

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/trxb201405270253

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^{1,3} 于东升^{1,3†} 赵永存^{1,3} 王宁¹ 张海东^{1,3}
潘剑君² 史学正^{1,3}

(1 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)

(2 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

(3 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 农田生态系统土壤有机碳对农业生产、生态平衡和全球气候变化至关重要, 有机碳组分构成及平均驻留时间对深入了解土壤有机碳特征及演变规律意义重大。通过土壤呼吸培养实验和三库一级动力学方程, 模拟分析了成都典型区水稻土有机碳组分构成特征; 利用土壤定量化属性与有机碳各组分相关及回归分析, 建立研究区土壤有机碳各组分预测模型。结果表明, 有机碳组分的活性碳、慢性碳和惰性碳含量在表层(0~20 cm)分别为0.42、6.13、11.43 g kg⁻¹, 均高于亚表层(20~40 cm)的0.23、4.09、7.50 g kg⁻¹, 两土层间有机碳组分含量具有显著性差异, 但有机碳组分比例没有显著性差异。剖面(0~100 cm)有机碳组分含量随着深度增加而减小, 活性碳和慢性碳比例随着深度增加而降低, 惰性碳比例则随着深度增加显著升高。容重、全氮和全磷对有机碳各组分含量, 质地对活性碳组分含量、比例及平均驻留时间, pH对慢性碳和惰性碳组分比例均具有显著影响; 活性碳和惰性碳组分含量与土壤全氮、碳氮比、pH以及土壤细粉粒(0.02~0.002 mm)含量间存在显著线性关系, 可用来预测水稻土有机碳各组分含量, 研究结果对其他地区土壤有机碳各组分研究及预测具有积极启示作用。

关键词 水稻土; 有机碳组分; 影响因素; 预测模型

中图分类号 S153.6 **文献标识码** A

水稻土是我国重要的耕地土壤资源, 占全国耕地总面积的25%, 水稻土在水耕熟化过程中有机碳呈积累趋势。土壤有机碳根据其分解速率大致分为活性碳、慢性碳和惰性碳^[1], 这种方法不仅适合定量化评价有机碳储量, 还可以作为敏感性参数模拟有机碳未来演变趋势^[2]。同时, 土壤有机碳作为农作物生产重要的肥力因素, 各碳组分与土壤肥力也密切相关, 其中活性碳是土壤肥力质量的标志, 其大小可以反映潜在的养分含量, 其速率可以反映养分循环和供应状况; 活性碳和慢性碳控制着土壤养分的流失^[3]; 慢性碳和惰性碳能稳定的储存在土壤中, 维持土壤肥力^[3]。可见, 土壤肥力活性与有机碳组分构成、分解速率及周转时间均有

着密切关系。

目前国内外关于土壤有机碳组分的研究主要集中在不同类型及不同土地利用方式下土壤有机碳组分的构成特征方面。如Jha等^[4]探讨不同土地利用变化下的有机碳组分特征, 结果认为土壤惰性碳比例占65%~68%, 活性碳比例占3.3%~10%, 且惰性碳比例随着深度的增加而增加, 新的有机碳的输入更多的是增加了活性碳含量。Wiesmeier等^[5]分析比较农田、草原和森林三种土壤的有机碳组分构成特征, 结果表明农田和草原土壤有机碳中慢性碳和惰性碳比例高达90%, 而森林土壤活性碳比例高达40%。更多研究表明, 林地土壤活性碳比例最高, 活性碳和慢性碳平均驻留时间最长, 表明林地

*中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050507)和国家重点基础研究发展计划“973”项目(2010CB950702)资助

†通讯作者, E-mail: dshyu@issas.ac.cn

作者简介: 廖丹(1988—), 女, 硕士研究生, 研究方向为资源环境与遥感信息。E-mail: dliao@issas.ac.cn

收稿日期: 2014-05-27; 收到修改稿日期: 2014-11-18

土壤有机碳肥力有效性较高^[6]。灌丛土壤惰性碳比例高且慢性碳平均驻留时间长,其有机碳稳定性较强^[7]。果园土壤与林地、旱地和灌丛土壤相比,具有较低活性碳含量、最低惰性碳比例和最高慢性碳比例,且有机碳周转时间快,说明果园土壤有机碳稳定性并不高^[7]。丘陵红壤区的水田与旱地和果园比较,土壤慢性碳和惰性碳含量最高,利于土壤固碳^[8]。

然而,有机碳的不同组分在土壤中的矿化和转化过程是相当复杂的,不仅受环境因子的影响,还受到土壤因子和农业因子的影响。研究表明,年平均温度是影响活性碳的主要因素,植物类型是影响有机碳组分构成的主要原因^[6];成土母质和生境造成土壤具有凋落物化学组成的差异,进而影响有机碳三组分含量的差异^[9]。土壤年龄与土壤慢性碳和惰性碳含量呈正相关^[10],黏粒和粉粒含量之和与惰性碳平均驻留时间显著相关^[3],水分含量能显著增加活性碳和慢性碳的平均驻留时间^[11]。免耕和深耕两种方式可以增加活性碳和降低慢性碳的含量,相反,犁耕降低活性碳和增加慢性碳的含量^[12],长期施用化肥和增加种植密度能显著提高土壤活性碳的含量。

虽然已研究了众多土壤的有机碳组分构成特征及其影响因素,但水稻土有机碳组分构成特征数据匮乏且很少涉及土壤理化性质的定量分析。由于陆地生态模型的碳循环模拟多数借用其他类型土壤的碳组分构成比例作为模型输入敏感性参数,在对区域模拟过程中,有的甚至未按类型、层次设定参数,模拟结果不确定性难以评估。对处于长期淹水与脱水循环交替的水稻土而言,不同类型水稻土有机碳组分构成特征如何,是否与土壤类型等自然属性类型有关,能否利用土壤自然属性预测碳组分构成,是本研究所关注的问题。因此,在成都平原典型区,通过实地调查采样和土壤呼吸培养实验与分析,根据三库一级动力学方程^[13],利用SAS9.1软件拟合水稻土有机碳组分大小以及平均驻留时间,分析水稻土有机碳组分构成特征以及影响因素,为提高水稻土肥力以及水稻土碳循环模拟研究提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域为新都和郫县,位于成都平原

(102°54'~104°54' E, 30°05'~31°26' N)西北部,毗邻成都市区,是当地粮食作物的主产地,总耕地面积436.96 km²。该区域属于亚热带湿润季风气候区,气候温和湿润,雨量充沛;多年平均气温15.9~16.2℃,1月气温最低,8月气温最高。研究区土壤母质起源于冰后期近代河流堆积和山体岩层风化物^[14],多为灰色冲积物、灰棕冲积物、成都黏土、再积黄壤和砖红紫泥,为植物提供矿质养料的最初来源。在气候、地形和生物等自然因素作用下,不同母质演变为直径不同的矿物颗粒,使土壤质地多呈粉砂壤土、壤土和黏壤土,通气透水、保水保温性能均较好。优越的自然条件十分有利于水稻种植,形成了多种类型的水稻土(图1)。

随着农业的发展,土地开发程度高,人为耕作措施对土壤肥力有着重要影响。该区域栽培植被主要为粮经作物,其中稻谷播种面积最大,约占农作物总播种面积的55%左右,加之都江堰等灌溉便利,耕地土壤大多熟化成水稻土,并实行水旱轮作。但成都平原由于地形(古河道、槽形洼地)及沉积物等因素,局部地段也会出现渍水现象,形成潜育化发展方向的低产水稻土^[15]。

1.2 样品采集与分析

按水稻土类型进行采集点布设,共布置42个采样点,其中6个为剖面点,并在2010年10月水稻收割后采集土壤样品。剖面样点按其自然发生特点进行分层采样,其余36个样点按表层(0~20 cm)和亚表层(20~40 cm)分别采样,共计96个样品(图1)。

样品在室内自然风干,剔除石子和根系,碾磨分别过2 mm、0.85 mm和0.149 mm孔径筛。其中,过2 mm的土样采用吸管法测定土壤颗粒组成;电

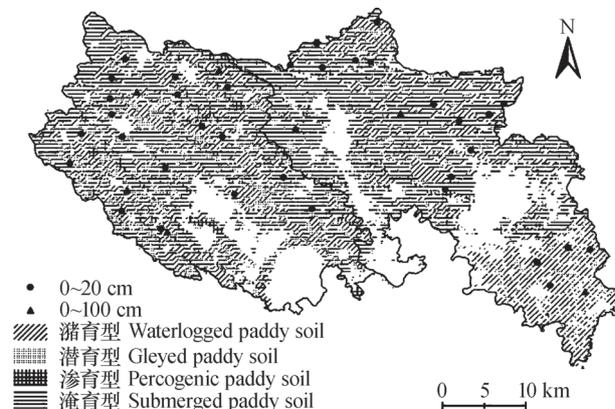


图1 研究区土壤采样点分布图

Fig.1 Distribution of soil sampling sites in the research region

位法测定pH(土水比为1:2.5)。过0.149 mm的土样采用重铬酸钾-硫酸消化法测定土壤有机碳含量;采用半微量开氏法测定全氮含量;采用氢氟酸-高氯酸-硝酸消煮法测定全磷和全钾含量。

测定土壤惰性碳时,首先称取过2 mm的样品1.00 g放置消煮管中,经6 mol l⁻¹ HCl^[16]消煮后,待样品冷却后用蒸馏水洗至中性,再碾磨过0.149 mm筛,用重铬酸钾-硫酸消化法测定其有机碳,即惰性碳含量。

1.3 样品呼吸培养及有机碳组分拟合

样品呼吸培养实验:称取过0.85 mm的土样100 g置于呼吸瓶中,湿润使其含水量达到65%,在25℃恒温箱内密封培养100 d。根据土壤有机碳分解前期快、后期慢的特点,设置不同时间间隔,用NaOH溶液吸收CO₂测定其释放速率。

土壤有机碳组分拟合:结合土壤呼吸培养实验所测得CO₂释放速率数据和已测定的惰性碳及总有机碳数据,利用三库一级动力学方程对土壤活性碳和慢性碳的含量及周转时间进行拟合,分别获得其试验拟合值。拟合方程为:

$$C_{\text{soct}} = C_a \times \exp(-K_a \times t) + C_s \times \exp(-K_s \times t) + C_r \times \exp(-K_r \times t) \quad (1)$$

式中, C_{soct} 为 t 时刻的有机碳含量 (g kg⁻¹); C_a 、 K_a 为土壤活性碳含量 (g kg⁻¹) 及其分解速率 (d⁻¹); C_s 、 K_s 为土壤慢性碳含量 (g kg⁻¹) 及其分解速率 (d⁻¹); C_r 、 K_r 为土壤惰性碳含量 (g kg⁻¹) 及其分解速率 (d⁻¹); K_a 、 K_s 、 K_r 为各碳库的平均驻留时间 (mean residue time, MRT) 的倒数。

由于惰性碳平均驻留时间太长难以准确获得,一般假设田间土壤惰性碳平均驻留时间为1 000年^[3]。由于实验室培养温度与当地田间实际温度存在差异,实验获得的各碳库平均驻留时间 (MRT_{lab}) 并非田间实际周转时间 (MRT_{field}),需进行转换计算:

$$MRT_{\text{field}} = MRT_{\text{lab}} \times Q_{10} \quad (2)$$

$$Q_{10} = 2^{[(25 - MAT) / 10]} \quad (3)$$

式中, MAT 为研究区年平均温度; MRT_{field} 为惰性碳在田间的平均驻留时间; MRT_{lab} 为惰性碳在实验室内的平均驻留时间; Q_{10} 为土壤有机碳矿化温度敏感性系数。

1.4 数据统计与分析

依据试验设计,土壤有机碳各组分与总碳之间关系式为:

$$\text{总有机碳 (SOC)} = \text{活性碳 (C}_a\text{)} + \text{慢性碳 (C}_s\text{)} + \text{惰性碳 (C}_r\text{)} \quad (4)$$

活性碳比例 (P_{C_a})、慢性碳比例 (P_{C_s})、惰性碳比例 (P_{C_r}) 分别为各组分含量占总有机碳 (SOC) 含量的百分比。

将有机碳各组分含量及比例进行正态分布检验后,采用方差分析检验水稻土(亚类)、母质和质地对其是否具有显著性影响,多重比较采用最小显著差异法(LSD)检验质地两两之间的显著性差异。采用Pearson法检验有机碳组分与其他理化性质之间的相关性^[17],利用回归分析法构建碳组分预测模型,确定土壤影响因素对碳组分变异的独立解释能力。最后采用配对T检验对模型预测精度进行检验。所有数据计算与统计分析工作均借助SPSS 20.0及Origin 8.5完成。

2 结果与讨论

2.1 土壤基本理化性质的统计特征

4种亚类水稻土的基本理化性质在表层和亚表层间具有统一的变化规律:表层有机碳、全氮、全磷和粉粒分别高于亚表层,而容重、全钾、pH、黏粒和砂粒分别低于亚表层(表1)。表层有机碳含量高,容重小和黏粒含量低说明土壤基质疏松,空隙较多,微生物活动较活跃,有大量黑色腐殖化残体碎屑和腐殖质颗粒,土壤肥力较高。

2.2 土壤有机碳组分构成特征

所有样点表层与亚表层样品的分析结果显示,水稻土有机碳各组分含量在表层与亚表层间差异极显著,表层均高于亚表层(表2)。由于表层常被扰动,农作物残留密集,有机物料输入多,土壤结构多呈粒状、团粒状或碎块状,空气、温度和水分条件优越,微生物活动频繁,加速农作物残体分解,利于有机物料直接吸收转换成土壤中新的有机碳,增加土壤有机碳含量^[18]。所以,耕层土壤更有利于有机碳的积累。

但水稻土有机碳各组分比例在这两个土层间的差异性并不显著,活性碳比例相对较小,亚表层惰性碳比例略高于表层(表2)。表层新有机碳输入也会促进旧有机碳分解,亚表层土壤由于缺乏新的有机碳源,抑制了旧有机碳的分解,且旧有机碳更多表现为惰性,所以惰性碳比例在亚表层较高^[19]。

水稻土亚表层活性碳和慢性碳的平均驻留时间

表1 供试土壤基本理化性质

		Table 1 Basic physical and chemical properties of the studied soils								
水稻土亚类 Subgroups of paddy soil	层次 Layer (cm)	有机碳 Organic carbon (g kg ⁻¹)	容重 Bulk density (g cm ⁻³)	pH	全氮 Total N (g kg ⁻¹)	全磷 Total P (g kg ⁻¹)	全钾 Total K (g kg ⁻¹)	颗粒组成 (%)		
								Particle size composition		
								砂粒 Sand	粉粒 Silt	黏粒 Clay
淹育型 Submerged paddy soil	0~20	17.46A	1.24A	6.22	1.84A	2.45A	24.04	21.83	63.61	14.56
	20~40	9.11B	1.47B	6.49	1.02B	1.59B	24.57	23.17	59.03	17.81
潜育型 Waterlogged paddy soil	0~20	17.66A	1.31A	6.02	1.80A	2.15A	23.40	17.75	61.72	20.53
	20~40	10.75B	1.55B	6.21	1.14B	1.58B	23.75	18.56	60.14	21.30
潜育型 Gleyed paddy soil	0~20	20.53	1.43	6.28	2.07a	2.17A	22.91	26.16	58.79	15.05
	20~40	11.62	1.55	6.66	1.15b	1.50B	23.26	27.78	55.29	16.94
渗育型 Percogenic paddy soil	0~20	15.39	1.42	6.37	1.48a	2.36	23.11	22.78	65.66	11.57
	20~40	9.27	1.53	7.06	0.96b	1.95	25.91	20.86	67.39	11.75

注：同列不同小写字母表示不同土层在 $p < 0.05$ 水平差异显著，不同大写字母表示不同土层在 $p < 0.01$ 水平差异显著 Note: Different lowercase letters in the same column mean significant difference at 5% level, and different capital letters in the same column mean significant difference at 1% level

分别高出表层 40%、27%，亚表层较表层土壤有机碳分解所需时间更长，相应分解速率更慢（表 2）。

潜育型、渗育型、潜育型、淹育型水稻土剖面各层次的活性碳含量均较少，且随着剖面深度增加而逐渐减小（图 2），这是因为平均驻留时间短的活性碳易于在土壤表层聚集^[20]。慢性碳含量在不同剖面深度间差异较大，总体上随着剖面深度增加而逐渐减小；仅淹育型水稻土在 70cm 处有轻微波动（图 2d）；其中潜育型（图 2c）和淹育型（图 2d）表层与亚表层间变化较为明显，分别下降 66%、76%。惰性碳含量在潜育型和渗育型水稻土中随着剖面深度增加，呈先减小后增加的趋势，但其含量低于表层，与习丹等^[21]研究桉树林、乡土树种林土壤惰性碳含量变化规律具有一致性；潜育型和淹育型则随着剖面深度的增加呈逐渐减小的趋势，与习丹等^[21]研究的灌草林、马占相思林的土壤惰性碳剖面变化规律一致。水稻土有机碳组分含量剖面分布特征与林地土壤剖面并无显著差异。

剖面土壤有机碳组分构成比例分析结果显示，活性碳组分比例在各剖面各层次均小于 4%，惰性碳比例均高于慢性碳比例（图 2）。渗育型、潜育

型和淹育型水稻土慢性碳比例随着土层加深逐渐减小，惰性碳比例随着土层加深逐渐增加；潜育型水稻土慢性碳比例随着土层加深先增加后减少，惰性碳比例随着土层加深先减少后增加（图 2）。潜育型水稻土碳组分比例在 0~40cm 土层的变化特征与朱凌宇等^[22]研究的祁连山森林土壤一致，即慢性碳比例亚表层>表层，惰性碳比例表层>亚表层。水稻土有机碳组分含量及比例的剖面分布特征与林地土壤具有共性，在水稻土亚类之间既具有共性又具有差异性。

2.3 土壤有机碳组分的影响因素

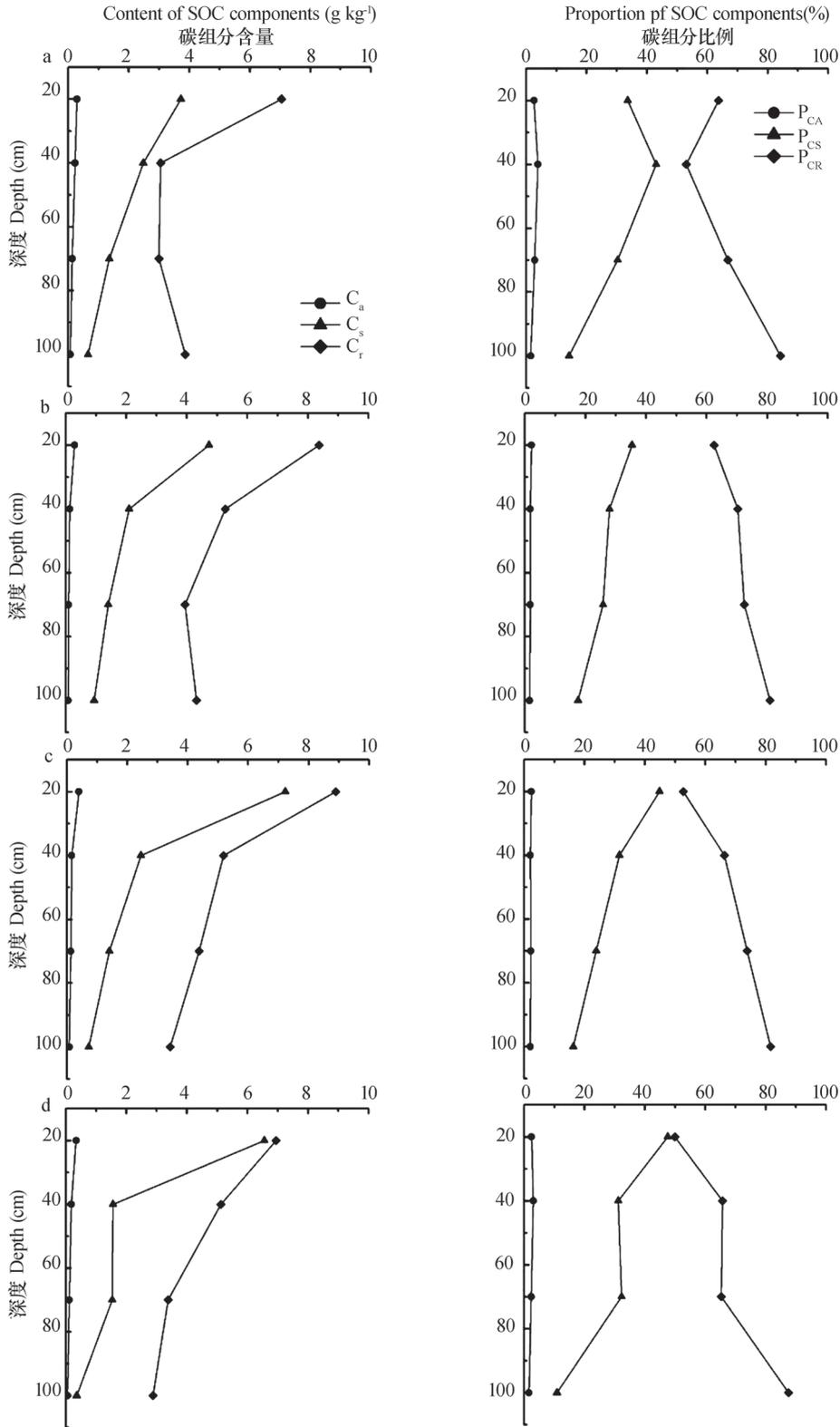
表层和亚表层水稻土有机碳各组分含量和比例在 4 种亚类间的差异性均不显著，不同母质和质地类型对表层土壤各有机碳组分含量和比例的影响也不显著。运用模型模拟研究生态系统碳循环，仅按土壤类型、母质类型或质地类型直接设定表层土壤有机碳组分含量或比例的预测模型参数缺乏足够的依据^[23]。

亚表层质地对活性碳含量和比例的影响达到显著水平（ $p=0.01$ ， $p=0.02$ ），活性碳含量及比例的均值在轻黏、中壤和重壤土之间具有显著性差异，

表2 水稻土表层及亚表层有机碳组分含量、比例及周转时间

Table 2 Content, proportion and mean residue time of SOC components in the surface and subsurface layers of paddy soil														
层次 ^① (cm)	碳组分含量 ^② (g kg ⁻¹)	均值 ^③	标准差 ^④	变异系数 ^⑤	层次 ^① (cm)	碳组分比例 ^⑥ (%)	均值 ^③	标准差 ^④	变异系数 ^⑤	层次 ^① (cm)	平均驻留时间 ^⑦	均值 ^③	标准差 ^④	变异系数 ^⑤
0~20	C _a	0.42A	0.13	31	0~20	P _{C_a}	2.37a	0.61	26	0~20	MRT _{C_a} (day)	4.65A	2.14	46
	C _s	6.13A	2.29	37		P _{C_s}	34.99a	12.34	35		MRT _{C_s} (year)	2.69A	1.18	44
	C _r	11.43A	4.4	39		P _{C_r}	62.64a	12.21	19					
20~40	C _a	0.23B	0.1	42	20~40	P _{C_a}	2.33a	1.04	44	20~40	MRT _{C_a} (day)	6.53B	3.59	55
	C _s	4.09B	5.01	123		P _{C_s}	32.56a	13.31	41		MRT _{C_s} (year)	3.41B	2.55	75
	C _r	7.50B	5.39	72		P _{C_r}	65.11a	13.34	20					

①Layer ②Content of SOC component ③Mean ④Standard deviation ⑤Variation coefficient ⑥Proportion of SOC components ⑦Mean residue time注：同列不同小写字母表示不同土层在 $p < 0.05$ 水平差异显著，不同大写字母表示不同土层在 $p < 0.01$ 水平差异显著 Note: Different lowercase letters in the same column mean significant difference at 5% level, and different capital letters in the same column mean significant difference at 1% level



C_a : Content of active carbon, C_s : Content of slow carbon, C_r : Content of resistant carbon, P_{C_a} : Proportion of active carbon in soil organic carbon, P_{C_s} : Proportion of slow carbon in soil organic carbon, P_{C_r} : Proportion of resistant carbon in soil organic carbon

图2 不同亚类水稻土碳组分含量和比例剖面分布图

(a. 潜育型水稻土; b. 渗育型水稻土; c. 潴育型水稻土; d. 淹育型水稻土)

Fig.2 Profile distributions of contents and proportions of SOC components in paddy soils belonging to different subgroups (a. Gleyed paddy soil, b. Percogenic paddy soil, c. Waterlogged paddy soil, d. Submerged paddy soil)

黏土的活性碳含量及比例均较中壤和重壤土高，体现黏粒对SOC及活性碳的有效保护作用^[24]。考虑到亚表层土壤质地的影响作用，生态模型土壤碳组分参数设置应按土壤层次区别对待，但由于土壤质地类型多是基于概念性、定性描述，缺乏定量化，即使在亚表层按质地类型设置土壤组分参数，也会存在很大的不确定性。

活性碳、慢性碳、惰性碳含量与容重呈极显著负相关（表3）。在一定范围内，土壤容重反映土壤结构性和通气性，土壤容重减小，可提高水稻根系生长量及地上生物量^[25]，有机碳来源增加，有利于土壤固碳。其中，慢性碳含量随容重减小而提高的趋势表现得最为明显，活性碳次之。

慢性碳含量与pH呈极显著负相关（表3）。在水稻生长的酸碱度范围内，pH对有机碳影响主要表现在降低有机碳溶解性、改变微生物种群、数量及微生物活性和酶活性。我国西南地区土壤有机碳含量随pH升高有降低的趋势^[26]，慢性碳表现明显，而惰性碳比例与pH呈极显著正相关，慢性碳比例则呈极显著负相关（表3），说明弱碱性土壤惰性碳比例较大，固碳效果较好。

土壤颗粒大小对活性碳比例及平均驻留时间影响最为明显，砂粒含量（0.1 ~ 0.05 mm）与活性碳比例呈显著负相关，粉粒含量（0.02 ~ 0.002 mm）与活性碳比例呈显著正相关；砂粉粒含量（2 ~ 0.02 mm）与活性碳平均驻留时间（MRT_{C_a}）呈显著负相关，随着粒径减小，其对MRT_{C_a}的影响越显著；黏粒含量（<0.002 mm）与MRT_{C_a}呈显著正相关（表3）。这与张俊华等^[27]研究结果一致，即水田中有机碳、活性碳、惰性碳与砂粒（>0.05 mm）呈显著负相关，与粉粒和黏粒含量（<0.05 mm）之和呈显著正相关。土壤颗粒变细，比表面积增大，在水、气和生物因素作用下表面吸附等化学和物理行为发生了改变，对土壤固相、有机碳组分保护作用增强^[28]，缓解了活性碳分解。

活性碳、慢性碳、惰性碳含量与全氮、全磷呈极显著正相关，其中惰性碳与全氮含量、活性碳与全磷含量的相关性最显著（表3）。全氮含量能显著增加土壤碳汇集，降低碳氮比，提高微生物活性；全磷和全钾有利于土壤营养元素的循环，促进有机碳组分增加。本次研究仅对典型水稻土有机碳组分与影响因素间的关系做了初步探讨，其深层机

表3 土壤有机碳组分与影响因素之间的相关性

Table 3 Relationships of SOC components with their affecting factors

	容重	pH	全氮	全磷	全钾	碳氮比
	Bulk density		Total N	Total P	Total K	C/N
SOC	-0.406**	ns	0.961**	0.476**	-0.253*	0.244*
C _a	-0.375**	ns	0.823**	0.460**	ns	ns
C _s	-0.422**	-0.374**	0.726**	0.364**	-0.289*	ns
C _r	-0.306**	ns	0.880**	0.431**	ns	0.207*
P _{C_a}	ns	-0.302**	ns	ns	ns	ns
P _{C_r}	ns	0.287**	ns	ns	ns	ns
MRT _{C_a}	0.313**	ns	-0.319**	ns	ns	ns
颗粒组成						
Particle size composition (mm, %)						
	2 ~ 0.1	0.1 ~ 0.05	0.05 ~ 0.02	0.02 ~ 0.002	<0.002	
P _{C_a}	ns	-0.212*	ns	0.245*	ns	
MRT _{C_a}	-0.245*	ns	-0.199*	ns	0.252*	
MRT _{C_s}	ns	ns	-0.211*	ns	ns	

注：*表示相关性在0.05水平上显著，**表示相关性在0.01水平上显著，ns表示相关性不显著。Note: *mean significant correlation difference at 5% level, ** mean significant correlation difference at 1% level, ns means not significant

理研究仍需进一步探明。

在相关分析基础上,对土壤有机碳组分含量与影响因素进行逐步回归分析,通过优化建立土壤活性碳(C_a)和惰性碳(C_r)含量的经验预测模型,预测模型的决定系数 R^2 分别为0.69、0.70($p < 0.05$)。

$$C_a = 0.21X_1 + 0.043X_2 - 0.26 \quad (R^2 = 0.69) \quad (5)$$

$$C_r = 6.67X_1 + 1.99X_2 + 1.28X_3 + 0.1X_4 - 29.65 \quad (R^2 = 0.70) \quad (6)$$

式中, X_1 为土壤氮含量, X_2 为土壤pH, X_3 为土壤碳氮比, X_4 为土壤细粉粒(0.02~0.002mm)含量。

利用预测模型及总有机碳与各组分之间的关系(式(4)),计算慢性碳(C_s)组分含量。慢性碳预测值和试验拟合值配对T检验结果显示,两者间差异并不显著,总体均值趋于一致;慢性碳预测值与试验拟合值相关分析也显示出较高解释度($r = 0.76$, $p = 0.00$)(图3);表明研究区土壤有机碳各组分含量预测模型可用土壤属性进行定量预测。究其原因,一是本文分析获得的影响碳组分关键因子是确切的,二是研究和分析土壤材料均是同一类型土壤(水稻土),易于达到较好相关性预测结果,但预测精度有待提高。

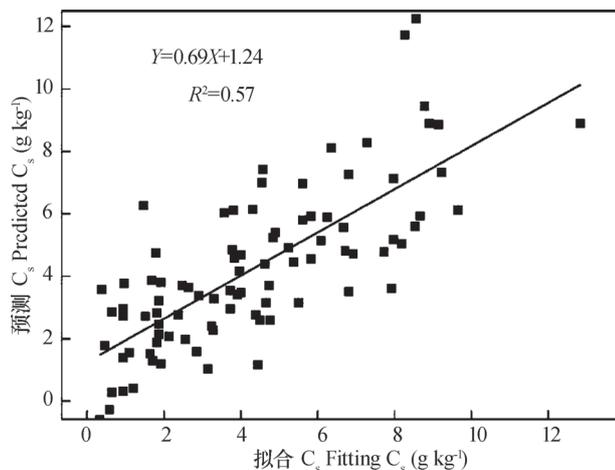


图3 慢性碳预测值与试验拟合值的线性关系

Fig.3 Liner relationship of predicted C_s and experimentally fitted C_s .

3 结论

成都典型区水稻土活性碳和慢性碳含量均随着剖面深度增加而减小,不同水稻土亚类之间惰性

碳含量随剖面深度的变化趋势有差异。水稻土剖面各层活性碳比例均小于4%,随剖面深度无明显变化;慢性碳比例均小于惰性碳,两者随剖面深度变化具有对称性。水稻土表层土壤有机碳各组分含量、活性碳和慢性碳比例均高于亚表层土壤,但惰性碳比例小于亚表层,亚表层土壤有机碳的惰性较表层高。水稻土有机碳组分构成受质地、颗粒组成、pH及全氮、全磷、全钾的综合影响,但不同组分影响因素存在差异。其中,黏土更有利于保存活性碳,弱碱性环境土壤固碳效果更好。同时,活性碳和惰性碳含量与土壤全氮、碳氮比、pH和细粉粒含量(0.02~0.002mm)间存在显著线性关系,可用来预测水稻土有机碳各组分含量,但预测精度有待提高。这对其他地区土壤有机碳各组分研究及预测具有积极的启示作用。

参考文献

- [1] Parton W J, Schimel D S, Cole C V, et al. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in great plains grasslands. *Soil Science Society of America Journal*, 1987, 51 (5): 1173—1179
- [2] Yang L X, Pan J J. Dynamics models of soil organic carbon. *Journal of Forestry Research*, 2003, 14 (4): 323—330
- [3] Paul E A, Collins H P, Leavitt S W, et al. Dynamics of resistant soil carbon of midwestern agricultural soils measured by naturally occurring ^{14}C abundance. *Geoderma*, 2001, 104: 239—256
- [4] Jha P, De A, Lakaria B L, et al. Soil carbon pools, mineralization and fluxes associated with land use change in vertisols of central India. *National Academy Science Letters*, 2012, 35 (6): 475—483
- [5] Wiesmeier M, Schad P, Lützw M V, et al. Quantification of functional soil organic carbon pools for major soil units and land uses in southeast Germany (bavaria). *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2014, 185: 208—220
- [6] Yang L, Pan J, Shao Y, et al. Soil organic carbon decomposition and carbon pools in temperate and subtropical forests in China. *Journal of Environmental Management*, 2007, 85 (3): 690—695
- [7] 严毅萍, 曹建华, 杨慧, 等. 岩溶区不同土地利用方式对土壤有机碳碳库及周转时间的影响. *水土保持学报*, 2012, 26 (2): 144—149. Yan Y P, Cao J H, Yang H, et al. The impact of different soil type on soil organic carbon pool and turnover in Karst Area (In

- Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26 (2): 144—149
- [8] 孟静娟, 史学军, 潘剑君, 等. 农业利用方式对土壤有机碳库大小及周转的影响研究. *水土保持学报*, 2009, 23 (6): 145—148. Meng J J, Shi X J, Pan J J, et al. Effects of agricultural land use types on soil organic carbon pool size and turnover (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23 (6): 145—148
- [9] 史学军, 潘剑君, 陈锦盈, 等. 不同类型凋落物对土壤有机碳矿化的影响. *环境科学*, 2009, 30 (6): 1832—1837. Shi X J, Pan J J, Chen J Y, et al. Effects of different types of litters on soil organic carbon mineralization (In Chinese). *Environmental Science*, 2009, 30 (6): 1832—1837
- [10] Clark J D, Plante A F, Johnson A H. Soil organic matter quality in chronosequences of secondary northern hardwood forests in western New England. *Soil Science Society of America Journal*, 2012, 76 (2): 684—693
- [11] Collins H P, Elliott E T, Paustian K, et al. Soil carbon pools and fluxes in long-term corn belt agroecosystems. *Soil Biology & Biochemistry*, 2000, 32: 157—168
- [12] Zhao H, Lv Y, Wang X, et al. Tillage impacts on the fractions and compositions of soil organic carbon. *Geoderma*, 2012, 189/190: 397—403
- [13] Paul E A, Harris D, Collins H P, et al. Evolution of CO₂ and soil carbon dynamics in biologically managed, row-crop agroecosystems. *Soil Ecology*, 1999, 11: 53—65
- [14] 徐杰, 郑德霖, 丁昌正, 等. 成都市新都土壤. 1985: 7—9. Xu J, Zheng D L, Ding C Z, et al. Soil of Xindu District of Chengdu City (In Chinese). 1985: 7—9
- [15] 王昌全, 李冰. 成都平原质量研究. 北京: 科学出版社, 2012: 1—10. Wang C Q, Li B. Study on the soil quality of Chengdu Plain (In Chinese). Beijing: Science Press, 2012: 1—10
- [16] Paul E A, Morris S J, Conant R T, et al. Does the acid hydrolysis-incubation method measure meaningful soil organic carbon pools? *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70 (3): 1023—1035
- [17] Kieber R J, Long M S, Willey J D. Factors influencing nitrogen speciation in coastal rainwater. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 2005, 52 (1): 81—99
- [18] Blanco-Canqui H, Lal R. No-tillage and soil-profile carbon sequestration: An on-farm assessment. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72 (3): 693—701
- [19] Fontaine S, Barot S, Barre P, et al. Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply. *Nature*, 2007, 450 (8): 277—280
- [20] Katsuno K, Miyairi Y, Tamura K, et al. A study of the carbon dynamics of Japanese grassland and forest using ¹⁴C and ¹³C. *Nuclear Instrument and Methods in Physics Research Section B*, 2010, 268 (7): 1106—1109
- [21] 习丹, 李炯, 旷远文, 等. 鹤山不同植被类型土壤惰性碳含量及其季节变化特征. *热带亚热带植物学报*, 2013, 21 (3): 203—210. Xi D, Li J, Kuang Y W, et al. Variation of soil non-labile carbon under different forest types in Heshan (In Chinese). *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2013, 21 (3): 203—210
- [22] 朱凌宇, 潘剑君, 张威. 祁连山不同海拔土壤有机碳库及分解特征研究. *环境科学*, 2013, 34 (2): 669—675. Zhu L Y, Pan J J, Zhang W. Study on soil organic carbon pools and turnover characteristics along an elevation gradient in Qilian Mountain (In Chinese). *Environmental Science*, 2013, 34 (2): 669—675
- [23] Basso B, Gargiulo O, Paustian K, et al. Procedures for initializing soil organic carbon pools in the 100-year model for agricultural systems. *Soil Science Society of America Journal*, 2011, 75 (1): 69—78
- [24] Sakin E. Relationships between of carbon, nitrogen stocks and texture of the Harran plain soils in southeastern Turkey. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 2012, 18 (4): 626—634
- [25] 张玉屏, 朱德峰, 林贤青, 等. 田间条件下水稻根系分布及其与土壤容重的关系. *中国水稻科学*, 2003, 17 (2): 141—144. Zhang Y P, Zhu D F, Lin X Q, et al. Roots distribution of rice in field and its relation to soil bulk density (In Chinese). *Journal of Chinese Rice Science*, 2003, 17 (2): 141—144
- [26] 戴万宏, 黄耀, 武丽, 等. 中国地带性土壤有机质含量与酸碱度的关系. *土壤学报*, 2009, 46 (5): 851—860. Dai W H, Huang Y, Wu L, et al. Relationships between soil organic matter content and pH in top soil of zonal soils in China (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46 (5): 851—860
- [27] 张俊华, 李国栋, 南忠仁. 黑河中游典型土地利用方式下土壤粒径分布及与有机碳的关系. *生态学报*, 2012, 32 (12): 3745—3753. Zhang J H, Li G D, Nan Z R. Soil particle size distribution and its relationship with soil organic carbons under different land uses in the middle of Heihe River (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32 (12): 3745—3753
- [28] 熊毅, 李庆逵. 中国水稻土. 北京: 科学出版社, 1992: 321—327. Hseung Y, Li Q K. Paddy soil in China (In Chinese). Beijing: Science Press, 1992: 321—327

COMPOSITION OF ORGANIC CARBON IN PADDY SOIL IN TYPICAL AREA OF CHENGDU AND ITS INFLUENCING FACTORS

Liao Dan^{1, 3} Yu Dongsheng^{1, 3†} Zhao Yongcun^{1, 3} Wang Ning¹

Zhang Haidong^{1, 3} Pan Jianjun² ShiXuezheng^{1, 3}

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

(2 College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

(3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Soil organic carbon (SOC) in farmland ecosystems is essential to agriculture and crucial to ecology and global climate change. Composition and mean residence time (MRT) of SOC are closely related to soil structural stability, sustainable soil nutrient supply, soil biodiversity and mitigation of greenhouse effect. Based on the three-pool first-order kinetics equation and the soil respiration incubation experiment conducted, the major organic carbon components of the paddy soil typical of Chengdu were measured for analogical analysis of SOC composition and for establishment of models for prediction of SOC components by means of quantification of soil properties as well as correlation and regression analyses of various fractions of organic carbon. Results show that the content of active carbon (C_a), slow carbon (C_s) and resistant carbon (C_r), was 0.42, 6.13 and 11.43 g kg⁻¹, respectively, in the surface layer (0 ~ 20 cm), and 0.23, 4.09 and 7.50 g kg⁻¹, in the sub-surface layer (20 ~ 40 cm). Obviously, the contents were higher in the surface layer than that in the sub-surface layer. Although the organic carbon in the sub-surface layer was higher than that in the surface layer in inertness, no significant difference was observed between the organic carbons in the two soil layers in proportion of components. No apparent difference was observed either between paddy soils derived from similar parent materials but sorted into different subgroups in content and proportion of organic carbon components. However, soil texture had some high impacts on content and proportion of organic carbon components in the sub-surface layer. In soil profiles (0 ~ 100 cm), contents of C_a and C_s decreased with increasing depth. However the decrease in content of C_r varied with soil subgroup, in some subgroups it decreased with soil depth, while in some it decreased first and then increased. In paddy soils the constituent proportions of C_a in all soil layers were less than 4% and no obvious change was found with soil depth; the constituent proportion of C_s was lower than that of C_r , and the two fractions of organic carbon varied with soil depth symmetrically, in constituent proportion, that is, C_s decreased with soil depth, while C_r increased significantly with soil depth. Paddy soils and forest soils shared some common characters in distribution of contents and constituent proportions of organic carbon components in soil profile, however, paddy soils, different in subgroup, had something common and something different, as well, in this aspect. Composition of soil organic carbon in paddy soils was subject to the integrated effect of bulk density, texture, particle-size composition, pH, carbon-nitrogen ratio, total nitrogen, total phosphorus, and total potassium, but each fraction of SOC had its own main affecting factors. The analysis results show that the contents of various organic carbon components were in extremely significant negative relationships with bulk density, and in extremely significant positive relationships with total nitrogen and total phosphorus. Clay was favorable to

preservation of C_a , and weak alkaline environment was conducive to soil carbon sequestration. Based the relationships of the fractions of organic carbon with various related factors, the significant linear relations ($R^2=0.69$) observed of C_a with total nitrogen and pH and the significant linear relations of ($R^2=0.70$) C_r with soil total nitrogen, carbon-nitrogen ratio, pH value as well as the content of fine silt (0.02 ~ 0.002 mm), it is feasible to predict contents of various fractions of organic carbon in paddy soil, but the prediction accuracy needs to be improved. However, the findings of this study has some positive reference value to researches and prediction of components of SOC in other regions.

Key words Paddy soil; Organic carbon components; Influencing factors; Prediction model

(责任编辑：檀满枝)

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



9 770564 392156