国家自然科学基金项目（49972083，40472123）
中国地质调查局地质调查项目
中国地质大学学术专著出版基金资助出版
研究成果

土壤水资源及其有效利用

——以华北平原为例

靳孟贵　方连育　等著

中国地质大学出版社

国家自然科学基金项目(49972083,40472123)
中国地质调查局地质调查项目
中国地质大学学术专著出版基金

研究成果
资助出版

土壤水资源及其有效利用

——以华北平原为例

靳孟贵　方连育　等著

中国地质大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

土壤水资源及其有效利用——以华北平原为例/靳孟贵,方连育等著.—武汉:中国地质大学出版社,2006.11

ISBN 7-5625-2124-7

Ⅰ.土…
Ⅱ.①靳…②方…
Ⅲ.土壤水-水资源-有效利用-华北平原
Ⅳ.S152.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 084198 号

土壤水资源及其有效利用——以华北平原为例 靳孟贵 方连育 等著

责任编辑:王凤林 责任校对:胡义珍

出版发行:中国地质大学出版社(武汉市洪山区鲁磨路 388 号) 邮政编码:430074

电话:(027)87482760 传真:87481537 E-mail:cbb@cug.edu.cn

经 销:全国新华书店 http://www.cugp.cn

开本:787 毫米×1 092 毫米 1/16 字数:226 千字 印张:8.75 彩页:2

版次:2006 年 11 月第 1 版 印次:2006 年 11 月第 1 次印刷

印刷:湖北地矿印业有限公司 印数:1—800 册

ISBN 7-5625-2124-7/S·29 定价:29.00 元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

前 言

农业是第一用水大户，约占我国用水总量的70%以上。土壤水是农业生产的核心资源之一，是农用水资源最重要的部分。目前农业用水有效程度依然很低，提高土壤水利用效率，还有很大潜力。

我国北方降水的2/3转化为土壤水(天然)，地下水和地表水也只有在转化为土壤水(人工)后才能被作物利用。探讨土壤水资源的特性和评价方法，对于完善水资源理论具有重要意义。进行土壤水开发利用技术的研究与推广，有效利用土壤水，是高效利用有限水资源的关键；对于缓解北方水资源紧缺，优化配置水土资源，实现农业的可持续发展具有重要的战略意义。

传统水资源评价与规划只考虑地表水和地下水，完全忽略了土壤水。例如，按传统方法计算，年均降水量500～600mm的河北平原黑龙港地区亩均水资源只有117m³(合175mm)，竟然比年均降水350mm(何希吾等，1996)、亩均水资源252m³的以色列还少，这显然是不符合实际的。把所占水资源份额最大、对农林牧业生产起关键作用的土壤水排除在水资源评价内容之外，必然使水资源评价产生很大的偏差。这是长期以来水资源评价的一个重大误区。

土壤水是否作为资源，曾有争议。随着人们对土壤水研究的深入以及土壤水作为资源的客观性，使越来越多的学者认识到土壤水的资源属性。自20世纪70年代前苏联学者李沃维奇(M. Nputotulu)提出土壤水资源的概念(朱福星，1993)以来，国内外学者对土壤展开了系列研究(Budagovskii，1985、1991；Shumova，2000；由懋正等，1996；冯谦诚等，1990；张利等，1990)。但是，迄今为止，土壤水资源评价仍未被列入水资源评价之中；土壤水资源评价的内容与方法更无标准可循。

为了探讨土壤水资源的特性和评价方法，研究提高土壤水利用效率的途径和技术措施，笔者及其课题组先后开展了国土资源部科技项目"土壤水资源的特性及评价方法探讨"、中国地质调查局地质调查项目"土壤水的开发利用技术研究与推广"、国家自然科学基金"土壤水流动系统及其应用研究"、原地矿部定向基金项目"河北省景县王瞳试验区土壤水有效利用及咸水利用与调控研究"等项目。本书是笔者多年来开展的土壤水系列研究成果的总结。

在研究过程中，我们采用点面结合、多学科交叉渗透、室内外试验与示范结合、定性分析与定量模拟相互印证的技术路线；组织了由水文地质、农田水利、农学、土肥、环境、微生物、地球化学等方面人员组成的多学科队伍联合攻关，在深入分析土壤水资源特性的基础上，重点研究土壤水的科学利用技术及其相关的应用基础问题。既注重在典型地区的重点试验，又在面上

选择代表性地段进行示范。选择华北平原中部地区的衡水市开展土壤水利用技术的试验研究，并在景县、冀州、饶阳等地开展示范；在衡水、郑州和王疃等地进行不同岩性、不同地下水位埋深条件下的土壤水动态监测。

土壤水有效利用就是要全方位地提高作物产量和水分生产率（单位体积水的作物产量）。除气候条件外，作物品种、耕作方式、土壤类型、土壤水分、养分、温热状况等诸多因素都将综合影响作物产量和水分利用率。同时，这些因素彼此之间是相互作用、相互制约、不可分割的。研究它们的内在规律及其对作物产量和水分利用率的综合效果，构建优化的田间生态环境（土壤水分、养分、温热、透气条件等）是提高作物产量和水分生产率的关键。为此，我们提出了土壤水全时空调控和土壤水流动系统的概念，用以指导田间土壤水有效利用试验。把土水势、水分、热、养分、盐分、微生物等纳入土壤水流动系统理论的统一框架中，通过理论分析、室内外试验与计算机模拟综合研究各因素相互作用、相互制约的内在规律（时空四维）及其对作物产量和水分利用率的影响。定量分析作物耗水量组成和比例，探讨不同处理的节水增产机理和土壤水利用潜力。

在总结以上科研成果的基础上，本书论述了土壤水资源的概念、特性与评价方法，以及土壤水有效利用的理论与实践等。全书共分九章。第一章综述国内外研究动态，介绍了本书的主要内容和研究思路。第二章论述土壤水资源的特性及评价方法（提出用土壤水资源年补给量表示一个地区土壤水资源的多少，用作物生长期土壤水资源可利用量评价作物生长期土壤水资源的多少）；并给出了华北典型地区土壤水资源评价实例，论述了不同地区、不同土壤结构的土壤水资源特点。第三章针对华北地区主要作物需水规律与降水时间分布的矛盾，论述了土壤水有效利用原理，包括土壤水流动系统理论、土壤水全时空调控概念框架及相应的土壤水调控措施。第四章论述了有效利用土壤水综合配套技术的试验成果。第五章论述了基于土壤水流动系统的土壤水分—养分—盐分数值模拟，进一步分析了典型土壤水调控措施的节水增产机理。第六章介绍土壤水利用配套技术示范情况。第七章评价了土壤水利用技术的经济效益。第八章提出了土壤水利用技术推广方案。第九章为结论和建议。

本书撰写分工如下：前言由靳孟贵执笔，第一章、第二章由靳孟贵、张德忠执笔，第三章由靳孟贵、汪丙国执笔，第四章由郭会荣、方连育执笔，第五章由汪丙国执笔，第六章由方连育、康清普执笔，第七章由高云福、方连育执笔，第八章由方连育、高云福执笔，第九章由张德忠、靳孟贵执笔。全书由靳孟贵统稿。王蕴玉、罗泽娇、赵万林、张素娥、吴恒富等参加了部分章节的资料整理或图件绘制。

张人权教授早在20世纪70年代就撰文论述土壤水资源利用问题，主持完成了“河北省景县王疃综合利用水资源农业试点，1991—1995”、“河北省景县王疃试验区土壤水有效利用及咸水利用与调控研究，1993—1995”等与土壤水有关的课题，参与了后续的土壤水系列研究工作，

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

并审阅了本书的多次修改稿件，提出了许多建设性意见。

书中关于土壤水资源特性和评价方法、土壤水流动系统的主要成果是靳孟贵在武汉水利电力大学从事博士后研究期间的研究成果，得到了武汉水利电力大学张蔚榛教授（中国工程院院士）、张瑜芳教授的指导与帮助。河北地勘局第三水文地质工程地质大队、河南省环境水文地质总站、河北省农科院旱作研究所的许多同志，以及中国地质大学的许多研究生为野外试验与监测、室内样品分析测试等工作付出了辛勤的劳动。研究过程中获得了中国地质调查局、国土资源部国际合作与科学技术司、国家自然科学基金委的经费资助；得到了中国地质调查局、中国地质大学、河北省地质调查院、河南省环境水文地质总站、河北省农科院旱作研究所、衡水市农业局、景县龙华镇政府和高庄村村委会、王瞳镇政府、野庄乡政府和堤子村村委会、饶阳县王同岳乡政府、冀州市门庄乡零藏口村委会等单位的大力支持。在此谨对为本项研究给予关心、支持的单位和个人表示衷心的感谢，对本书引用文献的作者们表示感谢。

研究土壤水及其有效利用的理论与技术，推广利用土壤水是一项公益性、前瞻性工作，对于解决“三农”问题具有重要意义。我们殷切希望社会各界人士进一步关心、支持、宣传这项工作；期待更多同仁积极参与土壤水的调查研究，以及成果交流和应用推广，共同为我国农业的可持续发展作出更大贡献。恳切希望读者批评指正书中的错误与疏漏。

通信地址：武汉市中国地质大学环境学院，邮编：430074；电话：027－67883461；电子邮件：mgjin@cug.edu.cn。

作　者

2005 年 12 月

目 录

第1章 绪 论 …… 1

1.1 问题的提出及意义 …… 1
1.2 研究现状概述 …… 1
1.3 研究内容和思路 …… 3

第2章 土壤水资源及其评价方法 …… 5

2.1 土壤水在水资源组成中的地位 …… 5
2.2 土壤水资源的概念与特性 …… 6
2.3 土壤水资源评价内容与方法 …… 8
2.3.1 土壤水资源的若干指标 …… 8
2.3.2 土壤水资源年补给量(W_r) …… 10
2.3.3 作物生长期土壤水资源可利用量(W_c) …… 10
2.3.4 作物生长阶段土壤水资源可利用量 …… 11
2.3.5 土壤水的水质 …… 11
2.4 王疃试验区土壤水资源评价 …… 11
2.4.1 王疃试验区基本条件 …… 11
2.4.2 王疃试验区土壤水特征 …… 14
2.4.3 王疃试验区土壤水资源年补给量 …… 18
2.4.4 王疃试验区主要作物生长期土壤水资源可利用量 …… 19
2.5 郑州均衡试验场土壤水资源 …… 21
2.5.1 郑州均衡试验场土壤水监测情况 …… 21
2.5.2 郑州均衡试验场不同地中渗透仪的土壤水动态特征 …… 21
2.5.3 郑州均衡试验场不同地中渗透仪的土壤水年补给量 …… 24
2.6 衡水试验场不同田间管理条件下的土壤水动态特征 …… 26

第3章 土壤水调控原理 …… 29

3.1 土壤水调控的意义 …… 29
3.2 土壤水流动系统的概念及特点 …… 30
3.3 土壤水全时空调控的涵义与措施 …… 32
3.4 基于土壤水流动系统理论的土壤水调控 …… 34
3.4.1 合理利用土壤水系统的调节功能 …… 34
3.4.2 提高土壤水储存量的利用率 …… 36
3.4.3 提高土壤水系统的储水能力 …… 36
3.4.4 优化土壤水流动模式 …… 36

第 4 章 土壤水有效利用试验 …… 40
4.1 试验概况 …… 40
4.1.1 主要试验内容 …… 40
4.1.2 衡水试验场基本条件 …… 41
4.1.3 衡水试验场试验情况 …… 42
4.2 冬小麦土壤水利用试验 …… 42
4.2.1 深部土壤水利用试验分析 …… 42
4.2.2 优化土壤水流动模式试验分析 …… 52
4.3 夏玉米土壤水利用试验 …… 59
4.3.1 土壤水分特征 …… 59
4.3.2 土壤养分、盐分、微生物及温度分析 …… 61
4.4 提高土壤水系统储水能力试验 …… 64
4.5 王瞳棉花田土壤水利用试验 …… 66
4.6 试验小结 …… 68
第 5 章 土壤水流动系统数值模拟 …… 70
5.1 土壤水流动系统数学模型及模拟 …… 70
5.1.1 土壤水流及溶质运移数学模型 …… 70
5.1.2 数学模型的求解 …… 71
5.1.3 模型参数及其确定 …… 71
5.2 夏玉米田土壤水流动系统数值模拟 …… 76
5.2.1 夏玉米田二维土壤水分—养分—盐分模拟 …… 76
5.2.2 模拟结果分析 …… 77
5.3 沟播冬小麦田土壤水流动系统数值模拟 …… 78
5.3.1 边界条件 …… 79
5.3.2 模拟区剖分及参数输入 …… 79
5.3.3 模拟时段及时间步长 …… 79
5.3.4 数值模拟及其结果分析 …… 80
5.4 典型条件下二维土壤水分—养分—盐分数值模拟 …… 84
5.4.1 不同土壤结构条件下二维土壤水分—养分—盐分模拟 …… 84
5.4.2 不同潜水位埋深条件下二维土壤水分—养分—盐分模拟 …… 88
5.5 小 结 …… 90
第 6 章 土壤水利用技术示范 …… 93
6.1 示范区选择的原则及组织情况 …… 93
6.2 示范区基本情况 …… 93
6.2.1 衡水市旱作所试验场方田示范区 …… 93
6.2.2 景县龙华镇高庄示范区 …… 93
6.2.3 饶阳县王同岳乡崔池示范区 …… 94

6.2.4 冀州市门庄乡零藏口示范区 …… 94
6.3 示范技术要求 …… 95
6.3.1 冬小麦土壤水利用技术示范及观测要求 …… 95
6.3.2 夏玉米土壤水利用技术示范及观测要求 …… 96
6.4 土壤水利用技术示范结果分析 …… 97
6.4.1 冬小麦土壤水利用技术示范的节水增产效果分析 …… 97
6.4.2 夏玉米土壤水利用技术示范的节水增产效果分析 …… 99
6.5 示范小结 …… 101
第7章 土壤水利用技术的经济效益评价 …… 102
7.1 土壤水利用技术的经济评价指标 …… 102
7.2 土壤水利用技术的经济效益评价 …… 103
7.2.1 单项指数评价 …… 103
7.2.2 综合指数评价 …… 105
7.2.3 土壤水利用技术的效益分析 …… 106
7.2.4 土壤水利用的宏观效益评价 …… 109
7.3 土壤水利用技术的适用性分析 …… 111
7.4 小 结 …… 113
第8章 土壤水利用技术推广方案 …… 114
8.1 推广利用土壤水的意义及可行性 …… 114
8.2 拟推广的土壤水利用技术 …… 114
8.2.1 提高土壤水系统调节能力技术 …… 114
8.2.2 合理密植充分利用深部土壤水技术 …… 115
8.2.3 优化土壤水流动模式技术 …… 115
8.3 推广措施 …… 119
8.3.1 推广组织形式 …… 119
8.3.2 经 费 …… 119
8.3.3 预期效果 …… 120
8.3.4 保障措施 …… 120
第9章 结论与建议 …… 122
9.1 结 论 …… 122
9.2 建 议 …… 123
参考文献 …… 124

第1章 绪 论

1.1 问题的提出及意义

华北平原水资源紧缺，已成为制约第一用水大户农业可持续发展的主要因素，前景令人担忧。例如，河北平原许多地表水体干枯，地下水严重超采导致区域地下水位持续下降。据1996—1997年数据，浅层地下水超采量 $15.6\times10^8 m^3/a$，局部含水层已被疏干；深层地下水超采量 $24.55\times10^8 m^3/a$。20世纪60年代初，山前平原区浅层地下水埋深在1～10m之间；2001年，山前平原区浅层地下水埋深下降为4～40m(费宇红，2005)。东部滨海平原区沧州深层地下水漏斗中心水位埋深已由1972年的9.21m(白永辉等，2005)下降到2003年的100.88m(胡荣花等，2005)。然而，很多地方农业用水浪费仍然严重，目前农业的发展主要是靠过量利用水资源、牺牲环境为代价换取的。显然，这种发展是不可持续的！

华北平原降水的70%以上转化为土壤水(天然)，地下水和地表水也只有在转化为土壤水(人工)后才能被作物利用；土壤水是可被植物直接利用的唯一水资源形式(Zhang，*et al.*，1994)。土壤水资源对于农、林、牧业及生态、环境保护具有重要意义。但是，迄今为止，土壤水作为水资源的重要组成，还没有引起社会各界的足够认识与重视；人们在评价水资源时，仍然把占水资源份额最大的土壤水排除在外，这是农用水资源评价的一个误区。土壤水资源评价的内容与方法更未得到公认。

从灌溉水源到田间，再通过作物蒸腾、光合作用形成作物经济产量，水分在经过的一系列转化环节中，产生无效损失(靳孟贵等，1999b)。其中，田间土壤水腾发消耗中1/3～1/2为无效的土面蒸发，蒸腾消耗也不都是有效的(雷声隆，1997；张喜英等，1995)。目前我国农业用水效率仍然较低，提高土壤水利用效率的潜力很大。

因此，研究土壤水资源的特性、调查与评价方法，是正确评价与合理利用农用水资源的基础；探讨并推广土壤水利用技术，有效利用土壤水，是高效利用有限水资源的关键，对于实现当地农、林、牧业的可持续发展和生态环境保护具有重要意义。本书主要以华北平原区为例，论述有关土壤水资源及其有效利用的理论和技术方法。

1.2 研究现状概述

自20世纪70年代前苏联学者李沃维奇提出土壤水资源(由懋正，王会肖，1996a)的概念后，前苏联学者 Budagovskii(1985)，Budagovskii *et al.* (1991)，Shumova(2000)等发表了关于土壤水资源的论述。Budagovskii(1985)等认为一个区域的降水量(扣除降雪蒸发量)在理论上可作为天然水分资源，它等于可恢复的地表水资源、土壤水资源和地下水资源之和；给定时期的腾发量(evapotranspiration)是土壤水的数量评价。

土壤水资源可供作物(植物)的利用储量(reserves)和作物对土壤水的有效利用程度可以用以下三个参数定量表征(Budagovskii,1985;Shumova,2000):①作物实际蒸腾量与潜在蒸腾量(对应最优土壤水储存量的蒸腾量)的比值(称为植物供水系数,crop water supply parameter),表示土壤水可供植被利用的程度;该系数等于1表示土壤水能充分满足植物蒸腾,小于1表示土壤水储量有限,可能制约植物蒸腾。②作物实际蒸腾量与腾发量的比值(称为土壤水利用系数,soil water utilization parameter),表示植物利用土壤水的有效程度;等于1时表示土壤水全部消耗于蒸腾。③实际腾发量与潜在蒸腾量的比值(称为土壤水储量系数,soil water reserves parameter),表示提高农田土壤水利用效率的潜力;该系数大于1时,可以通过减少土壤蒸发措施提高土壤水利用效率。这些系数都是随年度或时间不断变化的。但是,以上系数并不能满足土壤水资源评价和田间管理的需要,其理论和实用价值还需进一步探讨。

西方学者对土壤水运动理论和应用研究作出了卓越的贡献(雷志栋等,1999;Nielsen *et al.*,1972; Jury *et al.*,1991;Looney *et al.*,2000),但关于土壤水资源的明确论述,却较为少见。国内外学者关于土壤水势理论、农田四水转化、非饱和水盐运移理论、土壤—植物—大气连续体SPAC系统及其应用等方面的大量研究工作大大地推动了土壤水和节水农业等问题的发展(张蔚榛,1997;雷志栋等,1999;Looney *et al.*,2000)。

半个世纪以来(特别是近20多年来)我国许多科学家和工程技术人员一直致力于土壤水理论及其应用的研究(如农用水资源开发利用、节水农业、灌溉排水、盐碱地改良等),推动了我国农业的发展(贾大林等,1992;石元春等,1995;胡毓骐等,1995;刘昌明等,1997,1999;李英能等,1998)。

原武汉地质学院河北平原地下水科研组、河北地质局第九地质大队1979年在"我国北方平原农用地下水合理开发利用探讨"一文中明确提出有效利用土壤水问题。由懋正、袁小良等20世纪80年代开始探讨土壤水资源问题(由懋正等,1996)。

近10多年来,我国学者对土壤水资源作了一系列研究,探讨了土壤水资源的特性及其评价方法(李宝庆,1989;冯谦诚等,1990;张利等,1990;张和平等,1992;靳孟贵等,1997a,1999a;程伍群等,2001;夏自强等,2001)。冯谦诚等(1990)以河北临西实验区为例,探讨了土壤水的特点、概念与评价方法,指出:土壤水资源为土壤层内经常参与陆地水分交换的水量,并以土壤水补给量作为土壤水资源的数量评价。由懋正、王会肖(1996)在《农田土壤水资源评价》一书中较为全面地总结了国内外关于土壤水资源的研究进展,并比较系统地提出了土壤水资源的评价原则与方法,指出:一个流域的天然水资源量是其降水量,等于地表水、土壤水和地下水资源之和;即区域土壤水资源等于区域降水量减去地表水和地下水资源量。

杨建锋等(2000)专门讨论了地下水位浅埋区的土壤水资源评价问题,提出把地下水资源与土壤水资源作为一体进行评价。

一些学者还专门从土壤水库的角度探讨了土壤水及其利用问题。李开元、李玉山(1995)探讨了黄土高原土壤水库效应,通过农田水量平衡计算提出了土壤水利用的问题和潜力。沈振荣、汪林等(1995)探讨了华北平原土壤水及其对农作物的供水意义。孟春红等(2004)探讨了河北沧州地区土壤水库的储水能力。余艳玲等(2003)对比了土壤水库与地表水库的特性,探讨了云南省3个典型旱作区的土壤水资源评价与调控问题。

目前,土壤水资源研究的主要不足有:对土壤水资源的特性和重要性认识不够全面;尚未建立既能满足区域水资源比较或均衡分析需要,又能反映流域内不同地貌单元、不同岩性、不

此为试读,需要完整PDF请访问: www.ertongbook.com

同土地利用情况下土壤水资源量差异，指导田间管理，并得到公认的土壤水资源概念、评价指标与野外调查方法；土壤水资源的水质评价很少研究。

农田水分利用效率与农田土壤结构、作物特征、耕作方式、田间管理、灌溉排水等因素密切相关。由于研究对象的复杂性和测试手段的限制，目前多局限于单一或若干因子的研究。对以上诸多因素内在规律及其对作物产量和水分利用率作用的综合研究还不够系统深入。未能把田间微地形、土壤结构、土壤水势、水分、介质、水化学、温度等纳入统一的理论框架中研究其总体规律，及其对作物产量和水分利用率的综合作用。

在土壤水利用方面，尚有以下不足：灌水定额或灌溉定额的确定未能充分考虑土壤岩性（储水特性）和作物根深的时空变化；底墒水的合理利用研究不够，忽视从小麦浇底墒水到播种之间的土壤水无效蒸发等。由于健康的水市场尚未建立，当前很多政策法规对节水农业的激励不力，不少节水农业技术和土壤水利用技术推广十分困难。

1990年以来，笔者及其所在单位中国地质大学（武汉）、河北省地质勘查开发局第三水文地质工程地质大队、河北省地质调查院先后开展了“河北省景县王瞳综合利用水资源农业试点，1991—1998”、原地矿部定向科研基金“河北省景县王瞳试验区土壤水有效利用及咸水利用与调控研究，1993—1995”、国土资源部科技项目“土壤水资源的特性及评价方法探讨”、中国地质调查局地质调查项目“土壤水的开发利用技术研究与推广”、国家自然科学基金“土壤水流动系统及其应用研究”等项目，在土壤水利用的理论与技术方面取得了一些进展和成果。

经过多年的研究，笔者建议用土壤水资源年补给量表示特定区域或特定地点的土壤水资源数量，用于区域和农田水均衡分析；用土壤水储存量、土壤水最大次调节量、土壤水理论可利用量、作物生长期及生长阶段土壤水资源可利用量等指标表征特定条件下土壤水系统特征，用于指导农田灌溉和土壤水调控实践。实践证明，应用这些指标可以满足土壤水资源数量评价和田间管理的需要（靳孟贵等，1997a、1999a）。同时提出土壤水全时空调控的概念框架，指导土壤水调控实践，提高土壤水利用效率（靳孟贵等，1997b、1998a、1999b；Jin *et al.*，1999）。笔者认为，水资源或土壤水有效利用是个系统工程，不能仅仅局限于水资源本身去谈提高水资源利用效率，应综合采用各种措施提高作物产量和水的利用效率。通过分析水分—生物经济产量的转化过程，并对照华北地区作物耗水量与作物产量关系散点图发现，研究区农业用水效率低，有较大的提高潜力（靳孟贵等，1999b）。顺应水资源—环境条件，优化农业结构与布局，运用经济、行政杠杆改变传统用水习惯，增加综合科技投入，可以明显提高作物水分生产率（单位体积水的作物经济产量）和单位面积产量，是发挥水资源潜力的重要方面。

1.3 研究内容和思路

本书主要内容及其关系如图1-1所示，研究内容可概括为以下方面。

（1）在进行土壤水动态监测并收集已有土壤水动态监测资料的基础上，探讨土壤水资源的特性，以及不同土壤结构、不同地下水位埋深条件下土壤水的时空变化特征。

（2）探讨能满足农业用水供需分析及作物田间管理需要的土壤水资源评价方法。

（3）建立土壤水流动系统的概念，探讨土壤水流动系统的特征及其数值模拟方法。

（4）进行土壤水合理开发利用技术与配套措施的田间试验，监测土壤水分、水势、水质、温度、养分、微生物等要素；建立二维非均质水流与溶质运移模型，分析土壤水盐热运移规律，确

定作物耗水量组成比例，解释节水增产机理。

(5)选择典型地区，进行土壤水利用技术示范。

(6)开展土壤水利用技术的经济效益评价，总结土壤水利用技术示范成果，提出土壤水利用技术推广建议。

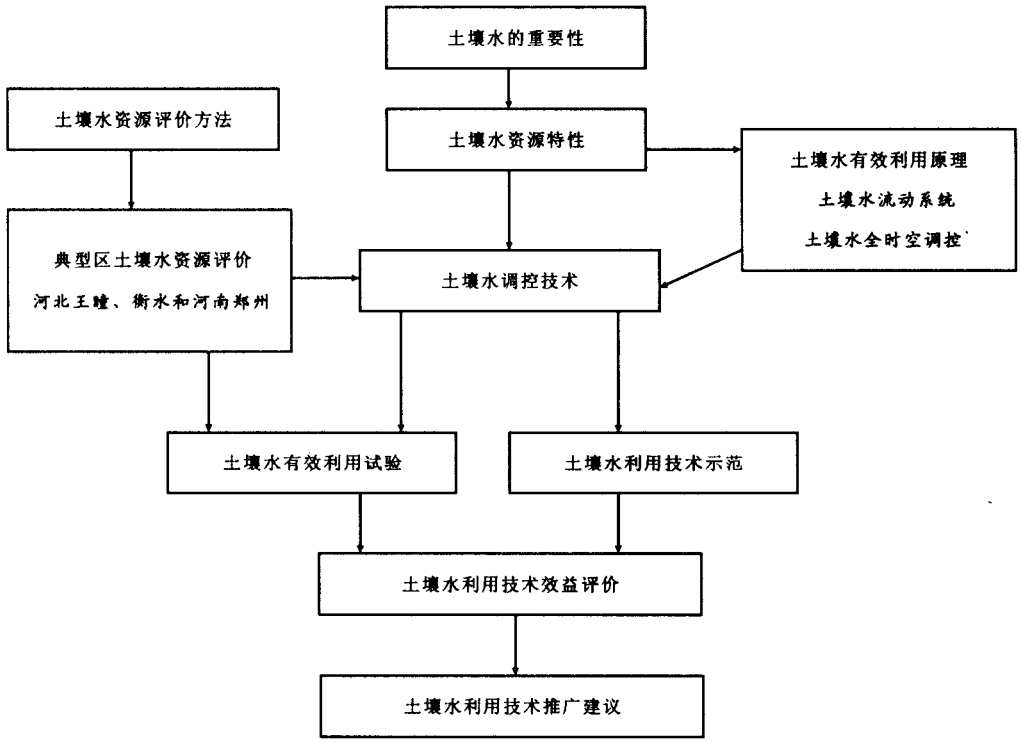

图 1-1 本书内容及其关系框图

我们采用点面结合、多学科交叉渗透、室内外试验与示范结合的方法开展土壤水合理开发利用技术研究，既注重在典型地区的重点试验，又在面上选择代表性地段进行示范。组织农田水利、水文地质、农学、土肥、地球化学等方面的多学科队伍联合攻关，重点研究田间土壤水的利用技术及其相关的基础理论问题。在输水、灌溉等方面综合采用已有的先进技术。

研究中以土壤水全时空调控理论(靳孟贵等，1999a)为指导，全方位地提高作物产量和水分生产率(单位体积水的作物产量)。在建立非饱和带作物生长条件下土壤水流动系统概念的基础上，把土水势、水分、热、养分、盐分、微生物等纳入土壤水流动系统理论的统一框架中，通过理论分析、室内外试验与计算机模拟，综合研究各因素相互作用、相互制约的内在规律(时空四维)及其对作物产量和水分利用率的影响。

第 2 章　土壤水资源及其评价方法

本章在论述土壤水资源概念、特征、评价内容和方法的基础上，利用郑州、河北衡水和王疃等典型地区的土壤水监测资料，分析不同地区、不同岩性、不同地下水位埋深条件下的土壤水资源特征（土壤水的补给量、储存量、可利用量等）。

2.1　土壤水在水资源组成中的地位

一个地区的水资源系统包括大气降水、地表水、地下水与土壤水。对农业而言，土壤水是关键，所有其他水资源都必须转化为土壤水（如灌溉形成的人工土壤水）以后才能被作物所利用。例如，河北黑龙港地区多年平均年降水量为 550mm，各种水资源组成如表 2－1 所示。从农业用水角度，潜在可利用的毛水量应为耕地范围内降水量形成的天然土壤水，加上可供农业利用的地表水与地下水。该地区耕地面积为 3 177.4×10^4 亩，以降水 20%补给地下水，6%形成地表径流计，则降水的 74%转化为土壤水，合 407mm，或每亩 271m^3。全区耕地范围可利用天然土壤水总量 86.26×$10^8$$m^3$；可利用地表水为 18.02×$10^8$$m^3$；浅层地下水可利用量按 19.51×$10^8$$m^3$ 估算；则该区总计可利用水量为 123.79×$10^8$$m^3$。亩均耕地毛水量为 389 m^3，合 584mm（其中含灌溉水每亩 118m^3，合 177mm）。

表 2－1　黑龙港地区水资源一览表（靳孟贵等，1999b）

项　目		多年平均值（×$10^8$$m^3$/a）	备　注
大气降水		181.31	多年平均降水量取 550mm；面积取 32 966km^2
地表水		18.02（含客水 16.20）	
浅层地下水	厚度＞20m 淡水	11.23	
	厚度 10～20m 淡水	7.40	
	2～3 g/L 微咸水	6.63	
	3～5 g/L 咸水	4.17	
	＞5 g/L 咸水	3.36	
	小计	32.79	
深层地下淡水		0.42	
天然土壤水		86.26	按耕地面积算；降水 20%计为地下水，6%计为本地产流

因此，黑龙港地区的水资源虽然相当紧缺，但农业亩均水资源占有量并不很少。传统的算法不把土壤水天然资源计算在内，显然是不妥的。以色列全国平均降水量仅为350mm，亩均拥有水量259m³（何希吾等，1996），而本区年降水量最小的地方接近500mm，多的地方达600mm。就农业而言，水资源条件比以色列优越。只要充分发挥水资源的潜力，黑龙港地区的农业还是大有可为的。

目前该地区地下淡水，尤其是深层淡水开发利用已经远远超出地下水资源的承受能力，按目前开采现状延续下去，地下水资源是无法永续利用的。但是，薄层淡水及微—半咸水的潜力还未充分发挥。

土壤水是四水转化的枢纽。对农业而言，它是可被作物直接利用的唯一形式。无论是灌溉水，还是天然降水，都要转化为土壤水后才被作物根系吸收（Zhang *et al.*，1994）。土壤水资源是份额最大的水资源，例如河北平原降水的74%转化为土壤水（杨路华等，2004；靳孟贵，1999b；夏自强等，2001）。因此，充分有效地利用土壤水是合理有效地利用一个地区总水资源的关键。为此，笔者在阐述土壤水资源概念的基础上，结合河北王疃、河南郑州等处监测资料，讨论土壤水资源的特性，提出土壤水资源的评价内容与方法，为有效利用土壤水奠定理论基础。

2.2 土壤水资源的概念与特性

不考虑侧向流动，有作物条件下土壤水的收入、支出项可概化为图2-1(a)所示。土壤水通过其上边界接受降水或灌溉时，当入渗水使土壤含水量超过田间持水量，便下渗补给地下

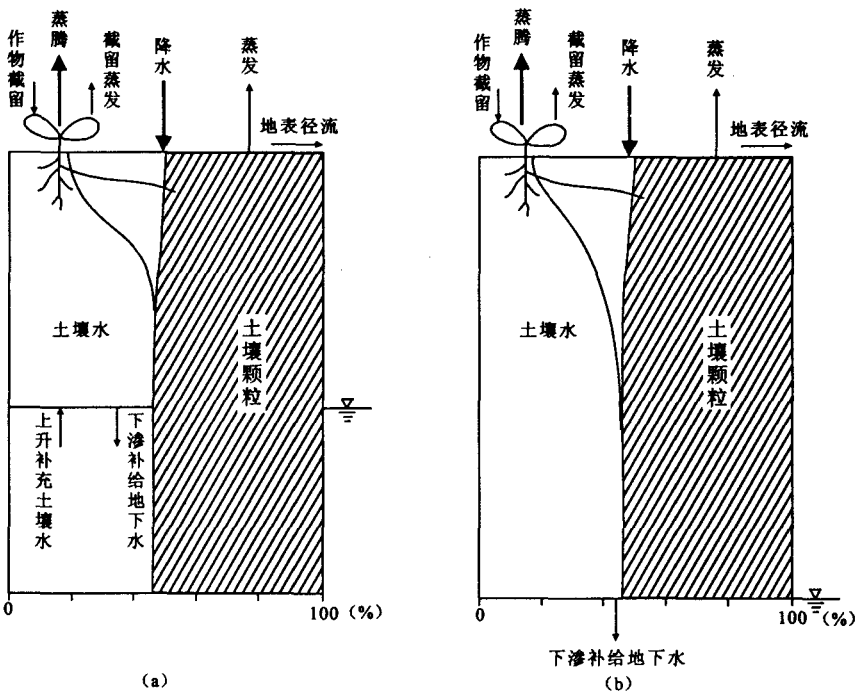

图2-1 无侧向流动时土壤水收入支出示意图（靳孟贵等，1997b）

(a)潜水位埋深小时；(b)潜水位埋深大时

水。在潜水位埋深较浅时，土壤水与地下水关系随潜水位波动和气象条件的变化而改变。随着潜水位埋深的加大，土壤水获得地下水的补给越来越少(靳孟贵等，1997b、1999b)。

当潜水位埋深大到一定深度后，地下水无法靠毛细力作用上升补给浅部土壤水。这种地下水只接受下渗补给，不发生潜水蒸发的情况称为地下水位深埋(雷志栋，1992)。例如，王疃试验场，地下水位埋深为 7.8～8.6 m(1994)，全年总水势垂向分布情况说明，土壤水始终得不到地下水的上升补给(图 2－2)。此时，土壤水收支要素如图 2－1(b)所示。土壤水的收入项为：降水和灌溉入渗；支出项为：蒸腾、土面蒸发及下渗补给地下水，降水的一部分因作物叶面截留直接蒸发返回大气。河北王疃地区属于地下水位深埋条件。

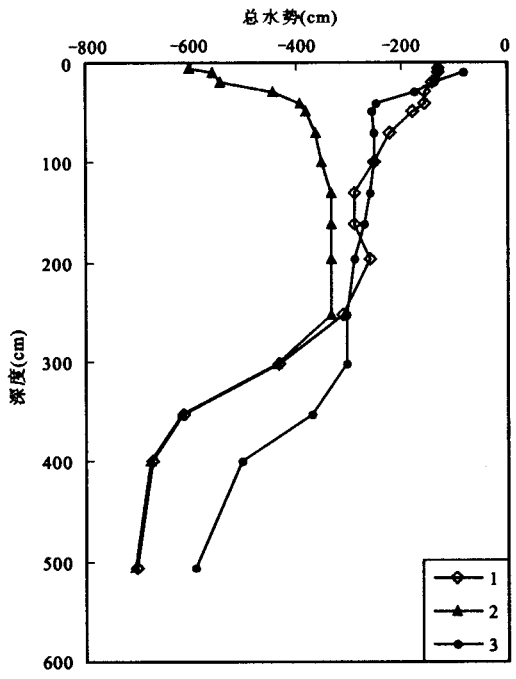

图 2－2　王疃 E_4 田块 1994 年土壤总水势垂向分布图
(靳孟贵等，1997b)
1. 5 月 10 日(灌溉后一天)；2. 5 月 25 日；3. 7 月 29 日(雨季)

土壤水资源的概念是从农业的角度提出的，我们把可被植物根系吸收利用的土壤空隙中的水称为土壤水资源(靳孟贵等，1997b)。土壤水资源对于农、林、牧业及生态、环境保护具有重要意义。气象条件、降水分布特征、包气带岩性及厚度、微地形、土地利用方式与强度等都将影响土壤水资源的时空分布。土壤水资源具有以下重要特性。

(1)对降水的依赖性与可恢复性：土壤水资源时间分布对当地降水具有很强的依赖性，一般降水多的雨季土壤水储存量大，旱季土壤水储存量小(图 2－3)。土壤水在非雨季被植物利用或蒸发消耗，腾空库容后，通过降水入渗，土壤水得到恢复更新。

(2)不易保存性(易耗失性)：土壤水与地下水相比不易保存，一方面表现在不及时利用或采取人为措施保存就会无效损失(蒸发消耗)，另一方面表现在土壤含水量超过田间持水量后会发生深层渗漏补给地下水。因此，应尽量设法使作物适时利用土壤水。

(3)不可开采只能就地利用：土壤水资源不可能像地下水那样地被开采输运，故土壤水一般只能被作物就地利用。

(4)与农业活动的密切相关性：土壤水资源的数量(尤其是其可利用量)随作(植)物种类和耕作措施不同而不同。

(5)可调控性：土壤水资源可以通过人为措施(如人工改变微地形，中期松土，建立微水文系统，设置地膜、秸秆、砂砾等人工界面等)调控其输入输出，增加有效补充，减少无效损失，并可在时空分布上加以调控，尽可能地使其与作物在时空分布上一致。显然，这种情况下，不仅要在时空上调控土壤水以适应作物；同时还需要调整作物时空布局以适应土壤水。

2.3 土壤水资源评价内容与方法

为了兼顾区域和田间水资源平衡计算，我们建议用以下指标评价土壤水资源：用土壤水资源年补给量表示特定区域或特定地点的土壤水资源数量，用于区域和农田水均衡分析；用土壤水储存量、土壤水最大次调节量、土壤水理论可利用量、作物生长期及生长阶段土壤水资源可利用量等指标表征特定条件下土壤水系统特征，用于指导农田灌溉和土壤水调控实践。

2.3.1 土壤水资源的若干指标

我们知道，潜水位浅埋条件下土壤水下边界条件受潜水位制约，如图 2-1(a)所示，其下边界表现为有时地下水上升补充土壤水，有时土壤水下渗补给地下水。而潜水位深埋(例如潜水位埋深大于 6m)时，土壤水下渗补给地下水，无地下水反向补给土壤水[图 2-1(b)]。

2.3.1.1 土壤水储存量(W)

某时刻作物潜在可利用深度以上，单位面积土壤柱体所含有的土壤水体积称为土壤水储存量(相当于地表水库某时刻的实际库容)，用以度量土壤水的多少，记为 W，以 mm 表示。它在数值上等于土壤体积含水量分布函数 $\theta(z,t)$ 在作物潜在可利用深度 d 上的积分(图 2-3)，即：

$$W(t) = \int_0^d \theta(z,t)\mathrm{d}z \qquad (2-1)$$

式中：$W(t)$ 为某 t 时刻的土壤水储存量；z 为垂向坐标，零点取在地面，向下为正；d 为作物潜在可利用深度，是指特定条件下作物根系吸收土壤水的可能深度。

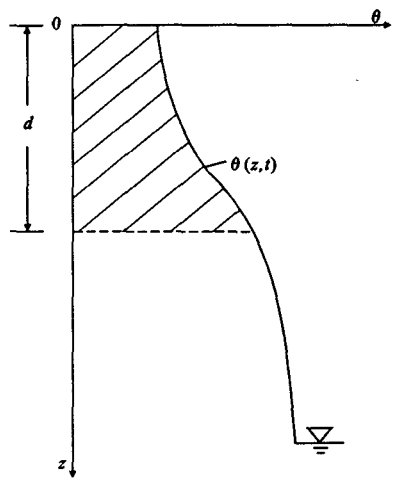

图 2-3 土壤水储存量的概念
(靳孟贵等，1997b)

2.3.1.2 土壤水理论无效库容(W_{up})

我们知道当根层土壤含水量达到凋萎含水量(Hillel，1980；De Laat，1985)时或根层土壤水负压达到凋萎负压时，土壤中的水不能被作物利用。此时，作物潜在利用深度以上单位面积土壤柱体中所含有的水体积称为土壤水理论无效库容，记为 W_{up}。它在数值上等于根层土壤水达到凋萎含水量时的土壤含水量分布函数 $\theta_{up}(z)$ 在作物潜在可利用深度 d 上的积分，以 mm 水柱表示，即：

$$W_{up} = \int_0^d \theta_{up}(z)\mathrm{d}z \qquad (2-2)$$

显然，土壤水理论无效库容是一临界值，是土壤水调控时允许的下限土壤水储存量(图 2-4)，相当于地表水库的死库容。

2.3.1.3 土壤水最大次调节量(W_{am})

为了评价土壤水系统的调节能力，我们引出土壤水最大次调节量的概念。土壤水最大次调节量是指对应于田间持水率的土壤水储存量与土壤水无效库容之差，记为 W_{am}。理论上限土壤水储存量是指在不产生明显深层渗漏的条件下，作物潜在可利用深度 d 以上单位面积土壤柱体所能容纳的最大水量，即

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com