



新世纪高等学校教材

环境科学与工程系列教材

ADVANCED
HYDROLOGY

现代水文学

主 编 徐宗学
编 著 彭定志 庞 博
占车生 杨 赤



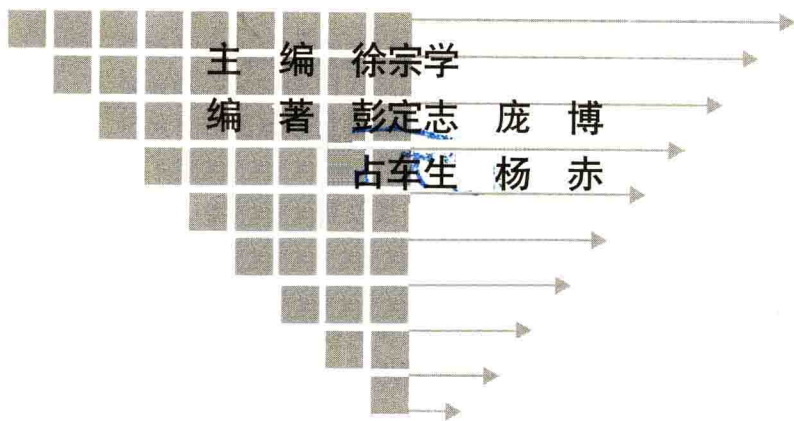
北京师范大学出版集团
BEIJING NORMAL UNIVERSITY PUBLISHING GROUP
北京师范大学出版社

新世纪高等学校教材

环境科学与工程系列教材

现代水文学

ADVANCED HYDROLOGY



主 编 徐宗学

编 著 彭定志 庞 博

占车生 杨 赤



北京师范大学出版集团
BEIJING NORMAL UNIVERSITY PUBLISHING GROUP
北京师范大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

现代水文学 / 徐宗学主编. —北京: 北京师范大学出版社, 2013.7

(新世纪高等学校教材·环境科学与工程系列教材)

ISBN 978-7-303-15892-8

I. ①现… II. ①徐… III. ①水文学-高等学校-教材
IV. ①P33

中国版本图书馆CIP数据核字 (2013) 第 011591 号

营销中心电话 010-58802181 58805532
北师大出版社高等教育分社网 <http://gaojiao.bnup.com>
电子信箱 gaojiao@bnupg.com

XIANDAI SHUIWENXUE

出版发行: 北京师范大学出版社 www.bnup.com

北京新街口外大街19号

邮政编码: 100875

印刷: 北京中印联印务有限公司

经销: 全国新华书店

开本: 170 mm × 230 mm

印张: 23.5

字数: 422 千字

版次: 2013 年 7 月第 1 版

印次: 2013 年 7 月第 1 次印刷

定价: 36.00 元

策划编辑: 胡廷兰

责任编辑: 胡廷兰

美术编辑: 毛佳

装帧设计: 毛佳

责任校对: 李菡

责任印制: 孙文凯

版权所有 侵权必究

反盗版、侵权举报电话: 010-58800697

北京读者服务部电话: 010-58808104

外埠邮购电话: 010-58808083

本书如有印装质量问题, 请与印制管理部联系调换。

印制管理部电话: 010-58800825

前 言

水文科学是一门既年轻又古老的科学。称其为年轻，是因为最近几十年来，随着各国经济社会的快速发展，水问题日益突出，洪涝灾害频发，水资源短缺加剧，水污染日趋严重，生态不断退化，水问题受到了世界各国的广泛关注，水文科学作为解决上述水问题的基础科学，也受到了空前的关注，得到了前所未有的快速发展和壮大。水文学研究取得了许多新的成果，极大地丰富和发展了水文科学的内容，扩大了水文科学的内涵。称其为古老，是因为水文科学事实上已有数千年的历史，公元前 3000 多年前，古埃及开始在尼罗河观测水位，开启了水文测验的历史，而公元前 1400 年前后出现在殷墟甲骨文中关于降雨和洪水的记载、公元前 251 年李冰在都江堰用石人水尺观测水位以及公元前 88 年前后王充提出关于水文循环成因的科学解释，则标志着我国古代人民对水文科学发展的早期贡献。

19 世纪，随着牛顿力学的诞生和快速发展，以数学和力学为中心的古典科学得到了快速发展，这一时期水文学也得到了迅速发展，到 1850 年前后逐渐形成了自己的一套方法，19 世纪也是水文科学发展的奠基阶段。20 世纪以后，随着工业化进程，世界各国生产力快速发展，水利工程建设日益受到重视，社会发展的客观需要为工程水文学的快速发展奠定了基础。在此期间，国际上提出了很多水文科学的基本理论和方法，这些理论和方法不仅为许多水利工程的设计和建设提供了理论依据，也奠定了工程水文学的基本内容。现代工程水文学的很多内容都是这一时期

的产物，例如频率分析方法、产汇流计算理论与方法等，而且时至今日还在水利工程实践中普遍采用。20世纪后半叶，随着世界各国经济的快速发展，尤其是计算机的发明和应用，在全世界范围内引发了以计算机技术为核心的信息革命，水文科学也得到了前所未有的迅猛发展，涌现出了各种新理论、新方法。例如，以计算机技术为标志的水文模型得到了极为广泛的研究，以遥感技术为依托的遥感水文学得到了异常快速的发展。此外，以研究水资源短缺问题为核心的水资源水文学，以研究水环境为核心的环境水文学，以研究生态和水文过程相互关系为主线的生态水文学不断成长壮大，逐渐成为水文科学的热点研究领域和重要分支科学。近年来，随着全球气候变化日益受到重视，以研究气候变化对水循环的影响为主要内容的全球变化水文学正在成为国际水文学界新的热点研究领域，极大地丰富了传统水文科学的内容，扩展了水文科学的内涵。

水文科学既是地学领域的一门基础科学，也是一门为水利工程服务的应用科学。作为地学领域的基础科学，水文科学主要研究地球系统中水的存在、分布、运动、循环变化规律，水的物理、化学性质，以及水圈与大气圈、岩石圈和生物圈的相互关系。作为水利工程领域的应用科学，水文科学则重点研究水资源开发利用和保护，水旱灾害的形成、预测预报、防治，以及水利、土木、道路、桥涵、电力工程等的规划、设计、施工与管理中的水文水利计算技术，为防洪抗旱、合理开发和利用水资源提供科学依据。因此，水文科学的研究领域十分宽广，内容十分丰富，尽管目前研究分子水平的水循环物理过程在水文学中尚不多见，但从大气到海洋，从陆地表面到地下，都属于水文科学的研究范畴，都有很多水文工作者在开展各种各样的研究；此外，水圈同大气圈、岩石圈和生物圈等地球自然圈层的相互关系，也是水文科学的研究领域。水文学不仅研究水量，而且研究水质；不仅研究现时水情的瞬息变化，而且探求地球上水的生命史，预测其未来的演变趋势。

也正是由于上述原因，水文科学成为一门几乎无处不在的科学。例如，在水利院校，很多专业都要学习水文学；传统的地理专业的学生要学习水文学原理；在农业大学，农业水文学是一门很重要的专业基础课；在林业大学，森林水文学也是一门很重要的专业课；土木类专业，道路、桥梁、工民建等专业的学生要学习工程水文学；对环境科学与工程、资源科学、生态科学、土地管理等很多专业而言，水文学也是必不可少的专业基础课。

面对如此浩瀚的研究对象和如此丰富的研究内容，遴选和吸收合适的内容绝不是一件轻而易举的事情。另外，何谓现代水文学？它既无普遍认可的概

念，也没有相对固定的内容。鉴于以上现状，作者基于北京师范大学高年级本科生和研究生的教学特点与要求，结合目前相关院校开展科学研究工作的具体内容和实际需求，重点选择水文模型、水文预报、水文统计、气象水文学、遥感水文学、生态水文学等相关内容。本书第1章、第2章事实上属于水文学原理的部分内容。而后面几章内容几乎每一章都对应着一门专业课，水文学及水资源以及相关专业的研究生学习完本课程以后根据需要可以继续选修水文模型、水文统计、水文预报、遥感水文学等专业课。毋庸置疑，本教材的编写，既要考虑到研究生的水平，又要照顾到不同专业的需求，从浩瀚的水文科学海洋里面挑出几滴满足多数人愿望的水滴，有着无法想象的困难，还是一件十分棘手的事情，书中纰漏和问题在所难免。本书第4章、第7章由彭定志副教授编写，第5章由杨赤副教授编写，第6章由占车生副研究员编写，第8章、第9章由庞博副教授编写，第11章由占车生副研究员、庞博副教授共同编写，其余各章以及前言等有关内容由徐宗学教授编写，并由徐宗学教授最后统稿。在本书编写过程中，作者所指导的博士、硕士研究生刘浏、徐华山、刘星才、左德鹏、朱玉龙、甄婷婷、王洁、刘博、赵洁、李林涛、杜洋、蒋欣昊、武玮、唐芳芳等先后帮助搜集素材、整理文稿和校对等，借此机会对大家的辛勤劳动表示衷心的感谢。

2007年，为了进一步促进和加强研究生教学工作，北京师范大学研究生院开展硕士研究生学位基础课程建设项目，根据学校的要求并结合水科学研究院的特点，徐宗学教授同杨赤副教授、彭定志副教授、占车生副研究员和庞博副教授组成以教授为中心、青年教师为骨干的教学团队，共同向研究生院提交申报了《现代水文学》硕士研究生学位基础课程建设项目申请报告，在学校组织相关专家函审和会评的基础上，《现代水文学》被学校正式批准为立项建设课程之一。项目立项以后，徐宗学教授组织教学团队成员反复讨论、充分论证，几次修改和完善教学大纲，结合已经顺利完成的几轮教学，对教材内容进行了多次修改和补充。2008年春季学期，第一次正式开设本课程，至今已前后进行了多轮教学工作，无论是从研究生的评教结果来看，还是2009年度学校组织的中期评估和2011年组织的结项验收，本课程都得到了很高的评价。在项目建设期间，配合教学工作，还建立和完善了网络教学平台，对于改进本课程的教学工作起到了积极作用。作为北京师范大学立项建设课程，本教材的编写得到了北京师范大学研究生院的资助和大力支持。同时，从本课程立项之初，北京师范大学出版集团胡廷兰女士就积极关注和关心本教材的编写工作，为本教材的顺利出版付诸了大量心血。在此，对北京师范大学研究生院有关领导、对

北京师范大学出版集团尤其是胡廷兰女士表示衷心的感谢。

作者 1979 年进入武汉水利电力学院学习，1988 年获得水文学及水资源专业博士学位后到清华大学任教，从事水文学研究与教学工作已将近 30 年。然而，从未感到社会对水文科学的需求像今天这样强烈和迫切，作为水文工作者，面对着频繁发生的洪涝灾害，日益严峻的水资源危机和日益混浊的河水、湖泊和水库，感到肩上的担子从未像今天这样沉重。健康的水循环和不断发展完善的水文科学已成为当今社会发展不可或缺的重要保障，成为支撑经济社会可持续发展的重要保障。对于广大水文工作者而言，既是机遇，更是挑战，我们只有不断进取、努力奋斗、勇于创新，才会不断促进水文科学的健康发展，无愧于社会和时代赋予我们的神圣使命。

最后需要再一次说明的是，由于编者水平所限，加之准备时间不足，书中疏漏和不足在所难免，敬请有关专家学者和广大读者批评指正，以利于本书今后不断修改和完善。

作 者
2012 年 12 月

目 录

第 1 章 绪 论 /1

1.1 水文学及其研究方法	1
1.1.1 水文学	1
1.1.2 水文学研究方法	5
1.2 水循环与水量平衡	6
1.2.1 水循环	6
1.2.2 水量平衡	11
1.3 水文学研究任务	15
1.4 水文学发展简史	17
1.4.1 水文学发展历程	17
1.4.2 我国水文学的发展	20
1.5 本章小结	23
参考文献	24

第 2 章 产汇流理论与计算方法 /26

2.1 河流与流域	26
2.1.1 河流	26
2.1.2 水系	28
2.1.3 流域	29
2.2 河川径流形成过程	30
2.2.1 流域蓄渗过程	30
2.2.2 坡面汇流过程	33

2.2.3	河网汇流过程	33
2.3	流域产流分析与计算	34
2.3.1	植物截留	34
2.3.2	填注量	35
2.3.3	下渗损耗及产流方式	35
2.3.4	蓄满产流与超渗产流	36
2.3.5	冰雪融水径流	38
2.4	流域汇流分析与计算	41
2.4.1	流域汇流的基本概念	41
2.4.2	单位线	42
2.4.3	综合单位线	45
2.5	河道洪水演算的水文学方法	47
2.5.1	马斯京根法	47
2.5.2	通用蓄量模型	50
2.6	本章小结	52
	参考文献	52

第3章 分布式水文模型 /54

3.1	水文模型概述	54
3.2	水文模型发展回顾与展望	55
3.2.1	水文模型发展回顾	55
3.2.2	水文模型发展展望	60
3.3	DEM与分布式水文模型	63
3.3.1	DEM简介	63
3.3.2	基于DEM的分布式水文模型	65
3.3.3	小结	70
3.4	代表性分布式水文模型	70
3.4.1	SWAT模型	70
3.4.2	VIC模型	75
3.4.3	SHE模型	79
3.5	分布式水文模型应用：以SWAT模型为例	86
3.5.1	SWAT模型应用	87

3.5.2 小结	101
3.6 本章小结	102
参考文献	104

第4章 现代水文信息采集与集成 /112

4.1 水文测验	112
4.1.1 水位观测	114
4.1.2 流量观测	115
4.1.3 雨量观测	116
4.1.4 河流泥沙测验	117
4.2 水文数据	118
4.2.1 水位流量关系曲线	118
4.2.2 流量资料	118
4.2.3 水文数据库	118
4.2.4 水文年鉴	119
4.3 水情自动遥测系统	120
4.3.1 遥测站	120
4.3.2 中继站	121
4.3.3 中心站	121
4.4 我国洪水调度决策支持系统实例	122
4.4.1 洪水预报子系统	122
4.4.2 洪水调度子系统	123
4.4.3 兴利调度子系统	123
4.4.4 数据库管理与信息服务子系统	123
4.5 本章小结	124
参考文献	124

第5章 定量降水预报 /126

5.1 前言	126
5.2 天气雷达定量降水预报	129
5.2.1 发展概况	129
5.2.2 反演原理与误差修正	131

5.2.3	雷达—雨量计联合估计降水	134
5.3	气象卫星定量降水预报	135
5.3.1	发展概况	135
5.3.2	星载观测仪器	139
5.3.3	气象卫星定量降水预报	141
5.4	数值模式定量降水预报	143
5.4.1	发展概况	143
5.4.2	数值预报系统的组成	146
5.4.3	中尺度数值预报模式简介	148
5.4.4	集合预报	151
5.5	本章小结	152
	参考文献	153

第6章 现代水文遥感技术 /154

6.1	遥感水文基础	154
6.1.1	遥感的物理原理和技术	154
6.1.2	遥感的环境物理学基础	155
6.1.3	遥感信息与地理信息集成	159
6.2	水文参量遥感提取与估算	161
6.2.1	植被参数	161
6.2.2	地表温度	161
6.2.3	土地利用	162
6.2.4	水体及水域	164
6.3	遥感水文建模	167
6.3.1	水文过程参量反演	167
6.3.2	遥感水文模型	181
6.3.3	遥感冰雪监测	185
6.3.4	未来高光谱在水文建模中的应用	191
6.4	遥感技术与水资源管理	194
6.5	遥感水文展望	198
6.6	本章小结	200
	参考文献	201

第 7 章 现代水文预报 /203

7.1	河段洪水预报	203
7.1.1	相应水位(流量)法	203
7.1.2	合成流量法	210
7.2	流域产汇流预报	212
7.2.1	蓄满产流	213
7.2.2	超渗产流	214
7.2.3	混合产流	214
7.2.4	流域汇流预报	214
7.3	降雨径流模型预报及参数率定	214
7.4	中长期水文预报方法	217
7.4.1	传统的中长期水文预报方法	218
7.4.2	中长期水文预报新方法	222
7.5	水文预报误差和精度评定方法	223
7.6	本章小结	224
	参考文献	225

第 8 章 现代洪水风险分析 /226

8.1	引言	226
8.2	洪水风险的相关概念	227
8.2.1	洪水与洪水灾害	227
8.2.2	洪水风险	228
8.2.3	洪水风险管理	230
8.3	洪水风险管理体系	232
8.3.1	洪水风险分析	232
8.3.2	洪水风险评价	234
8.3.3	洪水风险处理	235
8.4	洪水风险管理流程	236
8.5	洪水风险图	238
8.5.1	洪水风险图的定义	239
8.5.2	洪水风险图编制的一般步骤	240
8.5.3	洪水风险图编制方法	240

8.5.4	洪水风险图应用现状	241
8.6	洪水风险管理研究进展与前沿领域	242
8.6.1	洪水风险研究进展	242
8.6.2	洪水管理的前沿问题	244
8.7	本章小结	250
	参考文献	250

第9章 水文学中的非线性方法 /255

9.1	引言	255
9.2	水文非线性方法的发展历程	256
9.3	常用的水文非线性模型	258
9.3.1	水文线性模型	258
9.3.2	水文非线性模型	262
9.3.3	时变增益非线性扰动模型	264
9.4	水文非线性方法的研究进展	266
9.4.1	人工神经网络	267
9.4.2	遗传算法	269
9.5	本章小结	271
	参考文献	272

第10章 生态水文过程及其模拟 /278

10.1	概述	278
10.2	植物水分关系	280
10.2.1	植物细胞水分关系	281
10.2.2	植物水分关系	284
10.2.3	植物根系的吸水作用	286
10.2.4	制约植物水分吸收的因素	289
10.3	森林生态水文过程	290
10.3.1	森林水分循环	290
10.3.2	森林蒸散	291
10.3.3	森林截留	293
10.3.4	森林水文模型	295

10.4	湿地/陆地生态水文过程	297
10.4.1	湿地水分状况与植被	297
10.4.2	湿地植被对水分的影响	300
10.4.3	干旱区生态水文过程	301
10.4.4	干旱区生态水文过程模拟	304
10.5	河流/湖泊生态水文过程	307
10.5.1	植物对河道水流的影响	307
10.5.2	河道形态对水生植物的影响	312
10.5.3	水陆交错带的植被与水分	314
10.5.4	湖泊形态与水生植物群落	318
10.6	生态水文模型	319
10.6.1	生态水文过程	319
10.6.2	生态水文模型	320
10.6.3	生态水文模型开发中的若干问题	324
10.6.4	典型生态水文模型及其应用	326
10.7	本章小结	329
	参考文献	331

第 11 章 流域水文过程综合模拟与实践 /345

11.1	MIKE SHE 上机实践	345
11.1.1	MIKE SHE 简介	345
11.1.2	MIKE SHE 的用户界面	346
11.1.3	MIKE SHE 的实际操作	349
11.2	水文参数的定量遥感反演	353
11.2.1	常用遥感软件	353
11.2.2	遥感数据处理	355
11.2.3	定量遥感蒸散反演	357
11.3	本章小结	361
	参考文献	361

第1章 绪论

1.1 水文学及其研究方法

1.1.1 水文学

水文学作为地球科学的一门分支科学，主要研究地球系统中水的存在、分布、运动、循环变化规律，水的物理、化学性质，以及水圈与大气圈、岩石圈和生物圈的相互关系。同时，水文学也是水利工程一级学科下的五个二级学科之一。其研究内容除了水的形成、循环、时空分布特征、化学和物理性质以外，还包括水资源开发利用和保护，水旱灾害的形成、预测预报、防治，以及水利工程和其他有关土木、道路、桥涵、电力工程等的规划、设计、施工、管理中的水文水利计算技术，为防洪抗旱、合理开发和利用水资源，不断改善人类生存和发展条件提供科学依据。水文学的研究领域十分宽广，从大气到海洋，从陆地表面到地下，都属于水文科学的研究范畴；水圈同大气圈、岩石圈和生物圈等地球自然圈层的相互关系，也是水文学的研究领域；水文科学不仅研究水量，而且研究水质，不仅研究现时水情的瞬息变化，而且探求地球上水的生命史，预测其未来的演变趋势。水文科学不仅是水利工程及其分支学科如农田水利工程、水文学及水资源、水利工程建筑与施工、河口海岸工程等的基础，也是诸如地理科学、环境科学、资源科学、生态科学等学科的基础，是一门非常重要而且应用十分广泛的科学(徐宗学，李景玉，2010)。

美国联邦政府科技委员会于1962年将水文学定义为一门研究地球上水的存在、循环、分布，物理、化学性质，以及环境问题的科学。Wiesner于1970年在《水文气象学》一书中提出：水文循环之研究对象为水分在气态、液态和固态三种情况下之运动现象，如何由海洋、陆地和生物体中蒸发和蒸散到大气中，再经复杂之气象变化和降水过程回至地面，然后以各种不同方式进入几乎所有之合成物和有机体内。故“水文学”亦可解释为水文循环之科学。1987年《中国大百科全书》定义水文学是关于地球上水的起源、存在、分布、循环运动等变化规律和运用这些规律为人类服务的知识体系(《中国大百科全书》编辑委

员会, 1987)。1988年, 美国水文科学委员会将水文科学的研究范围定义为: ①陆地水循环中一切尺度的物理和化学的过程, 以及和水循环相互间有重要作用的生物学过程; ②地球系统所有方面的全球水平衡的时空分布特性。

按照我国目前的学科分类, 水文学属于地球科学的二级学科, 同时也属于水利工程一级学科下面的五个二级学科之一。虽然仅仅是一门二级学科, 但其分支科学十分庞大, 内容十分广泛, 按照不同分类标准有许多不同的分支学科。例如, 按研究方法不同分为地理水文学、系统水文学、随机水文学、遥感水文学、实验水文学、同位素水文学、数字水文学等; 按研究对象不同可以分为流域水文学、海洋水文学、河流水文学、沼泽水文学、湖泊水文学、河口水文学、冰川水文学、湿地水文学、干旱水文学、水文气象学、地下水水文学等; 按应用范围不同可以分为工程水文学、农业水文学、城市水文学、环境水文学、森林水文学、生态水文学等。可见, 水文学内容之广, 与国民经济关系之密切是一般其他二级学科所罕见的。

1.1.1.1 地球上各种水体的数量与分布

大气中的水汽, 地球表面上的江河、湖泊、沼泽、冰川、海洋和地下水等, 统称为水体。水文学研究各种水体的存在、循环和分布, 物理与化学特性, 以及水体对环境的影响和作用, 包括对生物特别是对人类的影响。地球上各种水体的数量和分布如表 1-1 所示。

表 1-1 水文循环各环节中的水量及其更新所需时间

环节	总量 /(10^3 km^3)	占总量 /%	占淡水 /%	年循环量 /(km^3)	更新所需时间
海洋	1 338 000	96.5		505 000	2 650 a
直至 2 000 m 深的地下水	23 400	1.7		16 700	1 400 a
其中淡水	10 530	0.76	30.1		
土壤水	16.5	0.001	0.05	16 500	1 a
冰川与永久积雪	24 064.1	1.74	68.7		
其中南极	21 600	1.56	61.7		
格陵兰	23 40	0.17	6.68	2 477	9 700 a
北极岛屿	83.5	0.006	0.24		
其他山区	40.6	0.003	0.12	25	1600 a

续表

环节	总量 /(10^3 km^3)	占总量 /%	占淡水 /%	年循环量 /(km^3)	更新所 需时间
地面冰(永冻)	300	0.022	0.86	30	10 000 a
湖泊	176.4	0.013		10 376	17 a
其中淡水湖	91	0.007	0.26		
咸水湖	85.4	0.006			
沼泽	11.47	0.000 8	0.03		5 a
河流	2.12	0.000 02	0.006	49 400	16 d
大气水	12.9	0.001	0.04	577 000	8 d
生物水	1.12	0.000 1	0.002 3		数小时
总水量	1 385 981.61	100			
总淡水量	35 029.21	2.53	100		

1.1.1.2 全球水量平衡

某一时刻储存于地球表面($5.1 \times 10^8 \text{ km}^2$)上的水量, 约为 $13.86 \times 10^8 \text{ km}^3$ ($1 \text{ km}^3 = 10 \times 10^8 \text{ m}^3$)。其中分布在海洋的水量约为 $13.38 \times 10^8 \text{ km}^3$, 占总水量的 96.5%, 分布在陆地上的水量约为 $0.48 \times 10^8 \text{ km}^3$, 占总水量的 3.5%。而陆地水中有 1.7% 存在于极地冰雪中, 1.7% 存在于地下水中, 仅有 0.1% 存在于地面和大气中。其中大气水量很小(仅 $12\,900 \text{ km}^3$), 但地球上的水分循环昼夜往复, 每年通过大气的水量是很大的, 年循环达 $600\,000 \text{ km}^3$ 。地球上的水量平衡如表 1-2 所示。

表 1-2 全球年水量平衡

水情	海洋	陆地
面积 (10^3 km^2)	361 000	149 000
降水 (km^3/a)	458 000	119 000
(mm/a)	1 270	800
蒸发 (km^3/a)	505 000	72 000
(mm/a)	1 400	485