

国家高技术研究发展计划项目课题研究成果
流域水循环模拟与调控国家重点实验室资助

畦田施肥灌溉地表水流 溶质运动理论与模拟

Theory and Simulation on Surface Water Flow and
Solute Transport in Basin Fertilization Irrigation

许迪 章少辉 白美健 李益农/著

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \nabla \cdot (K_w \cdot \nabla \zeta) - \nabla \cdot (K_w \cdot C) - i_c$$

$$\frac{\partial \mathbf{q}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\mathbf{u}} \cdot \mathbf{q}, \bar{\mathbf{v}} \cdot \mathbf{q}) = S_{\zeta}^M + S_f^M + S_{in}^M$$

$$\langle u \rangle = \frac{u_r}{\kappa} \cdot \ln \left(\frac{u_r z}{\nu} \right) + 0.52 \quad \langle v \rangle = \frac{v_r}{\kappa} \cdot \ln \left(\frac{v_r z}{\nu} \right) + 0.52$$

$$\nabla \cdot (\langle u \rangle, \langle v \rangle, \langle w \rangle) = 0$$

$$\frac{\partial \langle c \rangle}{\partial t} + \nabla \cdot (\langle u \rangle \cdot \langle c \rangle, \langle v \rangle \cdot \langle c \rangle, \langle w \rangle \cdot \langle c \rangle) = \nabla \cdot (\kappa_t \cdot \nabla \langle c \rangle)$$



科学出版社

国家高技术研究发展计划项目课题研究成果
流域水循环模拟与调控国家重点实验室资助

畦田施肥灌溉地表水流 溶质运动理论与模拟

许 迪 章少辉 白美健 李益农 著

科学出版社

内 容 简 介

本书以国家高技术研究发展计划(863 计划)项目课题和国家自然科学基金课题等取得的研究成果为依托,围绕畦田施肥灌溉地表水流溶质迁移运动过程,开展相关理论与模拟方法研究。其中第 2~第 4 章主要阐述畦田施肥灌溉地表水流溶质运动理论与模拟方法;第 5~第 8 章主要涉及畦田灌溉地表水流运动模拟;第 9~第 11 章主要开展畦田施肥灌溉地表水流溶质运动模拟;第 12~第 15 章主要进行畦田施肥灌溉性能评价与技术要素优化组合分析。

本书具备理论性、前沿性和适用性,可供从事农业水土工程、农田水利工程等学科的科研人员、教师、设计人员及管理者参考,也可作为相关专业研究生和本科生的学习参考书。

图书在版编目(CIP)数据

畦灌施肥灌溉地表水流溶质运动理论与模拟 / 许迪等著. —北京:科学出版社, 2017. 12

ISBN 978-7-03-055356-0

I. 畦… II. 许… III. 畦灌-施肥-研究 IV. ①S275.3 ②S147.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 281892 号

责任编辑:李 敏 杨逢渤 / 责任校对:彭 涛

责任印制:肖 兴 / 封面设计:章少辉 黄华斌

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 12 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2017 年 12 月第一次印刷 印张:29 1/4

字数:700 000

定价:298.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序 言

地面施肥灌溉因具备简便、经济、实用的特点，已在国外农业生产中得到应用。在地面施肥灌溉条件下，地表水肥料溶质沿畦（沟）长度分布的均匀性将直接影响下渗肥分在作物根系层内的分布状况，这不仅取决于灌水分布的均匀性，还与施肥分布的均匀性密切相关。粗放的地面施肥灌溉措施必然导致肥料的非均匀分布及深层渗漏流失，致使施肥灌溉性能下降并对农田水土环境带来潜在危害。

为了获取高水准的地面施肥灌溉性能与效果，不断改进和完善地面施肥灌溉设计方法及运行管理活动，亟待开展地面施肥灌溉地表水流溶质运动理论与模拟方法研究，丰富完善相关的理论与方法，创建开发相应的数学模型，建立改进相关的数值模拟解法，以便为优化地面施肥灌溉工程设计方案、评价地面施肥灌溉系统性能、鉴定地面施肥灌溉运行管理措施提供支撑条件，实现灌溉节水（肥）增效和农田减排降污的目标。

围绕畦田施肥灌溉地表水流溶质运动理论与模拟研究主题，本书作者依托国家863计划课题“激光控制平地与精细地面灌溉设备”（2006AA100210）、“精细地面灌溉技术与设备”（2011AA100505），以及国家自然科学基金项目“微地形和入渗空间变异对畦灌性能组合影响研究”（50909100）、“撒施化肥下畦灌地表-土壤水肥耦合模拟方法研究”（51209227）“土地精细平整下畦灌二维水流运动特性及畦田布局模式研究”（51279225），长期系统地开展田间科学试验观测、理论机理深化、模拟模型创建、数值求解方法构建、模拟分析评价等室内外深入研究。基于试验观测与理论分析相结合的思路，丰富了畦田施肥灌溉地表水流溶质运动理论与模拟方法，创建了基于全水动力学方程数学类型改型的地表非恒定流运动模拟技术与方法，构建了畦田撒（液）施肥料灌溉地表水流溶质运动全耦合模型，开展了畦田撒（液）施肥料灌溉性能模拟评价与技术要素优化组合分析，取得了如下四个方面的主要创新成果。

第一，基于基础物理学与几何学新视角，丰富了现有畦田施肥灌溉地表水流溶质运动理论与方法，改进和完善了地表水流溶质运动模拟模型及其数值模拟方法，为科学表征和数值求解畦田施肥灌溉地表水流溶质迁移运动提供了数理基础与模拟

方法。

1) 丰富了畦田施肥灌溉地表水流溶质运动理论与模拟方法。构建了不同坐标系下地表水流溶质运动各物理变量之间的变换关系式,有效降低了应用地表水流溶质运动张量解决实际问题的数学难度;简化完善了雷诺平均尺度下和地面水深尺度下地表水流溶质运动控制方程的推导过程,构建了两种尺度下地表水流流速之间的定量关系式;提出了基于剪切理论的地表水流溶质弥散系数表达式,拓展了守恒型对流-弥散方程的表述形式,为开展跨尺度下的地表水流溶质运动数值模拟提供了理论依据。

2) 完善了畦田施肥灌溉地表水流溶质运动模拟模型。对地表水流溶质运动控制及耦合方程表达式与其数值模拟方法的数理需求分析表明,采用守恒-非守恒型全水动力学方程和守恒型对流-弥散方程及具备自适应迎风特征离散格式的有限体积法,是准确表述畦田施肥灌溉地表水流溶质运动的最佳选择;基于畦面微地形空间分布状况影响的数理需求解析,揭示了基于守恒-非守恒型全水动力学方程可以有效规避维系物理变量之间数值平衡关系约束的内在机理。

3) 改进了畦田施肥灌溉地表水流溶质运动数值模拟方法。对地表水流溶质运动控制及耦合方程的系统性数学类型分类,为有效选择或合理构建适宜的数值模拟方法奠定了基础;基于构造的地表水流溶质运动物理波特征向量空间与实际物理空间的双重映射关系,形象地诠释了向量耗散有限体积法的数理机制;借助立体几何直观表达形式,改进了地表水流溶质运动干湿边界捕捉方法,克服了现有方法仅适用于地表水流溶质运动消退过程的明显缺陷。

第二,基于改变偏微分方程组数学类型的思路,创建了基于双曲-抛物型守恒-非守恒全水动力学方程的地面灌溉模型及其数值模拟方法,构建了各向异性畦面糙率模型,攻克了初始地表水深、干湿边界、糙率各向同性等前提假设条件不合理的技术难题,为模拟地面灌溉地表非恒定流运动提供了可靠的数值求解工具与手段。

1) 创建了双曲-抛物型守恒-非守恒全水动力学方程并构造了相应的初始条件和边界条件。通过设置并引入平衡函数,将双曲型守恒-非守恒全水动力学方程分解为描述地表水流运动扩散效应和对流效应的抛物型扩散方程及双曲型对流方程,创立了易于被数值模拟求解的双曲-抛物型守恒-非守恒全水动力学方程,完全规避了因初始地表水深假设引起的在无水区域求解抛物型扩散方程遇到的数学奇点问题,且仅在有水区域定义并运算双曲型对流方程,摒弃了干湿边界条件,避免了由此带来的计算误差。

2) 构建了各向异性畦面糙率模型。考虑畦面糙率各向异性显著特征,将抛物型

扩散方程中的标量型地表水流扩散系数转换为张量型向量，基于双曲型对流方程中的各向同性畦面糙率向量，推导获得各向异性畦面糙率向量表达式，由两者共同构成的各向异性畦面糙率模型真实反映和体现出畦底表土形态对水流运动阻力产生的影响作用。

3) 建立了标量耗散有限体积法及全隐时间离散数值解法。采用零耗散中心格式有限体积法空间离散抛物型扩散方程，基于迎风格式基本概念并类比于空气动力学中对马赫数在数值平均意义下的重新定义，建立起具有标量耗散特征的有限体积法并对双曲型对流方程进行空间离散，采用全隐时间离散格式达到统一数值模拟求解双曲-抛物型守恒-非守恒全水动力学方程中各分量项的目的，实现了真正意义上的无条件稳定性数值求解。

与现有双曲型守恒全水动力学方程地面灌溉模型的最佳模拟效果相比，对考虑各向异性畦面糙率模型的双曲-抛物型守恒-非守恒全水动力学方程地面灌溉模型而言，数值模拟求解难度明显下降，估值精度提高了 12 个百分点以上，水量平衡误差降低了 3 个量级，数值计算稳定性高出了 2 个量级，计算效率上升了近 10 倍，量级提升了地表非恒定流运动模拟性能。

第三，基于跨越典型特征尺度构思，创立了畦田撒施肥料灌溉地表水流溶质运动全耦合模型，突破了迄今为止无法模拟撒施肥料灌溉地表水流溶质运动的技术瓶颈，构建了畦田液施肥料灌溉地表水流溶质运动全耦合模型，为畦田施肥灌溉地表水流溶质运动数值模拟及工程优化设计与性能评价提供了可靠的支撑条件。

1) 创立了畦田撒施肥料灌溉地表水流溶质运动全耦合模型。在采用地面水深尺度下的双曲-抛物型守恒-非守恒全水动力学方程表述地表水流运动过程的基础上，基于雷诺平均尺度下垂向非均布流速分布律及守恒或非守恒型 Navier-Stokes 方程组的质量守恒方程，重构了三维非均匀分布地表水流速场，利用雷诺平均尺度下守恒型对流-扩散方程描述地表水流溶质运动过程，创立了跨越典型特征尺度下的畦田撒施肥料灌溉地表水流溶质运动全耦合模型，实现了地表水流的对流与扩散过程和溶质的对流与扩散过程间的非线性互动关联。

2) 构建了畦田液施肥料灌溉地表水流溶质运动全耦合模型。借助双曲-抛物型守恒-非守恒全水动力学方程描述畦田液施肥料灌溉地表水流溶质运动过程，利用守恒型对流-弥散方程表述地表水流溶质运动过程，构建了畦田液施肥料灌溉地表水流溶质运动全耦合方程及全耦合模式，实现了地表水流溶质弥散过程与地表水流溶质运动其他物理过程之间的全耦合同步求解。

畦田液施肥料灌溉地表水流溶质运动全耦合模型模拟的氮素浓度平均值相对误

差约为 5%，在数值计算稳定性和质量平衡误差等方面也具备优良性能；与现有地表水流溶质运动耦合模型的最佳模拟效果相比，畦田液施肥料灌溉地表水流溶质运动全耦合模型的氮素浓度模拟精度提高了 3 个百分点以上，质量平衡误差降低了 3 个量级，明显改善了模拟效果。

第四，基于肥料非均匀撒施系数定义，采用建立的畦田施肥灌溉地表水流溶质运动全耦合模型，系统开展了撒施和液施肥料灌溉性能模拟评价及技术要素优化组合分析，确定了施肥灌溉技术要素优化组合方案及其空间区域，为畦田施肥灌溉工程优化设计与运行管理提供了参数选择依据。

1) 畦田撒施肥料灌溉性能模拟评价与灌溉技术要素优化组合。揭示出施肥性能评价指标施氮分布均匀性 UCC_N 和施氮效率 E_{aN} 随肥料非均匀撒施系数的增大呈现出先升后降的变化趋势与特点，发现不同入流形式下最佳肥料非均匀撒施系数随畦田规格（条畦→窄畦→宽畦）扩大而递减增加，不同畦田规格下最佳肥料非均匀撒施系数却随入流形式（线形→扇形→角形）变化而递增上升，扩大畦田规格将增加各入流形式下的最佳肥料非均匀撒施系数。在 $UCC_N \geq 75\%$ 和 $E_{aN} \geq 75\%$ 约束下确定的施肥灌溉技术要素优化组合空间区域，可为华北平原冬小麦畦田撒施肥料灌溉工程优化设计与运行管理提供参数选择依据。

2) 畦田液施肥料灌溉性能模拟评价与灌溉技术要素优化组合。揭示出施肥性能评价指标施氮分布均匀性 UCC_N 和施氮效率 E_{aN} 随施肥时机的变化呈现出逐渐下降的变化趋势与特点，发现扇形和角形入流形式下最佳施肥时机随畦田规格（条畦→窄畦→宽畦）扩大由前半程液施灌溉转为全程液施灌溉，窄畦和宽畦下最佳施肥时机也随入流形式（线形→扇形→角形）变化由前半程液施灌溉转为全程液施灌溉，扩大畦田规格将改变扇形和角形入流形式下的最佳施肥时机选择。在 $UCC_N \geq 75\%$ 和 $E_{aN} \geq 75\%$ 约束下确定的施肥灌溉技术要素优化组合空间区域，可为华北平原冬小麦畦田液施肥料灌溉工程优化设计与运行管理提供参数选择依据。

全书由参与上述国家 863 计划项目课题和国家自然科学基金项目的科研人员合作撰写。第 1 章由许迪、章少辉、白美健、李益农撰写；第 2、第 5、第 11、第 15 章由许迪、章少辉、白美健、李益农撰写；第 3、第 4、第 6、第 10、第 14 章由章少辉、许迪、白美健、李益农撰写；第 7、第 12、第 13 章由白美健、许迪、李益农、章少辉撰写；第 8、第 9 章由李益农、白美健、许迪、章少辉撰写；由许迪完成全书、统稿。

除上述人员外，先后参与本项工作的其他人员还有：中国水利水电科学研究院李福祥、史源等，以及博（硕）士研究生于非、梁艳萍、李志新、董勤各、刘姗姗、

张凯等。此外，在研究过程中，还得到大连理工大学金生教授、清华大学余锡平教授的热情指教与帮助，以及河北省冶河灌区管理处、北京市大兴区水务局、新疆生产建设兵团等单位的大力协助和支持，在此一并表示由衷的感谢和敬意！

由于研究水平和时间所限，书中难免存在不足和疏漏，恳请同行专家批评指正，不吝赐教。

作 者

2017 年 12 月

Preface

Surface fertilization irrigation has been widely applied in agricultural production practices due to its simple, economical, and practical properties. In surface fertilization irrigation, the water and fertilizer distribution uniformity along the field surface can directly affect the nutrient distribution in crop root zone, which depends not only on irrigation water uniformity but also on fertilization distribution uniformity. As a result, extensive surface fertilization irrigation strategies will inevitably lead to uneven fertilizer distribution and deep percolation loss, and therefore low fertilization performance and potential damage to the soil and water environment of farmland.

To achieve accurate performances and effects of surface fertilization irrigation, and to continuously improve the design and management of surface fertilization irrigation system, it urgently needs to conduct research on the theory and method on surface water flow and solute transport, enrich relevant theory and method, develop corresponding mathematical model, and construct and improve relevant numerical solution, so that to provide support in the optimal design, performance evaluation, as well as identification and selection of operation and management strategies of surface fertilization irrigation system for the ultimate target of improving irrigation water use and fertilizer application efficiency and of reducing farmland pollution.

The authors of this book have been focusing on the theory and simulation of water flow and solute transport in surface fertilization irrigation over the past years, and deeply and systematically devoting themselves to field experiment observation, theoretical mechanism exploration, simulation model development, numerical simulation method construction, simulation analysis and performance evaluation about surface fertilization irrigation based on recent research projects, including the National High Technology Research and Development Program Projects of "Laser-control land leveling and precise surface irrigation equipments (2006AA100210)" and " Precise surface irrigation

technology and equipments (2011AA100505)” as well as the National Natural Science Foundation Projects of “Study on the effects of the spatial variability of micro-topography and infiltration on irrigation performance (50909100)”, “Study on the water- fertilizer coupled simulation method in surface- subsurface domain under basin irrigation with conventional fertilizer application (51209227)” and “Study on 2-D irrigation water flow characteristic and basin layout mode with precise land leveling (51279225)”. Based on the combination of experiment observation, theoretical analysis and numerical simulation, the authors enriched and developed the mathematical-physical theory and numerical method on water flow and solute transport in surface fertilization irrigation, created the simulation technology and method for unsteady surface water flow based on the mathematical type modification of Fully-Hydrodynamic Equation, and construct the fully-coupled models for surface water flow and solute transport in both basin fertigation and basin irrigation with conventional fertilizer application. Moreover, the models developed above had been applied to simulate the impact of the technological elements in basin fertilization irrigation on fertilization performance, and to determine the optimal combination of these technological elements. Overall, four major innovations had been achieved as follows:

(1) Based on a novel perspective of basic physics and geometry, existing theory and method on surface water flow and solute transport in basin fertilization irrigation were enriched, and the corresponding mathematical model and its numerical solutions were effectively improved, thus providing mathematical- physical basis and simulation method for scientific characterization and numerical solution of surface water flow and solute transport processes in basin fertilization irrigation.

(2) Based on the thinking of changing the mathematical type of the partially differential equation, a surface irrigation mathematical model and its numerical solution on the basis of conserved/non- conserved Fully Hydrodynamic Equation with hyperbolic-parabolic hybrid structure were first established and an anisotropic roughness model was developed, and the technical difficult problems in the hypothetical conditions of initial water depth, dry-wet boundary and isotropic roughness were totally overcome and tackled, thus providing reliable numerical solution tools and means for simulation of surface water flow and solute transport in basin fertilization irrigation.

(3) Based on a conception across typical characteristic scales, a fully-coupled model to simulate surface water flow and solute transport in basin irrigation with conventional

fertilizer application was constructed, and meanwhile a fully-coupled model to simulate surface water flow and solute transport in basin fertigation was developed, thus providing reliable support for the optimal design and performance evaluation of basin fertilization irrigation system.

(4) Based on the definition of non-uniform conventional fertilizer application coefficient, the developed fully-coupled models as mentioned above were applied to evaluate the fertilization performance and to determine the optimal scenarios and phase domain of the technological factors in basin fertilization irrigation, thus providing basis for parameter selection in the optimal design and operation management of basin fertilization irrigation system.

The following colleagues contributed to this work: Li Fuxiang, Shi Yuan, Wu Caili as well as Yu Fei, Liang Yanping, Li Zhixin, Dong Qinge, Liu Shanshan, Zhang Kai. The authors are grateful to Professor Jin Sheng of Dalian University of Technology and Professor Yu Xiping of Tsinghua University. The authors would also like to thank the irrigation districts in Hebei province, Beijing Daxing Water Resources Bureau, and Xinjiang Production & Construction Corps.

目 录

序言

第1章 绪论	1
1.1 地面灌溉地表水流运动理论与模拟方法	2
1.2 地面施肥灌溉地表水流溶质运动理论与模拟方法	10
1.3 主要研究内容	14
参考文献	16
第2章 畦田施肥灌溉地表水流溶质运动理论与方法	21
2.1 地表水流溶质运动水动力学基础	22
2.2 地表水流溶质运动典型特征尺度及物理变量与控制方程表达式	33
2.3 地表水流运动控制方程	36
2.4 地表水流溶质运动控制方程	45
2.5 结论	52
参考文献	52
第3章 畦田施肥灌溉地表水流溶质运动模拟模型	55
3.1 地表水流运动模拟模型	56
3.2 地表水流溶质运动模拟模型	69
3.3 地表水流溶质运动耦合模拟模型	74
3.4 地表水流溶质运动物理过程数理需求	76
3.5 地表水流溶质运动模拟及耦合模拟模型确认与验证	82
3.6 结论	83
参考文献	84
第4章 畦田施肥灌溉地表水流溶质运动数值模拟方法	87
4.1 地表水流溶质运动控制及耦合方程数学类型分类	88
4.2 地表水流溶质运动控制及耦合方程空间与时间离散格式	94
4.3 地表水流溶质运动干湿边界条件空间与时间离散格式	123
4.4 地表水流溶质运动控制及耦合方程空间与时间离散方程求解方法	136
4.5 结论	140
参考文献	141

第 5 章 基于双曲-抛物型方程结构的全水动力学方程畦田灌溉地表水流运动模拟	143
5.1 基于双曲-抛物型方程结构的全水动力学方程畦田灌溉模型构建及数值模拟求解	144
5.2 基于双曲-抛物型方程结构的全水动力学方程畦田灌溉模型模拟效果评价方法	157
5.3 基于双曲-抛物型方程结构的全水动力学方程畦田灌溉模型确认与验证	161
5.4 结论	171
参考文献	172
第 6 章 考虑各向异性畦面糙率的全水动力学方程畦田灌溉地表水流运动模拟	174
6.1 考虑各向异性畦面糙率的全水动力学方程畦田灌溉模型构建及数值模拟求解	175
6.2 考虑各向异性畦面糙率的全水动力学方程畦田灌溉模型模拟效果评价方法	185
6.3 考虑各向异性畦面糙率的全水动力学方程畦田灌溉模型确认与验证	188
6.4 考虑各向异性畦面糙率的全水动力学方程畦田灌溉模型应用	198
6.5 结论	215
参考文献	216
第 7 章 利用 Richards 方程估算入渗通量的全水动力学方程畦田灌溉地表水流运动模拟	218
7.1 利用 Richards 方程估算入渗通量的全水动力学方程畦田灌溉模型构建及数值模拟求解	220
7.2 利用 Richards 方程估算入渗通量的全水动力学方程畦田灌溉模型模拟效果评价方法	231
7.3 利用 Richards 方程估算入渗通量的全水动力学方程畦田灌溉模型确认与验证	232
7.4 利用 Richards 公式估算入渗通量的全水动力学方程畦田灌溉模型应用	239
7.5 结论	244
参考文献	245
第 8 章 依据维度分裂主方向修正的全水动力学方程畦田灌溉地表水流运动模拟	247
8.1 依据维度分裂主方向修正的全水动力学方程畦田灌溉模型构建及数值模拟求解	248
8.2 依据维度分裂主方向修正的全水动力学方程畦田灌溉模型模拟效果评价	

方法	258
8.3 依据维度分裂主方向修正的全水动力学方程畦田灌溉模型确认与验证 ...	259
8.4 结论	265
参考文献	265
第9章 畦田施肥灌溉试验与方法	267
9.1 施肥灌溉方式	268
9.2 畦田施肥灌溉试验区	276
9.3 畦田施肥灌溉试验	277
9.4 畦田施肥灌溉试验观测与测试方法	285
9.5 畦田施肥灌溉试验数据统计分析方法	291
9.6 结论	293
参考文献	293
第10章 畦田液施肥料灌溉地表水流溶质运动全耦合模拟	295
10.1 畦田液施肥料灌溉地表水流溶质运动全耦合模型构建及数值模拟求解	296
10.2 畦田液施肥料灌溉地表水流溶质运动全耦合模型模拟效果评价方法	304
10.3 畦田液施肥料灌溉地表水流溶质运动全耦合模型确认与验证	306
10.4 结论	313
参考文献	313
第11章 畦田撒施肥料灌溉地表水流溶质运动全耦合模拟	315
11.1 畦田撒施肥料灌溉地表水流溶质运动全耦合模型构建及数值模拟求解	316
11.2 畦田撒施肥料灌溉地表水流溶质运动全耦合模型模拟效果评价方法	329
11.3 畦田撒施肥料灌溉地表水流溶质运动全耦合模型确认与验证	330
11.4 结论	339
参考文献	340
第12章 冬小麦畦田施用尿素肥料灌溉特性与性能评价	342
12.1 施肥灌溉性能评价指标	343
12.2 畦田均匀撒施尿素灌溉	346
12.3 畦田液施尿素灌溉	354
12.4 结论	369
参考文献	370
第13章 冬小麦畦田施用硫酸铵肥料灌溉特性与性能评价	371
13.1 施肥灌溉性能评价指标	372
13.2 畦田均匀撒施和液施硫酸铵灌溉	375

13.3	畦田非均匀撒施硫酸铵灌溉	389
13.4	结论	395
	参考文献	395
第14章	畦田液施肥料灌溉性能模拟评价与技术要素优化组合	397
14.1	畦田液施肥料灌溉数值模拟实验设计	398
14.2	畦田液施肥料灌溉模型参数及模拟条件确定	399
14.3	畦田液施肥料灌溉施肥性能评价指标	399
14.4	畦田液施肥料灌溉技术要素对施肥性能影响模拟评价	400
14.5	畦田液施肥料灌溉技术要素优化组合分析	407
14.6	结论	421
	参考文献	422
第15章	畦田撒施肥料灌溉性能模拟评价与技术要素优化组合	423
15.1	畦田撒施肥料灌溉数值模拟实验设计	424
15.2	畦田撒施肥料灌溉模型参数及模拟条件确定	424
15.3	畦田撒施肥料灌溉施肥性能评价指标	425
15.4	畦田撒施肥料灌溉技术要素对施肥性能影响模拟评价	425
15.5	畦田撒施肥料灌溉技术要素优化组合分析	432
15.6	结论	446
	参考文献	447

Catalogue

Preface

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Theory and simulation method on surface water flow in surface irrigation	2
1.2 Theory and simulation method on surface solute transport in surface fertilization irrigation	10
1.3 Main research contents	14
References	16
Chapter 2 Theory and method on surface water flow and solute transport in basin fertilization irrigation	21
2.1 Hydrodynamic basis of surface water flow and solute transport	22
2.2 Typical characteristic scales, physical variables and governing equation expressions	33
2.3 Governing equations of surface water flow	36
2.4 Governing equations of surface solute transport	45
2.5 Conclusions	52
References	52
Chapter 3 Mathematical model on surface water flow and solute transport in basin fertilization irrigation	55
3.1 Mathematical model of surface water flow	56
3.2 Mathematical model of surface solute transport	69
3.3 Coupled mathematical model of surface water flow and solute transport	74
3.4 Mathematical-physical requirements in physical process of surface water flow and solute transport	76
3.5 Verification and validation of mathematical and coupled mathematical models	82
3.6 Conclusions	83
References	84
Chapter 4 Numerical solution on surface water flow and solute transport in basin fertilization irrigation	87
4.1 Classification of mathematical type of governing equations and their coupled expressions	88

4.2	Spatial-temporal discrete schemes of governing equations and their coupled expressions	94
4.3	Spatial-temporal discrete schemes of dry-wet boundary conditions	123
4.4	Solutions of spatial-temporal discrete schemes of governing equations and their coupled expressions	136
4.5	Conclusions	140
	References	141
Chapter 5 Simulation on surface water flow in basin irrigation based on Fully Hydrodynamic Equation with hyperbolic-parabolic hybrid structure ...		
5.1	Mathematical model development and its numerical solution	144
5.2	Evaluation method of simulation performance	157
5.3	Verification and validation of the developed model	161
5.4	Conclusions	171
	References	172
Chapter 6 Simulation on surface water flow in basin irrigation based on Fully Hydrodynamic Equation with anisotropic roughness		
6.1	Mathematical model development and its numerical solution	174
6.2	Evaluation method of simulation performance	175
6.3	Verification and validation of the developed model	185
6.4	Application of the developed model	188
6.5	Conclusions	198
	References	215
Chapter 7 Simulation on surface water flow in basin irrigation based on Fully Hydrodynamic Equation estimating infiltration with Richards Equation ...		
7.1	Mathematical model development and its numerical solution	218
7.2	Evaluation method of simulation performance	220
7.3	Verification and validation of the developed model	231
7.4	Application of the developed model	232
7.5	Conclusions	239
	References	244
Chapter 8 Simulation on surface water flow in basin irrigation based on Fully Hydrodynamic Equation with dimensional splitting and main direction correction		
8.1	Mathematical model development and its numerical solution	247
		248