

# 薄盘光滑样条插值中三种协变量方法的 降水量插值精度比较

刘正佳<sup>1,2,3</sup>, 于兴修<sup>1</sup>, 王丝丝<sup>4</sup>, 商贵铎<sup>2,3</sup>

(1. 临沂大学 山东省水土保持与环境保育重点实验室/资源环境学院. 山东临沂 276005;

2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 3. 山东师范大学人口资源与环境学院, 济南 250014;

4. 香港中文大学地理与资源管理系, 香港)

**摘 要:**在薄盘光滑样条插值中, 高相关协变量的选取决定了插值结果的精确性。以2001-2009年全国728个气象站点日降水为数据源, 提取年降水量数据, 在分析多年平均降水量与两协变量高程(DEM)和距海岸线距离(DCL)的空间相关性基础上, 利用ANUSPLIN软件, 比较不同协变量下降水量插值结果精度在全国尺度以及区域尺度上的差异。以DEM、DCL及DEM-DCL分别为协变量对降水量数据进行空间插值发现: ①在全国尺度上, DEM法的平均绝对误差(MAE)为47.79, 略低于DEM-DCL法(48.90), 但显著低于DCL法(55.54); 且DEM法的平均相对误差和均方根误差也明显低于其它两种方法。②在区域尺度上, 除西藏地区外的其他7个区域, 3种方法的插值误差与全国尺度上相一致。西藏地区降水插值结果以DCL法的精度最高, 而DEM法则较差。研究建议除在西藏地区的降水量插值研究中采用DCL法, 在全国其他大部分区域采用DEM法。

**关 键 词:**降水量插值; ANUSPLIN; 协变量; 精度

降水数据是生态机理模型(如CEVSA模型)重要的输入要素之一, 在区域尺度和全球尺度生态系统变化模拟与研究发挥着极其重要的作用。降水数据的精确性往往决定模型的输出结果, 进而影响到模型模拟预测的精度。高空间分辨率、网格化的降水数据能够更好的表达其连续分布的空间特征, 可以和其他环境、遥感等数据高度兼容, 且在一定程度上会减少模型输出结果的不确定性<sup>[1]</sup>, 是地学模型和气候模型等相关研究重要的输入变量<sup>[2]</sup>。目前, 降水数据的获取主要依靠气象台站的长期定位观测, 但现有气象台站分布不均且数量较少, 导致了空间降水数据精确性下降<sup>[3]</sup>。因此, 如何利用有限的观测台站数据获取高精度、高分辨率的空间分布数据, 是一个重要的科学问题。

高相关性变量的选取及其与插值模型的整合方式是降雨插值研究的主导方向<sup>[4]</sup>。大气降水的分布受纬度位置(气压带或风带)、海陆分布(距海远近)、大气环流(季风)、下垫面条件和人类活动等多尺度多要素综合作用的影响。降水随距海洋(或海

岸线)距离远近而变化的现象具有普遍性, 这种比降会因空间位置和时间而变化而变化<sup>[5-6]</sup>。下垫面也是影响降水的重要因素之一, 在区域尺度上, 地形起伏对降水的分布产生了重大的影响<sup>[7-8]</sup>。现阶段研究中, 已提出了大量的降水插值方法, 如: ArcGIS中提供的反距离加权法、样条函数法、普通克里格方法等<sup>[9]</sup>, 以及贝叶斯插值法<sup>[10]</sup>、薄盘光滑样条法、多元线性回归方法<sup>[11]</sup>等, 这些方法中以Hutchinson提出的薄盘光滑样条法应用最为广泛<sup>[12-14]</sup>。国内外学者<sup>[15-18]</sup>在应用薄盘光滑样条法时, 多考虑DEM对降水的影响, 然而, 将距海岸线距离作为变量应用到插值中的研究相对较少。同时, 不同区域尺度间的比较研究较少。

本研究以ANUSPLIN为工具, 以高程(Digital elevation model, DEM)、距海岸线距离(distance from the coastline to each point, DCL)及DEM-DCL为协变量, 比较分析降水量插值结果在全国及区域尺度的差异, 确定对区域降水插值影响最大的协变量, 以降低降水插值中的不确定性, 以期今后精确降水数据插值研究提供借鉴。

收稿日期: 2011-10; 修订日期: 2012-02.

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-08-0877); 临沂市重大科技创新项目(201011019)。

作者简介: 刘正佳(1986-), 男, 回族, 山东青州人, 硕士研究生, 主要从事遥感和GIS应用研究。E-mail: lzj7sdjn@126.com

通讯作者: 于兴修(1967-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事资源利用与环境效应研究。E-mail: yuxingxiu@lyu.edu.cn

# 1 数据与方法

## 1.1 数据来源与处理

降水数据来自中国728个气象台站(图1)的长期日平均气象观测记录,其中,有658个台站有2001-2004年的数据,681个有2005年的数据,683个有2006年的数据,727个有2007-2008年的数据,676个2009年的。数据中包含了台站号、经纬度、日降水量和站海拔等信息。为进一步计算每个站点的多年平均降水量,对降水量缺测月份较多的台站予以剔除。因此,本研究中实际使用了658个台站的实际观测资料。对658个台站日降水量数据作进一步处理,将日降水量数据转化为旬降水量,以便插值使用。旬降水量数据是CEVSA模型重要的驱动数据,且利用旬降水量进行插值有效的节省了插值时间。

空间分辨率为1 km×1 km的DEM和海岸线矢量数据,由中国科学院地理科学与资源研究所数据中心提供,其投影方式均为Albers。投影的主要参数单位为m;参考椭球体为Krasovsky;X、Y轴偏量都为0;第一标准纬线为25°0'0"N;第二标准纬线为47°0'0"N;中央经线为105°0'0"E;坐标原点为0°0'0";半球参数为Krasovsky的长短半轴。本研究海岸线由3部分组成:一部分是中国大陆陆地海岸线北起辽宁省丹东鸭绿江口湿地,南至广西省东兴市金滩;另外两部分分别是海南省、台湾省的轮廓线。

## 1.2 相关性分析

大量研究<sup>[4-5,8,17-21]</sup>表明,高程和距海岸线距离等是影响降水空间分布的主要因素。本研究利用SPSS 17.0软件进行相关分析,经正态分布检验,因为多年平均的年降水空间分布数据不服从正态分布,故相关分析时采用Spearman相关系数。

## 1.3 插值原理与方法

**1.3.1 ANUSPLIN4.3基本原理** ANUSPLIN是基于普通薄盘和局部薄盘样条函数插值理论。局部薄盘光滑样条法是对薄盘光滑样条原型的扩展,ANUSPLIN中除普通的样条自变量外还允许引入线性协变量模型。本研究以ANUSPLIN为基础工具,将DEM、海岸线(站点到海岸线的距离)及二者组合分别作为协变量,并对这3种方法插值的结果进行对比分析,以研究何种方法更能准确、便捷的反映降水的空间分布情况。

局部薄盘光滑样条的理论统计模型为:

$$z_i = f(x_i) + b^T y_i + e_i (i = 1, \dots, N) \quad (1)$$

式中:  $z_i$  是位于空间  $i$  点的因变量;  $x_i$  为  $d$  维样条独立变量;  $f(x_i)$  为需要估算的关于  $x_i$  的未知光滑函数;  $b$  为  $y_i$  的  $p$  维系数;  $y_i$  为  $p$  维独立协变量;  $e_i$  为具有期望值为0且方差为  $w_i \sigma^2$  的自变量随机误差,其中  $w_i$  为作为权重的已知局部相对变异系数,  $\sigma^2$  为误差方差,在所有数据点上为常数,但通常未知<sup>[22]</sup>。由式(1)可见,当式中缺少第二项,即协变量维数  $p=0$  时,模型可简化为普通薄盘光滑样条;当缺少第一项独立自变量时,模型变为多元线性回归模型,但ANUSPLIN中不允许这种情况出现。

函数  $f(x_i)$  和系数  $b$  可通过下式的最小化确定,即最小二乘估计确定<sup>[16,22]</sup>:

$$\sum_{i=1}^N \left( \frac{z_i - f(x_i) p b^T y_i}{w_i} \right)^2 + \rho J_m(f) = \min \quad (2)$$

式中:  $J_m(f)$  为函数  $f(x_i)$  的粗糙度测度函数,  $m$  在ANUSPLIN中称为样条次数,也叫粗糙度次数;  $\rho$  为正的光滑参数,在数据保真度与曲面的粗糙度之间起平衡作用。当  $\rho$  接近于零时,拟合函数是一种精确插值方法。当  $\rho$  接近于无穷时,函数接近于是最小二乘多项式,命令由粗糙次数  $m$  决定。而光滑参数值通常由广义交叉验证(Generalized Cross Validation, GCV)的最小化来确定,也可由最大似然估计(generalised max likelihood, GML)或期望真实平方误差(Expected True Square Error, MSE)的最小化来确定。GCV、GML、MSE的具体计算公式可在ANUSPLIN VERSION 4.36 USER GUIDE的7~8页上查阅<sup>[22]</sup>。

**1.3.2 基于DEM辅助的插值方法** 将中国陆地区域  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$  的经纬度坐标导入ArcGIS 9.3,利用

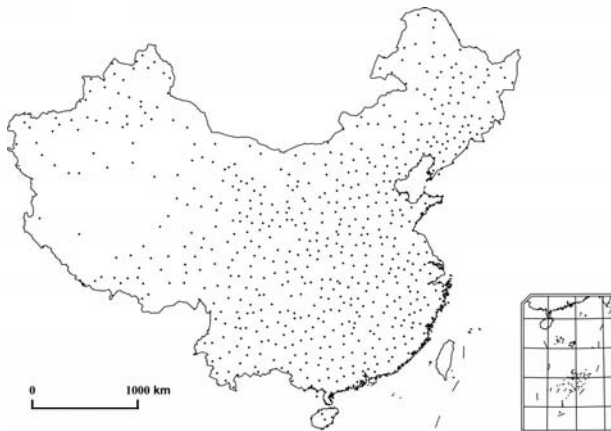


图1 中国气象站空间分布

Fig.1 Distribution of meteorological stations in China

ArcGIS 中提供的 Extract values to point 工具从重采样为  $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$  的 DEM 上提取出所有格点的高程, 并进行投影变换处理, 最终转成 Albers 投影。然后将属性表导出, 并处理成 ANUSPLIN 下 lappnt.exe 需要的格式, 最终保存为 \*.txt 文件。

**1.3.3 基于海岸线辅助的插值方法** 简称 DCL 法, 同样将中国陆地区域  $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$  的经纬度坐标导入 ArcGIS 9.3, 投影方式转换为 Albers 投影。利用 ArcGIS 中提供的 near 工具提取出每一个格点距海岸线的距离(m)。然后, 将属性表导出, 进一步处理成 ANUSPLIN 下 lappnt.exe 需要的格式, 最终保存为 \*.txt 文件。

**1.3.4 基于 DEM-DCL 辅助的插值方法** 这种方法是以以上两种方法的结合, 最终生成的 \*.txt 文件里包含了经纬度、高程及距海岸线距离 4 个变量的数值, 以便同时利用 DEM 和 DCL 插值。

**1.4 误差分析方法**

在比较空间插值精度时, 本研究未参照 ANUSPLIN 提供的 GCV 验证方法, 而是采用参考标准较 GCV 法更加丰富、国内常用交叉验证法<sup>[2,23]</sup>来对比分析各插值结果。交叉验证的原理是: 首先假定每一个气象站点的降水值是未知的, 都用周围站点的值插值估计, 然后就算所有站点的实际观测值与估计值之间的误差。交叉验证中, 运用表征估计值可能的误差范围的平均绝对误差(MAE)、反映插值相对精确性的平均相对误差(MRE)、反映利用数据估值的灵敏度和极值效应的均方根误差(RMSE)3 个参数评估插值方法效果。其计算公式如式(3)~式(5):

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Z_i - Z_i'| \tag{3}$$

$$MRE = \frac{n}{\sum_{i=1}^n |Z_i|} \times MAE \tag{4}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z_i - Z_i')^2}{n}} \tag{5}$$

式中:  $Z_i$  为第  $i$  个台站的实际观测值;  $Z_i'$  为第  $i$  个台站的估计值;  $n$  为参与检验的台站的个数。

**2 结果分析与讨论**

**2.1 相关分析结果**

相关分析表明: 降水与高程、距海岸线距离的

相关系数  $r$  分别为  $0.276^{**}$ 、 $-0.469^{**}$  (\*\*表示在  $\alpha=0.01$  下显著, 样本数  $n=658$ )。显然, 降水与距海岸线距离存在中度相关性, 与高程存在低度相关性, 卢爱刚等<sup>[24]</sup>的研究结果发现: 高程仅在一定范围( $<3000$  m)内对降水影响较明显, 与本研究结果也较符合。

**2.2 插值结果比较**

**2.2.1 插值结果的空间分析** 图 2 为利用 3 种方法插值后得到的中国陆地区域降水分布图, 其中, 图 2b 降水空间分布格局及趋势与阎洪<sup>[17]</sup>的研究结论基本一致, 即: 模拟的结果对中国气候空间有很大改进, 特别是在山区和气象台网稀疏的地区。3 种方法均可较好的反映出降水的空间分布格局, 即东南沿海多, 西北内陆少, 从东南沿海向西北内陆逐渐减少。年均降水量空间变异较大。但不同插值方法所得的结果在空间分布上存在一定的差异, DEM 法和 DEM-DCL 法在空间分辨精度和细节表现方面要优于 DCL 法。DEM 法可以较准确的反映复杂地形条件下降水的空间差异, 而 DCL 法插值结果较为平滑, 仅反映了降水的变化趋势, 忽略了降水分布的空间异质性。

由图 1 可以看出, 全国气象站点的分布差异较大, 主要表现为东部沿海多, 西部内陆少。因此, 本研究参照中国自然地理区划(图 2), 将全国划分为东北地区(I)、华北地区(II)、华中地区(III)、华南地区(IV)、内蒙古地区(V)、西北地区(VI)、西藏地区(VII)和西南地区(VIII)等 8 个代表性区域<sup>[25]</sup>, 各区内包含的台站数目如表 1 所示。图 2 中 DEM-DCL 法和 DEM 法在插值效果上表现出了高度的一致性, 但与 DCL 法有明显的差异, 尤其是西北、西藏、西南、华南等地区, 空间差异较为显著, 如: 西北地区南部及西藏地区西北部, DEM-DCL 法和 DEM 法显示该区域降水量分布在  $200 \sim 500$  mm 之间, 而 DCL 法则显示该区域年降水量的范围为  $0 \sim 200$  mm。

由此也可推断, 当 DEM 和 DCL 共同作为协变量时, DEM 是主导因子。

**2.2.2 区域比较** 表 1 为各区气象台站实测年降雨量最大值、最小值、平均值与 3 种插值方法估值的比较。在 8 个大区内, 通过对比发现: ①DCL 法估计的区域最大降水量普遍低于实测最大降水量; 除西北地区外, 区域最小降水量普遍高于实测最小降水量, 且区域平均降水量普遍最接近区域实测降水平均值。②DEM 法估计中, 除内蒙古和西藏地区高估区域最大降水外, 其余 6 个区域普遍低估区域最大降水量; 西北地区低估最小降水量, 而其他 7



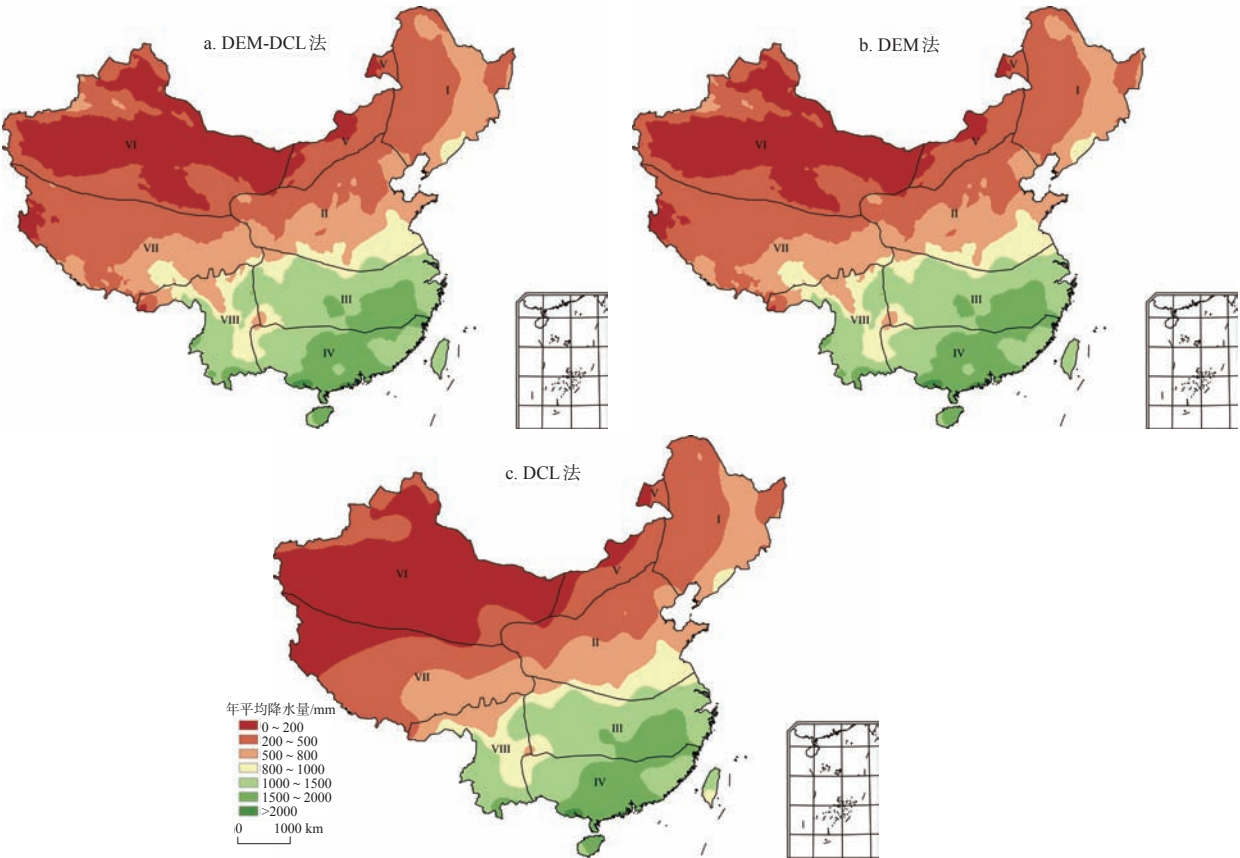


表 1 各区年降水量最大值、最小值及平均值与估值的对比

Tab.1 Contrasts of the actual and estimated maximum, minimum and average values of annual precipitation

图 2 中国年平均降水量空间分布图

Fig.2 Spatial patterns of annual mean precipitation in China

编号	台站 数目	年降水量实测值			DCL 法下插值的			DEM 法下插值的			DEM-DCL 法下插值的		
		/mm			年降水量/mm			年降水量/mm			年降水量/mm		
		max	min	average	max	min	average	max	min	average	max	min	average
I	98	1036.1	257.8	508.0	935.8	269.3	508.9	994.9	263.0	517.1	982.7	263.0	517.4
II	147	1140.6	201.4	586.9	1103.1	217.4	588.3	1125.4	210.6	599.2	1126.4	216.6	599.4
III	119	2070.0	709.4	1303.7	1724.1	717.5	1303.4	1788.6	792.0	1313.8	1786.2	765.4	1313.3
IV	92	2991.2	760.5	1529.3	2406.3	827.7	1531.6	2663.4	848.2	1543.3	2658.4	853.8	1543.4
V	22	360.6	119.1	234.4	349.8	132.0	234.9	370.0	121.0	246.5	380.6	120.9	246.6
VI	84	593.5	18.3	145.8	450.4	14.0	147.7	585.9	15.4	167.1	553.5	18.3	145.8
VII	49	856.0	58.5	487.4	750.3	59.7	483.0	945.0	121.0	546.4	940.3	115.8	545.4
VIII	47	2381.7	484.9	1064.5	1744.6	571.6	1060.4	1980.0	670.2	1122.5	1966.9	658.2	1120.2

注: max 表示最大降水量, min 表示最小降水量, average 表示平均降水量。

个区域的最小降水量均高估。③DCL-DEM法,在区域最大和最小降水量估计方面表现出与DEM法大致相同的结果,但DCL-DEM法在西北地区估计的最小和平均值确是3种方法中最接近实测值的。  
2.2.3 季节差异 DEM-DCL法、DEM法及DCL法插值的全国多年年平均降水量分别为575.89 mm、575.31 mm、544.50 mm均低于2009年国家气象局

公布的常年年平均降雨量612 mm,这可能与近年来全国总降水量普遍偏少且干旱频繁、气象台站较少、插值方法存在一定不确定性等因素有关。  
图3为利用3种协变量方法插值的多年季节平均降水量差异图:季节平均降水量在冬、春两季差异较小;而夏、秋季节差异较大。夏、秋两季DCL法插值出的季节平均降水量均低于DEM-DCL法

和 DEM 法,这可能与 DCL 法较 DEM-DCL 法和 DEM 法低估湿润半湿润地区(图2中I、II、III、IV)降水量有关。DEM-DCL 法、DEM 法及 DCL 法季节平均降水量:在夏季分别为 274.31 mm、273.95 mm、258.35 mm;在秋季分别为 185.28 mm、185.13 mm、171.81 mm。DCL 法较 DEM-DCL 法、DEM 法有随季节平均降水量增加差异变大的趋势。

2.3 模拟精度分析

2.3.1 中国陆地区域尺度的误差分析 交叉验证结果如表2所示,3种协变量插值方法 MAE 的大小排列为:DCL 法>DEM-DCL 法> DEM 法,其值分别为 56.02、49.08 和 48.19。MRE 的大小排列为:DCL 法>DEM-DCL 法>DEM 法,其值分别为 0.070、0.062 和 0.061。RMSE 的大小排列为 DCL 法>DEM-DCL 法>DEM 法,其值分别为 93.94、77.71 和 76.38。

比较分析发现:与降水存在低度相关的高程作为协变量时,在全国尺度上显示了较高的插值精度,DEM 法的 MAE 比 DCL 法的低 7.83,且 MRE 比 DCL 法低 0.009;相反,与降水存在中度相关的 DCL 作为协变量并没有显示出较好的插值效果,尽管体现出了降水的地带性变化特征,但在 3 种插值结果中其精度是最差的;DEM-DCL 法插值精度明显高于 DCL 法,但略低于 DEM 法,插值误差增大可能是协变量中增加了 DCL 的原因,这表明 DCL 虽然与降水存在较大相关性,但其作为协变量在全国尺度降水插值应用中并没有较好的提高插值精确性。通过误差对比,DEM 法插值效果最好,DEM-DCL 法次之,DCL 法较差。

2.3.2 区域尺度的误差分析 MRE 反映了插值结果的相对精确性,东北、华中、华北等地区 MRE 值相对较小,表明在该地区插值精确性相对较高,这可

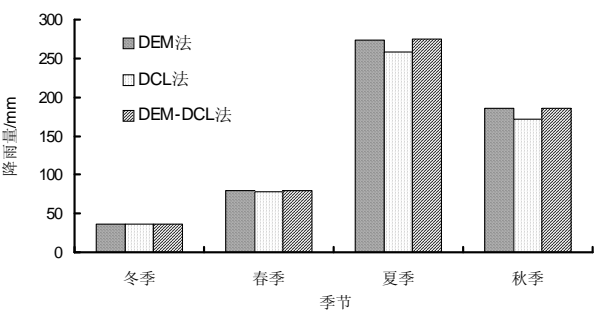


图3 季节平均降水量差异

Fig.3 The differences of seasonal mean precipitation

能与这些地区地处东部沿海、气象观测站点相对较多且分布较均匀、海拔相对较低且地势较平坦有一定关系;而西南和西北地区 MRE 值相对较大,表明在这些地区插值精确性相对较低,这可能与这些地区深居内陆、单位面积上气象站点相对较少、海拔较高且地形变化差异较大有一定关系。区域尺度上,3种协变量插值方法在东北、华北、华中、华南、内蒙古、西北和西南等7个区域的 MAE 大小排列顺序与全国尺度的研究结果基本一致,但在西藏地区却相反。有研究<sup>[7]</sup>指出,在青藏高原高原地区的干季(10月到次年5月),海拔对高原月降水的影响很小,因而以高程为数据源的多元回归法及相应的混合插值法不适合;相关研究<sup>[23]</sup>同样指出,降水与海拔 3000 m 以下的区域相关性更好,因而对于平均海拔在 4000 m 以上的青藏高原用 DEM 辅助插值不适合。在西藏地区,3种协变量插值方法 MAE 的大小排列为 DEM 法>DEM-DCL 法> DCL 法,其值分别为 60.63、59.66 和 33.61;插值的精确性方面,DCL 法也明显优于 DEM 法和 DEM&DCL 法,其 MRE 值分别为 0.069、0.124 和 0.122;这说明高相关变量 DCL 才是决定该地区降水插值精确性的关键因子。

表2 三种不同协变量插值法的误差统计

Tab.2 Error statistics of three different covariates interpolation methods

区域	MAE			MRE			RMSE		
	DCL	DEM	DEM-DCL	DCL	DEM	DEM-DCL	DCL	DEM	DEM-DCL
东北地区	23.78	18.90	19.86	0.047	0.037	0.039	29.74	24.20	25.24
华北地区	35.19	30.02	30.50	0.060	0.051	0.052	50.23	44.21	45.66
华中地区	69.23	53.98	54.61	0.053	0.041	0.042	97.05	80.33	80.78
华南地区	113.98	80.34	82.23	0.075	0.053	0.054	160.40	109.88	112.06
内蒙地区	16.17	13.53	13.98	0.069	0.058	0.060	21.86	18.07	18.38
西北地区	26.45	25.16	26.18	0.181	0.173	0.180	37.43	36.09	36.29
西藏地区	33.61	60.63	59.66	0.069	0.124	0.122	48.65	75.47	75.45
西南地区	136.41	132.93	135.57	0.128	0.125	0.127	185.48	161.11	164.74
全国	56.02	48.19	49.08	0.070	0.061	0.062	93.94	76.38	77.71

### 3 结论

本研究利用中国陆地区域 658 个气象站的降水观测资料,系统分析了 3 种插值方法(分别以 DEM、DCL 和 DEM-DCL 作为协变量)插值结果之间的差异。结果表明:在全国尺度上,与降水存在低度相关的高程变量,作为协变量参与降水空间插值时,插值效果较好;且交叉验证结果表明,DEM 法的 MAE、MRE、RMSE 均最小。虽然 3 种方法都反映出了降水变化的地带性特征,但 DEM 法可以更加准确的反映出复杂地形条件下降水的空间差异。3 种方法中,DEM 法插值效果最好的,DEM-DCL 法次之、DCL 法较差。DEM 法所需计算变量少、操作简便、模拟精度较高,值得在全国尺度降水插值中应用。

除西藏地区外的其他 7 个区域,3 种方法的插值误差排列顺序与全国尺度的相一致:DEM 法插值效果最好,DEM-DCL 法次之、DCL 法较差。但西藏地区则表现出相反的结论,DCL 法插值效果最好,而 DEM 法插值效果较差,可能由于该地区海拔较高、全年干季时间较长且年均降水量相对较少,海拔对高原降水的影响较小有一定关系<sup>[7,23]</sup>。因此,对该区域进行降水插值时,建议采用 DCL 为协变量的 ANUSPLIN 插值法。

在季节差异方面,DCL 法插值出的季节平均降水量在冬、春两季较 DEM-DCL 法和 DEM 法差异较小;而夏、秋两季季节平均降水量均低于 DEM-DCL 法和 DEM 法。

降水插值结果受插值方法、气象站的空间分布和数目等多因素综合影响。插值软件本身的局限性很难在短时期内突破,进一步提高插值精度的关键在于尽可能多的增加观测站点的数量,如增加境外台站或县市级台站等。另外,在大尺度研究中,由于地形复杂多样、气候差异性大,且气象站数量有限,因此为了保证降水估值的准确性,客观反映降雨的空间分布特征,需要进一步在不同区域拟合插值方面深入研究。

### 参考文献

- [1] Marie B, Pierre F, Philippe C, et al. How uncertainties in future climate change predictions translate into future terrestrial carbon fluxes. *Global Change Biology*, 2005, 11(6): 959-970.
- [2] 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. *地理学报*, 2004, 59(3): 666-374.

- [3] Nynke H, Mark N, Carol M. The influence of interpolation and station network density on the distributions and trends of climate variables in gridded daily data. *Climate Dynamics*, 2010, 35(5): 841-858.
- [4] 朱会义,贾绍凤. 降雨信息空间插值的不确定性分析. *地理科学进展*, 2004, 23(2): 34-42.
- [5] Jorge M, Javier L, Pilar G. Estimation models for precipitation in mountainous regions: The use of GIS and multivariate analysis. *Journal of Hydrology*. 2003, 270(1-2): 1-11.
- [6] 何红艳,郭志华,肖文发. 降水空间插值技术的研究进展. *生态学杂志*, 2005, 24(10): 1187-1191.
- [7] 何红艳,郭志华,肖文发,等. 利用 GIS 和多变量分析估算青藏高原月降水. *生态学报*, 2005, 25(11): 2933-2938.
- [8] 刘志红, Tim R, Li L T, 等. 基于 ANUSPLIN 的时间序列气象要素空间插值. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2008, 36(10): 227-234.
- [9] Cristina P, Nuria B, Josep E, et al. Seasonal precipitation interpolation at the Valencia region with multivariate methods using geographic and topographic information. *International Journal of Climatology*, 2010, 30(10): 1547-1563.
- [10] Ijaz H, Gunter S, Jurgen P, et al. Spatio-temporal interpolation of precipitation during monsoon periods in Pakistan. *Advances in Water Resources*, 2010, 33(8): 880-886.
- [11] Bruce D, Ingrid S, Massimo C, et al. Spatial Mapping of Ozone and SO<sub>2</sub> Trends in Europe. *Science of Total Environment*, 2010, 408(20): 4795-4806.
- [12] Cuauhtemoc S, Gerald E, Nicjolas L, et al. Spline models of contemporary 2030, 2060 and 2090 climates for Mexico and their use in understanding climate-change impacts on the vegetation. *Climate Change*, 2010, 102(3-4): 595-623.
- [13] Effie K, Christos G, Tom H, et al. Assessment of interpolated ERA-40 reanalysis temperature and precipitation against observations of the Balkan Peninsula. *Theoretical and Applied Climatology*, 2010, 102(1-2): 115-124.
- [14] Hijmans R, Cameron S, Parra J, et al. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 2005, 25(15): 1965-1978.
- [15] Hutchinson M, Mckenney D, Lawrence K, et al. Development and Testing of Canada-Wide Interpolated Spatial Models of Daily Minimum-Maximum Temperature and Precipitation for 1961-2003. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2009, 48(4): 725-741.
- [16] Price D, McKenney D, Nalder I, et al. A comparison of two statistical methods for spatial interpolation of Canadi-

- an monthly mean climate data. *Agricultural and Forest meteorology*, 2000, 101(2-3): 81-94.
- [17] 阎洪. 薄板光滑样条插值与中国气候空间模拟. *地理科学*, 2004, 24(2): 163-169.
- [18] 刘志红, Li Lingtao, Tim R, 等. 专用气候数据空间插值软件 ANUSPLIN 及其应用. *气象*, 2008, 34(2): 92-100.
- [19] 门明新, 宇振荣, 许皞. 基于地统计学的河北省降雨侵蚀力空间格局研究. *中国农业科学*, 2006, 39(11): 2270-2277.
- [20] Murat Z, Ibrahim K, Faris K. Determination of bioclimatic comfort in Erzurum-Rize expressway corridor using GIS. *Building and Environment*, 2010, 45(1): 158-164.
- [21] 林忠辉, 莫兴国, 李宏轩, 等. 中国陆地区域气象要素的空间插值方法. *地理学报*, 2002, 57(1): 47-56.
- [22] Humchinson M F. ANUSPLIN VERSION4.36 USER GUIDE. Canberra ACT 0200, Australian National University, Centre for Resource and Environmental Studies, 2006.
- [23] 胡江林, 张人禾, 牛涛. 长江流域 0.1° 网格逐日降水数据集及其精度. *自然资源学报*, 2008, 23(1): 136-149.
- [24] 卢爱刚, 康世昌, 庞德谦, 等. 中国降水量区域变化稳定性研究. *生态环境*, 2008, 17(6): 2433-2435.
- [25] 李克让, 黄玫, 陶波, 等. 中国陆地生态系统过程及对全球变化响应与适应的模拟研究. 北京: 气象出版社, 2009: 164-165.

## Comparative Analysis of Three Covariates Methods in Thin-Plate Smoothing Splines for Interpolating Precipitation

LIU Zhengjia<sup>1,2,3</sup>, YU Xingxiu<sup>1</sup>, WANG Sisi<sup>4</sup>, SHANG Guiduo<sup>2,3</sup>

(1. Linyi University, The Key Laboratory of Soil & Water Conservation and Environment Protection of Shandong Province/College of Resources Environment, Linyi, 276005, Shandong, China;

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

3. College of Population, Resource and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250014, China;

4. Department of Geography and Resource Management, the Chinese University of Hong Kong, Hong Kong, China )

**Abstract:** In the thin-plate smoothing splines interpolation, the accuracy of interpolation results is mainly determined by choosing the independent covariate. Annual precipitation data were extracted by using daily precipitation data of 728 meteorological stations from 2001 to 2009 in China. We evaluated spatial correlation relationships between annual precipitation and two covariates such as DEM and distance from the coastline to each point (DCL) and compared the accuracy difference of precipitation interpolation results from different covariates in the national scale and regional scale. All interpolation work has been conducted with the aid of the software of ANUSPLIN. We used three interpolation methods, which respectively considered DEM, DCL and DEM-DCL as the covariates to obtain spatial distribution of precipitation. Our analyses show that, (1) in the national scale, the mean absolute error (MAE) of interpolation method of DEM is 47.79, which is slightly lower than that of the method of DEM-DCL (48.90), while obviously lower than that of the method of DCL (55.54), and MRE and RMSE of the method of DEM were also lower than other two methods significantly. (2) In regional scale, the errors of three methods of interpolation are the same as that in national scale except Tibet. The accuracy of precipitation interpolation results was the highest using DCL method, and the poorest using DEM method. Results suggest that precipitation interpolation method of DEM could be widely used in some relevant national scale researches, and precipitation interpolation method of DCL was strongly recommended in Tibet.

**Key words:** precipitation interpolation; ANUSPLIN; covariates; accuracy

本文引用格式:

刘正佳, 于兴修, 王丝丝, 等. 薄盘光滑样条插值中三种协变量方法的降水量插值精度比较. *地理科学进展*, 2012, 31(1): 56-62.