

流域管理决策支持系统研究进展*

曹 宇** 颜 晶

(浙江大学土地管理系, 杭州 310029)

摘 要 流域管理决策支持系统是为帮助流域管理者实现水资源优化配置而研发的智能系统,其模拟结果直接影响流域管理的科学性和实用性.本文从水量模拟和调配系统、水质监测和评价系统、流域综合管理系统三方面总结了国内外的相关研究,并分析了现存系统的特点和存在的问题,同时简要介绍 AQUA-Tool、Elbe-DSS、HD 等代表性系统的模型结构和发展现状.模拟结果精确稳定、工作流程简洁、用户可视化程度高是流域管理决策支持系统的研发重点,优化方案选择模型和三维可视化工具、研发跨流域综合管理系统、提高利益相关者的参与度是未来该领域的发展方向.

关键词 流域管理 决策支持系统 情景模拟 用户参与

文章编号 1001-9332(2012)07-2007-08 **中图分类号** TV213.9 **文献标识码** A

Decision support system for watershed management: A review. CAO Yu, YAN Jing (*Department of Land Management, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China*). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2012, 23(7): 2007–2014.

Abstract: Watershed management decision support system (DSS) is an intellectual system developed for the optimal allocation of water resources by watershed managers, and the simulation results of the system can directly affect the scientificity and practicability of watershed management. This paper summarized the related researches from the aspects of water quantity simulation and deployment systems, water quality monitoring and evaluation systems, and integrated watershed management systems. The main features and problems in existing DSS were analyzed, and the model structure and development status of the representative systems such as AQUA-Tool, Elbe-DSS, and HD were introduced. It was suggested that the accuracy and stability of simulated results, the succinctness of working process, and the high degree of user visualization would be the focuses in developing the DSS in the future, and the optimization of program-selecting models and 3D visualization tools, the research and development of inter-basin integrated management DSS, and the improvement of stakeholder participation would be the development trend for the future watershed management DSS.

Key words: watershed management; decision support system; scenario simulation; stakeholder participation.

水是人类生存和发展的物质基础.随着经济发展和人口增长,过度开发地下水和水体污染等原因导致的水资源短缺已成为困扰各国的难题.河流作为最主要的水资源载体,对各国和各地区人们的生存起着至关重要的作用,因而实现流域水资源的合理利用和科学管理是区域可持续发展的关键.流域管理的目标是保护和改善水体质量并且实现水资源

的可持续利用^[1].随着对水利用问题认识的深入,流域管理目标已经从传统的疏浚通航、洪水治理、生态保护、水产养殖等单目标管理发展到目前强调生态、经济、社会综合功能的多目标可持续流域管理^[2].具体来说,流域综合管理既要满足不断增长的社会经济发展要求,又要持续保护河流生态和景观;既要统筹兼顾水质、自然保护、生态、防洪、航运、工业、矿业、农业和旅游业等,又要公正协调不同利益集团的要求^[3].

由于流域生态环境的复杂性、多尺度性和多目标性,决策支持系统作为高性能的模拟和可视化工具

* 国家自然科学基金项目(30700098)、浙江省自然科学基金项目(Y507207)和中央高校基本科研业务费专项资助.

** 通讯作者. E-mail: caoyu@zju.edu.cn

2011-09-19 收稿, 2012-04-21 接受.

具,在帮助流域管理者确定管理目标、设计管理方案、综合评价流域状况等方面具有不可替代的作用^[4]。为了应对日趋复杂的流域管理问题,各国都积极研发适合本国的决策支持系统,并已在水资源系统规划、设计和管理中得到了成功应用。国外特别是欧洲国家开展此类工作较早,已成功研制出多个较成熟的流域管理决策支持系统,如 AQUA-Tool、MIKE-BASIN、MULIN、RIBASIM、WEAP 等,取得了巨大的社会经济效益。中国在 20 世纪 90 年代末开始此类系统的研发工作,虽然在黄河和黑河流域取得了一定成果,但由于专家知识和研究范围的局限性,至今未形成一个适用于全国的、以跨流域水资源优化配置为核心的决策支持系统,且基于水质水量实时监测信息的决策支持系统尚处于尝试阶段^[5],并未在特定流域实际运行。

流域管理决策支持系统作为决策支持系统的重要分支,其概念框架及模型的研发、校准和耦合对于其他决策支持系统特别是环境管理决策支持系统具有重要的借鉴意义,它对数据模拟的准确性和用户界面友好化的要求符合当今所有决策支持系统的发展趋势。因而,流域管理决策支持系统的研究进展在很大程度上能够反映决策支持系统的整体发展情况,而且能够为相关决策支持系统在生态学和地理学上的应用提供研究经验。流域管理决策支持系统在帮助管理者制定适宜的政策、处理水权纠纷、实现河流数字化、跨流域生态系统保护^[6]等领域具有不可替代的作用,虽然已经经过了近 30 年的发展,但在模型构建、用户参与、效果反馈等方面仍存在很多不足,而且多目标可持续发展规划管理决策系统研究在我国也是刚刚起步^[7]。本文对现存的流域管理决策支持系统进行系统归纳和分析,总结其优缺点,并探讨了未来的发展趋势,以期为国内外相关系统的研究提供必要的理论支持和技术参考。

1 流域管理决策支持系统

决策支持系统(decision support system, DSS)的概念最早于 20 世纪 70 年代初被提出^[8]。它面对半结构化的决策问题,以管理科学、计算机科学、行为科学和控制论为基础,以计算机技术、人工智能技术、经济数学方法和信息技术为手段,是一种支持中、高级决策者决策活动的人机系统^[9]。它能为决策者迅速而准确地提供决策需要的数据、信息和背景资料,可帮助决策者明确目标、建立和修改模型、提供备选方案、评价和优选各种方案、通过人机对话

进行分析、比较和判断,从而为正确决策提供有利支持^[10]。

在流域管理方面,大多数决策支持系统通过地理信息系统收集数据,并且能够以方案预算和模型耦合为基础,对不同管理方案产生的水文、生态和经济后果进行跨学科的多标准分析^[11]。它通过对流域(包括地表水、地下水、水量、水环境、取排水等)的动态监测、数据采集、实时传输和信息存储管理,结合特定流域的社会、经济、人口、环境等因素和生活、工农业等对水资源的需求,实现对流域水资源的远程调配控制和智能管理,以支持流域水资源日常管理办公自动化^[12]。流域管理决策系统的构建一般包括以下基本结构:1)主菜单程序;2)地理信息系统;3)数据库管理系统;4)模拟模型、最优化模型、专家系统模型等;5)一套前处理和后处理程序;6)一套效用函数^[13]。系统功能主要包括描述、评估、预测和优化等,可以给水资源管理相关部门和领导提供直观具体的专家咨询和决策支持^[14]。

根据管理目标的侧重点和系统结构特点,流域管理决策支持系统可以分为水量调度系统、水质控制系统和综合管理系统三大类。前两类是专门针对地区缺水或污染的特殊水文状况设计的决策系统,模型结构单一,模块功能简单,主要从地表水和地下水两方面对水量、水质进行监测和预案设计,在涉及较少利益主体的小流域有很好的运用。综合管理系统一般包括水量调度子系统和水质控制子系统,它是在耦合水量和水质模型的基础上,加入规划评估、事务管理、实施监督等模块(图 1),从供水、治污、交易、立法等方面对流域管理的程度进行深化,使决策过程科学化。它往往由前两种系统经过改进发展而来,根据特定的研究目标增加相应的子系统,适合解决跨流域的水管理问题。

2 国外流域管理决策支持系统研究进展

国外关于流域管理决策支持系统的研究起步较早,20 世纪 90 年代初期就已设计完成部分具有一定功能的系统,主要集中在水质分析、水量调配与规划、灌区系统引水等方面。特别是 2000 年“欧洲水框架指令”(WFD)^[15]颁布以后,流域管理决策支持系统在欧洲进入蓬勃发展期,同时也积极推动了世界其他国家如美国、墨西哥、印度等多国的系统研发工作。现在流行的流域管理决策支持系统多采用驱动力、压力、状况、影响、响应概念模型框架(DPSIR)^[16],通过指标计算对流域状态进行评估或

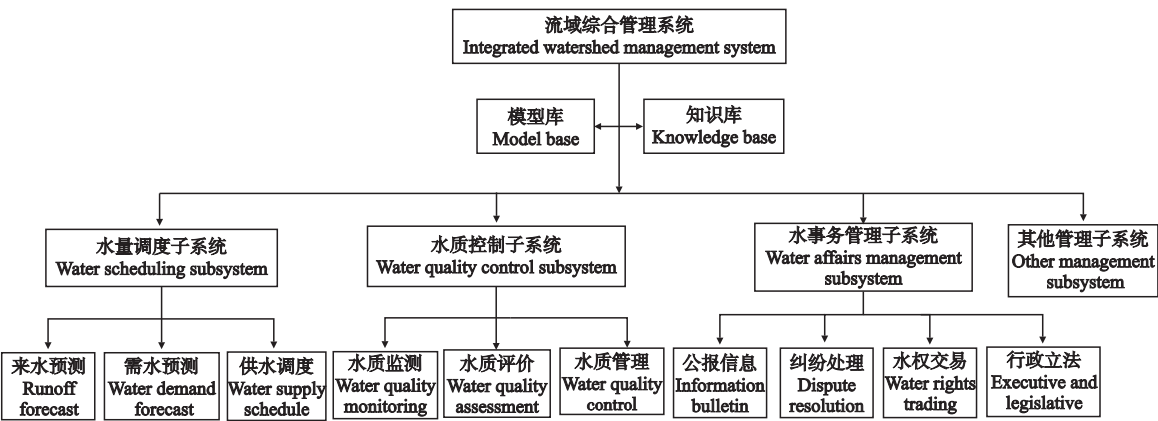


图 1 流域综合管理决策支持系统结构框架

Fig. 1 Framework of integrated watershed management support system.

通过政策方案模拟实现流域综合效益最大化。

2.1 水量预测与调度系统

水量预测与调度系统的核心组件是需水预测模型和供水优化模型,其目标是充分利用有限的水资源,发挥最大的社会、经济和生态效益.有的系统专门针对干旱、半干旱区,以实现节约用水政策规划,寻求合理方案缓解地区缺水问题.最具代表性的是由意大利 Cagliari 大学设计研发的 WARGI 系统^[17],它的特点是将优化模型和仿真模型进行耦合,通过水文状况分析制定减轻地区干旱威胁的水管理政策.该系统已在意大利撒丁岛地区成功运用,能够为工农业和生活用水的有效分配提供重要指导.另一个代表性系统是 Gastelum 等^[18]在 Conchos 流域设计出的决策支持系统,它通过情景模拟从短期收益和长期收益两方面对制度的合理性进行评判.该系统的优点是能够为涉及多国利益、多个参与主体的流域调水问题的政策制定提供技术支持,实现跨流域管理.此外,还有一些系统既适用于缺水地区又能在水量相对丰富的地区运用,如 REALM^[19]是由澳大利亚学者设计的水量调配模拟系统,它的适用范围广泛,能够处理不同水文条件下的水资源供应问题,其优点是能以图形输出的方式对调度方案带来的效果进行直观分析和比较,操作简便.

2.2 水质监测和控制系统

水质监测和控制系统主要用于工农业发展迅速的河段和湖泊地区,目标是规范人们的用地行为,制定恰当的污染治理措施,以维持水环境生态平衡. Berkemer 等^[20]开发的 ORVAN 是早期用于水质评估的决策支持系统,它与同期的系统相比,模块设计和用户操作相对简单,核心数据的模拟准确性较高,可以进行不同情景下的河流水质变化模拟,但也存

在情景呈现和多标准数据融合能力不强的缺点. River Life DSS 是芬兰为了加强水污染控制而研发的系统,它包括一系列模拟工具和方法信息包,专门用于描述不同土地使用方式产生的非点源污染,从而对河流的生态和水文环境进行评价^[21]. Catch MODS 是由澳大利亚的 Newham 等^[22]发展起来的用于评估管理行为对水质影响的决策支持系统,它最简单的模型输出是识别非点源污染的污染源地区,并且可以制定控制污染、改善水质的成本-效益最优化决策.该系统最大的特点是在开发过程中充分调动利益相关者的积极性,由系统用户进行测试,根据用户反馈对系统进行修正,从而最大程度满足用户需求^[23].

2.3 流域综合管理系统

流域综合管理系统是该领域的发展趋势和研究重点.各模型发展程度有很大不同,有些已经基本开发完成,用户可以从网站上下载软件并获得源代码,也可以通过用户指南对相应模块进行修正.如由瑞典 Stockholm 环境研究所研究开发的 WEAP 系统^[24]是用以帮助决策者收集、处理水文信息的规划决策工具,它依托 GIS 平台,通过预测水量供求关系、水质分析评价和政策预案模拟实现水资源的合理化分配.西班牙水研究所开发的 AQUA-Tool^[25]由流域仿真、决策优化、水文状态实时监测、水质评价、水权交易管理、污水处理等多个模块组成,在水量配置和水质评价方面具有完善的功能^[26],现主要用于干旱区流域管理,对提高水资源利用效率、监测水文环境状态、完善水权交易具有重要的实用价值^[27]. RI-BASIM^[28]也是一个较成熟的决策支持系统,仿真效果强、易于与其他专家决策支持系统耦合是其突出特点,它能生成详细的水资源格局图,并且可以方便

地与 DELWAQ 等专业水质模型进行连接,可以实现河流水质变化的详细模拟。

除了发展较完善的流域综合管理系统,另有一些系统仍处于发展阶段。如由德国联邦水文学研究所开发的 Elbe-DSS^[29],其系统功能涵盖了水质、防洪、漫滩生态和航运,同时考虑气候变化、农业政策和人口变化等外部情景,可以评估流域管理效果并且预测人类活动对 Elbe 河流及其漫滩的影响^[30]。它的成本-效益分析功能较完善,但在用户界面友好化、系统适应性等方面有很大不足^[11]。由 Volk 等^[31]设计的 FLUMAGIS 能够实现水文、生态和社会经济状况综合评估,其最大的特点是具备 3D 可视化模块,着重呈现土地利用变化对流域水资源状况的影响。虽然它已具备强大的结果呈现和评价功能,但仍存在模拟效果依赖使用者专业知识,水质监测数据无法与实际定量目标相吻合等缺点^[32]。

3 国内流域管理决策支持系统研究进展

从 20 世纪末开始,中国开始积极进行流域管理决策支持系统的研究工作,研究地区集中在经济、社会迅速发展的黄河、长江和辽河流域,以及生态环境相对脆弱的黑河和塔里木河流域,研究内容主要是水量调度、洪水防治以及水质的实时监测和治理。研究初期以概念模型的提出和研究方法探讨为主,近年来逐步转入对实际模型的开发和运用。

3.1 概念模型研究

张勤生等^[33]阐述了黄河流域骨干工程决策支持系统开发研究中所使用的建模方法,即先在系统分析中建立系统的与或图,获得系统中各决策问题求解序列、本原问题集合以及本原问题求解算法的集合,然后将其与广义模型结合,采用零部件模型设计技术建模。程春田和欧春平^[34]认为,集成管理是流域防洪调度决策支持系统的重要发展方向,应综合运用 Web、GIS、数据库、神经网络、模糊系统、基因遗传算法与水文系统等多学科知识建立智能化和实用化决策支持系统。段学军^[35]提出流域可持续发展决策支持系统 (VSDDSS) 的开发雏形,它由数据查询检索、辅助决策支持及图形管理 3 个基本模块组成,具备信息处理和更新、方案评价、流域发展规划及决策方案咨询等多种功能。刘志辉^[36]结合干旱区实际,阐述了一个集流域信息、数据库管理、实时监测、水量预测、水库排沙调度、优化供水决策、系统在线帮助等多功能为一体的流域供水管理决策支持系统的开发设计思路。

3.2 应用系统开发

3.2.1 水量预测和调度系统 中国水量调度决策支持系统建设主要集中在黄河流域,目的是为引流灌溉、洪水防治、通航等提供决策支持。王煜等^[37]进行了黄河三门峡以下非汛期水量调度决策支持系统 (WRDDSS) 的研发工作,运用面向对象技术和 GIS 空间可视化技术对黄河下游灌区在非汛期的引水方案进行情景模拟^[38],以解决引黄灌区水量分配问题,这是中国在该领域的首次实践和成功运用。许迪等^[39]应用 SEDAM 模型模拟黄河上游惠农引黄灌区的灌溉需求与渠系输配水状况,利用节水多准则分析方法评价农田与输水系统的改善方案。李燕和李满春^[40]开发的黄河水量调度管理决策支持系统能够实现水资源预测预报、需水监测分析、水量调度业务处理和仿真、实况综合监视等功能,在运行中达到了满意效果,值得进一步完善和推广。

在其他流域,中国学者对水量调度决策支持系统的研发也取得了一定进展。魏加华等^[41]设计的塔里木河水量统一调度决策支持系统,具有来水预报、需水预测、调度方案编制和调度总结等功能,其优点能够适用于大型流域多水源、多用户复杂条件下的水量调度,具有可操作性和普适性强的特点。盖迎春和李新^[42]借鉴 WMDSS 的开发经验和框架结构,集成 GIS、Internet 等技术以及软件工程方法,研发了黑河流域中游水资源管理决策支持系统——HD。该系统将县际分水模型、省际调水模型、灌溉管理模型、干旱指数模型等集成到水资源管理模型中,能够实现河流来水预测和灌区分水调度,现已成功试运行于黑河流域的中游清水河灌区、三清灌区、洪水河灌区等,成为中国流域管理决策支持系统的杰出代表。

3.2.2 水质监测和控制系统 该系统主要通过对流域范围水文过程和点源或非点源污染的模拟计算来解决不同条件下的水管理问题^[43]。翟淑华和秦佩瑛^[44]建立了太湖流域河网水质管理决策支持系统 (TAIHU DSS),它将数据库、水质模型、污染负荷模型、图形动态显示软件、案例分析工具等集合于一体,优点是能够以图形方式对河网状况进行动态显示,实时监测功能强。张绍峰等^[45]建立了黄河流域水资源保护决策支持体系,该体系采用多层结构、组件技术及 MIS 与 GIS 相结合的开发模式,模型库主要包括污染源评价与预测模型、水质评价与预测模型和灰箱模型,是“数字黄河”工程在水资源保护领域的具体体现。杜鹏飞等^[46]应用 GIS 技术实现农业非点源污染模型的输入数据准备和输出结果分析功

能,调用筛选模块生成较优的非点源污染控制技术组合集,并以官厅水库崇礼县小流域为背景对系统进行了评估和应用,但其对较大流域的运用效果仍有待验证.高鹏飞等^[47]针对松花江硝基苯水污染研发了流域水污染应急决策支持系统的模型系统,其优点是能够为突发水污染状况的决策提供定量化支持,并可实时可视化地展现特征污染物的行为和影响.韩龙等^[48]将流域内水系数据、地形数据、土地利用数据、社会经济及人口数据等进行融合,对深圳市石岩水库流域进行实证研究,构建了石岩水库流域管理决策支持系统,评价了旱季截污、产业结构调整、雨季截流等单个及组合措施的水质改善效果.

3.2.3 流域综合管理系统 近年来,中国学者在借鉴国外相关研究的基础上,开始研发适应本国流域水情的综合管理决策支持系统,在小流域运用较多^[49],且研究重点主要集中在水质水量实时监测、跨流域水权交易、流域总体规划等方面.2009年,马拥军^[50]提出建设长江流域水资源管理决策支持系统,包括水资源事务管理以及水资源配置和监督2个子系统.其中,取水许可管理系统和长江流域省际边界河流地理信息系统已经开发完成并投入使用,其他系统仍在研发或试用中.这是迄今为止中国研发的最完善的流域综合管理决策支持系统,对中国其他流域的管理实践具有很强的指导意义.由加拿大学者和中国学者合作开发的 SMC-DSS^[51],是一个基于多准则情景分析的决策支持系统,现已在中国海河流域试运行,最大的优点是善于解决涉及一些冲突目标的管理问题,并且能灵活应对结果的不确定性.此外,兰州交通大学设计开发了一个流域城市行业和水资源交易平台,该系统由水质水量评估、流域信息呈现、贸易信息分析、多级环境管理、法律法规管理等多个子系统构成,通过对沿岸城市取水和废水排放的直观观察,促进水权交易和利益相关者的权益分配^[52],它是实现中国水权交易定量化、合法化、制度化的重要尝试.

4 国内外流域管理决策支持系统的评述和比较

各国都在积极开展流域管理决策支持系统的研发工作,只是基于不同的立法框架和决策目标,系统的特征有所差异.国外起步较早,已形成结构和功能较完善的多个系统,并且在欧洲、北美洲和非洲等多个流域有成功应用,以综合性的多功能决策支持系统为主;研究范围有跨国、跨地区的大尺度,也有集中分析某一河段的中小尺度,如 TRANSCAT DSS^[53]

是在欧洲跨流域集水区建立的决策选择系统,前面提到的 Elbe-DSS 则适用于不同的空间尺度;在模型可得性方面,大多数系统都能在网上直接下载,用户可以根据各自需求对模型进行调整和修正.虽然相关研究已经取得一定成绩,但大多数系统仍存在模拟结果不稳定、运行速度慢、适用性差、用户界面友好化程度低等缺陷.

中国开展相关研究的时间较晚,开发完成的系统有限,只有部分进入试运行,大部分仍处于研发阶段;偏重单一功能决策支持系统的设计,特别是为配合中国“南水北调”工程而开发出的水量调度系统占据大部分,在流域水质监测方面尚有很大不足;流域综合管理决策支持系统的研发工作相对滞后,还未形成完善的政策选择和优化模型,在水价、水法、水权领域缺乏相应的技术支持.近年来,中国注重对国外流域管理系统的引进,如 Elbe-DSS、Water Ware、RIBASIM 等开始试运行,但因模型的假设前提具有限制性^[54],系统的调配尚未达到令人满意的效果.

5 结 语

通过比较可以看出,国内外流域管理决策支持系统存在共同的发展趋势:在系统开发方面,注重与网络技术结合,将单一的程序语言开发转变为更多用户参与的开放式代码共享开发;与“3S”技术结合,依托遥感数据和 GIS 的空间分析功能实现模拟效果的可视化呈现^[55];在系统功能方面,进行水情状况和生态环境的实时监测,注重信息处理和报告;优化方案选择模型,追求模拟效果的准确性和稳定性^[56].

成功的流域管理决策支持系统应在模型的耦合、校准和验证方面具有高品质,系统功能完善且稳定,能够准确应对复杂多变的流域管理问题.此外,系统的信息结构和工作流程组成方式应较简洁、可视化程度应较高^[57],使用户能够方便获取诸如流域地理信息、调度方案、政策模拟报告等系统结果.因而,笔者认为该领域未来的研究方向可归纳为以下几个方面:1) 系统结构,以方案优化选择模型^[58]和三维可视化工具的理想组合为主,加强模型的集成、校准、验证和不确定分析,同时注重简洁性和灵活性,尽量避免复杂的结构或数据处理过程以及模型连接路径;2) 系统功能,使社会、经济和生态效益最大化,从水质、水量、水权等多方面管理水资源,管理范畴由中小尺度的河段或湖泊向跨国、跨地区的

大尺度流域转变,实施跨流域综合规划和生态系统管理^[59];3)系统用户,鼓励用户参与研发过程,多部门积极合作,在遵守相关立法框架、符合各项指令要求的前提下,从管理目标出发,提升用户在模型校正和效果检测过程中的参与度。

参考文献

- [1] Lin Q-Q (林秋奇), Duan S-S (段舜山), Han B-P (韩博平). Theory, method and practice of watershed quality management. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2001, **20**(4): 46–51 (in Chinese)
- [2] Gottardo S, Semenzin S, Agostini P, *et al.* Supporting tools for decisional process within water framework directive: From EU context to modelkey perspective. *Sustainable Use and Development of Watersheds*, 2008, **3**: 215–225
- [3] Hu S-P (胡苏萍). Integrated watershed management decision support system in Elbe basin. *Express Water Resources and Hydropower Information* (水利水电快报), 2011, **32**(3): 1–4 (in Chinese)
- [4] Hu T-S (胡铁松), Wan Y-H (王永华), Feng S-Y (冯尚友). Dynamic and prospects of current water resources decision support system. *Advances in Water Science* (水科学进展), 1993, **4**(3): 237–242 (in Chinese)
- [5] Ma Z-K (马振坤). Study and Application of the Model of Real Time Monitor Decision Support System for Water Amount and Water Quality of Taihu Basin. Master Thesis. Nanjing: Hehai University, 2007 (in Chinese)
- [6] Song X-L (宋晓龙), Li X-W (李晓文), Zhang M-X (张明祥), *et al.* Optimization of conservation network system for inter-basin wetland ecosystem in Huang-Huai-Hai Region. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2012, **23**(2): 475–482 (in Chinese)
- [7] Liu L (刘莉), Liu G-L (刘国良), Chen S-Z (陈绍志), *et al.* Multiple functions-targeted algorithms and potential applications of Forest Simulation Optimization System (FSOS). *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2011, **22**(11): 3067–3072 (in Chinese)
- [8] Chen W-W (陈文伟). Decision Support System and Its Development. Beijing: Tsinghua University Press, 1994 (in Chinese)
- [9] Kuang K-W (邝孔武), Wang X-M (王晓敏). Information Systems Analysis and Design. Beijing: Tsinghua University Press, 2001 (in Chinese)
- [10] Liu J-M (刘健民). The development and application of water resources planning and management decision support system. *Advances in Water Science* (水科学进展), 1995, **6**(3): 255–260 (in Chinese)
- [11] Lautenbach S, Berlekamp J, Graf N, *et al.* Scenario analysis and management options for sustainable river basin management: Application of the Elbe-DSS. *Environmental Modelling and Software*, 2009, **24**: 26–43
- [12] Peng S-H (彭盛华). Water Environment Management: Theory and Practice. PhD Thesis. Beijing: Beijing Normal University, 2001 (in Chinese)
- [13] Editorial Staff of Express Water Resources and Hydropower Information (《水利水电快报》编辑部). Concept design of integrated river basin planning decision support system. *Express Water Resources and Hydropower Information* (水利水电快报), 2005, **26**(20): 28–30 (in Chinese)
- [14] Huang J-Y (黄进勇), Wang Z-Q (王兆骞). Establishment of Chinese eco-agricultural model management information and decision support system. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2003, **14**(4): 525–529 (in Chinese)
- [15] Philippe G. Integrated river basin management, ICT and DSS: Challenges and needs. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2008, **33**: 312–321
- [16] Hanne S, Lars KP, Dale R, *et al.* Discursive biases of the environmental research framework DPSIR. *Land Use Policy*, 2008, **25**: 116–125
- [17] Sechi GM, Sulis A. Water system management through a mixed optimization simulation approach. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2009, **135**: 160–170
- [18] Gastelum JR, Valdes JB, Stewart S. A decision support system to improve water resources management in the Conchos Basin. *Water Resources Management*, 2009, **23**: 1519–1548
- [19] Department of Sustainability and Environment of Victoria. Resource Allocation Model (REALM) [EB/OL]. (2011-09-05) [2011-09-15]. <http://www.water.vic.gov.au/monitoring/surface-water-modeling/realml>
- [20] Berkemer R, Makowski M, Watkins D. A Prototype of a Decision Support System for River Basin Water Quality Management in Central and Eastern Europe. Laxenburg: International Institute for Applied System Analysis, 1993
- [21] Karjalainen SM, Hekkinen K. The river Life project and implementation of water framework directive. *Environmental Science and Policy*, 2005, **8**: 263–265
- [22] Newham LTH, Letcher RA, Jakeman AJ, *et al.* Framework for integrated hydrologic, sediment and nutrient export modeling for catchment-scale management. *Environmental Modelling and Software*, 2004, **19**: 1029–1038

- [23] Newham LTH, Jakeman AJ, Letcher RA. Stakeholder participation in modeling for integrated catchment assessment and management: An Australian case study. *International Journal of River Basin Management*, 2006, **4**: 1–13
- [24] Mounir ZM, Ma CM, Amadou I. Application of water evaluation and planning: A model to assess future water demands in the Niger River (in Niger Republic). *Modern Applied Science*, 2011, **5**: 76–87
- [25] Andreu J, Capilla J, Sanchis E. AQUATOOL, a generalized decision-support system for water-resources planning and operational management. *Journal of Hydrology*, 1996, **177**: 269–291
- [26] Javier PA, Joaquín AA, Miguel MM, *et al.* Water quantity and quality models applied to the Jucar River Basin, Spain. *Water Resources Management*, 2010, **24**: 2759–2779
- [27] Andreu J, Polo JF, Perez MA, *et al.* Decision support system for drought planning and management in the Jucar River Basin. The 18th World IMACS/MODSIM Congress, Cairns, 2009: 3223–3229
- [28] Hydraulics D. RIBASIM: River basin planning and management simulation program. Proceedings of the iEMSs-Third Biennial Meeting, Burlington, 2006: 148–155
- [29] Kok JL, Kofalk S. Towards a user-oriented design of a DSS for integrated river-basin management: The Elbe DSS prototype. Proceedings of the iEMSs-Third Biennial Meeting, Burlington, 2006: 1–6
- [30] Kok JL, Kofalk S, Berlekamp J, *et al.* From design to application of a decision-support system for integrated river-basin management. *Water Resources Management*, 2009, **23**: 1781–1811
- [31] Volk M, Hirschfeld J, Schmidt G, *et al.* A SDSS-based ecological-economic modeling approach for integrated river basin management on different scale levels-the project FLUMAGIS. *Water Resources Management*, 2007, **21**: 2049–2061
- [32] Volk M, Hirschfeld J, Dehnhardt A, *et al.* Integrated ecological-economic modeling of water pollution abatement management options in the upper Ems River. *Ecological Economics*, 2008, **66**: 66–76
- [33] Zhang Q-S (张勤生), Xuan H-Y (宣慧玉), Hua S-Z (华绍祖), *et al.* System analysis and modeling method of decision support systems for key dams in the Yellow River Valley. *Journal of Xi'an Jiaotong University* (西安交通大学学报), 1998, **32**(4): 71–75 (in Chinese)
- [34] Cheng C-T (程春田), Ou C-P (欧春平). Integrated management of decision support system for flood control of river basin. *Journal of Dalian University of Technology* (大连理工大学学报), 2001, **41**(1): 108–111 (in Chinese)
- [35] Duan X-J (段学军). The construction and application of the valley sustainable development decision support system. *Economic Geography* (经济地理), 1999, **19**(6): 12–17 (in Chinese)
- [36] Liu Z-H (刘志辉). Decision support system for water supply management in drainage basin. *Arid Land Geography* (干旱区地理), 2000, **23**(3): 259–263 (in Chinese)
- [37] Wang Y (王煜), Yang L-B (杨立彬), Hou C-H (侯传河), *et al.* Using the object oriented program to research and develop the water dispatching decision support system. *Advances in Water Science* (水科学进展), 2000, **11**(4): 441–446 (in Chinese)
- [38] Wang Y (王煜), Wang D-X (王道席), Wang J-L (王军良), *et al.* Application of GIS to the water dispatching decision support system. *Advances in Water Science* (水科学进展), 2003, **14**(1): 114–117 (in Chinese)
- [39] Xu D (许迪), Li Y-N (李益农), Liu Y (刘钰), *et al.* DSS model based on irrigation demand-delivery simulation and multi-criteria analysis for water saving. *Journal of Hydraulic Engineering* (水利学报), 2004(11): 7–14 (in Chinese)
- [40] Li Y (李燕), Li M-C (李满春). A study on the construction of water resources regulation decision support system of the Yellow River. *Areal Research and Development* (地域研究与开发), 2009, **28**(5): 140–144 (in Chinese)
- [41] Wei J-H (魏加华), Wang G-Q (王光谦), Liu R-H (刘荣华). Decision support system for water resources unified regulation of the Tarim River Basin. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology* (南水北调与水利科技), 2009, **7**(1): 17–22 (in Chinese)
- [42] Gai Y-C (盖迎春), Li X (李新). Design and implementation of water resources management and decision support system in the middle reaches of Heihe River. *Journal of Glaciology and Geocryology* (冰川冻土), 2011, **33**(1): 190–196 (in Chinese)
- [43] Jin J-L (金婧靓), Wang F-E (王飞儿), Dai L-Y (戴露莹), *et al.* Characteristics of non-point source pollution in Tiaoxi watershed and related affecting factors. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2011, **22**(8): 2119–2125 (in Chinese)
- [44] Zhai S-H (翟淑华), Qin P-Y (秦佩瑛). River water quality management decision support system of Taihu Basin. *Water Resources Protection* (水资源保护), 2002

- (3): 60–62 (in Chinese)
- [45] Zhang S-F (张绍峰), Wang X-F (王先锋), Niu Y-S (牛永生), *et al.* Study on decision making support system for water resources protection of the Yellow River Basin. *Yellow River* (人民黄河), 2005, **27**(9): 34–38 (in Chinese)
- [46] Du P-F (杜鹏飞), Song K (宋 科), Zhang D-W (张大伟), *et al.* Watershed non-point source pollution control decision support system. *Journal of Tsinghua University*(Science and Technology) (清华大学学报·自然科学版), 2003, **43**(10): 1343–1346 (in Chinese)
- [47] Gao P-F (高鹏飞), Wang P (王 鹏), Guo L (郭亮), *et al.* Model systems in emergency decision support system for basin water pollution. *Journal of Harbin Institute of Technology* (哈尔滨工业大学学报), 2009, **41**(2): 92–96 (in Chinese)
- [48] Han L (韩 龙), Qin H-P (秦华鹏), Lu N (鲁南), *et al.* Decision support system for water quality integrated management based on digital watershed technology: A case study of Shiyan Reservoir in Shenzhen. *Environmental Science & Technology* (环境科学与技术), 2010, **33**(5): 196–201 (in Chinese)
- [49] Liu G-H (刘高焕), Zhu H-Y (朱会义), Cai Q-G (蔡强国), *et al.* Integretion research on small watershed integrated management information system. *Geographical Research* (地理研究), 2002, **21**(1): 25–33 (in Chinese)
- [50] Ma Y-J (马拥军). Construction of decision-making support system for water resources management of the Yangtze River Basin. *Yangtze River* (人民长江), 2009, **40**(4): 16–19 (in Chinese)
- [51] Wenga SQ, Huang GH, Li YP. An integrated scenario-based multi-criteria decision support system for water resources management and planning: A case study in the Haihe River Basin. *Expert Systems with Applications*, 2010, **37**: 8242–8254
- [52] Zhang GZ, Zhao WN, Liu H. A GIS-based decision support system for water trade management of river basin cities. *Procedia Environmental Sciences*, 2010, **2**: 650–655
- [53] Delipetrev BT, Mihajlov D, Delipetrov M, *et al.* Model of the hydro-information system of the republic of Macedonia. *Journal of Computing and Information Technology*, 2010, **18**: 201–204
- [54] Hang Y-X (杭艳秀), Lin Y (林 勇), Kang Y-L (康月兰), *et al.* Review of forestry decision support system. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国生态农业学报), 2010, **18**(2): 446–452 (in Chinese)
- [55] Awad M, Khawlie M, Darwich T. Web based meta-database and its role in improving water resources management in the Mediterranean Basin. *Water Resources Management*, 2009, **23**: 2669–2680
- [56] Whittaker G, Confesor RJ, Griffith SM, *et al.* A hybrid genetic algorithm for multi-objective problems with activity analysis-based local search. *European Journal of Operational Research*, 2009, **193**: 195–203
- [57] Diez E, McIntosh BS. A review of the factors which influence the use and usefulness of information systems. *Environmental Modelling and Software*, 2009, **24**: 588–602
- [58] Zoltay VI, Vogel RM, Kirshen PH, *et al.* Integrated watershed management modeling: Generic optimization model applied to the Ipswich River Basin. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2010, **136**: 566–575
- [59] Chu J-S (初建松). Management of large marine ecosystem based on ecosystem approach. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2011, **22**(9): 2464–2470 (in Chinese)

作者简介 曹 宇,男,1976 年生,博士,副教授.主要从事景观生态学、土地利用与规划、生态系统综合评价、3S 技术应用研究,发表论文 30 篇. E-mail: caoyu@zju.edu.cn

责任编辑 杨 弘
