

基于污染足迹的太湖流域稻作农业污染评估 ——以常州市和宜兴市为例

李 静^{1,2}, 闵庆文^{1*}, 李文华¹, 焦雯珺¹, 袁 正^{1,2}

(1.中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2.中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 稻作农业在保障粮食安全方面贡献巨大,但因经济利益驱动,化肥农药被过量施用,造成了氮、磷等营养物质流失,对水环境产生严重影响。本文基于全国第一次污染普查数据,结合各类污染物的产排污系数计算了稻作农业 COD、TN 和 TP 入河量,通过污染足迹模型计算了稻作农业 COD、TN 和 TP 的污染足迹,通过污染压力模型计算了稻作农业 COD、TN 和 TP 的污染压力指数,并对其进行评估。结果表明:(1)常州市、宜兴市稻作农业生产过程中向水环境排放的污染物中以 COD 和 TN 为主,其入河量分别为 $792.96 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $605.28 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$,TP 入河量为 $27.16 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$;(2)常州市、宜兴市稻作农业 TN 污染足迹最大($3\,944.50 \text{ hm}^2$),其次为 TP 污染足迹($2\,578.95 \text{ hm}^2$),最小的是 COD 污染足迹(523.52 hm^2);(3)常州市、宜兴市稻作农业对水环境的污染压力指数为 2.10,处于中度污染压力状况,表明常州市、宜兴市稻作农业生产活动超出了当地水域的承载能力,对当地水环境产生了压力。

关键词: 稻作农业; COD; TN; TP; 污染足迹; 污染压力; 太湖流域

中图分类号: X820.3

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2014)04-0372-09

doi: 10.13254/j.jare.2014.0093

Pollution Assessment of Rice Agriculture in the Taihu Lake Watershed Based on the Pollution Footprint: A Case Study of Changzhou City and Yixing City, China

LI Jing^{1,2}, MIN Qing-wen^{1*}, LI Wen-hua¹, JIAO Wen-jun¹, YUAN Zheng^{1,2}

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Rice agriculture has been proved to make a great contribution to the food quantity security, but farmers are driven by economic interests to overuse the pesticides and chemical fertilizers. The water environment is getting worse and worse. Based on the first national census of pollution data and the production and drainage coefficient of the pollutants, this paper calculated pollutant (COD, TN and TP) quantity into river from rice agriculture. The pollution footprint based on the pollution footprint model and the pressure index of pollution based on the pollution pressure model were also calculated. The results showed that the river discharge of COD and TN took the most part in that of COD, TN and TP. The river discharge of COD, TN and TP was $792.96 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, $605.28 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ and $27.16 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ respectively. The pollution footprint of TN was the largest, which was $3\,944.50 \text{ hm}^2$, the second was the pollution footprint of TP, which was $2\,578.95 \text{ hm}^2$, the smallest was the pollution footprint of COD, which was 523.52 hm^2 . The pollution pressure index of rice agriculture was 2.10, indicating that the river is in a moderate pollution stress condition. So the pollutant river discharge of the rice agriculture is beyond the carrying capacity of the local waters.

Keywords: rice agriculture; COD; TN; TP; pollution footprint; pollution pressure; Taihu Lake Basin

农业是整个国民经济发展的基础,尤其是稻作农业,全国一半以上的人口以稻米为主食。不可否认现代化大规模农业生产在保障粮食数量安全方面贡献

巨大,现代化的大规模农业机械生产在大幅度提高粮食产量、保障粮食数量安全的同时,也不同程度破坏了农田生态系统,甚至危及到粮食与食品安全,并对整个区域的生态环境产生严重影响^[1]。具体表现为,化肥农药的过量施用,使我国稻田多数处于氮、磷素盈余状态,这对水环境构成了严重的威胁^[2-6]。

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^[7-8]。

收稿日期: 2014-04-11

基金项目: 环保公益项目“基于低碳经济与生态农业的稻田面源污染控制技术筛选与效益评估”(201009020)

作者简介: 李 静(1984—),女,山东聊城人,在读博士,研究方向为农业环境与区域可持续发展。E-mail: xiaofengxue86@163.com

* 通信作者: 闵庆文

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 $577.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $34.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,远高于全国平均的 $411.0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $11.25\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,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^[9]。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 $600\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,远远高于作物实际需要量^[10]。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 $225\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

综上可知,随着化肥、农药的施用强度逐年增大,稻作生产过程中的污染物流失势必会对当地的水环境产生严重影响。目前,已经有学者从综合考虑种植业、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,计算农业污染排放量和污染压力指数,定量分析了处于太湖流域农业污染物排放对水环境影响的严重性^[11-12]。但是还没有研究从污染足迹的角度对太湖流域稻作农业进行定量评估。因而,本文以太湖流域稻作农业生产为研究对象,基于污染足迹模型探讨太湖流域稻作农业的污染状况,期望为该流域合理施用化肥和有效控制稻作农业污染提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

一般情况下,水体流域都由多个小流域组成,结合流域的地形特征,可将农业污染概分为山区小流域农业污染和平原小流域农业污染。不同的小流域具有不同的特征,其污染特点及发生规律也不尽相同。本文研究的是稻作生产污染问题,从表 1 中可以看出太湖流域平原河网区和山地丘陵地区水田生产的 COD、TN 和 TP 的污染物流失系数相同,因而本文认为太湖流域平原地区和山区的稻作生产对太湖流域水环境的影响相同。故本文选取太湖流域上游江苏省常州市、宜兴市作为研究区,通过对常州市、宜兴市的稻作农业污染研究,以期反映太湖流域稻作生产活动对太湖水环境的影响。

常州市、宜兴市地处江苏省南部、太湖流域上游(见图 1),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

表 1 研究区不同土地利用方式肥料流失系数
Table 1 Fertilizer loss coefficient of different land use in the study area

分区	土地利用方式	COD/ $\text{kg}\cdot 667\text{ m}^{-2}$	TN/ $\text{kg}\cdot 667\text{ m}^{-2}$	TP/ $\text{kg}\cdot 667\text{ m}^{-2}$
南方湿润平原区	旱地	1.496	3.014	0.185
	水田	1.314	1.003	0.045
	园地	1.496	2.043	0.146
	保护地	1.496	1.410	0.021
南方山地丘陵区	旱地	1.496	0.565	0.052
	水田	1.314	1.003	0.045
	园地	1.496	0.491	0.234
	保护地	1.496	1.410	0.021

注: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 取值来自参考文献[16]。

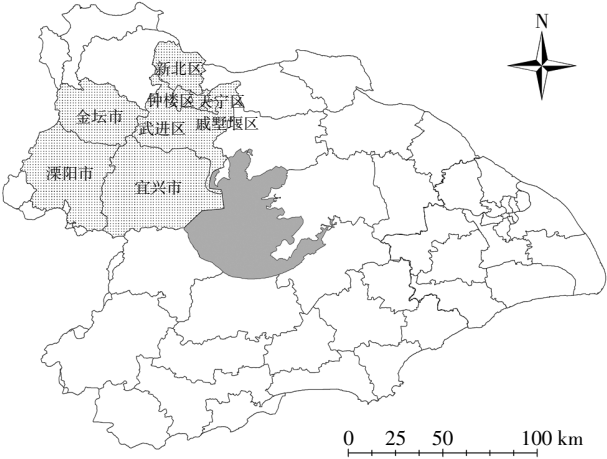


图 1 研究区位置图

Figure 1 The location of the study area

平均气温 $16.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,年平均降水量 $1\ 068.9\text{ mm}$ 。境内河道纵横交织,湖塘星罗棋布,南溪水系、洮湖水系是境内主要河流水系,长荡湖、溇湖是境内主要湖泊。

常州市辖金坛、溧阳两市和天宁、钟楼、戚墅堰、新北、武进 5 区;宜兴市辖 4 个街道、14 个镇。2007 年常州市、宜兴市常住总人口 362.18×10^4 人,人口密度 $561\text{ 人}\cdot\text{km}^{-2}$,非农业人口 217.31×10^4 人,占总人口的比重为 60.00%。2007 年常州市和宜兴市经济总产值为 2 386.34 亿元,第一产业产值 81.69×10^8 元,占经济总产值的 3.42%;第二产业产值 $1\ 422.56\times 10^8$ 元,占经济总产值的 59.61%,其中工业产值为 $1\ 320.42\times 10^8$ 元;第三产业产值 882.09×10^8 元,占经济总产值的 36.96%,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。然而,在经济飞速发展的同时,常州市和宜兴市生态环境也受到了严重破坏。

1.2 研究方法及数据来源

1.2.1 研究方法

本文首先计算稻作农业 COD、TN 和 TP 的入河量^[13]。其次,通过污染足迹模型计算稻作农业 COD、TN 和 TP 的污染足迹^[14];最后,通过污染压力模型计算稻作农业 COD、TN 和 TP 的污染压力指数,并对其进行评估。

1.2.1.1 污染物入河量计算

稻作农业化学需氧量(COD)、总氮(TN)和总磷(TP)的入河量可根据公式(1)计算得到:

$$W_{R_f} = A_f \times C_f \times P_f \times R_f \quad (1)$$

式中, W_{R_f} 为种植业污染物的入河量($\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$); A_f 为研究区稻田面积(667 m^2),取自研究区污染源普查数据; C_f 为稻田的肥料流失系数($\text{kg} \cdot 667 \text{ m}^{-2}$)(表 1); P_f 为稻田污染物的排放系数(本文取值 1,因研究区地势平坦,农业与河流的间距较小,且土地对污染物的吸纳能力较小,即排放量等于产生量); R_f 为稻田污染物的入河系数,从《太湖流域主要入湖河流水环境综合整治规划编制规范》可知稻田生产的污染物入河系数为 0.1~0.3(表 2),并结合多次去研究区的实地考察,最终将稻田污染物的入河系数定为 0.3。

1.2.1.2 污染足迹模型

基于污染物吸纳的生态足迹,即污染足迹,是指吸纳一定人口产生的污染物实际所需要的土地面积^[15],在理论基础、研究内容、计算方法等方面都与传统生态足迹中的能源足迹有着本质的区别。焦雯珺等^[14]根据污染足迹基本理论,构建了太湖流域有机物污染足迹(PF_{COD})、氮污染足迹(PF_{N})和磷污染足迹(PF_{P})模型(公式 2~公式 4)。

$$PF_{\text{COD}} = \frac{P_{\text{COD}}}{NY_{\text{COD}}} \quad (2)$$

$$PF_{\text{N}} = \frac{P_{\text{N}}}{NY_{\text{N}}} \quad (3)$$

$$PF_{\text{P}} = \frac{P_{\text{P}}}{NY_{\text{P}}} \quad (4)$$

式中, PF_{N} 、 PF_{P} 和 PF_{COD} 分别为稻作农业的氮、磷和

COD 污染足迹(hm^2); P_{N} 、 P_{P} 和 P_{COD} 分别为稻作农业的氮、磷和 COD 入河量(kg); NY_{COD} 、 NY_{N} 和 NY_{P} 分别为区域水体对 COD、氮和磷的平均吸纳能力($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),其值分别为 1 514.67、153.45、10.53 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[14]。

1.2.1.3 污染压力模型

本文利用污染压力指数(公式 5)来衡量区域水污染压力的大小,即利用污染足迹与污染承载力的比值对区域水污染压力进行综合评估。如果污染承载力大于污染足迹,即存在污染盈余,人类的排污活动在区域的可承载范围之内;如果污染承载力小于污染足迹,即存在污染赤字,人类活动所产生的污染物超出了区域的纳污能力。

$$PC = A \times 0.22 \times 0.16$$

$$I = \frac{PF}{PC} \quad (5)$$

式中, A 为区域水域面积(hm^2), I 为污染压力指数, PF 为稻作农业的污染足迹(本文认为有机物、氮和磷在对水环境的影响上具有明显重叠,故选取三者中的最大值作为研究区的污染足迹), PC 为稻作农业的污染承载力。如果 $I < 1$,说明该区域无水污染压力;如果 $1 < I < 2$,说明该区域存在轻度水污染压力;如果 $2 < I < 3$,说明该区域存在中度水污染压力;如果 $I > 3$,则说明该区域存在重度水污染压力。焦雯珺等^[14]通过计算得出,2007 年常州市工业、生活和农业对常州市污染物排放的贡献率大致为 33%、45%和 22%。因而认为农业(种植业、畜禽养殖业和水产养殖业)的污染承载力是分配区域污染承载力的 22%,其中经计算稻作农业(水田)COD、TN 和 TP 的总污染足迹是种植业(旱地、水田、园地和保护地)COD、TN 和 TP 的总污染的 0.47;并且是农业(种植业、畜禽养殖业和水产养殖业)COD、TN 和 TP 总污染足迹的 0.16,故稻作农业的污染承载力分配农业总污染承载力的 0.16。最终求得太湖流域稻作农业的污染承载力。

1.2.2 数据来源

稻作农业的污染物排放量和入河量计算所需数

表 2 太湖流域各类污染源污染物的入河系数

Table 2 Coefficients of losing into rivers of pollutants in the Taihu Lake Basin

污染物	工业	城镇生活	农村生活	农田	畜禽养殖	水产养殖
COD	0.8~1	0.6~0.9	0.1~0.2	0.1~0.3	0.5~0.8	0.8~1
NH ₃ -N	0.8~1	0.6~0.9	0.1~0.2	0.1~0.3	0.5~0.8	0.8~1
TN	0.8~1	0.6~0.9	0.1~0.2	0.1~0.3	0.5~0.8	0.8~1
TP	0.8~1	0.6~0.9	0.1~0.2	0.1~0.3	0.5~0.8	0.8~1

注:数据来自《太湖流域主要入湖河流水环境综合整治规划编制规范》。

据来自常州市、宜兴市 2007 年污染源普查资料。不同土地利用方式肥料流失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》和文献[16]。入河系数是在实地考察的基础上参照《太湖流域主要入湖河流水环境综合整治规划编制规范》确定的。研究区污染承载力则为常州市、宜兴市的实际水域面积，通过研究区 1:10 万土地利用遥感解译数据统计得到。

2 结果与讨论

2.1 稻作农业污染排放特征

根据稻作农业污染物入河量计算公式 1,对常州市、宜兴市稻作农业 COD、TN 和 TP 的入河量进行了计算,各区县计算结果见表 3。

表 3 研究区稻作农业污染物入河量($\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$)

Table 3 COD, TN and TP river discharge of rice agriculture in the study area ($\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$)

研究区	入河量		
	COD	TN	TP
常州金坛市	115.71	88.33	3.96
常州溧阳市	234.04	178.65	8.02
常州武进区	119.19	90.98	4.08
常州新北區	67.14	51.25	2.30
常州天宁区	0.02	0.02	0.00
常州钟楼区	0.95	0.72	0.03
常州戚墅堰区	1.81	1.38	0.06
宜兴市	254.09	193.95	8.70
合计	792.96	605.28	27.16

从表 3 中可知,2007 年研究区稻作农业 COD、TN 和 TP 的入河量分别为 792.96、605.28 t 和 27.16 t,其中,以宜兴市的入河量最大,其次为溧阳市和武进区,三者之和占到研究区稻作农业 COD、TN 和 TP 总入河量的 76.59%、76.60%和 76.58%。不难看出,宜兴市、溧阳市和武进区是研究区稻作农业污染物排放最多的地区。

具体到研究区稻作农业污染物排放的空间格局(图2~图4),可以看出污染物排放较多的地区集中在宜兴市、武进区和新北区的部分乡镇以及溧阳市和金坛市的绝大部分乡镇。其中,溧阳市的社渚镇、上兴镇、竹箦镇、别桥镇、南渡镇、溧城镇,宜兴市徐舍镇的污染物入河量最大;而新北区的新桥镇、薛家镇和新北城区、钟楼区,天宁区,戚墅堰区,武进区的横山桥镇、横林镇、遥观镇、湖塘镇、洛阳镇、牛塘镇、嘉泽镇、

湟里镇,宜兴市的宜城街道、湖滄镇、太华镇,溧阳市的上黄镇的稻作生产污染物入河量普遍较少。从图2~图4可以看出,研究区稻作农业污染物入河量区域差异较大。

由图 2~图 4 可知,入河量较高的乡镇,其 COD 入河量超过 $21.70 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, TN 入河量超过 $16.56 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, TP 入河量超过 $0.74 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$;而排放量较少的乡镇,其 COD 入河量小于 $6.06 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, TN 入河量小于 $4.63 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, TP 入河量小于 $0.21 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

2.2 稻作农业污染足迹分析

根据太湖流域污染足迹模型(公式 2~公式 4),结合研究区稻作农业 COD、TN 和 TP 入河量的计算结果,计算得到研究区稻作农业 COD 污染足迹、TN 污染足迹和 TP 污染足迹,各区县计算结果见表 4。

从表 4 中可以看出, 研究区 2007 年稻作农业有机物污染足迹为 523.52 hm^2 , 其中宜兴市、溧阳市和武进区有机物污染足迹依次为 167.75、154.52 hm^2 和 78.69 hm^2 , 三者之和占到研究区稻作农业有机物污染足迹的 76.59%; 研究区 2007 年稻作农业氮污染足迹为 3 944.50 hm^2 , 其中宜兴市、溧阳市和武进区稻作农

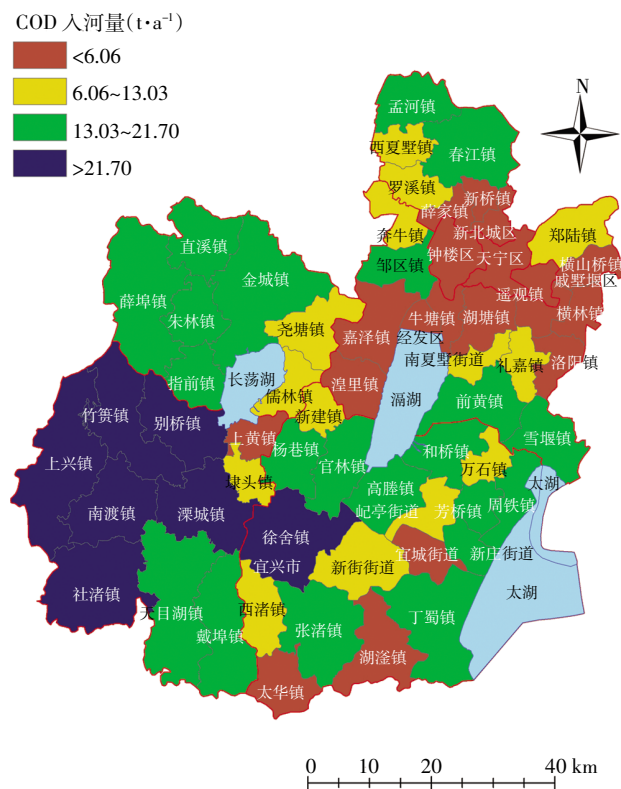


图 2 研究区稻作农业 COD 排放的空间格局

Figure 2 Spatial distribution of COD river discharge from rice agriculture in the study area

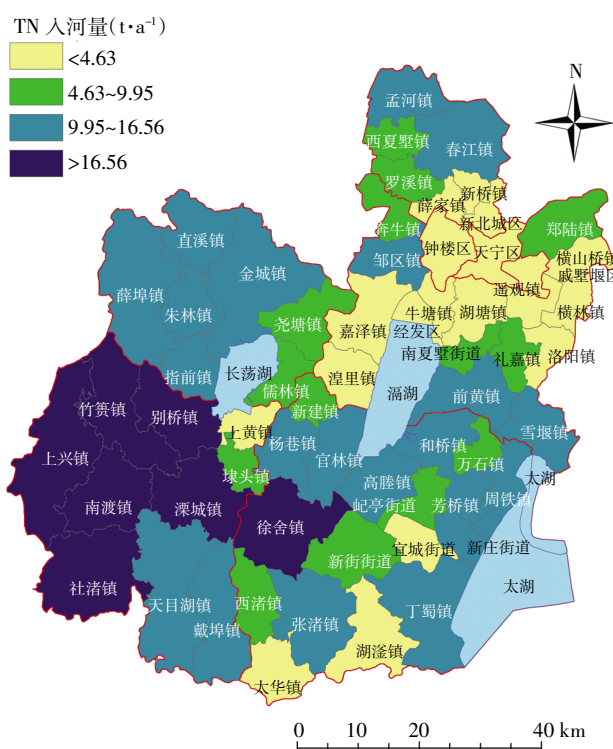


图 3 研究区稻作农业 TN 排放的空间格局

Figure 3 Spatial distribution of TN river discharge from rice agriculture in the study area

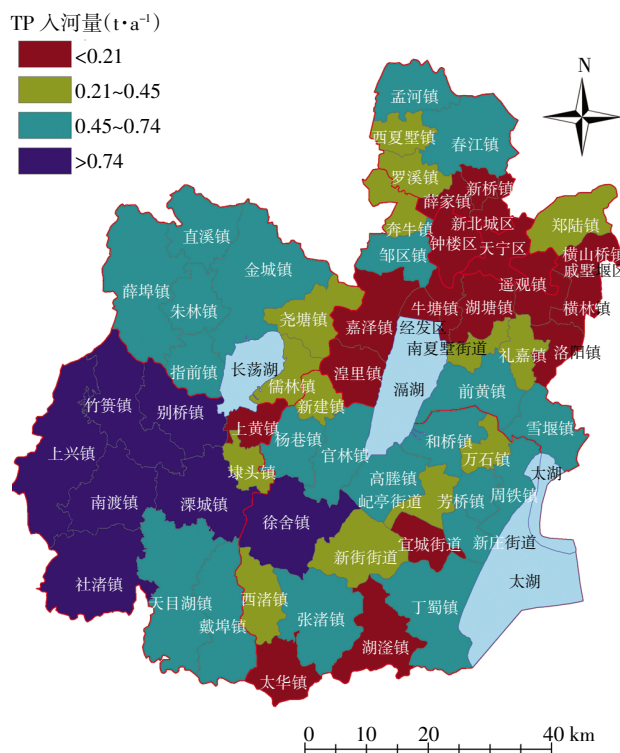


图 4 研究区稻作农业 TP 排放的空间格局

Figure 4 Spatial distribution of TP river discharge from rice agriculture in the study area

表 4 研究区污染物污染足迹(hm^2)Table 4 Pollution footprint of rice agriculture in the study area (hm^2)

研究区	污染足迹			稻作农业污染足迹
	COD	N	P	
常州金坛市	76.40	575.61	376.34	575.61
常州溧阳市	154.52	1 164.23	761.18	1 164.23
常州武进区	78.69	592.91	387.65	592.91
常州新北区	44.32	333.96	218.35	333.96
常州天宁区	0.02	0.11	0.07	0.11
常州钟楼区	0.63	4.72	3.08	4.72
常州戚墅堰区	1.20	9.02	5.90	9.02
宜兴市	167.75	1 263.95	826.38	1 263.95
合计	523.52	3 944.50	2 578.95	3 944.50

业氮污染足迹依次为 1 263.95、1 164.23 hm^2 和 592.91 hm^2 , 三者之和占到研究区稻作农业氮污染足迹的 76.59%; 研究区 2007 年稻作农业磷污染足迹为 2 578.95 hm^2 , 其中宜兴市、溧阳市、武进区稻作农业磷污染足迹依次为 826.38、761.18 hm^2 和 387.65 hm^2 , 三者之和占到研究区稻作农业磷污染足迹的 76.59%。

从表 4 中可以看出, 研究区 2007 年稻作农业污染足迹为 3 944.50 hm^2 , 其中宜兴市、溧阳市和武进区的污染足迹位列前三, 其值依次为 1 263.95、1 164.23 hm^2 和 592.91 hm^2 。这说明研究区所辖区县中宜兴市、溧阳市和武进区排放的污染物对当地水域空间的生态占用是最大的。

具体到研究区稻作农业有机物、氮和磷污染足迹的空间分布(图 5~图 7), 可以看出研究区稻作农业 COD、氮和磷污染足迹较大的地区集中在溧阳市的社渚镇、上兴镇、竹箦镇、别桥镇、南渡镇、溧城镇和宜兴市的徐舍镇。其稻作农业 COD 污染足迹普遍高于 14.32 hm^2 , 氮污染足迹普遍高于 107.93 hm^2 , 磷污染足迹普遍高于 70.57 hm^2 。而新北区的新桥镇、薛家镇、新北城区、钟楼区、天宁区、戚墅堰区、武进区的横山桥镇、横林镇、遥观镇、湖塘镇、洛阳镇、牛塘镇、嘉泽镇、湟里镇、宜兴市的宜城街道、湖滏镇、太华镇、溧阳市上黄镇的稻作农业 COD、氮和磷污染足迹普遍较低。其稻作农业 COD 污染足迹普遍低于 4.00 hm^2 , 氮污染足迹普遍低于 30.16 hm^2 , 磷污染足迹普遍低于 19.72 hm^2 。

由图 8 可知, 各区县的稻作农业污染足迹中, 氮污染足迹所占的比例最大, 其次是磷污染足迹。由此可知, 稻作农业氮类污染物对当地水域空间的生态占用最大, 其次为磷类污染物。COD 的入河量在稻作农

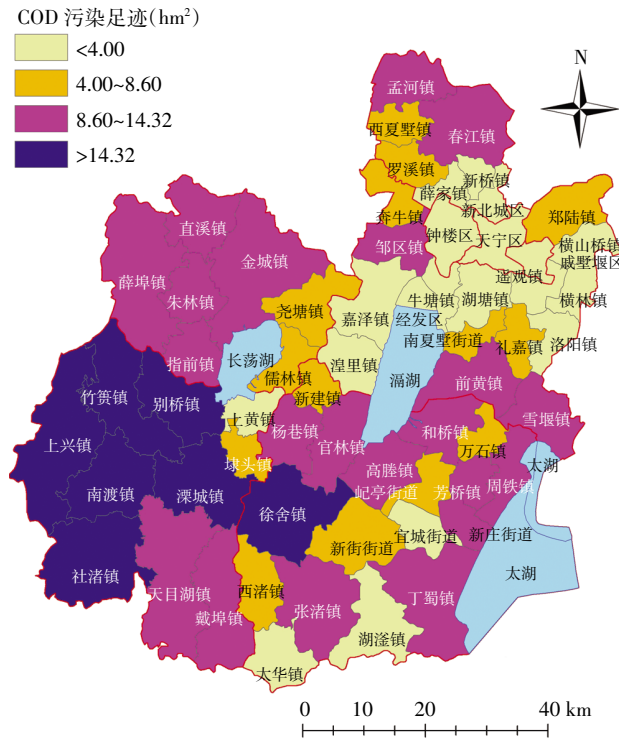


图 5 研究区稻作农业 COD 污染足迹的空间格局

Figure 5 Spatial distribution of COD pollution footprint from rice agriculture in the study area

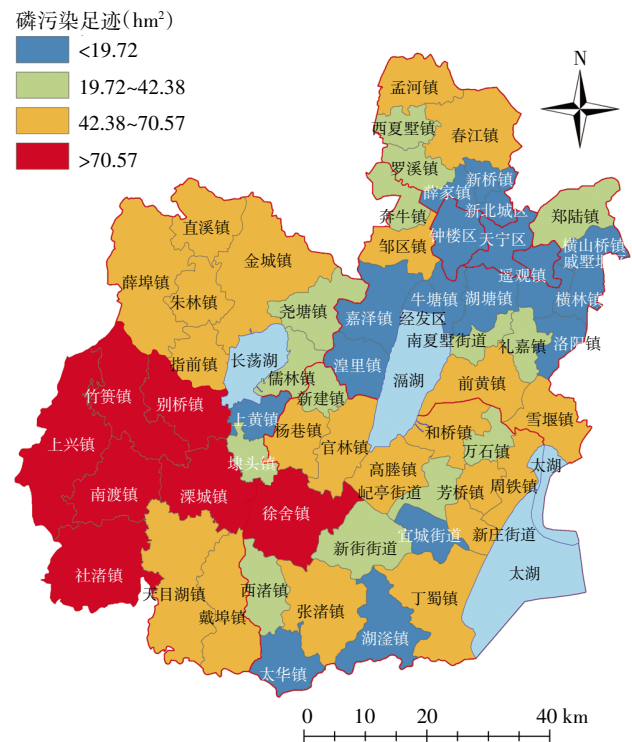


图 7 研究区稻作农业磷污染足迹的空间格局

Figure 7 Spatial distribution of TP pollution footprint from rice agriculture in the study area

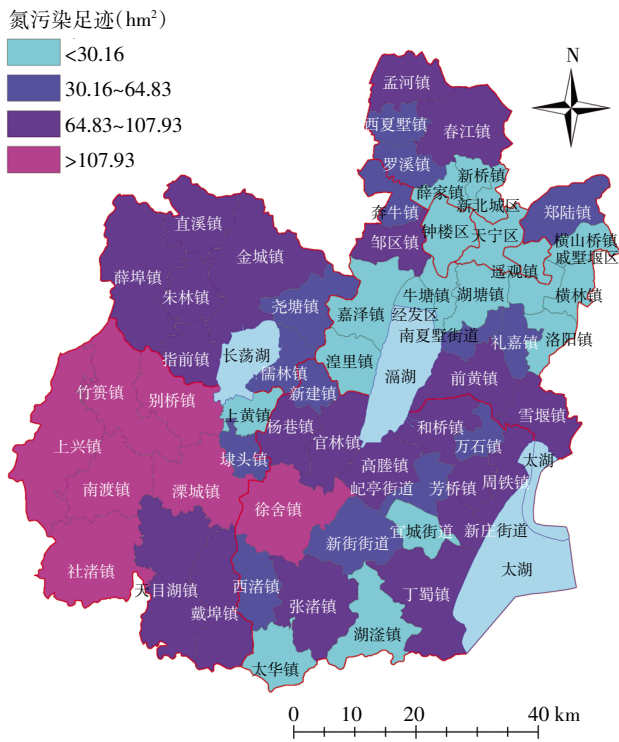


图 6 研究区稻作农业氮污染足迹的空间格局

Figure 6 Spatial distribution of TN pollution footprint from rice agriculture in the study area

业污染物入河量中所占的比重最大,但其污染足迹却是 3 类污染物中最小的,是因为太湖流域河网对 COD ($1\,514.67\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)、TN ($153.45\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) 和 TP ($10.53\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) 的吸纳能力不同。

从研究区污染足迹空间分布图(图 9)中可知,污染足迹较大的地区集中在溧阳市的社渚镇、上兴镇、竹箦镇、别桥镇、南渡镇、溧城镇和宜兴市的徐舍镇,其污染足迹普遍高于 107.93 hm^2 。

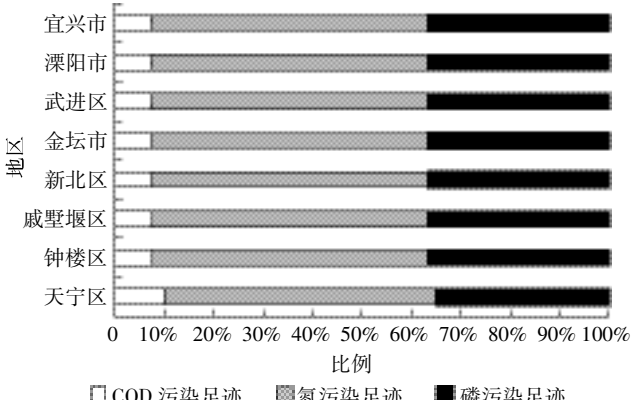


图 8 研究区稻作农业污染物污染足迹比例

Figure 8 Proportions of different pollutants discharged from rice agriculture in the study area

2.3 稻作农业污染压力评估

利用稻作农业污染足迹与污染承载力,计算得到稻作农业的污染赤字/盈余和污染压力指数,各区县的计算结果见表 5。

由表 5 可知,研究区 2007 年稻作农业污染足迹为 3 944.51 hm²,污染承载力为 1 876.27 hm²,污染赤字为 2 068.24 hm²,稻作农业生产活动所排放的污染物俨然超出当地水域的承载能力,对当地水环境产生了巨大的压力。尽管研究区总体上超载,但是各区县

的污染赤字/盈余差异十分显著:溧阳市水域的污染物吸纳能力仅能满足当地 38.02%的纳污需求,导致其污染赤字高达 721.55 hm²;宜兴市次之,污染赤字为 618.24 hm²;而天宁区水域的纳污能力不但能满足当地稻作生产的纳污需求,而且还有 15.51 hm² 的污染盈余。

表 5 显示,研究区 2007 年稻作农业污染压力指数为 2.10,当地水环境总体上处于中度污染状态。新北区、钟楼区和戚墅堰区的污染压力指数均大于 3,溧阳市最大污染压力指数大于 2 小于 3,金坛市、武进区和宜兴市的最大污染压力指数大于 1 小于 2,天宁区的最大污染压力指数小于 1。这说明新北区、钟楼区和戚墅堰区的当地水环境总体上存在重度污染压力,溧阳市当地水环境总体上存在中度污染压力,金坛市、武进区和宜兴市当地水环境总体上存在轻度污染压力,而天宁区当地水环境则总体上不存在污染压力。

尽管研究区总体上处于中度污染压力状态,但是研究区稻作农业污染压力指数空间差异显著。从图 10 中可以进一步看出,新北区的新北城区,天宁区,

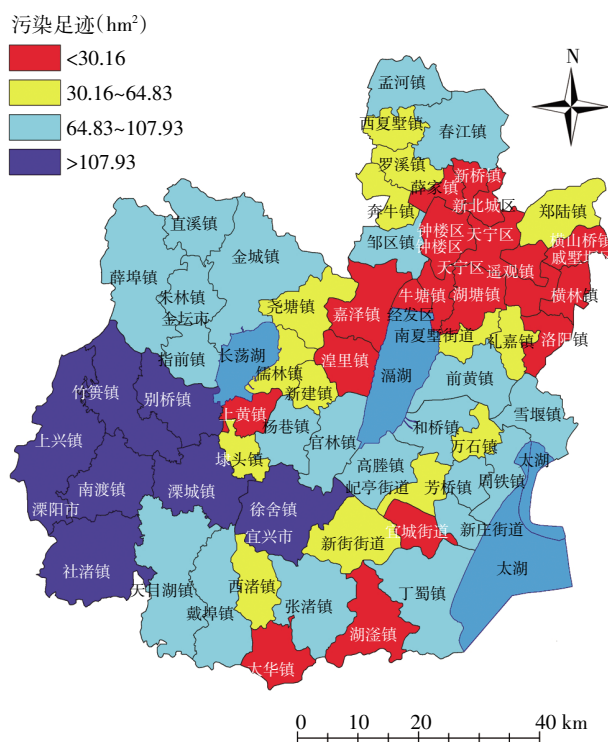


图 9 研究区稻作农业污染足迹的空间格局

Figure 9 Spatial distribution of pollution footprint from rice agriculture in the study area

表 5 研究区稻作生产污染赤字/盈余

Table 5 Pollution deficit/surplus of rice agriculture in the study area

研究区	污染足迹/ hm ²	污染承载力/ hm ²	污染赤字/盈余/ hm ²	污染压力 指数
常州金坛市	575.61	432.96	-142.65	1.33
常州溧阳市	1 164.23	442.68	-721.55	2.63
常州武进区	592.91	316.66	-276.25	1.87
常州新北区	333.96	19.40	-314.56	17.22
常州天宁区	0.11	15.63	15.51	0.01
常州钟楼区	4.72	0.70	-4.01	6.70
常州戚墅堰区	9.02	2.53	-6.49	3.56
宜兴市	1 263.95	645.71	-618.24	1.96
合计	3 944.51	1 876.27	-2 068.24	2.10

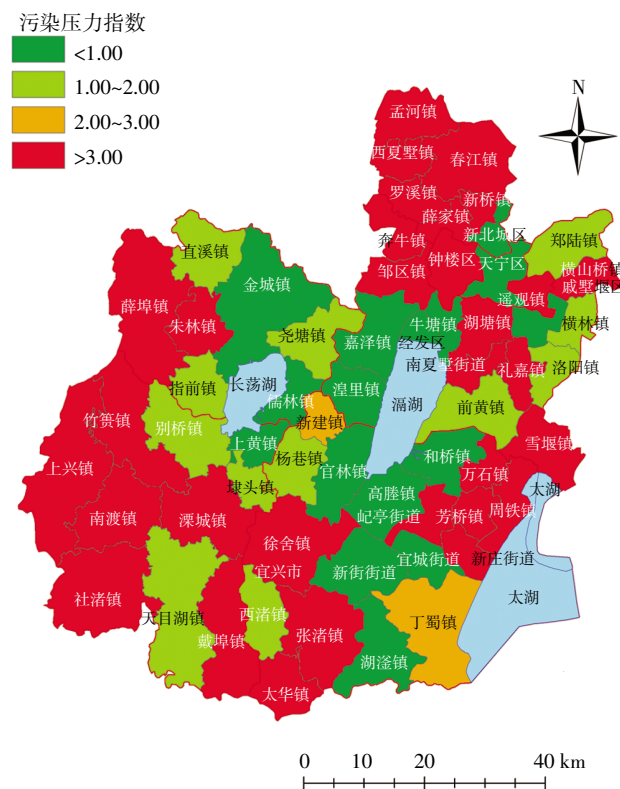


图 10 研究区稻作生产污染压力指数的空间格局

Figure 10 Spatial distribution of pressure index of rice agriculture in the study area

武进市的遥塘镇、经发区、牛塘镇、嘉泽镇、湟里镇,金坛市的金城镇、儒林镇,溧阳市的上黄镇,宜兴市的官林镇、和桥镇、高塍镇、新街街道、宜城街道、湖滢镇的稻作农业生产活动还没有对当地水环境造成污染压力;研究区存在轻度污染压力的地区集中在武进市的郑陆镇、横林镇、洛阳镇、前黄镇,金坛市的直溪镇、尧塘镇、指前镇,溧阳市的别桥镇、埭头镇、天目湖镇,宜兴市的杨巷镇、西渚镇。研究区的剩余乡镇则存在中度甚至中度污染压力。

3 结论

通过计算研究区稻作农业污染足迹和污染压力指数并对其进行评估,得到如下结论:

(1)从污染物入河量来看,常州市、宜兴市稻作农业生产过程中向水环境排放的污染物以 COD 和 TN 为主。COD 和 TN 的入河量均是 TP 入河量的 20 多倍,COD 和 TN 的年入河量分别为 $792.96 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $605.28 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$,TP 的年入河量为 $27.16 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

(2)从污染足迹来看,常州市、宜兴市稻作农业生产过程中产生的 TN 对当地水域空间的生态占用是最大的($3\,944.50 \text{ hm}^2$),其次为 TP($2\,578.95 \text{ hm}^2$),最小的是 COD(523.52 hm^2)。

(3)从污染压力状况来看,常州市、宜兴市稻作农业对水环境造成的污染压力指数为 2.10,处于中度污染压力状况。但是具体到各个区县,其污染压力状况各异,只有常州市天宁区的污染压力指数小于 1,其他各区县的污染压力指数都大于 1,表明常州市、宜兴市稻作农业生产活动超出了当地水域的承载能力,对当地水环境产生了压力。

参考文献:

- [1] 李文华, 刘某承, 张 丹. 用生态价值观权衡传统农业与常规农业的效益——以稻鱼共作模式为例[J]. 资源科学, 2009, 31(6): 899-904.
- [2] 杨林章, 冯彦房, 施卫明, 等. 我国农业面源污染治理技术研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(1): 96-101.
- [3] 郭廷忠, 张 超, 张丽君. 中国农业污染问题研究[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(1): 1773-1775.
- [4] GUO Ting-zhong, ZHANG Chao, ZHANG Li-jun. On agricultural pollution in China[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2009, 37(1): 1773-1775. (in Chinese)
- [5] 马立珊, 汪祖强, 张水铭, 等. 苏南太湖水系农业面源污染及其控制对策研究[J]. 环境科学学报, 1997, 17(1): 39-47.
- [6] MA Li-shan, WANG Zu-qiang, ZHANG Shui-ming, et al. Pollution from agricultural non-point sources and its control in river system of Taihu Lake, Jiangsu[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1997, 17(1): 39-47. (in Chinese)
- [7] 黄宗楚. 上海旱地农田氮磷流失过程及环境效益研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2005.
- [8] HUANG Zong-chu. The study of nonirrigated farmland nitrogen and phosphorus loss course and environmental effect in Shanghai[D]. Shanghai: East China Normal University, 2005. (in Chinese)
- [9] 苑韶峰, 吕 军. 流域农业非点源污染研究概况[J]. 土壤通报, 2004, 35(4): 507-511.
- [10] YUAN Shao-feng, LÜ Jun. A general introduction of agricultural non-point source pollution in watersheds[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(4): 507-511. (in Chinese)
- [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): 35-38.
- [12] ZHANG Da-di, ZHANG Xiao-hong, DAI Yu-min. Investigation and assessment of pollution load on four surface runoffs in Shanghai suburbs [J]. *Shanghai Environmental Sciences*, 1997, 16(9): 35-38. (in Chinese)
- [13] 沈根祥, 王振旗, 钱晓雍, 等. 上海大莲湖区域农业面源污染特征研究[J]. 上海农业学报, 2010, 26(1): 55-59.
- [14] SHEN Gen-xiang, WANG Zhen-qi, QIAN Xiao-yong, et al. The features of agricultural nonpoint source pollution in the Dalian Lake area of Shanghai[J]. *Acta Agriculture Shanghai*, 2010, 26(1): 55-59. (in Chinese)
- [15] 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.
- [16] YAN Li-zhen, SHI Min-jun, WANG Lei. Review of agricultural non-point pollution in Taihu Lake and Taihu Basin[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2010, 20(1): 99-107. (in Chinese)
- [17] 焦雯珺, 闵庆文, 等. 太湖流域水环境变化人文驱动力研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2011.
- [18] JIAO Wen-jun, MIN Qing-wen, et al. The study of human-induced drivers of water environment changes in the Taihu Lake Basin[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2011. (in Chinese)
- [19] 李 静, 闵庆文, 李子君, 等. 太湖流域农业污染压力分析[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(3): 348-355.
- [20] LI Jing, MIN Qing-wen, LI Zi-jun, et al. Agricultural pollution pressure in the Taihu Lake Basin [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(3): 348-355. (in Chinese)
- [21] 李 静, 闵庆文, 李文华, 等. 太湖流域平原河网区农业污染研究——以常州市和宜兴市为例[J]. 生态与农村环境学报, 2014, 30(2): 167-173.
- [22] LI Jing, MIN Qing-wen, LI Wen-hua, et al. Agricultural pollution of the river-netted plain areas in the Taihu Lake Basin: a Case Study of Changzhou and Yixing[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*,

- 2014, 30(2): 167-173.(in Chinese)
- [13] 焦雯珺, 闵庆文, 成升魁, 等. 基于污染足迹模型的太湖流域水环境演变的人文驱动力评估——以江苏省常州市为例[J]. 资源科学, 2011, 33(2): 223-229.
JIAO Wen-jun, MIN Qing-wen, CHENG Sheng-kui, et al. An assessment of human-induced drivers of water environment changes in the Taihu Lake Basin based on a pollution footprint model: a case study of Changzhou City, Jiangsu Province[J]. *Resources Science*, 2011, 33(2): 223-229.(in Chinese)
- [14] 焦雯珺, 闵庆文, 成升魁, 等. 污染足迹及其在区域水污染压力评估中的应用——以太湖流域上游湖州市为例[J]. 生态学报, 2011, 31(19): 5599-5606.
JIAO Wen-jun, MIN Qing-wen, CHENG Sheng-kui, et al. Pollution footprint and its application in regional water pollution pressure assessment: a case study of Huzhou City in the upstream of Taihu Lake Watershed[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(19): 5599-5606.(in Chinese)
- [15] 闵庆文, 焦雯珺, 成升魁. 污染足迹: 一种基于生态系统服务的生态足迹[J]. 资源科学, 2011, 33(2): 195-200.
MIN Qing-wen, JIAO Wen-jun, CHENG Sheng-kui. Pollution footprint: a type of ecological footprint based on ecosystem services[J]. *Resources Science*, 2011, 33(2): 195-200.(in Chinese)
- [16] 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.
ZHANG Gui-ying, WANG Zu-qiang. Investigation on the COD balance in agricultural water of Taihu Lake region[J]. *Rural Eco-environment*, 1994, 10(2): 41-44.(in Chinese)