

# 中国 55 年来地面水汽压网格数据集的建立及精度评价<sup>\* 1</sup>

沈 艳<sup>1</sup> 熊安元<sup>1</sup> 施晓晖<sup>2</sup> 刘小宁<sup>1</sup>

SHEN Yan<sup>1</sup> XIONG Anyuan<sup>1</sup> SHI Xiaohui<sup>2</sup> LIU Xiaoning<sup>1</sup>

1. 国家气象信息中心,北京,100081

2. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京,100081

1. National Meteorological Information Center, CMA, Beijing 100081, China

2. State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China

2007-05-28 收稿,2007-07-30 改回.

**Shen Yan, Xiong Anyuan, Shi Xiaohui, Liu Xiaoning, 2008. Development of the grid-based ground water vapor pressure over China in recent 55 years and its accuracy evaluation. Acta Meteorologica Sinica, 66(2):283–291**

**Abstract** The detection of large-area average changes of meteorological data is always hampered because of the different record series of long-term in-situ measurements, which can often cause the spatial sampling errors. Fortunately, more and more scientists explore that the grid-based dataset can reduce the spatial sampling error through given interpolation method. Substantial progress has been made in the last two decades in quantitatively documenting analysis of different meteorological factors. Ground water vapor pressure is an important meteorological factor that can control some physiological, ecological and water balance process in ecosystem. In this article, using the quality controlled observational monthly and yearly mean ground water vapor pressure data series over China Mainland, through the ANUSPLIN software developed by the Australian National University based on the thin-plate smooth spline method, the datasets of yearly and monthly grid-based ground water vapor pressure are established over China in recent 55 years from the 1951 to 2005. Cross-validation tests show that this gauge-based analysis has high quantitative quality, which annual interpolation error is typically less than 0.3 hPa except from 1951 to 1953 and monthly error has periodic variation with biggest in summer and smallest in winter. In spring and autumn its monthly error value is between the others. The research results include: (1) The relationship between measured and its corresponding grid cell indicates that they are a good linear correlation passing the 0.01-level confidence check. The grid value can represent the pattern of the measured one. (2) Using the 30-year normal from the 1971 to 2000, annual and seasonal variation based on the grid dataset suggests that average annual change shows increasing trend over the 55 years with its linear trend 0.52 hPa per 100-year. The increasing trend in western China is more obvious than that in eastern China. For the seasonal scales, the summer trend is the most dramatic, which is estimated linear trend 0.98 hPa per 100-year over the whole China. While the spring is lowest which is 0.42 hPa per 100-year. Considering the temperature rising in recent 50 years, 3.15% of water vapor will be increased when temperature warms up 1 degree over China, which is lower than the globe average value. There are two reasons for it, one is the stronger warming trend in China than in the world the other maybe arises from drought enhancement in China. This developed datasets are helpful to explore the spatial and temporal distributions of the ground water vapor pressure. It can be used in a wide range of applications, including weather/climate monitoring, climate analysis, numerical model verifications, ecological assessment, and hydrological studies.

**Key words** Grid dataset, Ground water vapor pressure, Climate change, Trend coefficient

**摘 要** 对气象要素网格化是气候变化研究中避免空间抽样误差的有效方法之一。文中采用薄盘光滑样条插值法(ANUSPLIN),在考虑站点经度、纬度和海拔高度的基础上,对中国 55 年来地面水汽压站点资料进行空间插值,得到了中国陆地水汽

\* 资助课题:国家级气象科学数据资源建设(2005DKA31700-02),中国气象局气象新技术推广项目(CMATG2006Z03)。

作者简介:沈艳,主要从事气候变化研究。E-mail: sheny@cma.gov.cn

压年和月平均值  $1^\circ \times 1^\circ$  网格数据集。精度检验表明:中国年水汽压插值误差普遍小于 0.3 hPa;而月水汽压的插值误差由于受水汽压周期变化的影响,表现出周期性变化的特点。一般夏季较大,最大误差在 0.5 hPa 左右,冬季较小,约为 0.2 hPa。在考虑站点海拔与对应网格 DEM 差值大小的基础上,建立实测水汽压值与对应网格水汽压值年序列,并进一步分析二者的相关关系,表明:(1)二者具有很好的相关性,相关系数为 0.88—0.96;(2)能很好地模拟地形影响,得到的网格水汽压可以较好地代表实测水汽压的变化趋势。由此建立了中国近 55 年来地面水汽压的年序列。其趋势表明:近 55 年来中国年平均水汽压呈增加趋势,其线性趋势为 0.52 hPa/(100 a),其中西部增加趋势大于东部,且以夏季的增大趋势最为显著。结合近 50 年来气温的变化趋势说明:在中国,气温每增加  $1^\circ\text{C}$ ,大气中年平均水汽含量约增加 3.15%。

**关键词** 网格数据集,地面水汽压,气候变化,趋势系数

**中图法分类号** P468.0<sup>+</sup>2

## 1 引言

区域以及全球尺度的温、压、湿数据是气候变化和生态系统研究中的重要数据。但是由于研究区特殊的地理位置以及气象观测仪器设备的不足,使获取一定区域内实测数据存在困难。

气象要素空间分布由宏观地理环境和微观地形因素共同决定。微观地形因素包括局地海拔高度、坡地方位和小地形形态(傅抱璞,1988;卢其尧等,1988),对要素空间分布的影响相对复杂。而宏观地理环境因素包括地理位置因素(经度和纬度)、宏观地形因素(特别是大山脉走向与总体高度)和大自然地理环境因素(森林、水体等),对气候要素空间分布的影响是有规律可循的。这种规律性是进行气象要素空间网格化研究的前提条件。据此可以利用气象台站实测资料,用数学模型模拟宏观地理环境因素对气象要素空间分布的影响,找出定量关系,进而推知无观测地方的气候状况,这是进行网格化研究遵循的基本思路。

在研究全球或区域大尺度气候变化序列时,往往需要先将气候序列网格化,以确保网格序列能代表相同面积上的气候变化。从现有研究来看,对气温和降水的网格化研究相对较多,国际上较有影响力的数据集有:Hanson 数据集(Hanson, et al., 1988), Jones 数据集(Jones, et al., 1986; Jones, 1994), NCDC 的全球历史气候网格数据集(GHCN)(Vose, et al., 1992; Peterson, et al., 1997), CRU 数据集(Hulme, 1992), GPCP 全球月降水数据集(Huffman, et al., 1997; Adler, et al., 2001)以及由 NCEP 气候预测中心(CPC)发展的 CMAP 数据集(Xie 等, 1997)等。中国研究者也建立了近半个世纪中国大陆  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$  的气温网格数据集(李庆祥等, 2007)。湿度作为重要的气象要素,其网格化

研究很少有报道。本文基于薄盘光滑样条插值法(ANUSPLIN)对 1951—2005 年水汽压站点资料进行空间插值,生成中国  $1^\circ \times 1^\circ$  的水汽压网格数据集,进而计算出中国水汽压的变化趋势和幅度。另外,分别考虑了 1951—1959 年每年的实际气象台站数,并据此重新构建了 9 个插值序列,序列长度分别是 1951—2005、1952—2005、1953—2005、1954—2005、1955—2005、1956—2005、1957—2005、1958—2005 和 1959—2005 年,来说明气象台站数的变化对水汽压空间插值结果的影响。

## 2 数据和方法

### 2.1 数据说明

数据主要包括两部分:一是气象资料室存档的中国各基本、基准台站 55 年来地面月和年平均水汽压数据。包括:从 1951 年 1 月到 2005 年 12 月共计 660 个月的数据文件(1-660 表示对应月份);从 1951 年到 2005 年共计 55 a 的数据;1971—2000 年 30 a 累年标准值和累年月标准值。另一部分资料是  $1^\circ \times 1^\circ$  的数字高程模型资料 DEM。

需要说明的是:自 1951 年以来,中国许多气象台站均发生过业务改革、台站迁移、更迭等,有的已取消,有的则为新建站,研究中共涉及 720 多个台站(图 1)。总的来说,东南沿海、华北平原以及西南部分地区是中国台站分布较为密集的地区,而青藏高原、西北内陆以及内蒙古部分地区台站分布相对稀疏。表明长期以来中国气象台站空间分布的不均衡。从中国气象台站数随时间变化的曲线看出:不同历史时期的台站数不尽相同,年代越早台站数越少,但其增长迅速,到 20 世纪 60 年以后台站数基本稳定在 650—690。因此,数据集制作时,每个数据文件包含的台站数不完全相同。

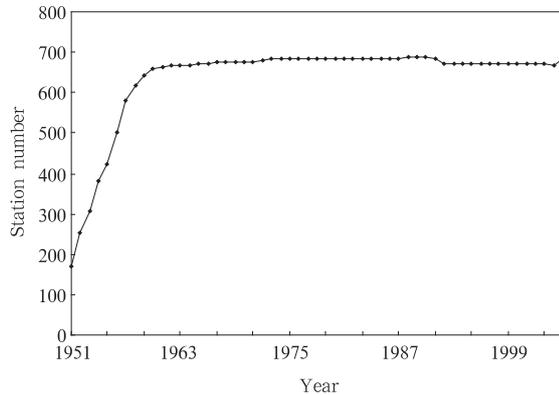


图 1 中国气象台站数随时间的变化曲线

Fig. 1 Changing curve of benchmark and base station number in China

## 2.2 方法简介

ANUSPLIN 是澳大利亚国立大学基于平滑样条原理开发的一套 FORTRAN 插值程序包,通过拟合数据序列计算并优化薄盘平滑样条函数,最终利用样条函数进行空间插值 (Hutchinson, 1991; Hutchinson, et al., 1994)。在位置  $x_i$  处,由  $n$  组数据  $z_i$  拟合的薄盘样条函数  $f$  的模型是 (Hutchinson, et al., 1995)

$$z_i = f(x_i) + \varepsilon_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

其中  $x_i$  表示地理位置信息,如所处的经度、纬度以及海拔高度; $\varepsilon_i$  是一个期望为 0 的随机误差协方差矩阵并假设  $\varepsilon_i = \mathbf{V}\sigma^2$ , 这里  $\mathbf{V}$  是已知的  $n \times n$  维正定矩阵,通常是对角阵; $\sigma^2$  通常是未知的;函数  $f$  通过最小二乘法使式(2)的值最小而获得

$$(z - f)^T \mathbf{V}^{-1} (z - f) + \rho J_m(f) \quad (2)$$

这里  $z = (z_1, z_2, \dots, z_n)^T$ ,  $f = (f_1, f_2, \dots, f_n)^T$ ,  $\mathbf{T}$  代表转置,  $f_i = f(x_i)$ 。  $J_m(f)$  是由样条函数  $f$  的  $m$  阶偏导确定的粗糙度; $\rho$  是正的光滑参数,要在数据准确性与曲面粗糙度之间取平衡,通过最小化 GCV (Generalised Cross Validation) 得到。也可以用最大似然法 GML (Generalised max likelihood) 或真实均方误差 MSE (“true” mean square error) 最小确定。ANUSPLIN 中同时提供了 GCV 和 GML 两种选择平滑参数的判断方法。

ANUSPLIN 可以将不同时间尺度的数据按列排放进行批处理,其插值结果能够提供诸多统计参数:原数据的平均值、方差、标准差;表示拟合曲面精度的有信号自由度 (Signal)、光滑参数 (RHO)、

GCV、GCV 的平方根、均方误差 (MSE) 以及 MSE 的平方根。Signal 表示拟合曲面的复杂程度,能用来判断曲面拟合的质量。研究表明:Signal 不能大于数据量的一半,如果大于一半则说明数据太少或数据短序列相关 (Hutchinson, et al., 1994; Holdaway, 1995)。RHO 非常小但 Signal 超过数据量的一半或 RHO 很大但 Signal 较小都说明拟合过程找不到合适的光滑参数值,即所选模型不适合曲面插值并以“\*”标出。目前 ANUSPLIN 4.36 版本最多可以处理维数为 10 的样条(如经度、纬度等),也允许引入协变量模型,如考虑气温随海拔高度的变化,其结果可以反映气温垂直递减率的变化,考虑水汽压随海拔高度的变化可以反映其垂直递减率的变化。鉴于 ANUSPLIN 能自动判断模型有效性、允许引入协变量模型以及数据易实现空间可视化等优点,因此采用了此方法。

已有研究者根据中国山区和自由大气中的水汽压垂直廓线,拟合出了适用于中国的水汽压随海拔高度的变化式(翁笃鸣等,1990),并且认为  $e$  指数分布具有较高精度。因此,本研究以经、纬度为样条函数自变量,以海拔高度为协变量并选用  $e$  指数形式来模拟水汽压随海拔高度的变化。样条函数的具体表达式为

$$e_i = f(\phi_i, \varphi_i) + p^T \exp(-bh_i) + \varepsilon_i \quad (3)$$

其中  $e_i$  是第  $i$  个网格上的水汽压值,  $\phi_i, \varphi_i$  是第  $i$  个网格对应的经度和纬度,  $p$  (海平面水汽压与插值系数的乘积) 为  $\exp(-bh_i)$  的系数,  $\mathbf{T}$  代表转置,  $b$  为水汽压递减系数,  $h_i$  是第  $i$  个网格对应的海拔高度,  $\varepsilon_i$  是期望值为 0 的自变量随机误差。

## 3 插值精度评价

利用 ANUSPLIN 对 1951—2005 年共 55 a 和 660 个月的水汽压数据进行空间插值,其插值结果的精度评价如下。

### 3.1 GCV 的变化

从 GCV 的年变化(图 2)看,1951—1953 年的 GCV 分别是 1.20、1.16 和 1.11 hPa,较其他年份偏大。对应的 36 个月中,GCV 的波动变化比较明显,最小值只有 0.466 hPa,而最大值达到了 3.95 hPa。说明:虽然用 RHO 和 Signal 判断模型有效,但是由于有效样本数较少仍会导致精度较低。另外,数据

本身的误差也会造成 GCV 偏大。通过查阅台站年总簿发现:1951—1953 年台站记录的水汽压值存在观测不规范(包括仪器变化,仪器架设高度不一致)和使用“空盒”的非正式记录等情况,使得数据误差相对较大。其他年 GCV 变化较为平稳,在 0.65 hPa 左右,说明地面水汽压的年变幅为 0.56—0.73 hPa。进入 1990 年以后,GCV 有减小的趋势,之后略有升高并维持在 0.55 hPa 左右。

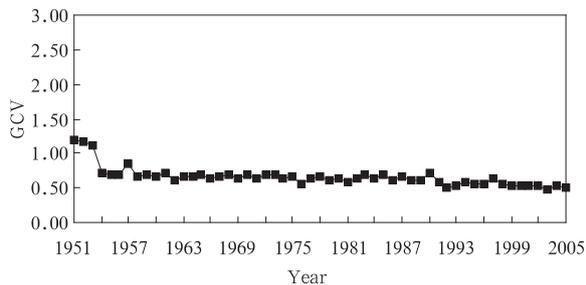


图 2 1951—2005 年 GCV 的年变化曲线

ig. 2 Annual curves of GCV from 1951 to 2005

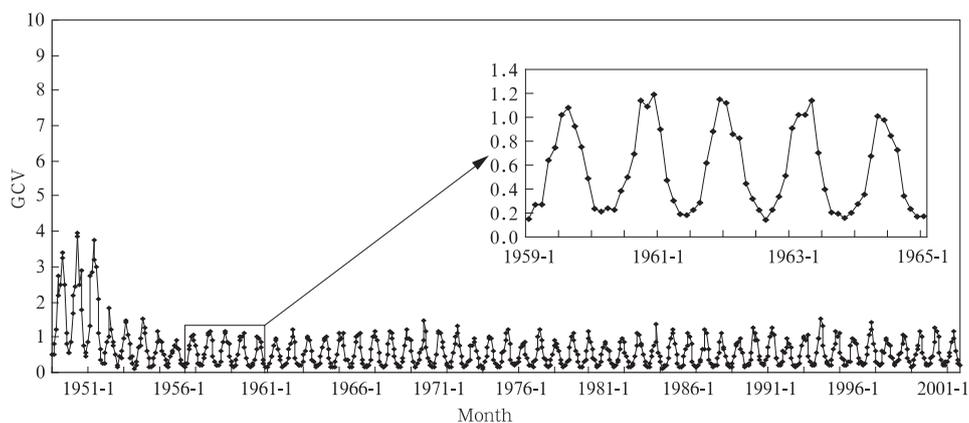


图 3 1951 年 1 月—2005 年 12 月平均 GCV 的长期变化曲线

Fig. 3 Monthly changing curves of GCV from Jan 1951 to Dec 2005

他 5 个在甘肃、青海和西藏,小于 -1500 m 的台站只有 3 个,分别是山西五台山、吉林天池和四川峨眉山。从中进一步选取建站时间长、序列较完整的站点作为代表性站点。表 1 分别给出了代表性站点的高程信息以及台站实测值和对应网格值的线性相关关系。图 4 给出了观测和网格水汽压值的年变化序列,由于建站时间不同,因此序列的起始年有所不同。

对于 DEM 与站点海拔相近的台站,如富锦、溧阳、武汉和开鲁,从图 4 可以发现两条曲线的变化趋势基本相同,水汽压值非常接近。对应线性模型的

从月 GCV 变化及其局部放大后的曲线表明(图 3):同一年的 GCV 表现出周期为 12(1 a)的变化特点,一般夏季(7 或 8 月)GCV 达到最大,平均在 1.0 hPa 左右,冬季(12 月或 1 月)最小约 0.15 hPa,春秋两季介于二者之间。这是水汽压的季节变化决定的。插值结果的均方根误差 RMSE(图未给出)表明:年值的 RMSE 均小于 0.3 hPa,而月 RMSE 一般夏季最大,平均达到 0.5 hPa 左右,冬季最小,约为 0.2 hPa,春秋两季居中。

### 3.2 站点实测值与对应网格值的比较

利用站点实测水汽压值与对应网格值的关系,进一步评估网格水汽压值的精度。由于该数据集考虑了海拔高度的影响,而且实际研究中站点海拔高度(Hei)与对应网格 DEM 存在差异,因此根据差值(DEM-Hei)分 3 种情况,即差值在  $\pm 10$  m 之内、大于 1500 m 和小于 -1500 m 来分别探讨两者的对应关系。其中差值在  $\pm 10$  m 以内的台站共有 60 个,大于 1500 m 的有 12 个台站,其中 7 个分布在新疆,其

斜率基本都接近 1,两者具有很好的相关关系,其相关系数分别是 0.96、0.93、0.96 和 0.94。这说明在地势平坦、地形起伏不大的地区,得到的网格水汽压无论在数值大小还是变化趋势上都能较准确的代表实测值。

选取了且末和玉门镇两个台站,来验证该数据集对 DEM 远远大于站点海拔台站的插值效果。因为水汽压随海拔高度升高而减小,因此对应网格上的水汽压值将比实测站点值偏小,这也从图 4 两个台站的年序列变化曲线得到了证实。例如且末站的实测多年平均值是 5.6 hPa,而对应网格的多年平均

表 1 代表性站点的高程信息及站点实测值和对应网格值的线性模型与相关关系  
Table 1 Elevation, linear models and relation coefficients between measured and grid cell water vapor pressure (WVP) for typical stations

站名(省/区)	海拔高度(m)	网格高度(m)	网格高度与海拔高度差(m)	线性方程	相关系数
富锦(黑龙江)	66	67	1	$y=0.93x+0.60$	$R=0.96$
溧阳(江苏)	7	12	5	$y=0.94x+0.54$	$R=0.93$
武汉(湖北)	23	24	1	$y=0.98x+0.09$	$R=0.96$
开鲁(内蒙古)	241	240	-1	$y=1.00x-0.08$	$R=0.94$
且末(新疆)	1247	4064	2817	$y=0.35x+0.36$	$R=0.89$
玉门镇(甘肃)	1526	3758	2232	$y=0.45x+0.24$	$R=0.91$
五台山(山西,迁址前)	2208	208	-2000	$y=2.22x+0.44$	$R=0.93$
五台山(山西,迁址后)	2896	208	-2688	$y=1.75x+0.58$	$R=0.88$

注:  $x$  表示站点实测值,  $y$  表示对应网格值。

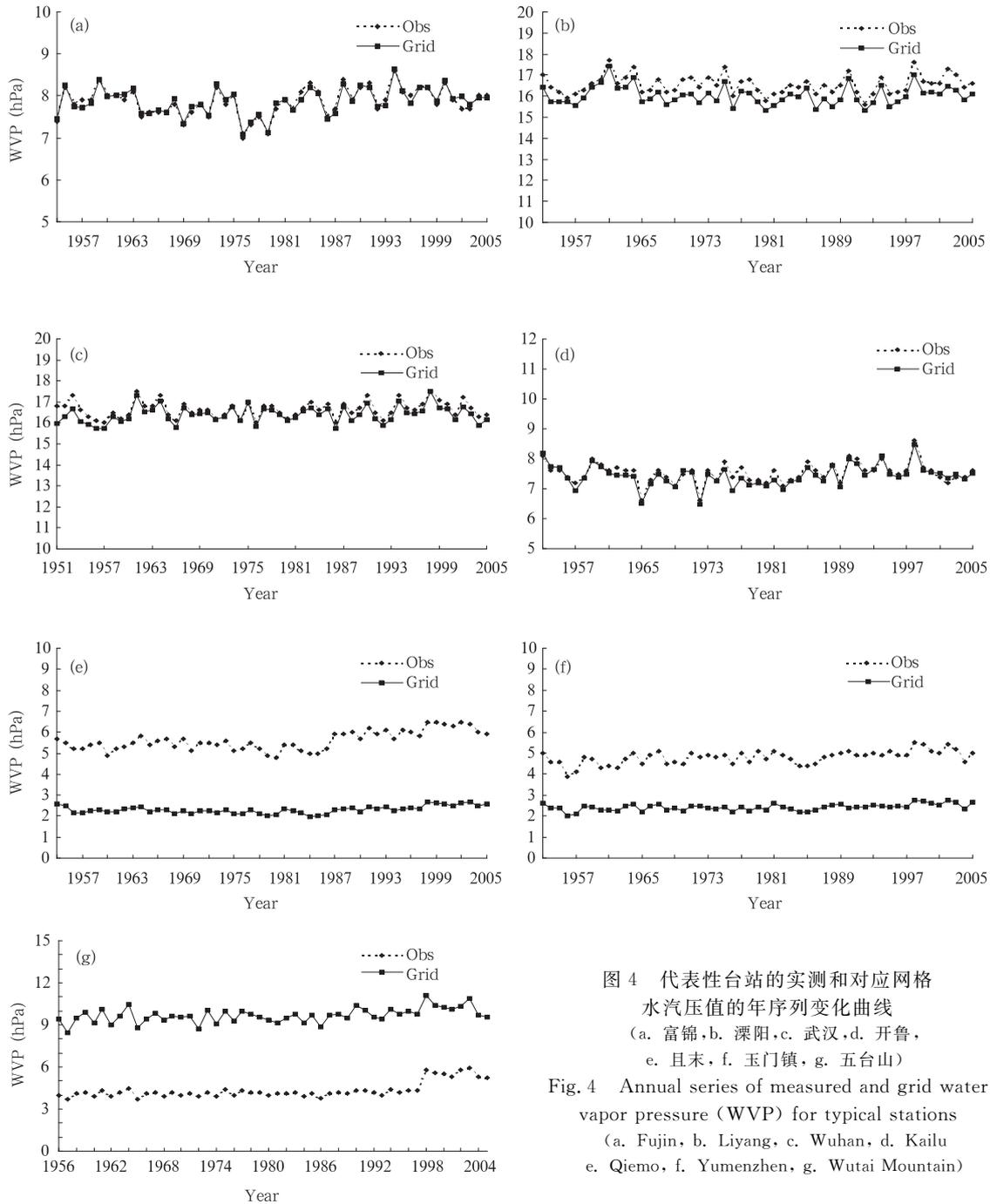


图 4 代表性站点的实测和对应网格水汽压值的年序列变化曲线  
(a. 富锦, b. 溧阳, c. 武汉, d. 开鲁, e. 且末, f. 玉门镇, g. 五台山)

Fig. 4 Annual series of measured and grid water vapor pressure (WVP) for typical stations  
(a. Fujin, b. Liyang, c. Wuhan, d. Kailu, e. Qiemu, f. Yumenzhen, g. Wutai Mountain)

值只有 2.3 hPa,玉门镇分别是 4.8 和 2.4 hPa。同时也注意到:网格年序列与实测值年序列的趋势分布非常一致,例如玉门镇站从 1981 到 1990 年的实测序列有先减小后增大的“V”字型分布,其网格序列也有同样的分布型。对应线性模型的斜率分别是 0.35 和 0.45,相关系数分别是 0.89 和 0.91,达到显著相关。五台山站是一个站点海拔远远大于对应网格 DEM 的代表性台站,DEM 比站点海拔低约 2000 m,因此网格水汽压将比实测值偏大,多年平均值分别是 9.7 和 4.4 hPa,偏大 5.3 hPa(图 4)。另外,五台山站从 1955 年 10 月建站以来,于 1998 年 1 月 1 日有过一次大的迁站,站点海拔从 2896 m 直降到 2208 m,降幅约 700 m,水汽压观测值必将变大,对应的网格水汽压值也会增大,这在图 4 中有所体现。因此分两段(迁站前和迁站后)分别拟合线性模型(图 5),其斜率分别是 2.22 和 1.75,相关系数分别是 0.93 和 0.88,均为显著相关。说明在地形起伏较大的地区,该数据集同样能较好的表示实测水汽压的变化趋势。

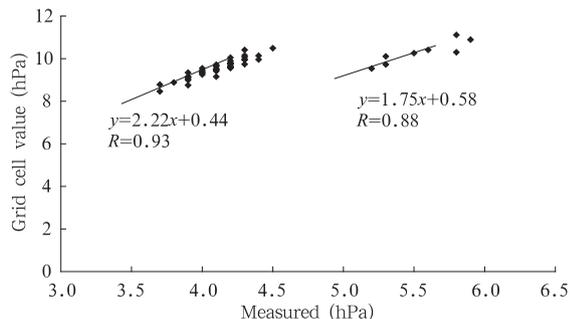


图 5 五台山站迁站前后实测和网格水汽压值的线性模型及相关系数

Fig. 5 Linear model and correlation coefficient between measured and grid cell WVP for Wutai Mountain station

### 3.3 水汽压的年和季节变化

重点讨论基于该网格数据集中国水汽压长时间序列及其变化趋势。用水汽压累年(1971—2000 年)标准值插值后的网格数据作为多年平均值(用累年月平均值的插值结果作为季节平均值),分析了 55 年来中国水汽压年变化和季节变化特征。四季划分是春季为 3—5 月,夏季为 6—8 月,秋季为 9—11 月,冬季为 12 月—次年 2 月。

从中国水汽压的变化(图 6)可知:近 55 年来中国年平均水汽压呈增加趋势。线性趋势为

0.052 hPa/(10 a),通过了 0.05 的显著性检验。尤其是 20 世纪 80 年代以后,以水汽压正距平为主(正距平最大年份是 1998 年),而之前正负距平交替,且以负距平居多,这代表年代际的变化信号。王遵娅等(2004)研究了近 50 年来中国年平均相对湿度的变化趋势,表明近 50 年来中国年平均相对湿度略呈减小趋势。这是因为相对湿度是空气中实际水汽压与当时气温下的饱和水汽压之比,而 21 世纪以来气温持续升高(王绍武等,1998),对应气温下的饱和水汽压增大,使得相对湿度反而减小。

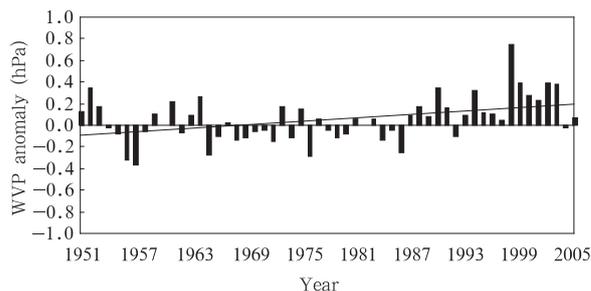


图 6 1951—2005 年中国年平均水汽压距平的时间序列及其线性趋势

Fig. 6 Time series and linear trend of annual water vapor pressure anomaly from 1951 to 2005

进一步以 107.5°E 为界,将中国分为东、西两部分讨论水汽压的变化趋势(图 7)。与中国平均趋势一致,东、西部近 55 年来地面水汽压均呈上升趋势,线性趋势分别是 0.038 hPa/(10 a)和 0.061 hPa/(10 a),相关系数分别是 0.216 和 0.534,西部地区上升更明显,且通过了 0.05 的显著性检验。值得一提的是:1987 年之后,西部地区都转为正距平,表明了强烈的年代际变化信号。研究表明:地面水汽压与降水有很好的对应关系(杨景梅等,1996,2002),本文得到的 20 世纪 80 年代后期中国西部地面水汽压明显增大的研究结果与有关研究发现的降水增加趋势主要发生在中国西部(翟盘茂等,1999)的现象之间可能存在一定联系。

就水汽压的季节变化而言(表 2),春、夏、秋、冬四季的水汽压距平都呈增加趋势,以夏季的线性趋势最大,高于年平均值,其他 3 个季节均等于或小于年平均趋势,其中春季的趋势最小是 0.042 hPa/(10 a)。夏季和冬季通过了 0.05 的显著性检验,而春秋两季的线性增加趋势不显著。近 50 年来中国气温变暖幅度约 1.1 °C(任国玉等,2005),表 2 中年

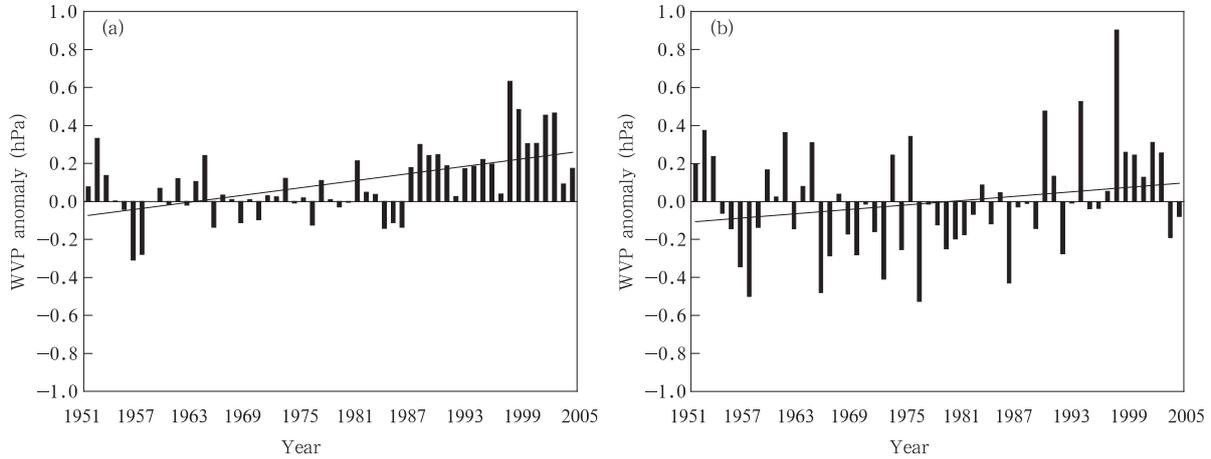


图 7 1951—2005 年东(b)、西部(a)年平均水汽压距平的时间序列及其线性趋势

Fig. 7 Time series and linear trend of annual WVP anomaly from 1951 to 2005 for the east (b) and west (a) region

平均水汽压线性趋势增加 3.59%，可以得到：在中国，气温每增加 1℃，大气中水汽含量约增加 3.15%，小于全球研究中得到的约 7% 的增加速率。这可能是中国比全球同期平均增温速率明显偏高(李庆祥等, 2007; 任国玉等, 2005)，以及中国干旱化趋势共同影响的结果。任国玉得到近 50 年来气温趋势分别是春季 0.23℃/(10 a)，夏季 0.12℃/(10 a)，秋季 0.19℃/(10 a) 和冬季 0.36℃/(10 a)(任国玉, 2005)，据此得到气温每增加 1℃，春、夏、秋和冬季大气中水汽含量分别增加 2.76%、5.65%、3.55% 和 4.27%，夏季增加最大，而春季最小。

表 2 年平均及各季节地面水汽压距平的线性趋势和相关系数

Table 2 Linear trends and correlation coefficient of ground water vapor pressure anomaly

	线性趋势 (hPa/(10 a))	相关系数	趋势上升 百分值(%)
春	0.042	0.25	3.19
夏	0.098*	0.40	3.73
秋	0.052	0.26	3.71
冬	0.047*	0.35	8.45
年	0.052*	0.40	3.59

注：\* 表示通过 0.05 的显著性检验。

### 3.4 站网密度对插值结果的影响

从图 1 可知，1951 年有效台站数只有 138 个，1959 年迅速发展到了 626 个气象台站，之后台站数相对稳定。另外，中国气象台站空间分布的不均衡，东南部地区分布较多，西北内陆及青藏高原台站稀疏。

那么台站数量的变化和空间分布的不均衡是否会对水汽压的年序列产生影响呢？这里利用 1951—1959 年共 9 个不同站网密度下得到的网格数据，建立地面水汽压近 55 年来的时间序列，有效台站数和序列长度信息(表 3)，对应 9 个站网密度下地面水汽压年序列见图 8。用地面水汽压累年(1971—2000 年)平均值的网格数据作为多年平均值，得到各序列的距平变化序列(略)，其平均距平及线性趋势见表 3。需要说明的是：为了使平均距平和线性趋势系数具有可比性，给出的均是 1959—2005 年序列的值。

表 3 不同站网密度下的序列长度及其线性趋势

Table 3 Time series and its linear trend coefficient under different station number

时段	台站数	年均水汽压 距平(hPa)	线性趋势 (hPa/(10 a))
1951—2005	138	0.321	0.080
1952—2005	172	0.355	0.079
1953—2005	275	0.193	0.085
1954—2005	339	0.087	0.083
1955—2005	395	0.113	0.082
1956—2005	441	0.091	0.088
1957—2005	546	0.083	0.074
1958—2005	586	0.055	0.070
1959—2005	626	0.065	0.067

由图 8 可知，9 条序列的变化趋势基本相同，都呈增加趋势，极大极小值出现的年份吻合，但前 2 个序列值高于其他序列，其平均距平约比其他序列大一个量级(表 3)。从线性趋势来看(表 3)，当台站数在

500 以下时,对应的线性趋势都大于 $0.08 \text{ hPa}/10 \text{ a}$ ,而当台站数增加到 500 以上时,线性趋势有所减小,其中 1959 年台站数为 626 个时,对应的线性趋势为 $0.067 \text{ hPa}/(10 \text{ a})$ 。站点分布的地区不均衡是造成距平和线性趋势系数偏大的主要原因。分析 1951—1959 年气象站点空间分布可知(略):1951—1959

年,中国东部即水汽压高值区气象台站一直维持相对高数量的分布,而到 1956 年止,分布在青海、西藏以及新疆和内蒙古的气象台站仍然相对较少,在对这些区域插值时,会选择邻近的高值台站来代替,使得网格水汽压值偏大,由此得到的序列会偏高估计全国平均值,导致比“真实序列”有增加的趋势。

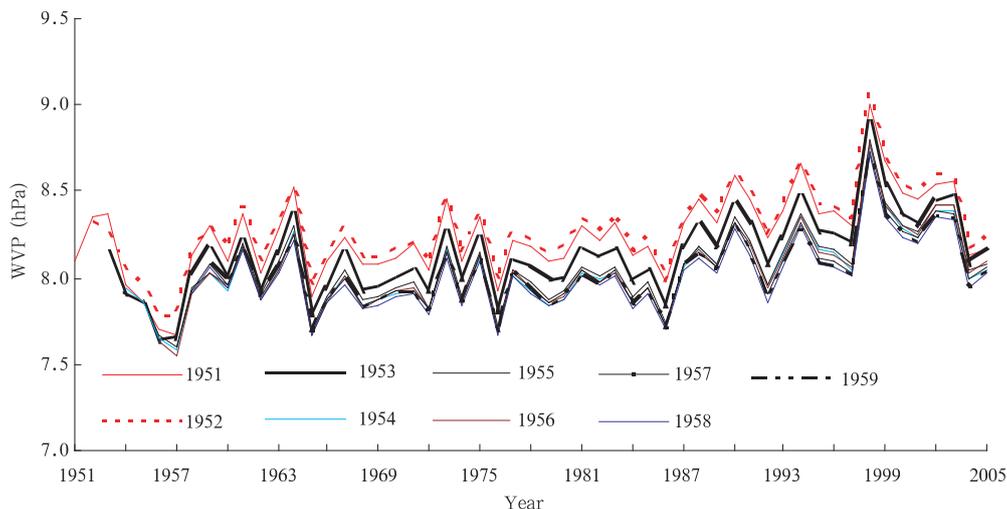


图 8 9 个站网密度下的全国平均地面水汽压年序列

Fig. 8 Time series of average ground WVP under nine station number

#### 4 结论与讨论

目前气象站网密度相对稀疏,用站点资料直接进行区域气候变化研究的空间采样误差较大,需要先对其空间插值。薄盘光滑样条插值法(ANUSP-LIN)在考虑各种气象要素时空分布规律的基础上,能够考虑地形对气象要素空间分布的影响,使山地和边远地区气象信息得以更准确的表达。已有研究表明:对比相同数据不同方法,此方法插值结果比较理想(Xu, et al., 2001)。

本文借助该方法,利用台站实测的月值(1951 年 1 月—2005 年 12 月)和年值(1951—2005)水汽压,分别生成了空间分辨率 $1^\circ \times 1^\circ$ 的中国区域逐年、逐月水汽压网格数据集。研究表明:中国年水汽压插值误差普遍小于 $0.3 \text{ hPa}$ ;而月水汽压的插值误差由于受水汽压周期性变化的影响,也表现出周期性变化的特点。一般夏季较大,最大误差在 $0.5 \text{ hPa}$ 左右,冬季较小约 $0.2 \text{ hPa}$ 。考虑站点海拔与对应网格 DEM 的基础上,建立了实测水汽压值与对应网格水汽压值年序列的相关关系,表明二者具有很

好的相关性,相关系数为 $0.88—0.96$ ,都通过了 $0.01$ 的显著性检验;同时,在地势平坦、地形起伏不大的地区,网格水汽压无论是数值大小还是变化趋势上都能较好地代表实测水汽压,而在地形起伏较大的区域,同样能较好地表示实测水汽压的变化趋势。

利用网格数据建立中国 55 年来水汽压长时间序列及其变化趋势表明:中国范围的年平均水汽压近 55 年来呈增大趋势,西部大于东部,且以夏季的增大趋势最为显著。若考虑近 50 年来中国气温的变幅可以得到:在中国,气温每增加 $1^\circ \text{C}$ ,大气中年平均水汽含量约增加 $3.15\%$ ;春、夏、秋和冬四季分别增加 $2.76\%$ 、 $5.65\%$ 、 $3.55\%$ 和 $4.27\%$ ,夏季增加最大,而春季最小。此数据集的建立可以很好地揭示和展现中国近 55 年来水汽压的时空变化规律,能够为更精细的气候变化研究提供参考,并为各种气候模式的运行提供数据支持。

致谢:本文写作过程中,多次与 NCEP 气候预测中心的 Pingping Xie 博士进行讨论,提出了诸多中肯的建议,在此深表感谢。感谢国家气象信息中心的朱江博士对 DEM 数

据的处理。

## References

- Adler R F, Kidd C, Petty G, et al. 2001. Intercomparison of Global Precipitation Products; The Third Precipitation Intercomparison Project (PIP-3). *Bull Amer Meteor Soc*, 82(7):1377-1396
- Fu Baopu. 1988. Spatial modeling of climate factors in mountainous area. *Acta Meteor Sinica*(in Chinese), 46(3):319-326
- Hanson J and Lebedeff S. 1988. Global surface air temperature: update through 1987. *Geophys Res Lett*, 15(4):323-326
- Holdaway M R. 1996. Spatial modeling and interpolation of monthly temperature using Kriging. *Clim Res*, 6(3):215-225
- Huffman G J, Adler R F, Rudolf B R, et al. 1997. The Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Combined Precipitation Dataset. *Bull Amer Meteor Soc*, 78(1):5-20
- Hulme M. 1992. A 1951 - 80 global land precipitation climatology for the evaluation of general circulation models. *Climate Dyn*, 7(1):57-72
- Hutchinson M F, Gessler P E. 1994. Splines-more than just a smooth interpolator. *Geoderma*, 62(1):45-67
- Hutchinson M F. 1995. Interpolating mean rainfall using thin plate smoothing splines. *Int J GIS*, 9(4):385-403
- Hutchinson M F. 1991. The application of thin plate smoothing splines to continent-wide data assimilation//Jasper J D. BMRC Research Report No. 27, Data Assimilation Systems. Melbourne: Bureau of Meteorology, 104-113
- Jones P D, Raper R, Bradley R S, et al. 1986. Northern hemisphere surface air temperature variations: 1851 - 1984. *J Climate Appl Meteor*, 25(2): 161-179
- Jones P D. 1994. Hemispheric surface air temperature variations: A reanalysis and an update to 1993. *J Climate*, 7(11):1794-1802
- Li Qingxiang, Li Wei. 2007. Construction of the gridded historic temperature dataset over China during the recent half century. *Acta Meteor Sinica* (in Chinese), 65(2): 293-300
- Lu Qiyao, Fu Baopu, Yu Jingming. 1988. Estimation methods in distribution of agrilimatic resources in mountainous areas and climatic effects of micro-topography. *J Natural Resources* (in Chinese), 3(2):101-113
- Peterson T C, Vose R S. 1997. An overview of the global historical climatology network temperature database. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(12):2837-2849
- Ren Guoyu, Guo Jun, Xu Mingzhi, et al. 2005. Climate changes of China's mainland over the past half century. *Acta Meteor Sinica* (in Chinese), 63(6): 942-956
- Vose R S, Schmoyer R L, Steurer P M, et al. 1992. The Global Historical Climatology Network: Long-term monthly temperature, Precipitation, sea-level pressure, and station pressure data. ORNL, 325
- Wang Shaowu, Ye Jinlin, Gong Daoyi. 1998. The establishment of annual temperature series in China over the past century. *J Applied Meteor* (in Chinese), 9(4):392-401
- Wang Zunya, Ding Yihui, He Jinhai. 2004. An updating analysis of the climate change in China in recent 50 years. *Acta Meteor Sinica* (in Chinese), 62(2):228-236
- Weng Duming, Luo Zhexian. 1990. Mountain Topographic Climate. Beijing:China Meteorological Press(in Chinese), 541pp
- Xie P, Arkin P A. 1997. Global Precipitation: A 17-year Monthly Analysis Based on Gauge Observations, Satellite Estimates and Numerical Model Outputs. *Bull Amer Meteor Soc*, 78(11): 2539-2558
- Xu D Y, Yan H. 2001. A comparing study on the impacts of climate change on the geographic distribution of *Pinus koraiensis*. *Environment International*, 27(2):201-205
- Yang Jingmei, Qiu Jinhuan. 2002. A method for estimating precipitable water and effective water vapor content from ground humidity parameters. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 26(1):9-22
- Yang Jingmei, Qiu Jinhuan. 1996. The empirical expressions of the relation between precipitable water and ground water vapor pressure for some areas in China. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 20(5):620-626
- Zhai Panmao, Ren Fumin, Zhang Qiang. 1999. The change trend detection of precipitation extremes over China. *Acta Meteor Sinica* (in Chinese), 57(2):208-216

## 附中文参考文献

- 傅抱璞. 1988. 山地气候要素空间分布的模拟. *气象学报*, 46(3): 319-326
- 李庆祥, 李伟. 2007. 近半个世纪中国区域历史气温网格数据集的建立. *气象学报*, 65(2): 293-300
- 卢其尧, 傅抱璞, 虞静明. 1988. 山区农业气候资源空间分布的推算方法及小地形的气候效应. *自然资源学报*, 3(2):101-113
- 任国玉, 郭军, 徐铭志等. 2005. 近 50 年中国地面气候变化基本特征. *气象学报*, 63(6): 942-956
- 王绍武, 叶瑾琳, 龚道溢. 1998. 近百年中国年气温序列的建立. *应用气象学报*, 9(4):392-401
- 王遵娅, 丁一汇, 何金海等. 2004. 近 50 年来中国气候变化特征的再分析. *气象学报*, 62(2):228-236
- 翁笃鸣, 罗哲贤. 1990. 山区地形气候. 北京:气象出版社, 541pp
- 杨景梅, 邱金桓. 1996. 我国可降水量同地面水汽压关系的经验表达式. *大气科学*, 20(5): 620-626
- 杨景梅, 邱金桓. 2002. 用地面湿度参量计算我国整层大气可降水量及有效水汽含量方法的研究. *大气科学*, 26(1): 9-22
- 翟盘茂, 任福民, 张强. 1999. 中国降水极值变化趋势检测. *气象学报*, 57(2):208-216