

文章编号: 0455-2059(2008)05-0012-08

统计降尺度对西北地区未来气候变化预估

赵传燕¹, 南忠仁², 程国栋³, 邹松兵³, 张永忠³

(1. 兰州大学 干旱与草地农业生态教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000;

2. 兰州大学 西部环境教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000;

3. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所 冻土实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 利用 IPCC 数据分发中心提供的模式集成结果和多年的观测资料, 建立大尺度气候状况(主要是降水与气温)与区域地理位置和海拔的统计降尺度关系, 并用独立的观测资料检验这种关系, 实现西北地区高分辨率气候空间分布; 然后把这种关系应用于 AOGCMs 输出的大尺度气候信息, 预估西北地区未来的气候变化情景. 结果表明: 与 20 世纪后半期相比, 未来 30 年中国西北地区将普遍增温, 增温幅度显著的地区在甘肃中东部、内蒙古、宁夏、陕西中北部、青海东北部和新疆的天山及阿尔泰山, 增温幅度为 0.5~1.0 °C; 降幅较大的地区在塔里木盆地, 降幅为 0.5~1.32 °C; 降水普遍增加, 增加比较显著的地区有新疆的塔里木盆地南部、阿尔泰山和天山, 陕西省南部, 增加幅度为 25~78 mm/年, 降水减少的地区在高原区, 青海省最为显著, 减少幅度为 81~108 mm/年.

关键词: 西北地区; 气候变化; 统计降尺度

中图分类号: P432.1

文献标识码: A

Prediction of the trend of the future climate change in Northwestern China by statistical downscaling

ZHAO Chuan-yan¹, NAN Zhong-ren², CHENG Guo-dong³,
ZOU Song-bing³, ZHANG Yong-zhong³

(1. Key Laboratory of Arid and Grassland Ecology with the Ministry of Education,
Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

2. Key Laboratory of Western China's Environmental Systems with the Ministry of Education,
Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

3. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Region Environmental and
Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Based on the integral output of AOGCMs and observation data, the projections of climate change in the coming 30 years in Northwestern China have been presented in this study. Some conclusions from the study might be drawn as follows: The average air temperature would rise significantly in future 30 years. Warming would most obviously take place in eastern Gansu, Inner Mongolia, Ningxia, northern Shaanxi, northeastern Qinghai, Tianshan Mountains and Altay Mountains in Xinjiang, by about 0.5~1.0 °C. However, the average air temperature would decrease in western Xinjiang, especially in Tarim River Basin for about 0.5~1.32 °C. The average precipitation would increase in northwestern China in the coming 30 years relative to climate baseline, especially in the southern Tarim River Basin, Altay Mountains and Tianshan Mountains and southern Shaanxi. It would increase by about 25~78 mm/a. Precipitation would decrease most prominently in Qinghai by 81~108 mm/a.

Key words: Northwestern China; climate change; statistical downscaling

收稿日期: 2008-01-09; 修回日期: 2008-03-26.

基金项目: 新疆维吾尔自治区生态学重点学科项目和国家自然科学基金(40671067)资助.

作者简介: 赵传燕(1963-), 女, 山东曹县人, 教授, 博士, 研究方向为生态水文学与环境模拟, e-mail: nanzhr@lzb.ac.cn.

1 全球气候变化预测

由于自然和人类活动的干扰,近年来大气污染和温室气体浓度升高,加剧了气候变化的速度。尽管气候变化问题还存在很大的不确定性,但温室效应的存在及全球气候变暖的可能性和趋势已为众人接受。2007年IPCC第四次气候变化科学报告指出,20世纪以来全球平均气温上升 0.76°C ,并且预估21世纪全球还将继续升温 $1.8\sim 4.0^{\circ}\text{C}$ ^[1]。人类活动已成为推动全球气候变化的一种强迫力,这种强迫力在十年到百年尺度的变化上已与自然界相当或过之^[2-5]。因此,IPCC排放情景特别报告分析气候变化的驱动力时,把人口、技术和经济的发展列为主要的驱动因素^[6],考虑了与人口、未来经济发展状况及引用技术有关的温室气体和气溶胶的排放机制。不久前,国际上多个模式先后完成了A1, A2, B1和B2温室气体和气溶胶排放情景下21世纪全球气候变化趋势的数值模拟预测。随着气候模式数值模拟不确定性的逐步降低^[7]及其对1861~2000年自然因素和人类活动影响下气候变化趋势的合理模拟^[8-9],气候模式被认为有能力给出关于未来气候的比较科学可靠的模拟结果。因此,气候模式已成为全球变化领域主要的研究手段。借助GCM模式预测结果,中国近十几年来已在气候未来变化领域中开展了多项研究工作,揭示了21世纪中国大陆年均表面温度升高过程将与全球同步,但东北、西部和华中地区增幅较大。21世纪后半段中国大陆降水量几乎是全域性的增加^[10-12],并进行了各种温室气体排放情景下中国气候未来变化的数值试验^[13-14]和气候未来变化预测不确定性及相关综合性研究^[15]。研究证明气候模式能相当好地模拟大尺度最重要的气候平均状况,特别是能较好地模拟高层大气场、近地面温度和大气环流。但由于目前GCM输出的空间分辨率较低,缺少区域气候信息,很难对区域气候情景做精确的预测^[16-17]。为弥补这一不足,目前采用了3种方法:发展更高分辨率的区域环流模式^[18-19];对GCM预测结果插值;采用统计降尺度方法^[20]。高分辨率的区域环流模式的优点是:物理意义明确,能应用于任何地方而不受观测资料的影响;但它的缺点是计算量大、费机时,并需要界定众多边界条件,而获取这些边界条件参数非常困难。统计降尺度法利用多年观测资料建立大尺度气候状况(主要是大气环流)和区域气候要素间的统计关系,并用独立的观测资料检验这种关系,最后把这种关系应用于GCM输出的大尺度未

来气候信息,预估区域未来的气候变化情景(如:气温和降水)。与区域环流模式相比,它最大的优点是计算量相当小、节省机时,缺点是需要足够的观测资料建立统计模式。鉴于高分辨率区域环流模式的不足和统计降尺度方法的优势,本研究在大量气象观测资料基础上建立大尺度气候状况(主要是气温和降水)与所在地理位置和海拔间的统计关系,预估西北地区未来的气候变化情景,为评估区域气候变化对区域自然环境(植被演替、植被净第一性生产力、冰川和径流等)的影响奠定基础。

2 西北地区气候变化的研究进展

西北地区是气候变化敏感区,其气候变化在东亚、中国的气候变化中占有重要地位。研究表明:近50年来西北地区气温变化与中国和东亚气温的变化存在明显的正相关,有一致的增暖趋势,且西北增温略高于东亚和中国的平均水平^[21-22],而降水量的变化则不一致,其中新疆大部、祁连山区和河西走廊中西段等地区降水明显增加,而甘肃河东地区、青海东部、陕西、宁夏和内蒙古西部则明显减少^[23-24]。大量监测数据成为西北地区气候变化的事实依据,如:降水与径流增加、冰川消融加速、湖泊水位上升、植被有所改善等现象^[25-26]。针对这些事实,施雅风等^[27-28]提出了西北气候可能正由暖干向暖湿转型的科学推断,根据转型标准把西北地区目前的气候变化分为显著转型区、轻度转型区和未转型区三个区域,以表明气候变化的局域差异。本文在西北地区选择了18个典型站点,根据30年的观测数据,统计分析发现水热的变化强度、方向及二者的组合表现出不同的形式(图1)。逐年气温变化可分为显著升温型(图1a, c, d, e, p)、显著降温型(图1i, r)和变化平稳型(图1f, g, h, n, o);逐年降水的变化趋势也可分相同3种类型,但变化平稳型占多数。水热组合显示同向(图1b, c)和反向(图1a, f, r)两种趋势,西北地区气候变化的复杂性和多样性由高原地形的热力、动力作用连同盛行环流的年际变化及复杂的地形条件造成。根据主要驱动因素,可分为西风带气候区(包括新疆、柴达木盆地和甘肃河西走廊中西段)、高原气候区(包括青海省及祁连山区)、亚洲季风影响区及其边缘区域(包括陕西、宁夏、甘肃河西走廊东段以东、青海东部)^[24]。针对西北地区复杂的气候变化和多种驱动力的影响,GCM输出的结果远不能满足描述区域气候特征,有必要降尺度提高GCM分辨率,对区域气候情景做精确预测。

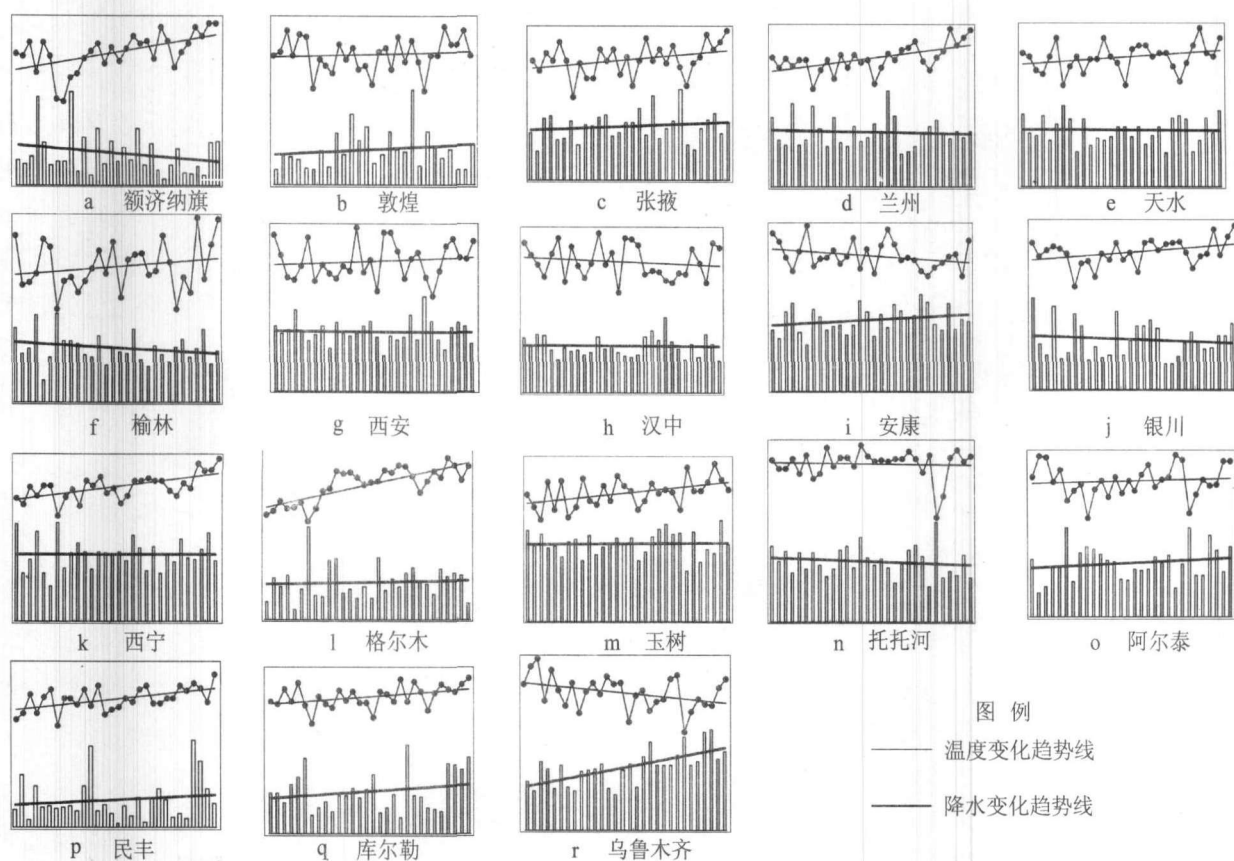


图1 1961~1990年西北地区典型站点气温和降水变化趋势

Fig. 1 Trend of annual mean air temperature and precipitation in northwestern region in 1961~1990

3 数据收集及研究方法

3.1 研究区概况

研究区地理位置为东经 $73^{\circ}26.8'$ ~ $113^{\circ}6.4'$ 、北纬 $31^{\circ}32.5'$ ~ $49^{\circ}10.7'$ ，行政上包括新疆、青海、甘肃、宁夏、陕西五省区全部和内蒙古西部(图2)，总面积 $334 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。大部分区域位于控制中国水资源时空分布的太平洋水文循环系统、印度洋水文循环系统、北冰洋水文循环系统和鄂霍次克海水文循环系统影响较小的地带，气候极为干旱。受季风影响，降水从东向西减少，植被相应由森林、草原向荒漠过渡。除水平地带性外，垂直分异显著。由于地形表现出庞大的山系和平原相间分布的特点，山系对水汽的阻挡和抬升作用，使得山区降水较多，年降水量可达 $400 \sim 800 \text{ mm}$ ；另一方面山系阻挡了水汽向平原区的侵入，造成平原的干旱，年降水量仅为 $50 \sim 200 \text{ mm}$ 。这就使气候从平原到高山呈现明显的垂直分异，逐渐由干旱、半干旱向半湿润过渡。其大致规律为：年降水量 $200 \sim 300 \text{ mm}$ 的中低山带分布荒漠草原和干草原，该带蒸发旺盛、土壤干燥、地表径流极不发育；年降水量 $400 \sim 600 \text{ mm}$ 的中山带分布森林草原和森林草甸草原，土壤为山地栗钙土和黑钙土，土壤松软，渗透性强，土壤保水与持水性能好；年降水

量 $600 \sim 800 \text{ mm}$ 的中高山带，因气温低而分布着灌丛草甸和高寒草甸，土壤为高山草甸土，土层薄且有冻土分布。随着海拔升高，有冰川积雪形成，雪线以下发育高山垫状植被，土壤为高山漠土。在广大的内陆平原，年降水量小于 200 mm ，潜在蒸散发为 $2000 \sim 3000 \text{ mm}$ ，有的地方可达 4000 mm ^[29]，发育地带性荒漠，由各种超旱生的灌木、半灌木、小灌木及半乔木组成，盖度极低(图2)。

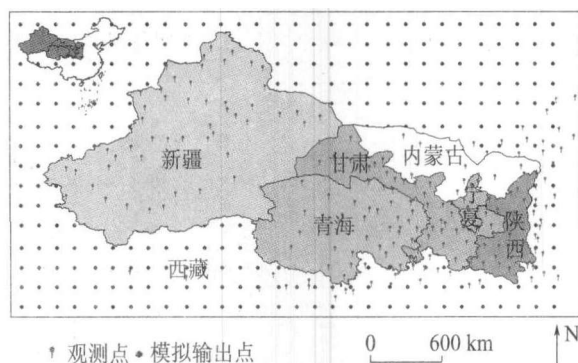


图2 研究区相对位置及气象站点分布

Fig. 2 Location of study area and the distribution of meteorological stations

3.2 数据收集与研究方法

3.2.1 数据收集

本研究所用气象数据来源于中国气象资料共享网(<http://cde.cma.gov.cn>)，时间为1961年1月

~2000 年 12 月, 数据内容为月降水量、月平均温度、各气象站点的经度、纬度和海拔高度, 共涉及 211 个站点(图 2)。DEM 来源于国家自然科学基金委“中国西部环境与生态科学数据中心”(http://westdc.westgis.ac.cn)。多年平均气温和降水模式集成结果从http://www.gisclimatechange.org下载, 下载时间段为 1961~2030 年, 空间分辨率 1.406 25°。

3.2.2 研究方法

用 1961~2000 年的平均值作为气候场, 预估到 2030 年的气候变化。到 2030 年中国人均 GDP 约为 10 000 美元, GDP 增长率为 6%, 总人口为 15 亿, 一次商品能源消费量为 3.9×10^9 吨标煤(用于建筑能源效率标准, 在 2030 年将实现 75% 的提高标准; 2030 年燃煤电厂效率提高到 38%; 普及高燃料率汽车; 增加天然气供应)。经济发展和政策情景与 IPCC 提出的可持续发展情景 B2 十分接近^[30-31], 因此对西北气候变化预测采用 B2 方案预估结果。

首先采用 Kriging 内插的方法将气温模式集成结果的格点值插值到西北地区各站, 利用研究区

内 211 个气温观测数据进行验证, 寻找调节因素, 同时获取模拟数据的拟合方程^[32], 假设拟合方程在未来变化的气候情景下适用, 从而对 2000~2030 年的模式结果进行调节。211 个站点插值数据与观测数据比较见图 3a, 相关系数(R^2)为 0.62。利用 SPSS 中的 stepwise 建立 211 个站点插值数据与相应的海拔高度(H), 经度(X)和纬度(Y)回归方程, 得出气温(T)与海拔高度(H)和纬度(Y)呈显著相关, 其回归方程为

$$T = 21.681 - 0.00398H - 0.283Y. \tag{1}$$

利用方程(1)对气温进行校正, 校正后与观测值进行对比(图 3b), 相关系数(R^2)达到 0.82。在分析方程(1)产生的误差时发现, 误差主要由纬度和经度两大因素所致, 气温最终调整公式为

$$T_{adj} = 21.681 - 0.00398H - 0.283Y + \epsilon. \tag{2}$$

其中: T_{adj} 为最终调整的模式输出结果; ϵ 为模拟值与观测值误差($\epsilon = 27.029 - 0.393Y - 0.0968X$)。利用公式(2)计算的气温与观测值比较见图 4, 相关系数(R^2)达到 0.94。

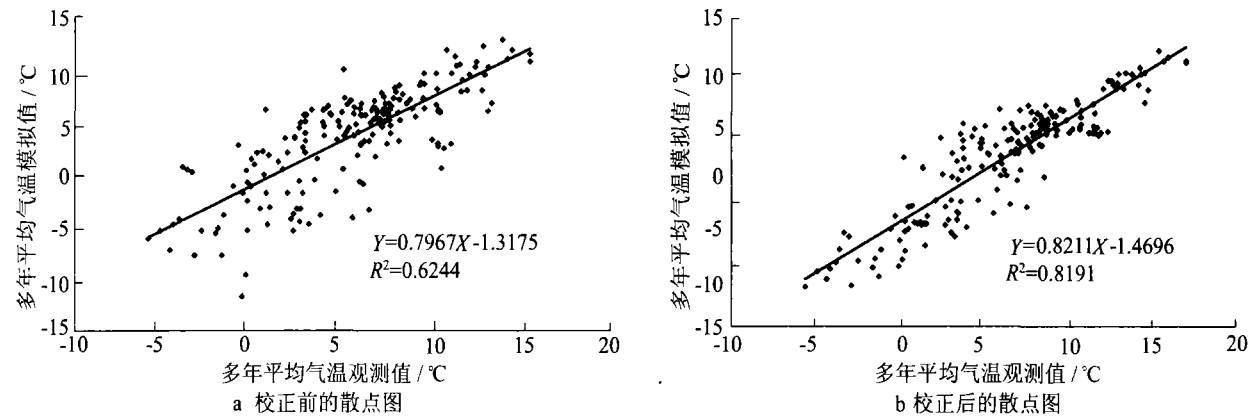


图 3 多年平均气温观测值与模拟值散点图

Fig. 3 Scatter plots of mean annual air temperature between simulated and measured value

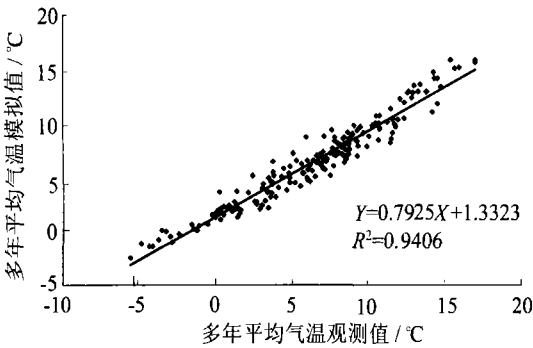


图 4 利用式(2)计算的多年平均气温观测值与模拟值散点图

Fig. 4 Scatter plots of mean annual air temperature between simulated and measured calculated by equation (2)

研究区内除由中国气象资料共享网获得

的 211 个站点数据外, 同时收集到 337 个水文站和雨量站的观测数据。利用 548 个站点插值数据与相应的海拔高度(H)、经度(X)和纬度(Y)分析发现, 降水与 3 种因素之间的关系为非线性的。在不同气候区 3 种因素对降水的影响表现出不同形式: 季风影响区和高原区降水明显, 随纬度的增加而降低, 西风区大致以北纬 42.5° 处为界, 以南随纬度的增加而减少, 以北随纬度增加而增加(图 5a); 季风影响区和高原区降水随经度的增加而增加, 西风区相反(图 5b); 地形因素在三个区域中对降水反应不显著(图 5c), 实际上高度对降水影响明显, 但因地形与地理位置叠加, 地形作用在研究区尺度上不能显示出来。因此, 降水的降尺度比温度降尺度显得困难。

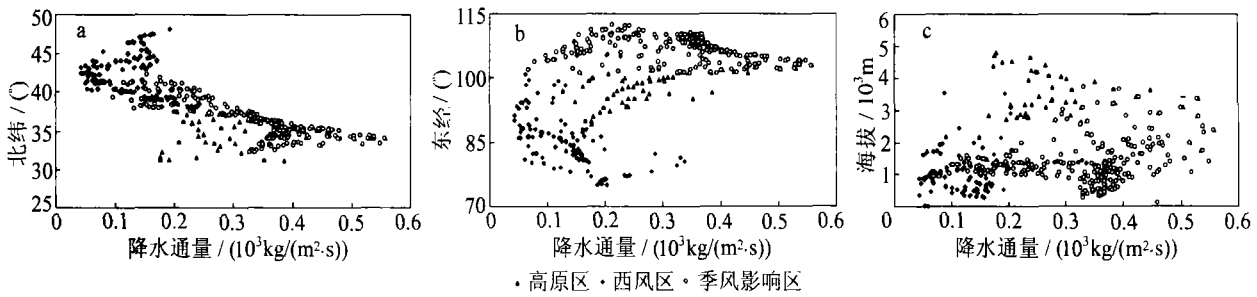


图 5 降水通量与地理位置和海拔高度的关系

Fig. 5 Relationship between precipitation flux and location and altitude

根据温度降尺度的同样步骤对降水模式集成结果进行降尺度, 将 1961~2000 年多年平均插值数据与观测数据比较, 插值数据与海拔高度(H)、经度(X)和纬度(Y)进行回归分析, 建立回归方程(3), 两者的相关系数(R^2)为 0.53(图 6).

$$P = 1.024 - 0.0244Y + 0.001828X. \quad (3)$$

其中: P 为降水通量. 比较校正后的降水通量与观测值, 发现二者为非线性相关, 相关系数(R^2)达到 0.74.

$$P_{\text{adj}} \cong 9534.5P^2 - 2775P + 322.87 + \Delta P. \quad (4)$$

其中: P_{adj} 为最终调整的模式输出结果; ΔP 为校正误差. 同时利用二者的非线性相关关系(图 7)把模拟的降水通量转换成降水量.

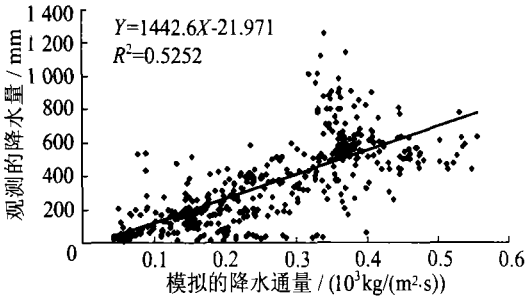


图 6 多年平均降水量观测值与模拟值散点图

Fig. 6 Scatter plots of mean annual precipitation between simulated and measured

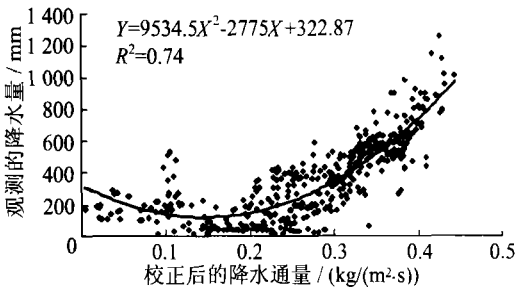


图 7 校正后多年平均降水量观测值与模拟值散点图
Fig. 7 Scatter plots of mean annual precipitation between simulated and measured after validating

利用 DEM 数据提取研究区经度(X)和纬度(Y)栅格数据, 在 ARC/INFO GRID 模块中根据

方程(2)~(4)计算多年平均气温和年平均降水量的空间分布. 对 2000~2030 年平均气温和降水量进行空间插值, 利用获取的统计关系对此进行校正并获取气温和降水的空间分布.

4 结果与讨论

4.1 大尺度环流模型精度评价

采用 Kriging 内插方法将气温模式集成结果的格点值插值到西北地区各站. 在不考虑插值产生误差的情况下, 比较模型输出结果与观测值发现: 气温的相关系数(R^2)为 0.62, 降水的相关系数(R^2)为 0.53. 可以看出大气环流模式输出结果不能很好地反映区域气候信息, 经过地形和地理位置的调节, 气温相关系数(R^2)可达到 0.94, 降水相关系数(R^2)达到 0.74. 气温明显受地形和纬度的影响, 统计降尺度后, 模型输出结果与观测值接近. 对于降水, 由于高原地形的热力、动力作用连同盛行环流的年际变化及复杂的地形条件, 降水的降尺度比温度降尺度显得较为困难, 尤其地形与经度的叠加作用, 地形对降水的影响不显著.

4.2 未来 30 年气温、降水的空间分布

2001~2030 年平均降水和气温的空间分布见图 8. 西北地域广阔, 地形复杂, 高山与平原、盆地相间, 沙漠与绿洲共存, 所以未来多年平均降水和气温的空间分布差异较大. 图 8 展示西北多数地区降水量不多, 年降水量分布趋势从东南至西北由多到少, 又由少略有增多. 陕西中南部、甘肃南部、青海东南部年平均降水量为 500~800 mm, 少数地区降水可达到 800 mm 以上; 陕西中北部、宁夏大部、甘肃中部、内蒙古西部、青海中东部、新疆北部平均年降水量为 100~400 mm; 甘肃西北部、青海西北部、新疆中南部年降水量一般为 100~200 mm. 图 8 也展示气温受地形影响非常显著, 高值出现在陕甘两省秦岭以南、陕西关中、新疆塔里木盆地、准噶尔盆地和吐鲁番盆地; 低值出现在青海西南部、新疆的天山和昆仑山. 甘肃省大部、内

蒙古西部、宁夏和陕北气温为 14.9~5.3℃。青海省除柴达木盆地和湟水谷地外, 其他地区的气温都 在 1.5℃ 以下。新疆的昆仑山、天山和阿尔泰山气温较低。

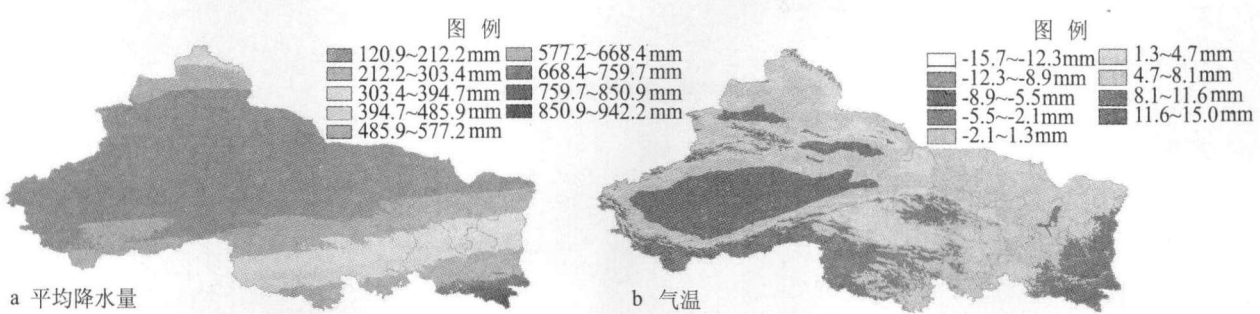


图 8 西北地区 2000~2030 年多年平均降水量和气温的空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of mean annual precipitation and temperature in the northwest region from 2000 to 2030

4.3 未来气候的空间变化

图9显示西北地区降水普遍增加, 增加较显著的地区有新疆塔里木盆地南部、阿尔泰山和天山, 陕西省南部, 增加幅度为 25~78 mm, 该幅度变化的区域占西北地区总面积的 7.2%; 降水减少的地区以青海省最显著, 减少幅度为 81~108 mm, 该幅度变化的区域占西北地区总面积的 22.1%. 降水增加幅度在 0~25 mm 的区域占西北地区总面积的 47.5%, 降水减少 -28.3~0 mm 的区域占西北地区总面积的 23.2%. 赵宗慈等^[33]综合预测内蒙古、陕西、宁夏、甘肃、青海和新疆的降水到 2030 年分别增加 4~14, 7~17, 8~18, 11~21, 9~19 mm, 综合考虑 7 个模式的试验平均, 预计 2030 年西北平均降水变化范围为 -108~55 mm^[21]. 分析模拟结果, 气温模拟的可信度较高, 降水模拟的不确定性很大^[30]. 根据本研究分析未来 30 年气候变化比较显

著的是高原区, 尤其是青海升温明显和降水减少; 西风区温度升降明显, 降水增加但幅度不大; 季风影响区的降水变化不显著, 温度变化南北有异.

未来 30 年的气温、降水的平均状况与 1961~2000 年的比较发现(图 9): 西北地区普遍增温, 增温幅度显著的地区在甘肃中东部、内蒙古、宁夏、陕西中北部、青海东北部和新疆的天山及阿尔泰山, 增温幅度在 0.5~1.0℃; 降幅较大的地区在塔里木盆地, 降幅在 0.5~1.32℃. 从统计资料上看, 气候变暖的地区主要在新疆北部、西北东部及青海^[34-36], 未来 30 年的气候变暖区与观测的变暖区一致. 不同的模式考虑不同的情景, 模拟结果有所不同, 徐影等^[22]考虑既有温室气体又有气溶胶的影响, 模拟到 2030 年西北地区温度将升高 1.9℃. 考虑自然与人类的联合作用, 赵宗慈等^[33]预测西北地区未来 30 年气温将升高 0.8~1.2℃.

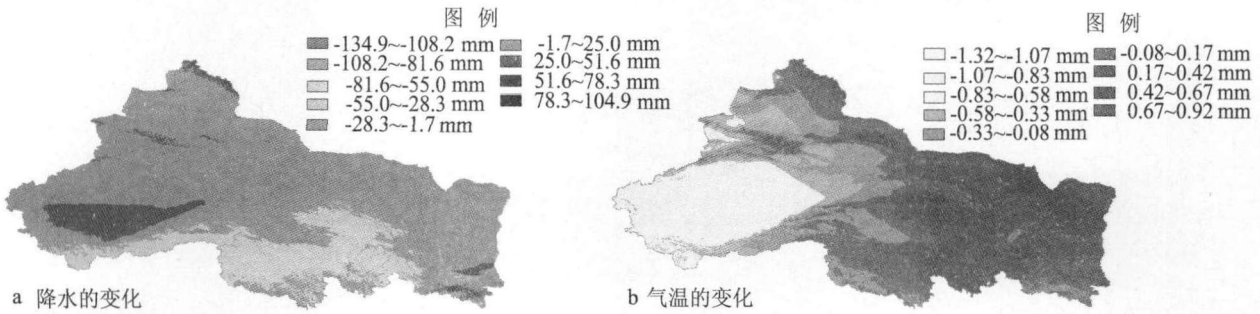


图 9 未来 30 年降水变化和气温的空间分布

Fig. 9 Distribution of temperature and precipitation changed in the future 30 years

5 结论

利用大气环流模式集成结果结合气候观测数据寻找调节因素, 获取模拟数据调节的拟合方程, 实现西北地区模式结果的降尺度. 假设有观测数据以来所建立的拟合方程在未来变化的气候情景下适用, 预测未来 30 年的气候变化. 通过分析得

出如下结论:

- 1) 气温降尺度模型精度较高, 模拟结果与观测值比较发现, 相关系数(R^2)可达到 0.94. 降水降尺度模型精度偏低, 相关系数(R^2)为 0.74.
- 2) 未来 30 年平均气温和降水的空间分布差异较大, 气温受地形的影响显著, 降水与地理位置关

系密切,地形对降水的调节作用有待进一步研究.

3) 西北地区普遍增温,增温幅度显著的地区在甘肃中东部、内蒙古、宁夏、陕西中北部、青海东北部和新疆的天山及阿尔泰山,增温幅度为 $0.5\sim 1.0^{\circ}\text{C}$;降幅比较大的地区发生在塔里木盆地,降幅为 $0.5\sim 1.32^{\circ}\text{C}$.

4) 西北地区降水普遍增加,增加较显著的地区有新疆塔里木盆地南部、阿尔泰山和天山、陕西省南部,增加幅度为 $25\sim 78\text{ mm}$,该幅度变化的区域占西北地区总面积的7.2%;降水增加幅度在 $0\sim 25\text{ mm}$ 的区域占西北地区总面积的47.5%.降水减少的地区在高原区,以青海省最显著,减少幅度为 $81\sim 108\text{ mm}$,该幅度变化的区域占西北地区总面积的22.1%;降水减少 $-28.3\sim 0\text{ mm}$ 的区域占西北地区总面积的23.2%.

参 考 文 献

- [1] IPCC, WGIII. The fourth assessment report: summary for policymakers[EB/OL]. [2007-03-08]. <http://www.rivm.nl/env/int/ipcc>.
- [2] HOUGHTON J T, JENKINS G J, EPHRAUMS J J. Climate change, the IPCC scientific assessment[M]. London: Cambridge University Press, 1990: 365.
- [3] HOUGHTON J T, CALLANDER B A, VARNEY S K. Climate change 1992, the supplementary report to the IPCC scientific assessment[M]. London: Cambridge University Press, 1992: 200.
- [4] 石广玉,王喜红,张立盛,等.人类活动对气候影响的研究 II: 对东亚和中国气候变化的影响[J].气候与环境研究, 2002, 7(2): 255-266.
- [5] 叶笃正,符淙斌,董文杰.全球变化科学进展与未来趋势[J].地球科学进展, 2002, 17(4): 467-469.
- [6] 熊伟,许吟隆,林而达,等. IPCC SRES A2 和 B2 情景下我国玉米产量变化模拟[J].中国农业气象, 2005, 26(1): 11-15.
- [7] HOUGHTON J T. IPCC Climate change 2001: the scientific basis[M]. London: Cambridge University Press, 2001: 1-881.
- [8] STOTT P A, TETT S F B, JONES G S, et al. External control of twentieth century temperature variations by natural and anthropogenic forcing[J]. Science, 2000, 15: 2 133-2 137.
- [9] TETT S F B, JONES G S, STOTT P A, et al. Estimation of natural and anthropogenic contributions to 20th century[R]. Hadley: Centre Tech Note 19, Hadley Centre for Climate Prediction and Response, 2000: 1-52.
- [10] 姜大膀,王会军,郎咸梅.全球变暖背景下东亚气候变化的最新情景预测[J].地球物理学报, 2004, 47(4): 590-596.
- [11] 姜大膀,王会军,郎咸梅. SRES A2 情景下中国气候未来变化的多模式集合预测结果[J].地球物理学报, 2004, 47(5): 776-784.
- [12] 许吟隆,薛峰,林一骅.不同温室气体排放情景下中国21世纪地面气温和降水变化的模拟分析[J].气候与环境研究, 2003, 8(2): 209-217.
- [13] 王会军,曾庆存,张学洪. CO_2 含量加倍引起的气候变化的数值模拟研究[J].中国科学: B 辑, 1992, 22(6): 663-672.
- [14] 陈起英,俞永强,郭裕福,等.温室效应引起的东亚区域气候变化[J].气候与环境研究, 1996, 1(2): 113-123.
- [15] 王明星,杨昕.人类活动对气候影响的研究 I: 温室气体和气溶胶[J].气候与环境研究, 2002, 7(2): 247-254.
- [16] CUBASCH U, VON STORCH H, WASZKEWITZ J, et al. Estimates of climate changes in southern Europe using different downscaling techniques[J]. Climate Research, 1996, 7: 129-149.
- [17] RISBEY J, STONE P. A case study of the adequacy of GCM simulations for input to regional climate change[J]. Journal of Climate, 1996, 9: 1 441-1 467.
- [18] BOVILLE B A. Sensitivity of simulated climate to model resolution[J]. Journal of Climate, 1991, 4: 469-485.
- [19] BOYLE J S. Sensitivity of dynamical quantities to horizontal resolution for a climate simulation using the ECMWF (Cycle33) Model[J]. Journal of Climate, 1993, 6: 796-815.
- [20] 范丽军,符淙斌,陈德亮.统计降尺度法对未来区域气候变化情景预估的研究进展[J].地球科学进展, 2005, 20(3): 320-329.
- [21] 赵宗慈,丁一汇,徐影,等.人类活动对20世纪中国西北地区气候变化影响检测和21世纪预测[J].气候与环境研究, 2003, 8(1): 26-34.
- [22] 徐影,丁一汇,赵宗慈.人类活动引起的我国西北地区21世纪温度和降水变化情景分析[J].冰川冻土, 2003, 25(3): 328-330.
- [23] 张存杰.全球气候变暖对西北地区秋季降水的影响[J].冰川冻土, 2003, 25(2): 157-164.

(下转第25页)

- in soil in Bashang area, China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2003, 15(4): 548-553.
- [5] 史培军, 宫鹏, 李晓兵, 等. 土地利用覆盖变化研究的方法与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 37-40.
- [6] 马金珠, 朱中华. 石羊河流域水环境演化与水资源可持续利用[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 2005: 1-36.
- [7] 王德卿, 刘晓泉, 胡玉华. 石羊河流域水资源现状及可持续利用对策[J]. 甘肃农业科技, 2003, 12(1): 3-5.
- [8] 刘金荣, 谢晓蓉. 河西走廊干旱荒漠区盐碱化土地修复与调控研究——以黑河灌区为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2005, 16(3): 79-84.
- [9] 吴薇, 颜长珍, 王建华, 等. 应用遥感和GIS技术进行西北地区土地资源调查[J]. 中国沙漠, 2000, 20(2): 229-232.
- [10] 王思远, 刘纪远, 张增祥. 中国土地利用时空特征分析[J]. 地理学报, 2001, 56(6): 631-639.
- [11] 刘纪远, 布和敖斯尔. 中国土地利用变化现代过程空间特征的研究——基于卫星遥感数据[J]. 第四纪研究, 2000, 20(3): 229-238.
- [12] 夏佰成, 胡金明, 宋新山. 近15年来洮儿河流域土地利用变化研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(2): 123-127.
- [13] 肖笃宁, 李秀珍. 当代景观生态学的进展和展望[J]. 地理科学, 1997, 7(4): 356-364.
- [14] 肖笃宁, 布仓仁, 李秀珍. 生态空间理论与景观异质性[J]. 生态学报, 1997, 17(5): 453-460.
- [15] 肖笃宁. 景观生态学理论、方法及应用[M]. 北京: 中国林业出版社, 1991: 21-27.
- [16] 朱会义, 何书金, 张明. 环渤海地区土地利用变化的驱动力分析[J]. 地理研究, 2001, 20(6): 659-678.
- [17] 常兆丰, 韩福贵. 石羊河下游沙漠化的自然因素和人为因素及其位移[J]. 干旱区地理, 2005, 28(2): 150-156.
- [18] 王琪, 史基安. 石羊河流域环境现状及其演化趋势分析[J]. 中国沙漠, 2003, 23(1): 46-53.
- [19] 白映万, 王开录. 石羊河流域水资源保护与可持续利用对策[J]. 水土保持研究, 2005, 12(4): 253-256.
- [20] 韩惠, 冯兆东, 俄有浩, 等. 利用TM系列影像监测盐碱化土地变化——以民勤绿洲为例[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2006, 42(4): 1-6.
- [21] 王法刚, 王文颖, 陈志, 等. 土地利用变化对高寒草垫植物群落结构及物种多样性的影响[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2007, 43(3): 58-64.
- [22] 赵晶. 基于CA的城市土地利用演变人工神经网络模拟[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2006, 42(5): 27-32.

(上接第18页)

- [24] 宋连春, 张存杰. 20世纪西北地区降水量变化特征[J]. 冰川冻土, 2003, 25(2): 143-148.
- [25] 何清, 杨青, 李红军. 新疆40 a来气温、降水和沙尘天气变化[J]. 冰川冻土, 2003, 25(4): 423-427.
- [26] 李栋梁, 魏丽, 蔡英, 等. 中国西北现代气候变化事实与未来趋势展望[J]. 冰川冻土, 2003, 25(2): 135-142.
- [27] 施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 中国西北气候由暖干向暖湿型的特征和趋势探讨[J]. 第四纪研究, 2003, 23(2): 152-164.
- [28] 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.
- [29] 王文辉. 内蒙古气候[M]. 北京: 气象出版社, 1990.
- [30] 林而达, 许吟隆, 蒋金荷, 等. 气候变化国家评估报告(II): 气候变化的影响与适应[J]. 气候变化研究进展, 2006, 2(2): 51-61.
- [31] 姜克携. 中国到2020年能源需求与供应情景[EB/OL]. [2005-10-25]. <http://www.ipieca.org/download>.
- [32] 刘勇, 邹松兵. 祁连山地区高分辨率气温降水量分布模型[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2006, 42(1): 7-12.
- [33] 赵宗慈, 高学杰, 汤懋苍, 等. 气候变化预测[C]//丁一汇. 中国西部环境变化的预测. 北京: 科学出版社, 2002: 16-46.
- [34] 施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型问题评估[M]. 北京: 气象出版社, 2003: 60-100.
- [35] 尚可政, 韩晶晶, 杨德保, 等. 西藏西北高原气候变化趋势及预测——以狮泉河站为例[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2006, 42(6): 27-32.