太湖地区农业源对水体氮污染的贡献——以宜溧河流域为例

罗永霞[1,2], 高 波[1,2], 颜晓元[2], 姜小三[1*], 逯超普[2*]

(1.南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095; 2.中国科学院南京土壤研究所, 土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 南京 210008)

摘 要:宜溧河流域是太湖上游的主要集水流域,该流域的污染物排放是太湖污染负荷的重要来源。重点针对种植业、畜禽养殖业和水产养殖业三种农业污染源,基于统计年鉴、遥感解译、野外监测和调研等多种手段,对种植业、水产养殖业和禽畜养殖业分行业进行了氮污染负荷核算。结果表明,2013 年宜溧河流域主要农业源氮污染负荷总量为 6861 t,单位排放强度为 22.2 kg·hm^{-2};种植业和禽畜养殖业是宜溧河流域氮污染的主要来源,其中种植业源 TN 排放量最大,为 3832 t,占总负荷的 55.9%,种植业中蔬菜地对氮污染的贡献较大,TN 排放量占总农业源负荷的 18.7%;禽畜养殖业源 TN 排放量次之,占总负荷的 34.4%;水产养殖业源 TN 排放量最小,占总负荷的 9.8%。因此,针对宜溧河流域农业源氮污染的治理,在考虑禽畜养殖和水产养殖的同时,应以种植业污染尤其是菜地作为重点研究对象,制定合理的控制措施。

关键词:宜溧河流域;农业源污染;氮污染负荷

中图分类号:X524 **文献标志码**:A **文章编号**:1672-2043(2015)12-2318-09 doi:10.11654/jaes.2015.12.010

Estimating Contribution of Agricultural Sources to Aquatic Nitrogen Load in Taihu Lake Region: A Case Study of Yili River Catchment

LUO Yong-xia[1,2], GAO Bo[1,2], YAN Xiao-yuan[2], JIANG Xiao-san[1,*], TI Chao-pu[2*]

(1.College of Resources and Environment Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2.State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agricultural, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Taihu Lake region is densely populated, along with developed industry and intensive agriculture. The surface water pollution, especially eutrophication, has seriously affected both water supply and economic development in this region in recent years. Nitrogen (N) is a major pollutant in the surface water in this region. The Yili River catchment is a main upper catchment of the Taihu Lake. Hence, identifying the sources of N loads would help manage N fertilizers and water resources and reduce surface water pollution effectively. In this study, three main sources of agricultural source pollution including cropland, livestock and poultry husbandry, and aquaculture were analyzed through survey, monitoring, remote sensing, and use of statistical data and GIS technologies. Results showed that the total N load in this catchment was 6861 t in 2013, with an average of 22.2 kg·hm^{-2}. Cropland, livestock and poultry husbandry were the main sources of N pollution in this catchment, which was 3832 t and 2358 t, accounting for 56% and 34% of the total agricultural N loads, respectively. The N load from aquaculture was only 9.8% of the total agricultural N loads. Vegetable land was one of the major N pollution sources of cropland, amounting to 18.7% of the total agricultural N. Therefore, policies and managements of water N pollution control should be focused on vegetable systems in this area.

Keywords: Yili River catchment; agricultural source pollution; aquatic N load

收稿日期:2015-07-01

基金项目:中国科学院重点部署项目(KZZD-EW-10-04-02)

作者简介:罗永霞(1991—),女,四川甘孜人,硕士研究生,从事农业生态系统氮循环与面源污染研究。E-mail:2013103074@njau.edu.cn

* **通信作者**:姜小三 E-mail:gis@njau.edu.cn;逯超普 E-mail:cpti@issas.ac.cn

随着工业点源污染的有效治理,农业源污染对水环境的影响日益凸显,已经得到越来越多的关注和研究[1-2]。Van Drecht 等[3]指出农业源氮(N)对全球地表水污染的贡献为 19%~61%; 我国第一次全国污染普查结果显示,农业源污染物 TN(总氮)排放量约占排放总量的 57.2%[4];国家环境保护部对太湖、巢湖、滇池的调查研究显示,水体中的氮、磷大部分来自于生活污水和农业源污染, 工业废水对 TN 的贡献率仅为 10%~16%[5]。太湖水体污染严重,2013 年太湖营养健康状况报告显示,当年太湖主要水质指标中 TN 平均浓度 1.97 mg·L^{-1},为地表水Ⅴ类水质状况[6]。关于太湖地区水体污染的研究较多,但研究阶段不同,方法不同,各污染源贡献的比例差别较大,如金相灿等[7]指出太湖地区来自农业源的 TN 污染物占污染物总量的 52.6%(1999 年);杨林章等[8]对太湖地区污染负荷来源的分析表明,农业源 TN 污染所占的比重约为 58%(2013 年);刘庄等[9]的研究表明,畜禽养殖和水产养殖是太湖流域农业源污染的主要来源,来自这二者的 TN 污染负荷占流域总负荷的 43%(2010 年);郭红岩等[10]指出太湖地区水稻季各种类型农业源污染中,农田氮排放量占总排放量的 72.7%(2003 年)。大量研究显示, 近 30 年来太湖地区农业非点源污染研究主要局限于某一区域营养元素的试验调查与监测,或者片面地研究某一农业源对水环境的影响[7-13]。这些研究缺乏对种植业、畜禽养殖业和水产养殖业的综合考虑,更缺少对水环境污染影响的定量分析。种植业源中农田是研究者长期关注的重点,也是农业源中占污染比重较大的源[11],而随着设施菜地的急剧增加,其逐渐成为农业源氮污染的一个关注重点[12-13]。设施菜地种植效益高,菜农为了追求效益,超高量使用氮、磷肥料,单季作物化肥纯养分用量平均为 569~2000 kg·hm^{-2},为普通大田作物的数倍甚至数十倍,这成为水体富营养化的主要潜在威胁之一[14]。另外,太湖流域淡水资源丰富,渔业水平较发达,养殖户为追求高产往往投放过量的饵料,过量的营养成分导致养殖水体中氮、磷浓度偏高,Cai 等[15]的研究显示太湖地区池塘养殖污水年产生量为 12.7~50.9 万 t,但现有研究对水产养殖污染负荷的关注较少,尤其是围网养殖,主要关注围网养殖面积的动态变化,对围网养殖污染负荷的研究较为缺乏。关于禽畜养殖产排污系数的研究在太湖地区也鲜见报道,而且大部分农业源估算中的禽畜养殖排放系数通过查阅资料获取。钱秀红等[16]在太湖流域的杭嘉湖水网平原的研究表明,除杭州市以生活污染居第一位外,其余 9 个市县的水体污染源均以畜禽粪尿污染居第一位。因此,对太湖水体农业源污染评估,应综合种植业、禽畜养殖和水产养殖这几方面进行研究。尤其是近年来随着太湖水环境质量的恶化,政府制定了一系列治理方案和规章,如 2012 年编制了《太湖流域水环境综合治理总体方案(2013 年修编)》,方案出台后,太湖流域非点源污染治理力度加大,如水产养殖业围网养殖的面积大量减少[17]等,所以有必要对太湖流域农业源氮污染重新进行核算。

目前农业源污染的研究方法主要有野外调研、野外监测、模型模拟等[18]。野外调研覆盖范围广、时效性强、可以较为直观地表达一个地区的整体污染情况,但是调查往往缺乏规范、标准的农业源污染调查评估指标体系,影响调查数据及评估结果的可靠性;野外监测得到的数据可靠,时效性好,但是其研究区域范围较小,野外实验干扰较大,数据收集工作的劳动强度大、效率低;模型模拟在进行农业源污染的定量化研究以及影响评价和污染治理时是一种直接有效的研究方法,但是其需要大量的验证参数,且同一模型在不同地区适用性不同。因此,开展农业源污染研究有必要综合调查、监测、遥感和 GIS 等方法。

针对农业源污染研究中存在的问题与不足,本研究以 2013 年为基准年,借助野外调研、定位监测、统计年鉴、遥感和 GIS 等多种手段获取数据,从种植业、水产养殖业和畜禽养殖业对太湖地区农业源氮污染负荷进行核算。借助遥感解译和 GIS 软件,不仅可以获得较为缺乏的设施菜地、水产养殖的面积数据,而且可以显示污染负荷的空间分布特征,为后期全面研究太湖流域的农业源污染及空间分布情况打下基础,为采取控制措施提供决策支持。

1 材料与方法

1.1 研究区选择

宜溧河流域位于太湖西部,江苏省南部,流域中下游平原地区是一个河网纵横交错、湖荡密布的地区。中下游地区主要河道有南溪河、北溪河、丹金溧漕河以及武宜运河等; 下游的宜兴市境内分布有西氿、团氿及东氿 3 个相互连通的小型湖泊以及都山荡、马公荡、莲花荡等湖荡。流域南部宜溧山区来水主要汇入南溪河及中河并经西氿、团氿、东氿调蓄后经大浦港、陈东港等入太湖河道汇入太湖;北部茅山丘陵地区的来水主要汇入北河[19]。流域 2013 年年均气温 16.5 ℃,年总降雨量 2 366.4 mm。流域内土地利用方

式主要为林地、耕地、居民地、果园、草地和水体[20]。本研究中流域面积为 3089 km^2，主要由宜兴、溧阳两市构成，共包含 42 个乡镇，区域内人口密集，经济高度发达，污染负荷高，水质恶化，尤其是氮、磷污染严重[21]，流域产生的污染物通过各种水系直接或间接排入太湖，是太湖流域水环境治理的重点和难点。宜溧河流域的地理位置见图 1。

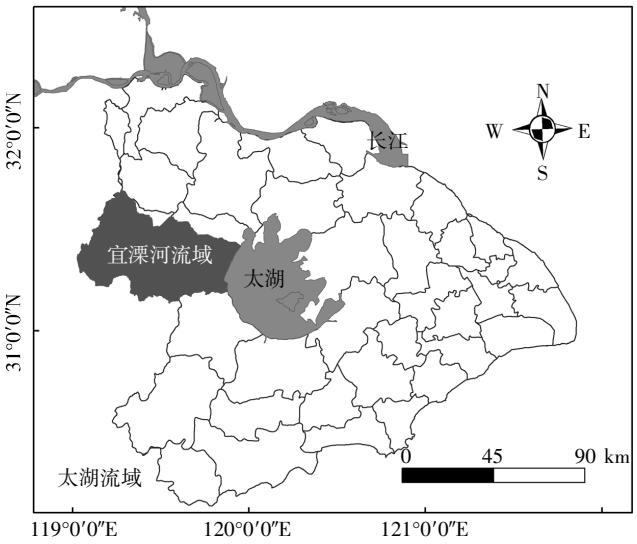

图 1 宜溧河流域地理位置

Figure 1 Location of Yili River catchment

1.2 核算方法

1.2.1 种植业源氮污染负荷估算

种植业源氮污染核算通过野外调研、遥感解译、野外监测、数据收集和统计年鉴整理等方法完成。其中土地利用类型的解译利用 eCognition 软件采用面向对象的分析方法对 2013 年 4 月和 5 月两期宜溧河流域的高分辨率遥感影像进行解译，影像来自资源三号卫星，分辨率为 5.8 m。

种植业调查内容包括地块面积、肥料（化肥和有机肥）的施用和流失情况、排水去向等。根据种植类别将种植业分为水田、旱地和蔬菜地，不同作物单位面积氮肥施用量调研结果如表 1 所示。对于氮流失系数，本研究通过对数据的整理和收集，归纳出太湖地区稻季 TN 径流淋溶损失与施肥量之间的关系，如图 2 所示。针对蔬菜地，分别选取大棚和露天菜地进行野外监测，选择宜溧河流域代表性的蔬菜品种，设置不同的施肥处理，进行 1 年以上的连续监测，获取设施菜地和露天菜地的 TN 径流淋溶损失与施肥量之间的关系。由于旱地研究数据较少，本研究中旱地 TN 径流淋溶损失与施肥量的关系参考 Ju 等[22]、Zhao 等[23]和逯超普[24]的研究（表 2）。

种植业氮污染负荷通过调研获取的单位面积氮肥用量、播种面积与经验公式相结合进行计算。则种植业源氮排污量计算公式如下：

$$F=\sum_i \eta_i \times S_i \quad (1)$$

式中：F 为种植业源总氮排放量，t；η_i 为第 i 种作物 TN 排放系数，kg·hm^{-2}；S_i 为宜溧河流域该 i 种作物的播种面积，hm^2。

表 1 不同作物单位面积氮肥施用量（kg N·hm^{-2}）

Table 1 Nitrogen fertilizer application rates of different crop（kg N·hm^{-2}）

地区 Region	水稻 Rice	小麦 Wheat	油菜 Rape	设施菜地 Greenhouse vegetable	露天菜地 Open field vegetable
宜兴 Yixing	358±82	259±51	286±93	693±132	462±132
溧阳 Liyang	346±63	252±52	283±105	1125±196	750±196

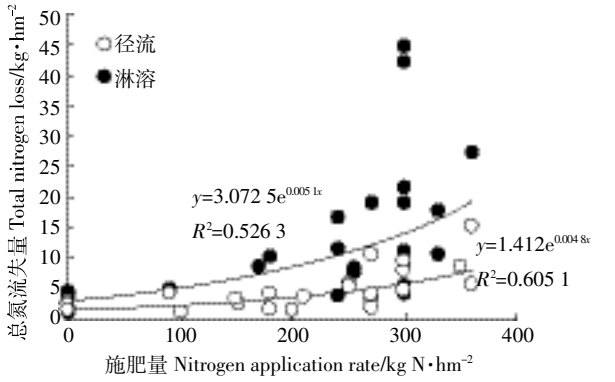

图 2 稻季总氮径流淋溶量与施肥量关系

Figure 2 Relationships of total nitrogen runoff and leaching with nitrogen application rates during rice season

表 2 旱地总氮径流淋溶损失参数

Table 2 Total nitrogen leaching and runoff coefficients for uplands

作物类型 Agrotype	淋溶 Leaching/%	径流 Runoff/%
小麦 Wheat	3.40[22]	4.15[23]
油菜 Rape	4.35[22]	3.19[24]
玉米 Maize	3.88[22]	3.67[24]

1.2.2 水产养殖业源

水产养殖业源氮污染核算通过野外调研、野外监测、遥感解译等方法完成。通过遥感解译获得围网养殖和池塘养殖的水体面积；野外调查则包括养殖模式、养殖面积、水体交换情况等；同时选择典型水产养殖模式，分别对池塘养殖和围网养殖两种养殖模式进

行实地监测,根据水产品的养殖周期、换水和排水进行采样,水样按照《水和废水监测分析方法(第四版)》[25]进行采集和保存;污染物浓度采用 SKALAR San^{++}全自动连续流动分析仪进行测定。本研究中围网养殖的 TN 平均浓度为 0.91 mg·L^{-1},池塘养殖的 TN 平均浓度为 2.39 mg·L^{-1}。水产养殖排污系数和氮排污量计算公式如下:

$$P_j=\sum_i Q_i\times C_i \quad (2)$$

式中:P_j 为第 j 种水产养殖方式的 TN 排放系数,kg·hm^{-2};Q_i 为第 i 次换水时的排水量,m^3;C_i 为第 i 次排水时的 TN 浓度,mg·L^{-1}。

$$F=\sum_j P_j\times S_j \quad (3)$$

式中:F 为水产养殖业 TN 排放量,t;S_j 为第 j 种养殖方式的养殖面积,hm^2。

1.2.3 禽畜养殖业源

禽畜养殖业源氮污染核算通过野外调研、野外监测、数据收集和统计年鉴整理等方法完成。野外调研内容包括养殖数量、饲料用量、粪尿产生量、粪尿处理方式等。禽畜养殖业源氮排放量用公式 4 计算,其中粪氮系数、尿氮系数和粪尿流失率参考武淑霞[26]和周亮等[27]的研究,如表 3 所示;畜禽数量根据生长周期确定,出栏时间大于 1 年的牲畜如牛采用年末存栏量作为畜禽养殖数量,其他畜禽(猪、羊、家禽等)出栏次数小于 1 年,则用年末出栏量表示畜禽养殖数量[28-29],流域内宜兴、溧阳两市的畜禽养殖数量如表 4 所示。污水处理率通过统计年鉴和实地监测得到,去氮率参考 Ti 等[30]关于水体氮负荷的研究。

$$F=\sum_i (A_i\times C_i+B_i\times D_i)\times N_i\times R\times(1-E\times Q) \quad (2)$$

式中:F 为禽畜养殖业 TN 排放量,t;A_i 为第 i 种畜禽的粪氮系数,kg·头$^{-1}$;C_i 为第 i 种畜禽的粪流失率;B_i 为第 i 种畜禽的尿氮系数,kg·头$^{-1}$;D_i 为第 i 种畜禽的尿流失率;N_i 为第 i 种畜禽的畜禽数量;R 为进入污水处理厂的比例;E 为污水处理率;Q 为污水处理去氮率。

表 4 宜溧河流域主要畜禽养殖数量

Table 4 Number of major livestock and poultry husbandry in Yili River catchment

地区 Region	牛 Cow/头	猪 Pig/万头	羊 Sheep/万只	家禽 Poultry/万羽
宜兴 Yixing	627	35.8	2.1	620
溧阳 Liyang	946	21.6	8.5	646
合计 Total	1573	57.4	10.6	1266

2 结果与分析

2.1 种植业源氮负荷

研究区各类别作物播种面积见图 3,种植业源 TN 排放情况如表 5 和图 4 所示。种植业 TN 负荷量为 3832 t,其中径流排放量 2032 t,占总排放量的 53.0%,淋溶排放量 1780 t,占总排放量的 47.0%。种植业中水田播种面积最大,占种植业总面积的 46.0%,水田 TN 排放量为 1504 t,占种植业源总排放量的 39.3%,其中 TN 径流排放量 1064 t,占水田 TN 排放量的 70.7%,TN 淋溶排放量 440 t,占水田 TN 排放量的 29.3%;旱地播种面积仅次于水田,占种植业总面积的 42.6%,旱地作物小麦、油菜和玉米的播种面积分别占旱地总面积的 80.3%、17.3%和 2.4%,旱地 TN 排放量为 1048 t,占种植业源总排放量的 27.3%,其中 TN 径流排放量 549 t,占旱地 TN 排放量的 52.4%,TN 淋溶排放量 499 t,占旱地 TN 排放量的 47.6%;蔬菜地播种面积最小,占种植业总面积的 11.4%,蔬菜地分为露天蔬菜地和设施蔬菜地两种种植模式,流域内主要为露天菜地,占蔬菜地总面积的

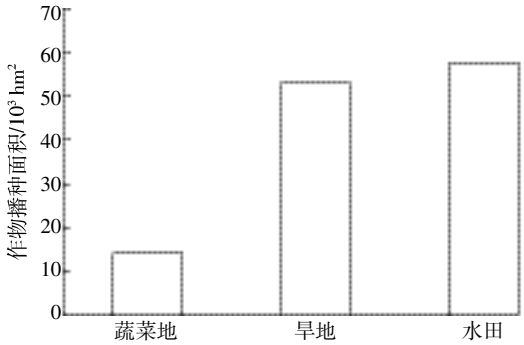

图 3 各类别作物播种面积

Figure 3 Planting areas of different types of crops

表 3 禽畜养殖业核算氮排放系数和流失率系数

Table 3 Nitrogen load and loss coefficients for livestock and poultry husbandry

项目 Items	猪粪 Pig manure	猪尿 Swine urine	牛粪 Cow dung	牛尿 Bovine urine	家禽 Poultry	羊粪 Sheep manure
氮系数 Nitrogen coefficient/g·capita^{-1}	7.58[26]	3.93[26]	29.34[26]	19.45[26]	0.39[26]	4.81[26]
流失率 Loss coefficient/%	26[26]	75[26]	63[26]	76[26]	16[26]	5.30[27]

表 5 种植业源 TN 污染负荷估算结果

Table 5 Calculation of TN pollution load of farmland cultivation

作物类型 Agrotype	面积 Area/10^3 hm^2	径流损失量 Runoff load/t	淋溶损失量 Leaching load/t	总损失量 Total load/t
水稻 Rice	57.5	1064	440	1504
小麦 Wheat	42.7	452	371	823
油菜 Rape	9.2	84	114	198
玉米 Maize	1.3	13	14	27
设施蔬菜地 Greenhouse vegetable	3.4	—	593	593
露天蔬菜地 Open field vegetable	10.8	419	268	687
总计 Total	124.9	2032	1800	3832

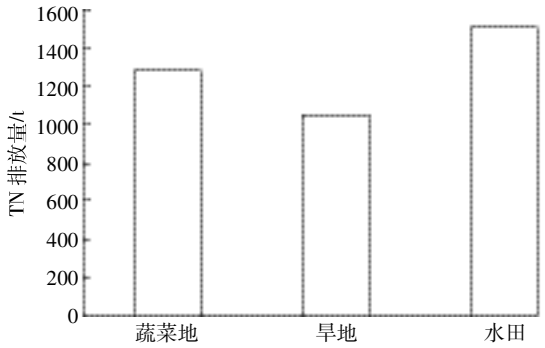

图 4 种植业不同种植类别 TN 污染负荷

Figure 4 TN pollution loads of different croplands

76.1%,设施菜地播种面积占蔬菜地总面积的 23.9%,蔬菜地 TN 排放量仅次于水田,为 1280 t,占种植业源总排放量的 33.4%,其中 TN 径流排放量 419 t,占蔬菜地 TN 排放量的 32.7%,TN 淋溶排放量为 861 t,占蔬菜地 TN 排放量的 67.3%。

2.2 水产养殖业源氮负荷估算

本研究中通过遥感解译得到宜溧河流域水产养殖业总面积为 23.4×10^3 hm^2, 养殖方式以池塘养殖为主,面积为 22.2×10^3 hm^2,占水产养殖业总面积的 94.9%;围网养殖面积 1.2×10^3 hm^2,占水产养殖业总面积的 5.1%,围网养殖区域主要分布在西氿、东氿等小型湖泊以及都山荡、马公荡等湖荡中,且分布范围较小。计算得到水产养殖业源 TN 排放量为 672 t,其中池塘养殖 TN 排放量 637 t,占水产养殖业源 TN 排放量的 94.8%;围网养殖 TN 排放量 35 t,占水产养殖业源 TN 排放量的 5.2%。水产养殖业源不同养殖方式的面积及 TN 排放量如表 6 所示。

2.3 禽畜养殖业源氮负荷估算

宜溧河流域主要区域宜兴和溧阳两市的禽畜养殖业源的 TN 排放系数和 TN 排放量如表 7 所示。TN 排放系数两市均为牛最高,生猪次之,宜兴市和溧阳市牛的 TN 排放系数分别为 21.6、20.8 kg·头$^{-1}$, 生猪的 TN 排放系数分别为 3.2、3.1 kg·头$^{-1}$。宜溧河流域禽畜养殖业源 TN 排放量为 2358 t,其中宜兴市禽畜养殖业源 TN 排放量为 1410 t, 占流域总排放量的 59.8%,溧阳市禽畜养殖业源 TN 排放量为 948 t,占流域总排放量的 40.2%。宜溧河流域 TN 排放量生猪最大,为 1805 t,占流域 TN 总排放量的 76.5%,其中宜兴市生猪 TN 排放量为 1142 t, 占宜兴市畜禽养殖业 TN 总排放量的 81.0%, 溧阳市生猪 TN 排放量为 663 t,占溧阳市畜禽养殖业 TN 总排放量的 69.9%;其次是家禽,流域内家禽的 TN 排放量为 503 t,占流域 TN 总排放量的 21.3%,其中宜兴市家禽 TN 排放量为 251 t, 占宜兴市畜禽养殖业源 TN 总排放量的 17.8%,溧

表 6 水产养殖业源不同养殖方式的面积及 TN 排放量

Table 6 Area and TN load of different types of aquaculture

项目 Items	池塘养殖 Pond breed	围网养殖 Aquatic breed	合计 Total
面积 Area/10^3 hm^2	22.2	1.2	23.4
TN 排放系数 TN load coefficient/kg·hm^{-2}	28.7	41.0	—
TN 排放量 TN load/t	637	35	672

表 7 禽畜养殖业 TN 排污系数和 TN 排放量

Table 7 Load coefficients and load of TN pollutants from different types of livestock and poultry husbandry

地区 Region	畜禽种类 Livestock and poultry	TN 排放系数 TN load coefficient/kg·头$^{-1}$	TN 排放量 TN load/t
宜兴 Yixing	牛 Cow	21.56	14
	猪 Pig	3.19	1142
	家禽 Poultry	0.04	251
	羊 Sheep	0.17	3
溧阳 Liyang	牛 Cow	20.78	20
	猪 Pig	3.07	663
	家禽 Poultry	0.04	252
	羊 Sheep	0.16	14
合计 Total	—	—	2358

阳市家禽 TN 排放量为 252 t,占溧阳市畜禽养殖业源 TN 总排放量的 26.6%。

2.4 宜栗河流域农业源污染负荷

宜溧河流域 2013 年主要农业源 TN 排放总量达到 6861 t,单位排放强度为 22.2 kg·hm^{-2}。流域内主要农业源氮污染排放构成如图 5 所示。主要农业源TN 排放量高低顺序依次为种植业源>禽畜养殖业源>水产养殖业源,种植业源 TN 排放量最大,达到 3832 t,占总排放量的 55.9%,单位排放强度为 12.4 kg·hm^{-2},禽畜养殖业源 TN 排放量次之,达到 2358 t,占总排放量的 34.4%,单位排放强度为 7.6 kg·hm^{-2},水产养殖业源的 TN 排放量相对较小,为 672 t,占总排放量的 9.8%,单位排放强度为 2.2 kg·hm^{-2}。

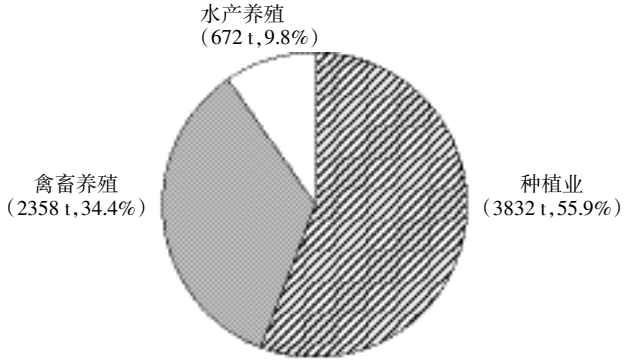

图 5 宜溧河流域主要农业源氮排放量及比例

Figure 5 Loads and percentages of TN pollution from different major agricultural sources of Yili River catchment

3 讨论

3.1 宜栗河流域氮污染排放特征

本研究分析了宜溧河流域 2013 年种植业、禽畜养殖业和水产养殖业的情况,详细计算出了各类农业源的 TN 排放量。宜栗河流域各农业源的 TN 排放量分别占总排放量的比例与前人的研究比较如图 6 所示,本研究中种植业、禽畜养殖业和水产养殖业所占比例分别为 55.9%、34.4%和 9.8%, 与我国第一次全国污染普查[5]的结果相比,水产养殖业比例增加,主要原因可能在于研究区渔业发达, 水产养殖相对较多,本研究在野外调研和遥感解译时也发现研究区有较发达的水产养殖业,养殖户为追求高产往往投入过量的饵料。边博等[31]研究表明,太湖西部农业源中种植业、禽畜养殖业和水产养殖业的 TN 排放量占总排放量的比例分别为 79%、12%、9%, 其研究中种植业所占比例高于本研究,而禽畜养殖业低于本研究,原因

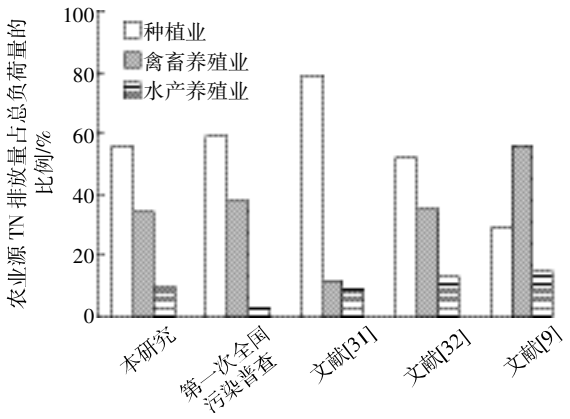

图 6 有关文献中三种农业源 TN 排放量占总负荷量的比例

Figure 6 Proportion of TN from three agricultural sources in total TN loads

在于其研究中禽畜养殖业污染负荷的核算方法与本研究不同,而且其统计得到的畜禽出栏量较少。本研究调查结果显示,设施菜地单位面积年施肥量为 909 kg N·hm^{-2},露天菜地 606 kg N·hm^{-2},水稻单位面积施肥量为 352 kg N·hm^{-2},蔬菜地单位面积施肥量几乎达到水田的 2~3 倍, 在农业源氮污染中占了较大比重。刘庄等[9]在太湖流域的研究中种植业未考虑 TN 排放量较高的蔬菜地,得到的结果种植业 TN 排放量相对较小,种植业、禽畜养殖业和水产养殖业分别为 29%、56%和 15%。

本研究结果显示农业源种植业、禽畜养殖业、水产养殖业的 TN 单位排放强度分别为 12.4、7.6、2.2 kg·hm^{-2}, 其中种植业 TN 单位排放强度均高于边博等[31]、李荣刚等[32]的研究结果(分别为 4.6、8. 9 kg·hm^{-2}),分析发现他们的研究均没有考虑 TN 排放量较大的蔬菜地,本研究中蔬菜地 TN 单位排放强度为 4.1 kg·hm^{-2};其他原因可能是随着城市化进程的加快,耕地面积不断减少,单位面积排放强度增大,本研究在统计中发现,宜溧河流域 2013 年耕地面积比 2012 年减少 2.31×10^3 hm^2。

本研究中种植业源 TN 排放量为 3832 t, 在三类农业源中占的比重最大,其较高的肥料用量是 TN 排放量大的原因,尤其是蔬菜地复种指数高,单位面积施肥量大。种植业中稻田的氮污染负荷量最大,水田 TN 排放系数为 26.2 kg·hm^{-2},低于 Guo 等[33]在太湖的水田 TN 净负荷量 34.1 kg·hm^{-2}, 但因宜溧河流域的粮食作物以水稻为主,水稻的种植面积最大,占种植业总面积的 46.0%, 所以水田的氮污染负荷量最大。相对于旱地,蔬菜地的排污量较大,蔬菜地的播种面

积比旱地少，但是其较高的排污系数使得蔬菜地的 TN 负荷量高于旱地。

水产养殖业源 TN 排放量为 672 t，以池塘养殖排放为主，池塘养殖 TN 排放量占水产养殖业TN 排放量的 94.8%，池塘养殖的 TN 排放系数为 28.7 kg·hm^{-2}，与陈家长等[34]、戴捷等[35]的研究系数相当。围网养殖的 TN 排放系数为 41.0 kg·hm^{-2}，辛玉婷等[36]在阳澄湖研究围网养殖恒定源 TN 排放系数为 63.66 kg·hm^{-2}，围网养殖的 TN 排放系数非常高，几乎达到池塘养殖的 2 倍。流域内池塘养殖面积大，围网养殖区域为一些面积较小的湖泊和湖荡，且随着太湖水环境问题日益突出及太湖整治力度的加大，太湖地区的围网养殖面积大量减少，水产养殖业氮污染得到一定控制[17,37]，但是水产养殖业的 TN 系数仍然很高，可能与养殖过程中饵料的投放等有关。

禽畜养殖业源 TN 排放量为 2358 t，TN 排放量最大的是生猪，占畜禽养殖业源 TN 总排放量的 76.5%，其次是家禽，高排放量与流域的生猪和家禽的出栏量较大有关。王晋虎等[38]在星云湖流域对畜禽养殖污染估算的研究也显示以猪粪便为主要污染物的畜禽粪便污染是星云湖流域最大的污染源，其次是家禽和牛。随着禽畜养殖业污染的日益凸显，国家和地方均颁布了一系列规章，如《畜禽养殖污染防治管理办法》和《畜禽养殖业污染防治技术规范》等，以及针对太湖流域的《关于加快太湖流域畜禽污染治理工作的意见》等，使禽畜养殖业发生了很多变化，如养殖模式从分散养殖逐渐转变为集约化养殖，很多养殖场建造了污水处理厂、有机肥生产厂等配套设施，禽畜养殖业产生的污染得到了一定的治理，本研究在调查中也发现太湖周边养殖散户数量减少。但是人们生活水平的提高，大大增加了对肉类等副食品的需求，刺激了养殖业的发展，所以禽畜养殖业氮污染治理应受到足够的重视。

3.2 宜溧河流域氮污染负荷控制管理措施

宜溧河流域农业源氮污染治理，在考虑禽畜养殖和水产养殖的同时，应将种植业污染尤其是蔬菜地作为重点研究对象，制定合理的控制措施。种植业氮肥施用量高，作物的氮肥当季利用率低，所以种植业应合理控制化肥的施用量，充分发挥氮肥的增产作用，提高氮肥利用率，减少农田中过剩氮的流失[39]。大量的研究表明，设置隔离带、拦截沟等是拦截氮从农田向生态环境敏感区扩散的有效途径和方法[40-42]。本研究在调查中发现大量的水产养殖户单个围网养殖面积为 1 hm^2，大围网养殖几乎消失，随着太湖水污染整治力度的加大，太湖地区水产养殖面积大量减少，水产养殖氮污染将得到逐步控制，但是养殖过程的饵料投放等导致水产养殖的 TN 排放系数仍然很高。所以，水产养殖业控制养殖面积，合理分布养殖区域，减少饵料投放等对于流域水环境保护起到积极作用；此外，养殖区应实行轮养，提倡生态养殖，以利于湖泊生态恢复和保护[43-45]。本研究结果显示，规模化养殖场的氮污染负荷量仍然很高，可能与政策本身存在很多缺陷以及执行力度不够有关[46]。禽畜养殖业应提高现有法规规章的法律效力和实际执行力，从法律层面给予更多关注，制定更多、更符合实际需要的环境政策，有效控制规模化养殖场禽畜粪尿的排放，进一步重视养殖散户，规范其畜舍选址，远离水源地建造畜舍，给予养殖户一定的资金补助等。

4 结论

（1）2013 年宜溧河流域农业源 TN 排放量达到 6861 t，单位排放强度为 22.2 kg·hm^{-2}，其中种植业、禽畜养殖业和水产养殖业 TN 排放量分别为 3832 t、2358 t 和 672 t，占总负荷的比例为 55.9%、34.4%和 9.8%。

（2）流域内种植业化肥施用量高，氮损失量大，尤其蔬菜地较明显，蔬菜地 TN 排放量占总农业源负荷的 18.7%；禽畜养殖业 TN 排放系数牛最大，TN 排放量生猪和家禽的养殖数量多，排放量大；水产养殖业 TN 排放量以池塘养殖为主，围网养殖排污系数大，但养殖面积少，TN 排放量较少。

（3）针对流域内农业源氮污染治理，在考虑禽畜养殖业和水产养殖业的同时，应以种植业污染尤其是蔬菜地为重点研究对象，制定合理的减排控制措施。

参考文献：

[1] Lacroix A, Beaudoin N, Makowski D. Agricultural water nonpoint pollution control under uncertainty and climate variability[J]. *Ecological Economics*, 2005, 53(1): 115-127.

[2] Edwards A C, Withers P J A. Transport and delivery of suspended solids, nitrogen and phosphorus from various sources to fresh waters in the UK [J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 350(3-4): 144-153.

[3] Van Drecht G, Bouwman A F, Knoop J M, et al. Global modeling of the fate of nitrogen from point and nonpoint sources in soils, groundwater, and surface water[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, 17(4): 1115.

[4] 中华人民共和国环境保护部, 中华人民共和国国家统计局, 中华人民共和国农业部. 第一次全国污染源普查公报[R]. 2010.
Ministry of Environmental Protection of the People's Reputation of Chi-

na, National Bureau of Statistics of the People's Republic of China, Ministry of Agriculture of the People's Reputation of China. The first national pollution census bulletin[R]. 2010.

[5] 国家环境保护总局. 三河三湖水污染防治计划及规划[M]. 北京:中国环境科学出版社, 2000.
The Central People's Government of the People's Republic of China. The water pollution prevention and control for "Three Rivers and Three Lakes"[M]. Beijing:China Environmental Science Press, 2000.

[6] 水利部太湖流域管理局, 江苏省水利厅, 浙江省水利厅, 等. 2013 年太湖健康报告[R]. 2014.
Taihu Basin Authority of Ministry of Water Resources, Water Resources Department of Jiangsu Province, Water Resources Department of Zhejiang Province, et al. Taihu health report in 2013[R]. 2014.

[7] 金相灿, 叶 春, 颜昌宙, 等. 太湖重点污染控制区综合治理方案研究[J]. 环境科学研究, 1999, 12(5):1-5.
JIN Xiang-can, YE Chun, YAN Chang-zhou, et al. Comprehensive treatment plan for key-polluted regions of Lake Taihu[J]. *Research of Environmental Sciences*, 1999, 12(5):1-5.

[8] 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-Retain-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.

[9] 刘 庄, 李维新, 张毅敏, 等. 太湖流域非点源污染负荷估算[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(增刊 1):45-48.
LIU Zhuang, LI Wei-xin, ZHANG Yi-min, et al. Estimation of non-point source pollution load in Taihu Lake basin[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2010, 26(Suppl1):45-48.

[10] 郭红岩, 王晓蓉, 朱建国, 等. 太湖流域非点源氮污染对水质影响的定量化研究[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(2):150-153.
GUO Hong-yan, WANG Xiao-rong, ZHU Jian-guo, et al. Quantity of nitrogen from non-point source pollution in Taihu Lake catchment[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(2):150-153.

[11] Zhao X, Zhou Y, Min J, et al. Nitrogen runoff dominates water nitrogen pollution from rice-wheat rotation in the Taihu Lake region of China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2012, 156:1-11.

[12] Min J, Zhao X, Shi W M, et al. Nitrogen balance and loss in a greenhouse vegetable system in Southeastern China[J]. *Pedosphere*, 2011, 21(4):464-472.

[13] Nasha D, Watersb D, Buldu A, et al. Using a conceptual Bayesian network to investigate environmental management of vegetable production in the Lake Taihu region of China[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2013, 46 :170-181.

[14] 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.

[15] Cai C F, Gu X H, Ye Y T, et al. Assessment of pollutant loads discharged from aquaculture ponds around Taihu Lake, China[J]. *Aquaculture Research*, 2013, 44:795-806.

[16] 钱秀红, 徐建民, 施加春, 等. 杭嘉湖水网平原农业非点源污染的综合调查和评价[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2002, 28(2):147-150.
QIAN Xiu-hong, XU Jian-min, SHI Jia-chun, et al. Comprehensive survey and evaluation of agricultural nonpoint source pollution in Hang-Jia-Hu water-net plain[J]. *Journal of Zhejiang University (Agric & Life Sci)*, 2002, 28(2):147-150.

[17] 范亚民, 李海宇, 何华春, 等. 近 30 年来太湖围湖利用及东太湖网围养殖动态变化研究[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(2):121-126.
FAN Ya-min, LI Hai-yu, HE Hua-chun, et al. Dynamic monitoring of lake reclamation in the Taihu Lake and lake enclosure culture of the east Taihu Lake in recent 30 years[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2012, 21(2):121-126.

[18] 高 波, 颜晓元, 姜小三, 等. 太湖地区农业源污染核算研究进展[J]. 湖泊科学, 2014, 26(6):822-828.
GAO Bo, YAN Xiao-yuan, JIANG Xiao-san, et al. Research progress in estimation of agricultural sources pollution of the Lake Taihu region [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2014, 26(6):822-828.

[19] 史云祥. 宜溧河流域水环境演变趋势以及污染物输移过程研究[D]. 南京:南京理工大学, 2002.
SHI Yun-xiang. Water environment evolvement trend and pollution transport process research of Yilihe basin[D]. Nanjing:Nanjing University of Science and Technology, 2002.

[20] 王翊晨, 姚治君, 刘兆飞, 等. 太湖流域宜溧河与西苕溪水质对比分析[J]. 地理科学进展, 2011, 30(7): 853-860.
WANG Yi-chen, YAO Zhi-jun, LIU Zhao-fei, et al. Comparison analysis of water quality between Yili River and Xitiaoxi River in Taihu basin[J]. *Process in Geography*, 2011, 30(7): 853-860.

[21] 许朋柱, 秦伯强, 黄文钰, 等. 太湖流域宜溧河地区水体水质状况及营养状态评价[J]. 湖泊科学, 2001, 13(4):315-321.
XU Peng-zhu, QIN Bo-qiang, HUANG Wen-yu, et al. Assessment of water quality and nutrition to water bodies the Yilihe Watershed, Taihu Basin[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2001, 13(4):315-321.

[22] Ju X T, Xing G X, Chen X P, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. *Proceeding of the National Academy of Science*, 2009, 106:3041-3046.

[23] Zhao X, Yan X Y, Xiong Z Q, et al. Spatial and temporal variation of inorganic nitrogen wet deposition to the Yangtze River Delta Region, China[J]. *Water Air & Soil Pollution*, 2009, 203:277-289.

[24] 逄超普. 不同空间尺度区域氮素收支[D]. 南京:南京农业大学, 2008.
TI Chao-pu. Regional nitrogen budget at different spatial scales[D]. Nanjing:Nanjing Agricultural Univercity, 2008.

[25] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 四版. 北京:中国环境科学出版社, 2002:701-705.
State Environmental Protection Administration. Methods for the moni-

toring and analysis of water and wastewater[M]. 4th Edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002:701-705.

[26] 武淑霞. 我国农村畜禽养殖业氮磷排放变化特征及其对农业面源污染的影响[D]. 北京:中国农业科学院, 2005.
WU Shu-xia. The spatial and temporal change of nitrogen and phosphorus produced by livestock and poultry & their effects on agricultural non-point pollution in China[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2005.

[27] 周 亮, 徐建刚, 孙东琪, 等. 淮河流域农业非点源污染空间特征解析及分类控制[J]. 环境科学, 2013, 34(2):547-554.
ZHOU Liang, XU Jian-gang, SUN Dong-qi, et al. Spatial heterogeneity and classified control of agricultural non-point source pollution in Huaihe River basin[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(2):547-554.

[28] 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.
YAN Li-zhen, SHI Min-jun, WANG Lei. Review of agricultural non-point pollution in Taihu Lake and Taihu basin[J]. *China Pollution, Resources and Environment*, 2010, 20(1):99-107.

[29] 王方浩, 马文奇, 窦争霞, 等. 中国畜禽粪便产生量估算及环境效应[J]. 中国环境科学, 2006, 26(5):614-617.
WANG Fang-hao, MA Wen-qi, DOU Zheng-xia, et al. The estimation of the production amount of animal manure and its environmental effect in China[J]. *China Environmental Science*, 2006, 26(5):614-617.

[30] Ti C P, Xia Y Q, Pan J J, et al. Nitrogen budget and surface water nitrogen load in Changshu: A case study in the Taihu Lake region of China [J]. *Nutrient Cycling Agroecosystems*, 2011, 91(1):55-66.

[31] 边 博, 朱 伟, 李 冰, 等. 太湖流域西部地区面源污染特征及其控制技术[J]. 水资源保护, 2015, 31(1):48-55.
BIAN Bo, ZHU Wei, LI Bing, et al. Characteristics and control techniques of non-point pollution in the western region of Taihu Basin[J]. *Water Resources Pollution*, 2015, 31(1):48-55.

[32] 李荣刚, 夏源陵, 吴安之, 等. 江苏太湖地区水污染物及其向水体的排放量[J]. 湖泊科学, 2000, 12(2):147-153.
LI Rong-gang, XIA Yuan-ling, WU An-zhi, et al. Pollutants sources and their discharging amount in Taihu Lake area of Jiangsu Province[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2000, 12(2):147-153.

[33] Guo H Y, Zhu J G , Wang X R, et al. Case study on nitrogen and phosphorus emissions from paddy field in Taihu region[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2004, 26:209-219.

[34] 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.
CHEN Jia-zhang, HU Geng-dong, QU Jian-hong, et al. TN and TP from pond crab farming in the Taihu Valley[J]. *Rural Eco-Environment*, 2005, 21(1):21-23.

[35] 戴 捷, 李传岭, 邓楚洲, 等. 洪湖流域半封闭池塘河蟹养殖氮磷污染负荷研究[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(5):169-172.
DAI Jie, LI Chuan-ling, DENG Chu-zhou, et al. Investigation of nitrogen and phosphorus pollution and their pollution loads of pond crab farming in Honghu Valley[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 33(5):169-172.

[36] 辛玉婷. 阳澄湖围网养殖污染负荷计算及其污染效应研究[D]. 南京:河海大学, 2007.
XIN Yu-ting. Study on the pollution load calculation and polluting effect of barier net aquiculture in Yangcheng Lake[D]. Nanjing: Hehai University, 2007.

[37] 王家伟, 李云梅. 多参数融合的太湖围网养殖遥感动态监测[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(29):14334-14337.
WANG Jia-wei, LI Yun-mei. RS-based multi-parameter integration of dynamic monitoring of enclosure culture in Taihu Lake[J]. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2009, 37(29):14334-14337.

[38] 王晋虎. 星云湖流域畜禽养殖污染特征及其定量估算研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2011.
WANG Jin-hu. The research of Xingyun Lake Vellay raising livestock pollution characters and quantitative estimation[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2011.

[39] 蔡祖聪, 颜晓元, 朱兆良. 立足于解决高投入条件下的氮污染问题[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(1):1-6.
CAI Zu-cong, YAN Xiao-yuan, ZHU Zhao-liang. A great challenge to solve nitrogen pollution from intensive agriculture[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(1):1-6.

[40] Braskerud B C. Factors affecting nitrogen retention in small constructed wetlands treating agricultural non-point source pollution[J]. *Ecological Engineering*, 2002, 18:351-370.

[41] 王沛芳, 王 超, 徐海波. 自然水塘湿地系统对农业非点源氮的净化截留效应研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(3):782-785.
WANG Pei-fang, WANG Chao, XU Hai-bo. Effectiveness of nutrient retention and purification in natural ponds[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(3):782-785.

[42] 杨林章, 周小平, 王建国, 等. 用于农田非点源污染控制的生态拦截型沟渠系统及其效果[J]. 生态学杂志, 2005, 24(11):1371-1374.
YANG Lin-zhang, ZHOU Xiao-ping, WANG Jian-guo, et al. Ecological ditch system with interception function and its effects on controlling farmland non-point pollution[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(11):1371-1374.

[43] 戴恒鑫, 马旭洲, 李应森, 等. 湖南大通湖河蟹池塘生态养殖模式对水质净化的试验研究[J]. 安全与环境学报, 2012, 12(5):89-94.
DAI Heng-xin, MA Xu-zhou, LI Ying-sen, et al. Purification effect of the ecological culture pattern of *Eriocheir sinensis* on the water quality in Datong Lake, Hunan[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2012, 12(5):89-94.

[44] Cao L, Wang W M, Yang Y, et al. Environmental impact of aquaculture and countermeasures to aquaculture pollution in China[J]. *Environmental Science Pollution Research*, 2007, 1414(7):452-462.

[45] Lin Y F , Jing S R, Lee D Y, et al. Constructed wetlands for water pollution management of aquaculture farms conducting earthen pond culture[J]. *Water Environment Research*, 2010, 82(8):759-768.

[46] 吴 丹. 太湖流域畜禽养殖非点源污染控制政策的实证分析[D]. 杭州:浙江大学, 2011.
WU Dan. An empirical analysis of nonpoint source pollution control policy on livestock farming in Lake Tai watershed[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.