

有机污染型灌溉水对土壤团聚体的影响*

李霄云 王益权[†] 孙慧敏 徐海 王永健 徐爽

(西北农林科技大学资源与环境学院, 陕西杨凌 712100)

摘要 为了评估灌溉水中有机污染物对农田土壤物理状态的影响, 本研究以长期采用有机污染型水体灌溉的陕西交口灌区农田土壤为研究对象, 以气候条件、土壤条件以及耕作制度基本一致, 长期采用未污染的地下水灌溉的农田土壤为对照, 分别用干筛和湿筛法测定了土壤团聚体和微团聚体组成等, 分析了优势团聚体的变化情况。结果表明: 长期采用有机污染水灌溉明显降低土壤中大于 10 mm 大团聚体和小于 0.25 mm 微团聚体的含量, 显著增加了直径为 1~5 mm 范围内“(质量)优势团聚体”的含量; 水稳性团聚体与土壤有机质含量呈显著正相关, 而与机械组成的相关系数未达到显著水平; 有机污染型水体灌溉可以显著改善微团聚体的特性, 增大了土壤团聚度, 降低其分散系数, 从而改善了土壤结构状况。综合试验结果证明, 灌溉水中的有机污染物质有助于显著地改善土壤结构状况和特性。

关键词 有机污染; 土壤团聚体组成; 优势团聚体; 团聚体破坏率

中图分类号 S152.3⁺²; S152.4 **文献标识码** A

20 世纪 80 年代以来, 随着工业化、城市化和农业现代化进程的加快, 灌溉用水不断被工业和城市生活用水所挤占, 水资源“农转非”成为必然, 因此缺水、水污染和农业用水效率偏低等问题日趋严重, 污水灌溉已经成为缓解农业缺水的一个重要途径。

然而, 近些年灌溉水体中有机物的种类与含量对土壤质量的综合效应成为环境科学家、土壤学家及水资源学家共同关注的科学问题。有学者研究了灌溉水质对土壤养分平衡的影响及土壤有机碳组成的影响等^[1], 而灌溉水质中有机污染物对土壤物理性状的影响研究的还不够。有研究已经表明, 土壤有机质(SOM)是影响土壤团聚体状况的最主要因素, 有机质含量与土壤质量存在着正相关关系^[2], 与土壤物理性质自然有着密不可分的关系。反之, 团聚体又是 SOM 保持的场所, 对固碳和肥力均十分重要, 即腐殖质既是形成稳定性团聚体的胶结物质, 也是主要的固碳物质^[3]。近些年来, 人们逐渐认识到受物理保护的 SOM 在固碳和肥力上有重要作用, 而且对农业措施和短期试验响应比较敏感^[4-9], 但从土壤团聚状况与污染水体中有机物的相关方面研究还较少。

关中地区不仅是陕西省同样也是我国主要粮食产区之一, 其中渭河为该区域农业发展提供着较为充足的灌水资源。然而, 从 20 世纪 90 年代以来, 哺育了关中文明的渭河却集纳了陕西 80% 以上的污水, 被人们戏称为关中黑色“下水道”。蔡明等^[10]研究表明, 按污染物种类划分, 渭河属于有机型污染水体, 以化学需氧量(COD)、五日生化需氧量(BOD₅)、氨氮和酚污染较为严重。李群等^[11]

* 农业部科技教育司“苹果园沼肥应用技术与示范”(编号 K312021012) 资助

[†] 通讯作者: 王益权(1957—), 男, 陕西旬邑人, 教授, 博士生导师, 从事土壤物理及改良方面的教学与研究工
作。E-mail: soilphysics@163.com

作者简介: 李霄云(1985—), 女, 陕西榆林人, 博士研究生, 研究方向为农业环境保护与食品安全。E-mail:
lixiaoyun518@163.com

收稿日期: 2010-11-08; 收到修改稿日期: 2011-03-30

研究也表明,渭河下游水体中有机污染严重,且年度变化呈上升趋势。即使如此,关中的宝鸡峡灌区和交口灌区还不得不长期使用被污染的渭河水进行农田灌溉,使得土壤每年要接纳不少河水有机污染物,同时也必然会给土壤输入了一定量的有机碳源,导致土壤有机质的容量、组成和分解能力均发生了不同程度的变化。然而,前人的研究多数是在实验室的条件下,有目标的进行土壤改性研究工作,对于自然环境条件下,长期有机污染水体(各类有机污染物混合体)灌溉对土壤团聚性质的影响和由此而产生的效应却关注较少。因此,本研究就自然条件下长期有机污染水体灌溉对土壤团聚效应方面的影响进行了探讨,结果将为合理开发、利用水资源,缓解水资源危机,改善土壤结构,提高土壤生产力和土壤固碳效应提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 灌区基本情况

交口抽渭灌区位于陕西省关中平原东部的渭河下游,1960年修建,是一个以渭河为灌溉水源、灌排并举的大型多级抽水灌溉工程,灌溉着西安、渭南两市的临潼、闫良、临渭、大荔、富平、蒲城六县(区)33个乡镇的约79 800 hm²农田。对照灌区于1950年修建完工通水,一直以无污染的地下水为灌溉水源,灌溉着蒲城、大荔一带地方的部分乡镇约33 607 hm²农田。从20世纪90年代开始,污水灌溉的生产事故在交口灌区时有发生。由于灌溉水体中所含的有机物成分复杂,且是长期的动态累积指标,难以一一分离测定。为了全面地反映水体中有机物污染状况,本实验选用COD作为反映有机物污染的因子。2008年11月通过对灌区水样进行采集测定显示,交口灌区水体的平均COD为87.8 mg L⁻¹,而对照灌区水体的平均COD为2.6 mg L⁻¹。

1.2 供试土壤

2008年11月中旬采自陕西省阎良区、渭南市的临渭区和大荔县一线,污染水灌溉土样的采样点设置在前两个区域,属于交口灌区(JK),自位于阎良区相桥镇的交口渭一级站附近农田开始,沿灌渠经石家村(JK-1)、祁孟村(JK-2)至临渭区的官道(JK-3)、大什(JK-4)、小什(JK-5)、固市(JK-6)一线,随机设置6个点采集耕层样品(0~20 cm);对照灌区(CK)土样采样点设置在大荔县羌白镇吕杨村(CK-1, CK-2, CK-3)、白村(CK-4, CK-5)一带,随机设置了5个点采集耕层土壤样品(0~20cm),该地区农田常年使用未污染的地下水灌溉。两个采样地的区域气候条件、农业耕作管理习惯和土地利用模式基本相同(长期以种植小麦为主),土壤均属于灰壤土^[12]。采集的原状土样用采集盒收集带回实验室,并将大土块按其结构轻轻剥成直径10 mm左右的团块,挑去石块、石砾和动植物残体等,放在纸上在室内风干,然后测定各采样点的土壤有机质含量和土壤颗粒组成(表1)。

表1 各采样点土壤有机质含量和土壤颗粒组成

Table 1 SOM contents and particle-size distributions of the soils at sampling points

土样	所属灌区	土壤	颗粒组成	Particle size distribution (%)
----	------	----	------	--------------------------------

代号 Soil code	Irrigation area	有机质 SOM (g kg ⁻¹)	砂粒 Sand 1~0.05 mm	粉砂粒 Silt 0.05~0.001 mm	黏粒 Clay <0.001 mm
JK-1	交口灌区	17.94	14.65	75.31	10.04
JK-2	JK irrigation	19.61	16.46	73.51	10.03
JK-3	area	19.07	13.31	76.41	10.28
JK-4		20.77	12.36	80.07	14.57
JK-5		18.37	12.66	79.46	14.88
JK-6		20.94	13.04	71.15	15.81
CK-1	对照灌区	9.72	25.95	65.19	8.86
CK-2	CK irrigation	14.02	29.28	61.27	9.45
CK-3	area	16.64	27.35	63.43	9.22
CK-4		11.98	20.95	68.17	10.88
CK-5		11.09	22.95	67.55	9.50

1.3 研究方法

土壤团聚体组成分别用干筛法和湿筛法测定。其中干筛法是在振动筛分机上进行，筛分时间为 5 min，分别通过 10 mm、7 mm、5 mm、3 mm、2 mm、1 mm、0.5 mm 和 0.25 mm 共 8 个筛级；湿筛采用 Yoder 法，分别通过 5 mm、2 mm、1 mm、0.5 mm 和 0.25 mm 共 5 个筛级；土壤微团聚体分析和土壤的机械组成采用了比重计（甲种）法和吸管法分别进行测定。在测定土壤颗粒组成时为了防止有机质和碳酸钙对沉降的影响，去除了土样中的有机质和碳酸钙。

1.4 数据处理

分别采用平均质量直径（MWD）、平均几何直径（GMD）、团聚体破坏率（PAD）、团聚度和分散系数来表示团聚体组成，结构性及其稳定性。其中，MWD 和 GMD 是反映土壤团聚体大小分布状况的常用指标，MWD 和 GMD 值越大表示团聚体的平均团聚度越高，稳定性越强。为了比较不同直径团聚体的稳定性，平均重量直径采用式（1）标准化。标准化平均当量直径（NMWD）是衡量团聚体稳定性的一个指标，其值越低，表示团聚体稳定性越小。本文所需计算公式如下^[13-16]：

$$NMWD = \frac{MWD}{r_{max} - r_{min}} \quad (1)$$

式中， r_{max} 为最大初始筛子孔径， r_{min} 为最小筛子孔径。

$$PAD = \frac{W_a - W_b}{W_a} \times 100\% \quad (2)$$

式中， W_a 、 W_b 分别为干筛和湿筛中大于某一直径级别团聚体的重量百分含量。

$$\text{团聚度}(\%) = \frac{b - a}{b} \times 100\% \quad (3)$$

$$\text{分散系数}(\%) = \frac{a'}{b'} \times 100\% \quad (4)$$

式（3）、式（4）中， a 为 >0.05 mm 微团聚体分析值； b 为 >0.05 mm 机械组成分析值； a' 为 <0.01 mm

微团聚体分析值；b'为<0.01 mm 机械组成分析值。

2 结果与分析

2.1 长期有机污染型水体灌溉对土壤团聚体组成的影响

2.1.1 对各级别土壤团聚体组成的影响 土壤团聚体是土壤肥力的重要物质基础,受到一系列土壤管理和利用措施的影响。本研究分析了长期不同灌溉水质条件下,土壤中大于 0.25 mm 团聚体的组成(见表 2),企图探明有机污染灌溉水对土壤团聚作用的影响。

表 2 是两个灌区土样在干筛和湿筛条件下团聚体大小分布的逐级别比较。在干筛条件下,交口灌区土壤大于 10 mm 大团聚体和小于 0.25 mm 微团聚体含量均小于大荔土壤,尽管大于 10 mm 团聚体的差异未达到显著水平,而小于 0.25 mm 团聚体已经达到了极显著水平。此外,交口灌区土壤中直径大于 5 mm 团聚体含量低于对照土壤,而直径在 5~0.25 mm 范围的团聚体含量却前者大于后者。在湿筛条件下,也显示出了相同趋势,表明长期采用有机污染水灌溉在一定程度上改善了土壤的结构性状,体现在不仅减少了较大团块的量,而且更明显地增加了土壤颗粒的团聚作用,尤其是显著地增加了 1~5 mm 范围内土壤团聚体的含量,且交口灌区土壤 2~0.25 mm 水稳性团聚体明显地高于对照土壤。

表 2 不同灌水处理土壤团聚体的组成状况

Table 2 Composition of soil aggregates in fields under different irrigation treatments

测定方法 Measurement methods	团聚体组成 Aggregates composition	JK	CK
干筛法 Dry sieving (%)	>10 mm	15.99	20.63
	7~10 mm	17.09	16.43
	5~7 mm	6.79	6.72
	3~5 mm	14.99**	10.98**
	2~3 mm	2.52**	1.46**
	1~2 mm	13.99*	7.55**
	0.5~1 mm	13.20*	8.90*
	0.25~0.5 mm	3.79	3.06
	>0.25 mm	88.35**	75.72**
湿筛法 Wet sieving (%)	<0.25 mm	11.65**	24.28**
	>5 mm	3.33	1.30
	2~5 mm	2.59	1.63
	1~2 mm	3.34**	1.25**
	0.5~1 mm	8.11**	3.01**
	0.25~0.5 mm	13.68**	7.11**
	>0.25 mm	31.05**	14.53**

注: * (或 **) 表示交口灌区土样与对照土样之间的差异达到显著或极显著水平 Note: * (or **) stands for significant difference at 0.05(or 0.01)level between JK soil samples and CK soil samples

2.1.2 对土壤优势团聚体的影响 良好的土壤团聚状况应该是质和量的结合，在探求团聚体总量的基础上，不同级别团聚体的大小分布状况与土壤质量的关系更为密切。威廉姆斯认为土壤中直径在 1~3 mm 的团聚体才与作物产量有很强的正相关关系^[17]，Вильямс、Соколовский 和 Саввинов 也认为团聚体直径在 1~5 mm 是最有价值的结构性团聚体^[18]，其含义并不在于它的含量占优势，而在于它的质量性状非常突出，姑且称之为“(质量)优势团聚体”。

分析两种土壤发现，(数量)优势团聚体在干筛条件下均以大于 5 mm 大团聚体为主，分别占 39.87%和 43.78%，而在湿筛过程中团聚体遭到很大破坏，大于 5 mm 团聚体含量很少，(数量)优势团聚体的直径由大变小，交口灌区土壤中(数量)优势水稳性团聚体集中在 0.25~1 mm 级别范围内，占了团聚体总量的 1/4 左右，而对照土壤仅在 1/10 左右。说明长期采用有机污染型水体灌溉，能显著地提高土壤颗粒的团聚作用，也明显改善了团聚体的稳定性，表现出了明显改善土壤结构状况的趋势。

为了进一步研究长期不同灌溉水体对土壤团聚体组成及质量的影响，采用(质量)优势团聚体的平均百分含量作为指标来对两个灌区的土壤进行分析对比。从表 2 可以得出，在干筛条件下，交口灌区土壤直径 1~5 mm 的(质量)优势团聚体的平均百分含量接近是对照土壤的 2 倍，在湿筛条件下前者水稳性团聚体的平均百分含量是后者的 2 倍还高，说明长期有机污染型水体灌溉不仅有利于 1~5 mm 直径范围的(质量)优势团聚体的形成，且其水稳性较对照土壤有明显提高。

2.1.3 对土壤微团聚体的影响 土壤中良好物理状况的建立不仅取决于大团聚体的存在，微团聚体也是不可缺少的质量元素。目前许多学者认为，对土壤微团聚体状况的研究具有更为重要的意义。本论文根据机械分析与微团聚体分析的结果(见图 1 和图 2)来比较两个灌区土壤的团聚化水平。

图 1 和图 2 是两个灌区土壤颗粒组成和微团聚体组成的累计分配曲线，土壤颗粒组成累计分配曲线与微团聚体组成累计分配曲线差异越大，说明小颗粒被团聚成微团聚体的程度越高。从图 1 和图 2 中可以看出，交口灌区土壤和对照土壤的黏粒分别被团聚为微团聚体的程度明显不同，交口灌区土壤颗粒团聚化水平明显高于对照灌区土壤。

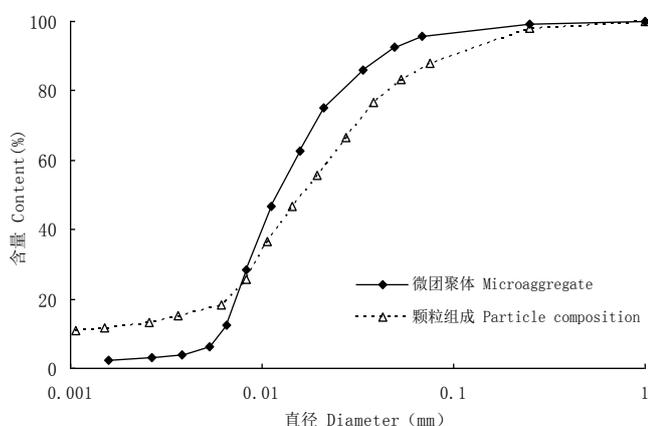


图 1 颗粒与微团聚体分配曲线(交口)
Fig.1 Distribution curves of particles and micro-aggregates(JK)

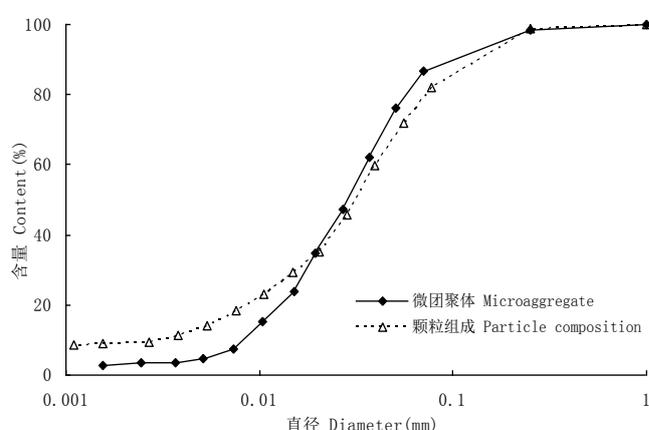


图 2 颗粒与微团聚体分配曲线(对照)
Fig.2 Distribution curves of particles and micro-aggregates(CK)

2.2 长期有机污染型水体灌溉对土壤团聚体稳定性的影响

土壤团聚体的稳定性是评价土壤结构好坏的重要指标之一，其水稳性在很大程度上依赖于土壤有机质含量。表征土壤团聚体稳定性的指标有很多，其中干筛和湿筛后大于 0.25 mm 团聚体数量越多意味着团聚体愈稳定。同一种土壤干、湿筛之间大于某一直径团聚体的差值越小意味着结构体愈稳定。表 3 显示干筛后交口灌区土壤直径大于 0.25 mm 团聚体为 88.35%，湿筛后为 31.05%；而干筛后对照土壤直径大于 0.25 mm 团聚体为 75.72%，而湿筛后仅为 14.53%，两种土壤干、湿筛之间差值很大，说明本地区土壤团聚体的稳定性普遍很差。

2.2.1 对土壤 NMWD 和 GMD 的影响 利用 NMWD 和 GMD 来比较两种灌溉处理土壤团聚体的整体状况（见表 3），发现在干筛条件下，交口灌区和对照灌区土壤中团聚体的大小差异并不显著，说明在干筛条件下整体上两种处理间土壤团聚体组成差别不大。此外，对干筛后团聚体组成逐级别地进行相互对比发现，对照灌区土壤大于 10 mm 直径的大块较多，团聚体质量较差。在湿筛条件下二者差异显然不同，NMWD 值的差异达到了显著水平，交口灌区土壤的平均 NMWD 值较大荔的高出 1 倍多，说明灌溉水体中有机污染物对于土壤的水稳性团聚体形成具有显著的促进作用。两种处理土壤的 GMD 值差异未达到显著水平，用其评价土壤团聚体质量差异显得不够灵敏，成为本论文选取以 NMWD 值为指标作为评价团聚体质量性状的依据。

表 3 不同灌水处理土壤团聚体的 NMWD 和 GMD 比较

Table 3 Comparison of NMWD with GMD of soil aggregates in fields under different irrigation treatments

土样代号 Soil code	干筛法 Dry sieving				湿筛法 Wet sieving			
	NMWD	平均 Average	GWD	平均 Average	NMWD	平均 Average	GWD	平均 Average
JK-1	0.378		2.719		0.047		1.028	
JK-2	0.499		3.003		0.052		1.024	
JK-3	0.403		2.781		0.116		1.207	
JK-4	0.447	0.459	2.846	2.897	0.162	0.105*	1.291	1.165
JK-5	0.507		3.045		0.083		1.160	
JK-6	0.518		2.991		0.168		1.300	
CK-1	0.492		2.869		0.054		1.094	
CK-2	0.528		2.978		0.045		1.056	
CK-3	0.475	0.471	2.871	2.838	0.050	0.048*	1.073	1.065
CK-4	0.473		2.746		0.058		1.110	
CK-5	0.387		2.726		0.032		0.994	

2.2.2 对土壤 PAD 的影响 土壤团聚体破坏率是常用的表征其稳定性的质量指标之一。从表 4 中可以看出，以直径大于 2 mm 团聚体为标准，其破坏率 PAD 平均值对照土壤高于交口灌区土壤，但差异不大；若以直径大于 0.25 mm 团聚体为标准，其破坏率 PAD 平均值对照土壤显著地高于交口灌区土壤。大于 0.25 mm 水稳性团聚体的平均含量，交口灌区土壤与对照土壤之间达到极显著水平，说明交口灌区土壤团聚体稳定性高于对照土壤，既显示了有机污染型水体灌溉对于土壤团聚体稳定性的作用效应，也呈现出其作用水平仅限于在直径较小的团聚体范围。

表 4 湿筛法测定土壤团聚体稳定性分析

Table 4 Stability analysis of soil aggregates with the wet-sieving method

土样代号 Soil code	>0.25mm 水稳性团聚体 >0.25mm Water-stable aggregates (%)	平均值 Average	PAD ¹⁾ (%)			
			>0.25 mm	平均值 Average	>2 mm	平均值 Average
JK-1	18.92		38.75		95.93	
JK-2	20.67		76.42		96.74	
JK-3	38.92		55.41		88.49	
JK-4	41.93	31.05**	52.63	58.52*	80.80	89.63
JK-5	25.61		72.81		93.43	
JK-6	40.26		55.11		82.39	
CK-1	16.01		79.16		94.05	
CK-2	14.93		81.51		96.35	
CK-3	15.41	14.53**	79.48	80.81*	94.45	94.79
CK-4	15.46		78.67		92.97	
CK-5	10.84		85.24		96.11	

1) PAD: 团聚体破坏率 Percentage of aggregate destruction

2.2.3 对土壤团聚度和分散系数的影响 土壤团聚度表示土壤颗粒的团聚程度，其值越大表示土壤稳定性越强；而土壤分散系数则用来表示土壤团聚体在水中被破坏的程度，分散系数愈大，则团聚体的稳定性愈低。对两个灌区土壤团聚度和分散系数计算后比较，有助于评定土壤的结构性与分散性，从而判断土壤形成结构的潜在性能。

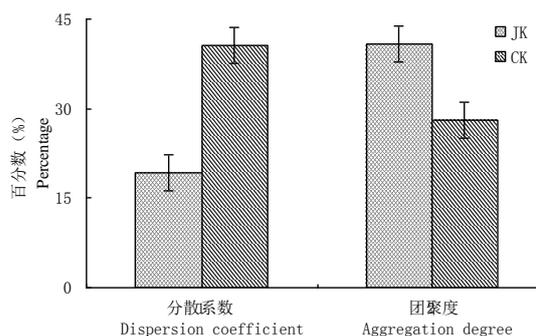


图3 不同灌水处理土壤团聚度和分散系数
Fig.3 Aggregation degree and dispersion coefficient of soil aggregates in soils in different irrigation treatments

由图 3 知，交口灌区土壤的团聚度高于对照土壤 12.75%，而其分散系数却低于对照土壤 21.33%，进一步证实了长期采用有机污染型水体灌溉不仅可以提高土壤团聚化水平，增加气稳定性和抗破坏能力，而且为大团聚体形成奠定了基础。

2.3 土壤机械组成及有机质含量与 NMWD 和 GMD 值间的相关性分析

通过对长期不同灌溉水体处理的土壤 NMWD 值和 GMD 值分别与其有机质含量、砂粒、粉砂粒

和黏粒的相关性分析,探讨了土壤团聚体性状与其有机质含量和机械组成的关系。从表 5 可知,在干筛条件下,无论是交口灌区还是对照灌区,虽然土壤团聚体的 NMWD 值和 GMD 值与其有机质和机械组成的相关性均未达到显著水平,相对而言,有机质含量与 NMWD 值和 GMD 值的相关系数较机械组成高;在湿筛条件下,两个灌水处理土壤团聚体的 NMWD 值和 GMD 值分别与有机质含量间相关性均达显著水平,尤其是 NMWD 值与有机质含量之间的相关性达极显著水平,而与砂粒、粉砂粒和黏粒含量的相关性却未达到显著水平。说明虽然两个灌溉区土壤质地间稍有差异,但土壤团聚体组成及其稳定性与有机质含量的相关性更为密切,尤其是水稳性团聚体与土壤有机质含量呈显著正相关关系,而受质地的影响相对较小。

表 5 NMWD 和 GMD 值与有机质及机械组成的相关分析

Table 5 Correlation analysis of NMWD and GMD with organic matter and mechanical composition

相关系数 Correlation coefficient	干筛法 Dry sieving				湿筛法 Wet sieving			
	NMWD		GMD		NMWD		GMD	
	JK	CK	JK	CK	JK	CK	JK	CK
有机质含量 Organic matter content	0.6891	0.5308	0.7553	0.7495	0.9705**	0.9154**	0.8482*	0.8138*
砂粒含量 Sand content	0.1092	0.1786	0.1150	0.1518	-0.3523	0.0472	-0.6435	-0.1227
粉砂粒含量 Silt content	-0.5494	-0.2970	-0.5189	-0.3081	-0.1675	-0.2373	0.0302	-0.0386
黏粒含量 Clay content	0.0388	0.3294	0.4831	0.4879	0.5653	0.6798	0.7180	0.6788

注:*(或**)表示显著水平为 $p<0.05$ (或 $p<0.01$) Note: *(or **) stands for significance level at $p<0.05$ (or $p<0.01$)

3 结 论

本研究结果显示,长期采用有机污染水体灌溉农田对土壤团聚体组成有着较为明显的影响。总体来看,交口灌区土壤大于 10 mm 的大团聚体和小于 0.25 mm 的微团聚体含量明显低于对照灌区,但其直径范围为 1~5 mm 的(质量)优势团聚体的含量显著增加了,说明污染水中的有机物质不仅促进了大于 10 mm 大团聚体向较低级别团聚体的转变,同时这些有机物质也有助于小于 0.25 mm 的微团聚体或矿质单粒形成了小于 10 mm 的团聚体,从而大大改善了土壤的结构状况。

同时,长期采用有机污染水体灌溉农田土壤,不仅可以显著提高土壤团聚体的稳定性,而且增加土壤团聚度,降低其分散系数。在湿筛条件下,大于 0.25 mm 团聚体的破坏率,对照灌区土壤明显小于交口灌区土壤,且差异达到显著水平;此外,大于 0.25 mm 水稳性团聚体的含量,交口灌区土壤明显高于对照灌区土壤,达到极显著水平,表明交口灌区土壤在保持土壤团聚体稳定性的能力上强于大荔土壤,尤其是水稳性团聚体与土壤有机质含量成显著正相关,这与其他研究者的结论相同^[19-20],而与机械组成的相关系数未达到显著水平。

目前,关于长期有机污染型水体灌溉条件下,土壤团聚状况改善的主要驱动因素还不十分清楚,本研究所得结论是否适用于其他地区,仍需要进一步研究。

参考文献

- [1] 胡海燕,王益权,张育林,等. 污染的灌溉水对农田土壤养分平衡的作用与影响. 干旱地区农业研究, 2010, 28(5): 129-142. Hu H Y, Wang Y Q, Zhang Y L, et al. The action and influence of polluted irrigation water on soil nutrients balance (In Chinese). *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2010, 28(5): 129-142
- [2] 赵佳瑞,王益权,刘军,等. 灌溉水质对土壤质量的影响. 生态环境, 2008, 17(3): 1 240-1 243. Zhao J R, Wang Y Q, Liu J, et al. Effect of irrigation water quality on soil organic matter accumulation (In Chinese). *Ecology and Environment*, 2008, 17(3): 1 240-1 243
- [3] Albert U I, Antonio F P, Burrow D. Effects of potassium humate on aggregate stability of two soils from Victoria, Australia. *Geoderma*, 2005, 125: 321-330
- [4] Six J, Paustain K, Eillott E T, et al. Soil structure and organic matter I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon. *Soil Sci Soc Am J*, 2000, 64:607-689
- [5] John B., Yamashita T., Ludwig B., Flessa H.. Storage of organic carbon in aggregate and density fractions of silty soils under different types of land use. *Geoderma*, 2005, 128:63-79
- [6] Bronick C J, Lal R. Manuring and rotation effects on soil organic carbon concentration for different aggregate size fractions on two soils in northeastern Ohio, USA. *Soil & Tillage Research*, 2005, 81:239-252
- [7] 杨长明, 欧阳竹, 董玉红. 不同施肥模式对潮土有机碳组分及团聚体稳定性的影响, 生态学杂志, 2005, 24(8):887-892. Yang C M, Ou Y Z, Dong Y H. Organic carbon fractions and aggregate stability in aquatic soil under different fertilization (In Chinese). *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(8):887-892
- [8] Alvaro-Fuentes J, Jose L A, Gracia R. Soil management effects on aggregate dynamics in semiarid Aragon (NE Spain). *Soil & Tillage Research*, 2007, 378:179-182
- [9] Green V S, Stott D E, Cruz J C. Tillage impacts on soil biological activity and aggregation in Brazilian Cerrado Oxisol. *Soil & Tillage Research*, 2007, 92:114-121
- [10] 南香红. 水危机系列报道七:黄河最大支流之死. 南方新闻网, 2007-11-19. Nan X H. The series report on water crisis 7: The death of the Yellow River's maximum tributaries (In Chinese). *Southern News*, 2007-11-19
- [11] 李群,王丽伟,刁立芳,等. 渭河下游有机物污染状况及趋势分析. 人民黄河, 2006(12): 37-38. Li Q, Wang L W, Diao L F, et al. Current situation of the lower Yellow River organic pollution (In Chinese). *Yellow River*, 2006(12): 37-38
- [12] 梅畅和. 渭南土壤. 西安:天则出版社, 1990: 65-66. Mei C H. Weinan soil (In Chinese). Xi'an: Tianze Press, 1990: 65-66
- [13] Kemper W D, Rosenau R C. Aggregate stability and size distribution//Klute A. Methods of soil analysis. Part I. Physical and mineralogical methods. Agronomy Monograph No.9. Madison, WI: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986: 425-442
- [14] 彭新华,张斌,赵其国. 红壤侵蚀裸地植被恢复及土壤有机碳对团聚体稳定性的影响. 生态学报, 2003, 23(10): 2 176-2 183. Peng X H, Zhang B, Zhao Q G. Effect of soil organic carbon on aggregate stability after vegetative restoration on severely eroded red soil (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(10): 2 176-2 183
- [15] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室. 土壤物理性质测定法. 北京: 科学出版社, 1978: 87-95. Department of Soil Physics, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. The determination methods of soil physical properties (In Chinese). Beijing: Science Press, 1978: 87-95
- [16] 孙天聪,李世清,邵明安. 长期施肥对褐土有机碳和氮素在团聚体中分布的影响. 中国农业科学, 2005, 38(9): 1 841-1 848. Sun T C, Li S Q, Shao M A. Effects of long-term fertilization on distribution of organic matters and nitrogen in cinnamon soil aggregates (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(9): 1 841-1 848
- [17] 姚贤良,程云生,等. 土壤物理学. 北京: 农业出版社, 1986. Yao X L, Cheng Y S, et al. Soil physics (In Chinese). Beijing: Agriculture Press, 1986

- [18] 柯夫达 B A. 陆宝树,等. 译. 土壤学原理:上册. 北京: 科学出版社, 1981: 236-246. Ковда В А. Лу В С, et al. trans. Soil science principle. Vol. 1. Beijing: Science Press, 1981: 236-246
- [19] 李小刚,崔志军,王玲英,等. 盐化和有机质对土壤结构稳定性及阿特伯格极限的影响. 土壤学报, 2002, 39(4): 550-559. Li X G, Gui Z J, Wang L Y, et al. Effects of salinization and organic matter on soil structural stability and atterberg limits (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2002, 39(4): 550-559
- [20] 孙艳, 王益权, 刘军, 等. 日光温室蔬菜栽培对土壤团聚体稳定性的影响——以陕西省泾阳县日光温室土壤为例. 土壤学报, 2011, 48(1): 168-174. Sun Y, Wang Y Q, Liu J, et al. Effects of solar greenhouse vegetable cultivation on soil aggregates stability – A case study of solar greenhouse soil in Jingyang County, Shaanxi Province (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2011, 48(1): 168-174

Effects of Irrigation Water Polluted with Organic contaminants on Soil Aggregates

Li Xiaoyun Wang Yiquan[†] Sun Huimin Xu Hai Wang Yongjian Xu Shuang

(College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract In order to study effects of organic pollutants in irrigation water on soil physical properties, tracts of farmland in the Jiaokou Irrigation Zone, Shaanxi, that had long been irrigated with water polluted with organic contaminants were selected as subject in the study and some other tracts of farmland that had long been irrigated with unpolluted groundwater were set as control. They were both the same in soil condition and under the same climate condition and the same cultivation system. Composition of soil aggregates and microaggregates were measured by dry sieving and wet sieving, separately for analysis of variation of, dominant fractions of aggregates. Results show that long-term irrigation with organic-polluted water significantly decreased the contents of macro-aggregates (>10 mm) and micro-aggregates (<0.25 mm), but increased the content of “(quality) dominant aggregates” (1~5 mm). Correlation analysis shows that the content of water-stable aggregates was positively related with the content of soil organic matter, but insignificantly related to the mechanical composition of water-stable aggregates. Long-term irrigation with organic-polluted water also improved soil aggregate stability and enhanced soil aggregation, but reduced aggregate dispersion coefficient, an indication that soil structure was effectively improved. The findings prove that organic pollutants in irrigation water significantly improves soil structure and properties.

Key words Organic pollution; Soil aggregates composition; Dominant aggregates; Percentage of aggregate destruction (PAD)