



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

地下水 系统分析与工程

万新南·等 编著 Groundwater
System and Engineering



四川大学出版社



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

地下水 系统分析与工程

Groundwater
System and Engineering

万新南 余永红 夏克勤 编著
李 晓 杨 菊 杨艳娜



四川大学出版社

责任编辑:周树琴
责任校对:段悟吾
封面设计:墨创文化
责任印制:李 平

图书在版编目(CIP)数据

地下水系统分析与工程 / 万新南主编. —成都:
四川大学出版社, 2010. 12
ISBN 978-7-5614-5109-0

I. ①地… II. ①万… III. ①地下水—系统分析—高等
学校—教材 IV. ①P641.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 252436 号

内容简介

本书为“普通高等教育‘十一五’国家级规划教材”,全书共八章,主要介绍水循环及结构模型,水文要素的系统调查与研究方法,地下水系统的调查及勘察技术,地下水动态与均衡研究,地下水资源的系统评价,地下水系统开发与疏排工程,地下水开发及疏排引起的环境效应与评价,地下水环境修复与治理工程等。本书以系统理论思想为主导,从实际出发,讨论了重大的地下水系统研究方法、地下水开发、矿山隧道疏排水及地下水环境修复等工程问题。特别是本书融入了作者近年西部构造与地形复杂区地下水研究的一系列科学研究成果及国内外最新地下水研究的新进展与新方法,涉及内容较广,富有时代感。本书打破了原水文地质教材的编写架构,同时保留并加强了部分原《水文地质学》教材的重要经典内容。

本书可作为与地下水工程相关专业的高等院校本科生教材,其中部分内容理论性较深,可作为水文地质专业硕士、博士及相关学科专业人员提高自身专业技能或研究的参考书。

书名 地下水系统分析与工程

主 编 万新南
出 版 四川大学出版社
地 址 成都市一环路南一段 24 号 (610065)
发 行 四川大学出版社
书 号 ISBN 978-7-5614-5109-0
印 刷 郫县犀浦印刷厂
成品尺寸 185 mm×260 mm
印 张 21.5
字 数 491 千字
版 次 2010 年 12 月第 1 版
印 次 2010 年 12 月第 1 次印刷
印 数 0 001~3 000 册
定 价 38.00 元

◆读者邮购本书,请与本社发行科
联系。电话:85408408/85401670/
85408023 邮政编码:610065

◆本社图书如有印装质量问题,请
寄回出版社调换。

◆网址:www.scupress.com.cn

版权所有◆侵权必究

前 言

本书为“普通高等教育‘十一五’国家级规划教材”，是在房佩贤、王家昌等编写《专门水文地质学》，地质出版社，1987、1996、2005年；宋焕荣、万新南、夏克勤编写《水资源勘察及开发利用》，成都理工学院内部教材，1996年；徐恒力、万新南等编写《水资源开发与保护》，地质出版社，2001年等教材基础上，根据近年水文地质学的发展、中国西部特殊地貌、地质构造等水文地质特点及作者数十年的科学研究成果，重新编著的一本以地下水系统为主线，应用性较强，含盖面较广，内容适中且与其他类似教材有别，具有自身特色的专业水文地质教材。

全书共八章，重点从概念与数学的系统性上完善了水文循环结构模型，提出了以植被为中心的生态水层参与水文循环的重要作用，特别是降水在生态水层的控制下对地表水与地下水的分配，从实用意义上与科学理论上完善了“三水转换”的过程，即通过生态水层的调节、缓存、分配功能，实现降水转换成地表水与地下水，从而得到了具有实用意义的“四水转换”（降水、生态水、地表水及地下水相互转换）的概念。因此在与地下水问题有关的水文要素的系统调查方面不止限于植被的调查，而是大篇幅地增加了以植被为中心的对生态水层的调查与研究，并结合地表水文学方法引进与充实了降雨调查、地表水调查等内容。

在第3章“地下水系统的调查及勘察技术”中，针对中国西部水文地质构造复杂、地形起伏多变、岩溶发育等特点增加了相关研究方法与实例，并且将中国西部水文地质特点贯穿于全书各章内容。对较为传统的第4、第5章“地下水动态与均衡研究”，“地下水资源的系统评价”中也增加了适于西部复杂水文地质单元的水均衡与水资源评价方法及相关实例。第6章“地下水开发与疏排工程”除汇集了以上教材的精华部分外，还根据地下水资源开发取水、矿山疏排水及地下隧道开发工程疏水的研究特点与共性，把矿床水文地质研究与隧道疏排水研究统一纳入“疏排水工程”进行系统讨论，避免了认为“矿床水文地质学”具有“独立性”的误解，使地下水研究更具系统性，便于读者易于应用基本水文地质知识解决“以取水为同一目的”的地下水“开发”与“疏排”两个逆问题（一个作为开发资源从地下取水、一个作为排除水害从地下疏水，实际上两者都是消耗地下水，只是“取水”的强度要求不同）。在第7章“地下水开发、疏排的环境效应与评价”中系统引进了环境评价的一系列新观点新方法，系统地介绍了地下水环境评价方法，并针对目前应用较广的“模糊数学评价方法”的本身进行了评价与改进，拓宽了地下水环境评价的思路。第8章“地下水环境修复与治理工程”由美籍华裔余永红博士（美国伊利诺州水动力研究服务有限公司工程总经理兼公司副主席，Hydrodynamics Consultants, Ins, Illinois, USA）用英文撰写，由陈利娟、朱静、张

会明、刘峰等研究生初步译成中文后，由万新南校正并部分重编，并得到余永红博士认同。该章融汇了美国及他本人多年在地下水环境修复工程技术领域的最新进展与实用方法，首次无保留地介绍到中国，为中国松散沉积区地下水环境保护、治理奠定了理论与技术基础。其余各章节由万新南、夏克勤、李晓、杨菊、杨艳娜等各有侧重共同编写，全书由万新南统稿，并经课堂实际应用一年，再次修改定稿，全书凝聚了参编者多年的心血与智慧。虽想力求做到尽善尽美，但仍难免错漏之处，敬请读者、专家批评斧正。

为保证本书内容、概念及文字表述的准确与精炼，该书前后历时近五年，参考了国内外大量的有关教科书、专著、论文及未正式出版的科学研究报告。本书内容丰富、知识面较广，其中介绍的大部分数学研究方法虽已为多届环境水文地质学本科毕业生毕业论文应用，并经过通俗易懂的编改，但与同类教材相比，可能具有一定的深度，并超出本科教学范围。对于与地下水专业相关的高等院校的本科生教学，教师可对全书内容进行筛选，对教材中部分较深、较难的专业内容可指导优秀本科生选修或作为学生毕业后参考。教材目标是使学生在本科阶段对地下水研究有一个较系统的了解。本教材的编著宗旨是：不仅是一本较好的本科教学教材，也是一本中国西部地区从事水文地质工程地质科技研究人员的适用性参考书。

学海艰辛云与路，科界成器图与文。成功中自有四川大学出版社，特别是周树琴女士从立项到出版各环节给予本教材的多方帮助与支持，还有石岩、苏君博、刘珊、黄颀、陈利娟、朱静、张会明、苏潇、任欣、刘峰、邓琼、熊斌等水文地质、环境水文学专业研究生的参与及辛勤劳动，如资料的翻译、扫描、识别、制图等工作，作者一并向他们表示衷心感谢！

万新南

2010年12月

目 录

| | |
|--------------------------|--------|
| 第 1 章 水圈与水循环系统 | (1) |
| 1.1 水 圈 | (1) |
| 1.2 水文循环系统 | (1) |
| 1.2.1 水文循环的复杂性 | (1) |
| 1.2.2 水文循环的类型 | (2) |
| 1.3 水文循环结构模型 | (6) |
| 1.3.1 结构模型四要素的基本概念与特征 | (6) |
| 1.3.2 水文循环的结构模型 | (8) |
| 第 2 章 水文要素调查与系统研究方法 | (24) |
| 2.1 降水系统调查 | (24) |
| 2.1.1 降水要素的调查 | (24) |
| 2.1.2 降水特征 | (25) |
| 2.1.3 影响降水的因素 | (27) |
| 2.1.4 面降水量计算 | (28) |
| 2.2 生态水系统调查 | (30) |
| 2.2.1 “生态水”与“生态需水”的概念与讨论 | (30) |
| 2.2.2 生态水层构成要素调查 | (33) |
| 2.2.3 生态水系统分析 | (35) |
| 2.2.4 生态水层调查方法 | (50) |
| 2.3 地表水系统调查 | (50) |
| 2.3.1 地表水系统的重要术语与概念 | (50) |
| 2.3.2 河川径流的形成过程 | (52) |
| 2.3.3 影响地表径流形成过程的因素 | (56) |
| 2.3.4 地表水调查的内容 | (58) |
| 2.3.5 地表水调查方法与手段 | (60) |
| 2.3.6 地表水调查资料的整理与分析 | (62) |
| 第 3 章 地下水系统调查与勘察技术 | (64) |
| 3.1 水文地质调查概述 | (64) |
| 3.1.1 水文地质调查的目的 | (64) |

| | | |
|--------------|-------------------------|---------|
| 3.1.2 | 水文地质调查方法 | (64) |
| 3.1.3 | 水文地质调查的阶段和任务 | (65) |
| 3.1.4 | 水文地质调查工作的原则、步骤 | (66) |
| 3.2 | 水文地质测绘 | (67) |
| 3.2.1 | 水文地质测绘的基本任务 | (67) |
| 3.2.2 | 水文地质测绘的基本要求与步骤 | (67) |
| 3.2.3 | 水文地质测绘的内容 | (70) |
| 3.2.4 | 不同地质地貌单元的水文地质测绘 | (72) |
| 3.2.5 | 水文地质条件的综合分析 | (79) |
| 3.3 | 水文地质物探 | (81) |
| 3.3.1 | 地面物探 | (83) |
| 3.3.2 | 地球物理测井 | (85) |
| 3.3.3 | 水文物探工作内容 | (87) |
| 3.4 | 水文地质钻探 | (89) |
| 3.4.1 | 水文地质钻探工作的任务 | (89) |
| 3.4.2 | 水文钻孔布孔原则及布孔方案 | (89) |
| 3.4.3 | 水文钻孔技术要求 | (91) |
| 3.4.4 | 钻探过程中的水文地质观测与编录 | (93) |
| 3.5 | 水文地质试验 | (94) |
| 3.5.1 | 抽水试验 | (95) |
| 3.5.2 | 渗水试验 | (104) |
| 3.5.3 | 钻孔注水试验 | (106) |
| 3.5.4 | 溶质弥散试验 | (107) |
| 3.5.5 | 示踪试验 | (108) |
| 3.6 | 水文地质调查的成果汇总与报告编写 | (109) |
| 3.6.1 | 水文地质信息系统 | (109) |
| 3.6.2 | 文字报告系统 | (113) |
| 第 4 章 | 地下水动态与均衡研究 | (116) |
| 4.1 | 地下水动态与均衡的概念及研究意义 | (116) |
| 4.1.1 | 地下水动态与均衡的基本概念 | (116) |
| 4.1.2 | 地下水动态均衡研究的目的是与意义 | (116) |
| 4.2 | 地下水动态研究 | (117) |
| 4.2.1 | 地下水动态特征研究 | (117) |
| 4.2.2 | 地下水动态的预测预报 | (123) |
| 4.3 | 地下水均衡研究 | (127) |
| 4.3.1 | 均衡期与均衡区的划定 | (127) |
| 4.3.2 | 均衡式的建立 | (127) |

| | |
|-----------------------------------|-------|
| 4.3.3 均衡要素的测定 | (129) |
| 第5章 地下水资源系统评价 | (136) |
| 5.1 地下水资源的概念与“量分解” | (136) |
| 5.1.1 地下水资源的概念 | (136) |
| 5.1.2 地下水资源的基本特征 | (136) |
| 5.1.3 地下水资源量的分解及其讨论 | (137) |
| 5.2 地下水资源量的系统评价 | (143) |
| 5.2.1 地下水资源量评价的目的及原则 | (143) |
| 5.2.2 经验计算法 | (147) |
| 5.2.3 数理统计法 | (158) |
| 5.2.4 地下水渗流理论数学建模法 | (174) |
| 5.3 地下水资源“质”的系统评价 | (184) |
| 5.3.1 评价原则及标准 | (184) |
| 5.3.2 评价方法的选择与评价实例 | (187) |
| 第6章 地下水系统开发与疏排工程 | (201) |
| 6.1 地下水开发工程 | (201) |
| 6.1.1 地下水源地的选择 | (201) |
| 6.1.2 地下取水建筑物的类型与设计 | (202) |
| 6.1.3 地下储水工程 | (213) |
| 6.2 矿坑地下水疏排工程 | (218) |
| 6.2.1 采矿工程与矿床水文地质概要 | (218) |
| 6.2.2 矿坑充水条件分析 | (223) |
| 6.2.3 矿坑(井)涌水量预测内容及要求 | (230) |
| 6.2.4 矿坑(井)涌水量系统预测方法 | (233) |
| 6.2.5 矿坑排水工程及优化 | (245) |
| 6.3 地质灾害防治与地下水疏排工程 | (248) |
| 6.3.1 地下水活动对地质灾害的影响及对策 | (248) |
| 6.3.2 地质灾害体的地下水疏排工程 | (249) |
| 第7章 地下水开发、疏排的环境效应与评价 | (256) |
| 7.1 环境地质效应 | (256) |
| 7.1.1 地面沉降与塌陷的环境地质特征 | (256) |
| 7.1.2 环境地质效应的机理分析 | (259) |
| 7.2 地下水开采、疏排引起的水质恶化 | (269) |
| 7.2.1 地下水强采导致的污染扩散 | (269) |
| 7.2.2 滨海区地下淡水的咸化 | (269) |

| | |
|-------------------------------|--------------|
| 7.2.3 地下水开发引起的生态环境效应 | (273) |
| 7.3 地下水环境影响评价 | (275) |
| 7.3.1 环境影响评价体系 | (275) |
| 7.3.2 环境影响预评价方法 | (279) |
| 第8章 地下水环境修复与治理工程 | (291) |
| 8.1 地下水污染特征与污染范围调查 | (291) |
| 8.1.1 污染现场调查 | (291) |
| 8.1.2 土钻应用与观测井安装 | (295) |
| 8.2 污染信息的采集与系统分析 | (297) |
| 8.2.1 土壤污染信息的采集 | (297) |
| 8.2.2 污染信息获取 | (299) |
| 8.2.3 地下水特征信息 | (301) |
| 8.3 环境影响风险评价 | (305) |
| 8.3.1 风险评估概念 | (305) |
| 8.3.2 污染受体与污染接触路径 | (306) |
| 8.3.3 风险(危害)等级划分与评估 | (307) |
| 8.3.4 风险级别量化计算 | (309) |
| 8.3.5 风险评价案例 | (314) |
| 8.4 地下水环境的修复技术 | (319) |
| 8.4.1 修复目标 | (319) |
| 8.4.2 修复方案制定及可行性研究 | (320) |
| 8.4.3 土壤和地下水的修复技术 | (321) |
| 主要参考文献 | (331) |

第1章 水圈与水循环系统

1.1 水 圈

在环境研究领域往往把地球分为四大圈层：大气圈、水圈、生物圈与岩石圈，而水圈是勾通各圈层最重要的纽带。

据地球起源的研究，早在50亿年前，地球温度极高，尚处于熔融状态，在地球温度逐渐冷却的过程中，物质发生分异，一些相对难熔馏的重组份聚集、下沉，构成地幔物质，易熔馏的轻组份被挤到外层，在接近地球浅部时，不断富集并分异出水汽和易挥发物质。随着地壳温度的持续下降，水分开始成低温气态水飘逸在地球外圈、或成液态水聚集在地球表面和浅部岩石的空隙中，形成水圈。水圈形成之后，生物圈也就在地球表层开始了它的成长演化过程。从此，由于生物圈与水圈间的相互影响，地球上的水分分布与存在方式发生了根本性的改变，出现了复杂的水分循环模式，即地球表部层圈（包括岩石圈上部、水圈、生物圈和大气圈）的水分循环以及表部层圈和深部层圈之间的水分循环。

目前所指地球水圈主要指地球表面的降水（包括固态冰雪、降雨、蒸发、凝结等）以及湿地（包括江、河、湖、沼泽以及陆地人造水域）、海洋，而属于以上各水转化、缓存的“过渡水”形式则是与生物圈特别是植被有关的“生态水”与“地下水”系统，它们是一个可以相互转换且随时间而变化的整体系统或称作一个统一的水圈。

1.2 水文循环系统

1.2.1 水文循环的复杂性

在水文循环中，大气环流使一些地区成为水汽源区——如海洋，其蒸发量大于降水量，而另一些地区成为水汽聚集区——如陆地，其蒸发量小于降水量。显然海洋蒸发是大气中水汽的主要来源。海洋提供的水汽有8%~15%被大气环流输送到大陆上空，形成大陆总降水量的89%，大陆降水量的另外11%是由大陆本身蒸发形成。海洋向陆地输送水汽不是单方向的，在海洋蒸发的水汽输送到陆地上空的同时，陆地上空的水汽也借助气流飘向海洋，只不过海洋向陆地的有效水汽（可形成降水的水汽）输送量较大而已。海洋蒸发的水汽进入大陆上空后，先在海洋边缘地区致雨，其余的水汽随气流向内陆推进，并在中途不断形成降水过程，于是愈向内陆大气中的海洋水汽愈少，以至不能单独形成雨雪。内陆腹地的降水主要靠局域或地区性的水循环维持，所以，有的地区降水稀少、径流量小而成为干旱缺水地区（图1-1）。

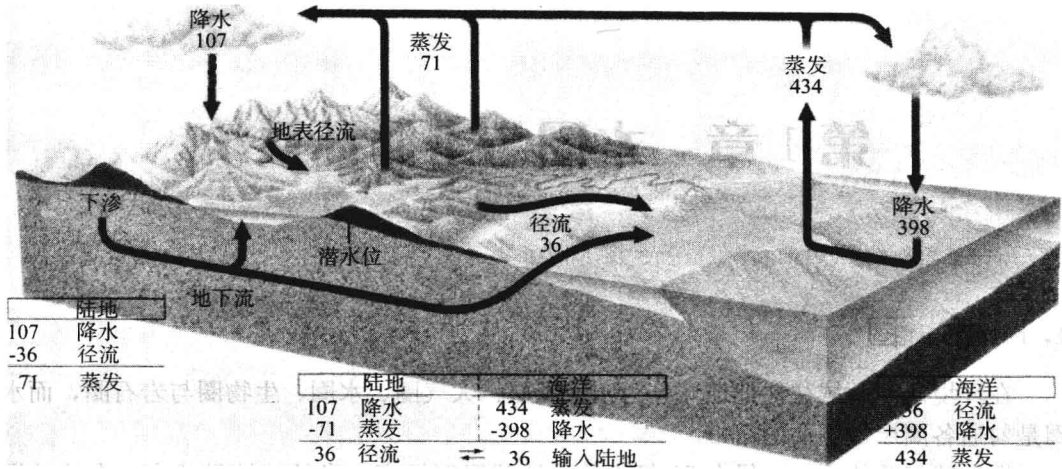


图 1-1 复杂的水文循环系统 (引自 Understanding Earth 3th Edi. Frank Press. Raymond Siever, 2002)

图中数字为水量绝对值, 单位为 $1000 \text{ km}^3/\text{a}$, 计算表为水量平衡式。

1.2.2 水文循环的类型

水文循环是地球表面层圈水运动的基本形式。水通过蒸发、水汽输送、降水、蓄渗、根吸、汇流等水文过程紧密联系、相互转化, 形成一个庞大的动态系统。水文循环可根据循环途径和规模分为大循环、小循环。

1.2.2.1 水文大循环

海洋表面从太阳获得能量, 水分蒸发逸入大气, 并通过大气环流漂移到陆地上空, 在一定条件下凝结, 以降水的形式降落到地面。降落到地面的水, 一部分形成地表径流汇入江河湖泊最终回归大海, 另一部分渗入地下。渗入地下的水, 部分滞留在植被层与包气带中 (形成生态水层), 其余的进入饱水带成为地下水, 并以地下潜流或泉的形式排入江河, 最终也回到海洋 (图 1-2)。这种发生在海洋和陆地之间的水分循环称为水文大循环或海陆水文循环。

1.2.2.2 水文小循环

水文小循环简称小循环, 是指陆地上的水或海洋水单独与大气水进行的水分循环过程。

陆地上的水, 包括地表水、地下水、生态水, 通过植被蒸腾或地表的蒸发作用, 陆地所存水分以气态水的形式进入大气。然后, 又通过降水回到陆地。这种小循环又被称为陆地水文循环。

如果海洋水通过蒸发变为大气水, 然后以降水形式重归海洋, 这种小循环又称海洋水文循环。

1.2.2.3 人类活动对水文循环的影响

在社会生产力高速发展, 科学技术迅猛进步的今天, 人类活动已成为影响水文循环的重要因素。抽取地下水、拦截河水、修建水库、引水灌溉、南水北调工程在局部甚至区域

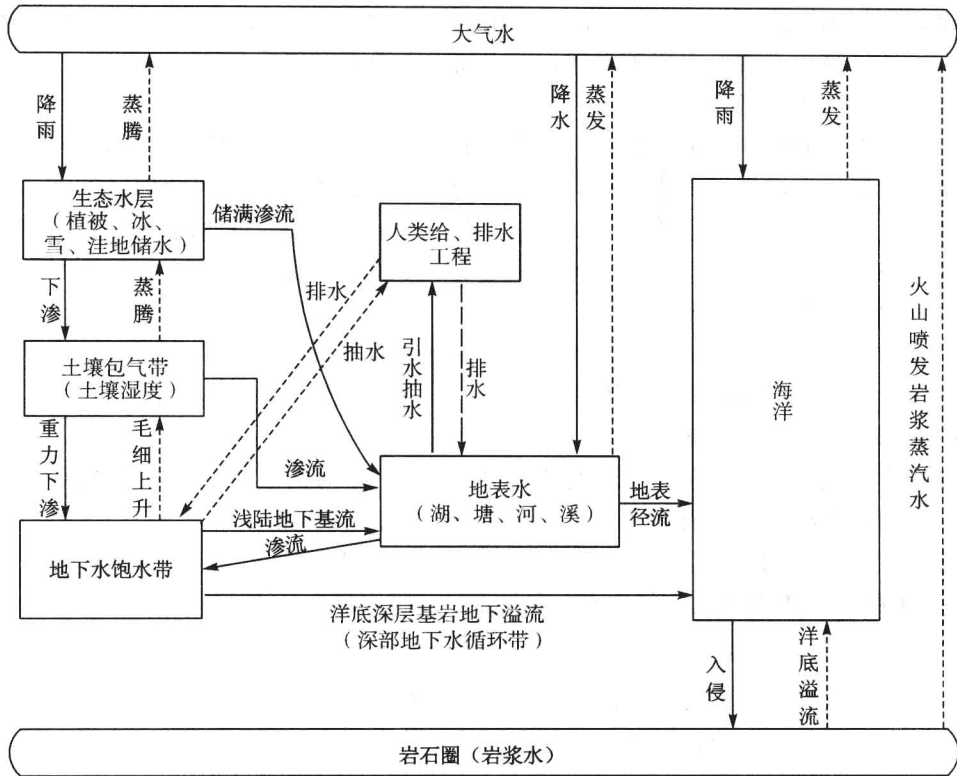


图 1-2 全球水文循环概化图 (据 Applied Hydrogeology 修改)

范围上改变天然水分的运移途径和各水文要素之间的水量交换关系。森林采伐、荒地垦殖、围湖造田等活动在一定程度上影响天然水分蒸腾蒸发强度以及土壤水分的分布；房屋、道路、机场等人工覆盖物也可以阻碍降水的下渗和水分的蒸发；工业废气的排放产生的温室效应和酸雨，影响湖海水分的蒸发、冰盖的消融直接或间接影响大水文循环与小水文循环的过程与速度，包括化学物质在各水体间的迁移。总之，由于人为活动的干扰，天然水循环状况会受到冲击而发生变化，其影响深度与广度不断扩大。在时间与空间上影响着水文循环的过程与方式。但并没有形成独立的“由自然水文要素与人为因素（人为的水分收支环节）组合成的水文循环过程——衍生水循环”、或称人工水文循环。其实水循环是一个自然过程，如一部“天然永动机”周而复始，它不会因人类活动作用而改变或停止；人类的排水、截流，包括污染，只是对水循环，特别是对局部流域或某个流域的小区块的子循环的一个参与干扰，而不会出现一个相对独立的循环过程。

1.2.2.4 水文循环的子系统划分

无论全球水循环，还是某流域水循环，由于地球的自转、地球气候分带特征，使其存在一系列的次一级循环系统。如以中国为中心可划为以下四个相对独立的子系统。当然，这些系统在一定条件下也会发生变化。

(1) 太平洋水文循环系统

该系统的水汽源于太平洋，在季风的作用下，大量的水汽由我国东南沿海向西北方

向移动，沿途形成降水，转化的径流最终由河流自西向东注入太平洋。在它的影响下，我国东南地区降水充沛，水资源丰富，而内陆水资源相对贫乏。

(2) 印度洋水文循环系统

来自西南方向的水汽也是我国水资源的重要来源之一。夏季盛行的西南季风，将印度洋深厚潮湿的水汽带入我国，影响着西南乃至中南、华南甚至河套地区的降水状况，使西南地区成为水资源丰富的地区。由它带来的水量一部分通过西南地区的河流如雅鲁藏布江、怒江等汇入印度洋，另一部分参与太平洋的水文循环。

(3) 北冰洋水文循环系统

北冰洋气流一般在冬季经西伯利亚、蒙古进入我国北方地区，有时可达西湖盆地。因水汽含量较少，形成的降水量不大。

(4) 鄂霍次克海水文循环系统

在春季到夏季之间，东北气流把鄂霍次克海和日本海的湿冷空气带入我国东北，使我国东北的东部和北部成为降水较多、水资源相对丰富的地区。

此外，我国西北地区尤其是西藏、青海等地。虽受太平洋水汽西移的影响，但主要在大陆水文循环的控制之下，空气中水分含量不足、降水量少，该地区水资源最为贫乏。

1.2.2.5 水文循环周期与水体更新周期

水文循环它具有一定的周期性，一般指某一水文单元水量、水位包括水质随时间变化的年周期、多年周期或长周期，这是水文单元动态变化的周期性。

通过水文循环，地球上各种水体的数量与质量将保持在时空上的相对平衡，使水也具有其特定的“年龄”，使水体的量与质在自身所储存的空间上按一定的时间进行交替更新。研究表明，各类水体的更新周期长短不一，理论上大气水的计算周期一般为 8 天，河水约为 16 天，深层地下水平均为 1400 年，而陆地冰川和永冻层的水则更长（见表 1-1）。水的更新周期与水文周期是两个不同的概念，前者是针对某一储水空间中的新水驱替老水、水量的交替过程，即某一水体中，某一年龄的水被年轻的水排挤，最终丧失全部赋存空间的过程。其水动力性质是水质点的运移，水质点运移路径愈长，运移速度愈小，老水贮留时间愈长。反之，新水取代老水的时间过程就短，更新周期也较短。

表 1-1 各类水体的更新周期

| 水体 | 更新周期 | 水体 | 更新周期 |
|---------|---------|-----|------|
| 海洋 | 2500 年 | 湖泊 | 17 年 |
| 深层地下水 | 1400 年 | 沼泽 | 5 年 |
| 极地冰川和雪盖 | 9700 年 | 生态水 | 1 年 |
| 高山冰川 | 1600 年 | 河流 | 16 天 |
| 永冻层中水 | 10000 年 | 大气水 | 8 天 |
| 生物水 | 几小时 | | |

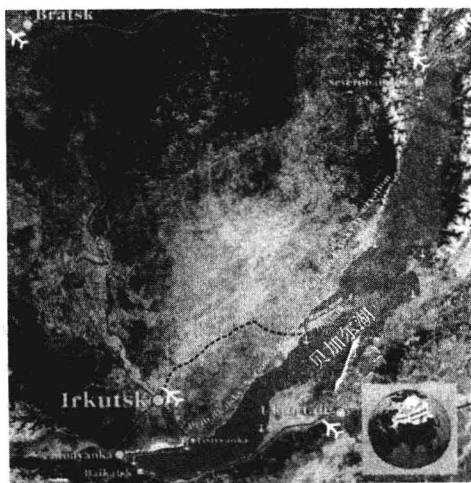
(据 UN. Water Development and Management In: Proceeding of the UN Water Conference 1977. Part 4. Oxford Programon Press, 1978)

对于水质的交替更新过程与水量有所不同,一般条件下新水与介质接触的时间较短,水岩作用不够充分,水质往往具有低矿化的特点。古老的水因滞留时间长,水岩作用充分,水中离子种类相对较多且含量较大。所以,含盐量愈高,水的更新周期愈长。这一特点在地下水中表现得较明显。在地下水系统中,深层地下水或水流滞缓区地下水储存年龄偏古老,当进行地下水开采时,将引起地下水渗流场形态变化与水化学场的变化,并使深层水(古老水)所处的封闭条件遭受破坏,从而加快水的交替。水质点的运移路径改变,致使某些高矿化度水向低矿化的水域迁移,致使原先的淡水区因咸水的运移、混合,出现水质恶化现象。

1.2.2.6 深部地下水与浅部地下水(或地表水)的交替

地球表部圈层与深部圈层之间的水分周转是伴随岩石物质的运动、转移、交换而进行的。来自深部的水通过板块边缘的深断裂上升溢出地表,与此同时,在深海槽的板块俯冲带携带较多水分的地壳上部岩块又会返回地球深部,使地幔得到包括水分在内的物质补充。这种发生在地球深浅部之间的物质循环(包括其中的水分循环)统称地质循环。研究表明,在地质循环中,水分的运动途径很长,速度缓慢,周转的水量较少。研究地质循环对深入了解水的起源、演化以及地下水在各种地质过程中所起的作用有着重要的理论价值。

深部地下水与浅部地表水或地下水交替活动的一个典型例子是现俄罗斯的贝加尔湖。它是世界上最深的淡水湖泊,平均深度730 m,最大深度1680 m,淡水储量达全球淡水湖水总量的1/5。它具有由湖变“海”成“洋”的发展趋势;贝加尔湖也是地震多发区,每隔20~30年则会发生一次7~9级强震。1959年的9.5级大地震使湖底深度下降15 m~20 m。1962年的10级地震使入湖的色楞格北部河口区下沉面积达200 km²。湖中生物物种丰富,除淡水生物外,还有相当数量的生活在咸水中的海洋生物,如海豹、龙虾等。该湖在科学研究上存在许多难解之谜(图1-3)。据最近俄中科学家共同



贝加尔湖卫星照片

图1-3 贝加尔湖深部大泉

对贝加尔湖深部科学考查,发现水下深部大泉,这应该是地壳深部地下水通过深部构造断裂补给湖水的典型水文地质现象。

1.2.2.7 水分循环的驱动机制

水分循环如同一部庞大而复杂的“永动机”不断运转,地球上的水体,由于太阳辐射作用,从太阳获得能量后产生蒸发,蒸发的水汽被气流输送到大陆上空,在适当的条件下,水分凝结、产生降水,降落到地面上的水再经过植被截流、缓存、分配与河道汇流等一系列复杂运动过程,形成径流又返回海洋,周而复始,完成陆—陆间、海—海间及海—陆间的水分循环。

水分循环的太阳辐射驱动过程的判断是通过地面辐射平衡值(B_r)来确定。

地面辐射平衡值是指地球表面得到的太阳辐射与地面的反射之差。辐射平衡值可用以下方程求得

$$B_r = (Q_d + q_c)(1 - \alpha_0) - F \quad (1-1)$$

式中: Q_d ——太阳直接辐射量;

q_c ——散射辐射量;

α_0 ——地面对太阳辐射的总反射率;

F ——地面向大气的有效辐射量。

当 $B_r > 0$ 时,地面热量收入大于支出,热量有盈余,地面温度升高,则以蒸发为主;当 $B_r < 0$ 时,地面热量亏损,温度下降,则发生温度对流,可能降雨。

辐射平衡值的大小与地理纬度、地区的昼夜长短、地面特性和大气中的水汽含量相关。辐射平衡有日变化和年变化规律。纬度越低,辐射平衡保持正值的月份越多,纬度越高,辐射平衡保持正值的月份越少。

1.3 水文循环结构模型

1.3.1 结构模型四要素的基本概念与特征

水文循环的四要素是:降水(包括降雨、降雪、冰雹等),生态水,地表水与地下水。据有关文献资料统计:地下水占水圈总水量的1.69%,地表水占水圈总水量的96.554%。地表水又分为两部分:湿地(陆地地表水的总称)与海洋,湿地水为0.014%,而海洋水为96.54%;以淡水资源而论,地下水占30%,而湿地淡水只占0.3%,冰川类淡水占68%。

(1) 降水

降水是水文循环过程的主导因素,没有降水过程,则没有水文循环,因而水文循环研究实质上是研究降水的动态分配过程,是水文循环转换模型中的输入系统,大多以变量 P 表示。但该系统变化规律难以把握,一般作为一个统计量记载在水文报告中。

(2) 生态水

储于生态水层(森林、植被及根系土壤层)中,有植被存在的地方都存在生态水层,它是降水进行首次储存、分配的关键,也可称为储水—配水层,该层却不被常规水文研究所重视,充其量只作为植被的水文效应略为一提。

在水资源这一大系统中,生态水(Eco-Water)是其中最活跃、最积极,也是最重要的因子。“生态水”概念在以往的教科书中或一些研究的论著中未曾出现过,但该术语不同于“生物体内水”,或“生态用水”、“环境用水”,或者是有些表格中表达的“土壤水”,而是水环境系统的一个“层次”,也就是说,随着环境研究、水资源量研究的深入,随着学科的渗透,生态水层(Eco-Water Sphere)有必要单独划出并与地表水、地下水一道进行深入研究。但该水层系统的研究又不同于农业生态学或森林水文学,前者注重其水在植物体内的循环方式、后者注重降水在树冠的截留与树杆上的直流。而生态水层研究是把生态水作为水文循环系统的一个“独立转换器”研究,是解决水资源转化定量研究的关键部分(图1-4)。

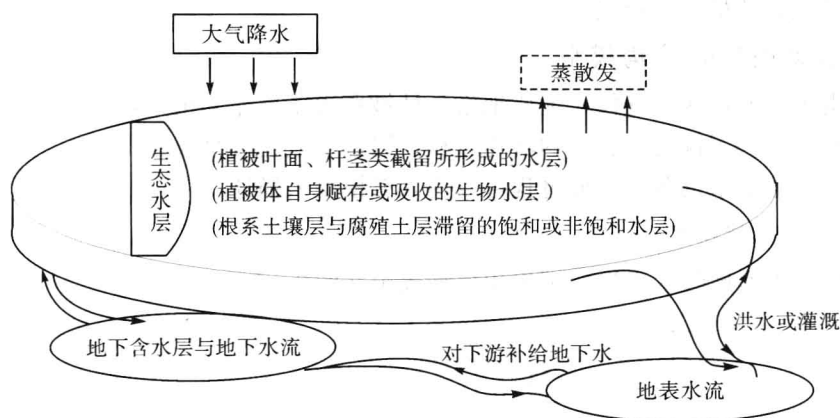


图1-4 生态水层在水循环中所处地位(有如计算机的CPU)——进行缓存、调节与分配

生态水是指与地球表层植物体紧密相关的水体,是地球水圈中的一个重要部分。地球水圈又可细分为大气水圈、地表水圈、生态水圈及地下水圈(图1-2)。生态水为地球表面植被层,包括叶面、根系、腐殖层、表层耕植土壤层及植物体本身所能截留(滞留)或涵养的水量,这部分水主要与地球表面的植被密切相关,围绕植被层形成了水循环的一个特殊转换带或过渡带,它的存在形式与运动形式有别于地表水与地下水;其水量能用于蒸发、调剂补给地表与地下水。在原始森林区,生态水层(植被层等)所截取的水量可占降水量的20%~30%,有的可达40%,其量不可低估。在水资源循环过程中,生态水的多寡,直接影响各水资源量的分配与在其储存体中滞留的时间。生态水可以分为三大部分:

- ① 以植物为主体的植被层(叶面、根系、腐殖层)在不同形式的降水中所截留的水;
- ② 以植被宿体——根系土壤包气带层所能滞留的非饱和水;
- ③ 以植物体本身所拥有各种形式的生物水,生物体内所涵养的水分不直接参与地表与地下的径流,是以特殊的“生物水”运动模式影响周边气候温度环境,以蒸腾、根部吸收方式直接或间接影响降雨、地下水与地表水运动。同时又是地下水与地表水运动的重要补充。

在自然条件下，生态水层的分布具有一定的连续性，并与流域吻合成片成层分布，但由于人为的改造，该水层依人类改造的模式已呈不连续状态，表现为天然林区富水，而在砍伐区或农耕区贫水，甚至缺水。

(3) 地表水

主要是指在地表以天然江、河、湖、海，包括人工水库、塘堰等形式的水体，它是直接可取的水体，是降水在生态水层进行分配转化后的最终产物之一。

(4) 地下水

它是地下含水层中储存的重力水，它储存于地下岩层的孔隙、裂隙与岩溶孔洞和管道之中，可通过天然泉口外溢或通过人类有目的地开凿井孔抽取，也是降水在生态水层进行分配转化后的最终产物之一。

1.3.2 水文循环的结构模型

中国由于地域辽阔，气候、地质地貌与植被覆盖条件差异很大，因而地下水的转换模式非常复杂，为了说明其各水的转化过程，以数学概化模型表达。

地下水盆地中水资源的形成过程可以用入渗模型来描述。

1.3.2.1 降水入渗模型

一个地下水盆地降水入渗的理想化模型表示在图 1-5 中。

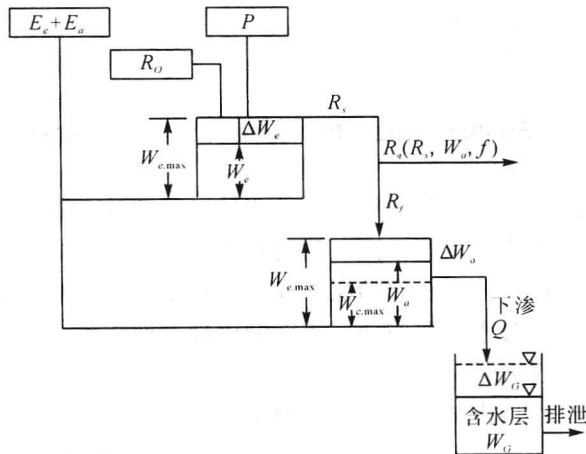


图 1-5 降水入渗模型（根据本-茨维和哥尔兹托夫）

降水入渗到达地下水面的过程，可用水经过两个“蓄水池”的过程来模拟。上一个“蓄水池” W_e 用来模拟生态水层（它包括植被储水层系与相对孤立的塘、洼地表蓄水），下一个“蓄水池”则是植被根系层以下（不包括植被根系土壤层本身）包气带土壤层（图 1-4）。降雨后，直接落在补给区的水量 P 和虽落在补给区外但由坡面径流汇入补给区的降水量 R_o ，首先要填满地表塘、洼（它有底板隔水的塘、洼，也有底部透水的塘、洼，后者水可以入渗补给地下水），有部分则被生态水层所拦蓄。如果蓄水池原有的蓄水量为 W_e ，最大蓄水量为 $W_{e,max}$ ，只有当