海河流域 60 年降水量的变化及未来情景分析

鲍振鑫^{1,2},张建云^{1,2},严小林^{1,2},王国庆^{1,2},贺瑞敏^{1,2} (1. 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,江苏南京 210029; 2. 水利部应对 气候变化研究中心,江苏南京 210029)

摘要:降水量是水文循环的重要因素。利用 Mann-Kendall 趋势检验方法,分析了 1951—2010 年海河流域降水 量的历史演变规律;并根据大气环流数据分析了降水变化的原因;利用全球气候模式数据预测了未来降水量的 可能变化情景。主要结论为:(1)1951—2010 年,海河流域的年降水量呈显著减少趋势,达到了 5% 的显著性水 平,其中夏季降水减少的幅度最大。(2)南方涛动指数(SOI)和海河流域降水具有较好的正相关,而太平洋年代 波动(PDO)和太平洋年代内的波动(IPO)与海河流域降水具有较好的负相关。(3)在未来气候变化背景下,海 河流域的年降水量和月降水量都将呈现出增加趋势;在 A1B 情景下,总体上流域东部降水量的增加幅度要大于 流域西部。相关研究成果对于保障流域的水资源安全,支撑区域经济社会可持续发展,具有重要的科学价值和 实际意义。

关 键 词:降水量;海河流域;演变规律;成因;未来情景 中图分类号:TV11 **文献标志码**:A **文章编号**:1009-640X(2014)05-0008-06

水资源是支撑社会经济发展不可替代的基础性自然资源。水文循环是水资源更新和可持续性开发利用 的源动力。降水是水文循环的重要环节,是水资源最主要的来源,其微弱的改变会对流域水文循环过程产生 重要的影响,从而改变区域水资源的时空分布状况^[1-2]。近几十年来,受气候变化的影响,大气环流状况发 生了变化,全球范围内降水的时空分布呈现出区域性变化特点^[3]。因此研究气候变化背景下降水量的历史 演变规律,揭示其变化原因并预测未来降水量的可能情景,对于保障流域的水资源安全、支撑区域经济社会 可持续发展,具有重要的科学价值和实际意义。

利用趋势检验方法,很多学者诊断了降水量的历史变化特征。例如:Z. Cong 等^[4]发现在过去50年,受季风减弱的影响,中国北方的降水有所减少,但是南方的降水呈现增加趋势。G. B. Fu 等^[5]发现在过去40年华北平原的年降水量减少了43.9 mm(6.7%),减少趋势不显著。Y. Yang 等^[6]指出从1960—1999年,海河流域的8个子流域中有5个子流域降水量的变化趋势不显著。J. Chu 等^[7]的研究结果表明,1958—2007年间海河流域的降水量呈下降趋势,尤其是1980年以后更明显;在季节上,夏季的下降幅度最大,而春季有所增加。翟劭燚等^[8]分析了海河流域1956—2006年降水量的周期性变化,检测出存在4,7,10和准24年的主周期变化。马颖等^[9]检测了海河流域降水的历史变化特征。刘学锋等^[10]分析了过去47年海河流域降水极值的时空演变特征。王利娜等^[11]分析了海河流域近50年降水量的时空变化特征。这些研究主要侧重于对降水量历史演变规律的检测。对于从大气环流变化的角度来解释降水量变化原因的研究还较少。此外,如何准确预测未来降水量的可能情景依然是水文气象学家面临的一个难题。

收稿日期: 2014-01-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41401023,41330854);"十二五"国家科技支撑计划项目(2012BAC21B01, 2012BAC19B03);水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放研究基金(2013490411)

作者简介: 鲍振鑫(1985-),男,江苏南通人,工程师,博士,主要从事气候变化与水资源方面的研究。

E-mail: zxbao@nhri.cn

1 流域概况

1.1 海河流域概况

海河流域位于中国北方,东经112°~120°,北纬35°~43°之间,西以山西高原与黄河流域接界,北以蒙 古高原与内陆河流域接界,南靠黄河、东临渤海。海河流域面积为32万km²,占全国总面积的3.3%。流域 属于温带东亚季风气候区,年平均气温在0~14.5℃,年平均降水量535 mm,是我国东部沿海降水最少的地 区,属半湿润半干旱地带,年平均陆面蒸发量470 mm,水面蒸发量1073 mm。年平均气温与年降水量基本 上从东南沿海向西北内部依次递减,但是在流域西部和东北部山区迎风坡前有2个年降水量极值中心。流 域内人均总水资源占有量为276 m³,仅为全国平均的13%,远低于人均1000 m³的国际水资源紧缺标准;亩 均水资源量213 m³,为全国平均水平的15%。在全国各大流域中,海河流域的人均、亩均水资源量最低。 2005年海河流域总人口1.34亿,占全国的10.2%,国内生产总值(GDP)25750亿元,占全国的14.1%,人均 GDP为1.92万元,高出全国平均水平的1.38倍。海河流域人口密集,大中城市众多,是我国重要的工业基 地和高新技术产业基地,在我国政治经济中占有重要的地位。

1.2 研究资料

选取了海河流域内的 37 个气象站,包括 1951—2010 年日过程的降水量资料。这些气象资料由中国气象局发布,具有很好的科学性和准确性。利用泰森多边形法则,可以计算得到面平均降水量的日过程序列。

评估未来的降水量变化情景,主要依赖于全球气候模式(GCM)。IPCC(政府间气候变化专门委员会)第4次评价报告中共采用了24个GCMs,本文采用其中的4个,分别为:澳大利亚的CSIRO-Mk3.0,德国的MPI-OM,美国的NCAR-CCSM3和英国的HadCM3。将1961—1990年作为基准期;未来的2010—2099年分为3个时期:2010—2039年,2040—2069年和2070—2099年,分别记为2020S,2050S和2080S。

利用 GCMs 对未来的全球气候变化情景评估,首先需要确定未来的人口、经济发展、环境和全球分布等驱动因子,然后确定温室气体和硫化物气溶胶排放情景,根据大气浓度计算大气层顶的辐射强迫,最后分析未来气候要素的变化。在 IPCC 的第4 次评价报告中采用了 SRES 排放情景,它包含了 A1,A2,B1 和 B2 这4 个情景族共40 种不同的排放情景。其中 A 情景是高排放情景,B 情景是低排放情景;1 情景表示全球化显著,2 情景则反应了明显的区域特性。A1 情景描述了一个经济高速发展的世界,全球人口在 21 世纪中期达到峰值,并快速引进新的和更高效的技术,同时大幅度降低地区性的差异,其中的 A1B 情景反应了各种能源的使用达到了平衡;在 A2 情景下,未来世界的发展很不均衡,人口持续增长,经济增长和技术变化有明显的区域特性,全球化不明显;B1 情景的人口增长和 A1 情景类似,但是经济结构向服务和信息转变,从全球角度实现经济、社会和环境的可持续发展;在 B2 情景下,人口增长低于 A2 情景,经济中等发展,技术多样化,侧重于从区域角度实现经济、社会和环境的可持续发展。为了充分反映未来的各种可能变化,本文选用了 4 种 SRES 气候变化排放情景:A1B,A2,B1 和 B2。

2 计算方法

采用由 H. B. Mann 和 M. G. Kendall 提出的 Mann-Kendall 非参数趋势检验方法来检测水文气候要素演变 趋势的显著性水平^[12-13]。由于具有能够处理非正态分布数据、不受少数异常值的干扰、计算简单效率高等 优点, Mann-Kendall 趋势检验方法在很多领域得到了广泛应用,其计算步骤如下:

①给定原假设 H₀,样本序列没有显著上升或者下降趋势。

②构造 Mann-Kendall 统计量 UF_i ,来检验原假设是否成立,其计算公式为:

$$UF_{i} = \frac{S_{i} - E(S_{i})}{\sqrt{\operatorname{Var}(S_{i})}} \quad (i = 1, 2, \cdots, n)$$
(1)

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad (k = 2, 3..., n)$$
 (2)

$$r_{i} = \begin{cases} +1, & x_{i} > x_{j} \\ 0, & x_{i} \le x_{j} \end{cases} \quad (j = 1, 2, \cdots, i - 1)$$
(3)

式中:x;是样本容量为n的系列。如果它服从独立随机同分布,则S;的期望值和方差可由下式计算:

$$E(S_i) = i(i-1)/4$$

$$Var(S_i) = i(i-1)(2i+5)/72$$
(4)

③给定一个显著性水平 α ,由正态分布表可以查得临界值 $U_{\alpha/2}$ 。当 $|UF_i| < U_{\alpha/2}$ 时,接受原假设,即趋势 不显著;当 $|UF_i| > U_{\alpha/2}$ 时,拒绝原假设,即趋势显著。而且, $UF_i > 0$ 表示序列呈上升趋势; $UF_i < 0$ 表示序 列呈下降趋势。

3 计算结果分析

3.1 降水量的历史演变规律

1951—2010年,海河流域的年降水量呈减少趋势,其递 减速率为16.3 mm/10年(图1)。最大年降水量发生在1964 年,为817 mm;紧随其后的1965年降水量只有355 mm,是降 水最少的一年。流域年降水量在20世纪60年代初期之前偏 多,此后降水量偏多偏少年交替出现,进入80年代降水开始减 少,90年代末期后持续减少。Mann-Kendall检验结果表明年 降水量的减少趋势显著,达到了5%的水平。各个月降水量的 变化趋势不相同(图2(a))。5月、6月和9月的降水量呈增加 趋势,但是都不显著;其他9个月的降水量呈减少趋势,其中 只有11月达到了5%的显著性水平,8月达到了1%的显著



2014年10月

性水平。可见夏季降水的减少是年降水量减少的主要原因。流域内 37 个气象站中,有 35 个站的年降水呈减少趋势,其中有 5 个位于流域北部气象站的减少趋势达到了 5% 的显著性水平(图 3(b))。2 个呈现增加趋势的气象站位于流域南部,但是增加趋势都不显著。



Fig. 2 The Mann-Kendall testing statistics values for precipitation in the HRB

3.2 降水量的变化成因

海河流域降水年代以及年代际的波动和下降趋势的动力机理十分复杂,受到厄尔尼诺南方涛动(El Nino-Southern Oscillation, ENSO)、太平洋年代波动(Pacific decadal oscillation, PDO)和太平洋年代内的波动 (Interdecadal Pacific oscillation, IPO)等因素的影响。

(1) ENSO 对海河降水的影响。ENSO 通常由南方涛动指数(Southern Oscillation index, SOI)来表示。观测数据表明, SOI 和海河流域降水具有较好的正相关,即SOI 是正值时, 海河流域降水偏高; 而SOI 是负值

时,海河流域降水偏小(图3)。SOI 由澳大利亚 Tahiti 和 Darwin 站的月或者季节的气压差来计算。持续负的 SOI 值 表示 EL Nino 事件,这时中东部赤道太平洋的海水温度异常 偏高,太平洋风的强度会降低;而正的 SOI 表示 La Nina 事 件,通常伴随着强烈的太平洋风和较高的西南赤道太平洋海 水温度,与此同时中东部赤道太平洋的海水温度会异常偏 低。在 EL Nino 事件的发展阶段,夏季西赤道太平洋的海水 温度异常偏低,在中国南海和菲律宾附近的对流活动偏弱, 导致副热带高气压带南移,从而中国北方降水稀少;相反的, 在 EL Nino 事件的衰退阶段,菲律宾附近的对流活动偏强, 副热带高气压带北移,干旱少雨就发生在长江和淮河流域, 而海河流域的降水就会偏高^[14]。

(2) PDO 和 IPO 对海河降水的影响。观测数据表明, PDO 和 IPO 与海河流域降水具有较好的负相关(图 3)。 PDO 是太平洋气候波动的一种表征,由 20°N 以北的太平洋





海水温度高低来表示,通常具有 20~30 年的变化特征^[15]。当 PDO 是正值时,西太平洋较冷,而部分东太平 洋处于温暖状态,反之亦然。IPO 表示相似的太平洋北部和南部的海水温度和海平面气压,通常具有 15~ 30 年的循环。如果中东部赤道太平洋的海水温度偏高,而北太平洋中部的海水温度偏低,这时太平洋就处 于温暖阶段,副热带高气压带系统异常偏北,中国北方受到高压控制,输送过来的水汽量会减少,从而导致海 河流域降水较少。

3.3 未来降水量情景

3.3.1 年平均值变化 在未来气候变化背景下,海河流域的年降水量将呈现出增加趋势,但是不确定性较大,即不同的气候模式在不同气候情景下的预测值差别很大(图4)。



Fig. 4 The future scenarios of precipitation

例如,在 A1B 情景下 NCAR-CCSM3 的模拟结果显示,与基准期相比在 2020S,2050S 和 2080S,年降水量 将分别增加 14%,30% 和 33%。随着时间的推移,各个 GCMs 在不同情景下降水量模拟值的差异将越来越 大。在 2020S,年降水量的变化幅度为-2% ~ 16%;在 2050S 为 4% ~ 30%,2080S 为 5% ~ 39%。没有明显 的迹象表明哪一个情景下的降水量增加程度最大或者最小。以 NCAR-CCSM3 为例,在 2020S,A1B 和 A2 情 景下的降水量增加程度分别为最大的 14% 和最小的 10%;然而在 2080S,A2 情景下降水量增加最大 (39%),而 B1 情景下最小(16%)。

3.3.2 月平均值变化 模拟的未来3个时期月降水量相对于基准期的变化见图5。在2020S的12个月中,除了4—6月份共有9个月的降水量可能会增加。例如5月份和7月份降水量变化的50%分位点分别为-0.35%和18.7%。在2050S,除了11月份共有11个月的降水量可能会增加;在2080S,除了6月份也共有

11 个月的降水量可能会增加。总体而言,在未来气候变化背景下,4—6 月份的降水量增加程度最小;而降水量增加程度最大的时期不固定。在 2020S,8 月份的降水量增加程度最大(50%分位点是 21.3%),在 2050S,1 月份的降水量增加程度最大(50%分位点是 52.3%),在 2080S,12 月份的降水量增加程度最大(50%分位 点是 51.3%)。



Fig. 5 Relative change of monthly precipitation in the 21st century compared to the baseline period

3.3.3 变化的空间分布 以 A1B 情景为例,图6显示了4个 GCMs 模拟的未来3个时期降水量相对于基准

期变化的空间分布。CSIRO-Mk 3.0 模拟的未来流域东北部 的降水量将呈现增加趋势,而西南部的降水量将减少。在 2020S,MPI-OM 模拟的流域大部分地区的降水量将减少;而 在 2050S 和 2080S,除了西南部的部分地区,流域大部分地区 的降水量将增加。NCAR-CCSM3 模拟的未来流域西部的降 水量增加幅度要小于东部。PRECIS 模拟的未来流域北部的 降水量增加幅度要大于南部。

4 结 语

(1)1951—2010年,海河流域的年降水量呈显著减少趋势,达到了5%的水平,其中夏季降水减少的幅度最大。

(2)SOI 和海河流域降水具有较好的正相关, 而 PDO 和 IPO 与海河流域降水具有较好的负相关。

(3)在未来气候变化背景下,海河流域的年降水量和月 降水量都将呈现增加趋势,但是不确定性较大。在 A1B 情 景下,总体上流域东部降水量的增加幅度要大于流域西部。

参考文献:

- [1] 张建云,王国庆. 气候变化对水文水资源影响研究[M]. 北京:科学出版社,2007. (ZHANG Jian-yun, WANG Guo-qing. The impact of climate change on water resources[M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese))
- BAO Z, ZHANG J, LIU J, et al. Sensitivity of hydrological variables to climate change in the Haihe River basin, China [J]. Hydrological Processes, 2012, 26(15): 2294-2306, doi: 10.1002/hyp. 8348.
- [3] IPCC. Climate change 2007: synthesis report [R]. Geneva, Switzerland, 2007.
- [4] CONG Z, ZHAO J, YANG D, et al. Understanding the hydrological trends of river basins in China [J]. Journal of Hydrology, 2010, 388: 350-356.
- [5] FU G B, CHARLES S P, YU J J, et al. Decadal climatic variability, trends, and future scenarios for the North China Plain[J]. Journal of Climate, 2009, 22, 2111-2123.



相对于基准期变化的空间分布

Fig. 6 The spatial distribution of precipitation change in the 21st century compared to the baseline period under the A1B scenario

- [6] YANG Y, TIAN F. Abrupt change of runoff and its major driving factors in Haihe River catchment, China [J]. Journal of Hydrology, 2009, 374, 373-383.
- [7] CHU J, XIA J, XU C, et al. Spatial and temporal variability of daily precipitation in Haihe River Basin, 1958-2007 [J]. Journal of Geographical Sciences, 2010, 20(2): 248-260.
- [8] 翟劭燚, 张建云, 刘九夫, 等. 海河流域近 50 年降水变化多时间尺度分析[J]. 海河水利, 2009(1): 1-3. (ZHAI Shaoyi, ZHANG Jian-yun, LIU Jiu-fu, et al. Multiple time-scale analysis of precipitation variation in Haihe River Basin during last 50 years[J]. Haihe Water Conservancy, 2009(1): 1-3. (in Chinese))
- [9] 马颖,张松涛. 海河水系降水与径流趋势变化及突变分析[J]. 海河水利, 2010(6): 4-6. (MA Ying, ZHANG Song-tao. The trends and breakpoints of the precipitation and runoff in the Haihe River Basin[J]. Haihe Water Conservancy, 2010(6): 4-6. (in Chinese))
- [10] 刘学锋,向亮,于长文. 海河流域降水极值的时空演变特征[J]. 气候与环境研究, 2010, 15(4): 451-461. (LIU Xuefeng, XIANG Liang, YU Chang-wen. Characteristics of temporal and spatial variations of the precipitation extremes in the Haihe River basin[J]. Climatic and Environmental Research, 2010, 15(4): 451-461. (in Chinese))
- [11] 王利娜,朱厚华,鲁帆,等. 海河流域近 50 年降水量时空变化特征分析,干旱地区农业研究, 2012, 30(2): 242-246.
 (WANG Li-na, ZHU Hou-hua, LU Fan, et al. Characteristics of temporal and spatial variation of precipitation in Haihe River Basin during recent 50 years, 2012, 30(2): 242-246. (in Chinese))
- [12] MANN H B, Non-parametric tests against trend[J]. Econometrica. 1945(13): 245-259.
- [13] KENDALL M G. Rank correlation methods [M]. 4th ed. London: Charles Griffin, 1975.
- [14] HUANG R H, WU Y F. The influence of ENSO on the summer climate change in China and its mechanism [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 1989, 6(1): 21-30.
- [15] BIONDI F, GERSHUNOV A, CAYAN D. North Pacific decadal climate variability since 1661[J]. Journal of Climate, 2001, 14(1): 5-10.

Analysis of precipitation in the Haihe River basin during the last decades of years and future scenarios

BAO Zhen-xin^{1,2}, ZHANG Jian-yun^{1,2}, YAN Xiao-lin^{1,2}, WANG Guo-qing^{1,2}, HE Rui-min^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Research Center for Climate Change, MWR, Nanjing 210029, China)

Abstract: The precipitation is an important component of the hydrological circle. Using the Mann-Kendall's testing method, the studies of the variation tendency of the precipitation during 1951—2010 has been carried out for the Haihe River basin (HRB). The attribution for the precipitation has been analyzed based on the atmosphere circulation data. The future scenario for the precipitation is estimated by use of the data obtained from the Global climate models (GCMs). The analysis results indicate that: (1)There is a significant decreasing trend toward the precipitation, which reaches 5 per cent of the precipitation in the Haihe River basin during 1951—2010, and it shows a decided tendency to decrease in the summer. (2)There is a positive relationship between the precipitation and Southern oscillation index (SOI); but a negative relationship between the precipitation might increase against a background of the climate changes in the Haihe River basin in the future. Generally, under the A1B scenario, the increasing trend of the precipitation in the eastern Haihe River basin is higher than that in the western Haihe River basin. These analysis results would be of significance for water resources security and regional social-economic development.

Key words: precipitation; Haihe River basin; variation tendency; future scenario