

干旱区内陆河漫溢型生态用水调控的模拟分析

陈曦¹ 黄粤^{1, 2} 钱静^{1, 3} 刘海龙^{1, 2} 冯先伟^{1, 2} 刘英^{1, 2} 包安明¹ 王伟胜¹

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐, 830011; 2. 中国科学院研究生院, 北京, 100039.; 香港浸会大学, 香港)

摘要: 利用地理信息系统、洪水演进、遥感方法, 通过对塔里木河干流灿木里克漫溢型生态用水调控的分析, 建立了生态放水漫溢模型, 动态模拟了生态放水的漫溢过程, 分析了生态用水量与生态保护范围、放水淹没时间之间的定量关系, 结果表明生态放水流量的大小和时间的长短对生态用水的效率影响很大, 相同生态用水量按不同流量和时间供给其效果呈几何指数关系, 地形起伏度在生态用水中也起到关键性作用, 生态用水的调控不能等同于简单的农业灌溉系统, 简单的放水会造成很大的浪费, 且达不到预期的生态效应。

关键词: 内陆河, 生态用水, 人工调控, 模拟分析

干旱区生态用水是生态系统维持与修复的基本条件, 生态用水分为自然生态用水和人工调控生态用水^[1, 2]。随着干旱区水资源利用矛盾的加剧, 要求人们有效地调节社会经济用水与生态用水之间的矛盾, 原始低效无调控的自然生态用水部分被人工调控的生态用水所取代, 生态放水逐步成为内陆河流生态用水调节和生态恢复的重要手段, 而生态用水与灌溉、工业、生活供水有着很大的区别, 模拟生态用水是干旱区内陆河流水量调控的核心问题之一。历史上塔里木河是一条自然游荡的河流, 两岸以胡杨为主要建群种的天然植被主要靠地下水和洪水漫溢维持。上个世纪九十年代, 为了解决塔里木河下游 300 多km断流河道的问题, 开始进行人工生态用水的调度, 修建了贯穿中游和下游的堤防工程和遍布两岸的生态闸工程, 彻底改变了塔里木河天然河道的水文过程。塔里木河的洪水受到人工堤防和生态闸的调节, 基本上不能够漫堤而过, 两岸天然植被的生态用水主要通过生态放水提供, 天然植被变化的程度与放水的大小和时间直接相关。目前, 国内外关于生态需水的研究较多^[3], 关于生态用水的调节主要集中在个体植物生理用水的调节上^[4], 对流域尺度生态用水调控的研究还处于起步阶段, 干旱内陆河生态用水调控模拟及生态响应还未见报道。本文提出的生态用水调控方法无疑将对干旱区内陆河流域生态系统修复和水量调度提供科学有效的手段, 对减少无效水量损耗, 提高内陆河水资源的利用率, 尤其是生态用水的利用率起到重要作用。

1. 研究区概况

塔里木河干流从阿克苏河、叶尔羌河、和田河三河汇合口肖夹克至台特玛湖全长 1321km, 其中肖夹克至英巴扎为上游, 河长 495km, 河道比较顺直, 河漫滩发育, 河势多变, 汛期洪水漫溢; 英巴扎至恰拉为中游, 河长 398km, 河道弯曲, 河势相对稳定, 泥沙淤积, 洪水漫溢, 无效耗水严重; 恰拉至台特玛湖为下游, 河长 428km, 河道比较稳定。

灿木里克生态闸位于塔里木河中游下段左岸, 控制生态面积 49.025km², 生态需水量 1.25×10⁷m³。生态区域属大陆性暖温带极端干旱气候, 降雨稀少, 蒸发强烈, 气候干燥, 多风, 日照长, 温差大, 夏季炎热, 冬季干冷。多年平均气温 10.7℃, 极端最高气温达 43.6℃, 极端最低气温-30.9℃, 大于 10℃积温 4000~4500℃之间, 日照小时数约 3000h, 无霜期 187~233d。多年平均降水量 17.4~42.8mm, 蒸发能力为 1125~1600mm, 干旱指数为 17~50, 属极端干旱地区。由于受到塔里木河和洪水漫溢影响, 该区域自然景观秀丽, 塔里木河干流堤防修建后为了维持堤防外侧生态状况, 于 7 月底至 9 月上旬汛期通过生态闸口放水, 淹

没的主要植被类型为红柳，胡杨及芦苇等。

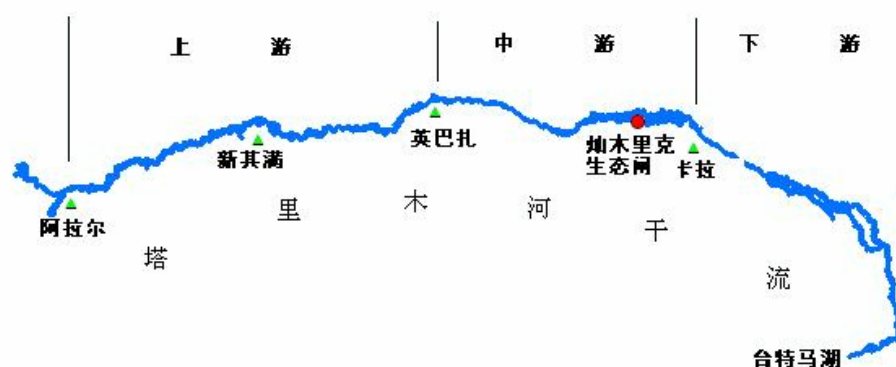


图 1. 塔里木河干流示意图

Fig 1. The main stream of Tarim River

从淹没方式上看，坎木里克生态闸属典型的漫溢型生态闸，即洪水过闸口后，不经河道、渠系的引导，而是依据地形和下垫面特征在区域内自由漫溢。其供水的能力除与闸门设计、引水条件有关外，还与生态闸后地形、土壤及土地利用状况有关。

3. 研究方法

3.1 研究数据

- 1) 地形数据。研究区域 1:1 万数字高程模型 (DEM)。
- 2) 研究区下垫面属性数据
 - a. 土壤类型。根据遥感解译及实际调查，获得流域的土壤类型分布图及土壤的水利特性数据。对各典型土壤进行分层，实测各分层土壤的厚度、容重、重量含水量和孔隙度，土壤层和地下含水层厚度等。
 - b. 土地利用数据。通过美国LANDSAT ETM 影像解译出2004年土地利用分布图，确定各流域内各种土地利用类型所占的比例及植被类型。
- 3) 气象数据。区域内气象站点长年观测数据，包括气温(最高、最低和平均)、降水、气压、相对湿度、风速、水汽压、日照时数等。
- 4) 水文观测数据。从闸口水文观测点获取水量、水位等观测数据；闸后河道断面数据。

3.2 生态闸生态放水模拟

塔里木河干流区属山前平原型河流，加之气候极度干旱，基本上不产流，区域内水资源运移过程主要是河水、地下水、土壤水及灌溉用水之间的转化和地表的蒸发蒸散。

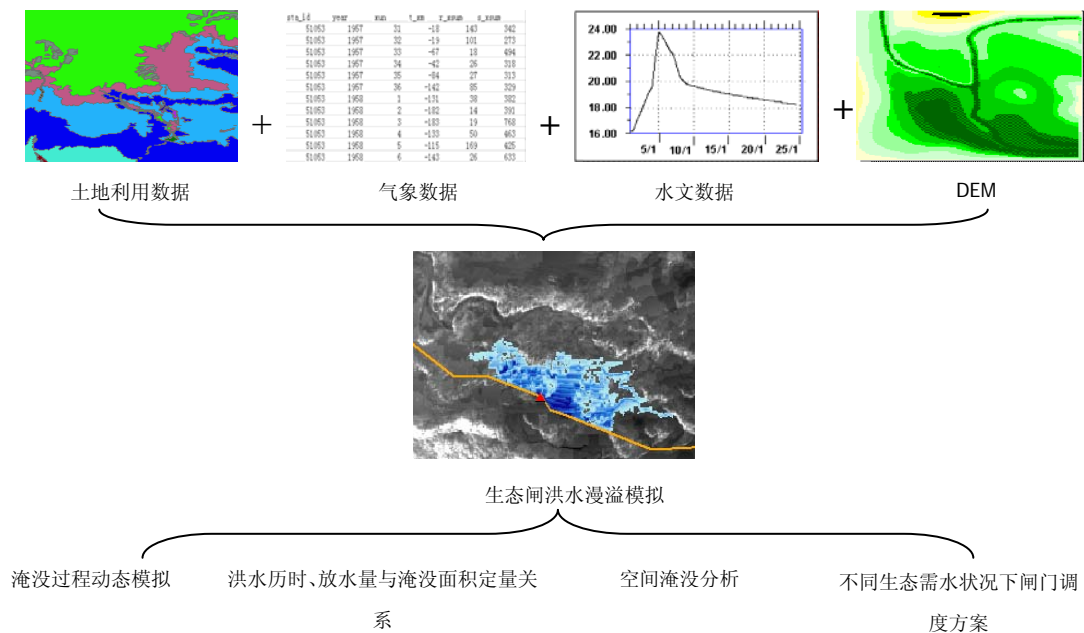


图 2. 生态洪水漫溢模型建立与分析

Fig1. Method of model construction and analysis

3.3 模拟结果的验证

洪水淹没范围的验证主要通过2005年8月12日-9月10日放水过程实时、实地监测，用GPS确定淹没边界的特征点，估算淹没面积来实现。验证结果显示，模拟实际流量过程淹没范围空间分布与实测淹没范围较为吻合，面积误差小于10%。

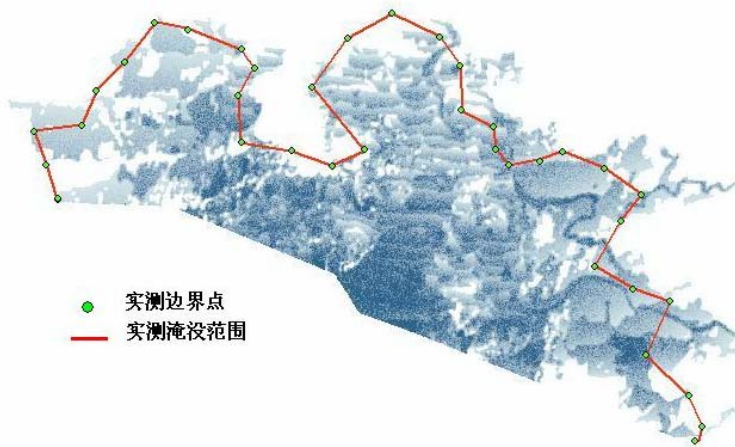


图3. 模拟实际流量过程淹没范围空间分布与实测淹没范围验证结果

Fig.2 The calibration of simulated flood area and observing floodarea

4. 结果分析

灿木里克生态闸设计供水量为 $1.79 \times 10^7 \text{ m}^3$ ，洪水期最大流量为 $45.9 \text{ m}^3/\text{s}$ 。以设计最大引水量、过流量为计算依据，分别模拟 $10 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $15 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $20 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $25 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $30 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $40 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $45 \text{ m}^3/\text{s}$ 流量的放水淹没过程，进而对各流量过程中淹没时间、放水量和面积的关系做

出定量分析与探讨。

表 1. 设计引水量下闸口流量与淹没时间

Table1. Flux of the Canmulik Eco-gate and the corresponding flood times								
闸口流量 (m ³ /s)	10	15	20	25	30	35	40	45
淹没时间 (h)	498.05	332.03	249.02	199.22	166.02	142.30	124.51	110.68

4.1 淹没过程模拟

本研究使用 mike 21 的 flow model 模拟洪水漫溢过程,用水动力学方法计算洪水面积,在定义一个栅格及其相邻的 8 个单元,用 Manning-Strikler 方程计算相邻单元间的水流。同时考虑了堤防对水流的阻碍作用,模拟结果以栅格图形式表达。

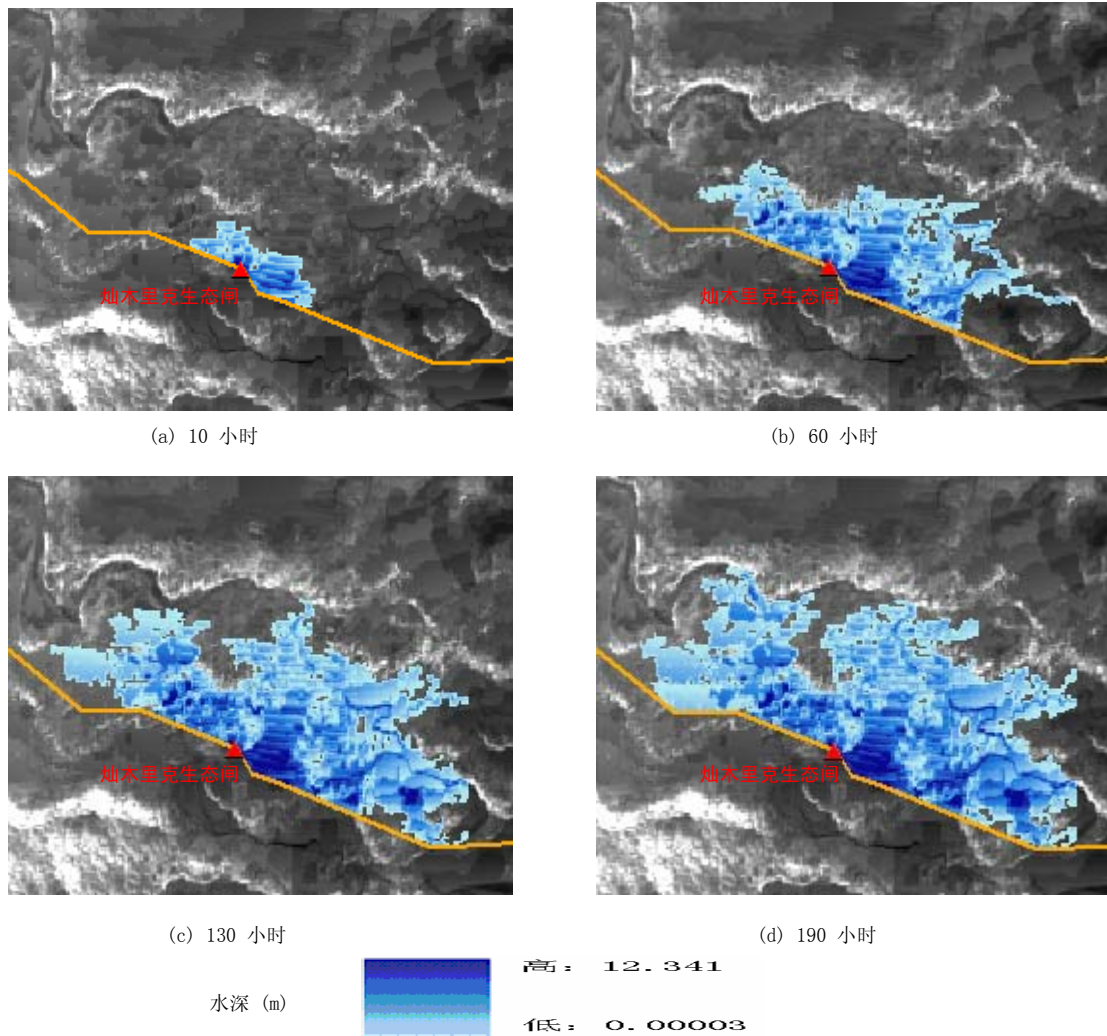


图 4. 25 m³/s生态放水淹没过程模拟结果

Fig3. The results of flood process modeling in Canmulik Eco-gate

4.2 时间与淹没面积的关系

通过对模拟结果进行统计分析,得到灿木里克生态闸不同放水流量所对应的时间、面积曲线如下所示:

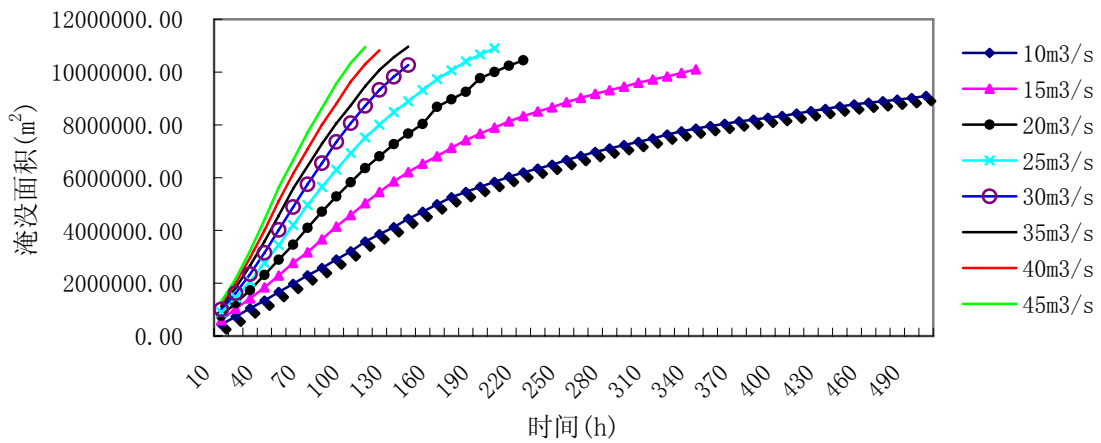


图 5. 不同流量下的淹没时间与淹没面积

Fig4. The relationship of flood area and flood time

表 2. 不同流量下放水时间与漫溢面积的关系

Table2. The relationship of flood time and flood area in different flux

流量 (m³/s)	R ²	回归方程
10	0.999	$S = -162724 + 40941.1t - 64.03t^2 + 0.038t^3$
15	0.999	$S = -169379 + 56040.8t - 82.98t^2 + 0.01t^3$
20	0.999	$S = -27943 + 62691.7t - 26.26t^2 - 0.229t^3$
25	0.999	$S = 48206 + 69923.6t + 38.41t^2 - 0.593t^3$
30	0.999	$S = 366030 + 55197.0t + 494.24t^2 - 2.7523t^3$
35	0.998	$S = 259786 + 74418.0t + 357.51t^2 - 2.461t^3$
40	1.000	$S = 335158 + 77119.6t + 535.46t^2 - 3.757t^3$
45	1.000	$S = 360489 + 82188.2t + 672.74t^2 - 4.965t^3$

模拟结果表明，淹没面积随着时间的增加不断增大；但由于受到地形与地表植被覆盖情况的影响，二者之间的关系不是线性的，一元三次回归方程能够更好地拟合模拟数据；同时，通过模拟结果的分析发现，随着时间的增加，漫溢面积增大的趋势逐渐变缓，而表现为水深的增加。

4.3 放水量与淹没面积的关系

根据模拟计算结果，我们将每一流量漫溢过程中的放水量与淹没面积进行拟合，得到各流量下二者的回归方程，揭示了水流在生态区域内分配与耗散的一些规律。通过以下方程便可推求闸口不同流量时，任意放水量所淹没的生态面积，是进行生态闸调控和流域水量合理调配的关键依。

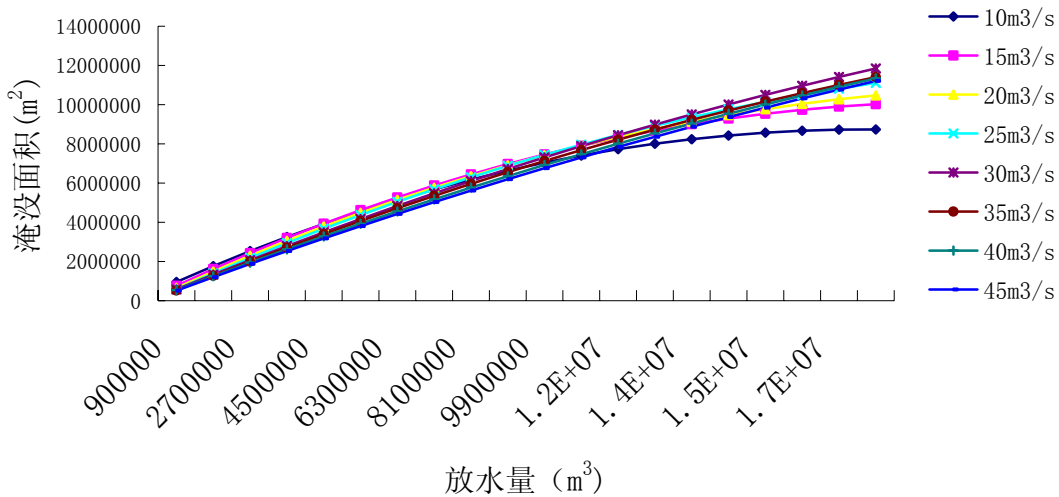


图 6. 不同流量放水过程淹没面积与放水量的拟合结果

Fig5. The relationship of flood area and flood volume

表 3. 不同流量下放水量与漫溢面积的关系

Table3. The relationship of flood volume and flood area in different flux

流量(m³/s)	R ²	回归方程
10	0.998	$S = 104326 + 0.971V - 2.73 \times 10^{-8}V^2$
15	0.999	$S = -129156 + 1.014V - 2.5 \times 10^{-8}V^2$
20	0.998	$S = -222428 + 0.99V - 2.2 \times 10^{-8}V^2$
25	0.994	$S = -266961 + 0.956V - 1.8 \times 10^{-8}V^2$
30	0.997	$S = -195444 + 0.867V - 1.1 \times 10^{-8}V^2$
35	0.999	$S = -242269 + 0.863V - 1.2 \times 10^{-8}V^2$
40	0.987	$S = -177654 + 0.811V - 0.95 \times 10^{-8}V^2$
45	0.998	$S = -181710 + 0.784V - 0.84 \times 10^{-8}V^2$

淹没面积于放水量之间的关系可近似地通过一元二次回归方程来描述，即淹没面积随着放水量的增加不断增大，同时漫溢面积增大的趋势逐渐变缓，而表现为淹没区域内水深的增加。

通过对各流量结果的对比发现，在放水量达到约 900 万立方米之前，相同放水量下漫溢面积的大小与放水的流量成反比，即流量越小淹没范围越大，流量越小生态放水的效率越高；当放水量超过这一临界区域时，漫溢面积的变化速率与流量成正比，即流量越大淹没区域增大的越快；当放水量达到生态区域最大需水量时，30 m³/s放水过程的淹没面积最大，对应淹没面积为 10m³/s<15m³/s<20 m³/s <25 m³/s <45 m³/s <40 m³/s <35 m³/s<30 m³/s，即在完全满足区域生态需水量的情况下，30 m³/s流量过程的放水效率最高。

4. 4 结合上游来水状况的生态放水效率分析

生态放水的效率不仅取决于闸后生态区域的特性，还与上游来水情况紧密相关，从时间上把握洪水期最佳放水区间，并结合最佳放水流量方案，才能够使生态放水达到最大效益。以 2002 年灿木里克生态闸上游乌斯满河口水文站来水数据为例（见图 6）

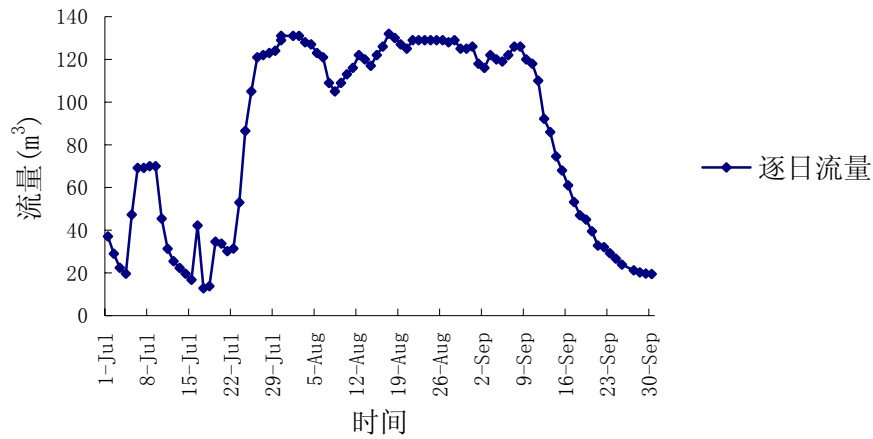


图 7. 2002 年洪水期乌斯满河口水文站来水过程

Fig.6 the daily flux of Wusiman station of flood period in 2002

根据洪水的时间分布，放水时间应集中在 7 月 26 日至 9 月 11 日之间，对来水量进行统计后按照水量分配原则向灿木里克生态区放水 1300 万立方米，

即 $\max V =$

计算器漫溢面积从而从中选出最佳方案。如：

序号	放水方案	漫溢面积
1	$15 \text{ m}^3/\text{s} \times 2\text{d} + 30\text{m}^3/\text{s} \times 4\text{d} = \max V$	10115298
2	$10 \text{ m}^3/\text{s} \times 10\text{d} + 25\text{m}^3/\text{s} \times 2\text{d} = \max V$	9927754
3	$10 \text{ m}^3/\text{s} \times 3\text{d} + 15\text{m}^3/\text{s} \times 4\text{d} + 30\text{m}^3/\text{s} \times 2\text{d} = \max V$	10771754
4	$10 \text{ m}^3/\text{s} \times 2\text{d} + 20\text{m}^3/\text{s} \times 2\text{d} + 30\text{m}^3/\text{s} \times 3\text{d} = \max V$	8253875
5	$10 \text{ m}^3/\text{s} \times 1\text{d} + 25\text{m}^3/\text{s} \times 1\text{d} + 35\text{m}^3/\text{s} \times 2\text{d} + 45\text{m}^3/\text{s} \times 1\text{d} = \max V$	9559057
6	$10 \text{ m}^3/\text{s} \times 1\text{d} + 20\text{m}^3/\text{s} \times 1\text{d} + 30\text{m}^3/\text{s} \times 1\text{d} + 45\text{m}^3/\text{s} \times 2\text{d} = \max V$	9485689
7	$10 \text{ m}^3/\text{s} \times 1\text{d} + 15\text{m}^3/\text{s} \times 1\text{d} + 25\text{m}^3/\text{s} \times 2\text{d} + 35\text{m}^3/\text{s} \times 1\text{d} + 40\text{m}^3/\text{s} \times 1\text{d} = \max V$	9999140
8	$15 \text{ m}^3/\text{s} \times 2\text{d} + 20\text{m}^3/\text{s} \times 1\text{d} + 25\text{m}^3/\text{s} \times 1\text{d} + 35\text{m}^3/\text{s} \times 1\text{d} + 40\text{m}^3/\text{s} \times 1\text{d} = \max V$	10398755

可选取 $30 \text{ m}^3/\text{s}$ 为主要放水流量标准，在满足生态区需水的同时实现水资源利用的最大效益。

5. 结论

- (1) 塔里木河干流区域水文、气象站点稀少，植被、土壤等下垫面信息也十分有限；在这样的情况下，建立具有完备参数体系的分布式水文模型比较困难^[7-10]。Floodarea 模型在保留主要下垫面信息空间分布式输入的同时，尽可能多的简化了模型参数，成功实现了对干流漫溢型生态闸洪水过程的模拟。提出了干旱区内陆河流域小尺度水文模拟及水—生态关系研究的新思路；也可作为建立完备的流域生态水调控机制的基础和探索。
- (2) 通过对模拟结果的分析 and 计算，得到以下规律：a. 随着时间的增加，漫溢面积增大的趋势逐渐变缓，水深的增加趋势明显； b. 淹没面积随着放水量的增加不断增大，

同时漫溢面积增大的趋势逐渐变缓,而表现为淹没区域内水深的增加;c. 900 万立方米是漫溢面积与放水量关系变化的临界点;d. 在完全满足灿木里克闸后区域生态需水量的情况下,30 m³/s流量过程的放水效率最高,淹没范围最大。

- (3) 结合洪水期河道来水数据,确定最佳放水方案,对流域生态用水的调控和合理利用具有深远的意义。

参考文献:

- [01] 樊自立, 马映军. 干旱区水资源开发及合理利用的几个问题[J]. 干旱区地理. 2000, 17(3):6-11.
[Fan Zili, Ma Yingjun. Some issues about the exploitation and the rational utilization of water resources in the arid areas. Arid land geography [J]. 2000, 17(3):6-11.]
- [02] 贾保全, 徐英勤. 干旱区生态用水的概念和分类——以新疆为例[J]. 干旱区地理. 1998, 21(2):8-12.
[Jia Baoquan, Xu Yingqin. The conception of the eco-environmental water demand and its classification in arid land - taking xinjiang as an example [J]. Arid land geography. 1998, 21(2):8-12.]
- [03] Z. Tanga, B.A. Engela, B.C. Pijanowskib, etal. Forecasting land use change and its environmental impact at a watershed scale. Journal of Environmental Management, 2005, 1-11.
- [04] 王根绪, 张珏, 刘桂民等. 干旱内陆流域河道外生态需水量评价——以黑河流域为例. 生态学报. 2005, 25(10):2467-2476. [Wang Genxu, Zhang Yu, Liu Guimin, etal. Water demand evaluation of riverside ecosystem in arid inland river basin: the case of Heihe River Basin. Acta Ecologica Sinica. 2005, 25(10):2467-2476.]
- [05] J. R. Thompson, H. Refstrup, H. Gavin, etal. Application of the coupled MIKE SHE/MIKE 11 modelling system to a lowland wet grassland in southeast England [J]. Journal of hydrology. 2004, 293: 151-179.
- [06] Manoj K. Jain, Vijay P. Singh. DEM-based modelling of surface runoff using diffusion wave equation [J]. Journal of hydrology. 2005, 302:107-126.
- [07] 夏军, 王纲胜, 吕爱峰等. 分布式时变增益流域水循环模拟[J]. 地理学报. 2003, 58(5):789-796. [Xia Jun, Wang Gangsheng, Lv Aifeng, etal. A Research on distributed time variant gain modeling [J]. Acta geographica sinica. 2003, 58(5):789-796.]
- [08] 陈求稳, 欧阳志云. 生态水利学耦合模型及其应用[J]. 水利学报. 2005, 36(11):1273-1279. [Chen Qiuwen, Ouyang Zhiyun. Integrated ecohydraulics model and the application. Shuili Xuebao. 2005, 36(11):1273-1279.
- [09] 方创琳, 鲍超. 黑河流域水-生态-经济发展耦合模型及应用[J]. 地理学报. 2004, 59(5):781-790. [Fang Chuangli, Bao Chao. The coupling modle of water-ecology-economy coordinanted development and its application in heihe river basin [J]. Arid land geography. 2004, 59(5):781-790.]
- [10] 樊自立, 马映军. 干旱区水资源开发及合理利用的几个问题[J]. 干旱区地理. 2000, 17(3):6-11. [Fan Zili, Ma Yingjun. Some issues about the exploitation and the rational utilization of water resources in the arid areas. Arid land geography [J]. 2000, 17(3):6-11.]

Modelling and Analysis of the Ecological Water Controlling in Arid

Inland River Basin: the Case of Tarim Basin

Chen Xi¹ Huang Yue^{1, 2} Qian Jing^{1,3} Liu Hailong^{1, 2} Feng Xianwei^{1,2} Bao Anming¹
Wang Weisheng¹

(1. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Science, Urumqi, 830011, China; 2. Graduate school Academy of Science, Beijing, 100039, china ; 3. Hong Kong Baptist University, Hong Kong, China.)

Abstract: Using GIS, Hydrology and remote sensing to modeling the flood process of Canmulik ecogate. The model not only create a method to calculate and analyze the effect of ecological flood, but also simulated flow directions and spatial distribution of the water that poured from the eco-gate, and the results of flood simulation accord with observed data very well. In addition, the equations which reveal the rules of flood process and water distributing in the ecological zone of Canmulik have been calculated for giving some pivotal laws of Eco-gate running, and can be used in the making of water distribution plans. The result shows that the flux and time impact the efficacy of ecological flood significantly, and the relations of flood area, time and flux are accord with geometry exponential relation. And hypsography becomes the key factor of the using of ecological water. The controlling of ecological water is not as same as the irrigation system; simple flood could not reach the best ecological benefit.