

# 基于 DEM 的秦岭温度场模拟

莫中国<sup>1,2</sup>, 张百平<sup>2</sup>

(1. 重庆工商大学旅游学院, 重庆 400067

2. 中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101)

**摘要:** 考虑到秦岭地形对温度场的影响因素, 以主分水岭为界分为南北两部分, 在普通插值的基础上, 采用一种基于 DEM 的辅助插值方法, 同时考虑秦岭南北坡坡向的差异, 对秦岭的温度场进行了模拟。采用气象观测站点数据和格网精度为 100m 的 DEM 数据, 利用 GIS 空间分析方法, 模拟了秦岭的温度场, 并对模拟结果进行了交叉验证分析。实验表明, 基于 DEM 的秦岭温度场模拟, 结果较精确地反映秦岭山地的温度场分布特征, 同时验证了秦岭对南北气温具有明显的分异作用和气候效应。

**关键词:** 秦岭; 辅助插值方法; 温度场; 模拟

**中图分类号:** P423 P931

**文献标识码:** A

秦岭是横亘于我国中部的一条东西走向的山脉, 大体与 1月 0℃等温线、800 mm 等雨量线及 2 000 h日照时数等值线一致<sup>[1]</sup>, 成为我国南、北气候的自然分界线, 长期以来秦岭一直被作为我国南方和北方的一条重要的地理分界线。秦岭在气候上有十分显著的影响, 它使潮湿的海洋气团不易深入到西北, 同时也阻挡了北方的寒潮不会长驱南下, 减小寒潮猛烈的侵袭, 成为我国北亚热带和暖温带的分界线, 特别是冬季对冷空气有显著的屏障作用<sup>[2-3]</sup>。

秦岭南、北之间纬度相差很少, 海拔相差悬殊, 海拔对气温的影响超过了纬度的影响, 等温线、等高线与山体走向大致相符。秦岭由于地势的原因, 气温随海拔的增加而呈递减的趋势, 温度场的模拟不仅要考虑坡向的因素, 而且必需要考虑到地形的影响因素。

气候数据的模拟可以利用气象站点观测数据, 通过空间插值方法得到面状栅格数据, 常用插值方法很多, 如距离权重法、趋势面法、样条函数法、泰森多边形法、多元回归法、双线性内插法等, 但均未能很好地考虑气象因素或地形因素而达到很好的模拟

结果。

其他方法如梯度距离平方反比法, 在距离权重的基础上, 考虑气象要素随海拔和经度、纬度的变化<sup>[4]</sup>。还有一种基于 DEM 和智能搜索距离的温度空间插值方法 (SSI), 是种优于反距离平方 (IDS) 的方法, 能客观地反映温度随经度、纬度和高度梯度变化的地带性特征<sup>[5]</sup>。封志明还对反距离平方加权法和梯度距离平方反比法这两种方法进行了比较和精度分析<sup>[6]</sup>。

杨昌军利用高斯权重法的订正方法, 采用一种考虑地形因子的温度插值方法取得很好效果<sup>[7]</sup>。赵登忠使用基于 DEM 的 PRISM 内插方法, 考虑距离、高程、坡度、坡向、垂直分层、地表分类 6个权重因子, 利用气象数据高程梯度变化来计算每个 DEM 格网的气象值<sup>[8]</sup>。

这些气候模拟方法各异, 精度和应用目的也不尽相同, 但都考虑了地形因子, 模拟效果比较理想, 可以为秦岭温度场的模拟提供理论和方法的支持, 但有的需要专业插值软件去实现, 如 ANUSPLN、PRISM 等<sup>[8]</sup>。本文对秦岭温度场进行模拟时, 在普通插值方法的基础上, 利用 ARC/INFO 软件提供的一

收稿日期 (Received date): 2006-12-01; 改回日期 (Accepted): 2007-05-13.

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金项目 (40571010) 资助。 [Supported by NSFC (40571010)]

作者简介 (Biography): 莫中国 (1972-), 男, 安徽庐江人, 博士。研究方向: 城乡规划与地理信息系统。 [Mo Shenguo (1972-), male, PH. D, teacher of Chongqing Technology & Business University. Research field: town and county planning and GIS.]

些空间插值方法, 采用一种基于 DEM 的辅助插值方法, 并且考虑到坡向的差异, 反映秦岭温度场的特征。

# 1 基于 DEM 的温度插值方法

## 1.1 一般的插值方法

在实际应用中, 如果未考虑地形等因素的气候插值中, 可采用 ArcGIS 地统计分析模块中提供的几种插值方法: 反距离加权插值法、样条插值法、多项式插值法和克里格插值法等。

普通克里格法 (Ordinary Kriging 简称 OK), 是以区域化变量理论为基础, 半变异函数为其分析工具, 其预测模型可以表达为

$$\hat{Z}(S_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(S_i) \tag{1}$$

式中  $Z(S_i)$  是第  $i$  点的观测值,  $\lambda_i$  是第  $i$  点的观测值的未知权重系数,  $S_0$  是预测点的位置。OK 法取决于半变异图、距预测点的距离和预测点周围的观测值的空间关系。

在 OK 法插值中, 采用球形模型, 其半变异模型表达式

$$\gamma(h; \theta) = \begin{cases} \theta_s \left[ \frac{3 \|h\|}{2 \theta_r} - \frac{1}{2} \left( \frac{\|h\|}{\theta_r} \right)^3 \right] & 0 \leq \|h\| \leq \theta_r \\ \theta_s & \theta_r < \|h\| \end{cases} \tag{2}$$

式中  $\theta_s$  是基台值参数,  $\theta_r$  是变程参数。

## 1.2 基于 DEM 的辅助插值方法

温度的水平地带性和垂直地带性分布特征, 对温度插值结果会产生很大的影响, 可以利用温度与经度、纬度和海拔的关系提高温度插值的精度<sup>[5]</sup>。

当考虑海拔对温度的影响时, 任一点的平均温度  $T$  可以表示为

$$T = T_0 - A * E \tag{3}$$

式中  $T_0$  为海平面的温度,  $E$  为海拔,  $A$  为平均环境温度垂直递减率, 通常取常数  $0.65 \text{ } ^\circ\text{C} / 100 \text{ m}$ , 表示高度每上升  $100 \text{ m}$ , 平均温度下降  $0.65 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。

秦岭地势高峻, 东西跨度大, 经度、纬度和海拔对气温的影响比较大。秦岭的主分水岭将秦岭分为南、北两部分, 南、北坡气温随海拔的垂直递减率不同, 所以在考虑到地形插值的同时, 应该考虑南、北坡气温递减率数值的差异, 而不能取常数。

根据秦岭南、北坡的气温随海拔的递减率, 将秦岭的气温数据修正到海平面的高度。先用 OK 方法进行一般插值, 将插值生成的温度场栅格数据 GRID 1 和 DEM 数据 GRID 2 分南、北坡做格网计算, 最终生成具有地形特征的秦岭温度场数据, 具有统一的栅格分辨率  $100 \text{ m}$ 。栅格计算表达式为

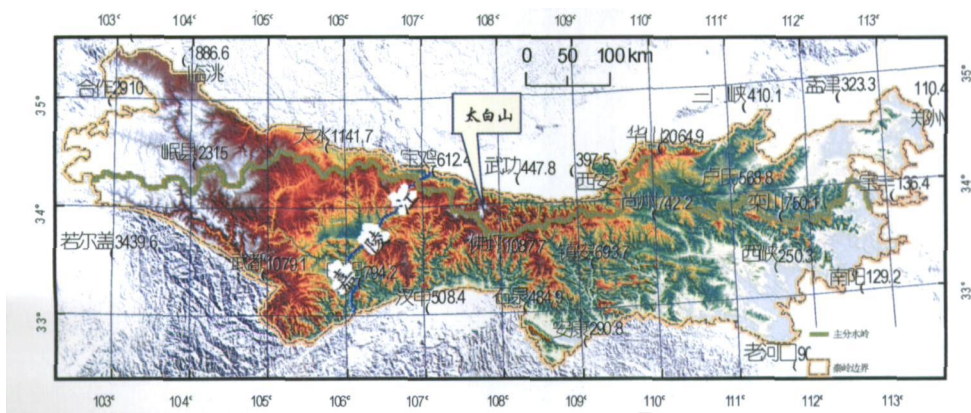
$$\text{GRID 3} = \text{GRID 1} - A * \text{GRID 2} \tag{4}$$

式中 GRID 3 为生成的温度场数据, GRID 1 为用 OK 方法生成的修正后的气温数据, GRID 2 为 DEM 栅格数据。

# 2 温度插值模型的实现

## 2.1 气候数据的收集与整理

本文收集了秦岭及其邻近地区 1971~2000 年 30 a 平均的气候数据, 共有 29 个气象观测站点数据, 其中秦岭北坡 16 个站点, 南坡 13 个站点。站点比较稀疏, 但分布比较均匀 (图 1)。经整理的数据包含的气候要素有: 1 月平均气温  $T_1$ 、7 月平均气温  $T_7$ 、年平均气温  $T$ 、极端最高温  $T_{\max}$ 、极端最低温  $T_{\min}$  等 (表 1), 其中气温数据用于温度插值的模拟。



(注: 图中数字为站点的海拔, 单位  $\text{m}$ , 中间的线为秦岭分水岭)

图 1 秦岭主要的气象站分布

Fig. 1 Main meteorological stations in Qinling Mountains

表 1 秦岭主要气象台站的气候指标 (温度:  $^{\circ}\text{C}$ , 降水量: mm)

Table 1 Climate index of main meteorological stations in Qinling Mts ( $T$ :  $^{\circ}\text{C}$ ,  $P$ : mm)

	站名	$X$ (经度)	$Y$ (纬度)	$T1$	$T7$	$T$	$T_{\text{max}}$	$T_{\text{min}}$	$P1$	$P7$	$P$
北坡	临夏	103.18	35.58	-6.64	18.08	7.00	41.9	-12.9	3.27	101.73	495.09
	临洮	103.87	35.37	-6.99	18.68	7.23	30.0	-16.8	3.95	103.10	519.85
	合作	102.90	35.00	-9.88	12.83	2.44	23.2	-19.7	3.34	110.26	531.63
	岷县	104.02	34.43	-6.34	16.07	5.83	26.3	-16.5	2.43	104.32	560.94
	天水	105.75	34.58	-1.95	22.78	11.04	33.2	-8.2	5.10	84.61	491.96
	宝鸡	107.13	34.35	0.07	25.44	13.19	34.0	-6.5	6.39	111.07	656.30
	武功	108.22	34.25	-0.36	26.01	13.26	34.4	-7.6	5.93	87.59	571.98
	西安	108.93	34.30	-0.14	26.57	13.72	35.5	-7.4	6.91	98.57	553.37
	华山	110.08	34.48	-5.96	17.48	6.16	23.0	-12.0	11.39	152.58	813.82
	三门峡	111.20	34.80	-0.32	26.45	13.92	34.4	-6.8	5.75	112.65	559.34
	卢氏	111.03	34.05	-0.92	25.01	12.55	33.8	-8.6	6.25	122.97	622.64
	孟津	112.43	34.83	-0.14	26.16	13.91	33.7	-7.1	7.97	152.67	625.04
	栾川	111.60	33.78	-0.49	23.87	12.13	32.5	-8.1	10.43	165.14	816.23
	郑州	113.65	34.72	0.10	26.96	14.37	34.2	-7.6	8.78	155.51	632.48
	许昌	113.85	34.02	0.67	27.08	14.54	34.0	-5.6	12.00	163.25	705.69
	宝丰	113.05	33.88	0.84	26.92	14.55	34.3	-6.2	11.88	161.18	740.43
南坡	玛曲	102.08	34.00	-9.36	10.92	1.41	19.6	-19.3	4.03	122.01	596.50
	若尔盖	102.97	33.58	-10.15	10.75	1.08	20.0	-21.8	4.80	122.50	649.31
	武都	104.92	33.40	3.33	24.74	14.65	33.7	-1.9	1.91	86.69	471.93
	略阳	106.15	33.32	2.19	23.52	13.37	32.5	-3.4	4.46	187.15	792.10
	汉中	107.03	33.07	2.43	25.22	14.38	33.2	-2.6	8.71	175.21	852.83
	佛坪	107.98	33.53	0.67	21.81	11.63	32.5	-5.4	6.09	203.15	906.84
	尚州	109.97	33.87	0.49	24.38	12.83	33.2	-5.7	8.17	124.28	668.61
	镇安	109.15	33.43	1.48	23.99	13.12	34.3	-5.0	6.52	148.11	763.08
	西峡	111.50	33.30	2.23	26.63	15.06	34.6	-4.6	15.33	185.43	848.63
	南阳	112.58	33.03	1.43	26.93	14.93	33.8	-5.3	13.69	177.83	778.09
	石泉	108.27	33.05	2.84	25.35	14.55	35.0	-2.5	7.03	184.68	874.78
	安康	109.03	32.72	3.51	26.90	15.67	35.7	-2.3	5.53	149.96	814.44
	老河口	111.67	32.38	2.56	27.30	15.56	35.5	-4.8	21.48	120.62	835.39

2.2 气温递减率

气温随海拔的上升,一般呈线性下降。综合分析秦岭北坡和南坡气象站点全部的气温数据,对气温数据与海拔的关系进行一次线性回归分析,得到秦岭北坡和南坡的气温随海拔的递减率,如表 2 所示。

冬季秦岭北坡气温递减率小于南坡,北坡为  $0.37^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ,南坡为  $0.38^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ,夏季北坡则大于南坡,北坡为  $0.51^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ,南坡为  $0.49^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 。极端最高温和极端最低温的递减率北坡均小于南坡,年均气温北坡略小于南坡。从秦岭气温随海拔高度的递减率可以看出,除夏季北坡的递减

率出现反常外,其他温度要素北坡的递减率均小于南坡。

表 2 秦岭气温随高度的递减率  $A$  (单位:  $^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ )

Table 2 Progressive decrease rate of temperature ( $A$ ) in Qinling Mts ( $^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ )

气温要素	北坡	南坡
1月气温 $T1$	0.37	0.38
7月气温 $T7$	0.51	0.49
年均气温 $T$	0.43	0.43
极端最高温 $T_{\text{max}}$	0.32	0.47
极端最低温 $T_{\text{min}}$	0.45	0.52

2.3 交叉验证

利用表 2 的递减率数据, 将秦岭各气象站点的气温指标修正到海平面高度, 利用 OK 插值方法对修正数据进行一般插值。对插值结果进行误差分析后, 得到海平面高度的秦岭气温数据。对气温数据

5个指标的插值结果作误差分析 (交叉验证), 平均误差值  $ME$  比较小, 均方根误差值  $RMS$  和均方根误差标准差  $RMSSE$  值比较接近 1,  $RMS$  和  $ASE$  数值比较小, 而且数值比较接近, 误差分析表明, 模拟结果比较理想, 符合精度要求 (表 3)。

表 3 OK 插值方法交叉验证的结果 (单位:  $^{\circ}\text{C}$ )  
Table 3 Results of cross-validation by OK interpretation means

气温要素	平均误差 $ME$	均方根误差 $RMS$	平均标准差 $ASE$	平均误差标准差 $MSE$	均方根误差标准差 $RMSSE$
1月气温 $T_1$	0.012 200	0.995 1	0.741 9	0.014 420	1.308
7月气温 $T_7$	-0.008 354	0.597 2	0.456 6	-0.003 429	1.267
年均气温 $T$	0.014 500	0.676 5	0.465 8	0.032 470	1.398
极端最高温 $T_{max}$	-0.063 081	3.500	2.353	-0.023 11	1.437
极端最低温 $T_{min}$	-0.031 017	2.276	1.601	-0.016 07	1.393

将秦岭北坡和南坡的气温随海拔的递减率作为权重, 建立合适的数学模型来进行格网计算, 分北坡和南坡输出最终的结果, 并合并图层。对  $T_1$  和  $T_7$  的模拟结果进行抽样分析, 选取实测站点数据进行精度评估, 结果发现  $T_1$  的误差范围为  $0.1\sim0.6^{\circ}\text{C}$ , 平均误差约为  $0.4^{\circ}\text{C}$ ;  $T_7$  的误差范围为  $0.2\sim0.8^{\circ}\text{C}$ , 平均误差约为  $0.5^{\circ}\text{C}$ , 均符合精度要求, 并较好反映了秦岭南北坡考虑到地形因素的温度场分布特征。

3 结果分析与讨论

秦岭 1 月平均气温范围为  $-10\sim3^{\circ}\text{C}$ , 平均值为  $-2\sim0^{\circ}\text{C}$ , 北坡 1 月平均气温范围  $0\sim-10^{\circ}\text{C}$ , 平均值为  $-2^{\circ}\text{C}$ , 南坡为  $2\sim-8^{\circ}\text{C}$ , 平均值为  $0\sim2^{\circ}\text{C}$ , 北麓的渭河平原 1 月平均气温  $0\sim2^{\circ}\text{C}$ , 南坡的汉江谷地约为  $2\sim4^{\circ}\text{C}$ , 北坡比南坡 1 月平均气温低约  $2^{\circ}\text{C}$  (图 2-A)。秦岭 7 月平均气温范围为  $10\sim27^{\circ}\text{C}$ , 平均值为  $22\sim24^{\circ}\text{C}$  左右, 北坡平均值为  $22\sim24^{\circ}\text{C}$ , 南坡平均值为  $23\sim25^{\circ}\text{C}$ 。北坡的渭河平原和南坡的汉江谷地相差不大, 约为  $24\sim26^{\circ}\text{C}$  (图 2-B)。

秦岭的年平均气温范围为  $-4\sim16^{\circ}\text{C}$ , 平均值约  $10^{\circ}\text{C}$ , 北坡范围为  $-4\sim14^{\circ}\text{C}$ , 南坡范围为  $0\sim16^{\circ}\text{C}$ , 年平均气温等值线大致与秦岭主分水岭平行 (图 2-C)。北坡的渭河平原年平均气温约为  $12^{\circ}\text{C}$ , 南坡的汉江谷地约为  $14^{\circ}\text{C}$ , 南坡的年平均气温

约  $11^{\circ}\text{C}$ , 大于北坡  $12^{\circ}\text{C}$ 。  
秦岭的极端最高温是位于秦岭北坡甘肃临夏站的  $41.9^{\circ}\text{C}$ , 而 30 a 极端最高温的最低值是陕西华山站的  $23.0^{\circ}\text{C}$ 。秦岭南坡极端最高温范围为  $32\sim35^{\circ}\text{C}$ , 最大值为陕西安康站的  $35.7^{\circ}\text{C}$ , 插值模拟结果最大值位于秦岭南坡丹江口南老河口站的  $37.6^{\circ}\text{C}$  (图 2-D)。秦岭的极端最低温范围是  $-2\sim-25^{\circ}\text{C}$ , 其中北坡平均值为  $-8\sim-12^{\circ}\text{C}$ , 南坡平均值为  $-4^{\circ}\text{C}$ , 北坡低于南坡。极端最低温极值是秦岭北坡的合作站  $-19.7^{\circ}\text{C}$ , 南坡极端最低温极值是陕西尚州站的  $-5.7^{\circ}\text{C}$  (图 2-E)。

秦岭南北坡纬向距离小, 最窄处北坡与南坡只有 100 km 多。而北坡 1 月平均气温比南坡低  $3.6^{\circ}\text{C}$ , 年平均气温比南坡低  $2.0^{\circ}\text{C}$ , 秦岭温度场分布特征的分析验证了秦岭对南北气温的分异作用, 特别是对冬季气温的影响程度大于夏季气温。

由于是考虑地形基于 DEM 的辅助插值模型, 利用 GIS 实现了秦岭温度场的模拟, 模拟结果交叉验证表明, 秦岭温度场的模拟符合精度要求, 并精确地反映了秦岭气温分布特征与地形的关系, 验证了秦岭对南北气温具有明显的分异作用, 特别是对冬季气温的影响程度大于夏季气温, 同时也为利用 GIS 空间分析方法, 为其他地形复杂的大面积山地气候模拟提供研究方法的探讨。

山地气候是个复杂的系统, 不仅山地的两侧气候有极大的差异, 山地气候还具有垂直方向的变化。秦岭气候的模拟还包括降水的空间分布模拟, 气温



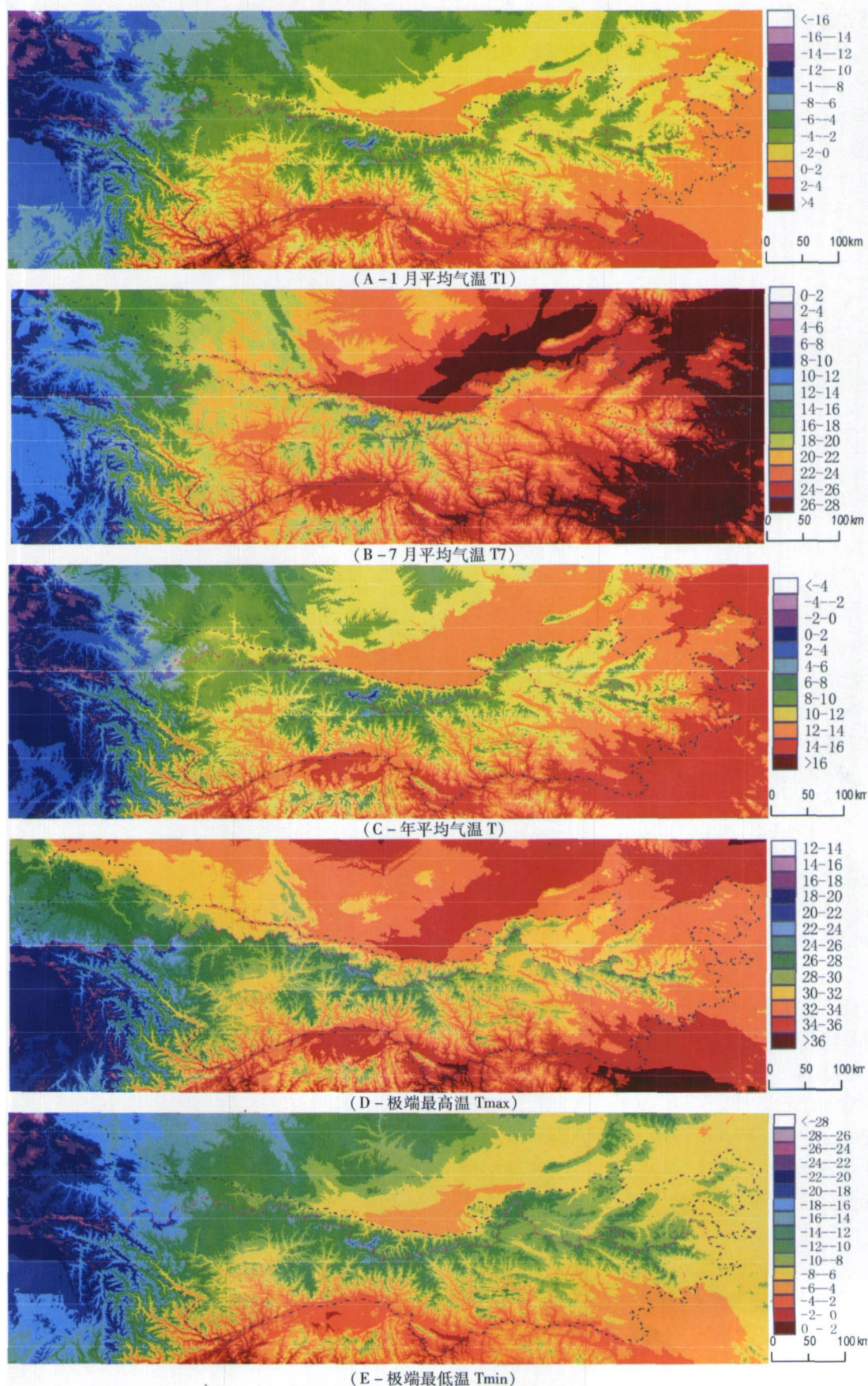


图 2 基于 DEM 的秦岭温度场模拟

Fig. 2 Simulation of temperature fields based on DEM interpretation in Qinling Mts.

随海拔升高呈线性变化, 山地降水与地形的关系比较复杂, 而且降水的垂直变化具有更复杂的关系, 秦岭降水的空间分布特征研究有待更进一步的研究。

## 参考文献 (References)

- [1] Liu Ming-guang Chinese Atlases of Physical Geography (Editor II) [M]. Beijing: SinoMaps Press, 1988 [刘明光主编. 中国自然地理图集 (第二版) [M]. 北京: 中国地图出版社, 1998]
- [2] Li Zhao-yuan, Fu Bao-pu. The climatic features in Qinling Mountains [A]. In Mountain Climate Corpus [C]. Beijing: Meteorology Press, 1984: 87~97 [李兆元, 傅抱璞. 秦岭山地的气候特点 [A]. 见: 山地气候文集 [C]. 北京: 气象出版社, 1984: 87~97]
- [3] Qi Ying, Li Zhao-yuan. Theoretical study on cold-air damping of the Qinling Mountains [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1995, 53(2): 186~193 [齐瑛, 李兆元. 秦岭山脉对冷空气屏障的理论研究 [J]. 气象学报, 1995, 53(2): 186~193]
- [4] Lin Zhong-hui, MO Xing-guo, Li Hong-xuan. Comparison of three spatial interpolation methods for climate variables in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2002, 57(1): 47~56 [林忠辉, 莫兴国, 李宏轩. 中国陆地区域气象要素的空间插值 [J]. 地理学报, 2002, 57(1): 47~56]

- [5] Pan Yao-zhong, Gong Dao-yi, Deng Lei. Smart distance searching-based and DEM-informed interpolation of surface air temperature in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(3): 366~374 [潘耀忠, 龚道溢, 邓磊. 基于 DEM 的中国陆地多年平均温度插值方法 [J]. 地理学报, 2004, 59(3): 366~374]
- [6] Feng Zhi-ming, Yang Yan-zhao, Ding Xiao-qiang. Optimization of the spatial interpolation methods for climate resources [J]. *Geographical Research*, 2004, 23(3): 357~364 [封志明, 杨艳昭, 丁晓强. 气象要素空间插值方法优化 [J]. 地理研究, 2004, 23(3): 357~364]
- [7] Yang Chang-jun, Chen Wei-min, Luo Ling. Applications of Gaussian weighted method to the spatial interpolation of temperature [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2004, 27(5): 606~614 [杨昌军, 陈渭民, 罗玲. 高斯权重法在温度场插值中的应用研究 [J]. 南京气象学院学报, 2004, 27(5): 606~614]
- [8] Zhao Deng-zhong, Zhang Wan-chang, Liu San-chao. Interpolation of meteorological data based on DEM using PRISM model [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 24(2): 205~212 [赵登忠, 张万昌, 刘三超. 基于 DEM 的地理要素 PRISM 空间内插研究 [J]. 地理科学, 24(2): 205~212]

# Simulation of Temperature Fields Based on DEM in Qinling Mountains

MO Shenguo<sup>1, 2</sup>, ZHANG Baiping<sup>2</sup>

(1. Tourism College, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China;

2. LREIS, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

**Abstract** Qinling Mountains, middle-altitude mountains in central China, is an important climate borderline of the North and the South in China. Many climate simulation methods based on terrain are studied to simulate mountain climate fields by former researchers and can help to temperature fields' simulation of Qinling Mountains.

Considering the influent factor of landforms on temperature fields and the aspect differences on northern and southern slopes above the ridge of Qinling Mountains, the DEM-Aided spatial interpolation method is applied on the basis of Ordinary Kriging interpolation method and the temperature fields of Qinling Mountains are simulated. Based on the data of meteorological observation stations and the DEM data with the grid precision of  $100 \times 100$  meters, this paper simulates the temperature fields of Qinling Mountains by GIS spatial analysis methods, and the cross validation is adopted to simulation results.

The report indicates that the simulation results of temperature fields of Qinling Mountains based on DEM are perfect, the prediction errors precision are rational, and the results reflect accurately the temperature distribution features of Qinling Mountains, which indicates that Qinling Mountains is an important climate borderline in China. At the same time, the simulation of temperature fields has proved that Qinling Mountains has evident climate differentional and climate effects on both sides of Qinling Mountains.

**Key words** Qinling Mountains; DEM-Aided spatial interpolation method; temperature field simulation