

# Response of Runoff over the Future Period to Climate Change in China\*

Gaoxu Wang, Junbiao Wei, Hongzhen Zhao, Baodeng Hou

State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing  
Email: gxwang@nhri.cn

Received: Aug. 6<sup>th</sup>, 2012; revised: Aug. 21<sup>st</sup>, 2012; accepted: Sep. 6<sup>th</sup>, 2012

**Abstract:** For revealing the impacts of future climate change on water resources in China, this article used the natural runoff, precipitation and temperature of National Water Resources Zone in 1961-2000, established the regression model about the natural runoff, precipitation, and temperature; and calculated the runoff in 2011-2050 in different modes which combined with the precipitation and temperature data of WCRP open publishing coupled mode comparison plans-stage 3 data, analysed the climate change response on runoff. Results indicates that: the precipitation, temperature and runoff in all water resources zones are correlated significantly, the effects of regression analysis are very good; in A1B, and A2 and B1 3 modes, the future period (2011-2050) average runoffs in Haihe Zone, Yellow River Zone, Liaohe Zone, Songhuajiang Zone, Southwest Rivers Zone and Northwest Rivers Zone are larger than the baseline period (1961-2000). In the three modes, Pearl River Zone's future period runoff is less than baseline period by 3.89%; Routheast Rivers Zone and Changjiang River Zone's runoff are increase in A1B and B1 modes, but reduce in A2 mode; Huaihe Zone's runoff is reduce in A2 mode, but increase in A1B and B1 modes.

**Keywords:** Runoff; Climate Change; Regression Model; Forecast

## 我国未来时期径流对气候变化的响应\*

王高旭, 魏俊彪, 赵宏臻, 侯保灯

南京水利科学研究院, 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京  
Email: gxwang@nhri.cn

收稿日期: 2012年8月6日; 修回日期: 2012年8月21日; 录用日期: 2012年9月6日

**摘要:** 为揭示未来气候变化对我国水资源的影响, 文章采用 1961~2000 年全国 10 个水资源一级区的天然径流、降水和气温资料, 建立了各水资源分区径流与降水、气温的统计回归模型, 并结合公开发布的 WCRP 耦合模式比较计划 - 阶段 3 的降水和气温数据计算了 A1B、A2 和 B1 三种气候情景下 2011~2050 年的径流量, 分析了径流量对气候要素的响应。结果表明: 各水资源分区降水、气温与径流的相关性显著, 回归分析效果很好; A1B、A2 和 B1 情景模式下, 海河区、黄河区、辽河区、松花江区、西北诸河区和西南诸河区未来时期(2011~2050 年)平均径流量比基准期(1961~2000 年)均有所增加; 珠江区在三种模式下未来时期多年平均径流深比基准期减少, 平均减少幅度 3.89%; 东南诸河区和长江区在 A1B、B1 情景模式下径流深增加, A2 情景模式下减少; 淮河区在 A2 情景模式下径流深减少, A1B、B1 情景模式下增加。

**关键词:** 径流; 气候变化; 回归模型; 预测

\*基金项目: 国家自然科学基金项目(51109138); 水利部公益性行业科研专项(200901043, 200701005)。  
作者简介: 王高旭(1979-), 男, 江苏, 南京水利科学研究院, 工程师, 研究方向为水资源管理。

## 1. 引言

洪涝和干旱是我国最主要的自然灾害。特别是近年来我国极端天气事件频发, 有多项局部地区灾害强度超过历史记录。根据上个世纪 60 年代以来的资料分析, 江淮以南地区的年降水量和降水强度增加, 暴雨、洪涝事件发生频率变大; 而华北及东北南部降水量却有减少趋势。从上个世纪 70 年代后期至今, 华北的干旱不断加剧; 90 年代后期以来, 华北地区更是连年出现大旱, 甚至有的地区连续五至六年遭遇干旱<sup>[1]</sup>。上世纪 90 年代以来全国年均洪涝灾害损失达 1100 亿元, 约占 GDP 的 2%, 同期我国旱灾损失约占全国 GDP 的 2%, 洪涝灾害和水资源短缺已成为社会经济发展的瓶颈, 并威胁到我国的粮食安全和生态环境安全<sup>[2]</sup>。人口增长和经济快速发展是形成上述水问题的经济和社会原因; 水文循环要素的演变及其对气候变化的响应是形成上述水问题的自然原因。

由于温室气体对气候系统的影响呈现累计效应, 全球气候变化正在加速进行, 并将持续很长的时期。气候变化已引起全球和我国极端水文 - 气象事件频发, 洪涝和干旱加剧, 而且以加速度态势加剧了水资源时空分布的不均匀性。尽管对气候变化的预测还有很大的不确定性, 但全球气候变化对水文循环、生态环境等多方面产生巨大影响的事实已被越来越多的国家及民众所认同<sup>[3]</sup>。缓解和解决上述严峻水问题, 保障国家的可持续发展, 是我国面临的重大经济社会问题, 也是我国面临的重大科学技术问题。本研究基于历史实测数据建立回归模型, 预测我国各大流域未来时期径流量对气候变化的响应, 研究成果可为水资源规划及管理部门提供参考。

## 2. 径流与气候因素的关系分析

气候因素是影响水循环过程的最主要因素之一。降水及其季节分配决定了一个地区可获得的水量及其时间分布, 气温、空气湿度及风等因子决定了水分的蒸发特征; 决定水分蒸发及下渗的某些下垫面因子如植被和土壤特征, 也和气候密切相关。

根据近年来我国开展的气候变化影响方面的研究成果, 对黄河、汉江、赣江、淮河、海河流域径流对气候变化的敏感性分析结果表明<sup>[4-9]</sup>: 1) 气温和降水是对径流影响显著的 2 个的因子, 也是目前研究中最常用的因子; 2) 径流对降水的敏感性远大于气温;

气温对径流的影响随降水的变化而变化; 降水增加, 气温对径流的影响更显著; 随降水减少, 气温对径流的影响愈不明显; 3) 在气温情景固定情况下, 降雨变率对径流影响非常大; 变化相同的幅度, 降雨的增加对径流的影响比减少对径流的影响大。

根据前文分析和已有研究成果可知, 土壤水分与降水和蒸发关系最为密切, 蒸发又主要受到气温的影响, 考虑到目前的数据条件, 本次研究选择气温和降水两个因素进行径流的响应分析。

## 3. 径流对气候变化响应所用的数据与方法

### 3.1. 数据资料

#### 3.1.1. 径流系列资料

由于人类活动改变了流域下垫面条件, 导致蒸发、入渗、产流等水文过程发生一定的变化, 从而造成径流量的改变。为保证径流系列成果的一致性, 应针对各流域实际情况, 结合水土保持建设、地下水开采对地表水影响、水利工程建设引起的水面蒸发附加损失等因素, 对还原数据进行修正。本文所用的径流系列资料来自“全国水资源综合规划”中各水资源一级区 1961~2000 年径流深数据, 该资料经过了严格的质量控制, 具有较好的一致性。图 1 为全国水资源一级区分区图。

#### 3.1.2. 基准期实测数据

选择 1961~2000 年作为本次研究的基准期, 基准期的降水和气温数据采用的是 756 个国家基本和基准气象台站的实测数据。对每日的降水量和气温数据进行统计后得到各站年降水量、年平均气温、春季平均气温和夏季平均气温四组气象数据, 采用泰森多边形法计算各水资源一级区的平均数据。图 2 是基于全国 756 个气象站的泰森多边形。

#### 3.1.3. 气候情景与预测数据修正

联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)2000 年公布了“排放情景特别报告”(SRES), 提出了由 A1、A2、B1 和 B2 四种不同情景框架构成的情景族<sup>[10,11]</sup>。其中, A1 描述了经济高速发展, 全球人口在 21 世纪中叶达到峰值, 高排放情景的世界, A1 情景系列划分为 3 个群组: 矿物燃料密集型(A1F1)、非矿物能源型(A1T)、各种能源资源均衡型(A1B); A2 描述了人口持



Figure 1. Water resources zone of China  
图 1. 全国水资源一级区图

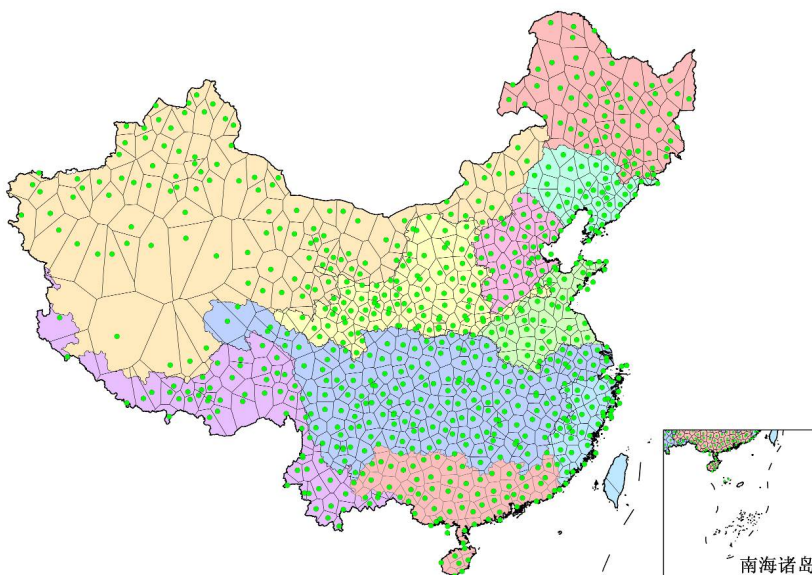


Figure 2. Thiessen polygon of 756 weather stations  
图 2. 全国 756 个气象站的泰森多边形

续增长，人均经济增长和技术变化有明显地方性，全球化不明显的世界；B1 描述了人口发展同 A1，但经济结构向服务和信息转变，强调从全球角度解决经济、社会和环境可持续性问题的低排放情景的世界；B2 描述了人口增长低于 A2，经济中等发展，技术更多样化，侧重于从局地解决经济、社会和环境可持续性问题的世界。根据 IPCC 2007 年发布的第四次评估报告，A1B、A2 和 B1 三种框架具有一定的代表性，

是目前气候变化研究的热点<sup>[11]</sup>，本次研究也将采用这三种气候情景下的预测数据来开展研究。

研究所采用的不同情景框架下未来的降水和气温数据的预测值来自公开发布的 WCRP(The World Climate Research Programme)的耦合模式比较计划(阶段 3)的多模式平均数据<sup>[12,13]</sup>，选取了 A1B、A2 和 B1 三种框架和情景模式的降水和气温数据。WCRP 的多模式数据来自全球 20 多个模式组提供的全球气候模

式模拟和预估结果, 数据的时间年限是 1901 年 01 月至 2099 年 12 月, 数据范围为: 72°E~135°E、15.5°N~55.5°N, 数据分辨率为  $1^\circ \times 1^\circ$ 。

由于全球气候模式的精度限制, 多模式数据经加权平均和降尺度处理后, 所得的基准期模拟结果依然与测站实测数据差别较大, 需要进行修正。本研究应用 Delta 方法, 通过使用 1961~2000 年的实测气象数据对模拟的降水和气温数据进行修正, 建立未来时期(2011~2050 年)的三种气候变化情景的降水和气温。Delta 方法是美国国家评价中心推荐应用的未来气候情景生成方法, 虽然该方法存在一定的局限性, 但是采用 Delta 法修正后的情景很好的代表了区域气候模式的输出变化, 且其应用比较简单, 因此仍然得到了较为广泛的应用<sup>[14]</sup>。

### 3.2. 回归分析方法

由于气温、降水和各种水文要素之间的关系错综复杂、相互影响, 很难用一种概念性模型进行分析、计算以及预测, 因此通过建立统计模型近似地估计仍然是一种合理可行的途径<sup>[15]</sup>。本研究采用多元回归分析进行各水资源一级区径流深( $R$ )对降水量( $P$ )和气温( $T$ )的响应分析。

在回归模型的建立过程中, 首先对全国十大水资源一级区基准期(1961~2000 年)的实测降水和气温、还原径流分别建立三种类型的回归模型, 其中包括将基准期的实测降水量和年平均气温作为自变量的二元线性回归模型和二元非线性回归模型以及用前一年(1960~1999 年)降水量序列、当年(1961~2000 年)降水量序列、当年春季和夏季平均气温建立的四元线性回归模型; 然后, 用上述三种回归模型对各个水资源一级区的径流序列逐一进行计算, 在通过 F 检验的回归模型中进行相关系数值的比较, 采用相关系数数值最大的回归模型进行该水资源一级区未来当地径流的模拟; 最后, 将三种未来气候变化情景修正后的降水和气温资料代入回归模型, 可以得到未来气候变化情景下径流序列的预测值。

## 4. 径流对未来气候变化的响应分析

### 4.1. 未来时期气温和降水变化

根据 WCRP 计划的多模式平均数据, 对未来时期

的气温和降水的变化进行分析。

三种情景模式下, 全国范围在未来时期(2011~2050 年)多年平均气温均比基准期(1961~2000 年)有所增加。其中 A1B 情景下气温增加最为明显, 平均增加  $1.5^\circ\text{C}$ , A2 情景下气温增加  $1.4^\circ\text{C}$ , B1 情景下气温增加  $1.2^\circ\text{C}$ 。在 2025 年前后, A2、B1 和 A1B 情景下增温情形一致, 平均增加  $1.4^\circ\text{C}$ 。到 2050 年前后, A1B 情景增温更明显, 平均增加  $1.8^\circ\text{C}$ ; A2 情景下平均增温  $1.6^\circ\text{C}$ , B1 情景增温最少, 平均增加  $1.3^\circ\text{C}$ 。

三种情景模式下, 整个全国范围在未来时期(2011~2050 年)多年平均降水比基准期(1961~2000 年)降水均有所增加, 且增加幅度较大, 其中 B1 情景下降水增加最明显, 平均增加 4.1%; A1B 情景下次之, 平均增加 3.7%; 而 A2 情景下降水增加最少, 平均增加 2.1%。在三种情景模式下, 未来时期(2011~2050 年)的降水变化趋势是基本一致的。

### 4.2. 各水资源一级区回归模型的构建

根据全国实测的降水、气温数据与还原后的径流深系列数据建立回归模型, 综合考虑二元线性回归模型、二元非线性回归模型和四元线性回归模型的相关系数和显著性水平, 确定全国最优回归模型为:

$$R = -318.208 + 0.129P_1 + 0.7724P_2 + 0.764T_1 + 5.367T_2$$

其中  $R$  为全国范围 1961~2000 年的径流深序列, mm;  $P_1$ 、 $P_2$  分别为上年和当年的降水量, mm;  $T_1$ 、 $T_2$  为当年春季和夏季的平均气温,  $^\circ\text{C}$ 。相关系数  $r = 0.892$ , 显著性水平  $\text{Sig.}F = 1.218 \times 10^{-11} < 0.05$ , 说明变量之间的相关关系显著, 回归效果很好。另外由回归方程可知, 全国年径流深与上年和当年的降水量、春季和夏季的平均气温都呈正相关, 并且年径流深受当年降水和夏季气温影响更大。

由表 1 可知, 全国 10 个水资源一级区中有 2 个区应用了二元非线性回归模型, 分别是淮河区 and 辽河区, 其它水资源一级区都是四元线性回归模型; 所有回归模型的相关系数均比较高, 其中东南诸河区、海河区、淮河区、松花江区、长江区和珠江去的相关系数超过了 0.9, 占了全部分区个数的一半以上, 仅西南诸河区的相关系数低于 0.7; 所有水资源一级区的方差分析的显著性水平  $\text{Sig.}F$  值都远远小于 0.05, 说明变量之间的相关关系显著, 回归效果很好, 同时也

说明降水和气温变化是影响各个水资源一级区年径流深变化的主要因素。

淮河区和辽河区的回归模型中  $P$  的回归系数均为正,  $T$  的回归系数均为负, 表明年径流深与年降水量呈正相关关系, 与年平均气温呈负相关关系。8 个四元线性回归模型的  $P_2$  的回归系数比  $P_1$  的回归系数要大, 除了西北诸河区  $P_1$  的回归系数为负(接近于 0)外, 其它  $P_1$ 、 $P_2$  的回归系数均为正, 说明这些水资源一级区的年径流深与上年和当年的降水量呈正相关关系, 且受当年降水量的影响更大; 年径流深与当年春季和夏季平均气温的关系各个区不尽相同, 松花江区、珠江区和西南诸河区的  $R$  与  $T_1$ 、 $T_2$  呈负相关关系, 东南诸河区、海河区和西北诸河区的  $R$  与  $T_1$  呈负相关、与  $T_2$  呈正相关, 黄河和长江区的  $R$  与  $T_1$  呈正相关、与  $T_2$  呈负相关。各个区的年径流深与当年春季和夏季平均气温的复杂关系主要与水资源一级区所处的经纬度、气候条件、地形地貌、人类活动的影响等因素有关。

### 4.3. 不同情景模式下全国各区径流预测

分别将修正后的 A1B、A2 和 B1 情景模式下的未来时期(2011~2050 年)气温和降水时间序列代入全国的回归模型, 即可得到全国未来时期(2011~2050 年)的径流深预测值, 如表 2 所示。全国的基准期多年平均径流深为 282.9 mm, A1B、A2、B1 情景模式下未来时期多年平均径流深分别为 295.6 mm、287.7 mm、293.4 mm, 均比基准期有所增加, 增幅分别为 4.12%、1.34%、3.35%。

图 3 是全国各个水资源一级区基准期和 A1B、A2 和 B1 情景模式下的多年平均年径流深的柱状图, 由图可知, 海河区、黄河区、辽河区、西北诸河区和西南诸河区在 A1B、A2、B1 情景模式下未来时期多年平均径流深均比基准期大, 珠江区在三种模式下未来时期多年平均径流深比基准期小, 而淮河区和长江区的未来时期径流深变幅不大。

**Table 1. Regressive model relating annual runoff to precipitation and temperature in water resources zones of China**  
**表 1. 全国十大水资源一级区的年径流与降水、气温的回归模型**

水资源一级区	回归方程	相关系数	检验	
			$F$	$Sig.F$
东南诸河	$R = -1104.927 + 0.09P_1 + 1.045P_2 - 8.361T_1 + 16.132T_2$	0.967	124.218	0
海河	$R = -213.533 + 0.086P_1 + 0.279P_2 - 1.643T_1 + 4.548T_2$	0.911	42.556	$5.598 \times 10^{-13}$
淮河	$R = e^{-10.088} \cdot P^{2.674} \cdot T^{-1.048}$	0.945	154.100	0
黄河	$R = -13.217 + 0.072P_1 + 0.262P_2 + 0.548T_1 - 3.501T_2$	0.871	27.441	$2.312 \times 10^{-10}$
辽河	$R = e^{-9.443} \cdot P^{2.27} \cdot T^{-0.001}$	0.883	65.708	$6.662 \times 10^{-13}$
松花江	$R = -251.504 + 0.177P_1 + 0.676P_2 - 1.501T_1 - 1.243T_2$	0.928	53.873	$1.765 \times 10^{-14}$
西北	$R = -53.541 - 0.002P_1 + 0.091P_2 - 0.064T_1 + 3.899T_2$	0.715	9.156	$3.591 \times 10^{-5}$
西南	$R = -494.99 + 0.499P_1 + 1.73P_2 - 7.689T_1 - 0.217T_2$	0.665	6.937	0.0003195
长江	$R = -382.939 + 0.066P_1 + 0.905P_2 + 9.691T_1 - 7.259T_2$	0.946	74.387	$1.11 \times 10^{-16}$
珠江	$R = 109.842 + 0.186P_1 + 0.795P_2 - 7.469T_1 - 23.092T_2$	0.939	65.362	$9.992 \times 10^{-16}$

**Table 2. Comparison between forecasting runoff and base runoff in different modes**  
**表 2. 全国不同情景模式下预测期径流深与基准期径流深的对比**

情景模式	基准期多年平均径流深(mm)	未来时期多年平均径流深(mm)	径流深变化量(mm)	径流深变化率
A1B		295.6	11.7	4.12%
A2	283.9	287.7	3.79	1.34%
B1		293.4	9.5	3.35%

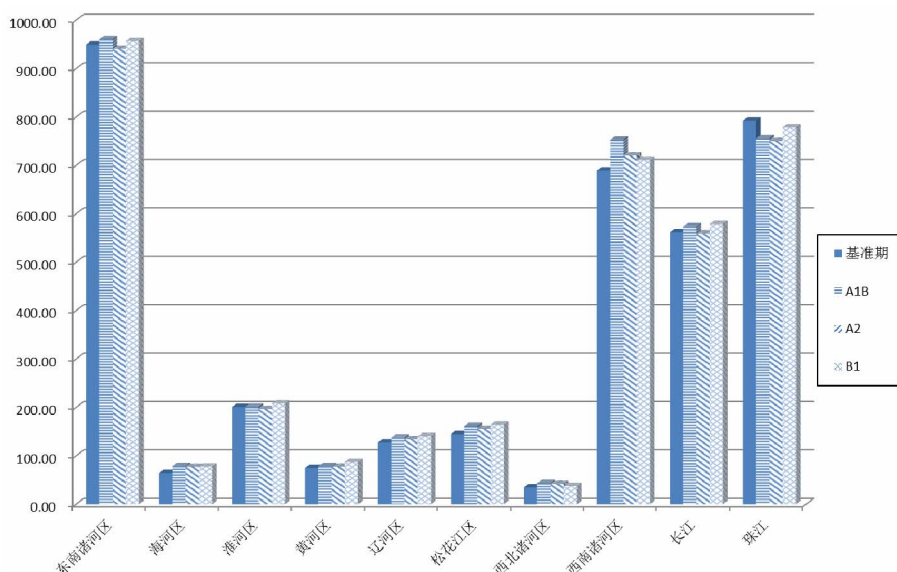


Figure 3. Average annual runoff in water resources zone of China  
图3. 全国各水资源一级区多年平均年径流深(基准期和未来时期)

#### 4.3.1. A1B 情景模式下全国各区径流预测

表3是A1B情景模式下全国各水资源一级区预测径流深与基准期径流深的对比表。由表可知,在A1B情景模式下,珠江区的未来时期多年平均径流深比基准年减少了4.61%,而其他的水资源一级区未来时期多年平均径流深均有所增加。其中,径流深增量最大的是西南诸河区,增加了63.49 mm;增加比率最大的是西北诸河区,增加了25.38%,其次是海河区,增加了22.85%。

#### 4.3.2. A2 情景模式下全国各区径流预测

表4是A2情景模式下全国各水资源一级区预测径流深与基准期径流深的对比表。由表可知,A2情景模式下,东南诸河区、淮河区、长江区和珠江区未来时期多年平均径流深较基准期有所减少,其中珠江区减少幅度最大,减幅为5.31%;其他水资源一级区未来时期多年平均径流深较基准期有所增加,但增加幅度均略小于A1B情景模式,径流深增加比率最大的是西北诸河区,增加了20.74%,其次是海河区,增加了20.21%。

#### 4.3.3. B1 情景模式下全国各区径流预测

表5是B1情景模式下全国各水资源一级区预测径流深与基准期径流深的对比表。由表可知,与A1B情景模式一致,B1情景模式下仅珠江区未来时期多年平均径流深较基准期少,且减少幅度小于A1B和A2

情景模式;其他水资源一级区的未来时期径流深均比基准期有所增加,其中增加幅度最大的是西南诸河区和松花江区,变化率最大的是海河区,增加了21.23%,其次是黄河区,增加了16.49%。

### 5. 结论

A1B、A2和B1情景模式下,全国范围未来时期(2011~2050年)多年平均气温比基准期(1961~2000年)增加,其中A1B增加最明显,A2次之,B1最少;同样,未来时期降水量也有所增加,其中B1增加最明显,A1B次之,A2最小。

东南诸河区、松花江区、海河区、黄河区、长江区、珠江区、西南诸河区、西北诸河区以及全国范围的降水、气温与径流的回归关系以多元线性回归最好,辽河区和淮河区的降水、气温和径流的回归关系以二元非线性最好,各回归方程的相关系数都很高,显著性水平 *Sig.F* 均远小于0.05,说明各水资源分区降水、气温与径流的相关性显著,回归效果很好。

A1B、A2和B1情景模式下,海河区、黄河区、辽河区、松花江区、西北诸河区和西南诸河区未来时期平均径流量比基准期均有所增加,其中海河区平均增幅为21.43%、黄河区平均增幅为8.25%,辽河区平均增幅为7.78%、松花江区平均增幅为10.66%、西北诸河区平均增幅为18.00%、西南诸河区平均增幅为5.61%;珠江区在三种模式下未来时期多年平均径流

**Table 3. Comparison between forecasting runoff and base runoff in A1B mode. Unit: mm**  
**表 3. A1B 情景下预测径流深与基准期径流深的对比。单位: mm**

水资源一级区	基准期多年平均径流深	未来时期多年平均径流深	径流深变化量	径流深变化率
东南诸河	949.40	960.45	11.05	1.16%
海河	64.18	78.85	14.67	22.85%
淮河	200.98	201.25	0.27	0.14%
黄河	74.79	78.35	3.56	4.75%
辽河	127.55	137.67	10.12	7.94%
松花江	145.00	161.35	16.35	11.28%
西北	34.81	43.65	8.84	25.38%
西南	689.56	753.05	63.49	9.21%
长江	561.35	573.73	12.37	2.20%
珠江	792.37	755.85	-36.52	-4.61%

**Table 4. Comparison between forecasting runoff and base runoff in A2 mode. Unit: mm**  
**表 4. A2 情景下区预测径流深与基准期径流深的对比。单位: mm**

水资源一级区	基准期多年平均径流深	未来时期多年平均径流深	径流深变化量	径流深变化率
东南诸河区	949.40	940.74	-8.65	-0.91%
海河区	64.18	77.15	12.97	20.21%
淮河区	200.98	196.55	-4.43	-2.20%
黄河区	74.79	77.41	2.62	3.50%
辽河区	127.55	134.25	6.70	5.25%
松花江区	145.00	155.49	10.49	7.24%
西北诸河区	34.81	42.03	7.22	20.74%
西南诸河区	689.56	720.49	30.94	4.49%
长江	561.35	559.36	-1.99	-0.35%
珠江	792.37	750.33	-42.04	-5.31%

**Table 5. Comparison between forecasting runoff and base runoff in B1 mode. Unit: mm**  
**表 5. B1 情景下预测径流深与基准期径流深的对比。单位: mm**

水资源一级区	基准期多年平均径流深	未来时期多年平均径流深	径流深变化量	径流深变化率
东南诸河区	949.40	956.57	7.17	0.76%
海河区	64.18	77.81	13.62	21.23%
淮河区	200.98	208.34	7.36	3.66%
黄河区	74.79	87.12	12.33	16.49%
辽河区	127.55	140.49	12.94	10.14%
松花江区	145.00	164.50	19.51	13.45%
西北诸河区	34.81	37.55	2.74	7.87%
西南诸河区	689.56	711.08	21.53	3.12%
长江	561.35	578.94	17.59	3.13%
珠江	792.37	778.36	-14.01	-1.77%

深比基准期减少, 平均减少幅度 3.89%; 东南诸河区、长江区和淮河区未来时期多年平均径流深与基准期相比变幅不大, 其中东南诸河区和长江区未来时期多

年平均径流深在 A1B、B1 情景模式下有所增加, 在 A2 情景模式下略有减少; 淮河区未来时期多年平均径流深在 A2 情景模式下有所减少, A1B、B1 情景模

式下有所增加。

## 参考文献 (References)

- [1] 秦大河. 我国气候与环境变化及其影响与对策[J]. 理论动态, 2006, 6: 28-38.  
QIN Dahe. Influence and countermeasures for climate and environment change of China. Theoretical Trends, 2006, 6: 28-38. (in Chinese)
- [2] 张建云, 王国庆, 杨扬, 等. 气候变化对中国水安全的影响研究[J]. 气候变化研究进展, 2008, 4(5): 290-295.  
ZHANG Jianyun, WANG Guoqing, YANG Yang, et al. The possible impacts of climate change on water security in China. Advances in Climate Change Research, 2008, 4(5): 290-295. (in Chinese)
- [3] 王国庆. 气候变化对黄河中游水水文资源影响的关键问题研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.  
WANG Guoqing. Impacts of climate change on hydrology and water resources in the middle reaches of the Yellow River Basin. Nanjing: Hohai University, 2006. (in Chinese)
- [4] 刘春蓁. 气候变化对我国水水文资源的可能影响[J]. 水科学进展, 1997, 8(3): 220-225.  
LIU Chunzhen. Potential impact of climate change on hydrology and water resources in China. Advances in Water Science, 1997, 8(3): 220-225. (in Chinese)
- [5] 王国庆, 王云璋, 尚长昆. 气候变化对黄河水资源的影响[J]. 人民黄河, 2000, 22(9): 40-46.  
WANG Guoqing, WANG Yunzhang and SHANG Changkun. Impact of climate changes on water resources in the Yellow River. Yellow River, 2000, 22(9): 40-46. (in Chinese)
- [6] 郭生练, 杨井, 彭辉, 等. 气候异常变化对长江中下游水水文资源的影响评价, 21世纪中国水文科学研究的新问题新技术和新方法[C]. 北京: 科学出版社, 2001: 175-180.  
GUO Shenglian, YANG jing, PENG Hui, et al. The impact of climate change and climate variation on hydrology and water resources in the Changjiang (Yangtze) River Basin. Beijing: Science Press, 2001: 175-180. (in Chinese)
- [7] 范广洲, 吕世华, 程国栋. 气候变化对滦河流域水资源影响的水文模式模拟[J]. 高原气象, 2001, 20(3): 202-310.  
FAN Guangzhou, LV Shihua and CHENG Guodong. Simulation of influence of climate change on water resource over Luanhe River Valley using a hydrological model. Plateau Meteorology, 2001, 20(3): 202-310. (in Chinese)
- [8] 游松财, KIYOSHI Takahashi, YUZURU Matsuoka. 全球气候变化对中国未来地表径流的影响[J]. 第四纪研究, 2002, 22(2): 148-157.  
YOU Songcai, KIYOSHI Takahashi and YUZURU Matsuoka. Climate change impact on surface runoff in China. Quaternary Sciences, 2002, 22(2): 148-157. (in Chinese)
- [9] 张建云, 章四龙. 水文科学面临的气候变化问题, 中国水文科学与技术研究进展[M]. 南京: 河海大学出版社, 2004: 1-13.  
ZHANG Jianyun, ZHANG Silong. Climate change issues of hydrology, advances of hydrological sciences and technology. Nanjing: Hohai University Press, 2004: 1-13. (in Chinese)
- [10] IPCC. Climate change 2001: The scientific basis. Contribution of working group 1 to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [11] IPCC. Climate change 2007: The physical science basis, summary for policymakers. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [12] GAO, Xuejie, SHI, Ying, SONG, Ruiyan, et al. Reduction of future monsoon precipitation over China: Comparison between a high resolution RCM simulation and the driving GCM, Meteorology and Atmospheric Physics, 2008, 100: 73-86.
- [13] SHI, Y., GAO, X. J., WANG, Y. G., et al. Simulation and projection of monsoon rainfall and rain patterns over Eastern China under global warming by RegCM3. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2009, 2(5): 308-313.
- [14] 赵芳芳, 徐宗学. 统计降尺度方法和Delta方法建立黄河源区气候情景的比较分析[J]. 气象学报, 2007, 65(4): 654-662.  
ZHAO Fangfang, XU Zongxue. Comparative analysis on down-scaled climate scenarios for headwater catchment of yellow river using SDS and Delta methods. Acta Meteorologica Sinica, 2007, 65(4): 654-662. (in Chinese)
- [15] 张世法, 顾颖, 林锦. 气候模式应用中的不确定性分析[J]. 水科学进展, 2010, 21(4): 504-511.  
ZHANG Shifa, GU Ying and LIN Jin. Uncertainty analysis in the application of climate models. Advances in Water Sciences, 2010, 21(4): 504-511. (in Chinese)