

国家“八五”科技攻关项目、中国—欧洲联盟科技合作项目

# 农业持续发展的 农田水土管理研究

许迪 蔡林根 王少丽 刘钰 李益农 丁昆仑 等 编著



中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

国家“八五”科技攻关项目、中国—欧洲联盟科技合作项目

# 农业持续发展的 农田水土管理研究

许迪 蔡林根 王少丽 刘钰 李益农 丁昆仑 等 编著



中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

## 内 容 提 要

本书是在中国水利水电科学研究院水利研究所取得的国家“八五”科技攻关项目和中国—欧洲联盟科技合作项目研究成果的基础上撰写的。全书共分十章,内容包括:研究区概况、降水与地表水分析、地下水特性、土壤特性、作物需水量、灌溉制度模拟、改善地面灌溉方法、田间土管理措施、农田土壤水动态模拟、区域水管理等。书中以区域农田为研究单元,详细论述了有益于农业可持续发展的农田水土管理技术,既含有技术基础理论研究,又包括实际应用效果分析。

本书资料翔实,内容丰富,具有基础理论与实地应用相结合的显著特点,可供广大水利科技人员和相关专业的大专院校师生参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

农业持续发展的农田水土管理研究/许迪等编著.-北京:中国水利水电出版社,2000.9

ISBN 7-5084-0428-9

I. 农… II. 许… III. 地面灌溉-灌溉管理-研究 IV. S275.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 67176 号

|       |                                                                                                                                  |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 书 名   | 农业持续发展的农田水土管理研究                                                                                                                  |
| 作 者   | 许迪 蔡林根 王少丽 刘钰 李益农 丁昆仑 等编著                                                                                                        |
| 出版、发行 | 中国水利水电出版社(北京市三里河路6号 100044)<br>网址: www.waterpub.com.cn<br>E-mail: sale@waterpub.com.cn<br>电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (发行部) |
| 经 售   | 全国各地新华书店                                                                                                                         |
| 排 版   | 北京密云红光印刷厂                                                                                                                        |
| 印 刷   | 北京市朝阳区小红门印刷厂                                                                                                                     |
| 规 格   | 787×1092 毫米 16 开本 21.25 印张 495 千字                                                                                                |
| 版 次   | 2000 年 10 月第一版 2000 年 10 月北京第一次印刷                                                                                                |
| 印 数   | 0001—1300 册                                                                                                                      |
| 定 价   | 60.00 元                                                                                                                          |

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

# 前 言

水土资源短缺和生态环境恶化已成为全世界普遍关注的严重问题,这使人们意识到节约用水和保护耕地的重要性。为确保粮食安全和农村发展,必须加强农田水土资源的管理研究,大力推广节水灌溉技术和土管理技术,以便提高农业用水的生产效率,实施灌溉农业可持续发展战略。

黄淮海平原的耕地肥沃、光热资源充足,但由于地处半湿润大陆性季风气候区,降雨的时空分布极不均匀,历史上旱、涝、盐碱灾害频繁发生,因此,农业的稳定发展与水利是息息相关的。中华人民共和国成立以来,在黄淮海平原进行了大规模的水利建设,兴建了一大批用于防洪、灌溉和排水的工程,使得农业生产条件明显改善,农业产量稳步增长,成为我国最重要的农业生产基地之一,其中粮食和棉花产量分别占全国总产量的20%和50%以上。

由于黄淮海平原人口稠密、土地垦殖率和农田灌溉率较高,已成为我国水资源严重短缺的地区之一,特别是海河流域,人均年水资源占有量只有 $348\text{m}^3$ ,不到全国平均数的16%。在黄淮海平原,一方面,随着对地表水的大规模开发利用,许多河流的中下游常年处于断流状态,地表水短缺的现象日趋严重;另一方面,对地下水的大量超采,导致地下水位大面积下降。总之,水资源短缺已经给黄淮海平原的人民生活、工农业生产造成了严重影响,带来了地面沉降、海水入侵、土壤盐碱化等一系列生态环境问题。因此,研究适宜本地区特点的农田水土管理技术、制定科学的农田水管理模式和区域水管理策略,对提高农田水土资源利用率、保持农田生态环境具有十分重要的理论意义和实用价值。

1991~1998年,中国水利水电科学研究院水利研究所在黄淮海平原选择了自然条件和农业生产条件方面具有一定代表性的河北省雄县和北京市大兴县作为研究地点和技术推广应用试区,先后开展了国家“八五”攻关项目“农业持续发展节水型灌排综合技术研究”(85—06—01—15—3)和得到欧洲联盟与瑞士政府资助的中国—欧洲联盟科技合作项目“黄淮海平原农业可持续发展水土管理研究”(TS3\*CT93—0250)。在这两个项目的执行过程中,系统地研究和探讨了用于农业可持续发展的农田水土管理技术和区域水资源平衡与调控技术。主要研究内容包括:①利用先进的数据分析方法与手段对自然资源(气候、水文、土壤等)进行分析评价,确定各类数据的时空分布特

征, 检验数据资料的质量。②根据野外田间长期实验观测, 描述地下水—土壤—作物—大气连续系统中水分循环的特点, 采用模拟模型定量研究农田水土管理活动对水平衡过程的影响。③采用田间试验资料验证对比参照作物蒸发量和作物系数的计算方法, 确定主要作物的需水量及相关参数; 利用改进的灌溉模型完成对现行灌溉制度的评价; 模拟不同典型年气候条件下的冬小麦—夏玉米连作种植模式的节水灌溉制度。④根据田间试验数据对现行的地面畦灌方法进行科学评价, 对影响地面畦灌特性的灌水技术要素进行分析, 模拟评价改进后的畦灌系统性能, 分析节水潜力。⑤通过对小区试验结果的对比分析, 研究田间土管理技术对土壤特性、土壤水分、作物产量及水分利用效率的影响, 提出以增强降雨入渗和土壤贮水能力、减少地面径流和表土蒸发为目的的土管理技术组合模式。⑥在完成区域水文循环要素的研究基础上, 选择相关分析法开展区域水量平衡计算, 制定在地下水人工回灌条件下的以提高用水效率为目标的区域水管理策略。

本项目在研究方法上遵循实践—理论—实践的认识过程, 通过长期大量的田间试验对比、现场数据监测、室内计算机模拟等工作, 完成了与农田水土管理技术相关的技术基础理论研究和应用研究, 取得的科研成果和改进的水土管理技术已在整个雄县试区范围内得到应用推广。该项目不仅重视技术基础理论与生产实践相结合, 而且十分重视应用技术的示范推广, 在获得高水平研究成果的同时, 取得了良好的经济、社会和环境生态效益。经水利部组织的部级鉴定, 两个项目的科研成果总体均达到国际先进水平, 一些研究专题居国际领先水准。与此同时, 结合项目研究内容共完成博士论文4篇, 在国际国内学术刊物上发表论文近30篇, 组织国际研讨会2次。为将最终成果进行系统总结, 特编纂本专著, 为黄淮海平原农业可持续发展、促进农田水土管理技术的应用研究尽绵薄之力。

本书是在国家“八五”科技攻关项目和中国—欧洲联盟科技合作项目的研究成果基础上编著的。书中部分内容参考了由本书作者撰写的, 由L.S.Pereira、梁瑞驹、A.Musy和M.J.Hann主编的中国—欧洲联盟科技合作项目最终研究报告《Water and Soil Management for Sustainable Agriculture in the North China Plain》。项目总协调人兼葡萄牙项目组协调人、葡萄牙里斯本科技大学农业工程学院L.S.Pereira教授, 中国项目组协调人、中国水利水电科学研究院梁瑞驹教授、钱蕴璧教授级高级工程师、张启舜教授级高级工程师, 瑞士项目组协调人、瑞士联邦洛桑理工学院土壤与水管理学院A.Musy教授, 英国项目组协调人、英国克莱菲尔德大学农业、食品与环境学院的

M.J.Hann 副教授等人对本项目的组织管理与实施、研究内容的设置与开展给予了精心指导和悉心帮助。葡萄牙里斯本科技大学的 R.M.Fernando 副教授、J.L.Teixeira 副教授、P.L.Sousa 副教授、M.J.Calejo 工程师, 瑞士联邦洛桑理工学院的 A.Mermoud 教授、R.Schmid 工程师、N.Randin 工程师、R.Thielen 工程师和英国克莱菲尔德大学的 K.J.Foot 工程师等人均参与了本项目的部分研究工作。

本书由参加上述两个研究项目各专题工作的科技人员, 按章节内容分工合作撰写, 最后由许迪、蔡林根审定统稿, 撰写人员名单如下:

第一章 李益农 丁昆仑 许迪

第二章 王少丽 李传军 李福祥

第三章 王少丽

第四章 许迪

第五章 刘钰

第六章 刘钰

第七章 李益农

第八章 丁昆仑

第九章 许迪

第十章 王少丽 蔡林根

除上述编写人员外, 先后参加本项目课题研究的中方人员尚有: 中国水利水电科学研究院水利研究所刘群昌、王桂芬、徐景东; 河北省雄县水利局左沛山、白锡民、蔡占领、肖贺仲、肖志强。因此, 本书也包含了这些同志的劳动结晶。

在完成本项目的过程中, 得到了水利部和中国水利水电科学研究院有关领导、专家的指教和帮助, 研究区所在地的省水利厅也给予了大力支持, 雄县县政府和县水利局为研究活动提供了良好的研究和示范条件, 在此一并表示最衷心的感谢和敬意!

由于时间仓促, 水平有限, 文中欠妥或谬误之处, 敬请读者批评指正, 不吝赐教。

编著者

2000年6月

# 目 录

## 前言

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| <b>第一章 研究区概况</b> .....  | 1   |
| 第一节 基本状况 .....          | 1   |
| 第二节 试验设施及手段 .....       | 5   |
| 参考文献 .....              | 11  |
| <b>第二章 降水与地表水</b> ..... | 12  |
| 第一节 降水量 .....           | 12  |
| 第二节 地表径流量 .....         | 22  |
| 第三节 降水与旱涝灾害成因 .....     | 31  |
| 参考文献 .....              | 34  |
| <b>第三章 地下水特性</b> .....  | 36  |
| 第一节 区域地质与水文地质 .....     | 36  |
| 第二节 水文地质参数 .....        | 38  |
| 第三节 地下水化学特性 .....       | 51  |
| 第四节 地下水位动态 .....        | 57  |
| 参考文献 .....              | 62  |
| <b>第四章 土壤特性</b> .....   | 64  |
| 第一节 土壤类型分布 .....        | 64  |
| 第二节 田间土壤特性空间变异性 .....   | 65  |
| 第三节 田间典型土壤基本性质 .....    | 72  |
| 第四节 土壤水力特性 .....        | 75  |
| 参考文献 .....              | 98  |
| <b>第五章 作物需水量</b> .....  | 101 |
| 第一节 田间灌溉试验 .....        | 101 |
| 第二节 参照腾发量 .....         | 111 |
| 第三节 作物系数 .....          | 126 |
| 第四节 土面蒸发 .....          | 142 |
| 第五节 作物根系吸水剖面 .....      | 146 |
| 第六节 作物需水量与灌溉需水量 .....   | 149 |

|                              |            |
|------------------------------|------------|
| 参考文献 .....                   | 153        |
| <b>第六章 灌溉制度模拟 .....</b>      | <b>154</b> |
| 第一节 灌溉制度模型 .....             | 154        |
| 第二节 下边界水分通量 .....            | 157        |
| 第三节 灌溉制度模拟 .....             | 166        |
| 第四节 冬小麦—夏玉米连作模式下的灌溉制度 .....  | 171        |
| 参考文献 .....                   | 181        |
| <b>第七章 改进地面灌溉方法 .....</b>    | <b>183</b> |
| 第一节 地面灌溉的田间评价方法 .....        | 183        |
| 第二节 畦田灌溉技术要素分析 .....         | 200        |
| 第三节 改进地面灌溉技术 .....           | 204        |
| 第四节 农田激光平地技术的初步应用 .....      | 216        |
| 参考文献 .....                   | 224        |
| <b>第八章 田间土管理措施 .....</b>     | <b>226</b> |
| 第一节 田间试验处理 .....             | 226        |
| 第二节 土管理措施对土壤性能的影响 .....      | 233        |
| 第三节 土管理措施对作物产量的影响 .....      | 242        |
| 第四节 田间土管理技术的组合方式 .....       | 248        |
| 参考文献 .....                   | 251        |
| <b>第九章 农田土壤水动态模拟 .....</b>   | <b>253</b> |
| 第一节 土壤水动力学模型比较及选择 .....      | 253        |
| 第二节 非饱和区域土壤水运动分布特征 .....     | 275        |
| 第三节 降雨(灌溉)入渗补给量模拟计算 .....    | 278        |
| 第四节 耕层土壤特性时间变异性 .....        | 284        |
| 第五节 土壤水力特性动态参数下农田水平衡模拟 ..... | 297        |
| 参考文献 .....                   | 306        |
| <b>第十章 区域水管理 .....</b>       | <b>309</b> |
| 第一节 可引用水量预测 .....            | 309        |
| 第二节 区域水量平衡分析 .....           | 312        |
| 第三节 渠系入渗补给 .....             | 318        |
| 第四节 区域水管理策略 .....            | 325        |
| 参考文献 .....                   | 330        |



# 第一章

## 研究区概况

该项目的研究内容主要包括：田间土壤水特性、作物灌溉制度的改善、地面灌溉方法的评价及改进、田间土管理措施的评价和应用、区域水平衡计算和水管理等，与此相关的田间实验和小区试验工作分别在华北平原的河北省雄县和北京市大兴县开展。其中雄县研究区约  $148\text{km}^2$ ，位于雄县胜利灌区内，由相对独立封闭的水文系统构成，研究工作主要在此区域内进行，并对研究成果进行田间示范，是从事项目研究工作的主要场所；大兴研究区地处中国水利水电科学研究院节水灌溉试验基地，用于田间试验的面积约  $7\text{km}^2$ ，主要进行与田间土管理措施相关的小区试验工作，并开展部分有关地面灌溉方法评价的现场试验。本章重点介绍雄县研究区的基本情况，并简述大兴研究区的状况。

### 第一节 基本状况

#### 一、地理位置

河北省雄县和北京市大兴县两地相距约  $90\text{km}$ ，均位于华北平原中部（图 1-1）。雄县地处北京、天津、保定三角地带中心，东、东南部和霸州市、文安县为界，西、西北部与容城、新城县接壤，南、西南部和任丘、安新县毗连，东北部与固安县相邻，地处北纬  $38^{\circ}55' \sim 39^{\circ}10'$ ，东经  $116^{\circ}01' \sim 116^{\circ}20'$ ，东西最宽  $26\text{km}$ ，南北最长  $25.5\text{km}$ ，总面积  $524\text{km}^2$ ，雄县研究区位于该县中部，新盖房分洪道以北（图 1-2），控制面积  $148\text{km}^2$ 。大兴县位于北京南  $30\text{km}$ ，东、西部分别与通州区、房山区为邻，南部是河北固安县，地处北纬  $39^{\circ}39'$ ，东经  $116^{\circ}15'$ 。

#### 二、水利枢纽系统

大清河是流经雄县境内的唯一天然河道，全长  $42\text{km}$ ，其上游为拒马河。拒马河发源于涞源城关旗山脚下，至山口涞水县铁锁崖共长  $197\text{km}$ ，拒马河自此分为南北拒马河，北拒马河在东茨村以上有胡良河、琉璃河、小清河汇入，下称白河沟。南拒马河从铁锁崖向南，流经涞水、定兴至北河店，与中易水、北易水汇流后过铁路，至东马营与白沟河相会后，经新盖房枢纽入大清河，流经雄县至东淀后汇入海河（图 1-3），总流域面积  $1\text{万 km}^2$ 。

大清河新盖房水利枢纽系统包括新盖房调洪控制工程和分洪道、白沟引河、河道灌溉闸。新盖房调洪控制工程由溢流堰和分洪闸构成，位于新盖房分洪道上口，溢流堰在左，设计最大泄量  $3964\text{m}^3/\text{s}$ ，分洪闸在右，共 7 孔，每孔宽  $10\text{m}$ ，设计最大泄量  $1036\text{m}^3/\text{s}$ ，堰闸合计最大泄洪流量  $5000\text{m}^3/\text{s}$ ，防洪标准为 20 年一遇。新盖房枢纽右岸建

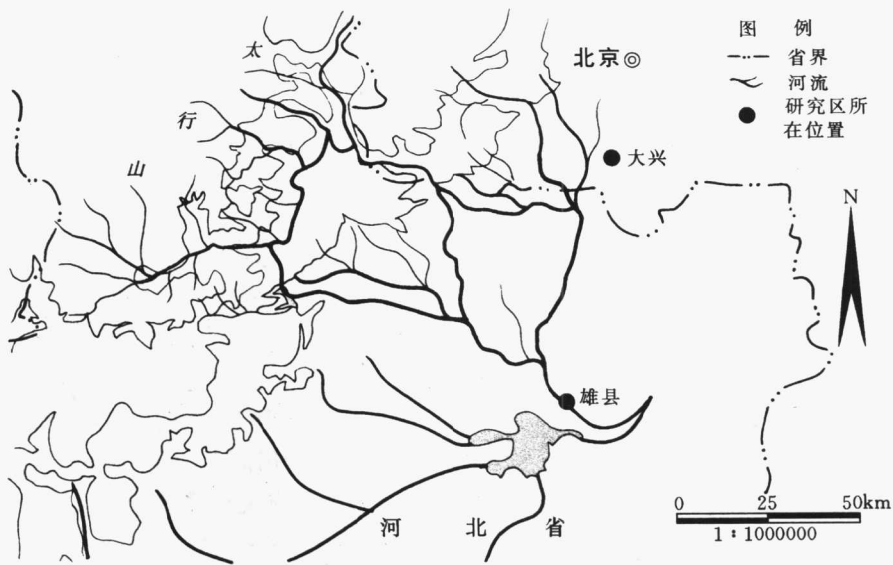


图 1-1 雄县和大兴研究区所处地理位置

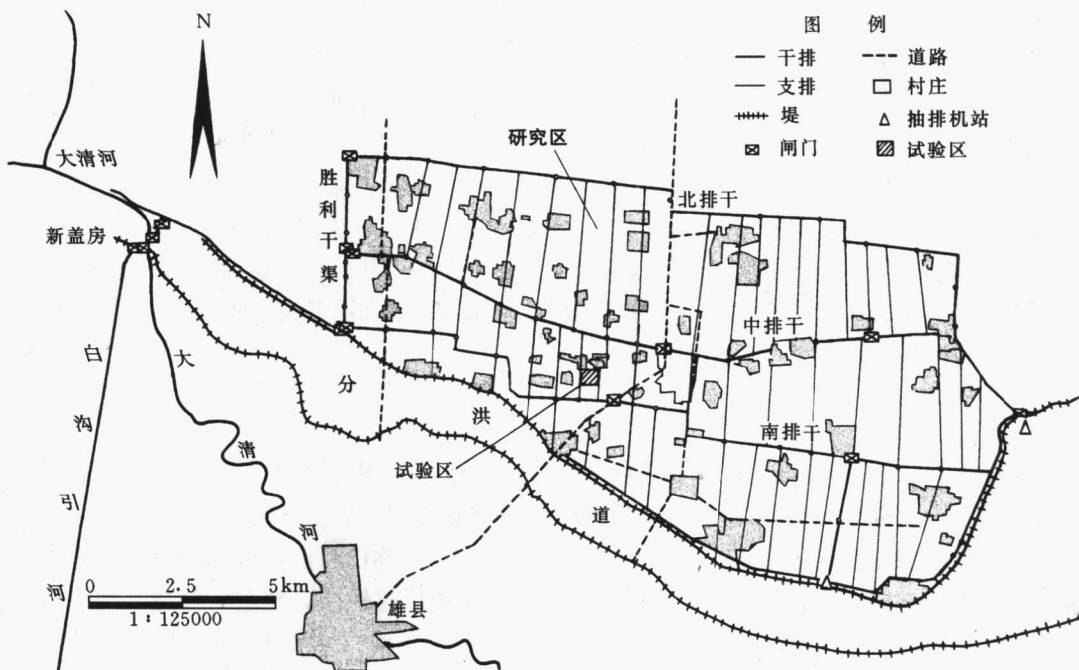


图 1-2 雄县研究区位置及水利工程布置图

有 5 孔闸一座，通过白沟引河向白洋淀放水，设计流量  $500\text{m}^3/\text{s}$ ，白洋淀位于雄县西南部，是华北地区的天然蓄水湖泊，风景秀丽，总面积  $366\text{km}^2$ 。大清河河道内溢流堰北端建有 3 孔拦河闸，用于灌溉，设计流量  $67\text{m}^3/\text{s}$ ，向雄县马庄灌区和胜利灌区供水，设计

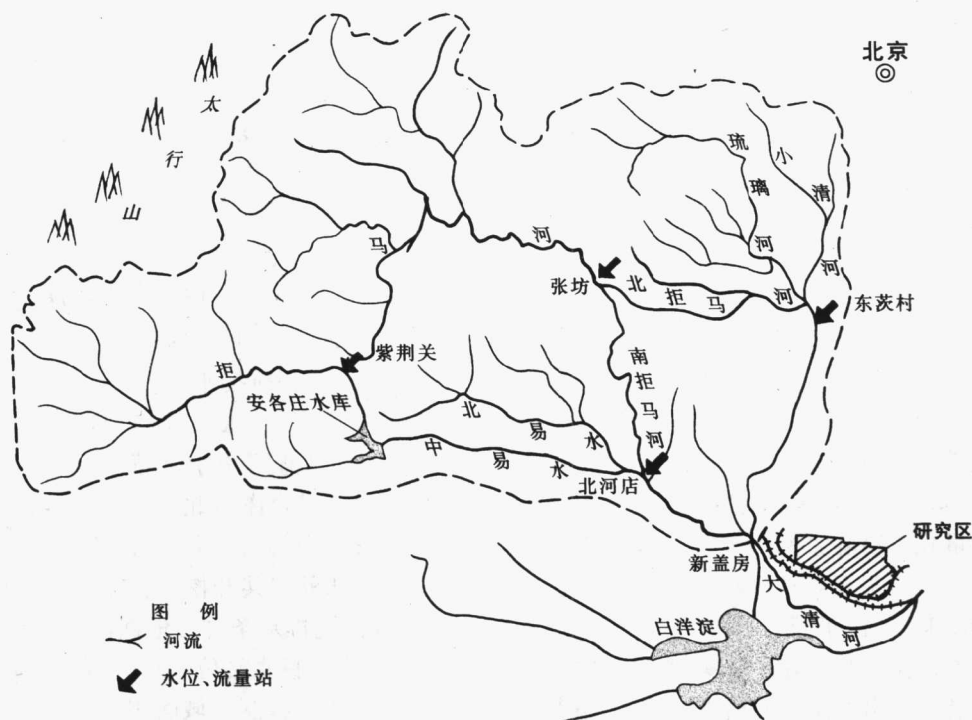


图 1-3 雄县研究区上游河流水系

灌溉面积 15000hm<sup>2</sup>，雄县研究区即位于胜利灌区内。

### 三、自然条件

雄县和大兴县位于华北平原中部，地处太行山东麓，属大型冲洪积扇及山前冲洪积倾斜平原区。北部及西北部地面高程 50~100m，坡度 1/1000~1/3000，河床切割深度大，岩溶、裂隙发育，面积约 7600km<sup>2</sup>；东南部为倾斜平原地带，海拔在 50m 以下，坡降约 1/3000~1/6000，地势低缓，植被发育，面积约 2400km<sup>2</sup>。该区地势总体上由西北向东南倾斜。区内表层土质以轻壤土和砂壤土为主，其余为中壤土、重壤土等。土壤主要以潮土类型为主。

两个研究区属半干旱温带大陆性季风气候，冬季寒冷少雪，春季干燥多风，夏季炎热多雨。多年年平均降雨量 540mm，降水特点是年际变化大及年内分配不均。例如，雄县最大年雨量为 971mm（1954 年），最小年雨量仅 206 mm（1962 年）。降雨多集中在汛期的 6~9 月份，4 个月的降雨量可占全年总量的 80% 以上，其中汛期降雨又主要集中在 7~8 月份，约占全年雨量的 60% 左右。该区多年平均气温 12.1℃，极端最高温度为 39.5℃（7 月份），极端最低温度为 -25℃（1 月份）。东北风和西北风为主要风向，年平均风速 1.2 m/s。表层土壤上冻期平均从每年的 12 月 10 日到次年 3 月初，最大冻土深约 50 cm，发生于 2 月。全年大于 10℃ 的有效积温为 4730℃，分布在 2 月 22 日~12 月 4 日，共 285 天内。无霜期平均为 185 天，全年日照数约为 2600h，年平均水面蒸发量 1800 mm 以上。上述水文气象条件形成了研究区所在地具有冬春干旱、夏季多雨、旱涝交替的显著

气候特点。

区内丰富的光热自然条件适宜于小麦、玉米、花生、芝麻、豆类等多种作物的发育生长,其中冬小麦(10月初至次年6月中)和夏玉米(6月中至9月底)连作是当地采用的主要作物种植模式,平均复种指数达1.4。在正常年份,冬小麦生长期内需进行补充灌溉,以保障作物生长发育的需要,而夏玉米生长期内则无需灌溉。

#### 四、水利工程现状

胜利灌区地处新盖房分洪道以北,友谊河以南,是引大清河提灌的大型灌区之一,灌溉分洪道以北的大营、孤庄头、张岗等10个乡镇的土地,总耕地面积22838hm<sup>2</sup>。灌区水利工程系统由1条总干渠、3条分干渠、18条支渠和2座提排扬水站组成,使得整个研究区形成封闭的水文系统单元(图1-3)。其中总干渠全长6.2km,渠首自新盖房溢流堰北端3孔灌溉闸起,经高庄胜利闸至渠尾,将上游大清河引入灌区,设计流量13m<sup>3</sup>/s。3条分干渠依此为:陈家柳南干渠,从傅家营村到里合庄村北,全长11.4km,设计流量4m<sup>3</sup>/s;陈家柳中干渠,自大营至双堂,长16.9km,过水流量3.5m<sup>3</sup>/s;陈家柳北干渠,由口头至双堂村西,全长19.7km,流量3m<sup>3</sup>/s。此外,共开挖配套支渠18条,总长86.3km。由于灌区下游部分农田低洼封闭,不具备自流排水条件,地面涝水只能依靠扬水站提排,故兴建了陈家柳、青年路扬水站。其中陈家柳扬水站位于新盖房分洪道左堤上,装有9台机组,每台排水能力2m<sup>3</sup>/s,总装机1485kW,控制流域面积240km<sup>2</sup>,设计排涝标准为10年一遇。青年路扬水站位于新盖房分洪道左堤南庄子村东处,装机5台,单机功率155kW,控制面积54km<sup>2</sup>,排涝标准为5年一遇。

雄县研究区内的渠系工程为灌排两用,既可通过新盖房枢纽将大清河经胜利干渠引入灌溉,又能在夏季汛期当作排水主干道使用,排泄暴雨产生的地面径流和农田地面涝水,还可在非汛期内利用渠系网络储蓄来自大清河上游的余水,通过渠道侧渗实施对地下水的回补。由于胜利灌区水源来自大清河,属季节性灌区,进入20世纪80年代以后,因上游干旱少雨,导致河水经常断流,水源保证率较低,因此,研究区内近年来已建有大量农用机井用于灌溉,实行井渠结合,地表水与地下水联合使用,互为调剂补充。

#### 五、社会经济条件

雄县研究区包括北大营、孤庄头、张岗等7个乡镇的111个村庄,人口约12万。耕地面积16900hm<sup>2</sup>,约占整个胜利灌区总耕地面积的74%(周顺升等,1994年)。区内灌溉水源为地表水和地下水,现有机井1567眼,控制灌溉面积11800hm<sup>2</sup>,占总耕地面积的70%。其中低压管道输水灌溉面积约7080hm<sup>2</sup>,占总灌溉面积的60%,田间灌溉以地面畦灌为主。在灌排并举、井渠结合、回补地下水的农业灌溉用水策略指导下,20世纪90年代以来,区内农业生产得到稳步发展,粮棉产量逐步提高,其中粮食产量从1990年的57904t增加到1998年的103724t,年平均增长12%,尤其在1996~1998三年内,粮食增产效果尤为明显。与此同时,人均农业毛收入亦从1990年的7916万元增长到1998年的11226万元,平均年增长8.4%;与之相应的人均净收入由674元上升至1288元,年均增长23%。

## 第二节 试验设施及手段

雄县研究区的总面积为  $148\text{km}^2$ ，有关区域水平衡和水管理方面的研究在这个具有区域尺度的相对封闭的水文单元内开展。同时，为了完成作物灌溉制度、地面灌溉方法和田间土管理措施等研究课题，建立起田间试验区，从事田间尺度下的野外试验和资料观测工作，为土壤水运动、作物灌溉制度和地面灌溉等各类数学模型的输入参数计算及确定、模拟模型的率定和田间验证以及田间水土管理措施的评价提供科学依据。田间试验区建立在雄县研究区中部孤庄头乡刘神堂村南，田块长  $180\text{m}$ 、宽  $120\text{m}$ ，总面积约  $2.2\text{hm}^2$ ，内设田间实验站和水土管理试验小区（图 1-4）。在大兴研究区，只从事田间尺度下的小区试验和数据观测。在上述研究（区内），分别布设了相应的实验观测设备，采用不同的试验观测手段。

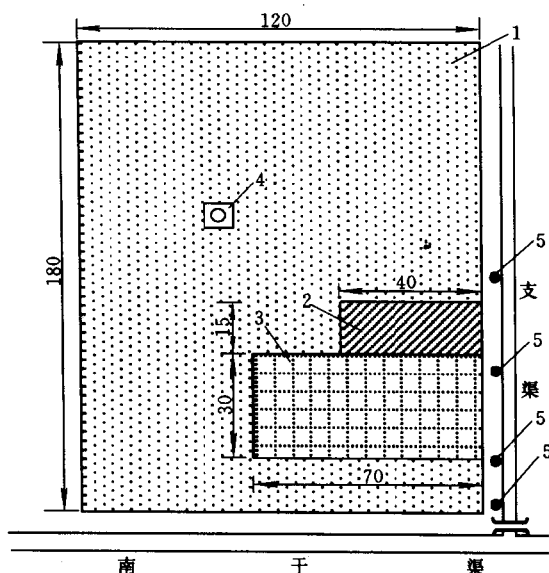


图 1-4 雄县田间试验区平面布置图（单位：m）

1—田间试验区；2—田间实验站；3—土水管理试验小区；  
4—农用机井；5—地下水观测井

### 一、雄县研究区

基于研究区域水量平衡及转换的目的，在整个研究区内对上游客水引用量、下排水量、当地降水量和地下水位动态变化等资料进行长期观测和监测，以便系统地、正确地了解和分析区内水量平衡动态过程。

#### （一）渠道引水量观测

如图 1-5 所示，灌区渠道引水量的观测站（点）均设在现有渠系的分水闸门处。引水量观测分为两种类型：其一是设在各级渠首的监测点，主要用于观测渠道进水量；其二是设在渠段上的水量监测点，主要用于了解渠段内分水及水量损失的情况。在胜利灌区渠首的高庄闸处设有水位尺，通过引水期间记录到的水位变化资料和相应的引水时间，利用已有的水位—流量关系曲线，计算引水流量和累计引水量。引水期间，当来水量不稳定时，观测时间为 4 小时一次，来水量稳定时，1 天 3 次。在南干渠、中干渠和北干渠的首部控制闸门处装有水位尺，渠道引水期间采用流速仪等方法测定流速并计算相应的流量，根据每次观测的流量及间隔时间计算时段过水量。观测时间通常为 1 天 3 次，累计各次过水量即可得到一次引水过程内各干渠的进水量。设立在中排干和南排干区间闸门位置处的水量观测点，在引水期间使用简易测流方法并结合观测水位估算过流量，渠道水位的观测时间为 1 天 2 次。

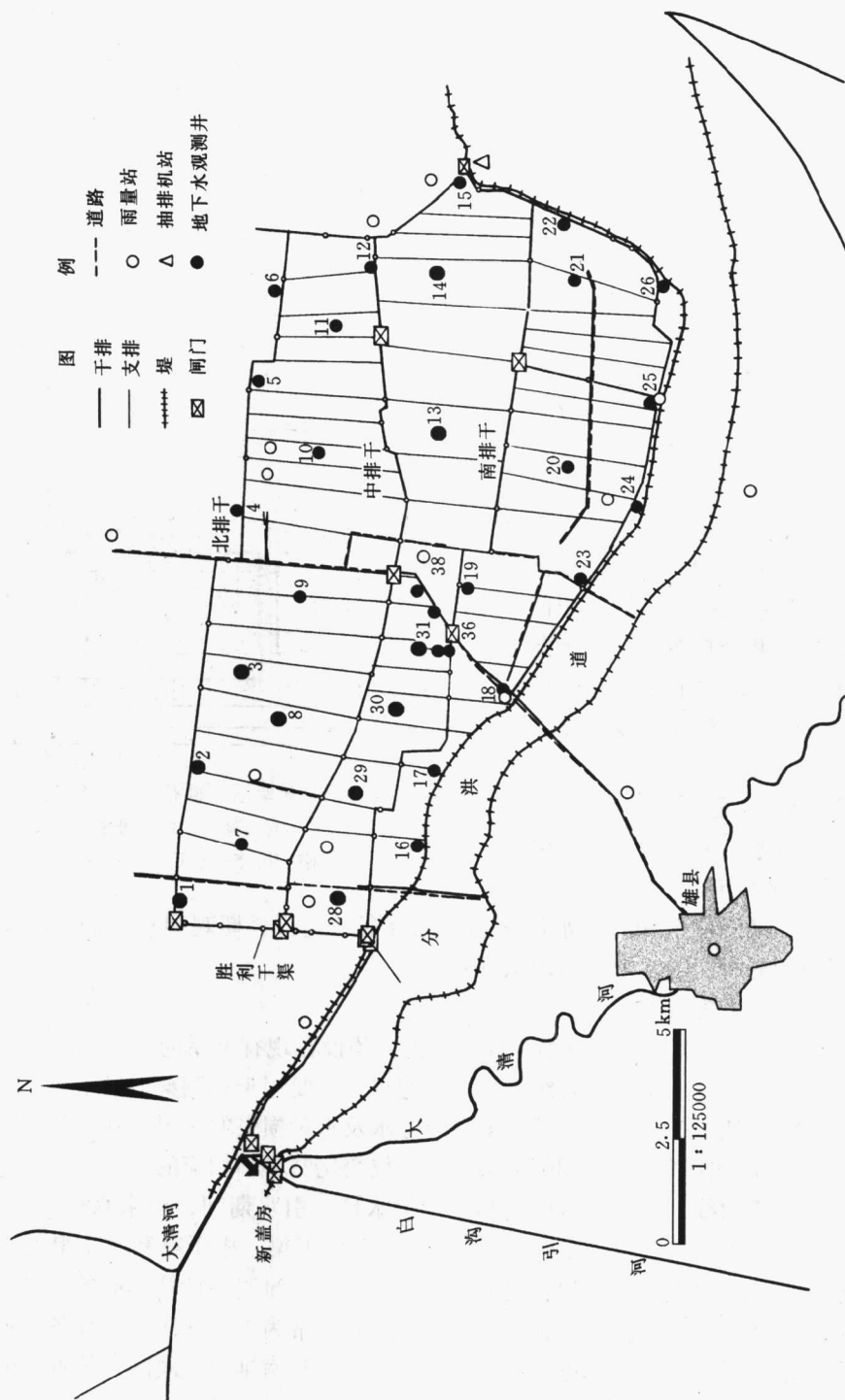


图 1-5 雄县研究区内实验观测设施分布图

## （二）排水量观测

由于研究区内的水利工程系统采用一套渠系、灌排两用的运行方式，故在灌区引水期间，除被农民通过自流或提灌方法引用的水量外，其余被蓄储在渠道内，用于补充土壤水并回灌地下水。在雨季，产生的地表径流通过各级渠系汇流后，下排到灌区下游，经提排进入新盖房分洪道。下游陈家柳、青年路扬水站的提排水量就是整个研究区的外排水量。

## （三）降水量观测

如图 1-5 所示，区内共设有 9 个雨量站，其中 8 个是县气象局设立的汛期雨量站，有 1979 年以来的汛期雨量资料；另一个是设在米北的省水文站，有 1965 年以来的汛期雨量资料。此外，位于县城附近的雄县气象站拥有 1953 年以来的逐年日降水量数据，而新盖房雨量站则有自 1970 年以来的逐年日降水量资料。此外，来自临近研究区的一些雨量站观测数据也将根据实际情况加以借鉴参考。

## （四）地下水位观测

1992 年，在整个研究区范围内布设了由 34 眼观测井组成的地下水位监测站网（图 1-5）。根据监测目的，井点的选择和布置考虑了区域自然条件、控制范围和水利工程现状等因素，布设方法采用均匀分布的方式，保证全区范围内的地下水位边界条件得以控制。每眼观测井的平均控制面积约  $4.4\text{km}^2$ ，具有较高的分布密度，可以满足较高的地下水位监测质量。观测井采用直径约 80mm 的 PVC 管制作，埋深在 15~25m 范围内，确保地下水位较低时仍能使用。观测工作由专人负责，采用简易电测水位计每 5 天观测一次，观测时间统一在观测当日上午 8:00，读数精度至毫米。由于井径小又无过滤措施，长期使用后井底易堵塞，故平均使用 2~3 年后，在其附近择地新建观测井。另外，为了解分干渠对地下水渗流和渠系侧向补给的影响，在试验区内，沿南干渠左侧垂直布设了由 6 眼观测井构成的地下水位变化观测剖面，其中井位的布置距离由密至稀，据南干渠的距离分别为 0 m、20m、50m、100m、300 m 和 800m 不等。在渠道放水灌溉回补期内，这些井的观测时间为 1 天 2 次，非引水期间的观测次数及日期相同于普通地下水位观测井。

## 二、雄县田间实验站

位于田间试验区内的实验站始建于 1993 年，占地  $40\text{m} \times 15\text{m}$ 。内设一座自记式农业气象站、一套人工气象观测设施、两个作物灌溉试验小区、两个土壤水分状态变量观测剖面、一眼灌溉浅井和一眼地下水位观测井（图 1-6）。用来确定分层非均质土壤理化性质和水力特性的室外田间试验和与作物生长参数相关的田间实验观测在站内完成。

### （一）气象资料观测

1993 年建站后，采用自记式和人工观测两套气象设施开展常规项目的气象观测，包括降雨、风速和风向、气温、地温、相对空气湿度、太阳辐射、日照时数和水面蒸发量（E601 和 D20 两类蒸发皿）等。其中自记气象站每小时采样一次，并自动将采集到的数据储存在模块内；人工观测的次数和时间参照国家相关业务部门制定的标准和要求执行。这两套气象观测数据可以相互补充验证，并定期与雄县气象站的观测资料进行对比校核，以保证气象资料的质量和完整性。

### （二）作物灌溉试验小区

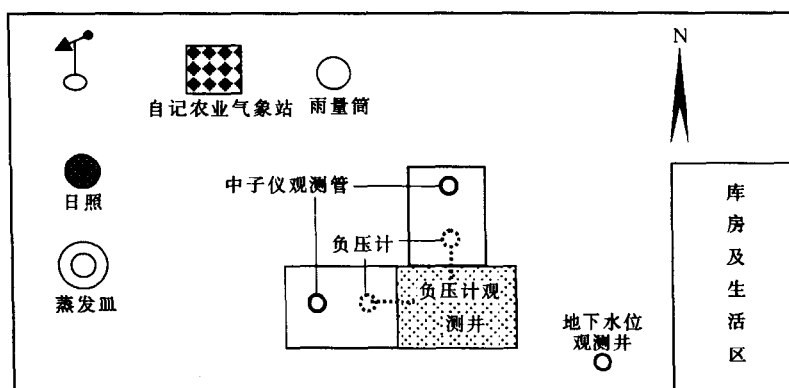


图 1-6 雄县田间实验站平面布置图

站内设有两个作物灌溉试验小区，每个小区的面积约为  $12\text{m}^2$ ，环绕四周有  $30\text{m}^2$  的保护区，确保各类观测数据资料的可靠性。作物灌水量由带有量水刻度的蓄水池控制，土壤水分观测由中子仪、负压计以及时域反射仪完成。来自作物灌溉小区的实验资料主要用来率定和验证非饱和土壤水运动模型和作物灌溉制度模拟模型，并用来确定上述模型运行所需要的输入参数。有关作物生长发育和生理特征的参数指标在小区内通过田间实验手段测定，并通过小区内放置的微型蒸发器观测裸土蒸发状况和有作物植被地表覆盖条件下的裸间土面蒸发量。

### (三) 土壤水分状态变量观测

土壤水分状态变量通常是指用来反映土壤水分状态变化的一些物理值，如土壤含水率、土壤负压水头和土壤导水率等，其中可以通过观测手段直接定量的是含水率和负值。在每个作物灌溉试验小区内均设立了土壤含水率和负压水头的观测剖面，深度达到  $7\text{m}$ ，可有效地监测非饱和区域内土壤水运动过程和与地下水位连接的状态。

土壤负压观测采用国产 WM-1 型水银式负压计系统，单支负压计的测量精度为  $133\text{Pa}$ ，陶土头进气值不大于  $120\text{kPa}$ ，渗流量离散性不大于  $0.05\text{ml}/(\text{min}\cdot\text{kPa})$ 。所有单支负压计被置于同一观测板上进行观测，从而可清晰地显示出土壤剖面水势的分布趋势，有助于监视整个负压计系统的工作状态。

在每个作物灌溉小区内，沿地面向下（上密下疏），在不同深度处共安装 32 根负压计，直到  $7.1\text{m}$  的深度。安装负压计采用两种形式，即地表下  $0\sim 4\text{m}$  的土层范围内使用斜插方式埋设负压计，而  $4\text{m}$  以下采用直插方式，将数支负压计按埋深距离捆绑固定在同一插杆上，放入事先预留的洞穴中。所有单支负压计分别与负压计观测井内的 2 块观测板相连，其中第 1 块板用来显示  $0\sim 4\text{m}$  范围内的土壤负压状况， $4\text{m}$  以下的土壤负压则由第 2 块板监测，整个负压计系统的安装形式和陶土头的埋设方式可参考图 1-7。土壤负压常规观测为 5 天 1 次，当降雨量超过  $20\text{mm}$  或实施灌溉前后需增加观测次数，在冬季土壤冻结期间可适当酌减观测次数。

图 1-8 给出了在  $4\text{m}$  上下不同土壤埋深处计算负压值的示意图。在  $0\sim 4\text{m}$  土壤剖面内，计算土壤负压的公式为：



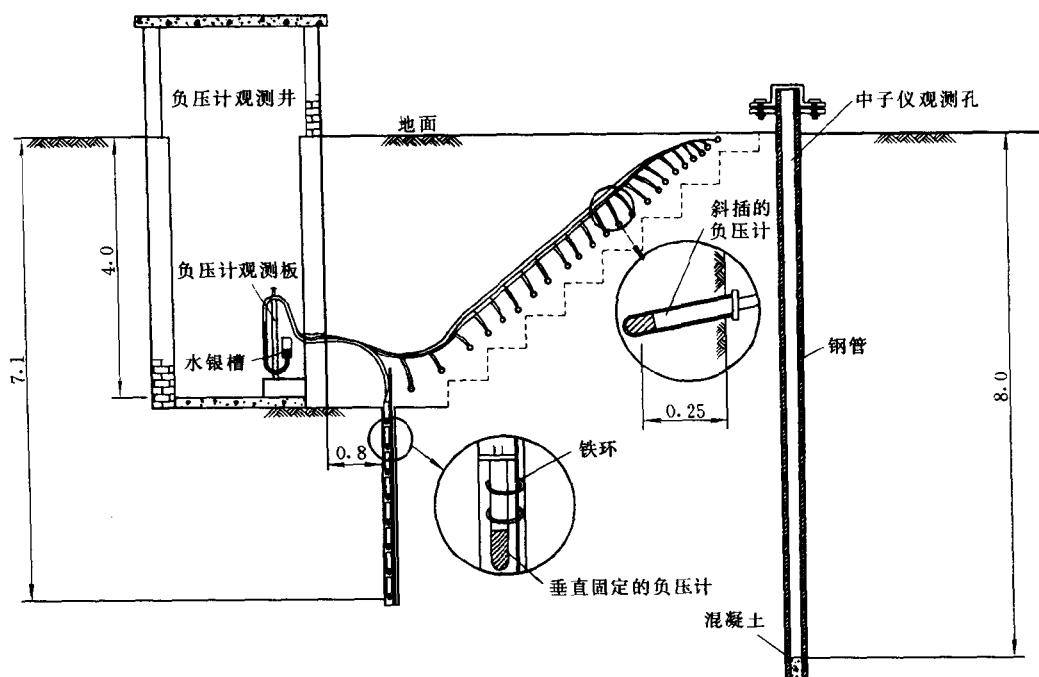


图 1-7 雄县田间实验站的土壤水分观测系统示意图 (单位: m)

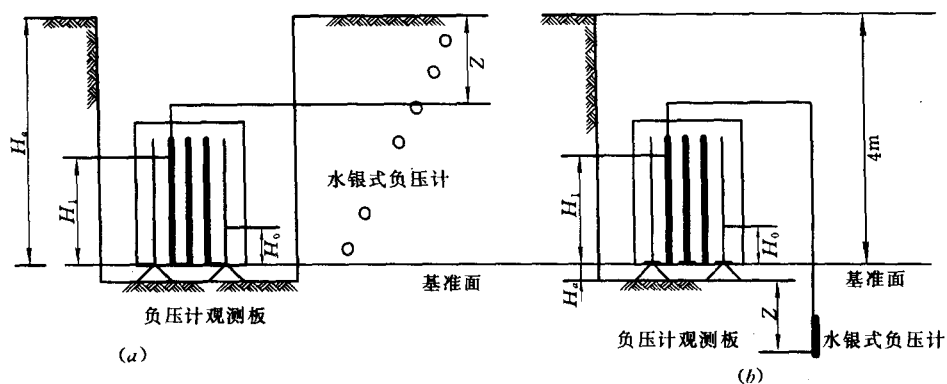


图 1-8 不同土壤深度处计算负压值的示意图

(a) 4m 以上; (b) 4m 以下

$$h = -12.6H_1 + 13.6H_0 - H_a + Z \quad (1-1)$$

4m 以下计算土壤负压的公式为:

$$h = -12.6H_1 + 13.6H_0 + H_a + Z \quad (1-2)$$

式中:  $H_1$  为负压计水银液面的高度, cm;  $H_0$  为水银槽中水银液面的高度, cm;  $H_a$  为观测板基准面与地表间的距离, cm;  $Z$  为埋设的陶土头中心位置与地表间的垂直距离, cm。

$H_a$  和  $Z$  相对于每块观测板而言是固定值,  $H_0$  则要在每次观测前从观测板上读取。

土壤含水率剖面监测采用中子水分仪完成, 它是一种用来定点测量土壤非饱和带体积