夏荒漠草原土壤水热及补播牧草生物量的影响[J]. 草业学报, 2021, 30(4):58-67.
- Zhang R, Li J P, Peng W D, et al. Effects of mulching with caragana (*Caragana intermedia*) branches on soil moisture content and temperature and reseeded forage biomass in desertified grassland in Ningxia Province, China[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2021, 30(4):58-67.
- [17] 程静, 王鹏, 陈红翔, 等. 半干旱区生态风险时空演变及其影响因素的地理探测: 以宁夏盐池县为例[J]. 干旱区地理, 2022, 45(5):1637-1648.
- Cheng J, Wang P, Chen H X, et al. Geographical exploration of the spatial and temporal evolution of ecological risk and its influencing factors in semi-arid regions: A case of Yanchi County in Ningxia[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(5):1637-1648.
- [18] 王乐, 杜灵通, 马龙龙, 等. 人工灌丛化对荒漠草原生态系统碳储量的影响[J]. 生态学报, 2022, 42(1):246-254.
- Wang L, Du L T, Ma L L, et al. Effects of planted shrub encroachment on carbon storage of desert steppe ecosystem[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(1):246-254.
- [19] 李同川. 黄土高原土壤大孔隙特征及其对土壤水分的影响[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- Li T C. Characteristics of Soil Macropore on the Loess Plateau and Their Effects on Soil Water[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2017.
- [20] Luo L, Lin H, Li S. Quantification of 3-D soil macropore networks in different soil types and land uses using computed tomography[J]. Journal of Hydrology, 2010, 393(1/2):53-64.
- [21] 石辉, 陈凤琴, 刘世荣. 岷江上游森林土壤大孔隙特征及其对水分出流速率的影响[J]. 生态学报, 2005, 25(3):507-512.
- Shi H, Chen F Q, Liu S R. Macropores properties of forest soil and its influence on water effluent in the upper reaches of Minjiang River[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(3):507-512.
- [22] 吕刚, 王洪禄, 黄龙. 辽西半干旱区森林土壤大孔隙特征研究[J]. 水土保持通报, 2012, 32(5):176-181.
- Lü G, Wang H L, Huang L. A study on macropore properties of forest soil in semi-arid region of western Liaoning Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32(5):176-181.
- [23] Budhathoki S, Lamba J, Srivastava P, et al. Temporal and spatial variability in 3D soil macropore characteristics determined using X-ray computed tomography[J]. Journal of Soils and Sediments, 2022, 22(4):1263-1277.
- [24] 王卫华, 张志鹏. 基于土壤导气率的燥红土孔隙结构及弯曲连通性研究[J]. 土壤学报, 2018, 55(2):360-368.
- Wang W H, Zhang Z P. Study on the dry red soil pore structure and pore tortuosity-connectivity based on soil air permeability[J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55(2):360-368.
- [25] 张靖, 陈琳, 周虎, 等. 基于数字图像技术的土壤孔隙结构定量研究进展[J]. 土壤, 2023, 55(1):21-29.
- Zhang J, Chen L, Zhou H, et al. Quantification of soil pore structure based on digital image technology: A review[J]. Soils, 2023, 55(1):21-29.
- [26] 黄娟, 邓羽松, 马占龙, 等. 桂东南花岗岩丘陵区不同土地利用方式土壤大孔隙特征[J]. 水土保持学报, 2021, 35(2):80-86.
- Huang J, Deng Y S, Ma Z L, et al. Characteristics of soil macropores in Granite Hilly Region Area with different land use types in southeast Guangxi[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(2):80-86.
- [27] Yi J, Yang Y, Liu M X, et al. Characterising macropores and preferential flow of mountainous forest soils with contrasting human disturbances [J]. Soil Research, 2019, 57(6):601-614.