

巢湖地区稻虾共作模式对稻田土壤肥力的影响

吴本丽¹, 陈贵生², 赵慧敏³, 王晓健⁴, 黄龙¹, 陈静¹, 何吉祥^{1*}

(1. 安徽省农业科学院水产研究所, 合肥 230031; 2. 安徽省巢湖市柘皋镇农业综合服务站, 合肥 238000;
3. 巢湖市水产局, 合肥 238000; 4. 安徽省合肥市长丰县杜集乡农业综合服务站, 合肥 231100)

摘要: 为监测巢湖地区稻虾共作模式生产前后稻田土壤肥力的变化, 2016年度在巢湖周边设置2个监测区域, 分别在水稻种植前、营养生长期和收割后3次采集稻田土壤样本, 测定土壤有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾和阳离子交换量等肥力指标; 并结合水稻和小龙虾产量及施肥投喂管理, 比较了常规单作稻田和稻虾共作模式稻田土壤肥力变化及生产效益。结果显示, 稻虾共作模式水稻产量均高于常规单作稻田, 可增产2%~3%; 正常投喂时, 共作模式可收获小龙虾1200 kg·hm⁻²以上。水稻生产后, A区稻虾共作模式田的肥力水平普遍高于单作稻田, B区域稻虾共作模式田土壤有机质、全磷、阳离子交换量水平高于单作稻田 ($P<0.05$), 其余肥力因子差异不显著 ($P>0.05$)。总体而言, 稻虾共作模式更有助于保持监测区域稻田土壤肥力。

关键词: 稻虾共作模式; 土壤肥力; 产量; 生态效益

中图分类号: S158.2; S966.12

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2018)01-0096-05

Effects of the integrated rice-crayfish mode on soil fertility in Chaohu Lake region

WU Benli¹, CHEN Guisheng², ZHAO Huimin³, WANG Xiaojian⁴, HUANG Long¹, CHEN Jing¹, HE Jixiang¹

(1. Institute of Fisheries, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230031;

2. Zhegao Town Agricultural Comprehensive Service Station of Chaohu City, Hefei 238000;

3. Fisheries Bureau of Chaohu City, Hefei 238000;

4. Duji Town Agricultural Comprehensive Service Station of Changfeng County, Hefei 231100)

Abstract: Two sampling areas around Chaohu Lake were set up to monitor the variation of soil fertility in 2016. We collected soil samples before rice plantation, vegetative growth stage and after harvest, respectively. Total nitrogen, total phosphorus, total potassium, available nitrogen, available phosphorus, available potassium, and cation exchange capacity were analyzed. The rice yield was evaluated. The results showed that the rice yield was 2%-3% higher in the integrated rice-crayfish mode than in the monoculture rice mode. The yield of crayfish was above 1200 kg·hm⁻² under the regular feeding. The soil fertility was better in the integrated rice-crayfish mode in sampling area A ($P<0.05$) than the monoculture rice mode. The organic matter, total phosphorus, and cation exchange capacity were higher than those in the integrated rice-crayfish mode in sampling area B with no significant difference in other fertility factors ($P>0.05$). In general, the integrated rice-crayfish mode was more conducive to maintaining soil fertility.

Key words: integrated rice-crayfish mode; soil fertility; yield; ecological impact

近年来, 我国的农业生产力有极大提高, 但仍多为高投入、高能耗的粗放农业, 存在土壤资源退化和农田环境污染风险, 甚至可能带来温室效应、酸雨、水体富营养化和生物多样性衰退等重大生态问题, 不利于农业可持续发展和人类健康^[1-3]。巢湖

位于安徽省中部, 长江以北、淮河以南, 是我国五大淡水湖泊之一。长期以来, 受不合理的人类活动的影响, 巢湖流域面临着严重的环境污染及水体富营养化, 影响了流域社会经济的可持续发展^[4-6]。随着巢湖流域点源污染控制的不断深入, 农业面源污

收稿日期: 2017-06-05

基金项目: 安徽省重点研发与开发计划项目(1704g07020118), 安徽省水产产业技术体系(皖农科 2016[84]号)和安徽省农业科学院成果推广项目(16E0505)共同资助。

作者简介: 吴本丽, 博士, 助理研究员。E-mail: wubenli5555@163.com

* 通信作者: 何吉祥, 副研究员。E-mail: hejixiang813@126.com

染问题显得越来越突出, 农业生产中化肥的大量使用成为主要因素之一, 其中氮磷污染最为严重^[6]。本研究对巢湖地区稻虾共作模式稻田土壤肥力的年度变化进行了监测, 期望获得该地区稻田土壤肥力基本情况及稻虾共作模式对稻田土壤肥力的影响, 为因地制宜的实施规模化综合种养管理及提升稻田综合种养的经济和生态效益提供一定的参考。

1 材料与方法

2016 年 3 月—10 月定期对巢湖烔炀镇大高村 A (31° 40' 48" N, 117° 35' 50" E) 和黄麓镇芦溪村 B (31° 34' 05" N, 117° 34' 02" E) 两个区域稻田进行监测 (图 1)。每个监测区域随机挑选 3 块稻虾共作模式田和 1 块常规稻田作为监测田, 单田面积 1.33 hm² 左右。以水稻生产周期确定采样时间, 分别在插秧前 (生产前)、营养生长期 (生产中) 和收割后 (生产后) 各采集土样 1 次, 采集稻田表层 25 cm 土壤。采集土壤样本时, 每块稻田划分为 8 区块, 每区块按照 S 形走向采集 8 个点土壤, 混合为 1 个样本, 每块稻田采集 8 个混合土样用于肥力指标测定, 检测指标包括 pH、有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾和阳离子交换量等, 采样及指标检测方法参考《土壤农化分析》^[7]。水稻产量在收割后逐田统计, 计算均值; 小龙虾产量根据起捕情况推算并统计不同规格比例。数据统计采用 SPSS19.0 和 Microsoft Excel 2007 等软件完成, 对同一区域不同种模式稻田生产前后检测数据分别进行单因素方差分析, 并将生产前、生产后不同模式的检测数据进行 Duncan's 多重比较, 获得不同种养模式生产前后土壤肥力差异。

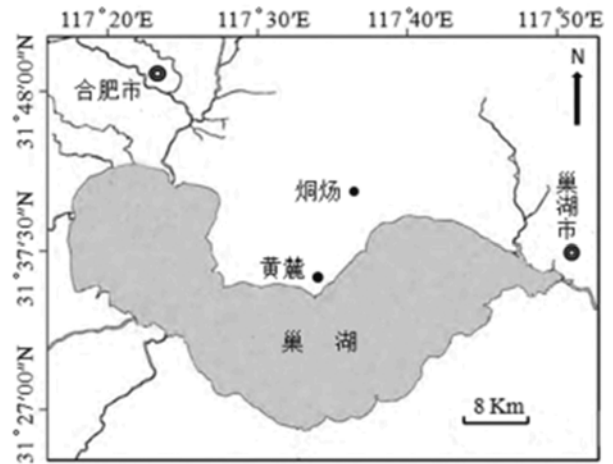


图 1 采样区域烔炀和黄麓

Figure 1 Sampling area of Tongyang and Huanglu

2 结果与分析

2.1 生产情况

2 个区域水稻品种和施肥管理有所不同, 水稻产量也有显著差异 ($P < 0.05$), B 区的施肥量高于 A 区, 但 A 区单作稻田和稻虾共作模式田水稻产量均高于 B 区。同一区域, 水稻品种、栽植密度和施肥管理均相同的情况下, 稻虾共作模式水稻产量显著高于单作稻田 ($P < 0.05$) (表 1), 其中 A 区稻虾共作模式田产量提高 3.2%, B 区提高 2.1%。A 区稻虾共作田投喂量为 30 kg·d⁻¹·hm⁻², 小龙虾可至少增产 1 200 kg·hm⁻²; B 区投喂 4.5 kg·d⁻¹·hm⁻² 时, 可增产 400 kg·hm⁻² (表 2)。实际生产中仅起捕部分大规格商品虾, 小龙虾总产量未精确统计, 捕捞后稻田中仍有部分亲虾和大量虾苗, 剩余量显著高于初始投放量。

表 1 监测区域水稻种植及收获情况

Table 1 Rice cultivation and yield in the monitoring area

监测区域 Area	种养模式 Mode	水稻品种 Rice variety	种植密度/万株·hm ⁻² Planting density	施肥种类 Fertilization	施肥量/kg·hm ⁻² Fertilizing amount	水稻产量/kg·hm ⁻² Rice yield
A	水稻单作	欣荣优化占	15	复合肥	225	7 560
	稻虾共作	欣荣优化占	15	225kg 复合肥	225	7 800
B	水稻单作	源两优 600	15	复合肥 尿素	225 75	7 125
	稻虾共作	源两优 600	15	复合肥 尿素	225 75	7 275

2.2 生产前后稻田土壤肥力变化

2.2.1 A 区主要肥力水平变化 A 区生产前后稻田土壤肥力水平对比结果显示, 生产后, 单作水稻和稻虾共作两种模式稻田土壤 pH、有机质、全钾、速效钾和有效磷水平均显著上升 ($P < 0.05$); 两种模式稻田土壤中碱解氮水平均下降; 阳离子交换量在

生产前后差异不显著 ($P > 0.05$); 生产后单作稻田土壤中全氮和全磷水平低于生产前, 而稻虾共作模式田高于生产前期。

2016 年水稻生产后, 两种模式田土壤肥力水平对比显示, A 区稻虾共作模式田的土壤肥力水平普遍高于单作稻田 (表 3)。其中: 有机质高 12.8%;

全磷和有效磷分别高出 75.0% 和 1.7%；全钾和速效钾分别高出 11.4% 和 11.1%；全氮和碱解氮分别高出 12.2% 和 19.7%；pH 和阳离子交换量在两种模式田中差异不显著 ($P>0.05$)。

表 2 监测区域稻虾共作模式小龙虾放养及收获情况
Table 2 Crayfish farming and yield in the monitoring area

监测区域 Area	初始个体均重/g Initial body weight	放养密度/kg·hm ⁻² Stocking density	投喂量/kg·d ⁻¹ ·hm ⁻² Feeding amount	产量/kg·hm ⁻² Yield*	商品虾不同规格比例/% Proportion of different crayfish size			
					25 g	30 g	35 g	≥40 g
A	5.0	450	30	1 200	30	20	30	20
B	5.0	450	4.5	400	30	30	20	20

注：表中产量指起捕的龙虾重量，不同规格所占比例由起捕商品虾计算获得。

Note: The yield* means trapped crayfish, the proportion of different crayfish sizes was calculated by trapped individuals.

表 3 A 区生产前后土壤肥力因子水平
Table 3 The level of soil fertility before and after planting in sampling area A

时期 Stage	pH	有机质/g·kg ⁻¹ Organic matter	全氮/g·kg ⁻¹ Total nitrogen	全磷/g·kg ⁻¹ Total phosphorus
生产前期 Before planting	6.71±0.30 ^a	21.9±3.7 ^a	0.84±0.12 ^a	0.27±0.03 ^b
单作稻田生产后期 After harvest for monoculture rice paddy	6.87±0.10 ^b	31.2±5.0 ^b	0.82±0.35 ^a	0.20±0.03 ^a
稻虾共作田生产后期 After harvest for integrated rice-crayfish paddy	6.95±0.00 ^b	35.2±7.1 ^c	0.92±0.38 ^b	0.35±0.04 ^c

全钾/g·kg ⁻¹ Total potassium	碱解氮/mg·kg ⁻¹ Available nitrogen	有效磷/mg·kg ⁻¹ Available phosphorus	速效钾/mg·kg ⁻¹ Available potassium	阳离子交换量/cmol·kg ⁻¹ Cation exchange capacity
10.62±2.29 ^a	128.2±7.6 ^c	2.0±0.4 ^a	91.5±21.3 ^a	38.1±7.6 ^a
13.45±1.16 ^b	79.6±7.0 ^a	11.8±2.2 ^b	113.1±13.3 ^b	39.9±2.0 ^a
14.98±1.34 ^b	95.3±4.6 ^b	12.0±3.4 ^b	125.6±11.6 ^b	37.6±6.1 ^a

注：表中同列上标不同字母表示差异显著 ($P<0.05$)，下同。

Note: Different superscript letters in the same column mean significant difference ($P<0.05$), the same below.

表 4 B 区生产前后土壤肥力因子水平
Table 4 The level of soil fertility before and after planting in sampling area B

时期 Stage	pH	有机质/g·kg ⁻¹ Organic matter	全氮/g·kg ⁻¹ Total nitrogen	全磷/g·kg ⁻¹ Total phosphorus
生产前期 Before planting	6.61±0.30 ^a	21.5±1.5 ^a	0.76±0.03 ^a	0.21±0.02 ^a
单作稻田生产后期 After harvest for monoculture rice paddy	6.65±0.05 ^a	30.9±3.9 ^b	0.79±0.05 ^a	0.20±0.02 ^a
稻虾共作田生产后期 After harvest for Integrated rice-crayfish paddy	6.57±0.00 ^a	34.7±7.1 ^c	0.77±0.08 ^a	0.22±0.04 ^a

全钾/g·kg ⁻¹ Total potassium	碱解氮/mg·kg ⁻¹ Available nitrogen	有效磷/mg·kg ⁻¹ Available phosphorus	速效钾/mg·kg ⁻¹ Available potassium	阳离子交换量/cmol·kg ⁻¹ cation exchange capacity
10.63±0.27 ^b	88.9±1.2 ^b	3.1±0.5 ^a	56.3±2.4 ^b	36.2±3.7 ^b
10.02±0.07 ^a	64.2±3.6 ^a	24.7±3.4 ^b	52.3±1.9 ^a	31.5±1.9 ^a
9.81±0.34 ^a	62.3±4.6 ^a	27.9±3.4 ^b	50.1±2.6 ^a	34.5±2.1 ^b

2.2.2 B 区域主要肥力水平变化 B 区生产前后稻田土壤肥力水平对比结果显示，生产后，单作水稻和稻虾共作两种模式稻田土壤有机质和有效磷水平均显著上升 ($P<0.05$)；两种模式稻田土壤中全钾、速效钾、碱解氮和阳离子交换量水平均下降；pH、全磷和全氮在生产前后差异不显著 ($P>0.05$)。

生产后两种模式田土壤肥力水平对比显示，稻虾共作模式田土壤有机质、全磷、有效磷和阳离子交换量水平高于单作稻田，分别高出 12.3%、15.8%、12.0% 和 9.5%；单作稻田土壤中全钾、速效钾、全氮和碱解氮水平略高于稻虾共作模式田，分别高出 2.1%、4.4%、2.6% 和 3.0%，两种模式田差异不显

著 ($P>0.05$) (表 4)。

总体而言，巢湖地区不同区域稻田土壤肥力水平有较大差异，A 区生产前后稻田土壤肥力水平普遍高于 B 区。同一区域单作稻田和稻虾共作模式田两种生产模式对土壤肥力影响不同，本次监测结果显示稻虾共作模式更有助于保持稻田土壤肥力。

3 讨论

3.1 巢湖地区稻田土壤肥力基本情况及稻虾共作模式对土壤肥力的影响

李建军等对近 25 年来中国粮食主产区稻田土壤基础地力进行了统计，结果显示稻田土壤基础地

力和稻田土壤生产力均随时间不断提升^[8]。佘国涵等通过定位试验,研究了稻虾共作模式对不同土层土壤理化性状以及水稻产量的影响,表示长期稻虾共作模式显著提高了表层土壤有机碳、全钾和碱解氮含量,产量也比水稻单作模式高^[9]。稻虾共作模式改善了土壤结构,增加了土壤养分和微生物群落多样性,降低杂草发生和多样性,提高了水稻产量以及经济效益^[10-12]。本研究中不同监测区域或种养模式条件下,土壤肥力及变化均存在一定差异,如,两个监测区生产前后土壤中全氮和全磷均十分丰富,A区生产后常规稻田全氮和全磷水平下降,而稻虾共作田全氮相对稳定,全磷有所提升;B区生产后常规稻田全氮有所上升,全磷有所下降,而稻虾共作田全氮和全磷均有小程度下降。两个监测区土壤肥力及产量之间的差异可能与两区种植水稻品种及小龙虾补充投喂水平相关。实际生产中,A区投喂量显著高于B区,残饵和代谢产物也要高于B区,残饵和代谢产物进入稻田被微生物分解成为有效土壤养分,可提升稻田土壤肥力及作物对养分的利用,进而提升水稻产量。生产后土壤中有效养分下降,可能是外源难以满足作物正常生长。

巢湖地区稻田多为水田,属于湿地生态系统,大部分时间呈淹水状态,水稻田土壤有机质含量明显高于其他土地利用方式。有机质是土壤肥力的标志物质,直接影响着土壤的耐肥性、保墒性、缓冲性、耕性,通气状况和土壤温度等。土壤有机质含量受土壤的耕作状况、土壤pH和阳离子交换量,盐基饱和度等相关因素影响^[13-14]。周慧平等对巢湖流域各类土壤的研究表明,本区土壤有机质平均含量仅为 $19.8 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[15],2011年监测结果与之相近,为 $19.5 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[16]。本次监测结果显示稻虾共作后土壤有机质含量高于单作稻田,稻虾共作模式土壤有机质含量比生产前提高60.7%~61.4%,生产后有机质丰富,而单作稻田仅提高42.5%~43.7%。生产后有机质上升可能是秸秆还田的作用,秸秆还田可增加稻田土壤其他养分因子含量^[17];稻虾共作后有机质含量更高,可能与小龙虾行为、生理和代谢活动相关。

有效磷在生产前后差异十分显著。对照土壤养分含量分级标准,两监测区域生产前有效磷均处于缺乏状态,生产后含量显著提升至较丰富的水平。土壤中有效磷水平容易受到土地利用方式的影响和人为干扰^[2],时空变异较大^[18]。已有研究资料显示巢湖地区土壤的固磷能力相对较低,水土界面磷迁移能力强,农业非点源磷污染的发生风险较大^[19]。本次监测区域在生产前有效磷水平均处于缺乏状

态,种养前期及中期水平持续较低,水稻收割后有效磷水平急剧上升。可能是由于1)监测区域在种植前经过了彻底的田间改造,深层有效养分低的土壤被上移^[9];2)种植水稻前,稻田长期处于干涸状态,磷元素难以得到有效释放;3)水稻栽植后,灌溉、施肥等田间管理活动有效的提高了有效磷的水平;4)水稻收割后秸秆还田、灌水使土壤有机质水平提高,促进磷的释放,使有效磷水平上升^[13]。

所有监测点生产后碱解氮水平均下降,其中A区稻虾共作田水平高于单作稻田;B区稻虾共作田碱解氮水平略低于单作稻田。这可能是由于该地区土壤肥力基础水平较低,而稻虾共作模式又减少了常规施肥量,致使土壤中碱解氮被充分利用。生产后,A区速效钾有所上升,B区略有下降,稻虾共作模式田和单作稻田间差异相似。两个监测区域阳离子交换量水平高于已有研究显示水平,阳离子交换量在生产前后相对稳定^[16,19]。

3.2 综合种养模式环境效益分析及因地制宜发展种养模式的必要性

种养模式创新及技术标准化是现代农业健康发展的必然手段,稻田综合种养是目前被广泛认识的生产模式之一。粗放型农业普遍存在化肥施用不当、施用过或长期施用的情况,久而久之会降低作物对养分利用率并产生残存效应,给生态环境带来了巨大的压力^[3,5]。稻田综合种养过程中会减低肥料的使用,且种养期间一般不使用农药,对提高农田环境效益和食品安全有重要意义。稻田复合种养可有效提高土壤有机质、全氮、碱解氮、速效磷和速效钾等水平,土壤物理性状也会得到一定程度地改善。由于土壤肥力的提高以及土壤通气状况的改善,也促进了水稻对主要养分的吸收,进而提升水稻产量^[20],并能在稳粮的基础上达到一田双收的效果,提升经济效益。但目前稻田综合种养规模化程度不够,成本投入偏高^[21];不同地区和种养方式对农业资源利用及稻田环境的影响程度差异较大^[22]。

气候条件、土壤类型、种植模式和施肥用药管理等不同都会影响土壤中养分含量及利用率^[23-24]。农业生产中为保持高生产力,一般采取有机肥和无机化肥配施的方式来补充土壤养分,全面提高土壤氮、磷、钾、有机质和微生物群落多样性^[25-27]。稻田综合种养认为降低化肥的使用,保证生产和土壤肥力,且一般在生产前施用大量有机肥。有研究表明有机肥的施用可降低土壤重金属有效性,从而降低土壤重金属给农产品带来的安全风险^[28];但也有研究表明长期施用猪粪会导致土壤重金属,如镉的

大量积累^[29]。因此,在关注稻田土壤肥力的同时,还需要进一步监测土壤重金属及有毒有害物质的富集效应。另外,长期固定某一种种养模式,可能会出现养殖动物疾病暴发、衍生新的杂草群落结构等现象^[10];稻虾共作环沟中的养殖用水直接用于灌溉,为作物生长补充养分,但长期养殖污水灌溉会使氮、磷积累,促进氮、磷在土壤剖面中的垂直迁移,增加对地下水的污染风险,综合种养带来的环境效益和经济效益可能会有所削减。

4 结论

同一区域、种养管理模式一致时,稻虾共作模式水稻产量明显高于水稻单作稻田。稻虾共作模式下水稻产量的提高,可能是养殖动物残饵和代谢产物提升了土壤肥力,也可能是养殖动物的行为、生理代谢等促进了水稻对土壤中养分的利用效率。

稻虾共作模式减少施肥量和全程禁药的可行性较高,但相关过程及机制还需要通过连续监测及定量试验来验证。共作模式虽可有效促进化肥减施,降低污染风险,但如果土壤基础肥力较低,仍需根据稻田土壤实际情况合理施肥,盲目减肥可能会导致稻田基础肥力逐步丧失。

在开展稻田综合种养前应该监测稻田土壤肥力,以便于科学指导施足基肥,并实时、连续、系统地监测综合种养模式对稻田土壤环境的影响。根据土壤实际情况因地制宜的进行生产管理,适时地做出调整,不断进行生产模式创新以提升农业经济和环境效益。

参考文献:

- [1] HOWARTH R W, ANDERSON D, CLOERN J, et al. Nutrient pollution of coastal rivers, bays, and seas[J]. *Issues Ecol*, 2000, 7:1-15.
- [2] 侯鹏程, 徐向东, 潘根兴. 不同利用方式下吴江市耕地土壤环境质量变化[J]. *生态环境学报*, 2007, 16(1): 152-157.
- [3] 田艳, 马友华, 胡宏祥, 等. 农田土壤中氮的环境指标研究[J]. *中国农学通报*, 2017, 33(7):142-147.
- [4] 张民, 孔繁翔. 巢湖富营养化的历程, 空间分布与治理策略(1984-2013年)[J]. *湖泊科学*, 2015, 27(5): 791-798.
- [5] 刘新, 蒋豫, 高俊峰, 等. 巢湖湖区及主要出入湖河流表层沉积物重金属污染特征及风险评价[J]. *湖泊科学*, 2016, 28(3): 502-512.
- [6] 王雪蕾, 王新新, 朱利, 等. 巢湖流域氮磷面源污染与水华空间分布遥感解析[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(5): 1511-1519.
- [7] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2008.
- [8] 李建军, 辛景树, 张会民, 等. 长江中下游粮食主产区25年来稻田土壤养分演变特征[J]. *植物营养与肥料学*

报, 2015, 21(1): 92-103.

- [9] 倡国涵, 彭成林, 徐祥玉, 等. 稻虾共作模式对涝渍稻田土壤理化性状的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2017, 25(1): 61-68.
- [10] 靳振江. 耕作和长期施肥对稻田土壤微生物群落结构及活性的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2013.
- [11] 徐大兵, 贾平安, 彭成林, 等. 稻虾共作模式下稻田杂草生长和群落多样性的调查[J]. *湖北农业科学*, 2015, 54(22): 5599-5602.
- [12] 倡国涵, 彭成林, 徐祥玉, 等. 稻-虾共作模式对涝渍稻田土壤微生物群落多样性及土壤肥力的影响[J]. *土壤*, 2016, 48(3): 503-509.
- [13] 路丹, 何明菊, 区惠平, 等. 耕作方式对稻田土壤活性有机碳组分、有机碳矿化以及腐殖质特征的影响[J]. *土壤通报*, 2014(5): 1144-1150.
- [14] 王文婧, 戴万宏. 安徽主要土壤酸碱性及其酸缓冲性能研究[J]. *中国农学通报*, 2012, 28(15): 67-72.
- [15] 周慧平, 高超, 王登峰, 等. 巢湖流域农田土壤磷吸附指数及吸附饱和度特征[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(s2): 386-389.
- [16] 范荣桂, 王长春, 陈书琴, 等. 巢湖周边地区表层土壤总氮、有机质空间分布特征[J]. *环境科学与技术*, 2011, 34(5): 117-120.
- [17] 安婉丽, 谢海云, 王维奇, 等. 秸秆还田对稻田土壤水稳性团聚体养分及其生态化学计量比的影响[J]. *生态学杂志*, 2017, 36(1): 150-156.
- [18] 王关林, 苏章锋, 刘东, 等. 虾稻共作土壤养分空间变异及中稻施肥技术研究[J]. *现代农业科技*, 2017(2): 160-162.
- [19] 赵来, 吕成文. 土壤分形特征与土壤肥力关系研究:以皖南地区水稻土为例[J]. *中国土壤与肥料*, 2005(6): 7-11.
- [20] 杨志辉, 黄璜, 王华. 稻-鸭复合生态系统稻田土壤质量研究[J]. *土壤通报*, 2004, 35(2): 117-121.
- [21] 李嘉尧, 常东, 李柏年, 等. 不同稻田综合种养模式的成本效益分析[J]. *水产学报*, 2014, 38(9): 1431-1438.
- [22] 杨海龙, 封志明, 吕耀. 不同稻作模式下农田生态环境效应研究[J]. *安徽农业科学*, 2015, 43(17): 258-262.
- [23] 赵兰, 黎华寿. 四种除草剂对稻田土壤微生物类群的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(2): 508-514.
- [24] 王婷婷, 祝贞科, 朱捍华, 等. 施氮和水分管理对光合碳在土壤-水稻系统间分配的量化研究[J]. *环境科学*, 2017, 38(3): 1227-1233.
- [25] 徐玲, 张杨珠, 曾希柏, 等. 不同施肥结构对稻田土壤肥力质量的影响[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2006, 32(4): 362-367.
- [26] 郝晓晖, 胡荣桂, 吴金水, 等. 期施肥对稻田土壤有机氮、微生物生物量及功能多样性的影响[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(6): 1477-1484.
- [27] 罗璐, 周萍, 童成立, 等. 长期施肥措施下稻田土壤有机质稳定性研究[J]. *环境科学*, 2013, 34(2): 692-697.
- [28] Bolan N S, Adriano D C, Natesan R, et al. Effects of organic amendments on the reduction and phytoavailability of chromate in mineral soil[J]. *J Environ Qual*, 2003, 32(1): 120-128.
- [29] 王腾飞, 谭长银, 曹雪莹, 等. 长期施肥对土壤重金属积累和有效性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(2): 257-263.