

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2015.01.008

# 太湖流域西部地区面源污染特征及其控制技术

边博<sup>1,2</sup>, 朱伟<sup>3</sup>, 李冰<sup>1</sup>, 吴海锁<sup>1</sup>, 周灵君<sup>1,2</sup>

(1. 江苏省环境科学研究院, 江苏南京 210036; 2. 江苏省环境工程重点实验室, 江苏南京 210036;  
3. 河海大学环境学院, 江苏南京 210098)

**摘要:**针对太湖流域西部地区源污染的主要来源,依据由单元田间试验和小流域出口营养盐输出监测值与流域土地利用结构关系推算获得输出系数,计算了种植业典型土地利用类型的COD、TN、NH<sub>3</sub>-N和TP的排放量,结合其他种类面源排放量,指出太湖流域西部地区农业面源污染呈现出农村生活污水和种植业污染为主的排放特征。提出了面源污染适宜推广的处理模式,梳理不同种类面源污染处理存在的主要问题并相应提出面源污染控制建议,为太湖流域面源控制提供参考。

**关键词:**面源控制;输出系数模型;污染排放特征;土地利用方式;太湖流域

中图分类号:X171.1 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2015)01-0048-08

## Characteristics and control techniques of non-point pollution in the western region of Taihu Basin

BIAN Bo<sup>1,2</sup>, ZHU Wei<sup>3</sup>, LI Bing<sup>1</sup>, WU Haisuo<sup>1</sup>, ZHOU Lingjun<sup>1,2</sup>

(1. Jiangsu Provincial Academy of Environmental Science, Nanjing 210036, China;  
2. Jiangsu Province Key Laboratory of Environmental Engineering, Nanjing 210036, China;  
3. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** As to the main source of non-point source pollution in western region of Taihu Basin, the output coefficient was got according to the relationship between the unit field experiment and the monitoring values of small watershed nutrient output and the structure of watershed land use. The emissions of COD、TN、NH<sub>3</sub>-N and TP from typical land use of planting industry were calculated. Combined with those emissions of other kinds of non-point source pollution, the authors of this paper thought that the non-point source pollution in the western region of Taihu Basin was mainly from rural sewage and planting industry pollution. The main problems existing in controlling different types of non-point source pollution were analyzed. On this basis, some treatment mode for controlling non-point source pollution were proposed, aiming to provide a reference for non-point source controlling in Taihu Lake watershed.

**Key words:** non-point source pollution controlling; output coefficient mode; characteristics of pollution emission; method of land use; Taihu Basin

随着太湖流域工业污染点源和城乡污水治理逐步到位,面源污染占污染负荷的比重逐步提高,流域面源污染已成为太湖水体污染的主要来源和该流域污染治理的主要矛盾<sup>[1]</sup>。如何大幅度削减排污总量,制订具有针对性和可行性的面源治理措施,实施小流域面源污染控制工程显得十分必要。由于流域

内面源污染产生量大,发生时随机性和污染源不易确定性,面源污染控制起来难度较大<sup>[2-5]</sup>。因此开展太湖流域西部区域面源主要污染物特征解析及控制研究,不仅对该地区具有现实意义,而且对整个太湖流域都具有重要作用。

本研究以太湖流域西部地区为对象,研究区面

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07506-001);江苏省第4期“333”工程科研项目(BRA2014375);江苏省科技基础设施建设计划(BM2013013)

作者简介:边博(1977—),男,高级工程师,博士,主要从事面源污染控制及水生态修复。E-mail: bianbo1@163.com

积 5272 km<sup>2</sup>, 占太湖流域总面积的 14%, 基本涵盖了太湖流域上游主要入湖河流, 河网区水质达标率仅为 17%, 是影响太湖水体, 特别是梅梁湾、竺山湾水质的主要区域<sup>[1]</sup>。

太湖地区农业面源污染主要包括种植业污染、养殖业污染和农村居民生活污染等。特别是种植业面源由于其形成过程受区域气候条件、土地利用方式和降水过程等多种因素影响, 具有污染产生过程复杂、排放途径及排放量不确定、污染负荷的时空变异性等特点, 因而造成了种植业面源污染负荷难以准确核算<sup>[6]</sup>。

影响种植业面源污染的关键性因素是土地利用方式。一般而言, 研究人员相对容易得到种植业土地利用资料, 可建立土地利用与面源污染负荷之间的关系, 定量研究流域内不同土地利用类型输出污染物的负荷, 为种植业面源污染负荷的核算提供依据。根据这一思路, 国内外研究者提出并改进了输出系数模型, 该方法直接建立流域土地利用类型与种植业污染输出量的关系, 利用污染物输出系数来估算流域输出的面源污染负荷, 有效避开了面源污染发生的复杂过程。该模型所需参数少、操作简便, 又具有一定的精度和广泛的适用性, 很大程度上反映了区域面源污染输出强度<sup>[7-8]</sup>。因此开展区域输出系数研究对于认识区域面源污染特征、强度以及建立面源污染模型提供了一种有效途径<sup>[9-13]</sup>。

本研究采用的土地利用类型的输出系数由单元田间试验和小流域出口营养盐输出监测值与流域土地利用结构关系推算获得<sup>[14]</sup>, 输出系数具有较好流域尺度适用性<sup>[10]</sup>; 同时利用多年降雨径流关系计算流域径流深分布, 考虑降雨径流的空间差异影响, 并将输出系数模型与地理信息系统(GIS)与遥感(RS)技术相结合, 从而进一步提高了模型精度。

本文通过现场调查、实测方法以及输出系数模型, 核算太湖流域西部地区内面源排放量, 明确研究区面源污染的排放特征, 基于不同面源类型的典型治理实例, 确定了不同类型面源污染的适用或推荐技术, 并提出了治理模式相关建议, 从而为太湖流域面源控制提供科学指导。

## 1 面源污染划分及其计算

### 1.1 面源污染的划分

农村面源污染又称农村非点源污染, 主要是指从事农业生产和生活活动时所产生的污染物, 如农田中的土粒, 氮素, 磷素, 农药及其他有机或无机污染物质(本文未涉及)在降水或灌溉过程中, 通过农田地表径流, 农田排水和地下渗漏进入水体, 引起水

质污染的过程。典型的农村面源污染包括农田径流(化肥), 水土流失, 农村生活污水, 农村水产及畜禽养殖等造成的污染。太湖流域江苏农村现代化和城市化发展迅速, 特别是城乡一体化的发展, 使得该研究区的农业面源污染主要有农业种植业、农村生活、畜禽粪便和水产养殖污染等主要类型。

### 1.2 计算方法

#### 1.2.1 种植业

种植业调查内容包括种植种类, 种植面积、肥料施用情况等。为了确定西部区域种植业面源污染排放系数, 选择常州市雪堰镇和宜兴丁蜀镇作为典型代表区, 对种植业污染的产生、迁移和转化特征进行研究, 构建输出系数模型, 计算研究区各类种植业各类营养盐输出负荷, 输出系数模型如式(1)所示。

$$L_j = \sum_{i=1}^n E_{i,j} A_i Q_i \quad (1)$$

式中:  $L_j$  为第  $j$  种营养盐输出负荷;  $E_{i,j}$  为第  $i$  种土地利用类型的第  $j$  营养盐的输出系数(以浓度表示), 通过实验获取输出系数;  $A_i$  为第  $i$  种土地利用类型的面积, 通过遥感解译获取土地类型面积;  $Q_i$  为第  $i$  类土地利用类型上产生的径流量, 通过利用 SCS (soil conservation service) 模型确定模型中  $Q$  值, 主要依据宜兴市降雨资料; 其中  $j$  分别为 COD、TN、NH<sub>3</sub>-N 和 TP 4 种污染物指标,  $i$  分别为耕地—旱地、耕地—水田、园地和保护地 4 种土地利用类型。

#### 1.2.2 养殖业

a. 畜禽养殖业。调查内容包括畜禽养殖种类、养殖的数量(包括生长各阶段的以及年末的存、出栏量)、畜禽养殖场的类型以及污染物排放的形式、排放去向、接纳水体等。研究根据农业污染源基本数据, 实地调查了畜禽养殖情况, 对区域内畜禽养殖种类、存栏量、排放去向、处理方式等情况进行了详细调查; 并根据养殖种类的不同, 采集多处有区域代表性的养殖场进行了实际监测, 初步计算出畜禽养殖业排污量<sup>[15]</sup>, 如式(2)所示。

$$W_{\text{畜禽}} = N_{\text{饲}} t (\delta_1 \alpha_1 + \delta_2 \alpha_2) \quad (2)$$

式中:  $W_{\text{畜禽}}$  为畜禽养殖的污染物排放量,  $N_{\text{饲}}$  为饲养数;  $t$  为饲养期;  $\delta_1$  为畜禽个体日产粪量;  $\alpha_1$  为畜禽粪中污染物平均含量;  $\delta_2$  为畜禽个体日产尿量;  $\alpha_2$  为畜禽尿中污染物平均含量。

研究中设定牛、猪、鸡和鸭的饲养周期分别为 365 d、150 d、60 d 和 60 d; 牛、猪、鸡和鸭的粪和尿产生量分别为 20 kg/d、10 kg/d; 2 kg/d、3.3 kg/d; 0.1 kg/d、0.0 kg/d; 0.1 kg/d、0.0 kg/d。

不同养殖种类的粪和尿中污染物平均质量比见表 1 所示。

表1 畜禽粪便中污染物平均质量比 kg/t

项目	w(COD)	w(NH <sub>3</sub> -N)	w(TP)	w(TN)
牛粪	31.0	1.7	1.2	4.4
牛尿	6.0	3.5	0.4	8.0
猪粪	52.0	3.1	3.4	5.9
猪尿	9.0	1.4	0.5	3.3
鸡粪	45.0	4.8	5.4	9.8

**b. 水产养殖业。**调查内容包括水产养殖类型、养殖面积、养殖过程中投放饲料、药物等情况以及污染物排放形式、排放去向和受纳水体等。研究根据所获得的全国污染源普查基本数据,选择典型水产养殖地,采用试验和观察的方式,得到水产养殖污染物排放与人工管理、养殖种类、天气条件等人为和自然因素的关系。通过实际测量来确定水产养殖的污染物排放系数;同时与经验值比对验证。结合水产养殖面积可以推算出水产养殖排污量<sup>[15]</sup>,水产规模化养殖排放量按以下方法测算(式(3))。

$$W_{\text{水产}} = N\Delta C_i \quad (3)$$

式中: $W_{\text{水产}}$ 为养殖单位面积的排入水体污染物量; $N$ 为年排水量; $\Delta C_i$ 为污染物浓度的增量(表2)。

表2 水产养殖及农村生活污水排放浓度增量

指标	污染物浓度增量	
	水产养殖/ ( $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ )	日均农村生活污水/ ( $\text{g} \cdot \text{人}^{-1}$ )
COD	2000	15~60
NH <sub>3</sub> -N	85	4~6
TP	50	0.3~0.8
TN	340	5~12

### 1.2.3 农村生活污水

根据统计年鉴,了解并核实调查范围内城镇人口、农村人口、流动人口的数量和分布情况,选取有代表性的镇、村,抽样调查各种不同类型居民的生活方式和生活习惯,确定城镇和农村人均综合用水量、人均综合排水量、生活污水平均浓度等生活污染的统计参数,采用已有生活污水集中处理厂接管情况对生活污水排放统计结果进行校核,对出现的偏差进行合理调整<sup>[15]</sup>,农村生活污水排放量测算按公式(4)和表2进行。

$$W_{\text{生活}} = N_{\text{农}} \alpha_3 \quad (4)$$

式中: $W_{\text{生活}}$ 为农村生活污水排放量; $N_{\text{农}}$ 为农村人口数; $\alpha_3$ 为农村生活排污系数。

## 2 结果与讨论

### 2.1 研究区面源排放构成特征

农业面源污染主要以农村生活污水和种植业污染为主,4项污染物指标均超过农业面源污染总量的2/3,而TN主要来自农村生活污水和种植业污染,所占比例高达91%,水产养殖污染相对较小,农

业面源排放构成图1所示。

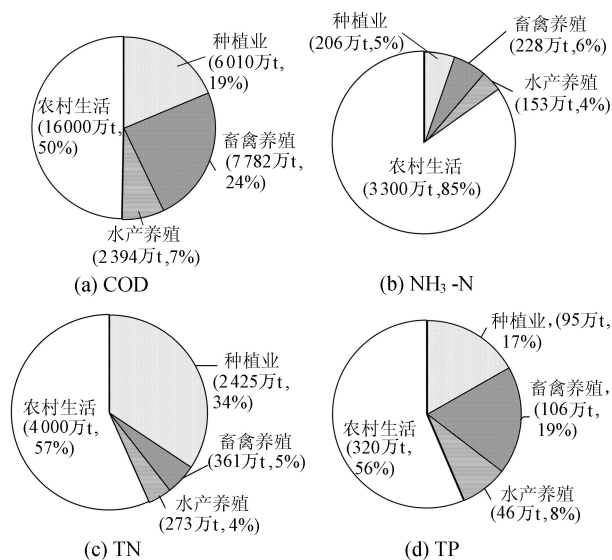


图1 研究区污染物排放量及构成比例

本文分析了2010年研究区内种植业、畜禽养殖和水产养殖的情况,详细计算出了各类农业面源的污染物(COD、NH<sub>3</sub>-N、TN、TP)排放量。

研究区主要有旱地、水田、茶园、桑园、果园5种农用地类型,种植面积约13.08万hm<sup>2</sup>,利用模型对研究区种植业污染源主要污染物排放量进行估算,COD、NH<sub>3</sub>-N、TN和TP输出污染负荷分别为6010t、206t、2425t和95t。畜禽养殖场共有2453家,总存栏量约53.88万头,COD、NH<sub>3</sub>-N、TN、TP排放量分别为7782t、228t、360t和106t。网箱养殖7000hm<sup>2</sup>,池塘养殖18200hm<sup>2</sup>,水产养殖COD、NH<sub>3</sub>-N、TN、TP排放量分别为2394t、153t、273t和46t。农村人口290万人,农村生活污水产生总量为0.85亿t,COD、NH<sub>3</sub>-N、TN、TP排放量分别为16000t、3300t、4000t和320t。结果表明,农业面源污染排放COD、NH<sub>3</sub>-N、TN、TP排放总量分别为32186t、3887t、7059t和567t。

### 2.2 种植业面源排放量计算

采用输出系数模型计算研究区典型农用地旱地、水田、茶园、桑园、果园和其他园地等种植业面源COD、TN、NH<sub>3</sub>-N和TP的排放量,研究区农业用地总面积为1254.89km<sup>2</sup>,其中,水田分布面积最大,为833.37km<sup>2</sup>;旱地次之,为236.27km<sup>2</sup>;果园、茶园和桑园面积分别为101.19km<sup>2</sup>、51.18km<sup>2</sup>和3.58km<sup>2</sup>;而其他园地总面积约29.54km<sup>2</sup>,见图2所示。

输出系数模型中,地表径流量 $Q_i$ 采用美国水土保持局提出的SCS(soil conservation service)降雨径流模型进行计算;CN值结合流域的实际情况确定各土地利用类型值;降水量采用宜兴市46年(1960—2005年)水文监测平均数据。研究利用SCS曲线法

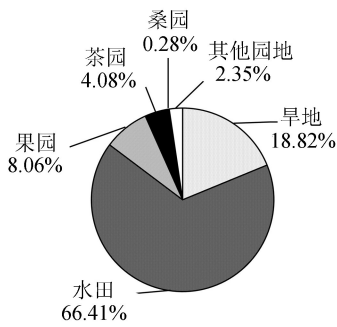


图2 研究区主要农用地土地利用类型

计算得到不同土地利用类型的不同季节径流深,同时用宜兴市 1986—2007 年官林镇、横山水库、湖父镇、宜兴市 4 个水文站 20 a 连续降雨统计资料计算年平均降雨量,最终计算输出系数模型中的径流量。采用典型小流域实际监测值计算的营养盐输出负荷与模型估算的小流域营养盐输出负荷结果,进行比较并对模型估算精度进行检验,流域内选择了 5 个典型的小流域出口设立监测点监测了流域出口的 COD、TN、NH<sub>3</sub>-N 和 TP 输出浓度和流量与输出系数模型估算进行校核,分析误差存在原因并进行参数调整,确定模型计算最终的输出系数,如表 3 所示。

表3 研究区各类土地利用类型输出系数 mg/L

污染物	各类土地利用类型输出系数			
	耕地-旱地	耕地-水田	园地	保护地
COD	5.721	5.721	3.930	2.850
TN	2.518	2.518	2.509	1.390
NH <sub>3</sub> -N	0.180	0.150	0.360	0.160
TP	0.166	0.166	0.049	0.028

输出系数模型在流域尺度上具有一定可靠性,可为流域面源污染负荷估算提供依据。

同时根据小流域输出污染物汇入河流的断面水质情况,通过输出负荷和河流污染物通量变化值进一步检验输出系数模型计算结果,小流域内 COD、TN、NH<sub>3</sub>-N 和 TP 误差分别为 7.6%、9.5%、8.9% 和 4.5%,误差在 10% 以内,基本符合模型计算精度要求,通过确定的输出系数计算出:2010 年研究区 COD、NH<sub>3</sub>-N、TN、TP 的年输出平均污染强度分别为 1.14 t/hm<sup>2</sup>、0.039 t/hm<sup>2</sup>、0.46 t/hm<sup>2</sup> 和 0.018 t/hm<sup>2</sup> (图 3),输出污染负荷分别为 6 010 t、206 t、2 425 t 和 95 t (图 1)。研究区内通过产排污系数计算得出:种植业面源 COD、NH<sub>3</sub>-N、TN 和 TP 输出污染负荷分别为 6 897 t、233 t、2 808 t 和 105 t。这两种计算结果相比,输出系数模型计算的结果偏小,主要由于流域出口监测主要污染物指标受众多影响因素,情况比较复杂,污染物在径流迁移过程中发生了降解、吸附等衰减作用,使得不同污染指标输出系数浓度可能偏小,比如 COD 容易发生降解,使得通过模型和排污

系数计算的 COD 污染负荷的差值比其他污染指标差值大。

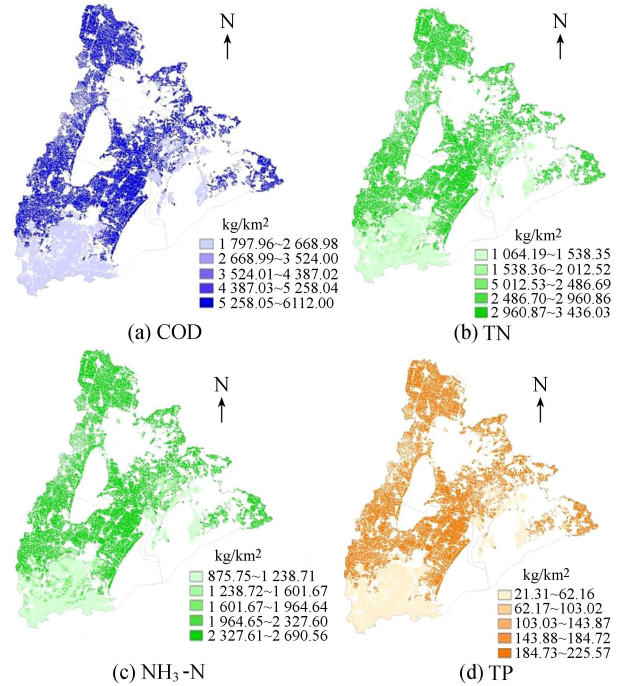


图3 研究区 2010 年污染负荷输出空间分布

## 2.3 太湖流域西部区域面源控制技术及其模式

### 2.3.1 农村生活污水处理模式及技术

**a. 纳入城镇污水处理管网集中处理模式。**研究区结合农村环境综合整治、连片整治、水环境综合治理和生态市创建,农村生活污水处理取得了较快发展。以前绝大部分村庄没有排水渠道和污水处理系统、生活污水随意排放的现象已得到改善。对于接近城区、镇区且满足城镇污水收集管网接入要求的村庄,扩大了城镇污水管网的延伸覆盖,纳入城镇污水收集处理系统,目前部分村庄的生活污水已实现了接管集中处理。但集中污水处理并不能解决无管网覆盖地区水环境污染问题。在远离城市、镇区的乡村,集中管网无法通达,即使能够随主要道路延伸,接管费用和长途污水泵站输送、运行费用都非常高,单位污水处理成本也大大提高,可以因地制宜地选择接管。

**b. 分散式农村生活污水处理模式。**经调查,区域内分散式处理技术主要采用以下工艺:无动力(微动力)土壤处理系统、A/O 法生化-人工湿地系统、生物滤池-表面流人工湿地系统、塔式蚯蚓生态滤池-生态沟渠系统、阿科蔓原位处理系统、厌氧池-跌水充氧接触氧化池-人工湿地系统、脱氮池-脉冲多层复合滤料生物滤池-人工湿地系统及其他工艺,不同工艺处理污水量及比例如图 4 所示。

研究区内超过 50% 的农村生活污水处理工程用无动力或微动力土壤处理系统,处理总水量达

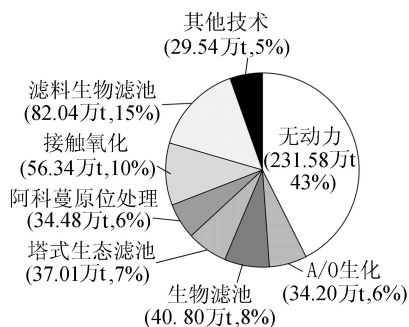


图4 农村生活污水不同工艺处理污水量及比例

231 万 t;其次为“脱氮池-脉冲多层复合滤料生物滤池-人工湿地”系统和“厌氧池-跌水充氧接触氧化池-人工湿地”系统,二者处理水量分别为 82 万 t 和 56 万 t。进一步分析对比各种分散式生活污水处理工艺的适用性与处理效果,结果见表 4。不同处理技术因为污水特征及现场条件的差异,处理效果有些差别。单纯的有动力污水处理技术运行成本较高,单纯的无动力生活污水处理技术效果较差,为了以较少投入达到较好的污水处理效果,根据苏南生活污水治理工作中的经验,优先推荐“动力生化+人工湿地”组合技术,结合其他几种农村分散式生活污水处理技术,形成太湖流域农村分散式生活污水处理推荐技术方案,见表 5。方案中几种处理技术污染物削减范围大致为:COD79%~88%,NH<sub>3</sub>-N61%~83%,TN43%~85%,TP55%~90%,对于处理规模不超过 500 t/d 的农村生活污水处理工程出水 COD、NH<sub>3</sub>-N、TN 和 TP 4 项指标执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》一级 B 标准。

### 2.3.2 畜禽养殖处理模式及技术

a. 分散式畜禽养殖管理减排处理模式。江苏省在畜禽养殖业环境管理和污染治理方面开展大量工作,探索和实践了管理的有效途径,2008 年召开太湖流域农业面源污染防治工作会议,结合江苏省《太湖流域畜禽养殖布局规划及面源污染治理工作方案》的要求,对江苏省畜禽养殖实行分区管理,分步治理,划定畜禽禁养区、限养区和适度发展区,特别对太湖流域分散式养殖管理效果显著。

b. 分散式小型规模化养殖集中收集处理原位资源化利用模式。养猪场猪粪、猪尿污水不仅含有

表 5 太湖流域农村分散式生活污水处理推荐技术

推荐组合工艺技术	日处理水量/t	适用条件	主体	
			工程造价/(万元·t <sup>-1</sup> )	运行费用/(元·t <sup>-1</sup> )
SBR-人工湿地	1~200	用地紧张,排放要求高	0.5~1	0.4~0.6
脉冲多层复合滤池-人工湿地	1~200	有可利用空闲地	0.5左右	0.2~0.5
微动力 A/O 池-人工湿地	1~200	有可利用空闲地	0.45~0.6	0.25~0.4
接触氧化-人工湿地	50~200	有可利用空闲地	0.5左右	0.25~0.35

高浓度有机污染物和高浓度固态悬浮物,而且富含 N、P 等营养元素,NH<sub>3</sub>-N 浓度高,这些污水直接排放将对环境造成很大的污染,针对武进区礼嘉片“万顷良田”建设规划区大量需求有机肥的实际,将规划区周围 74 户养殖户(图 5)(每户存栏量几百头猪,总存栏量 14566 头猪)的猪粪便污水统一收集,与经过预处理的部分农作物秸秆混合后集中处理,利用“万顷良田”建设规划区完善的排灌设施,把 3 万 t 粪便污水转化为农业生产所需要的优质有机肥料,真正做到养殖污染物减量化、资源化、无害化,达到零排放的目标。针对分散式规模化养殖猪粪“养殖户收集、社会化清运、企业处理、区镇监督”典型新处理模式,不同规模分散式畜禽粪便全量统一收集后运送到沼气工程进行无害化处理,产生的沼肥回用农田,其工艺流程见图 6。

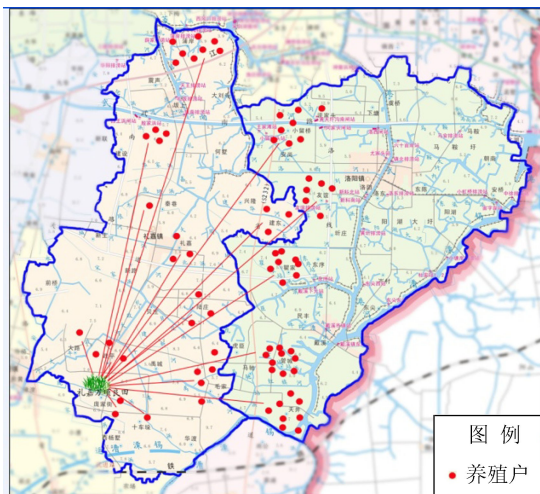


图5 小型规模化养殖场分布

表 4 分散式农村生活污水处理效果

类别	雪堰镇雅浦村 (无动力法)			丁蜀镇定溪村 (厌氧发酵-好氧曝气法)			雪堰镇仁庄村 (生物滤池法)			雪堰镇凤沟村 (阿科蔓生态基法)			周铁镇分水村 (脉冲多层复合滤池法)		
	进水/t	出水/t	处理率/%	进水/t	出水/t	处理率/%	进水/t	出水/t	处理率/%	进水/t	出水/t	处理率/%	进水/t	出水/t	处理率/%
COD	187.00	64.30	65.6	103.00	54.20	47.4	84.90	27.00	68.2	175.00	29.00	83.4	69.00	20.10	70.9
SS	112.00	9.00	92.0	50.00	32.00	36.0	14.00	7.00	50.0	15.00	9.00	40.0	62.00	11.00	82.3
NH <sub>3</sub> -N	15.22	3.46	77.3	18.06	2.85	84.2	4.66	1.30	72.1	7.85	1.73	78.0	14.57	2.60	82.2
TN	25.27	13.12	48.1	30.31	10.77	64.5	5.74	2.34	59.2	9.36	4.32	53.8	24.28	7.37	69.6
TP	2.56	0.44	82.8	2.67	0.32	88.0	0.45	0.12	73.3	1.19	0.15	87.4	3.71	0.22	94.1

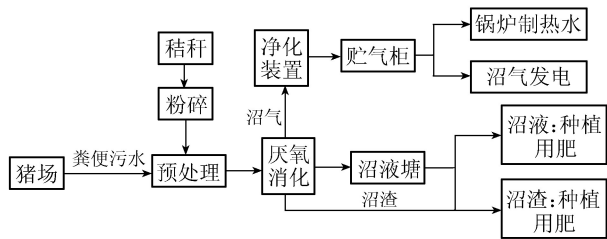


图6 分散式规模化养殖猪粪沼气化主要处理流程工艺

c. 大型规模化养殖原位收集处理和资源化利用模式。宜兴市兴望农牧有限公司现有1200头种猪场,年出栏种猪、商品猪2万头,沼气发电工程年处理猪粪尿25000t,年产沼气36.5万 $m^3$ ,发电机组80kW,年发电69万 $kW \cdot h$ ,产生的25000t沼液、沼渣作为有机肥浇灌200 $hm^2$ 果树、苗木和有机稻米基地133.33 $hm^2$ 。将每天产生的猪粪尿、冲洗水收集到猪粪收集池,经格栅拦渣去除如塑料袋、草绳等无机杂物后进入均质调节池通过搅拌使之均匀,然后泵入厌氧发酵罐进行厌氧发酵处理,产生的沼气通过热电联产的沼气发电机组用来发电,供养殖场内作为生产和生活所需部分电能;沼气发电机组所产生的余热用于厌氧消化罐增温;厌氧发酵所产生的沼液和沼渣用于无公害种植基地有机肥料。由于农作物施肥过程中部分氮、磷等营养成分随着地表径流和地下渗透流失,采取建设生态沟渠、生态塘、生态防护林以及生物有机肥的施用,对农作物生产所产生的面源污染进行控制,以达到安全排放标准,保护项目区水环境。生态沟渠塘中的堆积的淤泥可还施于无公害种植基地,种植的部分水草也可以用来作为畜禽养殖的饲料,其工艺路线实现“减量化、无害化、资源化、生态化”目标要求,详见图7。

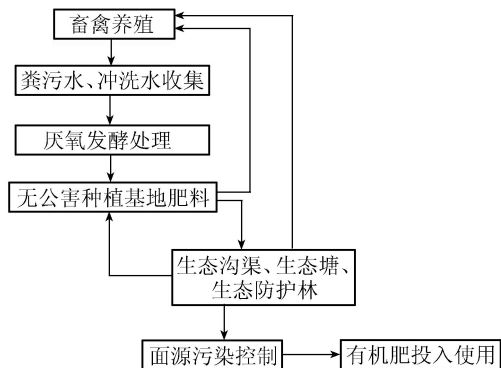


图7 大型规模化养殖原位收集处理和资源化工艺流程

对于研究对象为选择了沼气处理利用方式为主的代表性规模化畜禽养殖场,沼气工艺处理效果为:单纯采用沼气工艺对COD的去除率为46.02%~88.70%,平均为63.83%,但采用“沼气+好氧”混合处理方式对COD的去除率可达到93.85%。单纯采用沼气工艺对TP的去除率为50.02%~

80.00%,平均为66.06%,但采用“沼气+沉淀”混合处理方式对TP去除率可达到71.95%。沼气工艺对 $NO_3-N$ 、 $NH_3-N$ 和TN的去除率整体水平表现为: $NO_3-N > NH_3-N > TN$ ,去除率分别为62.57%~83.17%、41.11%~61.88%、14.13%~64.37%,平均去除率分别为71.16%、50.86%、38.49%,由上述可以看出,单纯采用沼气工艺对 $NH_3-N$ 和TN去除效果不明显,而采用“沼气+好氧”混合处理方式对 $NO_3-N$ 、 $NH_3-N$ 和TN的去除率都很高,分别达到了93.44%、88.13%、85.84%。

### 2.3.3 水产养殖污染处理模式

宜兴丁蜀镇池塘循环水养殖处理模式由人工复合湿地、进排水沟渠循环系统、生态养殖区3部分组成。

人工复合湿地:采用全面清淤、晒塘、消毒和整修池塘基础环境,合理移植各类水草,投放螺蛳,形成立体的净化系统。

进排水沟渠循环系统:在利用现有的生产河道的基础上,在养殖区建设进排水沟渠系统,并根据水位落差和水流方向,合理设置提水泵站,保证水体循环的畅通,形成“湿地→养殖区→湿地”的循环回路。

生态养殖区建设:为提高养殖区各污染物自我消化能力,在冬春捕捞季节,对养殖塘口进行全面清塘晒塘。养殖期间多品种种植水草,提高青虾、白鲢等滤食性品种密度,合理使用水质改良剂,并在部分塘口设置底层曝气增氧设施。

这种水产养殖污染处理模式实施后,每年削减区域污染排放量分别为SS 10363t、COD 1069t、TP 28t、 $NH_3-N$  216t。

### 2.3.4 种植业污染处理模式

a. 因地制宜构建氮磷生态拦截工程模式。在太湖一级保护区及主要入湖河流等重点区域,依据“因地制宜,生态降解”的原则,充分利用现有条件,对农田排水沟渠和废弃池塘进行生态化工程改造,建成氮磷生态拦截型沟渠塘湿地系统,改造后的渠体断面为等腰梯形,两侧具有一定坡度,沟壁和沟底均为土质,配置多种植物。沟体内相隔一定距离构建透水坝、拦截坝等辅助性工程设施,减缓水流速度,延长水力停留时间,使流水携带的悬浮物质和养分得以沉淀和去除,使之在具有排、蓄水功能基础上,增加对农田排水中污染物的拦截、吸附、沉积、转化和吸收利用功能,有效地防止N、P等营养物质进入湖体。

b. 区域尾水循环处理及养分回用处理模式。以宜兴丁蜀镇下属渭湊村、洋渚村和双桥村等3个行政村内的河流、养殖排水、农田、支浜等水环境为对象进行生态净化,同时合理收集来水,实现养分循

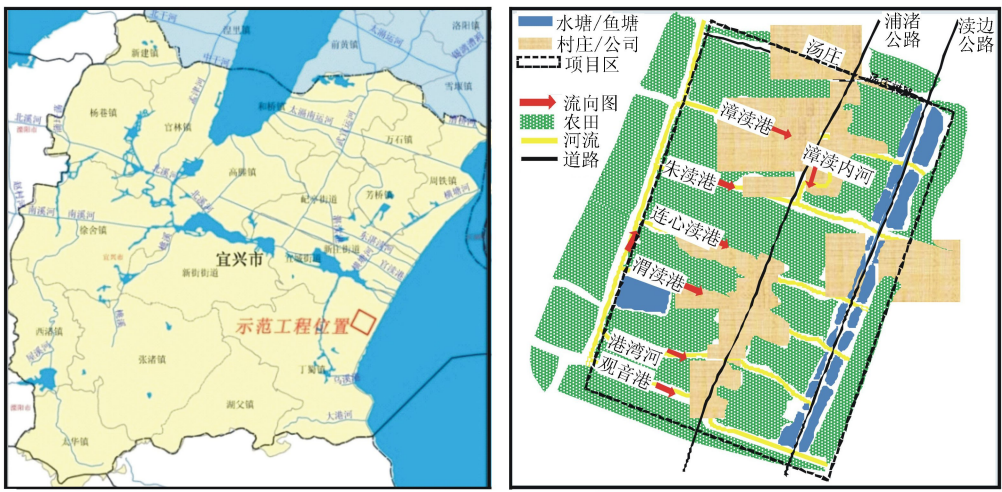


图8 工程地理位置示意图

循环利用,回灌农田区域内辐射居民区和农业连片种植区面积总计约 230 hm<sup>2</sup>(图 8)。利用丁蜀的读边公路具有较多的废旧鱼塘、农田、沼泽及拆迁或轮转土地,针对农村面源排放低污染水,构建生活污水无害化收集处理系统、面源流失养分循环利用系统、低污染水强化净化系统;并将生活污水无害化收集处理系统、面源流失养分循环利用系统、低污染水强化净化系统依次串联成一个整体,通过资源循环利用的方式,减少化肥投入、养分流失和径流产生量,形成了一种农村集中区域“污染源头减量、过程削减、养分循环利用”的处理模式,有效削减了进入太湖湖体的营养物质,同时实现了面源污染控制和面源流失养分综合利用,工艺流程见图 9。

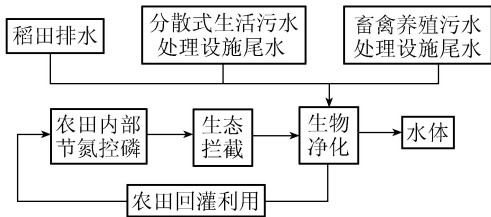


图9 区域尾水循环处理及养分回用处理工艺流程图

## 2.4 研究区面源污染存在的主要问题及建议

研究区内农村生活、种植业、畜禽养殖是面源污染的主要问题,水产养殖污染不容忽视。

### 2.4.1 存在问题

**a.** 农村生活污水处理率低。农村面积广大,人口众多,农村人口居住分散,生活污水难以收集,生活污水处理不够重视,导致绝大部分生活污水未经处理直接排放,使得农村生活污水处理设施覆盖率较低。建设和运行管护中亟待解决资金、技术等瓶颈问题。

**b.** 重视污水处理设施主体工程建设,忽视污水管网的建设,导致污水处理设施不能正常发挥作用。首先,管网规划设计不合理,未能因地制宜地设计管

网线路,采用合流制模式极大增加了处理成本和效率;管网入户率低,造成污水收集量少,后期二次施工,增加人工成本。污水收集率不高,农村生活污水包括厨房、洗澡、洗衣和粪水 4 类,目前主要处理对象为粪水,对于其他污水处理率极低。

**c.** 虽然一些畜禽养殖场已经做到粪便综合利用,但散养和部分规模养殖场的养殖污水缺乏严格控制,污水排放浓度较高,且有较多养殖污水渗入或排入河道,畜禽粪便综合利用和处理处置率还有待提高。

**d.** 水产养殖网围、网箱养殖污染严重,布局不合理。部分水产养殖场靠近水源地,严重威胁水源地安全;循环水池养殖技术未得到有效推广;水产养殖户监管力度不够。

**e.** 区域内农业生产基本条件好,集约化程度较高。耕地平均化肥和农药施用量大,管理技术和施肥不合理,治理设施不足,导致化肥、农药流失进入河流,增加了水体污染负荷。

### 2.4.2 建议

**a.** 具备管网接入条件的地区,选择接入管网集中处理,筛选优势工艺,推广成熟的农村生活污水处理技术。

**b.** 畜禽养殖进行建设项目选址时,要严格执行国家环境保护相关法律法规关于禁建(养)和限建(养)的规定。在分散养殖较为集中的区域,建设畜禽养殖粪污集中收集处理服务体系。通过政府部门统筹,培育新型责任主体,鼓励分散养殖场(户)积极参与,推进畜禽粪污集中处理与资源化利用。同时按照“减量化、无害化、资源化、生态化”要求,实施畜禽养殖污染治理工程,推行“种养控”一体化循环利用产业链模式,提高畜禽养殖场固体粪污处理利用率。

**c.** 实施退渔(垦)还湖,逐步缩减围网,减少喂

养投料,提倡生态养殖。通过构建“养殖池塘生态养殖区-湿地净化区”系统,发展池塘循环水养殖工程,实现养殖尾水的达标,减少污染物排放。

d. 控制种植业面源污染要从源头抓起,配合过程阻断及生态修复等工程措施,减少污染物的产生。构建种植业尾水及农田地表径流的生态拦截屏障与尾水回用工程,实现污染物的有效控制与养分的高效利用。

### 3 结 语

a. 研究采用由单元田间试验和小流域出口营养盐输出监测值与流域土地利用结构关系推算获得输出系数,使得系数具有较好的流域尺度适用性,计算了种植业典型土地利用类型污染物排放量,模型计算误差在 10% 以内,基本符合模型精度要求。

b. 通过计算研究区不同种类面源污染的排放量,明确了该区域农业面源污染主要以农村生活污水和种植业污染为主的排放特征。

c. 基于农业面源污染的排放特征,梳理不同种类面源污染处理的主要问题,提出面源控制的建议,提出了控制农业面源污染适宜推广的处理模式。

### 参考文献:

[ 1 ] 国家发展与改革委员会. 太湖流域水环境综合治理总体方案(2013 年) [R]. 国家发展与改革委员会,北京:2013;12-26.

[ 2 ] 张红举,陈方. 太湖流域面源污染现状及控制途径[J]. 水资源保护,2010,26(3):87-90. (ZHANG Hongju, CHEN Fang. Non-point pollution statistics and control measures in Taihu Basin[J]. Water Resources Protection, 2010,26(3):87-90. (in Chinese))

[ 3 ] 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):346-354. (MA Lishan, WANG Zuqiang, ZHANG Shuiming, 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):346-354. (in Chinese))

[ 4 ] 李兆富,杨桂山,李恒鹏. 西苕溪典型小流域土地利用对氮素输出的影响[J]. 中国环境科学,2005,25(6):678-681. (LI Zhaofu, YANG Guishan, LI Hengpeng. Influence of land use on nitrogen exports in Xitiaoxi typical subwatersheds[J]. China Environmental Science, 2005,25(6):678-681. (in Chinese))

[ 5 ] 贺贻生,傅伯杰,陈利顶. 非点源污染的管理和控制[J]. 环境科学,1998,19(5):87-91. (HE Chansheng, FU Bojie, CHEN Liding. Nonpoint source pollution control and management [J]. Environmental Science, 1998,19(5):87-91. (in Chinese))

[ 6 ] 薛利红,杨林章. 面源污染物输出系数模型的研究进展[J]. 生态学杂志,2009,28(4):755-761. (XUE Lihong, YANG Linzhang. Research advances of export coefficient model for nonpoint source pollution[J]. Chinese Journal of Ecology, 2009,28(4):755-761. (in Chinese))

[ 7 ] Mc FARLAND A M S, AUUCK H L M. Determining nutrient export coefficients and source loading uncertainty using in stream monitoring data[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2001,37:223-236

[ 8 ] 蔡明,李怀恩,庄咏涛,等. 改进的输出系数法在流域非点源污染负荷估算中的应用[J]. 水利学报,2004(7):1-8. (CAI Ming, LI Huaien, ZHUANG Yongtao et al. Application of modified export coefficient method in polluting load estimation of non-point source pollution [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004(7):1-8. (in Chinese))

[ 9 ] SHRESTHA S, KAZAMA F, NEWHAM L T H. A framework for estimating pollutant export coefficients from long-term in-stream water quality monitoring data [J]. Environ Model Softw, 2008,23:182-194.

[ 10 ] 李兆富,杨桂山,李恒鹏. 基于改进输出系数模型的流域营养盐输出估算[J]. 环境科学,2009,30(3):668-672. (LI Zhaofu, YANG Guishan, LI Hengpeng. Estimated nutrient export loads based on improved export coefficient model in Xitiaoxi watershed [J]. Environmental Science, 2009,30(3):668-672. (in Chinese))

[ 11 ] 龙天渝,梁常德,李继承,等. 基于 SLURP 模型和输出系数法的三峡库区非点源氮磷负荷预测[J]. 环境科学学报,2008,28(3):574-581. (LONG Tianyu, LIANG Changde, LI Jicheng, et al. Forecasting the pollution load of non-point sources imported to the Three Gorges Reservoir [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008,28(3):574-581. (in Chinese))

[ 12 ] 杨峰,王鹏举,杨珊珊,等. 城郊农业区小流域土地利用结构对氮素输出的影响[J]. 环境科学,2012,33(8):2652-2658. (YANG Feng, WANG Pengju, YANG Shanshan, et al. Influence of land use structure on nitrogen output in the watershed of suburban agriculture regions [J]. Environmental Science, 2012,33(8):2652-2658. (in Chinese))

[ 13 ] 边博,吴海锁,王惠中,等. 江苏省地表集中式水源地面源污染防治技术与示范[M]. 北京:中国环境科学出版社,2013:105-156.

[ 14 ] 常闻捷,边博,蔡安娟,等. 太湖重污染区麦季养分输入与流失规律研究[J]. 环境科学与技术,2012,35(2):8-13. (CHANG Wenjie, BIAN Bo, CAI Anjuan, et al. Nutrient inputs and runoff losses during wheat season in highly-contaminated zone of Taihu Lake Region [J]. Environmental Science & Technology, 2012,35(2):8-13. (in Chinese))

[ 15 ] 孔福生,黎刚,姜勇,等. 江苏省长江口及毗邻海域生态环境现状[R]. 南京:江苏省环境监测中心,2006:76-89.

(收稿日期:2014-10-25 编辑:高渭文)