

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2011.02.011

减少面源污染的农田排水工程设计标准与管理措施

殷国玺^{1 2} 宋培青² 张国华³ 张展羽^{1 2}

(1. 河海大学南方地区高效灌排与农业水土环境教育部重点实验室 江苏 南京 210098 ;
2. 河海大学水利水电学院 江苏 南京 210098 ; 3. 中国灌溉排水发展中心 北京 100054)

摘要 : 以控制排水量和减少污染物的流失量 , 并提高水、肥利用率为目标 , 探讨了具有环境和资源效应的排水工程设计标准和管理措施 . 采用灌溉与排水系统结合、减少暗管的埋深等新技术 , 可以有效防止过度排水 , 并降低排水中硝态氮和盐分的浓度 . 实施地下水位管理 , 不仅能够减少排水量 , 而且可以提高灌溉水的利用率 , 同时降低污染物的流失量 . 这些方法和措施适合在湿润地区推广 , 在干旱和半干旱地区要防止控制排水产生盐碱化 , 当土壤中的磷富集时 , 地下水位上升可能导致排水中磷的浓度升高 . 应用结果表明 , 这些技术和方法改善了水环境并提高了水资源的利用率 .

关键词 : 控制排水 ; 面源污染 ; 排水设计 ; 排水管理 ; 地下水位管理

中图分类号 : X592 文献标志码 : A 文章编号 : 1000-1980(2011)02-0176-05

农田排水可以排除过多的地表水、加大渗漏强度、降低过高的地下水位 , 在一定程度上满足了除涝防渍或改良盐碱地的需要 . 但由于大量施肥导致土壤养分富集 , 过度排水增大了农田氮、磷和盐分等污染物的流失量 , 加重了对水环境的面源污染 , 也降低了水资源的利用率 .

在减少面源污染方面 , 欧美等发达国家在农田排水系统的设计标准与管理措施方面已经取得了很多研究成果 . 有关研究者针对农田排水输出面源污染的途径 , 通过改进排水系统的设计与管理 , 使农田排水系统在发挥正效应的同时尽可能减少负效应 . 实践表明 , 这些研究成果推广应用于排水工程设计和排水管理 , 显著减少了农田排水对环境和生态的影响 . 20 世纪 90 年代我国也开始了控制排水的研究 , 但可供大面积推广的研究成果相对较少 . 本文根据农田排水工程设计理念和管理措施产生的外部效应(图 1) , 针对我国排水工程设计与排水管理现状 , 变革排水工程的设计理念 , 探索减少面源污染输出的排水工程设计标准与管理措施 , 为促进我国农业的健康发展和生态环境的改善提供理论依据 .

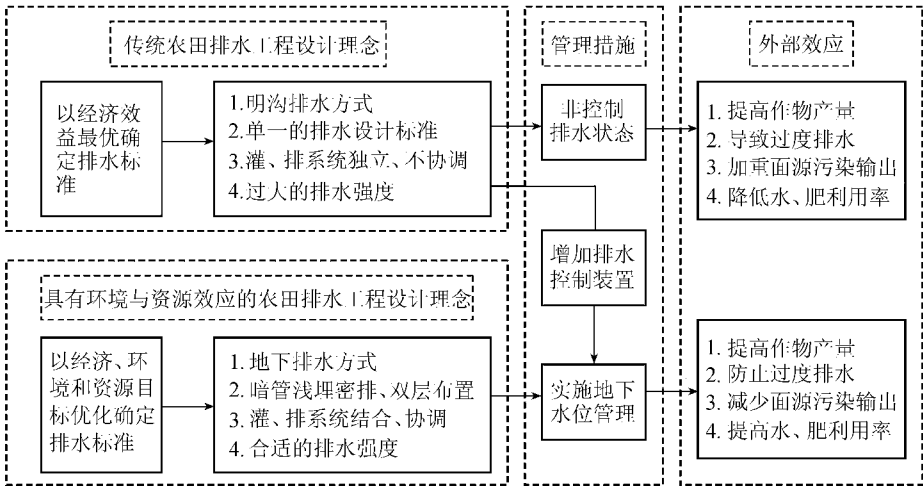


图 1 排水工程设计理念和管理措施的外部效应

Fig. 1 Externalities of design ideas and management measure for drainage systems

1 农田排水输出面源污染

1.1 明沟排水方式不利于面源污染的控制

强降雨期间明沟排水方式中的氮、磷主要是以推移质和悬移质形态流失,是农田地表径流中氮、磷流失的主要形态之一,在丘陵地区尤为明显^[1]。地表水中的氮、磷通过土壤的过滤、吸附和硝化,渗入农田地下排水系统的主要是可溶性的氮、磷,因此,地下排水方式有利于降低颗粒态氮、磷的流失量。长期的实际观测表明,地下排水方式比明沟排水方式更有利于降低面源污染的输出,尽管 2 种排水方式的总氮流失量没有明显差别,但由于磷主要吸附或结合在土壤颗粒中,地下排水比明沟排水总磷的流失量减少了 90%,土壤颗粒的流失量减少了 86%^[2]。

1.2 排水系统参数设计的目标单一

传统排水系统的设计理念是提高作物产量和优化工程效益,但忽视了保护水环境和提高水、肥利用率。对于某一确定的排水系统设计标准,虽然增加排水暗管的埋深和加宽暗管的间距可以减少暗管的使用数量,降低地下排水系统的建设成本,但由于土壤水和地下水中的硝态氮容易迁移,在大量使用化肥的农田,硝态氮的流失量随着暗管间距的加宽和埋深的增加而增加^[3]。在含盐量比较高的地区建设地下排水系统,暗管深埋、间距加宽增加了排水中盐分的浓度,并形成了过度排水,降低了灌溉水的利用率^[4]。此外,提高排水系统的设计标准,农田排水量将增大,氮、磷和盐分的流失量也相应增加,排水系统的设计排水强度与面源污染的输出量成正比。

1.3 缺乏排水管理

农田排水系统的排水强度依据排涝、除渍的设计标准确定,在干旱地区或田间蒸发量大于降雨量的灌溉季节,当排水系统缺乏管理时,将形成过度排水,造成地下水水位过低,土壤毛管水无法上升到作物根系层,不利于作物根系吸收水分和养分,降低了灌溉水和雨水的利用率^[5]。过度排水导致了农田水分和养分的大量流失,氮、磷等养分对下游水体造成了污染。对于干旱和半干旱地区的地下排水系统,大部分非控制排水系统处于过度排水状态,从农田中排出了远大于灌溉输入的盐分。

2 减少面源污染输出的排水系统设计

通过改进排水系统的设计,控制排水量,减少氮、磷和盐分的流失量,提高水、肥利用率。

2.1 排水暗管浅埋密排

浅埋密排的暗管布置方式使土壤中形成降低氮浓度的“还原区”,农田排水在排出前通过这个“还原区”进行反硝化,降低了排水中硝态氮的浓度。实践证明,排水暗管浅埋密排的设计方式有以下特点:(a)避免过度排水,排水暗管埋深 0.75 m、间距 12.5 m 比埋深 1.5 m、间距 25 m 减少了 42% 的排水量^[6]。(b)显著减少面源污染的流失量,地下排水暗管埋深 1 m 比埋深 1.25 m 减少 43% 的硝态氮流失量^[7]。(c)在盐分含量比较高的地区能够有效减少盐分的流失量,地下排水暗管埋深 0.7 m 比 1.8 m 排水中盐分含量降低了 81%,排水量减少了 79%^[8]。

2.2 排水暗管双层布置

将排水暗管分高、低 2 层间隔布置,当地下水头降到上层排水暗管时,排水效果如同单层布置方式,而排水暗管间距增加了 1 倍,从而控制了排水强度^[9]。双层布置的排水系统无需进行复杂的地下水位管理,上层排水暗管还可以作为地下灌溉系统。对已经运行的单层非控制排水系统,采取间隔堵塞或对畅通的暗管安装控制装置等措施能够减少排水量并节约灌溉用水量^[10]。将排水暗管双层布置思路应用于明沟排水系统设计,把排水沟设计为 2 个台阶,较高台阶中的植物能吸收较低台阶的氮、磷,既控制了排水强度,又减少了氮、磷流失量^[11]。

2.3 灌、排系统结合

使用地下排水系统进行灌溉,其原理是利用上升到作物根系层的土壤毛管水灌溉。由于地下灌、排系统结合的设计方式既减少了氮、磷的流失量,又提高了作物产量,在美国湿润地区和荷兰得到了普遍应用^[12]。在加拿大安达略省进行了地下灌、排系统结合与分开的对比观测,2 个田块的暗管埋深均为 0.6 m,间距均为 6.1 m。尽管地下灌、排系统结合比独立排水系统的排水量增加了 8%,但田间的水分利用率却提高了 11%,排

水中的硝态氮平均浓度降低了 41% ,硝态氮的年流失量减少了 36.8% ,玉米产量增加了 64%^[13] .应设计涝渍兼治的明暗组合排水方式 ,将明沟和暗管的特点有机结合起来 ,以实现涝水明排、浅排和渍水暗排、深排的优化组合排水方式 .

2.4 确定合适的排水强度

在计算地下排水暗管埋深和间距时 ,应依据排水强度并兼顾减少面源污染的输出量 .使用 Hooghoudt 公式计算地下暗管的埋深和间距虽然计算简单 ,但忽略了排水过程和各种因素的相互作用 ,无法反映氮、磷和盐分的运移和流失过程 .使用模拟模型不仅能够反映氮、磷和盐分的运移和流失过程 ,还可以优化产量目标 ,但需要输入大量的参数 .按照排水系统设计与排水管理相结合的原则 ,在确定地下暗管埋深和间距时 ,只需满足作物高产所必要的排水强度 ,这样既保持了较高的地下水位并减少了排水量 ,在满足作物高产的同时又最大限度地减少了氮、磷流失量 .

3 减少面源污染输出的排水系统管理

3.1 增加反硝化作用

在不影响作物根系层通气的前提下 ,通过维持相对较高的地下水位 ,形成嫌气土壤环境 ,有利于增加反硝化作用 ,降低排水中硝态氮的浓度 .由于反硝化过程受土壤性质、温度和气候影响较大 ,在某些地区和季节增强反硝化作用效果并不显著^[14] .从整个控制排水过程观察 ,表层(0~15 cm)土壤的反硝化作用明显 .在加拿大魁北克省进行的 2 年控制排水试验^[15]表明 ,控制排水的农田硝态氮浓度比非控制排水分别低 42% 和 16% .反硝化过程产生 N_2 和 N_2O ,大量的 N_2O 将破坏大气环境 .室内反硝化试验表明 , N_2 是反硝化的主要产物 , N_2O 只占反硝化产物的 2% 左右^[16] .

3.2 减少排水量

在不形成涝、渍的前提下 ,通过地下水位管理减少排水量 ,能够显著降低氮、磷的流失量 ,提高水、肥利用率 .对瑞典农田作物在各生长阶段实施地下水位管理^[17] ,与非控制排水相比 ,控制排水的排水量第 1 年减少了 79% ,第 2 年减少了 94% ,硝态氮流失量第 1 年减少了 78% ,第 2 年减少了 94% ,磷流失量第 1 年减少了 58% ,第 2 年减少了 85% .由于每年平均排水量减少了 ,总氮和总磷的流失量也相应减少 .在干旱或半干旱地区 ,通过地下水位管理减少排水量 ,能够显著减少农田盐分的输出 .

3.3 兼顾提高产量和减少面源污染

作物主要从根系层土壤中吸收水分和养分 ,减少根系层土壤中的水分和养分流失 ,有利于提高水、肥利用率 ,并减少面源污染的流失 .通过观测不同地下水位的大豆产量和排水中硝态氮的浓度 ,发现地下水埋深保持在 0.6~0.8 m ,大豆产量增加 ,地下排水中硝态氮的浓度降低^[18] .当地下水位无法同时满足产量和环境目标时 ,要兼顾提高产量并减少面源污染输出量 .在地下水位分别为 0.3 m、0.6 m 和 0.9 m 的农田中 ,0.3 m 的氮流失量最小 ,0.9 m 的玉米产量最高 .建议地下水位控制在 0.6 m ,兼顾提高玉米产量和减少氮的流失量^[19] .

3.4 防止磷浓度升高

在长期过量施用化肥的情况下 ,土壤中的磷趋于饱和 .由于控制排水和灌、排系统结合维持的地下水位较高 ,形成了缺氧的土壤环境 ,部分沉淀态、吸附态无机磷酸盐氧化还原溶解 ,有机磷酸盐矿化溶解 ,释放到土壤水和地下水中 ,增加了排水中磷的浓度 .在磷富集的农田 ,一个田块进行地下灌溉与控制排水结合的农田水分管理 ,尽管该田块的排水量减少了 27% ,但排水中磷的浓度比另一非控制排水田块的磷浓度增加了 131% .随着可溶性磷的增大 ,土壤磷饱和度增加 ,排水中的磷 96% 为可溶性磷^[20] .

3.5 防止盐碱化

在干旱和半干旱地区 ,控制排水使地下水位升高 ,水分蒸发导致表层土壤积盐 ,水位升高后是否产生盐碱化 ,影响到该地区的控制排水是否可行^[21] .在蒸发量远大于降雨量的宁夏惠农灌区 ,既要充分利用水资源又要防止盐碱化 ,将现状灌水量减少 25% 的同时将地下水埋深控制在 70 cm 以下 ,作物根区既不产生明显的积盐 ,又减少 31.4% 的排水量^[22] ,从而达到节水、增产和改善农田水土环境的目标 .为了节约灌溉用水量 ,减少排水量 ,降低农田面源污染的流失量 ,在宁夏银南灌区实施了水盐平衡的控制排水措施 .结果表明 ,银南灌区处于脱盐状态且土壤盐分尚未达到作物的耐盐临界值^[23] .因此 ,通过制定合理的农田排水管理方案 ,控制

排水在干旱和半干旱地区也是可行的。

4 结 论

在充分考虑排水可能对环境带来负面影响的基础上,农田排水的主要目标是:排涝除渍,提高作物的产量和优化工程效益;控制排水量并减少污染物的流失量;提高水、肥利用率。本文根据农田排水的主要目标制定具有环境和资源效应的排水工程设计标准和管理措施,改变和完善传统农田排水工程的设计理念、设计标准、排水技术和管理措施。

a. 在对排水系统进行设计和管理时,除了考虑提高作物产量和优化工程效益外,还要考虑排水系统造成的面源污染,并评价排水对农田水、肥利用率的影响

b. 减少排水量能够减少面源污染,但可能影响排涝除渍,如何同时优化各排水目标,需要研究多目标控制排水模式。通过田间试验和数学模拟,建立各个排水目标的目标函数,在此基础上研究多目标控制排水的控制模型和优化方法,实现减少面源污染的农田控制排水。

c. 在设计排水系统的排水强度时,目前的计算方法没有考虑排水强度对氮、磷和盐分流失量的影响。通过田间试验和理论分析,建立能够反映氮、磷和盐分流失量的排水强度计算方法或经验公式,将有利于确定具有环境和资源效应的排水强度。

d. 对于明沟排水系统,需要研究新型排水沟出口控制设施和装置,使其能够控制排水沟水位,进而实施农田地下水位管理,同时有利于排水沟中的悬移质和推移质沉淀。

参考文献:

- [1] 殷国玺,张展羽,郭相平,等.地表控制排水对氮质量浓度和排放量影响的试验研究[J].河海大学学报:自然科学版,2006,34(1):21-24.(YIN Guo-xi,ZHANG Zhan-yu,GUO Xiang-ping,et al. Experimental study on effect of controlled drainage from ground surface on concentration and discharge of nitrogen[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2006, 34(1): 21-24. (in Chinese))
- [2] SPIRO G,JACQU F,SULCE S. Effect of subsurface drainage on nutrient pollution of surface waters in south eastern Albania[J]. The Science of the Total Environment,1996,191:15-21.
- [3] SANDS G R,SONG I,BUSMAN L M,et al. The effects of subsurface drainage depth and intensity on nitrate loads in the northern corn belt[J]. Transactions of the ASABE,2008,51(3):937-946.
- [4] CHRISTEN E W,SKEHAN D. Design and management of subsurface horizontal drainage to reduce salt load[J]. ASCE Irrig Drain Eng,2001,127:148-155.
- [5] AYARS J E,CHRISTEN E W,SOPPE R W,et al. Resource potential of shallow ground for crop water use: a review[J]. Irrig Sci,2006,24:147-160.
- [6] BURCHELL M R,SKAGGS R W,CHESCHEIR G M,et al. Shallow subsurface drains to reduce nitrate losses from drained agricultural land[J]. Transactions of the ASABE,2005,48(3):1079-1089.
- [7] BREVE M A,SKAGGS R W,PARSONS J E,et al. Using the drainmod :N model to study effects of drainage system design and management on crop productivity,profitability and NO₃ losses in drainage water[J]. Agricultural Water Management,1998,35:227-243.
- [8] CHRISTEN E W,SKEHAN D. Design and management of subsurface horizontal drainage to reduce salt load[J]. ASCE Irrig Drain Eng,2001,127:148-155.
- [9] VERMA A K,GUPTA S K,SINGH K K,et al. An analytical solution for design of bi-level drainage systems[J]. Agricultural Water Management,1998,37:75-92.
- [10] WAHBA M A S,CHRISTEN E W,AMER M H. Irrigation water saving by management of existing subsurface drainage in Egypt[J]. Irrig Drain,2005,54:1-11.
- [11] WARD A D,MECKLENBURG D,POWELL G E,et al. Designing two-stage agricultural drainage ditches[M]. Joseph:American Society of Agricultural and Biological Engineers,2004.
- [12] RAATS P A C,FEDDES R A. Contributions by Jans Wesseling,Jan van Schilfgaarde, and Herman Bouwer to effective and responsible water management in agriculture[J]. Agric Water Manage,2006,86:9-29.
- [13] NG H Y F,TAN C S,DRURY C F,et al. Controlled drainage and subirrigation influences tile nitrate loss and corn yields in a sandy loam soil in Southwestern Ontario[J]. Agriculture,Ecosystems and Environment,2002,90:81-88.
- [14] WESSTROM I,MESSING I. Effects of controlled drainage on N and P losses and N dynamics in a loamy sand with spring crops[J].

Agricultural Water Management 2007 87 :229-240.

- [15] ABDIRASHID A ,ELMI C ,MADRAMOOTOO C. Influence of water table and nitrogen management on residual soil NO_3 and denitrification rate under corn production in sandy loam soil in Quebec Agriculture[J]. Ecosystems and Environment 2000 79 :187-197.
- [16] KLEWER B A ,GILLIAM J W. Water management effects on denitrification and nitrous oxide evolution[J]. Soil Sci Soc Am ,1995 59 :1694-1701.
- [17] WESSTROM I ,MESSING I ,LINNAR H ,et al. Controlled drainage :effects on drain outflow and water quality[J]. Agricultural Water Management 2001 47 (2) 85-100.
- [18] MADRAMOOTOO C A ,WIYO K A ,ENRIGHT P. Nutrient losses through tile drains from potato fields[J]. Appl Eng Agric ,1992 8 (5) :639-646.
- [19] KALITA P K ,KANWAR R S. Effect of water table management practices on the transport of nitrate-N to shallow groundwater[J]. Transactions of the ASABE ,1993 36 (2) 413-421.
- [20] VALERO C S ,MADRAMOOTOO C ,MPFLI N S. Water table management impacts on phosphorus loads in tile drainage[J]. Agricultural Water Management 2007 89 :71-80.
- [21] 刘建刚 ,罗纳 ,贾忠华 ,等. 从水盐平衡的角度分析控制排水在银南灌区实施的可行性[J]. 农业工程学报 ,2005 21 (4) 43-46.(LIU Jian-gang ,LUO Wan ,JIA Zhong-hua ,et al. Feasibility study of adopting controlled drainage in Yinnan irrigation district based on salt and water balance[J]. Transactions of the CSAE 2005 21 (4) 43-46.(in Chinese))
- [22] 王少丽 ,许迪 ,方树星 ,等. 水管理策略对土壤水盐动态和区域地下排水影响的模拟评价[J]. 水利学报 ,2005 36 (7) :799-805.(WANG Shao-li ,XU Di ,FANG Shu-xing ,et al. Effects of water management strategies on soil water-salt movement and subsurface drainage[J]. Journal of Hydraulic Engineering 2005 36 (7) :799-805.(in Chinese))
- [23] LUO Wan ,JIA Zhong-hua ,FANG Shu-xing ,et al. Outflow reduction and salt and nitrogen dynamics at controlled drainage in the Yin Nan irrigation district ,China[J]. Agric Water Manage 2008 95 (7) 809-816.

Design standards and management measures for farmland drainage systems to mitigate non-point source pollution

YIN Guo-xi^{1 2} , SONG Pei-qing² , ZHANG Guo-hua³ , ZHANG Zhan-yu^{1 2}

(1. Key Laboratory of Efficiency Irrigation-Drainage and Agricultural Soil-Water Environment in Southern China of Ministry of Education , Hohai University , Nanjing 210098 , China ;

2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China ;

3. China Irrigation and Drainage Development Center , Beijing 100054 , China)

Abstract : The design standards and management measures for drainage systems with environmental and resource effects were discussed by regarding the control of the total drainage flow , the reduction of the contaminant load and the improvement of irrigation and fertilization efficiency as the goal. The new techniques of the combination of controlled drainage and sub-irrigation systems and the reduction of installation depth of lateral pipes would effectively prevent excessive drainage and mitigate nitrate and salt concentrations in drainage flow. The management of water table position would reduce the drainage flow and contaminant load and improve the irrigation efficiency. The above measures would be applicable to humid areas. When applied in arid and semi-arid areas , the soil salinity should be avoided. When the phosphorus in the soil was rich and the concentration of phosphorus in the drainage flow might be raised by the increase of the water table. The results show that these new techniques and methods for drainage systems can improve the efficiency of water resources.

Key words : controlled drainage ; non-point source pollution ; drainage design ; drainage management ; water table management