

DOI: 10.5846/stxb201501190152

王玺洋, 于东升, 廖丹, 潘剑君, 黄标, 史学正. 长三角典型水稻土有机碳组分构成及其主控因子. 生态学报, 2016, 36(15): - .

Wang X Y, Yu D S, Liao D, Pan J J, Huang B, Shi X Z. Characteristics of typical paddy soil organic carbon fractions and their main control factors in the Yangtze River Delta. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(15): - .

长三角典型水稻土有机碳组分构成及其主控因子

王玺洋^{1,3}, 于东升^{1,3,*}, 廖丹^{1,3}, 潘剑君², 黄标^{1,3}, 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学院, 南京 210095

3 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 准确把握水稻土有机碳组分构成特征及其主控因子, 对量化评价土壤有机碳质量和未来演变趋势具有重要意义。通过室内土壤呼吸培养实验结合有机碳三库一级动力学方程, 模拟得到长三角地区典型水稻土剖面(0—100 cm)各土层有机碳组分含量及其分布特征; 并利用主成分分析获取主控因子, 建立有机碳组分回归预测模型。结果表明: 水稻土活性碳、慢性碳和惰性碳含量随剖面深度增加而降低, 上层土壤(0—40 cm)有机碳组分含量下降速度明显快于下层土壤(40—100 cm); 水稻土活性碳构成比例不超过 5.3%, 慢性碳构成比例大于活性碳与慢性碳比例之和, 达到 60% 以上, 水稻土有机碳总量变异主要取决于慢性碳和惰性碳组分变异。因此, 水稻土固碳重点在于慢性和惰性组分。同时, 研究还发现水稻土类型和剖面深度主要在表层对有机碳组分含量和比例构成产生显著影响, 土壤有机碳量、全氮和 pH 是影响水稻土有机碳组分含量分异的主控因子, 利用主控因子可较好预测水稻土有机碳组分含量。

关键词: 土壤有机碳组分; 主控因子; 预测模型; 水稻土; 长三角地区

Characteristics of typical paddy soil organic carbon fractions and their main control factors in the Yangtze River Delta

WANG Xiyang^{1,3}, YU Dongsheng^{1,3,*}, LIAO Dan^{1,3}, PAN Jianjun², HUANG Biao^{1,3}, SHI Xuezheng^{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 Resource and Environmental Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China

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

Abstract: Paddy soil is a key type of cultivated soil in China. Precisely understanding the characteristics and main control factors of paddy soil organic carbon fractions is critical to quantitatively evaluating soil organic carbon (SOC) quality and monitoring its trends. We collected 65 soil samples from 13 soil profiles associated with three major paddy soil types in the Yangtze River Delta, including 5 hydromorphic paddy soil profiles, 3 percogetic paddy soil profiles, and 5 degleyed paddy soil profiles. Through long-term soil incubation experiments, the SOC decomposition amounts were measured at different times (1, 3, 5, 7, 10, 15, 22, 29, 36, 43, 50, 60, 70, 84, and 99 days); the amount of resistant SOC (C_r) was determined by the acid hydrolysis method, and the amount of active SOC (C_a), slow SOC (C_s), and resistant SOC (C_r) were simulated by fitting a three-pool first-order equation to the above data. Distribution characteristics of paddy soil organic fractions in profiles (0—100 cm) were analyzed and illuminated, and main control factors on SOC fractions were obtained through principal component analysis. Finally, a regression model was established to predict SOC fractions from the

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项 (XDA05050507); 自然科学基金 (41571206); 国家重点基础研究发展计划“973”项目 (2010CB950702)

收稿日期: 2015-01-19; 网络出版日期: 2015-00-00

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

main control factors. Results showed that the amount of active SOC(C_a), slow SOC(C_s), and resistant SOC(C_r) declined with the increase of soil profile depth, and that the rate of SOC fraction decrease in the upper layer (0—40 cm) was faster than in the subsoil (40—100 cm). The type of paddy soil did not influence the amount of soil organic carbon fractions significantly. The C_a pool comprised less than 5.3% of the total SOC, and the proportion of the C_r pool, which was more than 60% in total SOC, was larger than the combined proportions of the C_a and C_s pools. The amount of SOC fractions was significantly higher in topsoil (0—20 cm) than in other soil horizons. The variation in total SOC was mainly due to the C_s and C_r contributions. Therefore, more attention should be paid to the fractions of C_s and C_r when maximizing carbon sequestration in soils. The type of paddy soil and the depth primarily influenced the organic carbon composition of the topsoil. This research found that total SOC, total nitrogen (TN), and pH were the main control factors influencing the differences in SOC fraction amounts, and they can be used to predict SOC fraction amounts to more comprehensively understand the SOC cycle. Determining the amounts and composition proportions of SOC fractions can contribute significantly to mastering soil organic carbon pool dynamics. Creating a cost effective model to predict SOC fractions is meaningful and urgent. According to our research, SOC fractions can be predicted from the basic physical and chemical properties of soils.

Key Words: SOC fractions; main control factors; prediction model; paddy soils; Yangtze River Delta

水稻土作为我国主要耕作土壤已有 7000 多年历史,其面积已占到全国总耕地面积的 25%和世界水耕土壤面积的 23%^[1],研究水稻土有机碳库对于发展农业生产和调控大气碳源、汇具有双重作用^[2]。当前,水稻土有机碳的构成特征及影响因素研究仍显不足,究其原因主要是对多组分复合体构成的有机碳认识不够。依据土壤有机碳分解速率,国际上一般将土壤有机碳库分为活性碳(C_a)、慢性碳(C_s)和惰性碳(C_r)^[3-4]三种组分碳库。有机碳活性组分在土壤中表现最为活跃,直接反映了土壤养分循环和供应状况^[5];慢性碳和惰性碳在土壤中较难分解而可以长久保留,对土壤固碳保肥尤为重要^[6]。因此,研究土壤有机碳库组分构成特征及其驱动力,不仅有利于定量化评价土壤有机碳库质量,而且对准确评估土壤有机碳未来演变趋势具有积极意义^[7]。

近年来国内外学者在土壤有机碳组分构成特征方面取得了一些研究进展。Yang 等^[7]对温带和亚热带森林土壤的研究表明,活性、慢性和惰性碳库比例分别为 1%—3%、25%—65%和 35%—80%。杨慧等^[8]通过土壤培养实验和方程拟合,对桂林岩溶区土壤的研究结果表明,活性碳、慢性碳和惰性碳构成比例分别为 1.82%—2.71%、33.91%—45.47%和 51.82%—64.01%,农田土壤有机碳较灌丛和林地更难分解。Jha 等^[9]对有机碳组分比例进行分析,得出惰性碳组分比例随深度增加而增加,有机碳输入多为活性碳。廖丹等^[10]研究了成都水稻土有机碳组分构成特征,结果显示,表层土壤(0—20 cm)有机碳组分含量显著高于亚表层土壤(20—40 cm),而土层间各组分占总有机碳含量的比例无显著差异。诸多土壤有机碳库组分构成特征研究取得的共同性认识可归纳为:活性碳库比例一般不超过 5%,但在慢性和惰性碳库构成比例上具有明显差别;有机碳组分构成特征随剖面深度会出现差异。

史学军等^[11]研究认为,决定土壤有机碳分解速率的主要因素是其自身理化性质和外源有机物。土壤有机碳库组分影响因素研究也表明,土壤有机碳库不同组分的分解会受到地理环境、凋落物特性、颗粒组成等因素影响。如:年均温越低,森林土壤的活性碳比例越小,有机碳库越稳定^[7]。土壤凋落物中的木质素可以阻碍有机碳组分的分解^[12]。土壤的粉粒和粘粒含量通过改变有机碳组分的构成比例对其分解与转化产生影响^[6,13];土壤全氮、全磷、pH、粉粒等理化指标均与其有机碳组分含量存在显著线性关系^[10]。也有研究认为,不同耕作方式也会影响土壤有机碳组分含量,如免耕和深耕可以增加活性碳含量,而翻耕则相反^[14]。

已有研究多集中于林地、草地和旱地表层土壤有机碳组分特征的研究,影响因素也局限于土地类型、环境因素、土壤机械组成方面,而对长期处于淹水和脱水循环交替作用下的水稻土而言,其有机碳库组分状况研究

明显不足。本文针对长三角典型地区水稻土,利用室内土壤有机碳培养实验和三库一级动力学方程拟合,获得水稻土剖面各土层有机碳组分数据,分析水稻土剖面有机碳组分特征及其影响因素,尝试建立水稻土有机碳组分预测模型,为水稻土有机碳循环模拟研究提供理论依据和技术参数。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域选在上海的金山、青浦和松江区(N30°46′—31°16′,E120°54′—121°23′)。该区地处长江三角洲冲积平原前端,北界长江,南临杭州湾,西接江、浙两省。境内平均海拔高度在4 m左右,地势较为平坦;气候类型属亚热带季风气候,光照充分,雨量充沛,且水、热同季,年均气温为15.7℃,年均降水量达1200 mm。良好的水热条件极有利于水稻的种植,研究区水稻种植历史悠久,潴育型、渗育型和脱潜型等典型水稻土发育完善,分布面积最广。

1.2 样品采集与分析方法

选取供试区面积分布最广、发育最为完善的3种主要水稻土类型,按照各类型水稻土分布面积比例,设置剖面样点13个。其中,潴育型水稻土、脱潜型水稻土分别布设5个样点,渗育型水稻土布设3个样点。统一划分土壤剖面为5个土层,每层20 cm,分层取样,总计65个土壤样品,取各类型不同土层水稻土样品5个用以模型验证。所有样品采集均在2010年10月水稻收割后完成。

土壤总有机碳(SOC)的测定采用重铬酸钾(浓硫酸)氧化-外加热法;土壤容重利用环刀重复3次取样,烘干法测定;土壤pH值测定采用电位法;全氮的测定采用半微量开氏法;土壤全磷采用HF-HClO₄-HNO₃消煮-钼锑抗比色法测定;土壤全钾采用HF-HClO₄-HNO₃消煮-火焰光度法测定;有效磷采用0.5 mol/L碳酸氢钠提取-钼锑抗比色法测定;速效钾采用1 mol/L中性醋酸铵浸提-火焰光度法测定;土壤质地采用吸管法(GB7845-87)测定(中国科学院南京土壤研究所,1978a)。土壤惰性碳(C_r)经6 mol/LHCL水解,再用重铬酸钾(浓硫酸)氧化-外加热法测定^[15]。

恒温培养法进行土壤呼吸实验^[16]:取过100目筛的风干土样100 g放入培养瓶,并调节其含水量为田间持水量的65%,通过培养瓶内的梨形瓶注入的0.5 mol/LNaOH来吸收土壤有机碳分解释放的CO₂,保持培养箱25℃恒温且黑暗条件100 d,定时通气,最后用0.5 mol/LHCL滴定计算CO₂的分解释放量,获得100 d内不同时间序列(1,3,5,7,10,15,22,29,36,43,50,60,70,84,99 d)有机碳的分解量。

1.3 数据处理与统计分析

土壤有机碳的三库一级动力学方程如下^[17]:

$$C_{\text{soct}} = C_a \times \exp(-ka \times t) + C_s \times \exp(-ks \times t) + C_r \times \exp(-kr \times t) \quad (1)$$

式中, C_{soct} 是时间 t 时刻的有机碳含量; C_a 、 K_a 表示土壤有机碳活性碳库含量(g/kg)及其分解速率(g/kg); C_s 、 K_s 表示土壤有机碳慢性碳库含量(g/kg)及其分解速率(day⁻¹); C_r 、 K_r 表示土壤有机碳惰性碳库含量(g/kg)及其分解速率(day⁻¹); K_a 、 K_s 、 K_r 与平均驻留时间(mean residue time, MRT)成倒数关系。由于土壤惰性碳平均驻留时间太长,不易获得,一般假定田间土壤惰性碳的平均驻留时间为1000年^[10]。利用公式(2)、(3)转化为惰性碳在实验室内平均驻留时间,得到 $K_r = 1/\text{MRT}_{\text{lab}}$ 。

$$\text{MRT}_{\text{lab}} = \text{MRT}_{\text{field}} / Q_{10} \quad (2)$$

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

式中, MRT_{lab} 表示惰性碳在实验室内平均驻留时间; $\text{MRT}_{\text{field}}$ 表示惰性碳的田间平均驻留时间; MAT 为研究区的年平均温度,取15.7℃; Q_{10} 为温度敏感系数,即土壤温度每升高10℃有机碳的增加量。

根据惰性碳实测值和呼吸培养实验得到的不同时间序列的有机碳分解量数据(C_{soct}),利用(1)式对土壤活性碳库(C_a)的大小及分解速率 K_a 、 K_s 进行拟合获取数据。慢性碳库(C_s)量计算方法如下:

$$C_s = C_{\text{soc}} - C_a - C_r \quad (4)$$

土壤有机碳组分含量及其分解速率数据利用 SAS9.3 的非线性回归进行拟合;利用 Origin8.5 制作土壤有机碳组剖面特征分布图;土壤剖面各层间有机碳组分差异性分析,影响因素主成分分析,回归分析以及验证点预测值与实验拟合值配对 T 检验均采用 SPSS18.0 进行;其它数据处理与分析采用 EXCEL2010 完成。

2 结果与讨论

2.1 不同类型水稻土剖面土壤理化性质统计特征

研究区 3 种典型水稻土剖面(0—100 cm)各土层基本理化性质测定结果的平均值(包括验证点数据)统计如表 1 所示。可见,各类型水稻土有机碳、全氮、全磷、有效磷和速效钾表层含量均高于剖面其他土层,其它理化指标随剖面深度无明显变化,但不同类型水稻土理化性质之间有差异。

2.2 不同类型水稻土有机碳组剖面分布特征

研究区三种典型类型水稻土的活性碳、慢性碳和惰性碳含量均表现出随剖面深度增加而下降的趋势,下层(80—100 cm)土壤碳组分平均含量较表层(0—20 cm)分别降低了 61.3%、77.4%和 63.0%(图 1),与其它非

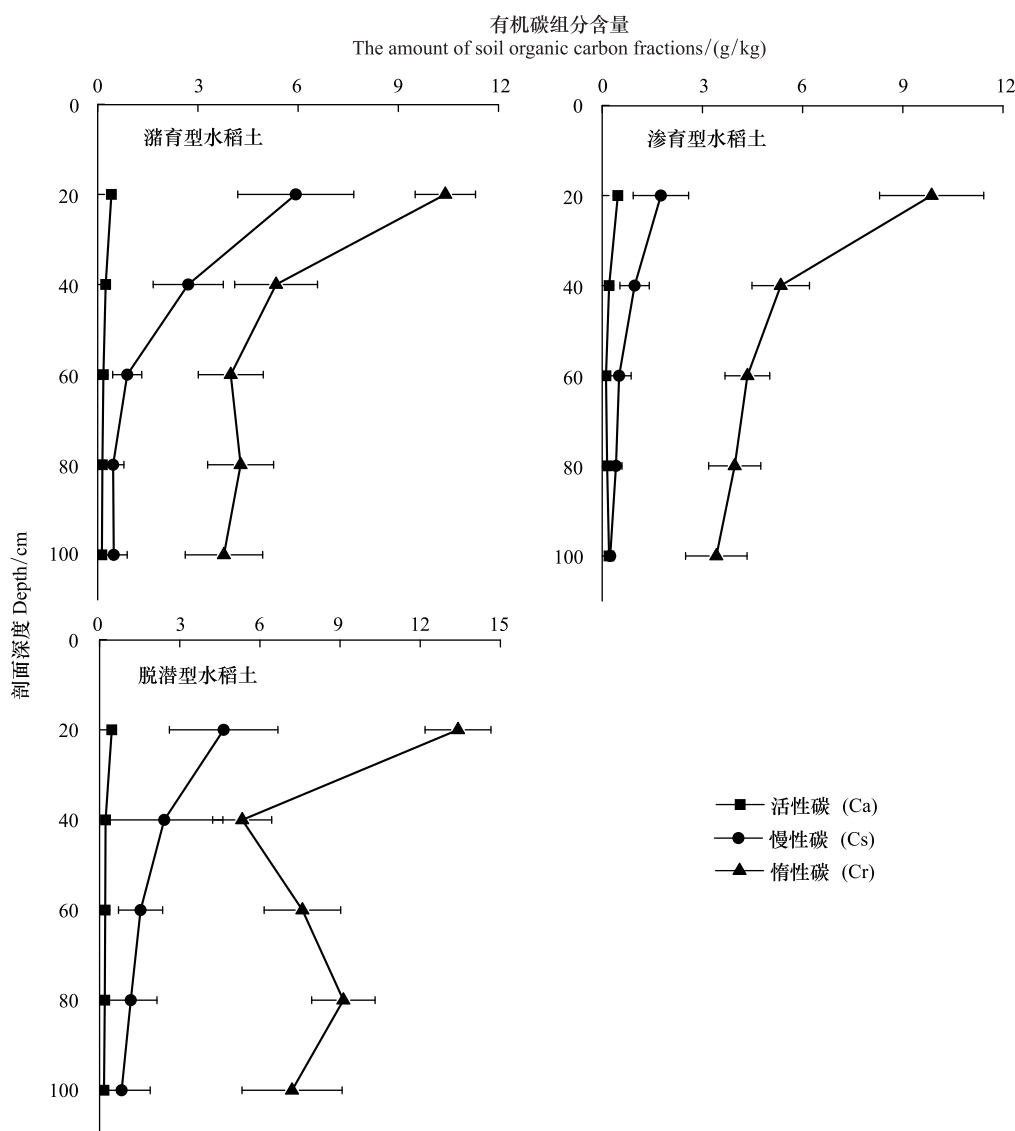


图 1 不同类型水稻土有机碳组分含量剖面分布

Fig.1 The distribution of SOC fractions amount in profiles of different paddy soils

表 1 各土层水稻土基本理化性质
Table 1 Basic physical and chemical properties of each layers in paddy soils

水稻土类型 Types of paddy soil	土层 Depth/ cm	有机碳 Organic carbon/ (g/kg)	容重 Bulk density/ (g/cm ³)	pH	全氮 Total N/ (g/kg)	全磷 Total P/ (g/kg)	全钾 Total K/ (g/kg)	有效磷 Available P/ (mg/kg)	速效钾 Available K/ (mg/kg)	颗粒组成/% Particle size composition		
										砂粒 Sand	粉粒 Silt	粘粒 Clay
淤育型 Hydromorphic paddy soil	0—20	17.7	1.2	6.3	1.7	2.7	26.0	52.8	147.6	6.8	66.5	26.6
	20—40	8.3	1.5	7.5	0.9	1.7	28.0	15.6	116.1	7.2	67.0	29.9
	40—60	5.0	1.5	7.5	0.7	1.3	28.1	4.4	122.0	6.7	64.8	28.5
	60—80	4.9	1.5	7.7	0.7	1.3	28.5	4.0	126.3	6.3	66.4	27.3
	80—100	4.4	1.5	7.8	0.6	1.4	28.0	3.6	121.4	6.4	68.4	25.2
渗育型 Petrogenic paddy soil	0—20	12.1	1.3	7.6	1.3	1.9	25.0	35.6	112.4	7.3	78.7	14.0
	20—40	6.5	1.5	8.0	0.7	1.4	25.7	2.6	79.0	3.7	83.4	12.8
	40—60	5.0	1.4	8.0	0.5	1.4	26.5	2.7	100.8	5.8	82.9	11.4
	60—80	4.5	1.4	8.1	0.5	1.4	25.8	3.4	95.6	7.1	82.5	10.4
	80—100	3.9	1.3	8.3	0.4	1.4	24.5	4.3	86.0	8.6	82.2	9.2
脱潜型 Degleyed paddy soil	0—20	18.5	1.2	6.8	1.9	2.4	26.2	37.3	151.7	6.0	67.8	26.1
	20—40	8.0	1.5	7.7	0.8	1.5	26.9	7.1	121.7	4.9	68.2	26.9
	40—60	9.3	1.5	7.7	0.8	1.3	27.4	3.4	142.0	5.9	65.1	29.0
	60—80	10.5	1.4	7.6	0.8	1.2	28.1	2.7	148.7	6.0	64.0	29.9
	80—100	8.2	1.5	7.8	0.7	1.2	28.2	3.2	149.7	5.0	66.3	28.7

水稻土类型土壤有机碳含量的剖面分布规律具有一致性^[18-20]。一般来说,可溶性有机碳向下迁移必然会受到矿质土壤的物理滞留及微生物的生化分解,造成下层土壤有机碳含量较上层低^[21]。不同类型的水稻土有机碳组分含量随深度下降的速度存在差异,除脱潜型水稻土惰性碳外,其它组分下降速度均表现为上层土壤(0—40 cm)>下层土壤(40—100 cm)(图 1),其中渗育型水稻土活性碳下降最快,潜育型水稻土慢性碳和惰性碳下降最快,脱潜型水稻土慢性碳和惰性碳下降最慢。

三种类型水稻土各土层有机碳组分含量均呈现:活性碳<慢性碳<惰性碳,与杨慧等对桂林岩溶区 3 种土壤(旱地、灌丛和林地)的研究结果具有一致性^[8,10];而邵月红^[22]在江西余江县水稻土和旱地土壤有机碳组分的研究中发现,慢性碳含量大于惰性碳含量。可能由于成土母质与用地类型的不同导致土壤理化性质及植被凋落物化学组成出现差异,进而产生土壤有机碳组分含量上的差异^[12]。

相同土层不同类型水稻土各有机碳组分含量也显示出了不同的差异性(图 1)。在 0—20 cm 土层,潜育型水稻土与渗育型水稻土的活性碳含量差异显著,脱潜型水稻土惰性碳含量与潜育型及渗育型的水稻土均有显著差异($P<0.05$);下层土壤(40—100 cm)各土层仅活性碳含量在部分类型水稻土间差异显著,其它均不显著($P<0.05$)。可见,不同类型水稻土有机碳组分含量仅在表层土壤(0—20 cm)及下层土壤的活性碳组分方面表现差异,水稻土亚类并未对所有土层的有机碳组分含量产生显著影响。不同亚类水稻土主要源于水分类型的不同而产生表层土壤微生物活性的差异,其中易分解的活性碳组分表现最为敏感。邵月红等^[22]研究认为,潜育型水稻土水分条件更有利于微生物分解有机碳而活性碳含量较潜育型和淹育型水稻土高。

仅考虑土层深度因素(表 2),表层水稻土(0—20 cm)有机碳组分含量显著高于其它土层,而下层土壤(40—100 cm)各土层有机碳组分含量与比例并无显著性差异,说明下层水稻土有机碳组分构成在长年耕作培育过程中易于达到稳定状态;活性碳比例较小,随土层加深无显著变化,而惰性碳和慢性碳由于理化性质较活性碳稳定而得以更长久驻留^[6],从而保持较大比例。在旱地土壤中,活性碳含量在表层和中下层无明显差异,且活性碳比例小于同一地区水稻土,慢性碳比例则相反^[22]。王充^[23]对东北黑土、暗棕壤、草甸土和沼泽土 4 种类型土壤有机碳组分构成特征研究认为,土壤有机碳组分含量占总有机碳比例与剖面深度并无显著关系。说明季节性干湿交替的水稻土更易于对表层土壤有机碳组分构成产生影响。

表 2 水稻土剖面各土层有机碳组分含量及其比例差异性分析

Table 2 Difference analysis on the amount and proportion of SOC fractions in all layers of each paddy soil profile

土层 Depths/cm	活性碳含量 The amount of $C_a/(g/kg)$	慢性碳含量 The amount of $C_s/(g/kg)$	惰性碳含量 The amount of $C_r/(g/kg)$	活性碳比例 The proportion of $C_a/\%$	慢性碳比例 The proportion of $C_s/\%$	惰性碳比例 The proportion of $C_r/\%$
0—20	0.44±0.06aA	5.02±3.53aA	11.75±2.68aA	2.65±0.60a	27.50±12.04aA	69.85±11.64bB
20—40	0.23±0.07bB	2.44±1.64abAB	5.34±1.41bB	3.16±1.37a	28.38±12.34aA	68.47±11.64bB
40—60	0.18±0.05cdeBCDE	1.16±0.87bcAB	5.68±5.18bB	3.45±1.95a	17.32±9.98bB	79.22±10.11abAB
60—80	0.17±0.05deDE	0.78±0.76cdeB	6.49±4.77bB	3.11±1.88a	10.24±6.10bcB	86.65±6.48aA
80—100	0.15±0.05eE	0.62±0.76cdeB	5.33±4.85bB	3.33±1.66a	9.08±6.00cB	87.59±5.66aA

同列不同大写字母表示差异达极显著($P<0.01$),不同小写字母表示差异达显著($P<0.05$)

总体上看,水稻土有机碳组分含量剖面分布特征与其他类型土壤具有一致性,随剖面深度增加而降低。水稻土有机碳库中,惰性碳所占比例最大,慢性碳次之,活性碳所占比例较小;其中脱潜型水稻土所含惰性碳和慢性碳含量较高而固碳能力最强。不同类型水稻土及剖面深度的有机碳组分含量与比例主要在表层土壤出现显著差异,其它土层并无明显变化,活性碳比例与水稻土剖面深度无关。

2.3 影响水稻土有机碳组分构成的主控因子分析

对水稻土 65 个土壤样品理化指标进行主成分分析的结果表明,前 4 个主成分因子的累积贡献率已经超过 83%,完全达到分析要求;通过观察碎石图(图 2),前 3 个主成分位于陡峭部分,表明该三因子最重要,提取获得主成分载荷矩阵(表 3)。

第一主成分 Y_1 的因子在水稻土 SOC 含量、容重、pH 值和全氮量上有较大载荷,且相关系数绝对值达 0.78 以上,这一主成分对有机碳组分含量的贡献率为 37.8%,说明土壤 SOC 含量、容重、pH 值和全氮量是影响水稻土有机碳组分含量的主导因素;第二主成分 Y_2 在水稻土粉粒和粘粒含量上载荷较大,相关系数分别为 -0.75 和 0.81,对有机碳组分的贡献率是 22.9%,是影响水稻土有机碳组分含量的次要因素;第三主成分主要在碳氮比上载荷较大,其对有机碳组分含量的贡献率为 14.0%,对水稻土有机碳组分含量影响最小;其他主成分对有机碳组分含量的贡献率合计为 23.8%,说明水稻土理化性质对有机碳组分含量影响因素较多,且主控因子明显(表 3)。

对以上获取的主控因子与水稻土 65 个土壤样品有机碳组分含量进行相关分析发现,水稻土有机碳含量、全氮量均与其活性碳、慢性碳和惰性碳含量呈极显著正相关,且碳氮比也与之呈显著正相关;容重和 pH 值与三种碳组分含量呈极显著负相关,土壤中粉粒与粘粒百分比仅与惰性碳含量呈极显著正相关(表 4)。显然,适当提高水稻土中 C/N 均有助于水稻土三种有机碳组分的固定,这是因为土壤中微生物活性会随 C/N 值的升高而出现降低^[24]。一定程度上降低土壤容重和 pH 值也将有利于保持水稻土有机碳组分含量,降低土壤容重可以促进水稻根系生长,补充土壤有机碳量^[25]。低 pH 条件可能会抑制微生物对水稻土有机碳组分的分解^[13],土壤颗粒中,粒径较小的粉粒和粘粒通过吸附作用将有机碳包裹起来对土壤有机碳组分的分解产生阻碍^[13]。

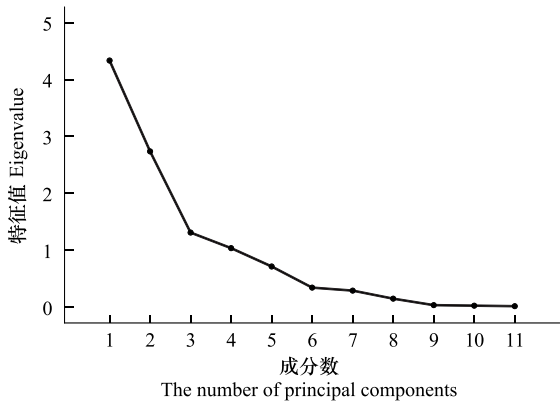


图 2 碎石图
Fig.2 Screen plot

表 3 主成分载荷矩阵

Table 3 Principal components loading matrix			
影响因素 Influencing factors	主成分 Y_1 Principal components Y_1	主成分 Y_2 Principal components Y_2	主成分 Y_3 Principal components Y_3
有机碳 Organic carbon	0.92	-0.01	-0.15
容重 Bulk density	-0.81	0.26	0.24
pH 值	-0.78	0.10	0.05
碳氮比 C/N	0.51	0.13	-0.69
全氮量 Total N	0.91	-0.10	0.12
全磷量 Total P	0.48	-0.66	0.48
全钾量 Total K	-0.09	0.60	0.53
有效磷含量 Available P	0.60	-0.58	0.42
速效钾含量 Available P	0.55	0.56	0.34
砂粒含量 Sand content	-0.10	-0.01	0.55
粉粒含量 Silt content	-0.48	-0.75	-0.12
粘粒含量 Clay content	0.46	0.81	-0.00

表 4 水稻土有机碳组分含量与其主控因子的相关性分析

Table 4 Correlation analysis for the amount of organic carbon fractions and principal factors in paddy soils							
项目 Items	有机碳 SOC/ (g/kg)	全氮 Total N/ (g/kg)	碳氮比 C/N	容重 Bulk density/ (g/cm ³)	pH	粉粒含量 Silt content/%	粘粒含量 Clay content/%
C _a	0.68 **	0.75 **	0.26 *	-0.62 **	-0.54 **	0.06	-0.08
C _s	0.76 **	0.82 **	0.27 *	-0.64 **	-0.68 **	-0.23	0.23
C _r	0.94 **	0.81 **	0.70 **	-0.71 **	-0.41 **	0.33 **	0.37 **

* 表示 0.05 水平上显著相关; * * 表示 0.01 水平上显著相关

以上分析表明,水稻土有机碳含量、全氮量、容重和 pH 可作为水稻土有机碳组分分异的主控因子。

2.4 水稻土有机碳组分含量多元回归预测及检验

利用其中 60 个土壤样品数据进行逐步回归分析,建立水稻土活性碳(C_a)、慢性碳(C_s)和惰性碳(C_r)含量与其主要影响因子的回归方程:

$$C_a = 0.189X_2 - 0.012X_4 + 0.003X_5 + 0.165 \quad (R^2 = 0.728) \tag{5}$$

$$C_s = 2.938X_2 - 0.908X_3 + 6.016 \quad (R^2 = 0.720) \tag{6}$$

$$C_r = 1.022X_1 - 3.342X_2 + 0.924X_3 - 6.197 \quad (R^2 = 0.924) \tag{7}$$

式中, X_1 表示 SOC, X_2 表示 TN, X_3 表示 pH, X_4 表示 TK, X_5 表示粉粒含量。回归模型中, X_1 、 X_2 、 X_3 三个自变量均为第一主成分因子,活性碳影响因素较复杂,其中全氮量变化斜率最大,更显著地影响水稻土有机碳组分含量,这与主成分分析的解释基本吻合,综合认为 SOC、TN、pH 是水稻土有机碳组分含量的主控因子。

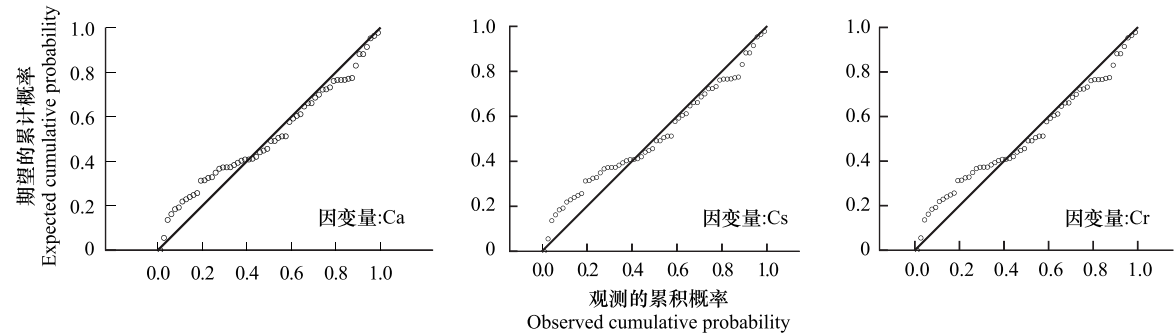


图3 标准化残差的累积概率图
Fig.3 Plots of the cumulative probability standardized residuals

通过对回归模型进行 F 检验,得到方差分析的显著性概率(Sig.值)远小于 0.05,说明线性回归效果显著;随机变量残差服从正态分布,回归模型通过显著性检验(图 3)。所建碳组分含量预测模型(5)、(6)、(7)决定系数(R^2)分别达到 0.728、0.720 和 0.924,拟合优度较高;利用预测模型计算所得样点有机碳组分含量数据与其相应的实验拟合数据进行配对 T 检验结果表明,模型预测值与实验拟合值并无显著差异($P<0.05$)(表 5)。利用土壤理化特性可以较准确地定量化预测水稻土有机碳组分含量。

表 5 有机碳组分含量实验拟合值与预测值配对 T 检验结果

Table 5 Results of paired T test between the experimental and predicted values on SOC fractions amount						
配对变量 Paired variables	均值 Mean	标准差 Standard deviation	相关系数 Correlation coefficient	t 统计量	自由度 df	显著性水平 Sig. (2-tailed)
C_a	0.02	0.06	0.57	0.61	4	0.57
C_s	0.64	1.39	0.89	1.03	4	0.36
C_r	-0.63	1.36	0.96	-1.04	4	0.36

水稻土有机碳组分的定量化预测不仅可以丰富土壤碳循环的模拟研究,而且有助于在土壤有机碳库质量评价中把握有效部分及未来演变趋势^[7]。利用主控因子对土壤有机碳组分含量进行预测还可以解决呼吸培养实验耗时费力、模型参数输入的盲目性及不确定性^[26]等问题。余涛等^[27]研究认为,年均降雨量、年均气温和土壤 pH 是驱动我国水稻土有机碳含量分布差异的主要因子,人为管理方式次之。但本研究区处于长三角冲积平原,气候条件及农田管理措施差异较小,长年耕作发育的水稻土理化性质与其有机碳组分含量具有较强相关性,建立的多元回归预测模型可用于该地区同类型土壤有机碳组分预测。

3 结论

水稻土活性碳、慢性碳和惰性碳含量整体上随剖面深度增加而下降,且不同土层下降速度不同,上层土壤

(0—40 cm)有机碳组分含量下降速度明显快于下层土壤(40—100 cm),其中渗育型水稻土活性碳含量下降最快,潜育型水稻土慢性碳和惰性碳含量下降最快;水稻土有机碳库组分的含量表现为:惰性碳>慢性碳>活性碳,其中活性碳构成比例不超过 5.3%,惰性碳比例大于活性碳与慢性碳比例之和,达到 60%以上;水稻土类型主要对表层土壤有机碳组分含量和比例构成产生显著影响,其它土层无明显变化。

仅考虑土层深度因素,表层(0—20 cm)水稻土有机碳组分含量显著高于其它土层,上层土壤慢性碳比例显著高于下层土壤,惰性碳比例则相反,而活性碳比例及下层水稻土有机碳组分含量不受土层深度影响;总有有机碳变异主要来源于慢性碳和惰性碳组分变异,因此水稻土固碳的重点在于慢性和惰性组分。

影响水稻土有机碳组分含量分异的主控因子为土壤有机碳总量、全氮量和 pH,其中全氮量影响最显著。适当提高水稻土 C/N 值和降低土壤容重均有利于水稻土固碳。利用主控因子所得回归方程对水稻土慢性碳和惰性碳含量解释度较高,可以有效地定量化预测水稻土有机碳组分含量,对准确把握水稻土有机碳循环模拟研究具有重要意义。

参考文献(References):

- [1] 李庆逵. 中国水稻土. 北京: 科学出版社, 1992: 1-514.
- [2] Smith P. Carbon sequestration in croplands: the potential in Europe and the global context. *European Journal of Agronomy*, 2004, 20(3): 229-236.
- [3] Parton W J, Schimel D S, Cole C V, Ojima D S. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in great plains grasslands. *Soil Science Society of America Journal*, 1987, 51(5): 1173-1179.
- [4] Nicolardot B, Molina J A E, Allard M R. C and N fluxes between pools of soil organic matter: model calibration with long-term incubation data. *Soil Biology and Biochemistry*, 1994, 26(2): 235-243.
- [5] 倪进治, 徐建民, 谢正苗. 土壤生物活性有机碳库及其表征指标的研究. *植物营养与肥料学报*, 2001, 7(1): 56-63.
- [6] Wiesmeier M, Schad P, von Lützow M, Poeplau C, Spörlein P, Geuß U, Hangen E, Reischl A, Schilling B, Kögel-Knabner I. 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.
- [7] Yang L, Pan J, Shao Y, Chen J M, Ju W M, Shi X, Yuan S. Soil organic carbon decomposition and carbon pools in temperate and sub-tropical forests in China. *Journal of Environmental Management*, 2007, 85(3): 690-695.
- [8] 杨慧, 张连凯, 曹建华, 于爽. 桂林毛村岩溶区不同土地利用方式土壤有机碳矿化及土壤碳结构比较. *中国岩溶*, 2011, 30(4): 410-416.
- [9] Jha P, De A, Lakaria B L, Biswas A K, Singh M, Reddy K S, Rao A S. 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.
- [10] 廖丹, 于东升, 赵永存, 王宁, 张海东, 潘剑君, 史学正. 成都典型区水稻土有机碳组分构成及其影响因素研究. *土壤学报*, 2015, 52(3): 49-59.
- [11] 史学军, 陈锦盈, 潘剑君, 孙波, 李忠佩, 遆超普, 张黎明. 几种不同类型土壤有机碳库容大小及周转研究. *水土保持学报*, 2008, 22(6): 123-127.
- [12] 史学军, 潘剑君, 陈锦盈, 杨志强, 张黎明, 孙波, 李忠佩. 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.
- [13] 李顺姬, 邱丽萍, 张兴昌. 黄土高原土壤有机碳矿化及其与土壤理化性质的关系. *生态学报*, 2010, 30(5): 1217-1226.
- [14] Zhao H, Lv Y Z, Wang X K, Zhang H L, Yang X M. Tillage impacts on the fractions and compositions of soil organic carbon. *Geoderma*, 2012, 189-190: 397-403.
- [15] Paul E A, Morris S J, Conant R T, Plantea A F. Does the acid hydrolysis-incubation method measure meaningful soil organic carbon pools?. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70(3): 1023-1035.
- [16] Collins H P, Elliott E T, Paustian K, Bundy L G, Dick W A, Huggins D R, Smucker A J M, Paul E A. Soil carbon pools and fluxes in long-term corn belt agroecosystems. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(2): 157-168.
- [17] Collins H P, Christenson D R, Blevins R L, Bundy L G, Dick W A, Huggins D R, Paul E A. Soil carbon dynamics in corn-based agroecosystems: results from carbon-13 natural abundance. *Soil Science Society of American Journal*, 1999, 63(3): 584-591.
- [18] 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.

- [19] 李辉, 张军科, 江长胜, 郝庆菊, 吴艳, 谢德体. 耕作方式对紫色水稻土有机碳和微生物生物量碳的影响. 生态学报, 2012, 32(1): 247-255.
- [20] 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(2): 425-433.
- [21] Rumpel C, Kögel-Knabner I. Deep soil organic matter—a key but poorly understood component of terrestrial C cycle. Plant and Soil, 2011, 338(1/2): 143-158.
- [22] 邵月红, 潘剑君, 孙波, 李海鹰. 农田土壤有机碳库大小及周转. 生态学杂志, 2006, 25(1): 19-23.
- [23] 王充. 典型黑土区农田土壤有机碳库特征及组分模拟研究. 北京: 中国科学院大学, 2014.
- [24] 徐阳春, 沈其荣, 冉炜. 长期免耕与施用有机肥对土壤微生物生物量碳、氮、磷的影响. 土壤学报, 2002, 39(1): 89-96.
- [25] 张玉屏, 朱德峰, 林贤青, 焦桂爱, 黄群. 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.
- [26] Gijssman A J, Hoogenboom G, Parton W J, Kerridge P C. Modifying DSSAT crop models for low-input agricultural systems using a soil organic matter-residue module from century. Agronomie, 2002, 94(3): 462-474.
- [27] 余涛, 杨忠芳, 侯青叶, 夏学齐, 宗思锋, 李彪. 我国主要农耕区水稻土有机碳含量分布及影响因素研究. 地学前缘, 2011, 18(6): 11-19.