

国家重点基础研究发展规划(973)项目

“黄河流域水资源演化规律与可再生性维持机理”(G19990436)系列专著

# 基于 RS/GIS 技术的 黄河流域水循环要素研究

刘昌明 杨胜天 孙睿 著



黄河水利出版社

中国地理信息系统与遥感应用 / 中国地理信息系统与遥感应用 / 中国地理信息系统与遥感应用

# 基于 RS/GIS 技术的 黄河流域水循环要素研究

王 强 王 强 王 强 王 强 王 强



中国地理信息系统与遥感应用 / 中国地理信息系统与遥感应用 / 中国地理信息系统与遥感应用

黄河水利委员会治黄著作出版资金资助出版图书

国家重点基础研究发展规划(973)项目

“黄河流域水资源演化规律与可再生性维持机理”(G19990436)系列专著

# 基于 RS/GIS 技术的 黄河流域水循环要素研究

刘昌明 杨胜天 孙 睿 著

黄河水利出版社

## 内 容 提 要

“基于 RS/GIS 技术的黄河流域水循环要素研究”是国家重点基础研究发展规划(973)项目“黄河流域水资源演化规律与可再生性维持机理”(G19990436)第一课题“黄河流域水循环动力学机制与模拟”(G1999043601)研究成果的重要组成部分。主要利用遥感和地理信息系统技术,推求水循环过程中的水文参数,包括土壤水分、蒸发等,分析这些水文参数与土地利用、气候变化的关系,研究黄河流域水循环要素的时空分布规律。全书共分九章。第一章和第二章介绍了水资源遥感的主要研究进展,以及遥感和地理信息系统的基本原理;第三章至第七章主要论述了黄河流域蒸散量、土壤水分、植被覆盖变化、流域地表干旱状况变化和主要气象要素气候变化趋势;第八章阐述了黄河源区水循环过程;第九章对黄河流域水循环要素研究中 RS/GIS 方法进行了评价。

本书可供水文水资源、环境科学、地球科学、遥感与地理信息系统相关专业的高等院校师生,以及科研、管理和决策部门的人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

基于 RS/GIS 技术的黄河流域水循环要素研究/刘昌明,  
杨胜天,孙睿著. —郑州:黄河水利出版社,2006. 12  
ISBN 7-80734-168-8

I. 基… II. ①刘…②杨…③孙… III. 地理信息  
系统-应用-黄河流域-水循环-水文要素-研究  
IV. P344.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 155161 号

策划编辑:岳德军 电话:0371-66022217 dejunyue@163.com

---

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市金水路 11 号 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371-66026940

传真:0371-66022620

E-mail:hhslebs@126.com

承印单位:河南省瑞光印务股份有限公司

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:14.25

字数:330 千字

印数:1—1 200

版次:2006 年 12 月第 1 版

印次:2006 年 12 月第 1 次印刷

---

书号:ISBN 7-80734-168-8/P·62

定价:48.00 元

## 前 言

水循环研究是水文学研究的前沿和热点, IGBP/BAHC 和 WCRP-GEWEX 计划都将水循环作为核心研究项目。水循环涉及气圈、水圈、生物圈等多个圈层,同时,关系到全球生态与环境的变化。水循环的运动与变化直接影响到人类赖以生存的淡水资源,是全球变化中的一个重要方面,其研究在理论上和实践上具有深刻的意义和价值。目前,国内外水循环的研究可以分为宏观与微观两个方面。宏观方面直接属于全球变化的内容,微观方面则直接涉及到生态系统平衡。在水循环的研究中,主要的科学问题包括降水、产流、汇流、下渗、蒸发、地下水的补给和排泄、径流等一系列的水循环环节,这方面的研究方兴未艾。由于气候和人类活动的影响,水循环的各个环节不断发生变化,而这些变化的区域分异具有多样性,研究未臻完善。在国内,此类研究刚刚起步,由于中国的自然条件多样,水循环的过程相当复杂,例如黄河等大江大河长数千公里,自然条件包括地形地貌、土壤植被、气候、人类活动等区域差异相当明显。水循环过程十分复杂,这就增加了研究的难度,因此开展这一研究具有明确的创新前景。

水资源问题直接关系到国计民生和社会经济可持续发展的基本需求,水资源时间与空间的变化又直接取决于水文循环规律的认识。近 20 年来,计算机科学的发展使得遥感(RS)和地理信息系统(GIS)在水文学(Hydrology)中的应用有了长足的发展。遥感技术具有强大的对地观测能力,提供面状信息,获取常规手段无法测量到的水文变量和参数,提供长期、动态和连续的大范围资料,为定量研究水循环要素的变化规律提供了数据支持。GIS 是一种采集、处理、传输、存储、管理、查询检索、分析、表达和应用地理信息的计算机决策支持系统,其最主要特点在于存储和处理的信息是经过地理编码的空间信息、地理位置及与该位置有关的地物属性信息。从根本上说,GIS 包括空间信息的组织管理、分析提取,以及信息表达三方面的主要功能,可以有效地组织和管理各类水循环要素数据,为研究黄河流域水文过程提供有力的数据支持。遥感与地理信息系统作为地学分析的工具和手段,可以分别用于水文学各个方面的研究,二者结合,可以发挥各自的特点与优势,极大地拓宽了水文学研究的思路和方法,加大了水文学研究的广度和深度。

黄河流域是我国当前西部大开发的重要地区之一。黄河流域大部分地区属于半干旱和半湿润区,水资源条件先天不足,人均占有年水资源量仅为全国平均的 1/5。作为我国北方地区最大的供水水源,黄河以其占全国河川径流 2% 的有限水量,担负着本流域和下游引黄灌区占全国 9% 的耕地面积和 12% 人口的供水任务,同时还要向流域外部分地区(含河北、天津及青岛)远距离送水。全流域水资源总量利用率高达 84%,水资源净消耗率达 53.3%。在人类活动的影响下,流域水资源状况日益恶化。特别是近 20 多年来干流、主要支流下游断流频繁发生,不仅使水资源供需矛盾加剧,而且对流域的生态和环境带来一系列冲击。缓解黄河流域水资源危机的科学依据在于对流域水循环过程的认识和把握。水资源的开发利用是人类对天然水循环过程的干扰,天然水循环特征必然因人类

活动而改变,并反过来影响水资源的开发利用。因此,只有在认识水循环规律的基础上,水资源的开发利用才有可能趋于合理和高效,从而实现水资源的可持续利用。探索黄河流域水循环要素的演化规律,分析水循环各要素对人类活动、气候变化以及土地利用和土地覆被变化的响应,不仅对于寻找协调黄河流域人水关系的适应性对策、维系黄河流域社会经济可持续发展、顺利实施我国西部大开发战略意义重大,而且其理论问题也是国际水科学的前沿问题。黄河流域水循环要素研究,既可以对国际 IGBP - BAHC 等科学计划做出贡献,而且对促进源头创新、促进西部大开发战略中水的问题基础研究和水资源可持续利用与生态保护,都有重大的理论价值和科学意义。

“基于 RS/GIS 技术的黄河流域水循环要素研究”是国家重点基础研究发展规划(973)项目“黄河流域水资源演化规律与可再生性维持机理”(G19990436)第一课题“黄河流域水循环动力学机制与模拟”(G1999043601)研究成果的重要组成部分。本课题负责人为刘昌明院士;项目依托单位有中国科学院地理科学与资源研究所、北京师范大学、武汉大学、黄河水利委员会水文局、中国科学院遥感应用研究所等。“基于 RS/GIS 技术的黄河流域水循环要素研究”利用遥感和地理信息系统技术,推求水循环过程中的水文参数,包括土壤水分、蒸发等,分析这些水文参数与土地利用、气候变化的关系,研究黄河流域水循环要素的时空分布规律。该研究取得了以下主要成果:利用 1981~2000 年 8km 分辨率 NOAA AVHRR 数据和对应年份黄河流域气象观测数据,分析了 20 世纪 80 年代初至 90 年代末黄河流域干旱变化状况、流域植被覆盖的变化及与气候因子(气温与降水)之间的相互关系;利用累积 NDVI 法及互补相关模型估算了黄河流域地表蒸散发的大小,并对流域近 20 年来地表蒸散发的空间分布格局及时间动态变化进行了研究;建立了基于遥感条件温度植被指数和气象观测数据基础上的黄河流域厚层土体(0~1m)土壤水分遥感估算方法;建立和验证了基于 MODIS 遥感数据基础上的土壤水分计算模型,并对 MODIS 数据结合能量平衡模型估算日蒸散进行了初步研究;结合 1kmDEM,在考虑地形遮蔽情况下,生成了黄河流域晴天条件下的日太阳辐射及日照时数空间分布图;分析了日蒸发皿蒸发值的变化趋势;根据黄河流域及其周边气象站 1960~2000 年逐月气象资料,结合地理信息系统 ArcGIS8.1,对黄河流域降水、温度、蒸发皿蒸发量、日照百分率、太阳辐射等气象要素的气候变化趋势及其空间分布进行分析,为进一步研究黄河流域蒸散变化规律和水资源演化规律提供了基础背景信息,为研究黄河流域水文过程提供了有力的数据支持,并在此系统支持下完成了黄河流域水循环模拟与计算系统的研究,提出了黄河流域及其主要水文分区水循环要素计算的定量成果,为黄河水资源的科学评价提供了理论依据。本项研究对准国际前沿,密切结合了国家解决黄河水资源问题的重大需求,为解决水量平衡问题、地表干旱问题、气候变化问题,以及农业生产等诸多方面的扩展研究提供了新的思路;同时,在学科前沿的层次上,为地表水循环的内在机理提供了新的科学认识,为水资源的合理利用和调控提供科学依据。

“百闻不如一见”,实地考察是地理科学研究中的一个重要环节。参加本书编写的作者,都在黄河流域进行过实地考察和调查研究,对黄河流域的自然地理特征有着比较深刻的了解。在实地考察的基础上,参阅多年来水循环要素的研究资料,对黄河流域水循环要素的研究提出了一些新的观点和看法。当然,由于水循环涉及要素复杂,遥感解译技术也

在不断提高之中,没有很成熟的理论和方法可供借鉴,这些新的观点和论述可能存在一定的片面性,尚有不妥之处,敬请同行、读者批评指正。

在本书的编写过程中,相关研究人员进行了充分的讨论,各抒己见,共同探讨,根据讨论的原则和意见分工撰写。本书在刘昌明院士亲自指导、修改、审定下,由杨胜天、孙睿、李道峰、曾燕、吴险峰、刘绍民、王鹏新等完成;在编写过程中,张士锋、郑红星、王中根、陈利群、杨桂莲等提供了十分有益的建议,付新峰、杨世琦、于小飞、王冰、田雷、孙中平等作了文字与图表编写;刘卓编写了部分章节,做了大量的书稿完善工作,使得本书得以最终完成。本书被出版也得到了广大专家、学者、出版人员的大力支持,谨在此一并表示感谢!同时感谢所有引用参考文献的作者!

衷心希望本书的出版能为水文学的发展贡献一份力量!

作 者

2006 年 8 月

# 目 录

## 前言

|                                          |       |
|------------------------------------------|-------|
| 第一章 绪 论 .....                            | (1)   |
| 第一节 水资源与水循环研究进展 .....                    | (2)   |
| 第二节 遥感技术与水循环研究概述 .....                   | (5)   |
| 第三节 黄河流域自然环境概况 .....                     | (8)   |
| 第四节 黄河流域水循环研究现状 .....                    | (16)  |
| 第五节 本书结构 .....                           | (17)  |
| 第二章 RS/GIS 基本原理及在水循环研究中的应用 .....         | (18)  |
| 第一节 遥感基本原理 .....                         | (18)  |
| 第二节 遥感传感器 .....                          | (29)  |
| 第三节 遥感在水文水循环中的主要应用 .....                 | (35)  |
| 第四节 地理信息系统基本原理及其在水循环中的应用 .....           | (44)  |
| 第五节 遥感与地理信息系统在水循环要素中的综合应用 .....          | (47)  |
| 第三章 黄河流域蒸散量的遥感估算 .....                   | (50)  |
| 第一节 区域蒸散遥感估算方法概述 .....                   | (50)  |
| 第二节 黄河流域典型地区日蒸散量的遥感估算 .....              | (57)  |
| 第三节 互补相关模型估算黄河流域月蒸散量 .....               | (67)  |
| 第四节 累积 <i>NDVI</i> 在黄河流域年蒸散量估算中的应用 ..... | (78)  |
| 第四章 黄河流域土壤水分遥感估算 .....                   | (85)  |
| 第一节 条件温度植被指数估算黄河流域土壤水分 .....             | (85)  |
| 第二节 MODIS 遥感数据的土壤水分敏感性分析及应用 .....        | (102) |
| 第五章 黄河流域植被覆盖变化分析 .....                   | (116) |
| 第一节 植被指数的发展及分类 .....                     | (116) |
| 第二节 遥感数据与气象数据处理 .....                    | (118) |
| 第三节 研究方法与结果分析 .....                      | (119) |
| 第四节 生态保护和建设效益评估 .....                    | (127) |
| 第六章 黄河流域地表干旱状况变化特征分析 .....               | (129) |
| 第一节 地表干旱指标研究状况 .....                     | (129) |
| 第二节 研究区域与资料处理 .....                      | (131) |
| 第三节 研究方法与结果 .....                        | (133) |
| 第四节 结果分析 .....                           | (135) |

|                                            |       |
|--------------------------------------------|-------|
| <b>第七章 黄河流域主要气象要素气候变化趋势分析</b> .....        | (139) |
| 第一节 气象要素气候变化趋势研究方法 .....                   | (139) |
| 第二节 黄河流域降水气候变化趋势 .....                     | (142) |
| 第三节 黄河流域温度变化趋势 .....                       | (147) |
| 第四节 黄河流域蒸发皿蒸发量气候变化趋势 .....                 | (150) |
| 第五节 黄河流域日照百分率气候变化趋势 .....                  | (155) |
| 第六节 黄河流域太阳总辐射气候变化趋势 .....                  | (158) |
| <b>第八章 黄河源区水循环过程综合分析</b> .....             | (163) |
| 第一节 黄河源区降水分析 .....                         | (163) |
| 第二节 黄河源区土地覆被变化分析 .....                     | (170) |
| 第三节 黄河源区 50 年来气候与水文变化分析 .....              | (181) |
| 第四节 黄河源区变化环境下的水文模拟 .....                   | (199) |
| <b>第九章 黄河流域水循环要素研究中 RS/GIS 方法的评价</b> ..... | (201) |
| 第一节 RS/GIS 方法的分析与评价 .....                  | (201) |
| 第二节 研究的展望 .....                            | (205) |
| <b>参考文献</b> .....                          | (208) |

# 第一章 绪 论

水是人类生存的基本条件,是社会生产活动最重要的物质基础,是生态系统中最重要单元要素(刘昌明,2001)。水资源数量的多少、质量的好坏直接影响到人们的身体健康、社会的工农业生产发展,同时水资源状况还会改变地球的环境质量,在很大程度上控制着全球环境的变化。

2002年8月在约翰内斯堡举行的关于可持续发展的世界首脑会议已经认识到在水循环观测和相关研究领域合作的重要性。首脑峰会的重要决议是要重点研究水循环过程,参加的国家决定通过联合制定观察水循环要素来改善水资源管理,并针对发展中国家和经济转型中的国家,鼓励和促进其资源共享和传播,提供空间技术应用条件。全球观测战略伙伴计划(IGOS-P)制定的“全球水循环集成观测(IGWCO)”计划正是针对这一需要而提出的。IGWCO将有助于从全球到地方多时空角度改进观测水循环演变能力,其确定的全球水循环主题,既能够保持全球水循环观测系统的连续性,又能将不同来源(卫星系统、原地网络、野外试验、新的数据平台)数据与新兴数据同化和模型化,向水循环综合观测系统的战略方向发展。为了给保持和推进全球水循环观测战略提供导向框架,IGWCO全球水循环主题将主要支持气候变化监测、世界水资源有效管理和可持续发展、资源开发和环境管理的社会应用、数值天气和水文预报,以及引导水循环关键问题的研究,包括了降水、土壤含水量、流量和地表蓄水量、冰冻圈变量(包括积雪覆盖、雪水当量、冰和地表冰)、云和水汽、蒸发和蒸散发、地下水、水质,以及观测系统和数据库等9个专题。

截止到2002年,国际地圈-生物圈计划(IGBP)前10年的活动取得了重要进展,并于2003年开始进入了第二阶段新的10年计划。IGBP前10年的核心计划之一,即水文循环生物圈方面(BAHC)得到了丰硕的成果,受到学术界的公认。在进一步总结全球变化研究问题的基础上,针对未来科学发展的需求,又提出了新的10年研究计划,形成了全球三大方向的研究,即水循环、碳循环与农业(粮食与纤维)。IGBP与其他3个国际计划(生物多样性(BIODIVERSITAS)、世界气候研究计划(WCRP)及国际人类活动影响全球变化计划(IHDP))联合成立了地球系统科学伙伴计划(Earth System Science Partnership, ESSP),共同制定全球水系统计划(Global Water Systems Project, GWSP),以此作为ESSP跨多种学科的联合研究计划。GWSP已于2005年2月在德国波恩举行了第一届科学指导委员会(GWSP-Scientific Steering Committee)会议,标志着GWSP的正式启动。全球水系统计划在第3号ESSP报告中发布了GWSP的第一期报告,明确提出了以水循环为中心的全球水系统中驱动力、条件指标和状态变量间的相互关系(见图1-1),表明了当前人类引发水系统变化已经涉及到全球范围。

黄河源远流长,发源于青藏高原巴颜喀拉山北麓海拔4500m的约古宗列盆地,流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、山西、陕西、河南、山东等九省(区),干流河道全长5464km,注入渤海,流域面积79.5万 $\text{km}^2$ (包括内流区4.2万 $\text{km}^2$ )。黄河流域面临着干

旱缺水、沙多水少、洪水威胁、生态退化与水质污染问题,这些问题在幅员辽阔的黄河流域因地而异。为此,充分吸收国内外水科学研究经验,开展黄河流域水循环机制研究是十分重要的。

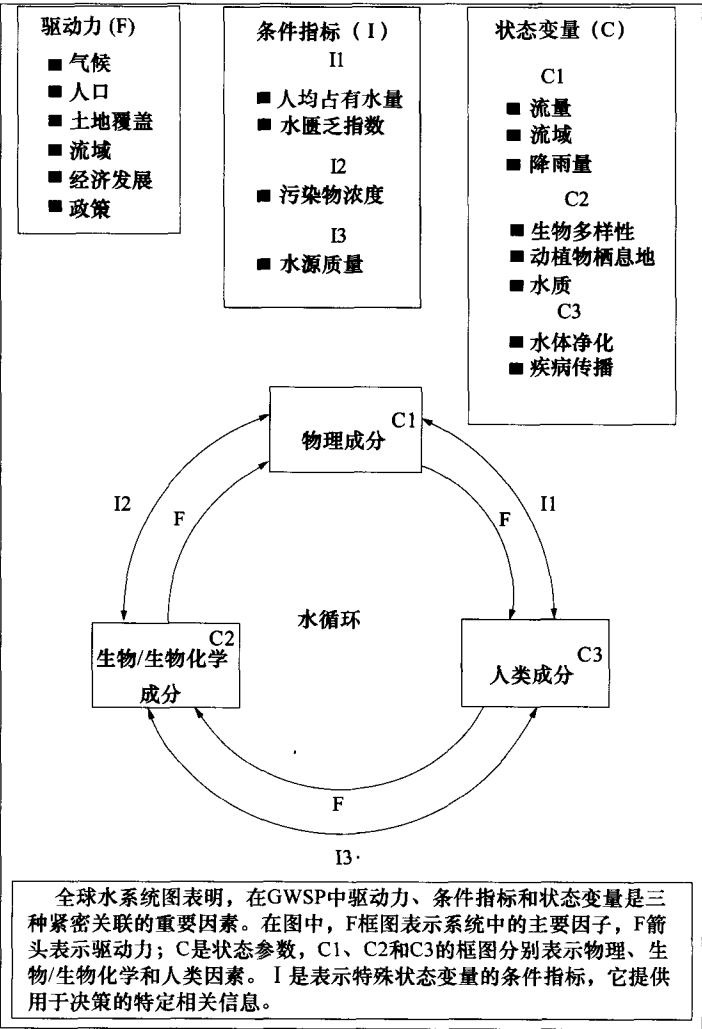


图 1-1 全球水系统示意图

## 第一节 水资源与水循环研究进展

国际上已经开展了许多水问题的研究工作,作为认识水问题的基本理论,水循环与水平衡正在宏观与微观尺度上不断扩展与深化。在宏观上把水问题提高到流域与全球尺度加以分析,这些研究促进了 RS 与 GIS 的应用,并成为水循环机制研究的重要手段。20 世纪 80 年代以来,国际上开展了多项与水循环密切相关的有关水问题的研究计划 (UNESCO, 1972),如 80 年代以来,UNESCO 一直执行的国际水文计划 (IHP),国际地

圈-生物圈计划(IGBP)开展的水文循环生物圈的研究项目(BAHC),以及世界气候研究计划(WCRP)开展的全球能量与水循环试验(GEWEX),这些计划相互促进并完善了区域与全球水文学的发展。例如国际地圈-生物圈计划(IGBP)强调界面过程研究,力图把描述全球物理气候系统的大气环流模式(GCMs)与全球水循环模型相耦合,这一研究将提供量化与描述全球水文过程与未来变化的可能,其中包含自然变化与人类活动的影响。人类活动对水文循环的影响归结为两大类:①与土地有关的人类活动。这类活动多属于对水文循环的直接影响,例如森林采伐、开荒耕种、放牧、兴修堤坝水库、拦河引水、农田灌溉、工矿交通建筑、城市化等。这些活动均会改变陆地水文循环与水量平衡过程,其影响范围多是局地性的,但随时间逐渐扩展。②与影响气候变化有关的人类活动。土地利用的改变也常常会影响局地气候,如地表反射率的改变、大面积的水库与引水灌溉会改变地区的水分与热量条件。

在这些大型的科学计划中,开展了一系列的外场观测试验研究和陆面方案的性能比较(表 1-1 中列出了其中一部分),它们不仅在一定程度上解决了全球环境变化问题,而且还应用地表水分和能量循环过程的原理,建立了一系列陆地地表过程模式,开辟了宏观尺度水循环机制研究的新途径。

表 1-1 大尺度地气观测试验(史学丽,2001)

| 试验名称              | 时间            | 地点              | 试验面积<br>(km × km) | 主要目的                                |
|-------------------|---------------|-----------------|-------------------|-------------------------------------|
| HAPEX - MOBILHY   | 1985 ~ 1988 年 | 法国西南            | 100 × 100         | 能量 - 水交换、中尺度模拟                      |
| FIFE              | 1987 ~ 1989 年 | 美国              | 15 × 15           | 能量 - 水 - 碳交换、遥感研究                   |
| KUREX             | 1988 ~ 1991 年 | 莫斯科西南<br>50km 处 |                   | 能量 - 水 - 碳交换、遥感研究                   |
| EFEDA             | 1991 ~ 1995 年 | 西班牙中部           | 100 × 100         | 能量 - 水 - 碳交换、遥感                     |
| HAPEX - SAHEL     | 1992 年        | 尼日尔             | 100 × 100         | 能量 - 水 - 碳交换、遥感、中尺度模拟               |
| BOREAS            | 1992 ~ 1996 年 | 加拿大             | 1 000 × 1 000     | 能量 - 水 - 碳交换、碳循环、生物地理、土壤生态、中尺度模拟、遥感 |
| GCLP              | 1995 ~ 2000 年 | 美国密西西比          | 2 000 × 2 000     | 能量 - 水 - 碳交换、尺度研究、中尺度模拟、遥感应应用       |
| LBA               | 1998 ~ 2000 年 | 巴西亚马孙           | 2 000 × 2 000     | 能量 - 水 - 碳交换、尺度研究、中尺度模拟、遥感应应用       |
| ABRACOS           | 1900 ~ 1994 年 | 巴西亚马孙           |                   | 塔层微气象、遥感、生态、水化学、水平衡、植物与土壤物理         |
| REKLIP            | 1991 ~ 1999 年 | 德国、法国、<br>瑞士    | 103 ~ 106         | 微气象、遥感和热量通量                         |
| OASIS             | 1993 ~ 1996 年 | 澳大利亚半<br>干旱地区   | 103 ~ 106         | 微尺度与中尺度平流过程、能量与物质输送过程               |
| NOPEX             | 1994 ~ 1996 年 | 瑞典              | 100 ~ 106         | 中尺度模拟、遥感研究                          |
| Lockeger - Sleigh | 1992 年        | 澳大利亚            | 104 ~ 106         | 边界层气象模拟                             |
| TVER              | 1990 ~ 1994 年 | 俄罗斯             | 104 ~ 106         | 遥感、生态、地 - 气相互作用                     |

陆面过程模式中物理过程的描述主要考虑了能量收支平衡和水分收支平衡。所有陆面模式描述的都是垂向一维陆气间水分和能量的交换过程,水平方向上假定是均匀的。对于陆面水分收支过程,降水一部分被植被叶面截留,一部分直接降落到地面。植物枝叶截留的降水一部分用于蒸发,另一部分滴落到地面,与直接降落到地面的降水一起渗入土壤中或形成表面径流。土壤中的水和叶面上截留的水通过蒸发返回大气,植被的根系从土壤中吸收水分再由叶面向大气蒸腾水汽。这样形成了一个大气、陆表水分循环圈。水分循环不仅决定了水的分布和平衡,还通过蒸发和降水过程,对能量的再分配起着决定性作用。20 世纪 80 年代以来,陆面过程模式本质上都属于计算土壤-植被-大气间传输方案(Soil Vegetation Atmospheric Transfer Schemes, SVAT)。Dickinson 等(1986)建立了一种充分考虑生物大气相互作用的,计算大气和植物覆盖的陆面间热量、质量和动量输送的模型,简称 BATS 模型(Biosphere Atmosphere Transfer Schemes),Sellers(1986)也建立了一种简单生物圈模型 SiB(Simple Biosphere model),这一类考虑植物作用的模型统称 SVAT。10 年中,陆面参数化方案发展迅速,改进和新的模型不断问世。从 90 年代以后,随着植物生理学和生态学研究的发展,加之卫星遥感技术的应用,新一代陆面模式中包括了植物进行光合作用的生物化学模式,这类模式的代表有 LSM(Bonan G B, 1996)、SiB2(Colello G D 等, 1998)和 AVIM(季劲钧等, 1999)。

我国结合 BAHC、GEWEX 等计划,对大气、陆地和水系统间的界面过程,气候变化和水文系统的关系,湿润带、热带、干旱半干旱区水文研究与水资源管理战略等也进行了比较深入的研究。“七五”至“九五”期间,我国开展了一系列的大型地气相互作用科学试验,包括“黑河流域地气相互作用野外试验”(HEIFE)、青藏高原试验(TIPEX)、淮河流域能量与水分试验(HUBEX),以及内蒙古半干旱草原土壤-植被-大气相互作用试验(IMGRASS)。这些试验于 1998、1999 年陆续结束,已积累了丰富的、有待开发的陆-气相互作用资料。

在积极开展从水分能量平衡交换过程研究宏观尺度陆面模式的同时,从水循环过程的产汇流物理过程出发,中小尺度水文模型的研究也经过了从概念性水文模型到分布式水文模型的发展历程,推动了中小尺度水循环机制的进一步深入研究(吴险峰, 2002)。自 1969 年 Freeze 和 Harlan 第一次提出了关于分布式物理模型的概念后,分布式模型开始得到快速发展。三个欧洲机构提出的 SHE 模型(Abbott M B, J C Bathurst, 等, 1986a)是最早的分布式水文模型的代表,在欧洲和其他地区得到了应用和验证(Abbott M B, J C Bathurst, 等, 1986b)。SHE 模型考虑了截留、下渗、土壤蓄水量、蒸散发、地表径流、壤中流、地下径流、融雪径流等水文过程;但在 SHE 模型的流域参数、降雨及水文响应的空间处理中,垂直方向用层表示,水平方向用方形网格表示。另外一些考虑流域空间特性、输入、输出空间变化的分布式物理模型,如:CEQUEAU 模型(Storm B, K H Jensen, 1984),将流域分为方形网格,输入所有网格的地形、地貌、雨量等特征,对每一个网格进行计算,在水质模拟、防洪、水库设计等诸多方面有适用性;Susa 流域模型(Charbonneau R, J P Fortin 和 G Morin, 1977)强调地表水和地下水的合成,除可模拟径流外,还可以用于预测土地利用的水文效应;还有一些 SHE 模型的不同版本及 IHDM 模型(Refsgard J C 和 E Hansen, 1982)等。国内这方面的研究开展较晚,但也进行了有益的探索和研究。我们在黄河流

域提出了一种分布式水文模型,模型包括各小流域产流、汇流、流域单宽入流和上游入流反演、河道洪水演进四个部分,水源分坡面流、壤中流和地下径流,考虑了产流随空间和时间变化的分布特征,能计算产流的多种径流成分的物理过程。将数学物理问题与洪水预报结合,给出了流域产流、河道汇流、水库洪水演进三个动态分布预报耦合模型,不仅可以用于分析降水径流规律,还可以用于洪水预报,该模型在丰满、龙河口和陆浑等水库流域得到应用(郭生练等,2001);张建云等(2000)建立了参数网格化的分布式月径流模型,并应用模型进行了华北、江淮流域的水资源动态模拟评估。

水循环研究除在国内已发展的各类流域水文模型外,正深入到单元尺度的细微观测与计算模拟,尤其是田间水分运动与交换过程的试验与计算研究。相对于宏观尺度的研究,我国在这方面已有一定的工作基础,这些研究主要致力于揭示界面过程中水分、热量交换规律,例如,地下/土壤水、植物根系吸收、植物冠层辐射平衡、温度、总气孔阻力、边界层阻力、土面蒸发、土壤热通量等。土壤-植物-大气连续系统的研究、多种水体之间多种形式耦合系统的探讨,以及不同地理带的水循环过程的试验研究,对于发展水资源评价方法、农田节水调控、农业合理用水,具有重要的意义和广阔的应用前景(Barrett, 1986)。水循环的微观与宏观的结合表征水文科学理论的逐步完善和系统化。

综上所述,近年来,一系列大型的科学计划和外场试验不断推动了水资源与水循环研究工作的向前发展,主要表现为两个特征:①在宏观尺度水资源与水循环的研究方面,从水分能量平衡过程和界面相互作用过程出发,开展了涉及水循环过程的各种陆面过程模式研究工作;②在中小尺度水资源与水循环的研究方面,从水文产汇流物理机制出发,开展了各种分布式水文模型的研究工作。在未来的水资源与水循环研究工作中,将面临解决以下问题(Dara Entekhabi, 1999):

(1)地面水文系统和大气模式中天气与气候变量相结合的机制和途径。

(2)地形、土壤和植被等水循环影响因子与水文响应过程的机制,以及它们相互作用的时间尺度。

(3)微观水文模型和宏观水文过程间的空间尺度转换。

(4)土壤水分在大尺度土壤-植被-大气系统水分能量交换过程中机制及其作用。

(5)人类活动对水循环过程的作用过程。

## 第二节 遥感技术与水循环研究概述

水循环机制的研究是水资源研究的基础性问题,为此在实验室和野外试验场开展了许多有关水循环机制的研究工作。包括观测和计算微观小范围内的各个水循环过程,如入渗、径流和蒸散发等;但是,中大尺度范围的水循环过程的观测和计算却比较困难,其原因在于目前我们还不能很好地将中大尺度范围的各个水循环过程在空间和时间尺度上完全统一(National Research Council, 1991)。因此,为了很好地解决中大尺度的水循环机制研究问题,应该积极地推动新模型和新数据在区域水循环研究中的应用。在这方面,遥感技术有其独特的作用,它不仅能提供丰富的空间信息,更重要的是它还能提供许多常规传统方法难以观测到的水循环要素数据(Engman, Edwin T, 1995),包括土壤、植被、地质、地

貌、地形、土地利用和水系水体等许多有关下垫面条件的信息,也可以测定估算蒸散发、土壤含水量和降雨的云中水汽含量与可降水量。

## 一、遥感信息在水循环地表因子获取中的应用

地表因子是水分在地表再分配的控制性因子,是水循环模型中不可缺少的控制性条件。在中大尺度的水循环过程研究中,地表因子的空间分布规律基本上决定了水循环的空间分异性。目前,遥感在水循环地表因子获取中的应用主要在土地覆盖和土地利用、植被指数/叶面积指数以及地形因子等方面的研究有比较大的进展。

土地覆盖和土地利用是遥感能直接观测到的要素,已被普遍使用在水循环过程的研究中。在产汇流参数、生物生产量和农业灌溉措施等确定方面,都离不开土地覆盖和土地利用资源。早在 80 年代,Ragan 和 Jackson (1980) 以及 Bondelid 等(1982)就利用遥感方法确定城市、农业和森林的土地覆盖和土地利用数据,作为输入水文模型的参数加以利用。

在 1972 年发射第一颗人造地球资源卫星时,科学家就试图研究并建立光谱响应与植被覆盖间的近似关系。研究结果表明,利用在轨卫星的红光和红外波段的不同组合进行植被研究效果非常好。这些波段在气象卫星和地球观测卫星上都普遍存在,并包含 90% 以上的植被信息(Baret F, 1989)。这些波段间的不同组合方式被统称为植被指数(田庆久, 1998)。植被指数的定量测量可表明植被活力,而且植被指数比单波段用来探测生物量有更好的灵敏性。植被指数有助于增强遥感影像的解译力,已作为一种遥感手段广泛应用于土地利用覆盖探测、植被覆盖密度评价、作物识别和作物预报等方面,并在专题制图方面增强了分类能力。植被指数还可用来诊断植被一系列生物物理参量:叶面积指数(LAI)、植被覆盖率(Percentage of Vegetation Coverage)、生物量(Biomass)等,从而用来分析植被与大气之间物质与能量的交换过程,如蒸散发及碳循环等。植被指数/叶面积指数与蒸散系数(通常定义为实际蒸散量和作物参考蒸散的比率)有关,Choudhury (1994)已经阐明了蒸散系数和植被指数有很好的相关性,所以从遥感数据可以直接反演出作物蒸散系数。

遥感数据可以用于地形因子的提取,Haralick (1985)从陆地卫星遥感数据提取了高质量的地形数据,Case (1989)从 spot 遥感立体像对数据可以提取 DEM 数据,其垂直分辨率达到 5m,水平分辨率达到 10m,这些地形因子数据完全可以满足水文模型的需要。

## 二、遥感信息在水循环能量因子获取中的应用

能量因子是水循环的基本动力,控制着水循环中水分通量的大小和水循环过程的强弱。目前,遥感在水循环能量因子获取中的应用主要有地表温度、辐射状况、显热通量以及潜热通量等。

通过热红外遥感方法可以反演地表温度,而地面温度又可以用于蒸散计算,Price (1982)已经应用热红外遥感数据进行了区域蒸散的遥感试验,并将计算结果和气象方法计算的蒸散数据进行了对比分析。Jackson (1985)和 Gash (1987)分析了区域蒸散空间分异和地面温度的相互关系。Humes (1994)利用遥感地面温度和反照率数据建立模型,

进行了从点到面的蒸散计算。

太阳入射辐射可以通过遥感方法获取(Tarpley, 1973), Pinker (1994)应用 GOES 遥感数据计算了短波入射辐射的能量通量和地表反照率, 阐明精确获得短波净辐射的可行性。晴空条件下, 在均匀表面光谱数据已经知道的情况下, 地表反照率可以通过覆盖可见光和近红外波段的遥感数据计算出来(Jackson, 1985), 通过热红外遥感数据反演出的地表温度可以用于地面长波辐射的计算(Kustas 等, 1994)

显热通量可以通过地表阻抗法(Monteith, 1973)和近地边界层方法(Brutsaert, 1992)计算, 在这些计算中, 地表温度可以通过遥感反演出, Hall (1992)、Brutsaert (1992) 和 Kustas (1994) 的研究中阐述了这种计算方法有一定的可靠性。

尽管直接从遥感数据反演地表潜热通量有一定的困难, 但在辐射能量与显热通量已知的情况下可通过能量平衡余项法进行计算。

### 三、遥感信息在水循环水分因子获取中的应用

水分因子是水循环的基本方面, 水循环研究就是要揭示生态环境系统中的各种水分状况与数量, 从而计算出它们之间的界面通量, 最终认清生态环境中水循环过程的根本规律。目前遥感信息在水循环水分因子获取中的应用主要有土壤湿度、雪和降水等。

微波遥感是通过土壤含水量影响介电常数, 使回波信号不同, 建立土壤含水量与微波后向散射系数关系, 达到监测土壤水分的目的。微波遥感监测土壤水分精度较高, 且可以全天候使用, 这是监测土壤水分最有希望的方法之一。一系列的遥感试验说明, 土壤表层(0~5cm)的水分可以被微波传感器准确感知(Jackson, 1993), Wood (1993)用试验说明在小流域内地面土壤水分观测数据和微波遥感数据的相关性, Lin (1994)通过微波遥感获得土壤水分状况, 并计算出了小流域内的水分平衡状况, Goodrich (1994)利用微波遥感方法确定流域的土壤水分状况, 并可以作为水文模型中土壤水分含水量。

积雪/冰川是水循环中又一要素, 由可见光和近红外遥感数据可确定积雪场/冰川的分布范围和面积, 目前在北美洲, 4 000 多个流域的冰雪分布图已由 NOAA AVHRR 遥感资料绘制成功, 这些图都是以周为时段的连续资料, 其中 10% 的流域分布图被划分为垂直带(Carroll, 1995)。Hall (1985)用多时相遥感数据分析雪覆盖的变化, 从而确定雪的厚度和水量。微波遥感则可用于积雪/冰等融水量的估算(Rango, 1989; Shi, 1994), 加拿大气候中心的工作人员利用被动微波遥感资料引入微波亮度温度研制了一种积雪/冰等融水量的定时预报模型, 并应用到加拿大草原地区(Anderson, 1997)。遥感技术在冰雪水文中的应用, 还包括对积雪/冰区温度、湿度、反射率、雪粒大小等的估算。

随着卫星探测技术水平的提高和地面处理能力的增强以及卫星得到的气象参数和信息的日益增多, 利用卫星云图作定量降水估计正在蓬勃发展。依据所采用的资料源, 利用遥感资料进行降水量计算的公式与算法, 大致分为三大类: 一是利用 VIS/IR 资料, 二是利用微波资料, 三是两者结合。在早期, 降水一般利用遥感资料的红外(IR)和可见光(VIS)波段数据估算, 通过对云系进行分类以及确定降水云的覆盖情况估计降水, 后来 Gfith (1978) 和 Stout (1979) 等又提出了利用连续几张红外及可见光云图估计对流云降水的生命演变法(life evolution), 认为雨量是云临界面积和云生命史(life cycle)的函数, 要

求在整个生命期(life period)中追踪云体。在条件气候均匀的区域(在作业区域,一旦降水事件发生,则任一点、任一时刻,雨强 $R$ 的分布是相近的,它近似于该区域气候的雨强分布,雨强的平均值也就近似不变),一种简单而有效的利用卫星云图估计降水量的面积—时间积分法,也逐渐受到人们的关注。这种方法的主要思想是忽略个体对流云的生命史效应,仅选取数字化卫星云图上某一临界亮度温度包围的云面积作为唯一的预报因子,利用长时间、大尺度的资料确定降水量与云面积的经验关系来估计降水量(方竹君,1998)。微波遥感用于降水的研究是从1987年SSM/I发射之后,微波技术由于能够穿透云端而获得云层之下实际降雨微粒的特征,也已成为获得陆地降水的有效手段。

综上所述,由于遥感方法从高空观测地表,具有宏观性、多时相和比较经济等特点,能够大量获取水循环各个方面的因子信息,为许多水文模型提供必要的参数,极大地推动了水循环过程的研究。遥感技术未来的发展,可望在高空间分辨率、高光谱分辨率、高时间频度和多角度等方面取得巨大的进展,新的遥感数据和遥感理论与方法将更加精确地反演地表物质、能量因子及其转换过程。遥感技术是获取非均匀下垫面、非均匀介质参数最有效、最经济的方法,将改进水循环机制研究中的信息获取,主要表现在以下几个方面:

(1)观测体系方面。由于遥感传感器不断向前发展,热红外、微波、高光谱和多角度遥感技术得到广泛的应用,将极大地解决地面温度、土壤湿度、雪的体积、植被生态参数和地形参数水循环要素等的观测,从根本上改善目前的水循环常规观测。

(2)面资料方面。常规传统的水循环观测方法一般只是获得某个点上的水循环要素数据,而遥感观测获得的却是面上的数据,这种面上的数据恰恰是水循环过程的综合体现,所以比点上的数据更能客观地反映出水循环的机制,将有助于水循环过程的尺度问题研究。

(3)新型数据方面。遥感技术不仅可以通过传感器波长和观测角度的变化,获得新的水循环参数,而且通过与地理信息系统的结合,将传统的地面各种图件资料和观测点资料重新综合,从而提供地面资料与遥感资料相综合的水循环参数。

### 第三节 黄河流域自然环境概况

#### 一、自然概况

黄河源远流长,发源于青藏高原巴颜喀拉山北麓海拔4500m的约古宗列盆地,流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、山西、陕西、河南、山东等九省(区),干流河道全长5464km,注入渤海,流域位于 $96^{\circ}\text{E} \sim 119^{\circ}\text{E}$ 、 $32^{\circ}\text{N} \sim 42^{\circ}\text{N}$ 。幅员辽阔,流域面积79.5万 $\text{km}^2$ (包括内流区4.2万 $\text{km}^2$ )。

黄河自河源至内蒙古自治区托克托县的河口镇为上游,河道长3471.6km,流域面积42.8万 $\text{km}^2$ ,占全河流域面积的53.8%。汇入的较大支流(流域面积1000 $\text{km}^2$ 以上)有43条。青海省玛多以上属河源段,河段内的扎陵湖、鄂陵湖,海拔都在4260m以上,蓄水量47亿 $\text{m}^3$ 和108亿 $\text{m}^3$ ,是我国最大的高原淡水湖。玛多至玛曲区间,黄河流经巴颜喀拉山与积石山之间的盆地和低山丘陵,大部分河段河谷宽阔,间有几段峡谷。玛曲至龙羊