

文章编号:1000-0240(2012)05-1248-09

水资源管理决策支持系统研究进展与展望

盖迎春, 李 新

(中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 从框架、技术等方面介绍了水资源管理决策支持系统发展状态, 总结了水资源管理决策支持系统的 3 个发展阶段: 模型模拟阶段、模型模拟+DSS(DSS: Decision Support System)阶段、情景分析+集成建模环境+DSS 工具阶段, 阐述了这 3 个发展阶段各自的特点, 剖析了制约水资源管理决策支持系统的发展因素, 讨论了建立一个成功的水资源管理决策支持系统应具备的条件和采用的方式. 最后, 提出了集成综合观测系统、集成建模环境和联机协商环境的水资源管理决策支持系统框架.

关键词: 决策支持系统; 水资源管理; 模型集成; 建模环境

中图分类号: TV213.4 文献标识码: A

0 引言

水是支撑地球有机生命系统的重要物质基础, 受全球气候变化和人类活动的双重影响, 已造成全球性和区域性水资源危机. 预计 2025 年全球人口将达到 80 亿, 届时生活、工业、家畜方面的水资源需求量将上升 50%^[1], 必将加剧农业、工业、城市、生活和生态用水的矛盾, 致使水资源管理问题更加趋于复杂化. 水资源管理问题不仅仅是水文、水资源问题, 而且还是包括跨区域、跨国界而引起的政治、经济问题; 在水资源管理机构中的多层次管理问题; 在学科上, 涉及到地学、生态、经济、社会科学、大气科学等多学科交叉问题. 尽管水资源管理的决策者或管理者对某一区域的水资源配置、利用现状十分了解, 但他们对于区域的水文循环过程以及水文-生态-经济之间的耦合过程并不十分清楚, 因此, 依靠个人能力来对水资源管理中的重大非结构化和半结构化问题做出正确的决策十分困难. 另一方面, 科学家们已建立了较完善的物理模型来模拟区域水文过程、生态过程等, 更加准确地认识不同时空尺度下地表参数各分量的状态, 而这些却是管理者决策过程中所需的重要信息. 为了建立决策者与科学家之间的桥梁, Fedra^[2] 首先将决策支持

系统的思想引入到水资源管理中.

决策支持系统 (Decision Support System, DSS) 源于管理学, 以运筹学、控制论和行为科学为基础, 其主要特点是能够解决非结构化和半结构化问题, 重点是定量模型应用、数据分析和为决策者提供决策依据^[3], 目标是辅助决策^[4], 而非替代决策^[5]. DSS 提出之后, 很快被应用到环境、经济、军事、管理等领域. 根据决策者的需求, 科学家将刻画地表过程的各物理模型以及相应驱动数据集、参数集集成到 DSS 框架下, 决策者可以通过使用该系 统来获取决策过程中有用的信息. 因此, 水资源管理决策支持系统 (Water Resources Management Decision Support System, WRMDSS) 是建立水文水资源学家和水资源管理者、决策者之间的桥梁, 它能够将水资源管理涉及的决策问题通过水文水资源学家建立的物理模型或经验模型进行定量表达, 使决策者站在科学的基础上把握决策过程, 从而提高决策的效能. 因此, WRMDSS 在未来的全球、区域或流域水资源管理中将起到重大作用. 近 30 a 来, 已开发的 WRMDSS 不计其数, 但被成功应用于实践中的却不是很多. 主要原因有: 1) 软件太复杂, 可操作性低; 2) 软件需要用户提供的知识太多; 3) 系统目标和农民的需求脱节, 实用性不

收稿日期: 2012-02-22; 修订日期: 2012-05-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40925004); 中国科学院“百人计划”项目 (29Y127D01); 中国科学院重要方向项目 (KZCX2-YW-Q10-1); 中国科学院西部行动计划项目 (KZCX2-XB3-12) 资助

作者简介: 盖迎春 (1974—), 男, 河北行唐人, 高级工程师, 2007 年在中国科学院寒区旱区环境与工程研究所获硕士学位, 现为博士研究生, 主要从事水资源管理、可持续发展、决策支持系统与 GIS 研究. E-mail: gtw@lzb.ac.cn

强；4)系统灵活性差；5)系统使用的数据资源太少^[6]。下面将首先介绍 WRMDSS 的研究进展，根据已有 WRMDSS 的研建经验，在第二节中分析建立一个成功决策支持系统应注意的关键问题；结论将在第三节中给出。

1 WRMDSS 的发展

WRMDSS 的发展主要受到两方面因素的推动：一方面是 DSS 与地理信息系统 (GIS: Geographical Information System)、遥感 (RS: Remote Sensing)、专家系统、数据挖掘、人工智能等高新技术的集成，使其解决非结构化和半结构化问题的能力逐渐增强；另一方面科学家对地表过程中的各种物理机制的认识逐渐加深和对物理过程模拟能力的不断增强，使人们能够得到时间尺度更短、空间尺度更小的地表参数各分量的状态，为决策者能够提供更加精细的辅助决策信息。建模环境使用户能够方便地选择合适的模块或模型来“组装”成一个完整模型来模拟决策过程中涉及到的各种物理过程 (水文过程、生态、经济以及其间的耦合过程等)，通过这种方法可以有效地针对不同的决策问题，设计出多种模拟模型，从而使 WRMDSS 更加灵活。

WRMDSS 的发展经历了 3 个阶段 (图 1)：模型模拟阶段、模型模拟 + DSS 阶段、情景分析 + 集成建模环境 + DSS 工具阶段。随着 WRMDSS 框架不断完善，系统的可操作性、灵活性和实用性也在逐渐增强。但是，由于受到水资源管理问题的复杂

性、决策者对水资源管理问题的认知能力、模型建立者对物理过程的表达能力以及集成建模环境的模拟能力的综合制约，DSS 灵活性一般不会大幅度提高。相比之下，随着计算机处理能力的不断增强，软件工程技术的不断完善以及可视化技术的迅速发展，使 DSS 的可操作性逐渐增强；同时，在水资源管理决策支持系统开发期间，决策者、科学家、开发人员以及民众的共同参与，更加推动了实用的水资源管理决策支持系统发展的步伐。

2 模型模拟阶段

在 WRMDSS 发展的最初阶段，并没有明确提出水资源管理决策支持系统的概念，但水资源管理者已将水文学、水力学、生态学以及统计学等知识引入到水资源管理中，科学地辅助决策与水资源管理相关的各类问题，我们认为这类系统也属于水资源管理决策支持系统^[7]。引入方法一般是水资源管理决策者针对自身水资源管理中面临的实际问题，与科学技术人员交流，借助于科学技术人员对水资源决策过程中各物理过程的定量模拟，辅助他们的决策过程。但是，决策的问题大多集中在低维不确定性问题上，使用的模型主要以统计模型为主。例如，科学家和管理人员利用气候数据和降水的概率预报数据，结合模拟模型对粉砂土壤下玉米的灌溉用水计划进行优化^[8]，以便达到节水的目的。应用 Bayesian 理论，结合水库蓄水、山区积雪等数据^[9]，预测不同时期来水与供水。根据土地和水资源状

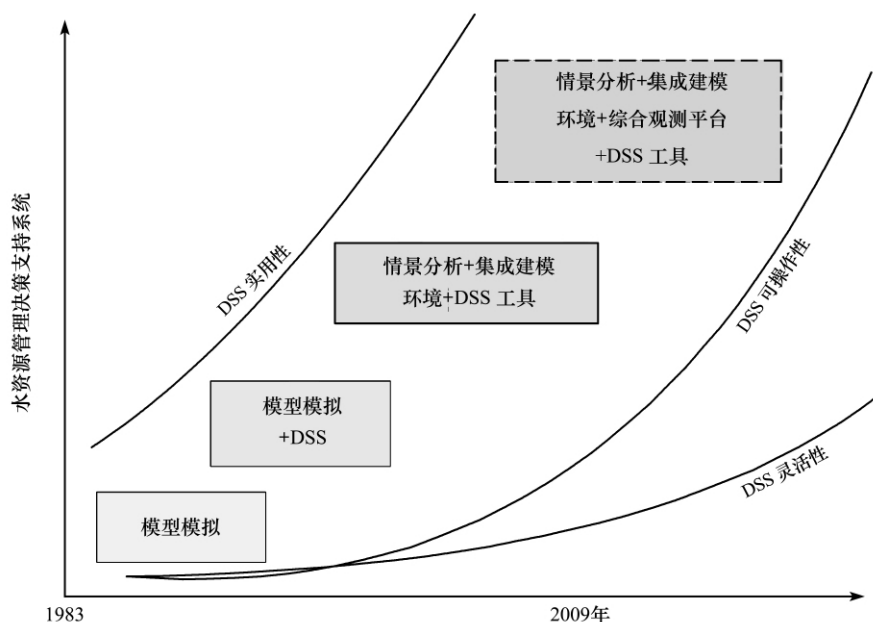


图 1 WRMDSS 发展阶段

Fig. 1 Development of the Water Resources Management Decision Support System

态,利用固定产量模型和水生产函数来优化作物的种植结构^[10]。Loucks 等^[11]开发了简单的、交互式的、基于图形的模拟模型,目的是对流域管理中的水流、蓄水、水质、水力发电以及能源方面进行管理。针对湖泊或芦苇地区,建立了基于磷的水质模拟系统,该系统集成了一系列启发式方法和面向物理和社会经济过程的模拟模型,评价浅湖区农业土地利用、旅游、水质等问题^[2]等等。

在这一时期,由于受到计算机运算能力不强、图形用户界面的操作系统发展尚未成型、微型计算机应用还不广泛等因素限制,大大影响了 WRMDSS 的发展,尤其是其灵活性、可操作性和实用性的综合发展。

3 模型模拟+DSS 阶段

由于水资源管理决策过程中人的影响因素(人的文化类别和等级制度的差异^[12])和水-生态-经济-社会的相互影响与协调发展,这些因素也使水资源管理问题变得越来越复杂。同时,与水资源管理相关的数据和信息缺乏一致性和完整性,因此,想从数学中找到一个最优的问题解决方案来解决复杂的非结构化和半结构化决策问题是比较困难的。随着计算机技术、信息技术的飞速发展和 DSS 技术理论的不断成熟,以及 GIS、RS、人工智能技术、数据挖掘技术与 DSS 的综合集成,快速推动了 WRMDSS 的发展。信息技术为决策领域带来的潜在的最大推动作用克服了数据在时间、空间和传输上的限制,使大规模分布式集成运算成为可能。GIS 技术不但可以有效地显示和分析空间数据,而且能够空间化属性数据以及为分布式模型提供输入^[13-15]。遥感数据为水资源问题提供了一种潜在的更好的表达方法,为 DSS 带来了新的革命,它能够为决策模型提供实时、精确的输入数据^[16],除此之外,结合遥感反演方法,能够提供面上的高时空分辨率的地表参数各分量。

DSS 是用于解决复杂的决策问题而开发的一组基于计算机的工具集,其核心是模型和数据。它的三部件结构^[17]、三系统结构^[18]、三库结构以及 n-库结构十分有利于模型、数据和知识的集成,建立起科研人员与决策者之间的桥梁,隐性地扩展了决策群体的知识组织结构,使决策过程更有科学依据。水资源管理决策支持系统则是将水资源管理问题进行结构化,处理为能够用数学方法表达的模型,整合水资源管理相关的数据、信息和知识资

源,并能够将运行结果明确地提供给决策者的计算机系统。它使管理者更好地理解水资源系统的自然过程,同时为不同部门之间的组织、协调提供了一个良好的工具。因此,随着水资源管理复杂性的提高,水文学、水资源学、生态学、经济学、社会科学和信息技术的多学科交叉,以及人类活动在不同时间、空间尺度上的变化成为这个阶段水资源管理决策支持系统中模型模拟研究的重要内容。主要体现在:

(1) 更加注重水-生态-经济-社会系统之间的综合模拟。包括利用地下水水流模型(MODFLOW (Modular Three-dimensional Finite-difference Ground-water Flow Model)-96)、污染物运移模型 MT3D (Modular 3-D Transport Model)-96 和地面沉降模型 INTERBED 来模拟由于地下水的过度开采而引起的地下水流、溶解物传输和地面沉降的动态变化^[15];地下水系统与经济系统之间的耦合,利用 FAO (Food and Agriculture Organization) 提供的作物耗水模型、ARIMA 农作物市场价格预测模型与 USGS (United States Geological Survey) 开发的三维有限差分地下水流模型 MODFLOW 的耦合^[19];污染物迁移对水生生态系统的影响模拟^[20-21]等。

(2) 水资源的统一管理。精细的水资源管理方法大大扩展了水资源管理问题涉及的领域,使水资源管理已不再是“就水论水”,而是水量与水质的综合管理^[22]、地表水与地下水的综合管理^[23-24]、河流与水库的联合管理^[25-27]、供水与需水的协调管理^[28-29]、水与生态的综合管理以及水与经济的集成管理^[30]。

(3) WRMDSS 建设。水资源管理决策过程十分复杂,这不仅仅取决于人类活动对自然过程的影响以及其反馈作用之间的多维系统的交换存在,同时决策者的个人偏好以及文化倾向都对决策过程产生较大影响。要想让计算机能够更好地参与到水资源管理决策中,不仅仅需要计算机具有快速的运算能力,更需要其起到桥梁作用,建立科学家与决策者之间的交流纽带。因此,在 WRMDSS 的设计上,将科研人员、决策者、管理者、开发者以及民众联系起来^[31],发挥各领域人员优势,将决策问题转换为模型,并集成到 DSS 框架中;在 WRMDSS 开发上,采用组件式的开发模式,使系统便于扩展,提高其灵活性^[32-33]。

在该阶段出现了很多成功的水资源管理决策支

持系统, 例如, AQUATOOL^[34]、Modsim^[25-26]、RiverWare^[32-33]、MOIRA-PLUS^[21]、Low Flows^[35]等。在我国许多地区也建立了一系列的水资源管理决策支持系统, 包括黄河水量调度管理决策支持系统^[36]、黑河流域中游水资源管理决策支持系统^[29]、塔里木河流域水量调度决策支持系统^[37]、邯郸地区水资源管理决策支持系统^[38]、灌区水资源实时优化调配决策支持系统^[39]等。然而, 这类 DSS 存在一定的局限性, 即, 当遇到新的问题时, 管理者和开发者必须集成新的模型, 来满足用户的需求。

4 情景分析+集成建模环境+DSS 工具

随着全球气候变化、人口持续增长、城市扩张的影响, 改变着区域自然水文循环过程, 使水在时空分布上的不确定性大大增强, 同时由于影响水文过程的因素增多, 增加了水资源管理的复杂性。目前的水资源管理决策支持系统已不在局限于解决特定的水资源管理问题, 而是能够随着决策者的需求变化, 发现水资源管理中潜在的问题。

水资源管理问题受需求的影响而复杂程度不同, 这种需求大多是针对未来“环境”的变化下, 水政策和规划对这些变化的响应。由于未来“环境”变化的高度不确定, 使这种响应也存在很大不确定性。从而, 解决水资源管理问题可以看成是一个优化过程^[19, 40], 即, 针对决策者的详细需求, 利用优化模型来获得一个最优响应方案^[41]。传统的随机优化方法是在样本数据的基础上对未知参数的统计描述, 样本数据量很大时, 这种方法很有效, 但当样本数量很小时, 这种方法便不能使用。在这种情况下, 情景分析则是一种比较有效的方法。它是针对未来的不确定性, 提出多种独立描述方案, 分别对各方案进行模拟, 并从其中寻求最优响应方案的过程^[42], 因此, 情景分析是面向问题的一种方法^[43]。这种方法计算简单, 容易理解, 并且能够处理多个目标和复杂的随机约束, 同时, 也可以应用到优化中^[44]。在水资源管理问题中, 情景可以是一组物理参数, 如温度、降水等, 也可以是一组政策。

模型是决策支持系统的核心, 也是模拟物理过程的重要手段, 大多数模型的开发都是针对特定的科学问题。随着水资源管理问题涉及的学科的扩大, 模拟的物理过程在时空上和机理上更加精细以及各物理过程之间耦合关系的复杂程度的提高, 使物理模型向着两个方向发展^[45]: 一是将水资源管

理涉及到的所有物理过程作为一个整体来模拟, 这样模型将会变得更加复杂和庞大; 二是将所有物理过程进行独立模拟, 并对物理模型定义统一数据交换接口和尺度转换方法, 通过集成建模环境组织和构建更加复杂的模型^[46]。在模型集成方法上可以分为技术途径的集成和知识途径集成^[47]。第二种方法是近些年来发展很快的建模方法, 它可以随着研究区域和尺度的变化而快速构建新的模型, 从而大大提高了建模速度和预测能力^[48]。

集成建模环境并不是将模型简单地拼凑在一起, 而是根据用户的实际需求, 参考各模块功能说明和接口定义, 选择合适模块组建更复杂的模型。这种方法好处就是研究、开发与管理相辅相成, 研究人员和建模人员可以将更多的时间花费在建模上, 而不是输入输出的管理上; 开发人员则将模型实现, 并定义各模型在不同时空尺度上的输入输出接口和编写详细的模型说明; 管理人员可以“组装”各模块来解决自己的实际问题。在流域水资源管理中, 集成建模环境实质为决策提供了三个服务^[49], 即模块重用、模型组建和分析应用。目前, 已有的建模环境主要包括空间建模环境(SME: Spatial Modeling Environment)^[50]、通用建模环境(CME: Community Modelling Environment)^[51]、模块建模系统(MMS: Modular Modeling System)^[52]和开放地理建模环境(OGME: Open Geographic Modeling Environment)^[53]。

情景分析和集成建模环境在水资源管理决策支持系统框架中的集成^[21, 42, 54-55], 进一步促进了水资源管理决策支持系统的发展, 使 DSS 更具灵活性。它是将动态的水资源管理、可扩展的软件结构、集成建模环境和情景分析方法融为一体, 可以根据决策者的需求, 针对不同水资源管理问题, 提供多种解决方案。

该阶段出现的水资源管理决策支持系统主要包括 BASINS(Better Assessment Science Integrating point & Non-point Sources)^[56]、E2^[55]、Tarsier^[57]等。

5 展望与结论

5.1 展望

水资源管理决策支持系统发展 40 多年来, 更多的研究工作和文献集中在其如何解决水资源管理问题上, 而在水资源管理中, 数据也是水资源管理决策过程中核心的因素。如何快速、有效获取准确

的数据也是水资源管理决策支持系统面临的主要问题之一。已有的数据获取手段(气象站、水文站等)已无法满足多种因素影响下的水资源管理决策过程的需要。

随着数字地球全球战略思想的发展,其核心是通过信息的获取、存储、传输、处理、分析和多维可视化,实现地球系统实体的信息化表达和各圈层之间相互作用的物理过程的模拟,服务于人类社会^[58],而主要出口之一则是辅助决策。水是联系自然界各物理过程以及自然与人类社会的主要纽带之一^[59],各圈层之间相互作用的物理过程的模拟使人们更加清晰的认识水资源管理中涉及各物理过程。流域是水文循环过程研究和水资源管理研究的最小单元,李新等^[60]在“数字黑河”的研究中,针对数据集成问题,提出了3个层次的数据集成方法,将各类观测数据(包括卫星、航空和地面)、科学试验数据和模型数据集进行统一管理。水资源管理决策过程中涉及到的一些重要水文循环变量和过程可以通过卫星观测获取^[61]。目前,在可见光-近红外与热红外方面土壤水分反演的研究已十分成熟,并能够提供中等空间分辨率的土壤水分反演结果。如,利用NOAA/AVHRR的第4、5通道亮温数据或MODIS的第31波段、32波段数据,结合同相NDVI数据,通过条件植被指数(VTCI: Vegetation Temperature Condition Index)^[62-63]建立特征空间来反演土壤水分^[64-65];利用ETM+近红外(Nir)和红光(Red)波段反射率建立Nir-Red光谱特征空间,根据土壤水分在该特征空间中的分布规律来监测土壤水分^[66];利用地表温度和NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)建立的温度植被干旱指数(TVDI: Temperature Vegetation Dryness Index)能够对覆盖度较高地区的土壤水分进行监测^[67]等。在主、被动微波土壤水分反演方面也取得了很大成功^[68-70]。利用GRACE重力卫星可以获取区域水储量的变化^[71-72]。此外,通过遥感方法还可以获取降水^[73]、蒸散发^[74-75]、地表温度^[76]、积雪^[77-78]等水文循环各分量。遥感反演的水文循环各变量数据,结合地面观测,利用数据同化方法可以得到时空分辨率更高的数据集。

多源观测系统能够为水资源管理决策从不同时空尺度上提供前所未有的多源数据基础。许多遥感数据及产品都是可以免费获取,针对水资源管理中涉及的不同的水文变量和生态变量,结合地面观测,通过建立从遥感数据获取-处理-反演(-同化)自

动化流程,将遥感数据和地面观测同时引入水资源管理决策支持系统框架下,从根本上改变现有水资源管理决策支持系统的框架结构,使其向着“综合观测系统+情景分析+集成模拟环境+DSS工具”的方向发展。

除此之外,实际的水资源管理问题通常设计部门众多,决策过程不仅依靠水资源管理部门,还必须有防洪部门、水质监测部门、水利工程部门、林业部门、农业部门等众多部门的参与,这些部门的协同工作才是水资源管理决策过程成败的关键。作为决策的主体——人,在决策过程中的作用也逐渐被重视起来。通过文化理论将决策者分为不同类型,并利用决策者自身素质以及文化类型来定量其在群决策过程中的个人偏好。因此,构建基于文化理论的多部门协商水资源管理群决策支持系统则是水资源管理决策支持系统的另一重要发展趋势。

综上所述,集成综合观测系统、建模环境和联机协商环境的水资源管理决策支持系统是指针对不同的水文、气候和政策情景,以遥感、地面水文水利监测为手段获取实时多源数据资源,利用联机协商环境建立各级水管部门和用水单位之间的水资源管理群决策环境,通过建模环境对水资源管理中涉及的物理过程和人文过程进行集成和模拟,结合多目标规划方法和博弈论,能够为决策者提供科学决策依据的系统。该系统能够为综合水资源管理问题的提出、协商和决策提供一个综合平台。

5.2 结论

水资源管理决策支持系统为科学家和水资源管理决策者或管理者之间建立了一座桥梁。能够将科学家对水文循环过程的认识带给水资源管理的决策者,为他们提供决策所需的重要信息。从以往的水资源管理决策支持系统建立的经验来看,这座“桥梁”的好坏不仅取决于建造它的工程师(软件工程人员),更重要的是对水资源管理问题的需求以及科研人员对实际的水资源管理问题中涉及的各种过程的认识能力。因此,成功建立一个水资源管理决策支持系统需要实际参与水资源管理的用户(决策人员、管理人员和公众)、科研人员以及软件工程人员的共同参与,并以会议的形式达到交流的目的。

对于实际参与水资源管理的用户,从多角度、多层次,提出详细的实际水资源管理面临的问题,分主次阐明这些问题存在的原因以及传统的解决方法,为可行的定量解决方法的提出奠定基础。科研人员的任务则是研究实际水资源管理问题涉及到的

物理过程, 分解实际的水资源管理问题, 根据实际情况, 利用合适的数学方法将其定量表达成模型。而软件工程人员要从系统建设的角度考虑系统框架的设计、开发方法的选择, 从系统的易用、简洁、稳定以及可扩展性强等方面出发, 利用计算机语言将系统实现。

参考文献 (References):

- [1] Rosegrant M W, Cai X M, Cline S A. Global Water Outlook to 2025: Averting An Impending Crisis [R]. IFPRI-IWMI Technical Report. Washington, DC, WA, 2002.
- [2] Fedra K. Interactive water-quality simulation in a regional framework: a management-oriented approach to lake and watershed modeling[J]. *Ecological Modeling*, 1984, **21**(4): 209—232.
- [3] Power D J. A brief history of decision support systems[E/OL]. DSSResources.com, World Wide Web, [Http://DSS-Resource.COM/history/dsshistory.html](http://DSS-Resource.COM/history/dsshistory.html), 2007.
- [4] Arnott D, Pervan G. Eight key issues for the decision support systems discipline[J]. *Decision Support Systems*, 2008, **44**: 657—672.
- [5] Turban E, Aronson J, Liang T, Sharda R. Decision support and business intelligence systems, 8th Edition Prentice Hall, Upper Saddle River NJ. 2007.
- [6] Mackrell D, Kerr D, von Hellens L. A qualitative case study of the adoption and use of an agricultural decision support system in the Australian cotton industry: The socio-technical view[J]. *Decision Support System*, 2009, **47**: 143—153.
- [7] Power D J. What is a DSS? [J]. *The On-Line Executive Journal for Data-Intensive Decision Support*, 1997, **1**(3). Retrieved October 20, 2004 from <http://dssresources.com/papers/whatisdss/index.html>.
- [8] Hashemi F, Decker W. Using climatic information and weather forecast for decisions in economizing irrigation water [J]. *Agricultural Meteorology*, 1969, **6**(4): 245—257.
- [9] Andersen J C, Hiskey H H, Lackawathana S. Application of statistical decision theory to water use analysis in Sevier County, Utah[J]. *Water Resources Research*, 1971, **7**(3): 443—452.
- [10] Kumar R, Khepar S D. Decision models for optimal cropping patterns in irrigations based on crop water production functions[J]. *Agricultural Water Management*, 1980, **3**(1): 65—76.
- [11] Loucks D P, Salewicz K A. IRIS: An Interactive River System Simulation Program, General Introduction and Description[R]. International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, 1989.
- [12] Ward V. Towards a theory of a state-non-state actors: a grid-group cultural approach [M]//Jacquin-Berdal D, Oros A, Verweij M. Culture in World Politics. London, New York: MacMilan, 1998: 206—244.
- [13] Crossland M D. Individual Decision-Maker Performance With and Without a Geographic Information System: An Empirical Investigation[D]. Doctoral Dissertation at Indiana University completed in June, 1992
- [14] Crossland M D, Wynne B E, Perkins W C. Spatial decision support systems: an overview of technology and a test of efficacy[J]. *Decision Support Systems*, 1995, **14**: 219—235.
- [15] Liu C W. Decision support system for managing ground water resources in the Choushui River alluvial in Taiwan[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2004, **40**: 431—442.
- [16] Cai Ximing, Kumar P, Liang Z. Remote sensing based decision support system for the restoration of an arid basin ecosystem: application to the Hei River Basin in China[R].
- [17] Ralph H. Spragure. A framework for the development of decision support systems[J]. *MIS Quarterly*, 1980, **4**(4): 1—10.
- [18] Bonczak R H, Holsapple C W, Whinston A B. Foundations of Decision Support Systems [M]. New York: Academic Press, 1981.
- [19] Recio B, Ibanez J, Rubio F, et al. A decision support system for analyzing the impact of water restriction policies[J]. *Decision Support Systems*, 2005, **39**: 385—402.
- [20] Trepel M, Kluge W. WETTRANS: a flow-path-oriented decision support system for the assessment of water and nitrogen exchange in riparian peatlands[J]. *Hydrological Processes*, 2004, **18**: 357—371.
- [21] Monte L, Brittain J E, Gallego E, et al. MOIRA-PLUS: A decision support system for the management of complex fresh water ecosystem contaminated by radionuclides and heavy metals[J]. *Computer & Geosciences*, 2009, **35**: 880—896.
- [22] Engle B A, Choi J Y, Harbor J, Pandey S. Web-based DSS for hydrologic impact evaluation of small watershed land use changes[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2003, **39**: 241—249.
- [23] Stansbury J, Woldt W, Bogardi I, Bleed A. Decision support system for water transfer evaluation[J]. *Water Resources Research*, 1991, **27**(4): 443—451.
- [24] Chen Xing, Cheng Jilin, Zhou Jiankang. Study of decision-making support system for optimal distribution of water resources based on GIS[J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2008, **19**(5): 15—19. [陈兴, 程吉林, 周健康. 基于 GIS 的水资源优化配置决策支持系统的研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2008, **19**(5): 15—19.]
- [25] Labadie J. River Basin Network Model for Water Rights Planning, MODSIM: Technical Manual[J]. Department of Civil Engineering, Colorado State University, Fort Collins, CO., 1995.
- [26] Fredericks J W, Labadie J, Altenhofen M. Decision support system for conjunctive stream-aquifer management[J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 1998, **124**(2): 69—78.
- [27] Soncini-Sessa R, Castelletti A, Weber E. A DSS for planning and managing water reservoir systems [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2003, **18**: 395—404.
- [28] Liu Zhihui. Decision support system for water supply management in drainage basin[J]. *Arid Land Geography*, 2000, **23**(3): 259—263. [刘志辉. 流域供水管理决策支持系统总体设计[J]. *干旱区地理*, 2000, **23**(3): 259—263.]
- [29] Ge Yingchun, Li Xin. Design and implementation of water resources management and decision support system in the Middle Reaches of Heihe River[J]. *Journal of Glaciology and*

- Geocryology, 2011, **33**(1): 190–196. [盖迎春, 李新. 黑河流域中游水资源管理决策支持系统设计与实现[J]. 冰川冻土, 2011, **33**(1): 190–196.]
- [30] Cheng Guodong, Xiao Honglang, Xu Zhongmin, *et al.* Water issue and its countermeasure in the inland river basins of Northwest China – A case study in Heihe River Basin[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, **28**(3): 406–413. [程国栋, 肖洪浪, 徐中民, 等. 中国西北内陆河水问题及其应对策略[J]. 冰川冻土, 2006, **28**(3): 406–413.]
- [31] Salewicz K A, Nakayama M. Development of a web-based decision support system (DSS) for managing large international rivers[J]. Global Environmental Change-human and Policy Dimensions 14 SU, 2004(Suppl. 1): 25–37.
- [32] Zagona E A, Fulp T J, Goranflo H M, *et al.* RiverWare: a general river and reservoir modeling environment[C]//Proceedings of the First Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference, Las Vegas, NV, 1998; 5–113
- [33] Zagona E A, Fulp T J, Shane R, *et al.* RiverWare[J]. Journal of American Water Resources Association, 2001, **37**(4): 913–929.
- [34] Andreu J, Capilla J, Sanchis E. AQUATOOL, a generalized decision-support system for water-resources planning and operational management[J]. Journal of Hydrology, 1996, **177**: 269–291.
- [35] Holmes M G R, Young A R, Goodwin T H, *et al.* A catchment-based water resource decision-support tool for the United Kingdom [J]. Environmental Modelling & Software, 2005, **20**: 197–202.
- [36] Li Yan, Li Manchun. A study on the construction of water resources regulation decision support system of the Yellow River[J]. Areal Research and Development, 2009, **28**(5): 140–144. [李燕, 李满春. 黄河水量调度管理决策支持系统建设研究[J]. 地域研究与开发, 2009, **28**(5): 140–144.]
- [37] Wei Jiahua, Wang Guangqian, Liu Ronghua. Decision support system for water resources unified regulation of the Tarim River Basin[J]. South North Water Transfers and Water Science & Technology, 2009, **7**(1): 17–21. [魏加华, 王光谦, 刘荣华. 塔里木河流域水量调度决策支持系统[J]. 南水北调与水利科技, 2009, **7**(1): 17–21.]
- [38] Zhu Changjun, Wang Ming, Li Shuwen, *et al.* Management decision support system of regional water resources in Handan area[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2008, **27**(Suppl.): 323–325. [朱长军, 王明, 李树文, 等. 邯郸地区水资源管理决策支持系统[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2008, **27**(Suppl.): 323–325.]
- [39] Xu Jianxin, Bai Xuemei, Shen Jin, *et al.* Decision-making software for real-time optimal allocation of water resources in irrigation area[J]. Advances in Water Science, 2003, **14**(2): 178–183. [徐建新, 白雪梅, 沈晋, 等. 灌区水资源实时优化调配决策软件研制[J]. 水科学进展, 2003, **14**(2): 178–183.]
- [40] Harald Vacik, Manfred J Lexer. Application of a spatial decision support system in managing the protection forests of Vienna for sustained yield of water resources[J]. Forest Ecology and Management, 2001, **1433**: 65–76.
- [41] Loucks D P, Stedinger J R, Haith D A. Water Resource Systems Planning and Analysis[M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1981.
- [42] Pallottino S, Sechi G M, Zuddas P. A DSS for water resources management under uncertainty by scenario analysis [J]. Environmental Modelling & Software, 2005, **20**: 1031–1042
- [43] Swart R J, Raskin P, Robinson J. The problem of the future: sustainability science and scenario analysis[J]. Global Environmental Change, 2004, **14**: 137–146.
- [44] Ron S Dembo. Scenario optimization[J]. Annals of Operations Research, 1991, **30**: 63–80.
- [45] Nan Zhuotong, Shu Lele, Zhao Yanbo, *et al.* Study of integrated modeling environment and its application in Heihe River Basin[J]. Science in China(Technology), 2011, **41**(8): 1043–1054. [南卓铜, 舒乐乐, 赵彦博, 等. 集成建模环境研究及其在黑河流域的初步应用[J]. 中国科学(技术科学), 2011, **41**(8): 1043–1054.]
- [46] Jo Ellen Brandmeyer, Hassan A Karimi. Coupling methodologies for environmental models[J]. Environmental Modelling & Software, 2000, **15**: 479–488.
- [47] Li Xin, Cheng Guodong, Kang Ersi, *et al.* Digital Heihe River Basin. 3: Model integration[J]. Advances in Earth Science, 2010, **25**(8): 852–865. [李新, 程国栋, 康尔洒, 等. 数字黑河的思考与实践 3: 模型集成[J]. 地球科学进展, 2010, **25**(8): 852–865.]
- [48] Chenoweth T, Dowling K L, St Louis R D. Convincing DSS users that complex models are worth the effort[J]. Decision Support System, 2004, **37**: 71–83.
- [49] Argent R M, Vertessy R A, Watson F G R. A framework for catchment prediction modeling[C]//Proceedings of 26th National and 3rd International Hydrology and Water Resources Symposium, Vol. 2. The Institution of Engineers, Australia, Perth, 2000; 706–711.
- [50] <http://www.uvm.edu/giee/SME3/SME3.html>.
- [51] <http://www.scec.org/cme/section1.html>.
- [52] Leavesley G H, Markstrom S L, Brewer M S, *et al.* The modular modeling system (MMS) – The physical process modeling component of a database-centred decision support system for water and power management[J]. Water, Air and Soil Pollution, 1996, **90**: 303–311.
- [53] Maxwell T, Costanza R. An open geographic modeling environment[J]. Simulation, 1997, **68**(3): 175–185.
- [54] Aravossis K, Vliamos S, Anagnostopoulos P, *et al.* An innovative cost-benefit-analysis decision support system for the evaluation of alternative scenarios of water resources management. Fresenius Environmental Bulletin, Parlar Scientific Publications, 2003, **12**(12): 1433–1443.
- [55] Argent R M, Perrand J M, Rahman J M, *et al.* A new approach to water quality modeling and environmental decision support systems[J]. Environmental Modelling & Software, 2009, **24**: 809–818.
- [56] National Center for Environmental Assessment Office of Research and Development. BASINS 4.0 Climate Assessment Tool (CAT): Supporting Documentation and User's Manual [R]. United States Environmental Protection Agency, 2009.
- [57] Waston F G R, Vertessy R A, Grayson R B, *et al.* Towards parsimony in large scale hydrological modeling–Australian and Californian experience with the Macaque model [C]//Fall AGU Meeting 1998, Paper H72D-21, 1998.

- [58] Chen Shupeng, Guo Huadong. Digital earth and earth observation[J]. *Acta Geographical Sinica*, 2000, **55**(1): 8-13. [陈述彭, 郭华东. “数字地球”与对地观测[J]. *地理学报*, 2000, **55**(1): 8-13.]
- [59] Cheng Guodong, Zhao Chuanyan. An integrated study of ecological and hydrological processes in the inland river basin of the arid regions, China[J]. *Advances in Earth Science*, 2008, **23**(10): 1005-1012. [程国栋, 赵传燕. 干旱区内陆河流域生态水文综合集成研究[J]. *地球科学进展*, 2008, **23**(10): 1005-1012.]
- [60] Li Xin, Wu Lizong, Ma Mingguo, *et al.* Digital Heihe River Basin. 2: Data integration[J]. *Advances in Earth Science*, 2010, **25**(3): 306-316. [李新, 吴立宗, 马明国, 等. 数字黑河的思考与实践 2: 数据集成[J]. *地球科学进展*, 2010, **25**(3): 306-316.]
- [61] Li Xin, Cheng Guodong, Ma Mingguo, *et al.* Digital Heihe River Basin. 4: Watershed observing system[J]. *Advances in Earth Science*, 2010, **25**(8): 866-876. [李新, 程国栋, 马明国, 等. 数字黑河的思考与实践 4: 流域观测系统[J]. *地球科学进展*, 2010, **25**(8): 866-876.]
- [62] Kogan F N. Remote sensing of weather impacts on vegetation in non-homogenous areas[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1990, **11**(1): 405-419.
- [63] Gillies R R, Carlson T N, Cui J, *et al.* A verification of the ‘triangle’ method for obtaining surface soil water content and energy fluxes from remote measurement of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and surface radiant temperature[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, **18**: 3145-3166.
- [64] Liu Liangyun, Zhang Bing, Zheng Lanfang, *et al.* Target classification and soil water content regression using land surface temperature (LST) and vegetation index (IV)[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2002, **21**(4): 269-273. [刘良云, 张兵, 郑兰芬, 等. 利用温度和植被指数进行地物分类和土壤水分反演[J]. *红外与毫米波学报*, 2002, **21**(4): 269-273.]
- [65] Yang Shengtian, Liu Changming, Wang Pengxin. The method of calculating soil water in Yellow River Basin by remote sensing[J]. *Progress in Geography*, 2003, **22**(5): 454-463. [杨胜天, 刘昌明, 王鹏新. 黄河流域土壤水分遥感估算[J]. *地理科学进展*, 2003, **22**(5): 454-463.]
- [66] Zhang Zhiming, Qin Qiming, A buduwasiti Wulamu, *et al.* New method on soil water observation based on NIR-Red spectrum feature space[J]. *Science in China (D: Earth Sciences)*, 2006, **36**(11): 1020-1026. [詹志明, 秦其明, 阿布都瓦斯提·吾拉木, 等. 基于 NIR-Red 光谱特征空间的土壤水分监测新方法[J]. *中国科学(D 辑: 地球科学)*, 2006, **36**(11): 1020-1026.]
- [67] Carlson T N, Gillie R R, Perry E M. A method to make use of thermal infrared temperature and NDVI measurements to infer surface soil water content and fractional vegetation cover [J]. *Remote Sensing Rev.*, 1994, **9**: 161-173.
- [68] Zhao Tianjie, Zhang Lixin, Jiang Lingmei. Joint inversion of soil moisture using active and passive microwave data[J]. *Advances in Earth Science*, 2009, **24**(7): 769-775. [赵天杰, 张立新, 蒋玲梅, 等. 利用主被动微波数据联合反演土壤水分[J]. *地球科学进展*, 2009, **24**(7): 769-775.]
- [69] Wang Shuguo, Li Xin, Han Xunjun, *et al.* Derivation of surface soil moisture in the Middle stream of Heihe River Basin using multi-temporal ASAR images [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2009, **24**(5): 582-587. [王树果, 李新, 韩旭军, 等. 利用多时相 ASAR 数据反演黑河流域中游地表土壤水分[J]. *遥感技术与应用*, 2009, **24**(5): 582-587.]
- [70] Qin Yanfang, Chen Xi, Zhou Kefa, *et al.* Using GPR to sound the spatial and temporal distributions of dune surface water contents before and after snowmelt in the early spring [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, **34**(3): 690-697. [秦艳芳, 陈曦, 周可法, 等. 利用探地雷达观测分析早春融雪前后沙丘表层土壤含水量的时空分布[J]. *冰川冻土*, 2012, **34**(3): 690-697.]
- [71] Swenson S, Wahr J, Milly P. Estimated accuracies of regional water storage variations inferred from the gravity recovery and climate experiment (GRACE)[J]. *Water Resources Research*, 2003, **39**(8): 11. DOI: 10.1029/2002 WR 001808.
- [72] Cao Yanping, Nan Zhuotong. Monitoring water storage variations in the Heihe River Basin by the GRACE gravity satellite[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2011, **26**(6): 719-727. [曹艳萍, 南卓铜. 利用 GRACE 重力卫星监测黑河流域水储量变化[J]. *遥感技术与应用*, 2011, **26**(6): 719-727.]
- [73] Zhao Guo, Chu Rongzhong, Zhang Tong, *et al.* An improvement of polarimetric radar rainfall estimates[J]. *Plateau Meteorology*, 2011, **30**(2): 498-507. [赵果, 楚荣忠, 张彤, 等. 偏振多普勒雷达定量测量降雨精度的改进[J]. *高原气象*, 2011, **30**(2): 498-507.]
- [74] Li X M, Yang W F, Ling L, *et al.* Estimation of evapotranspiration in an arid region by remote sensing—A case study in the middle reaches of the Heihe River Basin[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2012, doi: 10.1016/j.jag.2011.09.008.
- [75] Huang C L, Li X, Wang J M, *et al.* Assimilation of remote sensing data products into common land model for evapotranspiration forecasting[C]//Zhang JX, Goodchild MF. The 8th International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences, Vol. 1. Shanghai, China: World Academic Press, 2008: 234-241.
- [76] Ouyang Bin, Che Tao, Dai Liyun, *et al.* Estimating mean daily surface temperature over the Tibetan Plateau based on MODIS LST products[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, **34**(2): 296-303. [欧阳斌, 车涛, 戴礼云, 等. 基于 MODIS LST 产品估算青藏高原地区的日平均地表温度[J]. *冰川冻土*, 2012, **34**(2): 296-303.]
- [77] Liu Junfeng, Chen Rensheng. Validation of MODIS snow covered days by the combined using of MODIS Aqua and Terra snow cover products and in-situ observations all over China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, **33**(3): 504-511. [刘俊峰, 陈仁升. 基于 MODIS 双星积雪遥感数据的积雪日数空间分布研究[J]. *冰川冻土*, 2011, **33**(3): 504-511.]
- [78] Lin Jintang, Feng Xuezhi, Xiao Pengfeng, *et al.* Spatial and temporal characteristics of satellite snow cover in a typical area of Tianshan mountains[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, **33**(5): 971-978. [林金堂, 冯学智, 肖鹏峰, 等. 天山典型区卫星雪盖时空特征研究[J]. *冰川冻土*, 2011, **33**(5): 971-978.]

Water Resources Management Decision Support System : Review and Prospect

GE Ying-chun, LI Xin

*(Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese
Academy of Sciences, Lanzhou Gansu 730000, China)*

Abstract: In this paper, development process of water resources management decision support system (WRMDSS) is introduced, which includes three phases: model simulation, model simulation + DSS (Decision Support System), scenario analysis + integrated modeling environment + DSS tool. The features of each phase are described in detail. The first phase focused on applying the physical models related with water to decision-making processes of water resources management. With the development of DSS technique, it was the main characteristics of the second phase that the framework of WRMDSS was gradually improved by using the more the better the physical models

and the later the techniques including the GIS (Geographical Information System), RS (Remote Sensing), ES (Expert System), et al. In the final phase, the researches on WRMDSS aim to enhance the WRMDSS functions by taking into account flexibility, maneuverability and practicability of DSS by means of integrating the Modeling Environment. The reasons that block the development of WRMDSS also analyzed in this paper, and how to develop the successful WRMDSS is brought forward. Finally, the concepts on integrating multi-source observation system, modeling environment and on-line negotiation environment are proposed.

Key words: decision support system; water resources management; model integration; modeling environment