

气候变化和水库运行对径流影响的定量研究

毕彦杰, 赵勇, 肖伟华, 吴迪, 周翔南, 张守平

(中国水利水电科学研究院 水资源研究所 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘要: 将流域水循环模型 SWAT 模型和区域气候模型 RegCm³ 进行单向耦合, 构建流域水循环综合模拟平台, 并在澜沧江上中游地区进行了应用。分别考虑气候变化(温度、降水)和水库运行的影响, 通过与天然情景进行对比分析, 定量研究了气候变化和水库运行在下游径流变化中所占的比重。结果表明: 未来 20 年内, 无论是气候变化还是水库运行都将导致澜沧江下游径流减少, 其中气候变化的贡献率则达到 88%, 而水库运行的贡献率仅占 12%, 气候变化是造成澜沧江下游径流减少的最主要原因。而在气候变化的因子中, 温度变化的贡献率占到 81%, 降水变化的贡献率仅为 19%, 因此温度是造成径流变化的所有因子中最重要的影响因子。水库运行对下游径流的影响主要体现在年内变化上, 即“削峰补枯”作用, 而对年际变化的影响不明显。

关键词: 气候变化; 人类活动; SWAT 模型; 区域气候模型 RegCm³; 澜沧江

中图分类号: P333 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)01-0029-05

Quantitative research on the effects of climate change and human activity on runoff

BI Yan jie, ZHAO Yong, XIAO Wei hua, WU Di, ZHOU Xiang nan, ZHANG Shou ping
(State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin,
China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: The basin water cycle model SWAT and regional climate model RegCm³ were coupled to develop the comprehensive simulation platform of basin water cycle, which was applied in the upper and middle reaches of the Lancang-Mekong River. Compared with the natural conditions, the effects of climate change (temperature and precipitation) and reservoir operation on the runoff in the lower reach were investigated quantitatively. The results showed that both climate change and reservoir operation can decrease the runoff in the lower reach of the Lancang-Mekong River in the next twenty years, with the contribution rate of 88% from climate change while 12% from reservoir operation. Climate change is the main reason to cause the decreasing of runoff in the lower reach, with the contribution rate of 81% from temperature variation while 19% from precipitation variation. Consequently, temperature is the most important factor to affect the runoff in the lower reach of the Lancang-Mekong River. The effects of reservoir operation on the runoff had significant variations within a year, but insignificant variations between different years.

Key words: climate change; human activity; SWAT model; regional climate model RegCm³; Lancang-Mekong River

1 研究背景

变化环境下水循环演变规律的研究是当前人们研究的热点^[1-2]。在气候变化和人类活动的双重影响下, 陆面水循环的演变规律正在发生着深刻的变化, 其中如何定量区分气候变化和人类活动在陆面水循环变化过程中所占的比重, 不仅是水循环领域亟待解决的科研问题, 也是相关管理部门正在面临的现实问题。对于跨国河流来说, 因涉及到

不同国家的利益, 其水资源的公平合理利用不仅影响到我国西部地区的可持续性发展, 而且关系到我国与毗邻国的睦邻友好、国际区域合作以及这些国家未来的可持续性发展^[3]。以澜沧江流域为例, 2010 年我国西南及东南亚地区出现了极为罕见的严重干旱, 国外有观点认为是中国上游修建水库是澜沧江下游干旱的主要原因, 一度对我国西南地区水利事业的发展造成不利影响。因此定量研究气候变化和上游水库运行对下游径流变化的影响程度就变得十分

收稿日期: 2014-11-02 修回日期: 2014-11-11 网络出版时间: 2014-12-03

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20141203.1358.025.html>

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2010CB951100);“十二五”国家科技支撑计划基金资助项目(2012BAC19B03)

作者简介: 毕彦杰(1986-), 男, 博士研究生, 主要从事流域水循环机理研究及模型开发。E-mail: 835938470@qq.com

必要和迫切。

本文在吴迪^[4]等人的研究基础上,以 SWAT 模型为基础,单向耦合区域气候模型 RegCm³,构建流域水循环综合模拟平台,分别定量研究澜沧江中上游气候变化不同因子(如温度、降水等)以及水库运行在不同情景下对下游径流的影响,并与天然情景进行对比分析,最终得出不同因子在径流变化的成因中所占的比重,为变化环境下的流域水循环研究及跨界河流的水资源管理等问题提供参考。

2 区域概况

澜沧江-湄公河发源于中国青藏高原唐古拉山北麓,流域总面积约 80 万 km²,从河源至河口全长约 4 880 km,平均比降为 1.03‰,河口多年平均流量 4 750 亿 m³。澜沧江流域山峦重叠,流域内气候差异很大。流域水资源主要靠大气降水、高山冰雪融水和地下水补给,上游地区主要靠冰雪融水补给^[5]。

3 研究方法

3.1 SWAT 模型

SWAT 模型是一个概念模型和物理模型相结合的半分布式水文模型^[6,8],其模拟思路如下:先根据地表高程、子流域、土地利用、土壤分布等将研究区域分为若干个水文响应单元 HRU;然后在每一个子流域上或 HRU 上应用传统的概念性模型来推求净雨,再进行汇流计算,最后求得流域的出口断面流量^[9-14]。

SWAT 模型在时间序列上是一个连续模型,能够进行长期的模拟,既可进行年过程的模拟也可以进行月或日过程的模拟,计算效率较高。从空间尺度来说,SWAT 模型更适用于大流域地区的模拟应用^[15]。

3.2 区域气候模型 RegCm³

气候模型分区域气候模型和全球气候模型两种,其中,区域气候模型具有较高的分辨率,能够描述区域内地表特征、中小尺度地形和其它因子对区域气候变化的强迫和影响。本文结合研究区的实际情况采用了区域气候模型 RegCm³进行模拟,并通过与陆面水循环模型 SWAT 的耦合,最终构建了流域水循环综合模拟平台,为研究气候变化条件下的流域水循环演变规律奠定了基础^[4]。

4 模型的数据输入

4.1 模型基本数据输入

(1) DEM 数据。来自美国地质调查局(USGS),分辨率为 1 km × 1 km。

(2) 气象及水文数据。气象数据来自美国气象中心数据集资料 GSOD(<ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/g sod/>),共 17 个气象站点 1990 年-2010 年逐日气象数据(气象站点分布图略);水文数据选取琅勃拉邦水文站 1990 年-2007 年逐月径流量,进行模型的率定和验证。

(3) 土地利用 LUCC。土地利用资料由湄公河委会提供,比例尺为 1:1 120 000。

(4) 土壤数据。土壤空间分布图来自于中国科学院南京

土壤所,利用 Spaw 软件将土壤参数转换成美国标准,并将其加入 USERSOIL 数据库中。

(5) 子流域的划分和水文响应单元 HRU 的确定:根据研究实际情况,模型将流域划分成 160 个子流域和 543 个水文响应单元。

(6) 水库数据。研究区主要水库有漫湾、小湾、大朝山、糯扎渡、景洪五个水库(水电站分布图略)。

4.2 未来温度和降水输入数据

由于气候模式输出结果存在不确定性,国内外通常采用差值方法,进行气候变化对未来水资源影响研究。具体是计算区域气候模式基础(1980 年-2009 年)和未来(2010 年-2039 年)两个时段三十年月平均温度和降水多年平均值的差值,将其作为未来的气候变化量,再将该变化叠加到 1990 年-2009 年逐日观测温度和降水序列上,作为模型未来(2010 年-2029 年)气候变化的输入数据^[4]。

5 模型的率定和验证

本文采用相关系数 R^2 和纳什效率 E_{ns} 系数来对 SWAT 模型进行参数率定和验证。以琅勃拉邦实测流量数据为基准,率定期选取 1990 年-1998 年,验证期选 1999 年-2007 年,经分析发现率定和验证结果都能满足评价要求(见表 1 及图 1)。

表 1 模型率定及验证结果

Tab. 1 Model calibration and verification

| 时期 | 相关系数 R^2 | Nash 系数 E_{ns} |
|-----|------------|------------------|
| 率定期 | 0.84 | 0.79 |
| 验证期 | 0.88 | 0.81 |

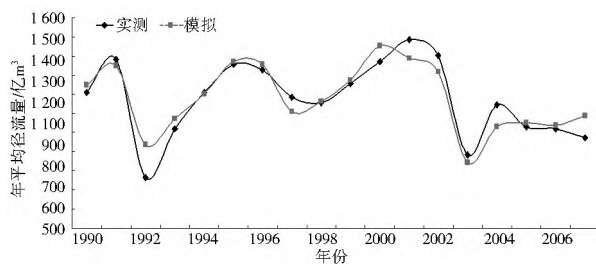


图 1 琅勃拉邦水文站年模拟与实测年径流量对比

Fig. 1 Comparison of simulated and measured runoff at the Langbolabang station

6 气候变化和水库运行对河道径流的影响分析

6.1 气候变化对径流的影响分析

为了深入的研究气候变化过程中温度和降水对流域径流的影响,模型将气候变化分为三种情景进行考虑:气候变化综合情景(同时考虑温度和降水的变化)、仅温度变化情景、仅降水变化情景。在这里,不考虑人工干扰作用的情景,即认为流域径流过程是没有人工干预(水库调度、人工取水等)的天然情景。模型选择琅勃拉邦水文站的径流过程进行对比分析,结果如下。

情景 N: 气候变化综合情景。未来二十年气候变化将导

致澜沧江流域径流量减少,琅勃拉邦水文站多年平均径流量与天然径流相比减少4%(如图2),影响较为显著。

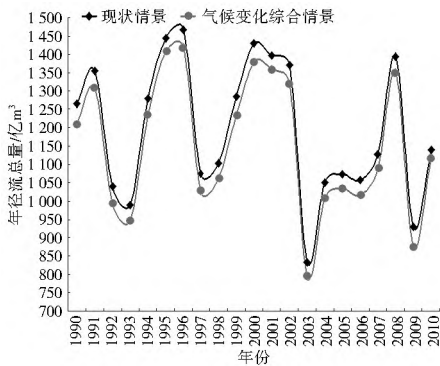


图2 情景N模拟结果对比

Fig. 2 Comparison of simulated and actual runoff under scenario N

情景O:仅降水变化情景。未来二十年气候变化将导致琅勃拉邦径流量略微减少,减少幅度为0.5%(如图3),变化不明显。

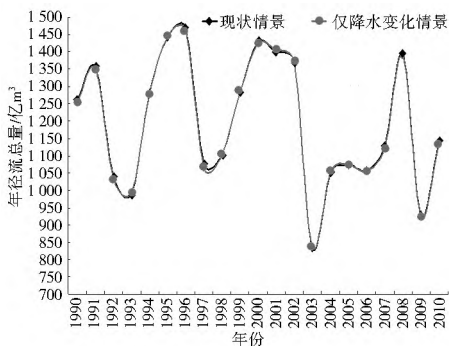


图3 情景O模拟结果对比

Fig. 3 Comparison of simulated and actual runoff under scenario O

情景O:仅温度变化:未来二十年气候变化将导致琅勃拉邦径流量呈明显减少趋势,减少幅度为3%(如图4)。

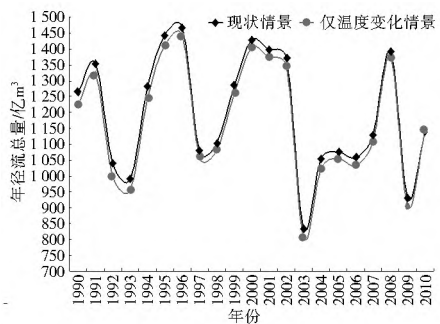


图4 情景O模拟结果对比

Fig. 4 Comparison of simulated and actual runoff under scenario O

分析发现,三种情景均导致流域径流减少,即未来的气候变化对径流的影响整体呈减少趋势,与吴迪等人的研究结果相符合^[2]。在气候变化的影响因子中,温度的贡献率为81%,而降水的贡献率为19%,相对而言,温度变化对径流的影响更为显著。

6.2 水库运行对径流的影响分析

研究区中的人类活动主要是水库的修建及运行,由于在现状模拟时段中,景洪、小湾、糯扎度等水库尚未建成,因此

本文分两种情景考虑人类活动的影响:第一种是现状情景,分析现状情景下已建成的水库对下游径流的影响;第二种是未来情景,考虑未来模拟时段内所有水库全部运行时对下游径流的影响,包括规划建设的水库。

情景N:仅考虑已建成水库运行的情景。已建成水库包括漫湾、大朝山水库。分析发现,漫湾和大朝山两个水库的运行使下游年均径流量略微减少,减少幅度仅为0.1%,影响非常小(如图5)。

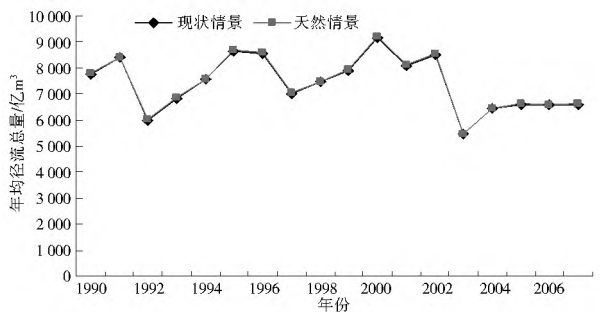


图5 情景N模拟结果

Fig. 5 Simulated results under scenario I

情景O:考虑未来所有水库均运行的情景。未来二十年当漫湾、小湾、糯扎渡、景洪、大朝山等五大水库全部投入运行之后,琅勃拉邦水文站年均径流相比天然情景减少了0.5%,相比情景N的0.1,减少幅度略有增加。但与气候变化所造成的4%的降幅相比,依然是非常小的(图6)。

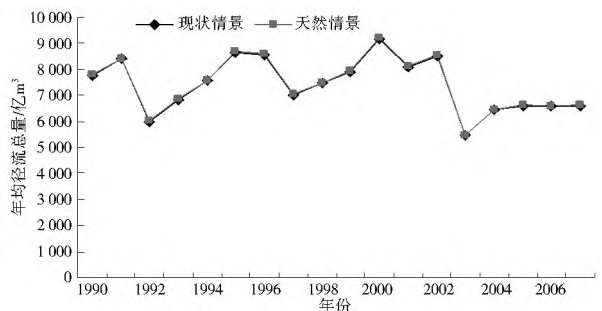


图6 情景O模拟结果对比

Fig. 6 Simulated results under scenario II

水库运行对下游径流的影响主要体现在年内径流调节方面,以情景N为例分析如下。

(1) 汛期(5月-10月)。

琅勃拉邦水文站1992年(漫湾水库于1992年投入运行)以前年径流量在与天然径流相比没有变化;漫湾水库运行以后,下游汛期水量略有减少,1992年-2001年汛期平均流量由6305 m³/s减少为6250 m³/s,减少了55 m³/s,减少幅度为0.8%(图7)。大朝山水库在2002年运行以后,琅勃拉邦水文站2002年-2007年汛期平均流量由5580 m³/s减少为5490 m³/s,减少了90 m³/s,减少幅度为1.6%。总体来说,由于澜沧江干流汛期径流量较大,且已建成的漫湾、大朝山等水库库容有限,因此上游水库运行对琅勃拉邦汛期径流量影响不大,水库的“削峰”作用不太明显,不过随着小湾、糯扎度、景洪等水库的相继运行,水库调蓄作用逐渐增大,“削峰”作用也逐渐增强。

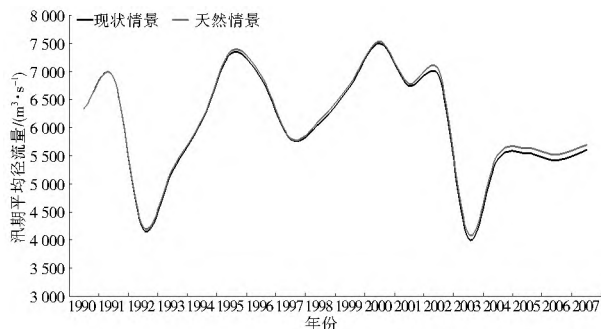


图 7 情景 I 汛期平均径流量对比分析

Fig. 7 Comparison of actual and natural runoff under scenario I during the flood period

(2) 非汛期(11 月- 4 月)。

由于非汛期的径流基数较小,上游水库的调蓄作用对下游径流的影响较大。琅勃拉邦水文站在 1993 年- 2002 年平均流量由 $1\,430\text{ m}^3/\text{s}$ 增加到 $1\,480\text{ m}^3/\text{s}$, 增加幅度为 3.2% (如图 8); 2003 年- 2007 年非汛期平均流量由 $1\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 增加到 $1\,095\text{ m}^3/\text{s}$, 增加幅度为 9.6%。相对于汛期来说,水库的调蓄作用相对较大,“补枯”作用较为明显。

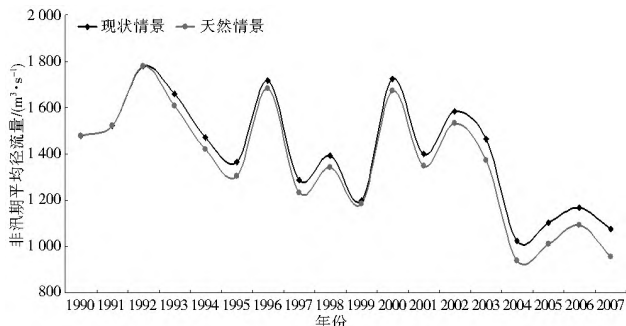


图 8 情景 I 非汛期平均径流量对比分析

Fig. 8 Comparison of actual and natural runoff under scenario I during the non-flood period

通过与气候变化情景的对比分析发现,在澜沧江径流减少的所有影响因子中,人类活动的贡献率仅占 12%,气候变化的贡献率则达到 88%,因此可以说气候变化是造成径流变化的最主要原因。而在气候变化的影响因子中,温度是未来澜沧江下游径流变化的最要的影响因子。

7 结论

本文以澜沧江中上游为研究对象,通过耦合流域水循环模型 SWAT 和区域气候模型 RegCm3,建立了水循环综合模拟平台,并分别定量研究气候变化和水库运行对下游径流的影响,得到以下结论。

(1) 未来二十年气候变化将导致澜沧江流域径流量减少,琅勃拉邦水文站多年平均径流量与天然径流相比减少 4%;其中当仅有降水变化时,径流只有略微减少,减少幅度为 0.5%,变化不明显;而当仅有温度变化时,径流减少 3%,相对而言,温度变化对径流的影响更为明显(注:上述结论均建立在未来时段内人类活动(如水库运行等)不发生变化的情境下)。

(2) 水库对径流的影响主要体现在年内季节变化上,年

际变化不大。但是随着水库的相继投入运行,下游径流量相比天然径流会有所减少。当漫湾和大朝山投入运行后,年均径流量相比天然径流减少了 0.1%;而当全部水库都投入运行后,流域年均径流量约减少 0.5%,减少幅度略有增加,但相比总径流而言依然不大。

(3) 在汛期,水库的“削峰”作用不太显著;在非汛期,由于澜沧江非汛期径流量相对较小,因此水库的调蓄作用相对较大,“补枯”作用较为明显。

(4) 在澜沧江径流减少的所有影响因子中,水库运行的贡献率仅占 12%,气候变化的贡献率则达到 88%,因此气候变化是造成径流变化的最主要原因。而在气候变化的影响因子中,温度变化的贡献率占到 81%,降水变化的贡献率为 19%。可以说温度是澜沧江下游径流变化的最要的影响因子。

总之,气候变化和人类活动对水循环影响的定量研究是一个复杂的问题,由于研究区域的特殊性,在气候变化中,本文仅考虑了温度和降水的变化,未来将开展所有水文要素的影响分析;而在人类活动中也仅考虑了水库运行的影响,土地利用变化、人工取水等其他因子的变化对水循环的影响也是下一步需要研究的重点。

参考文献(References):

- [1] Wanli Shi, Xuezhong Yu. Spatial and temporal variability of daily precipitation concentration in the Lancang River basin, China[J]. Journal of Hydrology, 2013, 495(3): 197-207.
- [2] Feifei Wu, Xuan Wang. Spatiotemporal analysis of temperature variation patterns under climate change in the upper reach of Mekong River basin[J]. Science of the Total Environment, 2012, 428(3): 208-218.
- [3] 尤卫红,何大明,索渺清. 澜沧江的跨境径流量变化及其对云南降水量场变化的响应[J]. 自然资源学报, 2005, 20(3): 363-369. (YOU Weir hong, HE Da ming, SU O Miao qing. Trans-boundary flow change of the Lancang River and its response to the variation of precipitation field over Yunnan[J]. Journal of Natural Resources, 2005, 20(3): 363-369. (in Chinese))
- [4] 吴迪,赵勇,裴源生,等. 气候变化对澜沧江上中游的影响研究[J]. 自然资源学报, 2013, 28(9): 1569-1582. (WU Di, ZHAO Yong, PEI Yuan sheng, et, al. Climate change and its effects on runoff in upper and middle reaches of Lancang Mekong river[J]. Journal of Natural Resources, 2013, 28(9): 1569-1582. (in Chinese))
- [5] 周婷,于福亮,李传哲,等. 湄公河清盛站水文情势变化分析[J]. 水电能源科学, 2011, 29(11): 15-18. (ZHOU Ting, YU Fu liang, LI Chuan zhe, et, al. Analysis of hydrological regime changes of chiang saen station in Mekong River[J]. Water Resources and Power, 2011, 29(11): 15-18. (in Chinese))
- [6] 代俊峰,崔远. 基于 SWAT 的灌区分布式水文模型—N. 模型构建的原理与方法[J]. 水利学报, 2009, 40(2): 145-153. (DAI Jun feng, CUI Yuan. Distributed hydrological model for irrigation area based on SWAT—N. Principle and method[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(2): 145-153. (in Chinese))
- [7] 代俊峰,崔远. 基于 SWAT 的灌区分布式水文模型—O. 模型

- 应用[J]. 水利学报, 2009, 40(3): 311-319. (DAI Jur feng, CU I Yuan. Distributed hydrological model for irrigation area based on SWAT — 0. Model application[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(3): 311-319. (in Chinese))
- [8] Zhang Xuesong, Hao Fanghua. Application Of SWAT Model In The Upstream Watershed Of The Luohe River [J]. Chinese Geographical Science, 2003, 13(4): 334-339.
- [9] Lir jing Qiu, Ferr li Zheng, Rur sheng Yin. SWAT-based runoff and sediment simulation in a small watershed, the loessial hill-y-gullied region of China: capabilities and challenges[J]. International Journal of Sediment Research, 2012, 40(2): 188-194.
- [10] Saleh A, Arnold J G, Gassman P W, et al. Application of SWAT for the upper north Bosque river watershed [J]. Transactions of the ASAE, 2000, 43(5): 1077-1087.
- [11] Arnold J G, Srinivasan R, Mutiah R S, et al. Large Area Hydrologic Modeling and Assessment. Part I, Model Development [J]. Journal of the American Water Resource Association, 1998, 34(1): 73-89.
- [12] Khalil Ahmad, Philip W G, Ramesh Kanwar . Evaluation of the Tile Flow Component of the SWAT Model under Different Management Systems [R]. Working Paper 02-WP 303, June 2002, www . card.iastate . edu. 2002 .
- [13] Gosain A K, Sandhya Rao, Srinivasan R, et al . Return flow assessment for irrigation command in the Palleru river basin using SWAT model [J]. Hydrological Processes, 2005, 19(3): 673-682 .
- [14] 桑学峰, 周祖昊, 秦大庸, 等. 改进的 SWAT 模型在强人类活动地区的应用 [J]. 水利学报, 2008, 39(12): 1377-1383. (SANG Xue feng, ZHOU Zir hao, QIN Da yong, et al. Application of improved SWAT model to area with strong human activities [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(12): 1377-1383. (in Chinese))
- [15] Molden D, Sakthivadivel R. Water accounting to assess use and productivity of water [J]. Water Resource Development, 1999, 15(12): 55-71.

《河北省水文站名览》新书内容介绍

由河北省水文水资源勘测局编写的《河北省水文站名览》一书, 2014年10月由河北科学技术出版社出版发行。

《河北省水文站名览》一书, 收集了从清朝末期(清光绪4年)以来, 在河北省(原直隶省)境内的水文站设立、发展及沿革过程。主要内容包括河北省水文站网及管理机构沿革、水文站网类别、站网分布与河道特征值、水文站网规划与监测技术、水文站功能评价、各流域水系水文站网分布情况、河北省水位站、临时调水水文站等。该书是对河北省开展水文监测以来水文发展的系统性总结, 准确、客观、系统地反映水文工作的发展与演进过程, 可作为历史资料保存和应用, 对研究水文发展史、水文科学在不同历史时期的发展变化, 有重要的参考价值。可供从事水文、水利工作的科技人员阅读和使用, 也可作为水文科研、规划设计、教学科研等部门参考用书。

水利部副部长刘宁、河北省水利厅副厅长为该书作序, 对该书给与高度评价, 《河北省水文站名览》具有十分重要的承鉴水文站沿革, 启推水文事业发展的历时意义和现实需求。