

区域地下水演化 与评价理论方法

张光辉 费宇红 聂振龙 严明疆 等著



科学出版社

国土资源科技领军人才开发与培养计划（首批）和国家自然科学基金项目资助研究成果

区域地下水演化与评价理论方法

张光辉 费宇红 聂振龙 严明疆 等 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书从非饱和水运移与水势理论、区域地下水演化与水循环理论和地下水异变机制与可持续性评价理论三个方面,凝练与集成张光辉科研团队在1983~2013年期间,历经30年应用基础研究的成果,包括包气带水分运移、重金属在包气带行为、降水-地表水-土壤水-地下水“四水”转化、土壤盐分分布特征与地下水关系、区域地下水循环演化及其环境异变规律、层圈间水循环过程与地下水演变周期性、大厚度包气带条件下潜水入渗补给量形成、深层地下水补给与释水、西北地区流域尺度水循环演化与调控阈、人工地下调蓄与外域调水对地下水修复潜力、地下水异变机制及其可持续性评价理论以及不同时期对21世纪中国水问题与方略的看法。

本书适用于水资源与环境、气象、水文、国土资源与农田水利的科研、教学、规划、管理人员和地球科学相关学科研究生等。

图书在版编目(CIP)数据

区域地下水演化与评价理论方法/张光辉等著. —北京:科学出版社, 2014.5

ISBN 978-7-03-040653-8

I. ①区… II. ①张… III. ①地下水水文学-文集②地下水资源-资源评价-文集 IV. ①P641.1-53②P641.8-53

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第101012号

责任编辑:韦沁/责任校对:郑金红 刘亚琦

责任印制:钱玉芬/封面设计:耕者设计工作室

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

*

2014年5月第一版 开本:787×1092 1/16

2014年5月第一次印刷 印张:40 1/4

字数:954 000

定价:239.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

作者名单

张光辉	费宇红	聂振龙	严明疆	申建梅	王金哲
李慧娣	郝明亮	杨丽芝	刘春华	刘中培	连英立
周在明	冯慧敏	王电龙	田言亮	刘克岩	

资助项目

国土资源部“国土资源科技领军人才开发与培养计划”(首批, 2013~2017)

国家自然科学基金项目“降水变驱动地下水变幅与灌溉用水强度互动阈识别”(2012~2015)、
“干旱区地下水循环变异影响阈识别”(2005~2007)

国家 973 项目“海河流域二元水循环模式与水资源演变机理”(2006~2011)

国家科技支撑计划项目“华北平原农作物布局结构与区域水资源适应性研究”(2007~2010)、

“环渤海平原水土盐动态与地下咸水资源可利用承载力评估”(2009~2012)

国土资源大调查项目科技专题“中国北方地下水功能评价与区划综合研究”(2004~2006)

国土资源部科技重点基础项目“西北典型内流盆地水循环规律与地下水形成演化模式”(2002~2006)

国家科技部公益类科技项目“太行山山前平原南水北调地下调蓄潜力与效益”(2000~2003)

原地质矿产部科技重点基础项目“区域地下水演化过程及其与相邻层圈相互作用”(1996~2000)

序 言

地下水是赋存于地壳表层中可被人类利用的自然资源和维系生态环境不可缺少的因子,水循环是地下水补给与更新的源泉,包括区域或流域水循环、降水-土壤水-地表水-地下水的“四水”转化过程以及浅层地下水与深层承压地下水系统的层间越流过程,存在不同时空尺度上水的数量、质量和水位动态的周期变化规律及差异性,尤其是区域地下水演变。这些规律和差异性,与气候变化和人类活动影响的周期性和不确定性密切相关。未来区域地下水演化与过去和现在的规律或特征之间存在趋势相同或相似性,也存在不可完全重复性的特点。由此,区域地下水评价理论方法的境界,应是恰到好处地提供满足所需尺度下研究成果,既不是更高的精度,也不是泛论的结果,而是能确保相应时空尺度下区域地下水可持续利用,其间某些时段或局域可能出现暂时性的超采或缺水,但是,从全区或整个规划周期来看,区域地下水开发利用是均衡的。

在我国北方地区,地下水资源已成为生活用水、经济社会发展的基础资源和综合国力的有机组成部分,目前,我国国民经济高速发展,人口不断增长和城市化率不断提高,以及区域水资源短缺和地下水超采日益加剧,唯有合理可持续地利用和有效保护地下水资源及其环境,才能保证经济社会可持续发展。全国地下水天然资源量为 9235 亿 m^3/a ,只有 26.86% 分布于平原区;孔隙水、岩溶水和裂隙水的地下淡水可开采资源量分别占全国淡水可开采资源总量的 47.79%、24.71% 和 27.50%。占全国总面积 60% 的北方地区,地下水资源量仅占全国地下水资源总量的 36.41%。但是北方地区孔隙水资源量占全国孔隙水资源总量的 80.07%,主要分布在大型拗陷盆地和断陷盆地的平原区。近几年来我国地下水年均开采量 1110 亿 m^3 ,北方地区的地下水开采量占全国总开采量的 88.45%,其中华北地区(海河流域)占 21.13%,松花江流域占 18.12%,淮河流域占 16.08%,黄河流域占 11.63%。90% 的北方大中城市、乡镇的生活饮用水和工业用水,以地下水作为主要供水水源。

在华北地区,河北省地下水开采量占全国总开采量的 13.97%,河南省和山东省分别占 11.84%、8.05%。华北平原的地下水开采量已占当地总供水量的 60% 以上,其中河北平原达 80% 以上。在过去 30 年中,由于过度开采地下水,许多地区地下水位不断下降,第 I 含水层组已被大范围地超采疏干,地面沉降和生态环境退化问题日趋严重。因此,自 20 世纪 80 年代以来,区域地下水演变及其相关研究备受关注,学者们先后开展了众多的国家和省部级重大、重点科技项目研究,取得了丰硕成果,促进了我国地下水资源合理开发利用,有力地支撑了区域经济社会高速发展。

值此本书的首席作者——张光辉博士从事水文地质学 30 周年之际,依托国土资源部“科技领军人才开发与培养计划(首批,2013 年入选)”和国家自然科学基金项目(编号 41172214,2012~2015),凝练和深化作者耕耘 30 年的基础研究创新成果,撰著

《区域地下水演化与评价理论方法》一书，作为承先启后的标志和纪念。张光辉博士于1983年7月毕业于长春地质学院水文地质专业之后，一直在中国地质科学院水文地质环境地质研究所（简称“水环所”，隶属国土资源部，原名为“地质矿产部水文地质工程地质研究所”）工作至今。1991年破格晋升副研究员，1993年和2000年开始分别为中国地质科学院硕士生导师及博士生导师。1996~2005年，主持国土资源部环境地质重点实验室工作（正处级）。现为水文地质专业理学博士，水环所二级研究员、所学术委员会副主任和副总工程师，兼任中国地质科学院科技委员会委员和河北省政府专家献策团成员，享受国务院政府特殊津贴。2013年入选国土资源部“国土资源科技领军人才开发与培养计划”。

在过去30年中，作者及其团队先后负责完成原地质矿产部科技重点基础项目“区域地下水演化过程及其与相邻层圈相互作用”（1996~2000），国家科技部公益类科技项目“太行山前平原南水北调地下调蓄潜力与效益”（2000~2003），国土资源部科技重点基础项目“西北典型内流盆地水循环规律与地下水形成演化模式”（2002~2006），国土资源大调查项目科技专题“中国北方地下水功能评价与区划综合研究”（2004~2006），国家973项目“海河流域二元水循环模式与水资源演变机理”（2006~2011），国家科技支撑计划项目“华北平原农作物布局结构与区域水资源适应性研究”（2007~2010）、“环渤海平原水土盐动态与地下咸水资源可利用承载力评估”（2009~2012）以及国家自然科学基金项目“干旱区地下水循环变异影响阈识别”（2005~2007）、“降水变化驱动地下水变幅与灌溉用水强度互动阈识别”（2012~2015）等30余项科研项目，已发表学术论文200多篇，获得国家、省部级科学技术奖的成果20余项，包括省（部）级科学技术奖一等奖4项和二等奖3项，培养博士研究生20余人，参加国家和省部重点、重大或自然科学基金项目，以及国家、省部科技奖评审千余项。

本书从非饱和水运移与水势理论、区域地下水演化与水循环理论和地下水异变机制与可持续性评价理论三个方面，重点阐述中国地下水演化研究起源与理论、非饱和水运移与土壤水势、全新世以来华北平原地下水演化规律、“四水”转化机理与测算方法、区域地下水超采因缘与效应、地下水脆弱性与华北平原特征、区域地下水变化与灌溉农业关系、环渤海平原土壤盐化与地下水关系、重金属在包气带行为及其对地下水影响、西北地区黑河流域尺度水循环演化与调控阈、华北平原地下调蓄特征与效应、区域地下水功能及可持续利用性评价理论方法和21世纪中国水问题与方略，包括1998年作者的初始认识和2013年作者的进一步认识，较系统地介绍了有关“区域地下水演化与评价理论方法”的研究成果。

在本书编著中，张光辉负责全书纲要拟定，撰写序言、第一至第三章、第五至第七章、第九至第十二章、第四篇和全书统编与审定。费宇红参加撰写第四章、第八章和第九章主要内容。聂振龙协作全书统编、审定和参加撰写第六、七章及第十章。严明疆负责全书中插图编绘和参加撰写第四章、第十章部分内容。申建梅负责全书图表编审和参加撰写第七章。王金哲参加第四章、第七章和第十一章部分内容撰写。李慧娣、郝明亮参加第一、二章和第四章部分内容撰写。杨丽芝、刘春华参加第四章和第九章撰写。刘中培、连英立参加第四章、第七章和第十一章部分内容撰写。周在明参加第四章部分内

容撰写。冯慧敏、王电龙参加第八章部分内容撰写。田言亮等参加书中部分图件编绘和有关章节撰写。刘克岩参加第九章部分内容撰写。

在本研究开展过程中,得到中国地质科学院水文地质环境地质研究所大力支持和帮助,得到多位院士和数十位知名专家指导,确保了本研究成果的高质量完成,得到国土、气象、水文、农业、土壤、环境与水文地质学等众多单位相助,学科间彼此交融、互补和支撑,使得我们的研究成果得到了广泛认可和赞誉,取得重大经济与社会效益。

值此书发行之际,对支持和帮助本研究的专家、单位和同仁表示衷心的感谢;本书出版过程中得到科学出版社鼎力相助,在此一并致以诚挚的感谢。

著者

2013年10月2日

目 录

序言

第一篇 非饱和水运移与水势理论

第一章 非饱和水运移与土壤水势·····	3
第一节 零通量面理论与应用·····	3
第二节 “三水”转化水势标示特征·····	6
第三节 包气带性状对入渗性影响·····	23
第四节 温度对包气带水运移影响·····	31
第五节 土壤水动力状态标示特征应用与机理·····	40
小结·····	45
参考文献·····	46
第二章 水文地质学与“四水”转化研究·····	50
第一节 水文地质学形成与演进·····	50
第二节 “四水”转化定量关系与机制·····	52
第三节 二元水循环中“四水”转化特征·····	62
第四节 潜水入渗补给量形成规律与监测方法·····	71
第五节 应用 ZFP 法计算浅层地下水补给量问题·····	82
第六节 原位实测潜水蒸发极限深度与给水度测定新方法·····	94
小结·····	103
参考文献·····	104
第三章 重金属在包气带中行为特征与控制·····	107
第一节 镉在包气带中行为特征及主要影响因素·····	107
第二节 镉的形态变化特征及影响因素·····	126
第三节 镉在土壤中迁移与转化模式特征·····	130
第四节 镉在土壤中迁移与转化控制作用·····	136
第五节 镉生态环境危害效应与影响因素·····	154
第六节 减轻和控制重金属生环危害对策·····	160
小结·····	164
参考文献·····	165
第四章 环渤海平原土壤盐化与地下水关系·····	168
第一节 研究背景·····	168

第二节	土壤盐分与盐渍化分布特征·····	171
第三节	土壤盐分剖面不同聚型及其水动力学特征·····	192
第四节	土壤盐渍化成因机制与主要影响特征·····	206
第五节	土壤积盐特征与地下水关系·····	210
第六节	土壤盐分情势界定与盐渍化防治对策·····	218
小结	·····	224
参考文献	·····	225

第二篇 区域地下水演化与水循环理论

第五章	中国地下水演化研究起源与理论·····	231
第一节	区域地下水演化研究属性与进展·····	231
第二节	中国区域地下水演化研究起源与进展·····	239
第三节	中国大陆水循环演化理论与意义·····	246
第四节	中国北方浅部地下水同位素分层特征与意义·····	252
第五节	区域水循环演化信息熵特征·····	262
第六节	地下水形成与区域水循环演化关系·····	267
小结	·····	276
参考文献	·····	276
第六章	全新世以来华北平原地下水演化规律·····	280
第一节	华北平原地下水演化地史特征·····	280
第二节	华北平原地下水演变周期性·····	303
第三节	华北平原地下水演化区位特征·····	309
第四节	300年来太行山前平原地下水补给演化特征·····	315
第五节	近60年以来区域地下水演变时代特征·····	321
第六节	华北东部平原深层水补给特征与释水机制·····	331
小结	·····	338
参考文献	·····	339
第七章	西北典型流域水循环演化特征与调控阈·····	343
第一节	流域水循环与演化特征·····	343
第二节	流域地下水循环演化与水化学特征·····	355
第三节	流域水循环与地下水演化同位素特征·····	364
第四节	流域水循环过程与演化机制·····	367
第五节	平原区地下水温度变化特征与意义·····	378
第六节	下游区生态脆弱特征与调控阈·····	383
小结	·····	392
参考文献	·····	394

第八章 区域地下水调蓄条件与潜力	397
第一节 基本理念与调蓄原理	397
第二节 太行山前平原地下调蓄条件	399
第三节 不同条件下地下调蓄功能特征	404
第四节 华北主要河道带地下调蓄潜力	414
第五节 华北东南平原区地下调蓄潜力	420
第六节 浅层水超采区地下调蓄效应	421
小结	427
参考文献	427

第三篇 地下水异变机制与可持续性评价理论

第九章 区域地下水超采因缘与效应	431
第一节 华北平原水资源紧缺情势与因缘	431
第二节 滹沱河流域平原区地下水流场异变与动因	444
第三节 人类活动对华北白洋淀流域径流影响特征	449
第四节 深层水漏斗区开采量组成变化特征与机制	455
第五节 华北东部平原地面沉降特征与机制	463
第六节 人类活动对区域地下水劣变影响程度	466
小结	474
参考文献	475
第十章 地下水脆弱性与华北平原特征	479
第一节 地下水脆弱性理论与评价方法	479
第二节 地下水脆弱性评价应用实例	489
第三节 人类活动对地下水脆弱性影响特征	504
第四节 地下水脆弱性综合特征	507
第五节 华北平原地下水脆弱性特征	511
第六节 华北山前丘陵区地下水赋存非均一与易疏干性	515
小结	521
参考文献	521
第十一章 区域地下水变化与灌溉农业关系	524
第一节 灌溉农业布局与用水强度变化特征	524
第二节 华北农灌用水与地下水承载力适应性状况	542
第三节 区域地下水超采与灌溉作物布局关系	547
第四节 河北粮食持续增产与地下水关系	556
第五节 农业开采与降水互动耦合对地下水影响特征	562
第六节 区域地下水水质变与化肥农药施用影响	570
小结	574

参考文献	575
第十二章 区域地下水功能及可持续利用性评价理论方法	578
第一节 地下水可持续开采量与地下水功能关系	578
第二节 地下水功能可持续利用性评价理论方法	583
第三节 地下水功能评价体系属性层组成与意义	589
第四节 地下水功能评价中数据提取与处理技术	592
第五节 地下水功能评价 GFS 系统及功能	595
第六节 华北平原地下水功能分布与区划特征	601
小结	610
参考文献	611

第四篇 21 世纪中国水问题与方略

参考文献	627
------	-----

第一篇 非饱和水运移与水势理论

本篇共计四章，分别为非饱和水运移与土壤水势、水文地质学与“四水”转化研究、重金属在包气带中行为特征与控制、环渤海平原土壤盐化与地下水关系，重点阐述潜水面以上的包气带水分、溶质和盐分时空变化规律和非饱和水动力学特征、土壤水动力状态标示特征、降水-地表水-包气带水-地下水“四水”转化规律、大厚度包气带中监测入渗补给量方法和应用零通量面（zero flux plane, ZFP）法计算浅层地下水补给量问题，深入剖析毒性金属在包气带中行为特征及其与土壤水分非饱和程度关系。最后，针对华北平原中、东部微咸地下水合理利用面临的问题，给出土壤盐分与盐渍化程度空间格局、土壤盐分不同聚型及其水动力学特征和它们与地下水之间关系。

大 陸 地 理 學

第一章 緒論
一、地理學之定義
二、地理學之分類
三、地理學之重要性
四、地理學之研究對象
五、地理學之研究方法



第一章 非饱和水运移与土壤水势

第一节 零通量面理论与应用

零通量面方法自 1982 年引入我国以来,促进了我国土壤水分运移规律和降水与灌溉水入渗补给地下水机理的深入研究。自 21 世纪以来,水势理论被引入地下水数值模拟中,促进了解决水盐运移数值模拟和入渗模型有关水文地质参数难题。

一、ZFP 法原理与 20 世纪 80 年代应用特征

水势理念由国际土壤学会于 1963 年提出 (Taylor, 1983a, 1983b)。20 世纪 70 年代,英国水文学者 Cooper (1980) 在绘制林地土壤总水势分布剖面时发现,总水势梯度 (I_{usa}) 存在比较稳定的零拐点,且具有区域一致性分布特点。包气带剖面中,水势能梯度为零值的点称为零通量点。由同一区域、不同剖面的零通量点组成的面,称为零通量面。根据零通量面位置及其上、下土壤层水势梯度指向,能够确定土壤水分变化量的去向,进而提高研判包气带水盐运移去向和降水入渗补给地下水状况。

ZFP 方法 (zero flux plane, ZFP) 是建立于能量守恒和质量守恒理论基础上的,由“达西定律”和“水流连续性方程”联立构建式 (1-1),有

$$q = K(\theta) \frac{\partial \varphi}{\partial Z} = 0 \quad (\text{当 } I_{\text{usa}} = \frac{\partial \varphi}{\partial Z} = 0 \text{ 时}) \quad (1-1)$$

式中, q 为非饱和状态下单位面积的水分通量, m/d ; $K(\theta)$ 为土壤非饱和渗透系数,其大小与包气带含水量状况相关, m/d ; $\frac{\partial \varphi}{\partial Z}$ 或 I_{usa} 为总水势梯度, $\text{cmH}_2\text{O/cm}^{\text{①}}$ 或 mmHg/cm 。

I_{usa} 和 q 分别由负压计 (又称张力计) 和中子水分仪或其他仪器实测的土壤水势、含水量资料计算获得,无需求取不易准确获得的 $K(\theta)$ 参数,所以,应降低因 $K(\theta)$ 取值不确定带来的问题。

在获得土壤水势和土壤含水量资料基础上,利用式 (1-1) 原理,可以分别确定某时段 ZFP 之上或之下的土壤水分变化量去向。当 I_{usa} 指向地表,表明土壤水分变化量运移向地表,进入大气中;当 I_{usa} 指向地下水面,表明土壤水分变化量运移向地下水,或已补给进入地下水中。

应根据某时段土壤水势和土壤含水量监测资料确定 ZFP 位置和土壤剖面含水变化量之后,就可以确定土壤水分蒸发量、地下水入渗补给量或潜水蒸发量。如果 ZFP 为

① 非饱和带水势能的单位。

发散型,即 ZFP 之上土壤总水势梯度指向地表,ZFP 之下土壤总水势梯度指向地下水,则 ZFP 之上的土壤剖面水分变化量为该时段的土壤水蒸发量,ZFP 之下的土壤剖面水分变化量为该时段包气带水入渗对地下水补给量。

ZFP 方法适用于岩土颗粒较细(中粗砂以下)第四纪松散沉积地层、潜水位埋深大于蒸发影响极限深度的地区。一般难以应用基岩山区和以卵砾石为主的松散地层分布区,这些地区 ZFP 存在条件欠缺,或虽 ZFP 存在,但监测十分困难。在适用 ZFP 方法的地区,ZFP 也不是永续存在或稳定不变的,其存在与降水(或灌溉)入渗和蒸发条件密切相关。较充分灌溉或较大降水,都会导致 ZFP 消失。在我国北方地区,除了较大降水或充分供水灌溉期间,大部分时段 ZFP 是存在的。一般是取用年内最深的 ZFP 作为确定入渗补给量和蒸发量的分界线,然后应用土壤水势理论计算降水或灌溉入渗补给地下水量和土壤水蒸发消耗量,或根据土壤剖面某段的水势和含水量变化监测资料求算非饱和条件下 K 参数,这期间与 ZFP 存在与否没有关系,只需确定被研究的土壤剖面段的总水势梯度方向是一致的,即土壤水完全向上运移,或完全向下运移。

20 世纪 80 年代初,如何克服水文地质参数不确定性,进一步认识大气降水、土壤水、地表水和地下水“四水”转化过程,以及提高地下水补给量评价精度问题受到重视。此时,ZFP 方法被引入,基于国家“六五”科技攻关项目第 38 项子课题“华北地区地下水补给量及其时空变化规律研究”,先后在河北省石家庄、南宫县和南皮县建立了实验研究基地和野外原位试验场,对 ZFP 方法开展了系统性应用研究。随后,河南郑州、商丘,山东禹城,辽宁沈阳,陕西西安,甘肃张掖,新疆昌吉和四川成都等地陆续建立了与 ZFP 方法有关的地下水均衡试验场(站),全面展开了 ZFP 的应用实验研究,为后来的我国地下水循环演化和新一轮地下水资源调查评价奠定了坚实基础。

本书作者于 1988 年在《水文地质工程地质》上发表的“试论在我国北方应用零通量面方法计算地下水补给量问题”,比较全面地阐述了当时 ZFP 方法应用的局限性和弥补方法,并于 1992 年在《水利学报》上阐述了“零通量面方法的改进”,促进了 ZFP 方法在我国“四水”转化研究中更好的应用。同期,原地质矿产部水文地质工程地质研究所研发的 WM 型负压计,及时地提供了 ZFP 方法应用的关键技术支撑。清华大学的谢森传等(1988)在零通量面方法研究基础上,提出定位能量法。这一时期,ZFP 方法主要应用于包气带水分入渗补给量与蒸发量确定研究。

二、20 世纪 90 年代水势理论应用特征

在 ZFP 方法不断深入应用中,张光辉等(1991a, 1991b)发现在降水或灌溉入渗过程中,总水势梯度具有如下特征:当被监测土层含水量处于增加状态(土壤吸水阶段),随着土壤含水量不断增大,总水势梯度大于 $1.0\text{cmH}_2\text{O}/\text{cm}$,且逐渐降低。当充分供水入渗、被监测土层含水量趋近于饱和状态时,即流入、流出被监测土层的水量相等(土壤过水阶段),总水势梯度趋近于 $1.0\text{cmH}_2\text{O}/\text{cm}$ 或等于 $1.0\text{cmH}_2\text{O}/\text{cm}$ 。当被监测土层含水量处于减少状态(土壤脱水阶段),总水势梯度小于 $1.0\text{cmH}_2\text{O}/\text{cm}$ 。

20 世纪 90 年代,我国北方干旱气候频发,农业灌溉节水问题受到高度重视,80 年

代的许多 ZFP 方法研究成果被推广到指导农业灌溉节水关键技术研究。因为式(1-1)中 I_{usa} 表征土壤水动力状态, 它的变化与入渗供水量(或灌溉水量)和土壤含水量状况密切相关, 所以, 利用 I_{usa} 监测结果可以了解农田水分亏缺程度和是否需要灌溉, 以及掌控已灌溉的程度。即当土壤层的上部含水量远低于其下部含水量时, 上部水势的绝对值(或观测值)必然远大于下部水势的绝对值(或观测值), 由此呈现 $I_{\text{usa}} \ll 0 \text{cmH}_2\text{O}/\text{cm}$ 情况, 它表明自地表至土壤层下部土壤中, 水分因蒸发蒸腾作用而大量损失, 距离地表越近, 损失水量越大, 水势的绝对值越大(水势越小), 土壤水分亏缺程度越来越严重。这时, 可结合土壤水分张力计的具体观测值, 适时灌溉。当 I_{usa} 值越趋近 $1.0 \text{cmH}_2\text{O}/\text{cm}$ 时, 表明土壤含水量临近饱和, 需注意调控灌溉水量或限控灌溉时间, 避免较多无效灌溉水量的发生, 应及时结束该次灌溉。

20 世纪 90 年代初, 荆恩春等(1994)总结了过去近 10 年来有关土壤水分通量法实验研究成果, 提出了定位通量法、纠偏通量法和瞬时剖面通量法, 给出了应用检验结果。靳孟贵和方连育(2006)基于土壤水势理论, 在河北王瞳地区开展了实地验证研究, 确定了王瞳地区土壤水理论无效库容、土壤水最大次调节量、土壤水可利用量和土壤水储量, 推动了土壤水资源化研究。

三、21 世纪以来水势理论应用特征

进入 21 世纪以来, 随着地下水数值模拟对水文地质参数要求的不断提高, ZFP 法又受到关注。曾亦键等(2008)在土壤水分特征参数的计算和聂卫波等(2009)在建立沟灌土壤水分运动数值模拟与入渗模型中, 都较好地应用 ZFP 法解决了参数方面难题。王鹏等(2009)通过太行山区典型植被对土壤水势动态影响研究, 发现刺槐林地土壤对降水入渗的反应时间最快, 侧柏林地土壤在雨后的持水性最好。汪丙国等(2010)应用土壤水分通量法和包气带水均衡的原理, 阐明巨厚包气带条件下覆盖秸秆麦田的地下水入渗补给量小于不盖秸秆, 对于解答华北平原地下水水位不断下降和农业活动对入渗补给影响难题具有促进作用。宋献方等(2011)利用土壤水势和地下水观测数据研究了沧州、衡水地下水浅埋区不同年份土壤水分动态规律, 结果表明, 平水年或丰水年后的土壤水分从表层到深层为增长型趋势, 枯水年为增长-减小-增长趋势, 土壤水分具有补给和消耗的季节性变化特征。

刘贯群、宋涛(2008)提出, 漫灌条件下, 经过 2 次灌溉过后土壤含水量不断升高。徐学选等(2010)研究黄土丘陵区降水-土壤水-地下水转化, 实验结果表明, 降水补给地下水存在一定的滞后时间, 与包气带厚度和岩性有关。王政友(2011)认为, 降水入渗补给地下水滞后时间与地下水埋深之间为乘幂关系。郝芳华、欧阳威(2008)认为在灌区的灌溉(降雨)-下渗-潜水蒸发类型环境中, 降水影响较小。聂振龙、连英立(2011)利用包气带环境示踪剂研究张掖盆地降水入渗速率, 表明在张掖盆地地下水水位埋深 $>5\text{m}$ 的地带仍存在降水入渗补给, 在沙丘覆盖区地下水水位埋深 6.3m 时, 降水入渗补给速率为 $13.3 \sim 14.4 \text{mm}/\text{a}$, 在裸地区地下水水位埋深 8.6m 时, 降水入渗补给速率为 $16.8 \sim 18.4 \text{mm}/\text{a}$ 。李雪转、樊贵盛(2012)通过非充分供水土壤水分入渗规律研究, 提出非充分供水土壤水分入渗过程是自然界降雨水分和灌溉水进入土壤的重要过

程之一,小强度降水或喷洒条件下的水分入渗属于非充分供水入渗。孙晓旭、陈建生(2012)研究土壤水蒸发与降水入渗非饱和带过程中不同水体的氢氧同位素的变化规律发现,对于砂土的土壤水蒸发过程中剩余水体的氢氧同位素分馏遵从瑞利模式,而黄土的剩余土壤水的氢氧同位素值越来越远离瑞利分馏关系线。

傅斌等(2008)提出入渗率随降雨历时增加而减小,累积入渗量可以用降雨历时的线性函数来表示。吴继强等(2009)发现,不同有效面孔隙度条件下累积入渗量符合Kostiakov模型,但其参数是有效面孔隙度的函数,大孔隙的连通性在一定条件下对土壤水分的优先入渗起主导作用。付湘等(2010)认为,土壤空间变异下,田间降雨、入渗和径流之间滞后的非均一特征需加以重视,其明显影响数值模拟结果。束龙仓等(2008)提出,合理考虑水文地质参数不确定性,可以提高地下水补给量可靠度。谭秀翠、杨金忠(2012)提出,石津灌区净入渗水量及潜在补给系数具有明显的时空变异性,其主要取决于根区层土壤的水量均衡过程。

另外,ZFP法在环渤海平原区土壤水盐运移研究应用中发现,表聚型、中聚型和底聚型等不同土壤盐分聚集类型都各有其独特水势动力学剖面特征。其中,表聚型土壤盐分剖面形成的水动力学特征是总水势梯度指向地表,其绝对值远大于 $1.0\text{cmH}_2\text{O}/\text{cm}$,表征土壤水盐向上运移。在这种土壤水动力学剖面背景下,蒸发将促使浅埋的地下水通过包气带毛细输导至地表,水分气化进入大气,盐分残留在表层土壤中,进而加剧土壤盐渍化。中聚型土壤盐分剖面形成的水动力学特征是包气带上部的水势梯度指向地下水面,总水势梯度大于 $1.0\text{cmH}_2\text{O}/\text{cm}$,水盐向下运移。在入渗水量有限条件下,往往入渗水流湿润峰尚未到达包气带下部时,该场入渗已结束,剖面下部的水势梯度仍然指向地表,水盐向上运移,形成剖面中水盐含量凸现特征。只有当入渗水量足够充分,剖面中部所聚的盐分才能够充分向下运移,直至进入地下水中。否则,在蒸发作用下,剖面中部的水盐向上运移至地表层,由中聚型转化为表聚型。底聚型土壤盐分剖面形成的水动力学特征是入渗水分自上而下贯穿整个土壤剖面,水势梯度指向地下水面,总水势梯度大于 $1.0\text{cmH}_2\text{O}/\text{cm}$,水盐向下运移,包括进入地下水中。

四、水势理论应用未来趋势

从过去30年水势理论和ZFP方法应用特征来看,水势理论及其技术方法的未来应用趋势应包括如下四个方面:①拓展包气带非饱和参数研究,包括 $K(\theta)$ 、 $D(\theta)$ 、 $C(\theta)$ 及 S (根系吸水率),减少计算的不确定性,提高地下水数值模拟研究可靠性;②深化土壤水盐运移和聚集模式认识,通过科学调控潜水水位埋深改变零通量面位置,实现控制土壤水盐(养分或污染物)运移的研究;③通过区域性零通量面分布及其埋深变化规律研究,提高ZFP方法确定降水入渗对地下水的潜在补给量的区域代表性;④土壤水资源合理利用研究,促进农业节水灌溉的监测与预警研究方法研究。

第二节 “三水”转化水势标示特征

大气降水或灌溉水进入包气带,转变为土壤水;再经过入渗,转化为地下水,或地