

“十二五”国家重点图书出版规划项目



海河流域水循环演变机理与水资源高效利用丛书

海河流域土壤水监测数据集成与 土壤水效用评价

刘家宏 高学睿 刘淼 秦韬 栾清华 等著



科学出版社

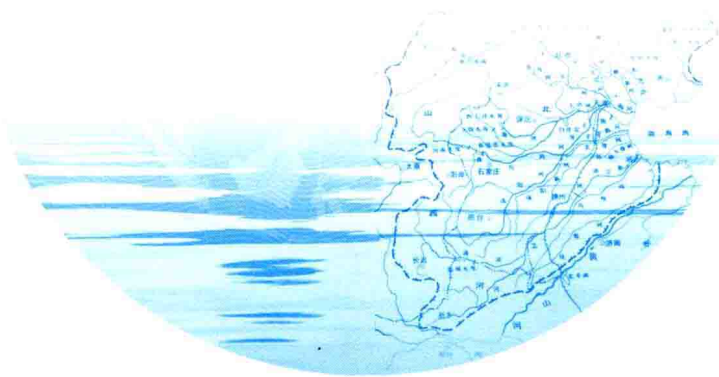
“十二五”国家重点图书出版规划项目



海河流域水循环演变机理与水资源高效利用丛书

海河流域土壤水监测数据集成与 土壤水效用评价

刘家宏 高学睿 刘 淼 秦 韬 栾清华 等 著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书从区域土壤水监测方法、土壤水运动模拟及土壤水资源利用等方面系统梳理国内外土壤水领域研究的重要成果和进展。从广义水资源的概念和属性出发,提出土壤水的效用评价理论方法,并结合农田水循环模型工具和多指标综合评价方法建立土壤水效用定量评价的方法体系。本书同时结合国家重点基础研究发展计划(“973”)项目“海河流域水循环演变机理与水资源高效利用”取得的相关实验成果,在典型农田尺度上,对田间土壤水的运动规律进行定量观测和分析;在区域大尺度上,揭示海河流域不同深度层土壤湿度的空间分布规律,并根据观测成果对典型区域的土壤水库特性参数进行了测算,本研究成果可为开展海河流域土壤水的开发和高效利用提供重要参考。

本书可作为大专院校和科研单位的专家学者及研究生的参考资料,也可水资源管理、农田水利及抗旱节水等领域的技术人员提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

海河流域土壤水监测数据集成与土壤水效用评价 / 刘家宏等著. —北京: 科学出版社, 2015. 6

(海河流域水循环演变机理与水资源高效利用丛书)

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-03-044823-1

I. 海… II. 刘… III. 海河—流域—土壤水—研究 IV. S159. 221

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 124405 号

责任编辑: 李 敏 吕彩霞 / 责任校对: 邹慧卿

责任印制: 肖 兴 / 封面设计: 王 浩

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

*

2015 年 6 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2015 年 6 月第一次印刷 印张: 11 1/4 插页: 2

字数: 500 000

定价: 100.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

总 序

流域水循环是水资源形成、演化的客观基础，也是水环境与生态系统演化的主导驱动因子。水资源问题不论其表现形式如何，都可以归结为流域水循环分项过程或其伴生过程演变导致的失衡问题；为解决水资源问题开展的各类水事活动，本质上均是针对流域“自然-社会”二元水循环分项或其伴生过程实施的基于目标导向的人工调控行为。现代环境下，受人类活动和气候变化的综合作用与影响，流域水循环朝着更加剧烈和复杂的方向演变，致使许多国家和地区面临着更加突出的水短缺、水污染和生态退化问题。揭示变化环境下的流域水循环演变机理并发现演变规律，寻找以水资源高效利用为核心的水循环多维均衡调控路径，是解决复杂水资源问题的科学基础，也是当前水文、水资源领域重大的前沿基础科学命题。

受人口规模、经济社会发展压力和水资源本底条件的影响，中国是世界上水循环演变最剧烈、水资源问题最突出的国家之一，其中又以海河流域最为严重和典型。海河流域人均径流性水资源居全国十大一级流域之末，流域内人口稠密、生产发达，经济社会需水模数居全国前列，流域水资源衰减问题十分突出，不同行业用水竞争激烈，环境容量与排污量矛盾尖锐，水资源短缺、水环境污染和水生态退化问题极其严重。为建立人类活动干扰下的流域水循环演化基础认知模式，揭示流域水循环及其伴生过程演变机理与规律，从而为流域治水和生态环境保护实践提供基础科技支撑，2006年科学技术部批准设立了国家重点基础研究发展计划（973计划）项目“海河流域水循环演变机理与水资源高效利用”（编号：2006CB403400）。项目下设8个课题，力图建立起人类活动密集缺水区域流域二元水循环演化的基础理论，认知流域水循环及其伴生的水化学、水生态过程演化的机理，构建流域水循环及其伴生过程的综合模型系统，揭示流域水资源、水生态与水环境演变的客观规律，继而在科学评价流域资源利用效率的基础上，提出城市和农业水资源高效利用与流域水循环整体调控的标准与模式，为强人类活动严重缺水流域的水循环演变认知与调控奠定科学基础，增强中国缺水地区水安全保障的基础科学支持能力。

通过5年的联合攻关，项目取得了6方面的主要成果：一是揭示了强人类活动影响下的流域水循环与水资源演变机理；二是辨析了与水循环伴生的流域水化学与生态过程演化

的原理和驱动机制；三是创新形成了流域“自然-社会”二元水循环及其伴生过程的综合模拟与预测技术；四是发现了变化环境下的海河流域水资源与生态环境演化规律；五是明晰了海河流域多尺度城市与农业高效用水的机理与路径；六是构建了海河流域水循环多维临界整体调控理论、阈值与模式。项目在 2010 年顺利通过科学技术部的验收，且在同批验收的资源环境领域 973 计划项目中位居前列。目前该项目的部分成果已获得了多项省部级科技进步一等奖。总体来看，在项目实施过程中和项目完成后的近一年时间内，许多成果已经在国家和地方重大治水实践中得到了很好的应用，为流域水资源管理与生态环境治理提供了基础支撑，所蕴藏的生态环境和经济社会效益开始逐步显露；同时项目的实施在促进中国水循环模拟与调控基础研究的发展以及提升中国水科学研究的国际地位等方面也发挥了重要的作用和积极的影响。

本项目部分研究成果已通过科技论文的形式进行了一定程度的传播，为将项目研究成果进行全面、系统和集中展示，项目专家组决定以各个课题为单元，将取得的主要成果集结成为丛书，陆续出版，以更好地实现研究成果和科学知识的社会共享，同时也期望能够得到来自各方的指正和交流。

最后特别要说的是，本项目从设立到实施，得到了科学技术部、水利部等有关部门以及众多不同领域专家的悉心关怀和大力支持，项目所取得的每一点进展、每一项成果与之都是密不可分的，借此机会向给予我们诸多帮助的部门和专家表达最诚挚的感谢。

是为序。

海河 973 计划项目首席科学家
流域水循环模拟与调控国家重点实验室主任
中国工程院院士



2011 年 10 月 10 日

序

土壤水是流域水循环过程中一种重要赋存形式，是调节和分配流域地表、地下水量的关键变量，是影响流域实际蒸散发的主要因素。对于农业及生态系统来说，土壤水尤为重要，因为一切形式的水都要转变成土壤水才能被农作物或其他地表植被所吸收，其时空分布、数量无不影响着农作物的产量以及生态系统的功能。除此之外，土壤水还是气候系统中的一个关键变量，控制着众多地球物理过程和反馈循环回路。在水资源供需矛盾突出的地区，土壤水由于其在一定时空尺度内具有相对稳定性且能够被农作物或其他地表植被所直接利用而具备了一定的资源属性；特别是在资源性缺水地区，越来越多的研究人员和水资源管理者逐渐认识到土壤水因子和土壤水过程调控在区域水资源管理和优化配置中起到的巨大影响作用。

海河流域是我国当前水资源矛盾最为突出的地区，其人口、经济总量和粮食产量分别占全国的 10%、15% 和 10%，而水资源量仅占全国的 1%，水资源开发利用率长期超过 100%，是我国水资源开发利用程度最高、人类活动影响最剧烈的流域。在这样的背景下，充分挖掘和发挥土壤水因子对水资源优化配置和高效利用的支撑潜力是海河流域必要且有效的途径。本书以海河流域为研究区域，就区域土壤水监测数据集成和效用评价方面开展研究，选题对拓展土壤水理论以及指导流域水资源管理实践都具有重要意义。

本书以国家重大基础研究发展计划（973 计划）项目“海河流域水循环演变机理与水资源高效利用”及一系列国家自然科学基金项目为依托，遵循“基础理论—数据收集和试验监测—模型构建—区域验证”的研究思路和技术路线，归纳总结并系统展示了著者及其研究团队在海河流域土壤水效用评价的理论方法、试验监测和模拟应用分析上取得的成果。具体地，在理论成果层面提出了土壤水效用的概念和内涵，并构建了一套土壤水效用定量评价的技术方法；在试验成果层面，介绍了海河流域典型田块尺度土壤水过程转化试验和海河流域大尺度土壤岩性采样与土壤湿度观测试验的相关数据成果；在应用成果层面，初步分析了海河流域典型区域土壤水库的特征参数，并以邯郸市为例展示了土壤水效用定量评价的实践应用。

特别指出，上述成果在大尺度土壤水试验监测和模型开发上极具原创性。首先，针对当前流域尺度土壤水研究多集中在站点尺度，缺少大尺度土壤岩性和土壤墒情基础数据等薄弱环节，投入大量物力和人力开展了海河流域土壤水研究基础数据的大范围采集工作。数据采集工作非常扎实，采样试验共布设试验点 318 个，获取 1.5m 深度下的分层土壤岩性和土壤墒情数据，采样区域总覆盖面积 10.16 万 km²，约为海河流域总面积的 1/3，且

基本涵盖海河流域主要的自然地理类型、土壤类型、土地利用类型和农业种植结构类型等，积累了一批具有重要价值的土壤特性基础研究数据。其次，基于试验研究及MODCYCLE模型，初步提出了海河流域土壤水资源效用评价的框架理论和水资源效用定量化计算方法，完善了土壤水资源研究体系，拓展了土壤水的研究思路。研究表明，海河流域农田土壤水综合效用指数在不同水平年为0.62~0.74，其中平水年土壤水综合效用指数最高，丰水年其次，枯水年最低，这一定量评估成果对土壤水研究具有重要参考价值。应用成果也从一个侧面验证了MODCYCLE模型在强人类活动流域水循环模拟和水资源评价中的适用性和科学价值。

本书理论基础扎实、研究思路清晰、应用成果丰富，为海河流域大尺度土壤水规律研究提供了重要的数据基础和模型支撑；为强人类活动影响的缺水流域土壤水开发与流域水资源管理提供了重要的参考依据。同时，对于从事相关领域和相关区域工作的科研人员和水资源管理人员而言，也是一本很好的参考书籍。

中国工程院院士
中国农业大学教授



2015年6月16日

前言

土壤水是作物生长最直接的水源，其他形式的水一般要转化为土壤水才能被作物有效吸收，参与光合作用并产生干物质。因此土壤水对于农业生产十分重要、不可或缺。然而土壤水是极不稳定的，在作物的根系层土壤水分含量的日变化量十分明显，尤其在一些半湿润、半干旱地区，10 天以上持续不降雨，土壤就会从湿润转化为干旱。正是由于土壤水的这一特征，常规的以月尺度、年尺度为主的水资源评价方法都无法适用，亟需研究提出新的土壤水评价方法。本研究从土壤水对农业生产的有效性指标考虑，提出了基于土壤水监测的全时空效用评价理论和技术方法，以海河流域典型区为例，开展了技术应用实践。

海河流域是华北地区的粮仓，以占全国 1% 的水资源承担了 10% 的粮食生产任务，其中土壤水发挥了不可替代的作用。然而，对土壤水的资源属性长期以来备受学术界的争议，对于土壤水的资源和效用评价也是众说纷纭。2006 ~2010 年由王浩院士主持立项的国家“973”项目“海河流域水循环演变机理与水资源高效利用”对土壤水开展了专题研究。在海河流域 6 个地市布设 318 个观测点对土壤水分、土壤质地和机械组成进行了分层测验，获得了较为系统的土壤水特征数据，为海河流域土壤水研究积累了宝贵的第一手资料。基于土壤水及其相关物理特性观测数据，本研究模拟构建了海河流域典型区域的土壤湿度场。考虑到土壤湿度场的时空演变特性和农作物生长期对土壤水分的需求节律，从土壤水有效性理论出发，开展了区域土壤水的效用评价。相关成果可为土壤水的全时空高效调控提供科技支撑。

本书系统汇聚了“海河流域土壤水监测与土壤水效用评价”研究和实践中取得的主要成果，共分 9 章，主要包括四个部分：第一部分为绪论，即第 1 章，简述土壤水研究的基本概念、研究内容与技术路线；第二部分为理论部分，包括第 2 ~4 章，系统梳理本领域的国内外研究进展，提出农田土壤水效用评价与全时空高效调控理论，介绍土壤水监测的主要方法和原理；第三部分为实践应用部分，包括第 5 ~8 章，开展不同空间尺度土壤水监测，构建典型区域土壤湿度场，并进行土壤水效用评价；第四部分为结论与展望，即第 9 章，总结研究成果，并提出土壤水高效调控的方向和未来研究重点。

本书是在国家“973”项目“海河流域水循环演变机理与水资源高效利用”(2006CB403400)、国家自然科学基金面上项目(51279208)、国家自然科学基金青年基金(51109222、51209170、51409275、51409078和51309245)以及国家国际科技合作专项资助(2013DFG70990)的共同资助下,由中国水利水电科学研究院、西北农林科技大学、河北工程大学等单位的研究人员共同编写完成,具体完成人员如下:

第1章 高学睿,刘家宏,张海行,栾清华,付潇然;

第2章 刘家宏,陈似蓝,高学睿,秦韬,栾清华;

第3章 高学睿,刘家宏,陈向东,栾清华,付潇然;

第4章 刘淼,高学睿,刘家宏,陈似蓝,张海行;

第5章 刘家宏,李玮,王润东,付潇然,曹阳;

第6章 刘淼,刘家宏,张海行,陈似蓝,栾勇;

第7章 栾清华,秦韬,刘家宏,高学睿,陈向东;

第8章 高学睿,刘淼,陈向东,张海行,徐丹;

第9章 秦韬,高学睿,刘家宏,刘淼。

特别指出,中国工程院王浩院士、中国水利水电科学研究院秦大庸教授、河北省农林科学院李科江教授以及河北省水文局刘克岩教授在本书编著和课题研究过程中,多次亲临现场并给予耐心指导;中国水利水电科学研究院陆垂裕教授在MODCYCLE模型的开发和完善过程中,做了大量的开创性工作,杨贵羽教授为本书成稿提供了许多宝贵意见和建议。同时,张俊俄、郭迎新、葛怀凤、陈根发、陈强、于赢东、卢路、叶睿、胡剑、苟思、侯卓等克服许多艰辛、不畏严寒、不辞劳苦,与有关编著成员齐心协力完成了流域内10.16万 km^2 的野外土壤墒情试验以及相关实地调研和踏勘。野外试验和调研期间得到了河北省水利厅、河北省农林科学院、河北省水文局、邯郸市水利局等部门及其下属单位领导、专家和工作人员的指导和帮助,在此一并致谢。

限于笔者水平和编写仓促,书中不足之处在所难免,敬请广大读者不吝批评赐教。

作 者

2015年3月于北京

目 录

总序
序
前言

第 1 章 绪论	1
1.1 土壤水的概念及其表征	1
1.2 土壤水资源的研究意义与研究重点	3
1.3 主要内容及技术路线	5
1.3.1 主要内容	5
1.3.2 技术路线	6
1.4 本章小结	7
第 2 章 国内外土壤水研究进展	8
2.1 土壤水监测方法的研究进展	8
2.2 土壤水运动机理与模拟研究进展概述	10
2.2.1 土壤水运动理论研究及发展	10
2.2.2 土壤水运动过程模拟研究进展	11
2.3 土壤水资源评价与作物高效利用研究进展	13
2.3.1 土壤水资源的认识	13
2.3.2 土壤水资源评价研究	14
2.3.3 作物对土壤水高效利用研究	16
2.4 本章小结	17
第 3 章 土壤水效用评价与高效利用调控理论方法	18
3.1 土壤水效用评价理论	18
3.2 土壤水效用评价指标体系与计算方法	20
3.2.1 农田土壤水库及其特征库容	20
3.2.2 基于土壤水库的土壤水效用评价指标及计算方法	21
3.3 土壤水效用评价方法与工具	25

3.3.1 农田土壤水运动模拟	25
3.3.2 基于层次分析法的土壤水效用多指标综合评价	41
3.4 土壤水高效利用调控理论	44
3.4.1 土壤水调控的意义	44
3.4.2 土壤水全时空调控的概念理论	45
3.4.3 土壤水全时空调控的方法准则	46
3.5 本章小结	47
第4章 土壤水监测方法与基本原理	48
4.1 点尺度土壤水分监测的主要方法	48
4.1.1 烘干称重法	48
4.1.2 负压式土壤湿度计测定法	49
4.1.3 中子法	51
4.1.4 电磁法	51
4.2 农田单元水分运移系统监测方案	52
4.2.1 水平衡法	53
4.2.2 大气湍流特征监测法	53
4.3 区域大尺度土壤水监测原理和方法	55
4.3.1 基于多元校验的分布式水文模型模拟法	56
4.3.2 光学遥感方法	57
4.3.3 微波遥感方法	59
4.4 本章小结	62
第5章 海河流域典型农田单元土壤水监测研究	63
5.1 典型单元试验介绍	63
5.1.1 试验区简介	63
5.1.2 试验观测	64
5.1.3 部分观测数据	67
5.2 土壤水转换模型的构建	70
5.3 模拟结果验证	71
5.3.1 埋深 2m 以上土壤含水率对比验证	71
5.3.2 土壤剖面分层含水率对比验证	72
5.3.3 叶面积指数和株高对比验证	72
5.4 典型单元土壤水转换规律研究	73
5.4.1 MODCYCLE 模拟研究	73

5.4.2 水平衡法 ET 研究	79
5.5 本章小结	83
第 6 章 海河流域大尺度土壤水特征参数监测研究	84
6.1 海河流域大尺度土壤采样试验概况	85
6.1.1 研究区域	85
6.1.2 采样点布设	85
6.1.3 观测方案	89
6.2 海河流域典型单元特征时段土壤湿度场分布图	92
6.2.1 南部平原小麦返青期土壤湿度场特征	92
6.2.2 山前平原春季灌溉前土壤湿度场特征	92
6.2.3 沿海低平原灌溉间隔期土壤湿度场特征	95
6.2.4 滦河流域小麦成熟期土壤湿度场特征	97
6.2.5 北部起伏区高植被覆盖期土壤湿度场特征	98
6.2.6 黑龙港平原玉米成熟期土壤湿度场特征	100
6.3 海河流域典型单元土壤水库特性分析	104
6.3.1 海河流域典型单元土壤水库特征参数估算方法	104
6.3.2 海河流域典型单元土壤水库特征参数估算结果	105
6.4 本章小结	109
第 7 章 邯郸市农田土壤连续湿度场的模拟与构建	110
7.1 研究区概况	110
7.1.1 地理区位	110
7.1.2 气候水文	111
7.1.3 社会经济与农业生产	113
7.2 研究区土壤湿度场的模拟与插值	113
7.3 基础数据准备与模型构建	114
7.3.1 基础数据需求	114
7.3.2 研究区子流域划分及模拟河道定义	115
7.3.3 土壤类型、土地利用及农业种植管理	117
7.3.4 农田土壤分层与土壤属性数据	120
7.3.5 基本模拟单元的建立	121
7.3.6 模型采用的主要数据	122
7.4 参数率定结果验证	126
7.4.1 水量平衡验证	127

7.4.2	出境水量验证	128
7.4.3	土壤湿度验证	130
7.5	土壤墒情连续场的生成	138
7.6	本章小结	139
第8章	邯郸市农田土壤水效用评价	140
8.1	邯郸市土壤水效用评价结果	140
8.1.1	评价指标	140
8.1.2	基于层次分析法的指标权重计算	141
8.2	邯郸市农田土壤水效用评价结果	143
8.2.1	对比情景的设置	143
8.2.2	平水年全市农田土壤水效用评价	143
8.2.3	丰水年及枯水年全市农田土壤水效用评价	147
8.3	邯郸市农田土壤水全时空调控的方法与措施	152
8.3.1	农业水资源分区测算与种植结构调整	152
8.3.2	提高土壤储水能力	153
8.3.3	实施区域测墒灌溉管理制度	153
8.3.4	大力普及节水农业技术	153
8.4	本章小结	153
第9章	结论与展望	154
9.1	结论	154
9.1.1	理论方法层面	154
9.1.2	试验研究层面	155
9.1.3	成果应用层面	156
9.2	研究展望	158
参考文献		160
索引		166

第 1 章 | 绪 论

受气候变化和人类活动的共同影响，我国径流水资源日益匮乏，其中以海河流域、黄河流域及西北内陆河流域最为严重（杨贵羽等，2014）。在水资源供需矛盾十分突出的大背景下，城市工业、生活取水挤占了农业和生态的正常用水需求，带来生态环境恶化、农业干旱风险加大等问题。

土壤水对农业和生态系统的作用属性在很长一段时间内被水资源研究领域所忽视。传统的狭义水资源只涉及“看得见”的地表水和地下水资源，对易于散失并难以调控的土壤水缺乏足够的重视和研究。为应对当前水资源短缺的形势，结合已有先进的土壤水监测手段和模拟技术，加强土壤水的调控和利用不仅变得可能，而且非常必要。为此，本书以我国水资源最为紧缺的海河流域为例，采取点面结合的方式，运用观测和模拟手段，构建了研究区土壤湿度场，揭示研究区土壤湿度的时空变化规律。从土壤水资源的功能和属性出发，提出了区域土壤水效用理论与评价方法，并在河北省邯郸市进行了应用和验证。本研究在农田水循环全过程模拟解析的基础上，立足于土壤水的全时空调控管理，实现土壤水资源的有效开发和高效利用，这是未来我国北方缺水地区农业和生态发展的重要策略和管理方向。

1.1 土壤水的概念及其表征

土壤是地球表面风化的散碎岩石，是一种由大小不同的固体颗粒集合而成的具有孔隙或空隙的散粒体，是自然界极为常见的多孔介质（朱建强，2008）。土壤水是赋存于土壤多孔空隙介质中的液体。地球表面的土壤层是一个巨大的土壤蓄水库，蓄水容量据估计可以达到 $16\ 500\ \text{km}^3$ ，是地球上河川径流量的 8 倍之多（芮孝芳，2004）。在水文循环过程中，土壤起着十分重要的调节和分配水量的作用。因此，土壤水是全球水文循环系统、生态系统及气候系统中的一个关键变量，控制众多地球物理过程和反馈循环回路。对农业系统来说，由于一切形式的水都要转变成土壤水才能被农作物所吸收，农田土壤水循环过程，以及土壤的时空分布、形态、数量与农作物的高产稳产具有十分重要的关系。

根据《辞海》的定义，土壤水是指在水循环过程中存在于地表以下，存储和运移在土壤岩石空隙、裂隙等介质中的水分。由于在生产实践中不同研究领域的侧重点不同，提出的土壤水的概念也不尽相同。在土壤学中，土壤水是指在一个大气压下，在 105°C 的条件下能从土壤中分离出来的水分。从本质上说，土壤学从土颗粒的水吸力角度定义了不同土壤水类型。土壤水分主要受到土壤颗粒的分子力、土壤孔隙毛细力及地球重力的作用。土壤颗粒表面对水分子的吸引力称为分子力，受到土壤分子力而固持的土壤水称为束缚水。

束缚水分分为两类：吸湿水和膜状水。吸湿水是被干燥土粒表面分子引力强烈吸附的水分，由于水分子被土粒表面强烈吸引，分子之间的距离小于液态水分子之间的距离，因此吸湿水表现出来的是固态水的性质。吸湿水不能移动，对农作物的生长几乎没有任何作用。膜状水是排列在吸湿水包裹的土体颗粒外围的水膜。由于膜状水是由土体颗粒表面形成吸湿水层后的剩余分子力引起的，因此它受到的分子引力较小，性质与液态水相似，可以部分为农作物所用。土壤孔隙是一条条相互连通的很细的毛管，可以对孔隙中的水产生毛管力，由于毛管力的作用而固持在土壤中的水分称为毛管水。毛管水根据其于地下水之间的互动关系可以分为毛管上升水和毛管悬着水。地下水可以凭借毛管作用上升进入土壤孔隙中，这种沿着毛管上升的水分称为毛管上升水；降雨或灌溉后凭借毛管作用力保持在土壤表层的水分，称为毛管悬着水，它与地下水无直接水力关系。当土壤水分含量超过毛管的持水能力时，土壤水将在重力作用下向下移动，称为重力水。重力水向下移动时，如果中途不遇到任何障碍一直进入地下含水层，这部分水叫做渗透重力水；如果重力水在向下运动过程中遇到不透水层，重力水的下渗会受到阻碍从而形成滞水，这部分水称为支持重力水。

土壤中各种类型的水分都可以用一个典型的土壤湿度来表征，该数值对于特定条件和特定质地的土壤通常保持相对稳定，将其称为土壤水分常数。它一般可分为以下几种。

1) 吸湿系数。当空气中的水汽达到饱和时，干燥土壤的吸湿水达到最大数量时的土壤含水量称为最大吸湿量，亦称之为吸湿系数。由于吸湿水不能被植物根系所吸收，被认为是无效水。

2) 凋萎系数。当土壤含水量下降到一定程度时，作物根系由于无法吸水而产生永久凋萎，此时的土壤含水量称为凋萎系数。凋萎系数是一个重要的土壤水分常数，它是作物承受干旱的下限，对表征农业干旱具有十分重要的意义。

3) 最大分子持水量。膜状水和吸湿水达到最大量时的土壤含水率称为最大分子持水量。由于膜状水受到的分子力远远小于吸湿水，因此一部分的膜状水可以被植物根系吸收。

4) 毛管断裂含水量。当土壤中的悬着毛管水减少到一定程度时，其连续程度会遭到破坏而断裂，从而停止悬着毛管水的运动，此时的土壤含水率称为毛管断裂含水量。毛管断裂含水量对作物的生长具有十分重要的意义，它可以作为人工灌水的下限。

5) 田间持水量。从数量上来讲，田间持水量是指土壤中悬着毛管水达到最大量时的土壤含水量，它包括全部的吸湿水、膜状水和毛管悬着水。田间持水量是土壤在不受地下水影响的情况下所能保持水分的最大数量，当土壤含水量超过田间持水量时，由于受到重力的作用，水分将向下运动不能固持在土壤孔隙中，因此，田间持水量被认为是田间土壤水有效利用的上限，也是田间灌水量的确定依据。

6) 饱和含水量。当土壤中的毛管孔隙都充满水分时，土壤的含水率称为土壤全持水量。土壤全持水量在数量上等于土壤的孔隙度，是衡量土壤水分饱和状态的一个重要标准。

根据以上论述，土壤水分常数与土壤水分类型之间的关系可由图 1-1 来表示。

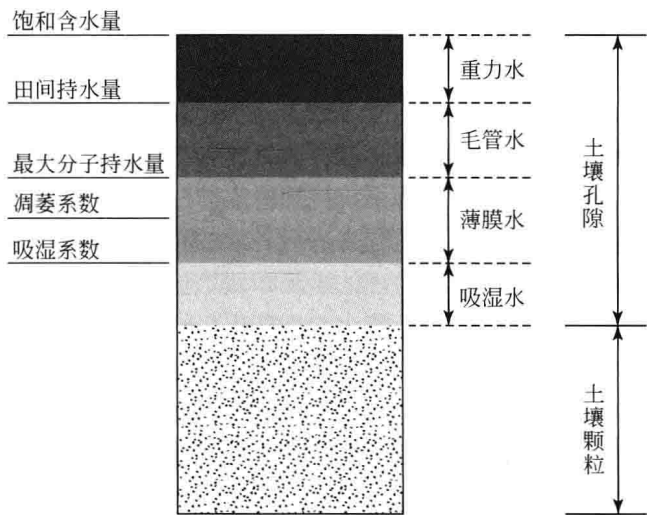


图 1-1 土壤水分常数与土壤水分类型关系示意图

1.2 土壤水资源的意义与研究重点

土壤水是农业和生态系统中各种生物生长和活动的必需要素，任何形式的水资源只有转化为土壤水才能被作物或植物吸收，土壤水的数量和质量直接影响作物或植物的生长发育。从水循环角度来看，土壤水也是水文过程中最活跃的要素之一，其补给和排泄过程十分频繁，是流域“三水”（大气水、地表水和地下水）转化的纽带，在水资源的形成、转化和消耗过程中具有不可替代的重要作用。因此，土壤水为作物生长提供有效供水的特性是被普遍公认的，土壤水的资源属性也是显而易见的。

“土壤水资源”的概念自首次由苏联水文学家利沃维奇（M. Nputotulu）提出之后，在国内外就一直被广泛地讨论和研究。水文学家施成熙等（1984）认为：土壤水被调蓄到起后备水源的作用，形成可以向根系层补给土壤水分的土壤水库，但还不是浅层潜水的组成部分时，也可以按水资源论；刘昌明院士也对土壤水资源的概念作了详细论述，并提出了区域多年平均土壤水评价的计算公式。然而，该公式仅笼统地将土壤水蓄变量作为土壤水资源（刘昌明，2004）。目前，绝大多数研究者对土壤水资源的研究主要从农业角度出发，认为土壤水资源是指可被作物根系吸收利用的浅层土壤孔隙中的水。但是土壤水到底能否被称为水资源？该问题可以从水资源本身的行为和特性方面进行分析。目前，水资源的本质特征已经在学界基本达成了共识，即有效性、可控性和可再生性。水资源的有效性是指，只有对人类生存和发展及自然生态系统具有效用的水分才可以看做水资源，换句话说，就是对生产、生活和生态提供有效供水的那部分水量。可控性是指，在对自然和社会具有效用的那部分水资源中，人们只有通过工程、管理等措施可以开发利用和调控的那部分水分才能称为水资源；可再生性是指，水资源在流域水循环过程中形成和转化，其数量和质量在一定程度上保持稳定的再生性和持续性（王浩等，2004）。

以水资源的定义和标准来衡量土壤水，其行为和特征基本满足水资源的一切特性。首先，土壤水对国民经济和生态系统的效用是显而易见的。土壤水对农业生产的作用非常重要，它是维系作物生长发育的最主要的水分源泉，一切形式的水资源只有转化为土壤水才能被作物吸收和利用，土壤水的数量和质量直接影响到作物的生长发育。土壤水同时又是流域生态水文过程中的关键因子，是整个生态系统持续稳定的核心要素之一。其次，虽然土壤水不像地表水和地下水那样可以通过修建工程来进行有效的调控和调度，但是可以通过调整种植结构、提高区域耕作工艺水平、采用合理的灌溉和栽培技术等措施优化土壤水的时空分布规律，提高土壤水的利用效率。再次，土壤水的循环再生性是显而易见的。土壤水是区域水文过程中最为活跃的要素之一，直接参与区域水循环。观测资料表明，土壤水的补给、稳定和排泄过程呈现出大大小小的多周期单位，这种现象受到大尺度气候因子、年尺度气象因子、次降雨过程及作物耕作等管理行为的影响。从一个水文年份来看，汛期一般是土壤水的补给阶段，汛期末到第二年春季是土壤水的稳定平衡阶段，从第二年春季开始到汛期到来之前正值作物生长旺盛的高需水阶段，也是土壤水高强度排泄阶段。通过上述补给和排泄过程的循环往复，土壤水资源可以得到永续利用，为国民经济和生态系统健康发展服务。

当前，全球气候变化和高强度人类活动对地表径流性水资源的时空格局影响十分明显，传统的狭义水资源衰减趋势显著，保障自然、社会多用户的用水需求，保持经济增长，提高粮食安全等都是摆在水资源管理人员面前的难题。因此，拓展传统水资源管理的视野和路径，开展广义水资源的开发和高效利用研究，评估全口径水资源的利用效率，是应对当前水资源供需矛盾的重要措施。

毋庸置疑，土壤水资源在保障农业生产和维持生态系统平衡中地位突出，不仅可以支撑国民经济命脉——农业的生产，还为自然生态系统健康持续提供充足的水源保障。尽管人们对土壤水资源的认识已经逐渐加深，但在土壤水资源的储量计算、土壤水的利用效率评价及土壤水高效利用调控手段等方面还存在很多不足。概括起来，当前土壤水资源领域的主要研究热点如下。

1) 区域土壤水特性与土壤水资源数量评价。由于长期以来土壤水资源并没有像径流性水资源那样得到充分的重视，开展土壤水数量评价的相关研究还不多，还未形成相对成熟的土壤水资源数量评价理论与方法体系。开展土壤水资源的数量评价的首要前提是要对研究区的土壤湿度进行较长时期的连续观测，同时要对农田土壤根系活动层的土壤属性和关键参数进行有效采集和分析。然而，不同于雨情和水情的监测站网体系，目前我国的土壤墒情监测站网建设还不完善，尚缺乏大尺度区域土壤湿度时空变化的连续观测成果。受到资金和技术的限制，农田土壤层特征参数的获取和分析也存在困难，很大程度上阻滞了土壤水资源评价理论和技术的发展进步。今后，应大力开发新的土壤水监测技术，结合遥感技术、计算机模拟技术、数据同化技术等高新技术，开展全国土壤墒情监测站网的业务化运行，建立区域土壤属性数据库，为土壤水资源的评价和计算提供基础数据支持。

2) 土壤水利用效率与效用评价。追求水资源的高效利用是水资源管理者的永恒目标。对传统的径流性水资源来说，一般使用投入单位水量产生的效益和价值来衡量水资源的使用效率。由于径流性水资源的可调控性好，该计算方法一般可以得出确定的结果。但是，土壤水运动特