

文章编号: 1673-1719 (2008) 03-0145-06

2050年前长江流域地表水资源变化趋势

刘波^{1,2,4}, 姜彤^{1,2}, 任国玉², Klaus Fraedrich³

- (1 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008;
2 中国气象局气候研究开放实验室, 北京 100081;
3 Meteorological Institute, Hamburg University, Hamburg, Germany;
4 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 利用ECHAM5/MPI-OM气候模式预估2001—2050年长江流域不同排放情景(SRES-A2, A1B, B1)下径流深的变化, 分析了长江流域地表水资源量的时空变化特征。结果表明: 3种排放情景下长江流域多年平均地表水资源量相差不大, 但不同排放情景下年际变化特征较为复杂, 且变化趋势有所不同。其中, A2高排放情景下地表水资源量呈缓慢减小的趋势, A1B中等排放情景下变化趋势不明显, B1低排放情景下呈相对最为显著的增加趋势。地表水资源量年代际变化波动幅度也较大, 2001—2030年3种情景下地表水资源量总体呈现下降特征, 但从2030年起, 则均表现出不同程度的增加, 最高增幅达7.47%, 其中尤以夏季和冬季增加显著。模式预估长江流域未来水资源量仍保持目前水平, 水资源空间分布不均匀特征仍较为突出。

关键词: 预估; 气候变化; 地表水资源; 排放情景; 长江流域

中图分类号: P467/P333.3 **文献标识码:** A

引言

IPCC第四次评估报告指出, 近一百年(1906—2005年)全球平均地表温度上升了0.74℃, 气候系统的变暖毋庸置疑^[1-2]。随着全球气温升高, 水循环加快, 全球水资源的时空分布特征将会改变。

长江流域因其特殊的地理位置, 受季风气候影响较为显著, 流域内气候因子随季节与年际变化分配不均, 在空间分布上差异也较大。已有研究表明, 受全球气候变化的影响, 过去40余年间长江流域年平均气温呈现上升趋势, 且20世纪90年代平均温度比1961—1990年平均温度升高约0.3℃; 流域年平均降水量具有微弱上升趋势, 但时空分布不均匀性在加剧^[3]。全流域夏季降水量呈显著的增加趋

势, 上游地区年平均降水量自1975年起减小趋势明显^[4]。流域内蒸发皿蒸发量、参照蒸发量和实际蒸发量的年平均变化均呈现显著下降趋势, 以夏季下降趋势最为显著, 且中下游地区蒸发量的变化趋势比上游地区显著^[5]。受全球以及区域气候因子的变化以及人类活动的影响, 水资源特征也相应地在时间、空间上发生不同程度的变化, 地表水资源时空分布不均匀特征进一步加剧^[6]。长江流域宜昌站实测径流显示出微弱的下降趋势; 而大通站径流量具有一定增加趋势, 其中, 夏季径流平均增速为 $16.5 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ^[7]。

一定流域或区域的地表水资源量, 主要由降水补给, 并能反映在河川径流量上^[8]。径流深是指在某一时段内通过河流上指定断面的径流总量除以该

收稿日期: 2007-08-21; 修订日期: 2007-12-03

基金项目: 中国气象局气候变化专项(CCSF2007-35); 气候研究开放实验室基金(LCS-2006-07)资助

作者简介: 刘波(1980-), 女, 博士生, 从事气候变化与水循环研究。E-mail: bobo13705@163.com

断面以上的流域面积所得的值,它相当于该时段内平均分布于该流域面积上的水深(通常以mm计),具有一定的空间特性,可以从宏观上描述区域地表水资源条件。本文采用德国马普气象研究所ECHAM5/MPI-OM模式输出的逐日地表径流,将其换算成径流深来表征地表水资源量,分析了IPCC SRES-A2、A1B、B1情景下21世纪前50 a长江流域地表水资源时空变化特征及趋势。

1 数据与方法

ECHAM模式是IPCC历次评估报告均采用的大气环流模式之一,其中ECHAM5/MPI-OM模式是德国马普气象研究所在ECHAM4的基础上改进后的模式,公布于2007年IPCC第四次评估报告。新的ECHAM5模式包含了水文循环方面的很多改进,可以更好地反映流域内产流的空间特性⁹⁾。Hagemann等^[10]将气候模式模拟结果与全球实际观测的降水、蒸发、径流等水循环因子进行比较,对比分析了ECHAM5在全球7大主要流域的模拟能力。

本研究采用的ECHAM5/MPI-OM模式空间分辨率为T63(相当于 $1.875^\circ \times 1.875^\circ$ 栅格),长江流域覆盖有79个格点,参与地表水计算的有77个格点。所用的3种温室气体排放情景包括强调环境可持续发展的全球共同发展情景(B1,低排放)、注重经济增长的全球共同发展情景(A1B,中等排放)和注重经济增长的区域发展情景(A2,高排放)^[11]。

时间序列的周期分析采用最大熵谱分析方法^[11]。另外,采用Mann-Kendall(M-K)趋势分析检验法^[12]进行气候要素的趋势分析;空间分析采用IDW反距离加权法进行空间内差,并将对未采样点贡献最大的邻近站点数和距离幂级分别设置为6和3。

2 地表水资源的时间变化

2.1 不同排放情景下水资源的年及年代际变化

根据长江流域水资源公报^[13],长江流域多年平均年径流深约为552.7 mm。2001年全流域平均年径流深为491.3 mm,比常年平均偏少9.2%;2003年全

流域平均年径流深为562.2 mm,比常年偏多约1.7%;2004年径流深为484.2 mm,比常年偏少12.4%(见图1中圆点)。由此可见,21世纪初的几年,流域平均水资源量较常年偏少,这与模式预估的结果基本吻合。

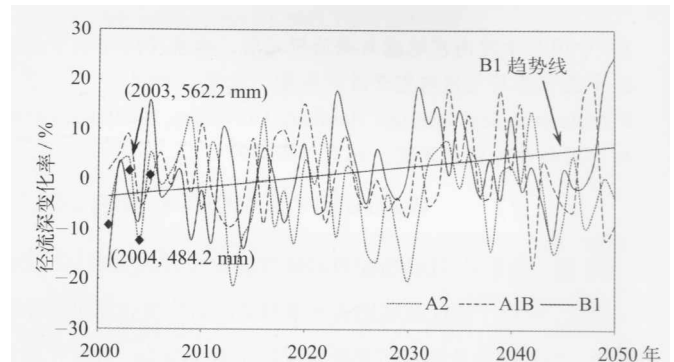


图1 ECHAM5 模式预估 2001—2050 年长江流域年径流深变化(相对于1960—2000年)

Fig. 1 ECHAM5-projected annual runoff depth of the Yangtze River in 2001—2050 (relative to 1960—2000)

气候模式预估结果(图1)表明,21世纪前50 a 3种排放情景下长江流域多年平均径流深相差不大,但不同排放情景下径流深年际变化特征均较为明显,其变化趋势有所不同。就全流域50 a整体趋势而言,A2情景下年径流深呈波动且缓慢减小的趋势,但变化趋势不显著,线性倾向率为 $-0.3 \text{ mm}/10 \text{ a}$;A1B情景下年径流深变化趋势不明显;B1情景下年径流深的增加趋势相对最为显著,M-K非参数趋势检验的统计量为2.18,置信水平 $> 99\%$,线性倾向率为 $2.1 \text{ mm}/10 \text{ a}$ (见图1中直线)。

对21世纪前50年长江流域年径流深年代际变化(见表1)分析结果表明,3种排放情景下年径流深年代际变化波动幅度较大。21世纪前30 a,3种情景下流域平均年径流深总体呈现一定的下降特征;但在21世纪30年代,3种情景下预估的年径流深均表现出不同程度的增加,其中B1情景径流深增加幅度最大,达到7.47%;21世纪40年代仍以B1情景下地表水资源量增加最多,达到3.16%。

总的来说,气候模式预估结果表明,在2001—2050年长江流域地表水资源量年际及年代际的波

动均较为显著，其中 B1 情景下年径流深的波动幅度最大。

表 1 ECHAM5 模式预估 2001—2050 年长江流域年径流深变化率（相对于 1960—2000 年）（%）

Table 1 Change rates (%) of the ECHAM5-projected annual runoff depth of the Yangtze River in 2001-2050 (relative to 1960-2000)

排放情景	年代				
	2000	2010	2020	2030	2040
A2	0.41	-4.23	-6.75	0.50	-2.40
A1B	2.83	1.22	-1.86	4.74	0.33
B1	-2.84	-1.27	1.66	7.47	3.16

2.2 不同排放情景下水资源的季节变化

长江流域四季分明，这里采用天文四季划分方法，定 3—5 月为春季，6—8 月为夏季，9—11 月为秋季，12—2 月为冬季，并以 2001—2010 年为基准年，分析 2011—2050 年长江流域地表水资源季节变化特征。

3 种排放情景下，各季节径流深的变化趋势并不一致（如图 2）。A2 排放情景下（图 2a），径流深总体呈现减小特征，2011—2030 年流域地表水量在 2001—2010 年基础上进一步减小，而 2040 年代，冬、春两季径流深有所增加，夏秋两季水资源量继续减小；A1B 情景下（图 2b），模式预估流域内夏季径流深有所增加，而其他季节水资源量减小特征明显；B1 情景下（图 2c），流域径流深在各个季节总体均呈现增加趋势，增幅亦最大，2020 年后，秋冬两季水资源量增幅均高于 10%，尤以冬季径流深增加幅度最大。总的来说，模式预估 2010 年代流域各季节水资源量较基准年有所减小，而 2030 年代 3 种排放情景下夏季水资源量均有不同程度的增加。

2.3 不同排放情景下水资源的周期特征

利用最大熵谱分析方法，通过寻找最大功率谱（即谱熵），寻找随机序列的周期（见表 2）。分析结果表明，2001—2050 年，ECHAM5 气候模式预估 A2 情景下年径流深时间序列振荡强度相对较小，第

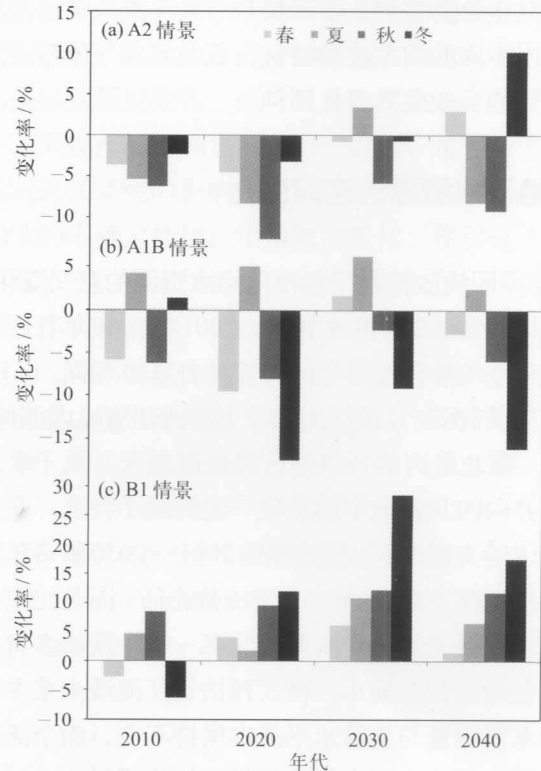


图 2 ECHAM5 模式预估 3 种排放情景下 2011—2050 年长江流域径流深季节变化（相对于 2001—2010 年）

Fig. 2 Change rates of the ECHAM5-projected seasonal runoff depth of the Yangtze River in 2011-2050 under three emission scenarios (relative to 2001-2010)

一周期为 3 a，第二周期为 4 a。A1B 和 B1 排放情景下功率谱值较大，表明年径流深存在明显周期。其中，A1B 情景的第一周期为 17 a，第二周期为 4 a；B1 排放情景第一周期为 3 a，第二周期为 4 a，皆具有较高的功率谱，序列振荡强度较大。

表 2 ECHAM5 模式预估 3 种排放情景下 2001—2050 年长江流域年径流深周期特征

Table 2 Periodicity of the ECHAM5-projected annual runoff depth of the Yangtze River in 2001-2050 under three emission scenarios

排放情景	第一周期			第二周期		
	功率谱	频率	周期/a	功率谱	频率	周期/a
A2	4275.1	0.31	3	4269.6	0.23	4
A1B	7965.4	0.06	17	6979.1	0.24	4
B1	8473.4	0.39	3	8016.4	0.27	4

以上分析表明,不同情景下长江流域年径流深表现出不同的周期波动特征,人类温室气体排放的增加可能会改变其变化周期。

3 地表水资源的空间变化

3.1 不同排放情景下多年平均水资源的空间变化

模式预估3种排放情景下2001—2050年长江流域多年平均年径流深空间分布特征基本相同。以B1情景为例(图3a),长江流域在上游四川省境内西侧,西南-东北走向的一带地区径流深较大,属于丰水区,并向四川盆地中部呈现一定的减小特征;在流域中下游大部地区,模式预估2001—2050年多年平均年径流深 > 700 mm,水资源量充沛;而长江源头地区、上游干流云贵高原西北部一带,预估多年平均年径流深相对较小。模式预估长江流域未来多年平均水资源量与当前水平基本保持不变,而全流域水资源空间分布不均匀特征仍然较为明显。

3.2 不同排放情景下水资源变化趋势的空间特征

利用M-K非参数检验方法,对模式预估21世纪长江流域水资源变化趋势的进一步分析可见,尽管3种情景下多年平均水资源量的空间分布非常一致,

但各情景预估的水资源量变化趋势却表现出不同的特征。

A2排放情景下(图3b),长江流域上游源头以及中下游大部分地区,年地表水资源量呈现出增加的趋势,局部地区增加趋势显著;而中上游大部地区年径流深呈不同程度的减小趋势,横断山脉南缘及云贵高原西部地区,径流深减小的趋势通过了置信度为99%的检验。A1B排放情景下(图3c),长江源头及中下游大部分地区,地表水资源量呈减小趋势,长三角地区减小趋势非常显著;而青藏高原东侧年径流深增加趋势显著,且通过了置信度为90%的检验。B1排放情景下(图3d),模式预估全流域接近90%的地区地表水资源量呈现增加趋势,其中,长江下游干流、洞庭湖及鄱阳湖流域北部地区年径流深增加的趋势通过了置信度为99%的检验,与另两种情景相比,B1情景下长江流域年径流深线性增加趋势最为显著。

4 结论与讨论

选择径流深作为衡量地表水资源量的特征变量,通过对ECHAM5/MPI-OM气候模式预估结果的分析,得到2001—2050年不同排放情景下长江流域地

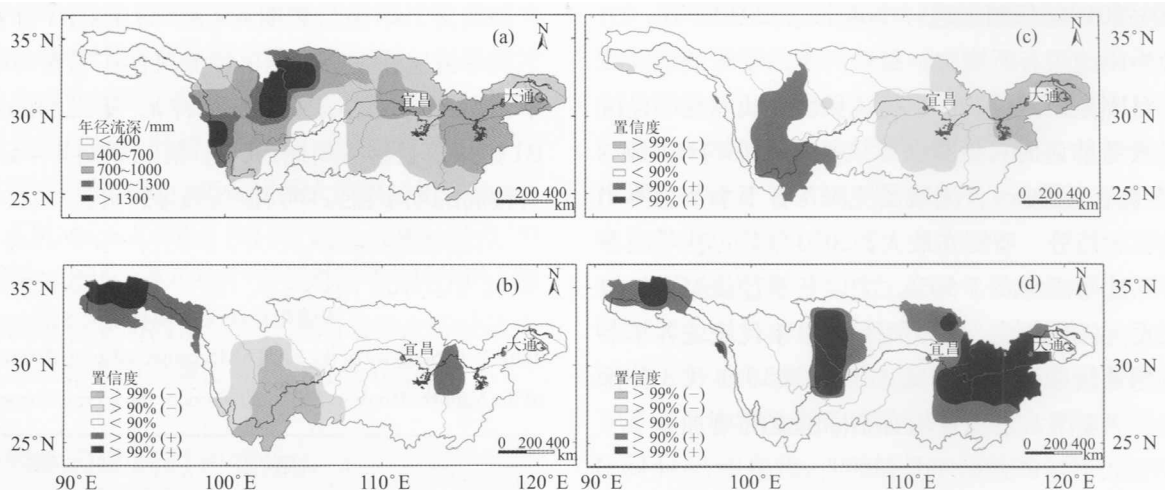


图3 ECHAM5模式预估2001—2050年长江流域平均年径流深空间分布(a)及A2(b),A1B(c),B1(d)情景下年径流深变化M-K趋势

Fig. 3 Spatial pattern of the ECHAM5-projected average annual runoff depth of the Yangtze River basin in 2001—2050 under B1 scenario (a) and M-K trends of annual runoff depth under A2 (b), A1B (c), and B1 (d) scenarios

表水资源量的年际、年代际、季节变化,周期变化,以及空间分布的变化特征如下。

(1) 不同排放情景下,2001—2050年长江流域平均地表水资源量年际变化特征较为明显,其变化趋势有所不同。就全流域50 a总体趋势而言,A2情景下地表水资源量呈波动且缓慢减小的趋势;A1B情景下变化趋势不明显;B1情景下增加趋势最为显著,置信水平 $> 99\%$,线性倾向率为 $2.1 \text{ mm}/10 \text{ a}$,约合 $3.8 \text{ 亿 m}^3/\text{a}$ 。而年代际变化波动幅度较大,21世纪前30 a,3种情景下流域平均年径流深总体呈现下降特征;30年代后表现出不同程度的增加,其中B1情景下年径流深增加幅度最大。另外,气候变化也会对区域水资源的周期特征产生影响。

(2) 长江流域四季分明,3种排放情景下各季节地表水资源变化趋势并不一致。A2排放情景下,2040年代冬、春两季径流深有所增加;A1B情景下,夏季径流深有所增加,其他季节减小特征明显;B1情景下流域径流深在各季节均增加,且增幅最大。

(3) 长江流域未来多年平均径流深在不同情景下的空间分布特征基本相同;但各情景预估的水资源量变化趋势却表现出不同的特征,以B1排放情景下长江流域地表水资源量增加趋势最为显著,全流域近90%的地区呈增加趋势,而全流域水资源空间分布明显不均匀。

有研究表明^[14]:2001—2050年长江上游地区年降水量呈减少的年份偏多;中下游地区降水量变化不显著,但变率较大,夏季降水有更加集中的趋势,且时间分布不均匀。这与本文地表径流量的分析结果总体吻合,表明降水仍是长江流域地表水资源的重要影响因素之一。气候自然变化加之人类活动引起的区域气候变化及其可能导致的洪涝、干旱加剧,对于长江流域水资源系统而言无疑是一个重要的附加的胁迫因素。因此,需要制定长远的发展规划,加强防洪、抗旱、供水等方面基础设施建设,健全现代化的水利管理体系,进而减少水资源系统包括防洪系统、抗旱系统及供水系统对气候强迫的脆弱性,以提高长江流域水资源系统对气候变化的适应能力。

另外,由于自然气候系统是一个高度非线性的复杂系统,具有内在混沌的特征,加之人类对气候系统认识的局限性,使得目前的气候变化研究均存在不同程度的不确定性。另一方面,近年来人为因素对气候系统的影响逐步加剧,而那些与人为因素相关的不确定性往往很难被量化,使得这一问题更加复杂。未来气候变化的预估结果很大程度上依赖于模式和情景,因此需要加强气候系统观测,提高对气候系统变化过程的科学认识,进一步完善气候模式,加强对未来气候变化条件下水资源特征的了解,来实现水资源的可持续开发利用。■

致谢:德国汉堡大学气象研究所和德国马普气象研究所提供了ECHAM5气候模式2001—2050年中国范围内逐日模拟资料,特此感谢!

参考文献

- [1] IPCC. Climate Change 2007: The Scientific Basis. Summary for Policymakers and Technical Summary of Working Group I to the Fourth Assessment Report [M]. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 2007
- [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
- [3] 姜彤,苏布达,王艳君,等. 四十年来长江流域气温、降水与径流变化趋势 [J]. 气候变化研究进展, 2005, 1 (2): 65-68
- [4] Su B D, Jiang T, Shi Y F, *et al.* Observed precipitation trends in the Yangtze River basin from 1951-2002 [J]. Journal of Geographical Science, 2004, 14 (2): 204-218
- [5] 王艳君,姜彤,许崇育,等. 长江流域1961—2000年蒸发量变化趋势研究 [J]. 气候变化研究进展, 2005, 1 (3): 99-105
- [6] 秦年秀,姜彤,许崇育. 长江流域径流趋势变化及突变分析 [J]. 长江流域资源与环境, 2005, 14 (5): 589-594
- [7] Jiang T, Su B D, Hartmann H. Temporal and spatial trends of precipitation and river flow in the Yangtze River basin, 1961-2000 [J]. Geomorphology, 2007, 85 (3/4): 143-154
- [8] 金栋梁. 金栋梁水文水资源论著选 [J]. 水资源研究, 2006 (增刊): 311-315

- [9] Blender R, Fraedrich K. Long-term memory of the hydrological cycle and river runoffs in China in a high-resolution climate model [J]. *International Journal of Climatology*, 2006, 12 (26): 1547-1565
- [10] Hagemann S, Arpe K, Roeckner E. Evaluation of the hydrological cycle in the ECHAM5 model [J]. *Journal of Climate*, 2006, 19 (16): 3810-3827
- [11] 王栋, 朱元铎. 最大熵原理在水文水资源科学中的应用 [J]. *水科学进展*, 2001, 12 (3): 424-430
- [12] Kendall M G. Rank Correlation Methods [M]. London: Charles Griffin, 1975: 1-202
- [13] 水利部长江水利委员会. 长江流域及西南诸河水资源公报 [R]. 武汉: 长江水利委员会, 2000, 2001, 2003, 2004, 2005, 2006
- [14] 曾小凡, 苏布达, 姜彤, 等. 21世纪前半叶长江流域气候趋势的一种预估 [J]. *气候变化研究进展*, 2007, 3 (5): 293-298

Projected Surface Water Resource of the Yangtze River Basin Before 2050

Liu Bo^{1,2,4}, Jiang Tong^{1,2}, Ren Guoyu², Klaus Fraedrich³

(1 *Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*; 2 *Laboratory for Climate Studies, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China*; 3 *Meteorological Institute, Hamburg University, Hamburg, Germany*; 4 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: Based on projected runoff depth of ECHAM5/MPI-OM climate model for the Yangtze River basin under different GHG emission scenarios (SRES-A2, A1B, B1) in 2001-2050, the temporal and spatial patterns of future surface water resource in the Yangtze River basin were analyzed. The results show that the long-term average annual surface water resources of the Yangtze River under three scenarios are similar, while interannual fluctuations are complicated with different trends. The surface water resource declines gradually in fluctuation under the A2 scenario, shows no obvious trend under the A1B scenario, and displays a relatively significant increasing trend under the B1 scenario. Decadal variations of the surface water resource are notable, showing an overall decline trend under all the three scenarios in 2001-2030, while an increase trend to varying extent after the 2030s, especially in summer and winter. The projected future water resource in the Yangtze River remains the current level, showing an evident spatially uneven feature.

Key words: projection; climate change; surface water resource; GHG emission scenario; the Yangtze River basin