

利用反向法评价气候变化下的水资源系统风险

李科^{1,2}, 齐晶瑶¹, 王昭阳¹, 冯岩¹, BROWN Casey³

(1. 哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090; 2. 吉林建筑工程学院市政与环境工程学院, 吉林 长春 130118; 3. University of Massachusetts, Amherst MA 01003, USA)

摘要: 目前多数研究直接将大气环流模式(GCM)获得的气候要素输入水文模型或者系统动力学模型评价气候变化所引起的风险, 而忽视了一些重要统计要素的实际影响。针对目前研究存在的问题, 利用随机模型产生大量模拟数据并输入到关于水资源系统的系统动力模型, 通过评价指数和模拟数据间的统计关系建立“气候响应模型”, 最终利用多种大气环流模式来进行风险评价。通过 A2 气候变化情景下 36 种 GCM 对美国麻州 Quabbin 水库未来两个时段 2036—2065 年和 2066—2095 年由气候变化引起的风险进行评价。结果表明, 在 1950—1999 年流域净流量年际方差 100%~140% 范围内, 2036—2065 年的风险为 0.25~0.30, 2066—2095 年的风险为 0.30~0.45。

关键词: 气候变化; 大气环流模式; 风险评价; 气候响应方程; 水资源系统

中图分类号: TV212 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2013)02-0184-06

20 世纪是人类历史地表温度上升最快的 100 年。进入 21 世纪以来, 由于温室气体排放量继续增长, 许多专家学者指出全球气候仍将以变暖为主要特征^[1-2]。地表气温的变化必然影响到全球以及区域水循环过程, 从而加剧洪涝和干旱的发生频率和程度, 这将直接威胁到供水安全、粮食安全, 同时也会引起一系列的社会和生态环境问题^[3-6]。

国际上关于气候变化对水资源影响方面的研究始于 20 世纪 70 年代, 随着大气环流模式(GCM)的逐步完善, 国际水文学者越来越重视全球变化对水资源的影响, 展开了大量研究工作^[7-8]。目前的研究多利用大气环流模式生成的气象要素直接输入相应的水文模型或者水资源动力学模型来评价气候变化对水资源系统的影响。例如, Hamlet 和 Lettenmaier^[9]利用 GCM 所得到的温度和降雨量输入到一个水库模型来评价未来气候变化对哥伦比亚流域水库的影响。单一的 GCM 只是对未来的一种猜测^[10], 为解决这一问题, 目前很多研究同时利用多种 GCM 评价气候变化对水资源的影响。例如, Vano 等^[11]利用 20 种 GCM 来评价 Puget Sound 地区水库在未来气候变化下供水的可靠度。由于 GCM 对未来气候要素的统计要素也很难正确反映, 如方差、自回归等^[12], 因此目前多数研究都是直接利用 GCM 来评价气候变化对水资源的影响, 往往忽略统计要素对水资源的实际影响, 而实际上这些统计要素对水资源均有很大的影响^[13]。

本文针对直接利用 GCM 所产生的问题, 提出一种新的评价气候变化对水资源影响的方法, 称作“反向方法”。首先建立关于水资源系统的系统动力学模型; 利用随机模型根据观测数据生成大量模拟数据, 输入到系统动力学模型中, 同时选取一个评价指数来评价水资源系统, 最终利用评价指数和输入的模拟数据间的统计关系建立“气候响应方程”; 将 GCM 得到的气象要素, 通过水文模型转换成“气候响应方程”相应的输入变量, 最终对气候变化下的水资源系统进行风险评估。

收稿日期: 2012-06-06; 网络出版时间: 2013-02-02

网络出版地址: <http://www.cnki.net/KCMS/detail/32.1309.P.20130202.1645.005.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40971026); 城市水资源与水环境国家重点实验室开放研究项目(ES201109 HIT)

作者简介: 李科(1982-), 男, 辽宁沈阳人, 博士研究生, 主要从事水资源管理研究。E-mail: like_student@163.com

通信作者: 齐晶瑶, E-mail: jyq@hit.edu.cn

1 研究区域及资料

Quabbin 水库位于美国麻州中部, 是麻州最大的内陆水体。主要为水库以东 105 km 的波士顿提供水源, 也为波士顿地区的 40 个社区进行供水。同时, 也作为其西部 3 个城镇的水源地, 此外作为另外 3 个城镇的备用水源。Quabbin 水库流域面积 490 km², 水面面积 99.9 km², 最大库容 15.6 亿 m³, 死库容 0.634 亿 m³。Swift 河是其主要供水来源。Quabbin 水库每天对外供水 113 万 m³。

本文所采用的观测数据为 1950—1999 年的流域净流量(径流量 - 蒸发量)、降雨量、月平均温度、日最高温度、日最低温度。本文采用 36 种 GCM 在 A2 气候变化情境下输出的 2036—2095 年资料, 并将其分为两个未来时段进行分析: 2036—2065 年和 2066—2095 年。具体所采用的 36 种 GCM 见表 1。在 A2 气候变化情景下, 人口快速增长(每年 0.83%), 国际合作较少, 经济增长迟缓(每年 1.65%), 到 21 世纪末 CO₂ 体积分数达到 754 mL/m³[14]。所有 GCM 所采用的水平分辨率均为 0.125° × 0.125°。在下文分析过程中, 均以 1950—1999 年作为平均状态。

表 1 本文所采用的 GCM
Table 1 GCMs adopted by this paper

GCM 名称	编号	GCM 名称	编号
BCCR_BCM2_0	1	IPSL_CM4	1
CCCMA_CGCM3_1	1, ..., 5	MIROC3_2_MEDRES	1, ..., 3
CNRM_CM3	1	MIUB_ECHO_G	1, ..., 3
CSIRO_MK3_0	1	MPI_ECHAM5	1, ..., 3
GFDL_CM2_0	1	MRI_CGCM2_3_2A	1, ..., 5
GFDL_CM2_1	1	NCAR_CCSM3_0	1, ..., 4
GISS_MODEL_E_R	1	NCAR_PCM1	1, ..., 4
INMCM3_0	1	UKMO_HADCM3	1

2 系统动力学模型的建立

利用 Stella 软件建立关于 Quabbin 水库的系统动力学模型, 该模型以月为基本步长, 其水量平衡用下式表示:

$$S_t = S_{t-1} + Q_t - R \quad (1)$$

式中 S_t 为 t 月末的水存储量; S_{t-1} 为 $t-1$ 月末的水存储量; Q_t 为流域净流量(径流量 - 蒸发量); R 为供水量, 在模型中设定为麻州水利委员会所要求的每天供水 113 万 m³。当 S_t 大于水库库容 15.6 亿 m³ 时, 超出的部分被认为全部溢出; 当 S_t 小于水库死库容 0.634 亿 m³ 时, 供水默认为 0。

3 气候响应方程的建立

本文采用可靠度 C_R 作为评价水库在气候变化下的表现指数[15]。该指数已经广泛应用于水资源研究[16], 可表示为

$$C_R = \sum_{t=1}^T Z_t / T \quad (2)$$

式中 当 $Z_t = 1$ 时, 表示 t 月水库达到供水要求, 当 $Z_t = 0$ 时表示 t 月水库未达到供水要求; 如果 $X_t \geq C$, 则 $Z_t = 1$, 否则 $Z_t = 0$, X_t 为水库供水量, C 为麻州水利委员会制定每天供水要求 113 万 m³。

为了获得更多样品空间以建立“气候响应方程”, 本文利用时间序列模型根据 1950—1999 年的流域净流量观测数据的 100%, 95%, 90%, 85%, 80%, 70%, 共产生 6 组 50 000 年随机模拟数据, 所采用的时间序列模型为 ARMA(1, 4), 其中 1 和 4 利用 AIC 方法[17]最终确定。具体关于 ARMA 模型可参见文献[18]。将

模拟数据以30年为一周期进行分割,最终得到4998个周期,并将每一周期的数据输入到所建立的系统动力学模型中,这样每一周期都会得到一个相应的可靠度。最后利用探索分析法对每一周期的统计要素(流域净流量年平均值、年际标准方差、年自相关、多年月平均值、月标准方差和月自相关)和可靠度之间的统计关系进行分析,结果表明流域净流量的年平均值和年际标准方差可以描述98%的可靠度指数。这说明可以利用流域净流量的年平均值和年际标准方差与可靠度之间的统计关系建立“气候响应方程”。本文采用多元 Logistic 函数建立“气候响应方程”:

$$C_r = \frac{1}{1 + \exp(\beta X)} \quad (3)$$

$$\beta X = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_n X_n \quad (4)$$

式中 β_n 为系数; X 为预测因子。采用 Logistic 函数最大的优点是其能将预测因子从 $[-\infty, +\infty]$ 范围转换成被预测指数的 $[0, 1]$, 这与可靠度指数的范围一致。本文将流域净流量年平均值 (km^3) 和年际方差 (km^3) 作为预测因子, 可靠度作为被预测指数。利用 ARMA 产生的模拟数据和对应的可靠度指数, 通过最大相似法来确定系数 β_n , 其中, β_0 为 -13.5318 ; 流域净流量年均值的系数 β_1 为 6.6128×10^{-5} ; 流域净流量年标准方差的系数 β_2 为 -1.0535×10^{-5} , 相关系数为 0.82。

4 水文模型

本文采用5参数的 ABCD 水文模型^[10], 主要参数分别为 a 、 b 、 c 、 d 和 e , 每个参数都有明确的物理意义, 其中 a 为土壤完全饱和和前径流的倾向性; b 为蒸发逾土壤含水量的上限; c 为平均径流来自地下水的比例系数; d 为地下水残留时间的倒数; e 为融化比率, 所有参数均用最小二乘法获得。

图1对比了利用 ABCD 水文模型模拟 1950—1999 年流域净流量与观测值的差异, 以检验 ABCD 模型的性能。图1(a)对模拟数据与观测数据进行了逐月对比, 二者的变化趋势及大小较为一致, 表明 ABCD 模型能够很好地反映流域净流量的变化情况。图1(b)对模拟数据和观测数据进行了 1:1 的对比, 模拟数据与观测数据比值基本围绕在 1:1 线周围, 二者的线性关系也达到了 0.89。图1(c)从多年各月平均流域净流量进行了对比。1~7月、10月和12月模拟数据与观测数据基本一致; 8月、9月模拟数据略高于观测数据, 分别约为 0.4 km^3 和 0.7 km^3 ; 11月的模拟结果略低于观测数据, 约为 0.4 km^3 , 总体对多年月平均模拟结果较好。由此可知 ABCD 模型能够很好地模拟 Quabbin 水库的流域净流量。

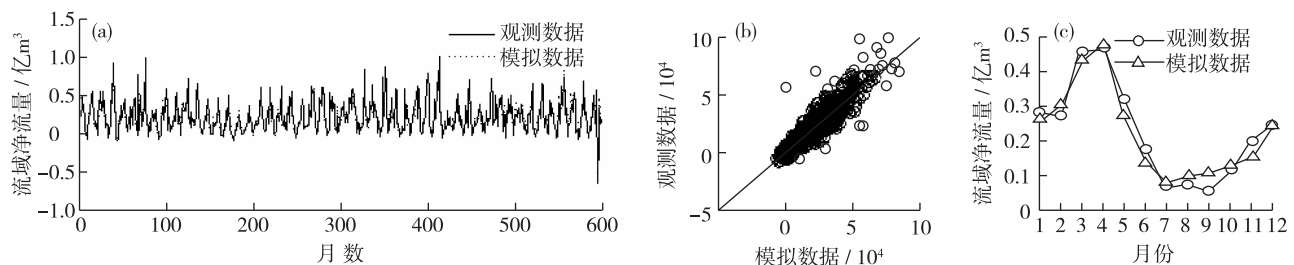


图1 1950—1999年观测流域净流量和模拟流域净流量对比

Fig. 1 Observed and simulated net basin supply (Q_t) from 1950 to 1999

图2对比了 GCM 预测未来两个时段的年均温和年降雨量与观测数据的年均温和年降雨量。如图2所示, 在未来两个时段, 大部分 GCM 结果显示降雨量增加, 并且在两个未来时段的降雨量增加数量相差不多, 同时也有部分 GCM 结果显示降雨量将要减少。此外, 所有 GCM 结果显示年均温将要升高, 尤其在 2066—2095 年更为明显, 从观测数据的 7.8°C 上升到 $10.0 \sim 12.8^\circ\text{C}$ 。图3对比了 ABCD 模型利用 GCM 预测的气候要素模拟流域净流量年均值与观测的流域净流量年均值。由图3可见, 2036—2065 年利用 GCM 预测流域净流量年均值的中位数高于观测数据, 升高了 5% 左右; 2066—2095 年利用 GCM 预测流域净流量年均值的中

位数较观测数据低, 降低了 5% 左右。总体上看, 由 GCM 预测未来两个时期的流域净流量年均值主要集中在观测数据的 70% ~ 140% 之间。结合图 2 和图 3 可知, 尽管未来两个时段大部分 GCM 显示年降雨量将有所增加, 但近半数 GCM 的结果显示流域净流量年均值要低于观测数据。

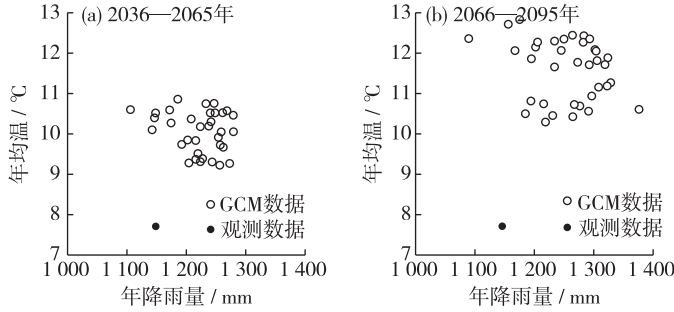


图 2 从 GCM 中得到的年均温和年降雨量

Fig. 2 Annual temperature and precipitation obtained from GCM

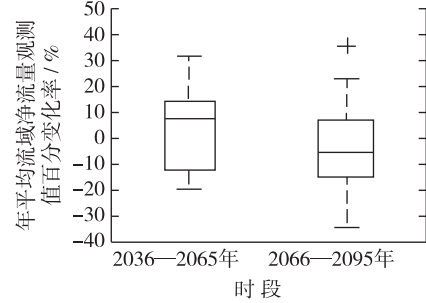


图 3 未来 GCM 与观测的流域净流量的年平均变化率

Fig. 3 Percent change of net basin supply from GCM to the observed data

5 风险评价

风险常表述为与可靠度相对应的风险率, 即荷载大于系统承载能力引发系统失效的概率^[20], 本文定义为当供水量低于供水要求的概率, 风险方程可表示为

$$r = \sum L(\theta_i)P(\theta_i) \tag{5}$$

式中 r 为风险; $P(\theta_i)$ 为气候 θ 在状态 i 下的概率; $L(\theta_i)$ 为 θ_i 气候状态下的损失方程, 本文 $L(\theta_i)$ 表示为

$$L(\theta_i) = \begin{cases} 1 & C_R < C \\ 0 & C_R \geq C \end{cases} \tag{6}$$

由于麻州水利委员会要求可靠度要大于 0.95, 所以本文将阈值 C 设定为 0.95。利用式(6), $L(\theta_i)$ 就变成了二元形式, 对风险 r 的计算直接转化成对 $P(\theta_i)$ 的计算。由于 GCM 预测的气候要素年标准方差往往低于实际值很多, 而气候变化引起气候要素年际的波动将要增加, 也就是气候要素的年标准方差增加, 本文假设未来流域净流量年际变化在观测值 100% ~ 140% 间变化, 所以本文将流域净流量的年际方差设置成基准年的 100%、110%、120%、130% 和 140%, 同时将 ABCD 水文模型所计算得到的未来两个时段的流域净流量年均值输入到“气候响应方程”, 这样就得到未来两个时段不同流域净流量年际标准方差下的可靠度。为了计算 $P(\theta_i)$, Vano 等^[11] 建议把每种 GCM 所预测的气候状态在未来都具有相同的发生概率。也就是说, 哪种被预测的气候状态下的 GCM 数量多, 这种气候状态在未来发生的概率也越大, 所以可以利用经验累积函数来计算 $P(\theta_i)$, 其公式如下^[21]:

$$P(\theta_i) = \frac{m_i}{n + 1} \tag{7}$$

式中 m_i 为气候 θ_i 状态下可靠度的排序(从小到大); n 为 GCM 数量, 本文为 36。其计算结果如图 4 所示。由图 4 可见, 在未来两个时段, 随着流域净流量年际标准方差的增加, 其风险值均升高。当流域净流量年际标准方差从观测数据的 100% 上升至 140% 时, 在 2036—2065 年时段, 风险值变化不大, 从 0.25 上升至 0.30; 在 2066—2095 年, 风险值从 0.30 上升至 0.45。由此可知, 流域净流量年际标准方差对风险值影响较大, 当流域净流量年际标准方差从观测值的 100% 上升至 140% 时, 虽然风险值在 2036—2065 年时段只上升 0.05 左右, 但其他两个时段均超过 0.10。未来两个时段的风险值在 100% ~ 140% 流域净流量观测值年际标准方差范围内均超过 0.20, 尤其在最后时段 2066—2095 年, 风险值为 0.30 ~ 0.45。决策者必须对目前水资源系统做出相应措施以降低受未来气候变化的影响。

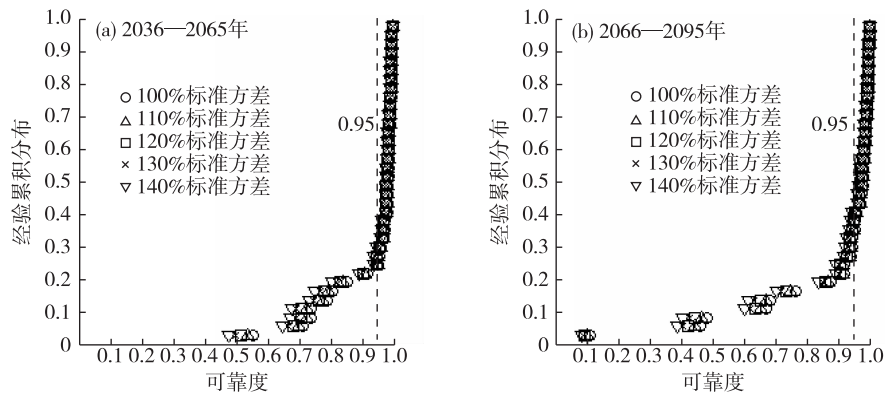


图4 可靠度的经验累积分布

Fig. 4 Empirical cumulative distribution function of the reliability

6 结 论

将评价气候变化对水资源影响的“反向”方法应用到美国麻州的 Quabbin 水库, 在观测的流域净流量的年际方差 100% ~ 140% 范围内, A2 气候变化情景下, 2036—2065 年的风险为 0.25 ~ 0.30; 2066—2095 年的风险为 0.30 ~ 0.45。在 A2 气候变化情景下, 未来两个时段的风险值均超过了 0.20, 决策者应根据情况对现有水资源系统进行必要的调整。

参考文献:

- [1] HAYHOE K, WAKE C, ANDERSON B, et al. Regional climate change projections for the Northeast USA[J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2008,13(5/6): 425-436.
- [2] 董磊华,熊立华,于坤霞,等. 气候变化与人类活动对水文影响的研究进展[J]. *水科学进展*, 2012,23(2): 278-285. (DONG Leihua, XIONG Lihua, YU Kunxia, et al. Research advances in effects of climate change and human activities on hydrology[J]. *Advance in Water Science*, 2012,23(2): 278-285. (in Chinese))
- [3] ANDERSON B T, HAYHOE K, LIANG X Z. Anthropogenic-induced changes in twenty-first century summertime hydroclimatology of the Northeastern US[J]. *Climatic change*, 2010,99(3/4): 403-423.
- [4] ZARGHAMI M, ABDI A, BABAEIAN I, et al. Impacts of climate change on runoffs in East Azerbaijan, Iran[J]. *Global and Planetary Change*, 2011,78(3/4): 137-146.
- [5] 李林,戴升,申红艳,等. 长江源区地表水资源对气候变化的响应及趋势预测[J]. *地理学报*, 2012(7): 941-950. (LI Lin, DAI Sheng, SHEN Hongyan, et al. Response of water resources to climate change and its future trend in the source region of the Yangtze River[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012(7): 941-950. (in Chinese))
- [6] 夏星辉,吴琼,牟新利. 全球气候变化对地表水环境质量影响研究进展[J]. *水科学进展*, 2012,23(1): 124-133. (XIA Xinghui, WU Qiong, MOU Xinli. Advances in impacts of climate change on surface water quality[J]. *Advance in Water Science*, 2012, 23(1): 124-133. (in Chinese))
- [7] TANZEEBA S, GAN T Y. Potential impact of climate change on the water availability of South Saskatchewan River Basin[J]. *Climatic Change*, 2012,112(2): 355-386.
- [8] 刘艳丽,张建云,王国庆,等. 气候自然变异在气候变化对水资源影响评价中的贡献分析: I. 基准期的模型与方法[J]. *水科学进展*, 2012,23(2): 147-155. (LIU Yanli, ZHANG Jianyun, WANG Guoqing, et al. Evaluation on the influence of natural climate variability in assessing climate change impacts on water resources: I: Model and methodology in baseline period[J]. *Advance in Water Science*, 2012,23(2): 147-155. (in Chinese))
- [9] HAMLET A F, LETTENMAIER D P. Effects of climate change on hydrology and water resources in the Columbia River basin[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 1999,35(6): 1597-1623.

- [10] CUNDERLIK J M, SIMONOVIC S P. Inverse flood risk modelling under changing climatic conditions[J]. *Hydrological Processes*, 2007, 21(5): 563-577.
- [11] VANO J A, VOISIN N, CUO L, et al. Climate change impacts on water management in the Puget Sound region, Washington State, USA[J]. *Climatic Change*, 2010, 102(1/2): 261-286.
- [12] ARORA V K, BOER G J. Effects of simulated climate change on the hydrology of major river basins[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(D4): 3335-3348.
- [13] VOGEL R M, LANE M, RAVINDIRAN R S, et al. Storage reservoir behavior in the United States[J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 1999, 125(5): 245-254.
- [14] NAKICENOVIC N, ALCAMO J, DAVIS G, et al. Special report on emissions scenarios: A special report of working group III of the intergovernmental panel on climate change[R]. Place: Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA (US), Environmental Molecular Sciences Laboratory (US), 2000.
- [15] HASHIMOTO T, STEDINGER J R, LOUCKS D P. Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water-resource system performance evaluation[J]. *Water Resources Research*, 1982, 18(1): 14-20.
- [16] KARAMOUZ M, IMEN S, NAZIF S. Development of a demand driven hydro-climatic model for drought planning[J]. *Water Resources Management*, 2012, 26(2): 329-357.
- [17] AKAIKE H. An information criterion (AIC)[J]. *Math Sci*, 1976, 14(3): 5-9.
- [18] SALAS J, OBEYSEKERA J. ARMA model identification of hydrologic time series[J]. *Water Resources Research*, 1982, 18(4): 1011-1021.
- [19] MARTINEZ G F, GUPTA H V. Toward improved identification of hydrological models: A diagnostic evaluation of the "abcd" monthly water balance model for the conterminous United States[J]. *Water Resources Research*, 2010, 46, w08507.
- [20] 李爱花, 刘恒, 耿雷华, 等. 水利工程风险分析研究现状综述[J]. *水科学进展*, 2009, 20(3): 453-459. (LI Aihua, LIU Heng, GENG Leihua, et al. Review of risk analysis of hydraulic engineering system[J]. *Advance in Water Science*, 2009, 20(3): 453-459. (in Chinese))
- [21] WILKS D S. *Statistical methods in the atmospheric sciences*[M]. Salt Lake City: Academic Press, 2011.

An inverse approach to evaluate the risk of water resources under climate change*

LI Ke^{1,2}, QI Jingyao¹, WANG Zhaoyang¹, FENG Yan¹, BROWN Casey³

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Institute of Harbin Technology, Harbin 150090, China;

2. School of Municipal and Environmental Engineering, Jilin Architecture and Civil Engineering Institute, Changchun 130118, China;

3. University of Massachusetts, Amherst MA 01003, USA)

Abstract: A new method to evaluate the risk of water resources under climate change is proposed. The method is mainly comprised of three steps: ① build a dynamic model representing the water resources system; ② do stochastic analysis and then build a climate response function which allows linking the climate states to the performance indicator of the water resources system; ③ the climate information of GCMs is tailored to evaluate the risk. Finally, this method is applied to evaluate the climate change induced risk in Quabbin Reservoir, Massachusetts, United of States. Through 36 GCMs in A2 scenario within two periods 2036—2065 and 2066—2095, the results show that the risk with 100% – 140% historical net basin supply (NBS) annual standard deviation is between 0.25 and 0.30 in 2036—2065, and between 0.30 and 0.45 in 2066—2095.

Key words: climate change; general circulation model; risk evaluation; climate response equation; water resources

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 40971026).