



基于区域蒸散的 北京市水资源管理

吴炳方 胡明罡 刘钰 著



科学出版社

本书由 GEF 海河流域水资源与水环境综合管理项目经费资助

基于区域蒸散的北京市水资源管理

吴炳方 胡明罡 刘 钰 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书围绕蒸散(ET)遥感监测与应用,介绍了北京市蒸散监测系统的建设和应用情况。全书共分六章:第一章介绍了北京市水资源供需矛盾及其应对策略;第二章介绍了基于 ETWatch 的蒸散遥感监测系统;第三章介绍了北京市区域蒸散及其特点;第四章介绍了基于遥感蒸散量的大兴区耗水管理;第五章介绍了基于遥感蒸散的节水效果评价;第六章介绍了基于遥感蒸散的北京市水资源合理配置。

本书可供农业、水资源、水利及水利工程、生态和资源环境等专业研究人员、高等院校教师、研究生、本科生,以及水利、农林、气象等部门的工程技术人员和政府决策部门的行政管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

基于区域蒸散的北京市水资源管理/吴炳方,胡明罡,刘钰著.北京:科学出版社,2016

ISBN 978-7-03-049078-0

I. ①基… II. ①吴… ②胡… ③刘… III. ①水资源管理-研究-北京市 IV. ①TV213.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 142193 号

责任编辑:张井飞 李 静 韩 鹏/责任校对:于佳悦

责任印制:肖 兴/封面设计:陈 敬

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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 6 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2016 年 6 月第一次印刷 印张:13

字数:300 000

定价:158.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《基于区域蒸散的北京市水资源管理》

主要编著人员及分工

第一章	吴炳方	胡明罡	
第二章	吴炳方	闫娜娜	刘绍明
第三章	吴炳方	闫娜娜	曾红伟
第四章	刘 钰	彭致功	
第五章	毛德发	闫娜娜	
第六章	蒋云钟	甘治国	

序

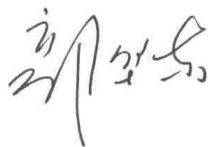
北京是水资源严重匮乏的特大型城市，人均水资源占有量仅约 100m^3 ，约为世界人均占有量的 $1/70$ 。水资源短缺已成为北京市经济社会发展的最大瓶颈之一。

随着常驻人口的迅猛增长，城市的不断发展，北京市水资源供给面临巨大的压力，导致地下水超采严重，水环境恶化的局面。为缓解水资源供求的矛盾，北京市先后采取了产业结构调整、节水改造、人口总量控制、南水北调工程等一系列的措施。2014 年底，年供水量近 10亿 m^3 的南水北调工程供水进京后，北京市水资源供需矛盾有所缓和。因历史水资源欠债较多，将来人口的进一步增长、城市的持续扩张，南水北调工程中线供水只是缓冲垫，而非万能险，用好南调水，缓解北京市水资源供需矛盾的状况依旧任重而道远。

纵观水循环的整个过程，只有蒸散(ET)才是水资源的真正损耗量，因此，只有减少耗水才能实现节水。对地观测技术为流域尺度耗水量的监测提供了有效的解决方案，长时序、高分辨率多源遥感数据的不断涌现，甚至为地块尺度的耗水量的精确量测和节水效果的评估提供了可能。每位遥感工作者都乐于见到研究成果被行业部门所采用，为重大国计民生问题的解决提供支撑。在阅览此书的过程中，我欣喜地看到，我的同事吴炳方博士历时多年潜心研制的区域蒸散遥感监测方法与系统在北京市得到了推广应用。同时，吴博士与刘珏和胡明昱等水利工作者一道，针对北京水资源匮乏的现状，提出并积极实践基于遥感的耗水管理方法与技术，形成一套以北京市水资源可持续利用为基础的区域可耗水总量评估、ET 约束的灌溉用水定额分配、目标 ET 约束的北京市水资源调配等水资源管理方法，构建了北京市 ET 耗水遥感监测、应用分析与信息发布平台，为北京市耗水量的监测、节水效果评估、耗水总量优化配置提供了切实可行的操作平台。

为缓解北京市水资源供需紧张的矛盾，促进水资源的可持续利用，2011 年北京市出台了水资源管理“三条红线”为核心的最严格水资源管理制度。本书是响应北京市最严格水资源管理制度的成果总结，可为“三条红线”实施效果的评估、最严格水资源管理制度的落实提供参考。在本书即将出版之际，我谨向作者表示祝贺，向读者们推荐该书，衷心祝愿这本专著的出版能够进一步推动遥感技术与水资源管理的融合，促进水资源管理方法的不断创新，为水资源的可持续利用与发展贡献智慧与力量。

中国科学院院士



2016 年 6 月 21 日

前 言

随着北京市人口增长、经济发展和城市规模的不断扩大,北京市对水资源的需求量越来越大,20世纪80年代以来一直维持在40亿 m^3 以上,远远超出区域水资源的总量。水资源短缺以及不合理的利用使得区域内河道干涸、湿地萎缩和地下水超采等生态环境问题突出,严重影响了北京市社会经济的发展,这向水资源管理提出新的挑战。探索新的管理模式是实现首都节水、解决当前水资源问题的一个首要任务。

蒸散是水循环中的要素之一。地球表面通过植被蒸腾,土壤蒸发或者水面蒸发的形式向大气运送着大量的水,即蒸散(evapotranspiration, ET),是水系统中的主要消耗量。蒸散既是区域水循环和能量平衡的重要过程,也是生态过程与水文过程的重要纽带。定量估算区域内的蒸散,并从水资源消耗角度开展区域水资源管理、水权制定与合理分配是一项创新的技术与方法。在过去的几十年中,地表水循环中的ET分项由于缺乏有效的监测手段,一度为研究人员和水管理者所忽视。遥感技术为区域蒸散的估算提供了新的技术手段。

本书有三项主要内容,可为我国资源型缺水地区的水资源综合管理提供借鉴。一是蒸散遥感监测系统的建设,即如何获取区域大范围的蒸散数据,用遥感手段进行区域尺度非均匀下垫面的蒸散估算,为新的水资源管理模式提供数据支持,提高北京市水资源的综合管理水平。相对于水文气象学观测,遥感数据具有空间上连续和时间上动态变化的特点,遥感数据的多光谱信息能够提供与地表能量平衡过程和地表覆盖状况密切相关的参数。二是基于蒸散的农业水资源管理方法研究,即如何将蒸散与水权相结合应用于农业用水管理,以及节水效果的评价。三是基于蒸散的水资源管理,着重在利用蒸散开展北京市水资源的合理配置的应用。

本书参加编著人员还有相关单位的何浩、李黔湘、熊隽、吴方明、朱伟伟、庄齐枫、于名召、贾贞贞等。

由于编写时间仓促、作者水平有限,书中不妥之处在所难免,敬请读者和有关专家

给予批评指正，以利于本书的修正与完善。

本书得到了世界银行全球环境基金（GEF）“海河流域水资源与水环境综合管理项目”以及中国科学院知识创新工程重大项目“重大工程生态效应遥感监测与评估项目”的支持，也是北京市 GEF 项目的部分研究成果。

作 者

2015 年 5 月 5 日

目 录

序	
前言	
第一章 北京市水资源供需矛盾及其应对策略	1
第一节 北京市水资源供需现状	1
第二节 基于遥感技术的水资源管理体制改革的	2
一、遥感技术在水资源管理中的应用	2
二、基于区域蒸散的水资源管理理念	3
参考文献	5
第二章 北京市 ET 遥感监测系统	6
第一节 蒸散遥感监测	6
第二节 北京市 ET 遥感监测集成应用系统总体结构与流程	11
一、系统总体结构	12
二、系统业务流程	13
参考文献	30
第三章 北京市蒸散时空分布特征	34
第一节 北京市区域蒸散时空特征分析	34
一、北京市蒸散空间变化分析	34
二、北京市蒸散时间变化分析	37
三、蒸散空间分布的影响因素分析	41
四、典型土地利用蒸散的时空变化	47
五、典型作物区蒸散的时空变化	50
六、蒸散时空分析小结	51
第二节 潮白河流域耗水结构分析	52
一、潮白河流域区域蓄变量分析	52
二、潮白河流域上下游耗水格局分析	55
第三节 北京市可耗水量与耗水平衡分析	56
一、可耗水量理论与方法	56
二、北京市可耗水量与耗水平衡分析	61
参考文献	64
第四章 基于遥感蒸散量的大兴区耗水管理	66
第一节 基于遥感数据的现状耗水分析	66
一、不同土地利用类型下的蒸散	66
二、蒸散的年内变化	68

三、各乡镇蒸散状况	68
四、典型作物耗水分析	69
五、基于遥感蒸散数据的区域水分盈亏	72
第二节 区域蒸散定额和灌溉用水定额分配	74
一、不同作物蒸散定额的确定与验证	75
二、基于遥感蒸散的节水潜力分析	78
三、基于遥感蒸散定额的灌溉定额分配	81
第三节 基于遥感蒸散数据的区域水平衡分析	84
一、模型概述	84
二、模型校验	87
三、区域水平衡现状	90
四、区域水平衡情景方案分析	91
第四节 典型示范区灌溉用水管理与评价	97
一、基于 CPSP 模型的灌溉水管理评价	98
二、基于主成分分析的灌溉水管理评价	108
参考文献	114
第五章 基于遥感蒸散的节水效果评价	116
第一节 区县节水效果	116
一、节水效果评价方法	116
二、项目区县的节水效果评价	118
第二节 工程措施节水效果	118
一、工程措施实施现状	118
二、管灌措施节水效果评价	119
第三节 农艺措施节水效果	121
一、农艺措施实施现状	121
二、种植结构调整节水效果评价	122
参考文献	123
第六章 基于遥感蒸散的北京市水资源合理配置	125
第一节 基于蒸散指标的水资源调配理念	125
一、基于蒸散的水资源调配与传统的水资源调配的区别	125
二、基于蒸散指标的水资源调配理念内涵	126
第二节 基于蒸散目标的水资源调配技术	127
一、基于蒸散的水资源调配技术框架	127
二、区域蒸散控制目标分析技术	128
三、基于蒸散的水资源调配综合分析技术	129
四、水资源配置模拟技术	132
五、分布式水文模型对蒸散分配方案的验证技术	134
第三节 北京市水资源调配方案计算	138

一、北京市水源条件	138
二、北京市水资源调配系统网络概化图	143
三、北京市可消耗蒸散分析	143
四、北京市水资源调配边界条件分析	151
五、北京市水资源调配情景设置	154
六、北京市调配情景蒸散控制目标	155
七、北京市水资源调配方案主要计算结果	157
参考文献	192

第一章 北京市水资源供需矛盾及其应对策略

第一节 北京市水资源供需现状

北京市位于华北平原北端,行政区域面积 1.64 万 km^2 ,受大气环流影响属于温带大陆性季风气候。冬季受蒙古高压影响,盛行偏北风;夏季处于大陆热低压范围内,受太平洋的东南气流和印度洋的西南气流影响,盛行偏南风。

北京地处海河流域,主要分布有永定河、潮白河、北运河、蓟运河和大清河等五大河系,其中蓟运河、潮白河、北运河通常称为北三河。北三河位于海河流域北部的永定河、滦河之间。北运河发源于北京市昌平区北部山区,通州北关闸以上称为温榆河,以下称为北运河,向南经通惠河、凉水河、凤港减河等平原河道,至土门楼经青龙湾减河入潮白新河。潮白河由潮河、白河两大支流组成,均发源于河北省沽源县,在密云县以南交汇成潮白河,吴村闸以下称潮白新河,至宁车沽闸汇入永定新河。永定河是海河流域北系一条主要河道,上游有桑干河、洋河两大支流,分别发源于内蒙古高原南麓和山西高原北部,两河在河北省怀来县朱官屯汇合后称永定河。

北京市境内多年平均降水量 585mm,降水量 80%集中在汛期(6~9月),非汛期降水量很少,而汛期降水量又多集中在 7 月、8 月。根据多年(1956~2000 年)水文数据显示,北京市年均水资源量 38 亿 m^3 ,其中地表水资源量 14 亿 m^3 ,地下水资源量 24 亿 m^3 。各主要河流的入境流量是首都的主要水源,由于近十几年上游工农业的发展,用水量不断增加,致使入流量逐年减少,如永定河官厅水库水量由 20 世纪 50 年代的 18 亿 m^3 ,减少到目前的年均 1 亿 m^3 左右。

目前,水资源已经成为制约首都可持续发展的主要问题,体现在水资源供需失衡、局部水污染加重和生态环境持续恶化等方面。北京市人均水资源占有量不足 1000 m^3 ,2000 年以来连续 9 年干旱,人均水资源量更是一度低于 220 m^3 ,按国际标准,属于重度水资源短缺地区。水资源问题已成为影响和制约北京市经济社会发展的主要因素。自 20 世纪 80 年代起,密云水库就不再向天津、河北供水,同时北京市政府也采取了计划用水、节约用水等措施,克服了水资源紧缺的巨大困难,有力地保障和促进了首都经济、社会的发展。但是,随着人口的增多,仅靠牺牲周边地区利益并不是长久之计,南水北调工程的实施可以极大地缓解首都的水资源供需紧张情况,但如果首都自身水资源发展不能形成可持续的良性循环体系,若干年后北京依然会面临水资源短缺的困境。

一个地区的水资源循环方式决定着该地区的水资源可持续利用能力。总体来说,入流大于出流,地区水资源会逐步增加,除了可见的地表水库蓄水量增加外,地下水储量也会上升;反之,地区水资源会逐渐减少,随之而来出现一系列问题,不仅是用水量得不到保证,重要的是水环境恶化,以及一些地质次生灾害。通常来说,一个区域的出流量由三部分构成,一种是地表出流,如河流、沟渠等;另一种是地下出流,这种出流很

难测算与监测;还有一种就是蒸发、蒸腾散失。对于北京地区而言,地表流出量易于观测与管理,数量也容易统计,多年平均流出量约 14.51亿m^3 。北京市2003~2008年平均年蒸发量约 533mm ,总量达到了 86.9亿m^3 。通过水量平衡方程,很容易得出,每年北京市水资源净亏损 2.5亿m^3 。如此众多的水从何而来?只有超采地下水!北京市地下水平均埋深由1980年的 7.2m ,降到了2008年的 22.92m 。因此,有效地控制蒸发量,可以促进本地区水资源的回补,实现水资源的可持续利用。

第二节 基于遥感技术的水资源管理体制变革

一、遥感技术在水资源管理中的应用

“遥感”(remote sensing)指的是在远距离不接触物体的情况下获取有关物体的各种信息。目前,人们已经能够利用航天、航空(包括近地面)遥感平台上的遥感仪器,获取地球表层(包括陆圈、水圈、生物圈、大气圈)特征的反射或发射电磁辐射能的数据,通过数据处理和分析,定性、定量地研究地球表层的物理过程、化学过程、生物过程和地学过程,为资源调查、环境监测等服务。因此,遥感是以电磁波与地球表面物质相互作用为基础,探测、分析和研究地球资源与环境,揭示地球表面各要素的空间分布特征与时空变化规律的一门科学技术。

来自遥感的测量具有空间上连续和时间上动态变化的特点,实现由点到面的转换:遥感手段可覆盖广大区域,如整个流域的面积,而地面测量则常常由于昂贵的费用和后勤供给条件的约束被限制在狭小的实验区内;遥感获得的信息能按行政单元、流域单元汇总。

遥感技术在水资源和水环境调查中的应用领域十分广泛,其宏观、快速、客观、经济,以及可再现历史的动态变化等优势是其他传统方法所不可替代的。遥感数据与其他水文背景数据进一步相结合,在GIS等信息分析和管理技术的支撑下,可向决策者、管理者、咨询者、研究人员和大众提供与水资源相关的重要信息。这种信息在立法、计划编制、水权分配、评估、影响评价、调查研究,以及在健康和环境相关领域都有巨大的潜在作用。下面给出本书内容相关的一些应用。

(一) 水利用模式和生产力

随着水资源利用强度的日益加剧,了解水利用模式非常重要。水资源是怎样被消耗的?什么时候是节约水资源的最好时机,怎样提高水利用效率?怎样最优地再分配水资源?使用遥感监测的蒸散数据与土地类型分类相结合,可以方便地得到农田、森林、草地,以及非植被区的蒸散量等,进而评估各土地类型的蒸散(evapotranspiration, ET)值、水利用模式和水分生产率的变化情况。

(二) 灌溉系统效率评价

对于灌溉系统,需要进行定期的监测,在大范围复杂地区,遥感估算的ET数据在

评价和监督灌溉系统性能上可以发挥重要的作用。通过遥感 ET 数据, 可以获取土地和水资源生产力的空间变化信息, 将地面观测资料与 GIS 环境中的水文模型结合起来, 就可对影响其变化的原因作出解释, 进而分析灌溉的效果。

ET 数据可用于比较不同灌溉系统的性能, 分析不同气候区的作物密度、ET 值和作物胁迫的空间变化。空间变化常被用于评价使用水资源和使用灌溉设施的状况。

(三) 水资源规划与水权

制定长期的水资源规划, 往往要求有准确的灌溉面积、作物模式、ET 值和水利用的历史数据信息。实际中人们所掌握的信息往往只是统计数据, 而不是实际发生的数据。以灌溉面积为例, 两者之间会存在着巨大的差异, 有的高达 40%~70%。遥感则可以获得实际数据。一旦建立起水权体系, 可依据用遥感得到的水资源利用数据, 确定用水户的当前和历史用水量。在水权完善后, 还可以结合有关水权的地理数据库实施来进一步核查用水量的情况。

(四) 运行管理

来自田间的实际水分信息可以帮助进一步提高水分利用效率, 通过定期监测田间的湿度指标, 管理者可对灌溉方案不断的修正。这样的监控也有助于人们从中发现预定灌溉方案的偏差, 分析发生偏离的原因, 并相应地调整供水方案。灌溉系统的水分配多数是依据灌溉面积、作物类型、气象条件和作物的需水量来决定的, 灌溉渠道的能力则是依据一定比例的作物需水量的最大流量确定的。种植模式可能由于市场机制、水涝或者是旱情而改变。遥感则能定期地更新灌溉区域, 从而减少与灌溉区域初始估计值的偏差。

(五) 工程影响评价

工程影响评价要求将灌溉工程执行以前和执行以后的情形进行比较。为此在灌溉工程交付使用后, 可用遥感技术对工程投入前后的耕作面积、稻田面积和作物产量进行监测估算, 量化了灌溉工程实施的影响、单位水生产力的变化、灌溉面积的变化、作物种植结构的变化等, 从而对工程投资效果进行分析。

(六) 流域水平衡

流域中的所有用户都是相互联系的。上游的开发如森林采伐、灌溉现代化、不断扩展的城市化和工业化发展, 也将不断地影响下游沿河地区。那些初看无害于生态, 但实际上违背环境规律的活动, 很可能已对其他地区的环境产生不利影响。基于遥感的 ET 估算, 不仅可以获取农耕地耗水量, 也可以获取流域其他地区的蒸散发量, 从而迅速对流域水状况作出评价, 为水资源的决策服务。

二、基于区域蒸散的水资源管理理念

在传统农业中灌溉效率提高可增加“节水”这一观点指导下, 出现了“水越节越少”的奇怪现象, 在资源型缺水地区加剧了水资源矛盾, 还引发了一系列生态环境问题, 区

域水资源管理面临着极大的挑战。通过重新梳理水循环和用水过程,核算水账,发现传统农业中由于灌溉效率提高而“节约”的水量,如果没有增加本区域的出境流量或者是补给地下水,而是在本区域内被消耗掉,从区域水文过程来看不能被视为真正的节水量。这一观点已经被很多学者发现并陈述(Willardson et al., 1994; Seckler, 1996; Jensen, 2007; Perry, 2007; Wu et al., 2014)。因此,基于“区域耗水量的减少”才是真正的节水这一观点,通过实践形成了一种新的水资源管理理念——耗水管理,通过 ET 控制下的节水,实现水资源的高效利用及可持续利用,是对“供水管理”和“需水管理”的补充和完善(任宪照和吴炳方, 2014)。

Wu 等(2014)通过对海河流域耗水管理实践的总结提出了耗水管理的四个步骤,在北京水资源管理中同样适用。实施耗水管理最基本的技术保障是区域蒸散的估算。区域蒸散量(耗水量, ET)能真实反映一个区域的水资源消耗量,通过减少实际 ET 来满足目标 ET。同时,节水措施实施前后的 ET 变化也能够反映节水效果。

一是流域尺度的耗水平衡分析。区域耗水平衡分析是总体上了解水资源消耗状态、进行水资源论证、制定应对政策的首要步骤。基于时间序列的遥感年 ET,结合降水和出入境流量、生活和工矿企业耗水数据,可以开展简单的耗水平衡分析,估算区域水蓄变量的变化量,对当前一段时间地下水使用状况有一个总的认识与评价。

二是基于可持续目标进行目标可耗水量的计算。通过遥感监测 ET 值,结合当地降水和土地利用数据,可以分离为可控 ET 和不可控 ET。通过可控 ET 与不可控 ET 分解,计算自然生态系统的耗水量,结合不同年的降水与入境流量可以估算目标平均可耗水量。

三是 ET 在各种用水户间的分配。ET 的分配过程是在目标 ET 的总量限制下,统筹考虑用水户间的耗水公平及优先度,将 ET 划分到不同用水户。在分配过程中优先度不仅仅指经济生态效益,也需要考虑生产效率,如农田耗水需要考虑水分生产率的差异;另外一点就是 ET 分配向水权的转换。基于 ET 管理的水权体系可由三部分内容组成:①取水权,即可以抽取的水量;②用水权,即可以消耗的水量(ET);③退水权,即必须回归到当地水系统中的水量。核心是用水权的分配。这种制度安排将体现在:①产权结构明晰,取、用、排水的界定有助于对行动者的权利和义务的界定,同时有利于规范的确立;②将目标 ET 的分配(总量控制)与 ET 定额管理相结合,实现了“自上而下”和“自下而上”相结合的分配和管理措施,由此也将引导着水管理体制的改变;③确立用 ET 值分配方式建立水权,对每个用水者或用水机构的行为有一定的控制和制约作用,意味着用水户的广泛参与,从而有利于将河流水资源的受益者或利益相关者有效组织起来,建立基层用水组织,提供资源保护的服务;④将退水权纳入水权体系,能较好地规范和控制公众的排水行为,确保回归河流的水量 and 水质,从而解决目前日益突出的河流断流和干涸、地下水位急剧下降、河流水质恶化等水资源问题;⑤以 ET 作为分配核心,可较好地解决水资源分配中的不公正行为,防止由于权力机关的保护,稀缺水资源被分配给无效率或低效率的用水部门。此外,这种制度安排还有利于促进排污许可与取水许可制度的结合,有利于搭建流域与行政区域之间的协商平台,促进区域涉水行政事务一体化和基层用水户组织建设进程取得实质性进展。

四是节水潜力评价与节水效果监督。通过工程措施实施前后的典型区与对照区的耗

水量比较,结合措施实施信息进行节水潜力评价,为节水规划制定提供支持。另外,通过 ET 的过程监测,以及与目标 ET 的比较开展节水效果监督,提出建设性的建议。如果遥感监测 ET 值大,说明消耗的水量超过了当地可持续的水资源利用量,应人工拦蓄径流,增加实际可利用水量,或采取综合节水措施,减少 ET 值,使实际可利用水量与 ET 趋于平衡;反之如果目标 ET 值大,并且实际可利用水量超过了 ET 值的合理范围,出现土地盐渍化和沼泽化现象,应选择适宜的用地方式和植被类型,使 ET 值接近于当地的水分条件;在此基础上,采取必要的工程措施,减少径流流入,增加径流流出,取得水分的供需平衡。

总之,基于 ET 的水资源、水环境综合管理体系是一种新的理念与思路。利用 ET 加强耗水管理,是解决现行水资源和水环境分割管理行政体制所带来的体制性障碍、保证流域水资源可持续利用和渤海海洋良好的生态环境的一种较好的方法和措施。

参 考 文 献

- 任宪照,吴炳方. 2014. 流域耗水管理方法与实践. 北京: 科学出版社.
- Jensen M E. 2007. Beyond irrigation efficiency. *Irr Sci*, 25: 233-245.
- Perry C. 2007. Efficient irrigation; inefficient communication; flawed recommendations. *Irrigation and Drainage*, 56: 367-378.
- Seckler D. 1996. New era of water resources management: From dry to wet watersavings. Research Report. International Water Management Institute, Colombo, Sri Lanka.
- Willardson L S, Allen R G, Frederiksen H D. 1994. Eliminating Irrigation Efficiencies, USCID 13th Technical Conference, Denver, Colorado, 19-22 October, 15.
- Wu B F, Jiang L P, Yan N N, et al. 2014. Basin-wide evapotranspiration management: Concept and practical application in Hai Basin, China. *Agric, Water Manag*, 145: 145-153.

第二章 北京市 ET 遥感监测系统

北京市作为我国水资源严重短缺的特大型城市,水资源开发利用达到了自然更新的极限,水资源供需形势十分严峻,建设节水型城市已是当务之急。然而,由于农业用水管理的复杂性,在实际工作中仍然面临很多问题,水资源浪费的现象依然严重,其中问题的关键就在于缺乏农业真实耗水量的信息。因此,不掌握农业耗水量就很难建立起以水价为杠杆的水管理调节机制,很难做到减少水资源的浪费,从而也不能建立起先进的节水灌溉制度。

在全球环境基金(GEF)组织资助的《中国 GEF 海河流域水资源与水环境综合管理项目》支持下,以实现“ET 管理”的理念为指导,提出了应用卫星遥感技术监测地面 ET 的需求,采用先进的遥感技术与地面观测相结合,形成 ET 立体监测系统,准确、快速和客观地监测区域 ET,并把监测数据用于流域水资源综合管理,构建 ET 遥感监测与应用系统。

采用遥感监测技术,建立北京市 ET 遥感监测集成应用系统,形成从数据采集、预处理、处理和 ET 数据生产再到 ET 数据管理和应用的业务化流程,从而为进行大范围农业用水量的实时监测奠定基础。鉴于 ET 数据生成过程中形成的大量数据(包括 ET 数据)是后续应用的基础,采用关系数据库的方式将所有相关数据集中管理起来,并与 ET 遥感监测系统的数据库集成,开发应用分析工具。

第一节 蒸散遥感监测

陆面蒸散是陆地表层水循环中最大、最难估算的分量,同时也是陆面过程中地气相互作用的重要过程之一(陈喜和陈洵洪, 2004; 辛晓洲, 2003)。国际上的许多研究计划和组织对此都十分关注。特别是在 20 世纪 90 年代以后,联合国教科文组织(UNESCO)、国际科学理事会(ICSU)、国际水文学协会(IAHS)和世界气象组织(WMO)等实施了一系列国际水科学计划,如国际水文十年(IHD)、国际水文计划(IHP)、世界气候研究计划(WCRP)、全球能量和水循环试验项目(GEWEX)、国际地圈-生物圈计划(IGBP)等。这些计划几乎都将蒸散量估算列为陆地-大气相互作用、地球气候和水圈相互作用、农业灌排等研究的重要内容之一。

20 世纪 70 年代以来,卫星遥感技术的出现和发展,为准确估算区域蒸散带来了新的活力,并为大面积蒸散的研究提供了一种不可替代的手段。非接触大面积的遥感地表辐射状况和温度状况,可直接提供土壤-植被-大气系统的界面能量信息;多时相的热惯量遥感可提取土壤和植物水分的信息;多光谱与多时相的遥感资料可演绎出下垫面的几何结构信息。这些信息的获取,使得遥感方法能够更加准确的定量描述区域的空间特性,比常规的气象学方法有明显的优越性,近年来遥感方法已广泛应用于蒸散研究(郭晓寅,

2004; 马耀明等, 1997; 吴炳方等, 2008)。

蒸散过程是水由液态转化为水蒸气的过程, 在地表-大气系统中, 蒸散量的大小反映了土壤含水量的损耗和作物的真实需水量, 也反映了水循环的消耗过程。蒸散量的观测方法和仪器在不断地发展, 出现了如大型称重式蒸渗仪 (lysimeter)、涡度相关仪 (eddy-covariance) 和大口径闪烁仪 (large aperture scintillometer) 等各类仪器。由于在测量原理、仪器系统等方面存在差异, 用于观测蒸散的各类仪器之间还难以形成一致的观测结果 (Farahani et al., 2007)。此外, 在实际应用中往往需要的是蒸散量的空间分布状况, 而非局部点的蒸散值, 基于机载或星载的遥感手段是解决此类问题的唯一方法。

地表蒸散量的测量方法较多, 一般可分为: 水文学方法, 如蒸渗仪、水量平衡法等; 微气象方法, 如涡动相关仪 (eddy-covariance system, EC)、波文比-能量平衡测定系统 (Bowen ratio energy balance system, BR)、空气动力学法等; 植被生理学方法, 如热扩散液流测定系统 (thermal dissipation sap flow velocity probe, TDP)、气孔计等。目前应用较广泛的地表蒸散量测量方法包括: 涡动相关仪、蒸渗仪、波文比-能量平衡测定系统等 (Meijninger et al., 2002a)。

蒸散在时间上和空间上是高度变化的 (Turner, 1991), 与气象条件、降水量、土壤水文参数、植被类型和密度的时空格局密切相关。使用遥感监测蒸散是一种通俗的说法, 事实上遥感不能直接监测蒸散, 但可以直接监测许多影响蒸散的因子, 如地表反照率、土壤湿度、地表温度和粗糙度等重要参数, 因此需要在这些因子的遥感监测基础上利用模型估算蒸散, 如地表能量平衡模型。遥感监测地表蒸散的方法具有空间上连续和在时间上动态变化特点, 能够刻画出蒸散量的时空分布与变化, 这是遥感监测蒸散区别于传统方法的优势和特点。众多蒸散估算模型在不同地区获得了应用 (Allen et al., 2007; Bastiaanssen et al., 1998a; Nishida et al., 2003; Su, 1999; 吴炳方等, 2008)。蒸散遥感监测模型不同于水文模型, 既不需要降雨量作为输入, 也不需要土壤结构信息, 瞬时的蒸发速率直接与地表参数 (地表温度、植被覆盖度等) 相关, 而且提供的是蒸散速率的空间分布信息。遥感方法估算区域蒸散的精度能够满足水文、生态、农业和森林等相关研究的需要 (Kalma et al., 2008)。

从地表能量平衡方程、大气边界层理论, 以及 SVAT 模型的水热传输规律出发, 依靠地面观测发展起来的地气交换模型是遥感监测蒸散的基础, 遥感所起到的主要作用是提供模型所需的输入参数, 如地表温度、地表粗糙度及到达地表的净辐射等, 这类参数具有时空快速变化的特点, 可以通过遥感手段方便地获取。但遥感能提供的参数也有限, 不能提供蒸散计算所需的所有参数, 这就要求对模型做出一定的简化或是将遥感数据与地面观测数据结合起来, 发挥出遥感在时空动态监测方式的独特优势。

当前, 利用星载遥感数据计算蒸散所用的波段信息有可见光、近红外和热红外。可见光和近红外遥感数据主要用来反演地表反照率和植被指数等地表参数, 热红外波段则主要用来反演地表温度和比辐射率。用于 ET 监测的卫星主要包括地球同步气象卫星 (如 GMS、FY-2 系列等), 极轨气象卫星 (NOAA 系列、FY-1/3 系列等), 陆地资源卫星 (Landsat5、Landsat7、HJ 等), 以及 2000 年左右发射运行的 EOS 系列卫星。由于不同卫星探测波段的数量、位置和波谱分辨率不同, 过境的时间频度及空间分辨率也不同,