

两种降尺度方法对钱塘江流域日设计暴雨计算的影响*

张徐杰, 马冲, 朱仟, 泮苏莉, 许月萍
(浙江大学水文与水资源工程研究所, 浙江 杭州 310058)

摘要: 研究气候变化对水资源的可能影响, 能让人类在面临气候变化时能够及时地采取相应措施。利用大气环流模式 HadCM3 的结果和国家气象局提供的钱塘江流域 7 个站点 1961 - 1990 年逐日实测气象资料, 选取 A1B 排放情景, 分别通过动力降尺度方法和统计降尺度方法, 分析 2011 - 2030 时期 (2020s) 的日设计暴雨, 并对两种方法计算得出的设计暴雨进行比较。结果表明, 除个别站点外, 在 A1B 情景下, 两种降尺度方法下极端暴雨出现的频率相比基准期都有所增加, 其中动力降尺度方法下不同重现期的设计暴雨值增幅更大。

关键词: 气候变化; 降尺度方法; PRECIS; LARS-WG; 降雨频率

中图分类号: P339 文献标志码: A 文章编号: 0529 - 6579 (2014) 01 - 0052 - 05

Design Storm Estimation Using Two Downscaling Methods in Qiantang River Basin

ZHANG Xujie, MA Chong, ZHU Qian, PAN Suli, XU Yueping

(Institute of Hydrology and Water Resources, Civil Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Studying the impacts of climate change on water resource can help human beings take measures when facing problems. The results of HadCM3 and 7 meteorological sites' daily data supplied by China Meteorological Administration in Qiantang River Basin are used to estimate design storms in 2020s under A1B scenario by both dynamic and statistical downscaling methods. The final results show that extreme storms will increase in 2020s under A1B scenario. Besides, the design storms for different return periods calculated through the dynamical method will increase more than those calculated through statistical method.

Key words: climate change; downscaling method; PRECIS; LARS-WG; precipitation frequency

1 研究背景

2007年, 联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 发布第四次评估报告, 其中指出: 过去 50 年中, 强降水、高温热浪等极端天气气候事件, 呈现不断增多增强的趋势, 预计今后这种极端事件的出现将更加频繁^[1]。气候变化问题受到了各国政府及科学家的重点关注, 在气候变化研究方面, 国内外也都取得了非常显著的成绩^[2-4]。对气候变

化的研究, 可以让人类尽早地认识到因气候变化而产生的水资源及生态方面的影响。同时, 研究气候变化对水资源的影响, 可以为水利工程的规划和建设提供指导性的意见, 让人类在面临气候变化时能够及时地采取相应措施。CO₂ 排放量增加, 气候变暖, 会使大气的持水能力增加, 从而可能增加极端暴雨的发生频率。然而, 气候变化对极端暴雨到底能产生多大的影响, 目前还无人敢下定论。

大气环流模式 (General Circulation Model, GCM)

* 收稿日期: 2013 - 05 - 20

基金项目: 科技部国际科技合作计划资助项目 (2010DFA24320); 国家自然科学基金资助项目 (51379183)

作者简介: 张徐杰 (1987 年生), 男; 研究方向: 气候变化下水资源风险分析; 通讯作者: 许月萍; E-mail: yuepingxu@zju.edu.cn

能较好地模拟出全球气候平均态，在年际预测方面效果不错。然而，GCM 的输出结果空间分辨率很低，需要通过降尺度方法以得到较高分辨率的结果^[5]。降尺度方法有动力降尺度方法和统计降尺度方法两种^[6-8]。动力降尺度法的优点在于物理意义明确，保证了与 GCM 输出变量的一致性，可直接应用于任何地方而不需要当地实测资料。但它的缺点是计算量大，并且受 GCM 提供的初始边界条件的影响，在应用于不同的区域时需要重新调整参数。而统计降尺度方法的优点是计算量小，可灵活选用不同算法。但它的成功运用需要以长期的实测资料为基础，并且要选择合适的气候预报因子和合适的统计降尺度算法。

本文分别采用动力降尺度方法和统计降尺度方法，将 A1B 排放情景下的大气环流模式 HadCM3 的结果降尺度至钱塘江流域 7 个站点，提取其中的降雨量进行频率分析，预测钱塘江流域 2011 - 2030 时期（2020s）各重现期下的设计暴雨值，并对两种方法的结果进行比较。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区域和数据来源

钱塘江是浙江省第一大河，河流全长 688 km，流域面积 5.56 万 km²，年均流量 442.5 亿 m³。上游安徽省休宁县海拔 1 600 m 以上的怀玉山主峰六股尖，汇新安江建德段后与衢江合流，经杭州湾注入东海。主要支流有金华江、新安江、桐溪、浦阳江等。钱塘江流域属亚热带季风气候，雨量充沛，四季分明。全年平均气温 17.5 ℃，平均相对湿度 70.3%，年降水量 1 141 mm，年日照时数 1 765 h。

入东海。主要支流有金华江、新安江、桐溪、浦阳江等。钱塘江流域属亚热带季风气候，雨量充沛，四季分明。全年平均气温 17.5 ℃，平均相对湿度 70.3%，年降水量 1 141 mm，年日照时数 1 765 h。

本文的数据主要包括国家气象局提供的钱塘江流域 7 个气象站点 1961 - 1990 年的逐日实测气象资料，其中包括日最高气温、最低气温、日降雨量和日照时数等，为气候变化研究的基准期数据。各气象站点信息如图 1 和表 1 所示。A1B 排放情景下大气环流模式 HadCM3 的结果来自英国气象局 Hadley 气候预测与研究，作为未来的气候情景数据。

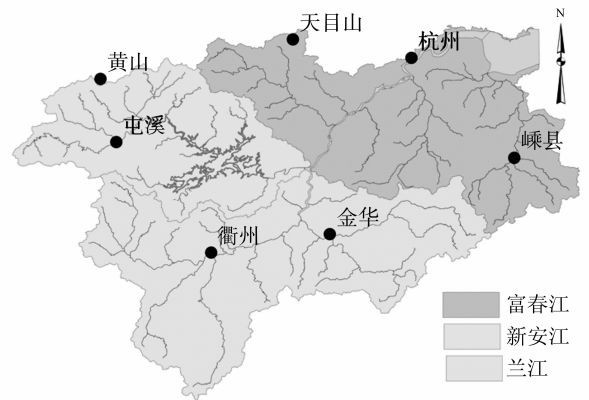


图 1 钱塘江流域站点分布

Fig. 1 The distribution of stations in Qiantang River Basin

表 1 钱塘江流域各站点信息

Table 1 Information of stations in Qiantang River Basin

站点	经度/(°)E	纬度/(°)N	海拔/m	年份	数据来源
杭州	120°10′	30°14′	4.7	1961 - 1990	国家气象局
黄山	118°09′	30°08′	1840.4	1961 - 1990	国家气象局
金华	119°39′	29°07′	62.6	1961 - 1990	国家气象局
衢州	118°54′	29°00′	82.4	1961 - 1990	国家气象局
嵊县	120°49′	29°36′	104.3	1961 - 1990	国家气象局
天目山	119°25′	30°21′	1 505.9	1961 - 1990	国家气象局
屯溪	118°17′	29°43′	142.7	1961 - 1990	国家气象局

2.2 暴雨资料生成方法

2.2.1 动力降尺度方法 本文中用到的动力降尺度方法为 PRECIS 区域气候模式，它是由 Hadley 气候预测与研究发展中心发展的区域气候模拟系统，可在 Linux 系统下运行。国内用 PRECIS 研究气候变化的主要有许吟隆等^[9]，并且取得了较大的成果。大气环流模式 HadCM3 的分辨率为 2.5° 纬度 × 3.75° 经度，经过 PRECIS 降尺度后可得到 0.5° 纬

度 × 0.5° 经度的较高分辨率的逐日降雨模拟结果。提取 PRECIS 模拟的覆盖钱塘江流域 1961 - 1990 年逐日降雨量和 2011 - 2030 年逐日降雨量两部分结果，通过反距离权重方法插值至 7 个站点。

反距离权重法（Inverse Distance Weighted, IDW）是基于“地理第一定律”的基本假设：即两个物体的相似性随它们间的距离增大而减小。其原理是通过计算未测量点附近各个点的测量值的加

权平均来进行插值, 根据空间自相关性原理, 在空间上越靠近的事物或现象就越相似, 则其在最近点处取得的权值为最大^[10]。因此, IDW 在邻近范围内插值误差对空间位置有着较强的依赖关系。其一般表达式为

$$Y_o = \left(\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{d_i^r} \right) / \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^r} \right) \quad (1)$$

式中, Y_o 为 o 点的估计值, x_i 为控制点 i 的实测值, d_i 为控制点 i 与点 o 的距离, n 为控制点的数目, r 为指定的幂数, 本次研究中取 $r=2$ 。

与大气环流模式一样, 区域气候模式模拟气候时存在一定的偏差, 在预测未来气候时需要进行偏差校正。将插值得到的 1961 - 1990 年逐日降雨数据 (设为 Y^{RCM}) 进行多年月平均统计, 得到 $\overline{Y_i^{RCM}}$ ($i = 1, 2, 3, \dots, 12$); 再将各站点 1961 - 1990 年的逐日降雨数据进行多年月平均统计, 得到 $\overline{Y_i}$ ($i = 1, 2, 3, \dots, 12$)。两者相除, 以得到 PRECIS 模式各月的偏差校正系数为:

$$K_i = \frac{\overline{Y_i}}{\overline{Y_i^{RCM}}}, \text{ 其中 } i = 1, 2, 3, \dots, 12 \quad (2)$$

然后将插值得到的 2011 - 2030 年逐日数据按 12 个月进行分类, 每个月的数据分别乘以各月的偏差校正系数 K_i , 以得到偏差校正后的 PRECIS 模拟结果。

2.2.2 统计降尺度方法 统计降尺度方法是在大尺度的再分析资料和区域气候要素之间建立统计关系, 然后把这种关系应用于 GCM 输出的大尺度气候信息, 从而得到区域未来的气候要素^[5]。常用的统计降尺度方法很多, 概括起来主要有以下 3 种: ① 转换函数法; ② 天气分型技术; ③ 天气发生器。

本文所采用的统计降尺度方法为英国洛桑实验室开发的 LARS-WG 随机天气发生器^[11]。它是通过一个半经验分布模型来模拟干湿序列、日降雨量、日辐射量、日最低温和日最高温。对每一个气象变量 v , 它的值 v_i 与发生的概率 p_i 的对应关系如下:

$$v_i = \min \{ v : P(v_{obs} \leq v) \geq p_i \} \quad (3)$$

$i = 0, 1, 2, \dots, n$

其中 $P(\cdot)$ 表示基于实际观测数据 $\{v_{obs}\}$ 的概率, n 是分布间隔数, $n = 23$ 。对每一个气象变量, 两个概率值是给定的, 即 $p_0 = 0$, $p_n = 1$, 而与之相对应的变量值分别是 $v_0 = \min\{v_{obs}\}$ 和 $v_n = \max\{v_{obs}\}$ 。为了更准确地估计气象变量的极值, 给定一些概率值非常接近 0, 与气象变量的极小值相对应; 也给

定一些概率值非常接近 1, 与气象变量的极大值相对应。对于降雨量来说, 就定义了三个非常接近 1 的概率值: $P_{n-1} = 0.999$, $P_{n-2} = 0.995$, $P_{n-3} = 0.985$ 。

LARS-WG 的标准输入数据包括年份、天数、日最高温、日最低温、日降雨量和日辐射量。LARS-WG 可以根据输入的基准期 (1961 - 1990 年) 气象数据生成任意年数的随机天气序列, 另外还可以结合未来的气候情景文件生成未来任意年数的随机天气序列。Semenov 在文献 [12] 中指出, 如果基准期的实测气象数据是 1961 - 1990 年的, 则可以直接通过 LARS-WG 来利用 GCM 结果生成所需时间段的随机天气序列, 而不需对 GCM 结果进行偏差校正。在 LARS-WG 天气发生器中, 根据天气发生器的格式要求输入各个站点 1961 - 1990 年的气象数据, 选择基准期和 HadCM3 在 A1B 排放情景下 2020s 时期的预测结果, 生成该气候情景下 100 年的随机天气序列。LARS-WG 生成的结果包括日最低温、日最高温、日降雨量、日辐射量和日潜在蒸发量, 提取其中的年最大日降雨量来进行降雨频率分析。

3 结果与分析

3.1 模拟性能验证

基准期下 PRECIS 模拟结果与实测气象资料的比较可用偏差校正系数的倒数 ($1/K$) 来反映 (如图 2), 其值越接近于 1, 表示模拟性能越好。由图可见, 在基准期内, PRECIS 模拟的 30 年月均降雨结果与实测气象资料相比: ① 各站点冬季 (12 月 - 次年 2 月) 的模拟结果都偏大, 其中天目山站最明显, 其 1 月份和 12 月份的模拟结果偏大超过 70%; ② 4 - 11 月份, 天目山站和黄山站的模拟结果都偏小, 其中黄山站 7 月份和 8 月份的模拟结果偏小超过 50%; ③ 衢州站和金华站 8 月份的模拟结果偏大超过 50%; ④ 可见对 PRECIS 的结果进

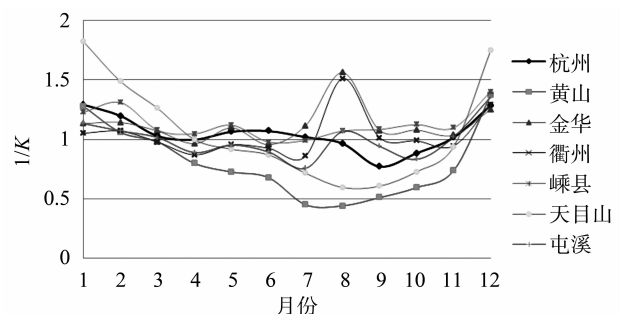


图 2 PRECIS 模拟能力验证

Fig. 2 Validation of PRECIS

行偏差校正有必要性。

基准期下 LARS-WG 模拟性能验证采用相似办法：将 LARS-WG 生成的降雨数据与实测降雨数据分别按月求平均，然后两者相比较，结果见图 3。由图可知，各站点基准期下的月均误差波动没有 PRECIS 那么大。各站点冬季模拟结果与 PRECIS 相似，都偏大。事实上，计算设计暴雨值时只需用到年最大降雨值，而年最大降雨一般出现在 5 - 8 月份，LARS-WG 模拟的 5 - 8 月份结果月均误差都在 20% 以内。

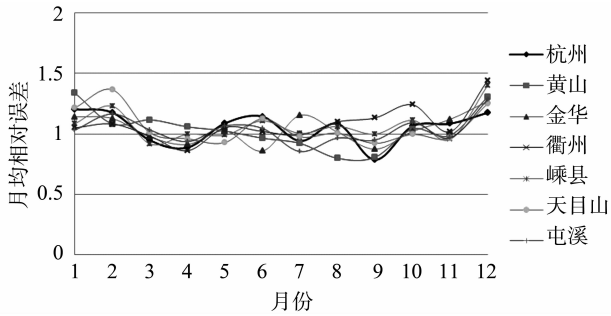


图 3 LARS-WG 模拟能力验证

Fig. 3 Validation of LARS-WG

3.2 设计暴雨计算结果

根据各站点 1961 - 1990 年实测降雨数据，计算不同重现期下的日设计暴雨值，作为基准期设计暴雨值。选择 A1B 排放情景下大气环流模式 HadCM3 的输出结果作为 PRECIS 运行的边界条件，生成 2011 - 2030 年的降雨数据，进行反距离权重插值

和偏差校正后，计算不同重现期下的日设计暴雨值。根据 A1B 排放情景下大气环流模式 HadCM3 的输出结果，通过 LARS-WG 天气发生器，生成 2020s 时期 100 年的随机天气序列，提取其中的降雨数据进行设计暴雨计算。

杭州站的设计暴雨值结果比较见表 2。在 2020s 时期，通过 PRECIS 和 LARS-WG 计算得出不同重现期下的设计暴雨值与基准期相比，都有较显著的增幅。随着重现期的增大，增幅有明显减小的趋势。通过 PRECIS 计算得到的各重现期下的设计暴雨值比 LARS-WG 的结果大，尤其是重现期较小的时候。

不同站点的百年一遇设计暴雨值比较见表 3。由表可知，不同站点间的设计暴雨值差异较大，可能与不同站点的地理位置和气候条件有关。2020s 时期，通过 PRECIS 计算的不同站点百年一遇设计暴雨值相对基准期的增幅远比通过 LARS-WG 计算的设计暴雨值大（天目山站例外）。事实上，PRECIS 模拟的月降水量与年降水量相对基准期并没有明显的增幅，而极端暴雨量的增幅却比较显著。通过 LARS-WG 计算的百年一遇设计暴雨值相对基准期并没有显著的增幅，甚至在嵊县站和天目山站反而出现小量的降幅。PRECIS 区域气候模式是基于物理过程进行模拟的，而 LARS-WG 天气发生器是基于统计过程进行模拟的。一般来说，基于物理过程的模拟在极端事件方面效果较好。

表 2 杭州站设计暴雨值

Table 2 Design storms in Hangzhou station

重现期	5 a	10 a	20 a	50 a	100 a	200 a	500 a
基准期/mm	113.96	133.62	151.91	174.85	191.59	207.98	229.24
2020s (PRECIS)/mm	188.17	205.24	219.47	235.63	246.50	256.51	268.71
增幅/%	65.12	53.60	44.47	34.76	28.66	23.33	17.22
2020s (LARS-WG)/mm	137.03	158.87	178.38	202.02	218.79	234.87	255.32
增幅/%	20.24	18.90	17.42	15.54	14.20	12.93	11.38

表 3 不同站点百年一遇设计暴雨值

Table 3 Design storms of 100 year in different stations

站点	杭州	黄山	金华	衢州	嵊县	天目山	屯溪
基准期/mm	191.59	266.78	135.12	148.14	151.95	155.24	184.82
2020s (PRECIS)/mm	246.50	348.92	210.67	217.13	249.63	158.68	276.60
增幅/%	28.66	30.79	55.91	46.57	64.28	2.22	49.66
2020s (LARS-WG)/mm	218.79	267.61	135.33	169.65	148.9	152.77	195.8
增幅/%	14.20	0.31	0.16	14.52	-2.01	-1.59	5.94

4 结 论

本文选用 A1B 排放情景下大气环流模式 Had-CM3 的结果, 分别通过 PRECIS 区域气候模式和 LARS-WG 天气发生器进行降尺度处理, 结合 P-III 型曲线和线性矩参数估计方法, 估算钱塘江流域 2020s 时期的日设计暴雨值, 主要得到以下结论: 除个别站点外, 在 A1B 情景下, 通过 PRECIS 计算的不同站点设计暴雨值比通过 LARS-WG 计算的设计暴雨值大, 且两者相对基准期都有增大的趋势。对文中, PRECIS 模式以月进行偏差校正对日设计暴雨计算的影响以及其他排放情景下气候变化对设计暴雨的影响有待进一步研究。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change 2007: The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 2007.
- [2] GREEN D, ALEXANDER L, MCLNNES K, et al. An assessment of climate change impacts and adaptation for the Torres Strait Islands, Australia [J]. Climatic Change, 2010, 102(3/4): 687 - 707.
- [3] 张建业, 王国庆, 贺瑞敏等. 黄河中游水文变化趋势及其对气候变化的响应[J]. 水科学进展, 2009, 20(2): 153 - 158.
- [4] 丛振涛, 姚本智, 倪广恒. SRA1B 情景下中国主要作

- 物需水预测[J]. 水科学进展, 2011, 22(1): 38 - 43.
- [5] 范丽军. 统计降尺度方法的研究及其对中国未来区域气候情景的预估[D]. 北京: 中国科学院, 2006.
- [6] BOE J, TERRAY L, HABETS F, et al. Statistical and dynamical downscaling of the Seine basin climate for hydro-meteorological studies [J]. International Journal of Climatology, 2007, 27(12): 1643 - 1655.
- [7] CHIEW F H S, KIRONO D G C, KENT D M, et al. Comparison of runoff modelled using rainfall from different downscaling methods for historical and future climates [J]. Journal of Hydrology, 2010, 387(1/2): 10 - 23.
- [8] GUAN H, WILSON J L, XIE H. A cluster-optimizing regression-based approach for precipitation spatial downscaling in mountainous terrain [J]. Journal of Hydrology, 2009, 375(3/4): 578 - 588.
- [9] 许吟隆, 黄晓莹, 张勇, 等. PRECIS 对华南地区气候模拟能力的验证[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2007, 46(5): 93 - 97.
- [10] 刘光孟, 汪云甲, 王允. 反距离权重插值因子对插值误差影响分析[J]. 中国科技论文在线, 2010, 5(11): 879 - 884.
- [11] SEMENOV M A, BARROW E M. LARS-WG: a stochastic weather generator for use in climate impact studies. LARS-WG 3.0 manual[R/OL]. [2002 - 09 - 05] <http://www.rothamsted.bbsrc.ac.uk/mas-models/download/LARS-WG-Manual.pdf/>.
- [12] SEMENOV M A, STRATONOVITCH P. Use of multi-model ensembles from global climate models for assessment of climate change impacts [J]. Climate research, 2010, 40(1): 1 - 14.

(上接第 51 页)

- [3] YANG J L, MA Y T, LI M X, et al. Modeling and simulating the transcritical CO₂ heat pump system [J]. Energy, 2010, 35: 4812 - 4818.
- [4] FARDOUN F, IBRAHIM O, ZOUGHAIBA. Quasi-steady state modeling of an air source heat pump water heater [J]. Energy, 2011, 6: 325 - 330.
- [5] WANG J F, HIHARA E. Performance comparison of heat pump water heaters using carbon dioxide and R22 as refrigerants[C] // Preliminary proceedings of the fifth IIR-Gustav Lorentzen conference on natural working fluids, Guangzhou China, 2002: 260 - 267.
- [6] BYRNE P, MIRIEL J, LENATY. Design and simulation of a heat pump for simultaneous heating and cooling using HFC or CO₂ as a working fluid [J]. International Journal of Refrigeration, 2009, 32: 1711 - 1723.
- [7] CULLIMOREB A, RING S G, JOHNSON D A. SINDA/FLUINT user's manual[M]. C&R, 1992.
- [8] 王冬. 家用空气源二氧化碳热泵热水器实验及模拟[D]. 广州: 中山大学, 2010.
- [9] HOOPER W B. Calculate head loss caused by change in pipe size [J]. Chemical Engineering, 1988, 7: 89 - 92.
- [10] WELTY J R. Engineering heat transfer [M]. SI, New York: Wiley, 1978.
- [11] SPINDLER K. A review on heat transfer correlations for supercritical carbon dioxide under cooling conditions [C] // 7th IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural Working Fluids, Trondheim, Norway, May 28 - 31, 2004.
- [12] American Society of Heating, Refrigerating, and air conditioning engineers [M]. Inc (ASHRAE) Handbook, 1981 Fundamentals, 1981.
- [13] JEONG JIN, KIM C N, YOUN B. A study on the thermal contact conductance in fin - tube heat exchangers with 7 mm tube [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006, 49: 1547 - 1555.
- [14] LI Huizhen, QU Zhiguo, CHENG Yongpan, et al. Experimental and numerical study on heat transfer and fluid flow characteristics of slotted fin-and-tube heat transfer surfaces [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2005, 39(3): 48 - 52.