

江汉平原典型农业灌排单元土壤有机碳密度分布特征

周黎¹, 冯伟², 易军^{1,3}, 刘目兴^{1,3}, 刘秀芸¹, 陈露¹, 庄道珩¹, 张海林^{1,3}

(1.地理过程分析与模拟湖北省重点实验室, 武汉 430079;

2.华中师范大学出版社, 武汉 430079; 3.华中师范大学可持续发展研究中心, 武汉 430079)

摘要: 农田土壤有机碳库是陆地生态系统最重要的土壤碳库之一, 明晰农田土壤有机碳的空间分布特征与影响机制, 可为农田土壤肥力及固碳能力评价提供采样依据和理论基础。以江汉平原典型农业灌排单元(面积 45 hm²)为研究对象, 测定了 104 个样点 0—200 cm 深度范围内 1 560 个土壤样品的有机碳含量, 并计算碳密度, 揭示土壤有机碳密度的空间分布特征, 并分析耕作方式和耕作历史对其分布的影响。结果表明: (1) 0—200 cm 农田土壤剖面内, 20, 200 cm 厚度土层有机碳密度的均值变化范围分别为 1.75~3.77, 11.67~34.24 kg/m², 随着土层深度的增加, 农田土壤有机碳密度先急剧降低后缓慢增加, 且 100—200 cm 土层的有机碳密度约占整个土壤剖面的 45.26%, 深层有机碳储量需引起重视; (2) 在灌排单元尺度上, 0—20 cm 土层和 0—200 cm 剖面有机碳密度均具有较强空间自相关性, 表明成土母质和地形等结构性因素是影响灌排单元尺度土壤有机碳空间分布特征的主导因子; (3) 耕作方式和耕作历史影响农田土壤的有机碳密度, 稻田所有土层的有机碳密度均高于旱地, 0—200 cm 剖面的有机碳密度是旱地的 1.31 倍; 老稻田所有土层的有机碳密度均高于新稻田; 林地改稻田和旱地改稻田样地在 0—200 cm 剖面有机碳总密度差异较小, 但林地浅层土体的碳密度更大; 合理的增加稻田面积是快速提高农田碳储量的有效途径之一; (4) 灌排单元尺度农田土壤有机碳密度的代表性稳定深度为 180—200 cm, 在进行土壤有机碳密度调查时应尽量延伸采样深度。研究结果为提高农田土壤有机碳密度估算的准确性与采样设计的合理性, 以及农田土壤的固碳能力评价提供了科学依据。

关键词: 农田碳密度; 稻田; 旱地; 林地; 耕作历史; 江汉平原

中图分类号: S153.6

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)06-0213-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2021.06.029

Distribution Characteristics of Soil Organic Carbon Density Under a Typical Agricultural Irrigation-Drainage Unit in Jiangnan Plain

ZHOU Li¹, FENG Wei², YI Jun^{1,3}, LIU Muxing^{1,3},

LIU Xiuyun¹, CHEN Lu¹, ZHUANG Daoheng¹, ZHANG Hailin^{1,3}

(1.Hubei Key Laboratory for Geographical Process Analyzing & Modeling, Wuhan 430079; 2.Central China Normal University Press, Wuhan 430079; 3.College of Urban and Environmental Sciences, Central China Normal University, Wuhan 430079)

Abstract: Farmland soil organic carbon pool is one of the most important soil carbon pools in terrestrial ecosystem. Clarifying the spatial distribution characteristics and influence mechanism of farmland soil organic carbon can provide sampling and theoretical basis for the evaluation of soil fertility and carbon sequestration capacity. Taking a typical agricultural irrigation and drainage unit (area: 45 hm²) in the Jiangnan plain as the research object, the soil organic carbon contents (SOC) of 1 560 soil samples in 104 sites with the depth of 0—200 cm were measured, and the soil carbon density (SOCD) was calculated. We revealed the spatial characteristics and the distribution patterns of soil organic carbon density, and analyzed the influence of cultivation mode and history on its distribution. The results showed that: (1) In the 0—200 cm soil profile, the mean variation of SOCD in the 20 cm and 200 cm soil layer was 1.75~3.77 kg/m² and 11.67~34.24 kg/m², and the SOCD decreased sharply at first and then increased slowly as the increase of soil depth. The SOCD in

收稿日期: 2021-05-01

资助项目: 国家自然科学基金项目(41601215, 41771261); 湖北省自然科学基金项目(2016CFA026, 2019CFB766); 华中师范大学中央高校基本科研业务费项目(CCN20QN030, CCNU20TD008)

第一作者: 周黎(1996—), 女, 安徽合肥人, 硕士研究生, 主要从事土壤水文研究。E-mail: 15375517096@163.com

通信作者: 张海林(1976—), 男, 湖北随州人, 博士, 副教授, 主要从事土壤水文研究。E-mail: hailzhang@mail.ccnu.edu.cn

100—200 cm soil layer accounted for about 45.26% of the whole soil profile. Therefore, we should pay more attention to the deep-layer SOCD. (2) The SOCD in 0—20 cm and 0—200 cm soil layer under an Irrigation-Drainage Unit had strong spatial autocorrelation, indicating that structural factors such as soil parent material and topography were the dominant factors affecting the spatial distribution of SOCD under an Irrigation-Drainage Unit. (3) The SOCD among different cultivation modes and history were significantly different. It showed that the SOCD of all soil layers in paddy field was higher than that of upland field. The SOCD of was 1.31 times that of upland field in the 0—200 cm, and the old paddy field was higher than the new paddy field in all soil layers. However, the difference between the total SCOD of the woodland to paddy field and the SCOD of the dryland to paddy field was relatively small in the 0—200 cm, while the higher SOCD was observed in woodland than dryland. The above shows that increasing the area of paddy field is one of the effective ways to rapidly increase farmland carbon storage. (4) The representative stable depth of SOCD at the scale of irrigation and drainage units was 180—200 cm, and the sampling depth should be extended as deep as possible when we investigated SOCD. These results provide a scientific basis for improving the accuracy of estimation of SOCD and the rationality of sampling design, as well as the evaluation of soil carbon sequestration capacity.

Keywords: soil organic carbon density; paddy field; upland field; woodland field; cultivation history; Jiangnan Plain

农田生态系统是一个巨大的碳库,其土壤所贮存的碳占全球陆地碳储量的 8%~10%。在农田碳库中,有机碳密度表征单位面积一定深度的土层中土壤有机碳储量,它不仅是衡量土壤肥力和质量的重要指标,且其微小变化显著影响着全球碳循环过程^[1]。因此,理解农田碳密度的变化特征对于调控生态系统碳平衡和缓解温室效应具有重要意义^[2]。

据估算^[3],中国农田土壤有机碳储量约为 7.03 Pg,占全球农田碳库的 8.8%~17.6%;提高我国农田土壤有机碳水平对于早日实现碳达峰和碳中和目标具有重要现实意义^[4]。而准确量化农田碳密度是掌握现有碳储量现状、设立农田土壤有机碳目标水平的前提。由于表层土壤的有机碳水平高,且与作物生长密切相关,因此有关农田碳密度的研究主要集中于表层(0—20 cm)或 0—100 cm 土层^[5-7]。姜蓝齐等^[6]估算了松嫩平原农田表层土壤碳密度约为 1.61 kg/m²,郭洋等^[7]研究了中国西北干旱区农田 0—100 cm 剖面土壤密度约为 8.33 kg/m²。然而,土壤碳密度在很大程度上受采样深度影响。郝翔翔等^[8]研究表明,0—200 cm 土层的有机碳密度比 0—100 cm 土层高出 29.2%;Batties^[9]研究发现,若将 100—200 cm 土层的数据计算在内,全球有机碳估算值增加了 60%;Kalbitz 等^[10]研究认为,表层土壤有机碳的获得可以抵消深层碳的损失,并建议将深层土壤纳入全球碳核算计划。表明深层土壤的有机碳密度也不容忽视。

江汉平原区位于湖北省中南部,是长江中下游典型的农业种植区,灌排单元是其该地区典型的独立水

文单元。作为湖北乃至全国重要的粮食生产基地,其有机碳分布特征也备受关注^[11-13]。考虑到表层土壤的有机质含量与作物生长关系最为密切,王玉竹等^[11]、张涛^[13]探究了江汉平原表层土壤有机碳密度分布与变化特点,但并未关注深层有机碳储量问题;杨军等^[12]采取“单位土壤碳量”方法估算了江汉平原 0—180 cm 土层的平均有机碳密度,但其未比较不同类型农田的差异,而农田类型是影响有机质密度的重要因子。另外,近些年来江汉平原也普遍存在农田利用类型转变现象^[14],特别是旱地改稻田的转变模式。大量研究^[15-16]表明,土地利用方式转变会影响农田碳输入和转化过程,进而改变其分布特征。有研究^[15]发现,天然次生林转变为农田后 0—100 cm 土层土壤有机碳密度平均降低 35%;贾树海等^[16]研究表明,在旱地改种水稻年限较短时(3 年内),土壤有机碳平均降低 26.53%,而在改种 5~25 年间,稻田各土层有机碳密度均大于旱田。然而,针对农田类型转变对土壤有机碳密度影响的研究在江汉平原地区尚缺少相关报道。一般来说,独立水文单元是开展水土过程研究的基础子单元,而灌排单元和小流域分别是平原河网区和山地/丘陵区独立水文单元。灌溉和降雨的发生将驱动有机碳的垂直迁移,而频繁的灌排作用会显著改变土壤的通气状况,进而影响有机碳的转化,最终改变土壤有机碳的分布特征,目前对于灌排单元尺度的有机碳储量研究还相对缺乏。江汉平原是典型的平原河网区,以其典型灌排单元农田为对象,通过调查深层剖面的土壤有机碳密度,揭示其空间分异

特征与影响因子,可为平原河网区有机碳密度调查设计与提高农田有机碳储量提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于江汉平原中南部的华中师范大学江汉平原农业监测站(29°90′N,112°34′E)(图 1a)。该地为亚热带季风气候,年平均日照时间 2 000 h 以上,年平均气温 16.1℃,1 月最低,7 月最高;年平均降水量 1 100~1 300 mm,降水主要集中在 4—9 月。

所选农业灌排单元试验区面积约 45 hm²,四周均为灌溉所需沟渠。土地利用类型以农田为主,农田

类型主要分为稻田和旱地(图 1b)。稻田耕种模式主要为单季中稻;旱地在夏季主要种植棉花和大豆,在冬季主要种植小麦和油菜。年平均地下水位埋深在 0.2~2.5 m,土壤母质以近现代河流冲积物和湖相沉积物为主。近些年来,由于受水稻种植机械化水平提高、高经济效益驱使等影响,近 20 年来,江汉平原存在大量的旱地或其他类型样地改稻田的现象。根据研究区内稻田耕作年限的差异,可以把稻田分为老稻田(水耕>100 年)和新稻田(水耕 2~20 年);而新稻田又可以根据改稻田之前的用地类型分为旱地改稻田和林地改稻田 2 类(图 1b)。

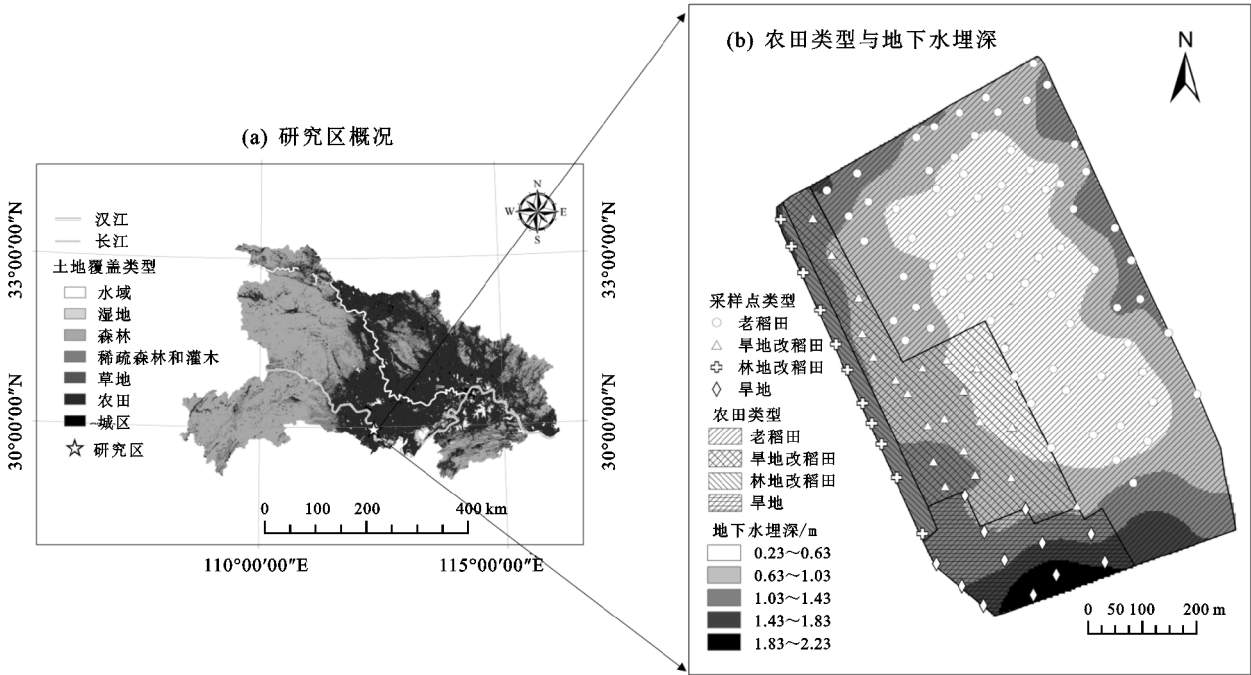


图 1 研究区地理位置、农田类型与年均地下水埋深

1.2 土样采集与测定

根据均匀布点的原则,在研究区共布设了 104 个采样点(图 1),采样点均在农田内。将采样点农田根据农田类型分类:旱地样点 11 个,稻田样点 93 个;其中,老稻田样点 64 个,旱地改稻田样点 21 个,林地改稻田样点 8 个。

土壤样本采集工作于 2018 年 5 月进行,在各采样点用土钻采集 0—200 cm 深度的土壤样品,其中 0—100 cm 的采样间隔为 10 cm,100—200 cm 的采样间隔为 20 cm。每个样点获取土壤样品 15 个,104 个采样点共采集扰动土壤样品 1 560 个。采集的样品风干过筛后进行土壤有机碳含量测定(重铬酸钾—硫酸氧化法)^[17]。另外,在旱地和各水耕年限稻田分别挖掘 1 个 100 cm 深的土壤剖面,用环刀分层采集土壤样品并测定土壤容重(烘干法)^[17];对于 100—200 cm 土层,假定其容重与 100 cm 深度相同。

1.3 土壤有机碳密度估算

土壤有机碳密度(soil organic carbon density, SOCD)是指单位面积一定深度的土层中土壤有机碳储量,计算公式为:

$$SOC_D = \frac{L_i \times SOC_i \times BD_i \times (1 - \frac{C_i}{100})}{100} \quad (1)$$

式中:SOCD_i为*i*层土壤有机碳密度(kg/m²);*L_i*为*i*层土壤的厚度(cm),其中 0—100 cm 土层厚度间隔为 10 cm,100—200 cm 间隔为 20 cm;SOC_{*i*}为*i*层土壤的有机碳含量(g/kg);BD_{*i*}为*i*层土壤的容重(g/cm³);*C_i*为*i*层土壤>2 mm 的砾石所占的体积百分比(%)。

1.4 地统计学分析

采用半方差函数进行空间自相关分析,克里金插值法进行空间插值。

估算半变异函数公式为:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^n [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (2)$$

式中: $\gamma(h)$ 为半方差函数; h 为样点空间间隔距离,称为步长; $Z(x_i)$ 为区域化变量 Z 在 X_i 处的实测值; $Z(x_i+h)$ 为与 X_i 距离为 h 处样点的实测值; $N(h)$ 为以 h 为步长的所有观测点的成对数目。由 $\gamma(h)$ 对 h 作图可得到半方差函数图,根据决定系数和残差 RSS 对半方差函数进行拟合得到最优的理论模型。

用于拟合该函数模型有线性模型、球状模型、指数模型等,本文对半变异函数的拟合主要采用指数模型和高斯模型。以指数模型为例,其计算公式为:

$$\gamma(h)=C_0+C(1-e^{-\frac{h^2}{a^2}})$$

(3)

式中: C_0 为块金值,是由试验误差、施肥管理、作物类型等随机因素引起的变异; C 为结构方差,是由气候、母质、地形等非人为结构性因素引起的变异。 $(C+C_0)$ 为基台值(半方差函数随间距递增到一定程度后出现的平稳值),表示系统内总的变异;块金值与基台值之比($C_0/(C_0+C)$)表示空间变异性程度(由随机性因素引起的空间变异性占系统总变异的比重)。当块金基台比 $<25\%$ 时,表示变量具有强烈的空间自相关性;块金基台比在 $25\% \sim 75\%$ 范围内,表示变量具有中等水平的空间自相关性;块金系数 $>75\%$,表示变量具有较弱的空间自相关性,变异主要由随机变异组成。

克里金插值计算公式为:

$$Z(x_0)=\sum_{i=1}^n\lambda_iZ(x_i)$$

(4)

式中: $Z(x_0)$ 表示预测的未知采样点的值; $Z(x_i)$ 表示预测的未知采样点周围的已知采样点的值; n 为已知采样点的个数; λ_i 为第 i 个采样点的权重。

1.5 稳定性深度分析

由于土壤的非均匀性质,模拟和预测土壤的特性时必须理解尺度的影响。土壤性质在空间上变化,并在一定距离内相关。Vachaud 等^[18]观测了不同时期土壤水分的近似空间排序发现,通过有限数量的土壤含水量测量可以对大面积区域范围的含水量进行估计。

为了确定土壤有机碳密度的稳定性深度,采用与 Vachaud 等^[18]提出的相似方法。计算相同测量时间下每个采样位置有机碳密度的相对误差为 δ_{ij} 。

$$\delta_{ij}=\frac{\theta_{ij}-\bar{\theta}_j}{\bar{\theta}_j}$$

(5)

式中: θ_{ij} 为每个采样位置的有机碳密度(kg/m^2); θ_j 为研究区内第 j 个深度的平均有机碳密度(kg/m^2)。

$$\bar{\delta}_i=\frac{1}{N}\sum_{j=1}^N\delta_{ij}$$

(6)

$$\sigma(\delta_i)=\sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{j=1}^N(\delta_{ij}-\bar{\delta}_i)^2}$$

(7)

式中:对于每个深度 j , δ_i 为其相对误差的均值; $\sigma(\delta_i)$

为标准差。

1.6 统计分析

本文采用单因素方差分析(ANOVA)结合最小显著性差异(LSD)检验土壤有机碳密度差异性。方差分析前,首先判断各组数值是否满足正态分布以及方差是否具有齐性,如果不满足,则对相应数值进行对数或指数转换以满足单因素方差分析的假定条件。以上分析通过 SPSS 25.0 统计软件完成,并使用 Origin 2018 软件制图。

2 结果与分析

2.1 有机碳密度描述性统计分析

研究区 0—200 cm 深度土壤剖面各土层有机碳密度有较大差异(表 1)。土壤有机碳密度最大值为 $8.36\text{ kg}/\text{m}^2$,位于 0—20 cm,最小值为 $0.30\text{ kg}/\text{m}^2$,位于 160—180 cm。整个剖面 20,200 cm 厚度土壤有机碳密度均值变化范围分别为 $1.75 \sim 3.77, 11.67 \sim 34.24\text{ kg}/\text{m}^2$,随着土层深度的增加呈现先急剧降低后缓慢增加的趋势,其中 100—200 cm 土层的有机碳密度约占 0—200 cm 剖面的 45.36% 。有机碳密度标准差变化范围为 $0.48 \sim 1.35\text{ kg}/\text{m}^2$,最大值和最小值分别在 0—20,80—100 cm 土层。有机碳密度变异系数处于 $25\% \sim 40\%$,属于中等变异强度;变异系数的最大值和最小值分别出现在 20—40,80—100 cm 土层。

表 1 土壤有机碳密度描述性统计

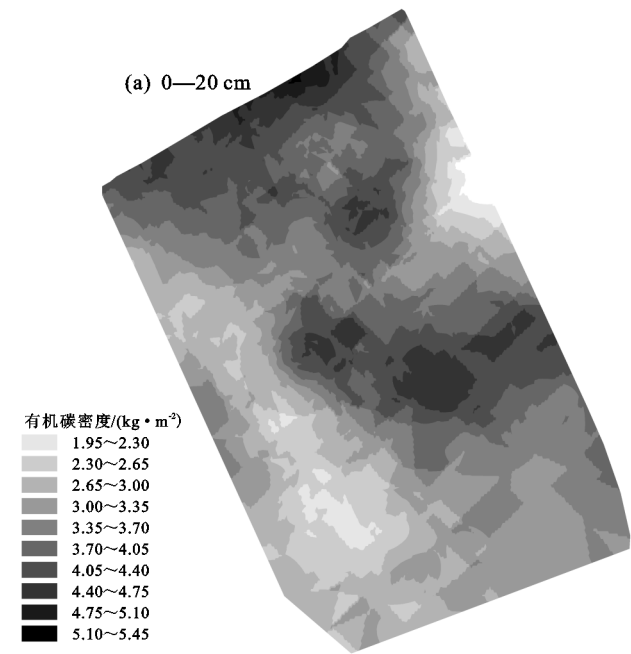
土层 深度/cm	最大值/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	最小值/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	均值/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	标准差/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	变异 系数/%
0—20	8.36	1.11	3.77	1.35	35.81
20—40	7.26	0.78	2.56	1.01	39.45
40—60	4.38	0.48	2.11	0.70	33.18
60—80	3.81	0.63	1.83	0.59	32.24
80—100	3.18	0.51	1.75	0.48	27.43
100—120	4.48	0.42	1.82	0.68	37.36
120—140	5.16	0.66	1.95	0.71	36.41
140—160	3.68	0.43	1.96	0.64	32.65
160—180	4.68	0.30	2.07	0.78	37.68
180—200	4.48	0.46	2.14	0.77	35.98

2.2 有机碳密度地统计学分析

使用半方差变异函数对 0—20,0—200 cm 土层有机碳密度进行拟合,得到最优半方差模型及参数(表 2)。0—20,0—200 cm 土层最佳半方差模型分别为指数模型和高斯模型,模型决定系数(R^2)均大于 0.7。 $(C_0/(C_0+C))$ 数值介于 $0 \sim 13.6\%$,表明本研究中土壤有机碳密度具有强空间自相关性($<25\%$),并且 0—200 cm 土层空间自相关性强于 0—20 cm 土壤剖面。0—20 cm 土层的土壤有机碳

密度变程(236.660 m)远大于 0—200 cm 土层的有机碳密度变程(66.512 m)。

基于克里金插值法的土壤有机碳密度空间分布图(图 2)表明,对于 0—20 cm 土层,有机碳密度的高值区较为集中,主要位于研究区中部、北部等区域,而低值主要位于西部、西南及东北部区域。对于 0—200 cm 土



层,有机碳密度分布整体呈现东北高、西南低的特点。

表 2 土壤有机碳密度半方差函数理论模型及参数

土层深度/cm	模型	C_0	C_0+C	$C_0/(C_0+C)$	变程/m	决定系数 R^2
0—20	指数模型	0.043	0.316	0.136	235.660	0.799
0—200	高斯模型	0.001	2.046	0	66.512	0.894

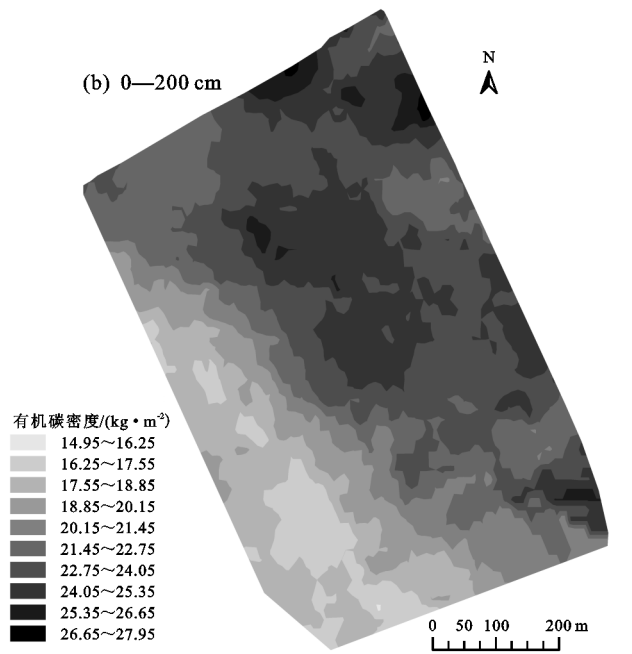
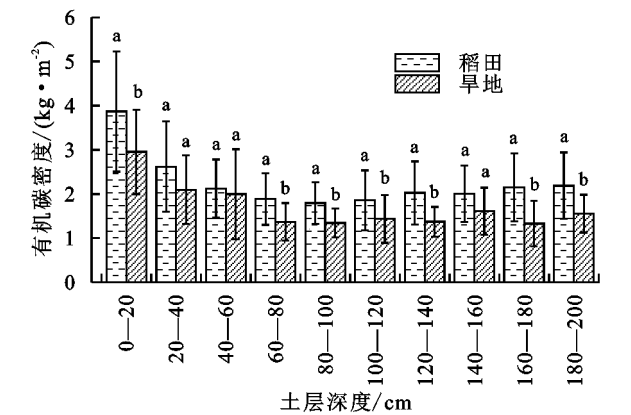


图 2 0—20 cm 和 0—200 cm 土层有机碳密度空间分布

2.3 不同农田利用类型土壤有机碳密度特征

农田类型的差异影响土壤的有机碳密度。在垂直剖面上,稻田与旱地土壤有机碳密度均随土层深度增加先急剧降低后缓慢增加(图 3),且 2 种农田的最大值和最小值均分别位于 0—20,80—100 cm 土层。方差分析结果表明,对于 0—200 cm 剖面,除 20—40,40—60 cm 土层外,其他土层均表现为稻田土壤有机碳密度均显著高于旱地($P<0.05$)。稻田和旱地在 0—20 cm 土层有机碳密度分别为(3.87±1.36),(2.95±0.96) kg/m²,0—200 cm 土层有机碳密度分别为(22.50±4.45),(17.05±4.05)kg/m²。



注:同一土层不同字母表示不同处理存在显著差异($P<0.05$)。

图 3 不同农田利用类型土壤有机碳密度

2.4 不同耕种历史稻田土壤有机碳密度特征

耕种历史的差异也影响稻田土壤有机碳的密度(表 3)。对于 0—20 cm 土层,老稻田的土壤有机碳密度在数值上略大于新稻田,但方差分析结果不显著。对于 0—200 cm 土层,老稻田土壤有机碳密度显著高于新稻田,且 2 种新稻田差异较小。

表 3 不同农田耕作历史稻田土壤有机碳密度

耕作历史	0—20 cm	0—200 cm
老稻田	4.05±1.30a	23.71±4.03a
旱地改稻田	3.46±1.57a	19.85±3.98b
林地改稻田	3.48±1.04a	19.81±5.03b

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同字母表示处理间存在显著差异($P<0.05$)。

对于不同耕作历史稻田,土壤有机碳密度均随着土层深度的增加先急剧下降后缓慢降低(图 4),最大值和最小值均分别位于 0—20,80—120 cm 土层。老稻田所有土层的有机碳密度在数值上均高于新稻田,而新稻田之间的大小关系随土层深度的变化而不同。在 0—20 cm,两者有机碳密度相近;在 20—100 cm,林地改稻田均高于旱地改稻田;在 100—200 cm,旱地改稻田样地均高于林地改稻田。

方差分析结果表明,3 种稻田样地 0—20 cm 土层的有机碳密度均无显著差异;在 20—100 cm,老稻田显著高于旱地改稻田,其他稻田之间无显著差异;

在 100—120 cm,老稻田显著高于林地改稻田,其他稻田之间无显著差异;在 120—200 cm,老稻田和旱地改稻田均显著高于林地改稻田,而老稻田和旱地改稻田差异较小。

2.5 土壤有机碳密度稳定性分析

整个研究区不同农田类型,以及不同耕作历史农田的土壤有机碳密度稳定性分析结果见图 5。依据选取 $\bar{\delta}_i$ 最接近于 0 和 $\sigma(\delta_i)$ 最小的原则,研究区土壤有机碳密度的代表性稳定深度为 180—200 cm,稻田与旱地分别选取 180—200,140—160 cm。而对于老稻田、旱地改稻田和林地改稻田,其稳定性深度分别为 180—200,180—200,60—80 cm。

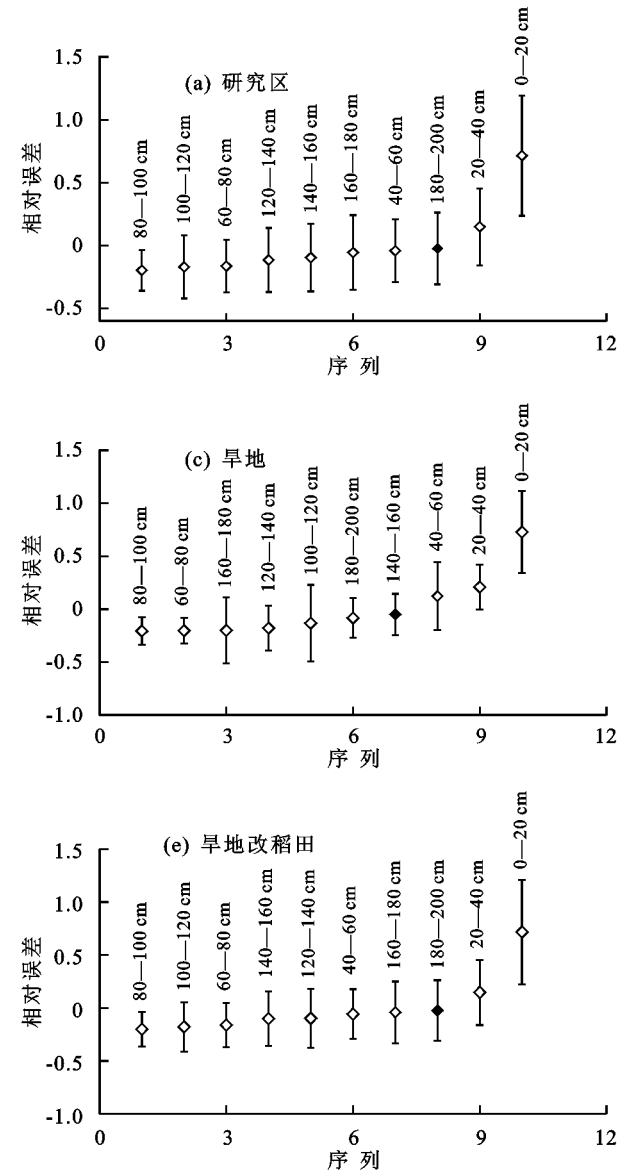
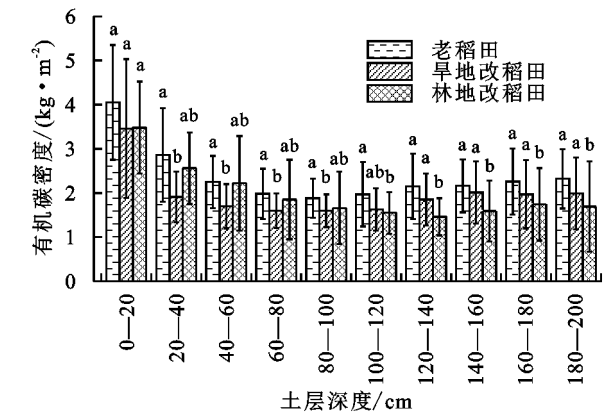


图 5 土壤有机碳密度深度稳定性分析

3 讨论

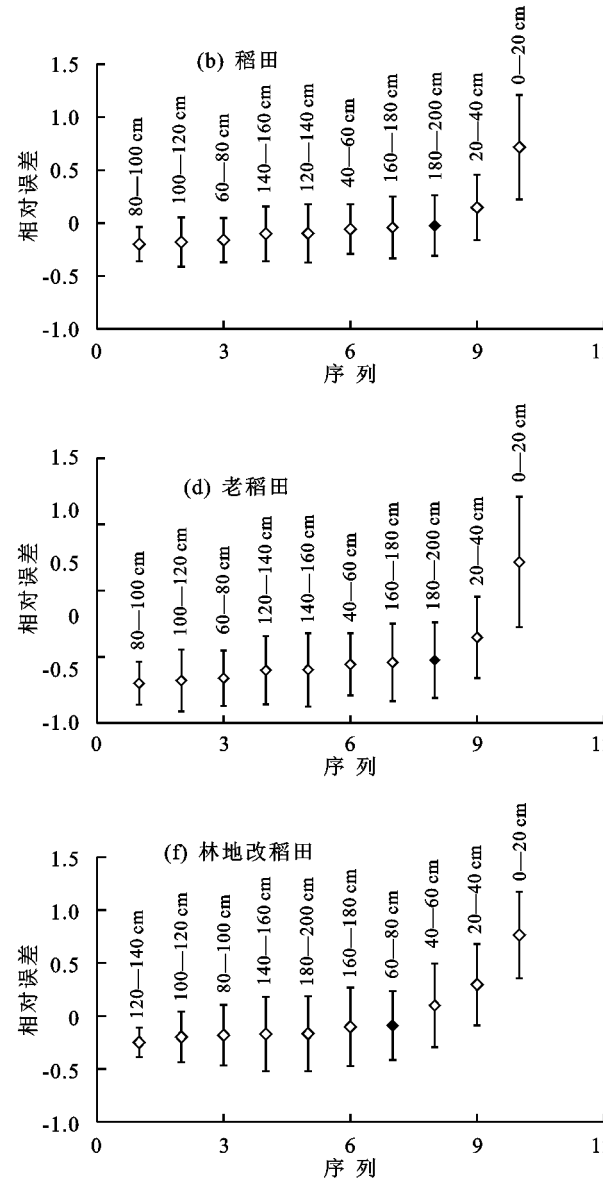
3.1 土壤有机碳密度空间变异性和分布特性

由于研究尺度、地貌单元的破碎程度、地形特征存在差异,导致土壤有机碳密度在空间上的分布也各不相同。本研究所在的灌排单元土壤有机碳密度分



注:同一土层不同字母表示不同处理存在显著性差异($P<0.05$)。

图 4 不同耕种历史稻田土壤有机碳密度



布具有强空间自相关性,且 0—200 cm 的土壤有机碳密度空间自相关性强于 0—20 cm,说明变异主要是由成土母质和地形等结构性因素引起的,且随土层的加深结构性因素作用越来越强烈,随机性因素作用相对减弱,原因是表层土壤受到的影响因子比深层土壤更

多,且有机碳的转化更为复杂^[19]。说明变异主要由非人为结构性因素引起,如成土母质、地形等。这与曹宏杰等^[20]研究三江平原、邹润彦等^[21]研究环鄱阳湖区农田的结果类似;而不同于尺度较大的成都平原^[22]和地形复杂的黄土高原^[23]研究结果。这种差异主要是与研究的空間尺度和地形特征有关,在較小的空間尺度和較小的地形波动下,土壤初始性质更为相近。

本研究区的有机碳密度与其他研究存在一些相似与不同。本研究0—20 cm 土层稻田(3.87 kg/m^2)和旱地(2.95 kg/m^2)土壤的有机碳密度明显低于全国均值^[24](分别为 $4.69, 3.59 \text{ kg/m}^2$),但0—100 cm 土层(12.02 kg/m^2)高于全国均值^[5](9.60 kg/m^2),表明有机碳在剖面上的垂直分布特征有较大差异。对于不同地区有机碳密度的差异也存在不同,与黄土高原相比,0—20,0—200 cm 土层的有机碳明显高于中国黄土高原地区^[22](分别为 $1.82, 9.57 \text{ kg/m}^2$);而与我国东北黑土区^[8]相比,其稻田和旱地0—20 cm 土层土壤有机碳密度分别为是本研究的1.52,1.71倍,且0—200 cm 土层也比本研究区高约16.0%。与江汉平原地区已有研究相比,0—20 cm(3.77 kg/m^2)和0—100 cm 土层(12.02 kg/m^2)的有机碳密度与杨军等^[12]在江汉平原测定的结果相近,但0—180 cm 土层(19.82 kg/m^2)的有机碳密度高于其研究结果(16.31 kg/m^2),表明江汉平原地区深层土体的碳密度问题还需要进一步研究。

不同地区土壤有机碳密度在垂直方向上的变化特征也存在一些差异。研究区有机碳密度呈现随土层深度增加先急剧降低后缓慢增加的变化趋势,然而赵俊峰等^[25]、Yu 等^[23]、郑琳等^[26]发现,黄土高原区和东北黑土区的有机碳密度均随土层深度的增加而降低,这种区别可能是由于灌溉和降雨量、成土过程和地下水位埋深差异共同造成。首先,与黄土区和黑土区农田相比,本研究区降雨丰富、且灌溉量和频率相对较高,使表层土壤有机碳向下淋溶迁移更为明显,导致深层土壤有机碳含量增加^[27];其次,江汉平原土壤母质以近现代河流冲积物和湖相沉积物为主,原有的植被在多次的冲积和沉积过程中被掩埋,也可导致深层土壤较高的有机碳储量^[28]。另外,研究区常年地下水位埋深较浅(0.2~2.5 m),深层土体含水量高,氧气含量低,有机碳不易发生矿化^[29],使得表层淋洗至深层土壤的有机碳可以较为稳定的保存;而黄土区和黑土区的地下水位埋深较深,深层有机碳更易矿化。因此,在进行土壤有机碳密度调查时,对于平原河网区,更应延伸采样的深度,以提高有机碳储

量估算工作的准确性。由于深层土体的有机碳密度还在持续增加,因此本研究所选的200 cm 深度可能还不够,还需进一步拓展研究深度。

3.2 耕作措施对土壤有机碳密度的影响

农田耕作措施的差异影响有机碳的输入、转化和迁移过程,进而改变土壤有机碳密度。本研究发现,稻田土壤的有机碳密度明显高于旱地,特别是耕层,这与 Wei 等^[30]、Chen 等^[31]的研究结果基本一致。一是由于稻田的秸秆和根系及其分泌物输入量明显高于旱地^[32],其有机碳的直接来源更多;二是在稻田长期的厌氧条件下,低氧气含量有效减缓土壤有机物的分解,从而促进有机碳的累积^[1];三是稻田土壤中铁氧化物等物质具有稳定碳的作用^[33]。

水稻耕作年限的差异影响稻田土壤有机碳密度分布。本研究发现,老稻田的土壤有机碳密度在所有土层均高于新稻田,这与 Li 等^[34]研究结果相符。随着耕作年限增加,水稻秸秆和根系的大量积累,使得土壤有机质输入量增加,因此土壤有机碳随着稻田耕作年限的增加而逐渐积累。然而,增加的速率越来越缓慢,特别是对于耕层土壤^[35]。Li 等^[34]和李忠佩等^[36]研究发现,在水稻种植的前30年,稻田表层土壤有机碳随耕作年限逐年增加,然后基本趋于稳定;且初始0~30年有机碳增加速率约是30年以后的10~25倍。本研究中,新稻田的年积累速率($0.173 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$)约是老稻田在20年后($0.007 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$)的23倍。Huang 等^[37]则认为,水稻土有机碳短期积累速率较快主要是由于有机物质输入量的快速增加,以及厌氧条件下分解速率的快速降低;且近些年来的秸秆还田政策进一步加快了稻田有机碳的短期积累速率。因此,旱地或林地改稻田对提高农田生态系统的碳储量具有积极意义。

改稻田之前的用地类型也影响土壤有机碳密度分布。尽管整个剖面的有机碳密度差异较小,但垂直分布特征却存在一些差异。在0—100 cm 土层,林地改稻田密度高于旱地改稻田。一是由于林地表层土壤初始有机质含量远高于旱地,且部分难分解的可溶性有机碳可以向下淋溶至深层土壤;二是树木发达的深根系能够在上层土壤中大量积累和固存有机碳,逐渐腐烂的根系成为土壤有机碳的重要来源^[38]。而100 cm 以下林地改稻田有机碳密度却明显低于旱地改稻田,一是由于旱地改稻田样地的地下水位埋深相对更浅,深层土壤的厌氧条件更有利于有机碳的累积和保存^[32];二是林地改稻田样地均分布在灌排单元边界,深层的有机碳可能被侧向的潜水流淋洗至边界沟渠,若无

边界灌排沟渠影响,林地改稻田样地的有机碳密度很可能更高,还需要其他试验进一步明确这种影响。

另外,有机碳的垂直分布特征也影响了有机碳密度代表性深度的选取。对于有机碳含量随土层深度增加而逐渐降低的地区,其稳定性深度往往在上层土体,若用下层土体估计有机碳密度,其结果会偏低。由于研究区土壤有机碳密度随土层深度的增加呈现先降低后增加的趋势,因此在上层和下层土体均存在一个土层可以代表剖面的有机碳平均密度。而深层土体有机碳密度变化较上层土体更慢,变异性也越小,最终表现出比上层土壤更强的代表性。这也进一步表明,在进行土壤有机碳储量调查时,应尽可能延伸采样深度。当然,耕作方式与耕作历史对有机碳密度的影响也改变了稳定性深度的选择,但总体都在较深的土壤层次。

4 结论

(1)本研究所在灌排单元 0—200 cm 土层的有机碳密度具有较强空间自相关性,成土母质和地形等结构性因素是影响土壤有机碳空间分布特征的主导因子;在垂直剖面上,有机碳密度随土层深度增加先急剧降低后缓慢升高,研究区有机碳密度的代表性稳定深度为 180—200 cm,深层土体有机碳储量不容忽视。

(2)农田耕作措施的差异影响土壤有机碳密度,稻田在所有土层均显著高于旱地。耕作历史也影响稻田的有机碳密度,表现为老稻田在所有土层均高于新稻田,旱地改稻田与林地改稻田 0—200 cm 剖面有机碳总储量差异较小,但林地浅层土体碳密度更大;旱地或林地改稻田有利于农田生态系统对碳的固持。

参考文献:

- [1] Ren W, Banger K, Tao B, et al. Global pattern and change of cropland soil organic carbon during 1901—2010: Roles of climate, atmospheric chemistry, land use and management [J]. *Geography and Sustainability*, 2020, 1(1): 59-69.
- [2] Li L J, Burger M, Du S L, et al. Change in soil organic carbon between 1981 and 2011 in croplands of Heilongjiang Province, northeast China [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2016, 96(4): 1275-1283.
- [3] Ren W, Tian H Q, Tao B, et al. China's crop productivity and soil carbon storage as influenced by multifactor global change [J]. *Global Change Biology*, 2012, 18(9): 2945-2957.
- [4] 胡鞍钢. 中国实现 2030 年前碳达峰目标及主要途径 [J]. *北京工业大学学报(社会科学版)*, 2021, 21(3): 1-15.
- [5] Zhang W X, Wang X J, Lu T P, et al. Influences of soil

properties and hydrological processes on soil carbon dynamics in the cropland of North China Plain [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2020, 295: e106886.

- [6] 姜蓝齐, 臧淑英, 张丽娟, 等. 松嫩平原农田土壤有机碳变化及固碳潜力估算 [J]. *生态学报*, 2017, 37(21): 7068-7081.
- [7] 郭洋, 李香兰, 王秀君, 等. 干旱半干旱区农田土壤碳垂直剖面分布特征研究 [J]. *土壤学报*, 2016, 53(6): 1433-1443.
- [8] 郝翔翔, 韩晓增, 李禄军, 等. 土地利用方式对黑土剖面有机碳分布及碳储量的影响 [J]. *应用生态学报*, 2015, 26(4): 965-972.
- [9] Baties N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world [J]. *Journal of Soil Science*, 2000, 47: 158-163.
- [10] Kalbitz K, Kaiser K, Fiedler S, et al. The carbon count of 2000 years of rice cultivation [J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(4): 1107-1113.
- [11] 王玉竹, 肖和艾, 周萍, 等. 江汉平原农田土壤有机碳分布与变化特点: 以潜江市为例 [J]. *环境科学*, 2015, 36(9): 3422-3428.
- [12] 杨军, 张德存, 胡绍祥, 等. 江汉平原土壤有机碳储量和密度分布特征研究 [C] // 第三届全国应用地球化学学术会议论文集. 周永章. 第三届全国应用地球化学学术会议论文集. 广州: 中山大学出版社, 2010: 404-411.
- [13] 张涛. 基于 GIS 的江汉平原土壤养分空间分异及土壤有机碳研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2015.
- [14] 闫加力, 李懋, 熊双莲, 等. 旱改水对水稻幼苗生长的影响及秸秆的改良作用 [J]. *中国生态农业学报*, 2015, 23(5): 554-562.
- [15] 张帅, 许明祥, 张亚锋, 等. 黄土丘陵区土地利用变化对深层土壤有机碳储量的影响 [J]. *环境科学学报*, 2014, 34(12): 3094-3101.
- [16] 贾树海, 张佳楠, 张玉玲, 等. 东北黑土区旱田改稻田后土壤有机碳、全氮的变化特征 [J]. *中国农业科学*, 2017, 50(7): 1252-1262.
- [17] 程东娟, 张亚丽. 土壤物理实验指导 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.
- [18] Vachaud G, Passerat S A, Balabanis P, et al. Temporal stability of spatially measured soil water probability density function [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1985, 49(4): 822-828.
- [19] 栗文玉, 刘小芳, 赵勇钢, 等. 黄土丘陵区人工柠条恢复为主小流域土壤有机碳空间变异性及其影响因素 [J]. *水土保持研究*, 2020, 27(2): 15-22.
- [20] 曹宏杰, 王立民, 罗春雨, 等. 三江平原地区土壤有机碳及其组分的空间分布特征 [J]. *生态环境学报*, 2013, 22(7): 1111-1118.
- [21] 邹润彦, 周宏冀, 郭熙, 等. 环鄱阳湖区农田土壤有机碳影响因素空间分布格局分析及制图研究 [J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(5): 1121-1131.
- [22] 李珊, 李启权, 王昌全, 等. 成都平原区水稻土有机碳剖

面分布特征及影响因素[J].环境科学,2018,39(7):3365-3372.

[23] Yu H Y, Zha T G, Zhang X X, et al. Vertical distribution and influencing factors of soil organic carbon in the Loess Plateau, China[J].Science of the Total Environment,2019,693:e133632.

[24] Song G H, Li L Q, Pan G X, et al. Topsoil organic carbon storage of China and its loss by cultivation[J].Biogeochemistry,2005,74(1):47-62.

[25] 赵俊峰,肖礼,黄懿梅,等.黄土丘陵区不同种植类型梯田 2 m 土层有机碳的分布特征[J].水土保持学报,2017,31(5):253-259.

[26] 郑琳,韩晓增,郝翔翔,等.取样和计算方法对黑土剖面土壤有机碳密度的影响[J].生态学杂志,2015,34(9):2583-2589.

[27] 解怀亮,王玉刚,李彦,等.灌溉淋溶对土壤有机碳和无机碳及理化性质的影响[J].水土保持学报,2014,28(4):188-193.

[28] 陈芳,张海涛,王天巍,等.江汉平原典型土壤的系统分类及空间分布研究[J].土壤学报,2014,51(4):761-771.

[29] 林清美,廖超林,谢丽华,等.地下水位和长期施肥对红壤性水稻土有机碳矿化特征的影响[J].土壤学报,2019,56(6):1414-1423.

[30] Wei L, Ge T, Zhu Z K, et al. Comparing carbon and nitrogen stocks in paddy and upland soils: Accumulation, stabilization mechanisms, and environmental drivers[J].Geoderma,2021,398(1/2):e115121.

[31] Chen X B, Hu Y J, Xia Y H, et al. Contrasting pathways of carbon sequestration in paddy and upland soils [J].Global Change Biology,2021,27(11):2478-2490.

[32] Sokol N W, Bradford M A. Microbial formation of stable soil carbon is more efficient from belowground than aboveground input[J].Nature Geoscience,2019,12(1):46-53.

[33] Zou Y C, Zhang S J, Huo L L, et al. Wetland saturation with introduced Fe(III) reduces total carbon emissions and promotes the sequestration of DOC[J].Geoderma,2018,325:141-151.

[34] Li Z P, Zhang T L, Li D C, et al. Changes in soil properties of paddy fields across a cultivation chronosequence in subtropical China [J].Pedosphere, 2005, 15 (1):110-119.

[35] 韩光中,张甘霖,黄来明,等.水耕人为土有机碳和全氮对水分状况和耕作时间的响应[J].土壤学报,2019,56(6):1300-1308.

[36] 李忠佩,张桃林,陈碧云,等.红壤稻田土壤有机质的积累过程特征分析[J].土壤学报,2003,40(3):344-352.

[37] Huang L M, Thompson A, Zhang G L, et al. The use of chronosequences in studies of paddy soil evolution: A review[J].Geoderma,2015,237/238:199-210.

[38] 王凯,宋立宁,张成龙,等.科尔沁沙地典型林分土壤有机碳储量与根际效应的关系[J].水土保持学报,2013,27(6):221-225.

(上接第 212 页)

[19] 王家宝,郭刚,袁嫚嫚,等.新型控释氮肥不同配施比例对水稻生长及养分利用的影响[J].磷肥与复肥,2020,35(4):49-52.

[20] 王强,徐建明,姜丽娜,等.轮作水稻对大棚土壤硝化作用和氮挥发的影响[J].水土保持学报,2017,31(1):186-190.

[21] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000.

[22] 敖玉琴,张维,田玉华,等.脲胺氮肥对太湖地区稻田氨挥发及氮肥利用率的影响[J].土壤,2016,48(2):248-253.

[23] 严田蓉,何艳,唐源,等.缓释尿素与普通尿素配施对直播杂交水稻叶片生长及产量的影响[J].植物营养与肥料学报,2019,25(5):729-740.

[24] Miao X K, Xing X M, Ding Y F, et al. Yield and nitrogen uptake of bowl-seedling machine-transplanted rice with slow-release nitrogen fertilizer[J].Agronomy Journal,2016,108(1):313-320.

[25] 郭晨.缓/控释尿素施用对作物产量、氮肥利用率及温室气体排放的影响[D].武汉:华中农业大学,2018.

[26] 薛欣欣,吴小平,王文斌,等.控释尿素与普通尿素配施对水稻产量及氮肥利用效率的影响[J].热带作物学报,2018,39(11):2132-2139.

[27] 刘红江,郭智,郑建初,等.不同类型缓控释肥对水稻产量形成和稻田氮素流失的影响[J].江苏农业学报,2018,34(4):783-789.

[28] 田昌,周旋,谢桂先,等.控释尿素减施对双季稻田氨挥发损失和氮肥利用率的影响[J].中国水稻科学,2018,32(4):387-397.

[29] 石敦杰,杨兰,荣湘民,等.控释氮肥和氮磷减量对水稻产量及田面水氮磷流失的影响[J].江苏农业科学,2018,46(11):44-47.

[30] Wang H, Hegazy A M, Jiang X, et al. Suppression of ammonia volatilization from rice-wheat rotation fields amended with controlled-release urea and urea[J].Agronomy Journal,2016,108(3):1214-1224.

[31] 周雯雯,贾浩然,张月,等.不同类型新型肥料对双季稻产量、氮肥利用率和经济效益的影响[J].植物营养与肥料学报,2020,26(4):657-668.

[32] 陈琨,秦鱼生,喻华,等.控释氮肥对一季中稻产量及氮肥利用率的影响[J].西南农业学报,2018,31(3):507-512.