

高扬程灌区

水盐运移监测与模拟

徐存东 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

高扬程灌区

水盐运移监测与模拟

徐存东 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书共7章,第1章综述了灌区水盐运移对区域水土环境影响的研究意义及国内外研究现状,第2章介绍了研究区——景电灌区内的地形、地貌、气象条件以及灌区水资源、土地资源的开发利用现状,第3章介绍了土壤水分及溶质运移的基本原理和数学模型,第4章开展了灌区土壤微观水盐运移的动态模拟及对灌区地下水盐变化的动态监测,第5章介绍了灌区的水盐均衡计算方法、水土化学分布与演化特征以及盐渍土的水盐调控措施,第6章论述了影响灌区水土环境变迁的权重分析及其变迁过程的评估,第7章介绍了区域地下水动态以及区域水盐动态的预报方法和模型。

本书可供水利、土壤、农业、地理、环境等学科的科研、教学和相关工程技术人员学习和阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

高扬程灌区水盐运移监测与模拟 / 徐存东著. — 北京 : 中国水利水电出版社, 2015. 10
ISBN 978-7-5170-3758-3

I. ①高… II. ①徐… III. ①灌区—土壤盐渍度—关系—土壤水—研究 IV. ①S156.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第250508号

书 名	高扬程灌区水盐运移监测与模拟
作 者	徐存东 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	170mm×240mm 16开本 12印张 228千字
版 次	2015年10月第1版 2015年10月第1次印刷
定 价	48.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前言

我国西北地区幅员辽阔，光热条件充足，土地资源开发潜力巨大，但是受水资源匮乏和干旱少雨气候的制约，大面积适宜耕种的土地长期荒芜，造成土地资源的闲置。得益于电力提水设备和引水灌溉技术的发展，我国西北地区建成了许多高扬程灌区，通过开垦天然荒漠形成了大片人工绿洲，这些灌区的出现和发展不仅缓解了区域生态环境恶化的趋势，而且促进了当地绿洲农业和绿洲经济的快速发展。如今，高扬程提水灌溉工程已成为解决我国西北地区农业干旱缺水问题、提高土地资源利用率的主要途径之一，并不断发挥着巨大的经济效益、生态效益和社会效益，已成为我国西北干旱区人民的翻身致富工程。

但在高扬程灌区创造了巨大的经济效益、生态效益和社会效益的同时，由于灌区不完善的灌排系统，不合理的灌溉制度致使局部出现了一些负面水土环境问题，如土壤次生盐渍化、土地沙漠化、天然植被衰败、地下水质恶化、地下水位持续抬升等问题。这种由人工灌溉造成的局域水土环境的退化和变迁，严重影响着农作物的健康生长，对灌区农业生产安全构成了严重的威胁，在一定程度上制约着灌区经济、生态和社会的持续、稳定、健康发展。

针对由人工灌溉引起的区域水盐运移所造成的水土资源环境退化的问题，国内外各界围绕着水土资源的高效利用和综合治理开展了大量的有益研究。本书是在系统总结这方面研究成果的基础上，进一步开展灌区宏观与微观相结合的水盐运移监测分析与模拟工作，全面系统地评估该区域水土环境的变迁与区域水盐运移的响应关系，探索区域内水土环境变迁过程的驱动机理，揭示区域内水盐运移的态势和规律。

全书主要围绕高扬程灌区水土环境变迁监测和水盐运移动态模

拟两条主线开展。具体内容包括：①通过多点定位监测和数值模拟，揭示高扬程灌区微观土壤水盐运移的特征，探寻区域水盐均衡机理、水土化学分布态势以及水盐调控对策；②通过大尺度的遥感监测和长序列的定点监测，评估灌区水土环境演变过程，验证区域环境变迁对水盐运移的响应程度，探索高扬程灌区土壤微观水盐运移对区域宏观水土环境变迁的驱动机理，达到评估和预测区域水土环境变迁态势的目的。

本书由华北水利水电大学徐存东主笔，撰写过程中景泰川电力提灌管理局何玉琛、张茂林，甘肃省治沙研究所魏怀东、陈芳、利亚，华北水利水电大学孙艳伟、张先起、韩立炜、张宏洋、王燕、聂俊坤、刘辉、王荣荣、丁廉营、温钦钰、王国霞等均对本书的撰写提供了重要的参考资料，并提出了中肯的修改意见和建议，在此一并表示感谢。本书的完成和出版得到了“国家自然科学基金(51279064、51579102、31360204)”、“2014年度河南省教育厅科技创新人才支持计划(14HASTIT047)”、“2014年度河南省高校科技创新团队支持计划(14IRTSTHN028)”及“水资源高效利用与保障工程协同创新中心(2013CICWP-HN)”的资助，在此表示感谢。

本书在编写过程中参考和引用了大量国内外学者的有关书籍、文献资料、教材的论述，吸收了同行们的辛勤劳动成果，同时也得到了诸多专家、教授的指导，他们对本书的编写提出了许多宝贵的意见和建议，在此一并表示衷心的感谢。由于灌区区域水盐运移及水土资源变迁的研究涉及气候学、水文学、土壤学、地理学等多个学科知识，研究难度很大，特别是编者水平有限，书中的缺点和疏误在所难免，恳请读者批评指正，提出改进意见。

作者

2015年8月

目 录

前言

1 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 国内外研究现状	3
1.3 研究技术路线	13
2 研究区概况	15
2.1 地理位置	15
2.2 地貌特征	15
2.3 气象特征	16
2.4 灌区水资源现状	18
2.5 灌区土地资源现状	21
3 土壤水盐运移基本理论	24
3.1 土壤水分运移数学模型	24
3.2 土壤溶质运移数学模型	31
4 干旱扬水灌区水盐运移特征	44
4.1 灌区水资源系统	44
4.2 灌区田间土壤水盐运移模拟	48
4.3 区域水盐运移动态监测	76
5 灌区水盐均衡与调控	84
5.1 灌区水盐供源和循环	84
5.2 水盐均衡计算	86
5.3 水盐排引比	113
5.4 灌区土壤化学时空分布和演化态势	114
5.5 水土化学分布和演化互动效应	116
5.6 盐渍土的水盐调控研究	121
5.7 盐渍土水盐调控研究展望	125

6	灌区水土环境变迁过程评估	129
6.1	灌区水土环境变迁的影响因素权重分析	130
6.2	灌区地表水与水资源分布的变迁	136
6.3	灌区气候环境的变迁	137
6.4	土地利用与覆被的分布变迁	140
6.5	灌区区域景观格局的变迁	145
6.6	灌区的水盐运移对土地盐碱化的影响	147
7	区域水盐运移态势预测	151
7.1	水盐运移态势预测的基本原则	151
7.2	水盐运移态势预测要点	152
7.3	土壤水盐动态预测方法	154
7.4	区域水盐运动的系统分析和预测体系	155
7.5	区域地下水位动态预测	161
7.6	区域土壤盐分动态预测	174
	参考文献	179

1 绪论

1.1 研究背景及意义

土地是人类生活和生产活动赖以维系的宝贵资源,然而在特殊的自然地理、水文地质及气候条件下,土地资源发生了严重的退化,盐渍化土壤广泛分布,并已造成了世界性的生态环境问题。据统计,全球共有 9.5 亿 hm^2 盐渍土,占全球陆地面积的约 10%,广泛分布于 100 多个国家和地区。我国盐渍化土地面积达 3500 万 hm^2 ,其中有 1000 多万 hm^2 可耕地正在遭受盐渍化的危害,约占全国可耕地面积的 1/4,而我国西北地区就占了其中的 60% 左右。面临日益减少和退化的土地资源,将盐渍化土壤作为一种重要的土地资源,探究盐渍化土壤水盐运移的机理、寻求合理改良盐渍化土壤的途径、提高现有土地资源的生产能力对实现土地资源的可持续开发利用具有重要的经济和社会价值。

我国西北干旱区幅员辽阔,土地资源丰富、光热条件充足,但水资源严重短缺,生态环境先天性脆弱,水资源是这些区域经济、社会和生态环境发展演化的主要制约因素。针对该地区土壤与水资源分配不协调的现状,建设大规模的扬水灌溉工程是解决这些地区水资源短缺、大片适宜耕种的土地长期荒芜、耕地土壤盐渍化等问题的主要途径。长期以来,人们所关注的重点是通过发展大面积的人工灌溉来开发干旱区长期荒芜的土地资源,以适应人口快速增长的需求。特别是随着电力提水设备和引水灌溉技术的发展,在我国的西北地区建成了许多高扬程灌区,这些灌区的出现为当地的经济建设和社会发展产生了重大效益。

甘肃省景泰川电力提灌灌区(以下简称“景电灌区”)是地处我国西北干旱荒漠区的一个生态系统完全开放而水土资源环境相对封闭的大型扬水灌区,地理区域为东经 $103^{\circ}20' \sim 104^{\circ}04'$ 、北纬 $37^{\circ}26' \sim 38^{\circ}41'$ 之间,北倚腾格里沙漠,南靠祁连山东端,东临黄河,是连接甘肃、宁夏、内蒙古的 3 省(自治区)交界地带。由于其特殊的地理位置和特定的自然环境,该区域的水土环境问题直接关系到如何阻止沙漠南移和防止周边土地的深度荒漠化等区域环境安全问题。灌区建成于 20 世纪 70 年代初,经过 40 多年长期的人工提水灌溉,

灌区的地下水盐运移态势、土地利用类型、水土资源空间分布等环境因子的响应已发生显著变化。

然而,针对景电灌区的人工提水灌溉,从生态景观的角度来看,是在原有的天然荒漠区上建成了大面积的人工绿洲,实际是为干旱区注入了最敏感的影响因子——水,从而根本上改变了景电灌区区域环境的原始发展规律,大量的水资源调入和人工灌溉引起的土壤水盐运移对灌区的水土环境演变产生了长期性的影响,并导致一些局部负面水土环境问题的产生,如土壤次生盐碱化、土地沙漠化、地下水水质恶化、地下水位持续下降或上升等环境问题,特别是灌区内集中引水灌溉造成的由水盐运移、重组和逐步累积所引起的区域水土环境变迁问题十分突出。这些问题产生的机理往往在短期之内无法明确掌握,要想探究这些问题的发展演变规律,只有通过长期的监测研究,才能得到逐步认识。同时,景电灌区又具有其特殊的气候条件和自然环境,不同水文地质单元在不同的灌溉条件下水盐运移的动态有所不同,由此引起的水土环境变迁和演化的表征也不尽相同,很难用统一的模型和指标体系对其进行评估。因此,探究景电灌区土壤水盐运移引起的区域水土环境变迁规律是灌区开展水土资源保护与可持续开发利用的基础。

土壤水盐运移是一种复杂的多相运动体系,其中土壤水分的运动主要以降水、蒸发、灌溉、作物腾发、深层渗漏及毛管水的形式循环,对于种植作物的情况,还需考虑作物根系吸水的影响。土壤盐分主要是随着水分的运动及其自身浓度梯度的作用迁移运动,并且在迁移过程中,部分盐分可以被土壤吸附、植物吸收或产生离析沉淀、化合分解、离子交换等化学变化,因而土壤水盐运移处在一个十分复杂的物理、化学和生物变化系统中。盐随水来,水是盐的载体,在区域水的运动循环中时刻伴随着盐的淋洗、积累,水盐运移与干旱区水土资源开发有着非常密切的关系。探究水盐运移的规律可以指导土壤改良,降低土壤开发成本;可以摸清水盐运动现状及其变化规律,将其和地下水系统资料的研究相结合,可进一步刻画地下水水位水质动态,降低和避免土壤次生盐碱化,降低环境污染程度,保护河流、水库和湿地,为区域生态环境的平衡和水土资源变迁过程的评估提供科学依据。

近年来,国内外各界对于干旱灌区的水盐运移、土地盐碱化、地下水水质恶化等水土环境问题日益重视,并围绕着干旱灌区水土资源的高效利用和综合效益的提高开展了大量的研究工作。随着干旱灌区水盐运移所引起的各类环境问题的逐步显现,人类已经不再满足于单一的、惟功利主义的传统水土资源开发方式,而是从可持续发展的角度,重新思考和审视在干旱区大面积的发展人工灌溉给区域水土环境带来的诸多问题。高效利用有限水资源,强调其对生态环境的影响,成为近年来学者和工程规划者们首要考虑的问题。

目前,在干旱区规划和发展扬水灌溉工程的重点已从如何扩大灌溉面积、提高灌溉效益、合理高效利用有限的水资源转向了如何调整灌区的用水结构,正确评估人工灌溉对区域水土环境的影响,探讨通过改进区域水资源调配来减小由此引发的负面效应,并通过续建配套工程来保护和恢复区域水土环境向良性的可持续发展之路行进的可行性,通过改进灌区用水结构来避免和挽回由此引发的对区域水土环境的潜在危害,变工程水利为生态水利。同时也有人提出在干旱扬水灌区需要重视和高效利用区域灌溉回归水资源,以改善和调整由此引发的对区域水土环境恶性变迁的潜在影响。然而,受中长期的监测资料短缺的影响,迄今为止人们对由人工灌溉引起的区域水盐运移与水土资源变迁过程的耦合关系研究还不够充分,因此,进一步探求更为科学的评估体系和方法来评估这种影响的响应程度成为了新的科学命题。

如今,随着遥感、地理信息系统技术、水生态与水环境学及土壤水盐运移模拟技术的日趋成熟,本书旨在通过宏观与微观相结合的监测分析,全面系统地评估以明晰景电灌区水土环境的变迁与区域水盐运移的耦合关系,探索区域内水土环境变迁过程的驱动机理,揭示区域内水盐运移的态势和规律,对预防和治理水盐运移造成的水土资源退化问题,推动干旱区人工新绿洲的可持续发展,维护我国西北地区的环境安全具有重要意义,同时也对其他国家的干旱扬水灌区的水土资源变迁过程的评估具有重要示范作用。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 土壤水盐运移研究现状

1.2.1.1 土壤水盐运移理论研究现状

土壤水分运移理论起源于1856年的法国,水力学家达西(Darcy)通过饱和和渗流实验得出了渗流速度与水力梯度之间的关系,阐明了饱和土壤中水分的运移机理。1907年Buckingham将能量引入到土壤水分运移的研究,至1931年Richards将饱和条件下的达西定律引入到多孔介质非饱和流中,最终构建了多孔介质中流体运移的基本方程。在该方程的基础上结合质量守恒定理推导出了非饱和土壤水分运动的连续性方程。土壤水盐运移是土壤水分运移与盐分溶液运移共同作用的结果,因此,土壤盐分运移的基本方程式建立在土壤水分运动方程基础之上的。在相当长的时间内,人们对土壤溶质的运移研究多集中在溶质的物理和化学量的变化上,很少研究它在土壤中的移动过程和规律。1952年,Lapidus和Amundson提出了一个类似于对流-弥散方程(CDE)的模拟模型,揭开了溶质运移研究的序幕。1954年,Scheidegger将Lapidus的方程扩展到三维的情况,并在均质土壤、稳态流条件下,推导出了反映溶质运

移的概率密度函数。1956年, Rifi 在 Scheidegger 研究基础上, 又考虑了溶质运移时的分子扩散作用, 并引入了弥散度 ($\alpha = D/V$) 的概念, 来表征土壤特性对溶质运移的影响。1960年, Nielson 和 Biggar 分别从实验、理论、数值模型及运移过程几个方面说明对流、扩散和化学反应的耦合是同时存在于土壤溶质运移过程中的, 并以试验结果对 Lapidus、Scheidegger 及 Nielson 的模型进行了比较分析, 进而确立了土壤溶质运移的对流-弥散方程 (Convection Dispersion Equation, CDE), 首次系统地论述了 CDE 方程的科学性和合理性并确立了 CDE 方程作为土壤溶质运移研究的经典和基本方程的主导地位。随后, Warrick、Lawson 和 Elrick 等在应用 Nielson 提出的 CDE 方程研究生产实际中的溶质运移问题时, 出现了理论结果与实测值不吻合的现象。1976年, Biggar 和 Nielson 针对这一问题作了进一步的分析论证, 认为理论值与野外实测值之间的差异是由于土壤的空间变异性所致。Sauty、Sudicky、Butters 和 Willian A. Jury 在试验和分析中也得出相同的结论。之后, 野外溶质运移的模拟研究理论便被分为两大类: 一类是确定性理论, 即对流弥散方程 (CDE), 该理论可较好地揭示溶质在均质多孔介质中的运移机理, 即时间、空间对溶质运移的影响。但是, 由于该理论中参数的空间变异性较大等问题, 确定性理论尚不能有效地应用于野外大田的研究中。第二类理论是由美国加州大学 Willian A. Jury 教授 1982 年提出的随机传输函数理论, 也称为黑箱理论。Jury 认为土壤中的孔隙是非常复杂的, 溶质在土壤中运移的细节过程犹如黑箱是无法准确描述的, 溶质在不同土层深度中迁移的通量, 可以通过已知浓度的累积入渗通量来估计。在溶质运移的野外大田试验观测资料还不丰富的情况下, 黑箱理论是目前模拟大田溶质运移规律的最有效理论之一。与此同时, 美国国家盐土试验室的 Van. Genuchten 教授, 在对流-弥散模型的分析研究基础上, 考虑土壤中不动水体影响, 提出了动水-不动水体理论。在该理论中, Van. Genuchten 把溶质视为在动水和不动水两种孔隙中, 而且还会在两个区域间相互运移。目前, CDE 方程、黑箱理论和动水-不动水体理论构成了当今世界上溶质运移研究的三大学派。

国内对针对土壤水盐运移理论的研究起步于 20 世纪 50 年代初期, 起初主要针对地下水矿化度与地表盐渍化的相互关系进行了研究。至 20 世纪 80 年代, 由于地中渗透仪的应用, 可对土壤水在蒸发、入渗的运移规律开展研究, 1983 年石元春利用该方法对黄淮海平原的土壤水分动态特点进行了详细的研究, 并提出来黄淮海平原的水均衡方程和模型。随着国外研究成果的引入, 20 世纪 80 年代至今, 土壤水盐运移的研究就围绕着土壤水盐运移能量的平衡方程和数学模型而展开, 并取得了长足的发展。1982 年雷志栋和杨诗秀采用有限元对一维非饱和土壤水流进行了数值计算, 同年欧安和张蔚

臻提出以势能理论研究土壤水运动的模拟过程。同时,国内学者应用溶质运移的对流-弥散方程,通过室内控制试验,测定并修正了对流-弥散方程中的水动力弥散系数和孔隙水流速度,然后用有限差分法求解方程,分析了各主要参数对溶质运移的影响。武汉大学的叶自桐和黄康乐(1987)分别对饱和和非饱和土壤的溶质运移进行了试验研究及数值模拟。1988年杨金忠就多孔介质中溶质运移的机理及数学模型的构建开展了大量研究。叶自桐(1990)对传输函数模型(TFM)进行了部分简化,提出了适宜于入渗条件下土壤盐分对流运移的传输函数修正模型。清华大学的杨诗秀(1992)在室内土柱上研究了杀虫剂在土壤中运移及其影响因素。中国农业大学的黄元仿、李韵珠、陆锦文(1993)研究了田间条件下土壤氮素运移的模拟模型,用田间观测值进行了氮素的平衡计算。冯绍元(1995)研究了排水条件下饱和和土壤中氮肥转化与运移问题。1998年张展羽将溶质运移理论和SPAC系统理论相结合,构建了考虑农作物动态生长的农田水盐运移模型。2001年郭维东根据非饱和土壤水分运移理论,建立了坐水播种时耕作层土壤水分入渗的二维数值模型,结果表明入渗过程受到土壤初始含水率、回土量、种沟宽度的影响。2002年汪丙国建立了田间沟垄地形条件下土壤剖面的二维饱和和非饱和水分及溶质运移数学模型,并对夏玉米生长条件下土壤剖面的水盐运移动态过程进行了模拟,揭示了土壤剖面水盐的相互关系和土壤水分运移特征。2004年杨劲松利用大型土柱模拟研究了田间气候下,地下水位和作物生长变化对土壤水盐运移的影响并建立了一维土壤水盐运移模型。2007年串志强同样利用非饱和土壤水分运移理论,建立了膜下滴灌条件下土壤水分运移的二维数学模型,模拟结果表明,数值解可以对该条件下土壤水分运动特征进行准确模拟反映。2010年李宏伟建立了降雨入渗条件下土质边坡的二维非饱和土壤水分渗流模型,模拟结果表明,土体表层的含水率受降雨入渗的影响,且雨强越大土壤含水率越大,当渗透系数与雨强相同时,土壤含水率变化减弱,该模拟结果对土质边坡抗滑坡的控制预防具有重要实际意义。2011年郑平建立了冻土区埋地管道周围土壤的水分运移模型,认为在输油温度不稳定的情况下,土壤水分的运动对土壤本身的传导性具有一定的影响。2013年余根坚、黄介生等开展了不同灌水模式下土壤水盐运移规律的研究,提出采用合理灌水方式和灌水定额控制土壤盐分累积过程的水盐调控思路。

农业水土工程领域的科研工作者对土壤水盐运移的研究从早期的实验室研究已逐步地过渡到不同区域和领域的野外研究中,同时通过先进的实验设备实时监测土壤运移的相关参数,通过不断改进数学模型为农业工程及盐渍化的防止提供了可靠的理论基础。

1.2.1.2 土壤水盐运移模型研究现状

土壤水盐运移模型基本上可分为宏观水盐平衡模型、物理模型、确定性模型和随机理论基础模型等。其中,确定性模型主要有对流-弥散传输模型、考虑源汇项模型、传递函数模型等,它以质量守恒和动量守恒定律为基础,由基本的对流-弥散方程及其辅助性方程组成,在变量、边界及初始条件都是确定的条件下,每次都能得到一组确定的解。

对流-弥散传输模型考虑溶质在土壤中的对流弥散作用,并且伴随着溶质被吸附与分解的过程。国外的 R. Nielsen、Van. Genuchten (1986) 等,国内的同延安、王全九等 (1993) 在这个基础上发展了两区模型。同时,提出了基于像活塞在气缸中运动假定的土壤孔隙一种溶液被另一种溶液挤走的活塞流渗流模型。由于土壤参数存在空间时间变异性,国内外学者又进一步发展了随机对流弥散传输与随机函数模型。这些随机模型考虑了土壤的空间变异性以及水分、盐分运动的随机性。传递函数模型是一个把溶质运移时间作为随机变量的随机传输模型,它将土壤孔隙中溶质的复杂运动作为随机过程来处理。对于一个已经确定的溶质运移过程,总可以用随机变量定义的联合概率密度函数来描述,这种条件密度函数体现了土体内复杂运移机制及其溶质运移过程的作用。便于考虑土壤各向异性及空间变异性问题是该模型的最大特点,对田间溶质迁移研究比较方便。

目前研究最多的是基于土壤水分运动理论和多孔介质中的溶质运移理论,建立的以对流、弥散为主,综合考虑包括解吸、吸附、源汇项及动水-不动水等多种因素影响的溶质运移模型。但是,由于土壤参数时空变异性及计算的复杂性,目前所做的一些模拟大多采用的是简化的模型。

现在,国内外普遍采用的数值模型是由美国国家盐改中心 (U. S. Salinity Laboratory) 研发的 SWMS - 1D、SWMS - 2D、SWMS - 3D、HYDRUS - 1D、HYDRUS - 2D、MODPATH、MODFLOW 等一系列模型,这些模型可成功地模拟饱和-非饱和多孔介质中水分、能量及溶质运移,其应用领域涉及地下水动态、节水灌溉、盐碱地改良、水环境模拟、作物生长、农药污染、环境污染物扩散等。除了要有准确、充足的数据外,对溶质运移规律的模拟还取决于计算方法的选择。正确的数值计算方法不仅影响计算精度和效率,而且对方程的实际应用也会起到至关重要的作用。鉴于溶质问题的复杂性,只有在理想化的条件下才能求出解析解,因此数值法是解决溶质迁移模型的常用方法。

随机性物理模型应用较为广泛的代表为 HYDRUS 模型。HYDRUS 模型自 2000 年引入我国以来,得到了广泛的应用。2003 年曹巧红将 HYDRUS - 1D 水氮联合模型用于模拟冬小麦农田水分氮素运移转化过程。2004 年李韵珠运用 HYDRUS 模型对在浅层地下水和蒸发条件下含有黏土层的土壤的水和

Cl^- 的运移状况进行数值模拟的研究。2005 年池宝亮根据非饱和土壤水动力学理论,应用 HYDRUS 模型建立了地下点源滴管的土壤水分轴对称二维模型,对比分析了几种土壤条件下埋点源滴管时土壤水分的运移状况,模拟值与实测值具有良好的同步性,说明该模型可用于模拟土壤内的水分运移状况。2010 年陈丽娟利用 HYDRUS 模型对明沟排水洗盐过程中一、二维土壤水盐运移动态进行了研究,确立了区域不同含盐量情况下明沟排水洗盐在沟距一半处的洗盐制度。2011 年孙建书等利用 HYDRUS-1D 模型对宁夏银北灌区在不同灌排模式下土壤水盐运移进行数值模拟,研究结果可为节水、排水工程的规划与盐渍土的防治提供决策依据。2013 年高越采用 HYDRUS 模型模拟土壤水分、盐分时发现存在模拟值与实测值不吻合的情况,并指出主要原因为模型的地区适应性不强,在输入数据后对不同条件下的土壤水盐运移模拟结果出现误差现象,其次该模型假设土壤水分运移参数在模拟过程中保持一致,这与土壤水分运移参数是随着土壤水的运移而变化的实际情况不相符。

近年来,国内外学者针对土壤水盐运移模型微观机理的研究主要体现在将现有模型进一步合理化,应用模拟理论进行数学处理,对复杂体系中的水盐运移进行模拟和预测方面。土壤水盐运移的田间研究主要侧重于应用随机理论或随机分析。由于土壤的复杂性,三维各向异性土体成为研究的重点,同时在一些研究中还考虑了非稳定流情况。1986 年 Nielson 提出了考虑源汇项的一维 CDE 模型,通过添加源汇项,改进的 CDE 模型具备了实际生产的可信度。1996 年 Toride 等建立了针对稳定下渗和初级运动线性吸附的 CDE 模型。1997 年杨金忠等用随机分析法对三维各向异性非饱和土体中吸附性溶质的运动规律进行研究,发现横向弥散度不受含水率变化影响,但纵向弥散度随含水率的减少而增加,在含水率较小的条件下,含水率对纵向弥散度的影响更为显著。另外,从宏观上来看,纵向弥散度随着滞留因子的增加而增加。1998 年 Flury 将溶质的降解和吸附过程与土壤深度的关系用函数进行了概化,并用实验数据进行了验证。同年,张友宽在随机理论基础上用导水率呈对数函数形式的高斯协方差函数对三维各向异性土体中的溶质运移作了分析,并将此结果与以前导水率呈指数函数形式下的结果进行了比较。1999 年张展羽等通过引入影响因素 α ,将土壤对盐分的吸附作用源汇项简化为对弥散项的弱化。2001 年乔云峰等在含水率不变的前提下,将土壤中存在的可动水和不可动水加入到对流弥散模型中,改进了 CDE 模型。2003 年余艳玲等以土壤水分运移方程为基础,研究了降雨条件下旱地土壤水分的运移规律,模拟值与实测值吻合较好。2005 年彭建平采用 CDE 模型模拟了三峡工程对长江河口地区土壤水盐动态的影响。2009 年梁冰根据饱和-非饱和土壤水分确定性物理模型,对路堑边坡进行降雨入渗和再分布下坡面土壤水分分布的动态规律研究,数值模拟结果可为边坡排

水加固设计提供定量依据。2012 年虎胆·吐马尔白利用土壤水盐运移模型,对膜下滴灌棉花全生育期内土壤水盐运移规律进行了数值模拟,提出只有增加田间实测资料,方可模拟表、中、深层土壤含水率和含盐量。这些与实际田间土壤状况较为接近的研究和模拟表明,模型已经从室内试验模拟转向实际生产应用。

1.2.2 灌区水盐调控的研究现状

1.2.2.1 灌区土壤耗水量研究现状

据统计,全国 402 处大型灌区占全国 11% 的耕地面积,粮食产量占了全国总产量 22%,大型灌区农业生产总值占全国农业总产值的 1/3。我国西部干旱区大型灌区除传统意义上的灌溉、排水功能外,还要保障当地农村、小城镇居民的生活用水及工矿企业的供水。因此,西部干旱大型灌区既是农民致富的根基,农村、农业发展的基础,同时也是国民经济发展和生态环境安全的主要支柱。灌区的耗水过程既是自然界的一种水文现象,同时又是人类对水量循环的一种干预。随着社会经济的发展,灌区的产业结构、用水结构、灌溉面积、种植结构、灌溉用水水平在不断地发生着变化,这些变化相应地影响着灌区耗水量及耗水系数的变化。

对于灌区耗水量的概念,目前,国外分为有益耗水量和无益耗水量。有益耗水量指水分的消耗能产生一定效益,如农业用水的消耗能产生粮食,环境用水能改善生态环境等。无益耗水量指水分的消耗不能产生效益或产生负效益,如涝渍地上的水分蒸发、深层渗漏的水进入咸水含水层等。在国内分为用水耗水量和非用水耗水量。用水耗水量是指毛用水量在输水、用水过程中,通过蒸发、土壤吸收、产品带走、居民和牲畜引用等多种途径消耗掉而不能回归到地表水体或地下含水层的水量。非用水耗水量是指河道、湖泊、水库等地表水体的蒸发量和地下水的潜水蒸发量。张永勤在南京地区农业耗水量估算时,认为农业用水仅指农业生产用水,不包括农村生活及牲畜用水,故农业耗水量就是农田蒸散发量。王少丽采用相关分析法对河北雄县水量平衡进行分析计算,将耕地、非耕地的腾发量,农村人畜用水量以及农村工副业用水量纳入灌区耗水量计算的范畴。秦大勇在宁夏引黄灌区耗水量及水均衡模拟计算中,认为耗水量包括作物耗水量、潜水蒸发量和水面蒸发量。随着水资源供需矛盾的加剧,进一步完善灌区耗水量的计算方法,加强对灌区耗水量计算数据的搜集,准确评估灌区耗水量及耗水系数将为灌区水资源的合理配置及高效利用提供重要决策依据。

1.2.2.2 灌区土壤水盐调控模式研究现状

人类对灌区地表水的调控利用及地表水和地下水的联合调控的目的是高效

利用有限的水土资源以获得最大限度的产出。早在 20 世纪初期, 美国和加拿大就率先开始调控地表水和地下水之间的转化, 预控性地开发利用地下水灌溉, 以求减少地表水资源的浪费。我国从 20 世纪 50 年代开始, 先后对一些盐渍化问题严重的灌区开展了土壤改良试验研究并取得了很多成果, 这些成果在指导灌区水盐调控和土壤改良方面发挥了积极作用。

传统土壤水盐调控模式主要是通过水利措施对盐渍化土地进行改良, 但通过该措施会消耗大量的淡水资源。20 世纪 80 年代初期, 方生、陈秀玲等在对黄淮海平原近滨海缺水盐渍区盐碱低产田综合治理与土壤盐渍化监测预报的研究中提出地下水动态调控的盐碱地改良思路, 这种思路的主导思想是充分利用浅层淡水和微咸水, 利用调控土壤根系层盐渍度使其小于作物耐盐度临界值, 调控使地下水埋深不超过动态临界深度, 通过促使淋洗脱盐的过程强于蒸发积盐的过程, 以实现旱涝碱咸的综合治理。进入 20 世纪 90 年代以来, 根据旱区土壤盐分分布特征, 土壤水盐调控模式从单一型向复合型转变。1995 年徐东瑞通过定位监测和土壤盐渍化遥感资料, 确定了人工调控与土壤盐渍化发育的数学关系, 依据灰色理论建立了河北省沧州市盐渍化土壤面积预测模型。同年, 荆恩春等在对宁夏贺兰县江南村盐改试验研究中, 提出盐碱地改良分别达到不同目标的三组适宜潜水埋深的动态曲线。进入 21 世纪后, 我国的科研工作者们分别在不同区域进行了水盐调控方面的大量研究, 其中以新疆的内陆河流域和宁夏沿黄引水灌区的水盐调控研究居多, 这些研究成果在对指导区域水盐调控方面起到了积极作用。2005 年韩双平研究了宁夏银北平原江南村盐碱地改良试验区的土壤水分、盐分运移机理。2010 年闫侃分析了宁夏青铜峡灌区的地下水盐动态并进行了预测。2012 年王婧针对不同程度盐渍化土壤提出了“上膜下秸”的技术模式、优化施肥调盐技术模式、高效套作技术模式等新的复合型调控模式。同年, 王水献通过利用田间尺度上的二维土壤水盐运移数值模型, 确定了以小麦作为研究对象的盐渍土区合理的地下水水盐调控深度, 为干旱灌区水盐调控提供了理论基础。

作为水资源极度短缺的西北干旱地区, 地下水动态调控是重要的防治土壤次生盐渍化的技术手段。在实际调控过程中, 由于不同区域的作物、土壤、气候等条件各不相同, 所以, 地下水动态调控的思路和模式也不尽相同。我国西北地区的高扬程灌区因降水少, 蒸发量大, 冻结期长, 土壤母质含盐量高, 所以其地下水动态调控思路异于其他区域, 在实际调控过程中采取哪种模式可达到最好效果尚需进一步研究与探讨。本书从灌区水盐供源和循环、水盐均衡计算、水盐排引比、土壤化学的时空分布和演化、水土化学分布和演化互动效应等几个方面阐述灌区水盐均衡关系与调控措施。

1.2.3 区域水土环境评价研究现状

充分认识灌区区域水土环境状况,正确评价其现状水土环境质量,是灌区区域环境预测和预警研究的基础,也是规划和制定国民经济发展计划的重要依据。

区域水土环境是一个多因子的复杂的综合系统,分析各因子变化及其相互作用,进而评价水土环境质量涉及问题较多。1978年加拿大学者 W. Souneim 提出环境评价的矩阵方法,通过对各环境因子进行加权,推算出各种环境影响的叠加计算,从而拉开了多指标评价的序幕。1997年 S. Amir 等提出决策支持框架和工具以减小区域开发引起水土资源的流失,并评价对水土环境的潜在影响。1999年 Ertsen 等针对荷兰水土环境不断变坏的趋势,提出生态水文影响评价模型,以对区域水土环境进行更好的管理。2000年 CH. Chen 等研究了流域水资源开发的水土环境承载力,并提出承载力计算模型。同年, Heggem 与 Kepner 等利用景观分析方法评价人类土地利用对生态的影响,并将其应用于提高流域环境质量。2002年 Rachel 等在定量考虑生态特征的前提下,针对具体流域运用生态风险评价法进行评价并取得较好的效果。

我国对生态环境质量的综合评价指标体系始于 20 世纪 80 年代,重点是农业生态系统,涉及区域环境规划、山区生态环境、土地可持续利用和省级生态综合评价等。1991年陈国阶分析了三峡工程对生态环境的影响,提出了相应的评价指标体系。2000年李堂军等对矿区和矿产资源开发环境影响因素进行了系统分析,在工程分析和环境影响因素识别基础上,构建了环境影响评价指标体系,并对评价方法进行了探讨。2001年徐福留对大型水利工程的环境影响进行了分析,提出了评价指标体系,并用模糊评判方法进行了综合评价。2004年严宝文等探讨了基于信息熵理论的区域农业水土资源环境系统状况评价体系。科研人员将新近发展的数学理论应用于指标体系,提出了许多实用数学模型和评价方法。特别是系统工程科学、模糊数学、灰色系统理论等一些现代统计学手段的出现,使其向精细化、定量化发展迈进了一大步。

卫星遥感和地理信息技术大范围应用于土地资源调查和监测始于 20 世纪 70 年。1991年美国国家地质测绘局建立了基于生物物候模型的土地覆被特征数据库。1992年欧共体开展了利用遥感技术监测欧共体国家耕地、农作物变化的计划。1980—1984年,我国首次利用遥感技术完成了全国土地利用调查。2007年我国启动了第二次全国土地调查,采用遥感技术大面积测绘土地、森林、城镇建设用地。近年来,随着航天遥感技术的发展和一系列大型遥感计划的实施,遥感在土地利用与土地覆被变迁研究中得到了广泛的应用。地理信息技术和遥感技术的有机结合能够实现包括空间数据和矢量数据在内的多源海量