

余凌宇,孙泉沁,田卓,等.再生水灌溉对土壤连通孔隙特征及水力性质的影响[J].中国环境科学,2025,45(5):2664-2670.

She L Y, Sun X Q, Tian Z, et al. The impact of reclaimed water irrigation on soil connected pore characteristics and hydraulic properties [J]. China Environmental Science, 2025,45(5):2664-2670.

再生水灌溉对土壤连通孔隙特征及水力性质的影响

余凌宇¹,孙泉沁^{2,3*},田卓³,王洪德^{3,4}(1.扬州大学水利科学与工程学院,江苏扬州 225009; 2.河海大学水土保持学院,江苏常州 213200; 3.河海大学农业科学与工程学院,江苏南京 211000; 4.河海大学地球科学与工程学院,江苏南京 211000)

摘要:以宿迁市某再生水农业灌溉区域开展,选择长期地表水灌溉(S1)、再生水短期灌溉(S2)与再生水长期灌溉(S3)区域,采用塑料环刀和铁环刀取0~20cm和20~40cm的原状土,通过CT扫描和图像处理技术获取不同处理下土壤连通孔隙及其结构特征,同步测试土壤的水力性质,探究再生水灌溉对土壤孔隙结构与水力参数的影响,分析引起水力性质变化的关键孔隙参数.结果表明:短期再生水灌溉破坏孔隙结构,使得孔隙结构趋向于简单化.再生水长期灌溉后,土壤孔隙结构较短期灌溉有一定程度的改善,与长期地表水灌溉土壤相比没有显著差异.再生水灌溉对表层土壤和深层土壤孔隙结构与水力性质无显著影响.再生水灌溉显著降低土壤的导水性.与长期地表水灌溉相比,再生水短期灌溉与长期灌溉土壤的 K_s 分别降低20.81%与20.18%.再生水灌溉对于土壤的持水性能影响不大.再生水灌溉后孔隙结构的变化显著影响土壤的水力性质,冗余分析结果表明孔隙参数共解释了83.30%的水力性质变异,其中表面分形维数对水力性质的影响最大,孔隙形状与所有的水力参数都没有显著的关系.

关键词:再生水; 连通孔隙; 图像处理; 水力性质; 冗余分析

中图分类号: X53,S27 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2025)05-2664-07

The impact of reclaimed water irrigation on soil connected pore characteristics and hydraulic properties. SHE Ling-yu¹, SUN Xiao-qin^{2,3*}, TIAN Zhuo³, WANG Hong-de^{3,4} (1.College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China; 2.College of Soil and Water Conservation, Hohai University, Changzhou 213200, China; 3.College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 211000, China; 4.School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211000, China), *China Environmental Science*, 2025,45(5): 2664~2670

Abstract: This study was conducted in an agricultural irrigation area of reclaimed water in Suqian City. In the irrigation area, regions with long-term surface water irrigation (S1), short-term reclaimed water irrigation (S2), and long-term reclaimed water irrigation (S3) were selected. Undisturbed soil samples were collected from depths of 0~20cm and 20~40cm using plastic and metal rings. CT scanning and image processing technology were used to obtain the connected pores and their structural characteristics under different treatments, while the hydraulic properties of the soils were simultaneously tested. This study aimed to investigate the impact of reclaimed water irrigation on soil pore structure and hydraulic parameters and to analyze the key pore parameters that caused changes in hydraulic properties. The results showed short-term reclaimed water irrigation disrupted the soil pore structure, leading to a simplification of the pore architecture. After long-term reclaimed water irrigation, the soil pore structure improved compared to short-term irrigation, with no significant difference observed when compared to the soil under long-term surface water irrigation. The use of reclaimed water for irrigation had no significant impact on the pore structure and hydraulic properties of both surface and subsurface soils. Reclaimed water irrigation significantly reduced soil hydraulic conductivity. Compared to the soil under long-term surface water irrigation, the hydraulic conductivity (K_s) for short-term and long-term reclaimed water irrigated soils decreased by 20.81% and 20.18%, respectively. Reclaimed water irrigation had little effect on soil water retention capacity. The changes in pore structure after reclaimed water irrigation significantly affected the soil's hydraulic properties. Redundancy analysis showed that pore parameters explained 83.30% of the variation in hydraulic properties, with surface fractal dimension having the greatest impact on hydraulic properties. Pore shape had no significant relationship with any hydraulic parameters.

Key words: reclaimed water; connected pores; image processing; hydraulic properties; redundancy analysis

再生水作为重要的可持续水源已被广泛应用于园林绿化、景观补水以及农业灌溉^[1].再生水中富含N、P和许多微量元素,能够增加土壤养分含量,提高土壤肥力^[2].然而,再生水中盐离子含量较高,过量

盐分的积累会引起土壤孔隙结构的改变,土壤的

收稿日期: 2024-09-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42407409)

* 责任作者, 讲师, sxqhu@hhu.edu.cn

水力性质将随着孔隙结构的变化而改变.研究发现,再生水灌溉后土壤中盐分的增加会导致土壤粘粒的膨胀与分散.分散的土壤颗粒将堵塞土壤孔隙,使得土壤水力性质变差^[3-5].此外,再生水中悬浮固体物将在大孔隙中沉积,使得土壤孔隙孔径分布发生改变,降低土壤的饱和导水率^[6].另一方面,土壤盐分浓度的提高有利于促进土壤颗粒的团聚,稳定土壤结构^[7],从而使得土壤大孔隙增加,土壤导水能力增强^[8].水流作为物质传输的媒介,其流动特征的改变将增大农田灌溉管理难度和污染风险管控难度^[9].因此,量化分析再生水灌溉对孔隙结构与水力性质的影响,对于优化再生水管理策略、实现可持续土壤管理有重要作用.

土壤的水力性质决定了水分的渗透速率和流动路径^[10],影响水体的污染物过滤和土壤的自净能力,而水力性质直接受到孔隙结构的影响.因此,量化土壤孔隙结构是确定再生水灌溉对土壤性质影响的关键^[11].近年来,CT 扫描技术的快速发展使得可视化与量化分析土壤孔隙结构成为了可能.大量研究表明 CT 扫描技术在定量土壤孔隙形状、大小、数量、分形维数等方面具有良好的应用前景^[12-13].土壤孔隙参数的获取能够更好地理解土壤中水分

运动、溶质运移等关键水文过程^[14].其中,土壤的连通性孔隙直接影响土壤中水分和溶质的流动路径和效率.但前期的研究更多地关注扫描图像获取的所有孔隙,针对连通性孔隙的研究较少.

宿迁市是黄淮平原资源型、水质型并存的典型缺水城市,已具有多年再生水农林灌溉的经验.基于此,本文以宿迁市典型再生水处理厂附近的不同灌溉年限的绿化用地的表层(0~20cm)和深层土壤(20~40cm)为研究对象,结合 CT 扫描技术提取不同年限再生水灌溉土壤的连通性孔隙,分析再生水灌溉对土壤孔隙结构与水力性质的影响,探究再生水灌溉土壤孔隙结构与水力性质的关系,明确再生水水力性质变化的关键孔隙结构参数,为安全合理利用再生水进行灌溉提供参考.

1 材料与方法

1.1 研究区域与样品采集

本研究在中国江苏省宿迁市主城区再生水处理厂附近绿化用地开展.再生水厂采用“物理沉淀+高效氧化+深度处理”相结合的工艺,有效去除再生水中的污染物与重金属离子,确保再生水符合农林灌溉的要求.再生水指标如表 1 所示.

表 1 再生水水质指标

Table 1 Reclaimed water quality indicators

指标	数值	指标	数值	指标	数值
pH 值	7.38±0.28	BOD ₅ (mg/L)	9.26±0.25	Cr (mg/L)	<0.03
EC (dS/m)	1.51±0.12	As (mg/L)	1.83×10 ⁻³ ±0.00	Cd(mg/L)	<0.005
SS (mg/L)	7.83±1.14	Hg (mg/L)	<4.00×10 ⁻⁵	Pb (mg/L)	<0.07
TN (mg/L)	8.78±1.21	COD (mg/L)	33.17±0.80		
NH ₄ ⁺ -N(mg/L)	0.33±0.14	DOC (mg/L)	2.43±0.34		

注:EC为土壤电导率;SS为悬浮固体;TN为总氮;BOD₅为5d生物需氧量;COD为化学需氧量;DOC为溶解性有机碳.

表 2 试验处理及土壤基本性质

Table 2 Experimental treatments and basic soil properties

处理	灌溉方式	取样深度(cm)	砂粒(%)	粉粒(%)	黏粒(%)	土壤质地	容重(g/cm ³)
S1	地表水灌溉 6 年	0~20	20.17	61.19	18.64	粉砂壤土	1.40
		20~40	22.36	59.00	18.64	粉砂壤土	1.41
S2	地表水灌溉 4 年+ 再生水灌溉 2 年	0~20	17.13	62.76	20.11	粉砂壤土	1.43
		20~40	18.47	55.89	25.64	粉砂壤土	1.40
S3	再生水灌溉 6 年	0~20	16.68	60.75	22.57	粉砂壤土	1.33
		20~40	14.07	61.37	24.56	粉砂壤土	1.59

为探究再生水灌溉对土壤孔隙结构与水力性质的影响,在研究区分别选择 3 块长期地表水灌溉

(S1)、再生水短期灌溉(S2)与再生水长期灌溉(S3)的地块,共计 9 个地块,每个地块的尺寸为 10×10m².

试验处理与土壤的理化性质如表 2 所示.在每个地块采用 100cm³ 的标准环刀采集 0~20 与 20~40cm 的原状土样测定土壤的水力性质,同步采用 100cm³ 的标准塑料环刀采集 0~20 与 20~40cm 的原状土样进行 CT 扫描试验,获取土壤孔隙参数.

1.2 CT 扫描与图像处理

CT 扫描试验在中国科学院南京土壤研究所进行,采用高分辨率 X 射线数字岩心分析系统(Phoenix Nanotom S,GE,USA)对原状土样进行扫描.扫描 X 射线的最大能量为 100kV 的电压和 100μA 的电流,扫描精度为 25μm.在获取 CT 切片图像后,采用 Fiji 软件对图像进行处理.为避免边缘效应,选择扫描样品中心 1024×1024×1024voxels (2.56×2.56×2.56cm³) 的区域进行分析.图 1(a)展示了再生水短期灌溉处理的一个扫描样本的灰度图.接着增加图像的亮度与对比度,采用中值滤波的方法去除小于 2 体素的噪点.然后将处理后的灰度图像转化为二值图像,图像的阈值决定了二值图像是否能够准确反映灰度图像的信息.在本研究中,采用以下步骤确定图像的阈值:复制当前灰度图像;采用软件默认方法调整阈值,

仔细比较灰度图像和二值图像,通过视觉判断确定阈值.二值化后的图像如图 1(b)所示.

为获取土壤中的连通孔隙,根据二值图像采用 Fiji 的 MorphoLibJ 插件处理.首先采用 Connected Components Labeling 对二值图像中的孔隙进行标记,如图 1(c)所示;然后采用“Keep Largest Label”消除二值图像中孤立孔隙,提取的连通性孔隙如图 1(d)所示.选择 MorphoLibJ 插件中的“Analyze Region 3D”功能计算孔隙的体积(V)、表面积(S)、平均宽度(MB)和形状参数(S_p).其中,平均宽度反映了孔隙的迂回程度,与流动阻力直接相关.形状参数选择采用圆球形度指数,其计算方法如下:

$$\text{Sphericity} = 36\pi \frac{V^2}{S^3} \quad (1)$$

式中: V 是孔隙体积,cm³; S 是孔隙表面积,cm².

此外,基于图 1(d)采用 BoneJ 插件的“Fractal Dimension”计算孔隙的质量分形维数 D_m .在计算表面分形维数 D_s 前,采用“Find Edges”提取孔隙与土壤基质的接触面,如图 1(e)所示.然后,通过“Fractal Dimension”计算 D_s .

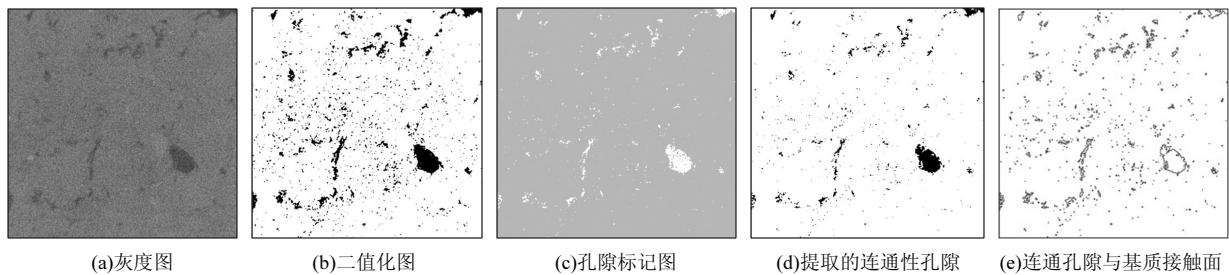


图 1 典型土壤样品的 CT 扫描图像

Fig.1 CT scan images of typical soil samples

1.3 水力性质测定

采用定水头法^[15]测定土壤饱和导水率 K_s :

$$K_s = \frac{QL}{AtH} \quad (2)$$

式中: Q 为稳定出水量,cm³; L 为土样高度,cm; A 为土样横截面积,cm²; t 为测量时间,h; H 为水头高度,cm.

试验采用离心机法(CR21N,日本日立公司)测定土壤的水力性质,测定时保持离心机内部温度为 20℃,测定不同吸力下(1,10,30,50,100,300,500,1000kPa)土壤样品对应的土壤重量含水量,根据测定的容重计算土壤体积含水量.每个吸力对应的离心机转速为 310,980,1698,2192,3100,5371,6933,

9806r/min,其测定时间分别为 10,26,41,48,58,73,80,90min.采用 RETC 软件中的 van Genuchten (VG)模型^[16]对离心机法所得含水量数据进行拟合,VG 模型表达式如下:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha h)^n]^m} \quad (3)$$

式中: θ 为土壤体积含水率,cm³/cm³; θ_r 为土壤残余体积含水,cm³/cm³; θ_s 为土壤的饱和体积含水率,cm³/cm³; h 为土壤吸力,cm; α 为进气值倒数,1/cm; m 、 n 为形状参数,其中 $m=1-1/n$.获取 VG 模型参数后,计算土壤田间持水率 $\theta_t(h=33.3\text{kPa})$ 与凋萎含水量 $\theta_w(h=1500\text{kPa})$ ^[17],土壤有效含水量 θ_A 为 θ_t 与

θ_w 差.

1.4 数据处理与分析

使用 Excel 录入并处理数据.采用 SPSS26.0 对数据进行相关性和显著性分析.使用 Canoco 5.0 进行冗余分析(RDA).图表采用 Excel 和 Origin 软件进行绘制.

2 结果与分析

2.1 再生水灌溉对土壤孔隙结构的影响

扫描土样的三维孔隙结构如图 2 所示.由图可知,随着灌溉年限的增加,表层土壤孔隙呈现下降趋势,深层土壤孔隙呈现上升趋势.表 3 展示了不同再生水灌溉年限土壤的孔隙结构参数.不难发现,再生

水短期灌溉下孔隙的 V 、 S 与 MB 均呈现一定幅度的降低.此外,再生水短期灌溉下,0~20 和 20~40cm 土层土壤的 D_m 较长期地表水灌溉显著降低了 6.74% 与 6.18%; D_s 显著降低了 6.83% 与 5.43%,且短期灌溉下土壤孔隙圆球度显著高于长期地表水灌溉土壤,这意味着再生水短期灌溉土壤孔隙结构可能受到破坏,趋向于简单化.而再生水长期灌溉后,土壤孔隙结构较短期灌溉有一定程度的改善,所有孔隙结构参数与长期地表水灌溉土壤没有显著差异.值得注意的是,再生水长期灌溉后,20~40cm 土层土壤的孔隙体积与表面积高于 0~20cm 土层,且两层土壤的 D_m 与 D_s 非常接近,长期灌溉对 20~40cm 土层土壤的孔隙结构恢复效果更佳.

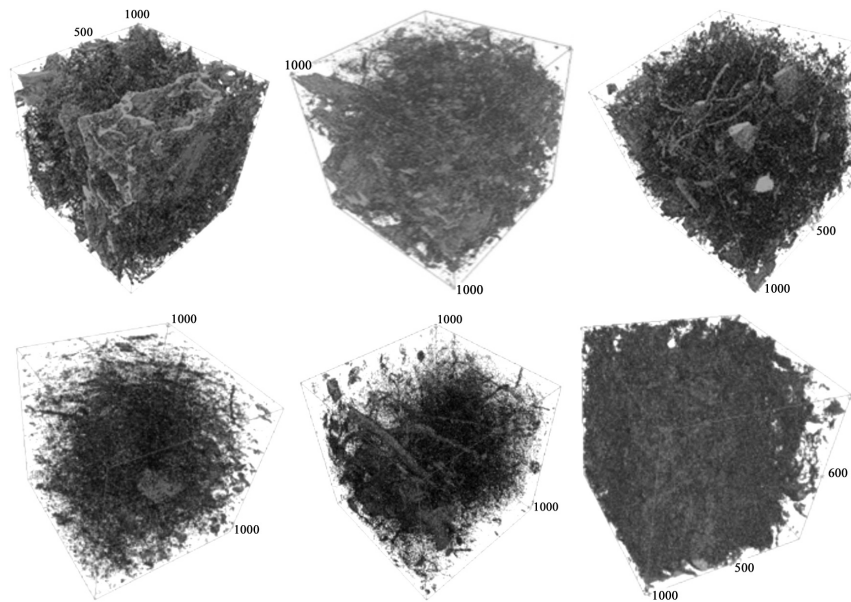


图 2 扫描土样的三维孔隙结构

Fig.2 Three-dimensional pore structure of scanned soil samples

第一列至第三列分别代表长期地表水灌溉、再生水短期灌溉与长期灌溉土样;第一行至第二行分别代表 0~20 与 20~40cm 土层土样,图中数字为坐标轴刻度,单位为 pixel

表 3 不同再生水灌溉年限土壤的孔隙结构参数

Table 3 The pore structure parameters of soil under different years of reclaimed water irrigation

取样点	取样深度(cm)	D_m	D_s	$V(\text{cm}^3)$	$S(\text{cm}^2)$	$S_p(10^{-5})$	$MB(\text{cm})$
S1	0~20	2.82±0.07a	2.78±0.09a	1.59±1.69a	414.45±346.67a	0.34±0.04b	2701.45±2486.23a
	20~40	2.75±0.02a	2.70±0.04a	0.71±0.605a	212.52±130.09a	0.53±0.01b	3908.05±1022.71a
S2	0~20	2.63±0.15b	2.60±0.16b	0.88±0.605a	198.57±131.98a	1.48±1.01a	2266.88±1023.74a
	20~40	2.58±0.09b	2.56±0.10b	0.84±0.205a	110.82±76.73a	1.68±0.74a	2407.01±1299.33a
S3	0~20	2.72±0.12ab	2.68±0.14ab	0.40±0.357a	132.00±114.64a	0.70±0.58ab	2428.61±1805.55a
	20~40	2.69±0.10ab	2.66±0.12ab	0.93±1.192a	210.00±124.27a	0.64±0.67ab	3769.50±1760.36a

注:S1为长期地表水灌溉;S2为再生水短期灌溉;S3为再生水长期灌溉. D_m 为质量分形维数; D_s 为表面分形维数; V 为孔隙体积; S 为孔隙表面积; S_p 为孔隙圆球度; MB 为平均宽度.表中结果均为3种灌溉模式下每种模式所取3个样本的平均值±标准差,同列不同小写字母表示不同灌溉年限差异显著($P<0.05$).

表 4 不同再生水灌溉年限土壤的水力参数

Table.4 The soil hydraulic parameters under different years of reclaimed water irrigation

取样点	取样深度(cm)	$\theta_s(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$	α	n	$K_s(\text{cm}/\text{h})$	$\theta_t(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$	$\theta_A(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$
S1	0~20	0.43±0.03a	0.06±0.00a	1.30±0.16a	11.67±0.47a	0.36±0.04a	0.29±0.05a
	20~40	0.43±0.02a	0.02±0.01a	1.24±0.04a	9.85±0.77a	0.40±0.01a	0.19±0.01a
S2	0~20	0.43±0.02a	0.02±0.00a	1.32±0.15a	8.46±0.44c	0.40±0.02a	0.21±0.05a
	20~40	0.42±0.03a	0.01±0.00a	1.29±0.17a	8.46±1.00c	0.39±0.02a	0.18±0.04a
S3	0~20	0.43±0.01a	0.01±0.00a	1.32±0.13a	8.70±0.94b	0.40±0.01a	0.26±0.14a
	20~40	0.43±0.03a	0.01±0.01a	1.26±0.07a	8.38±0.49b	0.40±0.02a	0.30±0.12a

注: θ_s 为饱和含水率; α 为进气值的倒数; n 为形状参数; K_s 为饱和导水率; θ_t 为田间持水量; θ_A 为有效含水量.表中结果均为3种灌溉模式下每种模式所取三个样本的平均值±标准差,同列不同小写字母表示不同灌溉年限差异显著($P<0.05$).

2.2 再生水灌溉对土壤水力性质的影响

不同年限再生水灌溉土壤的水力性质参数如表 4 所示.再生水灌溉后土壤的 θ_s 、 α 、 n 、 θ_t 与 θ_A 没有显著的变化,说明再生水灌溉对于土壤的持水性影响不大.但是不同灌溉年限下,土壤的 K_s 存在显著差异.与长期地表水灌溉相比,0~20cm 土层短期灌溉与长期灌溉土壤的 K_s 分别降低了 27.5%与 25.45%;20~40cm 土层则分别降低了 14.11%与 14.92%.这意味着采用再生水灌溉将显著降低土壤的导水性,特别是表层土壤的导水性.

2.3 再生水灌溉土壤孔隙参数与土壤水力参数的相关性分析

图 3 分析了孔隙结构参数与水力性质之间的相关性. D_m 和 D_s 均与 θ_s 和 K_s 呈显著正相关,这意味着复杂的孔隙空间与孔隙表面积显著影响土壤的导水性和持水性.孔隙表面积的降低将显著降低 α 、 K_s 与 θ_t ,土壤的渗透性、持水性和通气性减弱.MB 与 n 呈现显著正相关关系,与 θ_A 显著负相关,说明随着孔隙平均宽度的增加,土壤水分特征曲线变得更加陡峭,土壤水分的排出能力更强,降低土壤的水分保持能力.然而, S_p 与所有的水力参数都没有显著的关系,在连通孔隙中孔隙形状可能不是影响水力性质的关键因素.

为进一步探究再生水灌溉土壤水力性质变化的关键因子,本研究采用了冗余分析方法,结果如图 4 所示.结果表明,第 1 轴和第 2 轴分别解释了水力性质变化的 54.30%和 29.00%,各孔隙参数共解释了 83.30%的水力性质变异,说明第 1、2 排序轴很好地反映了土壤水力性质与孔隙结构之间的关系,且这种关系主要由第 1 排序轴决定.根据因子贡献度(图 4(b)), D_s 对水力性质的影响最大,达到了 45.70%,MB

次之,为 33.70%.

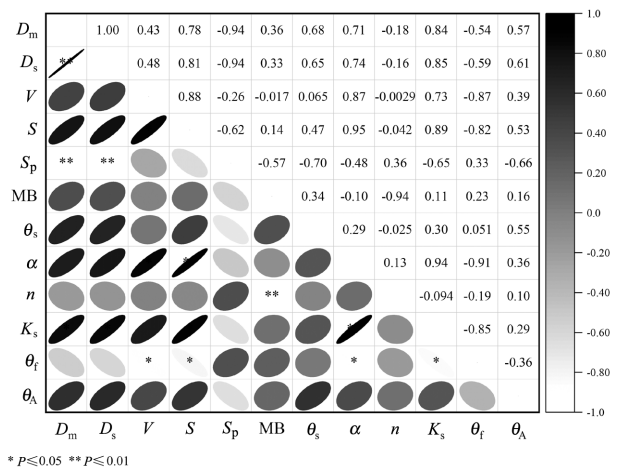
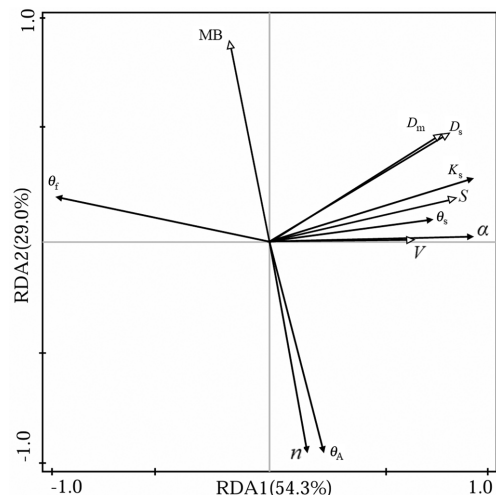


图 3 孔隙参数与水力性质相关性分析

Fig.3 Correlation analysis between pore parameters and hydraulic properties

**表示在 0.01 水平(双侧)上极显著相关;*表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关,图中朝向右上(左下)的椭圆表示正相关,朝向左上(右下)的椭圆表示负相关



(a)冗余分析结果图

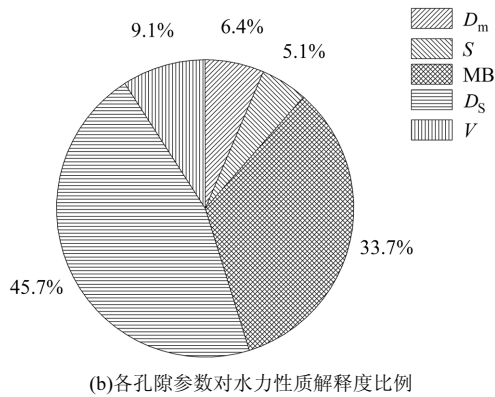


图 4 孔隙参数与水力性质冗余分析

Fig.4 Redundancy analysis of pore parameters and hydraulic properties

3 讨论

本研究表明,再生水短期灌溉下,土壤孔隙会发生破坏,孔隙结构趋向于简单化,导致土壤导水性降低.Sou 等^[18]研究发现再生水灌溉后 Na^+ 增加诱导土壤颗粒的分散和土壤结构的坍塌,部分分散的颗粒向下运动,导致孔隙逐渐阻塞.本研究试验土样为粉砂壤土,其颗粒组成以粉粒和黏粒为主,当采用再生水灌溉时,土壤中盐分离子增加破坏了粉粒之间的结合力,导致团聚体的解聚^[19].另一方面,盐分离子与土壤黏粒发生水膨胀作用,引起土壤不均衡膨胀与收缩,使得团聚的土壤颗粒之间被撕裂,造成土壤结构破坏^[20].但徐洋洋等^[10]发现再生水灌溉促进了砂粒含量较高土壤的大孔隙系统发育和大孔隙连通性发展,在一定程度上改善了土壤孔隙结构.这是因为再生水中富含的有机质能够与砂粒结合促进团聚体的形成,改善土壤结构,增大土壤入渗速率^[21],且改善程度和灌溉频率也有关系^[9].这意味着再生水短期灌溉对于细颗粒为主的土壤结构与水力性质影响更大.此外,本研究发现在长期灌溉下土壤性质得到了一定的恢复,再生水长期灌溉与长期地表水灌溉土壤样品之间没有显著差异,这与 Ceres 等^[22]的研究一致.这可能是因为再生水长期灌溉提供了持续的水分和有机物质,促进植物根系与土壤微生物的发育,促使土壤颗粒重新团聚,使得土壤孔隙结构与水力性质得到恢复^[23].管孝艳等^[24]研究发现再生水长期灌溉后土壤孔隙分布的非均匀性特征明显,土壤的大孔隙数目有一定程度的增加.Li 等^[25]认为再生水长期灌溉可以增强土壤酶活性加速土壤中 C、N、P、S 等元素的生物地球化学循环,从而提

高作物产量.由此可知,再生水长期灌溉对于土壤性质的影响较小,甚至有一定程度的改善作用.但本研究仅研究了再生水灌溉对于土壤结构与水力性质的影响,后期的研究中应进一步分析再生水灌溉对于污染物的累积机制,以便更好地阐明再生水灌溉的环境效应.

本研究表明,再生水灌溉后孔隙结构的变化显著影响土壤的水力性质,其中 D_s 对于水力性质变化的影响力最大.Sun 等^[26]研究发现 D_s 与高吸力下土壤的水分运动密切相关.再生水中富含许多微小的固体悬浮物^[27],这些物质在灌溉过程中逐渐沉积到土壤表面和孔隙中,使得土壤表面变得更为平滑,导致 D_s 的降低.这使得水流通道变得单一化,降低水分在土壤中传播的效率.土壤导水性能的下降会增加再生水中污染物在土壤中积累的风险,对环境造成威胁^[28].相关研究表明在使用再生水灌溉的城市公园土壤中,各种抗生素抗性基因与抗生素抗性细菌的丰度高于其他参考土壤^[29].因此,再生水灌溉需重视其降低土壤导水性能的问题.Tunc 等^[7]指出采用淡水稀释的再生水灌溉能够改善土壤的渗透率.卢佳宇等^[5]发现采用再生水和蒸馏水交替灌溉后土壤导水率高于再生水灌溉.结合使用常规水源与再生水交替灌溉,有助于维持土壤的导水性,从而更安全有效地利用再生水.对于土壤持水性而言,由于部分孔隙被悬浮物与破碎的土壤颗粒填充,孔隙的 MB 降低,土壤的水分保持能力得到了一定提升,有助于植物的生长.本研究中,再生水灌溉后孔隙的 MB 与土壤持水性没有显著变化,因此,尽管再生水灌溉破坏孔隙结构,但对于土壤的持水性影响有限.

4 结论

4.1 再生水短期灌溉下,土壤 D_m 与 D_s 较长期地表水灌溉土壤分别降低 6.46%与 6.13%,孔隙的 V 、 S 与 MB 均呈现一定幅度的降低.短期再生水灌溉破坏土壤孔隙结构,使得孔隙结构趋向于简单化.再生水长期灌溉后,土壤孔隙结构较短期灌溉有一定程度的改善,与长期地表水灌溉土壤没有显著差异.再生水灌溉对表层土壤和深层土壤孔隙结构与水力性质无显著影响.

4.2 再生水灌溉显著降低土壤的导水性.与长期地表水灌溉相比,短期灌溉与长期灌溉土壤的 K_s 分别降低 20.81%与 20.18%.再生水灌溉后土壤的 θ_s 、 α 、 n 、 θ_f 与 θ_A 没有显著的变化,再生水灌溉对于土壤的持水性影响不大.

4.3 再生水灌溉后孔隙结构的变化显著影响土壤的水力性质,冗余分析结果表明孔隙参数共解释了83.30%的水力性质变异,其中 D_s 对水力性质的影响最大。 S_p 与所有的水力参数都没有显著的关系,在连通孔隙中孔隙形状不是影响水力性质的关键因素。

参考文献:

- [1] 崔二革,崔丙健,刘源,等.生物炭对非常规水源灌溉下土壤-作物病原菌的影响[J]. 中国环境科学, 2020,40(3):1203-1212.
Cui E P, Cui B J, Liu Y, et al. Effects of biochar supplementation on the behavior of pathogens in soil-plant system under unconventional water resources irrigation [J]. China Environmental Science, 2020, 40(3):1203-1212.
- [2] 刘斐耀,尤全刚,薛娟,等.民勤荒漠绿洲过渡带粘土夹层水力性质及其生态水文意义探讨[J]. 干旱区资源与环境, 2024,38(1):114-122.
Liu F Y, You Q G, Xue X, et al. Hydraulic properties and eco-hydrology effects of clay interlayer in oasis-desert ecotone of Minqin [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2024,38(1):114-122.
- [3] Gharaibeh M A, Ghezzehei T A, Albalasmeh A A, et al. Alteration of physical and chemical characteristics of clayey soils by irrigation with treated waste water [J]. Geoderma, 2016,276:33-40.
- [4] Lado M, Ben-Hur M. Treated domestic sewage irrigation effects on soil hydraulic properties in arid and semiarid zones:A review [J]. Soil & Tillage Research, 2009,106(1):152-163.
- [5] 卢佳宇,王辉,欧阳赞.低盐再生水灌溉对亚热带红壤水力特性及微观结构的影响[J]. 农业工程学报, 2022,38(18):103-112.
Lu J Y, Wang H, Ouyang Z. Effects of low-salinity reclaimed wastewater irrigation on the hydraulic properties and microstructure of subtropical red soil [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022,38(18):103-112.
- [6] 盛丰,方娴静,吴丹,等.灌溉水中悬浮固体对土壤水分入渗性能的影响[J]. 农业工程学报, 2019,35(21):98-106.
Sheng F, Fang X J, Wu D, et al. Effects of suspended solids in irrigation water on soil water infiltration [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019,35(21):98-106.
- [7] Tunc T, Sahin U. The changes in the physical and hydraulic properties of a loamy soil under irrigation with simpler-reclaimed wastewaters [J]. Agric Water Manag, 2015,158:213-224.
- [8] 唐胜强,余冬立.灌溉水质对土壤饱和导水率和入渗特性的影响[J]. 农业机械学报, 2016,47(10):108-114.
Tang S Q, She D L. Influence of water quality on soil saturated hydraulic conductivity and infiltration properties [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(10):108-114.
- [9] 盛丰,李忠润,方娴静,等.再生水中阴离子表面活性剂对土壤结构与水流运动的影响[J]. 中国环境科学, 2020,40(10):4531-4539.
Sheng F, Li Z R, Fang X J, et al. Effects of anionic surfactant in reclaimed water on soil structural properties and water flow characteristics [J]. China Environmental Science, 2020,40(10):4531-4539.
- [10] 徐洋洋,张兴,左西宇,等.再生水灌溉对土壤表层大孔隙的影响[J]. 农业工程学报, 2023,39(23):113-122.
Xu Y Y, Zhang X, Zuo X Y, et al. Effects of reclaimed water irrigation with different water quality on surface soil macro-pores [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(23):113-122.
- [11] 潘能,陈卫平,焦文涛,等.绿地再生水灌溉土壤盐度累积及风险分析[J]. 环境科学, 2012,33(12):4088-4093.
Pan N, Chen W P, Jiao W T, et al. Soil salinity in greenland irrigated with reclaimed water and risk assessment [J]. Environmental Science, 2012,33(12):4088-4093.
- [12] 胡霞,李宗超,刘勇,等.基于CT扫描研究青海湖流域高寒草甸不同坡位土壤大孔隙结构特征[J]. 土壤, 2016,48(1):180-185.
Hu X, Li Z C, Liu Y, et al. Soil macropores of alpine kobresia meadow in different slope positions in the Qinghai Lake watershed [J]. Soils, 2016,48(1):180-185.
- [13] 洪明海,徐驰,曾文治,等.盐渍土壤孔隙结构及分形特征研究[J]. 中国农村水利水电, 2017:54-58.
Hong M H, Xu C, Zeng W Z, et al. Study on pore structure and the fractal characteristics of saline soil [J]. China Rural Water and Hydropower, 2017:54-58.
- [14] 张佐源,夏彬,郝旺林,等.黄土高原坝地土层状土壤剖面孔隙分布特征[J]. 水土保持学报, 2023,37(6):83-90.
Zang Z Y, Xu B, Hao W L, et al. Pore distribution characteristics of layered soil profile in Dam Land of Loess Plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023,37(6):83-90.
- [15] 曹瑞雪,邵明安,贾小旭.层状土壤饱和导水率影响的试验研究[J]. 水土保持学报, 2015,29(3):18-21.
Cao R X, Shao M A, Jia X X. Experimental study on effects of layered soils on saturated hydraulic conductivity [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015,29(3):18-21.
- [16] 陈俊英,柴红阳,Fillerman L,等.再生水水质对斥水和亲水土壤水分特征曲线的影响[J]. 农业工程学报, 2018,34(11):121-127.
Chen J Y, Chai H Y, Fillerman L, et al. Impact of treated waste water quality on repellent and wettable soil water characteristic curve [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018,34(11):121-127.
- [17] 谷丰,陈雪娇,魏翠兰,等.砂姜黑土钙质结核剖面分布特征及其对土壤持水性的影响[J]. 农业工程学报, 2021,37(6):73-80.
Gu F, Chen X J, Wei C L, et al. Distribution of calcareous concretion in soil profile and their effects on soil water retention in calcic vertisol [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021,37(6):73-80.
- [18] Sou/Dakouré M Y, Mermoud A, Yacouba H, et al. Impacts of irrigation with industrial treated wastewater on soil properties [J]. Geoderma, 2013,200-201:31-39.
- [19] Farahani E, Emami H, Keller T, et al. Impact of monovalent cations on soil structure. Part I. Results of an Iranian soil [J]. International Agrophysics, 2018,32(1):57-67.
- [20] 胡廷飞,王辉,谭帅.再生水灌溉模式对潮土结构性及导水性能的影响[J]. 水土保持学报, 2020,34(2):146-152.
Hu T F, Wang H, Tan S. Effect of reclaimed water irrigation modes on the structural properties and hydraulic conductivity of tidal soil [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020,34(2):146-152.
- [21] 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):53-64.
- [22] Ceres P y C, Alfonso G S, Stéphane S, et al. Long-term (>90 years) wastewater irrigation effect on the pore characteristics and stability of soil aggregates [J]. Geoderma, 2023,434,116469.
- [23] Leuther F, Schlüter S, Wallach R, et al. Structure and hydraulic properties in soils under long-term irrigation with treated wastewater [J]. Geoderma, 2019,333:90-98.
- [24] 管孝艳,杨培岭,李柳,等.长期再生水灌溉后土壤孔隙分布的多重分形特征[J]. 排灌机械工程学报, 2018,36(11):1163-1167.
Guan X Y, Yang P L, Li L, et al. Multifractal characteristics of soil pore distribution after long-term recycled water irrigation [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2018,36(11):1163-1167.
- [25] Li B, Cao Y, Guan X, et al. Microbial assessments of soil with a 40-year history of reclaimed wastewater irrigation [J]. Science of the Total Environment, 2019,651(P1):696-705.
- [26] Sun X, She D, Wang H, et al. Modelling soil hydraulic properties with an improved pore-solid fractal (PSF) model through image analysis [J]. European Journal of Soil Science, 2022,73(1),e13156.
- [27] Bardhan G, Russo D, Goldstein D, et al. Changes in the hydraulic properties of a clay soil under long-term irrigation with treated wastewater [J]. Geoderma, 2016,264:1-9.
- [28] Deng S, Yan X, Zhu Q, et al. The utilization of reclaimed water: Possible risks arising from waterborne contaminants [J]. Environmental Pollution, 2019,254(PA):113020.
- [29] Han X M, Hu H W, Shi X Z, et al. Impacts of reclaimed water irrigation on soil antibiotic resistome in urban parks of Victoria, Australia [J]. Environmental Pollution, 2016,211:48-57.

作者简介: 余凌宇(2002-),男,湖南长沙人,扬州大学硕士研究生,主要从事农业水土工程方面研究.18008419556@163.com.