

防治土壤盐碱化地表水地下水联合管理模型

余 美^{1,2}, 芮孝芳^{1,2}

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学水资源环境学院, 江苏 南京 210098)

摘要 对防治土壤盐碱化的地表水地下水联合管理模型的一般结构进行了描述, 重点介绍了国内防治土壤盐碱化的地表水地下水联合管理模型及其优化方法的研究现状, 对代表性文献进行了评述。分析了联合管理模型中存在的不足, 并就该研究领域的发展趋势提出了个人看法。

关键词 地表水; 地下水; 土壤盐碱化; 联合管理模型; 优化方法

中图分类号 S274.3 文献标识码 A 文章编号 1004-693X(2007)04-0006-04

Study on integrated management model of groundwater and surface water for prevention of soil salinization

YU Mei^{1,2}, RUI Xiao-fang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Water Resources and Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract The general structure of the integrated groundwater and surface water management model for prevention of soil salinization were analyzed with emphasis on the models and their optimization methods in China, and the typical literatures were reviewed. The existing problems and the prospects of this field were also discussed.

Key words surface water; groundwater; soil salinization; integrated management model; optimization method

盐碱土是地球上广泛分布的一种土壤类型, 是一种重要的土地资源。全世界约有盐碱地 9.55 亿 hm^2 , 分布在世界各大洲干旱地区, 主要集中在欧亚大陆、非洲、美洲西部。我国盐碱土地资源总面积约为 9913 万 hm^2 , 主要分布在东北、华北、西北内陆地区以及长江以北沿海地带。土地盐碱化问题不但造成了资源的破坏、农业生产的巨大损失, 而且还对生物圈和生态环境构成威胁, 表现出环境和经济两方面的危害。随着人口的增加和水土资源的紧缺, 如何最优地利用现有水土资源, 改良利用盐碱地, 防止土壤盐碱化已成为迫切需要解决的问题。实践证明, 造成灌区盐碱化的根本原因是灌溉用水过量, 在排水不畅的条件下, 地下水补给量大于排泄量, 地下水位大幅度上升, 潜水蒸发加剧, 造成表土积盐。因此, 消除或防治灌区土壤盐碱化的关键问

题是水资源的合理开发和利用, 而且在很大程度上要通过地表水和地下水的联合优化运用, 控制和减少过量的地表用水, 适量开采地下水, 才能调控地下水埋深在适宜动态, 根层土壤的盐渍度在作物耐盐度临界值以内, 盐分动态达到年内及多年平衡, 防止土壤积盐和渍涝。

1 模型的结构

20 世纪 80 年代以后, 国内外许多学者利用系统分析和模拟技术, 提出了不少防治和改良盐碱地的地表水地下水联合管理模型。总体来看, 目前的管理模型均可分为描述水资源系统水(地表水、土壤水、地下水)盐特性的物理子模型, 表达管理目标及各种社会、经济、环境约束的管理子模型以及两者之间的耦合方法三部分。其中, 物理子模型因地下水

数值模拟方法不同分为集中参数模型和分布参数模型。集中参数模型根据区域地下水均衡原理,将地下含水层处理为地下水库,各水文参数和水文地质参数都取均值进行模拟计算。分布参数模型将研究区域按一定规则剖分为若干子区,各子区的参数分别取不同值,采用有限差分法和有限元法进行地下水动态和溶质运移数值模拟。管理子模型一般是以供水经济效益最大或供水费用最小作为单一目标。物理子模型与管理子模型的耦合方法包括模拟方法、嵌入法和响应矩阵法。模拟方法应用物理模型对不同决策变量的响应函数,建立一组非线性方程组,迭代求解。基于嵌入法概念的耦合方法是将整个物理模型(地表水盐、土壤水盐、地下水盐模拟)作为等式约束直接加入到优化模型中,或作为状态转移方程加入到依时序决策的动态规划问题中。一般的集中参数模型由于描述物理系统的方程简单,都可以以约束形式嵌入到优化模型中,成为物理可行约束,是目前最经常采用的耦合方法。响应矩阵法是一种间接方法,先通过运行物理模型求得单位脉冲作用下系统的响应矩阵,然后在优化模型的约束条件中通过卷积积分表达决策与系统响应的关系。

2 模型的优化方法

根据所采用的优化方法不同,防治盐碱化地表水地下水联合管理模型可分为线性规划模型、非线性规划模型、动态规划模型、模拟模型和大系统分解协调模型等。优化模型中的目标函数通常为水资源(地下水、地表水、客水)联合利用运行费用最低、产值最大、年内供水净效益最大等;约束方程包括:水量平衡约束、需水量约束、可供水量约束、工程容量约束、耕地面积约束、地下水埋深约束、含盐量约束、工农业产值约束、水质约束以及非负约束等;决策变量为时段地下水开采量、地表水引水量、客水供水量、排水量、人工回灌水量以及作物种植比例等。

2.1 线性规划模型

刘昌明等^[1]以地下水埋深作为主要环境控制变量,利用线性规划方法确定地下水、地表水和调水量的最优用水方案。王根绪^[2]提出把灌区优化利用水资源同当地水盐状态特征结合起来的水盐区分法。依据土壤水盐特征把灌区划分为不同的分区,各分区作为独立的水资源用户,建立以改善或充分利用水盐环境的水资源优化利用模型,组成灌区多目标的LP模型集,得到以土壤水盐状态指导灌溉的优化配水方案。路梅^[3]建立了旱、涝、碱综合治理线性优化模型,考虑各种水源的来水、农业费用、工农业及人畜生活用水、各类工程的容量等约束,以确定不同

年型各区域的作物种植优化布局和各种水源的取(排)水优化方案。邵景力^[4]运用响应矩阵法将地下水数值模拟模型与线性管理模型耦合,构建了地下水地表水联合调度多目标管理模型。王文科^[5]在水资源线性优化模型中,考虑了城镇生活用水、农村生活用水、工业用水、农田灌溉用水、生态环境用水和洗盐用水多个用水部门,计算了不同水平年、不同单元防止土壤盐渍化的地下水地表水配水比例。

2.2 非线性规划模型

彭世彰^[6]提出井渠结合灌溉的非线性管理模型,该模型在约束条件中考虑了调蓄土壤计划湿润层内的储水量至适宜范围,分析了地面水、土壤水和地下水之间的相互关系和转化,将地下含水层作为水库进行地下水位调节计算,使模型具有调蓄地面水源、土壤贮水层和地下含水层的能力。此后,又将作物临界土壤含盐量概念应用于防治土壤盐碱化的非线性规划灌排模型^[7],求得不同年型的灌排水量、淋洗水量、作物生长季节土壤盐分动态变化及地下水位年内调控过程。代涛^[8]建立了防治土壤次生盐碱化的排水优化非线性规划模型,约束条件中对土壤盐分和地下水进行平衡计算,将作物临界含盐量和地下水临界埋深结合在优化模型中,计算了地表水地下水引排水量、土壤盐分变化、地下水位变化和淋洗定额。

2.3 动态规划模型

蔡林根^[9]考虑了季雨量的随机性,选择季雨量和含水层蓄水量作为状态变量,建立了随机动态规划模型,求得了各季最优抽水、引水量策略以及初始地下水位和抽水量的概率分布。徐玉佩^[10]分别以二维地下水运动基本方程和地下水均衡方程为系统方程,建立了两种动态规划优化模型,计算了多年最优总开采量、各年最优控制水位、各年相应开采量及最优井渠用水比。陈喜^[11]建立了水盐平衡动态规划及灌排工程体系合理配置的优化模型,该模型以各时段的水盐平衡方程作为状态转移方程,对整个区域内未来10年引用地表水量、开采地下水量以及相应的配套水利工程井、渠、沟、站进行了规划。张展羽^[12]以淡水资源不足地区利用含盐劣质水灌溉为研究对象,根据作物生长对土壤水盐状态的动态响应函数,建立了节水、控盐灌溉制度动态规划设计模型。吕祝鸟^[13]建立了咸、淡水交替灌溉的水盐调控动态规划模型,首先根据各生育阶段的水盐敏感指标,用动态优化方法求解各生育阶段的最优灌溉制度,然后利用土壤水分运动方程模拟各时段末的水分含量,根据设置的土壤含水量的标准值,将已分到每个生育阶段的水量再重新分配到每个标准时

间段,以适应各时段内的水分亏缺,最终得出作物全生育期最优的淡水、微咸水水量分配方案。

2.4 模拟模型

袁宏源^[14]提出了一个仅含4个参数的数学模型来模拟灌区的地表水和地下水运动及水量平衡。首先,借助于历史观测资料,优选出一组参数;然后利用这组参数及人口合成的随机水文系列来预测未来的地下水位变化趋势,研究最优渠灌及井灌比例和灌区的规模。汪林^[15]采用国际地下水模型中心(ICWMC)的三维地下水有限差分模型,计算了灌区浅层地下水资源量、补排组构和可利用量,动态模拟了不同规划水平年在不同引水灌溉条件及地下水埋深控制标准下的引、排水方案。尹大凯^[16]运用美国盐碱地改良实验室开发的HYDRUS程序,对麦套玉米地进行了多种灌溉方案下的一维水盐运动数值模拟,研究了基本灌溉模式、井渠结合灌溉模式的改变对不同程度盐碱地改良的效果,并且建立了三维地下水非稳定流模型,用VisualMODFLOW软件对研究区域的4种灌溉方案进行了数值模拟。

2.5 大系统递阶管理模型

石玉波^[17]将水库与地下含水层构成的联合运用系统表达为分布参数系统,提出用联合运用系统的广义响应函数来描述系统对各类决策的响应,并建立递阶优化模型。递阶级对公用水资源进行分配并根据反馈信息修正分配方案,下级各子系统在递阶级确定的地表水分配量前提下决定子系统地下水开采与回灌计划。齐学斌^[18]采用大系统分解协调算法,建立了引黄水、地下水联合调度大系统递阶管理模型,包括地下水系统管理模型、系统供水量协调模型、用水系统管理模型、水资源系统和用水系统的总协调模型,以确定引黄水、地下水在各计算分区的最优配水以及作物最优种植面积。

2.6 其他模型

近几年来,对策论、灰色理论、模糊理论、神经网络理论以及决策支持系统等方法在地表水地下水联合运用防治盐碱化的研究中得到了越来越多的应用,多种优化方法的组合模型也得到了较快的发展。贾全昌^[19]把井渠灌溉调配问题归结为多目标的灰色局势决策,首先计算不同调配方案对应的目标值,构造效果测度矩阵和多目标决策矩阵,然后从优化决策矩阵中选择决策。陈喜^[20]把信息处理与计算模型相结合,研制出适用于引黄灌区的水资源决策软件。首先进行资料处理,输入区域内的气象、水文、水文地质、地理、地貌、经济等资料,形成数据库;然后调用上述资料,运用参数优选模型,求得有关水文地质参数,运用运行模型便可进行预测预报,如根

据研究区内进出水量水质,可预测地下水信息(地下水位、地下水矿化度的变化过程)、土壤信息(土壤含水量、土壤含盐量)、工程运用信息和灾害信息。周维博^[21]根据影响灌区地下水位变化的主要因素,建立井渠结合灌区神经网络BP模型,进行灌区地下水动态预报。

3 模型的发展趋势

随着盐碱化防治问题的深入,如何克服常规数学规划方法的局限性,使数学模型既能反映复杂系统的真实情况,又便于计算求解和实际应用,已成为该领域的主要研究方向。

3.1 土壤水盐动态模拟与管理模型的耦合

盐渍土的水盐动态模拟是地表水地下水联合运用防治盐碱化的一项重要研究内容,目前比较成熟的水盐平衡模型是以区域水盐收支平衡为基础,宏观地从水盐来源来表示水盐动态变化,其表达式简单,便于对复杂的大范围水盐运动过程及其规律进行宏观性的量化,因此常被作为区域综合治理和水盐调控的科学依据。上述防治盐碱的水资源管理模型中,大多将地下含水层水量均衡方程或地下水运动方程作为等式约束或状态转移方程加入到水资源管理模型中,仅从控制地下水位单方面来防治盐碱,而少有利用土壤水盐平衡方程和地下水盐分平衡方程增加对土壤储水量、土壤含盐量和地下水矿化度的调控。此外,与微观的水盐运移模型相比,水盐平衡模型只能提供区域的总体信息,而不能反映水盐在土壤—作物—大气连续体中的物理过程,揭示水盐运移的本质。因此,笔者认为应在地表水地下水联合运用中考虑更多的水盐调控因素,将土壤水盐平衡方程或运动方程以及地下水盐平衡方程或运动方程与水资源管理模型耦合,使建立的模型对联合运用系统的刻画更精细,更能真实地反映实际系统的特性,更多方位、更有效地调控土壤水盐,防治土壤盐碱化。

3.2 发展节水控盐用水模型

农业灌溉是我国用水最多的部门,发展非充分灌溉、合理利用含盐劣质水、建立节水型农业是必然趋势。目前所建模型中,大多利用水分生产函数供优化决策之用,不涉及土壤盐分对作物生长及产量的影响,只能用于淡水资源丰富地区。事实上,作物—水—土壤是一个复杂的系统,作物产量不仅与灌溉水量有关,还与灌溉水含盐量、土壤含盐量、地下水等众多因素密切相关,由于作物水盐生产函数综合反映了作物对土壤水分和盐渍度的敏感性随生长发育阶段不同而变化的基本现象,因此更能够有效

地指导淡水资源紧缺地区的含盐劣质水灌溉以及盐渍化地区的灌溉制度优化管理。

3.3 引入随机规划方法

由于联合运用问题涉及河流来水、降水量等随机因素,系统参数等具有不确定性,因此在防治盐碱化的地表水地下水优化管理中引入随机规划方法与风险分析技术,可以更真实地逼近实际系统。目前的随机规划只能处理极为有限的系统输入或参数特性等随机因素,在此方面还需进行深入的研究。

3.4 多目标交互式管理模型的研制

上述所建模型大多以灌溉净效益最大、工程运行费用最小或水资源消耗量最小为单一的目标,而实际上大规模的水资源联合运用往往还需要考虑社会、经济发展与生态环境保护的多目标规划。深入研究水资源系统与社会、经济、环境的定量关系,建立防治盐碱多目标管理模型是今后的研究趋向。在对多目标模型进行优化时尚有两个技术关键有待研究:实用有效的多目标优化模型的求解方法,如何从众多的非劣解中求解最佳满意解,并有机地融入决策者的偏好。

3.5 重视流域尺度防治盐碱化研究

目前,国内防治盐碱化的水资源联合管理模型大多以集中参数物理模型为基础,用水量平衡方程对地表水地下水系统进行描述。虽然,集中参数模型对资料要求不高,地表水地下水转化关系简单,但由于状态变量以含水层系统的平均水位代表,因此只能用于较小区域均质含水层或经概化处理后的规划问题。相对而言,国外近年来在分布参数地下水模型方面的研究发展较快,联合管理模型大多将有限差分数值模型作为地下水系统的物理模型,并应用响应函数模拟河流与地下含水层之间的水力联系,广泛用于大规模、非均质、复杂地下含水层系统与地表水系统(河流-含水层系统和滨海区域)的联合管理^[22-26],从区域水环境的宏观角度拓展了盐碱化防治的研究领域。不足之处是该方法对资料要求较高,与集中参数系统比较,地表地下水水力联系描述以及物理模型和管理子模型的耦合较难。

3.6 开展盐碱化防治决策支持系统研究

防治盐碱化水资源优化管理通常具有多维性、多功能性和多目标性,并带有不确定性参数,属于典型的半结构化问题,依靠单纯的模型尚不能很好地解决实际问题。决策支持系统是以辅助半结构化或非结构化决策过程为特征的计算机信息系统,能为决策者提供所需要的数据、信息和背景材料,帮助明确决策目标和进行问题的识别,建立、修改决策模型,提供各种备选方案,并对各种方案进行评价和优

选,可以通过人机反复对话,进行分析、比较和判断,为正确决策提供有益的帮助。同时,随着各种数据采集和通讯系统如 3S(GIS, GPS, RS)技术的不断发展和完善,防治盐碱化水资源决策支持系统必将成为今后的一个重要研究课题。

参考文献:

- [1] 刘昌明, 杜伟. 考虑环境因素的水资源联合利用最优化分析[J]. 水利学报, 1986(5): 38-44.
- [2] 王根绪. 灌区水资源优化利用的水盐区分法[J]. 甘肃科学学报, 1991(4): 52-59.
- [3] 路梅. 旱涝碱综合治理的优化模型[J]. 农田水利与小水电, 1996(5): 1-6.
- [4] 邵景力. 包头市地下水-地表水联合调度多目标管理模型[J]. 资源科学, 2003, 25(4): 49-55.
- [5] 王文科. 银川平原水资源优化配置研究[J]. 资源科学, 2004, 26(2): 36-45.
- [6] 彭世彰. 河套灌区井渠联合运用优化灌溉模型[J]. 水科学进展, 1992(3): 199-206.
- [7] 彭世彰. 防治土壤盐碱化最优灌排模型[J]. 水科学进展, 1995(3): 183-188.
- [8] 代涛. 西北干旱区水盐动态模拟及排水优化模型研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2004.
- [9] 蔡林根. 引黄灌区地面水、地下水系统的动态管理[J]. 水利学报, 1987(11): 37-44.
- [10] 徐玉佩. 井渠结合灌区优化开采地下水问题的初步研究[J]. 武汉水利电力学院学报, 1991, 24(6): 695-702.
- [11] 陈喜. 银北平罗地区水盐平衡动态规划及灌排工程体系合理配置的优化决策模型[C]//夏军. 现代水科学不确定性研究与进展. 成都: 成都科技大学出版社, 1994. 322-326.
- [12] 张展羽. 节水控盐灌溉制度的优化设计[J]. 水利学报, 2001(4): 89-94.
- [13] 吕祝乌. 土壤水盐运移模拟及灌溉制度优化设计[D]. 南京: 河海大学, 2005.
- [14] 袁宏源. 地面水与地下水联合利用的数学模型——人民胜利渠最优运行策略的研究[J]. 武汉水利电力学院学报, 1984(4): 157-166.
- [15] 汪林. 银川平原浅层地下水资源和盐调控研究[J]. 资源科学, 2001, 23(3): 82-87.
- [16] 尹大凯. 宁夏银北灌区井渠结合灌溉三维数值模拟与分析[J]. 灌溉排水学报, 2003, 22(1): 53-57.
- [17] 石玉波. 区域地表水地下水联合运用的分解协调优化方法[J]. 水科学进展, 1996, 7(3): 240-246.
- [18] 齐学斌. 商丘试验区引黄水、地下水联合调度大系统递阶管理模型研究[J]. 灌溉排水, 1999, 18(4): 36-39.
- [19] 贾全昌. 井渠灌溉调配的多目标灰色局势决策[J]. 水利学报, 1996(5): 38-44.
- [20] 陈喜. 引黄灌区水资源调控的信息系统研究. 西北水资源与水工程[J], 1996(1): 22-26. (下转第 14 页)

标间相关性的差异,说明物质的沉积经历了重力分离、水动力作用等过程。

参考文献:

- [1] 朱广伟,秦伯强,高光,等.长江中下游浅水湖泊沉积物中磷的形态及其与水相磷的关系[J].环境科学学报,2004,24(3):381-388.
- [2] 张路,范成新,池俏俏,等.太湖及其主要入湖河流沉积物磷形态分布研究[J].地球化学,2004,33(4):423-432.
- [3] 李军,刘丛强,王仕禄,等.太湖五里湖表层沉积物中不同形态磷的分布特征[J].矿物学报,2004,24(4):405-410.
- [4] 吴丰昌,白占国,万国江,等.贵州百花湖沉积物中磷的再迁移作用[J].环境科学进展,1996,8(3):58-61.
- [5] RUTTENBERG K C. Development of a sequential extraction method for different forms of phosphorus in marine sediments [J].Limnol Oceanograph,1992,37(7):1460-1482.
- [6] RUTTENBERG K C. Proxy paradox for P-Prediction [J]. Nature,1994,372:224-225
- [7] 潘成荣,姚凤云,汪新民.“引江济淮”输水干线浮游藻类与水体质量研究[J].合肥工业大学学报,2003,26(4):520-524.
- [8] 安徽省生态环境现状调查项目组.安徽省生态环境现状调查[R].合肥:安徽省环境保护局,2002.
- [9] 安徽省地表水环境容量核定项目组.安徽省地表水环境

容量核定[R].合肥:安徽省环境保护局,2005.

- [10] 金相灿,屠清瑛.湖泊富营养化调查规范[M].北京:中国环境科学出版社,1990.
- [11] GB9834-88 土壤有机质测定法[S].
- [12] 李悦,乌大年,薛永顺.沉积物中不同形态磷提取方法的改进及其环境地球化学意义[J].海洋环境科学,1998,17(1):15-20.
- [13] 隋桂荣.太湖表层沉积物中OM、TN、TP的现状与评价[J].湖泊科学,1996,8(4):319-324.
- [14] 陈敬安,万国江.云南程海现代沉积物物理环境纪录研究[J].矿物学报,2000,20(2):112-116
- [15] 姚书春,李世杰.巢湖富营养化过程的沉积纪录[J].沉积学报,2004,22(2):343-347
- [16] 孙惠民,何江,吕昌伟,等.乌梁素海沉积物中有机质和全氮含量分布特征[J].应用生态学报,2006,17(4):620-624
- [17] 翁焕新.河流和海陆交汇带现代沉积磷的环境地球化学[J].地球化学,1995,24(5):119-125.
- [18] 黄丽娟,常学秀,刘洁,等.滇池水-沉积物界面氮分布特点及其对控制蓝藻水华的意义[J].云南大学学报,2005,27(3):256-260.
- [19] 李宁波,李原.洱海表层沉积物营养盐的含量分布和环境意义[J].云南环境科学,2001,20(1):26-27.
- [20] GB3838-2002 地表水环境质量标准[S].

(收稿日期:2006-06-28 编辑:徐娟)

(上接第9页)

- [21] 周维博.人工神经网络理论在井渠结合灌区地下水动态预报中的应用[J].西北水资源与水工程,2003,14(2):5-9.
- [22] LELKOFF L J, GORELICK S M. Simulating physical processes and economic behavior in saline, irrigated agriculture: model development [J]. Water Resour Res, 1990, 26(7):1359-1369.
- [23] HALLAJI K, YAZICIGIL H. Optimal management of a coastal aquifer in southern Turkey [J]. J Water Resour Plng and Mgmt, 1996, 122(4):233-244.
- [24] NOBI N, GUPTA A D. Simulation of Regional Flow and Salinity Intrusion in an Integrated Stream-Aquifer System in Coastal Region: Southwest Region of Bangladesh [J]. Ground Water, 1997, 35(5):786-796.
- [25] PAMELA G E. Management Model for Conjunctive Use of Coastal Surface Water and Ground Water [J]. J Water Resour Plng and Mgmt, 1998, 124(3):129-139.
- [26] HAKAN B, MIGUEL A M. Joint management of surface and ground water supplies [J]. Ground Water, 1999, 37(2):214-221.

(收稿日期:2006-09-08 编辑:傅伟群)

·简讯·

以大型海藻为填充的 养殖污水净化装置研制成功

由中国科学院海洋研究所研究员李大鹏完成的以大型海藻为填充的养殖污水净化装置于2007年6月13日获国家发明专利授权。

根据大型海藻的生物学特性,该装置以实用化和半自动化连续运转为目标,具有光、温、营养盐、气体交换等培养条件的调节控制系统,能进行半连续或连续培养并具有较高的光能利用率。

该发明有如下优点:①筛选了适合作为填充的大型藻类(龙须菜、孔石莼、裙带菜),并设计制造了适合于养殖污水净化和大型藻高密度培养的光生物反应器。②管路上安装有制冷泵、水泵,制冷泵用于制冷海水,调节水温。可以在总出水管处取样分析水质,不达标污水随即流入进水管。动力水泵把水从底部提升到顶部,重复循环。③设有空气泵,可以给海水充气。

(本刊编辑部供稿)