

面源污染治理专论

农村面源污染治理的“4R”理论与工程实践
——源头减量技术薛利红^{1,2}, 杨林章^{1,2}, 施卫明², 王慎强²

(1.江苏省农业科学院, 南京 210014; 2.中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘要:农村面源污染因其污染源的高度分散性及污染排放的时空不确定性等特征,使得从源头上控制污染物的产生变得尤为重要。本文在自己已有工作的基础上,系统总结梳理了国内外的源头减量技术,并按照技术原理进行了分类阐述。研究表明,源头减量可以通过减少肥料用量或者减少排水量两种途径实现。减少肥料用量,可采用基于目标产量和肥料效应函数的氮肥优化技术、按需施肥技术、平衡施肥技术、有机无机配合技术或者使用新型缓控释肥等技术,也可通过改变轮作制度等来实现。从源头上减少排水量,则需要对水分进行优化管理,旱地采用水肥一体化技术,水田采用节水灌溉技术,坡耕地采用保护性耕作等技术等。减量技术的应用要兼顾作物产量和经济效益,并结合区域环境特征,因地制宜。源头减量技术的研发要顺应时代要求,以节本省工为目标,逐步向智能化、机械化迈进。源头减量的同时,要配置生态拦截技术等,并对污染物中的氮磷养分进行回用,最终实现污染物减排的最大化。

关键词:面源污染;源头减量;优化施肥;节水灌溉;新型缓控释肥;轮作制度改变

中图分类号:X506 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2013)05-0881-08 doi:10.11654/jaes.2013.05.001

Reduce-Retain-Reuse-Restore Technology for Controlling the Agricultural Non-point Pollution in Countryside in China: Source Reduction TechnologyXUE Li-hong^{1,2}, YANG Lin-zhang^{1,2}, SHI Wei-ming², WANG Shen-qiang²

(1.Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2.Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Due to the high dispersion of pollution source, spatial and temporal uncertainty of pollution emissions, source reduction technology become very important for non-point pollution control. In this paper, based on the authors' existing work, the source reduction technology was summarized and classified in accordance with the technical principles. Source reduction of non-point pollution can be achieved by reducing the fertilizer uses or the discharges. Fertilizer reduction could be achieved by using nitrogen optimizing based on the target yield and N-yield responsive curves, site-specific N management, balanced fertilization, organic combined inorganic fertilization, control-released fertilizer, or altering the crop systems with legumes. To reduce the discharges from agricultural fields, water regimes should be optimized, such as integrated water and fertilizer technology for dry lands, water-saving irrigation for paddy field, and conservation tillage for sloping lands. The adoption of source reduction technology for non-point pollution control should according to the regional environment characteristics and local conditions, and take into account the crop yield and economic benefits simultaneously. The future development of source reduction technology should focused on the labor-saving and cost-saving, and towards the intelligent and mechanization. In order to realize the maximum pollution reduction, ecological retain technology and nutrients reuse technology should be assembled together with the resource reduction technology.

Keywords: non-point pollution; source reduction; optimized fertilization; control-released fertilization; crop systems alteration; Water-saving irrigation

党的十八大报告提出,把生态文明建设放在突出地位,融入经济建设、政治建设、文化建设、社会建设

各方面和全过程,努力建设美丽中国,实现中华民族永续发展。建设美丽中国,离不开美丽乡村。我国作为传统的农业大国,农民人口占半数以上,农村面积占我国面积的90%左右。日益严重的农村面源污染已成为我国水体水质恶化的主要污染源,直接影响到了广大农村居民的生活环境以及农业的可持续健康发展。要打造美丽乡村,必须对农村面源污染进行控制。农

收稿日期:2013-04-25

基金项目:江苏省农业科技自主创新资金[CX(12)3046];国家水专项太湖项目(2012ZX07101-004);环保部公益性行业项目(2013467035)

作者简介:薛利红(1977—),女,博士,研究员,研究方向为农田养分精准管理与面源污染控制技术。

E-mail: njxuelihong@gmail.com

村面源污染中,化肥尤其是氮肥的大量使用是最重要的来源。据调查,我国氮肥利用率为30%~35%,磷肥利用率仅为10%~20%,每年农田氮肥的损失率在33.3%~73.6%之间,平均总损失率约60%。农村面源污染因其污染源的高度分散性以及污染排放的时空不确定性,使得管理者很难确定具体的责任主体和责任分担。鉴于过程监控的难度和末端治理的滞后效应及高成本等,从源头控制污染物的产生及其进入环境是防治农业面源污染的最佳对策。本文以农村面源污染的主要来源——种植业为主要研究对象,着重阐述农田氮磷养分损失的源头控制技术,并根据其技术原理进行了分类概括,总结了技术的应用效果及其适用范围,以期从事农村面源污染治理的相关人员提供借鉴参考。

1 基于增效原理的优化施肥技术

优化施肥技术以保证作物产量为核心,以作物养分需求为指导,并考虑土壤的养分供应能力进行施肥,使得施入的肥料尽量能被作物完全吸收利用,从而提高肥料利用率,达到减少化肥投入,降低面源污染的目的。

1.1 基于目标产量和肥料效应函数的氮肥优化技术

农民为了确保高产往往施入过量的氮肥,王海等^[1]的调查显示,太湖流域稻季施氮量平均在 $352 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,其中 $270 \sim 360 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的占43.3%, $360 \sim 450 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (过量施肥)和超过 $450 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (极端过量施肥)的分别占26.6%和13.3%。在太湖流域宜兴大浦多年的长期定位试验结果发现,作物产量与氮肥用量之间并不是简单的线性关系,而是二次曲线函数关系,氮素损

失与氮肥用量却存在着一个线性关系(图1),表明过多的氮肥投入不仅产量有所下降,而且环境污染也比较严重^[2-3]。因此,适宜减少施氮量,不仅能提高产量,还能减少面源污染。大量研究也表明,太湖流域稻田的最佳施氮量在 $210 \sim 270 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[2-6],当前农户氮肥用量可以减少20%~30%左右,能在增产的同时减少氮素损失^[7-11]。对于集约化设施菜地,采用基于目标产量和肥料效应函数的肥料优化技术,氮肥施用量可比农户对照减少10%~30%,面源污染排放显著降低而产量不减^[12-14]。在太湖地区连续4年的田间定位试验结果表明,在农户习惯施氮量的基础上减少氮肥用量20%~30%,可有效提高氮肥农学效率,降低土壤硝态氮残留量,减少全年氮淋洗量24%~56%,产量还有所提高^[15-16]。

1.2 基于作物冠层光谱或叶色的按需施氮技术

在目标产量和肥料效应函数法的基础上,考虑到作物长势和土壤养分存在的时空变异性,做到因地因作物施肥,发展了基于作物实时长势的追肥调控技术。该类技术以作物的叶色或冠层反射光谱为诊断工具,借助于叶绿素仪(SPAD仪)、便携式光谱仪或光谱传感器等可实现作物生长的无损快速诊断,并对追肥氮用量进行决策,从而避免过度施肥带来的面源污染问题或施肥不足带来的减产问题。薛利红等详细比较了国内外基于冠层反射光谱的追肥优化算法,结果表明减少基肥用量或不施基肥,根据作物长势实时反映出来的冠层反射光谱调整追肥用量可以保证高产、提高氮肥利用率并减少环境风险^[17]。在此基础上组建了基于目标产量的光谱施肥模型,并在江西双季稻区进行了检验和示范,表明基于冠层NDVI的诊断施肥

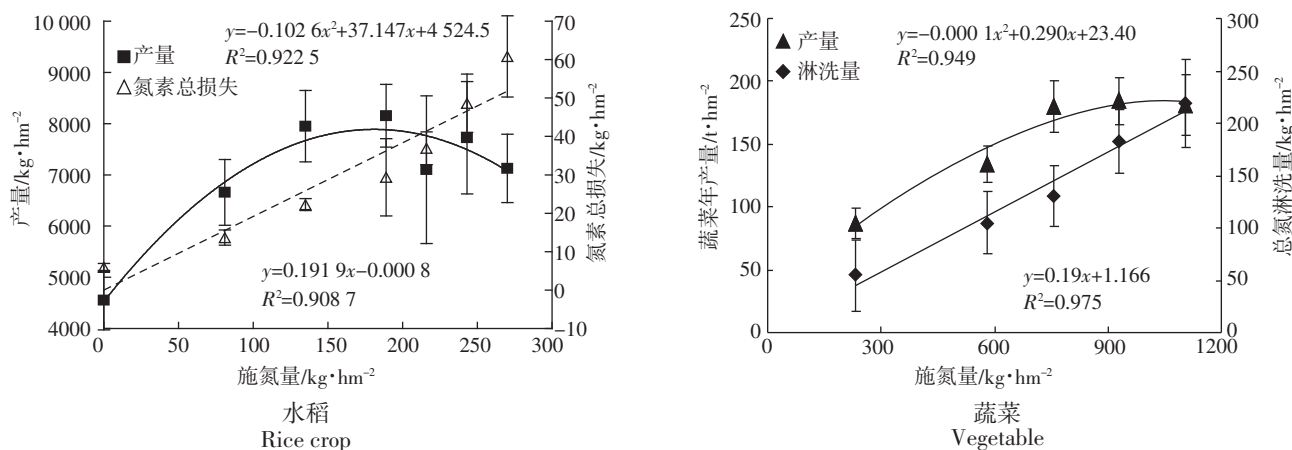


图1 不同施氮量下产量和氮肥流失的变化

Figure 1 Yield and N loss under different N rate

与传统氮肥报酬曲线计算出的最佳施肥量和最高产量相差无几,氮肥用量比农户习惯施肥降低了3%~20%,产量增加了5%~8%,氮肥农学效率提高了10%~20%左右,氮恢复效率提高了6%~10%^[18]。而利用叶色(SPAD仪)进行水稻推荐追肥,能在保证产量的基础上,减少农户氮肥用量40%左右,减少TN渗漏和径流损失38%和26%^[9-11]。

针对集约化设施蔬菜,提出了根层养分实时调控技术^[19]。该技术以根层养分为调控对象,根据蔬菜作物养分需求规律进行定量推荐施肥,使得蔬菜作物生产的养分供应处于“最佳状态”,以期达到满足蔬菜作物高产优质的养分需求的同时,不带来环境污染压力的目的。该技术已在京郊日光温室番茄生产中得到了初步应用,确定了其氮素供应目标值^[20],有利于减少养分向环境的排放。

1.3 平衡施肥技术

鉴于氮磷钾之间以及某些微量元素与氮磷钾之间的显著互作效应,为了最大程度地发挥肥料效应,在李比希最小因子定律的指导下,发展了平衡施肥技术。平衡施肥技术也称测土配方施肥技术,其在作物需肥规律、土壤供肥特性与肥料效应的基础上,统筹考虑了氮磷钾3种大量元素及微量元素的供应,从而使土壤养分的供应能够全面满足作物生产的需要,提高肥料利用率,减少肥料损失。南四湖沿岸麦玉米轮作区玉米季采用平衡施用氮磷钾肥技术,可比农户习惯施肥模式减少化肥氮用量,玉米产量不减而径流和淋溶无机氮损失降低18%^[21]。对于紫色土坡耕地,玉米平衡施肥在3种模拟人工降雨强度条件下均能减少氮磷钾的流失^[22],自然降雨条件下能显著降低总磷流失52%~61%^[23]。山核桃平衡施肥可降低氮磷流失30%以上^[24]。南方典型红壤坡耕地的萝卜和花生采用平衡施肥技术,不仅减少了氮肥用量,提高了氮素利用率,还降低了径流中氮的浓度^[25]。需值得注意的是,平衡施肥技术的污染减排效果主要依赖于土壤的养分丰缺平衡状态。

1.4 新型缓控释肥技术

鉴于传统速效化肥释放速度快、需多次施肥等缺点,发展了新型缓控释肥技术。新型缓控释肥通过对传统肥料外层包膜处理来控制养分释放速度和释放量,使其与作物需求相一致,可显著提高肥料利用率。另外包膜材料阻隔膜内尿素与土壤脲酶的直接接触及阻碍膜内尿素溶出过程所必需的水分运移,减少了参与氨挥发的底物尿素态氮,还抑制了土壤脲酶活

性,从而明显降低氨挥发损失。王慎强等在宜兴大埔连续3年的田间试验结果表明,不论稻季或麦季,与等氮量的普通尿素处理相比,缓控释肥明显降低了径流N浓度,减少径流N损失约50%左右,降低氨挥发损失15%~30%,减少基肥期淋洗氮损失35%左右(图2)。薛利红等综合比较了国内现有商品缓控释肥对太湖流域稻田污染控制的效果,研究发现,与等养分的普通化肥分次施用相比,缓控释肥一次性基施条件下,南京土壤研究所缓控释肥不仅增产16%,还能减少径流氮损失约40%;在缓控释肥与化肥配施(5:5)条件下,所有缓控释肥处理均表现出了增产作用,6种肥料中有4种均表现出了一定的减排效果(6%~23%)(图3)。在此基础上,综合成本效益,总结提出了太湖流域稻田基于新型缓控释肥的“一基一追”技术,即稻田氮肥用量在200~210 kgN·hm⁻²为宜,其中60%~70%采用新型缓控释肥,一次性基施,其余采用普通尿素,在穗分化期施用,既增产增效,又能减氮减排^[9-11]。其他人的结果也表明,无论是在单季稻区还是双季稻区,稻田施用缓释肥,能比农户常规施肥减少氮肥用量10%~26%,产量不减少甚至增加,径流总氮损失降低36%~53%^[26-28]。

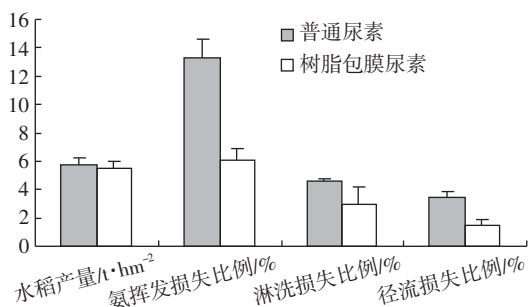


图2 新型缓控释肥的增产减排效果

Figure 2 Effect of coated-urea on rice yield and N loss from ammonia volatilization, runoff and leaching

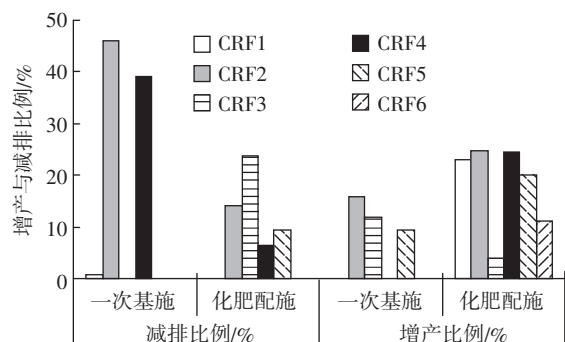


图3 不同缓控释肥对水稻的增产减排效果

Figure 3 Effect of different control-released fertilizer on rice yield and N runoff loss

缓控释肥对旱地的节氮减排效果也比较显著。花生施用缓控释肥,整个生长季径流总氮和总磷损失分别削减了7%~21%和16%~36%^[29]。麦玉轮作区玉米季施用缓控释肥,可比农户习惯施肥模式减少化肥氮用量 $201 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$,比例高达58%,玉米产量不减少而径流和淋溶无机氮损失降低27%^[30]。值得注意的是,缓控释肥对径流氮减排的效果存在着不确定性,因降雨发生的时间而异。在生长前期,缓控释肥处理能显著减少地表径流中氮含量,但在生育后期,由于其养分缓慢释放特性,与常规速效化肥相比,地表径流中氮浓度可能会有所提高^[11,29]。在实际应用中,应结合作物类型等选择适宜的缓控释肥品种。

2 有机肥替代减量技术

这类技术多以农业废弃物如秸秆、处理过的畜禽粪便、沼液沼渣、菌渣、绿肥等富含一定NP养分的有机物料来替代部分化肥,利用有机物料中养分缓慢释放的特点,达到减少化肥用量,减少面源污染排放的目的。稻麦轮作系统采用有机肥与无机化肥配施,与传统农户施肥处理可减少氮用量25%左右,产量略有增加,氮肥利用效率增加,稻季径流氮损失减少6%~28%,麦季径流和渗漏损失减少25%~46%;与等氮量的纯化肥处理相比,径流减排效果因径流产生的时间而变化,若径流发生在施肥后期,有机肥处理因其养分缓慢释放特性而导致径流损失略高于纯化肥处理,若径流发生在施肥后一周内,则低于纯化肥处理^[9,11]。秸秆还田处理使稻麦两熟制农田周年作物产量略有增加,减少稻麦周年的氮磷径流损失量7%~8%^[31]。双季稻采用绿肥还田,能减少化肥氮投入 $115.5 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$,径流氮损失减少 $8.9 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[32]。南四湖沿岸麦玉轮作区玉米季采用麦秸还田处理和有机无机配施处理,在减少化肥氮投入的同时,径流和淋溶无机氮损失减少了23%和25%^[21,30]。露地蔬菜有机无机配施也可提高蔬菜产量,削减地表径流氮磷损失^[33]。若采用商品有机肥还田,有机肥的比例以占氮总量的20%~30%为宜,基肥时施入,这样既能维持土壤肥力,保证产量,又不过多增加投入成本,是一项经济简单又能减少面源污染的实用技术^[30,9-11]。

3 基于种植制度/轮作制度调整的源头减量技术

轮作制度或者耕作制度不同,化肥的投入量及水分管理方式也会不同,从而造成面源污染产生情况也

不尽相同。我们在太湖流域宜兴连续8年的定位试验结果表明,与稻麦轮作农户常规施肥模式相比,稻-紫云英、稻-黑麦草和稻-休闲轮作下水稻无氮区产量可达最高产量的75%~85%,稻季氮肥用量分别减至 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时产量还略有增加,径流总氮损失可减少18%~45%;由于冬季不施氮肥,冬季径流总氮损失减少了70%~90%^[34]。进一步对稻-紫云英、稻-蚕豆、稻-油菜、稻-休闲和稻麦五种轮作方式的连续3年田间数据比较发现,稻-紫云英和稻-休闲的减排效果最佳,能减少径流总氮损失35%~40%,每 667 m^2 经济效益减少250~300元;而稻-蚕豆轮作能在减少径流氮排放25%~30%的条件下获得较高的经济效益(图4)。洱海流域水稻4种不同轮作模式(水稻-蚕豆、水稻-油菜、水稻-大蒜、水稻-黑麦草)的调查也表明,水稻-蚕豆比水稻-大蒜模式减少氮素流失风险38%^[35]。利用豆科植物轮作还田,可提高土壤肥力,降低稻季施肥量^[36],减少稻季氮肥流失引起的环境风险^[37];另外,由于冬季不施氮肥有效降低了土壤中速效氮含量,从而使冬季径流氮损失显著减少,无疑是河网地区环境敏感区面源污染削减的有效方法之一。在此基础上,我们又进一步研究了水稻-紫云英轮作下氮肥减量的最大可能性,长期定位试验田的3年微区试验结果表明,紫云英还田条件下,稻季只补施33%的化肥氮即 $81 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 左右,就能获得与农户施肥模式相同的产量(数据略)。

60%以上的设施菜地在夏季期间处于揭棚状态,而揭棚期(6—9月)又恰逢降雨高峰期,加上设施菜地土壤硝态氮高残留现象普遍,导致该期土壤硝态氮

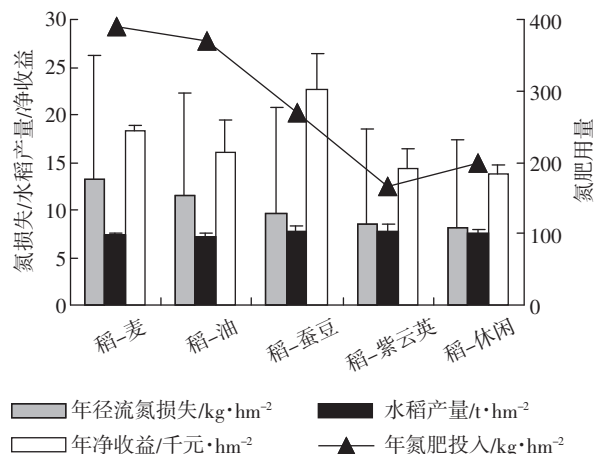


图4 稻田不同轮作制度下的氮肥投入量、水稻产量、净收益及环境排放

Figure 4 Annual N input, rice yield, annual net benefit and annual N loss through runoff under different rice-based rotations

淋失严重,为氮流失的高峰时期^[38-39]。该期种植填闲作物,可有效吸收土壤根层氮素,减少径流损失;同时植物的蒸腾作用减少了土壤剖面中的水分,减少了硝酸盐随水分的下移;深根系的填闲作物还可通过根系的下扎将土壤下层养分像泵一样抽上来,从而显著减少了土壤淋洗的风险。太湖地区设施蔬菜轮作体系的揭棚期种植填闲作物甜玉米,可显著降低土壤剖面中硝态氮的含量,减少淋洗液中总氮浓度 22%~64%。填闲作物配合蔬菜的氮肥减量处理,其减排效果更为显著(图 5)。

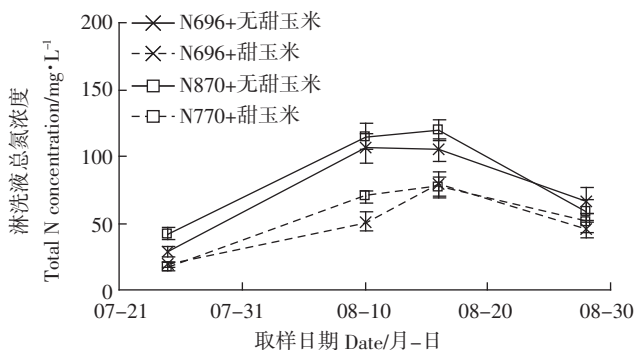


图 5 设施蔬菜休闲期有无填闲作物的淋洗液氮浓度

Figure 5 Total N concentration of leached water under different N fertilizer rates during fallow period

4 节水灌溉及水肥一体化技术

农田氮磷等养分的流失是以水为载体,对于旱地,水分还是影响肥料有效性的重要因素,因此农田水分管理对控制农业面源污染的流失起着不可忽视的作用。在旱作和蔬菜生产中,多采用大水畦灌、随水冲肥的方法,造成氮素养分向深层土壤淋失,氮素利用率降低。优化灌溉管理,发展水肥一体化技术(滴灌、喷灌),可有效提高水肥利用率,减少氮磷流失,并缓解土壤次生盐渍化问题^[40]。水肥一体化技术与传统施肥相比节肥 30%左右,作物产量相当,蔬菜体内硝酸盐含量降低 30%以上,硝酸盐淋洗减少 1/3 以上。水肥一体化技术实现了平衡施肥和集中施肥,减少了肥料挥发和流失以及养分过剩造成的损失,具有施肥简便、供肥及时、作物易于吸收、提高肥料利用率等优点。但投资较大,并需进行合理的管理和维护,否则易导致滴头堵塞。

稻田田面平整,犁底层结实,并在田埂的保护下形成封闭径流体系,只有在特殊情况如暴雨发生时,田面水才会溢出形成机会径流。因此,通过水分管理在源头上控制氮磷流失是可行的而且较易实施。在同一施氮水平下,水稻控制灌溉可明显减少灌水次数和

灌水量,节水 25%左右,并降低渗漏水量 32.7%,尽管渗漏水中氮浓度略有上升,但渗漏氮损失量仍减少了 16%~49%,产量还有所增加^[41]。水稻采用间歇灌溉和湿润灌溉比常规淹灌能显著减低排水中氮磷浓度^[42-43]。张志剑等^[44-45]提出了稻田“零排放”水分管理技术,即在节水灌溉的基础上,综合降雨信息,将田间烤田取代人工田间排水,确保在水稻的全生育期内只灌不排的稻田水分管理技术;试验结果表明,一季水稻的总磷、溶解态磷和颗粒态磷的净排放负荷分别降到了 -0.65、-0.30、-0.17 kgP·hm⁻²,使稻田由输出磷素的“源”转成为截流净化磷素的“汇”,起到了净化水体的作用。乔欣等则提出了稻田的浅灌深蓄模式,即提高田埂高度,降低每次灌水的深度,比常规灌溉能减少排水量 44.7%^[46]。稻田节水灌溉减少氮磷流失的机理主要体现在:(1)减少了稻田机会径流,降低了排水量;(2)降低了稻田表层水的水压,削弱了稻田水分下渗的动力,抑制了氮磷的淋失;(3)薄水层增加了土壤及其表层水中微生物的数量和活性,提高了氮素吸收利用率;(4)土壤通气性增强,氧化还原电位增加,加速了磷的固定,降低了磷素流失的潜能。但在实际应用中,节水灌溉应考虑施肥活动的影响,延长施肥与田间排水的时间差,施肥后一周内应尽量避免排水事件的发生。

5 其他技术

针对旱地尤其是坡耕地,发展了基于保护性耕作的土壤养分流失控制技术,如免耕技术、覆盖技术、横垄耕作技术等,可减少地表产流次数和径流量,降低氮磷养分流失^[47-48]。另外,针对土壤磷素流失,采用施加一些土壤改良剂如氢氧化铝、石灰石粉、石膏、氯化钙、铁铝氧化物、粉煤灰、污泥以及粘粒含量较高的泻湖沉积物等来降低土壤中磷的有效性,从而达到减少磷流失的目的^[49]。

6 小结与讨论

(1)源头减量是减少面源污染的根本所在。农业面源污染因其污染来源复杂、分散,污染排放存在着不确定性和随机性、时空变异性较大等特点,造成污染的过程监控和过程拦截难以实施。加上其污染物浓度较低,汇入水体后的末端治理成本高,见效慢。因此,从源头上控制面源污染发生量是减少面源污染的最有效措施。

(2)源头减量可以通过减少肥料用量或者减少排

水量两种途径实现。减少肥料用量,则可采用基于目标产量和肥料效应函数的氮肥优化技术、按需施肥技术、平衡施肥技术、有机无机配合技术或者使用新型缓控释肥等技术,也可通过改变轮作制度等来实现。从源头上减少排水量,则需要对水分进行优化管理,旱地采用水肥一体化技术,水田采用节水灌溉技术,坡耕地采用保护性耕作等技术等。

(3)减量技术的应用要兼顾作物产量和经济效益,并结合区域环境特征,因地制宜。我国人多地少,为确保粮食安全,就必须要保证作物高产。源头减量技术要被广大农民所接受并自觉采纳,除了政府适当的引导外,技术的经济效益分析不容忽视。另外,还需根据区域环境特征,因地制宜,对这些源头减量技术进行优化组合,并在空间上进行优化配置,从而最大程度地减少面源污染的发生量。如针对太湖流域稻田,可以根据稻田沿河湖距离的远近,因地制宜地采用不同的技术组合,对一级保护区或沿河湖区,优先考虑环境效应,可以改变轮作制度,冬季种植豆科绿肥,保证稻季高产,牺牲冬季作物产量;而对其他区域的稻田,则进行优化施肥处理,保证高产高效的同时减少污染排放。

(4)源头减量技术的研发要顺应时代要求,以节本省工为目标,逐步向智能化、机械化迈进。随着我国农村经济水平的提高以及农村务工人员的不增多,劳动力日益紧缺。农村土地扭转现象普遍,农村合作社、家庭农场将成为未来农业的发展方向,节本省工便成为源头减量技术研发的第一要求,机械化、智能化将成为未来的发展方向。如大田作物发展基于作物长势遥感和土壤肥力的实时精准施肥机械,蔬菜发展水肥一体化控制系统,稻田研发基于大粒缓控释肥的施肥插秧一体化机械等等。

(5)源头减量的同时,要配置生态拦截技术等,并对污染物中的氮磷养分进行回用,最终实现污染物减排的最大化。源头减量虽然能有效减少污染物的产生量,但不能完全控制污染的产生,这就要求在污染物向水体的迁移过程中实施生态拦截等技术,增加污染物在陆地的停留时间和路线,进一步对污染物中的氮磷养分进行回用,减少其向水体的迁移,从而最大程度地减少面源污染对水体环境的风险。

参考文献:

- [1] 王海,席运官,陈瑞冰,等.太湖地区肥料、农药过量施用调查研究[J].农业环境与发展,2009,26(3):10-15.
- WANG Hai, XI Yun-guan, CHEN Rui-bing, et al. Investigation on ex-

- cessive application of fertilizer and pesticides in Taihu Lake region[J]. *Agro-environment and development*, 2009, 26(3):10-15.
- [2] 薛峰,颜廷梅,乔俊,等.太湖地区稻田减量施肥的环境效益和经济效益分析[J].生态与农村环境学报,2009,25(4):26-31,51.
- XUE Feng, YAN Ting-Mei, QIAO Jun, et al. Economic and environmental benefits of lower fertilizer application rate in paddy fields in Taihu Area[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2009, 25(4):26-31,51
- [3] 赵冬,颜廷梅,乔俊,等.稻季田面水不同形态氮素变化及氮肥减量研究[J].生态环境学报,2011,20(4):743-749.
- ZHAO Dong, YAN Ting-Mei, QIAO Jun, et al. Change of different nitrogen forms in surface water of rice field and reduction of nitrogen fertilizer application in rice season[J]. *Ecology and Environment*, 2011, 20(4):743-749.
- [4] 崔玉亭,程序,韩纯儒,等.苏南太湖流域水稻经济生态适宜施氮量研究[J].生态学报,2000,20(4):659-662.
- CUI Yu-ting, CHENG Xu, HAN Chun-ru, et al. The economic and ecological satisfactory amount of nitrogen fertilizer using on rice in Tai Lake watershed[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(4):659-662.
- [5] 黄进宝,范晓晖,张绍林,等.太湖地区黄泥土壤水稻氮素利用与经济生态适宜施氮量[J].生态学报,2007,27(2):588-595.
- HUANG Jin-bao, FAN Xiao-hui, ZHANG Shao-lin, et al. Investigation on the economically-ecologically appropriate amount of nitrogen fertilizer applied in rice production in Feleaching-stagnic anthrosols of the Taihu Lake region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(2):588-595.
- [6] 闫德智,王德建,林静慧.太湖地区氮肥用量对土壤供氮、水稻吸氮和地下水的影响[J].土壤学报,2005,42(3):440-446.
- YAN De-zhi, WANG De-jian, LIN Jing-hui. Effects of fertilizer-N application rate on soil N supply, rice N uptake and groundwater in Taihu Region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 42(3):440-446.
- [7] 张刚,王德建,陈效民.稻田化肥减量施用的环境效应[J].中国生态农业学报,2008,16(2):327-330.
- ZHANG Gang, WANG De-jian, CHEN Xiao-min. Effects of reduced fertilizer application on environmental quality of paddy field [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(2):327-330.
- [8] QIAO Jun, YANG Lin-zhang, YAN Ting-mei, et al. Nitrogen fertilizer reduction in rice production for two consecutive years in the Taihu Lake region[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2012, 146, 103-112.
- [9] 俞映惊,薛利红,杨林章.太湖地区稻麦轮作系统不同氮肥管理模式对麦季氮素利用与流失的影响研究[J].农业环境科学学报,2011,30(12):2475-2482.
- YU Ying-liang, XUE Li-hong, YANG Lin-zhang. Nitrogen use efficiency and loss from runoff and leaching in wheat season with rice-wheat rotation system under different nitrogen management methods in Taihu Lake Region[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(12):2475-2482.
- [10] 俞映惊,薛利红,杨林章.不同氮肥管理模式对太湖流域稻田土壤氮素渗漏的影响[J].土壤学报,2011,48(5):988-995.
- YU Ying-liang, XUE Li-hong, YANG Lin-zhang. Effects of nitrogen management on nitrogen leaching of paddy soil in Taihu Lake Region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 48(5):988-995.
- [11] 薛利红,俞映惊,杨林章.太湖流域稻田不同氮肥管理模式下的氮素平衡特征及环境效应评价[J].环境科学,2011,32(4):222-227.

- XUE Li-hong, YU Ying-liang, YANG Lin-zhang. Nitrogen balance and environmental impact of paddy field under different N management methods in Taihu Lake Region[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(4): 222-227.
- [12] 刘宏斌,李志宏,张维理,等. 露地栽培条件下大白菜氮肥利用率与硝态氮淋溶损失研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(3): 286-291.
- LIU Hong-bin, LI Zhi-hong, ZHANG Wei-li, et al. Study on N use efficiency of Chinese cabbage and nitrate leaching under open field cultivation[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2004, 10(3): 286-291.
- [13] 闵 炬,施卫明. 不同施氮量对太湖地区大棚蔬菜产量、氮肥利用率及品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(1): 151-157.
- MIN Ju, SHI Wei-ming. Effects of different N rates on the yield, N use efficiency and fruit quality of vegetables cultivated in plastic greenhouse in Taihu Lake region[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(1): 151-157.
- [14] 高佳佳,雷金繁,陈竹君,等. 施肥对新建日光温室番茄产量及土壤养分含量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(1): 19-24.
- GAO Jia-jia, LEI Jin-fan, CHEN Zhu-jun, et al. Effects of fertilization on the yield of tomato and soil nutrient contents in newly-built sunlight greenhouse[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2012, 30(1): 19-24.
- [15] Min Ju, ZHAO Xu, SHI Wei-ming, et al. Annual nitrogen balance and losses in greenhouse vegetable systems in South-eastern China[J]. *Pedosphere*, 2011, 21(4): 464-472.
- [16] 陆扣萍,谢寅峰,闵 炬,等. 不同施氮量对大棚茼蒿根系形态及产量和品质的影响[J]. 土壤, 2011, 43(4): 542-547.
- LU Kou-ping, XIE Yin-feng, MIN Ju, et al. Effects of different N rates on root morphology, yield and fruit quality of lettuce cultivated in plastic greenhouse[J]. *Soils*, 2011, 43(4): 542-547.
- [17] XUE Li-hong, YANG Lin-zhang. Recommendations for nitrogen fertilizer topdressing rates in rice using canopy reflectance spectra [J]. *Biosystems Engineering*, 2008, 100, 524-534.
- [18] 覃 夏,王绍华,薛利红. 江西鹰潭地区早稻氮素营养光谱诊断模型的构建与应用[J]. 中国农业科学, 2011, 44(4): 691-698.
- QIN Xia, WANG Shao-hua, XUE Li-hong. Nitrogen nutrition diagnosis of early rice with NDVI and its application for nitrogen topdressing recommendation at Yingtan, Jiangxi Province [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(4): 691-698.
- [19] 陈 清,张福锁. 蔬菜养分资源综合管理理论与实践[M]. 北京: 中国农业大学出版社. 2005.
- CHEN Qin, ZHANG Fu-suo. Integrated management and practices of nutrient resources in vegetable field [M]. China Agricultural University Press, Beijing. 2005.
- [20] HE Fei-fei, CHEN Qin, JIANG Rong-feng, et al. Yield and nitrogen balance of greenhouse tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) with conventional and site-specific nitrogen management in Northern China [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystem*, 2007, 77: 1-14.
- [21] 谭德水,江丽华,张 骞,等. 不同施肥模式调控沿湖农田无机氮流失的原位研究:以南四湖过水区粮田为例[J]. 生态学报, 2011, 31(12): 3488-3496.
- TAN De-shui, JIANG Li-hua, ZHANG Qian, et al. In situ study on influences of different fertilization patterns on inorganic nitrogen losses through leaching and runoff: A case of field in Nansi Lake Basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(12): 3488-3496.
- [22] 林超文,罗春燕,庞良玉,等. 不同耕作和覆盖方式对紫色丘陵区坡耕地水土及养分流失的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(22): 6091-6101.
- LIN Chao-wen, LUO Chun-yan, PANG Liang-yu, et al. Effects of different cultivation and mulching methods on soil erosion and nutrient losses from a purple soil of sloping land[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(22): 6091-6101.
- [23] 徐泰平,朱 波,况福虹,等. 平衡施肥对紫色土坡耕地磷素径流流失的影响[J]. 农业环境科学学报. 2006, 25(4): 1055-1059.
- XU Tai-ping, ZHU Bo, KUANG Fu-hong, et al. Effects of balanced fertilization on phosphorus loss by runoff from slope cropland in purple-soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(4): 1055-1059.
- [24] 黄程鹏,吴家森,许开平,等. 不同施肥山核桃林氮磷径流流失特征[J]. 水土保持学报, 2012, 26(1): 43-47.
- HUANG Cheng-peng, WU Jia-sen, XU Kai-ping, et al. Runoff losses of nitrogen and phosphorus under *Carya cathayensis* Sarg. stand with different fertilization[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(1): 43-47.
- [25] 王 云,徐昌旭,汪怀建,等. 施肥与耕作对红壤坡地养分流失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(3): 500-507.
- WANG Yun, XU Chang-xu, WANG Huai-jian, et al. Effect of fertilizer levels and tillage methods on nutrient loss of red soil slopes[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(3): 500-507.
- [26] 徐培智,郑惠典,张育灿,等. 水稻缓释控释肥的增产效应与环保效应[J]. 生态环境, 2004, 13(2): 227-229.
- XU Pei-zhi, ZHENG Hui-dian, ZHANG Yu-can, et al. Effects of a slow/controlled released fertilizer on rice yield and the environment[J]. *Ecology and Environment*, 2004, 13(2): 227-229.
- [27] 张丽娟,马中文,马友华,等. 优化施肥和缓释肥对水稻田面水氮磷动态变化的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(1): 90-95.
- ZHANG Li-juan, MA Zhong-wen, MA You-hua, et al. Dynamic variation of nitrogen and phosphorus under optimize fertilization and slow-release fertilizer in paddy field surface water[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(1): 90-95.
- [28] 鲁艳红,纪雄辉,郑圣先,等. 施用控释氮肥对减少稻田氮素径流损失和提高水稻氮素利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(3): 490-495.
- LU Yan-hong, JI Xiong-hui, ZHENG Sheng-xian, et al. Effect of controlled-release nitrogen fertilizer on reducing nitrogen runoff loss and increasing nitrogen recovery efficiency of rice plant[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(3): 490-495.
- [29] 王艳华,邱现奎,胡国庆,等. 控释肥对坡地农田地表径流氮磷流失的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(2): 10-15.
- WANG Yan-hua, QIU Xian-kui, HU Guo-qing, et al. Effect of controlled release fertilizer on nitrogen and phosphorus runoff losses from farmland in slope field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(2): 10-15.
- [30] 谭德水,江丽华,张 骞,等. 南四湖过水区不同施肥模式下农田养分径流特征初步研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(2): 464-471.
- TAN De-shui, JIANG Li-hua, ZHANG Qian, et al. Characteristics of nutrient runoff losses in farmland of Nansi Lake basin under different

- fertilization patterns[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(2): 464–471.
- [31] 刘红江, 郑建初, 陈留根, 等. 秸秆还田对农田周年地表径流氮、磷、钾流失的影响[J]. *生态环境学报*, 2012, 21(6): 1031–1036.
- LIU Hong-jiang, ZHENG Jian-chu, CHEN Liu-gen, et al. Effects of straw-returning on annual overland runoff N, P, K loss in farmland[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(6): 1031–1036.
- [32] 吴俊, 樊剑波, 何园球, 等. 不同减量施肥条件下稻田面水氮素动态变化及径流损失研究[J]. *生态环境学报*, 2012, 21(9): 1561–1566.
- WU Jun, FAN Jian-bo, HE Yuan-qiu, et al. Dynamics of nitrogen and runoff loss in ponding water of paddy field under different fertilization practices[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(9): 1561–1566.
- [33] 黄东风, 王果, 李卫华, 等. 不同施肥模式对小白菜生长、营养累积及菜地氮、磷流失的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2009, 17(4): 619–624.
- HUANG Dong-feng, WANG Guo, LI Wei-hua, et al. Effect of fertilization mode on growth and nutrition accumulation in vegetables, and loss of nitrogen and phosphorus in vegetable fields[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2009, 17(4): 619–624.
- [34] 乔俊, 颜廷梅, 薛峰, 等. 太湖地区稻田不同轮作制度下的氮肥减量研究[J]. *中国生态农业学报*, 2011, 19(1): 24–31.
- QIAO Jun, YAN Ting-mei, XUE Feng, et al. Reduction of nitrogen fertilizer application under different crop rotation systems in paddy fields of Taihu Area[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(1): 24–31.
- [35] 汤秋香, 任天志, 雷宝坤, 等. 洱海北部地区不同轮作农田氮、磷流失特性研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(3): 608–615.
- TANG Qiu-xiang, REN Tian-zhi, LEI Bao-kun, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus losses in different crop rotation systems in the North of Erhai Lake Basin[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(3): 608–615.
- [36] 诸海焘, 余廷园, 田吉林. 绿肥-水稻轮作体系中氮肥适宜用量研究[J]. *上海农业学报*, 2008, 24(4): 60–64.
- ZHU Hai-tao, YU Ting-yuan, TIAN Ji-lin. Study on suitable nitrogen fertilizer dose under green manure crop-rice rotation system[J]. *Acta Agriculturae Shanghai*, 2008, 24(4): 60–64.
- [37] 卢萍, 单玉华, 杨林章, 等. 绿肥轮作还田对稻田土壤溶液氮素变化及水稻产量的影响[J]. *土壤*, 2006, 38(3): 270–275.
- LU Ping, SHAN Yu-hua, YANG Lin-zhang, et al. Influence of green manure crop on nitrogen concentration in soil solution of paddy field and rice yield[J]. *Soil*, 2006, 38(3): 270–275.
- [38] MIN Ju, ZHANG Hai-lin, SHI Wei-ming. Optimizing nitrogen input to reduce nitrate leaching loss in greenhouse vegetable production[J]. *Agricultural Water Management*, 2012(111): 53–59.
- [39] 陆扣萍, 闵炬, 李蒙, 等. 施氮量对太湖地区设施菜地年氮素淋失的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(4): 706–711.
- LU Kou-ping, MIN Ju, LI Meng, et al. Effect of nitrogen fertilizer application rates on annual nitrogen leaching loss from protected vegetable production system in Tai Lake Region, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(4): 706–712.
- [40] 郭春霞, 沈根祥, 黄丽华, 等. 精确滴灌施肥技术对大棚土壤盐渍化和氮磷流失控制的研究[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(2): 287–291.
- GUO Chun-xia, SHEN Gen-xiang, HUANG Li-hua, et al. Control of soil salinization and reduction of N & P loss with drip fertigation in greenhouse[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(2): 287–291.
- [41] 尹海峰, 焦加国, 孙震, 等. 不同水肥管理模式对太湖地区稻田土壤氮素渗漏淋溶的影响[J], *土壤*, 2013, 待发表.
- [42] 李荣刚, 夏源陵, 吴安之, 等. 太湖地区水稻节水灌溉与氮素淋失[J]. *河海大学学报*, 2001, 29(2): 21–25.
- LI Rong-gang, XIA Yuan-ling, WU An-zhi et al. Water saving irrigation and control of nitrogen leaching in Taihu Lake Region[J]. *Journal of Hehai University*, 2001, 29(2): 21–25.
- [43] 郑世宗, 陈雪, 张志剑. 水稻薄露灌溉对水体环境质量影响的研究[J]. *中国农村水利水电*, 2005, 3: 7–8, 11.
- ZHENG Shi-zong, CHEN Xue, ZHANG Zhi-jian. Study on the impacts of rice thin and wet irrigation on water environmental quality[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2005, 3: 7–8, 11.
- [44] ZHANG Zhi-jian, ZHANG Jian-ying, HE Ruo, et al. Phosphorus interception in floodwater of paddy field during the rice-growing season in Taihu Lake Basin[J]. *Environmental Pollution*, 2007, 145: 425–433.
- [45] ZHANG Zhijian, ZHU Yinmei, GUO Peiyong, et al. Potential loss of phosphorus from a rice field in Taihu Lake Basin[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2004, 33(4): 1403–1412.
- [46] 乔欣, 邵东国, 刘欢欢, 等. 节灌控排条件下氮磷迁移转化规律研究[J]. *水利学报*, 2011, 42(7): 862–868.
- QIAO Xin, SHAO Dong-guo, LIU Huan-huan, et al. Study on the moving and transforming law of N and P under water-saving irrigation and controlled drainage[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 42(7): 862–868.
- [47] 辛艳, 王瑄, 邱野, 等. 耕地不同耕作模式下土壤养分流失特征研究[J]. *沈阳农业大学学报*, 2012, 43(3): 346–350.
- XIN Yan, WANG Xuan, QIU Ye, et al. Discipline of nutrient losses from slope cropland in Liaoning Province under different cropping modes[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2012, 43(3): 346–350.
- [48] 李友军, 黄明, 吴金芝, 等. 不同耕作方式对豫西旱区坡耕地水肥利用与流失的影响[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(2): 42–47.
- LI You-jun, HUANG Ming, WU Jin-zhi, et al. Effects of different tillage on utilization and run-off of water and nutrient in sloping farmland of Yuxi dryland area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(2): 42–47.
- [49] 麻万诸, 章明奎. 改良剂降低富磷蔬菜地土壤磷和氮流失的作用[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(5): 22–27.
- MA Wan-zhu, ZHANG Ming-kui. Effects of amendments to reduce runoff loss of phosphorus and nitrogen from a vegetable soil with high test phosphorus[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(5): 22–27.