

王刚, 潘涛, 齐珺, 等. 不同水源供水与水库运行方案下水利工程群应对干旱能力评价研究——以漳卫河流域为例[J]. 灾害学, 2015, 30(4): 121–125. [Wang Gang, Pan Tao, Qi Jun, et al. Study on Drought Coping Ability Assessment of Hydraulic Engineering Projects under Different Water Supply and Reservoir Operation Programs: A Case Study in Zhangwei River Basin[J]. Journal of Catastrophology, 2015, 30(4): 121–125.]

不同水源供水与水库运行方案下水利工程群应对干旱能力评价研究

——以漳卫河流域为例*

王刚^{1,2}, 潘涛^{1,3}, 齐珺¹, 宋新山², 金鑫⁴, 翁白莎⁵

- (1. 北京市环境保护科学研究院 国家城市环境污染控制工程技术研究中心, 北京 100037;
2. 东华大学 环境科学与工程学院 上海 201620; 3. 天津大学 环境科学与工程学院 天津 300072;
4. 辽宁省水文局, 辽宁 沈阳 110003; 5. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘要: 综合考虑不同水库汛限水位和多种供水水源方案设置5种情景方案, 通过长系列优化调算分析不同方案下漳卫河流域的缺水状况, 并基于干旱应对能力水平指数(HEGdca)评价不同方案下流域水利工程群整体应对不同程度干旱事件的能力。结果表明: 抬高汛限水位会降低流域整体应对干旱能力, 大量超采地下水和南水北调中线调水方案均能显著提高流域干旱应对水平, 但从改善流域生态环境的角度, 外流域调水是解决流域干旱缺水问题的必然选择。对漳卫河流域而言, 从干旱应对的角度, 水库宜采用固定汛限水位的运行方式。充分利用外调水源并适当超采部分地下水, 是未来一定的发展阶段内比较符合漳卫河流域实际情况的水资源利用方式。

关键词: 水利工程群; 干旱; 应对能力; 汛限水位; 供水水源; 多方案比选; 漳卫河流域

中图分类号: X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2015)04-0121-05

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2015.04.023

水利工程可以对水资源进行时间尺度和空间尺度上的再分配, 降低复杂气候水文条件下来水的不确定性, 为不同用水户提供相对稳定的供水水源, 是应对区域干旱和规避旱灾风险的关键途径之一^[1-3]。在干旱易发地区布置水利工程显然是应对干旱的前提, 而工程整体效率与效益的发挥除了与工程合理布局有联系之外, 还与工程的运行管理水平密切相关^[4-5]。蓄水工程, 尤其是大型骨干工程, 具有显著的调节性能, 可改善天然来水过程与用水过程在时间上的不匹配性, 保障干旱缺水时段的用水需求。一般而言, 提高水库汛限水位, 可减少汛前弃水量, 在一定程度上能增加水库的供水效益^[6-7]。但现实中单一水源供水的情况较少, 多由蓄、引、提、调等水利工程组成的复杂供水系统供水。从流域水资源系统整体的角度, 调整水库汛限水位对于水利工程群整体供水效益有何影响, 这方面的文献报道还比较少。

漳卫河流域位于海河流域南部, 是我国传统的干旱缺水地区, 也是南水北调中线工程的受水

区之一。中线工程已于2014年12月份正式通水, 流域外调水是否会显著改变本地区的水资源开发利用的格局, 对于提高本地区干旱应对能力的效果如何等, 也是当前工程人员和决策者所关心的问题。本研究以漳卫河流域为研究靶区, 考虑流域内大型水库汛限水位调整及调水前后水利工程条件的变化, 设置5种水库运行和水源供水的情景方案; 从干旱期水资源供需平衡出发, 以干旱应对能力水平指数为评价指标, 评估了不同方案下流域年均缺水状况及应对不同程度干旱事件的能力, 为流域水利工程运行管理和干旱应对提供决策支撑。

1 研究区概况

漳卫河流域属于南运河水系, 地理坐标为112.44°~115.34°E, 35.01°~37.62°N, 流域面积为 $3.53 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。流域内现有关河、后湾、漳泽、

* 收稿日期: 2015-04-29 修回日期: 2015-06-07

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51409266); 北京市环境保护科学院基金(2012-B-08)

作者简介: 王刚(1985-), 男, 河南平顶山人, 博士, 主要从事变化环境下水资源综合应对、水资源与水环境管理相关研究。

E-mail: Gangwnan@163.com

岳城、盘石头、小南海等 6 座大型水库, 总库容 $27.13 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占多年平均地表水资源量的 86.4%。目前, 山西省规划在漳河上游修建下交漳和吴家庄水库, 但颇具争议。引、提水工程共计 3 723 处, 总设计供水能力 $38.81 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。另外流域内有两处流域外(黄河)调水工程, 受水区为焦作和新乡两地, 现状供水能力为 $6.33 \times 10^8 \text{ m}^3$ [8]。同时, 漳卫河流域也是南水北调中线工程的受益区, 按照近期 $97.1 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的调水规模, 流域内的焦作、新乡、安阳、鹤壁、邯郸等地区总计可获得 $8.04 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的水量分配指标 [9]。目前漳卫河流域地下水超采比较严重, 地下水整体开发利用率达到 175 %。

为方便构建模型进行优化调算, 需要划分流域计算单元。以漳卫河流域的水系分布为基础, 结合流域内行政单元的划分, 以流域水资源三级区套地级市为基本计算单元, 将整个流域划分为漳卫河山区晋中、山区长治、平原安阳等 13 个计算单元。图 1 为概化后的漳卫河流域水资源系统网络图。

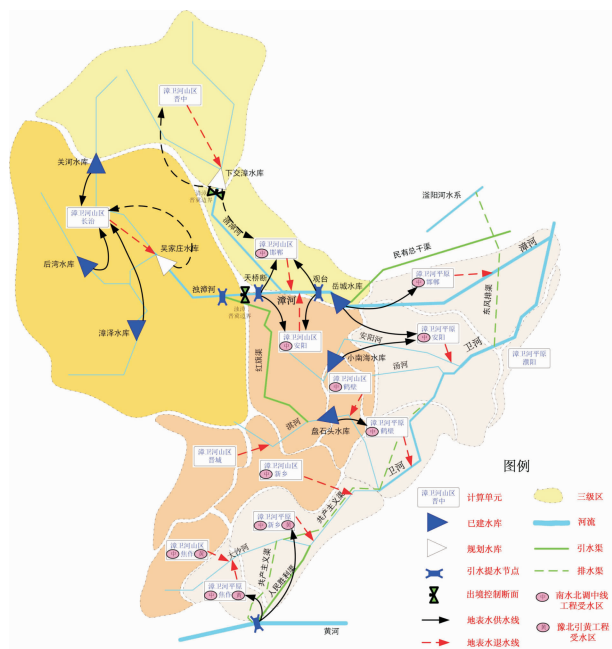


图 1 漳卫河流域水资源系统概化

2 数据与方法

2.1 干旱应对能力水平指数

水利工程群应对干旱的本质是干早期水利工程提供的水量能够满足用户多大程度的用水需求 [3]。文献 [3] 中将水利工程群应对干旱能力水平指数定义为: 一定水平年, 一定干旱频率下, 干早期水利工程的可供水量与需水量的比值。其表达式为:

$$HEG_{dca}(t, p) = \frac{WS_d(t, p)}{WR_d(t, p)} \quad (1)$$

式中: $HEG_{dca}(t, p)$ 为水利工程群 (Hydrological Engineering Group, HEG) 在水平年 t 、干旱频率 p 下的应对干旱能力 (drought coping ability, dca); $WS_d(t, p)$ 为水平年 t 、干旱频率 p 下, 干旱期间水利工程群调节下的供水能力; WR_d 为水平年 t 、干旱频率 p 下, 干旱期间保证正常的生产、生活所需水量, 包括生产、生活和生态三部分的水量。水平年 t 主要反映不同水平年水利工程体系的数量、规模及布局情况的差异; 干旱频率 p 则反映不同的干旱程度。

2.2 干旱时段及供需水量

根据干旱应对能力水平指数的定义, 关键是要确定干早期以及计算干旱期的需水量和可供水量。在文献 [3] 中, 以标准化降水指数 SPI 为诊断指标识别流域干旱过程, 并结合游程理论划分干早期, 进而采用 Copula 函数构造干旱历时与干旱强度的联合分布, 并推求干旱联合分布的重现期; 构建了面向干旱的水资源优化配置模型, 采用长系列调算方法确定每个干旱期内水利工程群的可供水量; 对于干旱期的需水量和需水过程的推求方法也有系统的论述。这些不是本文研究的重点, 这里不赘述。

2.3 数据来源

本文确定干早期所使用的降水资料及用于计算农业需水所用的辐射、气温、水气压、风速等气象资料, 均来自中国地面气象资料日值数据集, 可从中国气象科学数据共享服务网下载。漳卫河流域内各计算单元的工业、生活、生态用水数据参考了山西、河南、河北三省的水利统计年鉴以及邯郸、新乡、安阳等相关地市的水资源公报。模型调算所使用的各个计算单元 1956–2000 年水资源量数据来源于全国第二次水资源综合规划成果。设置水库运行方案所用的水库参数由漳河上游管理局提供, 未来规划水平年外调水量数据基于水利部长江水利委员会研究制定的《南水北调中线工程规划》成果 [9] 进行估算。

3 结果与讨论

3.1 方案设置

(1) 现状年、固定汛限水位方案

南水北调中线工程实施以前, 在现状水利工程条件下, 水库汛期运行统一采用主汛期汛限水位运行, 作为基准方案 1。

(2) 现状年、汛限水位调整方案

在现状水利工程条件下, 水库按照主汛期、后汛期和过渡期采用不同的汛限水位运行, 作为方案 2。漳卫河流域汛期为 6–9 月份, 但具体到

表 1 大型水库汛限水位调整方案

大型水库	主汛期		过渡期		后汛期	
	汛限水位/m	相应库容/ 亿 m ³	汛限水位/m	相应库容/ 亿 m ³	汛限水位/m	相应库容/ 亿 m ³
岳城水库	134.0	1.98	141.0	4.05	145.0	5.45
漳泽水库	901.0	0.87	901.0	0.87	902.4	1.25
后湾水库	917.0	0.35	919.5	0.45	921.0	0.52
关河水库	987.9	0.13	989.0	0.20	992.4	0.41
小南海水库	160.0	0.17	168.0	0.34	173.0	0.48
盘石头水库	235.6	1.43	248.0	2.45	254.0	3.05

表 2 近期调水方案下各评价单元增加的可供水量

评价单元	增加的可供水量/万 m ³	评价单元	增加的可供水量/万 m ³
漳卫河山区晋中	0	漳卫河山区鹤壁	9 120
漳卫河山区长治	0	漳卫河平原鹤壁	13 680
漳卫河山区晋城	0	漳卫河山区新乡	7 667
漳卫河山区邯郸	5 407	漳卫河平原新乡	9 909
漳卫河平原邯郸	6 563	漳卫河山区焦作	7 277
漳卫河山区安阳	7 904	漳卫河平原焦作	5 447
漳卫河平原安阳	7 432		

每座水库,其汛期划分又有所差别。由于本文水资源调配模型供需水计算的时间尺度是以月为单位,为简便起见,特别规定主汛期为7月,后汛期为9月,6月和8月为过渡期,参照各水库运行参数,各分期流域主要大型水库汛限水位调整方案见表1。

(3) 现状年、地下水超采 20% 方案

在方案1的基础上,将地下水开发利用限值由可开采量上调为超采 20%,调整模型约束条件重新进行优化运算,作为方案3。

(4) 近期中线调水方案

考虑南水北调中线工程实施以后流域内增加的可供水量,同时根据人口、工业增长预测对规划年生活、工业需水量进行相应调整,作为方案4。漳卫河流域可获得约 $8.04 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的调水量,各工程受益区增加的可供水量如表2所示。根据外调水优先供应生活和工业、兼顾农业用水的原则,在水资源调配模型中,先将外调水分配给工业和生活使用,如有剩余则放在水库或引水节点,与本地水资源一起调配使用。

(5) 近期中线调水、地下水超采 10% 方案

在方案4的基础上,允许地下水最高可超采 10%,作为方案5。

3.2 不同情景方案下的干旱应该能力对比分析

3.2.1 不同水库运行方式下干旱应对能力对比

通过对比前两种情景方案下漳卫河流域及各计算单元的缺水率和水利工程应对干旱能力水平指数,即可得出不同水库运行方式对流域干旱应对能力的影响。在现状水利工程条件下采用固定汛限水位,经模型长系列优化调算,在统计时段 1970—2000 年内,漳卫河流域平均年缺水量为

25 091 万 m³, 年均缺水率约为 5.54 %。而在现状水利工程条件下采用调整汛限水位方案,模型调算结果表明,1970—2000 年全流域平均年缺水量将达到 40 490 万 m³, 年均缺水率为 8.95 %。方案2与基准方案1对比,除了漳卫河山区焦作、山区新乡、平原新乡3个评价单元的年均缺水量略有减少外,其他单元的年均缺水量均有不同程度增加,尤其是漳卫河平原邯郸、山区安阳、平原安阳3个下游用水单元的缺水量显著增加(图2)。同时,方案2下漳卫河流域整体应对10年一遇、10~20年一遇、20~30年一遇、30~50年一遇、80~100年一遇等不同重现期的干旱的水平指数分别由方案1下的0.984、0.971、0.966、0.939、0.840降低至0.967、0.944、0.921、0.910、0.815(图3)。

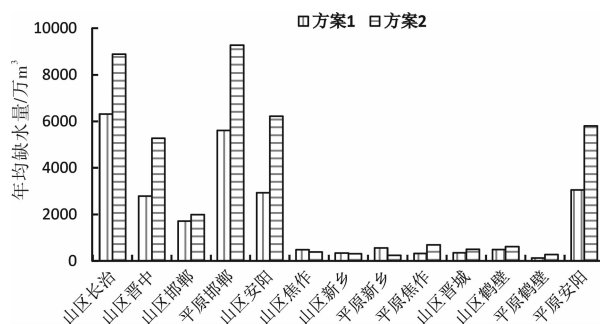


图2 不同水库汛限水位方案下流域各计算单元年均缺水量对比

一般认为,采用分期汛限水位,适当提高过渡期和后汛期防洪限制水位,可增加水库的蓄水量,增强水库的供水效益,因此应该对提高区域应对干旱能力有利。但采用方案2得到的结果却劣于方案1。以漳卫河山区长治为例,该评价单元是漳泽、后湾、关河三库供水直接受益区,调整汛

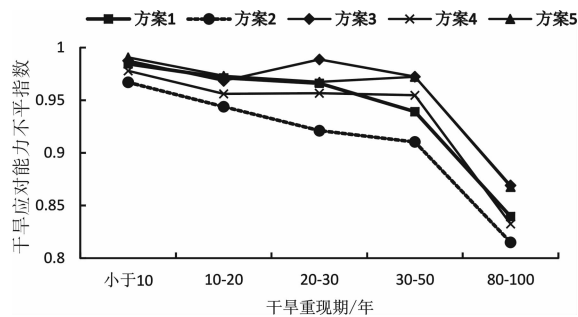


图3 5种情景方案下流域各计算单元干旱应对能力对比

限水位,减少汛期弃水量,理论上能增加水库的供水效益。但实际情况是:固定汛限水位下,水库年均供水量 12 204 万 m^3 ,引提水工程年均供水量 14 517 万 m^3 ;而调整汛限水位后,水库年均供水量 10 853 万 m^3 ,引提水工程年均供水量 13 194 万 m^3 。年均缺水量由 6 312 万 m^3 增加至 8 885 万 m^3 。就提高水库汛限水位,流域多数用水单元缺水增加的原因可从以下两个方面解释。一是漳卫河流域引、提水工程的供水能力很强,上游水库汛期降低水位产生的弃水会被下游的引提水工程再利用,所以水利工程群总的供水效益不会因为水库弃水而降低。相反,抬高汛限水位不仅会降低本单元的引、提水工程供水量,还对下游其它用水单元尤其是没有蓄水工程调节的用水单元供水影响较大。二是汛期雨量一般较为充沛,也是作物需水旺盛期。但在气候变化背景下,流域夏旱时有发生,根据 1956–2013 年的统计资料,漳卫河流域夏旱发生概率约为 30.9%^[10]。当夏旱发生时,水库提高汛限水位减少供水量,而水库下泄水量减少又对下游引提水工程供水量有较大影响,所以夏旱发生年份缺水量势必会增加。

3.2.2 不同水源供水方案对干旱应对能力的影响

通过对比方案 3、4、5 三种情景,可以得出相同水库运行方式下(固定汛限水位)采用不同水源供水方案对漳卫河流域干旱应对能力的影响(图 4)。方案 3 为现状水利工程条件下地下水允许超采 20%。与基准方案 1 相比,该方案下流域各评价单元 1970–2000 年平均缺水量均有较明显的减少,全流域年均缺水量减少至 15 374 万 m^3 ,减幅达 38.7%,流域年均缺水率为 3.39%。干旱应对能力水平指数也有一定的提高,尤其是应对 20~30 年一遇、30~50 年一遇和 50~80 年一遇等较严重的干旱事件,分别由 0.966、0.939、0.840 提高到 0.989、0.972、0.869。方案 4 是规划水平年南水北调中线调水方案。与方案 1 相比,中线调水实施以后,各工程受益区用水单元中除了漳卫河山区安阳、平原鹤壁、平原安阳因需水量同步增长,而导致缺水量有所增加以外,其他评价单元年均缺水量均有不同程度的减少,而流域上游非调水受水区的用水单元(漳卫河山区长治、山区晋中和

山区晋城)的缺水量则有一定程度的增加,流域总年均缺水量减少为 23 647 万 m^3 ,比基准方案下年均缺水量减少 1 444 万。方案 5 是规划水平年在中线调水方案的基础上再允许地下水超采 10%。与基准方案相比,该方案下各计算单元多年平均缺水量显著减少,流域年均总缺水量为 15 668 万 m^3 ,与方案 3 超采地下水 20% 方案下的缺水状况相当,漳卫河流域整体应对不同重现期的干旱事件的能力水平指数也基本与方案 3 的一致(见图 3)。

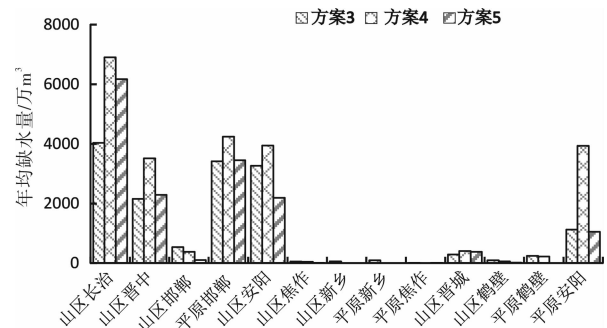


图4 不同水源供水方案下流域各计算单元年均缺水量对比

在上述三种水源供水方案中,方案 3 大量超采地下水是目前漳卫河流域水资源开发利用的常态,相对基准方案 1,地下水供水量由 170 193 万 m^3 增加到 190 743 万 m^3 ,虽然在一定程度上缓解了流域的干旱缺水状况,但是已经产生了较严重的环境地质问题^[11–12],是不可持续的。方案 4 中线调水方案对于解决流域的干旱缺水问题效果显著,同时也能通过外调水置换出一部分地下水供水量,但考虑到未来一定阶段内用水需求的刚性增长,仍需超采部分地下水量弥补用水缺口。因此,方案 5 是比较贴合规划水平年用水实际的供水方案。

4 结论

本文综合考虑水库汛期不同运行方式和可能的供水水源方案设置 5 种情景方案,并评价了不同方案下漳卫河流域年均缺水状况及应对不同程度干旱事件的能力,可以得出以下结论。

(1) 汛限水位调整或许能提高单个水利工程的供水效益,但对于整个区域水利工程群应对干旱的能力未必都是有利的。对于漳卫河流域而言,从干旱应对的角度,宜采用固定汛限水位。

(2) 地下水作为一种相对稳定的供水水源,对于缓解区域干旱缺水状况的作用是显著的,但超采地下水已经产生了较明显的生态环境问题,是不可持续的。南水北调中线工程是解决流域水资源紧缺问题的必然选择,地下水适宜作为应急水源使用。

(3) 中线调水对提高区域干旱应对能力、降低区域干旱风险的效果也是显著的,但在未来一定

发展阶段, 水资源需求的刚性增长是客观存在的。为应对未来调水实施以后个别用水单元仍然可能存在的用水缺口, 在较严重的干旱情景下超采部分地下水也是合理的。

参考文献:

- [1] Wanders N, Wada Y. Human and climate impacts on the 21st century hydrological drought[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, In Press, Corrected Proof, doi: 10. 1016/j. jhydrol. 2014. 10. 047.
- [2] Watts G, von Christerson B, Hannaford J, et al. Testing the resilience of water supply systems to long droughts[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 414–415: 255–267.
- [3] 王刚, 潘涛, 严登华, 等. 水利工程群应对干旱能力定量评价研究: 方法及案例[J]. *灾害学*, 2015, 30(2): 56–63.
- [4] Chang F J, Wang K W. A systematical water allocation scheme for drought mitigation[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 507: 124–133.
- [5] Wang G, Yan D H, Yang Z Y, et al. Drought-Coping Capacity Assessment of Water Resources Projects and Regulation: A Technological Framework and Key Issues for Research[J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 864: 2268–2277.
- [6] 刘丽丽. 基于风险的东阿水库汛限水位调整效益分析研究[D]. 济南: 山东大学, 2013.
- [7] 李景保, 巢礼义, 杨奇勇, 等. 基于洪水资源化的水库汛限水位调整及其风险管理[J]. *自然资源学报*, 2007, 22(3): 329–340.
- [8] 王刚, 严登华, 杜秀敏, 等. 基于水资源系统的流域干旱风险评价——以漳卫河流域为例[J]. *灾害学*, 2014, 29(4): 98–104.
- [9] 水利部长江水利委员会. 南水北调中线工程规划[R]. 武汉: 水利部长江水利委员会, 2001.
- [10] 王刚, 严登华, 申丽霞, 等. 近 55 年以来漳卫河流域干旱演变特征[J]. *南水北调与水利科技*, 2014, 12(4): 1–5, 29.
- [11] 钟华平, 卞锦宇, 李伟. 南水北调受水区地下水保护与修复措施[J]. *中国水利*, 2010, 7: 33–35.
- [12] 石建省, 王昭, 张兆吉, 等. 华北平原深层地下水超采程度计算与分析[J]. *地学前缘*, 2010, 17(6): 215–220.

Drought Coping Ability Assessment of Hydraulic Engineering Projects under Different Water Supply and Reservoir Operation Programs: A Case Study in Zhangwei River Basin

Wang Gang^{1, 2}, Pan Tao^{1, 3}, Qi Jun¹, Song Xinshan², Jin Xin⁴ and Weng Baisha⁵

(1. *Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection, Chinese National Engineering Research Center of Urban Environmental Pollution Control, Beijing 100037, China;*

2. *College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China;*

3. *School of Environmental Science and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China;*

4. *Hydrological Bureau of Liaoning Province, Shenyang 110003, China;* 5. *China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)*

Abstract: Considering both adjustment of reservoir limited water level and different water supply sources, five combined scenarios have been set. The water shortage situation of the Zhangwei River basin under different scenarios were analyzed according to the simulation results of water resources optimal allocation model, and based on the drought coping ability index of hydraulic engineering group (HEGdca), the overall drought coping ability of the basin for different scenarios was also assessed. The results show that raising the reservoir limited water level could reduce the drought coping ability of the whole basin. Both the programs of over-exploitation of groundwater and the South-to-North Water Diversion project can significantly reduce the drought risk. However, from the respective of ecological improvement and environmental protection, inter-basin water transfer is an inevitable choice to solve the problem of drought and water shortage in the study basin. For the Zhangwei River basin, fixed reservoir limited water level should be adopted to cope with droughts. It is a reasonable pattern of water resources utilization in line with the local conditions that making full use of transferring water as well as part over-exploited groundwater for a certain development stage.

Key words: hydraulic engineering projects; drought; coping ability; flood control level; water supply source; multi-program comparison; Zhangwei River basin