

jingzhunjieshui  
GUANGAIKONGZHIJISHU



# 精准节水灌溉控制技术

赵燕东 张 军 王海兰 编著



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

。對國員人朱娃丁謝哥蘇水計

## 内 容 介 绍

本书详细阐述了土壤墒情及植物茎体含水率测量方法,及土壤水分传感器和植物茎体水分传感器的工作原理和研制过程,经过大量实验,验证了传感器具有较高的可靠性、一致性和稳定性。以此为基础,研制出了按植物生命需水状况灌溉自动调控系统,并成功应用到北京奥运项目——民族大道精准节水灌溉项目,证明了此系统具有较高的可用性。

本书适合节水灌溉研究学者、农林高等院校的教师及学生、节水灌溉工程设计人员、节水灌溉施工技术人员阅读。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

## 图书在版编目(CIP)数据

精准节水灌溉控制技术 / 赵燕东, 张军, 王海兰编著. —北京: 电子工业出版社, 2010.1  
ISBN 978-7-121-09883-3

I. 精… II. ①赵… ②张… ③王… III. 节约用水—灌溉—技术 IV. S275

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 208105 号

责任编辑: 董亚峰

印 刷: 北京市天竺颖华印刷厂

装 订: 三河市鑫金马印装有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 720×1000 1/16 印张: 13.25 字数: 340 千字

印 次: 2010 年 1 月第 1 次印刷

印 数: 2000 册

定 价: 36.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 [zltz@phei.com.cn](mailto:zltz@phei.com.cn), 盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

服务热线: (010) 88258888。

## 前 言

自然环境离不开水的存在,人类生存、动植物的生长都和水息息相关,全世界共同面临的问题是可用水资源贫乏。中国水资源贫乏,人均占有量仅 $2\,300\text{ m}^3/\text{年}$ ,只相当于世界人均的 $1/4$ ,是世界上人均占有水资源最贫乏的13个国家之一。中国又是世界农业大国,农业用水占社会总耗水量的80%以上,但水资源利用有效性很差。如何解决农业需水量大、浪费大和水资源贫乏这一矛盾是关系国计民生的大事。在作物生产中,作物有效灌水量的多少是影响作物产量的重要因素,目前,中国年灌溉用水量约3 900亿立方米,有效利用率只有30%~50%,而先进国家已达70%~80%,中国每立方厘米水的粮食生产能力不足1.5 kg,先进国家已达2.4 kg。因此,节约用水、提高水资源利用率显得尤为重要。

水资源的合理利用是保证农业生产的重要条件,实施精准灌溉能有效提高水资源利用率。当前,我国现有的节水灌溉系统多采用对微喷灌用具的改进,如改装雾化喷头、安装配套的防滴器等,而缺少对植物需水信号和土壤水分状况的实时监测,不能实现按植物生长发育的需求进行定时定量精准灌溉,出现或者不能在植物需水时及时补水,或者一次灌水过多的现象,影响植物生长。在水资源严重不足的情况下,造成水源浪费,也会因为土壤水分过多,肥料(特别是氮肥)将随水分渗漏到地下水中,造成污染。

精准灌溉是按照植物生命需求进行灌水和停水。要用最少的水取得最好的灌溉效果,达到节水灌溉的最大效益,就要深入了解植物的需水状况,在植物需水时进行定量供水。从生命活动的本质上检测植物响应干旱的生理过程,是对抗旱理论的发展和创新,具有重要的理论和实践意义。

本书以植物生命需水状况和土壤墒情为依据,提出了精准灌溉新思路。主要内容如下。

- 1) 详细阐述了我国水资源概况及精准节水灌溉的意义,叙述了灌溉控制技术的范畴及其发展现状,并介绍了按植物生命需水状况精准节水灌溉控制技术概况。

- 2) 将土壤—植物—水作为一个大系统,研究三者之间的密切相关性,以此作为按植物生命需水状况精准节水灌溉控制系统的理论依据。

3) 系统地阐述了精准灌溉控制系统的结构, 分别提出了基于现场总线式和无线传感器网络式的精准灌溉控制体系结构, 给出了硬件实现及软件设计方案。

4) 详细叙述了土壤水分及植物茎体含水率的采集方法, 并对各种方法的优缺点及可行性进行分析。

5) 阐述了基于介质介电特性的水分传感器的理论基础及测量方法、传感器的结构设计、传感器的测量灵敏度; 对 BD-I 型土壤水分传感器和 BD-II 型植物水分传感器的性能作了详细说明, 并通过系统的实验, 证明其有效性。

6) 以 2008 北京奥运项目——民族大道精准节水灌溉控制系统的成功实施为范例, 从系统设计 (设计思路—系统组成—系统的生物学依据—系统硬件设计—远程监控软件设计), 到工程实施 (实施现场区域划分—BD-I 型传感器的布局设置—控制电缆埋设及喷头安装—运行结果及分析), 介绍了按植物生命需水状况精准节水灌溉控制技术的应用。

北京联合大学电信学院的张军老师、北京林业大学工学院的王海兰老师参加了本书的撰写工作。章军富、彭曾愉、江挺等研究生为本书的编写做了大量的工作, 在此表示衷心的感谢。

本书的所有研究是在国家自然科学基金项目 (30671715)、国家“十一五”重大支撑项目 (2006-BAD-03-A-01)、林业公益性行业科研专项 (200704040) 及 2008 北京市教育委员会共建项目共同资助下完成的, 在此表示衷心的感谢。

由于著者水平有限, 时间仓促, 对该项技术的研究还有待于深入, 缺点和不足之处在所难免, 恳请读者批评指正。

赵燕东

2009-8-5

# 目 录

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| <b>第1章 绪论</b> .....             | 1  |
| 1.1 我国水资源概况及精准节水灌溉的意义 .....     | 1  |
| 1.1.1 水资源概述 .....               | 1  |
| 1.1.2 人类长期面临的水资源问题 .....        | 2  |
| 1.2 灌溉控制技术的范畴及其发展现状 .....       | 9  |
| 1.2.1 灌溉控制技术的范畴 .....           | 9  |
| 1.2.2 我国灌溉控制技术现状及发展 .....       | 10 |
| 1.3 按植物生命需水状况精准节水灌溉控制技术概况 ..... | 11 |
| <b>第2章 土壤、植物以及水之间的关系</b> .....  | 13 |
| 2.1 引言 .....                    | 13 |
| 2.2 土壤 .....                    | 14 |
| 2.2.1 土壤质地及分类 .....             | 15 |
| 2.2.2 土壤结构及分类 .....             | 17 |
| 2.2.3 土壤容重、孔隙度及湿度 .....         | 19 |
| 2.3 植物 .....                    | 21 |
| 2.3.1 植物成长 .....                | 21 |
| 2.3.2 植物结构 .....                | 22 |
| 2.4 水 .....                     | 22 |
| 2.4.1 水和土壤 .....                | 23 |
| 2.4.2 水和植物 .....                | 27 |
| 2.5 小结 .....                    | 29 |
| <b>第3章 水分采集方法</b> .....         | 30 |
| 3.1 引言 .....                    | 30 |
| 3.2 土壤水分采集方法 .....              | 30 |

|            |                        |           |
|------------|------------------------|-----------|
| 3.2.1      | 烘干法                    | 31        |
| 3.2.2      | 瓶筒法测量土壤含水量             | 32        |
| 3.2.3      | 中子衰减法测量土壤含水量           | 33        |
| 3.2.4      | 张力计式土壤水分传感器            | 34        |
| 3.2.5      | 近红外反射法测量土壤含水量          | 37        |
| 3.2.6      | 介电法速测土壤含水量             | 38        |
| 3.3        | 植物茎体水分采集方法             | 43        |
| 3.3.1      | 直接法                    | 44        |
| 3.3.2      | 间接法                    | 45        |
| 3.4        | 小结                     | 47        |
| <b>第4章</b> | <b>水分传感器的理论基础及测量方法</b> | <b>48</b> |
| 4.1        | 引言                     | 48        |
| 4.2        | 土壤水分传感器的理论基础及测量方法      | 48        |
| 4.2.1      | 土壤水分介电测量的理论基础          | 48        |
| 4.2.2      | 土壤水分介电测量的通用模型          | 49        |
| 4.2.3      | 电极化和介电常数               | 52        |
| 4.2.4      | 介电弛豫和德拜方程              | 53        |
| 4.2.5      | 测试频率的确定                | 56        |
| 4.2.6      | 基于驻波率 (SWR) 原理的快速测量方法  | 57        |
| 4.2.7      | 基于传输线阻抗原理的快速测量方法       | 60        |
| 4.2.8      | 基于电磁场理论的分析方法           | 62        |
| 4.3        | 植物茎体水分传感器的理论基础及测量方法    | 64        |
| 4.3.1      | 植物茎体的宏观构造及水分分布变异       | 64        |
| 4.3.2      | 植物茎体水的存在形式及水分分布变异      | 66        |
| 4.3.3      | 植物的介电特性                | 68        |
| 4.3.4      | 植物茎体含水率与介电常数的标定关系      | 72        |
| 4.4        | 小结                     | 74        |
| <b>第5章</b> | <b>水分传感器的结构研究</b>      | <b>76</b> |
| 5.1        | 引言                     | 76        |
| 5.2        | 土壤水分传感器结构研究            | 76        |
| 5.2.1      | 单针式结构                  | 77        |



|       |                         |     |
|-------|-------------------------|-----|
| 5.2.2 | 两针式结构                   | 78  |
| 5.2.3 | 三针式结构                   | 79  |
| 5.2.4 | 平行四针式结构                 | 84  |
| 5.3   | 植物茎体水分传感器结构研究           | 89  |
| 5.4   | BD-I型土壤水分传感器探头结构设计      | 90  |
| 5.4.1 | 四针等长土壤水分传感器探头的特征阻抗模型    | 90  |
| 5.4.2 | 四针不等长土壤水分传感器探头的特征阻抗模型   | 92  |
| 5.4.3 | BD-I型土壤水分传感器探头阻抗模型的实验验证 | 93  |
| 5.5   | BD-II型植物茎体水分传感器探头结构设计   | 95  |
| 5.6   | 传感器总体电路设计               | 97  |
| 5.6.1 | 超高频信号源的设计               | 98  |
| 5.6.2 | 检波电路的设计                 | 104 |
| 5.6.3 | 显示仪表电路的设计               | 105 |
| 5.6.4 | 电池充电电路                  | 106 |
| 5.7   | 小结                      | 107 |
| 第6章   | 传感器性能分析研究               | 108 |
| 6.1   | 引言                      | 108 |
| 6.2   | 传感器的能量分布及测量敏感度分析        | 108 |
| 6.2.1 | 空间敏感度的定义                | 108 |
| 6.2.2 | BD-II型水分传感器测量敏感度分析      | 114 |
| 6.2.3 | BD-I型水分传感器探头的测量敏感度分析    | 123 |
| 6.3   | BD-I型传感器性能分析研究          | 129 |
| 6.3.1 | 测量数据的处理方法               | 130 |
| 6.3.2 | BD-I型传感器的静、动态特性         | 132 |
| 6.3.3 | BD-I型传感器的一致性分析          | 133 |
| 6.3.4 | BD-I型传感器测量结果受土壤质地影响的分析  | 139 |
| 6.3.5 | BD-I与TDR、FD型传感器性能对比分析   | 140 |
| 6.3.6 | 用BD-I型传感器监测作物土壤墒情       | 144 |
| 6.4   | BD-II型传感器性能分析研究         | 145 |
| 6.4.1 | 有机溶液介电常数测量实验            | 145 |
| 6.4.2 | 烘干标定实验                  | 154 |
| 6.4.3 | 植物体积含水率实时测量实验           | 162 |

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| 6.5 小结                             | 164 |
| <b>第7章 精准节水灌溉控制系统体系</b>            | 165 |
| 7.1 引言                             | 165 |
| 7.2 精准节水灌溉控制系统网络组成                 | 166 |
| 7.2.1 基于现场总线式灌溉控制系统                | 166 |
| 7.2.2 几种常用的总线控制网络                  | 168 |
| 7.2.3 基于 Zigbee 无线传感器网络的精准灌溉控制系统   | 176 |
| 7.3 小结                             | 182 |
| <b>第8章 按植物生命需水状况精准节水灌溉控制技术应用实例</b> | 183 |
| 8.1 引言                             | 183 |
| 8.2 系统设计                           | 184 |
| 8.2.1 设计思想                         | 184 |
| 8.2.2 系统组成                         | 185 |
| 8.2.3 系统的生物学依据                     | 185 |
| 8.2.4 系统工作原理                       | 186 |
| 8.2.5 系统硬件设计                       | 187 |
| 8.2.6 灌溉监测控制器                      | 188 |
| 8.2.7 系统监控器                        | 189 |
| 8.2.8 系统控制结构                       | 190 |
| 8.2.9 系统控制轮灌区的划分原则                 | 191 |
| 8.2.10 灌溉小区土壤含水率预设值的整定             | 191 |
| 8.2.11 系统运行参数                      | 191 |
| 8.3 工程实施                           | 194 |
| 8.3.1 区域划分                         | 194 |
| 8.3.2 传感器的埋设                       | 195 |
| 8.3.3 控制线缆埋设和喷头安装                  | 196 |
| 8.4 实际运行及结果分析                      | 197 |
| 8.5 小结                             | 198 |
| 参考文献                               | 199 |

# 第1章 绪 论

## 1.1 我国水资源概况及精准节水灌溉的意义

### 1.1.1 水资源概述

水作为一种资源,是宝贵的最基础的自然资源,是人类赖以生存和社会生产必不可少、又无法替代的重要物质资源,也是维持自然界生态平衡和社会发展和谐的基本物质基础。自然界的水资源尽管能够循环,而且可以逐年得到补充和恢复,但对于某一时段、某一区域来说,可供人们日常生活和生产使用的水量是有限的,不少国家和地区历史上已多次发生水荒。近些年来,由于生产的发展,生活水平的提高,用水量逐年增大,加之用水浪费和污染,水资源已成为各国倍加关注的重大问题。为了人类生存和保持世界经济可持续发展,对现有水资源进行综合开发利用、科学管理是摆在世界各国面前的一项长远而又艰巨的历史重任。因此,在某种意义上,水是人类生存生息的决定因素,是城市社会安全、经济持续发展的重要制约因素,具有突出的战略地位。

天然水资源即地球上所有的气态、液态或固态的天然水。人类可利用的水资源,主要指某一地区逐年可以恢复和更新的淡水资源,即通常所说的水资源。地球上的水可分为两大类:一类是永久储量,它的更替周期长,更新缓慢,如深层地下水;另一类是年内可以恢复储量,它积极参与全球水循环,逐年得到更新,在较长时间内保持动态平衡。只有年内可恢复的水资源才可以为人类所利用。

1991年,《水科学进展》编辑部组织国内有关专家对水资源的定义和内涵进行了较为深入的讨论。主要观点有如下几种。

1) 水资源主要是指与人类社会用水密切相关而又能不断更新的淡水,包



括地表水、地下水和土壤水，其补给来源为大气降水。

2) 作为维持人类社会存在并发展的重要自然资源之一的水资源，应当是可以按照社会的需要提供或有可能提供的水量，并有可靠的来源，且可以通过自然界水文循环不断得到更新或补偿，可以由人工加以控制，水质能够适应人类用水的要求。

3) 一切有利用价值，包括各种不同来源和形式的水，均属于水资源范畴。

4) 从自然资源的观点出发，水资源可定义为与人类生产和生活有关的天然水源。

5) 人类所利用的水资源包括农业用水、工业和生活用水。河槽水流是工农业用剩的水量，不应误作全国水资源。

6) 水资源是指可供国民经济利用的淡水资源，它来源于大气降水，其数量为扣除降水期蒸发的总水量。

7) 不能把降水、天然水称为水资源，犹如不能把海水、洪水、气态水当作水资源一样，要把具有稳定径流量、可供利用的相应数量的水定义为水资源。

8) 降水是陆地上一切水分的来源，但降水只是一种潜在的水资源，只有降水量中可利用的部分才是真正的水资源。

从水质的角度出发，地球上的水又有淡水、咸水之分。海洋水、矿化地下水以及地表咸水湖泊中的水都是咸水，不能为人类所利用。这一类水占地球水储量的绝大部分。地球上的淡水只有 0.35 亿立方千米，占总储量的 2.5%。

### 1.1.2 人类长期面临的水资源问题

水资源不仅是人类及其他一切生物生存的的必要条件和基础物质，也是国民经济建设和社会发展不可缺少的资源。一个人每天需摄入 2~2.5 kg 的水，以保持人体的水平衡，水在人体中的储量约为体重的三分之二；水也是一切植物生存生长进行光合作用和输入营养物质的要素，是工业生产不可缺少的原料、溶剂、交换介质等。

在当今世界，对水的认识是把其纳入国家综合国力的重要组成部分来对待的。人均年耗水量已成为衡量一个国家经济发展程度的重要标志，其用水结构成为判断一个国家工业化程度和生活水平的重要依据，而每立方米水所能创造的财富，又是衡量一个国家技术经济水平的重要尺度，其开发利用潜



力决定着一个国家的发展后劲。在我国,把“水利是农业的命脉”提高到水利是国民经济的基础设施和基础产业的地位,并纳入国家可持续发展长远目标规划进行优先考虑。

人类经济社会的发展,从一定意义上说意味着人类向自然进行索取,如果这种索取不适当,则迟早会给我们带来问题。以下几个方面的问题充分说明节水灌溉成为社会发展的迫切需求。

1) 水旱灾害是人类面临的主要自然灾害。人类与水旱灾害争已有几千年历史,但时至今日,水旱灾害造成的损失仍位居各种自然灾害之首。水旱灾害一般由气象因素、人为因素或地震、战争等引发。据统计,在世界范围内每年因水旱灾害造成的损失占各种自然灾害总损失的比例达 55%,其中水灾为 40%,旱灾为 15%。地球上的自然灾害主要分布在环太平洋和北纬  $20^{\circ} \sim 50^{\circ}$  两个带状区域内,全球 95% 的火山、95% 的地震、70% 的海啸都发生在这里,大部分水旱灾害也集中在这里。我国是严重干旱缺水的国家,也是洪涝灾害频发的国家,水旱灾害每年给我国带来巨大的损失。据统计,20 世纪 30 年代主要江河的几次特大洪水造成 65 万人死亡。1920 年陕西、河南、河北、山东、山西 5 省的持续大旱造成 50 万人死亡。1949 年以来,我国因洪涝死亡人数约 27 万人,年均 4 800 余人。同时,洪涝与干旱造成大量的土地被淹、粮食绝收、工业停产、交通中断、环境恶化等,造成巨大损失。水旱灾害与经济社会快速发展紧密相连,与水资源短缺、水环境恶化、水土流失加剧的问题交织在一起,增大了我国水问题的复杂性与艰巨性,不仅对全面加强水旱灾害的应急管理、风险管理提出了新的挑战,而且将成为长期困扰我国可持续发展的重大课题。

2) 全球气候变暖问题使得水问题更加严峻。人口的增加,工业的发展,导致二氧化碳等温室气体大量排放,“温室效应”加剧,全球气候变暖,海平面上升,水文循环发生一些变化。气温的极端变化导致了云层中水蒸气的含量在不同时间差异也很大。在同一地区,有时是暴风骤雨,降水量巨大,最终导致水灾,使人们失去家园;有时连续数月干旱,田地因缺水而裂开,最终导致旱灾,使人们失去粮食。尤其是在非洲贫困地区,干旱导致了更大的贫困,更多的贫民在饥饿的困境中挣扎。全球气候变暖已对中国产生比较明显的影响:一是使中国一些地区降水量减少,如山西省汾河流域多年平均降水量已由过去的 558 mm 减少到现在的 449 mm,减少近 20%;二是使海平面明显上升,据分析,近 100 年来中国海平面平均每年上升了 0.14 cm,其中天津、江苏、上海和广东沿海近 100 年来海平面上升超过了 20 cm。按照 20 世纪



50年代至80年代受旱农田面积的增长速度,到21世纪30年代至40年代受旱面积可能增长至4000万公顷以上。在西北干旱地区,上下游水资源如继续缺乏强有力的协调统一管理,则河下游将有近7万公顷的农田因干旱缺水而弃耕荒芜。

3) 乱砍乱伐以及其他破坏环境的行为产生了负面影响。盲目砍伐森林,不合理的筑坝拦水、围垦、跨流域调水、引水灌溉和开采地下水等,都有可能带来负面影响。对森林的乱砍滥伐,致使水土流失严重,恶化了当地生态与环境,造成了河道淤积,加之不合理的围垦,减少了水体的调蓄能力和输水能力,从而降低了江河防洪标准。砍伐树木会加快水土流失,从而增加山体滑坡的可能性。因为树木的根系组织将土壤固定在基岩上,树冠将雨水分散到大范围的区域,植被吸收雨水,因此密林被砍伐殆尽后,洪水的风险就增大。过量地开采地下水,会出现区域性地下水漏斗,引发地面沉降和海水入侵,不利于防洪,污染了地下水。不合理的引水灌溉,可能造成灌区次生盐碱化,也可能引起河流盐化。流域大量修建蓄水工程,或不合理使用河川径流,或不合理跨流域调水,可能使河川径流不合理地减少,甚至断流,导致下游河道淤积萎缩,防洪能力降低,湿地缩小,河口水环境恶化,生物多样性减少。

### 1. 世界水资源概况

全球可利用的水资源有限,随着人口的增长,需水量的增加,人类活动的加剧,尤其是污染物排放量的增加等,全球水资源面临的压力将有增无减。作为国家生存与发展的基本保障条件,水资源安全的问题已成为世人关注的焦点。如何在满足可持续发展的条件下,保证水资源的安全,是目前面临的一个十分严峻又富有挑战性的问题,也是国际国内水资源领域一个十分重要的方向性问题。

全球海洋面积占全球面积的70.8%,陆地上也有地表水分布,全球水资源总量约为138.6万亿立方米,其中淡水储量为3.5万亿立方米,占水总储量的2.53%。由于经济和技术的限制,到目前为止,固态的冰雪淡水,盐湖水等还很少被直接大量利用。易开发利用的与人类关系密切的湖泊、河流和浅层地下淡水也只占淡水总资源量的0.34%,为10.46万亿立方米,是全球水总储量的0.01%。

由表1-1可以看出,在陆地水量中,扣除地下矿化水和地表湖泊咸水,在淡水中占很大比重的是处于两极地带的冰雪和高山冰川中永久性积雪、冻土中的水量,目前还难以被开发利用,仅有0.35%是在河流、湖泊、土壤中,



人类可以利用。

表1-1 地球上的水体分布

| 项 目   | 总水量<br>( $\times 10^6 \text{ km}^3$ )<br>( $\times 10^6 \text{ km}^3$ ) | 占总水量百分比<br>(%)<br>(%) | 淡水量<br>( $\times 10^6 \text{ km}^3$ )<br>( $\times 10^6 \text{ km}^3$ ) | 占总水量百分比<br>(%)<br>(%) |
|-------|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| 总水量   | 1 385.984 61                                                            | 100                   | 35.029 21                                                               | 100                   |
| 海洋水   | 1 338.0                                                                 | 96.5                  |                                                                         |                       |
| 地下水   | 23.4                                                                    | 1.7                   | 10.53                                                                   | 30.06                 |
| 土壤水   | 0.016 5                                                                 | 0.001                 | 0.016 5                                                                 | 0.05                  |
| 冰雪总量  | 24.064 1                                                                | 1.74                  | 24.064 1                                                                | 68.7                  |
| 其中：南极 | 21.6                                                                    | 1.56                  | 21.6                                                                    | 61.7                  |
| 格陵兰岛  | 2.34                                                                    | 0.17                  | 2.34                                                                    | 6.68                  |
| 北极    | 0.083 5                                                                 | 0.006                 | 0.083 5                                                                 | 0.24                  |
| 山岳    | 0.040 6                                                                 | 0.003                 | 0.040 6                                                                 | 0.12                  |
| 冰土地下水 | 0.3                                                                     | 0.022                 | 0.3                                                                     | 0.86                  |
| 地表水   | 0.189 99                                                                | 0.014                 | 0.104 59                                                                | 0.3                   |
| 其中：湖泊 | 0.176 4                                                                 | 0.013                 | 0.091                                                                   | 0.26                  |
| 沼泽    | 0.011 47                                                                | 0.000 8               | 0.011 47                                                                | 0.03                  |
| 河川    | 0.002 12                                                                | 0.000 2               | 0.002 12                                                                | 0.006                 |
| 大气中水  | 0.012 9                                                                 | 0.001                 | 0.012 9                                                                 | 0.04                  |
| 生物内水  | 0.001 12                                                                | 0.000 1               | 0.001 12                                                                | 0.003                 |

注：引自联合国水会议论文《世界水平衡和地球水资源》，1997年3月。

可见地球上水的总量虽多，但是能被人类容易利用的淡水资源却十分有限，且主要靠降雨补充。世界上大气降水在地域和时空的分布很不均匀，在北半球范围，随着纬度的增高，降水量明显减小；南半球降水量也有随着纬度的增高而减小的趋势，但在  $40^\circ \sim 60^\circ$  范围内的降雨量明显增大。此外，沿海区域与内陆也有显著的差异，沿海地区明显高于内陆地区，少则几倍，多则十几倍，所以各大洲水资源量相差很大。大洋洲的一些岛屿，如新西兰、伊里安、塔斯马尼亚等，年降雨量几乎高达 3 000 mm，淡水资源最为丰富；南美洲水资源也比较丰富，年平均降雨量约为 1 600 mm；而非洲一些国家和地区，由于干旱少雨，有 2/3 的国土面积为无永久性河流的荒漠、半荒漠，年降水量不足 200 mm。

据科学界估计，全世界有半数以上的国家和地区缺乏饮用水，特别是经

济欠发达的第三世界国家, 目前已有 70% 即 17 亿人喝不上清洁水, 世界已有将近 80% 的人口受到水荒的威胁。

目前全球的缺水问题主要有两种类型: 一是水资源被过度开发, 造成河流干涸和地下储水层严重下降; 二是虽然一些地区雨水和河流资源非常丰富, 但当地缺乏蓄水的资金和技术手段。因此, 一方面要合理使用水资源, 避免过度开发, 另一方面还要加强储水蓄水能力。目前最为紧迫的就是要减少农业用水。

目前, 农业用水已经超过全世界用水的 74%, 如生产 1 kg 小麦需要 500 kg 至 4 000 kg 水, 而生产 1 kg 肉类食品需要 1 万 kg 水。现在全球人口为 61 亿, 50 年后将增加到 80 亿至 90 亿, 因此只有设法用尽量少的水生产出更多的食品, 才能满足人口增长的需要。

人类的生活和各种生产活动离不开水, 同时水又是人类赖以生存的地球环境的基本要素, 这样一种自然资源一旦缺乏, 必将严重影响经济及人类社会活动, 危害人类生存。

## 2. 我国水资源概况

我国疆域辽阔, 国土面积 960 万平方千米, 由于位置处于季风气候区域, 每年夏季来自热带及太平洋低纬度上温暖而潮湿的气团, 随着强盛的东南季风侵入我国东南地区, 引起大量降雨。从西南的印度洋和东北的鄂霍茨克送来的水汽, 对我国西南和东北地区所获充足雨量, 也起重要作用。这些水汽引起丰沛的降雨和径流, 使我国成为世界上水资源比较丰富的国家之一。

我国江河众多, 其中流域面积在  $100 \text{ km}^2$  以上的河流总计有五万多条, 流域面积在  $1000 \text{ km}^2$  以上的河流大约有 1 500 多条。我国的湖泊面积在  $1 \text{ km}^2$  以上的有 2 300 多个, 总面积  $71\,787 \text{ km}^2$ 。内流湖泊面积为  $41\,137 \text{ km}^2$ , 储水量 4 943 亿立方米, 其中淡水储量为 455 亿立方米, 外流湖泊面积为  $30\,650 \text{ km}^2$ , 储水量为 2 145 亿立方米, 其中淡水储量为 1 805 亿立方米。我国有冰川 4 300 多条, 集中分布在西部地区。冰川面积约为  $56\,500 \text{ km}^2$ , 分布于内陆河的冰川面积为  $33\,600 \text{ km}^2$ , 外流河的冰川面积为  $22\,825 \text{ km}^2$ , 冰川总储量约为  $52\,000 \text{ m}^3$ 。

这里顺便指出: 地下水资源中仅包括积极参与水循环的浅层地下水。深层地下水为永久储量, 没有计入。鉴于浅层地下水与河川径流有互相转化补给的复杂关系, 因而其间有重复的计算水量, 应予扣除。



如果将全国水资源按流域分为 11 个分区,则各分区的计算面积、年降水总量、年地下水资源总量、年水资源总量分别列于表 1-2。

表1-2 全国分区年降水、年河川径流、年地下水、年水资源总量表

| 分 区    | 计算面积<br>(km <sup>2</sup> ) | 年降水          |           | 年河川径流        |           | 年地下<br>水资源<br>(亿立方米) | 年水资源<br>总量<br>(亿立方米) |
|--------|----------------------------|--------------|-----------|--------------|-----------|----------------------|----------------------|
|        |                            | 总量<br>(亿立方米) | 深<br>(mm) | 总量<br>(亿立方米) | 深<br>(mm) |                      |                      |
| 黑龙江流域片 | 903 418                    | 4 476        | 496       | 1 166        | 129       | 431                  | 1 352                |
| 辽河流域片  | 345 072                    | 1 901        | 551       | 487          | 141       | 194                  | 577                  |
| 海滦河流域片 | 318 161                    | 1 781        | 560       | 288          | 91        | 265                  | 421                  |
| 黄河流域片  | 794 712                    | 3 691        | 464       | 661          | 83        | 406                  | 744                  |
| 淮河流域片  | 329 211                    | 2 830        | 360       | 741          | 225       | 393                  | 961                  |
| 长江流域片  | 1 808 500                  | 19 360       | 1 071     | 9 513        | 526       | 2 464                | 9 613                |
| 珠江流域片  | 580 641                    | 8 967        | 1 544     | 4 685        | 807       | 1 115                | 4 708                |
| 浙闽台诸河片 | 239 803                    | 4 216        | 758       | 2 557        | 1 066     | 623                  | 2 592                |
| 西南诸河片  | 851 406                    | 9 346        | 1 098     | 5 853        | 688       | 1 544                | 5 853                |
| 内陆诸河片  | 3 321 713                  | 5 113        | 154       | 1 064        | 32        | 820                  | 1 200                |
| 额尔齐斯河  | 52 730                     | 208          | 395       | 100          | 190       | 43                   | 103                  |
| 全 国    | 9 545 322                  | 61 889       | 648       | 27 115       | 284       | 8 288                | 28 124               |

注:引自中国水利电力部水文局《中国水资源评价》,水利电力出版社,1987年12月。

我国水资源有如下几个特点。

1) 中国水资源总量丰富,但人均水资源占有量少。我国国土面积占世界陆地面积的 6%,居世界第三位,在 960 万平方千米的国土上养育着占世界 22% 的人民。我国多年平均年水资源总量为 28 124 亿立方米,仅次于巴西、俄罗斯、加拿大、美国和印度尼西亚,居世界第 6 位。但是我国平均每年降水深为 648 mm (降水总量为 6.2 万亿立方米),小于全球陆面平均降水深 800 mm,也小于亚洲陆面平均降水深 740 mm。我国人口众多,人均水资源占有量不足 2 300 m<sup>3</sup>,大大低于世界的平均水平,为世界平均水平的 1/4,不到美国人均水平的 1/5。从亩耕地占有量来看,我国亩均径流为 1 800 m<sup>3</sup>,相当于世界平均水平的 2/3,我国水资源总量多,人均、亩均占有量少,是水资源短缺的国家之一。我国水资源十分珍贵,尤其是人均占有水资源量极不丰富。表 1-3 所显示的数据,



不能不引起我们的足够重视。

表1-3 我国年径流总量、人均、亩均水量与国外比较

| 国家名称 | 年径流总量<br>( $10^8 \text{ m}^3$ ) | 年径流深<br>(mm) | 人口<br>(亿) | 人均水量<br>( $\text{m}^3/\text{人}$ ) | 耕地<br>( $10^8 \text{ m}^2$ ) | 亩均水量<br>( $\text{m}^3/\text{亩}$ ) |
|------|---------------------------------|--------------|-----------|-----------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| 巴 西  | 51 912                          | 609          | 1.23      | 42 200                            | 4.85                         | 10 701                            |
| 前苏联  | 47 140                          | 211          | 2.64      | 17 860                            | 34.00                        | 1 385                             |
| 加拿大  | 31 220                          | 313          | 0.24      | 130 080                           | 6.54                         | 4 771                             |
| 美 国  | 29 702                          | 317          | 2.2       | 13 500                            | 28.40                        | 1 046                             |
| 印 尼  | 28 113                          | 1 476        | 1.48      | 19 000                            | 2.13                         | 13 200                            |
| 中 国  | 27 115                          | 284          | 11.73     | 2 310                             | 15.06                        | 1 800                             |
| 印 度  | 17 800                          | 514          | 6.78      | 2 625                             | 24.70                        | 721                               |
| 日 本  | 5 470                           | 1 470        | 1.16      | 4 716                             | 0.65                         | 8 462                             |
| 全世界  | 468 000                         | 314          | 43.35     | 10 800                            | 198.90                       | 2 353                             |

注：外国人口是联合国 1979 年的统计数。我国人口是 1993 年普查人口数。我国人口、水量、耕地均包括台湾省。

2) 水资源在空间上分布不均。从空间分布上看，我国南方水资源多，北方水资源少；沿海多，内陆少；山区多，平原少。我国季风气候特别明显，夏秋季节，太平洋的东南风，带来大量雨水，由东南向西北方向移动；冬春季节，受西伯利亚的内陆气候影响，干旱少雨，由西北向东南方向移动，形成我国水资源分布在东南多，西北少的特点；年平均降水深从东南的 1 600~1 800 mm，向西北逐渐减少到 200 mm 以下，致使西北和华北地区约有 45% 的面积处于干旱、半干旱地带，水资源明显稀少。长江流域及其以南地区耕地面积占全国的 36%，地表水资源占全国的 81% 以上，而淮河以北的华北、东北、西北等地的耕地面积占全国的 64%，地表水资源量仅为全国的 19%，水资源量严重不足。这对我国工农业生产和人民生活有着很大的影响，造成水资源供需矛盾突出，水、土、矿产资源的配置不合理，制约着我国经济的发展。滥砍滥伐等问题严重，加剧了水旱灾害，使生态失调。

3) 水资源在时间上分布不平衡。这种不平衡主要表现在年内各个季节