

太湖地区麦季协调农学、环境和经济效益的推荐施肥量*

夏永秋 颜晓元[†]

(中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘要 基于氮肥用量与各种氮素去向关系的实验数据, 构建了太湖地区麦季协调农学、环境和经济效益的氮素连锁效应评价模型。研究表明太湖地区麦季推荐施氮量为 205 kg hm⁻², 最大净收益为 2 621 元 hm⁻²。此时产量收益为 3 722 元 hm⁻², 环境总损失为 1 101 元 hm⁻², 其分量大小依次为酸雨效应损失、温室效应损失、富营养化效应损失。若田块之间净经济收益变动 10 元 hm⁻², 区域平均施氮量变动于 193~218 kg hm⁻² 之间。与传统施氮量相比, 本研究推荐施氮量能减少施氮 10%~40%, 净经济效益提高 5%~15%。该方法不仅能综合考虑氮肥的农学、环境和经济效应, 能为其他地区或作物的生态农业提供参考, 估算的区域推荐施肥量也易于决策者和农民采用。

关键词 推荐施肥量; 协调农学、环境与经济效益; 模型; 最大净收益; 太湖地区

中图分类号 S19 文献标识码 A

太湖地区是重要的稻麦轮作区, 长期以来氮肥用量一直保持在较高水平, 给环境带来巨大的负荷。有研究表明, 在不同深度稻田地下水中, 麦季硝态氮浓度远高于稻季硝态氮浓度^[1]。根据IPCC报道^[2], 麦季N₂O的缺省排放系数(1%)也远大于其在稻季的排放系数(0.3%)。因此, 麦季过量施用氮肥已越来越多地受到人们的关注^[3-5]。

为减少氮素损失, 同时保证粮食高产, 环境经济评价方法得到越来越多的应用。如在太湖地区, 吕耀等^[6]考虑了氮素淋洗和径流对太湖造成的富营养化损失, 计算了氮素的边际成本, 求得该区稻麦轮作系统生态经济施氮量为 327.82~371.61 kg hm⁻²。Wang 等^[6]选择了两个不同土壤类型, 研究了麦季施氮量和产量、硝氮淋洗量的关系, 假定环境损失等于氮肥的成本, 研究得出麦季最经济的施氮量为 180~225 kg hm⁻²。Liang 等^[6]在考虑获得较高产量和地下水淋洗的硝氮不超标的情况下, 得到推荐施氮量为 120~180 kg hm⁻²。

各研究所得的适宜施氮量差别很大, 究其原因, 主要是田块之间的产量和氮损失差别很大, 因此基于田块间的研究很难反映太湖地区的区域实际情况。而且, 这些研究均只考虑了氮素富营养化效应, 未能综合考虑氮素其他环境效应如温室气体效应、酸雨效应。其原因在于很难建立综合评价指标以及氮素各种去向的定量关系。为此本研究收集太湖地区近 20 年来的研究成果, 利用数学统计方法, 分别建立施氮量与小麦产量以及施氮量与各种氮素损失如 N₂O 排放、总氮淋洗与径流、氨挥发等之间的数学关系, 构建协调氮肥农学和环境效应的统一经济指标和评价模型, 以期为该区生态适宜施氮量的确定提供科学依据。

1 研究方法

1.1 模型构建

在小麦生产体系中, 随着施肥量的增加, 除了氮肥的成本会增加外, 小麦的产量也随之增加, 但是增加幅度会越来越小, 超过一定的量, 产量甚至会降低; 而环境损失如 N₂O 排放、总氮淋洗与径流、氨挥发速率等会随施氮量的增加而增大, 环境负荷变大。因此, 氮肥对农学、环境和经济的综合效益 (N_{NB}) 可以用氮肥的产量收益扣除氮肥成本和环境代价

* 中国科学院知识创新工程项目 (KZCX2-YW-440) 和江苏省自然科学基金项目 (BK2010609) 资助

[†] 通讯作者, Tel: 025-86881530, E-mail: yanxy@issas.ac.cn

作者简介: 夏永秋 (1979-), 男, 湖南武冈人, 博士, 主要从事农田碳氮循环研究。E-mail: yqxia@issas.ac.cn

收稿日期: 2010-07-12; 收到修改稿日期: 2010-10-17

进行计算：

$$N_{NB} = M_{\text{wheat}}(F_{\text{yield}}(N_{\text{rate}}), P_{\text{wheat}}) - M_N(N_{\text{rate}}, P_N) - \sum_{i=1}^3 M_{\text{loss}_i}(F_{\text{loss}_i}(N_{\text{rate}}), P_{\text{loss}_i}) \quad (1)$$

式中， M_{wheat} 为小麦的边际产量效益(元 hm^{-2})，是边际产量 ($F_{\text{yield}}(N_{\text{rate}})$, kg hm^{-2})与小麦价格(P_{wheat} , 元 kg^{-1})的函数； N_{rate} 为麦季施氮量(N kg hm^{-2})； M_N 为肥料成本(元 hm^{-2})，是肥料价格(P_N , 元 kg^{-1})与施氮量 N_{rate} 的函数； M_{loss_i} 为氮素边际损失环境效应 i 的代价(元 hm^{-2})，是环境效应损失当量($F_{\text{loss}_i}(N_{\text{rate}})$)和该效应的环境成本(P_{loss_i} , 元 kg^{-1})的函数；在本研究中，共区分了 3 种环境效应：温室气体效应、酸雨效应和富营养化效应。边际产量 ($F_{\text{yield}}(N_{\text{rate}})$) 和边际环境效应损失当量($F_{\text{loss}_i}(N_{\text{rate}})$) 均是施氮量 N_{rate} 的函数。

因此，通过建立氮素农学与环境效应统一的经济评价指标，应用氮肥的边际产量与边际损失函数，就可以计算麦季氮素的净收益。对氮素净收益函数求一阶导数，当一阶导数为 0 时得到最大净收益及其推荐施肥量。

1.2 数据收集与统计

为了构建麦季氮肥的边际产量与边际损失函数，收集了太湖地区近 20 年来麦季氮肥用量与产量的田间试验数据。在条件允许的情况下，同步收集其麦季氮素损失如 N_2O 排放、总氮淋洗与径流、氨挥发的量。通过数学统计软件 SPSS 11.5 寻找相关系数最高的函数关系式。为了保证数据具有可比性，田间试验的农业管理程序和当地农民常规基本一致，氮肥以尿素为主， N_2O 的测定方法为密闭箱法，氨挥发测定方法为密闭室法，总氮 TN 淋洗和径流测定方法为 PVC 流出液收集法。

1.3 经济评价指标

1.3.1 边际环境损失

施入农田的氮肥能通过各种途径损失到环境中，如损失的 N_2O 、氨挥发，硝氮氨氮对环境产生的效应各不相同，又能在环境中发生连锁效应，因此很难用统一的指标评价其综合效应。Moomaw 和 Birch^[7] 引入四种经济评价指标：处理（修复）成本、破坏损失、替代成本、减量损失。在太湖流域，较易找到前两种评价指标的参考标准。因此，可以应用这两种指标，评估和比较每种氮通量的环境影响所导致的损失，从而综合评估氮素损失的环境和经济效应。

为了评价不同形态氮素的同一种环境效应，需要对各种氮素损失乘以一定的系数进行转化。按照 Eco-indicator 95 转化程序，1kg NH_3 挥发相当于 0.33 kg PO_4^{3-} 的富营养化效应和 1.88 kg SO_2 的酸雨效应；1 kg 径流或淋洗损失的 TN 相当于 0.42 kg PO_4^{3-} 的富营养化效应；1kg N_2O 在 100 年尺度上相当于 310 kg CO_2 的温室气体效应^[8]。

根据中国环境科学院和清华大学等单位的研究结果，酸雨污染给我国造成的损失每年超过 1 100 亿元，即每排放 1kg SO_2 将造成超过 5 元的损失。由于氨挥发会在近距离内沉降下来^[9]，而太湖地区有 16% 的陆地面积是自然湿地（河流、湖泊、沼泽地等），因此只有 84% 的氨挥发会通过干湿沉降至土壤表面造成酸化效应，沉降至水面的氨对水体有富营养化效应。施氮产生氨挥发酸雨效应的边际环境损失 ($M_{\text{loss-NH}_3}$, 元 hm^{-2}) 可用下式表示：

$$M_{\text{loss-NH}_3} = 84\% \times 1.88 \times F_{\text{NH}_3}(N_{\text{rate}}) \times P_a \times 17/14 \quad (2)$$

式中，1.88 为 1 kg NH_3 挥发等量 SO_2 酸雨效应的转换系数， P_a 为每 kg SO_2 导致的酸雨损失(元 kg^{-1})，在本文中为 5 元 kg^{-1} ； $F_{\text{NH}_3}(N_{\text{rate}})$ 为氨挥发的边际损失量，是施氮量的函数(kg hm^{-2})；17/14 是 N 对 NH_3 的转换系数。

进入水体的氨氮和硝氮能对环境带来多种损失。已有研究表明，由于水体富含活化氮对

渔业、饮用水源、旅游业以及居住环境的环境损失约为 0.41 元 $\text{kg}^{-1} \text{N}^{[10]}$ 。根据《污水排污费征收标准及计算方法》，每 0.25 kg 总磷相当于 1 kg 污染当量值，而太湖地区每当量污染物的处理成本为 0.9 元。因此，如果处理这些废水需要成本 3.6 元 $\text{kg}^{-1} \text{PO}_4^{3-}$ ，总和折算成富营养化损失相当于 3.8 元 $\text{kg}^{-1} \text{PO}_4^{3-}$ 。因此，从径流和淋失的总氮富营养化效应的边际环境损失可用下式表示：

$$M_{\text{loss-E}} = [0.42 \times (FL_{\text{TN}}(N_{\text{rate}}) + FR_{\text{TN}}(N_{\text{rate}})) + 0.33 \times F_{\text{HN}_3}(N_{\text{rate}}) \times 17/14] \times P_e \quad (3)$$

式中， P_e 为每 kg PO_4^{3-} 的富营养化损失 (元 kg^{-1})； $FL_{\text{TN}}(N_{\text{rate}})$ 和 $FR_{\text{TN}}(N_{\text{rate}})$ 分别为施氮后被淋洗和径流产生的 TN 边际损失量 (kg hm^{-2})，均是施氮量 N_{rate} 的函数；0.42 和 0.33 为 1 kg TN 和 NH_3 等量 PO_4^{3-} 富营养化效应的转换系数；17/14 为 N 对 NH_3 的转换系数。

N_2O 是一种重要的温室气体，每 kg N_2O 的温室效应在 100 年时间尺度上相当于 310 kg CO_2 。根据国际上 2008 年的碳交易价格，每吨 CO_2 的市场价格为 20.4 美元，折合人民币 145.8 元。因此，施氮产生 N_2O 温室效应的边际环境损失为：

$$M_{\text{loss-N}_2\text{O}} = 310 \times FE_{\text{N}_2\text{O}}(N_{\text{rate}}) \times P_{\text{gh}} \times 44/28 \quad (4)$$

式中， $FE_{\text{N}_2\text{O}}(N_{\text{rate}})$ 为施氮后 N_2O -N 的边际排放量 (kg hm^{-2})，是施氮量 N_{rate} 的函数；310 为 1 kg N_2O 等量 CO_2 温室气体效应的转换系数； P_{gh} 为国际上 CO_2 的市场价格 (元 kg^{-1})，44/28 为 N 对 N_2O 的转换系数。

太湖地区氮肥主要以尿素为主 (含氮量 46%)，当前尿素的价格为 1.75 元 kg^{-1} ，折合成氮为 3.8 元 kg^{-1} 。氮肥成本 (M_N , 元 hm^{-2}) 为氮肥的价格 (P_N , 元 kg^{-1}) 与施氮量 (N_{rate} , kg hm^{-2}) 的乘积。

1.3.2 边际农学效益 在一定的范围内，随着施氮量的增加，小麦的产量也随之增加。在本研究中，边际农学效益主要考虑增加单位氮肥用量所能增加的小麦产量效益。2010 年小麦的平均价格为 1.5 元 kg^{-1} ，边际农学效益即为小麦增产量与小麦单价的乘积。

1.4 不确定性分析

产量和各种氮素损失的测量误差及价格的波动均会导致推荐施肥量的不同。为了辨别其中最重要的影响因子，应用蒙特卡洛模拟方法，在各种参数的变化范围内随机取值，分析推荐施肥量计算结果的不确定性范围与模型参数重要性程度。

为了比较模型对不同参数的灵敏度差异，需要首先将参数无量纲化，通过灵敏度指数指示净收入随各输入参数变化的强度：

$$\frac{y - \bar{y}}{S_y} = \beta_i \frac{f(x_i - \bar{x}_i)}{S_{x_i}} \quad (5)$$

式中， β_i 为参数 x_i 的灵敏度指数。由于每个参数 x_i 取值不同， y 一般不保持为常数，因此通过对大量样本的统计分析获取 x_i 的统计平均值，用以总体描述不同模型参数的灵敏度差异。然而，如果 x_i 和 y 成非线性相关或参数 x_i 之间有显著的相关关系，用 β_i 来指示灵敏度就会产生很大的误差^[11]。因此采用偏不确定性 (Partial uncertainty contribution, PUC) 指示方法来分析 y 对 x_i 的灵敏度，该方法考虑了参数之间的互相影响：

$$PUC_k = \sum_{i=1}^p \beta_i \cdot r_{x_i y} \cdot r_{x_k y_i}^2 \quad (6)$$

式中， $r_{x_i y}$ 和 $r_{x_k y_i}$ 分别为 x_i 与 y 和 x_k 与 y_i 之间的相关系数。通过 PUC 指数的大小即可判断各参数对模型重要性的高低。

在分析氮肥的农学、环境和经济综合效益时，不确定性主要来源于两个方面：实验数据测定和价格波动。实验数据测定的不确定性主要由于土壤属性、气候变化、田间管理、测定方法等的差别而引起，可以通过拟合函数系数的标准差来表示（见下节）。价格波动主要是由于市场原因引起的价格变化，可以通过市场调查一定时间段内的价格范围来确定。

2 结果与分析

2.1 小麦产量与施氮量的关系

根据文献研究数据的统计结果，得到施氮量与小麦产量的关系如图 1 所示。小麦总产量 ($T_{\text{yield}}(N_{\text{rate}})$, kg hm^{-2}) 可以用施氮量 (N_{rate} , N kg hm^{-2}) 的二次函数表示：

$$T_{\text{yield}}(N_{\text{rate}}) = -(0.039 \pm 0.005)N_{\text{rate}}^2 + (20.1 \pm 1.9)N_{\text{rate}} + (2198.5 \pm 155.8) \quad (7)$$

由式 (7) 可知，当不施肥时，太湖地区小麦的基础产量为 $(2198.5 \pm 155.8) \text{ kg}$ ，小麦的边际产量为总产量减去基础产量。当施氮量为 258 kg hm^{-2} 时，小麦产量最高为 4788 kg 。当施氮量超过 258 kg hm^{-2} 时，小麦产量反而随施氮量的增加而下降。

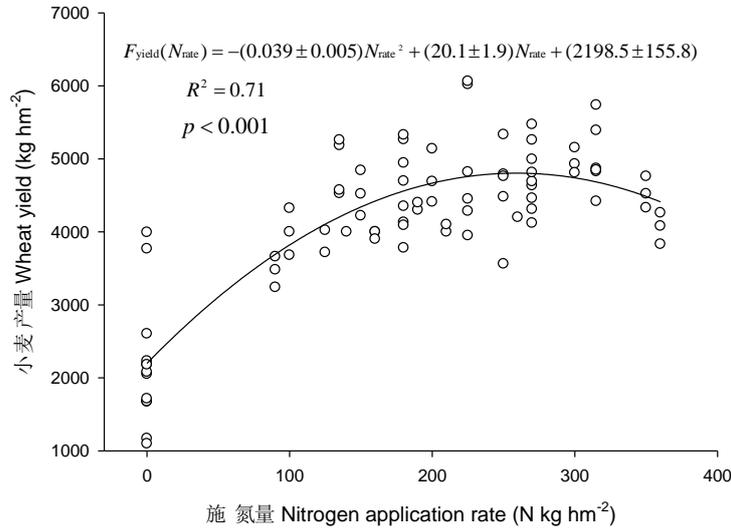


图 1 太湖地区小麦产量与施氮量关系图

Fig.1 Relationship between wheat yield and nitrogen application rates in the Taihu Lake region

2.2 氮素损失与施氮量的关系

2.2.1 氨挥发量与施氮量的关系 氨挥发是氮肥损失的重要途径，容易受气候和土壤条件的影响，因此变异较大。在太湖地区，麦季生长期氨挥发损失率在 $1.51\% \sim 19.2\%$ 之间^[12-13]。根据当前太湖地区监测数据，发现麦季氨挥发 ($T_{\text{NH}_3}(N_{\text{rate}})$, kg hm^{-2}) 与施氮量成显著线性相关 (图 2)：

$$T_{\text{NH}_3}(N_{\text{rate}}) = (1.20 \pm 1.34) + (0.077 \pm 0.012)N_{\text{rate}} \quad (8)$$

由式 (8) 可知，太湖地区氨挥发损失占总施氮量的比例约为 7.7% ，土壤氨挥发量的背景值约为 1.20 kg hm^{-2} 。太湖地区麦季氨挥发的边际损失量 ($F_{\text{NH}_3}(N_{\text{rate}})$, kg hm^{-2}) 可表示为：

$$F_{\text{NH}_3}(N_{\text{rate}}) = (0.077 \pm 0.012)N_{\text{rate}} \quad (9)$$

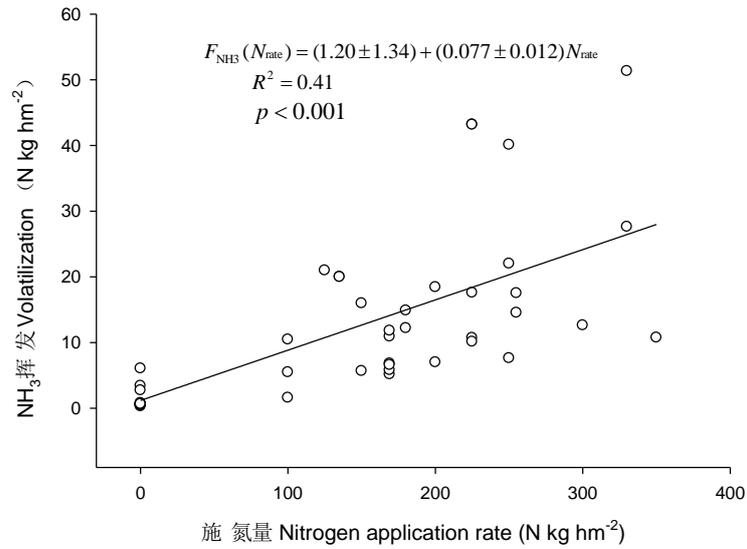


图 2 太湖地区麦季氨挥发量与施氮量关系图

Fig.2 Relationship between NH_3 volatilization and nitrogen application rates for the wheat season in the Taihu Lake region

2.2.2 N_2O 排放与施氮量的关系 麦季与稻季不同，稻季由于要实行水分管理，导致 N_2O 排放速率在排水和淹水阶段有明显的变化。而麦季土壤没有田面水， N_2O 排放速率主要受氮肥种类和氮肥用量的影响^[14]。由于麦季施氮量与 N_2O 排放量的关系不显著，而与边际排放量（ N_2O 排放量-土壤排放背景值）的关系显著（图 3），因此太湖地区麦季 N_2O 排放的边际损失量（ $F_{\text{N}_2\text{O}}(N_{\text{rate}})$, kg hm^{-2} ）可表示为：

$$F_{\text{N}_2\text{O}}(N_{\text{rate}}) = (0.21 \pm 0.11) \exp[(0.010 \pm 0.002)N_{\text{rate}}] \quad (10)$$

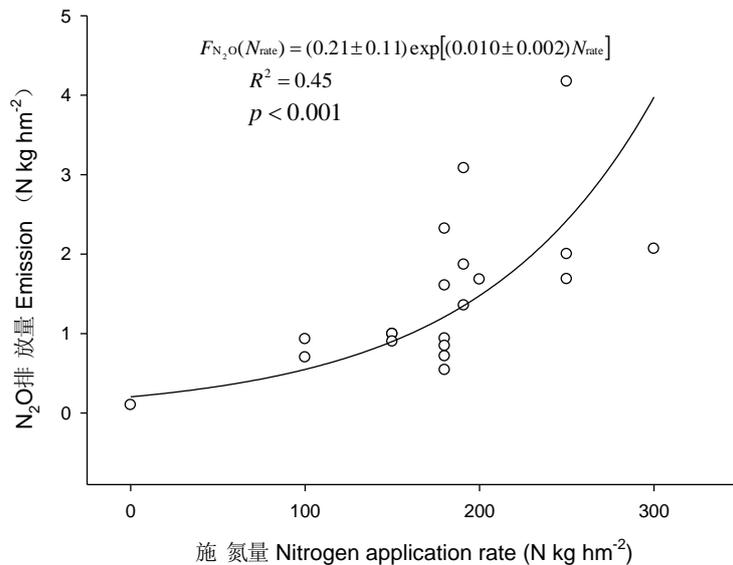


图 3 太湖地区麦季 N_2O 排放量与施氮量关系图

Fig.3 Relationship between N_2O emission and nitrogen application rates for the wheat season in the Taihu Lake region

2.2.3 径流和淋洗中总氮损失量与施氮量的关系 硝态氮和氨态氮均会通过径流和淋洗过程

从田间损失。文献中往往缺少硝氮和氨氮的数据，而只有总氮的损失量。淋洗和径流液中总氮损失（分别为 $TL_{TN}(N_{rate})$ 和 $TR_{TN}(N_{rate})$ ， kg hm^{-2} ）和施氮量的关系分别如图 4 和图 5 所示，其相关关系式如下：

$$TL_{TN}(N_{rate}) = (1.91 \pm 0.82) + (0.021 \pm 0.004)N_{rate} \quad (11)$$

$$TR_{TN}(N_{rate}) = (5.36 \pm 1.95) \exp[(0.006 \pm 0.001)N_{rate}] \quad (12)$$

由式（11）和式（12）可以看出，麦季淋洗和径流中总氮损失量的背景值分别为 N （ 1.91 ± 0.82 ）和（ 5.36 ± 1.95 ） kg hm^{-2} 。总氮损失量减去背景排放值即为边际损失量（ FL_{TN} 和 FR_{TN} ， kg hm^{-2} ）。

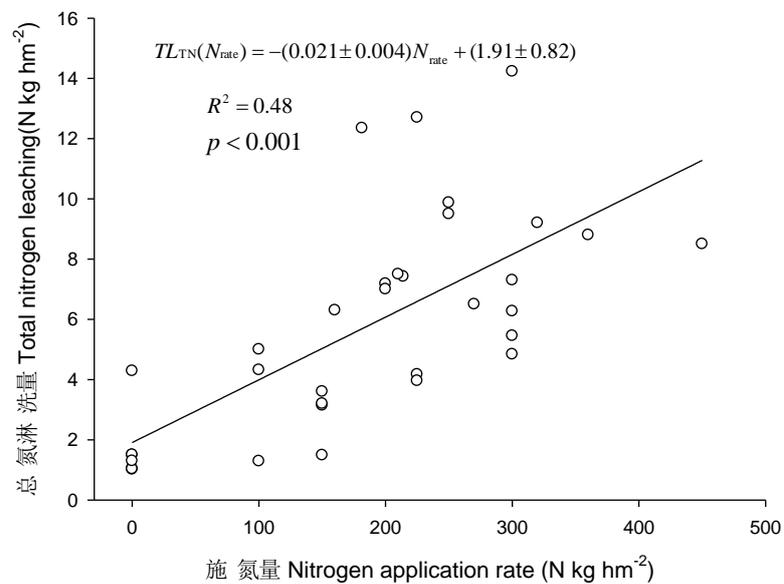


图 4 太湖地区麦季总氮淋洗量与施氮量关系图

Fig.4 Relationship between total nitrogen leaching and nitrogen application rates in the wheat season for the Taihu Lake region

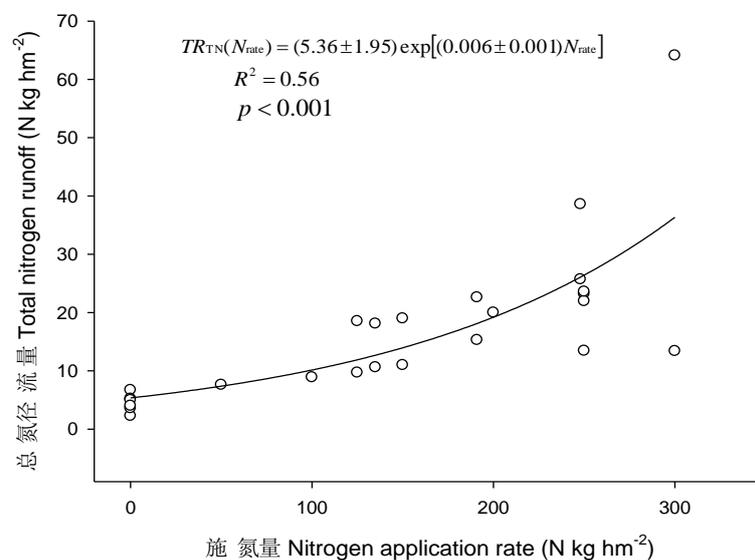


图5 太湖地区麦季总氮径流量与施氮量关系图

Fig.5 Relationship between total nitrogen runoff and nitrogen application rates for the wheat season in the Taihu Lake region

2.3 推荐施肥量

通过以上施氮量与边际产量和环境损失的关系式，联合构建的农学和环境统一经济评价指标，就可以应用式(1)计算氮肥的净收益以及边际产量收益、氮肥成本和边际环境损失。如图6所示，当施氮量为 258 kg hm^{-2} 时，边际产量的收益最大为 3885 元 hm^{-2} ，但是氮肥成本和环境损失之和高达 1444 元 hm^{-2} ，净收益为 2441 元 hm^{-2} 。而当施氮量为 205 kg hm^{-2} ，虽然产量收益要略低(3722 元 hm^{-2})，但是氮肥成本和环境损失大大降低(1101 元 hm^{-2})，此时净收益达到最大为 2621 元 hm^{-2} ，各环境损失大小依次为酸雨效应损失 151 元 hm^{-2} ，温室效应损失 119 元 hm^{-2} ，富营养化效应损失 52 元 hm^{-2} 。因此，太湖地区麦季的推荐施氮量为 205 kg hm^{-2} 。

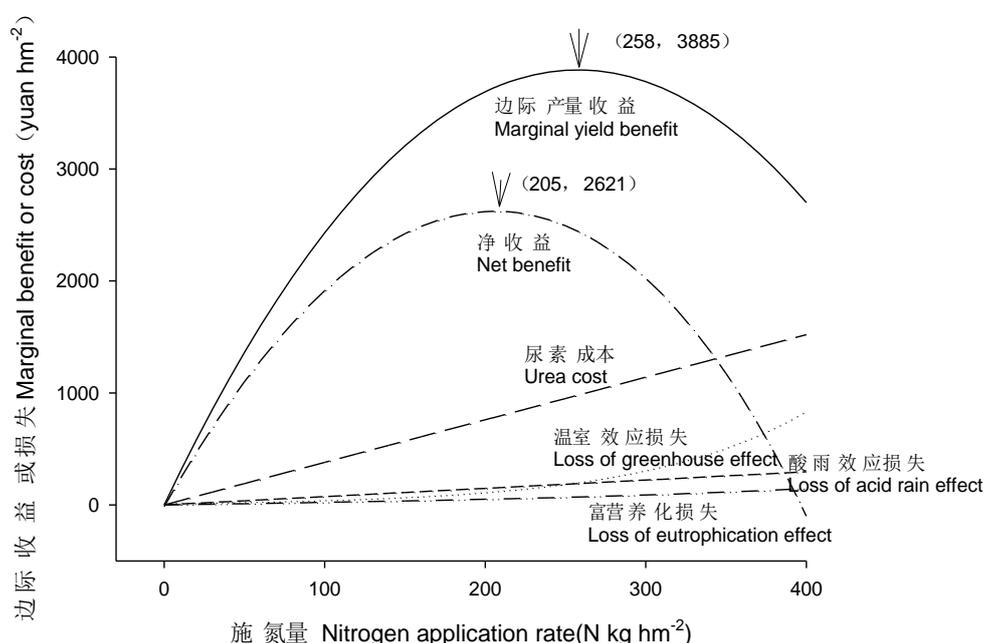


图6 太湖地区麦季边际效益或损失与施氮量关系图

Fig.6 Relationship of marginal benefits or loss with nitrogen application rates for the wheat season in the Taihu Lake region

由于各氮素去向的测量误差或者价格波动，会导致推荐施肥量和最大净收益发生变化。由以上氮素各种去向与施氮量的关系式，可得本研究所需的参数不确定性范围如表1所示。通过蒙特卡洛分析，最佳施氮量和最大净收益的波动范围分别为 $N\ 166.7\sim 243.4\text{ kg hm}^{-2}$ 和 $1943\sim 3301\text{ 元 hm}^{-2}$ 之间(表2)。最大净收益的变异系数(13.21%)大于推荐施肥的变异系数(9.54%)。根据置信区间的确定方法，置信度为95%的最大净收益置信区间为(2612, 2632) 元 hm^{-2} ，置信度为95%推荐施氮量置信区间为(204.5, 205.6) kg hm^{-2} 。

表1 蒙特卡洛模拟所需参数的变化范围

Table 1 Variability of model input parameters for Monte Carlo simulation

N素去向	参数均值 (标准差)	价格类型	价格范围
Nitrogen pathway	Mean (Std. deviation)	Price type	Price ranges (yuan kg ⁻¹)
T_{yield}	-0.039(±0.005); 20.1(±1.9)	P_{wheat}	1.4~1.6
T_{NH_3}	0.077(±0.012)	P_a	4.5~6.0
$F_{\text{N}_2\text{O}}$	0.010(±0.002)	P_{gh}	0.07~0.30
TL_{TN}	0.021(±0.004)	P_e	3.27~4.28
TR_{TN}	0.006(±0.001)	P_N	3.6~4.0

表 2 最大净收入、推荐施肥量、尿素成本及氮素各种去向的不确定性

Table 2 Uncertainties in the fate of nitrogen, urea cost, recommended fertilization and maximum net benefits for the wheat season in the Taihu Lake region

	最小	最大	均值	标准差	变异系数
	Minimum	Maximum	Mean	Std. deviation	CV(%)
最大净收入	1 943	3 301	2 622	346	13.21
Maximum net benefit (yuan hm ⁻²)					
推荐施肥量	166.7	243.4	205.1	19.6	9.54
Recommendation rate (N kg hm ⁻²)					
F_{yield} (kg hm ⁻²)	2 021	3 169	2 591	290	11.19
F_{NH_3} (N kg hm ⁻²)	11.38	18.52	14.95	2.33	15.58
$F_{\text{N}_2\text{O}}$ (N kg hm ⁻²)	1.38	2.81	1.95	0.39	20.00
FR_{TN} (N kg hm ⁻²)	12.96	24.14	18.95	3.16	16.67
FL_{TN} (N kg hm ⁻²)	2.90	6.24	4.47	0.85	19.05
P_N (yuan hm ⁻²)	605.3	871.3	738.3	72.4	10.14

3 讨论

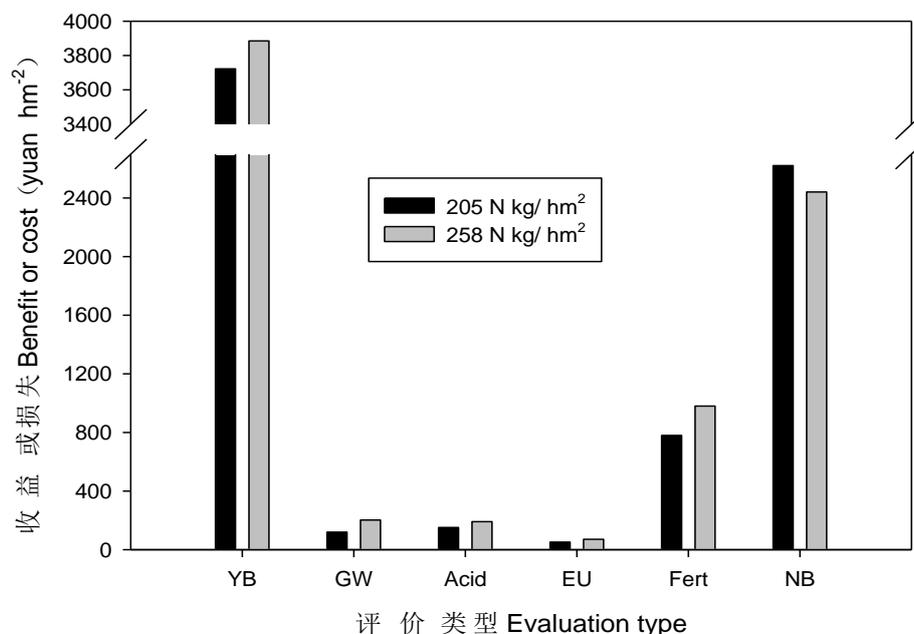
3.1 各推荐施肥确定方法的比较

推荐施肥按照确定方法的不同可以通过事后 (*ex post optimal nitrogen rates*) 与事前估计 (*ex ante recommendations*) 确定^[15]。事后估计是评价性的, 往往基于已有的施氮水平和产量的关系, 用氮肥的产量收益扣除环境代价和氮肥的成本计算净收益^[16-17]。而事前估计是预测性的, 强调环境限制因子, 通常根据土壤、气候、作物和氮肥价格等参数预测最佳施氮量^[18-19], 因此最佳施氮量的大小直接取决于氮肥的边际产量。当一个地区没有充分认识到作物产量与环境因子和氮肥的关系时, 用事前估计方法预测结果往往与实际值会有很大的偏差, 存在很大的应用风险。作物施氮量与边际产量关系越不显著, 事前估计的推荐施肥值就越不可靠, 在实际生产中就会产生很大的误导作用^[15]。

在太湖地区, 研究者常采用事后评估的方法计算推荐施氮量。其典型代表如朱兆良^[20]基于多点施氮量与产量关系的田间实验, 应用氮肥的产量效益扣除氮肥的成本, 计算了太湖地区水稻的推荐施氮量, 但是该方法没有考虑氮肥的环境损失。吕耀等^[2]和 Liang 等^[4]在计算麦季推荐施肥过程中, 也只考虑了氮素淋洗或径流对太湖造成的富营养化损失, 没有考虑其他类型的环境损失。而 Wang 等^[21]假定环境总损失等于氮肥的成本, 该方法没能将环境损失细分成富营养化效应损失、温室效应损失、酸雨效应损失, 计算结果过于粗略。以上方法的缺陷是缺少一个氮肥农学与环境的统一评价指标, 以及氮素各种去向数据的支撑。

如图 7 所示, 与产量最大时的施氮量 (258 kg hm⁻²) 相比, 本研究的推荐施氮量的产量收益 (YB) 虽然略低 (低 4.3%), 但施氮量大大降低 (低 25.9%), 各种环境损失也小于产

量最大时的各种环境损失，因而净收益（NB）要高于传统施肥的净收益（高 6.9%）。由于净收益-施氮量曲线在推荐施氮量附近已相当平缓，少量增加或者减少施氮量对净收益影响很小。如若田块之间净经济收益变化 10 元 hm^{-2} ，区域平均施氮量变动于 193~218 kg hm^{-2} 之间。本推荐施氮量在太湖稻麦轮作区具有广泛的应用价值。与农民通过经验方法确定施氮量相比（施氮量往往高达 230~270 kg hm^{-2} ），本研究推荐施氮量能减少 10%~40% 的施氮量，而净经济效益能提高 5%~15%。



YB: 产量收益 Yield benefit; GW: 温室效应损失 Loss of greenhouse effect; Acid: 酸雨效应损失 Loss of acid rain effect; EU: 富营养化效应损失 Loss of eutrophication effect; Fert: 肥料成本 Fertilizer cost; NB: 净收益 Net benefit

图 7 太湖地区麦季常规施肥与本研究推荐施肥收益与损失比较

Fig.7 Comparison between conventional N application rate and recommended N application rate in benefit and loss for the wheat season in the Taihu Lake region

3.2 不确定性分析

小麦产量除受施氮量的影响外，还取决于地力水平、氮肥管理模式、气候、栽培密度和品种等因素^[22]。由于无法获取更广泛的数据，本模型还难以描述这些因素对小麦产量以及推荐施氮量的影响。但是在太湖地区，水稻土是小麦生产的主要土壤类型，大部分实验地之间土壤性状差别不显著。各实验地的氮肥管理模式、栽培密度和品种与当地农民习惯相似，气候大致相同。因此，总体而言，本研究的数据来源具有较好的代表性，相应的模型有显著的统计意义。

本模型估算的推荐施肥不确定性为 9.54%，其不确定性主要来自 2 个方面：各氮素去向的测量偏差和各价格波动。如表 2 所示，通过蒙特卡洛模拟表明， N_2O 排放量的不确定性最大，变异系数为 20%，这是由于当前麦季测量 N_2O 精度不高所致。如 Zou 等^[23]收集了太湖地区麦季的 N_2O 测量值，统计表明 N_2O 的排放系数变化范围在 1.25%~2.05% 之间。其余氮素去向的不确定性也主要来源于地理条件变异和测量方式误差等。由于市场因素而存在的肥料价格的波动导致氮肥成本的不确定性。测量数据的偏差可以通过各拟合模型系数的标准差来确定，价格波动可以通过年度各价格指标的变化范围来界定。因此，如能获得较准确的测量数值或者市场价格，本模型的系数可以随时得到修正以减少误差。

各参数对推荐施肥量影响的重要性可以通过偏不确定性指数指示。如表 3 所示, 各因子对推荐施肥和最大净收益影响的重要性基本一致。小麦产量拟合因子、小麦价格和氮肥价格是其中最重要的因子, 在具体的田间实践中, 应尽可能准确地获取这些参数值。而 N_2O 排放拟合因子、 P_e 、 P_{gh} 是最不敏感的因子。其中 N_2O 虽然温室效应大, 但是排放量相对较小, 测量值变异小, 所以对整个模型估算结果影响不大, 在推荐施肥中可以忽略。富营养化价格参数在模型中虽然重要性较低, 但是仍然与推荐施肥和最大净收益估算值显著相关, 在模型中不能忽略。

表 3 应用偏不确定性评价各参数对模型重要性的高低 (-表示负相关)

Table 3 Evaluation of contribution of each parameter to the model with partial uncertainty contribution (PUC) (- implies that the contribution is negligible)

因子 Parameter	推荐施肥 Recommendation rate		最大净收益 Maximum net benefit	
	偏不确定性	重要性	偏不确定性	重要性
	Partial uncertainty contribution	Ranking	Partial uncertainty contribution	Ranking
T_{yield}	0.04*	8	0.06*	8
	0.25*	1	0.17*	1
T_{NH_3}	-0.11*	6	-0.07*	7
F_{N_2O}	-0.03*	9	-0.05*	9
TL_{TN}	-0.14*	4	-0.09*	4
TR_{TN}	-0.12*	5	-0.08*	5
P_{wheat}	0.17*	3	0.15*	2
P_a	-0.08*	7	-0.07*	6
P_{gh}	-0.02	11	-0.01	11
P_e	-0.03*	10	-0.03*	10
P_N	-0.19*	2	-0.15*	3

注: *, 在 $p=0.05$ 水平上显著 Note: *, Significant in $p=0.05$ level

4 结论

本研究基于太湖地区大量氮肥去向与氮肥用量实验的监测结果, 率先建立了评价氮肥农学和环境效应的统一经济指标, 并构建了评价模型。运用该模型, 分别计算了麦季氮肥的边际产量效应、富营养化效应、温室气体效应、酸雨效应, 得到太湖地区麦季协调农学、环境和经济效益的推荐施氮量为 205 kg hm^{-2} , 最大净收益为 2621 元 hm^{-2} 。若田块之间净经济收益变动 10 元 hm^{-2} , 区域平均施氮量变动于 $193\sim 218 \text{ kg hm}^{-2}$ 之间。该推荐施肥确定方法简单可行, 环境效应考虑全面, 估算的推荐施肥量能大大改善太湖地区氮肥高投入、高污染的特点, 达到产量、环境、经济的和谐统一。

参考文献

- [1] 邢光熹, 曹亚澄, 施书莲, 等. 太湖地区水体中氮的来源和反硝化作用. 中国科学 B 辑, 2001, 31(2): 130-137. Xing G X, Cao Y C, Shi S L, et al. N pollution sources and denitrification in water bodies in the Taihu Lake region (In Chinese). Science in China Series B, 2001, 31(4): 130-137
- [2] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Guidelines for national greenhouse gas inventories. 2006, <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/>
- [3] Roelcke M, Han Y, Schleaf K H, et al. Recent trends and recommendations for nitrogen fertilization in intensive agriculture in eastern China. Pedosphere, 2004, 14(4): 449-460

- [4] 王德建, 林静慧, 孙瑞娟, 等. 太湖地区稻麦高产的氮肥适宜用量及其对地下水的影响. 土壤学报, 2003, 40(3): 426-432. Wang D J, Lin J H, Sun R J, et al. Optimum nitrogen rate for a high productivity rice-wheat system and its impact on the groundwater in the Taihu Lake region (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(3): 426-432
- [5] 晏娟, 沈其荣, 尹斌, 等. 太湖地区稻麦轮作系统下施氮量对作物产量及氮肥利用率影响的研究. 土壤, 2009, 41(3): 372-376. Yan J, Shen Q R, Yin B, et al. Effects of fertilizer N application rate on yields and use efficiencies in rice-wheat rotation system in Taihu Lake region (In Chinese). *Soils*, 2009, 41(3): 372-376
- [6] 吕耀, 程序. 太湖地区农氮素非点源污染及环境经济分析. 上海环境科学, 2000, 19(4): 143-145. Lv Y, Cheng X. Nitrogen pollution from agricultural non-point sources in the Taihu Lake region and its environmental economics analysis (In Chinese). *Shanghai Environmental Science*, 2000, 19(4): 143-145
- [7] Moomaw W R, Birch M B. Cascading costs: An economic nitrogen cycle. *Science in China Series C: Life Sciences*, 2005, 48: 678-696
- [8] Goedkoop M. The eco-indicator 95: Weighting method for environmental impact analysis for clean design. *Computer and Chemical Engineering*, 1995, 20: 1 377-1 382
- [9] Aneja V P, Bunton B, Walker J T, et al. Measurement and analysis of atmospheric ammonia emissions from anaerobic lagoons. *Atmospheric Environment*, 2001, 35(11): 1 949-1 958
- [10] 向平安, 周燕, 江巨鳌, 等. 洞庭湖区氮肥外部成本及稻田氮素经济生态最佳投入研究. 中国农业科学, 2006, 39(12): 2531-2537. Xiang P A, Zhou Y, Jiang J A, et al. Studies on the external costs of and the optimum use of nitrogen fertilizer based on the balance of economic and ecological benefits in the paddy field system of the Dongting Lake area (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(12): 2 531-2 537
- [11] Sobol I M. Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2001, 55(1/3): 271-280
- [12] 黄进宝, 葛高飞, 范晓晖. 太湖地区麦季氨挥发与氮素利用的研究. 安徽农业大学学报, 2009, 36(4): 677-682. Huang J B, Ge G F, Fan X H. Nitrogen use efficiency and ammonia volatilization from urea applied to wheat on a paddy field in Taihu Lake region (In Chinese). *Journal of Anhui Agricultural University*, 2009, 36(4): 677-682
- [13] 范晓晖, 宋勇生. 太湖地区麦季氮肥的氨挥发及其影响因素的研究//江苏省土壤学会. 江苏土壤肥料科学与农业环境. 南京: 河海大学出版社, 2006: 201-207. Fan X H, Song Y S. Ammonia volatilization from wheat fields in the Taihu Lake region and its influencing factors// Soil Science Society of Jiangsu. *Jiangsu soil and fertilizer science and agricultural environment* (In Chinese). Nanjing: Hohai University Press, 2006: 201-207
- [14] 郑循华, 王明星, 王跃思, 等. 华东稻麦轮作生态系统的 N_2O 排放研究. 应用生态学报, 1997, 8(5): 495-499. Zheng X H, Wang M X, Wang Y S, et al. N_2O emission from rice-wheat ecosystem in Southeast China (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1997, 8(5): 495-499
- [15] Rajsic P, Weersink A. Do farmers waste fertilizer? A comparison of ex post optimal nitrogen rates and ex ante recommendations by model, site and year. *Agricultural Systems*, 2008, 97(1/2): 56-67
- [16] Liu Y, Swinton S M, Miller N R. Is site-specific yield response consistent over time? Does it pay? *American Journal of Agricultural Economics*, 2006, 88(2): 471-483
- [17] Yadav S N, Peterson W, Easter K W. Do farmers overuse nitrogen fertilizer to the detriment of the environment? *Environmental and Resource Economics*, 1997, 9(3): 323-340
- [18] Ontario Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs. General recommended nitrogen rates for maize. 2006, <http://www.gomaize.net/v2006/Ncalc/Ontario%20N%20calculator.xls>
- [19] Lambert D M, Lowenberg-DeBoer J, Malzer G L. Economic analysis of spatial-temporal patterns in corn and soybean response to nitrogen and phosphorus. *Agronomy Journal*, 2006, 98(1): 43-54
- [20] 朱兆良. 推荐氮肥适宜适用量的方法论刍议. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(1): 1-4. Zhu Z L. On the methodology of recommendation for the application rate of chemical fertilizer nitrogen to crops (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(1): 1-4

- [21] Wang D J, Liu Q, Lin J H, et al. Optimum nitrogen use and reduced nitrogen loss for production of rice and wheat in the Yangtze Delta region. *Environmental Geochemistry and Health*, 2004, 26: 221-227
- [22] 汤勇华, 黄耀. 中国大陆主要粮食作物地力贡献率及其影响因素的统计分析. *农业环境科学学报*, 2008, 27(4):1 283-1 289.
Tang Y H, Huang Y. Statistical analysis of the percentage of soil fertility contribution to grain crop yield and driving factors in mainland China (In Chinese). *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(4): 1 283-1 289
- [23] Zou J W, Huang Y, Lu Y, et al. Direct emission factor for N₂O from rice–winter wheat rotation systems in southeast China. *Atmospheric Environment*, 2005, 39: 4 755-4 765

Nitrogen fertilization rate recommendation integrating agronomic, environmental, and economic benefits for wheat season in the Taihu Lake region

Xia Yongqiu Yan Xiaoyuan[†]

(Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract Excessive nitrogen (N) fertilization in wheat season in the Taihu Lake region has resulted in serious environmental problems. Previous studies have recommended optimum N fertilization rate. However, so far no holistic evaluation has been made of environmental impacts of N fertilizer. Therefore, based on experiments on fates of various N fractions in relation to N application rate in the region, an evaluation model for knock-on effect of N was developed, integrating agronomic, environmental, and economic benefits in wheat season in the Taihu Lake region. Evaluation with the model show that N application was recommended at N 205 kg hm⁻² for wheat season in the Taihu Lake region, which may bring about maximum net benefit 2 621 Yuan, which is the balance between 3 722 yuan hm⁻² in yield benefit and 1 101 yuan hm⁻² in total environmental loss. The total loss covers the following losses lined in a decreasing sequence in terms of value, acid rain, greenhouse effect and eutrophication. If the net economic benefit is allowed to fluctuate within the range of 10 yuan hm⁻², the recommended regional mean N application rate would vary in the range from 193 to 218 kg hm⁻², which is 10% to 40% lower than the prevailing N application rate, and nevertheless, would increase the net economic benefit by 5%~15% in the Taihu Lake region. This method not only takes into account agronomic, environmental and economic benefits comprehensively, but also provides reference for eco-farming in other regions or other crops. It is easy for decision-makers and farmers to calculate or recommend N fertilizer rate.

Key words Recommended nitrogen application rate; Harmonized agronomic, environmental, and economic benefits; Model; Maximum net benefit; Taihu Lake region