

ISSN 0564-3929

Acta Pedologica Sinica 土壤学报

Turang Xuebao



中国土壤学会 主办
科学出版社 出版

2015

第52卷 第3期

Vol.52 No.3



土壤学报

(Turang Xuebao)



第 52 卷 第 3 期 2015 年 5 月

目 次

综述与评论

- 强还原土壤灭菌防控作物土传病的应用研究····· 蔡祖聪 张金波 黄新琦等 (469)
- 土壤裂隙及其优先流研究进展····· 张中彬 彭新华 (477)

研究论文

- 东北典型黑土区农耕土壤团聚体流失特征····· 温磊磊 郑粉莉 沈海鸥等 (489)
- 青藏高原永冻土活动层厚度预测指标集的建立及制图····· 陈吉科 赵玉国 赵 林等 (499)
- 贡嘎山海螺沟冰川退缩区土壤序列矿物组成变化····· 杨子江 邴海健 周 俊等 (507)
- 成都典型区水稻土有机碳组分构成及其影响因素研究····· 廖 丹 于东升 赵永存等 (517)
- 河北省土壤温度与干湿状况的时空变化特征····· 曹祥会 雷秋良 龙怀玉等 (528)
- 喀斯特小流域土壤饱和导水率垂直分布特征····· 付同刚 陈洪松 王克林 (538)
- 大沽河中游地区土壤水与浅层地下水转化关系研究····· 杨玉峥 林 青 王松禄等 (547)
- 化学转化法测定水体中硝酸盐的氮氧同位素比值····· 王 曦 曹亚澄 韩 勇等 (558)
- ¹³C脉冲标记定量研究施氮量对光合碳在水稻-土壤系统中分布的影响 ···· 刘 萍 江春玉 李忠佩 (567)
- 垄作免耕对稻田垄埂土壤有机碳累积和作物产量的影响····· 慈 恩 王莲阁 丁长欢等 (576)
- 施入¹⁵N标记氮肥在长期不同培肥土壤的残留及其利用 ····· 赵 伟 梁 斌 周建斌 (587)
- 长期不同施肥对红壤性水稻土产量及基础地力的影响····· 鲁艳红 廖育林 周 兴等 (597)
- 长期施肥对双季稻产量变化趋势、稳定性和可持续性的影响····· 冀建华 侯红乾 刘益仁等 (607)
- 高粱分泌硝化抑制物对羟基苯丙酸与质子泵的关系研究····· 周金泉 张明超 魏志军等 (620)
- 钝化剂-锌肥降低烟草镉含量长期效果研究 ····· 曹晨亮 王 卫 马义兵等 (628)
- 钾肥和腐殖酸互作对烤烟有机钾盐指数的影响····· 郑东方 许嘉阳 许自成等 (637)
- 桉树取代马尾松对土壤养分和酶活性的影响····· 张 凯 郑 华 陈法霖等 (646)
- 荒漠区生物土壤结皮对土壤酶活性的影响····· 杨航宇 刘艳梅 王廷璞 (654)
- 高量秸秆不同深度还田对黑土有机质组成和酶活性的影响····· 矫丽娜 李志洪 殷程程等 (665)
- 链霉菌JD211对水稻幼苗促生作用及土壤细菌多样性的影响 ····· 王世强 魏赛金 杨陶陶等 (673)

研究简报

- 基于最小数据集的塔里木河上游绿洲土壤质量评价····· 贡 璐 张雪妮 冉启洋 (682)
- 铁膜对水稻根表面电化学性质和氮磷钾短期吸收的影响····· 郑芸芸 李忠意 李九玉等 (690)
- 长期不同施肥条件下红壤性水稻土微生物群落结构的变化····· 夏 昕 石 坤 黄欠如等 (697)
- 滨海盐碱地不同造林树种林地土壤盐碱化特征····· 王合云 李红丽 董 智等 (706)

信息

- 2015国际土壤年 ····· (696)

封面图片：稻田裂隙二维与三维图像 (由张中彬提供)

DOI: 10.11766/trxb201406260324

垄作免耕对稻田垄埂土壤有机碳累积和作物产量的影响*

慈 恩^{1, 2} 王莲阁¹ 丁长欢¹ 谢德体^{1, 2}

(1 西南大学资源环境学院, 重庆 400715)

(2 重庆市三峡库区农业面源污染控制工程技术研究中心, 重庆 400715)

摘 要 依托稻田免耕长期定位试验, 研究了垄作免耕对稻田垄埂土壤有机碳累积和作物产量的影响。研究主要涉及常规平作(中稻—冬水田, 简称中稻)、常规平作(中稻—油菜, 简称稻油)、垄作免耕(中稻)和垄作免耕(稻油)等4个耕作处理。针对垄作对田面微地形的影响, 将垄作小区中所有垄埂当成一个整体, 统计其土壤有机碳的累积指标, 再与平作处理中同体积或同质量的表土层(对比土层)作比较。结果表明, 在对比土层和小区垄埂体积相同时, 垄作免耕(稻油)的垄埂土壤有机碳密度要显著高于2个常规平作处理中对比土层和垄作免耕(中稻)的垄埂($p < 0.05$); 在对比土层与小区垄埂质量相同时, 各耕作处理的垄埂或对比土层中单位质量土壤的固碳量依次为: 垄作免耕(稻油) > 常规平作(中稻) > 垄作免耕(中稻) > 常规平作(稻油), 且处理间差异显著($p < 0.05$)。这表明, 针对垄埂和对比土层而言, 垄作免耕(稻油)的土壤有机碳累积效应要优于垄作免耕(中稻)和常规平作处理。与传统的常规平作相比, 垄作免耕的水稻增产效应明显, 虽然其会导致油菜减产, 但不影响水旱两季作物的经济总产出。总体而言, 垄作免耕(稻油)是一种能兼顾环境和经济效益的稻田保护性耕作措施。

关键词 土壤有机碳; 水稻; 保护性耕作; 固碳; 垄埂

中图分类号 S153 **文献标识码** A

农田土壤碳库受人为扰动频繁, 极易发生变化, 这不仅会影响到土壤肥力与作物产量, 甚至对区域及全球环境也会产生影响^[1]。近年来, 人们逐渐认同保护性耕作是实现农田土壤资源可持续发展的重要措施, 其促进土壤碳增汇和生产功能优化等效应也已被诸多学者所证实^[2-6]。垄作免耕是我国南方稻田保护性耕作的突出代表^[7], 其能否兼顾固碳、稳产/增产等功能? 这是当前引导农田管理措施调整的决策者们和广大种植户所共同关心的一个重要问题。

众所周知, 垄作能改变田面微地形, 起垄、开沟会使原有田面变得起伏不平。长期以来, 在有关垄作对土壤有机碳累积影响的研究中, 人们往往会忽略田面微地形差异的影响, 沿垄埂(或垄体)垂

直分层采样, 并将其与平作田块中相同深度土层的有机碳含量或密度进行直接比较^[8-11], 来探讨垄作和平作在影响土壤有机碳累积上的区别。然而, 这种直接比较的合理性是有待商榷的。首先, 垄作田块中垄、沟相间, 尤其是在垄体深度范围内, 土壤仅存于垄埂上, 垄沟中是没有土壤的, 这使得其土壤的空间分布有异于平作田块; 其次, 垄埂是由原田块的表层土壤经人为堆积而成的, 在保持土壤体积不变的情况下, 其垂直厚度要大于原田块中用于堆积垄埂的表土层, 而平作则仍维持原有的平坦表土层不变, 这些差异均表明垄埂土层与相同深度的平作土层之间不具直接对比性。由作垄过程可知, 垄埂土壤源自原田块的表土层, 若想要了解垄作对原田块表土有机碳累积的影响就必须从垄埂入

* 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050506)、国家自然科学基金项目(41301245)、中央高校基本科研业务费专项(XDJK2013B043)和重庆市环境保护局环保科技项目(环科学2010第26号)资助

作者简介: 慈 恩(1981—), 男, 安徽枞阳人, 博士, 副研究员, 主要从事土壤碳循环研究。E-mail: cien777@163.com

收稿日期: 2014-06-26; 收到修改稿日期: 2014-08-31

手。那么，如何实现垄埂和平作表土层之间的合理对比是开展上述研究的关键。本文认为，可将同一垄作田块中所有垄埂当成一个整体，统计该整体的各项土壤有机碳累积指标，再与相应的平作表土层作比较，这将能很好地消除田面微地形差异的影响，实现两者之间的合理对比。

近年来，诸多研究表明垄作免耕能有效增加稻田表层土壤有机碳^[12-14]，但这些研究均是基于垄埂土层与相同深度的平作土层间的直接对比，没有将整个田块中所有垄埂当成一个整体来考虑，这势必会影响到研究结论的准确性。另外，当前有关垄作免耕对稻田作物产量影响的研究主要着重于水稻^[15]，而对长期(>10a)垄作免耕后水旱两季作物的增/减产情况则研究缺乏。为此，本研究依托稻田免耕长期定位试验，充分考虑到垄作与平作间的田面差异，开展垄作免耕对稻田垄埂土壤有机碳累积和作物产量的影响研究，旨在验证稻田垄作免耕的固碳和稳产/增产功能，同时也为今后在起伏田面中开展类似研究提供一些方法借鉴。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究依托的稻田免耕长期定位试验始设于1990年，地点位于重庆市北碚区西南大学试验农场(30°26' N, 106°26' E)，海拔230 m，年均温18.3℃，年日照1 277 h，年均降水量1 105 mm，无霜期约334 d，土壤为中生代侏罗系沙溪庙组灰棕紫色沙泥岩母质上发育的中性紫色水稻土。该定位试验小区0~20 cm土层的初始理化性质如下：pH

7.1，有机碳13.4 g kg⁻¹，全氮1.7 g kg⁻¹，全磷0.8 g kg⁻¹，全钾22.7 g kg⁻¹，碱解氮120.1 mg kg⁻¹，有效磷7.5 mg kg⁻¹，速效钾71.1 mg kg⁻¹，黏粒(<2 μm) 144.2 g kg⁻¹。

1.2 试验处理

研究涉及4种耕作处理：(1) CP1，常规平作(中稻—冬水田)，简称常规平作(中稻)，为单季平作处理，代表四川盆地稻田传统耕作方法，每年翻耕植稻，水稻收后灌冬水；(2) RN1，垄作免耕(中稻—冬水田)，简称垄作免耕(中稻)，全年免耕，作垄规格为：垄埂和垄沟交替排列(图1)，其中，垄埂横截面的顶宽和底宽分别为25 cm和40 cm，垄沟横截面的顶宽和底宽分别为30 cm和15 cm，垄沟深度为35 cm，每小区5垄，水稻收获后免耕灌冬水休闲；(3) CP2，常规平作(中稻—油菜)，简称常规平作(稻油)，为水旱两季平作处理，翻耕种植水稻和油菜，水稻收后，放干田内明水翻耕种油菜，油菜收获后灌水犁耙种水稻；(4) RN2，垄作免耕(中稻—油菜)，简称垄作免耕(稻油)，全年免耕，作垄规格与RN1相同，水稻收后种油菜，油菜生长期间，降低垄沟水位，保持垄埂浸润，第二年油菜收后灌水种植水稻。各处理小区面积为20 m²，4次重复，随机区组排列。各处理中相同作物的播种、施肥等管理一致，其中，施肥量为尿素273.1 kg hm⁻²、过磷酸钙500.3 kg hm⁻²、氯化钾150.1 kg hm⁻²，折算成纯养分为N 125.63 kg hm⁻²、P₂O₅ 50.03 kg hm⁻²、K₂O 90.06 kg hm⁻²；油菜、水稻过磷酸钙作底肥1次施用；尿素用量的2/3作底肥，1/3作追肥；氯化钾底肥和追肥各1/2。

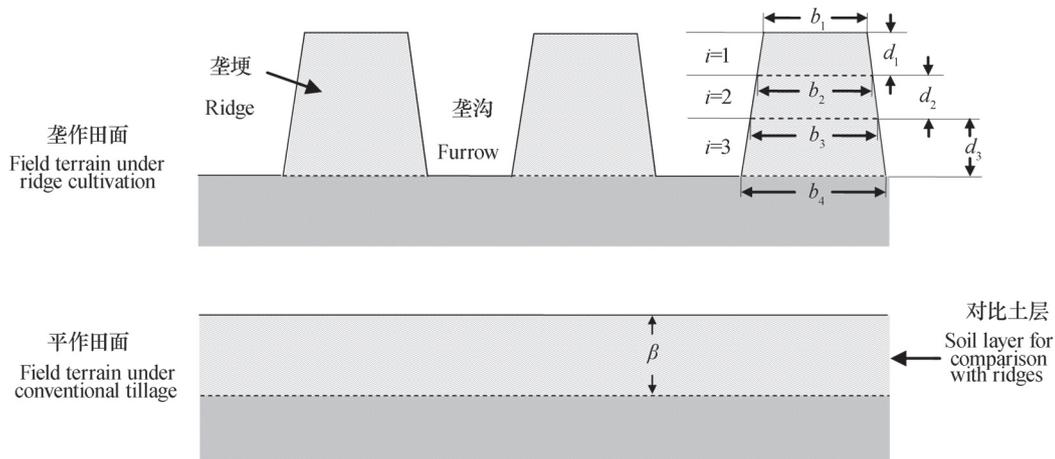


图1 垄作和平作田面的土体横截面示意图

Fig. 1 Sketch of cross-section of surface soil in paddy fields under ridge cultivation and conventional tillage

1.3 作物产量测算及土样采集与分析

在每季作物（水稻和油菜）成熟后，分试验小区进行收割，将作物籽粒晒干、去杂后称重。取1 kg去杂后的作物籽粒，利用烘干法（在80℃下，将样品烘至恒重），测定其含水量。根据测定的含水量，计算各试验小区作物籽粒的烘干重；然后，水稻和油菜分别按13.5%和14.0%的标准含水量折算成的标准产量作为小区实际产量。

鉴于垄埂的高度为35 cm，故在每个垄作小区中，随机选取5个垄面，由垄顶沿垂直于水平面方向，采取垄面0~10、10~20、20~35 cm深度的分层切片，并利用环刀采集各深度的容重土样（3个重复），将相同深度的垄面切片均匀混合成一个样品，每个垄作小区各有3个代表不同深度的混合土样。在平作小区中，随机采取5个样点的0~10、10~20、20~30 cm深度的分层土样，并采集各层土壤的容重样，将相同深度的分层土样均匀混合成一个样品，每个平作小区各有3个代表不同深度的混合土样。各耕作处理的4个重复小区均按上述方法采集土样，时间为2011年5月。土壤有机碳（Soil organic carbon, SOC）采用重铬酸钾容量法测定，全氮采用半微量开氏定氮法，容重测定采用环刀法，砾石（>2 mm）含量测定利用干筛法^[16-17]。易氧化有机碳（Labile organic carbon, LOC）含量采用333 mmol L⁻¹高锰酸钾氧化法测定^[18]，具体步骤如下：称取约含15~30 mg碳的100目风干土样于50 ml离心管中，加入25 ml浓度为333 mmol L⁻¹的KMnO₄，振荡1 h，震荡后的样品在转速4 000 r min⁻¹下离心5 min，取上清液，用去离子水按1:250的比例稀释，将稀释液在565 nm波长处比色，同时配制标准系列浓度的KMnO₄溶液在565 nm波长处比色，根据KMnO₄的浓度变化计算样品中易氧化有机碳含量。

1.4 平作小区中对比土层深度的确定

要想实现垄埂土体与平作表土层之间的有效对比，如何确定平作小区中拟与垄埂土体对比的表土层（简称对比土层）深度或厚度（ β ）是关键（图1）。本研究在充分考虑垄作和平作之间田面微地形的差异、垄埂土壤的来源与影响因素、垄埂土壤与平作田块表土的对比可行性等基础上，提出了基于与垄埂体积相同或质量相同的两种不同估算方法，来确定平作小区中对比土层的深度（0~ β cm），具体如

下：（1）在保证平作小区0~ β cm深度土层与垄作小区中垄埂土壤体积相同的情况下，计算 β 值（cm）。具体计算公式为： $\beta = \frac{V_R}{S_p} \times 100$ ，式中 V_R 为垄作小区内所有垄埂土壤的总体积（m³）； S_p 为平作小区的面积（m²）。（2）在保证平作小区0~ β cm深度土层与垄作小区中垄埂土壤质量相同的情况下，计算 β 值（cm）。具体计算

$$\text{公式为: } \beta = \frac{M_R - \sum_{i=1}^{n-1} S_p \times (X_{i+1} - X_i) \times \theta_i \times 10}{S_p \times \theta_n \times 10} + X_n,$$

式中 M_R 为垄作小区内所有垄埂土壤的总质量（kg）； S_p 为平作小区的面积（m²）； i 为平作小区中采样土层序数，在0~ β cm深度范围内， $1 \leq i \leq n$ ；平作小区0~ β cm土层的底面位于第 n 层； X 为平作小区中采样土层的顶面和底面深度（cm）（ $\beta \geq X_n > X_{n-1} > \dots > X_2 > X_1 = 0$ ），（ $X_{i+1} - X_i$ ）为平作小区第 i 层的土壤厚度（cm）； θ_i 和 θ_n 分别为平作小区第 i 层和第 n 层的土壤容重（g cm⁻³）。根据上述两种估算方法确定 β 值后，再分别统计平作小区中0~ β cm深度对比土层的有机碳密度（同体积）和含量（同质量）。

1.5 垄埂和对比土层的有机碳储量、密度和含量计算

垄埂的土壤有机碳储量和密度计算：本文将垄作小区内所有垄埂当成一个整体来计算，其垄埂土壤有机碳储量即为小区内所有垄埂的土壤有机碳储量之和，根据对垄埂分层采样分析获得的土壤有机碳含量、容重、砾石含量等指标，计算垄埂土壤有机碳储量。具体计算公式如下：

$$T_R = N \times T_r = N \times \sum_{i=1}^n T_i \quad (1)$$

$$T_i = \frac{(b_i + b_{i+1}) \times d_i \times l \times \theta_i \times C_i \times (1 - F_i)}{20\,000} \quad (2)$$

式（1）和式（2）中， T_R 为垄作小区的垄埂土壤有机碳储量（kg）； N 为垄作小区内垄埂条数； T_r 为单条垄埂的土壤有机碳储量（kg）； i 为垄埂的采样土层序数（ $i \geq 1$ ，本文垄埂土壤分3层取样，其 i 值依次为1、2和3，具体见图1）； T_i 为单条垄埂中第 i 层的土壤有机碳储量（kg）； b_i 和 b_{i+1} 分别表示垄埂第 i 层梯形横截面（与水平面垂直）的上底和下底的宽度（cm）； d_i 为垄埂第 i 层梯形横截面的垂直高度（cm），即垄埂第 i 层的垂直厚度（本文垄埂3个分层的垂直厚度依次为 $d_1=10$ cm、 $d_2=10$

cm和 $d_3=15$ cm, 具体见图1); l 为单条垄埂的长度(与水平面平行)(m); θ_i 为垄埂第 i 层的土壤容重(g cm^{-3}); C_i 为垄埂第 i 层的土壤有机碳含量(g kg^{-1}); F_i 为垄埂第 i 层土壤中 >2 mm石砾的比例。

通常土壤有机碳密度都是基于一定土层厚度的, 指某一深度范围内单位面积土体所含的有机碳质量, 单位为 kg m^{-2} 。由于垄埂与普通的水平田面不同, 不适于用土层厚度表达, 因此, 根据本研究的表达需要, 文中所列的土壤有机碳密度均为单位体积土体的有机碳含量, 单位为 kg m^{-3} 。垄作小区的垄埂土壤有机碳密度计算公式如下:

$$D_R = \frac{T_R}{V_R} = \frac{T_R}{N \times S_r \times l} \quad (3)$$

$$T_{0-\beta} = \frac{[C_n \times (\beta - X_n) \times \theta_n \times (1 - F_n)] + \sum_{i=1}^{n-1} C_i \times (X_{i+1} - X_i) \times \theta_i \times (1 - F_i)] \times S_p}{100} \quad (4)$$

$$D_{0-\beta} = \frac{T_{0-\beta}}{V_{0-\beta}} = \frac{T_{0-\beta}}{S_p \times \beta} \times 100 \quad (5)$$

式(4)和式(5)中, $T_{0-\beta}$ 为平作小区中 $0 \sim \beta$ cm深度对比土层的有机碳储量(kg), i 为采样土层序数, 在 $0 \sim \beta$ cm深度范围内, $1 \leq i \leq n$; $0 \sim \beta$ cm土层的底面位于第 n 层; X 为采样土层顶面和底面的深度(cm)(在 $0 \sim \beta$ cm深度范围内, $\beta \geq X_n > X_{n-1} > \dots > X_2 > X_1 = 0$), $(X_{i+1} - X_i)$ 为第 i 层土壤厚度(cm); C_i 和 C_n 分别为第 i 层和第 n 层的土壤有机碳含量(g kg^{-1}); θ_i 和 θ_n 分别为第 i 层和第 n 层的土壤容重(g cm^{-3}); F_i 和 F_n 分别为第 i 层和第 n 层土壤中 >2 mm石砾的比例; S_p 为平作小区的面积(m^2); $D_{0-\beta}$ 为平作小区中 $0 \sim \beta$ cm深度对比土层的有机碳密度(kg m^{-3}), $V_{0-\beta}$ 为 $0 \sim \beta$ cm深度对比土层的体积(m^3)。

垄埂和对比土层的有机碳含量计算: 鉴于研究需要, 分别将垄作小区的垄埂和平作小区的对比土层当成一个整体单元, 根据小区垄埂和对比土层的土壤有机碳储量和土壤质量, 来计算各整体单元的土壤有机碳含量, 具体公式为: $C = \frac{T}{M} \times 1000$ 式中 C 为小区垄埂或对比土层等整体单元的土壤有机碳含量(g kg^{-1}); T 为整体单元的土壤有机碳储量(kg); M 为整体单元的土壤质量(kg)。

1.6 数据处理

分别将垄作小区的垄埂和平作小区的对比土层

式(3)中, D_R 为垄作小区的垄埂土壤有机碳密度(kg m^{-3}); T_R 为垄作小区的垄埂土壤有机碳储量(kg); V_R 为垄作小区内垄埂土壤的总体积(m^3); N 为垄作小区内垄埂条数; S_r 为单条垄埂的梯形横截面面积(m^2); l 为单条垄埂的长度(m)。

平作小区中对比土层的有机碳储量和密度计算: 根据平作小区各深度采样土层的有机碳含量、容重、砾石含量等指标, 统计 $0 \sim \beta$ cm深度对比土层的有机碳储量和密度; 为确保其与垄埂土壤有机碳密度的可比性, 对比土层的有机碳密度也为单位体积土体的有机碳含量, 单位为 kg m^{-3} 。平作小区中对比土层的有机碳储量和密度计算公式如下^[19-20]:

当成一个整体单元, 根据各自分层土样的理化指标数据, 参照1.5节中土壤有机碳含量的统计方法, 计算各整体单元的其他理化指标值。此外, 采用Excel 2003和SPSS 19.0软件对数据进行统计分析, 多重比较采用LSD法($p < 0.05$)。

2 结 果

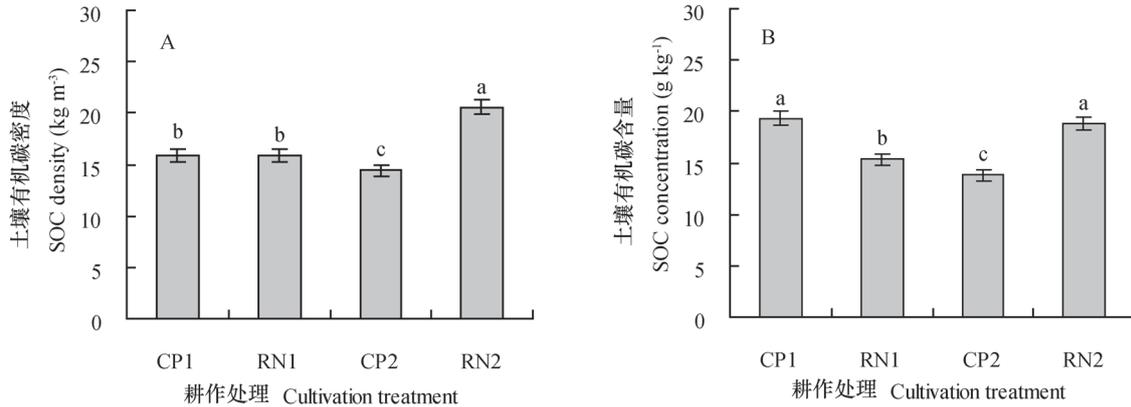
2.1 稻田垄埂土壤和对比土层的总有机碳密度和含量

通常, 在对比不同土体间有机碳密度时, 主要是基于相同体积的, 即相同厚度或深度单位面积土体之间的对比^[19]。在本研究中, 基于与小区垄埂土壤体积相同的原则, 采用前文1.4节中的计算方法(1), 算出平作处理(CP1和CP2)中对比土层的深度为 $0 \sim 20.68$ cm, 并据此求得土壤有机碳(SOC)密度和含量(图2)。由图2A可知, 在对比土层和垄埂体积相同的情况下, RN2处理的垄埂SOC密度显著高于CP1和CP2处理中对比土层和RN1处理的垄埂($p < 0.05$); CP2处理中对比土层的SOC密度最低, 且显著低于其他耕作处理的垄埂或对比土层($p < 0.05$); RN1处理的垄埂与CP1处理中对比土层相比, 两者的SOC密度非常接近,

且无显著差异。此外，比较垄埂和同体积对比土层中SOC含量可知（图2B），CP1处理中对比土层的SOC含量为最高值，其与RN2处理的垄埂SOC含量之间差异不显著，但两者均显著高于RN1处理和

CP2处理（ $p < 0.05$ ）；与SOC密度相同，CP2处理中对比土层的SOC含量依然为最低值，且显著低于其他耕作处理（ $p < 0.05$ ）。

为了更清晰地反映垄作免耕对稻田垄埂土壤有



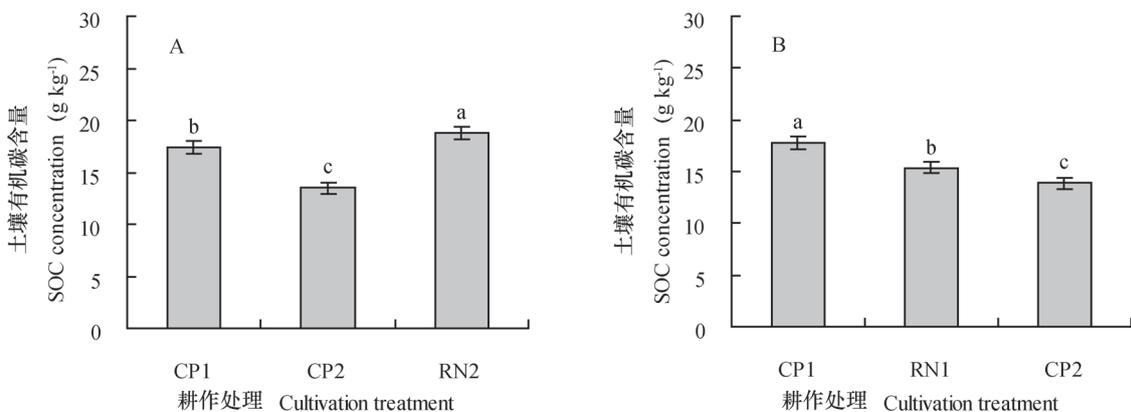
注：图中不同小写字母表示差异显著（ $p < 0.05$ ）；CP1为常规平作（中稻），RN1为垄作免耕（中稻），CP2为常规平作（稻油），RN2为垄作免耕（稻油）。下同 Note: Different lowercase letters mean significant difference between treatments ($p < 0.05$). CP1, Conventional tillage system (rice-winter fallow); RN1, No-tillage ridge-cultivation system (rice-winter fallow); CP2, Conventional tillage system (rice-rape); RN2, No-tillage ridge-cultivation system (rice-rape). The same below

图2 不同耕作处理中垄埂和同体积对比土层的土壤有机碳密度和含量

Fig. 2 SOC density and content in the ridges and the soil layers in control the same in soil volume relative to cultivation treatments

机碳累积的影响，除上述同体积对比外，本文又基于对比土层与小区垄埂土壤质量相同的原则，采用前文1.4节中的计算方法（2），计算了平作处理中同质量对比土层的有机碳含量，以用于对比分析。因RN1和RN2处理中垄埂土壤的质量不同，故分别以各自的垄埂土壤质量为参照，计算同质量的对比土层SOC含量，具体见图3。由图3A可知，在平作处理（CP1和CP2）中对比土层的土壤质量与RN2

处理中垄埂土体相同时，RN2处理的垄埂SOC含量要显著高于2个平作处理（CP1和CP2）的对比土层，CP1处理中对比土层的SOC含量显著高于CP2处理（ $p < 0.05$ ）。此外，若以RN1处理的垄埂土壤质量为参照（图3B），CP1处理中同质量对比土层的SOC含量要显著高于RN1处理的垄埂土壤，而CP2处理中对比土层SOC含量仍显著低于RN1处理的垄埂土壤（ $p < 0.05$ ）。



注：A. 基于RN2处理的垄埂土壤质量；B. 基于RN1处理的垄埂土壤质量 Note: A. based on the soil mass of ridges in Treatment RN2; B. based on the soil mass of ridges in Treatment RN1

图3 不同耕作处理中垄埂和同质量对比土层的土壤有机碳含量

Fig. 3 SOC content in the ridges and the soil layers in the control the same in soil mass relative to cultivation treatments

2.2 稻田垄埂土壤和对比土层的易氧化有机碳密度和含量

为考察垄作免耕对垄埂土壤活性有机碳组分累积的影响, 本文分别基于与小区垄埂土壤同体积或同质量的原则, 对平作处理中对比土层的易氧化有机碳 (LOC) 含量和密度进行了统计, 具体见表1。比较不同耕作处理中垄埂土壤和同体积对比土层的LOC密度和含量可知, RN2处理的垄埂土壤LOC密度显著高于其他耕作处理的垄埂土壤或对比土层; CP2处理中对比土层的LOC密度最低, 且显著低于RN2处理; CP1处理中对比土层的LOC密度与CP2、RN2处理间均无显著差异 ($p < 0.05$)。由表1还可知, 在垄埂土壤和同体积对比土层中, RN2和CP2处理的LOC含量分别为最高值和最低

值, 其中RN2处理的垄埂土壤LOC含量与CP1处理中对比土层之间差异不显著, 但显著大于其他耕作处理 (RN1和CP2)。在对比土层的土壤质量与RN1处理的垄埂土体相同时, CP1处理中对比土层的LOC含量略高于RN1处理的垄埂土壤LOC含量, 且两者间无显著差异, 但两者均显著高于CP2处理。在对比土层的土壤质量与RN2处理的垄埂土体相同时, RN2处理的垄埂土壤LOC含量则显著高于平作处理 (CP1和CP2) 中对比土层。此外, 由表1可知, 在同体积和同质量两种比较模式下, RN2和RN1处理中垄埂土壤的LOC/SOC值均高于平作处理 (CP1和CP2) 中对比土层, 且RN2与2个平作处理间差异显著 ($p < 0.05$)。

表1 不同耕作处理中垄埂土体和对比土层的易氧化有机碳 (LOC) 含量和密度

Table 1 Content and density of liable organic carbon (LOC) in the ridges and the soil layers in the control relative to cultivation treatments

耕作处理 Cultivation treatment	同体积 The same in volume			同质量 The same in mass			
	LOC含量 LOC content (g kg ⁻¹)	LOC密度 LOC density (kg m ⁻³)	LOC/SOC ¹⁾ (%)	基于RN1 Based on RN1		基于RN2 Based on RN2	
				LOC含量 LOC content (g kg ⁻¹)	LOC/SOC (%)	LOC含量 LOC content (g kg ⁻¹)	LOC/SOC (%)
CP1	5.62 ± 0.37a	4.62 ± 0.30bc	29.02 ± 0.93c	5.11 ± 0.24a	28.84 ± 0.50b	5.01 ± 0.22b	28.79 ± 0.43b
RN1	4.77 ± 0.10b	4.94 ± 0.10b	31.07 ± 0.50ab	4.77 ± 0.10a	31.07 ± 0.50a		
CP2	4.03 ± 0.16c	4.23 ± 0.16c	29.32 ± 0.14b	4.06 ± 0.16b	29.33 ± 0.13b	3.94 ± 0.15c	29.26 ± 0.19b
RN2	6.01 ± 0.46a	6.57 ± 0.50a	31.89 ± 1.66a			6.01 ± 0.46a	31.89 ± 1.66a

注: 1) LOC/SOC为LOC含量与土壤有机碳 (SOC) 含量的比值; 2) 同列不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($p < 0.05$)
Note: 1) LOC/SOC = ratio of LOC to SOC in concentration. 2) Different lowercase letters in the same column indicate significant difference between treatments ($p < 0.05$)

2.3 不同耕作处理的作物产量

本文对供试小区采样前近10年 (2001—2010年) 的作物产量进行了统计和分析, 具体见图4和图5。从图4A可见, 2001—2010年间, 除2007、2009年外, 其余年份的垄作处理 (RN1和RN2) 中水稻产量均要高于平作处理 (CP1和CP2); 从4个耕作处理的水稻产量年份变化来看, 除2006年偏低、2008年偏高外, 各耕作处理的水稻产量整体上是相对稳定的, 基本维持在6 200 ~ 7 800 kg hm⁻²之间。从图4B可知, 2001—2010年间, CP2处理中各年份的油菜产量一直高于RN2处理; 从CP2和

RN2处理的油菜产量年份变化来看, 除2006年出现显著下降外, 2007—2010年间的油菜产量整体上较2001—2005年间有小幅提升, 在两个年份段 (2001—2005年、2007—2010年) 内各处理的油菜产量年份变化则相对较小。为了更清晰地比较各耕作处理对作物产量的影响, 本文对不同耕作处理中2001—2010年的作物产量均值进行了统计, 具体见图5。从图5A可见, 2001—2010年间, 各处理的水稻产量均值依次为: RN2 > RN1 > CP2 > CP1, 其中垄作处理 (RN1和RN2) 的水稻产量均值显著高于平作处理 (CP1和CP2) ($p < 0.05$),

若以CP1产量为参照, RN1和RN2处理的水稻产量增幅分别为4.64%和6.97%, 而垄作处理间和平作处理间的水稻产量均值则差异不显著; 此外, RN2

处理中2001—2010年的油菜产量均值显著低于CP2处理 ($p < 0.05$) (图5B), 若以CP2处理为参照, 其油菜产量降幅为14.27%。

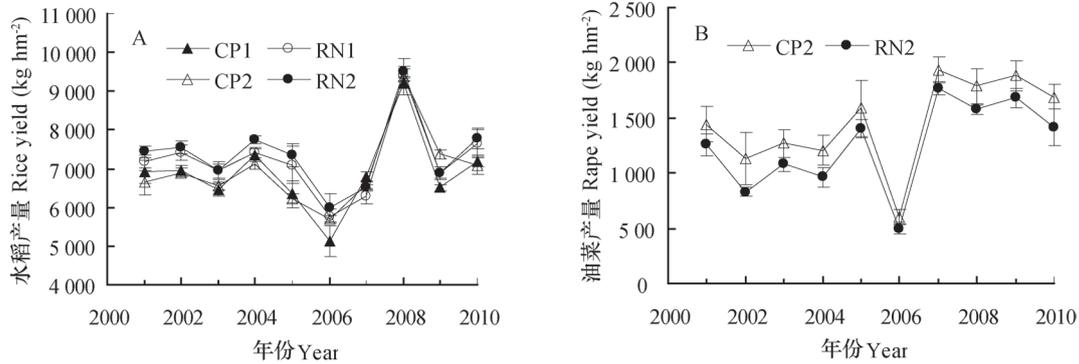


图4 2001—2010年期间不同耕作处理的水稻和油菜产量变化

Fig. 4 Variation of yield of rice and rape relative to cultivation treatments for the years of 2001—2010

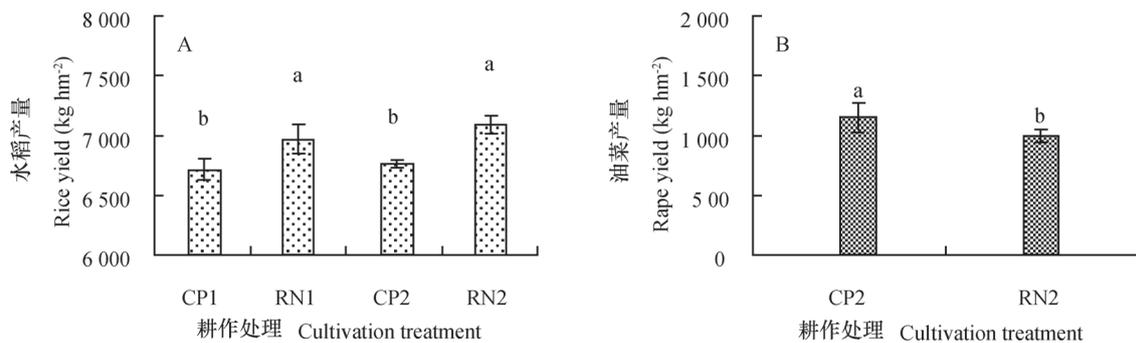


图5 2001—2010年期间不同耕作处理的水稻和油菜产量均值

Fig. 5 Average yields of rice and rape relative to cultivation treatments for the years of 2001—2010

3 讨论

3.1 垄作免耕对稻田垄埂土壤有机碳累积的影响

研究表明, 在基于与垄埂同体积和同质量2个不同的计算原则下, 垄作免耕(稻油)处理(RN2)中垄埂土体的固碳量均显著高于其他平作处理(CP1和CP2), 且垄作免耕(稻油)中垄埂土壤的增碳效应明显优于垄作免耕(中稻)处理(RN1)。各耕作处理中, 垄埂和对比土层的SOC含量均高于1990年试验小区0~20 cm表土层SOC含量初始值, 且各对比土层的深度均大于20 cm, 这进一步证实了各耕作处理的长期实施对稻田表土具有增碳效应^[12-14]。在同体积条件下, 虽然常规平作(中稻)的对比土层SOC密度要显著低于垄作免耕(稻油)处理, 但两者的SOC含量则无显著差异

(图2), 这主要由于不同耕作方式下土壤容重存在差异导致同体积土体的质量不同所引起的, 如RN2处理中0~10、10~20和20~35 cm垄埂土层的容重分别为0.94、1.13和1.15 g cm⁻³, 而CP1处理中用于对比土层计算的0~10、10~20和20~30 cm等3个土层的容重则相对较低, 依次为0.77、0.86和1.02 g cm⁻³。可见, 虽然同体积土体之间的对比能很好地体现耕作方式对SOC在指定空间中累积的影响, 但若若要反映单位质量土体的固碳效果, 更准确地表达耕作方式对特定土体中SOC累积的影响, 笔者认为同质量对比要优于同体积对比。从图3中同质量对比可见, 不同耕作处理中单位质量土体的固碳量依次为: RN2 > CP1 > RN1 > CP2, 这表明垄作免耕(稻油)的垄埂SOC累积效应优于常规平作的对比表层, 而垄作免耕(中稻)则不及常

规平作(中稻), 常规平作(稻油)的对比表层SOC累积效应最差。由此推知, 垄作免耕的增碳优势主要体现在旱作季。RN1处理为单季水稻且收割后灌冬水休闲, 与RN2处理的水旱两季相比, 其垄埂土壤中植物残体输入较少, 且在稻作季较之CP1处理也无增碳优势, 故导致RN1处理虽实施了垄作免耕但其固碳效果不及RN2和CP1处理。在该长期定位试验点的以往研究中, 未考虑到田面微地形差异的影响, 将相同深度的垄埂土层和平作土层进行直接对比, 结果表明RN1处理0~20 cm土层的有机碳密度要显著高于CP1处理的0~20 cm土层, 进而认为垄作免耕(中稻)处理的表土增碳效应要强于常规平作(中稻)处理^[14], 这与本文的研究结论正好相反, 可见选择合理的对比方法非常重要。此外, 针对垄作免耕(稻油)的垄埂土壤增碳效应, 结合该定位试验的前期研究, 可将原因归为如下: (1) 垄埂免耕(稻油)处理中, 作物根系生长优势突出, 增加了垄埂土壤中植物残留量^[15, 21]; (2) 由于土壤团聚体物理保护作用的增强^[22-23]以及腐殖酸组成与结构、热力学特征等属性的改变^[24-25], 提高了垄作免耕(稻油)处理中垄埂SOC的自身抗分解能力^[14, 26]。根据LOC分析可知(表1), 垄作免耕(稻油)处理的垄埂土壤具有较高的LOC含量和比例, 这正是该耕作处理中土壤活性有机碳组分能受到较好保护的一个重要体现。在常规平作(稻油)处理中, 水旱两季均需翻耕种植, 人为扰动频繁, 同时旱作季实行排水、落干种植, 表层土壤水分含量低, 长期处于好氧状态, 这些因素有助于其表土有机碳的快速分解与矿化^[27-28], 进而显著降低其表土有机碳的累积效应。

3.2 垄作免耕对稻田作物产量与经济效益的影响

各耕作处理中2001—2010年的作物产量表明, 同常规平作相比, 长期(>10 a)垄作免耕仍能显著提高水稻产量, 其中垄作免耕(稻油)最为突出; 在2个常规平作处理间, 水稻产量无显著差异, 但常规平作(中稻)要略低于常规平作(稻油), 这与高明等^[15]的早期观测结果类似。由此可见, 若将单季水稻—冬水田的传统平作改为水旱两季, 并不影响其水稻产量, 在保证稳产的情况或有小幅提升, 而若将翻耕平作改为垄作免耕则能显著增加水稻产量。虽然, 垄作免耕(稻油)处理的

水稻增产优势明显, 但同常规平作(稻油)相比, 其油菜产量则出现明显下降。可见, 若将翻耕平作改为垄作免耕会导致旱季作物油菜的减产。为此, 本研究又从经济效益的层面分析了垄作免耕对作物产出的影响。本研究中, 同常规平作(稻油)相比, 垄作免耕(稻油)处理中稻谷年增产418.75 kg hm⁻²、油菜籽年减产207.50 kg hm⁻², 若按照2010年重庆地区主要农作物价格(稻谷2.0元 kg⁻¹、油菜籽4.0元 kg⁻¹)计算, 两种耕作处理中全年作物产出的总经济效益基本相同。这表明, 若将水稻—油菜两季的翻耕平作改为垄作免耕, 并不影响其两季作物的经济总产出。另外, 各耕作处理的作物产量在2006年出现大幅下降可能与当年重庆遭遇百年一遇的干旱天气有关^[29]。在中低产田改良中, 垄作是解决南方水田冷浸障碍的一种重要措施^[30], 但若年年翻耕作垄则需要大量的劳动投入, 尤其在劳动力不足且农用机械使用率不高的丘陵山区, 结合前文中垄作免耕的环境和经济效益分析可知, 推行垄作免耕是节约劳动成本、实现“双赢”的一种可行选择; 若能结合当地实际情况, 科学地调整其配套轮作, 可能会获得更高的经济效益。

4 结 论

长期实施垄作免耕(稻油)能显著促进稻田垄埂土壤中有机碳的累积, 其固碳效果要优于垄作免耕(中稻)和常规平作; 此外, 同传统的翻耕平作相比, 垄作免耕的水稻增产效应明显, 虽然其会导致旱季作物油菜减产, 但并不影响水旱两季作物的经济总产出。总体而言, 垄作免耕(稻油)是一种能兼顾环境和经济效益的稻田保护性耕作措施, 值得在水田冷浸现象突出的南方丘陵山区推广。

参 考 文 献

- [1] Lal R. Sequestering carbon in soils of agro-ecosystems. *Food Policy*, 2011, 36 (Suppl): 33—39
- [2] 田康, 赵永存, 邢喆, 等. 中国保护性耕作农田土壤有机碳变化速率研究—基于长期试验点的Meta分析. *土壤学报*, 2013, 50 (3): 433—440. Tiang K, Zhao Y C, Xing Z, et al. A meta-analysis of long-term experiment data for characterizing the topsoil organic carbon changes under different conservation tillage in cropland of China (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50 (3): 433—440

- [3] de Sanctis G, Roggero P P, Seddaiu G, et al. Long-term no tillage increased soil organic carbon content of rain-fed cereal systems in a Mediterranean area. *European Journal of Agronomy*, 2012, 40: 18—27
- [4] Liu E, Teclerian S G, Yan C, et al. Long-term effects of no-tillage management practice on soil organic carbon and its fractions in the northern China. *Geoderma*, 2014, 213: 379—384
- [5] Olson K R, Al-Kaisi M M, Lal R, et al. Experimental consideration, treatments, and methods in determining soil organic carbon sequestration rates. *Soil Science Society of America Journal*, 2014, 78 (2) : 348—360
- [6] Karlen D L, Kovar J L, Cambardella C A, et al. Thirty-year tillage effects on crop yield and soil fertility indicators. *Soil and Tillage Research*, 2013, 130: 24—41
- [7] 谢德体, 陈绍兰. 水田自然免耕的理论与技术. 重庆: 重庆出版社, 2002. Xie D T, Chen S L. Theory and technique of paddy field under soil virginization (In Chinese). Chongqing: Chongqing Press, 2002
- [8] Zibilske L M, Bradford J M, Smart J R. Conservation tillage induced changes in organic carbon, total nitrogen and available phosphorus in a semi-arid alkaline subtropical soil. *Soil and Tillage Research*, 2002, 66 (2) : 153—163
- [9] Liang A Z, Zhang X P, Fang H J, et al. Short-term effects of tillage practices on organic carbon in clay loam soil of northeast China. *Pedosphere*, 2007, 17 (5) : 619—623
- [10] 唐晓红, 邵景安, 高明, 等. 保护性耕作对紫色水稻土团聚体组成和有机碳储量的影响. *应用生态学报*, 2007, 18 (5) : 1027—1032. Tang X H, Shao J A, Gao M, et al. Effects of conservational tillage on aggregate composition and organic carbon storage in purple paddy soil (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18 (5) : 1027—1032
- [11] Varvel G E, Wilhelm W W. Long-term soil organic carbon as affected by tillage and cropping systems. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, 74 (3) : 915—921
- [12] Huang X X, Gao M, Wei C F, et al. Tillage effect on organic carbon in a purple paddy soil. *Pedosphere*, 2006, 16 (5) : 660—667
- [13] 唐晓红, 邵景安, 黄雪夏, 等. 垄作免耕下紫色水稻土有机碳的分布特征. *土壤学报*, 2007, 44 (2) : 235—243. Tang X H, Shao J A, Huang X X, et al. Distribution of soil organic carbon in purple paddy field under long-term non-tillage ridge culture (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44 (2) : 235—243
- [14] 彭娟, 符卓旺, 朱洁, 等. 耕作制度对紫色水稻土有机碳累积及矿化动态的影响. *水土保持学报*, 2011, 25 (4) : 175—178, 182. Peng J, Fu Z W, Zhu J, et al. Effects of tillage systems on accumulation and mineralization of organic carbon in purple paddy soil (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25 (4) : 175—178, 182
- [15] 高明, 张磊, 魏朝富, 等. 稻田长期垄作免耕对水稻产量及土壤肥力的影响研究. *植物营养与肥料学报*, 2004, 10 (4) : 343—348, 354. Gao M, Zhang L, Wei C F, et al. Study of the changes of the rice yield and soil fertility on the paddy field under long-term no-tillage and ridge culture conditions (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2004, 10 (4) : 343—348, 354
- [16] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. Lu R K. Analytical methods for soil agro-chemistry (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000
- [17] 依艳丽. 土壤物理研究法. 北京: 北京大学出版社, 2009. Yi Y L. Soil physics research methods (In Chinese). Beijing: Peking University Press, 2009
- [18] Lefroy R D B, Blair G J, Strong W M. Changes in soil organic mater with cropping as measured by organic carbon fractions and ^{13}C natural isotope abundance. *Plant and Soil*, 1993, 155/156: 399—402
- [19] 金峰, 杨浩, 蔡祖聪, 等. 土壤有机碳密度及储量的统计研究. *土壤学报*, 2001, 38 (4) : 522—528. Jin F, Yang H, Cai Z C, et al. Calculation of density and reserve of organic carbon in soils (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2001, 38 (4) : 522—528
- [20] Ci E, Yang L Z. Paddy soils continuously cultivated for hundreds to thousands of years still sequester carbon. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Soil & Plant Science*, 2013, 63 (8) : 694—703
- [21] 高明, 车福才, 魏朝富, 等. 垄作免耕稻田水稻根系生长状况的研究. *土壤通报*, 1998, 29 (5) : 236—238. Gao M, Che F C, Wei C F, et al. Study on the growth of rice root in paddy field under ridge cultivation and no tillage system (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 1998, 29 (5) : 236—238
- [22] 唐晓红, 魏朝富, 吕家格, 等. 保护性耕作对丘陵区水稻土团聚体稳定性的影响. *农业工程学报*, 2009, 25 (11) : 49—54. Tang X H, Wei C F, Lü J K, et al. Effects of conservation tillage on aggregate stability of paddy soil in hilly region (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*,

- 2009, 25 (11): 49—54
- [23] 袁俊吉, 彭思利, 蒋先军, 等. 稻田垄作免耕对土壤团聚体和有机质的影响. 农业工程学报, 2010, 26 (12): 153—160. Yuan J J, Peng S L, Jiang X J, et al. Effects of combing ridge and no-tillage on aggregates and organic matter in a rice-based cropping system (In Chinese). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26 (12): 153—160
- [24] 唐晓红. 四川盆地紫色水稻土腐殖质特征及其团聚体有机碳保护机制. 重庆: 西南大学资源环境学院, 2008. Tang X H. Characteristic of humus substances and the protection mechanism of organic carbon in aggregates in purple paddy soil of the Sichuan Basin, China (In Chinese). Chongqing: College of Resources and Environment, Southwest University, 2008
- [25] 邵景安, 唐晓红, 魏朝富, 等. 保护性耕作对稻田土壤有机质的影响. 生态学报, 2007, 27 (11): 4434—4442. Shao J A, Tang X H, Wei C F, et al. Effects of conservation tillage on soil organic matter in paddy rice cultivation (In English with Chinese abstract). Acta Ecologica Sinica, 2007, 27 (11): 4434—4442
- [26] 慈恩, 朱洁, 彭娟, 等. 垄作免耕对稻田土壤有机碳活性组分和 $\delta^{13}\text{C}$ 的影响. 中国农业科学, 2013, 46 (5): 978—986. Ci E, Zhu J, Peng J, et al. Active fractions and $\delta^{13}\text{C}$ value of soil organic carbon in paddy fields under ridge-cultivation and no tillage system (In Chinese). Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46 (5): 978—986
- [27] 王栋, 李辉信, 李小红, 等. 覆草旱作对稻田土壤活性有机碳的影响. 中国农业科学, 2011, 44 (1): 75—83. Wang D, Li H X, Li X H, et al. Soil labile organic carbon as affected by non-flooded rice cultivation with straw mulching under different tillages (In Chinese). Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44 (1): 75—83
- [28] Kaiser M, Piegholdt C, Andruschkewitsch R, et al. Impact of tillage intensity on carbon and nitrogen pools in surface and sub-surface soils of three long-term field experiments. European Journal of Soil Science, 2014, 65 (4): 499—509
- [29] 陈洪滨, 范学花. 2006年极端天气和气候事件及其他相关事件的概要回顾. 气候与环境研究, 2007, 12 (1): 100—112. Chen H B, Fan X H. Some extreme events of weather, climate and related phenomena in 2006 (In Chinese). Climatic and Environment Research, 2007, 12 (1): 100—112
- [30] 赵强基. 我国南方耕作制度的发展和展望. 中国农业科学, 1990, 23 (5): 33—38. Zhao Q J. Development and prospect of the cropping systems in the southern part of China (In Chinese). Scientia Agricultura Sinica, 1990, 23 (5): 33—38

EFFECTS OF NO-TILLAGE RIDGE-CULTIVATION ON SOIL ORGANIC CARBON ACCUMULATION IN RIDGES AND CROP YIELDS IN PADDY FIELDS

Ci En^{1, 2} Wang Liange¹ Ding Changhuan¹ Xie Deti^{1, 2}

(1 College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China)

(2 Chongqing Engineering Research Center for Agricultural Non-point Source Pollution Control in the Three Gorges Reservoir Area, Chongqing 400715, China)

Abstract No-tillage ridge-cultivation is a prominent representative of the conservation tillage systems for paddy fields in South China. It is, therefore of some important practical significance to quantify whether the conservation tillage system is able to contribute to improving soil organic carbon (SOC) sequestration and keeping stable and high crop yields as well, in paddy fields. Ridge cultivation changes micro-topography of the surface soil in paddy fields. However, for long, in their studies on organic carbon accumulation in topsoil of cropland under ridge cultivation and under conventional tillage, the difference in micro-topography of the surface soil between the two different cultivation systems has been often neglected, which would inevitably affect accuracy of the comparison. Hence, a long-term field experiment was conducted to investigate effects of no-tillage ridge-cultivation on SOC accumulation in ridge soil and crop yields in paddy fields, taking into full account the effect of ridges

on micro-topography of the tested paddy fields. The long-term field experiment, initiated in 1990 and located in the experimental farm of Southwest University in Chongqing city, China (30°26' N, 106°26' E), is designed to have four different cultivation treatments in the field experiment, that is, Treatment CP1 (conventional tillage under the rotation of rice and winter fallow), Treatment CP2 (conventional tillage under the rotation of rice and rape), Treatment RN1 (no-tillage ridge-cultivation under the rotation of rice and winter fallow), and Treatment RN2 (no-tillage ridge-cultivation under the rotation of rice and rape). In this study, all the ridges in each plot under ridge cultivation were considered as a whole when calculated and compared SOC accumulation with the topsoil layers in Treatments CP1 and CP2 (the soil layers in the control), and the comparison required that the soil layers in the control and the ridges should have the same soil volume or mass in their respective plots. As the topsoil layers in conventional tillage treatments (CP1 and CP2) and the ridges in ridge-cultivation treatments (RN1 and RN2) had the same soil volume in their respective plots, Treatment RN2 was obviously higher than Treatments CP1, CP2 and RN1 in SOC density ($p < 0.05$), while Treatment RN1 did not differ much from Treatment CP1 in SOC density, but both were obviously higher than Treatment CP2 ($p < 0.05$). When the topsoil layers in conventional tillage treatments (CP1 and CP2) and the ridges in ridge-cultivation treatment (RN1 or RN2) had the same soil mass in their respective plots, SOC storage per unit mass of soil in the ridges and the topsoil layers displayed an order of $RN2 > CP1 > RN1 > CP2$, and the difference between the treatments was significant ($p < 0.05$). All these indicate that Treatment RN2 is much higher than Treatments CP1, CP2 and RN1 in SOC accumulation efficiency in topsoil. Analysis of labile organic carbon (LOC) in the ridges and the soil layers in the control also indicates that Treatment RN2 was higher in LOC content and LOC/SOC than the others, revealing that Treatment RN2 provides better protection to LOC in SOC against mineralization, which is one of the main reasons why Treatment RN2 is higher in SOC accumulation in the ridges. In terms of their effects on yields of the crops, both Treatments RN1 and RN2 increased significantly rice yield ($p < 0.05$), but Treatment RN2 did have some reverse effect on rape yield ($p < 0.05$), which, however, didn't affect much the total economic output of the field from the two harvests (rice and rape) per year. In conclusion, Treatment RN2 is a kind of conservation tillage system combining environmental and economic benefits for paddy field, and worth extrapolating to the hilly and mountain areas of South China, where cold waterlogged paddy fields are extensively distributed.

Key words Soil organic carbon; Rice; Conservation tillage; Carbon sequestration; Ridge

(责任编辑: 卢 萍)

CONTENTS

Reviews and Comments

- Application of reductive soil disinfection to suppress soil-borne pathogens Cai Zucong, Zhang Jinbo, Huang Xinqi, et al. (475)
 A review of researches on soil cracks and their impacts on preferential flow...Zhang Zhongbin, Peng Xinhua (488)

Research Articles

- Characteristics of soil aggregate loss in croplands in the typical black soil region of Northeast China Wen Leilei, Zheng Fenli, Shen Haiou, et al. (498)
 Construction of an index set for predicting thickness of active layer of permafrost in Qinghai-Tibet Plateau and for mapping Chen Jike, Zhao Yuguo, Zhao Lin, et al. (506)
 Variation of mineral composition along the soil chronosequence at the Hailuoguo Glacier foreland of Gongga Mountain Yang Zijiang, Bing Haijian, Zhou Jun, et al. (515)
 Composition of organic carbon in paddy soil in typical area of Chengdu and its influencing factors Liao Dan, Yu Dongsheng, ZhaoYongcun, et al. (526)
 Spatio-temporal variation of soil temperature and soil moisture regime in Hebei Province Cao Xianghui, Lei Qiuliang, Long Huaiyu, et al. (536)
 Vertical distribution of soil saturated hydraulic conductivity in a small karst catchment Fu Tonggang, Chen Hongsong, Wang Kelin (546)
 Transformation between soil water and shallow groundwater in the middle reaches of the Dagu River Yang Yuzheng, Lin Qing, Wang Songlu, et al. (556)
 Determination of nitrogen and oxygen isotope ratio of nitrate in water with a chemical conversion method Wang Xi, Cao Yacheng, Han Yong, et al. (565)
 Quantitative research on effects of nitrogen application rate on distribution of photosynthetic carbon in rice-soil system using ¹³C pulse labeling technique Liu Ping, Jiang Chunyu, Li Zhongpei (574)
 Effects of no-tillage ridge-cultivation on soil organic carbon accumulation in ridges and crop yields in paddy fields Ci En, Wang Liange, Ding Changhuan, et al. (585)
 Residual of applied ¹⁵N fertilizer in soils under long-term different patterns of fertilization and its utilization Zhao Wei, Liang Bin, Zhou Jianbin (595)
 Effect of long-term fertilization on rice yield and basic soil productivity in red paddy soil under double-rice system Lu Yanhong, Liao Yulin, Zhou Xing, et al. (605)
 Effects of long-term fertilization on yield variation trend, yield stability and sustainability in the double cropping rice system Ji Jianhua, Hou Hongqian, Liu Yiren, et al. (618)
 Relationship between exudation of nitrification inhibitor MHPP and plasma membrane proton pump of sorghum root Zhou Jinquan, Zhang Mingchao, Wei Zhijun, et al. (527)
 Effects of long-term amendment with passivant and zinc fertilizer on cadmium reduction in tobacco growing in a Cd contaminated field Cao Chenliang, Wang Wei, Ma Yibing, et al. (635)
 Effects of interaction between potassium and humic acid on index of organic potassium salt in flue-cured tobacco Zheng Dongfang, Xu Jiayang, Xu Zicheng, et al. (645)
 Impacts of replacement of *Pinus* with *Eucalyptus* on soil nutrients and enzyme activities Zhang Kai, Zheng Hua, Chen Falin, et al. (653)
 Effects of biological soil crusts on soil enzyme activities in desert areas Yang Hangyu, Liu Yanmei, Wang Tingpu (663)
 Effect of incorporation of crop straw on composition of soil organic matter and enzyme activity in black soil relative to depth and rate of the incorporation Jiao Lina, Li Zhihong, Yin Chengcheng, et al. (671)
 Effect of *Streptomyces* JD211 promoting growth of rice seedlings and diversity of soil bacteria Wang Shiqiang, Wei Saijin, Yang Taotao, et al. (681)

Research Notes

- Quality assessment of oasis soil in the upper reaches of Tarim River based on minimum data set Gong Lu, Zhang Xueni, Ran Qiyang (689)
 Effect of iron plaque on surface electrochemical properties and short-term N, P and K uptake by rice rootsZheng Yunyun, Li Zhongyi, Li Jiuyu, et al. (695)
 The changes of microbial community structure in red paddy soil under long-term fertilization Xia Xin, Shi Kun, Huang Qianru, et al. (705)
 Salinization characteristics of afforested coastal saline soil as affected by species of trees used in afforestation Wang Heyun, Li Hongli, Dong Zhi, et al. (712)

Cover Picture: Two dimensional and three dimensional images of soil cracks in paddy field (by Zhang Zhongbin)

《土壤学报》编辑委员会

主 编: 史学正

执行编委: (按姓氏笔画为序)

丁维新	巨晓棠	王敬国	王朝辉	史 舟	宇万太	朱永官
李永涛	李芳柏	李保国	李 航	吴金水	沈其荣	张玉龙
张甘霖	张福锁	陈德明	邵明安	杨劲松	杨明义	杨林章
林先贵	依艳丽	周东美	周健民	金继运	逢焕成	胡 锋
施卫明	骆永明	赵小敏	贾仲君	徐国华	徐明岗	徐建明
崔中利	常志州	黄巧云	章明奎	蒋 新	彭新华	雷 梅
窦 森	廖宗文	蔡祖聪	蔡崇法	潘根兴	魏朝富	

编辑部主任: 陈德明

责任编辑: 汪枳生 卢 萍 檀满枝

土 壤 学 报

Turang Xuebao

(双月刊, 1948年创刊)

第 52 卷 第 3 期 2015 年 5 月

ACTA PEDOLOGICA SINICA

(Bimonthly, Started in 1948)

Vol. 52 No. 3 May, 2015

编 辑 《土壤学报》编辑委员会
地址: 南京市北京东路 71 号 邮政编码: 210008
电话: 025 - 86881237
E-mail: actapedo@issas.ac.cn

Edited by Editorial Board of Acta Pedologica Sinica
Add: 71 East Beijing Road, Nanjing 210008, China
Tel: 025 - 86881237
E-mail: actapedo@issas.ac.cn

主 编 史 学 正
主 管 中 国 科 学 院
主 办 中 国 土 壤 学 会
承 办 中国科学院南京土壤研究所

Editor-in-Chief Shi Xuezheng
Superintended by Chinese Academy of Sciences
Sponsored by Soil Science Society of China
Undertaken by Institute of Soil Science,
Chinese Academy of Sciences

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

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

印刷装订 北京中科印刷有限公司
总发行 科 学 出 版 社
地址: 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717
电话: 010 - 64017032
E-mail: journal@mail.sciencep.com

Printed by Beijing Zhongke Printing Limited Company
Distributed by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China
Tel: 010 - 64017032
E-mail: journal@mail.sciencep.com

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

Foreign China International Book Trading Corporation
Add: P. O. Box 399, Beijing 100044, China

国内统一刊号: CN 32-1119/P

国内邮发代号: 2-560

国外发行代号: BM45

定价: 60.00 元

国 内 外 公 开 发 行



ISSN 0564-3929

