

doi:10.3969/j.issn.1000-6362.2021.04.001

白娜玲,吕卫光,郑宪清,等.菜田种养复合系统氮/磷平衡分析[J].中国农业气象,2021,42(4):261-271

## 菜田种养复合系统氮/磷平衡分析\*

白娜玲<sup>1,2,3,4</sup>, 吕卫光<sup>1,2,3,4</sup>, 郑宪清<sup>1,2,3</sup>, 李双喜<sup>1,3,4</sup>, 何 宇<sup>5</sup>, 张娟琴<sup>1,2,3</sup>, 张海韵<sup>1,2,3,4</sup>, 张翰林<sup>1,2,3,4\*\*</sup>

(1.上海市农业科学院生态环境保护研究所, 上海 201403; 2.农业农村部上海农业环境与耕地保育科学观测试验站, 上海 201403; 3.上海市农业环境保护监测站, 上海 201403; 4.上海市设施园艺技术重点实验室, 上海 201403; 5.上海海洋大学海洋生态与环境学院, 上海 201306)

**摘要:** 通过田间试验, 设置菜田种养复合模式 (VE) 和常规菜田单一种植模式 (对照, CK) 两个处理, 采用投入-产出法, 于蔬菜收获后对种植 (种养) 系统内土壤、水体和产品 (包括花菜和水产动物) 中氮磷含量进行测定, 研究 VE 模式下土壤 (耕作区、底泥、边沟)、蔬菜 (花菜)、水产 (螃蟹、黄鳝、鱼) 和水体内氮、磷平衡和循环特征。结果表明: 系统内总氮/总磷 (TN/TP) 含量均以肥料输入最大, VE 模式和 CK 模式肥料氮、磷输入分别占 TN/TP 总输入量的 89.09%、99.73% 和 89.20%、99.86%, 收获季花菜花球氮、磷输出分别占 TN/TP 总输出量的 37.74%、33.69% 和 38.26%、34.50%。VE 模式中的系统 TN/TP 输出/输入比分别为 67.01% 和 39.51%, 均高于 CK 模式, VE 模式降低了系统氮、磷表观损失 35.19kg 和 24.38kg。当前投入水平下, 两种模式的系统 TN/TP 盈余量均为负, 说明均需投入适量肥料以利于作物产出和系统平衡。研究结果有助于为菜田种养复合模式氮、磷循环和平衡管理提供参考。

**关键词:** 种养复合; 菜田; 养分平衡; 氮磷

## Analysis of the Nitrogen and Phosphorus Balance in the Integrated Ecosystem in Vegetable Field

BAI Na-ling<sup>1,2,3,4</sup>, LV Wei-guang<sup>1,2,3,4</sup>, ZHENG Xian-qing<sup>1,2,3</sup>, LI Shuang-xi<sup>1,3,4</sup>, HE Yu<sup>5</sup>, ZHANG Juan-qin<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Hai-yun<sup>1,2,3,4</sup>, ZHANG Han-lin<sup>1,2,3,4</sup>

(1. Eco-Environmental Protection Research Institute, Shanghai Academy of Agricultural Sciences, Shanghai 201403, China; 2. Shanghai Agri-Environmental and Cultivated Land Conservation of Scientific Observation and Experiment Station, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 201403; 3. Shanghai Agri-Environmental Protection Monitoring Station, Shanghai 201403; 4. Shanghai Key Laboratory of Horticultural Technology, Shanghai 201403; 5. Faculty of Marine Ecology and Environment, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306)

**Abstract:** In this study, a field experiment was conducted to study the balance and cycling characteristics of nitrogen (N) and phosphorus (P) under the integrated planting and breeding system in the vegetable field (VE mode) using an input-output method, with the conventional singly planting system as the control (CK mode). And the corresponding parameters were determined and analyzed: farming soil, ditch bottom mud, side ditch soil, cauliflower, aquatic products (crab, eel, fish), and water in the ditch. The results showed that the total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) were the largest in the fertilizer input, accounting for 89.09% and 99.73% (VE mode) and 89.20% and 99.86% (CK mode) of the total input, respectively. In the harvest season, the TN and TP of cauliflower

\* 收稿日期: 2020-09-27

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFD0800205); 上海市农业科学院卓越团队建设计划 [2017(A-03)]

\*\* 通讯作者: 张翰林, 副研究员, 从事土壤生态学研究, E-mail: zhanghanlinchick@163.com

第一作者联系方式: 白娜玲, E-mail: bainaling@saas.sh.cn

curd, of the total output, accounted for 37.74% and 33.69% in the VE mode and 38.26% and 34.50% in the CK mode. The TN and TP input/output ratios of VE system were 67.01% and 39.51%, which both were higher than those of CK system(66.75% and 38.82%), indicating that VE mode decreased the apparent loss of N and P in the system(35.19kg and 24.38kg). Under the current input levels, the apparent balance of both TN and TP in the whole VE and CK systems were in deficit, so appropriate amount of fertilizer was needed for the two modes to guarantee crop yield and system balance. The research will be helpful to provide references for N and P cycling mechanism and balance management of the integrated plantation and breeding system in the vegetable field.

**Key words:** Integrated planting and breeding system; Vegetable field; Nutrient balance; Nitrogen and phosphorus

农田生态系统是人类建立的最大限度产出有效产品的生态系统,传统农业的单一生产模式受诸多自然条件限制,从而导致其生产工艺和经济转化效率不断降低。农牧分离、种养分离,导致原本互补的种植业和养殖业均成为环境污染的罪魁祸首。农业面源污染问题主要来源于种植业大量使用化学肥料造成氮(N)、磷(P)流失,养殖业产生并排放大量废尾水。因此,基于立体农业的种养复合生产模式逐步发展起来,并成为提升农业效应和改善生态环境的有效途径<sup>[1-2]</sup>。

稻田种养模式已在世界范围内得到深入研究和广泛推广,主要有稻鱼、稻虾、稻鸭、稻蟹、稻鳖、稻蛙等,以及在此基础上衍生的其它复合生态种养模式<sup>[3]</sup>。菜田立体种养模式将原本分离的旱地蔬菜种植、水产动物养殖耦合在同一生态系统中,运用现代生态农业措施,集合发挥各生产因子优势,提高养分及资源利用效率,达到共同促进与效益叠加的效果<sup>[4]</sup>。以往的菜田种养模式主要指水培蔬菜和水产动物共生,蔬菜只能吸取水中养分,限制了蔬菜种植的种类和生长需求<sup>[5]</sup>。而水旱共作的菜田种养复合系统,扩大了作物和水产动物选择范围,防涝防旱,增产增收,植物-微生物-水产品生态关系可实现生态循环农业的创新发展<sup>[6]</sup>。

N、P养分是农业生态系统物质循环的重要组成部分,明确其循环与平衡特征有利于提高生态系统生产力与稳定性。已有学者针对稻田种养复合模式下的养分循环与平衡状况开展了大量研究。李成芳等<sup>[7]</sup>指出,稻鸭、稻鱼共作生态系统中鸭和鱼的存在使系统N输出大于N输入,加速了土壤有机N营养周转,显著提高了水稻N的输出。而佘国涵等<sup>[8]</sup>发现稻虾共作模式降低了N、P的输出/输入比,促进了土壤中N、P累积,但增加了系统表观损失量。因此,种养复合系统的N、P循环特征可能与具体模式、

水产动物、施肥状况等有关<sup>[9]</sup>。对于菜田种养复合系统而言,干旱与湿润并存的菜-鳊-蚓复合生态系统可提高单位面积产量50%以上,使水灾、病虫害造成的经济损失减少30%以上,实现农业废弃物(如秸秆)的100%回收再利用<sup>[10]</sup>。水旱共存可通过小气候影响菜田种养复合系统内物理化学反应、植物生长及土壤细菌的结构和丰度<sup>[11]</sup>。此外,与稻田种养相比,菜田种养复合系统中水产动物生长在沟渠中,对陆地作物的扰动作用相对较小。菜田种养复合系统内的N、P能量流动规律、养分盈余与损失量是否会有差异,还未见研究报道。因此,本研究通过设置田间试验,研究菜田种养复合系统中N和P的输入、输出及平衡状况,以期菜田种养复合模式下科学合理的生产管理制度提供数据支撑。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验地点

试验地点位于上海市崇明岛西部的三星镇(31°41'15"N, 121°54'00"E),具体为西新村菜田种养复合模式长期定位试验田。崇明岛平均海拔4m,属北亚热带季风气候,盛行东南风,温暖湿润,夏季湿热,冬季干冷。年均降水量1003.70mm,降水集中在4-9月,全年无霜期229d,年均气温15.3℃,≥10℃年均积温2559.60℃·d。

### 1.2 试验设计

菜田复合种养田间试验始于2009年,种植制度为芋艿(崇明香酥芋)-花菜(台松)轮作。花菜种植和收获时间分别为2018年9月5日和2019年3月20日。设置两个处理:(1)菜田种养复合模式(VE):开沟养水产动物,同时水面上设有诱集灯以诱集飞虫作为水产动物饵料;花菜收获后茎叶取出,根部还田。(2)单一种植模式(对照,CK):沟中有水,无水产动物;花菜收获后茎叶取出,根部还田。每个处理3次重复,随机区组设计。

试验田布局见图1。每个处理小区分4个菜畦,菜畦间水沟上宽为1.50m,下宽为0.50m,沟深为1.00m。小区总面积为1744.00m<sup>2</sup>,陆地面积为1440.00m<sup>2</sup>,水体面积为304.00m<sup>2</sup>,水体面积占比为17.43%。耕作区深度按0.20m计算,基本可反映土壤养分状况;底泥和边沟深度分别为0.20m和0.10m。蔬菜生育期内不排水,期间需引水浇灌花菜。花菜整个种植周期需引入灌溉水约40m<sup>3</sup>,灌溉水来自于就近河水。种植季和收获季水沟中水深分别保持0.70m和0.50m。

施肥情况。花菜种植施用N、P(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)和K(K<sub>2</sub>O)

肥分别为309.00、102.00和102.00kg·hm<sup>-2</sup>。CK处理中底肥为375.00kg·hm<sup>-2</sup>复合肥(17-17-17),返青肥为150.00kg·hm<sup>-2</sup>尿素,发棵肥为300.00kg·hm<sup>-2</sup>尿素,花球肥为225.00kg·hm<sup>-2</sup>复合肥。VE处理中底肥以等氮量有机肥代替,不足部分用过磷酸钙和硫酸钾补足,其余时期施肥量与CK处理一致。

水产动物养殖情况。VE模式中投入水产动物幼苗(螃蟹37.50kg·hm<sup>-2</sup>、黄鳝67.50kg·hm<sup>-2</sup>和鱼45.00kg·hm<sup>-2</sup>)。水产动物以诱集灯捕获飞虫及水中营养为食物,无需额外投加饲料。花菜收获季时一并捕捞收集。

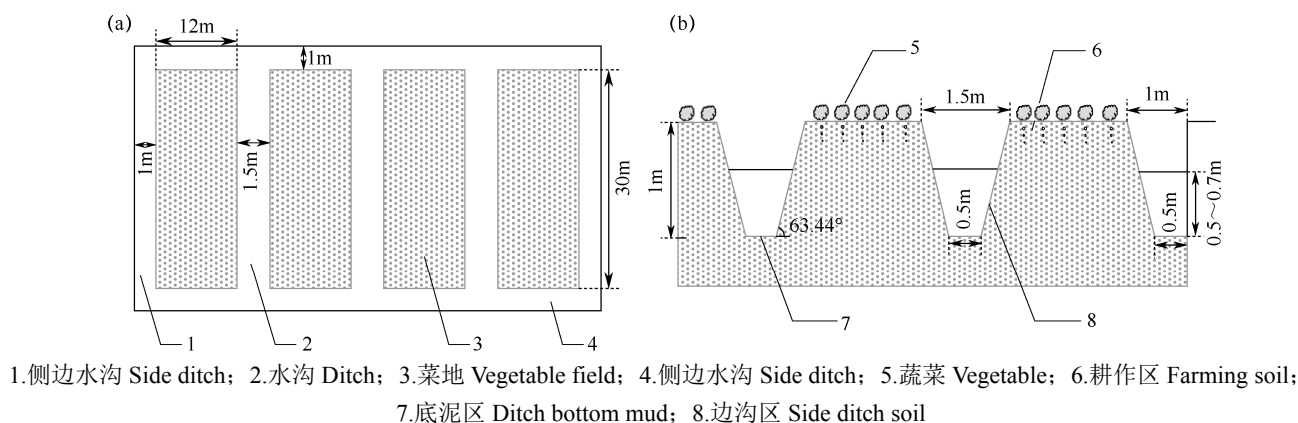


图1 菜田种养复合系统(VE)的田间布局正面(a)和侧面(b)示意图

Fig. 1 Schematic top(a) and lateral(b) views of the integrated planting and breeding system of the vegetable field(VE)

### 1.3 样品采集与测定方法

土壤氮磷含量测定。分别于花菜种植前2018年8月28日和花菜收获后2019年4月3日,依据“S”形五点采样法采集耕作区(0.20m)、边沟(0.10m)和底泥(0.20m)土样。按照“四分法”取1kg土壤于阴凉通风处风干,磨细过筛后置于干燥处保存待测。烘干称重法测定土壤样品含水量。土壤总氮采用凯氏定氮法-自动定氮仪测定,土壤总磷(以P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>计)采用酸溶-钼锑抗比色法测定。

水体中氮磷含量测定。花菜种植期间取灌溉水水样1L,并分别于花菜种植前2018年8月28日和花菜收获后2019年4月3日在水面下10~20cm深度取水样1L。水样经预先灼烧称重过的Whatman GF/F玻璃纤维素膜(0.45μm)过滤,待测。总氮采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度计法测定,总磷采用过硫酸钾氧化-钼蓝比色法测定<sup>[12]</sup>。

产品(包括花菜和水产动物)中氮磷含量测定。收获季节,选择长势良好且一致的花菜5株(水产

动物5条)用于氮磷含量测定。在花菜成熟期取全株样品,分别测定花球、茎叶、根部的氮磷含量。其中取根方法:以植株为圆心,以0.20m为半径,挖取深度为0.20m的柱状土块,保证根的完整性,清洗干净。水产动物则需先饥饿处理使其体内食物消化排泄而成空腹,清洗干净。将植株不同部位和完整的螃蟹/黄鳝/鱼在105℃杀青0.5h后75℃烘干至恒重,粉碎过筛后采用硫酸-过氧化氢消煮,凯氏定氮法-自动定氮仪测定全氮含量,酸溶-钼锑抗比色法测定全磷含量<sup>[13]</sup>。烘干称重法测定各样品含水量。花菜和水产动物实收测产。

### 1.4 指标计算

根据李丹丹等<sup>[14]</sup>对长三角地区大气N沉降的研究结果,确定本试验期间N沉降值为30kg·hm<sup>-2</sup>。

分析系统氮总量(TN)、磷总量(TP)平衡特征时,背景值为花菜种植前土壤和水体的TN/TP起始量,现值为花菜收获后土壤和水体的TN/TP残留量。TN/TP输入主要是肥料、花菜和水产动物幼苗、

灌溉水、大气沉降等,输出主要考虑花菜产量、水产动物产量。

#### (1) 系统 TN/TP 总输入量

化肥:施肥量 ( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) $\times$ 小区陆地面积 ( $\text{hm}^2$ ) $\times$ N/P 含量 (%)。

花菜幼苗:花菜幼苗鲜重 ( $\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$ ) $\times$ 种植密度 ( $\text{株}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) $\times$ 小区陆地面积 ( $\text{hm}^2$ ) $\times$ [1-花菜幼苗含水量 (%) ] $\times$ 花菜幼苗 N/P 含量 ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )。

水产动物幼苗:幼苗投放量 ( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) $\times$ 小区水体面积 ( $\text{hm}^2$ ) $\times$ [1-水产幼苗含水量 (%) ] $\times$ 水产幼苗 N/P 含量 ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )。

灌溉水:体积 ( $\text{m}^3$ ) $\times$ 密度 ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) $\times$ N/P 含量 ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )。

大气沉降:试验期间 N 沉降值 ( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) $\times$ 小区面积 ( $\text{hm}^2$ )。

#### (2) 系统 TN/TP 总输出量

花菜:花菜各器官产量 ( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) $\times$ 小区陆地面积 ( $\text{hm}^2$ ) $\times$ [1-花菜各器官含水量 (%) ] $\times$ 花菜各器官 N/P 含量 ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )。

水产动物:水产动物产量 ( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) $\times$ 小区水体面积 ( $\text{hm}^2$ ) $\times$ [1-水产动物含水量 (%) ] $\times$ 水产动物 N/P 含量 ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )。

#### (3) 其它指标

土壤 TN/TP 截留量:收获季土壤 TN/TP 量 ( $\text{kg}$ ) -

种植前土壤 TN/TP 量 ( $\text{kg}$ )。

水体 TN/TP 截留量:收获季水体 TN/TP 量 ( $\text{kg}$ ) - 种植前水体 TN/TP 量 ( $\text{kg}$ )。

系统 TN/TP 盈余量:系统 TN/TP 输入 ( $\text{kg}$ ) - 系统 TN/TP 输出 ( $\text{kg}$ ) + 土壤 TN/TP 截留量 ( $\text{kg}$ ) + 水体 TN/TP 截留量 ( $\text{kg}$ ) + 循环量 ( $\text{kg}$ )<sup>[14]</sup>。

### 1.5 统计分析

试验数据采用 SPSS 16.0 进行统计分析,应用独立样本 t-检验对比分析两组处理间的差异显著性 ( $P<0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 菜田种养复合系统的氮磷输入量分析

#### 2.1.1 花菜种植前土壤及水样中 TN/TP 背景值

花菜种植前分别对 VE 和 CK 模式耕作区土壤、底泥土壤、边沟土壤和水体样品中氮磷含量进行测定,结果见表 1。由表可知,VE 模式土壤 TN/TP 总量分别为 533.64kg 和 537.20kg,CK 模式土壤 TN/TP 总量分别为 551.35kg 和 574.63kg,且 CK 模式土壤 TP 总量显著高于 VE 模式 ( $P<0.05$ ),但不同处理间 TN 总量无显著差异。表 2 为各土壤区基本数据特征,花菜种植前水体深度为 0.70m,计算可知水体体积为 133.40 $\text{m}^3$ ,因此,VE 和 CK 模式水体中 TN/TP 总量分别为 36.02、1.07g 和 26.68、0.80g。

表 1 花菜种植前种养复合系统 (VE) 与单一种植系统 (CK) 中 TN/TP 背景值

Table 1 The background values of TN/TP in the planting and breeding system(VE) and singly planting system(CK) before cauliflower plantation

模式 Mode	样品 Sample	含水量 Water content (%)	N 含量 N content ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	P 含量 P content ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	N 总量 Total N (kg)	P 总量 Total P (kg)
VE	耕作区土壤 Farming soil	19.00	1.40 $\pm$ 0.01	1.40 $\pm$ 0.02	457.23	457.23
	底泥 Ditch bottom mud	55.00	1.70 $\pm$ 0.02	1.60 $\pm$ 0.04	19.81	18.65
	边沟土 Side ditch soil	35.01	1.20 $\pm$ 0.02	1.30 $\pm$ 0.03	56.60	61.32
	水体 Water	—	(0.27 $\pm$ 0.01) $\times 10^{-3}$	(0.08 $\pm$ 0.02) $\times 10^{-4}$	36.02 $\times 10^{-3}$	1.07 $\times 10^{-3}$
	合计 Total				533.68a	537.20b
CK	耕作区土壤 Farming soil	19.00	1.40 $\pm$ 0.01	1.50 $\pm$ 0.03	457.23	489.89
	底泥 Ditch bottom mud	55.00	1.60 $\pm$ 0.01	1.20 $\pm$ 0.03	18.65	13.99
	边沟土 Side ditch soil	35.01	1.60 $\pm$ 0.01	1.50 $\pm$ 0.02	75.47	70.75
	水体 Water	—	(0.20 $\pm$ 0.00) $\times 10^{-3}$	(0.06 $\pm$ 0.02) $\times 10^{-4}$	26.68 $\times 10^{-3}$	0.80 $\times 10^{-3}$
	合计 Total				551.38a	574.63a

注:表中数据为平均值 $\pm$ 标准误差。不同小写字母表示处理间差异达到显著水平 ( $P<0.05$ )。“—”表示无数值。下同。

Note: The data in the table are mean  $\pm$  SE. Different lowercase letters indicate significant difference between VE and CK modes( $P<0.05$ ). “—” means no data. The same as below.

表 2 试验田各土壤区基本数据

Table 2 The basic characteristics of each soil region in the vegetable field

项目 Item	体积 Volume (m <sup>3</sup> )	土壤密度 Soil density (g·cm <sup>-3</sup> )	土壤总重量 Total weight (kg)
耕作区土壤 Farming soil	288.00	1.40±0.20	403.20×10 <sup>3</sup>
底泥 Ditch bottom mud	25.90	1.00±0.10	25.90×10 <sup>3</sup>
边沟土 Side ditch soil	55.83	1.30±0.10	72.58×10 <sup>3</sup>

2.1.2 花菜种植前系统外 TN/TP 输入值

系统外 TN/TP 输入主要由施用肥料、作物幼苗和水产动物幼苗、灌溉水、大气沉降等带入。由表 3 可见, VE 和 CK 模式肥料、花菜幼苗、灌溉水、大气沉降等输入量相同。种植花菜施用肥料带入 TN/TP 总量分别为 44.50kg 和 14.69kg。花菜种植密度为 27000 株·hm<sup>-2</sup>, 幼苗平均单重为 5.00g, 故花菜幼苗总鲜重为 135.00kg·hm<sup>-2</sup>, 因此系统外带入 TN 总量为 135.00kg·hm<sup>-2</sup>×1440m<sup>2</sup>×(1-87.00%)×38.70g·kg<sup>-1</sup>=97.80g。同理, 系统外带入 TP 总量为 12.26g。花菜整个种植周期需引入灌溉水约为 40m<sup>3</sup>, 根据其氮磷含量分别为 1.50mg·kg<sup>-1</sup>和 0.20mg·kg<sup>-1</sup>计算, 带入的 TN/TP 总量分别为 60.00g 和 8.00g。本试验田中氮沉降值为 5.23kg。

与 CK 模式不同, VE 模式还引入了螃蟹、黄鳝和鱼幼苗, 系统水体面积为 304m<sup>2</sup>, 利用表 3 中各自氮磷含量, 得出水产动物幼苗带入的 TN/TP 总量分别为 58.98g 和 15.47g。因此, VE 模式 TN/TP 输入

总量分别为 49.95kg 和 14.73kg, CK 模式 TN/TP 输入总量分别为 49.89kg 和 14.71kg。

综上所述, VE 模式系统 TN/TP 背景值为 533.68kg 和 537.20kg; 输入值为 49.95kg 和 14.73kg。CK 模式系统 TN/TP 背景值为 551.38kg 和 574.63kg; 输入值为 49.89kg 和 14.71kg。花菜种植季, CK 模式 TP 背景值高出 VE 模式 6.95% (P<0.05), 两种模式间 TN 背景值、TN/TP 输入总量无显著差异。

2.1.3 系统外 TN/TP 输入占比

对于 TN 输入而言, 化肥输入 44.50kg, 分别占 VE 模式和 CK 模式总输入量的 89.09%和 89.20%。相应地, 作物和水产动物幼苗占比较小, 仅分别占 VE 模式和 CK 模式总输入量的 0.31%和 0.20%。对于 TP 输入而言, 化肥输入 14.69kg, 占 VE 模式和 CK 模式总输入量的 99.73%和 99.86%。相应地, 作物和水产动物幼苗的 TP 总量分别占 VE 模式和 CK 模式总输入量的 0.19%和 0.08%。

表 3 花菜种植季种养复合系统 (VE) 与单一种植系统 (CK) TN/TP 含量及输入值

Table 3 The TN/TP input in the planting and breeding system(VE) and singly planting system(CK) in cauliflower plantation season

模式 Mode	投入物 Input	含水量 Water content (%)	N 含量 N content (g·kg <sup>-1</sup> )	P 含量 P content (g·kg <sup>-1</sup> )	N 总量 Total N (kg)	P 总量 Total P (kg)
VE	肥料 Fertilizer	—	—	—	44.50	14.69
	花菜 Cauliflower	87.00	38.70±1.94	4.85±0.25	97.80×10 <sup>-3</sup>	12.26×10 <sup>-3</sup>
	黄鳝 Eel	81.52	30.10±1.50	5.80±0.30	11.41×10 <sup>-3</sup>	2.20×10 <sup>-3</sup>
	鱼 Fish	76.49	94.70±4.73	22.90±1.15	30.46×10 <sup>-3</sup>	7.37×10 <sup>-3</sup>
	螃蟹 Crab	71.84	53.30±2.67	18.40±0.90	17.11×10 <sup>-3</sup>	5.91×10 <sup>-3</sup>
	灌溉水 Irrigation water	—	(1.50±0.01)×10 <sup>-3</sup>	(0.20±0.00)×10 <sup>-3</sup>	60.00×10 <sup>-3</sup>	8.00×10 <sup>-3</sup>
	大气沉降 Atmospheric deposition	—	—	—	5.23	—
	合计 Total				49.95a	14.73a
CK	肥料 Fertilizer	—	—	—	44.50	14.69
	花菜 Cauliflower	87.00	38.70±1.94	4.85±0.25	97.80×10 <sup>-3</sup>	12.26×10 <sup>-3</sup>
	灌溉水 Irrigation water	—	(1.50±0.01)×10 <sup>-3</sup>	(0.20±0.00)×10 <sup>-3</sup>	60.00×10 <sup>-3</sup>	8.00×10 <sup>-3</sup>
	大气沉降 Atmospheric deposition	—	—	—	5.23	—
	合计 Total				49.89a	14.71a

## 2.2 菜田种养复合系统的氮磷输出量分析

### 2.2.1 花菜收获后土壤及水样中 TN/TP 现值

花菜收获后分别对 VE 和 CK 模式耕作区土壤、底泥土壤、边沟土壤和水体中氮磷含量进行测定(表 4)。由表 4 并结合表 2 中基本数据特征可知, VE 模式土壤 TN/TP 总量分别为 404.24kg 和 520.73kg; 而 CK 模式土壤 TN/TP 总量分别为 386.59、533.71kg。种植季水体深度为 0.50m, 故其体积为 86.56m<sup>3</sup>, VE 和 CK 模式水体 TN/TP 总量现值分别为 56.26、77.90g 和 54.53、48.47g。

### 2.2.2 系统向外界 TN/TP 输出值

系统向外界 TN/TP 输出值包括花菜和水产动物所输出的 TN/TP 量(表 5)。按菜地面积 1440m<sup>2</sup> 计算, VE 模式中花球、茎叶输出 TN 总量分别为 12.63、20.42kg, TP 分别为 1.96、3.71kg; CK 模式中花球、茎叶输出 TN/TP 总量分别为 12.74、20.56kg 和 1.97、3.74kg。根部全量还田, 参与系统养分循环, VE 模式和 CK 模式根部 TN/TP 总量分别为 2.78、0.83kg 和 2.83、0.84kg。

VE 模式引入了水产动物, 使得系统的 TN 和 TP

表 4 花菜收获季种养复合系统(VE)与单一种植系统(CK)土壤和水体中 TN/TP 现值

Table 4 The N and P content in the planting and breeding system(VE) and singly planting system(CK) in the cauliflower harvest season

模式 Mode	样品 Sample	含水量 Water content (%)	TN 含量 TN content (g·kg <sup>-1</sup> )	TP 含量 TP content (g·kg <sup>-1</sup> )	N 总量 Total N (kg)	P 总量 Total P (kg)
VE	耕作区土壤 Farming soil	19.00	1.00±0.02	1.40±0.04	326.59	457.23
	底泥 Ditch bottom mud	55.00	1.40±0.04	1.40±0.03	16.32	16.32
	边沟土 Side ditch soil	35.00	1.30±0.05	1.00±0.06	61.33	47.18
	水体 Water	—	(0.65±0.01)×10 <sup>-3</sup>	(0.90±0.00)×10 <sup>-3</sup>	56.26×10 <sup>-3</sup>	77.90×10 <sup>-3</sup>
	合计 Total				404.30a	520.81a
CK	耕作区土壤 Farming soil	19.00	1.00±0.02	1.40±0.05	326.59	457.23
	底泥 Ditch bottom mud	55.00	1.10±0.02	1.30±0.06	12.82	15.15
	边沟土 Side ditch soil	35.00	1.00±0.04	1.30±0.03	47.18	61.33
	水体 Water	—	(0.63±0.02)×10 <sup>-3</sup>	(0.56±0.04)×10 <sup>-3</sup>	54.53×10 <sup>-3</sup>	48.47×10 <sup>-3</sup>
	合计 Total				386.64a	533.76a

表 5 花菜收获季种养复合系统(VE)与单一种植系统(CK)产量及 TN/TP 输出量

Table 5 The production and TN/TP output in the planting and breeding system(VE) and singly planting system(CK) in the cauliflower harvest season

模式 Mode	产出物 Output	产量 Yield (kg·hm <sup>-2</sup> )	含水量 Water content (%)	N 含量 N content (g·kg <sup>-1</sup> )	P 含量 P content (g·kg <sup>-1</sup> )	N 总量 Total N (kg)	P 总量 Total P (kg)
VE	花球 Curd	22650.00±566.17	92.00	48.40±2.02	7.50±0.45	12.63	1.96
	根部 Root	3870.00±97.48	55.00	11.10±0.42	3.30±0.28	2.78	0.83
	茎叶 Stem leaf	56625.00±1416.33	93.00	36.30±0.75	6.60±1.21	20.42	3.71
	黄鳝 Eel	262.50±10.50	76.80	112.46±5.63	47.87±2.40	208.20×10 <sup>-3</sup>	88.62×10 <sup>-3</sup>
	鱼 Fish	135.00±6.50	70.26	94.70±4.35	22.90±1.15	115.58×10 <sup>-3</sup>	27.95×10 <sup>-3</sup>
	螃蟹 Crab	187.50±9.00	69.45	53.30±2.67	18.40±0.90	92.81×10 <sup>-3</sup>	32.04×10 <sup>-3</sup>
	合计 Total					36.25a	6.65a
CK	花球 Curd	22845.00±561.49	92.00	48.40±2.82	7.50±0.45	12.74	1.97
	根部 Root	3930.00±100.05	55.00	11.10±0.92	3.30±0.25	2.83	0.84
	茎叶 Stem leaf	57000.00±1325.21	93.10	36.30±0.77	6.60±1.24	20.56	3.74
	合计 Total					36.13a	6.55a

总产出和平衡特征发生改变。VE 模式中螃蟹、黄鳝和鱼的产量分别为 187.50、262.50、135.00kg·hm<sup>-2</sup>；根据水体面积 304m<sup>2</sup> 计算，螃蟹输出的 TN/TP 分别为 92.81g 和 32.04g，黄鳝输出的 TN/TP 分别为 208.20g 和 88.62g，鱼输出的 TN/TP 分别为 115.58g 和 27.95g。因此，水产动物输出的 TN/TP 总量分别为 416.59g 和 148.61g。

VE 模式系统 TN/TP 现值分别为 404.30kg 和 520.81kg；产出（含根部）总量分别为 36.25kg 和 6.65kg。CK 模式系统 TN/TP 现值分别为 386.64kg 和 533.76kg；产出（含根部）总量分别为 36.13kg 和 6.55kg。收获季节，两种模式间 TN/TP 现值、输出总量均无显著差异。

2.2.3 系统外 TN/TP 输出占比

对于 TN 输出而言，花菜花球占 VE 模式和 CK 模式总输出量（根部不计入）的 37.74%和 38.26%。相应地，水产动物占比较小，占 VE 模式 TN 总输出

量的 1.24%。对于 TP 输出而言，花球占 VE 模式和 CK 模式总输出量（根部不计入）的 33.69%和 34.50%。相应地，水产动物占比较小，占 VE 模式 TP 总输出量的 2.55%。

2.3 菜田种养复合系统的氮磷平衡分析

2.3.1 水土环境中 TN/TP 盈余分析

对于土壤 TN/TP 截存量而言，应以收获后与种植前所测数据之差值计算（式 8）。VE 模式和 CK 模式土壤 TN/TP 截存量分别为-129.40、-16.47kg 和 -164.76、-40.92kg。对于水体 TN/TP 截存量而言，应以收获后与种植前所测数据之差计算（式 9），因此，VE 模式和 CK 模式水体 TN/TP 截存量分别为 20.24、76.83g 和 27.85、47.67g。根据式（10）可得，VE 模式的系统 TN/TP 盈余量分别为-110.12kg 和 -6.65kg。由表 6 可知，CK 模式氮磷亏损显著高于 VE 模式（P<0.05），说明 VE 模式有助于减少系统 TN/TP 损失。

表 6 种养复合系统（VE）与单一种植系统（CK）TN/TP 平衡分析

Table 6 The analysis of the balance characteristics of TN/TP in the planting and breeding system(VE) and singly planting system(CK)

		N 总量 Total N(kg)		P 总量 Total P(kg)	
		VE	CK	VE	CK
输入 Input	肥料 Fertilizer	44.50	44.50	14.69	14.69
	花菜幼苗 Cauliflower seedling	97.80×10 <sup>-3</sup>	97.80×10 <sup>-3</sup>	12.26×10 <sup>-3</sup>	12.26×10 <sup>-3</sup>
	黄鳝幼苗 Eel seedling	11.41×10 <sup>-3</sup>	—	2.20×10 <sup>-3</sup>	—
	鱼幼苗 Fish seedling	30.46×10 <sup>-3</sup>	—	7.36×10 <sup>-3</sup>	—
	螃蟹幼苗 Crab seedling	17.11×10 <sup>-3</sup>	—	5.91×10 <sup>-3</sup>	—
	灌溉水 Irrigation water	60.00×10 <sup>-3</sup>	60.00×10 <sup>-3</sup>	8.00×10 <sup>-3</sup>	8.00×10 <sup>-3</sup>
	大气沉降 Atmospheric deposition	5.23	5.23	—	—
	合计 Total	49.95a	49.89a	14.73a	14.71a
输出 Output	花球 Curd	12.63	12.74	1.96	1.97
	茎叶 Stem and leaf	20.42	20.56	3.71	3.74
	黄鳝 Eel	208.20×10 <sup>-3</sup>	—	88.62×10 <sup>-3</sup>	—
	鱼 Fish	115.58×10 <sup>-3</sup>	—	27.95×10 <sup>-3</sup>	—
	螃蟹 Crab	92.81×10 <sup>-3</sup>	—	32.04×10 <sup>-3</sup>	—
	合计 Total	33.47a	33.30a	5.82a	5.71a
循环量 Circulation content	根部 Root	2.78	2.83	0.83	0.84
	土壤截存量 Soil sequestration	-129.40	-164.76	-16.47	-40.92
	水体截存量 Water sequestration	20.24×10 <sup>-3</sup>	27.85×10 <sup>-3</sup>	76.83×10 <sup>-3</sup>	47.67×10 <sup>-3</sup>
	系统盈余量 System surplus	-110.12b	-145.31a	-6.65b	-31.03a
	系统总输出/输入 System output/input (%)	67.01a	66.75a	39.51a	38.82a

### 2.3.2 菜田种养复合模式 TN/TP 平衡特征

VE 模式与 CK 模式的差异主要为水产动物的输入与输出。花菜种植前, VE 模式水产动物幼苗的 TN 输入量为 0.06kg; 花菜收获后, VE 模式中水产动物 TN 输出量为 0.42kg。因此, VE 模式中水产动物的生长输出也是系统 TN 的重要能量流向。VE 和 CK 模式系统 TN 盈余量分别为-110.12kg 和-145.31kg, 即表观损失量分别为 110.12kg 和 145.31kg, 说明两个模式中系统 TN 总量均有损失。VE 和 CK 模式系统 TP 表观损失量分别为 6.65kg 和 31.03kg, 说明两系统中 TP 总量均有损失。VE 模式中系统 TN/TP 表观损失低于 CK 模式, 分别降低了 35.19kg 和 24.38kg。

系统 TN/TP 的输出/输入比可代表系统表观养分利用情况<sup>[8]</sup>。VE 模式的 TN/TP 输出/输入比分别为 67.01%、39.51%, CK 模式分别为 66.75%、38.82%, 为了维持系统的稳定产出与生态平衡, 均需要额外添加 N/P, 且 CK 模式需求比 VE 模式多出 0.26 个和 0.69 个百分点。

## 3 讨论与结论

### 3.1 讨论

传统农业以大量施用化肥、农药为特点, 由此带来了系列负面效应, 例如, 土壤板结、面源污染、生物多样性减少及产量不可持续性问题<sup>[15]</sup>。近年来, 以低污染、低能耗为基础的立体种养复合模式成为重要的生态农业生产模式, 有利于系统内生循环, 在改善环境、提升农产品品质、提高农业效益等方面优势显著。但有关水旱共作的菜田种养复合系统的养分循环与平衡特征方面的研究报道极少。本研究中, TN/TP 主要输出途径是花球和茎叶部, 表明初级生产在该系统 N 和 P 循环中十分重要。VE 模式由于水产动物的存在使其 TN/TP 输出均高于 CK 模式, 水产动物输出的 TN/TP 分别为 0.42kg 和 0.15kg, 分别占总输出量的 1.25%和 2.58%。该模式中的水产动物通过摄食小飞虫、系统中的浮游动物、有机养分、碎屑等, 将 CK 模式中流失的物质和能量截留并利用, 从而提高系统输出量, 也有利于系统养分循环<sup>[16]</sup>。在以往稻田种养系统中也有类似发现, 稻鸭共作处理能够维持系统养分平衡, 该模式 N、P 归还率是施用化肥处理的 4.5 倍和 3.7 倍<sup>[17]</sup>。孙琳琳等<sup>[18]</sup>指出, 复合种养模式可避免传统养殖模式下由

饲料残余引起的水体富营养化; 本试验中观测到水体 TN/TP 差异不大, 有待于后续深入研究。

N、P 养分施入土壤后主要有三种去向, 一是被作物吸收利用; 二是以不同形态残留在土壤中供下季作物利用; 三是损失到大气和水体造成环境污染, 包括氨挥发、反硝化、淋溶与径流损失等<sup>[19]</sup>。营养元素很容易随水流作用(灌溉、降雨等)直渗到地下或侧渗到排水沟内, 从而导致 N、P 损失引发面源污染<sup>[20]</sup>。花菜种植季, CK 模式系统土壤 TP 背景值显著高于 VE 模式 ( $P<0.05$ ), 推测可能由于长期施用化肥导致作物吸收障碍, 从而造成 P 素积累。本试验中, VE 模式和 CK 模式系统 TN/TP 盈余量分别为-110.12、-6.65kg 和-145.31、-31.03kg, 即在花菜种植季两种模式均有不同程度的 TN/TP 表观损失。VE 模式 TN/TP 的总输出/总输入比分别为 67.01%和 39.51%, 而 CK 模式为 66.75%和 38.82%, 表明系统输入的 TN/TP 除被收获的农产品(作物、水产动物)吸收外, 仍有部分养分盈余未被吸收利用, 剩余氮磷残留于土壤中或通过挥发、渗漏等方式流失<sup>[21-22]</sup>, 同时表明 VE 模式的系统养分利用效率高于 CK 模式, 这与人研究结果一致<sup>[10]</sup>。

VE 模式下水产动物的扰动可疏松土壤, 增加土壤孔隙度, 改善土壤结构, 促进养分循环, 而 CK 模式相对更易使养分流失到沟底(底泥)或者地下水<sup>[11,23]</sup>。因此, 有必要测定耕作区、底泥、边沟等土壤 N、P 含量变化, 且取样深度需要细化。本研究中, 不同模式下的底泥深度均按 0.1m 计算, 但实际深度变化可能有一定偏差。VE 模式养殖的黄鳝、螃蟹喜在洞中潜伏, 使水产动物产量偏低。此外, 其它因素也需考虑, 例如, 沟中水生植物的生物量未计入, 将导致 TN/TP 总量输出偏低; 0.2m 以下的耕作区也可能存在 N、P 含量的波动<sup>[24]</sup>等。

VE 模式创新性地将旱地种植与水产动物养殖相耦合, 扩大了作物和水产选择范围, 改善了饲料和化学肥料投入量大, 以及系统单一造成的资源浪费、收益低等问题, 从而最大限度保护生态环境, 实现双赢<sup>[9]</sup>。该模式能促进资源合理利用<sup>[11,25]</sup>, 提高系统自我稳态与维持力, 提升作物品质。此外, VE 模式中模仿野生条件养殖黄鳝、螃蟹, 养殖密度低、单价高, 适合订单贸易<sup>[10,26]</sup>。计算可得<sup>[10]</sup>, 本试验中 VE 模式系统净利润高出传统模式(CK) 27650

元·hm<sup>-2</sup>,提高了64.59%,且底泥土壤可根据需求翻到陆地(菜地)中,从而起到肥田提质和减少肥料施用的效果。但前期相关设施(诱集灯、防逃设施)、人工成本、技术知识等投入<sup>[27]</sup>使得复合生产模式成本较高,可能会降低农民生产积极性。同时,应对花菜及水产动物的安全性指标、品质性状指标、商品性特征等进一步评估与分析。

### 3.2 结论

养分输入与支出间的平衡状况是表征农田养分管理是否可持续的重要指标。菜田种养复合模式中的系统TN/TP输出/输入比分别为67.01%和39.51%,均高于非种养单一种植模式的66.75%和38.82%;当前投入水平下,两种模式中系统TN/TP盈余量均为负,菜田种养复合模式减少了系统N、P表观损失35.19kg和24.38kg。两种模式均需投入适量肥料以利于作物产出和系统平衡。

### 参考文献 References

- [1] 奚业文,周洵.稻虾连作共作稻田生态系统中物质循环和效益初步研究[J].中国水产,2016(3):78-82.  
Xi Y W,Zhou X A preliminary study on the material cycle and benefit of rice-crayfish continuous cropping and co-cropping system in paddy fields[J].China Fisheries, 2016(3):78-82.(in Chinese)
- [2] 朱小童.种养复合型家庭农场的业绩评价[D].南京:南京农业大学,2017:1-65.  
Zhu X T.Performance evaluation of breeding and planting family farm[D].Nanjing:Nanjing Agricultural University, 2017:1-65.(in Chinese)
- [3] 隆斌庆,陈灿,黄璜,等.稻田生态种养的发展现状与前景分析[J].作物研究,2017,31(6):607-612.  
Long B Q,Chen C,Huang H,et al.Analysis on the development status and prospect of ecological planting and breeding system in rice field[J].Crop Research,2017, 31(6):607-612.(in Chinese)
- [4] 张翰林,吕卫光,陶晓斌,等.一种种养复合的菜田蟾蜍生态养殖方法[P].2016,CN201610389200.X.  
Zhang H L,Lv W G,Tao X B,et al.The ecological integrated farming methods of breeding toad in vegetable field[P].2016,CN201610389200.X.(in Chinese)
- [5] 张家宏,王桂良,王守红,等.水生蔬菜+鸭共作技术集成及效益分析[J].浙江农业科学,2016,57(10):1706-1709.  
Zhang J H,Wang G L,Wang S H,et al.Technology integration and benefit analysis of aquatic vegetable and duck[J].Journal of Zhejiang Agricultural Sciences,2016, 57(10):1706-1709.(in Chinese)
- [6] 吴永琼,李玉洪,潘玲华,等.一种蔬菜-鱼立体共生的种养系统和种养方法[P].2018,CN201810637370.4.  
Wu Y Q,Li Y H,Pan L H,et al.The stereo integrated vegetable-fish system and methods[P].2018,CN201810637 370.4.(in Chinese)
- [7] 李成芳,曹凑贵,汪金平,等.稻鸭稻鱼共作生态系统 N 素平衡的研究[J].农业环境科学学报,2008,27(4):1326-1334.  
Li C F,Cao C G,Wang J P,et al.Studies on nitrogen cycling in integrated rice-duck,rich-fish ecosystems[J].Journal of Agro-Environment Science,2008,27(4):1326-1334.(in Chinese)
- [8] 倡国涵,袁家富,彭成林,等.稻虾共作模式氮和磷循环特征及平衡状况[J].中国生态农业学报,2019,27(9): 1309-1318.  
Si G H,Yuan J F,Peng C L,et al.Nitrogen and phosphorus cycling characteristics and balance of the integrated rice-crayfish system[J].Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019,27(9):1309-1318.(in Chinese)
- [9] 王强盛,王晓莹,杭玉浩,等.稻田综合种养复合模式及生态效应[J].中国农学通报,2019,35(8):46-51.  
Wang Q S,Wang X Y,Hang Y H,et al.Combination modes and ecological effects of planting-breeding ecosystem in rice field[J].Chinese Agricultural Science Bulletin,2019, 35(8):46-51.(in Chinese)
- [10] 李双喜,吕卫光,郑宪清,等.都市型郊区循环农业发展模式探讨:以上海市崇明区菜蚓鳢立体种养模式为例[J].上海农业学报,2017,33(6):23-27.  
Li S X,Lv W G,Zheng X Q,et al.Circular agriculture development models in the suburbs of metropolis:Case study of stereo cycling model of vegetable-earthworm-eel[J].Acta Agriculturae Shanghai,2017,33(6):23-27.(in Chinese)
- [11] Zheng X Q,Lv W G,Song K,et al.Effects of a vegetable-eel-earthworm integrated planting and breeding system on bacterial community structure in vegetable fields[J].Scientific Reports,2018,8(1):9520.
- [12] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技

- 出版社,2000:12-226.
- Lu R K. Analytical methods of soil agricultural chemistry [M]. Beijing: China Agricultural Science Technology Press, 2000:12-226. (in Chinese)
- [13] 刘赵帆, 张国斌, 郁继华, 等. 氮肥形态及配比对花椰菜产量、品质和养分吸收的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(7):1923-1930.
- Liu Z F, Zhang G B, Yu J H, et al. Effects of different nitrogen forms and their ratios on broccoli yield, quality, and nutrient absorption[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(7):1923-1930. (in Chinese)
- [14] 李丹丹, 孟顺龙, 胡庚东, 等. 稻-蟹复合生态种养系统氮磷平衡及经济效益研究[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(18):188-191.
- Li D D, Meng S L, Hu G D, et al. Study on nitrogen and phosphorus balance and economic benefit in rice-eriocheir sinensis mutual ecosystem[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018, 46(18):188-191. (in Chinese)
- [15] 丘雯文, 钟涨宝, 李兆亮, 等. 中国农业面源污染排放格局的时空特征[J]. 中国农业资源与区划, 2019, 40(1):26-34.
- Qiu W W, Zhong Z B, Li Z L, et al. Spatial-temporal variations of agricultural non-point source pollution in China[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2019, 40(1):26-34. (in Chinese)
- [16] 李成芳, 曹凑贵, 汪金平, 等. 稻鸭、稻鱼共作生态系统土壤可溶性有机 N 的动态和损失[J]. 生态学报, 2009, 29(5):2451-2550.
- Li C F, Cao C G, Wang J P, et al. Dynamics of soil soluble organic N in rice-duck and rice-fish ecosystems[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(5):2541-2550. (in Chinese)
- [17] 王文博. 稻鸭共作及沼液施用对水稻产量和稻田系统养分平衡的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2014:1-89.
- Wang W B. Effects of rice yield and nutrient balance of paddy field system under rice-duck and biogas slurry[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014:1-89. (in Chinese)
- [18] 孙琳琳, 宋协法, 李薏, 等. 外加植物碳源对人工湿地处理海水循环水养殖尾水脱氮性能的影响[J]. 环境工程学报, 2019, 13(6):1382-1390.
- Sun L L, Song X F, Li M, et al. Nitrogen removal performance of artificial wetland with plant carbon source from seawater circulating aquaculture tail water[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2019, 13(6):1382-1390. (in Chinese)
- [19] 侯金权. 洞庭湖区菜园土 N、P 养分径流淋失及其与蔬菜施肥的关系[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2009:1-53.
- Hou J Q. N and P leaching and its relations with fertilization in vegetable soils in Dongting Lake area[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2009:1-53. (in Chinese)
- [20] 肖建南, 张爱平, 刘汝亮, 等. 生物炭施用对稻田氮磷肥流失的影响[J]. 中国农业气象, 2017, 38(3):163-171.
- Xiao J N, Zhang A P, Liu R L, et al. Effects of biochar application on the losses of nitrogen and phosphorus in surface water of paddy field[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2017, 38(3):163-171. (in Chinese)
- [21] 叶洁琼. 氮素在盐碱稻田中的迁移转化规律研究[D]. 上海: 东华大学, 2012:1-67.
- Ye J Q. Transport and transformation of nitrogen element in saline-alkali paddy soil[D]. Shanghai: Donghua University, 2012:1-67. (in Chinese)
- [22] Li F B, Feng J F, Zhou X Y, et al. Impact of rice-fish/shrimp co-culture on the  $N_2O$  emission and  $NH_3$  volatilization in intensive aquaculture ponds[J]. Science of the Total Environment, 2019, 655:284-291.
- [23] 朱捷. 鱼藕共生模式下藕田节肢动物多样性及其重要害虫的发生动态[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2015:1-85.
- Zhu J. Dynamics of the important insect pests and arthropod diversity in the fish-lotus symbiotic system fields[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2015:1-85. (in Chinese)
- [24] 胡志平, 郑祥民, 黄宗楚, 等. 上海郊区罗店旱地氮素的淋溶研究[J]. 长江流域资源与环境, 2007, 16(5):624-627.
- Hu Z P, Zheng X M, Huang Z C, et al. Characteristics of N-element leakage in the dry land in Luodian in Shanghai suburbs[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2007, 16(5):624-627. (in Chinese)
- [25] 张帆, 隋鹏, 陈源泉, 等. “稻鸭共生”生态系统稻季 N、P 循环[J]. 生态学报, 2011, 31(4):1093-1100.
- Zhang F, Sui P, Chen Y Q, et al. Nitrogen and phosphorus cycling from rice-duck mutual ecosystem during late rice growth season[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(4):1093-

- 1100.(in Chinese)
- [26] 李涛,范洁群,钱振官,等.稻鳊种养田杂草群落组成及不同除草剂对黄鳊生长的影响[J].植物保护,2019,45(2): 224-229.
- Li T,Fan J Q,Qian Z G,et al.Composition of weed communities and herbicides application technology in integrated farming of rice and *Monopterus albus*[J].Plant Protection,2019,45(2):224-229.(in Chinese)
- [27] Muhammad A,Liu J,Geng Y C,et al.Co-culture of rice and aquatic animals:an integrated system to achieve production and environmental sustainability[J].Journal of Cleaner Production,2020,249:119310.