

循环型农业清洁流域建设 ——以柘皋河流域为例

王芊¹ 郑利杰² 朱昌雄^{1*}

(1. 中国农业科学院 农业环境与可持续发展研究所/农业农村部农业环境重点实验室,北京 100081;
2. 生态环境部环境规划院 农村环境保护中心,北京 100012)

摘要 为在流域尺度下构建全面系统的面源污染防控体系,以安徽省巢湖流域内一个典型的农业流域柘皋河流域作为案例,调查该流域种植制度、养殖模式、农村生活等数据,分析其面源污染特征,基于水环境容量计算柘皋河流域种植源氮磷减排潜力,在借鉴生态清洁小流域建设思路的基础上,提出循环型农业清洁流域建设,并从环境效益和技术应用两方面构建评价体系,并在实施减排措施基础上开展初步评价。结果表明:柘皋河流域内氮、磷年排放量分别为1 923和168 t;种植源氮减排率为37%,磷水环境容量空间充裕;实施清洁集成技术减排措施能够实现流域减排目标;综合评价指标值为0.684,表明流域的管理状况不佳。最后,提出了构建市场机制、强化基础设施建设、优化种养空间布局 and 加大政策支持等方面建议,以提升清洁技术效益和改善流域环境管理。

关键词 农业清洁流域; 循环型; 评价体系; 氮; 磷; 水环境容量

中图分类号 X321

文章编号 1007-4333(2021)07-0220-13

文献标志码 A

Construction of circular agricultural clean watershed: A case study of Zhégaohe watershed

WANG Qian¹, ZHENG Lijie², ZHU Changxiong^{1*}

(1. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture/Key Laboratory for Agricultural Environment of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;
2. Center for Rural Environmental Protection, Chinese Academy of Environmental Planning, Beijing 100012, China)

Abstract Aiming at establishing a system highlighting prevention and control measures on reducing NPS pollution at watershed scale, a typical agricultural watershed in Chaohu region, Zhégaohe watershed, was chosen as study object. Detailed survey was conducted to investigate the farming system, breeding mode and rural living. By learning from the thought of eco-clean small watershed construction, the definition and evaluation goals of circular agricultural clean watershed were put forward. Comprehensive assessment system of circular agricultural clean watershed was constructed. A primary evaluation on the implementation of pollution reduction measures was conducted. The results showed that: The annual N and P discharge load in the watershed were 1 923 and 128 t, respectively. Based on the water environmental capacity, the discharge load reduction percentages of NPS pollutants were calculated. It was found that 37% for nitrogen and there was abundant water environment capacity for phosphorus. Through implementing clean combined-technologies, the N and P discharge load reduction amount were calculated, which can achieve the corresponding reduction goals for Zhégaohe watershed. Based on the implementation effects, a preliminary assessment was conducted and the results showed that the sum of 7 weighted indicators was 0.684 indicating that the management

收稿日期: 2020-10-30

基金项目: 国家科技重大专项(2015ZX07103-007,2017ZX07401-002)

第一作者: 王芊,助理研究员,主要从事农业面源污染防控研究,E-mail:wangqian02@caas.cn

郑利杰,工程师,主要从事农业农村环境保护研究,E-mail:zhenglj@caep.org.cn

通讯作者: 朱昌雄,研究员,主要从事农业环境污染治理研究,E-mail:zhuchangxiong@caas.cn

performance was disappointed to some extent and thus the effects of combined-technologies was correspondingly limited. Finally, policy suggestions, e. g. marketing mechanism, strengthening farmland infrastructure construction, optimization of spatial distribution pattern for planting and breeding industries and increasing policy support were put forward to achieve higher clean technology efficiency and improve the watershed environmental management drastically.

Keywords agricultural clean watershed; circular; nitrogen; phosphorus; assessment system; water environmental capacity

随着农业生产的快速发展,化肥及农药大量施用,农业面源污染已成为威胁水体安全的重要原因。20世纪50—80年代,欧美发达国家就经历了严重的面源污染问题,很多地区水体的氮、磷污染负荷加剧^[1]。自20世纪80年代以来,我国由于农业面源污染的加剧,直接导致了地下水水质变劣和河湖水体富营养化,主要归咎于农业生产中施用的化肥及农药的低利用率及畜禽粪污的直接排放^[2]。为了治理面源污染问题,西方国家采取了技术加政策的方法,在技术层面主要是推广最佳养分管理技术、畜禽养殖配套耕地和处理设施技术、合理轮作技术、有机肥施用分区限时施用技术等,在政策层面则出台了对环境友好型农业技术的补贴措施和违反相关规定的惩戒规定,措施实施后明显改善水体环境质量^[1]。近年来,为治理农业面源污染和缓解环境资源压力,我国提出了化肥农药“两减”目标和“零增长”的方案,力图遏制化肥农药的高投入^[3-4]。国内已有围绕面源污染发生规律、污染脆弱区划分、防控技术研发和工程措施设计等方面开展大量研究,为面源污染防控提供了坚实的理论和技術支撑^[2,5-7]。

已有研究关注模型模拟方法和污染物输出系数、入河系数等,同时关注基于污染物入河量提出以空间管控和生态修复为核心的防控方案^[8-16]。由于面源污染治理涉及到种植业、养殖业、农村生活等多个方面,需要各方面配合开展综合调研和统筹推进治理。在我国长期开展小流域综合治理工作的基础上,水利部提出了“生态清洁小流域”的治理思路,发布了SL 534—2013《生态清洁小流域建设技术导则》,将面源污染治理问题纳入了生态清洁小流域建设内容之中^[17]。与此同时,面源污染研究重心开始向技术系统化集成和工程评估转移,着眼于结合工程措施来推动养分用量的削减和区域循环利用^[18-24]。

以种养结合循环农业思路指导的有机农业生产模式和农业清洁生产技术是未来解决面源污染的重要方向。已有研究基于水环境容量对面源污染减排

率进行计算,结果表明该方法对于制订面源污染防治策略可发挥重要作用^[25-27]。然而,目前关于农业清洁流域建设的研究相对较少,因此,本研究借鉴生态清洁小流域建设思路和先进的技术模式,结合“十二五”水专项“流域农业面源污染防治整装技术与农业清洁流域示范”(2015ZX07103-007)的调研数据和成果,拟以巢湖流域内柘皋河流域为典型案例,构建统筹考虑流域水环境容量和种植、养殖、农村生活污染排放的农业清洁流域建设系统和评价指标体系,以期改善我国在流域尺度层面面源污染治理中存在的系统性不强、循环薄弱和技术单一的状况,为流域面源污染系统化治理提供理论依据和技术支撑。

1 研究区域概况

柘皋河流域位于安徽省巢湖市,属巢湖水系,发源于巢湖市与肥东县交界的西大山一带的低山丘陵区,自北向南经栏杆集镇、柘皋镇、夏阁镇、中埠镇注入巢湖,是巢湖的主要支流。柘皋河主河道全长24.4 km,流域总面积528 km²,其中夏阁河全长23.5 km,流域面积166 km²,是柘皋河最大支流。近年来,由于农村生活污染、农业面源污染、畜禽与水产业养殖业污染等原因,该流域地表水水质难以持续保持稳定,安徽省委省政府将柘皋河流域确定为巢湖流域治理“6+1”重点河流之一^[28]。全流域可分为12个小流域治理单元,流域内常住人口约22.1万人,农村常住人口为17.24万人,耕地面积3.1万hm²,14.4万猪当量(表1)。

2 研究方法

2.1 循环型农业清洁流域评价体系构建

2.1.1 循环型农业清洁流域内涵

通过借鉴生态清洁小流域内涵,本研究提出循环型农业清洁流域的概念。以农业污染源排放占总污染排放量的70%以上且工业污染源得到有效治理的流域为治理对象,以提高流域农业氮、磷资源循

表1 柘皋河流域内小流域基本情况

Table 1 Basic information of small watersheds in Zhegaohu watershed

小流域 Small watershed	乡镇 Town	耕地面积/hm ² Area of arable land	农村常住人口数 No. of rural permanent population	猪当量/头 Pig equivalent
金府河 Jinfuhe	庙岗乡,柘皋镇	4 526	20 107	12 792
龙山河与跃子山河 Longshanhe and Yuezishanhe	栏杆集镇,苏湾镇,柘皋镇	5 379	22 867	17 295
板桥河 Banqiaohe	夏阁镇,柘皋镇	2 950	16 007	8 828
夏阁河上游 Upstream of Xiagehe	夏阁镇	1 621	11 343	10 518
夏阁河中游 Middle reaches of Xiagehe	夏阁镇	2 526	15 397	20 726
大夏河 Daxiahe	夏阁镇	940	7 977	25 533
西峰河 Xifenghe	夏阁镇	1 760	12 950	13 068
竹柯河 Zhukehe	夏阁镇	588	4 949	8 967
夏阁河下游 Lower reaches of Xiagehe	夏阁镇,卧牛山街道	1 598	9 670	14 106
大沙河 Dashahe	庙岗乡,柘皋镇	3 948	13 028	3 627
柘皋河中游 Middle reaches of Zhegaohu	柘皋镇,夏阁镇,中埠镇	3 721	34 545	4 443
柘皋河下游 Lower reaches of Zhegaohu	中埠镇	1 454	3 515	4 374
合计 Total		31 011	172 36	144 277

环利用率为主要目标,以防控流域面源污染的产生为重点建设任务,通过实施种植业和养殖业清洁生产、农村生活垃圾和生活污水治理、种养结合及生态沟渠建设等一系列管控措施,实现流域内水质达标和种植业、养殖业和农村环境整体清洁。在评价体系的建立过程中,以小流域作为基本建设单元开展种植业、养殖业和农村生活污染的防治。小流域规模框为:种植业 0.1 万 hm² 耕地;畜禽养殖业存栏猪当量 3 万头;农村常住人口 5 万人。主要考核指标包括:流域内 4~5 级河道水质达到 III 类标准;生产出绿色安全的农产品;农田氮磷流失显著减少;养殖废弃物资源化利用率达到 98%;农村生活污水达到地方标准或资源化利用率达 60%。

2.1.2 清洁技术体系

本研究对种植业、养殖业、农村生活 3 个领域提

出 19 项清洁生产技术(表 2)。

2.1.3 评价指标体系

从环境效益和技术应用两方面提出 7 项评价指标;将流域水体水质指标与管理指标作为最重要的 2 项指标,其权重比值合计为 50%。其中水体水质指标为环境效益指标,权重值为各指标中最高。其余 5 项指标则分别关于种植、养殖、农村生活、种养结合及农产品安全 5 方面。7 项指标中,除(1)指标为负向指标外,其余 6 项指标均按正向指标处理。7 项指标具体阐述如下:

1) 水体污染压力指数(WPI)。利用污染足迹法^[30]计算小流域的水体污染压力指数,以衡量区域污染严重程度,当水体污染压力指数超过 1 时按 1 计。依据“短板效应”按污染最严重的污染物计算。权重值设为 0.3。

表2 循环型农业清洁流域的清洁技术

Table 2 Clean technologies adopted by agricultural clean watershed featured with circle characteristics

治理领域 Management scope	编号 Code	技术 Technology	
种植业 Planting industry	TS1	设施节水氮磷污染防控	
	TS2	大田氮磷减量优化	
	TS3	种植结构优化	
	TS4	农田氮磷控流失	
	TS5	侧条施肥	
	过程拦截 Midway	TP6	排水全程拦截
	Retention	TP7	农田消纳阻控
	养分回用 Nutrient reuse	TP8	稻田水肥调控与退水拦截
	TC9	农村生活达标尾水农田回用	
养殖业 Breeding industry	TB10	微生物发酵床的养殖废弃物全循环利用	
	TB11	养殖废水碳氮磷协同处理	
	TB12	高效堆肥及功能有机肥生产	
	TB13	保氮除臭通气槽式堆肥	
农村生活 Rural living	TR14	生活垃圾分类收集	
	TR15	多介质土壤层耦合处理	
	TR16	FMBR 兼氧膜生物反应器	
	TR17	自充氧层叠生态滤床处理	
	TR18	厌氧滤井+跌水曝气人工湿地处理	
	TR19	营养供体利用型处理	

注：依据参考文献[29]。

Note: Based on Reference [29].

2)种养循环(RPB)。微生物发酵床的养殖废弃物全循环利用技术(TB10)的覆盖面积与流域耕地总面积的70%之比,种养循环超过1时按1计。权重值设为0.1。

3)畜禽粪污利用指数(UFW)。确保畜禽粪便100%收集且氮、磷资源化利用达98%以上。当以上3个要求均达到标准,畜禽粪污利用指数视为1,否则视为0。权重值设为0.1。

4)面源污染削减指数(RNPL)。种植业面源污染氮、磷排放量要削减30%以上,两者均达到100%时设为1,均低于30%设为0,其余情况按两者削减率乘积计。权重值设为0.1。

5)绿色农产品(GAP)。主要以重金属含量和硝酸盐含量抽检合格率作为评价指标,依照有关标准^[31-32],若全部指标合格则绿色农产品指标值为1,若某一项指标超标则绿色农产品指标值为0。权重值设为0.1。

6)农村生活污染利用(URL)。农村生活污水治理达到地方标准或资源化利用率达到60%,COD、TN、TP的排放标准参照GB18918-2002《城镇污水处理厂污染物排放标准》中一级A标准。当农村生活污水达到治理标准,农村生活污染利用指标值计为0.5或氮、磷资源化利用率达到60%时,该指标计为0.5;当两者同时达到要求时,指标值计

为1;否则指标值计为0。权重值设为0.1。

7)技术集成与管理(CTIM)。当地主管部门设立专门管理机构,依据与第三方环境评估机构签订管理协议,依托第三方机构开展如下工作:评估小流域环境容量,制订面源污染防治方案,加强对敏感区域和重点环节的管控,提出为农业主体发放应用清洁技术的生态补偿资金建议清单,在入河断面安装水质仪器开展水质监测和预警。权重值为0.2。根据技术集成度不同分为如下4种情况:①同时涵盖种植业、养殖业、农村生活3个领域的技术,其中应至少包含TS2、TP7、TC9、TB11、TB12、TR14和TR18这7个单项技术,可以视为达到100%集成。各单项技术覆盖占相应污染类别设定规模的比值应达到70%以上,下同;②涵盖种植业、养殖业、农村生活3个领域中至少2个领域的技术,且至少涵盖3类技术,每类技术至少包括①中提到的相应单项技术,可视为50%集成;③种植业中至少涵盖源头削减与过程拦截两类中各自1项技术,或养殖业中同时涵盖TB11和TB12技术,或农村生活中同时涵盖TR14和TR18技术,可视为25%集成;④其余情况视为零集成。

2.2 氮磷排放量及入河量

基于巢湖流域统计资料设置本流域内的稻麦轮作、菜地、果园三者的耕地比例分别为93.6%、5.1%、1.3%。农村生活污水处理率设为0.1。种植业中蔬菜和果树产排污系数基于第一次全国污染

源普查数据,稻麦轮作数据主要基于实验数据(未发表)和文献结果^[33];养殖业产排污系数通过对2篇文献中的粪污养分浓度与粪污产生量相乘计算得到^[34-35];农村生活污水产排污系数参考与本流域邻近的太湖流域数据^[36-37],并根据调研数据调整了农村生活污水的产排污系数。种植业、养殖业和农村生活污水3种污染源入河系数参考太湖流域数据^[37]。不同污染源氮、磷排放和入河系数见表3。

参考输出系数模型计算流域排放量^[14]。

$$L_i = \sum_{j=1}^3 E_{i,j} \cdot A_{i,j} \quad (1)$$

式中: L_i 为第*i*种污染物的年排放量,t; $A_{i,j}$ 为第*i*种污染物第*j*种污染源的耕地面积或农村常住人口或猪当量(其中, $i=1,2$,分别为氮和磷; $j=1,2,3$,分别为农田、畜禽养殖和农村生活三大污染源); $E_{i,j}$ 为第*i*种污染物第*j*种污染源的产排污系数。

根据输出系数模型与入河系数计算流域的入河负荷。

$$R_i = \sum_{j=1}^3 L_{i,j} \cdot \lambda_{i,j} \quad (2)$$

式中: R_i 为第*i*种污染物的年入水负荷,t; $L_{i,j}$ 为第*i*种污染物第*j*种污染源的年排放负荷(其中, $i=1,2$,分别为氮和磷; $j=1,2,3$,分别与农田、畜禽养殖和农村生活三大污染源); $\lambda_{i,j}$ 为第*i*种污染物第*j*种污染源的入河系数。

表3 面源污染3大来源产排污系数和入河系数

Table 3 Generation & export and discharge into river coefficients of non-point source pollution originated from three major sources

系数 Coefficient	污染物 Pollutants	种植业 Planting industry			养殖业 Breeding industry	农村生活污水 Rural domestic sewage
		稻麦轮作 Rice-wheat rotation	蔬菜 Vegetable	果树 Fruit tree		
产排污系数 Generation & export coefficient	N	29.9	18.5	20.0	7.100	10.10
	P	1.2	5.8	1.6	2.200	0.70
入河系数 Coefficient of discharge into river	N		0.1		0.213	0.05
	P				0.154	

2.3 水环境容量

柘皋河流域的水资源总量(V_w)按1.5亿 m^3 计,水体中氮、磷的本底浓度(B_{01} 、 B_{02})按1.15 mg/L、0.06 mg/L计,水质降解系数按0.1

计^[37-40]。氮、磷水环境容量(Q_i ,t)计算公式如下^[41]:

$$Q_i = V_w \cdot (B_{4,i} - B_{0,i}) \cdot 10^{-6} + C_{0,i} \quad (3)$$

式中: Q_i 为第*i*类污染物的水环境容量,t; V_w 为水资源总量, m^3 ; $B_{4,i}$ 为地表水环境质量标准

(GB 3838—2002)规定的第Ⅳ类水体的*i*类污染物含量,取值分别为 1.5、0.3,mg/L; $B_{0,i}$ 为水体中*i*类污染物含量本底值,mg/L; $C_{0,i}$ 为水体对*i*类污染物的同化能力,t。

水质同化能力按下式计算^[42]：

$$C_{0,i} = K_i \cdot V_w \cdot C_s \cdot 10^{-6} \quad (4)$$

式中： K_i 为*i*类污染物的水质降解系数,L/d; C_s 为该水体相应水质标准浓度,此处按 $B_{4,i}$ 计。

2.4 农田径流污染减排率

设定 $R_i = Q_i$,通过计算求出 Q_i 、 $R_{i,2}$ 、 $R_{i,3}$ 各值,并将其代入下式：

$$R'_{i,1} = Q_i - R_{i,2} - R_{i,3} \quad (5)$$

式中： $R'_{i,1}$ 为农田径流第*i*类污染物入河量目标值,t; Q_i 为第*i*类污染物的水环境容量,t; $R_{i,2}$ 为畜禽第*i*类污染物年入水负荷,t; $R_{i,3}$ 为农村生活第*i*类污染物年入水负荷,t。

农田径流污染物产生量目标值($L'_{i,1}$)：

$$L'_{i,1} = \frac{R'_{i,1}}{\lambda_{i,1}} \quad (6)$$

式中： $L'_{i,1}$ 为农田第*i*类污染物产生量目标值,t; $\lambda_{i,1}$ 为农田第*i*类污染物入河系数。

通过比较农田径流污染物产生量的实际值($L_{i,1}$)与目标值($L'_{i,1}$)，可求得农田径流污染减排率

(RLRF_{*i,1*})：

$$RLRF_{i,1} = \left[\frac{(L_{i,1} - L'_{i,1})}{L_{i,1}} \right] \cdot 100\% \quad (7)$$

式中：RLRF_{*i,1*}为农田第*i*类污染物减排率,%; $L_{i,1}$ 为农田第*i*类污染物产生量实际值,t; $L'_{i,1}$ 为农田第*i*类污染物产生量目标值,t。

3 结果与分析

3.1 柘皋河流域氮磷排放量及减排率

根据“十二五”水专项“流域农业面源污染防治整装技术与农业清洁流域示范”的调研,可计算出常规种植方式下氮、磷年排放量分别为 904.9 和 45.3 t;对于畜禽养殖业,氮、磷年排放量分别为 203.5 和 63.3 t;对于农村生活污水,氮、磷年排放量分别为 814.7 和 59.7 t。种植业、养殖业和农村生活氮、磷年排放量合计值分别为 1 923.0 和 168.0 t。种植业、养殖业和农村生活 3 大来源氮磷排放量所占比例见图 1。如图 1 所示:柘皋河流域内氮排放量中以种植源所占比重最高,磷排放量以畜禽源污染所占比重最高,两者分别占总量的 47%、38%;氮排放量中农村生活源比重约为养殖源的 4 倍,分别为 42%、11%;磷排放量中农村生活源比重高于种植源,分别为 35%、27%。

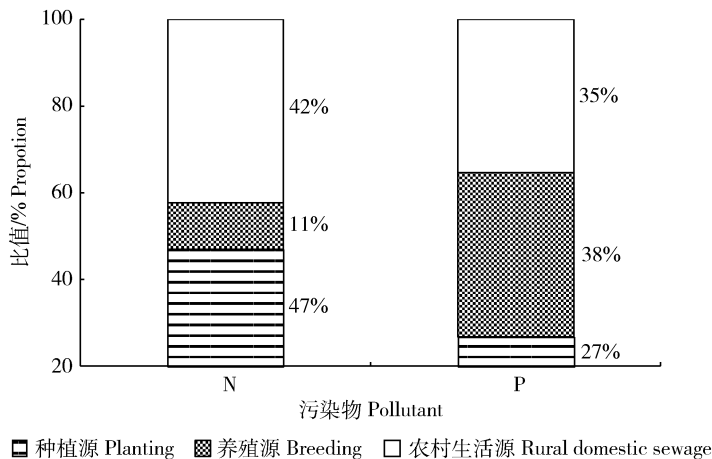


图 1 柘皋河流域种植业、养殖业和农村生活 3 大来源氮和磷排放量比值

Fig. 1 Proportion of discharge load from 3 major types of non-point source pollution comprising planting, breeding and rural domestic sewage for N and P in Zhegaohe watershed

根据式(3)和(4),可计算出柘皋河流域的氮磷水环境容量(Q_1 、 Q_2)分别为 74.6 和 81.0 t。对氮而言,若未对养殖业和农村生活污水加以资源化利用,两者的氮入河量达到 80.0 t,超出水环境氮容量

(74.6 t),种植业无可利用的入河空间。若采取资源化利用措施,两者氮入河量之和为 17.2 t,种植业氮剩余入河空间为 57.4 t,可得出种植业氮减排目标和减排率分别为 334.8 t 和 37%。对于磷而言,

柘皋河流域水环境容量为 81.0 t,采用资源化利用措施与否留给种植业的磷入河空间分别为 68.6 和 79.6 t,均高于种植业现状入河量,表明流域磷环境容量空间充足。

3.2 柘皋河流域减排技术实施效果

种植业是面源污染治理的重点,按稻麦轮作、蔬菜、果树 3 类种植类型,结合水稻、小麦、蔬菜、果树

种植集成技术体系和减排效果参数,可计算出种植业的氮磷减排量(表 4 和表 5)。由表 5 可见作物种植集成技术的氮磷减排量分别为 429.5 和 23.5 t,超出了 3.2 节中计算出的 334.8 t 的减排目标。生态沟渠工程的氮、磷减排率可达 48.1%、40.2%,该工程可进一步削减种植源氮磷排放量分别为 228.7 和 8.7 t。

表 4 不同技术的氮磷径流流失减排效果

Table 4 Reduction rate of N and P run off load of combined-technologies of major engineering technologies for planting industry

对象 Object	技术 Technology	技术描述及减排效果 Technology introduction and reduction rate of N and P run off load
水稻 Rice	增碳减氮+节水灌溉	炭基肥为核心技术,该肥料以有机、无机肥料为主要原料,添加了一定比例的生物炭,具有多方面的环保性能。通过基施炭基肥,能减少氮肥用量,结合间歇浅湿节水灌溉,可使氮磷减排率分别为 69.47%、52.11%。
小麦 Wheat	生物炭土壤改良剂+秸秆全量还田	施用以复合氨基酸、高分子材料、黄腐酸等多种物质合成的生物炭材料作为土壤改良剂,可减轻土壤中重金属等污染物毒害,增加土壤肥力。同时采取水稻秸秆全量还田和少(免)耕机旋耕整地。氮磷减排率分别达到 21%、25%
蔬菜、果树 Facility vegetable and orchard	膜下滴灌+水肥一体化	通过水肥一体化设施按蔬菜、果树生长的需求为根系提供肥料和水分,在地面覆盖黑色地膜,抑制杂草生长。

表 5 柘皋河流域种植业面源污染氮磷减排量

Table 5 N and P runoff reduction for planting industry in Zhgaohe watershed

种植类型 Planting type	减排率/% Pollution reduction rate		减排量/t Pollution reduction	
	N	P	N	P
	稻麦轮作 Rice-wheat rotation	45.2	38.6	392.1
蔬菜 Vegetable	100.0	100.0	29.2	9.2
果树 Fruit tree	100.0	100.0	8.1	0.7
合计 Total			429.5	23.5

3.3 柘皋河流域初步评价

本研究仅对采取相应治理措施后污染压力指数、种养循环,畜禽粪污利用、面源污染削减率、绿色农产品达标率、农村生活污染利用、技术集成与管理 7 项指标开展评价。由于调研数据有限,设定种养循环,畜禽粪污利用、绿色农产品达标率、农村生活污染利用 4 项指标值均达到标准权重值 0.1,技术集成与管理指标为标准权重的 1/2(0.1)。对于水

体污染压力指数,按未占用的氮的水环境容量的比率计算,且仅考虑氮指标,计算得出水体污染压力指数为 0.132,面源污染削减率指标为 0.052。通过对各指标值加和得到流域合成值为 0.684。可见,在 4 项指标均达到标准权重值时,流域合成值仍不高,这与本研究中选用相应的减排参数及水体本底污染有关。因而也表明流域的管理状况不佳,未能真正发挥技术组合间的整装联动作用,因此本研究中将技

术集成与管理指标值相应调低。今后应进一步增强减排措施的效果,并开展水体修复治理工程,完善环境治理的市场运作机制。

4 讨论

随着农业内部分工细化和农业生产规模化发展,种植业和养殖业间的天然养分链条在现代生产条件下被人为地打断,农业面源污染问题因氮磷养分的循环不畅变得日益严峻,农村生活污染逐渐成为部分地区面源污染的重要来源,构建循环型的农业清洁流域在此背景下应运而生^[43]。

流域内水环境容量是确定种养规模的前提,在一定环境容量内,水体可对流入其中的氮、磷等营养物质起到净化作用^[44]。已有研究利用水文水质模型模拟巢湖水环境容量,并计算出各小流域的年最大允许入湖量,其中柘皋河流域的总氮、总磷最大允许入湖量分别为 600 和 70 t^[38],与本研究所计算出的两者环境容量约为 80 t 不一致。究其原因:一方面是该研究依据巢湖水环境容量计算各小流域最大允许入湖量较高,故而计算出的总氮最大允许入湖量较高;另一方面,也与不同入湖流域的总氮、总磷负荷所占比例差别及不同湖区水质管理目标有关。柘皋河总磷入湖量在东部湖区居于首位,其余总磷重污染流域集中于西部湖区,且东部湖区对应的水质管理目标高于西部湖区,因而总磷 70 t 的最大允许入湖量与本研究计算结果相近。双桥河流域是与柘皋河流域相邻的一条小流域,该流域流经巢湖市区,主要污染源为城市生活污染,研究表明仅铵态氮尚存水环境容量(38.42 t),总磷已无环境容量^[45]。由于城市生活污水中磷养分较多,而农田径流中氮较多,造成了 2 个流域氮、磷环境容量的差别。

实际入河量与环境容量之比可以反映流域内污染的严重程度。如在太湖流域常州和宜兴市的农业污染压力研究表明:大多数乡镇的农业面源氮、磷污染量已经超出了水环境容量,部分地区污染压力值高于 3^[46]。运用 SWAT 模型和水质模型模拟浙江省苕溪流域不同子流域的水环境容量与面源污染排放量,结果表明流域内污染压力总体较高,总氮的压力值超过 2^[47]。本研究中计算出的氮现状污染压力值同样高于 2,而磷的污染压力值低于 1。由于太湖流域、苕溪流域的生活污染相对较为严重,在苕溪流域养殖源氮、磷产生量为种植源的 5~10 倍,使得生

活和养殖源磷污染比重升高。从巢湖面源污染来源结构来看,源于生活和养殖业的磷入湖量占总入湖量的 50%^[48],因而以种植业占优势地位的柘皋河流域磷污染压力相应较低。

开展“种植-养殖-农村生活”内部的养分循环模式可以有效减轻污染压力,但是仍需要通过加强流域环境管理,引入市场化运行机制。除本研究提到的第三方运营机制外,还可通过加强园区建设和综合运用配额、税费、补贴等政策和经济手段,为循环产业链条的发展创造必要的硬件条件和适宜的外部环境^[49-50]。今后研究在考虑水环境容量限制的基础上,也应考虑土地承载力以优化流域内种养比例,从而维持高水平的养分循环率^[51]。

5 政策建议

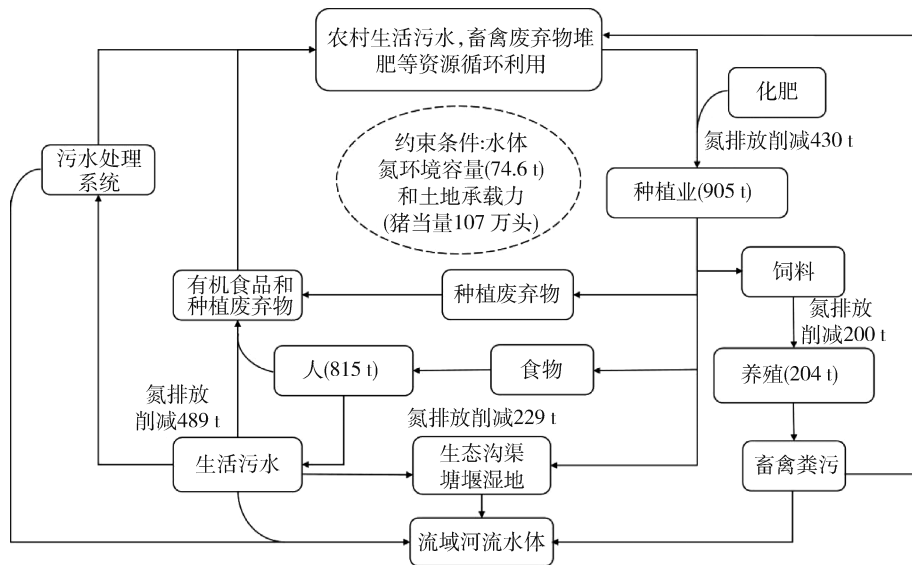
循环型农业清洁流域建设应以“山水林田湖草沙”思想为统领,促进流域内农业生产与生态环境的良性循环。在不突破水环境容量和粪污土地承载力的前提下实施种植、养殖、农村生活各环节的面源污染减排措施,结合“种养生”循环链条将减排措施有机结合起来,实现流域内养分资源的循环利用和污染排放量降低,最终达到降低环境污染压力的效果。具体的减排措施方案见图 2。循环型农业清洁流域建设首先要考虑水环境容量,并根据土地承载力限定流域内养殖规模。由于本流域磷环境容量空间较为充足,因而面源污染减排方案主要针对氮的减排措施。在图中构建的循环链条中,通过农村生活污水处理、畜禽粪污堆肥等可以大幅削减排放量,分别达到 489 和 200 t。种植业的氮排放量最高,达到 905 t,通过削减 430 t 即可实现种植业减排目标。今后宜加强流域内部氮养分由种植业向养殖业和农村生活环节的流动,以减少循环系统外部养分输入。也应加强生态沟渠的建设,可以进一步削减 229 t。

具体建议如下:

首先,要依靠市场的力量开展治理,与第三方市场主体签订合同,明确第三方的工作任务。主要包括:加强对流域内关键水质断面进行水质监测,确定环境敏感区域,制定面源污染防控方案,提供清洁环保技术指导,并监督技术的实施,提出发放生态补偿资金建议。参照与本流域条件相似的太湖流域的研究,可根据财力按 700~2 700 Yuan/hm² 补贴采用清洁种植技术的农田^[52]。优化养殖业的空间布

局,根据稻麦轮作农田基于氮估算的畜禽粪污土地承载力推荐值(猪当量 $34.5 \text{ 头}/\text{hm}^2$)^[51],可计

算出柘皋河流域的土地承载力为猪当量 107 万头(图 2)。



方案改编自 Rosemarin 等^[50]。

The scheme is adapted from Rosemarin et al. ^[50].

图 2 柘皋河循环型农业清洁流域建设方案

Fig. 2 Construction scheme of circular agricultural clean watershed for Zhegaohe watershed

其次,要加强流域基础设施建设,在面源污染敏感区域修建能有效削减氮磷径流的塘堰湿地和生态沟渠系统;开展高标准农田建设,完善田间路网和管线铺设,方便田间灌溉和有机肥的施用;开展农村生活污水处理厂及管网建设,并同农田灌溉管网有效衔接,能将处理达标后的生活污水用于养分循环利用;发展生态农业、有机农业等标准化农业,推动水肥一体化、减肥减药、精准施肥等环保技术的应用,为养殖业产生的有机肥资源提供消纳场所。

最后,加大对养殖业污染治理力度,按照土地承载力严格控制养殖规模,引导养殖业规模化发展。推广节水、节料等清洁养殖工艺和干清粪、微生物发酵等实用技术,实现源头减少粪污总量。配套建设前段处理设施、厌氧消化设施、厌氧消化剩余物利用设施等,考虑有机肥最佳施用半径建设废弃物资源化中心。加大对于有机肥施用机械和还田技术的研究,发展有机肥施用专业合作组织,推动有机肥还田利用。

致谢

感谢江苏省农业科学院杨林章研究员对农业清洁流域建设思路的重要建议。

参考文献 References

- [1] 张维理, 冀宏杰, Kolbe H, 徐爱国. 中国农业面源污染形势估计及控制对策 II. 欧美国家农业面源污染状况及控制[J]. 中国农业科学, 2004, 37(7): 1018-1025
Zhang W L, Ji H J, Kolbe H, Xu A G. Estimation of agricultural non-point source pollution in China and the alleviating strategies II. Status of agricultural non-point source pollution and the alleviating strategies in European and American countries [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(7): 1018-1025 (in Chinese)
- [2] 马林, 卢洁, 赵浩, 柏兆海, 胡春胜. 中国硝酸盐脆弱区划分与面源污染阻控[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(11): 2387-2391
Ma L, Lu J, Zhao H, Bai Z H, Hu C S. Nitrate vulnerable zones and strategies of non-point pollution mitigation in China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(11): 2387-2391 (in Chinese)
- [3] 农业农村部. 农业部关于打好农业面源污染防治攻坚战的意见[EB/OL]. (2020-10-30). http://jiuban.moa.gov.cn/zwillm/zwdt/201504/t20150413_4524372.htm
Ministry of Agriculture and Rural Affairs. Implementation suggestions of Ministry of Agriculture on taking solid action to battle prevention and control of non-point source pollution [EB/OL]. (2020-10-30). http://jiuban.moa.gov.cn/zwillm/zwdt/201504/t20150413_4524372.htm (in Chinese)

- [4] 农业农村部. 农业部关于印发《到2020年化肥使用量零增长行动方案》和《到2020年农药使用量零增长行动方案》的通知[EB/OL]. (2020-10-30). http://www.moa.gov.cn/nybgb/2015/san/201711/t20171129_5923401.htm
Ministry of Agriculture and Rural Affairs. Notice of Ministry of Agriculture on issuing zero-growth action plan of chemical fertilizer use until 2020 and zero-growth action plan of pesticide use until 2020[EB/OL]. (2020-10-30). http://www.moa.gov.cn/nybgb/2015/san/201711/t20171129_5923401.htm (in Chinese)
- [5] 侯彦林, 周永娟, 李红英, 赵慧明. 中国农田氮面源污染研究: I 污染类型区划和分省污染现状分析[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4): 1271-1276
Hou Y L, Zhou Y J, Li H Y, Zhao H M. Nitrogen non-point field pollution in China: I Regionalization of pollution types and pollution analysis in different provinces[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(4): 1271-1276 (in Chinese)
- [6] 杨林章, 冯彦房, 施卫明, 薛利红, 王慎强, 宋祥甫, 常志州. 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
Yang L Z, Feng Y F, Shi W M, Xue L H, Wang S Q, Song X F, Chang Z Z. Review of the advances and development trends in agricultural non-point source pollution control in China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(1): 96-101 (in Chinese)
- [7] 董蓓蓓, 马淑花, 曹宏斌, 张懿. 我国农田总氮流失影响因素分析[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(10): 2040-2045
Dong B B, Ma S H, Cao H B, Zhang Y. Investigations into the farmland total nitrogen loss in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(10): 2040-2045 (in Chinese)
- [8] Mockler E M, Shahumyan H, Williams B, Bruen M. Loose one-way coupling of land use and nutrient emission models to assess effects of regional development scenarios on catchment water quality[J]. *Environment Modeling Assessment*, 2020, 25(4): 591-607
- [9] 耿润哲, 殷培红, 周丽丽, 王萌. 关于农业面源污染物入河系数测算技术路线与关键方法的探讨[J]. 环境与可持续发展, 2019, 44(2): 26-30
Geng R Z, Yin P H, Zhou L L, Wang M. Review: Assessment and calculation for the pass through rate of agricultural diffuse sources pollution in national scale[J]. *Environment and Sustainable Development*, 2019, 44(2): 26-30 (in Chinese)
- [10] Chen X, Wang Y H, Cai Z C, Wu C B, Ye C. Effects of land-use and land-cover change on nitrogen transport in northern Taihu basin, China during 1990 - 2017[J]. *Sustainability*, 2020, 12(9): 3895
- [11] Huang J L, Li Q S, Huang L, Zhang Z F, Mu J L, Huang Y L. Watershed-scale evaluation for land-based nonpoint source nutrients management in the Bohai Sea Bay, China[J]. *Ocean & Coastal management*, 2013, 71: 314-325
- [12] 殷培红, 耿润哲, 裴晓菲, 王萌, 杨生光, 周丽丽. 以水环境质量改善为核心建立监督指导农业面源污染治理制度框架[J]. 环境与可持续发展, 2019, 44(2): 10-15
Yin P H, Geng R Z, Pei X F, Wang M, Yang S G, Zhou L L. Taking the improvement of water environment quality as the core, establishing an institutional framework for supervising and guiding agricultural non-point source pollution control[J]. *Environment and Sustainable Development*, 2019, 44(2): 10-15 (in Chinese)
- [13] 陈仕奇, 龙翼, 严冬春, 高明, 黎嘉成, 徐国鑫, 黄荣. 三峡库区石盘丘小流域氮磷输出形态及流失通量[J]. 环境科学, 2020, 41(3): 1276-1285
Chen S Q, Long Y, Yan D C, Gao M, Li J C, Xu G X, Huang R. Characteristics of nitrogen and phosphorus output and loss flux in the Shipanqiu watershed, Three Gorges Reservoir area[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(3): 1276-1285 (in Chinese)
- [14] 胡文慧, 李光永, 郭亚洁, 贾云茂. 汾河灌区农业面源污染经验统计模型的构建与验证[J]. 中国农业大学学报, 2015, 20(2): 207-215
Hu W H, Li G Y, Guo Y J, Jia Y M. Construction and verification of an empirical model for agricultural nonpoint source pollution in the Fenhe irrigation district[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2015, 20(2): 207-215 (in Chinese)
- [15] 罗玉, 肖尧, 张晓旭, 孟祥琪. 抚仙湖-星云湖流域氮、磷污染防治对策研究: 以2000—2015年数据为例[J]. 环境保护科学, 2020, 46(1): 106-112, 161
Luo Y, Xiao Y, Zhang X X, Meng X Q. The countermeasures of nitrogen and phosphorus pollution prevention and control in the watershed of Fuxian Lake and Xingyun Lake: Based on the data from 2000 - 2015[J]. *Environmental Protection Science*, 2020, 46(1): 106-112, 161 (in Chinese)
- [16] 张平, 刘云慧, 肖禾, 宇振荣. 基于SWAT模型的北京密云水库沿湖区氮磷流失风险分区[J]. 中国农业大学学报, 2011, 16(3): 53-59
Zhang P, Liu Y H, Xiao H, Yu Z R. Identification of the risk area of nitrogen and phosphorus loss at lakeshore of Miyun Reservoir by using SWAT model[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2011, 16(3): 53-59 (in Chinese)
- [17] 王丽华, 吴垠, 杨善洁. 新常态下生态清洁小流域建设现状及对策[J]. 环境与发展, 2018, 30(12): 195-196
Wang L H, Wu Y, Yang S J. Current situation and countermeasures of ecological clean small watershed construction under the new normal[J]. *Environment and Sustainable Development*, 2018, 30(12): 195-196 (in Chinese)
- [18] 严冬春. 创新小流域建设技术 凝练绿色农业发展模式[J]. 科技成果管理与研究, 2018(5): 78-80
Yan D C. Technology innovation of constructing small watershed and put forward green agricultural development

- mode [J]. *Management and Research on Scientific & Technological Achievements*, 2018(5): 78-80 (in Chinese)
- [19] 朱永青, 崔云霞, 夏梦茹, 李伟迪, 徐璐, 曹炜琦, 王国祥. 平原河网农业复合污染区清洁小流域建设及评价指标体系研究[J]. *环境生态学*, 2020, 2(7): 13-20
- Zhu Y Q, Cui Y X, Xia M R, Li W D, Xu L, Cao W Q, Wang G X. Study on the construction and evaluation index system of clean small watershed in agricultural complex contaminated area of plain river network[J]. *Environmental Ecology*, 2020, 2(7): 13-20 (in Chinese)
- [20] 杨林章, 施卫明, 薛利红, 宋祥甫, 王慎强, 常志州. 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 L Z, Shi W M, Xue L H, Song X F, Wang S Q, Chang Z Z. ‘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 (in Chinese)
- [21] Zhang T, Yang Y H, Ni J P, Xie D T. Construction of an integrated technology system for control agricultural non-point source pollution in the Three Gorges Reservoir areas [J]. *Agriculture, Ecosystem & Environment*, 2020, 295
- [22] Zhang T, Yang Y H, Ni J P, Xie D T. Best management practices for agricultural non-point source pollution in a small watershed based on the AnnAGNPS model[J]. *Soil Use and Management*, 2020, 36(1): 45-57
- [23] 席运官, 刘明庆, 李德波. 南方丘陵地区“猪-沼-果-鱼”生产系统农业面源污染控制技术规范[J]. *广东农业科学*, 2014, 41(11): 177-180
- Xi Y G, Liu M Q, Li D B. Technical specification of pig-biogas-fruit-fish producing system for agricultural non-point source pollution control in hilly area of South China [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2014, 41(11): 177-180 (in Chinese)
- [24] 孙笑蕾, 胡正义, 刘莉, 李松炎, 刘福来. 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 X L, Hu Z Y, Liu L, Li S Y, Liu F L. 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 (in Chinese)
- [25] 张弛, 席运官, 肖兴基. 有机农业推动绿色发展与面源污染防控[J]. *世界环境*, 2018(4): 36-39
- Zhang C, Xi Y G, Xiao X J. Organic agriculture promotes green development and non-point source pollution prevention and control [J]. *World Environment*, 2018(4): 36-39 (in Chinese)
- [26] 翁伯琦, 雷锦桂, 江枝和, 林代炎. 集约化畜牧业污染现状分析及资源化循环利用对策思考[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(S1): 294-299
- Weng B Q, Lei J G, Jiang Z H, Lin D Y. Present situation analysis of intensive livestock pollution and countermeasures consideration of resource recycling [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(S1): 294-299 (in Chinese)
- [27] Liu L, Liu A, Guan Y T. Approach to estimating non-point pollutant load removal rates based on water environmental capacity: A case study in Shenzhen[J]. *Journal of Southeast University: English Edition*, 2014, 30(2): 143-149
- [28] 严化文. 总投资约 30 亿元, 柘皋河流域综合项目启动[EB/OL]. (2020-10-30). <http://hch.ahwang.cn/chnews/20200506/2050473.html>
- Yan H W. With total investment as RMB 3 billion yuan, the Zhegaohe watershed comprehensive project was launched[EB/OL]. (2020-10-30). <http://hch.ahwang.cn/chnews/20200506/2050473.html> (in Chinese)
- [29] 水体污染控制与治理重大专项办公室, 国家长江生态环境保护修复联合研究中心. 水专项支撑长江生态环境保护修复推荐技术手册(第一册)流域面源污染治理分册[EB/OL]. (2020-10-30). <http://sthjt.hubei.gov.cn/hjsj/ztlz/hbsh/hbsyjs/201908/P020191109496324784345.pdf>
- National Program Management Office for Water Pollution Control and Treatment, National Joint Research Centre for Yangtze River Conservation. Nonpoint pollution control in watershed, manual of recomondation technologies in terms of protection and repaire of the eco-environment of Yangtze River supported by Project of Water Pollution Control and Management 1[EB/OL]. (2020-10-30). <http://sthjt.hubei.gov.cn/hjsj/ztlz/hbsh/hbsyjs/201908/P020191109496324784345.pdf> (in Chinese)
- [30] 焦雯璐, 闵庆文, 成升魁, 袁正, 李静, 戴忱. 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 W J, Min Q W, Cheng S K, Yuan Z, Li J, Dai C. 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)
- [31] 赵凤霞, 王正平, 宋学立, 朱景伟, 孙卉卉, 高相彬, 王海涛. 我国与欧盟主要农产品的重金属的限量标准比较[J]. *贵州农业科学*, 2014, 42(3): 161-166
- Zhao F X, Wang Z P, Song X L, Zhu J W, Sun H H, Gao X B, Wang H T. Comparison of heavy metal maximum residue limit standard in main agricultural products between China and EU[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2014, 42(3): 161-166 (in Chinese)
- [32] 肖青亮, 郑诗樟, 牛德奎. 施肥对蔬菜累积硝酸盐影响的研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2007, 35(6): 1732-1734, 1791
- Xiao Q L, Zheng S Z, Niu D K. Effect of fertilization on the nitrate accumulation in vegetable crop[J]. *Journal of Anhui*

- Agricultural Sciences*, 2007, 35(6): 1732-1734, 1791 (in Chinese)
- [33] 戴曹培. 优化施肥对农业面源污染控制研究: 以巢湖流域麦稻轮作为例[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2017
- Dai C P. Research on control of agricultural non-point source pollution by optimized fertilization-by the wheat and rice crop rotation in Chaohu basin [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2017 (in Chinese)
- [34] 王方浩, 马文奇, 窦争霞, 马林, 刘小利, 许俊香, 张福锁. 中国畜禽粪便产生量估算及环境效益[J]. 中国环境科学, 2006, 26(5): 614-617
- Wang F H, Ma W Q, Dou Z X, Ma L, Liu X L, Xu J X, Zhang F S. The estimation of the production amount of animal manure and its environmental effects in China [J]. *China Environmental Science*, 2006, 26(5): 614-617 (in Chinese)
- [35] 朱建春, 张增强, 樊志民, 李荣华. 中国畜禽粪便的能源潜力与氮磷耕地负荷及总量控制[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(3): 435-445
- Zhu J C, Zhang Z Q, Fan Z M, Li R H. Biogas potential, cropland load and total amount control of animal manure in China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(3): 435-445 (in Chinese)
- [36] 王文林, 胡孟春, 唐晓燕. 太湖流域农村生活污水产排污系数测算[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(6): 616-621
- Wang W L, Hu M C, Tang X Y. Estimation of sewage production and discharge coefficients of rural areas in Taihu lake basin [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment Science*, 2010, 26(6): 616-621 (in Chinese)
- [37] 彭兆弟, 李胜生, 刘庄, 杨汉培, 李维新, 庄巍, 李文静, 杭小帅. 太湖流域跨界区农业面源污染特征[J]. 生态与农村环境学报, 2016, 32(3): 458-465
- Peng Z D, Li S S, Liu Z, Yang H P, Li W X, Zhuang W, Li W J, Hang X S. Characteristics of transboundary non-point source agricultural pollution in the Taihu vally [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2016, 32(3): 458-465 (in Chinese)
- [38] 王鹏腾, 辛伟光, 刘改妮, 孟婷婷, 季海波, 李英汉, 许杰玉, 冯梦南. 基于水环境容量的污染物总量控制方案: 以合肥市巢湖流域为例[C]//2014 中国环境科学学会学术年会论文集. 成都: 中国环境科学学会, 2014: 666-672
- Wang P T, Xin W G, Liu G N, Meng T T, Ji H B, Li Y H, Xu J Y, Feng M N. Plan of total water pollution quantity control based on water environmental capacity: A case study of Chaohu Watershed in Hefei [C]. In: *Proceedings of the Chinese Society for Environmental Sciences Annual Conference 2014*. Chengdu: Chinese Society for Environmental Sciences, 2014: 666-672 (in Chinese)
- [39] 丁云霄. 巢湖主要入湖河流(南淝河、柘皋河、丰乐河、杭埠河)生态系统健康诊断[D]. 合肥: 安徽大学, 2018
- Ding Y X. Ecosystem health diagnosis of rivers (Nanfei River, Zhagao River, Fengle River, Hangbu River) into the Chaohu Lake [D]. Hefei: Anhui University, 2018 (in Chinese)
- [40] 李晓连. 基于水环境容量的辽河铁岭段污染负荷总量分配 [D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2016
- Li X L. Total pollution load distribution of Liao River in Tieling based on water environment capacity [D]. Shenyang: Shenyang Sci-Tech University, 2016 (in Chinese)
- [41] 海热提, 王文兴. 生态环境评价、规划与管理[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2004
- Haireti T, Wang W X. *Assessment, Planning and Management of Ecological Environment* [M]. Beijing: China Environment Science Press, 2004 (in Chinese)
- [42] 罗缙, 逢勇, 罗清吉, 林颖. 太湖流域平原河网区往复流河道水环境容量研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2004, 32(2): 144-146
- Luo J, Pang Y, Luo Q J, Lin Y. Study on water environment capacity for reversing current channels in plain river network region in Taihu Lake Basin [J]. *Journal of Hehai University: Natural Sciences*, 2004, 32(2): 144-146 (in Chinese)
- [43] 赵立欣, 孟海波, 沈玉君, 丁京涛, 张曦. 中国北方平原地区种养循环农业现状调研与发展分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(18): 1-10
- Zhao L X, Meng H B, Shen Y J, Ding J T, Zhang X. Investigation and development analysis of planting-breeding circulating agriculture ecosystem system in northern plains in China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(18): 1-10 (in Chinese)
- [44] 孙宇, 张永春. 利用河流的环境容量控制太湖流域农村面源污染[J]. 中国水土保持, 2005(10): 39-41
- Sun Y, Zhang Y C. Controlling nonpoint source pollution in rural region in Taihu Basin based on river environment capacity [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2005(10): 39-41
- [45] 花莉, 曹立帆, 张浏, 党海迪. 双桥河流域水环境容量及污染负荷分配研究[J]. 陕西科技大学学报, 2019, 37(1): 31-36
- Hua L, Cao L F, Zhang L, Dang H D. Study on water environment capacity and pollution load distribution in Shuangqiao River Basin [J]. *Journal of Shanxi University of Science & Technology*, 2019, 37(1): 31-36 (in Chinese)
- [46] 李静, 闵庆文, 李子君, 焦文珺, 袁正, 伦飞. 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
- Li J, Min Q W, Li Z J, Jiao W J, Yuan Z, Lun F. Agricultural pollution pressure in the Taihu Lake Basin [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(3): 348-355 (in Chinese)
- [47] 朱瑶. 苕溪流域非点源污染 SWAT 与 WASP 耦合模拟及水环境容量研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014
- Zhu R. The research on water environmental capacity and non-point source pollution simulation of Tiaoxi watershed using SWAT and WASP model [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014 (in Chinese)
- [48] 谭茜. 环巢湖支流污染结构及治理方向[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(17): 77-82

- Tan Q. Pollution structure and pollution control ideas of Chaohu Lake tributaries[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2016, 44(17): 77-82 (in Chinese)
- [49] 耿兵, 刘雪, 叶婧, 李红娜, 朱昌雄. 加快发展农业循环产业, 促进农业面源污染治理[J]. *中国农业科技导报*, 2014, 16(2): 9-13
- Geng B, Liu X, Ye J, Li H N, Zhu C X. Accelerating the development of circulatory agriculture and improving control of agricultural non-point source pollution [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2014, 16(2): 9-13 (in Chinese)
- [50] Rosemarin A, Macura B, Carolus J, Barquet K, Ek F, Järnberg L, Lorick D, Johannesdottir S, Pedersen S M, Koskiaho J, Haddaway N R, Okruszko T. Circular nutrient solutions for agriculture and wastewater-a review of technologies and practices [J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2020, 45: 78-91
- [51] 农业农村部. 农业部办公厅关于印发《畜禽粪污土地承载力测算技术指南》的通知[EB/OL]. (2020-10-30). http://www.moa.gov.cn/nybg/2018/201802/201805/t20180515_6142139.htm
- Ministry of Agriculture and Rural Affairs. Notice of Ministry of Agriculture on issuing technology guidelines of calculating land bearing capacity of livestock and poultry manure[EB/OL]. (2020-10-30). http://www.moa.gov.cn/nybg/2018/201802/201805/t20180515_6142139.htm
- [52] 王芊, 武永峰, 罗良国. 基于氮流失控制的种植结构调整与配套生态补偿措施:以竺山湾小流域为例[J]. *土壤学报*, 2017, 54(1): 273-280
- Wang Q, Wu Y F, LUO L G. N-Loss-Control-Oriented readjustment of planting structure and its matching ecological compensation measures: A case study of Zhushanwan catchment[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(1): 273-280 (in Chinese)

责任编辑: 杨爱东