

县级农业灌溉智能决策工具的开发和应用

杨井泉¹, 王中根², 于磊¹, 刘丽芳³, 李建新¹, 郭晶晶⁴

(1. 水利部海河水利委员会 水利信息中心, 天津 300181;

2. 中国科学院 地理科学与资源研究所 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101;

3. 北京师范大学 水科学研究院, 北京 100875; 4. 天津市龙网科技发展有限公司, 天津 300181)

摘要: 为了节约水资源、提高县级农业灌溉管理水平, 基于 SWAT 模型和农田水量平衡原理, 开发了县级农业灌溉智能决策工具, 主要包括农业灌溉规划子系统和实时灌溉子系统。从该决策工具的总体设计出发, 对各子系统的功能要求和实现进行了介绍。该决策工具在馆陶县的示范应用实践表明, 农业灌溉规划子系统模拟的蒸散发与实测的蒸散发比较接近, 可用来优选县级农业管理措施; 实时灌溉子系统能够对农田土壤墒情进行预测, 对县域灌水时间和灌水量进行预报。该县级农业灌溉智能决策工具的开发为水资源的高效利用和农业灌溉自动化管理提供了有力的技术支持。

关键词: 农业灌溉; 规划管理; 实时灌溉; 智能决策; 馆陶县

中图分类号: S274; TP311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2014)03-0180-06

Development and Application of Agricultural Irrigation Intelligent Decision Making Tool on County Scale

YANG Jing quan¹, WANG Zhong gen², YU Lei¹, LIU Li fang³, LI Jian xin¹, GUO Jing jing⁴

(1. Water Information Network Center, Haihe River Water Conservancy Commission, Ministry of Water Resources, Tianjin 300181, China; 2. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

3. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

4. Lonwin Technology Company Limited in Tianjin, Tianjin 300181, China)

Abstract: In order to save water resources and improve the level of agricultural irrigation management, an agricultural irrigation intelligent decision making tool, including agricultural irrigation planning sub system and real time irrigation sub system, was developed based on the SWAT model and agricultural water balance theory. The function requirement and realization of each system were introduced from the perspective of overall design of the tool. The developed tool was applied in Guantao County. The application results showed that the simulated evapotranspiration from the agricultural irrigation planning sub system is similar to the measured value, so this system can be used to optimize agricultural management practice. The real time irrigation sub system can predict the soil moisture and determine the irrigation time and amount. The tool can provide technical support for the efficient use of water resources and automation management in agricultural irrigation on county scale.

Key words: agricultural irrigation; planning management; real time irrigation; intelligent decision making; Guantao County

海河流域以不足全国 1.3% 的水资源量, 承担着近 12% 的灌溉面积和超过 10% 的人口的用水任务, 水资源供需矛盾十分突出, 属于严重的资源性缺水地区^[1-2]。由于流域内农业用水占水资源利用量的 64.7%^[3], 因此采用节水灌溉管理决策技术, 提高灌溉水利用效率, 具有重要的意义。

20 世纪 70、80 年代, 人们开始进行人工智能灌溉决策支

持系统的研究^[4-5]。灌溉决策支持系统主要功能可以分为三类: (1) 根据历史资料, 将有限的供水量在区域、作物、作物的生育期进行合理的分配^[6-11]; (2) 在供水充足的情况, 进行实时灌水时间和灌水量预报^[12]; (3) 进行供水量限制情况下的实时灌水时间预报和灌水量分配^[13]。决策系统应用的空间尺度可以分为两类, 即田间尺度和流域尺度。尽管灌溉决策

收稿日期: 2013-09-25 修回日期: 2014-01-13 网络出版时间: 2014-05-07

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2014.03.038.html>

基金项目: 农业科技成果转化资金项目(2011GB23320013); 国家自然科学基金资助项目(41271048)

作者简介: 杨井泉(1964-), 男, 高级工程师, 主要从事水利信息化管理工作。E-mail: yangjingquan@hwcc.gov.cn

通讯作者: 刘丽芳(1981-), 女, 重庆人, 博士研究生, 主要从事水文模拟研究。E-mail: liulifang198160@163.com

支持系统解决的问题、应用的空间尺度各不相同,但大多数的灌溉决策支持系统都是基于农田水量平衡计算来开发的,而对流域尺度的径流、壤中流、地下水补给考虑不足,因此不能与流域水资源管理形成一个整体。

鉴于此,本研究基于流域“四水”转化的理念,在流域水文模型 SWAT 和水量平衡原理的基础上,开发一个农业灌溉智能决策工具,进行农田管理措施优选和供水充足条件下的实时灌溉预报,并选择海河流域内馆陶县进行示范应用。

1 县级农业灌溉智能决策工具的总体设计

1.1 决策工具的目标

农业灌溉智能决策工具的总体目标是:基于“四水”转化理念,在县级 SWAT 模型的基础上,模拟农田管理(农艺措施、灌溉制度等)对流域水资源、土壤墒情及作物生长的影响,优选农田管理措施,对县级农业灌溉进行规划;根据水量平衡原理,结合当地天气预报信息,进行农田实时灌溉预测;为县级农业节水管理、水资源规划配置和改善因缺水导致的生态环境问题等提供技术支持。

1.2 总体设计

以馆陶县为例,农业灌溉智能决策工具总体设计思路(图 1)如下:

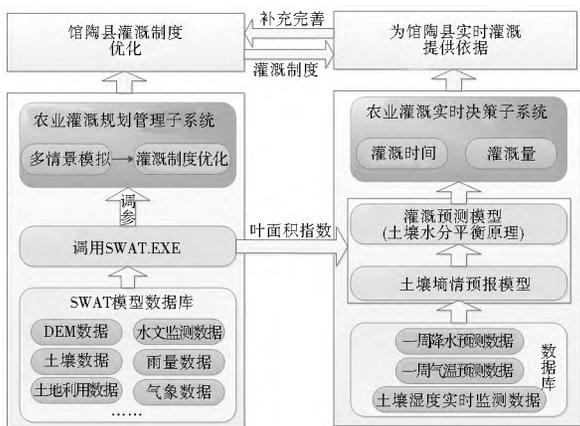


图 1 馆陶县农业灌溉智能决策工具总体设计

Fig. 1 The conceptual diagram of overall design of agricultural irrigation intelligent decision making tool in Guantao County

灌溉管理智能决策工具在功能上要满足农田管理措施规划和实时灌溉预报的两部分需求,因此决策工具应包括两个子系统:灌溉规划子系统侧重于优选合理的管理措施(包括灌溉制度),为县级农田管理提供技术支撑;实时灌溉子系统侧重于在优选管理措施的基础上对实时灌溉进行预报,为县级农田实时灌溉提供决策支持。农业灌溉规划子系统的优化结果是实时灌溉子系统的输入条件,实时灌溉系统中的灌溉预测是对农业灌溉规划子系统中优化农业管理措施的完善和补充。

与其它灌溉决策支持系统相比,县级农业灌溉智能决策工具是以流域“四水”转化为基础进行灌溉决策,考虑了地表径流、壤中流和地下水补给,可在空间上对作物实际腾发量、灌溉水量等进行展示。

1.3 数据要求

农业灌溉智能决策工具数据分为基础数据、监测数据、主题数据、元数据四部分。其中基础数据主要包括研究区行政区划图(乡镇级)、土壤图、水系图(包括水库、渠系分布)、数字高程(DEM)数据、灌区空间分布图等,以及研究区的社会经济数据;监测数据包括雨水情数据、地表水监测数据、地下水数据、气象数据、地表水质监测数据、遥感监测 ET 数据;主题数据包括不同情景的灌溉制度对应的数据;元数据包括数据库描述、空间数据元数据、属性数据元数据、数据服务元数据等内容。

2 农业灌溉规划子系统的开发

2.1 功能要求

农业灌溉规划子系统是在县级水资源与水环境综合管理工具的基础上开发的,其功能包括:结合农田土壤含水量及农业灌溉用水信息,分析现状农业灌溉制度及农田灌溉的适宜土壤墒情;分析不同灌溉制度、保墒及综合管理措施等情景下,项目区作物耗水量、作物产量、水分生产率等,优化现状农业管理措施(包括灌溉制度),为研究区制定最优农业管理措施提供科学依据和技术支撑。灌溉规划管理子系统的业务流程见图 2。



图 2 灌溉规划管理子系统业务流程

Fig. 2 The flow chart of agricultural irrigation planning sub system

2.2 水文过程模拟

农业灌溉规划子系统通过调用 SWAT 模型来实现水文过程模拟,以及土地利用与土地覆盖变化对径流量的影响。SWAT 模型是由美国农业部(USDA)农业发展中心(ARS)开发的流域尺度半分布式水文模型。它属于以水量平衡原理为基础的物理过程模型,模型以日为时间步长,可以考虑气候、水文、作物生长、农业管理措施和河道等过程^[14]。

在 SWAT 模型中,地表径流的计算采用 SCS 曲线方法^[15];各层土壤的下渗水量采用土壤储水演算方程进行计算。当某一层土壤含水量超过此层田间持水量且下层土壤未达到饱和时,水分将会入渗至下层土壤;当某层土壤冻结时,土壤水将停止运动。基于坡度、坡长和土壤饱和导水率,使用动态储水模型,同时计算侧向流与渗漏量,当土壤非

饱和带中形成上层滞水饱和带时,假定水力梯度近似等于地面坡度,沿坡面的饱和带积水将沿坡做侧向运动,产生侧向流;蒸散发的计算包括了植被冠层截留、土壤蒸发和作物蒸腾,其中潜在蒸散发的计算可采用 Hargreaves & Samani (1985) 公式^[16];作物模块是由 EPIC 模型作物模块简化得到,可以用于模拟不同作物的叶面积变化、生物量累积和产量。农业灌溉规划子系统在调用 SWAT 模型后,可利用水文站径流资料、遥感监测 ET 数据等来率定模型参数,以 Nash 效率系数或相对误差作为评价标准。

在 SWAT 模型中调整水文响应单元的灌溉水量、灌水时间和种植作物类型,可以模拟灌溉制度变化或种植结构调整对水循环、作物产量、水分利用效率的影响;改变土壤实际蒸发中参数 CV(地表生物量和残余物量)中残余物量的值,即改变土壤表面覆盖指数,可以模拟秸秆覆盖对水循环、作物产量、水分利用效率的影响。

2.3 系统实现

根据农业灌溉规划管理子系统的设计要求,开发的可视化界面见图 3,其主要模块包括:模型输入、运行模型、模型输出、分区统计、情景分析和设置等。

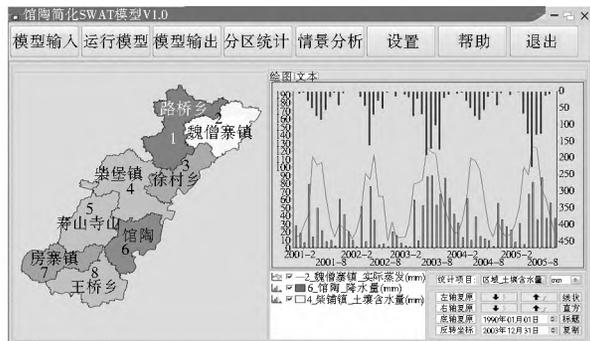


图 3 馆陶县农业灌溉规划管理子系统的可视化界面

Fig. 3 The visual interface of agricultural irrigation planning sub system in Guantao County

(1) 在模型输入模块中,具有模型运行涉及的数据输入功能。根据数据保存路径,载入数据文件,并将导入的数据格式自动转化为 SWAT 模型运行规定的格式。

(2) 在运行模型模块中,能够设置模型运行条件(模拟时间、蒸散发模型、输出时段)、选择结果输出频率、查看模型运行的基本信息(子流域、水库及 HRU 个数、模拟时段、模拟总年数)等。当运行条件设置完成后,通过用户确认,系统将运行 SWAT2000 进行计算,并且将以窗口形式显示模型运行过程。

(3) 在模型输出模块中,具有输出模型计算结果以及误差分析等功能。在模型输出模块可以选择的输出项目包括:输出文件(行政区、子流域或 HRU)、作物类型、输出统计项目(潜在蒸发、实际蒸发、灌溉量、降雨量、土壤含水量、水分胁迫系数、叶面积指数等)、添加实测数据、展示方式(图像或文本,图像中包括柱状图或折线图)。图像还可实现微调(左轴复原、右轴复原、底轴复原、反转坐标)。

(4) 在分区统计模块中,可将模型计算结果按乡镇等行政区划进行统计分析及展示。

(5) 在情景分析模块中,可以设置多种节水管理措施方

案,如调整种植结构、采取覆盖保墒、改变灌溉方式等。

3 实时灌溉子系统的开发

3.1 功能要求

实时灌溉子系统在农业灌溉规划管理子系统基础上,结合当地天气预报信息,进行农田土壤墒情及作物生长需水等的模拟和预测,确定合理灌溉时间及灌溉量,为县级农业节水灌溉、水资源规划配置和改善因缺水导致的生态环境问题提供技术支持,有效节省研究区农民农业灌溉用水费用。其流程如图 4 所示。

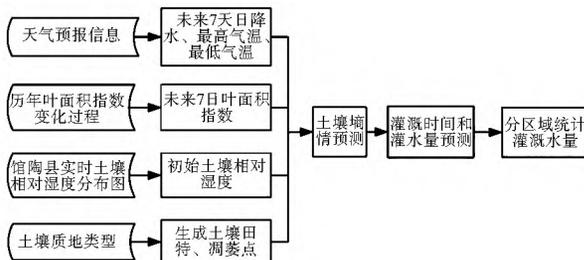


图 4 农业实时灌溉预测流程

Fig. 4 The flow chart of real-time irrigation forecast

3.2 实时灌溉预测模型

对于海河流域旱作农田,实际土壤蓄水量可根据水量平衡进行计算:

$$SW(t+1) = SW(t) + f(t) + Irr(t) - Q_i(t) - REC(t) - ET_a(t) \quad (1)$$

式中: $SW(t+1)$ 和 $SW(t)$ 分别为时段末和时段初的土壤蓄水量(mm); $f(t)$ 为降水下渗量(mm); $Irr(t)$ 为灌溉水量(mm); $Q_i(t)$ 为壤中流(mm); $REC(t)$ 为地下水补给量(mm); $ET_a(t)$ 为实际作物腾发量(mm)。其中降雨入渗、壤中流、地下水补给的计算可参考 HIMS 模型^[17]。

降水入渗量采用试验所得的经验模型计算:

$$f = R \cdot P^r \quad (2)$$

式中: P 为降水量(mm); 经验系数 R 和 r 可根据土壤湿度和植被覆盖情况查表得到^[17]。

实际作物腾发量受天气、土壤和作物等三个方面的影响,计算包括潜在作物腾发量和实际作物腾发量。潜在作物腾发量采用 Hargreaves & Samani(1985) 公式^[16]进行计算。实际作物腾发量采用下式计算:

$$ET_a = K_s K_c ET_0 \quad (3)$$

$$K_s = \begin{cases} 1 & \theta > F_c \\ \frac{\theta}{\theta_f} & F_c > \theta > \theta_m \\ 0 & \theta < \theta_m \end{cases} \quad (4)$$

式中: ET_0 为潜在作物腾发量(mm); K_c 为作物系数,根据试验结果确定、查有关地区作物系数表或根据叶面积指数计算; K_s 为土壤水分修正系数; θ 为土壤实际含水量; F_c 为田间持水量; θ_m 为凋萎点; 其余符号意义同上。

为了满足农作物正常生长的需要,任一时段内土壤含水量必须经常保持在一定的适宜范围内,因此当计算的土壤含水量小于需要灌溉的下限时进行灌溉,灌至作物适宜土壤含水量的上限,本研究中默认灌溉的上限为 $0.8F_c$, 下限为

0.6F_C。灌溉水量按下式进行计算:

$$Irr(t) = 0.8S W_{FC} - S W(t) \quad (5)$$

式中:SW_{FC}为F_C对应的土壤蓄水量(mm);其余符号意义同上。

3.3 系统实现

根据实时灌溉子系统设计要求,开发的可视化界面见图5,其主要模块包括:背景设置、植被类型设置、土壤墒情预测、灌溉预报等模块。

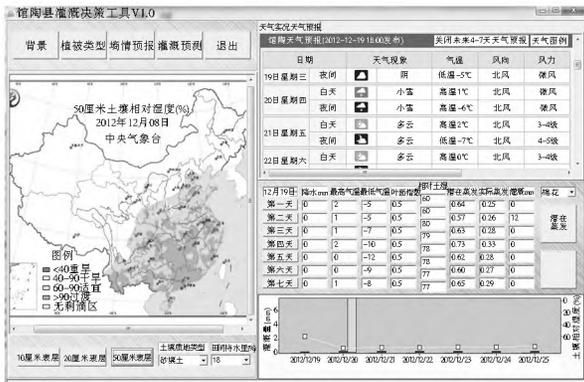


图5 实时灌溉子系统的可视化界面

Fig. 5 The visual interface of real time irrigation sub system

(1)背景模块主要完成输入或通过互联网连接,获取天气预报信息、实时土壤相对湿度信息等功能。

(2)植被类型模块主要用于输入研究区的作物类型、叶面积指数等。

(3)土壤墒情预测模块则是根据初始土壤含水量、一周的天气预报、叶面积指数、田间持水量、凋萎点含水量等数据,运用实际蒸散发模型,估算未来一周作物实际腾发量,并对未来一周土壤含水量进行预测。

(4)灌溉预报模块是根据土壤墒情预测模型,预报未来一周内的灌溉水量和灌溉时间,同时对输出时间、输出乡镇名称和输出作物类型进行设置,界面将自动输出对应的种植面积和所需总灌溉量。

4 县级农业灌溉智能决策工具在馆陶县的应用

4.1 馆陶县概况

本文选取海河流域内馆陶县作为研究区域,总面积456.3 km²,总耕地面积28 696 hm²,地面总坡度约为0.6/10 000~0.8/10 000。该区域属暖温带半湿润地区,大陆性季风气候,冬季寒冷少雪,夏季炎热多雨。多年平均降雨量为555.9 mm,潜在蒸发量1 515.6 mm,平均温度13.4℃。主要作物为冬小麦、夏玉米和棉花,春季平均10年有8~9年干旱,冬小麦生长对农田灌溉系统有很大的依赖性。馆陶县行政区划及雨量站分布见图6,渠系分布见图7。

4.2 农业灌溉规划子系统的应用

利用馆陶县基础数据和2000年-2005年遥感监测ET数据来率定和验证灌溉规划子系统,参数率定的顺序为先上游后下游。根据统计结果,馆陶县69个子流域中除个别子流域外,各子流域的模拟ET和遥感监测ET的误差都在10%

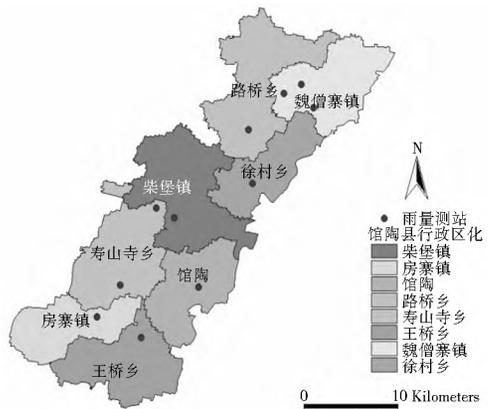


图6 馆陶县行政区划及雨量站分布

Fig. 6 Administrative division and geographical locations of rain gauge stations in Guantao County

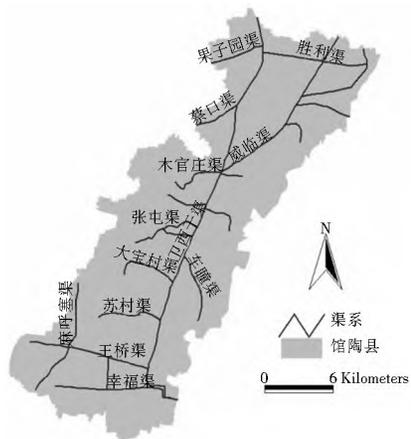


图7 馆陶县渠系分布

Fig. 7 Canal distribution in Guantao County

之内,说明灌溉规划模型对流域ET的模拟结果较好。馆陶县模拟ET与遥感监测ET相比,除了2004年相差较大外,其余年份均在10%以内,四年ET平均值相差仅为1.53%(见表1),进一步说明ET模拟结果比较理想。

表1 馆陶县遥感监测ET和模型模拟ET对比

Table 1 Comparison of the simulated and remote sensing monitored ET in GuanTao County

| 年份 | 遥感监测 ET/mm | 模型模拟 ET/mm | 相对误差 (%) |
|------|------------|------------|----------|
| 2002 | 536.02 | 502.75 | - 6.21 |
| 2003 | 654.39 | 694.03 | 6.06 |
| 2004 | 661.45 | 565.44 | - 14.52 |
| 2005 | 616.93 | 668.79 | 8.41 |
| 平均 | 617.20 | 607.75 | - 1.53 |

为了分析最优的农田管理措施,利用经过率定和验证的灌溉规划子系统,模拟了灌水量分别减少10%、20%和30%的情况下,2009年-2011年作物总产量受到的影响,发现:灌溉量减少10%对作物产量影响不大。此外,对秸秆还田措施的影响分析发现:秸秆还田措施后,作物产量显著增加。而同时模拟上述两种措施对产量的影响发现,“现状管理措施的基础上灌溉量减少10%并采取秸秆还田”方案下,作物产量增加最高,因此,将之确定为馆陶县的最优农业灌溉管理方案。

4.3 实时灌溉子系统的应用

馆陶县实时灌溉子系统墒情预报与灌溉预测模块界面见图 8。利用实时灌溉预测模型,将馆陶县 2009 年-2011 年逐日实测降雨、最高气温、最低气温等信息输入到模型中,对各年需要灌溉的时间和水量进行预测,得到各年的预测灌水总量,并与灌溉定额进行对比,结果表明:实时灌溉子系统能够对县域农田土壤墒情、灌水时间和灌溉水量进行预报;采用实时灌溉子系统可以使玉米-小麦轮作农田和棉花农田在不影响农作物产量的基础上,灌水量减少 17% 左右。

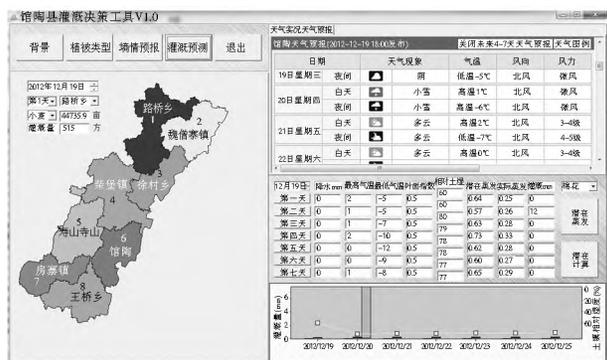


图 8 馆陶县农业实时灌溉预测管理

Fig. 8 The real time irrigation forecast management of GuanTao County

5 结语

县级农业灌溉智能决策工具是节约水资源和提高县级农业灌溉管理水平的重要手段。该工具包括农业灌溉规划子系统和实时灌溉子系统两部分。灌溉规划子系统是以 SWAT 模型为基础开发的,侧重于模拟农田管理措施对流域水资源、土壤墒情及作物生长等的影响,优选合理的管理措施(包括灌溉制度),为县级农田管理提供技术支持;实时灌溉子系统是以水量平衡原理为基础,侧重于在优选管理措施的基础上对实时灌溉进行预报,为县级农田实时灌溉提供决策支持。

农业灌溉规划子系统的优化结果是实时灌溉子系统输入的条件,而后的预测结果又是对前者优化措施的完善和补充。与其它灌溉决策支持系统相比,县级农业灌溉智能决策工具是以流域“四水”转化理论为基础,考虑了地表径流、壤中流和地下水补给,能在空间上对作物实际腾发量、灌溉水量等进行展示。

将开发农业灌溉智能决策工具在馆陶县进行实际应用的结果表明,系统模拟的蒸散发与实测的蒸散发比较接近,而该县的最优农业灌溉管理方案为“在现状管理措施基础上,减少 10% 的灌水量,并采用秸秆还田”;系统还可以对县域农田土壤墒情、灌水时间和灌溉水量进行预报;采用实时灌溉子系统可以使玉米-小麦轮作农田和棉花农田在不影响农作物产量的基础上,灌水量减少 17% 左右。因此该工具有利于实现水资源的高效利用,可为县级农田灌溉自动化管理提供技术支持和软件服务。未来该工具可以进一步耦合供水量限制情况下的实时灌溉预报和水量分配模型。

参考文献(References):

[1] 韩瑞光. 海河流域推行最严格水资源管理制度的探讨[J]. 水利发展研究, 2011, (7): 8-11. (HAN Rui guang. Discussion on the Implementation of the Strictest Water Resources Management System in Hai River Basin[J]. Water Resources Development Research, 2011, (7): 8-11. (in Chinese))

[2] 王文生. 实行最严格水资源管理制度是海河流域经济社会发展的迫切需求[J]. 海河水利, 2012, (2): 5-7. (WANG Wen sheng. Implementation of the Strictest Water Resources Management System is the Urgent Requirement of Social And Economical Development in Hai River Basin[J]. Haihe Water Resources, 2012, (2): 5-7. (in Chinese))

[3] 水利部海河水利委员会. 海河流域水资源公报[Z]. 2011. (Haihe River Commission. Bulletin of the Haihe River Basin Water Resources[Z]. 2011. (in Chinese))

[4] 马孝义, 王波雷, 张兴建, 等. 灌区用水决策支持系统的现状及展望[J]. 水土保持研究, 2008, 15(4): 28-32, 36. (MA Xiao yi, WANG Bo lei, ZHANG Jiar xing, et al. Current Status of Irrigation District Water Using Decided Supporting System and Its Prospects[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2008, 15(4): 28-32, 36. (in Chinese))

[5] Palmer R, Holmes K. Operational Guidance During Droughts: Expert System Approach[J]. J. Water Resour. Plann. Manage., 1988, 114(6): 647-666.

[6] Martin Smith. CROPWAT: A Computer Program for Irrigation Planning and Management[M]. Rome: FAO Irrigation and Drainage, 1992.

[7] Cabelguenne M. etc. Real Time Irrigation Management Using the EPIC2PHASE Model and Weather Forecasts[J]. Agricultural Water Management, 1997, (32): 227-238.

[8] 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. (XU Jiar xin, BAI Xue mei, 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. (in Chinese))

[9] 张展羽, 高玉芳, 李龙昌, 等. 沿海缺水灌区水资源优化调配耦合模型[J]. 水利学报, 2006, 37(10): 1246-1252. (ZHANG Zhan yu, GAO Yu fang, LI Long chang, et al. Optimal Utilization of Water Resource in Coastal Water Deficient Irrigation Region[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(10): 1246-1252. (in Chinese))

[10] 金江波. 灌溉预报决策支持系统的示范与推广[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(4): 137-139, 143. (JIN Jiang bo. Demonstration and Extension of Irrigation Prediction and Decision making Support system[J]. South to North Water Diversion and Water Science & Technology, 2012, 10(4): 137-139, 143. (in Chinese))

[11] 杨玲, 邱苑梅, 张慧颖, 等. 基于非充分灌溉原理的灌区水资源优化配置模型及决策软件研究[J]. 节水灌溉, 2012, (2): 53-56. (YANG Ling, QIU Yuan mei, ZHANG Hui ying, et al. The Study of Decision Support System on Water Resources Optimal Allocation in Irrigation Area Based on Un sufficient Irrigation[J]. Water Saving Irrigation, 2012, (2): 53-56. (in Chinese))

- Chinese)
- [12] 丁富平, 吴发启, 赵龙山, 等. 基于 VB 的水田灌溉自动化管理系统[J]. 水土保持研究, 2010, 17(4): 233-238. (DING Furping, WU Faqi, ZHAO Longshan, et al. Paddy Field Irrigation Automation Management System Based on VB[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2010, 17(4): 233-238. (in Chinese))
- [13] 段春青. 基于现代智能技术的灌区水资源优化调度研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2007. (DUAN Chunqing. Research of Water Optimal Operation in Irrigation Area Base on Advanced Intelligence Technique [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2007. (in Chinese))
- [14] Arnold J G, Fohrer N. SWAT2000: Current Capabilities and Research Opportunities in Applied Watershed Modelling[J]. Hydrological Processes, 2005, 19(3): 563-572.
- [15] USDA Soil Conservation Service. Hydrology section 4[R]. Washington, DC: US Government Printing Office, 1972.
- [16] Hargreaves G H, Samani Z A. Reference Crop Evapotranspiration from Temperature[J]. Transaction of ASAE, 1985, 1(2): 96-99.
- [17] 刘昌明, 王中根, 郑红星, 等. HIMS 系统及其定制模型的开发与应用[J]. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2008, 38(3): 350-360. (LIU Changming, WANG Zhonggen, ZHENG Hongxing, et al. Development of Hydroinformatics Modelling System and Its Application[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2008, 51(4): 456-466. (in Chinese))
-
- (上接第 46 页)
- [7] 胡海英, 黄国如. 东苕溪流域暴雨洪水变化趋势分析[J]. 水力发电, 2012, 38(8): 14-16. (HU Haiying, HUANG Guoru. Trend Analysis of Storm and Flood at DongTiaoXi Basin[J]. Hydroelectric Power, 2012, 38(8): 14-16. (in Chinese))
- [8] 任宪韶, 胡作亮, 曹寅白, 等. 海河流域水资源评价[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007. (REN Xiasha, HU Zuoliang, CAO Yanbai, et al. Water Resources Assessment of Haihe River Basin[M]. Beijing: China Water Power Press, 2007. (in Chinese))
- [9] 韩占军. 海河流域降水径流特性分析[J]. 水文科技研究与发展, 2010, 5: 208-211. (HAN Zhanjun. Characteristic Analysis of Rainfall Runoff in Haihe River Basin[J]. Research and Development of Hydrological Science, 2010, 5: 208-211. (in Chinese))
- [10] 金懋高, 毛凤莲, 姚建文. 海河流域近 30 年气候变化的某些特征及其对水资源的影响初探[J]. 水文, 1993, (3). (JIN Maogao, MAO Fenglian, YAO Jianwen. Some Features of Climate Change and its Preliminary Impacts on Water Resources in Haihe River Basin Nearly 30 Years[J]. Hydrology, 1993, (3). (in Chinese))
- [11] 戴健男, 姚玉海, 姚成. 海河流域下垫面变化对洪水影响的研究[EB/OL]. 中国科技论文在线, <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201011293>, 2010-11-12. (DAI Jianan, YAO Yuhai, YAO Cheng. Research on the Flood Affected Because of Changes in Underlying Surface at Haihe River Basin[EB/OL]. China Sciencepaper Online, <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201011293>, 2010-11-12. (in Chinese))
- [12] 夏军, 欧春平, HUANG G H, 等. 基于 GIS 和差异信息测度的海河流域水文气象要素时空变异性分析[J]. 自然资源学报, 2007, 5(3): 409-415. (XIA Jun, OU Chunping, HUANG G H, et al. Temporal Variability Analysis of Hydrological and Meteorological Elements in Haihe River Basin Based on GIS and Information Measure Differences[J]. Journal of Natural Resources, 2007, 5(3): 409-415. (in Chinese))
- [13] 王晓霞, 徐宗学, 纪一鸣, 等. 海河流域降水量长期变化趋势的时空分布特征[J]. 水文水资源, 2010, (1): 35-38. (WANG Xiaxia, XU Zongxue, JI Yiming, et al. Spatial and Temporal Characteristics of Long Term Trends in Precipitation at Haihe River Basin[J]. Hydrology and Water Resources, 2010, (1): 35-38. (in Chinese))
- [14] 殷水清, 高歌, 李维京, 等. 1961-2004 年海河流域夏季逐时降水变化趋势[J]. 地球科学, 2012, 42(2): 256-266. (YIN Shuiqing, GAO Ge, LI Weijing, et al. The Trends of Summer Hourly Precipitation at Hohai Basin Between 1961 and 2004[J]. Earth Sciences, 2012, 42(2): 256-266. (in Chinese))
- [15] 水利部海河水利委员会. 海河流域下垫面变化对洪水影响研究(海河流域综合规划专题研究一)[R]. 2009. (HAIHE River Water Resources Commission of Ministry of Water Resources. Research on the Flood Affected Because of Changes in Underlying Surface at Haihe River Basin (The Integrated Planning and Special Research 1 of Haihe River Basin) [R]. 2009. (in Chinese))