

太湖流域农业污染压力分析*

李 静^{1,2} 闵庆文^{2**} 李子君¹ 焦雯珺^{2,3} 袁 正^{2,3} 伦 飞^{2,3}

(1. 山东师范大学 济南 250014; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所 北京 100101;
3. 中国科学院研究生院 北京 100049)

摘 要 太湖及其流域的水环境质量呈现严重恶化趋势, 农业污染物的排放是太湖流域水体环境恶化的主要原因之一。太湖流域农业污染物主要来源于种植业、畜禽养殖业和水产养殖业的生产过程。本文从综合考虑种植业、畜禽养殖业和水产养殖业生产过程中产生的污染物对水环境影响的角度, 构建农业污染压力模型, 计算农业污染压力指数, 定量分析了处于太湖流域的江苏省常州和宜兴两市农业污染物排放对水环境影响的严重性。研究结果表明: 两市农业生产过程中产生的氮和磷污染物是造成水体污染的主要贡献者, 其污染压力指数普遍大于 1; 农业污染压力指数在空间分布上存在明显差异; 虽两市近年来单位面积化肥农药的使用量有所减少, 但仍远远高于安全使用量的上限, 以常州市为例, 2008 年单位耕地面积化肥施用量为 $452.71 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 为 2000—2008 年期间最少的一年, 但仍然高于发达国家为防止化肥对水体污染所规定的平均化肥施用量的安全上限 $225 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。本文从整体上分析了农业污染物排放对水环境产生的影响, 对实现水资源的可持续利用和水环境管理具有一定的参考价值。

关键词 污染压力指数 农业污染 水环境管理 太湖流域 总氮 总磷 化学需氧量
中图分类号: X824 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2012)03-0348-08

Agricultural pollution pressure in the Taihu Lake Basin

LI Jing^{1,2}, MIN Qing-Wen², LI Zi-Jun¹, JIAO Wen-Jun^{2,3}, YUAN Zheng^{2,3}, LUN Fei^{2,3}

(1. Shandong Normal University, Jinan 250014, China; 2. Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract The serious water environment quality deterioration in the Taihu Lake Basin (TLB) has been largely blamed on agricultural pollution. The pollutants were mainly from the processing of plant, livestock and poultry and aquacultural products. This paper developed an agricultural pollution model that calculates the pressure index of agricultural pollution based on the cultivation of plants and the breeding of livestock, poultry and aquaculture. The results showed that nitrogen and phosphorus pollutants largely contributed to water pollution with pollution pressure index value greater than one. Spatial distributions of agricultural pollution pressure index differed not only with different cultivation and breeding practices, but also with region. Although fertilizer and pesticide dose per unit area decreased, it was still far above the upper limit of safety usage. For example, the lowest fertilizer dose in Changzhou City during 2000—2008 was $452.71 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (in 2008), which was still above the $225 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ upper safe limit. The findings in this paper served as important reference for sustainable usage of water resources and water environment management in terms of the influence of agriculture pollution on the water environment.

Key words Pollution pressure index, Agricultural pollution, Water environment management, Taihu Lake Basin, Total nitrogen, Total phosphorus, Chemical oxygen demand
(Received Jul. 17, 2011; accepted Oct. 28, 2011)

太湖流域人口密集, 经济发达, 土地利用集约, 是我国最早的农业生产地区之一。随着城市化进程

的加快和农业生产方式的转变, 农业污染物的排放严重影响了流域的水质, 并使许多湖泊、河流出现

* 国家水体污染控制与治理科技重大专项课题(2008ZX07526-007)资助

** 通讯作者, E-mail: minqw@igsnr.ac.cn

李静(1986—), 女, 硕士研究生, 研究方向为环境变化与区域可持续发展。E-mail: xiaofengxue86@163.com

收稿日期: 2011-07-17 接受日期: 2011-10-28

了严重的富营养化^[1-3]。太湖流域水环境的不断恶化已经严重威胁到太湖流域工农业发展所依赖的生态基础,影响到城市的供水安全,并对宝贵的自然资源和生态资源造成了破坏^[4]。近年来,农业污染研究成为水环境管理领域研究的一个热点,控制农业非点源污染已成为农业可持续发展和社会主义新农村建设的重大课题之一^[5]。因此,农业污染研究对改善流域水质和实现社会经济的可持续发展具有重要意义。

自20世纪60年代以来,太湖水质的污染明显加剧,表现为每10年左右水质下降1个级别。据太湖流域水资源公报统计,2003—2009年期间,太湖流域50%以上河流水质劣于V类,流域水资源污染严重,农业污染物排放是其主要原因之一,近年来流域农业污染问题及其治理受到越来越多的关注^[6]。现阶段太湖流域农业污染研究主要局限于某一区域的营养元素的试验调查与监测,根据不同污染物的排污系数,得出农业对水环境的影响^[7-13],然而,这些研究缺乏从整体上将种植业、畜禽养殖业和水产养殖业综合考虑,更缺少对水环境污染影响的定量分析。考虑到河网分布和环境容量计算的合理性,本文将江苏省常州市和宜兴市作为研究区,将种植业、畜禽养殖业和水产养殖业综合考虑并定量分析农业生产过程对水环境的影响,为控制农业污染物

的产生和水环境管理提供参考。

1 研究区概况

常州市和宜兴市地处江苏省南部、太湖流域上游(图1),常州市辖金坛、溧阳两市和天宁、钟楼、戚墅堰、新北、武进5区,土地面积4385 km²;宜兴市辖4个街道、14个镇,土地面积2039 km²。研究区地处苏锡常平原区,地势平坦,耕地面积广阔。属亚热带湿润季风气候,四季分明、雨热同期,年平均气温16.3℃,年平均降水量1068.9 mm。境内河道纵横交织,湖塘星罗棋布,南溪水系、洮滆水系是境内主要河流水系,长荡湖、滆湖是境内主要湖泊。

2007年常州市和宜兴市经济总产值为2386.34亿元,第一产业产值81.69亿元,占经济总产值的3.42%;第二产业产值1422.56亿元,占经济总产值的59.61%,其中工业产值为1320.42亿元;第三产业产值882.09亿元,占经济总产值的36.96%。研究区第二产业占主导地位。常州市和宜兴市的社会经济发展水平明显高于全国平均水平。2007年,人均GDP为51493元,是全国人均GDP的2.25倍。然而,在社会经济迅速发展的同时,常州市和宜兴市也付出了沉重的生态环境代价。2007年研究区地表水水污染严重,境内评价河长水质劣于Ⅲ类的占55.80%、Ⅳ类占13.90%、Ⅴ类占14.40%,仅有15.90%的评价河长水质为Ⅱ类和Ⅲ类。

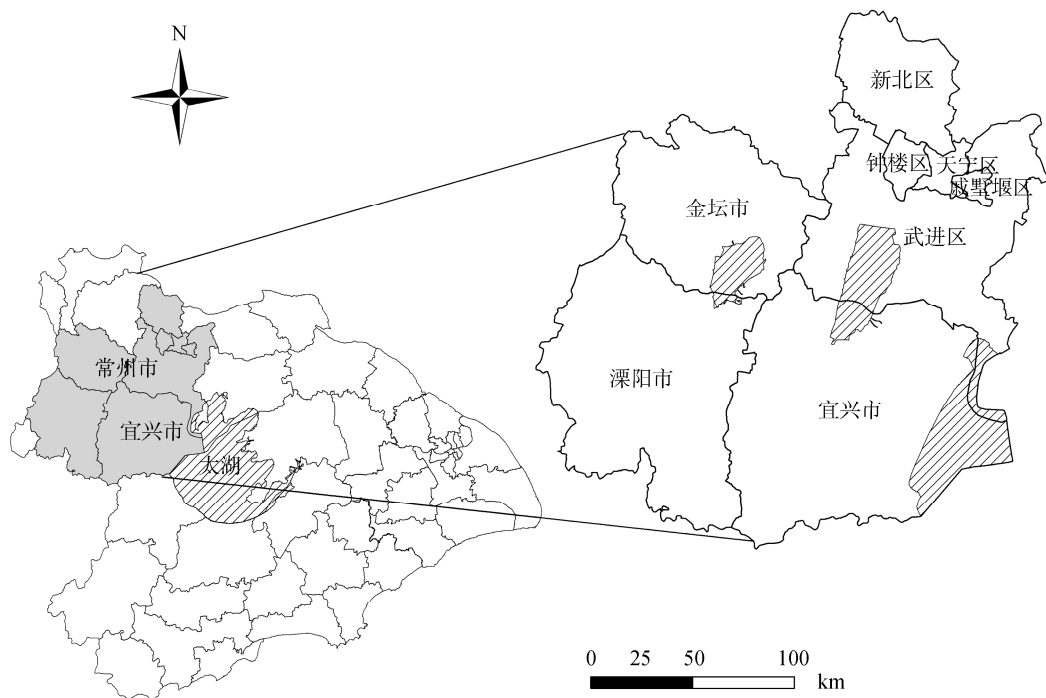


图1 研究区位置

Fig. 1 Location of the study area

2 研究方法及数据来源

2.1 研究方法

本文涉及的农业主要包括种植业、畜禽养殖业和水产养殖业 3 种类型。考虑到研究区的实际情况和数据可得性,通过构建农业污染压力模型,计算农业污染压力指数,定量分析农业污染物排放对水环境的影响。首先,根据研究区 2007 年污染源普查资料计算农业污染物(有机物、氮和磷)的入河量。其次,计算研究区农业污染物的水环境容量。最后,结合农业污染物的入河量及其水环境容量,计算得到农业污染压力指数,进而定量分析农业污染物排放对水环境的影响程度。

2.1.1 种植业污染物产生量、排放量和入河量

种植业的化学需氧量(COD_{C_f})、总氮(TN_{C_f})和总磷(TP_{C_f})的产生量可根据式(1)计算得到:

$$W_{C_f} = \sum A_{fi} \times C_{fi} \quad (1)$$

式中, W_{C_f} 为种植业污染物的产生量(kg·a⁻¹); i 为土地利用方式(南方湿润平原区和南方山地丘陵区均分别为旱地、水田、园地和保护地 4 种土地利用方式); A_{fi} 为某土地利用方式的土地面积(hm²), 取自研究区污染源普查数据; C_{fi} 为某土地利用方式肥料流失系数(kg·hm⁻²)[TN 和 TP 的取值通过对《第一次全国污染源普查——农业污染源之肥料流失系数手册》整理得到, COD 取值来自张桂英等^[14]的研究成果]。

种植业的化学需氧量(COD_{P_f})、总氮(TN_{P_f})和总磷(TP_{P_f})的排放量可根据式(2)计算得到:

$$W_{P_f} = W_{C_f} \times P_f \quad (2)$$

式中, W_{P_f} 为种植业污染物的排放量(kg·a⁻¹), W_{C_f} 与式(1)相同, P_f 为种植业污染物的排放系数(结合实地调研, 本文取值 1, 即排放量等于产生量)。

种植业的化学需氧量(COD_{R_f})、总氮(TN_{R_f})和总磷(TP_{R_f})的入河量可根据式(3)计算得到:

$$W_{R_f} = W_{P_f} \times R_f \quad (3)$$

式中, W_{R_f} 为种植业污染物的入河量(kg·a⁻¹), W_{P_f} 与式(2)相同, R_f 为种植业污染物的入河系数[结合实地调研成果和太湖流域各类污染源污染物的入河系数表(表 1), 本文取值 0.3]。

表 1 太湖流域各类污染源污染物的入河系数表

Table 1 Coefficients of losing into rivers of pollutants from different sub-industries of agriculture in the Taihu Lake Basin

污染物 Pollutant	种植业 Farming	畜禽养殖业 Livestock and poultry raising	水产养殖业 Aquaculture
COD	0.1~0.3	0.5~0.8	0.8~1.0
NH ₃ -N	0.1~0.3	0.5~0.8	0.8~1.0
TN	0.1~0.3	0.5~0.8	0.8~1.0
TP	0.1~0.3	0.5~0.8	0.8~1.0

来自《太湖流域主要入湖河流环境综合整治规划编制规范》
Come from The Workout Criterion to Comprehensive Control of the Main Inflow Rivers in Taihu Lake Basin.

2.1.2 畜禽养殖业污染物产生量、排放量和入河量
畜禽养殖业的化学需氧量(COD_{C_s})、总氮(TN_{C_s})和总磷(TP_{C_s})的产生量可根据式(4)计算得到:

$$W_{C_s} = \sum \sum N_{sij} \times L_{sij} \times C_{sij} \times 10^{-3} \quad (4)$$

(i=1, 2, 3; j=1, 2, ..., 5)

式中, W_{C_s} 为畜禽养殖业污染物的产生量(kg·a⁻¹); i 为饲养阶段(其中生猪包括保育、育肥和妊娠 3 个饲养阶段, 奶牛包括育成牛和产奶牛两个饲养阶段, 肉牛包括育肥牛 1 个饲养阶段, 蛋鸡包括育雏育成和产蛋鸡两个饲养阶段, 肉鸡包括商品肉鸡 1 个饲养阶段); j 为动物种类(生猪、奶牛、肉牛、蛋鸡和肉鸡); N_{sij} 为某种饲养阶段的某种动物存栏量(头), 取自研究区污染源普查数据; L_{sij} 为某种饲养阶段某种动物的生长周期(d), 取自研究区污染源普查数据; C_{sij} 为某种饲养阶段某种动物产污系数(g·头⁻¹·d⁻¹, 来自《第一次全国污染源普查畜禽养殖业污染源产排污系数手册》)。

畜禽养殖业的化学需氧量(COD_{P_s})、总氮(TN_{P_s})和总磷(TP_{P_s})的排放量可根据式(5)计算得到:

$$W_{P_s} = \sum \sum N_{sij} \times L_{sij} \times P_{sij} \times 10^{-3} \quad (5)$$

(i=1, 2, 3; j=1, 2, ..., 5)

式中, W_{P_s} 为畜禽养殖业污染物的排放量(kg·a⁻¹), i 、 j 、 N_{sij} 、 L_{sij} 与式(4)相同, P_{sij} 为某种饲养阶段的某种动物排污系数(g·头⁻¹·d⁻¹, 来自《第一次全国污染源普查畜禽养殖业污染源产排污系数手册》)。

畜禽养殖业的化学需氧量(COD_{R_s})、总氮(TN_{R_s})和总磷(TP_{R_s})的入河量可根据式(6)计算得到:

$$W_{R_s} = W_{P_s} \times R_s \quad (6)$$

式中, W_{R_s} 为畜禽养殖业污染物的入河量(kg·a⁻¹), W_{P_s} 与式(5)相同, R_s 为畜禽养殖业污染物的入河系数[由于清粪工艺的差异, 结合实地调研成果和太湖流域各类污染源污染物的入河系数表(表 1), 本文对干清粪的取值为 0.1, 水冲清粪的取值为 0.8]。

2.1.3 水产养殖业污染物产生量、排放量和入河量

太湖流域的水产养殖业主要分为池塘养殖和网箱养殖, 因而计算水产养殖业时对其进行区分。水产养殖业的化学需氧量(COD_{C_m})、总氮(TN_{C_m})和总磷(TP_{C_m})的产生量可根据式(7)计算得到:

$$W_{C_m} = \sum \sum (O_{mij} - I_{mij}) \times C_{mij} \times 10^{-3} \quad (7)$$

(i=1, 2, ..., n; j=1, 2)

式中, W_{C_m} 为水产养殖业污染物的产生量(kg·a⁻¹); i 为养殖品种(成鱼主要包括草鱼、鲫鱼、鳊鱼、鲢鱼、青鱼、河蟹、青虾、鳙鱼、鲑鱼、鲤鱼、鳖、河鲃、黄颡鱼、克氏原螯虾、乌鳢、鳊鱼、龟、鲶鱼、长吻鮠、鲃鱼、南美白对虾(淡)、罗非鱼、鲟鱼、池沼公鱼、螺、河蚌、罗氏沼虾、泥鳅、黄鳝、鳊鱼、鳙鱼、蛙、加州鲈、其他, 鱼苗主要包括淡水鱼苗、

淡水虾苗、淡水蟹、淡水贝、淡水其他); j 为养殖模式(分池塘养殖和网箱养殖); O_{mij} 为某种养殖模式某种养殖品种的产量($\text{kg}\cdot\text{a}^{-1}$), 取自研究区污染源普查数据; I_{mij} 为某种养殖模式某种养殖品种的投放量($\text{kg}\cdot\text{a}^{-1}$), 取自研究区污染源普查数据; C_{mij} 为某种养殖模式的某种养殖品种的污染物产生系数($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 来自《第一次全国污染源普查水产养殖业污染源产排污系数手册》)。

水产养殖业的化学需氧量(COD_{P_m})、总氮(TN_{P_m})和总磷(TP_{P_m})的排放量可根据式(8)计算得到:

$$W_{P_m} = \sum \sum (O_{mij} - I_{mij}) \times P_{mij} \times 10^{-3} \quad (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2) \quad (8)$$

式中, W_{P_m} 为水产养殖业污染物的排放量($\text{kg}\cdot\text{a}^{-1}$), i 、 j 、 O_{mij} 、 I_{mij} 与式(7)相同, P_{mij} 为某种养殖模式某种养殖品种的污染物排放系数($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 来自《第一次全国污染源普查水产养殖业污染源产排污系数手册》)。

水产养殖业的化学需氧量(COD_{R_m})、总氮(TN_{R_m})和总磷(TP_{R_m})的入河量可根据式(9)计算得到:

$$W_{R_m} = \sum W_{P_{mj}} \times R_{mj} \quad (j=1, 2) \quad (9)$$

式中, W_{R_m} 为水产养殖业污染物的入河量($\text{kg}\cdot\text{a}^{-1}$), j 与式(7)相同, $W_{P_{mj}}$ 为某种养殖模式的污染物排放量($\text{kg}\cdot\text{a}^{-1}$), R_{mj} 为某种养殖模式的污染物入河系数[结合实地调研成果和太湖流域各类污染源污染物的入河系数表(表1), 本文池塘养殖取值0.8, 网箱养殖取值1.0]。

2.1.4 农业污染物的入河量

农业源污染物入河量即为种植业、畜禽养殖业和水产养殖业三者入河量之和 $W_{R_{ij}}$ 。

$$W_{R_{ij}} = W_{R_{fij}} + W_{R_{sij}} + W_{R_{mij}} \quad (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, 3) \quad (10)$$

式中, $W_{R_{ij}}$ 为第*i*个乡镇农业第*j*种污染物(分COD、TN和TP)的入河量; $W_{R_{fij}}$ 为种植业第*i*个乡镇农业第*j*种污染物的入河量($\text{kg}\cdot\text{a}^{-1}$); $W_{R_{sij}}$ 为畜禽养殖业第*i*个乡镇农业第*j*种污染物的入河量($\text{kg}\cdot\text{a}^{-1}$); $W_{R_{mij}}$ 为水产养殖业第*i*个乡镇农业第*j*种污染物的入河量($\text{kg}\cdot\text{a}^{-1}$)。

2.1.5 农业污染压力指数

通过各乡镇的污染物入河量和各乡镇农业水环境容量来计算各乡镇农业污染压力指数 $S_{(ij)}$:

$$S_{(ij)} = W_{R_{ij}} / W_{(ij)} \quad (i=1, 2, \dots; j=1, 2, 3) \quad (11)$$

式中, j 为污染物类型, 分COD、TN和TP; $W_{R_{ij}}$ 与式(10)相同; $W_{(ij)}$ 第*i*个乡镇农业第*j*种污染物环境容量; $S_{(ij)}$ 为第*i*个乡镇农业第*j*种污染物的污染压力指数。

2.2 数据来源

文中种植业、畜禽养殖业和水产养殖业排放的有机物、氮和磷的产生量、排放量和入河量计算所需数据来自常州和宜兴市2007年污染源普查资料。不同土地利用方式肥料流失系数、畜禽养殖业的产排污系数和水产养殖业的产排污系数主要来自于《第一次全国污染源普查——农业污染源之肥料流失系数手册》、《第一次全国污染源普查畜禽养殖业污染源产排污系数手册》和相关文献^[14]。入河系数的确定参照《太湖流域主要入湖河流水环境综合整治规划编制规范》并结合实地考察的结果。水环境容量来源于河海大学。研究区的耕地面积等数据来自于历年常州市统计年鉴。

3 研究区农业污染压力指数分析

由公式(1)~(11)计算可得各乡镇农业污染压力指数(表2), 通过ArcGis分析软件可得各乡镇农业COD、TN和TP的污染压力指数分布图(图2)。其中污染压力指数小于1, 表示污染物的入河量小于水环境容量, 表明污染物的入河量还在水环境的允许范围之内, 对水体的影响不大; 污染压力指数大于1, 则表示污染物的入河量已超过水环境容量, 表明污染物的排放已影响到水环境健康。

图2为研究区农业COD、TN和TP污染压力指数空间分布图。从图2a可以看出研究区大部分地区农业COD排放量还在水环境的承受范围之内, 污染压力指数均小于1; 污染最严重的乡镇为戚墅堰区、牛塘镇和前黄镇, 其COD污染压力指数均大于2。由此可见, 农业向水体排放的有机物较少, 大部分地区COD入河量还在COD的环境容量范围之内。

从图2b可知, 研究区大部分地区TN污染压力指数介于1~3, 表明TN污染物入河量超过水环境容量。其中竹林镇、嘉泽镇、牛塘镇和前黄镇农业TN污染物最为严重, 其污染压力指数大于3。只有南部几个乡镇的污染压力指数小于1。由此可见, 农业生产过程中产生的氮对水体的影响较大。从图2c可知, 研究区有10个乡镇的TP污染压力指数大于3, 大部分地区TP的污染压力指数介于1~3, 超过水环境对其的容量; 只有南部几个乡镇的污染压力指数小于1。由此可见, 农业磷污染物排放较氮污染物排放更为严重。

由以上分析可知, 农业生产过程中产生的污染物入河量, 除大部分地区COD入河量在环境容量范围之内外, TN和TP的入河量大部分地区均超过水体所能承受的范围, 污染压力指数均大于1, 有的地区甚至大于3, 对水环境造成的压力较大。

表 2 研究区各乡镇农业污染压力指数
Table 2 Pressure indices of agricultural pollution in different towns of the studied area

乡镇名称 Town name	COD 污染 压力指数 Pressure index of COD pollution	TN 污染 压力指数 Pressure index of TN pollution	TP 污染 压力指数 Pressure index of TP pollution	乡镇名称 Town name	COD 污染 压力指数 Pressure index of COD pollution	TN 污染 压力指数 Pressure index of TN pollution	TP 污染 压力指数 Pressure index of TP pollution
太华镇 Taihua Town	0.07	0.40	0.39	湟里镇 Huangli Town	2.21	4.84	8.42
湖滢镇 Hufu Town	0.18	0.48	0.59	儒林镇 Rulin Town	1.24	1.05	1.25
张渚镇 Zhangzhu Town	0.20	0.80	0.72	竹箦镇 Zhukui Town	1.14	2.54	2.93
丁蜀镇 Dingshu Town	0.23	0.78	0.64	指前镇 Zhiqian Town	1.27	2.07	3.04
西渚镇 Xizhu Town	0.27	1.16	0.81	洛阳镇 Luoyang Town	0.77	1.61	1.52
戴埠镇 Daibu town	0.18	0.83	0.55	南夏墅街道 Nanxiashu Street	0.20	1.14	0.59
社渚镇 Shezhu Town	0.69	1.58	1.27	礼嘉镇 Lijia Town	1.10	1.71	1.69
宜城街道 Yicheng Street	0.10	0.39	0.28	经发区 Jingfa District	1.73	1.95	3.06
新街街道 Xinjie Street	0.24	0.79	0.66	尧塘镇 Yaotang Town	1.39	1.73	1.85
天目湖镇 Tianmuhu Town	0.17	0.69	0.52	湖塘镇 Hutang Town	0.49	0.73	0.57
新庄街道 Xinzhuang Street	0.85	1.78	1.68	遥观镇 Yaoguan Town	1.69	1.64	2.13
徐舍镇 Xushe Town	0.47	1.49	1.07	横林镇 Henglin Town	1.06	1.29	1.21
芳桥镇 Fangqiao Town	0.63	1.78	1.34	牛塘镇 Niutang Town	4.29	13.56	22.50
妃亭街道 Qiting Street	0.50	1.43	0.89	嘉泽镇 Jiaze Town	0.80	5.39	8.93
埭头镇 Daitou Town	0.70	1.20	1.17	竹林镇 Zhulin town	1.46	3.64	5.78
万石镇 Wanshi Town	0.42	1.72	1.02	戚墅堰区 Qinshuyan District	3.77	2.58	4.40
和桥镇 Heqiao Town	2.33	2.86	3.50	横山桥镇 Hengshanqiao Town	1.16	1.39	1.80
杨巷镇 Yangxiang Town	0.65	1.41	1.30	邹区镇 Zouqu Town	1.49	1.89	2.13
官林镇 Guanlin Town	0.90	1.48	1.45	天宁区 Tianning District	0.06	0.22	0.14
上黄镇 Shanghuang Town	0.94	1.04	1.16	薛埠镇 Xuebu Town	0.64	1.71	1.62
雪堰镇 Xueyan Town	2.04	2.25	2.37	钟楼区 Zhonglou District	0.65	0.53	0.71
新建镇 Xinjian Town	0.68	1.14	0.87	金城镇 Jincheng Town	1.01	1.64	1.60
别桥镇 Bieqiao Town	1.15	1.85	2.78	直溪镇 Zhixi Town	1.85	2.37	3.15
上兴镇 Shangxing Town	0.42	1.81	1.24	郑陆镇 Zhenglu Town	0.73	1.55	1.22
前黄镇 Qianhuang Town	3.87	7.68	12.94	新北区 Xinbei District	1.81	2.00	2.16
奔牛镇 Benniu Town	0.84	1.78	1.39				

4 农业源污染物来源分析

农业在极大地满足城乡生活的同时,过量的化肥农药投入、畜禽粪便排放和水产养殖污染物排放给水环境带来极大影响。对太湖流域农业污染物排放对水环境所造成的影响进行分析,可从农业污染物的来源,即种植业、畜禽养殖业和水产养殖业进行分析。

4.1 种植业

太湖流域自20世纪80年代以来化肥施用量一直呈上升趋势,是我国化肥施用量最高的地区之一^[15-17]。随着城市化进程的加速,太湖地区的传统农业生产方式正逐渐向大规模、集约化农业生产方式转变。农民大量施用化肥和农药,其数量高达577.5 kg·hm⁻²和34.5 kg·hm⁻²,远高于全国平均的411.0 kg·hm⁻²和11.25 kg·hm⁻²,造成大量氮素和磷素进入水体,加速了流域水体的污染和富营养化^[18]。自20世纪80年代初以来太湖地区农田生态系统中的氮、磷一直处于盈余状态,养分高度集中,大田作物施肥量甚至达到600 kg·hm⁻²,远远高于作物实际需要量^[19]。21世纪以来,单位耕地面积的施肥量虽然有所下降(图3),但下降幅度并不高,这是太湖上游地区在工业

点源得到控制,而湖泊水质仍然没有得到根本好转的一个主要原因^[20]。

近年来,常州市耕地面积持续减少,2008年比2000年减少43 160 hm²,在此期间化肥施用总量和农药使用量分别减少27 601 t和347 t。虽然化肥农药的总量有所减少,但随着耕地面积的减少,其单位耕地面积的使用量变化并不很明显(图3)。由图3可知,2008年单位耕地面积化肥施用量为452.71 kg·hm⁻²,为2000—2008年期间最少的一年,但仍然高于发达国家为防止化肥对水体污染所规定的平均化肥施用量的安全上限225 kg·hm⁻²^[21]。已有研究表明,在太湖地区稻田中化肥氮使用量大量增加的同时,氮肥的增产效果明显降低,其主要原因是高产地区氮肥施用量偏高,导致氮肥利用率低、损失大^[22-23];营养元素通过径流和渗漏所损失的量,与肥料施用量呈线性正相关^[24],因而合理施用氮肥可显著减少农田氮素引起的非点源污染。

4.2 畜禽养殖业

随着人民生活水平的提高和膳食结构的变化,城乡居民对畜禽肉蛋奶的需求量一直在不断提高,太湖流域人口密度高,城市化水平居全国之首,畜

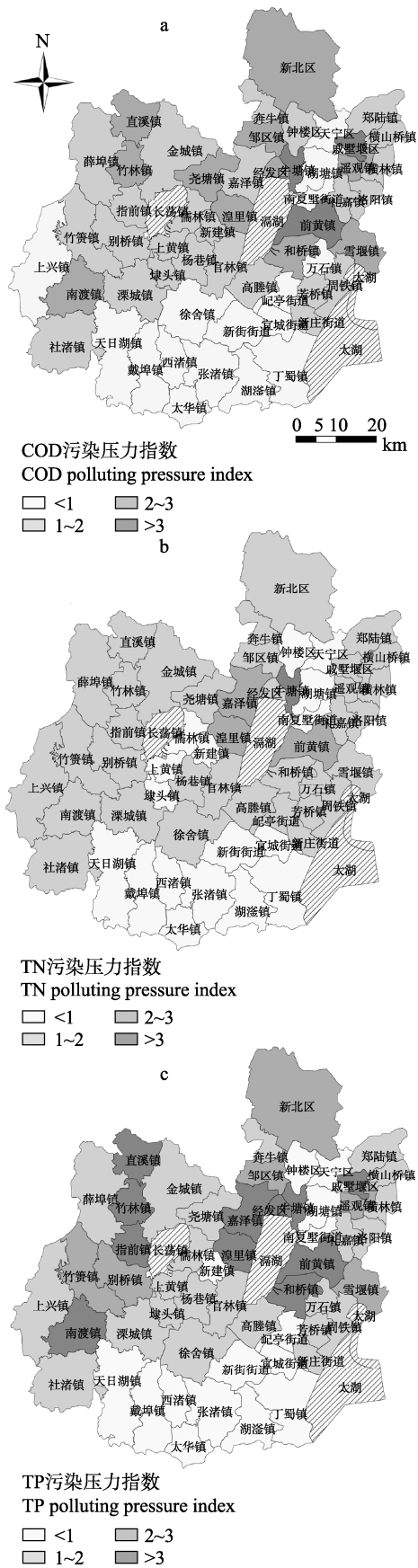


图 2 研究区各乡镇 COD(a)、TN(b)和 TP(c)农业污染压力指数

Fig. 2 Pressure indices of agriculture COD (a), TN (b) and TP (c) pollution in different towns of the studied area

禽肉蛋的需求量大,一大批规模畜禽场在远近郊区应运而生。20世纪60年代以来我国畜禽养殖业快速发展的同时,在地表径流、运输和利用等各个环节都对环境产生了污染。具体为:饲养过程中畜禽粪便排放形成的废弃物、食物残渣以及清洁饲养圈所产生的污泥水,经雨水冲刷形成地表径流后造成环境污染;粪便在堆放和储运过程中,因为降雨和其他原因进入水体形成污染;粪肥归田后因为得不到有效利用,营养物质随径流进入水体而形成污染。

近年来,伴随着畜禽养殖业的快速发展,产生了大量的畜禽粪便,引发了严重的环境问题。从表3可以看出,近年来虽然猪和羊的存栏量不断减少,2008年猪和羊的年末存栏量比2000年分别减少36.32万头和40.84万头,其出栏量分别减少9.63万头和44.87万头,但在此期间,家禽的年末存栏量和出栏量增长迅速,分别增加409.19万只和1637.67万只。综上所述,畜禽养殖业的发展对水环境造成严重影响,成为除种植业之外的又一重要污染物来源。

4.3 水产养殖业

太湖流域水产养殖业发展较快,尤其是围网养鱼,加速了水体的污染和富营养化。养殖的超常规发展导致区域水环境恶化和水生生物群落结构的剧烈演变。饵料大量投喂导致的饵料剩余和养殖对象排泄的粪便引起了养殖区水质和底质污染^[25]。近年来,太湖流域的淡水养殖面积和水产品总产量不断增加。以常州市为例(图4),2000—2008年期间,淡水养殖面积和水产品总产量呈总体不断增加趋势,2008年淡水养殖面积和水产品总产量比2000年分别增加 $7.03 \times 10^3 \text{ hm}^2$ 和 $3.10 \times 10^4 \text{ t}$ 。如果按每生产1t鱼向湖内释放氮141.25kg,磷14.14kg,每生产1t蟹向湖内释放氮571.81kg,磷71.57kg^[26],随着水产品总产量的不断增加其向水体排放的污染物将不断增加。由此可见,随着养殖规模不断扩大,大量饵料的投放及不合理的水生植被利用方式将给水环境带来严重影响,使水体处于富营养状态。

5 结论

通过计算研究区农业源污染压力指数并对其进行分析,得到如下结论:

(1)农业生产过程中产生的氮和磷是造成水体污染的主要贡献者,其对水环境的影响已经严重超过水环境所能承受的范围,TN和TP的污染压力指数普遍大于1,部分地区甚至大于3。相对而言,有机物污染物对水环境的影响较小,大部分地区的COD入河量还在环境容量范围之内。

(2)农业污染物对水环境产生的影响在空间上存

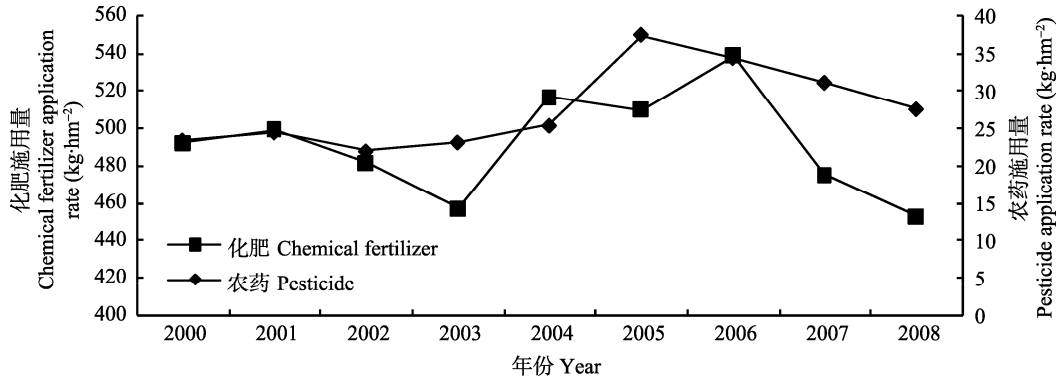


图3 2000—2008年常州市单位耕地面积化肥农药施用量

Fig. 3 Chemical fertilizer and pesticide application rates in Changzhou City during 2000—2008

表3 2000—2008年常州市各类畜禽数量

Table 3 Quantities of livestock in Changzhou City during 2000—2008

10⁴

年份 Year	猪年末存栏数 Number of pig on-hand at year-end	猪出栏数 Number of pig out of hand	羊年末存栏数 Number of sheep on-hand in year-end	羊出栏数 Number of sheep out of hand	家禽年末存栏数 Number of poultry on-hand at year-end	家禽出栏数 Number of poultry out of hand
2000	86.20	93.92	46.57	56.43	629.20	1 687.19
2001	87.90	98.21	48.75	55.53	682.30	1 799.80
2002	83.29	97.60	47.20	62.61	677.66	1 902.26
2003	65.53	91.40	22.19	43.28	685.92	1 998.62
2004	69.10	98.30	21.81	28.34	785.22	2 288.39
2005	68.51	107.73	9.82	16.69	826.76	2 559.22
2006	49.99	97.29	8.05	12.35	904.55	2 722.99
2007	45.30	80.50	6.45	9.98	977.90	3 082.40
2008	49.88	84.29	5.73	11.56	1 038.39	3 324.86

数据来源于 2000—2008 年《常州市统计年鉴》Data come from Statistical Yearbook of Changzhou (2000—2008).

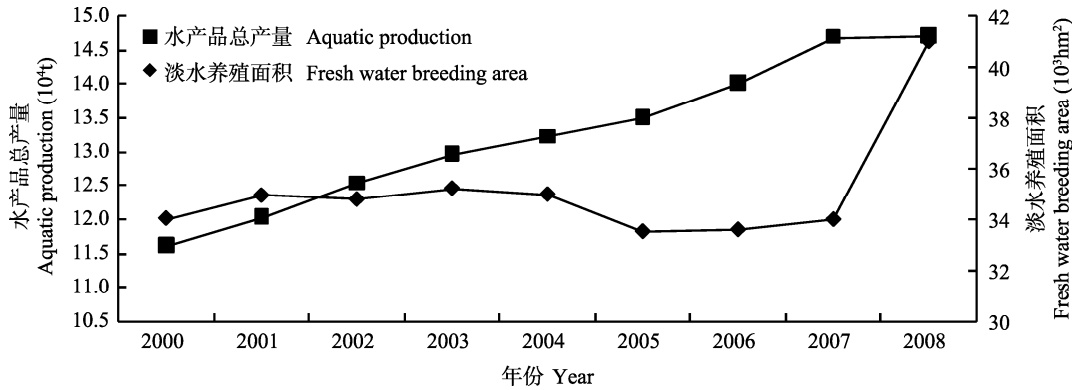


图4 2000—2008年常州市水产品总产量和淡水养殖面积

Fig. 4 Aquatic products output and fresh water breeding area in Changzhou City during 2000—2008

在差异。戚墅堰区、牛塘镇、前黄镇、竹林镇、嘉泽镇的农业污染较严重，对水环境造成的影响普遍高于其他地区。天目湖镇、戴埠镇、西渚镇、太华镇、张渚镇、湖父镇、丁蜀镇等对水环境的影响较小。因而，今后研究的重点应该侧重于研究污染压力指数较大地区的农业结构，寻求原因，为今后改善农业结构提供依据。

(3)近年来，尽管化肥农药的使用量有所减少。但随着城市化进程的加快，耕地面积不断减少，化

肥单位面积使用量变化不大，仍远远高于发达国家为防止水体污染所规定的平均化肥施用量的安全上限225 kg·hm⁻²。畜禽养殖业高速发展，尤其是家禽养殖发展迅速，规模大；水产养殖业发展较快，淡水养殖面积和水产品总产量不断增加，导致向水环境排放的污染物不断增多。综上所述，应利用物质能量循环理论，将种植业、畜禽养殖业和水产养殖业相结合，尽可能减少污染物排放量，否则，随着农业的发展，势必造成物质和能量的浪费，加重对

水环境的影响。

农业污染压力分析是对农业污染物排放状况的量化描述,为描述农业污染现状提供了依据。但污染压力指数计算过程中,相关系数的取值因地制宜,本文根据实地考察的结果和相关文献确定相关系数,对计算农业污染压力指数具有一定的参考价值,但还有待进一步完善。

参考文献

- [1] 张洪熙,谭长乐,赵步洪,等. 全量麦草旋耕还田轻简稻作技术研究进展[J]. 江苏农业科学, 2006(5): 1-4
- [2] 徐国伟,吴长付,刘辉,等. 秸秆还田与实地氮肥管理对水稻产量及品质的影响[J]. 中国农学通报, 2006, 22(10): 209-215
- [3] 王振忠,董百舒,吴敬民. 太湖稻麦地区秸秆还田增产及培肥效果[J]. 安徽农业科学, 2002, 30(2): 269-271
- [4] 闫丽珍,石敏俊,王磊. 太湖流域农业面源污染及控制研究进展[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(1): 99-107
- [5] 张蔚文,石敏俊,黄祖辉. 控制非点源污染的政策情景模拟:以太湖流域的平湖市为例[J]. 中国农村经济, 2006, 3(2): 40-47
- [6] 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
- [7] 薛峰,颜廷梅,乔俊,等. 太湖地区稻田减量施肥的环境效益和经济效益分析[J]. 生态与农村环境学报, 2009, 25(4): 26-31, 51
- [8] 陈家长,胡庚东,瞿建宏,等. 太湖流域池塘河蟹养殖向太湖排放氮磷的研究[J]. 农村生态环境, 2005, 21(1): 21-23
- [9] 宋勇生,范晓晖. 太湖地区稻田氮肥吸收及其利用的研究[J]. 应用生态学报, 2003, 14(11): 2081-2083
- [10] 段亮,段增强,常江. 地表管理与施肥方式对太湖流域旱地氮素流失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(3): 813-818
- [11] 张大弟,张晓红,戴育民. 上海市郊4种地表径流污染负荷调查与评价[J]. 上海环境科学, 1997, 16(9): 7-11
- [12] 段亮,段增强,常江. 地表管理与施肥方式对太湖流域旱地氮素流失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(3): 813-818
- [13] 马立珊. 苏南太湖水系农业非点源氮污染及其控制对策研究[J]. 应用生态学报, 1992, 3(4): 346-354
- [14] 张桂英,汪祖强. 苏南太湖地区农田水中COD的调查研究[J]. 农村生态环境, 1994, 10(2): 41-44
- [15] 严慧岭. 盐渍土麦秸还田效应初探[J]. 土壤肥料, 1993(5): 15-17
- [16] 陈新红,叶玉秀,许仁良,等. 小麦秸秆还田量对水稻产量和品质的影响[J]. 作物杂志, 2009(1): 54-56
- [17] 林泽新. 太湖流域水环境变化及缘由分析[J]. 湖泊科学, 2002, 14(2): 111-116
- [18] 高超,吴蔚东,张桃林. 太湖地区农田土壤养分动态及其启示[J]. 地理科学, 2001, 21(5): 428-432
- [19] 许朋柱,秦伯强, Behrendt H, 等. 太湖上游流域农业土地的氮剩余及其对湖泊富营养化的影响[J]. 湖泊科学, 2006, 18(4): 395-400
- [20] 陈磊山,姜冬梅,陆根法. 农村面源污染与建设环境管理体系问题研究——以太湖地区为例[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(34): 11170-11171
- [21] 李家康,林葆,梁国庆,等. 对我国化肥使用前景的剖析[J]. 植物营养与肥料学报, 2001, 7(1): 1-10
- [22] 孙彭力,王慧君. 氮素化肥的环境污染[J]. 环境污染与防治, 1995, 17(1): 38-41
- [23] 汪军,王德建,张刚. 太湖地区稻麦轮作体系下秸秆还田配施氮肥对水稻产量及经济效益的影响[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(2): 265-270
- [24] 何俊,谷孝鸿,白秀玲. 太湖渔业产量和结构变化及其对水环境的影响[J]. 海洋湖沼通报, 2009(2): 143-150
- [25] 朱万斌,王海滨,林长松,等. 中国生态农业与面源污染减排[J]. 中国农学通报, 2007, 23(10): 25-29
- [26] 杨清心,李文朝,俞林,等. 东太湖围栏养殖及其环境效应[J]. 湖泊科学, 1995, 7(3): 256-262