

引黄灌溉耕作对土壤团聚体有机碳的影响

杨飞霞^{1,2}, 曹广超², 于东升³, 史学正³, 董林林^{3,4}

(1. 青海师范大学生命与地理科学学院, 西宁 810001; 2. 青海省自然地理与环境过程重点实验室, 西宁 810001;
3. 土壤与农业可持续发展国家重点实验室中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008;
4. 江苏太湖地区农业科学研究所, 江苏 苏州 215155)

摘要: 为研究灌溉耕作影响下土壤团聚体及有机碳的特征情况, 以宁夏引黄灌区为研究对象, 选取对照土壤与耕作土壤, 通过干、湿筛结合的方法, 得到大团聚体(>2 mm)、中间团聚体($2\sim 0.25$ mm)、微团聚体($0.25\sim 0.053$ mm)和粉+黏团聚体(<0.053 mm), 并测定团聚体有机碳含量, 分析团聚体有机碳与总有机碳之间的关系。结果表明, 灌溉耕作对团聚体分布具有极显著影响($P<0.01$), 其中大团聚体和中间团聚体质量分数上升, 微团聚体和粉+黏团聚体质量分数下降, 灌溉土壤团聚体分布趋势为微团聚体 $>$ 粉+黏团聚体 $>$ 中间团聚体 $>$ 大团聚体。经灌溉耕作后土壤团聚体稳定性大于对照土壤, 不同类型的灌溉土壤稳定性基本一致, 对照土壤间差异明显。除 <0.053 mm外, 团聚体有机碳分布在经过灌溉耕作后有显著性差异($P<0.05$), 团聚体有机碳分布随粒级大小基本呈“V”形分布。团聚体有机碳含量均表现出灌溉土壤高于对照土壤, 其中灌溉土壤中灌淤土和潮土团聚体有机碳总量较高。未受人为灌溉耕作影响的自然土壤团聚体有机碳与总有机碳间具有显著的正相关性, 土壤总有机碳增加主要依赖 >0.053 mm团聚体有机碳增加。引黄灌溉耕作有利于增加大粒级团聚体的比例, 提升团聚体稳定, 显著增加有机碳含量。

关键词: 灌溉耕作; 团聚体; 有机碳; 相关性

中图分类号: S153.6

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)04-0190-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.04.030

Effect of Cultivation and Irrigation with Yellow River on Soil Organic Carbon in Soil Aggregates

YANG Feixia^{1,2}, CAO Guangchao², YU Dongshen³, SHI Xuezheng³, DONG Linlin^{3,4}

(1. College of Life and Geographical Sciences, Qinghai Normal University, Xining 810001;

2. Qinghai Key Laboratory of Natural Geography and Environmental Process, Xining 810001;

3. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Science, Nanjing 210008; 4. Taihu Research Institute of Agriculture Science, Suzhou, Jiangsu 215155)

Abstract: In order to study the effects of cultivation and irrigation on soil aggregation and organic carbon, the study subjects were selected from the irrigation zone in Ningxia province, and selected the control and irrigated soil. Through the combination of dry and wet methods, we got the proportion of large macroaggregates (>2 mm), small macroaggregates ($0.25\sim 2$ mm), microaggregates ($0.25\sim 0.053$ mm) and silt + clay (<0.053 mm), and measured the content of organic carbon in each aggregate fraction and analyzed the relationship between organic carbon and total organic carbon. The results showed that aggregate distribution changed significantly ($P<0.01$) after irrigation, large macroaggregates and small macroaggregates proportion raised, microaggregates and silt + clay mass proportion decreased, the distribution trend was microaggregates $>$ silt + clay $>$ small macroaggregates $>$ large macroaggregates. Irrigated soil aggregate stability was greater than that of the control soil, different types of irrigated soil had the same stability, and showed difference between control soils. In addition to <0.053 mm, the aggregate distribution of organic carbon after irrigation had significant difference ($P<0.05$), the organic carbon content had a “V” distribution with the size of the granule. Soil organic carbon in aggregate was higher in irrigated soil than that of the control soil, Irrigated-silted soil

收稿日期: 2018-03-08

资助项目: 国家自然科学基金项目(41501326)

第一作者: 杨飞霞(1993—), 女, 硕士研究生, 主要从事地表环境过程与演变研究。E-mail: yfx812@163.com

通信作者: 董林林(1979—), 女, 博士, 副研究员, 主要从事土壤与沉积环境研究。E-mail: jinjindoudou2005@163.com

and Fluvo-aquic soil showed higher aggregate organic carbon content. There was a significant positive correlation between organic carbon in aggregate and total organic carbon in non-cultivated and non-irrigated natural soils, soil total organic carbon increase mainly depended on increment of >0.053 mm aggregate organic carbon. Cultivation and irrigation with sediment laden Yellow River water was significantly beneficial to increase the proportion of large scale aggregate, the stability of the aggregate, and the organic carbon content.

Keywords: irrigation tillage; aggregate; organic carbon; correlation

土壤团聚体是土壤结构最基本的单位,是土壤稳定性的一个重要指标,改变土壤结构可提高团聚体稳定性,对土壤肥力的保持与提升具有积极作用^[1]。同时,土壤团聚体被认为是土壤质量或土壤健康的关键指标,与生态系统中许多功能有着密切关系^[2]。根据 Six 等^[3]的研究,团聚体分级以 0.25 mm 为界, >0.25 mm 的团聚体称为大团聚体, <0.25 mm 的团聚体称为微团聚体。分析团聚体的方法包括干筛法、湿筛法及干、湿筛结合法,其中干、湿筛结合是目前使用最为广泛的团聚体分析方法。

土壤团聚体与有机质之间存在密切联系,一方面土壤团聚体是有机质储存与转化场所,可为有机质的形成与分解提供空间;另一方面,土壤有机质是团聚体的主要胶结剂,是土壤团聚体形成的物质基础^[4]。目前,有关土壤团聚体有机碳的研究多数集中在土地利用方式和农业管理措施,如耕作方式、种植方式、施肥等方面。Pinheiro 等^[5]比较了不同土地利用方式下的土壤团聚体有机碳含量,结果表明草地土壤团聚体有机碳含量显著高于耕地和裸地;邱晓蕾等^[6]研究结果显示,与常规种植相比,有机种植模式下有机碳含量显著提高,微团聚体有机碳更多且更稳定;谭秋锦等^[7]对峡谷型喀斯特生态系统的研究认为,土壤团聚体有机碳含量以 $0.25\sim 0.053$ mm 粒级最高, >5 mm 粒级含量最低。

灌溉是提高土壤有机碳含量的有效措施^[8]。在水资源缺乏的我国西北地区,引用含有泥沙的河水进行灌溉是保障农作物正常生长的有效措施,也有利于提升土壤肥力,增加土壤有机碳含量,提高土壤团聚体稳定性^[9]。李霄云等^[10]在陕西交口灌区研究认为,长期采用有机污染水灌溉,可提高农田土壤团聚体稳定性,降低其分散系数;张耀方等^[11]在宁夏平罗比较不同利用方式对灌淤土团聚体稳定性的研究得出, >1 mm 粒级土壤团聚体稳定性中,旱作高于水田, $1\sim 0.25$ mm 土壤团聚体稳定性中,旱作小于水田,前期的研究主要分析了灌溉对土壤团聚体稳定性的影响,对长期引用高含沙河水灌溉影响下土壤团聚体有机碳的构成和稳定性特征尚不明确。本文采用干、湿筛结合方法^[12],将土壤分为大团聚体(>2 mm)、中间团聚体($2\sim 0.25$ mm)、微团聚体($0.25\sim$

0.053 mm)和粉+黏团聚体(<0.053 mm),通过对宁夏引黄灌区土壤团聚体组成及团聚体有机碳含量的测定分析,试图阐明引黄灌溉耕作下土壤团聚体构成和团聚体有机碳的构成特征,探讨灌溉耕作对团聚体有机碳的影响,以期对土壤肥力保持与提升和增加土壤固碳减排提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

宁夏引黄灌区位于我国西北地区的东部,宁夏回族自治区的中北部($35^{\circ}14'\sim 39^{\circ}23'N$, $104^{\circ}17'\sim 107^{\circ}49'E$),年均气温 $8\sim 9$ °C,年降水量 200 mm,年均日照时间 $2800\sim 3100$ h,无霜期长达 164 d。宁夏引黄灌溉面积为 4.61×10^5 hm^2 ,占全区灌溉面积的 93% ,引黄灌溉分为自流灌溉和扬水灌溉,自流灌溉面积为 3.83×10^5 hm^2 ,占全区引黄灌溉总面积的 77.39% ,位于北部银川平原,是宁夏历史悠久的灌区,也是我国四大自流灌区之一,扬水灌溉面积 7.73×10^4 hm^2 ,占全区引黄灌溉总面积的 15.61% 。

1.2 样品采集与分析

宁夏引黄灌区灌溉耕作是指在农业耕作区进行灌溉作业的同时进行农耕活动,灌溉是为了更有效的耕作活动,两者不可分割。根据灌区土壤类型及特征,选择具有代表性的五类土壤:淡灰钙土(Sierozem soil)、风沙土(Aeolian Sandy Soil)、灌淤土(Irrigated-silted Soil)、潮土(Fluvo-aquic Soil)和新积土(Alluvial Soil),其中灌淤土分布最广且灌溉时间最长。灌渠自建成后持续使用至今,因此灌渠的建成时间大体代表了土壤的灌溉时间,并以此来设置灌区土壤的灌溉年限,在没有受到灌溉耕作及人为扰动地区设置对照土壤,灌溉时间设为 0 年,以此来保证土壤的代表性。灌淤土和新积土是在风沙土、淡灰钙土及潮土的基础上,因长期的耕作、灌溉、施肥等人为活动形成的,可将其他 3 类土壤的对照土壤作为灌淤土和新积土的对照土壤。2015年10月宁夏灌区冬季灌水前进行土样采集,共 67 个样点土壤,采样深度为 $0\sim 30$ cm,每个样品 1.50 kg,环刀法测容重(3 个重复)。样品带回室内,自然风干,剔除杂物,以备试验。

干筛分析:将自然风干土样掰成小块,剔除草根等杂质,从上往下依次过 $2,0.25,0.053$ mm 套筛(筛子附

有底盘),得到 $>2, 2\sim 0.25, 0.25\sim 0.053, <0.053$ mm 4 个粒级团聚体,按百分比称取共计 50.00 g 风干土样, <0.053 mm 粒级单独装袋,其余统一装袋。湿筛分析:将 3 个粒级土样倒入一套筛子(2, 0.25, 0.053 mm)底部无托盘,并完全放入纯水环境中静置 10 min,随后湿筛 10 min(振幅 30 次/min),分别得到大团聚体、中间团聚体、微团聚体,将土样装入铝盒中静置 24 h,吸干多余水分,60 ℃ 烘干。

土壤有机碳及土壤团聚体有机碳含量采用重铬酸钾滴定法测定^[13]。

1.3 数据分析

大团聚体、中间团聚体和微团聚体质量称重可得,粉+黏团聚体质量用 50.00 g 减去其他 3 个团聚体质量所得。相关计算公式:

各团聚体质量分数=该团聚体质量/土壤样品总质量 $\times 100\%$

$$\text{平均质量直径(MWD)} = \sum_i \bar{X}_i W_i$$

式中: n 为粒级分组组数; \bar{X}_i 为粒级组分平均直径,其中 >2 mm 和 <0.053 mm 粒级组分平均直径为 2 mm 和 0.053 mm; W_i 为粒级质量分数。

采用 Excel 2010、Origin 9.0 和 SPSS 19.0 对数据进行处理,相关数据进行单因素方差分析、 t 检验分析及相关分析($P<0.05$)。

表 1 对照与灌溉土壤团聚体质量分数

单位:%

土壤	>2 mm	$2\sim 0.25$ mm	$0.25\sim 0.053$ mm	<0.053 mm
对照土壤	$4.81\pm 3.74^{***}$	18.37 ± 9.63	$49.27\pm 20.04^{**}$	$27.54\pm 16.38^{***}$
灌溉土壤	10.47 ± 7.56	28.71 ± 11.5	37.36 ± 13.14	23.56 ± 9.12

注:表中数据为平均值 \pm 标准误;***、**分别指在同一粒级下不同土壤间 $P<0.001$ 和 $P<0.01$ 水平上差异显著。下同。

2.2 灌溉耕作对土壤团聚体水稳定性指标的影响

平均质量直径(MWD)是团聚体稳定性的重要指标,MWD 值越高表示团聚度越高,团聚体结构越稳定。从图 1 可以看出,对照土壤之间稳定性差异明显,MWD 为淡灰钙土 $>$ 风沙土 $>$ 灌淤土(新积土) $>$ 潮土;不同类型灌溉土壤稳定性差异不明显,基本维持在 0.82~0.83 mm。经灌溉耕作后的土壤稳定性较对照土壤增强,说明灌溉耕作活动对土壤稳定性的提高具有显著作用。

在 5 种类型对照土壤中,0—30 cm 深度内,淡灰钙土稳定性最高,MWD 值达到 0.81 mm,植物根系和微生物代谢产生的多糖胶结物质和菌丝体的缠绕对团聚体的稳定性具有积极作用^[15];潮土稳定性最低,MWD 值仅为 0.72 mm,稳定性最低的原因可能与潮土的采样地点区域有关,潮土分别来源于 SOC 含量较高和较低的惠农渠和东干渠,SOC 含量影响土壤稳定性,使其稳定性平均值在 5 类土壤中最低,经灌溉耕作后潮土稳定性提升至 0.83 mm。在不同

2 结果与分析

2.1 灌溉耕作对土壤团聚体组成的影响

灌溉耕作后宁夏引黄灌区土壤团聚体组成见表 1。不同类型的土壤间团聚体组成差异明显,对照土壤团聚体质量分数大小顺序为:微团聚体 $>$ 粉+黏团聚体 $>$ 中间团聚体 $>$ 大团聚体。经过人为灌溉耕作后,土壤团聚体质量分数大小顺序为:微团聚体 $>$ 中间团聚体 $>$ 粉+黏团聚体 $>$ 大团聚体。

不同土壤下大团聚体含量最高仅为 10%,微团聚体含量均最高,变幅在 37.36%~49.27%,说明微团聚体(0.25~0.053 mm)是该区域团聚体存在的主要形式。 >2 mm 灌溉土壤团聚体质量分数与对照相比增幅最大,达到 1.17 倍,0.25~0.053 mm 团聚体质量分数降幅最大,但所占比例仍占 4 个粒级中最高, <0.053 mm 团聚体对照土壤与灌溉土壤间差异极显著($P<0.001$)。土壤经灌溉耕作后,微团聚体和粉+黏团聚体含量有所降低,分别由原来的 49%和 27%降低到 37%和 23%,同时大团聚体和中间团聚体有所增加,增幅均超过 36%。由此可见灌溉耕作有利于 >0.25 mm 团聚体的形成,原因在于有机物进入到土壤中直接与微团聚体黏结形成大团聚体^[14],同时植物根系本身具有胶结作用,根系能把土壤微小颗粒胶结成稳定的大团聚体,增加了大团聚体含量。

类型灌溉土壤 0—30 cm 范围中,新积土和风沙土稳定性为 0.82 mm,潮土、灌淤土和淡灰钙土稳定性为 0.83 mm,不同类型土壤灌溉时间差异较大,新积土灌溉时间仅有 15 年,灌淤土为 2 000 年左右,其灌溉耕作后结果基本相同。由此可见,灌溉耕作后时间不是影响土壤稳定性的主要原因。

2.3 灌溉耕作对土壤团聚体有机碳分布的影响

从图 2 可以看出,除粉+黏团聚体外,灌溉耕作导致其他粒级团聚体有机碳分布差异显著($P<0.05$),0—30 cm 土层深度内,对照土壤团聚体有机碳质量分数大小顺序为:微团聚体 $>$ 粉+黏团聚体 $>$ 中间团聚体 $>$ 大团聚体;灌溉土壤团聚体有机碳质量分数大小顺序为:微团聚体 $>$ 中间团聚体 $>$ 粉+黏团聚体 $>$ 大团聚体。经灌溉耕作后,微团聚体有机碳质量分数较对照土壤有所下降,下降幅度为 38.67%($P<0.05$),大团聚体和中间团聚体质量分数有所上升,增幅分别为 19.86%和 20.57%($P<0.05$),粉+黏团聚体有机碳质量分数基本不变,表明灌溉耕作对 >0.053 mm 团聚体有

机碳分布影响明显,对 <0.053 mm 团聚体有机碳分布影响不大。根据 Six 等^[16]关于团聚体的经典模型的研究表明,新鲜的有机质可将微团聚体胶结成大团聚体,有机质分解时大团聚体直接分解成微团聚体。灌溉耕作及有机物质增加有利于大团聚体和中间团聚体的形成,土壤有机碳向稳定性更高的大团聚体和中间团聚体聚集,同时灌溉土壤较对照土壤各粒级团聚体有机碳差异性减弱,团聚体有机碳分布更均匀。

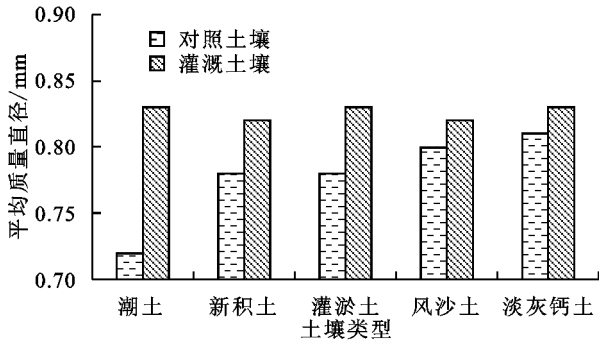
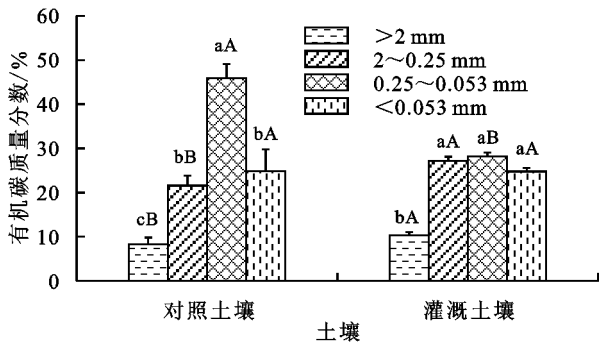


图1 灌溉耕作影响下不同类型土壤团聚体平均质量直径



注:不同小写字母表示在同一土壤下不同粒级差异显著($P<0.05$);不同大写字母表示在同一粒级下不同土壤差异显著($P<0.05$)。

图2 灌溉耕作对土壤各粒级团聚体有机碳质量分数的影响

随着团聚体粒级的减小,除潮土和灌淤土外,所有土壤团聚体有机碳含量呈“V”形分布(图3),团聚体有机碳含量随着粒级的减小先降低后升高, <0.053 mm 粒级团聚体有机碳含量最高。李恋卿等^[17]对退化红壤植被表层土壤团聚体有机碳的研究中得到了一致的结论。灌淤土经灌溉耕作后有机碳含量随粒级的减小分别为 8.13, 8.43, 6.77, 6.89 g/kg,有机碳含量整体呈下降趋势,体现灌溉耕作在土壤团聚体形成过程中的重要作用,灌淤土的灌溉耕作时间长,积累的有机质多,微团聚体在有机质的作用下胶结成粒级更大的团聚体,使得大团聚体有机碳含量增加,微团聚体含量降低^[18]。潮土在未经灌溉耕作前,团聚体有机碳含量随粒级的减小而下降,原因一方面可能与潮土分布区域有关,团聚体有机碳含量平均值较低,另一方面可能与潮土自身性质有关,具体原因有待进一步研究。

2.4 灌溉耕作对土壤团聚体有机碳含量的影响

由图3可以看出,在0—30 cm 土层深度内,大团聚体、中间团聚体、微团聚体和粉+黏团聚体对照土壤有机碳平均值含量分别为 3.50, 3.24, 2.50, 4.46 g/kg,灌溉土壤对应的各粒级有机碳含量分别为 5.50, 5.40, 4.24, 6.44 g/kg,分别增加了 36.36%, 40%, 41.04%, 30.75%。微团聚体有机碳含量增加越多,说明微团聚体有机碳对灌溉耕作的反应越敏感。粉+黏团聚体有机碳含量最高,符合有机碳含量优先向小粒级团聚体聚集理论,大团聚体有机碳含量较高,可能是因为大团聚体中处于分解状态的根系和菌丝经过腐质化过程使其中有机碳含量增加^[19]。

图4为0—30 cm 深度内灌溉耕作对不同类型土壤团聚体有机碳含量的影响,灌溉耕作后的农作物枯落物遗留在土壤表层,可供微生物生存与活动的能量增多,促进土壤表层生物活性,从而利于土壤团聚体内有机质形成,增加土壤有机碳含量^[20]。灌溉耕作对不同类型土壤团聚体有机碳含量的影响不同,大团聚体和中间团聚体中,风沙土对照土壤与灌溉土壤差异性明显($P<0.05$),微团聚体中,淡灰钙对照土壤与灌溉土壤极显著性差异($P<0.01$),粉+黏团聚体中,灌溉耕作对不同类型团聚体有机碳的影响不明显($P>0.05$)。

从图4可以看出,不同类型土壤下0—30 cm 土层深度内各粒级团聚体含量,灌溉耕作影响下所有粒级团聚体有机碳含量均为灌淤土>潮土>淡灰钙土>风沙土>新积土,5类土壤中灌淤土和潮土团聚体有机碳含量相对较高,淡灰钙土、风沙土和新积土团聚体有机碳含量相对较低,原因可能与灌淤土和潮土分布区域有关,其分布地区灌溉条件较优越,利于作物生长,进入土壤中的有机质更多样,且能更好地保存和积累下来,为土壤团聚体的形成提供更多的胶结物质^[21]。

2.5 土壤总有机碳与团聚体有机碳的关系

从图5可以看出,在所有团聚体中,随土壤总有机碳含量增加,各粒级团聚体有机碳含量总体呈增加趋势,且土壤总有机碳与团聚体有机碳呈正相关关系。其中, $>2, 2\sim0.25, 0.25\sim0.053$ mm 粒级总有机碳与团聚体有机碳均达极显著正相关($P<0.01$), <0.053 mm 粒级总有机碳与团聚体有机碳无明显相关性($P>0.05$)。与灌溉土壤相比,对照土壤团聚体有机碳与总有机碳间均表现出更强的相关性,说明团聚体有机碳含量对总有机碳含量的响应在对照土壤中更为强烈。

粉+黏团聚体有机碳与总有机碳的关系不显著($P>0.05$), <0.053 mm 团聚体在对照土壤中有机碳与总有机碳间的相关系数为 0.655,经灌溉耕作后的相

关系数降低为 0.539,同时增加趋势变缓,说明总有机碳随粉+黏团聚体有机碳的增加而增加,但增幅不大。原因可能与团聚体中的颗粒态有机质有关(particulate

organic matter,POM),团聚体中 POM 因受到物理保护而减少矿化反应,与粉+黏团聚体结合降低了总有机碳对团聚体的影响,提高了粉+黏团聚体的稳定性。

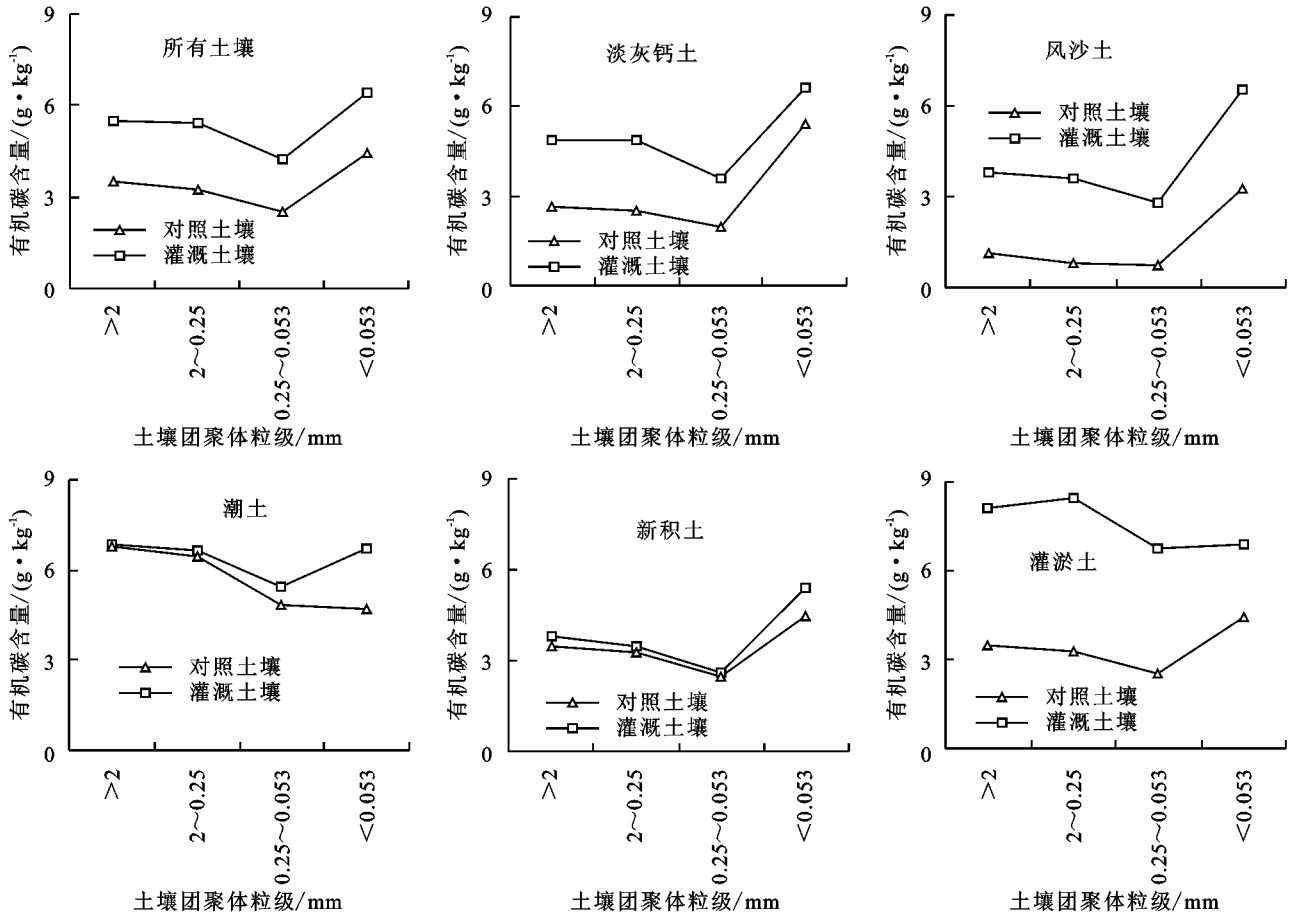


图 3 土壤各粒级团聚体有机碳分布情况

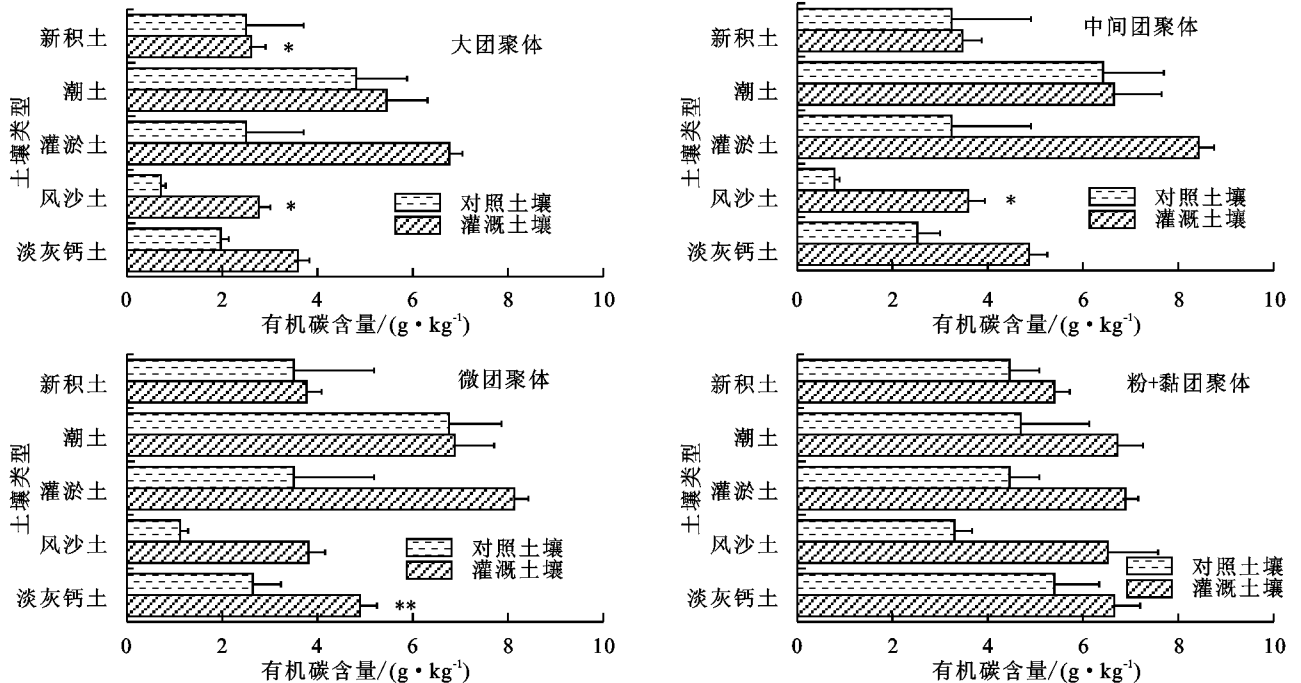


图 4 灌溉耕作影响下不同类型土壤各粒级有机碳含量

在对照土壤中,中间团聚体有机碳与总有机碳的正相关关系最为显著($P<0.01$),相关系数达到 0.966,其

次为微团聚体、大团聚体和粉+黏团聚体,在灌溉土壤中,总有机碳与团聚体有机碳之间的相关性大小为微团

聚体>中间团聚体>大团聚体>粉+黏团聚体,除粉+黏团聚体外,其余团聚体有机碳与总有机碳的相关性均达到 0.940。由此可见,在 0—30 cm 土层,灌溉耕作对

增加土壤团聚体有机碳含量具有积极作用,土壤总有机碳的增加主要受到>2,2~0.25,0.25~0.053 mm 团聚体中有机碳增加的影响。

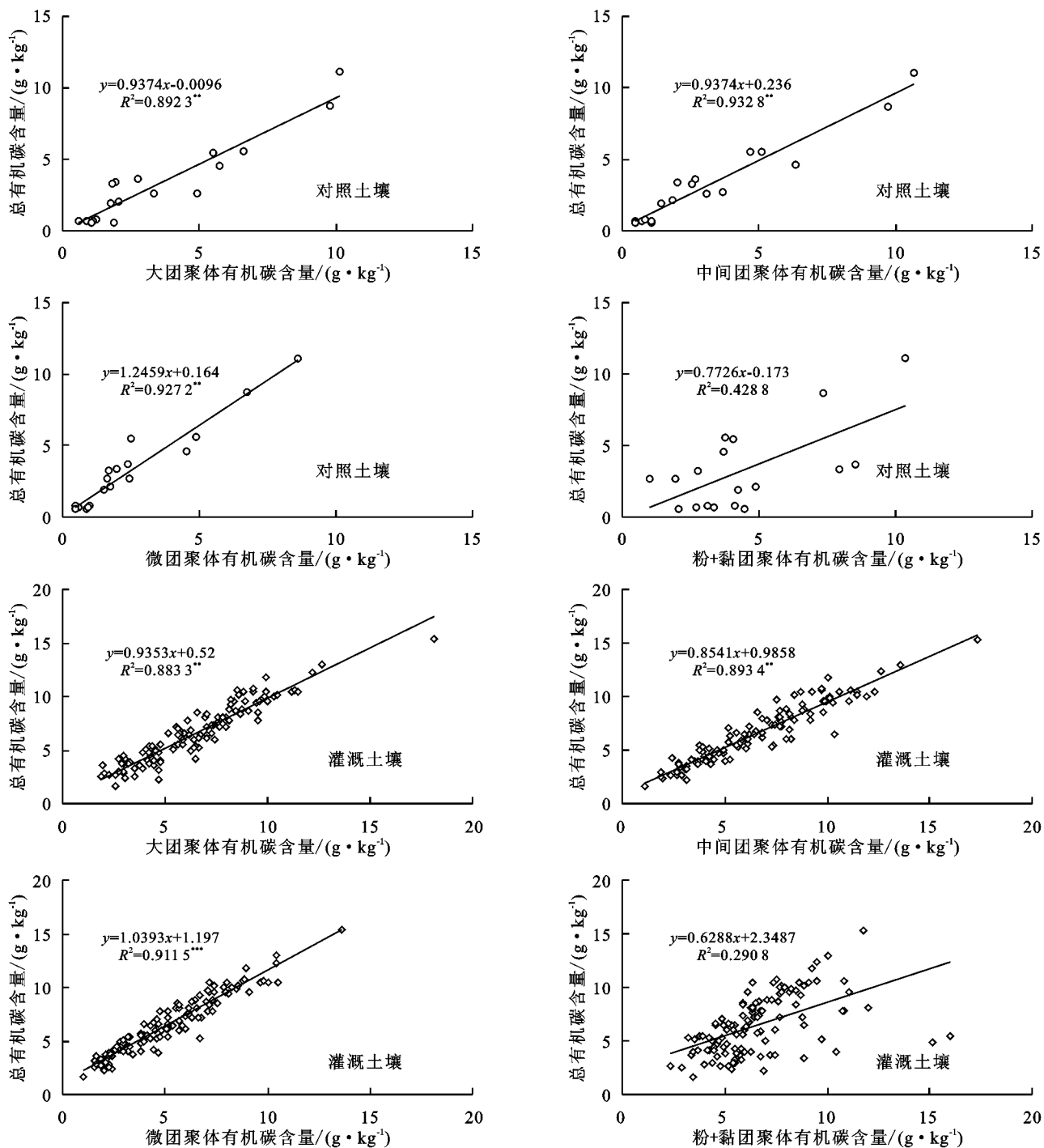


图 5 土壤各粒级团聚体有机碳与总有机碳的相互关系

3 结论

(1)经灌溉耕作后,土壤团聚体稳定性增强,团聚体有机碳含量会随之增加,团聚体有机碳分布随着粒级的减小呈“V”形分布。

(2)经灌溉耕作后,团聚体及有机碳分布更加均匀,>0.25 mm 团聚体质量分数及有机碳质量分数有所上升,<0.25 mm 团聚体质量分数及有机碳质量分数有所降低,微团聚体在 4 个粒级中分布最广,

但微团聚体有机碳含量却是最低的,造成这种现象的具体原因有待进一步研究。

(3)无论对照土壤还是灌溉土壤,团聚体有机碳与总有机碳均具有较强的相关性,其中未经灌溉耕作影响的团聚体有机碳对土壤总有机碳的响应更为强烈。

参考文献:

[1] 史琼彬,赵秀兰,常同举,等.耕作方式对紫色水稻土壤团聚体中有机质及重金属的分布特征影响[J].环境科学,

- 2016,37(5):1923-1930.
- [2] 李鉴霖,江长胜,郝庆菊. 土地利用方式对缙云山土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响[J]. 环境科学,2014,35(12):4695-4704.
- [3] Six J, Elliott E T, Paustian K. Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1999,63(5):1350-1358.
- [4] 龚仓,马玲玲,成杭新,等. 典型农耕区黑土和沼泽土团聚体颗粒中重金属的分布特征解析[J]. 生态环境学报,2012,21(9):1635-1639.
- [5] Pinheiro E, Pereira M G, Anjos L. Aggregate distribution and soil organic matter under different tillage systems for vegetable crops in a red Latosol from Brazil[J]. *Soil and Tillage Research*,2004,77(1):79-84.
- [6] 邱晓蕾,宗良纲,刘一凡,等. 不同种植模式对土壤团聚体及有机碳组分的影响[J]. 环境科学,2015,36(3):1045-1052.
- [7] 谭秋锦,宋同清,彭晚霞,等. 峡谷型喀斯特不同生态系统土壤团聚体稳定性及有机碳特征[J]. 应用生态学报,2014,25(3):671-678.
- [8] Giubergia J P, Martellotto E, Lavado R S. Complementary irrigation and direct drilling have little effect on soil organic carbon content in semiarid argentina[J]. *Soil and Tillage Research*,2013,134(8):147-152.
- [9] 董林林,于东升,张海东,等. 宁夏引黄灌区土壤有机碳密度时空变化特征[J]. 生态学杂志,2015,34(8):2245-2254.
- [10] 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.
- [11] 张耀方,赵世伟,李晓晓,等. 利用方式对灌淤土团聚体稳定性及有机碳官能团特征的影响[J]. 水土保持学报,2015,29(1):169-174.
- [12] Mahmoud M, Janssen M, Peth S, et al. Long-term impact of irrigation with olive mill wastewater on aggregate properties in the top soil[J]. *Soil and Tillage Research*,2012,124(4):24-31.
- [13] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科学出版社,2000.
- [14] 陈丽珍. 亚表层培肥对土壤团聚体有机质特征的影响[D]. 长春:吉林农业大学,2013.
- [15] 戴珏,胡君利,林先贵,等. 免耕对潮土不同粒级团聚体有机碳含量及微生物碳代谢活性的影响[J]. 土壤学报,2010,47(5):923-930.
- [16] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture[J]. *Soil Biology and Biochemistry*,2000,32(14):2099-2103.
- [17] 李恋卿,潘根兴,张旭辉. 退化红壤植被恢复中表层土壤微团聚体及其有机碳的分布变化[J]. 土壤通报,2000,31(5):193-195.
- [18] Cambardella C A, Elliott E T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence [J]. *Soil Science Society of America Journal*,2007,56(3):777-783.
- [19] 陈山. 不同利用方式土壤团聚体稳定性及其与有机质和铁铝氧化物的关系[D]. 武汉:华中农业大学,2012.
- [20] Sodhi G P, Beri V, Benbi D K. Soil aggregation and distribution of carbon and nitrogen in different fractions under long-term application of compost in rice-wheat system[J]. *Soil and Tillage Research*,2009,103(2):412-418.
- [21] 董林林,张海东,于东升,等. 引黄灌淤耕作对剖面土壤有机质组分构成的影响[J]. 土壤学报,2017,54(3):613-623.

(上接第 189 页)

- [16] 李辉信,袁颖红,黄欠如,等. 不同施肥处理对红壤水稻土团聚体有机碳分布的影响[J]. 土壤学报,2006,43(3):422-427.
- [17] 冷延慧,汪景宽,李双异. 长期施肥对黑土团聚体分布和碳储量变化的影响[J]. 生态学杂志,2008,27(12):2171-2177.
- [18] 邢旭明,王红梅,安婷婷,等. 长期施肥对棕壤团聚体组成及其主要养分赋存的影响[J]. 水土保持学报,2015,29(2):267-273.
- [19] 吕欣欣,丁雪丽,张彬,等. 长期定位施肥和地膜覆盖对棕壤团聚体稳定性及其有机碳含量的影响[J]. 农业资源与环境学报,2018,35(1):1-10.
- [20] 李辉信,袁颖红,黄欠如,等. 不同施肥处理对红壤水稻土团聚体有机碳分布的影响[J]. 土壤学报,2006,43(3):422-429.
- [21] 刘敏英. 植茶年限对土壤团聚体组成及其有机碳组分影响[D]. 成都:四川农业大学,2012.
- [22] 刘中良,字万太,周桦,等. 长期施肥对土壤团聚体分布和养分含量的影响[J]. 土壤,2011,43(5):720-728.
- [23] 高会议,郭胜利,刘文兆,等. 不同施肥处理对黑垆土各粒级团聚体中有机碳含量分布的影响[J]. 土壤学报,2010,47(5):931-938.
- [24] 陈晓芬,李忠佩,刘明,等. 不同施肥处理对红壤水稻土团聚体有机碳、氮分布和微生物生物量的影响[J]. 中国农业科学,2013,46(5):950-960.
- [25] 樊红柱,秦鱼生,陈庆瑞,等. 长期施肥紫色水稻土团聚体稳定性及其固碳特征[J]. 植物营养与肥料学报,2015,21(6):1473-1480.