

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第34卷 第3期 Vol.34 No.3 **2014**

中国生态学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 34 卷 第 3 期 2014 年 2 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 灾后生态恢复评价研究进展 刘孝富,王文杰,李京,等 (527)
- 基于生态能量视角的我国小水电可持续性分析 庞明月,张力小,王长波 (537)

个体与基础生态

- 北部湾北部海域夏季微型浮游动物对浮游植物的摄食压力 马璐,曹文清,张文静,等 (546)
- 鲶鱼和胡子鲶的两性异形与雌性个体生育力 樊晓丽,林植华,丁先龙,等 (555)
- 环境温度对白头鹎代谢产热和蒸发失水的影响 林琳,曹梦婷,胡益林,等 (564)
- 灌溉对沙拐枣幼苗生长及氮素利用的影响 黄彩变,曾凡江,雷加强,等 (572)
- PAHs 污染土壤植物修复对酶活性的影响 朱凡,洪湘琦,闫文德,等 (581)
- 基于修正 RISKE 模型的重庆岩溶地区地下水脆弱性评价 魏兴萍,蒲俊兵,赵纯勇 (589)
- 排水沟蓄水条件下农田与排水沟水盐监测 潘延鑫,罗纨,贾忠华,等 (597)

种群、群落和生态系统

- 高寒退化草地不同海拔梯度狼毒种群分布格局及空间关联性 高福元,赵成章,卓马兰草 (605)
- 捕食者对空心莲子草叶甲种群的生物胁迫 刘雨芳,李菲,桂芳艳,等 (613)
- 夏、冬季南海北部浮游植物群落特征 马威,孙军 (621)
- 磨盘山天然次生林凋落物数量及动态 范春楠,郭忠玲,郑金萍,等 (633)
- 持续干旱对樱桃根际土壤细菌数量及结构多样性影响 刘方春,邢尚军,马海林,等 (642)
- 随机森林算法基本思想及其在生态学中的应用——以云南松分布模拟为例 张雷,王琳琳,张旭东,等 (650)
- 基于水文平衡的湿地退化驱动因子定量研究 侯鹏,申文明,王桥,等 (660)
- 华北低丘山地人工林蒸散的控制因子 黄辉,孟平,张劲松,等 (667)
- 新疆天山高寒草原不同放牧管理下的 CO₂, CH₄ 和 N₂O 通量特征 贺桂香,李凯辉,宋韦,等 (674)

景观、区域和全球生态

- 宁夏生态足迹影响因子的偏最小二乘回归分析 马明德,马学娟,谢应忠,等 (682)
- 引黄灌区土壤有机碳密度剖面特征及固碳速率 董林林,杨浩,于东升,等 (690)
- 自养微生物同化 CO₂ 的分子生态研究及同化碳在土壤中的转化 吴小红,简燕,陈晓娟,等 (701)

资源与产业生态

- 基于能值分析法的矿区循环经济系统生态效率分析 孙玉峰,郭全营 (710)

基于 AD-AS 模型的海岸带生态系统综合承载力评估——以舟山海岸带为例 苏盼盼,叶属峰,过仲阳,等 (718)

城乡与社会生态

基于增强回归树和 Logistic 回归的城市扩展驱动力分析 李春林,刘 淼,胡远满,等 (727)

研究简报

陕西省不同生态区大气氮素干湿沉降的时空变异 梁 婷,同延安,林 文,等 (738)

不同覆盖方式对旱地果园水热特征的影响 刘小勇,李红旭,李建明,等 (746)

长白山苔原带土壤动物群落结构及多样性..... 王振海,殷秀琴,蒋云峰 (755)

最大可允许填海面积模拟——厦门西海域案例研究 林琛琛,饶欢欢,刘 岩,等 (766)

学术信息与动态

2013 年水文土壤学与自然资源可持续利用国际学术研讨会述评 张 骁,赵文武 (774)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 252 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 29 * 2014-02



封面图说: 云南松树冠——云南松为松科松属裸子植物,多生长在海拔 1000—3500m 的高山,喜光、耐干旱、耐瘠薄,适应酸性的红壤、黄壤,在其他树种不能生长的贫瘠石砾地或冲刷严重的荒山坡分布,易于天然更新。主要分布于四川西南部、云南、西藏东南部、贵州西部、广西西部,常形成大面积纯林,尤以云南分布最广,故有云南松之称。云南松树高可达 30m,胸径达 1m,树皮呈灰褐色,叶通常 3 针一束,鲜有两针,球果圆锥状卵圆形,种子近卵圆形或倒卵形。树干通直,木质轻软细密,是优质造纸、人造板原料,富含松脂是云南松的重要特点之一。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201211051537

董林林, 杨浩, 于东升, 张海东, 刘杨, 史学正. 引黄灌区土壤有机碳密度剖面特征及固碳速率. 生态学报, 2014, 34(3): 690-700.

Dong L L, Yang H, Yu D S, Zhang H D, Liu Y, Shi X Z. Profile distribution patterns of soil organic carbon and the rate of carbon sequestration in Ningxia Irrigation Zone. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(3): 690-700.

引黄灌区土壤有机碳密度剖面特征及固碳速率

董林林^{1,2}, 杨浩², 于东升^{1,2,*}, 张海东¹, 刘杨¹, 史学正¹

(1. 中国科学院南京土壤研究所(土壤与农业可持续发展国家重点实验室), 南京 210008;

2. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210097)

摘要:为揭示灌溉耕作对土壤有机碳密度剖面(0—100 cm)分布产生的影响,通过在宁夏引黄灌区进行实地调查与采样,以无灌溉耕作的自然土壤作为对照,研究不同灌溉耕作时间序列下灌区土壤有机碳密度的剖面分布特征,并估算其平均固碳速率。结果表明:灌区土壤有机碳含量具有随土层深度增加而下降的剖面分布特征,灌溉耕作对增加表层土壤有机碳含量作用最明显;灌区土壤剖面碳密度与灌溉耕作时间和土壤类型均显著相关($P < 0.01$),相关系数分别为 0.63 和 0.74,且因灌溉耕作时间和土壤类型的不同,土壤有机碳密度差异性显著($P < 0.05$);灌溉耕作影响的土层深度及剖面土壤有机碳密度的增加量因灌溉耕作时间长短的不同而异;引黄灌区 5 类土壤的平均固碳速率为 $0.53 \text{ MgC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。引黄灌溉耕作在增加农田土壤固碳中发挥着重要作用。

关键词:土壤有机碳;灌溉;剖面特征;固碳速率;宁夏引黄灌区

Profile distribution patterns of soil organic carbon and the rate of carbon sequestration in Ningxia Irrigation Zone

DONG Linlin^{1,2}, YANG Hao², YU Dongsheng^{1,2,*}, ZHANG Haidong¹, LIU Yang¹, SHI Xuezheng¹

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

2 College of Geographical Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China

Abstract: To reveal the effect of irrigation with sediment laden water from the Yellow River on soil organic carbon (SOC) distribution in profile (0—100 cm), Ningxia Irrigation Zone was selected as the study area to carry out the research. Totally, 40 soil profiles of five soil types (Irrigation-silted soils, Fluvo-aquic soils, Sierozem soil, Aeolian sandy soil and Alluvial soils) were collected, including 34 cropland profiles with the irrigated durations ranged from 10 to 2200 years and 6 natural soil profiles never irrigated and cultivated, to analyze profile distribution patterns of SOC content and density under different durations of irrigation and cultivation. The natural soil profiles were used as control profiles and their irrigation duration were set to zero. Pearson correlation coefficients were calculated to determine relationships between SOC density and irrigation durations and soil types. SOC content and density were subjected to analysis of variance (ANOVA) to test difference of irrigation effects from irrigation years and soil types at 5% probability level, respectively. SOC sequestration rate was also estimated by comparing irrigated soils with control ones.

Results indicated that SOC content of irrigated cropland showed a decreasing trend with the deepening of soil layers in profile. SOC content of surface layer (0—20 cm) affected mainly by irrigation and cultivation increased more rapidly than those of deeper layers affected mainly by soil parent material. When the irrigated duration was about 50 years, the SOC

基金项目:国家重点基础研究发展计划“973”资助项目(2010CB950702);中国科学院战略性先导科技专项资助项目(XDA05050507);博士后基金资助项目(1202051C)

收稿日期:2012-11-05; 修订日期:2013-05-29

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dshyu@issas.ac.cn

content showed the most significant difference among the five soil types. The irrigation-silted soil layer formed by irrigation and cultivation activities, usually thicker than 50 cm, were found in those areas with such activities of 50 years over. The depth influenced by irrigation and the increment of SOC density both are different due to the difference of irrigation durations. SOC density was significantly related with irrigation durations and soil types, the correlation coefficients were 0.63 ($P < 0.01$) and 0.74 ($P < 0.01$), respectively. SOC density in the profile depth were significant different ($P < 0.05$) among varied irrigation durations and soil types. SOC density increment was significantly and positively correlated with irrigation durations shorter than 50 years. On average, the SOC density increment of the cropland soils in depth of 0—20, 20—30, 30—60 and 60—100 cm were 14.69, 4.52, 9.84 and 9.52 Mg/hm^2 more than the corresponding soil layers of their control profiles. SOC density increment of irrigation-silted soils formed under the long-term alternate activities of irrigation, manure addition, silting and cultivation, was more than other four soil types in Ningxia Irrigation Zone.

The linear relationships between SOC density increments and irrigation durations inferred that average SOC sequestration rate reached $0.53 \text{ MgC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ from the five soil types in Ningxia Irrigation Zone. The SOC sequestration rate varied among soil types.

Results discussion indicated, by stimulating plant and root growth as well as soil biotic activity, irrigation could potentially enhance SOC sequestration of cultivated land in the arid and semi-arid area. In addition, irrigation with sediment laden Yellow River water via sediment with organic matter silting, make the irrigation-silted soil layer thicker at the top of profile, and SOC increased accordingly. Overall, irrigation by the Yellow River water plays an important role in increasing SOC density.

Key Words: soils; organic carbon; irrigation; carbon sequestration rate; Ningxia Irrigation Zone

土壤有机碳库是陆地生态系统中最大的碳库,地表 0—100 cm 土壤有机碳库储量约为 1 500 Pg C, 约为全球大气碳总量的 2 倍或植被碳总量的 3 倍^[1]。全球土壤(1 m 土体内)中碳的年周转量大致与年均人类活动排放的 CO_2 -C 量相当,在过去的 100 a 间,全球土壤有机碳的损失量占同期大气圈 CO_2 增加量的 20% 以上^[2]。土壤有机碳库在调节全球气候变化中发挥着重要作用^[3],其变化已成为目前国际最为关注的研究热点之一^[4-7]。

人类耕作活动对农田土壤产生强烈扰动,不同的农业生产措施对土壤有机碳变化的影响具有明显的差异^[7-8]。作为保障农业正常生产的重要措施,灌溉能够促进农作物生长,产生更多的凋落物及根系生物量,从而影响农田土壤有机碳投入^[9-10]。已有研究显示,有机物投入的增加有利于土壤有机碳的积累,而根系投入对增加土壤有机碳的效果更加显著^[11]。可见,灌溉能够影响农田土壤有机碳投入,是驱动土壤有机碳变化的重要因素之一。Miyasaka 等在中国东北地区的研究表明,与非灌溉农田相比,灌溉农田土壤的固碳效应更显著^[12];Gwenzi 等在津巴布韦的研究结果显示,灌溉后棉花—小麦轮作区

表层 0—30 cm 土壤有机碳增加了 71%—80%^[13];Masto 等研究表明,污水灌溉 20 a 后印度农业研究所试验田表层 0—15 cm 土壤的有机碳含量增至 0.51%—0.86%^[14];郭秉晨等的研究结果显示,1985 年至 2005 年宁夏引黄灌区耕层 0—20 cm 土壤有机质的年均增幅为 0.4%^[15];唐光木等研究表明,灌溉耕作前 5 a,新疆绿洲灌区耕层 0—30 cm 土壤有机碳含量增加迅速,10 a 后趋于平缓^[16]。然而,上述研究均侧重于灌溉对表层 0—30 cm 土壤有机碳含量变化的影响,而对剖面(0—100 cm)土壤有机碳含量的变化还不十分清楚,对不同灌溉时间序列下土壤有机碳的剖面分布特征及其差异性的研究则更少。

在一定区域尺度上,土壤有机碳受控于土壤类型^[17-18]。因此,在研究灌溉对土壤有机碳变化产生的影响时,应考虑土壤类型对土壤有机碳及其差异性的影响,但与此相关的研究中极少分析土壤类型对其产生的影响。本文以不同类型土壤的有机碳含量变化对灌溉耕作的响应,及灌溉耕作时间对各类型土壤有机碳剖面分布特征的影响为研究目的,以宁夏引黄灌区为研究对象,分析不同灌溉时间序列

下 5 种类型土壤的有机碳密度剖面分布特征及变化,为精确估算土壤有机碳储量、选择合理有效的农业措施、促进土壤固碳提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区域

宁夏回族自治区 (E104° 16' 55"—107° 38' 53", N35° 14' 25"—39° 23' 10"), 总面积 $5.18 \times 10^4 \text{ km}^2$, 位于

其北部的引黄灌区,具有悠久的灌溉耕作历史。引黄灌区最早的灌溉农业始于秦朝,随着灌溉农业规模的扩大,在不同历史时期修建了多条灌渠。由于修建时间不同,各灌渠所灌溉区域的灌溉历史也不同(表 1)。各灌渠自建成后持续使用至今,假设同一渠道灌溉区域的灌溉时间相同,因此本研究根据各灌渠的建成时间确定灌区土壤的灌溉耕作时间,并构建引黄灌区的灌溉耕作时间序列。

表 1 宁夏引黄灌区不同土壤类型剖面样点分布数量

Table 1 Number of sample sites in different types of soil in irrigated area in Ningxia

灌渠名称 Irrigation channel	修建年代 Construction time	灌溉时间 Irrigation duration/a	各类型土壤剖面数目/个 Number of profiles in different types of soil				
			灌淤土 Irrigation-silted soils	潮土 Fluvo-aquic soils	淡灰钙土 Sierozem soil	风沙土 Aeolian sandy soil	新积土 Alluvial soils
			秦渠	公元前 214	约 2200	4	
汉延渠	约公元 700	约 1300	3				
惠农渠	1729	约 280	5	1			
跃进渠	1958	约 52	5				
西干渠	1960	约 50	2		2	1	
东干渠	1975	约 30		1	1		1
固海灌区	1986	约 20			2	1	
红寺堡灌区	1998	约 10			2	1	2
对照 Control		0		1	3	2	

土壤类型名称为发生分类学名称,分别对应于世界土壤资源参比基础(WRB)划分的灌淤人为土、筒育钙积土、干旱砂性土、石灰性冲积土、石灰性冲积锥形土^[19];灌渠建设时间参考文献^[20-21],其中跃进渠和西干渠灌区的灌溉时间仅相差 2 a,在数据分析时均按约 50 a 计

宁夏引黄灌区早期修建的灌渠主要分布在银川平原地区,该区域是宁夏重要的水稻产区,受长期灌溉、淤积和耕作的影响,耕作土壤主要为灌淤土(我国西部灌溉农业区特有的土壤类型,它是因长期引用含有泥沙的河水进行灌溉、耕作形成的具有一定厚度的熟化土层的人为土壤),面积约占宁夏引黄灌区的 40%。在宁夏引黄灌区,最早修建的秦渠,距今已有超过 2 000 a 的历史。随着灌溉技术的发展,在引黄灌区的南部山区,新的灌渠不断建成,如红寺堡扬水灌区,建成时间约 10 a(表 1),分布的土壤主要是灰钙土(约占灌区土壤面积的 20%)、风沙土等,土壤肥力较低,主要生产小麦、玉米等作物。至本研究采样时间,其灌溉时间可界定为 7 个时段,分别为:10、20、30、50、280、1 300 和 2 200 a。灌区采样点的数量与分布见表 1 和图 1。

1.2 样品采集

本研究共布设各类型土壤的剖面采样点 40 个。其中,灌溉土壤样点 34 个,均为耕地,布点的原则

为:以灌区各类型土壤分布的面积大小为基础,结合灌渠的灌溉历史及灌溉面积,沿灌渠布设样点;根据灌区历史资料记载的地理环境特征,在无法开垦种植的、未受灌溉耕作等人为扰动的长年荒地或河滩地上布设 6 个对照剖面,分别为 3 个淡灰钙土(本区地带性土壤)、2 个风沙土和 1 个潮土剖面,对照剖面的灌溉时间设为 0 a。通过灌溉土壤与对照土壤的比较,分析灌溉耕作引起的土壤有机碳含量及密度的变化。考虑到灌淤土和新积土是在淡灰钙土、风沙土、潮土和河流冲积物的基础上,受人为耕作扰动形成,因此这 3 类土壤的 6 个对照剖面也可作为灌淤土和新积土的对照剖面。

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 1 m,按土壤发生和耕地土壤特点将土壤剖面分为 4—5 个土层。依据当地土壤耕层及犁底层深度,统一划分表土层 0—20 cm 和亚表层 20—30 cm,心土母质层 30—100 cm 则视各剖面土壤自然发生情况分为 2—3 层。每层自上而

下均匀采集土壤样品 1.00 kg,用环刀法测定土壤体

积质量(3个重复)。

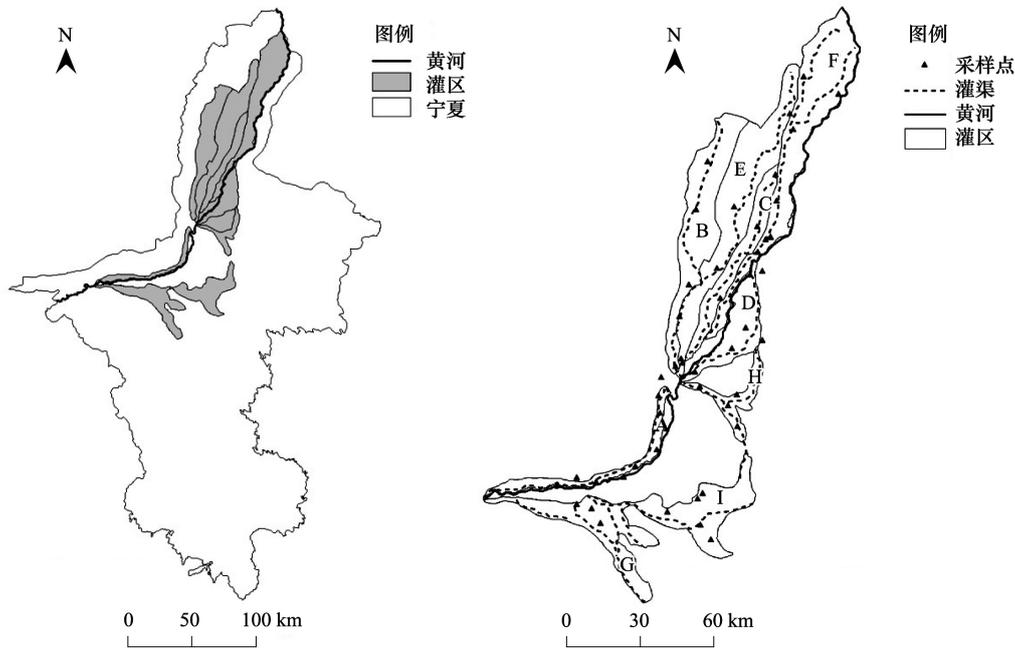


图1 宁夏引黄灌区剖面样点及灌渠分布

Fig.1 Distribution of sample sites and irrigation channel in Ningxia

A:跃进渠灌区 Area irrigated by Yuejin channel;B:西干渠灌区 Area irrigated by Xi Channel;C:汉延渠灌区 Area irrigated by Hanyan channel;D:秦渠灌区 Area irrigated by Qin Channel;E:唐徕渠灌区 Area irrigated by Tanglai Channel;F:惠农渠灌区 Area irrigated by Huinong Channel;G:固海灌区 Guhai pumping-irrigation area;H:东干渠灌区 Area irrigated by Dong Channel;I:红寺堡灌区:Hongsipu pumping-irrigation area

采集的土壤样品在室内预处理后采用重铬酸钾 ($K_2Cr_2O_7$) 氧化-滴定法测定土壤有机碳含量。

1.3 数据处理与统计分析

本研究是按自然发生学原理划分的土壤剖面层次,为方便不同灌溉耕作时间下土壤剖面各层次之间的比较,根据土壤剖面特征,利用土壤层厚度加权平均法^[22]计算土壤剖面 30—60 和 60—100 cm 的土壤有机碳含量及密度;同一灌溉耕作时间下,同类土壤相同深度土层的土壤有机碳含量及密度取其算术平均值。土壤有机碳密度 SOCD 的计算公式如下^[23]

$$SOCD = \sum_{i=1}^n (1 - \theta_i\%) \times \rho_i \times C_i \times T_i / 10 \quad (1)$$

式中,SOCD 为土壤剖面有机碳密度 (Mg/hm^2); θ_i 、 ρ_i 、 C_i 、 T_i 分别为第 i 层粒径 >2 mm 的砾石体积分数 (%)、土壤体积质量 (g/cm^3)、土壤有机碳含量 (g/kg) 及土层厚度 (cm), n 为参与计算的土壤层次总数。由于全球 50% 以上的土壤碳库储存在地表 100 cm 深度土层内^[24-25],且目前与此相关的研究中多是以表层至 100 cm 作为土壤有机碳储量的估算深度^[25-27],因此本研究中土壤有机碳密度计算深度

为 100 cm。

土壤固碳速率反映了某一时间段内土壤有机碳密度相对于时间的变化率,可表示为某一时间段内土壤有机碳密度变化量与时间的比值:

$$V = \Delta SOCD_j / t \quad (2)$$

式中, V 为某一剖面样点的土壤固碳速率 ($MgC \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$); t 为灌溉耕作时间 (a); $\Delta SOCD_j$ 为某一深度内各土层土壤有机碳密度变化量的总和;各土层土壤有机碳密度的变化量为灌溉耕作土壤各土层 SOCD 相对于同类土壤对照剖面相应土层 SOCD 的变化量:

$$\Delta SOCD = SOCD_i - SOCD_{ick} \quad (3)$$

式中, $\Delta SOCD$ 为第 i 层的土壤有机碳密度增加量 (Mg/hm^2);若 $\Delta SOCD$ 为正值,则说明土壤有机碳密度是增加的,为碳汇,若 $\Delta SOCD$ 为负值,则说明土壤有机碳密度是减少的,为碳源; $SOCD_i$ 为第 i 层土壤有机碳密度 (Mg/hm^2); $SOCD_{ick}$ 为与 $SOCD_i$ 同类型的对照土壤剖面第 i 层的土壤有机碳密度 (Mg/hm^2)。

运用单因素方差分析检验灌溉耕作时间和土壤类型影响下土壤有机碳含量及密度差异性的显著程度,并计算其 Pearson 简单相关系数, $P < 0.05$ 。数据

计算和统计分析工作运用 Excel 和 SPSS 软件完成。

2 结果与讨论

2.1 土壤有机碳含量剖面变化特征

总体上,灌区 5 类土壤的有机碳含量随土层深度增加呈现下降的趋势(图 2),这种特征符合一般耕作土壤 SOC 含量的剖面分布规律^[14,16,28],灌溉耕作并没有从根本上改变 SOC 剖面分布的一般规律,但在土壤剖面不同深度处,灌溉耕作对其变化的影响程度不同。

以灌淤土为例(图 2),其对照土壤表层 0—20 cm 的 SOC 含量平均为 2.48 g/kg,经过 50—2 200 a 的灌溉耕作后,SOC 含量平均为 9.22 g/kg,增加明显 ($P<0.001$);而在 60—100 cm 处,SOC 平均含量降至

3.02 g/kg,仍明显高于对照土壤 SOC 含量 0.8 g/kg ($P<0.05$)。可见,灌溉耕作影响下,土壤表层 SOC 含量增加比深层土壤更明显。其他 4 类土壤的 SOC 含量随土层深度变化的规律,大体上与灌淤土相似(图 2),不同的是,其他 4 类土壤的 SOC 含量变化主要表现在受灌溉耕作影响强烈的表层及亚表层(0—30 cm),30 cm 以下土层 SOC 含量增加不明显。说明灌溉耕作对 0—30 cm 土层 SOC 含量的变化影响更强烈,而对更深土层 SOC 含量变化的影响较弱,灌溉耕作引起的 SOC 含量的增加量呈现出与土层深度成反比的规律,且不同土层间 SOC 含量差异显著 ($P<0.05$)。与对照土壤相比,灌区土壤有机碳含量随土层深度增加而降低的剖面分布规律更为明显。

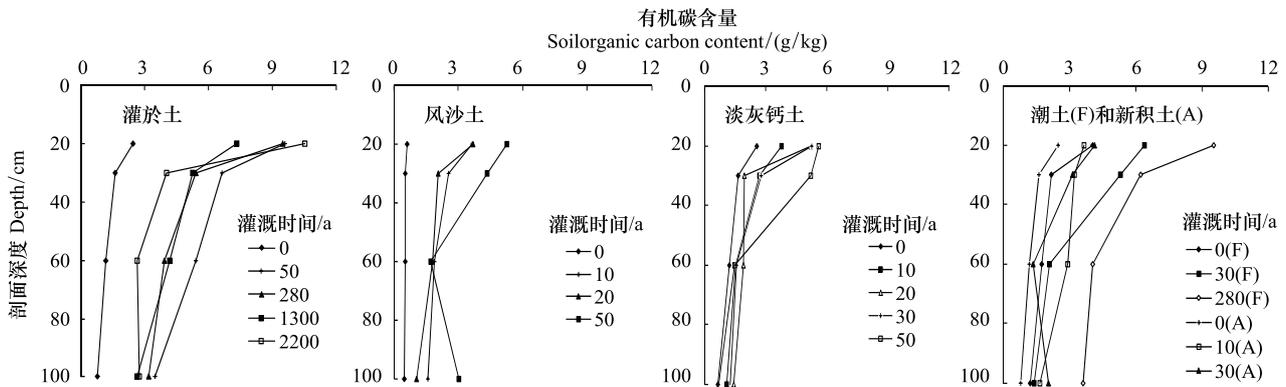


图 2 不同灌溉耕作时间下各类型土壤的有机碳含量

Fig.2 Soil organic carbon of each soil type under different durations of irrigation

就某一类土壤而言,在相同深度处,灌溉耕作时间长短对 SOC 含量的变化产生重要影响。以灌淤土为例(图 2),当灌溉耕作时间为 50 a 时,表层 0—20 cm SOC 含量为 9.57 g/kg,而当灌溉耕作时间为 2200 a 时,表层 SOC 含量为 10.52 g/kg,除灌溉耕作 1300 a 的土壤外,表层 SOC 含量有随灌溉耕作时间的延长而增加的趋势;而对于 20—100 cm 各土层,除灌溉耕作 1300 a 的土壤外,各层次 SOC 含量随灌溉耕作时间的延长呈现降低的趋势,这可能是因为表层土壤对 SOC 的拦截作用,致使表下层土壤得不到充足的有机碳源补充,且灌溉耕作时间越长,土壤中相对较早形成的有机碳分解的更多^[29],再加上母质中 SOC 较低所造成的。受灌溉耕作影响的风沙土,0—100 cm 各土层 SOC 含量高于对照土壤(图 2);灌溉耕作时间为 50 a 的风沙土在 60 cm 深度处

出现沙土层,因此其 SOC 含量略低于灌溉耕作时间为 10、20 a 的土壤;灌溉耕作 10 a 的风沙土表层 0—20 cm 的 SOC 含量略低于灌溉 20 a 的土壤,表层 SOC 含量有随灌溉耕作时间延长而增加的趋势,但是表层以下各深度处灌溉耕作 10 a 的 SOC 含量却略高于灌溉耕作 20 a 的土壤,这可能是因为风沙土分布的区域土壤 SOC 含量初始值存在差异所导致。灌溉耕作后的淡灰钙土 0—60 cm 土层土壤 SOC 含量均高于对照,且随灌溉耕作时间的延长呈增加的趋势(图 2),表层增加最明显。与对照土壤相比,受灌溉耕作的影响,潮土各土层 SOC 含量均有增加,且灌溉耕作 280 a 的土壤各层次 SOC 含量均高于灌溉耕作 30 a 的土壤(图 2)。由于灌溉耕作 30 a 的新积土在 30—60 cm 深度出现粗砂层,导致土壤 SOC 含量低于灌溉耕作 10 a 的土壤 SOC 含量,也低于 60—

100 cm 土层的 SOC 含量,对其他各土层而言,灌溉耕作 30 a 的新积土 SOC 含量均高于灌溉耕作 10 a 的 SOC 含量,也高于对照土壤(图 2)。

总体上,灌区 5 类土壤表层 SOC 含量受灌溉耕作的影响变化最明显,且有随灌溉耕作时间延长而增加的趋势,但由于表层(0—20 cm)及表层以下 20—100 cm SOC 含量变化的不同步性,致使灌溉耕

作土壤表层与表下层之间 SOC 含量差异明显。单因素方差分析的结果表明:不同的灌溉耕作时间下,表层及亚表层 0—30 cm 深度内, SOC 含量差异显著,而在 30cm 以下深度,土壤有机碳变化受灌溉耕作时间的影响并不显著。这也说明,灌溉耕作对表层及亚表层的 SOC 含量变化影响强烈(表 2),对更深层次的土壤影响较弱。

表 2 土壤类型和灌溉时间对土壤有机碳含量的差异性影响分析

Table 2 Analysis of variance (ANOVA) tested for effects of irrigation duration and soil type

土层 Depth /cm	按灌溉时间进行方差分析 ANOVA tested by irrigation duration		按土壤类型进行方差分析 ANOVA tested by soil type	
	<i>P</i>	显著性	<i>P</i>	显著性
0—20	0	显著	0	显著
20—30	0.002	显著	0	显著
30—60	0.091	不显著	0.001	显著
60—100	0.114	不显著	0.003	显著

表中 *P* 为单因素方差分析的概率值

已有研究表明,土壤类型对 SOC 含量产生重要影响^[17-18]。本研究以灌溉时间 10、30、50 和 280 a 为例,比较分析不同类型的土壤在相同的灌溉耕作时间下、相同深度处 SOC 含量之间的差异性。结果显示:当灌溉耕作时间为 10 a 时(图 2),0—20 cm 深度,3 类土壤 SOC 含量的大小顺序为:淡灰钙土>新积土>风沙土;在 20—30 cm 深度则是:新积土>淡灰钙土>风沙土,保肥能力最差的风沙土, SOC 含量最低;而在 30—100 cm 深度处则为:新积土>风沙土>淡灰钙土,受母质影响更大,但在剖面各深度处, SOC 含量差别并不明显;当灌溉耕作时间为 30 a 时(图 2),0—20 cm 和 30—60 cm 深度处,3 类土壤的 SOC 大小顺序均为:潮土>淡灰钙土>新积土,而在 20—30 cm 处,则是潮土>新积土>淡灰钙土,母质层(60—100 cm) SOC 含量大小顺序为:新积土>潮土>淡灰钙土,潮土 0—30 cm 各土层均有较高的 SOC 含量;当灌溉耕作时间为 50 a 时(图 2),3 类土壤 0—30 cm 的 SOC 含量大小顺序为:灌淤土>淡灰钙土>风沙土,因土壤类型的不同,差异明显,而 30—100 cm 处 SOC 大小顺序为:灌淤土>风沙土>淡灰钙土,灌淤土各土层 SOC 含量最高;当灌溉耕作时间为 280 a(图 2),潮土各土层 SOC 含量略高于灌淤土,但无明显差别。灌淤土和潮土各层次的 SOC 含量相对较高(图 2),主要原因在于土壤成土母质不同使得 SOC 含量的初始值存在差异^[30]。特别是在 60—100 cm 深度,母质对土壤 SOC 含量的影响更明显,

灌区土壤母质主要是有机碳含量低的洪积物、冲积物或沙性母质,且差异较大,由不同母质发育的土壤其 SOC 含量初始值就出现明显差异^[11, 30]。

综上所述,不同类型的土壤其 SOC 含量在灌溉耕作时间为 50 a 时,差异最明显。当灌溉耕作时间超过 50 a 时,灌区土壤以灌淤土为主, SOC 含量较高;而当灌溉耕作时间少于 50 a 时,各土类间 SOC 含量差异并不明显。与其他 4 类土壤相比,灌淤土是在长期灌溉、淤积和耕作施肥交迭作用下形成的人为土壤,受灌溉耕作的影响更强,土壤 SOC 含量增加更显著,特别是 0—20 cm 土壤。若不考虑灌溉耕作时间等因素的影响,因土壤类型的不同,灌区 5 类土壤剖面各土层 SOC 含量差异显著($P < 0.01$)(表 2)。可见,土壤类型是影响 SOC 含量的主要因素之一,灌溉耕作并没有改变这种作用,即使是受灌溉耕作影响最强烈的表层土壤也是如此。灌区 5 类土壤表层(0—20 cm) SOC 含量存在差异的原因可能有两个:一是受土壤类型的影响,土壤有机碳含量背景值存在差异;二是不同类型的土壤灌溉耕作的时间长短及方式不同。灌淤土的灌溉耕作时间最长,主要为自流灌溉,携带有机物的泥沙沉积较多, SOC 含量较高;而淡灰钙土、风沙土及新积土等的灌溉时间短,且多为扬水灌溉(对灌溉水源进行沉沙处理,减少了携带有机物质的泥沙进入农田),灌溉耕作对增加 SOC 含量的影响不如灌淤土明显。因此,在土壤类型与灌溉耕作的双重影响下,灌区不同类型土壤

表层 SOC 含量存在明显差异。而引黄灌溉作为保障灌区农业生产的重要措施,对改善土壤性状和增加 SOC 含量作用明显,但对表层以下更深土层 SOC 含量的影响远弱于母质。

2.2 土壤有机碳密度的剖面分布特征

宁夏灌区 5 类土壤的有机碳密度随土层深度变化的剖面分布特征如图 3 所示。不同灌溉耕作时间序列下,在剖面深度(0—100 cm)内,灌区土壤各土层的 SOC 密度均高于未受灌溉耕作影响的对照土壤。当灌溉耕作时间不足 50 a 时,灌溉耕作土壤的有机碳密度较对照土壤增加不显著,而当灌溉耕作

时间超过 50 a 时,灌溉耕作土壤与对照土壤相比,其 SOC 密度明显增加($P < 0.01$) (图 3),且灌区 5 类土壤的 SOC 密度随灌溉耕作时间序列变化产生的差异性显著($P < 0.01$)。平均而言,灌溉耕作土壤 0—20、20—30、30—60 和 60—100 cm 的 SOC 密度分别比对照土壤相应层次的 SOC 密度增加 14.69、4.52、9.84 和 9.52 Mg/hm^2 。可见,灌溉耕作对提高 SOC 密度的作用随土层深度的增加而减弱,而表层 SOC 密度的增加又与灌溉耕作时间相关($P < 0.05$),可见,长期的灌溉耕作对增加表层 SOC 密度作用显著。

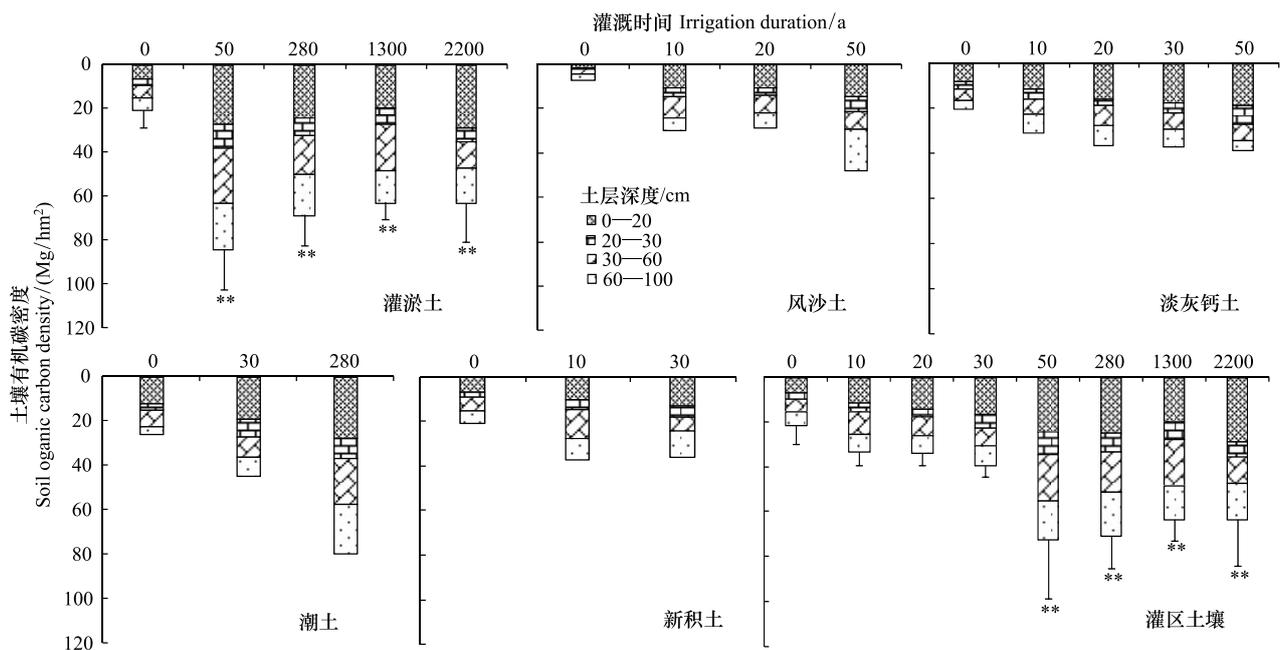


图 3 不同灌溉时间下的土壤有机碳密度

Fig.3 Soil organic carbon density of each type of soil under different durations of irrigation

** 表示灌溉耕作土壤的有机碳密度相对于对照土壤在 $P < 0.01$ 水平上差异性显著

灌淤土各土层 SOC 密度在不同的灌溉耕作时间下均比对照土壤有明显增加($P < 0.01$),但在灌溉耕作时间为 50 a 时,剖面 SOC 密度最大(图 3);其他 4 类土壤的 SOC 密度均表现出随灌溉耕作时间延长而增加的趋势(图 3),具有与土壤有机碳含量相似的变化趋势。由表 3 可知,灌淤土 SOC 密度比其他类型土壤的 SOC 密度要高,增加也最多,且剖面各层次 SOC 密度与对照土壤相比增加均显著($P < 0.001$);而其他几类土壤仅表层 SOC 密度增加显著($P < 0.05$) (表 3),表下层 SOC 密度变化存在较大差别。这是因为灌淤土的灌溉耕作时间最长,受其影响的土层深度一般在 50 cm 以上,SOC 含量相对较高,而其他

4 类土壤灌溉耕作时间短,灌溉耕作仅对表层甚至亚表层 SOC 密度的变化产生影响,且 SOC 密度相对较低,可见,灌区土壤各层次 SOC 密度的变化因土壤类型的不同而异。另外,土壤类型也影响了灌区农作物的种类,在灌溉耕作时间较长的灌区,以灌淤土为主,便利的灌溉条件适宜水稻的大面积种植,也使土壤水分条件得以改善,有利于土壤有机碳积累;而在灌溉耕作时间较短的灌区,分布的主要是淡灰钙土、风沙土和新积土,适宜小麦和玉米等耐旱作物的生长,扬水灌渠的修建为灌区作物生长提供了可靠的水源保障,但是这些区域土壤水分条件仍较差,不利于土壤有机碳积累。

灌溉耕作时间和土壤类型是影响灌区 SOC 密度的 2 个重要因素,它们与灌区 5 类土壤剖面 SOC 密度(0—100 cm)之间的相关系数分别为 0.63 和 0.74,均为显著相关($P < 0.01$),剖面 SOC 密度与土壤类型之间的相关系数大于其与灌溉耕作时间之间的相关系数,说明土壤类型对 SOC 密度的影响略强于灌溉耕作时间,而且 30—100 cm SOC 含量受灌溉耕作时间的影响不显著(表 2),说明土壤类型是影响土壤有机碳密度更为主要的因素。

引用含有大量泥沙的黄河水进行灌溉,河水中携带有机物质的泥沙随水流进入农田并不断沉积,据估算^[30],宁夏灌区农田每年的泥沙淤积量约为 10300—155400 kg/hm²,因此,灌溉时间不同,淤积的土层厚度就不同,灌区 SOC 含量增加也不同。灌淤

土的形成正是长期灌溉、淤积和耕作作用的结果。从植被-土壤系统来讲,植被是影响 SOC 垂直分布的决定性因素之一^[21]。植物根系、凋落物及有机肥是 SOC 的主要物质来源,而植物碳投入的多少对 SOC 含量产生重要的影响^[10-11]。在干旱、半干旱地区,灌溉是保证农业正常生产的重要措施,能够促进作物生长,产生更多的凋落物。就农田土壤而言,植物根系是增加 SOC 的重要物源,其根系生长的土层厚度与耕作层厚度(约 20 cm)基本一致。当作物收割后,作物根系及残茬会保留在耕作层中^[31],再加上肥料特别是有机肥的施用,增加了 SOC 投入,使表层 SOC 含量比表下层增加更明显。可见,灌溉耕作是增加宁夏引黄灌区 SOC 含量的重要因素。

表 3 灌区土壤不同深度处有机碳密度相对于对照土壤的变化

Table 3 Change of soil organic carbon density of irrigated soil compared with non-irrigated and non-cultivated soil

土壤类型 Soil type	样点数目 Profile	灌溉时间/a Irrigation duration	土壤有机碳密度 SOC density/(Mg/hm ²)				
			土层深度 Depth /cm				
			0—20	20—30	30—60	60—100	
灌淤土 Irrigation-silted soils	对照土壤	6	0	6.79	2.75	5.88	5.74
	灌溉土壤	19	50、280、1300、2200	25.7***	8.66***	20.18***	18.51***
新积土 Alluvial soils	灌溉土壤	3	10、30	11.34	4.77*	10.56	10.48*
淡灰钙土 Sierozem soil	对照土壤	3	0	8.01	3.67	7.09	7.32
	灌溉土壤	7	10、20、30、50	15.54*	5.08	7.64	7.21
风沙土 Aeolian sandy soil	对照土壤	2	0	2.24	1.21	3.50	4.50
	灌溉土壤	3	10、20、50	12.55**	4.51	8.55*	10.34
潮土 Fluvo-aquic soils	对照土壤	1	0	1.22	0.31	0.70	3.50
	灌溉土壤	2	30、280	1.93	0.60	1.22	13.12

表中数据为各类型灌溉土壤不同层次土壤有机碳密度(Mg/hm²)的算术平均值;灌淤土和新积土的对照土壤为其余 3 类土壤 6 个对照剖面各层土壤有机碳密度的算术平均值;*, **, *** 分别表示在 0.05、0.01、0.001 水平上差异显著

2.3 灌区土壤固碳速率

土壤固碳速率是衡量某一区域土壤有机碳储量随时间尺度变化快慢的重要参数。根据表 1 中各灌

区的灌溉时间,运用公式(2)、(3)计算宁夏灌区各类型土壤(0—100 cm)在不同灌溉耕作时间下的固碳速率如表 4。

表 4 宁夏灌区各类型土壤固碳速率

Table 4 Soil carbon sequestration rate of each type soil in Ningxia Irrigation Zone

统计参数 Parameters	各类土壤有机碳固碳速率				
	Carbon sequestration rate of each type soil / (MgC·hm ⁻² ·a ⁻¹)				
	灌淤土 Irrigation-silted soils	潮土 Fluvo-aquic soils	淡灰钙土 Sierozem soil	风沙土 Aeolian sandy soil	新积土 Alluvial soils
最大值 maximum	2.11	0.75	3.07	1.86	2.26
最小值 minimum	0.01	0.21	0.15	0.74	0.51
平均值 average	0.63	0.47	0.96	1.16	1.29

表中平均值为各类型土壤所有采样点剖面土壤固碳速率的算术平均值

剖面深度计算,灌区土壤的固碳速率因土壤类型不同而异,其中,灌溉耕作时间最长的灌淤土和潮土的固碳速率较小,最小值仅为 0.01 MgC·hm⁻²·a⁻¹。

受长期灌溉的影响,灌水落淤形成的灌淤层不断加厚,抬高了地面,为保证灌溉的正常进行,必须移走部分灌淤层土壤以利于灌溉,因此土壤剖面 SOC 密

度的变化率并不能真实地反映长期灌溉耕作影响下灌淤土的固碳速率。前期的研究发现,由于泥沙沉积致使灌区农田土壤每年增厚约 1 cm^[30],若按此计算,灌溉耕作 50 a 后,灌淤层的厚度约为 50 cm,但是耕作层厚度仅约 20 cm 左右,灌溉和耕作过程中产生的有机碳并不能输送至更深的土层,而使 50 cm 以下土壤处于碳释放状态,SOC 密度减小;就淡灰钙土、风沙土和新积土而言,灌溉时间较短,且灌溉耕作仅对 0—30 cm SOC 密度增加作用显著(表 2,图 3),表下层 SOC 含量则主要受母质的影响。因此,若按剖面 SOC 密度增加量来计算灌区土壤固碳速率,就忽视了母质对其产生的影响,是不合理的。因此本研究通过计算灌溉耕作时间在 50 a 之内的土壤,其 0—30 cm 的 SOC 密度变化量,再进行线性拟合来确定灌区 SOC 密度的平均提高速率,不同于已有研究中 SOC 含量提高速率(0—20 或 0—30 cm)的计算^[24,32-33]。

通过绘制灌溉时间在 50 a 以内的各样点 0—30 cm SOC 密度增加量随灌溉耕作时间变化的散点图,来拟合灌区 5 类土壤的 SOC 密度随灌溉耕作时间变化的线性方程,所得直线斜率即为灌区 5 类土壤的平均固碳速率,如图 4。

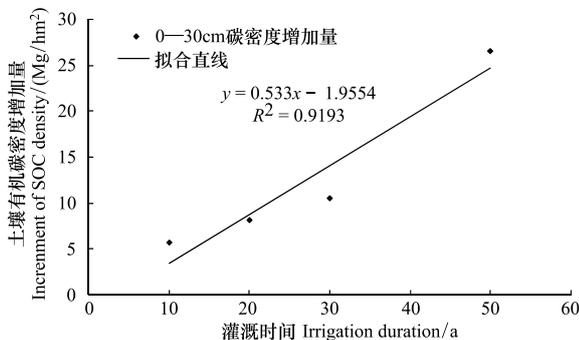


图 4 宁夏引黄灌区土壤有机碳密度增加量随灌溉耕作时间的变化趋势

Fig. 4 Trend of soil organic carbon density increment of irrigated soils changed under different irrigation durations in Ningxia, China

图中数据点为相同灌溉耕作时间下各样点 0—30 cm 土壤有机碳密度增量平均值;公式中 y 为土壤有机碳密度增加量; x 为灌溉时间, R^2 为决定系数

灌区 SOC 密度增加量与灌溉耕作时间显著相关,相关系数为 0.96 ($P < 0.01$),图中直线的斜率即为灌区土壤的平均固碳速率,为 $0.53 \text{ MgC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

灌溉耕作时间和土壤类型是影响灌区土壤固碳速率的 2 个重要因素,而灌区作物品种、种植方式、施肥及灌溉河水中泥沙来源的不同也会影响灌区土壤的固碳速率^[11,30,33]。

3 结论

通过对宁夏引黄灌区不同灌溉耕作时间序列下 5 种类型土壤的有机碳含量及密度的分析,可得出如下结论:

(1) 灌区 5 种类型土壤的 SOC 含量均随土层深度增加呈下降的规律,且表层(0—20 cm) SOC 含量初始值越低,灌溉耕作时间越长, SOC 含量增加就越显著,致使 SOC 含量随土层深度增加而下降的规律越明显。

(2) 土壤类型和灌溉耕作时间与灌区 5 类土壤的 SOC 密度均显著相关($P < 0.01$),相关系数分别为 0.74 和 0.63,可见,土壤类型和灌溉耕作时间是影响灌区土壤有机碳密度差异的 2 个主要因素,且土壤类型的影响略强于灌溉耕作时间。

(3) 灌区土壤固碳速率因土壤类型不同而异。5 类土壤中,灌溉耕作时间最长的灌淤土和潮土的固碳速率较小,最小值仅为 $0.01 \text{ MgC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;灌溉时间 50 a 以内,0—30 cm 土层的 SOC 密度增加量随灌溉耕作时间变化的拟合结果表明,灌区 SOC 密度增加量与灌溉耕作时间显著相关,相关系数为 0.96 ($P < 0.01$),灌区土壤的平均固碳速率为 $0.53 \text{ MgC} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

References:

- [1] Jobbagy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications*, 2000, 10(2): 423-436.
- [2] Batjes N H, Bridges E M. A review of soil factors and processes that control fluxes of heat, moisture and greenhouse gases. Technical Paper 23, International Soil Reference and Information Centre, Wageningen, 1992, 97-145.
- [3] Wang Y Q, Zhang X C, Zhang J L, Li S J. Spatial variability of soil organic carbon in a watershed on the Loess Plateau. *Pedosphere*, 2009, 19(4): 486-495.
- [4] He N P, Han X G, Yu G R, Dai J Z. Effects of prescribed fire on carbon sequestration of long-term grazing-excluded grasslands in Inner Mongolia. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(14): 4388-4395.
- [5] 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.
- [6] Piao S L, Fang J Y, Ciais P, Peylin P, Huang Y, Sitch S, Wang T. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China. *Nature*, 2009, 458(7241): 1009-1013.
- [7] Williams J R, Nelson R G, Glassen M M, Rice C W. Carbon sequestration in soil with consideration of CO₂ emissions from production inputs: an economic analysis. *Environmental Management*, 2004, 33(1): 264-273.
- [8] Raiesi F. Soil properties and C dynamics in abandoned and cultivated farmlands in a semi-arid ecosystem. *Plant and Soil*, 2012, 351(1/2): 161-175.
- [9] Lei H M, Yang D W, Cai J F, Wang F J. Long-term variability of the carbon balance in a large irrigated area along the lower Yellow River from 1984 to 2006. *Science China Earth Sciences*, 2013, 56(4): 671-683.
- [10] Ghimire R, Adhikari K R, Chen Z S, Shah S C, Dahai K R. Soil organic carbon sequestration as affected by tillage, crop residue, and nitrogen application in rice-wheat rotation system. *Paddy and Water Environment*, 2012, 10(2): 95-102.
- [11] Kätterer T, Bolinder M A, Andrén O, Kirchmann H, Menichetti L. Roots contribute more to refractory soil organic matter than above-ground crop residues, as revealed by a long-term field experiment. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2011, 141(1/2): 184-192.
- [12] Miyasaka T, Okura T, Zhao H, Zuo X, Takeuchi K. Impacts of the local land-use system in a semi-arid region of northeastern China on soil properties, crop growth, and weed communities. *Journal of Arid Environments*, 2011, 75(11): 1155-1163.
- [13] Gwenzi W, Gotosa J, Chakanetsa S, Mutema Z. 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. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2009, 83(3): 211-221.
- [14] Mastro R E, Chhonkar P K, Singh D, Patra A K. Changes in soil quality indicators under long-term sewage irrigation in a subtropical environment. *Environmental Geology*, 2009, 56(6): 1237-1243.
- [15] Guo B C, Ma Y L, Feng J, Guan X C, Zhang W P. Changing trend of organic matter and nutrient content in cultivated land of the Ningxia irrigation area of Yellow River. *Journal of Agricultural Sciences*, 2006, 27(3): 1-5.
- [16] Tang G M, Xu W L, Sheng J D, Liang Z, Zhou B, Zhu M. The variation of soil organic carbon and soil particle-size in Xinjiang oasis farmland of different years. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(2): 279-285.
- [17] Aranda V, Ayora-Cañada M J, Domínguez-Vidal A, Martín-García J M, Calero J, Delgado R, Vedejo T, González-Vila F J. Effect of soil type and management (organic vs conventional) on soil organic matter quality in olive groves in a semi-arid environment in Sierra Mágina Natural Park (S Spain). *Geoderma*, 2011, 164(1/2): 54-63.
- [18] Grüneberg E, Schöning I, Kalko E K V, Weisser W W. Regional organic carbon stock variability: A comparison between depth increments and soil horizons. *Geoderma*, 2011, 155(3/4): 426-433.
- [19] Shi X Z, Yu D S, Yang G X, Wang H J, Du F H, Gong Z T. Cross-reference benchmarks for translating the Genetic Soil Classification of China into the Chinese Soil Taxonomy. *Pedosphere*, 2006, 16(2): 147-153.
- [20] Wu H X. Ningxia water conservancy in 50 years. Ningxia People's Press, Yinchuan, China, 2008.
- [21] Wu Q G. Yellow River and water conservancy in Ningxia. Ningxia People's Republic Press, Yinchuan, China, 2007-2008.
- [22] Cai Z C, Xie D T, Xu H, Wei Z F, Gao M. Factors influencing CH₄ emissions from a permanently flooded rice field during rice growing period. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(5): 705-709.
- [23] Yu D S, Shi X Z, Sun W X, Wang H J, Liu Q H, Zhao Y C. Estimation of China soil organic carbon storage and density based on 1:1000000 soil database. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(12): 2279-2283.
- [24] Wang Y G, Li Y, Ye X H, Wang X P. Profile storage of organic/inorganic carbon in soil: From forest to desert. *Science of the Total Environment*, 2010, 408(8): 1925-1931.
- [25] Deng W G, Wu W D, Wang H L, Luo W, Kimberley M O. Temporal dynamics of iron-rich, tropical soil organic carbon pools after land-use change from forest to sugarcane. *Journal of Soils and Sediments*, 2009, 9(2): 112-120.
- [26] Shrestha B M, Sitaula B K, Singh B R, Bajracharya R M. Soil organic carbon stocks in soil aggregates under different land use systems in Nepal. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2004, 70(2): 201-213.
- [27] Eaton J M, McGoff N M, Byrne K A, Leahy P, Kiely G. Land cover change and soil organic carbon stocks in the Republic of Ireland 1851—2000. *Climatic Change*, 2008, 91(3/4): 317-334.
- [28] Kramer C, Gleixner G. Soil organic matter in soil depth profiles: Distinct carbon preferences of microbial groups during carbon transformation. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(4): 425-433.
- [29] Fontaine S, Barot S, Barré P, Bdioui N, Mary B, Rumpel C. Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply. *Nature*, 2007, 450(8): 277-280.
- [30] Wang J Z, Ma Y L, Jin G Z. Irrigating warped soils in China. Science Press, Beijing, 1996.
- [31] Wu Y Q, Liu G H, Fu B J, Guo Y H. Study on the vertical distribution of soil organic carbon density in the Tibetan Plateau.

Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, 28(2): 362-367.

- [32] Saha D, Kukal S S, Sharma S. Land use impacts on SOC fractions and aggregate stability in typic ustochrepts of Northwest India. *Plant and Soil*, 2011, 339(1/2): 457-470.
- [33] Spohn M, Giani L. Impacts of Land use change on soil aggregation and aggregate stabilizing compounds as dependent on time. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(5): 1081-1088.

参考文献:

- [4] 何念鹏,韩兴国,于贵瑞,代景忠. 火烧对长期封育草地土壤碳固持效应的影响. *生态学报*,2012,32(14): 4388-4395.
- [15] 郭秉晨,马玉兰,冯静,关晓春,张卫平. 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.
- [16] 唐光木,徐万里,盛建东,梁智,周勃,朱敏. 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.
- [20] 吴洪相. 宁夏水利五十年. 银川:宁夏人民出版社,2008.
- [21] 吴强国. 黄河与宁夏水利. 银川:宁夏人民出版社,2007-2008.
- [22] 蔡祖聪,谢德体,徐华,魏朝富,高明. 冬灌田影响水稻生长期甲烷排放量的因素分析. *应用生态学报*, 2003, 14(5): 705-709.
- [23] 于东升,史学正,孙维侠,王洪杰,刘庆花,赵永存. 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.
- [30] 王吉智,马玉兰,金国柱. 中国灌淤土. 北京,科学出版社,1996.
- [31] 吴雅琼,刘国华,傅伯杰,郭玉华. 青藏高原土壤有机碳密度垂直分布研究. *环境科学学报*,2008,28(2): 362-367.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.34, No.3 Feb., 2014 (Semimonthly)
CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Research advances and prospects of post-disaster ecological restoration assessment
..... LIU Xiaofu, WANG Wenjie, LI Jing, et al (527)
- The sustainability analysis of small hydropower plants in China based on ecological energetic accounting
..... PANG Mingyue, ZHANG Lixiao, WANG Changbo (537)

Autecology & Fundamentals

- An ecological study on zooplankton in the northern Beibu Gulf V: the effects of microzooplankton grazing on phytoplankton in summer
..... MA Lu, CAO Wenqing, ZHANG Wenjing, et al (546)
- Sexual size dimorphism and female individual fecundity of *Silurus asotus* and *Clarias fuscus*
..... FAN Xiaoli, LIN Zhihua, DING Xianlong, et al (555)
- Effect of environmental temperature on thermogenesis and evaporative water loss in Chinese bulbuls (*Pycnonotus sinensis*)
..... LIN Lin, CAO Mengting, HU Yilin, et al (564)
- Effects of irrigation on plant growth and nitrogen use characteristics of *Calligonum caput-medusae* Schrenk seedlings
..... HUANG Caibian, ZENG Fanjiang, LEI Jiaqiang, et al (572)
- Enzymatic activity during phytoremediation of polycyclic aromatic hydrocarbon impacted soil
..... ZHU Fan, HONG Xiangqi, YAN Wende, et al (581)
- Assessment of karst groundwater vulnerability in Chongqing based on revised RISKE model
..... WEI Xingping, PU Junbing, ZHAO Chunyong (589)
- Monitoring salt and water dynamics in farmland and drainage ditch in a saline environment under reduced drainage intensity
..... PAN Yanxin, LUO Wan, JIA Zhonghua, et al (597)

Population, Community and Ecosystem

- Spatial distribution and spatial association of *Stellera chamaejasme* population in the different altitude in degraded alpine grassland
..... GAO Fuyuan, ZHAO Chengzhang, ZHUO MA Lancao (605)
- Biotic stress of predators on population of alligator weed flea beetle, *Agasicles hygrophila* (Col.: Chrysomelidae)
..... LIU Yufang, LI Fei, GUI Fangyan, et al (613)
- Characteristics of phytoplankton community in the northern South China Sea in summer and winter
..... MA Wei, SUN Jun (621)
- The amount and dynamics of litterfall in the natural secondary forest in Mopan Mountain
..... FAN Chunnan, GUO Zhongling, ZHENG Jinping, et al (633)
- Effects of continuous drought on soil bacteria populations and community diversity in sweet cherry rhizosphere
..... LIU Fangchun, XING Shangjun, MA Hailin, et al (642)
- The basic principle of random forest and its applications in ecology: a case study of *Pinus yunnanensis*
..... ZHANG Lei, Wang Linlin, ZHANG Xudong, et al (650)
- Quantitative analysis of driving factors for wetland degradation based on hydrology balance
..... HOU Peng, SHEN Wenming, WANG Qiao, et al (660)
- Stomatal and environmental control on evapotranspiration in a plantation in the lower mountain areas of North China
..... HUANG Hui, MENG Ping, ZHANG Jinsong, et al (667)
- The fluxes of carbon dioxide, methane and nitrous oxide in alpine grassland of the Tianshan Mountains, Xinjiang
..... HE Guixiang, LI Kaihui, SONG Wei, et al (674)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Analysis the relationship between ecological footprint (EF) of ningxia and influencing factors: Partial Least-Squares Regression (PLS)
..... MA Mingde, MA Xuejuan, XIE Yingzhong, et al (682)
- Profile distribution patterns of soil organic carbon and the rate of carbon sequestration in Ningxia Irrigation Zone
..... DONG Linlin, YANG Hao, YU Dongsheng, et al (690)
- Molecular mechanism on carbon dioxide assimilation of autotrophic microorganism and carbon translocation in agricultural soils
..... WU Xiaohong, JIAN Yan, CHEN Xiaojuan, et al (701)

Resource and Industrial Ecology

- Ecological efficiency analysis of the circular economy system in mining area based on emergy analytic approach
..... SUN Yufeng, GUO Quanying (710)
- Assessing synthetic carrying capacity based on AD-AS model: a case study in Coastal Zone, Zhoushan
..... SU Panpan, YE Shufeng, GUO Zhongyang, et al (718)

Urban, Rural and Social Ecology

- Driving forces analysis of urban expansion based on boosted regression trees and Logistic regression
..... LI Chunlin, LIU Miao, HU Yuanman, et al (727)

Research Notes

- Spatial-temporal variability of dry and wet deposition of atmospheric nitrogen in different ecological regions of Shaanxi
..... LIANG Ting, TONG Yan'an, LIN Wen, et al (738)
- The effects of different mulching way on soil water thermal characteristics in pear orchard in the arid area
..... LIU Xiaoyong, LI Hongxun, LI Jianming, et al (746)
- Structure and diversity of soil fauna communities in the tundra of the Changbai Mountains, China
..... WANG Zhenhai, YIN Xiuqin, JIANG Yunfeng (755)
- Modeling the total allowable area for coastal reclamation: a case study of Xiamen, China
..... LIN Chenchen, RAO Huanhuan, LIU Yan, et al (766)

《生态学报》2014 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 34 卷 第 3 期 (2014 年 2 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 34 No. 3 (February, 2014)

编 辑 《生态学报》编辑部
地址:北京海淀区双清路 18 号
邮政编码:100085
电话:(010)62941099
www.ecologica.cn
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

主 编 王如松
主 管 中国科学技术协会
主 办 中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
地址:北京海淀区双清路 18 号
邮政编码:100085

出 版 科 学 出 版 社
地址:北京东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717

印 刷 北京北林印刷厂
发 行 科 学 出 版 社
地址:东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717
电话:(010)64034563
E-mail: journal@cspg.net

订 购 全国各地邮局
国外发行 中国国际图书贸易总公司
地址:北京 399 信箱
邮政编码:100044

广告经营
许 可 证 京海工商广字第 8013 号

Edited by Editorial board of
ACTA ECOLOGICA SINICA
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
Tel: (010)62941099
www.ecologica.cn
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

Editor-in-chief WANG Rusong
Supervised by China Association for Science and Technology
Sponsored by Ecological Society of China
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China

Published by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

Printed by Beijing Bei Lin Printing House,
Beijing 100083, China

Distributed by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North
Street, Beijing 100717, China
Tel: (010)64034563
E-mail: journal@cspg.net

Domestic All Local Post Offices in China
Foreign China International Book Trading
Corporation
Add: P.O.Box 399 Beijing 100044, China



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元