

复杂地形条件下气候变量空间分布分析方案研究*

薛根元^{1,2} 周锁铨² 余越辉³ 梁旭⁴ 宫鹏⁵(浙江省气象局¹ 杭州 310002; 南京信息工程大学² 南京 210044; 浙江省绍兴市气象局³ 浙江绍兴 312000; 加州大学伯克利分校土木环境工程系⁴ 美国加州 94720-1710; 南京大学国际地球系统科学研究所 南京 100093)

〔摘要〕 为分析气候变量的空间分布,本文以高斯权重插值法为基础,设计了一个考虑地形因子的改进方案,结合 Barnes 订正法,给出了相应的误差订正方案和逐步订正方案,并得到地面温度场。分析表明,这是一种简明、精度较高且与地形吻合较好的复杂地形条件下温度空间分析方案。同时,本文提出将参与插值的要素统一到同一高度并考虑地形特点以消除地形影响的降水空间分析方案,也有较好的效果;本文还研究了不同空间分辨率时气候要素的空间分析结果,表明研究长江流域水文过程采用 4 km 分辨率为宜。

〔关键词〕 复杂地形 气候变量 空间分析

〔中图分类号〕 P4

〔文献标识码〕 A

〔文章编号〕 1000-7857(2004)08-0042-05

THE IMPROVED PROJECTS CONSIDERING COMPLICATED TERRAIN CONDITIONS USED TO ANALYZE SPATIAL INTERPOLATION OF CLIMATIC VARIABLES

XUE Gen-yuan^{1,2} ZHOU Suo-quan² YU Yue-hui³ LIANG Xu⁴ GONG Peng⁵

(1. Meteorological Bureau of Zhejiang Province, Hangzhou 310002, China;

2. Nanjing Information and Engineering University, Nanjing 210044, China;

3. Meteorological Bureau of Shaoxing City, Shaoxing 312000, Zhejiang Province, China;

4. Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of California, Berkeley, CA 94720-1710, USA;

5. Dept. of International Earth System Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: Based on the Gauss weighted interpolation, in this paper, an improved project considering terrain factors has been brought forward, at the same time, with the correction project performed by Barnes, the corresponding error correction project and stepwise correction project have been given and the ground temperature field has been obtained. The analyzed results show that it is a concise, precise project and well fitted with terrain spatial interpolation project of temperature under complicated terrain conditions. For eliminating the effect on precipitation from terrains, the project that all the elements concerned with the interpolation are unified on the same height and the terrain characteristics are taken into account has been put forward, which also displays a better effect. Furthermore, the results analyzed spatially of the climatic elements under the different special resolution have been investigated, which denotes that the resolution of 4km is the most suitable for the research on the hydrologic processes of the Changjiang River drainage area and is prone to coupling with the regional climatic model.

Key Words: complicated terrain, climatic variables, spatial interpolation**CLC Number:** P4**Document Code:** A**Article ID:** 1000-7857(2004)08-0042-05

1 引言

一般而言,非气象站(格)点的气候变量值只能从其它邻近站(格)点推算,故推算方法及对地形等因子的处理对精度影响较大。许多研究考虑了取样点地理位置、各点间的地形关系,并用插值方法模拟气候变量的空间分布^[1-3],但一般的插值只考虑了采样点间的空间关系,而气候变量不仅与空间尺度有关,还与高度、坡向、坡面、植被等有关^[4]。因

此,复杂地形下的插值精度就不高。为此,卢其尧曾给出山区年、月平均温度推算新方法(卢其尧,1999);近年来,有人开始用 Kriging 法作气象(候)要素插值^[5],但该方法不能有效考虑气候变量与地形间的内在关系,且即使通过 GIS 平台用该方法作变量插值,仍不能反映局地气候的变化^[6]。其它常用的方法,如逐步订正法、拉格朗日插值法等,都因未很好考虑地形影响而有类似缺陷,这是因为复杂地形的影响常使插值难以反映真实气候要素场^[7]。为此,本文在高斯权重插值法的基础上,提出考虑地形因子的改进方案,并结合 Barnes 订正法(Barnes,1980),给出相应的误差订正方案和逐步订正方案^[8-10]用于温度场进行试验,以检验这一改进

* 本文获国家重点基础研究(973)项目(2001CB309404)、海外杰出青年合作项目(40128001/D05)、国家自然科学基金项目(49375248)、浙江省科研(C33)项目(2004C33082)联合资助。

方案的效果。

考虑到降水与地形间关系复杂,许多作者将海拔高度引入地理统计中^[11-13],有的则用回归方法建立降水与地形变量值如位置、坡度坡向的回归方程^[14-18],但这些方法用在山区所得到的精度有限。为此,最近,Marquie^[19]考虑了用多个地形变量如坡向、坡度等作为因子,求得降水空间分布与这些因子的回归方程。为提高精度,他还将研究区域的降水分为干季和湿季分别建立方程。但这种方法仍有一定的局限性。本文设计一种新方案,其原理是引入地形因子,将参与插值的要素统一到同一高度并考虑地形特点以消除地形影响^[9]。

研究区域位于秦岭南坡、汉江上游褒河流域,即陕西凤县东部—太白县西部—留坝县北部(33°40′~34°20′N,106°40′~107°30′E),流域面积2500km²,年均降水量500~700mm,流域内4条支流于江口镇汇入汉江;地势起伏,落差1000~1200m左右。

2 大流域温度场空间分布分析方案的改进

2.1 引入订正方案的高斯权重法^[20]

设 $F_0(i,j)$ 为所要获得的分析区域内网格点的要素值(这里为温度), (i,j) 为各点行、列的序号, $F(k)$ 为已有测站实测要素值(k 为测站序号),则插值公式为:

$$F_0(i,j) = \sum_{k=1}^k F(k)W_0(i,j,k) / \sum_{k=1}^k W_0(i,j,k) \quad (2.1)$$

$$W_0(i,j,k) = \exp(-r_{i,j,k}^2/4a) \quad (2.2)$$

式中, $r_{i,j,k}$ 为格点 (i,j) 到测站 k 的距离; K 为分析区和影响区半径内测站总数; a 为常数。设 $F_0(k)$ 为未用网格上反算出来的测站要素估计值,则 $F_D(k)$ 确定为:

$$F_D(k) = F(k) - F_0(k) \quad (2.3)$$

$$F_0(k) = \sum_{i=1}^{m+4,n+4} W(i,j,k)F_0(i,j) / \sum_{i=1}^{4,4} W(i,j,k) \quad (2.4)$$

$$W(i,j,k) = 1/r_{i,j,k}^2 \quad (2.5)$$

式中 (m,n) 为离测站 k 最近的格点序号。

设格点上修正的要素值为 $F_D(i,j)$,则

$$F_D(i,j) = \sum_{k=1}^k W_D(i,j,k)F_D(k) / \sum_{k=1}^k W_D(i,j,k) \quad (2.6)$$

$$W_D(i,j,k) = \exp(-r_{i,j,k}^2/4as) \quad (2.7)$$

其中, $0 < s < 1$ 。最后,经订正后格点上的要素值 $F(i,j)$ 为:

$$F(i,j) = F_0(i,j) + F_D(i,j) \quad (2.8)$$

这里, a 的取值决定波长响应宽度, s 的取值影响计算值向实际值的收敛速度。

2.2 改进方案 I——地形订正法

考虑到温度随高度、坡面、坡向和植被等而变化^[21],故这里设计将参与插值的要素统一调整到同一高度并考虑地形特点的修正方案。为此,加入地形因子 $[dem(i,j)-h(k)]\gamma_k$,这时的插值公式表示为:

$$F_0(i,j) = \sum_{k=1}^k W_0(i,j,k) \{ F(k) + [dem(i,j)-h(k)]\gamma_k \} / \sum_{k=1}^k W_0(i,j,k) \quad (2.9)$$

其中, $dem(i,j)$ 为格点 (i,j) 处的海拔高度, $h(k)$ 为测站 k 处的海拔高度, γ_k 为测站 k 处与坡向、坡面和植被等地形因素有关

的气温直减率。将反算出测站要素估计值的(2.4)式修改为:

$$F_0(k) = \sum_{i=1}^{m+4,n+4} W(i,j,k) \{ F_0(i,j) + [h(k)-dem(i,j)]\gamma_{(i,j)} \} / \sum_{i=1}^{4,4} W(i,j,k) \quad (2.10)$$

其中, $\gamma_{(i,j)}$ 为格点 (i,j) 处的气温直减率, $[h(k)-dem(i,j)]\gamma_{(i,j)}$ 为地形因子。原用于计算格点上修正的要素值的式(2.6)修改为:

$$F_D(i,j) = \sum_{k=1}^k W_D(i,j,k) \{ F_D(k) + [F_D(k)/F(k)] [dem(i,j)-h(k)]\gamma_k \} / \sum_{k=1}^k W_D(i,j,k) \quad (2.11)$$

其中, $F_D(k)=F(k)-F_0(k)$, $F_D(k)/F(k)$ 为地形因子对温度的影响由算法带来的误差的修正权重, $[F_D(k)/F(k)][dem(i,j)-h(k)]\gamma_k$ 为地形因子。格点上要素值的修正,实际上是修正由算法带来的误差。测站值与地形因子在(2.11)式中属同一和式中的两项,因此,由算法带来的误差影响是一致的。为简便起见,取它们相等的相对误差进行订正,故(2.11)式中地形因子对温度的影响的误差以温度的相对误差为权重进行修正。

2.3 改进方案 II——剩余误差订正法

为进一步减小估计误差,本文用逐步订正法,给出与以上改进方案相应的剩余误差订正方案。用改进的高斯权重法计算出格点上的要素值 $F(i,j)$,再次计算测站估计值误差:

$$F'_D(k) = F(k) - F'_0(k) \quad (2.12)$$

$$F'_0(k) = \sum_{i=1}^{m+4,n+4} W(i,j,k) \{ F_0(i,j) + [h(k)-dem(i,j)]\gamma_{(i,j)} \} / \sum_{i=1}^{4,4} W(i,j,k) \quad (2.13)$$

其中, $[h(k)-dem(i,j)]\gamma_{(i,j)}$ 为地形因子, $F'_0(k)$ 为用网格点上的订正后的要素值 $F(i,j)$ 反算出来的测站要素估计值。再利用 $F'_D(k)$ 求出格点修正要素值 $F'_D(i,j)$,即:

$$F'_D(i,j) = \sum_{k=1}^k W_D(i,j,k) \{ F'_D(k) + [F'_D(k)/F(k)] [dem(i,j)-h(k)]\gamma_k \} / \sum_{k=1}^k W_D(i,j,k) \quad (2.14)$$

其中, $[F'_D(k)/F(k)] [dem(i,j)-h(k)]\gamma_k$ 为地形因子,为修正权重。再次订正后格点上的要素值为:

$$F'(i,j) = F(i,j) + F'_D(i,j) \quad (2.15)$$

用 $F'(i,j)$ 替换 $F(i,j)$,直到误差达到最小为止。

2.4 改进方案在大流域温度场空间分布分析中的应用

将2001年5月1日的测站数据,分别用高斯权重插值法、高斯权重插值法经逐步误差订正和改进的高斯权重插值法经逐步误差订正,得到分辨率为1km的长江中上游温度空间分布,结果如图1所示。

图1a显示出长江流域温度空间分布的基本趋势,即自上游到中游温度逐渐增高,高原上温度最低。在高原东侧,温度的分布表现为随高度增加而降低的现象,具有典型的垂直分布特点,特别是在高原边缘地面温度变化剧烈,这与实际状况相一致。

由于温度空间插值总存在误差,为将空间插值的误差降低到最小程度,再对温度的插值误差进行多次订正,直到计算误差小于任一小的值为止。图1b为经订正后的结果,由图可见,经订正后的温度表现出明显的区域性特点,如四川盆地、高原东侧。用这种方法得到的估计值的期望值(或估计值的均方误差)与原始值的期望值(或原始值的均方误

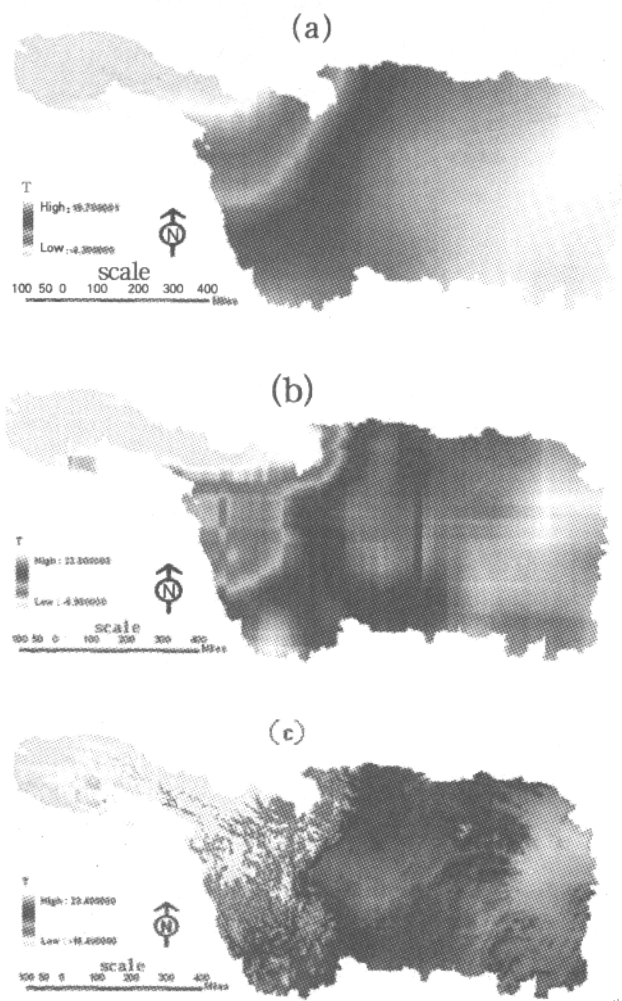


图1 1km分辨率条件下长江中上游区域温度空间分布
(a 高斯权重插值法;b 高斯权重插值法经逐步误差订正;
c 改进后的高斯权重插值法经逐步误差订正)

差)的比值最接近1, 测站估计值的平均绝对误差、测站估计值的平均误差的绝对值、插值平均误差平方的平方根与另外几种方法相比均达最小。

但即使采用多次订正误差的逐步插值方法, 也不能很好地反映温度的小地形效应, 为此, 用改进的高斯权重法插值经(2.14)式逐步订正得到温度场, 其测站估计值的平均绝对误差为0.43℃, 插值平均误差平方的平方根为0.56℃(详见图1c)。各测站估计值误差分布如图2所示。可以看到, 绝对误差在0.5℃以内的测站数占总数的67.2%, 绝对误差在1℃以内的测站数占总数的92.6%, 绝对误差在2℃以内的测站数占总数的99.5%。

从全年来看, 插值的平均误差为0, 温度平均绝对误差在0.8℃以内(可达0.43℃以下), 插值平均误差平方的均方根可达0.56℃, 插值后的测站温度期望值与插值前近乎相等), 插值后测站温度的均方差与插值前比值达99.84%以上。改进的温度插值方案计算的地面温度分布, 与长江流域的地形非常吻合, 其平均相对误差<0.2%, 平均绝对误差<0.4℃, 插值误差的均方根可达0.56, 插值后站点温度期望值与插值前的比值为1.00001~1.00099, 插值后的站点温度的均方差

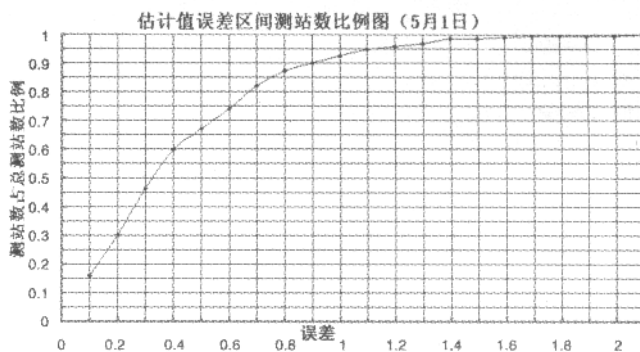


图2 各误差值区间内的测站个数占总测站个数的比例图
(图中纵坐标表示各误差值区间内的测站个数占总测站个数的比例, 横坐标表示误差值)

与插值前相比可信度达99%以上。

3 小流域降水气候要素的空间分析改进方案及其应用

3.1 小流域降水气候资料的空间分析改进方案

降水一般有对流性降水和大尺度平流降水, 前者空间分布不均匀, 插值可能造成实际极值的变化, 因而带来插值误差, 这一插值误差难以进行订正; 后者一般与下垫面类型关系不密切, 空间分布较均匀, 一般可采用空间插值法。插值的方法很多^[22-24], 考虑到降水受高度、坡面、坡向等多因素的影响, 故本文提出将参与插值的要素订正到同一高度并考虑地形特点以消除地形影响的方案:

$$F_0(i,j) = \sum_{k=1}^k W_0(i,j,k) \{F(k) + g(i,j,k)\} / \sum_{k=1}^k W_0(i,j,k) \quad (3.1)$$

其中K是对格点(i,j)有显著影响的站点数, 其中:

$$g(i,j,k) = a_1 \Delta dh(i,j,k) + a_2 \Delta dh(i,j,k)^2 + a_3 \Delta dh(i,j,k)^3 + b_1 \text{slop}(i,j) + b_2 \text{slop}(i,j)^2 + b_3 \text{slop}(i,j)^3 + c_1 \text{dsou}(i,j) + c_2 \text{dsou}(i,j)^2 + c_3 \text{dsou}(i,j)^3 \quad (3.2)$$

上式中, $\Delta dh(i,j,k) = \text{dem}(i,j) - h(k)$ 为地形因子, $\text{dem}(i,j)$ 为格点(i,j)处的海拔高度, $h(k)$ 为测站k处的海拔高度。由格点的插值, 计算测站要素值为:

$$F_0(k) = \sum_{i,j=1}^{m+4,n+4} W(i,j,k) \{F_0(i,j) + g(i,j,k)\} / \sum_{i,j=1}^{4,4} W(i,j,k) \quad (3.3)$$

格点上要素值的修订值为:

$$F_D(i,j) = \sum_{k=1}^k W_D(i,j,k) \{F_D(k) + [F_D(k)/F(k)]g(i,j,k)\} / \sum_{k=1}^k W_D(i,j,k) \quad (3.4)$$

其中, $F_D(k) = F(k) - F_0(k)$, $[F_D(k)/F(k)]g(i,j,k)$ 为新的地形因子, $F_D(k)/F(k)$ 为地形因子对降水的影响由于算法带来的误差的修正权重。在引入新的地形因子基础上, 与分析温度空间分布的修正方案相似, 为了减小误差, 使估计值与测量值更接近, 本文利用逐步订正法给出剩余误差订正方案。

利用改进的高斯权重法计算出的格点上的要素值 $F(i,j)$ 再次计算测站估计值误差:

$$F'_D(k) = F(k) - F'_0(k) \quad (3.5)$$

$$F'_0(k) = \sum_{i,j=1}^{m+4,n+4} W(i,j,k) \{F(i,j) + g(i,j,k)\} / \sum_{i,j=1}^{4,4} W(i,j,k) \quad (3.6)$$

其中, $F'_0(k)$ 为用网格点上的订正后的要素值 $F(i,j)$ 反算出来的测站要素估计值, $g(i,j,k)$ 为地形因子。再利用 $F'_D(k)$ 求出格点修正要素值 $F'_D(i,j)$, 即:

$$F'_D(i,j) = \sum_{k=1}^k W_D(i,j,k) \{ F'_D(k) + [F'_D(k)/F(k)] g(i,j,k) \} / \sum_{k=1}^k W_D(i,j,k) \quad (3.7)$$

其中, 这时地形因子调整为 $[F'_D(k)/F(k)] g(i,j,k)$, $F'_D(k)/F(k)$ 为修正权重。再次订正后格点上的要素值为:

$$F'(i,j) = F(i,j) + F'_D(i,j) \quad (3.8)$$

用 $F'(i,j)$ 替换 $F(i,j)$, 直到误差达最小为止。

3.2 降水气候要素空间分析结果与分析

图 3 是不同降水空间分布形态的插值结果。图 3a 是 1997 年 9 月 11 日的一次降水过程, 降水自南而北逐渐增加, 插值方案比较好地表现了降水的空间分布趋势, 同时也表现出了降水受小地形影响而产生的区域差异。从图中也可以看到, 降水带主要集中在北部山区, 区域降水随海拔高度的增高而增加。

图 3b 是完全不同于图 3a 的降水空间分布形态。结果表明, 本插值方案既能计算大尺度的空间降水, 也能考虑到由于地形的原因而产生的局地降水的差异。事实上, 对一天的降水插值比一年的降水空间的插值更容易产生较大的误差, 从 1997 年和 2001 年不同年降水量分布的插值, 可看到年降水总量的插值效果比日降水量的插值效果更好 (图略)。图 3c 为 1997 年降水呈现出从南向北减少的趋势, 降水量主要集中在南部山区地势较低的地区, 而北部的降水较少, 降水沿着河道向北伸展, 降水随高度的增高而减少; 但在地势最高的太白山上, 降水并不是最低的, 也就是说, 降水并不是随高度的增加而线性减少。2001 年降水总量的分布与 1997 年的分布形态差异较大, 主要表现在南北降水量差异不大, 所不同的是地势较高的地方降水量较少。可见方案对降水空间分布不均匀性有较好的表现能力, 因此是一种较理想的降水插值修正方案。

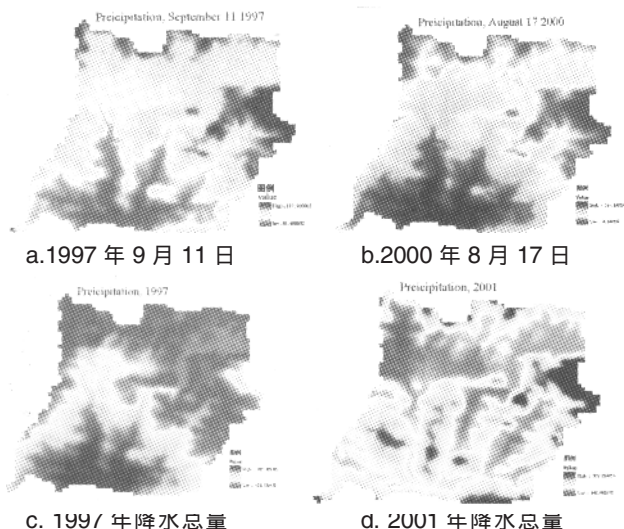


图 3 渭河流域小区域起伏地形 (1km 分辨率) 条件下降水的空间插值

应性, 即插值的效果不依赖于插值的分辨率。实际工作中需要对各种不同分辨率的气候变量进行插值, 为检验本插值方案对低分辨率气候变量的插值效果, 需要对不同分辨率条件下的插值效果进行分析^[25]。

图 4 为秦岭南坡褒河流域 4km 分辨率地形条件下气候要素空间插值的效果。图 4a、b 分别是日最低温度和 10 年平均温度的空间插值, 温度最高位于南部的河谷地带, 并顺着河谷向北逐渐降低, 北部高山区和太白山区, 温度达到最低。最高和最低温度的空间分布趋势相一致, 这符合山区温度随地形变化的特点。图 4c 是风速的插值结果, 图中显示在南北部山区风速较大, 而在山谷地区风速较小, 这与海拔较低的地方风速较小、海拔较高的地方风速较大的近地层风速随高度变化规律一致。图 4d 是 10 年平均降水插值空间分布, 年降水量由西南向北逐渐增加, 同时东北部太白山上也较多; 多年平均降水量的分布没有明显的地理特点, 即降水量与地形的关系, 并不像日降水量那样显著受到地形的影响, 说明该区域主要受大尺度降水影响, 这与实际相一致; 此外, 插值的结果也表示, 降水的空间变化仍然受到地形的影响, 特别是由于北部地形高, 潮湿气流受到抬升, 易形成降水。

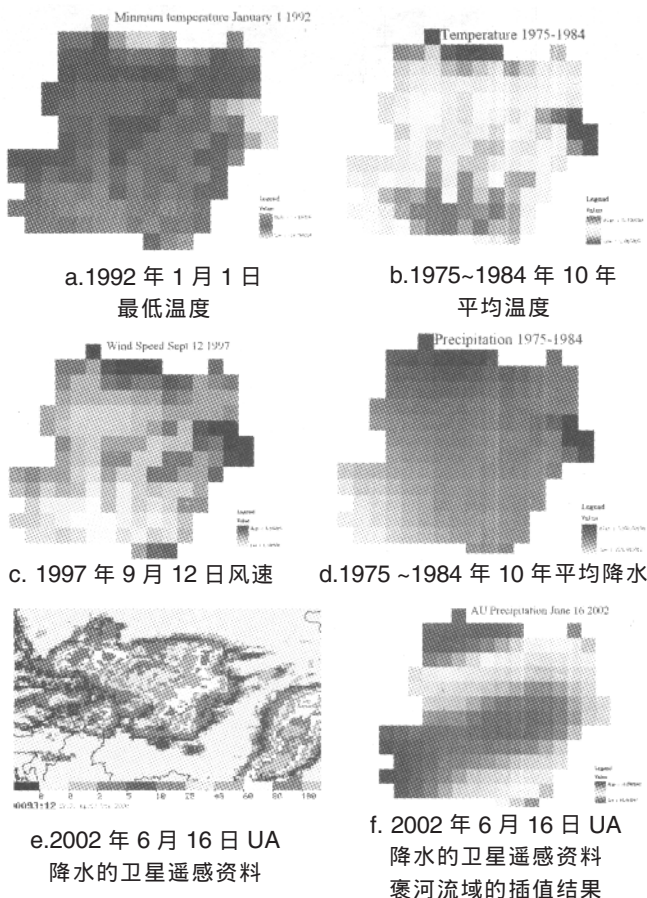


图 4 褒河流域 4km 分辨率地形条件下气候要素空间插值的效果

图 4e 是 2002 年 6 月 16 日 Arizona 大学利用卫星云图反演的降水资料, 其空间分辨率为 25km。利用本插值方案, 将遥感反演的降水资料插值到研究的区域^[26], 得到图 4f。由图可见, 遥感云图反演得到的结果表明在研究区域有一个西南-东北向的降水带, 这与气象站点降水资料的空间插值

4 不同空间分辨率条件下气候变量的空间分析

一个好的插值方案对不同的空间分辨率应有较好的适

有所差别,一般由地面观测站点获得的降水资料无法表示这种空间特征,显示出遥感反演的降水比站点的降水有更高的空间分辨能力。

5 结语

气候资料站(格)点空间分析(插值计算)是研究陆面水文过程的基础。以往一些研究所采用的方法所得到的格点上的气候变量值误差较大,特别是降水的空间插值一直没有解决好。本文以高斯权重插值法为基础,提出考虑地形因子的改进方案,同时结合 Barnes 法,给出相应的误差订正方案和逐步订正方案,得到大尺度的地面温度场。分析表明,这是一种简明、精度较高且与地形吻合较好的复杂地形条件下的温度空间插值方案。

同时,本文提出一个将参与插值的要素统一到同一高度并考虑地形特点以消除地形影响的降水空间分析修正方案,也取得了较好的效果。这一方案考虑了大尺度降水过程,根据降水资料的空间分布的特点,采用逐步进行误差修正的方法,能够有效地提高降水插值的精度。由于本订正方案考虑了地形的高度、地形的坡度和坡向等多种因素,因此,对于受区域地形气候影响明显、由地形和对流性天气产生的降水,虽然表现出具有显著的空间分布不均匀性,但本方案也能有效地改善区域降水插值效果。另外,本研究也采用了 Arizona 大学用卫星遥感资料反演的 25km 分辨率的降水资料,因而得到的气候变量空间插值结果是可靠的。

分析还发现,研究长江支流水文过程采用 4km 分辨率为宜。当分辨率低于 4km 时,不能准确反映地形、地面植被等地面信息;高于 4km 时,由于水文和气象实测资料空间分辨率较低,当用于空间插值时,很难准确反映复杂地形条件下山区小气候的真实状况。

参考文献(Reference)

- [1] Liang X, Xie Z. A new surface runoff parameterization with subgrid-scale soil heterogeneity for land surface models [J]. *Advance in Water Resources*, 2001, 24: 1 173~1 193
- [2] 周锁铨,吴息,张翠.地表径流方案对区域气候模式的作用及影响[A].中国气象学会气候学委员会.新世纪气象科技创新与大气科学发展——气候系统与气候变化 [M].北京:气象出版社,2003. 218~223
- [3] 魏和林,符淙斌.下垫面非均匀性的模拟[J].气候与环境研究, 1997, 2(2): 107~114
- [4] Kurtzman D, Kadmon R. Mapping of temperature variables in Israel: a comparison of different interpolation methods [J]. *Clim. Res.*, 1999, 13: 33~43
- [5] Oliver M A, Webster R. Kriging: a method of interpolation for geographical information systems [J]. *Int J. Geogr. Inform. Syst.*, 1990, 4(3): 313~332
- [6] Ninyerola M, Pons X, Roure J M. A methodological approach of climatological modeling of air temperature and precipitation through GIS techniques[J]. *Int. J. Climatol.* 2000, 20(14): 1 823~1 841
- [7] Ninyerola M, Pons X, Roure J M. A methodological approach of climatological modeling of air temperature and precipitation through GIS techniques[J]. *Int. J. Climatol.* 2000, 20(14): 1 823~1 841
- [8] 周锁铨,缪启龙.日照百分率的小网格分析方法[J].气象科学, 1993, 16(3)
- [9] 周锁铨,缪启龙.山区降水资源的小网格分析方法[A].见:气候资源开发利用[M].北京:气象出版社,1995
- [10] 周锁铨,缪启龙.山区总辐射的小网格分析方法[J].低纬高原天气,1993,6
- [11] Martínez-Cob A. Multivariate geostatistical analysis of evapotranspiration and precipitation in mountainous terrain [J]. *J Hydrol.* 1996, 174(1-2): 19~35
- [12] Prodhomme C, Duncan W R. Mapping extreme rainfall in a mountainous region using geostatistical techniques: a case study in Scotland[J]. *Int. J. Climatol.* 1999, 19(12): 1 337~1 356
- [13] Goovaerts P. Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall [J]. *J. Hydrol.* 2000, 228: 113~129
- [14] Basist A, Bell G D, Meentenmeyer V. Statistical relationships between topography and precipitation patterns[J]. *J. Clim.* 1994, 7(9): 1 305~1 315
- [15] Goodale C L, Alber J D, Ollinger S V. Mapping monthly precipitation, temperature and solar radiation for Ireland with polynomial regression and digital elevation model [J]. *Clim. Res.* 1998, 10: 35~49
- [16] Ninyerola M, Pons X, Roure J M. A methodological approach of climatological modeling of air temperature and precipitation through GIS techniques[J]. *Int. J. Climatol.* 2000, 20(14): 1 823~1 841
- [17] Wotling G, Bouvier Ch, Danloux J, Fritsch J M. Regionalization of extreme precipitation distribution using the principal components of the topographical environment [J]. *J. Hydrol.* 2000, 233: 86~101
- [18] Weisse A K, Bois P. Topographic effects on statistical characteristics of heavy rainfall and mapping in the French Alps [J]. *J. Appl. Meteorol.* 2001, 40(4): 720~740
- [19] Marquínez J, Lastra J, García P. Estimation models for precipitation in mountainous regions: the use of GIS and multivariate analysis[J]. *J. Hydrol.* 2003, 270: 1~11
- [20] Suoquan Zhou, Cui Zhang, Xi Wu. Coupling Experiment of Regional Climate Model with River Flow Routing Model [A]. International conference of GIS and remote sensing in hydrology water resources and environment. Yichang City, China. Sept. 2003
- [21] 周锁铨,代刊,张翠.陆面过程模式的改进及其检验[J].气象学报, 2003, 3(61): 275~290
- [22] 王守荣,黄荣辉,丁一汇等.分布式水文-土壤-植被模式的改进及气候水文 Off-line 模拟试验 [J].气象学报, 2002, 60(3): 290~290
- [23] 周秀骥等.长江三角洲低层大气与生态系统相互作用研究 [M].北京:气象出版社,2004. 1~47
- [24] 董敏主编.国家气候中心大气环流模式——基本原理和使用说明[M].北京:气象出版社,2001. 99~132
- [25] Suoquan Z. Simulated Study of land surface energy and hydrology balance[A]. International symposium of climate change. Beijing, China. April, 2003. 271~272
- [26] 布和敖斯尔,刘纪远等.遥感在我国资源与环境变化研究中的作用[J].科技导报,1997,110(8): 14~18

(责任编辑 苏青)