

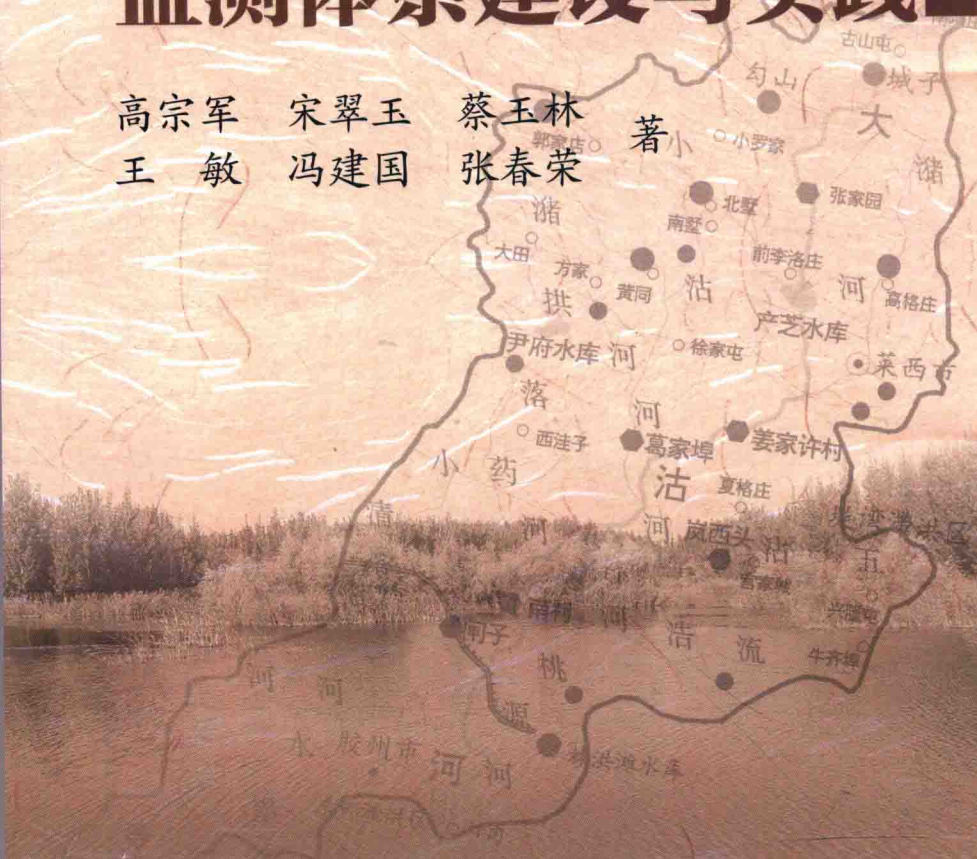


水科学博士文库

*Construction and Practice of Hydrological Elements
Monitoring System in Dagu River Basin*

大沽河流域水文要素 监测体系建设与实践

高宗军 宋翠玉 蔡玉林 著
王敏 冯建国 张春荣



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

水科学博士文库

水利部公益项目“变化环境下大沽河水资源安全保障技术研究”(201301089)资助

*Construction and Practice of Hydrological Elements
Monitoring System in Dagu River Basin*

大沽河流域水文要素 监测体系建设与实践

高宗军 宋翠玉 蔡玉林 著
王敏 冯建国 张春荣



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

·北京·

内 容 提 要

本书介绍了大沽河流域基于遥感的多水文要素构成的监测体系的建设与实践, 主要包括流域概况、流域蒸散发遥感反演、流域降水遥感估算与分析、流域土壤水分遥感反演与分析、流域径流量估计、流域土地利用动态监测、河道变迁分析与研究、流域大气-水文相互作用过程遥感监测体系等内容。全书理论与实践相结合, 对中小流域水文监测具有指导和示范意义。

本书可供从事水文监测和遥感技术应用等工作的专业技术人员阅读, 也可供相关专业院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

大沽河流域水文要素监测体系建设与实践 / 高宗军等著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2017.8
(水科学博士文库)
ISBN 978-7-5170-5658-4

I. ①大… II. ①高… III. ①河流—水文观测—研究—青岛 IV. ①P332

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第181136号

书 名	水科学博士文库 大沽河流域水文要素监测体系建设与实践 DAGU HE LIUYU SHUIWEN YAOSU JIANCE TIXI JIANSHE YU SHIJIAN
作 者	高宗军 宋翠玉 蔡玉林 王敏 冯建国 张春荣 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京嘉恒彩色印刷有限责任公司
规 格	170mm×240mm 16开本 8.75印张 167千字
版 次	2017年8月第1版 2017年8月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	45.00元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究



前言

QIANYAN

水是生命之源。水文学作为一门古老、传统而又日新月异的学科，伴随着社会发展昂首进入了21世纪。由于人口的急剧增加、社会发展的不平衡和生产力水平的迅猛提高，特别是在我国工业化水平、农业现代化水平及城市化水平均得到了长足进步的情况下，我国水资源短缺的现实更加严峻，某些干旱地区水资源供给形势甚至与非洲干旱地区的形势一样严峻。人们开始重视生态和环境的协调与可持续发展，一些新的技术和手段不断地涌现出来，促进了水文学的发展步伐，使得水文学的发展呈现出勃勃生机的态势。

遥感技术在水文监测方面的应用，近年来已经得到了飞速的发展。无论在理论上还是在技术上，尤其是在小比例尺大范围的水文监测方面，都具有了成功的案例，甚至已经发展成为一门边缘学科或综合学科——遥感水文学。

本书作者有幸参与了水利部公益项目“变化环境下大沽河水资源安全保障技术研究”（项目编号：201301089），主要完成了“水资源情势变化定量监测技术”的研究任务。根据任务书的要求，利用高分辨率遥感卫星数据对大沽河流域水循环和关键水文要素（降水、径流、土壤水、蒸散发）、湿地变迁、土地利用动态进行监测，分析大沽河流域水资源时空演变特征及大气水、地表水、地下水、土壤水相互转化的过程，建立具有时空属性的数据模型，实现大沽河流域水资源动态变化的数字化监测、预测和模拟。本书研究的主要内容如下：

- (1) 区域大气-水文相互作用过程监测与模拟。
- (2) 关键水文要素、土地利用监测与评估。
- (3) 流域土地利用动态监测。
- (4) 河道治理过程中河道特性变化监测与评估。

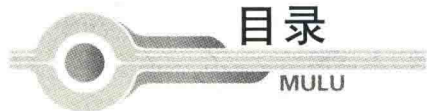
在两年多的学习、调查、研究中，作者较为系统地了解并领会了遥感技术在水文监测方面的原理、方法，并利用这些知识对大沽河流域（青岛市区域）开展了尝试性研究工作，特别是结合该流域已有的长期的观测资料与遥感数据获得的结果进行了对比，发现或得到了一些有意义的结论或启示，经过归纳总结，整理成本书。因而本书既是工作实践的心得体会，也是经验和结论的总结，冀望通过本书，与广大读者交流卫星遥感技术在流域水文监测中应用的研究进展。

特别需要指出的是，研究项目是在青岛市水利局水资源研究室的程桂福研究员、山东省水利科学研究院张保祥研究员、青岛市水文局姜世强总工程师领导下实施的，青岛市水文局崔俊岭高级工程师、黄修东博士以及山东师范大学崔素芳博士自始至终给予了积极的配合、无私的帮助和热情的指导；项目实施过程中，得到了中国水利水电科学研究院、水利部防洪抗旱减灾工程技术研究中心辛景峰教授、杨永民博士的热情帮助，并有幸聆听了他们的高水平讲座和指导；青岛市气象局提供了大量长观资料；山东科技大学研究生徐衍兰、刘晓笛、田禹、李佳佳、董红志、于慧娜、王世臣、姚东绪等同学都参与了工作，付出了辛劳。在此一并表示感谢！

由于作者水平有限，加之受工作条件及获得数据的限制，书中内容难免存在不足之处，敬请读者批评指正。

作者

2017年3月于青岛



目录

MULU

前言

第 1 章 概述	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 国内外研究现状	2
第 2 章 大沽河流域概况	23
2.1 地理位置	23
2.2 气象气候	24
2.3 水文	26
2.4 地形与地貌	29
2.5 地质	29
2.6 水文地质	30
2.7 土壤植被	32
2.8 社会经济概况	33
2.9 水环境状况	34
第 3 章 大沽河流域蒸散发遥感反演	36
3.1 基于 SEBAL 模型的蒸散发反演原理	36
3.2 大沽河流域年内蒸散量反演及变化研究	38
3.3 大沽河流域蒸散量年际变化规律研究	46
第 4 章 大沽河流域降水遥感估算与分析	50
4.1 FY-2F 降水估算产品	50
4.2 基于 FY-2F 降水估算产品的大沽河流域降水分析	51
第 5 章 大沽河流域土壤水分遥感反演与分析	57
5.1 光学和热红外遥感土壤水分反演原理	57
5.2 土壤水分反演模型的选择	61
5.3 基于 TVDI 的大沽河流域土壤水分监测	62

第 6 章	大沽河流域径流量估计	70
6.1	径流	70
6.2	降水与径流间的相关性	75
6.3	利用遥感数据资料进行流量预报	77
第 7 章	大沽河流域土地利用动态监测	80
7.1	研究数据及预处理	81
7.2	分类精度评价	83
7.3	变化监测分析及结论	87
第 8 章	基于遥感技术的大沽河河道变迁分析与研究	90
8.1	研究内容及方法	90
8.2	数据获取	91
8.3	数据预处理	92
8.4	河道特征提取	98
8.5	河道变迁分析	104
第 9 章	流域大气-水文相互作用过程遥感监测体系	106
9.1	各要素的遥感监测	107
9.2	模型建立流程	111
附录：书中部分彩图示意		113
参考文献		120
后记		133

第 1 章 概 述

1.1 研究背景及意义

水资源是不可替代的战略性资源，是经济和社会可持续发展的重要物质基础。水资源安全是在不超出水资源承载能力和水环境承载能力的条件下，水资源的供给能够在质和量上满足人类的生活、生产和生态用水需求。

近 100 年来，气候与环境已经发生了明显变化，气候变暖成为了主导趋势。相关资料表明，在过去的 100 年间（1906—2005 年），地球表面的平均温度增加了 0.74°C 。受全球气候变暖的影响，全球降水也发生了显著变化，全球水文循环加剧，极端水文事件频发。伴随着剧烈的人类活动，土地利用类型的转变导致覆被发生变化，大规模水利工程等建设改变了河川径流过程，区域地表水和地下水的交互作用也越来越频繁。流域是人类活动最密切的自然水循环基本单元，如何实现流域水资源合理开发和高效利用，使水环境得到更好的治理保护及水资源得到合理配置成为亟待解决的主要问题。气候变化对河流的影响已经成为世界普遍关注的重要问题，由气候变化所引起水资源量的时空分布和水质变化等问题已成为各国科学家和政府关注的热点。由于气候变化导致水资源在时间和空间上的重新分配，水资源数量发生了改变，自然生态环境和人类社会的经济发展受到严重的影响。因此，研究变化环境条件下对水文循环系统的影响及响应机制十分重要，而水文要素的快速监测及其监测体系建设是研究水文循环的基础。

大沽河流域位于胶东半岛西部，在东经 $120^{\circ}03'$ ~ $120^{\circ}25'$ 、北纬 $36^{\circ}10'$ ~ $37^{\circ}12'$ 之间。干流全长 179.9km，流域总面积 6131.3km^2 ，其中在山东省青岛市境内 4781km^2 ，流域内有产芝水库、尹府水库、高格庄水库等大中型水库 9 座，多年平均水资源总量为 9.10 亿 m^3 ，地表总拦蓄能力达 4.143 亿 m^3 ，是青岛市的重要城市水源地。大沽河流域是青岛市经济发展的中心，流域内分布着 50 多处乡镇、1953 座村庄及莱西、胶州两座县级市。同时，河道两岸分布着许多工厂企业。该流域内有耕地 251.89 万亩，农业总产值 63.35 亿元，工业总产值 139.30 亿元，该流域水资源状况、分配合理与否以及开发利用格局将直接影响到青岛市的供水安全、上下游和左右岸之间的社会稳定与和谐。为



此,有必要开展水文要素检测体系建设,为水资源优化配置、保证青岛市的供水安全提供技术支持。

遥感是 20 世纪 60 年代迅速发展起来的一门综合性探测技术。地物由于其种类或所处的环境不同,对电磁波有不同的反射或发射特性,根据远距离的传感器所获取的电磁辐射特征的差异即可识别地物。遥感技术具有视域宽广、信息丰富、多时相性和成本低等特点,目前已成为许多水文工作中不可缺少的高新技术手段,为水文水资源研究提供了许多新的信息、技术和资料支持。遥感技术在水文学中的应用可大致分为两方面:一是利用遥感资料提取各种水体(如湖泊、河流、湿地等)的面积变化、监测冰川和积雪的融化状态信息以及洪水过程的动态监测等,这是遥感技术在水文学中的直接应用;二是利用遥感资料进行有关水文过程中的参数和变量的推求。通常是利用一些经验公式、统计模型和概念性水文模型等来获取诸如径流、土壤水分、区域蒸发、降水等水文变量。因为这些水文变量不是由遥感资料直接获得的,又称遥感技术在水文学中的间接应用(傅国斌和刘昌明,2001)。对于区域尺度上的水文要素估算、土地利用覆被变化以及河道变迁监测而言,遥感技术不仅具有常规手段无法比拟的同时快速获得大面积地面特征信息的优势,而且也是目前最经济和最准确的手段之一。

本书拟利用多传感器卫星对大沽河流域的水循环和关键水文要素(蒸散发、降水、土壤水、径流等)、河道变迁、土地利用动态进行监测,建立具有空间和时间属性的数据模型,对大沽河流域水资源情势变化进行模拟,研究大气水、地表水、地下水、土壤水相互转化的过程,实现大沽河流域水资源动态变化的数字化监测和预测。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 蒸散发估算国内外研究现状

蒸散发(ET)是植被及地面向大气输送的水汽总通量,既包括地表和植物表面的水分蒸发,也包括植物表面和植物体内的水分蒸腾,它是陆面水文过程中极其重要的分量,决定了土壤-植被-大气系统中的水分和热量传输,是地表水量平衡支出项中的主要组成部分,同时也是陆地表层水循环最大、最难估算的部分,是水文水循环和水量平衡研究的核心。蒸散发在维持陆面水分平衡和地表能量平衡上发挥着重要作用,区域地表蒸散的变化特征反映了陆面过程中能量和水分收支状况的演变趋势,同时也进一步影响着区域气候和水资源的总量分布,进而对区域经济发展产生影响。



蒸散发作为水循环过程中最重要的分量之一，迄今已经有很长的研究历史，尤其是近半个世纪以来，学者们一直致力于蒸散发的理论模拟和估算。大量的理论和实践表明，蒸散发及其时空分布与气象状况、土壤水分、植被等因素息息相关，难以准确获取。传统的蒸散发估算方法局限于局部尺度，而较大空间尺度内陆面特征和水热传输的非均匀性导致传统的估算方法难以获取区域尺度的蒸散发。遥感技术的兴起和应用，使得估算大面积区域的蒸散发成为可能，尤其是 20 世纪 70 年代以后，涌现出了许多估算蒸散发的模型，使蒸散发的估算扩展到了空间尺度，并广泛应用于农业、水文等研究领域。遥感以少量的地面数据估算大范围区域蒸散的优势被认为是可以经济、有效地提供区域蒸散发消耗量的唯一方法。因此，开展基于遥感手段的区域地表能量与水分动态监测研究具有重要意义。

遥感估算区域蒸散发的方法主要分为经验统计模型、与传统方法相结合的遥感模型、地表能量平衡模型、温度-植被指数特征空间法、陆面过程与数据同化等。

经验统计模型机理简单，它是将站点通量观测数据与遥感数据相结合，直接拟合蒸散发与遥感参量（一般是地表温度和植被指数）的回归关系，然后估算区域尺度上的蒸散发。该方法的优点主要是简单易行，20 世纪遥感反演蒸散发初期，在估算小区域的蒸散发方面发挥了重要的作用；但是由于经验统计模型在很大程度上依赖于地表观测数据，可移植性较差，很难应用于大面积的区域蒸散发的精确估算。

与传统方法相结合的遥感模型蒸散发估算方法大都具有较为坚实的理论基础，物理概念比较明确，能较好地反映蒸散发的物理机制。然而，传统方法主要基于单点或田间尺度进行计算，难以用于非均匀下垫面蒸散发的计算。为弥补传统方法在区域尺度上的不足，结合遥感技术计算模型中所需要的净辐射、土壤热通量、阻抗等参数，进而计算区域蒸散发，使其从单点尺度推广到区域尺度，成为近年来研究的重点。1948 年，H. L. Penman 提出了基于能量平衡原理估算可能蒸发的 Penman 公式。1965 年，J. L. Monteith 将冠层阻抗的概念引入 Penman 公式，表征植被生理作用和土壤供水状况对潜热通量的影响，以估算非饱和下垫面的实际蒸散发，由此得到了著名的 Penman - Monteith 公式。该公式被证明在致密冠层的蒸散发估算上有良好的效果。除 Penman 类模型外，R. J. Bouchet 于 1963 年提出了陆面实际蒸散与可能蒸散之间的互补关系原理，为估算实际蒸散发开辟了新的途径。C. Priestley 和 R. J. Taylor 在 1972 年以平衡蒸发为基础，在无平流假设的前提下，建立了饱和下垫面蒸散发的计算方法，提出了 Priestley - Taylor 模型。

温度-植被指数特征空间法主要是基于地表温度和植被指数之间的时空对



应关系与地表植被覆盖和土壤水分状况等参数之间的密切关系。以此为基础的地表蒸散算法，一般是通过特征空间求解蒸发比、Priestley - Taylor 系数、水分亏缺指数 WDI 等，进而计算地表蒸散量。这种方法不过多依赖气象要素，但干湿边难以准确确定，大都适用于平坦下垫面，并且要求土壤表面水分状况、植被数或植被覆盖度具有较大的变化范围。

陆面过程模型是用来研究陆地-大气之间物质和能量交换过程的模型。陆面数据同化的核心思想是在陆面过程模型的动力学框架内，融合不同来源和不同分辨率的直接（地面）与间接（遥感）观测，集成陆面过程模型和各种观测算子（如辐射传输模型），根据观测自动调整模型的参数和状态变量，来获得更为可靠的地表水分和能量循环过程的信息。陆面过程与数据同化法虽然能模拟出水热通量过程的连续变化，但计算量很大，特别是较高分辨率遥感数据用于同化时，模型需要输入很多与土壤和植被属性有关的参数，而这些参数在区域尺度上很难获得，并且由于多数数值模拟需要连续的气象资料，在一定程度上限制了在区域尺度上的应用。

地表能量平衡模型法，又称为地表能量平衡余项法，是目前遥感估算不同时间和空间尺度上趋于蒸散发中应用最广泛的一种方法。不考虑由平流引起的水平能量传输，地表单位面积上垂直方向净收入能量分配形式主要包括：用于大气升温的感热通量，用于水在相态转换时（如蒸发、凝结、升华、融化等）所需的潜热通量以及用于地表加热的土壤热通量，还有一部分消耗于植被光合作用和新陈代谢活动引起的能量转换和植被组织内部及植被冠层空间的热量储存，这部分比测量主要成分的误差还小，因而常常忽略不计。地表能量平衡模型的基本思想是，在不考虑平流作用和生物体体内需水的情况下，将潜热通量作为能量平衡方程的余项进行估算，然后将潜热通量转换为瞬时蒸散量。荷兰学者 Bastiaanssen 等（1998）开发了遥感陆面能量平衡模型——SEBAL 模型，通过反演遥感地表参数，获取气象数据和植被下垫面信息估算蒸散量。Su 等（2002）提出了 SEBS 模型，其理论基础是用于计算热量粗糙度的动力学模型、大气总体相似性理论以及 Monino - Obukhov 相似性理论。M. D. Ahmad 等（2006）采用 SEBAL 模型，结合 Landsat - 7 影像对印度克里希纳盆地的蒸散量进行了估算；Anderson L. Ruhoff 等（2012）基于 SEBAL 模型和 MODIS 数据估算了巴西热带稀树草原的蒸散量；Mohammad Taghi Dastorani 等（2012）利用 SEBAL 模型和 MODIS 数据估算了伊朗亚兹德省干旱山区的蒸散量，以上研究结果均证明了 SEBAL 模型在区域蒸散量研究中的适用性。

国内在利用卫星遥感资料估算非均匀陆面区域蒸散量方面起步较晚。1991 年，Chen 等（1991）尝试利用 NOAA/AVHRR、海拔高度和气象观测数据来对江河流域复杂地形上的蒸散量进行估算，用改进的 Penman 公式先计算出各



类下垫面实际蒸散发量与蒸发潜力的比值,然后求出月平均蒸散量。马耀明等(1999)在利用卫星遥感技术结合地面资料估算区域尺度上的地表反射率、NDVI及地表温度的基础上,研究了非均匀地面地表特征参数及能量平衡各分量的区域分布及季节差异。陈云浩、李晓兵等(2002)在利用遥感资料求取地表特征参数的基础上,建立了裸露地表条件下的裸土蒸发和全植被覆盖条件下的植被蒸腾计算模型,然后结合植被覆盖度给出非均匀陆面条件下的区域蒸散计算方法;2005年,陈云浩、李晓兵等发展了一个两层的蒸散发计算模型,即从植被冠层和土壤表面出发,分别建立陆面日蒸散发量计算的阻抗模型,然后结合植被覆盖度给出非均匀陆面条件下的日蒸散发量计算方法。何玲和莫兴国(2007)应用遥感数据、农业气象站测量数据及Nishida模型等模拟了无定河流域日蒸散量,并对该流域日蒸散的空间分布规律进行了研究。李红军等(2005)采用Landsat-7 ETM+数据和SEBAL模型对河北省栾城县进行了遥感蒸散研究,估算了区域日蒸散量,模拟结果较为合理;刘朝顺等(2009)利用改进的SEBAL模型推估了区域地表蒸散,并验证了结果与实测值具有良好的一致性;杜嘉等(2010)利用SEBAL模型估算了三江平原的日蒸散量,蒸散量估算结果与实测数据误差较小,且进一步分析了不同土地利用类型蒸散量的差异。

1.2.2 遥感降水反演的研究现状

降水是指从云中降落至地球表面的所有固态和液态的水分,是陆地表面水文气象的重要因素,对区域水循环过程和水平衡都具有重要的意义。降水及其分布以自上而下的方式影响陆地水文生态等过程,例如,产生地表径流、导致土壤水分发生变化等。然而,降水过程作为一种复杂的自然现象,在时空分布上具有显著的变异性特征。因此,获取高时空分辨率的降水数据,对于认识与理解陆地表面过程至关重要。

传统的降水观测手段主要是地面气象站点采用雨量仪器设备(如雨量计、地基雷达)直接观测地面降水量,并通过插值方法获取区域数据。站点观测具有较高的精度,但由于雨量计或地基雷达在陆地上分布不均,在海洋上分布更加稀少,其获取的点状降水数据存在着点位密度与分布不均匀的问题,插值结果的精度难以得到保证,具有宏观性的卫星观测则可以弥补这些缺陷。

基于卫星遥感技术对降水的时空分布进行精准测量,成为近50年来最富有挑战性的科学研究目标之一。早期的遥感降水反演主要依赖于被动遥感,包括地球静止卫星和近地轨道卫星上搭载的可见光、红外和被动微波传感器。地球静止卫星上可见光和红外传感器通常每隔数十分钟对目标区域进行一次观测,时间分辨率高,能够提供卫星云图,抓住一些生命史较短的降水云系统。



搭载在近地轨道卫星上的各类传感器在扫描时会出现盲区,但是微波通道提供的卫星云图,可以有效地减少卷云对降水反演精度的影响。1997年11月发射的热带降雨观测卫星(TRMM)搭载了世界上第一台星载降水雷达,开创了全球降水监测的新时代。

近几十年来,人们针对各类传感器研发的降水反演算法已达上百种,既有经验型算法,也包括基于物理原理的算法。根据不同的传感器类型,目前已有的各类卫星遥感降水反演算法分为可见光(VIS)/红外(IR)反演、被动微波(passive microwave, PMW)反演、主动微波(active microwave, AMW, 雷达)反演以及多传感器联合(multi-sensor, MS)反演等4种类型。

可见光/红外降水反演算法是最早提出而且也是最为简单的一种方法,该算法利用了冷云和暖云的物理性质。冷云和暖云的存在与对流有关,对流云系会产生降水。可以说,降水是大气动力与热力作用的综合结果,这种作用不仅决定了云中的降水,而且决定了降水云的外在形态。可见光及红外降水估计方法正是借助于可见光和红外扫描辐射仪对降水云外在形态的探测去推断云中的降水信息。对大量降水过程的定量分析表明:一些云图特征量(如云顶温度、温度梯度、云团的膨胀、穿透性云顶的存在、云体相对于云团中心的偏离量)与云底降水有着一定的对应关系。

强对流云团云顶温度是与降水强度关系最为密切的云图特征量。一般而言,降雨强度越强,其垂直发展高度越高,云顶温度便越低。在可见光及红外光波段测得的云顶信息,可用来间接估算地表降水。具体而言,即建立云顶红外温度与降雨概率和强度之间的关系。其中,目前应用最广泛的是地球静止业务环境卫星(GOES)的降水指数GPI(Arkin等,1987),其表达式为

$$GPI = r_c F_c t \quad (1.1)$$

式中:GPI为降水指数,mm; t 为持续时间,h; r_c 为转换常数,3mm/h; F_c 为面积不小于50km×50km区域的冷云覆盖率,无量纲单位,变化区间是0~1。

云顶亮温低于235K的云体,定义为冷云。GPI指数浅显易懂,简单易用,在40°N~40°S区域对流系统是主要的降水系统,而在纬度高于40°的地域这一算法存在很大的局限性。

基于GPI算法原理,Ba等(2001)提出了GOES多光谱降水算法(GM-SRA),它使用GOES的5个可见光/红外波段(VIS/IR)数据,采用指数函数和二次曲线估计降雨强度,并利用湿度校正因子和云增长速率校正因子对初始估计结果进行修正。

除了GMSRA算法之外,其他的VIS/IR算法有Griffith-Woodley算法(1978)和出射长波辐射降水指数法OPI(Xie等,1997)等。Ebert等



(1998) 使用对地静止气象卫星 GMS 和地基雷达数据, 在西太平洋海域对 16 种 VIS/IR 降水反演算法进行了比较与分析, 发现各种算法普遍高估降水。尽管各种算法在降水量估算值上存在不同程度的差异, 但是它们所得出的降水空间分布则非常相似。

虽然 VIS/IR 反演算法在估算精度上相对有限, 但由于 GEO 提供了长时间、相对连续的可见光/红外波段监测数据, 可以提供非常精细的降水强度变化信息, 所以 VIS/IR 算法已经广泛应用于包括气象业务在内的各个领域之中。我国学者利用 GMS、风云气象卫星 (FY-2) 等地球静止卫星资料, 直接使用或者改进了 VIS/IR 降水反演算法, 探讨了数种 VIS/IR 算法在中国地区的适用性 (杨义彬, 2011; 徐晶等, 2005; 陈利群等, 2006)。其中, 基于 FY-2 系列卫星的降水估算是国内最常用的降水反演方法。

与可见光和红外波段相比, 被动微波 (PMW) 不仅具有穿透云雨大气的的能力, 到达星载微波辐射计的降水云体内部产生的辐射信息还直接包含了降水结构信息, 所以利用微波资料反演降水更为直接, 比 VIS/IR 算法有更坚实的物理基础 (李小青, 2004)。迄今为止, 根据微波辐射传输原理和海/陆微波辐射特性, 人们提出了许多 PMW 降水反演方法。其中, Wilheit 等 (1977) 通过建立模拟或观测亮温与降雨率之间的简单回归关系, 第一个提出了被动微波降水反演算法。目前在各类业务中得到广泛应用的统计-物理混合算法是 Ferraro 算法 (Ferraro, 1997), 它在海洋上的反演误差为 50%, 陆地上为 75% (热带和夏季中纬度地区)。而在物理原理上更为严谨的算法基本上都建立在概率论基础上, 其中戈达廓线算法 (GPROF) 应用得最多 (Kummerow 等, 2001)。由于微波传感器仅安置在近地轨道卫星上, 所以 PMW 算法只适用于该类星载传感器。在海洋上传感器 (低频段) 的空间分辨率大约为 $50\text{km} \times 50\text{km}$, 在陆地上传感器 (高频段) 的空间分辨率大都低于 $10\text{km} \times 10\text{km}$ 。

热带降雨测量卫星 TRMM (tropical rainfall measuring mission satellite) 上搭载了第一台专门用于监测降水的主动式微波传感器 (precipitation radar, PR, 降水雷达), 这也是目前世界上唯一的星载降水雷达仪器。它是一台相控阵天气雷达, 主要使用 13.8GHz 频段来观测降水粒子和地球表面的反射能量, 并且能够获得海洋和陆地降水的三维空间结构信息 (Iguchi 等, 2000)。TRMM-PR 成功在轨运行极大地推动了基于星载雷达的降水反演算法研究 (吴庆梅, 2003)。星载雷达降水反演成为当前降水反演研究最重要的研究领域。

国外对 TRMM 降水数据的研究领域涉及的范围广, 不仅包括降水的一些微物理结构和气候特征等, 还包括降水的时空分布情况。Hong 等 (2005) 通过 TMI (TRMM microwave imager) 瞬时降水数据对利用遥感信息估算降水



的神经网络系统参数进行适当调整后, 研究发现热带地区降水量在精度和稳定性方面, 通过 PERSIANN (precipitation estimation from remotely sensed information using artificial neural networks) 估算均有所提高。Krishnamurti 和 Kishtawal (2000) 把 TRMM 卫星和 Meteosat-5 降水资料相结合, 估算出亚洲范围内夏季风影响下降水的日变化分布情况。Berg 等 (2002) 利用 TRMM 卫星 PR 的降水资料对东、西太平洋赤道辐合带 1999 年 12 月至 2000 年 2 月的降水结构研究发现: 两部分降水结构受地区差异的影响明显, 在季节和年际变化上的差异也很显著。也有一些学者通过 PR 降水资料探讨了大城市对降水空间分布的影响 (Smith 等, 2007)。佛罗里达州立大学的研究人员把 TRMM 卫星降水数据和 SSMI (special sensor microwave imager) 数据应用到天气预报的模式中, 从而提高了局部地区乃至全球范围天气预报的准确性, 进而也能够极大地提高对降水预报的精确度 (Krishnamurti 等, 2001)。Lonfat 等 (2004) 通过 TRMM 的 TMI 和 PR 资料详细地分析了台风的降水水平分布、降水粒子的垂直分布以及热带气旋加热等情况。Liu 等 (2000) 把 QuikSCAT 的海表面风资料和 TRMM 降水资料相结合进行研究, 结果表明飓风动力和水过程是相互作用、相互影响的。

国内学者利用 TRMM 卫星降水数据开展相关研究较晚 (始于 21 世纪初), 研究主要集中在以下几个方面:

(1) 对台风降水结构的研究。在初期研究阶段, 毛冬艳 (2001) 通过 TRMM 降水数据对 Sam 台风做了相关研究。丁伟钰等 (2002) 利用 TRMM 降水资料分析了在广州登陆的热带气旋降水的时空分布特征。牛晓蕾等 (2004) 以桑达热带风暴和 1999 年的 9908 号热带风暴为研究对象, 利用 TRMM 卫星的 TMI 降水资料, 定量分析西北太平洋上热带气旋降水与水汽、潜热的相关关系。傅云飞等 (2008) 利用 TRMM 卫星的 PR、TMI 和 VIRS 传感器, 对 2004 年发生的“云娜”台风隔离分析降水云和非降水云的特征。钟敏 (2005) 利用 TRMM 测雨雷达的 2A25 数据, 研究了 1999 年的 9914 号台风降水在 3 个不同时间点内降水的强度和垂直结构特征。

(2) 对局地中尺度强对流天气系统降水结构研究。程明虎等 (2001) 采用 TRMM 降水数据对 1998 年长江流域的暴雨展开了相应的研究, 并借此分析了暴雨的降水强度、空间分布、降水类型以及暴雨的降水水平和垂直分布等结构特征。傅云飞等 (2007) 结合 TRMM 卫星的测雨雷达 PR 和微波成像仪获得的降水数据, 分析了 1996 年和 1998 年分别发生在皖南地区和武汉地区的两个中尺度下降水的强度和空间分布情况及其降水的水平结构和垂直结构特征, 以及与 TMI 微波亮温的关系。郑媛媛等 (2004) 采用 TRMM 卫星上的测雨雷达、微波成像仪、可见光和红外扫描仪获取的降水资料, 分析了 1999 年发生



在黄淮地区的冰雹降水过程。

(3) 对大尺度范围内发生降水的特征研究。陈举等 (2005) 利用获取的 TRMM 卫星雷达降水数据, 研究了南海及其周边区域降水的空间分布和季节变化特征。李锐等 (2005) 利用 TRMM 卫星的测雨雷达的探测降水的结果, 研究了 1997 和 1998 年厄尔尼诺后期热带太平洋的降水结构, 并与 1999 年和 2000 年非厄尔尼诺同期的降水情况进行对比分析。傅云飞等 (2007) 结合 TRMM 卫星的 PR、TMI、VIRS 和 LIS 等传感器对降水云进行综合探测, 利用全球降水气候计划降水资料 (GPCP) 和中国气象站点实测的降水资料, 研究了东南亚降水时空分布特点, 并与 PR、GPCP 以及地面实测降水进行对比分析。刘奇和傅云飞 (2007) 利用长时间序列的 TRMM 降水资料, 统计分析了亚洲夏季降水的水平分布特征, 研究结果表明在孟加拉湾北部沿岸、中国南海南部以及赤道西太平洋暖池形成了 3 个稳定的强降水中心, 并利用 GPCP 的地表降水数据, 评估分析了整个亚洲范围内洋面、陆面和 6 个典型区域的 TMI 降水精度。

(4) 在中尺度数值模式中的应用研究。杨传国等利用 TRMM 卫星的测雨雷达获取的降水数据, 并结合分布式陆面水文模型, 模拟流域中尺度下陆面水文的过程, 利用该遥感数据对水文预报等研究领域进行性能评估。徐枝芳通过 MM5 模式, 并利用 TRMM 卫星的 PR 降水资料模拟了江淮流域两次暴雨发生的全过程; 此外, 徐枝芳还与葛文忠等改进了 MM5 中的积云参数化 Grell 方案, 并用该方案也模拟了 1998 年发生在江淮流域的两次特大暴雨过程。丁伟钰在 GRAPES 三维变分通话系统的基础上, 利用改进的郭晓岚对流参数化方案作为观测算子, 对 TRMM 卫星降水率资料进行同化。马雷鸣等分析了 TRMM 卫星海表降水率数据的四维变分同化在热带气旋数值模拟中的重要性。

(5) 对微波反演降水研究。毛冬艳 (2001) 采用 TRMM 卫星的 TMI 降水数据, 并在考虑到海洋、陆地和海岸 3 种不同下垫面情况下, 反演中国及邻近地区的瞬时降水。姚展予等 (2002) 基于 4 种基于 TRMM 卫星 TMI 亮温数据的方法, 反演了 1998 年发生在中国江淮流域的夏季洪涝灾害情况, 并对比分析了实测洪涝灾害, 结果表明用 TMI 亮温数据反演地面洪涝灾害精度较高, 能够满足应用的需求。此外, 还利用 TMI 的探测结果分析了陆地上空非降水云中的液态水路径的微波反演方案, 并检验了该反演方案 (姚展予等, 2003)。王雨等 (2006) 利用 TRMM 卫星 TMI 的探测资料, 分析了副热带地区非降水云液态水路径 TMI 的反演方案, 并对反演结果进行了间接检验。钟中和和王晓丹 (2007) 分析了 TRMM 卫星 TMI 的微波亮温数据在反演陆地和海洋降水中存在的差异, 且还把 TRMM 卫星的 TMI 和 PR 探测数据相结合,



从台风 Aere (2004 年) 接近台湾的观测资料中选取 3 个时间点的数据, 采用 4 种不同的方法反演降水, 并对比分析了这 4 种方法的反演结果。何文英等 (2005) 利用 TRMM 卫星的 PR 和 TMI 联合探测数据, 以及河南省气象站点小时降水数据, 比较验证了几种陆面降水的统计反演模型。王小兰 (2009) 利用物理方法把 TRMM 卫星的 TMI 亮温资料用来反演整个中国范围内的陆地降水分布。

然而, PR 并非尽善尽美。它的扫描宽度为 216km (轨道抬升后为 247km), 观测范围有限。同时, 它具有地基雷达的弱点, 雷达观测数据的衰减校正和降水估算方法也受到诸多参数不确定性的影响。

大量的对比研究发现, 在反演瞬时降水方面 PMW 算法的精准度要高于 VIS/IR 算法。由于 GEO 卫星具有较高的时间采样频率, 在反演连续降水方面 VIS/IR 算法则具有更大的优势。结合 VIS/IR 算法和被动微波算法等进行联合反演可以弥补单一传感器算法存在的不足, 而发展主/被动传感器的联合反演方法具有更加广阔的发展前景, 因此近 20 年来结合 VIS/IR、PMW 和 PR 数据的联合反演降水算法 (multi-Sensor precipitation estimation, MPE) 层出不穷 (刘元波等, 2011)。

郭瑞芳等 (2015) 将 MPE 方法定义为: 以 GEO-IR 和/或 LEO-PMW 为主要数据源, 并以星载降水雷达、地基雷达、其他卫星数据以及地面站点降水数据、雷电、风等数据中一种或者几种为辅助数据, 利用数学和/或物理方法反演降水速率的过程。迄今为止, 已经提出了很多种 MPE 方法。根据主要数据源的不同, 可以分为 PMW-IR、PR-PMW、PR-IR 和 PR-PMW-IR, 最常见的 MPE 方法是 PMW-IR。根据 MS 联合方法的不同, 主要可以分为两类: 标定法和云迹法。标定法是建立 GEO-IR 和 MW 的经验关系, 以此对 IR 做校正或者调整, 利用校正后的 IR 估算降水速率。最常见的标定法是用 PMW 反演/估算的降水速率校正或者调整 IR 估算的降水速率, 从而得到精度较高的降水速率数据。标定法可以细分为 3 类: ①地球静止业务环境卫星 (geostationary environmental satellites, GOES) 降水指数 (GEOS precipitation index) 校正法, 利用 MW 校正 GEO-IR 反演/估算的降水速率; ②回归法, PMW 反演/估算降水速率直接建立与 IR 亮温 (temperature brightness, Tb) 的回归关系, 基于此回归方程校正降水速率; ③直方图或者概率匹配法, PMW 反演/估算的降水速率的累计分布函数和 IR Tb 进行匹配, 从而获取 IR Tb 和降水速率的对应关系。云迹法是基于 IR 获取云迹对 PMW 反演/估算进行插值, 从而得到大范围的降水速率数据。现有的 MPE 方法大多数属于标定法, 而云迹法较少。目前, 3 种广泛使用的反演算法分别是由 Joyce 等 (2004) 提出的气候预测中心形变算法 (CMORPH), 由 Huffman 等 (2007) 提出的