

附件 6
湖泊生态环境保护系列技术指南之六

农田面源污染防治技术指南

（试行）

前 言

为贯彻落实党中央、国务院“让江河湖泊休养生息”和十八大及十八届三中全会关于“生态文明建设”的战略部署，加快对水质较好湖泊（含水库，下同）的保护，避免众多水质较好湖泊走“先污染、后治理”的老路，环境保护部、国家发展和改革委员会、财政部印发了《水质较好湖泊生态环境保护总体规划（2013-2020年）》（以下简称《规划》）。为推进《规划》实施，指导各地开展水质较好湖泊生态环境保护工作，在国家水体污染控制与治理重大专项湖泊富营养化控制与治理技术及综合示范主题等相关科研成果基础上，制定本指南。

本指南明确了农田面源污染控制原则与策略，提出了农田面源污染诊断方法与技术，详细介绍了化肥减量化、种植制度优化、节水灌溉等源头控制技术和生态拦截带、生态沟渠等过程阻断技术，以及前置库、人工湿地等末端强化技术内容。本制度有助于科学指导各地合理开展湖泊流域农田面源污染控制工作，减少农田面源污染向湖泊水体迁移，为维护湖泊及流域生态系统健康提供保障。

本指南为指导性文件，各地可参考本指南提出的农田面源污染防治措施的技术方法，根据本地湖泊流域所处的自然地理状况和社会环境、主要环境问题等个性特征，参考选择适宜的农田面源污染防治技术。

本指南为首次发布。

本指南由环境保护部污染防治司、规划财务司组织制订。

本指南主要起草单位：中国环境科学研究院、中国科学院大学、江苏省农业科学院。

目 录

1	总则	1
1.1	适用范围	1
1.2	规范性引用文件.....	1
1.3	术语和定义	2
2	农田面源污染产生过程、污染特征及控制策略	5
2.1	产生过程	5
2.2	主要污染物及其性质.....	5
2.3	产生规律	6
2.4	污染特征	7
2.5	控制原则与策略.....	7
3	农田面源污染诊断方法与技术	9
3.1	污染物识别	9
3.2	污染物向水体迁移途径诊断	9
3.3	优先控制污染物确定.....	9
3.4	污染物向水体迁移关键时期诊断	10
3.5	农田面源污染重点控制区识别与确定	10
3.6	农田面源污染监测方法与技术	10
4	农田面源污染源头控制技术	14
4.1	土地利用规划与空间布局.....	14
4.2	化肥减量化技术.....	15
4.3	种植制度优化.....	18

4.4	土壤耕作优化.....	19
4.5	土壤调理剂施用.....	20
4.6	氨挥发控制技术.....	21
4.7	节水灌溉技术.....	22
4.8	农作物秸秆利用技术.....	25
4.9	农药减量化与残留控制技术.....	27
5	农田面源污染过程阻断技术.....	29
5.1	生态田埂技术.....	29
5.2	生态拦截带技术.....	30
5.3	生态拦截沟渠技术.....	30
6	农田面源污染末端强化技术.....	32
6.1	前置库技术.....	32
6.2	生态排水系统滞留拦截技术.....	33
6.3	人工湿地技术.....	34
7	投资与估算.....	36
8	维护管理.....	37
8.1	二次污染防治.....	37
8.2	防止淤积.....	37
附件	案例.....	38

1 总则

1.1 适用范围

本技术指南规定了种植业相关的最佳管理实用技术，主要包括农田面源污染诊断方法与技术、农田面源污染源头控制技术、农田面源污染过程阻断技术、农田面源污染末端强化技术等。

本技术指南适用于水质较好湖泊（含水库）流域的农田种植业污染控制，其他流域的农田种植业污染控制可参照执行。

1.2 规范性引用文件

本指南内容引用了下列文件中的条款。凡是不注日期的引用文件，其有效版本适用于本指南。

GB/T 16453.1-2008 水土保持综合治理 技术规范 坡耕地治理技术

GB 3838-2002 地表水环境质量标准

GB 50288-1999 灌溉与排水工程设计规范

GB/T 50363-2006 节水灌溉工程技术规范

GB 5084-2005 农田灌溉水质标准

GB/T 8321-2009 农药合理使用准则

HJ 555-2010 化肥施用环境安全技术导则

HJ 556-2010 农药使用环境安全技术导则

SL 18-2004 渠道防渗工程技术规范

TD/T 1012-2000 土地开发整理项目规划设计规范

1.3 术语和定义

1.3.1 氨挥发

土壤中的铵态氮转化为氨气而进入大气的过程。

1.3.2 大气沉降

指大气中氮、磷、重金属及有机污染物等直接沉降或通过雨雪等方式沉降到陆地和水体的过程，包括干沉降和湿沉降两种。

1.3.3 等高种植

在山坡同等高度的土地上种植农作物。等高种植可减轻降雨对山坡上土壤的冲刷。

1.3.4 过程阻断技术

指在污染物向水体迁移的过程中，通过一些物理的、生物的以及工程的方法等对污染物进行拦截阻断和强化净化，延长其在陆域的停留时间，最大化减少其进入水体的污染物量。

1.3.5 缓释肥料

由化学法或物理法制成能延缓养分释放速率，可供植物持续吸收利用的肥料。

1.3.6 缓释氮肥

由于化学成分改变或表面包涂半透水性或不透水性物质，而使其有效氮素慢慢释放，保持肥效较长的氮肥。

1.3.7 基肥

播种前或移栽前施入土壤的肥料。

1.3.8 硝化抑制剂

某些能抑制硝化菌活性，降低或延缓铵态氮向硝态氮的转化，从而减少氮素以硝酸盐态淋溶损失的物质。

1.3.9 土壤淋溶

降水或灌溉导致土体水下渗，上方土层中的某些矿物盐类或有机物质溶解并转移到下方土层中的过程。

1.3.10 农田面源污染

指农业生产活动中的氮素和磷素等营养物、农药以及其它有机或无机污染物，通过农田地表径流和农田渗漏等途径污染地表和地下水环境。

1.3.11 农田废弃物资源化

指对农业生产、农产品加工、畜禽养殖业和农村居民生活排放的废弃物进行资源化利用，通常资源化方式有肥料化、基质化和能源化等。

1.3.12 农药废弃物

指农药使用过程中产生的废包装物及在贮运等过程中失效的农药。

1.3.13 生态拦截

依据生态学原理，采用生物技术、工程技术等措施对农田径流中的氮、磷等物质进行拦截、吸附、沉积、转化及吸收利用，从而对农田流失的氮磷等进行有效拦截，达到控制养分流失，实现养分再利用。

1.3.14 生态沟渠

依据生态学原理，在农田系统中构建的沟渠。在沟渠中配置多种植物，并在沟渠中设置透水坝、拦截坝等辅助性工程设施，对沟渠水体中氮、磷等物质进行拦截、吸附，从而净化水质。

1.3.15 土壤吸附作用

污染物在土壤中于固、液两相间分配达到平衡时的吸附性能。

1.3.16 土壤调理剂

又称土壤改良剂，指加入土壤中用于改善土壤的物理和(或)化学性质，及其生物活性的物料。

1.3.17 微灌技术

指利用微灌设备组装成微灌系统，将有压水输送分配到田间，通过灌水器以微小的流量湿润作物根部附近土壤的一种局部灌水技术。

2 农田面源污染产生过程、污染特征及控制策略

2.1 产生过程

种植业生产过程中为保证农作物生产和收获,经常使用大量肥料(化肥、有机肥)和农药等农用化学品,造成这些农用化学品在土壤中大量累积。在降雨及灌溉的驱动下,肥料中的氮磷及农药中的有机组分等通过径流、淋溶、侧渗向水体迁移;肥料中的氮和农药中的有机组分通过挥发进入大气,随后又通过大气干湿沉降向水体迁移;农田废弃物大量堆积产生的污染物随径流、淋溶、侧渗向水体迁移。

2.2 主要污染物及其性质

农田种植业生产过程中产生的污染物主要包括氮、磷、农田废弃物和残留农药等,造成我国土壤及水体污染的农药主要是有机氯(滴滴涕、六六六、毒杀酚等)和有机磷(甲胺磷、对硫磷、敌敌畏等)两大类。

2.2.1 溶解性

氮(氨氮、铵态氮、硝态氮、有机氮)、磷(无机磷和有机磷)、农药等可溶于水,其主要以水为载体,通过径流、淋溶、下渗和侧渗等途径进入地表水和地下水。

2.2.2 吸附性

氮(氨氮、铵态氮、硝态氮、有机氮)、磷(无机磷和有机磷)、农药等被土壤颗粒物吸附,通过土壤流失随径流迁移至水体,污染水

体。通常，土壤对无机磷酸盐吸附能力较强。

2.2.3 挥发性

部分污染物，如氨氮、农药等具有挥发性，可通过挥发进入大气，随后通过干湿沉降进入水体。

2.2.4 时空变异性

农田面源污染物向水体的迁移主要受降雨、灌排等的驱动，具有明显的不确定性和时空变异性。

2.3 产生规律

农田面源污染产生量受降雨的强烈影响，降雨量越大、降雨强度越高，污染产生量就越大。水是农田面源污染向水体迁移的载体。降雨产生地表径流或淋溶时，溶于水中的污染物向水体迁移。降雨强度越大，径流量越大，农田向水体迁移的污染量越多。

农田面源污染产生量受施肥量和施肥时间的强烈影响，施肥量越高，污染产生的风险越大。施肥一周内是农田面源污染的高风险期，施肥一周以后则风险较低。

农田面源污染发生受土壤类型、耕作方式及肥料种类等的影响。旱地主要以淋溶和氨挥发损失为主，稻田以径流和氨挥发损失为主。粗质地土壤漏水、漏肥，污染物以淋溶方式迁移的风险大。石灰性等碱性土壤氨挥发风险大。温度越高氨挥发量越大。速效氮肥如尿素、碳铵等流失风险较大，而有机肥和缓控释肥相对较小。

2.4 污染特征

农田面源污染面广量大，污染主体多，污染源分散且隐蔽，污染发生的时间和空间具有随机性和不确定性，难监测、难量化。因此，农田面源污染控制的难度较大。

农田面源污染不仅包括氮、磷等无机物污染，还包括农药带来的有机污染，呈复合污染特征。加上农业生产经营的多样化，使得农田面源污染难以像点源污染治理那样制定统一的技术标准和措施。因此，农田面源污染难以治理。

农田面源污染物具有量大和低浓度特征，难治理、成本高、见效慢。农田面源污染物主要是氮和磷，排放的大部分污染物在进入水体后浓度相对较低，总氮浓度一般低于 10 mg/L，总磷浓度一般低于 2 mg/L。由于浓度低，污染物来源多而分散，造成治理难度加大，传统的脱氮除磷工艺去除效率较低、成本高且见效慢。

农田面源污染监管难。我国农业涉及人口众多，生产主体庞大(千家万户)，涉及管理部门多（农业、环保、林业等），协调管理困难。

2.5 控制原则与策略

2.5.1 控制原则

遵循总量控制原则。

采取源头控制、过程阻断、末端强化相结合原则。

遵循污染中氮、磷与水的资源化利用原则。

与农村生态文明建设相结合原则。

2.5.2. 控制策略

农田面源污染控制应对面源污水实行分区、分级、分时段综合处理和控制。分区控制即划分不同污染风险区进行控制，根据农田距离河湖的位置进行风险区的划分。离河湖近的区域应严格实行总量控制，可适当减少农产品产量，发展生态循环农业，政府可采取一定的生态补偿措施；其它地区要兼顾产量和环境，发展高产高效低污农业。分级控制，即根据不同区域污染水体的重要性以及污染途径的贡献进行优先排序分级控制，如北方旱作区地下水硝酸盐超标严重，应重点控制渗漏，以氨挥发和径流控制为辅；南方地表水体富营养化严重，应重点控制径流，以氨挥发和渗漏控制为辅；农药污染严重的区域则以农药控制为主。分段控制，即根据污染发生过程中污染的严重程度进行分段控制，应重点对雨季进行控制，对污水进行收集与处理；降雨时应重点控制初期径流(此时污染物浓度较高)。施肥季应注重施肥一周内的污染防控，此期为污染的高风险期。

3 农田面源污染诊断方法与技术

农田面源污染诊断主要涉及探明某区域农田面源污染主要污染物、面源污染物向水体迁移途径、发生强度、时空规律及其关键影响因素等，这些信息对选择农田面源污染防治技术，制定科学、合理、低成本、可持续、高效的农田面源污染控制措施与方案具有重要参考价值。

3.1 污染物识别

通过采集典型时期农田径流水、沟渠水、淋溶水样，分析其污染物种类，监测从农田挥发的污染物种类，结合对污染受纳水体利用途径、土壤性质、环境要素（降雨等）和施肥等，来综合判断区域内污染物种类。

3.2 污染物向水体迁移途径诊断

在获得农田面源污染物信息基础上，监测农田面源污染物通过径流、淋溶、挥发-沉降向水体迁移通量，估计其相对大小，并评判污染物向水体迁移的主要途径。

3.3 优先控制污染物确定

在了解农田面源污染物种类、主要途径、通量的基础上，结合对受纳水体污染物敏感性分析，以及水体利用途径等情况，综合考虑，因地制宜，确定农田面源污染优先控制污染物。优先控制污染物筛选的原则：

优先选择的污染物应具有较大的排放量；

优先选择的污染物应是影响受纳水体水质的关键因子；

优先选择的污染物应是毒性效应大的化学物质；

优先选择在水中难于降解，在生物体中有积累性，具有水生生物毒性的污染物。

3.4 污染物向水体迁移关键时期诊断

根据观测不同时段（日动态、月动态、季动态，降雨历程等）农田面源污染物通过径流、淋溶、挥发-沉降向水体迁移通量评判污染物向水体迁移关键时期。

3.5 农田面源污染重点控制区识别与确定

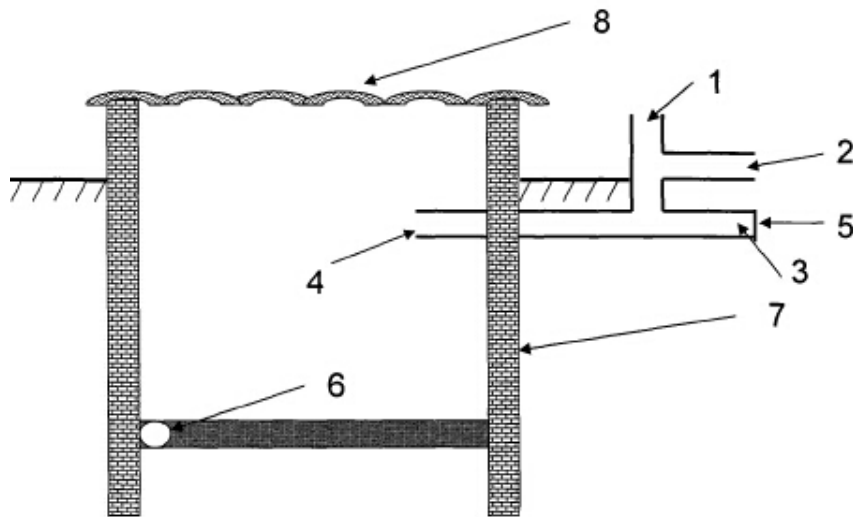
在农田土壤污染物迁移因素差异较小的区域内，决定土壤污染物向水体迁移风险的主要因素为土壤污染物浓度。采集土壤样品，依据环境风险评价的土壤污染分析方法分析土壤污染物浓度，结合污染物迁移临界值，采用地统计学方法制定区域土壤污染迁移风险图。污染迁移高风险区域即为农田面源污染重点控制区。

3.6 农田面源污染监测方法与技术

3.6.1 径流污染监测

在田间布设径流收集管和相应的径流池。为同时适用于水田、旱田和水旱轮作条件下的径流收集与监测，径流收集管包括多个高度不同的可封闭的进水口和一个出水口，进水口的高度一般分别与田埂、地面高度及田间排水沟的高度保持一致。径流收集管一般安装在监测小区与径

流池相连一侧，靠近小区中间的位置。径流池与径流收集管出水口连通，径流池底部侧面设有排水凹槽（图 3-1）。在径流池外侧，一般较径流池深 20 cm 左右，设置排泄池。径流池、排泄池根据当地单场暴雨量及其产流量、径流小区面积、农田种植作物类型等具体情况来设计。



图中，1-进水口一、2-进水口二、3-进水口三、4-出水口、5-盖子、6-排水凹槽、7-防水墙、8-径流池盖

图 3-1 农田径流收集装置简图

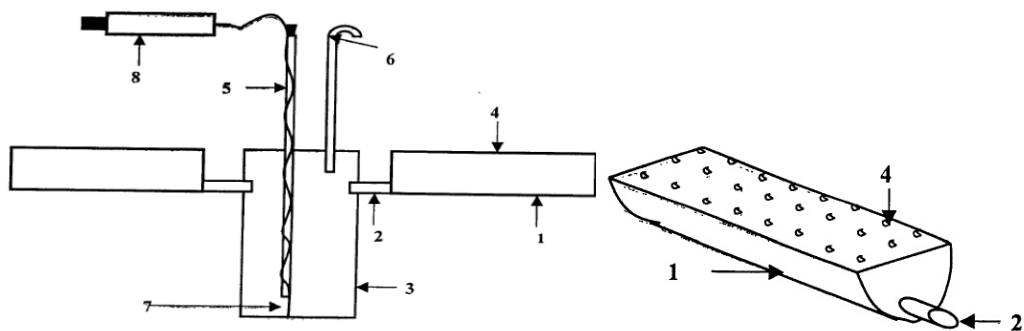
水样的采集频率为每场降水采集一次。采样时记录各径流池水面高度，计算径流量；将径流池中的水和泥沙搅拌均匀，采集中间部分水样，最后将径流池清洗干净，以备下次径流收集和计量。水样的分析方法参照《水和废水监测分析方法》（第四版）。

3.6.2 淋溶污染监测

淋溶液收集采集装置主要由集水槽、导水管和集水桶等组成（图 3-2）。水平设置的集水槽为半圆筒形容器，其平面向上，弧面朝下，平面上开设有若干渗水孔，并覆盖有 3~4 层塑料纱布（纱布孔径 ≤ 0.5 mm），阻挡了土壤颗粒而使渗漏水进入槽内。集水槽下部通过导水管

与低位设置并封闭的集水桶连通，该集水桶上设有通气管和出水管，出水管上连接有抽水软管和抽气筒。

在集水桶的两侧或周围设置一个或若干个集水槽；集水桶的顶部与其两侧的集水槽的平面部分设置在同一平面内，通气管和出水管垂直于集水槽所在的平面。



图中，1-集水槽、2-导水管、3-集水桶、4-渗水孔、5-出水管、6-通气管、7-抽水软管、8-抽气筒

图 3-2 农田地下淋溶采集装置及其集水槽的结构示意图

3.6.3 氨挥发-氮沉降通量监测

在我国农田面源污染研究中主要采用直接法中的密闭法和通气法来测定土壤氨挥发。密闭法其原理是利用空气置换将土壤挥发出来的氨随气流进入吸收瓶中，然后将吸收液带回室内测定。目前采用的吸收液是混合有指示剂的 2%的硼酸溶液，然后用标准稀硫酸滴定计算氨挥发量（图 3-3A）。密闭法不需要精密仪器，成本低，但灵敏度较低。通气法是在密闭法的基础上改进的测定氨挥发的方法。通气法是将浸以 15 mL 磷酸甘油溶液的海绵放置在土壤氨挥发的捕获装置上，用以吸收从土壤中挥发的氨气（图 3-3B）。另外一种改进的田间原位测定氨挥发的装置包括通气管、空气交换室、洗气瓶、流量计和

真空抽气控制装置（图 3-4）。通气管与空气交换室的进口连接，空气交换室嵌入土壤中，其出口与洗气瓶进口连接，洗气瓶出口与真空抽气控制装置通过流量计连接，洗气瓶内装有 100 mL 的 0.01 mol/L 的稀硫酸溶液。

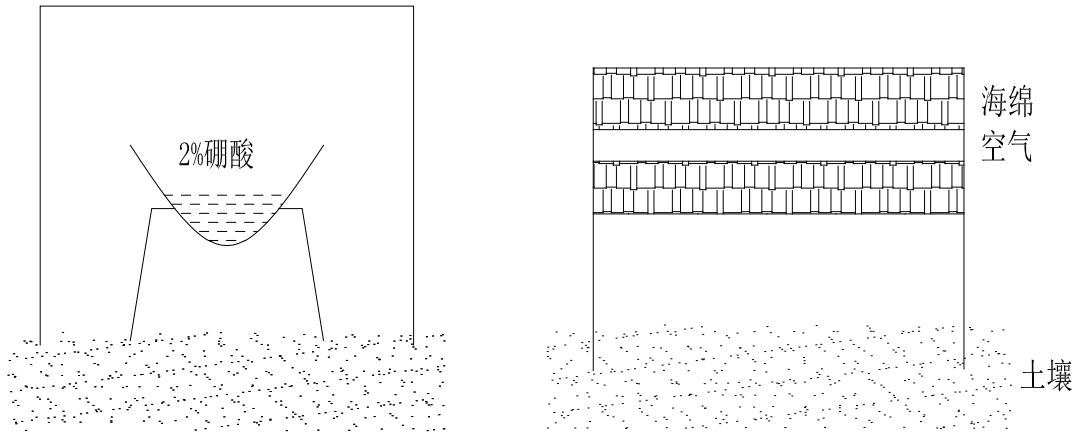
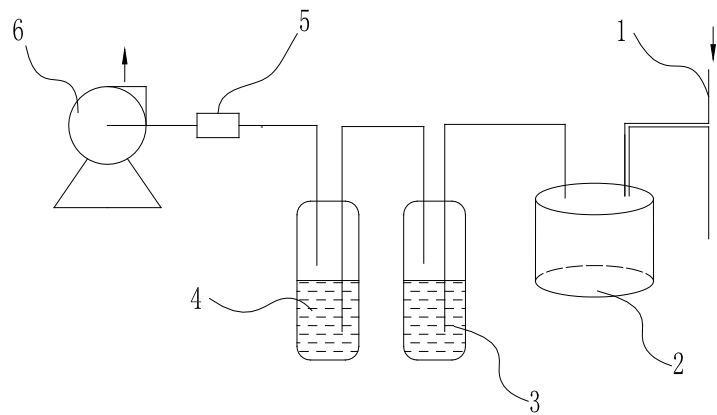


图 3-3 测定田间土壤氨挥发的密闭法 (A) 和通气法 (B) 装置



图中，1-通气管、2-空气交换室、3-洗气瓶、5-流量计、6-真空抽气控制装置

图 3-4 田间原位测定氨挥发的装置

在农田施肥后一周内氨挥发的采样频率较高，以后采样频率逐渐减少。田间土壤的氨挥发速率由下式得出：

$$NH_3-N(kg \cdot hm^{-2} \cdot d^{-1}) = \frac{M}{A \times D} \times 10^{-2}$$

其中，M 测得的氨量(NH₃-N, mg)；A 收集装置的横截面积(m²)；D 是连续收集氨气的时间 (d)。

4 农田面源污染源头控制技术

4.1 土地利用规划与空间布局

土地利用规划与空间布局应符合《土地开发整理项目规划设计规范》(TD/T1012-2000)要求。在土壤质地、植被类型及降雨量相似条件下,径流量、泥沙流失量与坡度成正比。禁止在 25 度以上陡坡地开垦种植农作物,在 25 度以上陡坡地种植经济林的,应当科学选择植物种,合理确定规模,采取水土保持措施,防止水土流失。在 5 度到 25 度荒坡地开垦种植农作物,应当采取水土保持措施,采取等高种植。在山区开发过程中可采取“顶林、腰园、谷农、塘鱼”的山地立体开发模式,使农田面源污染最小化。

畜禽粪便有机肥是保证农业养分循环的重要途径之一。但是,过渡施用有机肥将导致土壤氮磷养分过量积累,农田面源污染风险增加。因此,区域内应保证合理种植业和养殖业之间的平衡。

在沿湖地区,建议划分为核心区、缓冲区、扩展区三个区域。区域划分标准如下:

核心区:结合气象因素(降雨量、降雨强度、降雨历时和降雨雨型)、地形(坡度和坡长)和土壤状况(土壤类型及利用方式),并沿着分支河流向上游适当延伸,因地制宜,划分出核心区。

缓冲区:根据保护性质和实际需要确定其宽度,一般几公里。

扩展区:结合支流流域、自然地形进行划分,因地制宜。

不同类型区域采取不同的农业生产技术标准。在离河湖最近的核

心区内，禁止开发，禁止种植业；在离河湖较近的缓冲区内，限制开发，禁止传统农业，可发展有机农业；在离河湖较远的扩展区内，优化开发，发展绿色种植业。

水源保护区和重要水源敏感区，禁止发展集约化农业，不提倡发展传统种植业。在水源保护区，一时难以完成居民区迁移的，在不影响水源保护的前提下，可适度发展有机农业，兼顾当地经济发展和水环境保护。

4.2 化肥减量化技术

4.2.1 化肥环境安全使用原则

根据《化肥施用环境安全技术导则》（HJ 555-2010），化肥环境安全使用原则主要包括：

- （1）在保障农产品产量的前提下，节约资源、提高化肥利用率。
- （2）考虑不同地区气候特征、种植制度、环境承载力以及环境质量的要求，确定化肥品种、用量及施用方法。
- （3）分析不同化肥品种的特点、流失途径及其影响因素，通过调节可人为控制的影响因素，从源头、田间管理、末端拦截三个环节控制化肥的流失，降低对环境的污染风险。

4.2.2 化肥施用技术

为了减少施肥对农田面源污染发生的影响，应从循环经济理念出发，从养分平衡和施肥技术出发，科学制定环境友好的养分管理技术。科学施肥是通过合理减少农田养分投入，提高氮磷养分利用率，从而

减少农田面源污染。

（1）精准化平衡施肥技术

主要包括有机肥与无机肥配施技术和养分平衡施肥技术（氮、磷、钾大量元素，钙、镁、硫中量元素，以及微量元素之间平衡）等。

有机无机配施技术：有机肥施入土壤，经微生物分解，可源源不断、缓慢地释放出各种养分供植物吸收，避免氮磷肥快速释放带来流失。有机肥是改良土壤的主要物质，微生物在分解过程中产生分泌酶和腐殖质，促进土壤团粒结构形成，增强土壤保水保肥能力，减少氮磷流失风险。有机肥可提高土壤难溶性磷的有效性，减少化学磷肥施用量。因此，以农业废弃物如处理过的秸秆和畜禽粪便、沼液沼渣、菌渣、绿肥等富含一定氮磷养分的有机物料来替代部分化肥，从而减少化肥施用量，降低农田面源污染风险。

太湖流域稻麦轮作系统采用有机肥与无机肥配施技术，与传统农户施肥处理相比可减少氮用量 25%左右，产量略有增加，稻季径流氮损失减少 6~28%，麦季径流和淋溶氮损失减少 25~46%。南四湖麦玉轮作系统玉米季采用有机无机配施技术，在减少化肥氮投入的同时，径流和淋溶氮损失分别减少了 23%和 25%。

养分平衡施肥技术：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，统筹考虑了氮磷钾三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，减少氮磷养分损失。平衡施肥技术氮磷污染减排效果主要依赖于土壤养分丰缺及平衡状态。在巢湖地区根据蔬菜

地养分供应能力和甘蓝的营养特性，采用平衡施肥技术，使肥料施用量减少 30%，氮、磷淋溶损失量分别减少 90%和 78%。

（2）科学施肥方式

多种施肥方式（如叶面施肥、分次施肥、基肥与追施结合、化肥深施和定点施肥等）相结合；对较容易产生渗漏的土壤，尽量减少使用容易产生径流、容易挥发、环境风险大的肥料，不宜使用硝态氮肥，适宜使用铵态氮肥；不宜选择雨前表施化肥；为减少氨挥发损失，不宜在中午施氮肥；采用分次施肥，忌一次大量施肥；尽量在春季施用化肥，夏秋季（雨季）追加少量化肥，以减少化肥随径流的流失；氮肥应重点施在作物生长吸收的高峰期，夏季施用尿素时，如有条件可加施脲酶抑制剂，以减缓尿素的水解，减少氨挥发；若施用铵态氮肥，应以少量分次施用为原则，如有条件可加施硝化抑制剂，抑制铵态氮转化为硝态氮；应在一个轮作周期统筹施肥，把磷肥重点施在对磷敏感的作物上，其他作物利用其后效，如在水旱轮作中，把磷肥重点施在旱作上。

（3）大力推广缓释肥料

鉴于传统速效化肥释放速度快、需多次施肥等缺点，研发并生产缓释肥料。缓释肥料中养分的释放与作物养分需求比较吻合，养分的释放供应量前期不过多，后期不缺乏，具有“削峰填谷”的效果，可降低养分向环境排放的风险。

新型缓释氮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。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，降低氨挥发损失。

通过施用缓释氮肥，江苏省宜兴大埔稻麦轮作径流氮损失减少约 50%，氨挥发损失降低 15~30%，基肥期淋溶氮损失减少 35%左右。宜兴大埔基于新型缓释肥稻田氮肥用量在 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，又能减少氮损失。在实际应用中，应结合作物类型等选择适宜的缓释肥料品种。

鉴于缓释氮肥价格高于普通尿素，建议用缓释尿素部分代替尿素，节约氮肥用量，兼顾施肥成本和环境保护平衡。

4.3 种植制度优化

种植制度不同，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。根据《水土保持综合治理 技术规范 坡耕地治理技术》(GB/T 16453.1-2008)，采用间作、套种、轮作、休闲地上种绿肥等技术可提高植被覆盖度，提高土壤抗蚀性能，降低面源污染发生风险。间作即两种不同作物同时播种，间作的两种作物应具备生态群落相互协调、生长环境互补的特点，主要有：高秆作物与低秆作物、深根作物与浅根作物、早熟作物与晚熟作物、密生作物与疏生作物、喜光作物与喜阴作物、禾本科作物与豆科作物等不同作物的合理配置。根据作物的生理特性可分别采取行间间作和株间间作。套种即在同一地块内，前季作物生长的后期，在其行间或株间播

种或移栽后季作物，两种作物收获时间不同，其作物配置的协调互补与间作相同。稻麦轮作制中引入豆科绿肥，既可降低旱季的施氮量，又可补充稻季的氮素。与稻麦轮作农户常规施肥模式相比，太湖流域宜兴地区稻-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%。

4.4 土壤耕作优化

针对旱地尤其是坡耕地，应采用保护性耕作的土壤养分流失控制技术，如免耕技术、等高耕作技术、沟垄耕作技术等，减少地表产流次数和径流量，降低氮磷养分流失。

4.4.1 免耕技术

是少耕和免耕法的总称，尽量减少翻耕次数。这种方法对坡度较小的农田具有保持水土、改良土壤结构的功能，结合秸秆残茬覆盖效果更为明显。

4.4.2 等高耕作技术

沿等高线耕作，形成一道道等高犁沟，以拦蓄水分，减少地表径流和土壤冲刷。这种方法适宜于大于 2 度的坡耕地。

4.4.3 沟垄耕作技术

沿等高线进行犁耕并形成沟和垄，在沟内或陇上种植作物。沟垄

耕作能使原来倾斜的坡面变成等高的沟和垄，改变小地形，分散和拦蓄地表径流，减少冲刷和拦截泥沙，主要方法有：垄作区田、套作区田、套犁沟播、平播后起垄等。

4.4.4 蓄水聚肥改土耕作技术

又称抗旱丰产沟，把土壤分层组合成“种植沟”和“生土垄”两部分。种植沟集中耕层肥土，集中施肥，底土做成垄，拦蓄径流和泥沙。

4.4.5 其他耕作技术

如深松耕法（以秋季深耕为主）、留茬覆盖耕作法、刨窝点播法等。但对于土层厚度较薄的地区，不宜深播。

4.5 土壤调理剂施用

土壤调理剂具有改良土壤质地与结构、提高土壤保水供水能力、调节土壤酸碱度、改良盐碱土、改善土壤的营养供应状况、修复重金属污染土壤等作用。根据其功能土壤调理剂分为土壤结构改良剂、土壤保水剂、土壤酸碱度调节剂、盐碱土改良剂、污染土壤修复剂、锁磷剂、重金属污染阻控剂等。

4.5.1 保水剂

土壤保水剂又称土壤保墒剂、抗蒸腾剂、贮肥蓄药剂，是一种具有三维网状结构的有机高分子聚合物。在土壤中能将雨水或灌溉水迅速吸收并保持，变为固态水而不流动、不渗失，长久保持局部恒湿，干旱时缓慢释放供植物利用。因此，保水剂的应用可有效改善农田土壤水分状

况，提高水分利用率。土壤保水剂的种类很多，其中聚丙烯酰胺（PAM）是目前应用较多的土壤改良剂之一，PAM 具有较好的抑制土壤水分蒸发的能力，能够改善土壤的结构和增加土壤中团聚体的稳定性，防止土壤结皮和流失、增加土壤的入渗率，减少地表径流。施用土壤改良剂（PAM、硫酸亚铁和硫酸铝）后，农业土壤和坡耕地土壤径流水中总磷和溶解性总磷显著降低。

4.5.2 生物质炭

生物质炭由于其良好的吸附性能、低廉的成本以及良好的生物亲和性，被运用于农田营养盐释放控制，受到研究人员的关注。在农田表层20 cm的土壤中施加0.5%的生物质炭，可减少15%的铵态氮损失量。

4.5.3 硝化抑制剂

施用硝化抑制剂使土壤中长时间保持较高的铵态氮含量，减少土壤中硝态氮的积累，进而减少土壤氮素的淋失和反硝化损失，延长氮肥肥效，提高氮肥利用效率。

4.6 氨挥发控制技术

氨挥发是肥料氮素损失的重要途径之一，损失率因土壤类型、土壤水分、气候条件、肥料类型及用量、施肥时间和方式等不同而存在很大差异。施用缓控释肥、氮磷钾平衡施用或有机无机肥混施等能有效减少田间氨挥发损失；添加保水剂有利于减少农田氨挥发；根据不同农作物不同生长期对氮肥的利用率来考虑施肥量有助于减缓氨

挥发；基于作物阶段氮素吸收增加追肥比例和施肥次数的优化施氮能有效减少农田氨挥发损失。

土壤氨挥发速率与气温显著正相关，田间氨挥发的高峰期主要发生在白天 11:00-13:00 之间，避免在中午施肥有利于减少氨挥发损失。

4.7 节水灌溉技术

节水灌溉是解决农作物缺水用水、缓解旱情和防止污染物迁移的有效措施，常见的节水灌溉技术包括喷灌技术、微灌技术和低压管道灌溉技术。根据《节水灌溉工程技术规范》（GB/T 50363-2006），灌溉水源应优化配置、合理利用、节约保护水资源，发挥灌溉水资源的最大效益；节水灌溉应充分利用当地降水；用工业或生活污水作为灌溉水源时，必须经过净化处理，达到《农田灌溉水质标准》（GB 5084-2005）要求。

4.7.1 喷灌技术

我国广泛使用的喷灌类型有：固定管道式喷灌、半移动式管道喷灌、滚移式喷灌、大型平移喷灌和中小型喷灌。喷灌技术喷水均匀，受地形条件的限制小，在砂土或地形坡度达到 5%等地面灌溉有困难的地方都可以采用，一般能增产 15%，提高节水率近 30~50%，提高工效 20~30 倍，提高耕地利用率 7%。但喷灌技术最大的缺点就是受环境因素制约，由于是空中喷洒，在有风的情况下，是很难保证对农作物的均匀喷洒，并且喷灌技术也不适合于蒸发较强的环境，过快的蒸发使得小水滴还没接触作物之前已被蒸发的差不多，达不到灌溉应

有的作用。由于喷灌设备投资较高，目前多用于在水资源缺乏、经济较发达的地区。

4.7.2 微灌技术

按灌水器及出流形式的不同，微灌主要有滴灌、微喷灌、小管出流、渗灌等形式。滴灌是利用安装在末级管道（称为毛管）上的滴头，将压力水一滴一滴地、均匀地、缓慢地滴入作物根系的灌溉方法。通常将毛管和灌水器放在地面，也可以把毛管和灌水器埋入地面以下30cm左右。前者称为地表滴灌，后者称为地下滴灌。微喷灌是直接安装在毛管上或与毛管连接的微喷头将压力水以喷洒状湿润土壤。微喷头有固定式和旋转式两种，前者喷射范围小，水滴小；后者喷射范围较大，水滴也大些，故安装的间距也比较大。微喷头的流量通常为20~250 L/h。小管出流是利用小塑料管与毛管连接作为灌水器，以细流状局部湿润作物附近的土壤，小管出流的流量常为40~250 L/h。渗灌是利用一种特别的渗水毛管埋入地表以下30 cm左右，压力水通过渗水毛管管壁的毛细孔以渗流的形式湿润其周围土壤。由于渗灌能减少土壤表面蒸发，从技术上来讲，是用水量很省的一种微灌技术，但渗灌管常埋于地下，由于作物根系有向水性，渗灌管经常遭受堵塞问题困扰。

微灌技术做到了灌溉均匀，可以控制每个灌水器的出水流量，均匀率高达80%以上；微灌技术可节省大量的劳动力，只需监察灌水器的工作情况即可，操作方便且容易控制；微灌技术可以把肥料溶于水中，减少氨挥发、径流和淋溶损失，增加了肥料的利用率。但微灌技

术需要在地下铺设大量的管道增加了灌溉成本，同时喷水器小容易堵塞，需要经常的检查。

4.7.3 低压管道灌溉技术

低压管道灌溉技术是通过机泵（或利用天然水头）和管道系统直接将低压水引入田间进行灌溉的方法，普遍适用于我国北方井灌区。低压管道灌溉技术系统由水源（机井）、输水管道、给配水装置（出水口、给水栓）、安全保护设施（安全阀、排气阀）、田间灌水设施等部分组成，通过压力管道系统把水输送到田间。

低压管道灌溉的管网类型包括：移动式、半固定式、固定式和管渠结合式。根据水源位置、控制范围、地面坡度、田块形状、作物种植方向等条件，管网布设成树枝状或环状。常见有“一”字形、“T”形、“L”形、“H”形、环形、梳齿形(或环状网)、龟骨形（或环状网）等几种形式。其中，当水源位于田块一侧时，常采用“一”字形、“T”形和“L”形三种形式，这三种形式适用于井的出水量 $20\sim 40\text{ m}^3/\text{h}$ ，控制灌溉面积 $50\sim 100$ 亩，田块的长宽比不大于 3。当水源位于田块中心时常采用“H”形或环形，这两种形式适用于井出水量 $40\sim 60\text{ m}^3/\text{h}$ ，控制面积 $100\sim 150$ 亩，田块的长宽比 <2 。当长宽比 >2 时，采用长“一”字形布置。当水源位于田块一侧，控制面积较大成近似方形地块、作物种植方向与灌水方向不同时，可布置成梳齿形(或环状网)、龟骨形（或环状网）两种形式。这些布置形式适用于出水量 $60\sim 100\text{ m}^3/\text{h}$ ，控制面积 $150\sim 300$ 亩，田块的长度和宽度相近的情况。

管道系统布设的基本原则：1) 应做到排水、道路、林带、供电

等系统紧密结合，统筹安排，并充分利用原有水利和其他工程设施。

2) 根据当地的交通、能源、材料供应等条件及经济、技术、劳力等情况，因地制宜地选择管材。3) 管网布置力求管线总长度短、控制面积大、并做到管线平顺，减少拐弯、起伏等现象，达到投资少效益高的目的。4) 支管走向应与作物种植方向及地形坡度相适应。5) 根据现行生产管理体制，确定出水口间距，使之适用于用户管理，有利于轮灌，达到省水、节能的目的。

低压管道灌溉技术的优点在于：1) 节水。由于是管道输水，有效的减少了水分的蒸发和渗漏损失，提高了水的有效利用率。2) 输水快、省时、省力。管道输水灌溉是在一定压力下进行的，一般比土渠输水流速大、输水快、供水及时，有利于提高灌水效率，适时供水，节约灌水劳力。3) 减少土渠占地。管道可以露天也可以埋在地下，不像水渠一样需要占用田地。4) 节能。低压管道灌溉技术的工作压力相对于喷灌和微灌技术是较低的，一般可节省能耗 20~25%。5) 灌水及时，促进增产增收。管道输水灌溉，减少水量损失，同时改善了田间灌水条件，缩短了轮灌周期，从而有效地满足了作物生长的需水，促进增产增收。

4.8 农作物秸秆利用技术

以发展循环农业为原则，通过微生物资源进行转换，使资源重新回到农业生态系统，进而对资源进行多级利用，提高资源的价值。以秸秆为例，提出了以下4 条秸秆资源循环利用的主要模式。

4.8.1 秸秆养殖与能源循环模式

以秸秆喂养牲畜，将产生的牲畜粪便放入沼气池中进行厌氧发酵，生产沼气、沼液和沼渣。沼气可用于农户日常用气需要和保暖，同时还可以发电；沼液可作为肥料直接还田；沼渣可用来培养食用菌，食用菌产生的菇渣用来培养蚯蚓，蚯蚓可用来养殖鱼类和鸡鸭，所有粪便汇集后入沼气池，继续用来发酵。

4.8.2 秸秆食用菌循环模式

秸秆直接作为培养食用菌的养料；培养食用菌产生的菇渣，首先可直接入沼气池用来发酵，还可以用于养殖牲畜，培育蚯蚓；蚯蚓可用来制作蛋白肥料，还可继续用来养殖鱼类和鸡鸭，养鱼所用池塘中的废水和废渣可用于肥料还田。

4.8.3 秸秆沼气循环模式

这是一条清洁能源模式，直接将农田产生的大量秸秆作为原料放入沼气池中进行发酵。产生的沼气同模式一，从而实现多级循环利用。

4.8.4 秸秆质碳循环模式

将秸秆进行热解，热解后产生了三种形态的物质。气态的物质，同沼气有着相同的用途，用于发电和农户日常使用；固态的物质作为生物质炭生产培养基质、肥料缓释剂、土壤修复剂，最终还田以服务农田生产；液态的物质，即木醋液，用来生产叶面肥、抗虫、抗菌剂，也用来服务农田生产。

4.9 农药减量化与残留控制技术

农药环境安全使用原则及防止农药污染环境的措施参见《农药使用环境安全技术导则》（HJ 556-2010）。

4.9.1 农药环境安全使用原则

（1）遵循“预防为主、综合防治”的环保方针，不宜使用剧毒农药、持久性农药，减少使用高毒农药、长残留农药，使用安全、高效、环保的农药，鼓励推行生物防治技术。保护有益生物和珍稀物种，维持生态系统的平衡。

（2）农药使用应遵守《农药合理使用准则》（GB/T 8321-2009）的有关规定，并按照农药产品标签和说明书中规定的用途、使用技术与方法等科学施用。

4.9.2 防止农药污染环境的技术措施

（1）根据土壤类型、作物生长特性、生态环境及气候特征，合理选择农药品种，减少农药在土壤中的残留或迁移。在地表水网密集区、水产养殖等渔业水域、娱乐用水区等，不宜使用易移动、难吸附、水中持留性很稳定的农药品种。

（2）推行农药减量增效使用技术、良好农业规范技术等，鼓励施药器械、施药技术的研发与应用，提高农药施用效率。在化学农药减量施用方面，当前主要发展趋势是由化学农药防治逐渐转向非化学防治技术或低污染的化学防治技术。近年来，江苏省多家单位联合开展水稻化学农药污染控制技术研究，针对水稻螟虫、灰飞虱、条纹叶

枯病与纹枯病等重大病虫害，研发了多项无公害关键技术，在水稻核心示范区减少了 30%农药用量。选用高效低毒的三唑磷、丙溴磷、井冈霉素、噻嗪酮、毒死蜱等药剂进行施药，增产 7%。

（3）科学利用生物技术，加快残留农药安全降解。施用具有农药降解功能的微生物菌剂，加快土壤中杀虫剂和除草剂的降解速度，减少对后茬作物的危害影响。

（4）物理防控措施（如采用太阳能、频振式杀虫灯、性引诱剂等）。

（5）生态防控措施，引入天敌，提高生物多样性，种植具有驱诱作用的植物等。

（6）节制用药，即结合病虫草害发生情况，科学控制农药使用量、使用频率、使用周期等，减少进入土壤、水体的农药总量。

（7）加强田间农艺管理措施。采用土地轮休、水旱轮作、深耕暴晒、施用有机肥料等措施，提高土壤对农药的环境容量。不宜雨前施药或施药后排水，减少含农药浓度较高的田水排入地表水体。

（8）加强对农药废弃物的管理。不应将农药废弃包装物作为他用；完好无损的包装物可由销售部门或生产厂统一回收。不应在易对人、畜、作物和其他植物，以及食品和水源造成危害的地方处置农药废弃物。

5 农田面源污染过程阻断技术

农田面源污染物质大部分随降雨径流进入水体，在其进入水体前，通过建立生态拦截系统，有效阻断径流水中氮磷等污染物进入水环境，是控制农田面源污染的重要技术手段。目前农田面源污染过程阻断常用的技术有两大类：一类是农田内部的拦截，如稻田生态田埂技术、生态拦截缓冲带技术、生物篱技术、设施菜地增设填闲作物种植技术、果园生草技术（果树下种植三叶草等减少地表径流量）；另一大类是污染物离开农田后的拦截阻断技术，包括生态拦截沟渠技术、生态护岸边坡技术等。这类技术多通过对现有沟渠的生态改造和功能强化，或者额外建设生态工程，利用物理、化学和生物的联合作用对污染物主要是氮磷进行强化净化和深度处理，不仅能有效拦截、净化农田氮磷污染物，而且滞留土壤氮磷于田内和（或）沟渠中，实现污染物中氮磷的减量化排放或最大化去除以及氮磷的资源化利用。

5.1 生态田埂技术

农田地表径流是氮磷养分损失的重要途径之一，也是残留农药等向水体迁移的重要途径。现有农田的田埂一般只有 20 cm 左右，遇到较大的降雨时，很容易产生地表径流。将现有田埂加高 10~15 cm，可有效防止 30~50 mm 降雨时产生地表径流，或在稻田施肥初期减少灌水以降低表层水深度，从而可减少大部分的农田地表径流。在田埂的两侧可栽种植物，形成隔离带，在发生地表径流时可有效阻截氮磷养分损失和控制残留农药向水体迁移。太湖地区将田埂高度增加 8

cm，稻季径流量和氮素径流排放分别降低 73%和 90%。

5.2 生态拦截带技术

生态拦截带技术主要用于控制旱地系统氮磷养分、农药残留等向水体迁移。将旱地的沟渠集成生态型沟渠，同时在旱地的周边建一生态隔离带，由地表径流携带的泥沙、氮磷养分、农药等通过生态隔离带被阻截，将大部分泥沙，部分可溶性氮磷养分、农药等留在生态拦截带内，拦截带种植的植物可吸收径流中的氮磷养分，从而减少地表径流携带的氮磷等向水体迁移。

生态拦截带宽度应兼顾土地价值和污染拦截效率，拦截带植物应兼顾污染拦截效率和植物利用价值。生态拦截带拦截污染物效率与污染物形态、径流量、拦截带宽度、拦截带植物密度及其生长情况、坡度、土壤性质等有关。生态拦截带拦截效率是评价生态拦截带效果的重要参数。太湖宜兴蔬菜地周边生态拦截带对总氮、总磷拦截效率可达 30~90%，对水溶态磷酸盐拦截效率可达 20~90%，对可溶态硝态氮拦截效率可达 10~98%。用于建设拦截带的土地价值、运行费用等关系到生态拦截带可持续性，应考虑拦截带植物利用，如拦截带种植的植物可用于喂鱼或家禽。

5.3 生态拦截沟渠技术

田间沟渠是用于雨季田间排水，防止田间作物渍害的重要农田基本建设内容。如果沟渠过渡硬质化，虽然有利于排水，但对田间面源污染物拦截效率非常低，不利于农田面源污染防治。设计、建设兼顾

排水和拦截农田面源污染物的生态沟渠具有重要意义。

生态沟渠用于收集农田径流、渗漏排水，一般位于田块间。生态沟渠通常由初沉池（水入口）、泥质或硬质生态沟框架和植物组成。初沉池位于农田排水出口与生态沟渠连接处，用于收集农田径流颗粒物。生态沟渠框架采用泥质还是硬质取决于当地土地价值、经济水平等因素。土地紧张、经济发达的地区建议采用水泥硬质框架，而土地不紧张、经济实力弱的地区可采用泥质框架。生态沟渠框架（沟底、沟板）用含孔穴的水泥硬质板建成，空穴用于植物（作物或草）种植。沟底、沟板种植的植物既能拦截农田径流污染物，也能吸收径流水、渗漏水中的氮磷养分，达到控制污染物向水体迁移和氮磷养分再利用目的。空穴密度，沟底及沟板植物种植密度、植物种类和植物生长，沟长度、宽带、深度和坡度，水流速度及水泥性质等影响生态沟渠对农田污染拦截效率。太湖宜兴稻区生态沟渠对氮磷拦截效率平均可达40%以上。昆明蔬菜种植区生态沟渠对氮、磷拦截效率可达35%和50%。

6 农田面源污染末端强化技术

农田面源污染物离开农田、沟渠后的汇流被收集，再进行末端强化净化与资源化处理，如前置库技术、生态塘技术、人工湿地技术等。这类技术多通过对现有塘池的生态改造和功能强化，或者额外建设生态工程，利用物理、化学和生物的联合作用对污染物主要是氮磷进行强化净化和深度处理，不仅能有效拦截、净化种植区污染物，还能滞留种植区氮磷污染，回田再利用，实现种植区氮磷污染物减量化排放或最大化去除。

6.1 前置库技术

前置库技术因其费用较低、适合多种条件等特点，是目前防治面源污染的有效措施之一。前置库技术通过调节来水在前置库区的滞留时间，使径流污水中的泥沙和吸附在泥沙上的污染物质在前置库沉降；利用前置库内的生态系统，吸收去除水体和底泥中的污染物。

前置库通常由沉降带、强化净化系统、导流与回用系统 3 个部分组成（图 6-1）。沉降带可利用现有的沟渠，加以适当改造，并种植水生植物，对引入处理系统的地表径流中的污染颗粒物、泥沙等进行拦截、沉淀处理。强化净化系统分为浅水净化区和深水净化区，其中浅水生态净化区类似于砾石床的人工湿地生态处理系统。首先沉降带出水以潜流方式进入砾石和植物根系组成的具有渗水能力的基质层，污染物质在过滤、沉淀、吸附等物理作用、微生物的生物降解作用、硝化反硝化作用以及植物吸收等多种形式的净化作用下被高效降解；

再进入挺水植物区域，进一步吸收氮磷等物质，对入库径流进行深度处理；深水强化净化区利用具有高效净化作用的易沉藻类、具有固定化脱氮除磷微生物的漂浮床、以及其他高效人工强化净化技术进一步去除氮、磷和有机污染物等，库区可结合污染物净化进行适度水产养殖。为防止前置库系统暴饮，可设置导流系统，20 min 后的后期雨水可通过导流系统排出库区。经前置库系统处理后的地表径流，也可以通过回用系统回用于农田灌溉。

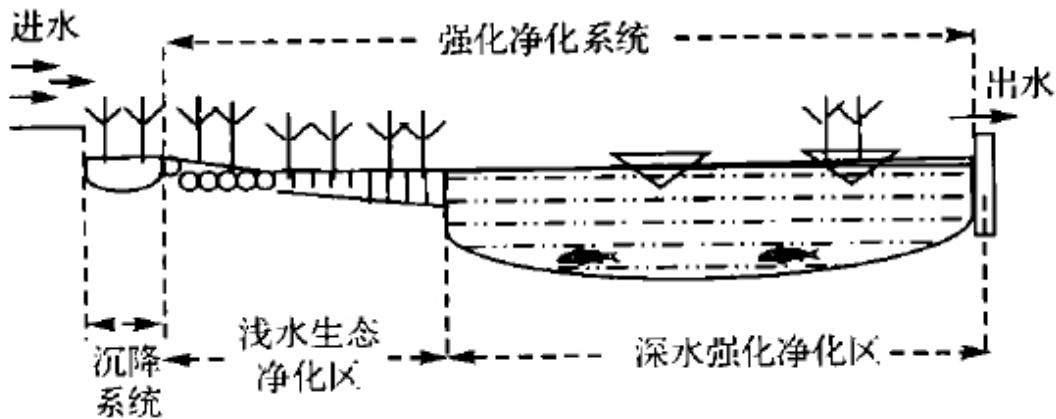


图 6-1 强化净化前置库系统的组成结构图

在设计过程中要考虑光照、温度、水力参数、水深、滞水时间、前置库库容、存贮能力、污染负荷大小等因子。对氮的去除率是滞水时间和氮磷比的函数，一般氮磷比越小，去除率越大。

6.2 生态排水系统滞留拦截技术

旱作区或水旱轮作区的旱作季节农田径流流入沟渠，随后汇流进入塘池系统。排水系统包括引流渠和生态塘池系统。水田或水旱轮作区的水稻种植季节，生态排水系统仅包括生态沟渠和生态塘池系统。

对于大面积连片旱地，在田间可以建设若干地表径流收集系统，

收集田间径流水，并输送入生态塘池系统。径流输送系统可以通过地下暗管，也可地上沟渠输送。

生态塘池系统主要用于收集、滞留沟渠排水。一个区域应建设若干个生态塘系统-梯级生态塘系统。经过生态塘系统处理的水可以进一步流入下游湿地系统，或直接用于农田灌溉。

生态塘池系统一般包括二部分，位于前端的沉降塘系统和位于后端的滞留系统，沉降塘系统深度要大于后端。生态塘通常因地制宜，依当地地势、地形、地貌和当地实际情况而建，采取废弃塘改造成本低，泥质和硬质化均可，取决于当地土地和经济发展水平。生态塘长、宽、深比例，植物种类、密度、生长和植物配置影响生态塘对农田面源污水中污染物拦截效率。前端生态塘系统深度一般大于 1m，位于后端的滞留系统深度约 0.3 m。

生态塘池长期运行后，应该对其进行清淤，清除的淤泥经过合理处理可回用肥田。

6.3 人工湿地技术

通过生态拦截带、生态排水系统可拦截大部分农田排放的氮磷及残留农药等，但仍有一部分氮磷和农药存在，直接排入水体有污染风险。在农业区下游，建设一个或若干个湿地，收集生态塘系统处理的排水，对其进行深度处理，有利于将农田面源污染降低到最低限度。由于人工湿地具有投资和运行费用低、污水处理规模灵活、维护和管理技术要求低、占地面积较大等特点，非常适合在土地资源丰富的农村地区应用。

人工湿地根据污水流动的方式可分为 3 种类型：表面流湿地、潜流湿地、垂直流湿地。对于农业面源污染尤其是农田排水氮磷拦截，表面流具有投资少、操作简单、运行费用低、景观效果好等优势。潜流湿地虽然具有占地少、卫生条件好等优点，但与比表面流系统相比，潜流湿地处理系统具有投资高，对氮、磷的去除效率低等不足。垂直流湿地的基建成本较高，较易滋生蚊蝇。

湿地系统包括水收集沉降区和水净化植被过滤区二部分。收集沉降区一般占湿地总面积 20~30%，深度一般为 1~1.5 m，水净化植被过滤区占湿地总面积 70~80%，深度 0.2~0.4 m。为了达到高标准排水需要（《地表水环境质量标准》（GB 3838-2002）），也可在湿地系统中设置物化强化处理系统，用于吸附氮磷、农药等污染物。

湿地结构、长宽深比例，植物种类、密度、生长和植物配置影响湿地系统对水质净化效果。

湿地植物的选择：漂浮植物—小叶浮萍具有较强的生长适应性，对氮磷等污染物具有较强的去除能力；挺水植物—芦苇去除氮磷能力较强，根部生成的湿生环境可有效吸收和吸附污染物。另外水芹、慈菇等经济植物同样有较好的净化效果；沉水植物—菹草能有效吸收氮磷，同时增加了污染物滞留时间，提高湿地承载负荷。也可选择种植莲藕、菱角等经济植物；草滤带—天然草种。

7 投资与估算

农田面源污染防治项目的建设投资主要包括建设管理费，可行性研究费，勘察设计费，土方开挖、运输与整理费，石料、水泥和木桩等建设材料费，植物栽种和相关工程砌筑费，工程监理费，以及植物收割、疏浚清淤等日常维护管理费用。

农田面源污染防治项目的设施和环境保护工程概预算依据有关工程概预算规范执行。

8 维护管理

8.1 二次污染防治

水生植物死亡后沉积水底会腐烂，向水体释放有机物质和氮磷，造成二次污染。为防止二次污染，应对农田面源污染防治工程内的功能植物进行定期收获、处置、利用。为便于利用，功能植物品种的选择，应尽量选择当地有经济效益的植物种，从而提高功能植物回收的可操作性。例如，茭草、芦苇、荻草、苏丹草和黑麦草等是奶牛很好的饲料，奶牛的粪肥又可用作园林的肥料。结合生态产品利用工程，发展生态型绿色农业。

8.2 防止淤积

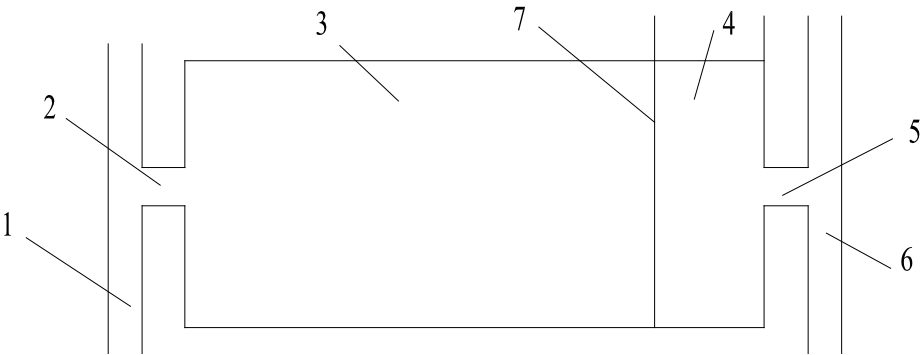
一般生态沟渠底淤积物超过 10 cm 或杂草丛生，严重影响水流的区段，要及时清淤，保证沟渠的容量和水生植物的正常生长。农田排灌沟渠清理不要彻底清理沟渠，要保留部分植物和淤泥。

附件 案例

案例一：源头控制

一、农田布局^[1]

技术方案：农田布局时，首先提高农田作业区四周田埂的高度，然后在农田作业区相对的两边分别开设灌溉渠道和排水渠道。在农田作业区内，靠近排水渠道的一侧装设隔离装置，隔离装置将农田作业区分成两块，靠近灌溉渠道的是常规操作区，靠近排水渠道的是缓冲区，再在灌溉渠道内开设灌水口与常规操作区相通，由排水渠道内开设出水口与缓冲区相通（图 1）。其中，田埂高度为 30~40 cm；隔离装置距离排水渠道一侧 3~4 m，隔离装置高度为 20~25 cm，可为隔板或土堆。



图中，1-灌溉渠道、2-灌水口、3-常规操作区（农田中按照当地常规农田管理模式进行种植作物，包括施肥和灌水）、4-缓冲区（缓冲带内种植作物，但不施用任何肥料）、5-出水口、6-排水渠道、7-隔离装置

图 1 具有减缓农业面源污染功能的农田布局结构示意图

效益分析：该农田布局不但可以利用缓冲带拦截农田的氮磷等，减缓农田因养分流失对周围水环境的污染，而且缓冲带内种植的作物可以利用拦截的养分来满足作物生长，取得经济效益和生态效益的双赢。例如，在太湖流域宜兴市大浦镇和常熟市杨园镇进行上述的农田

布局，缓冲带与施肥农田当年水稻产量没有显著差异，缓冲带利用大田流失的养分足够水稻生长发育使用，不会造成水稻减产；同时，缓冲带能显著地拦截径流养分，稻季拦截的溶解态总氮和总磷分别为 20.6~51.8 kg/hm² 和 4.7~5.1 kg/hm²，而且对渗漏水中氮磷养分的水平迁移具有明显的拦截效果。

二、化控防污技术^[2]

化控防污技术是利用化学物质调控土壤和作物的水肥状况，以达到改良土壤结构、减少水土流失、提高土壤保水保肥能力、抑制土壤蒸发、防止水肥深层渗漏等作用，进而实现水肥高效利用和减少农田面源污染为目标的一种新型非工程调控技术。该技术适宜北方干旱及半干旱农业生产区面源污染的防治。

技术方案：在坡地作物生产过程中施用化控制剂。在一个作物生育期内施用土壤结构改良剂 0.3~2.0 kg/亩；施用土壤保水剂 3~18 kg/亩；施用植物抗蒸腾剂 1~3 kg/亩，在一个生育期内喷施 3~5 次。土壤结构改良剂、土壤保水剂和植物抗蒸腾剂的施用量因田面坡度、作物类型及年龄的不同而异。

土壤结构改良剂为阴离子聚丙烯酰胺、阳离子聚丙烯酰胺、非离子聚丙烯酰胺、两性离子聚丙烯酰胺中的一种或多种。当坡度为 5~10 度、10~15 度和 15 度以上时，土壤结构改良剂的施用量分别为 0.3~1.0 kg/亩、0.6~1.5 kg/亩和 1.0~2.0 kg/亩。在翻耕或锄草措施之后、灌水和雨季来临之前施用土壤结构改良剂，施用时间，将土壤结构改良剂与土壤按质量比 1:80~100 混合后施用。

土壤保水剂为淀粉接枝聚丙烯酸盐、纤维素羧甲基化产物、聚丙烯酸盐、聚丙烯酰胺、聚丙烯酰胺-丙烯酸交联共聚物、聚乙烯醇中的一种或多种。当作物为果树时，要在果树萌芽前期施入土壤保水剂。

对于七年以上和七年以下的果树，土壤保水剂施用量分别为 15~18 kg/亩和 12~15 kg/亩。当作物为大田作物时，土壤保水剂施用量为 3~5 kg/亩。施用时，将土壤保水剂与土壤按质量比 1:50~70 混合后施用。

植物抗蒸腾剂为醋酸苯汞、脱落酸、甲草胺、Vapor Gard、黄腐酸中的一种。当作物为果树时，全生育期内总共喷施 2~3 kg/亩，喷施 3~5 次，每隔 25~30 天喷施一次，植物抗蒸腾剂与水按质量比 1:200~400 稀释后施用；当作物为大田作物时，全生育期内总共喷施 1~2 kg/亩，喷施 3~5 次，每隔 25~30 天喷施一次，植物抗蒸腾剂与水按质量比 1:250~500 稀释后施用。

效益分析：该技术将土壤-作物作为整体，通过联合应用土壤结构改良剂、土壤保水剂和植物抗蒸腾剂三种制剂可以实现立体、全面蓄持水肥、阻截污染物流失途径，从而提高了农田水肥利用效率并能从源头上减少化肥和农药等的摄入，减轻了面源污染。与工程措施相比，化控防污技术投入少、操作简便，更加适合于山区复杂地形条件下进行推广应用。

三、农作物秸秆处理技术^[3]

将水稻秸秆在 300~700°C 下炭化成水稻秸秆生物质炭，破碎成碳粉；将氮磷钾颗粒复合肥（氮元素、五氧化二磷和氧化钾的质量比为 15:15:15）40~45 份，腐殖酸 3~6 份，膨润土 2~5 份，水稻秸秆生物质炭 6~10 份用搅拌机进行搅拌，同时均匀喷洒粘结剂；将混合均匀的湿物料送入滚筒造粒机造粒，得水稻炭基缓释肥。

与施用复合肥相比，施用等量的水稻炭基缓释肥能有效控制铵态氮和硝态氮径流损失和稻田下渗水铵态氮淋溶损失，同时炭基缓释肥可以持留氮素，增加土壤中有效态氮的含量，提高水稻对养分的吸收利用效率。

案例二：过程控制

一、生态田埂^[4]

技术方案：选用具备主埂、支埂和毛埂的农田，以 3 种田埂为界，将农田围成面积 300 m² 以上的封闭区域，封闭区域长 60 m 以上，宽 50 m 以上，每个区域设有一个进水口和一个出水口（图 2）。主埂宽度为 2~3 m，为田园大块的分界线，主埂两侧路肩为土路肩，路肩宽度大于 30 cm；支埂宽度为 80~100 cm，为田间输水通道的护埂，支埂的两侧路肩和支埂中心路面各占支埂宽度的 1/3，在支埂两侧的路肩之间设有自然杂草生长区；毛埂宽度为 40~60 cm，为农田水肥防漏屏障，是不同农户地块的分界线和农田操作时的临时人行通道，毛埂不划分路面和路肩，两侧均与农田直接接触。主埂路面采用泥结碎石路面工艺铺设，以粗碎石做主骨料形成嵌锁作用，以粘土作填缝结合料，经过路面整平、摊铺碎石、预碾碎石、铺土、带土碾压、最终碾压，使主埂路面厚度为 8~12 cm，路面材料土的含量为 30~35%。

植物选择：主埂、支埂和毛埂的植物配置依据水旱轮作区和雨养旱作农田两类来进行配置，水旱轮作区的农田植物配置选择耐涝品种，雨养旱作区选择耐旱的植物品种；草本经济植物条带实行每季成熟后收获，然后再进行新一轮播种。氮磷富集植物、观赏景观植物选用多年生植物种类。主埂路肩条带上的乔木选用属于豆科的合欢、墨西哥柏、车桑子中的一种或几种；灌木选择印度木豆、灌木柳；草本选择对磷有富集作用的多年生黑麦草。支埂两侧路肩条带上的灌木选择印度木豆或灌木柳；草本经济作物在大春季种植大豆和豌豆，在小

春季种植蚕豆或一次性种植多年生鱼腥草；草本氮磷富集作物选择多年生黑麦草或水蓼，草本观赏植物选择田埂报春或万寿菊。毛埂条带上草本经济作物大春季选择大豆，小春季选择蚕豆或豌豆；在水旱轮作区选择多年生水芹菜，草本氮磷富集植物选择黑麦草或水蓼。

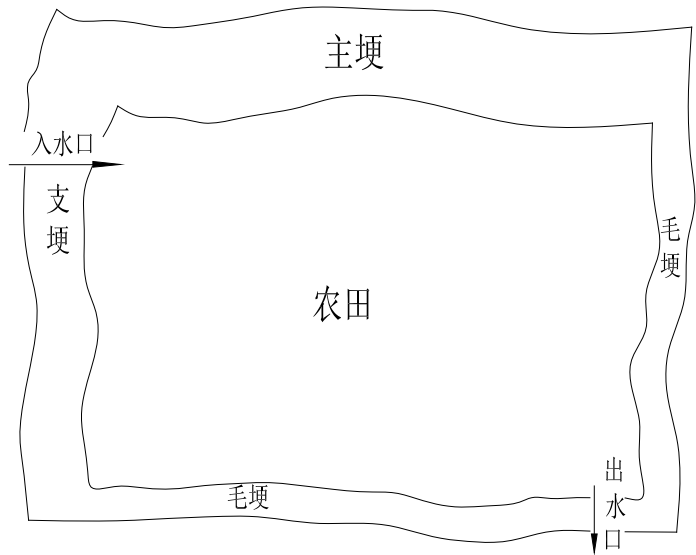


图 2 农田生物田埂结构图

效益分析：构建本田埂能够降低农田沟渠出水口 10.2%的总氮和 15.3%的总磷浓度；每年田埂植物能带走大量的氮磷，降低了农田氮磷污染的风险；田埂植物根系的固土作用明显，阻挡农田水的外排，与原有田埂相比，减少 11.4%的外排水，从而减少了随水流走的氮磷污染物；同时本田埂增加了农田的生物多样性，维持了农田的生态平衡，明显减少农作物的病虫害发生。

二、生态拦截带^[5]

以生态学理论为依据，通过生态拦截带、菜地生态拦截沟构建、草后续利用及维护三项技术的集成，实现生态拦截控制菜地氮磷向水体迁移。

技术方案：在河道、湖、池塘与蔬菜地之间，设置宽度为 4~6 m 的生态拦截带，在拦截带内种植经济型牧草，不施肥。在毗邻的蔬菜地块之间设置用于灌溉和排水的生态拦截沟，沟的宽度与深度为 20~30 cm。沟渠底部和两边侧壁种植经济型牧草，配施叶面肥。根据当地实际情况和季节不同，选择适宜的经济型牧草，并根据牧草的需要施用专门配方的叶面肥。牧草可选苏丹草、黑麦草、狼尾草及黑麦草与苏丹草的组合。牧草就近供应渔业养殖的需要，牧草种植面积与其可支持的渔业养殖面积的比例约为 1:1~1.5。

效益分析：生态拦截草带能拦截径流氮 42~91%，其中对颗粒态氮拦截效率为 46~95%，对水溶态氮的拦截效率为 20~79%；生态拦截草带能拦截径流磷 30~92%，其中对颗粒态磷拦截效率为 17~95%。在生态拦截沟内种植苏丹草，每米能够拦截 0.38 mg 总氮和 0.12 mg 总磷。

三、生态沟渠

1. 农田径流污染生态拦截沟渠^[6]

我国农田排水沟渠主要有 2 种类型：土质沟渠和混凝土沟渠。土质沟渠存在的主要问题是容易产生水土流失和杂草丛生，两者都对受纳水体产生污染，混凝土沟渠存在的主要问题是流速较快，难以较完全地沉降排水中的泥沙，同时缺少植物和微生物，不能吸收、吸附和降解排水中的氮磷。针对农田面源污染特点，王建国等^[6]发明一种集农田排水与防控农田面源污染于一体的农田径流污染生态拦截沟渠。

技术方案：将原有的农田排水沟渠改造成横断面为梯形的沟渠，沟渠的两侧和底部上分布有多个由混凝土制成的长方形孔，在长方形孔中种植对氮磷具有较强吸收能力的植物。沟渠中相隔一定距离并呈S形状放置一定数量的、内填对氮磷具有较强吸附能力的吸附材料(如炉渣)的过滤箱，同时在过滤箱中种植经济植物。为增加排水在沟渠中的滞留时间，在沟渠中分段设置一定数量的节制闸，并在节制闸底部设置一个控水阀。该农田径流污染生态拦截沟渠的总体结构见图3。

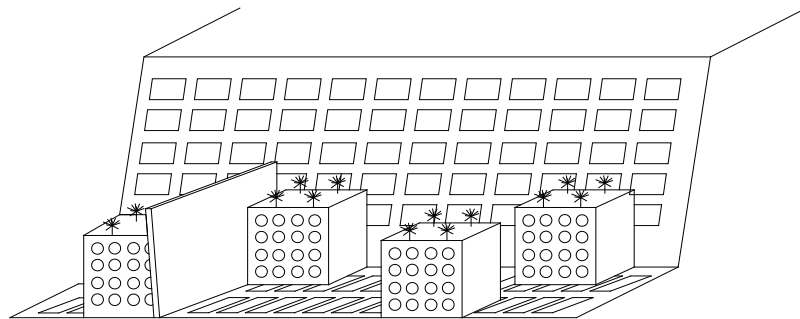


图3 农田径流污染生态拦截沟渠的总体结构示意图

植物选择：选择对氮磷等污染物较强吸收能力、生长旺盛、具有一定的经济价值或易于处置利用，并可形成良好生态景观的植物。如在太湖地区，夏季在沟底种植空心菜、水稻或空心菜与水稻的组合，在沟壁上种植狗牙根、豆角或狗牙根与豆角的组合；冬季在沟底种植水芹，在沟壁上种植乌塌菜、黑麦草或乌塌菜与黑麦草的组合。

效益分析：本农田径流污染生态拦截沟渠，一是能有效拦截农田排水中的氮磷，拦截率分别达50%和60%以上；二是能有效拦截农田排水中的悬浮物，拦截率达到95%以上；三是能充分利用原有农田排水沟渠，占用耕地面积少；四是工程造价与维护成本低、操作维护简单、便于大面积推广应用。

2. 农田径流氮磷生态拦截沟渠^[7]

(1) 生态沟渠设计

生态沟渠建设密度应能满足农田排水要求和生态拦截需要，一般为每 hm^2 农田 100 m 生态沟渠。一般分布在农田四周与农田区外的河道之间。

1) 工程设计

生态拦截型沟渠系统主要由工程部分和生物部分组成，工程部分主要包括渠体及生态拦截坝、节制闸等，生物部分主要包括沟底、沟两侧的植物。

渠体设计：渠体的断面为等腰梯形，上宽 1.5 m，底宽 1.0 m，深 0.6 m。沟壁、沟底均为土质（图 4）。

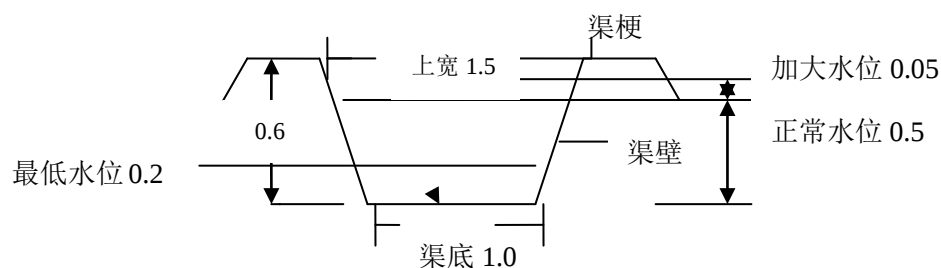


图 4 生态沟渠断面示意图（单位：m）

拦水节制闸坝设计：在生态沟渠的出水口用混凝土建造拦截坝，在拦截坝上建一个排水节制闸。排水节制闸的闸顶高程为 0.45 m，闸底高程设计为 0.1 m，闸孔净宽设计为 0.4 m，闸门采用直升式平面钢闸门。排水口底面离渠底 20 cm，根据需要可将拦截沟渠的水位分为 20 cm（旱作）、50 cm（种植水稻及水生蔬菜）溢流 2 种状态（见图

5)。

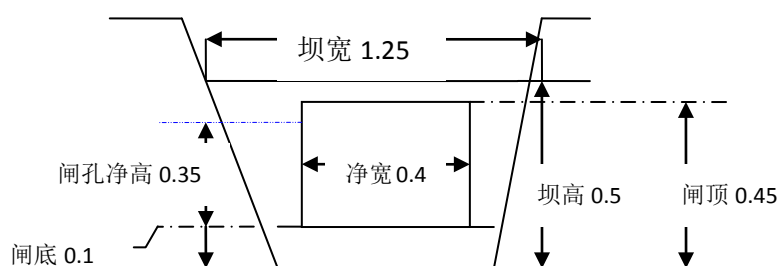


图 5 节制闸坝断面示意图（单位：m）

透水坝设计：透水坝是针对平原河网地区河网密集、水力坡降小的地形特点，以及农田面源污染的时空不均匀性，用砾石或碎石在河道中的适当位置人工垒筑坝体，利用坝前河道的容积贮存一次或多次降雨的径流，通过坝体的可控渗流来调节坝体的过流量，通过抬高上游水位为下游的处理单元提供“水头”。它既可以拦蓄径流，也具有一定的净化效果。

透水坝其剖面为梯形复式结构，坝坡的边坡系数为 1:1~1:2.5，用炉碴、碎砖等多孔材料建成与渠体断面相对称的渗漏型生态拦截坝，坝高 0.4 m，与渠埂持平，宽 0.3 m。透水坝分布在沟渠中，起址坝离拦水节制闸坝前 1 m，以后每间隔 50 m 设 1 座。

材料选择：根据《灌溉与排水工程设计规范》（GB 50288-1999）和《渠道防渗工程技术规范》（SL 18-2004）要求进行。

2) 植物设计

植物是生态拦截沟渠的重要组成部分。选择对氮、磷等污染物具有较强吸收能力，生长旺盛，具有一定的经济价值或易于处置利用，

并可形成良好生态景观的植物。生态沟渠中的植物可由人工种植和自然演替形成，沟壁植物以自然演替为主，人工辅助种植如狗牙根（夏季）、黑麦草（冬季）等；夏季沟底种植空心菜和茭白等植物，冬季种植水芹等。也可全年在沟底种植菹草、马来眼子菜、金鱼藻等沉水植物。

（2）生态沟渠构建

因地制宜，等高开沟，保证水流平缓，延长滞留时间，提高拦截效果。

生态沟渠采用梯形断面、复式断面和植生型防渗砌块技术，系统主要由工程部分和植物部分组成。沟渠两侧沟壁和沟底均由蜂窝状水泥板组成，两侧沟壁具有一定坡度，沟体较深，沟体内相隔一定距离构建小型坝以减缓水速、延长水力停留时间，使流水携带的颗粒物质和氮磷等得以沉淀和去除。夏季在沟壁孔中隔行种植多年生狗牙根植物，沟底种植空心菜；冬季在沟壁孔剩余行中种植黑麦草，在沟底种植水芹。

不同等高的生态沟渠之间通过节制闸连接。农田排水口与生态沟渠排水口距离 50 m 以上。

（3）效益分析

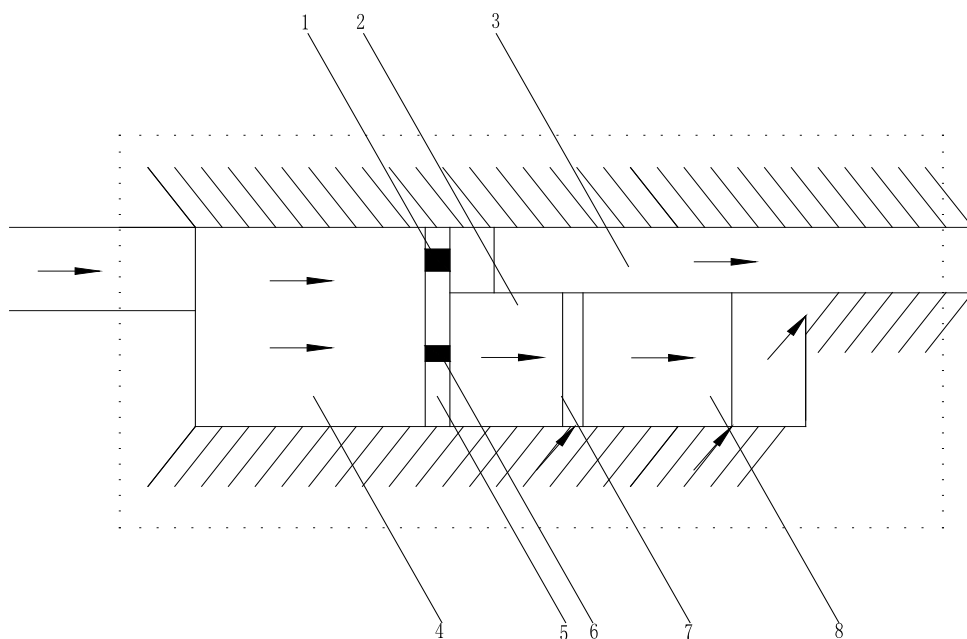
以农田排水口、生态沟渠出水口水体作为生态沟渠水体净化的检测取样点。测定样品中氮磷等污染物浓度，分析生态沟渠拦截、净化效果。一般生态沟渠对农田排水总氮、总磷的平均去除率分别达到 50%和 40%。

案例三：末端强化

一、前置库

1. 一种山地丘陵区农业面源污染净化前置库串联系统^[8]

在沂蒙山区的典型山地丘陵区建立小流域净化前置库串联系统。每一个前置库单元建设有生态塘池、沉淀池、前置库主库区和泄洪通道与泄洪管（图6）。在现有沟渠较宽区域，建设一个拦水坝，形成生态塘池，拦水坝上设置泄洪闸、以及与下面沉淀池相连的出水控制闸。根据实际需要，可对生态塘池进行一定的清挖，使其储存一定的水量。生态塘池深度一般在1~2 m之间，也可种植比较柔性的沉水植物。生态塘池储水通过出口控制闸进入沉淀池，沉淀池的深度一般控制在1 m内，面积由实际地形决定。经沉淀、拦截作用，径流中的大部分泥沙和悬浮颗粒物被沉降，出水采用表层水漫流的形式进入前置库库区。前置库主库区位于沉淀池后，库区面积根据现有地形尽量大，水深一般在10~100 cm，库区内种植对水位胁迫适应能力强、净化效果好，根系发达的土著水生植被。在前置库库区边，利用原有沟渠，建设泄洪通道。



图中，1-泄洪闸、2-沉淀池、3-泄洪通道（生态沟渠）、4-生态塘池、5-拦水坝、6-控制闸、7-泄洪管、8-前置库库区

图6 小型前置库单元结构示意图

前置库出水进入原有沟渠，通过沟渠的连接，将2个小型前置库单元进行串联，在雨季可去除总氮、总磷和悬浮颗粒物30%以上，在非雨季可去除总氮、总磷和悬浮颗粒物60%以上。

2. 平原河网地区面源污染强化净化前置库系统^[9]

在江苏省宜兴市大浦镇浦南村建立强化净化前置库系统，应用于平原河网地区农田面源污染控制。该强化净化前置库系统包括地表径流收集与调节子系统（生态沟渠）、沉降子系统（植物栅）、生态透水坝和前置库库区4个部分（图7）。地表径流收集与调节子系统长度为100 m以上，是利用现有河道沟渠或通过挖掘沟渠，结合生态沟渠技术，收集地表径流并利用河道自然净化的功能去除一部分悬浮物及少量的氮磷。沉降子系统长度为10~100 m，建立在生态沟渠后部，主

要种植水生植物起到拦截、沉降作用，同时去除地表径流中的一部分氮磷等污染物。利用砾石构筑生态透水坝，砾石床种植的植物、砾石孔隙与植物根系周围的微生物共同高效去除氮磷等污染物。在透水坝后建立前置库库区，利用具有高效净化作用的生物浮床、生物操纵技术、水生植物带、固定化脱氮除磷微生物等，强化去除氮磷等污染物。

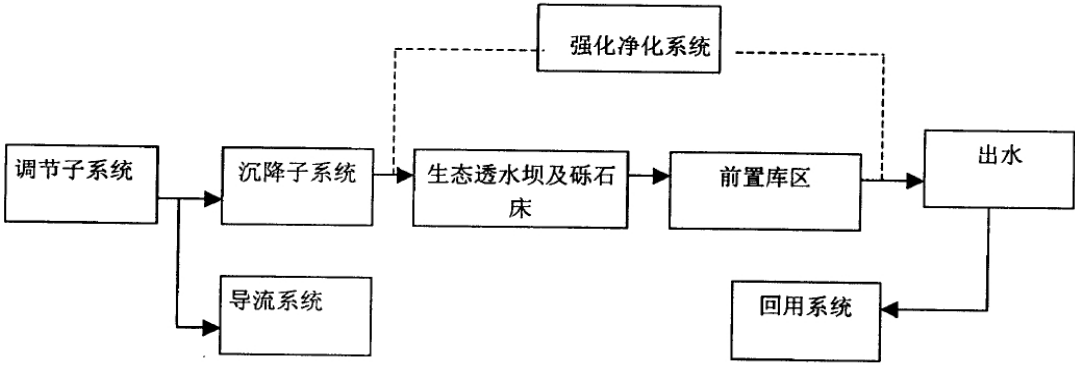


图7 平原河网地区面源污染强化净化前置库系统的结构示意图

二、堰塘湿地

堰塘湿地通过植物吸收、底泥吸附、微生物降解等综合作用，对农田排水进行净化。它不是专门建造的人工湿地，而是在农田中选取被废弃的堰塘进行稍微改造（如种植水生植物，清淤等）即可。其余设施可以根据农田现有设施进行改造。堰塘湿地水环境修复技术的最大特点是费用低廉、操作简单，在中国南方灌区有很大的推广前景。

1. 湖北堰塘湿地农田水环境修复^[10]

在湖北省漳河灌区选取了 1 个封闭区域。该区位于湖北省灌溉试验中心站以南 2 km，总面积 11.8 万 m²，如图 8 所示。区域内地势北高南低，东西高中间低，平均海拔高程为 96 m。经统计，区域内共有 132 块农田，绝大部分田块种植水稻，种植制度为水稻-油菜/小麦

一年两熟，2009 年灌区水稻施肥水平为：氮肥为 180 kg/hm^2 ，基肥用碳酸氢铵，追肥(分蘖肥)用尿素；磷肥为 40 kg/hm^2 ，钾肥为 70 kg/hm^2 。区域内在田块管理上采取分户管理的模式，灌溉水水源主要来自位于区域西侧的三千渠一分干。

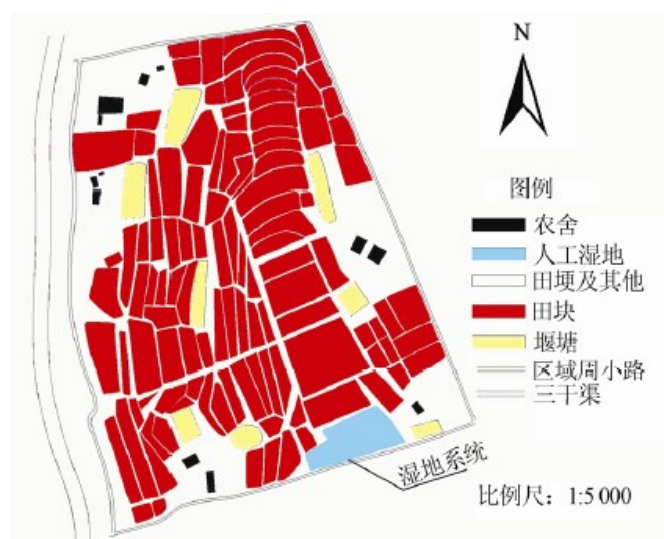
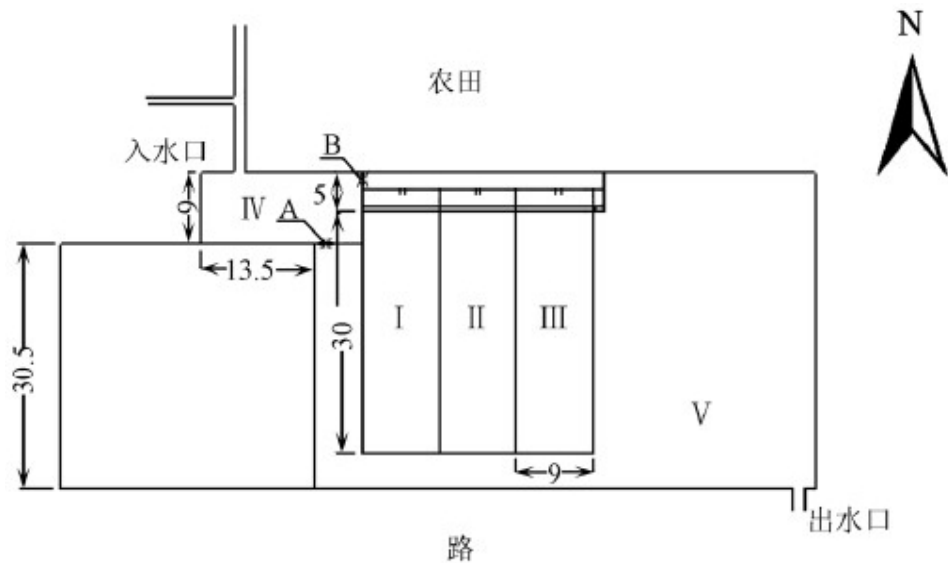


图8 平面图

湿地设计：最南端在整个区域中地势最低，该处有1 座堰塘，将其改造为塘堰湿地，可以收集全区域农田排水。该堰塘表面积 2300 m^2 ，主要水生植物有菖蒲、芦苇等。从湿地实际情况出发将堰塘湿地划分为3个处理单元，各个单元之间用墙体隔开，每个单元均有各自独立的进水口和出水口，相互之间不联通（图9）。3个处理单元分别为：单元Ⅰ为不做任何处理的纯天然状态，起对照作用；单元Ⅱ对湿地植物密度进行了优化，观测植物调整后的湿地处理效果；单元Ⅲ对湿地底泥进行了疏浚，回填新的底泥，然后重新调整植物种植密度。由于菖蒲在漳河灌区堰塘湿地当中属于优势物种，而且其吸收氮、磷效果很好，因此在湿地改造过程中将3个单元的湿地植物全部改种为

菖蒲。



图中，I、II、III 是做对比的 3 个处理单元、单元 IV 相当于初级沉淀池、单元 V 为湿地空余区。A、B 为控制流入水量的墙体。

图9 塘堰湿地平面布置图

湿地植被的后处理：一般采用2 种方法处理湿地植被：1）除去植株；2）疏浚底泥，将肥沃湿地部分底泥进行疏浚（一般为0.5 m）。除去的植株和底泥含有丰富的氮磷，可以还田。

效益分析：湿地对农田排水的氮、磷去除效率随着水稻生育阶段的不同而异，在水稻生长初期和中期（分蘖拔节期、孕穗抽穗期）对氮、磷的去除率比较高，总氮去除率最大达到了 81.6%，总磷去除率最大达到了 80.0%，但在水稻生长期后期，湿地不能发挥去除农田排水中氮、磷的作用。从整个水稻生育期来看，湿地氮、磷素去除率分别为 46%和 44%，达到了预期目标。3 个处理单元中，作为对照的单元 I 的处理效果最差。单元 II 和单元 III 优化了湿地植物的种植密度，处理氮的能力显著增强，说明湿地植物对氮素的吸收是湿地去除农田面源污染中过量氮素的一个重要途径。单元 III 比单元 II 的磷的去除效

果好,说明湿地基质底泥对磷的吸附以及底泥基质表面土壤钙与磷酸根离子的化学反应是湿地对去除磷元素的主要作用。

2. 桂林市堰塘湿地农田水环境修复^[11]

位于广西壮族自治区桂林灌溉试验中心站东侧农田,面积约为6.3 hm²,灌溉水源取自桂林市清狮潭水库西干渠。表面流人工湿地设计面积为0.147 hm²,控制水田面积为3.107 hm²。在整个表面流人工湿地系统中,灌溉用水经由渠道进入农田,农田排水由毛沟排入表面流人工湿地,经过表面流人工湿地处理后排入湿地下游农田,用于农田回灌。表面流人工湿地基质由砾石、沸石、粉煤灰等组成,整个湿地分为A、B、C、D四个区(图10)。农田排水从A区流入,经过B区、C区、D区,最后从D区流出。沿水流方向依次在A、B、C、D区栽种的植物为:荷花、茭白(释放大量氧)、三菱草(对氮、磷的吸收能力很强)和睡莲(覆盖水面可以提供一个厌氧环境)。在该堰塘湿地系统中农田排水进入A区,首先进行沉淀,去除颗粒物质;进入B区,将排水中的氮素充分地转化为硝态氮以利于植物的吸收;进入C区,三棱草通过吸收作用而去除排水中大部分的氮磷;最后排水进入D区,厌氧环境下排水中的有机物进行分解;最后排水从湿地出口排出流入区域周围的排水沟流进下游的鱼塘或堰塘进行储存。

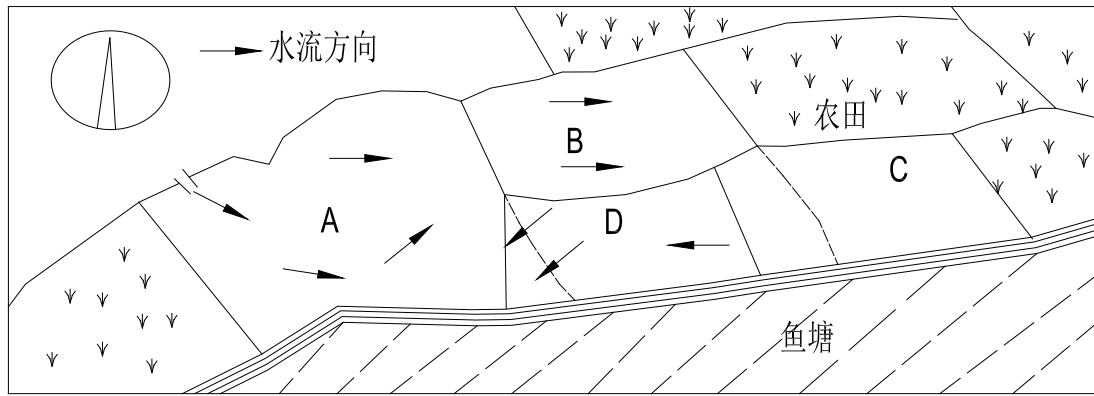


图10 堰塘湿地平面布置图

效益分析：经过整个水稻生育期(二期水稻) 的运行试验，堰塘湿地对农田排水中氮、磷的平均去除率分别达到了53.8% 和61.1%，去除效果良好。

三、农田排水氮磷拦截潜流坝^[12]

水力停留时间是人工湿地污水处理系统重要的设计参数之一，这一参数对于去除水体中氮、磷及悬浮物等有着重要的意义。潜流湿地往往可以在相对较小的处理单元内增加水力停留时间，而对于表面流湿地则需要相对较长的处理单元来实现相同的水力停留时间。为了提高现有表面流人工湿地的氮磷拦截能力，增加表面流人工湿地的水力停留时间，增强水体氮磷及悬浮物的消减能力等，设计了一种氮磷拦截潜流坝。

潜流坝位于苏州市相城区新埂村，紧邻太湖主要入湖河流望虞河，区域内河流纵横，湖泊众多，地处温带，四季分明，气候温和，雨量充沛，年平均气温为16 ℃年降水量1200 mm，3至8月的降水量占全年雨量的65%左右。试验区距离太湖5.3 km，距离望虞河300 m（望虞河为引江济太工程调水河道）。

设计原则：将沟渠来水合理分配到湿地，削减暴雨期间的水量负荷以及进水中的氮、磷含量；不影响上游农田耕作，不改变沟渠塘原有功能；湿地建成后具有较佳的美学景观，湿地的部分植物产品可创造经济效益。

湿地及潜流坝构建：浅塘湿地由原来洼地而来，原有植物主要为芦苇，经过改造后形成两个水面面积相同的浅塘湿地生态塘1和生态塘2。其中生态塘2中布设有潜流坝，同时为了景观效果和减少投资，在生态塘2中设计有人工岛。人工岛由原有洼地土壤堆砌而成，人工岛两侧有2个潜流坝，2个潜流坝宽度均为4 m，长6 m，人工岛面积100 m²，生态塘1宽度为22 m，长度为45 m，生态塘2宽度为25.3 m，长度为45 m。2个生态塘示意图如图11。进水用直径为30 cm波纹管由原农田排水渠引入，2个进水口高度一致，位置相同。在2个生态塘出水口设置2个拦水节制闸。2个生态塘进水量一致，平均日进水量200 m³，构建潜流坝成本为每米1000元。

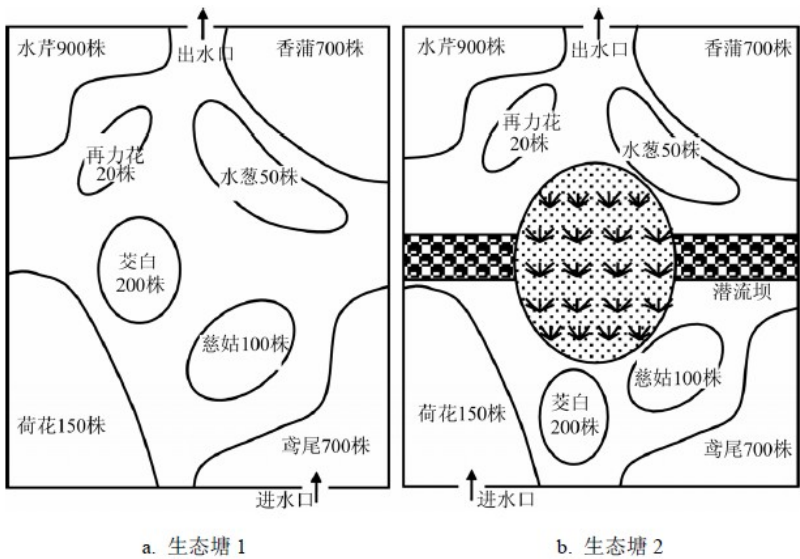


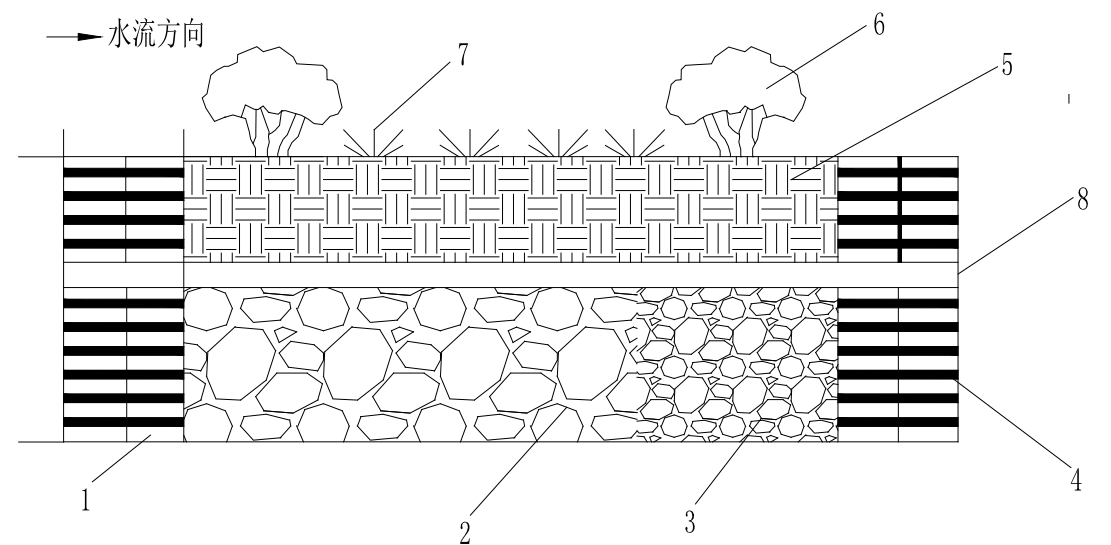
图11 试验区概况及试验区设计

设计方法：该潜流坝主要应用于农田生态沟渠塘拦截氮磷等物质

的表面流人工湿地，坝体高80 cm，长度依据具体沟渠塘宽度而定，宽度为4~6 m，潜流坝两侧有透水墙，宽度为40 cm，由空心砖垒砌而成。透水墙中间设置有砾石填料层，高度为40 cm，考虑到工程投资砾石填料层可就近用料，可采用鹅暖石、废砖块、煤渣、水泥块等的一种或几种。砾石填料层的砾石粒径在靠近进水口一端为5~8 cm，然后向出水口一端砾石粒径逐渐降低到1~2 cm。为了更好的吸收水体中的氮磷，在砾石填料层上方有土壤覆盖层，高度为40 cm，土壤覆盖层上种植有植被系统，可以种植常绿草本植物和灌木，常绿草坪可以栽种多年生黑麦草、高羊茅、早熟禾、小冠花等，常绿灌木可以栽种冬青、小叶黄杨、女贞、小檗、黄杨、石楠等灌木（图12）。为了防止来水过量而漫过潜流坝，在潜流坝中部埋设有溢流管高度距坝底50 cm，溢流管直径为20 cm，溢流管数量按照潜流坝长度每2米1根来设置。当农田排水沟渠系统中水体通过氮磷拦截潜流坝时，能有效增加水力停留时间，并且由于设置了砾石填料层，能使水体中的悬浮污染物得到沉降和吸附，氮磷拦截潜流坝上的植物也可以有效吸收水体中的氮磷等污染物，最终实现对水体氮磷等污染物的有效拦截。

植物配置：在植物选择上除具有普通水生植物适应性强、生物量大的优点外，还应具有景观性好、四季常绿或者短休眠特性的植物。最终筛选生态塘四周和边坡布置垂柳，护坡植物选择多年生黑麦草、高羊茅、早熟禾、小冠花、狗牙根等，在生态塘内布置常绿水生植物水芹、路易斯安娜鸢尾、狐尾藻，其他水生植物菖蒲、香蒲、茭白、慈菇、荷花、水葱、慈菇、再力花等。人工岛上种植垂柳、小叶黄杨、

女贞、石楠等灌木，潜流坝上种植小叶黄杨、女贞、石楠等灌木及护坡植物多年生黑麦草、高羊茅、早熟禾、小冠花、狗牙根等。



图中，1-透水墙（进水侧）、2-砾石填料层（5-8cm）、3-砾石填料层（1-2cm）、4-透水墙（出水侧）、5-土壤层、6-常绿灌木、7-常绿草本植物、8-溢流管

图12 潜流坝断面示意图

氮磷拦截效率：无潜流坝生态塘1水体铵态氮和总氮的平均去除率分别为68.7%和62.6%，带潜流坝生态塘2水体铵态氮和总氮的平均去除率分别为77.1%和69.8%，分别较生态塘1高出8.3%和7.2%。无潜流坝生态塘1水体总磷的平均去除率为34.6%，带潜流坝生态塘2水体总磷的平均去除率为51.6%，说明潜流坝对氮磷具有较强的去除能力。

经济效益分析：构建潜流坝成本为每米1000元，虽然潜流坝的投入比常规表面流湿地有所增加，但具有潜流坝的生态塘2较无潜流坝的生态塘1每年平均可以减少排放铵态氮12.4 kg、总氮28.5 kg、总磷3.65 kg。同时该潜流坝占地面积小，节约了土地成本，并且具有较强的拦水阻流作用，增加水流的渗流时间，延长水力停留时间，同时潜流坝上的植物也可以有效吸收水体氮磷等。因此，构建氮磷拦截潜流

坝在经济上和去除水体氮磷污染物功效上都是可行的。

参考文献

- [1] 王德建,张刚,王灿. 一种具有减缓农业面源污染功能的农田布局方法[Z]. CN101715663A: 中国科学院南京土壤研究所,2010.
- [2] 杨培岭,廖人宽,任树梅,李云开,杨元辉,化相国. 一种防治坡地农业面源污染的方法[Z]. CN102986328A: 中国农业大学,2013.
- [3] 吴伟祥,冯琪波,周旻旻,吴忆敏.一种水稻炭基缓释肥及其制备方法[P].浙江: CN102219604A,2011-10-19.
- [4] 雷宝坤,续勇波,陈安强,毛妍婷,鲁耀,刘宏斌,翟丽梅,王洪媛,王应学. 一种利用生物田埂控制农田氮磷面源污染的方法[Z]. CN103270832A: 云南省农业科学院农业环境资源研究所,2013.
- [5] 胡正义,王彩绒,林天,李国栋,杨林章,施卫明,吴锡军. 菜地土壤氮磷径流控制生态拦截方法[Z]. CN1823564: 中国科学院南京土壤研究所,2006.
- [6] 王建国,单艳红,王岩,薄录吉,王永谦,杨林章. 农田径流污染生态拦截沟渠[Z]. CN102094407A: 中国科学院南京土壤研究所,2011.
- [7] 苏州市农业地方标准, DB3205/T 157-2008, 农田径流氮磷生态拦截沟渠构建技术规范, <http://wenku.baidu.com/view/ab8f4d87ec3a87c24028c481.html>
- [8] 李宝,刘前进,于兴修. 一种山地丘陵区农业面源污染净化前置库串联系统[P]. 山东: CN102874972A,2013-01-16.
- [9] 张永春,张毅敏,胡孟春,张龙江,田猛,唐小燕,吴小敏. 平原河网地区面源污染强化净化前置库系统[P]. 江苏: CN1621622,2005-06-01.

- [10] 潘乐, 茆智, 董斌, 等. 塘堰湿地减少农田面源污染的试验研究[J]. 农业工程学报. 2012, 28(4): 130-135.
- [11] 李文斌, 李新建, 高学睿, 等. 桂林市堰塘湿地农田水环境修复技术研究[J]. 灌溉排水学报. 2011, 30(2): 119-122.
- [12] 赵建宁, 张贵龙, 刘红梅, 等. 农田排水氮磷拦截潜流坝的设计与运行[J]. 农业工程学报. 2013, 29(2): 88-92.