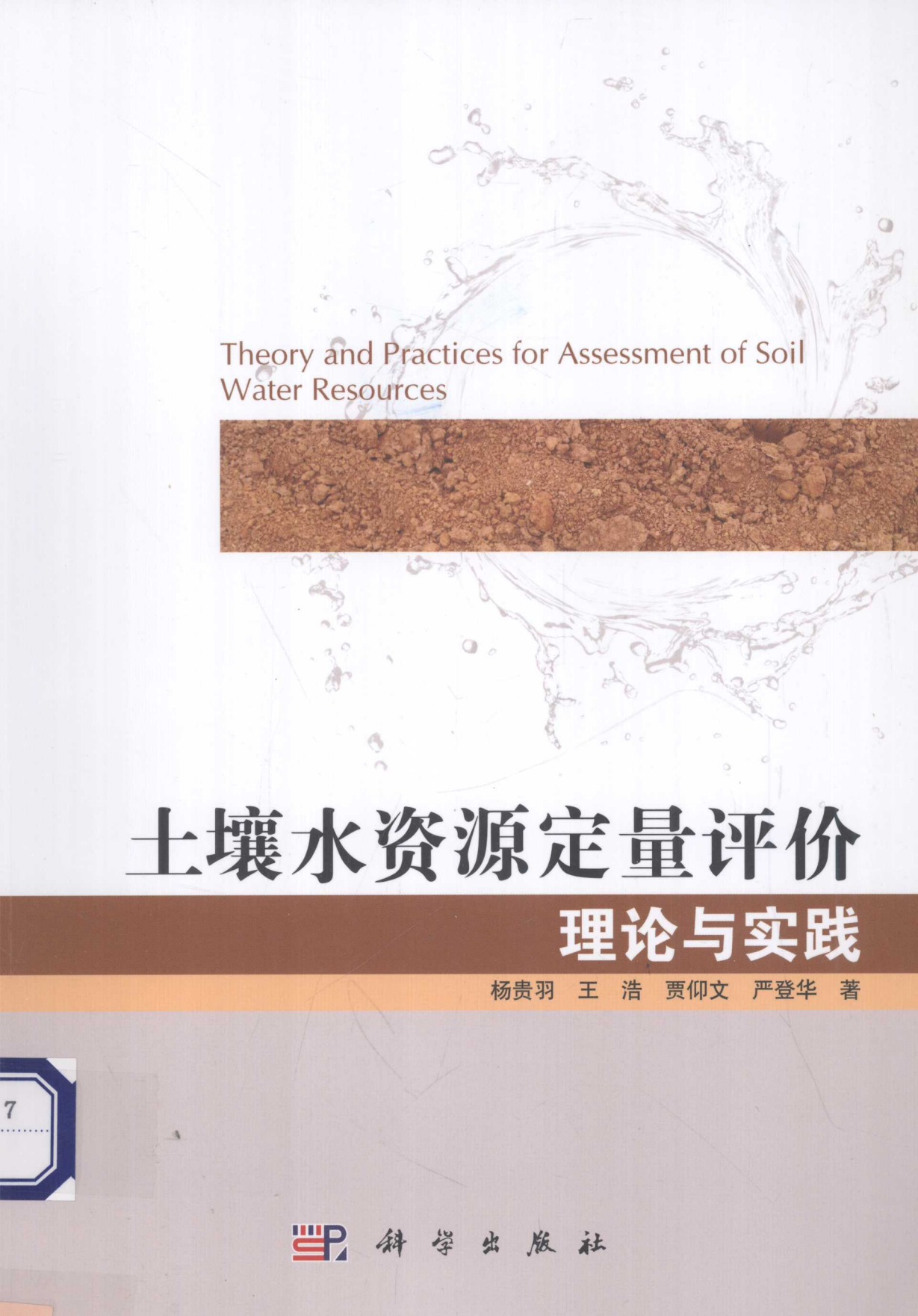
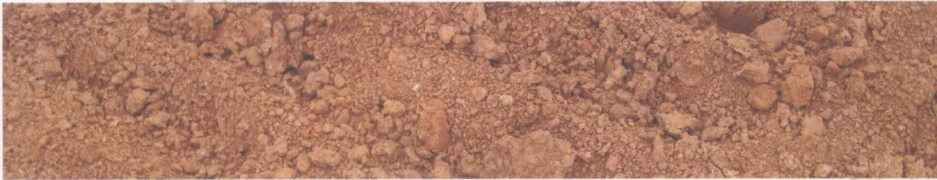




Theory and Practices for Assessment of Soil  
Water Resources



# 土壤水资源定量评价

## 理论与实践

杨贵羽 王 浩 贾仰文 严登华 著



科学出版社

# 土壤水资源定量评价

## 理论与实践

杨贵羽 王 浩 贾仰文 严登华 著

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

全书针对当前径流性水资源严重匮乏,非径流性水资源得到日益重视,水资源管理亦从需水管理向耗水管理转变的现实需求,对占非径流性水资源绝对大比重的土壤水资源,在全面论述其生产、生活和生态作用后,重申了土壤水资源内涵,从宏观尺度开展了流域尺度土壤水资源数量和消耗效率评价理论与方法研究,首次综合考虑水资源的“有效性、可控性和可再生性”三大基本准则,立足于水循环全过程,提出了大尺度土壤水资源数量和消耗效率评价理论体系,围绕水循环过程的土壤水资源调控方向,并在黄河流域、海河流域和松辽流域进行了初步应用。

本书理论与实践紧密结合,内容相对全面,技术实用,可供水资源评价、水资源管理以及农业水资源管理等方面的专业研究人员、工程技术人员、管理人员及高等院校师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

土壤水资源定量评价理论与实践 / 杨贵羽等著. —北京: 科学出版社, 2014. 1

ISBN 978-7-03-039547-4

I. 土… II. 杨… III. 土壤水-水资源-资源评价-中国 IV. S152.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 0008828 号

责任编辑: 李 敏 吕彩霞 / 责任校对: 包志虹

责任印制: 赵德静 / 封面设计: 无极书装

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>

骏杰印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销



\*

2014 年 1 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2014 年 1 月第一次印刷 印张: 12 3/4 插页: 2

字数: 250 000

定价: 80.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

## 前 言

水是基础性自然资源和战略性经济资源,是人类赖以生存的无可替代的宝贵物质。水资源数量的多少、质量的优劣均直接或间接的影响着自然和社会经济的健康发展。然而,在全球气候变化和高强度人类活动的影响下,水资源短缺已成为全球性普遍问题,并引发了一系列与之相关的生态环境问题。为此,从根本上解决这些问题,缓解水资源短缺成为首要任务,合理用好每一滴水成为解决水资源短缺的必然之路。

土壤水资源,作为水循环过程中水分转化的重要组成部分,占降水派生水资源的绝对大比重,不仅数量可观,而且长期以来在维持区域/流域农业生产和生态环境建设和保护方面发挥着最为直接的作用。而且随着水资源管理的深入(从需水管理向耗水管理转变)和现代水资源开发利用技术的发展,立足于水循环全过程,挖掘一切可利用水资源,开展不同赋存形式(径流性水资源和非径流性水资源)水资源的合理利用,已成为新形势下水资源管理的组成部分。加强宏观尺度土壤水资源研究也已成为水资源管理的重要组成部分,同时也是实现水土保持和生态环境建设的重要构成部分,对水资源合理利用、农业生产和生态环境建设具有十分重要的现实意义。然而,由于土壤水分不能提取和运输的特点以及受土壤理化性质的影响,因此有关宏观尺度开展土壤水资源的研究较少,对其资源特性(数量和消耗效率)的研究存在大量空白,难以针对性地加以调控和利用。

为此,面对日益严峻的水资源短缺的现实问题和迫切的实践需求,在国家重点基础研究(973)发展规划项目课题“黄河流域水资源演变规律与二元演化模型研究”(G1999043602)、“海河流域二元水循环模式与水资源高效利用”(2006CB403400)以及“十一五”国家科技支撑计划重点课题“松辽流域水资源全口径水资源评价及早情预测关键技术研究”(2007BAB28B01),以及国家自然科学基金创新群体“流域水循环模拟与调控”(51021066)的共同支持下,本研究从宏观尺度开展了流域尺度土壤水资源数量和消耗效率评价理论与方法研究,首次综合考虑水资源的“有效性、可控性和可再生性”三大基本准则,立足于水循环全过程,提出了大尺度土壤水资源数量和消耗效率评价理论,并在黄河流域、海河流域和松辽流域进行了初步应用。

本书在上述项目支撑下,首先系统地梳理了土壤水分及土壤水资源研究现状

以及现实的需求;然后在全面分析土壤水分在生产、生活和生态中所发挥的资源特性的基础上,立足于水循环过程,从可持续利用的角度重新定义了土壤水资源,综合水资源的三大属性,提出土壤水资源数量评价指标体系;最后,结合土地利用,在剖析土壤水资源的消耗结构的基础上,提出了土壤水资源消耗效率的评价准则,实现了北方三大流域土壤水资源数量和消耗效率的探索性评价。全书内容共分9章。具体内容概括如下:

第1章绪论。针对当前径流性水资源匮乏的现实情势,本章简要阐述了开展土壤水及土壤水资源研究的现实意义,并系统梳理了有关土壤水及土壤水资源的研究现状和发展趋势。

第2章土壤水的资源特性及土壤水资源内涵。本章从土壤水在生产、生活和生态中的作用和意义,以及在水循环中发挥的承接作用两方面,在系统阐述了开展土壤水的资源特性后,基于当前土壤水资源的概念,立足于水资源的有效性、可控性和可再生性三大属性,重新定义了土壤水资源,并结合土壤水资源在陆域生态系统、农业生产系统中的作用,阐述了开展土壤水资源评价的必要性。

第3章土壤水资源评价理论与定量化方法。本章首先以水资源最本质的三大特点:有效性、可控性和可再生性为准则,建立了土壤水资源数量评价指标体系,并以水平衡原理为基础,结合土壤水资源的动态转化特性,阐述了土壤水资源数量和消耗原理,提出了土壤水资源消耗效率的界定准则,定量推导了土壤水资源各评价指标。为实现土壤水资源的定量计算,又进一步从田间到区域,从土壤水分动态转化的单环节,以及水循环全过程各环节耦合两方面介绍了土壤水定量化工具,并以分布式WEP-L模型为例,详细阐述土壤水资源评价的模型机理和模拟方法。

第4章黄河流域土壤水资源及其消耗效率评价。本章根据水量平衡方程,结合黄河流域分布式水文模型——WEP-L模型,从水循环角度对区域土壤水资源进行初步评价,并结合流域的土地利用状况的变化,剖析了土壤水资源动态转化过程中补给与消耗特点,分析了流域土壤水资源数量、消耗结构和消耗效率的时空演变特征,针对土壤水资源的数量和消耗特点提出了土壤水资源合理利用的方向和可能的调控措施。

第5章海河流域土壤水资源及其消耗效率评价。本章以海河流域综合模拟平台中的核心工具——WEPLAR为基本工具,通过不同气象系列、历史系列年下垫面条件下水循环全过程的精细模拟,对土壤水资源的数量、消耗结构、消耗效率进行系统评价,并对比分析了流域高强度人类活动影响及不同气象条件下土壤水资源的动态转化关系,探索了海河流域土壤水资源合理利用的方向,为流域深入开展“耗水”管理提供了重要支撑。

第6章松辽流域土壤水资源及其消耗效率评价。本章以松辽流域水资源分布二元演化模型——WEPSL模型为基本工具,在对1956~2006年系列水文气象资料,历史系列下垫面和现状下垫面条件下,松花江区水循环要素全面动态模拟的基础上,对流域土壤水资源的数量、消耗结构和消耗效率进行了初步评价,揭示了在“自然—社会”二元水循环条件下,土壤水资源的时空演变特性,为进一步调控奠定了基础。

第7章土壤水资源调控策略研究。本章在全面综述了我国影响粮食生产的两大刚性约束——土地资源和水资源现状及面临问题的基础上,为合理利用有限的水资源,以及针对国民经济发展大户——农业,在剖析农业水循环原理的基础上,提出了土壤水资源管理的策略和基本调控方向。

第8章结论与展望。本章首先总结第1~7章的主要研究和主要成果,然后结合当前土壤水资源的研究现状以及未来水资源管理的趋势,从土壤水分在水循环、能量循环和物质循环过程中的作用三方面,展望了未来土壤水资源的研究趋势。

希望相关研究成果能够对区域/流域水资源的合理利用、提高水资源利用效率,改善水资源匮乏的现实提供参考。

本书涉及的成果主要是基于作者所参与的研究工作,及相关研究报告的进一步完善。第1、2章主要由杨贵羽、潘新撰写;第3、7、8章主要由杨贵羽、王浩撰写。第4、5章主要由杨贵羽、贾仰文撰写。第6章主要由杨贵羽、严登华撰写。全书由杨贵羽、王浩、贾仰文统稿。

在此对在研究过程中给予支持和帮助的周祖昊教授、仇亚琴教授表示衷心的感谢。对在成书过程中,给予极大鼓励的汪林教授、王建华教授、王芳教授表示衷心的感谢。同时,也感谢气候室里一直默默支持我工作的肖伟华博士、鲁帆博士、杨志勇博士、吴迪博士、李传哲博士、黄彬彬博士后、于赢东硕士、张鹏硕士等同仁。

因时间和作者水平有限,对于土壤水资源评价理论的研究还不够深入,所提出的理论和方法不尽完善,书中不足之处,敬请广大读者批评指正。

杨贵羽

2013年5月

# 目 录

|                                         |     |
|-----------------------------------------|-----|
| 第 1 章 绪论 .....                          | 1   |
| 1.1 土壤水及土壤水资源研究的意义 .....                | 1   |
| 1.2 土壤水的研究现状和发展趋势 .....                 | 2   |
| 1.3 主要研究目标、内容与技术路线 .....                | 13  |
| 1.4 本章小结 .....                          | 15  |
| 第 2 章 土壤水的资源特性及土壤水资源内涵 .....            | 16  |
| 2.1 土壤水的含义及其在生产实践中的作用 .....             | 16  |
| 2.2 土壤水在水循环过程中的作用 .....                 | 21  |
| 2.3 土壤水资源的内涵及开展土壤水资源评价的重要性 .....        | 27  |
| 2.4 本章小结 .....                          | 34  |
| 第 3 章 土壤水资源评价理论与定量化方法 .....             | 36  |
| 3.1 土壤水资源数量评价理论 .....                   | 36  |
| 3.2 土壤水资源消耗效率评价理论 .....                 | 44  |
| 3.3 土壤水资源的定量化工具 .....                   | 49  |
| 3.4 二元水循环条件下分布式水文模型——WEP-L 分布式模型 .....  | 55  |
| 3.5 本章小结 .....                          | 66  |
| 第 4 章 黄河流域土壤水资源及其消耗效率评价 .....           | 67  |
| 4.1 黄河流域概况及水资源状况 .....                  | 67  |
| 4.2 黄河流域 WEP-L 模型对土壤水资源的模拟 .....        | 76  |
| 4.3 历史下垫面流域土壤水资源数量及其演变规律评价 .....        | 81  |
| 4.4 历史下垫面流域土壤水资源消耗结构和消耗效率分析 .....       | 90  |
| 4.5 不同下垫面情景下土壤水资源的消耗动态转化 .....          | 94  |
| 4.6 本章小结 .....                          | 101 |
| 第 5 章 海河流域土壤水资源及其消耗效率评价 .....           | 105 |
| 5.1 海河流域概况及其水循环要素的演变 .....              | 105 |
| 5.2 海河流域模型工具 WEPLAR 及模拟过程的简要概述 .....    | 115 |
| 5.3 50 年气象系列历史下垫面海河流域土壤水资源量 .....       | 120 |
| 5.4 50 年气象系列历史下垫面流域土壤水资源消耗结构和消耗效率 ..... | 126 |

|       |                                 |     |
|-------|---------------------------------|-----|
| 5.5   | 26 年气象系列历史下垫面土壤水资源变化 .....      | 132 |
| 5.6   | 本章小结 .....                      | 134 |
| 第 6 章 | 松辽流域土壤水资源及其消耗效率评价 .....         | 137 |
| 6.1   | 流域概况及水资源特性 .....                | 137 |
| 6.2   | 松辽流域水循环模拟过程的简要说明 .....          | 149 |
| 6.3   | 历史下垫面松辽流域土壤水资源量 .....           | 152 |
| 6.4   | 历史下垫面松辽流域土壤水资源消耗结构和消耗效率 .....   | 159 |
| 6.5   | 现状下垫面土壤水资源的数量及消耗特点 .....        | 165 |
| 6.6   | 本章小结 .....                      | 168 |
| 第 7 章 | 土壤水资源调控策略研究 .....               | 171 |
| 7.1   | 我国农业水土资源状况及面临的问题 .....          | 171 |
| 7.2   | 农业水循环原理及基于水循环过程的土壤水资源调控意义 ..... | 177 |
| 7.3   | 基于农业水循环过程的土壤水资源调控策略及调控方向 .....  | 180 |
| 7.4   | 本章小结 .....                      | 182 |
| 第 8 章 | 结论与展望 .....                     | 184 |
| 8.1   | 结论 .....                        | 184 |
| 8.2   | 展望 .....                        | 190 |
| 参考文献  | .....                           | 192 |

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 土壤水及土壤水资源研究的意义

土壤水是地表水与地下水相互联系的纽带,在水资源的形成、转化与消耗过程中,具有不可或缺的作用。土壤水的数量、质量及其运动转化状态不仅与水文水资源密切联系,而且与农业气象密不可分。在水文水资源方面:土壤水作为“四水”(或“五水”)转化过程中的中间环节,其数量的多少和运移状况,一方面,直接关系着大气降水的下渗和径流性水资源的动态转化,影响着区域土壤和植被的蒸发蒸腾,进而全面影响陆域水分的收支;另一方面,作为区域/流域水分支出重要构成要素之一的土壤水的蒸发蒸腾消耗,又通过积极参与大气与地表、土壤层的热交换,影响着陆域的能量平衡,进而反作用于水量平衡,从而对水循环产生间接影响。在农业生产方面,土壤水作为土壤的有机构成要素之一,不仅影响着土壤的物理性质,制约着土壤中养分和溶质的溶解、转移及微生物的活动,而且作为陆面生态系统最直接的水分源泉,关系着陆域农作物和植被的长势,影响着区域农作物种植结构和灌溉制度,其数量和空间分布与农业干旱程度与状况密切相关(王浩和杨贵羽,2009)。由此可见,土壤水在水资源领域、农业生产和生态环境领域均具有极为重要的作用,长期以来发挥着极为重要的资源作用。因此,面对全球气候变化和高强度人类活动影响下径流性水资源匮乏程度的日益加剧,以及生态环境的恶化,使得从资源角度认识土壤水,从水量收支角度加强土壤水资源管理将成为更深层水资源管理不容忽视的重要内容之一。

与此同时,随着科学技术的发展,人类开发利用水资源的能力进一步增强,水资源的内涵不断丰富,1988年联合国教科文组织(UNESCO)和世界气象组织(WMO)给出水资源的概念是:人类长期生存、生活和生产活动中所需要的既有数量要求又有质量要求,并为适应特定地区的水需求而能长期供应的水源,包括地表水、地下水、土壤水、冰川水和大气水。“从自然资源的观念出发,与人类生产与生活有关的天然水源”均可作为水资源(刘昌明,2001),以及水圈中的任何水对人类都有着直接或者间接的利用价值,都可以视为水资源等有关水资源

概念。Falkenmark (1995) 开展的“绿水”资源研究等,都已从不同角度体现了土壤水的资源特性和土壤水应属于水资源的范畴。

尽管土壤水分自身时空变化的复杂性使得从区域、大尺度角度探讨土壤水的难度较大,但是,随着遥测遥感空间技术和大型计算机技术,“3S”技术(即RS技术、GIS技术和ES技术)和分布式水文模型等科学技术的发展,均为从区域大尺度(区域尺度)开展土壤水资源研究提供了强有力的工具。因此,从水资源的概念和土壤水分动态转化的量化技术工具方面均为开展宏观尺度土壤水资源研究奠定了基础。

总之,面对我国径流性水资源匮乏程度日益严重、生态环境恶化、干旱频发等现实情势,充分利用先进的监测计算工具,精确了解土壤水分的动态转化状况、加强对土壤水资源特性的研究不仅必要而且可能。2002年8月29日第九届全国人民代表大会常务委员会第二十九次会议通过的《中华人民共和国水法》指出:“水资源包括地表水和地下水”,仍未能全面反映可持续发展不同层面需求的现实。

为此,本书针对迫切的现实需求和土壤水的资源特点,通过总结大量相关研究成果和有关土壤水在动态转化中的特点,从其对生产、生活和生态中所发挥的作用三方面,系统梳理土壤水的资源特性、土壤水资源的概念以及相关评价成果后,结合土壤水分在生态建设和生态保护方面的作用,立足于水资源的“有效性、可控性和可持续性”三大属性,在理论上重新定义了土壤水资源,构建了土壤水资源评价指标体系,并结合土壤水库的补给与消耗特点,提出并推导了土壤水资源数量和消耗转化的评价准则和界定方法。在此理论基础上,以地面监测数据、RS/GIS以及分布式水文模型等先进技术为工具,对黄河流域、海河流域以及松花江流域的土壤水资源数量和动态转化特性进行了初步评价。最后,立足于更深层的水资源需求管理——耗水管理的发展趋势和农业水循环原理,结合我国水土资源特点,探讨了我国土壤水资源调控的策略和调控方向。

## 1.2 土壤水的研究现状和发展趋势

土壤水不仅参与水循环过程,而且是整个大气、植被、地表、地下水等各水循环环节的重要纽带。同时,作为农作物生长、生态环境健康发展最直接的水分源泉,土壤水与粮食生产和生态环境保护直接相关。因此,长期以来土壤水一直在生产和生活中发挥着极为重要的作用,受到农业、生态和水资源等众多领域的广泛关注。然而,由于土壤水的复杂性,因此相关研究的进展较为缓慢,且直到1907年土壤水毛管势提出后,土壤水研究才从早期的定性描述性研究转向定量

分析研究,而快速发展阶段始于20世纪50年代。纵观土壤水的研究可集中的概括为以下四方面:土壤水运动机理的研究;不同时空尺度下土壤水分监测方法和监测手段的研究;土壤水分动态转化的定量化方法研究;基于水资源特性开展的土壤水资源研究。

### 1.2.1 土壤水运动机理的研究

土壤水运动机理的定量研究主要集中于以土壤水系统为对象的研究、土壤水与其相关子系统作用关系的研究两方面。

以土壤水系统为对象的研究,按照研究进程分为两个阶段,即以形态学观点占主导的阶段和以能态学观点占主导的阶段。以形态学观点占主导的阶段主要出现在18世纪30年代之前,是从土壤水存在、运动的表观现象对其进行的定性描述。之后,由于形态学的观点不能完全从机理的角度说明土壤水的运动转化行为,一些研究者致力于能态学观点的土壤水运动机理的探讨。对于以能态学为主导的土壤水运动机理的定量研究是以1931年Richards提出的非饱和流基本方程为基础,是从水分运动的能量驱动角度开展的。Richards非饱和流基本方程(Richards, 1931)为从机理上认识土壤水的运动奠定了坚实的基础,使得土壤水的研究逐步由静态走向动态,从定性走向定量。特别是20世纪80年代以来,随着测试手段和计算机应用技术的发展,以及学科间的相互渗透,土壤水分的研究由经验到理论,由定性到定量发生了质的转变,国内外众多的研究者从能量角度对土壤水进行了系统的分析,并涌现出大量有关土壤水定量分析的专著,如*Soil Water* (Nielsen et al., 1972)、*Soil and Water Physical Principles and Processes* (Hillel, 1971)、*Application of Soil Physics* (Hillel, 1980)、*Computer Simulation of Soil Water Dynamics* (Hillel, 1987)、《土壤水动力学》(雷志栋等, 1988)等。这也为相关应用学科的发展奠定了坚实的理论基础。

与此同时,土壤水与各相关子系统间的作用关系研究也得到了发展。Philip于1966年提出了较为完整的土壤-植被-大气系统(soil-plant-atmospheric continuous, SPAC)概念,将土壤水运动的研究范围由非饱和土壤水子系统扩展到土壤-植被以及大气系统,他认为尽管介质不同,界面不一,但在物理上都是一个统一的连续体,水在该系统中的流动过程就像连环一样,相互衔接,而且完全可以应用统一的能量指标加以表述。这使土壤水的研究空间得以扩展,由对单一的土壤系统的研究转向土壤、植被和大气等相关水循环子系统间相互作用关系探讨的基础(Philip, 1966)。在这些方面,我国也得到迅速发展。1983年谭孝元首次在国内提出了SPAC水分传输的电模拟方程式以及流经SPAC系统的水分通量数学模型;邵明安等(1986)利用此原理,定量分析了SPAC系统中水流的

阻力;1996年张蔚榛在总结土壤水和地下水相互作用关系研究成果的基础上,出版了《地下水与土壤水动力学》;康绍忠等(1992)在对SPAC系统水分传输机理研究的基础上,提出了包括作物根区土壤水动态模拟、作物根系吸水模拟和蒸发蒸腾模拟3个子系统组成的SPAC系统水分传输的动态模拟模型;荆恩春等(1994)通过试验分析了土壤水的运动行为。但是,由于水分在SPAC系统中各环节运动和变化的物理机制还存在许多不清楚的地方,如干土层和大气中的水分扩散,液态水到气态水的相变,土面蒸发和叶面蒸腾等原理并不十分清楚。因而,目前有关SPAC系统中不同环节更细的研究尚处于半经验半理论阶段,仍有较长的路需要探索。

在此期间,为进一步认识土壤水在系统间的相互转化机理,还有一些研究者,立足于土壤水运移理论,从土壤水作为影响因素和土壤水作为被影响因素两方面开展了大量的研究,相继提出了土壤水溶质运移(史海滨和陈亚新,1993;杨金忠和叶自桐,1994;李韵珠和李保国,1998)、土壤水与作物关系(邵明安,1987;邵明安和Sinmonds,1992;尚松浩等,1997;郭群善等,1997)、土壤水热运动(胡和平等,1992;杨邦杰和隋红建,1997)、土壤水分运动参数的确定(Buidine,1953;Garden,1956,1970;Wind,1968;Mualem,1976;邵明安,1991;许迪,1996)等理论。尽管这些方面的研究日臻完善,以上众多有关土壤水运动的研究为从机理上认识土壤水的动态转化特性奠定了坚实的基础,也为宏观尺度上开展相关研究和应用提供了支撑,但是由于研究区域的扩大以及土壤水空间变异性较大等特点,因此有关土壤水的研究仍有较多的方向需要探索。为合理实施水土保持,改善流域/区域的水土流失状况,目前针对特定土壤、特定区域和用水结构条件下的SPAC系统中土壤水运动机理成为又一重要研究方面(邵明安,等,1999;陈洪松和邵明安,2003)。

### 1.2.2 不同时空尺度下土壤水监测方法和监测手段研究

土壤水监测是开展土壤水运动机理研究和定量分析的前提。随着土壤水研究范围、研究深度的逐渐扩大,不同空间尺度上土壤水监测的研究相继问世。目前相关的研究集中于以下两大方面,即田间和实验室等中小尺度的研究,结合遥感遥测反演方法及技术的宏观大尺度研究。

#### 1) 田间和实验室尺度土壤水监测方法研究

田间和实验室尺度土壤水监测方法绝大多数采用的仍是传统方法,主要包括:经典的土钻法、张力计法、中子仪法和时域反射仪,以及与此相关联的几种监测技术相结合的联合监测法。

土钻法,也称烘干法(朱祖祥,1983),是一种公认的简单易行且有足够精度(最经典和最准确)的测定土壤含水量的方法,且是目前广泛用于探讨田间和实验室尺度的直接测量土壤水变化行为的方法。尽管该方法为土壤水的定量研究提供了坚实的试验基础,然而,该方法也存在一些不足,主要体现在三方面:①利用此方法只能测定土壤含水量,且必须在已知土壤容重的条件下获得;②在取样和测定过程中常造成土壤结构的破坏;③在进行连续土壤水监测时,必须不断地变动取土点,由于土壤的空间变异性使所测得土壤含水量往往存在很大的差异,造成所测定的土壤含水量不能代表真实情况。

张力计法,也称负压计法,是利用土壤负压来显示土壤水状况的方法。张力计发明于1931年(Richards, 1931)。之后为实现记录的自动化,一些研究者对张力计进行了数据记录和传输方面的改进(Long, 1984),但其基本原理不变,即是利用张力计测得土壤水基质势,结合土壤水分特征曲线,推出土壤含水量。尽管张力计的使用非常广泛,但是主要体现在测量过程中易受环境温度的影响(高照阳等, 2004),不适宜用于极端干旱土壤水的测量,在一定程度上影响了该方法的进一步推广。

中子仪法,也称中子土壤湿度计法,起源于20世纪40年代,60年代开始在水文领域的相关量化研究中得到应用。其基本原理是通过测量快中子与土壤中氢原子的碰撞而转化为慢中子数量的方式监测土壤水的状况。在测量过程中,操作较为简便,只需要将探头插入预设的测量位置便可测得该位置周围的土壤含水量,改变探头的高度即可获得不同土层的土壤含水量。该方法具有能够定位观测土壤水的动态过程和测量过程中所受扰动较小的优点,一度被广泛采用。它不仅应用于田间土壤水的测定,而且还广泛地应用于工业、建筑业以及水利工程建设中。然而,其不足主要体现在由于快中子大量向空中逃逸而造成的测量误差(周钟瑜, 1986),已难以胜任对作物根系层土壤含水量的研究。另外,由于不能实现长期大面积的动态监测,而且存在对人体健康造成危害的致命缺陷,中子仪法近年来已经在发达国家遭到弃用,在国内也仅有少量用于实验研究。

时域反射仪(time and domain reflector, TDR),是为克服以上测定方法的不足,开展不受土壤类型、结构、密度、温度等因素影响的更加精确的仪器。TDR是加拿大农业土地资源管理中心的Topp等于1980年,在总结前人微波、电容法的基础上根据电磁波的传导原理,设计并制造出的(Topp et al., 1980)。这种仪器可以克服插入式中子仪不能测定土壤表层含水量的缺点。其测定土壤含水量的原理相当简单,通过放置或垂直插入土壤中的探针发射阶梯状高频电磁波,电磁波在探针末端反射回来,设备通过电磁波的发射和接收时

间差来测量土壤含水量(泽春浩, 1994)。然而, 其不足是在导电率较高的土壤中, 其测量精度将下降。

驻波比法 (standing wave ratio), Topp 等在 1980 年提出了土壤含水率与土壤介电常数之间存在着确定性的单值多项式关系, 为土壤水测量研究开辟了一种新的研究方向, 即通过测量土壤的介电常数来求得土壤含水率。从电磁学的角度来看, 所有的绝缘体都可以看作是电介质。对于土壤来说, 其电介质主要是土壤固相物质、水和空气三种电介质组成的混合物。在常温状态下, 水的介电常数约为 80, 土壤固相物质的介电常数为 3~5, 空气的介电常数为 1, 因而, 影响土壤介电常数的因素主要是含水率。Roth (1990) 等提出利用土、水和空气三相物质的空间分配比例来计算土壤介电常数, 并经 Gardner 等改进后, 为采用介电方法测量土壤水含量提供了进一步的理论依据, 并利用这些原理进行土壤含水率的测量 (Gaskin and Miller, 1996; Gardner et al., 1998)。我国学者也开展了相应的研究 (孙宇瑞和汪懋华, 1999; 孙凯, 2004)。由于操作简单, 精度相对较高, 此方法成为目前国内外广泛采用的测量土壤含水量的方法。

光学测量法, 是一种非接触式的测量土壤含水率的方法, 最早是 Bower (1965) 提出多孔介质中光的反射与其含水率相关, 随后一些研究人员利用光的反射、透射、偏振与土壤含水率具有一定相关性而进行土壤含水量推测的方法 (Hoa, 1981; Zhang et al., 2000)。尽管该方法具有非接触式的优点, 但是由于受土壤变异性影响, 精度低 (马孝义等, 1995), 适应性不强, 其研究与开发的前景并不乐观。

与此同时, 一些研究者也结合不同的研究深度, 提出真空蒸馏技术提取土壤水分的实验研究 (王涛等, 2009), 及共沸蒸馏法提取植物水蒸发与土壤水的研究 (张丛志和张佳宝, 2008)。

尽管以上各种土壤水测定方法和监测手段对认识土壤水的含量、土壤水的运移状况提供了支撑, 并为进一步开展土壤水的定量研究奠定了基础。但是, 这些监测方法均存在取样较为稀疏、代表范围有限、数据收集时效差、人力财力消耗大等问题, 尤其在宏观大尺度监测中大多存在以点代面, 难以开展较大尺度区域监测的共同问题。

## 2) 遥感监测与反演土壤水的方法

遥感监测土壤水为开展宏观大尺度土壤水研究发挥了重要作用。该方法是利用遥感能够应用传感器获得地表反射或辐射的能量, 在客观反映地面综合特征的基础上进行的。其优势, 一方面在于它能够频繁和持久的提供地表特征的面状信息, 是对传统的以稀疏散点为基础的对地观测手段的一种扩展; 另一方面在于遥

感可以进行反演,即可从携带地理信息的电磁信号中提取地物的特征,通过模型进行反演得以实现(彭望球和白振平,2002)。模型反演是遥感监测地面物质的根本性问题。因而在监测土壤水分时,利用遥感原理,通过传感器来接收土壤水分的光谱信息,并经过相应的信息技术处理,结合地面的调查,反演土壤水分状况是遥感监测土壤水分的研究重点,具有小尺度田间观测难以实现的优点。而且随着遥感监测技术和反演技术的发展,能够简便、快捷、快速、有效地获取土壤属性分异特征的新遥感技术方法正在逐渐取代原有传统的大面积地面定点观测,为大范围区域土壤水含量的实时或准时动态监测提供了条件。

利用遥感技术监测土壤水的研究始于20世纪60年代末。随着遥感技术的不断发展,遥感监测土壤水的方法也在不断发展和完善。特别是近30年来,随着土壤水研究尺度的扩大,利用遥感反演土壤水的方法引起了广泛关注,出现了大量利用RS反演土壤水的图形信息(mapping information),为从区域角度认识土壤水提供了便利。利用遥感反演或监测计算土壤水(墒情)的方法较多,从宏观上可将其分为两大类:一类是利用微波遥感对地表土壤湿度进行直接测定(陆家驹和张和平,1997);另一类是根据可见光或红外波段的RS资料反推土壤含水量进行间接测定。间接测定方法是日前应用较多的方法,该方法是通过获得的地表能量和作物生长状况信息建立与土壤水相关关系的经验公式,从而获得土壤含水量。

目前有关RS反演土壤水的总体思路相似,但是由于研究目的和精度的不同,国内外的研究者发展了具有不同原理的监测反演方法,主要研究方法包括热惯量法(Watson, 1971, 1974; Rose, 1986; 隋洪智, 1990; 张仁华, 1991; England and Galantowicz, 1992)、蒸散发与作物缺水指数法(Jackson and Idso, 1981, Jackson et al., 1988; Jupp, 1990; Moran et al., 1994; 赵昕奕等, 1999)、植被指数法(普布次仁, 1995; 陈乾, 1994; 王鹏新等, 2001)等。

热惯量法,是由Watson等(1971)首次提出,是一种在裸地或低植被覆盖条件土壤的能量平衡方程基础上,对土壤表层水分进行定量反演的方法。其基本原理是依靠土壤的一种热特性是引起土壤表层温度变化的重要因素,影响土壤温度日较差的大小,同时由于水分具有较大的热容量和热传导率而使得较湿的土壤具有较大的热惯量。因此,土壤水与土壤热惯量间有重要的联系,为此依据热惯量可获得土壤水。

蒸散发与作物缺水指数法(crop water stress index, CWI),最早由Jackson等(1981)以能量平衡为基础提出的,是以水分供应为蒸散过程的基本条件,土壤含水量与叶面温度密切相关,影响蒸散速率为依据,根据蒸散作用与能量和土壤含水量的关系,把一定条件下充分供水的蒸发定义为潜在蒸发,把实际蒸发与潜

在蒸发的比值定义为作物缺水的度量,进行土壤水含量的计算。

植被指数法,是卫星传感器不同通道探测数据的线性或非线性组合,能够反映绿色植物生长和分布的特征指数。植被指数的时空变化与土壤水状况有一定的相关性。目前最常用的有归一化植被指数、距平植被指数以及条件植被指数。

以上相关遥感反演土壤水方法的应用使土壤水监测的时空尺度得到了较大的发展,为认识土壤水提供了可资利用的资料。但是,不同方法由于受到不同因素的限制,因而应用范围不同。热惯量法比较适合于植被覆盖度低的地方;蒸散发作物缺水指数法与热惯量法恰好相反,对于植被盖度较低的地方会夸大植被的作用,进而影响监测精度;植被指数法和热惯量法需要较长时间的遥感影像,在实际应用中比较困难(仝兆远和张万昌,2007)。但相比而言,热惯量法和植被指数法由于具有较强的物理基础而成为监测土壤水和农业干旱较为成熟的方法。

综上所述,遥感监测土壤水的优势很明显,但是其不足也很突出。由于遥感监测不是全范围、全时期的监测,就其原理而言,主要基于能量平衡,缺乏对土壤水在水量平衡中所发挥作用的体现。同时,目前通过数据反演推求土壤水的方法实质是一种利用卫星资料和相应的地面资料进行统计回归的方法,原理性较差。为提高遥感反演土壤水的精度,获得对不同埋深处土壤水的认识,需对不同监测对象采用不同方法进行处理(Jackson, 1993; Kostov and Jackson, 1993),如统计外插法(Rose, 1986)、辐射反演转换法(England, 1992)、参数剖面模型法(隋洪智等, 1990),以及将观测到的数据输入到土壤水预测模型等(张仁华, 2001)方法。不同的反演方法,其适应性条件差异较大,如利用微波遥感对地表土壤湿度直接测定主要集中于土壤表层(0~20cm)(Jackson et al., 1989; Wim and Bastiaanssen, 2000);微波方法、可见光近红外方法、热红外方法以及二者相结合的方法适用于不同植被盖度的地面状况。因而,根据不同遥感方法的特点,针对区域特点,开展遥感技术对土壤水的定量研究成为一个新的探索方向。

### 1.2.3 土壤水动态转化的定量化方法研究

土壤水运动较为复杂,因而其动态转化过程中的定量化模拟方法较多,主要概括为以下三方面:基于土壤水动力学的数值模拟方法、基于水量平衡的土壤水定量研究方法、宏观尺度土壤水的定量化方法。

基于土壤水动力学的数值模拟方法,其原理主要依据 Darcy 定律和连续原理建立水流基本方程,进而采用有限差分方式进行计算。由于其原理较为清楚,且建立在严格的科学基础上,比较接近田间实际,且随着计算机技术的发展,有关

基于水动力学的数值模拟方法先后经历了非饱和土壤水一维运动的数值计算和非饱和条件下二维水流动态模拟研究,使得此定量化方法基本摆脱了过去静态或孤立的水分形态学研究的局面,从而被广泛采用。我国经典的论著有《土壤水动力学》(雷志栋等,1988)、《地下水与土壤水动力学》(张蔚榛等,1996)、《土壤水热运动模型及其应用》(杨邦杰和隋红建,1997)。但是,由于受土壤物理性质和其他因素的影响较大,空间变异性问题突出,该方法仅能够用于特定条件下土壤水转化过程,难以用于较大区域。

基于水量平衡的土壤水定量研究方法,该方法是在确定的时空条件下,研究均衡要素的变动情况。由于原理明确,操作简单,可避开一些变异性较大的土壤物理参数的获取,因而在较大区域上被广泛采用。例如,石元春和辛德惠(1983)采用此方法对黄淮海平原的水均衡进行了系统模拟;Zelt(1993)采用此方法对美国大平原的水分平衡状况进行了研究。相关研究为大区域认识土壤水分运动特性,加强水分管理提供了支撑。尽管如此,由于土壤水系统的平衡要素较多、影响因素复杂,故存在难以准确获得的不足。

宏观尺度土壤水的定量化方法,随着有关土壤水定量研究的深入,Kostov 和 Jankson(1993)在总结以上众多方法的基础上,提出了一种较为先进的计算方法,即集遥感监测反演数据和计算模型于一体的定量土壤水运动的方法。他们认为仅依靠模型,特别是水动力学模型计算的土壤水,在模型的参数上存在误差,RS 监测的土壤水则又缺乏水平衡原理以及空间尺度转化等问题。因而,他们认为采用数据同化方法将 RS 技术与分布式模型相结合,可充分发挥两种定量方法的优势,是进行土壤水定量计算最好的方法。后来一些研究者也提出相似的看法(Entekhabi et al., 1994; Jackson, 1988),认为将 RS 数据与水循环模型相结合进行土壤水研究,不仅有利于土壤水研究区域的扩展,而且也能很好的考虑区域土壤参数空间异质性问题。用此方法开展土壤含水量计算、土壤水动态转化关系研究成为近年来有关大尺度土壤水研究的主要方向之一。

关于将 RS 信息应用于水文模型来探讨水循环中各要素演变规律的研究较多,刘昌明(2001)将其概括为三类:第一类为 RS 资料与地面同步实测资料建立回归模型的方法,此方法一般用于低分辨率、长时段的水资源规划管理中;第二类为水量平衡模型,将 RS 资料和地面常规实测资料相结合,推求水量;第三类为紧密结合的遥感水文模型,即目前将 RS 数据、GIS 数据与分布式水文模型结合起来探讨水循环演化形式的研究。

纵观相关研究,将两者相结合进行水循环要素的研究越来越多。但是,由于土壤水自身的复杂性,矢量数据和栅格数据间格式转化问题(Ehlers, 1991),造成许多研究只与 RS 数据或 GIS 数据单独结合,且主要集中于土壤表层。因而,