排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2014 年 4 月 Apr. 2014
第 32 卷 第 4 期 Vol. 32 No. 4

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.13.0174


王少丽

农田除涝排水技术研究综述

王少丽[1,2], 许迪[1,2], 陈皓锐[1,2], 韩松俊[1,2], 焦平全[1,2]
(1. 中国水利水电科学研究院水利研究所, 北京 100048; 2. 国家节水灌溉北京工程技术研究中心, 北京 100048)

摘要: 从农田涝灾风险评估、农田除涝排水工程技术、农田除涝排水管理 3 个方面入手,综述了近年来国内外取得的相关研究成果,并对农田除涝排水技术研究的未来发展进行了展望.明确指出未来的重点方向是:研究变化环境下的农田涝灾演变规律,构建人工-自然复杂条件下的农田涝灾预测评估技术与方法;研究满足作物产量需求和环境保护要求的农田涝灾综合控制标准,提升传统农田除涝治理技术水平与管理模式,探讨现代化除涝技术与传统除涝技术相结合的技术体系;重视农田排水资源的高效利用,研究适宜不同类型区的节水灌溉与控制排水相结合、灌溉排水与沟塘湿地调蓄净化相结合、排水资源循环灌溉再利用与除涝抗旱相结合的农田排水管理模式.

关键词: 农田除涝;涝灾;风险评估;排水工程;排水管理
中图分类号: S276 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2014)04-0343-07

王少丽,许迪,陈皓锐,等.农田除涝排水技术研究综述[J].排灌机械工程学报,2014,32(4):343-349.

Review on research of farmland drainage technology

Wang Shaoli[1,2], *Xu Di*[1,2], *Chen Haorui*[1,2], *Han Songjun*[1,2], *Jiao Pingjin*[1,2]
(1. Department of Irrigation and Drainage, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China; 2. National Center of Efficient Irrigation Engineering and Technology Research-Beijing, Beijing 100048, China)

Abstract: The research achievements domestic and abroad in recent years were reviewed from three aspects: risk assessment of waterlogging disaster, technology as well as management of farmland drainage, and the prospects of future development of farmland drainage technology were described. The key research directions in the future was pointed out: the evolution laws of farmland waterlogging disaster under the changing environment should be studied, and the forecast and evaluation technique under artificial-natural complex conditions should be established; the integrated control standard of waterlogging disaster for satisfying the crop production and basic environmental protection demand should be investigated to promote the technical level and management model of conventional farmland drainage control, and the combined system of modern and conventional drainage technology should be discussed; the efficient utilization of farmland drainage resources should be paid attention, and the farmland drainage management model should be studied combining water-saving irrigation with controlled drainage, irrigation and drainage with pond purification, drainage water reuse for irrigation with waterlogging and drought control.

Key words: farmland drainage; waterlogging disaster; risk assessment; drainage engineering; drainage management

收稿日期: 2013-08-02; **网络出版时间:** 2014-04-09
网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/doi/10.3969/j.issn.1674-8530.13.0174.html
基金项目: 国家科技支撑计划重点资助项目(2012BAD08B00); 国家自然科学基金创新研究群体项目(51021066); 中国水利水电科学研究院青年科研专项资金资助项目(节集 1304)
作者简介: 王少丽(1963—),女,江苏无锡人,教授级高工,博士(shaoliw@iwhr.com),主要从事农田排水与水环境保护技术研究.
许迪(1957—),男,北京海淀人,教授级高工,博士(xudi@iwhr.com),主要从事农业节水应用基础与技术研究.

中国是世界上洪涝灾害最为频繁的国家之一,洪涝灾害以其发生频率高、分布范围广、灾害程度重、经济损失大等特点给农业生产及社会经济发展带来巨大影响.近年来,受全球气候变化影响,水资源时空分布不均,洪涝灾害的突发性、异常性和不可预见性日益凸显,受灾损失程度总体上呈逐渐增大趋势.根据空间分布现状,我国农田涝灾频发区和易涝区多集中在大江大河中下游,其危害造成严重的作物减产损失,特别是中东部和东南沿海一带,这些地区人口密集,社会经济发展水平较高,一旦发生涝灾,损失尤为严重.此外,农田排出的涝水携带的化肥、农药及其他污染物,通过排水系统进入地表和地下水体,成为农业面源污染的重要途径之一.因此,农田涝灾对我国农业生产和国家粮食安全及生态安全产生了严重威胁,制约着我国社会经济的可持续发展.为减轻农田涝灾危害,国内外学者对其产生的机理和演变规律、除涝减灾的技术方法与措施等高度重视,取得了大量的相关研究成果.文中从农田涝灾风险评估、农田除涝排水工程技术、农田除涝排水管理等3个方面,综述分析国内外研究进展,提出今后的重点研究和发展方向.

1 农田涝灾风险评估研究

风险评估是农田涝灾防御的一项基础性工作.在定量评价农田涝灾风险基础上,分析不同地区涝灾发生的演变规律,对于探索防御涝灾害的应对措施,降低农田涝灾风险和减轻灾害损失具有重要意义.

1.1 基于指标体系的风险综合评估

基于指标体系的涝灾风险评估前提是选择合适的指标因子建立评价指标体系,核心工作是选择适当的数学方法建立综合评价数学模型,常用的数学方法包括特尔非法、主成分分析法、层次分析法、模糊综合评价和人工神经网络等.此外,一些新的数学方法如投影寻踪、集对分析法、支持向量机、资料包络分析、信息扩散理论,以及多种数学方法集成性模型也逐渐被广泛用于涝灾风险评估[1].

基于指标体系的涝灾风险建模与评估,其方法简便、数据易于获得,已在国内广泛应用,但在指标的选择与量化、指标因子权重的确定、风险等级的划分等方面还具有不同程度的主观性,且风险评价结果的空间分辨率较低,难以模拟涝灾系统的不确定性和动态性,只适用于大尺度区域的灾害风险评估.

1.2 涝灾风险评估的数值模型

涝灾风险是自然因素和社会经济因素共同作用的结果,在导致涝灾风险的因素中,致灾因子、孕灾环境和部分抗灾能力的综合效果可以通过数值模型给予量化,从而获得导致承载体发生损害的直接水文指标,然后结合承载体的脆弱性,最终获取涝灾风险评估结果.

受灌排沟渠和塘堰改造、土地平整、作物种植、道路建设等复杂下垫面条件变化的影响,农田水分循环过程与自然流域水分循环过程有着显著差异,基于自然流域水分运动规律的水文模型对灌区的适应性被越来越多的学者所重新审视.灌区农田水分循环模拟模型的构建正日益受到重视,该类模型构建主要有三种方式:一是在原有流域水文模型基础上,针对灌区水分循环特征进行水循环过程的改进[2];二是在田间水文模型基础上进行扩展,将其用于区域尺度[3];三是研发适合于灌区水分循环特征的分布式排涝模型[4].在灌区农田水循环模型构建中,需要深入分析的问题在于如何针对人工-自然综合作用形成的地貌条件进行合理的空间离散,以便准确反映农业区地表和地下水流迁移的路径与方向.另外,灌区复杂地貌条件下的汇流规律及其对沟渠、塘堰、水库、道路等地物的响应机制,也需通过开展小流域试验获得,从而使灌区水文模型的模拟效果更为精确.

1.3 不同承载体的受涝响应规律

对于住宅、建筑物、商业、工业一类的承载体,多通过实地调查获得其灾损曲线[5].而农业方面的承载体则主要是田间种植的作物,通过小尺度下的田间试验,获得各种作物在不同暴雨强度、淹水深度与历时等状况下的产量响应以及涝渍胁迫下的作物水分生产函数等一系列成果,为区域农田作物受涝风险评估脆弱性程度的构建提供基础[6].除作物的经济损失外,生态环境作为一种新的承载体开始受到关注,洪涝灾害对自然生态与环境的影响研究正日益引起人们重视[7];现有基于小尺度田间试验的作物受涝水分生产函数和响应规律等成果也有待于扩展到大尺度农田作物受涝灾害的评估研究当中.

1.4 环境变化对涝灾风险的影响

全球气候变化直接影响涝灾风险的致灾因子,环境变化下的涝灾风险研究也多集中于此,且大部分采用“If-What”的研究框架,即根据IPCC推荐的

排放情景驱动气象模型或天气发生器获取气候预估值,并采用不同的降尺度方法获得研究区未来气候波动的结果,且作为边界条件输入到涝灾数值模型,模拟气候变化下的涝灾风险[8].

随着人类活动加剧,土地利用变化[9]、圩区治理和外河水面率变化[10]等对涝灾风险影响的研究已成为关注的热点.研究表明,城市化过程通过植被砍伐、土壤夯实、开沟排水、下垫面变化,改变了地表用地类型的景观结构和植被特征,影响了地表产汇流机制和水分循环过程;有研究也认为不透水面格局趋向积聚,径流就增加,而林地格局趋向分散,植被缓解径流的能力就降低.

由于气候变化和人类活动之间并非是孤立的,故对涝灾形成环境中各因子之间的诱发关系及相互影响机制还有待做进一步研究.其次,极值气候对涝灾的影响还面临着一些研究难点,如极值气候的定义、极值分布函数分析和极值点的确定等;气候和水文模型在极值环境中的适应性和不确定性分析、极值气候条件和极端涝灾形成的动力学机制等也需引起必要的关注.

1.5　涝灾风险评估的不确定性

涝灾风险评估的不确定性来源于输入变量的不确定性、模型的不确定性和模型参数的不确定性,现有分析多针对水文模型的不确定性,采用的数学方法主要有参数敏感性分析、蒙特卡洛法、通用似然不确定性估计法、马尔科夫链、卡尔曼滤波、贝叶斯法等,分析的对象主要围绕灾害风险评估过程中使用的水文模型参数或致灾因子,基本思路是将不确定性因子用随机变量、模糊变量或区间变量替代原模型中的确定性变量,通过对风险输出结果的变化来分析不确定性[11].在涝灾风险的不确定性研究方面,目前还较少考虑孕灾环境、水文模型结构所导致的不确定性问题,非水文模型(综合评价模型、承载体灾损模型、未来社会经济发展模型)带来的不确定性也很少引起关注.

2　农田除涝排水工程技术研究

农田除涝排水工程技术与方法研究具有很长的历史,现有技术的应用使得大面积涝渍土壤得到改良,保障了粮食安全.近年来气候的极端变化,短期内的强降水引起的洪涝灾害、涝渍相随、旱涝交替的演变,以及人类活动的加剧等,都对农田除涝排水工程技术与方法提出了新的需求和挑战.

2.1　农田除涝排水措施及施工工艺

明沟、暗管、竖井及泵站抽排等是典型的农田除涝排水工程技术措施,其中明沟排水是最早发展起来也是运用最为广泛的排水措施.国内农田排水系统多采用由不同级别排水沟组成的单一明沟布设方式,而发达国家的田间末级排水则广泛采用暗管排水形式.暗管排水可减少明沟的占地面积,管护简单,降渍效果好,但排地表水效果不如明沟,且工程建设投资较大,施工技术要求较高.随着技术发展与进步,兼具明暗2种排水工程措施优势的明暗组合排水技术方式将成为未来农田除涝排水工程技术的发展方向.由于排水引起的潜在环境危害与旱涝交替的加剧,为了减少不必要的土壤水肥流失,美国、加拿大等国家发展并应用了控制排水技术,结合控制排水进行除涝排水工程技术研究是对传统除涝排水工程技术的创新.

20世纪60年代出现了开沟铺管机,随后又出现无沟铺管技术,为现代化暗管排水技术的发展和推广提供了支撑手段.无沟铺管机是一种自动化程度较高的暗管铺设设备,安装速度快,可精确定位暗管的深度与坡度,不破坏土壤与作物,无须回填土壤,但只适用管径较小的预装外包料的波纹管,且难以在过湿土壤条件下施工,其优势随埋管深度增加和土壤黏性增大而降低.随着激光控制技术应用到铺管机上,有效提高了地下暗管的铺设质量和效率[12],实现了保证沟深和坡度的挖沟、铺管、回填为一体的集约化技术.但受技术、经济、观念等限制,目前我国暗排技术发展还相对滞后,特别是施工机械发展的滞后成为现代化暗管排水技术应用推广的瓶颈.

2.2　农田除涝排水工程材料

农田排水系统的工程材料包括明沟护坡和排水附属建筑物所需材料、排水管及配件和管材外包料等.在防止明沟边坡坍塌的技术措施中,除放缓边坡、种草护坡、加强管护外,常用的加固边坡的材料有砂(土)袋、砂卵石、透水混凝土板、黏土块、暗管和透水防沙的土工布等.近年来,国内外广泛开展生态护坡技术研究与应用,日本于1995年率先开展植被生态混凝土研究,美国及欧洲发达国家自20世纪末也相继开展了生态混凝土研究与开发[13].相比之下,我国的研究起步较晚,目前主要集中在河道的边坡护岸、城市景观建设、水污染治理等领域,在农田排水沟边坡防护上仅开展了小规模的试验示范.

目前常用的暗管排水管材主要有PVC、PE波纹塑料管,适合于挖沟铺管机等先进施工技术,铺设效率高,应用较为广泛.铺设外包滤料是暗管排水施工过程中必要的环节,早期较为成熟的技术是采用级配良好的砂石料或植株秸秆作为外包滤料.随着自动挖沟铺管机械设备的发展,选择人工合成材料如土工布等作为排水暗管的外包滤料受到广泛关注.针对土工布外包滤料的选择已做了大量研究工作,如Stuyt等[14]研究了暗管排水外包滤料的选取、设计与施工,提出了选择土工布的计算方法和选择标准;丁昆仑等[15]开展了宁夏银北灌区暗管排水外包滤料的一维和二维试验研究,提出了适宜于当地暗管排水需求的无纺土工布规格指标与选择方法.

2.3 农田涝渍灾害治理标准

合理的排水标准是确定农田排水工程规模的重要依据.早期的除涝排渍标准研究主要以提高作物产量为目标,采用田间淹水试验,研究作物关键期的受涝渍程度和产量之间的响应关系[16],主要研究的作物有冬小麦和棉花,经济作物研究较少.考虑到作物在不同生长阶段对涝渍敏感程度的差异,国内外学者提出了以抑制天数指标作为涝渍设计标准的依据[17].随着对农作物产量与排水控制指标的关系、排水控制指标与农田排水系统投资及运行费用的关系等研究成果的不断积累,通过排水系统的效益-费用分析,以排水净效益最大作为排水目标被广泛重视,并开展了相关的应用研究[18].

由于认识到农田排水存在着环境效应,如何将环境影响纳入排水标准的制定中是今后需进一步研究的重要内容.排水标准的制定受各种因素的影响,需要综合考虑当地的气候变化、经济发展预期以及环境社会发展等各方面的影响.

2.4 农田除涝治渍排水工程设计

排涝(渍)流量、地下水降落速率、地下水位控制深度等是农田除涝治渍排水工程设计中考虑的主要排水控制指标,其决定了排水沟(管)的工程规模.通常采用平均排除法或经验公式法计算单位面积上的设计排涝流量(排涝模数),并以此设计排水沟道的断面尺寸等.单位面积上的设计排渍流量(排渍模数)由地下水下降速率和土壤特性等确定,以排渍模数、地下水降落速率、地下水位控制深度指标为依据,基于排水渗流理论推导排水沟(管)间距计算公式一直是研究的重点.自20世纪中叶以来,用于描述稳定流和非稳定流的田间排水沟(管)间距计算方程由国内外许多学者相继提出[19].自20世纪60年代以来,Sieben、Hiler、张蔚榛等综合考虑了作物产量与排水工程规格的关系,使得通过排水系统设计来优化产量与效益成为可能.同时开展的以建立作物产量与地下水位深度、排水间距或回落速率关系为目的的试验研究,又为建立数值模型模拟排水工程规格与地下水位、土壤水分状况和作物产量关系奠定了理论基础.随着计算机模拟技术的发展,数值模型逐渐应用于排水工程优化设计.近年来,气候变化和土地利用方式的改变,使得相同设计暴雨下可能产生与以往不同的排涝流量,需要对现有排涝模数公式中的相关系数和指数作进一步的研究.

3 农田除涝排水管理研究

农田排放水被认为是引起农业面源污染的来源之一,然而其中的污染物能够通过一系列措施得到控制,适当的排水管理措施具有显著的节水减污效应,在水资源短缺地区,农田排放水还可作为一个重要的水源加以合理再利用.

3.1 改进排水系统设计的减污效应

与农田排放水中污染物负荷直接相关的设计指标是排水强度和排水系统的布置方式[20].通过改进排水系统的设计与管理,在促进农业生产的同时能尽可能减小排水系统对水环境产生的负面影响.Peterson等[21]把排水沟设计为2级复式断面,以控制排水强度和减少氮磷流失量;Verma等[22]采用双层排水暗管控制排水强度;殷国玺等[23]建议采取涝渍兼治的明暗组合排水方式,实现涝水明排、浅排和渍水暗排、深排的优化组合功能.此外,也采用模型模拟确定不同排水管理措施下的污染物流失路径,评估排水设施建成后是否可能成为污染通道,进而在排水系统设计时确定合理的布置方式以避开污染源[24-25].

3.2 农田控制排水措施的减污效应

控制排水对减少氮磷流失和提高作物产量具有重要作用.控制排水条件下的氮迁移转化虽然与土壤类型、气候条件、作物和其他管理措施密不可分,但控制水深、沟(管)间距也具有显著影响[26].近年来,国内专家开始尝试水稻控制排水研究[27]、排水沟上修建拦蓄设施的抗旱减污研究[28]、控制排水条件下的氮迁移转化规律研究[29]等,但在技术成熟度和应用性方面与发达国家相比还有一定差距.

我国灌区的排水系统主要依赖明沟排水,如何结合中国国情,将节水灌溉与控制排水相结合,兼顾除涝、抗旱、减污的控制排水及其运行模式是需深入研究的问题.

3.3　沟渠塘堰对污染物的消减效应

农田排水沟渠具有物质传输、过滤或阻隔以及物质能量源(汇)等功能,显著影响农田生态系统中各种物质循环过程.近年来,国内外研究者开始关注农田排水沟渠的环境效应,探讨如何利用农田排水沟渠对物质的阻隔和过滤功能来减轻和防治农业面源污染,如湿地水库排水消减再利用系统[30],灌溉、排水、湿地净化、排水再利用复合系统[31].我国研究人员在广西青狮潭灌区和湖北漳河灌区也开展了灌溉-排水-湿地综合管理系统研究[32-33].由于灌区排水具有强烈的季节性和随机性,塘堰不同的植物配置和水流状态控制对灌区排水处理效果的差别较大,因此,尚需深入研究符合灌区水肥流失特点的沟渠塘堰系统优化布局及其生态系统设计方法、基于沟渠塘堰系统水量水质水生物协同机理的灌区水文生态环境过程宏观作用机制和调控等.

3.4　农田排水再利用的减污效应

农田排水的灌溉再利用不仅可节约农业用水,还能促进排水中氮、磷等营养元素的高效再利用.为此,农田排水再利用的水质标准、利用模式、环境效应及风险评价等一直是研究的重点内容.Hama等[34]在排水干沟处设置控制闸门储蓄排水用于灌溉,其中2006年和2007年排水灌溉再利用的水量分别占总灌水量的88%和82%,并将排入地表水体的118 kg/hm^{2}和199 kg/hm^{2}悬浮性固体返回到水田.Feng等[35]研究了循环灌溉系统下水稻田的营养元素输移转化规律,循环利用部分水稻田的排水可增加水力停留时间,有利于稻田吸附营养元素,且减少稻田出流中的氮、磷负荷.Ale等[36]采用数学模型模拟评价了排水循环再利用对降低田间污染负荷的效果.近年来,研究发现排水再利用是造成灌区水文过程尺度效应的主要因素,现有排水再利用的方法或评估模型多基于某一介质或过程的描述,尚需深入研究灌区不同尺度水量水质转换关系及其排水再利用的环境效应.

4　研究展望

随着我国城乡社会经济的快速发展,人类活动干扰的加剧,现有农田除涝工程体系已不能适应新的形势.一是土地利用状况的变化影响致灾暴雨的产汇流形成过程;二是流域水土流失以及不当的河道整治和围垦等,改变了农田涝灾形成的边界条件;三是短历时强降雨条件发生的频率增加,导致超标准致灾暴雨的强度和发生频率也在增加,如何为农业高产稳产和农村可持续发展提供有效可靠的农田涝灾安全保障体系,是亟待研究和解决的重点.

4.1　农田涝灾演变规律与评估技术

受农田自然-人工复合型系统自身复杂性及其相互制约机制的影响,尚未开发出普遍适用的,可描述受田块、沟渠、田埂、坑塘等综合影响的农田涝灾预测预报模型.为此,需要深入研究变化环境下的农田涝灾演变规律,探讨灌溉渠系、排水沟网对灌区水文特性的影响和调节机制.此外,以GIS为平台,结合遥感技术、水文和水力模型以及基础数据库,开发综合性的农田涝灾风险预测评估和决策支持系统也是研究的重点.

4.2　农田涝灾多目标综合控制标准

排水标准与水环境质量之间密切关联.一方面排水对水环境会产生有利影响,如提供作物正常生长的良好水、热、气环境条件;另一方面,排水也会对水环境产生不利影响,如影响水体的质量和地下水饮用安全、危害渔业健康等.目前确定农田除涝排水标准的主要依据是保障作物生长和经济效益,在满足作物产量需求和环境保护基本前提下,研究制定切合实际的农田涝灾综合控制标准,对指导当地水利工程建设至关重要.

4.3　农田除涝减灾与水肥资源高效利用

随着农田排涝理念和内涵的不断发展,只考虑农田除涝经济效益的传统农田排水系统工程布局设计正在向考虑农田除涝和减轻农业面源污染的双重效应转型.重视农田排水资源的高效利用,探讨适宜不同类型区的最佳养分管理、耕作管理、作物系统以及农业综合管理措施,研究节水灌溉与控制排水相结合、灌溉排水与沟塘湿地调蓄净化相结合、排水资源循环灌溉再利用和除涝抗旱相结合的农田排水管理模式,既可保证作物生长适宜的土壤水分条件,又能减少土壤养分的流失,进而提高田间水肥资源的利用效率.

4.4　提升传统的农田除涝技术水平

随着我国经济社会的发展,对农田除涝减灾将提出更高的要求,对提高农田除涝减灾工程能力的

途经将有新的认识,研究具有区域特色的农田涝灾治理技术体系,提升传统的治理技术水平与管理模式势在必行.结合中国国情,需探讨现代化农田排涝技术与传统明沟排水等除涝技术的结合、排蓄灌的结合、工程措施与优化调度技术的结合、除涝和抗旱的结合、灌排沟渠塘堰系统的协同调控等适应农田不同类型涝区的除涝组合技术体系,探讨完善的应急抢险技术、手段和组织方案,建立高效的应急对策系统.

参考文献(References)

[1] 谢云霞,王文圣. 城市洪涝易损性评价的分形模糊集对评价模型[J]. 深圳大学学报:理工版, 2012, 29(1):12-17.
Xie Yunxia, Wang Wensheng. Fractal fuzzy set pair analysis assessment model of urban flood-waterlogged vulnerability [J]. Journal of Shenzhen University:Science & Engineering, 2012, 29(1): 12-17. (in Chinese)

[2] Xie X H, Cui Y L. Development and test of SWAT for modeling hydrological processes in irrigation districts with paddy rice [J]. Journal of Hydrology, 2011, 396(1/2):61-71.

[3] Noory H, Van Der Zee S E A T M, Liaghat A M, et al. Distributed agro-hydrological modeling with SWAP to improve water and salt management of the Voshmgir irrigation and drainage network in Northern Iran [J]. Agricultural Water Management, 2011, 98 (6): 1062-1070.

[4] Lecina S, Playán E. Model for the simulation of water flow in irrigation districts. Ⅰ:Description [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2006, 132(4): 310-321.

[5] Hsu W K, Huang P C, Chang C C, et al. An integrated flood risk assessment model for property insurance industry in Taiwan [J]. Natural Hazards, 2011, 58(3): 1295-1309.

[6] 谢彦,张茂文,刘许生,等. 洪涝对早、中稻生产的影响调查与研究结果简报[J]. 中国农学通报, 2011, 27(9):281-286.
Xie Yan, Zhang Maowen, Liu Xusheng, et al. Floods of early rice production and research results presentation impact survey [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(9):281-286. (in Chinese)

[7] Brody S D, Peacock W G, Gunn J. Ecological indicators of flood risk along the Gulf of Mexico[J]. Ecological Indicators,2012,18:493-500.

[8] Veijalainen N, Lotsari E, Alho P, et al. National scale assessment of climate change impacts on flooding in Finland [J]. Journal of Hydrology, 2010, 391(3/4): 333-350.

[9] Lubomir Solin, Jan Feranec, Jozef Novacek. Land cover changes in small catchments in Slovakia during 1990—2006 and their effects on frequency of flood event[J]. Natural Hazards, 2011,56(1):195-214.

[10] 徐建叶. 圩区治理对区域防洪排涝影响的研究[D]. 扬州:扬州大学水利科学与工程学院, 2009.

[11] Aronica G T, Franza F, Bates P D, et al. Probabilistic evaluation of flood hazard in urban areas using Monte Carlo simulation [J]. Hydrological Processes, 2012, 26(26):3962-3972.

[12] Fouss J L, Fausey N R. Research and development of laser-beam automatic grade-control system on high-speed subsurface drainage equipment [J]. Transactions of the ASABE, 2007,50(5):1663-1667.

[13] 刘斯凤,刘黎,余新洲,等. 植被型生态混凝土的研究现状及趋势[J]. 三峡大学学报:自然科学版, 2009,31(3):52-55.
Liu Sifeng, Liu Li, Yu Xinzhou, et al. Current situation and trends of research on vegetation-growing eco-concrete[J]. Journal of China Three Gorges University: Natural Sciences, 2009, 31(3): 52-55. (in Chinese)

[14] Stuyt L C P M, Dierickx W, Martínez-Beltrán J. Materials for Subsurface Land Drainage Systems [M]. Rome:Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2005.

[15] 丁昆仑,余玲,董锋,等. 宁夏银北排水项目暗管排水外包滤料试验研究[J]. 灌溉排水,2000, 19(3):8-11.
Ding Kunlun, Yu Ling, Dong Feng, et al. An experimental study on geotextiles used as sub-drain pipe filters in Yinbei drainage project in Ningxia[J]. Irrigation and Drainage, 2000, 19(3):8-11. (in Chinese)

[16] 殷剑敏,孔萍,李迎春,等. 我国南方早稻洪涝灾害指标试验研究[J]. 自然灾害学报, 2009,18(4):1-5.
Yin Jianmin, Kong Ping, Li Yingchun, et al. Experimental research on flood disaster indices of early rice in Southern China [J]. Journal of Natural Disasters,2009, 18(4): 1-5. (in Chinese)

[17] 邵光成,俞双恩,刘娜,等. 以涝渍连续拟制天数为冬小麦排水指标的试验[J]. 农业工程学报,2010, 26(8):56-60.
Shao Guangcheng, Yu Shuang'en, Liu Na, et al. Study on continuous days of water logging and excessive soil water as drainage index of wheat [J]. Transactions of

the CSAE, 2010, 26(8):56－60. (in Chinese)

[18] 陈平,罗静,韦余广. 涝灾风险及排涝设计标准风险分析优选方法[J]. 防灾减灾工程学报,2006, 26(4):458－462.
Chen Ping, Luo Jing, Wei Yuguang. Waterlogging risk and risk analysis-based optimization for design criteria for waterlogging control [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2006, 26(4):458－462. (in Chinese)

[19] 瞿兴业. 农田排灌渗流计算及其应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2011.

[20] Sands G R, Busman L M, Rugger W E, et al. The effects of subsurface drainage depth and intensity on nitrate load in a cold climate [J]. Transactions of the ASABE, 2008, 51(3): 937－946.

[21] Peterson J, Wilson B N, and Kramer G. Two-stage ditch assessment using the concepts model[C]//American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting,2010.

[22] Verma A K, Gupta S K, Singh K K, et al. Design of bilevel drainage systems: An analytical solution using inversion theorem [J]. Journal of Agricultural Engineering, 2007, 44(4): 31－37.

[23] 殷国玺, 宋培青, 张国华, 等. 减少面源污染的农田排水工程设计标准与管理措施[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2011, 39(2): 176－180.
Yin Guoxi, Song Peiqing, Zhang Guohua, et al. Design standards and management measures for farmland drainage systems to mitigate non-point source pollution [J]. Journal of Hohai University:Natural Sciences, 2011, 39(2):176－180. (in Chinese)

[24] Delgado J A, Gross C M, Lal H, et al. A new GIS nitrogen trading tool concept for conservation and reduction of reactive nitrogen losses to the environment [J]. Advances in Agronomy, 2010, 105: 117－171.

[25] Kleinman P J A, Sharpley A N, McDowell R W, et al. Managing agricultural phosphorus for water quality protection: Principles for progress [J]. Plant and Soil, 2011, 349(1/2): 1－14.

[26] Kroger R, Cooper C M, Moore M T. A preliminary study of an alternative controlled drainage strategy in surface drainage ditches: Low-grade weirs [J]. Agricultural Water Management, 2008, 95(6): 678－684.

[27] 高焕芝, 彭世彰, 茆智, 等. 不同灌排模式稻田排水中氮磷流失规律[J]. 节水灌溉,2009(9):1－3.
Gao Huanzhi, Peng Shizhang, Mao Zhi, et al. Nitrogen and phosphorus loss in the drainage water of paddy field under different irrigation and drainage conditions [J]. Water-Saving Irrigation, 2009(9):1－3. (in Chinese)

[28] 王友贞, 王修贵, 汤广民. 大沟控制排水对地下水水位影响研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(6): 74－77.
Wang Youzhen, Wang Xiugui, Tang Guangmin. Effects of controlled drainage of main ditch on groundwater table [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(6): 74－77. (in Chinese)

[29] 孙怀卫, 杨金忠, 王修贵, 等. 大棚控制排水对土壤水氮变化的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(5): 37－45.
Sun Huaiwei, Yang Jinzhong, Wang Xiugui, et al. Effects of controlled drainage on soil water and nitrogen changes in greenhouse [J]. Transactions of the CSAE, 2011,27(5):37－45. (in Chinese)

[30] Madani A, Haverstock A, Gordon B R. Design, construction, and operation of a wetland/reservoir system receiving agricultural drainage water[C]//19th World Congress of Soil Science, 2010.

[31] Smiley P C, Allred B J. Differences in aquatic communities between wetlands created by an agricultural water recycling system [J]. Wetlands Ecology and Management, 2011, 19(6): 1－11.

[32] Dong B, Mao Z, Brown L, et al. Irrigation ponds: Possibility and potentials for the treatment of drainage water from paddy fields in Zhanghe irrigation system [J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2009, 52(11): 3320－3327.

[33] Shao X, Qiu J, Hu X, et al. Preliminary study of the WRSIS concept at the paddy-upland crops rotation area in southern China [C]//9th International Drainage Symposium Held Jointly with CIGR and CSBE/SCGAB Proceedings, 2010.

[34] Hama T, Nakamura K, Kawashima S. Effectiveness of cyclic irrigation in reducing suspended solids load from a paddy-field district [J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(3): 483－489.

[35] Feng Y W, Yoshinaga I, Shiratani E, et al. Nutrient balance in a paddy field with a recycling irrigation system [J]. Water Science and Technology, 2005, 51(3/4): 151－157.

[36] Ale S, Bowling L C, Owens P R, et al. Development and application of a distributed modeling approach to assess the watershed-scale impact of drainage water management [J]. Agricultural Water Management, 2012, 107: 23－33.

(责任编辑　徐云峰)