

DOI: 10.11766/trxb202107050343

黄晶, 韩天富, 申哲, 柳开楼, 马常宝, 王慧颖, 曲潇琳, 于子坤, 谢建华, 张会民. 基于模糊数学 (Fuzzy) 法的中国水稻土肥力质量近 30 年的时空变化特征[J]. 土壤学报, 2023, 60 (2): 355–366.

HUANG Jing, HAN Tianfu, SHEN Zhe, LIU Kailou, MA Changbao, WANG Huiying, QU Xiaolin, YU Zikun, XIE Jianhua, ZHANG Huimin. Spatiotemporal Variation of Fertility Quality of Chinese Paddy Soil Based on Fuzzy Method in Recent 30 Years[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60 (2): 355–366.

基于模糊数学 (Fuzzy) 法的中国水稻土肥力质量近 30 年的时空变化特征*

黄晶^{1, 2}, 韩天富¹, 申哲¹, 柳开楼³, 马常宝⁴, 王慧颖⁴, 曲潇琳⁴, 于子坤⁴, 谢建华⁴, 张会民^{1, 2†}

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/耕地培育技术国家工程实验室, 北京 100081; 2. 祁阳农田生态系统国家野外科学观测研究站, 湖南祁阳 426182; 3. 江西省红壤研究所/国家红壤改良工程技术研究中心, 江西进贤 330046; 4. 农业农村部耕地质量监测保护中心, 北京 100125)

摘要: 基于农业农村部在我国主要稻区的长期定位监测数据 (1988—2017 年), 采用模糊数学 (Fuzzy) 法对水稻土肥力质量进行评价, 并结合地统计学和机器学习, 阐明我国水稻土肥力质量时空变化特征及其影响因素。近 30 a 来全国稻区土壤肥力质量呈显著上升趋势 ($P < 0.05$), 从前期 (1988—1999 年) 至中期 (2000—2009 年) 和从中期至近期 (2010—2017 年), 全国稻田土壤肥力指数 (SFI) 分别平均增加了 6.9% 和 17.7%。各稻区 SFI 阶段性变化特征存在差异, 西南和长江中游稻区呈前慢后快的显著上升趋势 ($P < 0.05$), 华南和长江三角洲 (长三角) 稻区呈前快后稳的上升趋势, 东北稻区呈前降后升的变化趋势。近期全国稻田 SFI 呈现北高南低、东高西低的分布特征, SFI 超过全国平均值 (0.61) 的区域占 50.2%。与中期相比较, 近期全国稻区 SFI 总体呈上升趋势, SFI 增加的区域占 69.3%。各稻区在前期和中期 (东北稻区的中期除外) 均表现为土壤有机质和全氮影响 SFI 变化的相对重要性占比 (19.4%~60.3%) 远大于其他指标 (0.1%~13.3%)。至近期, 所有稻区各指标影响 SFI 变化的相对重要性占比差距缩小 (7.4%~26.8%), 土壤有效磷和速效钾及土壤 pH (东北稻区 pH 除外) 等指标的相对重要性增加, 其中长江中游稻区土壤有效磷含量的相对重要性增至最大, 但各稻区仍均以土壤全氮和有机质含量的相对重要性较大。综上, 应综合考虑不同阶段和不同稻区土壤肥力质量时空差异特征及其关键肥力指标相对重要性的变化, 针对性地优化施肥措施, 防治水稻土酸化, 以改善和提高水稻土肥力质量。

关键词: 水稻土; 主要稻区; 模糊数学 (Fuzzy) 法; 土壤肥力指数; 时空变化; 增强回归树

中图分类号: S156.6 **文献标志码:** A

* 国家重点研发计划项目课题 (2016YFD0300901) 和现代农业产业技术体系 (CARS-01-88, CARS-22-Z09) 资助 Supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFD0300901) and China Agriculture Research System (Nos. CARS-01-88 and CARS-22-Z09)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: zhanghuimin@caas.cn

作者简介: 黄晶 (1983—), 男, 湖南汨罗人, 博士, 副研究员, 主要从事土壤养分循环与资源高效利用研究。E-mail: huangjing@caas.cn

收稿日期: 2021-07-05; 收到修改稿日期: 2021-11-01; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2022-03-08

Spatiotemporal Variation of Fertility Quality of Chinese Paddy Soil Based on Fuzzy Method in Recent 30 Years

HUANG Jing^{1,2}, HAN Tianfu¹, SHEN Zhe¹, LIU Kailou³, MA Changbao⁴, WANG Huiying⁴, QU Xiaolin⁴, YU Zikun⁴, XIE Jianhua⁴, ZHANG Huimin^{1,2†}

(1. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences/National Engineering Laboratory for Improving Quality of Arable Land, Beijing 100081, China; 2. National Observation and Research Station of Qiyang Agri-ecology System, Qiyang, Hunan 426182, China; 3. Jiangxi Institute of Red Soil/National Engineering and Technology Research Center for Red Soil Improvement, Jinxian, Jiangxi 330046, China; 4. Center of Cultivated Land Quality Monitoring and Protection, Ministry of Agricultural and Rural Affairs, Beijing 100125, China)

Abstract: [Objective] The spatiotemporal variation characteristics and driving factors of fertility quality of paddy soils in China were studied. [Method] Based on the long-term monitoring data (1988—2017) of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs in the main rice areas in China, the fertility quality of paddy soil in the main rice areas was evaluated by the fuzzy mathematics (Fuzzy) method, and combined geo-statistics with machine learning. [Result] In the recent 30 years, the soil fertility index (SFI) of the rice area in China increased significantly ($P < 0.05$). From the prophase (1988—1999) to the interim (2000—2009) and from the interim to the recent (2010—2017), the national paddy field SFI increased by 6.9% and 17.7% on average, respectively. The characteristics of SFI varied in different time stages in the main rice regions. The rice regions in southwest China and the middle reaches of the Yangtze River showed a significant increasing trend of slow in the early period (from prophase to interim) and fast in the later period (from interim to recent) ($P < 0.05$). Also the rice fields in South China and the Yangtze River Delta showed a rising trend of fast in the early stage (from prophase to interim) and stable in the later stage (from interim to recent). There was a decreasing trend in the earlier period (from interim to recent) and increasing in the later period (from interim to recent) in the Northeast rice region. At the recent, the distribution of paddy SFI in China showed a trend of higher in the north and lower in the south, higher in the east and lower in the west. The area with SFI exceeding the national average (0.61) accounted for 50.2%. Compared with the SFI of the rice region in the interim, the SFI showed an overall upward trend in the recent. The increased area accounted for 69.3%. The relative importance of soil organic matter and total nitrogen to SFI change (19.4%—60.3%) was much higher than that of other indexes (0.1%—13.3%) in all rice areas in the prophase and interim (except the middle stage of the northeast rice region). The relative importance of soil Olsen-P, available potassium and soil pH (except the northeast rice region) increased in all rice regions, and the relative importance of soil Olsen-P content increased to the maximum in the middle reaches of the Yangtze River. However, the relative importance of soil total nitrogen and soil organic matter content was greater in all rice regions. [Conclusion] In conclusion, the spatiotemporal variation characteristics of soil fertility quality and the changes of key driving factors at different stages and in different rice regions should be comprehensively considered. The balanced fertilization measures should be optimized to prevent and control soil acidification and to improve the fertility quality of paddy soil.

Key words: Paddy soil; Main rice region; Fuzzy method; Soil fertility index; Temporal and spatial variation; Boosted regression tree

水稻是中国主要的三大粮食作物之一,我国有超过 2/3 的人口以大米为主食,水稻种植面积约占全球的 1/5, 在我国的粮食安全保障体系和农业生产中占有重要地位。了解水稻土肥沃程度和科学培肥是当前保障水稻丰产稳产和实现粮食安全的重要内容。据统计^[1], 我国 2019 年水稻播种面积为 2 969 万 hm^2 , 占粮食作物总播种面积的 25% 以上。水稻在中国分布广泛, 自南向北跨越了热带、亚热

带、温带及寒温带地区。32 个省、自治区、直辖市中除青海外, 均有水稻种植, 其中有 16 个省(市)的播种面积大于 50 万 hm^2 ^[2]。由于水稻土是以种植水稻为主的耕作制度下人为管理措施影响形成的, 导致各水稻种植区域的施肥、耕作措施、田间管理等存在差异, 同时土壤母质、气候、地形和水文等因素可能会对土壤供肥潜力产生一定程度的影响^[3], 最终引起水稻土肥力高低水平存在高度的时空异

质性。而理解和表征土壤肥力的时空变化是土壤学的基本任务,也是评估和合理发挥土壤功能的重要前提^[4]。

土壤肥力是衡量土壤能够提供作物生长所需的各种养分的能力,是影响作物产量的重要因素。通常情况,高肥力下水稻产量显著高于低肥力土壤^[5]。就单个肥力指标的变化而言,我国主要稻区土壤 pH 整体呈弱酸性^[6]。近 30 a 水稻土受酸胁迫程度加剧,水稻土由酸性 ($5.5 \leq \text{pH} \leq 6.5$) 转变为强酸性 ($\text{pH} < 5.5$) 面积增加相对比例最大,主要集中于长江中下游中部、南部和华南区中部、南部^[7]。近 30 a 主要稻作区土壤有机质 ($31.3 \sim 32.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和全氮 ($1.88 \sim 1.92 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 含量基本稳定,有机质含量从高至低依次为长江中游、华南、东北、西南和长江下游稻区,有机质含量年均增速 ($0.09 \sim 0.12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 呈现从南到北依次增加的趋势^[8-9]。主要稻作区土壤有效磷含量随施肥年限的延长而显著升高,土壤有效磷含量近 30 a 平均为 $21.18 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均年增速为 $0.36 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[10]。在近 30 a 间,东北区水稻土速效钾含量显著高于长江三角洲(长三角)、长江中游、华南和西南地区。随试验年限的延长,除了长江中游的水稻土速效钾为先增加后稳定的趋势外,东北、长三角和华南区速效钾含量均呈先稳定后增加的趋势,而西南区则无显著变化^[11]。以上研究为全国主要稻区单项肥力指标的管理和调控提供了科学依据。但是土壤单一养分或肥力指标的变化仅能从一定角度反映土壤肥力的变化特征,难以全面表征土壤肥力质量。用合理的方法评估土壤肥力水平的时空变化特征,了解我国主要水稻土肥力时间、空间变化特征及其影响因素,为实现“藏粮于地”、保障粮食安全具有重要意义。因此,本研究基于农业农村部在我国主要稻区的长期定位监测数据(1988—2017 年),参考《土壤质量指标与评价》^[12]的水稻土肥力评价指标体系和方法,采用模糊数学(Fuzzy)法^[12-13]对水稻土肥力质量进行综合评价,并结合地统计学和机器学习等方法,以期探明我国主要稻区近 30 a 来水稻土肥力质量时空变化特征及其影响因素,为各稻区土壤培肥提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 数据来源

基于农业农村部在全国布置的稻作区土壤监测

点,本研究所用的数据均来源于近 30 a(1988—2017 年)监测工作开展期间所收集的水稻田间试验数据。共选取全国主要稻作区 322 个土壤监测点,结合区域气候、土壤类型及水稻栽培制度的差异,将我国粮食主产区水稻土分为 5 大区域:东北区(黑龙江省(3 个)、吉林省(7 个)和辽宁省(7 个))、长江中游区(湖北省(18 个)、湖南省(45 个)、江西省(51)和安徽省(29 个))、长三角区(江苏省(36 个)、浙江省(14 个)和上海市(3 个))、西南区(四川省(30 个)、云南省(7 个)、贵州省(7 个)和重庆市(9 个))和华南区(广东省(33 个)、福建省(12 个)和广西壮族自治区(11 个))(括号内数字为各省(区、市)监测点数量)。监测地块的地理位置、耕作制度、土壤类型、作物类型、分布面积、管理水平等在各区域均有较好的代表性。监测点具体设置详见已发表文章^[8-10]。

1.2 土壤肥力指数计算

参考前人^[12]对评价指标的选择,同时综合考虑水稻土肥力要素的特点以及农业农村部土壤质量监测数据的构成,本研究选用各监测点常规施肥区的土壤 pH、有机质、全氮、有效磷和速效钾共 5 项作为土壤肥力综合评价的参考指标,并对获得的数据通过 3σ 准则删除特异值,即样本平均值加减三倍标准差,在此区间以外的数据均定为特异值^[14]。按照模糊数学(Fuzzy)法计算土壤肥力质量。首先对土壤中各参评肥力指标建立相应的隶属度函数,计算其隶属度值。根据土壤肥力指标对作物产量的效应曲线将隶属度函数分为 S 型和抛物线型两种类型。其中有机质、全氮、有效磷、速效钾属于 S 型(正相关型)隶属度函数,pH 属于抛物线型(梯型)隶属度函数^[15]。结合《土壤质量指标与评价》^[12]和本研究数据的分布特征,确定土壤 pH 在抛物线型隶属度函数曲线中转折点 X1、X2、X3 和 X4 的取值分别对应为 4.5、5.5、6.0 和 7.0。土壤有机质、全氮、有效磷和速效钾在 S 型隶属度函数曲线中转折点 X1 的相应取值分别为 $10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, X2 的相应取值分别为 $40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $2.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。将各项肥力质量指标值分别代入隶属度函数可得其隶属度值,采用相关系数法计算权重。

由加乘法则得到评价土壤肥力指数(soil fertility index, SFI)的综合性指标值,即土壤肥力质量。

计算公式为:

$$SFI = \sum Wi \times Ni \quad (1)$$

式中, Wi 和 Ni 分别表示第 i 种肥力质量指标的权重系数和隶属度值。

1.3 土壤肥力指数空间分布图绘制

半方差函数在 GS⁺9.0 软件进行模拟, 根据决定系数 R^2 最大即最优的原则选择理论模型。经 K-S 检验, 1988—1999 年 (前期)、2000—2009 年 (中期) 和 2010—2017 年 (近期) 全国稻区样点分布符合正态分布, 由全国稻区 SFI 半变异函数模型及相关参数 (表 1) 可见, 中期和近期的块金系数小于 75%,

数据空间相关性较强, 决定系数和残差均符合克里金 (Kriging) 插值要求, 对这 2 个时间阶段的土壤肥力指数在 ArcGIS 10.2 中进行插值分析。

1.4 数据统计与分析方法

经 Excel 2010 整理数据后, 用 SPSS 12.5 软件进行方差分析, 各稻区 SFI 在不同时间阶段之间的差异采用最小显著差异 (LSD) 法进行显著性分析 ($P < 0.05$), 采用 SigmaPlot 12.5 作图。采用增强回归树 (boosted regression tree, BRT) 模型计算不同时间阶段地理位置 (经度和纬度)、土壤 pH、有机质、全氮、有效磷和速效钾等指标影响 SFI 变化的相对重要性, 采用 R 语言中的 “gbm” 数据包计算相对重要性。

表 1 各时间段全国稻区土壤肥力指数半变异函数模型及相关参数

Table 1 Semi-variation function model of soil fertility index in National rice area and related parameters at each stage in time

时间 Time	理论模型 Theoretical model	块金值 Nugget	基台值 Sill	块金系数 ^①	变程 Range/km	决定系数 ^②	残差 Residual
1988—1999 年 (前期) ^③	球状模型 ^⑥	0.0007	0.020	0.964	54	0.026	2.16×10^{-4}
2000—2009 年 (中期) ^④	指数模型 ^⑦	0.009	0.034	0.734	582	0.416	4.12×10^{-4}
2010—2017 年 (近期) ^⑤	指数模型 ^⑦	0.0122	0.0329	0.628	966	0.909	4.00×10^{-5}

①Nugget coefficient, ②Determination coefficient, ③Prophase, ④Interim, ⑤Recent, ⑥Spherical model, ⑦Exponential model.

2 结果

2.1 近 30 年稻田土壤肥力质量时间变化特征

各稻区不同时间阶段的土壤肥力指数 (SFI) 变化如表 2 所示。前期各稻区 SFI 变化范围在 0.41~0.64, 全国平均为 0.48, 以西南稻区最低, 东北稻区最高, 变异系数分别以西南稻区最高和东北稻区最低。中期各稻区 SFI 变化范围在 0.41~0.64, 全国平均为 0.51, 以西南稻区最低, 华南稻区最高, 变异系数分别以西南稻区最高和华南稻区最低。近期各稻区 SFI 变化范围在 0.52~0.73, 全国平均为 0.61, 以西南和长三角稻区最低, 东北稻区最高, 变异系数分别以西南稻区最高和东北稻区最低。在 3 个时间段, 各稻区 SFI 变化均表现为中等强度变异 ($CV > 10\%$)。

近 30 a 来全国稻区 SFI 呈显著上升趋势 ($P < 0.05$), 各稻区在不同时间阶段的变化趋势各不相同 (图 1), 从前期至中期和从中期至近期, 全国稻区 SFI 平均增加了 6.9% 和 17.7%, 中期至近期的增加幅度大于

前期至中期。西南稻区从前期至中期, SFI 无显著变化, 从中期至近期, SFI 显著提高了 31.2% ($P < 0.05$)。华南稻区从前期至中期, SFI 显著上升了 21.2% ($P < 0.05$), 从中期至近期, SFI 略有下降。长江中游稻区从前期至中期, SFI 显著上升了 20.6% ($P < 0.05$), 从中期至近期, SFI 显著增加 ($P < 0.05$), 增幅略有下降 (6.2%)。长三角稻区从前期至中期和从中期至近期, SFI 分别增加了 3.8% 和 4.4%, 近 30 年增加约 8.2%, 未达到显著上升水平。东北稻区的 SFI 相对其他稻区, 处于较高水平, 从前期至中期, SFI 变化略有下降, 降幅为 8.6%, 从中期至近期, SFI 显著增加了 25.0% ($P < 0.05$)。

2.2 中国稻田土壤肥力质量空间变化特征

近期全国稻区 SFI 表现为北高南低、东高西低的空间分布特征。SFI 超过全国平均值 (0.61) 的区域占 50.2%, 主要分布在东北的黑龙江省和吉林省、长江中游的湖南省和江西省、西南的云南省和贵州省南部、华南区的广西壮族自治区, 其他稻区 SFI 均低于全国平均值, 并且在四川省北部、重庆市、

表 2 各稻区不同时间阶段土壤肥力指数描述性统计

Table 2 Descriptive statistics of soil fertility index at different time stages in each rice area

时间 Time	区域 Region	样本数 Samples	最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均 Average	标准差 SD	变异系数 CV/%	K-S 检验值 K-S check value
1988—1999 年 (前期 Prophase)	SW	14	0.21	0.75	0.41	0.15	36.7	0.25
	SC	15	0.29	0.72	0.54	0.14	26.4	0.13
	MYR	95	0.14	0.75	0.47	0.14	29.4	0.09
	YRD	26	0.21	0.74	0.48	0.15	31.9	0.15
	NE	7	0.50	0.81	0.64	0.12	18.2	0.20
	WN	157	0.14	0.81	0.48	0.15	30.6	0.04
2000—2009 年 (中期 Interim)	SW	228	0.13	0.83	0.40	0.15	37.3	0.07
	SC	35	0.32	0.82	0.65	0.14	21.4	0.18
	MYR	395	0.19	0.89	0.57	0.17	29.2	0.08
	YRD	32	0.23	0.79	0.50	0.16	31.3	0.10
	NE	9	0.32	0.76	0.58	0.15	26.4	0.21
	WN	699	0.13	0.89	0.51	0.18	34.8	0.06
2010—2017 年 (近期 Recent)	SW	73	0.17	0.85	0.52	0.18	33.6	0.10
	SC	101	0.29	0.92	0.60	0.15	24.2	0.07
	MYR	558	0.14	0.96	0.60	0.17	27.5	0.07
	YRD	116	0.15	0.90	0.52	0.17	33.3	0.07
	NE	134	0.31	1.00	0.73	0.15	20.6	0.06
	WN	982	0.14	1.00	0.61	0.17	28.8	0.05

注: SW: 西南; SC: 华南; MYR: 长江中游; YRD: 长江三角洲; NE: 东北; WN: 全国。SD, 标准偏差; CV, 变异系数。下同。 Note: SW, Southwest of China; SC, South of China; MYR, Middle of the Yangtze River; YRD, Yangtze River Delta; NE, Northeast of China; WN, Whole National; SD, Standard deviation; CV, Coefficient of variation. The same below.

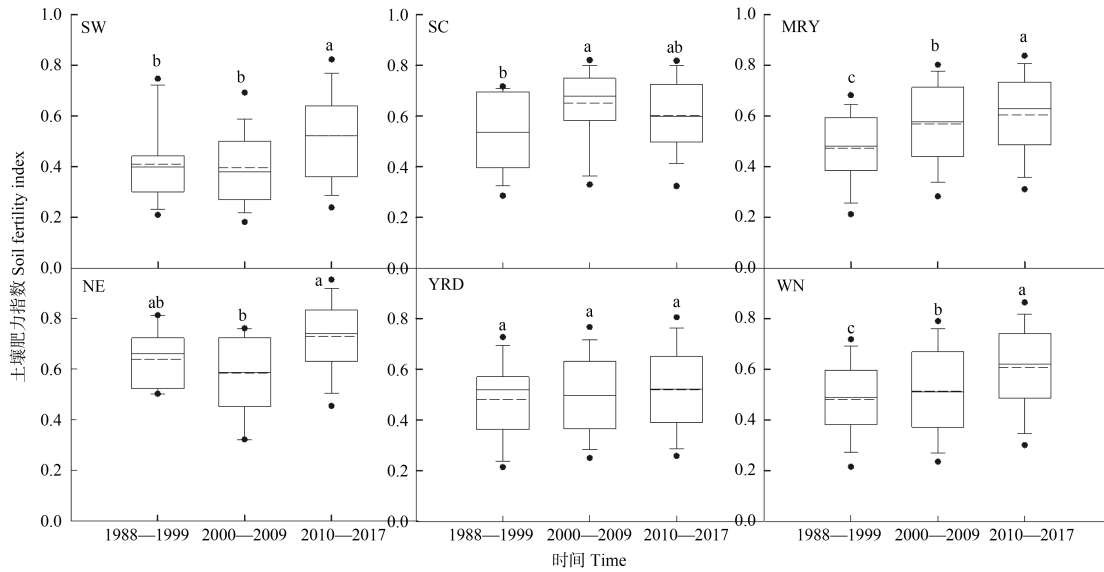
湖北省北部、安徽省北部和江苏省北部区域, 稻田 SFI 低于中期的全国平均值 (0.51), 所占面积约 21.4% (图 2)。

从中期至近期, 全国稻区 SFI 总体呈上升趋势, SFI 增加的区域占 69.3%, 主要分布在东北稻区、长江中游稻区和西南稻区大部分区域。土壤肥力下降的区域占 30.7%, 集中分布在华南稻区、长三角稻区浙江省和西南稻区的四川省北部区域 (图 3)。

2.3 中国水稻土肥力质量变化影响因子及其相对重要性

本研究所选指标影响各稻区 SFI 变化的相对重要性有区域差异, 也呈现明显的时间阶段性变化特征 (图 4)。西南稻区, 前期和中期土壤有机质和全氮含量影响 SFI 变化的相对重要性占比最大, 2 个指标的相对重要性之和在前期和中期分别为 69.3%

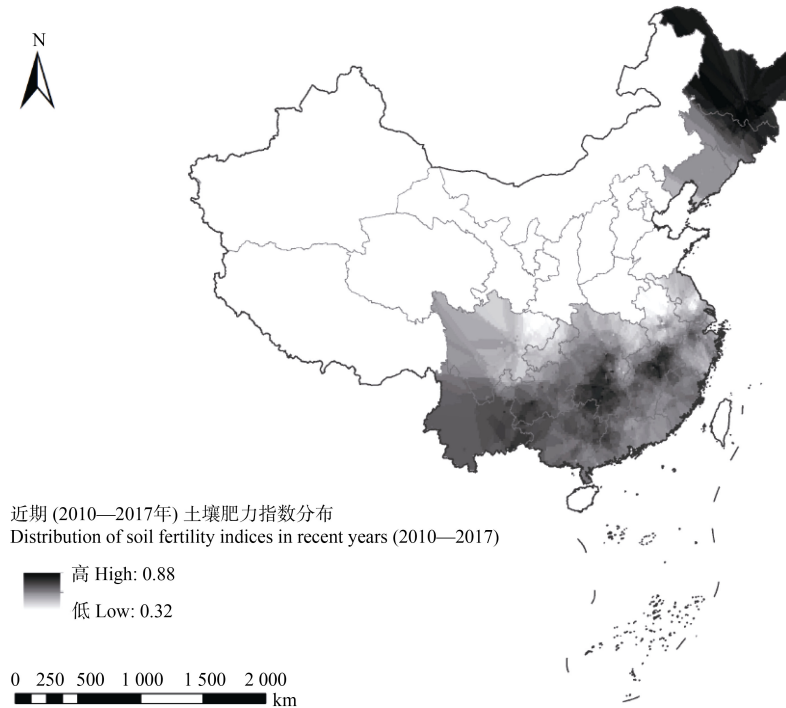
和 86.8%, 其他各指标在前期和中期的相对重要性及变幅较小。至近期, 土壤有机质和全氮含量的相对重要性大幅度下降, 分别为 17.8% 和 20.8%, 经度、纬度、pH、有效磷和速效钾影响 SFI 变化的相对重要性, 与前期相比较, 均有不同程度的上升。华南稻区, 前期和中期土壤有机质和全氮含量影响 SFI 变化的相对重要性占比最大, 2 个指标的相对重要性之和在前期和中期分别为 82.7% 和 74.4%, 从前期到中期, 土壤有机质含量的相对重要性从 49.6% 下降至 19.4%, 土壤全氮和速效钾的相对重要性分别从 33.1% 和 2.7% 上升至 55.0% 和 9.7%。与前期和中期相比较, 近期的土壤有机质和全氮含量的相对重要性已分别降低至 18.4% 和 18.6%, 经度、纬度、pH、有效磷和速效钾影响 SFI 变化的相对重要性均有提高。长江中游稻区, 前期和中期影响 SFI



注：图中不同的小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)；实心圆圈 (●) 为异常值，中间实线代表中位数，虚线代表平均值；上下两条线分别代表 75% 和 25% 的置信区间；上下两个短线分别代表 95% 和 5% 的置信区间。Note: Different lowercases indicate significantly different ($P < 0.05$). The solid points represent the vertical outliers. The solid line in the box represents the median value, and the short dash represents the average value. The upper and lower line represents 75% and 25% confidence intervals, respectively. The upper and lower dots represent 95% and 5% confidence intervals, respectively.

图 1 各稻区土壤肥力指数不同时间阶段变化

Fig. 1 The soil fertility index of each rice area changed in different time stages



注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS (2016) 1554 号的标准地图制作，底图无修改，下同。Note: This map is made based on the standard map No. GS (2016) 1554 downloaded from the standard map service website of National Administration of Surveying, Mapping and Geographic Information, without modification of the base map. The same below.

图 2 近期 (2010—2017) 主要稻区水稻土肥力指数空间变化

Fig. 2 Current situation of paddy soil fertility index in recent in main rice areas

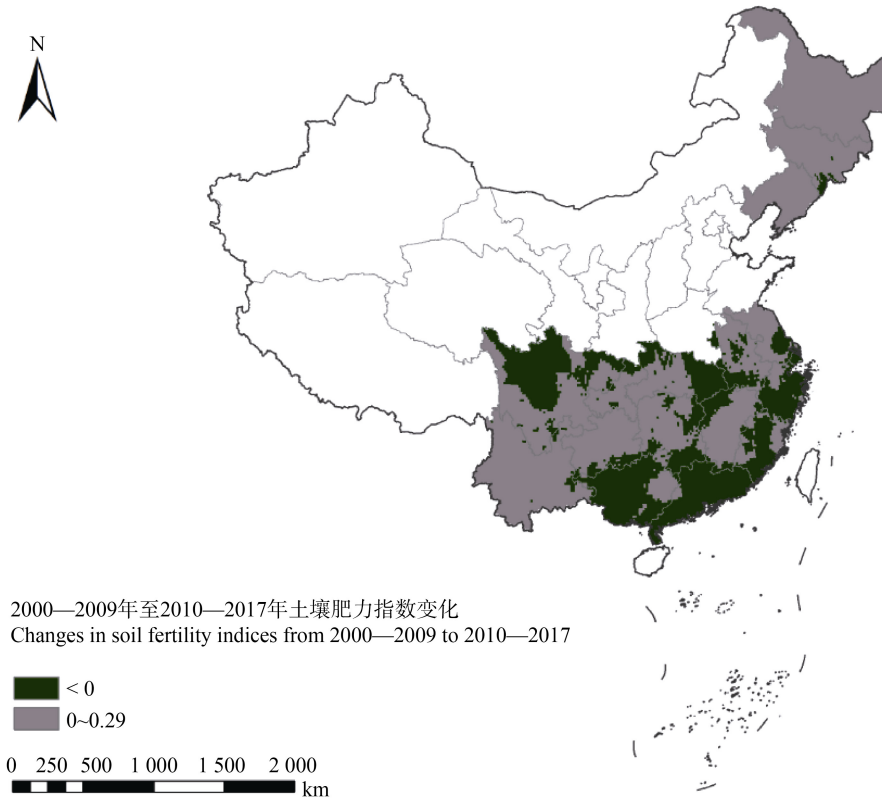
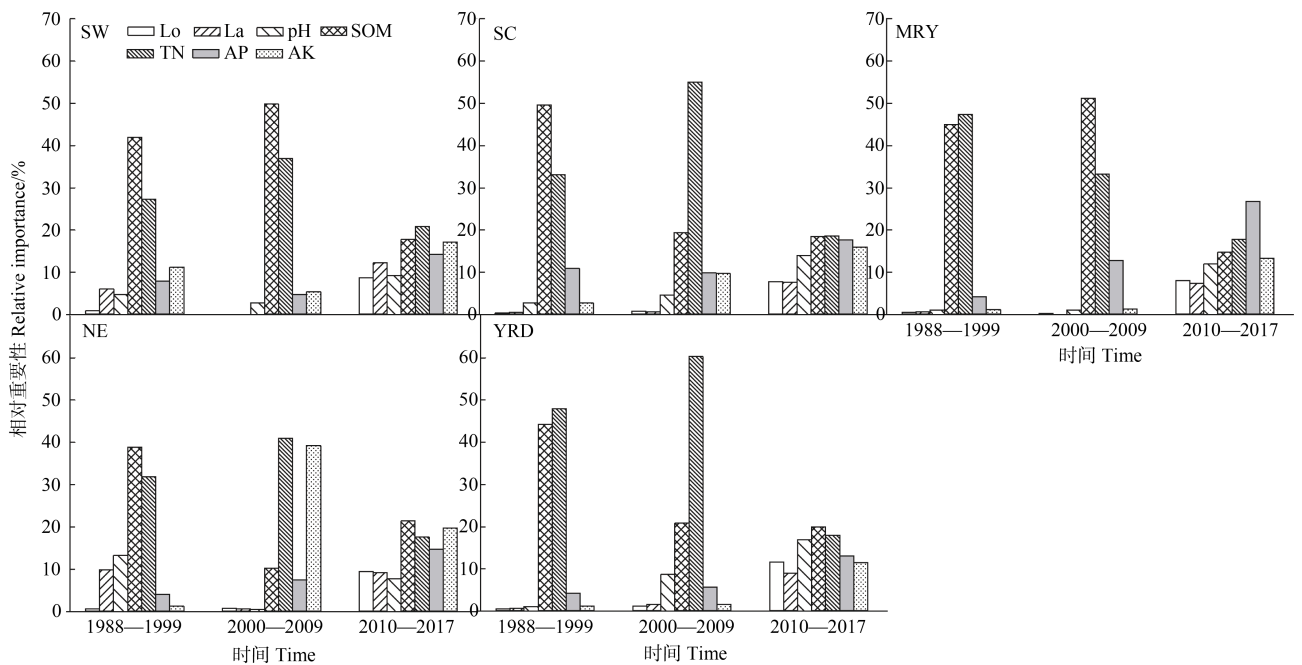


图 3 主要稻区近 20 年水稻土肥力指数变化（从中期到近期）

Fig. 3 Changes of paddy soil fertility index in main rice areas in recent 20 years (from interim to recent)



注：图中 Lo、La、SOM、TN、AP 和 AK 分别表示经度、纬度、土壤有机质、全氮、有效磷和速效钾。Note: Lo, La, SOM, TN, AP and AK represent longitude, latitude, soil organic matter, total nitrogen, available phosphorus and rapidly available potassium respectively.

图 4 各稻区肥力指标影响土壤肥力指数变化的相对重要性

Fig. 4 The relative importance of fertility indexes affecting soil fertility index changes

变化的主要因素为土壤有机质和全氮含量, 2 个指标的相对重要性之和在前期和中期分别为 92.4%和 84.5%, 至中期, 土壤有效磷含量的相对重要性已上升至 12.8%, 其他各指标在前期和中期的相对重要性和变幅较小。近期与前期和中期相比较, 土壤有机质和全氮含量的相对重要性已分别下降至 14.7%和 19.7%, 经度、纬度、pH、有效磷和速效钾影响 SFI 变化的相对重要性均有上升。长三角稻区, 前期和中期影响 SFI 变化的主要因素为土壤有机质和全氮含量, 2 个指标的相对重要性之和在前期和中期分别为 92.2%和 81.2%, 从前期至中期, 土壤有机质含量的相对重要性由 44.3%降低至 20.9%, 土壤全氮含量和 pH 的相对重要性已分别由 47.9%和 1.1%上升至 60.3%和 8.7%。至近期, 各指标影响 SFI 变化的相对重要性的占比差异进一步缩小, 从中期至近期, 土壤 pH 的相对重要性 (16.9%) 仅次于土壤全氮和有机质含量 (20.0%和 18.0%)。东北稻区, 前期影响 SFI 变化的主要因素为土壤有机质、全氮和 pH, 3 个指标的相对重要性占比达 84.1%。至中期, 影响 SFI 变化的主要因素为土壤全氮、速效钾和有机质含量, 3 个指标的相对重要性占比达 90.6%, 与前期相比较, 土壤速效钾含量的相对重要性增加了约 30 倍。至近期, 经度、纬度、pH、有机质、全氮、有效磷和速效钾影响 SFI 变化的相对重要性 (9.2%~21.4%) 差异进一步缩小。总体而言, 各稻区在前期和中期 (东北稻区的中期除外) 均表现为土壤有机质和全氮对影响 SFI 变化的相对重要性占比 (19.4%~60.3%) 远大于其他指标 (0.1%~13.3%), 相差约 5 倍~603 倍。至近期, 所有稻区各指标影响 SFI 变化的相对重要性占比差距缩小 (7.4%~26.8%)。各稻区在前期和中期均表现为土壤有机质和全氮对影响 SFI 变化的相对重要性占比 (10.3%~60.3%) 远大于其他指标 (0.1%~39.3%), 至近期, 所有稻区各指标影响肥力指数变化的相对重要性占比 (7.4%~26.8%) 差距缩小, 除土壤有机质和全氮含量的相对重要性不同程度降低但依然较高之外 (14.7%~21.4%), 其他指标的相对重要性得到凸显 (7.4%~26.8%), 各稻区土壤有效磷和速效钾含量及除东北稻区外土壤 pH 等指标的相对重要性增加, 其中长江中游稻区土壤有效磷含量的相对重要性增至最大。

3 讨 论

3.1 近 30 年稻田土壤肥力质量呈阶段性变化

土壤有机质和大量养分元素的含量是土壤肥力的核心, 而通过合理施肥调节农田养分的循环和平衡是提高农田土壤肥力的主要手段, 土壤养分含量变化是导致土壤肥力水平出现时空差异的主要因素^[16]。近 30 a 来全国稻区 SFI 呈显著上升趋势, 主要是由于近 30 a 全国稻田耕层土壤有机质、有效磷和速效钾含量年平均呈增加趋势^[9-11]。各稻区由于土壤类型、农田管理措施和气候因子等差异, 导致土壤肥力时间变化特征各异。西南和华南稻区的土壤综合肥力水平在近 30 a 显著提升 (图 1), 可能是由于前期 (1988—1999 年) SFI 较低, 分别为 0.41 和 0.47, 而随着养分投入的逐年增加, 尤其从 20 世纪 80 年代初开始迅速上升, 至 2008 年, 通过化肥投入的氮、磷、钾养分以华北和长江中下游地区较高, 两区合计占全国化肥消费量的 56.7%, 西南地区氮、磷、钾的消费量占全国的 11.1%, 且长江中下游和西南地区有机肥养分投入量也较高, 分别占全国的 19.2%和 21.6%^[17], 通过区域养分投入量的增加, 提高土壤有机质和大量元素含量, 从而提升土壤综合肥力水平; 同时在 2010 年之后, 近期 (2010—2017 年) 随着高标准农田建设的大范围实施, SFI 的增幅相比前期更大。东北、长三角和华南稻区 SFI 近 30 a 来的变化差异不显著 (图 1)。东北稻区 SFI 表现为先降后升, 从前期至中期 (2000—2009 年) 下降了约 8.6% (图 1)。可能是由于近些年来东北旱改稻面积逐年增加, 而种稻年限是影响土壤肥力质量变化的重要因素, 东北黑土区旱田改稻田大于 5 年后, 稻田土壤才具有明显的固碳 (氮) 能力^[18]。2010 年之后, 随着东北水稻种植面积的进一步增加^[19], 在测土配方施肥和土壤有机质提升等项目的实施下, 合理施肥和秸秆还田能够促进 SFI 提升^[20]。华南稻区 SFI 呈先升后降的趋势, 前期至中期 SFI 显著上升 ($P<0.05$), 中期至近期 SFI 的变化未达到显著水平 (图 1)。可能由于前期随着外源投入的增加, 土壤有机质和氮磷钾养分含量逐渐提高, 土壤肥力水平提升较快^[21-22]。后期随着化肥零增长等行动的实施, 化肥投入量相对减少, 同时随着种植制度和农田管理措施的变化, 有机物料还田率下降^[23], 可能使得 SFI 略有降低。长三角

稻区近 30 a SFI 呈上升趋势, 但未见显著差异 (图 1)。可能是由于该区域水稻土主要由黄棕壤及相应的草甸土、沼泽土和河流冲积土发育而成, 经过长期培育形成了大面积具有“鱗血”斑块的综合肥力水平较高的水稻土^[24]。同时, 该稻区的养分投入量长期保持在较高水平, 并采取了稻麦轮作和保护性耕作等措施以提高土壤质量^[25]。

3.2 各稻区土壤肥力质量空间变化影响因素及其相对重要性

2010—2017 年全国稻区 SFI 表现为北高南低、东高西低的空间分布特征。主要是由于南方水稻土分布区域高温多雨和复种指数高, 导致养分淋失和耗竭严重, 加之该地区水稻土母质大多是第四纪红土, 富含铁、锰氧化物, pH 较低, 黏土矿物以高岭石为主, 来自母质的矿质成分较少, 土壤有机质的组成又简单, 土壤肥力质量偏低^[24]。而北方地区水稻土黏土矿物以水云母为主, 有机质组成中胡敏酸和富里酸的比值较高, 同时 pH 较高^[24]。西南稻区主要以紫色土为主, 受成土因素影响, 紫色土土层浅薄、水土流失严重、保水保肥能力差、土壤肥力低等障碍突出^[26], 其肥力质量低于东部水稻土。可见, 农业气候条件、成土母质和耕作制度等原因导致全国主要稻区土壤肥力质量呈明显的空间差异。

水稻土肥力主要驱动因子存在地区差异, 因此, 依据区域特征采取针对性措施是持续、高效培肥土壤的保证^[21]。从前期至中期, 西南、华南、长江中游和长三角稻区均以有机质和全氮含量影响 SFI 变化的相对重要性占比远大于其他指标 (图 4)。这可能与当时各稻区的施肥措施有关, 我国改革开放以来, 绿肥、草塘泥、畜禽粪便等有机肥用量逐渐减少, 化肥消费量上升迅速, 以施用单质化肥为主, 复合肥施用比例较小, 并且与氮肥的大量施用相比, 磷、钾肥施用比例仍然偏低^[17, 27-28]。肥料结构单一, 施肥主要以有机肥和化学氮肥为主, 导致影响 SFI 变化的主要因素为土壤有机质和全氮含量。从前期至中期, 东北稻区影响土壤肥力变化的主要因素由土壤有机质和全氮含量变成了土壤全氮和速效钾含量 (图 4)。这可能与东北稻区水稻种植面积的时空演变有关, 东北地区水稻种植面积由 2001 年的 271.64 万 hm^2 扩大至 2017 年的 604.33 万 hm^2 ^[29]。在淹水条件下, 有机物积累较多, 土壤中磷有效性增强, 同时由于长期重施氮磷肥, 钾肥的施用量较

小, 而使土壤养分状况发生改变。已由以前的缺氮、缺磷、不缺钾, 转变为不缺氮, 磷有余而钾不足^[30]。

近期, 西南、华南、长三角和东北稻区, 仍以土壤有机质和全氮含量影响 SFI 变化的相对重要性占比较大 (图 4)。不同稻区相关研究结果也表明, 这时期土壤有机质含量是土壤肥力的一个关键因素^[13, 21, 31-32], Fan 等^[33]研究指出, 中国近 30 a 主要作物系统土壤基础肥力的提高主要原因就是土壤有机质含量的提高。西南、华南、长三角和东北稻区 2010—2017 年土壤有机质和全氮之间的相关系数分别为 0.696 9 ($n=212$)、0.703 6 ($n=388$)、0.500 9 ($n=311$) 和 0.455 ($n=182$), 均达到极显著正相关水平 ($P<0.01$), 各稻区土壤碳氮呈明显耦合关系 (数据未列出)。因此, 建议以上稻区主要考虑通过增加有机物料投入来增加土壤有机质含量, 从而提升土壤肥力质量。尤其对于 SFI 下降的华南稻区、长三角稻区浙江省和西南稻区的四川省北部区域, 应通过增施有机肥、种植绿肥和秸秆还田等多种措施^[26, 34], 以提高土壤有机质含量和磷钾库容量, 从而实现土壤综合肥力水平的提升。至近期, 所有稻区各指标影响肥力指数变化的相对重要性占比差距缩小, 除土壤有机质和全氮含量的相对重要性不同程度降低但依然较高之外, 各稻区土壤有效磷和速效钾及除东北稻区外土壤 pH 等指标的相对重要性增加 (图 4)。这主要与国家积极推广测土配方施肥技术相关, 从 2009 年开始, 中国有关教学科研单位与地方政府及肥料企业合作, 基于测土配方施肥的田间试验数据和测土数据开展不同尺度上的“大配方、小调整”区域配肥技术研究与应用, 通过配方的调整, 改变了农民原来不合理的施肥习惯, 配肥施入的氮、磷、钾和中微量元素更均衡^[35], 同时, 由于长期氮肥过量施用, 近 30 a 来水稻土受土壤酸胁迫程度加剧, 特别是由酸性 ($5.5<\text{pH}\leq 6.5$) 转变成强酸性 ($\text{pH}<5.5$) 面积增加相对比例最大, 主要集中在长江中下游中部、南部和华南区中部、南部^[7]。上述因素可能导致影响 SFI 变化的各指标的相对重要性均有凸显。其中长江中游稻区, 土壤有效磷含量影响 SFI 变化的相对重要性占比增至最大 (图 4), 与该区域之前的相关研究结果^[36]相似。可能是由于该区域 (湖南、湖北和江西) 水稻种植范围主要位于南方红壤区, 为低硅、高铁铝型土壤, 且质地黏重、有机质含量不足、固

磷能力强, 导致土壤有效磷含量总体较低^[37]。本研究中有 56.6% 的监测点位, 其有效磷含量低于该区域水稻土有效磷农学阈值 ($17.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[37]。因此, 建议对长江中游稻区可采取有机无机肥料配施和适当增施化学磷肥等方式, 以增加土壤有效磷含量和土壤磷素有效性^[37]。因此, 今后应根据各区域水稻生产实际情况和肥力指标的变化, 适时优化配肥方案, 确保水稻丰产和水稻土肥力可持续发展。

4 结 论

近 30 a 来全国稻区土壤肥力质量呈前慢 (前期至中期) 后快 (中期至近期)、总体显著上升趋势, 各稻区土壤肥力质量阶段性变化特征各异, 西南和长江中游稻区呈前慢后快的显著上升趋势, 华南和长三角稻区呈前快后稳的上升趋势, 东北稻区呈前降后升的变化趋势。近期全国稻田土壤肥力质量分布表现为北高南低、东高西低空间分布特征。土壤肥力指数超过全国平均值 (0.61) 的区域占 50.2%。近期与中期相比较, 全国稻区土壤肥力质量总体呈上升趋势, 增加的区域占 69.3%。导致水稻土肥力质量变化的各肥力指标的相对重要性存在时间和地区差异。各稻区在前期和中期均表现为土壤有机质和全氮对影响肥力质量变化的相对重要性占比远大于其他指标。近期, 所有稻区各指标影响肥力质量变化的相对重要性占比差距缩小, 除土壤有机质和全氮含量的相对重要性不同程度降低但依然较高之外, 各稻区土壤有效磷和速效钾及除东北稻区外土壤 pH 等指标的相对重要性增加, 其中长江中游稻区土壤有效磷含量的相对重要性增至最大。各稻区应通过增施有机肥、种植绿肥和秸秆还田, 对于长江中游稻区还需适当增施化学磷肥等多种措施来提高土壤有机质含量和磷钾有效性, 防治土壤酸化, 进而提升土壤肥力质量, 以确保水稻丰产和水稻土肥力质量可持续发展。

参考文献 (References)

- [1] National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China statistical yearbook-2020[M]. Beijing: China Statistics Press, 2020. [中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴-2020[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.]
- [2] China National Rice Research Institute, National Rice Industry Technology R&D Center. China rice industry development report 2020[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2020. [中国水稻研究所, 国家水稻产业技术研发中心. 2020 年中国水稻产业发展报告[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2020.]
- [3] Else K B, Giulia B, Zhanguo B, et al. Soil quality – A critical review[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2018, 120: 105–125.
- [4] Zhang G L, Shi Z, Zhu A X, et al. Progress and perspective of studies on soils in space and time[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57 (5): 1060–1070. [张甘霖, 史舟, 朱阿兴, 等. 土壤时空变化研究的进展与未来[J]. 土壤学报, 2020, 57 (5): 1060–1070.]
- [5] Dong Y X, Tu N M, Wei Z. Research progress on difference of response to fertilization in paddy soils with different basic fertility[J]. China Rice, 2019, 25 (5): 19–23. [董一漩, 屠乃美, 魏征. 不同基础肥力水稻土对施肥响应的差异性研究进展[J]. 中国稻米, 2019, 25 (5): 19–23.]
- [6] Han T F, Liu K L, Huang J, et al. Spatio-temporal evolution of soil pH and its driving factors in the main Chinese farmland during past 30 years[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26 (12): 1–13. [韩天富, 柳开楼, 黄晶, 等. 近 30 年中国主要农田土壤 pH 时空演变及其驱动因素[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26 (12): 1–13.]
- [7] Ye Y C, Sun B, Liu S G, et al. Spatio-temporal variation of paddy soil acidification and its response to nitrogen surplus in China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52 (2): 246–256. [叶英聪, 孙波, 刘绍贵, 等. 中国水稻土酸化时空变化特征及其对氮素盈余的响应[J]. 农业机械学报, 2021, 52 (2): 246–256.]
- [8] Wu H L, Wang S C, Yan Z H, et al. Evolution characteristics of fertility of typical paddy soil in China in recent 30 years[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018, 24 (6): 1416–1424. [武红亮, 王士超, 闫志浩, 等. 近 30 年我国典型水稻土肥力演变特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24 (6): 1416–1424.]
- [9] Li D C, Huang J, Ma C B, et al. Spatio-temporal variations of soil organic matter in paddy soil and its driving factors in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53 (12): 2410–2422. [李冬初, 黄晶, 马常宝, 等. 中国稻田土壤有机质时空变化及其驱动因素[J]. 中国农业科学, 2020, 53 (12): 2410–2422.]
- [10] Du J X, Liu K L, Huang J, et al. Spatio-temporal evolution characteristics of soil available phosphorus and its response to phosphorus balance in paddy soil in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58 (2): 476–486. [都江雪, 柳开楼, 黄晶, 等. 中国稻田土壤有效磷时空演变特征及其对磷平衡的响应[J]. 土壤学报, 2021, 58 (2): 476–486.]
- [11] Liu K L, Han T F, Huang J, et al. Spatio-temporal

- variation of soil readily available potassium and partial factor productivity of potassium fertilizer in rice cultivation regions of China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58 (1): 202—212. [柳开楼, 韩天富, 黄晶, 等. 中国稻作区土壤速效钾和钾肥偏生产力时空变化[J]. *土壤学报*, 2021, 58 (1): 202—212.]
- [12] Xu J M, Zhang G L, Xie Z M. Indices and assessment of soil quality[M]. Beijing: Science Press, 2010. [徐建明, 张甘霖, 谢正苗. 土壤质量指标与评价[M]. 北京: 科学出版社, 2010.]
- [13] Wang Y P, Huang J, Liu K L, et al. Evaluation and spatial variability of paddy soil fertility in typical county of northeast China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26 (2): 256—266. [王远鹏, 黄晶, 柳开楼, 等. 东北典型县域稻田土壤肥力评价及其空间变异[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26 (2): 256—266.]
- [14] Wang W N, Lu J W, Lu M X, et al. Status quo and variation of soil fertility in paddy field—A case study of Hubei Province [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49 (2): 319—330. [王伟妮, 鲁剑巍, 鲁明星, 等. 水田土壤肥力现状及变化规律分析—以湖北省为例[J]. *土壤学报*, 2012, 49 (2): 319—330.]
- [15] Yan X, Zhang Y Z, Liu J. The research progress of soil fertility quality evaluation[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2008 (5): 82—85. [颜雄, 张杨珠, 刘晶. 土壤肥力质量评价的研究进展[J]. *湖南农业科学*, 2008 (5): 82—85.]
- [16] Sun B, Pan X Z, Wang D J, et al. Effect of nutrient balance on spatial and temporal change of soil fertility in different agriculture area in China[J]. *Advances in Earth Science*, 2008, 23 (11): 1201—1208. [孙波, 潘贤章, 王德建, 等. 我国不同区域农田养分平衡对土壤肥力时空演变的影响[J]. *地球科学进展*, 2008, 23 (11): 1201—1208.]
- [17] Li S T, Jin J Y. Characteristics of nutrient input/output and nutrient balance in different regions of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44 (20): 4207—4229. [李书田, 金继运. 中国不同区域农田养分输入、输出与平衡[J]. *中国农业科学*, 2011, 44 (20): 4207—4229.]
- [18] Jia S H, Zhang J N, Zhang Y L, et al. Changes of the characteristics of soil organic carbon and total nitrogen after conversion from upland to paddy field in black soil region of Northeast China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50 (7): 1252—1262. [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.]
- [19] Peng X L, Wang W, Zhou N, et al. Analysis of fertilizer application and its reduction potential in paddy fields of Heilongjiang Province[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52 (12): 2092—2100. [彭显龙, 王伟, 周娜, 等. 基于农户施肥和土壤肥力的黑龙江水稻减肥潜力分析[J]. *中国农业科学*, 2019, 52 (12): 2092—2100.]
- [20] Kang R F, Ren Y, Wu H J, et al. Changes in the nutrients and fertility of black soil over 26 years in Northeast China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49 (11): 2113—2125. [康日峰, 任意, 吴会军, 等. 26 年来东北黑土区土壤养分演变特征[J]. *中国农业科学*, 2016, 49 (11): 2113—2125.]
- [21] Li Z F, Xu M G, Pang H C, et al. The rice yield trend in three hydric paddy soils in South China and its fertility factors[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51 (5): 953—962. [李忠芳, 徐明岗, 逢焕成, 等. 中国南方潜育性水稻土产量演变及其肥力驱动因素分析[J]. *土壤学报*, 2014, 51 (5): 953—962.]
- [22] Zhou B, Chen X F, Zhang C L, et al. Principal component analysis of spatial and temporal evolution of soil fertility in Guangming New District, Shenzhen City[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2012, 33 (4): 448—452. [周波, 陈旭飞, 张聪俐, 等. 深圳市光明新区土壤肥力时空演变的主成分分析. *华南农业大学学报*, 2012, 33 (4): 448—452.]
- [23] Liu X Y. Study on nutrients balance and requirement in agricultural production in China[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2018. [刘晓永. 中国农业生产中的养分平衡与需求研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2018.]
- [24] Cao Z H, Zhou J M. Soil quality of China[M]. Beijing: Science Press, 2008. [曹志洪, 周健民. 中国土壤质量[M]. 北京: 科学出版社, 2008.]
- [25] Zhang W J, Zheng C Y, Chen C Q. Theory and technology of sustainable high-yield cultivation of three main grain crops[M]. Beijing: Science Press, 2019. [张卫建, 郑成岩, 陈长青. 三大主粮作物可持续高产栽培理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2019.]
- [26] Fan H Z, Xu M G. Fertility evolution and sustainable utilization technology of purple paddy soil under long-term fertilization[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2020. [樊红柱, 徐明岗. 长期施肥紫色水稻土肥力演变与可持续利用技术[M], 北京: 中国农业科学技术出版社, 2020.]
- [27] Xu X H, Dai Q G, Fang J. Problems and countermeasures of rice fertilization in Jiangsu Province[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2000 (4): 44—46. [许学宏, 戴其根, 方瑾. 江苏水稻施肥现状存在问题及对策[J]. *江苏农业科学*, 2000 (4): 44—46.]
- [28] Du S, Ma C B, Gao X Z, et al. Current situation and characteristics of rice fertilization in China (I) [J]. *China Agricultural Technology Extension*, 2004 (4): 50—51. [杜森, 马常宝, 高祥照, 等. 我国水稻施肥现状和特征 (一) [J]. *中国农技推广*, 2004 (4): 50—51.]
- [29] Li Y. Analysis on the spatio-temporal evolution characteristics and driving mechanism of rice distribution in Northeast China[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2021, 44 (1): 73—77. [李宇. 东北地区

- 水稻分布的时空演变特征及驱动机制分析[J]. 测绘与空间地理信息, 2021, 44 (1): 73—77.]
- [30] Cong W B. Study on the nitrogen phosphorus potassium nutrition balance case of albic rice soil[J]. [从万彪. 三江平原白浆土型水稻土氮磷钾养分平衡的研究[J]. 中国农学通报, 2006, 22 (2): 249—253.]
- [31] Chen X J, Zhao Y N, Chai G Q, et al. Integrated soil fertility and yield response to long-term different fertilization in purple soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32 (S1): 139—144. [陈轩敬, 赵亚南, 柴冠群, 等. 长期不同施肥下紫色土综合肥力演变及作物产量响应[J]. 农业工程学报, 2016, 32 (S1): 139—144.]
- [32] Wang X K, Xu M, Wang J D, et al. Response of typical paddy soil fertility to long-term cultivation in Taihu Lake region[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2009, 17 (2): 220—224. [王绪奎, 徐茂, 汪吉东, 等. 太湖地区典型水稻土大时间尺度下的肥力质量演变[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17 (2): 220—224.]
- [33] Fan M S, Lal R, Cao J, et al. Plant-based assessment of inherent soil productivity and contributions to China's cereal crop yield increase since 1980[J]. PLoS One, 2013, 8 (9): e74617.
- [34] Xu M G, Zhang W J, Huang S M. Evolution of soil fertility in China [M]. 2nd ed. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2015. [徐明岗, 张文菊, 黄绍敏. 土壤肥力演变[M]. 2版. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2015.]
- [35] Wu L Q. Fertilizer recommendations for three major cereal crops based on regional fertilizer formula and site specific adjustment in China[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014. [吴良泉. 基于“大配方、小调整”的中国三大粮食作物区域配肥技术研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.]
- [36] Wang Y P, Huang J, Sun Y X, et al. Spatiotemporal variability characteristics of soil fertility in red soil paddy region in the past 35 Years—A case study of Jinxian county[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53 (16): 3294—3306. [王远鹏, 黄晶, 孙钰翔, 等. 近35年红壤稻区土壤肥力时空演变特征—以进贤县为例[J]. 中国农业科学, 2020, 53 (16): 3294—3306.]
- [37] Zhang S X, Xu M G. Evolution and efficient utilization of soil phosphorus in China[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2020. [张淑香, 徐明岗. 中国土壤磷素演变与高效利用[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2020.]

(责任编辑: 陈荣府)