

胡 博, 罗良国, 武永锋, 等. 环竺山湾湖小流域种植业面源污染减排潜力研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(7): 1368–1375.

HU Bo, LUO Liang-guo, WU Yong-feng, et al. Potential of mitigating nonpoint source pollution from farmlands around Zhushan bay in Tai Lake watershed[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(7): 1368–1375.

## 环竺山湾湖小流域种植业面源污染减排潜力研究

胡 博<sup>1</sup>, 罗良国<sup>1\*</sup>, 武永锋<sup>1</sup>, 王 艳<sup>2</sup>, 王 芊<sup>1</sup>, 王娜娜<sup>1</sup>, 杨林章<sup>3</sup>

(1. 农业清洁流域创新团队, 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 农业部农业环境重点实验室, 北京 100081; 2. 中国农业科学院农业经济与发展研究所, 北京 100081; 3. 江苏省农科院农业资源与环境研究所, 南京 210014)

**摘 要:** 农田面源污染一直被认为是竺山湾湖水水质恶化的重要因素之一。采用实地调研农户的方法考察了环竺山湾湖小流域粮食作物(水稻、小麦)、蔬菜、果园生产在“十二五”初期养分投入状况, 结合太湖流域“十一五”期间已获示范验证、可推广应用的环境友好型种植技术模式或实践, 估算了环竺山湾湖小流域种植业生产控污减排能力。结果表明, 基于目前的稻麦、蔬菜和果树种植面积, 规模化应用稻-麦施肥减量技术和稻-绿肥技术轮作模式可分别实现无机 N 投入减量 132.4、424.3 t·a<sup>-1</sup> 和总 N 减排 20、42.3 t·a<sup>-1</sup>; 蔬菜种植优化技术模式可减少无机 N 投入 993.7 t·a<sup>-1</sup> 和减排总 N 181.3 t·a<sup>-1</sup>; 果园优化施肥与三叶草截流控害集成技术模式, 至少可实现节省无机 N 投入 1000 t·a<sup>-1</sup> 和减排总 N 116.8 t·a<sup>-1</sup>。综上, 环竺山湾湖小流域种植业生产已较“十一五”时期无机 N 投入水平明显降低, 但依然还有减量空间; 有机肥施用量逐步提升, 但符合竺山湾湖小流域的最适施用水平还有待深入研究。最后给出了环竺山湾湖小流域农田面源污染规模化防控建议, 以期改善竺山湾湖水水质进而确保太湖水质安全提供支持。

**关键词:** 养分 N 投入; 环境友好型种植技术模式; 农田面源污染; 减排潜力; 环竺山湾湖小流域

**中图分类号:** S143.1    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1672-2043(2016)07-1368-08    doi:10.11654/jaes.2016.07.020

### Potential of mitigating nonpoint source pollution from farmlands around Zhushan bay in Tai Lake watershed

HU Bo<sup>1</sup>, LUO Liang-guo<sup>1\*</sup>, WU Yong-feng<sup>1</sup>, WANG Yan<sup>2</sup>, WANG Qian<sup>1</sup>, WANG Na-na<sup>1</sup>, YANG Lin-zhang<sup>3</sup>

(1. Agricultural Clean Watershed Group, Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory for Agricultural Environment of Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China; 2. Institute of Agricultural Economics and Development, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 3. Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

**Abstract:** Farmland nonpoint source pollution has been recognized as one of the important factors deteriorating water quality of Zhushan bay in Tai Lake watershed. Those growers planting grain crops, vegetables and fruits around Zhushan bay were interviewed on nutrient inputs to farmlands. Based on the environmental-friendly agricultural technology practices that were demonstrated, verified, and regionally extended during the 11th five-year planning period, the potential of mitigating nonpoint source pollution from farmlands around Zhushan bay in Tai Lake watershed was estimated. Results showed that, under the current acreage of growing rice-wheat, vegetables and fruits, the large-scale applications of environmental-friendly agricultural technology practices, i.e., rice-wheat fertilization reduction technology and rice-green manure rotation pattern, could further reduce inorganic N inputs by 132.4 t·a<sup>-1</sup> and 424.3 t·a<sup>-1</sup>, and mitigate the total N load of 42.3 t·a<sup>-1</sup> and 20 t·a<sup>-1</sup>, respectively; vegetable optimized planting mode could realize a reduction of 993.7 t·a<sup>-1</sup> inorganic N and a mitigation of 181.3 t·a<sup>-1</sup> total N; orchard integration mode of optimum fertilization, run-off, and pest control with clover could cut at least 1000 t·a<sup>-1</sup> of inorganic N inputs and mitigate 116.8 t·a<sup>-1</sup> of total N surface runoff loss. Compared with the 11th five-year planning period, the present results also

收稿日期: 2015-12-30

基金项目: “十二五”国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07101-004, 2014ZX07105-001); 中国农科院农业清洁流域创新项目、环境友好型农业技术生态补偿中韩合作项目和德合作项目

作者简介: 胡 博(1988—), 男, 硕士研究生, 研究方向为农业面源污染防治治理与农业清洁生产生态补偿机制政策。E-mail: 75hubo@163.com

\* 通信作者: 罗良国 E-mail: luolianguo@caas.cn

showed that increasing uses of organic fertilizers could additionally reduce inorganic nitrogen inputs in local farmland. However, further research is necessary to find the most appropriate application level of organic fertilizers for the region. This study also proposed a scale prevention and control of farmland nonpoint source pollution around Zhushan bay in Tai Lake watershed in order to provide supports for water quality safety of Tai Lake.

**Keywords:** nutrient input; environmental-friendly farming technology; farmland nonpoint source pollution; mitigation potential; Zhushan bay in Tai Lake watershed

国家“十一五”水专项研究成果表明,太湖流域污染负荷中 58%的总氮和 40%的总磷来自农业面源污染,而农业面源中种植业源污染对太湖总氮和总磷的贡献率分别高达 29%和 19%<sup>[1-3]</sup>,其根源在于种植业生产中不合理的肥料投入。一方面,在太湖地区种植业中,化肥的投入比重不断提高,另一方面,每年每公顷土地使用化肥总量(N、P、K 有效成分)已由 20 世纪 80 年代中后期的 25 kg 增加到 45 kg,其中氮素达 30 kg 以上,占 70%以上,而作物吸收的当季氮肥利用率却只有 25%左右<sup>[4]</sup>。竺山湾湖是太湖水域的一部分,属太湖流域水利分区的湖西区,处于湖内水力关系的上游,是太湖接纳地表径流的主要区域。过量施用的肥料养分通过农地地表径流与地下淋溶进入水环境中导致水体污染,因而环竺山湾湖小流域种植业生产活动不可避免地给竺山湾湖水水质带来影响。竺山湾湖终年水质较差<sup>[5]</sup>,与竺山湾湖水功能区划对应的水质标准Ⅲ类(GB 3838—2002)<sup>[6]</sup>比较,竺山湾湖水含氮污染物(TN)超标最严重;与《地表水资源质量评价技术规程》(SL 393—2007)所列营养状态指数(EI)<sup>[7]</sup>比较,竺山湾湖水处于重度富营养化状态。

为此,本研究拟通过现场实地调研农户的方法考察环竺山湾湖小流域粮食作物(水稻和小麦)、蔬菜、果园等种植业生产在“十二五”初期的养分投入状况,通过对数据进行统计分析,得到环竺山湾湖小流域种植业生产中氮肥实际施用量,结合环竺山湾湖小流域所辖直湖港区域“十一五”期间已通过示范验证的、可推广应用的环境友好型种植技术模式的应用,估算环竺山湾湖小流域种植业生产控污减排能力,为竺山湾湖水水质改善提供支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

环竺山湾湖小流域地跨常州市武进区和无锡市宜兴地区,覆盖了前黄镇、雪堰镇、和桥镇、万石镇和周铁镇五个乡镇(图 1)。区域内地势低平,河网稠密,常年平均气温 15~17 ℃,降水量 1117 mm,特别适合

农业生产,并以种植业最为发达,稻田、菜地以及果林占地面积约 1.9 万 hm<sup>2</sup>。近些年,为了追求更高的经济效益,越来越多的稻田改为设施菜地和果园,该流域呈现粮作面积压缩、非粮作面积扩增趋势(表 1),甚至是在湖滨带地区,这加剧了竺山湖水水质进一步恶化的风险。

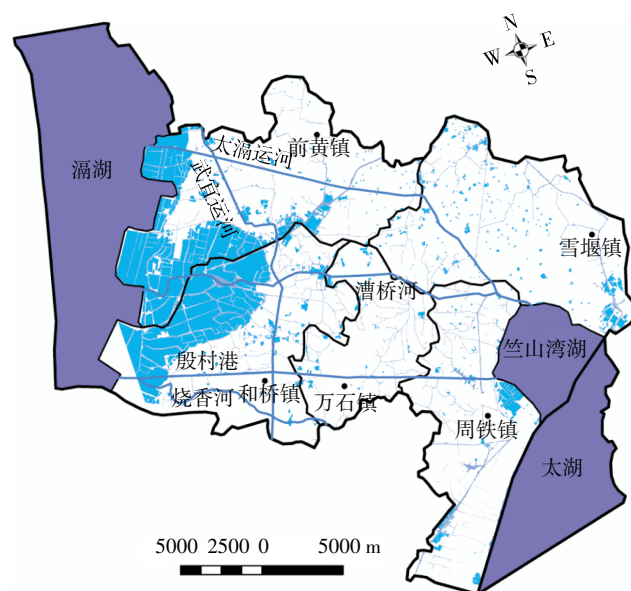


图 1 环竺山湾湖小流域研究区域示意图

Figure 1 Research area around Zhushan bay in Tai Lake watershed

表 1 2012—2013 年度环竺山湾湖小流域 5 乡镇  
种植面积(hm<sup>2</sup>)

Table 1 Farming area around Zhushan bay in Tai Lake watershed  
in 2012—2013(hm<sup>2</sup>)

| 年度   | 小麦       | 水稻       | 油菜    | 蔬菜      | 果园      | 林地      |
|------|----------|----------|-------|---------|---------|---------|
| 2012 | 10 950.8 | 11 308.3 | 438.9 | 2 259.4 | 1 575.9 | 4 576.4 |
| 2013 | 10 682.9 | 10 849.3 | 405.1 | 2 358.1 | 1 959.3 | 4 706.4 |

注:根据常州武进区统计局和无锡宜兴市统计局提供的数据整理。

### 1.2 数据来源

为了解环竺山湾湖小流域种植农户在生产实践中肥料养分投入情况,于 2013 年 5 月、8 月和 11 月,在该区域内 5 个乡镇分别选择 4 自然村落随机抽取农

户进行问卷调查。问卷问题以定性与定量相结合为主,调查采用一对一、面对面访谈形式。因为该区域农业用地主要以耕地、园地为主,林地和牧草地的比重小(常州市武进区土地利用与宜兴市土地利用 2006—2020 年总体规划),调研主要围绕粮食、蔬菜和水果普通种植农户、种植大户、种植专业合作社展开,被访农户共计 200 户,其中有效问卷 180 份。不同大田作物如水稻、小麦、蔬菜和水果种植被访的普通农户、专业大户、合作社比例不同(表 2)。研究中使用的二手数据主要包括常州市武进区与宜兴市农林局和统计局提供的 2012—2013 相关乡镇耕地总面积与相关作物种植面积,以及中科院南京土壤所杨林章研究团队“十一五”期间在太湖流域示范验证的、可推广应用的环境友好型种植技术模式的肥料利用与污染物减排参数。

表 2 不同作物生产被调研农户分布情况

Table 2 Percentages of surveyed farmers growing various crops

| 类别   | 水稻    | 小麦    | 蔬菜    | 果园    |
|------|-------|-------|-------|-------|
| 合作社  | 25.4% | 23.5% | 13.0% | 8.3%  |
| 专业农户 | 23.7% | 17.6% | 80.4% | 50.0% |
| 一般农户 | 50.8% | 58.8% | 6.5%  | 41.7% |

### 1.3 研究方法

本研究中,农户在稻麦、蔬菜和水果生产过程中投入的化肥主要涉及尿素、复合肥和碳铵三种,所投入无机 N 养分量均按照农户所施肥料包装袋上标识的养分含量计算;有机肥料多施用于果园和蔬菜,包括鸡粪、猪粪、兔粪、菜籽饼、豆饼、商品有机肥,其调研农户所投入养分量均按照《中国有机肥料养分志》参数<sup>[8]</sup>汇总计算,而稻麦主粮生产施用有机肥的农户及有机肥施用量都非常少,以文献<sup>[9]</sup>提出的参数计量有机 N 投入。根据不同作物(水稻、小麦、蔬菜和果树)种植土地利用类型,农户传统种植方式下的养分投入水平和污染负荷排放与环境友好型种植技术模式下养分投入水平和污染负荷排放之差,即为环境友好型种植技术模式的控污减排潜力。

## 2 结果与分析

### 2.1 稻麦轮作土地利用模式下种植源污染减排潜力

“十一五”初期,当地农户在稻麦轮作模式的生产过程中,无机肥料 N 投入水平为 $540 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (水稻 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和小麦 $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )<sup>[10-12]</sup>,由表 3 可见,到 2013

年调研时该值已下降至 $490.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,表明近 10 年的农业环保宣传,特别是“十一五”期间各种环保示范项目的实施在引导和推进农户改进施肥习惯和行为方面起到了一定的作用。但与可推荐环境友好型种植技术模式或轮作模式的施肥水平相比,还有很大的节肥提效和控污减排空间。若以农户现在的施肥水平和稻麦轮作模式为对照,基于目前稻麦面积 $1\,459.7 \text{ hm}^2$ 估算,推广优化的减量施肥技术至少还可节省肥料 N 投入量 $132.4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ ;如果采纳应用稻绿肥轮作模式,则节省肥料 N 投入量更多,达到 $424.3 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 。从控污减排的角度,在源头减 N 的稻麦轮作模式下还可减少地表径流和淋失 N 总量 $20 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ ;在稻麦轮作调整为稻-绿肥/豆模式下还可减少地表径流和淋失 N 总量 $42.3 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 。那么两种环境友好型种植技术模式所减排 N 总量分别达到 $152.4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ (源头减量+减排)和 $466.7 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ (源头减量+减排),占投入肥料 N 量的 21.3%和 65.2%,显然稻-绿肥/豆轮作模式控污减排更优。

表 3 环竺山湾湖小流域农田优化稻麦轮作模式面源污染减排潜力( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )

Table 3 Potential of mitigating farmland nonpoint source pollution under optimized modes of paddy rice and wheat rotation system around Zhushan bay in Tai Lake watershed( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )

| 农户习惯种植模式<br>无机 N 投入量 <sup>①</sup> | 调控措施            | 推荐环境友好型种植技术/施肥模式        |                     |                   |
|-----------------------------------|-----------------|-------------------------|---------------------|-------------------|
|                                   |                 | 推荐无机 N 投入量 <sup>②</sup> | 污染排放削减 <sup>③</sup> | 投入减量 <sup>④</sup> |
| 稻-麦                               | 源头肥料投入减量技术      | 稻-麦                     | 稻-麦模式               |                   |
| 水稻 小麦                             |                 | 水稻 小麦                   | 总 N                 |                   |
| 267.8 222.9                       |                 | 200 200                 | 13.7                | 90.7              |
| 稻-麦                               | 基于种植结构调整的控污减排技术 | 稻-紫云英/豆                 | 稻-紫云英模式             |                   |
| 水稻 小麦                             |                 | 水稻 紫云英                  | 总 N                 |                   |
| 267.8 222.9                       |                 | 200 0                   | 3.9                 | 290.7             |

注:①“十二五”初期调研农户数据;②“十一五”课题成果总结,其中③指径流损失+渗漏损失;④数据结果为①-②。

### 2.2 蔬菜生产土地利用模式下种植源污染减排潜力

由表 4 可见,环竺山湖小流域蔬菜种植主要分布在无锡市宜兴的周铁镇、万石镇和常州市武进区前黄镇,其他两镇面积不足 $200 \text{ hm}^2$ 。2013 年较 2012 年蔬菜种植面积总体上呈扩大趋势,从 2012 年的 $2\,259.4 \text{ hm}^2$ 扩大到 $2\,358.1 \text{ hm}^2$ ,增长了 5%,其中以周铁镇扩大最多,扩增 $70 \text{ hm}^2$ ,前黄镇、和桥镇分别扩大 $30 \text{ hm}^2$ 和 $8 \text{ hm}^2$ ,万石镇种植面积保持不变,雪堰镇种植面积有所减少。通过调研发现,蔬菜种植面积扩大的主因是蔬菜种植效益比较高,稻田改菜地所致,特别是无

锡周铁镇沿太湖的洋溪一带,当地政府鼓励农户弃稻麦模式改种蔬菜。而雪堰镇菜地面积缩减则与改种果园,特别是扩大葡萄种植面积有关。

表4 2012—2013年环竺山湾湖小流域5镇常年蔬菜种植面积( $\text{hm}^2$ )

Table 4 Areas of vegetables in five townships around Zhushan bay in Tai Lake watershed in both 2012 and 2013( $\text{hm}^2$ )

| 年度   | 和桥镇   | 万石镇   | 周铁镇     | 前黄镇   | 雪堰镇   | 总计      |
|------|-------|-------|---------|-------|-------|---------|
| 2012 | 141.9 | 440.0 | 1 196.7 | 286.7 | 194.1 | 2 259.4 |
| 2013 | 149.9 | 440.0 | 1 266.7 | 319.1 | 182.4 | 2 358.1 |

注:根据常州武进区统计局和无锡宜兴市统计局提供的数据整理。

由表5可见,“十二五”初期农户番茄种植的无机肥料N投入已由“十一五”时期 $400\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 降低至 $253.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,与“十一五”优化施肥减量40%后的N投入水平量接近,仅有5%的差异;而有机肥料N投入水平较“十一五”期间略有10%的提升。表明当地农户的番茄生产已采取施肥减量优化模式,较常规生产模式实现减少 $14.9\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 流失,加上源头投入N减量 $13.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,西红柿种植季节总计减排N $28.4\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。而“十二五”初期当地农户茼蒿种植的无机肥料N投入还保持与“十一五”期间相同的水平;不过有机肥料N投入提升较快,比“十一五”投入水平

增长35%,因此推广茼蒿施肥优化减量行动还需更加努力。与“十一五”杨林章团队研究提出的优化减量水平比,茼蒿种植过程至少还有40%源头养分N节省空间以及减量投入下 $42.6\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 减排空间,茼蒿种植季节可总计减排N $259.9\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

在太湖流域,番茄收获后与茼蒿种植前有一个接茬期。该期从气候特点上属于高温高湿、雨热同季时期。无论是设施或露地蔬菜生产,对于散户菜农来说,为了经济利益最大化,多数菜农未让菜地休闲而是种植茼蒿、小毛菜这样成熟期短、耐高温高湿的蔬菜。根据2013年农户调研结果,成熟期短的蔬菜生产以有机肥料N投入为主,名义上是为下一季正茬恢复地力做准备,但无机肥料N投入量也并不低,平均达到 $190.6\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,只比番茄生产优化N投入水平减少20%。由于该期属于设施蔬菜揭棚期,与露地蔬菜生产一样面临很大N素流失环境风险。根据全国农业面源污染普查公布的N流失系数(南方湿润平原区—平地—旱地—露地蔬菜)推算,该期将导致 $13.1\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 总N流失。基于“十一五”杨林章团队研究成果,填闲种植甜玉米虽不影响该期淋洗液体积,但可使农民习惯施氮量条件下淋洗液总氮浓度大幅度降低,与休闲相比,甜玉米填闲种植可显著减少总N淋洗 $19.4\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,并对下茬茼蒿产量无显著影响<sup>[13]</sup>。

竺山湖小流域是典型水网地区,蔬菜地大多靠近

表5 环竺山湾湖小流域优化蔬菜种植模式面源污染减排潜力( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )

Table 5 Potential of mitigating farmland nonpoint source pollution under optimized mode of vegetable production around Zhushan bay in Tai Lake watershed ( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )

| 传统模式 I：                                    |                    | 传统模式 II：                                  |                   | 环境友好型模式：                                     |                   | 源头无机 N 减量                          | 总N减排效应              |
|--------------------------------------------|--------------------|-------------------------------------------|-------------------|----------------------------------------------|-------------------|------------------------------------|---------------------|
| 番茄<br> <br>接茬毛菜类<br> <br>茼蒿<br> <br>其他冬作蔬菜 |                    | 番茄<br> <br>休闲 *<br> <br>茼蒿<br> <br>其他冬作蔬菜 |                   | 番茄<br> <br>接茬甜玉米 *<br> <br>茼蒿<br> <br>其他冬作蔬菜 |                   |                                    |                     |
| 无机 N 投入                                    | 有机 N 投入            | 无机 N 投入                                   | 有机 N 投入           | 无机 N 投入                                      | 有机 N 投入           |                                    |                     |
| 253.5 <sup>①</sup>                         | 76.9 <sup>①</sup>  | 253.5 <sup>①</sup>                        | 76.9 <sup>①</sup> | 253.5 <sup>①</sup>                           | 76.9 <sup>①</sup> | 13.5 <sup>③</sup>                  | —                   |
| 400 <sup>②</sup>                           | 70 <sup>②</sup>    | 400 <sup>②</sup>                          | 70 <sup>②</sup>   | 240 <sup>②</sup>                             | 70 <sup>②</sup>   | 160 <sup>④</sup>                   | 14.9 <sup>⑦</sup>   |
|                                            |                    |                                           |                   |                                              |                   |                                    |                     |
| 190.6 <sup>①</sup>                         | 153.9 <sup>①</sup> | 0                                         | 0                 | 0                                            | 0                 | 190.6 <sup>⑤</sup> /0 <sup>⑥</sup> | —/19.4 <sup>⑧</sup> |
|                                            |                    |                                           |                   |                                              |                   |                                    |                     |
| 529.3 <sup>①</sup>                         | 94.8 <sup>①</sup>  | 529.3 <sup>①</sup>                        | 94.8 <sup>①</sup> | 529.3 <sup>①</sup>                           | 94.8 <sup>①</sup> | 217.3 <sup>③</sup>                 | —                   |
| 520 <sup>②</sup>                           | 70 <sup>②</sup>    | 520 <sup>②</sup>                          | 70 <sup>②</sup>   | 312 <sup>②</sup>                             | 70 <sup>②</sup>   | 208 <sup>④</sup>                   | 42.6 <sup>⑦</sup>   |

注:①“十二五”初期调研农户数据;②“十一五”期间杨林章团队研究成果[陆扣萍 2012(2010年实验值)],其中,总N减排指径流+渗漏总N;③“十二五”初期调研农户蔬菜生产无机N投入与环境友好型模式蔬菜生产无机N投入之差;④“十一五”调研农户蔬菜生产无机N投入与环境友好型模式蔬菜生产无机N投入之差;⑤毛菜类菜无机N投入与环境友好型填闲模式无机N投入之差;⑥接茬休闲无机N投入与环境友好型填闲模式无机N投入之差;⑦指情景④下的总氮减排量;⑧指环境友好型填闲模式与休闲模式比较的减排量;“—”指在情景⑤下未开展减排实验;表头种植模式下标注星号\*表示无N施入,没有标注均表示有N施入。

河道,N 污染物进入水体的路径较短,如果推广应用蔬菜种植优化技术模式(N 减量-填闲-N 减量)而不影响产量,至少可节省肥料 N 投入量  $421.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  和减排总 N  $76.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,按照环竺山湾湖小流域 2013 年蔬菜面积  $2\,358.1 \text{ hm}^2$  估算,可减少无机肥料 N 投入  $993.7 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$  和减排总 N  $181.3 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

### 2.3 果园生产土地利用模式下种植源污染减排潜力

由表 6 可知,环竺山湾湖小流域果园发展主要以种植葡萄、桃和梨三种水果为主,不同乡镇发展规模各不同。总体上,葡萄种植普遍,比例较高,其次是桃和梨。在 5 个乡镇中,以常州市武进区前黄和雪堰 2 镇规模较大,2012—2013 总面积平均达到  $1435 \text{ hm}^2$ ,2013 年较 2012 年增长了 31%;宜兴市的和桥、万石和周铁 3 镇种植规模相对较小,总计约  $332.6 \text{ hm}^2$ ,仅相当于武进区 2 个乡镇种植面积的 23.2%,种植规模 2 年间几乎无变化,发展规模相对稳定。

基于“十一五”期间杨林章研究团队提出的以水蜜桃生产为案例、可确保稳产前提下的“减量控释混配鸡粪与三叶草种植”结合模式的示范应用,可实现水蜜桃生产比果农习惯肥料 N 投入减少  $285 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  (其中无机减量  $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 有机减量  $105 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) 和减少总氮流失  $21 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。通过“十二五”初期对当地果农再调研发现,有机肥投入水平较“十一五”时期增长 17.8%的同时,无机肥料 N 投入大幅降低。如水蜜桃生产投入无机 N 仅为“十一五”时期的 30%,是

“十一五”减量后投入 N 水平的 40.6%,表明优化施肥+三叶草截流控害集成技术模式还有 59.3%的节肥空间,可再减少无机 N 投入  $320.6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (表 7)。因此,以 2013 年度环竺山湾湖小流域水果种植近  $2000 \text{ hm}^2$  的规模,在全面提升有机肥施用水平前提下,采用优化施肥与三叶草截流控害集成技术模式,至少可实现无机 N 投入减量  $500.6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,径流总 N 减排  $58.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,实现环竺山湾湖小流域节省无机肥料 N  $1000 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ ,减排径流总 N  $116.8 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

## 3 讨论

我国粮食生产连续 11 年保持增长,化肥做出了重要的贡献。但改革将农作物过分依赖化肥的传统生产方式向化肥减施增效技术的普及应用转变,已成为当下及未来农业生产和生态环境协调发展务必践行的新要求。竺山湾项目区尽管地处我国东部经济发达地区,其粮作生产,特别是水稻和小麦种植户化肥 N 投入平均水平在“十二五”期间已经比“十一五”期间分别降低 7%和 3%,为  $278 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  和  $233 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,表明“十一五”期间各种环保示范项目的实施在引导和推进农户改进施肥习惯和行为方面起到了一定的作用。不过,调研发现,竺山湾区域农田粮作稻麦生产体系还主要以无机化肥为主(其中化肥施用中尿素用量高达 70%,复合肥仅为 25%,碳铵 5%),很少或几乎不施用有机肥,与周扬等<sup>[14]</sup>研究结果一致。这不利

表 6 2012—2013 年环竺山湾湖小流域 5 镇果园发展规模( $\text{hm}^2$ )

Table 6 Areas of orchards in five townships around Zhushan bay in Tai Lake watershed in 2012 and 2013( $\text{hm}^2$ )

| 果园  | 前黄镇    |        | 雪堰镇    |        | 和桥镇    |        | 万石镇    |        | 周铁镇    |        |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|     | 2012 年 | 2013 年 | 2012 年 | 2013 年 | 2012 年 | 2013 年 | 2012 年 | 2013 年 | 2012 年 | 2013 年 |
| 梨园  | 8.5    | 11.3   | 101.4  | 110.8  | 1.8    | 1.8    | 5.6    | 5.6    | 91.7   | 91.7   |
| 葡萄园 | 200.2  | 275.5  | 315.1  | 356.8  | 25.2   | 25.2   | 29.3   | 33.0   | 33.5   | 33.5   |
| 桃园  | 42.9   | 114.8  | 515.2  | 695.2  | 9.0    | 9.0    | 9.7    | 9.7    | 6.7    | 6.7    |

注:根据常州武进区统计局和无锡宜兴市统计局提供的数据整理。

表 7 环竺山湾湖小流域水蜜桃优化种植模式面源污染减排潜力( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )

Table 7 Potential of mitigating farmland nonpoint source pollution under optimized mode of fruit production around

Zhushan bay in Tai Lake watershed( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )

| 农户习惯种植模式 |                   |                   | 环境友好型<br>种植模式 | 环境效果                 |                     |                          |                         |
|----------|-------------------|-------------------|---------------|----------------------|---------------------|--------------------------|-------------------------|
| 养分源      | N 投入 <sup>①</sup> | N 投入 <sup>②</sup> |               | 投入 N 减量 <sup>②</sup> | 总 N 减排 <sup>②</sup> | 投入 N 继续减量空间 <sup>③</sup> | 总 N 继续减排空间 <sup>③</sup> |
| 无机       | 219.4             | 720               | 控释肥配鸡粪+       | 180                  | 21                  | 320.6                    | 37.4                    |
| 有机       | 309.2             | 262.5             | 三叶草           |                      |                     |                          |                         |

注:①“十二五”初期调研农户数据;②“十一五”期间杨林章团队研究成果,其中减排指减少径流 N 损失;③指在①背景下,控释肥配鸡粪+三叶草模式还可实现投入 N 减量和面源污染的减排。

于提高地力和降低环境风险。虽然将稻麦轮作改为稻绿肥生产模式已被证明是一种可靠的化肥减施增效途径<sup>[5]</sup>,但考虑到江苏作为粮食主产区承载的粮食安全任务,竺山湾区域稻麦轮作是否要部分或全部调整为稻-绿肥/豆的轮作模式,还有待进一步研究。而推广稻-绿肥/豆的轮作模式在年际变动因素下潜存的农户经济效益受损则需政府进行生态补偿。

Ju 等<sup>[16]</sup>研究表明农户在蔬菜生产上的高肥料 N 投入相当普遍,而实地调研发现环竺山湾湖小流域的蔬菜生产也不例外,其单季蔬菜生产平均投入 N 量达到  $367.3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,单季最高量可达  $624.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,由此引起的严重农田面源污染排放不可避免<sup>[17-18]</sup>,直接导致周边竺山湖水质的恶化。因此,寻求一种高效的解决途径从根本上降低或减少菜地对水环境的潜在污染成为大家关注的焦点。调研发现,农户种植蔬菜选择设施与露天种植方式各式各样,规模有大有小,即使同一农户既种植有露天蔬菜也有设施蔬菜,所种蔬菜品种随意性大,不同地块或同一地块的蔬菜种植品种繁多,品种之间生长期叠加普遍、复种指数高等都给选择合适的、有代表性的蔬菜种植模式展现全年蔬菜生产对环境的影响带来难度。在竺山湾小流域,因设施蔬菜种植的揭棚期(7月至9月)与露天蔬菜遭遇雨热同期,而菜地养分流失主要以淋失为主,按照陆扣萍等<sup>[18]</sup>和曹兵等<sup>[19]</sup>揭示太湖地区露天番茄与设施番茄种植其硝态氮淋失分别占施氮量比例接近(分别是  $10\% \sim 10.2\%$  和  $9.1\% \sim 9.3\%$ ),莴苣季略高于番茄季。结合 2013 年实地调研和“十一五”杨林章团队研究成果,将设施与露天番茄种植与莴苣模式合并为一类,确立番茄-接茬菜(休闲或填闲玉米)-莴苣种植模式为环竺山湖小流域典型的蔬菜环境友好型种植技术模式。习斌等<sup>[20]</sup>和张继宗等<sup>[21]</sup>的研究也表明,填闲甜玉米确实可大大降低当期硝态氮淋洗损失,发挥减排增效作用。从国家推广适度规模经营角度,散户种植格局会逐渐被适度规模替代。蔬菜专业合作社在规模化生产过程中,体会到高温高湿接茬期艰辛的生产环境和高昂的劳动力成本,同时明白耕地需用养结合,更愿让该档期菜地休闲。一方面,有利于培育地力和避免菜地不休闲继续种植导致的环境风险;另一方面,又为减轻菜地休闲时潜在环境风险开展不施任何肥料的填闲种植提供了可能。

环竺山湖小流域农民流转耕地扩种水果,主要源于水果相对于粮食商品性价比高,较传统的粮食生产具有较大的比较优势,可快速致富。但果树生产地力

要求高,施肥量大、次数多、肥料埋深浅,不可避免造成养分损失。而氮素在环境中的变化最为活跃,超量施肥、施肥技术水平和综合农艺水平低,难免对环境造成不良影响。有机无机配合施用基本上已成为环竺山湾湖小流域果农水果种植施肥习惯行为,特别是果树生殖生长期追肥多数是撒施地表,很少采取掩土覆盖措施,肥料很容易随追肥时节恰遇同期充沛的雨水经地表径流直接进入地表水体,导致肥料利用率低和水环境的直接污染,对竺山湖水质改善构成威胁,并严重影响太湖水质安全。“减量控释混配鸡粪与三叶草种植”结合模式在竺山湾小流域水蜜桃生产上的应用,实现了比果农习惯肥料 N 投入减少  $285 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  和减少总氮流失  $21 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,面源污染减排效果明显,与李发林等<sup>[22]</sup>和高小叶等<sup>[23]</sup>采用果园生草栽培方式有效防控果园面源污染结果一致,表明通过绿色技术模式替代或改造传统果园种植技术模式可以达到果园面源污染的防控与减排目标。不过,如何规范式地收割或处理茂密生草而不妨碍和影响果农对果树的日常管护还需进一步的研究。

#### 4 结论与建议

(1)环竺山湾湖小流域种植业生产化肥 N 投入水平“十二五”期间较“十一五”期间降低明显,继续减量还有很大空间。较之于  $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  农田环境安全化肥 N 投入使用上限,当地种植业生产化肥 N 平均投入水平减量潜力当属蔬菜>稻麦轮作模式,水果生产无机 N 投入平均水平已略低农田安全化肥使用水平,但水果生产无机 N 投入还有很大节省空间。

(2)环竺山湖小流域种植业生产有机肥施用量逐步提升,但符合区域最适量施用水平有待深入研究。欧盟对水体水质已达到富营养化程度的周边农区,通过采取强制性措施以减少营养物质的进一步流失,规定有机肥料 N 施用量不得超过  $170 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,并限制有机肥的施用时间。那么,在我国环竺山湾湖小流域确保种植生产可持续发展,有机肥施用时间、投入的最适量和最大量还有待研究,而围绕有机肥施用还存在有机肥堆放场地、运输成本、人力成本等对果农收益带来潜在影响的因素更需要政府深入考量。

(3)优化种植技术模式可以实现农户传统种植方式的绿色替代,其普及应用需要与土地利用方式和耕作方式的调整相结合,方能实现真正的绿色和种植业源污染减排效果,特别是对种植业源高污染风险作物生产规模的调减和环境敏感区域种植方式的改变。由

于这种调减和改变实际上是绿色农业需求背景下对种植结构的调整,如何最大程度地通过调整种植结构,改善土地利用方式和耕作方式,既满足环竺山湖小流域种植业源污染减排目标,又确保了农民利益,除了区域适宜的绿色替代技术模式的导入,还需要其规模化应用保证农业面源污染的技术性减排,以及需要配套的绿色支持政策(生态补偿政策)发挥强有力的管理性减排作用,一方面监督绿色技术的落实,一方面激励利益相关方对绿色技术的可持续实践行动,以最终实现竺山湾湖水水质永续安全,进而确保太湖水水质持续安全。

#### 参考文献:

- [1] 张维理, 武淑霞, 冀宏杰, 等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策 I: 21 世纪初期中国农业面源污染的形势估计[J]. 中国农业科学, 2004, 37(7): 1008-1017.  
ZHANG Wei-li, WU Shu-xia, JI Hong-jie, et al. Estimation of agricultural non-point source pollution in China and the alleviating strategies I. Estimation of agricultural non-point source pollution in China in early 21 century[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(7): 1008-1017.
- [2] 杨林章, 施卫明, 薛利红, 等. 农村面源污染治理的“4R”理论与工程实践: 总体思路与“4R”治理技术[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(1): 1-8.  
YANG Lin-zhang, SHI Wei-ming, XUE Li-hong, et al. Reduce-Reuse-Reuse-Restore technology for the controlling the agricultural non-point source pollution in countryside in China: General countermeasures and technologies[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(1): 1-8.
- [3] 程 谊, 贾云生, 汪 玉, 等. 太湖竺山湾小流域果园养分投入特征及其土壤肥力状况分析[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(10): 1940-1947.  
CHENG Yi, JIA Yun-sheng, WANG Yu, et al. Nutrient inputs and soil fertility status in orchards of Zhushanbay in Tai Lake watershed[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(10): 1940-1947.
- [4] 舒川根. 太湖流域生态文明建设研究: 基于太湖水污染治理的视角[J]. 生态经济, 2010(6): 175-179.  
SHU Chuan-geng. Study of ecological civilization construction of Tai Lake basin: Based on the perspective of governance about water pollution in Tai Lake[J]. *Ecological Economy*, 2010(6): 175-179.
- [5] 杨 聪. 平原湖湾允许纳污量计算与分配技术: 竺山湾实证研究[D]. 北京: 清华大学, 2012.  
YANG Cong. Capacity calculation and loads allocation in plain bays: Case study in Zhushanbay[D]. Beijing: Tsinghua University, 2012.
- [6] 国家环保总局和国家质量监督检验检疫局发布. GB 3838—2002 地表水环境质量标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社出版, 2002.  
State Environmental Protection Administration and General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China publish. GB 3838—2002, Environmental quality standards for surface Water[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [7] 中华人民共和国水利部. 地表水环境质量评价技术规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.  
People's Republic of China Ministry of Water Resources. Technological regulations for surface water resources quality Assessment[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2007.
- [8] 全国农业技术推广服务中心. 中国有机肥料养分志[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999: 24-200.  
National Agricultural Technology Extension Service Center. China organic fertilizer nutrients[M]. Beijing: China Agricultural Press, 1999: 24-200.
- [9] 冀宏杰, 张认连, 武淑霞, 等. 太湖流域农田肥料投入与平衡状况分析[J]. 中国土壤与肥料, 2008(5): 70-75.  
JI Hong-jie, ZHANG Ren-lian, WU Shu-xia, et al. Analysis of fertilizer input and nutrient balance of farmland in Taihu watershed[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2008(5): 70-75.
- [10] 马立珩. 江苏省水稻、小麦施肥现状的分析与评价[D]. 南京: 南京农业大学, 2011.  
MA Li-heng. Analysis and evaluation of the current status of rice and wheat fertilization in Jiangsu Province[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011.
- [11] 夏小江. 太湖地区稻田氮磷养分径流流失及控制技术研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2012.  
XIA Xiao-jiang. Study on nitrogen and phosphorus runoff losses from paddy field and control technology in Tai Lake area[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012.
- [12] 俞映倬, 薛利红, 杨林章. 太湖地区稻麦轮作系统不同氮肥管理模式对麦季氮素利用与流失的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(12): 2475-2482.  
YU Ying-liang, XUE Li-hong, YANG Lin-zhang. Nitrogen use efficiency and loss from runoff and leaching in wheat season with rice-wheat rotation system under different nitrogen management methods in Tai Lake Region, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(12): 2475-2482.
- [13] 陆扣萍, 闵 炬, 施卫明, 等. 填闲作物甜玉米对太湖地区设施菜地土壤硝态氮残留及淋失的影响[J]. 土壤学报, 2013, 50(2): 331-339.  
LU Kou-ping, MIN Ju, SHI Wei-ming, et al. Effect of sweet corn as a catch crop on residual and leaching loss of soil nitrate in protected vegetable soil in Tai Lake Region[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(2): 331-339.
- [14] 周 扬, 司有斌, 赵 旭, 等. 太湖流域稻麦轮作农田氮肥施用状况、问题和对策[J]. 土壤, 2012, 44(3): 510-514.  
ZHOU Yang, SI You-bin, ZHAO Xu, et al. Situation, problems and countermeasures in nitrogen fertilization in rice/wheat rotation paddy-field of Taihu Lake Watershed[J]. *Soils*, 2012, 44(3): 510-514.
- [15] 乔 俊, 颜廷梅, 薛 峰, 等. 太湖地区稻田不同轮作制度下的氮肥减量研究[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(1): 24-31.  
QIAO Jun, YAN Ting-mei, XUE Feng, et al. Reduction of nitrogen fertilizer application under different crop rotation systems in paddy fields of Taihu Area[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(1): 24-31.

- 24-31.
- [16] Ju X T, Xing G X, Chen X P, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, 2009, 106(9): 3041-3046.
- [17] 陆扣萍, 谢寅峰, 闵 炬, 等. 不同施氮量对大棚茼蒿根系形态及产量和品质的影响[J]. 土壤, 2011, 43(4): 542-547.
- LU Kou-ping, XIE Yin-feng, MIN Ju, et al. Effects of different N rates on root morphology, yield and fruit quality of lettuce cultivated in plastic greenhouse[J]. *Soils*, 2011, 43(4): 542-547.
- [18] 陆扣萍, 闵 炬, 李 蒙, 等. 施氮量对太湖地区设施菜地年氮素淋失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(4): 706-712.
- LU Kou-ping, MIN Ju, LI Meng, et al. Effect of nitrogen fertilizer application rates on annual nitrogen leaching loss from protected vegetable production system in Tai Lake Region[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(4): 706-712.
- [19] 曹 兵, 贺发云, 徐秋明, 等. 露地蔬菜的氮肥效应与氮素去向[J]. 核农学报, 2008, 22(3): 343-347.
- CAO Bing, HE Fa-yun, XU Qiu-ming, et al. Nitrogen use efficiency and fate of N fertilizers applied to open field vegetables[J]. *Acta Agriculturae Nuclear Sinica*, 2008, 22(3): 343-347.
- [20] 习 斌, 张继宗, 翟丽梅, 等. 甜玉米作为填闲作物对北方设施菜地土壤环境及下茬作物的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(1): 113-119.
- XI Bin, ZHANG Ji-zong, ZHAI Li-mei, et al. Effect of sweet maize as catch crop on soil environment and following vegetable in greenhouse of Northern China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(1): 113-119.
- [21] 张继宗, 刘培财, 左 强, 等. 北方设施菜地夏季不同填闲作物的吸氮效果比较研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12): 2663-2667.
- ZHANG Ji-zong, LIU Pei-cai, ZUO Qiang, et al. Nitrogen uptake by different catch crops in facility vegetable field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(12): 2663-2667.
- [22] 李发林, 郑域茹, 郑 涛, 等. 果园带状生草对果园面源污染的控制效果[J]. 水土保持学报, 2013, 27(3): 82-89.
- LI Fa-lin, ZHENG Yu-ru, ZHENG Tao, et al. Influence of zonal grass on non-point source pollution control in orchard[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(3): 82-89.
- [23] 高小叶, 张兴兴, 朱建国, 等. 生草栽培对果园面源污染的控制: 三种牧草的比较研究[J]. 草业学报, 2015(2): 49-54.
- GAO Xiao-ye, ZHANG Xing-xing, ZHU Jian-guo, et al. A comparison of the effect of three grass species on controlling non-point pollution in orchards[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2015(2): 49-54.