

水文循环过程及 定量预报

陆桂华 吴志勇 何 海 ○ 著



科学出版社
www.sciencep.com

水文循环过程 及定量预报

陆桂华 吴志勇 何 海 著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书详细介绍了流域水文循环关键要素大气水、降水与蒸发的计算、预报、估算的技术与方法,并分别给出了大气水分析计算实例、定量降雨估算、预报技术与方法的应用实例、蒸发估算方法及其在干旱监测中的应用实例等;探讨了陆面过程模型和大尺度水文模型应用中的技术问题,根据中国的气候条件和下垫面条件,改进了陆面过程模型,探索了大尺度水文模型在中国应用的参数区域规律;将定量降雨预报与陆面水文过程相结合,开发了基于陆气耦合的定量降雨与实时洪水预报技术,并成功应用于淮河流域洪水预报实践中,其洪水预报精度和预见期均有提高,特别是预见期实现了实质性突破,在原有基础上增加了72小时以上。

本书可供水利工程、环境科学、地球科学等专业科研人员及研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

水文循环过程及定量预报/陆桂华,吴志勇,何海著. —北京:科学出版社,2010

ISBN 978-7-03-026608-8

I. ①水… II. ①陆…②吴…③何… III. ①水循环-过程②水循环-水文预报 IV. ①P339

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第017464号

责任编辑:赵 峰 朱海燕 刘希胜 / 责任校对:朱光光

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

北京天时彩色印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010年9月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2010年9月第一次印刷 印张:23 1/4

印数:1—2 000 字数:532 000

定价:98.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

水文循环是自然界最重要的物质循环之一，是连接大气圈、水圈、岩石圈和生物圈的纽带，是流域水资源和水旱灾害形成和演变最重要的驱动源。水文循环过程及其定量预报研究，乃是当今水文气象领域共同关注的热点和前沿问题。

本书是在多项科研成果及全国优秀博士学位论文《定量降雨与实时洪水预报》等五篇博士学位论文基础上凝练而成的，内容涵盖流域水文循环的主要环节和关键问题。书中各章节之间既自成体系，又相互关联；既有理论阐述，又有实例应用；既是科学传承，又具开拓创新。本书在学术思想上，强调研究项目与国民经济发展中的关键水问题密切结合，突出成果的应用性；在结构体系上，从水文循环的关键要素研究入手，通过剖析流域面雨量计算、实际蒸发量估算、降雨定量预报等技术，深入探讨大尺度陆面水文过程的机制与应用实践，成功开发出基于陆气耦合的实时洪水预报系统；既涵盖了水文循环研究的关键内容，又突出了定量预报的关键技术。

全书共分 9 章。第 1 章介绍水文循环基本概念与大气过程；第 2 章讨论流域面雨量计算方法；第 3 章介绍降雨定量预报方法；第 4 章探讨流域蒸散发估算方法；第 5 章讨论 CLASS 陆面过程模型的改进与应用；第 6 章讨论大尺度 VIC 水文模型的应用及参数区域规律探讨和移用方法；第 7 章提出基于网格的流域汇流模型；第 8 章介绍陆气耦合洪水预报系统；第 9 章介绍基于陆气耦合洪水预报系统的淮河流域实时洪水预报实例。

本书主要创新内容有：定量分析了我国西部塔里木河流域的大气水汽状态；提出了基于卫星测雨产品估算资料稀缺地区面雨量的方法；改进了 CLASS 陆面过程模型中产流计算的方案，引入了壤中流产流机制；提出了 VIC 大尺度水文模型的参数区域化方法；开发了考虑参数空间分布的网格汇流模型；建立了陆气耦合模型系统，并在淮河流域近几年的实时洪水预报中得到应用，将洪水预报的预见期增加了 72 小时以上。

本书的主要研究成果是在国家重点基础发展计划项目（2010CB428405）、国家自然科学基金项目（40371023、41001012）、“十一五”国家科技支撑计划项目（2006BAC05B02、2007BAC03A06）、水利部公益性行业科研专项经费项目（200701039、200801001）、水利部引进国际先进农业科学技术（948）项目（200317、200758）和中央高校基本科研业务费专项基金共同资助下完成的。加拿大 McGill 大学大气海洋科学系的 Lei Wen 博士、Charles Lin 教授和 Yufei Zhu 硕士，河海大学水文水资源学院研究生戚晓明、张续军、周玉良、金君良、闫桂霞、康燕霞、赵芬以及李永涛

参与了本书的部分研究和编写工作，研究生梅传贵、孙虹、姜秀娟、郝晶晶、范辉、王小峰、徐栋等参与了文字排版、校对等工作。刘国纬教授、文康教授、包为民教授等审阅了本书，提出了许多宝贵意见和建议。另外，科学出版社的赵峰同志对此书的出版付出了大量心血，在此一并感谢。

限于作者水平和编写时间仓促，书中不足之处在所难免，敬请广大读者不吝批评赐教。

作 者

2009年10月于南京

目 录

前言

第 1 章 水文循环基本概念与大气过程	1
1.1 水文循环基本概念与研究进展	1
1.1.1 水文循环过程	2
1.1.2 水文要素	4
1.1.3 水文循环研究进展	8
1.2 水文循环大气过程	10
1.2.1 水汽含量	10
1.2.2 水汽输送	11
1.2.3 水汽收支	13
1.2.4 水分内循环	14
1.3 塔里木河流域水汽含量时空特征	16
1.3.1 塔里木河流域概况	16
1.3.2 水汽含量空间分布	20
1.3.3 水汽含量时间变化	23
1.4 塔里木河流域水文内循环特征	27
1.4.1 水汽输送特征	28
1.4.2 水汽收支特征	35
1.4.3 水汽源汇特征	44
1.4.4 水文内循环特征	50
1.5 本章小结	56
第 2 章 流域面雨量计算	57
2.1 流域面雨量计算方法回顾	57
2.1.1 常用面雨量计算方法	57
2.1.2 降雨空间插值方法	59
2.2 变权重降雨插值方法	73
2.2.1 变权重插值公式	73
2.2.2 变权重的推求	73
2.2.3 插值精度验证	74
2.3 基于 TRMM PR 资料的降雨插值方法	76
2.3.1 TRMM 概述	76
2.3.2 TRMM 卫星测雨产品的精度检验	80

2.3.3	基于 T-G 联合的流域降雨量估算方法	82
2.3.4	T-G 联合回归法在淮河流域的应用	84
2.3.5	T-G 联合系数法在西北资料稀缺流域的应用	90
2.4	本章小结	94
第 3 章	降雨定量预报	95
3.1	概述	95
3.1.1	数值天气预报的历程	95
3.1.2	动力框架的发展	96
3.1.3	数值计算方法	98
3.1.4	物理过程参数化	102
3.1.5	资料同化及方法	107
3.1.6	数值天气预报	111
3.2	MC2 模式原理	116
3.2.1	MC2 模式的动力框架	116
3.2.2	MC2 的物理过程	126
3.3	MC2 模式程序结构	131
3.3.1	预处理程序	132
3.3.2	主程序	133
3.3.3	后处理程序	133
3.3.4	MC2 模式运行配置	133
3.4	MC2 模式的应用	134
3.4.1	预报方案设计	134
3.4.2	预报效果检验	136
3.4.3	1998 年和 2003 年后预报结果分析	138
3.4.4	2005~2007 年实时预报结果分析	143
3.5	本章小结	151
第 4 章	流域蒸散发估算	153
4.1	流域蒸散发方法回顾	153
4.1.1	蒸散发量的测定	153
4.1.2	蒸散发量的估算	160
4.2	流域蒸散发遥感估算模型及应用	163
4.2.1	经验模型	164
4.2.2	单层模型	164
4.2.3	双层模型	167
4.2.4	分块模型	169
4.2.5	蒸散发遥感估算模型应用	169
4.3	大气水分平衡方程估算蒸散发	175
4.3.1	大气水分平衡方程	175

4.3.2	塔里木河流域蒸散发估算	180
4.4	蒸发悖论	181
4.4.1	“蒸发悖论”现象	181
4.4.2	“蒸发悖论”现象讨论	184
4.5	本章小结	190
第5章	陆面过程模型 (CLASS) 改进与应用	192
5.1	模型原理	194
5.1.1	辐射传输方程	196
5.1.2	热量传输方程	199
5.1.3	动量传输方程	201
5.1.4	蒸散发计算方法	202
5.1.5	产流计算方法	203
5.1.6	模型参数和输入输出	205
5.1.7	模型程序结构	206
5.2	模型改进	208
5.2.1	模型原产流机制的不足	208
5.2.2	模型产流机制的改进	209
5.3	模型应用	212
5.3.1	验证区与资料	212
5.3.2	验证方案设计	214
5.3.3	单站模拟结果	217
5.3.4	流域尺度模拟结果	224
5.4	本章小结	229
第6章	大尺度水文模型 (VIC) 应用	231
6.1	VIC 模型原理和结构	231
6.1.1	模型原理	231
6.1.2	程序结构	240
6.1.3	软件移植	243
6.2	模型输入和参数确定	245
6.2.1	模型输入	245
6.2.2	气候地理参数	246
6.2.3	植被参数	248
6.2.4	土壤参数	252
6.2.5	水文参数	253
6.3	水文参数区域规律及移用	259
6.3.1	典型流域的选择	259
6.3.2	模拟结果分析	261
6.3.3	水文参数区域规律	267

6.3.4 水文参数移用	272
6.4 本章小结	273
第7章 基于网格的流域汇流模型	275
7.1 流域汇流方法	275
7.1.1 集总式汇流方法	275
7.1.2 分布式汇流方法	277
7.2 数字水系构建	279
7.2.1 DEM洼地处理	279
7.2.2 网格流向计算	280
7.2.3 水流累积量计算	280
7.2.4 网格比降计算	281
7.2.5 河网的提取	281
7.2.6 流域的划分	281
7.3 网格汇流模型	282
7.3.1 基本原理	282
7.3.2 参数求解	284
7.3.3 程序设计	287
7.4 模型应用	290
7.4.1 参数确定和验证	290
7.4.2 河网总入流的计算	294
7.4.3 结果分析	294
7.5 本章小结	301
第8章 陆气耦合洪水预报系统	303
8.1 洪水预报方法进展	305
8.1.1 河道洪水演进法	306
8.1.2 降雨径流预报法	308
8.1.3 气象-水文方法	314
8.1.4 陆气耦合模型研究进展	318
8.2 陆气耦合洪水预报系统构建	322
8.3 陆气耦合方式	329
8.3.1 MC2/CLASS双向耦合	329
8.3.2 MC2/新安江模型单向耦合	330
8.3.3 降雨定量预报的实时修正	331
8.4 预报检验	332
8.4.1 检验方案设计	332
8.4.2 检验结果分析	332
8.5 本章小结	334

第 9 章 淮河流域实时洪水预报实例	335
9.1 流域概况	335
9.2 2005 年实时洪水预报	336
9.2.1 淮河“2005.7”暴雨洪水	336
9.2.2 实时暴雨预报成果检验	336
9.2.3 实时洪水预报成果检验	339
9.2.4 实时洪水预警图	340
9.3 2007 年实时洪水预报	341
9.3.1 淮河“2007.7”暴雨洪水	341
9.3.2 实时暴雨预报成果检验	342
9.3.3 实时洪水预报成果检验	342
9.4 2008 年实时洪水预报	344
9.5 2009 年实时洪水预报	345
9.6 本章小结	346
参考文献	347

第1章 水文循环基本概念与大气过程

1.1 水文循环基本概念与研究进展

水文循环是指地球上的水在太阳辐射和重力作用下，通过蒸发、水汽输送、凝结降水、下渗以及径流等环节，不断地发生相态转换周而复始运动的过程。它是地球上最重要的物质循环之一，是联系地球水圈、大气圈、岩石圈及生物圈的纽带。水文循环联系海洋与陆地两大系统，塑造着地貌形态，控制着地球生态系统的平衡和协调。水文循环的运动，实现了全球水量、能量和地球化学物质的迁移与转换，使水资源不断更新，支撑着全球的生命。水文循环对于地球表层结构的演化和人类可持续发展具有重要的意义。

水文循环过程是物质与能量的传输、储存和转化的过程。大气环流、海陆分布、地势高低、地表状态等制约着水文循环的路径、规模与强度等。依据不同的途径和规模，水文循环分为大循环和小循环。大循环是指发生在海陆之间的循环，又称外循环，指海洋（或陆地）表面蒸发的水汽，随着气流运动被输送到陆地（或海洋）上空，成云致雨，降落到陆地（或海洋）表面的过程。小循环又称内循环，指发生在海洋与大气或陆地与大气之间的水分交换过程。如海洋表面蒸发的水汽，在海洋上空形成降水，又直接降落到海洋中，即为海洋水文小循环；陆地表面蒸发的水汽全部返回陆地，则为陆地水文小循环（图 1.1）。

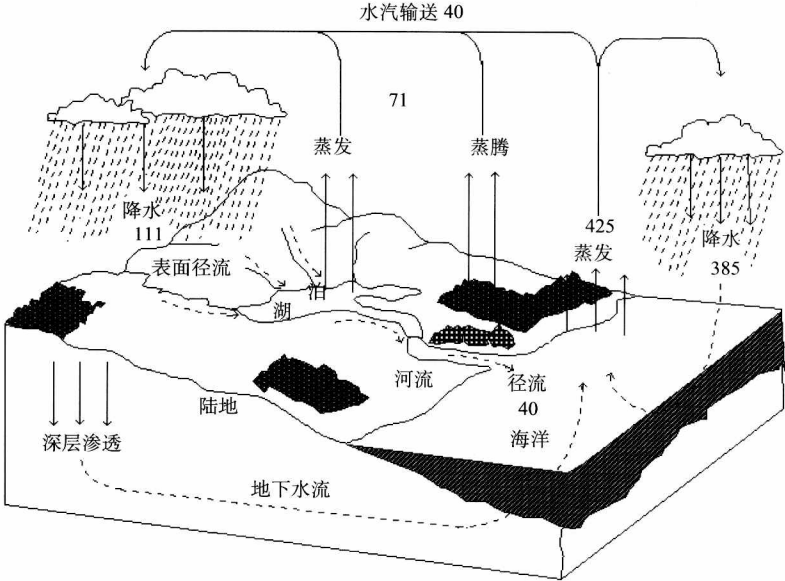


图 1.1 水文循环及全球水量平衡示意图

图中数字表示水量 ($10^3 \text{ km}^3/\text{a}$)

1.1.1 水文循环过程

水文循环的过程十分繁杂，主要包含了蒸发、水汽输送、降水、下渗和径流等环节。蒸发和降水发生在水循环的垂直方向上，它以相态的转化实现了水分和热量的转移。蒸发使地表液态水变成水汽（气态水），并随气流运动被输送到大陆上空，同时消耗大气的热量；降水使地表从大气获取水分，同时向大气释放热量。水汽输送、降水以及蒸发的过程可归结为水文循环的大气过程，通过它调整大气水分并重新塑造地球表面的水分格局。在降水过程中，除了蒸散作用外，一部分渗入岩土层中形成各种类型的地下水，参与地下径流过程，另一部分来不及渗入，形成地表径流，这便是水文循环的陆地过程。它与自然界复杂的地貌、地质、生物及人类活动交织在一起，形成不断细分的次级水文循环系统，如大气-土壤-植被子系统、地表水-土壤水-地下水子系统等。图 1.2 描述的是一个大气-植被-土壤-地下水的次级水文循环系统。

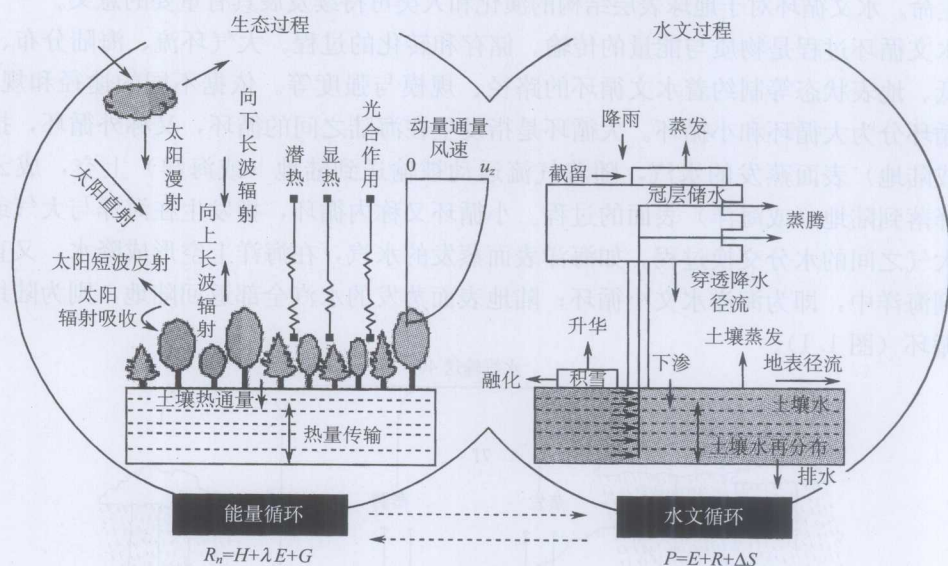


图 1.2 大气-植被-土壤-地下水水文循环过程

图中： R_n 为太阳辐射； H 为感热通量； λE 为潜热通量； G 为土壤热通量； P 为降水量； E 为蒸散发量； ΔS 为蓄水变化量

作为地球上最基本的物质循环和最活跃的自然现象，水文循环深刻地影响着全球地理环境、生态平衡以及水资源的开发利用。对自然界的水文过程来说，水文循环是千变万化的水文现象的根源。在水文循环过程中，全球总水量 13.86 亿 km^3 基本保持不变，但是各种水体之间相对数量却是不断变化的。尤其是在全球变暖背景下，冰川消融致使海平面上升，较大程度地改变了地球表面水体形态的分布，进而将对整个水文循环过程产生影响。

水汽输送是指大气中的水汽由气流携带从一个地区上空输送到另一个地区的过程。海洋和陆地上的水分通过蒸发升入空中，在大气环流背景下形成地球上空的水汽输送。据计算，大气中总水量约 1.29 万 km^3 ，而全球平均年降水量为 57.7 万 km^3 。这表明，大气中的水汽平均每年转化成降水 45 次，也即大气中的水汽循环更新一次只需 8d。如此频繁的更新过程，使得水汽输送成为区域水文循环强弱的制约因素。

水汽输送与大气环流密切相关。大气环流是地球上一切大规模大气运动的综合现象，它在行星尺度系统（水平尺度数千千米、垂直尺度十多千米、时间尺度 3d 以上）的运动方向基本稳定，这决定了水汽输送方向的稳定性。在北半球，副热带高压脊线以北盛行西风，水汽总是从大陆西部向东部输送；副热带高压脊线以南盛行热带东风，水汽总是从大陆东部向西部输送。在南半球，则有与之对称的输送方向。不同尺度的大气运动往往决定了相应区域上空的水汽输送和水分平衡，地理纬度、海陆分布、地貌及人类活动，也各自影响着不同范围内的水汽输送特征。

地表蒸发的水汽，在大气垂直方向的对流和湍流作用下，不断向空中扩散。空气的垂直运动使水汽向上输送，随着高度的增加，水汽输送扩散能力逐渐减弱。因此，大气中的水汽含量一般随高度的增加而明显减少。据观测资料，在距离地面 $1.5 \sim 2.0 \text{ km}$ 的高度上，水汽含量已减少为地面的一半，至 5.0 km 高度处，只有地面的 $1/10$ ，再向上水汽含量就更少了。在大气环流的控制下，水汽进行着高低纬间及海陆间的水平输送。

由于海陆间的巨大差异，海洋上空的水汽含量较多，在适当的平流条件下，水汽被输送到陆地上空，成为陆地降水的重要来源。图 1.3 是 1 月全球上空水汽输送概貌。北

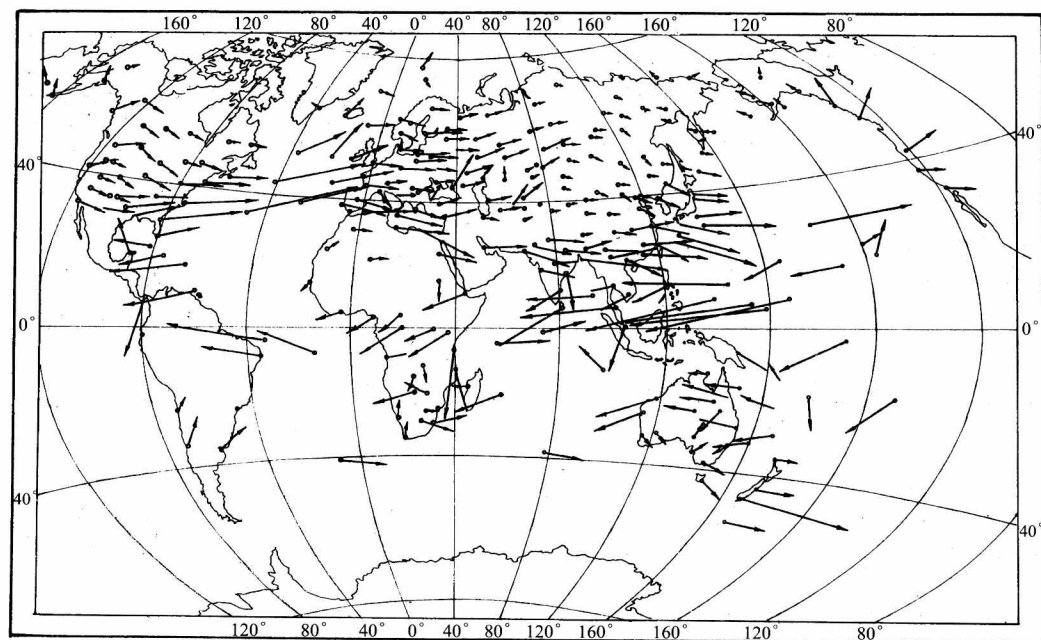


图 1.3 1 月全球水汽输送通量矢量场（刘国纬，1997）

箭头为输送方向，箭杆长代表通量大小；单位： $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$

半球 $20^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$ 带（副热带高压脊线北侧），盛行西风环流，水汽输送表现为自西向东、自南向北的输送路径。赤道至 20°N 带（热带辐合带两侧），盛行信风环流，表现为自西向东、自北向南的水汽输送。其中， $20^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$ 带是南北水汽交换最活跃的区域。南半球，1 月水汽输送场的总体形势不如北半球清晰，在南美洲、非洲南部、大洋洲及临近海域，存在着近似闭合的气旋性水汽输送。图 1.4 是 7 月全球上空水汽输送概貌。北半球，由于副热带高压脊的北移，水汽纬向输送的界限随之移至 30°N 附近，以北盛行自西向东的水汽输送，以南则为与热带东风相联系的自东向西的水汽输送。这时，北半球的水汽输送通量大为增强，强大的水汽输送提供了大陆降水所需的水汽。南半球，赤道至 20°S 范围内盛行东风水汽输送， 20°S 以南的盛行西风水汽输送（芮孝芳，2004；王守荣等，2003；刘国纬，1997）。

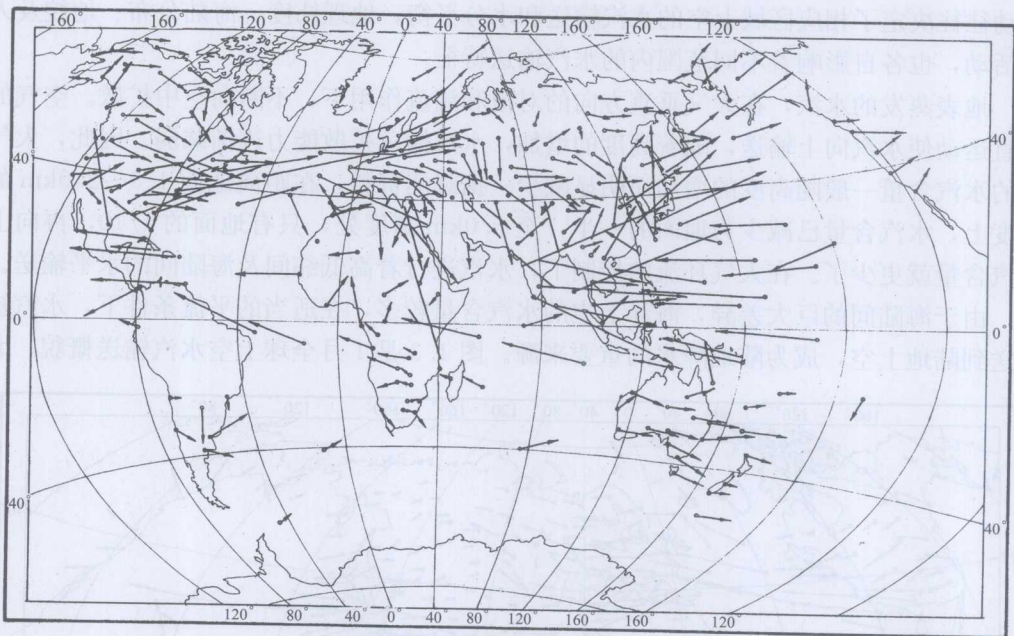


图 1.4 7 月全球水汽输送通量矢量场（刘国纬，1997）

箭头为输送方向，箭杆长代表通量大小；单位： $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$

大气中的水汽虽然只占全球水文循环总水量的 1.53%，但却是全球水文循环过程中最活跃的部分，在天气变化和地球系统的水文循环中扮演着重要的角色。正是由于大气中的水汽连续不断的更新和输移，才实现了全球各水体间水量的连续转换和更新。

1.1.2 水文要素

1.1.2.1 蒸发

蒸发是液态水转化为气态水，逸入大气的过程。自然界时刻都存在着水分蒸发。自然界的水分——海洋、河川、湖泊、沼泽中的水，植被叶面、枝干截流的水，渗入土壤

表层的水,在受热后都会向空中蒸发。蒸发是水文循环的重要过程,也是全球气候系统动态平衡中的重要环节。因蒸发表面的不同,自然界的蒸发可分为土壤表面的蒸发、江河湖海等水面上的蒸发、植物的蒸发。通常土壤表面的蒸发称为土壤蒸发,江河湖海的蒸发称为水面蒸发,植物体的蒸发称为植被蒸腾,因此自然界的蒸发统称为蒸散发。

水面蒸发是指水体表面的水分子通过吸收热量从水体表面逸出到大气过程。水面蒸发包括水分汽化和水汽扩散两个过程。

土壤蒸发是指土壤中的水分通过上升和汽化从土壤表面进入大气的过程。土壤蒸发过程分三个阶段:①毛细管运行阶段:当土壤湿润时,水充满土壤孔隙,水分通过毛细管作用,不断快速地向地表运行,水分在地表汽化、扩散,土壤水分蒸发强烈。②薄膜运行阶段:当蒸发耗水使土壤含水量降低,小于毛细管水断裂含水量时,毛细管水断开,毛细管传导作用停止,土壤水分则以薄膜水形式,由水膜厚的地方向水膜薄的地方运动。由于这种运动缓慢,土壤蒸发明显减弱。此时,蒸发不仅在地表进行,土壤内部水分也可汽化,并经土壤孔隙向大气扩散。③扩散运行阶段:当土壤含水量进一步降低,接近凋萎系数时,土壤水分由底层向土面的薄膜运动已基本停止,地表土壤内只有气态水进行扩散,蒸发率甚小。

植被蒸腾是指植被从土壤中吸收水分,通过植物体表面的气孔或皮孔,以气体状态散失到大气中的过程。植物的生长是通过蒸腾作用来运送水分及营养来维持的,植被蒸腾是植被生长过程中一个必要的环节。植被蒸腾首先是通过吸收土壤表面的水分来进行的,和土壤蒸发不同的是,当土壤表面的水分很少,不足以维持植被的生长时,植被还可以通过根系从地表以下较深的地方来吸收水分。

蒸散发过程涉及土壤、植被和大气等与天气气候密切相关的多种复杂过程,既是地面热量平衡的组成部分,又是水量平衡的组成部分。而地面热量、水分收支状况在很大程度上决定着天气气候的变化,进而决定着地理环境的形成和演变。据联合国教科文组织公布的全球水量平衡成果,全球平均每年的蒸散发量为 57.7 万 km^3 ,其中海洋的蒸散发量为 50.5 万 km^3 ,陆地的蒸散发量为 7.2 万 km^3 。全球平均每年的降水量也为 57.7 万 km^3 ,其中海洋的降水量为 45.8 万 km^3 ,陆地的降水量为 11.9 万 km^3 (芮孝芳, 2004; 王守荣等, 2003)。这表明,地球表面平均约 60% 的降水通过蒸发返回大气,在非洲这个比例可能达到 85% 左右,而在长期被冰雪覆盖的南极大陆只有 15% 左右。因此,蒸散发是大气-陆地水文循环耦合作用中最重要的联系,是决定天气气候条件的重要因子,在全球水循环和气候演变中具有举足轻重的作用。

1.1.2.2 降水

降水是指大气中的液态或固态水,在重力作用下,克服空气阻力,从空中降落到地面的现象。降水是描述地区气候系统及其变化的关键指标,是水文循环的重要环节,区域气候的变化清楚地体现在降水的变化上。降水的多少与水汽的输送密切相关。大陆上空的水汽辐合区,对应着地面的降水中心,往往也是大型河川的发育地带。因此,降水的分布与水汽输送一样,具有纬度地带性和海陆地带性。总体上,地球表面的降水量从赤道向两极逐渐减少。在赤道地区,气温高,蒸发强烈,大气

中的水汽含量高,水汽对流上升运动十分旺盛,因此是形成降水量最多的地带,全年平均降水量在 3000mm 以上,参见图 1.5。

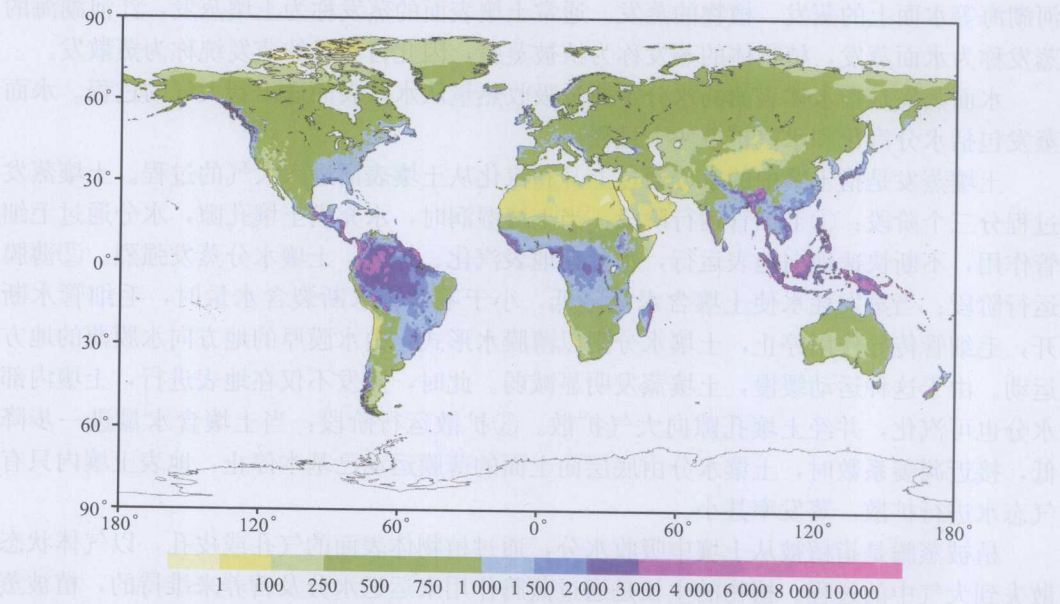


图 1.5 地球陆地表面的年降水量分布 (单位: mm)

降水的形成主要有两个基本的物理条件,即大气中必须含有足够的水汽和必须具有使大气中的水汽凝结成液态水的动力条件。根据动力条件的不同,降水可分为气旋雨、对流雨、地形雨和台风雨四类。影响降水及其时空分布的因素主要有地理位置、气旋、台风路径等气象因子,以及地貌、森林、水体等下垫面条件。对降水类型和影响因素的研究,有利于掌握降水的特性和判断降水资料的合理性与可靠性。可靠的降水预报是防治洪涝灾害的前提,但由于降水形成机制与预报问题的复杂性,定量降水预报一直是气象水文学领域研究的重点和难点。近年来,不断发展完善的数值天气预报为定量降水预报提供了新的途径,并成为定量降水预报研究的重要方向。

1.1.2.3 径流

径流是陆地上的水汇流到海洋或湖泊的过程。径流过程又分为截流蓄渗、坡面汇流、河网汇流三个阶段。

降水是径流形成的首要环节。降水到达近地面后,先被植被截流,之后落到地面并不断渗入土壤。一方面,当降雨强度超过土壤下渗能力时产生地表积水,并填蓄于大小坑洼中,蓄于坑洼中的水渗入土壤或被蒸发。坑洼填满后即形成从高处向低处流动的坡面径流(图 1.6)。另一方面,当土壤含水量饱和时,截流渗透的水分通过土壤空隙,由高处向低处流动,形成壤中流。此时,地下水得到补给,水位抬升,汇入河川的比率相应增加。汇入河川的地下水量为基本径流,是维持河川稳定的水源。尤其是枯水期,基本径流补给对于河川的水量平衡具有重要的意义。

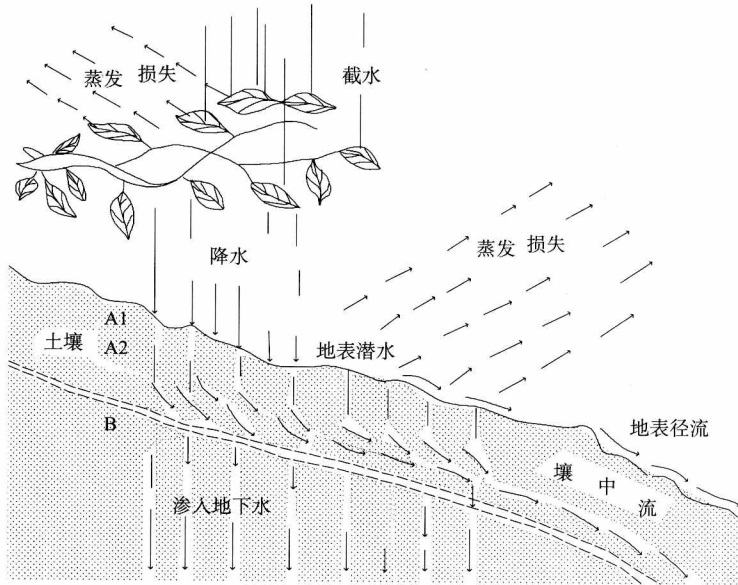


图 1.6 径流形成截流蓄渗与坡面汇流示意图

径流是流域中气候和下垫面各种自然地理因素综合作用的产物。影响径流大小的因素主要包括气候因素、流域下垫面因素以及人类活动。其中，气候因素是影响河川径流最基本和最重要的因素。气候因素中的降水和蒸发直接影响河川径流的形成和变化。降水方面，降水形式、总量、强度、过程以及在空间上的分布，都会影响河川径流的变化。蒸发方面，主要受制于空气饱和差和风速。饱和差越大，风速越大，则蒸发越强烈。气候的其他因素如温度、风、湿度等，往往也通过降水和蒸发影响河川径流。影响径流的另一重要因素为流域的下垫面因素，主要包括地貌、地质、植被、湖泊和沼泽等。地貌中山地高程和坡向影响降水的多少，如迎风坡多雨，背风坡少雨。坡地影响流域内汇流和下渗，如山溪的水就容易陡涨陡落。流域内地质和土壤条件往往决定流域的下渗、蒸发和地下最大蓄水量，如在断层、节理和裂缝发育的地区，地下水丰富，河川径流受地下水的影响较大。植被，特别是森林植被，可以起到蓄水、保水、保土作用，削减洪峰流量，增加枯水期流量，使河川径流的年内分配趋于均匀。此外，随着人类活动的加剧，其对径流的影响也日益凸显。例如，通过人工降雨、人工融化冰雪、跨流域调水增加河川径流量；通过植树造林、修筑梯田、筑沟开渠调节径流变化；通过修筑水库和蓄洪、分洪、泄洪等工程改变径流的时间和空间分布。

径流是地球表面水循环过程中的重要环节，它的化学、物理特性对地理环境和生态系统具有重要的作用。全球河川年径流量最大的区域位于赤道附近的南美洲和东南亚的热带雨林地区，年径流深在 1000mm 以上。此外，亚洲的东南部、欧洲的西北部沿海和北美洲的西北部沿海地区年径流量也较大，一般年径流深在 600mm 以上，有的地方达到 1000mm。而在内陆干旱地区，特别是亚洲大陆内部，年径流量很小，多年平均年径流深不足 50mm。