

安徽省热量资源空间分布模型及插值方法研究

吴文玉^{1,2}, 马晓群¹, 陈晓艺¹, 何彬方¹

(1 安徽省气象科学研究所, 安徽 合肥 230031; 2 安徽省大气科学与卫星遥感重点实验室, 安徽 合肥 230031)

[摘要] **【目的】**对安徽省热量资源进行栅格化处理, 解决无测站地区的热量资源估算问题, 为区域农业气候资源评估提供依据。**【方法】**利用安徽省 1971~2000 年气象站地面资料, 在地理信息系统技术(GIS)支持下, 采用多元回归结合空间插值方法, 建立安徽省热量资源要素空间分布模型, 并比较反距离权重法(IDW)、克里格和样条函数 3 种空间插值方法的精度。**【结果】**基于 GIS 平台, 建立了安徽省 250 m×250 m 分辨率的温度和积温栅格化数字地图。对空间插值方法的交叉验证结果表明, 3 种空间插值方法的平均绝对误差、平均误差平方的平方根排序均为 IDW<克里格法<样条函数法, IDW 法效果最优。**【结论】**应用 GIS 空间内插技术, 构建高分辨率的栅格化热量资源要素集, 可有效提高农业气候资源分析和利用的精细化程度。

[关键词] 空间分布模型; 空间插值; 热量资源; 栅格; 交叉验证

[中图分类号] S161.2; P423.2

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2009)09-0175-07

Establishment of spatial distribution models and spatial interpolation for thermal resources in Anhui Province

WU Wen-yu^{1,2}, MA Xiao-qun¹, CHEN Xiao-yi¹, HE Bin-fang¹

(1 Anhui Meteorological Institute, Hefei, Anhui 230031, China;

2 Anhui Province Atmospheric Science and Satellite Remote Sensing Key Laboratory, Hefei, Anhui 230031, China)

Abstract: **【Objective】**Spatial interpolation of climate data is frequently required to provide regional agricultural climate resource assessment and it can effectively solve the estimation of thermal resource in the area without observation station. **【Method】**Making full use of the meteorological observation data from 1971 to 2000, the spatial analysis models of heat factors were built up in virtue of SPSS. The heat factors included the annual mean temperature, and the accumulated temperature with characteristic temperature. **【Result】**On the basis of ArcGIS 9.2, the digital grid maps were formed on the scale of 250 m×250 m grid by applying the spatial distribution model. In this paper, based on regression analysis combined with spatial grid interpolation, the spatial interpolation methods of Inverse Distance Weight(IDW), Kriging, Spline and combined method were utilized for the comparison study on spatial interpolation of heat factors from 1971 to 2000 in Anhui province. Based on the mean absolute errors(MAE) and Root Mean Squared Interpolation Error(RMSIE) from cross-validation tests, the methods were ranked as IDW<Kriging<Spline for interpolating heat factors. **【Conclusion】**On the whole, IDW brought lowest errors. The high-resolution digital grid maps of heat factors were formed with the help of GIS spatial technology and could improve precision and accuracy of agricultural climate resource evaluation.

Key words: spatial distribution model; spatial interpolation; thermal resource; grid; cross-validation

* [收稿日期] 2008-12-19

[基金项目] 中国气象局业务建设项目“省级现代农业气象业务服务平台”; 武汉区域气象中心基金项目“长江中游区域粮食安全的气候影响评估研究”; 安徽省气象局业务建设重点项目“安徽省精细化农业气候区划”; 安徽省气象局科技发展基金项目“利用 GIS 技术对安徽省热量资源进行栅格化细分处理”

[作者简介] 吴文玉(1978—), 男, 安徽全椒人, 工程师, 硕士, 主要从事遥感和 GIS 应用研究。E-mail: wuwu2000@126.com

热量条件是农作物生长必需的环境因子之一,也是重要的农业气候资源^[1]。热量资源决定了农作物地区分布、种植制度、品种熟性和产量稳定程度等,常以温度高低和积温多少来表示^[2]。在区域农业气候资源评估中,高分辨率的气候要素分布图,有助于提高农业气候资源分析和农业气候区划的准确性。因此,需要利用空间插值技术,将离散站点气候资料扩展为区域化的栅格气象数据。然而,由于现有的气象站点空间分布不均、密度过小,而且呈离散型分布,难以满足气候资源评价对分辨率和准确性的要求^[3]。在实际工作中,研究人员将地统计学方法与地理信息系统的空间数据处理技术相结合,通过对已知站点气象数据进行空间插值,来实现由点数据到面数据的转化,生成研究区气象要素的空间栅格图^[4]。长期以来,国内外学者对空间离散数据的插值进行了大量研究,并提出了多种空间插值方法^[5-14]。目前,常用的气候资料空间插值方法有反距离权重法(Inverse distance weighted method, IDW)、克里格法(Kriging)、样条函数法(Spline),以及将多元回归与地理信息系统技术(GIS)和空间插值技术三者集成进行气候数据空间插值等方法^[15-16]。GIS具有强大的空间数据管理和分析功能,近年来,该技术已成功地运用到土地利用、水资源空间变异及平坦区域农业气候资源研究中。

安徽省南北跨度大,地形地貌类型复杂多样,平原、丘陵及山区热量资源区域差异很大,目前运用GIS技术对安徽省热量资源进行栅格化的研究尚不多见。本研究利用安徽省整编温度资料和数字高程模型(Digital elevation model, DEM)等数据,采用多元回归结合空间内插方法,建立了安徽省热量资源的空间分布模型,构建了安徽省网格温度数字专题地图,并对空间栅格化方法进行对比分析,以期对安徽省农业气候资源的精细化、量化分析和利用提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

安徽地处暖温带与亚热带过渡地区,气候温暖湿润,四季分明,地形地貌多样,长江和淮河自西向东横贯全境,将全省分为淮北、江淮、江南 3 大自然区。淮河以北地区地势坦荡辽阔,为黄淮海平原的重要组成部分;中部江淮之间,山地岗丘逶迤曲折、丘波起伏、岗冲相间;长江两岸和巢湖周围地势低平,属于长江中下游平原;南部以山地、丘陵为主。

全省大致可分为 5 个自然区域:淮北平原、江淮丘陵、皖西大别山区、沿江平原和皖南山区。

1.2 资料来源

(1)安徽省 79 个气象台站 1971~2000 年 30 年平均气温数据,来源于安徽省气候中心,每条数据包括气象站的站名、站号、经度、纬度、海拔高度和平均气温等数据项。

(2)基础地理信息数据为国家测绘局提供的 1:25 万地理信息数据。

1.3 数据处理

(1)使用 EXCEL 2003 整理 79 个台站基本信息,包括站号、站名、海拔高度、经度、纬度,以及 79 个台站 1971~2000 年平均气温资料。

(2)使用 ArcGIS 9.2 平台对 1:25 万地理信息数据进行处理,整理形成安徽省市县等行政边界和河流边界,提取 250 m×250 m DEM 高程等基础数据。

(3)根据不同地形及地貌类型,并兼顾分布的均匀性,从安徽 79 个气象站中选择 8 个气象站用于热量资源要素栅格化结果的验证。此 8 个气象站分别是:宿州、阜阳、寿县、滁州、合肥、安庆、泾县、休宁,其空间分布见图 1。

(4)用 SPSS 16.0 软件进行多元回归分析;在 ArcGIS 9.2 平台下,运用 IDW、克里格和样条函数法 3 种方法进行空间插值,栅格运算、制作热量资源要素(年平均气温、积温)分布图。

(5)对 8 个检验站点进行交叉验证及误差分析。



图 1 气象检验站点在安徽省的分布
Fig. 1 Distribution of meteorological observation stations in Anhui

1.4 研究方法

本研究拟采用多元回归结合空间内插法,对热

量资源要素(年平均气温、 $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温和 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温)进行栅格化,将热量要素分解为受可量化环境因子(如经度、纬度、海拔高度等)影响的规律性分量和非规律性分量 2 部分,其中非规律性分量是宏观地理因子模拟方程的残差部分,反映局部小地形因素和随机因素的影响,小地形影响的物理机制很复杂,到目前为止还没有公认的最好模拟模式。

利用多元回归方法进行热量要素栅格化的具体方法为,首先用气象站(不包括检验站点)的实测值作输出变量,以气象站的经度、纬度和海拔高度为输入变量建立多元回归模型,得到回归方程和各气象站点的热量要素计算值和残差;然后再用空间内插方法对热量要素残差进行空间插值,得到栅格化的残差;最后将回归模型和残差 2 部分进行栅格运算得到估算的实际预测值,其空间分布模型表达式为:

$$T=a\times M+b\times N+c\times P+d\times \epsilon。$$

式中: T 为站点气温, M 为站点的海拔高度, N 为站点的地理经度, P 为站点的地理纬度, d 为常数项, ϵ 为残差项, $a、b、c$ 为回归方程系数。

对热量要素回归模型的残差部分进行空间内插,用 ArcGIS 9.2 中的离散点插值法^[17],将热量要素残差 ϵ 内插到 $250\text{ m}\times 250\text{ m}$ 的栅格点上(分辨率与 DEM 相同),即得到热量要素残差 ϵ 的栅格分布图,获得 ϵ 栅格数据。本研究选用 IDW、克里格方法和样条函数法,作为热量资源要素残差的空间内插方法,并对 3 种方法结果进行对比分析,以提高插值精度。

1.4.1 IDW IDW 是一种基于相近相似原理的确定性插值方法,即 2 个物体距离越近,其值就越相似,反之距离越远则相似性越小。IDW 的公式如下:

$$Z(j)=\left[\sum_{i=1}^n\frac{Z_i}{d_i^2}\right]/\left[\sum_{i=1}^n\frac{1}{d_i^2}\right]。$$

式中: $Z(j)$ 为所要预测的 j 点的气象要素, Z_i 为气象要素在第 i 个站点的值, d_i 为插值点到第 i 个站点的大圆距离, n 为用于插值的气象站点数目。

1.4.2 克里格方法 克里格法是建立在地统计学基础上的一种插值方法,近年来在地质、气象等研究领域里得到广泛应用。该法以区域化变量理论为基础,以半变异函数(Semi-variogram)为分析工具,对空间分布具有随机性与结构性的变量的研究具有独特优点。对任一空间变量点的估计值 Z_x^* ,可以通过对其影响范围内的 n 个有效观测值 $Z(X_i)$ 的线性组合得到,即:

$$Z_x^*=\sum_{i=1}^n\lambda_iZ(X_i),i=1,\cdots,n。$$

式中: λ_i 是赋予气象观测值 $Z(X_i)$ 的权重系数,表示各站点气象要素值 $Z(X_i)$ 对估计值 Z_x^* 的贡献。为达到线性无偏估计,使估计方差最小,权重系数由普通或简单克里格方程组求得。同时,权重系数取决于变量的空间结构性,而任何变量的空间结构用半变异函数 $\gamma(h)$ 表示:

$$\gamma(h)=\frac{1}{2N(h)}\sum_{i=1}^{N(h)}(Z(X_i)-Z(X_i+h))^2。$$

式中: h 为距离矢量, $N(h)$ 为相距 h 的数据对数目。对于气温等热量资源要素插值采用幂函数模型、空洞效应模型较为理想;而对于降水的插值,可选择二次或幂函数模型。

1.4.3 样条函数法 样条函数法是用数学函数来逼近曲面的一种方法,该法易操作,计算量较小,与空间统计方法相比具有以下特点:不需要对空间方差的结构进行预先估计;不需要做统计假设,而这些假设往往是难以估计和验证的;当表面很平滑时,不牺牲精度。样条函数法适合于非常平滑的表面,一般要求有连续的一阶和二阶导数。其缺点是难以对误差进行估计,点稀疏时效果不好。

1.4.4 插值精度的评定方法 应用气象站点数据进行气象要素指标插值时,一般采用交叉验证方法(Cross-Validation)来验证某一插值方法的效果^[18-19]。交叉验证的过程是:首先假定每一气象站点的温度值为未知,用周围站点的实测值通过插值来估算,然后计算所有站点的实测值与估算值之间的误差。产生这种误差有 2 方面原因:一是插值算法的准确性,二是参与插值气象站点的疏密程度。虽然完全区分 2 种原因造成的误差十分困难,但对不同的插值方法,交叉验证仍然可以准确验证不同插值方法之间的相对精度。一般情况下,采用平均绝对误差(Mean absolute error,MAE)和平均误差平方的平方根(Root mean squared interpolation error,RMSIE)作为评估插值方法的标准。MAE 可以评估估算值可能的误差范围,RMSIE 可反映估算值的灵敏度和极值效应,其计算公式如下:

$$MAE=\frac{\sum_{i=1}^n|Z_i-Z'_i|}{n},$$
$$RMSIE=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n(Z_i-Z'_i)^2}{n}}。$$

式中: Z_i 为第 i 个站点的实际观测值; Z'_i 第 i 个站点的插值预测值; n 为用于验证的站点数目。

2 结果与分析

2.1 热量资源要素的空间分布模型

利用 SPSS 统计软件建立安徽省 71 个气象站

表 1 安徽省热量资源要素空间分布模型

Table 1 Regression models of Anhui heat factors and geographical parameters

空间回归模型 Spatial regression model	R^2	方差比 F	显著水平 Sig
$\bar{T}=-0.046M-0.587N-5.084P+388.632$	0.957	496.17	0.000
$\Sigma T_{\geq 0}=-16.092M-224.899N-1\,781.443P+140\,271.117$	0.953	448.75	0.000
$\Sigma T_{\geq 10}=-16.759M-194.495N-1\,278.787P+113\,828.475$	0.958	513.95	0.000

注： $\bar{T}$ 为 30 年年平均气温， $\Sigma T_{\geq 0}$ 为 30 年平均 $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温， $\Sigma T_{\geq 10}$ 为 30 年平均 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温； M,N,P 分别为站点的海拔高度、地理经度、地理纬度。

Note: $\bar{T}$ is the mean temperature of 30 years, $\Sigma T_{\geq 0}$ is $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ mean accumulated temperature of 30 years, $\Sigma T_{\geq 10}$ is $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ mean accumulated temperature of 30 years; M,N,P is elevation, longitude, latitude of meteorological observation respectively.

2.2 30 年年平均气温的栅格化结果

采用 IDW、克里格法和样条函数法 3 种方法，所得的 30 年年平均气温栅格化结果如图 2 所示。由图 2 可知，IDW、克里格法和样条函数法对安徽省

30 年年平均气温的栅格化结果分别为 $8.1\sim 16.8$ ， $8.2\sim 16.8$ 和 $7.9\sim 17.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；30 年年平均气温最高值分布在沿江区和皖南山区等局部地区，最低值出现在大别山区、皖南山区和淮北等地区。

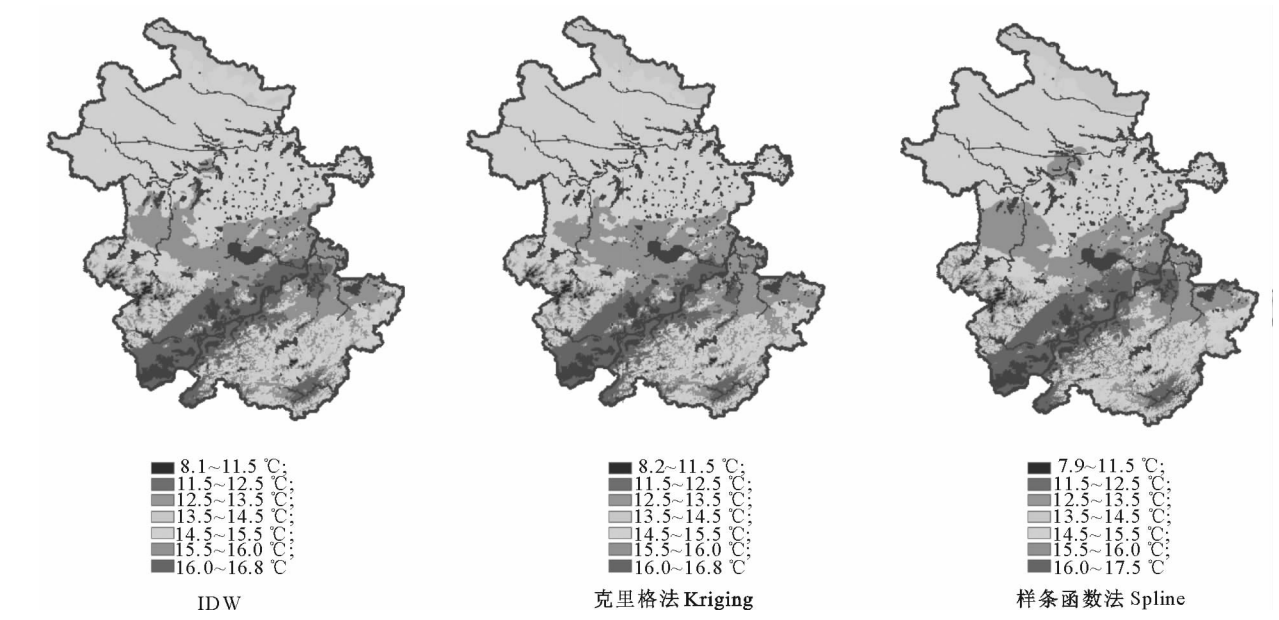


图 2 安徽省 30 年年平均气温的栅格化结果

Fig. 2 Distribution map of 30-year mean temperature in Anhui Province

2.3 30 年平均 $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温的栅格化结果

采用 IDW、克里格法和样条函数法 3 种方法，所得的 30 年平均 $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温栅格化结果如图 3 所示。由图 3 可知，IDW、克里格法和样条函数法对安徽省 $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温栅格化结果分别为 $3\,024\sim 6\,102$ ， $3\,056\sim 6\,084$ 和 $2\,919\sim 6\,352\text{ }^{\circ}\text{C}$ ； $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温最高值分布在沿江区、江淮区、皖南山区局部等地区，最低值出现在大别山区、皖南山区(黄山)等地。

2.4 30 年平均 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温的栅格化结果

采用 IDW、克里格法和样条函数法 3 种方法，所得的 30 年平均 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温栅格化结果如图 4 所示。由图 4 可知，IDW、克里格法和样条函数法对安徽省 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温的栅格化结果分别为 $2\,191\sim 5\,310$ ， $2\,202\sim 5\,292$ 和 $2\,123\sim 5\,552\text{ }^{\circ}\text{C}$ ； $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温最高值分布在沿江区、江淮区、皖南山区等地区，最低值出现在大别山区、皖南山区(黄山)等地。

综合图 2~图 4 可知,热量资源要素栅格化的结果均与地理纬度、DEM 呈负相关;DEM 高程值越大,热量资源要素值越小;地理纬度越低(小),热量资源越丰富(大)。热量资源要素在复杂山地部分(大别山区、皖南山区)的栅格化结果,与下垫面地形分布拟合结果关系尤为明显。

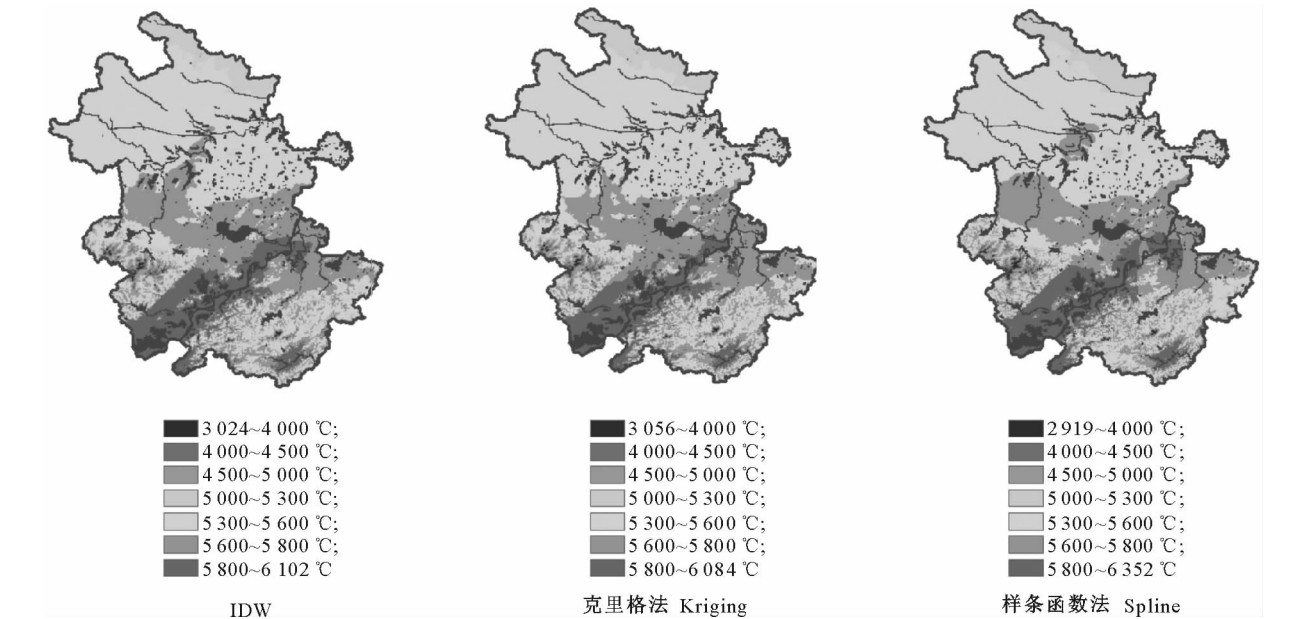


图 3 安徽省 $\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温的栅格化结果
Fig. 3 Distribution map of accumulated temperature($\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$) in Anhui Province

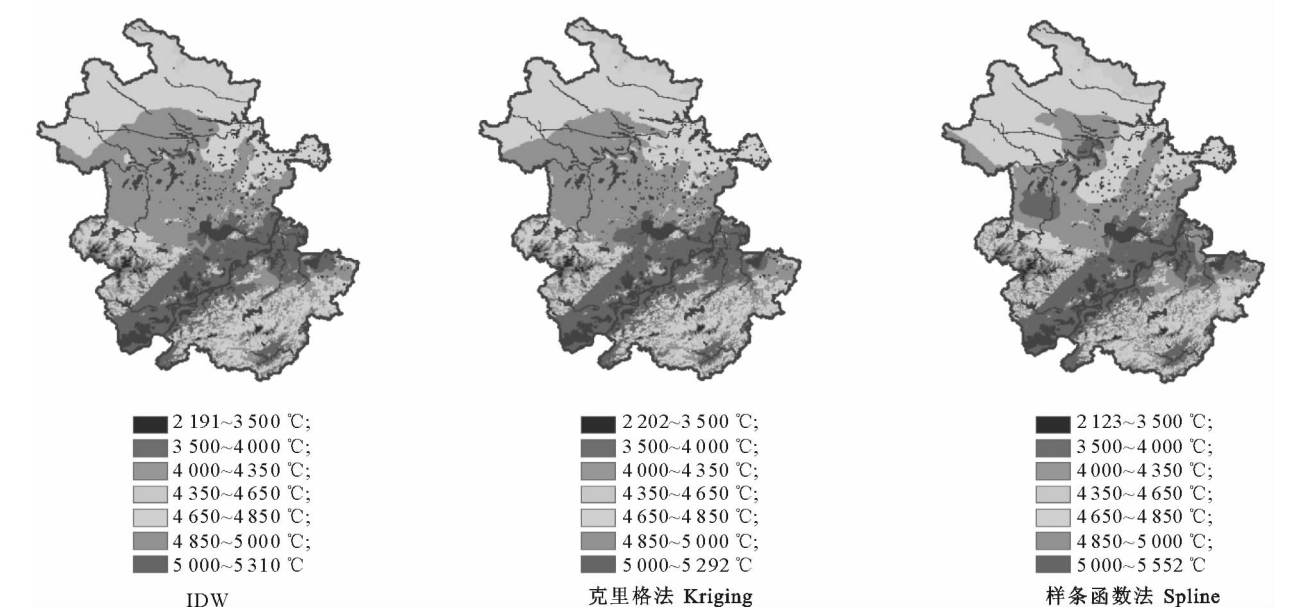


图 4 安徽省 $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温的栅格化结果
Fig. 4 Distribution map of accumulated temperature($\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) in Anhui Province

2.5 8 个气象检验点的误差分析

8 个检验站点的 MAE 和 RMSIE 误差分析如表 2 所示。由表 2 可看出,8 个检验站点 $\bar{T}$ 、 $\sum T_{\geq 0}$ 、 $\sum T_{\geq 10}$ 的 MAE 和 RMSIE 排序均为 IDW<克里格

法<样条函数法。表明将多元回归结合 IDW 方法用于热量资源要素栅格化时,其空间栅格化精度要高于克里格法和样条函数法。

表 2 安徽省 8 个气象检验站点的误差

Table 2 Results of cross-validation errors for three interpolation methods

站名 Station	$\bar{T}$			$\Sigma T_{\geq 0}$			$\Sigma T_{\geq 10}$		
	IDW	克里格法 Kriging	样条函数法 Spline	IDW	克里格法 Kriging	样条函数法 Spline	IDW	克里格法 Kriging	样条函数法 Spline
宿州 Suzhou	-0.06	-0.02	0.51	-21.02	-32.28	-1.69	-26.87	-9.00	-41.58
阜阳 Fuyang	0.26	0.18	0.15	89.66	142.67	89.45	69.33	69.12	114.08
寿县 Shouxian	-0.42	-0.39	1.14	-144.98	-140.91	-122.72	-131.37	-120.15	-122.37
滁州 Chuzhou	0.20	0.15	0.49	-21.17	-22.07	-25.11	49.01	44.06	44.74
合肥 Hefei	0.33	0.21	0.24	122.76	122.07	93.73	108.30	67.42	126.63
安庆 Anqing	0.45	0.52	0.72	169.55	164.87	199.97	160.83	188.33	167.72
泾县 Jingxian	-0.21	-0.36	0.00	-83.99	-32.75	-127.82	-88.20	-128.55	-49.98
休宁 Xiuning	0.01	0.14	0.61	-8.00	-6.30	4.83	-2.14	13.25	0.02
MAE	0.243	0.246	0.480	82.640	82.990	83.166	79.51	79.99	83.39
RMSIE	0.284	0.289	0.591	100.548	103.04	105.374	93.92	98.71	98.98

3 结论与讨论

本研究采用多元回归结合空间插值方法,建立了安徽省热量资源要素(年平均气温、积温等)与台站地理经度、纬度和高度的多元回归模型,通过了 0.01 水平的显著性检验,并进行了基于 MAE 和 RMSIE 的 IDW、克里格法和样条函数法 3 种插值方法的对比分析。

通过插值方法对比分析可知,用 3 种方法对热量资源要素多元回归的残差进行空间化处理时,IDW 比克里格法和样条函数法误差小,说明 IDW 法空间内插得到的回归残差占真实值部分的比例较小,其数据空间分布的规律性以及连续性均很差。而克里格法的空间内插是以空间连续性为隐含假设的,这就使得克里格法的优势难以表现出来,而 IDW 仅考虑距离远近的影响,反而空间化效果更好。

利用 GIS 技术,对安徽省热量资源要素进行栅格化,提高了热量资源评估分析的精细化程度。栅格结果的每一个栅格点代表等格距下垫面的要素数据,而且栅格化结果数据可直接转为带地理信息的文本数据,便于对细网格要素资料的进一步分析。

[参考文献]

[1] 尹洪涛,刘新安,刘寿东,等. 辽西地区热量资源分析与栅格化[J]. 资源科学,2006,28(1):169-173.
Yin H T,Liu X A,Liu S D. Analysis and grid of thermal resources in west Liaoning province [J]. Resources Scie-nce, 2006,28(1):169-173. (in Chinese)

[2] 钱锦霞,赵桂香,李新生,等. 基于 GIS 的半干旱山区热量资源评估-以晋中市为例 [J]. 干旱区地理,2007,30(4):579-584.
Qian J X,Zhao G X,Li X S. Evaluation of thermal resou-rce in the semi-arid mountainous areas based on GIS-a case study of Jinzhong city [J]. Arid Land Geograph,2007,30(4):579-584. (in Chinese)

[3] 郑小博,罗宇翔,于飞,等. 西南复杂山地农业气候要素空间插值方法比较 [J]. 中国农业气象,2008,29(4):458-462.
Zheng X B,Luo Y X,Yu F. Comparisons of spatial interp-ola-tion methods for agro-climate factors in complex mo-untain ar-eas of Southwest China [J]. Chinese Journal of Agrometeorolo-gy,2008,29(4):458-462. (in Chinese)

[4] 孟庆香,刘国彬,杨勤科. 黄土高原降水量的空间插值方法研究 [J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2006,34(3):83-88.
Meng Q X,Liu G B,Yang Q K. Research on spatial interpola-tion methods of pricipitation on loess plateau [J]. Journal of Northnest A&F University: Natural Science Edition,2006,34(3):83-88. (in Chinese)

[5] 李军,黄敬峰. 山区气温空间分布推算方法评述 [J]. 山地学报,2004,22(1):126-132.
Li J,Huang J F. Review on methods in simulating spatial dis-tribution of temperature in mountains [J]. Journal of Mountain Science, 2004,22(1):126-132. (in Chinese)

[6] 廖顺宝,李泽辉. 气温数据栅格化中的几个具体问题 [J]. 气象科技,2004,32(5):352-356.
Liao S B,Li Z H. Some practical problems related to rasteriza-tion of air temperature [J]. Meteorological Science and Tech-nology, 2004,32(5):352-356. (in Chinese)

[7] 廖顺宝,李泽辉. 基于 GIS 的定位观测数据空间化 [J]. 地理科学进展,2003,22(1):87-93.
Liao S B,Li Z H. A Methodology of spatialization of ob-served data based on GIS [J]. Progress in Geography,2003,22(1):87-93. (in Chinese)

- [8] Bates D, Lindstrom M, Wahba G. Gevpack-routines for generalized cross validation [J]. *Communications in Statistics B-Simulation and Computation*, 1987, 16: 263-297.
- [9] Price D T, McKenney D W, Nalder I A, et al. A comparison of two statistical methods for spatial interpolation of Canadian monthly mean climate data [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 101: 81-94.
- [10] Stahl K, Moore R D, Floyer J A, et al. Comparison of approaches for spatial interpolation of daily air temperature in a large region with complex topography and highly variable station density [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 139: 224-236.
- [11] 关宏强, 蔡福, 王阳, 等. 短时间序列气温要素空间插值方法精度的比较研究 [J]. *气象与环境学报*, 2007, 23(5): 13-16. Guan H Q, Cai F, Wang Y. Comparison of different spatial interpolation methods for air temperature data of short-time series [J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2007, 23(5): 13-16. (in Chinese)
- [12] 杨阳, 缪启龙, 邱新法, 等. GIS支持的起伏地形下重庆市水汽压的空间分布 [J]. *中国农业气象*, 2006, 27(1): 11-15. Yang Y, Miao Q L, Qiu X F. Spatially distribution of water-vapor press under rugged terrain on GIS in Chongqing [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2006, 27(1): 11-15. (in Chinese)
- [13] 刘新安, 于贵瑞, 范辽生, 等. 中国陆地生态信息空间化技术研究-温度、降水等气候要素 [J]. *自然资源学报*, 2004, 19(6): 818-825. Liu X A, Yu G R, Fan L S. Study on spatialization technology of terrestrial eco-information in China(Ⅲ): temperature and precipitation [J]. *Journal of Natural Resources*, 2004, 19(6): 818-825. (in Chinese)
- [14] 莫申国, 张百平. 基于DEM的秦岭温度场模拟 [J]. *山地学报*, 2007, 25(4): 406-411. Mo S G, Zhang B P. Simulation of temperature fields based on DEM in Qinling Mountains [J]. *Journal of Mountain Science*, 2007, 25(4): 406-411. (in Chinese)
- [15] 蔡福, 于慧波, 矫玲玲, 等. 降水要素空间插值精度的比较—以东北地区为例 [J]. *资源科学*, 2006, 28(6): 73-79. Cai F, Yu H B, Jiao L L. Comparison of precision of spatial interpolation of precipitation factors: A case study in Northeastern China [J]. *Resources Science*, 2006, 28(6): 73-79. (in Chinese)
- [16] 邵晓梅, 严昌荣, 魏红兵. 基于Kriging插值的黄河流域降水时空分布格局 [J]. *中国农业气象*, 2006, 27(2): 65-69. Shao X M, Yan C R, Wei H B. Spatial and temporal structure of precipitation in the Yellow River Basin based on Kriging method [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2006, 27(2): 65-69. (in Chinese)
- [17] 樊红, 詹小国. ARC/INFO应用与开发技术[M]. 修订版. 武汉: 武汉大学出版社, 2002: 185-262. Fan H, Zhan X G. Arc/Info Application and Development [M]. Revised Edition. Wuhan: Wuhan University Publishing House, 2002: 185-262. (in Chinese)
- [18] 刘登伟, 封志明, 杨艳昭. 海河流域降水空间插值方法的选取 [J]. *地球信息科学*, 2006, 8(4): 75-79. Liu D W, Feng Z M, Yang Y Z. Selection of the spatial interpolation methods for precipitation in the Haihe River Basin [J]. *GeoInformation Science*, 2006, 8(4): 75-79. (in Chinese)
- [19] Holdaway M R. Spatial modeling and interpolation of monthly temperature using Kriging [J]. *Clim Res*, 1996, 24: 1835-1845.