

doi:10.3799/dqkx.2015.170

# 污水灌溉下土壤孔隙特征的 CT 定量分析

郭晓明<sup>1,2</sup>, 马腾<sup>2\*</sup>, 陈柳竹<sup>2</sup>, 刘林<sup>2,3</sup>

1. 河南理工大学资源环境学院, 河南焦作 454003

2. 中国地质大学生物地质与环境地质国家重点实验室, 湖北武汉 430074

3. 中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏南京 210016

**摘要:** 污水中的悬浮物、盐分和有机营养物对土壤孔隙状况产生了深刻的影响。通过室内模拟和 CT(computed tomography) 扫描的方法, 定量研究污水灌溉条件下土壤孔隙数、孔隙度及形态特征。结果表明: 与对照点相比, 污水灌溉区上层土壤总孔隙数和大孔隙数(当量直径 $\geq 1.00$  mm)均显著升高, 而下层土壤总孔隙数、大孔隙数、粗孔隙数(当量直径为 $0.26 \sim 1.00$  mm)、总孔隙度、大孔隙度和粗孔隙度均显著降低( $p < 0.05$ ); 在模拟悬浮液和盐液灌溉条件下, 土壤总孔隙数、粗孔隙数和粗孔隙度均有所升高, 而大孔隙数、总孔隙度、大孔隙度和孔隙成圆率均有所降低; 在模拟营养液灌溉条件下, 土壤总孔隙数、大孔隙数、粗孔隙数和粗孔隙度均有所增加, 而孔隙成圆率有所降低; 对于研究区土壤来说, 悬浮液灌溉对土壤孔隙的影响效应强于盐液灌溉; 对于同种性质的污水灌溉来说, 污灌对对照点土壤孔隙的影响效应强于污灌区土壤。

**关键词:** 污水灌溉; 土壤孔隙; CT 扫描; 耕地; 环境地质。

中图分类号: P641.1

文章编号: 1000-2383(2015)11-1896-08

收稿日期: 2015-03-22

## Quantitative Analysis of Soil Pores under Sewage Irrigation Using Computerized Tomography

Guo Xiaoming<sup>1,2</sup>, Ma Teng<sup>2\*</sup>, Chen Liuzhu<sup>2</sup>, Liu Lin<sup>2,3</sup>

1. College of Resources and Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China

2. State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, China

**Abstract:** The suspension solids, salts and organic nutrients in sewage effluents can significantly affect soil porosity condition. Based on the laboratory simulation and computed tomography, the numbers of soil pores, porosity and shape were quantitatively studied under the condition of irrigation with sewage. The results show that the soils irrigated with sewage effluents exhibited higher total pore numbers and macropore numbers( $\geq 1.00$  mm in diameter) in the upper layer but lower total pore numbers, macropore numbers, coarse pore numbers ( $0.26 - 1.00$  mm in diameter), total porosity, macroporosity and coarse porosity in the subsoil layer when compared with the soils irrigated with groundwater ( $p < 0.05$ ). Under the condition of irrigation with suspension or with salt solution, total pore numbers, coarse pore numbers and coarse porosity increased, while macropore numbers, total porosity, macroporosity and cycle rate decreased. Under the condition of irrigation with nutrient solution, total pore numbers, macropore numbers, coarse pore numbers and coarse porosity increased, while macroporosity and cycle rate decreased. For the soil in the study fields, the effect of irrigation with suspension on the soil pores was stronger than that with salt solution. For the same irrigation with suspension or with salt solution, the effect of sewage irrigation on pores in groundwater irrigated soils was stronger than that in sewage irrigated soils.

**Key words:** sewage irrigation; soil pore; computed tomography; farmland; environmental geology.

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(No. 2010CB428802); 国家自然科学基金项目(Nos. 40872157, 40830748); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(No. 20110145110003); 河南省高校科技创新团队支持计划(No. 15IRTSTHN027)。

**作者简介:** 郭晓明(1982-), 男, 讲师, 博士, 从事水文地质相关教学工作, 主要从事包气带水文地质学的研究。E-mail: guoxiaoming@hpu.edu.cn

\* 通讯作者: 马腾, E-mail: mateng@cug.edu.cn

**引用格式:** 郭晓明, 马腾, 陈柳竹, 等. 2015. 污水灌溉下土壤孔隙特征的 CT 定量分析. 地球科学——中国地质大学学报, 40(11): 1896-1903.

污水灌溉在解决农业用水问题的同时,也造成了一系列的生态环境问题,尤其对灌区土壤及地下水污染(Yadav *et al.*, 2002; Al-Subu *et al.*, 2003; Alvarez-Bernal *et al.*, 2006; Huang *et al.*, 2011)、土壤水流与溶质运移(Magesan *et al.*, 2000; 杨军等, 2006; Lado and Ben-Hur, 2009)等方面产生了深刻影响,而土壤孔隙状况,特别是大孔隙( $>1.00$  mm)的性质,如数目、形状、方向及空间分布等决定着土壤中水分的流量、流速及持水性能(赵世伟等, 2010)。目前,有关污水灌溉区土壤孔隙方面的研究多局限在土壤容重、饱和水力传导度、孔隙度大小及分布等方面(李法虎等, 2006; Gharaibeh *et al.*, 2007; 夏江宝等, 2009),而对污水灌溉区土壤孔隙数量、分布及形态等“真实”状况方面的研究鲜见报道。因此,定量刻画污水灌溉区土壤孔隙特征对于深入理解土壤水流及溶质运移具有重要意义。

目前对土壤大孔隙研究的方法主要有染色示踪法、穿透曲线法、渗透仪法、数学模型法和 CT(computed tomography)扫描技术等(高朝侠等, 2014)。与其他方法相比,CT 扫描技术具有如下优势:能够对土体进行非破坏性分析,并且具有分析精度高和成像速度快等优点,还可通过连续切片图像的重组进行土体内部结构的三维重建(赵世伟等, 2010),所以在研究土壤孔隙状况,如孔隙数量、孔隙度和分形维数等方面取得了丰硕的成果和有益的实践(冯杰和郝振纯, 2002; Nunan *et al.*, 2006; Sander *et al.*, 2008)。为此,本文选择有代表性的污水灌溉区,通过野外采样和室内模拟试验,基于 CT 扫描技术,重点研究污灌条件下土壤孔隙数、形态及分布特征,探讨土壤孔隙特征的影响因素,旨在为污水灌溉区农业的可持续发展提供理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 自然概况

本研究选取有代表性的污水灌溉区石家庄栾城县为研究区。栾城县( $37^{\circ}47' \sim 38^{\circ}01' \text{N}$ ,  $114^{\circ}29' \sim 114^{\circ}47' \text{E}$ )位于河北省西南部,属太行山东麓山前平原的滹沱河冲积扇,为暖温带半湿润半干旱季风气候。年平均气温为  $12.2$   $^{\circ}\text{C}$ ,年平均降水量为  $493$  mm,降水主要集中在  $6 \sim 9$  月,占年降水量的  $80\%$  以上,年平均蒸发量为  $1972$  mm。研究区四季分明,春季干燥多风,夏季炎热多雨,秋季温和凉爽,冬季寒冷寡照、少雨雪。区内土壤类型主要为潮褐土

和石灰性褐土。

### 1.2 研究方法

**1.2.1 样品采集及预处理** 选取具有约 50 年污灌历史的耕地为采样点( $37^{\circ}58'00.0\text{N}$ ,  $114^{\circ}31'41.1\text{E}$ ),以污灌区附近地下水灌溉的耕地为对照点( $37^{\circ}57'36.4\text{N}$ ,  $114^{\circ}32'30.3\text{E}$ )。研究区土壤样品的采集分为原状土柱和扰动土样的采集。采集原状土柱的器材为 PVC 硬质管(配有管盖),其长为  $40$  cm,内径为  $10.5$  cm,壁厚为  $0.25$  cm。利用胶质锤将 PVC 管敲入土壤中采集原状土柱,采集深度为  $40$  cm,每个采样点随机采取 5 个重复样,采集后用盖子密封后保存,以供 CT 扫描进行孔隙指标的测试。将一根已知直径( $0.3$  mm)的不锈钢条插入已采集的原状土柱中,制作成一个已知直径的大孔隙。采集扰动土样的器材为洛阳铲,每个采样点取 3 个重复样,以  $0 \sim 20$  cm、 $20 \sim 40$  cm 分层采样,每个重复采用 S 形布点法采集 6 个样点组成一个混合样。土样混合后装入无菌封口塑料袋内。将土样带回实验室,剔除可见的动植物残体后于室内自然风干、研磨、过  $1$  mm 筛,以供土壤理化指标分析。供试土壤的基本理化性质如表 1 所示,灌溉污水和地下水的基本性质如表 2 所示。

**1.2.2 土壤孔隙特征的测定** CT 扫描试验在长江科学院水利部岩土力学与工程重点实验室完成。CT 扫描仪型号为德国 Siemens Somatom Sensation 40。CT 扫描仪的主要参数:峰值电压为  $120$  kV,电流为  $300$  mA,扫描时间  $1$  s。土柱扫描从顶端每隔  $0.7$  mm 扫描一个横截面,每个原状土柱经扫描后共计得到  $533$  副横断面图像。CT 图像是由一定数目从黑到白不同灰度的像素按矩阵排列所构成,图像格式为 BMP 位图。根据 CT 扫描仪的精度,本试验中所能辨别的最小当量孔径为  $0.26$  mm。

CT 扫描图像分析采用 Photoshop CS3 软件和 Arc/Info 10.0 软件处理完成,其分析处理过程见图 1。将 CT 扫描图像(图 1a)输入 Photoshop CS3 软件后,选择“阈值”命令,设定一个阈值,将图像转换成只有黑白 2 种色调的灰白图像(图 1b)。阈值是通过以下方法确定的:对含有已知大小孔隙的土柱进行 CT 扫描,然后设定一个阈值,进行图像分析,计算孔隙大小,并与已知孔隙大小进行比对,如相差过大,再重新设定一个阈值进行计算比较,直到相差值与已知值的比值小于  $1\%$  为止。通过上述方法确定本试验的阈值为  $70$ 。将处理后的灰白图像以 BMP 位图输出,并将其导入 Arc/Info 10.0 软件中。在

表 1 不同灌区土壤的基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of soils irrigated with sewage and groundwater

灌区	层位(cm)	pH	电导 ( $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ )	有机质 ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	$\text{Na}^+$ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	$\text{Ca}^{2+}$ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	CEC ( $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	粘粒 ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )
污灌区	0~20	8.13	286	24.58	36.23	13.22	14.65	405
	20~40	8.19	293	11.60	32.50	20.17	13.33	345
对照点	0~20	8.16	173	19.10	11.09	23.09	14.79	349
	20~40	8.59	206	8.99	14.44	24.62	15.10	342

注:CEC. 阳离子交换量(cation exchange capacity).

表 2 灌溉污水和灌溉地下水的基本性质

Table 2 Characteristics of sewage effluents and groundwater used for irrigation of agricultural soils

	pH	电导 ( $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ )	SS ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	有机碳 ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	$\text{Na}^+$ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	$\text{Ca}^{2+}$ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	$\text{Mg}^{2+}$ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	SAR
污水	7.7	1 599	293	136.9	162.5	107.7	30.6	3.5
地下水	7.2	1 347	ND	16.7	46.2	139.8	52.9	0.8

注:SS. 悬浮物(Suspended solids);SAR. 钠吸附比(sodium adsorption ratio);ND. 未检测(not detected).

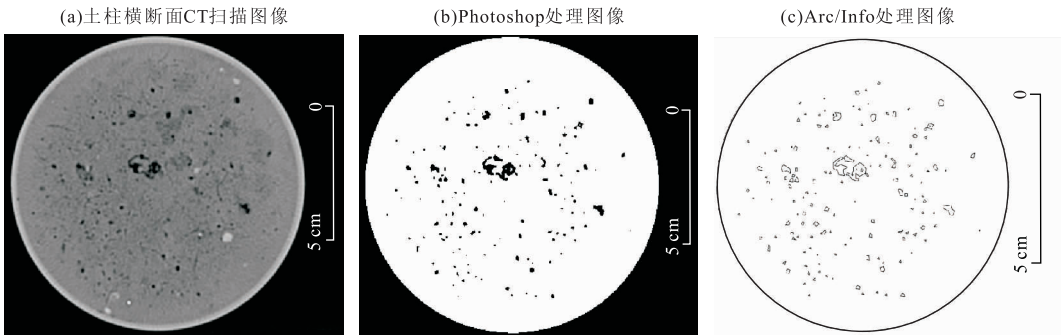


图 1 图像分析过程

Fig. 1 Process of CT image analysis

Arc/Info 10.0 软件中经过栅格—矢量转换、图像编辑和统计分析后可输出 BMP 格式的位图(图 1c)和 DBASE 格式的孔隙参数统计表,孔隙参数主要包括孔隙的数目、面积和周长。

本试验中孔隙结果可分为粗孔隙(当量直径为 0.26~1.00 mm)和大孔隙(当量直径 $\geq 1.00$  mm)。CT 扫描测定的总孔隙数为粗孔隙数和大孔隙数之和,粗孔隙度和大孔隙度分别为粗孔隙和大孔隙的面积所占图像面积的百分数,总孔隙度为粗孔隙度和大孔隙度之和。孔隙成圆率的计算公式为:孔隙成圆率 $=4\pi \times$ 孔隙面积/周长<sup>2</sup>。成圆率是常用来表示孔隙形态特征参数之一,成圆率数值越接近于 1,表示孔隙形态越接近于圆,若孔隙面积相同而孔隙周长越不规则,成圆率则越小。由于原状土柱两端可能在采集、运输和保存等过程中受到扰动而影响试验结果,因此本文只统计 5~35 cm 层位上的孔隙数据。方差分析采用 SPSS 13.0 软件处理。

### 1.2.3 土壤基本理化性质及水样的测定方法 土

壤 pH、EC、颗粒组成、有机质、 $\text{Na}^+$  和  $\text{Ca}^{2+}$ 、阳离子交换量的测定分别采用电位法、电导仪法、密度计法、重铬酸钾容量氧化—外加热法、电感耦合等离子体发射光谱法、乙酸铵交换—蒸馏滴定法(鲍士旦, 2000; 鲁如坤, 2000)。水体 pH、电导、SS 和有机碳的测定分别采用 pH 计、电导率仪、烘干法和燃烧氧化—红外吸收法; $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  的测定均采用电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-AES)(国家环境保护总局, 2002)。

**1.2.4 室内模拟实验设计** 野外采集的原状土柱经 CT 扫描完成后,开始室内土柱模拟试验工作,并在试验结束后再次利用 CT 扫描仪测试孔隙参数。通过模拟试验,模拟悬浮液、盐液营养液和营养液灌溉 3 种情景下,土壤孔隙参数在灌溉前、后的变化特征。试验历时 59 d,试验条件设置如下:(1)模拟污水的水质:悬浮液为 1 g/L 滑石粉,盐液为 10 g/L NaCl,营养液为 15 g/L 蔗糖、1.8 g/L  $\text{KNO}_3$ 、1 g/L NaCl。(2)模拟灌溉的过程:为模拟田间污水有压入渗

过程,在室内始终维持土柱上端积一定厚度的水量。

## 2 结果与分析

### 2.1 污水灌溉区土壤孔隙特征

实验测得的污灌区与对照区土壤孔隙特征见表 3。

从表 3 可以看出,在剖面上,污灌区与对照点土壤总孔隙数、大孔隙数、粗孔隙数、总孔隙度、大孔隙度和粗孔隙度均呈现出相同的分布特征:上层(0~20 cm)显著高于下层(20~40 cm)。与对照点相比,污水灌溉区上层(0~20 cm)土壤总孔隙数和大孔隙数均显著较高( $p < 0.05$ ),而粗孔隙数、总孔隙度、大孔隙度和粗孔隙度均无显著的变化特征( $p > 0.05$ );下层(20~40 cm)土壤总孔隙数、大孔隙数、粗孔隙数、总孔隙度、大孔隙度和粗孔隙度均显著较低。可见,灌区土壤中孔隙数量以粗孔隙数为多,而孔隙度以大孔隙度为高;污水灌溉使上层土壤总孔隙数和大孔隙数升高了,而降低了下层土壤总孔隙数、大孔隙数、粗孔隙数、总孔隙度、大孔隙度和粗孔隙度。

### 2.2 模拟悬浮液灌溉条件下土壤孔隙变化特征

实验测得的模拟悬浮液灌溉条件下污灌区与对照区土壤孔隙变化特征分别见表 4 和表 5。

从表 4 可以看出,与灌前相比,灌后污灌区上层(0~20 cm)土壤总孔隙数、粗孔隙数和粗孔隙度均显著升高( $p < 0.05$ ),而总孔隙度、大孔隙度和孔隙成圆率均显著降低( $p < 0.05$ );下层(20~40 cm)土壤粗孔隙数显著升高,而成圆率显著降低。可见,模拟污灌情景下,悬浮液灌溉使污灌区上层土壤总孔隙数、粗孔隙数、粗孔隙度和下层土壤粗孔隙数升高了,而降低了上、下层土壤孔隙成圆率和上层土壤总孔隙度、大孔隙度。

从表 5 可以看出,与灌前相比,灌后对照点上层(0~20 cm)土壤总孔隙数、粗孔隙数和粗孔隙度均显著升高( $p < 0.05$ ),而总孔隙度和大孔隙度均显

著降低( $p < 0.05$ );下层(20~40 cm)土壤粗孔隙数显著升高,而大孔隙数、总孔隙度、大孔隙度和成圆率均显著降低。可见,模拟污灌情景下,悬浮液灌溉使对照点上层土壤总孔隙数、粗孔隙数、粗孔隙度和下层土壤粗孔隙数升高了,而降低了上、下层土壤总孔隙度、大孔隙度和下层土壤大孔隙数、孔隙成圆率。

### 2.3 模拟盐液灌溉条件下土壤孔隙变化特征

实验测得的模拟盐液灌溉条件下污灌区与对照区土壤孔隙变化特征分别见表 6 和表 7。

从表 6 可以看出,与灌前相比,灌后污灌区上层(0~20 cm)土壤总孔隙数、粗孔隙数和粗孔隙度显著升高( $p < 0.05$ ),而成圆率显著降低( $p < 0.05$ );下层(20~40 cm)土壤成圆率显著降低,而其他孔隙指标均无显著的变化特征( $p > 0.05$ )。可见,模拟污灌情景下,盐液灌溉使污灌区上层土壤总孔隙数、粗孔隙数和粗孔隙度升高了,而降低了上、下层土壤孔隙成圆率。

从表 7 可以看出,与灌前相比,灌后对照点上层(0~20 cm)土壤总孔隙数、粗孔隙数和粗孔隙度显著升高( $p < 0.05$ ),而成圆率显著降低( $p < 0.05$ );下层(20~40 cm)土壤总孔隙数、粗孔隙数和粗孔隙度显著升高,而大孔隙度和成圆率显著降低。可见,模拟污灌情景下,盐液灌溉使对照点上、下层土壤总孔隙数、粗孔隙数和粗孔隙度升高,而降低了下层土壤大孔隙度和上、下层土壤孔隙成圆率。

### 2.4 模拟营养液灌溉条件下土壤孔隙变化特征

实验测得的模拟营养液灌溉条件下污灌区与对照区土壤孔隙变化特征分别见表 8 和表 9。

从表 8 可以看出,与灌前相比,灌后污灌区上层(0~20 cm)土壤总孔隙数、大孔隙数、粗孔隙数和粗孔隙度均显著升高( $p < 0.05$ ),而成圆率显著降低;下层(20~40 cm)土壤所有孔隙指标均无显著的变化特征( $p > 0.05$ )。可见,模拟污灌情景下,营养液灌溉使污灌区上层土壤总孔隙数、大孔隙数、粗孔隙数和粗孔隙度升高了,而降低了上层土壤孔隙成圆率。

表3 不同灌区土壤中孔隙参数统计均值

Table 3 Average numbers of soil pores attributes in the different irrigated fields

灌区	层位(cm)	孔隙数			孔隙度(%)			成圆率
		总孔隙数	大孔隙数	粗孔隙数	总孔隙度	大孔隙度	粗孔隙度	
污灌区	0~20	106a	48a	58a	2.72a	2.52a	0.21a	0.658b
	20~40	39d	14d	24c	0.51c	0.42c	0.09c	0.659b
对照点	0~20	93b	39b	54a	2.34a	2.15a	0.19a	0.645a
	20~40	70c	28c	42b	1.35b	1.20b	0.15b	0.656b

注:多重比较中,同一列数值后的不同字母代表同一测定指标在0.05水平上差异显著;表4~表9同。

表 4 悬浮液灌溉条件下污灌区土壤中孔隙参数统计均值

Table 4 Average numbers of pores attributes in sewage irrigated soils under the condition of irrigation with suspension

灌区	层位(cm)	孔隙数			孔隙度(%)			成圆率
		总孔隙数	大孔隙数	粗孔隙数	总孔隙度	大孔隙度	粗孔隙度	
污灌区	0~20	120b	61a	59b	3.17a	2.96a	0.21b	0.659b
	20~40	41c	18b	23d	0.60c	0.51c	0.08c	0.672a
对照点	0~20	161a	54a	107a	2.14b	1.79b	0.34a	0.638c
	20~40	54c	16b	37c	0.48c	0.36c	0.12c	0.648bc

表 5 悬浮液灌溉条件下对照点土壤中孔隙参数统计均值

Table 5 Average numbers of pores attributes in groundwater irrigated soils under the condition of irrigation with suspension

灌区	层位(cm)	孔隙数			孔隙度(%)			成圆率
		总孔隙数	大孔隙数	粗孔隙数	总孔隙度	大孔隙度	粗孔隙度	
污灌区	0~20	94b	41a	53c	2.70a	2.51a	0.18b	0.636ab
	20~40	94b	39a	54c	1.97b	1.78b	0.20b	0.645a
对照点	0~20	136a	42a	95a	2.00b	1.69b	0.31a	0.625b
	20~40	95b	23b	73b	1.08c	0.84c	0.24b	0.630b

表 6 盐液灌溉条件下污灌区土壤中孔隙参数统计均值

Table 6 Average numbers of pores attributes in sewage irrigated soils under the condition of irrigation with salt solution

灌区	层位(cm)	孔隙数			孔隙度(%)			成圆率
		总孔隙数	大孔隙数	粗孔隙数	总孔隙度	大孔隙度	粗孔隙度	
污灌区	0~20	88b	37a	51b	1.96a	1.78a	0.18b	0.654a
	20~40	26c	9b	17c	0.33b	0.26b	0.06c	0.656a
对照点	0~20	129a	36a	93a	1.65a	1.37a	0.28a	0.626b
	20~40	33c	7b	26c	0.24b	0.16b	0.08c	0.638b

表 7 盐液灌溉条件下对照点土壤中孔隙参数统计均值

Table 7 Average numbers of pores attributes in groundwater irrigated soils under the condition of irrigation with salt solution

灌区	层位(cm)	孔隙数			孔隙度(%)			成圆率
		总孔隙数	大孔隙数	粗孔隙数	总孔隙度	大孔隙度	粗孔隙度	
污灌区	0~20	91bc	36a	55b	2.02a	1.82a	0.20bc	0.641b
	20~40	80c	31ab	50b	1.54ab	1.36a	0.17c	0.658a
对照点	0~20	119a	36a	83a	1.85a	1.59a	0.26a	0.621c
	20~40	101ab	27b	74a	1.03b	0.80b	0.23ab	0.633b

表 8 营养液灌溉条件下污灌区土壤中孔隙参数统计均值

Table 8 Average numbers of soil pores attributes in sewage irrigated soils under the condition of irrigation with nutrient solution

灌区	层位(cm)	孔隙数			孔隙度(%)			成圆率
		总孔隙数	大孔隙数	粗孔隙数	总孔隙度	大孔隙度	粗孔隙度	
污灌区	0~20	112b	47b	65b	3.05a	2.81a	0.23b	0.661a
	20~40	48c	16c	32c	0.60b	0.49b	0.11c	0.651ab
对照点	0~20	175a	59a	116a	2.93a	2.55a	0.37a	0.627c
	20~40	57c	19c	39c	0.80b	0.67b	0.13c	0.642b

表 9 营养液灌溉条件下对照点土壤中孔隙参数统计均值

Table 9 Average numbers of soil pores attributes in groundwater irrigated soils under the condition of irrigation with nutrient solution

灌区	层位(cm)	孔隙数			孔隙度(%)			成圆率
		总孔隙数	大孔隙数	粗孔隙数	总孔隙度	大孔隙度	粗孔隙度	
污灌区	0~20	93b	40b	53b	2.30a	2.12a	0.19b	0.660a
	20~40	36d	15c	22c	0.53b	0.46b	0.07c	0.666a
对照点	0~20	177a	57a	120a	2.70a	2.30a	0.40a	0.630b
	20~40	66c	18c	48b	0.79b	0.64b	0.15b	0.639b

从表 9 可以看出,与灌前相比,灌后对照点上层(0~20 cm)土壤总孔隙数、大孔隙数、粗孔隙数和粗孔隙度均显著升高( $p < 0.05$ ),而成圆率显著降低;下层(20~40 cm)土壤总孔隙数、粗孔隙数和粗孔隙度显著升高,而成圆率显著降低。可见,模拟污灌情景下,营养液灌溉使对照点上、下层土壤总孔隙数、粗孔隙数和粗孔隙度和上层土壤大孔隙数升高了,而降低了上、下层土壤孔隙成圆率。

### 3 讨论

灌溉污水的性质对土壤结构、入渗和灌溉效率具有潜在的重要影响(Emdad *et al.*, 2004),尤其是污水中输入的悬浮物、盐分和营养物质对土壤孔隙结构产生了深刻影响,这主要表现在:(1)污水中的悬浮物堵塞了土壤孔隙;(2)高 SAR(sodium adsorption ratio)的污水增强了土壤的膨胀和粘粒的分散;(3)外源有机营养物质的输入导致土壤微生物的增殖从而阻塞孔隙(Halliwel *et al.*, 2001; Lado and Ben-Hur, 2009)。李恋卿等(2001)研究发现,随着污灌年限的递增,土壤孔隙度呈递减趋势,容重呈递增趋势。Wang *et al.* (2003)研究发现,长期的污水灌溉造成土壤孔隙度降低。Emdad *et al.* (2004)研究了灌溉水质(3种处理: SAR=0.9, 10.0和30.0)对土壤结构的影响。结果表明,中、高 SAR的灌溉水会导致土壤团聚体稳定性降低和容重增加。本文野外的取样研究结果表明,污灌对土壤孔隙指标产生了显著的影响。污水灌溉使上层土壤总孔隙数和大孔隙数升高了,而降低了下层土壤总孔隙数、大孔隙数、粗孔隙数、总孔隙度、大孔隙度和粗孔隙度。

污水中的悬浮物、盐分和营养物等物质直接输入表层土壤,从而对表层土壤的物理、化学和生物性质影响最为直接和剧烈。Yadav *et al.* (2002)研究了污灌区土壤氮、磷、钾、锌、铜、锰、铅、铁、铬、镉和镍等元素在 0~60 cm 土层中的空间分布特征,结果表

明上述元素在垂向上主要富集在土壤 0~30 cm 土层上。本文野外的取样研究结果表明,污灌区上层土壤总孔隙数和大孔隙数发生了显著变化,而下层土壤总孔隙数、大孔隙数、粗孔隙数、总孔隙度、大孔隙度和粗孔隙度均发生了显著变化。表明污灌对下层土壤孔隙的影响强度要高于上层。室内的模拟试验结果表明,以污灌区土壤为例,在悬浮液灌溉条件下,灌溉前后上层土壤总孔隙数、总孔隙度、大孔隙度和粗孔隙度均存在显著差异性,而下层土壤无显著差异性;在盐液灌溉条件下,灌溉前后上层土壤总孔隙数、粗孔隙数和粗孔隙度均存在显著差异性,而下层土壤无显著差异性,表明悬浮液和盐液灌溉条件下上层土壤孔隙的响应强度要高于下层。可见,对于不同层位土壤孔隙指标对污灌的响应强度来说,野外和室内模拟结果出现差异性。分析其原因应该为室内模拟结果仅代表单一性质污水和较短时间尺度内的影响效应,而野外取样研究结果不仅是综合性复杂污水的长期影响效应,而且野外田间表层土壤结构还会受到耕作等人为因素的影响。

室内的模拟试验结果表明,在悬浮液和盐液 2 种不同性质的污水灌溉下,无论是污灌区土壤还是对照点土壤,土壤孔隙变化特征具有共性,同时也具有差异性。共性之处在于:土壤孔隙均表现出土壤总孔隙数、粗孔隙数和粗孔隙度有所升高,而大孔隙数、总孔隙度、大孔隙度和孔隙成圆率有所降低。造成上述结果的原因可能是在灌溉条件下,由于水化作用产生的膨胀和闭塞空气的爆裂使团聚体破坏,导致土壤粗孔隙数和粗孔隙度升高,同时由于悬浮物的输入对土壤大孔隙产生了一定的堵塞作用,钠离子的输入引起土壤粘粒的分散,因此导致土壤大孔隙数和大孔隙度的降低以及孔隙形态变差。差异之处在于:悬浮液灌溉条件下上层土壤总孔隙度和大孔隙度均显著降低,而盐液灌溉条件下上层土壤总孔隙度和大孔隙度均无显著的变化特征。表明对于研究区土壤来说,悬浮液灌溉的影响效应要强于盐液灌溉,这是因为研究区土壤质地为粘质土壤



(表 1),  $\text{Ca}^{2+}$  含量和阳离子交换量较高, 而二价交换性  $\text{Ca}^{2+}$  可以使土壤粘粒絮凝, 从而弱化了  $\text{Na}^+$  引起的粘粒分散效应. 与上述 2 种污水灌溉情景相比, 在营养液灌溉条件下土壤孔隙指标的变化特征具有较大的差异性. 无论是污灌区土壤还是对照点土壤, 土壤总孔隙数、大孔隙数、粗孔隙数和粗孔隙度均有所升高, 而土壤孔隙成圆率有所降低. 表明灌溉条件下的水化作用导致土壤粗孔隙增多, 而营养物的输入改变了土壤颗粒的表面特性, 导致土壤孔隙数增大以及孔隙形态变差.

在同种性质的污水灌溉条件下, 污灌区土壤和对照点土壤孔隙变化特征具有共性, 同时也具有差异性. 以悬浮液灌溉为例, 共性之处在于: 上层土壤总孔隙数、粗孔隙数、粗孔隙度和下层土壤粗孔隙数均显著升高, 下层土壤孔隙成圆率均显著降低; 差异之处在于: 对照点下层土壤大孔隙数、总孔隙度和大孔隙度均显著降低, 而污灌区土壤并无显著的变化特征. 以盐液灌溉为例, 共性之处在于: 上层土壤总孔隙数、粗孔隙数和粗孔隙度均显著升高, 上、下层土壤孔隙成圆率均显著降低; 差异之处在于: 对照点上层土壤总孔隙数、粗孔隙数和粗孔隙度均显著升高以及下层土壤大孔隙度显著降低, 而污灌区土壤并无显著的变化特征. 以营养液灌溉为例, 共性之处在于: 上层土壤总孔隙数、大孔隙数、粗孔隙数和粗孔隙度均显著升高, 上层土壤孔隙成圆率均显著降低; 差异之处在于: 对照点下层土壤总孔隙数、粗孔隙数和粗孔隙度均显著升高以及下层土壤成圆率显著降低, 而污灌区土壤并无显著的变化特征. 可见, 对于同种性质的污水灌溉来说, 对照点土壤孔隙对污灌的响应强度要大于污灌区土壤, 这可能是因为污灌区土壤由于长期的污水灌溉使土壤有机质增多(表 1), 而土壤有机质是团聚体形成的重要胶结物质, 通过有机质中不同组分的作用, 土壤中的颗粒或团聚体进行胶结, 改变了土壤的固体形态, 从而对土壤孔隙的变化具有重要影响.

## 4 结论

(1) 与对照点相比, 污水灌溉区上层土壤总孔隙数和大孔隙数(当量直径  $\geq 1.00 \text{ mm}$ ) 均显著升高, 而下层土壤总孔隙数、大孔隙数、粗孔隙数(当量直径为  $0.26 \sim 1.00 \text{ mm}$ )、总孔隙度、大孔隙度和粗孔隙度均显著降低( $p < 0.05$ ).

(2) 在模拟悬浮液和盐液灌溉条件下, 土壤总孔

隙数、粗孔隙数和粗孔隙度均有所增加, 而大孔隙数、总孔隙度、大孔隙度和孔隙成圆率均有所降低; 在模拟营养液灌溉条件下, 土壤总孔隙数、大孔隙数、粗孔隙数和粗孔隙度均有所增加, 而孔隙成圆率有所降低.

(3) 对于研究区土壤来说, 悬浮液灌溉对土壤孔隙的影响效应强于盐液灌溉.

(4) 对于同种性质的污水灌溉来说, 污灌对对照点土壤孔隙的影响效应强于污灌区土壤.

(5) 上述特征反映了污水灌溉对土壤孔隙具有复杂而深刻的影响效应.

## References

- Al-Subu, M. M., Haddad, M., Mizyed, N., et al., 2003. Impacts of Irrigation with Water Containing Heavy Metals on Soil and Groundwater— A Simulation Study. *Water, Air and Soil Pollution*, 146(1–4): 141–152. doi: 10.1023/A:1023995119824
- Alvarez-Bernal, D., Contreras-Ramos, S. M., Trujillo-Tapia, N., et al., 2006. Effects of Tanneries Wastewater on Chemical and Biological Soil Characteristics. *Applied Soil Ecology*, 33(3): 269–277. doi: 10.1016/j.apsoil.2005.10.007
- Bao, S. D., 2000. Soil Agro-Chemical Analysis. The Third Edition. China Agricultural Press, Beijing, 188–193 (in Chinese).
- Emdad, M. R., Raine, S. R., Smith, R. J., 2004. Effect of Water Quality on Soil Structure and Infiltration under Furrow Irrigation. *Irrigation Science*, 23(2): 55–60. doi: 10.1007/s00271-004-0093-y
- Feng, J., Hao, Z. C., 2002. Distribution of Soil Macropores Characterized by CT. *Advances in Water Science*, 13(5): 611–617 (in Chinese with English abstract).
- Gao, C. X., Xue, X. X., Zhao, J. N., et al., 2014. Review on Macropore Flow in Soil. *Acta Ecologica Sinica*, 34(11): 2801–2811 (in Chinese with English abstract).
- Gharaibeh, M. A., Eltaif, N. I., Al-Abdullah, B., 2007. Impact of Field Application of Treated Wastewater on Hydraulic Properties of Vertisols. *Water, Air and Soil Pollution*, 184: 347–353. doi: 10.1007/s11270-007-9423-z
- Halliwell, D. J., Barlow, K. M., Nash, D. M., 2001. A Review of the Effects of Wastewater Sodium on Soil Physical Properties and Their Implications for Irrigation Systems. *Australian Journal of Soil Research*, 39: 1259–1267.
- Huang, G. X., Sun, J. C., Zhang, Y., et al., 2011. Distribution of Arsenic in Sewage Irrigation Area of Pearl River

- Delta, China. *Journal of Earth Science*, 22(3): 396—410. doi:10.1007/s12583-011-0192-7
- Lado, M., Ben-Hur, M., 2009. Treated Domestic Sewage Irrigation Effects on Soil Hydraulic Properties in Arid and Semi-arid Zones: A Review. *Soil & Tillage Research*, 106(1): 152—163. doi:10.1016/j.still.2009.04.011
- Li, F. H., Huang, G. H., Ding, Y., et al., 2006. Effects of Soil Sodicity, Gypsum Application, and Filtration Disposal on Hydraulic Conductivity under Irrigation with Domestic Effluent Water. *Transactions of the CSAE*, 22(1): 48—52 (in Chinese with English abstract).
- Li, L. Q., Du, H. L., Feng, L. R., et al., 2001. Study on Properties of Physics and Chemistry of Cinnamon Soil with Wastewater Irrigation. *Journal of Shanxi Agricultural University*, 21(1): 73—75 (in Chinese with English abstract).
- Lu, R. K., 2000. Chemical Analysis Methods of Agricultural Soil. China Agricultural Science and Technology Press, Beijing, 22—169 (in Chinese).
- Magesan, G. N., Williamson, J. C., Yates, G. W., et al., 2000. Wastewater C:N Ratio Effects on Soil Hydraulic Conductivity and Potential Mechanisms for Recovery. *Bioresource Technology*, 71: 21—27.
- Nunan, N., Ritz, K., Rivers, M., et al., 2006. Investigating Microbial Micro-Habitat Structure Using X-Ray Computed Tomography. *Geoderma*, 133(3—4): 398—407. doi:10.1016/j.geoderma.2005.08.004
- Sander, T., Gerke, H. H., Rogasik, H., 2008. Assessment of Chinese Paddy-Soil Structure Using X-Ray Computed Tomography. *Geoderma*, 145(3—4): 303—314. doi:10.1016/j.geoderma.2008.03.024
- State Bureau of Environmental Protection, 2002. Water and Wastewater Monitoring Analysis Method (the Forth Edition). China Environmental Science Press, Beijing, 102—415 (in Chinese).
- Wang, Z., Chang, A. C., Wu, L., et al., 2003. Assessing the Soil Quality of Long-Term Reclaimed Wastewater-Irrigated Cropland. *Geoderma*, 114(3—4): 261—278. doi:10.1016/S0016-7601(03)00044-2
- Xia, J. B., Liu, Q., Xie, W. J., et al., 2009. Effect of Wastewater Irrigation on Soil Hydrological Properties in Reed Marsh. *Transactions of the CSAE*, 25(12): 63—68 (in Chinese with English abstract).
- Yadav, R. K., Goyal, B., Sharma, R. K., et al., 2002. Post-Irrigation Impact of Domestic Sewage Effluent on Composition of Soils, Crops and Ground Water—A Case Study. *Environment International*, 28(6): 481—486. doi:10.1016/S0160-4120(02)00070-3
- Yang, J., Zheng, Y. M., Chen, T. B., et al., 2006. Leaching of Heavy Metals in Soil Column under Irrigation Reclaimed Water: A Simulation Experiment. *Geographical Research*, 25(3): 449—456 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, S. W., Zhao, Y. G., Wu, J., S., 2010. Quantitative Analysis of Soil Pores under Natural Vegetation Successions on the Loess Plateau. *Science in China (Series D)*, 40(2): 223—231 (in Chinese).

### 附中文参考文献

- 鲍士旦, 2000. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 188—193.
- 冯杰, 郝振纯, 2002. CT 扫描确定土壤大孔隙分布. 水科学进展, 13(5): 611—617.
- 高朝侯, 徐学选, 赵娇娜, 等, 2014. 土壤大孔隙流研究现状与发展趋势. 生态学报, 34(11): 2801—2811.
- 李法虎, 黄冠华, 丁贇, 等, 2006. 污灌条件下土壤碱度、石膏施用以及污水过滤处理对水力传导度的影响. 农业工程学报, 22(1): 48—52.
- 李恋卿, 杜慧玲, 冯两蕊, 等, 2001. 不同年限污水灌溉对石灰性褐土理化性质的影响. 山西农业大学学报, 21(1): 73—75.
- 鲁如坤, 2000. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 22—169.
- 国家环境保护总局, 2002. 水和废水监测分析方法(第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 102—415.
- 夏江宝, 刘庆, 谢文军, 等, 2009. 废水灌溉对芦苇地土壤水文特征的影响. 农业工程学报, 25(12): 63—68.
- 杨军, 郑袁明, 陈同斌, 等, 2006. 中水灌溉下重金属在土壤中的垂直迁移及其对地下水的污染风险. 地理研究, 25(3): 449—456.
- 赵世伟, 赵勇刚, 吴金水, 2010. 黄土高原植被演替下土壤孔隙的定量分析. 中国科学(D辑), 40(2): 223—231.