

# 养殖废水灌溉对玉米地土壤水溶性碳及其剖面分布的影响

刘诗梦, 程秀华, 莫康, 王晗, 曲永胜, 廖林仙  
(河海大学 水利水电学院, 南京 210098)

**摘要:**为了研究养殖废水灌溉对土壤水溶性碳量及其占总有机碳量比例的剖面分布的影响,设置水质和灌溉量处理,测定了玉米地土壤总有机碳和水溶性碳量,分析了水溶性碳占总有机碳比例及其剖面分布特征。结果表明,总有机碳及水溶性碳量在土壤表层较高,且随着土层加深均有所减少。养殖废水灌溉条件下的土壤总有机碳和水溶性碳量总体上比清水灌溉处理的高,这说明在一定范围内养殖废水灌溉更有利于土壤中有机碳量的增加。清水灌溉条件下,灌水量为 $640\text{ m}^3/\text{hm}^2$ 时土壤总有机碳量最高;灌水量为 $760\text{ m}^3/\text{hm}^2$ 时水溶性碳量最高。养殖废水灌溉条件下,灌水量为 $880\text{ m}^3/\text{hm}^2$ 时土壤总有机碳和水溶性碳量均为最高。由于土壤中的总有机碳在土壤深层分布较少,且随土层加深土壤总有机碳量下降幅度减小,水溶性碳占总有机碳的比例随土层深度加深而逐步增加。养殖废水灌溉有利于土壤总有机碳、水溶性碳量的增加,并可促进二者在土壤表层的积累。

**关键词:** 养殖废水灌溉; 土壤总有机碳; 水溶性碳

中图分类号: S274.1

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2017.02.006

刘诗梦,程秀华,莫康,等. 养殖废水灌溉对玉米地土壤水溶性碳及其剖面分布的影响[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(2): 39-43.

## 0 引言

农业水资源短缺和水污染是当前制约我国国民经济和社会可持续发展的重要因素<sup>[1]</sup>。污水经适当处理后回用于农业灌溉是开发利用劣质水资源、推进节水农业和保护水体环境的重要途径,亦是实现社会、经济、环境持续协调发展的重要保证。对发酵过的动物粪便、尿液、饲料残渣和冲洗水等混合有机肥(养殖废水),稀释后灌溉农作物,不仅可减少环境污染尤其是缓解水体富营养化的压力,而且还能降低水处理的成本,因此在新西兰、澳大利亚等奶牛业发达的国家被广泛使用<sup>[2-4]</sup>,而在中国应用不多。养殖废水灌溉能够提高土壤有机质和肥力,增加作物产量,提高作物品质,甚至能代替肥料的营养<sup>[5-7]</sup>。土壤有机碳是土壤质量的核心<sup>[8]</sup>,其质量和数量影响着土壤的物理、化学和生物特征及其过程,影响和控制着植物初级生产量,是土壤质量评价的重要指标<sup>[9]</sup>。

土壤水溶性碳(DOC)是指在室温及天然pH值条件下土壤样品中能溶于水相的有机组分<sup>[10]</sup>。虽然土壤水溶性碳的量不超过 $200\text{ mg/kg}$ ,占土壤有机碳的比例很小,一般不到3%,但它是土壤微生物的主要能源,在提供土壤养分方面具有重要的作用<sup>[11]</sup>。虽然土壤中水溶性碳的量很少,但可以直接被植物吸收加以利用<sup>[12]</sup>,是土壤碳库的重要组成部分。同时,水溶性碳对土壤有机碳的周转也具有重要意义<sup>[13-14]</sup>。目前,有少量研究表明,养殖废水灌溉可增加土壤的有机质量<sup>[15]</sup>,但对有机质的形态及其变化规律以及变化机理方面则鲜有文献报道。为此,在前人研究的基础上,通过研究养殖废水灌溉下土壤各深度的土壤有机碳和水溶性碳的量以及水溶性碳占土壤有机碳的比例,对养殖废水灌溉的影响做出评价,为土壤水分和施肥的管理提供科学评价。

收稿日期:2016-07-25

基金项目:国家自然科学基金青年项目(51209065);中央高校科研业务费(2014B06114);河海大学水利学科专业国家级实验教学示范中心创新创业项目

作者简介:刘诗梦(1995-),女,本科生,研究方向为农业水利工程。E-mail: 164226432@qq.com

通信作者:廖林仙(1979-),女,讲师,博士,主要从事养殖废水灌溉及其环境效应研究。E-mail: liaolinxian@163.com

# 1 材料与方法

## 1.1 试验区概况

试验在江苏省南京市蔬菜花卉科学研究所科研基地塑料大棚内进行(31°43' N、118°47' E),该地区属亚热带受季风影响的湿润气候,年日照时间为2 017.2 h,平均气温 15.7 °C,平均降水量为1 072.9 mm。

## 1.2 试验设计

采取桶装试验,桶高 70 cm,上口直径 56.5 cm,底部直径 46 cm,土壤经混匀装入桶中。试验设灌溉水质和灌水量 2 个因素,灌溉水质设清水(W)和养殖废水(R),灌水量设 640、760、880 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>共 3 个水平,每 2 周灌 1 次水,分别标记为 1、2、3,共 6 个处理,重复 3 次。

养殖废水来源于横溪镇奶牛场,为奶牛的尿液和冲刷废水的混合液,水质稳定可靠,取水后放置适当时间,取静置液体的上层按照 1:10 的比例稀释后作为灌溉水源。灌溉用养殖废水及清水的性质见表 1。

表 1 灌溉用养殖废水及清水性质

指标	pH 值	EC( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ )	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N 量/(mg·L <sup>-1</sup> )	COD 量/(mg·L <sup>-1</sup> )	TN 量/(mg·L <sup>-1</sup> )	TP 量/(mg·L <sup>-1</sup> )
清水	7.45	143	1.87	17	14.8	1.6
养殖废水	7.36~7.94	184~367	2.36~9.37	683~1562	36.9~41.76	6.7~8.3

## 1.3 土样采集

种植作物为玉米,2015 年 8 月 4 日第一次灌水前取样作为原始样本,分别在 9 月 5 日、26 日取土,取土深度为 0~20、20~40、40~60 cm,经风干、磨碎备用。种植玉米前,测得土壤的总有机碳量平均为 17.51 g/kg;水溶性碳量平均为 160.97 mg/kg。

## 1.4 试验测定项目与方法

采用重铬酸钾外加热法测定土壤有机碳(TOC)质量分数。采用重铬酸钾-硫酸外加热法测定土壤水溶性碳(DOC),称取新鲜土样约 12.5 g,加入 10 mL 的氯化钾(2 mol/L),于室温下以 180 r/min 的转速振荡 30 min,经过 0.45  $\mu\text{m}$  的滤膜过滤后,提取过滤液,放入 10 mL 的重铬酸钾(0.018 mol/L)-硫酸(12 mol/L)混合液,消煮后使用 0.05 mol/L 的硫酸亚铁溶液滴定,并与空白溶液进行比较。

# 2 结果与分析

## 2.1 土壤总有机碳(TOC)

土壤总有机碳是土壤的重要组成部分,尽管只占土壤总质量的很小一部分,但其在土壤肥力、生态系统平衡、农业可持续发展等方面有着重要作用<sup>[16]</sup>。种植玉米后,不同测定日期土壤总有机碳质量分数如表 2 所示。

表 2 不同灌溉处理下不同土层土壤总有机碳量

g/kg

处理	9月5日			9月26日		
	0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm	0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm
W1	22.28 <sup>b</sup>	15.80 <sup>a</sup>	12.54 <sup>a</sup>	23.29 <sup>ab</sup>	14.98 <sup>a</sup>	13.41 <sup>a</sup>
W2	21.53 <sup>c</sup>	14.84 <sup>ab</sup>	11.58 <sup>ab</sup>	22.81 <sup>ab</sup>	14.64 <sup>a</sup>	12.55 <sup>a</sup>
W3	21.77 <sup>bc</sup>	15.74 <sup>a</sup>	10.12 <sup>bc</sup>	22.72 <sup>b</sup>	14.78 <sup>a</sup>	10.74 <sup>b</sup>
R1	21.58 <sup>bc</sup>	14.60 <sup>ab</sup>	9.45 <sup>c</sup>	22.78 <sup>ab</sup>	13.31 <sup>ab</sup>	11.11 <sup>b</sup>
R2	22.08 <sup>b</sup>	12.62 <sup>b</sup>	8.51 <sup>c</sup>	24.83 <sup>ab</sup>	11.91 <sup>c</sup>	9.68 <sup>b</sup>
R3	24.12 <sup>a</sup>	13.39 <sup>b</sup>	9.65 <sup>c</sup>	25.64 <sup>a</sup>	12.48 <sup>bc</sup>	10.62 <sup>b</sup>

注 同列不同小写字母表示差异达 5% 显著水平,具有相同字母的差异不显著;下同。

从表 2 可看出,同一灌溉处理不同土层间总有机碳量差异较大,清水灌溉处理的变化范围为 10.12~23.29 g/kg;养殖废水灌溉处理的变化范围为 8.51~25.64 g/kg。

2 种灌溉处理的有机碳量沿土层剖面分布的特点相似,0~20 cm 土层的土壤有机碳量最高,其下各层随着深度增加依次减少,40~60 cm 土层的总有机碳量达到最低,这与已有研究成果<sup>[16-17]</sup>相同。从 0~20 cm 土层至 20~40 cm 土层,土壤中的总有机碳量下降较快,降幅范围为 27.12%~44.25%;从 20~40 cm 至 40~60 cm 土层,土壤总有机碳下降较慢,降幅范围为 21.01%~35.22%。

比较不同处理在相同灌水量同一土层的土壤总有机碳量,0~20 cm 土层灌水量为 640 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>时,清水灌溉与养殖废水灌溉处理土壤总有机碳量无显著差异;灌水量为 760 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>时养殖废水灌溉的总有机碳量较清水灌溉有显著提升,升幅范围为 2.55%~12.41%;灌水量为 880 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>时养殖废水灌溉的总有机碳量较清水灌溉提升范围为 9.28%~10.80%。而 20~40 cm 和 40~60cm 土层相同灌水量下 2 种灌溉水质处理间土壤总有机碳量差异并不明显。

清水灌溉条件下,灌水量为 640 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>时,0~20 cm 土层土壤总有机碳量最高,较灌水量 760 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>和灌水量 880 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>增长 2.10%~3.48%;养殖废水灌溉处理下,灌水量为 880 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>时,0~20 cm 土层土壤总有机碳量最高,较其他灌水量处理有显著增长,增长范围为 3.26%~12.55%。在 20~40 cm 和 40~60 cm 土层各处理总有机碳量差异较小。

比较同一处理相同灌水量在不同日期的土壤总有机碳量发现,随着时间增长,9月5日清水灌溉处理 0~20 cm 土层总有机碳量增长最多,增幅为 27.24%;养殖废水灌溉处理 40~60 cm 土层总有机碳量增幅最大,为 37.75%。9月26日各处理各土层总有机碳量基本保持不变,增减范围较小。

## 2.2 土壤水溶性碳(DOC)

表 3 给出了玉米种植后不同灌溉处理水溶性碳量。由表 3 可知,同一灌溉处理在不同深度的土层水溶性碳量差异不大,清水灌溉处理的水溶性碳量变化范围为 124.55~171.25 mg/kg;养殖废水灌溉处理的变化范围为 135.86~184.61 mg/kg。

表 3 不同灌溉处理下不同土层土壤水溶性碳量

mg/kg

处理	9月5日			9月26日		
	0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm	0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm
W1	141.25 <sup>d</sup>	124.55 <sup>d</sup>	126.85 <sup>d</sup>	142.64 <sup>d</sup>	124.55 <sup>d</sup>	125.25 <sup>d</sup>
W2	170.52 <sup>b</sup>	139.14 <sup>c</sup>	139.78 <sup>c</sup>	171.25 <sup>b</sup>	139.45 <sup>c</sup>	138.08 <sup>c</sup>
W3	163.68 <sup>bc</sup>	156.63 <sup>bc</sup>	152.11 <sup>bc</sup>	163.39 <sup>c</sup>	152.33 <sup>c</sup>	147.93 <sup>b</sup>
R1	158.87 <sup>c</sup>	138.23 <sup>c</sup>	136.89 <sup>cd</sup>	159.51 <sup>c</sup>	138.36 <sup>cd</sup>	135.86 <sup>d</sup>
R2	166.10 <sup>b</sup>	157.62 <sup>b</sup>	154.38 <sup>b</sup>	168.25 <sup>c</sup>	157.49 <sup>b</sup>	155.00 <sup>ab</sup>
R3	184.61 <sup>a</sup>	162.85 <sup>a</sup>	160.36 <sup>a</sup>	183.66 <sup>a</sup>	163.73 <sup>a</sup>	159.38 <sup>a</sup>

2 种灌溉处理的土壤水溶性碳量剖面分布特点相似,虽然土壤中的水溶性碳量较少,但随着土层的加深,土壤水溶性碳量逐渐降低,降幅逐渐减小,这与总有机碳在土壤剖面上的分布规律是一致的,这也有相关研究成果<sup>[16]</sup>相似。

根据显著性检验结果可知,各土层之间不同灌溉处理、不同灌水量均有明显差异,比较同一灌溉处理不同灌水量的水溶性碳量,清水灌溉条件下,0~20 cm 土层,灌水量为 760 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>时水溶性碳量最高,较另外 2 种灌水量有显著增长,增长范围为 3.02%~20.72%;20~60 cm 土层灌水量为 880 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>时水溶性碳量最高,增长范围为 4.81%~25.76%;养殖废水灌溉条件下,0~60 cm 土层,灌水量为 880 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>时,水溶性碳量较另外 2 种灌水量处理有明显增长,增长范围为 2.82%~18.34%。

比较不同灌溉处理在同一灌水量下同一土层的水溶性碳量,除 0~20 cm 土层灌水量为 760 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>时 2 种灌溉处理无明显差异外,其余土层养殖废水灌溉处理的水溶性碳量较清水灌溉处理均有显著增长,增长范围为 3.97%~13.28%。

比较同一处理相同灌水量在不同日期的土壤水溶性碳量,随着时间增长,各土层处水溶性碳量基本保持不变,说明随时间增长土壤中水溶性碳量已基本趋于稳定。

图 1 给出了 9月5日和 9月26日各处理水溶性碳占土壤总有机碳的比例沿土壤剖面分布的情况,其中 9月5日水溶性碳量占比(DOC/TOC)的范围为 0.63%~1.74%;9月26日时 DOC/TOC 的范围为 0.61%~1.60%。2次取土的 DOC/TOC 的比例剖面分布的特点相似,即随着土壤深度加深,水溶性碳占总有机碳的比例也逐渐增加。9月5日,从 0~20 cm 土层到 20~40 cm 土层增幅较小,从 20~40 cm 土层到 40~60 cm 土层增加幅度变大;9月26日,从 0~20 cm 土层到 20~40 cm 土层增幅较大,从 20~40 cm 土层到 40~60 cm 土层增加幅度变小。

比较不同灌溉处理同一土层同一灌水量时的 DOC/TOC 比例发现,均是养殖废水灌溉处理大于清水灌溉处理的所占比例,其中 0~20 cm 土层各灌溉处理间无明显差异;20~40 cm 土层,灌水量为 760 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>时,养

殖废水灌溉处理较清水灌溉处理有显著增长,增长幅度为37.89%,灌水量为640 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>和880 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>时养殖废水灌溉处理增长幅度分别为25.31%和25.96%;40~60 cm 土层,灌水量为760 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>时养殖废水灌溉处理增长最为显著,增长幅度为45.45%,另外2种灌水量的各处理间无明显差异。虽然表层水溶性碳量最高,但所占比例最小。这也与已有相关研究结果<sup>[16-19]</sup>相同。

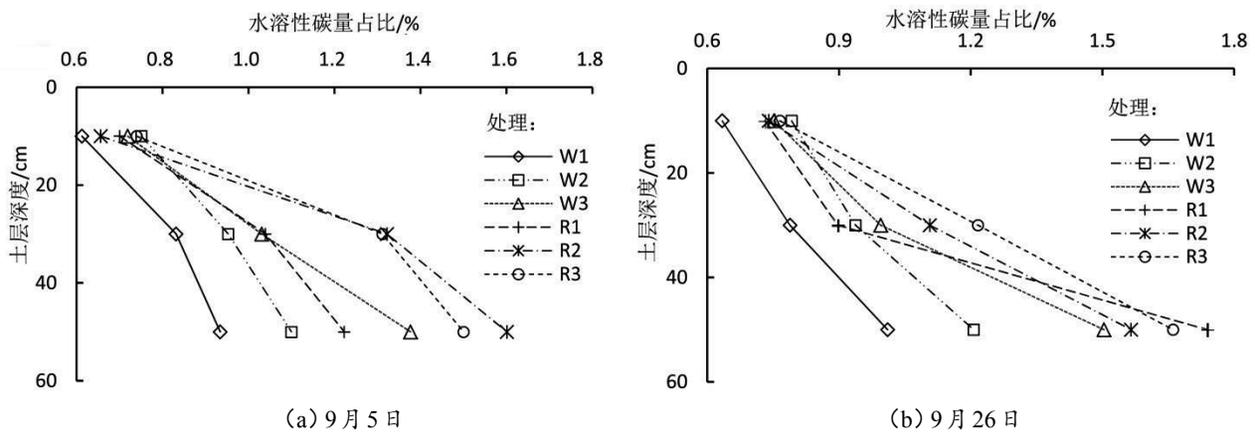


图1 水溶性碳占总有机碳比例剖面分布

### 3 结论

1)在同等种植条件下,浇灌养殖废水和清水条件下土壤总有机碳量沿土层深度分布的特点相似,即随着土层加深,总有机碳量逐渐降低。对比清水灌溉处理,养殖废水灌溉有利于土壤有机碳量增加并促进表层土壤有机碳的增加,灌水量为880 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>时土壤有机碳量增加幅度最大。随时间增长,土壤中各土层总有机碳量均有增长,0~20 cm 土层处增幅范围为2.98%~17.03%,其他土层增长较小,且各土层总有机碳量逐渐趋于稳定。

2)清水灌溉和养殖废水灌溉处理下土壤水溶性碳量均有沿土层加深而逐渐降低的趋势;且比较不同灌溉处理同一灌溉量在同一土层的水溶性碳量,养殖废水灌溉也有利于土壤水溶性碳量的增加,灌水量为760 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>时水溶性碳量增加幅度最大。同时,2种灌溉处理中 DOC/TOC 的比例沿土层深度分布的特征相似,即随土层深度增加,水溶性碳量占总有机碳量的比例逐渐上升,灌水量为760 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>时水溶性碳量占比增加幅度最大。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 李生荣. 我国水资源的现状与对策[J]. 延安职业技术学院学报, 2009, 23(6):101-103.
- [ 2 ] SHINJI KANEKO, KATSUYA TANAKA, TOMOYO TOYOTA, et al. Water efficiency of agricultural production in China: Regional comparison from 1999 to 2002[J]. International Journal of Agricultural Resources, Governance and Ecology, 2004, 3(3/4): 231-234.
- [ 3 ] HU J L, WANG S C, YEH F Y. Total-factor water efficiency of regions in China[J]. Resources Policy, 2006, 31(4): 217-230..
- [ 4 ] 封志明, 杨艳昭, 刘宝勤. 甘肃省农田水分平衡及其时空分布规律[J]. 自然资源学报, 2005, 20(2): 188-194.
- [ 5 ] 吕翠美, 吴泽宁. 区域用水效率与节水潜力的能值分析[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(2): 62-67.
- [ 6 ] 李绍飞. 改进的模糊物元模型在灌区农业用水效率评价中的应用[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(11): 175-181.
- [ 7 ] CHARNES A, COOPER W W, RHODES E. Measuring the efficiency of decision making units[J]. European Journal of Operational Research, 1978, 2(6): 429-444.
- [ 8 ] 安静, 邓波, 韩建国, 等. 土壤有机碳稳定性研究进展[J]. 草原与草坪, 2009(2): 82-87.
- [ 9 ] 胡海清, 陆昕, 孙龙, 等. 土壤活性有机碳分组及测定方法[J]. 森林工程, 2012, 28(5): 18-22.
- [ 10 ] 林滨, 陶澍. 沉积物中水溶性天然有机物吸着系数的动态测定[J]. 地理科学, 1996, 16(2): 164-169.
- [ 11 ] 汪伟, 杨玉盛, 陈光水, 等. 罗浮栲天然林土壤可溶性有机碳的剖面分布及季节变化[J]. 生态学杂志, 2008, 27(6): 924-928.
- [ 12 ] BURFORD J R, BREMNER J M. Relationships between the denitrification capacities of soils and total, water-soluble and readily decomposable soil organic matter[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1975, 7(6): 389-394.
- [ 13 ] 李忠佩, 张桃林, 陈碧云. 可溶性有机碳含量动态及其与土壤有机碳矿化的关系研究[J]. 土壤学报, 2004, 41(4): 544-551.
- [ 14 ] 刘淑霞, 刘景双, 赵明东, 等. 土壤活性有机碳与养分有效性及作物产量的关系[J]. 吉林农业大学学报, 2003, 25(5): 539-543.
- [ 15 ] 廖林仙, 蔡旺炜, 邵孝侯, 等. 奶牛场废水灌溉不同水分处理对土壤质量及硝态氮淋溶的影响[J]. 中国农村水利水电, 2013(10):13-16.
- [ 16 ] 韩琳, 张玉龙, 王烁, 等. 灌溉模式对保护地土壤可溶性有机碳与微生物量碳的影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(8): 1 625-1 633.

- [17] 马力,杨林章,慈恩,等. 长期不同施肥处理对水稻土有机碳分布变异及其矿化动态的影响[J]. 土壤学报, 2009,46(6): 1 050-1 058.
- [18] 唐首锋,张玉龙,袁德玲,等. 保护地不同灌溉方式下土壤碳库管理指数的研究[J]. 灌溉排水学报, 2009, 28(3): 39-41, 45.
- [19] 巫芯宇,廖和平,杨伟. 耕作方式对稻田土壤有机碳与易氧化有机碳的影响[J]. 农机化研究, 2013, 35(1): 184-188.

## **Influence of Irrigation with Dairy Effluent on Soil Dissolved Organic Carbon and Its Distribution of the Section in the Corn Field**

LIU Shimeng, CHEN Xiuhua, MO Kang, WANG Han, QU Yongsheng, LIAO Linxian  
(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Aiming to analyze the effect of livestock waste water irrigation on soil total organic carbon, dissolved organic carbon and the proportion of them, lysimeter experiment was conducted including clear water irrigation and livestock waste water irrigation with three irrigation amounts. The results showed that the contents of total organic carbon and dissolved organic carbon decreased with the increase of soil depth. Generally, the contents of the total organic carbon irrigated by livestock waste water were higher than those under clear water irrigation, which showed that livestock waste water irrigation would induce the increase of soil carbon content within a certain range, especially in upper soil. The proportion of dissolved organic carbon to the total organic carbon gradually increased with soil depth, as the decrement of soil total organic carbon increased with soil depth and decrement of soluble organic carbon decreased. Under the clear water irrigation, the content of total organic carbon in the surface soil was the highest when the irrigation amount was  $640 \text{ m}^3/\text{hm}^2$  and the content of dissolved organic carbon was the highest when the irrigation amount was  $760 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ; under the livestock waste water irrigation, both total organic carbon and dissolved organic carbon contents were the highest when the irrigation amount was  $880 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ . Livestock waste water irrigation is beneficial to the increase of the contents of soil total organic carbon and dissolved organic carbon and the accumulation of them in the upper soil.

**Key words:** livestock waste water irrigation; soil total organic carbon; dissolved organic carbon

责任编辑:刘春成