

DOI: 10.11766/trxb201904180202

李委涛, 刘明, 李朋发, 李桂龙, 江春玉, 吴萌, 仇存璞, 董元华, 李忠佩. 近 40 年余江县高产水稻土有机碳及养分含量的演变特征[J]. 土壤学报, 2020, 57 (4): 937–942.

LI Weitao, LIU Ming, LI Pengfa, LI Guilong, JIANG Chunyu, WU Meng, QIU Cunpu, Dong Yuanhua, LI Zhongpei. Temporal Variation of Soil Organic C and Nutrients in High Yield Paddy Soils of Yujiang County in the Past 40 Years [J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57 (4): 937–942.

近 40 年余江县高产水稻土有机碳及养分含量的演变特征*

李委涛¹, 刘 明¹, 李朋发^{1, 2}, 李桂龙^{1, 2}, 江春玉¹, 吴 萌¹, 仇存璞^{1, 2},
董元华^{1, 2}, 李忠佩^{1, 2†}

(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. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 土壤有机碳及养分是土壤肥力的重要指标, 研究土壤肥力的演变规律对提升地力、维持农业可持续发展具有重要的理论指导意义。参照第二次土壤普查和 2002 年采样背景资料, 通过田间采样分析及对比研究, 探讨江西省余江县高产水稻土有机碳、养分、pH 及阳离子交换量(CEC)的状况及其近 40 年的演变规律。结果表明, 余江县域内上表层水稻土(0~10 cm)有机碳、全氮、有效磷和速效钾含量分别是(27.3±1.3) g·kg⁻¹、(2.9±0.2) g·kg⁻¹、(40.5±3.8) mg·kg⁻¹、(148±7.9) mg·kg⁻¹, 土壤肥力处于较高水平。与 1980 年背景资料对比发现, 有机碳和土壤养分均有显著提升; 尤其自 2002 年以来, 近 15 年 0~10 cm 层次水稻土有机碳、全氮及速效钾的增幅分别达 35%、40%和 34%, 但有效磷含量变化并不显著, 而在 10~20 cm 层有效磷含量显著增加了 56%。与 2002 年采样结果相比, 0~10 cm、10~20 cm 和 20~40 cm pH 显著降低, 而 CEC 显著增加。长期植稻过程中施用化肥, 尤以近 15 年来, 土壤有机碳、养分及 CEC 显著提高, 但同时造成土壤 pH 下降。

关键词: 水稻土; 有机碳; 氮磷钾; pH; 土层

中图分类号: S158.1; S153.6[†]21 文献标志码: A

Temporal Variation of Soil Organic C and Nutrients in High Yield Paddy Soils of Yujiang County in the Past 40 Years

LI Weitao¹, LIU Ming¹, LI Pengfa^{1, 2}, LI Guilong^{1, 2}, JIANG Chunyu¹, WU Meng¹, QIU Cunpu^{1, 2}, Dong Yuanhua^{1, 2}, LI Zhongpei^{1, 2†}

(1. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: 【Objective】 Soil organic carbon and nutrients are important indicators of soil fertility. The study on rules of the

* 国家重点研发计划项目(2016YFD0200309, 2018YFD0301104-01)、中国博士后科学基金面上项目(2018M640530)与江苏省博士后基金项目(2018K202C)共同资助 Supported by the National Key Research and Development Program of China(Nos. 2016YFD0200309 and 2018YFD0301104-01), the Postdoctoral Science Foundation of China (No. 2018M640530) and the Postdoctoral Foundation of Jiangsu Province in China (No. 2018K202C)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: zhpli@issas.ac.cn

作者简介: 李委涛(1987—), 男, 河南开封人, 博士, 主要研究土壤有机碳转化的微生物学机制。E-mail: wtli@issas.ac.cn

收稿日期: 2019-04-18; 收到修改稿日期: 2019-07-18; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2019-08-20

temporal variation of soil fertility is of important theoretical guiding significance to improving soil fertility and maintaining sustainable development of the agriculture. 【Method】Based on the data of the Second National Soil Survey in 1980 and the soil sampling in 2002, soil samples(0–15 cm)were collected from three soil layers(0–10, 10–20 and 20–40 cm)at the same 26 sampling sites in paddy fields of Yujiang County in 2017 for analysis of soil organic carbon, nutrients, pH and CEC, and comparison was performed for rules of the variation of soil fertility in the past 40 years. 【Result】The contents of organic carbon, total nitrogen, available phosphorus and available potassium in the upper surface paddy soil (0–10 cm) in Yujiang County was $(27.3\pm 1.3)\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, $(2.9\pm 0.2)\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, $(40.5\pm 3.8)\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and $(148\pm 7.9)\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively. Compared with the data in 1980, organic carbon and soil nutrients have significantly improved; especially organic carbon, total nitrogen and available potassium in the 0–10 cm soil layer of the paddy fields have increased by 35%, 40% and 34%, respectively, in the past 15 years since 2002. The available phosphorus content in the 0–10 cm soil layer did not change much, while it did increase by 56% in the 10–20 cm soil layer. Compared with the data obtained in 2002, pH in the 0–10 cm, 10–20 cm and 20–40 cm soil layers decreased significantly, while CEC did reversely. 【Conclusion】Long-term paddy cultivation applied with chemical fertilizer significantly increased soil organic carbon, nutrients and CEC, but decreased soil pH, especially in the past 15 years.

Key words: Paddy soil; Soil organic carbon(SOC); Nitrogen, phosphorus and potassium; pH; Soil layer

水稻是全世界重要的粮食作物之一,近年来大量施用化肥使得作物产量大幅攀升^[1],以满足人类日益增长的粮食需求。随着化肥的连年施入,肥料利用率下降、养分增产效率显著降低,造成的环境压力越来越明显^[2-4],这些问题严重影响了农业可持续发展。土壤有机碳是反映土壤生态功能及肥力的重要指标^[5],施肥可显著增加土壤有机碳含量,进而影响土壤肥力的演变过程^[6]。受土壤空间异质性、时间尺度效应的影响,有关土壤肥力演变特征的众多结论并不一致。不同地域受气候因子、成土母质等一系列因子的影响,导致土壤肥力演化具有明显的差异性^[7];即使在一定区域范围,也因土壤类型差异导致土壤肥力演变特征迥异^[8]。随着研究的深入,占土壤碳库一半储量的下表层土壤逐渐受到重视^[9],随土层深度增加,土壤母质的影响可能随之增加^[10]。当前,研究某一时间段内不同施肥措施下表层土壤有机碳及养分变化的较多^[11],对于不同时间段内,不同土层碳库及养分演变的报道尚不多见。

我国亚热带地区是水稻的主要种植区,土壤类型多样,对于肥力水平较高的水田,肥料的大量施用,使得水田中物质循环维持在较高水平,表现出输入高于输出的盈余状态^[12]。有关土壤有机碳和养分的变化规律也有较多报道。然而,近年来肥料高投入下,土壤肥力演化特征并不清楚。本研究通过田间采样分析,并对比第二次土壤普查(1980年)及2002年对不同类型水稻土采样分析,研究江西省

余江县高产水稻土有机碳及土壤养分的演变规律,结果可为区域农田养分管理提供理论指导。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况与样品采集

本研究选择江西省余江县红壤典型区域,该区域属亚热带季风气候,年均气温 17.6℃,年均降水量 1 795 mm,年蒸发量 1 318 mm,无霜期 261 d。作物轮作制度为双季稻(*Oryza sativa* L.)。参照第二次土壤普查资料及 2002 年采样资料记载,在江西省余江县内 14 个乡镇选择 26 块高产水田,采样点均处于较高的地势、灌排水状况良好、耕作背景相近。于 2017 年晚稻收获后,采集 0~10 cm、10~20 cm 和 20~40 cm 不同深度土壤样品,采用五点法采集土样并混合为一个样品。土壤样品带回实验室,过 2 mm 筛后,于室温下阴干测定土壤理化指标。

1.2 测定指标与分析方法

采用高温外热重铬酸钾氧化—容量法测定土壤有机碳;半微量凯氏法测定全氮;碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法测定有效磷;乙酸铵浸提—火焰光度法测定速效钾;阳离子交换量(CEC)利用乙酸铵法测定;采用电位法测定土壤 pH(水土比 2.5:1)^[13]。

1.3 数据处理

采用配对 *t* 检验的方法分析不同年份同一田块

内相应土层有机碳、养分、pH 及 CEC 的差异性。 t 检验和各指标之间的相关性分析采用 SPSS16.0 (SPSS Inc. Chicago, IL, 美国) 统计软件进行。

2 结果与讨论

2.1 余江县高产水稻田有机碳和全氮在不同土层的分布规律

2017 年余江县高产水稻田不同土层 (0~10、10~20、20~40 cm) 有机碳含量分别为 (27.3±1.3) g·kg⁻¹、(20.3±1.2) g·kg⁻¹、(6.5±0.6) g·kg⁻¹, 全氮含量分别为 (2.9±0.2) g·kg⁻¹、(2.2±0.1) g·kg⁻¹、(0.8±0.1) g·kg⁻¹。将 0~10 cm 和 10~20 cm 土层中有机碳和全氮含量分别加权平均为 23.8 g·kg⁻¹ 和 2.6 g·kg⁻¹, 这些田块耕层土壤中有机碳和全氮含量均处于较高水平 (表 1)。李忠佩等^[14]研究红壤有机碳累积过程表明, 植稻 30 a 水田, 0~20 cm 土壤有机碳和全氮含量分别为 20 g·kg⁻¹ 和 1.6 g·kg⁻¹, 即使植稻达 80 a, 土壤有机碳和全氮含量趋于稳定, 无明显提升。本研究选取的水田, 植稻年限均在 80 a 以上, 有机碳和全氮含量丰富。

随土层深度增加, 土壤有机碳、全氮含量及碳氮比均逐渐降低。不同田块之间有机碳含量具有显著差异性, 变异系数达 24% (0~10 cm), 且随土层深度增加变异系数逐渐增加。这可能与土壤黏粒含量有关: 上表层土 (0~10 cm) 中有机碳与黏粒含量具有显著的正相关关系 ($r=0.49^*$, $n=26$), 并且这一相关性随土层深度增加更为明显。土壤母质决定着黏粒组分含量, 进而影响土壤有机无机复合体

及团聚体的形成, 导致不同母质发育土壤碳库含量和稳定性的差异, 土壤碳库与黏粒含量之间的正相关性在表层以下土壤尤为明显^[15]。

由于 1980 年土壤普查时采样深度为 0~15 cm, 本研究将 2002 年和 2017 年采样中 0~10 cm 和 10~20 cm 土层分析结果加权平均, 便于不同年份之间比较。结果表明, 土壤有机碳含量从 1980 年的 (17.6±1.5) g·kg⁻¹, 显著增加至 2017 年的 (24.9±1.2) g·kg⁻¹ ($t=2.5^*$, $n=26$) (图 1a))。从 1980 年至 2017 年, 土壤全氮含量显著增加 ($t=3^*$, $n=26$), 增幅达 62% (图 1b))。从第二次土壤普查到 2002 年采样, 近 20 年间, 土壤有机碳含量变化并不显著; 从 2002 年至 2017 年的 15 年间, 土壤有机碳和全氮含量显著增加, 最主要原因是化肥施用量大且连年增加, 提升作物产量及土壤养分含量。近 15 年来, 作物产量显著增加, 输入土壤的有机碳也随之增加, 导致耕层土壤中碳氮比显著增加。江叶枫等^[16]研究了余干县从 1982 年至 2012 年间土壤碳氮比的变化规律, 结果表明 30 年间大部分区域土壤 C/N 增加明显; 1982 年土壤 C/N 空间变异受成土母质的影响最大, 其影响程度占 17.3%, 而 2012 年土壤 C/N 空间变异受秸秆还田和氮肥施用量影响最大, 其影响程度为 42.3%。

2.2 余江县高产水稻田不同土层有效磷和速效钾变化规律

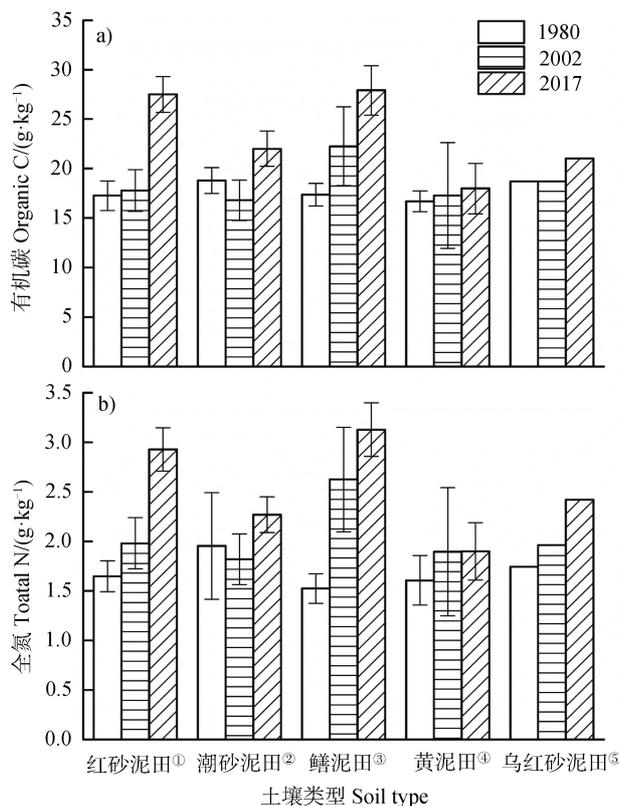
余江县高产水稻土不同土层 (0~10、10~20、20~40 cm) 有效磷含量分别为 (40.5±3.8) mg·kg⁻¹、(24.3±2.5) mg·kg⁻¹、(7.5±1.3) mg·kg⁻¹。对比 2002 年采样与本次采样结果, 过去 15 年间, 10~20 cm 土

表 1 2017 年余江县不同类型水稻土有机碳及全氮含量在不同土层的分布

Table 1 Distributions of organic C and total N content in soil profile relative to soil type in YuJiang County in 2017

土壤类型 Soil type	样本数 Samples	有机碳 Organic C / (g·kg ⁻¹)			全氮 Total N / (g·kg ⁻¹)		
		0~10 cm	10~20 cm	20~40 cm	0~10 cm	10~20 cm	20~40 cm
红砂泥田 ^①	8	29.7±2.2	23.1±1.9	7.0±0.9	3.2±0.3	2.5±0.2	0.8±0.1
潮砂泥田 ^②	8	24.4±2.1	17.2±1.8	5.0±0.5	2.5±0.2	1.8±0.2	0.6±0.1
鳊泥田 ^③	7	30.5±2.5	22.7±2.8	8.6±1.4	3.4±0.3	2.6±0.3	1.1±0.2
黄泥田 ^④	2	19.2±2.2	15.4±3.2	4.3±0.3	2.1±0.3	1.6±0.3	0.5±0.1
乌红砂泥田 ^⑤	1	23.8	20.3	3.2	2.7	1.8	0.5

注: 表中数据为平均值±标准误。Note: the data in the table are of mean ± standard error. ① Fe-leach-Stagnic Anthrosols, ② Haplic Stagnic Anthrosols, ③ Gleyic Stagnic Anthrosols, ④ Fe-accumul-Stagnic Anthrosols, and ⑤ Fe-leach-Stagnic Anthrosols.



① Fe-leach-Stagnic Anthrosols, ② Haplic Stagnic Anthrosols, ③ Gleyic Stagnic Anthrosols, ④ Fe-accumul-Stagnic Anthrosols, and ⑤ Fe-leach-Stagnic Anthrosols.

图1 1980—2017年间不同类型水稻土0~15 cm有机碳和全氮含量的变化

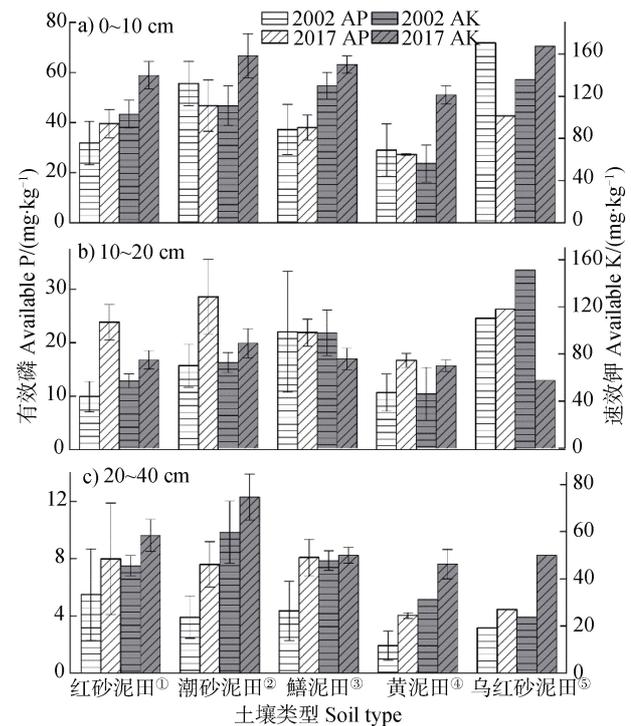
Fig. 1 Changes in organic C and total N content in the 0~15 cm soil layer in 1980—2017, relative to type of paddy soil

层有效磷含量显著增加 ($t=2.0^*$, $n=26$), 增幅达 56.2% (图 2b)。表土中有效磷含量较丰富, 随土层深度增加逐渐降低。不同田块之间有效磷含量也有显著差异性, 变异系数达 48% (0~10 cm), 且随土层深度增加变异系数逐渐增加, 下表层土变异系数达 87% (20~40 cm)。这可能与土壤质地有关, 不同质地土壤对磷的固定不同, 影响磷的有效性^[12]。

水稻土不同土层 (0~10、10~20、20~40 cm) 速效钾含量分别为 (148 ± 7.9) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、(78.5 ± 5.2) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、(59.9 ± 4.2) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。对比 2002 采样与本次采样结果, 过去 15 年间, 10~20 cm 和 20~40 cm 土层中速效钾含量显著增加 ($P<0.05$), 增幅分别为 33.9% 和 23.4% (图 2a), 图 2c)。表土中速效钾含量较丰富, 随土层深度增加逐渐降低。不同田块之

间速效钾含量也有显著差异性, 变异系数达 30% (0~10 cm)。施用钾肥显著增加土壤钾素可利用性, 不同土壤质地也是影响钾素有效性的重要因子^[17]。

与第二次土壤普查结果对比, 过去 37 年间, 表层土壤 (0~15 cm) 有效磷和速效钾含量分别增至 (35.1 ± 3.2) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 (124.8 ± 6.6) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 田块平均增幅分别为 2.7 倍和 37.3%。于洋等^[18]研究了 1980 年和 2011 年两个时期渭北台塬区耕地土壤养分的时空变异特征, 结果表明 30 年间有效磷显著增加了 179.3%, 速效养分增加量与土壤原有土壤养分含量呈显著负相关, 施肥和灌溉等为土壤速效养分时空变化的重要影响因素。



注: AP: 有效磷, AK: 速效钾。Notes: AP and AK stands for available P and readily available K, respectively. ①Fe-leach-Stagnic Anthrosols, ②Haplic Stagnic Anthrosols, ③Gleyic Stagnic Anthrosols, ④ Fe-accumul-Stagnic Anthrosols, and ⑤ Fe-leach-Stagnic Anthrosols.

图2 2002—2017年间不同类型水稻土有效磷和速效钾含量在不同土层的变化

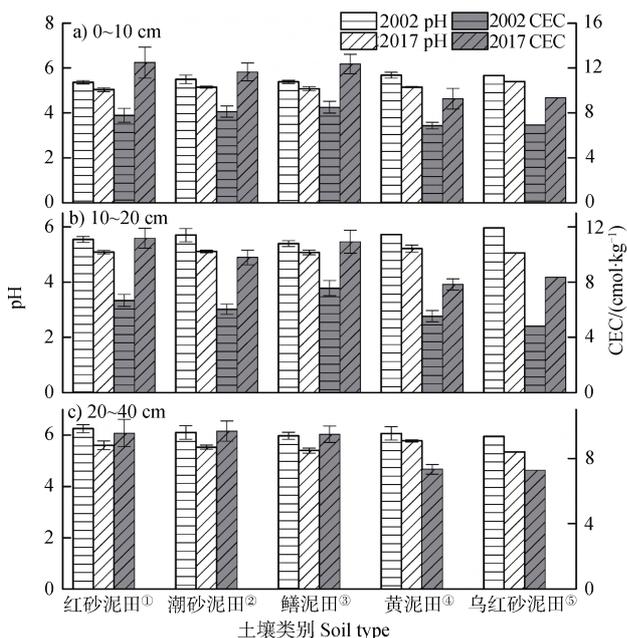
Fig. 2 Changes in available P and K in paddy soil in 2002—2017, relative to type of paddy soil and soil layer

2.3 余江县高产水稻田不同土层 pH 和 CEC 变化规律

余江县水稻土不同层次 (0~10、10~20、20~

40 cm) pH 平均值分别为 5.1 ± 0.04 、 5.1 ± 0.03 、 5.5 ± 0.06 。对比 2002 采样与本次采样结果, 过去 15 年间, 0~10、10~20、20~40 cm 土层 pH 均显著降低 ($P<0.001$) (图 3)。刘燕等^[19]对比了 2014 年与 1984 年扬州市邗江区耕地土壤 pH 的变化, 30 年间耕地土壤 pH 下降了 0.88 个单位。施肥是引起土壤 pH 下降的主要因素^[20-21]。

尽管长期施肥引起土壤 pH 显著降低, 但阳离子交换量 (CEC) 显著增加。余江县水稻土不同层次 (0~10、10~20、20~40 cm) 中 CEC 平均值分别为 (11.8 ± 0.6) $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 (10.3 ± 0.4) $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 (9.3 ± 0.4) $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。对比 2002 采样与本次采样结果, 过去 15 年间, 0~10、10~20 cm 土层均显著增加 ($P<0.001$) (图 3a), 图 3b)。郭春雷等^[22]研究发现, 与不施肥处理相比, 秸秆还田配施 NPK 肥可显著增加土壤 CEC, 增幅为 2.30 $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。施肥增加土壤 CEC, 可能的原因是, 长期施肥增加作物产量, 导致更多的秸秆量及残茬还田, 土壤有机质含量显著增加, 明显提高土壤 CEC^[23]。



①Fe-leach-Stagnic Anthrosols, ②Haplic Stagnic Anthrosols, ③Gleyic Stagnic Anthrosols, ④Fe-accumul-Stagnic Anthrosols, and ⑤Fe-leach-Stagnic Anthrosols.

图 3 2002—2017 年间不同类型水稻土 pH 和阳离子交换量 (CEC) 在不同土层的变化

Fig. 3 Changes in pH and cation exchange capacity (CEC) in paddy soil in 2002—2017 relative to type of paddy soil and soil layer

3 结 论

近 40 年, 余江县高产水稻田不同土层有机碳和养分含量显著增加, 尤其是从 2002 年至 2017 年的 15 年间, 土壤有机碳和养分含量增加更为显著。有机碳含量与土壤黏粒含量显著相关, 随土层深度增加相关性逐渐增加。长期植稻导致土壤不同土层 pH 不同程度的降低及 CEC 含量的显著增加。长期植稻过程中, 施肥增加土壤有机碳和养分含量, 但同时造成土壤 pH 降低。如何减量施肥, 既能保证土壤肥力又不造成土壤 pH 继续下降, 是当前需要解决的重要问题。

参考文献 (References)

- [1] Fang C Y, Tu N M, Zhang Q Z, et al. Effects of fertilization modes on available nutrient contents of reddish paddy soils and rice yields[J]. *Soils*, 2018, 50 (3): 462—468. [方畅宇, 屠乃美, 张清壮, 等. 不同施肥模式对稻田土壤速效养分含量及水稻产量的影响[J]. *土壤*, 2018, 50 (3): 462—468.]
- [2] Zhang F S, Wang J Q, Zhang W F, et al. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45 (5): 915—924. [张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. *土壤学报*, 2008, 45 (5): 915—924.]
- [3] Wang H Y, Zhou J M. Calculation of real fertilizer use efficiency and discussion on fertilization strategies[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51 (2): 216—225. [王火焰, 周健民. 肥料养分真实利用率计算与施肥策略[J]. *土壤学报*, 2014, 51 (2): 216—225.]
- [4] Liu J, Zuo Q, Zhai L M, et al. Phosphorus losses via surface runoff in rice-wheat cropping systems as impacted by rainfall regimes and fertilizer applications[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2016, 15 (3): 667—677.
- [5] Wiesmeier M, Urbanski L, Hobley E, et al. Soil organic carbon storage as a key function of soils - A review of drivers and indicators at various scales[J]. *Geoderma*, 2019, 333: 149—162.
- [6] Tian K, Zhao Y C, Xu X H, et al. Effects of long-term fertilization and residue management on soil organic carbon changes in paddy soils of China: A meta-analysis[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, 204: 40—50.
- [7] Luo Z K, Feng W T, Luo Y Q, et al. Soil organic carbon dynamics jointly controlled by climate, carbon inputs, soil properties and soil carbon fractions[J]. *Global Change Biology*, 2017, 23 (10): 4430—4439.

- [8] Gonçalves D R P, Sá J C D M, Mishra U, et al. Soil type and texture impacts on soil organic carbon storage in a sub-tropical agro-ecosystem[J]. *Geoderma*, 2017, 286: 88—97.
- [9] Gray J M, Bishop T F A, Wilson B R. Factors controlling soil organic carbon stocks with depth in eastern Australia[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2015, 79 (6): 1741—1751.
- [10] Guo Z C, Zhang Z B, Zhou H, et al. The effect of 34-year continuous fertilization on the SOC physical fractions and its chemical composition in a Vertisol[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: Article number: 2505.
- [11] Lv Z Z, Liu X M, Hou H Q, et al. Effects of 29-year long-term fertilizer management on soil phosphorus in double-crop rice system[J]. *Plant, Soil and Environment*, 2018, 64 (5): 221—226.
- [12] Li Z P, Zhang T L, Chen B Y. Changes of organic carbon and nutrient contents in highly productive paddy soils in Yujiang County of Jiangxi Province[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39 (2): 324—330. [李忠佩, 张桃林, 陈碧云. 江西余江县高产水稻土有机碳和养分含量变化[J]. *中国农业科学*, 2006, 39 (2): 324—330.]
- [13] Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000. [鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.]
- [14] Li Z P, Zhang T L, Chen B Y, et al. Soil organic matter dynamics in a cultivation chronosequence of paddy fields in subtropical China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40 (3): 344—352. [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.]
- [15] Angst G, Messinger J, Greiner M, et al. Soil organic carbon stocks in topsoil and subsoil controlled by parent material, carbon input in the rhizosphere, and microbial-derived compounds[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 122: 19—30.
- [16] Jiang Y F, Zhong S, Li J, et al. Spatial and temporal variability of soil C-to-N ratio of Yugan County and its influencing factors in the past 30 years[J]. *Environmental Science*, 2018, 39 (3): 1386—1395. [江叶枫, 钟珊, 李婕, 等. 近 30 年余干县耕地土壤碳氮比时空变异特征及其影响因素[J]. *环境科学*, 2018, 39 (3): 1386—1395.]
- [17] Fan Q Z, Xie J C. Variation of potassium fertility in soil in the long-term stationary experiment[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42 (4): 591—599. [范钦楨, 谢建昌. 长期肥料定位试验中土壤钾素肥力的演变[J]. *土壤学报*, 2005, 42 (4): 591—599.]
- [18] Yu Y, Zhao Y T, Chang Q R. Spatial-temporal variability of soil readily available nutrients in cultivated land of Weibei tableland area[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 (6): 1251—1261. [于洋, 赵业婷, 常庆瑞. 渭北台塬区耕地土壤速效养分时空变异特征[J]. *土壤学报*, 2015, 52 (6): 1251—1261.]
- [19] Liu Y, Mao W, Yang X D, et al. Temporal and spatial changing of farmland pH value in Hanjiang district, Yangzhou[J]. *Journal of Agriculture*, 2019, 9 (1): 16—20. [刘燕, 毛伟, 杨晓东, 等. 扬州市邗江区耕地土壤 pH 值时空演变[J]. *农学学报*, 2019, 9 (1): 16—20.]
- [20] Mao W, Li W X, Gao H, et al. pH variation and the driving factors of farmlands in Yangzhou for 30 years[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23 (4): 883—893. [毛伟, 李文西, 高晖, 等. 扬州市耕地土壤 pH 值 30 年演变及其驱动因子[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23 (4): 883—893.]
- [21] Guo X, Li H Y, Yu H M, et al. Drivers of spatio-temporal changes in paddy soil pH in Jiangxi Province, China from 1980 to 2010[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: Article number: 2702.
- [22] Guo C L, Li N, Peng J, et al. Direct returning of maize straw or as biochar to the field triggers change in acidity and exchangeable capacity in soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24 (5): 1205—1213. [郭春雷, 李娜, 彭靖, 等. 秸秆直接还田及炭化还田对土壤酸度和交换性能的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24 (5): 1205—1213.]
- [23] Yang Z Q, Lin C G. Influence of organic matter on cation exchange capacity of light cinnamon soils in Central Shanxi[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1988, 25 (1): 49—54. [杨振强, 林成谷. 晋中淡褐土中有机质对阳离子交换量的影响[J]. *土壤学报*, 1988, 25 (1): 49—54.]

(责任编辑: 陈荣府)