

# 宁夏引黄灌区不同类型土壤重组有机碳特征分析

杨飞霞<sup>1,2</sup>, 曹广超<sup>2</sup>, 于东升<sup>3</sup>, 史学正<sup>3</sup>, 于全波<sup>3</sup>, 董林林<sup>3,4</sup>

(1. 青海师范大学 地理科学学院, 青海 西宁 810001; 2. 青海省自然地理与环境过程重点实验室, 青海 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, 江苏 南京 210008; 4. 苏州市农业科学院, 江苏 苏州 215155)

**摘要:** [目的] 探究宁夏引黄灌区土壤总有机碳与重组有机碳的特征及相互关系, 为研究宁夏引黄灌区固碳效应及碳库稳定性提供科学依据。[方法] 以宁夏引黄灌区为研究对象, 通过实地采样与分析, 测定不同土壤类型总有机碳与重组有机碳含量。[结果] 土壤类型是影响宁夏引黄灌区土壤有机碳变化的主要因素, 经灌溉耕作后, 灌溉土壤总有机碳及重组有机碳含量较对照土壤均有所增加, 平均增加量分别为 2.27 和 2.02 g/kg, 增加量随土层深度增加而减小, 增加幅度因土壤类型存在差异; 重组有机碳与总有机碳存在显著相关关系 ( $p < 0.001$ )。[结论] 重组有机碳是总有机碳的重要部分, 它与总有机碳之间的相关性随着土层深度的增加而增强, 说明灌溉耕作活动及灌溉时间对土壤有机碳具有一定的影响。研究重组有机碳能更好地了解灌区土壤碳库稳定性。

**关键词:** 总有机碳; 重组有机碳; 宁夏引黄灌区

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2017)06-0085-07

**中图分类号:** S158.1

**文献参数:** 杨飞霞, 曹广超, 于东升, 等. 宁夏引黄灌区不同类型土壤重组有机碳特征分析[J]. 水土保持通报, 2017, 37(6): 85-91. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2017.06.014; Yang Feixia, Cao Guangchao, Yu Dongsheng, et al. Characteristics of different types of heavy fraction organic carbon in Ningxia irrigation zone[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(6): 85-91. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2017.06.014

## Characteristics of Different Types of Heavy Fraction Organic Carbon in Ningxia Irrigation Zone

YANG Feixia<sup>1,2</sup>, CAO Guangchao<sup>2</sup>, YU Dongsheng<sup>3</sup>, SHI Xuezheng<sup>3</sup>, YU Quanbo<sup>3</sup>, DONG Linlin<sup>3,4</sup>

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

2. Qinghai Province Key Laboratory of Physical Geography and Environmental Process, Xining, Qinghai

810001, China; 3. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Science, Nanjing, Jiangsu 210008, China; 4. Suzhou Academy of Agriculture Science, Suzhou, Jiangsu 215155, China)

**Abstract:** [Objective] Explore the characteristics of soil total organic carbon and heavy fraction organic carbon and their relationship to provide scientific bases for studying the carbon fixation effect and soil stability in Ningxia irrigation zone. [Methods] Taking Ningxia irrigation zone as the study area, the contents of total and heavy fraction organic carbon of 5 different types of soil were measured. [Results] Soil type is the main factor for change of soil organic carbon in the Ningxia irrigation zone. After different durations of irrigation and cultivation, total and heavy fraction organic carbon of irrigated soil were both increased. As compared with the non-irrigation and non-cultivation soil, the average increments were 2.27 and 2.02 g/kg, respectively. The increments decreased with the increase of soil depth, but the amplitudes differed among different soil types. There existed significant correlation between fraction organic carbon and total organic carbon. [Conclusion] Heavy fraction organic carbon is an important part of total organic carbon, its correlation with total organic carbon increase with the increase of soil depth. Irrigation and cultivation activities and irrigation time have influence on the soil organic carbon. Studying the fraction organic carbon can better understand soil carbon and soil stability.

**Keywords:** total organic carbon; heavy fraction organic carbon; Ningxia irrigation zone

收稿日期: 2017-04-14

修回日期: 2017-05-11

资助项目: 国家自然科学基金青年项目“基于活性系数的碳库稳定性灌溉时间序列演变机制研究”(41501326); 国家自然科学基金项目(0041304; 0041309); 2016年青海省自然地理与环境过程重点实验室项目

第一作者: 杨飞霞(1993—), 女(汉族), 江苏省南京市人, 硕士研究生, 研究方向为地表环境过程。E-mail: yfx812@163.com。

通信作者: 董林林(1979—), 女(汉族), 甘肃省天水市人, 博士, 副研究员, 主要从事土壤与沉积环境的研究。E-mail: jinjindoudou2005@163.com。

土壤有机碳(SOC)是土壤最基本的属性之一,也是衡量土壤肥力高低的重要指标之一,与农业生产之间的关系密切<sup>[1]</sup>。土壤有机碳库对温室气体浓度变化具有重要的调节作用,土壤可吸收或释放碳来改变自身的有机碳库储量,从而对各圈层中碳的动态平衡起到调节作用,进而影响大气中温室气体的浓度变化<sup>[2]</sup>。根据有机碳密度可将有机碳分为重组和轻组有机碳,重组有机碳是相对稳定的组分,对土壤的稳定性和维持生态平衡、缓解全球变暖具有重要意义<sup>[3-4]</sup>。目前多数研究认同土壤是碳汇的观点,农作物通过光合作用吸收并固定大气中的 CO<sub>2</sub>,降低温室气体的浓度,其中重组有机碳是土壤有机碳的重要组成部分,在总有机碳中的比例约在 60% 以上<sup>[5]</sup>,且具有周转时间长,稳定性高等特点,对土壤固碳具有重要的意义,研究重组有机碳能更好地分析土壤有机碳构成,对土壤固碳及土壤稳定性有进一步了解。

引用含有泥沙的河水进行灌溉在我国西北地区具有悠久的历史,对土壤理化性质也产生了重要影响。黄河是流经中国西部内陆的重要河流,以多沙闻名世界,已有的研究表明引黄灌溉对土壤有机碳具有重要的影响。如王吉智等<sup>[6]</sup>在中国西北半干旱区研究发现,引黄灌溉能增加土壤有机碳含量,同时促进灌淤土的形成;董林林等<sup>[7]</sup>在宁夏地区研究结果显示,随着灌溉时间的增加,土壤有机碳含量也会随之增加,在土壤剖面层次上,土壤有机碳含量随着深度的增加而减少;并将长期受引黄灌淤影响的土壤与未受灌溉耕作影响的土壤进行对比研究,指出引黄灌溉耕作有利于土壤固碳,长期引黄灌淤区土壤固碳 18.8 Tg,固碳效应因土壤类型的不同而异<sup>[8]</sup>。但灌溉对土壤重组有机碳的影响如何,不同类型土壤重组有机碳的差异性仍需进一步研究。本研究以宁夏引黄灌区为例,选取引黄灌溉耕作的 5 种类型土壤,对土壤总有机碳及重组有机碳进行对比分析,明确重组有机碳与土壤总有机碳的关系,以揭示灌区不同类型的土壤总有机碳及重组有机碳的差异性,为研究宁夏引黄灌区固碳效应及土壤稳定性提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域

宁夏回族自治区位于 104°16′55″—107°38′53″E, 35°14′25″—39°23′10″N,总面积 5.18×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>。引黄灌区位于自治区北部,大部分属黄河冲击平原一级阶地,西侧为贺兰山东麓洪积扇高阶地,年降水量达

200 mm,是宁夏地区最古老、最发达的灌溉农业区<sup>[9]</sup>。引黄灌溉在宁夏历史悠久,距今约有 2200 a 历史的秦渠是宁夏灌区最古老的灌渠,最新灌渠为红寺堡灌区,距今投入使用约 15 a。随着人类灌溉耕作活动范围的扩大和灌溉技术的发展,在不同的时期修建了多条灌渠(表 1)<sup>[10-12]</sup>,各灌渠自修建以来沿用至今。灌区土壤灌溉历史因修建年代不同而时间不同,为方便统计及研究灌区灌溉时间,假设同一条灌渠灌溉的区域时间相同,且为灌渠的修建时间。

宁夏引黄灌区最早且最主要的灌渠分布在银川平原地区<sup>[13]</sup>,该区域是宁夏水稻主产区,耕作土壤主要是灌淤土。这是一种分布在中国干旱与半干旱地区,在人类长期灌水落淤与耕作施肥交替下形成的,为地区农业稳定、发达提供重要依托的人为土壤<sup>[14-15]</sup>。引黄灌区主要土壤类型有 5 种,分别为灌淤土(Irrigated-silted soil)、淡灰钙土(Seriozem soil)、风沙土(Aeolian sandy soil)、潮土(Fluvi-aquic soil)和新积土(Alluvial soil)。

表 1 宁夏引黄灌区主要灌渠

渠道名称	修建年代	灌溉时间/a
秦渠	公元前 214 年	约 2 200
汉延渠	约公元前 102 年	约 2 100
唐徕渠	700 年	约 1 300
惠农渠	1729 年	约 280
跃进渠	1958 年	约 57
西干渠	1960 年	约 55
东干渠	1975 年	约 35
固海扬水灌区	1986 年	约 25
红寺堡灌区	2000 年	约 15

### 1.2 样品采集与处理

根据灌区 5 种土壤类型分布特征及灌溉历史,沿灌渠进行采样点分布,共采集各土壤类型样点 67 个,其中灌淤土壤样点 28 个(表 2)。在尚未开垦耕作的、未受灌溉影响等方式扰动的荒地或黄河河滩地上选择典型样点布设对照点,灌溉时间设定为 0 年,其中淡灰钙土、潮土、风沙土对照样点各 3 个。灌淤土及新积土是在淡灰钙土、潮土、风沙土基础上经耕作、灌溉及施肥等人为活动影响形成的,因此灌淤土和新积土的对照点参考这 3 类土壤对照样点。2015 年 10 月底灌区冬季灌水之前进行采样,根据不同类型土壤发生层次及当地土壤耕作特点将土壤样品分为表土层(0—20 cm)、亚表层(20—30 cm)2 个层次取样,采样深度共 30 cm。现场用环刀法采集并测定土壤容重,每层采集土壤样品 1.00 kg。采集的土样带回实

实验室进行前期处理工作,自然风干,挑除杂物,取部分土样磨细过 60 目尼龙筛,用重铬酸钾( $K_2Cr_2O_7$ )氧化滴定法<sup>[16]</sup>测定土壤有机质含量,除以 1.724(转换系数)得到土壤有机碳含量。采用改进的比重法测定土壤重组有机碳含量。称取过 2 mm 尼龙筛的风干土样至于离心管中,加入比重为  $1.7\text{ g/cm}^3$  的 NaI 溶液与土壤混合均匀,放入离心机中离心 10 min,将混合物表面漂浮的轻组有机质通过微孔滤膜过滤,在剩余的重组残留物中加入 25 ml NaI 溶液直至离心后的重液中无轻组有机物为止,一般重复上述过程 2~3 次。将收集的轻组有机质用  $CaCl_2$  冲洗去除 NaI ( $AgNO_3$  溶液检验,无黄色絮状物),再用蒸馏水洗涤 2~3 次,将分离出的重组有机物于  $60\text{ }^\circ\text{C}$  下烘干,采用重铬酸钾( $K_2Cr_2O_7$ )外加热法测定重组有机碳含量。

## 2 结果与分析

### 2.1 引黄灌区不同类型土壤总有机碳含量特征

根据数据统计结果显示(表 3),与对照土壤相比,经灌溉耕作后的宁夏引黄灌区绝大多数土壤总有

机碳(TOC)含量有所增加,表层土壤 TOC 含量增加幅度较亚表层大,经不同时间灌溉耕作后,0—20 cm 范围内 TOC 含量增幅大小顺序为:风沙土>灌淤土>淡灰钙土>新积土>潮土;在 0—30 cm 范围内,所有土壤灌溉后 TOC 含量均值高于对照土(0 年),增加幅度因土壤类型而不同,总体上,灌淤土>潮土>淡灰钙土>新积土>风沙土。

表 2 宁夏引黄灌区不同土壤类型样点分布数量

灌渠名称	灌淤土	潮土	淡灰钙土	风沙土	新积土
秦渠	4	—	—	—	—
汉延渠	3	—	—	—	—
唐徕渠	6	—	—	—	—
惠农渠	5	3	—	—	—
跃进渠	5	—	—	—	—
西干渠	3	1	3	1	—
东干渠	—	3	3	—	3
固海扬水灌区	—	—	3	3	—
红寺堡灌区	—	—	3	3	3
对照点	—	3	3	3	—

表 3 宁夏引黄灌区土壤样点有机碳含量统计特征

土壤类型	土层深度/ cm	对照点/ ( $g \cdot kg^{-1}$ )	有机碳含量			
			最大值/( $g \cdot kg^{-1}$ )	最小值/( $g \cdot kg^{-1}$ )	均值/( $g \cdot kg^{-1}$ )	标准差
灌淤土	0—20	3.94	15.36	5.30	8.48	2.17
	20—30	3.02	10.56	2.28	8.41	2.21
潮土	0—20	7.49	11.09	3.52	7.14	2.96
	20—30	4.90	12.82	2.65	6.61	2.80
淡灰钙土	0—20	3.65	7.80	2.10	5.07	1.33
	20—30	3.51	8.07	1.88	5.33	1.50
风沙土	0—20	0.67	7.21	0.63	4.41	1.34
	20—30	0.64	5.59	0.55	4.27	1.46
新积土	0—20	3.94	6.03	2.17	3.86	1.16
	20—30	3.02	5.04	1.61	3.45	1.10

注:对照点数据为各灌溉土壤类型不同层次的算数平均值。

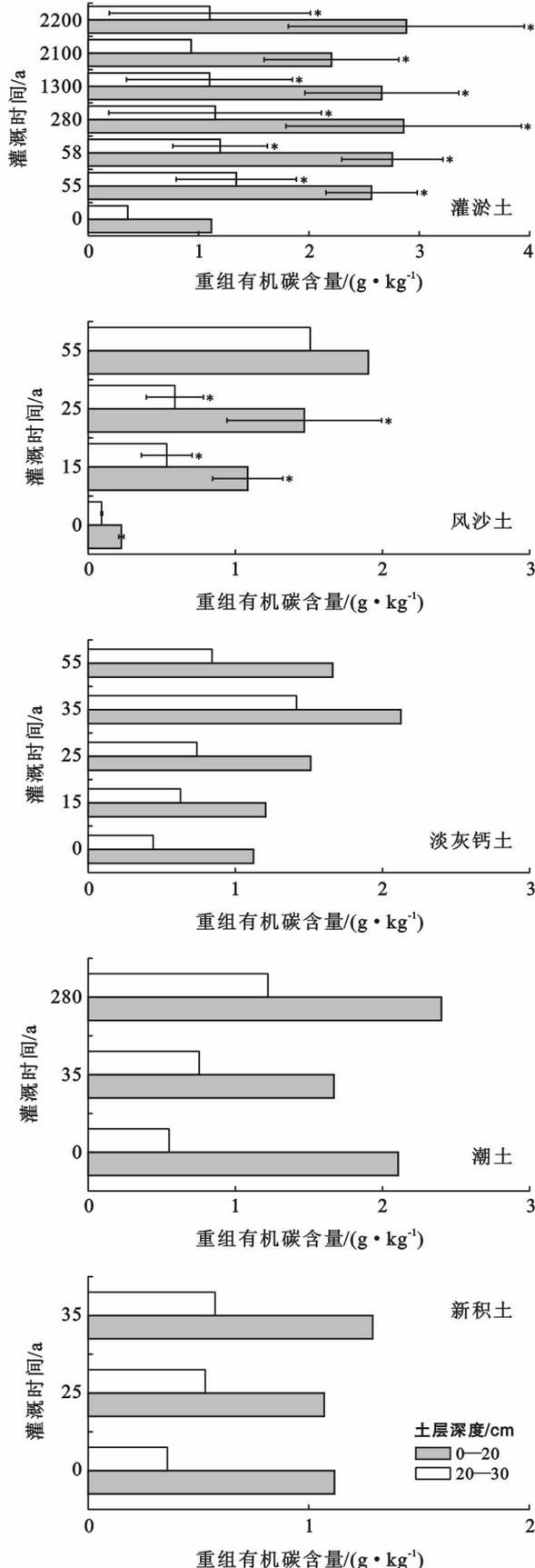
灌淤土 TOC 含量最高,0—20 cm 深度 TOC 含量均值达到  $8.48\text{ g/kg}$ ,最大值达  $15.46\text{ g/kg}$ ,最小值为  $5.30\text{ g/kg}$ ,均是 5 类土壤中最高的,同时标准差也较高。原因是灌淤土所处灌区历史最为悠久,长时间的灌溉增加 TOC 含量,灌溉时间越久,TOC 含量增加越多<sup>[17]</sup>。风沙土在表层及亚表层 TOC 含量最小值为对照 0 a 的土壤,分别为  $0.63$  及  $0.55\text{ g/kg}$ ,TOC 含量均值也是 5 类土壤中最底的。原因与风沙土的性质有关,风沙土中沙粒含量高,土壤矿化能力强,并表现出随着土层深度增加而降低趋势,固碳能力差,虽经灌溉耕作后 TOC 含量增加明显,增至对照

土的 5~6 倍,TOC 含量在 5 类土壤中仍是最低<sup>[18]</sup>。潮土对照土壤含量较高,对照土壤 TOC 含量表层与亚表层差值在 5 类土壤中最大,两者相差  $2.59\text{ g/kg}$ ,原因在于潮土表层土壤对 TOC 具有拦截作用,使亚表层土壤得不到充足的有机碳源补充,两者数值相差增大<sup>[19]</sup>。经灌溉耕作后,表层土壤 TOC 含量降低,亚表层含量增加明显( $p < 0.05$ ),与其他研究结论有所差别<sup>[20]</sup>。样点区域差异是一个重要原因,潮土主要位于 TOC 含量较高的惠农渠和较低的东干渠,两者均值较低,与 TOC 含量较高的对照土相比有所下降,其他原因有待进一步研究。新积土是 5 种类型土壤

中灌溉时间最短的土壤,最长年限只有 35 a,受灌溉耕作影响作用最小,TOC 含量均值在 5 种类型中最低,这说明灌溉耕作的年限对 TOC 含量具有重要影响,灌溉耕作时间越长,TOC 含量越大<sup>[21]</sup>。

## 2.2 引黄灌区不同类型土壤重组有机碳含量特征

宁夏灌区 5 类土壤重组有机碳含量特征如图 1 所示,土壤重组有机碳(HFOC)因土壤类型不同而有所差异,5 种类型土壤的 HFOC 大小排列次序为:灌淤土>潮土>淡灰钙土>新积土>风沙土,与总有机碳含量呈现规律一致<sup>[22]</sup>;与未受灌溉耕作影响的对照土壤相比,灌溉耕作后的 5 类土壤表层及亚表层重组有机碳含量均呈增加趋势,且亚表层含量较表层含量有所下降,平均减少 0.03 g/kg。土壤类型是引起宁夏引黄灌区土壤重组有机碳差异的主要因素,但是灌溉耕作活动及时间对 HFOC 含量影响不可忽略。与灌溉同时进行的耕作等活动,是影响 HFOC 含量的人为因素,对 HFOC 含量影响较大。对比灌溉土壤与对照土壤,HFOC 含量均随土层深度的增加而降低,符合一般的土壤有机碳分布规律<sup>[23]</sup>。与未受灌溉耕作影响的对照土壤相比,灌溉土壤 HFOC 含量在表层及亚表层增加明显( $p < 0.05$ ),表明灌溉耕作在 0—30 cm 范围内影响较大,人为灌溉耕作活动对 HFOC 含量变化具有重要意义。灌区各类型土壤重组有机碳含量随灌溉时间的差异呈现出一定的变化特征,基本表现为灌溉耕作时间越长,重组有机碳含量增加越多,与总有机碳基本规律一致。灌淤土是半干旱地区经长期灌溉耕作影响下形成的人为土壤,受灌溉影响最为强烈<sup>[24]</sup>,以灌淤土为例,0—20 cm 对照土壤重组有机碳含量为 3.94 g/kg(为淡灰钙土、潮土与风沙土 0—20 cm 对照土壤重组有机碳含量平均值),当灌溉时间为 55 a 时,其平均含量为 8.47 g/kg,增加明显( $p < 0.05$ ),当灌溉时间为 280 a 时,土壤 HFOC 含量最大,其值为 9.51 g/kg,增加显著( $p < 0.05$ )。在 20—30 cm 深度内,对照土壤 HFOC 含量为 2.12 g/kg,当灌溉时间分别达到 55,280 和 1 300 a 时,土壤 HFOC 含量分别为 7.90,6.96 和 6.83 g/kg。灌淤土表层土壤比亚表层土壤 HFOC 含量高,出现这种现象的原因有 2 个,一是来自外源性的有机物质,主要集中在表层 0—20 cm 深度内,表下层很难获取且外源物不易转移<sup>[25-26]</sup>,所以亚表层土壤有机质增加缓慢;二是表下层土壤重组有机碳在长时间得不到充足有机质补充的情况下,矿化分解速率加快,土壤长期处于丢碳状态。前期研究结果显示,形成时间越长的土壤中,周转时间较长的有机碳分解越多<sup>[27]</sup>,因此,灌溉时间较长的灌淤土表下层土壤 HFOC 含量低。



注: \*, \*\* 分别表示灌溉耕作土壤的重组有机碳含量相对于对照土壤在  $p < 0.05$ ,  $p < 0.01$  水平上的差异性。

图 1 不同灌溉时间土壤重组有机碳含量

### 2.3 引黄灌区土壤重组有机碳与总有机碳的关系

灌区不同类型土壤重组有机碳与总有机碳间在表层及亚表层的关系均密切(图 2),同时,不同类型土壤重组有机碳与总有机碳的相关系数高(表 4),这验证了重组有机碳是总有机碳的主要组成部分;灌区重组有机碳与总有机碳之间具有极显著的相关性( $p < 0.001$ ),但因不同的土壤类型存在差异;对比表层与亚表层可以发现,20—30 cm 范围内重组有机碳与总有机碳间的相关性强于 0—20 cm 范围内两者的相关性。虽然表层有机碳的来源比亚表层丰富,但因表层投入秸秆等肥料加快表层重组有机碳分解,加快重组有机碳周转速率<sup>[28]</sup>,同时因土壤有机碳的原始积累<sup>[29]</sup>,使得亚表层重组有机碳在总碳库中的比例高于表层,从而导致亚表层重组有机碳与总有机碳的相关性高于表层。灌区重组有机碳与总有机碳之间具有极显著的相关性( $p < 0.001$ ),皮尔逊相关系数均大于 0.94,说明宁夏引黄灌区重组有机碳对总有机碳响应强烈,与之前的研究结果一致<sup>[30-31]</sup>,原因在于 HFOC 周转时间长,受土壤中矿物颗粒保护,使其分解速率较轻组有机碳减缓<sup>[28]</sup>。同时,为了解土壤重组有机碳对总有机碳影响的贡献率进行了回归分析(图 2),结果表明灌区 HFOC 对 TOC 的解释度高,基本达到 90%以上,亚表层 HFOC 对 TOC 的解释度要高于表层,说明在亚表层内 HFOC 对 TOC 的贡献要高于表层。

表 4 5 种类型土壤重组有机碳与总有机碳的相关性

土层深度/cm	灌淤土	潮土	淡灰钙土	风沙土	新积土
0—20	0.973	0.995	0.963	0.979	0.994
20—30	0.985	0.995	0.975	0.993	0.946

新积土在 5 种类型中重组有机碳与总有机碳的相关性最低,原因可能与它的灌溉耕作年限有关,新积土形成时间及灌溉耕作时间最短,受灌溉耕作影响最弱,导致 HFOC 与 TOC 相关性在 5 种土壤类型中最低。图 2 显示,除新积土外,重组有机碳与总有机碳相关性随着土层深度的增加而增强,与表 4 皮尔逊相关系数表现一致,表明灌区土壤 HFOC 与 TOC 间的关系在亚表层更为密切。经过长时间的灌溉耕作,灌淤土、潮土、淡灰钙土与风沙土的 TOC 含量明显增加,HFOC 含量也随之增加,在 0—20 cm 土层深度内,灌溉耕作活动强度大;20—30 cm 范围内,土壤受人为活动干扰影响小,其稳定性也就越高,使 HFOC 与 TOC 相关性在 20—30 cm 范围内更强。新积土因形成时间短,HFOC 在 0—20 cm 范围内聚集的更多,因此 HFOC 与 TOC 相关性在表层更为显著。

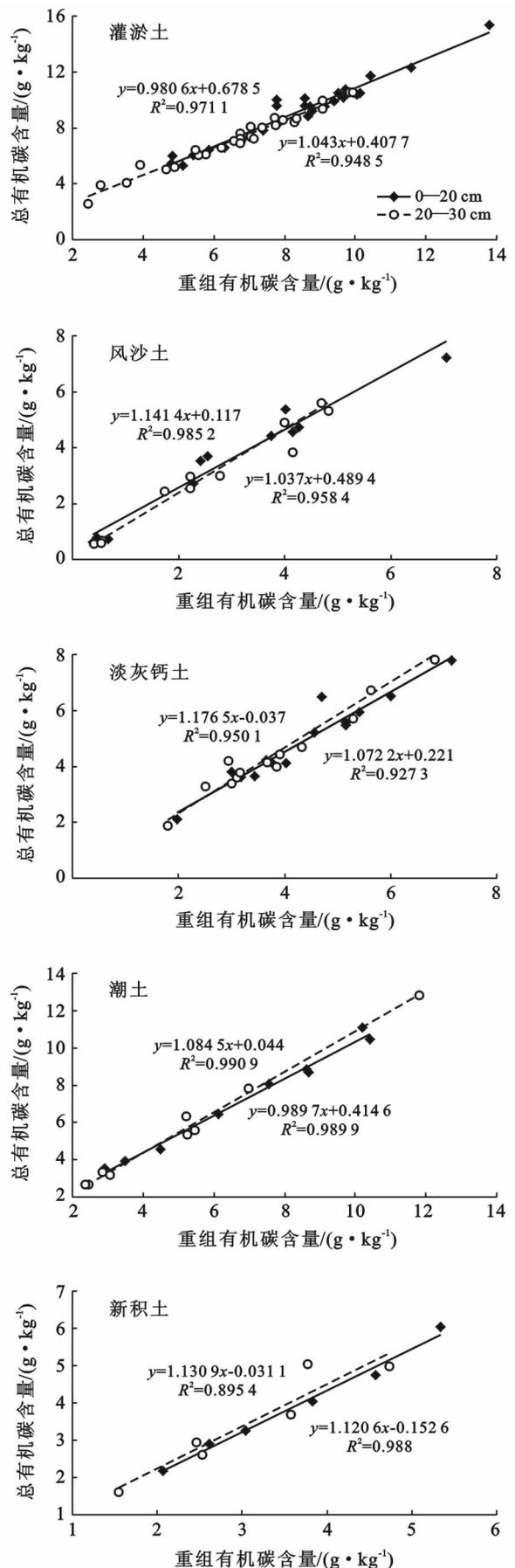


图 2 不同土壤类型重组有机碳与总有机碳间的关系

### 3 结论

重组有机碳是农田土壤碳库储量的主要成分,重组有机碳的变化对农田土壤碳库乃至大气 CO<sub>2</sub> 浓度有着重要的影响。重组有机碳是土壤中有有机碳与矿物质胶体结合的有机无机复合物<sup>[32]</sup>,主要隐蔽在团聚体内部或吸附在矿物表面,这种采用物理分解的方法对土壤有机碳的破坏程度很小,且能更好地反映有机碳的性质功能与周转特征<sup>[33]</sup>。重组有机碳紧密结合在矿物颗粒上,致使矿化速率大幅减缓,对土壤呼吸影响微弱,使土壤向大气中释放的 CO<sub>2</sub> 浓度降低,从而反映重组有机碳在土壤中的保持能力,在土壤固碳和土壤肥力保持方面具有重要的意义<sup>[28,31]</sup>。农田管理措施、土地利用方式和有机物的投入等能改变土壤有机碳组分,但重组有机碳的周转时间可以达到几十年、几百年甚至上千年,稳定性高,长期人为活动及环境因素共同作用才能改变重组有机碳含量及性质,如赵加瑞、唐光木等<sup>[34-35]</sup>研究发现长期灌溉耕作活动能增加土壤总有机碳及重组有机碳含量,与本研究结果一致。

目前多数对重组有机碳的研究主要集中在其分解速率,如比较总有机碳与重组有机碳的分解速率,或添加有机物质后重组有机碳分解速率的变化,不同土地利用方式或农田管理措施对重组有机碳的影响,以及添加有机物质对某一土壤类型重组有机碳的改变等。本研究针对宁夏受灌溉影响下的不同类型土壤总有机碳及重组有机碳含量进行测定分析,得出土壤类型是影响宁夏引黄灌区总有机碳含量及重组有机碳含量的主要因素,与对照土壤相比,在经过一段时间的灌溉耕作后,总有机碳含量及重组有机碳含量均有所增加,土壤类型是引起土壤有机碳变化的重要因素。同时,灌溉耕作活动及灌溉时间对土壤有机碳的影响不可忽略。经灌溉耕作后总有机碳含量及重组有机碳含量较对照土壤有所增加,表层增加量高于亚表层,不同的土壤类型增加幅度不同。宁夏引黄灌区重组有机碳与总有机碳呈极显著正相关关系,说明重组有机碳是总有机碳的主要组分,灌区土壤有机碳较稳定,亚表层重组有机碳与总有机碳具有更高的相关性,更好地反映人为活动对土壤有机碳的影响,研究重组有机碳对该研究区土壤稳定性具有重要意义。

#### [ 参 考 文 献 ]

[1] 陈庆强,彭少麟. 土壤碳循环研究进展[J]. 地理科学进展,1998,13(6):555-563.  
[2] 张文菊,彭佩钦,童成立,等. 洞庭湖湿地有机碳垂直分布与组成特征[J]. 环境科学,2005,26(3):56-60.

[3] 李晓迪,王淑民,张黎明,等. 土壤数据源和制图比例尺对旱地土壤有机碳储量估算影响[J]. 土壤学报,2016,53(1):58-71.  
[4] Nascentea A S, Li Y, Crusciol A C. Cover crops and no-till effect on physical fractions of soil organic matter[J]. Soil & Tillage Research, 2013,130(6):52-57.  
[5] 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 & Tillage Research, 2013,134(8):147-152.  
[6] 王吉智. 灌溉土—中国干旱与半干旱地区的人为土壤[J]. 干旱区资源与环境,1993,7(3/4):233-237.  
[7] 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.  
[8] Dong Lingling, Yu Dongsheng, Zhang Haidong, et al. Long-term effect of sediment laden Yellow River irrigation water on soil organic carbon stocks in Ningxia, China[J]. Soil & Tillage Research, 2015,145:148-156.  
[9] 马玉兰. 宁夏测土配方施肥技术[M]. 宁夏 银川:宁夏人民出版社,2008.  
[10] 吴强国. 黄河与宁夏水利[M]. 宁夏 银川:宁夏人民出版社,2008.  
[11] 宁夏水利厅. 宁夏水利五十年[M]. 宁夏 银川:宁夏人民出版社,2008.  
[12] 宁夏农业勘察设计院. 宁夏土壤[M]. 宁夏 银川:宁夏人民出版社,1990.  
[13] 王吉智,马玉兰,金国柱. 中国灌溉土[M]. 北京:科学出版社,1996.  
[14] 龚子同,张甘霖. 人为土壤形成过程及其在现代土壤学上的意义[J]. 生态环境,2003,12(2):184-191.  
[15] Shi Xuezheng, Yu Dongsheng, Yang Guoxiang, et al. Cross-reference benchmarks for translating the genetic soil classification of China into the Chinese soil taxonomy[J]. Pedosphere, 2006,16(2):147-153.  
[16] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社,2000.  
[17] 赵加瑞,王益权,刘军,等. 灌溉水质与土壤有机质累积的关系[J]. 生态环境,2008,17(3):1240-1243.  
[18] 李顺姬,邱莉萍,张兴昌. 黄土高原土壤有机碳矿化及其与土壤理化性质的关系[J]. 生态学报,2010,30(5):1217-1226.  
[19] Fontaine S, Barot S, Barre P, et al. Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply[J]. Nature, 2007,450(8):277-280.  
[20] 董林林,杨浩,于东升,等. 引黄灌区有机碳密度剖面特征及固碳速率[J]. 生态学报,2014,34(3):690-700.  
[21] 董林林,杨浩,于东升,等. 不同类型土壤引黄灌溉固碳效应的对比研究[J]. 土壤学报,2011,48(5):922-930.  
[22] Han Ying, Chen Gang, Wang Zhong. The progresses

- of Studies on Rubisco Activase[J]. Chinese Bulletin of Botany, 2000, 17(4):306-311.
- [23] Miltner A, Kopinke F D, Kindler R, et al. Non-photosynthetic CO<sub>2</sub> fixation by soil microorganisms[J]. Plant and Soil, 2005, 269(1/2):193-203.
- [24] 龚子同, 张甘霖, 王吉智, 等. 中国的灌淤人为土[J]. 干旱区研究, 2005, 22(1):4-10.
- [25] Malhi S S, Nyborg M, Goddard T, et al. Long-term tillage, straw and N rate effects on quantity and quality of organic C and N in a Gray Luvisol soil [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2011, 90(1):21-22.
- [26] Yu Hongyan, Ding Weixin, Geng Ruilin, et al. Effect of long-term compost and fertilizer application on stability of aggregate-associated organic carbon in an intensively cultivated sandy loam soil[J]. Biology and Fertility of Soils, 2012, 48(3):325-336.
- [27] Fontaine S, Sebastien B, Pierre B, et al. Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply[J]. Nature, 2007, 450(8):227-280.
- [28] 尹云峰, 蔡祖聪. 利用  $\delta^{13}\text{C}$  方法研究添加玉米秸秆下红壤总有机碳和重组有机碳的分解速率[J]. 土壤学报, 2007, 44(6):1022-1027.
- [29] 夏国芳. 有机物料对黑土有机碳积累的影响[D]. 黑龙江 哈尔滨:东北农业大学, 2006.
- [30] Saha D, Kukal S S, Sharma S. Land use impacts on SOC fractions and aggregate stability in typical Ustochrepts of Northwest India[J]. Plant Soil, 2011, 339(1/2):457-470.
- [31] 韩晓日, 苏俊峰, 丹利, 等. 长期施肥对棕壤有机碳及各组分的影响[J]. 土壤通报, 2008, 39(4):730-733.
- [32] 尤孟阳. 黑土母质熟化过程中的土壤有机碳组分与结构变化特征[D]. 黑龙江 哈尔滨:中国科学院东北地理与农业生态研究所, 2015.
- [33] 韩会阁. 土壤有机碳组分对土地利用方式的响应[D]. 甘肃 兰州:兰州大学, 2011.
- [34] 赵加瑞, 王益权, 刘军, 等. 灌溉水质与土壤有机质积累的关系[J]. 生态环境, 2008, 17(3):1240-1243.
- [35] 唐光木, 徐万里, 盛建东, 等. 新疆绿洲农田不同开垦年限土壤有机碳及不同粒径土壤颗粒有机碳变化[J]. 土壤学报, 2010, 47(2):279-285.

(上接第84页)

- [5] 何传龙, 郭熙盛, 王文军, 等. 春甘蓝—玉米—冬甘蓝轮作制下氮肥施用量研究[J]. 中国农业科学, 2007, 40(11):2527-2534.
- [6] 张国平, 颜家均, 王正银, 等. 平衡施肥对酸性紫色土甘蓝产量和品质的效应[J]. 西南大学学报:自然科学版, 2005, 27(5):729-732.
- [7] 蔡开地. 结球甘蓝平衡施用氮磷钾肥效应研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(1):73-77.
- [8] 金珂旭, 王正银, 樊驰, 等. 不同钾肥对甘蓝产量、品质和营养元素形态的影响[J]. 土壤学报, 2014, 51(6):1369-1377.
- [9] 罗昀, 周丽娜, 刘汝亮, 等. 施钾对宁夏引黄灌区甘蓝产量及品质的影响[J]. 西北农业学报, 2012, 21(7):168-171.
- [10] 林昌华, 白由路, 罗国安, 等. 氮磷钾肥对结球甘蓝商品性状及其产量的影响[J]. 中国农学通报, 2008, 24(6):329-334.
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社, 2000.
- [12] 黄巧义, 唐拴虎, 陈建生, 等. 氮磷钾配比对木薯养分吸收动态及产量影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4):947-956.
- [13] 李生秀. 植物营养与肥料学科的现状与展望[J]. 植物营养与肥料学报, 1999, 5(3):193-205.
- [14] 翟丙年, 李生秀. 冬小麦产量的水肥耦合模型[J]. 中国工程科学, 2002, 4(9):63-68.
- [15] 葛耀相. 黄土高原中部丘陵区不同因子对球茎甘蓝光合特性与产量的影响[D]. 陕西 杨凌:西北农林科技大学, 2008.
- [16] Osaki M, Shinano T, Tadano T. Carbon, nitrogen interaction model in field crop production [J]. Soil Science and Plant Nutrition, 1993, 155/156(1):203-206.
- [17] Osaki M, Zheng T, Konno K, et al. Carbon-nitrogen interaction related to P, K, Ca, and Mg nutrients in field crops [J]. Soil Science and Plant Nutrition, 1996, 42(3):539-552.
- [18] Mollier A, Pellerin S. Maize root system growth and development as influenced by phosphorus deficiency [J]. Journal of Experimental Botany, 1999, 50(333):487-497.
- [19] 侯彦林. “生态平衡施肥”的理论基础和技术体系[J]. 生态学报, 2000, 20(4):653-658.