农业环境科学学报
JOURNAL OF AGRO-ENVIRONMENT SCIENCE
中文核心期刊/CSCD
请通过网上投稿系统投稿
网址：http://www.aes.org.cn

# “产业治污”模式削减丘陵区农业面源氮排放

刘广龙， 李涛， 薛利红， 樊丹， 戴志刚， 甘晓东， 张凯， 周宇翔， 胡荣桂

引用本文:
刘广龙, 李涛, 薛利红, 等. “产业治污”模式削减丘陵区农业面源氮排放[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(9): 1963–1970.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11654/jaes.2021–0369

**您可能感兴趣的其他文章**

Articles you may be interested in

基于人为氮净输入及入河系数的流域河流氮输出负荷估算
凡翔, 吴凤平, 孟岑, 叶磊, 李希, 张满意, 李裕元, 吴根义, 吴金水
农业环境科学学报. 2021, 40(1): 185–193 https://doi.org/10.11654/jaes.2020–0762

英国农业面源污染防控对我国的启示
刘坤, 任天志, 吴文良, 孟凡乔, JessicaBellarby, LaurenceSmith
农业环境科学学报. 2016, 35(5): 817–823 https://doi.org/10.11654/jaes.2016.05.001

亚热带源头流域梯级池塘氮磷含量的时空变异及其影响因素
申雅莉, 周脚根, 彭佩钦, 吴金水
农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2420–2428 https://doi.org/10.11654/jaes.2019–1257

基于养分回用–化肥替代的农业面源污染氮负荷削减策略及技术
薛利红, 何世颖, 段婧婧, 张志勇, 杨林章
农业环境科学学报. 2017, 36(7): 1226–1231 https://doi.org/10.11654/jaes.2017–0949

农业面源和重金属专项实施进展与主要成效
熊炜, 杜会英, 徐长春, 郑戈
农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2105–2113 https://doi.org/10.11654/jaes.2020–1098

关注微信公众号，获得更多资讯信息

刘广龙, 李涛, 薛利红, 等. “产业治污”模式削减丘陵区农业面源氮排放[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(9): 1963-1970.
LIU G L, LI T, XUE L H, et al. Applying the “industrial controlling pollution” mode to control the discharge of nitrogen from agricultural non-point sources in hilly areas [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(9): 1963-1970.

开放科学 OSID

# “产业治污”模式削减丘陵区农业面源氮排放

刘广龙[1], 李涛[2], 薛利红[3], 樊丹[4], 戴志刚[5], 甘晓东[6], 张凯[7], 周宇翔[1], 胡荣桂[1*]

(1.华中农业大学资源与环境学院, 国家环境保护土壤健康诊断与绿色修复重点实验室, 武汉 430070; 2.十堰市农业生态环境保护站, 湖北 十堰 442000; 3.江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 农业农村部长江下游平原农业环境重点实验室, 南京 210014; 4.湖北省农业生态环境保护站, 武汉 430070; 5.湖北省耕地质量与肥料工作总站, 武汉 430070; 6.湖北省十堰市竹溪县农业农村局, 湖北 竹溪 442300; 7.农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191)

**摘　要:** 丘陵是我国南方面积最大的地貌类型,是降雨径流易发区和水土流失敏感区。诸多因素使农业面源氮排放成为丘陵区农村环境整治和乡村振兴的难题。为此,本研究以目标区域的产业发展为前提,基于丘陵小流域氮素流失特点,以氮资源循环利用为核心,针对农村生活源、农田种植源和畜禽养殖源分别构建了生活污水的稻田安全消纳净化技术、生态种植串联沟渠塘堰的立体消减技术和种养结合的畜禽粪污多级循环全消纳技术体系,提出了“产业治污”运行及管理模式,即:根据流域环境承载力确定产业结构和规模,建立“企业订单+基地+农户+专家团队”的产业控污机制和“村企合一参与式”的治污管理体系。并基于国家典型流域农业面源污染综合治理专项,在湖北省竹溪县竹溪河源头流域农业面源污染综合治理试点项目中进行了具体的工程设计和应用。实践证明,“产业治污”模式实现了目标区域污染治理与产业发展的有机融合,在有效削减丘陵区农业面源氮排放的同时,推动了产业结构调整,提升了农民收入,促进了农业经济发展与环境保护双赢。

**关键词:** 丘陵区;农业面源;氮;产业治污
**中图分类号:** X71;X52　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1672-2043(2021)09-1963-08　　doi:10.11654/jaes.2021-0369

## Applying the “industrial controlling pollution” mode to control the discharge of nitrogen from agricultural non-point sources in hilly areas

LIU Guanglong[1], LI Tao[2], XUE Lihong[3], FAN Dan[4], DAI Zhigang[5], GAN Xiaodong[6], ZHANG Kai[7], ZHOU Yuxiang[1], HU Ronggui[1*]

(1. College of Resources & Environment, Huazhong Agricultural University, State Environmental Protection Key Laboratory of Soil Health and Green Remediation, Wuhan 430070, China; 2. Shiyan Agricultural Ecological Environment Protection Station, Shiyan 442000, China; 3. Key Laboratory of Agro-Environment in Downstream of Yangtze Plain, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 4. Hubei Agricultural Ecological Environment Protection Station, Wuhan 430070, China; 5. Hubei General Station of Cultivated Land Quality and Fertilizer, Wuhan 430070, China; 6. Agricultural and Rural Bureau of Zhuxi County, Shiyan City, Hubei Province, Zhuxi 442300, China; 7. Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China)

**Abstract:** Hills, the most common landforms in South China, are prone to experience the effects of rainfall runoff and sensitive to soil

**收稿日期:** 2021-03-27　　**录用日期:** 2021-05-11
**作者简介:** 刘广龙(1984—),男,山东即墨人,副教授,主要从事农业面源污染防控与水环境保护研究。E-mail:liugl@mail.hzau.edu.cn
***通信作者:** 胡荣桂　E-mail:rghu@mail.hzau.edu.cn
**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2017YFD0800102, 2018YFD0800600); 国家自然科学基金项目(41877461); 中央高校基本科研业务费资助项目(2662020ZHPY002)
**Project supported:** The National Key Research and Development Program of China(2017YFD0800102, 2018YFD0800600); The National Natural Science Foundation of China(41877461); The Fundamental Research Funds for the Central Universities(2662020ZHPY002)

erosion. Many factors have made the discharge of agricultural nitrogen from non-point sources become the main environmental problem in the process of improving rural environments and applying rural revitalization in hilly areas. This work used paddy field safe purification, ecological planting plus ditch and pond, and combination of planting and breeding in multi-stage cycle as technologies to reduce nitrogen discharges from rural human, crop, and poultry breeding sources, respectively. In addition, the "industrial controlling pollution" operation and management mode was proposed which included determining the structure and scale of industries according to the environmental carrying capacity of the basin and using both the "enterprise order + base + farmer + expert team" industrial control pollution mechanism and "village enterprise integration and participation" pollution control management system. Thus, based on the national special project for comprehensively treating agricultural non-point source pollution in typical river basins, specific engineering designs were applied in a pilot project in the Zhuxi River source basin in Zhuxi County, Hubei Province. Practical application has proved that the "industrial controlling pollution" mode resulted in an organic integration of pollution control and industrial development in a target area, effectively reduced the discharge of agricultural nitrogen from non-point sources in hilly areas, promoted the adjusts the industrial structure, improved farmer income, and promoted a win-win scenario of agricultural economic development and environmental protection.

**Keywords**: hilly area; agricultural non-point source pollution; nitrogen; industrial controlling pollution

改革开放以来,我国工农业生产取得了举世瞩目的成就,与此同时也付出了极大的环境代价。农业面源污染已经成为美丽乡村建设、乡村振兴的重要阻碍,也严重威胁了饮用水安全。据《第二次全国污染源普查公报》显示,农业源排放的总氮达141.49万t,占总排放量的46.52%[1]。丘陵作为我国南方重要的农作区,占地范围广、降雨径流易发、水土流失敏感,使得农业面源氮排放进一步加剧[2-3]。但由于农业面源氮的来源广泛且迁移转化过程复杂[4],氮流失已成为农村水污染控制工作中的重难点,制约了我国现代农业和社会的可持续发展。

目前,国内外已研发了多种农业面源污染控制技术,包括农村生活污水的湿地处理技术[5-6]、农田面源的肥料管控技术[7]、农业废弃物的发酵产气技术[8-9]等。这些技术及相应的工程建设在削减农业面源氮排放负荷中均起到了一定作用,但多数是以牺牲农业生产产能为代价,且部分技术多是针对农业面源污染的局部环节而设计的,功能零散,难以有效解决区域农业面源污染问题。亦有诸多学者将各类技术进行了集成,构建如"控源-截污-资源化"模式[10]、"多级处理、循环利用"模式[11]等。但这些模式主要在平原河网地区完成,在丘陵区应用时难以获得预期效果。且这类技术模式在实际使用中,往往未考虑区域产业发展问题,导致污染治理工程持久运行和维护困难。

针对丘陵区农业面源氮排放问题的特殊性,在保持或提升区域社会经济发展的前提下,需在流域尺度上对现有技术进行梳理和集成,总结提炼出一套适用于丘陵区农业面源污染控制的技术和模式,来指导相应工程体系的建设和运行。为此,本团队基于多年从事丘陵区农业面源氮排放发生机理、治理技术研究和工程实践工作的基础上,在国家典型流域农业面源污染综合治理专项的支持下,在湖北、湖南、江苏等多个流域面源污染综合治理试点项目中进行了技术集成组装与模式应用。经过总结凝练,提出了丘陵区农业面源氮排放控制的"产业治污"模式,为丘陵区农业面源氮排放的治理提供参考。

## 1 丘陵区农业面源氮排放的来源及形成机理

### 1.1 丘陵区农业面源氮排放来源和流失负荷

针对丘陵区农业生产以小农户为经营单位的特点,在三峡库区的湖北省秭归县张家冲、曲溪流域、湖南省长沙县金井镇脱甲流域等区域对农户的生产与生活各环节进行了详细调查和研究。结果表明,张家冲小流域单位土地面积的氮素负荷调控着地表水体中的氮素含量,而流域内不同农户单位土地面积上氮素负荷顺序为养殖型农户>蔬菜种植户>柑橘种植户>茶叶种植户≈传统种植户[分别为(363±129)、(355±127)、(345±107)、(152±60)kg·hm$^{-2}$·a$^{-1}$和(151±73) kg·hm$^{-2}$·a$^{-1}$];张家冲小流域中施肥、水土流失、畜禽粪污和农村生活废水是农业面源氮排放的主要来源,分别占总氮排放负荷的40.4%、28.1%、20.9%和10.6%[12]。

### 1.2 丘陵区面源氮排放的主要形态和产生途径

对典型小流域的基流,降雨径流,农田淋溶水中氮的含量、形态及其时空变化的长期连续监测发现:流域内土地利用方式决定氮素流失量的大小,森林面积的增加可减少氮素流失,旱地、水田面积增加则加剧氮素流失[13];地表径流是流域氮输出的主要控制因子,80%以上的氮输出负荷发生在4月份到9月份的

雨季。农田地表径流和淋溶是农田氮流失的主要途径,硝态氮($NO_3^-$-N)是氮素流失的主要形态[14];土壤$NO_3^-$-N淋溶主要发生在耕作层,淋溶量大小顺序为:种粮地>种柑地>林地[15];农田与受纳水体的距离低于200 m时,氮素易迁移进入水体,超过200 m时,施肥对水体氮素含量影响轻微,故降低靠近水体农田的氮肥施用量可减少氮肥对水质的影响[16]。

## 2 “产业治污”模式的整体思路

“产业治污”模式的核心思想是通过农业产业发展解决农业产业的环境问题。在深入认知丘陵小流域氮素流失机理的基础上,针对丘陵区农业面源污染的来源和流失特征,以目标区域的产业发展为基础,以氮资源循环利用为核心,以“用”代“治”,针对居民生活源、农业种植源和畜禽养殖源分别构建了生活污水的稻田安全消纳净化技术、生态种植串联沟渠塘堰的立体消减技术和种养结合的畜禽粪污多级循环全消纳技术,并提出了“产业治污”运行及管理模式(图1),即:根据流域环境承载力确定产业结构和规模建立“企业订单+基地+农户+专家团队”的产业控污机制和“村企合一参与式”的治污管理体系。这一模式实现了目标区域污染治理与产业发展的有机融合,在有效控制丘陵区农业面源氮排放的同时,推动了产业结构调整,提升了农民收入,促进了农业经济发展与环境保护双赢。

**图1 丘陵区农业面源氮排放削减的“产业治污”模式架构图**

Figure 1 “Industrial pollution control” model framework of agricultural non-point source nitrogen discharge reduction in hilly area

## 3 “产业治污”模式的技术集成体系

“产业治污”模式技术集成和运行管理过程中,坚持思路转变,将农业面源氮排放治理转变为氮素资源循环利用,并以此构建了嵌入产业发展的氮排放农业产业链全程防治的技术集成体系。针对居民生活源,构建了稻田安全消纳净化技术;针对农田面源氮素流失,构建了生态种植串联沟渠塘堰的立体消减技术;针对畜禽养殖源,集成了种养结合的多级循环全消纳技术。各技术可根据治理区域的氮素流失特征进行选用,既可独立使用,又可相互串联,从而靶向性、全过程地实现丘陵区农业面源氮排放的有效控制。

### 3.1 生活污水的稻田安全消纳净化技术

首先,采用村镇合流制溢流雨水自动分流技术解决丘陵区农村生活污水多以合流制为主、污水收集量大、难以有效净化处理的难题。该技术运行方式是基于村镇地表径流的水质水量变化,利用跃流井实现生活污水和径流的初级分流,再利用分流井和溢流原理,实现初期径流和后期径流的二次分流,为雨污的分类处理和后期深度净化奠定了基础[17]。该技术的应用避免了分流管道的建设费用,工艺简单,建设及维护成本低,尤其适用于丘陵山区。

其次,利用稻田湿地净化氮浓度相对较高的分流生活污水和初期地表径流。通过稻田土壤的吸附作用、水稻植株的吸收利用、硝化反硝化作用等去除污水中的氮,实现农业生产与环境保护的双赢。仅需在水稻生长前期施用化肥80~120 kg·hm$^{-2}$(以氮计),水稻进入旺盛生长期后即可利用稻田人工湿地来净化生活污水等低污染水。稻田可设置成地表漫流型或沟灌渗滤型湿地(沟渠占地比10%),采用动态布水方式,地表漫流型湿地每日进水量为2~3 mm,沟灌渗滤型维持沟渠水面与畦面基本持平,水力停留时间以3 d左右为宜。每公顷稻田可消纳净化生活污水5 000 m$^3$以上,吸收利用污水中的氮54~137 kg,保证水稻安全高产,并减少化肥氮投入20%~40%,减少氨挥发排放25%~47%[18-21]。实际使用中,可根据区域氮排放减量要求合理设置生活污水排放量和稻田规划面积比例。

针对表面流稻田人工湿地反硝化能力不足的问题,可利用丘陵区的自然高程落差,实现潮汐流湿地处理农村生活污水。该技术采用倒U形管的方式产生自然型潮汐流态,实现湿地的脉冲式进入,形成了梯级湿地净化技术[22]。通过充氧、厌氧循环过程,促

进了硝化、反硝化的连续发生，提高了湿地脱氮效果。实际运行效果显示，潮汐上行流和下行流对化学需氧量平均去除率分别为65.1%和63.6%，对总氮的去除率可分别达到40.6%和36.0%[22]（图2）。

### 3.2 农田面源的生态种植串联沟渠塘堰的立体消减技术

根据丘陵区的地形地貌特征和耕地以坡地为主的现实，合理安排作物布局，以立体生态种植控制减少氮素流失（图3）。

在坡地上部，种植植物篱以拦截径流中的氮和减少水土流失。以紫穗槐和三叶草构成的植物篱缓冲可减少97.2%的径流量和97.5%的土壤侵蚀量，对径流中铵氮（$NH_4^+$-N）平均去除率为77.2%[23]。

在坡地中部，主要种植具有区内特色和需要大力发展的产业品种。在主要试验区，团队开发了中药材间套作的生态种植技术，主要有林-药间作、药-果间作、药-药间作、粮-药间作等模式。该技术可充分利用光照和雨水，提高植物的覆盖度，减少水土流失。与传统种植模式相比，总氮的平均削减量为36.6%，经济效益提高13%~307%[24-26]。

在坡地下方，采用多级沟渠、塘及缓冲带、人工湿地等生态系统对径流氮进行多级拦截。将整个生态处理系统分为多级串连的子系统，使水力停留时间延长，径流从形成到进入受纳水体的迁移过程中，经渠、塘及人工湿地的过滤、拦截、吸附及微生物作用后，总氮去除率可达34.2%[27]。

在坡底以生物脱氮沟实现淋溶氮净化。脱氮沟中的反硝化细菌利用硝酸氮为能源，以水溶性有机物为碳源，可实现出水中硝态氮（$NO_3^-$-N）平均浓度为3.1 mg·L$^{-1}$，低于国家《地下水环境质量标准》（GB/T 14848—1993）Ⅲ类水标准（$NO_3^-$-N<20 mg·L$^{-1}$）[28]。

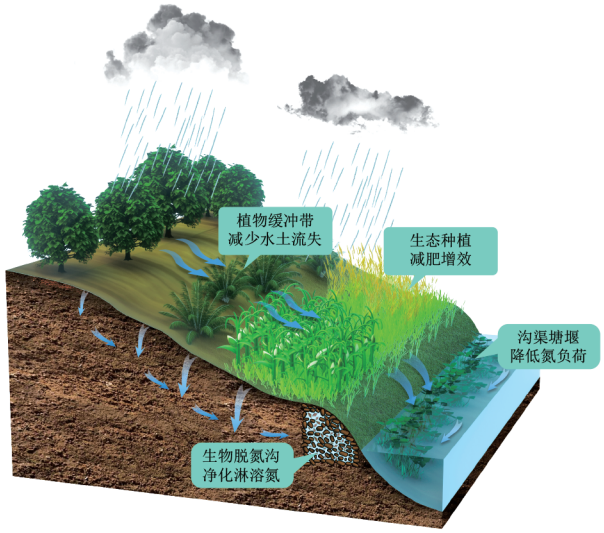


图3 生态种植串联沟渠塘堰立体种植技术示意图

Figure 3 Schematic diagram of three-dimensional planting technology of the ecological planting connecting ditch

### 3.3 种养结合的畜禽粪污多级循环全消纳技术

畜禽养殖废水排放量大，有机物和氮含量高，常规的工业污水处理方式处理成本大、难度高。传统的沼气技术则存在沼液排放量大、无法消纳等问题[21]。可采用“生猪养殖-种植和养殖废弃物处理-有机还田”的循环农业技术体系解决这一问题。该技术由规模化畜禽养殖场牵头，在选定区域内，根据土地承载能力确定畜禽养殖规模，以地定畜、以种定养，将养殖场周边田地作为主要的粪污消纳基地，实现了粪污全量资源化循环利用，达到粪污零排放，从而有效控制畜禽养殖面源污染（图4）。

根据不同作物需肥量和土壤养分含量特征，明确了区域内不同农田的粪污消纳能力（猪当量）：粮田

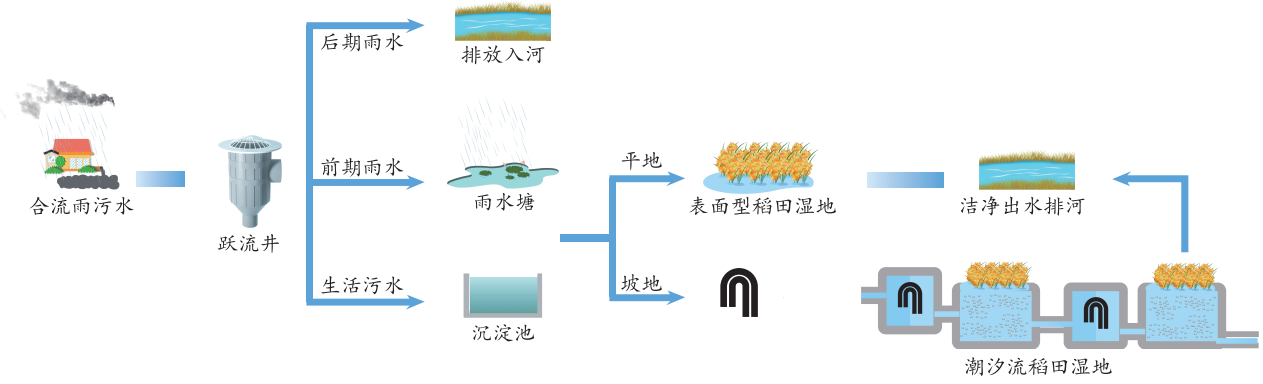


图2 生活污水稻田安全净化技术流程图

Figure 2 Flow chart of safe purification technology for domestic sewage by paddy fields

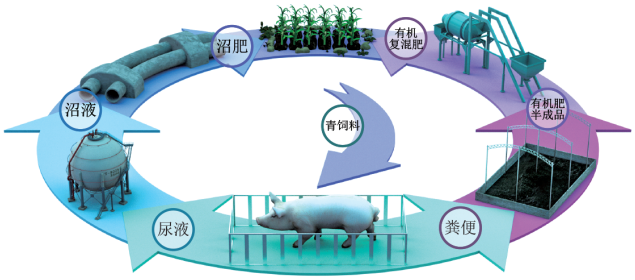


**图4 多级循环粪污全消纳的种养结合技术示意图**

Figure 4 Schematic diagram of integrated planting and breeding technology of multi-stage circulating fecal wastewater

30头·$hm^{-2}$、蔬菜地52.5头·$hm^{-2}$、果茶园15头·$hm^{-2}$。在一个面积约为1 333.3 $hm^2$的农田(坡地:80%、平地:20%)试验区,根据其种植结构计算区域内可承载的畜禽存栏量约为2.97万头猪当量,日可消纳猪粪21.3 t和污水84.1 t,年消纳猪粪7 765 t和养殖污水30 667.3 t。实际应用后,化肥和农药使用率降低66%,生产成本下降20%,农产品实现增值15%以上,农产品优质品率达95%以上,农民收入增加16.2%。

## 4 “产业治污”模式的运行管理方法

### 4.1 根据流域环境承载力确定产业结构和规模

以区域产业发展为主线,整合各种技术资源,组建以提高科技创新能力和解决生产实际问题为核心、项目为载体,包括科研、生产、销售、管理的“农业资源环境专家团队”,实现科学研究、企业生产、农户需求、市场销售无缝对接。专家团队根据流域环境承载力对流域整体产业发展方向与规模、企业生产工艺流程、种养殖业的规模及种类、粪污处理工艺、化肥和农药使用及相关生产生活环节等实行监管;同时建立农业面源污染管控负面清单,实行污染总量控制。以十堰市为例,专家团队根据其环境承载力将全市划分为南区、北区、核心区,并规划了六大特色农业产业发展规模及模式。南区以茶叶、核桃、中药材等多年生作物为主,北区以柑桔、蔬菜、粮油为主,沿汉江及主要支流沿线岸1 km的核心区以粮油为主。仅在山场面积比重较大的区域适度发展大型牲畜,在粮油种植面积比重较大的区域发展养殖业,养殖业发展规模由专家团队根据环境承载力、养殖总量红线确定。

### 4.2 构建“企业订单+基地+农户+专家团队”的产业控污机制

针对丘陵山区财力有限、污染治理资金短缺、技术团队缺乏、治理工程维持难等问题,将推进农业面源污染治理与发展农业适度规模经营紧密结合,培植生态种植和养殖龙头企业,通过企业订单的方式,形成“企业订单+基地+农户+专家团队”的产业控污机制。专家团队根据承载力和目标区域环境容量建立标准化种养及污染防治示范基地,推动技术推广应用覆盖面;指导工艺技术选型和标准研发,确定企业生产订单;利用国家精准扶贫平台,以农民土地股权入股的方式发展订单农业;龙头企业收益回馈农民,提高农民参与治污的能力和积极性,激发农业污染治理内在潜力。以种养结合产业为例,畜禽养殖企业建设粪污处理设施和沼液施用管网,使沼液就近还田,此举降低了企业处理成本;农户和合作社免费使用沼液,仅负责田间管网维护;专家团队根据土壤特性和作物需求设置沼液和清水配比,通过调整作物种植方式等措施增强农田对沼液的消纳能力。这种“产业治污”模式在提升特色产业效益的同时,形成企业、农户、基地、专业团队的良性互动,加速了产业和环保技术转化和应用,形成了控污治污的长效机制。

### 4.3 形成“村企合一参与式”的治污管理体系

农业环保工程普遍存在重建设、轻监管、运营难的困境。“产业治污”模式则是将公益类治污环保工程的产权交给村委会,企业只负责运营管理,实行市场化运作,产生收益回馈村委会,带动当地农民就业和开展生态种养。专家团队提供全程工艺技术和标准,监理环保工程建设,监控企业运营。村委会在专家团队的指导下将环保公益工程与美丽乡村建设、农村人居环境整治、生态观光休闲旅游结合起来,提高项目总收益。这种“村企合一参与式”的管理机制推动了环保公益企业的长效、稳定运转。

## 5 “产业治污”模式的工程应用与效果

在国家典型流域农业面源污染综合治理项目的支持下,在对丘陵区农业面源氮排放的来源及形成机理解析的基础上,基于“产业治污”理念,以氮资源循环利用为核心,在湖北、湖南、江苏等多个流域面源污染综合治理试点项目中进行了技术集成组装与模式应用,本文重点选取湖北省十堰市竹溪县竹溪河源头流域农业面源污染综合防治项目进行介绍(图5)。

项目示范区位于十堰市竹溪县县城西北方向,包括蒋家堰镇、中峰镇、龙坝镇及城关镇新胜村,辖19个村,共6 371户,24 617人,畜禽养殖折合猪当量39 210头。据竹溪县农业局提供的2016年数据显

示，项目区有耕地1 588.7 $hm^2$，其中，水田476.8 $hm^2$，旱地1 111.9 $hm^2$。2016年项目区内秸秆、尾菜总产生量约为3.3万t，其中小麦秸秆6 928 t，水稻秸秆21 137 t，尾菜残体5 183 t，秸秆、尾菜产生量大。项目区养殖场产生的粪便、污水缺乏相应处理技术手段，沼液储存能力不足，污水外排严重。项目区农田化肥、农药用量过大，加之秸秆随意堆放，致使氮、磷等养分易随径流直接进入水体，给竹溪河水环境带来严重危害。

结合项目示范区农业面源污染控制需求及发展经济的强烈意愿，本团队以茶产业、贡米产业和有机肥产业为依托，重点打造了与之匹配的3个示范工程，并将生活污水稻田净化技术、生态种植技术和畜禽粪污多级循环全消纳技术内嵌于3个产业之中。生态茶园可消纳山下畜禽养殖场产生的发酵沼液，有效处理猪场沼液4 000 $t \cdot a^{-1}$，且养殖企业负责沼液输送的管道养护，使沼液还田工程可持久运行；333.3 $hm^2$贡米基地在用水期可消纳生活污水166.5万$m^3$，非用水期间的生活污水则可通过生活污水一体化处理设施处置后排入竹溪河；有机肥厂设计产能为10万$t \cdot a^{-1}$，可全部消纳示范区内的农业秸秆、尾菜和畜禽养殖废弃物，生产的有机肥在茶园和贡米基地的使用也有效提升了贡米和茶叶的品质，但在山区如何实现农业秸秆的低成本回收仍是需要深度关注的话题。

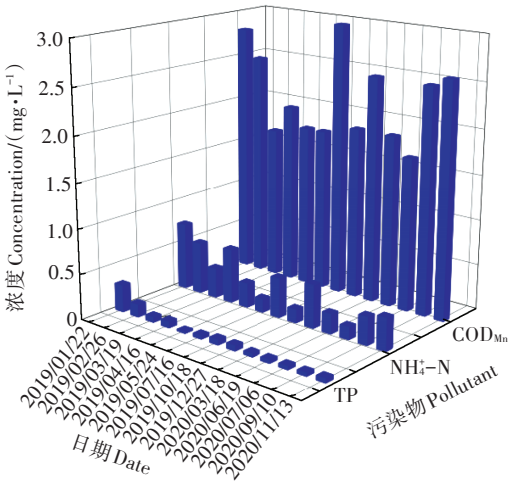


**图6 竹溪河花桥寺断面连续监测数据**
**（示范工程2019年4月起运行）**

Figure 6 Monitoring data of Huaqiaosi section in Zhuxi River(the demonstration project started from April 2019)

竹溪河花桥寺断面连续监测数据（图6）显示，项目建成运行后，竹溪河源头水质得到了明显改善。总磷（TP）平均降幅为75.6%（由0.14~0.30 $mg \cdot L^{-1}$降至0.02~0.07 $mg \cdot L^{-1}$），铵态氮（$NH_4^+$-N）平均下降53.6%（由0.57~1.07 $mg \cdot L^{-1}$降至0.14~0.84 $mg \cdot L^{-1}$）。化学需氧量（$COD_{Mn}$）在项目运行前后并未发生明显改变，主要是示范区内已完成农村厕所改造工程，生活污水排放已得到有效控制，$COD_{Mn}$背景值较低。此外，项

**图5 核心示范区的主要工程分布图**

Figure 5 Main engineering division map of core demonstration area

目在有效控制了示范区农业面源污染的同时,其创造的美丽生态环境也带动了观光旅游产业,提升了农业从业者的积极性。

## 6 结论

本文在系统研究了丘陵区农业面源氮排放来源和形成机理的基础上,创新性地提出了丘陵区农业面源氮排放削减的“产业治污”模式,其核心是通过农业产业发展解决农业产业的环境问题。这一模式不仅丰富了农业面源污染治理的理论,也在农村环境治理中得到了有效的应用。在“产业治污”模式下,思想观念由氮排放治理转向氮资源循环利用,以“用”代“治”,实现了农业面源氮的循环再利用,在有效降低了农业面源氮排放量的同时,推动了农业产业结构改革,进而从根本上消除了丘陵区农业面源氮排放对受纳水体的威胁。

**参考文献:**


[1] 第二次全国污染源普查公报[J]. 环境保护, 2020, 48(18):8-10. The second national pollution source census bulletin[J]. *Environmental Protection*, 2020, 48(18):8-10.

[2] 张祥稳, 惠富平, 戴家翠. 历史时期长江下游山地丘陵区玉米生产引发水土流失及其成因研究[J]. 中国水土保持, 2019(12):74-77. ZHANG X W, HUI F P, DAI J C. Research on soil erosion and its causes caused by corn production in the mountainous and hilly regions of the lower Yangtze River in historical period[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2019(12):74-77.

[3] ZHANG X X, SONG J X, WANG Y R, et al. Effects of land use on slope runoff and soil loss in the Loess Plateau of China: A meta-analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 755:142418.

[4] 谢经朝, 赵秀兰, 何丙辉, 等. 汉丰湖流域农业面源污染氮磷排放特征分析[J]. 环境科学, 2019, 40(4):1760-1769. XIE J C, ZHAO X L, HE B H, et al. Analysis of the characteristics of nitrogen and phosphorus emissions from agricultural non-point sources on Hanfeng Lake Basin[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(4):1760-1769.

[5] YI X S, LIN D X, LI J H, et al. Ecological treatment technology for agricultural non-point source pollution in remote rural areas of China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28: 40075-40087.

[6] 王晓云, 蒋柱武, 付爱民. UASB+两级人工湿地组合工艺处理农村污水[J]. 中国给水排水, 2020, 36(11):21-26. WANG X Y, JIANG Z W, FU A M. Treatment of rural domestic sewage by combined technology of upflow anaerobic sludge blanket and two-stage constructed wetlands[J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(11):21-26.

[7] 闵炬, 纪荣婷, 王霞, 等. 太湖地区种植结构及农田氮磷流失负荷变化[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(8):1230-1238. MIN J, JI R T, WANG X, et al. Changes in planting structure and nitrogen and phosphorus loss loads of farmland in Taihu Lake region[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(8):1230-1238.

[8] 于佳动, 赵立欣, 冯晶, 等. 序批式玉米秸秆牛粪混合厌氧干发酵产甲烷工艺优化研究[J]. 农业工程学报, 2018, 34(增刊1):86-92. YU J D, ZHAO L X, FENG J, et al. Study on optimal technology of methane production by sequencing batch dry anaerobic digestion with corn straw and cattle manure[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(Suppl 1):86-92.

[9] TAJMIRRIAHI M, MOMAYEZ F, KARIMI K. The critical impact of rice straw extractives on biogas and bioethanol production[J]. *Bioresource Technology*, 2021, 319:124167.

[10] 汤爱萍, 万金保, 李爽. “控源-截污-资源化”模式处理面源污染[J]. 环境工程学报, 2014, 8(5):1761-1768. TANG A P, WAN J B, LI S. Integrated mode of source controlling-wastewater intercepting-recycling for rural non-point source pollution[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, 8(5):1761-1768.

[11] 谢可军. 农业面源污染综合治理模式[J]. 湖南农业, 2018(5):7. XIE K J. Comprehensive management model of agricultural non-point source pollution[J]. *Hunan Agricuture*, 2018(5):7.

[12] 林杉, 冯明磊, 胡荣桂, 等. 三峡库区小流域农户氮循环和排放特征[J]. 环境科学, 2010, 31(3):632-638. LIN S, FENG M L, HU R G, et al. Characteristics of nitrogen cycling in farm systems in a small watershed of Three Gorges Reservoir area[J]. *Environmental Science*, 2010, 31(3):632-638.

[13] 刘仁燕, 冯明磊, 林杉, 等. 三峡库区小流域水体硝态氮含量及与土地利用的关系[J]. 自然资源学报, 2008, 23(5):886-892. LIU R Y, FENG M L, LIN S, et al. Nitrate nitrogen content of small watershed in the Three Gorges Reservoir area and its relationship with land use[J]. *Journal of Natural Resources*, 2008, 23(5):886-892.

[14] FENG M L, HU R G, LIN S, et al. Influence of land use on nitrate concentrations in baseflow in a rural watershed of Three Gorges Reservoir area, China[J]. *Journal of Food Agriculture & Environment*, 2010, 8(1):132-137.

[15] 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 F, WANG P J, YANG S S, 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.

[16] 冯明磊, 胡荣桂, 许克翠, 等. 三峡库区小流域不同尺度施氮量对水体的影响[J]. 中国环境科学, 2008, 28(2):168-172. FENG M L, HU R G, XU K C, et al. Inflence of nitrogen application amounts of different scales in small watershed of Three Gorges reserving area on water body[J]. *China Environmental Science*, 2008, 28(2):168-172.

[17] 赵建伟, 段丙政, 单保庆, 等. 一种合流制管网溢流雨水拦截分流控制装置:CN103643735A[P]. 2014-03-19. ZHAO J W, DUAN B Z, SHAN B Q, et al. Overflow rainwater interception and diversion control device for combined pipe network:CN103643735A[P]. 2014-03-19.

[18] 李梦瑶, 王旭刚, 徐晓峰, 等. 生活污水尾水灌溉对秸秆还田稻田氨挥发的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(7):1623-1632. LI M Y, WANG X G, XU X F, et al. Effects of treated domestic sewage irrigation on ammonia volatilization in straw-returning paddy fields

[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(7):1623-1632.

[19] 尹爱经, 薛利红, 杨林章, 等. 生活污水氮磷浓度对水稻生长及氮磷利用的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(4):768-776. YIN A J, XUE L H, YANG L Z, et al. Effects of the N and P concentrations in domestic wastewater on the growth, N and P uptakes of rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(4):768-776.

[20] 马资厚, 薛利红, 潘复燕, 等. 太湖流域稻田对3种低污染水氮的消纳利用及化肥减量效果[J]. 生态与农村环境学报, 2016, 32(4):570-576. MA Z H, XUE L H, PAN F Y, et al. Utilization of nitrogen in wastewater low in pollution degree in paddy fields and its effect on reducing fertilizer application in Tai Lake region[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2016, 32(4):570-576.

[21] DUAN J J, HE S Y, FENG Y F, et al. Floating ryegrass mat for the treatment of low-pollution wastewater[J]. *Ecological Engineering*, 2017, 108:172-178.

[22] 王龙涛, 赵建伟, 单保庆, 等. 秋季潮汐流模拟湿地对生活污水的处理效果[J]. 环境工程学报, 2016, 10(10):5352-5358. WANG L T, ZHAO J W, SHAN B Q, et al. Domestic sewage treatment of tidal flow constructed wetland in autumn[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, 10(10):5352-5358.

[23] 王华玲, 赵建伟, 程东升, 等. 不同植被缓冲带对坡耕地地表径流中氮磷的拦截效果[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(9):1730-1736. WANG H L, ZHAO J W, CHENG D S, et al. Nitrogen and phosphorus removal efficiency of different vegetative buffer strips on surface runoff from sloping land[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(9):1730-1736.

[24] 李涛, 耿正华, 闫仁凯, 等. 一种通过间作银杏和芍药防治坡地水土流失的方法:CN105794574A[P]. 2016-07-27. LI T, ZHE Z H, YAN R K, et al. Method for preventing and controlling soil erosion on slope land by intercropping ginkgo and peony: CN105794574A[P]. 2016-07-27.

[25] 李涛, 耿正华, 闫仁凯, 等. 一种通过间作玉米和白芷防治坡地水土流失的方法:CN105794471A[P]. 2016-07-27. LI T, ZHE Z H, YAN R K, et al. Method for preventing and controlling soil erosion on slope land by intercropping corn and *Angelica dahurica*:CN105794471A[P]. 2016-07-27.

[26] 李涛, 耿正华, 闫仁凯, 等. 一种通过轮作三叶菜和红花防治坡地水土流失的方法:CN105850416A[P]. 2016-08-17. LI T, ZHE Z H, YAN R K, et al. Method for preventing and controlling soil erosion on slope land by rotating clover and safflower: CN105850416A[P]. 2016-08-17.

[27] 王龙涛, 赵建伟, 华玉妹, 等. 植草沟净化地表径流运行条件优化[J]. 环境工程学报, 2016, 10(9):4855-4860. WANG L T, ZHAO J W, HUA Y M, et al. Optimum operating conditions of grassed swales to purify the surface runoff[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, 10(9):4855-4860.

[28] 孔繁鑫, 朱端卫, 范修远, 等. 脱氮沟对农业面源污染中地下水硝酸盐的去除效果[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4):1519-1524. KONG F X, ZHU D W, FAN X Y, et al. Effect of denitrification trench for removing groundwater nitrate of non-point source pollutant in rural areas[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(4):1519-1524.