

高等学校水利学科教学指导委员会组织编审

高等学校水利学科专业规范核心课程教材·水文与水资源工程

# 地下水水文学

主 编 河 海 大 学 束龙仓  
合肥工业大学 陶月赞  
主 审 合肥工业大学 张元禧



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

高等学校水利学科专业规范核心课程教材·水文与水资源工程（同时适用专业）

水力学（水利水电工程、农业水利工程、港口航道与海岸工程）

自然地理学

气象学与气候学教程

水文学原理

水文统计学

地下水水文学

水资源利用

水环境保护

水环境化学

河流动力学

地下水动力学

水信息技术

水文预报（第4版）

水文水利计算（第2版）

水文地质勘察

水灾害防治

地理信息系统原理与应用

中国水利水电出版社·教育出版分社

地址：北京市三里河路6号

邮编：100044

电话：(010) 68311132, 63202266-2511

E-mail: scl@waterpub.com.cn

wll@waterpub.com.cn

销售分类：水利教材/水文水资源

ISBN 978-7-5084-6173-1



9 787508 461731 >

定价：32.00 元

高等学校水利学科教学指导委员会组织编审

高等学校水利学科专业规范核心课程教材·水文与水资源工程

# 地下水水文学

主 编 河 海 大 学 束龙仓  
合肥工业大学 陶月赞  
主 审 合肥工业大学 张元禧



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

## 内 容 提 要

本教材为水利学科教学指导委员会推荐教材,全书除绪论外共分12章,包括:地下水及其赋存,地下水的物理性质和化学成分,地下水的补给、径流与排泄,地下水动态与均衡,地下水运动的基础理论,地下水流向完整井的运动,地下水流向河渠的运动,野外试验与动态观测,地下水资源评价,地下水污染,地下水水质评价,地下水资源管理。本教材在传统地下水水文学课程的基础上,增加了地下水的物理性质和化学成分,地下水的补给、径流与排泄,地下水污染等内容。

本教材为高等学校水文与水资源工程专业的核心教材,也适用于水利工程、城市给排水工程、农业土木工程、环境工程等专业师生阅读,并可供相关专业的工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

地下水水文学/束龙仓,陶月赞主编.——北京:中国水利水电出版社,2009

高等学校水利学科专业规范核心课程教材.水文与水资源工程

ISBN 978-7-5084-6173-1

I. 地… II. ①束…②陶… III. 地下水水文学—高等学校—教材 IV. P641.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第204585号

|      |                                                                                                                                                                                                                        |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 书 名  | 高等学校水利学科专业规范核心课程教材·水文与水资源工程<br><b>地下水水文学</b>                                                                                                                                                                           |
| 作 者  | 主编 河海大学 束龙仓 合肥工业大学 陶月赞<br>主审 合肥工业大学 张元禧                                                                                                                                                                                |
| 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: <a href="http://www.waterpub.com.cn">www.waterpub.com.cn</a><br>E-mail: <a href="mailto:sales@waterpub.com.cn">sales@waterpub.com.cn</a><br>电话: (010) 63202266 (总机)、68367658 (营销中心) |
| 经 售  | 北京科水图书销售中心(零售)<br>电话: (010) 88383994、63202643<br>全国各地新华书店和相关出版物销售网点                                                                                                                                                    |
| 排 版  | 中国水利水电出版社微机排版中心                                                                                                                                                                                                        |
| 印 刷  | 北京市兴怀印刷厂                                                                                                                                                                                                               |
| 规 格  | 175mm×245mm 16开本 18.25印张 421千字                                                                                                                                                                                         |
| 版 次  | 2009年1月第1版 2009年1月第1次印刷                                                                                                                                                                                                |
| 印 数  | 0001—3000册                                                                                                                                                                                                             |
| 定 价  | <b>32.00元</b>                                                                                                                                                                                                          |

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

# 高等学校水利学科专业规范核心课程教材

## 编 审 委 员 会

主 任 姜弘道 (河海大学)

副主任 王国仪 (中国水利水电出版社) 谈广鸣 (武汉大学)

李玉柱 (清华大学) 吴胜兴 (河海大学)

### 委 员

周孝德 (西安理工大学)

刘 超 (扬州大学)

任立良 (河海大学)

杨金忠 (武汉大学)

梅亚东 (武汉大学)

姜 峰 (大连理工大学)

王元战 (天津大学)

张展羽 (河海大学)

陈建康 (四川大学)

孙明权 (华北水利水电学院)

陈 楚 (水利部人才资源开发中心)

李建林 (三峡大学)

朝伦巴根 (内蒙古农业大学)

余锡平 (清华大学)

袁 鹏 (四川大学)

胡 明 (河海大学)

郑金海 (河海大学)

康海贵 (大连理工大学)

黄介生 (武汉大学)

冯 平 (天津大学)

侍克斌 (新疆农业大学)

孙春亮 (中国水利水电出版社)

秘 书 周立新 (河海大学)

丛书总策划 王国仪

# 水文与水资源工程专业教材编审分委员会

主 任 任立良（河海大学）

副主任 袁 鹏（四川大学）

梅亚东（武汉大学）

## 委 员

沈 冰（西安理工大学）

吴吉春（南京大学）

刘廷玺（内蒙古农业大学）

方红远（扬州大学）

姜卉芳（新疆农业大学）

靳孟贵（中国地质大学）

吴泽宁（郑州大学）

陈元芳（河海大学）

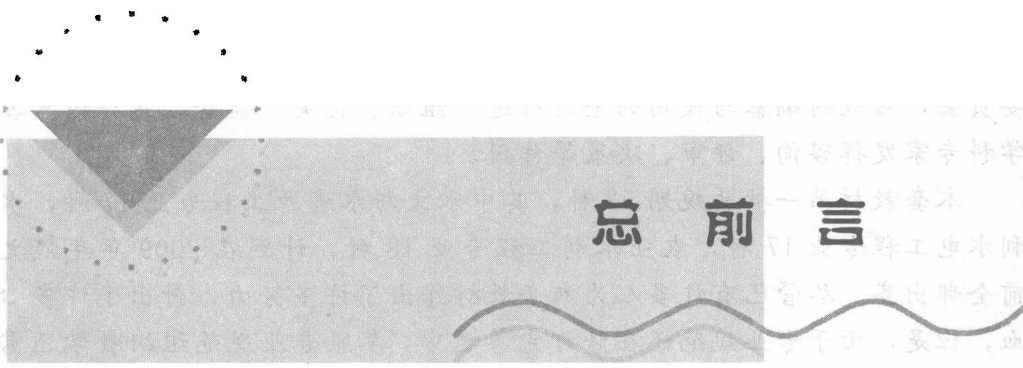
冯 平（天津大学）

纪昌明（华北电力大学）

刘俊民（西北农林科技大学）

金菊良（合肥工业大学）

郭纯青（桂林工学院）



## 总 前 言

随着我国水利事业与高等教育事业的快速发展以及教育教学改革的不断深入,水利高等教育也得到很大的发展与提高。与1999年相比,水利学科专业的办学点增加了将近一倍,每年的招生人数增加了将近两倍。通过专业目录调整与面向新世纪的教育教学改革,在水利学科专业的适应面有很大拓宽的同时,水利学科专业的建设也面临着新形势与新任务。

在教育部高教司的领导与组织下,从2003年到2005年,各学科教学指导委员会开展了本学科专业发展战略研究与制定专业规范的工作。在水利部人教司的支持下,水利学科教学指导委员会也组织课题组于2005年底完成了相关的研究工作,制定了水文与水资源工程,水利水电工程,港口、航道与海岸工程以及农业水利工程四个专业规范。这些专业规范较好地总结与体现了近些年来水利学科专业教育教学改革的成果,并能较好地适用不同地区、不同类型高校举办水利学科专业的共性需求与个性特色。为了便于各水利学科专业点参照专业规范组织教学,经水利学科教学指导委员会与中国水利水电出版社共同策划,决定组织编写出版“高等学校水利学科专业规范核心课程教材”。

核心课程是指该课程所包括的专业教育知识单元和知识点,是本专业的每个学生都必须学习、掌握的,或在一组课程中必须选择几门课程学习、掌握的,因而,核心课程教材质量对于保证水利学科各专业的教学质量具有重要的意义。为此,我们不仅提出了坚持“质量第一”的原则,还通过专业教学组讨论、提出,专家咨询组审议、遴选,相关院、系认定等步骤,对核心课程教材选题及其主编、主审和教材编写大纲进行了严格把

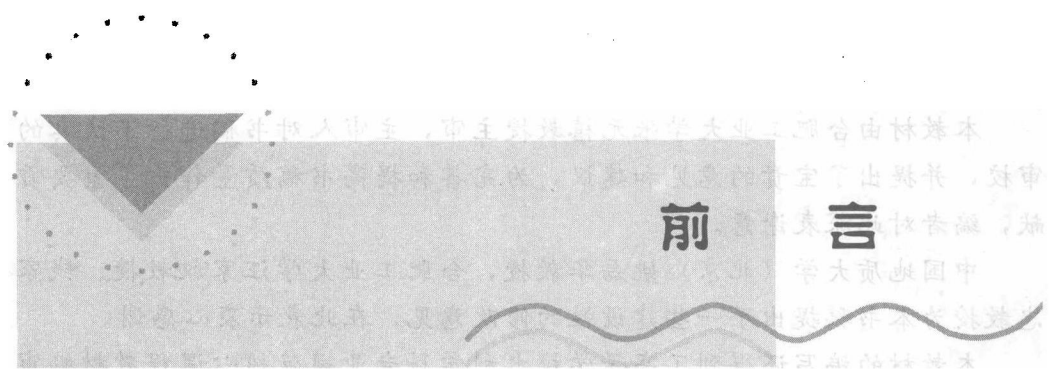
关。为了把本套教材组织好、编著好、出版好、使用好，我们还成立了高等学校水利学科专业规范核心课程教材编审委员会以及各专业教材编审分委员会，对教材编纂与使用的全过程进行组织、把关和监督。充分依靠各学科专家发挥咨询、评审、决策等作用。

本套教材第一批共规划 52 种，其中水文与水资源工程专业 17 种，水利水电工程专业 17 种，农业水利工程专业 18 种，计划在 2009 年年底之前全部出齐。尽管已有许多人为本套教材作出了许多努力，付出了许多心血，但是，由于专业规范还在修订完善之中，参照专业规范组织教学还需要通过实践不断总结提高，加之，在新形势下如何组织好教材建设还缺乏经验，因此，这套教材一定会有各种不足与缺点，恳请使用这套教材的师生提出宝贵意见。本套教材还将出版配套的立体化教材，以利于教、便于学，更希望师生们对此提出建议。

高等学校水利学科教学指导委员会

中国水利水电出版社

2008 年 4 月



# 前 言

本教材根据高等学校水利水电类教学指导委员会“十一五”教材出版计划和“水文与水资源工程本科专业规范”编写。本教材作为水文与水资源工程本科专业的核心课程教材，在“2006年水利水电类教学指导委员会水文水资源教学组会议”上讨论了本教材的编写大纲。

地下水水文学是水文学的一个分支，着重从水文学的观点研究地下水。“地下水水文学”是水文与水资源工程专业的一门必修的专业基础课。本课程的主要任务是培养学生从水文循环的基本原理出发，在完整的水循环体系内了解地下水的形成、储存、运动、补给、排泄等特征的变化规律，并使学生初步掌握地下水动态长期观测资料整理与分析的基本方法、野外试验设计与试验资料整理与分析的基本方法、水量平衡原理及其应用步骤、地下水资源评价的基本方法和水量平衡的基本分析方法，运用数理统计的方法，通过站网观测资料和试验资料来了解地下水动态，并作出地下水资源的初步评价。

本教材在中国水利水电出版社1998年10月出版的由张元禧、施鑫源编写的《地下水水文学》的基础上，增加了地下水的物理性质和化学成分、地下水补给、径流与排泄、地下水污染等内容。

本教材由河海大学束龙仓、合肥工业大学陶月赞主编。河海大学温忠辉、荆艳东，合肥工业大学刘佩贵参编。全书除绪论外共分12章，其中绪论，第1、2、9、12章及附录由束龙仓编写；第4、11章由温忠辉编写；第3章由荆艳东编写；第5、6、7、8章由陶月赞编写；第10章由刘佩贵编写；全书由束龙仓统稿。河海大学研究生陶玉飞、刘丽红、曹英

杰、甄黎、闵星，合肥工业大学研究生徐翹、蒋玲、杨杰、汪佳等参与了书稿的文字录入及电子图稿的绘制工作。

本教材由合肥工业大学张元禧教授主审，主审人对书稿进行了认真的审校，并提出了宝贵的意见和建议，为完善和提高书稿质量作出了重要贡献，编者对此深表谢意。

中国地质大学（北京）姚磊华教授，合肥工业大学汪家权教授、钱家忠教授为本书稿提出了一些建设性的修改意见，在此表示衷心感谢。

本教材的编写还得到了高等学校水利学科专业规范核心课程教材编审委员会主任姜弘道教授、水文与水资源工程专业教材编审分委员会主任任立良教授、分委员会委员陈元芳教授的大力支持，在此一并致谢。

限于编者的水平，书中不当之处，恳请读者批评指正。

编 者

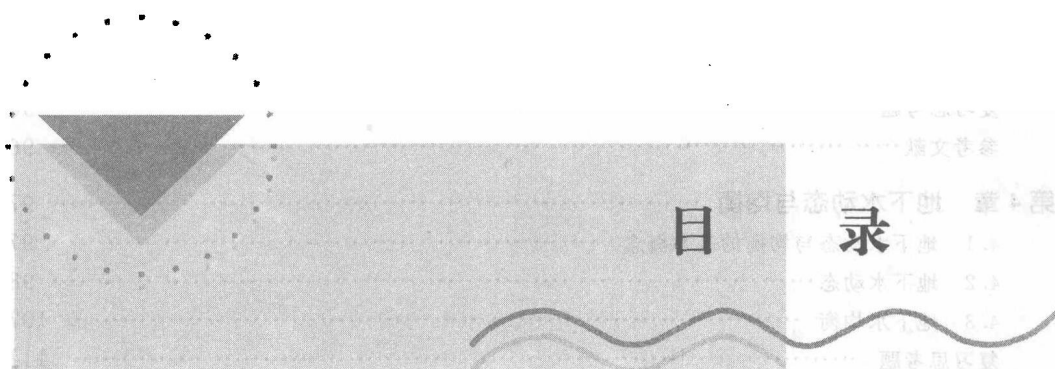
2008 年 10 月

# 符号与量纲

| 符号             | 说 明             | 量纲             | 符号              | 说 明           | 量纲              |
|----------------|-----------------|----------------|-----------------|---------------|-----------------|
| A              | 面积              | $L^2$          | M               | 含水层厚度         | L               |
| a              | 加速度             | $LT^{-2}$      | n               | 开采模数          | $LT^{-1}$       |
|                | 相对粗糙度           | $L^2T^{-1}$    |                 | 孔隙度           |                 |
|                | 压力传导系数 (导压系数)   | $L^2T^{-1}$    |                 | 外法线方向         |                 |
| B              | 宽度              | L              | n <sub>e</sub>  | 蒸发指数          |                 |
|                | 隔水底板高程          | L              |                 | 有效孔隙度         |                 |
| b              | 裂隙宽度            | L              | P               | 压力            | $MLT^{-2}$      |
|                | 单位宽度            | L              |                 | 经验频率          |                 |
| D              | 扩散系数            | $L^{-2}T^{-1}$ | p               | 压强            | $ML^{-1}T^{-2}$ |
|                | 水力弥散系数 (弥散系数)   | $L^{-2}T^{-1}$ | p <sub>a</sub>  | 大气压强          | $ML^{-1}T^{-2}$ |
| d              | 直径              | L              | Q               | 流量、补给量、排泄量等   | $L^3T^{-1}$     |
|                | 物质颗粒粒径          | L              | q               | 单宽流量          | $L^2T^{-1}$     |
| E              | 蒸发量             | $L^3$          |                 | 源汇项           | $T^{-1}$        |
|                | 植物蒸腾量           | $L^3$          | R               | 影响半径          | L               |
| e              | 孔隙比             |                |                 | 水力半径          | L               |
| F              | 面积              | $L^2$          | r <sub>w</sub>  | 抽水井半径         | L               |
| G              | 重力              | $MLT^{-2}$     | Re              | 雷诺数           |                 |
| g              | 重力加速度           | $LT^{-2}$      | Re <sub>c</sub> | 临界雷诺数         |                 |
| H              | 水位              | L              | S <sub>w</sub>  | 饱和度           |                 |
| ΔH             | 地下水水位的平均降 (升) 速 | $LT^{-1}$      | S <sub>r</sub>  | 持水度           |                 |
| h              | 水头              | L              | S <sub>0</sub>  | 土壤孔隙最低温度时饱和湿度 | $ML^{-3}$       |
| Δh             | 水位变幅            | L              | S <sub>0</sub>  | 土壤孔隙最大绝对湿度    | $ML^{-3}$       |
| $\bar{h}$      | 含水层平均厚度         | L              | T               | 导水系数          | $L^2T^{-1}$     |
| I              | 水力坡度            |                |                 | 绝对温度          | K               |
| i              | 潜水面坡度           |                | t               | 时间            | T               |
| K              | 渗透系数            | $LT^{-1}$      | U               | 势函数           |                 |
| K <sub>s</sub> | 岩溶率             |                | u               | 流速            | $LT^{-1}$       |
| K <sub>v</sub> | 体积裂隙率           |                | V               | 岩石总体积         | $L^3$           |
| K <sub>T</sub> | 面积裂隙率           |                | V <sub>s</sub>  | 固体骨架体积        | $L^3$           |
| K <sub>L</sub> | 线性裂隙率           |                | V <sub>K</sub>  | 岩石溶隙体积        | $L^3$           |
| L              | 长度              | L              | V <sub>T</sub>  | 岩石裂隙体积        | $L^3$           |
|                |                 |                | V <sub>e</sub>  | 有效体积          | $L^3$           |
|                |                 |                | V <sub>n</sub>  | 岩土孔隙体积        | $L^3$           |
|                |                 |                | v               | 渗流速度          | $LT^{-1}$       |

续表

| 符号             | 说 明        | 量纲           | 符号           | 说 明                    | 量纲              |
|----------------|------------|--------------|--------------|------------------------|-----------------|
| $W_{\text{弹}}$ | 承压水的弹性储存量  | $L^3$        | $\Gamma_2$   | 第二类边界                  |                 |
| $x$            | 坐标         | $L$          | $\epsilon$   | 潜水蒸发强度                 | $LT^{-1}$       |
|                | 湿周         | $L$          | $\epsilon_0$ | 潜水位近于地表时的蒸发强度          | $LT^{-1}$       |
| $y$            | 坐标         | $L$          | $\eta$       | 地下径流系数                 | $T^{-1}$        |
| $z$            | 坐标         | $L$          | $\mu$        | 给水度                    |                 |
|                | 位置水头       | $L$          |              | 动力黏滞系数                 | $ML^{-1}T^{-1}$ |
| $\alpha$       | 大气降水入渗系数   |              | $\mu_s$      | 释水（储水）率                | $L^{-1}$        |
|                | 衰减指数       |              | $\mu^*$      | 弹性释水（储水）系数             |                 |
|                | 泉流量衰减系数    |              |              |                        |                 |
|                | 多孔介质体积压缩系数 | $M^{-1}LT^2$ | $\sigma$     | 总应力                    | $ML^{-1}T^{-2}$ |
| $\beta_w$      | 水的体积压缩系数   | $M^{-1}LT^2$ |              | 表面张力                   | $MLT^{-2}$      |
| $\Gamma$       | 研究区边界      |              | $\Delta$     | $\Delta t$ 时段内地下水位平均埋深 | $L$             |
| $\Gamma_1$     | 第一类边界      |              | $\Delta_0$   | 地下水位极限埋深               | $L$             |



## 总前言

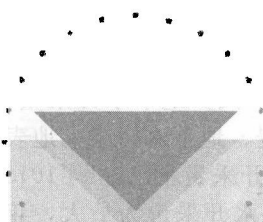
## 前言

## 符号与量纲

|                       |    |
|-----------------------|----|
| 绪论                    | 1  |
| 0.1 地下水资源开发利用概况       | 1  |
| 0.2 地下水水文学发展简史        | 7  |
| 0.3 《地下水水文学》的基本内容     | 9  |
| 复习思考题                 | 9  |
| 参考文献                  | 9  |
| 第1章 地下水及其赋存           | 10 |
| 1.1 自然界水的分布、循环与均衡     | 10 |
| 1.2 地下水的赋存            | 14 |
| 1.3 不同埋藏条件下的地下水       | 25 |
| 1.4 不同含水介质中的地下水       | 30 |
| 复习思考题                 | 42 |
| 参考文献                  | 42 |
| 第2章 地下水的物理性质和化学成分     | 44 |
| 2.1 地下水的物理性质          | 44 |
| 2.2 地下水的化学特征          | 46 |
| 2.3 地下水化学成分的形成作用及成因类型 | 54 |
| 复习思考题                 | 63 |
| 参考文献                  | 63 |
| 第3章 地下水的补给、径流与排泄      | 64 |
| 3.1 地下水的补给            | 64 |

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 3.2 地下水的排泄 .....             | 83  |
| 3.3 地下水的径流 .....             | 90  |
| 复习思考题 .....                  | 96  |
| 参考文献 .....                   | 96  |
| <b>第4章 地下水动态与均衡</b> .....    | 97  |
| 4.1 地下水动态与均衡的基本概念 .....      | 97  |
| 4.2 地下水动态 .....              | 98  |
| 4.3 地下水均衡 .....              | 107 |
| 复习思考题 .....                  | 111 |
| 参考文献 .....                   | 112 |
| <b>第5章 地下水运动的基础理论</b> .....  | 113 |
| 5.1 地下水渗流的基本知识 .....         | 113 |
| 5.2 地下水渗流的基本定律 .....         | 121 |
| 5.3 地下水流运动的基本方程 .....        | 125 |
| 复习思考题 .....                  | 134 |
| 参考文献 .....                   | 134 |
| <b>第6章 地下水流向完整井的运动</b> ..... | 136 |
| 6.1 基础知识 .....               | 136 |
| 6.2 地下水流向井的稳定流运动 .....       | 139 |
| 6.3 承压水流向井的非稳定运动 .....       | 143 |
| 6.4 潜水流向井的非稳定运动 .....        | 155 |
| 复习思考题 .....                  | 160 |
| 参考文献 .....                   | 161 |
| <b>第7章 地下水流向河渠的运动</b> .....  | 162 |
| 7.1 河渠间地下水稳定运动 .....         | 162 |
| 7.2 河渠附近潜水非稳定运动 .....        | 168 |
| 复习思考题 .....                  | 172 |
| 参考文献 .....                   | 172 |
| <b>第8章 野外试验与动态观测</b> .....   | 173 |
| 8.1 抽水试验设计与资料分析 .....        | 173 |
| 8.2 其他野外试验方法 .....           | 178 |
| 8.3 地下水动态监测网及其设计方法 .....     | 182 |
| 复习思考题 .....                  | 185 |
| 参考文献 .....                   | 185 |
| <b>第9章 地下水资源评价</b> .....     | 186 |
| 9.1 地下水资源的特点及分类 .....        | 186 |

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| 9.2 地下水资源评价的原则、方法和步骤 .....       | 193 |
| 9.3 地下水资源量计算的主要方法 .....          | 196 |
| 复习思考题 .....                      | 226 |
| 参考文献 .....                       | 226 |
| <b>第 10 章 地下水污染</b> .....        | 227 |
| 10.1 地下水污染的基本概念及特点 .....         | 227 |
| 10.2 地下水污染源及污染途径 .....           | 229 |
| 10.3 地下水污染修复 .....               | 235 |
| 复习思考题 .....                      | 242 |
| 参考文献 .....                       | 242 |
| <b>第 11 章 地下水水质评价</b> .....      | 243 |
| 11.1 饮用水水质评价 .....               | 243 |
| 11.2 工业用水水质评价 .....              | 249 |
| 11.3 农田灌溉用水水质评价 .....            | 254 |
| 11.4 矿泉水水质评价 .....               | 256 |
| 复习思考题 .....                      | 260 |
| 参考文献 .....                       | 260 |
| <b>第 12 章 地下水资源管理</b> .....      | 261 |
| 12.1 地下水资源管理的基本含义 .....          | 261 |
| 12.2 地下水资源管理的主要内容 .....          | 262 |
| 12.3 地下水资源保护 .....               | 274 |
| 复习思考题 .....                      | 275 |
| 参考文献 .....                       | 275 |
| <b>附录 与地下水学科相关的组织名称及网址</b> ..... | 276 |



## 绪 论



水是人类赖以生存的不可缺少的宝贵资源。作为水资源重要组成部分的地下水资源,由于其水质较好、分布较广泛、动态变化较稳定以及便于就地开发利用等优点,使其成为理想的供水水源。尤其是在地表水资源短缺的国家或地区,地下水的资源功能发挥得更加突出,地下水往往是主要的,甚至是唯一的生活和生产的供水水源。

地下水又是自然生态系统及环境的重要组成部分,如何合理地开发、利用、管理和保护地下水资源,发挥其生态服务功能,使地下水资源得到可持续利用,以支持经济社会的可持续发展,已成为摆在人们面前的一个时代问题。

### 0.1 地下水资源开发利用概况

#### 0.1.1 国外地下水资源开发利用概况

20 世纪 80 年代中期,全球地下水开采量约 5500 亿  $\text{m}^3/\text{a}$ , 其中,美国、中国、日本、澳大利亚分别为 1135 亿  $\text{m}^3/\text{a}$ 、760 亿  $\text{m}^3/\text{a}$ 、138 亿  $\text{m}^3/\text{a}$  和 27 亿  $\text{m}^3/\text{a}$ , 各国的开采量相差很大。20 世纪末期,全球地下水开采量已经超过 7500 亿  $\text{m}^3/\text{a}$ , 其中,美国、印度、中国的地下水开采量都在 1000 亿  $\text{m}^3/\text{a}$  以上,全球地下水开采量以印度和中国增长量最大。各国开采地下水的主要用途也不相同,如美国、中国、印度、墨西哥、巴基斯坦用于灌溉的地下水量,约占地下水总开采量的一半以上,而日本、欧盟各国地下水主要用于城乡居民生活供水。

地下水在各国的经济社会发展中起到了积极的作用,但地下水的过量开采已在全球范围内的许多地区产生了含水层疏干、地面变形(地面沉降、地面塌陷、地裂缝)、海(咸)水入侵、地下水污染等环境地质问题。同时在引水灌溉而排水不足的地区又造成土壤次生盐渍化等问题。现将国外主要国家地下水开发利用现状及存在问题概述如下。

##### 1. 美国

美国地下水开发利用历史较长,早在 19 世纪后期,加利福尼亚州(以下简称“加州”)中央谷地、芝加哥、南达科他州等地已开采地下水,主要用于农业灌溉和生

活用水。加州中央谷地为地下水开采强度最大的地区之一,达到  $47 \text{ 万 m}^3/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ,地下水水位累计下降了近  $80\text{m}$ ,累计地面沉降量最大可达  $8.8\text{m}$  ( $1940\sim 1970$  年)。20 世纪 60 年代末期,开始从加利福尼亚州北部引地表水,减少地下水开采量,以缓解地面沉降的发展。此外,地下水的开发还引起了海水入侵、地下水污染、地表径流减少等问题。美国地下水开发利用程度高,1985 年地下水开采量就已达  $1013 \text{ 亿 m}^3/\text{a}$ ,占全国淡水利用量的  $21.7\%$ 。以中西部高平原区地下水开采量为最大,年开采量超过年补给量,地下水水位持续下降,潜水含水层部分被疏干,含水层饱和厚度减少超过  $10\%$  的地区已达高平原含水层分布面积的  $1/4$ 。过量开采地下水,导致地下水水位持续下降,水井出水量衰减,水泵扬程加大,抽水成本也相应增加。

## 2. 印度

古代印度就有利用大口浅井汲取地下水的历史,20 世纪 30 年代,在恒河平原开始打深度  $100\text{m}$  以内的管井取水灌溉。地下水开采量中  $90\%$  以上用于农业灌溉,用于居民供水和工业供水的量不足地下水开采量的  $10\%$ 。印度多年平均可恢复地下水资源量为  $4500 \text{ 亿 m}^3$ ,目前抽水量达  $1350 \text{ 亿 m}^3/\text{a}$ ,已利用  $30\%$  左右。由于地下水开采的地区分布不均,有些地区地下水尚有进一步扩大开采的潜力,而另一些地区地下水已经出现了大面积超采。旁遮普邦、哈里亚纳邦和西拉贾斯坦邦的主要问题是地下水的盐度增加;古吉拉特邦北部和拉贾斯坦邦南部的地下水已被氯化物污染;南部基岩山区的单井出水量在减少,随着井深的加大,地下水的开发费用也在逐渐增加。根据国际水资源管理研究所的研究成果,由于地下水的开采、含水层的疏干,使印度农业收成的  $1/4$  受到严重威胁。

与地下水开发利用有关的环境问题除了过量开采造成的含水层疏干外,还有另一类问题,即人工引用地表水灌溉造成许多地区的地表积水,如印度全国的积水面积约  $600 \text{ 万 hm}^2$ 。在 12 个主要灌溉区,设计的灌溉面积为  $1100 \text{ 万 hm}^2$ ,其中有  $200 \text{ 万 hm}^2$  为积水面积,造成了  $100 \text{ 万 hm}^2$  的土壤次生盐渍化。

## 3. 也门

也门地下水开采所产生的问题已严重影响人们的日常生活。在也门的高平原区,地下水开采量已超过补给量的 4 倍。目前,也门可能是世界上在全国范围内地下水开采量超过补给量的唯一一个国家。

## 4. 孟加拉国

孟加拉国西部地下水已遭受砷污染,在沿海地区,为了灌溉而强烈开采地下水,使该地区含水层发生了海水入侵。这些问题不仅影响着该地区不断增长的人口对水资源的需求,而且制约着该地区经济的发展。

## 5. 约旦

近些年来,地下水的无序开发已严重影响着脆弱的生态环境,导致一些地区湿地的消失,如艾兹赖格绿洲就是地下水过量开采破坏生态环境的一个典型例子。该湿地面积为  $7500\text{hm}^2$ ,是大量珍稀的本地水生和陆地物种的良好栖息地,其绿洲被国际公认为候鸟的主要栖息地,由于农业灌溉及首都安曼的城市用水,上游大量的机井过量开采地下水,使湿地遭到破坏。在 20 世纪 80 年代的 10 年内,地下水过量开采已使地下水水位埋深从  $2.5\text{m}$  增加到  $7\text{m}$ ,许多补给绿洲的泉水已干枯,其流量从 1981 年