

引用格式:

洪曦, 宫殿林, 曾希柏, 罗尊长, 郑超, 汤春纯, 李荣, 吴培金, 李俊, 邓龙英. 基于农田氮磷平衡的红壤区农田环境友好型种植制度评价[J]. 农业现代化研究, 2025, 46(1): 155-164.

HONG X, GONG D L, ZENG X B, LUO Z C, ZHENG C, TANG C C, LI R, WU P J, LI Jun, DENG L Y. Evaluation of environment-friendly cropping systems in red soil areas based on farmland nitrogen and phosphorus balance[J]. Research of Agricultural Modernization, 2025, 46(1): 155-164.

DOI: 10.13872/j.1000-0275.2024.1543

CSTR: 32240.14.1000.0275.2024.1543



基于农田氮磷平衡的红壤区农田环境友好型种植制度评价

洪曦¹, 宫殿林^{2*}, 曾希柏³, 罗尊长¹, 郑超⁴, 汤春纯⁵, 李荣⁶,
吴培金⁷, 李俊⁸, 邓龙英⁹

(1. 湖南省土壤肥料研究所 湖南长沙 410125; 2. 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, 长沙农业环境观测研究站, 湖南长沙 410125; 3. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081; 4. 湘西土家族苗族自治州生态环境局, 湖南吉首 416500; 5. 岳阳市农业科学研究所, 国家农业环境岳阳观测实验站, 湖南岳阳 414000; 6. 汉寿县农业农村局, 湖南汉寿 415900; 7. 南县农业农村局, 湖南南县 413200; 8. 澧县农业农村局, 湖南澧县 415500; 9. 桂阳县农业农村局, 湖南桂阳 424400)

摘要: 农业面源污染是当前中国农业可持续发展面临的重要挑战之一, 合理的种植制度能够有效改善农业生态环境并提高农田的资源利用效率。为了探索适合湖南省红壤区的可持续农业种植模式, 本研究基于湖南省 10 个国家级农田长期定位监测点的种植制度试验, 选取了当地农民习惯施肥条件下的多种种植模式, 包括: 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) 4 种双季稻模式; 烤烟-水稻 (RT)、水稻-冬闲 (RW) 和水稻-油菜 (RO) 3 种一季稻模式; 以及棉花-油菜 (CR)、大豆-红薯 (SS) 和玉米-萝卜 (MR) 3 种旱作模式。通过生态经济效益综合评价法, 评估了不同种植制度的生态经济综合效益, 旨在为湖南省农田种植制度的合理布局、提升农业生产效益和减少农业面源污染提供理论依据。研究表明: 在 10 种模式中, RRC 模式的综合得分最高, 为 0.734, 其次为 SS 模式 (0.675), RO 模式和 CR 模式得分也较高, 分别为 0.666 和 0.670。得分最低的是 RW 模式 (0.392)。因此, RRC 模式被认为是红壤区兼顾经济和环境效益的最优种植制度, 值得推广; 而 RW 模式的生态经济效益最差, 不建议农民采用。

关键词: 生态经济效益; 长期定位监测试验; 环境友好; 种植制度; 综合评价

中图分类号: S154.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-0275 (2025) 01-0155-10

Evaluation of environment-friendly cropping systems in red soil areas based on farmland nitrogen and phosphorus balance

HONG Xi¹, GONG Dianlin², ZENG Xibai³, LUO Zunchang¹, ZHENG Chao⁴, TANG Chunchun⁵,
LI Rong⁶, WU Peijin⁷, LI Jun⁸, DENG Longying⁹

(1. Soil and Fertilizer Institute of Hunan Province, Changsha, Hunan 410125, China; 2. Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Regions, Changsha Research Station for Agricultural & Environmental Monitoring, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha, Hunan 410125, China; 3. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 4. Hunan Xiangxi Tujiazu & Miaozu Autonomous Prefecture Ecological Environment Bureau, Jishou, Hunan 416500, China; 5. Yueyang Agricultural Sciences Institute, National Agricultural Environment Observatory in Yueyang, Yueyang, Hunan 414000, China; 6. Agricultural and Rural Bureau of Hanshou County, Hanshou, Hunan 415900, China; 7. Agricultural Bureau of Nanxian County, Nanxian, Hunan 413200, China; 8. Agricultural Bureau of Lixian County, Lixian, Hunan 415500, China; 9. Agricultural Bureau of Guiyang County, Guiyang, Hunan 424400, China)

Abstract: Agricultural non-point source pollution is one of the key challenges facing the sustainable development of agriculture in China. A rational cropping system can effectively improve the agricultural ecological environment and enhance the resource utilization efficiency of farmland. To explore a sustainable agricultural model suitable for the red soil area of Hunan Province, this study selected a variety of cropping systems based on the customary fertilization

收稿日期 Received: 2024-09-20; 接受日期 Accepted: 2024-12-19

基金项目: 湖南省土壤肥料研究所所长基金 (2020tfs202); 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); 湖南省农业科技创新项目 (2024CX40)。Supported by the Director Fund Project of Soil and Fertilizer Institute of Hunan Province (2020tfs202); National Natural Science Foundation of China (U19A2048); Natural Science Foundation of Hunan Province (2020JJ5319); Hunan Agricultural Science and Technology Innovation Project (2024CX40).

* 通信作者 Corresponding author (gongdianlin@isa.ac.cn)

practices of local farmers, using data from 10 national long-term cropland monitoring sites in Hunan Province. The selected cropping systems include four double-cropping rice models: rice-rice-Chinese milk vetch (RRC), rice-rice-barley (RRB), rice-rice-winter fallow (RRW), and rice-rice-rapeseed (RRO); three single-season rice models: rice-tobacco (RT), rice-winter fallow (RW), and rice-rapeseed (RO); and three upland farming models: cotton-rapeseed (CR), soybean-sweet potato (SS), and corn-radish (MR). Using a comprehensive evaluation method of eco-economic benefits, the ecological and economic benefits of the different cropping systems were assessed. The aim was to provide a theoretical basis for the rational layout of cropping systems, improving agricultural productivity, and reducing agricultural non-point source pollution in Hunan Province. The results showed that among the 10 models, the RRC model had the highest composite score of 0.734, followed by the SS model (0.675). The RO and CR models also had relatively high scores of 0.666 and 0.670, respectively. The lowest score was obtained by the RW model (0.392). Therefore, the RRC model is considered the optimal cropping system for balancing both economic and environmental benefits in the red soil area and is recommended for promotion. In contrast, the RW model demonstrated the poorest eco-economic benefits and is not recommended for adoption by farmers.

Keywords : ecological and economic benefits; long-term positioning monitoring test; environmentally friendly; cropping systems; comprehensive assessment

我国是化肥施用大国, 过量和不合理的化肥使用导致了农田土壤氮磷素的失衡, 引发了农业面源污染等一系列环境问题。红壤区是我国光热水资源丰富、耕地复种指数高且生产潜力巨大的地区。然而, 该地区的作物种植制度多样, 各种种植制度的施肥和管理措施差异较大, 导致农田氮磷平衡差异显著, 从而影响了区域农业生产和管理, 并成为农业面源污染的重要原因之一。目前, 红壤区在调整种植制度时, 往往未充分考虑氮磷流失对生态环境的影响, 这给生态环境带来了较大威胁。基于农田氮磷平衡, 对红壤区农民习惯施肥和管理下的不同种植制度进行生态经济效益综合评价, 对于控制农业面源污染、优化农田养分管理、保护农业生态环境等方面具有重要意义^[1-2]。

国内外在种植制度筛选方面的研究主要聚焦于土壤质量、生态环境、社会效益和经济效益等多维度的综合评价。在土壤质量方面, 许多研究发现, 水稻-水稻-黑麦草、水稻-水稻-紫云英等轮作模式能显著增加土壤有机碳含量和改善碳库指数, 表现出较其他模式更优的土壤质量提升效果^[3]。此外, 针对长江中游地区的研究表明, 采用模糊数学法筛选出的“早稻-晚稻-冬季作物(马铃薯、大蒜、油菜、紫云英)”轮作模式, 能够有效提升土壤质量, 并具有较高的生态效益和社会经济效益^[4]。杨滨娟等^[5]通过层次分析法(AHP)对不同复种轮作模式的资源利用率和综合效益进行了评价, 发现“油菜-甘蔗(春大豆间作)→紫云英-早稻-玉米(红薯间作)”模式在长江中游地区表现优异, 资源利用率和经济效益较为突出。在生态环境和社会效益方面, 部分研究重点考虑作物轮作对碳排放和污染控制的影响。严燕等^[6]对长江下游地区的种植制度进行综合评价, 发现“冬小麦-水稻”和“冬油菜-水稻”

两种模式, 不仅能提高粮食产量, 还能显著降低温室气体排放, 成为较为理想的生态模式。同时, 姜超强等^[7]利用生命周期评价法评估了不同种植模式的碳汇效应, 研究发现再生稻种植模式在降低碳排放的同时, 也能获得较高的经济效益, 体现了生态与经济的双重优势。此外, 针对重金属污染风险的研究表明, 油菜-水稻轮作模式能够有效减少重金属镉的污染风险, 同时保证农民收入, 是一种较为优选的种植制度^[8]。Kumar等^[9]的研究则表明, 水稻与冬季作物如鹰嘴豆、扁豆等轮作, 不仅能提高系统生产力, 还能有效减少温室气体排放, 优化资源利用效率。

尽管前人的研究在土壤质量、重金属污染及温室气体排放等方面取得了重要进展, 但大多数研究基于短期田间试验数据, 且评价筛选方法较为单一, 对农田氮磷养分管理不当造成的面源污染问题评估不足。由于农田氮磷平衡计算中, 作物吸收并带走的氮磷养分是主要的支出项, 这一项受气候等因素的影响波动较大, 而长期定位试验具有时间的延续性和气候的重复性, 能够避免单一年份特殊气候或自然灾害对数据的干扰。同时, 综合评价方法能最大程度避免主观和不利的客观因素影响, 确保评价指标权重更加符合客观事实。因此, 本研究基于湖南省 10 个不同种植制度的长期定位监测试验, 以氮磷平衡为基础, 综合运用德尔菲法(Delphi)、AHP 和模糊数学法(Fuzzy Mathematics)进行综合评价, 旨在为红壤区农田氮磷养分的高效利用和农业生态环境的保护提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

湖南省位于中国中亚热带季风湿润气候区, 全

省地势西高东缓、南高北低，东、南、西三面环山，中部为丘陵，北部为洞庭湖平原。年降水量为 1 100~1 800 mm，主要集中在 4 至 6 月，占全年降水量的 50%~60%。无霜期为 260~310 d，年日照时数约为 1 240~1 870 h。

湖南是中国重要的农业省份，素有“湖广熟，天下足”的美誉。水稻种植面积居全国首位，油菜、蔬菜等农产品产量也位居全国前列。该省农业种植模式多样，包括水稻-水稻-油菜、水稻-水稻-紫云英、水稻-水稻-大麦、水稻-水稻-大豆、水稻-水稻-黑麦草、水稻-水稻-冬闲、水稻-冬闲、水稻-烤烟、水稻-绿肥、水稻-蔬菜、水稻-油菜等水稻轮作模式，以及大豆-红薯、玉米-萝卜、棉花-油菜等旱季作物轮作模式。

1.2 试验设计

本研究选取湖南省汉寿县、宁乡市、武冈市、南县、桂阳县、芷江县、澧县、岳阳市、道县和邵东市的 10 个长期定位监测点，设置了常规施肥处理，具体的种植制度包括：1) 水稻-水稻-紫云英(RRC)；2) 水稻-水稻-大麦(RRB)；3) 水稻-水稻-冬闲(RRW)；4) 水稻-水稻-油菜(RRO)；5) 水稻-

烤烟(RT)；6) 水稻-冬闲(RW)；7) 水稻-油菜(RO)；8) 棉花-油菜(CR)；9) 大豆-红薯(SS)；10) 玉米-萝卜(MR)。这些常规处理均是按照农民习惯性施肥和管理设置。各种种植制度的灌溉等田间管理措施详细信息参见宫殿林等^[10]。各长期定位试验土壤基本理化性质和施肥量分别见表 1 和表 2，各长期定位试验区位见图 1。

1.3 土壤样品采集与理化性质测定

土壤样品于 2022 年最后一季作物收获后采集。在采样前，先将小区内的植物残留物等杂物移除，然后使用土钻从每个小区内随机采集 0~20 cm 土层的 5 个点土样，按比例混合后组成一个样品。土壤、植株及籽粒样品的采集与测定方法参照《土壤农化分析》。

1.4 氮磷平衡计算方法

根据物质守恒定理，农田氮磷平衡量为氮磷输入量减去氮磷输出量^[11]。氮磷输入项包括肥料、干湿沉降、种苗和灌溉水带入（氮输入还包括生物固氮）；输出项为作物吸收移出量。干湿沉降和生物固氮输入量通过查阅相关文献估算^[12-14]，灌溉水带入量则根据各站提供的灌溉水体积和氮浓度计算得

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	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-紫云英(RRC)	汉寿县	1986	第四纪红土	5.65	30.60	2.01	0.42
	水稻-水稻-大麦(RRB)	宁乡市	1986	河流沉积物	6.85	29.39	2.01	0.59
	水稻-水稻-冬闲(RRW)	武冈市	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	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	2000	石灰岩洪积物	7.09	44.50	2.49	0.58
	水稻-冬闲(RW)	芷江县	1998	河湖沉积物	7.90	57.40	3.17	0.36
	水稻-油菜(RO)	澧县	2000	河流冲积物	5.36	39.21	2.32	-
旱作	棉花-油菜(CR)	岳阳市	1998	河湖冲积物	5.70	19.30	1.36	0.60
	大豆-红薯(SS)	道县	1998	第四纪红土	5.90	16.60	1.14	-
	玉米-萝卜(MR)	邵东市	2001	石灰岩风化物	4.70	18.70	0.94	-

表 2 各试验点常规施肥处理年平均施肥量

Table 2 The average annual fertilizer application of conventional fertilization treatment at each experimental site

处理	化肥施用量 / (kg/hm ²)			有机肥施用量 / (kg/hm ²)			肥料总施用量 / (kg/hm ²)		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
RRC	287.30	86.10	135.00	48.30	11.70	33.75	335.60	97.80	168.75
RRB	509.53	121.00	181.50	0.00	0.00	0.00	509.53	121.00	181.50
RRW	183.83	10.20	67.60	145.00	76.72	67.6	328.83	86.92	135.20
RRO	594.10	229.83	255.00	18.00	0.00	25.50	612.10	229.83	280.50
RT	263.28	171.10	408.00	35.25	28.20	90.75	298.53	199.90	498.75
RW	183.83	71.23	47.70	0.00	0.00	0.00	183.83	71.23	47.70
RO	343.28	162.48	157.50	39.15	6.48	87.30	382.43	168.96	244.80
CR	388.50	142.00	75.00	63.00	15.00	6.00	451.50	157.00	81.00
SS	166.65	64.22	33.75	10.55	29.00	37.20	177.20	93.22	70.95
MR	249.50	184.50	148.20	131.50	41.99	0.00	381.00	231.64	148.20

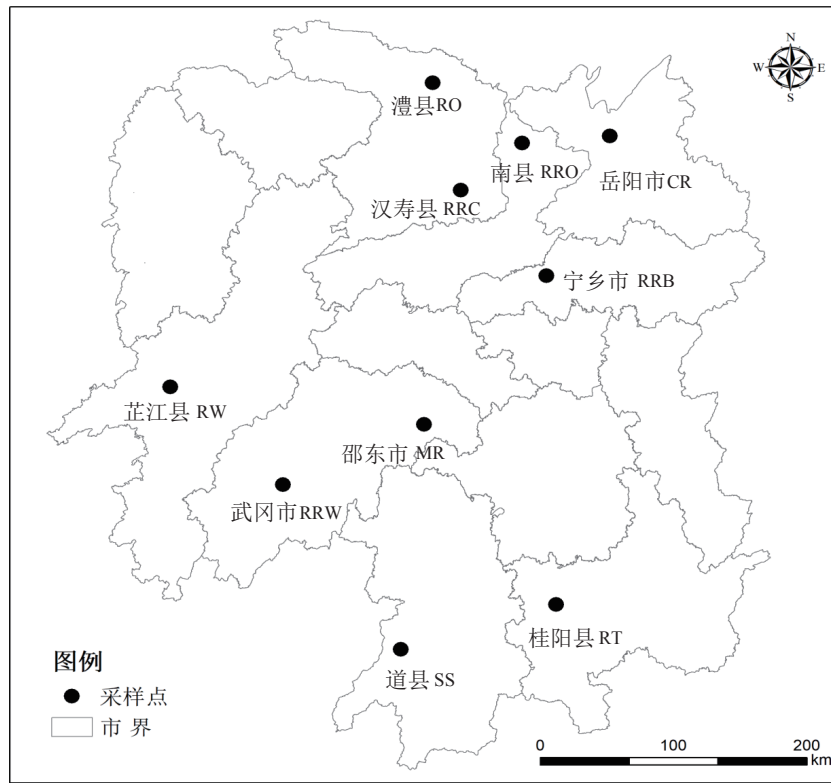


图 1 各长期定位试验点分布图

Fig. 1 The distribution map of each long-term experimental sites

出。作物吸收移出的氮磷量通过作物收获时秸秆和籽粒的氮磷含量及产量计算，数据来源于各小区作物收获时的测产数据和样品分析结果。农田氮平衡 (N_b) 和磷平衡 (P_b) 按以下公式计算：

$$N_b = N_{FE} + N_{SE} + N_{DE} + N_{BN} + N_{IR} - N_c \quad (1)$$

$$N_c = Y_g \times N_g + Y_s \times N_s \quad (2)$$

$$P_b = P_{FE} + P_{SE} + P_{DE} + P_{IR} - P_c \quad (3)$$

$$P_c = Y_g \times P_g + Y_s \times P_s \quad (4)$$

式中： N_{FE} 和 P_{FE} ， N_{SE} 和 P_{SE} ， N_{DE} 和 P_{DE} ， N_{IR} 和 P_{IR} 分别代表施肥，种子，干湿沉积和灌溉水带入的氮和磷， N_{BN} 代表生物固氮。 N_c 和 P_c 代表作物收获时地上部分带出的氮磷， Y_g 和 Y_s 分别代表籽粒和秸秆产量， N_g 和 P_g 分别代表籽粒氮磷浓度， N_s 和 P_s 分别代表秸秆氮磷浓度。

1.5 生态经济效益综合评价方法

1.5.1 农田生态经济综合评价指标体系的构建 采用 Delphi 法遴选评价指标。邀请多位国内相关领域的专家，根据各指标的相对重要性进行独立打分，最终确定 9 个经济和生态效益指标^[15-16]。其中，经济效益指标包括总收入（作物产出带来的收入、不扣除劳动力、化肥、农药等成本）和纯收益（总收

入减去劳动力、化肥、农药、种子、灌溉等支出）。生态效益指标主要包括稻田氮盈亏量、磷盈亏量、C/N 比、全氮年均增量、全磷年均增量、碱解氮年均增量和速效磷年均增量。

1.5.2 应用 AHP 法确定评价指标体系和各指标权重 首先，该方法将问题分为 3 个层次：1) 目标层：比较红壤丘陵区不同种植制度下农田的经济效益和生态效益；2) 准则层：经济效益和生态效益因子；3) 指标层：已选定的衡量经济效益和生态效益的相关指标。最终建立的具体指标体系见表 3。其次，构建判断矩阵。采用九分位比例标尺对各指标的相对重要性进行评判，构建判断矩阵，计算各指标的权重，并进行一致性检验^[15-16]。根据计算结果，得到的各指标权重如表 3 所示，各指标总权重表示为向量 W 。经一致性检验，权重的总一致性比例 CR 值为 0.000 3，远小于 0.1，表明评价指标体系的权重合理且适宜^[15]。

1.5.3 确定评价集和隶属度函数 应用模糊数学法对湖南省红壤丘陵区不同种植制度的生态经济效益进行综合评判。评价集由表 3 中指标层的各个指标组成。为了进行模糊评价，本文设定了各评价指标的隶属度函数，如表 4 所示，并根据这些隶属度函数计算不同种植制度下红壤农田的经济生态效益综合

表 3 湖南省红壤丘陵区不同种植制度下农田生态经济效益综合评价指标体系及相对应的权重

Table 3 Factor system and weights for evaluating ecological and economic benefits of red paddy under different cropping systems

目标层	准则层		指标层		总权重
	准则名称	权重	指标名称	权重	
不同种植制度 下红壤农田生态 经济效益评价	经济效益因子	0.400	纯收益	0.833	0.333
			总收入	0.167	0.067
			全氮年均增量	0.200	0.120
			C/N	0.200	0.120
	生态效益因子	0.600	全磷年均增量	0.133	0.080
			碱解氮年均增量	0.133	0.080
			速效磷年均增量	0.133	0.080
			氮盈亏量	0.100	0.060
			磷盈亏量	0.100	0.060

表 4 各评价指标的隶属度函数

Table 4 Subordinate functions of each evaluation factor

评价指标	下限	上限	隶属度函数	释义																											
纯收益	—	—	$u(x) = x_i / x_{\max}$	式中： $\mu(x)$ 为各指标的隶属度； x 为评价指标的实测值； x_i 为第 i 个样本的实际测量值， $i=1, 2, \dots, 10$ ； x_{\max} 为评价指标的最大实测值；纯收益、总收入不设上下限。																											
总收入	—	—			全氮年均增量	—	0.01	$u(x) = 1 - (x_i - b) / x_i, x > b$	式中： $\mu(x)$ 为各指标的隶属度； x 为评价指标的实测值； x_i 为第 i 个样本的实际测量值， $i=1, 2, \dots, 10$ ； b 为评价指标的上限； x_{\max} 为评价指标的最大实测值。	全磷年均增量	—	0.01	$u(x) = x_i / x_{\max}, 0 \leq x < b$	速效磷年均增量	0	0.5	$u(x) = x_i / (b - x_i), x < 0$	碱解氮年均增量	0	5	C/N	8	20	$u(x) = x_i / b$	式中： $\mu(x)$ 为各指标的隶属度， x 为评价指标的实测值， x_i 为第 i 个样本的实际测量值， b 为评价指标的上限； $i=1, 2, \dots, 10$ 。	氮盈亏量	—	—	$u(x) = x_{\min} / x_i $	式中： $\mu(x)$ 为各指标的隶属度； x 为评价指标的实测值； x_i 为第 i 个样本的实际测量值， $i=1, 2, \dots, 10$ ； x_{\min} 为评价指标的最小实测值；氮磷盈余不为 0。	磷盈亏量
全氮年均增量	—	0.01	$u(x) = 1 - (x_i - b) / x_i, x > b$	式中： $\mu(x)$ 为各指标的隶属度； x 为评价指标的实测值； x_i 为第 i 个样本的实际测量值， $i=1, 2, \dots, 10$ ； b 为评价指标的上限； x_{\max} 为评价指标的最大实测值。																											
全磷年均增量	—	0.01			$u(x) = x_i / x_{\max}, 0 \leq x < b$																										
速效磷年均增量	0	0.5	$u(x) = x_i / (b - x_i), x < 0$																												
碱解氮年均增量	0	5																													
C/N	8	20	$u(x) = x_i / b$	式中： $\mu(x)$ 为各指标的隶属度， x 为评价指标的实测值， x_i 为第 i 个样本的实际测量值， b 为评价指标的上限； $i=1, 2, \dots, 10$ 。																											
氮盈亏量	—	—	$u(x) = x_{\min} / x_i $	式中： $\mu(x)$ 为各指标的隶属度； x 为评价指标的实测值； x_i 为第 i 个样本的实际测量值， $i=1, 2, \dots, 10$ ； x_{\min} 为评价指标的最小实测值；氮磷盈余不为 0。																											
磷盈亏量	—	—																													

评价隶属度值，最终得到隶属度矩阵 G 。

1.5.4 生态经济效益综合评价模型的确定 根据第 2 步中得出的总权重向量 W 和第 3 步中得出的隶属度矩阵 G ，构建生态经济效益综合评价模型，具体表达式如下：

$$R=WG \quad (5)$$

式中： R 是红壤农田生态经济效益综合评价指数。

1.6 数据处理

本研究使用 SPSS 18.0 软件对数据进行单因素方差分析 (one-way ANOVA)，通过 Duncan 检验法对不同处理的差异显著性进行检验。评价模型的计算使用 Matlab 7.0 软件进行。

2 结果与分析

2.1 不同种植制度下农田氮磷养分变化

结果表明 (表 5)，经过多年的长期种植，水稻 - 水稻 - 冬闲、水稻 - 水稻 - 油菜和水稻 - 冬闲三种模式下，农田全氮含量呈下降趋势，其中水稻 - 水稻 - 冬闲模式的下降最为显著，年均降幅为 0.038 g/kg。

其余模式下，农田全氮含量则有所上升，尤其是玉米 - 萝卜模式，年均升幅为 0.038 g/kg。水稻 - 水稻 - 油菜模式下，农田碱解氮含量有所降低，年均降幅为 1.069 mg/kg，而其他模式下碱解氮含量普遍上升。水稻 - 水稻 - 大麦模式下，农田全磷含量呈下降趋势，年均降幅为 0.005 g/kg；水稻 - 水稻 - 紫云英和水稻 - 水稻 - 油菜模式下，农田速效磷含量有所下降，年均降幅分别为 0.114 和 0.141 mg/kg。总体而言，大多数种植模式下，农田氮磷养分含量均有所上升，表明农田中氮磷养分的投入量较大。

2.2 不同种植制度下农田氮磷平衡特征

不同种植制度下农田氮“输入 - 输出”平衡结果表明，各种种植制度的年均氮平衡均为盈余状态，且氮盈余量与氮输入量成正比 (表 6)。在水稻 - 水稻 - 紫云英模式下，作物的吸氮量与氮输入量之比高于其他种植制度，说明在相同施氮量下，该模式的作物吸氮量更高，即生物产出较好。此外，水稻 - 水稻 - 紫云英模式和 大豆 - 红薯模式下的单季氮盈余量相对较低，这与豆科植物的固氮作用密切相关。大部分种植模式的氮肥盈余量较高，特别是水稻 -

表 5 各种种植制度下农田氮磷养分变化 (2012—2022)

Table 5 Changes of nitrogen and phosphorus nutrients in farmland under different cropping systems (2012-2022)

种植制度	全氮 / (g/kg)			碱解氮 / (mg/kg)			全磷 / (g/kg)			速效磷 / (g/kg)		
	初值	终值	年均变化量	初值	终值	年均变化量	初值	终值	年均变化量	初值	终值	年均变化量
RRC	2.010	2.240	0.007	153.000	221.000	1.943	0.420	0.770	0.010	6.800	2.810	-0.114
RRB	2.010	2.450	0.012	144.100	156.000	0.425	0.590	0.400	-0.005	12.870	21.500	0.240
RRW	2.800	1.450	-0.038	230.000	236.000	0.400	0.720	0.730	0.001	8.000	17.780	0.652
RRO	2.600	2.480	-0.003	220.000	189.000	-1.069	0.810	1.100	0.008	28.600	23.540	-0.141
RT	2.490	2.520	0.002	161.000	198.000	5.286	0.580	1.460	0.059	32.000	69.700	4.713
RW	3.170	2.650	-0.033	167.000	221.000	9.000	0.360	0.460	0.007	4.600	8.320	0.620
RO	1.450	1.690	0.017	142.500	145.000	0.625	0.670	0.770	0.010	15.400	17.900	0.500
CR	1.360	1.450	0.006	184.000	197.000	1.300	0.600	0.870	0.011	15.000	18.200	0.457
SS	1.140	1.320	0.008	73.000	76.000	1.500	0.630	0.650	0.002	10.400	16.890	0.499
MR	1.090	1.330	0.024	77.000	109.000	6.400	0.630	0.780	0.015	9.800	15.500	1.140

注:RRC、RRB、RRW、RRO、RT、RW、RO、CR、SS 和 MR 分别代表水稻-水稻-紫云英、水稻-水稻-大麦、水稻-水稻-冬闲、水稻-水稻-油菜、水稻-烤烟、水稻-冬闲、水稻-油菜、棉花-油菜、大豆-红薯和玉米-萝卜。下表同。

表 6 不同种植制度下农田年均氮素平衡 (2012—2022) (kg/hm²)Table 6 Average annual N budget under different cropping systems (2012-2022) (kg/hm²)

种植制度	肥料输入	灌溉输入	干湿沉降	生物固氮	种子带入	氮输入	作物移出氮	氮盈亏量
RRC	335.60	20.70	33.21	80.67	4.99	504.56	318.90	156.27
RRB	509.53	27.36	36.58	35.00	4.99	627.82	326.30	287.16
RRW	328.83	21.60	41.61	22.00	4.54	446.05	242.49	176.09
RRO	612.10	27.36	34.01	24.50	4.57	729.97	333.99	368.55
RT	298.53	20.70	37.15	30.00	4.08	415.90	217.11	173.35
RW	183.83	18.72	35.24	15.00	2.27	299.39	176.87	78.19
RO	382.43	25.31	34.28	24.20	3.93	499.65	294.29	175.86
CR	451.50	18.32	35.24	28.00	3.99	568.79	312.97	224.08
SS	177.20	17.84	39.66	35.00	4.43	345.60	185.57	88.56
MR	381.00	18.24	34.34	26.00	3.44	497.74	298.68	164.34

注:氮输入为肥料输入、灌溉输入、干湿沉降、生物固氮、种子带入的加和;氮盈亏为氮输入减去作物移出氮。

水稻-油菜、水稻-水稻-大麦和水稻-水稻-冬闲模式的氮盈余量相对较高。这表明,这些模式下农民的氮肥施用量较高,导致氮肥的积累。

农田磷“输入-输出”平衡结果表明,除了水稻-水稻-紫云英模式外,各种种植制度的农田磷素均处于盈余状态,而且磷肥输入量较高的种植制度的磷盈余量普遍较高(表 7)。特别是玉米-萝卜模式,施用的磷肥量最高(101.14 kg/hm²),其磷盈余量也最高(51.94 kg/hm²)。水稻-水稻-紫云英模式的作物吸磷量与磷输入量之比也高于其他种植制度,显示出该模式的磷吸收效率较高。某些种植模式,如水稻-水稻-紫云英、水稻-油菜、大豆-红薯等,在年均施磷量下能够基本维持磷素平衡。然而,水稻-水稻-油菜、水稻-水稻-大麦、棉花-油菜等模式下,磷盈余过高,说明这些模式下农民施用磷肥的习惯不够合理,导致磷素的过度积累。

2.3 不同种植制度农田生态经济效益综合评价结果

在本文的氮磷平衡分析基础上,结合各处理的产量、土壤碳氮比、全氮和全磷增量等数据,根据

表 4 中各评价指标的隶属度函数,计算出各指标的隶属度(表 8),并构建隶属度矩阵。该隶属度矩阵为一个 10×9 的矩阵,其中 10 行分别代表不同种植制度下各项评价指标的无量纲化数值,9 列则代表 9 个判断指标的无量纲化数值。

将各指标的权重和隶属度值(表 8)组成的矩阵代入公式 5,可以得到不同种植制度下红壤农田生态经济效益的综合评价结果(图 2),包括经济效益指数(R1)、生态效益指数(R2)和生态经济综合效益指数(R)。评价结果显示,R1 得分最高的是水稻-烤烟处理(R1 为 1.000),其次为水稻-水稻-油菜处理(R1 为 0.938),得分最低的是水稻-冬闲处理(R1 仅为 0.533)。在生态效益方面,得分最高的是水稻-水稻-紫云英处理(R2 为 0.643),最低的是水稻-水稻-油菜处理(R2 为 0.153),其次为水稻-水稻-冬闲(R2 为 0.191)。综合各模式的经济和生态效益,水稻-水稻-紫云英模式的综合指数 R 值最高(为 0.734),而水稻-冬闲处理的 R 值最低(为 0.392)。根据各处理的 R 值可以初步判断,

表 7 不同种植制度下农田年均磷素平衡 (2012—2022) (kg/hm²)

Table 7 Average annual P budget under different cropping systems (2012-2022) (kg/hm²)

种植制度	肥料输入	灌溉输入	干湿沉降	种子带入	磷输入	作物移除磷	磷盈亏量
RRC	42.70	0.51	0.32	1.45	44.87	45.99	-1.01
RRB	52.83	0.65	0.37	1.46	55.31	34.66	20.65
RRW	37.95	0.54	0.43	1.15	39.82	31.80	8.27
RRO	100.35	0.61	0.34	1.21	102.28	66.27	36.24
RT	87.28	0.47	0.38	1.07	89.07	50.89	38.31
RW	31.10	0.50	0.35	0.58	32.39	28.43	4.10
RO	73.77	0.60	0.34	0.64	75.13	71.28	4.07
CR	68.55	0.32	0.35	1.02	70.29	35.23	35.01
SS	40.70	0.40	0.41	1.14	19.63	17.55	25.10
MR	101.14	0.34	0.34	1.10	102.96	50.98	51.94

注：磷输入为肥料输入、灌溉输入、干湿沉降、种子带入的加和；磷盈亏为磷输入减去作物移出磷。

表 8 不同种植制度下红壤农田经济生态效益综合评价隶属度值

表 8 Membership value of comprehensive evaluation of economic and ecological benefits of red soil farmland under different cropping systems

种植制度	纯利润	总收入	全氮增量	C/N	全磷增量	碱解氮	速效磷	氮盈亏量	磷盈亏量
RRC	0.888	0.792	0.514	0.490	1.000	1.000	-0.186	1.000	1.000
RRB	0.925	0.743	0.679	0.558	-0.343	0.219	0.479	0.608	0.202
RRW	0.764	0.696	-0.765	0.539	0.028	0.206	0.767	0.893	0.131
RRO	0.960	0.830	-0.250	0.496	0.806	-0.176	-0.219	0.457	0.029
RT	1.000	1.000	0.187	0.463	0.170	0.946	0.106	0.783	0.018
RW	0.544	0.476	-0.765	0.475	0.714	0.556	0.806	0.689	0.104
RO	0.796	0.602	0.583	0.462	1.000	0.322	1.000	0.592	0.222
CR	0.787	0.716	0.643	0.453	0.889	0.669	0.914	0.481	0.032
SS	0.772	0.637	0.750	0.458	0.200	0.772	0.998	0.762	0.456
MR	0.890	0.798	0.417	0.471	0.400	0.481	0.159	0.629	0.013

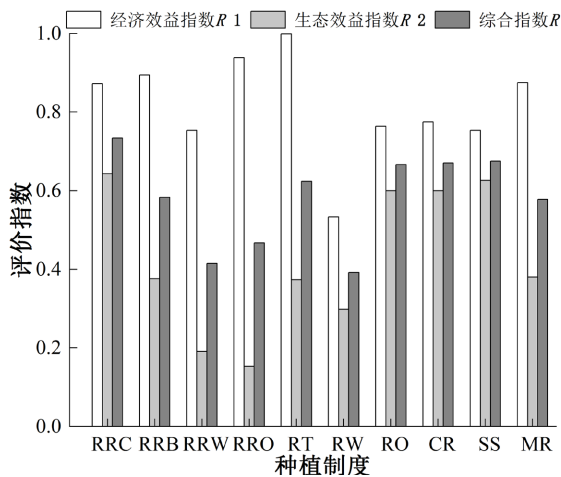


图 2 不同种植制度下红壤农田经济生态效益评价指数

Fig. 2 Statistical value of ecological and economic benefits index of red paddy under different treatments

注：RRC、RRB、RRW、RRO、RT、RW、RO、CR、SS 和 MR 分别代表水稻-水稻-紫云英、水稻-水稻-大麦、水稻-水稻-冬闲、水稻-水稻-油菜、水稻-烤烟、水稻-冬闲、水稻-油菜、棉花-油菜、大豆-红薯和玉米-萝卜。

在本研究的 10 种不同种植制度中，水稻-水稻-紫云英模式的综合效益最优，既能确保经济效益，又能兼顾生态效益。

3 讨论

3.1 长期不同种植制度下红壤农田氮磷养分变化和氮磷平衡状况

氮和磷是植物生长所需的两种最重要的营养元素，农田氮磷养分的变化受地形、母质、种植制度和施肥等多种内外因素的综合影响。宫殿林等^[10]的研究表明，在长期农民习惯性施肥的条件下，红壤农田不同种植制度下耕层土壤全氮、碱解氮和速效磷的含量大多呈现上升趋势，但其变化特征存在较大差异。本研究中，各种种植制度的氮磷养分年均值大部分呈上升趋势，表明长期农民习惯性施肥量较大，过量的氮磷可能导致潜在的环境污染问题。

土壤中的氮磷养分含量与氮磷平衡值密切相关^[17]。氮磷平衡（即氮磷输入与籽粒去除之间的差异）能够反映潜在的氮磷损失，是评价农田面源污染的关键指标，对优化土壤肥力管理和减少农业污染具有重要意义^[18]。不同种植制度对农田氮磷平衡具有显著影响^[19-20]。本研究中，除水稻-水稻-紫云英模式外，其他种植制度的农田氮磷均表现为盈余状态，尽管盈余量有所不同，这可能与不同种

植模式对农家肥和化肥等外部氮磷源的需求差异有关^[19, 21]。例如,水旱轮作的干湿交替、休耕期间的水分管理和秸秆管理等因素都会影响农田氮磷平衡^[22]。在稻田系统中,水稻-水稻-紫云英模式的氮磷平均盈余量最低。有研究表明,种植紫云英等绿肥可以提高作物对氮的吸收,减少氮的流失^[23],有效增强土壤的氮储存能力,并减缓土壤中磷的积累速率^[24]。

3.2 长期不同种植制度下红壤农田的生态经济效益评价

长期不同种植制度下农田的生态经济效益综合评价结果表明,在农民习惯性施肥管理下,水稻-水稻-紫云英模式在生态和经济效益方面得分较高,能够较好地兼顾生态效益和经济效益。而水稻-冬闲模式的经济生态综合指数则最低。

3.2.1 双季稻系统红壤农田的生态经济效益评价 在双季稻系统中,水稻-水稻-冬闲模式的生态经济效益综合得分较低,但冬季种植紫云英或油菜等三熟模式的经济生态综合指数则大幅提高。例如,冬季种植紫云英可以增加土壤的覆盖度,显著减少氮磷的流失,同时它还能将土壤底层的养分向耕层富集,优化农田的水肥供应,促进作物生长,并通过固定大气中的氮素来增加土壤养分含量^[24]。此外,紫云英种植还能改变土壤微生物的活性和组成,调整土壤养分形态比例,并促进有机-无机复合体的形成,进而改善土壤结构。长期施用紫云英作为绿肥有助于提高作物对氮的吸收,减少水稻生产系统中氮素的损失^[23, 25-27]。水稻-水稻-油菜(油菜收获后移走)模式的综合指数得分较低,主要由于农民习惯性施肥量较高,且本研究选取的长期定位监测点土壤母质为河湖沉积物,而这种土壤的沙性较强,吸附氮磷等养分的能力较差^[28],从而导致氮磷的流失较为严重,进而拉低了其生态效益得分。然而,从其他生态和经济指标来看,水稻-水稻-油菜模式依然是一种较优的种植制度。油菜是湖南省主要的油料作物之一,水稻-水稻-油菜三熟制是湖南省主要的稻田三熟种植模式^[29],该模式不仅能促进粮油双高产,增加农民收入,还能在长期种植中维持较好的土壤肥力质量^[30]。

3.2.2 一季稻系统红壤农田的生态经济效益评价 在一季稻系统中,水稻-油菜模式是湖南地区较为普及且具有代表性的种植制度之一,生态经济效益综合评价指数相对较高。水旱轮作系统下,土壤物理、化学和生物特性发生变化,这些变化对土壤肥效和养分循环产生了重要影响。研究表明,油菜植

株对土壤有效磷库有显著的正向影响,能够提高土壤中磷的有效性,进而有助于提高整个作物序列的产量稳定性^[19]。水稻-烤烟轮作模式的经济效益得分最高,但生态效益得分较低,主要是由于磷的盈余量较高,对环境存在较大的潜在风险。部分研究认为,虽然水稻-烤烟模式的经济效益较好,但其呈现出负碳汇效应,不符合我国倡导的“双碳”理念^[7]。水稻-冬闲模式的综合得分最低,有研究指出,近年来冬闲田的面积不断增加,已超 133 万 hm^2 ^[29],这种模式不利于提高经济效益,也不利于农业的可持续发展。

3.2.3 旱作系统红壤农田的生态经济效益评价 红壤旱地是南方重要的农业土壤资源,常见的旱地多熟制有一年两熟和一年三熟等模式^[31]。本研究仅选取了大豆-红薯、棉花-油菜和玉米-萝卜三种一年两熟旱作模式。根据生态经济效益综合评价结果,这三种模式的评价得分分别为:0.675、0.670和0.578。大豆-红薯模式和棉花-油菜模式的得分差异不大。大豆作为固氮作物,能够有效减少氮肥的施用量,而红薯生长速度快,种植技术简单,虫害少,且成本低,随着人们生活水平的提高,对红薯及其加工产品的需求增加,经济效益较高。棉花-油菜模式的得分较高,是南方旱地解决棉花和油料作物种植用地矛盾的有效途径。玉米-萝卜轮作的氮磷盈余量,尤其是磷盈余量较高,因此其经济指数较高,但生态指数较低。

从整体来看,农田三熟种植制度的经济效益普遍高于两熟和一熟制。中国南方红壤丘陵区水热光资源丰富,适合发展多熟制种植模式^[31],能够更均衡地利用土壤养分,改善土壤理化性质,并提高产量和收入^[32-34]。此外,作物轮作多样化能够降低气候变化带来的风险,是减少风险的核心战略之一,有助于确保国家粮食安全^[35-37]。然而,由于多种原因,农民对多熟制种植的积极性并不高。郝心怡等^[38]的研究表明,2001—2018年我国长江中下游地区的耕地复种指数呈下降趋势。在本研究中,由于农民习惯性施肥量较高,三熟制的施肥量普遍较大,如水稻-水稻-大麦和水稻-水稻-油菜模式,这导致了农民生产成本的上升,同时过量的氮磷肥料进入环境,造成环境污染。因此,尽管这两种模式在经济效益上表现良好,其生态效益评价价值较低。基于本章的生态经济效益综合评价结果,建议推广水稻-水稻-紫云英模式这一生态经济效益均优的种植模式。同时,水稻-水稻-大麦和水稻-水稻-油菜模式在减少农民习惯性化肥施用量方面也值得推广。

水旱轮作中的水稻-油菜模式，以及旱地系统中的棉花-油菜和大豆-红薯模式也是较为优良的轮作模式，而生态经济效益综合评价指数最低的水稻-冬闲模式则应避免采用。

4 结论

1) 在湖南红壤区，农民习惯性施肥条件下，不同种植制度的年均氮磷平衡普遍表现为盈余状态。其中，水稻-水稻-油菜种植模式的农田氮盈余量最高，达 368.55 kg/hm²，玉米-萝卜种植模式的磷盈余量最高，达 51.94 kg/hm²。水稻-水稻-紫云英和大豆-红薯模式的作物氮磷吸收量相较于输入量较高。

2) 不同种植制度的生态经济效益存在显著差异。水稻-水稻-紫云英模式的综合评价指数最高，为 0.734，是兼顾生态与经济效益的最优种植制度。除此之外，一季稻系统中的水稻-油菜模式，以及旱地中的大豆-红薯和棉花-油菜模式的生态经济效益综合评价指数也较高，分别为 0.666、0.675 和 0.670。而水稻-冬闲轮作模式的经济生态综合评价指数最低，为 0.392，是经济生态效益最差的种植制度，建议避免农民采用。

3) 基于当前湖南省农民习惯性施肥条件下的分析，推荐的种植模式为：双季稻田应优先选择水稻-水稻-紫云英模式；一季稻系统应首选水稻-油菜模式；旱地则首选大豆-红薯模式，其次为棉花-油菜模式。同时，水稻-水稻-油菜、水稻-水稻-大麦、棉花-油菜及玉米-萝卜等种植模式下，农民习惯施用的氮磷肥量较高，需适当减少氮磷肥的施用量。

参考文献：

- [1] HAYASHI K, SHIBATA H, OITA A, et al. Nitrogen budgets in Japan from 2000 to 2015: decreasing trend of nitrogen loss to the environment and the challenge to further reduce nitrogen waste[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 286: 117559.
- [2] O'DONNELL C, EGAN A, HARRINGTON J, et al. An overview on deficit and requirements of the Irish national soil phosphorus balance[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 785: 147251.
- [3] 龙攀, 苏姗, 黄亚男, 等. 双季稻田冬季种植模式对土壤有机碳和碳库管理指数的影响[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(4): 1135-1142.
LONG P, SU S, HUANG Y N, et al. Effects of winter cropping mode on soil organic carbon and carbon management index of double rice paddy[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(4): 1135-1142.
- [4] 王志强, 缪建群, 刘英, 等. 长江中游双季稻田不同轮作方式对土壤质量的影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2020, 28(11): 1703-1714.
WANG Z Q, MIAO J Q, LIU Y, et al. Effect of various crops rotations on soil quality in double cropping rice field in the middle reaches of the Yangtze River[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(11): 1703-1714.
- [5] 杨滨娟, 李新梅, 胡启良, 等. 长江中游不同复种轮作模式的资源利用率及综合效益比较[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2022, 30(9): 1501-1510.
YANG B J, LI X M, HU Q L, et al. Comparison of resource utilization efficiency and comprehensive benefits among different multiple cropping rotation patterns in the middle reaches of Yangtze River[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 30(9): 1501-1510.
- [6] 严燕, 季国军, 胡乃娟, 等. 长江下游稻田不同种植制度的碳足迹分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2024, 33(7): 1462-1473.
YAN Y, JI G J, HU N J, et al. Study on carbon footprint under different cropping patterns of paddy fields in the lower reaches of the Yangtze River[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2024, 33(7): 1462-1473.
- [7] 姜超强, 李晨, 朱启法, 等. 皖南不同种植模式碳汇效应及经济效益评价[J]. *生态环境学报*, 2022, 31(7): 1285-1292.
JIANG C Q, LI C, ZHU Q F, et al. Evaluation of carbon sink and economic benefit in different planting patterns in southern Anhui[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022, 31(7): 1285-1292.
- [8] 刘海涛, 陈一兵, 田静, 等. 成都平原不同种植模式下重金属镉污染风险和经济效益评价[J]. *农业资源与环境学报*, 2019, 36(2): 184-191.
LIU H T, CHEN Y B, TIAN J, et al. Evaluation of economic benefits and cadmium pollution risk in different cropping system in Chengdu Plain, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(2): 184-191.
- [9] KUMAR R, MISHRA J S, RAO K K, et al. Crop rotation and tillage management options for sustainable intensification of rice-fallow agro-ecosystem in eastern India[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 11146.
- [10] 宫殿林, 张文钊, 罗尊长, 等. 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, et al. 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.
- [11] 武兰芳, 欧阳竹. 种养结合生产区农田氮素平衡分析: 以山东省禹城为例[J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(4): 1312-1319.
WU L F, OUYANG Z. Nitrogen budget of farmland in crop-animal mixed farming system area: a case study of Yucheng County in Shandong Province[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(4): 1312-1319.
- [12] 鲁如坤, 刘鸿翔, 闻大中, 等. 我国典型地区农业生态系统养分循环和平衡研究 II. 农田养分收入参数[J]. *土壤通报*, 1996, 27(4): 151-154.
LU R K, LIU H X, WEN D Z, et al. Study on nutrient cycle and balance of agro-ecosystem in typical areas of China II. Nutrient income parameters of farmland[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1996, 27(4): 151-154.

- [13] SHEN J L, LI Y, LIU X J, et al. Atmospheric dry and wet nitrogen deposition on three contrasting land use types of an agricultural catchment in subtropical Central China[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 67: 415-424.
- [14] 高英志, 任健. 植物根瘤共生固氮研究进展与展望 [J]. *中国科学: 生命科学*, 2025, 55(1): 131-145.
GAO Y Z, REN J. Advances and prospects in plant root nodule symbiotic nitrogen fixation[J]. *SCIENTIA SINICA Vitae*, 2025, 55(1): 131-145.
- [15] 洪曦, 高菊生, 罗尊长, 等. 不同施肥措施对红壤稻田氮磷平衡及生态经济效益的影响 [J]. *应用生态学报*, 2018, 29(1): 158-166.
HONG X, GAO J S, LUO Z Z, et al. Effects of different fertilization regimes on nitrogen and phosphorus balance and eco-economic benefits in red paddy field[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(1): 158-166.
- [16] 高旺盛. 农业宏观经济分析方法与应用 [M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2009.
GAO W S. Macro-analysis approach and application on agricultural system[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2009.
- [17] MITTERMAYER M, GILG A, MAIDL F X, et al. Site-specific nitrogen balances based on spatially variable soil and plant properties[J]. *Precision Agriculture*, 2021, 22(5): 1416-1436.
- [18] LIM J Y, ISLAM BHUIYAN M S, LEE S B, et al. Agricultural nitrogen and phosphorus balances of Korea and Japan: highest nutrient surplus among OECD member countries[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 286: 117353.
- [19] ŁUKOWIAK R, GRZEBISZ W, SASSENATH G F. New insights into phosphorus management in agriculture: a crop rotation approach[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 542: 1062-1077.
- [20] ZHANG C, JU X T, POWLSON D, et al. Nitrogen surplus benchmarks for controlling N pollution in the main cropping systems of China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(12): 6678-6687.
- [21] LEE J, NECPÁLOVÁ M, CALITRI F, et al. Simulation of a regional soil nitrogen balance in Swiss croplands[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2020, 118(1): 9-22.
- [22] WELLS N S, CLOUGH T J, JOHNSON-BEEBOUT S E, et al. Land management between crops affects soil inorganic nitrogen balance in a tropical rice system[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2014, 100: 315-332.
- [23] LIANG H, LI S, ZHANG L, et al. Long-term green manuring enhances crop N uptake and reduces N losses in rice production system[J]. *Soil and Tillage Research*, 2022, 220: 105369.
- [24] HONG X, MA C, GAO J S, et al. Effects of different green manure treatments on soil apparent N and P balance under a 34-year double-rice cropping system[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19(1): 73-80.
- [25] ZHANG J L, NIE J, CAO W D, et al. Long-term green manuring to substitute partial chemical fertilizer simultaneously improving crop productivity and soil quality in a double-rice cropping system[J]. *European Journal of Agronomy*, 2023, 142: 126641.
- [26] YAO Z Y, XU Q, CHEN Y P, et al. Leguminous green manure enhances the soil organic nitrogen pool of cropland via disproportionate increase of nitrogen in particulate organic matter fractions[J]. *CATENA*, 2021, 207: 105574.
- [27] QASWAR M, HUANG J, AHMED W, et al. Long-term green manure rotations improve soil biochemical properties, yield sustainability and nutrient balances in acidic paddy soil under a rice-based cropping system[J]. *Agronomy*, 2019, 9(12): 780.
- [28] 曾希柏. 耕地质量培育技术与模式 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2014.
ZENG X B. Cultivation techniques and models of cultivated land quality[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2014.
- [29] 唐海明, 肖小平, 汤文光, 等. 湖南稻田现代农作制特征及发展对策 [J]. *农业现代化研究*, 2016, 37(4): 627-634.
TANG H M, XIAO X P, TANG W G, et al. Features and development countermeasures of modern farming system in Hunan Province[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2016, 37(4): 627-634.
- [30] 黄得志, 盛浩, 潘博, 等. 双季稻-冬闲/油菜田长期种植模式下的土壤肥力质量特征 [J]. *土壤通报*, 2019, 50(4): 913-919.
HUANG D Z, SHENG H, PAN B, et al. Characteristics of soil quality in a long-term double cropping rice system -winter fallow/rape fields[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2019, 50(4): 913-919.
- [31] 徐慧芳, 李淑娟, 李娜, 等. 南方红壤丘陵区旱地多熟种植的发展现状与研究进展 [J]. *生态科学*, 2022, 41(1): 213-221.
XU H F, LI S J, LI N, et al. Development situation and recent advance of multiple cropping in upland red soils under hilly regions of South China[J]. *Ecological Science*, 2022, 41(1): 213-221.
- [32] 叶天承, 陈惠哲, 向镜, 等. 粮油多熟制种植模式研究进展 [J]. *中国稻米*, 2023, 29(5): 17-22, 27.
YE T C, CHEN H Z, XIANG J, et al. Research progress on the planting model of multiple cropping of grain and oil[J]. *China Rice*, 2023, 29(5): 17-22, 27.
- [33] ALLETTO L, VANDEWALLE A, DEBAEKE P. Crop diversification improves cropping system sustainability: an 8-year on-farm experiment in south-western France[J]. *Agricultural Systems*, 2022, 200: 103433.
- [34] ZHAO J, YANG Y D, ZHANG K, et al. Does crop rotation yield more in China? A meta-analysis[J]. *Field Crops Research*, 2020, 245: 107659.
- [35] RENARD D, TILMAN D. National food production stabilized by crop diversity[J]. *Nature*, 2019, 571(7764): 257-260.
- [36] BOWLES T M, MOOSHAMMER M, SOCOLAR Y, et al. Long-term evidence shows that crop-rotation diversification increases agricultural resilience to adverse growing conditions in North America[J]. *One Earth*, 2020, 2(3): 284-293.
- [37] YANG T, SIDDIQUE K H M, LIU K. Cropping systems in agriculture and their impact on soil health: a review[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2020, 23: e01118.
- [38] 郝心怡, 张江, 白瑞, 等. 长江中下游地区耕地复种指数时空特征及驱动机制研究 [J]. *国土资源科技管理*, 2021, 38(4): 15-27.
HAO X Y, ZHANG J, BAI R, et al. Spatial and temporal characteristics and driving mechanism of multiple cropping index of cultivated land in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. *Scientific and Technological Management of Land and Resources*, 2021, 38(4): 15-27.