

黄河三角洲暗管排水系统排水效果模拟研究

刘文龙¹, 罗 纨¹, 杨玉珍², 卜凡敏²

(1. 西安理工大学 西北水资源与环境生态实验室, 陕西 西安 710048;

2. 东营市黄河三角洲保护与发展研究中心, 山东 东营 257091)

摘 要: 我国黄河三角洲地区地势平坦, 地下水埋深浅、含盐量高, 夏季降雨集中, 农业生产受到土壤盐渍化与涝渍灾害的威胁。因此排水系统建设是保证粮棉生产的一个重要条件。由于现行的排水设计规范依据的是农田水分调节的平均情况, 忽略了水文过程的随机性与地区水文要素的特点。本文使用田间水文模型 DRAINMOD 模拟研究了黄河三角洲地区暗管排水系统布置的排水效果。模拟结果显示: 在有效控制土壤盐分的前提下, 采用“浅密型”暗管布置能够更好地调控农田水分, 保证作物的正常生长; 该布置能够显著减少地下排水输出, 增蓄雨季淡水, 有利于三角洲地区农业非点源污染控制及生态环境保护。“浅密型”暗管布置在防涝排渍以及防止海水入侵方面均优于当地现有的深沟型明排系统。本研究成果可为黄河三角洲地区农业生产发展与生态环境保护提供技术支撑。

关键词: 暗管排水; 田间水文; DRAINMOD 模型; 涝渍灾害; 黄河三角洲

中图分类号: S276.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2013)01-0030-05

Simulation study on effect of subsurface drainage system layout in the Yellow River delta

LIU Wenlong¹, LUO Wan¹, YANG Yuzhen², BU Fanmin²

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

2. Dongying Yellow River Delta Conservation and Research Center, Dongying 257091, China)

Abstract: Agricultural production is threatened by waterlogged and soil salinization due to the flat relief, concentrated rainfall in summer, shallow ground water and high salinity in the Yellow River delta, construction of drainage systems thus becomes a prerequisite for production of food and cotton in this area. As the current standards for subsurface drainage design are developed on the basis of average soil moisture condition, the stochastic nature of the hydrological process and the special feature of the regional hydrological factors are neglected. This paper studied the effects of subsurface drainage systems layout with the field hydrology model – DRAINMOD. The results showed that shallow drainage may better perform on water control of farmland, non-point source reduction and sea water intrusion prevention than the traditional deep drainage ditches in the study area. The simulated total drainage discharge was significantly less with the shallow subsurface drainage layout than with the traditional deep ditch system. The results may provide practical guidance for agricultural production and ecological environment protection in the Yellow River Delta.

Key words: subsurface drainage; field hydrology; DRAINMOD model; waterlogged; Yellow River delta

1 研究背景

自然水文循环过程与农业生产需水过程之间往往存在不协调。因此, 在许多天然排水不畅的农业区都需要辅以人工排水措施来及时排除田间多余的水分, 以便为耕作提供必要的通行条件, 并在作物生长敏感期防止涝渍灾害对产量的不利影响。而在有盐碱化问题的地区, 农田排水是控制地下水埋深, 防止

土壤盐渍化, 保证农业粮、棉生产的一项重要措施^[1]。

目前, 农田排水系统设计主要是在现有研究成果的基础上, 利用经验系数、理论计算或粒子群法等计算方法来进行^[2-4]。关于农田排水的研究主要围绕某一影响因素来开展, 如涝渍因子的选择、排涝(渍)标准、涝渍兼治等方面的理论与实验研究^[5-7]。这些研究将作物产量用各种排水指标间接、定量地描述出来, 为更进一步的综合研究提供了

收稿日期: 2012-09-13; 修回日期: 2012-10-15

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划项目(2009BAC55B02); 国家自然科学基金资助项目(51079122)

作者简介: 刘文龙(1987-), 男, 河北邯郸人, 硕士研究生, 从事农业水资源管理与环境保护研究。

通讯作者: 罗 纨(1967-), 女, 新疆霍城人, 博士, 教授, 从事水资源与环境保护方面的教学与研究工作。

基础。然而,由于降雨等水文过程存在随机性,现行农田排水系统设计规范只考虑农田水分调节的平均情况,忽略了各地区水文气象等因素的特殊性;难以对于某一排水系统布置在不同气象条件下运行的性能进行预测。此时,采用田间水文模型来模拟分析排水系统的运行效果具有极大的优越性^[8-12]。

我国黄河三角洲地区地势平坦,自然排水不畅,且汛期降雨集中,暴雨常引发洪涝灾害;同时当地地下水埋深浅,蒸发强烈,土壤易发生盐渍化。因此黄河三角洲灌区内大多配套了农田排水系统。但因该地区的土壤结构松散、稳定性差,排水明沟边坡平缓,占地面积很大,加之地面建筑物多,非常不利于交通和机械化耕作,这与当地发展经济和实现农业现代化的目标之间存在矛盾。因此,近年来经济发展迅速的黄河三角洲地区积极引进国外先进的暗管排水技术,开展了暗管排水治理土壤盐渍化的尝试,初步取得了一些成果^[13]。

本文采用美国农业部自然资源保护局推荐的田间水文模型 DRAINMOD,以黄河三角洲地区为例,模拟研究了暗管排水系统布置要素中埋深、间距以及地表平整度对排水效果的影响;分析了研究区暗管排水系统布置方案的田间水文效应,并讨论了排水系统布置对海水入侵与减少农业非点源污染的潜在生态环境效应,成果可为类似地区农田排水建设提供理论依据与技术支撑。

2 研究方法

2.1 DRAINMOD 模型介绍

DRAINMOD 模型是 20 世纪 70 年代末由美国北卡罗来那州立大学农业工程系 Skaggs R W 博士开发的一个田间尺度水文模型^[14]。该模型通过输入长序列气象资料,采用较为简单的函数关系来描述田间水平衡要素(图 1)。模型首先分别进行田间(地表和土壤水分)水平衡计算。在 Δt 时段内,地表水平衡方程为:

$$\Delta S = P - F - RO \quad (1)$$

式中: ΔS 为地表的贮水变化量,cm; P 为降雨量,cm; F 为入渗量,cm; RO 为地表径流量,cm。

在同时段,地表到不透水层之间的土壤水分平衡方程为:

$$\Delta V = F - D - ET - DS \quad (2)$$

式中 ΔV 为土壤中的水量变化,cm; D 为侧向排水量,cm; ET 为腾发量,cm; DS 为深层渗漏量,cm。DRAINMOD 模型还可计算考虑旱、涝水分胁迫、迟播以及盐分

胁迫条件下可获得的作物相对产量。目前,模型功能已扩展到排水条件下,盐分和氮素运移的预测、森林的氮循环以及积雪与冻融对田间水文影响的预测。DRAINMOD 模型以其应用简便和预测准确的优点在世界上许多国家和地区得到了广泛的运用^[15]。

DRAINMOD 模型的主要输入参数包括降雨、气温等气象因子,分层土壤的水分特征参数,作物根系深度,种植收获日期以及排水系统布置的水力参数。其中土壤水分参数包括饱和导水率、土壤水分特征曲线、给水度与潜水蒸发通量等;水力参数包括排水沟/管间距、埋深、排水模数/系数、地表蓄水深度以及地表灌溉情况等。

2.2 研究区概况与模型输入参数

研究区位于黄河三角洲地区的山东省东营市广北农场。该区属于大陆性季风气候,多年平均降雨量约为 567.3 mm,多年平均气温为 11.7℃。图 2 显示研究区月平均气温与降水量分布情况。由图 1 可见,研究区最高月平均气温出现在 7 月,降雨集中在 6-9 月,“雨热同期”现象明显。研究区地势平坦,地表坑洼较少,土地整平之后,地表排水状况良好。当地已有的排水沟埋深约 2 m,间距 100 m 左右。由于边坡平缓,每条农沟占地宽度 10 m 以上。研究区的主要作物为棉花,8 月份进行一次灌溉。

在研究区实地开展的土壤调查结果显示,拟安装暗管排水区的土壤大致可分为 3 层,每层底部埋深分别为 30、100 与 200 cm。分层取土后在实验室测得各层土壤的饱和导水率以及水分特征曲线。同时,采用钻孔注水试验测定的土壤侧向导水系数约为 0.5~1.0 m/d。

为了验证 DRAINMOD 模型在黄河三角洲地区的适用性,收集了东营市 2008 年地下水埋深月平均记录值^[16],输入东营 2008 年气象数据以及上述土壤资料后,用 DRAINMOD 模型模拟了地下水埋深的月变化情况,与实测值进行了比较,并对部分土壤参数进行了适当的率定。在此基础上,我们根据研究区东营市 1955-2005 年连续的日气象资料,采用 DRAINMOD 模型逐日模拟分析了研究区不同排水系统布置方案的运行效果。

2.3 不同排水系统布置运行效果的模拟研究

农田排水的主要目的是防止涝渍灾害以及土壤盐分累计对作物产量的影响。类似地区的研究表明,当地下水埋深低于 1 m 时,夏季密集的降雨能够有效淋洗土壤中的盐分^[17],因此本文主要考虑了水分过多对作物生长的危害。以研究区种植较多的

作物-棉花为例,以水分胁迫对棉花产量的影响为控制指标,采用 DRAINMOD 模型模拟比较了研究区无排水系统以及浅密型和深沟型排水系统布置的运行效果。其中浅密型排水系统布置为埋深 1.2 m,间距 30 m;深沟型布置为埋深 2 m,间距 100 m。

模型采用地下水超标水位和持续时间累计值(SEW_{30})为判断标准,即在计算分析期内,统计地下水埋深小于等于 30 cm 的天数及超标水位的持续时间, SEW_{30} 的计算公式为:

$$SEW_{30} = \sum_{i=1}^n (30 - x_i) \quad (3)$$

式中: SEW_{30} 为超标水位和持续时间累计值, $\text{cm} \cdot \text{d}$; n 为作物生长季节总天数或某个生育阶段天数, d ; x_i 为第 i 天地下水埋深, cm 。朱建强等^[6]的研究表

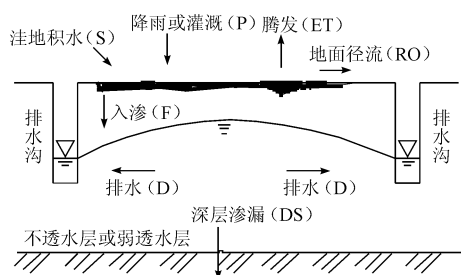


图1 DRAINMOD 模型农田水平平衡要素图

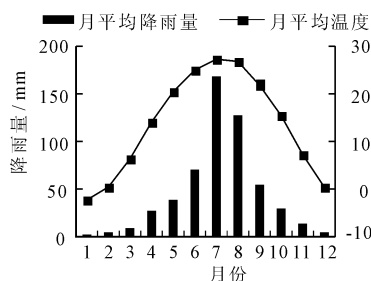


图2 研究区月平均降雨量与月平均气温

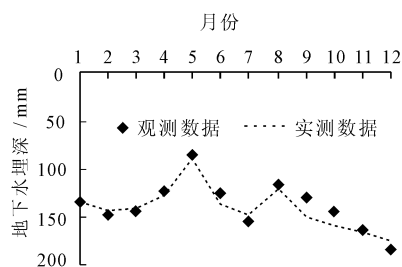


图3 DRAINMOD 模型 2008 年 月平均水位率定结果

3.2 排水系统布置的排水效果模拟分析

影响排水系统运行效果的主要因素有:排水沟/管的间距、埋深以及地表平整度。暗管间距与埋深反映的是地下排水强度,这两个量在 DRAINMOD 模型中作为两个独立的水力参数直接输入。地表平整度又称为地表排水状况,在 DRAINMOD 模型中以地表积水平均填洼深度和反映的田埂高度的最大蓄水深度两个参数来输入,这两个参数取值越大说明地表排水状况越差。以下用 DRAINMOD 模型模拟分析了上述几个参数对农田地表和地下排水量的影响。

首先假设排水暗管埋深为 2.0 m、地表最大蓄水深度是 1 cm,平均填洼深度为 0.5 cm(代表地表平整度较好的情况),图 4 显示排水间距变化对地表、地下以及总排水量的影响;由图可见,排水间距增大,地下排水量及总排水量减小,说明暗管排水的功能弱化,降雨径流主要从地表排出;针对研究区的降雨规律和土壤特性,图 4 显示排水深度为 2 m 时,间距大于 100 m 以后,工程排水效果很差,农田在降雨较为集中的夏季可能受到涝渍灾害的威胁。

为了分析暗管埋深对排水量的影响,假设排水管间距为 100 m,地表最大蓄水深度是 1 cm,平均填

明,棉花的相对产量与 SEW_{30} 之间存在显著的线性关系,因此本文根据这一经验关系分析了不同 SEW_{30} 条件下相应的作物产量。

3 结果与分析

3.1 模型的初步率定结果

图 3 显示 DRAINMOD 模型预测的 2008 年东营地区逐月地下水埋深与实测值的比较情况。可以看出模拟值与实测值的变化趋势基本一致,两者的相关系数达到 93.6%;绝对误差在 1.1 ~ 20.8 cm 之间,平均绝对误差为 7 cm,相对误差为 0.8% ~ 16.0%,平均相对误差为 5.2%。DRAINMOD 模拟结果能够比较精确的反映当地的地下水埋深变化,率定结果较好,可以用于排水系统模拟研究。

洼深度为 0.5 cm,此时排水量随埋深的变化如图 5 所示。由图 5 可见,地下排水量随埋深的增加而增大,埋深大于 1.5 m 以后,总排水量与地下排水量变化基本一致,说明研究区排水沟/管间距为 100 m 时,能够有效排出地表积水与地下渍水的暗管设计深度应该在 1.5 m 左右,小于该深度时,地表排水占主要成份。增加排水管埋深能够增强地下排水能力,减少地表径流,而且地下排水能力增加的幅度要大于地表径流减小的幅度,所以埋深增加能够强化排水系统的排水能力,但过多排除地下水对区域生态环境的影响也值得考虑。

由于地表平整度对农田排水的影响不容忽视,以下模拟分析了地表排水参数变化对排水量的影响。以研究区现有排水系统布置为例,设排水管间距为 100 m,埋深为 2.0 m,改变 DRAINMOD 模型地表排水输入参数-田块最大蓄水深度和田间平均积水填洼深度,模拟排水量相应的变化,结果如图 6 所示。图中田块最大蓄水深度为 1、2、3、5、10 cm,相应的田间积水填洼深度取其 1/2,即 0.5、1、1.5、2.5、5 cm。由图 6 可见,在同一排水强度下,若地表蓄水能力增加,地下排水量从 15.6 cm 增加到 18.4

cm,增幅为 18.2%;地表径流则从 4.9 cm 减少到 0.5 cm,变幅为 -89.7%;这时因为地表蓄水增加导致更多的水入渗后经地下排出。但对于农田而言,积水时间越长意味着作物受到涝渍灾害的程度越高。所以,土地平整以减少地表积水量是改善土地农田排水条件的一项重要内容。

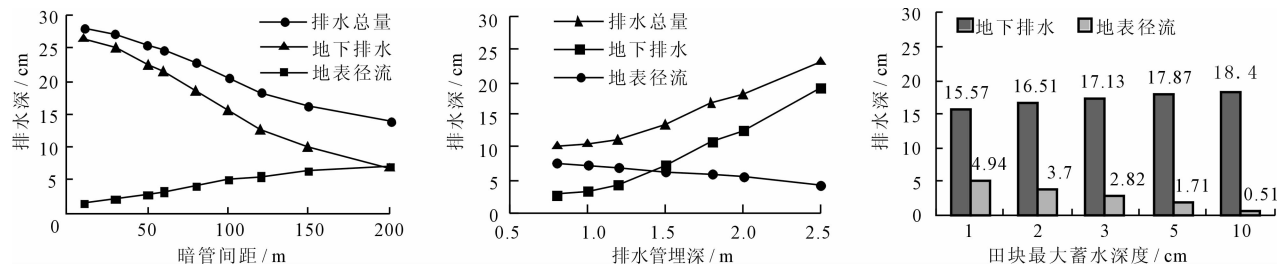


图 4 排水管间距对排水量的影响 图 5 排水管埋深对排水量的影响 图 6 田块最大蓄水深度对排水量的影响

3.3 不同排水系统布置的降渍效果模拟分析

近年来,对生态环境问题的关注迫使研究人员重新考虑农田排水系统设计的合理性。“浅密型”排水系统能够更好的协调生产与生态环境的关系^[18]。因此,模拟分析了在研究区采用“浅密型”排水系统的运行效果,并与土地开发前的天然状况以及现有排水系统的情况进行了比较,结果如图 7 所示。图 7 中 DRAINMOD 模拟结果为 50 年平均情况,结果显示,天然情况下,研究区农业排水主要通过地表排走;安装排水系统后,浅密型排水系统的地下排水增至 8.2 cm,地表径流减少到 3.7 cm;深沟型的地下排水增至为 10.8 cm,地表径流减至 3.9 cm。显然,排水系统建设会加强地下排水能力,减少地表径流。DRAINMOD 模型对反映土壤涝渍灾害指标 SEW_{30} 的计算结果显示:在无排水条件下 SEW_{30} 多年平均值为 310.9 cm·d,建设“浅密型”排水系统后降至 28.3 cm·d,而在“深沟型”排水条件下则为 56.54 cm·d。文献[6]的研究表明, SEW_{30} 超过 160 cm·d 时,棉花将减产达 20% 以上,可见研究区排水系统建设对于农业生产的必要性。值得注意的是,“浅密型”的 SEW_{30} 小于“深沟型”,这是因为“浅密型”的排水管布设浅且密,能够更迅速地疏干浅层土壤的水分,降低地下水埋深。所以对于涝渍灾害频发的区域,“浅密型”排水系统能够更好

地发挥排涝增产的功能。

根据 DRAINMOD 模型计算结果绘制了不同排水条件下研究区田间地下水埋深的变化,如图 8 所示。当研究区没有排水系统时,1-6 月份的地下水埋深基本稳定在 120~130 cm,在降雨的影响下,7-9 月份的地下水埋深变浅,最浅的 8 月平均埋深达到 92.8 cm,10 月份的地下水埋深降至 120 cm 并维持到年底。建立浅密型排水系统后,降水稀少的月份地下水埋深变化很小,但是在 7-9 月,月平均地下水埋深降低 23.5、32.7 与 27.6 cm;安装深沟型排水系统后,地下水埋深整体下降,平均下降达 25.5 cm。在作物生长旺盛的 7-9 月份,研究区安装排水系统后,月地下水平均埋深下降 20 cm 以上,有助于田间排涝除渍,可见安装排水系统对于提高作物抵御涝渍灾害效果显著。

3.4 排水系统布置的生态环境影响分析

研究区地处黄河三角洲,过度排泄地下水会导致海水入侵等问题。分析月平均地下水埋深图(图 8)发现,深沟型排水系统全年都进行排水,地下水埋深全年平均下降 25.5 cm。郭占荣^[19]根据静水压力平衡原理,建立了海水与淡水的水静力学模型(图 8):

$$z = 40 h_f \tag{4}$$

式中: z 为淡水区海平面以下的淡水水深, m; h_f 为潜水水位(地下水埋深), m。

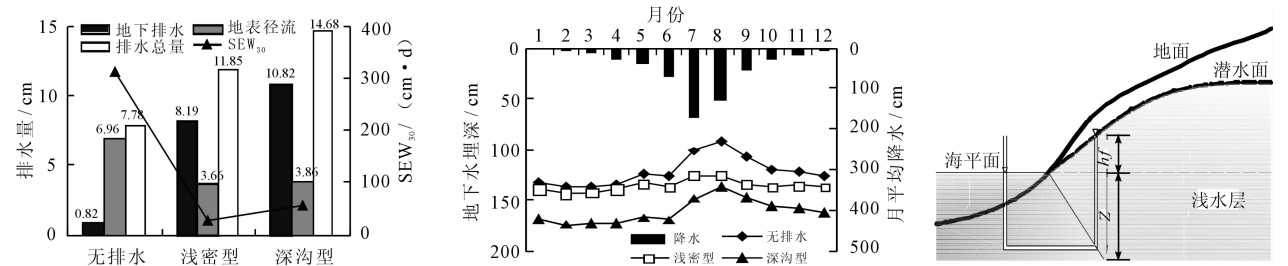


图 7 无排水和有排水情况下多年平均排水量对比图 图 8 无排水和有排水情况下月平均地下水埋深变化图 图 9 天然状态下海水与淡水的水静力学模型示意图

由式(4)可知,在不考虑潮汐、风暴潮等影响,当地下水埋深下降 0.255 m 时,对应地点的海平面以下的淡水水深(z)会减少 10.2 m,即盐淡水界面会上升 10.2 m,很可能会造成海水入侵。浅密型的排水系统排走的淡水主要是夏季过多的降水,其余月份地下水埋深下降较少,能够兼顾作物排渍需求与防范海水入侵。因此,相对于浅密型排水系统,深沟型排水系统有更高的海水入侵的风险。

近年来,富含氮素等营养物的农业排水尤其是地下排水对环境的非点源污染得到越来越多的关注。Skaggs 等^[18]研究发现,由于硝态氮易溶于水,地表排水携带的硝态氮浓度一般较低,31 个地区的实测资料显示平均浓度在 0.4 ~ 4 mg/L;地下排水中硝态氮的含量占其流失的大部分,大量的实测资料显示其平均浓度在 8 ~ 12 mg/L,所以,减小地下排水能够有效地减少氮素排放。由图 7 可得,深沟型排水系统的地下排水量为 10.82 cm,浅密型的地下排水量为 8.19 cm;与深沟型排水系统相比,浅密型排水系统的地下排水量消减了 24%,因此浅密型排水系统能够较好地减少硝态氮等污染物的排放。

4 结论与建议

本文应用 DRAINMOD 模型模拟分析了黄河三角洲地区不同排水系统布置的排水效果。模拟结果发现,研究区无人工排水系统条件下,水分过多会使作物减产 20% 以上;当地现行的“深沟型”排水系统可基本满足排涝除渍的需求,但是排水系统的设计能力过大,过量排水造成水资源的浪费与旱情的加重。若采用“浅密型”排水系统可减少 24% 的不必要排水,增加雨季淡水的蓄集,有利于黄河三角洲地区非点源污染控制、防治海水入侵等生态灾害。针对研究区地下水矿化度高,降雨集中等特点,如何通过合理灌、排措施,达到农业增产与生态环境保护的双重目标有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 倪福全. 农田水利工程概论[M]. 北京:中国水利水电出版社,2011.
- [2] 中华人民共和国水利部. GB 50288-99,灌溉与排水工程设计规范[S].

- [3] 邵孝侯,俞双恩,彭世彰. 圩区农田塑料暗管埋深和间距的确定方法评述[J]. 灌溉排水,2000,19(1):34-36.
- [4] 殷国玺,张展羽,张国华,等. 基于粒子群优化算法的农田多目标控制排水模型[J]. 农业工程学报,2009,25(3):6-9.
- [5] 沈荣开,王修贵,张瑜芳. 涝渍兼治农田排水标准的研究[J]. 水利学报,2001,32(12):36-39.
- [6] 朱建强. 基于作物的农田排水指标及排水调控研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2006.
- [7] 张蔚榛,张瑜芳. 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,2001,32(2):44-49.
- [8] Breve M, Skaggs R, Parsons J, et al. Using the DRAINMOD-N model to study effects of drainage system design and management on crop productivity, profitability and $\text{NO}_3\text{-N}$ losses in drainage water[J]. Agricultural water management, 1998,35(3):227-243.
- [9] 王少丽,王兴奎. 应用 DRAINMOD 农田排水模型对地下水位和排水量的模拟[J]. 农业工程学报,2006,22(2):54-59.
- [10] 孟江丽. 水盐和排水系统的模拟研究[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学,2006.
- [11] 景卫华,罗 炤,温 季,等. 农田控制排水与补充灌溉对作物产量和排水量影响的模拟分析[J]. 水利学报,2009,40(9):1140-1145.
- [12] 罗 炤,Sands G R,景卫华,等. “玉米带”改种多年生草类后对农田排水的水文效应模拟[J]. 农业工程学报,2010,26(2):89-94.
- [13] 彭成山,杨玉珍,郑存虎,等. 黄河三角洲暗管改碱工程技术实验与研究[M]. 郑州:黄河水利出版社,2006.
- [14] Skaggs R W. Drainmod: reference report, methods for design and evaluation of drainage-water management systems for soils with high water tables[M]. 1985.
- [15] 贾忠华,罗 炤,周晓夏,等. 干旱与半干旱地区湿地水文及临界条件的模拟研究[J]. 水利学报,2004,35(6):27-32.
- [16] 张美英,陈 莹,赵霞则. 东营市 2008 年地下水动态分析[J]. 水利科技,2001(1):40-42.
- [17] 方 生,陈秀玲. 华北平原大气降水对土壤淋洗脱盐的影响[J]. 土壤学报,2005,42(5):730-736.
- [18] Skaggs R W, van Schilfhaarde J V. Agricultural drainage[M]. USA:Madison Wisconsin,1999.
- [19] 郭占荣,黄奕普. 海水入侵问题研究综述[J]. 水文,2003,23(3):10-15.