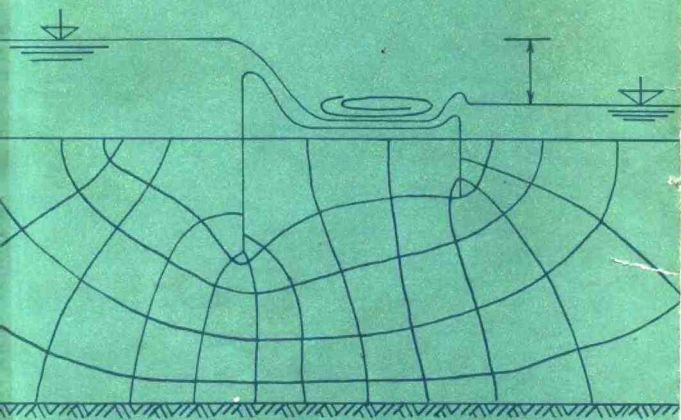


高等学校教材

# 水文地质学

任天培 (主编) 彭定邦 编  
周柔嘉 郑秀英 何成富



地质出版社

高等学校教材

# 水文地质学

任天培 (主编) 彭定邦 编  
郑秀英 何成富 周柔嘉

地质出版社

## 内 容 提 要

本书简明系统地讲述了水文地质学基本内容,包括水文地质学基础、地下水动力学及水文地质调查三个部分。书末并附有水文地质、工程地质学所需要的水力学基础知识。

读者对象:本书适合高等院校,包括职工大学的工程地质、水文地质和水利水电、铁道公路、工业及民用建筑等工程专业选作教材,也可供各类地质、工程技术工作者参考。

※ ※ ※

本书由李秉生主审,经地质矿产部水文地质教材编审委员会于1984年12月召开的审稿会审稿,同意作为高等学校教材出版。

※ ※ ※

高等学校教材

水文地质学

任天培(主编) 彭定邦 郑秀英 何成富 周柔嘉 编

责任编辑:李秉生 于纯仁

地质出版社出版

(北京 西四)

地质出版社印刷厂印刷

(北京海淀区学院路29号)

新华书店北京发行所发行,各地新华书店经售

开本:  $787 \times 1092^{1/2}$  印张: 19 字数: 442,500  
1986年6月北京第一版, 1986年6月北京第一次印刷  
印数: 1—7,560册 定价: 3.30元  
统一书号: 13038·教244

# 前 言

本书是为高等院校工程地质专业编写的教材，是根据1981年地质矿产部水文地质学教材编审委员会审订的教学大纲编写的。

本教材由水文地质学基础、地下水水力学和水文地质调查三部分内容所组成，侧重前二部分内容。鉴于工程地质专业不开设水力学课程，本教材附有水力学基础部分，讲授水文地质及工程地质所需要的水力学概念和知识。

受地质出版社教材室的委托，本教材由成都、武汉、长春和西安地质学院水文地质及工程地质系合编。编写分工如下：绪言及第二、三章由任天培（成都地院）执笔，第一、十章及水力学基础由彭定邦（武汉地院）执笔，第四、七、九章由郑秀英（长春地院）执笔，第十一章由何成富（西安地院）执笔，第五、八章由周柔嘉（成都地院）执笔，第六章由周柔嘉、郑秀英与何成富合写。本教材由任天培主持编写。在统稿前，有关水力学及地下水水力学部分，曾委托周柔嘉同志作过全面审订。

编写本教材主要参考了武汉、长春、西安、河北及成都等五所地质学院及南京大学的有关水文地质学教材，除此之外，还参考了上述院校及其它一些院校单位的有关教材、专著及文献等资料，详细目录见书后所列参考文献。在本教材的编写过程中，桂林冶金地质学院罗荫级同志参加了讨论编写细纲和教材初稿的编者会议，并提出过许多宝贵的意见。教材中插图系由成都地质学院季恒玉同志清绘。

本教材的送审稿，曾铅印提供武汉、长春、西安、桂林冶金、成都地质学院及保定冶金职工勘察学院试用。上述单位曾为本教材的修改提供过许多宝贵意见。

1984年12月，在地质矿产部水文地质学教材编审委员会主持下，在厦门召开了审稿会，由长春地质学院房佩贤（主审）、南京大学肖楠森、西南交通大学李秉生、河北地质学院王钟鼎、武汉地质学院许绍倬等同志，进行了细致的逐章审查，提出了许多宝贵的修改意见。武汉地质学院陈崇希同志还向评审会提交了书面审查意见。会后，编者根据审查意见进行了修改，修改稿由李秉生同志负责审查和编辑加工。

在此，编者谨向参加本教材审查的全体同志以及曾为本教材编写、修改提供过意见和资料的所有同志表示衷心的感谢。

由于我们水平有限，加之时间仓促，教材中缺点错误肯定难免，恳切希望批评指正。来函请寄成都地质学院水文地质及工程地质系。

编 者

1985年7月

# 目 录

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 绪论 .....                | 1  |
| 第一章 自然界的水循环与水均衡 .....   | 4  |
| 第一节 自然界的水循环 .....       | 4  |
| 一、自然界中水的分布 .....        | 4  |
| 二、自然界中水的循环 .....        | 4  |
| 第二节 自然界的水均衡 .....       | 6  |
| 一、全球水均衡方程式 .....        | 6  |
| 二、闭合流域水均衡方程式 .....      | 6  |
| 第三节 水均衡要素 .....         | 8  |
| 一、降水 .....              | 8  |
| 二、蒸发 .....              | 8  |
| 三、径流 .....              | 8  |
| 第二章 地下水的赋存 .....        | 10 |
| 第一节 岩石的空隙性 .....        | 10 |
| 一、空隙度的定义 .....          | 10 |
| 二、松散沉积物的空隙度 .....       | 10 |
| 三、沉积岩的空隙度 .....         | 12 |
| 四、深成岩和变质岩的空隙度 .....     | 13 |
| 五、火山岩的空隙度 .....         | 13 |
| 第二节 水在岩石中的存在形式 .....    | 13 |
| 一、气态水 .....             | 13 |
| 二、结合水 .....             | 14 |
| 三、重力水 .....             | 14 |
| 四、固态水 .....             | 14 |
| 五、矿物结合水 .....           | 14 |
| 第三节 岩石的水理性质 .....       | 15 |
| 一、容水性 .....             | 15 |
| 二、持水性 .....             | 15 |
| 三、给水性 .....             | 15 |
| 四、透水性 .....             | 16 |
| 第四节 地下水的垂直分布 .....      | 17 |
| 第五节 含水层与隔水层 .....       | 19 |
| 第六节 含水层的类型 .....        | 19 |
| 第三章 地下水的物理性质及化学成分 ..... | 21 |
| 第一节 地下水的物理性质 .....      | 21 |
| 第二节 地下水的化学成分 .....      | 23 |

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 一、地下水的化学成分 .....          | 23 |
| 二、地下水的矿化度、酸碱度及硬度 .....    | 24 |
| 第三节 地下水化学成分的形成 .....      | 26 |
| 一、地下水原始化学成分的特点 .....      | 26 |
| 二、地下水化学成分的形成作用 .....      | 26 |
| 三、影响地下水化学成分形成的因素 .....    | 28 |
| 第四节 地下水化学成分的分析与资料整理 ..... | 28 |
| 一、地下水化学成分的分析 .....        | 28 |
| 二、地下水化学分析资料的整理 .....      | 29 |
| 第五节 地下水按化学成分的分类 .....     | 31 |
| 第六节 地下水的水质评价 .....        | 32 |
| 一、饮用水的水质评价 .....          | 32 |
| 二、水的侵蚀性评价 .....           | 32 |
| 第四章 地下水运动基本规律 .....       | 35 |
| 第一节 基本概念 .....            | 35 |
| 一、渗透速度和实际速度 .....         | 36 |
| 二、渗透压强与测压管高度 .....        | 37 |
| 三、水头和水力坡度 .....           | 38 |
| 四、流线、等水头线和流网 .....        | 39 |
| 五、渗流的分类 .....             | 40 |
| 第二节 渗透的基本定律 .....         | 42 |
| 一、线性渗透定律—达西定律 .....       | 42 |
| 二、非线性渗透定律 .....           | 46 |
| 第三节 岩层按透水性的分类 .....       | 47 |
| 第五章 不同埋藏条件的地下水 .....      | 49 |
| 第一节 上层滞水 .....            | 49 |
| 第二节 潜水 .....              | 50 |
| 一、潜水的定义和特征 .....          | 50 |
| 二、潜水面及其表示方法 .....         | 51 |
| 三、潜水的补给、排泄和径流 .....       | 53 |
| 四、潜水的动态和均衡 .....          | 59 |
| 第三节 承压水 .....             | 62 |
| 一、承压水的定义和特征 .....         | 62 |
| 二、承压含水层的类型 .....          | 63 |
| 三、承压含水层的测压水位面及等水压线图 ..... | 64 |
| 四、承压水的补给、排泄和径流 .....      | 65 |
| 第六章 不同介质中的地下水 .....       | 68 |
| 第一节 孔隙水 .....             | 68 |
| 一、洪积物中的地下水 .....          | 68 |
| 二、冲积物中的地下水 .....          | 70 |
| 三、黄土中的地下水 .....           | 72 |

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 四、多年冻土区的地下水 .....             | 74  |
| 第二节 裂隙水 .....                 | 76  |
| 一、裂隙水的一般特征 .....              | 76  |
| 二、不同类型裂隙中的地下水 .....           | 77  |
| 第三节 岩溶水 .....                 | 80  |
| 一、岩溶水的分布 .....                | 81  |
| 二、岩溶水的运动特征 .....              | 85  |
| 三、岩溶水的补给和排泄 .....             | 87  |
| 四、岩溶水的动态 .....                | 88  |
| 第七章 地下水向河渠的稳定运动 .....         | 99  |
| 第一节 河渠间承压水的稳定运动 .....         | 99  |
| 一、承压水的线性运动 .....              | 99  |
| 二、承压水的平面运动 .....              | 92  |
| 第二节 河渠间潜水的稳定运动 .....          | 96  |
| 一、隔水底板平时潜水的平面运动 .....         | 97  |
| 二、隔水底板倾斜时潜水的平面运动 .....        | 99  |
| 三、河渠间潜水的空间运动 .....            | 101 |
| 四、承压一无压水的平面运动 .....           | 102 |
| 第三节 均匀渗入时河间地段中潜水的平面稳定运动 ..... | 103 |
| 第四节 非均质含水层中地下水的稳定运动 .....     | 107 |
| 一、地下水在透水性能突变含水层中的运动 .....     | 107 |
| 二、地下水在透水性能渐变含水层中的运动 .....     | 111 |
| 三、地下水在透水性能变化复杂含水层中的运动 .....   | 112 |
| 第八章 地下水向井的稳定运动 .....          | 114 |
| 第一节 地下水向完整单井的稳定运动 .....       | 114 |
| 一、地下水向潜水井的运动 .....            | 114 |
| 二、地下水向承压井的运动 .....            | 116 |
| 三、几个问题的讨论 .....               | 118 |
| 第二节 地下水向非完整井的稳定运动 .....       | 121 |
| 第三节 注水井计算 .....               | 122 |
| 第四节 干扰井计算 .....               | 123 |
| 一、势函数及势的迭加原理 .....            | 123 |
| 二、任意排列的完整干扰井群计算 .....         | 124 |
| 三、环形排列的完整井群计算 .....           | 127 |
| 第五节 边界附近井的计算 .....            | 128 |
| 一、直线补给边界附近井的计算 .....          | 128 |
| 二、直线隔水边界附近井的计算 .....          | 131 |
| 第六节 根据抽水试验资料确定井的涌水量经验公式 ..... | 133 |
| 第九章 地下水向井的非稳定运动 .....         | 138 |
| 第一节 地下水非稳定运动的基本微分方程 .....     | 138 |
| 一、承压水非稳定运动的基本微分方程 .....       | 138 |

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 二、潜水非稳定运动的基本微分方程 .....         | 141 |
| 第二节 无越流补给时承压水向完整井的非稳定运动 .....  | 143 |
| 一、承压水向单井的非稳定运动 .....           | 143 |
| 二、承压完整干扰井群的非稳定流计算 .....        | 155 |
| 三、边界井的非稳定流计算 .....             | 156 |
| 四、阶梯流量抽水井的非稳定计算 .....          | 158 |
| 第三节 有越流补给半承压完整井的非稳定运动 .....    | 160 |
| 一、假设条件 .....                   | 160 |
| 二、数学模型及解 .....                 | 181 |
| 三、公式的应用 .....                  | 183 |
| 第四节 无越流补给时潜水向完整井的非稳定运动 .....   | 170 |
| 一、近似解法 .....                   | 170 |
| 二、考虑潜水含水层迟后疏干的博尔顿法 .....       | 171 |
| 三、考虑潜水含水层的垂直分速度和弹性储量的纽曼法 ..... | 174 |
| 第十章 水工建筑物地区的渗透计算 .....         | 177 |
| 第一节 流网 .....                   | 177 |
| 一、流网的特性 .....                  | 177 |
| 二、流网的绘制 .....                  | 180 |
| 三、流网的用途 .....                  | 186 |
| 第二节 坝基渗透计算 .....               | 186 |
| 一、坝基为均质岩层的渗透计算 .....           | 186 |
| 二、坝基为非均质岩层的渗透流量计算 .....        | 190 |
| 第三节 绕坝渗透流量计算 .....             | 192 |
| 一、全带法 .....                    | 192 |
| 二、分带法 .....                    | 193 |
| 第四节 库岸渗透流量计算 .....             | 195 |
| 第五节 库区潜水回水计算 .....             | 197 |
| 一、极限回水值的预测 .....               | 197 |
| 二、非稳定回水计算 .....                | 201 |
| 第六节 基坑排水的渗流计算 .....            | 205 |
| 一、露天基坑排水 .....                 | 206 |
| 二、钻孔降低地下水位(水头) .....           | 209 |
| 三、排水沟(渠)降低地下水位 .....           | 212 |
| 第七节 渠道渗透计算 .....               | 213 |
| 一、渠道下为均质岩层 .....               | 213 |
| 二、渠道下为双层结构 .....               | 218 |
| 第十一章 水文地质调查 .....              | 215 |
| 第一节 水文地质测绘 .....               | 216 |
| 一、水文地质测绘的目的和任务 .....           | 216 |
| 二、水文地质测绘比例尺的选择 .....           | 216 |
| 三、水文地质测绘的准备工作 .....            | 216 |

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 四、水文地质测绘的工作方法 .....      | 218 |
| 五、水文地质测绘内容 .....         | 218 |
| 六、水文地质测绘的资料整理 .....      | 221 |
| 第二节 水文地质钻探 .....         | 222 |
| 一、水文地质钻探工作的特殊要求 .....    | 222 |
| 二、勘探线、孔的布置原则及孔深的确定 ..... | 223 |
| 三、钻孔设计书的编写 .....         | 224 |
| 四、钻探方法 .....             | 224 |
| 五、钻孔简易水文地质观测项目及要求 .....  | 225 |
| 六、钻孔编录及资料整理 .....        | 225 |
| 第三节 水文地质试验 .....         | 226 |
| 一、抽水试验 .....             | 227 |
| 二、注水试验 .....             | 234 |
| 三、渗水试验 .....             | 235 |
| 第四节 地下水动态观测 .....        | 236 |
| 一、观测网的布置原则 .....         | 236 |
| 二、观测资料的整理 .....          | 236 |
| 第五节 水文地质图编制要求 .....      | 237 |
| 一、综合水文地质图编图目的及任务 .....   | 237 |
| 二、编制综合水文地质图的基本原则 .....   | 238 |
| 三、综合水文地质图的内容 .....       | 238 |
| 第六节 报告书的编写 .....         | 242 |
| 第七节 地下水资源概念 .....        | 242 |
| 附录：水力学基础 .....           | 245 |
| 主要参考文献 .....             | 283 |
| 附表 .....                 | 284 |

- 1  $W(u)$  数值表
- 2 第一类越流系统定流量井函数  $W(u, \frac{r}{B})$
- 3  $e^x, E_1(x), e^x E_1(x), -E_1(-x)$  和  $-E_1(-x)e^x$  的数值表
- 4 博尔顿迟后重力给水潜水井流 A 类井函数  $W_A(u_d, \frac{r}{D}) - \frac{1}{u_d}$  表
- 5 博尔顿迟后重力给水潜水井流 B 类井函数  $W_B(u_d, \frac{r}{D}) - \frac{1}{u_d}$  表

## 附图

- 1 承压含水层中完整井定流量抽水时的  $W(u) - \frac{1}{u}$  标准曲线
- 2 承压含水层中完整井定流量抽水时的  $W(u) - u$  标准曲线
- 3 无压含水层中完整井定流量抽水时的  $W(u_d, \frac{r}{D}) - \frac{1}{u_d}$  (或  $\frac{1}{u_d}$  标准曲线)

## 绪 论

水文地质学是研究地下水的科学。

所谓地下水系指埋藏和运动于地表以下不同深度的土层和岩石空隙中的水。

地下水是地球上数量丰富、分布广泛的淡水资源，对人们生活和从事工农业生产有着重要意义。我国许多重要的城市如北京、天津、上海、西安、成都等的工业及生活供水都取用了地下水，其中北京总供水量的三分之二系取自地下水。在农业生产上，我国仅北方17个省市自治区，每年从地下抽取的水量即达四百亿立方米以上，约相当于黄河全年的总水量，灌溉着一亿七千余万亩耕地。我国南方也在广泛地开采利用地下水。例如四川省仅盆地中部丘陵地区，即已钻井五千余眼，供应着旱区三百余万农村人口的生活用水和上百万亩耕地的灌溉用水。

目前，我国年总用水量约四千亿立方米。其中地下水开采量五百五十亿立方米，约占全国总用水量的14%，占全国地下水总储量的6.9%。根据我国国民经济的发展速度和到二〇〇〇年实现工农业总产值翻两番的要求，预计本世纪末全国总用水量可能突破七千亿立方米。在未来的供水计划中，毫无疑问，地下水资源必将进一步发挥更大的作用。

地下水在埋藏较深时，往往含有较多的盐分和多种稀有元素或者具有较高的温度。前者是重要的矿产资源，可以从中提取有用的工业原料。如我国四川自贡地区，开采利用深部地下水一卤水，已有近两千年历史，过去从中提炼食盐，供应着我国西南数省的食用需要，现在还从中提取钾盐及溴、碘、硼、铷、钡等工业原料，在工农业生产的发展中起着重要作用。温度高的地下水可用来发电、取暖及用于发展养殖业等。温度高或含有某些特殊成分的地下水还可以用于医疗事业。

从上述不难看出，地下水是一种宝贵的自然资源，对人类生活和从事生产具有重要意义。但是，在另一方面，在某些情况下，地下水又是发展工农业生产和建设的障碍。

在气候干旱或半干旱地区，当地下水埋藏不深时，由于强烈蒸发作用的结果，含在地下水中的盐分便不断聚积于地表，造成土壤盐渍化，不利于农业生产的发展。

在采矿过程中，由于地下水大量涌入矿山坑道，往往使施工复杂化和采矿成本增高，严重时甚至威胁矿山工程和人身安全。我国的许多煤矿以及南方岩溶地区的金属矿山，坑道涌水问题均较突出。例如我国湖南某煤矿，平均每采出一吨煤，需要抽出地下水133立方米。国外某些矿山矿坑涌水问题同样也很突出。例如匈牙利尼拉德铝土矿，需要抽出210立方米的地下水才能采出一吨铝土。

在工程建设中，地下水常常会对建筑物的修建、正常运用和安全造成严重的危害。例如建筑在阿尔卑斯山脉下面的辛普隆隧道，在工程进行中，地下水以每分钟60立方米的速率涌入，使工程不得不停顿了六个星期。又如如在1959年发生崩溃的法国马尔帕塞特拱坝，则是因为库水从地下的节理裂隙中渗透入坝基下方的一层粘土之内，使粘土的性质变化，引起滑动而崩溃。美国加利福尼亚州的圣佛朗西斯坝，在水库修成蓄水以后，于1928年失事，高约70米的混凝土大坝被冲垮，事后研究认为，也是地下水的渗透引起的，渗透

水流对坝基红色砂砾岩中的粘土和石窝进行掏蚀冲刷,引起大坝滑移溃决。据美国发表的资料,在破坏的土石坝中,有40%是由于坝基土或坝体土渗透变形所造成的。由于地下水可溶性岩石的溶蚀作用,形成洞穴管道系统,引起岩溶渗漏,则是在碳酸盐岩地区修建水工建筑物常常会遇到的问题。例如西班牙的蒙特-哈克水库,由于通过石灰岩溶洞发生岩溶渗漏,致使水库修成后从未蓄满过水。美国的赫尔斯·巴尔重力坝,高25米,建成后漏水量达50米<sup>3</sup>/秒,并威胁到大坝的安全。我国碳酸盐岩分布面积达130万平方公里,约占全国总面积的七分之一,特别是西南地区,如川东、川南、滇东、贵州和广西的大部分,地表广泛分布着碳酸盐岩。开发这些地区的丰富水利资源,对岩溶渗漏问题必须进行认真的研究工作。岩溶地区修建其它工程也会遇到地下水问题。例如开挖隧洞、地下厂房等也会突然涌水,造成施工困难或使隧洞结构复杂化。在岩溶地区进行工程建设施工排除地下水时,还会产生地面塌陷、下沉、开裂等现象,对工程建筑物及工农业生产造成不良的影响。例如襄渝铁路隧道施工通过岩溶地区时,由于隧道施工排水,发生地面塌陷,造成房屋倒塌,农田破坏,交通受阻等情况,给工农业生产及人民生活造成不良影响。

本世纪以来,国内外一些大城市发生的地面沉降问题,也是由地下水所引起的。由于过量开采地下水,使地下水位大幅度下降,降低了土体中的空隙水压力,造成软土层压缩,因而引起地面沉降。由于过量开采地下水引起的地面沉降,以美国加利福尼亚州的圣华金流域、墨西哥的墨西哥城和日本的东京等地最为突出,最大沉降量东京为4.23米,墨西哥城为7.5米,圣华金流域达8.55米。我国上海市区的地面沉降是1930年前后发现的。1956年以后,随着地下水开采量的增加,地面下沉逐渐加剧,到1965年,最大沉降量已达2.37米。1966年以后,由于采取了人工回灌及其它措施,上海市区的地面沉降才基本上得到了控制。地面沉降已经成为现代许多大城市的重要公害问题,它对当地的工业生产、市政建设、交通运输以及人民生活都有很大的影响,有时还会造成巨大的损失。例如日本的东京、大阪和新潟,美国的长滩市,中国的上海市等,由于地面沉降的发展,已有部分地区的标高降低到低于或接近于海平面高程。这些地区经常遭受海水的侵袭,有些地区甚至长期积水,对当地人民的生产和生活有着严重的威胁。在一些地面沉降强烈的地区,例如美国长滩,伴随着地面垂直沉降还会发生较大的水平位移,往往会对地面和地下构筑物如地表的路面、铁路桥墩和大型建筑物的墙、支柱以及油井和其它管道等,造成严重的破坏。

综上所述可知,地下水一方面是宝贵的自然资源,我们要充分合理地利用它;另一方面它又是工农业生产和建设的不利因素,我们要有效地防治它。不论是利用地下水的有利方面,或是防治它的不利方面,都必须对它进行充分的研究。水文地质学就是研究地下水的科学。

水文地质学研究地下水的形成、运动、水质、数量及埋藏分布规律;同时还研究如何合理地开发利用地下水,以及如何有效地防止和消除地下水的危害。

水文地质学是一门比较新兴的科学,它在本世纪二十年代才逐渐发展成成熟为一门独立的科学。但是,由于水文地质学与工农业生产和人们的生活有着密切的关系,随着生产实践的发展和科学技术的不断进步,水文地质学已经获得了迅速的发展。目前水文地质学已形成了若干个独立的组成部分,即水文地质学基础、地下水动力学、水文地球化学、专门水文地质学和区域水文地质学。

水文地质学基础主要研究地下水的形成,基本特性和埋藏分布规律。

地下水动力学研究地下水在岩石空隙中运动的基本规律,从而对地下水的运动和数量进行近似的计算,为利用地下水资源和防治地下水的危害提供设计资料。

水文地球化学研究地下水的化学成分及其形成与分布的规律,并研究地下热水、矿水、环境水文地质、水化学找矿等应用水文地球化学问题。

专门水文地质学研究地下水的一般调查勘探方法及为各种专门的目的(如供水、农田灌溉、矿区、工程建筑等)的水文地质调查勘探方法。

区域水文地质学则研究地下水的区域性特点及其分布规律。

水文地质学同工程地质学有着密切的关系。工程地质学是研究与工程建筑有关的地质问题的科学。它必须研究与工程建筑物有关的地质条件,或称工程地质条件,其中主要是岩石和土的性质、地质构造、地貌、水文地质条件及物理地质作用等几个方面。由此可见,不掌握水文地质学的理论、知识和方法,就无法查清和阐明水文地质条件,也就不可能全面准确地对建筑物的工程地质条件进行评价。因此,水文地质学应该是工程地质学这门综合性学科的基础,是工程地质专业学生必须学习的专业基础课程。

# 第一章 自然界的水循环 与水均衡

## 第一节 自然界的水循环

### 一、自然界中水的分布

地球上的水以气态、液态和固态形式分布于大气圈、地球表面和地壳中，分别称为大气水、地表水和地下水。这些水组成地球的水圈。

水圈的总水量，有许多不同的估计，一般认为约  $14 \text{ km}^3$ 。其分布见表 1—1。从表中可见，绝大部分的水分布于海洋中，占 97.2%，只有 2.8% 的水分布于陆地上。在陆地水中，冰盖冰川和咸水又占到 75% 以上，剩下来可供人类直接利用的淡水的比例是不大的，其中主要是地下水，地表水所占比例甚小。大气水仅占总水量的 0.001%。但是，由于自然界水的不断循环，降落地表的降水远远超过保持于大气圈中的大气水量。

地球上水的分布①

表 1—1

| 水的分布 |                       | 水量 $\text{km}^3$ | 占总水量%  |
|------|-----------------------|------------------|--------|
| 大气水  |                       | 13000            | 0.001  |
| 地表水  | 海洋水                   | 1370000000       | 97.2   |
|      | 冰盖及冰川                 | 29200000         | 2.14   |
|      | 淡水湖                   | 125000           | 0.009  |
|      | 咸湖及内陆海                | 104000           | 0.008  |
|      | 河流水                   | 1250             | 0.0001 |
| 地下水  | 土壤水                   | 67030            | 0.005  |
|      | 地下水（至 4000m 深度，土壤水除外） | 8350030          | 0.61   |
| 总计   |                       | 1408000000       | 100    |

①据中山大学等：自然地理学（上册），1978。略有修改。

### 二、自然界中水的循环

在太阳热能和重力的作用下，自然界的水进行着往复不断的循环。

如图 1—1 所示，海洋中的水分蒸发成为水汽，进入大气圈；水汽随气流运移至陆地上空，在适宜的条件下，重新凝结下降。降落的水分，一部分沿地面汇集于低处，成为河流、湖泊等地表水；另一部分渗入土壤岩石，成为地下水。形成地表水的那部分水分，有的重新蒸发成为水汽，返回大气圈；有的渗入地下，形成地下水；其余部分则流入海洋。渗入地下的水，有的通过土面蒸发返回大气圈；有的被植物吸收，通过植物的叶面蒸发返回大气；其余部分则形成地下径流。地下径流或者直接流入海洋；或者经排泄成为地表水，然后返回海洋；或者在流动过程中多次地由地下转到地表，又由地表转入地下，最终

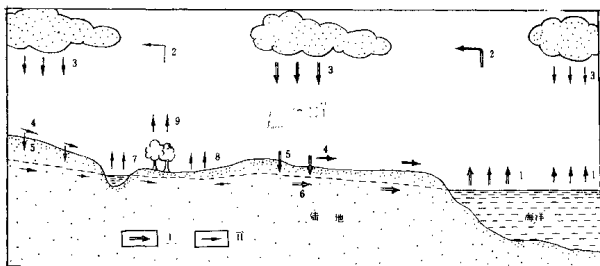


图 1—1 自然界水循环示意图

(据王大纯等)

I—大循环各环节；II—小循环各环节；1—海洋蒸发；2—大气水汽转移；3—降水；4—地表径流；5—入渗；6—地下径流；7—水面蒸发；8—土面蒸发；9—叶面蒸发（蒸腾）

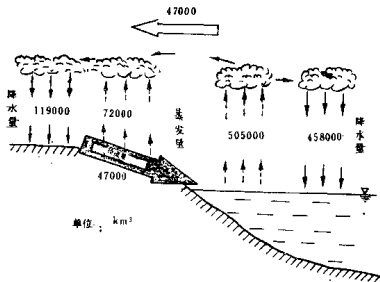


图 1—2 水循环与淡水资源

(据表1—2资料)

返回海洋。如此周而复始，循环不已。

自然界的水循环是由大循环与小循环组成的。水分从海洋经由陆地，最终返回海洋，这种发生于海洋与陆地之间的水循环，称为大循环。在陆地或海洋表面蒸发的水分，重又降落回到陆地或海洋表面。这种局部的水循环，称为小循环，或称为陆地水循环和海洋水循环。大循环是由许多小循环所组成的复杂的水循环过程。

由于水分循环，使水圈成为一个动态系统，并使水资源的性质与其它资源不同，它除了各类水体的静储量以外，还包括水循环过程中的动储量，即参加水分循环的水量。据计算，每年大约有505000km³的水从海洋蒸发到空中，有72000km³的水从陆地蒸发到空中，而每年降落到陆地上的水有119000km³，降落到海洋里的水只有458000km³。因此，海洋

蒸发量大于降水量, 其差值为  $505000 - 458000 = 47000 \text{ km}^3$ ; 陆地蒸发量小于降水量, 其差值为  $119000 - 72000 = 47000 \text{ km}^3$ 。这就是说, 通过水分循环, 每年有  $47000 \text{ km}^3$  淡水从海洋转移到了陆地上, 成为可供人类利用的淡水资源。

## 第二节 自然界的水均衡

自然界的水在不断地运动着、变化着和循环着。根据物质不灭定律可知: 对于任一地区、任一时段内, 收入的水量与支出的水量之间的差额必等于其蓄水量的变化, 即水循环过程中收支平衡。此即水均衡原理。水均衡原理是现代水文学的基本理论之一。根据这个原理, 可以列出水均衡方程式, 并在水文学和水文地质学中得到广泛的应用。

### 一、全球水均衡方程式

地球上多年长期内水量并无明显的增减现象。对于海洋来说, 多年平均蒸发量 ( $Z_0$ ) 应等于多年平均降水量 ( $X_0$ ) 和河流与地下水流入海洋的多年平均径流量 ( $Y$ ) 之和, 其水均衡方程式为:

$$Z_0 = X_0 + Y \quad (1-1)$$

在陆地上, 多年平均蒸发量 ( $Z_e$ ) 应等于陆地上的多年平均降水量 ( $X_e$ ) 与河流及地下水流出的多年平均径流量 ( $Y$ ) 之差, 其水均衡方程式为:

$$Z_e = X_e - Y \quad (1-2)$$

将以上两式相加, 即得全球水均衡方程式:

$$Z_0 + Z_e = X_0 + X_e \quad (1-3)$$

上式表明海洋和陆地上的蒸发量, 等于降落到海洋和陆地上的降水量。

大陆内流区的多年平均水均衡方程式为:

$$Z_i = X_i \quad (1-4)$$

此式表示内流区的多年平均降水量 ( $X_i$ ) 等于多年平均蒸发量 ( $Z_i$ )。但内流区并不是没有径流, 只是内流区的径流最终也消耗于蒸发而不注入海洋。

地球上水均衡的各要素值见表1—2。

地球上的水均衡①

表 1—2

| 区 域 | 水 均 衡 要 素                |              |                          |              |                          |              |
|-----|--------------------------|--------------|--------------------------|--------------|--------------------------|--------------|
|     | 蒸 发                      |              | 降 水                      |              | 径 流                      |              |
|     | 水 量<br>( $\text{km}^3$ ) | 水层深度<br>(mm) | 水 量<br>( $\text{km}^3$ ) | 水层深度<br>(mm) | 水 量<br>( $\text{km}^3$ ) | 水层深度<br>(mm) |
| 海 洋 | 505000                   | 1400         | 458000                   | 1270         | 47000                    | 130          |
| 陆 地 | 内流区                      | 9000         | 300                      | 9000         | 300                      |              |
|     | 外流区                      | 63000        | 529                      | 112000       | 924                      | 47000        |
|     | 全 球                      | 577000       | 1130                     | 577000       | 1130                     |              |

① 转引自河北师范大学等编 普通水文学, 1979。

### 二、闭合流域水均衡方程式

如果所研究的水均衡区为一闭合流域, 即流域的地下分水线与地面分水线相重合, 没

有相邻流域的地表水或地下水的流入或流出，而且河槽下切到足够深度或下切至不透水层表面，即地下水最终均能排入河道流出口断面，此时，

收入项（即进入闭合流域的水量）为：

$X$ ——流域平均降水量；

$U_1$ ——研究时段开始时流域的蓄水量。

支出项（即从闭合流域消耗的水量）为：

$Z$ ——流域平均蒸发量；

$Y$ ——出口断面径流量；

$U_2$ ——研究时段末流域的蓄水量。

则闭合流域水均衡方程式为：

$$X + U_1 = Z + Y + U_2$$

$$\text{或} \quad X = Y + Z + U_2 - U_1 \quad (1-5)$$

$$\text{令} \quad U_2 - U_1 = \pm \Delta U (\Delta U \text{ 为蓄水变量})$$

$$\text{则上式可写成:} \quad X = Y + Z \pm \Delta U \quad (1-6)$$

在多水期， $\Delta U$ 为正值，表示时段内的降水量除消耗于蒸发和径流外，还能使流域蓄水量增加；在少水期， $\Delta U$ 为负值，表示流域内不仅消耗掉了降水，而且还消耗了流域内的部分蓄水量，故使蓄水量减少。

在多年期间，闭合流域内的蓄水变量（ $\Delta U$ ）因有正有负，累加起来可以互相抵消，所以（1-6）式中最后一项可趋近于零。于是多年期间闭合流域的水均衡方程式为：

$$X_0 = Y_0 + Z_0 \quad (1-7)$$

式中， $X_0$ 为多年平均降水量， $Y_0$ 为多年平均径流量； $Z_0$ 为多年平均蒸发量。

若将（1-7）式两边均除以 $X_0$ ，则

$$\frac{Y_0}{X_0} + \frac{Z_0}{X_0} = 1 \quad (1-8)$$

式中， $\frac{Y_0}{X_0}$ 为多年平均径流系数， $\frac{Z_0}{X_0}$ 为多年平均蒸发系数，二者之和等于1。这两个系

数在不同自然地理区内是不同的，它们综合地反映了一个流域内气候的干湿程度。干燥地区蒸发系数大，径流系数小；湿润地区则径流系数大，蒸发系数小。例如我国北方河流多年平均径流系数小，而南方河流多年平均径流系数则较大（表1-3）。

我国主要河流的水均衡

表 1-3

（据河北师范大学等）

| 河 名              | 流域面积<br>( $\text{km}^2$ ) | 水 均 衡 要 素 |         |         | 多年平均径流系数 |
|------------------|---------------------------|-----------|---------|---------|----------|
|                  |                           | 降水 (mm)   | 蒸发 (mm) | 径流 (mm) |          |
| 松 花 江            | 549665                    | 525       | 380     | 145     | 0.28     |
| 黄 河              | 752443                    | 492       | 416     | 76      | 0.15     |
| 淮 河<br>(包括沂、沭、泗) | 261504                    | 929       | 738     | 191     | 0.21     |
| 长 江              | 1807199                   | 1055      | 513     | 542     | 0.51     |
| 珠 江              | 452616                    | 1438      | 666     | 772     | 0.54     |
| 雅鲁藏布江            | 246000                    | 699       | 225     | 474     | 0.68     |

### 第三节 水 均 衡 要 素

#### 一、降水

降水是从大气圈中降落到地面上的雨、雪、雹、霰等的总称。降水量是指降落到地面的雨水（或融化后的雪、雹、霰水），未经蒸发、渗透流失而积聚在水平面上的水层厚度，以mm为单位。降雨量用雨量计来测定，雨量计有观测式的和自记式的两种。

单位时间的降水量称为降水强度。根据降水强度的大小，分为小雨、中雨、大雨、暴雨等多种等级。强度大延续时间短的暴雨主要形成地表径流，常常是造成洪水的原因。强度不大但延续时间长的小雨，则对地下水的补给最有意义。

形成降水的水汽主要来自海洋，陆地上水分的蒸发也是大气圈水汽的来源。植树造林，修建水库、扩大灌溉面积等人类生产活动措施，可以增加地面水分的蒸发，扩大大气圈水汽的来源，在一定程度上可以影响到降水总量。

#### 二、蒸发

水由液态转化为气态的过程称为蒸发。蒸发分为水面蒸发和陆面蒸发两大类。水面蒸发系指江河、湖海、水库等水体表面的蒸发，而陆面蒸发则包括土面蒸发、植物截留蒸发和叶面蒸发（蒸腾）。地下水在距地表不深和毛细管上升高度能达到地表的地方也能参与蒸发。蒸发所消耗的水量称为蒸发量。通常用蒸发掉的水层厚度（mm）来计量。

影响蒸发的因素主要为蒸发面的温度、湿度、气压、风力及蒸发面的性质。温度愈高、相对湿度愈小、气压愈低、风力愈大，蒸发愈迅速。在温度、湿度、气压等因素相同的情况下，冰面的蒸发比水面要慢，海水比淡水要慢，清水比浊水要慢。

蒸发量可通过蒸发器直接测定，也可以用经验公式计算或用理论推求法求得。上述方法在气象学和水文学中有详细介绍。

#### 三、径流

径流系指降水降落地表之后在重力作用下沿地表和地下流动的水流。因此径流可分为地表径流和地下径流。径流是水循环的重要环节和水均衡的基本要素。

地表径流可用以下几种特征值来表示：流量、径流总量、径流深度、径流模数及径流系数。

##### （一）流量 $Q$

在单位时间内通过河流某一过水断面所流出的水量，称为流量，其常用单位是  $\text{m}^3/\text{s}$ 。从水力学得知，流量  $Q$  等于过水断面  $F$  与断面平均流速  $V$  的乘积，即  $Q = V \cdot F$ 。

##### （二）径流总量 $W$

在一定时段  $T$  内通过河流某一过水断面的总水量，称为径流总量，单位通常用  $\text{m}^3$  计。其计算公式为：

$$W = Q \cdot T \quad (1-9)$$

##### （三）径流深度 $Y$

某一时段内径流总量均匀分布于过水断面以上的整个流域面积上所得到的水层厚度，即为径流深度，单位以mm计。如已知过水断面以上的流域面积为  $F (\text{km}^2)$ ，径流总量为  $W (\text{m}^3)$ ，则径流深度为：