

干旱内陆河区 地表水和地下水 集成模型与应用研究

胡立堂 王忠静 田伟 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

干旱内陆河区 地表水和地下水 集成模型与应用研究

胡立堂 王忠静 田伟 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书是关于地表水和地下水相互作用研究的论著。本书在总结多项地表水和地下水相互转化方面科研项目成果的基础上,从干旱内陆河区水资源特点、国内外已有的地表水和地下水集成模型及特点、地表水和地下水转化机理方面深入研究地表水和地下水集成模型的模拟方法,提出了以地表水为主体和以地下水为主体的地表水和地下水模型时空尺度耦合的方法,构建了耦合基于水量平衡的地表水模型和分布式的饱和地下水流模型的集成模型,并将之应用于石羊河流域水资源配置;同时构建了基于 Richard 方程的地下水饱和一非饱和流和一维明渠汇流的耦合模型,考虑了区域尺度下非饱和渗流过程的简化处理方法,将模型应用于黑河干流中游地区地表水和地下水的数量转化分析和水资源管理。

本书具有较强的理论性、系统性和实践性,可作为水文水资源、生态环境、水文地质等专业的本科生、研究生的教学参考书,也可供从事水文水资源及其相关领域的科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

干旱内陆河区地表水和地下水集成模型与应用研究 /
胡立堂, 王忠静, 田伟著. — 北京: 中国水利水电出版社,
2013.8
ISBN 978-7-5170-1222-1

I. ①干… II. ①胡… ②王… ③田… III. ①干旱—
内陆水域—地面水—地下水—相互作用模型—研究 IV.
①P343②P641.13

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第202665号

书 名	干旱内陆河区地表水和地下水集成模型与应用研究
作 者	胡立堂 王忠静 田伟 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 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	北京市北中印刷厂
规 格	184mm×260mm 16开本 10.25印张 243千字 1插页
版 次	2013年8月第1版 2013年8月第1次印刷
印 数	0001—1500册
定 价	38.00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

经济、社会、人口、资源与环境的协调是可持续发展的重要基础，对其研究一直是资源、环境、经济等领域的热点问题。特别是在干旱内陆河区，水资源紧张，社会经济发展和水资源的矛盾更加突出，如何认识水土资源开发与生态环境的关系，并寻找协调两者关系的方法，是研究的核心所在。干旱内陆河区的地表水和地下水相互作用是普遍和重要的关系。地表水与地下水集成模型的研究将为水资源规划及合理配置提供必要的技术支持，特别是正确评价和分析人类活动影响下的水资源数量及其时空分布规律，而且在地下水污染逐渐成为国内关注和工作的焦点后，地表水和地下水交互带及功能会更加受到重视。地表水和地下水集成模型涉及水流和水质两方面的内容，目前国内外研究侧重于水流方面。最早的地表水和地下水交互方面的工作可追溯至 1877 年 Boussinesq 的研究，之后国内外学者展开了大量的研究，但地表水和地下水集成模型方面的专著尚未见报道。鉴于此，我们在总结多年相关工作的基础上，形成了一些对于干旱区地表水和地下水模型集成方面的认识，并将其汇集成文。

本书是在总结河西走廊黑河干流中游地区地下水运动数值模拟研究项目、石羊河流域重点治理规划项目，国家自然科学基金项目“河西内陆区地下水与泉、河转化演变模型研究”、中华人民共和国水利部水资源需求管理援助项目（WRDMAP: Water Resources Demand Management Assistance Project）和国家重点自然科学基金“黑河流域中游地区生态—水文过程演变规律及其耦合机理”项目地表水与地下水相互转化方面的研究基础上，从干旱内陆河区水资源特点和地表水和地下水转化理论方面探讨地表水和地下水模型集成的方法，并结合实例分析地表水和地下水的转化关系，定量评价地表水地下水转化的数量与水资源管理对策。本书的出版得到国家自然科学基金重点项目“黑河流域中游地区生态—水文过程演变规律及其耦合机理”（项目号：91125015）的资助。

本书第 1 章主要归纳了干旱内陆河流域的水循环特点、水资源利用中的问题及解决对策，然后针对水资源的概念，比较国内外已有的定义和内涵，总结各种评价方法，以便于更加清楚认识地表水和地下水转化在水资源评价与利用中的重要性。第 2 章系统总结了国内外地表水和地下水相互作用的热点问题，

同时评价已有模拟模型的特点,探索地表水和地下水集成模型的发展趋势。第3章探讨了在干旱区建立地表水和地下水集成模型的一般性方法。地表水模型采用一维河网汇流模型,地下水模型采用三维饱和和非饱和地下水流模型。在实际流域应用中可简化三维的非饱和水流模型为垂向一维的非饱和水流模型,其中为了检验模型的合理性,利用国内外公开的模型数据对地表水和地下水集成模型进行模拟和对比分析。第4章从理论上探讨地表水和地下水数量计算和关系判别方法,利用解析和理想模型分析地表水和地下水的时空转变特征。第5章探讨了以地表水模型为主体的地表水和地下水联合管理的模型和应用,以石羊河流域为实例,对地表水模型采用水量平衡原理进行简化,地下水模型采用饱和地下水流模型进行模拟,其中对非饱和带水流过程进行简化。在模型参数率定和验证的基础上,通过设置不同的水资源配置情景,对石羊河流域水资源合理配置进行分析和总结,为解决水资源的危机提供科学的决策支持。第6章探讨了以地下水模型为主体的水资源管理模型及应用,选取河西走廊黑河中游干流区为研究区,在多边形有限数值模拟软件的基础上建立了一维地表水流和含混合井孔的地下水三维流耦合数值模型,并对模型进行了参数率定及模型验证,分析了黑河中游河流与含水层关系演变的过程,总结了地表水和地下水作用的时空转变规律,并对减少潜水蒸发和渠系水入渗作了分析评价。

在工作过程中,特别感谢陈崇希教授多年来的悉心指导和谆谆教诲,是他领着我走向地下水数值模拟的大门,严谨的学风、敏锐的思维、对科学孜孜不倦的追求精神和高尚的人格使我受益匪浅,在此谨向他表示最诚挚的感谢。今年也是陈先生八十大寿,他依然密切关注着国内外地下水动态,在此谨向他致以最崇高的敬意。本书大部分成果也是在陈先生指导下完成,现将多年来的相关成果总结成书,祝陈先生福如东海、寿比南山!

在资料收集和科研过程中,Jan Van Wonderen, Robin Wardlaw, 甘肃地质工程勘察院的张荷生总工、程旭学高工、李爱军工程师,黄河水利委员会的钱云平高工,甘肃张掖水文水资源局陈文雄局长,甘肃省水利水电勘测设计研究院韩金强总工,清华大学赵建世博士都曾给予过无私的帮助,在此一并谨向他们表示衷心的感谢!

同时,将此书献给我的妻子孙树阁女士和儿子胡文昊,感谢她们多年来对我一如既往的支持和理解,使我能够全身心地投入到繁重的科研工作中。

限于时间和水平,错误和疏漏之处在所难免,敬请读者给予指正。

胡立堂

2013年4月13日

目 录

前言

第 1 章 干旱内陆河区水资源特点	1
1.1 水资源的定义与内涵	1
1.2 水资源量的计算与评价	2
1.2.1 地表水资源评价	3
1.2.2 地下水资源评价	3
1.2.3 水资源的可持续利用与合理配置	5
1.2.4 全国地表水和地下水资源的转换	7
1.3 干旱内陆河区水资源特点	8
1.4 干旱内陆河区解决水资源问题的途径	11
第 2 章 地表水和地下水的相互作用及研究方法	14
2.1 地表水和地下水的相互作用及集成模型的研究进展	14
2.1.1 地表水和地下水相互作用研究的热点问题	14
2.1.2 研究方法	15
2.2 地表水和地下水的相互作用及集成模型的研究进展	16
2.2.1 国内外地表水和地下水集成模型	16
2.2.2 地表水和地下水集成模型的分类和特点	19
2.2.3 发展趋势	20
第 3 章 干旱内陆河区地表水地下水集成的理论模型	21
3.1 地表水和地下水模型耦合模式	21
3.1.1 以地下水模型为主体的地表水—地下水流耦合模型	21
3.1.2 以地表水模型为主体的地表水—地下水流耦合模型	21
3.2 饱和和非饱和地下水三维流模型	23
3.2.1 饱和和非饱和地下水流模型的理论推导	23
3.2.2 水流模型的离散	26
3.2.3 水流模型差分方程的建立	28
3.2.4 地下水中污染物迁移模型的理论推导	29
3.2.5 模型的测试与验证	30
3.2.6 饱和—非饱和入渗过程的简化处理方法	34

3.3 地表水模型	40
3.3.1 一维明渠水流模型	40
3.3.2 基于水量平衡的地表水模型	45
第4章 地表水和地下水转换的理论研究	47
4.1 地表水和地下水的相互转化关系及数量确定	47
4.1.1 地表水和地下水的转化关系	47
4.1.2 地表水和地下水转化量的计算方法	47
4.2 地表水和地下水相互转化的理论分析	48
4.2.1 傍河抽水承压一无压地下水系统向河排泄量变化	48
4.2.2 傍河抽水地下水和河流的转化关系及数量变化	51
第5章 地表水地下水联合管理的模拟模型及应用	58
5.1 流域概况	60
5.1.1 地理位置与行政区划	60
5.1.2 地形地貌	61
5.1.3 气候	61
5.1.4 河流水系	61
5.1.5 生态环境	62
5.2 石羊河流域水资源模拟模型	62
5.2.1 水资源模拟模型概述	62
5.2.2 石羊河流域水力关系概化	63
5.2.3 地表水模型的建立	64
5.2.4 地下水模型的建立	72
5.2.5 地表水和地下水模型的耦合	74
5.3 水资源模拟模型的参数率定与验证	74
5.3.1 基础数据采集与整理	74
5.3.2 拟合求参	79
5.3.3 模型检验	83
5.4 流域水资源合理配置	89
5.4.1 流域现状水资源分配分析评价	89
5.4.2 水资源合理配置原则	92
5.4.3 水资源配置方案设置	93
5.4.4 水资源合理配置方案筛选	94
5.4.5 流域水资源合理配置方案	95
5.4.6 蔡旗断面泉水溢出量的进一步论证	98
5.5 改进 WEAP 模型的应用	100
5.5.1 改进 WEAP 模型设计	100
5.5.2 模型中的几个关键问题	101
5.5.3 模型验证和应用	103

第6章 基于物理基础的地表水与地下水模型及应用	107
6.1 区域条件概况	107
6.2 地下水动态分析	109
6.2.1 地下水头的动态	109
6.2.2 泉流量的动态	112
6.3 水文地质概念模型设计	112
6.3.1 模型范围	112
6.3.2 基本模型	112
6.4 模型识别	113
6.4.1 模型识别时段、单元剖分与结点设置	113
6.4.2 模型识别的基础资料	114
6.4.3 水文地质试验及水文地质参数	121
6.4.4 参数的确定	121
6.4.5 观测孔、泉拟合曲线及动态分析	123
6.4.6 潜水位变化分析	128
6.4.7 模拟时段水均衡分析	130
6.5 模型检验	131
6.5.1 基础资料	131
6.5.2 观测孔水头的检验	131
6.5.3 典型泉流量的检验	133
6.6 地下水开采动态预测与管理	133
6.6.1 夺取潜水蒸发量的开采方案	133
6.6.2 基于渠系防渗的地下水动态预测	138
参考文献	147

第 1 章 干旱内陆河区水资源特点

1.1 水资源的定义与内涵

从祖先逐水而居算起,人类探索利用水已经有很长的历史,目前人类还处在不断探索利用水的过程中。“水并不一定等于水资源”,两者涵义完全不同。据统计,地球拥有的总水量约为 136×10^8 亿 m^3 ,但能直接被人们生产和生活所利用的淡水总量约为 3.5×10^8 亿 m^3 ,是地球总水量的 2.8%。水资源只是人类可以利用的淡水中的一部分。而水不仅具有资源的属性,还是自然环境的重要组成部分,例如洪水可给人类带来很大的灾难,同时还可被人类所利用。

什么叫水资源?各个行业都开始对水资源进行研究。薛惠锋等(1995)将水资源研究领域分为五大学派:①实验传统和气象水文学派,即通过观察实验为主的手段对地球上水的起源、存在、分布、循环、运动等变化规律进行分析研究;②供水传统和工程学派,即人类用水和治水以“供水”为核心;③区域传统和地学学派,即对水资源进行区域研究,向周围空间、地上和地下辐射;④生态传统和环境学派,即注重水资源利用与环境关系的研究;⑤描述传统和人文学派,即对地球上水资源现象进行记载和描述。

各个行业对水资源的定义不一样,也赋予了水资源不同的内涵,目前尚没有统一的定义。《不列颠百科全书》将水资源定义为自然界一切形态(液态、固态和气态)的水。《中国大百科全书》将水资源解释为地球表层可供人类利用的水。显然,这些定义过大。1963年英国国会解释水资源为具有足够数量的可用水源。这也对水资源的一些特性未说清楚。1988年联合国教科文组织 UNESCO 和世界气象组织 WMO 认为作为资源的水应当是可供利用或者可能被利用,具有足够数量和可用质量,并可适合某地对水的需求而能长期供应的水源。

陈梦熊(1991)认为水资源一般指每年可更新的水量资源,地下水资源被看做“在岩土中赋存和运移的、质和量有一定利用价值的水”,它是地球水资源的一部分,与大气降水资源和地表水资源密切联系、相互转化。他根据供水的目的定义了狭义和广义水资源,认为狭义水资源一般是指生活用水、工业用水和农业用水;广义水资源还包括航运用水、能源用水、渔业用水以及工业矿水资源与热水资源等。水资源本身是一个与众多因素紧密联系并互相影响、互相制约的一个复杂系统。

施德鸿(1991)根据供水目的为主定义了水资源,他认为并非水就是资源,还需一系列的限定:①由于水具有流动、交替、更新的特点,在满足需要者质与量标准的前提下,应可逐年得到恢复;②要有一定规模的储存场所,以供调节使用;③可被安全可靠地转换为生态的、社会的、经济的效益,而不致产生人类不能接受的后果。

方红远(2004)认为水资源具有资源的、环境的和社会的等多重属性,从水维持人类



生命和社会经济发展的一般意义上说,水资源理解为能够被人类和其他生态系统直接或间接利用的,参与水分循环并不断恢复更新的且数量呈动态变化的淡水资源;一般所称的水资源实际是指由大气降水补给,主要赋存于地表江河湖泊以及浅层地下含水层,在水循环过程支配下可逐年更新恢复的水体。

刘昌明(1991)认为水资源的定义有广义和狭义之分,从自然资源的观念出发,水资源可定义为人类生产与生活资料的天然水源。水作为重要的环境要素,还与人类生存环境密切相关。广义的水资源应为一切可被人类利用的天然水,包括赋存于人类所及空间中各种相态(液、汽、固三态)的水。

《苏联百科词典》将水资源的内涵归纳为三方面的基本内容:①水资源是可以利用的自然物质;②水资源存在形式多种多样,包括地球水圈中所有水体,但淡水所占比例甚小,可利用部分更少;③水资源是一种可更新资源,如合理利用是用之不竭的。曲耀光(1991)认为这个定义对于全球宏观情况来说是完全适用的,但对于人类生活和生产的主要基础——陆地来说,不够全面,因为它没有涉及水资源的来源及转化。因此,他根据“四水”(大气水、地表水、土壤水和地下水)转化的研究成果,提出陆地流域的水资源定义:水资源是指可供国民经济利用的淡水水源,它来源于大气降水,其数量为扣除降水期蒸发的总降水量。理论上的水资源是取之不尽用之不竭的,如果合理利用,它在水分循环过程中将不断地得到更新和恢复。但在确定的时空条件下,水资源又有数量概念,不是取之不尽用之不竭的。

陈加琦等(2002)根据下述特征来定义水资源:①可以按照社会的需要提供或有可能提供的水量;②这个水量有可靠的来源,且这个来源可以通过自然界水文循环不断得到更新和补充;③这个水量可以由人工加以控制;④这个水量及其水质能够适应人类用水的需求。

尽管存在如此诸多的定义,有广义和狭义之分,目前所说的水资源主要还是指陆面上的水,不包括大气中的水分,而且水资源的概念是随着人类的认识和技术水平改变而改变的,因此根据水资源的几个特性可以表述水资源的基本属性。在开发利用水资源的过程中,人们已逐渐认识到水资源不仅仅只是一种自然资源,而且应当同评价、规划、开发、利用和保护紧密联系在一起。

1.2 水资源量的计算与评价

水资源是通过大气循环驱动的动态资源,为了科学地分析一个地区的水资源,必须以水循环的观点来研究水资源的转化。根据不同的研究对象,水资源评价可大致分为5个不同的阶段:首先是以“二水”(地表水和地下水)为研究对象的阶段,即针对地表水和地下水资源,忽略了两之间相互转化造成的重复估算部分,评价结果偏大;其次是以“三水”(大气水、地表水、地下水)研究对象为主的阶段,即考虑地表水和地下水相互作用;再次是以“四水”(大气水、地表水、土壤水和地下水)研究对象为主的阶段,土壤水作为联系地表水和地下水的一个纽带,其作用不可忽视;最后是以“五水”(大气水、地表水、土壤水、地下水和生态水)为研究对象的阶段,实质上这个阶段与上一阶段相



同，只不过是“面向生态”这个概念明确提出来了。

在国内的水资源评价中，地表水和地下水是分别进行估算的。由于地表水和地下水之间存在着相互补排、转化、循环的因素，河川径流中包含一部分地下水排泄量，地下水补给中有一部分来源于地表水体入渗，两者之间存在相互重复的部分。因此，在计算水资源总量时，不能直接将地表水资源量和地下水资源量相加作为水资源总量，必须扣除相互转化的重复水量。扣除重复水量的总水资源量计算见式 (1.2.1)。

$$W = W_r + U - D \quad (1.2.1)$$

式中： W_r 为多年平均河川径流量，即地表水资源量， $[L^3]$ ； U 为多年平均地下水补给量， $[L^3]$ ，即地下水资源量； D 为多年平均河川径流量与多年平均地下水补给量之间的重复量， $[L^3]$ 。

扣除重复水量法计算水资源总量关键是正确估算地表水、地下水相互转化的重复量。不同水资源类型区转化关系有差异，因此，应划分水资源类型区，按评价要求分别计算。

降水是大陆水资源的主要来源。对于一个相对封闭的流域，从水量平衡的原理，降水的转化可以表述为式 (1.2.2)。

$$P = E + R + \Delta U \quad (1.2.2)$$

式中： P 为年降水量， $[L^3]$ ； E 为年陆面蒸发量， $[L^3]$ ，包括土壤蒸发、植物蒸发和水体蒸发量； R 为年径流量（包括地表径流量和地下径流量）， $[L^3]$ ； ΔU 为地表、土壤和含水层的年流域蓄水变化量， $[L^3]$ 。对于多年平均来说，年平均蓄水变量近似不变，因此多年平均降雨量等于多年平均陆面蒸发量和多年平均径流量之和。

1.2.1 地表水资源评价

广义地讲，以液态或固态形式覆盖在地球表面上的自然水体，都属于地表水，它包括海洋水、湖泊水、冰川水和沼泽水；狭义的地表水主要包括河流水、湖泊水、冰川水和沼泽水，并把大气降水视为地表水体的主要补给源。

目前地表水资源评价主要针对的是河川径流量，其主要由雨洪地表径流量、排入河道的地下径流量和高山、冰川消融径流量组成。年径流量系列不仅受到自然气候的影响，而且受到下垫面条件改变的影响，因此在人类活动范围内的地表径流系列经常需要“还原”才能真正反映径流变化的规律，有时水文模型模拟的天然河川径流量系列比实际天然径流量系列更有代表性和适用性。

地表水资源是一种动态资源，不仅随着时间变化，而且还有地区分布的差异。降雨是地表水资源量的主要补给来源，因此地表水资源评价必须分析降水量的大小及时空分布特征，而降雨规律具有很大的不确定性。因此，研究地表水资源的表示方法主要是研究河川径流及与它有关的降水、蒸发等水平衡要素的表示方法。任何一个流域无时无刻不在进行着水的转移和交换，对这种处于复杂的运动、交换和变化状态的物理量，很难用简单的方法加以完美的描述，因此研究地表水资源时经常采用统计分析方法。

1.2.2 地下水资源评价

狭义的地下水是指饱和地下水，而广义的地下水指地面以下的地下水，包括了土壤



水。我国在 20 世纪 70 年代以前曾原封不动地采用原苏联普氏的分类对地下水资源进行分类,但该分类存在不少问题,主要是四类储量(即静储量、动储量、调节储量和开采储量)相互重叠,不易区分,应用时也不易掌握,未考虑开发之后补给和排泄条件的变化对补给量的影响;该分类也没有说明水量计算必须按一定的单元进行,另外,它不适用于松散沉积物中的深层承压水。这一时期提出的“单位静储量法”大量被应用,即当地下水取水量小于动储量(即地下水径流量或该断面以上的补给量)时,地下水位才能稳定。在流量超过动储量的抽水中,静储量便减少。在任意时间段内抽出的水量都等于所抽出的动储量总量和静储量的减少部分,但这一结论存在错误(焦赳赳等, 2003)。

1973 年原苏联宾德曼等人又提出了天然储量、天然资源、人工资源和诱导资源的分类,但这些概念之间的界线仍比较模糊。在 1979 年国家建设委员会组织编写的《供水水文地质勘察规范》中,从地下水的补给、径流和排泄的运动规律出发,将地下水资源划分为补给量、储存量和允许开采量三大类。与此类似的分类有 1983 年国家机械工业部各勘察单位在《供水水文地质手册》中提出的地下水资源分类方案,它将地下水资源量划分为补给量、储存量和消耗量。此分类方案中把《供水水文地质勘察规范》中的允许开采量作为消耗量的分量考虑。《地下水资源分类分级标准》(GB 15218—94)中,地下水资源分为允许开采资源和尚难利用的资源。

沈振荣等(1992)认为地下水的功能不仅可以作为水资源来开发利用,而且是人类赖以生存的地壳、地球环境的重要组成部分。因此,地下水的分类可以按其功能划分为环境地下水储量和地下水资源量两大类。环境地下水储量即指地下水位最大允许变动带以下的含水层所储存的全部地下水量,即地壳在历史时期中长期积累形成的地下水储量。环境地下水的更替变化非常缓慢,对其开采极易形成降落漏斗,甚至造成地面沉降、海水入侵、咸水入侵、水质恶化等一系列地球环境问题。地下水资源即为总的地下水总补给量,具体又可分为地下水天然资源、地下水人工资源量和地下水诱导资源量。

因此,从地下水资源的构成角度可将地下水资源分为补给资源和储存资源。补给资源是指通过各种途径自外界进入地下水系统的那部分水量,它是地下水系统中经常与外界发生交替,并能得到补充和恢复的地下水量;储存资源是指地下水系统在长期的补给和排泄过程中,蓄积于地下水系统内的那部分水量。而从开采角度可分为允许开采资源和尚难利用资源两类。允许开采资源是指地下水系统中能够取出,但不会引起严重的环境地质问题的那部分地下水资源;尚难利用资源是指地下水系统中因水文地质因素或技术经济条件等使地下水尚难利用的那部分地下水量。一些学者(Sophocleous, 2000; Kalf, 2005; Zhou, 2009)提出,用可持续开采量(sustainable yield)代替允许开采量,认为:地下水可持续开采量是一个含水系统的环境承载能力允许的条件下可以持续开采的水量,其目标是既要设法满足当代的发展需求,又不危及后代的发展需要。地下水可持续利用的目的不仅仅是水质和水量的保护,更是为维持和恢复生态与环境系统的完整性。在现行的地下水资源评价中,经常需要计算的是补给量、储存量和可持续开采量。

地下水资源评价中最让人关心的量是可持续开采量,而且围绕其定义有着较大的争论。传统地下水资源评价的理论体系,受“影响半径”模型的误导,形成了一系列原则上错误的地下水资源评价准则和方法(焦赳赳等, 2003)。1978 年国内众多学者围绕地下水



资源评价问题,曾举行“全国第一届地下水资源评价学术研讨会”,在认识上评价的方法逐渐从前苏联的静储量评价转化为以动储量为主导。陈崇希(1966,1978,1982)认为:当开采量等于补给增量与排泄减量之和时,地下水形成稳定流状态时的开采量就是可持续开采量。美国学者 Bredehoeft (2002) 也用岛状含水层证明:“可持续开采量等于地下水的补给增量减去排泄增量。”而且陈崇希(1966)教授进一步强调:在评价地下水资源时,“既要重视地下水补给形式和补给量的调查,也要重视对排泄的研究;在资料的分析上,不能只考虑天然条件下的补给和排泄,更应研究开采之后补给和排泄在数量上的变化。没有这方面数量上的研究,允许开采量是无法做出正确评价的”。而且国外学者也认同这个观点(Bredehoeft 2007; Stphens 2007)。

1.2.3 水资源的可持续利用与合理配置

据相关统计,中国水资源总量为 2.8 万亿 m^3 。其中地表水 2.7 万亿 m^3 ,地下水 0.83 万亿 m^3 ,由于地表水与地下水相互转换、互为补给,扣除两者重复计算量 0.73 万亿 m^3 ,与河川径流不重复的地下水资源量约为 0.1 万亿 m^3 。按照国际公认的标准,人均水资源低于 3000m^3 为轻度缺水;人均水资源低于 2000m^3 为中度缺水;人均水资源低于 1000m^3 为重度缺水;人均水资源低于 500m^3 为极度缺水。中国目前有 16 个省(自治区、直辖市)人均水资源量(不包括过境水)低于重度缺水线,有 6 个省、自治区(宁夏、河北、山东、河南、山西、江苏)人均水资源量低于 500m^3 。

水资源评价是保证水资源持续开发和管理的 premise,是进行与水有关活动的基础。目前,水资源评价研究的内容从早期只统计天然情况下水资源量及其时空分布特征开始,继而增加为水资源工程规划设计所需要的水文特征值计算方法及参数分析,然后又增加为水资源工程管理及水源保护的内容,特别是对水资源供需情况的分析和展望,以及在此基础上水资源开发前景展望逐渐成为主要的内容。对因水资源的开发治理引起的环境影响评价,正在成为人们十分关注的焦点。

水资源合理配置从广义的概念上讲就是研究如何利用好水资源,包括对水资源的开发、利用、保护与管理。合理配置中的合理是反映在水资源分配中解决水资源供需矛盾、各类用水竞争、上下游左右岸协调、不同水利工程投资关系、经济与生态环境用水效益、当代社会与未来社会用水、各种水源相互转化等一系列复杂关系中相对公平的、可接受的水资源分配方案(甘泓,2000)。合理配置是人们在分配稀缺资源进行分配时的目标和愿望。一般而言,合理配置的结果对某一个体的效益或利益并不是最高最好的,但对整个资源分配体系来说,其总体效益或利益是最高最好的。

就国内来说,多年来,针对内陆河流域区水资源的形成和转化规律以及水土资源的合理利用的问题,从“七五”到“十五”期间,国家科技部、中国科学院、自然科学基金委等部门都曾投入大量科研经费,组织研究力量开展了水文水资源、生态环境、土地利用、陆地表面过程等方面的研究,已形成了相当丰富的成果。20 世纪 80 年代初,以华士乾教授为首的课题组对北京地区的水资源利用系统工程方法进行了研究,并在国家“七五”重点科技攻关项目中加以提高和应用,该项研究成果考虑了水量的区域分配、水资源利用效率、水利工程建设秩序,以及水资源开发利用对国民经济发展的作用等,成为我国水资源



配置研究的雏形。之后“八五”国家重点科技攻关专题“华北地区宏观经济水资源规划理论与方法”系统地阐述了基于宏观经济的水资源优化配置理论技术体系,包括水资源优化配置的定义、内涵、决策机制和水资源配置多目标分析模型、宏观经济分析模型、模拟模型以及多层次多目标群决策计算方法、决策支持系统等。在“九五”期间,国家重点科技攻关项目“西北地区水资源合理开发利用与生态环境保护研究”,将水资源配置的范畴进一步拓展到社会经济—水资源—生态环境系统,配置的对象也发展到同时配置国民经济用水和生态环境用水,并且研究和提出了生态需水量计算方法等。在国家“十五”期间的“海河流域水资源综合规划”项目中建立海河流域水资源配置模型,模型采用与全国水资源综合规划相匹配的新分区、新口径和新资料,具备对现状及各规划水平年、不同工程布局及组合、不同需水要求下的水资源供需平衡分析计算能力。国家自然科学基金委员会正组织实施的重大研究计划“黑河流域生态—水文过程集成研究”以我国黑河流域为特定研究区域,从系统思路出发,探讨我国干旱区内陆河流域生态—水—经济的相互联系。

国外对水资源合理配置最早的实践研究始于20世纪40年代,从Masse提出的水库优化调度问题开始。20世纪50年代以后,随着系统分析理论和优化技术的引入以及60年代计算机技术的发展,水资源系统模拟模型技术得以迅速研究和应用。由于水资源系统的复杂性以及存在包括政治、社会、决策人偏好等各种非技术性因素,所以简单使用某些优化技术并不能取得预期的效果,而模拟模型技术可更加详细地描述水资源系统内部的复杂关系,并通过有效的分析计算获得满意的结果,从而为水资源宏观规划及实际调度运行提供充分的科学依据。

水资源合理配置是基于环境、经济、社会方面的原则下水资源的分配。王浩等(2004)对干旱区水资源合理配置模式与计算方法进行了讨论,集中讨论了生态需水与经济效益的关系;同时回顾和总结了流域水资源合理配置的研究进展,指出初始水权分配、公众参与等是目前水资源合理配置的缺点。夏军等(2005)分析了西北地区水资源合理配置和承载力,说明有限的水资源与人口增长、社会经济发展和生态环境建议对水资源需求的矛盾。栗晓玲等(2005)对干旱区面向生态的水资源合理配置问题进行了分析,指出需要建立水质水量统一的水资源配置模型,传统的以需定供的供水方式向宏观经济支持下面向生态的供水方式转变,常规的优化技术向模拟技术转变。左东启(2004)分析了跨流域调水对西部水资源配置可能存在的影 响。Reitsma(1996)提出决策支持系统(Decision Support System,简称DSS)的技术来进行水资源管理,后来很多人继续针对这个问题进行研究,并最终将水资源模拟模型做成DSS。

从原理来说,水资源配置模型包括优化模型和模拟模型两种。优化模型即是建立一个或多个目标函数,基于投入产出模型和系统动力学方法,最终用一定方法求出最优解;而模拟模型包括两种,两种都是基于宏观经济的水资源网络节点关系建立平衡方程进行水资源供需平衡预测和计算,不同是一种考虑地下水动力学方程,另一种不考虑。基于水资源系统节点平衡图的优化模型包括Becker(1995)、Rosegrant等(2000)、Xia等(2001)、赵建世(2003)等做的实例,其中赵建世(2003)在分析了水资源配置系统的复杂性及其复杂适应机理分析的基础上,应用复杂适应系统理论的基本原理和方法,构架出了全新的水资源配置系统分析模型。对于符合物理机理的模拟模型,Dai等(2001)耦合河流网络



节点水量模型 Modsimq 和河流水质软件 Qual2E, 对 Colorado 的 Arkansas 流域下游的灌区水质水量进行了模拟; Lee 等 (2005) 利用一维明渠的圣维南连续方程 (Utah 州大学的 CanalMan 软件) 对灌区规划中水资源模型进行了研究。而在水资源调度中, 比较难的是如何确定调度规则, Miles 等 (2002) 利用分类系统建立了单个/双个水库调度规则。

1.2.4 全国地表水和地下水资源的转换

根据全国水资源规划划定的水资源分区 (不包括香港、澳门特别行政区和台湾省), 全国可分为 10 个一级水资源分区, 分别为松花江流域、辽河流域、海河流域、黄河流域、淮河流域、长江流域、东南诸河流域、珠江流域、西南诸河流域和西北诸河流域, 总面积 953.31 万 km^2 , 其中, 西北诸河流域范围最大, 为 338.71 万 km^2 , 长江流域其次, 为 180 万 km^2 , 东南诸河流域范围最小, 为 24.06 km^2 。

据 2005~2011 年中国水资源公报统计, 多年平均地下水供水占总供水量的比例如图 1.2.1 所示。其中, 海河流域该比例最大, 约为 65%; 辽河流域其次, 占 55%; 松花江流域、黄河流域、淮河流域和西北诸河流域地下水供水比例分别为 42%、33%、28% 和 18%, 北方 6 区平均比例为 36%, 而南方 4 区的平均地下水供水比例约为 4%。

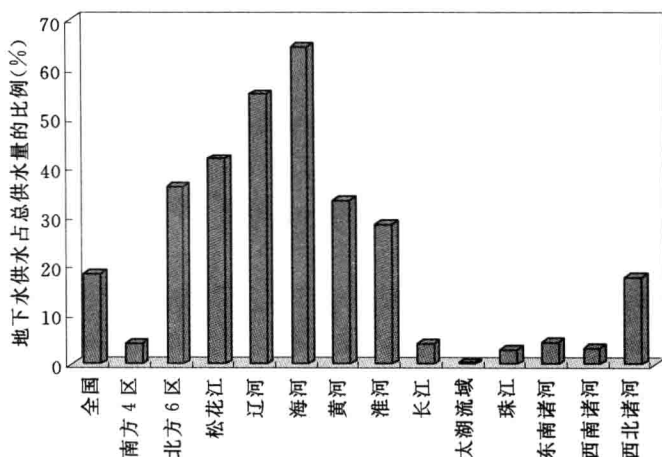


图 1.2.1 2005~2011 年全国及各大流域平均地下水供水比例

据中国水资源公报统计, 1997~2011 年全国及各一级水资源分区的平均地表水与地下水转换量与总资源量的比例如图 1.2.2 所示。从图中可知, 全国的比例约为 26%, 占了近 1/4; 西北诸河流域该比例占了 56% 之多, 超过了 50%; 黄河流域的比例约为 43%, 海河流域、西南诸河流域、长江流域、珠江流域、东南诸河流域、辽河流域、松花江流域、淮河流域和太湖流域 (其水资源量统计在长江流域中) 所占比例分别为 28%、25%、24%、24%、23%、22%、20%、15% 和 13%。北方 6 区 (松花江流域、辽河流域、海河流域、黄河流域、淮河流域、西北诸河流域) 和南方 4 区 (长江流域、珠江流域、东南诸河流域、西南诸河流域) 的平均比例分别为 31% 和 26%。该比例会因气候条件和地理位置差异而发生变化, 如对于长江流域来说, 长江上游平原区 47.2% 的地下水资源量由当地降水补给形成, 52.8% 由当地地表水体补给形成; 长江中游平原区地下水资源量中, 80.2% 由



当地降水补给形成, 19.8%由当地地表水体和山前侧向补给形成; 长江下游平原区地下水资源量中, 80.0%由当地降水补给形成, 20.0%由当地地表水体补给形成(丁志立等, 2008)。

因此, 地表水和地下水转换关系及数量的确定是非常重要的。而在干旱内陆河区, 地表水和地下水相互作用的影响则显得更重要, 准确确定地表水和地下水转换关系及其数量决定着区域供水安全。

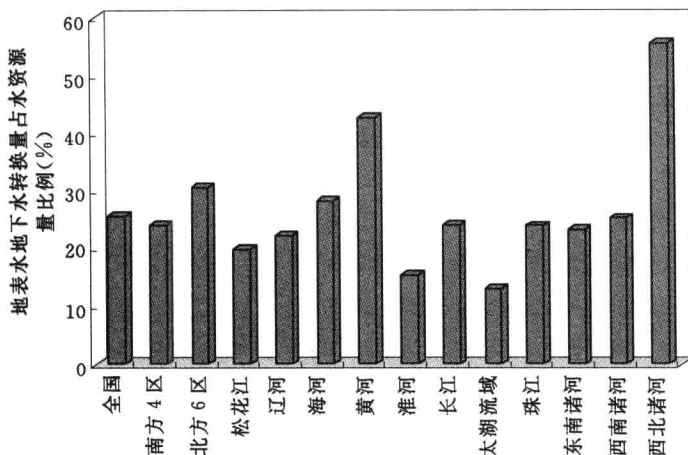


图 1.2.2 1997~2011 年全国及各大流域平均地表水地下水转换量占水资源总量比例

1.3 干旱内陆河区水资源特点

中国干旱内陆河区包括新疆全境、甘肃河西走廊及内蒙古贺兰山以西的地区, 面积约占到国土面积的 1/4, 典型流域包括: ①克里雅诸小河流域; ②和田河流域; ③叶尔羌河流域; ④喀什噶尔河流域; ⑤阿克苏河流域; ⑥渭干河流域; ⑦开都-孔雀河流域; ⑧吐鲁番盆地; ⑨哈密盆地; ⑩东段诸河流域; ⑪乌鲁木齐河流域; ⑫玛纳斯河流域; ⑬奎屯河流域; ⑭精河-博尔塔拉河流域; ⑮石羊河流域; ⑯黑河流域; ⑰疏勒河流域。干旱内陆河区由于独特的气候、地形、地貌特点, 其水资源也具有明显的特点, 主要有以下几点。

1. 降雨蒸发的分带性

内陆河流域降雨少, 蒸发强烈, 从盆地边缘到中心具有明确的分带性。据资料统计(曲炜, 2005), 内陆河流域区年平均降水深 153mm, 山区年均降水深 303mm。而在塔里木盆地、柴达木盆地中部降水量在 25mm 以下, 山区降水量可为盆地中部的几倍及数十倍以上。蒸发与降水分布趋势相反, 随高程增加蒸发能力减少。年水面蒸发从 600mm 左右到 2400mm 以上。在天山南坡迪那河站高达 2692mm。从高山、中山到山前平原, 再到荒漠、沙漠, 随着海拔降低, 降水依次迅速减少, 蒸发依次迅速增大。干旱指数可表征各流域的气候特征, 部分流域主要气象站干旱指数见表 1.3.1。高山区分布丰厚的山地冰川, 干旱指数小于 2, 是湿润区; 中山区是半湿润带, 干旱指数为 2~5; 低山带及山间盆地是



半干旱区，干旱指数为 5~10；山前平原，干旱指数为 8~20，是干旱带；戈壁、沙漠，干旱指数在 20 以上，个别地区可达 100 以上，是极干旱区。

表 1.3.1 干旱内陆区部分流域主要气象站点干旱指数表（曲炜，2005）

区域	流域	气象站	年降水（mm）	年蒸发（mm）	干旱指数
塔里木河盆地	阿克苏	阿克苏	62.0	1890.0	30.0
	叶尔羌	莎车	43.1	2245.0	52.0
	和田	和田	33.0	2640.0	80.0
	塔里木	尉犁	40.8	2910.0	71.0
	若羌	若羌	17.4	2902.0	167.0
天山北坡	玛纳斯	石河子	199.0	1515.0	8.0
		莫索湾	117.0	1942.0	17.0
河西走廊	石羊河	武威	160.0	2020.0	13.0
		民勤	110.0	2635.0	24.0
	黑河	酒泉	85.3	2149.0	25.0
		额济纳	42.0	3755.0	89.0

2. 水资源分布的水平分带性

每一盆地水资源的分布与水文地质特征，均呈明显的水平分带性。图 1.3.1 表示了干旱内陆河区水资源形成、转化及消散的一般过程。它依次经过山区（径流形成区）→冲洪积扇区（地下水补给区）→绿洲平原区（地下水出流区，形成泉集河）→尾间（地下水补给区和强烈蒸发区）→荒漠带。地下潜水埋深由深到浅，含水层由单层到多层，导水性由强到弱，水质由好到坏。

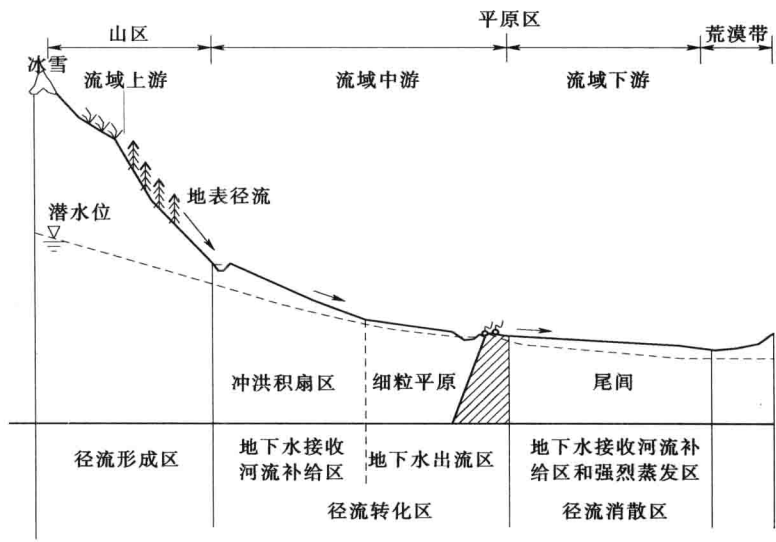


图 1.3.1 干旱内陆河区水资源形成、径流与消散示意图