西部干旱区未来气候变化高分辨率预估

于恩涛1, 孙建奇1, 吕光辉2, 陈活泼1, 向伟玲3

(1 中国科学院大气物理研究所竺可桢一南森国际研究中心,北京 100029; 2 绿洲生态教育部重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830046; 3 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室,北京 100029)

摘 要:利用高分辨率区域气候模式WRF,基于CMIP5 计划中MIROC5 输出结果,进行了我国高 分辨率(30 km)的历史模拟及未来预估。针对我国西部干旱区,在模式验证的基础上分析了该区 域未来气温和降水的变化。历史模拟结果显示WRF对我国西部干旱区有较好的模拟能力,模拟 结果较 MIROC5 有明显改进。21世纪西部干旱区将持续增暖,末期的增温幅度明显高于中期。和 全国平均相比,西部干旱区 21世纪增温幅度高于全国平均水平。空间分布上,年平均气温变化的 主要特征是新疆南部增温高于新疆北部,山区的增温高于盆地。气温季节变化主要表现为夏季增 温集中在山区,而冬季增温则更多集中在盆地。西部干旱区降水在 21世纪总体呈现减少趋势,夏 季降水减少更为明显,这和全国平均的降水增加并不一致。空间分布上,降水变化的主要特征是 山区降水减少,其中夏季山区降水减少十分明显,而盆地降水则略有增加。

关键词: 西部干旱区; 气候变化; 高分辨率; 未来预估

中图分类号: P467 文献标识码:A

文章编号:1000-6060(2015)03-0429-09(429~437)

DOI:10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2015.03.001

中国西部干旱区是指贺兰山以西、昆仑山系以 北,包括柴达木盆地、塔里木盆地、准噶尔盆地、河 西走廊和阿拉善高原,总面积达250×104 km²的广大 地区^[1](参见后文图1填色部分)。自然景观主要以 荒漠为主,并广泛发育着山地、河流、绿洲等多种自 然生态系统,成为与东部季风区和青藏高原区并列 的第三大自然区。绿洲作为西部干旱区人类活动 最重要的依托场所,其结构、功能和稳定性受到广 泛关注,不仅影响干旱区各个圈层不同时空尺度的 特征、格局和发展过程,同时对国家的资源、环境和 社会利益有重要影响[2]。绿洲生态系统的时空特征 和发展受气候变化的调控,气候的长期趋势与气候 波动都将产生重要的影响。自20世纪80年代以 来,我国西部干旱区气候经历了从暖干向暖湿的转 型[3-4],导致新疆天山西部地区降水增加、冰川消融 加速,植被逐步改善、而沙尘暴减少,新疆其他地区 以及祁连山中西段的降水和径流也有增加趋势^[4]。

已有的气候变暖虽然对西部干旱区生态环境有利, 但是,西部干旱区远离海洋,降水稀少,是气候敏感 区和生态脆弱区,未来百年西部干旱区气候如何变 化,人们对未来气候变化如何应对和适应,这既是 全球变化及适应性研究的核心问题,也是政府和社 会各界关注的重点。

IPCC(政府间气候变化委员会)第五次评估报告指出,未来全球气候将持续增暖^[5]。最新的CMIP5(耦合模式比较计划)计划中,数值模式使用了新的未来辐射强迫情景^[6],其模拟结果提供了在未来辐射强迫情景下全球气候可能变化情景。我国及中亚地区未来的气候变化引起了广泛关注,很多研究利用CMIP5预估结果对这些地区展开了深入分析^[7-15]。但CMIP5中使用的全球模式的分辨率多为100~300 km,对区域尺度气候变化的局地细节模拟能力有限。基于全球模式结果,利用区域气候模式进行动力降尺度模拟,不仅可以提供高分辨率

收稿日期: 2014-06-18; 修订日期: 2014-10-10

基金项目:国家重点基础研究发展计划(2012CB955401),绿洲生态教育部重点实验室开放课题(XJDX0201-2012-04)

作者简介:于恩涛,男,副研究员,研究方向:区域气候模拟与预估. Email: yetsyu@mail.iap.ac.cn

通讯作者: 吕光辉,教授,研究方向:全球变化与生物多样性研究. Email:ler@xju.edu.cn

局地细节,还可以明显提高模式的模拟性能^[16-20]。 如高学杰等利用 RegCM3 嵌套 MIROC3.2_hires 模 式,进行了 A1B 情景下我国 25 km 分辨率的未来预 估模拟,并对我国气候变化进行了分析^[18]。基于该 预估资料,吴佳等针对新疆地区 21 世纪气候变化 进行了分析^[19]。最近,高学杰等利用 CMIP5 中 BCC 模式结果进行了我国未来预估模拟^[20],但我 国西部干旱区地形、下垫面类型复杂多变,数值模 式的不确定较大,因此有必要基于最新的 CMIP5 结果,进行不同区域模式的我国西部干旱区未来气 候变化动力降尺度预估模拟,从而提供多个模式高 分辨率预估结果用于对比,同时减小未来预估模拟 的不确定性。

本文利用区域气候模式WRF(Weather Research and Forecasting Model),基于CMIP5计划中MIROC5 (Model for Interdisciplinary Research on Climate version 5)^[21]模式结果,进行了我国 30 km分辨率的历 史及未来预估模拟,集中针对我国西部干旱区,进 行了未来气温及降水变化的情景分析,以期对我国 西部干旱区未来全球变暖下的气候响应提供参考, 并为西部干旱区未来气候变暖的适应性研究提供 科学参考。

1 模式、资料与方法

在动力降尺度模拟中,全球模式用于为区域模 式提供初始和边界场,在本文模拟中,WRF模式的 初始和边界场来自于 MIROC5 的模拟结果。MI-ROC5 是在 MIROC3 的基础上发展而来,该模式大 气部分使用的是 FRCGC 大气模式,海洋部分使用 的是 COCO模式,海洋模式同时耦合了一个海冰模 式,陆面模式中耦合了河网模型。MIROC5 大气模 式的分辨率约为1.4 ℃,研究表明该模式对东亚地 区气候有较高的模拟能力^[21]。

WRF是新一代的中尺度天气和气候预报模拟 系统。该模式采用可压缩滞弹性非静力欧拉方程 组,由守恒变量构建通量形式的控制方程组,采用 地形追随质量垂直坐标,包含完整的物理过程参数 化方案。该模式在我国天气和气候研究中得到了 广泛的应用,并显示出良好的模拟性能^[22-23]。在本 文模拟中,WRF模式所使用的物理过程参数化方

案主要包括:微物理过程使用的是WSM6参数化方 案^[24],长波和短波辐射方案采用CAM辐射方案,该 方案包含多种温室气体,也包含云的参数化[25]。近 地层使用的是MM5的方案,主要计算地表能量、水 分和动量的交换^[26]。陆面过程采用的是Noah-MP 方案,该方案包含较为完整的冠层、植被和地下水 方案,同时对雪的物理过程进行了优化[27-28]。边界 层使用的是YSU方案^[29],积云对流参数化方案采用 的是Kain-Fritsch^[30]方案。模拟区域覆盖整个中国 地区,水平分辨率为30 km,模拟时间为1946-2100, 2006年之前模拟时段边界场来自MIROC5历史模 拟结果,而2006-2100年的边界场则使用MIROC5 模式 RCP6.0 情景下的预估结果。结果分析中, 1946-1960年为模式 spin-up 时间, 1961-2100年模 拟结果用于本文分析。考虑到观测资料的可用性, 本文取1961-2010年的模拟结果和对应的观测资料 进行对比,检验模式的模拟能力,而2011-2100年的 模拟结果则用于干旱区未来气候变化预估分析。 参考已有研究的定义,将1986-2005年作为参考时 段,其模拟的气候态作为参考,2046-2065年作为21 世纪中期,2081-2099年作为21世纪末期。

模式验证中,温度、降水的观测使用的是CN05.2 数据^[31],该数据基于中国气象局2400站观测资料而 生成的0.5°格点数据,该资料主要用于高分辨率模 式模拟的验证^[32],在国内模式研究领域得到了广泛 使用^[33]。考虑到MIROC5、WRF及CN05.2数据的分 辨率各不相同,因此,在计算相关系数及计算气温、 降水区域平均时,首先将MIROC5和WRF的模拟 结果统一插值到CN05.2资料的格点上,然后再进行 相应的计算,同时,在模式与观测空间分布对比时 (图1,图2),并未进行插值处理。

2 结果分析

2.1 模式现代气候态模拟验证

2.1.1 气温 图 1 为观测及 WRF 和 MIROC5 模拟的 1961-2010 年西部干旱区年平均、夏季平均和冬季平均气温的空间分布。从观测的年平均气温(图 1a-c)来看,最明显的特征是与"三山夹两盆"相对应的气温空间分布特点:在新疆地区,昆仑山、天山和阿尔泰山从南向北依次排列,塔里木盆地、准格尔

盆地横亘其中,山区由于海拔较高,地表气温较低, 而盆地地形较低,且分布着塔克拉玛干和古尔班通 古特两大沙漠,使得地表气温明显高于相邻地带。 而在西部干旱区东部地区,从南到北依次分布着柴 达木盆地、祁连山和阿拉善高原,因此地表气温分 布也呈现出"高-低-高"的特征。

WRF可以合理地模拟出年平均气温的空间分 布特征,模拟结果和观测是吻合的,如昆仑山、天 山、祁连山和阿尔泰山地区的低温中心,WRF可以 合理地模拟出来,而塔克拉玛干沙漠、古尔班通古 特沙漠和巴丹吉林沙漠的高温中心,在WRF模拟中 也都有很好的再现。另外,定量比较上可以看出, WRF模拟的温度的量值也比较合理,模拟和观测差 别并不明显,如盆地地区年平均气温为9~12℃左 右,而山区年平均气温为0℃左右。

MIROC5基本上能模拟出我国西部干旱区温度 的空间分布,如塔里木盆地的高温中心和山区的低 温等,但对比WRF和MIROC5模拟结果可以明显看 出,高分辨率可以显著提高模式对温度的模拟性 能。MIROC5模式虽然基本上模拟出塔里木盆地的 高温中心,但模拟范围过大,且温度偏高。另外,更 为明显的是,对天山山区的低温,特别是伊犁河谷 的低温,MIROC5基本没有模拟能力。因此,针对我 国西部干旱区年平均气温的分布,WRF相对于MI-ROC5有显著改进,表现出较高的模拟能力。

与年平均气温模拟相同,WRF模拟的夏季平均 和冬季平均气温相对于 MIROC5 也有显著改进。 从图 1d 中可以看出,观测的夏季平均气温在盆地地 区高于 21 ℃,而在山区地带则为9 ℃左右。WRF 可以合理地再现山区和盆地地区气温的分布,模拟 的量值和观测也比较接近(图 1e)。而 MIROC5 由 于分辨率较粗,对局地气温的分布模拟能力较弱, 特别是夏季伊犁河谷地区的低温中心,MIROC5 基 本没有反映出来(图 1f)。

观测的冬季平均气温在盆地地区低于-2℃,而 在某些山区则低于-20℃。WRF可以合理地再现 这些空间分布,模拟量值也和观测比较接近。同 时,在MIROC5结果中,模拟的盆地的高温范围过 大,甚至覆盖了大部分天山山区,伊犁河谷的低温 在模式中并没有反映。另外,MIROC5模拟的西部 干旱区冬季平均气温偏高,无论是盆地还是山区。 为定量的比较模式对气温的模拟能力,计算了 WRF和MIROC5模拟的年平均及季节平均的气温 与观测的空间相关系数,如表1所示。从表1可以 看出,无论是年平均还是季节平均,WRF模拟结果 相对MIROC5都有显著提高。WRF模拟的年平均 气温和观测的空间相关系数为0.96,春季到秋季的 相关系数为0.97,而MIROC5模拟的空间相关系数 则都略高于0.8。另外,从空间相关系数的季节分布 来看,无论是WRF还是MIROC5,都对春季、夏季和 秋季气温模拟能力较高,而对冬季气温模拟能力较弱有 关^[34]。

表1 WRF和MIROC5模拟的气温与观测的空间相关系数

 Tab.1
 Spatial correlation coefficients of simulated temperature against the observation

	-	0			
模式	年平均	春季	夏季	秋季	冬季
WRF	0.96	0. 97	0. 97	0. 97	0. 79
MIROC5	0. 81	0. 82	0. 84	0. 81	0. 71

2.1.2 降水 图 2 为观测和模式模拟的西部干旱 区年平均、夏季平均和冬季平均降水的空间分布。 从图中可以看出,WRF模式对降水的模拟也有显 著改进。观测中干旱区年平均降水在山区相对较 多,年降水量都>200 mm,而在伊犁河谷地区,年降 水量>500 mm。盆地地区由于沙漠广布,降水十分 稀少,如塔里木盆地、柴达木盆地等年降水量都低 于 50 mm。WRF可以合理地再现西部干旱区年平 均降水的时空分布,特别是山区降水量较多而盆地 降水量较少的空间特征。而MIROC5虽然总体上 可以反映出降水的空间模态,但对降水的局地细节 模拟能力较弱,如对塔里木盆地极端稀少降水的空 间分布特征并没有反映出来,而对天山山区、特别 是伊犁河谷降水中心模拟范围偏大,和观测并不 吻合。

观测的西部干旱区夏季降水也呈现出山区多、 盆地少的空间特征,山区夏季平均降水约为300 mm, 而盆地夏季平均降水约为25 mm。WRF模式可以 合理的再现夏季降水的空间分布特征,但是也能看 到,WRF和观测相比较,模拟的山区降水偏多,而对 盆地降水模拟偏少。MIROC5总体可以反映夏季降 水的空间分布,但对局地降水分布的细节,模拟能









力很弱。观测的西部干旱区冬季降水显著低于夏季降水,即使山区冬季降水也不到50 mm。WRF模拟中也明显存在山区降水多而盆地降水少的特征,而MIROC5模拟结果由于分辨率较粗,降水的局地细节和观测并不吻合。

另外注意到WRF在塔克拉玛干和古尔班通古特沙漠地区模拟的降水低于CN05.2资料,可能的原因是这些地区缺少气象观测台站,降水资料是由周边站点资料插值得到,这和沙漠地区实际降水存在误差。已有观测研究表明,塔里木盆地内部年平均降水低于25 mm,50 mm降水等值线基本沿沙漠边缘分布^[35],这和WRF模拟结果更加吻合。

2.2 干旱区未来气温、降水变化

2.2.1 空间分布 图 3 为 21 世纪中期和末期西部 干旱区年平均、夏季平均及冬季平均气温相对于参 考时段(1986-2005)的变化。从图中可以看出,气 温在 21 世纪将持续变暖,末期增温幅度显著高于中 期,从增温幅度上来看,末期增温幅度高于中期近 2℃左右。空间分布上,无论是 21 世纪中期还是末 期,新疆南部增温高于新疆北部,山区的增温高于 盆地地区,西部干旱区增温最高地区位于昆仑山北 坡和阿尔金山一带。

21世纪中期,西部干旱区年平均温度增加2~ 3℃,包括昆仑山、阿尔金山和天山西部山区地带增 温明显,其中阿尔金山部分地区增温超过3℃,而盆 地增温较弱,多低于2℃。夏季增温幅度高于年平 均,阿尔金山地区夏季增温最为显著。冬季增温幅 度较夏季略小,除昆仑山和阿尔金山外,冬季增温 较大地区主要集中在盆地,如准噶尔盆地、柴达木 盆地及哈密-吐鲁番一带。

21世纪末期西部干旱区年平均气温变化的主 要特征依然是山区增温高于盆地,新疆南部增温高 于新疆北部,但增温的幅度则显著高于中期,与参 考时段相比,西部干旱区大部分地区21世纪末期 年平均气温增高超过3℃。夏季增温更为明显,如 昆仑山北坡和阿尔金山等地增温超过4℃。冬季 增温则表现出盆地增温较高的特点,如准噶尔盆 地、柴达木盆地以及巴丹吉林沙漠地区冬季增温约 为4℃。21世纪的气温变化可能导致西部干旱区 盆地地区气温年较差减小,而山区的气温年较差 增大。 图4为21世纪西部干旱区降水的变化。从图 中可以看出,无论是21世纪中期还是末期,西部干 旱区降水变化的主要空间特征是山区降水减少而 盆地降水增加。与温度不同,21世纪中期和末期降 水相对与参考时段的变化幅度比较相似,并没有显 著的差别。从季节分布上看,夏季降水变化幅度大 于年平均,其中山区降水减少幅度很大,变化明显; 而冬季降水变化的主要特征是盆地地区降水明显 增加。

21世纪中期和末期,西部干旱区大部分地区年 平均降水增加,其中塔里木盆地、准噶尔盆地及阿 拉善高原地区降水增加比较明显,年平均降水增加 超过20%,但这些地区多为荒漠地区,降水稀少,换 算为实际降水量,则增加并不明显。而山区降水则 呈现减少的趋势,特别是昆仑山北坡地带。

21世纪西部干旱区夏季降水变化的空间分布 和年平均比较类似,总体特征为山区降水减少而盆 地降水增加。其中最显著的特征是山区地带降水 的显著减少,如昆仑山、阿尔金山北坡地带降水减 少超过40%,天山山区降水减少约为20%,考虑到这 些地区是西部干旱区主要的降水中心,如此大幅度 降水减少对该地区的气候将产生重要影响。究其 原因,这些地区降水的水汽主要源区位于本地,而 这些地区未来增暖十分显著,水汽虽有所增加,但 在水汽一定的条件下,温度的升高导致水汽难以饱 和,从而使得降水减少。夏季西部干旱区盆地降水 略有增加,这很可能和未来增暖背景下西风带水汽 输送增强有关^[11]。21世纪西部干旱区冬季降水总体 呈现增加趋势,主要出现在新疆地区和阿拉善高原 地区,其中新疆南部地区降水增加幅度比较明显。

2.2.2 时间分布 为对西部干旱区未来气温和降水的变化及与全国气候变化的异同有总体认识,计算了WRF模拟的西部干旱区和全国区域平均气温、降水变化曲线,计算中依然使用1986-2005作为参考时段。图5为1961-2100年观测、模式模拟和预估的年平均及夏季平均的温度变化曲线。从历史模拟(1961-2010)与观测的对比可以看出,WRF可以合理地模拟西部干旱区过去的温度变化,无论是年平均还是夏季平均温度变化,WRF模拟和观测都十分吻合。其中20世纪80年代以后的干旱区温度急剧上升,WRF模拟都有合理的再现。

38卷



图 3 21世纪中期(a-c)和末期(d-f)相对于参考时段的年平均(a,d)、夏季平均(b,e)和冬季平均(c,f)的气温变化(单位:℃) Fig.3 Annual mean(a,d), summer mean(b,e) and winter mean(c,f) temperature changes in the middle (a-c) and end(d-f) of 21st century(unit:℃)



图4 同图3,但为降水变化百分比(单位:%)

Fig.4 Same as Fig.3, but for percentage of precipitation change(unit:%)



图 5 1961-2100 年年平均(a) 和夏季平均(b) 温度变化(单位:℃)





Fig.6 Same as Fig.5, but for precipitation Change(unit:%)

从未来西部干旱区气温变化来看,持续增暖是 其主要特征,无论是年平均还是夏季平均。21世纪 中期,年平均温度约升高2℃,而21世纪末期,西部 干旱区区域平均增温接近4℃。夏季增温趋势十分 明显,21世纪末期西部干旱区增温将超过4℃。和 全国平均的气温变化相比,西部干旱区未来年平均 增温幅度都高于全国平均水平,如在21世纪末,西 部干旱区平均增温幅度高出全国平均约为0.2℃。 西部干旱区夏季增温表现更强烈,如在21世纪末 期,西部干旱区增温幅度高出全国平均0.6℃。因 此,在21世纪,西部干旱区增暖将明显高于全国平 均水平。

图6为21世纪年平均和夏季平均降水变化率的情况。首先,从历史模拟可以看出,模式对降水的模拟存在很大的不确定性,这也是所有数值模式的共性。另外,也能看到,对历史时期降水的总体变化趋势,WRF基本可以反映出来。21世纪,我国西部干旱区年平均降水变化不明显,只在末期有微弱的减少趋势。这和全国年平均降水的变化并不一致,预估的21世纪我国年平均降水将有明显增加趋势。夏季降水变化中,西部干旱区和全国平均区别更加明显,如西部干旱区降水在21世纪中期略有增加后,末期降水减少十分显著,特别是2080-2100年,区域平均夏季降水减少接近20%,而全国平均夏季降水依然呈现增加趋势。另外,21世纪末西部干旱区夏季降水变率很大,表明未来干旱区夏季极端降水事件可能呈现增加趋势。

3 结论和讨论

使用对我国有较好模拟能力的区域气候模式 WRF,基于CMIP5计划中MIROC5模式结果,进行 了我国高分辨率的历史模拟和未来气候变化预估。 本文针对我国西部干旱区,集中评估了WRF的模式 性能,并分析了WRF预估的未来气温、降水的变化。 结果显示WRF对我国西部干旱区气温、降水有较好 的模拟能力,模拟结果较MIROC5有明显改进。

21世纪西部干旱区持续增暖,末期增温幅度明 显高于中期,和全国平均相比,西部干旱区增温幅 度高于全国平均。空间分布上,年平均气温变化的 主要特征是新疆南部增温高于新疆北部,山区的增 温高于盆地。而温度季节变化特征并不一致,夏季 干旱区增温主要集中在山区,而冬季增温则更多集 中在盆地,因此21世纪的气温变化可能导致西部干 旱区盆地气温年较差减小,而山区的气温年较差 增大。

西部干旱区21世纪降水总体呈现减少趋势,夏 季降水减少更为明显,这和全国平均的降水变化并 不一致。值得注意的是,WRF预估的干旱区21世纪 末期夏季降水将减少超过20%。空间分布上,降水 变化的主要特征是山区区降水减少,其中夏季山区 降水减少十分显著,而盆地降水则略有增加,其中冬 季降水增加幅度较大。未来西部干旱区降水这种时 空变化将对气候产生巨大的影响。

数值模式的不确定性是气候变化研究必须考虑的重要部分,本文分析了未来气温和降水的变化 情景,但也应该注意到,历史模拟中,WRF对降水的 模拟性能低于对温度的模拟,降水模拟中不确定性 较大,因此,对干旱区未来降水变化的解译需要谨 慎对待。同时,虽然本文和已有的部分预估结果存 在一致性^[18-19],但数值模式完备程度、未来辐射强迫 情景的不确定性、单模式单物理过程参数化等都会 导致本文的结果存在不确定性。因此,进行多模式 多参数化方案集合预估模拟,将有利于减小模式不 确定性,加深对西部干旱区未来的气候变化的认 识,这也是下一步的工作内容。

参考文献(References)

- [1] 潘晓玲,王学才,雷加强.关于中国西部干旱区生态环境演变 与调控研究的思考[J].地球科学进展,2001,16(1):24-28.
 [PAN Xiaoling, WANG Xuecai, LEI Jiangqiang. Some consideration on evolution and control of ecological environment of arid regions in western China[J]. Advance in Earth Sciences, 2001, 16(1):24-28.]
- [2] 潘晓玲. 干旱区绿洲生态系统动态稳定性的初步研究[J]. 第四 纪研究, 2001, 21(4): 345-351. [PAN Xiaoling. A preliminary study on the stability of oasis ecosystem in arid area[J]. Quaternary Sciences, 2001, 21(4): 345-351.]
- [3] 胡汝骥,姜逢清,王亚俊,等. 新疆气候由暖干向暖湿转变的信号及影响[J]. 干旱区地理,2002,25(3):194-200.[HU Ruji,JI-ANG Fengqing, WANG Yajun, et al. A study on signals and effects of climatic pattern change from warm-dry to warm-wet in Xinjiang[J]. Arid Land Geography,2002,25(3):194-200.]

- [4] 施雅风,沈永平,胡汝骥.西北气候由暖干向暖湿转型的信号、 影响和前景初步探讨[J].冰川冻土,2002,24(3):219-226.
 [SHI Yafeng, SHEN Yongping, HU Ruji. Preliminary study on signal, impact and foreground of climatic shift from warm-dry to warm-humid in northwest China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2002,24(3):219-226.]
- IPCC. Climate change 2013: the physical science basis [M]// Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press, 2013: 1–1535.
- [6] TAYLOR K E, STOUFFER R J, MEEHL G A. An Overview of CMIP5 and the experiment design[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2012, 93:485–498.
- [7] 陈活泼. CMIP5 模式对21世纪末中国极端降水事件变化的预 估[J]. 科学通报, 2013, 58(8):743-752. [CHEN Huopo. Projected change in extreme rainfall events in China by the end of the 21st century using CMIP5 models[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(8):743-752.]
- [8] 姜大膀,田芝平. 21世纪东亚季风变化: CMIP3和CMIP5模式 预估结果[J]. 科学通报, 2013, 58(8): 707-716. [JIANG Dabang, TIAN Zhiping. East Asian monsoon change for the 21st century: Results of CMIP3 and CMIP5 models[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(8): 707-716.]
- [9] 姚遥,罗勇,黄建斌. 8个CMIP5模式对中国极端气温的模拟 和预估[J]. 气候变化研究进展, 2012, 8(4): 250–256. [YAO Yao, LUO Yong, HUANG Jianbin. Evaluation and projection of temperature extremes over China based on 8 modeling data from CMIP5[J]. Progressus Inquisitiones De Mutatione Climatis, 2012, 8(4): 250–256.]
- [10] ZHANG Ying. Projections of 2.0 °C warming over the globe and China under RCP4.5 [J]. Atmospheric and Oceanic Letters, 2012,5(6):514–520.
- [11] CHEN Huopo, SUN Jianqi. Projected change in East Asian summer monsoon precipitation under RCP scenario[J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 2013:1–23.
- [12] CHEN Huopo, SUN Jianqi, CHEN Xiaoli. Future changes of drought and flood events in China under a global warming scenario[J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2012, 6(1): 8–13.
- [13] 吴昊旻,黄安宁,何清,等. 10个CMIP5模式预估中亚地区未来50 a 降水时空变化特征[J]. 干旱区地理,2013,36(4):669–679.[WU Haowen,HUANG Anning,HE Qing, et al. Projection of the spatial and temporal variation characteristics of precipitation over Central Asia of 10 CMIP5 model in the next 50 years
 [J]. Arid Land Geography,2013,36(4):669–679.]
- [14] XU Ying, XU Chonghai. Preliminary assessment of simulations of climate changes over China by CMIP5 multi-models[J]. At-

mospheric and Oceanic Science Letters, 2012, 5, 489-494.

- [15] XU Chonghai, XU Ying. The projection of temperature and precipitation over China under RCP scenarios using a CMIP5 multimodel ensemble[J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2012,5:527–533.
- [16] WANG Huijun, YU Entao, YANG Song. An exceptionally heavy snowfall in Northeast China: Large-scale circulation anomalies and hindcast of the NCAR WRF model[J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 2011, 113(1):11–25.
- [17] YU Entao, WANG Huijun, SUN Jianqi. A quick report on a dynamical downscaling simulation over China using the nested model [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2010, 3 (6):325–329.
- [18] 高学杰,石英,GIORGI F. 中国区域气候变化的一个高分辨率数值模拟[J]. 中国科学:地球科学,2010,40(7):911-922.
 [GAO Xuejie, SHI Ying, GIORGI Filippo. A high resolution simulation of climate change over China[J]. Chinese Science Bulletin,2010,40(7):911-922.]
- [19] 吴佳,高学杰,石英,等. 新疆21世纪气候变化的高分辨率模拟
 [J]. 冰川冻土,2011,33(3):479-488. [WU Jia, GAO Xuejie, SHI Ying, et al. Climate change over Xinjiang region in the 21 century simulated by a high resolution regional climate model
 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2011,33(3):479-488.]
- [20] GAO Xuejie, WANG Meili, GIORGI Filippo. Climate change over China in the 21st Century as Simulated by BCC_zCSM1.1– Reg CM4.0 [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2013,6(5):381–386.
- [21] WATANABE M, SUZUKI T, OISHI R, et al. Improved climate simulation by MIROC5: mean states, variability, and climate sensitivity[J]. Journal of Climate, 2010, 23(23):6312–6335.
- [22] GE Quansheng, ZHANG Xuezhen, ZHENG Jingyun. Simulated effects of vegetation increase/decrease on temperature changes from 1982 to 2000 across the eastern China [J]. International Journal of Climatology, 2013, doi:10.1002/joc.3677.
- [23] YU Entao, WANG Huijun, SUN Jianqi, et al. Climatic response to changes in vegetation in the northwest Hetao Plain as simulated by the WRF model[J]. International Journal of Climatology, 2013,33(6):1470–1481.
- [24] HONG S Y, LIM J J. The WRF single-moment 6-class microphysics scheme(WSM6)[J]. Journal of the Korean Meteorological Society, 2006, 42: 129–151.
- [25] COLLINS W, RASCH P, BOVILLE B, et al. Description of the NCAR community atmosphere model (CAM 3.0) [M]. NCAR Technical Note, NCAR/TN-464+STR, 2004; 1–96.
- [26] SKAMAROCK W C, KLEMP J B, DUDHIA J, et al. A description of the advanced research WRF version 3[M]. NCAR Technical Note. NCAR/TN-475+STR. 2008;1–125.

- [27] NIU Guoyue, YANG Zengliang, MITCHELL K E, et al. The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP) : 1. Model description and evaluation with local-scale measurements [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2011, 116(D12):D12109.
- YANG Zengliang, NIU Guoyue, MITCHELL K E, et al. The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah–MP) : 2. Evaluation over global river basins
 [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2011, 116 (D12):D12110.
- [29] HONG S Y, NOH Y, DUDHIA J. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes [J]. Monthly Weather Review, 2006, 134(9):2318–2341.
- [30] KAIN J S. The kain-fritsch convective parameterization: an update[J]. Journal of Applied Meteorology, 2004, 43(1): 170–181.
- [31] WU Jia, GAO Xuejie. A gridded daily observation dataset over China region and comparison with the other datasets[J]. Chinese

Journal Geophysics, 2013, 56(4): 1102–1111.

- [32] XU Ying, GAO Xuejie, SHEN Yan, et al. A daily temperature dataset over China and its application in validating a RCM simulation [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2009, 26(4): 763– 772.
- [33] GAO Xuejie, SHI Ying, ZHANG Dongfeng, et al. Uncertainties in monsoon precipitation projections over China; results from two high-resolution RCM simulations [J]. Climate Research, 2012,52(1):213-226.
- [34] LIU Shuyan, GAO Wei, LIANG Xinzhong. A regional climate model downscaling projection of China future climate change[J]. Climate Dynamics, 2012; 1–14.
- [35] 金炯,董光荣,申建友. 新疆塔里木盆地的现代气候状况[J].干 旱区资源与环境,1994,8(3):12-21.[JIN Jiong, DONG Guangrong, SHEN Jianyou. The contemporary climate of Tarim Basin, Xinjiang [J]. Journal of Arid Land Resources and Enviroment,1994,8(3):12-21.]

High–resolution projection of future climate change in the northwestern arid regions of China

YU En-tao¹, SUN Jian-qi¹, LV Guang-hui², CHEN Huo-po¹, XIANG Wei-ling³

(1 NZC, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

2 Xinjiang Key Laboratory of Oasis Ecology, Urumqi 830046, Xinjiang, China;

3 LAPC, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: The climate over northwest China is always a big challenge for the Global Climate Models (GCMs) due to its complex topography and surface conditions, high-resolution dynamical downscaling simulation is usually considered as one useful method to achieve better model performance, both for the present climate simulation and the future projection. In this paper, a long term simulation over China for 1961–2100 was conducted using WRF model, which was forced by the output of MIROC5 from both historical and future projection experiment of the CMIP5 project, the horizental resolution is as high as 30 km. The model validation and future climate change was investigated focusing on northwest China. The results show that WRF has good performance in reproducing the regional temperature and precipitation distribution over northwest China. In the 21st century, surface temperature will continue to rise over northwest China, and the magnitude is larger in the end of 21st century than that in the middle. The annual mean temperature will rise faster in the southern part of Xinjiang than that in the northern part, and faster in the mountains than in the deserts. For the seasonal temperature change, the summer mean temperature will rise faster in the mountains, while the winter mean temperature will rise faster in the deserts. The precipitation over northwest China will decrease in the 21st century, especially in summer. The simulation indicates that the precipitation will decrease in the mountains, while increase slightly in the deserts.

Key Words: northwest arid regions; climate change; high resolution; climate projection