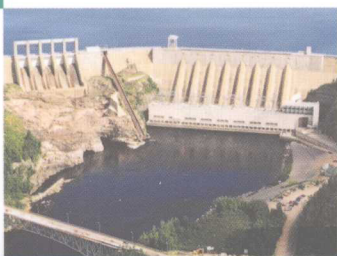


现代水资源系统解析与 决策方法研究

刘 宁 王建华 赵建世 著

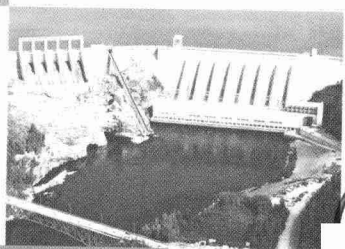


科学出版社

www.sciencep.com

现代水资源系统解析与 决策方法研究

刘 宁 王建华 赵建世 著



科学出版社
北京

内 容 简 介

本书首先阐述了现代水循环系统、水基系统及水资源系统等相关基本概念,在对传统水资源系统分离理论和规划方法进行总结与归纳的基础上,对现代水资源系统演变进行了分析和解读,提出了现代水资源系统分析理论与模型,即复杂适应系统理论与整体分析模型。同时对现代水资源系统分析方法进行了研究,构建了现代水资源系统决策支持系统,并将所上述现代水资源系统解析与决策方法理论及模型应用于海河流域,对海河流域水资源系统进行了综合分析,并模拟海河流域水资源规划情景,为海河流域水资源规划与管理提供有益借鉴。最后提出了基于复杂大系统观的现代水资源综合管理的模式框架。

本书可供从事水资源规划、水资源管理、城市规划的科研、规划和管理人员参考,也可供高等院校相关专业师生参阅。

图书在版编目(CIP)数据

现代水资源系统解析与决策方法研究 / 刘宁, 王建华, 赵建世著. —北京: 科学出版社, 2010

ISBN 978-7-03-026842-6

I. ①现… II. ①刘… ②王… ③赵… III. ①水资源管理 IV. ①TV213.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 030845 号

责任编辑: 李 敏 王 倩 / 责任校对: 何艳萍

责任印制: 钱玉芬 / 封面设计: 耕者设计

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

强 龙 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 5 月 第 一 版 开本: B5 (720 × 1000)

2010 年 5 月 第 一 次 印 刷 印张: 15 3/4 插页: 3

印数: 1—2 000 字数: 330 000

定 价: 56.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

本书研究得到国家“十一五”科技支撑计划重大项目课题“南水北调水资源综合配置关键技术研究”(2006BAB04A16)和国家重点基础研究发展计划(973)项目课题“基于水循环的水资源利用效用评价基础理论与方法”(2006CB403405)的支持

序

在愈来愈强烈的人类活动和气候变化的影响下，水资源系统已经、正在并且继续发生着深刻的演变，同时水资源系统复杂性和脆弱性加大，增加了水资源系统规划与调控的难度。解析变化环境下水资源系统演变的内在机理和发展规律，研究适合于复杂现代水资源系统的分析与决策技术，对水资源规划与管理决策，以及最严格水资源管理制度的建设无疑具有重要的理论和现实意义。

本书作者在历经一个较长时期的理论方法研究与实践探索积累、同时对传统水资源系统分析技术方法总结归纳的基础上，对现代环境下的水资源系统演变机理和解读的方法进行了探索，提出了复杂适应系统理论方法与复杂水资源系统整体分析模型，为现代水资源系统规划提供了分析和规划的技术路径，并在此基础上以海河流域为例进行了水资源系统的综合分析，最后面向今后一个时期水资源严格管理的实践需求，提出了基于复杂大系统观的现代水资源综合管理发展方向，其内在的科学逻辑清晰缜密，且面向最严格水资源管理的国家目标需求，彰显出显著的科学意义和应用价值。

我很愿意向大家推荐这本书，相信该书的出版在推动现代水资源规划与管理的研究与实践方面会发挥其应有的作用，同时也期待本书的作者在水资源科学研究上进行更多的探索和创新。

以此为序。

中国工程院院士 王浩

2010年4月

前 言

自从人类社会对自然界的水进行开发利用伊始，水就成为一种最基本的自然资源。随着经济社会的发展，一方面水资源系统的经济产出效率日益提高，同时为社会服务的范围和内涵不断拓展；另一方面人类对水资源系统影响的深度和广度也在逐渐加大，导致水资源系统的复杂性和脆弱性不断加大。进入 21 世纪，现代社会的持续发展对于包括饮用水、粮食生产用水、城市和工业供水以及生态与环境用水在内的水安全保障需求更是步入了一个空前的阶段。与此同时，由于经济社会取—耗—排水量的增加，水资源短缺与水生态环境退化问题已在全球范围内成为一种凸显的或潜在的危机。科学解读现代环境下水资源系统演变与发展的内在机理和规律，并在此基础上研究和应用适于复杂系统的分析与决策技术方法，做出符合自然规律和经济规律的水资源规划与管理决策，无疑是实现水资源可持续利用的科学途径。

在水资源系统分析和规划的早期阶段，线性规划、整数规划、动态规划以及随机规划是最常用的几种传统理论与方法，并在流域规划、水量调度和工程建设等方面的实践中得到应用。随着人类活动对水资源系统扰动程度的加深，水资源系统表现出显著的复杂大系统的非线性特征，加之随着社会发展进程的推进，由水资源系统支撑的生态与经济两大系统在用水竞争性和系统约束性方面不断增强，这就要求我们在进行流域水资源规划和决策时，引入适合于非线性复杂大系统的有效分析方法，研制包括经济系统、水文系统、环境系统和制度体系在内的水资源大系统规划和决策模型系统，作为流域水资源合理配置和可持续发展决策分析的综合分析工具。基于上述认识，作者在利用现代空间信息技术对现代水资源系统及其分项要素演变进行解读的基础上，引进发展并实践应用了非线性规划分析方法和现代决策理论，并以不同层次、具有适应性的主体为基本单位，通过描述同一层次间

主体的行为和相互关系，以及不同层次间的信息传递和作用机制，构建了基于复杂适应系统理论的水资源系统整体模型，并借助先进的计算机技术，构建了流域水资源决策支持系统，从而为现代环境下的复杂水资源系统分析和决策提供了较为完整的方法和手段。

为与上述水资源大系统分析和规划决策方法相衔接，现代水资源管理实践也需要从复杂大系统角度出发，实现一系列的深刻转变，包括在管理对象上要从传统的供用水管理转向维护水资源全属性功能的资源管理；在管理主体上要由一元的行政管理转向包括政府、市场、公众在内的多元化协同管理；在管理方式上要由各环节的分离管理转向基于流域“自然—人工”二元水循环全过程的统筹管理；在管理模式上由事中监督管理转向事前、事中和事后全过程控制管理；在管理机制上要由常态管理转向长效、常态、应急相结合的管理；在管理手段上要由过去的粗放式线条管理转向基于完整信息的精细化管理。

本书共有8章，第1章为水资源系统及系统分析基础，阐述了水资源、水资源系统和水资源系统分析的一些基础知识和认识，主要由王建华、赵建世和刘永攀执笔；第2章为传统水资源系统分析理论与方法，包括线性规划、动态规划和随机规划的基本理论和应用实例，主要由刘宁和赵建世执笔；第3章为现代水资源系统演变与解读，包括人类活动对于流域水循环影响及其伴生的资源、生态环境和社会经济效益，并利用现代水科学理论方法和信息技术对水资源系统进行解读，主要由刘宁、王建华、桑学锋和刘永攀执笔；第4章为现代水资源系统分析理论与模型，论述了复杂水资源大系统分析的方法和复杂系统适应理论，并构建了复杂水资源系统的整体分析模型，主要由赵建世、刘宁和桑学锋执笔；第5章为现代水资源系统分析方法，介绍了系统分析的非线性理论和以遗传算法为代表的非线性规划的通用数值解法，以及多目标规划理论与方法，主要由刘宁执笔；第6章为现代决策论与水资源决策支持系统，主要由刘宁和赵建世执笔；第7章为海河流域水资源系统综合分析，以我国受人类活动影响程度最深的海河流域为例，将上述现代水资源系统分析和决策方法应用于实践，实现了复杂情景下流域水资源规划和供需平衡分析，主要由赵建世、王建华、桑学锋和刘永攀执笔；第8章为基于复杂大系统观的现代水

资源综合管理，论述了现代环境下的流域水资源综合管理的改革方向，主要由刘宁、王建华和刘永攀执笔。

本书是作者在一个较长时期内从事相关规划和管理工作的积累和思考，部分基础工作在此之前的相关论著中已有一定体现，如《工程目标决策研究》等。伴随着我国水资源和水利工程规划工作的不断开展，作者以此书将近期对复杂大系统的分析和决策理论、方法与技术的认识做一个阶段性总结，旨在抛砖引玉，促进现代环境下的水资源系统分析和规划决策的科学性，但鉴于变化环境下的水资源大系统解析和决策问题的复杂性，加之作者水平局限，书中片面不足甚至挂一漏万之处，也望读者不吝指正。

借本书出版之际，作者要将特别的敬意献给长期以来对我们无私帮助的两为智慧师长——徐乾清院士和陈志恺院士，感谢他们对本书提出的高屋建瓴的意见，也借此机会深切缅怀徐乾清院士，同时敬祝陈志恺院士健康长寿。在本书的撰写过程中，国家“973”项目“海河流域水循环演变机理与水资源高效利用”首席科学家王浩院士给予了大力的帮助，并提出了许多中肯的意见和建议，在此也向他表示最诚挚的感谢。

作者

2010年2月

目 录

序	i
前言	iii
第 1 章 水资源系统及系统分析基础	1
1.1 水循环与水资源	1
1.1.1 水与水循环	1
1.1.2 水资源	3
1.2 水循环系统、水基系统及水资源系统	5
1.2.1 系统	5
1.2.2 水循环系统	6
1.2.3 水基系统	7
1.2.4 水资源系统	8
1.3 系统科学与系统工程	8
1.3.1 系统观及系统科学的产生及其早期发展	8
1.3.2 传统的系统工程与系统分析	10
1.3.3 系统科学的新发展	13
1.4 水资源系统分析及其发展方向	17
1.4.1 水资源系统描述与分析	17
1.4.2 水资源系统分析的发展方向	18
第 2 章 传统水资源系统分析理论与方法	20
2.1 线性规划	20
2.1.1 线性规划基本理论	20
2.1.2 线性规划应用实例	24
2.2 动态规划	27
2.2.1 动态规划基本理论	28
2.2.2 动态规划应用实例	28

2.3	随机规划	31
2.3.1	随机规划基本理论	31
2.3.2	随机规划应用实例	33
第3章	现代水资源系统演变与解读	37
3.1	人类活动对于流域水循环系统的干扰	37
3.1.1	对流域降水的影响	37
3.1.2	对下垫面环境的影响	38
3.1.3	人工侧支水循环形成	39
3.1.4	水循环动力条件的变化	40
3.2	流域水循环系统演变效应	41
3.2.1	水循环演变效应	41
3.2.2	水资源演变效应	42
3.2.3	生态环境演变效应	42
3.2.4	“泛流域”效应	43
3.3	现代水科学与信息技术支持下的水资源系统解读	43
3.3.1	水资源系统结构解读	43
3.3.2	流域水资源系统环境解读	44
3.3.3	水资源系统要素解读	46
第4章	现代水资源系统分析理论与模型	49
4.1	复杂水资源大系统分析方法论概述	49
4.1.1	水资源系统的复杂性	49
4.1.2	复杂水资源大系统分析方法在国外研究中的应用	50
4.1.3	复杂水资源大系统分析方法在国内研究中的应用	59
4.2	复杂适应系统理论与方法	80
4.2.1	复杂适应系统理论及其建模方法	80
4.2.2	流域水资源系统的组成与层次划分	85
4.3	复杂水资源系统整体分析模型	88
4.3.1	主体的分类	89
4.3.2	模型的框架结构	90
4.3.3	水资源系统整体模型的核心数学描述	92
4.3.4	水资源系统整体模型的求解技术	106
4.4	复杂适应系统整体分析模型应用实例	107
4.4.1	应用背景与模型设定	107
4.4.2	研究思路与方案设定	112

4.4.3	调水方案的宏观经济效果分析	114
4.4.4	调水方案水情分析	121
第5章	现代水资源系统分析方法	124
5.1	系统分析的非线性理论与方法	124
5.1.1	非线性规划的一般形式	124
5.1.2	非线性规划的理论解法	125
5.2	遗传算法——非线性规划的通用数值解法	127
5.2.1	遗传算法简介	127
5.2.2	遗传算法程序的实现	133
5.3	多目标规划理论与方法	134
5.3.1	情景分析法	136
5.3.2	切比雪夫方法	137
第6章	现代决策论与水资源决策支持系统	139
6.1	决策论概述	139
6.2	决策理论与决策方法	143
6.2.1	决策的含义和特征	143
6.2.2	决策的内容	144
6.2.3	决策的分类与基本原则	144
6.2.4	决策的一般步骤	146
6.2.5	决策的价值前提与事实前提	147
6.2.6	决策方法	148
6.3	决策支持系统	149
6.3.1	决策支持系统概述	149
6.3.2	流域决策支持系统的基本组成	152
6.3.3	流域决策支持系统的结构体系	155
6.4	流域水资源规划决策支持系统	157
6.4.1	系统总体结构	157
6.4.2	专业服务平台	160
6.4.3	会商决策支持中心	165
6.5	海河流域水资源规划决策支持系统实例	166
6.5.1	平台功能	166
6.5.2	平台结构	169
6.5.3	平台逻辑流程	169
第7章	海河流域水资源系统综合分析	171
7.1	流域概况	171

7.1.1	海河流域自然地理概况	171
7.1.2	海河流域社会经济发展概况	172
7.1.3	海河流域水资源概况	173
7.2	复杂流域水资源规划新特点	176
7.3	水资源及其开发利用现状评价模型	178
7.3.1	评价指标体系	179
7.3.2	评价数学模型	184
7.3.3	评价指标权重分析	189
7.3.4	评价结果及其分析	191
7.4	宏观经济水资源多目标分析模型	203
7.4.1	宏观经济水资源原理	203
7.4.2	基于宏观经济水资源模型的海河流域需水预测	210
7.5	水资源供需平衡分析模型	214
7.5.1	基本单元	214
7.5.2	地面地下水相互转化	216
7.5.3	下游来流系列	217
7.5.4	调度原则	217
7.5.5	调度系列	218
7.6	海河流域水资源规划情景分析	219
7.6.1	海河流域水资源规划情景设计	219
7.6.2	海河流域宏观经济水资源规划情景组合	223
7.6.3	流域宏观经济水资源计算结果分析	225
第8章	基于复杂大系统观的现代水资源综合管理	234
8.1	由供用水管理向面向全属性功能的资源管理转变	234
8.2	由一元行政管理向多元化主体协同管理转变	235
8.3	由单环节分离管理向基于水循环全过程的统筹管理转变	235
8.4	由事中监督管理向基于整体控制的系统管理转变	236
8.5	由常态管理向常态与应急相结合的机制性管理转变	236
8.6	由粗放式线条管理向基于完整信息的精细化管理转变	237
参考文献	238

第1章 水资源系统及系统分析基础

1.1 水循环与水资源

1.1.1 水与水循环

水是世界上最常见但又最不平凡的物质，它不仅具有良好的溶解性和渗透性，同时具有高热容量和高蒸发潜热，它通过蒸发和凝结调节着地球上的能量分布，通过搬运和沉积作用改变着悬移物质的分布，通过溶解和结晶作用调整着可溶物质的分布，通过参与光合和呼吸作用维持着大气组分和生命活动。因此，水是地球表面参与各类物理、化学和生物过程最频繁的物质，是支撑地球循环系统和生态系统最为重要的物质，也是经济社会活动的基础性物质，在地球的无机物质和有机生命的循环演变过程中扮演重要的角色，被誉为“生命之源”。

在太阳能、重力势能、生物势能等能量的共同作用下，水分从海洋和陆面蒸发，被大气环流输送到大气中，遇冷凝结成雨或雪降落，被树、草截留后在地表形成径流，入渗补给地下水，最后流入海洋或是尾间湖泊，再次从海洋和陆面蒸发。这种垂直向在“大气—地表—土壤—地下”间、水平向在“坡面—河道—海洋（尾间湖泊）”间循环往复，并伴随着气态、液态或固态相变的过程称之为水循环。水文循环强度可以通过各分项过程的循环通量来考察和评价，全球范围内陆地年均降水量约为800mm，年均蒸发量约为480mm，海洋年均降水量约为1270mm，蒸发量约为1400mm，陆地向海洋输送的径流量约为46 410km³/a（图1-1）。

六大洲水循环通量状况见表1-1。

表1-1 六大洲水循环通量概况

项目	世界	欧洲	亚洲	非洲	北美洲	南美洲	大洋洲
降水量/mm	800	790	740	740	756	1595	791
蒸发量/mm	577	507	416	587	418	910	511
河川径流量/mm	314	283	324	153	338	685	280
可更新水资源/km ³	42 780	2900	13 510	4050	7890	12 030	2400

资料来源：梅德门特，2002

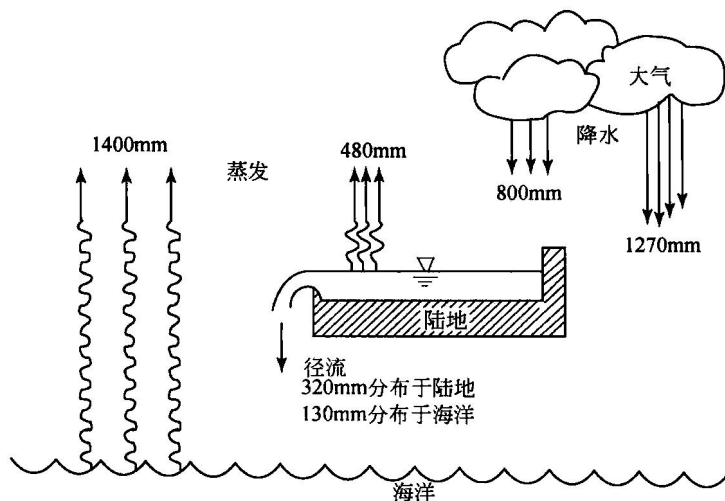


图 1-1 全球水文循环通量情况 (梅德门特, 2002)

在水文循环转化过程中，一部分水量以动态存量的形式赋存于地球表面，形成不同类型的水体，为水资源开发利用提供了基础。地球表面液态、固态水存量状况见表 1-2。

表 1-2 地球表面液态、固态水存量状况

类别	储量/1000km ³	占总储量/%	占总淡水量/%
海洋水	1 338 000	96.54	—
地下水	23 400	1.69	—
地下咸水	12 870	0.93	—
地下淡水	10 530	0.76	30.1
土壤水	16.5	0.001	0.05
冰川与冰盖	24 064.1	1.74	68.7
南极	21 600	1.56	61.7
格陵兰	2340	0.17	6.68
北极岛屿	83.5	0.006	0.24
高山	40.6	0.006	0.12
永冻层	300	0.022	0.86
湖泊水	176.4	0.013	
咸水	85.4	0.006	
淡水	91	0.007	0.26

续表

类别	储量/1000km ³	占总储量/%	占总淡水量/%
沼泽水	11.47	0.0008	0.03
河流水	2.12	0.0002	0.006
生物水	1.12	0.0001	0.003
大气水	12.9	0.001	0.04
总计	1 385 984.61	100	
其中淡水	35 029.21	2.53	100

资料来源：梅德门特，2002

水循环的空间尺度包括全球尺度、海洋和大陆尺度、流域尺度、局地尺度和用水单元尺度等，结合本书水资源规划的实践，以下主要讨论的是大陆流域尺度的水循环。

1.1.2 水资源

水资源一词最早出现于正式机构的名称，1894年美国地质调查局（USGS）设立了水资源处（WRD）并一直延续至今。一百多年过去了，关于水资源的定义及内涵却仍然见仁见智，缺乏一个统一的界定。《英国大百科全书》对于“水资源”一词的表述为“自然界一切形态（液态、固态、汽态）的水”，1988年联合国教科文组织（UNESCO）和世界气象组织（WMO）定义水资源是“作为资源的水应当是可供利用或可能被利用，具有足够数量和可用质量，并且可适合对某地为对水资源需求而能长期供应的水源”。国内对水资源的理解也不尽相同：《中国大百科全书·水利卷》中将其定义为“自然界各种形态（汽态、液态或固态）的天然水”，并把可供人类利用的水作为“供评价的水资源”；《中国资源科学百科全书》中，把水资源定义为“可供人类直接利用、能不断更新的天然淡水，主要指陆地上的地表水和地下水”。20世纪90年代《水科学进展》编辑部专门组织了一次笔谈，国内许多专家经过讨论，在水资源的基本特征上取得三个方面的共识：一是来源于降水；二是可供经济社会利用；三是补给源稳定且可更新。

尽管国内外关于水资源概念的论述莫衷一是，但基本上围绕着水资源承载的主客体范畴进行论述，水是水资源的主体，降水是地表所有水分的总体来源，因此对全口径水分（降水）资源结构的划分是水资源内涵的焦点之一。目前最宽泛的概念认为所有的降水都可以当作水资源，最狭窄的定义认为只有河川径流才算是水资源。经济社会系统和生态环境系统是水资源承载的双重客体，传统对于

水资源的定义多从经济社会系统出发，认为能够为人直接取用的水才算是水资源，而随着可持续发展理念的不断普及，一些学者认为生态系统利用的有效水分也应当纳入水资源的范畴，并提出了“蓝水”和“绿水”的概念。针对以上不同口径的划分差异，国家西北九五攻关研究“西北地区水资源合理配置与承载能力研究”和国家“973”项目“黄河流域水资源演变规律与二元演化模型”中提出了层次化的水资源定义，即基于有效性的广义水资源、基于可控性的狭义水资源以及基于可再生性准则与生态需水量和国民经济水资源可利用量（图 1-2），为水资源外延的科学界定提供了一套可度量的基准。

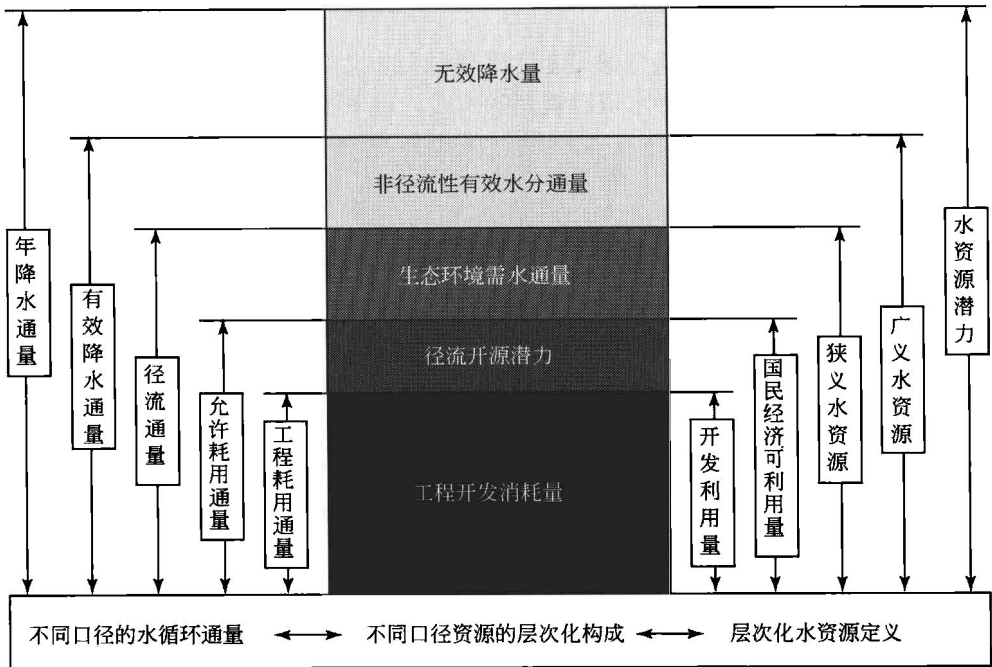


图 1-2 流域不同口径的水循环通量与层次化水资源定义的结构关系

水之所以作为一类重要的自然资源，是相对于经济社会和生态环境需求而言具有稀缺性，人与水之间的矛盾竞争也是推动水资源定义和水资源评价方法发展的基本动力。在水资源开发利用前期或是水资源丰沛地区，地表水资源能够满足经济社会的用水需求，同时也最易于取用，这种情况下只有河川径流被作为水资源，这种界定在许多水资源条件较好的国家和地区一直延续至今。随着经济社会用水需求的不断增长，地表水资源开发程度不断提高，地下水逐渐作为一种常规水源被开发利用，因此“不重复地下水资源量”就出现在水资源的评价范畴中。在我国一些北方流域，目前地下水开发利用程度也已经相当高，地表河流更是常

年干涸，基于这样一种背景，可以预见，有效的非重力形式的土壤水将会被纳入水资源框架当中，土壤水资源评价理论与方法将会成为水资源评价方法发展的增长点和突破点之一。

综上所述，对于水资源的内涵认知，可以得到几点结论：一是水资源是以降水为基本输入，其中垂向降水包括雨、雪、雨夹雪、米雪、霜、冰雹、冰粒和冰针等形式，水平降水主要指雾和露，水平降水在干旱地区或潮湿地区的作用，目前研究较少；二是有效性是评判水是否具有资源属性的主要标准，因此水资源的赋存形式多种多样，包括径流性地表水和地下水、非饱和带的土壤水以及冠层截流的重力水等；三是作为一种可再生的资源，水资源属于更新通量的范畴，评价结果是以年为时间单位进行循环通量上的积分量；四是水资源概念及其内涵是不断丰富的，随着人类社会对于水资源需求和利用水平的提高，水资源外延被不断拓展，内涵被不断添加。

1.2 水循环系统、水基系统及水资源系统

1.2.1 系统

按照系统研究开创者贝塔朗菲的定义，系统是“相互作用的多种元素的复合体”，这个定义包含了系统的多元性和相关性两个逻辑义项。具体地讲，系统是由相互作用和相互依赖的若干部分结合成的，具有特定功能的有机整体，而该系统本身又从属于一个更大系统的组成部分。因此，系统的确切含义依学科的不同、使用方法和解决问题的不同而有所区别。在人类社会中，人们为达到需求的目的，组建了许许多多的大系统，如国家、产业、文化教育等系统；这些系统本身是由许多小系统组成的，如产业大系统可分为工业、农业、流通和服务业等小系统；而这些小系统又由许多更小的系统组成，如工业又由重工业和轻工业组成。系统的大和小不是绝对的，它依研究问题的不同要求而定。就水资源系统而言，它属于国民经济大系统中，资源系统的一个分系统；而它本身又是由许多流域（或区域）水资源分系统组成的系统；各流域（或区域）水资源系统又是由许多小的流域（或区域）水资源子系统组成的。因此，系统的大小和复杂程度主要由研究者根据所要研究的问题和要求来确定。如果我们研究的问题只是某个流域水资源问题，则可圈定该流域为我们的系统，而该流域范围外则为系统的环境。若系统与外界环境无关，则称此系统处于封闭状态；若系统与外界环境需要进行物质和信息交换，则称此系统为开放系统。系统可以是静态的，也可以是动态的。系统的状态参数随时间变化的系统称之为动态系统；反之，为静态系统。