



## 不同水稻栽培密度下青田稻—鱼共生系统的土壤肥力

郭海松<sup>1,2,3</sup>, 罗衡<sup>1,2,3</sup>, 李丰<sup>1,2,3</sup>, 齐明<sup>1,2,3</sup>,  
胡忠军<sup>1,2,3</sup>, 刘其根<sup>1,2,3\*</sup>

(1. 上海海洋大学, 水产科学国家级实验教学示范中心, 上海 201306;  
2. 上海海洋大学, 农业农村部淡水水产种质资源重点实验室, 上海 201306;  
3. 上海海洋大学, 上海水产养殖工程技术研究中心, 上海 201306)

**摘要:** 作为联合国粮农组织的首个全球重要农业文化遗产(GIAHS)试点保护项目, 青田稻—鱼共生系统以其独特的优势受到越来越多的关注。为了更好地保护这一亚洲首个 GIAHS项目, 实验观察了青田稻—鱼共生系统在不同水稻栽培密度下的土壤肥力情况。结果显示, 调查区域稻田土壤的pH值为5.50~6.13, 呈弱酸性; 土壤养分(全氮、有机质、有效磷和速效钾)含量随水稻生长均呈先减少后增加趋势, 且在拔节期—抽穗期达到最低值, 但在水稻收割前的成熟期均能恢复至不低于初始的较高水平, 表明青田田鱼的活动有助于维持土壤肥力。根据水稻产量与土壤养分的关联度分析结果, 发现与水稻产量关系最密切的因子是土壤pH和速效钾; 相比于含量丰富的全氮、有效磷和有机质, 轻度缺乏的速效钾和较低的pH值限制了水稻的生长和最终产量。研究表明, 在本季种养过程中, 水稻栽插密度对稻田土壤肥力的影响不显著。

**关键词:** 土壤; 肥力; 水稻密度; 青田稻—鱼共生系统; 全球重要农业文化遗产  
**中图分类号:** S 964.2 **文献标志码:** A

传统的水稻单作模式通常需要通过大量施用化肥农药来维持高产<sup>[1-2]</sup>, 化肥对于粮食高产有着重要作用, 其对全球粮食产量的贡献率达50%~60%<sup>[3]</sup>, 在我国的贡献率也曾达56.81%<sup>[4]</sup>, 但是过量施用化肥, 增产效果不仅不显著, 甚至下降<sup>[5]</sup>, 还会造成严重的农业面源污染<sup>[6]</sup>, 导致土壤退化<sup>[7]</sup>, 增加土壤与稻米重金属污染的风险<sup>[8-10]</sup>。据报道, 我国目前普遍存在化肥过量施用的问题<sup>[5, 11]</sup>, 因此如何减少化肥施用量已成为当前农业科研中的一项重要课题。尽管化肥减量有很多技术, 但通过发展稻渔综合种养, 不失为一种既有效、又生态的途径, 近十年来受到了国内的广泛关注。

研究显示, 稻渔综合种养通过使用相对较

少的化学投入<sup>[12-13]</sup>, 在生产碳水化合物和蛋白质产品的同时保护了生物多样性<sup>[14-16]</sup>, 充分发挥了稀缺土地和水资源的作用, 提高了资源利用效率, 同时稻—鱼共生系统也具有更好的稳定性和可持续性<sup>[17]</sup>。而拥有1 300多年历史<sup>[18]</sup>的浙江青田稻—鱼共生系统更是其中的典范之一, 于2005年被联合国粮农组织列为首批全球重要农业文化遗产(Globally Important Agricultural Heritage System, GIAHS)保护项目, 且其建设和保护工作为联合国粮农组织启动全球范围的GIAHS计划奠定了基础, 同时也对我国新时期稻渔综合种养产业的发展起到了积极的推动作用。目前, 国内外有关稻渔综合种养对环境的生态学效应已有不少的研究<sup>[12, 19-24]</sup>, 如浙江大学陈欣教授团队

收稿日期: 2019-01-28 修回日期: 2019-08-09

资助项目: 上海市科学技术委员会专项(16391901600)

通信作者: 刘其根, E-mail: qgliu@shou.edu.cn

对青田稻—鱼共生系统的研究<sup>[13-14, 25-26]</sup>, 但多为对稻—鱼共生模式与水稻单作模式的调查比较; 马旭洲教授团队对稻—蟹模式的研究发现, 稻—蟹共作对土壤理化性质的改善和提高发挥了积极作用<sup>[27-28]</sup>, 而有关青田稻—鱼共生模式中稻田土壤肥力的研究鲜见。水稻栽培密度的选择是青田稻—鱼共生系统优化中的重要组成部分, 水稻栽培密度的改变对稻田土壤肥力的影响尚未知。

土壤肥力是土壤内在物质、结构和理化性质与外界环境条件综合作用的结果<sup>[29]</sup>, 其重要评价指标之一是土壤养分<sup>[30]</sup>。土壤养分是土壤肥力的物质基础, 土壤养分的丰缺程度直接关系到农作物的生长状况和产量水平, 且其在水稻生长期间的变化关系到土壤生产力的可持续性。Xie等<sup>[26]</sup>通过比较水稻单作和稻—鱼共生模式下稻田土壤的肥力发现, 稻—鱼共生模式可以在较低的化肥投入下保持较高的土壤肥力。传统的青田稻—鱼共生模式一般采用低密度栽培方式, 水稻株行距为40 cm×36 cm<sup>[18]</sup>。在本研究中, 通过调整青田稻—鱼共生系统中的栽培株行距来控制水稻密度, 调查研究了不同株行距下稻田土壤养分含量的变化规律, 以期传统的青田稻—鱼共生系统中最适水稻密度的选择提供基础数据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

研究地点为浙江省青田县仁庄镇(28°10'N, 120°31'E), 该地处浙江省东南部, 瓯江中下游, 属于典型亚热带季风气候区, 年平均气温18.3 °C, 年均日照时长1 712~1 825 h, 年均降水量1 400~2 100 mm。稻田属于洪积性泥沙田, 耕层厚度约20 cm<sup>[31]</sup>。稻田土壤类型为砂壤土, 容重约1.12 g/cm<sup>3</sup>, pH为5.76, 有机质为54.17 g/kg, 全氮为2.46 g/kg, 有效磷23.60 mg/kg, 速效钾为160.85 mg/kg, 土壤肥沃。

### 1.2 研究方法

调查田块选用随机大田块, 均为稻—鱼共作模式。水稻栽插均为单穴双株, 设置3个水稻密度处理组, 即3种栽培株行距: 20 cm×30 cm(以下简称“高密度”)、30 cm×30 cm(以下简称“中密度”)和40 cm×30 cm(以下简称“低密度”), 株距

为南北走向。每种密度处理各3个重复, 共计9块稻田。

种养殖稻田均采用平板式稻田。各田块田埂用水泥砖砌成, 深入地底30 cm, 高出水面50 cm, 能有效阻隔各田块之间的土壤养分交流。灌溉方式为山区梯田式流水灌溉, 稻田对角各开一口, 分别用作进水口和出水口, 进出水口用铁丝网拦住, 防止养殖鱼逃逸, 各田块水源一致。灌溉水位始终保持在15~20 cm。田块上方架设防鸟网。

水稻品种为“甬优17”, 养殖鱼品种为瓯江彩鲤(*Cyprinus carpio* var. *color*), 俗称青田田鱼。水稻于4月30日播种, 5月21日移栽, 9月28日收割。水稻移栽前对调查田块施用有机肥作为基肥, 水稻生长过程中不施追肥。水稻移栽稻田20 d(6月10日)后投放青田田鱼, 田鱼鱼种来源一致, 规格为50 g左右, 投放密度为9 000尾/hm<sup>2</sup>。田鱼投放3 d后开始投喂饲料, 日投喂量为田鱼体质量的2%~5%, 分早晚2次投喂, 并根据田鱼生长和摄食情况同步增加饲料投喂量。

### 1.3 土壤样品采集与养分含量测定

根据水稻生长进程, 分别于水稻分蘖期(5月31日)、拔节期(7月13日)、抽穗期(8月19日)和成熟期(9月27日)在各稻田采集土壤样品。按S形路线随机取5个点的土样, 用小铁铲在水稻根系周围挖取稻田耕作层土壤, 取样深度为0~15 cm。混匀每块稻田的土壤, 编号, 简单处理后在室温下完全风干, 研磨后过100目筛, 进行后续相关指标测定。

土壤样品送至上海交通大学分析测试中心食品检测部进行检测。土壤pH的测定方法为玻璃电极法(NY/T 1121.2-2006)<sup>[32]</sup>, 全氮的测定方法为半微量凯氏法(LY/T 1228-1999)<sup>[33]</sup>, 有机质的测定方法为重铬酸钾氧化—外加热法(LY/T 1237-1999)<sup>[34]</sup>, 有效磷的测定方法为碳酸氢钠浸提—钼锑抗分光光度法(HJ 704-2014)<sup>[35]</sup>, 速效钾的测定方法为乙酸铵浸提—火焰光度法(LY/T 1236-1999)<sup>[36]</sup>。

### 1.4 数据分析

水稻产量与土壤养分(pH、全氮、有机质、有效磷和速效钾)关系的分析采用灰色关联分析法(grey relational analysis, GRA)<sup>[37]</sup>。灰色关联分析法是一种针对抽象系统的分析方法, 根据因素

数据列的几何形状、发展态势接近的程度来衡量因素间关联程度的方法<sup>[38]</sup>, 是灰色系统理论的重要组成部分。具体分析步骤:

**建立相关数列** 将原始数据排列成相关数列, 确定一个因变量因素(水稻产量)和多个自变量因素(土壤养分)。

**原始数据标准化** 根据公式  $X_i = \frac{X_i(1)}{X_i(1)}$ ,  $\frac{X_i(2)}{X_i(1)}$ , ...,  $\frac{X_i(k)}{X_i(1)}$  ( $i=0, 1, 2, \dots$ ) 对水稻产量及土壤养分指标进行标准化处理。

式中,  $X_i$  是第  $k$  个处理组中因素  $i$  标准化后的值。 $i=0$  水稻产量,  $1$  全氮,  $2$  有机质,  $3$  有效磷,  $4$  速效钾,  $5$  pH;  $k=1, 2, 3, \dots, 9$ 。

**计算绝对差值** 计算水稻产量与各土壤养分因子的绝对差值  $\Delta_i(k)$ , 表示为  $\Delta_i(k) = |X_0(k) - X_i(k)|$ 。绝对差值中的最大值和最小值即为两个层次的最大和最小差值, 分别计作  $\max_i \max_k |X_0(k) - X_i(k)|$  和  $\min_i \min_k |X_0(k) - X_i(k)|$ , 计算结果最大差为 1.158、最小差为 0。

**计算关联系数** 计算公式:

$$\xi_i(k) = \frac{\min_i \min_k |X_0(k) - X_i(k)|}{|X_0(k) - X_i(k)| + \rho \frac{\max_i \max_k |X_0(k) - X_i(k)|}{\max_i \max_k |X_0(k) - X_i(k)|}} + \frac{\rho \frac{\max_i \max_k |X_0(k) - X_i(k)|}{|X_0(k) - X_i(k)| + \rho \frac{\max_i \max_k |X_0(k) - X_i(k)|}}{\max_i \max_k |X_0(k) - X_i(k)|}}$$

式中,  $\xi_i(k)$  即为  $X_i(k)$  对  $X_0(k)$  的关联系数, 范围值为  $0 < \xi_i(k) < 1$ 。  $\rho$  为分辨系数。

**计算关联度** 计算公式:

$$r_i = \frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^n \xi_i(k)$$

式中,  $n$  为比较序列的数据量, 计算后进行相关性排序, 即为水稻产量与各个土壤养分因子之间的灰色关联度。

所有数据均在 Excel 中建立数据库, 并用 SPSS 21.0 统计软件进行单因素方差(One-Way ANOVA)和非参数检验(Kruskal-Wallis), 多重比较采用 LSD 法; 土壤养分含量在水稻生长时期上的差异采用重复度量(repeated measures ANOVA)分析。  $P < 0.05$  表示差异显著,  $P < 0.01$  表示差异极显著。数据结果以平均值  $\pm$  标准误(mean  $\pm$  SE)表示。

## 2 结果

### 2.1 不同水稻栽培密度下土壤养分的变化规律

**土壤 pH 的动态变化** 不同水稻生长时期(分蘖期、拔节期、抽穗期和成熟期)和不同水稻栽培密度下稻田土壤 pH 的结果显示, 各处理组土壤均呈弱酸性且组间 pH 值相近。土壤 pH 值随着水稻的生长均呈先下降后上升的趋势(图 1)。低密度水稻栽培模式的稻田土壤在水稻各生长时期差异均不显著( $P > 0.05$ ); 中、高密度水稻栽培模式下稻田土壤的 pH 值分别在水稻拔节期和抽穗期显著低于各自的成熟期( $P < 0.05$ ), 其中高密度组在这 2 个时期的土壤 pH 值差异达到了极显著水平( $P < 0.01$ ), 而这 2 种栽培密度的土壤 pH 值在其他时期的差异均不显著( $P > 0.05$ )。此外, 中、低密度组在抽穗期的 pH 值均达到了最低值(5.65  $\pm$  0.05、5.60  $\pm$  0.02), 高密度组在拔节期达到最低值(5.58  $\pm$  0.05)。稻田土壤 pH 在水稻生长所有时期的处理组间差异均不显著( $P > 0.05$ ), 中、低密度组在拔节期和成熟期的 pH 值均高于高密度组。

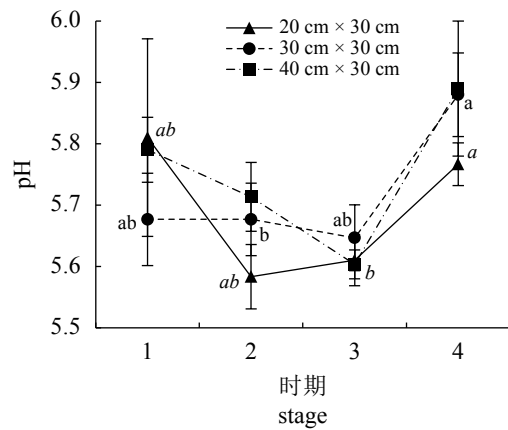


图 1 土壤 pH 值动态变化

1. 分蘖期, 2. 拔节期, 3. 抽穗期, 4. 成熟期, 折线图中不同处理间的小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ ), 下同。abc 对应 30 cm  $\times$  30 cm, abc 对应 20 cm  $\times$  30 cm

Fig. 1 Dynamics of soil pH

1. tillering stage, 2. elongation stage, 3. booting stage, 4. mature stage, different lower cases indicate significant differences in the line chart ( $P < 0.05$ ), the same below. abc corresponds to 30 cm  $\times$  30 cm, abc corresponds to 20 cm  $\times$  30 cm

**土壤有机质含量的变化** 随水稻的生长, 土壤有机质含量变化大致表现为先下降后上升趋势, 高、中、低密度组在拔节期均达到最低值, 分别为(43.73  $\pm$  10.55)、(43.33  $\pm$  7.64)和(47.17  $\pm$  9.09) g/kg(图 2)。与其他两个密度组相

比，低密度组稻田土壤有机质含量随时间推移波动幅度较小，相对稳定；三个处理组中，有且只有中密度组的有机质含量在不同水稻生长时期表现出显著差异( $P<0.05$ )：拔节期时显著低于抽穗期，且拔节期和抽穗期均显著低于分蘖期。在成熟期，三个密度组土壤有机质含量均恢复至与分蘖期无差异的水平，水稻四个时期各密度组间土壤的有机质含量差异均不显著( $P>0.05$ )。

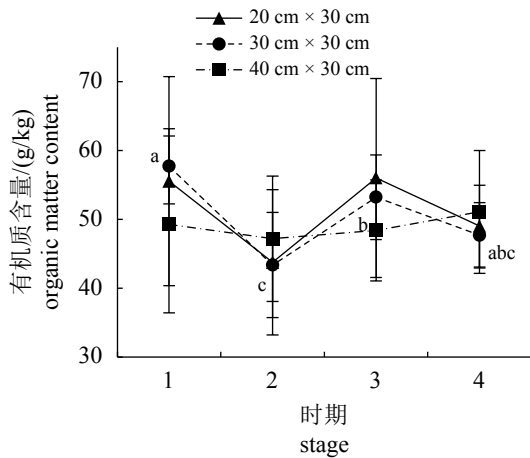


图2 不同水稻密度下的土壤有机质含量  
abc对应30 cm×30 cm

Fig. 2 Soil organic matter contents at different planting densities

abc corresponds to 30 cm×30 cm

**土壤全氮含量的变化** 各处理组土壤全氮含量随时间延长均呈先降低后升高的趋势，其中中、高密度组全氮含量最低值出现在水稻拔节期，而低密度组出现在抽穗期。与有机质相似，各处理组有且只有中密度组的土壤全氮含量在不同时期存在显著差异( $P<0.05$ )，拔节期的全氮含量显著低于抽穗期( $P<0.05$ )，且分蘖期、拔节期和抽穗期的全氮含量均显著低于成熟期( $P<0.05$ )。低、中、高3个密度组的土壤全氮含量分别从分蘖期的2.57、2.37和2.43 g/kg增加到成熟期的2.63、3.03和2.83 g/kg，分别提高了2.33%、27.85%、16.46%。在水稻发育的各时期中，不同栽培密度下的土壤全氮含量均无显著差异( $P>0.05$ )(图3)。

**土壤有效磷含量的变化** 土壤有效磷含量总体表现为在分蘖期—拔节期逐渐减少，在拔节期后开始增加。3个密度处理组的土壤有效磷含量在不同水稻发育时期的差异均未达到

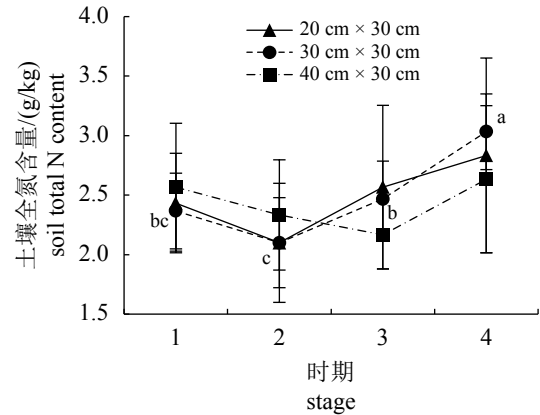


图3 不同水稻密度下的土壤全氮含量  
abc对应30 cm×30 cm

Fig. 3 Soil total N contents at different planting densities

abc corresponds to 30 cm×30 cm

显著性水平( $P>0.05$ )，且同一时期不同密度组间有效磷含量差异也均不显著( $P>0.05$ )。与土壤全氮、有机质等指标相比，本研究调查的土壤有效磷含量表现稳定，随时期变化幅度较小(图4)。

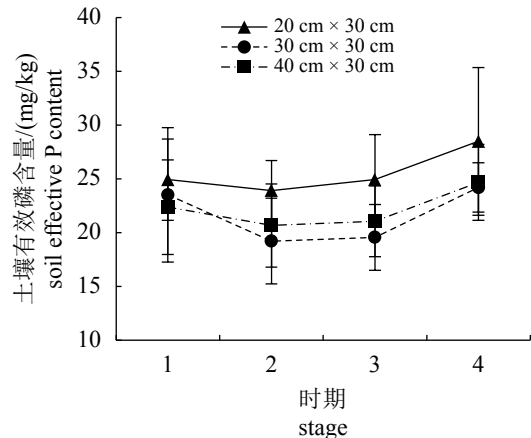


图4 不同水稻密度下的土壤有效磷含量

Fig. 4 Soil effective P contents at different planting densities

**土壤速效钾含量的变化** 各处理组的土壤速效钾含量随时间变化趋势高度相似，均表现为先降(分蘖期—抽穗期)后升(抽穗期—成熟期)，且各自的最低值均出现在水稻抽穗期。低、中、高密度组在抽穗期的土壤速效钾含量分别降至各自分蘖期的63.87%、60.33%、65.03%，至抽穗期时，约有37%的速效钾被水稻根系所吸收。但到水稻成熟期时，各处理组的土壤速效钾含量均与分蘖期无显著差异( $P>0.05$ )



(图5)。低密度组的土壤速效钾含量在抽穗期时显著低于其他3个时期( $P<0.05$ ), 且与成熟期有极显著差异( $P<0.01$ ); 中密度组在拔节和抽穗2个时期的差异不显著( $P>0.05$ ), 但均显著低于分蘖期( $P<0.05$ ); 高密度组的差异显著性仅表现在分蘖期和抽穗期, 抽穗期的速效钾含量显著低于分蘖期( $P<0.05$ )。分蘖期、抽穗期和成熟期的各密度组间速效钾含量差异均不显著( $P>0.05$ ), 拔节期时低密度组显著高于高密度组( $P<0.05$ )。

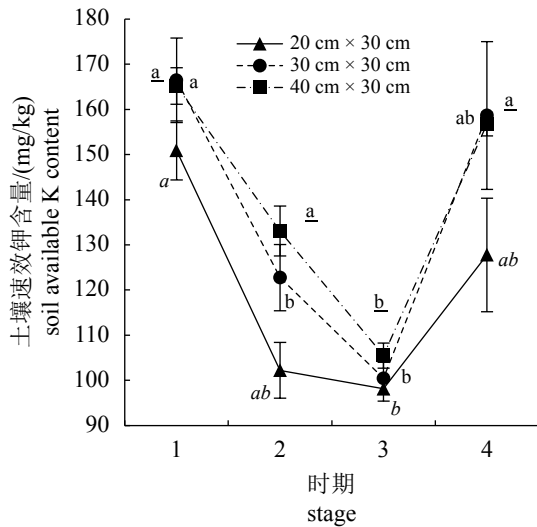


图5 不同水稻密度下的土壤速效钾含量

abc对应40 cm×30 cm, abc对应30 cm×30 cm, abc对应20 cm×30 cm

Fig. 5 Soil available K contents at different planting densities

abc corresponds to 40 cm×30 cm, abc corresponds to 30 cm×30 cm, abc corresponds to 20 cm×30 cm

### 2.2 水稻产量与土壤养分的关系

通过计算得到的关联度, 反映了水稻产量与水稻发育过程中土壤养分含量之间的定量关系。各土壤养分含量对水稻产量的重要性以关联度大小来表示, 关联度大的表明该因子对水稻产量贡献大; 反之贡献小。水稻产量和各土壤养分因子均有不同程度的关联性。灰色关联度总体为0.461~0.824, 各土壤养分因子与水稻产量关联度由强到弱排序依次为pH(0.824)>速效钾(0.787)>有效磷(0.502)>有机质(0.469)>全氮(0.461)(表1)。其中与水稻产量关联度最大的是pH, 关联度最小的是全氮。土壤pH和速效钾含量对水稻产量的贡献度相对较大, 土壤中有效磷、全氮和有机质含量的高低对水稻产量的影响较小。

表1 关联度矩阵

Tab. 1 Correlation matrix

关联矩阵 correlation matrix	土壤养分 soil nutrient				
	pH	速效钾 EK	有效磷 EP	有机质 SOM	全氮 TN
水稻产量 rice yield	0.824	0.787	0.502	0.469	0.461

### 2.3 土壤养分含量分级评价

根据《中国农业百科全书土壤卷》将本研究中4个水稻时期所采集的土壤样品的pH值划分等级<sup>[39]</sup>(表2), 据全国第二次土壤普查养分分级标准<sup>[40-41]</sup>对土壤养分进行分级(表3, 表4)。结果显示, 取样土壤pH值为5.50~6.13, 均呈弱酸性; 全氮含量为1.10~3.70 g/kg, 其中达到2级(丰富)以上(>2.0 g/kg)的样本占86.67%; 有机质含量为22.8~72.4 g/kg, 其中达到2级(丰富)以上(>30 g/kg)的样本占84.44%; 有效磷含量为12.21~41.55 mg/kg, 其中达到2级(丰富)以上(>20 mg/kg)的样本占57.78%; 速效钾含量为93.16~189.35 mg/kg, 其中达到2级(丰富)以上(>150 mg/kg)的样本仅占31.11%, 且这些钾素含量丰富的土壤均采集自水稻分蘖期和成熟期, 处于3级(较缺乏)的土壤样品占11.11%。综合分析, 调查区域稻田土壤中的全氮、有机质和有效磷含量丰富, 速效钾含量相对缺乏。

表2 土壤pH值等级划分标准

Tab. 2 Classification standard of soil pH

分级 grade	pH
强酸性 strong acidity	<4.5
酸性 acidity	4.5~5.5
弱酸性 weak acidity	5.5~6.5
中性 neutrality	6.5~7.5
碱性 alkalinity	7.5~8.5
强碱性 strong alkalinity	>8.5

### 3 讨论

在稻—鱼共生系统中, 鱼类的活动与排泄可以给稻田环境带来疏土和增肥的效果<sup>[42]</sup>。在传统的青田稻—鱼共生系统中, 当地农民常采用相对较低的水稻密度<sup>[18]</sup>, 这种较宽的间距有利于养殖田鱼的活动。本调查研究了高、中、低3种不同水稻密度下稻田土壤养分含量的变化规律。

表3 土壤养分分级评价标准

Tab. 3 Soil nutrient standard

级别 level	丰缺程度 degree	全氮/(g/kg) TN	有机质/(g/kg) SOM	有效磷/(mg/kg) EP	速效钾/(mg/kg) EK
1	极丰富 extremely abundant	>2.0	>40	>40	>200
2	丰富 abundant	1.5~2.0	30~40	20~40	150~200
3	中等 medium	1.0~1.5	20~30	10~20	100~150
4	较缺乏 relatively deficient	0.5~1.0	10~20	5~10	50~100
5	缺乏 deficient	0.25~0.5	6~10	3~5	30~50
6	极缺乏 extremely deficient	<0.25	<6	<3	<30

表4 调查区域稻田土壤养分分布情况

Tab. 4 Distribution of soil nutrient in experimental area

土壤养分 soil nutrient	含量 content	变异系数/% CV	平均值± 标准误 mean±SE	样本分布比例/% distribution ratio					
				1级(极丰富) level 1 (extremely abundant)	2级(丰富) level 2 (abundant)	3级(中等) level 3 (medium)	4级(较缺乏) level 4 (relatively deficient)	5级(缺乏) level 5 (deficient)	6级(极缺乏) level 6 (extremely deficient)
全氮/(g/kg) TN	1.10~3.70	30.36	2.47±0.75	68.89	17.78	13.33	0	0	0
有机质/(g/kg) SOM	22.8~72.4	28.42	5.02±1.43	71.11	13.33	15.56	0	0	0
有效磷/(mg/kg) EP	12.21~41.55	27.67	23.12±6.40	2.22	55.56	42.22	0	0	0
速效钾/(mg/kg) EK	93.16~189.35	19.27	132.31±25.50	0	31.11	57.78	11.11	0	0

研究发现,在青田传统的稻—鱼共生模式下,水稻栽插密度对稻田土壤养分含量的影响不显著,且在本季种养殖过程中土壤养分的含量未出现显著的降低。

土壤pH是评价土壤肥力的重要指标之一,其大小不仅影响土壤化学、物理和生物学特性,还会影响土壤微生物的活性及生物量<sup>[43]</sup>。pH对土壤肥力的影响主要体现在对营养元素的存在状态和有效性方面<sup>[44]</sup>。土壤有机质是作物生长的重要营养来源,是耕作层土壤的物理、化学和生物性质的直接影响因素,也是评价土壤质量、农业生产力和农业是否可持续发展的重要指标<sup>[45]</sup>。氮素是水稻生长发育和形成稻谷必不可少的养分之一<sup>[46]</sup>,而全氮含量是衡量土壤氮素基础肥力的重要指标,与农作物生长关系密切,是实现土壤可持续利用的关键因素<sup>[28]</sup>。有效磷是当季作物从土壤中主要吸收的磷,在一定程度上可以较好地反映土壤磷素的供应水平<sup>[47]</sup>。速效钾含量是衡量土壤钾素供应能力的主要指标<sup>[44]</sup>。本调查测定的各土壤养分含量在不同水稻密度下差异均并不显著,仅有速效钾含量在水稻拔节期时高、低密度组表现出显著差异(图5);

而各养分含量在水稻发育时间上的变化相对较大,表明在本次调查中,相较于水稻栽培密度,水稻生长对稻田土壤肥力的影响更大。在水稻拔节期,低密度组土壤的速效钾含量显著高于高密度组,可能是因为拔节期水稻对钾素需求量很大,且密植条件下水稻的单位面积穴数多、养分竞争激烈,加剧了土壤钾素的消耗。土壤养分含量及pH值在时间上的变化趋势整体表现为先降后升,与徐敏等<sup>[28]</sup>对土壤养分在不同水稻时期的研究结果一致。稻田土壤养分含量的最低值均出现在分蘖期—抽穗期,各处理组养分含量在分蘖期和成熟期均未产生显著性差异,土壤养分含量在水稻收割前(成熟期)均能恢复至不低于分蘖期含量的较高水平,表明本季稻渔综合种养并未显著降低稻田土壤肥力,这与Xie等<sup>[26]</sup>的研究结果相似。根据水稻养分吸收能力和发育进程的关系<sup>[48]</sup>,水稻移栽返青后,营养体逐渐生长,吸肥量也相应增加,到抽穗前达最高<sup>[49-51]</sup>;抽穗期之后随着水稻根系活力的减退,对土壤养分的吸收逐渐减少,而田鱼不断生长、规格变大,摄食及粪便排泄增多,不断带入更多的新的氮、磷、钾等养分,加上

其在稻田中的活动不断翻动土壤, 活化土壤原有养分, 促进稻田土壤养分循环<sup>[28]</sup>; 此时土壤氮素、磷素等营养物质的输入大于输出, 土壤养分含量逐渐回升。养殖田鱼活动在一定程度上起到的“不间断施肥”效果<sup>[52]</sup>有利于共生系统中土壤肥力的保持<sup>[49]</sup>。实践中, 人们也观察到, 在未追加施肥的情况下, 青田稻—鱼共生系统的再生稻依然生长良好, 这也从一个侧面反映了鱼粪对稻田肥力的补充作用。当然, 青田稻—鱼共生系统对土壤肥力的长期影响尚待今后的研究。此外, 水稻稀植条件下的土壤有机质和有效磷含量随水稻的生长变幅较小, 与密植相比表现得更加稳定, 且密植时全氮含量的最低值出现在拔节期, 稀植条件下的最低值出现在抽穗期, 在时间上略有滞后, 推测水稻稀植在土壤全氮的消耗方面起到缓冲作用, 其机理也有待后续研究揭示。

土壤中的氮、磷和有机质是水稻生长发育的主要营养物质<sup>[48, 53-54]</sup>。水稻产量与土壤养分关系的结果表明土壤有效磷、有机质和全氮含量的高低对水稻产量影响不大, 水稻产量受土壤 pH 和速效钾含量的影响较大(表 1)。根据土壤养分分级评价结果(表 4), 取样土壤均呈弱酸性; 调查区域稻田土壤中的全氮、有机质和有效磷含量十分丰富, 达到评价体系中 2 级以上标准的分别占 68.89%、84.44% 和 62.22%; 速效钾含量相对偏低, 达到 2 级以上(>150 mg/kg)的样本仅占 31.11%, 且达到丰富级别的样本均来自水稻分蘖期和成熟期, 表明在水稻生长旺盛的拔节期和抽穗期, 钾素供应一直不充足。推测原因可能是土壤中的有效磷、有机质和全氮含量均比较丰富, 能够充分满足水稻的生长, 而速效钾含量相对缺乏, 使速效钾含量成为了水稻生长发育的限制性因素, 加上弱酸性土壤的抑制作用<sup>[55]</sup>, 更加不利于稻谷的产出。酸性土壤 pH 的提高有利于发挥土壤养分的有效性<sup>[56]</sup>, 建议调查区域附近的稻田在实际生产中可适当增施土壤改良剂或采用豆科植物间作, 减轻土壤酸性程度, 同时适当增施钾肥来提高粮食产量。

#### 参考文献:

[1] Altieri M A. Linking ecologists and traditional farmers in the search for sustainable agriculture[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2004, 2(1): 35-42.

- [2] Poggio S L. Structure of weed communities occurring in monoculture and intercropping of field pea and barley[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2005, 109(1-2): 48-58.
- [3] 曾希柏, 陈同斌, 胡清秀, 等. 中国粮食生产潜力和化肥增产效率的区域分异[J]. *地理学报*, 2002, 57(5): 539-546.  
Zeng X B, Chen T B, Hu Q X, *et al.* Grain productivity and its potential as related to fertilizer consumption among different counties of China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2002, 57(5): 539-546(in Chinese).
- [4] 王祖力, 肖海峰. 化肥施用对粮食产量增长的作用分析[J]. *农业经济问题*, 2008(8): 65-68.  
Wang Z L, Xiao H F. Analysis on the role of fertilization on grain yield growth[J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2008(8): 65-68(in Chinese).
- [5] 麻坤, 刁钢. 化肥对中国粮食产量变化贡献率的研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(4): 1113-1120.  
Ma K, Diao G. Research on the contribution rate of fertilizer to grain yield in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(4): 1113-1120(in Chinese).
- [6] 朱泽闻, 李可心, 王浩. 我国稻渔综合种养的内涵特征、发展现状及政策建议[J]. *中国水产*, 2016(10): 32-35.  
Zhu Z W, Li K X, Wang H. Connotation characteristics, development status and policy suggestions of integrated rice breeding in China[J]. *China Fisheries*, 2016(10): 32-35(in Chinese).
- [7] 李东坡, 武志杰. 化学肥料的土壤生态环境效应[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(5): 1158-1165.  
Li D P, Wu Z J. Impact of chemical fertilizers application on soil ecological environment[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(5): 1158-1165(in Chinese).
- [8] Zheng G Z, Yue L P, Li Z P, *et al.* Assessment on heavy metals pollution of agricultural soil in Guanzhong District[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2006, 16(1): 105-113.
- [9] Atafar Z, Mesdaghinia A, Nouri J, *et al.* Effect of fertilizer application on soil heavy metal concentration[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, 160(1-4): 83-89.
- [10] 王美, 李书田. 肥料重金属含量状况及施肥对土壤和

- 作物重金属富集的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(2): 466-480.
- Wang M, Li S T. Heavy metals in fertilizers and effect of the fertilization on heavy metal accumulation in soils and crops[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(2): 466-480(in Chinese).
- [11] 孔凡斌, 郭巧苓, 潘丹. 中国粮食作物的过量施肥程度评价及时空分异[J]. *经济地理*, 2018, 38(10): 201-210, 240.
- Kong F B, Guo Q L, Pan D. Evaluation on overfertilization and its spatial-temporal difference about major grain crops in China[J]. *Economic Geography*, 2018, 38(10): 201-210, 240(in Chinese).
- [12] Frei M, Khan M A M, Razzak M A, *et al.* Effects of a mixed culture of common carp, *Cyprinus carpio* L., and Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* (L.), on terrestrial arthropod population, benthic fauna, and weed biomass in rice fields in Bangladesh[J]. *Biological Control*, 2007, 41(2): 207-213.
- [13] Xie J, Hu L L, Tang J J, *et al.* Ecological mechanisms underlying the sustainability of the agricultural heritage rice-fish coculture system[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(50): e1381-e1387.
- [14] Xie J, Wu X, Tang J J, *et al.* Conservation of traditional rice varieties in a Globally Important Agricultural Heritage System (GIAHS): rice-fish co-culture[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2011, 10(5): 754-761.
- [15] 胡亮亮. 农业生物种间互惠的生态系统功能[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- Hu L L. Ecosystem functioning of facilitation between co-cultured species[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014(in Chinese).
- [16] 游修龄. 稻田养鱼: 传统农业可持续发展的典型之一[J]. *农业考古*, 2006(4): 222-224.
- You X L. Rice-fish agriculture: one of the typical sustainable traditional agriculture models[J]. *Agricultural Archaeology*, 2006(4): 222-224(in Chinese).
- [17] Smith F. Biological diversity, ecosystem stability and economic development[J]. *Ecological Economics*, 1996, 16(3): 191-203.
- [18] 焦雯璐, 闵庆文. 浙江青田稻鱼共生系统[M]. 北京: 中国农业出版社, 2015.
- Jiao W J, Min Q W. Globally Important Agricultural Heritage Systems: the rice-fish coculture system of Qingtian, Zhejiang[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2015(in Chinese).
- [19] 陈飞星, 张增杰. 稻田养蟹模式的生态经济分析[J]. *应用生态学报*, 2002, 13(3): 323-326.
- Chen F X, Zhang Z J. Ecological economic analysis of a rice-crab model[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(3): 323-326(in Chinese).
- [20] 李娜娜. 中国主要稻田种养模式生态分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- Li N N. Ecological analysis of representative rice-based ecosystems in China[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013(in Chinese).
- [21] 甘德欣, 黄璜, 蒋廷杰. 免耕稻鸭复合系统生态学特性研究II. 土壤生物学特性[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2005, 31(1): 35-38.
- Gan D X, Huang H, Jiang T J. The ecological characteristics of no-tillage rice-duck complex system II. The microbe amounts and microbe biomass of soil[J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2005, 31(1): 35-38(in Chinese).
- [22] Gurung T B, Wagle S K. Revisiting underlying ecological principles of rice-fish integrated farming for environmental, economical and social benefits[J]. *Our Nature*, 2006, 3(1): 1-12.
- [23] Oehme M, Frei M, Razzak M A, *et al.* Studies on nitrogen cycling under different nitrogen inputs in integrated rice-fish culture in Bangladesh[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2007, 79(2): 181-191.
- [24] Tsuruta T, Yamaguchi M, Abe S I, *et al.* Effect of fish in rice-fish culture on the rice yield[J]. *Fisheries Science*, 2011, 77(1): 95-106.
- [25] Ren W Z, Hu L L, Guo L, *et al.* Preservation of the genetic diversity of a local common carp in the agricultural heritage rice-fish system[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(3): e546-e554.
- [26] Xie J, Wu X, Tang J J, *et al.* Chemical fertilizer reduction and soil fertility maintenance in rice-fish coculturesystem[J]. *Frontiers of Agriculture in China*, 2010, 4(4): 422-429.
- [27] 汪清, 王武, 马旭洲, 等. 稻蟹共作对土壤理化性质的影响[J]. *湖北农业科学*, 2011, 50(19): 3948-3952.
- Wang Q, Wang W, Ma X Z, *et al.* The effects of 中国水产学会主办 sponsored by China Society of Fisheries



- integrated rice-crab production on soil physical and chemical properties[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2011, 50(19): 3948-3952(in Chinese).
- [28] 徐敏, 王武, 马旭洲. 稻蟹共生系统不同水稻栽培模式土壤理化性状和有效养分的变化规律[J]. *广东农业科学*, 2013, 40(9): 53-57.  
Xu M, Wang W, Ma X Z. Regularity of different cultivation patterns on the soil physical and chemical properties, nutrition changes in rice-crab culture system[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2013, 40(9): 53-57(in Chinese).
- [29] 唐海明, 孙国峰, 肖小平, 等. 轮耕对双季稻田土壤全氮、有效磷、速效钾质量分数及水稻产量的影响[J]. *生态环境学报*, 2011, 20(3): 420-424.  
Tang H M, Sun G F, Xiao X P, *et al.* Effects of rotational tillage treatments on soil total nitrogen, available phosphorus, available potassium and grain yield of rice in double-rice cropping field[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(3): 420-424(in Chinese).
- [30] 康轩, 黄景, 吕巨智, 等. 保护性耕作对土壤养分及有机碳库的影响[J]. *生态环境学报*, 2009, 18(6): 2339-2343.  
Kang X, Huang J, Lü J Z, *et al.* Effects of conservation tillage on soil nutrient and organic carbon pool[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(6): 2339-2343(in Chinese).
- [31] 吴敏芳, 张剑, 陈欣, 等. 提升稻鱼共生模式的若干关键技术研究[J]. *中国农学通报*, 2014, 30(33): 51-55.  
Wu M F, Zhang J, Chen X, *et al.* Practical technology for improving rice-fish co-culture system[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(33): 51-55(in Chinese).
- [32] 全国农业技术推广服务中心. 土壤检测 第2部分: 土壤pH的测定: NY/T 1121.2-2006[S]. 北京: 中华人民共和国农业部, 2006.  
National Agricultural Technology Extension Service Center. Soil Testing Part 2: Method for determination of soil pH: NY/T 1121.2-2006[S]. Beijing: Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China, 2006(in Chinese).
- [33] 中国林业科学研究院林业研究所. 森林土壤全氮的测定: LY/T 1228-1999[S]. 北京: 中华人民共和国国家林业局, 1999.  
Research Institute of Forestry Chinese Academy of Forestry. Determination of total nitrogen in forest soil: LY/T 1228-1999[S]. Beijing: The state forestry administration of the People's Republic of China, 1999(in Chinese).
- [34] 中国林业科学研究院林业研究所. 森林土壤有机质的测定及碳氮比的计算: LY/T 1237-1999[S]. 北京: 中华人民共和国国家林业局, 1999.  
Research Institute of Forestry Chinese Academy of Forestry. Determination of organic matter in forest soil and calculation carbon-nitrogen ratio: LY/T 1237-1999[S]. Beijing: The state forestry administration of the People's Republic of China, 1999(in Chinese).
- [35] 环境保护部科技标准司. 土壤有效磷的测定碳酸氢钠浸提-钼锑抗分光光度法: HJ 704-2014[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2014.  
Department of science and technology standards, Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Soil quality--Determination of available phosphorus--Sodium hydrogen carbonate solution-Mo-Sb anti spectrophotometric method: HJ 704-2014[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2014(in Chinese).
- [36] 中国林业科学研究院林业研究所. 森林土壤速效钾的测定: LY/T 1236-1999[S]. 北京: 中华人民共和国国家林业局, 1999.  
Research Institute of Forestry Chinese Academy of Forestry. Determination of available potassium in forest soil: LY/T 1236-1999[S]. Beijing: The state forestry administration of the People's Republic of China, 1999(in Chinese).
- [37] 陈丹宁. 大庆市大同区农田土壤pH值与土壤养分因子灰色关联研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2015.  
Chen D N. Analysis on grey correlation between soil pH value and soil nutrients of Datong district, Daqing[D]. Harbin: Harbin Normal University, 2015(in Chinese).
- [38] 邓聚龙. 灰色系统基本方法[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1988.  
Deng J L. Basic method of Grey System[M]. Wuhan: Huazhong University of Technology Press, 1988(in Chinese).
- [39] 中国农业百科全书总编辑委员会土壤卷编辑委员会, 中国农业百科全书编辑部. 中国农业百科全书-土壤卷[M]. 北京: 农业出版社, 1996.

- Soil Volume Editorial Committee of General Editorial Committee of Chinese Agricultural Encyclopedia, China Agricultural Encyclopedia Editorial Department. China agricultural encyclopedia: soil[M]. Beijing: Agricultural Press, 1996(in Chinese).
- [40] 孙嘉兴, 杨双, 刘延斌, 等. 沈阳水稻种植区土壤养分肥力状况调查报告[J]. 中国农业信息, 2017(21): 46-47. Sun J X, Yang S, Liu Y B, *et al.* Investigation report on soil nutrient and fertility in rice planting area of Shenyang[J]. China Agricultural Information, 2017(21): 46-47(in Chinese).
- [41] 吴晶, 顾贤, 周雄飞, 等. 江苏盐城方强农场土壤养分状况的系统研究[J]. 江西农业学报, 2011, 23(6): 105-107, 110. Wu J, Gu X, Zhou X F, *et al.* Systematic research on soil nutrient status of Fangqiang farm in Yancheng of Jiangsu Province[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2011, 23(6): 105-107, 110(in Chinese).
- [42] 沈雪达, 苟伟明. 我国稻田养殖发展与前景探讨[J]. 中国渔业经济, 2013, 31(2): 151-156. Shen X D, Gou W M. Research on rice paddy development and prospects in China[J]. Chinese Fisheries Economics, 2013, 31(2): 151-156(in Chinese).
- [43] Aciego P J C, Brookes P C. Relationships between soil pH and microbial properties in a UK arable soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40(7): 1856-1861.
- [44] 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. 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(in Chinese).
- [45] Basamba T A, Barrios E, Amézquita E, *et al.* Tillage effects on maize yield in a Colombian savanna oxisol: soil organic matter and P fractions[J]. Soil and Tillage Research, 2006, 91(1-2): 131-142.
- [46] Bøckman O C, Olfsh W. Fertilizers, agronomy and N<sub>2</sub>O[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 1998, 52(2-3): 165-170.
- [47] 鲁如坤. 我国土壤氮、磷、钾的基本状况[J]. 土壤学报, 1989, 26(3): 280-286. Lu R K. General status of nutrients (N, P, K) in soils of China[J]. Acta Pedologica Sinica, 1989, 26(3): 280-286(in Chinese).
- [48] 慕成功, 郑义. 农作物配方施肥[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1995. Mu C G, Zheng Y. Formula fertilization of crops[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1995(in Chinese).
- [49] 张苗苗, 宗良纲, 谢桐洲. 有机稻鸭共作对土壤养分动态变化和经济效益的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(2): 256-260. Zhang M M, Zong L G, Xie T Z. Effect of integrated organic duck-rice farming on the dynamics of soil nutrient and associated economic benefits[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(2): 256-260(in Chinese).
- [50] 王秀芹, 张洪程, 黄银忠, 等. 施氮量对不同类型水稻品种吸氮特性及氮肥利用率的影响[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2003, 21(4): 325-330. Wang X Q, Zhang H C, Huang Y Z, *et al.* Effects of N-application rate on the characters of uptake nitrogen and nitrogen recovery of different rice varieties[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University(Agricultural Science Edition), 2003, 21(4): 325-330(in Chinese).
- [51] 陈贵, 张红梅, 沈亚强, 等. 猪粪与牛粪有机肥对水稻产量、养分利用和土壤肥力的影响[J]. 土壤, 2018, 50(1): 59-65. Chen G, Zhang H M, Shen Y Q, *et al.* Application effects of swine and cow manures on rice yield, nutrient uptakes and use efficiencies and soil fertility[J]. Soils, 2018, 50(1): 59-65(in Chinese).
- [52] 王昂, 王武, 马旭洲, 等. 养蟹稻田水环境部分因子变化研究[J]. 湖北农业科学, 2011, 50(17): 3514-3519. Wang A, Wang W, Ma X Z, *et al.* Study on the changes of water environmental factors in rice-crab culture system[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2011, 50(17): 3514-3519(in Chinese).
- [53] 文炯, 罗尊长, 李明德, 等. 土壤活性有机质及其与土壤养分的关系[J]. 湖南农业科学, 2009(1): 57-60. Wen J, Luo Z C, Li M D, *et al.* Soil active organic matter and its relationship with soil nutrients[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2009(1): 57-60(in Chinese).
- [54] 尹秀英, 许文良, 冯君. 吉林省稻田土壤营养元素与水稻产量的相互关系[J]. 长春科技大学学报, 2001, 31(1): 74-77. Yin X Y, Xu W L, Feng J. The correlation of the 中国水产学会主办 sponsored by China Society of Fisheries

- nutritious elements in paddy soil and the paddy yield in Jilin province[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 2001, 31(1): 74-77(in Chinese).
- [55] 易亚科, 周志波, 陈光辉. 土壤酸碱度对水稻生长及镉米镉含量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(3): 428-436.
- Yi Y K, Zhou Z B, Chen G H. Effects of soil pH on growth and grain cadmium content in rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(3): 428-436(in Chinese).
- [56] 钱笑杰, 林晓兰, 肖靖, 等. 福建果园土壤pH值、养分关系与土壤肥力质量评价研究——以福建省漳州市平和县琯溪蜜柚园地为例[J]. *福建热作科技*, 2017, 42(1): 9-15.
- Qian X J, Lin X L, Xiao J, *et al.* Study on soil pH value, nutrient relation and soil fertility quality evaluation in Fujian orchards: a case study of Guanxi Honey Pomelo Garden in Pinghe County, Zhangzhou City, Fujian Province[J]. *Fujian Science & Technology of Tropical Crops*, 2017, 42(1): 9-15(in Chinese).

## Investigation of soil fertility of Qingtian rice-fish coculture system under different rice cultivation densities

GUO Haisong<sup>1,2,3</sup>, LUO Heng<sup>1,2,3</sup>, LI Feng<sup>1,2,3</sup>, QI Ming<sup>1,2,3</sup>,  
HU Zhongjun<sup>1,2,3</sup>, LIU Qigen<sup>1,2,3\*</sup>

(1. National Demonstration Center for Experimental Fisheries Science Education,  
Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. Key Laboratory of Freshwater Aquatic Genetic Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs,  
Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

3. Shanghai Engineering Research Center of Aquaculture, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** As the first pilot site of the Globally Important Agricultural Heritage System (GIAHS), Qingtian rice-fish co-culture system has attracted more and more attention due to its unique advantages. In order to better conserve the first GIAHS project in Asia, we investigated the effects of different rice planting densities on soil fertility of Qingtian rice-fish co-culture systems. The results showed that the pH value of the tested paddy soil varied between 5.50-6.13, which was weakly acidic. The contents of soil nutrients (such as the soil total nitrogen, soil organic matter, available phosphorus and available potassium) first decreased and reached the lowest values at the booting stage, then recovered to the similar higher levels with the initial before rice harvesting, indicating that the activity of the field fish and perhaps fish feces could help maintain the soil fertility. According to the results of Grey relational analysis (GRA) between rice yield and soil nutrient, it was found that soil pH and available potassium were most closely related to rice yield. Compared with the rich nitrogen, available phosphorus and soil organic matter, the less sufficiently available potassium and low pH value might be responsible for the limited growth and yield of rice. Rice planting densities were not found to significantly affect soil fertility in Qingtian rice-fish co-culture system in this growing season.

**Key words:** soil; nutrient; rice density; Qingtian rice-fish coculture system; GIAHS

**Corresponding author:** LIU Qigen. E-mail: qgliu@shou.edu.cn

**Funding projects:** Science and Technology Commission of Shanghai Municipality(16391901600)