

气候变化对南水北调中线受水区径流量影响

梁钟元¹, 王海潮², 雷晓辉³

(1. 南水北调工程设计管理中心, 北京 100038; 2. 中国国际工程咨询公司, 北京 100048;
3. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘要: 资料显示, 南水北调中线受水区近 50 年来气温增高 1℃左右。为了分析气候变化对未来南水北调水源区需调水量的影响, 本文以南水北调中线受水区为研究对象, 采用 WCRP 的 CMIP3 数据, 运用 WEP-L 分布式水文模型, 计算气候变化情景对南水北调中线受水区径流量的影响。研究成果对于南水北调中线工程通水后水源区需调水量研究具有重要的借鉴意义, 为研究气候变化对径流量的影响提供了一种可靠的方法, 并为分析气候变化对水循环的影响奠定了重要的基础。

关键词: 气候变化; CMIP3; WEP-L; 南水北调中线受水区; 径流量影响

中图分类号: TV68; P339 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2014)02-0137-05

Impact of Climate Change on the Intake Area Runoff in the Middle Route of South to North Water Diversion Project

LIANG Zhong yuan¹, WANG Hai chao², LEI Xiao hui³

(1. Office of the South to North Water Diversion Project Commission of the State Council, Beijing 100038, China;
2. China International Engineering Consulting Corporation, Beijing 100048, China;
3. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: Previous results showed that the temperature of the intake area in the Middle Route of South to North Water Diversion Project increases by about 1℃ in recent 50 years. In order to analyze the impact of climate change on the future water regulation quantity in the water source area of the South to North Water Diversion Project, the paper investigated the impact of climate change on the intake area runoff in the Middle Route of South to North Water Diversion Project using the WEP-L distributed hydrological model based on the CMIP3 data of WCRP. The results are of an important significance for the study of water regulation quantity in the water source area during the operation of Middle Route of South to North Water Diversion Project, provide a reliable method for the study of the impact of climate change on runoff, and lay an important foundation for the analysis of the impact of climate change on hydrologic cycle.

Key words: climate change; CMIP3; WEP-L; intake area in the Middle Route of South to North Water Diversion Project; runoff impact

南水北调中线工程从汉江丹江口水库陶岔渠首闸引水, 经长江流域与淮河流域的分水岭方城垭口, 沿黄淮海平原西部边缘开挖渠道, 在郑州以西孤柏咀处通过隧洞穿过黄河, 沿京广铁路西侧北上, 基本自流到北京、天津^[1]。南水北调中线工程受水区(以下简称受水区)指规划由中线工程补水, 进行水资源供需分析的计算范围。根据自然条件、行政区划并考虑与南水北调东线和安徽省引江济淮线规划的补水范围衔接。规划的中线工程受水区为唐白河平原及黄淮海平原的西中部, 构成南北向逾 1 000 km、东西向局部超过 300

km 的条带状范围, 包括北京市和天津市的全部, 以及河北省、河南省的部分地区, 总面积 15 1 万 km²。由于受水区横跨海河流域、黄河流域、淮河流域, 在全球气候变暖^[2]的大背景下, 受水区径流量的形成极易受到气候变化的影响, 从而间接影响水源区的需调水量。

为了定量计算未来情景下水源区需调水量, 本文从需求角度出发, 选取受水区为研究对象, 在分析受水区气候变化事实的基础上, 计算气候变化情景下受水区径流量的变化, 以期在南水北调中线工程通水后水源区需调水量研究提供借鉴。

收稿日期: 2013-06-15 修回日期: 2014-01-15 网络出版时间: 2014-03-11

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2014.02.001.html>

作者简介: 梁钟元(1979), 男(朝鲜族), 吉林人, 工程师, 硕士, 主要从事技术管理及分布式流域水文模型方面研究。E-mail: lzy9905@mwr.gov.cn

1 受水区气候变化研究

1.1 受水区气温变化趋势

在受水区范围内东、南、西、北四个方向分别选择赤峰站、大同站、东营站、老河口站 1961-2005 年系列年平均气温数据,分析气温变化趋势,结果如图 1-图 4 所示。受水区年平均气温变化情况如图 5 所示。

总体看来,近 50 年受水区气温呈现增高的趋势,增高幅度 1℃左右。

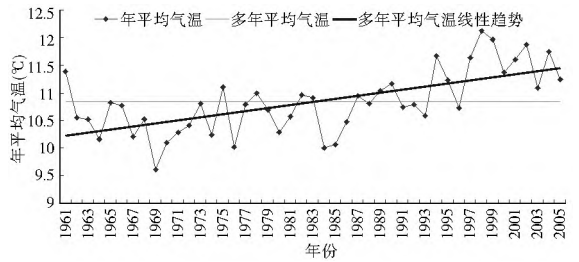


图 5 受水区年平均气温变化情况

Fig. 5 Variation of annual average temperature in the intake area

果不尽相同。许多研究证明,多个模式的平均效果优于单个模式的效果。因此,本文选用“WCRP 的耦合模式比较计划-阶段 3 的多模式数据”,简称为 CMIP3 数据^[3]。

通过分析,得到受水区 2001 年-2030 年系列及 2031 年-2050 年系列年平均气温及年降水量较 1901 年-2000 年系列的变化情况,见表 1。

表 1 受水区气温、降水变化情况

Table 1 Variations of temperature and precipitation in the intake area

气候情景	系列年	降水变化/mm	降水变化比例(%)	最大变幅(%)	气温变化幅度(℃)	最大变幅(℃)
A1B	2001-2030	14.46	1.9	9.2	0.97	1.63
	2031-2050	24.34	3.1	13.5	1.39	2.61
A2	2001-2030	13.38	1.7	7.4	1.04	1.58
	2031-2050	22.52	2.9	10.2	1.31	2.3
B1	2001-2030	27.39	3.5	10.1	0.98	1.46
	2031-2050	36.31	4.7	12.5	1.19	1.83

GCM 模拟的水文要素有两个主要的局限性^[4]:一是水文参数化很简单,常常不能提供详细的对水资源管理必需的信息;二是空间分辨率太粗,不能提供水文学方面关心的典型尺度上的水文信息。这种变化基本上反映大气温室气体浓度达到某一水平后,可能发生的升温和降水的变化而引起水循环的改变,基本上没有考虑人类作用于下垫面引起水循环的变化^[5]。

另外,GCM 模拟的水文要素在时间和空间尺度上与分布式水文模型不一致,因此气候模式的结果不能直接应用于分布式水文模型。本文在 CMIP3 数据输出结果的基础上,给出了气候变化情景,见表 2。

表 2 气候变化情景

Table 2 Climate change scenarios

气候变化	气温变化幅度(℃)				降水变化比例(%)			
变化值	-2	-1	1	2	-10	-5	5	10

2 气候变化对受水区径流量影响研究

2.1 受水区分布式水文模型构建

2.1.1 受水区水文模拟范围

由于受水区跨流域、跨区域,水文模拟为流域与区域相结合分布式水文模拟,另外,受水区的范围大部分都是平原区,但产流主要来自上游的山区。因此要精确模拟受水区的水循环过程,就要保证上游山区的产流模拟精确,或者研

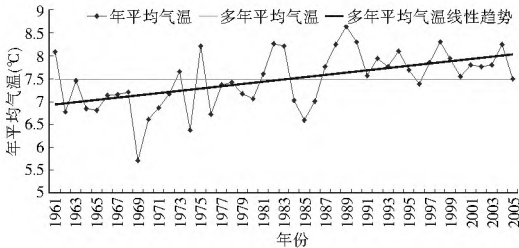


图 1 赤峰站年平均气温变化情况

Fig. 1 Variation of annual average temperature at the Chifeng station

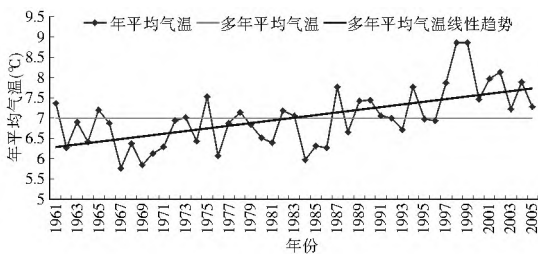


图 2 大同站年平均气温变化情况

Fig. 2 Variation of annual average temperature at the Datong station

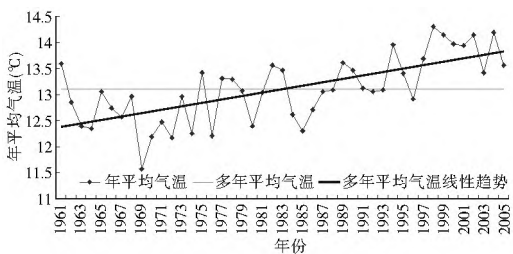


图 3 东营站年平均气温变化情况

Fig. 3 Variation of annual average temperature at the Dongying station

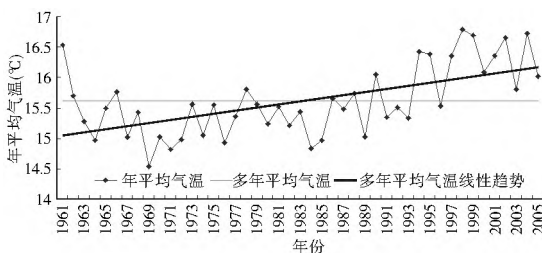


图 4 老河口站年平均气温变化情况

Fig. 4 Variation of annual average temperature at the Laohekou station

1.2 受水区未来气候变化情景

在气候变化研究中,不同气候模式对不同地区的模拟效

究区域的入口点水文资料足够精确。在综合考虑中线受水区边界、上游产流区和相关水文站位置等因素的前提下,最终确定:研究区域北边界为海河流域流域界;南边界为长江流域界;西边界分为三部分:海河流域界、黄河流域的一部分(通过入口点确定)、淮河流域界;东边界分为三个部分:海河流域为地市界、黄河流域通过出口点确定、淮河流域为扩大的地市界。

由于单独对汉江流域进行了分布式水文模拟,因此本文研究区域不包括长江流域部分。

2.1.2 受水区分布式水文模型构建

(1) 模型构建。鉴于受水区范围的广阔性,论文采用 WEPL 模型进行分布式水文模型构建^[6]。模型的输入数据包括水文气象、地表高程信息、河网、土地利用/覆被、土壤信息、水文地质、水保工程以及社会经济供水信息(受水区气象站分布如图 6 所示)。模型建立包括模拟水系提取、子流域划分、参数分区划分、气象信息空间展布四部分,将受水区共划分为 3 089 个子流域(子流域划分结果如图 7 所示),12 617 个子流域套等高带的计算单元。根据 38 个水文站,25 个出口点,共划分出 63 个参数分区(受水区参数分区结果如图 7 所示)。参数分区描述了每个水文站、出口点所独立控制的子流域全集。划分参数分区好处有:a. 可以根据水文站的径流过程分片进行参数调整;b. 可以只对参数分区内的子流域进行计算,从而大大提高模拟参数敏感性分析、率定的效率;c. 当上游有控制站时,下游参数分区计算就会自动读入上游参数分区的计算结果。

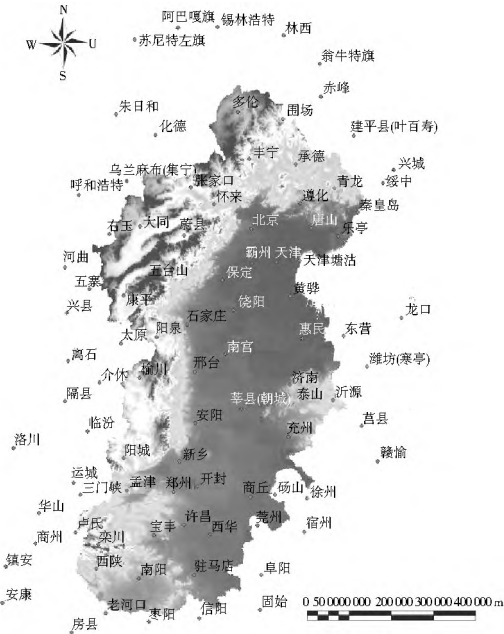


图 6 受水区气象站分布

Fig. 6 Distribution of meteorological stations in the intake area

(2) 参数敏感性分析。WEPL 模型的参数可分为三类:地表面及河道系统参数、植被参数、土壤与含水层参数,所有参数均有物理意义。理论上可根据观测实验数据和遥感数据进行推算而无需率定。但由于这些参数在每个计算单元内具有空间变异性,模拟计算时往往使用其单元内平均参数或称有效参数,因此,通常仍根据流量过程线对一些关键参

数进行适当调整。WEPL 模型参数敏感性分析的十个关键参数见表 3。

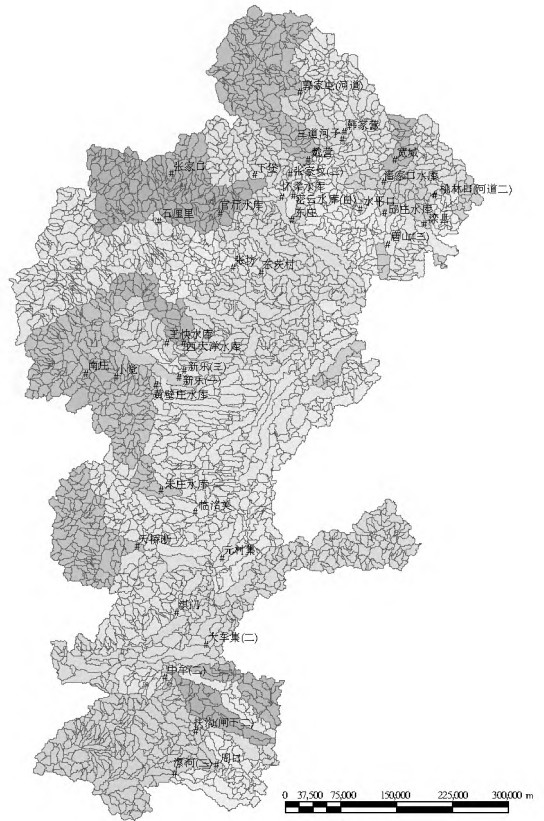


图 7 受水区参数分区结果

Fig. 7 Parameter zonations in the intake area

表 3 参数敏感性分析参数抽样范围

Table 3 Range of parameter values for the sensitivity analysis

序号	名称	下限	上限	参数说明
1	HSSF Coef	0.1	5	最大洼地储留深
2	W 3DE1	0.1	1	第一层土壤厚度
3	W 3DE2	0.2	2	第二层土壤厚度
4	W 3DE3	0.4	3	第三层土壤厚度
5	AK Coef	0.01	10	土壤渗透系数修正系数
6	rcdt Coef	0.01	30	含水层横向导水系数修正系数
7	ATHK Coef	0.1	30	山区含水层厚度修正系数
8	RCM Icoef	0.1	10	气孔阻抗修正系数
9	RivMNCof	0.01	1	子流域间河道汇流
10	SubMNCof	0.01	1	子流域内部坡面汇流

几个有代表性的水文站参数敏感性分析结果见表 4。

表 4 敏感性分析结果

Table 4 Sensitivity analysis results

水文站	三个最敏感参数		
大车集(二)	AK Coef	W 3DE3	W 3DE1
张家园(二)	ATHK Coef	AK Coef	rcdt coef
宽城	ATHK Coef	AK Coef	W 3DE2
桃林口(河道二)	ATHK Coef	W 3DE2	rcdt coef
漯河(二)	AK Coef	rcdt Coef	RivMNCof
南庄	rcdt Coef	AK Coef	W 3DE3

(3) 模型率定与验证。根据实测资料情况, 模型验证选取了 1961 年- 1970 系列年进行模型率定, 选取 1971 年- 1988 系列年进行模型验证, 结果见表 5。

从以上结果看出, 6 个站的 Nash 效率系数都在 0.5 以上, 而且大部分都在 0.8 以上, 相关系数都在 0.9 以上, 而径流量误差最大在 30%, 说明模型模拟效果好, 精度较高。

2.2 气候变化对受水区径流量影响研究

根据气候情景中的气温变化值及降雨变化值, 模拟出 1956 年- 2005 年 50 年系列各个参数分区的年径流量变化比例, 结果如图 8- 图 15 所示。

水文站	流域	率定结果			验证结果		
		误差 (%)	Nash 系数	相关系数	误差 (%)	Nash 系数	相关系数
大车集(二)	黄河	-23.12	0.75	0.89	7.10	0.46	0.71
张家坟(二)	海河	-29.36	0.91	0.98	3.81	0.55	0.95
宽城	海河	-22.63	0.94	0.99	-9.92	0.89	0.98
桃林口(河道二)	海河	-1.48	0.94	0.97	-0.10	0.82	0.96
漯河(二)	淮河	15.33	0.88	0.94	-10.22	0.81	0.93
南庄	海河	-15.45	0.85	0.93	-23.39	0.64	0.91

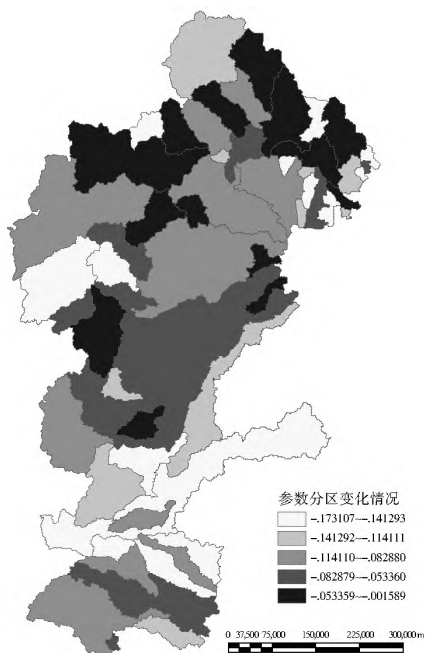


图 8 降水减少 5% 情景下各参数分区径流变化比例
Fig. 8 Variation percentages of runoff in each parameter zone with the decreasing of 5% precipitation

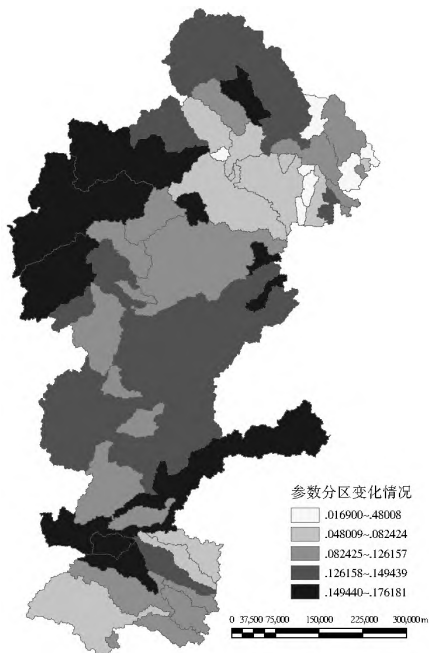


图 9 降水增加 5% 情景下各参数分区径流变化比例
Fig. 9 Variation percentages of runoff in each parameter zone with the increasing of 5% precipitation

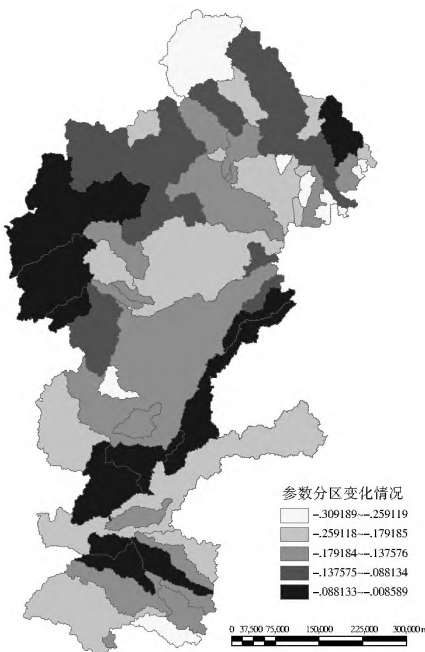


图 10 降水减少 10% 情景下各参数分区径流变化比例
Fig. 10 Variation percentages of runoff in each parameter zone with the decreasing of 10% precipitation

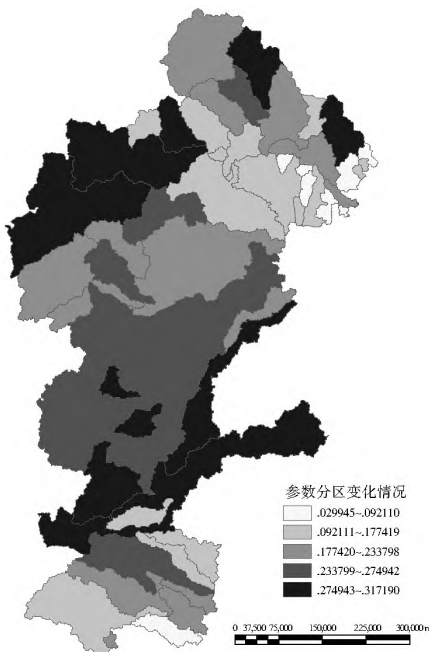


图 11 降水增加 10% 情景下各参数分区径流变化比例
Fig. 11 Variation percentages of runoff in each parameter zone with the increasing of 10% precipitation

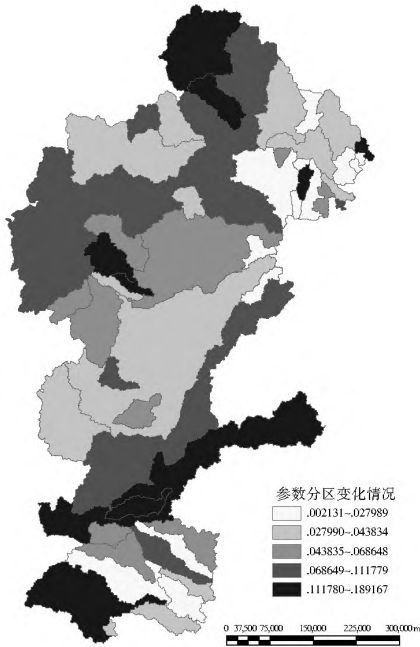


图 12 温度降低 1 °C 情景下各参数分区径流变化比例
Fig. 12 Variation percentages of runoff in each parameter zone with the decreasing of 1 °C temperature

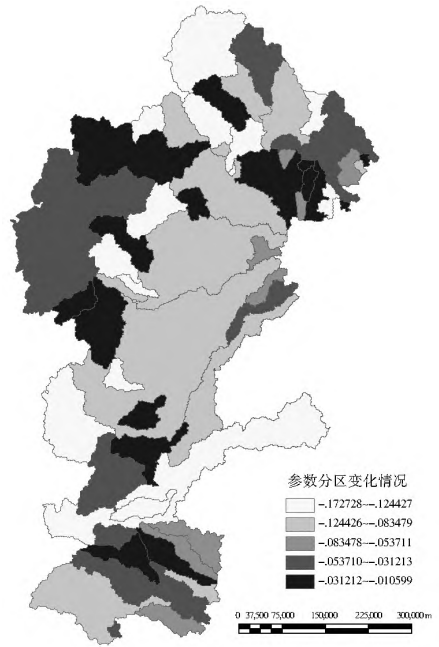


图 13 温度增加 1 °C 情景下各参数分区径流变化比例
Fig. 13 Variation percentages of runoff in each parameter zone with the increasing of 1 °C temperature

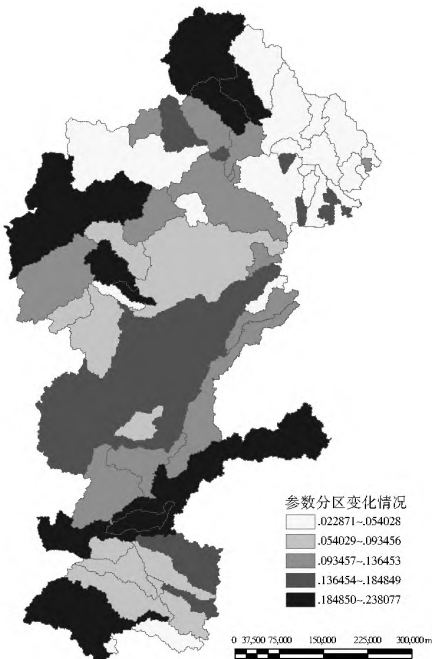


图 14 温度降低 2 °C 情景下各参数分区径流变化比例
Fig. 14 Variation percentages of runoff in each parameter zone with the decreasing of 2 °C temperature

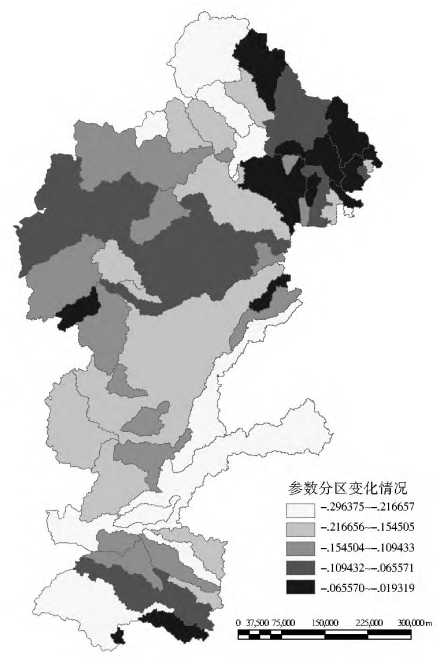


图 15 温度增加 2 °C 情景下各参数分区径流变化比例
Fig. 15 Variation percentages of runoff in each parameter zone with the increasing of 2 °C temperature

从图 8- 图 15 可以看出,黄河流域和海河流域子牙河山区、永定河册田水库以上山区、永定河册田水库至三家店区间几个三级区内参数分区径流变化比例较大。各参数分区平均径流变化比例见表 6。

表 6 气候变化情景下参数分区径流变化比例

Table 6 Variation percentages of runoff in each parameter zone under climate change scenarios

气候变化情景	气温变化幅度(°C)				降水变化比例(%)			
	- 2	- 1	1	2	- 10	- 5	5	10
径流变化比例(%)	11	6.6	- 7.3	- 13.4	- 15.6	- 9.2	11.1	20.1

总体看来,气温变化后,径流的增加减少与气温的升高降低呈现相反的趋势,径流变化率基本与温度变化率相同;降水变化后,径流的变化与降水的变化呈现一致的趋势,变化比例较降水变化比例偏大,径流变化率基本与降水变化率相同。

3 结语

变化环境下的水循环研究关注地球生物圈、全球变化以及人类活动对水循环的影响,是国际水文学与水资源学科及地理、生态等众多学科交叉的前沿性问题。本文分析了受水区区长系列气温变化趋势,模拟出了受水区八个气候变化情景,

(下转第 145 页)

不同深度的剪切波值波速范围为 153~ 226 m/s, 挤密区的地层剪切波波速范围为 167~ 297 m/s。挤密区的地层剪切波波速明显比原地层的地层剪切波速度高。

5 结论

通过夯扩挤密碎石桩施工现场的标准贯入试验和跨孔波速试验, 得出如下结论。

(1) 磁县段渠道夯扩挤密碎石桩试桩桩间土液化判别: 桩间距为 1.7 m、1.8 m 处理后地基土不存在液化, 桩间距为 1.9 m 处理后地基土存在液化。

(2) 从试桩的试验过程和检测结果可以得出, 采用步履式落锤载体扩桩机(重锤 3 500 kg, 锤径 355 mm), 每次填料量控制在 0.2~ 0.25 m³ 之间并且护筒提升速度不大于 1~ 2 m/min 内, 单击贯入度不大于 15 cm 的施工方 案, 能够达到消除液化的设计要求。

(3) 从原位跨孔剪切波速试验结果看, 桩间土的剪切波速较地基处理前提高较多, 夯扩挤密碎石桩的挤密效果明显。

参考文献(References):

[1] 许芸芸, 孙忠强, 刘亚昌, 等. 夯扩挤密碎石桩在沿海高速公路砂土液化地基中的应用[J]. 铁道建筑, 2007, (4): 66-67. (XU Yunyun, SUN Zhongqiang, LIU Yachang, et al. The Application of Ram Compaction Gravel Piles in Sand Liquefaction Improving of Coastal Express Way [J]. Railway Engineering, 2007, (4): 66-67. (in Chinese))

[2] 郝树林. 等能量等变形挤密渣土桩在北京动车段地基处理工程中的应用[J]. 工程勘察, 2009, (增1): 141-144. (HAO Shulin. The Application of Equal Energy and Deformation Compaction Muck Pile in Beijing High Speed Train Section [J]. Engineering Investigation & Surveying, 2009, (Supp. 1): 141-144.

(in Chinese))

[3] 符德军. 等能量等贯入度控制挤密碎石桩[J]. 山西建筑, 2007, 33(12): 122-123. (FU Dejun. Control of Compacted Gravel Pile with Equal Energy and Penetration [J]. Shanxi Architecture, 2007, 33(12): 122-123. (in Chinese))

[4] 胡存亮. 等能量等变形夯扩挤密桩在高速公路地基处理中的应用[J]. 交通标准化, 2007, (4): 69-71. (HU Cunliang. Application of Equal Energy and Equal Distortion Ramming Expanded Pile in Expressway Foundation Treatment [J]. Communication Standardization, 2007, (4): 69-71. (in Chinese))

[5] 张金成, 段亮亮. 等能量等变形挤密碎石桩处理液化砂土的效果[J]. 工程勘察, 2009(增1): 145-148. (ZHANG Jincheng, DUAN Liangliang. The Results of Equal Energy and Deformation Compaction Pile Treating Liquefaction Sand [J]. Engineering Investigation & Surveying, 2009, (Supp. 1): 145-148. (in Chinese))

[6] 封艳琴. 夯扩碎石桩在软基处理中的优势分析[J]. 北方交通, 2008(8): 128-130. (FENG Yanqin. Analysis of Superiority of Ram Replacement Stone Column to Treatment of Weak Foundation [J]. Northern Communications, 2008(8): 128-130. (in Chinese))

[7] 付殿武, 李凤起, 戚银生, 等. 夯扩挤密碎石桩处理液化砂土[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2010, 26(2): 282-285. (FU Diangu, LI Fengqi, QI Yisheng, et al. Study on Compacted Crushing Stone Pile in Treatment for Saturated Sand after Liquefaction [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2010, 26(2): 282-285. (in Chinese))

[8] 刘振京. 应用挤密碎石桩加固可液化地基的试验研究[J]. 路基工程, 2008, (3): 86-88. (LIU Zhenjing. Experimental Study of Compaction Gravel Piles Treating Liquefiable Foundation [J]. Subgrade Engineering, 2008, (3): 86-88. (in Chinese))

(上接第 141 页)

计算了气候变化对受水区径流量的影响, 研究成果对于气候变化对水循环的影响分析具有重要的理论价值, 对于研究未来情景下受水区需调水量具有重要的借鉴作用。

参考文献(References):

[1] 长江水利委员会长江勘测规划设计研究院. 南水北调中线一期工程项目建设书[R]. 2004. (Yangtze River Water Resources Investigation Planning and Design Institute Board. The First Phase of the Middle Route of South to North Water Transfer Project Proposal [R]. 2004. (in Chinese))

[2] 秦大河, 陈振林, 罗勇, 等. 气候变化科学的最新认知[J]. 气候变化研究进展, 2007, 3(2): 63-73. (QIN Dahe, CHEN Zhenlin, LUO Yong, et al. Updated Understanding of Climate Change Sciences [J]. Advances in Climate Change, 2007, 3(2): 63-73. (in Chinese))

[3] 国家气候中心. 中国地区气候变化预估数据集 Version 1.0 使用说明[Z]. 2008. (National Climate Centre. China Regional Climate Change Forecast Data Set Version 1.0 [Z]. 2008. (in Chinese))

[4] Gleick P H. Climate Change, Hydrology and Water Resources [J]. Reviews of Geophysics, 1989, 27(3): 329-344.

[5] 刘春葵. 气候变异与气候变化对水循环影响研究综述[J]. 水文, 2003, 23(4): 1-7. (LIU Chunhui. The Review of Impact Study of Climate Variability and Change on the Water Cycle [J]. Hydrology, 2003, 23(4): 1-7. (in Chinese))

[6] 贾仰文, 王浩, 倪广恒, 等. 分布式流域水文模型原理与实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005. (JIA Yangwen, WANG Hao, NI Guangheng, et al. A Distributed Watershed Hydrological Model Theory and Practice [M]. Beijing: China Water Power Press, 2005. (in Chinese))