

# 西辽河平原区水资源供需平衡分析

李成振, 孙万光

(中水东北勘测设计研究有限责任公司, 吉林 长春 130061)

**摘要:** 西辽河平原区河道沙化现象日益突出, 引发了一系列的生态环境问题, 水资源匮乏是河道沙化的主要原因。利用 MIKE BASIN 软件, 建立了西辽河平原区水资源管理规划模型, 根据平原区水循环的特点, 在流域关键节点径流量、供水量及水资源蓄变量 3 个方面对模型进行了验证, 结果令人满意。利用建立的模型, 基于 3 次平衡理论对研究区 2020 水平年水资源供需状况进行了分析。结果表明: 西辽河平原区缺水程度为 24.7%, 属资源性缺水, 强化节水及跨流域调水是解决本区水资源供需矛盾的有效措施。采取强化节水措施后, 减少需水占一次平衡缺水的 63.6%, 引绰济辽跨流域调水工程实施后, 受水区水资源短缺问题得以缓解, 通辽市科尔沁区地下水位有望每年回升 0.16 m。

**关键词:** 水资源管理; 供需平衡; MIKE BASIN; 缺水量; 西辽河平原区

中图分类号: TV211.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)01-0056-06

## Analysis of water resources supply – demand balance in the plain of West Liaohe River

LI Chengzhen, SUN Wanguang

(China Water Northeastern Investigation, Design and Research Co., Ltd, Changchun 130061, China)

**Abstract:** River desertification is increasingly prominent in the plain of West Liaohe river. A series of ecological environment problems have been triggered, water resources shortage is the main cause of the river desertification. A planning model of water resources management within the plain of West Liaohe River was established with the MIKE BASIN software. The model was validated in three aspects including runoff, water supply and water storage variation of the watershed key nodes according to the characteristics of water cycle in plain area, the results were satisfactory. The supply and demand status of water resources in the 2020 level year of the study area was analyzed using the established models based on water resources three – time allocation theory. The results showed that, the water shortage degree was 24.7% in the plain of West Liaohe River, which belonged to resource shortage. Strengthening water saving and inter – basin water transfer were effective measures to solve the contradiction between water resources supply and demand in this area. Water demand was reduced by 63.6% after taking the strengthening water saving measure. After the inter basin water transfer project of water regulation from Chuo river to West Liaohe river is implemented, water shortage problems can be alleviated in the water receiving area and the groundwater level is expected to rise 0.16m every year in Horqin district of Tongliao City.

**Key words:** water resources management; balance of supply and demand; MIKE BASIN; water shortage; the plain of West Liaohe River

## 1 研究背景

西辽河位于我国东北地区西南部, 全长 829

km, 自西向东流, 主要支流有西拉木伦河、老哈河、乌力吉木伦河、教来河、新开河等, 流域面积  $13.52 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 地处温带大陆性季风气候区, 年降水量

收稿日期: 2016-10-28; 修回日期: 2016-12-26

基金项目: 水利部公益性行业科研专项经费项目(201401015)

作者简介: 李成振(1977-), 男, 山东聊城人, 硕士, 高级工程师, 主要从事水文水资源工作。

在 350 ~ 450 mm 之间,属于半干旱气候。流域西北侧为大兴安岭南端,南侧为七老图山、医巫闾山和努鲁儿虎山,其余为西辽河平原。受全球气候变化及人类活动的双重影响,西辽河径流量日益减少,特别是 2000 年以来,台河口以下河段常年断流,河床干涸,裸露河漫滩,春季风沙弥漫,土地沙漠化扩大,生态环境恶化。地表水资源的短缺,使得人们不得不过度地开采地下水,导致通辽市区已形成大面积的地下水漏斗。西辽河平原区水资源短缺引发的一系列水生态环境及社会问题,已经引起了国内许多专家学者的关注。王西琴等<sup>[1]</sup>深入研究了西辽河断流问题,研究表明,河道断流发生的频率和持续的时间在周期变化中有增加趋势,流域降水减少、水利工程拦截和社会经济用水增加是河道断流的重要原因。杨恒山等<sup>[2]</sup>基于长系列降水和气温资料,对西辽河平原气候及水资源变化特征进行了研究,提出西辽河平原降水量在周期变化中有减少的趋势,西拉木伦河等 4 条入境河流的径流量减少,科尔沁区地下水超采区面积及漏斗区面积持续扩大,农业灌溉用水量波动上升。杨肖雨等<sup>[3]</sup>采用 Mann - Kendall 检验法、有序聚类分析和线性回归方法分析了西辽河源头流域降水量、径流量近 32 a 的年内和年际变化规律及其影响因素,提出流域年降水量和径流量均呈现下降的趋势,径流量下降幅度明显高于降水量,流域内土地利用/覆被变化和水库水坝修建、河道外取水等人类活动共同作用是该流域径流量减少的主要因素。赵鹏敏<sup>[4]</sup>分析了西辽河流域水资源开发方面存在的主要问题,提出须统筹规划,合理配置水资源等水资源开发利用对策。梁团豪等<sup>[5]</sup>运用运筹学方法和规则模型方法,构建了面向经济耗水与生态耗水总量控制的基于优化技术的水资源配置模型和基于规则的水资源配置模型,提出了西辽河流域未来 20 ~ 30 a 时间跨度水资源配置全方位多视角系列成果,为西辽河流域水资源综合规划提供了重要依据。

由于西辽河平原区地表水资源匮乏,地下水是该区稳定的供水水源。李志等<sup>[6]</sup>建立了西辽河平原地下水数值模拟模型,对地下水资源进行了评价计算。陈志云等<sup>[7]</sup>分析了地下水水位动态,确定了该区的地下水位动态类型,提出西辽河平原区地下水动态主要影响因素为气象因素及人为因素,地下水的大量开采对该区水资源可持续利用产生了极大的影响。徐凯等<sup>[8]</sup>基于分布式水循环模拟模型 MODCYCLE,建立了强人类活动影响下西辽河流域水循环模拟模

型,量化了西辽河平原地下水补给组成,分析了地下水动态补给情况及年际年内变化规律。

明确流域水资源供需关系是做好流域水资源管理规划的前提。MIKE BASIN 模型在流域水资源管理规划工作中得到了广泛应用<sup>[9-10]</sup>。模型的检验率定是建模成败的关键,在以往的相关研究中<sup>[11]</sup>,一般着眼于流域节点模拟的径流量及其过程与实测值之间的吻合程度,通常在径流验证后不去关注其他的水循环量的对比情况。如果仅做短期的洪水预报,这样做法是合适的,因为通常模拟期内的水循环过程以产汇流过程为主,抓住了径流就抓住了主要矛盾。但对本研究区,模型主要用来做区域长时间尺度的水量平衡分析,径流量不是区域水循环通量的主体,年径流量占降雨量的比例不足 10%,多数水文站常年断流,这种情况下即使径流量和径流过程与实测值的拟合精度达到 100%,也不足以说明模型模拟水循环过程的正确性。因此,在平原区以长时间尺度水量平衡分析为目的的模型率定验证的内容要复杂一些,同时难度也更大一些,应该以水量的校核为主,兼顾过程的对比校核。本文拟构建基于 MIKE BASIN 的西辽河平原区水资源管理规划模型,根据平原区水循环特点对模型进行率定,并根据三次平衡理论<sup>[12]</sup>对西辽河平原区 2020 水平年水资源供需状况进行分析,量化该区水资源缺口,提出缺水解决方案,为西辽河平原区河道沙化治理提供依据。

## 2 水资源管理规划模型

### 2.1 研究区域

根据研究目的,并结合流域控制性水利工程的分布情况,以及流域地形地貌特点,本次模拟范围为老哈河红山水库以下、西拉木伦河胡日哈以下,包括教来河、乌力吉木仁河、新开河及西辽河干流流域,总面积 78 865 km<sup>2</sup>。在行政区划上,模拟区涉及赤峰市的巴林左旗、阿鲁科尔沁旗、翁牛特旗及敖汉旗;通辽市的奈曼旗、库伦旗、科尔沁左翼后旗、科尔沁区、开鲁县、科尔沁左翼中旗及扎鲁特旗;以及兴安盟的科尔沁右翼中旗、白城市的通榆县、四平市的双辽市、松原市的长岭县。模拟范围及区内水文雨量站点分布情况如图 1 所示。

### 2.2 模型构建

在利用 MIKE BASIN 建模时要建立合理的流域网络节点,即将流域实体抽象化,确定需要模拟的流域的特征,这是进行水资源供需平衡分析的基础。具体说来,不同类型的空间概化方法有:将建制市、

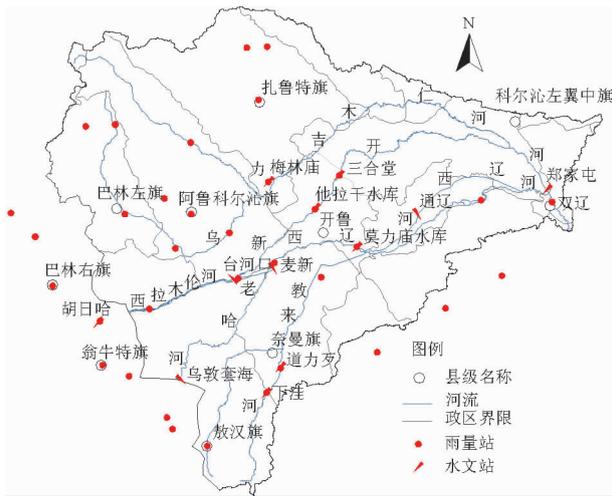


图1 研究区范围图

大型灌区、大型水库、大型调水工程受水点,以及较大支流入汇点等作为水资源网络中的单独节点;在取水口上游将小河流概化为一条单一河道;将一些小灌区概化为单一大灌区;将距离较近的多个小水库概化为一个大水库,合并后并于水资源管理网络中等等。流域各计算单元的供需分析概化为供水节点和取水节点之间的水量平衡关系。计算单元划分原则如下:(1)考虑河流所在的流域水系,尽量保持流域的干支流水系的完整性,也能反映各河段的特点。

(2)同一区域内自然地理要素、水资源特点、水资源开发利用条件和水利建设发展情况基本相同。

(3)考虑已建水利工程和水文站的控制作用,有利于进行水资源计量和供需平衡分析。

(4)适当考虑行政区划的完整性。

按照上述原则,将研究区划分为15个独立的计算单元,如图2所示。

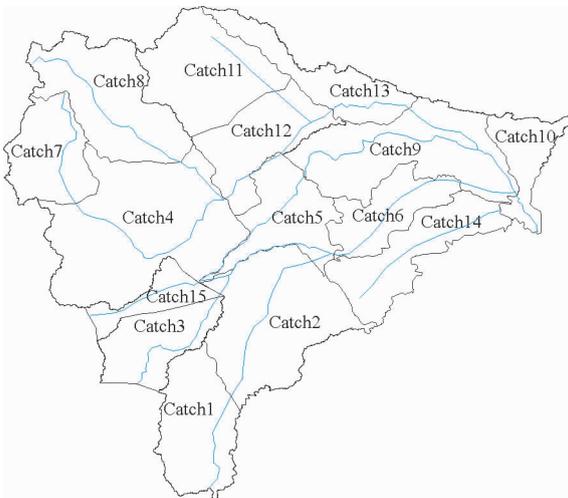


图2 模型网络概化图

## 2.3 模型验证

### 2.3.1 模型验证思路

由于研究区为平原区,在自然水循环方面,其特点是降雨径流系数小,降雨大部分消耗于大气蒸发,部分下渗转化为地下水,地表产流量很小。在人工侧支循环<sup>[13]</sup>方面,本区水资源开发利用程度较高,地下水开采量较大,主要用于农业灌溉,水资源垂向运动及转化规律明显。因此,在模型率定验证方面,不能仅着眼于流域节点模拟的径流量及其过程与实测值之间的吻合程度,应该以水量的校核为主,兼顾过程的对比校核。

考虑到模型验证内容及深度受可收集到的基础数据的制约,本次拟在以下几个方面对模型进行率定验证:

- (1)关键节点径流量与实际径流量相近;
- (2)地表水(或地下水)供水量与实际相符;
- (3)蓄水变量与实际情况接近。

### 2.3.2 模型验证结果

采用2004-2013年的气象、降雨、用水等统计数据验证模型。模型计算步长采用月。模型边界入口节点位于Catch3(老哈河红山水库以下)和Catch15(西拉沐沦河胡日哈至台河口区间)计算单元内。其中,Catch3入口节点位于计算单元进口位置,即红山水库泄流量;Catch15入口节点位于计算单元出口位置,即新开河分流口上游,径流资料采用实测资料(台河口新三站与台河口西五站径流之和)。

(1)流域关键节点径流量校验。选择水文站点作为径流量校验的节点,研究区内的水文站有台河口西五站、台河口新三站、大兴业站、他拉干站、总办窝堡站、三合堂站、通辽站、梅林庙站及郑家屯站。台河口西五站和台河口新三站位于模型进口位置,前者控制着台河口枢纽分入西拉沐沦河的水量,后者控制着台河口枢纽分入新开河的水量。两水文站实测流量之和作为入口边界,不必再进行流量校验。其他需要校验的节点有:他拉干水库与莫力庙水库引水量、梅林庙站与郑家屯站径流量。本文仅给出郑家屯站径流量验证结果,见表1所示。郑家屯水文站位于西辽河干流新开河河口下游断面,是研究区出口节点,该断面水量主要来源于乌力吉木仁河。从模拟结果看,该站枯水年份模拟误差相对较大,主要原因是由于流域内水利枢纽、水库较多,受人类活动干扰强烈。从多年平均水平上看,2004-2013年郑家屯多年平均径流量为 $6\ 573 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,模拟结果为 $6\ 890 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,两者比较接近。从各年份水量对比上看,由于总径流量不大,模拟误差可以接受。

表 1 郑家屯站径流量校验

年份	实测/ $10^4 \text{ m}^3$	模拟/ $10^4 \text{ m}^3$	相对误差/%
2004	12633	16758	32.7
2005	13881	10235	-26.3
2006	647	1065	64.7
2007	296	536	80.8
2008	10086	12536	24.3
2009	419	679	61.9
2010	1398	1782	27.4
2011	7632	5875	-23.0
2012	8475	10756	26.9
2013	10258	8674	-15.4
平均	6573	6890	4.8

(2) 地表水供水量校验。在模型率定阶段,没有设定地下水开采量限值,即当用水户采用地表和地下两种水源供水时,地表水供水不足的部分采用地下水补充。因此为保证准确模拟研究区水循环过程,必须对地表和地下两种水源在总供水量中所占的份额予以确定。受资料所限,本次仅对研究区通辽市境内的地表水供水量进行了校验,其结果如表 2 所示,虽然部分年份模拟相对误差较大,但考虑研究区地表水开发利用的复杂性,且其绝对误差相对于水资源开发利用总量甚微,故模拟结果可以接受。

表 2 研究区地表水供水量校验(通辽境内)  $10^4 \text{ m}^3$ 

年份	实测	模拟	误差
2004	17070	12982	-4088
2005	8600	5487	-3113
2006	12326	14234	1908
2007	9947	6890	-3057
2008	11153	7547	-3606
2009	9540	6782	-2758
2010	7403	8672	1269
2011	3432	2124	-1308
2012	7800	3526	-4274
2013	3752	3215	-537
平均	9102	7146	-1956

(3) 研究区蓄水变量校验。研究区蓄水变量校验分为水库蓄水变量校验和平原区地下水蓄变量校验。由于研究区地表径流量不大,水库总引蓄水量较小,在保证水库引蓄水量符合实际的前提下,水库年蓄水变量模拟误差对整体研究影响不大。必要时适当调整水库供水量或水库水量损失系数即可保证水库年蓄水变量与实际接近。下面主要探讨平原区地下水蓄变量的校验结果。

地下水是主要供水水源,且在模型率定期没有设置地下水供水上限。因此,对平原区地下水蓄变量进行校验,使地下水补排量与实际相符,是模型计算成败的关键。本次仅收集到研究区通辽市境内的地下水蓄变量资料(约占研究区总面积的 60%),研究区内仅科尔沁区和开鲁县作为独立的计算单元包括在内,其他不完全在研究区范围内或不完全在同一个计算单元内的旗县,其地下水蓄变量按面积比匹配,并作为整体进行率定。对其他缺乏实测资料的地区,其相关参数参照具备率定条件的计算单元予以确定。地下水蓄变量校验结果如表 3 ~ 表 4 所示,从多年平均数据看,模拟值与实际十分接近,虽然个别年份误差较大,但与研究区总的供水量相比,误差在可接受范围以内。

表 3 科尔沁区地下水蓄变量校验结果表  $10^4 \text{ m}^3$ 

年份	实测	模拟	误差
2004	-9857	-12303	-2446
2005	-2100	-5325	-3225
2006	-5800	-4786	1014
2007	-22131	-13605	8526
2008	-9800	-10702	-902
2009	-11700	-14795	-3095
2010	-2400	-6806	-4406
2011	-5800	-3217	2583
2012	-1000	-5238	-4238
2013	-1320	-8672	-7352
平均	-7191	-8545	-1354

表 4 开鲁县地下水蓄变量校验结果表  $10^4 \text{ m}^3$ 

年份	实测	模拟	误差
2004	-22014	-17835	4179
2005	-8400	-10782	-2382
2006	-17400	-13257	4143
2007	-32810	-26547	6263
2008	-21100	-17936	3164
2009	-30700	-26739	3961
2010	-12900	-16836	-3936
2011	-13800	-11784	2016
2012	-600	-8359	-7759
2013	-1830	-9543	-7713
平均	-16155	-15962	194

### 3 水资源供需平衡分析与解决对策

#### 3.1 水资源供需平衡分析

将 2020 水平年需水量预测成果<sup>[14]</sup>(基本方案)

输入水资源管理规划模型各类用水户需水端,运行完成后,整理得到研究区的水资源供需平衡结果,如表5所示。研究区总需水量  $41.80 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,总供

水量  $31.46 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,缺水  $10.34 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,缺水程度为24.7%,其中科尔沁区、开鲁县及科左中旗的缺水最大。

表5 研究区2020水平年基本方案水资源供需平衡分析成果表

$10^4 \text{ m}^3$

分区	计算单元	需水	供水		缺水
			地表	地下	
教来河上游	Catch1	22533	5170	12861	4502
教来河下游	Catch2	46395	1681	34938	9776
老哈河红山水库以下	Catch3	9900	710	6256	2934
乌力吉木仁河上游	Catch4、Catch7、Catch8	62268	14822	32156	15290
开鲁县	Catch5	56154	486	39265	16403
科尔沁区	Catch6	67763	1353	43455	22955
科左中旗	Catch9	52444	152	40861	11431
双辽	Catch10	17767	3430	9094	5243
乌力吉木仁和中游	Catch11、Catch12	33463	1975	23530	7958
乌力吉木仁河下游	Catch13	24998	1611	18959	4428
西辽河闭流区	Catch14	24339	844	21053	2442
总计		418024	32234	282428	103362

### 3.2 缺水解决方案

解决缺水的途径主要是开源和节流两个方面。首先是在需求方面通过各种节流措施进一步压缩需水增长速度,在供给端通过治污、雨水资源利用和当地水资源进一步挖潜以提高供水能力,如仍满足不了水资源需求,则研究实施外流域调水的可能性。

(1) 节水对降低需水量的作用。节水的措施主要包括:通过产业调整,限制高耗水行业发展;通过节水器具普及,降低用水定额以及提高农业用水效率等措施。采取上述措施后,水资源需求普遍有所降低。研究区中等干旱年满足社会主义新农村建设要求的基本方案需水为  $41.80 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,采取强化节水措施后需水为  $35.22 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,减少需水  $6.58 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,占一次平衡缺水的63.6%。

(2) 流域内地表水开发潜力分析。由研究区出口节点郑家屯水文站径流观测资料可知,1988-2013年郑家屯站年径流量为  $6.06 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,但年际分布极不均匀,最大1998年为  $3.93 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,最小2007年仅  $296 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。特别是近10年来,受上游水资源开发强度增大及持续干旱等因素影响,郑家屯站径流量2000-2013年平均年径流量仅为  $5.456 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。新开河及西辽河常年断流,继续扩大地表水开发的潜力不大,属资源性缺水。

需水由一般节水条件下的基本方案调整为强化

节水条件下的推荐方案,并且考虑了流域内所有可能的蓄水和引提水工程。强化节水方案需水量为  $35.23 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,二次平衡后,缺水量由一次平衡的  $10.34 \times 10^8 \text{ m}^3$  减为  $3.14 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,其中需水量减少  $6.57 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,流域内工程解决缺水  $0.63 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,流域内工程解决缺水占一次平衡缺水的6.1%。部分地区通过节水和流域内工程措施,已基本能满足本地用水需求,二次平衡后,缺水量仍然较大的为通辽市科尔沁区和开鲁县,水资源将成为制约地区经济可持续发展的瓶颈。

(3) 跨流域调水解决缺水方案。西辽河平原区属于资源性缺水,规划从绰尔河调水解决当地的水资源供需矛盾。引绰济辽工程自绰尔河引水至西辽河,向沿线城市及工业园区供水,设计年调水量  $6 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,本研究区受水量为  $2.72 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。考虑引绰济辽工程正常运行后,西辽河平原区水资源三次供需平衡结果见表6,研究区总缺水量为  $10.434 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,均为农业缺水,其中开鲁县缺水量最大,须通过调整产业结构加以解决。如减少水田种植面积,限制高耗水工业发展。跨流域调水后,科尔沁区地下水开采量每年减少  $4.356 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,地下水漏斗区地下水位有望得以逐步回升。若按水均衡方程式(1)估算跨流域调水对科尔沁区地下水位恢复的效果。2013年末科尔沁区地下水超采区面积<sup>[15]</sup>为  $2.759 \text{ km}^2$ ,依据本区水文

地质资料,含水层给水度取为 0.1,则超采区地下水位平均每年可回升 0.16 m。

$$\Delta W = \pm \mu F \frac{\Delta H}{\Delta T} \quad (1)$$

式中:  $\Delta W$  为计算时段内地下水蓄变量,  $m^3$ ;  $\mu$  为潜水含水层给水度;  $F$  为区域单元面积,  $m^2$ ;  $\Delta H$  为地下水位变幅,  $m$ ;  $\Delta T$  为计算时段长度,  $a$ 。

表 6 研究区 2020 水平年水资源供需三次平衡分析成果表

$10^4 m^3$

分区	计算单元	需水	供水			缺水
			地表	地下	外调水	
教来河上游	Catch1	19153	5170	12861	0	1122
教来河下游	Catch2	37116	1681	34938	0	497
老哈河红山水库以下	Catch3	7920	710	6256	0	954
乌力吉木仁河上游	Catch4、Catch7、Catch8	54173	20154	32156	0	1863
开鲁县	Catch5	49303	486	39265	5550	4002
科尔沁区	Catch6	58954	1353	39099	18502	0
科左中旗	Catch9	41955	152	40231	1572	0
双辽	Catch10	14213	3430	9094	0	1689
乌力吉木仁和中游	Catch11、Catch12	26770	2875	22323	1572	0
乌力吉木仁河下游	Catch13	20748	1611	18959	0	178
西辽河闭流区	Catch14	22026	844	21053	0	129
总计		352331	38466	276235	27196	10434

## 4 结 论

本文建立了基于 MIKE BASIN 的西辽河平原区水资源管理规划模型,对研究区 2020 水平年水资源供需状况进行了分析,针对水资源供需矛盾,提出了相应的解决对策,得出以下主要结论:

(1) 平原区水循环模型的率定验证不能仅着眼于流域节点模拟的径流量及其过程与实测值之间的吻合程度,应该以水量的校核为主,兼顾过程的对比校核。本文根据平原区水循环的特点对模型进行了验证,取得了良好的效果,其方法可作为其他平原区水循环模型检验率定的参考。

(2) 利用建立的模型对西辽河平原区 2020 水平年水资源供需状况进行了分析,结果表明,在基本方案下,研究区总缺水量为  $10.34 \times 10^8 m^3$ ,其中科尔沁区、开鲁县及科左中旗缺水最大。采用强化节水情况下,水量由一次平衡的  $10.34 \times 10^8 m^3$  减为  $3.14 \times 10^8 m^3$ ,部分地区通过节水和流域内工程措施,已基本能满足本地用水需求,用水缺口仍然较大的为通辽市科尔沁区和开鲁县。

(3) 西辽河平原区继续扩大地表水开发的潜力不大,属资源性缺水。引绰济辽工程是解决该区水资源供需矛盾的有效手段,工程实施后,研究区总缺

水量进一步消减为  $1.04 \times 10^8 m^3$ ,均为农业缺水,其中开鲁县缺水最大,须通过调整产业结构加以解决;科尔沁区地下水超采区地下水位有望得以逐步回升。

本研究成果可为西辽河平原区水资源管理规划提供参考。西辽河平原区地表水资源极度短缺,区内地表水库蓄水能力可观,地下水库也具有良好的储水及补给条件。通过优化水库调度及地表水库与地下水库联合调度,充分利用过境洪水资源,是下一步工作的研究方向。

### 参考文献:

- [1] 王西琴,李力. 西辽河断流问题及解决对策[J]. 干旱区资源与环境,2007,21(6):79-83.
- [2] 杨恒山,刘江,梁怀宇. 西辽河平原气候及水资源变化特征[J]. 应用生态学报,2009,20(1):84-90.
- [3] 杨肖丽,任立良,江善虎,等. 西辽河源头流域径流变化趋势及影响因素分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2012,40(1):37-41.
- [4] 赵鹏敏. 西辽河流域水资源开发利用对策[J]. 东北水利水电,2011,29(6):30-31.
- [5] 梁团豪,谢新民,崔新颖,等. 西辽河流域水资源合理配置研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2009,7(4):291-295.

- [4] Ghaffari G, Keesstra S, Ghodousi J, et al. SWAT – simulated hydrological impact of land – use change in the Zanjanrood Basin, Northwest Iran [J]. *Hydrological Processes*, 2010, 24(7):892 – 903.
- [5] Nie W M, Yuan Y P, Kepner W, et al. Assessing impacts of landuse and landcover changes on hydrology for the upper San Pedro watershed [J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 407(1/2/3/4):105 – 114.
- [6] 刘金巍, 靳甜甜, 刘国华, 等. 新疆玛纳斯河流域 2000 – 2010 年土地利用/覆盖变化及影响因素[J]. *生态学报*, 2014, 34(12):3211 – 3223.
- [7] 曹芳芳, 李雪, 王东, 等. 新安江流域土地利用结构对水质的影响[J]. *环境科学*, 2013, 34(7):2582 – 2587.
- [8] Cowling R M, Ego B, Knight A T, et al. An operational model for mainstreaming ecosystem services for implementation [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105(28):9483 – 9488.
- [9] 王学敏, 聂兴山. 汾河水库上游水土保持综合治理效益分析——以静乐县二期治汾为例[J]. *山西农业大学学报(社会科学版)*, 2007, 6(3):237 – 240.
- [10] 兰跃东. 汾河水库上游水土保持治理措施减沙效益分析[J]. *山西水土保持科技*, 2012, 9(3):7 – 9.
- [11] 王晓宇. 汾河水库及其上游水环境状况分析及治理[J]. *水资源保护*, 2010, 26(4):89 – 92.
- [12] 马晓勇, 张国信, 党晋华, 等. 汾河上游土地利用类型动态变化研究[J]. *山西大学学报(自然科学版)*, 2013, 36(2):308 – 312.
- [13] 马子清. *山西植被*[M]. 北京:中国科学技术出版社, 2001:48 – 138.
- [14] 张祎, 李玉凤, 高鸿, 等. 基于土地转移矩阵的生态服务功能研究——以南京市仙林新市区为例[J]. *生态与农村环境学报*, 2014, 30(6):800 – 805.
- [15] 刘纪元, 布和敖斯尔. 中国土地利用变化现代过程时空特征的研究: 基于卫星遥感数据[J]. *第四纪研究*, 2000, 20(3):229 – 239.
- [16] Wood D, Lenne J M. Revised wisdom in agriculture land use policy: 10 years on from Rio [J]. *Land Use Policy*, 2005, 22:75 – 93.
- [17] 徐晓莉, 秦柞栋. 汾河流域景观格局及其动态变化研究[C]//中国地理学会 2013 年(华北地区)学术年会论文集, 2013:786 – 794.
- [18] 曹银贵, 周伟, 乔陆印, 等. 青海省 2000 – 2008 年间城镇建设用地变化及驱动力分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2013, 27(1):40 – 46.
- [19] 陆大道. 我国的城镇化进程与扩张[J]. *城市规划学报*, 2007, 17(4):47 – 52.
- [20] 孟宝, 张勃, 张华. 黑河中游张掖市土地利用/覆盖变化的水文水资源效应分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2006, 20(3):94 – 99.

(上接第 61 页)

- [6] 李志, 于孟文, 张丽玲, 等. 西辽河平原地下水资源及其环境问题调查评价[M]. 北京:地质出版社, 2009.
- [7] 陈志云, 林岚, 王晓昕, 等. 西辽河平原区地下水水位动态与水资源可持续发展[J]. *水利经济*, 2012, 30(2):57 – 59.
- [8] 徐凯, 陆垂裕, 汪林. 西辽河流域平原区地下水动态补给研究[J]. *水利水电技术*, 2013, 44(6):22 – 25.
- [9] 顾世祥, 李远华, 何大明, 等. 以 MIKE BASIN 实现流域水资源三次供需平衡[J]. *水资源与水工程学报*, 2007, 18(1):5 – 10.
- [10] 陈刚, 张兴奇, 李满春. MIKE BASIN 支持下的流域水文建模与水资源管理分析——以西藏达孜县为例[J]. *地球信息科学*, 2008, 10(2):230 – 236.
- [11] 王蕾, 肖长来, 梁秀娟, 等. MIKE BASIN 模型在吉林市水资源配置方面的应用[J]. *中国农村水利水电*, 2014(1):128 – 131.
- [12] 王浩, 秦大庸, 王建华, 等. 黄淮海流域水资源合理配置[M]. 北京:科学出版社, 2003. 10:21 – 159.
- [13] 王浩, 王建华, 秦大庸, 等. 基于二元水循环模式的水资源评价理论方法[J]. *水利学报*, 2006, 37(12):1496 – 1502.
- [14] 中水东北勘测设计研究有限责任公司. 西辽河平原风沙河流沙化治理关键技术研究[R]. 长春:2016:109 – 136.
- [15] 通辽市水文局. 通辽市水资源公报[R]. 通辽:2013, 2.