

## 兼顾农业生产与环境保护的农田控制排水研究进展

罗 纨, 李 山, 贾忠华, 刘文龙, 潘延鑫, 武 迪

(西安理工大学教育部西北水资源与环境生态重点实验室, 西安 710048)

**摘 要:** 农田控制排水(又称地下水位管理)是一种通过调控农田排水量以达到减少污染物输出并保证农业生产的环境友好型水管理措施。该措施的发展经历了不同的阶段,从最早的保墒增产到后来的污染物削减以及节约灌溉用水等功能,对其研究和应用的不断深入,对于变化环境下农田排水的设计和管理都具有重要意义。该文回顾了农田控制排水发展的历史,阐述了该措施的各项功能及其研究方法和应用特点。结果认为,农田控制排水是新形势下农田排水的必要手段,通过对排水出口水位的调控可以达到调节农田水分,减少营养物流失,节约灌溉用水,增加雨水资源利用等多重目的,是存在排水问题地区农业生产可持续发展的最佳水管理措施。目前各地对于控制排水研究的热点问题是寻求一种适合当地农业生产形式的排水水位调控方案,使其具有可操作性、易于推广。

**关键词:** 排水, 水质, 灌溉, 水位管理, 盐分, 节水

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.16.001

中图分类号: S276

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-16-0001-06

罗 纨, 李 山, 贾忠华, 等. 兼顾农业生产与环境保护的农田控制排水研究进展[J]. 农业工程学报, 2013, 29(16): 1-6.

Luo Wan, Li Shan, Jia Zhonghua, et al. Advances in research of controlled drainage for crop production and environmental protection[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(16): 1-6. (in Chinese with English abstract)

### 0 引 言

随着中国经济的迅速发展和人口的不断增长,水资源短缺和水质恶化问题日益突出;如何利用有限的水资源来实现社会经济的可持续发展已成为当前迫切需要解决的问题之一。农业作为用水大户,提高其水资源利用率是各地水管理部门的一项重要任务。在湿润地区,由于降雨分配与农作物需水规律之间存在不一致性,在生长季的部分阶段,需要通过人工建设的排水沟/管系统,输出农田中过多的水分,以满足田间作业及作物生长对土壤水分条件的要求。在干旱、半干旱地区,降水稀少、蒸发量大,灌溉是保证农业生产的前提。但灌溉过程往往导致灌区地下水位抬高、土壤盐分累积,以致危害作物生长。因此在完善农田灌溉系统的同时,尚需健全排水系统,控制地下水埋深并输出淋洗土壤积盐的水分,达到维持灌区水盐平衡、稳定粮食生产的目的。但是,人为建设的农田排水沟/管加快了农田水分的运动,排水携带着从土壤中淋洗出来

的化肥、农药以及盐分等化学物进入地表水体后成为接纳水体的污染源<sup>[1]</sup>。上世纪 80 年代美国加州 San Joaquin Valley 农田排水造成下游 Kesterson 水库硒污染<sup>[2]</sup>以及密西西比河两岸农田排水氮素流失导致墨西哥湾(Gulf of Mexico)出现低氧区(Hypoxia)<sup>[3]</sup>等事件都是排水污染的典型代表。中国近年来由于农业非点源污染引起的地表水质污染事件也频频发生。这些现象都为农田排水管理敲响了警钟,迫使相关部门和研究人员尽快寻求切实可行的解决方案。

由于过去进行排水系统设计和建设时,主要是以提高农业生产为主要目标,农田排水对环境的负面影响一般不予考虑。为了尽快降低地下水位,排水系统建设往往过于保守,即系统容量过大(具体表现为排水沟较深、断面较大),以致排水能力过剩,出现过量排水问题。这种现象在加大排水输出、增加污染物输出的同时,还造成了农田水分损失过快,灌溉水量增加等不利影响。随着对排水污染环境问题的重视,通过工程措施对排水强度进行调控的农田控制排水技术应运而生,具体做法就是在农田排水出口处修建控制性建筑物,在不改变排水系统现有布置,保留系统功能的前提下,适时适量减小排水输出,达到减少污染物排放量的目的;而在干旱年份或季节,被抬高的地下水位还可以供作物利用一部分,达到抗旱增产的效果<sup>[4-6]</sup>。控制排水又

收稿日期: 2012-12-26 修订日期: 2013-07-26

基金项目: 国家自然科学基金(51079122); 水利部公益性行业科研专项经费项目(201201005)

作者简介: 罗 纨(1967-), 女, 新疆霍城人, 教授, 主要从事农业水资源保护研究。西安 西安理工大学教育部西北水资源与环境生态重点实验室, 710048。Email: wluo@mail.xaut.edu.cn

称为地下水位管理 (water table management), 它所倡导的理念就是按需精量排水, 须排则排, 多一滴都不排<sup>[7]</sup>。如何利用这一措施在保证农业生产的同时, 尽量降低农业非点源污染是目前具有人工排水系统的灌区和排区共同奋斗的目标。在当前农业生产与生态环境保护之间存在矛盾, 气候变化等因素影响农业水资源利用效率的形势下, 开展控制排水技术的研究对发展生产与保护环境具有重要的理论价值与实际意义。

## 1 农田控制排水发展历史及存在的主要问题

早在 20 世纪 20 年代, 美国中西部农业区因为春季涝渍问题突出而夏秋之际又出现干旱, 当地科研人员尝试了抬高排水出口来截留土壤水分损失, 减少旱情对作物产量影响的控制排水措施。该做法可以在相对干旱的作物生长期内增蓄雨水、提高土壤墒情, 使作物更多地利用一些土壤水或地下水, 达到增产的目的<sup>[8]</sup>。但直到 20 世纪 70 年代以后, 随着农业排水对水环境污染问题的认识, 控制排水技术才受到重视<sup>[9]</sup>, 并在美国东部率先得到推广, 成为一项环境友好型农田水管理措施<sup>[4-5, 10]</sup>。目前, 控制排水技术的应用已经遍布美国东部以及中西部平原区, 对当地农业非点源污染控制具有良好的效果。此外, 加拿大、瑞典以及澳大利亚等地的科研人员也开展了不少控制排水试验研究, 肯定了控制排水在减少排水输出以及提高水资源利用效率方面的作用<sup>[6, 11]</sup>。中国知名排水专家张瑜芳与张蔚臻<sup>[12-13]</sup>自 20 世纪 90 年代起就多次撰文, 讨论不同作物或同一作物在不同生长阶段的排水标准问题, 并提出针对不同作物生长以及排水输出量的水位调控方案, 开辟了中国控制排水技术研究的先河。近年来, 国内关于农田控制排水的研究不断深入, 研究区从南到北, 覆盖了不同的气候区以及不同的作物种植形式, 为控制排水技术在中国的推广使用打下了良好的理论基础<sup>[14-18]</sup>。

控制排水的根本思想就是“尽可能少排水”, 从而减少排水造成的地表水污染。美国东部等地的研究表明, 控制排水可减少 40% 的氮输出量<sup>[4-5]</sup>; 中国近年来开展的控制排水研究也表明在该技术在减少农业非点源污染方面效果显著<sup>[14-18]</sup>。尽管早期一些研究指出控制排水增加了田间湿度, 使反硝化作用增强后, 可减少硝态氮的输出。但是至今只有试验室土柱研究数据支持此结论<sup>[19]</sup>, 大田试验结果都表明控制排水减少污染的机理主要是排水总量的减少<sup>[4-7, 18]</sup>。这可能与大田土壤处于厌氧状态的时间较短, 以及温度变化快等因素有关。为了促进反硝化过程, 提高对农田排水中氮素的去除效率,

近年来出现了一些结合控制排水措施来降低排水中硝态氮浓度的‘生物反应器’ (Bioreactor) 技术的研究和应用, 收到了一些良好的效果<sup>[20]</sup>。因为控制排水在湿润地区降低农业非点源污染方面的效果显著, 美国一些州和地区已将控制排水列为农业生产的最佳水管理措施<sup>[10]</sup>; Agri Drain 公司还开发出专门用于农田控制排水的智能控制设备, 便于用户操作管理<sup>[21]</sup>。但湿润区降雨过程中的不确定性以及近年来极端气候现象的增多不断对控制排水技术提出新的挑战。如何根据降雨和作物生长规律进行水位的实时调控仍是控制排水技术在湿润区应用中存在的一个主要问题。

干旱、半干旱灌区农田排水的主要目的是淋洗土壤中的积盐。实施控制排水面临的挑战是如何维持田间水盐平衡; 其实施范围和效果受到作物、土壤及排水水质等因素的影响<sup>[22]</sup>。尽管如此, 现有研究已表明, 在有人工排水系统的灌区, 通过控制排水措施, 抬高灌区地下水位后, 作物可以就地利用浅层地下水, 减少对灌溉量的需求, 达到节约灌溉用水、保证粮食产量以及减少排水输出的多重目的<sup>[23]</sup>。但目前对于干旱区控制排水条件下, 土壤水盐动态变化的规律尚不明确, 如何根据作物生长特点来进行水位调控, 进而实现良性的水盐平衡还有待进一步研究。

## 2 控制排水对区域水环境的影响

在过去很长一段时期内, 农田排水都是单纯以除涝排渍、防治土壤盐碱化和提高农业生产为主要目标。随着人口膨胀、资源短缺以及生态环境恶化问题的突出, 农田排水逐渐演化成为一个多目标函数, 成为农业水资源管理中的一个重要组成部分; 它所涉及的水污染与生态环境问题是水资源规划与管理中首先需要考虑的内容。国际上对农业排水的研究重心已从单纯促进农业生产转移到在避免环境负面影响的前提下保证农业生产上来。例如, 一贯以排水而著称的国家-荷兰, 于 20 世纪 90 年代末转变了排水的战略思想。与尽快排除积水的传统做法相悖的是, 现行政策要求各地尽可能长时间的保留多余的积水, 借此弥补由于工业和城市化发展而缩小的生态水面面积<sup>[24]</sup>。在澳大利亚, 农业排水管理已从传统的防涝、排盐转化为以减少排水输出量、保护地表水质为主要目标<sup>[25]</sup>。

近年来, 中国学者也开展了一系列农田控制排水减少养分流失的研究工作, 尤其是对稻田排水的研究。如殷国玺等<sup>[16]</sup>在南方稻田应用不同工程与生物措施控制地表排水的试验结果发现, 延缓排水时间增加了稻田雨水入渗量, 田面水深及水力停留时间的增加降低了水中颗粒营养物的含量, 所控制田

块的氮素流失降低了 40% 左右。彭世彰等<sup>[26]</sup>结合控制灌溉技术以及沟渠湿地的生物降解作用, 观测发现灌排调控综合措施对稻田营养物输出具有明显的削减作用。陈会等<sup>[27]</sup>根据两年实测资料, 利用水平衡原理, 采用马斯京根法和连续分段马斯京根法模拟了南方灌区各级排水沟道的排水过程, 进而分析了排水面源污染物的水质水量过程。

农田控制排水是一种自下而上减少农业非点源污染、提高农业水资源利用效率的工程技术措施。对于存在人工排水设施的流域而言, 实施控制排水措施后, 农田土壤蓄水量普遍增加, 区域地下水位抬高, 蒸发蒸腾量相应的有所增加, 排出区外的地表与地下(排水)径流总量相应的减少, 因此可降低进入接纳水体的污染物负荷<sup>[28]</sup>。从雨水资源利用的角度来讲, 控制排水措施降低了流域排水强度, 使得更多的雨水资源得到蓄积和利用, 这在减少流域排水污染输出的同时, 提高了水资源的利用效率。对于滨海地区, 蓄积更多的雨水则意味着降低海水入侵的威胁, 对区域生态环境保护具有不可估量的好处。

### 3 控制排水的节水效果

目前在许多灌溉农业区, 尤其是发展中国家, 都存在灌溉和排水过量的问题。前者主要是由于管理水平低下造成的; 后者则主要是排水系统容量过大所致。干旱区过量排水问题的根源在于灌区水盐平衡在排水系统建设初期与现状的差别。许多灌区, 尤其是上游灌区, 经过若干年的排水改造, 盐分已控制在作物忍耐极限之内, 这时每年只需排除少量必要的盐分淋洗水即可。但现有的排水系统依旧按设计目标运行, 将大量含有农业污染物的排水送至下游河道或一些地表水体。过量排水又过早的疏干了田间水分, 增加了灌水频率, 加剧了化肥等农业化学物的流失, 造成了对有限水资源的浪费和污染<sup>[29]</sup>。

为了克服上述农业水资源利用中的不良现象, 需要对灌溉排水实行统一管理, 达到减少排水、节约水资源和保护水环境的综合目的。控制排水正是这样一种统一管理的措施: 通过对排水出口处的水位调节, 使排水量减少, 田间土壤水分损失速度减缓, 部分地下水可对作物实行渗灌, 减少作物对灌溉水的需求, 排水量也相应减少。如中国淮北地区的农田排水系统因建设时参照了华北地区的设计标准, 排水容量过大。当地农民在灌溉水源不足的形势下, 自发的在排水干沟上进行了封堵和加筑控制性建筑物, 降低排水能力, 减少灌溉用水, 成为中国农田控制排水的雏形<sup>[30]</sup>。在加拿大魁北克省进行的一项控制排水试验研究表明, 控制排水可与地面节水灌溉措施一样减少灌溉用水, 而且水的利用效率更高, 同时具有投资少

和运行费用低等优点<sup>[11]</sup>。

在讨论灌区水盐平衡与盐碱化控制时, 中国排水专家张蔚榛院士曾提出了分区考虑灌区水盐平衡, 因地制宜确定区内灌、排水制度的思想<sup>[31]</sup>。但目前中国许多灌区的水管理都采用统一的标准, 即使是在水旱轮作区, 排水系统也一如既往的运行。这种忽略灌区内地形、排水条件以及作物等差异的农业水管理措施, 导致了有限水资源的浪费和区域水环境的污染。近年来, 中国各地都大力推广了节水灌溉, 以提高水资源的利用效率。但由于灌区现有的排水系统容量过大, 水分疏干过快, 农户不得不频繁灌溉来补充作物需水要求。加之引水便利、水费偏低和无法分户计量等原因, 节约灌溉用水对农民的吸引力非常有限。在这种前提下, 从排水角度来抑制灌溉水用量具有诸多的优越性, 如节约灌水时间和劳力, 以及减少排水污染等。笔者在宁夏银南灌区进行的控制排水减少地表水污染的试验研究中发现, 控制排水措施有效的减少了地下排水量, 提高了田间湿润程度, 因此减少了灌溉次数。而试验区的一些农民也认识到此问题, 自发的封堵了排水农沟的出口, 称之为节约灌水时间和劳力<sup>[14,29]</sup>。在埃及以及印度开展的几项控制排水研究也报道了类似的结果, 即农民愿意为节省灌水时间和劳力而实施控制排水<sup>[32]</sup>。目前, 干旱灌区实施控制排水需要进一步研究的问题是灌溉制度调整后是否会对田间水盐平衡产生不利影响? 长期下去土壤是否会产生积盐现象。

### 4 控制排水研究方法及水位调控方案

在农田排水与水污染的研究方面, 目前应用较多的是现场观测试验与计算机模型模拟相结合的手段。由于水土系统在时间和空间上的随机性, 现场试验难以进行多因素控制, 往往需要在多年观测的基础上才能获得一般性结论<sup>[33]</sup>, 而且研究过程还常常受到资金和人员变化等条件的限制。因此, 利用当代先进的计算机模拟技术可在较短时间内迅速获得排水系统在不同气候、土壤和作物种植等条件下的运行效果<sup>[34]</sup>。但模型必须经过验证后才能用来预测系统在不同条件下的可能表现。现场试验是模型应用的前提, 只有利用实测资料对模型进行验证后加以合理应用, 才能获得可信的研究成果。不过, 在开展控制排水试验之前或过程中, 也可利用模拟模型对控制方案可能获得的实施效果进行分析, 指导试验方案的制定与调整。

现有文献中存在大量利用模型对排水水文过程以及污染物输出的模拟研究。这些研究从田间尺度到流域尺度不等, 模拟分析了不同控制方案或水

管理措施对排水量及污染物削减的效果<sup>[28,34]</sup>。其中,基于田间水文过程的 DRAINMOD 模型<sup>[35]</sup>应用最为广泛。该模型具有专门模拟排水出口水位调控对田间排水过程影响的控制排水模块,用户可根据排水系统布置以及作物生长的实际情况,以作物产量为目标函数,模拟分析水位调控方案对作物生长以及排水输出的影响。在水量平衡预测的基础上,近年来日益完善的 DRAINMOD\_NII 模型<sup>[36]</sup>模块又赋予了 DRAINMOD 模型模拟控制排水条件下田间氮素流失详细过程的功能。

开展控制排水试验的区域,一般要求地下水位埋深不宜过大(一般 $<3\text{ m}$ ),应存在弱水层或相对不透水层,以免抬高水位后垂向渗漏量过大。在暴雨比较集中地带,田面应平整且具有一定的坡度,保证地表排水状况良好。制定水位控制方案应参考当地主要作物的生长规律以及土壤排水特性,控制方案不宜太复杂而影响其操作性。作物生长旺季可将水位控制高度设在根区附近,如地面以下  $60\text{ cm}$ ,使作物最大限度的利用地下水和土壤水。但考虑作物品种及其耐淹能力,在生育期降雨过多时须及时降低排水出口水位,避免涝渍胁迫影响产量。在无排水需求的非生长季,可关闭排水出口,以便最大程度的减少排水输出;在播种和收获期,则应根据机耕或人工作业要求,提前降低水位,疏干土壤。在水位调控过程中降低排水出口高度时,还应注意操作过程不宜速度太快,避免造成瞬间水力梯度太大而将大量泥沙和污染物带入排水沟系统。

在水、旱轮作地区,控制排水可以灵活的满足不同生长阶段的排水需求,水位控制方案可以参考作物的生长习性来制定,考虑水、旱两种作物对水分的不同要求,满足各自的排水标准。稻田控制排水过程中,水位调控须满足生育阶段对稻田渗漏的最低要求,以避免有害物质的积累。此外,施肥后不宜立即排水,避免养分的大量流失<sup>[37]</sup>。

有盐碱化问题的地区,水位控制还需考虑控制防止土壤盐碱化的地下水适宜埋深。这一深度的确定取决于具体的水文气象条件、包括降雨和灌溉,以及土壤和作物生长因素。干旱、半干旱灌区地下水位抬升过程一般与灌溉过程保持一致;在作物生长旺季适当抬高排水出口,可减少排水输出、减少灌溉次数,达到节水、减排的双重效果。滨海盐碱地排水区,在雨季适当控制排水可增加淡水的蓄积量,有利于区域生态环境的改善。

控制排水技术在中国的推广应用相对滞后,一方面是由于对排水污染问题重视不足,另一方面可能是因为缺少易操作的水位调控方法与设备。中国许多灌区或者排区都实行水旱轮作制度,不同时期的排水要

求存在显著差异。在这种情况下,通过控制排水的工程手段对排水系统进行调控来满足不同作物的排水标准具有非常重要的意义。如前所述,根据气候、土壤以及作物生长规律进行的农田控制排水措施在满足作物水分调节要求的同时,可以充分利用雨水资源,节约灌溉用水,减少农田污染物的输出,是一种名符其实的环境友好型农业水管理措施。

## 5 结 论

排水设施建设是保障农业生产的一项基本措施,但其运用过程中难免造成对生态环境的不良影响。现代农业排水应转变以往“迅速排除多余水分”的观念,树立控制排水的思想,使农田排水成为作物生长过程中对土壤水分调控的杠杆,为农业生产的可持续发展服务。国内外研究结果表明,农田控制排水在满足除涝排渍要求的同时,还具有节约灌溉用水、增加雨水利用和减少农业污染物排放的综合效果,值得大力推广。在应用当中,对排水系统的调控须结合区域水文、气象、土壤以及作物生长的具体条件,满足生产与环境保护的双重要求,调控方案应当简便易行,具有实际可操作性。农田控制排水是协调农业生产与环境保护的一项工程技术措施,其推广使用可以实现提高农业生产用水效率、增加粮食产量,减少污染物输出和保护生态等方面的综合效益。

### [参 考 文 献]

- [1] Skaggs R W, Breve M A, Gilliam J W. Hydrologic and water quality impacts of agricultural drainage[J]. *Critical reviews in Environmental Science and technology*, 1994, 24(1): 1—32.
- [2] National Research Council. Irrigation-induced water quality problems: what can be learned from the San Joaquin Valley experience[R]. National Academy Press, Washington D.C., 1989: 157.
- [3] Rabalais N N, Turner R E, Justic D, et al. Nutrient changes in the Mississippi River and system response on the adjacent continental shelf[J]. *Estuaries*, 1996, 19(2B): 385—407.
- [4] Gilliam J W, Skaggs R W, Weed S B. Drainage control to diminish nitrate loss from agricultural fields[J]. *J. Environ. Qual.*, 1979, 8(1): 137—140.
- [5] Evans R O, Skaggs R W, Gilliam J W. Controlled versus conventional drainage effects on water quality[J]. *J. Irrig. And Drain. Engineering*, 1995, 121(4): 271—276.
- [6] Wesström I, Messing I, Linnér H, et al. Controlled drainage-effects on drain outflow and water quality[J]. *Agric. Water Manage.*, 2001, 47(2): 85—100.
- [7] Skaggs R W, Fausey N R, Evans R O. Drainage water management[J]. *J. Soil and Water Conservation*, 2012, 67(6): 167—172.
- [8] Wilson B. History of drainage research at the University of Minnesota[C]// Presented at University of Minnesota and Iowa State Drainage Research Forum, 23 March 2000.
- [9] Willardson L S, Meek B D, Grass L B, et al. Nitrate reduction with submerged drains[J]. *Transactions of the ASAE*, 1972, 15(1): 84—85, 90.

- [10] Evans R O, Skaggs R W. Development of Controlled Drainage as a BMP in North Carolina[C]// Pp. 001-015 in Drainage VIII Proceedings of the Eighth International Symposium, 21-24 March 2004 (Sacramento, California USA). ASAE Publication Number 701P0304, ed. R. Cooke. 2004.
- [11] Madramootoo C A, Dodds G T, Papadopoulos A. Agronomic and environmental benefits of water-table management[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1993, 119(6): 1052—1065.
- [12] 张瑜芳, 张蔚臻. 有关农田排水标准研究的几个问题[J]. 灌溉排水, 1994, 13(1): 1—6.  
Zhang Yufang, Zhang Weizhen. 1994. Some problems concerning the research needs on criteria for land drainage[J]. Chinese Journal of Irrigation and Drainage, 1994, 13(1): 1—6. (in Chinese with English abstract)
- [13] 张瑜芳, 张蔚臻. 2001. 考虑作物产量和化肥流失时排水设计标准的确定方法[J]. 水利学报, 2001(2): 44—49.  
Zhang Yufang, Zhang Weizhen. Determination of drainage criteria considering the increase of crop yield and environment protection[J]. Chinese Journal of Hydraulic Engineering, 2001(2): 44—49. (in Chinese with English abstract)
- [14] 罗纨, 贾忠华, 方树星, 等. 宁夏银南灌区稻田控制排水对排水量及盐分影响的试验研究[J]. 水利学报, 2006, 37(5): 608—612.  
Luo Wan, Jia Zhonghua, Fang Shuxing, et al. Effect of drainage control on salt and water balance in rice field[J]. Chinese Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(5): 608—612. (In Chinese with English abstract)
- [15] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(6): 74—77. (in Chinese with English abstract)
- [16] 殷国玺, 张展羽, 郭相平, 等. 减少氮流失的田间地表控制排水措施研究[J]. 水利学报, 2006, 37(8): 926—931.  
Yin Guoxi, Zhang Zhanyu, Guo Xiangping, et al. Effect of controlling devices on nitrogen losses in surface runoff of farmland[J]. Chinese Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(8): 926—931. (In Chinese with English abstract)
- [17] 郭相平, 张展羽, 殷国玺. 稻田控制排水对减少氮磷损失的影响[J]. 上海交通大学学报: 农业科学版, 2006, 24(3): 307—310.  
Guo Xiangping, Zhang Zhanyu, Yin Guoxi. Effect of controlled drainage on loss of nitrogen and phosphorus from paddy fields[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University: Agricultural science, 2006, 24(3): 307—310. (In Chinese with English abstract)
- [18] 袁念念, 黄介生, 谢华, 等. 暗管控制排水棉田氮素流失规律试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(9): 8—13.  
Yuan Niannian, Huang Jiesheng, Xie Hua, et al. Experimental study of nitrogen leaching pattern in controlled pipe-drainage cotton field[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(9): 8—13. (In Chinese with English abstract)
- [19] Meek B D, Grass L B, Willardson L S, et al. Nitrate transformation in a column with a controlled water table[J]. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 1970, 34(2): 235—239.
- [20] Christianson L, Bhandari A, Helmers M, et al. Performance evaluation of four field-scale agricultural drainage denitrification bioreactors in Iowa[J]. Trans. ASABE, 2012, 55(6): 2163—2174.
- [21] Schafer C J, Beebout LE, W Littler IV. Drainage tile flow regulator[P]. - US Patent 6,715,508, 2004.
- [22] Ayars J E, Christen E W, Hornbuckle J W. Controlled drainage for improved water management in arid regions irrigated agriculture [J]. Agricultural Water Management, 2006, 86(1/2): 128—139.
- [23] Ayars J E, Christen E W, Soppe R W, et al. The resource potential of in-situ shallow ground water use in irrigated agriculture: A review[J]. Irrigation Science, 2006, 24(3): 147—160.
- [24] Smedema L K, Vlotman W F, Rycroft D W. Modern Land Drainage[M]. A. A. Balkema Publishers, Taylor and Francis, The Netherlands, Leiden, 2004.
- [25] Hornbuckle J W, Christen E W, Ayars J E, et al. Controlled water table management as a strategy for reducing salt loads from subsurface drainage under perennial agriculture in semi-arid Australia[J]. Irrigation and Drainage Systems, 2005, 19: 145—159. 17
- [26] 彭世彰, 张正良, 罗玉峰, 等. 灌排调控的稻田中氮素浓度变化规律[J]. 农业工程学报, 2009, 25(9): 21—26.  
Peng Shizhang, Zhang Zhengliang, Luo Yufeng, Jiao Xiyun and Sun Yong. Variation of nitrogen concentration in drainage water from Paddy fields under controlled irrigation and drainage[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(9): 21—26. (in Chinese with English abstract)
- [27] 陈会, 王康, 周祖昊. 基于排水过程分析的水稻灌区农田面源污染模拟[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 112—119.  
Chen Hui, Wang Kang, Zhou Zuhao. Simulation of agricultural non-point source pollution from paddy rice irrigation district based on analyses of drainage processes[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(6): 112—119. (In Chinese with English abstract)
- [28] 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.
- [29] 罗纨, 方树星, 贾忠华, 等. 根据排水规律计算稻田节水的潜力[J]. 农业工程学报, 2007, 23(10): 41—44.  
Luo Wan, Fang Shuxing, Jia Zhonghua, et al. Estimating water saving potential based on drainage analysis[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007, 23(10): 41—44. (in Chinese with English abstract)
- [30] 王少丽, 王修贵, 丁昆仑, 等. 中国的农田排水技术进展与研究展望[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(1): 108—111.  
Wang Shaoli, Wang Xiugui, Ding Kunlun, et al. Advancement and prospect of farmland drainage in China[J]. Chinese Journal of Irrigation and Drainage, 2008, 27(1): 108—111. (In Chinese with English abstract)
- [31] 张蔚臻, 张瑜芳. 对灌区水盐平衡和控制土壤盐渍化的一些认识[J]. 中国农村水利水电, 2003(8): 13—18.  
Zhang Weizhen, Zhang Yufang. Knowledge of Water-and-Salt balance and control of soil saline-and-water-logging in irrigation district[J]. China Rural Water and Hydropower, 2003(8): 13—18. (In Chinese with English abstract)

- [32] Ritzema H. Drain for gain—making water management worth its salt[M]. PhD Thesis, Wageningen University and UNESO-IHE, CRC Press/Balkema. 2009.
- [33] Randall G W, Mulla D J. Nitrate nitrogen in surface waters as influenced by climatic conditions and agricultural practices[J]. *J. Environ. Qual.*, 2001, 30: 337—344.
- [34] Luo W, Sands G R., Youssef M, et al. Modeling the impact of alternative drainage practices in the northern Corn-belt with DRAINMOD-NII[J]. *Agric. Water Manage.*, 2010, 97(3): 389—398.
- [35] Skaggs R W. A water management model for shallow water table soils[R]. Tech. Rep. 134. Univ. of North Carolina Water Resources Res. Inst., Raleigh, NC. 1978.
- [36] Youssef M A, Skaggs R W, Chescheir G M, et al. The nitrogen simulation model, DRAINMOD\_NII[J]. *Trans. ASABE*, 2005, 48: 611—626.
- [37] 张瑜芳, 张蔚榛, 沈荣开, 等. 淹灌稻田的暗管排水中氮素流失的试验研究[J]. *灌溉排水*, 1999, 18(3): 12—16.
- Zhang Yufang, Zhang Weizhen, Shen Rongkai, et al. Experimental study on leaching losses of nitrogen in effluent from drained paddy rice fields[J]. *Chinese Journal of Irrigation and Drainage*, 1999, 18(3): 12—16. (In Chinese with English abstract)
- [38] 张蔚榛, 张瑜芳, 沈荣开. 排水条件下化肥流失的研究: 现状与展望[J]. *水科学进展*, 1997, 2(8): 197—204.
- Zhang Weizhen, Zhang Yufang, and Shen Rongkai. Study of losses of fertilizer in drained agricultural lands: present status and prospect[J]. *Advances in Water Science*, 1997, 2(8): 197—204. (In Chinese with English abstract)

## Advances in research of controlled drainage for crop production and environmental protection

Luo Wan, Li Shan, Jia Zhonghua, Liu Wenlong, Pan Yanxin, Wu Di

(Northwest Key Laboratory of Water Resources and Environment Ecology,  
Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** Controlled drainage, also known as water table management, is an environmental friendly agricultural water management practice. It has been widely advocated in recent years to reduce drainage discharge in order to reduce agricultural non-point source pollution while ensuring crop production. Further research and application of the controlled drainage are of great importance to drainage system design and water management in a changing environment. In this paper, we reviewed the development history, multiple functions and research advances of the controlled drainage in China and the world. The development of controlled drainage technique has experienced several stages, advancing from its original purpose of water conservation to later goals of nutrient loss reduction, and irrigation water saving etc. Implementation of controlled drainage can be performed easily with water level control structures installed at the outlet of drainage ditch or pipe. However, properly schedule water level adjustment at the outlet remains a challenge, considering the variable weather conditions and different crop drainage requirements. In saline agricultural environment, controlled drainage has to meet the requirement of salinity control. Existing research has demonstrated that controlled drainage can achieve multiple benefits in reducing nutrient losses and conserving water in humid regions, and controlling soil salinity and saving irrigation water in arid and semi-arid regions. Controlled drainage in coastal regions has additional benefits of reducing rain water losses and lowering the risk of salt water intrusion. While controlled drainage research in China is relatively lagged behind, this water table management technique has long been used by grass root farmers to reduce drainage intensity for less irrigation requirement. For many areas in China, where rice and dry foot crop are rotationally cultured, controlled drainage has the advantages of adjusting drainage intensity flexibly to meet moisture level requirement of different crops. The present need in controlled drainage is to make appropriate water level control schedules that are easy to implement and consistent with local crop production requirement. Computer modeling has been widely used to examine long term effect of controlled drainage on hydrology and nitrogen losses. DRAINMOD model is the mostly used simulation tool that predicts outcome of different drainage system layout under variable weather, soil and cropping conditions; the nitrogen module-DRAINMOD\_NII enables the model to predict nitrogen losses from drained agricultural fields under different water management, tillage and fertilization practices. Lacking of field observations is the major obstacle in applying modeling approach for controlled drainage research in China. In summary, we conclude that controlled drainage is a necessary practice for modern agricultural drainage; providing benefits in regulating soil moisture in the drained fields, reducing nutrient losses, saving irrigation water use and increasing rainwater use, controlled drainage is the best practice for drainage water management for sustainable agricultural development.

**Key words:** drainage, water quality, irrigation, water table management, salinity, water saving

(责任编辑: 曾懿婷)