

与地下水资源评价运动

中国建筑工程出版社

GROUND WATER

MOVEMENT

AND RESOURCE

EVALUATION

陈雨孙 著

与地下水 源水 评价 运动

— — — — —



— — — — —

地下水运动与资源评价

陈雨孙 著

中国建筑工业出版社

全书共五章，内容涉及到地下水资源评价相当广泛的理论问题及计算方法，包括地下水运动和资源的概念、分类及其估算的基本原则；单井抽水降落漏斗与补给类型、强度的关系；补给量与开采量的关系；多隔层含水层中抽水的降深分布和代数有限元法等。书中给出了数十个计算公式，并有算例和实例，书前列有本书引用的符号与量纲，书末附有参考文献和索引。

本书可作为与地下水专业有关的科技、研究、教学人员的参考，也可供大专院校水文地质、农田水利、给水排水等专业师生参考。

地下水运动与资源评价

陈 雨 孙 著

Ground Water Movement and Resource Evaluation

Chen Yu-Sun

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

开本：787×1092毫米 1/16 印张：25 $\frac{1}{4}$ 字数：608 千字

1986年7月第一版 1986年7月第一次印刷

印数：1—4,200册 定价：5.70元

统一书号：15046·4906

Ground Water Movement and Resource Evaluation

Chen Yu-Sun

China Building Industry Press

Beijing

代 序

本书著者陈雨孙，江苏省吴县人，1952年毕业于北京大学土木工程系。1956年前在建筑工程部综合勘察院从事房屋地基和工程地质勘察。1956年、1960年两次赴苏从事工程地质、地下水非稳定流的研究。以后在国内一直从事水文地质勘察和地下水动力学的研究，主持与审核过国内许多城市和建设工程地下水水源勘察工程，参与了柬埔寨和毛里塔尼亚等国一些工厂、城市水源勘察与水资源评价工作。在我国《工程勘察》、《水文地质工程地质》、《水利学报》等学术刊物上发表论文数十篇，著有《单井水力学》（1977年12月中国建筑工业出版社出版）、《抽水试验与参数测定》（与颜明志合写，1985年10月由水利电力出版社出版）。著者现任城乡建设环境保护部综合勘察院水文地质总工程师，曾兼任该院研究所所长。在学术界任中国地质学会水文地质专业委员会副主任委员、水文地质计算与地下水资源评价学组负责人，中国建筑学会工程勘察学术委员会委员、水文地质学组副组长。《工程勘察》刊物编辑委员会副主编。

《单井水力学》一书是著者对单井抽取地下水时产生的水力学问题系统研究的总结，书中提出了地下水三维流和紊流的理论，以及“引用补给半径”的新概念和测定方法，解决了抽水试验中经常遇到的各种实际问题，包括用单井的稳定和非稳定抽水试验测定含水层参数。《单井水力学》一书出版以后，受到国内外水文地质学者的重视，从国内有关学术会议及学术刊物上发表的有关探讨井的渗流和水文地质计算方面的论文所引的参考文献可看出，《单井水力学》已经成为一本重要的参考文献。

继《单井水力学》一书的出版，我社即约请著者撰写《群井水力学》，因为一个地下水源地通常都由若干个井组成，因而如何阐明地下水在群井抽水作用下的运动规律，进而作出地下水资源的评价，正是水文地质工作者极感兴趣的问题。陈雨孙同志欣然接受约稿。在此之前，陈雨孙在应聘参加《供水水文地质勘察规范》编制工作期间（1973~1976年），已对地下水资源问题作了一些研究，写了题为《地下水资源概念和评价原则》的论文，在中国地质学会首届全国地下水资源评价学术会议（1978年）发表。稍后，陈雨孙同志又承担了原国家基本建设委员会下达的研究项目（1979年）“地下水资源评价原理和方法”，此项目共包括五个专题。即：

- 一、地下水资源的概念、分类及其评价的基本原理；
- 二、论单井抽水的降落漏斗和补给类型、强度的关系；
- 三、补给量和开采量的关系；
- 四、多隔层含水层中抽水的降深分布；
- 五、代数有限元法——用于地下水计算。

第一个专题的研究报告已于1980年8月同另外的四个科研成果即（1）不均质含水层（双层介质）的引用补给半径与渗透系数的测定；（2）潜水井稳定流的解析解；（3）滦河改道与冀东平原的形成；（4）论西山香峪向斜奥陶系灰岩对北京市地下水补给作用等由原国家建筑工程总局设计局与中国建筑科学研究院共同组织邀请有关专家学者进行鉴定，鉴定书指出：“研究报告采用一维数学模型的解析解，分析研究了地下水在天然状态下和开采时的运动规律，通过严密的理论推导和分析，论述了我国过去在资源评价工作中

常用的四种储量（永久储量、动储量、调节储量和开采储量）的表现形式、性质及其相互关系；储量、资源、开采量之间的区别和联系，以及开采对地下水运动的影响等，从而提出了地下水资源的概念、分类及其评价的基本原理，并用实例作了说明。”鉴定书认为：

“采用一维数学模型充分分析论证地下水储量的概念及其相互关系，这在国内还是第一次，是一种新的尝试。本文推导演算正确，论证比较严密，条理清晰，概念和观点比较明确，结论正确，具有较高水平。对广大水文地质工作者正确的认识地下水储量和资源的概念及其分类有帮助，对今后在供水水文地质勘察工作中更好的评价地下水资源提供了理论基础，有指导意义。”鉴定书建议作者对文中个别论述前后不统一，个别算例数据需核对，补充越流补给的承压含水层数学模型等进一步补充修改后报上级机关并公开发表。此项成果在1980年9月召开的中国建筑学会工程勘察学术委员会“地下水资源概念与评价方法学术会议”上获得好评，认为在理论上有独到之处，对生产有参考价值。

著者又经过三年的努力，于1983年8月提出了其余四个专题的研究报告。这样就完成了“地下水资源评价原理和方法”项目的全部研究工作。经过城乡建设环境保护部科学技术局审查，并委托建设部综合勘察院邀请国内有关科研、高校、生产部门的专家学者对报告二至五作了审查，并提出了评议书。评议书中首先对后四个专题（研究报告二至五）作了这样的评价：“报告二探讨了单井抽水的降落漏斗与补给类型、强度的关系，针对三种补给类型（降水渗入、迳流、河流补给）与两种含水层（潜水、承压水）建立了五个数学模型，分别求得其解析解。作者在模型中考虑渗入补给与倾斜底板迳流补给乃系独到之处，而且首次应用弗列德霍姆积分方程于河流补给单井的计算，从而为解析法求解提供了一个新途径。报告对补给因子、补给强度、稳定时间以及补给半径等概念进行了深入探讨，有所启迪，有所建树；报告三探讨了补给量与群井开采量的关系，提出必须把地下水开采量限制在不超过可能产生公害的某一规定降深，并给出了在迳流、下渗、河流与人工补给条件下计算含水层中降深场的公式。这对合理开发利用地下水将会有重要的指导作用；报告四是在均质无界和忽略弱透水层弹性释水的前提下提出天然迳流、对天然蒸发袭夺与入渗补给条件下多层含水层的数学模型与解，并进一步提出简化此种多层含水层系统降深场计算的新思路和新方法；报告五基于渗流基本定律和均衡原理赋予有限元法形象而直观的解释，简单易懂。作者运用水位和溶质浓度的代数有限元法推导出一维、二维、轴对称和三维有限元的代数方程组，为在广大水文地质人员中推广应用有限元法做出了可贵的贡献”。并认为：“此项科研成果深入探讨了孔隙介质含水层在不同条件下开采后的降深分布以及开采量与补给量的关系，充实了地下水资源评价的理论和方法。几个课题的研究循序前进：由一维到多维，由单井到群井，由单层到多层，由理论到方法，具有较大的理论与实际意义。对在一定补给条件下开采后降深分布及开采量与补给量关系的研究深度、广度以及系统性，在目前国内外有关文献中尚属少见，在这方面填补了国内科研空白。就整体研究报告而言，所给出的大部分公式、概念与结论有很大的实用价值，达到了国内先进水平。”专家们建议著者对迳流补给型倾斜底板承压含水层的井流所建立的数学模型及“越流圈”的讨论等进一步修改补充。将这四部分研究报告与报告一合并为一个专著，尽速予以出版。

著者根据两次评议会的意见，并按照出版要求进一步进行修改、补充、整理。统一了全书的体例，使章节内容前后呼应，并编出了书中引用的主要符号、说明与量纲，最后编

出全书的内容索引。以较快的速度提出书稿。经过反复推敲,书名也由《地下水资源评价原理和方法》改名为《地下水运动与资源评价》。经著者推荐,由我社约请伍兆聪同志对书稿中的数学推导与计算部分进行了校核。在此我们对伍兆聪同志表示感谢。同时也对参加两次鉴定评议的专家学者们表示感谢,对组织这个研究课题的城乡建设环境保护部综合勘察院及主持审定的有关单位表示感谢,当然我们更要感谢本书的著者及协助其工作的同志,没有他们的勤奋努力,认真负责,细致推敲,反复核对,本书就不可能达到这个水平。

因此,本书书名由《群井水力学》改为《地下水储量计算原理》,再改为《地下水资源评价原理与方法》,最后定为《地下水运动与资源评价》的全过程,既反映了著者的学术思路的变化,也反映了本社对这本书稿的组稿、定稿过程。

我们相信,这本具有应用价值的学术性著作的出版,对推动学科的研究会起到积极作用。书中的学术论点和对一些实际工程的看法和建议,有的已被实践证实;有的意见尽管未被采纳,但作为一家之言,相信无论对具体地下水源工程,或者对城市建设和水源工程规划与改造,还是有参考意义的。我们希望,有更多的专家学者能在地下水动力学、特别是在推动学科发展、促进城乡建设环境保护事业发展的有关课题方面进行写作。我们期待,在我国有更多这方面的专著出版。

中国建筑工业出版社 石振华

1985年2月

符号与量纲

符 号	说 明	量 纲	符 号	说 明	量 纲
A	1. 面积	L^2		2. 点源强度、面源强度	L^4
	2. 系数			3. 热源强度	
$A=Q/\pi k p$	常系数		C	4. 系数	
$[A]$	矩阵(方阵)		$C=2q/s$	线源强度	
$[A]^o$	对角线矩阵		$[C]$	矩阵	
$[A]^{-1}$	矩阵 $[A]$ 的逆矩阵		$\{C\}$	浓度列阵	
$[A]^T$	转置矩阵		c_i	系数	
$[A]^*$	同阶新方阵		c_j	系数	
$[A]\lambda$	矩阵数乘		c_m	系数	
$ A $	行列式		c_n	系数	
$\{A\}$	列阵(列向量)		c_1	1. 小圆	
a	1. 导压系数	$L^2 T^{-1}$		2. 积分系数	
	2. 系数		c_2	积分系数	
a_i	1. 弥散度	$L^2 T^{-1}$	D	1. 弥散系数	$L^2 T^{-1}$
	2. 系数			2. 系数	
a_{ij}	矩阵元素		$DIG(N+1)$	辅助数组	
a_j	系数		d_i	系数	
a_m	系数		d_j	系数	
a_n	系数		d_m	系数	
B	1. 宽度	L	d_n	系数	
	2. 含水层宽度	L	E	1. 补给因子	
	3. 面积	L^2		2. 地下水蒸发量	L
	4. 系数			3. 系数	
$[B]$	矩阵		E'	$E' = k_0 / k M h_0$	L^2
b	1. 截距		E_i	系数	
	2. 松弛因子		E_p	函数	
	3. 系数		E_s	含水层的弹性模量	$ML^{-1} T^{-2}$
b'	1. 系数				
	2. 任一基准面算起的标高	L	E_w	地下水的弹性模量	$ML^{-1} T^{-2}$
b_i	系数		E_0	水面的蒸发量	L
b_j	系数		e	1. 自然对数的底	
b_m	系数			2. 有限单元的任意单元	
b_n	系数		(e)	有限单元法中的任意单元及编号	
b_o	座标原点任一基准面算起的标高	L	$(e)^{xy}$	偏心因子	
b_1	抽水井至河边的距离	L	F	函数、系数	
b_2	抽水井至对岸河边的距离	L	F_c	与时间无关的降水入渗补给率常数	
C	1. 浓度	ML^{-3}			

续表

符 号	说 明	量 纲	符 号	说 明	量 纲
$F(t)$	原函数		h_p	p 点铅直方向的水位	L
F_0	弥散速度	LT^{-1}	h_s	边界外侧常水位	L
$\{F\}$	流量列阵		h_w	井水位	L
$\{F_c\}$	溶质通量列阵		h_o	1. 初始水位(水头)	L
$\{F_h\}$	溶质通量水位列阵			2. 潜水层厚度	L
f	1. 函数			3. 潜水停止蒸发的水位	L
	2. 势差	L	h_1	截槽上游(右侧)水位	L
f_c	降水入渗率	LT^{-1}	h_2	截槽下游(左侧)水位	L
f_e	入渗补给量	LT^{-1}	I	1. 水力梯度	
f'_e	蒸发量	L		2. 浓度梯度	
f_n	地下水径流补给强度	LT^{-1}	$I = \sin\eta / \cos^2\eta$	补给因子的要素	
f_p	f 的 p 阶叠核		η 为含水层倾角		
$f(s)$	映象		$[I]$	n 阶单位矩阵	
f_v	下渗(垂向)补给强度	LT^{-1}	I_x	梯度在 x 方向上的分量	
G	格林函数		I_y	梯度在 y 方向上的分量	
$G(MR)$	压缩储存的一维数组		$I_0(x)$	一类零阶虚宗量贝塞尔函数	
g	重力加速度	LT^{-2}	$I_1(x)$	一类一阶虚宗量贝塞尔函数	
H	1. 水位	L	i	1. 水力坡度	
	2. 高度	L		2. 节点	
	3. 潜水停止蒸发的水位	L		3. 足标	
$\{H\}$	水位列阵		$J_0(x)$	一类零阶贝塞尔函数	
$H(t-t_0)$	单位函数		$J'_0(\sigma r)$	一类零阶贝塞尔函数对变量 r 的一阶微商	
h	1. 水位	L	$J_1(x)$	一类一阶贝塞尔函数	
	2. 水头、水头高度	L	j	1. 节点	
	3. 水深	L		2. 任一截槽	
	4. 动水位	L		3. 足标	
$h = p/\gamma g$	压力水头	L^2T^{-2}	K	分子扩散系数	L^2T^{-1}
$\bar{h}$	平均水位	L	$K(x, x')$	弗列德何蒙型积分方程的核	
$\{h\}$	水位列阵		$K_0(x)$	二类零阶虚宗量贝塞尔函数	
h_B	边界外常水位	L	$K_1(x)$	二类一阶虚宗量贝塞尔函数	
h_b	地表水位升高值	L	k	含水层渗透系数	LT^{-1}
h_e	天然水位	L	k_0	弱透水层(粘性土层)渗透系数	LT^{-1}
$h^{(e)}$	e 单元水位	L	k'	隔水层或弱透水层渗透系数	LT^{-1}
$\bar{h}^{(e)}$	e 单元平均水位	L	$k^{(e)}$	e 单元渗透系数	LT^{-1}
h_i	i 节点水位	L	L	1. 长度	L
$h_{i,0}$	i 节点上一时段末的水位	L		2. 含水层长度	L
h_j	1. j 节点水位	L	L_1	截槽下游(右侧)长度	L
	2. 任意截槽水位	L	L_2	截槽下游(左侧)长度	L
$h_{j,0}$	j 节点上一时段末的水位	L	$[L]$	上三角形矩阵	
h_L	截槽下游(右侧)水位	L	$[L]^{-1}$	$[L]$ 的转置矩阵	
h_m	1. m 节点水位	L	$[L_0]$	对角线矩阵	
	2. 截槽水位	L	$[L_1]$	下三角形矩阵	
	3. 截槽开采水位	L	l	1. 长度	L
h_{max}	最高水位	L		2. 迭代次数	
h_{min}	最低水位	L	$l^{(e)}$	e 单元的长度	L
$h_{m,0}$	m 节点上一时段末的水位	L			

续表

符 号	说 明	量 纲	符 号	说 明	量 纲
l_i	i 截槽段长	L	Q_c	抽水量	L^3T^{-1}
l_j	j 截槽段长	L	Q_d	动储量	L^3T^{-1}
l_m	m 截槽段长	L	Q_f	非稳定开采流量	L^3T^{-1}
l_1	截槽下游(右侧)段长	L	Q_i	任意井的抽水流量	L^3T^{-1}
l_2	截槽上游(左侧)段长	L	Q_j	1. 截槽的开采流量	L^3T^{-1}
M	含水层厚度	L		2. 天然径流量	L^3T^{-1}
m	1. 隔水层或弱透水层厚度	L	Q_k	开采量	L^3T^{-1}
	2. 节点代号		Q_{max}	1. 最大流量	L^3T^{-1}
	3. 任意自然数(正整数)、数目			2. 最大动储量	L^3T^{-1}
	4. 足标		Q_{min}	3. 总流量	L^3T^{-1}
m_0	弱透水层(粘性土层)厚度	L		1. 最小流量	L^3T^{-1}
N	1. 开始补给的第若干年	T		2. 最小动储量	L^3T^{-1}
	2. 任意自然数(正整数)、数目		$Q'_n = Q / 2\pi k_n M_n p$		
$[N]$	释(贮)水矩阵		$u = 1, 2, 3$		
$[N_c]$	释(贮)盐矩阵		Q_p	排泄量	L^3T^{-1}
$[N_h]$	水位方程中的释(贮)水矩阵		Q_r	1. 年径流量	L^3T^{-1}
n	1. 任意自然数(正整数)、数目			2. 断面 r 处的流量	L^3T^{-1}
	2. 与土壤性质有关的指数		Q_t	调节储量	L^3
	3. 夹角		Q_w	稳定开采流量	L^3T^{-1}
	4. 法向		Q_z	注水量	L^3T^{-1}
	5. 足标		q	1. 单宽流量	LT^{-1}
$n(e)$	e 单元释水性			2. 单位面积流量	L^2T^{-1}
O	座标原点		q_b	3. 单位出水量(涌水量)	L^2T^{-1}
$O(Er_2)$	变量 Er_2 的高阶无穷小量			4. 补给(或排泄)量	L^3T^{-1}
$[P]$	渗透矩阵		q_i	1. 常流量	L^3T^{-1}
$[P_c]$	弥散系数矩阵			2. 边界单元流量	L^3T^{-1}
$[P_h]$	渗透水位矩阵		q_l	1. i 节点流量	L^3T^{-1}
p	1. 变量			2. 任意点流量	L^3T^{-1}
	2. 点		q_i	i 节点上流量的分量	L^3T^{-1}
	3. 压力	MLT^{-2}	q_j	j 节点流量	L^3T^{-1}
	4. 压应力	$ML^{-1}T^{-2}$	q_m	m 节点流量	L^3T^{-1}
	5. 阶		q_s	流入量	L^3T^{-1}
	6. 级数的序数		q_x	流出量	L^3T^{-1}
	7. 拉普拉斯算子		q_0	1. 单位流量	L^2T^{-1}
	8. 年数	T		2. 单宽流量	LT^{-1}
p^*	e 单元渗透矩阵			3. 入渗率	LT^{-1}
Q	1. 流量	L^3T^{-1}	q_1	4. 因两端基准面高度不同而产生的稳定流量	L^3T^{-1}
	2. 出水量(涌水量、抽水量)	L^3T^{-1}	q_2	截槽下游(右侧)开采流量	L^3T^{-1}
	3. 开采量(开采流量)	L^3T^{-1}	R	截槽上游(左侧)开采流量	L^3T^{-1}
	4. 动储量	L^3T^{-1}	R_r	影响半径(漏斗半径)	L
	5. 径流量	L^3T^{-1}	R_y	补给半径	L
Q_b	补给量	L^3T^{-1}	R'_y	引用补给半径	L
			r	单一补给源的引用补给半径	L
				1. 半径	L

续表

符 号	说 明	量 纲	符 号	说 明	量 纲
r_3	2. 径向距离	L	V	1. 体积	L^3
r_w	三维流区半径	L		2. 储存量	L^3
S	井孔半径	L	V_c	储存量	L^3
S'	弹性释(贮)水系数、释水系数		$V_{d,i}$	多槽非稳定开采量总数	L^3
s	单位体积的弹性释水系数	L^{-1}	V_h	非稳定部分的开采量	L^3T^{-1}
s_B	水位降深	L	V_t	1. 弹性储存量	L^3
$\overline{s}$	潜水层底的降深	L		2. 调节储量	L^3T^{-1}
s_c	平均水位降深	L	V_w	稳定部分的开采量	L^3T^{-1}
s_i	潜水面的降深	L	v	1. 流(渗)速	LT^{-1}
s_l	1. 任意井孔的降深	L		2. 函数	
s_m	2. 中间截槽的降深	L	v_x, v_y, v_z	分别为在 x 、 y 、 z 方向上的	
s_{max}	潜水位至极限蒸发深度之	L		流速分量	LT^{-1}
	间的厚度		v_0	天然真流速	LT^{-1}
s_{min}	1. 最大水位降深	L	W	1. 储量	L^3
s_{m-1}	2. 稳定水位降深	L		2. 周期开采量	L^3T^{-1}
s_w	最小水位降深	L	W_b	3. 函数	
s_1	最末截槽降深	L	W_c	补给量	L^3T^{-1}
	井(孔内)水面降深	L	W_i	储水量	L^3
	1. 非河流补给引起的水位	L	W_j	i 结点的入渗(或蒸发)量	L
	降深		W_k	j 结点的入渗(或蒸发)量	L
	2. 第 1 截槽水位降深	L	W_m	总开采量	L^3T^{-1}
	3. 稳定水位降深	L	W_p	m 结点的入渗(或蒸发)量	L
s_2	1. 河流补给时的水位降深	L	W_t	排泄量	L^3T^{-1}
	2. 非稳定水位降深	L	w	调节储量	L^3
T	1. 周期	T	X	负降深值	L
	2. 补给排泄周期	T		面源水位降深场	
	3. 一个水文气象周期	T	x	1. 方向	
t	1. 时间	T		2. 座标	
	2. 发生入渗(潜水位升高)	T		3. 位置	
	的天数			4. 距离	L
t'	1. 任意年补给开始后的第	T	$\overline{x}$	地下水分水岭位置	
	若干天		$[Y]$	中间变量矩阵	
	2. 特定时间	T	$Y_0(x)$	第二类零阶贝塞尔函数	
t''	任意年非补给期开始后的	T	$Y_1(x)$	第二类一阶贝塞尔函数	
	第若干天		y	1. 方向	
t_1	雨季降雨持续的时间	T		2. 座标	
U	1. 水质点的真流速	LT^{-1}		3. 积分变量	
	2. 积分函数		z	1. 方向	
	3. Hankel 变换的映象			2. 座标	
$\{U_c\}$	对流列阵			3. 深度	L
U	1. 积分函数		z_B	承压水层顶板的纵座标	L
	2. 常微分方程的通解		z_c	潜水面纵座标	L
	3. 入渗量	L^3T^{-1}	α	1. 降水入渗系数	L
	4. 流速	LT^{-1}		2. 势平面倾角与单元倾向的	
U_0	非齐次常微分方程的解			夹角	
U_1	齐次常微分方程的解			3. 系数	

续表

符 号	说 明	量 纲	符 号	说 明	量 纲
α_m	1. 本征值			2. 含水层的孔隙率	
	2. 系数			3. 精度误差	
α_n	系数		ε'	抽水后的蒸发率	
β	1. 系数、比例常数		ε_0	潜水面蒸发率	
	2. 下渗(垂向)补给因子		η	倾角	
	3. 单元势平面的走向		θ	1. 角度	
	4. 斜率			2. 极座标	
β'	倾斜单元走向		θ'	真倾角、夹角	
β_m	1. 系数		κ	分子扩散系数	$L^2 T^{-1}$
	2. 变量		λ	参数、系数	
Γ	1. 渗流区边界		λ'	复变函数积分的积分变量	
	2. 弗列德何蒙积分方程的解核		λ''	复变函数积分的积分变量	
γ	1. 径流(侧向)补给因子	L^{-1}	μ	1. 含水层的给水度	
	2. 渗漏系数	L^{-1}		2. 动力粘滞系数	
	3. 越流系数	L^{-1}	$\mu^{(e)}$	单元给水度	
	4. 阻渗系数	L^{-1}	μ_0	弱透水层的给水度	
γ_w	水的密度	$ML^{-2}T^{-2}$	ξ	变量	
Δ	1. 地下水位埋深	L	ξ_1, ξ_2, ξ_3	σ 的三个根	
	2. 增(减)量、差值		π	圆周率	
	3. 函数		ρ	1. 水的密度	$ML^{-2}T^{-2}$
	地下水停止蒸发的深度	L		2. 变量	
Δh	水位恢复值	L	$\rho = (2H - \bar{h})/H^2 h$	背景水位	L
ΔM	弹性折算厚度	L	$\rho = 1/\bar{H}^2$	漏斗初始水位的平方倒数	L^{-2}
Δs_c	承压水位与潜水位差值	L	σ	Hankel算子	
ΔV	储存量的增量	L^3	τ	时间间隔	T
Δy	井间距	L	Φ	无界含水层单位瞬时面源降深场	
$\Delta \varepsilon$	蒸发率的减少量	L	φ	1. 势	
δ	1. 增量			2. 势函	
	2. 函数			3. 函数	
δt	时间间隔	T		单井抽水时由河流补给造成的水位升值	L
δV	储存量的增量	L^3	Ω		
ε	1. 蒸发率				

前言

建国30多年来,水文地质勘察和地下水的开发利用,在为城市和工矿供水,以及农业灌溉等方面,虽已作出了很大贡献,但实践表明,我们的地下水资源评价工作还不是很成功。以城市供水为例,在50年代初,地下水还未大量开发时,对地下水资源的评价大多偏小。在60年代,随着地下水开采的增长,资源评价的数量也不断调整、增长,成为70年代过量开采的原因之一,从而促成许多地方的地下水位大面积持续下降、水质变坏、地面沉降、咸(海)水入侵等不良后果。也加剧了一些城市、工矿的供水紧张,和发展了城乡争水的矛盾。

地下水资源的估算,的确比其它矿产资源困难得多。原因之一就是地下水不是静止的,而是运动的。不弄清各种具体条件下地下水运动的规律,就无法准确估算其量与质。因此,当前资源估算不准的问题,当然和其理论基础的地下水动力学的发展水平有关。而地下水动力学的发展方向不能不说又与研究地下水运动的观点分不开。

自从系统理论或系统工程在自然科学和社会科学各个领域得到广泛应用,并取得极大成功以来,也引起了水文地质工作者们的兴趣和重视。系统原来就是反映客观事物存在形式的一个古老的哲学范畴。所谓系统即指许多要素按一定规则和分工构成的一个整体。这个整体有其自身的目的。它不仅作为状态而存在,并且具有时间性的程序。于是,我们也可把地下水看作一个系统。它是由水、含水层(如砂、砾、卵石层,裂隙岩层,溶洞岩层等)、不透水层构成的一个整体。这个整体有输入(即补给,如大气降水、地表水的入渗等)和输出(即地下水的溢出、蒸发、排泄、开采)。在输入和输出的作用下,地下水的水位及梯度发生变化而使地下水产生运动。在运动过程中,水和岩石相互发生物理、化学作用和热量的转移,改变了水的温度和水中溶质的化学成分,使其水位、水质和水温按一定规律分布与变化,构成它的状态。

人类为了实现自己的目的,如凿井提水,用于生活、生产;又如冬季将冷水灌入含水层中储藏,夏季抽出用来防暑降温;或为保证水质防止污染、对地下水中溶质运移作出预测。这些都要求系统输出一定的功能。对于系统输出功能的最佳化的评价与选择,到实现系统的最佳运行,都必须对系统实行概化,建立数学模型,进行模拟,亦即必须对地下水系统有一个全面的、定量的认识。这一任务主要应由当代地下水动力学担当起来。要发挥地下水的最大效益,没有系统工程是不可能的,但没有一门能完善反映其运动规律的地下水动力学也是困难的。引一个譬喻来说,两者的关系就象瓦匠(系统工程)和砖(地下水动力学)。即使有了高超手艺的瓦工,但只有质量很次的砖瓦,当然也盖不成高质量的房屋。

为了把古典的地下水动力学发展成为适合于当代需要的地下水动力学,也离不开系统的观点。直到70年代,地下水动力学的研究对象还多偏于单井抽水的降深分布。这个问题当然很重要,也很需要。但由于在研究时只考虑输出,而未考虑输入,所以只能得到非稳定态的解。然而,在实际工作中,除要求了解抽水从非稳定到稳定的全过程外,还常常要想知道抽水量和补给量的关系。而这些问题却很难从现有的“地下水动力学”书本中得到解答。

以往,因缺乏整体的系统观点的指导而给资源评价带来的问题就更多了。例如过去凡遇到粗颗粒的巨厚含水层就认为找到了富水带,并仅仅以单井单位出水量 q 的大小作为区别地层“富水性”的标准。若按系统的观点看,所谓的“富水性”实际上只是反映了地下水系统结构的导水性而已。一个地下水系统之是否富水,不仅决定于系统结构的导水性(渗透系数),更重要的是它的输入,即系统的补给强度和补给量。所以,还常常发生这样的情况:在水文地质图上圈定的富水带,当开采量并不太大时,就出现持续的不稳定下降。又例如,过去作资源“评价”时,常常不分情况,不加区别地把地下水径流量当作地下水的补给量。按照系统的观点来看,只在没有人为活动参与的天然状态下,系统内部的径流才反映了输入、输出的存在,而其径流量在一定的条件下才可以代表补给量。但是,在一个补给量已被人为开采所耗尽而形成区域持续下降的水文地质单元的局部,由于开采必定造成水力坡度。所以,也可按照达西定律算得一定的径流量。可是,这种径流量却是由系统内部的储存量转化来的,根本不能代表系统的补给量。把这种径流也当作补给量,在过去的勘察报告中屡见不鲜。又例如在很多水文地质勘察报告书中还可看到另一种资源“评价”方法,即根据抽水试验确定单井出水量及其影响半径,以该影响半径为间距,在整个含水层均匀布井,以井数乘以单井出水量得总开采量。按系统的观点来看,这样算得的开采量实际上只代表系统的输出。因为这种评价方法没有考虑系统的输入,能否保持系统状态的稳定和保证这一开采方案的实施,令人怀疑。再如有的评价方法虽然也考虑到系统的输入,如入渗补给量,但是其常用的方法是以年降水量的平均入渗系数乘以含水层面积得出的。然而在实际勘察工作中,入渗系数常因缺乏条件不能通过实验测定,而是经验估定,故带有很大的伸缩性。如果拿系统观点来处理,则必须用输入、输出和系统的状态三者之间的平衡来检验输入量的估算是否准确。由此看来,这样一个观点必须明确,即没有经过检验的补给量是不可信的和不可靠的。

传统观点由于缺乏整体性而给资源评价的概念和估算方法带来缺陷,并造成了实际工作上的差误和损失也是不少的。例如,山东济南因大量开采地下水而把四大名泉基本耗干,如果不采取限制开采的措施,将使闻名于世的泉城的泉成为历史的遗迹。山西晋祠因在其南面清徐县“发现”了水质好水头高的自流盆地,并进行大量开采而使晋祠名泉几乎断流。自60年代以来,围绕山西几大名泉(如娘子关泉、龙子祠泉、广胜泉等)的扩泉(用管井)问题引起了热烈的争论,也花了很多资金,最后也没有解决这一争论。在70年代以来,随着城乡工农业争水的矛盾也日益突出,提出了所谓农业开采浅层水,工业开采深层水的政策。实践表明,不仅浅层水,而且深层水更易出现大面积、大幅度、持续性、不稳定下降。

如将上述资源估算中存在的问题归纳起来,大概有如下的四个方面,即以 q 论富(以单井单位出水量论定富水带)、以虚代实(以虚估的补给系数代替实际的补给量)、以径代补(以地下水径流量代替补给量)、以采定补(撇开补给,仅以“计算”的抽水量确定开采量)。由于这四种做法的随意性和主观性,往往会因迎合需要而作出偏大的地下水资源量的结论,给人以地下水十分丰富的假象。

70年代以来,引入数值法和电子计算机用于地下水的计算,逐步提高了地下水资源评价的精度。而数值法比原有的解析法具有更明显的优点,可以根据实际的水文地质条件在计算区域内,规划含水层的几何形状、变化其透水性和持水性、安排补给与排泄条件,具

有更灵活得多的适应性。从而有人认为, 地下水资源评价问题已可迎刃而解。但是, 从近些年来将数值法用于解决具体的地下水资源评价的实际效果来看, 似乎并非完全理想。究其原因也并不是对数值法的掌握有什么差错, 而是在于模型的概化上。例如对同一含水层用数值法, 由不同的人计算, 可得出两种截然不同的结论: 一个是水位可以稳定, 另一个是不稳定的。其原因无非是根据零星的钻孔水位观测和抽水试验资料作出不同的补、排关系的判断。所以模型的概化是与水文地质条件的全面认识和合理抽象有关的。而后者若离开了地下水动力学理论的指导是不容易做到的。所以笔者深感数值法是一个很好的方法, 但仅仅是一种方法而已。如若缺乏正确理论的指导, 则它的作用就会受到很大的限制。与此相反, 每一个具体的解析解虽然它的边界条件不一定与实际情况完全一致, 但它终究反映了给定条件下的地下水运动的规律, 故已上升到理论的范畴。当然, 我们也可利用数值法去揭示更复杂条件下的地下水运动规律。但是, 这已属于方法的结果, 而不是方法本身的问题了。

基于这一认识, 本书仍以较多的篇幅, 结合具体的、典型化的数学模型, 一个一个地求得它们的解析解, 并详尽地加以分析, 附有实例论证, 从中引出结论。但为解决具体计算问题的需要, 最后还提出了一种易于被水文地质工作者理解和掌握的数值计算方法——代数有限单元法。

这里须指出的是, 本书只是运用系统理论的观点来研究地下水的运动规律及其资源的估算方法, 而不涉及系统工程自身。所以, 有些术语当然仍用水文地质的。但是, 为了避免与传统观点的混淆, 所以对一些常用的水文地质术语给予重新定义。例如, 对于地下水补给(量), 本书规定, 只有从系统外部的输入才称之为补给(量)。同样, 只有输出系统以外才称之为排泄(量)。借以与“相邻含水层的补给”和“向相邻含水层排泄”的说法区别开来。如上所述, 这种说法容易把储存量当作补给量; 因为含水层既是相邻又是相通的, 所以必属同一地下水系统。一个系统内部的径流是由系统的状态所决定的, 而系统的状态又取决于系统的输入和输出。因此, 本书在研究地下水资源时, 是以补给、径流、排泄自成独立体系的含水层、弱透水层和隔水层的组合为对象, 并将这个组合定名为水文地质单元。而构成一个完整的、独立的水文地质单元的“水文地质条件”指的是: 含水层的结构、埋藏、分布、参数, 和地下水的水位、水量、水温、水质、水力性质(无压、承压)、补给(类型、强度、补给量、补给面的位置)、径流(径流量、储存量)、排泄(排泄的形式、排泄量、排泄面的位置), 以及边界条件(透水的、不透水的、混合的)等等。只有在查清包括上述全部内容的水文地质条件的基础上, 才能建立符合实际的数学模型。也只有这样, 方能比较准确而又可靠地计算出地下水资源的量和预测它的质的变化。这就是本书的基本出发点。

写作本书时曾怀有一个设想, 试图通过理论的和实践的各种途径, 把地下水是在补给、排泄作用下的一种可再生的自然资源这一本质问题解释清楚, 并想证明只有坚持整体的和系统的观点才能了解和掌握其再生的规律; 而只有当我们真正懂得地下水的再生规律, 才能摆脱短期的、局部的观点, 转而制定长期的、全局的政策, 采取科学管理和保护措施, 以保证城市和农村大家都有水可用。但限于作者的水平与经验, 要达到这一目的当然十分困难。所以, 书中定有不少错误和不妥之处, 敬请读者批评指正。此外, 作者在从事实际的水文地质勘察时也曾遇到一些地下水利用上的不合理的现象和问题, 但由于勘察

工作者只有建议权，而不能参与决策，眼看对建设带来损失，无力纠正，而深感遗憾！只好借写作本书的机会把一些已成为历史的问题作为实例和教训提出，以供有关方面参考。

本书的主要理论部分是作者于1973~1983年的十年间科研成果的综合。这些成果曾在两次科研成果鉴定与评议会上得到国内有关科研、高校、生产单位的不少专家学者审查与评议，他们提出了中肯和宝贵的意见，著者在整理本书稿时认真地考虑了这些意见，在此对这些专家学者表示衷心的感谢；他们是常士骠、梁汝超、黄少虎、蒋洪源、郑百坚、刘光尧、朱益春、石振华、李传尧、李文渊、李浩良、郭志业、姜世敏、王兆馨、胡安邦、范鹏飞、宋春青、周长瑚、黄明敏、刘振雁、周柔嘉、贾桂庭、王秉忱、伍兆聪、朱学愚、杨天行、周士鉴、林秋华、许涓铭、段光贤。

在研究过程中著者遇到数学上的困难常受到北京建筑工程学院郑百坚先生的指导；书中大部分的计算工作是由王志敏协助，上电子计算机完成的，其中比较困难和繁冗的如河流补给和潜水井两个数学模型的计算是由张子文、如代数有限元的二维、三维计算是由陈国志、如双层介质模型是由吴勇强分别完成的；书中又引用了一些单位和个人的实际资料，并蒙山西省地质局姜永和提供太原市地下水长期观测资料及冶金工业部517队提供滦河冲积扇的抽水试验资料；书中的数学推导承蒙伍兆聪审校；全书文稿承蒙颜明志缮校并编制全书索引、符号及量纲；谨在此向他们表示深切的谢意！

著 者

1984.7.1.于北京