DOI 10.15302/J-SSCAE-2024.06.016

长江三角洲地区农业面源污染“三水”协同治理体系构建研究

王超[1,2,3]，王沛芳[1,2,3*]，钱进[1,2,3]，胡斌[1,2,3]，尹金宝[1,2]

（1. 河海大学环境学院，南京 210098；2. 浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室，南京 210098；
3. 江苏省农业农村污染防控与治理工程研究中心，南京 210098）

摘要：农业是长江三角洲（长三角）地区的重要产业，农业面源污染给长三角地区的水安全、粮食安全和生态安全带来严峻挑战，亟需以水资源、水环境和水生态（“三水”）为依托，统筹推进面源污染协同治理，助力长三角一体化高质量发展。本文系统分析了长三角地区农业面源污染治理面临的挑战，包括农业用水量大且循环利用率低、农业面源污染成分复杂且产生和输送过程多变、区域种植养殖（种养）交互和污染排放叠加、水质改善与水量和水生态协同缺失、面源污染治理责任主体不明且工程长效运维困难等。研究提出了构建长三角地区农业面源污染协同治理体系的建议：构建农田区域循环湿地系统，建立“水肥药”资源的循环利用工程体系；发挥灌排工程系统的作用，实现农田污染物逐级截留净化与节水减污；统筹种养水肥综合利用，构建大农业一体化面源近零排放模式；融合“三水”共治，形成基于农业面源协同治理的和美乡村建设技术标准与管理范式；搭建共治共管平台，健全长三角地区“三水”综合管控体系。

关键词：长江三角洲；农业面源污染；“三水”共治；水肥循环利用；逐级截留净化

中图分类号：X323；X52　　**文献标识码：**A

Construction of Synergistic Governance System for Agricultural Non-point Source Pollution in the Yangtze River Delta

Wang Chao[1,2,3], Wang Peifang[1,2,3*], Qian Jin[1,2,3], Hu Bin[1,2,3], Yin Jinbao[1,2]

(1. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Nanjing 210098, China; 3. Jiangsu Provincial Engineering Research Center for Prevention and Control of Agricultural and Rural Pollution, Nanjing 210098, China)

Abstract: Agriculture is an important industry in the Yangtze River Delta. Agricultural non-point source pollution has brought severe challenges to water security, food security, and ecological safety in the Yangtze River Delta; therefore, it is urgent to synergistically manage agricultural non-point source pollution through co-governance of water resource protection, water pollution control, and aquatic ecosystem restoration, thereby safeguarding the high-quality and integrated development of the Yangtze River Delta. This study systematically analyzes the challenges faced in the management of agricultural non-point source pollution in the region: large agricultural water consumption and low recycling rate; complex composition of agricultural non-point source pollution and variable

收稿日期：2024-07-22；**修回日期：**2024-09-10

通讯作者：*王沛芳，河海大学环境学院教授，研究方向为农田灌排系统生态工程；E-mail: pfwang2005@hhu.edu.cn

资助项目：中国工程院咨询项目“长三角区域‘三水’融合共治战略研究”(2023-XZ-28)

本刊网址：www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

production and transportation process; mutual interaction of regional planting and breeding with superimposed pollution emissions; lack of coordination between water quality improvement, water quantity, and aquatic ecosystem; unclear responsibility of non-point source pollution governance entities; and difficulties in long-term operation and maintenance of engineering projects. The study proposes the following suggestions for the system construction aimed at synergistic governance of agricultural non-point source pollution in the Yangtze River Delta: (1) constructing a regional circular wetland system for farmland to facilitate the recycling of water, fertilizer, and pesticides; (2) leveraging irrigation and drainage systems to realize stepwise interception and purification of farmland pollutants; (3) coordinating the integrated use of water and fertilizer for planting and breeding to achieve near-zero emission of non-point source pollutants; (4) integrating the governance of water resource protection, water pollution control, and aquatic ecosystem restoration to establish technical standards and management paradigms; and (5) establishing a platform for co-governance to enhance the comprehensive control system for water resources, environment, and ecology in the Yangtze River Delta.
Keywords: Yangtze River Delta; agricultural non-point source pollution; coordination of water resources, environment, and ecology; water and fertilizer recycling; stepwise interception and purification

一、前言

长江三角洲（长三角）地区包括上海市、江苏省、浙江省、安徽省，总面积为 3.58×10^5 km^2。2023 年，长三角地区的国内生产总值为 30.5 万亿元[1]，以不到 4% 的国土面积产出了我国近 1/4 的经济总量，在国家现代化建设大局和全方位开放格局中具有举足轻重的战略地位[2]。长三角一体化发展已上升为国家战略，为长三角地区发展带来了重要发展机遇。农业是长三角地区的重要产业，然而，农业用水占比大、循环利用率低，不仅易造成水资源浪费，还会带来严重的农业面源污染。近年来，我国重视农业面源污染治理，开展了丰富的研究和实践。《“十四五”推进农业农村现代化规划的通知》要求，到 2025 年，农村人居环境整体提升，农业面源污染得到有效遏制，化肥、农药使用量持续减少。党的二十大报告指出，深入推进环境污染防治，统筹水资源、水环境、水生态“三水”治理，推动重要江河湖库生态保护治理。2024 年，中央一号文件指出，持续打好农业农村污染治理攻坚战，一体化推进乡村生态保护修复；扎实推进化肥农药减量增效，推广种养循环模式，整县推进农业面源污染综合防治。

目前，我国长三角地区农业面源污染的治理工作取得了一定成效，但由于农业种植业种类多样、面源产出规律复杂、传统污染物与新污染物交织复合，治理难度大，取得的效果不理想[3]。具体表现在：一是农业耗水量大，水资源利用占比高，挤占了工业和其他行业发展对水资源的需求，制约着长三角地区经济社会的高质量可持续发展；二是农业面源污染来源复杂，作物种类与水肥需求多样，污染负荷量质随机且产输过程多变，单项技术应用难有成效；三是区域种植养殖（种养）交互，氮、磷与新污染物成分复合，污染排放叠加，治理难度增大；四是农业面源污染治理当前还集中在污染物去除的水环境治理方面，缺少与灌排水量及沟渠生态系统的协同；五是区域农业面源管控治理的责任主体不清晰，跨部门协同管理的机制尚不健全，造成治理工程的长效运行得不到保障。因此，长三角地区农业面源污染的协同治理需从农田排水循环利用的水资源节约入手，加强区域种养一体化“水肥药”的综合利用，实现面源负荷的有效降低和近零排放；通过完善农田灌排系统和沟道系统生态逐级截留净化，实现“三水”融合，形成服务于农业面源协同治理的体制机制，达到治理的长效维持。

本文重点开展长三角地区农业面源的问题分析，针对性地提出面源污染协同治理的技术措施、工程体系和管理策略，为长三角地区高质量发展背景下的水安全研究提供基础参考。

二、长三角地区农业面源污染治理的现状及面临的挑战

（一）农业用水量和排污量大，节水减排仍有较大提升空间

1. 本地水资源量少，农业用水量占比高

长三角地区的本地水资源量为 1.984×10^{11} m^3，过境水资源量为 8.792×10^{11} m^3。过境水资源是本地水资源量的 4.4 倍，造成水资源开发利用成本高，增加了水体污染排放负荷，给生态环境和经济发展带来显著压力[4]。受传统水稻种植方式的影响，长三角地区的农业用水量大。《2023 年中国水资源公报》的数据显示，长三角地区的农业用水量为

4.75×10^{10} m^3，约占全国农业用水总量的12.9%，而长三角地区的水资源量仅约为全国水资源总量的7.3%[5]。加之，农田排水循环利用工程体系和政策机制建设有待提高，潜在的水资源浪费和面源污染压力增大。

2. 农业面源污染排放量大，负荷占比高，循环利用率低

由图1可见，在长三角地区的农业面源污染中，化学需氧量（COD）、氨氮（NH_3-N）、总氮（TN）、总磷（TP）的排放量分别为1.241×10^6 t、3.5×10^4 t、2.17×10^5 t、3.2×10^4 t，分别占全国农业源排放总量的11.6%、16.1%、15.3%、15.1%[6]，农业面源污染的排放量大、占比偏高。长三角地区的种植业、畜禽养殖业的污染物排放占比较高。其中，浙江省的种植业污染物排放量在长三角地区的占比最高，NH_3-N、TN、TP的排放分别占本省农业面源污染的71.2%、84.0%、81.3%[4]。在太湖望虞河流域的污染负荷中，水田排水贡献了COD总量的46.7%、NH_3-N总量的82.3%和TN的53.2%，畜禽养殖贡献了TP总量的58.9%[7]；在巢湖区域的污染负荷中，农田面源对NH_3-N、TN的影响分别达43.7%、50.3%[8]。农田灌溉水的有效利用率与国际先进水平还有较大差距。2023年，江苏省、浙江省、安徽省、上海市的农田灌溉水有效利用系数分别为0.622、0.612、0.572、0.74。长三角地区的农田灌溉排水回用制度还不完善，也是造成农业用水量大及污染排放占比高的重要原因。

（二）农业面源污染成分复杂且产生和输送过程多变，单项治理技术应用难达成效

1. 农业面源污染成分复杂，氮、磷与新污染物复合污染增加了治理难度

长三角地区地形复杂，农作物种植类型多，农业面源污染物种类多、负荷高、累积性强，面源污染产输时空异质，单点、单项的治理措施很难达到控制和改善效果。2023年，长三角地区的农作物总播种面积为1.894×10^7 hm^2，茶园和果园的种植面积为1.105×10^6 hm^2，蔬菜的种植面积为3.029×10^6 hm^2[1]。

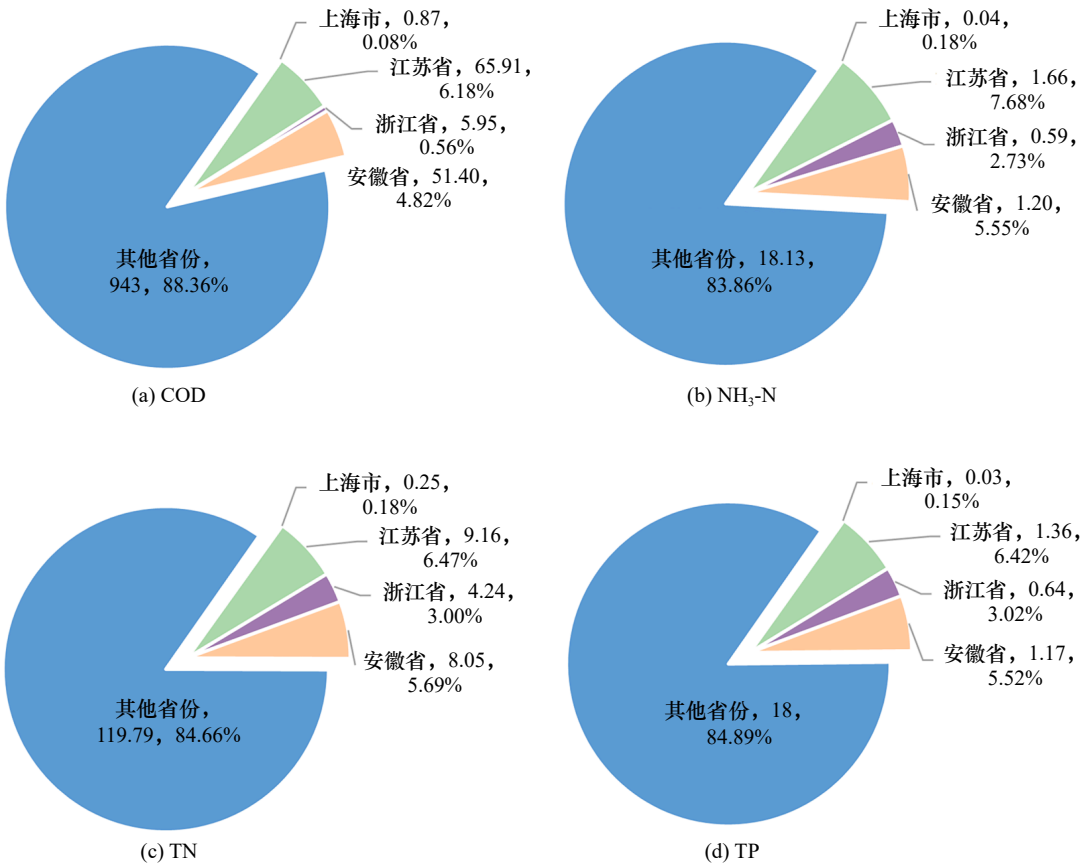

图1　长三角地区农业面源污染物的排放量及占比情况（单位：$\times10^4$ t）

长三角地区每年的化肥施用量为6.2×10^6 t、农药使用量为1.7×10^5 t，分别占全国总用量的12.3%、14.2%[9]。农业面源污染对河湖的富营养化贡献度约为23%~59.2%，对河湖的污染负荷影响显著[10]。过量使用化肥、农药等，在引起河湖水体富营养化的同时，也带来了各类新污染物的复合污染。太湖和长江下游片区的主要农药污染物为滴滴涕和六六六；浙江省的河网以含氯农药为主，包括氯丹、九氯、六六六等[11]。在上海金山区某养殖场废水中检测到大量磺胺类、大环内酯类、四环素类等抗生素，其中磺胺类抗生素的浓度最高可达100 μg/L[12]。养殖业中的抗生素平均利用率仅为20%~30%，多余的抗生素会随粪便排出并流向农田或周围水体，引起复合污染，加大治理难度。

2. 农业面源污染产生和输送过程多变，污染负荷量质随机，单项治理难有成效

农业面源污染的产生和输送受气候条件、地形地貌、土地利用方式、农业管理措施等因素的影响，这些因素在时间和空间上高度变异，从而使污染负荷的预测和控制变得复杂[13]。长三角地区地形复杂、土地利用方式多样，农业面源污染特征差异化明显。例如，平原地区以农田为主，氮、磷流失较为严重；丘陵地区以土壤侵蚀为主，导致悬浮物和有机质的污染更为严重[14]。另外，长三角地区的农业活动频繁多样，施肥、灌溉、作物轮作等农田管理措施均会影响污染物的产出和输送过程[15]。近年来，农业面源污染的控制和治理主要从源头污染控制、肥料减施深施、过程拦截技术应用等方面开展[16,17]。由于农业面源污染成分复杂且产生和输送过程多变，针对提高氮磷去除率的单项治理技术难以取得显著成效[18]；现有的治理技术尚未综合考虑“三水”的关系，仍需进一步努力以高效治理长三角地区的农业面源污染。

（三）种养综合利用模式尚未形成，“水肥药”多资源浪费与多源污染叠加

1. 水产养殖换排水污染负荷高且集中排放，现有处理方法占地大

有效利用养殖排水中的水、氮、磷等，有利于回收和利用多种资源，为农业生产提供水肥资源，构建区域一体化“鱼菜共生”“鱼果共生”等种养耦合模式[19]，进而从根本上降低长三角地区农业种植和养殖外排的面源负荷，实现面源氮、磷的高质利用和近零排放。长三角地区的淡水养殖产量为7.028×10^6 t，占全国淡水养殖总产量的22.08%[20]，排放的COD、NH_3-N、TN、TP分别为2.3×10^5 t、5000 kg、1.7×10^4 t、3000 kg，其中COD排放量已经超过区域内工业源的排放量，TP排放量更是达到工业源排放量的1.6倍[6]。长三角地区养殖池塘排水中的杀虫剂平均浓度为146.6 ng/L、杀菌剂平均浓度为62.6 ng/L、除草剂平均浓度为56 ng/L[21]。高浓度氮磷、农药、杀虫剂等污染物严重影响区域水生态环境。水产养殖废水处理技术主要有机械过滤等物理处理技术、臭氧氧化等化学处理技术和人工湿地等生物处理技术。近年来，长三角地区推广“生态沟渠→沉淀池→过滤坝→曝气池→过滤坝→生态净化池”的“三池两坝”水产养殖废水处理模式，取得了良好效果。但“三池两坝”模式的养殖废水处理设施所需面积较大，通常为鱼塘养殖总面积的6%~10%[22]，影响水产养殖的综合经济效益。

2. 农田面源与水产养殖污染叠加，种养结合体系不健全，治理难度加大

长三角地区的淡水养殖方式主要为池塘养殖，年养殖产量为4.978×10^6 t，占长三角地区淡水养殖总产量的70.8%[19]。未经有效处理的池塘养殖尾水进入河流和湖泊，造成了氮、磷污染，并与农田、化肥等污染物叠加，形成了多源污染和多污染源复合，加大了污染水体的治理难度，也成为形成农村黑臭水体的重要原因。近年来，长三角地区不断推广种植业和养殖业紧密衔接的结合模式，如稻渔综合种养，不仅可以促进农田生态系统物质循环利用和能量的多级流动，还有利于化肥和农药的减控使用[23]。但当前的种养结合模式还不够规范，仍有待大规模推广应用。

（四）水质改善与水量、水生态协同缺失，治理成效难维持

1. 农业面源污染去除方法多注重污染物减量，尚未结合灌排水量

长三角地区的农业面源污染治理，需综合考虑水资源节约利用、水环境质量改善和水生态系统良性3个方面，通过“三水”共治，实现水资源可持续利用、推动农业技术创新和生态农业实践。但当前长三角地区农业面源污染治理在控源减量和过程

拦截等技术应用中，污染物去除量与灌溉水量未有机结合，污染物沟道拦截去除与区域排水沟系统的生态净化能力未进行有效融合。我国农业面源污染去除关键技术取得了丰富的成果，如“田沟渠塘”综合防控技术体系、农业面源氮磷调控技术等[24]，并开展了部分示范应用，为我国农业面源污染治理提供了重要的技术支撑[25]。但当前农业面源污染的治理技术多关注面源污染的去除效率，适用范围往往受到限制。例如，滞留塘、植物过滤带、人工湿地等过程拦截技术对氮、磷的去除率分别为40%~50%、40%~90%[26,27]，表面流、潜流人工湿地对农药的平均去除率分别为67.8%、79%。灌排水量是农田污染物负荷量的主要影响因素，同时也会影响湿地等治理技术的进水量、流速、水深、停留时间等水文条件，进而改变污染物分布、氧化还原条件和迁移转化过程等。例如，微生物对湿地氮的去除贡献率可达60%~95%[28]，而水量和水深会显著影响微生物的群落分布，进而影响氮的去除效率。综上可知，现有农业面源污染治理技术普遍存在水量适用性限制，是农业面源污染治理存在的技术难题之一[13]。为提高农业面源污染的截留和去除效果，同时兼顾水资源循环利用需求、水环境及水生态系统的可持续发展，农业面源污染治理需要制定有效的灌排水量结合措施。

2. 农业面源污染治理目标多限于农田，区域结合及城乡融合能力不足

当前，长三角地区的农业面源污染防治多针对农田单方面，农田与养殖、农村生活、河湖等尚未融合，关联性不强。在农业和农村环境中，因缺乏区域统一规划，常年的连续环境监测点位不足、指标不连续，导致可利用的环境监测数据缺乏系统性和科学性[29,30]。因此，需要深化长三角地区的面源管理和治理模式，提高区域联防共治能力，系统规划农田、养殖、循环利用、生态沟渠、区域河湖、美丽乡村建设等。例如，注重产业上下游关系，整合“种植－养殖－粪污－天然气－有机肥－种植”等不同模式的闭路循环[31]；农田污染治理从单一因素驱动转变为全区域共治协同的系统化推进，为农业绿色发展提供高质量的技术支撑[32]；多方面提高农村的生活质量，融合城乡产业的上、中、下游关系，建设生态环境美、社会环境美、人文环境美、合理布局规划美和体制机制美的美丽乡村与美丽中国[33]。

（五）农业面源污染治理责任主体不明，工程长效运维困难

1. 农业面源污染治理的责任主体不明确，不同部门间缺乏协同机制

当前，在长三角地区农业面源污染治理中，农业管理部门、水利部门、环境保护部门之间缺乏有效的协同机制。农业管理部门主要关注农业生产和增产增收，水利部门多关注区域供水抗旱和排水防洪安全，生态环境保护部门则主要致力于农业面源污染监督和指导[34]，不同部门间的协同性不足。农业面源污染治理涉及大量的水环境数据和农业生产信息，而这些信息多分散在不同的部门，由于缺乏统一的管理和共享平台，收集整理难度大，造成用于环境治理的数据资料缺乏[29]。各部门在决策和执行过程中难以获取全面、准确的信息，限制了农业大数据的集成，导致农业面源污染治理的措施缺乏科学性和针对性。

2. 农业面源污染治理与工程运维管护主体不明、责任不清

农业面源污染治理工程涉及多个部门和利益方，包括农业部门、环境保护部门、水利部门、地方政府、农民等。农业面源污染治理与工程运维管护的责任主体不明晰、责任界定不明确，使治理工程项目的长效性得不到维护，成为当前治理工作中的难题。同时，农业面源污染协同治理涉及多学科交叉，需要专业的技术支持和高素质的运维团队，但治理工程技术支持、专业人才及费用的缺乏也制约了长三角地区农业面源污染治理的持续性。

三、长三角地区农业面源污染“三水”协同治理体系构建

为解决当前农业面源污染治理面临的农业用水量大且循环利用率低、农业面源污染成分复杂多变、种养污染交互叠加、水质改善与水量和水生态协同缺失、面源污染治理长效运维困难等挑战，本文构建了长三角地区农业面源污染协同治理体系（见图2），从“水肥药”循环利用、灌排系统截留净化与节水减污、种养一体化、协同治理标准与范式、共治共管平台等方面，实现区域“三水”协同共治，保障长三角地区的水安全、粮食安全和生态安全。

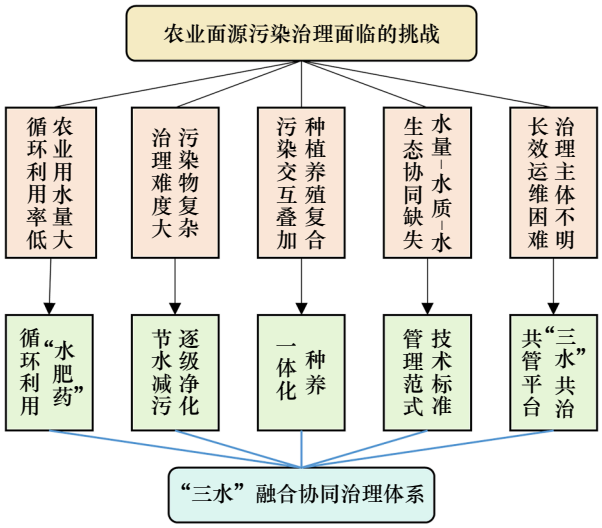

图2　长三角地区农业面源污染“三水”融合协同治理体系

（一）构建农田区域循环湿地系统，建立“水肥药”资源的循环利用工程体系

1. 科学规划和系统布局循环湿地

长三角地区的河浜、坑塘等洼陷结构众多，具有很强的调蓄能力，建议将其纳入农田灌排工程系统，发挥农田循环湿地的作用。循环湿地不仅可以有效净化排水中的污染物，改善水环境，还可以回收其中的养分用于促进农业生产，实现肥、药的循环利用，降低生产成本；拥有丰富的湿地动植物和微生物群落，具有恢复和增强生态系统服务功能的作用。利用长三角地区现有的坑塘、沟渠，结合邻近农田改造，因地制宜构建循环湿地，既能保证农业生产的可持续性，也有利于保护水体环境质量。

2. 构建区域“水肥药”资源循环利用工程体系

将循环湿地系统与灌排工程系统有机结合，形成以农田循环湿地为核心、融合种植和水产及畜禽养殖的“水肥药”多资源循环再利用工程体系。根据地理气候条件、农田灌溉面积等，优化循环湿地调蓄水量。循环湿地的水量调蓄循环利用可显著节约水资源，提高了农业用水效率，减轻区域水资源开发利用压力，有效保障长三角地区经济社会的综合发展。

（二）发挥灌排工程系统作用，实现农田污染物逐级截留净化与节水减污

1. 构建农田排水沟道逐级净污系统

为有效减轻和控制农业面源污染，长三角地区需加强农田和林地等农业种植灌溉排水工程的系统建设改造，发挥其在污染物截留和净化中的关键作用。建议通过优化设计和科学改造现有的灌排系统，综合运用生态沟渠、人工湿地和多种生态工程技术，统筹灌排工程的生态建设、高标准农田建设与农业面源污染治理，构建农业面源多级沟道截留和强化生物降解的污染物净化体系，实现农田排水中氮、磷等污染物的逐级截留与净化[35]。

2. 建设灌排工程智慧管理平台，实现区域水资源优化调控

建设灌排工程智慧管理平台，实时监测灌排系统和农田环境信息，自动采集作物生长数据，实现多源数据的可视化管理、作物需水预报模型和灌溉设备的远程控制。灌排工程智慧管理平台能为农田灌溉提供精准、智慧的管理方式，实施灌溉水量和灌水频次优化调控，进而提高灌溉和水资源利用效率，减少径流外排，控制区域面源污染的输出。

（三）统筹种养水肥综合利用，形成大农业一体化面源近零排放模式

1. 构建区域种养大农业一体化水肥资源循环利用体系

建议在长三角地区全面实施养殖业与种植业耦合的循环利用模式，通过整合种植、畜禽和水产养殖，形成互补互利的生态循环系统。例如，将种植区的排水经过湿地调蓄处理后用于再灌溉或养殖用水，种植区秸秆经过处理后作为饲料和肥料，畜禽粪便经必要处理后作为有机肥用于农作物生长等。结合“水肥药”协同高效施用、有机肥和生物农药等绿色产品研发等污染源头治理技术，从源头最大限度地减少面源污染，进一步推动水肥资源循环利用，实现资源的深度循环利用和高效管理。

2. 大力发展现代高效农业和节水产业，实现“水肥药”的精准管控与高效利用

大力发展现代高效农业和节水产业，利用先进的信息技术和智能控制技术，实时监测作物需水、需肥、需药情况，精准计量、精准配送“水肥药”，实现自动控制、远程监控和数据分析，进一步提高多种资源的综合利用效率，促进作物产量和品质提高，支撑农业面源污染近零排放。

（四）融合“三水”共治，形成基于农业面源协同治理的和美乡村建设技术标准与管理范式

1. 加快编制融入“三水”共治的农业面源治理技术标准

长三角地区构建融合水环境治理、水资源管理和水生态保护的“三水”共治范式是和美乡村建设的重要任务。制定融入“三水”共治的种植业污染治理、水产养殖尾水排放治理、畜禽养殖污染治理等环节的全链条、系统化标准规范，严格控制农业面源污染排入河湖，明确面源污染负荷核算，合理评估面源污染影响；因地制宜采用治理措施，推进面源污染高效治理；完善监测监管体系，加强农业面源监督管理。

2. 打造面源治理与和美乡村建设深度融合的建设与管理范式

从水资源开发利用、水环境综合整治、水生态保护恢复等方面统筹和美乡村建设和农业面源污染治理，借助高标准农田建设等工程措施，先行先试，布局农业面源污染协同治理试点，打造一批具有示范带动作用的工程建设和管理范式，形成易复制、可推广的和美乡村建设模式，有效破解长三角地区农业面源污染治理的瓶颈，促进生态文明建设和绿色可持续发展。

（五）搭建共治共管平台，健全长三角地区“三水”综合管控体系

1. 设立农业用水权、排污权交易激励机制

积极开展农业用水权、排污权交易，将农业改造和管理中取得的节水减污量纳入交易，推动市场化交易。完善用水权、排污权交易激励和投融资机制，落实交易收益分配制度，保护节水减污参与方的合理收益。鼓励第三方节水减污服务企业参与节水减污咨询、检测认证、用水减污绩效评价、技术改造、运行管理，提供社会化、专业化、规范化的节水减污服务。以政府为主导，调动市场机制，实现区域农业面源协同治理和高效综合管控目标。

2. 构建长三角地区分级调度管控体系

建议设立“三水”融合的“水管家”管理体系，构建长三角地区分级调度管控和运行管理体系，加强跨区域协调互动，搭建长三角地区省市联动的“三水”共治共管平台，全面把控区域“三水”共治战略和重大工程调控决策。共建区域“三水”共治示范区，打破行政壁垒，深化管控体系，提高政策协同，进一步优化区域分级协同调控策略，真正做到“三水”融合共治共管有抓手、政策措施有落实，护航长三角地区一体化高质量发展和生态环境安全。

四、结语

在“生态绿色”发展理念指导下，长三角一体化发展面临诸多挑战。本文围绕支撑长三角地区高质量发展的“三水”协同保障要求，研究了对其产生关键影响的农业面源污染协同治理体系，剖析了农业面源污染治理面临的农业用水量大且循环利用率低、农业面源污染成分复杂多变、种养污染交互叠加、水质改善与水量和水生态协同缺失、面源污染治理长效运维困难等挑战，针对性地提出了建立“水肥药”资源循环利用体系、发挥灌排工程系统逐级截留净化作用、统筹种养水肥综合利用、建立标准规范体系、搭建共治共管平台等长三角地区构建农业面源协同治理体系的建议。

长三角地区人口密集，城镇化水平高、资源开发强度大，针对存在的水动力弱、农业排水量大，特别是气候变化引起的暴雨集中、旱涝急转等关键问题，未来还需从水资源、水动力、水生态、水利工程运行调度等方面多领域统筹“三水”关键要素，协调跨区域政策机制，从区域一体化保护入手，坚持共保、共治、共建、共享、共赢的基本原则，实现长三角地区“三水”协同保护。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: July 22, 2024; **Revised date:** September 10, 2024

Corresponding author: Wang Peifang is a professor from the College of Environment, Hohai University. Her major research fields include ecological and engineering of farmland irrigation and drainage system. E-mail: pfwang2005@hhu.edu.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Strategic Research on the Integrated Governance of Water Ecology, Environment and Resources in the Yangtze River Delta” (2023-XZ-28)

参考文献

[1] 国家统计局. 中国统计年鉴 2024 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2024.
National Bureau of Statistics. China statistical yearbook 2024 [M].

Beijing: China Statistics Press, 2024.

[2] 中共中央 国务院印发《长江三角洲区域一体化发展规划纲要》[EB/OL]. (2019-12-01)[2024-06-10]. https://www. gov. cn/gongbao/content/2019/content_5462503.htm.
The Central Committee of the Communist Party of China and the State Council issued the *Outline of the Yangtze River Delta regional integration development plan* [EB/OL]. (2019-12-01)[2024-06-10]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2019/content_5462503.htm.

[3] 万君. 长三角地区农业面源污染治理存在的问题及对策 [D]. 合肥: 安徽农业大学(硕士学位论文), 2017.
Wan J. Problems and countermeasures of agricultural non-point source pollution control in Yangtze River Delta region [D]. Hefei: Anhui Agricultural University (Master’s thesis), 2017.

[4] 马方凯, 陈英健, 姜尚文. 长江三角洲区域水生态环境治理思考 [J]. 人民长江, 2022, 53(2): 48–53.
Ma F K, Chen Y J, Jiang S W. Thoughts on coordinated management of water ecological environment in Yangtze River Delta region [J]. Yangtze River, 2022, 53(2): 48–53.

[5] 中华人民共和国水利部. 中国水资源公报 2023 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2024.
Ministry of Water Resources of the People’s Republic of China. China water resources bulletin 2023 [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2024.

[6] 中华人民共和国生态环境部. 第二次全国污染源普查公报 [EB/OL]. (2020-06-08)[2024-06-16]. https://www. mee. gov. cn/home/ztbd/rdzl/wrypc/zlxz/202006/t20200616_784745.html.
Ministry of Ecology and Environment of the People’s Republic of China. The second national census on the sources of pollution [EB/OL]. (2020-06-08)[2020-06-16]. https://www. mee. gov. cn/home/ztbd/rdzl/wrypc/zlxz/202006/t20200616_784745.html.

[7] 王晓旭. 望虞河流域农业活动面源污染影响分析 [D]. 淮南: 安徽理工大学(硕士学位论文), 2019.
Wang X X. Analysis on the impact of agricultural non-point source pollution in Wangyu River Basin [D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology (Master’s thesis), 2019.

[8] 高珍, 赵嘉静, 强敏敏. 巢湖圩区农田面源污染负荷估算及治理措施研究 [J]. 西北水电, 2023 (6): 18–24.
Gao Z, Zhao J J, Qiang M M. Research on the estimation of non-point source pollution load and treatment measures of farmland in Chaohu polder area [J]. Northwest Hydropower, 2023 (6): 18–24.

[9] 国家统计局农村社会经济调查司. 中国农村统计年鉴2023 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2023.
National Bureau of Statistics Rural Social and Economic Survey Department. China rural statistical yearbook 2023 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2023.

[10] 王以淼, 周胜利. 浙江省水体富营养化特征及防治对策 [J]. 中国环境监测, 2018, 34(6): 170–178.
Wang Y M, Zhou S L. Characteristics of water eutrophication and its countermeasures in Zhejiang Province [J]. Environmental Monitoring in China, 2018, 34(6): 170–178.

[11] 高峰. 江苏省农业面源污染现状分析与对策研究 [D]. 南京: 南京农业大学(硕士学位论文), 2018.
Gao F. Analysis on the present situation of agricultural non-point source pollution in Jiangsu Province and its countermeasures [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University (Master’s thesis), 2018.

[12] 韩跃飞. 养猪场废水中抗生素去除技术研究 [D]. 上海: 华东理工大学(硕士学位论文), 2019.
Han Y F. Study on removal technology of antibiotics from pig farm wastewater [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology (Master’s thesis), 2019.

[13] 谢晓琳, 钱锋, 赵健, 等. 流域农业面源污染防治科学问题与技术研发需求 [J]. 环境科学学报, 2023, 43(12): 152–157.
Xie X L, Qian F, Zhao J, et al. Scientific issues and technological development needs for the prevention and control of agricultural non-point source pollution in river basins [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2023, 43(12): 152–157.

[14] Xu J H, Liu R, Ni M F, et al. Seasonal variations of water quality response to land use metrics at multi-spatial scales in the Yangtze River Basin [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2021, 28(28): 37172–37181.

[15] Wang H, Liu C, Xiong L C, et al. The spatial spillover effect and impact paths of agricultural industry agglomeration on agricultural non-point source pollution: A case study in Yangtze River Delta, China [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 401: 136600.

[16] 王沛芳, 钱进, 侯俊, 等. 一种可移动组装式农田排水沟水质净化器: CN103319005A [P]. 2013-09-25.
Wang P F, Qian J, Hou J, et al. The utility model relates to a movable assembly type farmland drainage ditch water purifier: CN103319005A [P]. 2013-09-25.

[17] 王沛芳, 王超, 钱进, 等. 灌区稻田排水沟串联湿地净污系统: CN103803760A [P]. 2014-05-21.
Wang P F, Wang C, Qian J, et al. Irrigation area of paddy field drainage ditch series wetland cleaning system: CN103803760A [P]. 2014-05-21.

[18] 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 L Z, Shi W M, Xue L H, 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.

[19] 高源, 张龙, 吴宜文, 等. 现代工厂化鱼菜共生绿色生态循环系统建立与应用 [J]. 农业工程技术, 2022, 42(7): 43–47.
Gao Y, Zhang L, Wu Y W, et al. Establishment and application of green ecological circulation system in modern industrialized aquaponics [J]. Agricultural Engineering Technology, 2022, 42(7): 43–47.

[20] 农业农村部渔业渔政管理局. 中国渔业统计年鉴—2022 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2022.
Ministry of Agriculture and Rural Fisheries Administration. China fishery statistical yearbook 2022 [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2022.

[21] 郑天铭, 王沛芳, 胡斌, 等. 水产养殖废水污染物含量与农灌适用性分析 [J]. 长江流域资源与环境, 2023, 32(10): 2173–2183.
Zheng T M, Wang P F, Hu B, et al. Contamination of aquaculture waste water and applicability of agricultural irrigation [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2023, 32(10): 2173–2183.

[22] 李木华, 李木良. “三池两坝”用于淡水养殖池塘尾水处理的技

术要点 [J]. 南方农业, 2022, 16(12): 204–206.
Li M H, Li M L. Technical points of “three ponds and two dams” for tail water treatment of freshwater aquaculture ponds [J]. South China Agriculture, 2022, 16(12): 204–206.

[23] 季雅岚, 涂德宝, 奚业文, 等. 江淮稻渔综合种养技术模式创新与发展建议 [J]. 安徽农业科学, 2022, 50(12): 63–66, 164.
Ji Y L, Tu D B, Xi Y W, et al. Technical innovation and development suggestions of rice-fishery integrated breeding in Jianghuai [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2022, 50(12): 63–66, 164.

[24] 李永灏, 龚俐婕, 王卓, 等. 汇/分流截–排水方式对降低三峡库区坡地磷流失量的影响 [J]. 农业工程学报, 2023, 39(22): 94–103.
Li Y H, Gong L J, Wang Z, et al. Confluence/diversion catch-drainage layout measures decreasing phosphorus loss from sloping lands in Three Gorges Reservoir Areas [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(22): 94–103.

[25] 徐长春, 熊炜, 刘婕. 国家重点研发计划农业面源专项服务绿色发展的主要成效与机制探索 [J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(3): 699–704.
Xu C C, Xiong W, Liu J. Research projects promoting green development within China’s agricultural sector: Insights from the National Key R & D Program of China for prevention and control of agricultural non-point source pollution and heavy metal contaminated croplands [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2023, 40(3): 699–704.

[26] 张希丽, 于政达, 王森, 等. 利用人工湿地去除农业径流中农药的研究进展 [J]. 应用生态学报, 2019, 30(3): 1025–1034.
Zhang X L, Yu Z D, Wang S, et al. Research advances in using constructed wetlands to remove pesticides in agricultural runoff [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(3): 1025–1034.

[27] Vymazal J. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands [J]. Science of the Total Environment, 2007, 380(1–3): 48–65.

[28] 郭士林, 叶春, 李春华, 等. 人工湿地氮转化对水位变化响应的研究进展 [J]. 环境工程技术学报, 2016, 6(6): 585–590.
Guo S L, Ye C, Li C H, et al. Research progress of nitrogen transformation in constructed wetlands in response to water-level change [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2016, 6(6): 585–590.

[29] 徐自江. 乡村振兴战略背景下农村环境监管的问题与对策研究 [J]. 黑龙江环境通报, 2023, 36(2): 137–139.
Xu Z J. Research on the problems and countermeasures of rural environmental regulation under the background of rural revitalization strategy [J]. Heilongjiang Environmental Journal, 2023, 36(2): 137–139.

[30] 王萌, 杨生光, 耿润哲. 农业面源污染防治的监测问题分析 [J]. 中国环境监测, 2022, 38(2): 61–66.
Wang M, Yang S G,Geng R Z. Analysis on monitoring and practices of agricultural non-point source pollution control [J]. Environmental Monitoring in China, 2022, 38(2): 61–66.

[31] 刘连华, 张晴雯, 黄雪良, 等. 整建制全要素全链条农业面源污染综合防治的思考及实践 [J]. 农业工程学报, 2024, 40(10): 306–314.
Liu L H, Zhang Q W, Huang X L, et al. Comprehensive prevention and control of agricultural non-point source pollution with whole factors and chain in an integrated system [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(10): 306–314.

[32] 展晓莹, 张爱平, 张晴雯. 农业绿色高质量发展期面源污染治理的思考与实践 [J]. 农业工程学报, 2020, 36(20): 1–7.
Zhan X Y, Zhang A P, Zhang Q W. Controlling agricultural non-point source pollution: Thinking and practice in the era of agricultural green high-quality development [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(20): 1–7.

[33] 柳兰芳. 从“美丽乡村”到“美丽中国”——解析“美丽乡村”的生态意蕴 [J]. 理论月刊, 2013 (9): 165–168.
Liu L F. From “beautiful countryside” to “beautiful China” —An analysis of the ecological implication of “beautiful countryside” [J]. Theory Monthly, 2013 (9): 165–168.

[34] 金书秦, 韩冬梅. 农业生态环境治理体系: 特征、要素和路径 [J]. 环境保护, 2020, 48(8): 15–20.
Jin S Q, Han D M. Comprehensive understanding of modernization of agricultural ecological environment governance system [J]. Environmental Protection, 2020, 48(8): 15–20.

[35] 王沛芳, 王超, 钱进, 等. 平原地区灌排耦合生态型灌区水循环利用的节水减污方法: CN104591395A [P]. 2015-05-06.
Wang P F, Wang C, Qian J, et al. Water saving and pollution reduction method of water recycling in ecological irrigation district with irrigation and drainage coupling in plain area: CN104591395A [P]. 2015-05-06.