

DOI: 10.11766/trxb201604050088

# 基于氮流失控制的种植结构调整与配套生态补偿措施\*

## ——以竺山湾小流域为例

王 芊 武永峰 罗良国†

(农业清洁流域创新团队, 农业部农业环境重点实验室, 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081)

**摘 要** 通过实地和查阅文献的方式调研了竺山湾小流域稻麦、蔬菜和果树的常规生产、清洁生产模式下的经济效益和氮(N)素流失等数据, 采用线性优化模型, 统筹考虑经济收益最大和污染排放总量控制, 根据N流失总量高低对竺山湾小流域种植业结构设置了五种情景(I、II、III、IV和V)进行调整。情景I以经济收益最高为目标, 情景II、III分别在削减情景I设定的N流失量20%和30%的约束下, 各自实现其经济收益最高的两个情景。对于情景II和情景III, 其N投入量、N流失量分别为6 267 t、511 t和5 567 t、447 t。与常规种植结构相比, 这两种情景均达到了N肥投入减少20%、N流失量减少30%的项目预期目标, 相对净收益分别达到8.456亿元、7.966亿元, 高于未调整前常规种植结构的7.873亿元, 属于五种结构调整情景中的最优和次优情景。估算了与种植结构调整相配套的生态补偿资金, 包括机会成本补贴和生态效益奖励两部分。除去交易成本后, 最优情景和次优情景相应的生态补偿总金额分别为961万元和3 507万元, 补偿标准分别为739 Yuan hm<sup>-2</sup>和2 696 Yuan hm<sup>-2</sup>。提出了本区域内种植业结构调整的政策建议, 以促进竺山湾小流域农田面源污染治理, 加快本区域种植业由传统生产方式向清洁生产方式的转型升级。

**关键词** 面源污染; 种植结构优化; 清洁生产模式; N流失量; 竺山湾小流域; 补偿政策

**中图分类号** X322 **文献标识码** A

在太湖地区, 据估算农业面源污染据占总污染负荷的30%~40%, 种植业污染占农业面源污染的比重在30%左右。而种植业普遍存在着不合理的N肥施用方式, 在蔬菜生产中过量施肥现象尤为严重, 对太湖水质安全造成了极大威胁。蔬菜、瓜果等经济作物的种植面积增加与复种指数的提高, 进一步加剧了农业面源污染形势<sup>[1-2]</sup>。为了扭转这种严峻污染现状, 既要通过推广清洁生产技术的应用从根本上减少N素淋失, 也要通过调整种植面积来

降低N素流失总量。从事种植业生产的农户是种植业结构调整针对的目标对象, 他们能否在种植中使用清洁生产技术是决定种植业结构调整成效的关键所在。由于多数农户出于对经济收益的顾虑不愿改变种植习惯, 因此实际中清洁生产技术并不会直接取代传统的种植方式, 还需要设计出经济激励的手段来促进农户主动采用清洁技术。如欧盟通过制定环境政策及开展环保计划以促进农业环境正外部性的行为, 美国则侧重于减少农业环境的负外部性,

\* 国家“十二五”水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07101-004, 2014ZX07105-001)和中国农业科学院农业清洁流域创新工程共同资助 Supported by the National Major Science and Technology Project of Water Pollution Control and Management for the 12th Five-Year Plan Period (Nos. 2012ZX07101-004 and 2014ZX07105-001) and the Agriculture Cleaner Watershed Innovation Project of the Chinese Academy of Agricultural Sciences

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: luoliangguo@caas.cn

作者简介: 王 芊(1983—), 男, 山西晋城人, 博士, 助理研究员, 主要研究农业面源污染防控。E-mail: wangqian02@caas.cn

收稿日期: 2016-04-05; 收到修改稿日期: 2016-06-14; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2016-10-10

通过耦合经济评价模型与环境污染模拟模型以寻求区域内的最佳实施方案,取得了良好的效果<sup>[3-7]</sup>。目前我国已在太湖、抚仙湖和三峡库区等流域开展了基于面源污染控制的农业结构调整的研究工作<sup>[8-10]</sup>,但是在小流域尺度同时开展种植业结构调整与生态补偿措施的研究鲜有报道。

竺山湾小流域毗邻太湖西北角半封闭的竺山湖,包括宜兴市的周铁镇、万石镇、和桥镇和常州市武进区的前黄镇、雪堰镇,主要入湖河流有太滆运河、漕桥河和殷村港。本文选择竺山湾小流域开展种植业结构调整研究,调研了区域内各主要作物常规和清洁生产过程中的N流失量、产量和经济效益指标的数据,获取了区域遥感影像以计算不同作物的种植面积,根据N素输出模型计算区域N流失量<sup>[11]</sup>,利用线性规划模型优化调整不同作物及生产方式的种植面积,在兼顾经济收益和污染排放双重目标的前提下计算出不同情景下的经济、环境综合收益,并得出了最优和次优情景下的单位面积补偿标准。本文还提出了相应的生态补偿机制,确保优化调整后的种植业结构长期稳定,达到最终降低农业面源污染排放量的目标,从而推进竺山湾区域农业可持续发展进程。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域范围

据当地有关规定,“在环太湖1公里以及主要入湖河流上溯10公里两侧各1公里范围内,建设有机农业生态圈,实施有机农业建设工程”。研究中将种植业结构的调整范围限定在环湖有机农业生态圈之外。获取了该区域2013年的SPOT6和2014年的快鸟(Quickbird)两景遥感影像,用以提取农业用地的遥感分类结果。

### 1.2 作物生产方式

根据调研,当地种植业典型的三种农业用地类型是稻/麦轮作地、设施蔬菜和果园。其中,蔬菜生产按照一年种植芹菜/番茄/莴苣三茬蔬菜模式,果园则统一视为水蜜桃种植。清洁生产是通过按需施肥来减少N肥施用量、改进施肥方式、调整轮作制度等,实现氮减排,同时能保证产量的基本稳定<sup>[12-14]</sup>。本研究中选用的清洁生产方式分别是稻/绿肥种植模式<sup>[15]</sup>、稻/麦减量施肥模式<sup>[16]</sup>、设施蔬菜减量施肥和填闲结合模式<sup>[17-18]</sup>,及果园肥料

深施和间作三叶草模式<sup>[19]</sup>。

### 1.3 线性优化模型

通过借鉴肖新成等<sup>[10]</sup>在三峡库区种植业结构调整的方法,利用最优化求解软件包LINGO进行运算。本研究设立了五种不同的情景,其中:情景I要达到经济收益最高;情景II-IV是在情景I的N流失量基础上分别削减20%、30%和40%,并实现经济收益最高;情景V要达到N流失量最小。约束条件包括N流失量约束、农用地面积约束和农副产品需求量约束。

## 2 结果与讨论

### 2.1 竺山湾区域生产与经济调研结果

稻麦作物、蔬菜和果树的种植面积及比例如表1所示,首先通过遥感影像可以计算出有机农业生态圈内的各作物种植面积占竺山湾区域总面积的比例(14.7%、46.6%和15.0%),之后就可计算出环湖有机农业生态圈之外的稻麦作物、蔬菜和果园的面积(10 120、1 260、1 630 hm<sup>2</sup>),三者合计为13 010 hm<sup>2</sup>。根据太湖地区开展的研究及相关调研数据<sup>[15-18, 20]</sup>,本研究采用的生产方式下N淋失量与经济效益指标如表2所示。经济效益指标包括人力成本、机械成本、N肥成本、毛收益和相对净收益。因为数据获取限制的原因,只考虑了相对重要的成本指标,从而计算出的是相对净收益值,而不是绝对净收益值。

### 2.2 种植面积优化模拟

五种优化情景下不同种植模式的种植面积和所占比例如表3所示。对于稻/麦种植而言,在情景I中全部为常规稻/麦种植模式,在情景II-V中常规稻/麦种植模式完全被两种清洁种植模式所取代。蔬菜清洁种植模式(V1)的种植面积在情景I和II中与常规种植面积相同,在情景III-V中则逐渐降低,种植面积的比例由9%降至1%。果树清洁种植模式(F1)的种植面积比例在情景I-IV中均为12%,在情景V中降至10%。国外开展磷(P)和农药的面源污染的治理中,常运用经验或机理模型对研究区域的环境风险等级进行划分,找到环境风险较高的地区,进而有针对性地采取清洁生产措施来减少面源污染产生<sup>[21-22]</sup>,今后可以在识别环境敏感区域的基础上开展种植业结构的空间布局研究。

表1 竺山湾区域环湖有机农业圈及以外的稻麦、蔬菜和果树种植业面积及比例

Table 1 Planting areas and ratios of rice, wheat, vegetable and fruits tree inside and outside the circum-lake organic agriculture zone in the Zhushanwan catchment

种植业面积 Planting cultivation area	稻麦作物 Rice-wheat		蔬菜 Vegetable		果树 Fruit tree		合计 Total	
	面积 Area (10 <sup>4</sup> hm <sup>2</sup> )	比例 Ratio (%)	面积 Area (10 <sup>4</sup> hm <sup>2</sup> )	比例 Ratio (%)	面积 Area (10 <sup>4</sup> hm <sup>2</sup> )	比例 Ratio (%)	面积 Area (10 <sup>4</sup> hm <sup>2</sup> )	比例 Ratio (%)
	含有机农业圈的竺山湾区域 Zhushanwan catchment including the organic agriculture zone	1.186	73.3	0.235	14.6	0.196	12.1	1.617
环湖有机农业圈 Organic agriculture zone	0.174	55.5	0.110	35.1	0.029	9.4	0.316	100
不含环湖有机农业圈区域 Zhushanwan catchment excluding the organic agriculture zone	1.012	77.6	0.126	9.7	0.163	12.8	1.301	100

表2 竺山湾小流域作物种植N投入量、N流失量及经济效益参数

Table 2 N input, N loss and economic benefit parameters of the crop production in the Zhushanwan catchment

种植模式 Production pattern	N投入量 N input (kg hm <sup>-2</sup> )	N流失量 N runoff and leaching (kg hm <sup>-2</sup> )	收获产量 Harvested yield (t hm <sup>-2</sup> )	毛收益 <sup>1)</sup> Gross revenue (10 <sup>4</sup> Yuan hm <sup>-2</sup> )	人力成本 Labor cost (10 <sup>4</sup> Yuan hm <sup>-2</sup> )	机械成本 <sup>2)</sup> Mechanical cost (10 <sup>4</sup> Yuan hm <sup>-2</sup> )	N肥成本 N fertilizer cost (10 <sup>4</sup> Yuan hm <sup>-2</sup> )	相对净收益 Relative net revenue (10 <sup>4</sup> Yuan hm <sup>-2</sup> )
稻/麦常规 <sup>①</sup> (C0)	510	45.5	13.9	3.52	0.74	0.7	0.19	1.88
稻/绿肥 <sup>②</sup> (C1)	150	12.0	7.4	2.08	0.74	0.54	0.06	0.73
稻/麦减量 <sup>③</sup> (C2)	390	33.5	13.5	3.41	0.74	0.7	0.15	1.82
蔬菜常规 <sup>④</sup> (V0)	1 480	185	251	36.3	7.6	—	0.6	28.1
蔬菜/填闲 <sup>⑤</sup> (V1)	1 200	128	265	39.4	8.0	—	0.5	30.9
果树常规 <sup>⑥</sup> (F0)	739	40.7	21.3	18.7	3.5	0.1	0.3	14.9
果树/三叶草 <sup>⑦</sup> (F1)	537	10.3	23.8	21.0	3.5	0.4	0.2	16.8

注：1) 农作物收获产量的单价按水稻2.8元 kg<sup>-1</sup>，小麦2元 kg<sup>-1</sup>，芹菜1.5元 kg<sup>-1</sup>，番茄1.6元 kg<sup>-1</sup>，莴苣1.2元 kg<sup>-1</sup>，水蜜桃8.8元 kg<sup>-1</sup> 计；2) “—”表示未计入 Note: 1) The profit of crop production is calculated on the basis of 2.8 Yuan kg<sup>-1</sup> for rice; 2 Yuan kg<sup>-1</sup> for wheat; 1.5 Yuan kg<sup>-1</sup> for celery; 1.6 Yuan kg<sup>-1</sup> for tomato; 1.2 Yuan kg<sup>-1</sup> for lettuce; 8.8 Yuan kg<sup>-1</sup> for honey peach; 2) “—” indicates the item is not taken into account; ①Conventional rice/wheat rotation (C0); ② Rice/green manure crop rotation (C1); ③Reduced fertilization for rice/wheat rotation (C2); ④Conventional vegetable production (V0); ⑤Vegetable/catch crop rotation (V1); ⑥Conventional fruit trees production (F0); ⑦Fruit trees/clover inter-cropping (F1). The same below

表3 常规种植和五种情景下各种种植模式的面积及所占比例

**Table 3** Planting areas and proportions of different crop production patterns in conventional cultivation system and five scenarios

种植模式 Production pattern	常规种植 <sup>1)</sup> Conventional Mode		情景 I <sup>2)</sup> Scenario I		情景 II <sup>3)</sup> Scenario II		情景 III <sup>4)</sup> Scenario III		情景 IV <sup>5)</sup> Scenario IV		情景 V <sup>6)</sup> Scenario V	
	面积	比例	面积	比例	面积	比例	面积	比例	面积	比例	面积	比例
	Area	Ratio	Area	Ratio	Area	Ratio	Area	Ratio	Area	Ratio	Area	Ratio
	(10 <sup>4</sup> hm <sup>2</sup> )	(%)	(10 <sup>4</sup> hm <sup>2</sup> )	(%)	(10 <sup>4</sup> hm <sup>2</sup> )	(%)	(10 <sup>4</sup> hm <sup>2</sup> )	(%)	(10 <sup>4</sup> hm <sup>2</sup> )	(%)	(10 <sup>4</sup> hm <sup>2</sup> )	(%)
C0	1.012	78	1.012	78	—	—	—	—	—	—	—	—
C1	—	—	—	—	0.028	2	0.296	23	0.396	31	0.527	40
C2	—	—	—	—	0.984	76	0.723	56	0.668	51	0.596	46
V0	0.126	10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
V1	—	—	0.126	10	0.126	10	0.119	9	0.074	6	0.015	1
F0	0.163	12	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
F1	—	—	0.163	12	0.163	12	0.163	12	0.163	12	0.128	10

注: 1) 采用当地传统的施肥及种植方式; 2) 情景 I 是以经济收益最高为目标的情景; 3) ~ 5) 情景 I - IV 是同时满足经济收益最高, 且 N 流失量分别不超过情景 I 下 N 流失量的 20%、30%、40% 两个目标的三个情景; 6) 情景 V 是 N 流失量最小为目标的情景。  
下同 Note: 1) Local traditional fertilization and planting mode; 2) Scenario I was designed to achieve the highest economic benefit; 3) ~ 5) Scenario II, III, IV was to reduce N loss by 20%, 30% and 40%, respectively, as compared with Scenario I while achieving their respective targets of economic benefit; and 6) Scenario V was designed to achieve its target of minimum N loss. The same below

表4 常规种植和五种情景下的 N 投入量、N 流失量和经济收益

**Table 4** N inputs, N loss and economic profits in conventional production mode and five different scenarios

污染和经济指标 Pollution and economic indices	常规种植 Conventional mode	情景 I Scenario I	情景 I Scenario I	情景 I Scenario I	情景 I Scenario I	情景 V Scenario V
N 投入量 N input (t a <sup>-1</sup> )	8 231	7 549	6 267	5 567	4 963	3 982
N 流失量 N loss (t a <sup>-1</sup> )	759	638	511	447	383	295
经济收益 Economic profit (10 <sup>8</sup> Yuan a <sup>-1</sup> )	7.873	8.548	8.456	7.966	6.550	4.093

表4中列出了常规种植结构及五种情景下的 N 投入量、N 流失量及经济收益数据。五种情景的 N 投入量和 N 流失量均低于常规种植结构。情景 I ~ III 的经济收益则高于常规种植结构, 其余的 IV、V 两种情景的经济收益低于常规种植结构。通过与常规种植结构进行比较, 情景 II 和 III 的 N 投入量削减率分别为 23.9%、32.4%, N 流失量削减率分别为 32.7% 和 41.1%, 达到国家“十二五”水专项在竺山湾区域设定的 N 投入量和 N 流失量的削减率目标 (分别为 20%、30%)。情景 II、III 的经济收

益的增长率均大于 0。又因为情景 II 经济收益相对较高, 达到 8.456 亿元, 可作为最优情景; 情景 III 的经济收益相对较低, 为 7.966 亿元, 可作为次优情景。

### 2.3 生态补偿措施

补偿标准按三部分进行计算: 一是用于补贴种植业结构调整后净收益的机会成本补贴。二是按每削减 1 千克 N 投入量补贴 1.11 元<sup>[23]</sup> 计算的生态效益补贴。三是将上述两项补贴总金额的 15% 作为交易成本<sup>[24]</sup>。最优情景 II 和次优情景 III 以及其中

各种种植模式的总生态补偿金额与单位面积平均补贴金额如表5所示。情景Ⅱ中除去交易成本后的生态补偿总金额共计961万元，平均补贴值为739 Yuan hm<sup>-2</sup>。情景Ⅲ中，除去交易成本后的补偿总金额为3 507万元，平均补贴值为2 696 Yuan hm<sup>-2</sup>。国外开展的研究测算的生态补偿标准介于610~4 744 Yuan hm<sup>-2</sup>之间，如：欧盟环保农业2007-2009年的平均补贴值为0.061万元 hm<sup>-2</sup>，日本滋贺县清洁生产方式补贴8万日元 hm<sup>-2</sup>（约4 744 Yuan hm<sup>-2</sup>），韩国对在旱地和水田的补贴标准分别为52.4

万~79.4万韩元 hm<sup>-2</sup>、21.7万~39.2万韩元 hm<sup>-2</sup>（约2 952~4 473、1 223~2 208 Yuan hm<sup>-2</sup>）<sup>[25]</sup>。国内在江苏宜兴、上海崇明岛<sup>[23, 26]</sup>开展的研究测算的补贴额度分别为620~7 098 Yuan hm<sup>-2</sup>和3 066~10 136 Yuan hm<sup>-2</sup>。本研究计算出的农业清洁生产方式补贴值介于739~2 696 Yuan hm<sup>-2</sup>，与欧盟、韩国的补贴水平及宜兴市计算值较为接近，高于我国目前推广实施的测土配方施肥平均补贴的资金（不足100 Yuan hm<sup>-2</sup>）<sup>[5]</sup>。

建立针对本区域的生态补偿机制对于长期巩固

表5 最优情景Ⅱ和次优情景Ⅲ的生态补偿方案

Table 5 Eco-compensation scheme for optimal scenario II and the second optimal scenario III

情景 Scenario	种植面积 Planting area (10 <sup>4</sup> hm <sup>2</sup> )	常规种植净 收益 <sup>①</sup> (10 <sup>8</sup> Yuan)	清洁种植净 收益 <sup>②</sup> (10 <sup>8</sup> Yuan)	常规种植N 投入量 <sup>③</sup> (t)	清洁种植N 投入量 <sup>④</sup> (t)	生态补偿总金额 (10 <sup>4</sup> Yuan)			平均补贴金额 <sup>⑧</sup> (Yuan hm <sup>-2</sup> )
						机会成本 补贴 <sup>⑤</sup>	生态效益 奖励 <sup>⑥</sup>	除去15%用于 管理的交易成 本后合计 <sup>⑦</sup>	
Ⅱ	1.301	7.872	8.443	8 231	6 267	912	218	961	739
Ⅲ	1.301	7.688	7.947	8 163	5 567	3 838	288	3 507	2 696

注：1）除最后一列按平均值计算外，3-10列按总计汇总。Note: 1) Sums were computed for columns 3-10 except for column 11. Column 11 was computed by dividing the values of column 10 by the corresponding values of column 3. ①Net profit of conventional production; ②Net profit of the cleaner production mode; ③N input in the conventional production; ④N input in the cleaner production mode; ⑤Opportunity cost-based subsidies; ⑥Ecological benefit rewards-based subsidies; ⑦The funds of eco-compensation include the budget of 15% for overhead expense; and ⑧Average subsidies of eco-compensation per unit area

种植业结构调整措施具有重要意义，本文主要从资金来源、支付对象、支付方式以及补偿措施的监督管理等方面进行讨论：（1）补偿资金主要从土地出让金中提取，还可向生产化肥和农药等化学投入品的农资生产企业适当征收环境税，公开向企业和个人募集生态补偿资金；（2）补偿支付对象主要为规模化种植主体；（3）补偿方式是主管部门与规模化种植主体签订为期5年的合同，对审核通过的主体分别按50%、20%、15%、10%、5%的比例在5年内发放合同资金；（4）种植主体需在第三方评估机构的协助下，提供制订出配套清洁生产技术的年度计划和田间管理措施，明确合同到期时需达到的农田环境标准。另外，加快土地流转进程，重点扶持农业专业合作社和农业龙头企业等规模化经营主体，是发展低碳农业、提高农业现代化水平的必然选择<sup>[27]</sup>。政府还要在生产、加工和销售等环节为规模化经营主体出台财税、信贷等方面

的优惠政策，搭建电商平台，以创造良好的经营环境。

### 3 结 论

在太湖地区针对稻/麦轮作、蔬菜和果树种植清洁生产模式的研究表明，清洁生产方式在稳定产量的同时可以大幅削减N流失量，是控制农业面源污染的重要手段。本研究将N流失量控制和相对净收益最大设定为双重目标，在涉及竺山湾小流域现有环境规划的基础上，考虑种植业生产的常规模式和清洁生产模式，设置了耕地面积和粮食安全等约束，并利用线性规划模型对种植业结构进行优化调整。按区域内种植业总N流失量的不同，分别计算了与不同N流失量水平相对应的五种不同种植业结构优化调整情景，通过择优比较遴选出了经济收益较高且污染水平能达到现有规划目标的最优

和次优两种情景。为推动当地农民能主动接受种植业结构调整,计算了最优和次优两种情景下的生态补偿方案,补贴分为机会成本补贴和生态效益奖励,除去交易成本后的补偿总金额分别为961万元、3 507万元,对应的补偿标准分别为739、2 696 Yuan hm<sup>-2</sup>。研究还提出促进生态补偿措施能持久发挥作用的政策建议。

## 参考文献

- [ 1 ] 李新艳,李恒鹏,杨桂山,等.江苏太湖地区农业耕作制度变化及其对地表水土环境的影响.长江流域资源与环境,2014,23(12):1699—1704  
Li X Y, Li H P, Yang G S, et al. Changes of farming systems in the past 60 years in the Taihu region of Jiangsu Province and its impact on the surface water and soil environment (In Chinese). Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014, 23(12): 1699—1704
- [ 2 ] 王令,王文杰,高振记,等.农业面源污染防治的经济手段研究综述.环境与可持续发展,2013(3):57—59  
Wang L, Wang W J, Gao Z J, et al. Review of economic methods of agricultural non-point source pollution control (In Chinese). Environment and Sustainable Development, 2013(3): 57—59
- [ 3 ] Balana B B, Vinten A, Slee B. A review on cost-effectiveness analysis of agri-environmental measures related to the EU WFD: Key issues, methods, and application. Ecological Economics, 2011, 70: 1021—1031
- [ 4 ] Mewes M. Diffuse nutrient reduction in the German Baltic Sea catchment: Cost-effectiveness analysis of water protection measures. Ecological Indicators, 2012, 22: 16—26
- [ 5 ] 胡博,杨颖,王芊,等.环境友好型农业生态补偿实践进展.中国农业科技导报,2016,18(1):7—17  
Hu B, Yang Y, Wang Q, et al. Progress of eco-compensation practice for environmental friendly agriculture (In Chinese). Journal of Agricultural Science and Technology, 2016, 18(1): 7—17
- [ 6 ] Bouraoui F, Grizzetti B. Modeling mitigation options to reduce diffuse nitrogen water pollution from agriculture. Science of the Total Environment, 2014, 468/469: 1267—1277
- [ 7 ] Yang W H, Khanna M, Farnsworth R, et al. Integrating economic, environmental and GIS modeling to target cost effective land retirement in multiple watersheds. Ecological Economics, 2003, 46: 249—267
- [ 8 ] 李萍萍,刘继展.太湖流域农业结构多目标优化设计.农业工程学报,2009,25(10):198—203  
Li P P, Liu J Z. Multi-objective optimization of agricultural structure in Taihu Lake basin (In Chinese). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(10): 198—203
- [ 9 ] 夏训峰,顾雨,席北斗,等.基于水环境约束的抚仙湖流域农业结构调整研究.环境科学研究,2010,23(10):1274—1278  
Xia X F, Gu Y, Xi B D, et al. Research on agricultural structure regulation in Fuxian Lake Basin based on water environmental constraints (In Chinese). Research of Environmental Sciences, 2010, 23(10): 1274—1278
- [ 10 ] 肖新成,谢德体,何炳辉,等.基于农业面源污染控制的三峡库区种植业结构优化.农业工程学报,2014,30(20):219—227  
Xiao X C, Xie D T, He B H, et al. Planting structure optimization based on agricultural non-point source pollution control in Three Gorges Reservoir Region (In Chinese). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(20): 219—227
- [ 11 ] 薛利红,杨林章.面源污染物输出系数模型的研究进展.生态学杂志,2009,28(4):755—761  
Xue L H, Yang L Z. Research advances of export coefficient model for non-point source pollution (In Chinese). Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(4): 755—761
- [ 12 ] 徐力刚,王晓龙,崔锐,等.不同农业种植方式对土壤中硝态氮淋失的影响研究.土壤,2012,44(2):225—231  
Xu L G, Wang X L, Cui R, et al. Study of nitrate nitrogen leaching characteristics in different agricultural planted farmland (In Chinese). Soils, 2012, 44(2): 225—231
- [ 13 ] 凌德,李婷,王火焰,等.施用方式和氮肥种类对水稻土中氮素迁移的影响效应.土壤,2015,47(3):478—482  
Ling D, Li T, Wang H Y, et al. Effects of fertilization methods and forms of nitrogen fertilizers on nitrogen diffusion and migration in paddy soil (In Chinese). Soils, 2015, 47(3): 478—482
- [ 14 ] 于飞,施卫明.近10年中国大陆主要粮食作物氮肥利用率分析.土壤学报,2015,52(6):1311—1324  
Yu F, Shi W M. Nitrogen use efficiencies of major grain crops in China in recent 10 years (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(6): 1311—1324
- [ 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. 中国生态农业学报, 2011, 19 (1): 24—31
- Qiao J, Yan T M, Xue F, et al. Reduction of nitrogen fertilizer application under different crop rotation systems in paddy fields of Taihu area (In Chinese). Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19 (1): 24—31
- [16] 薛利红, 俞映惊, 杨林章. 太湖流域稻田不同氮肥管理模式下的氮素平衡特征及环境效应评价. 环境科学, 2011, 32 (4): 1133—1138
- Xue L H, Yu Y L, Yang L Z. Nitrogen balance and environmental impact of paddy field under different N management methods in Taihu Lake Region (In Chinese). Environmental Science, 2011, 32 (4): 1133—1138
- [17] 陆扣萍, 闵炬, 施卫明, 等. 不同轮作模式对太湖地区大棚菜地土壤氮淋失的影响. 植物营养与肥料学报, 2013, 19 (3): 689—697
- Lu K P, Min J, Shi W M, et al. Effect of rotation patterns on nitrogen leaching loss from protected vegetable soil in Tai Lake region (In Chinese). Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2013, 19 (3): 689—697
- [18] 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. 土壤学报, 2013, 50 (2): 331—339
- Lu K P, Min J, Shi W M, et al. Effect of sweet corn as a catch crop on residual and leaching loss of soil nitrate in protected vegetable soil in Taihu Lake region (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2013, 50 (2): 331—339
- [19] 彭玲, 文昭, 安欣, 等. 果园生草对<sup>15</sup>N利用及土壤累积的影响. 土壤学报, 2015, 52 (4): 950—956
- Peng L, Wen Z, An X, et al. Effects of interplanting grass on utilization, loss and accumulation of <sup>15</sup>N in apple orchard (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2015, 52 (4): 950—956
- [20] 夏永秋, 颜晓元. 太湖地区麦季协调农学、环境和经济效益的推荐施肥量. 土壤学报, 2011, 48 (6): 1210—1218
- Xia Y Q, Yan X Y. Nitrogen fertilization rate recommendation integrating agronomic, environmental, and economic benefits for wheat season in the Taihu Lake region (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2011, 48 (6): 1210—1218
- [21] Ripa M N, Leone A, Garnier M, et al. Agricultural land use and best management practices to control nonpoint water pollution. Environmental Management, 2006, 38 (2): 253—266
- [22] Weissteiner C J, Pistocchi A, Marinov D, et al. An indicator to map diffuse chemical river pollution considering buffer capacity of riparian vegetation—A pan-European case study. Science of the Total Environment, 2014, 484: 64—73
- [23] 张印, 周羽辰, 孙华. 农田氮素非点源污染控制的生态补偿标准——以江苏省宜兴市为例. 生态学报, 2012, 32 (23): 7327—7335
- Zhang Y, Zhou Y C, Sun H. Ecological compensation standard for controlling nitrogen non-point pollution from farmland: A case study of Yixing City in Jiangsu Province (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2012, 32 (23): 7327—7335
- [24] Pagiola S. Payments for environmental services in Costa Rica. Ecological Economics, 2008, 65: 712—724
- [25] 马晓春, 宋莉莉, 李先德. 韩国农业补贴政策及启示. 农业技术经济, 2010 (7): 122—128
- Ma X C, Song L L, Li X D. Korea's subsidy policy on agriculture and the enlightenment for China. Technical Economy in Agriculture, 2010 (7): 122—128
- [26] 沈根祥, 黄丽华, 钱晓雍, 等. 环境友好农业生产方式生态补偿标准探讨——以崇明岛东滩绿色农业示范项目为例. 农业环境科学学报, 2009, 28 (5): 1079—1084
- Shen G X, Huang L H, Qian X Y, et al. Ecological compensation criteria for environmental-friendly agriculture production—Case study of green agriculture demonstration project in Dongtan, Chongming Island (In Chinese). Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28 (5): 1079—1084
- [27] 金辰, 孙波, 赵其国, 等. 我国发展低碳农业的政策、法规和技术体系分析. 土壤, 2014, 46 (1): 7—14
- Jin C, Sun B, Zhao Q G, et al. Analysis of policies, regulations and technological systems to develop low-carbon agriculture in China (In Chinese). Soils, 2014, 46 (1): 7—14

## N-Loss-Control-Oriented Readjustment of Planting Structure and Its Matching Ecological Compensation Measures —A Case Study of Zhushanwan Catchment

WANG Qian WU Yongfeng LUO Liangguo<sup>†</sup>

(Agricultural Clean Watershed Group; Key Laboratory for Agricultural Environment, Ministry of Agriculture; Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract** Through consultation of literature and field survey, data were collected of the conventional rice, wheat, vegetable and fruit production, the economic benefit of the production under the model of cleaner production and the nitrogen loss in the Zhushanwan catchment, a subwatershed in the northwest of the Taihu Lake Region, and other relevant social-economic data. An attempt was made to readjust the planting structure of the catchment in line with five simulated scenarios ( I , II , III , IV and V ), separately, high to low in total nitrogen loss, using the linear optimization model ( Software Lingo 11 ) and taking into full account maximal economic benefit and total volume control of pollution discharge. In Scenario II and III , the total N input was found to be 6 267 t and 5 567 t , respectively, and the total N loss 511 t and 447 t , respectively, which indicates that both scenarios meet their respective intended targets of reducing total N input by 20% and total N loss by 30% as compared with that in the conventional planting structure. Besides, the two scenarios may generate a relative net economic profit of 845.6 million yuan and 796.6 million yuan, respectively, both higher than that ( 787.3million yuan ) the conventional planting structure does. So among the five scenarios, Scenario II is the optimal one and Scenario III the second to follow for readjustment of the planting structure of the region. The quota of eco-compensation was calculated according to opportunity cost and ecological benefit reward, and the compensation policy and mechanisms were suggested to facilitate implementation of cleaner production. The ecological compensation funds, excluding transaction cost, about 15% of the total compensation for Scenario II and III is estimated to be 9.61 and 35.07 million yuan ( RMB ) , respectively, according to the standard for compensation, 739 and 2 696 Yuan hm<sup>-2</sup>, respectively. Implementation of the policy and its matching eco-compensation measures may effectively help control non-point source agricultural pollution and expedite the process of transformation or escalation of the farming industry in the region from the traditional one to the one of cleaner production.

**Key words** Non-point source pollution; Planting structure optimization; Cleaner production mode in agriculture; Nitrogen loss via surface runoff and leaching; Zhushanwan catchment; Compensation policy

( 责任编辑: 陈荣府 )