

北三河流域水资源供需平衡对降水变化的敏感性

刘涛, 赵泽锦, 刘利成, 王高旭, 吴永祥, 吴巍, 田雪莹, 张妮娜

Sensitivity analysis of water resources supply and demand balance to precipitation changes in Beisanhe River Basin

LIU Tao, ZHAO Zejin, LIU Licheng, WANG Gaoxu, WU Yongxiang, WU Wei, TIAN Xueying, ZHANG Nina

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20210926003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

混凝土剪切强度影响因素敏感性分析

Sensitivity analysis of influencing factors on concrete shear strength

水利水运工程学报. 2019(3): 112 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.03.014>

基于同步原型观测的水质改善效果敏感性分析与应用

Sensitivity analysis and application research of water quality improvement effect based on synchronous prototype observation

水利水运工程学报. 2019(5): 1 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.05.001>

黄河流域典型流域水文气象变化与径流过程模拟

Typical hydro-meteorological changes and runoff process simulation in Yellow River basin

水利水运工程学报. 2019(5): 36 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.05.005>

气候变化下黄河流域未来水资源趋势分析

The future water resources regime of the Yellow River basin in the context of climate change

水利水运工程学报. 2020(2): 1 <https://doi.org/10.12170/20200216001>

考虑爆破累积损伤效应的含泥化夹层边坡滑移分析

Analysis on sliding displacement of slope with muddy intercalation considering blasting cumulative damage effect

水利水运工程学报. 2021(1): 104 <https://doi.org/10.12170/20200127001>

海河流域径流变化趋势及其归因分析

Analysis of runoff change trend and its attribution in Haihe River basin

水利水运工程学报. 2017(4): 59 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.04.009>

DOI:10.12170/20210926003

刘涛, 赵泽锦, 刘利成, 等. 北三河流域水资源供需平衡对降水变化的敏感性[J]. 水利水运工程学报, 2022(5): 21-30. (LIU Tao, ZHAO Zejin, LIU Licheng, et al. Sensitivity analysis of water resources supply and demand balance to precipitation changes in Beisanhe River Basin[J]. Hydro-Science and Engineering, 2022(5): 21-30. (in Chinese))

北三河流域水资源供需平衡对降水变化的敏感性

刘涛^{1,2,3}, 赵泽锦⁴, 刘利成⁴, 王高旭^{1,3}, 吴永祥^{1,3}, 吴巍^{1,3}, 田雪莹^{1,2,3}, 张妮娜^{2,3}

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 3. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029; 4. 红河州南源供水有限公司, 云南 蒙自 661000)

摘要: 分析不同区域水资源供需平衡对降水变化的敏感性,并结合考虑云水资源和降水效率的空间分布,有助于常态化人工增雨作业地点的确定,对实现空陆水资源的统筹利用具有重要意义。以北三河流域为研究区域,基于新安江模型和彭曼-蒙特斯公式分析了研究区需水量对降水变化的响应,并探讨了不同计算单元水资源供需平衡对降水变化的敏感性。结果表明:当降水量增加时,流域平水年产水量增加的比例大于枯水年与特枯年,农田灌溉需水量随降水量的增加大致呈线性减小趋势;在不考虑外调水和地下水超采的情况下,自然降水情景的流域资源性缺水水量分别为 35.46 亿 m^3 (降水频率 $p=50%$)、43.17 亿 m^3 ($p=75%$)和 46.30 亿 m^3 ($p=95%$),缺水峰值分别出现在 5 月、7 月和 8 月;各单元缺水水量对降水变化的敏感性主要由产水变化主导,空间上呈由北向南逐渐递减的趋势,当平水年降水量增加 20% 时,北部地区缺水水量相对减少率达到 150% 以上,中部介于 30%~50%,南部则小于 15%。

关键词: 敏感性分析; 供需平衡; 降水变化; 北三河流域; 新安江模型

中图分类号: TV213.9; P481

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2022)05-0021-10

空中水资源^[1](又称云水资源)作为一种非常规水资源,虽在我国储量巨大,但其利用效率却十分低下。据统计,我国每年通过人工增雨活动增加的水资源量仅为 500 亿 m^3 ^[2],约有 87% 的云水资源飘出了我国上空^[3],造成了巨大的资源浪费。自 20 世纪 50 年代以来,为充分开发云水资源,各地气象及水利部门积极开展空陆水资源一体化利用工作,人工增雨活动正在由过去的抗旱应急向常态化业务转变^[4]。然而,现阶段开展的常态化人工增雨活动仅注重云水资源的时空分布变化规律,虽在一定程度上提高了云水资源利用效率,却忽略了区域的降水产流特性,对人工增加的雨量往往无法实现最优调配。因此,正确理解云水资源时空分布差异,认清区域供需平衡对降水变化的敏感性,对准确选择常态化人工增雨作业地点和提高云水资源利用效率具有重要意义。

针对空陆水资源如何实现一体化开发利用,相关学者做了许多有益探索。李家叶等^[5]将空中水资源定义为白水,研究并评估了中国大陆的白水及其降水转化特征;曾庆存等^[6]指出应在有利的时间和地区人工增雨,通过水利工程设施在有利的地区和时段贮水,调剂到少雨或少水的时间和地区,实现水资源统筹利用;张继群等^[7]认为我国目前缺乏与水利设施建设相结合的空中水资源长期开发利用计划,并提出应综合考虑空中水资源的开发与地表水资源的调配和利用。纵观我国空陆水资源统筹利用的研究进展,目前大体仅停留在宏观意义上的管理政策及未来的规划方面,对开展常态化人工增雨作业地点的选择研究较少,在指导云水资源进一步开发和空陆水资源一体化利用方面的实用性有待进一步提高。

采用降水情景驱动流域水文模型是评估降水变化对区域水资源影响的重要途径。李丹等^[8]基于

收稿日期: 2021-09-26

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFA0601703); 国家自然科学基金资助项目(42075191, 52009080, 91847301, 92047203)

作者简介: 刘涛(1995—),男,广东梅州人,硕士研究生,主要从事水资源配置与水库调度研究。E-mail: tliu@nhri.cn
通信作者: 王高旭(E-mail: gxwang@nhri.cn)

SWAT 模型通过假定降水增量模拟了汾河流域的径流变化趋势及径流量的年内变化特征;王建生等^[9]根据大气环流模型输出未来气候变化情景,基于流域水文模型研究了气候变化对京津唐地区水资源数量和时空变化的影响;王国庆等^[10]在分析黄河流域未来降水变化趋势的基础上,采用 RCCC-WBM 模型动态模拟了黄河流域未来水资源变化情势。降水变化的不确定性将对人工增雨作业效果的评估带来严峻挑战。

北三河流域位于我国京津冀地区,水资源较为匮乏。随着气候变化和人类活动的加剧,该地区水资源可利用量不断减少,而用水量与污水排放量不断增加,水资源供需矛盾突出已成为其经济可持续发展的主要制约因素^[11]。鉴于此,本文基于新安江模型、彭曼-蒙特斯公式探究北三河流域不同地区水资源供需平衡对降水变化的敏感性,可为常态化人工增雨作业的选址和落区的确定提供有益支撑,对实现空陆水资源统筹利用、缓解区域水资源供需矛盾等具有重要意义。

1 研究区域概况及数据来源

北三河流域包含北运河、潮白河和蓟运河,总体地势由东北向西南逐渐降低,流域面积约 4 万 km²。研究区属典型的温带东亚季风气候区,多年平均降水量约 600 mm,汛期降水量占年降水量的 80%~85%,尤以 7 月和 8 月降水居多,水量年内分配不均。北三河流域水系分布见图 1,研究数据来源见表 1。

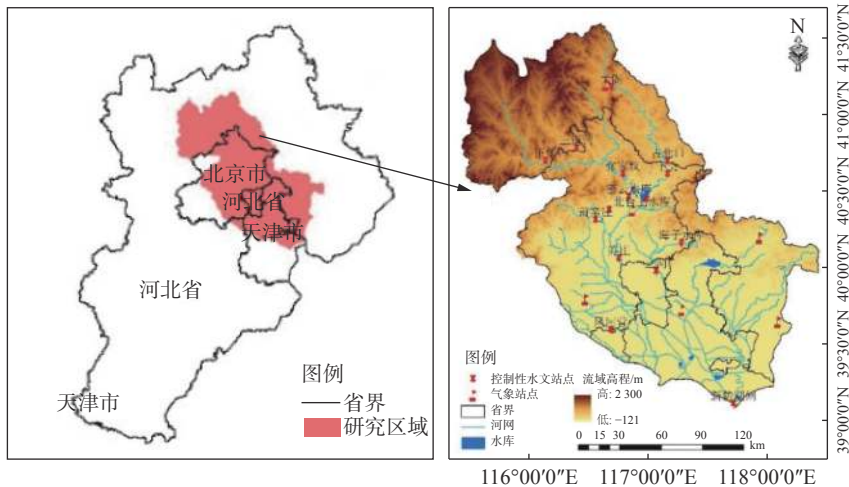


图 1 北三河流域基础地理概况

Fig. 1 Basic geography of Beisanhe River Basin

表 1 研究区各数据资料来源

Tab. 1 Data sources of the study area

数据资料	数据内容	数据来源
空间数据	数字高程模型(DEM)精度: 30 m×30 m	中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(http://www.gscloud.cn)
土地利用数据	2015年研究区土地利用数据	地理国情监测云平台(http://www.dsac.cn/DataProduct/)
土壤数据	2009年研究区土壤数据	世界粮农组织(FAO)提供的1:100万土壤数据(HWSD, http://www.fao.org/nr/land/-soils/har-monized-word-soil-database/)
气象数据	研究区内13个代表气象站1951—2018年逐日降水、蒸发、气温、风速等资料	中国气象数据共享网(http://data.cma.cn)
水文数据	大阁、三道营、三河和前辛庄水文站点2006—2018年逐日流量数据	中华人民共和国水文年鉴海河流域水文资料第3卷第2册
需水计算数据	城乡人口数量、农业耕地面积、工业产值、用水定额	用水定额来源于北京、天津、河北省用水定额,其他数据来源于各省统计年鉴

2 研究方法

采用三水源新安江模型模拟研究区域逐日来水过程。新安江模型是20世纪80年代基于山坡水文学提出的概念性水文模型,具有结构简单、参数较少、模拟精度稳定可靠等优点,其原理和方法详见文献[12]。

需水计算一般包括农业、工业、生活、生态等4个方面。本文采用定额法,根据区域城乡人口数量和工业万元增加值分别预测规划年生活需水量和工业需水量。基于土壤水量平衡法、彭曼-蒙特斯公式构建农田灌溉需水量计算模型^[13],模型公式如下:

$$F_g = [K_c E_{T0} - (P - D_p - R_c)] / r_x = (K_c E_{T0} - P_e) / r_x \quad (1)$$

式中: F_g 为灌溉需水量(mm); K_c 为作物系数,指某阶段作物需水量和参考作物需水量的比值; E_{T0} 为单一参考作物蒸腾蒸发总量(mm); P 为降水量(mm); D_p 为作物根区的深层渗漏量(mm); R_c 为田间排走的地面径流量(mm); P_e 为有效降水量(mm); r_x 为各省份农田灌溉水有效利用系数。其中 E_{T0} 根据FAO推荐的公式^[14]计算; r_x 参考中国灌溉排水发展中心(<http://www.jsgg.com.cn/>)2015年公布的全国测算成果,京津冀三省市分别为0.710、0.687和0.670。

为研究不同增雨情景下的区域水量供需平衡,突出人工增雨措施对缺水量的影响,本次计算的水量平衡方法仅考虑本地水资源,不考虑外调水资源。缺水率为缺水量与需水量的比值。水量平衡计算方法见式(2)。

$$W_{sd} = W_p - W_{ed} - W_{eu} \quad (2)$$

式中: W_{sd} 为缺水量(m^3); W_p 为区域自产水量(m^3); W_{ed} 为河道内生态需水量(m^3); W_{eu} 为区域社会经济用水量(m^3)。

随着人工影响天气技术的不断发展,人工增雨的效果已有了显著提高。大量试验结果表明,在现行技术条件下,相对增雨率位于5%~20%^[15-16]。为便于模型计算,本研究将实际降水日作为进行人工增雨日,以0~20%作为增雨区间。模拟增雨后的各日降水量计算方法见式(3)。

$$P'_i = P_i + P_i x \quad (3)$$

式中: P_i 和 P'_i 分别表示增雨前、后的日降水量(mm); x 为降水变化比例(%)。

3 单元划分及来需水分析

按地形、水系特点、行政区划和水利工程特点,将北三河流域划分为11个计算单元,其中山区6个,平原区5个。各单元土壤及其土地利用类型见图2。

3.1 单元来水量分析

本次模型参数率定站选择大阁、三道营、前辛庄、三河等4个水文站,这4个站均是国家级水文站,资料完整,分属潮河、黑河、潮白河和蓟运河(图1),涵盖了北三河流域山地和平原区。选取2006年为模型预热期,2007—2016年为率定期,2017—2019年为验证期,各站点的模型模拟精度见表2。

典型站点参数优化率定完成后,依据其他子流域各自的土地利用和土壤分布与4个典型站点的相似性原则进行参数展布。具体做法是:求出各子流域不同土地利用类型(土壤数据)面积所占总面积的比例,并对其归一化处理,然后计算归一化后的各子流域土地利用类型和土壤分布数据与典型站点数据的欧氏距离,以欧氏距离作为相似性指标,选择最短距离对应的子流域参数作为该流域的参数。归一化公式如下:

$$N_{i,j} = \frac{L_{i,j} - L_{i,\min}}{L_{i,\max} - L_{i,\min}} \quad (4)$$

式中: $N_{i,j}$ 为归一化数值, i 表示第 i 个子流域; j 表示土地利用类型/土壤类型; $N_{i,j}$ 为归一化数值; $L_{i,j}$ 表示第 i 个子流域第 j 个土地利用类型/土壤类型数据; $L_{i,\min}$ 和 $L_{i,\max}$ 分别表示第 i 个子流域土地利用类型/土壤类型数据的最大值和最小值。各子流域参数展布情况见表3。

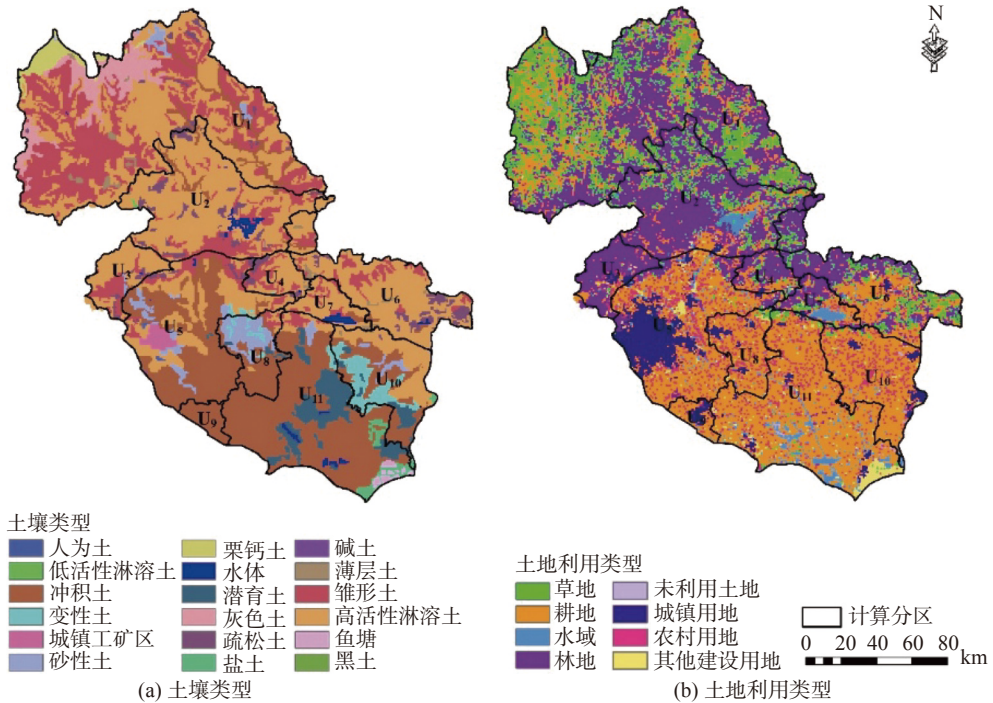


图 2 北三河流域计算单元划分及土壤土地利用类型

Fig. 2 Division of calculation units and types of soil and land use in Beisanhe River Basin

表 2 各水文站模型模拟精度

Tab. 2 Model simulation accuracy of each hydrological station

水文站点	率定期(2007—2016年)		验证期(2017—2019年)	
	平均相对误差/%	Nash系数	平均相对误差/%	Nash系数
大阁	11.74	0.84	13.41	0.76
三道营	9.45	0.81	11.42	0.80
前辛庄	13.51	0.86	14.67	0.81
三河	15.82	0.84	18.21	0.80

表 3 各子流域与典型站点欧氏距离

Tab. 3 Euclidean distance between sub-basins and typical stations

序号	子流域	与典型站点的欧氏距离				距离最近站点
		三河	三道营	前辛庄	大阁	
U ₁	河北潮白河山区	1.299	0.601	1.906	0.569	大阁
U ₂	北京潮白河山区	1.032	1.815	0.125	1.676	前辛庄
U ₃	北运河山区	0.894	2.144	0.074	2.264	前辛庄
U ₄	北京蓟运河山区	0.178	1.989	0.512	2.056	三河
U ₅	北京平原区	3.096	5.292	3.881	4.158	三河
U ₆	河北蓟运河山区	0.637	2.275	0.902	1.867	三河
U ₇	天津蓟运河山区	0.852	2.417	0.498	2.189	前辛庄
U ₈	廊坊平原区	3.279	4.824	3.928	3.997	三河
U ₉	廊坊市市区	4.155	5.577	3.798	4.289	前辛庄
U ₁₀	唐山平原区	3.396	6.385	4.760	5.337	三河
U ₁₁	天津平原区	4.540	5.934	4.238	4.770	前辛庄

模拟了北三河流域 11 个计算单元 1973—2018 年共 46 年逐日产水过程,各计算单元自然降水条件下的年径流深见图 3。北三河流域年平均径流深为 42.42 mm,相当于产流量为 16.46 亿 m³。分别选取

1974 年、2006 年和 2002 年作为降水频率 50%、75% 和 95% 的典型年,通过同倍比缩放法求得 3 种降水频率下的自然降水过程并输入至产水模型。经计算,平水年(降水频率 $p=50%$)的流域产流量为 14.11 亿 m^3 ,枯水年($p=75%$)为 9.19 亿 m^3 ,特枯年($p=95%$)为 5.57 亿 m^3 。

利用式(3)对 3 种降水频率典型年降水过程进行同比放大,并将增雨结果输入至产水模型,流域产水变化过程见图 4。随着降水量变化比例 x 的不断增大,流域产水量也不断增大,且不同水平年的增水效果明显不同,相同增雨条件下,枯水年增雨产生的径流增量小于平水年。当 $x=20%$ 时,平水年流域平均径流系数从自然降水的 0.24 上升到 0.33,产水量增加了近 90%。

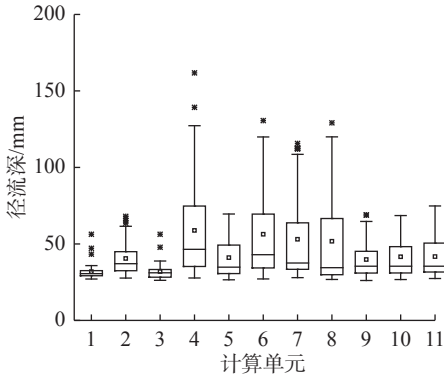


图 3 自然降水条件下的年径流深

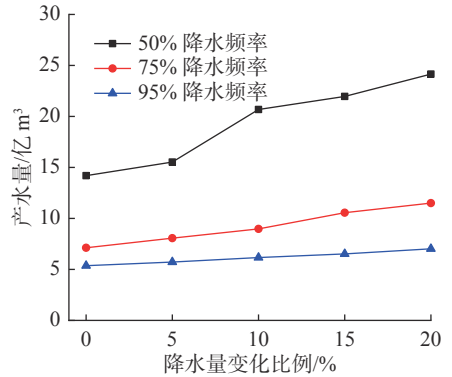


图 4 不同增雨条件下流域产水量变化

Fig. 3 Annual runoff depth without precipitation enhancement

Fig. 4 Variation of water yield under different precipitation conditions

3.2 单元需水量分析

区域需水量包括生活、工业、农业和生态四类需水。其中生活和工业需水主要受区域人口数量与工业技术的限制,生态需水量由河道多年平均径流量决定,而农业需水中的灌溉需水量受降水影响明显,一般情况下降水量越多,作物需水量越少。因此本文假定其他需水不受降水增减的影响,仅研究不同增雨条件下农田灌溉需水量的变化情况。

3.2.1 农田灌溉需水量 选用研究区气象站气压、风速、气温等气象资料,计算年内每日参考作物需水量。以京津冀地区种植面积较大的 13 种作物作为研究对象,根据不同作物的种植时间和灌溉制度,利用式(1)计算不同增雨幅度下各典型年的 13 种作物需水量。北三河流域各典型年降水变化下的农田灌溉需水量逐月变化情况见图 5。

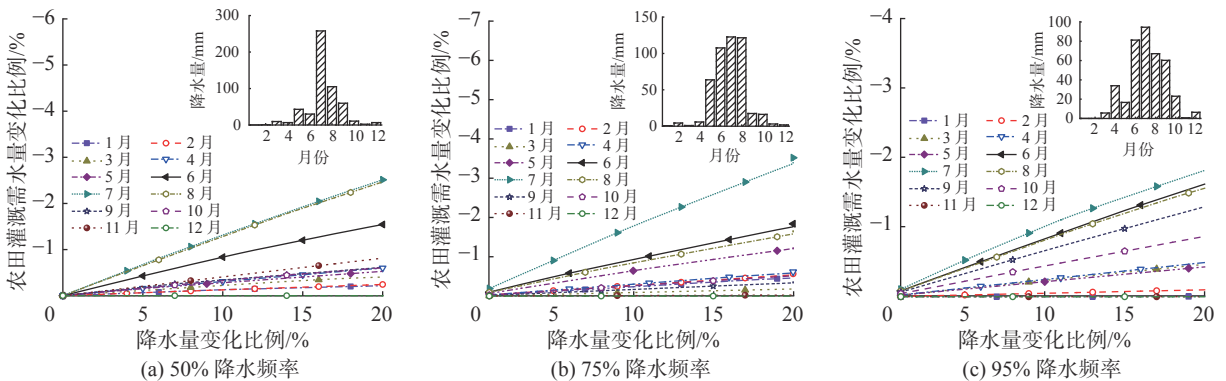


图 5 北三河流域降水变化下的农田灌溉需水量逐月变化

Fig. 5 Monthly changes of farmland irrigation water demand under changes in precipitation in Beisanhe River Basin

整体上看,随着降水量变化比例 x 的逐渐增加,3 种频率下各月份的农田灌溉需水量大致呈线性递减的趋势,且当 x 达到 20% 时,灌溉需水量最大减少了 3.5%,减少量约 1 126 万 m^3 ,需水量减少的幅度较降水增加幅度明显更小。

由图 5 还可见,各月份的灌溉需水对 x 的敏感程度不同,北三河流域农田灌溉需水量在汛期(6—9 月)对 x 的敏感性较非汛期明显更大,这不仅与当地的降水时空分布有关,同时也受农作物种植结构和种类的影响。

3.2.2 生活、工业和生态需水量 以 2019 年为现状年,2030 年为规划年,根据各地区城市总体规划、水资源公报等资料,对北三河流域生活、工业和生态需水进行合理预测,预测结果见表 4。

表 4 2030 年北三河流域生活、工业、生态需水量

Tab. 4 Domestic, industrial and ecological water demand of Beisanhe River Basin in 2030

单位: 万 m^3

计算分区	生活需水	工业需水	生态需水	计算分区	生活需水	工业需水	生态需水
U ₁	1 932	5 659	102	U ₇	728	1 205	450
U ₂	3 841	6 213	3 815	U ₈	3 416	8 546	451
U ₃	3 161	6 314	1 536	U ₉	983	3 411	102
U ₄	955	1 200	879	U ₁₀	5 373	22 050	2 356
U ₅	41 754	38 391	50 832	U ₁₁	7 186	12 984	5 631
U ₆	4 910	17 025	1 350				

4 结果与讨论

4.1 自然降水情景下的余缺水量

在不考虑外调水资源和地下水超采的情况下,对比各单元来需水量,2030 年北三河流域自然降水情景下的资源性余缺水量见表 5。

表 5 2030 年北三河流域自然降水时资源性余缺水情况

Tab. 5 Resource-based excess water shortage in Beisanhe River Basin in 2030 when there is no increase in rainfall

单位: 亿 m^3

计算分区	降水频率50%			降水频率75%			降水频率95%		
	总需水量	总来水量	余缺水量	总需水量	总来水量	余缺水量	总需水量	总来水量	余缺水量
U ₁	1.52	2.86	+1.34	1.54	2.41	+0.87	1.59	1.76	+0.17
U ₂	2.75	3.52	+0.77	2.79	1.45	-1.34	2.84	1.12	-1.72
U ₃	1.41	0.21	-1.20	1.42	0.17	-1.25	1.43	0.14	-1.29
U ₄	0.49	0.58	+0.09	0.50	0.27	-0.23	0.51	0.21	-0.30
U ₅	14.43	1.44	-12.99	14.49	0.73	-13.76	14.52	0.80	-13.72
U ₆	7.80	2.68	-5.12	7.86	0.60	-7.26	8.31	0.36	-7.95
U ₇	0.93	0.57	-0.36	0.94	0.22	-0.72	0.98	0.12	-0.86
U ₈	2.55	0.59	-1.96	2.58	0.34	-2.24	2.62	0.20	-2.42
U ₉	0.84	0.08	-0.76	0.86	0.05	-0.81	0.86	0.06	-0.80
U ₁₀	10.14	1.01	-9.13	10.30	0.45	-9.85	10.50	0.32	-10.18
U ₁₁	8.02	1.88	-6.14	7.96	1.38	-6.58	8.22	1.00	-7.22
合计	50.88	15.42	-35.46	51.23	8.07	-43.17	52.38	6.08	-46.30

自然降水情景下,2030 年北三河流域资源性缺水总量分别为 35.46 亿 m^3 ($p=50%$)、43.17 亿 m^3 ($p=75%$) 和 46.30 亿 m^3 ($p=95%$),受地区产流条件与经济发展水平不匹配的制约,3 种频率下北三河流域的水资源总量明显不足,无法满足当地需水要求。

从空间上看,11 个计算单元中,除河北潮白河山区(单元 U_1)外,其余单元均出现不同程度的资源性缺水,以北京平原区(单元 U_5)与唐山平原区(单元 U_{10})最为严重。前者包含了北京市朝阳区、海淀区等多个 人口密集区,生活用水量大;后者囊括了我国华北地区重要的装备制造基地——丰润区及素有“冀东粮 仓”的玉田县,区域产流量的限制及庞大的需水量造成了该地区缺水十分严重,特困年缺水总量达到了 13.72 亿 m^3 和 10.18 亿 m^3 。

从时间上看(图 6),3 种频率下北三河流域各月 份来水均无法满足本地需水要求。1 月、2 月、11 月 和 12 月缺水量在整个流域较其他月份更低,汛期 (6—9 月)受自然降水、气温和农作物生长周期的影 响,3 种频率下的缺水均较为明显。由于区域降水量 和需水情势的时空差异,缺水峰值出现的时间也有 所不同,平水年出现在 5 月,枯水年与特枯年出现在 7—8 月,缺水量分别为 5.18、5.90 和 7.79 亿 m^3 。 值得注意的是,平水年 8 月份降水较 7 月份更少,且需 水峰值同样出现在 8 月份,但缺水量却较 7 月份更 少,甚至与 11、12 月齐平。分析其原因,选取的 50% 频率典型年 7 月份降水主要集中在下半月,且 50% 以上降水集中于 7 月 25 日以后,受产流滞时的影响,由此产生的径流大部分出现在 8 月初,因此其产水量 与 7 月份相比要大得多,弥补并进一步减小了需水差异,使得 8 月份缺水量较少。

4.2 区域缺水量对降水变化敏感性分析

按照增雨区间为 0~20% 进行模拟,分析各单元缺水量对降水变化的敏感性,针对性地利用云水资源,可 以合理补充陆地水资源短缺,初步实现“云水-陆地水”的协同应用。

由图 7 可见,随着降水变化比例的不断增加,北三河流域在 3 种频率下的缺水总量呈现不同程度的下 降趋势,受降水总量限制,平水年减少趋势最大,枯水年其次,特枯年份最小。若降水量增加 10%,流域水资 源缺口分别为 30.00 亿 m^3 ($p=50%$)、42.06 亿 m^3 ($p=75%$) 和 46.03 亿 m^3 ($p=95%$),较未增雨时缺水量 相对减少了 21.89%、8.37% 和 2.97%。从缺水量减少比例看,不同增雨情景下的缺水量受需水影响较 小,其变化趋势与区域产水量的变化较为接近。主要原因为需水量对降水量变化的敏感性较产水量更 小,在增雨 20% 的情景下,需水量变幅仅在 3% 以 内,而产水量受区域产流条件与不透水面积分布的 影响,变化幅度最大达到了 50% 以上。因此,北三河 流域缺水量的改变受产流变化趋势主导。

流域内各计算单元缺水量对降水变化的敏感性 具有明显的区域差异,为消除流域面积的影响,采用

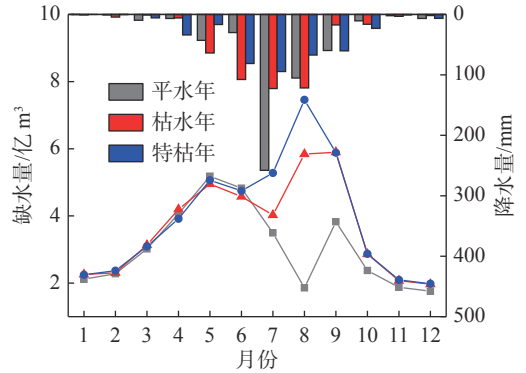


图 6 北三河流域自然降水情景下资源性缺水逐月变化 (其中降水量为柱状图、缺水量为点线图)

Fig. 6 Monthly change of resource water shortage under natural rainfall scenario in Beisanhe River Basin

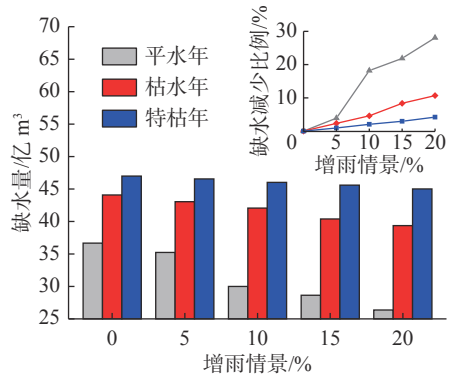


图 7 北三河流域不同增雨情景缺水总量变化

Fig. 7 Changes in the total amount of water shortage under different rainfall enhancement scenarios in Beisanhe River Basin

水量相对减少比例表征其空间差异性。不同增雨情景下的流域资源性缺水量的空间变化见图 8。从纵向看,各计算单元缺水量的变化受降水量丰枯影响较为显著,降水量越多,水量改变越大,反之则越小。若降水增加 15%,北京平原区(单元 U_5)和河北蓟运河山区(单元 U_6)水量在不同降水频率下的变化差异较大,平水年较未增雨时的水量减少了 3.78 亿 m^3 和 1.40 亿 m^3 ,相对减少了 29.1% 和 27.38%,而特枯年份减少了 0.15 亿 m^3 和 0.13 亿 m^3 ,相对未增雨时的水量仅减少了 1.5%。从横向看,同一降水频率下,区域增雨越多,增水效果越明显,缺水量的改变越大。以北京潮白河山区(单元 U_2)为例(图 8(c) 组),特枯年增雨 5%~20% 的水量较未增雨时分别减少了 0.10 亿 m^3 、0.30 亿 m^3 、0.39 亿 m^3 和 0.50 亿 m^3 ,相对减少率为 5.96%、17.43%、22.37% 和 28.77%。就降水变化敏感性而言,不同计算单元对降水的敏感程度差异同样较大。以差异最为明显的平水年降水增加 20% 情景为例(图 8(a4)),北三河流域各计算单元水量对降水变化的敏感性整体呈现由北部向南部逐渐递减的趋势,北部 U_1 、 U_2 和 U_4 单元水量较未增雨时分别减少了 3.80 亿 m^3 、1.39 亿 m^3 和 0.14 亿 m^3 ,相对减少率均达到了 150% 以上,中部地区(单元 U_5 、 U_6 和 U_7)变化比例位于 30%~50%,南部地区(单元 U_8 ~ U_{11})位于 0~15%。

在分析了不同计算单元水量对降水变化的敏感性后,结合区域云水资源与降水效率的时空分布,即可确定常态化人工增雨作业地点,有助于提高云水资源的开发利用效率,实现空陆水资源的统筹利用。

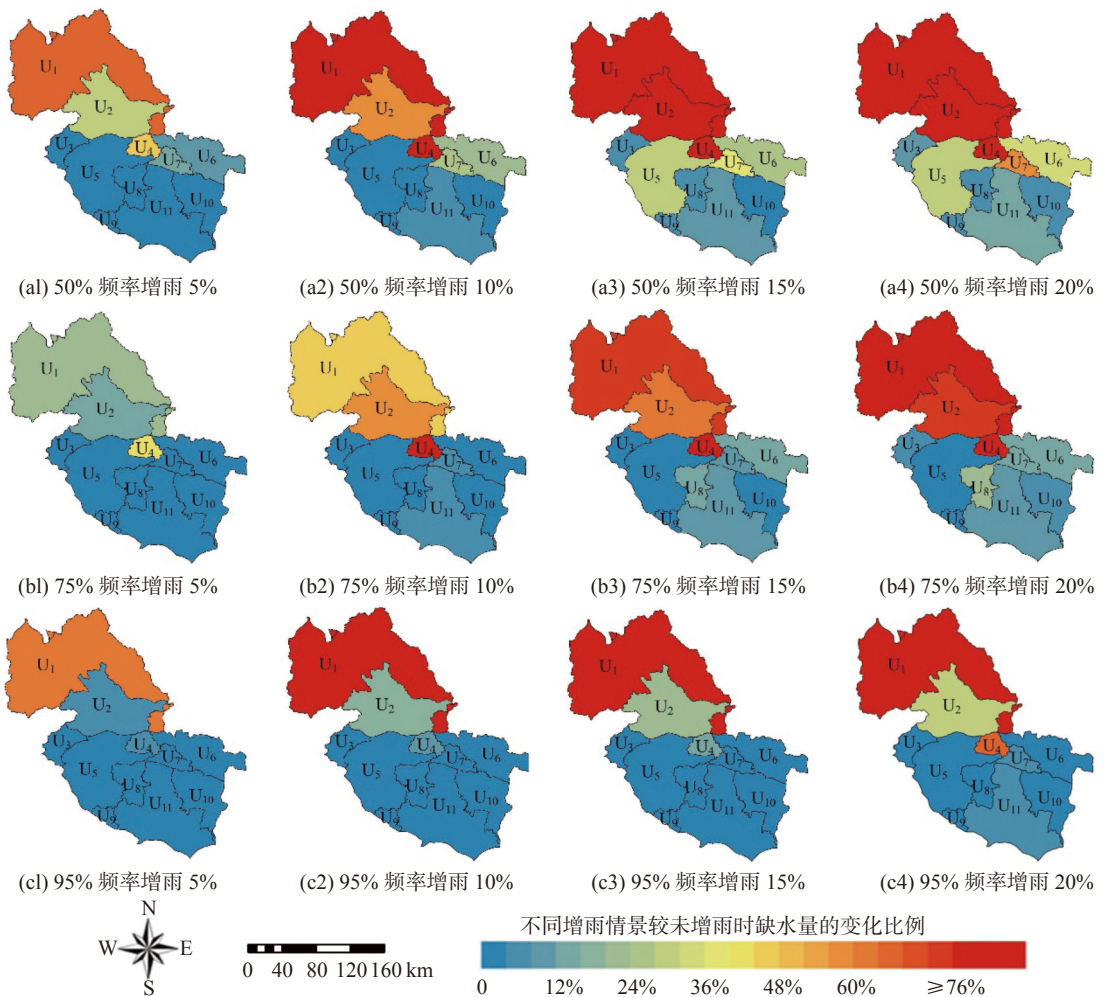


图 8 不同增雨情景下北三河流域资源性水量较未增雨时的空间变化

Fig. 8 Spatial variation of resource water shortage in Beisanhe River Basin under different precipitation increase scenarios compared with that without precipitation increase

5 结 语

(1)北三河流域在3种降水频率下的产流量随着降水量的增加而增加,农田灌溉需水量则相反,且前者较后者的变化幅度更大,导致区域的供需平衡趋势主要由产流量变化趋势主导。

(2)自然降水情景下,北三河流域出现明显的资源性缺水现象,其中以北京平原区与唐山平原区最为严重。受降水过程的影响,枯水年与特枯年缺水峰值出现在8月份,平水年的则出现在5月份。

(3)北三河流域的水资源供需平衡对降水变化的敏感性呈现由北部向南部逐渐递减的空间差异,当平水年降水量增加20%时,北部地区缺水相对减少率达到了150%以上,中部地区的为30%~50%,南部地区的则小于15%。

空陆水资源的统筹开发是一个复杂的系统工程,本文仅分析了不同计算单元对降水变化的敏感性,在考虑区域云水资源及其降水效率方面还有所欠缺,同时未来还可引入先进的分布式水文模型对不同单元进行更加深入而广泛的产流研究,提出更加科学完善的空陆水资源一体化利用的管理制度与设计方案。

参 考 文 献:

- [1] ZHOU Y Q, CAI M, TAN C, et al. Quantifying the cloud water resource: basic concepts and characteristics[J]. *Journal of Meteorological Research*, 2020, 34(6): 1242-1255.
- [2] 王光谦,钟德钰,李铁键,等.天空河流:发现、概念及其科学问题[J].中国科学:技术科学,2016,46(6):649-656.(WANG Guangqian, ZHONG Deyu, LI Tiejian, et al. Sky river: discovery, concept, and implications for future research[J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2016, 46(6): 649-656. (in Chinese))
- [3] 尹宪志,王毅荣,徐文君,等.祁连山空中云水资源开发潜力研究新进展[J].沙漠与绿洲气象,2020,14(6):134-140.(YIN Xianzhi, WANG Yirong, XU Wenjun, et al. Recent progress in research on potential for the development of cloud water resources over Qilian mountains area[J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 2020, 14(6): 134-140. (in Chinese))
- [4] 姚秀萍,吕明辉,范晓青,等.气象服务效益评价研究进展[J].气象,2011,37(6):749-755.(YAO Xiuping, LÜ Minghui, FAN Xiaoqing, et al. Review on evaluation of meteorological service benefits[J]. *Meteorological Monthly*, 2011, 37(6): 749-755. (in Chinese))
- [5] 李家叶,李铁键,王光谦,等.空中水资源及其降水转化分析[J].科学通报,2018,63(26):2785-2796.(LI Jiaye, LI Tiejian, WANG Guangqian, et al. Atmospheric water resource and precipitation conversion[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2018, 63(26): 2785-2796. (in Chinese))
- [6] 曾庆存,雷恒池,洪钟祥.人工增雨研究和作业的进展以及提高科学化的可行途径——“人工增雨研究专辑”前言[J].气候与环境研究,2012,17(6):659-665.(ZENG Qingcun, LEI Hengchi, HONG Zhongxiang. Advances in the research and practice of artificial precipitation enhancement and some possible and practical ways for their further development—preface to the Special Issue on the Artificial Precipitation Enhancement Research[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2012, 17(6): 659-665. (in Chinese))
- [7] 张继群,万育生.空中水资源的开发与利用[J].中国水利,2004(7):15-17,5.(ZHANG Jiqun, WAN Yusheng. Aerial water resources and approaches for development and utilization[J]. *China Water Resources*, 2004(7): 15-17, 5. (in Chinese))
- [8] 李丹,冯民权,苟婷.气候变化对汾河(运城段)径流影响模拟[J].水利水运工程学报,2016(2):54-61.(LI Dan, FENG Minquan, GOU Ting. Simulation of climate change impacts on runoff of Yuncheng reach of Fenhe River[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2016(2): 54-61. (in Chinese))
- [9] 王建生,张世法,黄国标,等.气候变化对京津唐地区水资源及供需平衡的影响[J].水科学进展,1996,7(1):26-36.(WANG Jiansheng, ZHANG Shifa, HUANG Guobiao, et al. Impact of climate change on water resources of Jing-Jin-Tang region[J]. *Advances in Water Science*, 1996, 7(1): 26-36. (in Chinese))
- [10] 王国庆,乔翠平,刘铭璐,等.气候变化下黄河流域未来水资源趋势分析[J].水利水运工程学报,2020(2):1-8.(WANG Guoqing, QIAO Cuiping, LIU Minglu, et al. The future water resources regime of the Yellow River Basin in the context of climate change[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2020(2): 1-8. (in Chinese))

- [11] 刘德地, 王高旭, 陈晓宏, 等. 基于混沌和声搜索算法的水资源优化配置[J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31(7): 1378-1386. (LIU Dedi, WANG Gaoxu, CHEN Xiaohong, et al. Optimal water resources deployment based on chaos harmony search algorithm[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2011, 31(7): 1378-1386. (in Chinese))
- [12] 赵人俊, 王佩兰. 新安江模型参数的分析[J]. 水文, 1988(6): 2-9. (ZHAO Renjun, WANG Peilan. Analysis of Xin'anjiang model parameters[J]. Journal of China Hydrology, 1988(6): 2-9. (in Chinese))
- [13] ALLEN R G, SMITH M, PERRIER A, et al. An update for the definition of reference evapotranspiration[J]. Journal of Environmental Science and Health Part A-toxic/hazardous Substances & Environmental Engineering, 1994, 43: 1-35.
- [14] ALLEN R, PEREIRA L, RAES D, et al. Crop evapotranspiration—guidelines for computing crop water requirements—FAO Irrigation and drainage paper 56[M]. Rome: FAO, 1998: 56.
- [15] 程鹏, 沈天成, 罗汉, 等. 石羊河上游地面人工增雨效果统计检验分析[J]. 干旱区地理, 2021, 44(4): 962-970. (CHENG Peng, SHEN Tiancheng, LUO Han, et al. Statistical test and analysis of artificial rainfall enhancement effect in the upper Shiyang River Basin[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(4): 962-970. (in Chinese))
- [16] 李宏宇, 嵇磊, 周崑, 等. 北京地区人工增雨效果和防雹经济效益评估[J]. 高原气象, 2014, 33(4): 1119-1130. (LI Hongyu, JI Lei, ZHOU Wei, et al. Effect evaluation of precipitation enhancement and hail suppression programs in Beijing region[J]. Plateau Meteorology, 2014, 33(4): 1119-1130. (in Chinese))

Sensitivity analysis of water resources supply and demand balance to precipitation changes in Beisanhe River Basin

LIU Tao^{1,2,3}, ZHAO Zejin⁴, LIU Licheng⁴, WANG Gaoxu^{1,3}, WU Yongxiang^{1,3},
WU Wei^{1,3}, TIAN Xueying^{1,2,3}, ZHANG Nina^{2,3}

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210029, China; 4. Honghe Nanyuan Water Supply Co., Ltd., Mengzi 661000, China)

Abstract: Analyzing the sensitivity of water supply and demand balance in different regions to changes in precipitation, based on the spatial distribution of cloud water resources and precipitation efficiency, is helpful to determining the location of normalized artificial precipitation enhancement, and is of great significance to the realization of the coordinated use of air and land water resources. We take the Beisanhe River Basin as the research area, analyze the response of the study area's incoming water demand to precipitation changes based on the Xin'anjiang Model and Penman-Montes formula, and discuss the sensitivity of the water supply and demand balance of different computing units to precipitation changes. The results show that when precipitation increases, the rate of increase in annual water production in the basin is greater than that in dry years and extreme dry years, and the water demand for farmland irrigation is roughly linear. Without considering external water transfer and groundwater overexploitation, the resource water shortage of the basin under the natural precipitation scenario is 3.546 billion cubic meters (precipitation frequency $p=50\%$), 4.317 billion billion cubic meters ($p=75\%$) and 4.630 billion cubic meters ($p=95\%$), and the peak of water shortage appears in May, July and August, respectively. The sensitivity of each unit's water shortage to changes in precipitation is mainly dominated by changes in water production, and shows a gradual decrease in space from north to south. When the average annual precipitation increases by 20%, water shortage in the north region will reach 150% or more, the central region will be between 30% and 50%, and the southern region will decrease by less than 15%.

Key words: sensitivity analysis; balance of supply and demand; changes in precipitation; Beisanhe River Basin; Xin'anjiang Model