

# 不同类型土壤引黄灌溉固碳效应的对比研究\*

董林林<sup>1</sup> 杨浩<sup>1</sup> 于东升<sup>1, 2†</sup> 张海东<sup>2</sup> 刘杨<sup>2</sup> 史学正<sup>2</sup>

(1 南京师范大学地理科学学院 南京 210097)

(2 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)

**摘要** 通过在宁夏引黄灌区实地调查、采样与分析, 研究 5 种类型土壤在不同灌溉耕作时间序列下土壤有机碳含量及碳密度的变化特征, 对比分析不同类型土壤对引黄灌溉耕作固碳效应的差异。结果表明: 灌溉耕作引起的土壤有机碳含量的变化因土壤类型的不同而存在差异; 在相同的灌溉耕作时间下, 5 种类型土壤的有机碳密度大小顺序为: 灌淤土>潮土>新积土>风沙土 >淡灰钙土; 与同类型未灌溉耕作的土壤比较, 灌溉耕作使各类型土壤有机碳密度均有不同程度的增加, 相同的灌溉耕作时间下土壤有机碳密度增幅排列次序为: 风沙土>潮土>灌淤土>淡灰钙土>新积土。宁夏引黄灌区的土壤固碳效应因土壤类型的不同存在明显差异。

**关键词** 引黄灌溉; 土壤有机碳含量; 土壤有机碳密度; 差异性

中图分类号 S158.1

文献标识码 A

灌溉耕作是进行农业生产活动的重要措施<sup>[1]</sup>, 也是土壤有机碳含量变化的重要驱动因素<sup>[2]</sup>, 对土壤有机碳含量提高有着积极的作用。James 和 Jeffrey 的研究认为灌溉增加了美国斯内克河平原表层(0~30cm)土壤有机碳含量<sup>[3]</sup>; Gwenz 和 Gotosa 的研究表明灌溉可使津巴布韦棉花—小麦轮作区表层(0~30cm)土壤有机碳增加 71%~80%<sup>[4]</sup>; Reginald 和 Pramod 在印度亚热带半干旱地区的研究也显示灌溉种植水稻和小麦 20a 后表层(0~15cm)土壤有机碳含量增加至 0.51%~0.86%<sup>[5]</sup>。在我国西北地区, 灌溉耕作有着悠久历史, 土壤有机碳含量得到明显提高, 特别是灌区表层土壤有机质的含量<sup>[6]</sup>。郭秉晨等的研究结果表明, 宁夏引黄灌区耕地土壤 1985 年至 2005 年间有机质的年均增幅为 0.4%<sup>[7]</sup>; 赵加瑞等在陕西交口灌区的研究表明, 抽渭灌区土壤表层有机质含量比井水灌区有明显增加<sup>[8]</sup>; 唐光木等对新疆绿洲多个灌溉时间序列下 3 种类型土壤的有机碳含量变化的研究结果显示, 灌溉耕作前 5a 耕层(0~30cm)土壤有机碳含量增加迅速, 10a 后趋于平缓<sup>[9]</sup>。已有研究工作多数仅对某一种类型土壤经灌溉后土壤有机质或有机碳含量变化开展研究, 或是对某一区域整体的土壤有机碳含

\*国家重点基础研究发展计划“973”项目(2010CB950702)和中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-YW-Q1-07, KSCX1-YW-09-01&02)资助

†通讯作者, E-mail: dshyu@issas.ac.cn

作者简介: 董林林(1979-), 女, 博士研究生, 研究方向: 土壤与沉积环境; E-mail:

jinjindoudou2005@163.com

收稿日期: 2011-03-04; 收到修改稿日期: 2011-05-23

量变化进行分析,忽视了土壤类型不同可能带来的土壤有机碳含量或碳密度增加的差异性分析。已有研究结果表明,土壤有机碳含量在不同尺度上的区域变异,主要受控于土壤类型因子<sup>[10-12]</sup>。因此,本研究以我国宁夏引黄灌区为例,选取引黄灌溉耕作的5种类型土壤对土壤有机碳含量及碳密度进行对比分析,以揭示灌区不同类型土壤引黄灌溉固碳效应的差异性,为研究灌溉耕作驱动下区域土壤碳密度或碳库变化提供科学依据。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 研究区概况

宁夏回族自治区位于东经 104°16'55"~107°38'53", 北纬 35°14'25"~39°23'10", 总面积 5.18×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>。地处我国西北边垂,南部山地,北部平原,东接黄土高原,西北为贺兰山地,黄河由中部自南向北流经银川平原,被誉为“塞上江南”。宁夏引黄灌区具有悠久的灌溉耕作历史,最早修建的秦渠灌溉历史达 2000a 多,新建灌区红寺堡扬水灌区,灌溉时间约有 10a,灌区土壤的灌溉历史因灌渠修建时间不同而异,同一灌渠的灌溉历史大致相同(表 1)。灌区主要土壤类型有灌淤土、淡灰钙土、风沙土、新积土、潮土[本研究采用发生分类学中的土壤类型名称,分别对应于世界土壤资源参比基础(WRB)划分的灌淤人为土(Irrigic Anthrosols)、筒育钙积土(Haplic Calcisols)、干旱砂性土(Aridic Arenosols)、石灰性冲积土(Calcaric Fluvisols)、石灰性冲积雏形土(Calcaric Fluvic Cambisols)等。其中,淡灰钙土为本区地带性土壤;灌淤土是一种分布在中国干旱与半干旱地区的古老灌区的,因长期引用含有大量泥沙的水流进行灌溉淤积和人为耕作施肥交迭作用下形成的厚度在 50 cm 以上的人为土壤<sup>[13-14]</sup>。

表 1 宁夏引黄灌区主要灌渠

Table1 Main irrigation channels in the Ningxia Yellow River Irrigation Zone		
灌渠名称 Irrigation channel	建设时间 Construction time	灌溉时间 Irrigation history (a)
秦渠 Qin Channel	公元前 214 年 214 a BC	约 2200 About 2200
惠农渠 Huinong Channel	1729 年 1729 a	约 280 About 280
跃进渠 Yuejin Channel	1958 年 1958 a	约 50 About 50
西干渠 Xi Channel	1960 年 1960 a	约 50 About 50
东干渠 Dong Channel	1975 年 1975 a	约 30 About 50
固海扬水干渠 Guhai Irrigation Channel	1986 年 1986 a	约 20 About 50
红寺堡扬水灌渠 Hongshipu Irrigation Channel	1998 年 1998 a	约 10 About 50

注:灌渠建设时间参考文献[15-17]

Note: Construction times of the irrigation channels were cited from references [15-17]

### 1.2 研究方法

1.2.1 土壤剖面样品采集与分析 根据灌区土壤类型,结合灌渠修建时间及灌溉历史,沿

灌渠进行布点采样(表 2)。为分析灌溉耕作引起的土壤有机碳含量及碳密度的变化, 各类土壤均布设一定数目的无灌溉耕作的自然对照剖面。考虑到灌淤土是在河流冲积物的基础上, 加上人为耕作活动所形成, 灌淤土对照点布设在未受人类活动影响的河流冲积形成的滩地或荒地上, 土壤类型为冲积土; 其他类型土壤的对照剖面各自布设在河滩地或荒地等未受灌溉耕作等人为扰动的同类型土壤分布区域。共布设 40 个各类型土壤剖面(图 1)。

表 2 宁夏引黄灌区不同土壤类型剖面样点分布数量

Table 2 Number of sampling sites distributed in soils different in type in irrigated area in the Ningxia Irrigation Zone(个)

土壤类型 Soil type	Zone(个)							固海扬水	红寺堡扬
	对照 Control profiles	秦渠 Qin Channel	惠农渠 Huinong Channel	跃进渠 Yuejin Channel	西干渠 Xi Channel	东干渠 Dong Channel	干渠	干渠 Guhai Irrigation Channel	水灌渠 Hongshipu Irrigation Channel
灌淤土 Irrigated-alluvial soils	3	4	5	5	2				
潮土 Fluvo-aquic soils	1		1				1		
淡灰钙土 Sierozem soil	3				2	1	2	2	
风沙土 Aeolian sandy soil	2				1		1	1	
新积土 Fluvent soil	1					1		1	

采样时间为 2009 年 10 月底灌区冬季灌水之前。土壤剖面采样深度为 1m, 按自然土壤发生和耕地土壤特点进行土壤剖面分层, 一般有 4~5 个土层, 依据当地耕层及犁底层深度, 统一划分表土层(0~20cm)和亚表层(20~30cm)基本一致, 心土母质层(30~100cm)则视各剖面具体自然发生情况再进行分层。各层自上而下均匀采集 1.00 kg 左右土样, 并用环刀法采集土样测定容重(每层采集三个)。

采集的土样放入室内进行风干, 碾磨过 2 mm 尼龙筛, 挑除草根等杂物, 取部分土样磨细过 60 目尼龙筛, 用重铬酸钾( $K_2Cr_2O_7$ )氧化-滴定法测定土壤有机质的含量, 土壤有机质含量除以 1.724 (转换系数)即可得到土壤有机碳的含量。

1.2.2 数据分析 不同灌溉耕作时间下各类型土壤有机碳含量及碳密度平均值均采用算术平均值统计分析方法。其中土壤有机碳密度的计算模型参考文献[18], 如下:

$$SOCD = \sum_{i=1}^n (1 - \theta_i \%) \times p_i \times C_i \times T_i / 100 \quad (1)$$

式中,  $SOCD$  为土壤剖面有机碳密度 ( $kgm^{-2}$ ),  $\theta_i$  为第  $i$  层  $> 2$  mm 砾石含量(体积%),  $p_i$  为

第  $i$  层土壤容重( $\text{g cm}^{-3}$ ),  $C_i$  为第  $i$  层土壤有机碳含量( $\text{gkg}^{-1}$ ),  $T_i$  为第  $i$  层土层厚度( $\text{cm}$ ),  $n$  为参与计算的土壤层次总数。参照国际惯例<sup>[19-23]</sup>, 本研究中土壤有机碳密度计算深度为  $1\text{m}$ 。数据的计算和分析分别在 Excel 和 SPSS 中完成。

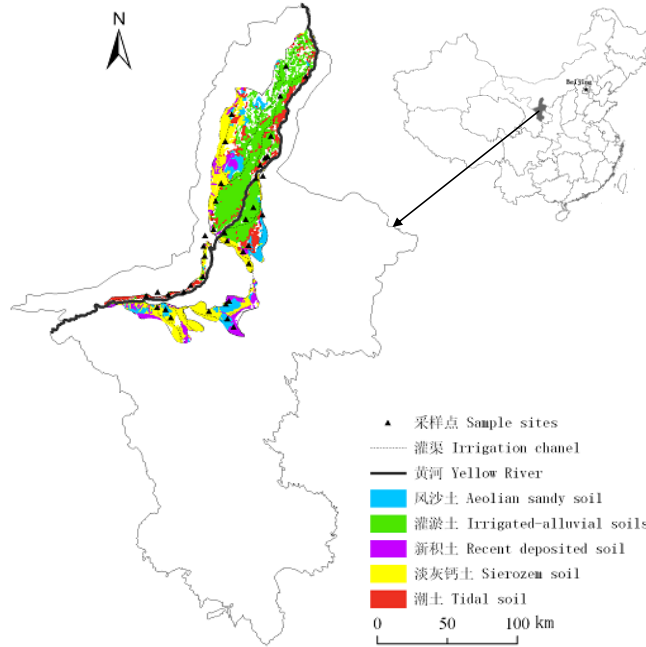


图 1 宁夏引黄各灌区土壤类型及剖面样点分布

Fig.1 Distribution of soil sampling sites and soil types in the Ningxia Irrigation Zone

## 2 结果与讨论

### 2.1 土壤样品分析结果统计

表 3 为宁夏引黄灌区土壤剖面不同深度土壤有机碳含量统计信息, 其中对照剖面未参与数值统计。

表 3 宁夏引黄灌区土壤剖面样点有机碳含量统计特征

剖面深度 Profile depth (cm)	统计 参数 Statistical parameter	各土壤类型土壤有机碳含量 Soil organic carbon content of each type of soil ( $\text{gkg}^{-1}$ )				
		灌淤土 Irrigated- alluvial soil	潮土 Fluvo-aquic soil	淡灰钙土 Sierozem soil	风沙土 Aeolian sandy soil	新积土 Fluvent soil
0~20	对照 Control	3.40	4.05	2.85	0.75	3.65
	最大值 Maximum	14.07	9.53	5.62	5.25	4.13
	最小值 Minimum	5.64	6.38	3.73	3.64	3.70
	平均值 Mean	9.18	7.95	4.93	4.19	3.92
20~30	对照 Control	3.41	2.16	2.68	0.82	2.77
	最大值 Maximum	8.91	6.21	5.24	4.34	3.67
	最小值 Minimum	1.73	5.29	1.87	2.08	3.12

	平均值 Mean	5.39	5.75	3.22	3.00	3.39
	对照 Control	2.46	1.35	1.81	0.76	1.89
30~60	最大值 Maximum	8.21	3.90	2.89	1.88	5.18
	最小值 Minimum	0.86	1.21	1.20	1.19	1.08
	平均值 Mean	4.33	2.55	1.72	1.43	3.13
	对照 Control	2.66	1.19	1.30	0.74	1.63
60~100	最大值 Maximum	6.53	4.16	1.73	3.04	2.14
	最小值 Minimum	0.87	2.32	0.64	1.02	1.49
	平均值 Mean	3.26	3.24	1.07	1.78	1.80

所有数据的统计结果表明,经灌溉耕作后,宁夏引黄灌区绝大多数土层的土壤有机碳含量平均值,与对照剖面层次相比均有增加,增加幅度因土壤类型的不同存在较大差异;仅淡灰钙土 30~60cm、60~100cm 土层的土壤有机碳含量略减小,原因在于这些土层土壤有机碳含量较低,后期的灌溉耕作对这些土层影响不明显。

各类型土壤的统计结果显示,灌淤土和潮土表层(0~20cm)土壤有机碳含量值多处于 7~10  $\text{gkg}^{-1}$  之间,淡灰钙土、风沙土和新积土表层(0~20cm)土壤有机碳含量值多处于 3~7  $\text{gkg}^{-1}$  之间,与对照剖面比较,灌淤土、淡灰钙土和风沙土表层土壤有机碳含量的增加最少分别为 0.59 倍、0.35 倍和 3.84 倍;最高分别为 0.97 倍、3.09 倍和 5.98 倍,灌溉耕作土壤表层土壤有机碳含量变化较其他土层明显,从各类型土壤剖面的统计结果来看,灌溉耕作不足 50a,除表层土壤外,其他各个层次土壤有机碳含量与对照剖面比较,差别并不明显,因此,分析表层(0~20cm)土壤有机碳含量变化,更能研究和揭示不同时间长度灌溉耕作对土壤碳汇增加的影响。

## 2.2 不同类型土壤表层土壤有机碳含量随灌溉耕作时间的变化特征

图 2 为宁夏引黄灌区 5 种类型土壤表层有机碳含量随灌溉耕作时间变化分布图,图中数据为不同灌溉耕作时间下土壤有机碳含量的平均值,对照土壤的灌溉耕作时间为 0 a。图 2 显示,宁夏引黄灌区 5 种类型土壤的有机碳含量均随灌溉时间的延长而呈现增加的趋势。分析灌淤土表层土壤有机碳含量随灌溉时间的变化(图 2A)可知,灌淤土表层土壤有机碳含量增幅较大,与对照相比增加约 2 倍~3 倍,且不同灌溉耕作时间下土壤有机碳含量与对照相比差异性显著( $p<0.01$ ),增加明显;不同灌溉耕作时间下潮土表层土壤有机碳含量增加明显(图 2B);淡灰钙土表层土壤有机碳含量受灌溉耕作时间的影响显著,二者相关系数为 0.727,但是不同灌溉耕作时间下表层土壤有机碳含量与对照相比差异性不显著( $p<0.01$ ),增加不明显(图 2C);风沙土表层土壤有机碳含量初始值较低,经灌溉耕作后表层土壤有机碳含量增至对照的 4~7 倍,但仍处于较低的水平(图 2D);新积土表层土壤有机碳含量受灌溉时间的影响不显著,灌溉耕作 10a、30a 后表层土壤有机碳含量仅增加 1.45%、13.18%(图 2E)。经不同时间的灌溉耕作后,五种类型土壤表层土壤有机碳含量的增幅大小顺序为:风沙土>灌淤土>潮土>淡灰钙土>新积土。

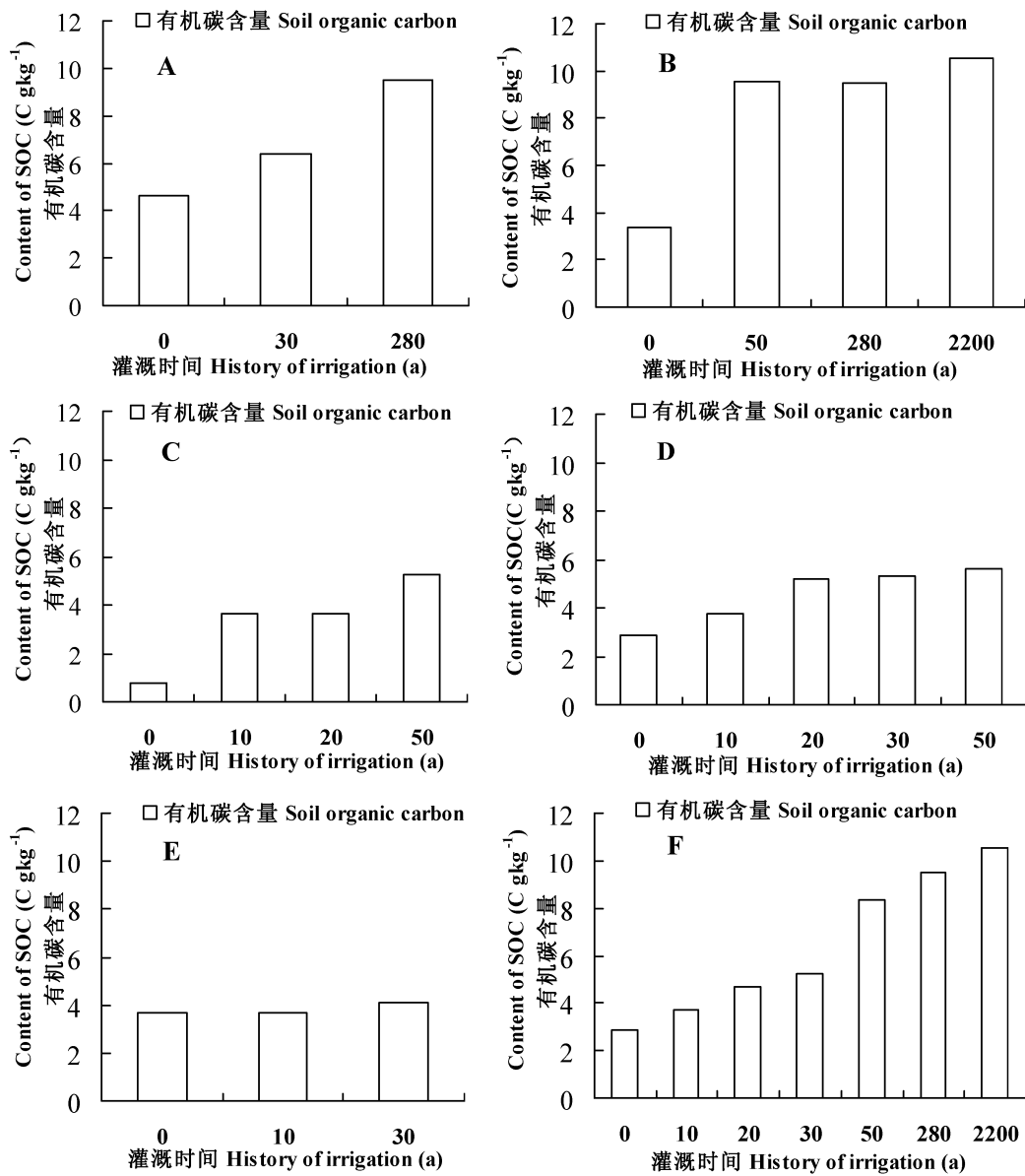


图2 各类型土壤表层(0~20cm)有机碳含量变化趋势(其中 A: 潮土; B: 灌淤土; C: 风沙土; D: 淡灰钙土; E: 新积土; F: 不同灌溉时间下的总体平均)

Fig.2 Content and change trend of soil organic carbon in the surface soil (0~20cm) of different soil types (A: Fluvo-aquic soils; B: Irrigation-silted soils; C: Aeolian sandy soil; D: Sierozem soil; E: Fluvent soil; F: average of all sites different in irrigation history)

### 2.3 引黄灌区不同土壤类型表层土壤有机碳含量差异性

灌溉耕作使宁夏引黄灌区表层土壤有机碳含量得以增加,但这种作用还受到灌溉耕作时间长短的影响:灌溉耕作时间较短,表层土壤有机碳含量较低;灌溉耕作时间较长,表层土壤有机碳含量较高,说明较高的土壤有机碳含量是经过长期引水灌溉耕作后累积的结果,但这种效果在灌溉耕作时间超过 50a 时表现才会较为明显,如淡灰钙土、风沙土和新积土(图 2C、图 2D、图 2E)。综合宁夏引黄灌区各类型土壤其表层土壤有机碳含量随灌溉耕作时间

的变化(图 2F)特征,灌区土壤表层有机碳含量与灌溉耕作时间之间存在下列关系(公式(2)):

$$SOC = 4.0053Ln(t) + 1.5375 \quad R^2=0.832 \quad (2)$$

公式(2)中,  $SOC$  为灌区土壤有机碳含量,  $t$  为灌溉耕作时间。可见,灌溉耕作对灌区表层土壤有机碳含量的增加有很大影响,随灌溉耕作时间的延长,灌区土壤表层土壤有机碳含量有增加的趋势。对于多数分布于干旱、半干旱地区的土壤而言,土壤有机碳含量普遍较低<sup>[24]</sup>,本研究中表层土壤有机碳含量最高的灌淤土其平均值仅为  $9.18 \text{ gkg}^{-1}$ ,而淡灰钙土、风沙土和新积土表层土壤有机碳含量明显低于灌淤土。

比较不同灌溉耕作时间下,灌区各类型土壤的表层有机碳含量可知,当灌溉耕作超过 280 a 时,灌淤土表层土壤有机碳平均含量为  $9.49 \text{ gkg}^{-1}$ ,略低于潮土表层有机碳含量  $9.53 \text{ gkg}^{-1}$ ,但明显高于淡灰钙土、风沙土和新积土表层土壤有机碳含量;当灌溉耕作时间在 50a 之内时,灌淤土表层土壤有机碳平均含量为  $9.58 \text{ gkg}^{-1}$ ,高于其他类型土壤,而在相同的灌溉耕作时间下,淡灰钙土表层土壤有机碳含量高于新积土和风沙土表层土壤有机碳含量。

不同类型土壤表层有机碳含量在相同的灌溉耕作时间下存在的差异性,说明不同土壤类型对引黄灌溉引起的土壤表层有机碳含量的高低变化响应不同。在本研究中,淡灰钙土属宁夏灌区地带性土壤,形成母质是第四纪冲积物,有机质含量较低,母质层有机质含量更低甚至没有生物积累;风沙土来自当地或邻近地区的沙质土壤或沙性母质,土壤有机质含量低;潮土、新积土是在洪积、冲积物基础上形成,有机质含量不高;灌淤土是在长期引用含有大量泥沙的黄河水灌溉并加上人为耕作活动形成的人为土,本身有机质含量并不是很高,但相对于灌区内其他四类土壤有机质含量较高<sup>[15]</sup>。因此,土壤类型决定了土壤中有机碳含量的背景值,灌溉耕作使土壤有机碳含量得以增加,且背景值越低增加越明显,同时灌溉耕作减小了因土壤类型不同而产生的土壤有机碳含量的区域间差异,因此灌溉耕作和土壤类型决定了土壤中有机碳含量的增加。本研究中灌淤土的表层土壤有机碳含量要高于其他类型的土壤,而灌淤土是在长期的灌溉、淤积、耕作下形成的,进一步证明引用河水进行灌溉耕作是增加干旱、半干旱地区土壤有机碳含量的重要途径。

## 2.4 不同类型土壤引黄灌溉固碳效应的比较

图 3 为宁夏引黄灌区 5 种类型土壤的有机碳密度随灌溉时间变化趋势图,图中数据为相同灌溉耕作时间下各剖面碳密度的平均值,对照剖面灌溉耕作时间为 0a。

图 3A 所示,灌淤土土壤碳密度较大,最大值出现在灌溉耕作时间为 50a 时,土壤碳密度与灌溉耕作时间的相关性不明显;经灌溉耕作后潮土土壤碳密度增加明显,而且灌溉耕作时间越长,增加越多(图 3B);淡灰钙土土壤有机碳密度与灌溉耕作时间的相关系数为 0.77,土壤有机碳密度与对照相比较增加并不明显(图 3C);风沙土土壤有机碳密度的背景值最低,经灌溉耕作后,土壤有机碳密度增加明显,即灌溉耕作对土壤有机碳密度本底值较低的土壤影响更为显著,特别是当灌溉耕作时间为 50a 时(图 3D);新积土土壤有机碳密度受灌溉耕作的影响较小,经过 20、30a 灌溉耕作后,分别增加 25.64%、7.44%,并不显著。综合宁夏

引黄灌区各类型土壤其有机碳密度随灌溉耕作时间的变化特征(图 3F)可知,灌溉耕作使宁夏引黄灌区土壤有机碳密度增加,当灌溉耕作时间为 50a 时增加最多,灌溉耕作时间 50a 以上的土壤有机碳密度高于灌溉耕作 50a 之内的土壤,主要是因为灌溉耕作时间 50a 以上的土壤是土壤有机碳密度较高的灌淤土和潮土,而灌溉耕作时间 50a 之内的是土壤有机碳密度较低的淡灰钙土、风沙土和新积土。土壤类型的差异决定了宁夏引黄灌区土壤有机碳密度的差异,但是人为的灌溉和耕作增加了灌区土壤有机碳密度并改变了因土壤类型不同造成的土壤有机碳密度的差异。本研究结果表明:土壤有机碳密度因土壤类型的不同而异,5 种类型土壤的有机碳密度的排列次序为:灌淤土>潮土>新积土>风沙土 >淡灰钙土;而在相同的灌溉耕作时间下,与同类型未受灌溉耕作影响的对照土壤相比,5 种类型土壤其有机碳密度增幅大小顺序为:风沙土>潮土>灌淤土>淡灰钙土>新积土。

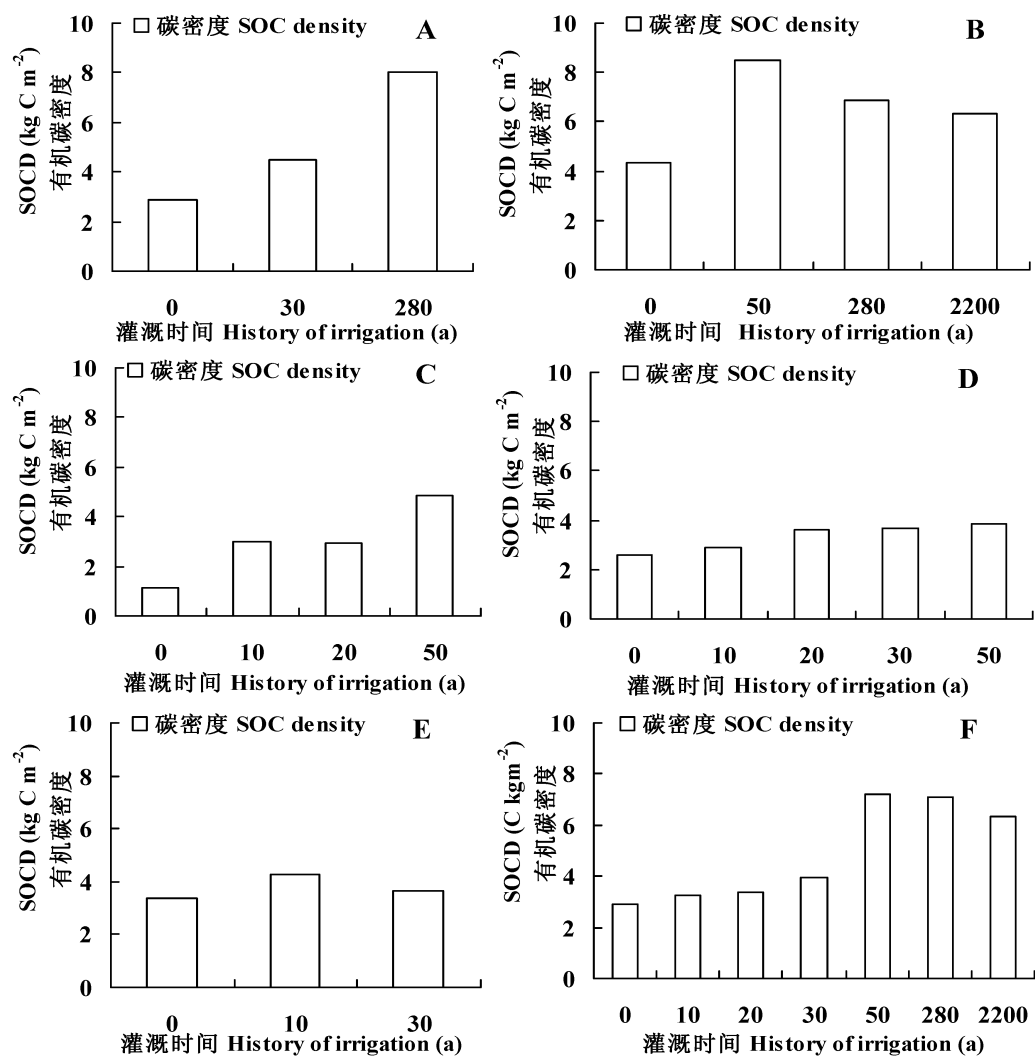


图 3 各类型土壤有机碳密度变化趋势 (A: 潮土; B: 灌淤土; C: 风沙土; D: 淡灰钙土; E: 新积土; F: 不同灌溉时间下的总体平均)

Fig.3 Change trend of soil organic carbon density of different soil types (A: Fluvo-aquic soil; B: Irrigated-alluvial soils; C: Aeolian sandy soil; D: Sierozem soil; E: Fluvent soils; F: average of all sites different in irrigation)



history)

需要指出的是,灌淤土土壤有机碳密度并未表现出灌溉时间越长,土壤有机碳密度越高的变化趋势(图 3A),这一现象并不能说明灌溉耕作时间超过 50a 后,灌淤土土壤有机碳密度减小了,或灌淤土由碳汇变成了碳源。从灌淤土的分布来讲,不同地区的土壤形成母质中土壤有机碳含量背景值存在很大差异,致使剖面碳密度也存在较大差异。主要原因是灌淤土是在淡灰钙土、风沙土、潮土及河流冲积物的基础上形成的具有一定厚度的特殊土壤,经长期的灌水落淤,再加上人为的灌溉、耕作及施肥增加了土壤有机物质的投入,最终使土壤性状发生改变,与原来有机质含量较低的淡灰钙土、风沙土及河流冲积物相比,土壤有机质含量得以提高,土壤有机碳密度增加。在本研究中,灌溉耕作时间超过 50a 的灌区,表层(0~20cm)及亚表层(20~30cm)土壤有机碳含量与灌溉耕作时间 50a 的灌区土壤有机碳含量差别不是很大,但在 30~100cm 深度处,灌溉耕作 50a 的土壤有较高的土壤有机碳含量,30~100 cm 属灌淤淤积形成的土层,土壤有机碳密度最高可达  $6.97 \text{ kgm}^{-2}$ ;而灌溉耕作超过 50a 的区域,灌淤淤积形成的土层较薄,在 30~100 cm 处土壤有机碳含量较低,土壤有机碳密度最低仅为  $1.14 \text{ kgm}^{-2}$ ,特别是 60~100 cm 深度为母质层,土壤有机碳含量明显降低,致使灌溉耕作超过 50a 后土壤有机碳密度低于灌溉耕作 50a 的土壤有机碳密度。总体来讲,灌淤土的土壤有机碳密度是增加的,而且是这五种土壤中最高的,从灌淤土的形成来看,其土壤有机碳密度的增加是长期灌溉耕作的结果。宁夏引黄灌区土壤有机碳密度的差异性是由土壤类型的不同引起的。

### 3 结 论

土壤类型从根本上决定了宁夏引黄灌区的土壤有机碳含量及密度,但是灌溉耕作增加了各土壤类型的有机碳含量与碳密度,并改变了因土壤类型不同造成的土壤有机碳含量与碳密度的差异。通过对比分析不同类型的土壤在灌溉时间序列下土壤有机碳含量和碳密度的变化,可得出如下结论:

1) 灌溉耕作可使土壤有机碳含量增加,一般而言,灌溉耕作时间越长,表层土壤有机碳含量越高,灌溉耕作在增加土壤有机碳含量的同时,减小了土壤有机碳含量在空间分布上的差异。

2) 不同土壤类型对引黄灌溉引起的土壤表层有机碳含量的高低变化响应不同,在相同灌溉耕作时间下,因土壤类型的不同,土壤有机碳含量增加也不尽相同,相对而言,灌淤土、风沙土、潮土有机碳含量增加明显,淡灰钙土和新积土增加不明显。

3) 灌溉耕作时间和土壤类型决定了引黄灌区的土壤碳密度,一般而言,灌溉耕作时间越长,土壤有机碳含量越高,土壤有机碳密度越大,如灌淤土和潮土;相反,灌溉耕作时间越短,土壤有机碳含量越低,土壤有机碳密度越小,如淡灰钙土、风沙土和新积土。灌溉耕作有利于土壤固碳,固碳效应因土壤类型的不同而异。

## 参考文献

- [1] Liu J G, Wiberg D, Zehnder A J B, et al. Modeling the role of irrigation in winter wheat yield, crop water productivity, and production in China. *Irrig Sci*, 2007, 26: 21-33
- [2] Wang Z M, Zhang B, Song K S, et al. Spatial variability of soil organic carbon under maize monoculture in the Song-Nen Plain, northeast China. *Pedosphere*, 2010, 20 (1): 80-89
- [3] Entry J A, Fuhrmann J J, Sojka R E, et al. Influence of irrigated agriculture on soil carbon and microbial community structure. *Environmental Management*, 2003, 33: 363-373
- [4] Gwenzi W, Gotosa J, Chakanetsa S, et al. Effects of tillage systems on soil organic carbon dynamics, structural stability and crop yields in irrigated wheat (*Triticum aestivum* L.)-cotton (*Gossypium hirsutum* L.) rotation in semi-arid Zimbabwe. *Nutr Cycl Agroecosyst*, 2009, 83: 211-221
- [5] Masto R E, Chhonkar P K, Singh D, et al. Changes in soil quality indicators under long-term sewage irrigation in a sub-tropical environment. *Environ Geol*, 2009, 56: 1237-1243
- [6] 张保华, 张金萍, 汤庆新, 等. 引黄灌溉对耕层土壤肥力的影响研究. *人民黄河*, 2008, 30 (10): 67-68, 76. Zhang B H, Zhang J P, Tang Q X, et al. Study on the effect of irrigation by Yellow River on the fertilization at surface of cultivated land (In Chinese). *Yellow River*, 2008, 30 (10): 67-68,76
- [7] 郭秉晨, 马玉兰, 冯静, 等. 宁夏引黄灌区耕地土壤有机质及养分质量分数变化趋势. *农业科学研究*, 2006, 27(3):1-5. Guo B C, Ma Y L, Feng J, et al. Changing trend of organic matter and nutrient content in cultivated land of the Ningxia irrigation area of Yellow River (In Chinese). *Journal of Agricultural Sciences*, 2006, 27 (3): 1-5
- [8] 赵加瑞, 王益权, 刘军, 等. 灌溉水质与土壤有机质累积的关系. *生态环境*, 2008, 17 (3): 1240-1243. 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): 1240-1243
- [9] 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. *土壤学报*, 2010, 47 (2): 279-285. Tang G M, Xu W L, Sheng J D, et al. The variation of soil organic carbon and soil particle-size in Xinjiang oasis Farmland of different years (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47 (2): 279-285
- [10] Wang Y Q, Zhang X C, Zhang J L, et al. Spatial variability of soil organic carbon in a watershed on the Loess Plateau. *Pedosphere*, 2009, 19 (4): 486-495
- [11] Hao Y, Lal R, Owens L B, et al. Effect of cropland management and slope position on soil organic carbon pool at the North Appalachian Experimental Watersheds. *Soil and Tillage Research*, 2002, (68): 133-142
- [12] Mohammadi J, Motaghian M H. Spatial prediction of soil aggregate stability and aggregate-

- associated organic carbon content at the catchment scale using Geostatistical Techniques. *Pedosphere*, 2011, 21 (3): 389-399
- [13] 王吉智. 灌淤土——中国干旱与半干旱地区的人为土壤. 干旱区资源与环境, 1993, 7(3,4): 233-237. Wang J Z. Irrigating Warped soils—a kind of in arid and Sub-arid region in China (In Chinese). *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 1993, 7 (3,4): 233-237
- [14] Shi X Z, Yu D S, Yang G X, et al. Cross-reference benchmarks for translating the Genetic Soil Classification of China into the Chinese Soil Taxonomy. *Pedosphere*, 2006, 16 (2): 147-153
- [15] 吴强国. 黄河与宁夏水利. 银川: 宁夏人民出版社, 2007-2008. Wu Q G. Yellow River and Water Conservancy in Ningxia (In Chinese). Yinchuan: Ningxia People's Republic Press, 2007-2008
- [16] 宁夏水利厅. 宁夏水利五十年. 银川: 宁夏人民出版社, 2008. Department of Water Resources of Ningxia Hui Autonomous. *Ningxia Water Conservancy in Fifty Years* (In Chinese). Yinchuan: Ningxia People's Republic Press, 2008
- [17] 宁夏农业勘察设计院. 宁夏土壤. 银川: 宁夏人民出版社, 1990. Agricultural Survey and Design Institute of Ningxia. *Ningxia Soil*. Yinchuan: Ningxia People's Republic Press (In Chinese). 1990
- [18] 于东升, 史学正, 孙维侠, 等. 基于 1: 100 万土壤数据库的中国土壤有机碳密度及储量研究. *应用生态学报*, 2005, 16 (12): 2279-2283. Yu D S, Shi X Z, Sun W X, et al. Estimation of China soil organic carbon storage and density based on 1:100 soil database (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(12): 2279-2283
- [19] Shrestha B M, Sitaula B K, Singh B R, et al. Soil organic carbon stocks in soil aggregates under different land use systems in Nepal. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2004, 70: 201-213
- [20] Saha D, Kukal S S, Sharma S. Landuse impacts on SOC fractions and aggregate stability in typic ustochrpts of Northwest India. *Plant Soil*, 2011, 339: 457-470
- [21] Eaton J M, McGoff N M, Byrne K A, et al. Land cover change and soil organic carbon stocks in the Republic of Ireland 1851-2000. *Climatic Change*, 2008, 91: 317-334
- [22] Deng W G, Wu W D, Wang H L, et al. Temporal dynamics of iron-rich, tropical soil organic carbon pools after land-use change from forest to sugarcane. *Soils Sediments*, 2009, (9): 112-120
- [23] Zhang Y, Zhao Y C, Shi X Z, et al. Variation of soil organic carbon estimates in mountain regions: A case study from Southwest China. *Geoderma*, 2008, 146: 449-456
- [24] Lal R. Carbon sequestration in dryland ecosystems. *Environmental Management*, 2004, 33(4),

## **Effect of Irrigation with Water Diverted from the Yellow River on Carbon Sequestration in Soils of Different Types in Ningxia Irrigation Zone**

Dong Linlin<sup>1</sup> Yang Hao<sup>1</sup> Yu Dongsheng<sup>1,2†</sup> Zhang Haidong<sup>2</sup> Liu Yang<sup>2</sup> Shi Xuezheng<sup>2</sup>

(1 College of Geographical Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China)

(2 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

**Abstract** Irrigation and cultivation are two important driving forces of variation of soil organic carbon density (SOCD). The Ningxia Irrigation Zone using water diverted from the Yellow River in irrigation was selected as a case for study, and 48 sampling points were set up in five types of soils to study characteristics of soil organic carbon (SOC) and SOCD in these soils under different cultivation and irrigation time series, and analyze differences among the soils in effect of irrigation and cultivation on carbon sequestration. Results show that the effect of irrigation and cultivation on carbon sequestration varied with the soil. The same in irrigation and cultivation history, the five types of soils followed a decreasing order of Irrigated-alluvial soils > Fluvo-aquic soils > Fluvent soils > Aeolian sandy soil > Sierozem soil in SOCD. Irrigation and cultivation increased SOCD to a varying degree in these soils, which followed Aeolian sandy soil > Fluvo-aquic soils > Irrigated-alluvial soils > Sierozem soil > Fluvent soil. The differences among the soils in effect of irrigation and cultivation on carbon sequestration are significant in the Ningxia Irrigation Zone.

**Key words** Irrigation with water diverted from the Yellow River; Soil organic carbon; Soil organic carbon density; Difference