# ASD 统计降尺度方法

# 在中国东部季风区典型流域的适用性分析

刘 品1,徐宗学1,李秀萍12,王时震3

(1.北京师范大学水科学研究院水沙科学教育部重点实验室,北京 100875;

2.中国科学院青藏高原研究所,北京 100101;3.66240 部队,北京 100042)

摘 要:ASD(Automated Statistical Downscaling)是一种基于回归分析的统计降尺度方法。应用 ASD 方法,选取东部季风区 3 个典型流域地面观测资料、ERA-40 再分析资料,建立预报量与大气环流因子之间的统计关系,对日降水量和日平均、最高、最低气温进行模拟,并评价模型对不同流域不同变量的模拟效果,分析其适用性。结果表明,ASD 模型能较好模拟出各地面变量的时间序列演变规律及空间分布特征,对气温变量的模拟效果优于降水变量。模型对水文气象特征各异的三个流域模拟效果均较好,同时有所差异,这与各流域不同的地理、气象因素有关。以上结果说明,ASD 模型在东部季风区适用性较好,可应用于构建未来气候变化情景及为水文模拟提供输入资料等相关方面。

关键词:气候变化;东部季风区;统计降尺度;ASD;ERA-40;BCCR

中图分类号:P412 文献标识码: A 文章编号:1000-0852(2013)04-0001-09

## 1 引言

全球气候变暖对气温和降水的时空分布会产生重 大影响,进而影响水资源、生态系统及社会经济等多个 方面。联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第四 次评估报告认为,全球气候变化已是不争的事实,将对 全球和区域水资源安全构成严重威胁<sup>[1]</sup>。根据 IPCC 的 预测结果,气候变暖将加快水文循环,造成陆地降水分 布不均,进一步导致旱涝等自然灾害的频繁发生,因 此,提高对未来气候变化的预估精度,进而探讨气候变 化对水文水资源的影响具有十分重要的现实意义。

当前预估大尺度未来气候变化最重要的手段是全 球大气环流模式(GCM)。然而 GCM 空间分辨率较低, 难以满足水文应用领域的需求,降尺度技术的应用可 弥补这一缺陷<sup>[2]</sup>。降尺度方法以大尺度气候情景为条 件,可将大尺度、低分辨率的 GCM 输出信息转化为较 高分辨率的区域尺度地面气候变化信息,以用于径流 模拟等水文领域。有关降尺度技术的对比研究方面,已 有学者做了大量研究<sup>[3-5]</sup>,当前应用的降尺度技术主要 有动力降尺度和统计降尺度两种。其中,动力降尺度通 过区域气候模式(RCM)与 GCM 的耦合,将 GCM 的输 出作为 RCM 的输入来实现,其物理意义明确,但对计 算机配置要求较高,需耗费大量机时,而且需要比较深 厚的气象专业背景知识; 而统计降尺度方法则是建立 GCM 输出中物理意义明确、模拟效果较好的大尺度气 候影响因子与小尺度地面观测数据之间的统计关系, 能够达到纠正 GCM 系统误差的效果,且计算量小,易 于实现。

目前应用中可供选择的统计降尺度方法较多,但 具体流域及问题不同,所适用的方法也不尽相同。基于 全面研究我国东部季风区气候变化对水资源的影响及 为水文模型提供全面输入资料的目的,本文选取 ASD 统计降尺度方法,对其在东部季风区典型流域的适用 性进行检验和分析。

收稿日期:2012-11-13

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)"气候变化对我国东部季风区陆地水循环与水资源安全的影响及适应对策"(2010CB428402) 作者简介:刘品 (1987-),女,山东聊城人,博士研究生,研究方向为气候变化对水资源的影响。E-mail: liupin@mail.bnu.edu.cn 通讯作者:徐宗学 (1962-),男,山东淄博人,教授,主要从事水文水资源方面的研究。E-mail: zxxu@bnu.edu.cn

## 2 研究区概况

根据国家重点基础研究发展计划 (973 计划)"气候变化对我国东部季风区陆地水循环与水资源安全的影响及适应对策"的研究内容,本文选取东部季风区水 文特征各异的三个流域作为研究区域。

按照自然地理区划,东部季风区指大兴安岭以东, 内蒙古高原以南,青藏高原以东的地区。土地面积为全 国的 46%,而人口占到全国的 95%,是国家最主要的 经济社会发展区域,也是受气候变化影响最为敏感、水 资源问题最为突出的地区。与东部季风区直接联系的 我国最为重要大江大河包括松花江、辽河、海河、黄河、 淮河、长江、东南诸河、珠江等八大流域。本研究中,选 取水文气象特征各异的辽河、黄河及东南诸河三流域 作为研究区域,如图 1 所示。



图 1 研究区位置图 Fig.1 Location of the study areas

辽河流域大部分地区属温带半湿润半干旱季风 气候,气温的分布为平原较高,山地较低,年平均约 在4℃~9℃间,自南向北递减,流域内年降水量地区 分布不均,约为 350~1 000mm,多年平均径流量约为 126×10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>。

黄河流域大部分位于我国北部缺水的干旱、半干 旱地区,流域内年平均气温上游 1℃~8℃,中游 8℃~ 14℃,下游 12℃~14℃。水资源十分贫乏,多年平均降水 量约为 476mm,多年平均径流量约为 580×10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>。

东南诸河流域地处东南部湿润地区,属亚热带海 洋季风气候区,气候温和,年平均气温在 16℃~21℃, 雨量充沛,多年平均降水量约为 1 526mm,沿海地区受 台风的袭击,洪涝灾害频繁。

# 3 数据和方法

3.1 数据来源

本研究中用到的数据主要包括:观测站点数据、 ERA-40 再分析数据以及 GCM(BCCR)的输出数据。

(1)观测站点数据。选取辽河流域16个,黄河流域 23个及东南诸河流域9个国家基准气象观测站点的 平均气温、最高气温、最低气温及平均降水数据,数据 来源于国家气象局国家气象信息中心。其中,用1961~ 1998年日序列数据进行模型的率定和验证。需要指出 的是,由于台湾地区数据的缺失,本研究中的东南诸河 流域只限定在中国大陆地区。

(2)ERA-40 再分析数据<sup>[6-7]</sup>。选取 ERA-40 资料中 描述大气环流和地表、850hPa、700hPa 及 500hPa 高度 大气湿度状况的 11 个变量:zg850 (850hPa 位势高 度)、zg700(700hPa 位势高度)、zg500(500hPa 位势高 度)、ua850(850hPa 纬向风)、uas(地面纬向风)、ta850 (850hPa 温度)、ta500(500hPa 温度)、tas(地面温度)、 hus850(850hPa 湿度)、hus500(500hPa 湿度)及 slp(海 平面气压),作为预报因子。

(3)GCM 数据。基于 ASD 降尺度模型对日尺度数 据的需求,在 IPCC AR4 中选取了能够提供日资料的 模式 BCCR\_BCM2.0,而对排放情景的选择,则是采取 了常用的中等强度排放情景 A1B。考虑到各数据资料 时间长度的匹配性问题,文中统一选取 1961~1998 年 作为当代的研究时段。

#### 3.2 研究方法

ASD(Automated Statistical Downscaling)技术是借 鉴 SDSM(Statistical Downscaling Model)模型的原理, 基于回归分析的方法,在 Matlab 环境下开发的。SDSM 模型发展至今已比较成熟<sup>[8]</sup>,当前国内已有多位学者 应用 SDSM 模型展开了相关研究,如褚健婷等分析了 SDSM 在海河流域的适用性<sup>[9]</sup>,刘浏等将 SDSM 与动力 降尺度方法 PRECIS 的模拟结果进行了对比<sup>[10]</sup>,刘兆 飞应用 SDSM 生成未来气候变化情景,分析了气候变 化对塔里木河流域水文要素的影响<sup>[11]</sup>,均取得了较好 的模拟效果。

较之 SDSM 模型,ASD 使用更为方便,且适用于 对批量数据的处理<sup>[12]</sup>。但目前国内对 ASD 模型的研究 与应用仍较少,本文在辽河、黄河和东南诸河流域应用 ASD 模型,建立大气环流因子与各观测站点降水和气 温数据之间的统计关系,并验证所建立统计关系在研 究区域的适用性。

本研究中采用 1961~1990 年的观测数据建立预报量与预报因子(ERA-40 再分析数据)之间的统计关系,确定 ASD 模型参数,并对其进行率定;随后,将建立的统计关系用于 BCCR\_BCM2.0 在 A1B 情景下的大气变量日资料,生成统计降尺度数据,并选取 1991~1998 年的观测数据进行模型验证。

4 结果分析

4.1 ASD 方法预报因子选取及率定效果分析

在研究选取的三个流域,选用 1961~1990 年的观 测数据建立预报量与 ERA-40 再分析数据之间的统计 关系,确定 ASD 模型的参数,完成模型率定。

鉴于 ASD 模型的建立是基于回归分析的方法,选 取常用来表征回归模型拟合效果的确定性系数 R<sup>2</sup> 对 率定期建立的大气环流预报因子与局地变量之间的统 计关系进行分析,评价该模型在研究区的率定效果。表 1~3 列出了模型率定期辽河、黄河及东南诸河流域各 站点日尺度降水量、平均气温、最高气温、最低气温的 确定性系数(R<sup>2</sup>)及预报因子选择情况。

本文所选研究区域受东亚季风强烈控制,大气环

流特征随季节变化产生显著差异,因此筛选预报因子存在较大挑战。由表 1~3 可知,不同区域的不同局地 变量分别与不同的大气预报因子相关。在不同区域,比 如对于平均气温,辽河流域和黄河流域均有大多数站 点选择了预报因子 uas(地面纬向风),但在东南诸河 流域,各站点都没有将其纳入;而在东南诸河选择较多 的 hus850(850hPa 湿度),在黄河流域的 23 个站点中, 只有 4 个站点选择了这一因子,而辽河流域各个站点 均没有选择。对于不同局地变量而言,在建立大气环流 因子与其之间的统计关系时,选择的预报因子也有所 不同。比如,考虑降水量时,三流域中的很多站点均选 择了 ta500 (500hPa 温度),tas (地面温度)和 zg500 (500hPa 位势高度);而对于平均气温,除上述三项预 报因子外,大多数站点还选择了 slp(海平面气压)。

根据表 1~3 中确定性系数的数据显示, ASD 模型 选定的大气环流因子可以较好地解释日平均气温、最 高气温及最低气温, 所选站点的确定性系数均在 0.837 以上,对于平均气温,各站点的确定性系数均达到 0.908 以上。在率定效果较好的辽河流域,平均气温、最 高气温和最低气温的确定性系数在 0.932~0.968,平均 气温率定期的确定性系数更是达到 0.953 以上。但是, ASD 对降水量的模拟能力明显偏低, 在相对模拟效果

表1 辽河流域预报因子的选择及率定期确定性系数 ( $R^2$ ) Table1 The selected predictors and  $R^2$  in calibration for the Liaohe River basin

站夕 -	降水量		平均气温		最高气温		最低气温	
坦石	预报因子	$R^2$	预报因子	$R^2$	预报因子	$R^2$	预报因子	$R^2$
扎鲁特旗	2,6,7,9,10	0.250	3,4,6,8,9	0.965	1,3,6,8,10	0.949	3,4,6,8,9	0.951
巴林左旗	2,6,7,9,10	0.281	3,4,6,8,9	0.962	1,3,6,8,10	0.945	2,4,7,8,9	0.932
林西	4,6,7,9,10	0.274	3,6,8,9,10	0.953	2,3,6,8,10	0.936	2,3,6,8,9	0.937
开鲁	4,5,6,9,11	0.206	3,4,6,8,9	0.960	3,6,8,9,10	0.934	2,4,5,8,9	0.956
双辽	3,4,5,6,9	0.187	3,4,6,8,9	0.966	3,6,8,9,10	0.950	1,4,7,8,9	0.950
赤峰	2,4,6,9,10	0.217	3,6,8,9,10	0.963	3,6,8,9,10	0.938	4,5,6,8,9	0.952
彰武	3,4,6,7,9	0.210	3,4,6,8,9	0.968	3,5,6,8,9	0.950	4,5,7,8,9	0.953
开原	4,6,7,9,10	0.188	3,6,8,9,10	0.963	3,6,9,10,11	0.947	3,4,6,8,9	0.951
朝阳	3,4,6,7,9	0.170	3,4,6,8,9	0.961	3,6,8,9,10	0.944	4,5,7,8,9	0.936
锦州	1,4,5,7,10	0.180	3,4,6,8,11	0.955	3,5,6,8,11	0.938	2,4,6,7,8	0.944
沈阳	3,4,6,7,9	0.205	3,4,6,8,9	0.965	3,6,8,9,10	0.953	1,2,4,8,9	0.950
本溪	2,4,6,7,9	0.230	3,6,8,9,10	0.962	3,6,9,10,11	0.945	3,4,6,8,9	0.948
桓仁	3,4,6,7,9	0.253	3,4,6,8,9	0.957	3,5,6,8,9	0.947	3,4,6,9,10	0.934
营口	3,4,6,9,10	0.229	3,4,6,8,9	0.963	3,4,6,8,9	0.951	1,2,4,6,9	0.957
丹东	4,5,6,7,9	0.255	3,6,8,10,11	0.962	3,5,6,8,10	0.942	3,4,6,10,11	0.952
大连	5,6,7,9,11	0.251	3,4,6,8,9	0.956	3,4,6,8,9	0.938	3,4,6,8,9	0.956

 $({\Xi:1-hus500;\ 2-hus850;\ 3-slp;\ 4-ta500;\ 5-ta850;\ 6-tas;\ 7-ua850;\ 8-uas;\ 9-zg500;\ 10-zg700;\ 11-zg850)}$ 

3

较好的辽河流域,多数站点的确定性系数超过了 0.200,各站点平均能够达到 0.224,而在黄河流域和东 南诸河流域,确定性系数的多站点平均值只有 0.191 和 0.173。这主要与降水预报因子的复杂性有关,一定 程度上,可以认为 ASD 模型能够较好模拟降水的总体 变化情况[13-14]。

由此可见,ASD 模型对辽河、黄河及东南诸河流 域的日尺度平均气温、最高气温和最低气温的模拟效 果较好,对降水量的模拟存在一定误差,总体模拟效果 相对较好。

表2 黄河流域预报因子的选择及率定期确定性系数 ( $R^2$ ) Table2 The selected predictors and  $R^2$  in calibration for the Yellow River basin

站名			平均气温		最高气温		最低气温	
	预报因子	$R^2$	预报因子	$R^2$	预报因子	$R^2$	预报因子	$R^2$
西宁	1,2,4,7,10	0.180	1,3,4,6,11	0.946	1,4,6,9,11	0.898	3,4,6,7,9	0.933
兰州	2,4,6,7,9	0.158	4,6,7,9,10	0.943	1,3,4,6,7	0.927	2,3,4,6,9	0.944
包头	1,2,4,5,9	0.232	3,4,6,8,9	0.962	1,3,5,6,7	0.951	2,3,4,6,9	0.950
呼和浩特	1,2,4,6,9	0.204	3,4,6,8,9	0.962	2,4,5,6,8	0.949	3,4,5,6,9	0.949
临河	1,2,5,6,9	0.215	3,4,6,8,9	0.959	3,5,6,10,11	0.942	2,3,4,6,9	0.948
河曲	4,6,7,9	0.220	3,6,8,9	0.957	1,3,5,6,7	0.947	1,3,5,6,9	0.930
银川	3,4,5,9,11	0.224	3,4,6,8,11	0.952	1,3,6,7,11	0.942	3,4,6,9,11	0.946
榆林	1,4,6,9,10	0.252	3,4,6,8,9	0.957	3,5,6,7,9	0.932	3,4,5,6,9	0.949
中宁	3,4,5,7,9	0.184	1,3,6,8,11	0.951	1,6,7,9,11	0.936	4,5,6,8,9	0.947
太原	1,4,6,9,11	0.218	3,4,6,8,9	0.962	2,5,6,8,10	0.938	2,3,4,6,9	0.943
固原	2,4,6,9,10	0.163	1,3,6,7,10	0.945	2,6,7,9,10	0.910	3,4,5,6,9	0.932
延安	1,4,6,9,10	0.226	3,4,6,8,9	0.957	1,3,6,7,9	0.921	2,3,4,6,9	0.941
临汾	1,4,6,7,9	0.169	2,4,6,8,9	0.957	2,3,6,7,8	0.931	4,7,8,9,11	0.939
长武	2,7,9,11	0.131	3,5,6,7,8	0.908	3,5,6,7,8	0.846	3,5,6,8,11	0.900
羊角沟	1,3,4,6,9	0.192	2,4,6,8,9	0.962	4,5,6,9,10	0.923	1,4,7,8,9	0.957
济南	3,4,6,8,9	0.182	3,4,6,9,10	0.959	3,5,6,9,10	0.941	2,4,6,9,10	0.951
玛多	1,2,4,7,11	0.218	2,3,4,7,9	0.930	2,4,5,6,7	0.729	1,2,3,4,9	0.914
岷县	1,2,4,5,7	0.172	1,4,6,9,10	0.945	1,6,7,9,11	0.888	2,3,4,5,9	0.915
天水	1,2,4,6,9	0.174	3,4,6,9,10	0.947	2,5,6,7,11	0.919	2,3,4,6,9	0.938
宝鸡	1,5,9,10	0.148	3,5,6,7,8	0.911	3,5,6,7,8	0.837	3,4,5,6,11	0.912
西安	1,2,4,10,11	0.179	3,4,6,8,9	0.952	3,5,6,7,10	0.927	3,4,6,8,9	0.946
华山	4,7,9,10,11	0.179	1,2,6,7,9	0.956	1,2,6,7,9	0.935	2,4,6,7,10	0.951
三门峡	4,6,9,10,11	0.175	3,4,6,8,9	0.952	1,3,5,6,7	0.928	3,4,6,8,9	0.949

(注:1-hus500; 2-hus850; 3-slp; 4-ta500; 5-ta850; 6-tas; 7-ua850; 8-uas; 9-zg500; 10-zg700; 11-zg850)

表3 东南诸河流域预报因子的选择及率定期确定性系数 (R<sup>2</sup>)

Table 3 The selected predictors and  $R^2$  in calibration for the southeastern river basins

站名 -	降水量		平均气温		最高气温		最低气温	
	预报因子	$R^2$	预报因子	$R^2$	预报因子	$R^2$	预报因子	$R^2$
定海	4,5,6,9,11	0.199	3,4,6,9,10	0.963	3,4,5,6,9	0.931	1,3,4,6,9	0.949
金华	1,2,4,9,11	0.182	1,2,4,6,9	0.958	1,2,6,9,11	0.915	4,7,8,9,11	0.955
龙泉	1,4,6,9,10	0.179	2,4,6,9,10	0.938	2,3,5,6,9	0.863	3,4,5,9,11	0.934
温州	3,4,6,9,10	0.186	2,4,6,9,10	0.956	3,5,6,9,11	0.912	2,4,6,8,9	0.952
泰宁	1,4,6,7,9	0.168	1,2,4,6,9	0.952	1,3,5,6,9	0.868	2,3,4,5,9	0.945
南平	1,4,6,7,9	0.158	2,4,6,9,11	0.950	2,3,5,6,9	0.886	2,3,4,9,11	0.939
上杭	4,5,6,9,10	0.161	2,3,6,9,11	0.932	3,4,5,6,9	0.845	2,4,6,9,11	0.937
梅县	1,2,3,4,9	0.152	2,4,5,6,9	0.946	3,4,5,6,9	0.873	1,2,3,4,9	0.923
厦门	1,4,5,6,9	0.176	2,4,5,6,9	0.944	3,4,5,6,9	0.890	2,6,8,9,11	0.942

(注:1-hus500; 2-hus850; 3-slp; 4-ta500; 5-ta850; 6-tas; 7-ua850; 8-uas; 9-zg500; 10-zg700; 11-zg850)

4.2 验证期结果分析

在 ASD 模型中建立统计关系之后,选取独立的观测资料对模型进行验证。本文根据 3 个流域 1991~ 1998 年的观测数据,同时针对 ASD 对地面变量的时间序列、空间分布的模拟能力及归一化的均方根误差



(NRMSE),评价模型的模拟效果。

4.2.1 时间序列模拟效果

由图 2~4 可以看出, ASD 模型在 3 个流域中均能 够较好地模拟出 4 个地面变量的季节变化,其中对平 均气温及气温极值的模拟与实测值吻合较好,对降水



图 2 辽河流域验证期月平均模拟值与观测值比较 Fig.2 Comparison between the simulated and observed values during validation period in the Liaohe River basin



Fig.3 Comparison between the simulated and observed values during validation period in the Yellow River basin

第4期





量的模拟效果相对较差一些。对比3个流域的模拟效 果,以东南诸河最优,但对于降水的模拟,辽河和黄河 流域对于降水时间序列演变趋势的把握较为准确。在 降水比较集中的7~8月份,辽河和黄河流域对降水的 模拟均低于观测值,而在东南诸河流域则偏高,可见模 型对降水时间集中且降水量大的雨季特征的模拟尚有 待提高。

具体来说,模型对 4~10 月气温变量的总体模拟 效果明显优于 11 月到次年 3 月,也就是说,ASD 模型 对平均气温较高,且早晚温差较小的月份模拟性能较 好。就流域而言,降水量模拟相对误差在东南诸河流 域、黄河流域和辽河流域各月份的平均值分别为 30%、38%和 45%;平均温度(最高温度/最低温度)的 误差则分别为 0.29℃(0.45℃/0.42℃)、0.66℃(0.69℃/ 0.68℃)和 0.95℃(0.96℃/1.00℃),东南诸河流域对变量 时间序列的模拟效果依然是 3 个流域中最好的,其次 是黄河流域和辽河流域。原因主要在于,3 个流域中, 辽河流域所处纬度最高,全年平均温度较低,而月际温 差和昼夜温差均较高,导致对该流域的精确模拟较为 困难<sup>[15]</sup>;而东南诸河流域的情况与辽河流域相反,有利 于获得好的模拟效果。

4.2.2 空间分布模拟效果

从空间上看 (见图 5~7), ASD 模型对 4 项地面变

量的空间分布把握较为准确,能够在相当程度上模拟 出各变量对应于各站点的空间分布格局。总体来说, ASD 模型的模拟结果显示出了较为一致的趋势,即对 降水量的模拟较实测值偏大,而平均气温、最高气温及 最低气温的模拟值较实测值整体偏小。三流域相比较 而言,以日降水量为例,东南诸河、辽河及黄河流域各 站点模拟的相对误差分别为 5.7%、19.4%和 30.0%;而 平均气温的误差分别为 5.7%、19.4%和 30.0%;而 平均气温的误差分别为 0.18℃、0.57℃和 0.63℃。可见, ASD 模型在东南诸河的模拟效果优于辽河流域及黄 河流域。究其原因,黄河流域面积较为广阔,流域内各 站点的气候及地形地貌要素差异较大,导致对该流域 的模拟较为困难<sup>[16-17]</sup>,而东南诸河流域地处湿润地区, 各站点间影响降水和气温的因子差别不大,因此,能够 取得较好的模拟效果。

4.2.3 模拟效果整体评价

除评价 ASD 模型对 3 个流域地面变量空间分布 及时间序列的模拟效果外,本研究还选取归一化的 均方根误差 NRMSE (Nornalised Root Mean Square Error)<sup>[11]</sup> 来定量评价模型验证期每对模拟值与观测值 之间的误差。NRMSE 定义为均方根误差与相应标准 差的比值,这一定义可以同时考虑到所考察变量的均 值和标准差。其值的大小代表模拟值偏离观测值的波 动范围。





#### 图 5 辽河流域验证期各站点模拟值与观测值比较

(横坐标数字 1~16 分别代表站点扎鲁特旗、巴林左旗、林西、开鲁、双辽、赤峰、彰武、开原、朝阳、锦州、沈阳、本溪、桓仁、营口、丹东、大连) Fig.5 Comparison between the simulated and observed values at the various stations in the Liaohe River basin ("1~16" on the horizontal ordinate stand for the stations: Zhaluteqi, Balinzuoqi, Linxi, Kailu, Shuangliao, Chifeng, Zhangwu, Kaiyuan, Chaoyang, Jinzhou, Shenyang, Benxi, Huanren, Yingkou, Dandong and Dalian)



图 6 黄河流域验证期各站点模拟值与观测值比较 (横坐标数字 1~23 分别代表站点西宁、兰州、包头、呼和浩特、临河、河曲、银川、榆林、 中宁、太原、固原、延安、临汾、长武、羊角沟、济南、玛多、岷县、天水、宝鸡、西安、华山、三门峡) Fig.6 Comparison between the simulated and observed values at the various stations in the Yellow River basin

("1-23" on the horizontal ordinate stand for the stations: Xining, Lanzhou, Baotou, Huhehaote, Linhe, Hequ, Yinchuan, Yulin, Zhongning, Taiyuan, Guyuan, Yan'an, Linfen, Changwu, Yangjiagou, Jinan, Maduo, Minxian, Tianshui, Baoji, Xi 'an, Huashan and Sanmenxia)

NRMSE=
$$\frac{\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(X_{mi}-X_{oi})^{2}}}{\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(X_{oi}-\overline{X}_{o})^{2}}}$$

式中:X<sub>ai</sub>和 X<sub>mi</sub>分别为观测序列和模拟序列的第 *i* 个 值; X̄<sub>a</sub>为观测序列数据的平均值; n 为数据序列的长度。 由表 4 可见, 3 个流域气温变量模拟的 NRMSE 均 介于 0.46~0.79 之间,其值越小说明 ASD 模型的表现



8



图 7 东南诸河流域验证期各站点模拟值与观测值比较

(横坐标数字 1~9 分别代表站点定海、金华、龙泉、温州、泰宁、南平、上杭、梅县、厦门)

Fig.7 Comparison between the simulated and observed values at the various stations in the southeastern river basins ("1~9" on the horizontal ordinate stand for the stations: Dinghai, Jinhua, Longquan, Wenzhou, Taining, Nanping, Shanghang, Meixian and Xiamen)

越好,同时注意到,ASD 模型对平均气温的模拟效果 优于最高气温及最低气温。而 ASD 模型输出降水变量 的 NRMSE 高于气候变量,在 1.33~1.47 之间。同样表 明,ASD 模型模拟降水变量的精度要低于气温变量。 虽然 NRMSE 在不同变量不同流域间存在差异,但已 经能够从量化评价的角度说明,ASD 模型能够较好的 模拟基准期平均气温、最高气温、最低气温的变化情 况。同时,一定程度上也能较好地模拟降水量的统计 特征。

表4 三流域模拟值与观测值的偏差 (NRMSE) Table4 Deviation between the simulated and observed values in the 3 river basins (NRMSE)

	降水量	平均气温	最高气温	最低气温
东南诸河	1.343	0.463	0.571	0.490
辽河	1.335	0.526	0.662	0.548
黄河	1.467	0.636	0.788	0.654

# 5 讨论与结论

针对东部季风区水文气象特征各异的辽河、黄河 及东南诸河三流域,本文研究了 ASD 降尺度方法的适 用性。借助 1961~1990 年 ERA-40 再分析数据,对模 型进行率定建立了预报量与大气环流预报因子之间的 统计关系,随后选用独立的观测资料对其进行验证。主 要结论如下:

(1)ASD 模型能够优选出具有一定物理机制的

适用于不同预报量的预报因子,并获得了较好的率 定效果。

(2)ASD 模型对气温变量(平均气温、最高气温和 最低气温)的模拟效果优于降水变量,这与降水变量本 身不确定性较大有关系。

(3)模型对3个流域的模拟效果存在差异。时间序 列演变趋势模拟效果的排序依次是:东南诸河流域、黄 河流域和辽河流域。而空间分布特征模拟效果的排序 则为:东南诸河流域、辽河流域和黄河流域。

造成这种差别的可能原因主要有 3 个方面: ①对 于月际温差和昼夜温差较高的流域,如辽河流域,模型 对地面变量时间序列演变规律的准确把握较为困难。 ②对于面积较为广阔,区域内各站点的气候及地形地 貌要素差异较大的流域,如黄河流域,对其空间分布特 征的模拟难度较大。③ASD 模型对空间及时间数据序 列异质性较强区域的模拟能力尚待提高。同时也说 明,进行 ASD 模型在不同区域的适用性研究是很有 必要的,能够帮助提高模型的应用效率,取得更好的 模拟效果。

(4) 总体来说,ASD 模型在水文气象特征各异的 辽河、黄河及东南诸河三流域整体均获得了较好的模 拟效果,适用性较强。能够较好地反映出降水量、平均 气温、最高气温及最低气温的月际变化趋势及站点间 的空间分布特征。可用于生成未来气候变化情景,并在

#### 此基础上为水文模拟提供输入资料。

#### 参考文献:

- IPCC.Climate Change 2007:Summary for Policymakers.Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M].Cambridge and New York:Cambridge University Press, 2007.
- [2] Xu C Y.From GCMs to river flow: A review of downscaling methods and hydrologic modeling approaches[J].Progress in Physical Geography, 1999, 23(2):229-249.
- [3] Gutmann E D,Rasmussen R M,Liu C H,et al.A comparison of statistical and dynamical downscaling of winter precipitation over complex terrain[J].Journal of Climate,2012,25(1):262-281.
- [4] Fowler H J, Wilby R L.Beyond the downscaling comparison study[J]. International Journal of Climatology, 2007, 27:1543-1545.
- [5] 范丽军.统计降尺度方法集合预估华东气温的初步研究[J].高原气象,2010,29 (2):392-402.(FAN Lijun.Preliminary study of statistically downscaled temperature ensemble predictions in eastern China
  [J].Plateau Meteorology,2010,29(2):392-402.(in Chinese))
- [6] 施春华,郑彬.欧洲中心臭氧再分析资料与 HALOE 观测资料的对比 分析[J].南京气象学院学报,2008:31(6):828-835.(SHI Chunhua, ZHENG Bin.A comparison analysis on stratospheric ozone of ERA-40 reanalysis and HALOE observations [J].Journal of Nanjing Institute of Meteorology,2008:31(6):828-835.(in Chinese))
- [7] 赵天保,符淙斌.中国区域 ERA-40、NCEP-2 再分析资料与观测资料 的初步比较与分析 [J].气候与环境研究,2006,11(1):14-32.(ZHAO Tianbao,FU Congbin.Preliminary comparison and analysis between ERA-40,NCEP-2 reanalysis and observations over China [J]. Climatic and Environmental Research, 2006,11(1):14-32.(in Chinese))
- [8] Wilby R L, Dawson C W, Barrow E M.SDSM-A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts [J].Environmental Modelling &Software, 2002, 17:147–159.
- [9] 褚健婷,夏军,许崇育.SDSM 模型在海河流域统计降尺度研究中的

适用性分析 [J].资源科学,2008,30(12):1825-1832.(CHU Jianting,XIA Jun,XU Chongyu.Suitability analysis of SDSM model in the Haihe river basin [J].Resources Science,2008,30(12):1825-1832.(in Chinese))

- [10] 刘浏,徐宗学,黄俊雄.2 种降尺度方法在太湖流域的应用对比 [J].
  气象科学,2011,31 (2):160-169.(LIU Liu,XU Zongxue,HUANG Junxiong.Comparative study on the application of two downscaling methods in the Taihu basin [J].Journal of the Meteorological Sciences,2011,31(2):160-169.(in Chinese))
- [11] 刘兆飞. 气候变化对塔里木河流域源区主要水文要素的影响研究 [D]. 北京:北京师范大学,2010.(LIU Zhaofei.Impact of Climate Change on Major Hydrological Processes in the Headwater Catchment of the Tarim River Basin [D].Beijing:Beijing Normal University,2010.(in Chinese))
- [12] Hessami M, Gachon P, Ouarda T, et al.Automated regression based statistical downscaling tool [J].Environmental Modelling & Software, 2008, 23(6), 813–834.
- [13] Wilby R L, Wigley T M.Precipitation predictor for downscaling: Observed and general circulation model relationships [J].International Journal of Climatology, 20(5):641–661.
- [14] Wilby R L, Tomlinson O J, Dawson C W.Multi-site simulation of precipitation by conditional resampling [J].Climate Research, 2003,23:183-194.
- [15] Wetterhall F, Halldin S, Xu CY.Seasonality properties of four statistical-downscaling methods in central Sweden [J].Theoretical and Applied Climatology, 2007, 87:123–137.
- [16] Watterson IG.Calculation of probability density functions for temperature and precipitation change under global warming [J].Journal of Geophysical Research, 2008, 113:D12106.
- [17] Perkins SE,Pitman AJ,Holbrook NJ,et al.Evaluation of the AR4 climate models' simulated daily maximum temperature, minimum temperature, and precipitation over Australia using probability density functions [J].Journal of Climate, 2007, 20:4356–4376.

# Application of ASD Statistical Technique in Typical Basins of Eastern Monsoon Region in China LIU Pin<sup>1</sup>, XU Zongxue<sup>1</sup>, LI Xiuping<sup>1,2</sup>, WANG Shizhen<sup>3</sup>

Key Laboratory of Water and Sediment Sciences of Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;
 Institute of Tibetan Plateau Research, CAS, Beijing 100101, China; 3. No.66240 Army Force, Beijing 100042, China)

Abstract: Statistical downscaling methods are usually used to fill the gap between large-scale climate change data and fine-scale hydrological application. Automated Statistical Downscaling (ASD) technique was investigated with the combination of a case study in 3 typical basins of eastern monsoon region in China in this paper. Statistical relationship between the predictant and predictor was developed by using the observed data of the 3 river basins and ERA-40 reanalysis data, and the high resolution daily precipitation, daily air temperature, daily maximum temperature and daily minimum temperature were then generated. Finally, the performance and suitability of ASD model were evaluated. The results show that ASD is capable of simulating temporal and spatial change characteristics of data series. Furthermore, the efficiency of simulation on air temperature variables is better than precipitation, and the performance of this model changes in different basins, as depending on geographic and meteorological factors of the study area. In a word, ASD model performs effectively in the study areas, which can be used to generate future scenarios in the related studies.

Key words: climate change; eastern monsoon region; statistical downscaling; ASD; ERA-40; BCCR