

DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2018.0478

孙笑蕾, 胡正义, 刘莉, 等. 基于肥水资源化的河网区镇域农业面源污染控制系统的构建: 以太湖地区新建镇为例[J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(5): 582-592.

SUN Xiao-lei, HU Zheng-yi, LIU Li, et al. Pollutant Reduction Systems for Controlling Agricultural Non-Point-Source Pollution in Town District of River Network Area Based on Reuse of Wastewater and Nutrient: A Case Study in Xinjian Town, Taihu Lake[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2019, 35(5): 582-592.

基于肥水资源化的河网区镇域农业面源污染控制系统的构建: 以太湖地区新建镇为例

孙笑蕾^{1,2}, 胡正义^{1,3}①, 刘莉¹, 李松炎^{1,2}, 刘福来² (1. 中国科学院大学资源与环境学院/中丹学院, 北京 101408; 2. 哥本哈根大学作物与环境科学学院, 丹麦 DK-2630; 3. 中丹科研教育中心, 北京 100190)

摘要: 河网地区农业面源污染控制不仅要考虑去污效果和成本, 还应兼顾资源化利用。以太湖西岸宜兴市新建镇种植业、畜禽养殖业和水产养殖业产生的 3 种污染源为对象, 调查获得该镇 3 种污染源污水负荷、各污染物(总氮、总磷、氨氮、COD)输出负荷及农田灌溉需水量, 并估算污水农用灌溉潜力和养殖粪污氮磷农用潜力。结合当地适宜的单项面源污染控制技术, 在达到 GB 5084—2005《农田灌溉水质标准》要求的前提下, 提出了全部畜禽粪污处理后还田(模式 I)、全部畜禽粪污处理后还田及部分水产养殖污水处理后农灌(模式 II) 2 种农业面源污染控制系统, 并估算系统各污染物削减量和成本。结果表明, 每年全部畜禽养殖污水($71.96 \times 10^3 \text{ m}^3$)和部分水产养殖污水($2\,277.11 \times 10^3 \text{ m}^3$)经处理达标后用于灌溉, 可以满足新建镇农田灌溉需水量(模式 II); 该系统总氮、总磷、氨氮和 COD 入河削减率分别为 84.3%、94.2%、89.6% 和 94.0%, 每年 N、P 肥施用量可分别减少 81.8 和 39.9 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。为了节约成本, 仅考虑畜禽养殖污水处理达标用于农灌($71.96 \times 10^3 \text{ m}^3$)(模式 I)可满足 3% 农田灌溉需水量, 该系统总氮、总磷、氨氮和 COD 入河削减率分别为 83.0%、93.7%、88.7% 和 93.7%, 每年 N、P 肥施用量可分别减少 52.0 和 34.2 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。所提出的 2 种肥水资源化农业面源污染控制系统可为新建镇污染控制工程建设提供技术参考。

关键词: 农业面源污染; 肥水资源化; 太湖地区; 镇域污染控制系统

中图分类号: X506; X508; X820.6 文献标志码: A 文章编号: 1673-4831(2019)05-0582-11

Pollutant Reduction Systems for Controlling Agricultural Non-Point-Source Pollution in Town District of River Network Area Based on Reuse of Wastewater and Nutrient: A Case Study in Xinjian Town, Taihu Lake. SUN Xiao-lei^{1,2}, HU Zheng-yi^{1,3}①, LIU Li¹, LI Song-yan^{1,2}, LIU Fu-lai² (1. College of Resources and Environment/Sino-Danish College, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China; 2. Department of Plant and Environmental Sciences, Crop Science Section, University of Copenhagen, DK-2630, Denmark; 3. Sino-Danish Center for Education and Research, Beijing 100190, China)

Abstract: In river network areas, the control of agricultural non-point source pollution (ANPSP) should consider not only the pollutant removal effect and cost but also the resource utilization efficiency. Taking Xinjian Town, Yixing City on the west bank of Taihu Lake as an example, the volume of wastewater and the pollutant loads discharged from three pollution sources (crop farming, livestock and aquaculture) were investigated. The demand of water for irrigation and the potential reuse of wastewater for irrigation and the potential reuse of nitrogen (N) and phosphorus (P) from manure and wastewater for fertilizing cropland were also estimated. The performance of two schemes of ANPSP control system (Scheme I: reuse of all livestock wastewater and manure; Scheme II: reuse of all livestock wastewater and manure and some aquaculture wastewater) on pollutant reduction efficiency (TN, TP, $\text{NH}_3\text{-N}$, and COD) and economic cost were evaluated. The results show that if all the livestock wastewater ($71.96 \times 10^3 \text{ m}^3$) and some aquaculture wastewater ($2\,277.11 \times 10^3 \text{ m}^3$) were reused for irrigation after processing could meet the total irrigation water demand in Xinjian

收稿日期: 2018-08-09

基金项目: 中国科学院重点部署项目(KZZD-EW-10-04-2)

① 通信作者 E-mail: zhyhu@ucas.ac.cn

Town (Scheme II). The removal efficiencies of Scheme II for the pollutants TN, TP, $\text{NH}_3\text{-N}$, and COD were 84.3%, 94.2%, 89.6% and 94.0%, respectively. In addition, Scheme II could reduce the use of chemical fertilizers by nearly $81.8 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ of N and $39.9 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ of P annually. In order to reduce costs, Scheme I that only reuse livestock wastewater ($71.96\times 10^3 \text{ m}^3$) for irrigation after processing could only meet with 3% of irrigation water demand. The removal efficiencies of Scheme I for the pollutants TN, TP, $\text{NH}_3\text{-N}$, and COD were 83.0%, 93.7%, 88.7% and 93.7%, respectively, and the use of N and P fertilizers can be reduced by nearly 52.0 and $34.2 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ annually. The proposed two schemes of ANPSP control system with consideration of nutrients and wastewater recycling may provide a reference for the construction of pollution control projects in Xinjian Town.

Key words: agricultural non-point-source pollution; reuse of wastewater and nutrient; Taihu Lake; systems for controlling pollution in town

农业面源污染是指在农业生产活动中,农田中的泥沙、营养盐及其他污染物,在降水或灌溉过程中,通过农田地表径流、壤中流、农田排水和地下渗漏途径进入水体而形成的面源污染^[1]。根据污染物主要来源可以将农业面源污染分为3大类:(1)农田径流、淋溶及侧渗;(2)畜禽养殖污水排放;(3)水产养殖排水。针对农业面源污染控制,所提出的“减源-拦截-修复”的“3R”策略得到广泛认可^[2]。刘莉等^[3]按照“3R”策略对近20 a来文献可查的农业面源污染控制技术进行了整理和分类,并依据技术的污染物削减率和削减成本,采用层次-灰色关联度法对同一类型的不同污染削减技术进行优选评估,在太湖地区筛选出适用于控制种植业、畜禽养殖业和水产养殖业面源污染的技术。

在“3R”策略的基础上,“源头减量-过程阻断-养分再利用-生态修复”的“4R”策略的提出进一步完善了农业面源污染治理的总体思路及指导原则^[4]。养分再利用实现了农业面源污染控制的种养结合,不仅可节省畜禽养殖废水和水产养殖废水深度处理成本,还可减少肥料投入成本,并满足部分季节农灌需水。太湖河网区种植业、养殖业(畜禽养殖、水产养殖)并存。因此,在构建河网区农业面源污染控制系统时应考虑肥水的资源化。

太湖西岸是典型的河网区,农业面源污染贡献率较高,已成为太湖水体污染的主要来源^[5-6]。太湖西岸沿湖村镇绝大多数包含种植业、畜禽养殖和水产养殖3种农业面源污染类型^[7]。虽然农村分散生活污水也有少量进入农田,部分地区甚至流入河流,但其属于农村面源污染,通常不纳入农业面源污染范畴。因此,笔者在构建农业面源污染控制系统时,没有考虑农村生活污水贡献。

笔者以太湖西岸宜兴市新建镇作为研究对象,收集当地农业基础数据,估算了年灌溉需水量,年农业源污水排放量,以及总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮

($\text{NH}_3\text{-N}$)和COD输出量,用于农业面源污染控制系统的量化设计;以课题组前期研究选择的适宜当地农业面源污染控制单项技术^[8]为基础,在畜禽养殖污水处理达标(GB 18596—2001《畜禽养殖业污染物排放标准》、GB 5084—2005《农田灌溉水质标准》、GB 3838—2002《地表水环境质量标准》Ⅲ级排放标准)前提下,估算污染物(TN、TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、COD)输出量和削减量及建设、运行成本;根据废水资源化满足灌溉水的程度,提出镇域农业面源污染控制系统,评价其环境效益和经济效益。研究结果可为当地农业面源污染控制工程建设提供技术支撑,也可为多污染源农业污染控制体系的构建提供借鉴。

1 研究区域

新建镇位于太湖西岸宜兴市西北部($31^\circ 34' 11.51'' \text{ N}$, $119^\circ 39' 27.71'' \text{ E}$),全镇区域面积约为 $4\,430 \text{ hm}^2$,辖1个社区,6个行政村,总人口为25 884人(2013年)。该区属亚热带海洋性季风气候区,年平均气温为 $15.6 \text{ }^\circ\text{C}$,年均降水量为 $1\,197.3 \text{ mm}$,雨季主要在集中在6—8月。新建镇大部分为平原地区,河流交叉密布,东西向河流主要有中干河、北干河,南北向河流主要有新丰河、新建河,西接洮湖来水,东流入溇湖,属洮溇太水系。宜兴市冬季月(12—次年5月)城市内河TN、TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量及COD分别为 6.3 、 0.3 、 2.4 和 $15.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,夏季月(6—11月)城市内河TN、TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量及COD分别为 7.7 、 0.4 、 2.9 和 $20.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[9],除冬季月COD以外其他各项指标均未达到GB 3838—2002Ⅲ类水标准(TN、TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量及COD分别为 1 、 0.2 、 1 和 $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)^[10]。

新建镇种植业、畜禽养殖业和水产养殖业3种农业类型并存。其中,种植业以稻麦轮作为主,兼有稻油轮作和蔬菜种植。畜禽养殖以猪、鸡为主,母猪存栏数为2 362头,生猪出栏量为8 536头,蛋

鸡存栏量为50 000羽,肉鸡出栏量为40 200羽。新建镇水产养殖业以螃蟹为主,近年来养殖规模增大,2016年养殖面积达968 hm²,当年的螃蟹养殖增产量为2 067 t。

2 新建镇农田灌溉需水量、3种污染源污水排放量及污染物输出负荷

新建镇农业种类齐全,畜禽养殖和水产养殖所产生的面源污染对农业面源污染的贡献较大。与农田径流相比,畜禽、水产养殖业所产生的粪便、污水含有较高的养分,且易于收集,具有较高的回用价值。因此,在河网区,收集的畜禽粪便经处理后可回田用作粪肥。畜禽养殖污水和水产养殖污水经处理后也可作为农田灌溉水。通常灌溉需水量与养殖污水排放量并不一致。若养殖污水(畜禽污水、水产污水)排放量不高于灌溉需水量,可将养殖污水处理后全部回用农田;若养殖污水(畜禽污水、水产污水)排放量高于灌溉需水量,则优先选择养分含量高的污水用于灌溉,若此类水量不足,可根据经济实力选择回用部分养分含量较低的污水用于灌溉。因此,基于肥水资源化利用的面源污染控制系统定量化设计,应对当地的灌溉需水量、污水排放量及其养分含量进行估算。

2.1 新建镇农田灌溉需水量

为了提高灌溉用水效率和效益,江苏省编制了《江苏省灌溉用水定额》^[11]。以此为依据,估算新建镇农田灌溉需水量。该镇全年灌溉定额为2 349.07×10³ m³,其中夏季月需水量占88.4%(表1)。

表1 新建镇农田灌溉需水量估算

Table 1 Estimated irrigation water demand in Xinjian

时间	种植类型	种植面积/ hm ²	灌溉定额 ^[12] / (10 ³ m ³ ·hm ⁻²)	灌溉需水量/ 10 ³ m ³
夏季月	水稻	211.42	9.71	2 052.89
	瓜果蔬菜	9.68	2.53	24.49
	总计	—	—	2 077.38
冬季月	小麦	193.17	1.20	231.80
	油菜	18.25	1.30	23.72
	叶菜蔬菜	9.68	1.67	16.17
	总计	—	—	271.69
全年	—	—	—	2 349.07

夏季月为6—11月,冬季月为12—次年5月。“—”表示无数据。

2.2 种植业、畜禽养殖业及水产养殖业污水排放量

2.2.1 农田地表径流量估计

种植业的污水排放类型主要是农田地表径流。

新建镇地处苏南地区,水稻灌溉以浅湿灌溉为主,即浅水湿润反复交替、适时落干的间歇灌溉模式^[12],技术要点包括:(1)返青、分蘖期浅水勤灌;(2)分蘖后期落干晒田;(3)拔节、孕穗期间歇灌;(4)抽穗、开花即乳熟期湿润灌溉;(5)黄熟期自然落干,遇雨排水。因此,无论是旱地还是水田,农田径流的形成主要与降雨有关,其产生量采用径流曲线法(SCS-CN)进行估算^[13]。SCS-CN模型结构简单,需要的参数较少,是一种常用的小流域降雨径流统计经验模型^[14]。该模型基于水量平衡公式〔式(1)〕和2个基本假定,即集水区实际径流量与可能最大径流量的比值等于实际入渗量与潜在蓄水能力的比值〔式(2)〕,以及初损量是潜在蓄水能力的一部分〔式(3)〕^[15]。

$$P=I_a+F+q, \quad (1)$$

$$F/S=q/(P-I_a), \quad (2)$$

$$I_a=\lambda S. \quad (3)$$

美国农业部水土保持局(Soil Conservation Service, SCS)根据大量降雨径流数据统计提出适用于较湿润区的λ值为0.2^[16],因此得到典型计算公式:

$$q = \begin{cases} (P - 0.2S)^2 / (P + 0.8S) & (P \geq 0.2S) \\ 0 & (P < 0.2S) \end{cases}. \quad (4)$$

式(4)中,潜在蓄水能力S可采用反映流域特性的综合参数-径流曲线数(N_c)进行经验转换:

$$S = \frac{25\ 400}{N_c} - 254. \quad (5)$$

式(1)~(5)中,P为降雨量,mm;I_a为初损量,mm;F为实际入渗量,mm;q为实际径流量,mm;S为潜在蓄水能力,mm;N_c为无量纲参数。根据美国农业部水土保持局的建议,将前期土壤湿度条件划分为干旱(AMC1)、正常(AMC2)和湿润(AMC3)3级,其中,AMC2状态下N_{c2}值可在NRCS-TR 55手册^[17]中查得,AMC1和AMC3状态下的N_{c1}和N_{c3}值可通过式(6)~(7)进行校正确定^[18]:

$$N_{c1} = \frac{N_{c2}}{(2.334 - 0.013\ 34N_{c2})}, \quad (6)$$

$$N_{c3} = \frac{N_{c2}}{(0.403\ 6 + 0.005\ 9N_{c2})}. \quad (7)$$

根据各种土壤的渗透性,不同的土壤类型可划分为透水(A)、较透水(B)、较不透水(C)和不透水(D)4类水文土壤组^[14]。新建镇土壤类型为漂洗型水稻土即白土^[19],属于C类较不透水类型。按照不同的土地覆被类型,新建镇水田和旱地中等湿润状态下的N_c值分别为85和83^[14],利用冬季月和夏季

月半年降雨资料估算年地表径流,结合当地多年平均降雨量及土壤含水量^[20],冬季月选择中等湿润状态下的 N_c 值,其中冬田与旱地均选择旱地中等湿润状态下的 N_c 值,夏季月选择校正后中等湿润

状态下的 N_c 值。由此计算得到新建镇农田年地表径流量为 $4\ 870.71 \times 10^3 \text{ m}^3$,其中,夏季月地表径流量占全年的67.4%;水稻种植地表径流量占全年的64.4%(表2~3)。

表2 新建镇农田地表径流量估计

Table 2 Estimated runoff from cropland in Xinjian

时间	土地利用	种植方式	降雨量 P/mm	径流曲线数 $N_c^{[14]}$	潜在蓄水能力 S/mm	地表径流量	
						q/mm	$Q/10^3 \text{ m}^3$
夏季月	旱地	蔬菜	1 504.36	93	19.37	1 481.36	143.30
	水田	水稻	1 504.36	94	16.47	1 484.78	3 139.12
	小计	—	—	—	—	—	3 282.52
冬季月	旱地	蔬菜	777.44	83	52.02	718.32	69.53
	冬田	油菜	777.44	83	52.02	718.32	1 387.57
		小麦	777.44	83	52.02	718.32	131.09
	小计	—	—	—	—	—	1 588.20
全年	—	—	—	—	—	—	4 870.71

夏季月为6—11月,冬季月为12—次年5月。 q 为实际径流量, Q 为年地表径流量。“—”表示无数据。

表3 新建镇3种农业污染源污水排放量及潜在灌溉回用量

Table 3 Discharged wastewater volume and potential reuse for irrigation of three pollution sources in Xinjian

时间	灌溉需水量/ 10^3 m^3	污水排放量/ 10^3 m^3			农用灌溉潜力/ 10^3 m^3		
		种植业	畜禽养殖	水产养殖	种植业 ¹⁾	畜禽养殖	水产养殖
夏季月	2 077.38	3 282.52	42.85	17 424.00	0	42.85	2 077.38
冬季月	271.69	1 588.20	29.11	9 680.00	0	29.11	271.69
全年	2 349.07	4 870.72	71.96	27 104.00	0	71.96	2 349.07

夏季月为6—11月,冬季月为12—次年5月。1)农田径流(不考虑农用灌溉)。

2.2.2 畜禽养殖业污水排放量

现场调查获悉该镇的养猪场、养鸡场均采用干清粪工艺收集粪污。按照GB 18596—2001^[21],猪和鸡冬季最高允许排水量分别为 $1.2 \text{ m}^3 \cdot \text{百头}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $0.5 \text{ m}^3 \cdot \text{千只}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$,猪和鸡夏季最高允许排水量分别为 $1.8 \text{ m}^3 \cdot \text{百头}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $0.7 \text{ m}^3 \cdot \text{千只}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。据此得到该镇畜禽养殖年污水排放量为 $71.96 \times 10^3 \text{ m}^3$,其中,夏季污水排放量占全年的59.5%(表3)。

2.2.3 水产养殖业污水排放量

新建镇螃蟹养殖均为围网养殖。2016年螃蟹养殖增产量为2 067 t。根据现场走访调查,河蟹养殖前期换水较少,从6月下旬到10月每半个月换水1次,共换水9次,每次换水率约为20%,12月起捕时全池抽干,养蟹池塘平均水深为1 m。据此估计每年该镇水产养殖业向外排水量为 $27\ 104.00 \times 10^3 \text{ m}^3$,其中,夏季向外排水量占全年的64.3%(表3)。

根据新建镇人口推算,每年该镇生活污水排放量为23.5万 m^3 ,而该镇水产养殖换水及清塘排放废水高达2 710.4万 m^3 ,位列3种污染源污水排放量之首,占全年农业源污水排放量的84.6%,畜禽养殖

业污水排放量很少,仅占全年农业面源污水排放量的0.2%(表3)。因此,从水量角度考虑,水产养殖废水农业资源化潜力大。

2.3 种植业、畜禽养殖业和水产养殖业各污染物输出负荷

采用输出系数法估算新建镇农业面源污染负荷。输出系数法是估算农业面源污染负荷的一种经验模型^[22],在一定区域内,同一种污染物的输出系数是相对确定的。输出系数法估算污染负荷的计算公式为

$$L_j = \sum_{i=1}^n E_{ij} \times A_i + N. \quad (8)$$

式(8)中, L_j 为流域内污染物 j 的总输出量, $\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$; i 为农田、畜禽或人口分类,共有 n 类; E_{ij} 为污染物 j 在第 i 种农田种植类型、畜禽养殖类型和水产养殖类型上的输出系数; A_i 为第 i 类土地面积($\text{hm}^2 \cdot \text{a}^{-1}$)、畜禽(头 $\cdot \text{a}^{-1}$ 或只 $\cdot \text{a}^{-1}$)或水产养殖年增产量($\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$); N 为降雨输入的污染物质, $\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$,该研究针对农业污染源产生的非点源污染进行估算,故不考虑此项贡献。

根据《第一次全国污染源普查——农业污染

源》及农田面源污染估算的文献^[23-24],确定种植业地表径流污染物输出系数;参照《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》^[25]确定螃蟹养殖污染物输出系数(表4)。为了比较农业面源污染对农村面源污染的相对贡献,还考察了生活污水污染情况,其污染系数参照文献推荐值^[26](表4)。

E_{ij} 计算公式^[27]为

$$E_{ij} = eD_i C_{ij} T \quad (9)$$

式(9)中, E_{ij} 为畜禽养殖业污染物年输出系数, $\text{kg}\cdot(\text{头或只})^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$; e 为流失系数,%; D_i 为日排泄系数, $\text{kg}\cdot(\text{头或只})^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$; C_{ij} 为畜禽粪便尿液养分含量, $\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$; T 为畜禽养殖时间,d。

参照《全国规模化畜禽养殖业污染情况调查及防治对策》^[28],以及太湖流域畜禽粪便污染调查结果^[27,29-30],结合该镇养殖状况,确定该镇畜禽养殖污染物输出系数,并估算其污染负荷。畜禽尿液污水

和粪便的流失系数分别为 65% 和 40%^[31]。猪的粪便产生量为 $1\,373.18\ \text{t}\cdot\text{a}^{-1}$,污水产生量为 $3\,681.85\ \text{m}^3\cdot\text{a}^{-1}$;蛋鸡粪便产生量为 $525.00\ \text{t}\cdot\text{a}^{-1}$,肉鸡粪便产生量为 $110.55\ \text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ (表 5)。

表 4 新建镇种植业、水产养殖业及生活污水污染物输出系数^[23-24,26]

Table 4 Pollutant export coefficients for crop farming, aquaculture and domestic sewage in Xinjian

污染物种类	污染物输出系数				
	种植业/ $(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1})$			A/ $(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1})$	B/ $(\text{kg}\cdot\text{人}^{-1}\cdot\text{a}^{-1})$
	小麦轮作	稻油轮作	蔬菜地		
TN	54.84	43.79	45.76	37.88	1.15
TP	0.55	0.37	2.67	7.28	0.08
$\text{NH}_3\text{-N}$	4.50	3.59	3.75	15.11	0.87
COD	87.00	87.00	35.00	56.72	3.38

A 为水产养殖业,这里指螃蟹养殖;B 为农村分散式生活污水,这里针对低收入人群^[26]。

表 5 新建镇畜禽养殖业污染物输出系数及粪污排放量

Table 5 Waste discharge load and pollutant export coefficients for livestock in Xinjian

种类	养殖时间 ^[27] /d	粪污类型	粪污排泄系数 ^[28-29] / $[\text{kg}\cdot(\text{头或只})^{-1}\cdot\text{d}^{-1}]$	污染物含量 ^[30] / $(\text{kg}\cdot\text{t}^{-1})$			
				TN	TP	$\text{NH}_3\text{-N}$	COD
猪	180	粪便	2	5.88	3.41	3.08	52.00
		尿液	3.3	3.30	0.52	1.43	9.00
蛋鸡	210	粪便	0.125	10.40	5.80	2.80	45.70
肉鸡	55	粪便	0.125	10.40	5.80	2.80	45.70
种类	流失系数 ^[31] / $\%$	污染物输出系数/ $[\text{kg}\cdot(\text{头或只})^{-1}\cdot\text{a}^{-1}]$				养殖数量	粪污排放量/ $(\text{t}\cdot\text{a}^{-1})$
		TN	TP	$\text{NH}_3\text{-N}$	COD		
猪	40	0.85	0.49	0.44	7.49	9 536	1 373.18
	65	1.27	0.20	0.55	3.47		
蛋鸡	40	0.11	0.06	0.03	0.48	50 000	525.00
肉鸡	40	0.03	0.02	0.01	0.13	40 200	110.55

1)单位为 $\text{m}^3\cdot\text{a}^{-1}$ 。

由表 6 可知,每年水产养殖废水排放氮输出量达 78.28 t,在农业面源污染源中位居第 1,甚至远大于生活污水氮输出量;畜禽养殖废水氮输出量位居第 2,相当于生活污水氮输出量;每年水产养殖和畜禽养殖磷输出量都大于生活污水磷输出量。因此,农业面源污染控制应考虑种养结合,注重畜禽养殖、水产养殖废水中养分的资源化具有实际意义。

水产养殖业污水排放的污染物 TN、TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 COD 分别占该镇农业面源污染总负荷的 67%、59%、72% 和 43%;而畜禽养殖业废水排放的污染物 TN、TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 COD 分别占该镇农业面源污染总负荷的 23%、40%、26% 和 50%;农田废水排放的污染物 TN、TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 COD 分别占该镇农业面源污染总负荷的 10%、1%、2% 和 7%(表 6)。而太湖地区农业面源污染的主要贡献者是农田,污染物 TN 和

TP 分别占 48% 和 38%^[32]。这种差异主要是由于新建镇螃蟹养殖面积大,占农业用地的 53%,因而成为农业面源污染的主要贡献者。

3 基于肥水资源化的新建镇农业面源污染控制系统的设计

3.1 基于肥水资源化的新建镇农业面源污染控制系统的设计原则

由于 GB 18596—2001^[21]中 TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量及 COD 高于 GB 3838—2002 中 III 级标准^[10]。因此,为了减少入河污染负荷,即使畜禽养殖污水处理达标,养殖厂处理后的污水也不宜直接排入河。养殖污水农田灌溉不但可利用污水中的氮磷养分,通过农田吸纳氮磷进一步深度净化污水,降低进入水环境的污染物^[33],而且可以满足农田灌溉水需求。

新建镇全年需要灌溉水,尤其是夏季(表1),该镇螃蟹养殖塘以及畜禽养殖厂地势均高于河道,从地势较低河道抽水灌溉所需动力应大于用养殖厂处理污水进行农田灌溉所需抽水动力成本。

表6 新建镇种植业、畜禽养殖业、水产养殖业和生活污水污染物输出负荷

Table 6 Pollutant export load from livestock, aquaculture and domestic sewage in Xinjian

分类	污染物输出负荷/(t·a ⁻¹)			
	TN	TP	NH ₃ -N	COD
种植业				
稻麦轮作	10.59	0.11	0.87	16.80
稻油轮作	0.80	0.01	0.06	1.59
蔬菜地	0.45	0.02	0.04	0.34
小计	11.84	0.14	0.97	18.73
畜禽养殖业				
猪				
粪便	8.07	4.68	4.23	71.41
污水	12.15	1.91	5.27	33.14
蛋鸡				
粪便	5.46	3.05	1.47	23.99
肉鸡				
粪便	1.15	0.64	0.31	5.05
小计(粪便)	14.68	8.37	6.01	100.45
小计(污水)	12.15	1.91	5.27	33.14
小计	26.83	10.28	11.28	133.59
水产养殖业				
螃蟹养殖	78.28	15.04	31.23	117.21
农业源合计	116.95	25.46	43.48	269.53
生活污水				
低收入人群	29.76	2.08	22.58	87.39

表7 农业面源污染控制技术污染削减率及年单位污染物削减负荷成本

Table 7 Pollutant reduction rate of technological options for controlling agricultural non-point source pollution and annual unit pollutant load reduction cost of construction and operation

污染源	技术	污染物削减率/%				成本/(元·kg ⁻¹ ·a ⁻¹)	
		TN	TP	NH ₃ -N	COD	建设	运行
种植业	GW ^[8]	91.60	81.30	74.00	65.30	9.47	1.91
畜禽养殖业	SBR ^[8]	90.00	99.05	91.67	96.31	3.07	0.33
水产养殖业	SBBR ^[8]	75.80	89.50	85.10	91.10	17.87	2.68
畜禽养殖业	M ^[36]	30.00	10.00	30.00	96.05	1.55	0.23

GW为植草沟-湿地滞留塘技术,SBR为沼气池-序批式活性污泥法-氧化塘系统,SBBR为组合填料序批式生物膜法,M为堆肥系统。

根据以前研究结果,选择上述最优技术作为新建镇养殖污水处理技术。存储池建设成本为300元·m⁻³,可设置DN500UPVC进、出水管各1条,长度均为50m,此管道报价为435元·m⁻¹,并配置4000W抽水泵1台,报价为2000元,运行成本包括人工管理费及耗损电费、工艺设备维护费,约为建设成本的20%^[8],用于农业灌溉的畜禽养殖和水产养殖

对畜禽养殖污水进行处理,使其氮、磷、COD达标(GB 18596—2001^[21])并经过杀菌处理后用于农田灌溉,不仅节省抽水动力成本,还可利用部分氮、磷养分,减少化学氮磷肥施用量。水产养殖污水COD较低,经杀菌处理后,达到GB 5084—2005^[34]要求,可用于农业灌溉,同时可利用其中的部分氮磷养分。畜禽养殖污水排放为每天恒定少量排放,水产养殖污水是周期性大量排放,而农田施肥、灌溉却具有季节性,需要配置污水储存池收集、储存畜禽养殖和水产养殖净化后污水,解决水供应与农田灌溉需水之间的季节性矛盾;同时,针对养殖场地与灌溉农田之间的空间差异,需在修建储存池时考虑输水管道的建设及电力输送问题。以水质达标(GB 18596—2001^[21]、GB 5084—2005^[34]、GB 3838—2002^[10])为前提,以农田灌溉需水量为基础,构建面源污染控制系统,确保实现污染物削减、肥水再利用和经济成本控制,最终达到水质改善和农业可持续发展的双赢目标。

3.2 基于肥水资源化的新建镇农业面源污染控制系统技术选择

针对太湖地区农业面源污染控制技术需求,以污染削减率、建设及运行成本为指标,采用层次-灰色关联度法对6种植业污染控制技术、10种畜禽养殖业污染控制技术和10种水产养殖业污染控制技术开展优选^[8],确定植草沟-湿地滞留塘技术为种植业污水控制最优技术,沼气池-序批式活性污泥法-氧化塘系统为畜禽养殖业污水控制最优技术,组合填料序批式生物膜法为水产养殖污水最优控制技术(表7)。

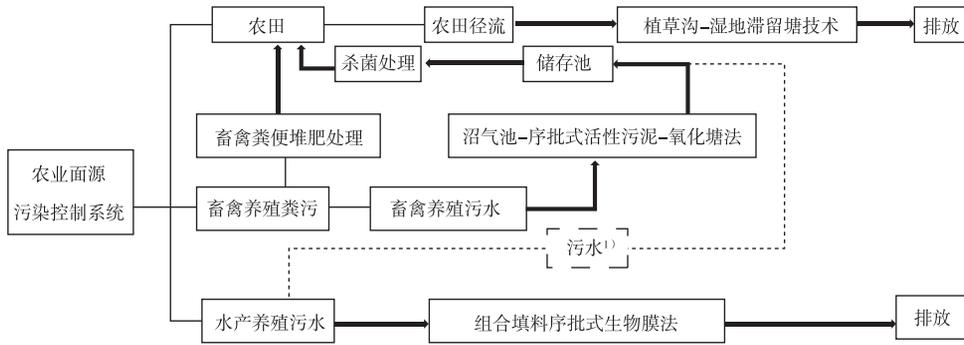
污水采用二氧化氯杀菌^[35],耗水费用报价为16.5元·kt⁻¹。采用堆肥系统处理干清粪^[36],堆肥还田,实现粪污资源化。

3.3 基于肥水资源化的新建镇农业面源污染控制系统构建

畜禽养殖污水处理达标(GB 18596—2001)后仍含有可观的氮磷等养分。因此,应该优先将净化

的畜禽养殖污水用于灌溉。由于新建镇畜禽养殖污水排放量远低于农田灌溉需水量(表 3),将畜禽养殖污水处理达标(GB 5084—2005)并消杀病菌后可以全部用于农田灌溉,可满足农田灌溉需水量的 3%(表 3)。全年水产养殖污水排放量大于农田灌

溉需水量,在畜禽净化污水优先农用灌溉的条件下,最多可将 $2\,277.11 \times 10^3 \text{ m}^3$ 水产养殖排放污水用于农田灌溉,满足 97% 的农田灌溉需水。为此,根据养殖污水资源化量,设计 2 种基于肥水资源化的新建镇农业面源污染控制系统(图 1)。



1) 农业面源污染控制系统模式 I (无农用灌溉), 农业面源污染控制系统模式 II (部分污水农用灌溉)。

图 1 新建镇农业面源污染控制系统

Fig. 1 System for controlling agricultural non-point-source pollution in Xinjian

模式 I 指全部畜禽废污回用,包括:畜禽养殖粪污堆肥还田^[36];畜禽养殖污水经过沼气池-序批式活性污泥法-氧化塘系统处理^[8],达标(GB 5084—2005)后在储存池中储存,经二氧化氯杀菌后用于农田灌溉;农田排水经过植草沟-湿地滞留塘处理^[8],随后就近排放入河;水产养殖排水经过组合填料序批式生物膜法处理^[8],随后就近排放入河。

模式 II 指全部畜禽废污及部分水产污水回用,包括:畜禽养殖粪污堆肥还田^[36];畜禽养殖污水经过沼气池-序批式活性污泥法-氧化塘系统处理^[8],达标(GB 5084—2005)后在储存池中储存,经二氧化氯杀菌后用于农田灌溉;农田排水经过植草沟-湿地滞留塘处理^[8],随后就近排放入河;水产养殖排水经过组合填料序批式生物膜法处理^[8], $2\,277.11 \times 10^3 \text{ m}^3$ 水经过二氧化氯消杀灭菌^[35],用于农田灌溉,其余水就近排放入河。

4 新建镇农业面源污染控制系统构建的可行性分析

4.1 基于水质的可行性分析

表 8 显示,畜禽养殖业所排污水经处理后 COD 达到农田灌溉用水最高标准(生食类蔬菜 $\leq 60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)^[34]。因此,畜禽养殖污水经处理后,可用于农田灌溉,实现全部资源化循环利用。水产养殖污水未处理前,COD 已达到农田灌溉用水标准(生食类蔬菜 $\leq 60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),这部分水产养殖污水仅需要进行

二氧化氯^[35]杀菌处理,即可直接用于农田灌溉。

表 8 新建镇 3 种污染源污水处理前后污染物浓度

Table 8 Concentration of pollutants in wastewater from three pollution sources before and after treatment

阶段	污染源	$\rho(\text{TN})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{TP})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	COD/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$
处理前	种植业	5.04	0.06	0.41	7.97
	畜禽养殖业	168.84	26.60	73.16	460.47
	水产养殖业	2.89	0.55	1.15	4.32
处理后	种植业	0.42	0.01	0.11	2.77
	畜禽养殖业	16.88	0.25	6.09	16.99
	水产养殖业	0.70	0.06	0.17	0.38

污水处理前污染物浓度(新建镇 3 种污染源排放的污水中各污染物平均浓度)=污染输出负荷/污水排放量,污水处理后污染物浓度(优选技术^[8]处理后出水浓度)=污染输出负荷 $\times(1-\text{污染物削减率}^{[8]})$ /污水排放量。

模式 I:农田排放污水经处理后达到地表水 III 类标准(TN、TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含量及 COD 分别为 1、0.2、1 和 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)^[10],可就近排放入河;水产养殖排放污水经处理后达到地表水 III 类标准,允许就近入河排放。

模式 II:农田排放污水经处理后达到地表水 III 类标准^[10],可就近排放入河;未农灌回用的水产养殖排放污水经处理后达到地表水 III 类标准,允许就近入河排放。

4.2 基于系统污染物削减量和成本的分析

根据各面源污染物输出负荷($L_{ij,t}$)及相关技术

的污染削减率($R_{E,ij}$, %), 计算得到各技术对污染物的年削减量(R_{ij} , $t \cdot a^{-1}$) [式(10)]; 根据各污染源污染物总输出负荷削减量(R_i , t)和相应处理技术的单位污染削减量的建设成本($U_{c,i}$, 元)和运行成本($U_{o,i}$, 元), 得到该项技术在新建镇建设污染处理工程的建设成本(C_c , 元) [式(11)]和运行成本(C_o , 元) [式(12)] (表9)。其中, 农田对回用灌溉的畜禽养殖净化污水和水产养殖污水以及还田的畜禽堆肥进行养分消纳, 此时农田的功效相当于污染物消纳体, 也具有污染削减能力, 理想状态下可认为农田完全消纳回灌污水及堆肥养分。

$$R_{ij} = R_{E,ij} L_{ij}, \quad (10)$$

$$C_c = R_i U_{c,i}, \quad (11)$$

$$C_o = R_i U_{o,i}。 \quad (12)$$

表9 新建镇农业面源污染控制系统污染削减量及削减成本
Table 9 Pollutant reduction and construction and operation cost based on proposed system of controlling agricultural non-point-source pollution in Xinjian

模式	技术	污染物削减量/($t \cdot a^{-1}$)					成本/10 ⁶ 元	
		TN	TP	NH ₃ -N	COD	总计	建设	运行
I	GW	10.84	0.11	0.72	12.23	23.90	0.23	0.05
	SBR	10.94	1.90	4.83	31.91	49.58	0.15	0.02
	M	4.41	0.84	1.80	96.48	103.53	0.16	0.02
	CP1	1.22	0.02	0.44	1.22	2.90	12.90	2.58
	CP2	10.28	7.53	4.21	3.97	25.99	—	—
	SBBR	59.34	13.46	26.58	106.78	206.16	3.68	0.55
	总计	97.03	23.86	38.58	252.59	412.06	17.12	3.22
II	GW	10.84	0.11	0.72	12.23	23.90	0.23	0.05
	SBR	10.94	1.90	4.83	31.91	49.58	0.15	0.02
	M	4.41	0.84	1.80	96.48	103.53	0.16	0.02
	CP1	1.22	0.02	0.44	1.22	2.90	12.90	2.58
	CP2	10.28	7.53	4.21	3.97	25.99	—	—
	SBBR	54.35	12.33	24.34	97.81	188.83	3.37	0.51
	CP3	6.58	1.26	2.62	9.85	20.31	72.82	14.60
		总计	98.62	23.99	38.96	253.47	415.04	89.63

GW为植草沟-湿地滞留塘技术, SBR为沼气池-序批式活性污泥法-氧化塘系统, M为堆肥系统, SBBR为组合填料序批式生物膜法, CP为农田消纳养分, 包括消纳净化后污水(畜禽养殖)的养分(CP1)、消纳畜禽粪堆肥还田养分(CP2)和消纳净化后污水(水产养殖)养分(CP3)。“—”表示无数据。

农业面源污染控制系统模式 I, 实现目标所需经费 2 034 万元, 其中工程建设成本占 84.2% (表 9)。农田消纳中, 储存池建设成本占总建设成本的 75.4%, 运行成本占总运行成本的 80.1%, 其为模式 I 的主要成本来源。模式 I 的 TN、TP、NH₃-N 和 COD 削减量分别为 97.03、23.86、38.58 和 252.59 t, 削减率分别为 83.0%、93.7%、88.7% 和 93.7%。其中, 水产养殖污水经处理后污染物削减量最高,

占总削减量的 50.0%; 其次为畜禽粪便, 其削减量占总削减量的 25.1%; 农田作为消纳体, 污染物削减量占总削减量的 7.0%。

农业面源污染控制系统模式 II, 实现目标所需经费 1.074 1 亿元, 其中工程建设成本占 83.4% (表 9)。农田消纳中, 储存池建设成本占总建设成本的 95.6%, 运行成本占总运行成本的 96.6%, 其为模式 II 的主要成本来源。模式 II 的 TN、TP、NH₃-N 和 COD 削减量分别为 98.62、23.99、38.96 和 253.47 t, 削减率分别为 84.3%、94.2%、89.6% 和 94.0%。其中, 水产养殖污水经处理后污染物削减量最高, 占总削减量的 45.5%; 其次为畜禽粪便, 其削减量占总削减量的 24.9%; 农田作为消纳体, 污染物削减量占总削减量的 11.9%。

4.3 基于肥水资源化的可行性分析

过量的化肥施用不仅增加农业成本和污水处理成本, 也会造成地表水环境恶化。作为一种不可再生资源, 磷肥也应合理施用。2015 年, 农业部印发了《到 2020 年化肥使用量零增长行动方案》, 以保障国家粮食安全和重要农产品有效供给并保护生态环境安全。净化废水灌溉作为水肥一体化的一种新型施肥方式以及畜禽堆肥作为有机肥替代化肥施用均得到了推荐。

农业面源污染控制系统模式 I: 系统对于 TN、TP、NH₃-N 和 COD 的削减率分别为 83.0%、93.7%、88.7% 和 93.7%; 其中, 农田作为消纳体, 每年消纳回用畜禽粪便污水, TN、TP、NH₃-N 和 COD 削减量分别可达 1.22、0.02、0.44 和 1.22 t。当地农田种植面积为 221.1 hm^2 (表 1), 每年畜禽净化污水农用灌溉量折算为 325.5 $t \cdot hm^{-2}$ (表 1, 表 10), 这部分污水在用于农田灌溉的同时有 5.5 $kg \cdot hm^{-2}$ N 和 0.1 $kg \cdot hm^{-2}$ P 实现还田, 分别占养分还田总量的 10.6% 和 0.3% (表 10); 每年堆肥的施用贡献了 89.4% 和 99.7% 的 N、P 养分还田量 (表 10), 折合为 46.5 $kg \cdot hm^{-2}$ N 和 34.1 $kg \cdot hm^{-2}$ P, 其符合畜禽粪便还田建议安全值 (N, 170 $kg \cdot hm^{-2}$; P, 35 $kg \cdot hm^{-2}$) [37-38]。综上所述, 新建镇每年可减少化肥氮用量折算为 52.0 $kg \cdot hm^{-2}$, 同时可减少化肥磷施用量 34.2 $kg \cdot hm^{-2}$ (表 10)。

农业面源污染控制系统模式 II: 系统对 TN、TP、NH₃-N 和 COD 的削减率分别为 84.3%、94.2%、89.6% 和 94.0%, 其中, 农田作为消纳体, 每年消纳回用畜禽粪便污水和水产污水, TN、TP、NH₃-N 和 COD 削减量可达 7.80、1.28、3.06 和 11.07 t。当地农田种植面积为 221.1 hm^2 (表 1), 每年畜禽净化污

水和水产养殖污水农用灌溉量折算为 $10\ 624.5\ \text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ (表1, 表10), 可完全替代常规农用水, 这部分污水在用于农田灌溉的同时有 $35.3\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\ \text{N}$ 和 $5.8\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\ \text{P}$ 实现还田, 分别占养分回用总量的 43.1% 和 14.5% (表10); 每年堆肥的施用贡献了

56.9% 和 85.5% 的 N、P 养分回用量, 可折算为 $46.5\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\ \text{N}$ 和 $34.1\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\ \text{P}$, 这个数值符合畜禽粪便还田建议安全值^[37-38]。综上所述, 新建镇每年可减少化肥氮用量折算为 $81.8\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 同时可减少化肥磷施用量 $39.9\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (表10)。

表10 农业面源污染控制系统中实际污水农用灌溉量和养分还田量

Table 10 Practical wastewater reuse for irrigation and nutrient return for field system based on proposed systems of controlling agricultural non-point-source pollution

模式	实际污水农用灌溉量/($10^3\ \text{m}^3\cdot\text{a}^{-1}$)			实际养分还田量/($\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$)							
	畜禽养殖	水产养殖	总计	畜禽养殖				水产养殖 (污水)		总计	
				污水		粪便		N	P	N	P
I	71.96	0	71.96	1.22	0.02	10.28	7.53	0	0	11.50	7.55
II	71.96	2 277.11	2 349.07	1.22	0.02	10.28	7.53	6.58	1.26	18.08	8.81

畜禽养殖污水排放量为 $71.96\times 10^3\ \text{m}^3\cdot\text{a}^{-1}$, 水产养殖污水排放量为 $27\ 104.00\times 10^3\ \text{m}^3\cdot\text{a}^{-1}$, 农田污水排放量为 $4\ 870.72\times 10^3\ \text{m}^3\cdot\text{a}^{-1}$, 农田灌溉需水量为 $2\ 349.07\times 10^3\ \text{m}^3\cdot\text{a}^{-1}$ (表3)。

相对于系统 I, 农业面源污染控制系统 II 对于污染物的削减能力更强, 水和养分回用效率更高, 但是建设成本和运行成本投入远远高于系统 I, 建设成本和运行成本分别为系统 I 的 5.2 倍和 5.5 倍 (表9)。所提出的 2 种肥水资源化农业面源污染控制系统可为新建镇污染控制工程建设提供技术参考。

5 结论

在太湖西岸宜兴市新建镇设计了基于肥水资源化利用的河网区农业面源污染控制系统。模式 I 的畜禽排放污水净化达标并经杀菌处理后用于农田灌溉, 畜禽粪便经堆肥处理后还田, 农田径流和水产养殖污水经处理达标后排入附近河流。模式 I 每年可回用 $325.5\ \text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 畜禽净化污水, 整个系统对 TN、TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 COD 的削减率分别为 83.0%、93.7%、88.7% 和 93.7%, 同时每年 N、P 肥施用量可分别减少 52.0 和 $34.2\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。模式 II 将畜禽养殖净化排放污水和部分水产养殖污水经杀菌处理后用于农田灌溉, 同时畜禽堆肥进行还田利用。模式 II 每年可回用 $10\ 624.5\ \text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 畜禽净化污水和水产养殖污水, 整个系统对 TN、TP、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 COD 的削减率分别为 84.3%、94.2%、89.6% 和 94.0%, 同时每年 N、P 肥施用量可分别减少 81.8 和 $39.9\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。所提出的 2 种肥水资源化农业面源污染控制系统可为新建镇污染控制工程建设提供技术参考。

参考文献:

- [1] USEPA. Nonpoint Source Pollution: The Nation's Largest Water Quality Problem [EB/OL]. (1996-03) [2018-07-01]. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/20004PZG.PDF?Dockey=20004PZG.PDF>.
- [2] 吴永红, 胡正义, 杨林章. 农业面源污染控制工程的“减源-拦截-修复”(3R)理论与实践[J]. 农业工程学报, 2011, 27(5): 1-6. [WU Yong-hong, HU Zheng-yi, YANG Lin-zhang. Strategies for Controlling Agricultural Non-Point Source Pollution: Reduce-Retain-Restoration (3R) Theory and Its Practice[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(5): 1-6.]
- [3] 刘莉, 胡正义. 基于污染物削减效果和成本的农业面源污染控制技术优选: 以太湖地区为例[J]. 生态与农村环境学报, 2015, 31(4): 608-616. [LIU Li, HU Zheng-yi. Selection of Optimal Agricultural Non-Point Source Pollution Prevention and Control Techniques Based on Effect and Cost of Their Pollution Reduction: A Case Study of the Taihu Region[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2015, 31(4): 608-616.]
- [4] 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.]
- [5] ZHANG J F. Forestry Measures for Ecologically Controlling Non-Point Source Pollution in Taihu Lake Watershed, China[M]. Singapore: Springer Singapore, 2016: 1.
- [6] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 关于印发太湖流域水环境综合治理总体方案(2013年修编)的通知[EB/OL]. (2013-12-30) [2018-07-01]. http://www.ndrc.gov.cn/tzgggz/dqjj/zhdt/201401/t20140114_575733.html.

- [7] 秦忠, 耿清蔚, 臧贵敏. 太湖流域平原水网区面源污染现状与控制对策[J]. 中国工程科学, 2010, 12(6): 113-116. [QIN Zhong, GENG Qing-wei, ZANG Gui-min. Statistics and Countermeasures of Non-Point Source Pollution in Plain River Network of Taihu Basin[J]. Engineering Sciences, 2010, 12(6): 113-116.]
- [8] 刘莉. 农业面源污染控制技术在太湖流域宜兴地区的适用性评估[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.
- [9] 郝昊, 王晓昌, 张琼华, 等. 宜兴城市内河污染物时空分布及解析[J]. 环境工程学报, 2015, 9(1): 125-130. [HAO Hao, WANG Xiao-chang, ZHANG Qiong-hua, et al. Spatiotemporal Distribution and Analysis for Pollutants in Inland Rivers of Yixing, China[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(1): 125-130.]
- [10] GB 3838—2002, 地表水环境质量标准[S]. [GB 3838—2002, Environmental Quality Standard for Surface Water [S].]
- [11] 江苏省水利厅办公室. 江苏省灌溉用水定额[EB/OL]. (2015-02-05) [2018-07-01]. http://jsssl.t.jiangsu.gov.cn/art/2015/2/28/art_43139_3546887.html.
- [12] 俞双恩, 张展羽. 江苏省水稻高产节水灌溉技术体系研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2002, 30(6): 30-34. [YU Shuang-en, ZHANG Zhan-yu. Technical System of Water-Saving Irrigation for Rice Planting in Jiangsu Province[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2002, 30(6): 30-34.]
- [13] MISHRA S K, SINGH V. Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) Methodology [M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 2003: 84-146.
- [14] 董文涛, 程先富, 张群, 等. SCS-CN模型在巢湖流域地表产流估算中的应用[J]. 水土保持通报, 2012, 32(3): 174-177, 187. [DONG Wen-tao, CHENG Xian-fu, ZHANG Qun, et al. Application of SCS-CN Model Estimating Surface Runoff to Chaohu Lake Basin[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32(3): 174-177, 187.]
- [15] 符素华, 王向亮, 王红叶, 等. SCS-CN径流模型中CN值确定方法研究[J]. 干旱区地理, 2012, 35(3): 415-421. [FU Su-hua, WANG Xiang-liang, WANG Hong-ye, et al. Method of Determining CN Value in the SCS-CN Method[J]. Arid Land Geography, 2012, 35(3): 415-421.]
- [16] 房孝铎, 王晓燕, 欧洋. 径流曲线法(SCS法)在降雨径流量计算中的应用: 以密云石匣径流试验小区为例[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2007, 28(1): 89-92, 102. [FANG Xiao-duo, WANG Xiao-yan, OU Yang. Calculation of Flow in Small Watershed by SCS[J]. Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition), 2007, 28(1): 89-92, 102.]
- [17] USDA. National Engineering Handbook, Section 4, Hydrology [Z/OL]. (1972) [2018-07-01]. <https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detailfull/national/water/?cid=stelprdb1043063>.
- [18] USDA. National Engineering Handbook, Section 4, Hydrology, Chapter 9, Hydrologic Soil-Cover Complexes [Z/OL]. (2004) [2018-07-01]. <https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detailfull/national/water/?cid=stelprdb1043063>.
- [19] 文博, 刘友兆, 夏敏, 等. 基于生态环境保护视角的农村居民点用地布局适宜性评价: 以江苏省宜兴市为例[J]. 水土保持通报, 2016, 36(4): 280-285. [WEN Bo, LIU You-zhao, XIA Min, et al. Suitability Evaluation of Rural Residential Land From Perspective of Ecological Environment Protection: A Case Study on Yixing City of Jiangsu Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016, 36(4): 280-285.]
- [20] SHADEED S, ALMASRI M. Application of GIS-Based SCS-CN Method in West Bank Catchments, Palestine[J]. Water Science and Engineering, 2010, 3(1): 1-13.
- [21] GB 18596—2001, 畜禽养殖业污染物排放标准[S]. [GB 18596—2001, Discharge Standard of Pollutants for Livestock and Poultry Breeding[S].]
- [22] DING X W, SHEN Z Y, HONG Q, et al. Development and Test of the Export Coefficient Model in the Upper Reach of the Yangtze River[J]. Journal of Hydrology, 2010, 383(3/4): 233-244.
- [23] 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(Suppl. 1): 45-48.]
- [24] 陈秋会, 席运官, 王磊, 等. 太湖地区稻麦轮作农田有机和常规种植模式下氮磷径流流失特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(8): 1550-1558. [CHEN Qiu-hui, XI Yun-guan, WANG Lei, et al. Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Runoff Losses in Organic and Conventional Rice-Wheat Rotation Farmland in Taihu Lake Region[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, 35(8): 1550-1558.]
- [25] 全国污染源普查水产养殖业污染源产排污系数测算项目组. 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[Z]. [出版地不详]: [出版者不详], 2009. [The Group of Pollution Discharging Coefficient in the National Aquaculture Pollution Census. The Emission Coefficient Manual of the First National Pollution Census[Z]. [s. l.]: [s. n.], 2009.]
- [26] 王文林, 胡孟春, 唐晓燕. 太湖流域农村生活污水产排污系数预算[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(6): 616-621. [WANG Wen-lin, HU Meng-chun, TANG Xiao-yan. Estimation of Sewage Production and Discharge Coefficients of Rural Areas in Taihu Lake Basin[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2010, 26(6): 616-621.]
- [27] 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 Population, Resources and Environment, 2010, 20(1): 99-107.]
- [28] 国家环境保护总局自然生态保护司. 全国规模化畜禽养殖业污染情况调查及防治对策[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 119-137.
- [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] 刘培芳, 陈振楼, 许世远, 等. 长江三角洲城郊畜禽粪便的污染负荷及其防治对策[J]. 长江流域资源与环境, 2002, 11(5):

- 456-460. [LIU Pei-fang, CHEN Zhen-lou, XU Shi-yuan, *et al.* Waste Loading and Treatment Strategies on the Excreta of Domestic Animals in the Yangtze Delta[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2002, 11(5): 456-460.]
- [31] 黄威, 聂耳, 李纪华, 等. 宜兴畜禽粪便污染负荷时空变化研究[J]. 家畜生态学报, 2013, 34(7): 64-69. [HUANG Wei, NIE Er, LI Ji-hua, *et al.* Study on the Spatiotemporal Change of Pollutant Load From Livestock and Poultry Manure in Yixing City[J]. Acta Ecologiae Animalis Domastici, 2013, 34(7): 64-69.]
- [32] GUO H Y, WANG X R, ZHU J G. Quantification and Index of Non-Point Source Pollution in Taihu Lake Region With GIS[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2004, 26(2): 147-156.
- [33] KIZILOGLU F M, TURAN M, SAHIN U, *et al.* Effects of Wastewater Irrigation on Soil and Cabbage-Plant (*Brassica oleracea* var. Capitata cv. Yalova-1) Chemical Properties[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2007, 170(1): 166 - 172.
- [34] GB 5084—2005, 农田灌溉水质标准[S]. [GB 5084—2005, Standards for Irrigation Water Quality[S].]
- [35] 李同. 猪场处理出水杀菌方法试验研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2014. [LI Tong. Pilot Study on Disinfection Methods of Treated Effluent From Swine Farm[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2014.]
- [36] 谭小琴. 利用堆肥处理规模化猪场粪污实现零排放研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2003. [TAN Xiao-qin. Study on Zero Effluent of Piggery Wastewater Through Co-Composting With Straw and Piggery Wastes[D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2003.]
- [37] OENEMA O, VAN LIERE L, PLETTE S, *et al.* Environmental Effects of Manure Policy Options in the Netherlands[J]. Water Science and Technology, 2004, 49(3): 101-108.
- [38] ROVIRA J S, SOLER J S, ROVIRA P S, *et al.* Code of Good Agricultural Practice and Water Pollution[M]//Fertilizers and Environment. Dordrecht: Springer Netherlands, 1996: 569-572. DOI: 10. 1007/978-94-009-1586-2_101.

作者简介: 孙笑蕾(1993—), 女, 山东莱芜人, 硕士生, 主要从事农业面源污染控制及农田氮磷淋溶控制方面的研究。
E-mail: sunxiaolei15@mails.ucas.ac.cn

(责任编辑: 李祥敏)

欢迎订阅 2019 年《生态与农村环境学报》

《生态与农村环境学报》系生态环境部主管、生态环境部南京环境科学研究所主办的全国性学术期刊, 是《中文核心期刊要目总览》入编期刊、中国科学引文数据库(CSCD)核心期刊、中国学术期刊评价研究报告(RCCSE)核心期刊、中国科技论文统计源期刊(中国科技核心期刊), 被中国科技论文与引文数据库(CSTPCD)、中文社会科学引文索引(CSSCI)、中国学术期刊综合评价数据库(CAJCED)、中国期刊全文数据库(CJFD)、中国核心期刊(遴选)数据库、CA、CABI、BA、BP、BD、UPD、GeoBase、ZR、EM、Scopus、AGRIS、中国农业文摘、中国生物学文摘、中国学术期刊文摘、地球与环境科学信息网(EES)等国内外重要刊库网收录。系全国优秀环境科技期刊, 江苏省优秀期刊, 中国期刊协会赠建全国百家期刊阅览室指定赠送期刊。

本刊宗旨: 及时报道生态与农村环境保护领域创新性研究成果等。

主要栏目: 研究报告、研究简报、研究方法、专论与综述、学术讨论与建议等。

主要内容: (1) 区域环境与发展, 包括生态环境变化与全球环境影响、区域生态环境风险评价、环境规划与管理、区域生态经济与生态安全等; (2) 自然保护与生态, 包括自然资源保护与利用、生物多样性与外来物种入侵、转基因生物环境安全与监控、生态保护、生态工程与生态修复、有机农业与农业生态、气候变化与生态响应等; (3) 污染控制与修复, 包括污染控制原理与技术、土壤污染与修复、水环境污染与修复、大气污染防控、农业废物综合利用与资源化、农用化学品风险评价与监控、化学品环境与健康等。

主要读者对象: 从事生态学、环境科学、农学、林学、地学、资源科学等研究、教学、生产的科技人员, 相关专业的高等院校师生以及各级决策与管理人员。

本刊为月刊, 每月 25 日出版, A4 开本, 每期 136 页, 每期定价 30.00 元, 全年定价 360.00 元, 公开发行, 国内邮发代号 28-114, 全国各地邮局均可订阅; 国外由中国国际图书贸易总公司(北京 399 信箱)负责发行, 国外发行代号 Q5688。如漏订, 可向本刊编辑部补订。编辑部地址: 江苏省南京市蒋王庙街 8 号; 邮政编码: 210042; 电话: (025) 85287092, 85287601, 85287036, 85287052, 85287053; 网址: <http://www.ere.ac.cn>; E-mail: ere@vip.163.com, bjb@nies.org。