

再生水灌溉模式对土壤团聚体及其有机碳分布的影响

胡廷飞, 王辉, 谭帅

引用本文:

胡廷飞, 王辉, 谭帅. 再生水灌溉模式对土壤团聚体及其有机碳分布的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(1): 143–151.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0955>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

膨润土对镉污染土壤团聚体结构特征及有机碳含量的影响

王润珑, 徐应明, 李然, 罗文文, 孙约兵

农业环境科学学报. 2018, 37(12): 2701–2710 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0104>

黄土高原旱地不同种植系统对土壤水稳性团聚体及碳氮分布的影响

魏艳春, 马天娥, 魏孝荣, 王昌钊, 郝明德, 张萌

农业环境科学学报. 2016(2): 305–313 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016.02.014>

生物炭对旱作农田土壤有机碳及氮素在团聚体中分布的影响

米会珍, 朱利霞, 沈玉芳, 李世清

农业环境科学学报. 2015, 34(8): 1550–1556 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.08.017>

施用有机肥提升不同土壤团聚体有机碳含量的差异性

陆太伟, 蔡岸冬, 徐明岗, 高强, 孙楠, 张文菊

农业环境科学学报. 2018, 37(10): 2183–2193 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1767>

长期施肥对洞庭湖区水稻土物理性状及团聚体中有机碳积累的影响

李文军, 彭保发, 周诗彪, 王亚力, 陈端吕, 童德保, 李红专

农业环境科学学报. 2015(4): 761–768 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.04.022>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

胡廷飞, 王 辉, 谭 帅. 再生水灌溉模式对土壤团聚体及其有机碳分布的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(1): 143–151.

HU Ting-fei, WANG Hui, TAN Shuai. Distribution characteristics of soil aggregates and their associated organic carbon under different irrigation modes with reclaimed water[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(1): 143–151.

再生水灌溉模式对土壤团聚体及其有机碳分布的影响

胡廷飞, 王 辉*, 谭 帅

(湖南农业大学水利与土木工程学院, 长沙 410128)

摘 要:为揭示再生水灌溉模式对土壤团聚体及其有机碳含量的影响,以潮土、紫色土和水稻土为研究对象,清水灌溉为对照(CK),研究了再生水灌溉(RW)、再生水-清水混合灌溉(RW-2)及再生水-清水交替灌溉(ARW) 3种灌溉模式下土壤团聚体含量及稳定性、土壤总有机碳、各粒级团聚体有机碳及其对土壤总有机碳贡献率的差异。结果表明:3种灌溉模式下,3种土壤团聚体均以大团聚体(>0.25 mm)为主,干筛和湿筛处理大团聚体比重分别为89.56%~97.91%和67.95%~81.81%;相比CK,潮土和水稻土各处理团聚体平均质量直径(MWD)及几何平均直径(GMD)均降低,但水稻土差异不显著,紫色土MWD和GMD则显著增长($P < 0.05$);潮土和紫色土各处理总有机碳含量及大团聚体有机碳含量均显著增长($P < 0.05$),水稻土变化不显著;3种土壤大团聚体有机碳含量是微团聚体有机碳含量的8.83~29.95倍,前者对土壤总有机碳含量的贡献率为89.42%~97.09%,后者贡献率为2.91%~10.58%。从改善土壤团聚状况及有机碳固持方面考虑,在紫色土和水稻土上进行再生水灌溉更适合,其中紫色土以RW模式改善效果最好,水稻土更适合采用RW-2模式。

关键词:再生水;灌溉模式;团聚体;有机碳

中图分类号:S153.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2020)01-0143-09 doi:10.11654/jaes.2019-0955

Distribution characteristics of soil aggregates and their associated organic carbon under different irrigation modes with reclaimed water

HU Ting-fei, WANG Hui*, TAN Shuai

(College of Water Resources and Civil Engineering, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: The effects of reclaimed water irrigation modes on the content and stability of soil aggregates, total soil organic carbon, and distribution of aggregate-associated organic carbon in three subtropical soils, i.e., tidal soil, purple soil and paddy soil, were investigated. An indoor simulation experiment was conducted at the irrigation and drainage laboratory of the college of water resources and civil engineering of Hunan agricultural university. Four treatments were designed as follows: fresh water irrigation (CK), reclaimed water irrigation (RW), alternative irrigation of fresh water and reclaimed water (ARW), and mixed irrigation of fresh water and reclaimed water (RW-2). Soil samples were collected from 0~15 cm soil layers in the plots of the four treatments for analysis. Using the dry sieving and wet sieving method, the proportions of aggregates >5 mm, 2~5 mm, 0.5~2 mm, 0.25~0.5 mm, and <0.25 mm in size were obtained, and then the mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD) of the fractions of soil aggregates were calculated. The organic carbon contents of the soil and aggregates were also discussed. The results showed that regardless of treatment, the aggregates of three subtropical soils were dominated by macroaggregates (>0.25 mm). The proportion of macroaggregates were 89.56%~97.91% and 67.95%~81.81% by dry sieve and wet sieve, respectively. Compared with CK, the MWD and GMD of tidal soil and paddy soil aggregates decreased in the three irrigation treat-

收稿日期:2019-08-31 录用日期:2019-09-29

作者简介:胡廷飞(1995—),男,贵州盘州人,硕士研究生,主要从事非常规水利用与土壤斥水性研究。E-mail:2759704595@qq.com

*通信作者:王 辉 E-mail:wanghuisb@126.com

基金项目:国家自然科学基金项目(41471185);湖南省教育厅重点项目(15A084);湖南省重点研发计划项目(2016JC2032)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41471185); The Key Project of Hunan Provincial Education Department(15A084); The Key Research and Development Program of Hunan Province(2016JC2032)

ments, while that of purple soil increased; the differences between tidal soil and purple soil were significant ($P<0.05$). The total organic carbon and macroaggregate-associated organic carbon contents in tidal soil and purple soil increased significantly ($P<0.05$), while that of paddy soil did not change significantly. The organic carbon content of macroaggregates was 8.83~29.95 times higher than that of microaggregates. The former contributed 89.42%~97.09% of the total soil organic carbon content while the latter contributed 2.91%~10.58%. We conclude that purple soil and paddy soil are more suitable for RW. RW improves purple soil agglomeration and organic carbon retention, while paddy soil is more suitable for RW-2.

Keywords: reclaimed water; irrigation mode; soil aggregate; soil organic carbon

面对日益增长的社会经济可持续发展需求,合理利用再生水进行农田灌溉是实现污水资源化、降低污水排放率的有效途径,具有重要的现实意义。然而,再生水虽经二级处理,其中仍含有较高的盐分、有机物和悬浮固体等^[1-2],长期灌溉可能导致土壤物理化学性质发生改变^[3],直接影响土壤团聚体的组成^[4],使得团聚体对土壤有机碳的固持和释放能力发生改变^[5-6]。Tarchitzky等^[7]研究发现再生水携带大量盐分进入受灌土壤后,使得土壤盐分含量提高,有利于促进土壤颗粒的絮凝作用,使得土壤颗粒团聚性增加;Halliwell等^[8]研究认为再生水中 Na^+ 浓度过高会使土壤颗粒膨胀和团聚体分散,破坏土壤团聚体结构;李霄云等^[9]研究表明有机污染型水体灌溉可以显著改善微团聚体的特性,增大土壤团聚度从而改善土壤结构状况;盛丰等^[10]研究发现采用含盐灌溉水-清水交替灌溉有利于提升土壤团聚体稳定性,抑制土壤板结;郑顺安等^[11]研究表明再生水灌溉促进土壤中 $>2\text{ mm}$ 的大粒径团聚体向较小粒径转化,有效改善砂质紫色土有机碳库。以上研究初步证实再生水灌溉显著影响受灌土壤团聚状况及有机碳分布特征。但关于受灌土团聚状况与有机碳含量之间的内在联系还缺乏深入研究,不同灌溉模式下土壤团聚体及其有机碳分布差异还不清楚。随着南方地区社会经济发展和节水城市建设理念的推行,再生水的利用在中国亚热带地区受到越来越多的重视,研究再生水灌溉模式对土壤团聚体及其有机碳分布的影响对提高南方地区再生水利用率具有重要意义。为此,本文以潮土、紫色土和水稻土为研究对象,采用再生水进行模拟灌

溉试验,以清水灌溉为对照,分析再生水不同灌溉模式(再生水灌溉、再生水-清水混合灌溉及再生水-清水交替灌溉)下土壤团聚体含量及稳定性、土壤总有机碳、各粒级团聚体有机碳及其对土壤总有机碳贡献率的差异,以期为再生水资源化利用及土壤肥力提高途径提供一定的理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤为研究区域内具有代表性的潮土、紫色土及水稻土,分别取自湖南省岳阳市($29^{\circ}03'21.8''\text{N}$, $113^{\circ}00'46.2''\text{E}$)和湖南省长沙市($28^{\circ}11'45''\text{N}$, $113^{\circ}07'33''\text{E}$ 和 $28^{\circ}18'44.4''\text{N}$, $113^{\circ}16'10.5''\text{E}$),主要土地利用方式为旱地和水田。利用随机、多点(10个点)法采集表层0~20 cm土样,自然风干,除去根、石块等杂物,磨碎过2 mm筛,充分混匀后备用。供试土壤的理化性质见表1。其中土壤机械组成采用吸管法测定;取20 g 试验土样按土水比1:5浸提后取上清液测定其电导率(EC)和pH;土壤有机碳的测定采用重铬酸钾氧化法。

试验再生水取自长沙市花桥污水处理厂,污水处理采用A2/O处理工艺,日处理能力9.57万 m^3 。经处理后的污水水质符合国家《城市污水再生利用农田灌溉用水水质》(GB 20922—2007)和《农田灌溉水质标准》(GB 5084—2005)。其pH为 7.6 ± 0.02 ,EC为 $1\,000.13\pm 134.75\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 分别为 37.51 ± 4.67 、 38.2 ± 6.8 、 6.12 ± 1.22 、 20.58 ± 2.38 、 $7.95\pm 0.27\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $5.61\pm 0.53\ \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,SAR为 $7.92\pm$

表1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Initial physical-chemical properties for tested soils

土壤类别 Soil classification	机械组成 Mechanical composition/%			质地 Soil texture	pH	EC/ $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	有机碳含量 Organic carbon content/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$
	0.02~2 mm	0.002~0.02 mm	<0.002 mm				
潮土 Tidal soil	15.00	47.00	38.00	粉黏土	5.69 ± 0.02	157.05 ± 10.75	8.85 ± 1.85
紫色土 Purple soil	34.00	33.00	33.00	壤黏土	7.50 ± 0.06	196.20 ± 12.22	10.83 ± 0.02
水稻土 Paddy soil	25.00	49.00	26.00	粉黏壤土	5.03 ± 0.01	96.60 ± 0.40	9.33 ± 1.20

1.04,总氮(TN)、总磷(TP)、总悬浮物(TSS)和化学需氧量(COD)分别为 3.92 ± 1.01 、 0.79 ± 0.52 、 4.80 ± 1.02 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 39.80 ± 7.68 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

1.2 试验设计及过程

考虑到灌溉过程中降雨的介入,且理想状态下雨水为纯净水,试验采用蒸馏水灌溉作为对照(CK)。为揭示再生水不同灌溉模式下土壤团聚体及其有机碳分布特征的差异,探寻一种对土壤团聚体及其有机碳含量改善较好的再生水灌溉模式。试验设置再生水灌溉(RW)、再生水-清水混合灌溉(RW-2)及再生水-清水交替灌溉(ARW)3种灌水模式。其中,RW-2为利用蒸馏水将再生水稀释2倍后灌溉;ARW为第一次采用再生水灌溉,下次采用蒸馏水灌溉,两者依次交替进行。

试验于2017年3月—2018年10月在湖南农业大学灌溉排水工程实验室内进行。试验土柱由直径26 cm,高32 cm的圆形培养桶制成,桶底均匀分布直径5 mm的渗水小孔以避免空气封闭和让多余的水流出。装土前在桶底铺设两层直径1 mm的纱网,而后均匀装填5 cm石英砂过滤层,过滤层表面铺设一层直径1 mm纱网。按 $1.20 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的设计容重分层(5 cm)装填土柱,层与层之间采用毛刷进行打毛处理,装填高度为17 cm。土柱装填完毕后,每个土柱分别采用6 L蒸馏水进行初灌,灌水时在土壤表面放置防冲滤网,防止灌水过程中对培养桶中的土壤造成冲刷作用。灌水后24 h内堵塞培养桶底孔以保证试验土样充分饱和,而后打开培养桶底孔将土柱自然风干。试验过程中所有土柱均采取避雨措施,防止自然降雨对试验造成干扰。

用于控制灌水下限的指标主要有土壤含水量和土水势。试验随机选取6个土柱埋设张力计,张力计埋在土柱中部、埋深为10 cm。试验根据张力计测定的土水势控制土柱灌水下限。试验土壤含水量达到田间持水量时张力计读数为10~35 kPa,土壤含水量低于田间持水量的60%已为轻度干旱,一般将此含水量作为灌溉的起点,因此每次当张力计读数为80~100 kPa时即进行灌水。每次灌水均测定土壤稳定入渗率,当前后3次土柱稳定入渗率均小于5%时,认为土壤结构基本稳定,终止灌水试验。灌溉持续时间1 a,每次灌水量均为6 L,共灌溉8次,单个土样灌水定额48 L。每个处理重复3次。灌水试验终止后,将土柱自然风干两星期左右。从每个处理的3个重复样品中采集0~15 cm原状土样,充分混合后形成

1个处理的复合样品,用于土壤团聚体分离及其有机碳测定。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 土壤团聚体组成及稳定性

采用干筛法测定土壤团聚体组成^[12]。取200 g土样用震击式标准振筛机(ZBSX-92A型,孔径依次为5、2、0.5 mm和0.25 mm)在最大功率下振荡5 min后,分别得到粒径>5、2~5、0.5~2、0.25~0.5 mm和<0.25 mm 5个级别土粒,称量各粒级土样质量。根据干筛法测定团聚体比例,称取50 g土样,采用湿筛法测定团聚体水稳定性^[12],用土壤团粒分析仪(FT-3型,孔径依次为5、2、0.5 mm和0.25 mm)以30次 $\cdot \text{min}^{-1}$ 频率振荡10 min,将各粒级土样置于100℃烘箱中烘干并称重。利用公式(1)和公式(2)分别计算各粒级团聚体及大团聚体($R_{0.25}$)百分含量,利用公式(3)和公式(4)计算土壤团聚体平均质量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)^[12]。

$$W_i = M_i / \sum_{i=1}^n M_i \times 100\% \quad (1)$$

式中: W_i 为各粒级团聚体百分含量,%; M_i 为各粒级团聚体烘干土质量,g。

$$R_{0.25} = M_{r>0.25} / \sum_{i=1}^n M_i \quad (2)$$

式中: $M_{r>0.25}$ 为粒径>0.25 mm团聚体烘干土质量,g。

$$MWD = \sum X_i \times W_i \quad (3)$$

$$GMD = \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^n M_i \lg X_i}{\sum_{i=1}^n M_i} \right] \quad (4)$$

式中: X_i 为各粒级团聚体平均直径,mm。

1.3.2 团聚体有机碳含量

由于土壤养分的水溶性较大,任何涉及化学物质的预处理都可能对养分状况产生很大影响。因此本文将干筛后各粒级土壤分别研磨后用于土壤有机碳的分析^[13]。团聚体有机碳对土壤总有机碳贡献率(F)采用公式(5)计算。

$$F = \frac{OC_i \times M_i}{SOC \times \sum_{i=1}^n M_i} \times 100\% \quad (5)$$

式中: OC_i 为第*i*级团聚体中有机碳含量, $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$;SOC为土壤总有机碳含量, $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.4 试验数据处理

运用Duncan's法对不同处理间的差异显著性进行分析,显著性检验设定为 $P < 0.05$,采用Pearson方法对土壤水稳定性团聚体参数进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 再生水灌溉模式对土壤团聚体分布及其稳定性的影响

干筛处理后,3种灌溉模式下土壤机械稳定性团聚体分布特征见图1。潮土以 >5 mm、 $2\sim5$ mm和 $0.5\sim2$ mm等3个粒级团聚体为主,3个粒级团聚体总量为79.90%~92.70%;紫色土以 >5 mm和 $2\sim5$ mm两个粒级团聚体为主,两个粒级团聚体总量为73.00%~82.82%;水稻土则以 $2\sim5$ mm和 $0.5\sim2$ mm两个粒级团聚体为主。两个粒级团聚体总量为61.90%~68.22%。3种土壤 $R_{0.25}$ 均达89.56%以上(表2)。方差分析表明:相比CK,除潮土RW处理 $R_{0.25}$ 无显著差异外,其他处理差异均显著($P<0.05$);紫色土和水稻土各处理下 $R_{0.25}$ 均无显著性差异。经湿筛处理后,土壤水稳性团聚体分布特征见图2。湿筛过程中非水稳性大团聚体破碎成较小粒级团聚体,使得3种土壤

$R_{0.25}$ 相比干筛处理后显著降低(表2),潮土、紫色土和水稻土依次分别下降18.31%~30.09%、16.44%~20.10%和11.74%~24.45%。方差分析表明:相比CK,除潮土ARW处理下 $R_{0.25}$ 差异显著外($P<0.05$),其他处理均无显著差异;紫色土和水稻土各处理下 $R_{0.25}$ 差异均不显著。

MWD 和 GMD 是反映土壤团聚体大小分布状况的常用指标,其值越大表明土壤平均粒径团聚度越高,抗侵蚀能力越强。从表3可以看出,潮土各处理下 MWD 和 GMD 表现为 $CK>RW-2>ARW>RW$,相比CK, MWD 和 GMD 分别显著降低13.61%~33.31%和7.24%~14.37%($P<0.05$);紫色土表现为 $RW>RW-2>ARW>CK$,相比CK, MWD 和 GMD 分别显著增长46.05%~85.46%和12.19%~25.31%($P<0.05$);水稻土 MWD 和 GMD 均表现为 $RW-2>CK>RW>ARW$,相比CK, $RW-2$ 处理下 MWD 和 GMD 分别增长2.86%和7.71%,其他处理则分别降低4.02%~8.19%和1.69%~

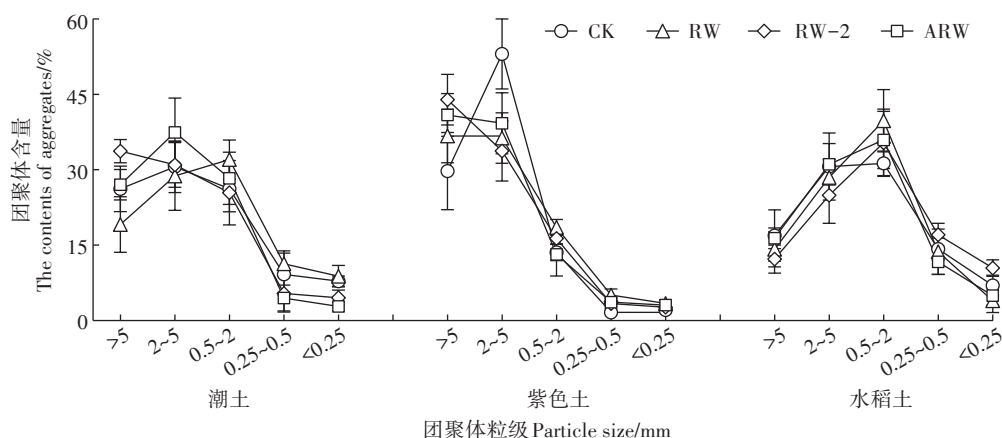


图1 干筛处理下各粒级土壤团聚体含量

Figure 1 The contents of soil aggregates with different particle sizes by dry seive

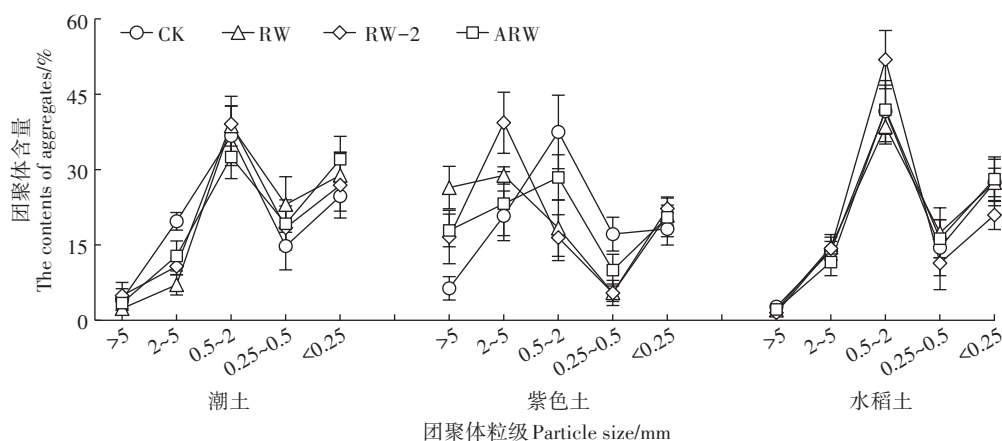


图2 湿筛处理下各粒级土壤团聚体含量

Figure 2 The contents of soil aggregates with different particle sizes by wet seive

表2 干筛与湿筛处理下不同灌溉模式 $R_{0.25}$ 含量

Table 2 The contents of macroaggregates by dry sieve or wet seive under different irrigation modes with reclaimed water

灌溉模式 Irrigation mode	干筛 $R_{0.25}$ Macroaggregate by dry sieve			湿筛 $R_{0.25}$ Macroaggregate by wet sieve		
	潮土 Tidal soil	紫色土 Purple soil	水稻土 Paddy soil	潮土 Tidal soil	紫色土 Purple soil	水稻土 Paddy soil
CK	92.18±1.98b	97.91±1.57a	93.02±2.04ab	75.29±2.97a	81.81±3.21a	72.56±2.83a
RW	91.18±1.49b	96.60±1.15a	96.07±2.34a	71.14±4.57ab	79.06±1.98a	72.58±4.63a
RW-2	95.46±1.51a	97.35±1.50a	89.56±1.65b	73.10±6.54ab	77.78±2.34a	79.05±2.89a
ARW	97.20±2.80a	96.94±2.03a	95.05±1.87a	67.95±4.55b	79.51±3.85a	71.90±4.43a

注:同列不同字母表示不同处理差异显著($P<0.05$, $n=3$)。下同。

Note: Different letters in the same column indicate significant difference among treatments ($P<0.05$, $n=3$). The same below.

2.97%,但差异均不显著。

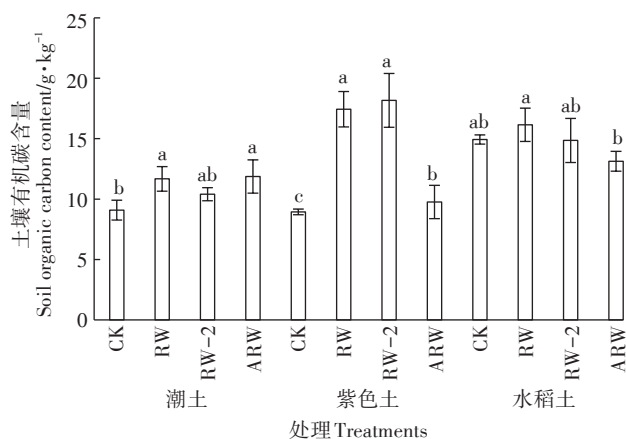
2.2 再生水灌溉模式对土壤有机碳含量的影响

2.2.1 再生水灌溉模式对土壤总有机碳含量的影响

图3表明3种灌溉模式下土壤总有机碳含量变化显著($P<0.05$)。相比初始有机碳含量,潮土和水稻土分别增长2.62%~34.07%和40.72%~73.05%;紫色土RW和RW-2处理分别增长61.02%和67.87%,而ARW和CK处理则分别降低11.00%和19.36%。多次灌水后,潮土各处理总有机碳含量表现为ARW>RW>RW-2>CK,相比CK,分别显著增长14.57%~30.65% ($P<0.05$);紫色土总有机碳含量表现为RW-2>RW>ARW>CK,相比CK,各处理分别显著增长9.13%~103.36% ($P<0.05$);水稻土各处理总有机碳含量表现为RW>CK≈RW-2>ARW,相比CK, RW处理增长8.16%, ARW处理下降13.70%,但差异均不显著。

2.2.2 再生水灌溉模式对土壤团聚体有机碳含量的影响

图4表明3种灌溉模式下土壤团聚体有机碳含量



不同字母表示不同处理差异显著($P<0.05$, $n=3$)。下同
Different letters indicate significant difference among treatments ($P<0.05$, $n=3$). The same below

图3 再生水不同灌溉模式下土壤总有机碳含量

Figure 3 The content of soil total organic carbon under different irrigation modes with reclaimed water

变化显著($P<0.05$)。相比CK, RW、RW-2和ARW处理下,潮土各粒级团聚体有机碳含量依次分别显著增长1.10%~44.56%、-8.28%~53.18%和-0.79%~48.11% ($P<0.05$);紫色土分别显著增加40.29%~163.09%、110.40%~129.67%和10.96%~27.70% ($P<0.05$);水稻土RW处理各粒级团聚体有机碳含量分别显著增长8.35%~19.54% ($P<0.05$), RW-2处理除0.5~2、2~5 mm两个粒级团聚体有机碳含量分别显著增长27.43%~46.75% ($P<0.05$)外,其他粒级团聚体分别显著降低6.54%~33.51% ($P<0.05$), ARW处理除0.25~0.5 mm粒级团聚体有机碳含量增长9.25%外,其他粒级团聚体有机碳含量分别显著降低2.76%~42.20% ($P<0.05$)。

>0.25 mm粒级团聚体称为大团聚体, <0.25 mm粒级团聚体称为微团聚体。根据实测各粒级团聚体含量及其有机碳含量计算大团聚体有机碳含量和微团聚体有机碳含量(表3)。潮土、紫色土和水稻土大团聚体有机碳含量均显著高于微团聚体有机碳含量 ($P<0.01$),其比值依次分别介于9.87~18.84、17.29~29.95和8.83~21.54。相比CK,各处理下潮土、紫色土和水稻土中大团聚体有机碳含量分别增长26.60%~46.43%、14.80%~99.13%和-3.16%~20.47%,方差分析表明:潮土ARW处理,紫色土RW和RW-2处理与水稻土RW处理大团聚体有机碳含量相比CK差异均显著($P<0.05$),其他处理无显著性差异。相比CK,潮土RW处理微团聚体有机碳含量增长6.87%, RW-2和ARW处理则分别降低40.31%和21.67%;紫色土各处理微团聚体有机碳含量分别显著增长24.87%~195.59%;水稻土除ARW处理下降48.01%外, RW-2和RW处理则分别增长53.65%和12.02%。方差分析表明:除紫色土RW-2与水稻土RW处理微团聚体有机碳含量相比CK差异性显著($P<0.05$)外,其他处理均无显著性差异。

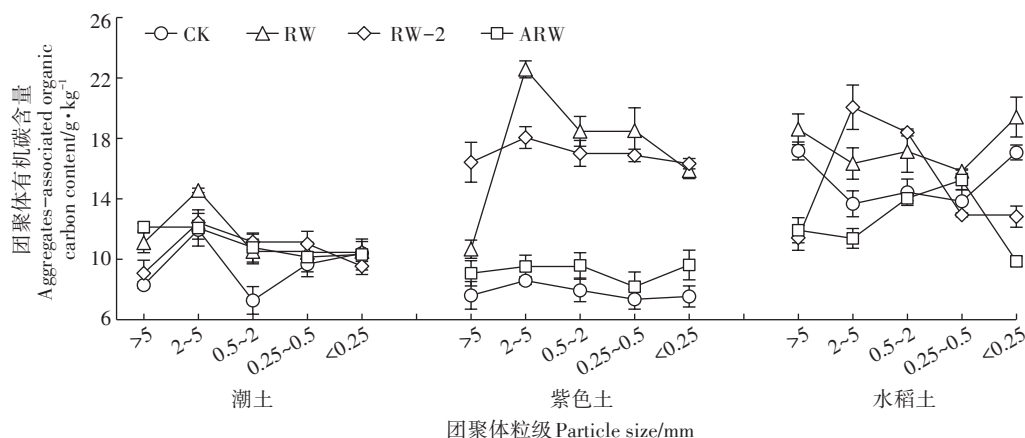


图4 再生水不同灌溉模式下各粒级土壤团聚体有机碳含量

Figure 4 The contents of organic carbon in soil aggregates with different particle sizes under different irrigation modes with reclaimed water

2.3 不同粒级团聚体对土壤总有机碳的贡献率

根据实测各粒级团聚体百分含量及其有机碳含量计算3种土壤总有机碳含量,在潮土、紫色土和水稻土中,其与实测土壤总有机碳含量的比值分别介于0.98~1.04、0.91~0.98和0.97~1.11。为方便作图与描述,本文采用计算土壤总有机碳含量表征再生水灌溉后的3种土壤总有机碳含量。

由图5可以看出,不同灌溉模式下,潮土各粒级团聚体对土壤有机碳的贡献率均以2~5 mm粒级团聚体最大,>5 mm和0.5~2 mm粒级团聚体次之,其中

>0.5 mm粒级团聚体对土壤总有机碳的贡献率为82.06%~90.66%;紫色土各处理对土壤总有机碳的贡献率以>5 mm和2~5 mm为主,其中>2 mm粒级团聚体对土壤总有机碳的贡献率共占71.21%~78.99%;水稻土各处理下则以0.5~2 mm粒级团聚体最大,2~5 mm粒级团聚体次之,其中0.5~5 mm粒级团聚体对土壤总有机碳的贡献率共占58.21%~69.96%。从图5和表3还可看出:大团聚体有机碳含量对土壤总有机碳含量的贡献率介于89.42%~97.09%,微团聚体有机碳含量的贡献率仅为2.91%~10.58%(不考虑土壤质

表3 再生水不同灌溉模式下大团聚体与微团聚体有机碳含量

Table 3 The contents of soil macroaggregate-associated organic carbon and microaggregate-associated organic carbon under different irrigation modes with reclaimed water

土壤类别 Soil classification	灌溉模式 Irrigation mode	$C_{ma}/g \cdot kg^{-1}$	$C_{mi}/g \cdot kg^{-1}$	C_{ma}/C_{mi}	$C_{mac}/\%$	GMD/mm	MWD/mm
潮土 Tidal soil	CK	8.66±1.55b	0.87±0.06ab	9.87±1.12c	91.48±4.26a	0.90±0.02a	1.54±0.00a
	RW	10.97±2.71ab	0.93±0.21a	11.72±0.22b	92.10±1.22a	0.77±0.01c	1.03±0.10d
	RW-2	11.41±2.08ab	0.62±0.19b	18.84±2.49a	94.90±1.00a	0.83±0.00b	1.33±0.01b
	ARW	12.69±1.39a	0.72±0.08ab	17.70±0.08a	94.57±1.15a	0.79±0.01c	1.22±0.04c
紫色土 Purple soil	CK	8.77±1.84b	0.36±0.04b	24.03±2.65b	95.97±0.42a	0.97±0.02d	1.76±0.34c
	RW	16.54±2.67a	0.55±0.05b	29.95±2.09a	97.09±2.51a	1.21±0.03a	3.27±0.21a
	RW-2	17.45±1.19a	1.07±0.34a	17.29±4.65c	94.15±2.01a	1.16±0.03b	2.87±0.17ab
	ARW	10.06±1.06b	0.45±0.06b	22.30±0.48bc	95.78±1.02a	1.09±0.01c	2.57±0.11b
水稻土 Paddy soil	CK	13.62±1.15b	1.21±0.48bc	12.41±4.33b	92.08±1.85a	0.84±0.05ab	1.29±0.06ab
	RW	16.40±1.85a	1.85±0.09a	8.83±0.57b	89.42±7.47a	0.83±0.05ab	1.24±0.10ab
	RW-2	15.22±1.58ab	1.35±0.35ab	11.59±1.89b	91.87±0.19a	0.91±0.03a	1.33±0.03a
	ARW	13.19±0.88b	0.63±0.14c	21.54±3.46a	95.49±0.68a	0.82±0.03b	1.19±0.05b

注: C_{ma} 为大团聚体有机碳含量, C_{mi} 为微团聚体有机碳含量; C_{mac} 为大团聚体有机碳含量对土壤总有机碳含量的贡献率; GMD 和 MWD 均采用湿筛处理后团聚体数据计算所得。

Note: C_{ma} is soil macroaggregate-associated organic carbon content, C_{mi} is soil microaggregate-associated organic carbon, C_{mac} is the contribution of soil macroaggregate-associated organic carbon content to the total organic carbon content, GMD and MWD are calculated with aggregate data by wet sieve.

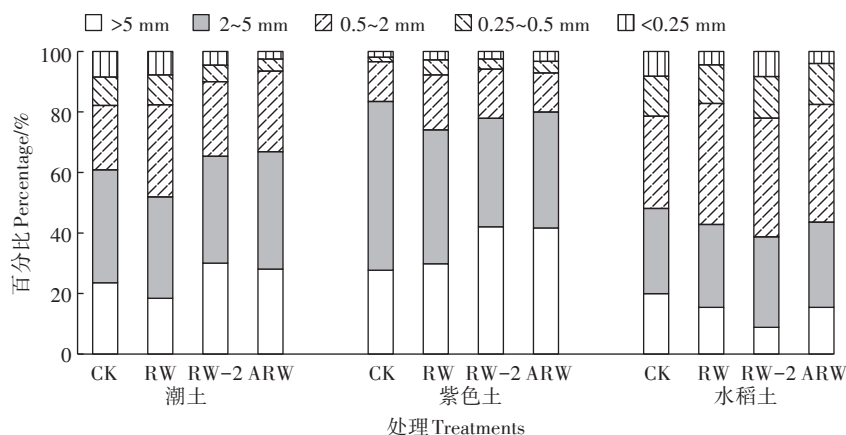


图5 团聚体有机碳含量占土壤总有机碳含量的百分比

Figure 5 The proportion of aggregate-associated organic carbon contents in soil total organic carbon contents

地差异)。

3 讨论

3.1 再生水不同灌溉模式下土壤团聚体分布及其稳定性差异

不同质地土壤由于土壤黏粒、粉粒及本身化学物质等含量差异影响土壤对入渗溶液中化学物质的吸附截留能力^[14]。使得再生水入渗对3种土壤团聚体组成产生不同影响,造成潮土、紫色土和水稻土优势粒级团聚体分布差异。从表3可以看出,潮土MWD和GMD表现为CK>RW-2>ARW>RW,紫色土表现为RW>RW-2>ARW>CK,水稻土则表现为RW-2>CK>RW>ARW。这表明再生水3种灌溉模式均降低潮土团聚体水稳定性,对紫色土团聚体水稳定性有增强作用;除RW-2处理外,其他处理均降低水稻土团聚体水稳定性。3种土壤团聚体水稳定性差异主要与土壤有机碳含量及土壤黏粒含量有关。土壤有机碳是形成土壤团聚体的重要胶结物质,土壤中有机碳含量增长会促进土壤较大粒级团聚体的形成^[15]。由于再生水中盐分含量较高($1\,000.13 \pm 134.75 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$),盐分进入土壤首先作用于土壤团聚体胶结物质,使得胶结剂发生糊化由凝胶变为溶胶,土壤胶结剂被软化溶解后,土壤团聚体遭到破坏,水稳定性降低。当盐分离子与土壤胶结剂反应过程结束后,继续与土壤黏粒发生水化膨胀作用,使得土壤结构进一步被破坏。从图3可以看出,虽然3种灌溉模式下潮土有机碳含量相比CK显著增长($P < 0.05$),但总体有机碳含量仍较低,而RW、RW-2和ARW等处理带入土壤的盐离子较多,部分盐离子将土壤有机碳软化溶解,其余继续与土壤黏粒发生水化膨胀作用,潮土黏粒含量较高

(38.00%),3种灌溉模式下潮土黏粒与盐离子的水化膨胀作用高于CK处理,使得潮土团聚体水稳定性显著降低。而紫色土RW、RW-2和ARW处理带入的有机碳胶结作用大于再生水带入的盐离子对土壤胶结剂的破坏作用,使得紫色土团聚作用提高,团聚体水稳定性增强。水稻土各处理有机碳含量变化并不显著,且黏粒含量较低(26.00%),与盐分的水化膨胀作用较弱,使得水稻土各处理团聚体水稳定性变化不显著。

试验前土壤溶液中化学物质浓度基本相同,再生水灌溉条件下,由于RW-2处理对再生水原液具有一定的稀释作用,使得入渗溶液中化学物质浓度处于较低水平;而ARW处理在清水交替灌溉时,对土壤的淋洗作用较为强烈,使得潮土和水稻土RW处理下团聚体水稳定性低于RW-2或ARW处理。而紫色土RW处理团聚体水稳定性高于RW-2或ARW处理,这可能是紫色土RW处理较高的有机碳含量造成的,其具体原因还需进一步深入研究。

3.2 再生水不同灌溉模式下土壤团聚体有机碳含量及其贡献率差异

由于再生水中所含的有机物成分复杂,难以一一分离测定。为了全面地反映再生水中有机物状况,本试验选用COD作为反映有机物含量的因子^[9]。以往研究认为再生水灌溉促进土壤有机质含量的累积^[11,16-17],本研究结果与其具有一致性(图3)。这是由于再生水中含有较高浓度的悬浮物(TSS为 $4.80 \pm 1.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)及有机质(COD为 $39.80 \pm 7.68 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)等,灌溉时给土壤输入了一定量的有机碳源,导致潮土和紫色土总有机碳含量显著增长(图3)。其次,由于再生水3种灌溉模式下潮土团聚体稳定性降低(表

3),团聚体结构被破坏,导致团聚体内部相对稳定的有机质被暴露,使得潮土总有机碳含量增加。由于RW-2处理对再生水中化学成分浓度具有一定的稀释作用,弱化再生水灌溉对土壤有机物质的补给强度;ARW处理下,清水灌溉对土壤中有机物质的淋洗作用导致土壤有机质随灌溉水迁移流失,使得水稻土RW-2和ARW处理土壤总有机碳含量低于RW处理。

土壤有机胶结物质的变化驱动土壤团聚体组成发生变异,进而影响土壤有机碳在不同粒级团聚体中的分配。由表3可以看出,3种土壤大团聚体有机碳含量显著高于微团聚体有机碳含量($P<0.01$)。这与Choudhury等^[18]和Kabiri等^[19]的研究结果相似。说明大团聚体是土壤有机碳供给的主要来源^[20]。大团聚体的形成和周转是影响土壤有机碳动态变化的关键过程^[21],由于微团聚体具有较大的比表面积,新鲜输入的有机物质进入土壤后,首先与土壤中粒径相对较小的微团聚体通过胶结作用聚合为大团聚体^[22],导致有机碳发生转移进入大团聚体,从而降低微团聚体中有机碳含量。由图4可以看出,虽然潮土和紫色土微团聚体有机碳含量相比其他粒级总体无显著性差异,且水稻土RW和CK处理微团聚体有机碳含量显著高于其他粒级团聚体,但微团聚体贡献率却远小于大团聚体。这表明土壤团聚体含量是引起团聚体养分贡献率变化的主要因素,这与王碧胜等^[23]研究结果一致。再生水3种灌溉模式下,土壤团聚体均以机械稳定性大团聚体为主(最低为89.56%),而团聚体有机碳对土壤总有机碳的贡献率取决于各粒级团聚体中有机碳含量和各粒级团聚体百分含量,使得大团聚体有机碳含量对土壤总有机碳含量的贡献率显著高于微团聚体(表3)。

4 结论

(1)再生水3种灌溉模式下,土壤机械稳定性团聚体均以大团聚体为主,湿筛后3种土壤大团聚体含量显著降低($P<0.05$)。再生水灌溉显著降低潮土团聚体水稳定性($P<0.05$),对紫色土团聚体水稳定性具有增强作用,采用RW-2模式可以增强水稻土团聚体水稳定性。

(2)再生水灌溉使得潮土和紫色土总有机碳及各粒级团聚体有机碳含量显著增长($P<0.05$),水稻土变化不显著。3种土壤大团聚体有机碳含量及其对土壤总有机碳的贡献率均显著高于微团聚体($P<0.01$)。

(3)从改善土壤团聚状况及有机碳固持方面考虑,在紫色土和水稻土上进行再生水灌溉更适合。紫

色土以RW模式改善效果最好,水稻土更适合采用RW-2模式。

参考文献:

- [1] Levy G J. Review: Impact of long-term irrigation with treated wastewater on soil-structure stability: The Israeli experience[J]. *Israel Journal of Plant Sciences*, 2011, 59(2/3/4): 95-104.
- [2] 商艳玲,李毅,朱德兰.再生水灌溉对土壤斥水性的影响[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(21): 89-97.
SHANG Yan-ling, LI Yi, ZHU De-lan. Effects of reclaimed water irrigation on soil water repellency[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(21): 89-97.
- [3] 王志超,史海滨,李仙岳,等.回填土下再生水灌溉对玉米生长及土壤理化性质的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(1): 196-202, 277.
WANG Zhi-chao, SHI Hai-bin, LI Xian-yue, et al. Effects of reclaimed water irrigation on the maize growth and physical and chemical properties of soil based on the construction backfill[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(1): 196-202, 277.
- [4] 徐爽,王益权.不同类型土壤团聚体化学稳定性分析[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(4): 173-178.
XU Shuang, WANG Yi-quan. Chemical stability of aggregates under different types of soil[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(4): 173-178.
- [5] Guggenberger G, Zech W, Thomas R J. Lignin and carbohydrate alteration in particle-size separates of an oxisol under tropical pastures following native savanna[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1995, 27(12): 1629-1638.
- [6] Zhang X, Xin X, Zhu A, et al. Effects of tillage and residue managements on organic C accumulation and soil aggregation in a sandy loam soil of the North China Plain[J]. *Catena*, 2017, 156(9): 176-183.
- [7] Tarchitzky J, Lerner O, Shani U, et al. Water distribution pattern in treated wastewater irrigated soils: Hydrophobicity effect[J]. *European Journal of Soil Science*, 2007, 58(3): 573-588.
- [8] Halliwell D J, Barlow K M, Nash D M. A review of the effects of wastewater sodium on soil physical properties and their implications for irrigation systems[J]. *Soil Research*, 2001, 39(39): 1259-1267.
- [9] 李霄云,王益权,孙慧敏,等.有机污染型灌溉水对土壤团聚体的影响[J]. *土壤学报*, 2011, 48(6): 1125-1132.
LI Xiao-yun, WANG Yi-quan, SUN Hui-min, et al. Effects of irrigation water polluted with organic contaminants on soil aggregates[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48(6): 1125-1132.
- [10] 盛丰,张敏,薛如霞,等.灌溉水中盐分对土壤结构性质及水流运动特征的影响[J]. *水利学报*, 2019, 50(3): 346-355.
SHENG Feng, ZHANG Min, XUE Ru-xia, et al. Effects of salt in irrigation water on soil structural properties and water flow characteristics[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, 50(3): 346-355.
- [11] 郑顺安,陈春,郑向群,等.再生水灌溉对土壤团聚体中有机碳、氮和磷的形态及分布的影响[J]. *中国环境科学*, 2012, 32(11): 2053-2059.
ZHENG Shun-an, CHEN Chun, ZHENG Xiang-qun, et al. Effect of

- reclaimed water irrigation on the distribution of organic carbon, nitrogen and phosphorus in different size of aggregates in sandy purple soil[J]. *China Environmental Science*, 2012, 32(11):2053-2059.
- [12] Hillel D. Environmental soil physics[M]. Salt Lake City: Academic Press, 1998: 114-125.
- [13] 章明奎, 郑顺安, 王丽平. 利用方式对砂质土壤有机碳、氮和磷的形态及其在不同大小团聚体中分布的影响[J]. 中国农业科学, 2007, 40(8): 1703-1711.
- ZHANG Ming-kui, ZHENG Shun-an, WANG Li-ping. Chemical forms and distributions of organic carbon, nitrogen and phosphorus in sandy soil aggregate fractions as affected by land uses[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(8): 1703-1711.
- [14] 胡传旺, 王辉, 武芸, 等. 再生水盐分在亚热带不同土壤中的迁移特性及其差异[J]. 农业工程学报, 2018, 34(20): 99-107.
- HU Chuan-wang, WANG Hui, WU Yun, et al. Migration characteristics and its differences of reclaimed water salinity in different subtropical soils[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(20): 99-107.
- [15] 王子龙, 胡斐南, 赵勇钢, 等. 土壤胶结物质分布特征及其对黄土大团聚体稳定性的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(5): 331-336.
- WANG Zi-long, HU Fei-nan, ZHAO Yong-gang, et al. Distribution characteristics of soil cementing material and its effect on loess macro-aggregate stability[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(5): 331-336.
- [16] 胡廷飞, 王辉, 胡传旺, 等. 灌溉水质和灌水方式对红壤斥水性及其理化性质的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36(8): 651-655, 661.
- HU Ting-fei, WANG Hui, HU Chuan-wang, et al. Effects of different water quality and irrigation methods on red soil water repellency and physical-chemical properties[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2018, 36(8): 651-655, 661.
- [17] 韩洋, 齐学斌, 李平, 等. 再生水和清水不同灌水水平对土壤理化性质及病原菌分布的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(8): 32-38.
- HAN Yang, QI Xue-bin, LI Ping, et al. Effects of the amount of irrigation with reclaimed wastewater on soil properties and distribution of pathogenic bacteria[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(8): 32-38.
- [18] Choudhury S G, Srivastava S, Singh R, et al. Tillage and residue management effects on soil aggregation, organic carbon dynamics and yield attribute in rice-wheat cropping system under reclaimed sodic soil[J]. *Soil & Tillage Research*, 2014, 136(4): 76-83.
- [19] Kabiri V, Raiesi F, Ghazavi M A. Six years of different tillage systems affected aggregate-associated SOM in a semi-arid loam soil from Central Iran[J]. *Soil & Tillage Research*, 2015, 154(12): 114-125.
- [20] 刘杰, 马艳婷, 王宪玲, 等. 渭北旱塬土地利用方式对土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响[J]. 环境科学, 2019, 40(7): 3361-3368.
- LIU Jie, MA Yan-ting, WANG Xian-ling, et al. Impact of land use type on the stability and organic carbon content of soil aggregates in the Weibei dryland[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(7): 3361-3368.
- [21] Six J, H Bossuyt, S Degryze, et al. A history of research on the link between(micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics[J]. *Soil & Tillage Research*, 2004, 79(1): 7-31.
- [22] 郑学博, 樊剑波, 周静. 沼液还田对旱地红壤有机质及团聚体特征的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(16): 3201-3210.
- ZHENG Xue-bo, FAN Jian-bo, ZHOU Jing. Effects of biogas slurry on soil organic matter and characteristics of soil aggregates in upland red earth[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(16): 3201-3210.
- [23] 王碧胜, 于维水, 武雪萍, 等. 添加玉米秸秆对旱作土壤团聚体及其有机碳含量的影响[J]. 中国农业科学, 2019, 52(9): 1553-1563.
- WANG Bi-sheng, YU Wei-shui, WU Xue-ping, et al. Effect of straw addition on the formation of aggregates and accumulation of organic carbon in dryland soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(9): 1553-1563.