

气候变化对南水北调中线工程可调水量的影响

孟 猛 刘敬明 孟 冲 石兰君

河南省地质局生态环境地质服务中心, 河南 郑州 450000

[摘要]为探析气候变化对南水北调中线工程可调水量的影响,文章依据 IPCC 第四次气候评估报告提供的多种情景下气候变化模拟成果,采用 SWAT 模型对汉江丹江口水库以上的汉江上游水文过程进行模拟,根据调度模型预测未来 50 年间南水北调中线工程可调水量的变化趋势。结果表明,气候变化导致可调水量在 1984 年~2011 年期间下降了 7.36%,此后在不同气候情景下的可调水量变化趋势不同,其中在高温温室气体排放情景下可调水量到 2060 年将有 6.86~9 亿 m³ 的升高,而在低温温室气体排放情景下可调水量趋势呈平稳波动。

[关键词]南水北调中线工程; 气候变化; SWAT 模型; IPCC; AR4; 可调水量

DOI: 10.33142/aem.v5i10.10030

中图分类号: P333.1

文献标识码: A

Impact of Climate Change on the Adjustable Water Volume of the Middle Route Project of the South to North Water Diversion Project

MENG Meng, LIU Jingming, MENG Chong, SHI Lanjun

Ecological Environment Geological Service Center of He'nan Geological Bureau, Zhengzhou, He'nan, 450000, China

Abstract: In order to explore the impact of climate change on the adjustable water volume of the Middle Route Project of the South to North Water Diversion, the article uses the SWAT model to simulate the hydrological process of the upper reaches of the Hanjiang above the Danjiangkou Reservoir, based on the climate change simulation results provided by the IPCC's fourth climate assessment report, and predicts the trend of the adjustable water volume of the Middle Route Project of the South to North Water Diversion in the next 50 years based on the scheduling model. The results indicate that climate change led to a decrease of 7.36% in adjustable water volume between 1984 and 2011. Subsequently, the trend of adjustable water volume change varies under different climate scenarios, with an increase of 686-900 million m³ in adjustable water volume under the high-temperature chamber gas emission scenario by 2060, while the trend of adjustable water volume fluctuates steadily under the low greenhouse gas emission scenario.

Keywords: middle route project of the South to North Water Diversion Project; climate change; SWAT model; IPCC; AR4; adjustable water volume

引言

全球温室效应除驱动气候变暖外,也将引起降水、蒸发、径流等水文要素的变化,从而改变区域水量平衡。如:除东亚地区的北半球中高纬度陆地降水量继续增加(约每 10 年增加 0.5%~1.0%);全球范围的冰川持续退缩,并引起以冰川径流作为供水源的地区的水源短缺;水文气象极端事件增加,中纬度地区近 50 年暴雨的发生频率增加了 2%~4%,中低纬度地区夏季的极端干旱事件增加。

南水北调中线工程地跨河南、河北、北京、天津 4 个省、直辖市,设计年调水量 141.4 亿 m³,使沿线 6000 万人口受益。对受水区的经济、民生、生态环境都有着重要的意义。然而,气候变化将造成南水北调中线工程水源区——汉江上游流域来水情势发生变化,进而影响到中线工程的可调水量和工程效益发挥。因此,有必要进行结合气候变化数据对汉江上游进行的可调水量计算研究。

本文利用不同的 GCMs 模型模拟的丹江口水库上游月降水和气温序列,采用 SWAT 水文模型对丹江口水库入库径流量的模拟结果,结合历史调度过程定量估算气候变化

对可调水量的影响,旨在为气候变化下南水北调中线工程的管理运行提供借鉴和参考。

1 研究区域及数据资料

1.1 研究区域

汉江是长江中游北岸最大的支流,发源于秦岭南麓米仓山西端。干流流经陕西、湖北两省,于武汉市汇入长江,全长 1577km,流域面积 15.9×10⁴km²。丹江口大坝以上为上游,全长 925km,占汉江总长的 59%,控制流域面积 9.52×10⁴km²。上游 79%为中低山地地形。属北亚热带边缘湿润季风气候区,气候温和,四季分明,雨量充沛,无霜期长,多年平均气温约 16℃,年平均降水量 700~1000mm,呈上游向下游递增趋势,而且水量在年内分配严重不均。汛期一般从 5 月份开始,10 月份结束,在 7~9 月,由于太平洋副热带高压发展强盛,加上西南低涡及强台风影响,造成该流域降雨集中,易形成洪涝灾害^[1]。

丹江口水库为汉江中、上游的分界,是南水北调中线工程的水源地,由 1973 年建成的丹江口大坝下闸蓄水后形成,多年平均入库水量为 394.8 亿 m³,水库水域面积将

达 1022.75km², 蓄水量达 290.5 亿 m³, 是亚洲第一大人工淡水湖。南水北调中线工程从丹江口水库陶岔闸引水, 近期年调水量 95 亿 m³, 远期调水量 130 亿 m³。丹江口大坝坝顶加高工程于 2013 年建成, 2014 年中线工程正式通水运行, 正常最高蓄水位为 170m, 最低退水位为 160 m。研究区域及水文站点分布见图 1^[2]。

1.2 数据资料

(1) 水文气象数据。本研究中实测期气象数据包括日平均气温、日最高气温、日最低气温、平均风速、相对湿度、日照时间和降水数据。数据来源于中国气象数据网, 数据长度为 1960~2010 年的连续日过程数据。气象站覆盖全流域, 共计 14 个气象站点。流域水文数据为安康、荆紫关、白河三个水文站点 1960~2010 年的日观测数据。研究区域及水文站点分布见图 1。

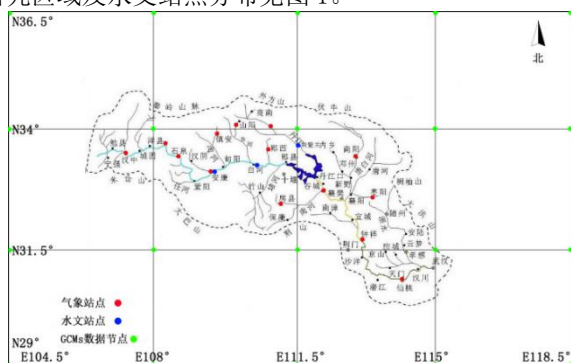


图 1 研究区水文气象站点及 GCMs 数据节点分布

(2) 地形、土地利用、植被等数据。流域分布式水文模型的建立需要包括地形、土地利用、土壤、植被等地理信息。本研究中的 DEM (Digital Elevation Model) 数据来源于地理空间数据云下载, 利用 Arc GIS 对原始数据进行拼接和裁剪等操作, 得到分辨率为 100×100 m 栅格数据。土壤数据来源于中国科学院南京土壤研究所土壤数据库下载得到 1: 100 万土壤图。土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn>), 比例尺为 1:10 万。土地利用在中国国家标准三级分类的基础上, 对土地利用数据进行再分类, 分类后的土地类型包括水田、旱地、林地、草地、水域、城镇用地和未利用地共七种。

(3) GCMs (Global Climate Models) 资料。IPCC 第四次评估报告收集了 23 个全球大气环流模型 9 种不同排放情景下的模拟结果。本文选取其中 CM1、CGCM3、CM3、FGOALS-g1.0、E-H 五个来自不同机构常用的 GCMs 模型, 各模型都包含四种气候情景: A2 情景 (全球人口不断增加, 区域性经济增长较为缓慢和分散)、A1B 情景 (能源结构在化石能源与清洁能源之间平衡的状况下, 全球经济高速增长)、B1 情景 (人口高速增长, 但经济结构向服务和信息经济转变, 引入清洁能源和资源节约技术)、1PT02X

情景 (温室气体以 1%增长的速度从前工业时期直到浓度变为 2 倍)。数据均来自于 IPCC 数据中心 (<http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk>), 模拟的气象要素包括近高空气温、地表气温、纬向风速、经向风速、相对湿度、平均降水等, 时间尺度为月, 数据序列从 2010~2070 年, 统一插值到 3.5°×2.5° 的网格分辨率上^[3]。

2 研究方法

2.1 水文序列划分方法

为寻找划分气候变化前后的关键时间点, 本文采用 Mann-Kendall 非参数统计检验方法来分析年气温、年降水序列的变化趋势和突变情况。根据检测出的径流突变点可将研究期划分为天然期和突变期。其中天然期流域受气候变化影响较为微小, 而突变期气候变化对流域产生显著影响。

Mann-Kendall 检验法是世界气象组织推荐并广泛使用的非参数检验方法, 主要用于气候要素在时间序列趋势中的突变性检测。该方法的优点在于不需要样本遵从一定的分布, 不受少数异常值的干扰, 且计算简便[4]。

2.2 大气环流模式降尺度方法

由于现有的大气环流模式 (General Circulation Models, GCM) 对气候变化模拟结果的空间分辨率较低, 而无法较准确地模拟区域尺度下的气候变化情况, 需要对 GCMs 模拟结果进行降尺度。本文采用主成分分析结合多元线性回归法 (EOF-MLR), 建立汉江上游气象要素与大气环流因子之间的函数统计关系。即首先以主成分分析法从包含 11 个大气环流因子 (见表 1), 覆盖 20 个数据格点的 11×20 个预报因子列进行数据降维, 将多维的预报因子简化为低维的主分量。之后建立区域实测气象要素与选取的主分量间的多元线性回归模型, 并以验证期的实测气象序列进行检验。将 IPCC 数据中心提供 5 个不同的 GCMs 模型的模拟结果的降尺度结果进行比较, 选取最优的 GCMs 模型应用于本研究中。

表 1 用于统计降尺度的气候因子

序号	因子简称	因子物理意义	单位
1	hgt500	500hPa 位势高度	m
2	rhum500	500hPa 相对湿度	%
3	ta500	500hPa 温度	℃
4	uwnd500	500hPa 纬向风速	m/s
5	vwnd500	500hPa 经向风速	m/s
6	hgt850	850hPa 位势高度	m
7	rhum850	850hPa 相对湿度	%
8	ta850	850hPa 温度	℃
9	uwnd850	850hPa 纬向风速	m/s
10	vwnd850	850hPa 经向风速	m/s
11	slp	海平面气压	mbar

2.3 SWAT 水文模型

采用 SWAT (Soil and Water Assessment Tools) 模型, 输入降尺度后的气候数据, 对汉江上游径流过程进行模拟。SWAT (Soil and Water Assessment Tools) 是 1994 年由美国农业部 (USDA) 农业研究局 (ARS) 开发的面向大中流域、长时间尺度的分布式流域尺度模型。用于模拟在具有不同土壤、土地利用方式和管理条件下的复杂流域内土地管理措施对水资源、泥沙、非点源污染等的长期影响, 也被用来有效模拟流域气候变化对水文循环的影响^[5]。

2.4 可调水量计算方法

丹江口水库调度模型如下:

$$V_t = V_{t-1} + Q_R \times \Delta t + V_h - V_{sh} - V_{zh} - V_x - V_d \quad (1)$$

式中: V_t 为 t 时刻库容, V_{t-1} 为 $t-1$ 时刻库容, Q_R 为 Δt 期间天然入库流量; V_h 为 Δt 期间上游回归水量; V_{sh} 为 Δt 期间上游耗水量; V_{zh} 为 Δt 期间库面蒸发水量; V_x 为 Δt 期间下泄水量; V_d 为 Δt 期间调水量。各项数据来自于各地市公布的水资源公报, 或由当地经济社会、自然条件统计数据计算。

上游回归水量 V_h :

$$V_h = \sum(V_{dl} \times \alpha_1 + V_y \times \alpha_2 + V_g \times \alpha_3) \quad (2)$$

式中: α_1 、 α_2 、 α_3 分别为各地电力、一般工业、灌溉用水回归系数, 查阅自各地水资源公报。

上游耗水量 V_{sh} :

$$V_{sh} = \sum(V_{dt} + V_y + V_t + V_q) \quad (3)$$

式中: V_{dt} 为电力工业需水量; V_y 为一般工业、生活需水量; V_t 为农业灌溉需水量; V_q 为牲畜等其他需水量。数据来源为汉江流域各地市公布的水资源公报。

③下泄水量 V_x :

$$V_x(i, j) = V_n(i, j) + V_w(i, j) - V_{支}(i, j) - V_{回}(i, j) \quad (4)$$

式中: i 为计算时段; j 为计算断面; V_w 为河道外需水; V_n 为河道内需水; $V_{支}$ 为支流及区间来水; $V_{回}$ 为回归利用水。其中河道外需水数据统计自汉江流域下游各地市公布的水资源公报; 河道内需水包括航运用水及环境用水两部分, 航运用水由汉江下游各段的航道等级确定, 环境用水由汉江 90 年代以来发生的几次水华爆发的相关数据分析, 下泄过程应使汉江沙洋段流量不低于 $500\text{m}^3/\text{s}$ 。

④调水量 V_d :

各时刻丹江口水库调水量根据水利枢纽综合利用调度图及调度规则确定, 调度规则简述如下:

当库水位达防洪调度区 (含防洪限制水位) 时, 陶岔渠首按最大过水能力供水, 如还有余水则电站按预想出力下泄流量; 在防洪调度线以下, 降低供水区之上, 陶岔渠首按设计引水流量供水; 在保证供水区与限制供水区之间设置降低供水区, 供水流量在设计引水流量基础上降低引水; 为使特枯年份供水不遭大的破坏, 使供水过程较为均匀; 在降低供水区至极限消落水位之间设限制供水区, 供水流量较设计引水流量及降低引水流量减少。

3 结果与分析

3.1 实测水文序列划分

由图 3 可以看出, 流域平均气温在 1982 年前后发生了突变。在 1982 年之前, 气温变化趋势不显著; 在 1982 年后, 统计量 UB 值基本大于 0, 表明降水呈上升趋势, 且在 1992 年超过了信度线, 说明 1992 年前后上升趋势显著。

降水存在实测期内整体呈下降趋势, 突变点位于 1986 年。突变点之前, 降水下降趋势较明显, 在 1968 年超出了信度线, 突变点之后, UB 值除了在 2003 年接近信度线之外, 整体都在 0 度线附近波动, 表明这一时期, 年降水量变化趋势趋向平缓。

Mann-Kendall 突变检测结果表明, 气温与降水突变点分别位于 1982 和 1986 年, 鉴于这两个时间点非常接近, 可以取这两者的中间值, 认为气候突变发生于 1984 年。

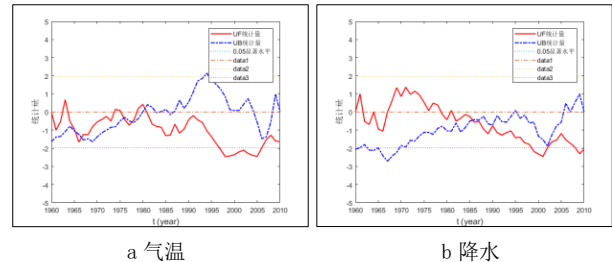


图 2 汉江上游年气温降水的 Mann-Kendall 突变点检验结果

3.2 模型建立

3.2.1 数据降尺度

(1) 降尺度模型的建立。选取汉江流域 14 个国家气象观测站 1984~2010 年的日最高气温、日最低气温、降水的连续日过程数据, 取 1984~2000 年数据用于建立模型, 2001~2010 年数据用于检验模型。

首先对表 1 中的气候预报因子数据进行标准化处理, 消除不同预报因子之间的单位差异, 其公式如下:

$$\tilde{x}_{ij} = (x_{ij} - \bar{x}_j) / \sigma_j \quad (5)$$

对标准化后的 11 种预报因子、覆盖 20 个数据格点, 共计 11×20 个因子集进行主成分分析, 若前 k 个主成分的累积贡献率超过 85%, 则认为前 k 个主成分基本包含原来指标信息。这 5 个 GCMs 模型的主成分分析结果如表 2 所示。

表 2 对气候预报因子的主成分分析的累计特征值

序号	CM1	CGCM3	CM3	FGOALS-g1.0	E-H
1	40.337	24.685	39.081	39.088	33.351
2	54.496	39.42	47.887	54.04	44.158
3	65.192	49.137	54.133	65.037	49.368
4	69.787	56.005	59.269	69.675	54.001
5	74.168	63.676	63.635	74.001	61.012
6	77.132	66.154	67.594	77.189	63.696
7	79.917	70.284	70.736	80.31	66.038
8	82.09	71.883	73.194	82.508	70.068

序号	CM1	CGCM3	CM3	FGOALS-g1.0	E-H
9	83.497	73.249	75.494	83.833	71.727
10	84.707	75.738	77.578	90	74.683
11	85.8	76.833	79.565	\	75.954
12	\	77.823	81.309	\	77.129
13	\	79.526	82.651	\	79.23
14	\	81.013	83.965	\	80.157
15	\	81.72	85.143	\	81.643
16	\	83.092	\	\	83.543
17	\	83.736	\	\	85.132
18	\	84.309	\	\	\
19	\	85.405	\	\	\
k	11	19	15	10	17

利用主成分建立汉江流域内站点的气象要素和大尺度气候因素之间的统计关系,建立降水和选取的主成分间的多元线性回归模型如下:

$$W_i = PC \times L_{PC} + \varepsilon \quad (6)$$

式中: W_i 表示第 i 站的气象数据序列; PC 为从预报因子数据集中提取的主分量; L_{PC} 为多元线性回归模型系数,可通过最小二乘法确定; ε 为残差部分。

(2) 降尺度模型的验证。建模过程中 1984~2000 年为建模期,剩余的 2000~2010 年为验证期。本研究中,用 14 个水文气象站的相关系数 R 及标准误差 $RMSE$ 的均值来评价统计降尺度模型模拟流域气象要素的效果。

总体来说,气温降尺度结果较降水得更稳定一些,五个 GCMs 模型降尺度结果相比较,北京气候研究所的 CM1 模型的精度更高,3 个指标的降尺度成果较其他四个模型均具有明显优势,表明该模型在汉江流域适用性更好。因此,在后文中评估气候变化对南水北调工程可调水量影响时,采用此模型的模拟成果数据。

3.2.2 模型率定与验证

以安康、荆紫关、白河三个水文站点的水文数据,进行汉江上游 SWAT 水文模型的参数率定与验证,模型率定期为 1984 年~2000 年,验证期为 2001 年~2010 年。对模型的模拟结果进行评估用纳什效率系数和相关系数。

纳什效率系数 (NES) 用以评价实测值与模拟值之间的匹配程度,一般用以验证水文模型模拟结果的好坏。范围为 $-\infty \sim 1$ 。当 NES 越接近 1,说明模拟值完美地匹配实测值。相关系数 R^2 是一种非确定性的关系,是研究变量之间线性相

关程度的量。 R^2 越接近 1,表示数据的相关性越大。

率定期和验证期的评价结果如表 4 所示。总体来说,相关效率都在 0.5 以上,效率系数都在 0.4 以上,表明模拟结果可靠性较高。率定期模拟结果准确性高于验证期,但差距并不大。从空间上来看,位于下游站点的模拟准确性高于上游站点。

表 4 模型率定期及验证期评价结果

站点	率定期			验证期		
	时间	相关系数 R^2	效率系数 NES	时间	相关系数 R^2	效率系数 NES
安康	1984~1997	0.921	0.867	2006~2010	0.739	0.253
荆紫关	1984~1998	0.814	0.81	2001~2010	0.778	0.484
白河	1984~1997	0.645	0.421	2007~2010	0.695	0.408

因流域实测径流数据存在空缺,因此只取率定期和验证期内完整的水文序列进行率定和验证,三个站点率定和验证期的水文过程模拟如图 6 所示。

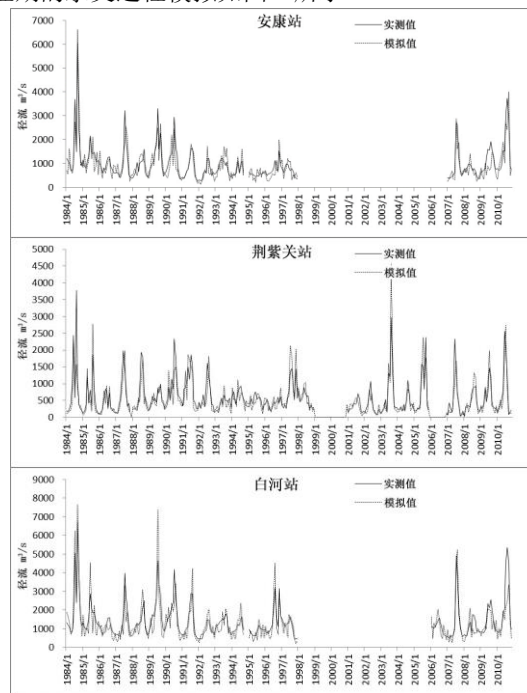


图 3 率定和验证期的模拟水文过程与实测过程对比

3.2.3 各气候变化情景的水文过程分析

针对 4 种情景下水文过程模拟结果,从年际及年内两方面分析气候变化对水文过程的影响。

表 3 验证期各模型降尺度成果评价

气候模式	CM1		CGCM3		CM3		FGOALS-g1.0		E-H	
指标	R	RMSE	R	RMSE	R	RMSE	R	RMSE	R	RMSE
降水	0.542	0.365	0.403	0.532	0.481	0.386	0.315	0.56	0.436	0.403
日最低气温	0.68	0.251	0.463	0.345	0.522	0.305	0.532	0.372	0.691	0.251
日最高气温	0.644	0.213	0.539	0.256	0.678	0.206	0.636	0.287	0.603	0.214

(1) 年际入流量分析。气候变化后各气候情景下丹江口水库年代际平均入流量如表 5 所示。可以看出在气候变化初期, 径流量下降明显, 进入 21 世纪, 径流量的年际变化呈现相对稳定、略有增长的趋势。各气候情景下的年平均径流量也有所差别, 温室气体高速增长的 1PT02X 情景下入库径流量最高; 引入清洁能源和资源节约技术的 B1 情景下入库径流量最低。可见在高碳排放的情景下, 丹江口水库的入库径流量会有小幅度地增加。

表 5 各气候情景下丹江口水库平均入流量年代际变化趋势

气候情景	实测过程 (m³/s)			模拟过程 (m³/s)					
	1984~1990	1991~2000	2001~2010	2011~2020	2021~2030	2031~2040	2041~2050	2051~2060	
A2				664.1	692.7	707.9	694.0	754.3	
A1B				713.7	731.1	724.9	746.7	734.5	
B1				698.8	671.8	698.7	720.1	669.0	
1PT02X				724.3	732.0	733.3	771.9	745.0	

(2) 年内入流量分析。径流年内分配规律如图 7 所示。4 种情景下, 1PT02X 情景的径流年内分配差异较为明显, 夏季 6~7 月迎来径流最高峰, 比其他三种情景下径流量高 200m³/s 以上。其他三种情景中, 引入清洁能源和资源节约技术的 B1 情景, 年内径流分配较为平缓, 夏季径流高峰期在 7~8 月间, 相对 1PT02X 情景更为推后。

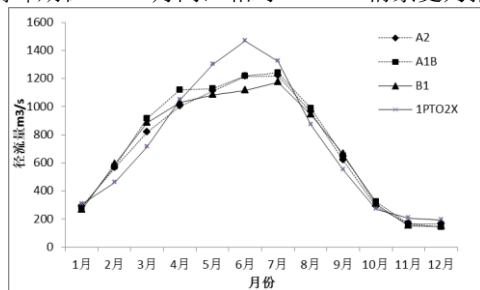


图 4 不同气候情景下径流年内分配

表 6 列出了各情景各阶段及多年平均年径流过程的 CV 值和集中度 Cd 值。可以看出不同情景下年内径流分配差异较年际间差异较为明显, 在各情景中, 1PT02X 情景的 CV 值与 Cd 值最高, 表明该情景年内径流过程波动更为明显, 且更向夏季集中; B1 情景的 CV 值与 Cd 值最低, 表明该情景下年内径流分配更为均匀。从气候变化突变点到研究期末, 各情景的年内分配特征值基本都是升高的趋势, 也表明了随着温室气体排放的增加, 极端气候增加, 年内降水分布更为集中。

表 6 丹江口水库入流年内分配特征值

气候情景	特征值	1984~2000	2001~2020	2021~2040	2041~2060	多年平均
A2	C _v	0.495	0.501	0.554	0.603	0.538
	C _d /%	53.1	53.7	59.17	63.54	57.38
A1B	C _v	0.52	0.498	0.556	0.582	0.539
	C _d /%	56.03	52.17	60.09	67.75	59.01
B1	C _v	0.404	0.435	0.442	0.503	0.446
	C _d /%	44.14	49.56	51.86	64.37	52.48
1PT02X	C _v	0.563	0.607	0.594	0.643	0.602
	C _d /%	62.34	68.45	65.36	72.47	67.16

3.3 气候变化对可调水量的影响分析

在对实测水文序列划分中, 确定流域的气候突变点位于 1984 年。以突变点前后的入流数据代入可调水量计算模型得出各年份水库的可调水量, 并按年时段进行汇总, 以分析不同气候情景、不同时期丹江口水库的可调水量变化情况。年际对比的结果如表 7 所示。

从表中可看出四种气候情景下的丹江口水库可调水量变化情况, 在 1984 年~2030 年间, 各个情景下的可调水量都呈较明显下降趋势, 这一时期正处于中国改革开放后高速发展的一段时期, 随着现代化进程的加快, 化石

表 7 气候变化对丹江口水库可调水量的影响

情景模式	计算项目	气候变化前	气候变化后			
		1960~1984	1984~2010	2011~2030	2031~2050	2051~2060
A2	入库径流 (亿 m³)	361.97	278.68	216.21	223.70	237.77
	可调水量 (亿 m³)	103.41	95.80	90.23	93.01	98.23
	变化率 (%)		-7.36%	-5.81%	3.08%	5.61%
A1B	入库径流 (亿 m³)	361.97	278.68	227.56	231.26	230.90
	可调水量 (亿 m³)	103.41	95.80	94.44	95.82	95.68
	变化率 (%)		-7.36%	-1.42%	1.46%	-0.15%
B1	入库径流 (亿 m³)	361.97	278.68	217.29	223.96	212.78
	可调水量 (亿 m³)	103.41	95.80	90.63	93.10	88.96
	变化率 (%)		-7.36%	-5.40%	2.73%	-4.45%
1PT02X	入库径流 (亿 m³)	361.97	278.68	229.15	235.91	247.64
	可调水量 (亿 m³)	103.41	95.80	95.03	97.54	101.89
	变化率 (%)		-7.36%	-0.80%	2.64%	4.46%

能源的大量使用使这一时期汉江流域气候发生了显著变化,区域水文、土壤、植被等条件随之改变,各个情景下的可调水量都有 10%左右的减少,但在水库的调度作用下下降幅度要小于入库径流量的下降幅度。而进入 2031 年后,我国工业化水平将步入新阶段,随着资源节约、清洁能源等技术的应用,气候变化趋势逐渐步入缓和阶段,各个情景的丹江口水库可调水量变化趋势各有异同,但整体都趋于稳定。其中 1PT02X 情景下可调水量最多,在 2031 年后两个年代段分别达到了 97.54 亿 m^3 和 101.89 亿 m^3 ,较其他三种情景的可调水量平均高出 5.58 万 m^3 。A2 情景下可调水量上升幅度最高,在 2031 年后两个年代段分别达到了 3.08%和 5.61%,较其他三种情景的变化率平均高出 2.17%。A1B 和 B1 情景下可调水量呈平稳波动趋势,在 2030 年后的 30 年间的变化率有正有负,且都不高于 5%。而 1PT02X 情景和 A2 情景都是高温温室气体排放情景,B1 为低温温室气体排放情景。可见在 2030 年后,由于温室气体排放引起的气候变化不会导致丹江口水库可调水量有明显的下降。

总体来说,气候变化在 1984~2030 年这一阶段将导致可调水量减少,这一时期丹江口水库的可调水量在各个情景下的降低幅度都在 10%左右,2030 年后,各情景下的可调水量都不会再有明显的减少,在高温温室气体排放情景下甚至会有小幅的上升。

4 结论

本文将 IPCC 数据中心提供的未来 50 年间全球气候模型在 4 种不同情景下的模拟数据,经过降尺度后应用于汉

江流域,结合汉江流域气象、水文、地形、社会经济等数据,应用 SWAT 模型对南水北调中线工程水源丹江口水库进行入流过程计算,综合水库历史调度数据对未来可调水量的变化趋势做出模拟。结果表明,在气候变化条件下,丹江口水库入库径流及可调水量都有一定的下降,未来在引入资源节约和清洁能源技术控制温室气体排放的情景下,可调水量将趋于稳定;在高温温室气体排放情况下,可调水量有所增加。据此得出未来气候变化对南水北调中线工程可供水量在不同时期不同影响程度的结论,可为南水北调中线工程的管理和调度工作提供了参考。

【参考文献】

- [1]翟家齐.南水北调中线工程运行水文风险管理研究[Z].郑州大学,2009.
 - [2]王元超.丹江口水库中长期径流预报及水质水量联合模拟技术[Z].中国水利水电科学研究院,2015.
 - [3]顾问,陈葆德,杨玉华,等. IPCC-AR4 全球气候模式在华东区域气候变化的预估能力评价与不确定性分析[J].地理科学进展,2010,29(7):818-826.
 - [4]Hamed K H,Rao A R. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data[J]. Journal of hydrology,2014(1):182-196.
 - [5]陈祥,刘卫林,熊翰林,等. SWAT 模型在赣江流域径流模拟中的应用研究[J]. 人民珠江,2018,39(12):31-35.
- 作者简介:孟猛(1992.3—),男,汉族,当前就职单位:河南省地质局生态环境地质服务中心,职称级别:助理工程师,硕士学位,研究方向:水文地质。