

张丹,邱新法,曾燕. 2011. 浙江省高分辨率气温空间分布图的计算与绘制[J]. 大气科学学报,34(2):215-224.

Zhang Dan, Qiu Xin-fa, Zeng Yan. 2011. Calculation and mapping of high resolution spatial distribution of monthly air temperature of Zhejiang Province[J]. Trans Atmos Sci,34(2):215-224.

## 浙江省高分辨率气温空间分布图的计算与绘制

张丹<sup>1</sup>,邱新法<sup>2</sup>,曾燕<sup>3</sup>

(1. 南京信息工程大学 气象灾害省部共建教育部重点实验室,江苏 南京 210044;2. 南京信息工程大学 遥感学院,江苏 南京 210044;  
3. 江苏省气象科学研究所,江苏 南京 210008)

**摘要:**以浙江省及周边74个气象站1961—2000年常规气温观测资料为基础,利用月平均气温物理经验统计模型,完成了浙江省100 m×100 m分辨率月平均气温、月平均最高气温、月平均最低气温空间分布的制图,分析了拟合气温的局地分布规律,并从多个角度对拟合结果进行了验证。结果表明,月平均气温的绝对误差平均值为0.09~0.59℃,平均最高气温误差为0.09~0.80℃,平均最低气温误差为0.10~0.58℃。拟合结果较好地反映了浙江山地月气温的宏观分布趋势和局地分布特征,为浙江山地气候资源的合理开发与利用提供了科学依据。

**关键词:**浙江省;气温;栅格化;高分辨率

**中图分类号:**P967 **文献标识码:**A **文章编号:**1674-7097(2011)02-0215-10

## Calculation and mapping of high resolution spatial distribution of monthly air temperature of Zhejiang Province

ZHANG Dan<sup>1</sup>, QIU Xin-fa<sup>2</sup>, ZENG Yan<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, NUIST, Nanjing 210044, China;  
2. School of Remote Sensing, NUIST, Nanjing 210044, China; 3. Jiangsu Institute of Meteorological Sciences, Nanjing 210008, China)

**Abstract:** Based on the temperature data of 74 conventional meteorological stations in Zhejiang province and the surrounding from 1961 to 2000, using the physical-experience model of monthly air temperature, we generated spatial distribution maps at a resolution of 100 m×100 m for the monthly mean, the monthly mean maximum and minimum air temperatures of Zhejiang province. The local distribution characteristics of fitting temperature are analyzed, and the simulated results are validated from several angles. Results show that the mean absolute error are 0.09—0.59℃ for monthly mean air temperature, 0.09—0.80℃ for monthly mean maximum temperature, and 0.10—0.58℃ for monthly mean minimum temperature, respectively. The simulation can reflect to a considerable extent for the macro and local distribution characteristics of air temperature, which makes a good foundation for the reasonable development and utilization of climate resource over the rugged terrain of Zhejiang province.

**Key words:** Zhejiang province; air temperature; gridding; high resolution

## 0 引言

气温是反映地区热量资源最主要的指标,气温

的平均状况、极端情况、温差大小等对农业种植业规划与布局、生态环境治理都有相当重要的意义(缪启龙等,1998;刘宣飞和朱乾根,1998)。由于气象

收稿日期:2010-03-25;改回日期:2010-06-02

基金项目:科技部公益性行业科研专项(GYHY200806002);中国气象局气象新技术推广重点项目(CMATG2006Z10);江苏省2008年度普通高校研究生科研创新计划(CX08B\_021Z)

作者简介:张丹(1985—),女,河南周口人,硕士,研究方向为3S技术在气象中的应用,nuistgiszd@163.com.

站多位于水平开阔地段,且数量有限,如何利用有限的气象站观测资料,研究气温的宏观分布规律,进而推算复杂地形下的气温空间分布,一直是气候学等领域的研究热点(Aikawa et al., 2007; Benavides et al., 2007)。

山区地形复杂多样,气候资源空间分布复杂。20 世纪 80 年代初,许多学者提出了以数理统计技术(李军和黄敬峰,2004)为主的山地气象要素推算方法,常用的有分离综合法(傅抱璞,1984)、统计回归法(卢其尧,1988)、回归余项法(沈国权,1984)、物象物候法(张福春,1984)等。计算模型中往往包括海拔、纬度、经度等宏观地理因子和坡度、坡向等局地地形因子(朱华忠等,2003),受当时的计算条件和数据获取手段等方面的影响,存在计算烦琐、工作量大、精度不高、空间分布制图困难等问题。20 世纪 90 年代以来,随着地理信息系统、遥感等空间信息技术的迅速发展和 DEM 数据的推广应用(Burrough, 2001; Luna et al., 2006),为气象要素的空间化提供了新的技术手段(张洪亮等,2002; 何洪林等,2004; Attorre et al., 2007),克服了传统模拟方法中小地形因子提取困难、精度不高、空间制图困难等难题,从而逐步成为气象要素空间化研究的重要手段。近年来国内外有关方面的研究也得到了迅速的发展,推算的气象要素由年平均气温到界限温度下的有效积温,考虑的影响因子从宏观的海拔、经度、纬度到局地的坡度、坡向、遮蔽度等,研究区域从小范围内的农业气候区划到全国陆地生态信息空间化研究(李军等,2006; 徐宗学等,2007; 潘文卓等,2008; 司鹏等,2010; 潘敖大等,2010)。张洪亮等(2002)提出利用平地与山地的辐射强度差异对山区气温空间小尺度模拟的修正模型,陈晓峰等(1998)提出引入太阳直接辐射对气温进行订正的地理统计模型,程路和邱新法(2006)通过考虑实际山地中天文辐射与水平面天文辐射的差异建立山地气温空间分布模型,为探索局地地形对气温影响的物理机理做出了有益的尝试。

浙江省位于我国东部沿海,属亚热带季风气候区,地形复杂,整个地势由西南向东北倾斜,山地和丘陵占 70.4%,平原和盆地占 23.2%,河流和湖泊占 6.4%,有“七山一水两分田”之说。优良的自然生态环境和独特的山区气候资源,使茶叶、柑桔等经济作物的产量位于全国前列,在当地社会经济中起着重要作用。因此,研究浙江省山地热量资源的精细空间分布,是最大限度地发掘其自然生产潜力,充

分发挥山地气候资源优势的重要基础。

以 100 m × 100 m 分辨率的 DEM 数据作为地形的综合反映,利用综合考虑海拔、总辐射和长波有效辐射影响的月平均气温物理经验统计模型,结合浙江山地总辐射分布式模拟结果,实现了浙江省 100 m × 100 m 分辨率月平均气温和月平均最高(最低)气温空间分布的制图。

## 1 资料

浙江省及周边 74 个常规气象站 1961—2000 年、2005 年月平均气温、月平均最高(最低)气温、月平均日照百分率、月平均相对湿度;浙江省 3 个气象站 1961—2000 年逐月总辐射量;浙西南山区丽水市 12 个气象哨 1985—1988 年逐年月平均气温野外考察资料;浙江省 100 m × 100 m 分辨率 DEM 数据。

## 2 浙江月平均气温空间分布拟合

### 2.1 月平均气温影响因素分析

影响气温的因素众多,其中,海拔、太阳短波辐射、地表长波辐射是影响地面气温的主要物理因子。图 1 给出了浙江省月平均气温与相关物理因子的相关关系。

图 1a 给出了浙江省及周边 74 个常规气象站 1961—2000 年 7 月气候平均气温与海拔高度的相关关系。可见,在气象站海拔高差较大的情况下,气温随海拔线性递减的规律显著。

投射到地表的太阳辐射量的多少直接影响气温的高低,太阳辐射强,气温高,反之则低。图 1b 给出了浙江省内仅有的 3 个总辐射观测站(杭州站、椒江站与慈溪站)1961—2000 年 7 月平均最高气温与日总辐射量的相关关系,表明月平均气温与日总辐射量之间具有良好的正相关关系。

有效辐射是影响气温的另一重要物理因子。在晴朗、干燥的夜晚,由于地表强烈的辐射冷却作用,气温低,昼夜温差大,这在冬季表现得尤为明显。由于有效辐射为非常规气象资料,采用有效辐射拟合中常用的日照百分率和相对湿度两个要素(曾燕等,2007),考察有效辐射对月平均气温的影响。图 1c 给出了浙江省 3 月平均最低气温与日照百分率的相关关系,可见它们呈明显的负相关关系。图 1d 给出了浙江省 11 月平均最低气温与相对湿度的相关关系,可见它们也呈现出显著的负相关关系,这在空气湿润的沿海和近水体地带,更加不容忽视。上述分析表明,有效辐射对气温的作用也非常重要。

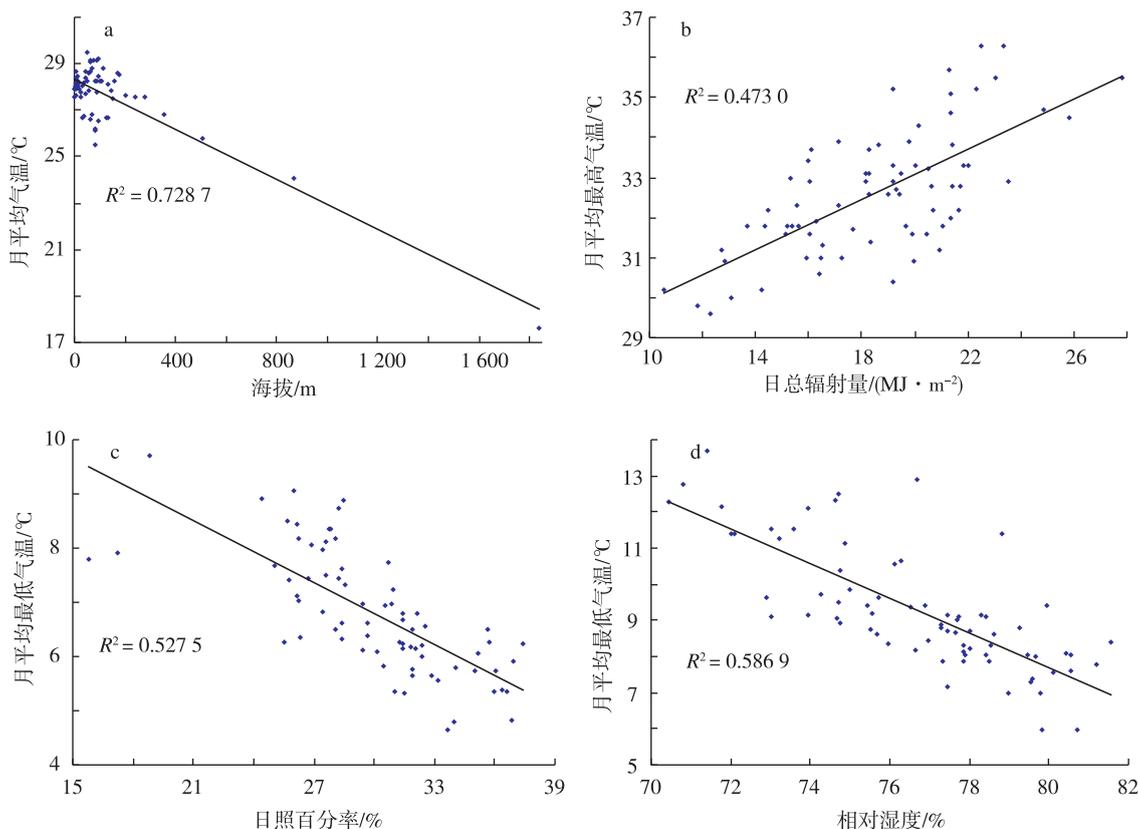


图1 浙江省月平均气温与相关物理因子的相关关系 a. 平均气温与海拔;b. 平均最高气温与日总辐射;c. 平均最低气温与日照百分率;d. 平均最低气温与相对湿度

Fig. 1 Correlations between monthly mean air temperature and related meteorological elements a. correlation between monthly mean air temperature and altitude;b. correlation between monthly mean maximum temperature and daily global radiation;c. correlation between monthly mean minimum temperature and percentage of sunshine;d. correlation between monthly mean minimum temperature and relative humidity

## 2.2 月平均气温模型的建立

从上述分析可以看出,海拔高度、总辐射、长波有效辐射对区域气温的形成具有显著影响。受资料和技术手段的限制,传统气温拟合往往不能充分考虑地形因素的影响。实际地形是相对起伏的(尤其在山区),可将其称为复杂地形。为此,采用如下气温拟合模型(Zeng et al., 2009):

$$T_{\alpha\beta} = a + bH_{\alpha\beta} + cQ_{\alpha\beta} + d(1-s)(1+w \cdot h) + \Delta T. \quad (1)$$

式中: $T_{\alpha\beta}$ 为复杂地形下月平均气温( $^{\circ}\text{C}$ ),“复杂地形”的意义在于模型考虑了地形因素的影响; $H_{\alpha\beta}$ 为海拔高度(m); $Q_{\alpha\beta}$ 为复杂地形下月平均日总辐射量( $\text{MJ}/\text{m}^2$ ); $s$ 、 $h$ 分别为月平均日照百分率和相对湿度,二者组合成一项,代表长波有效辐射影响; $a$ 为回归常数项; $b$ 为气温随海拔的递减率; $c$ 为气温随总辐射的递增率; $d$ 代表有效辐射对气温的影响强度; $w$ 为经验系数; $\Delta T$ 为其他因素对气温影响的综合余项。

(1)式中 $Q_{\alpha\beta}$ 为非常规气象观测资料,需要通过模型计算获得,具体计算方法见参考文献(曾燕等, 2005;曾燕等, 2008)。在不考虑 $\Delta T$ 的情况下,根据74个站1961—2000年逐月 $Q_{\alpha\beta}$ 计算结果,结合其气温、日照百分率、相对湿度和海拔高度资料,采用统计方法拟合获得(1)式中的经验系数 $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $w$ 。表1列出了各项统计参数,其中MABE(mean absolute bias error)为绝对误差平均值,代表了综合余项 $\Delta T$ 的绝对平均值,其数值不超过 $1.9^{\circ}\text{C}$ ,大部分在 $1.0^{\circ}\text{C}$ 以内,因此(1)式进行气温拟合所选取的影响因子是成功的。尽管综合余项 $\Delta T$ 数值并不大,但对气温拟合而言,仍是不容忽视的。

以 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 分辨率的栅格为计算单元,DEM数据作为地形的综合反应,获取栅格单元的海拔高度 $H_{\alpha\beta}$ ;运用ArcGIS,采用IDW插值方法,将74个站日照百分率 $s$ 和相对湿度 $h$ 观测资料进行空间内插获得其栅格分布;根据74个站气温拟合余项,采用IDW插值方法获得综合余项 $\Delta T$ 的栅格分布;

运用分布式总辐射模型计算获得的  $Q_{\text{a}\beta}$  的栅格分布 (曾燕等, 2005; 曾燕等, 2008); 结合表 1 给出经验

系数  $a, b, c, d, w$ , 即可获得  $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$  分辨率的浙江省气温的空间分布。

表 1 气温拟合模型统计参数表

Table 1 Fitted empirical coefficients for monthly temperatures' simulation model

	月份	$R$	$a$	$b$	$c$	$d$	$w$	MABE
月平均气温	1月	0.776 3	-59.704 5	-0.003 7	3.980 1	63.626 9	-0.168 0	1.003 9
	2月	0.623 4	-71.296 7	-0.003 7	4.203 8	55.767 5	0.149 5	1.401 6
	3月	0.612 9	-72.247 4	-0.003 1	3.464 2	74.946 4	-0.089 0	1.158 5
	4月	0.535 5	-54.190 3	-0.003 5	2.536 8	74.362 3	-0.259 9	1.210 4
	5月	0.653 7	8.029 1	-0.003 6	0.401 1	31.390 2	-0.806 1	1.080 5
	6月	0.772 7	1.511 9	-0.004 2	0.798 6	39.144 6	-0.659 9	0.846 6
	7月	0.938 6	28.749 0	-0.004 2	0.026 3	27.828 7	-1.324 8	0.504 9
	8月	0.942 4	25.686 3	-0.004 7	0.114 7	25.869 4	-1.205 0	0.438 3
	9月	0.773 9	3.485 1	-0.005 1	0.863 0	21.728 4	-0.335 0	0.942 0
	10月	0.781 5	-18.874 5	-0.005 7	1.776 0	40.262 4	-0.256 3	0.896 2
	11月	0.713 7	-19.361 0	-0.004 6	1.887 2	25.685 4	0.083 0	1.187 9
	12月	0.734 6	-45.447 2	-0.004 1	3.424 7	46.411 1	-0.007 5	1.217 1
月平均最高气温	1月	0.750 4	-65.434 8	-0.003 7	4.882 0	63.116 1	-0.052 8	1.193 5
	2月	0.608 4	-78.427 4	-0.003 7	5.045 2	59.311 6	0.197 8	1.805 8
	3月	0.555 7	-76.994 8	-0.003 0	3.958 0	86.677 9	-0.157 0	1.612 4
	4月	0.502 8	-53.878 3	-0.003 5	2.731 6	90.077 9	-0.389 8	1.639 5
	5月	0.669 1	22.573 0	-0.003 6	0.067 9	37.511 1	-1.144 1	1.433 0
	6月	0.760 4	2.405 6	-0.004 2	0.909 1	59.987 7	-0.795 9	1.139 9
	7月	0.903 0	26.170 4	-0.003 5	0.257 8	61.224 7	-1.152 0	0.874 8
	8月	0.885 1	7.789 7	-0.004 2	0.916 4	71.902 3	-0.906 0	0.857 7
	9月	0.721 0	6.793 0	-0.004 7	0.925 4	33.085 8	-0.633 0	1.175 6
	10月	0.816 1	-27.978 5	-0.006 1	2.596 2	41.551 5	-0.042 8	0.890 1
	11月	0.710 9	-14.761 2	-0.004 6	2.099 8	15.065 2	0.792 9	1.191 1
	12月	0.748 4	-48.115 6	-0.004 3	4.265 0	36.501 1	0.402 2	1.260 6
月平均最低气温	1月	0.756 2	-58.304 2	-0.003 8	3.513 2	63.547 1	-0.201 2	1.178 0
	2月	0.654 5	-70.742 4	-0.003 8	3.849 6	54.554 1	0.157 8	1.342 9
	3月	0.666 2	-75.318 6	-0.003 3	3.354 4	71.071 8	-0.005 5	1.084 3
	4月	0.602 9	-65.908 6	-0.003 6	2.792 6	71.060 2	-0.084 3	1.082 4
	5月	0.606 6	-3.117 7	-0.003 6	0.637 9	24.233 1	-0.345 8	1.006 5
	6月	0.727 1	0.229 2	-0.004 2	0.717 4	21.992 7	-0.305 3	0.825 8
	7月	0.886 5	25.980 1	-0.004 6	0	4.692 8	-1.929 7	0.565 9
	8月	0.876 0	25.305 0	-0.005 1	0	1.681 6	-2.434 1	0.597 5
	9月	0.682 0	-0.736 9	-0.005 1	0.867 5	14.678 3	0.229 2	1.139 9
	10月	0.668 2	-16.826 0	-0.005 3	1.371 4	42.433 8	-0.366 5	1.273 0
	11月	0.658 3	-24.757 6	-0.004 5	1.832 3	32.781 1	-0.064 8	1.521 7
	12月	0.710 6	-46.551 9	-0.003 9	3.045 6	52.276 4	-0.133 0	1.486 6

注:  $R$  为复相关系数; MABE 为绝对误差平均值.

### 2.3 浙江气温空间分布

根据浙江省 100 m × 100 m 分辨率的 1961—2000 年逐月平均气温、平均最高(最低)气温拟合结

果,获得了浙江省 40 a 气候平均的 1—12 月平均气温、平均最高(最低)气温的空间分布,并根据气候平均图统计获得表 2。

表 2 浙江省拟合气温的统计情况

Table 2 The statistics of simulated temperature in Zhejiang province

	平均气温				平均最高气温				平均最低气温			
	全省最高	全省最低	全省平均	标准差	全省最高	全省最低	全省平均	标准差	全省最高	全省最低	全省平均	标准差
1 月	18.99	-19.40	2.69	4.37	25.73	-20.08	6.85	5.22	14.74	-20.65	-0.41	3.97
2 月	21.98	-23.29	4.14	4.13	30.28	-24.12	8.39	4.84	16.64	-24.73	0.87	3.86
3 月	13.91	-14.34	7.77	2.48	18.93	-13.03	12.12	2.71	11.52	-16.97	4.32	2.52
4 月	17.94	-4.41	13.75	1.97	23.74	-0.78	18.60	2.04	13.79	-10.19	9.69	2.19
5 月	22.43	14.75	19.77	1.03	27.69	20.11	24.79	1.10	18.42	10.10	15.84	1.14
6 月	25.55	16.00	22.83	1.34	30.41	20.32	27.03	1.31	22.33	12.66	19.61	1.40
7 月	29.51	20.58	27.06	1.23	34.94	26.93	31.93	1.12	25.73	15.44	23.25	1.51
8 月	29.24	19.29	26.54	1.40	34.54	20.99	30.98	1.50	25.70	14.44	22.91	1.64
9 月	26.81	12.69	22.13	1.77	32.35	17.91	26.78	1.55	23.51	8.48	18.65	1.93
10 月	24.84	-1.62	16.52	2.77	30.27	-3.13	21.00	3.49	21.31	-2.30	12.97	2.46
11 月	22.08	-4.58	11.11	3.00	27.40	-0.12	16.19	3.10	19.44	-8.36	7.20	3.04
12 月	24.42	-17.92	4.96	5.09	34.24	-17.87	9.85	6.17	19.06	-19.70	1.23	4.63

图 2 给出了 1 月、4 月、7 月、10 月浙江 40 a 气候平均气温的空间分布(月平均最高、最低气温空间分布图略)。1 月(图 2a),浙江平均气温为 -19.4 ~ 19.0 °C,全省平均为 2.7 °C,由南至北,气温的纬向宏观分布特征明显,局地地形对气温影响显著,山区气温空间分异明显,东南沿海地区受水体调节作用,气温略高于内地。由表 2 中气温标准差的逐月对比看出,以 12 月、1 月、2 月标准差为最大,表明冬季全省气温的空间差异是最大的。4 月(图 2b),浙江平均气温在 -4.4 ~ 17.9 °C 之间,全省平均为 13.8 °C,除部分高海拔山区外,大部分地区气温在 10 °C 以上,与 1 月比较可知,内陆增温明显,气温呈由西南向东北递减趋势。7 月(图 2c),浙江平均气温在 20.6 ~ 29.5 °C 之间,全省平均为 27.1 °C,海拔高度成为影响气温分布的主导因子,全省气温随地势分布规律明显,受海洋水体影响,东南沿海地区气温比内陆略低。结合表 2 可以看出,6 月、7 月、8 月气温标准差较小,表明夏季全省气温的空间差异不大。10 月(图 2d),平均气温在 -1.6 ~ 24.8 °C 之间,全省平均为 16.5 °C,总体高于 4 月,这主要与秋季空气层结稳定、云量少、日照时间长、太阳辐射强有关。气温分布自东南向西北递减,与 1 月气温分布格局类似。

### 2.4 浙江气温局地分布规律

本文所用气温模型综合考虑了海拔高度、总辐射、有效辐射对气温空间分布的影响,作为输入项的总辐射是通过分布式模拟获得的,该模拟充分考虑了天文因子(太阳常数、日地相对距离、太阳赤纬等)和宏观地理因子(纬度等),以及局地地形因子(坡度、坡向)对总辐射的影响。因此气温拟合结果也体现了局地地形的影响特点。为了进一步分析气温的局地分布规律,根据浙江 100 m × 100 m 分辨率的月平均气温、月平均最高气温、月平均最低气温分布式拟合结果,统计各栅格点气温随纬度、海拔、坡度、坡向的变化规律,在固定其他三项因子不变的情况下,绘制气温随单项因子变化的曲线,如图 3 所示。图中坡向从正北开始,按顺时针方向度量,即正北为 0°,正东为 90°,正南为 180°,正西为 270°。

图 3a 给出了 29°N、海拔 1 000 m、坡度 10°的坡地上 1 月、4 月、7 月、10 月平均气温距平随坡向的变化规律,纵坐标为月平均气温距平,指某一坡向上栅格平均气温与所有坡向上所有栅格平均气温之差;图上每个点的气温距平是同一坡向上多个栅格气温距平的平均值(将纬度为 29°N、海拔高度为 1 000 m 且坡度为 10°的栅格挑选出来,对其进行统计分析,首先计算所有满足条件栅格的气温平均值,

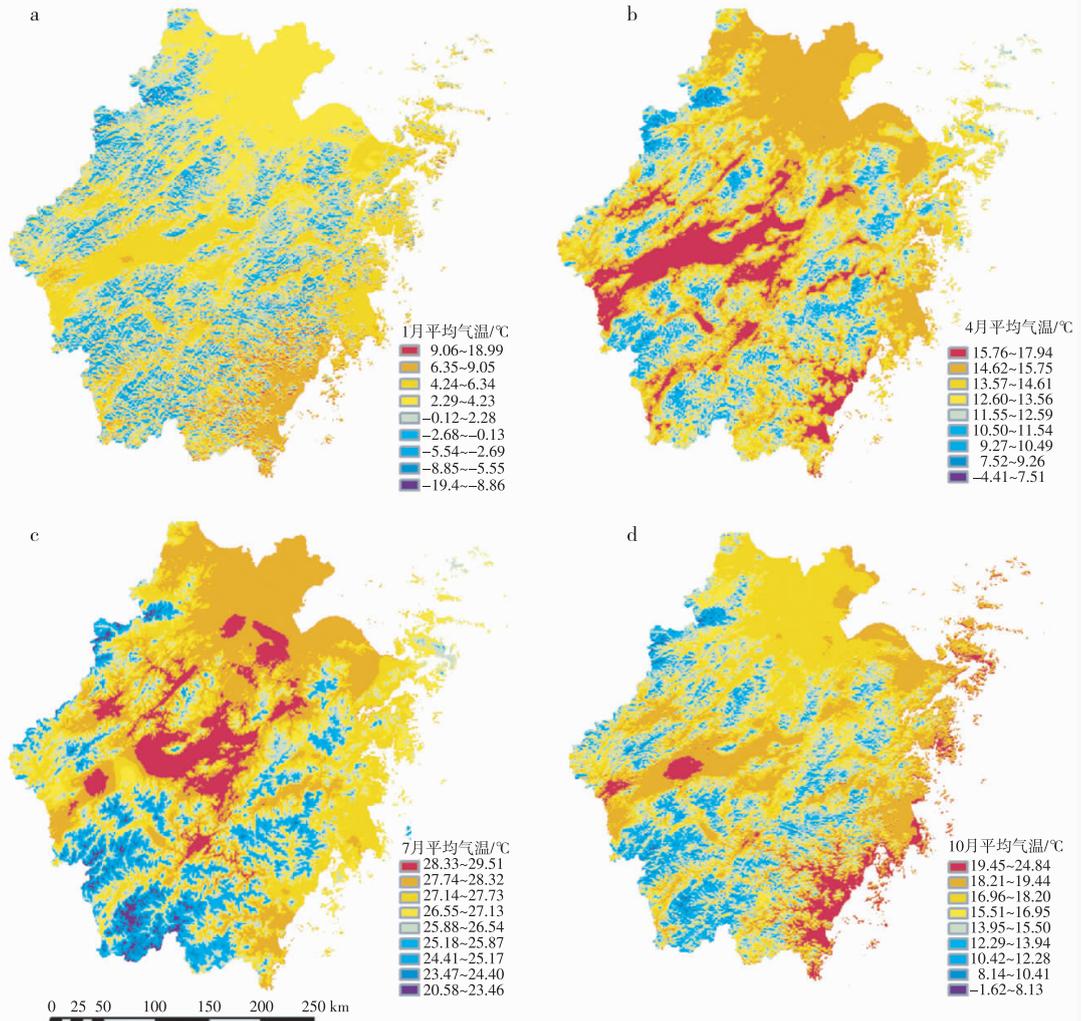


图2 浙江省 1961—2000 年气候平均的 1 月(a)、4 月(b)、7 月(c)、10 月(d)平均气温的空间分布(单位:°C)

Fig. 2 Spatial distributions of climatological mean air temperature in Zhejiang province during 1961—2000(units: °C)

a. January; b. April; c. July; d. October

之后计算某一坡向上所有栅格的气温平均值,将后者减去前者,获得该坡向栅格气温的距平值,即可绘制图 3a。图 3b 和 3d 中纵坐标的气温距平含义以此类推)。可以看出,不同坡向坡地的气温差异以 1 月最显著,其次是 10 月。7 月,不同坡向基本没有温差。由此可以得出结论:冬半年月平均气温受坡向影响较夏半年大。

图 3b 给出了 29°N、海拔 1 000 m、不同坡度的坡地上 1 月月平均气温距平随坡向的变化。可见,在 5°~35°的坡度范围内,随着坡度的增高,不同坡向气温差异呈增大趋势。

图 3c 给出了 29°N、海拔 1 000 m、不同坡向的坡地上 1 月平均气温随坡度的变化。由图可见,南坡月平均气温最高,北坡月平均气温最低,偏南坡月平均气温随坡度增加而增加,偏北坡月平均气温随

坡度增加而降低,且偏南坡月平均气温随坡度增加的幅度较偏北坡月平均气温随坡度降低的幅度小;东坡与西坡,东南坡与西南坡,东北坡与西北坡月平均气温随坡度的分布规律相一致。

图 3d 给出了 29°N、海拔 1 000 m、坡度 10°的坡地上 1 月、7 月、10 月平均气温距平、平均最高气温距平、平均最低气温距平随坡向的变化。可见,无论是月平均气温距平、月平均最高气温距平,还是月平均最低气温距平,均是 1 月的气温距平最大,7 月的气温距平最小,这表明 1 月不同坡向的温差较大,7 月不同坡向的温差较小。

### 3 浙江省气温拟合结果误差分析

#### 3.1 拟合误差与交叉验证误差分析

对浙江省内 63 个气象站月平均气温、月平均最

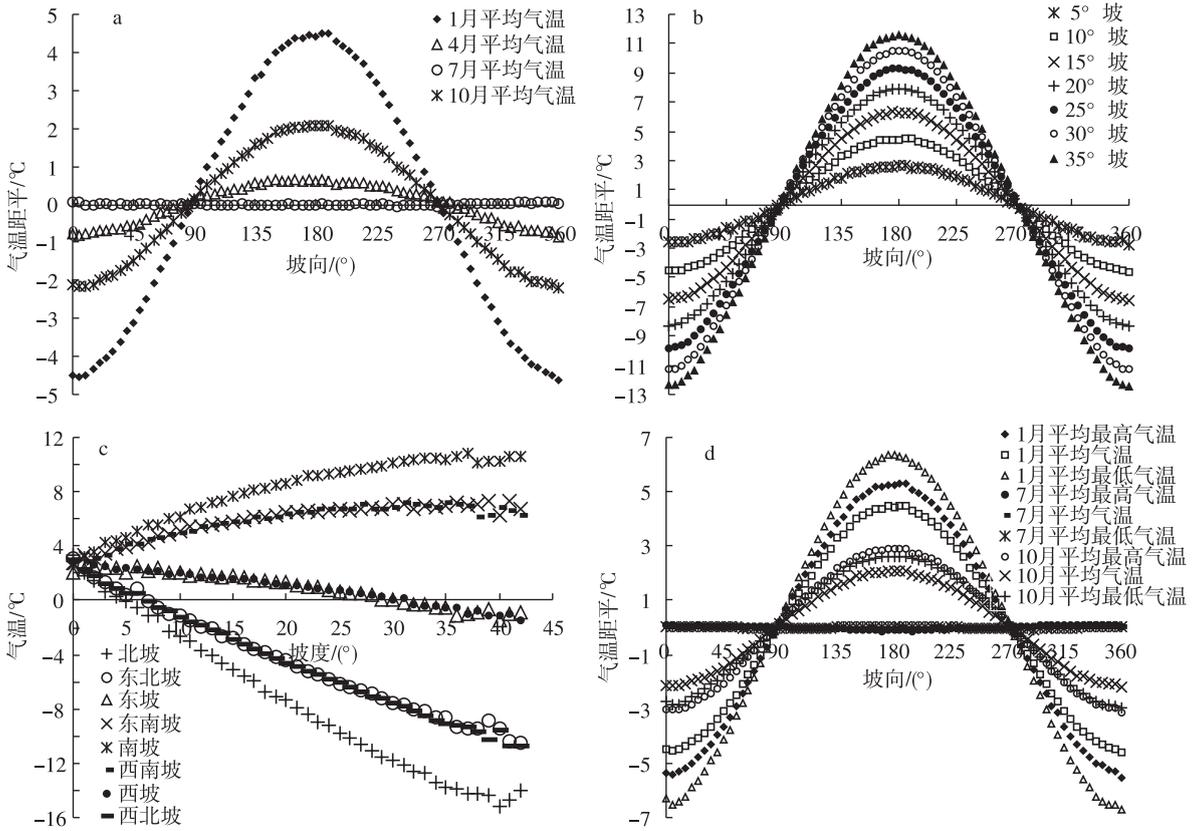


图 3 浙江省气温受地形影响的变化规律 a. 不同月份气温距平随坡向的变化;b. 不同坡度气温距平随坡向的变化;c. 不同坡向上气温随坡度的变化;d. 平均气温、平均最高气温、平均最低气温距平随坡向的变化

Fig. 3 Variation characteristics of monthly mean air temperature affected by the terrain a. characteristic of azimuth-dependent monthly mean temperature of different months;b. characteristic of azimuth-dependent monthly mean temperature anomaly of different slopes;c. characteristic of slope-dependent monthly mean temperature of different azimuths;d. characteristic of azimuth-dependent monthly mean temperature of three types

高(最低)气温的拟合结果进行验证,表 3 中第 1 列是统计获得的气象站气温拟合值与实测值之间的绝对误差平均值,可以看出,各月的平均气温误差为 0.10~0.65℃,平均最高气温误差为 0.09~0.80℃,平均最低气温误差为 0.10~0.58℃。

为了验证模型在空间维上的稳定性,对所应用的气温模型进行了交叉验证分析。具体方法是将浙江省内 63 个气象站分为 16 组,每组为空间分布均匀(即保证其均匀分布在全省范围)的 4 个站(最后一组 3 个站)。每次抽取一组站作为验证站不参加建模,用剩余台站资料建模,确定模型参数,拟合获得全省气温的空间分布,之后提取验证站的气温拟合值,统计其气温拟合值与实测值的误差。表 3 中第 2 列给出的是按照交叉验证方案,统计获得的验证气象站气温拟合值与实测值之间的绝对误差平均值,可以看出,交叉验证绝对误差平均值最大是 11

月平均最低气温,为 0.72℃;最小是 8 月平均气温,为 0.15℃,冷月误差较大,暖月较小。全年总体误差,月平均气温为 0.38℃,月平均最高气温 0.45℃,月平均最低气温为 0.44℃。表明气温模型具有良好的空间维拟合能力。

### 3.2 个例年验证分析

为了验证模型在时间维上的稳定性,对 2005 年浙江省内 63 个气象台站各月平均气温进行了拟合,表 4 列出了误差统计指标。可见,月平均气温的绝对误差平均值为 0.09~0.59℃,月平均最高气温误差为 0.08~0.72℃,月平均最低气温误差为 0.10~0.53℃。全年平均误差,月平均气温为 0.25℃,月平均最高气温为 0.29℃,月平均最低气温为 0.24℃,且仍然是冷月误差较大,暖月较小。相比而言,各项误差统计指标略小于交叉验证结果,表明模型同样具备较好的时间维外推性能。

表 3 拟合误差与交叉验证误差的统计情况

Table 3 Statistics of simulated error and cross-validation error

℃

	拟合误差			交叉验证误差		
	平均气温	最高气温	最低气温	平均气温	最高气温	最低气温
1 月	0.651 1	0.791 2	0.579 1	0.663 8	0.420 2	0.523 5
2 月	0.293 7	0.345 9	0.272 4	0.587 4	0.628 0	0.549 8
3 月	0.470 9	0.533 4	0.458 8	0.540 8	0.493 5	0.362 6
4 月	0.303 7	0.325 5	0.330 9	0.422 2	0.504 0	0.273 6
5 月	0.094 1	0.078 9	0.115 4	0.212 6	0.405 4	0.286 9
6 月	0.138 7	0.150 7	0.129 3	0.208 4	0.390 9	0.243 3
7 月	0.087 1	0.077 2	0.096 9	0.167 2	0.419 9	0.297 5
8 月	0.095 2	0.115 6	0.105 7	0.150 4	0.428 3	0.314 0
9 月	0.125 5	0.124 8	0.124 8	0.282 5	0.449 4	0.509 8
10 月	0.157 8	0.207 6	0.132 3	0.334 0	0.399 2	0.601 2
11 月	0.217 5	0.237 5	0.211 0	0.454 1	0.398 0	0.722 9
12 月	0.480 3	0.591 9	0.431 1	0.586 8	0.450 7	0.624 0
年平均	0.259 6	0.298 3	0.249 0	0.384 2	0.449 0	0.442 4

表 4 2005 年各月拟合气温误差的统计情况

Table 4 Error statistics of simulated monthly temperature in 2005

℃

	绝对误差平均值		
	平均气温	最高气温	最低气温
1 月	0.592 1	0.719 2	0.526 6
2 月	0.295 5	0.347 9	0.274 1
3 月	0.498 2	0.564 1	0.485 2
4 月	0.296 0	0.317 8	0.322 1
5 月	0.091 4	0.075 5	0.114 1
6 月	0.129 7	0.141 6	0.121 0
7 月	0.087 0	0.075 0	0.095 8
8 月	0.092 7	0.121 2	0.103 6
9 月	0.120 9	0.119 1	0.120 0
10 月	0.161 5	0.211 5	0.136 5
11 月	0.203 1	0.220 8	0.196 7
12 月	0.475 5	0.586 5	0.425 9
全年	0.254 2	0.292 4	0.244 0

### 3.3 气象哨资料验证分析

常规气象站多位于平坦开阔地段,为了进一步验证模型对山区气温拟合的适用性,利用浙西南山区丽水市 12 个气象哨 1985—1988 年的观测资料对拟合结果进行验证。相对于常规气象站而言,气象哨地理环境复杂,观测条件较差,观测年限较短,资料质量参差不齐。选择的 12 个气象哨具有相对完整的地理条件说明,它们分别是青田峰山、青田阜

山、庆元荷地、遂昌湖山、莲都巨溪、遂昌兰棚、遂昌龙殿、庆元隆宫、缙云前村、缙云三溪、松阳上河、缙云新建。将气象哨实测资料与相应气温拟合结果对照,统计获得相应误差指标。由表 5 可以看出,月平均气温的绝对误差平均值为 0.34 ~ 1.25 ℃,月平均最高气温误差为 0.84 ~ 1.44 ℃,月平均最低气温误差为 0.44 ~ 1.27 ℃。全年平均误差,月平均气温为 0.79 ℃,月平均最高气温 1.17 ℃,月平均最低气温为 0.75 ℃。较常规气象站误差而言,气象哨的气温拟合误差要大一些。其主要原因为,常规气象站日平均气温是通过一天 4 个时次(02 时、08 时、14 时、20 时)观测结果的平均而得到的。受地理环境限制,气象哨无 02 时观测数据,其日平均气温整编资料是根据一日 3 次的气温观测值结合附近气象站资料经统计订正后得出的。另外,气象哨在观测仪器、观测环境、观测人员素质等方面都不如气象站规范,其气温资料的代表性要差一些。因此表 5 给出的气象哨气温拟合“误差”,并不是真正意义上的“误差”。表 5 还给出了拟合气温与气象哨气温之间的相关系数,可以看出,月平均气温相关系数在 0.87 以上,月平均最高气温在 0.82 以上;除 5 月、12 月稍小以外,其他各月月平均最低气温相关系数在 0.85 以上。

图 4 给出了丽水市 12 个气象哨 1985—1988 年 4 a 逐月平均气温观测值与拟合值的相关关系。可以看出,两者的一致性非常好,总体相关系数为 0.99,表明本文进行的气温拟合是可靠的。

表 5 丽水市气象哨资料验证结果的统计情况

Table 5 Error tests by the observed data of meteorological posts in Lishui

	绝对误差平均值/°C			相关系数		
	平均气温	最高气温	最低气温	平均气温	最高气温	最低气温
1 月	1.093 4	1.438 5	0.943 5	0.917 2	0.846 5	0.896 4
2 月	0.859 1	1.115 8	0.717 6	0.935 0	0.930 5	0.928 8
3 月	1.095 7	1.308 0	0.937 5	0.869 0	0.888 4	0.854 5
4 月	0.873 3	1.117 1	0.737 8	0.865 4	0.820 8	0.887 0
5 月	0.673 6	1.190 6	0.774 5	0.933 5	0.906 6	0.703 2
6 月	0.481 3	0.841 9	0.444 9	0.938 8	0.888 0	0.943 1
7 月	0.769 2	1.527 3	0.705 4	0.930 1	0.899 0	0.881 5
8 月	0.610 8	1.156 0	0.728 3	0.969 7	0.943 4	0.897 7
9 月	0.341 5	0.974 4	0.494 6	0.974 4	0.917 1	0.940 2
10 月	0.705 3	1.107 7	0.548 8	0.961 1	0.888 6	0.948 3
11 月	0.720 2	0.905 0	0.738 9	0.926 8	0.889 4	0.925 3
12 月	1.246 6	1.415 9	1.274 3	0.899 7	0.881 7	0.686 5
全年	0.789 2	1.174 2	0.753 9	—	—	—

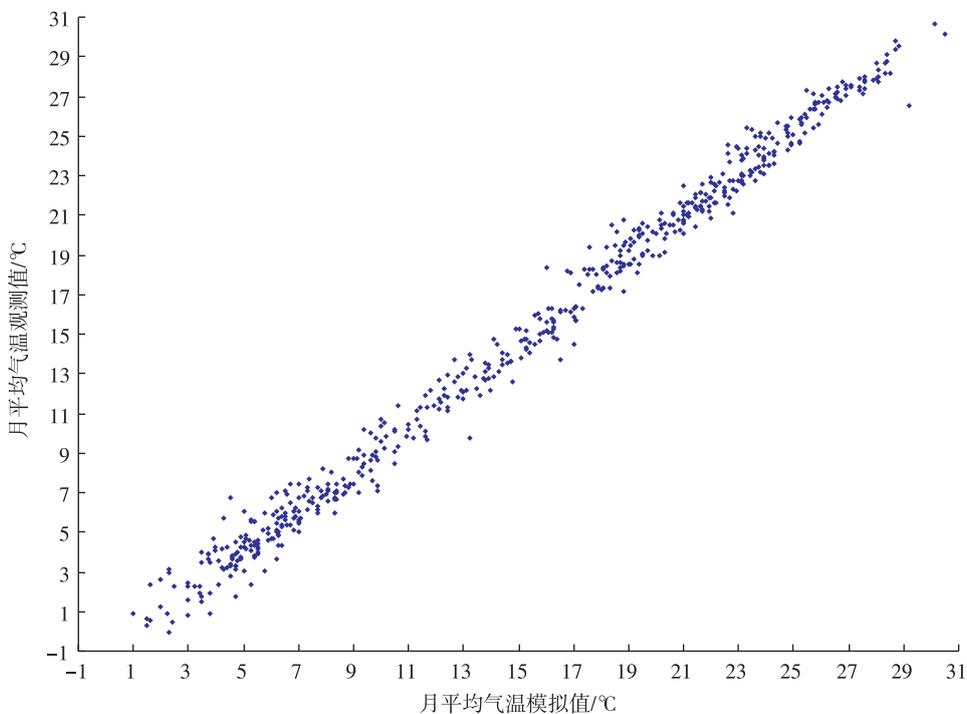


图 4 1985—1988 年丽水市 12 个气象哨月平均气温观测值与拟合值的相关关系

Fig.4 Correlation between observed temperature and simulated temperature of 12 meteorological posts in Lishui from 1985 to 1988

## 4 结论与展望

立足常规气象观测资料,应用月平均气温物理经验统计模型,综合考虑海拔、太阳辐射、长波有效辐射等因素对月平均气温的影响,实现了浙江山地

100 m × 100 m 分辨率的月平均气温、月平均最高(最低)气温空间分布制图。本研究表明,拟合结果能正确地表达浙江省宏观气候、局地地形等对月平均气温空间分布特征的影响,与传统的月平均气温空间插值、多元地理统计模型相比,有明显的改进。

误差分析和多重验证表明,模型具有良好的拟合精度、空间稳定性和山地扩展性能,这为复杂地形下热量资源的开发和利用提供了科学依据。

本文在进行浙江省高分辨率气温拟合时,代表有效辐射影响的输入项为日照百分率和相对湿度,这两项要素是根据常规气象站点资料通过插值法获得,若引入遥感反演数据改进有效辐射输入项,气温拟合精度将有望得到进一步提高。

## 参考文献:

陈晓峰,刘纪远,张增祥,等. 1998. 利用 GIS 方法建立山区温度分布模型[J]. 中国图象图形学报,3(3):234-238.

程路,邱新法. 2006. 基于 GIS 的秦岭山地气温空间分布[J]. 陕西气象(6):1-4.

傅抱璞. 1984. 关于山地气候资料的推算问题[C]//山地气候文集. 北京:气象出版社:23-34.

何洪林,于贵瑞,刘新安,等. 2004. 中国陆地生态信息空间化技术研究(II)——太阳辐射要素[J]. 自然资源学报,19(5):679-687.

李军,黄敬峰. 2004. 山区气温空间分布推算方法评述[J]. 山地学报,22(1):126-132.

李军,游松材,黄敬峰,等. 2006. 中国 1961—2000 年月平均气温空间插值方法与空间分布[J]. 生态环境,15(1):109-114.

刘宣飞,朱乾根. 1998. 中国气温与全球气温变化的关系[J]. 南京气象学院学报,21(3):390-397.

卢其尧. 1988. 山区年月平均气温推算方法的研究[J]. 地理学报,45(3):213-222.

缪启龙,周自江,殷永元,等. 1998. 中国近半个世纪最高气温变化特征[J]. 气象科学,18(2):103-112.

潘敖大,范苏丹,陈海山. 2010. 江苏省近 45 a 极端气候的变化特征[J]. 气象科学,30(1):87-92.

潘文卓,缪启龙,许遐祯. 2008. 1961—2006 年南京气温变化特征[J]. 南京气象学院学报,31(5):694-701.

沈国权. 1984. 考虑宏观地形的小网格温度场分析方法及应用[J]. 气象,10(6):22-27.

司鹏,李庆祥,李伟,等. 2010. 城市化对深圳气温变化的贡献[J]. 大气科学学报,33(1):110-116.

徐宗学,孟翠玲,赵芳芳. 2007. 山东省近 40 a 年来的气温和降水变化趋势分析[J]. 气象科学,27(4):387-393.

曾燕,邱新法,刘昌明,等. 2007. 黄河流域有效辐射拟合研究[J]. 地理科学,27(3):342-347.

曾燕,邱新法,刘绍民. 2005. 起伏地形下天文辐射分布式估算模型[J]. 地球物理学报,48(5):1028-1033.

曾燕,邱新法,潘敖大,等. 2008. 地形对黄河流域太阳辐射影响的分析研究[J]. 地球科学进展,23(11):1185-1193.

张福春. 1984. 在山区气候调查中物候指标的应用[C]//山地气候文集. 北京:气象出版社:55-62.

张洪亮,倪绍祥,邓自旺. 2002. 基于 DEM 的山区气温空间模拟方法[J]. 山地学报,20(3):360-364.

朱华忠,罗天祥,Daly C. 2003. 中国高分辨率温度和降水模拟数据的验证[J]. 地理研究,22(3):349-359.

Aikawa M, Hiraki T, Eiho J, et al. 2007. Characteristic air temperature distributions observed in summer and winter in urban area in Japan [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 131 (1/2/3): 255-265.

Attorre F, Alfo M, De Sanctis M, et al. 2007. Comparison of interpolation methods for mapping climatic and bioclimatic variables at regional scale [J]. International Journal of Climatology, 27 (13): 1825-1843.

Benavides R, Montes F, Rubio A, et al. 2007. Geostatistical modeling of air temperature in a mountainous region of Northern Spain [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 146(3/4):173-188.

Burrough P. 2001. GIS and geostatistics: Essential partners for spatial analysis [J]. Environmental and Ecological Statistics, 8 (4): 361-377.

Luna M, Morata A, Almarza C, et al. 2006. The use of GIS to evaluate and map extreme maximum and minimum temperature in Spain [J]. Meteorological Applications, 13(4):385-392.

Zeng Yan, Qiu Xinfu, He Yongjian, et al. 2009. Distributed modeling of monthly air temperatures over the rugged terrain of the Yellow River Basin [J]. Science in China Series D, 52(5):694-707.

(责任编辑:倪东鸿)