

# 公路气候区划的 DEM 综合插值法

鲁 娥<sup>1</sup>,张苗苗<sup>2</sup>,陈文强<sup>3</sup>,许金良<sup>1</sup>

(1. 长安大学 公路学院,陕西 西安 710064; 2. 宁波公路市政设计有限公司,浙江 宁波 315000;  
3. 安顺市交通建设工程质量监督站,贵州 安顺 561000)

**摘 要:**温度插值方法的精度对于公路气候区划有重要的影响,以新疆天山地区为例,利用天山及其周边地区共 52 个气象站点在 1971~2000 年间的气温数据,采用数理统计方法中的多元线性回归法分析了天山地区累年年平均气温与经度、纬度和海拔的相关关系,在基于 DEM(数字高程模型)一般插值方法的基础上,引入残差提出了基于 DEM 的综合插值法,与反距离权重法、普通 Kriging 法以及基于 DEM 的一般插值方法进行了插值效果对比和精度比较,在此基础上对 4 种插值方法得到的温度分布进行了分区,并对分区结果进行了分析。研究表明:插值精度越高,插值得到的气温分布与实际气温分布越接近,温度区划结果就越精确;基于 DEM 的 2 种插值方法较反距离权重法、普通 Kriging 法精度提高了 1 倍,更适用于地形复杂地区的公路气候区划需求;基于 DEM 的综合插值法相较于基于 DEM 的一般插值法在计算精度上提高了 10% 以上,在公路气候区划数据有限时具有一定的优越性。

**关键词:**道路工程;公路气候区划;DEM;插值方法

**中图分类号:**U419 **文献标志码:**A

## DEM interpolation method of climatic regionalization for highway

LU E<sup>1</sup>, ZHANG Miao-miao<sup>2</sup>, CHEN Wen-qiang<sup>3</sup>, XU Jin-liang<sup>1</sup>

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Ningbo Highway and Municipal Design Company Limited, Ningbo 315000, Zhejiang, China; 3. Anshun Traffic Engineering Construction Quality Supervision Station, Anshun 561000, Guizhou, China )

**Abstract:** The precision of temperature interpolation method has a great influence on climatic regionalization for highway. Based on the case study of Tianshan mountains area, the relationship between temperature and longitude, latitude, altitude was analyzed by using temperature data of 52 meteorological stations in and around Tianshan mountains areas from 1971 to 2000. Besides, a comprehensive interpolation method was proposed by introducing residual based on DEM(digital elevation model), and its effect and precision were compared with that of inverse distance weighing method, ordinary Kriging method, and general interpolation method based on DEM. Taking all of these for basis, the temperature distributions resulting from the four methods were divided and the results were analyzed. The results show that: the higher interpolation precision is, the gained temperature distribution is closer to the actual temperature distribution; the two interpolation methods based on DEM with its double precision than that of inverse distance

weighing method and ordinary Kriging method are more suitable for the need of highway climatic regionalization in complex terrains, and in contrast, the comprehensive interpolation method has an over 10% higher precision than general interpolation method, which shows certain superiority when the data of highway climatic regionalization is limited. 1 tab, 5 figs, 20 refs.

**Key words:** road engineering; climatic regionalization for highway; DEM; interpolation method

## 0 引言

公路气候区划是以大量气象站点观测的气象数据为基础,通过插值处理后根据所选的区划指标和确定的区划方案进行区域划分。气温是公路气候区划中重要的分区依据,无论是国家一级公路气候区划或者省区一级公路气候区划,还是农业气候区划、工程气候区划或者其他气候区划,基本上都采用热量气候资源,作为分区的主导依据。基本理论和出发点认为热量是一切气候分布和变化的根源,无论气候的地带性或者非地带性分布和变化,热量资源都起主导作用。因此,气温插值结果和实际的相符程度,即插值方法的精度是保证区划结果正确性的重要前提。已有公路气候区划着重于区划指标、区划方法、区划方案以及数据的可用性分析的研究<sup>[1-4]</sup>,忽略了研究数据插值精度这一关键问题。因此,如何借助空间插值方法,对有限站点的气象数据进行插值得出较为合理的气象数据分布,对公路气候区划具有十分重要的意义。以往的研究表明:气温不但受到经度、纬度以及海拔的影响,还和下垫面的类型有关<sup>[5-6]</sup>。ArcGIS 9.3 的 Geostatistical Analyst 模块提供的统计插值分析功能,在原始数据的相关因子较少和分布合理的情况下,精度较高。但是,如何在山区复杂地形条件下利用有限的观测数据插值得到气温的合理空间分布始终是一个难题<sup>[7]</sup>,并且,大多数研究表明考虑海拔高度对气温的影响可以明显减小模型误差,改善气温的模拟效果<sup>[8-11]</sup>。

新疆天山地区幅员辽阔,高差悬殊,气象站点分布相对稀疏,区域内气象站点的平均海拔为 1 151 m,远小于天山地区的平均高度 3 567 m,且站点基本分布于海拔 2 000 m 以下的地区。因此,本文以新疆天山地区为例,对最常用的 2 种插值方法反距离权重法(inverse distance weighing,简称 IDW)和普通克里金法(Kriging)进行了介绍,在基于 DEM(digital elevation model,数字高程模型)的一般插值方法的基础上,引入残差概念,提出了基于 DEM 的综合插值法。采用这 4 种插值方法对公路气候区

划数据的年平均气温进行插值分析,研究不同插值方法的精度对温度分区的影响,以确保公路气候区划的科学性和可靠性。

## 1 基础资料及预处理

公路气候区划数据预处理就是利用搜集的气象站点数据建立气象数据库,将空间数据和属性数据相关联,然后利用 ArcGIS9.3 的 Geostatistical Analyst 模块进行可用性分析,去除离群值后进行插值分析。所用的气温数据为天山及其周边地区共 52 个气象站点(如图 1 所示,其中新疆 46 个,甘肃 5 个,青海 1 个;在研究区域内的站点 29 个)1971~2000 年的气温资料,数据来源于中国气象局的中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/>)。52 个站点的气温数据中的 45 个用于构建气温插值模型,7 个用于模型精度的检验;用于检验的站点占总站点数的 13.46%,占研究区域站点数的 24.14%。

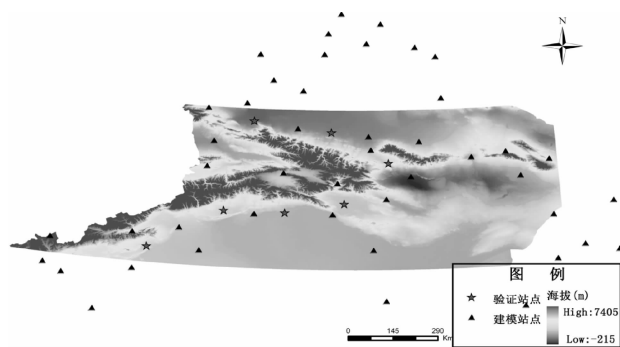


图 1 天山地区 DEM 及气温站点分布

Fig. 1 Tianshan mountains area DEM and temperature sites distribution

## 2 插值方法比较与研究

### 2.1 最常用插值方法简介

#### 2.1.1 反距离权重法

反距离权重法(inverse distance weighing,简称 IDW)基于这样的假设:彼此距离较近的事物要比彼此距离较远的事物更相似。这种方法并没有考虑到区域化变量的空间变异性,是一种纯几何加权法,

它是一种计算相对简单、操作相对便利的几何方法，是各种应用与研究中最常用的空间插值方法之一。可用下式表示<sup>[12]</sup>

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n 1/D_i^p Z_i}{\sum_{i=1}^n 1/D_i^p}$$

(1)

式中： $Z$  为估算值； $Z_i$  为第  $i$  ( $i=1, \dots, n$ ) 个样本的观测值； $D_i$  为估算点与第  $i$  个样本点之间的距离； $n$  为样本数； $p$  为距离的幂。

Husar 等的研究表明，样本点在预测过程中受参数  $p$  的影响，幂越高，内插的平滑效果越好<sup>[13]</sup>。

2.1.2 Kriging 法

Kriging 法是以这一技术的先驱者——南非的矿业工程师克里格(D. G. Krige)的姓名命名的。它是建立在变异函数空间分析基础上，对有限区域内的区域化变量取值进行无偏最优估计的一种方法<sup>[14-15]</sup>。Kriging 估计技术有别于其他空间估计方法的最主要特点，是在于对变量的空间相关性进行分析和利用<sup>[16]</sup>。在 ArcGIS 的 GA 扩展模块中，共包含普通 Kriging 法和简单 Kriging 法等 7 种克里金方法，且有其各自的适用范围<sup>[17]</sup>。在各种 Kriging 方法中，以普通 Kriging 法最为常用。

2.2 基于 DEM 的插值方法

许多学者的研究表明，作为热量指标的多年平均温度，其空间分布不仅存在明显的水平地带性特征，同时受海拔高度的强烈影响，即：温度与经度、纬度和海拔高度等因素存在十分显著的相关关系<sup>[18]</sup>。基于此，可以对某一地区的温度与经度、纬度和海拔进行回归分析，如果相关关系显著，便可建立合理的回归方程

$$T = \alpha X + \beta Y + \gamma H + C$$

(2)

式中： $T$  为气温； $X$  为经度； $Y$  为纬度； $H$  为高度； $C$  为常数； $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  为回归系数。

利用此方程中温度与海拔的关系即可将常用插值方法与 DEM 结合使用，可以称之为基于 DEM 的插值方法。

2.2.1 基于 DEM 的一般插值方法

一般情况下，气温随海拔上升而递减，这种趋势的强弱可用  $|\gamma|$  (式(2)中的回归系数  $\gamma$  的绝对值) 的大小来表示，称  $|\gamma|$  为气温的垂直递减率。利用气温的垂直递减率  $|\gamma|$  和站点的海拔高度，可以将站点气温反算得到站点的海平面温度后；然后再利用 ArcGIS 提供的普通 Kriging 法插值生成研究区域的海平面温度栅格数据；最后与区域 DEM 数据结合利用栅格计算器将海平面温度修正为研究区域的气温。这种方法称为基于 DEM 的一般插值方法，它是基于 DEM 插值方法的基本方法，其技术路线如图 2 所示。

2.2.2 基于 DEM 的综合插值法

基于 DEM 的一般插值方法利用数据统计分析得到的线性规律，在插值过程中充分考虑了对气温有直接影响的经度、纬度，尤其是海拔高度的影响。根据翁笃鸣等的研究，山区气温不但受到经度、纬度和海拔的影响，还受到诸如坡度、坡向、地形遮蔽度和土壤、植被等因素的影响<sup>[19]</sup>。而在建立的回归方程中很难将所有的因素考虑并囊括在内，这也是不实际的。为得到更加合理可靠的温度插值结果，本文引入残差的概念，将实测气温和按基于 DEM 的一般插值方法得到的预测气温之差称为气温残差。由此可在基于 DEM 的一般插值方法的基础上，得到另一种插值方法——基于 DEM 的综合插值法，其抄作流程见下页图 3。具体过程为：①计算研究区域内参与建模的 22 个站点的气温残差；②利用普通 Kriging 法插值生成研究区域的气温残差栅格数据；③最后利用栅格计算器将基于 DEM 的一般插值方法得到的研究区气温数据和气温残差数据相加得到最终的研究区气温栅格数据。这种方法是对基

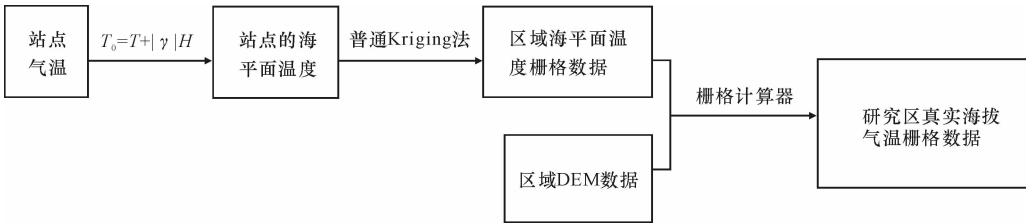


图 2 基于 DEM 的一般插值方法操作流程

Fig. 2 Operation process of general interpolation method based on DEM

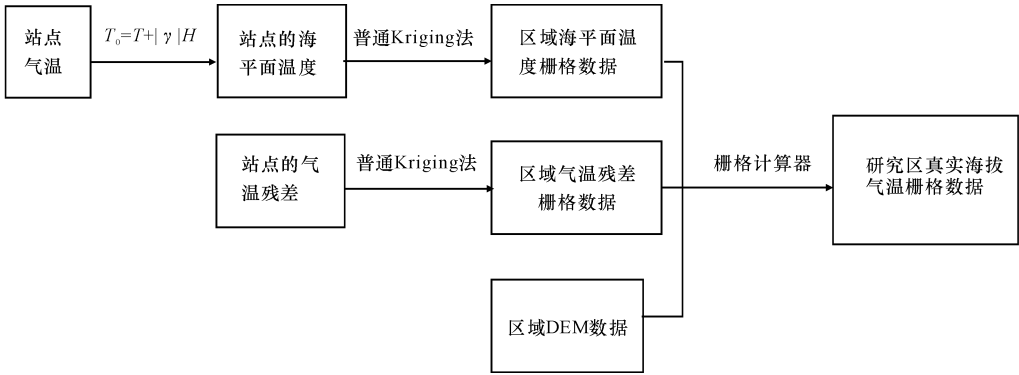


图 3 基于 DEM 的综合插值方法操作流程

Fig. 3 Operation process of integrated interpolation method based on DEM

于 DEM 的一般插值方法的进一步研究,虽然在方法和操作上并不复杂,但其不但考虑了经度、纬度和海拔因素对气温的影响,还考虑了其他很难甚至不能用回归方程表示的影响因素。

3 结果分析

要保证区划结果的正确性,区划数据必须和实际的气候情况相符,因此,需对研究数据的空间分布进行插值精度分析。

应用气象站点数据进行气候指标插值结果的精度检验,通常采用“实际验证”和“交叉验证”2 种方法<sup>[20]</sup>。实际验证是将部分站点用于建模和插值计算,然后利用未参与建模和插值计算的站点处的模型预测值和实际值进行比较的过程。交叉验证是在假设某一站点的温度值未知的基础上,采用周围站点的值对其进行插值估算,依次对所有站点做同样的操作,然后对所有站点的实际值与估算值进行比较的过程。2 种方法并没有实质上的区别,本文通过计算未参与建模和插值计算的站点的 MAE(模型预测温度与实际温度平均值的差值)和 RMSIE(模型预测温度与实际温度平均值差值平方和的平方根)作为指标来衡量模型的精度,MAE 和 RMSIE 的值越小,相应模型的精度也就越高。

3.1 不同插值方法插值效果对比

通过对天山地区 45 个建模站点 30 年(1971~2000 年)累年年平均气温与经度、纬度和海拔作回归分析,可以得到以下关系式

$$T = -0.110X - 1.123Y - 0.005H + 71.074 \quad (3)$$

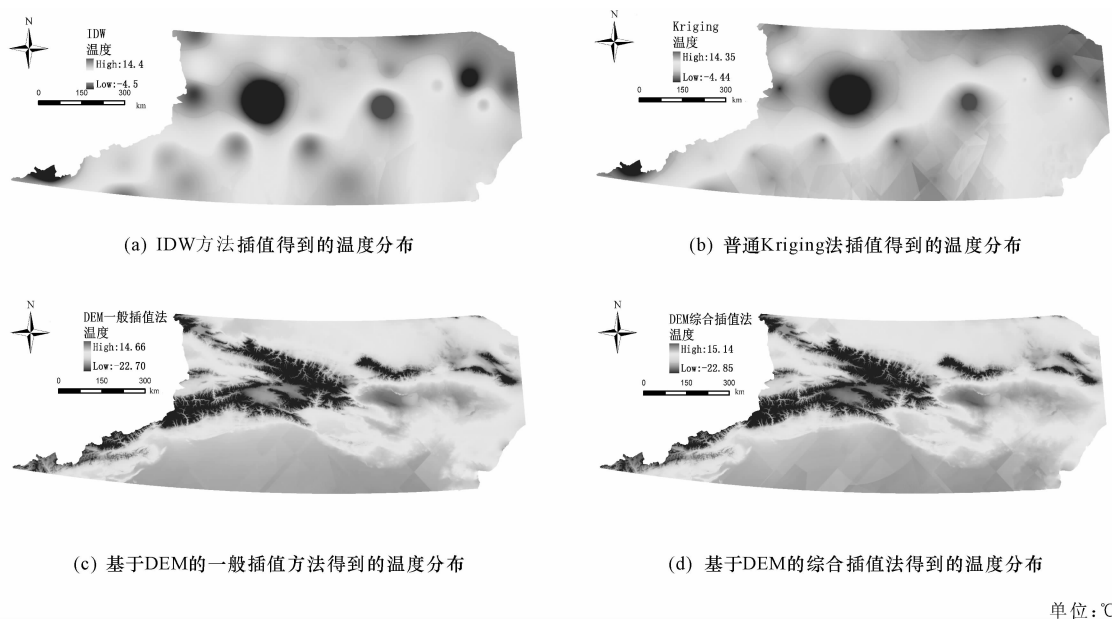
相关系数  $R = 0.923$ 。

然后利用 IDW 法、普通 Kriging 法、基于 DEM 的一般插值方法和基于 DEM 的综合插值法对天山地区 30 年累年年平均气温进行空间插值,得到 4 种

不同的温度分布,如下页图 4 所示。对不同插值方法得到的气温数值和温度分布进行比较可以发现:①IDW 方法得到的温度范围为  $-4.5\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 14.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,普通 Kriging 法得到的温度范围为  $-4.44\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 14.35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,两者较为相似,且 IDW 法和普通 Kriging 法直接插值得到的温度分布状况较为相似,都在一定程度上反应了天山地区气温的空间分布特点,且都有“牛眼”现象(当局部样本的数据较少时,内插结果受样本点数值的影响,产生围绕样本点的“靶心”,即“牛眼”现象),但普通 Kriging 法较 IDW 法相比“牛眼”现象有所弱化;②基于 DEM 的一般插值法得到的温度范围为  $-22.70\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 14.66\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,基于 DEM 的综合插值法得到的温度范围为  $-22.85\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 15.14\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,两者基本接近,且 2 种方法插值得到的温度分布十分相似,都十分明显地反映了天山地区气温的空间分布特点,很难从图形判断两者的优劣;③基于 DEM 的 2 种插值方法插值得到的温度范围与 IDW 法和普通 Kriging 法直接插值得到的温度范围有很大的差异,主要表现在低温上,这与高海拔地区无气象站点有关,其表现出来的温度随地形变化,尤其是随高度变化的特点十分显著。

3.2 不同插值方法精度比较

为简便有效地比较 4 种不同插值方法的相对优劣,对未参与建模和插值计算的精河、石河子等 7 个站点的预测温度和实际温度进行了比较(见下页表 1)。通过对各插值方法的 MAE 和 RMSIE 进行对比发现,基于 DEM 的插值方法的 MAE 和 RMSIE 都明显小于 IDW 法和普通 Kriging 方法的 MAE 和 RMSIE,其中以 IDW 法的 MAE 和 RMSIE 最大,以基于 DEM 的综合插值法的 MAE 和 RMSIE 最小。由此可见,4 种插值方法对天山地区 30 年累年年平均气温插值效果从优至劣的顺序依次为:基于



单位:℃

图 4 4 种不同插值方法得到的天山地区气温分布

Fig. 4 Temperature distribution from the four interpolation methods in Tianshan mountains area

表 1 不同插值方法精度比较

Tab. 1 Accuracy comparison of different interpolation methods

站点	30 年累年年 平均温度/℃	预测温度/℃			
		IDW 法	普通 Kriging 法	基于 DEM 的一般插值方法	基于 DEM 的综合插值法
精河	7.8	7.068	6.930	9.342	8.910
石河子	7.4	6.599	6.459	8.510	7.811
达板城	6.6	8.374	8.635	6.874	6.921
焉耆	8.5	9.445	9.282	8.794	9.482
拜城	7.8	8.497	8.435	8.405	8.569
轮台	11.0	7.595	7.563	9.453	9.776
柯坪	11.7	8.711	9.084	10.795	10.862
MAE		1.620	1.617	0.899	0.808
RMSIE		3.747	3.636	1.058	0.751

DEM 的综合插值法、基于 DEM 的一般插值法、普通 Kriging 法、IDW 法。

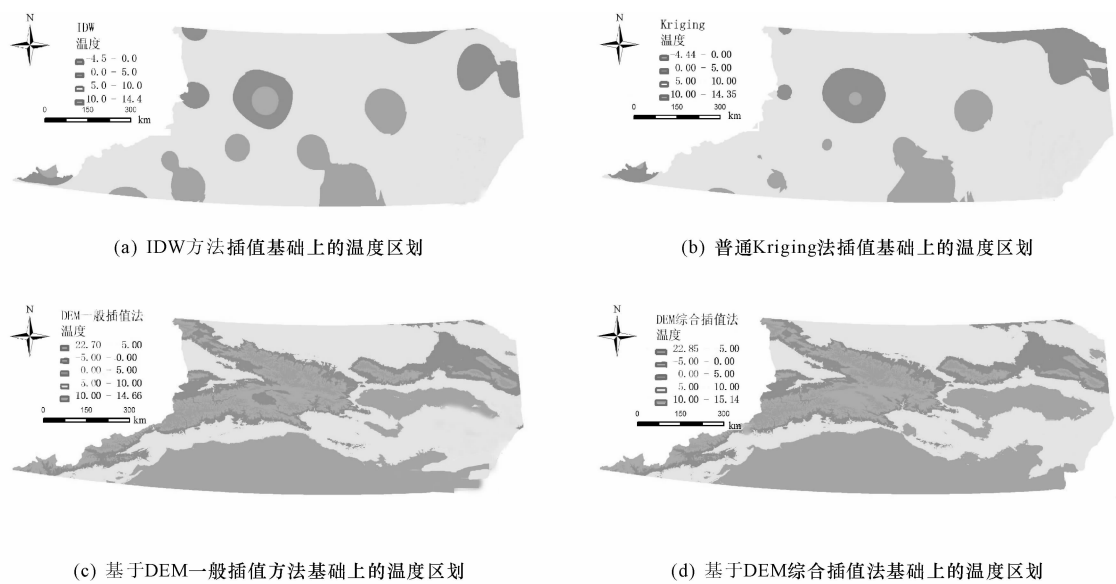
3.3 插值方法对气候区划的影响

新疆地区公路温度区划主要以年平均温度作为区划指标,目的是划分出不同的冻融地区。天山地区气候寒冷,年均气温较低,本文以-5℃、0℃、5℃、10℃为温度区划的分界线,对 4 种插值方法得到的温度分布进行区划划分(如下页图 5 所示),探讨不同插值方法对气候区划的影响。通过比较分析 4 种不同的温度区划初始图得出:①采用 IDW 方法和普通 Kriging 法得到的温度区划大体相同,不同温度的区划界限突兀,并且温度主要集中在 5℃~10℃这一区域,小于 0℃的冰冻区极少,这与该地区海拔高差悬殊且气象站点主要分布在海拔较低的位置有关;②基于 DEM 的 2 种插值方法得

到的温度区划主要分为 4 个区:小于 0℃、0℃~5℃、5℃~10℃以及大于 10℃,区划直观地展示了天山地区的温度分布,界限也较缓和;③采用 IDW 方法和普通 Kriging 法得到的温度区划和基于 DEM 的 2 种插值方法得到的温度区划相比,小于 0℃的区域较少,和天山高海拔地区常年冰冻的现象不符;这也证明采用基于 DEM 的插值方法模拟地势起伏较大区域的温度较为合适。④将气温分布图、区划图和插值精度结合,可以发现插值精度越高,插值得到的气温分布越接近现实,区划结果也越精确。

4 结 语

(1)由于气温数据对公路气候区划有重要影响,



单位:℃

图 5 不同插值方法的温度区划

Fig. 5 Temperature division of different interpolation methods

本文对天山地区 45 个站点 30 年年平均气温采用了 4 种方法(即:IDW 法、普通 Kriging 法、基于 DEM 的一般插值方法和基于 DEM 的综合插值法)进行插值试验,并对插值得到的温度分布以及温度区划进行了分析比较,对模型精度进行了讨论。

(2)对于温度插值而言,IDW 法和普通 Kriging 法的操作最为简单,但没有考虑地形因素对山区气温的影响,精度较低。基于 DEM 的插值方法充分考虑了经度、纬度,尤其是海拔对温度的影响,因而无论是得到的温度分布,还是模型精度,都明显优于 IDW 法和普通 Kriging 法这类直接插值方法。

(3)除经度、纬度和海拔外还有很多影响温度的因素,故在基于 DEM 的一般插值方法基础上,引入残差概念可以在一定程度上提高模型精度,得到更为合理的温度分布。

(4)对 4 种插值方法得到的温度分布按照相同的分区界限进行分区结果分析,结果表明插值的精度越低,区划方案的误差越大。采用 IDW 法和普通 Kriging 法进行插值的温度区划和天山地区的温度特点差别较大,在 DEM 插值方法基础上得到的温度区划能够很好地反映天山地区的温度分布。因此,提高插值的精度对区划方案的准确性有重要的影响。

(5)影响公路气候区划的因素很多,要提高分区的准确性,未来还需要通过大量数据分析确定更全面的影响因素,并在此基础上继续优化基于 DEM

的综合插值法的应用。

参考文献:

References:

[1] 李超,许金良,杨宏志.基于空间变异理论的中国公路气候区划[J].长安大学学报:自然科学版,2009,29(1):45-49.  
LI Chao, XU Jin-liang, YANG Hong-zhi. Climatic zoning for highway construction in China based on spatial variability theory [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29(1): 45-49. (in Chinese)  
[2] 苗英豪,王秉刚.中国公路气候区划方案[J].北京工业大学学报,2009,35(1):89-95.  
MIAO Ying-hao, WANG Bing-gang. China climatic regionalization for highway[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2009, 35(1): 89-95. (in Chinese)  
[3] 崔伯恩.西北地区公路自然气候区划及其对筑路材料的技术标准的影响研究[D].重庆:重庆交通学院,2003.  
CUI Bo-en. Research on natural climatic zoning of the northwest highway and its impact of technical standards for road construction materials[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2003. (in Chinese)  
[4] 牛玉欣,许金良,袁春建.山东省公路气候区划数据可用性分析[J].武汉理工大学学报,2010,32(24):90-93.

- NIU Yu-xin, XU Jin-liang, YUAN Chun-jian . Analyze of the availability of highway climatic zoning data of Shandong Province[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 32(24): 90-93. (in Chinese)
- [5] Daly C. Guidelines for assessing the suitability of spatial climate data sets[J]. International Journal of Climatology, 2006, 26(6): 707-721.
- [6] Nalder I A, Wei R W. Spatial interpolation of climatic normals; test of a new method in the Canadian boreal forest [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1998, 92(4): 211-225.
- [7] 李 新, 程国栋, 卢 玲. 青藏高原气温分布的空间插值方法比较[J]. 高原气象, 2003, 22(6): 565-573.  
LI Xin, CHENG Guo-dong, LU Ling. Comparison study of spatial interpolation methods of air temperature over Qinghai-Xizang plateau[J]. Plateau Meteorology, 2003, 22(6): 565-573. (in Chinese)
- [8] Dodson R, Marks D. Daily air temperature interpolated at high spatial resolution over a large mountainous region[J]. Climate Research, 1997, 8(1): 1-20.
- [9] Robeson S M, Janis M J. Comparison of temporal and unresolved spatial variability in multiyear time-averages of air temperature[J]. Climate Research, 1998, 10(1): 15-26.
- [10] 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 Shun-bao, LI Ze-hui. Some practical problems related to rasterization of air temperature[J]. Meteorology Science and Technology, 2004, 32(5): 352-356. (in Chinese)
- [11] 李 军, 游松财, 黄敬峰. 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, 2006, 15(1): 109-115.  
LI Jun, YOU Song-cai, HUANG Jing-feng. Spatial interpolation method and spatial distribution characteristics of monthly mean temperature in China during 1961-2000 [J]. Ecology and Environment, 2006, 15(1): 109-114. (in Chinese)
- [12] 李 新, 程国栋, 卢 玲. 空间内插方法比较[J]. 地球科学进展, 2000, 15(3): 260-265.  
LI Xin, CHENG Guo-dong, LU Ling. Comparison of spatial interpolation methods [J]. Advance in Earth Sciences, 2000, 15(3): 260-265. (in Chinese)
- [13] Husar R B, Falke S R. Uncertainty in the spatial interpolation of PM10 monitoring data in Southern California [EB/OL]. <http://capita.wustl.edu/CAPITA/CapitaReports/CaInterp/CaINTERP.HTML>, 1997-03-03/1999-10-25.
- [14] 侯景儒, 黄克先. 地质统计学的理论与方法[M]. 北京: 地质出版社, 1990.  
HOU Jing-ru, HUANG Jing-xian. The theories and methods of geostatistics[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1990. (in Chinese)
- [15] 吕连宏, 张 征, 迟志森, 等. 地质统计学在环境科学领域的应用进展[J]. 地球科学与环境学报, 2006, 28(1): 101-105.  
LU Lian-hong, ZHANG Zheng, CHI Zhi-miao, et al. Application and development of geostatistics in environmental sciences[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2006, 28(1): 101-105.
- [16] 王家华. 克里金地质绘图技术: 计算机的模型和算法[M]. 北京: 石油工业出版社, 1999.  
WANG Jia-hua. Kriging geological mapping technology: computer models and algorithms[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999. (in Chinese)
- [17] 秦 涛, 付宗堂. ArcGIS 中几种空间内插方法的比较[J]. 物探化探计算技术, 2007, 29(1): 72-75.  
QIN Tao, FU Zong-tang. Comparison of several space interpolation method in ArcGIS[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2007, 29(1): 72-75. (in Chinese)
- [18] 潘耀忠, 龚道溢, 邓 磊, 等. 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.  
PAN Yao-zhong, GONG Dao-yi, DENG Lei, et al. Smart distance searching-based and DEM-informed interpolation of surface air temperature in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2004, 59(3): 366-374. (in Chinese)
- [19] 翁笃鸣, 罗哲贤. 山区地形气候[M]. 北京: 气象出版社, 1990.  
WENG Du-ming, LUO Zhe-xian. Mountainous terrain and climate[M]. Beijing: Meteorological Press, 1990. (in Chinese)
- [20] 蔡迪花, 郭 锐, 李崇伟. 基于 DEM 的气温插值方法研究[J]. 干旱气象, 2009, 27(1): 11-17.  
CAI Di-hua, GUO Ni, LI Chong-wei. Interpolation of air temperature based on DEM over eastern region of Gansu[J]. Journal of Arid Meteorology, 2009, 27(1): 11-17. (in Chinese)