

引用格式：

宫殿林, 张文钊, 罗尊长, 高菊生, 郑超, 洪曦, 曾希柏, 董春华, 程爱武, 汤春纯, 李荣, 何运祥, 毛卫华, 涂赛军. 湖南省不同种植制度农田土壤肥力长期演变特征 [J]. 农业现代化研究, 2022, 43(6): 1120-1130.

Gong D L, Zhang W Z, Luo Z C, Gao J S, Zheng C, Hong X, Zeng X B, Dong C H, Cheng A W, Tang C C, Li R, He Y X, Mao W H, Tu S J. Long-term evolution characteristics of farmland soil fertility under different cropping systems in Hunan Province[J].

Research of Agricultural Modernization, 2022, 43(6): 1120-1130.

DOI: 10.13872/j.1000-0275.2022.0084



湖南省不同种植制度农田土壤肥力长期演变特征

宫殿林^{1,2}, 张文钊¹, 罗尊长³, 高菊生⁴, 郑超⁵, 洪曦^{3*}, 曾希柏⁶, 董春华³,
程爱武⁷, 汤春纯⁸, 李荣⁹, 何运祥¹⁰, 毛卫华¹¹, 涂赛军¹²

- (1. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 亚热带农业生态过程重点实验室, 湖南 长沙 410125; 2. 中国科学院亚热带农业生态研究所长沙农业环境观测研究站, 湖南 长沙 410125; 3. 湖南省农业科学院土壤肥料研究所, 农业部长江中游平原农业环境重点实验室, 湖南 长沙 410125; 4. 中国农业科学院衡阳红壤实验站, 湖南 衡阳 426182; 5. 湘西土家族苗族自治州生态环境局, 湖南 吉首 416099; 6. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081; 7. 湖南省宁乡县农业技术推广中心, 湖南 宁乡 410600; 8. 湖南省岳阳市农业科学研究所, 农业部岳阳农业环境科学观测实验站, 湖南 岳阳 414000; 9. 湖南省汉寿县农业农村局, 湖南 汉寿 415900; 10. 湖南省澧县农业农村局, 湖南 澧县 415500; 11. 芷江侗族自治县农业农村局, 湖南 芷江 419100; 12. 湖南省南县农业农村局, 湖南 南县 413200)

摘要: 明确不同种植制度农田肥力长期演变特征可为选择合适种植制度以提升耕地质量提供参考依据。以湖南省 12 个国家和省级农田长期定位试验点的种植制度试验为研究对象, 选择当地习惯施肥条件下的水稻—水稻—黑麦草 (RRR)、水稻—水稻—紫云英 (RRC)、水稻—水稻—大麦 (RRB)、水稻—水稻—冬闲 (RRW) 和水稻—水稻—油菜 (RRO) 5 种双季稻模式, 烤烟—水稻 (RT)、水稻—冬闲 (RW)、水稻—油菜 (RO) 和水稻—绿肥 (RG) 4 种一季稻模式, 棉花—油菜 (CR)、大豆—红薯 (SS) 和玉米—萝卜 (MR) 3 种旱作模式, 研究其土壤基础肥力指标和综合肥力的演变趋势。结果表明, 双季稻模式有机质含量高于旱作模式, 长期习惯性施肥条件下, 除 RRO、RT 和 RW 有机质含量下降外, 其余均有上升。RRW、RRO、RT 和 RW 全氮含量相对较高但均有下降, 其余则均有增加。RRO 和 RG 碱解氮含量下降明显, 而旱作模式均呈增加趋势。RRO 和 RRW 速效磷含量下降明显, 而旱作模式年均增加约 1.23~4.76 mg/kg。双季稻模式速效钾含量均有下降, 而一季稻和旱作模式除 RT 和 MR 增加外呈下降趋势或无明显变化。双季稻模式综合肥力下降, 而一季稻和旱作模式均有上升。研究表明, 湖南省不同种植制度农田肥力变化差异较大, 双季稻模式应控氮重钾, 一季稻模式应减施氮磷, 旱作模式应培肥地力和控施磷肥。

关键词: 土壤有机质; 综合肥力; 长期定位试验; 农田; 种植制度

中图分类号: S158.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-0275 (2022) 06-1120-11

Long-term evolution characteristics of farmland soil fertility under different cropping systems in Hunan Province

GONG Dian-lin^{1,2}, ZHANG Wen-zhao¹, LUO Zun-chang³, GAO Ju-sheng⁴, ZHENG Chao⁵,
HONG Xi³, ZENG Xi-bai⁶, DONG Chun-hua³, CHENG Ai-wu⁷, TANG Chun-chun⁸,
LI Rong⁹, HE Yun-xiang¹⁰, MAO Wei-hua¹¹, TU Sai-jun¹²

(1. Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Regions, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha, Hunan 410125, China; 2. Changsha Research Station for Agricultural & Environmental Monitoring, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha, Hunan

基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目 (U19A2048); 湖南省自然科学基金项目 (2020JJ5319); 湖南省土壤肥料研究所所长基金 (2020tfs202)。

作者简介: 宫殿林 (1981—), 男, 黑龙江七台河人, 硕士, 助理工程师, 主要从事农业生态环境研究, E-mail: gongdianlin@isa.ac.cn; 通信作者: 洪曦 (1982—), 女, 湖南岳阳人, 博士, 助理研究员, 主要从事植物营养与农业生态环境研究, E-mail: hongxi200712@126.com。

收稿日期: 2022-08-01; **接受日期:** 2022-10-26

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (U19A2048); Hunan Provincial Natural Science Foundation (2020JJ5319); Director Fund of Hunan Institute of Soil and Fertilizer (2020tfs202).

Corresponding author: HONG Xi, E-mail: hongxi200712@126.com.

Received 1 August, 2022; **Accepted** 26 October, 2022

410125, China; 3. Ministry of Agriculture Key Laboratory of Agriculture Environment in Middle Reach Plain of Yangtze River, Institute of Soil and Fertilizer, Hunan Academy of Agricultural Sciences, Changsha, Hunan 410125, China; 4. Red Soil Experimental Station of Chinese Academy of Agricultural Sciences in Hengyang, Qiyang, Hunan 426101, China; 5. Hunan Xiangxi TUJIAZU & MIAOZU Autonomous Prefecture Ecological Environment Bureau, Jishou, Hunan 416500, China; 6. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 7. Rural Technique Spreading Center of Ningxiang County, Changsha, Hunan 410600, China; 8. Yueyang Agricultural Sciences Institute, and Yueyang Agricultural Environment Scientific Experiment Station, Ministry of Agriculture of China, Yueyang, Hunan 414000, China; 9. Agricultural and Rural Bureau of Hanshou County, Hanshou, Hunan 415999, China; 10. Agricultural Bureau of Lixian County, Lixian, Hunan 415500, China; 11. Zhijiang Dong Autonomous County Bureau of Agriculture and Rural Areas, Zhijiang, Hunan 419100 China; 12. Nanxian Agricultural and Rural Bureau, Nanxian, Hunan 413200, China)

Abstract : Clarifying the long-term evolution characteristics of farmland soil fertility with different cropping systems can provide scientific basis for selecting appropriate cropping systems to improve soil quality of farmland. Based on 12 national and provincial long-term cropland system experiments in Hunan Province, the present study examined the soil fertility indexes and their evolution trend of five double-cropping rice modes (rice-rice-ryegrass (RRR), rice-rice-Chinese milk vetch (RRC), rice-rice-wheat (RRB), rice-rice-free (RRW), rice-rice-oil (RRO)), four single-season rice modes (rice-tobacco (RT), rice-free (RW), rice-oil (RO), rice-green (RG)), and three upland farming modes (cotton-oil (CR), soybean-sweet potato (SS), corn-radish (MR)). The results showed that under long-term conventional fertilization conditions, soil organic matter contents (SOM) of the double cropping rice mode was higher than that of the upland farming mode, and SOM of RRO, RT and RW modes decreased but SOM of the rest cropping systems increased over time. Soil total nitrogen contents (STN) of RRW, RRO, RT and RW was relatively high but decreased over time, whilst STN of the rest cropping systems increased. The contents of soil alkali-hydrolyzed nitrogen in RRO and RG decreased significantly, while those in the upland farming mode showed an increasing trend over time. The contents of soil available phosphorus in RRO and RRW decreased significantly, while those in the upland farming modes increased with an annual increase rate of 1.23~4.76 mg/kg. The contents of available potassium in the double-cropping rice model decreased, while those in the one-cropping rice and the upland farming modes showed a decreasing trend or no significant change except for the increase in RT and MR. The soil comprehensive fertility decreased over time for the double cropping rice mode, but increased for the single cropping rice and the upland farming modes. In conclusion, the temporal trend of soil fertility of farmland under different cropping systems are quite different in Hunan province. Nitrogen input should be reduced and potassium input should be increased in the double-cropping rice modes, nitrogen and phosphorus input should be reduced in single cropping rice mode, and soil fertility should be improved and phosphorus input should be reduced in the upland farming modes.

Key words : soil organic matter; comprehensive fertility; long-term experiment; farmland; planting system

湖南省地处长江中游地区，水热光资源丰富，生产潜力巨大，是我国重要的粮棉油生产基地。据湖南省第三次国土调查主要数据公报（2021）显示，全省现有耕地面积约 360 万 hm^2 ，其中，稻田面积近 300 万 hm^2 ，占比达 80% 以上。湖南省稻田主要以种植双季稻为主，但随着社会经济条件及粮食安全需求的变化，该区域稻田种植制度日趋多样化，出现了一季稻种植模式和由水田转变为旱地的旱作模式^[1]。土壤肥力水平和合理施用肥料是保证粮食持续增产和减少氮磷损失的关键因素。不同种植制度因作物类型、化肥施用和水管理田间管理措施各异，其对土壤肥力的影响存在较大差异。因此，了解湖南省各种种植制度下农田肥力现状，研究其在时间尺度上的演变规律，对有效保证湖南省耕地质量、保障我国粮食安全具有重要的现实意义。

土壤肥力在时间尺度上的演变受地形、母质、种植制度和施肥等内在和外在因素的综合影响^[2-3]，

其研究的经典方法是长期定位监测试验，主要由于土壤养分库容较大，短期内变化很难在总量上表现出来。因此，一般需要通过多年数据进行比较，才可能反映出其变化规律或趋势。如英国于 1843—1856 年在洛桑试验站开展的经典长期定位试验，我国在 20 世纪 80 年代起也开展了一批长期定位监测试验。目前，关于在长期定位试验基础上研究红壤土壤肥力演变特征的报道相对较多，尤其是长期施用有机肥、化肥和有机无机肥配施等对土壤的培肥作用^[4-6]。众多研究均表明长期化肥和有机肥配施在提升作物产量与农田土壤肥力方面优于长期单施化肥。旱地长期定位试验结果表明，化肥配施有机肥能够显著提升蔬菜—玉米轮作系统的作物产量和土壤综合肥力水平^[7]。湘南红壤地区连续耕作 30 年的双季稻—油菜轮作模式的红壤土壤肥力水平显著高于双季稻—冬闲模式，水稻土壤养分有效性和综合肥力质量得到了明显提升，改善了土壤综合肥力

质量^[8]。王乐等^[9]对潮土区土壤经过 10~29 年的常规施肥试验研究发现,土壤综合肥力和作物产量均有显著提高,其变化主要是潮土区土壤的综合肥力和耕作作物的产量变化受土壤全氮和有机质含量的影响,而且长期施用有机肥也可显著提升潮土区土壤的综合肥力,保证了作物的持续高产。

就湖南省农田肥力演变而言,已有研究主要集中在单一种植制度下红壤土壤肥力的变化,无法客观全面表征农民常规施肥下不同种植制度的土壤肥力动态变化。由于红壤区种植制度多样,且各种种植制度下农田肥力的演变规律尚不明确,为能真实全面反映红壤区农业生产实践中农田土壤肥力变化,本文以湖南省 12 个国家和省级农田长期定位试验点不同种植制度农民常规施肥条件下农田土壤养分变化为研究对象,探究农民常规施肥条件下湖南省不同种植制度农田土壤肥力的演变规律,以期为因地制宜选择合适的种植制度,合理调控土壤肥力和提升湖南省耕地质量提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

湖南省(108°47'~114°15'E, 24°39'~30°08'N)地处中亚热带季风湿润气候区,地势西高东缓、南高北低,东、南、西三面环山,中部为丘陵,北面为洞庭湖平原。全省年均温度 16~18℃,年≥10℃有效积温 5 000~5 900℃,年降雨量 1 100~1 800 mm,无霜期 260~310 d,日照时数约 1 240~1 870 h。

湖南省农田土壤成土母岩母质主要为花岗岩、砂页岩、板页岩、石灰岩、紫色砂页岩、第四纪红土和河湖沉积物等,主要土壤类型(土类)为红壤、黄壤、黄棕壤、紫色土、石灰土、潮土和水稻土等,

是我国重要的水稻种植区。从二十世纪六七十年代起,种植制度以双季稻模式为主,冬种作物以紫云英、油菜等为主。90 年代后期,种植模式逐步多样化,经济作物种植面积逐渐增加,传统的冬季作物种植面积减少,除传统的水稻—水稻—绿肥、水稻—水稻—油菜、水稻—水稻—冬闲和油菜—棉花以外,还有水稻—水稻—大麦、水稻—水稻—大豆、烤烟—水稻、水稻—蔬菜、大豆—红薯、玉米—萝卜等种植模式,近年来部分地区水稻—绿肥和水稻—冬闲等种植模式增多。

1.2 试验设计

本研究选取分别设立于湖南省祁阳、汉寿、宁乡、武冈、南县、桂阳、芷江、澧县、汝城、岳阳、道县和邵东的 12 个农田长期定位试验的常规施肥处理,上述常规处理均按照当地农民习惯性施肥和管理设置。其中,水稻—水稻—黑麦草和水稻—水稻—紫云英模式中的黑麦草和紫云英均在次年开春翻压作绿肥。水稻—水稻—油菜和水稻—油菜模式中的油菜收获后秸秆全部移出农田。长期定位试验开展最长时间为 35 年,最短时间为 11 年。各长期定位试验的基本信息和土壤基本理化性质见表 1。

水稻—水稻—黑麦草(RRR):小区面积为 37.5 m²。早晚稻基肥于水稻移栽前施入,追肥在移栽后 6~10 d 撒施。早稻移栽密度 25.5 万株/hm²;晚稻密度为 20 万株/hm²。在晚稻收割前 10~15 d 撒播黑麦草种子,播种量为 15.0 kg/hm²。黑麦草生长期不施肥。每季水稻收获后秸秆全部移出小区。

水稻—水稻—紫云英(RRC):小区面积为 66.7 m²。早晚稻基肥于水稻移栽前施入,追肥在移栽后 6~10 d 撒施,早晚稻移栽密度分别为 31.8 万和 33 万株/hm²。晚稻收割前 10~15 d 在小区内播撒

表 1 长期定位试验点基本信息和初始土壤理化性状

Table 1 Basic information and initial soil physicochemical properties of different long-term experimental sites

种植制度	模式	地点	经纬度	起始时间	成土母质	pH	有机质 (g/kg)	全氮 (g/kg)	全磷 (g/kg)
双季稻	水稻—水稻—黑麦草(RRR)	祁阳县	111°52'32" E, 26°45'42" N	1982	第四纪红土	6.60	22.57	1.58	0.82
	水稻—水稻—紫云英(RRC)	汉寿县	111°56'02" E, 28°52'57" N	1986	第四纪红土	5.65	30.60	2.01	0.42
	水稻—水稻—大麦(RRB)	宁乡县	112°34'59" E, 28°15'02" N	1986	河流沉积物	6.85	29.39	2.01	0.59
	水稻—水稻—冬闲(RRW)	武冈市	110°34'24" E, 26°43'45" N	1986	钙质页岩风化物	7.79	44.50	2.8	0.72
	水稻—水稻—油菜(RRO)	南县	111°35'05" E, 29°03'30" N	1986	河湖沉积物	8.05	54.30	2.60	0.81
一季稻	烤烟—水稻(RT)	桂阳县	112°37'16" E, 25°50'29" N	2000	石灰岩洪积物	7.09	44.50	2.49	0.58
	水稻—冬闲(RW)	芷江县	109°42'59" E, 27°26'17" N	1998	河湖沉积物	7.90	57.40	3.17	0.36
	水稻—油菜(RO)	澧县	111°43'25" E, 29°40'11" N	2000	河流冲积物	5.36	39.21	2.32	—
	水稻—绿肥(RG)	汝城县	113°41'30" E, 25°28'09" N	2003	石灰岩风化物	5.10	31.10	—	—
旱作	棉花—油菜(CR)	岳阳市	113°5'15" E, 29°16'00" N	1998	河湖冲积物	5.70	19.30	1.36	0.60
	大豆—红薯(SS)	道县	111°27'28" E, 25°31'14" N	1998	第四纪红土	5.90	16.60	1.14	—
	玉米—萝卜(MR)	邵东县	111°38'24" E, 27°10'05" N	2001	石灰岩风化物	4.70	18.70	0.94	—

紫云英种子, 播种量为 33 kg/hm², 紫云英生长期不施肥。每季水稻收获后秸秆全部移出小区。

水稻—水稻—大麦 (RRB): 小区面积 66.7 m²。早晚稻基肥于水稻移栽前施入, 追肥在移栽后 6~10 d 撒施。早晚稻移栽密度分别为 31.8 万和 33 万株/hm²。晚稻收获后开沟排水, 翻耕后播种大麦, 播种量为 250 kg/hm², 大麦播种前施入基肥。

水稻—水稻—冬闲 (RRW): 小区面积 66.7 m²。早晚稻基肥于水稻移栽前一天撒施, 追肥一般在移栽后 8~15 d 施用。基肥为 70% 的氮肥和全部磷肥, 追肥为 30% 的氮肥和全部钾肥。

水稻—水稻—油菜 (RRO): 小区面积 66.7 m²。早晚稻品种分别为湘早籼 45 号和黄花粘, 移栽密度分别为 33 万和 30 万株/hm²。晚稻收获后开沟排水, 翻耕后移栽油菜, 油菜品种为希望 98, 移栽密度为平均 8.5 万株/hm²。

烤烟—水稻 (RT): 小区面积为 13.4 m²。先种植烤烟, 待烤烟收获后再种植水稻, 试验种植烤烟品种为云烟 87, 水稻品种为两优 6206, 烤烟种植密度 2 万株/hm², 水稻 33 万株/hm²。

水稻—冬闲 (RW): 小区面积为 66.7 m²。于水稻移栽前一天撒施基肥, 在移栽后 8~15 d 追肥。基肥为 60% 的氮肥和全部磷钾肥, 追肥为 40% 的氮肥和全部钾肥, 种植密度为 25 万株/hm²。

水稻—油菜 (RO): 小区面积为 66.7 m²。水稻移栽密度 25 万株/hm²。水稻收获后开沟排水, 翻耕后移栽油菜, 移栽密度为 8.5 万株/hm²。

水稻—绿肥 (RG): 小区面积为 40 m²。水稻品种为超级杂交水稻 Y 两优 7 号, 移栽密度为 33 万株/hm²。基肥在水稻移栽前施入, 追肥在移栽后 6~10 d 撒施。在晚稻收割前 10~15 d 撒播紫云英种子, 品种为紫云英 2 号, 播种量为 33 kg/hm²。紫云英生长期不施肥。紫云英在次年水稻移栽前 15 d 全部翻压还田。

棉花—油菜 (CR): 小区面积为 40 m²。棉花在春季种植, 品种为湘杂棉 3 号。每年 4 月中旬育苗, 5 月中旬移栽, 移栽密度为 7.5 万株/hm², 10 月下旬收获。油菜品种湘油 16 号, 于每年 9 月下旬育苗, 棉花收获后移栽, 移栽密度为 7.8 万株/hm², 翌年

5 月初收获。

大豆—红薯 (SS): 小区面积为 66.7 m²。大豆在 3 月底至 4 月初种植, 采用穴播方式, 每穴播种 3~4 粒, 平均密度为 25 万穴/hm², 7 月初收获。大豆收获后, 翻耕起垄, 移栽红薯, 移栽密度为 4.0 万株/hm²。

玉米—萝卜 (MR): 小区面积为 66.7 m²。玉米在春季播种, 播种方式为穴播, 一穴一粒, 播种密度为 4.5 万株/hm²。玉米收获后及时翻耕整地。萝卜种植采用厢作, 厢宽 1.5 m, 播种密度为 10.5 万株/hm², 每穴播 1~2 粒。

1.3 土壤样品采集与理化性质测定

长期定位试验小区的土壤样品, 均在每年最后一季作物收获后采集。采样前, 将小区内残留的作物秸秆等全部移除, 在每个小区内随机选取 5 个点, 用不锈钢土钻采集耕层 (0~20 cm) 土壤样品, 挑去动植物残体、根系和石块, 混合均匀后装入塑料袋, 带回实验室放入 4 ℃ 箱保存备用。土壤理化性质测定均参照《土壤农化分析》^[10] 相关方法进行。

1.4 内梅罗指数法

内梅罗指数法是国际上应用较普遍的土壤综合肥力评价方法^[11-12], 它可以消除土壤各肥力指标之间量纲的差异, 通过此方法计算出的土壤分肥力系数处于 0~3 之间, 使得相同的参数之间可比性较强, 且同一级别的各属性之间分肥力系数比较接近, 可比性较高。

分肥力系数 (IFI_i) 的计算公式为:

$$IFI_i = \begin{cases} x/x_a & x \leq x_a \\ 1+(x-x_a)/(x_c-x_a) & x_a < x \leq x_c \\ 2+(x-x_c)/(x_p-x_c) & x_c < x \leq x_p \\ 3 & x > x_p \end{cases} \quad (1)$$

式中: IFI_i 为分肥力系数, x 为该属性测定值, x_a 与 x_p 为分级标准下、上限, x_c 为介于分级标准上、下限间。各属性值分级标准 (x_a, x_c, x_p) 主要参考第二次全国土壤普查标准 (表 2), 每个等级反映了其各自的土壤肥力状况。上限值 (x_a) 是指综合肥力处于低等级土壤的上限值, 小于等于 x_a 均属综合肥力低等级土地, x_p 下限值指综合肥力高等级的最低值,

表 2 土壤各属性的分级标准值
Table 2 Grading standards of soil properties

分级标准	有机质 (g/kg)	全氮 (g/kg)	碱解氮 (mg/kg)	速效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)
上限 (x_a)	10	0.75	60	3	40
上下限间的值 (x_c)	20	1.5	120	10	100
下限 (x_p)	30	2.0	180	20	150

大于等于 x_p 均属于综合肥力高等级土地^[13]。

土壤综合肥力系数计算方法为：

$$IFI = \frac{1}{2} \sqrt{IFI_{i,avg}^2 + IFI_{i,min}^2} \times \frac{n-1}{n} \quad (2)$$

式中：IFI 为土壤综合肥力系数， $IFI_{i,avg}$ 平均值与 $IFI_{i,min}$ 为土壤各属性分肥力均值与最小值， n 为评价指标个数。

2 结果与分析

2.1 农田土壤有机质含量动态变化分析

不同种植制度处理农田土壤有机质含量呈现出不同的演变趋势。双季稻的 RRR 和 RRC 模式的土壤有机质含量均呈逐年缓慢增加趋势，分别从试验前 1982 年的 20.10 g/kg 和 2004 年的 29.90 g/kg 增加到 2015 年的 30.34 和 39.80 g/kg (图 1)，年均增加分别为 0.31 和 0.90 g/kg。RRB 模式的土壤有机

质含量在 1998—2011 年期间呈逐年缓慢增加趋势，2011 年之后呈明显下降趋势，2015 年其有机质含量与试验前有机质含量无明显差异。RRW 模式的土壤有机质呈波浪型增加趋势，在 2005—2014 年期间年均增加 1.10 g/kg。与其它双季稻模式不同，RRO 模式的土壤有机质含量呈逐年下降趋势，自 2007 年至 2015 年其有机质含量由 58.70 g/kg 下降到了 46.90 g/kg，年均下降 1.31 g/kg。在 4 种一季稻模式中，RO 和 RG 模式的土壤有机质含量相对较低，呈逐年缓慢增加趋势，其年均增加量分别为 2.11 和 0.60 g/kg。RT 和 RW 模式的土壤有机质含量呈缓慢下降趋势，年均下降 0.31 和 1.38 g/kg。与双季稻和一季稻模式相比，旱作模式的土壤有机质含量相对偏低，其中 CR 模式的土壤有机质含量明显高于 SS 和 MR 模式，且其有机质呈明显增加趋势，年均增加 1.20 g/kg，而 SS 和 MR 模式的土壤有机质含量年际变化相对较大且无明显增加或下降趋势。

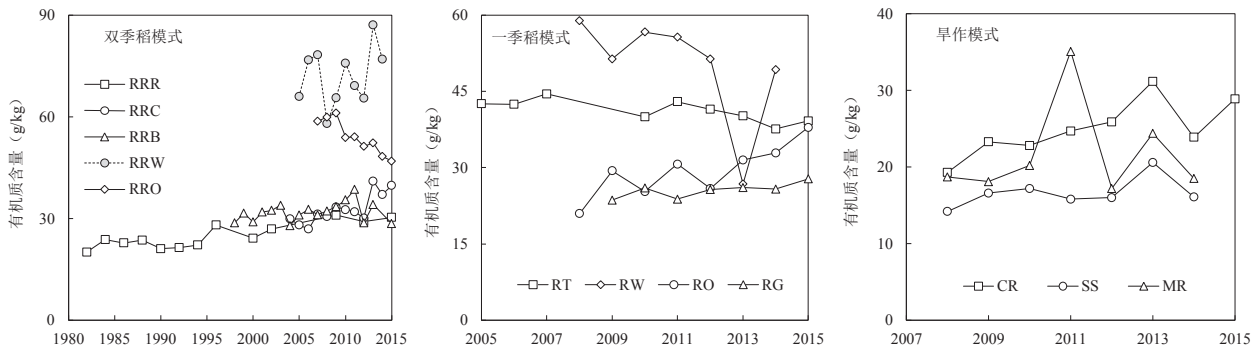


图 1 湖南省不同种植制度农田土壤有机质含量的长期变化

Fig. 1 Long-term evolution of organic matter content under different cropping systems in Hunan province

2.2 农田土壤全氮和碱解氮含量动态变化分析

湖南省不同种植制度处理农田土壤全氮含量的演变趋势与有机质含量的演变趋势较为一致。在双季稻模式中，RRR、RRB 和 RRC 模式的土壤全氮含量相对较低，均呈较为明显的增加趋势，其全氮

含量年均增加分别为 0.02、0.05 和 0.01 g/kg (图 2)。与之相反，RRW 和 RRO 模式的土壤全氮含量相对较高，达到了 2.34~4.38 g/kg，且均随试验年限延长呈下降趋势，年均下降分别为 0.02 和 0.12 g/kg。在一季稻模式中，农田土壤全氮含量相对较高的

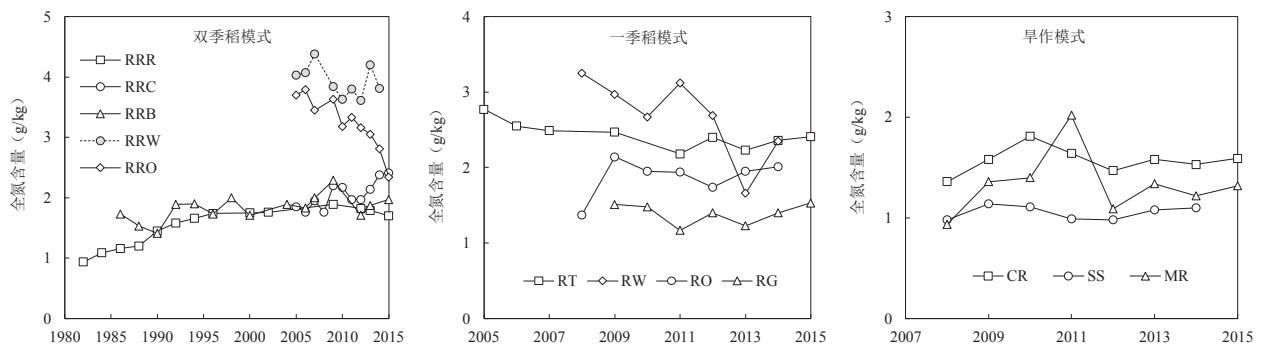


图 2 湖南省不同种植制度农田土壤全氮含量长期变化

Fig. 2 Long-term evolution of total N content under different cropping systems in Hunan province

RT 和 RW 模式的土壤全氮含量呈下降趋势，年均下降分别为 0.03 和 0.13 g/kg。农田土壤全氮含量相对较低的 RO 模式的全氮含量则呈上升趋势，年均增加 0.09 g/kg。RG 模式的土壤全氮含量则相对变化不明显。三种旱作模式的土壤全氮含量表现为 CR>MR>SS，且均有不同程度的增加，其中 CR 模式的土壤全氮含量年均增加 0.03 g/kg，MR 模式为 0.05 g/kg，SS 模式为 0.02 g/kg。

不同种植制度土壤碱解氮含量随时间变化趋势存在明显差异。在双季稻模式中，RRW 和 RRO 模式的土壤碱解氮含量约在 300 mg/kg 左右（图 3），整体高于其它三种双季稻模式，且年际间波动较大，其中 RRW 模式的土壤碱解氮含量在试验期间略有增加，年均增加 2.00 mg/kg，而 RRO 模式的碱解氮

在试验后期呈明显下降趋势，年均下降 8.01 mg/kg。RRR、RRC 和 RRB 模式的土壤碱解氮则均有不同程度的增加，其中 RRC 模式的土壤碱解氮含量增加速率相对较快，年均增加 3.17 mg/kg。四种一季稻模式农田土壤碱解氮含量年际变化相对较大，其中 RW 模式的土壤碱解氮含量相对较高，在试验期间年均增加 7.71 mg/kg。RT 和 RO 模式的土壤碱解氮含量在 159.00~193.50 mg/kg 之间波动，在试验期间略有增加。RG 模式的土壤碱解氮含量相对偏低，且呈下降趋势，年均下降 2.13 mg/kg。三种旱作模式的土壤碱解氮含量均有不同程度的增加，其中 CR 模式的碱解氮含量年均增加 4.55 mg/kg，SS 和 MR 模式的土壤碱解氮含量年均增加分别为 3.88 和 1.38 mg/kg。

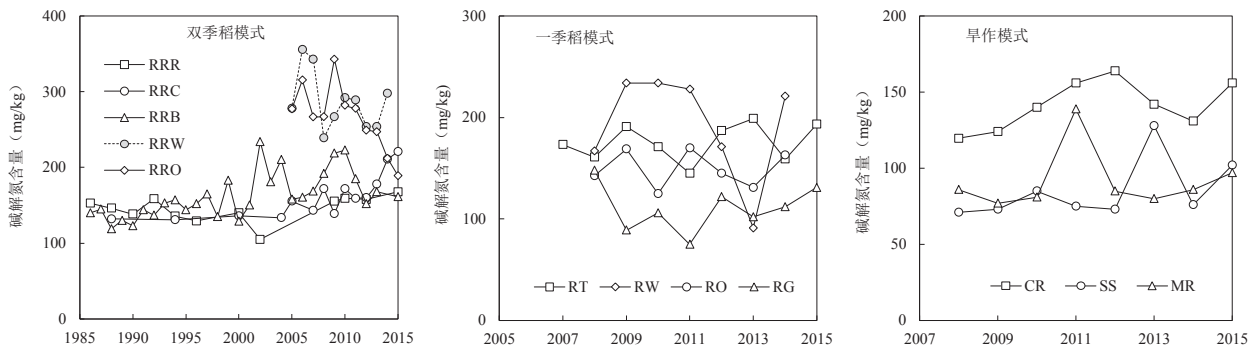


图 3 湖南省不同种植制度农田土壤碱解氮含量的长期变化

Fig. 3 Long-term evolution of alkaline hydrolysis N content under different cropping systems in Hunan province

2.3 农田土壤速效磷和速效钾动态变化分析

不同种植制度土壤速效磷含量的演变趋势存在较大差异。双季稻模式中的 RRR 和 RRO 模式的土壤速效磷含量明显高于其它三种双季稻模式，其中 RRR 模式土壤速效磷含量由 1982 年的 18.00 mg/kg 上升到了 2015 年的 79.50 mg/kg（图 4），年均增长 1.81 mg/kg。RRO 模式则呈下降趋势，由 2006 年的 51.20 mg/kg 下降到了 2015 年的 32.30 mg/kg，年均

下降 1.89 mg/kg。RRC、RRB 和 RRW 模式的土壤速效磷含量则相对偏低，基本上低于 20.00 mg/kg。RRC 和 RRW 模式的土壤速效磷含量呈缓慢增加趋势，年均增加分别为 0.26 和 0.34 mg/kg，而 RRB 模式的土壤速效磷含量则呈较明显的逐年降低趋势，由 1986 年的 28.00 mg/kg 下降到了 2015 年的 9.47 mg/kg，年均下降 0.62 mg/kg。RT 模式的土壤速效磷含量明显高于其它三种一季稻模式，且随试验年

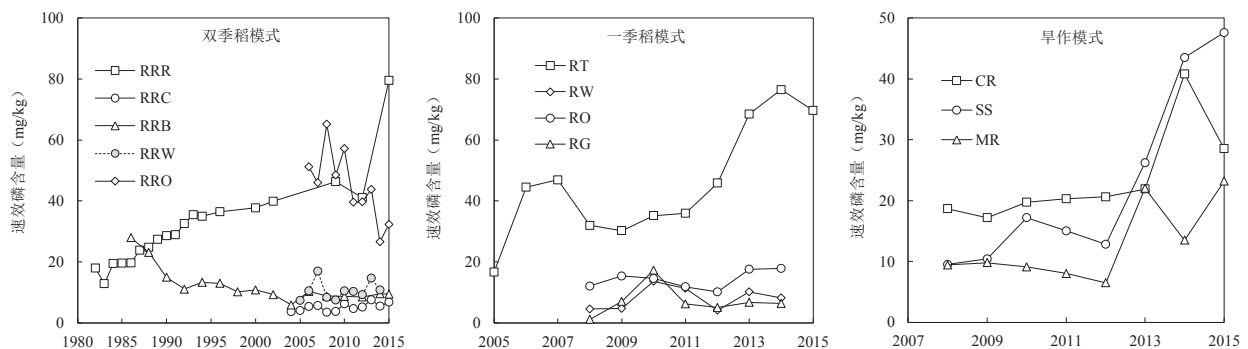


图 4 湖南省不同种植制度农田土壤速效磷含量的长期变化

Fig. 4 Long-term evolution of available phosphorus content under different cropping systems in Hunan province

限呈增加趋势，年均增加 4.82 mg/kg。RW、RO 和 RG 模式的土壤速效磷含量均呈缓慢增加趋势，年均增加分别为 0.52、0.83 和 0.74 mg/kg。三种旱作模式的土壤速效磷含量的演变趋势较为一致，均在试验前期变化不明显，在试验后期呈增加趋势，CR、SS 和 MR 的土壤速效磷含量年均增加分别为 1.23、4.76 和 1.47 mg/kg。

五种双季稻模式的土壤速效钾含量均呈下降趋势，其中 RRW 模式的土壤速效钾含量下降较为明显，自 2010—2015 年期间年均下降了 3.73 mg/kg，RRR、RRC、RRB 和 RRO 模式的土壤速效钾含量

年均分别下降 0.69、0.76、1.36 和 0.99 mg/kg (图 5)。在一季稻模式中，RT 模式的土壤速效钾含量明显高于其它三种一季稻模式，且呈增加趋势，年均增加 38.00 mg/kg。RW、RO 和 RG 模式的土壤速效钾含量基本低于 100 mg/kg，且均呈逐年缓慢降低趋势，年均降低分别为 3.25、3.14 和 2.38 mg/kg。在旱作模式中，MR 模式的土壤速效钾含量变化明显，由 2008 年的 87.00 mg/kg 上升到了 2015 年的 249.00 mg/kg，年均增加 20.25 mg/kg，相比之下，CR 和 SS 模式的土壤速效钾含量则年间相对稳定，无明显变化。

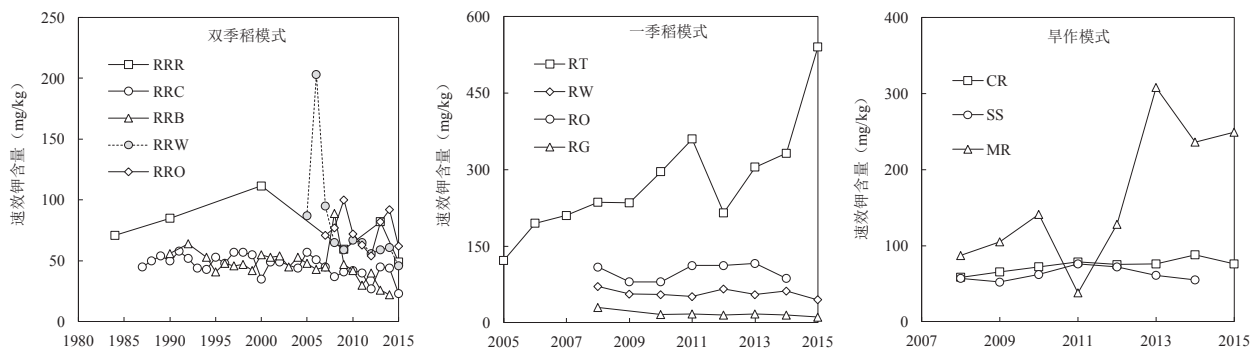


图 5 湖南省不同种植制度农田土壤速效钾含量的长期变化

Fig. 5 Long-term evolution of rapidly available potassium content under different cropping systems in Hunan province

2.4 农田土壤综合肥力变化分析

采用内梅罗指数法对不同种植制度土壤肥力进行综合分析，结果显示不同种植制度土壤的综合肥力系数 (IFI) 变化存在较大差异。双季稻模式中的综合肥力系数均有不同程度下降，其中 RRB 模式的 IFI 下降幅度最大，为 6.66%，而 RRW 模式的 IFI 年均下降幅度高于其它双季稻模式 (表 3)。一季稻模式的 IFI 均有不同程度上升，其中 RO 和 RG 模式的 IFI 上升幅度相对较高，增幅接近到了 14%。

三种旱作模式的 IFI 相对偏低，但均在试验年限内呈增加趋势，其中 CR 和 MR 模式的 IFI 增加幅度均超过了 20%。

3 讨论

3.1 湖南省不同种植制度农田土壤有机质长期演变

土壤有机质是衡量土壤肥力的核心指标，控制着诸多土壤理化性质和主要生物地球化学循环过程^[14]。国内外研究表明不同种植制度显著影响土壤

表 3 不同种植制度土壤综合肥力系数变化

Table 3 Changes of soil integrated fertility indexes of different cropping systems

种植制度	模式	初值	终值	统计年限	变化幅度 (%)	年均变化幅度 (%)
双季稻	RRR	1.13	1.09	1990—2012	-3.64	-0.14
	RRC	0.96	0.92	2005—2015	-4.49	-0.41
	RRB	1.01	0.94	1998—2012	-6.66	-0.44
	RRW	1.19	1.13	2005—2014	-4.72	-0.47
	RRO	1.24	1.20	2007—2015	-3.11	-0.35
一季稻	RT	1.66	1.70	2007—2015	2.41	0.30
	RW	1.05	1.11	2008—2014	6.47	0.92
	RO	1.12	1.28	2008—2014	13.81	1.97
	RG	0.77	0.67	2010—2014	13.40	2.68
旱作	CR	0.95	1.17	2008—2015	23.48	2.94
	SS	0.74	0.85	2008—2014	14.75	2.11
	MR	0.83	1.01	2008—2014	22.25	3.18

有机质含量^[15-17]。本研究结果表明,湖南省不同种植制度农田土壤有机质含量变化趋势均存在较大差异。在双季稻模式中,水稻—水稻—黑麦草、水稻—水稻—紫云英和水稻—水稻—冬闲模式的土壤有机质含量均有不同程度的增加,这可能与长期绿肥翻压还田和长期大量配施有机肥有关。绿肥是有机物质,施入土壤后矿化可形成有机质,同时,绿肥富含碳氮等元素,施用可提高作物产量,增加作物生物量及其残留量,从而增加土壤有机质含量^[2]。但曾希柏等^[18]认为传统的水稻—水稻—紫云英土壤有机质的变化幅度不大,而本研究中水稻—水稻—绿肥土壤有机质年均增长量达到了1.00 g/kg左右,两者之间的差异可能是由于土壤成土母质不同或是种植年限不同而造成。此外,相关研究指出长期有机物料还田和有机无机肥配施有利于土壤有机质的提升^[19-21]。相比之下,水稻—水稻—油菜模式虽然有大量的化学肥料投入,但其土壤有机质含量却呈逐年下降趋势,其主要原因可能是油菜种植过程中需要进行开沟排水和耕作层翻耕等农事操作,造成耕层土壤好氧环境,进而加速土壤有机碳的矿化分解速率和导致土壤有机碳的快速损失^[22-23]。

同样,由于长期的周期性的淹水—落干水分管理措施和频繁翻耕,一季稻模式中的烤烟—水稻处理土壤有机质含量也呈逐年下降趋势。虽然同样为水旱轮作模式,但水稻—油菜处理的土壤有机质含量呈逐年上升趋势,这可能与较高的有机肥投入有关。

与水田相比,旱地土壤有机碳矿化速率相对较快,土壤有机质提升难度相对较大^[24]。但在本研究中,由于长期大量的有机肥投入,棉花—油菜和大豆—红薯处理的土壤有机质均有不同程度的增加,而有机肥投入量相对较低的玉米—萝卜处理土壤有机质含量变化不明显,这充分说明了有机肥在提升土壤有机质含量中的重要作用。

3.2 湖南省不同种植制度农田土壤养分长期演变

全氮、碱解氮、速效磷和速效钾是土壤综合肥力属性的主要贡献因子^[9]。本研究结果表明,湖南省农田不同种植制度土壤全氮和速效养分长期演变均存在较大差异,这与国内外研究结果一致^[18, 25-26],其可能原因在于不同种植制度下,不同的水分管理和耕作措施以及不同的作物类型对养分的吸收和需求各异,导致土壤养分受到的影响存在较大差异^[18]。

土壤全氮反映土壤氮素的储量,也是衡量土壤肥力水平的重要指标之一。Mikha等^[27]认为种植制度可显著影响土壤氮素含量。本研究中水稻—

水稻—紫云英、水稻—水稻—大麦和水稻—水稻—黑麦草轮作下土壤全氮含量均随试验年限呈上升趋势,其中水稻—水稻—紫云英轮作的全氮年均增长率最高,分别是水稻—水稻—大麦和水稻—水稻—黑麦草轮作的6.15倍和2.21倍,同时水稻—水稻—紫云英轮作下土壤碱解氮的增加速率最高。这是由于紫云英属豆科固氮作物,能够吸收固定大气中的氮素,同时能吸收耕层以下的氮磷养分并累积至耕层^[28]。水稻—水稻—黑麦草轮作下全氮年增加量仅次于水稻—水稻—绿肥,这可能是由于黑麦草具有强大的须根系,能减少硝态氮随水分下渗的迁移^[29]。同时,由于紫云英、黑麦草翻压作绿肥能提高氮素在土壤中的残留率,减少氮的气态损失^[30]。但是水稻—水稻—大麦和水稻—水稻—黑麦草的土壤碱解氮含量年均增加幅度存在较明显差异,其差异的主要原因有待进一步研究。由于土壤有机质与土壤氮含量存在一定的相关性,因此,水稻—水稻—油菜处理的土壤全氮和碱解氮含量也均呈明显的下降趋势。烤烟—水稻和水稻—冬闲土壤全氮含量随年限延长而减少,不利于土壤全氮的累积,这可能是水稻—冬闲和水稻—水稻—冬闲轮作由于冬闲减少了作物对土壤的覆盖,而冬季作物覆盖有利于减少土壤氮素的流失^[31],同时烤烟—水稻轮作中烟草对氮的需求量相对较大,这也在一定程度上降低了土壤氮素含量。玉米—萝卜处理的土壤全氮含量增加速率相对高于其它旱作模式,这可能与较高的氮肥投入量有关,但其土壤碱解氮含量增加幅度明显低于棉花—油菜和大豆—红薯处理,其原因尚待进一步探明。

本研究大部分种植制度土壤速效磷含量均有不同程度的增加,尤其是双季稻模式中的水稻—水稻—黑麦草,一季稻模式中的烤烟—水稻和旱作模式中的大豆—红薯处理的土壤速效磷增加幅度相对较大,这可能与红壤具有强大的固磷能力有关^[32]。长期施用磷肥导致磷素在土壤中持续累积,累积的全磷在土壤速效磷低于一定水平时又可以转化为速效磷。另一方面也与上述处理长期施用大量磷肥有关,如烤烟—水稻模式的磷肥投入量是其它一季稻模式的2.17~4.09倍。但水稻—水稻—大麦轮作土壤速效磷却随时间呈线性递减趋势,这可能是由于相对较低的磷肥投入量满足不了三季作物的需磷量,从而导致土壤速效磷含量的下降;另外也可能是供试土壤的初始全磷含量相对较低所致。有研究表明,在土壤初始全磷含量相对较低情况下,全磷的累积不会提高速效磷含量^[33]。但值得注意的是

水稻—水稻—紫云英处理土壤初始全磷含量同样较低,速效磷含量却随年限延长呈线性增加趋势,这应该是绿肥转化为有机质过程中可活化土壤中固定的磷素所致^[2]。水稻—水稻—黑麦草轮作下速效磷年增加速率较高,这可能是由于黑麦草强大的须根系能通过其根际活性促进土壤磷有效化进程^[29]。三种旱作模式土壤的速效磷含量均有较大幅度提升,尤其是大豆—红薯模式。国内外均有研究表明,旱地作物轮作有利于提高土壤磷的累积,尤其是轮作中存在豆科作物时,豆科作物不但促进了氮的累积,同时能提高磷的可利用率,促进了磷的累积^[26,34]。

钾是植物必需的营养元素之一,土壤中速效钾是植物所需钾的主要来源。种植制度的不同,作物对施钾的反应大不相同,从而引起各种种植制度下土壤钾含量的差异^[35]。本研究结果显示双季稻模式耕层土壤速效钾含量均呈下降趋势,一季稻模式除了稻烟轮作外耕层土壤速效钾含量也均呈下降趋势。双季稻和一季稻模式大多属于水旱轮作,频繁的干湿交替过程致使土壤始终处于有氧—厌氧交替的状态,导致大量速效钾被土壤中的黏土矿物固定并阻碍缓效钾的释放,进而降低土壤中速效钾含量^[36-37]。另一方面,土壤速效钾含量的下降也可能与钾肥用量相对较低有关,如水稻—水稻—冬闲模式的钾肥用量远低于其它双季稻和一季稻模式,其耕层土壤速效钾含量下降速率却远高于其它模式。与其它双季稻和一季稻模式不同,烤烟—水稻模式虽然也属于水旱轮作,但其耕层土壤速效钾含量却呈明显上升趋势,其主要原因为烟草属于喜钾作物,长期高量的钾肥投入掩盖了干湿交替过程对土壤速效钾的负效应,提高了土壤速效钾含量。在旱作模式下,相较于大豆—红薯和棉花—油菜轮作,玉米—萝卜轮作模式的钾肥用量相对偏高,其土壤速效钾含量增加明显。由于旱地土壤中过量施用的钾肥不能迅速转化为土壤其他形态的钾,造成土壤速效钾含量过高,反而影响作物的正常生长^[38]。因此,玉米—萝卜轮作可以适当减少钾肥施用量。

3.3 湖南省不同种植制度农田土壤综合肥力长期演变

本文采用内梅罗指数法分析了湖南省农田不同种植制度土壤综合肥力系数的变化,结果显示湖南省不同种植制度农田土壤肥力演变不同,其原因主要有几个方面:第一,不同作物残茬、根系和落叶等残留物的数量和质量存在较大差异;第二,不同种植制度所在地区秸秆还田和施肥量不同;第三,不同种植制度由于作物产量、收获次数的不同,养分的输出也不同。第四,不同种植制度影响了土壤

温度、湿度等环境因素及土壤微生物区系,从而影响土壤肥力的演变^[39-41]。

尽管双季稻模式除水稻—水稻—油菜轮作外耕层土壤有机质含量均有明显上升,但其综合肥力均有不同程度的下降,其主要原因与土壤速效磷和速效钾含量下降有关。此外,双季稻模式中多数处理的土壤全氮和碱解氮均接近或超出分级标准值的下限,因此,湖南省农田双季稻模式应根据不同轮作作物的需肥特征,适当调整施肥策略,控制氮肥用量,重视和提高磷钾肥施用量。与双季稻模式的土壤综合肥力变化趋势相反,一季稻模式的综合肥力均有不同程度的上升,这主要与长期施用磷肥增加了土壤速效磷含量有关。由于长期大量施用氮肥,一季稻模式的土壤全氮含量相对偏高(水稻—绿肥模式除外),应适当降低氮肥用量。另外,烤烟—水稻模式因长期大量施用磷钾肥,其土壤速效磷钾含量远超过了分级标准值的下限,需要适当降低磷钾肥用量。水稻—油菜、水稻—冬闲和水稻—绿肥模式的土壤速效钾含量相对较低,应重视钾肥的施用。旱作模式土壤肥力均有明显上升,除了与其初始土壤肥力相对较低有关外,还与其长期大量施用磷肥,尤其是大豆—红薯和玉米—萝卜轮作模式,导致土壤有效磷含量快速提升有关,但鉴于其土壤有机质、全氮和速效钾含量相对偏低,而速效磷含量大多接近分级标准值的下限,应在注重培肥地力的基础上重视氮钾肥施用和控制磷肥用量。

4 结论

研究表明,长期农民习惯性施肥条件下,不同种植制度农田土壤有机质、全氮、碱解氮、速效磷和速效钾的演变特征均存在较大差异。双季稻和一季稻模式有机质含量高于旱作模式,除 RRO、RT 和 RW 模式的有机质含量逐年下降外,其余均逐年上升;双季稻和一季稻模式中全氮、碱解氮和速效磷含量呈逐年下降趋势,而旱作模式逐年递增;双季稻模式土壤速效钾含量均呈逐年下降趋势,而一季稻和旱作模式土壤速效钾逐年下降趋势不明显或无变化。

双季稻模式由于土壤速效钾含量下降导致综合肥力呈逐年下降趋势,应在控施氮肥基础上重视钾肥施用。而一季稻和旱作模式因土壤速效磷含量增加原因,导致土壤综合肥力均有所上升,应在注重培肥地力的基础上重视氮钾肥施用和控施磷肥。本研究结果可为湖南省农田合适的种植制度选择和土壤肥力科学调控提供理论依据和数据参考。

参考文献:

- [1] Lu H F, Bai Y, Ren H, et al. Integrated energy, energy and economic evaluation of rice and vegetable production systems in alluvial paddy fields: Implications for agricultural policy in China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2010, 91(12): 2727-2735.
- [2] 曾希柏. 耕地质量培育技术与模式[M]. 北京: 农业出版社, 2014. Zeng X B. Cultivation Techniques and Models of Cultivated Land Quality[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2014.
- [3] Pantani O L, Ferretti L, Santoni M, et al. Assessment of the impact of conventional and organic agroecosystems management options and conservation tillage on soil fertility at the Montepaldi Long Term Experiment, Tuscany[J]. *European Journal of Agronomy*, 2022, 140: 126575. DOI: 10.1016/J.EJA.2022.126575.
- [4] Li X, Li B, Chen L, et al. Partial substitution of chemical fertilizer with organic fertilizer over seven years increases yields and restores soil bacterial community diversity in wheat-rice rotation[J]. *European Journal of Agronomy*, 2022, 133: 126445. DOI: 10.1016/j.still.2021.105287.
- [5] Han J, Dong Y, Zhang M. Chemical fertilizer reduction with organic fertilizer effectively improve soil fertility and microbial community from newly cultivated land in the Loess Plateau of China[J]. *Applied Soil Ecology*, 2021, 165: 103966. DOI: 10.1016/J.APSOIL.2021.103966.
- [6] 孙铭鸿, 蒋炳伸, 沈健林, 等. 猪粪化肥配施对稻田土壤氮素含量及氮肥利用效率的影响[J]. *农业现代化研究*, 2021, 42(1): 175-183.
Sun M H, Jiang B S, Shen J L, et al. The effects of combined application of pig manure and chemical fertilizers on soil nitrogen contents and nitrogen use efficiency in a subtropical paddy field[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2021, 42(1): 175-183.
- [7] 谢军, 方林发, 徐春丽, 等. 西南紫色土不同施肥措施下土壤综合肥力评价与比较[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(6): 1500-1507.
Xie J, Fang L F, Xu C L, et al. Evaluation and comparison of integrated purple soil fertility under different fertilizations in Southwest China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(6): 1500-1507.
- [8] 马颖榴, 盛浩, 潘博, 等. 双季稻—油菜耕作制对土壤肥力质量长期演变的影响[J]. *土壤与作物*, 2019, 8(4): 453-461.
Ma H L, Sheng H, Pan B, et al. Impacts of long-term double-cropping rice-rape rotation on soil fertility quality[J]. *Soils and Crops*, 2019, 8(4): 453-461.
- [9] 王乐, 张淑香, 马常宝, 等. 潮土区 29 年来土壤肥力和作物产量演变特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(6): 1435-1444.
Wang L, Zhang S X, Ma C B, et al. Characteristics of soil fertility and crop yield evolution in fluvo-aquic soil area in the past 29 years[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(6): 1435-1444.
- [10] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. Bao S D. Soil Agrochemical Analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [11] 包耀贤, 徐明岗, 吕粉桃, 等. 长期施肥下土壤肥力变化的评价方法[J]. *中国农业科学*, 2012, 45(20): 4197-4204.
- Bao Y X, Xu M G, Lü F T, et al. Evaluation method on soil fertility under long-term fertilization[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(20): 4197-4204.
- [12] 殷志遥, 黄丽, 薛斌, 等. 稻—油轮作下保护性耕作对土壤肥力的影响及评价[J]. *中国生态农业学报*, 2017, 25(11): 1604-1614.
Yin Z Y, Huang L, Xue B, et al. Effect of conservation tillage on soil fertility under rice-rape rotation system[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(11): 1604-1614.
- [13] 阚文杰, 吴启堂. 一个定量综合评价土壤肥力的方法初探[J]. *土壤通报*, 1994, 25(6): 245-247.
Kan W J, Wu Q T. A preliminary study on a method for quantitative and comprehensive evaluation of soil fertility[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1994, 25(6): 245-247.
- [14] Manlay R J, Feller C, Swift M J. Historical evolution of soil organic matter concepts and their relationships with the fertility and sustainability of cropping systems[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2007, 119(3/4): 217-233.
- [15] Sauvadet M, Trap J, Damour G, et al. Agroecosystem diversification with legumes or non-legumes improves differently soil fertility according to soil type[J]. *Science of The Total Environment*, 2021, 795(2): 148934. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.148934.
- [16] Wissal M, Nadia K, Haythem M. Legumes: Model plants for sustainable agriculture in Phosphorus and Iron deficient soils[J]. *Agricultural Science Digest - A Research Journal*, 2020, 40(4): 445-447.
- [17] 陈鑫, 刘勤, 张刚. 太湖地区不同轮作模式对土壤肥力和水稻产量的影响[J]. *江苏农业学报*, 2021, 37(4): 874-883.
Chen X, Liu Q, Zhang G. Effects of different crop rotation modes on soil fertility and rice yield in Taihu region[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2021, 37(4): 874-883.
- [18] 曾希柏, 孙楠, 高菊生, 等. 双季稻田改制对作物生长及土壤养分的影响[J]. *中国农业科学*, 2007, 40(6): 1198-1205.
Zeng X B, Sun N, Gao J S, et al. Effects of cropping system change for paddy field with double harvest rice on the crops growth and soil nutrient[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(6): 1198-1205.
- [19] Han J Q, Dong Y Y, Zhang M. Chemical fertilizer reduction with organic fertilizer effectively improve soil fertility and microbial community from newly cultivated land in the Loess Plateau of China[J]. *Applied Soil Ecology*, 2021, 165(2): 103966. DOI: 10.1016/J.APSOIL.2021.103966.
- [20] Xu P D, Wu J, Wang H, et al. Long-term partial substitution of chemical fertilizer with green manure regulated organic matter mineralization in paddy soil dominantly by modulating organic carbon quality[J]. *Plant and Soil*, 2021, 468(1): 459-473.
- [21] 王慧, 唐杉, 王允青, 等. 紫云英翻压对稻田土壤肥力和双季稻产量的影响[J]. *土壤通报*, 2019, 50(6): 1384-1390.
Wang H, Tang S, Wang Y Q, et al. Effects of the incorporation of Chinese milk vetchon soil fertility and double rice yield[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2019, 50(6): 1384-1390.
- [22] Butterfly C R, Bünemann E K, McNeill A M, et al. Carbon pulses but not phosphorus pulses are related to decreases in microbial

- biomass during repeated drying and rewetting of soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(7): 1406-1416.
- [23] Harrison-Kirk T, Beare M H, Meenken E D, et al. Soil organic matter and texture affect responses to dry/wet cycles: Changes in soil organic matter fractions and relationships with C and N mineralisation[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 74: 50-60.
- [24] 李玲, 肖和艾, 吴金水. 红壤旱地和稻田土壤中有机底物的分解与转化研究 [J]. *土壤学报*, 2007, 44(4): 669-674.
Li L, Xiao H A, Wu J S. Decomposition and transformations of organic substrates in upland and paddy soils in red earth region[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(4): 669-674.
- [25] 蒋端生. 红壤丘陵区耕地肥力质量演变规律及其影响因素研究 [D]. 长沙: 湖南农业大学, 2008.
Jiang D S. Studies on the evolution law of the fertility quality of arable land and its influencing factors in red soil hilly areas[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2008.
- [26] Ohno T, Griffin T S, Liebman M, et al. Chemical characterization of soil phosphorus and organic matter in different cropping systems in Maine, USA[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2005, 105(4): 625-634.
- [27] Mikha M M, Rice C W, Benjamin J G. Estimating soil mineralizable nitrogen under different management practices[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70(5): 1522-1531.
- [28] 曾希柏, 关光复. 稻田不同耕作制下有机质和氮磷钾的变化研究 [J]. *生态学报*, 1999, 19(1): 90-95.
Zeng X B, Guan G F. The change of organic, nitrogen, phosphorus and potassium nutrient in the different cropping system[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(1): 90-95.
- [29] 辛国荣, 李剑, 杨中艺. 水田冬种多花黑麦草对土壤氮磷环境释放的影响 [J]. *草业学报*, 2011, 20(6): 118-125.
Xin G R, Li J, Yang Z Y. Effect of winter cropping Italian ryegrass on N and P leakage from soils[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2011, 20(6): 118-125.
- [30] 朱波, 易丽霞, 胡跃高, 等. 黑麦草鲜草翻压还田对双季稻田肥料氮循环的影响 [J]. *中国农业科学*, 2012, 45(13): 2764-2770.
Zhu B, Yi L X, Hu Y G, et al. Effects of ryegrass incorporation on fertilizer N cycling in a double rice system[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(13): 2764-2770.
- [31] Maltais-Landry G, Scow K, Brennan E, et al. Higher flexibility in input N:P ratios results in more balanced phosphorus budgets in two long-term experimental agroecosystems[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 223: 197-210.
- [32] 张丽芳, 杨成春, 王萍, 等. 长期施肥对红壤氮磷养分和玉米生长、氮磷吸收的影响 [J]. *浙江农业科学*, 2020, 61(9): 1757-1759.
Zhang L F, Yang C C, Wang P, et al. Effects of long-term fertilization on nitrogen and phosphorus in red soil and growth, nitrogen and phosphorus absorption of corn[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2020, 61(9): 1757-1759.
- [33] 王艳玲, 何园球, 吴洪生, 等. 长期施肥下红壤磷素积累的环境风险分析 [J]. *土壤学报*, 2010, 47(5): 880-887.
Wang Y L, He Y Q, Wu H S, et al. Environmental risk analysis of accumulation phosphorus in red soil under long-term fertilization[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(5): 880-887.
- [34] 陈长青, 何园球, 卞新民. 红壤丘陵区县域农林复合生态经济系统健康评价 [J]. *长江流域资源与环境*, 2009, 18(1): 79-85.
Chen C Q, He Y Q, Bian X M. Study of eco-economic health evaluation for agro-forestry ecosystem of county territory in laterite rolling region[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2009, 18(1): 79-85.
- [35] 谭德水, 金继运, 黄绍文, 等. 长期施钾与秸秆还田对华北潮土和褐土区作物产量及土壤钾素的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14(1): 106-112.
Tan D S, Jin J Y, Huang S W, et al. Effect of long-term application of potassium fertilizer and wheat straw to soil on yield of crops and soil potassium in fluvo-aquic soil and brown soil of northcentral China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(1): 106-112.
- [36] 李梦寻, 王冬梅, 任远, 等. 不同干湿交替频率对土壤速效养分、水溶性有机碳的影响 [J]. *生态学报*, 2018, 38(5): 1542-1549.
Li M X, Wang D M, Ren Y, et al. Influence of different drying-rewetting frequencies on available soil nutrients and DOC[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(5): 1542-1549.
- [37] 朱咏莉, 刘军, 王益权, 等. 干湿交替过程对黄土高原几种主要土壤钾有效性的影响 [J]. *土壤通报*, 2002, 33(6): 435-437.
Zhu Y L, Liu J, Wang Y Q, et al. Effect of alternation of drying and wetting on K-fixation capacity of soils in loess plateau[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2002, 33(6): 435-437.
- [38] 祝海燕, 王海峰, 李春燕. 过量施用钾肥对寿光设施果菜类蔬菜的影响 [J]. *中国蔬菜*, 2015(11): 93-95.
Zhu H Y, Wang H F, Li C Y. Effects of excessive K-fertilizer application on fruits and vegetables in Shouguang facility[J]. *China Vegetables*, 2015(11): 93-95.
- [39] 刘晓宏, 郝明德, 樊军. 黄土高原旱区长期不同轮作施肥对土壤供氮能力的影响 [J]. *干旱地区农业研究*, 2000, 18(3): 1-7.
Liu X H, Hao M D, Fan J. Effects of long-term rotation and fertilization on N-supply by soil in dryland area on loess plateau[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2000, 18(3): 1-7.
- [40] Gil S V, Meriles J, Conforto C, et al. Response of soil microbial communities to different management practices in surface soils of a soybean agroecosystem in Argentina[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2011, 47(1): 55-60.
- [41] Tian Y, Zhang X, Liu J, et al. Effects of summer cover crop and residue management on cucumber growth in intensive Chinese production systems: Soil nutrients, microbial properties and nematodes[J]. *Plant and Soil*, 2011, 339(1/2): 299-315.

(责任编辑: 董成立)