

河北省年均降水量插值方法比较

刘劲松^{1,2}, 陈 辉^{1,2,*}, 杨彬云¹, 王 卫², 相 云¹, 赵 超¹

(1. 河北省气象与生态环境实验室, 石家庄 050021 ;

2. 河北师范大学资源与环境科学学院, 河北省环境演变与生态建设实验室, 石家庄 050016)

摘要:以河北省及临近区域 120 个气象观测站点 1971~2000 年年均降水量数据为基础, 选择其中的 40 个作为检验站点, 其余站点分别取 80、40、20 个作为插值站点, 采用局部插值、整体插值、多元线性回归、综合模拟等多种插值模型讨论了降水空间插值问题, 主要结论如下: 插值站点数、模型类型、模型参数都会影响插值精度。局部插值模型相对误差最小值出现在 Spline、IDW 模型中, 其次为 Kriging 模型, 而整体模型 Trend、多元线性回归模型误差均较大, 但综合了局部插值模型和统计模型的综合模型一定程度上能改善插值精度及误差分布。河北省 80 和 40 个站点的最优插值模型为综合模型, 20 个站点的最优插值模型为 IDW2。

关键词:河北省; 年均降水量; 插值

文章编号: 1000-0933(2009)07-3493-08 中图分类号: P951 文献标识码: A

Comparison of interpolation methods on annual mean precipitation in Hebei Province

LIU Jin-Song^{1,2}, CHEN Hui^{1,2,*}, YANG Bin-Yun¹, WANG Wei², XIANG Yun¹, ZHAO Chao¹

¹ Hebei Key Laboratory of Meteorology and Environmental, Shijiazhuang 050021, China

² Hebei Key Laboratory of Environmental Change and Ecological Construction, College of Resources and Environment Sciences, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050016, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(7): 3493 ~ 3500.

Abstract: Methods, such as part interpolation, whole interpolation, multiple-linear regression and integrative model were used to interpolate the precipitation based on the annual mean precipitation from 120 climate stations in Hebei province and its adjacent areas (from 1971 to 2000). Results showed that numbers of interpolation climate stations, type of interpolation model and parameters of model influenced the interpolating precision. The smallest mean relative error (*MRE*) appeared in Spline or IDW models, followed by Kriging models, and bigger for the error of whole model Trend and Linear Regression Models. The integrative model, such as part model and linear regression model, could improve the interpolating precision and error distribution. In conclusion, integrative model is the suitable interpolating model for 80 and 40 climate stations in Hebei province, and IDW2 is best for 20 climate stations.

Key Words: Hebei Province; annual mean precipitation; interpolation

在全球变化研究的推动下, 很多反映生态系统演化规律的模型应运而生, 如土壤-植被-大气传输模型 SVAT, 区域植被生产力和碳循环的生态模型 CASE、TEM、FOREST、BGC, 水文模型 SWAT、SHE 等, 都是分布式模型^[1], 空间降水信息是重要的输入变量, 但由于气候站点布设的局限性, 绝大多数空间位置上的数据无

基金项目:河北省气象与生态环境实验室开放基金资助项目(SYSKF0603); 河北省自然科学基金资助项目(D2007000272); 国家自然科学基金资助项目(40871073); 国家“十一五”科技支撑计划重点资助项目(2006BAB15B02); 河北省教育厅软科学资助项目(2006206)

收稿日期: 2008-08-12; 修订日期: 2009-05-12

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chenhui720127@163.com

法获得,因此需要用空间插值的方法来解决^[2]。

空间插值的核心是建立充分逼近要素空间分布特征的函数方程。对于给定的区域与要素样本值,插值函数可以有多种模型形式。各种模型的精度受其理论基础、模型算法、时空尺度效应、样本数据属性等因素的综合影响。目前各种类型插值模型共存,都有一定数量的应用实例,综合起来主要有空间插值法(分为局部模型和整体模型)、统计模型法和综合方法^[3~9]。这些插值方法的优缺点已有文献论述,但在不同区域、不同的时空尺度下,哪种插值方法更优,学术界没有一个统一认识,但也有学者提出了集成统计方法和空间插值方法优势的综合内插法、大区域分解成小区域分别进行插值的混合内插法等方法给降水插值提出了新的思路^[10,11]。

本研究的目的:①寻找基于不同实测站点数、适合河北省年均降水量的插值方法。②探讨降水插值方法选择的一般思路,为其它区域降水插值提供参考。

1 研究区概况

河北省位于北纬 36°03'~42°40',东经 113°27'~119°50'之间,总面积 18.77 万 km²,占全国土地总面积的 1.96%,其中高原面积 1.60 万 km²,占全省总面积的 8.5%;山地面积 9.03 万 km²(包括丘陵和盆地),占全省土地总面积的 48.1%左右;平原面积 8.15 万 km²,占全省总面积的 43.4%。河北气温南高北低,境内多年最低平均气温 -2.7℃,多年最高平均气温 15℃。河北省年均降水量为 300~760mm 左右,燕山南麓地带降水量在 700mm 左右,是河北的降水中心,张家口坝上及阳蔚盆地年降水量在 400mm 以下,是全省少雨中心。

2 研究方法

2.1 数据来源

降水数据来源于国家气象局和河北省气象局,数据时间段为 1971~2000 年,共涉及河北省及相临区域站点 120 个,其中国家基准站 37 个。DEM 数据来源于美国地质调查局(USGS)EROS 数据中心的 HYDRO1k。

2.2 研究方法

降水插值模型利用 ArcGIS 9.0 提供的软件包,采用 IDW(反向距离加权法,权重值分别为 1、2、4,记作 IDW1、IDW2、IDW4)、Spline(权重值为 1)、Kriging(选择 spherical、circular、exponential、gaussian、linear 等半方差模型)、Trend(分别采用 1 次、2 次线性趋势面模型,记作 Trend_1、Trend_2)等方法进行插值。统计模型为降水与经度、纬度、海拔的多元线性回归。综合模型选取插值模型中较好的一种与回归模型建立线性回归进行模拟。

插值站点数据选取方法为:插值检验站点的选择方法较多,一般采用在实测站点中选取 30%~50% 的站点用于检验,其余站点用于插值。本文在 120 个站点数据中取 40 个进行插值检验,其他站点中分别取 80、40、20 个进行插值(图 1)。40 个检验站点的选择主要考虑站点分布的空间均匀性及站点在不同自然区的代表性。80 个插值站点代表可获取的较多的国家级、省级台站数,40 个站点接近本区域 37 个国家台站数,20 个站点代表站点分布更稀疏的情况,这样的选取方法可为能获取不同精度数据的插值提供参考。模型检验方法采用平均绝对误差百分比 MAE、平均相对误差百分比 MRE:

$$MAE = |P'(xi) - P(xi)| / P(xi) \times 100 \quad (1)$$

$$MRE = [P'(xi) - P(xi)] / P(xi) \times 100 \quad (2)$$

式中, $P'(xi)$ 为站点降水插值数据, $P(xi)$ 为站点降水实测数据。

3 研究结果

3.1 不同插值站点数各插值方法的误差比较

采用软件默认的搜索站点数 12 进行插值,插值误差检验结果显示:MAE 值表现出随插值站点数减少而增大的规律。不同模型的插值精度总体表现为局部插值模型 IDW、Kriging、Spline 插值精度明显高于整体模型 Trend。局部插值模型中 80 和 40 个插值站点的 Spline、IDW4 插值精度较高,20 个站点的 Kriging_exponential、IDW2 插值精度较高。Spline 是通过 2 个样本点之间的曲线变形达到最佳拟合的插值效果,这种

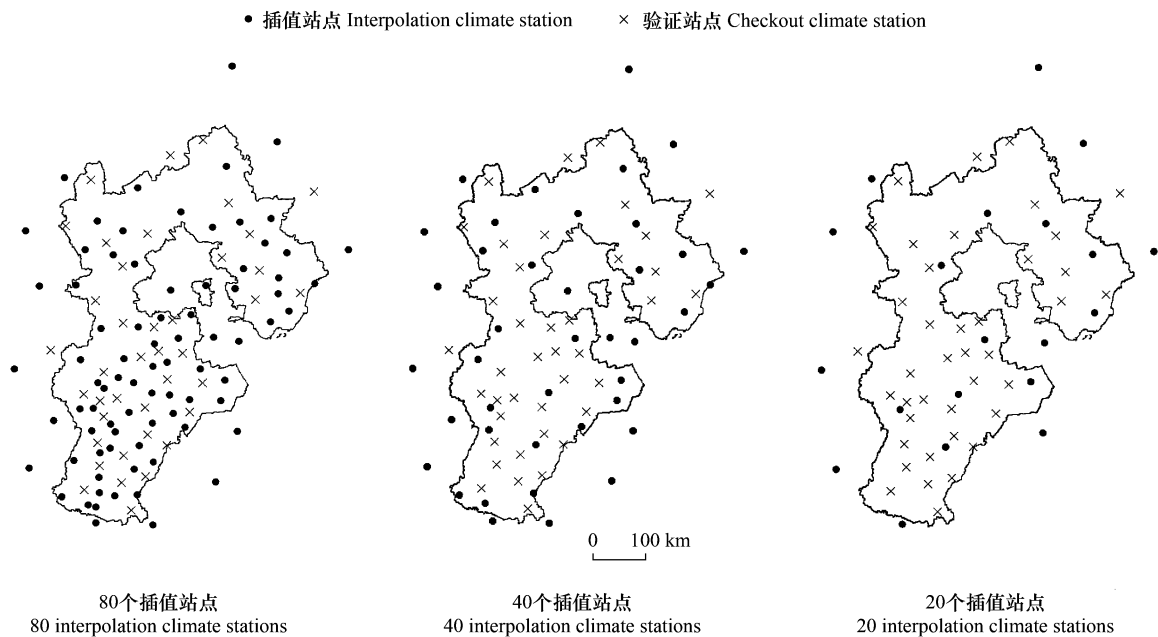


图1 插值站点验证站点分布图

Fig. 1 Distribution of climate stations for interpolation and checkout

方法比较稳健,并且不怎么依赖潜在的统计模型,在站点比较密集的区域插值效果比较好。IDW 法估算降水量时是根据距离衰减规律,对样本点的空间距离进行加权,当权重等于 1 时,是线性距离衰减插值;当权重 > 1 时,是非线性距离衰减插值。这种方法的优点是可以通过权重调整空间插值等值线的结构,在降水站点不是很密集的区域有助于提高插值精度。Kriging 从数学角度抽象来说,它是一种对空间分布数据求最优、线性、无偏内插的估计(best linear unbiased estimation,简称为 BLUE)方法,它的优点是考虑了各已知数据点的空间相关性^[10],站点较稀的区域选择此方法插值效果可能更好。本文的插值结果也印证了上述插值方法的特点。另外,除整体插值模型 Trend_1、Trend_2 外,80 个站点的插值精度普遍高于 40 个站点的,40 个站点的插值精度普遍高于 20 个站点的(表 1),说明插值站点的数量是影响模型插值精度的主要因素,以往研究也证实了这一点^[12]。

表 1 不同插值站点数插值误差比较

Table 1 Comparison of interpolation error of different climate stations (%)

插值方法 Interpolate methods	搜索站点数 Search radius	MRE_80 ^①	MAE_80 ^②	MRE_40	MAE_40	MRE_20	MAE_20
反距离加权法(指数 1) IDW1	12	0.00	6.86	1.13	7.67	-1.12	8.59
反距离加权法(指数 2) IDW2	12	-0.01	6.14	0.39	6.91	-2.50	7.41
反距离加权法(指数 4) IDW4	12	-1.50	5.44	-0.12	6.77	-3.57	7.95
环形克里金法 Kriging_circular	12	-1.91	5.56	-0.73	7.02	-4.78	7.76
指数克里金法 Kriging_exponential	12	-1.85	5.56	-0.69	7.03	-4.55	7.60
高斯克里金法 Kriging_gaussian	12	-1.69	6.07	0.06	7.74	-5.20	8.08
线性克里金法 Kriging_linear	12	-1.88	5.58	-0.73	7.00	-4.74	7.63
球形克里金法 Kriging_spherical	12	-1.91	5.56	-0.73	7.03	-4.81	7.78
样条法 Spline	12	-2.81	5.50	-1.29	6.42	-4.79	8.78
一次趋势面法 Trend_1		-0.03	9.26	0.13	9.83	-2.01	9.76
二次趋势面法 Trend_2		-0.67	8.25	0.58	9.06	-3.82	9.21

①平均绝对误差(80 个站点); ②平均相对误差(80 个站点)

减少局部模型的搜索站点数为 6 进行插值比较发现,80 个站点的插值精度明显降低,40 个站点和 20 个

站点部分插值方法的插值精度略有提高(表2)。站点分布较密集的区域,增加搜索站点数可能会增加插值精度,站点分布稀疏的区域,减少搜索站点的数目反而可能会提高插值精度,原因可能与站点的分布区域特征有关,即在区域特征相对一致的区域增加搜索站点数会增加插值精度,而在区域特征不一致的区域,较多的搜索站点数可能增加插值误差,反而较少的搜索站点数可能插值精度更高。因此插值搜索站点数的确定要考虑站点密度和分布区域特征,不能一概而论。

表2 不同插值站点数插值误差比较
Table 2 Comparison of interpolation error of different climate stations (%)

插值方法 Interpolate methods	搜索站点数 Search radius	MRE_80	MAE_80	MRE_40	MAE_40	MRE_20	MAE_20
反距离加权法(指数1)IDW1	6	0.75	16.25	0.39	7.38	-2.30	7.28
反距离加权法(指数2)IDW2	6	0.59	16.29	0.04	6.89	-3.05	7.18
反距离加权法(指数4)IDW4	6	0.55	16.52	-0.16	6.80	-3.64	7.96
环形克里金法 Kriging_circular	6	0.10	15.84	-0.62	7.00	-4.36	7.75
指数克里金法 Kriging_exponential	6	0.16	15.85	-0.59	7.03	-4.21	7.66
高斯克里金法 Kriging_gaussian	6	0.04	15.90	-0.06	7.71	-4.61	8.52
线性克里金法 Kriging_linear	6	0.09	15.83	-0.63	7.00	-4.36	7.74
球形克里金法 Kriging_spherical	6	0.10	15.85	-0.62	7.00	-4.36	7.75
样条法 Spline	6	0.75	17.14	-1.11	6.97	-5.24	9.31

上述分析表明,插值站点密度、模型类型、模型参数都会影响降水插值精度。具体影响效果要看插值区域的具体情况,因此,没有统一的适用于任何区域的插值方法。

3.2 降水与经度、纬度、海拔多元回归分析

上述插值方法有的考虑与插值点的位置关系,有的考虑参考点的降水值,但都没有考虑影响降水的环境因子。影响降水的因素很多,其中海拔是降水的重要影响因子,很多降水模拟方法都引入了这一因子^[13],高迎春对太行山燕山山地年降水量与海拔的关系也曾有过详细论述^[14]。但大尺度的降水与海陆相对位置、海拔高度有关,因此,经度、纬度、海拔都可能影响降水,一些大尺度降水模型如 PRISM 就引入了这些影响因子^[15,16]。本研究引入经度、纬度、海拔这3个影响因子,利用多元线性回归进行区域整体插值,分别得到依据80、40、20个站点的多元线性回归方程如下:

$$Y_{80} = -2815.744 + 39.320a - 31.579b + 0.011c \tag{3}$$

$$Y_{40} = -1564.997 + 27.639a - 28.531b - 0.029c \tag{4}$$

$$Y_{20} = -2893.705 + 47.391a - 54.464b + 0.075c \tag{5}$$

式中, Y 为多元线性回归模拟的年均降水量, a 为经度, b 为纬度, c 为海拔。

采用多元线性回归进行降水插值模拟误差较大(表3),且不能区分降水特征区域(如高值中心、低值中心),不能单独用于本区域的降水插值,但它的意义在于将大尺度的影响因素经度、纬度、海拔引入了降水插值过程,向从机理上揭示降水分布规律迈进了一步,因此,将回归统计模型与插值模型相结合,即采用综合插值方法,是进一步提高降水模拟精度的一个思路。

3.3 综合插值方法

选择误差较小的插值结果(80个插值站点的选择 Spline 和 IDW4 法,40个插值站点的选择 Spline 法,20个插值站点的选择 IDW2_6 和 IDW2_12 法)与回归模拟结果分别作为两个影响因子,做二者与降水实测值的多元线性回归,建立多元线性回归方程如下:

$$Y_{80} = 114.055 + 1.156S - 0.346P \tag{6}$$

$$Y_{80} = 106.508 + 1.452I_4 - 0.636P \tag{7}$$

$$Y_{40} = 131.980 + 1.183S - 0.421P \tag{8}$$

$$Y_{20} = -78.123 + 0.767I_{2,12} + 0.433P \quad (9)$$

$$Y_{20} = -34.372 + 0.718I_{2,6} + 0.396P \quad (10)$$

式中, S 为 Spline 法插值结果, I_4 为 IDW4 法插值结果, $I_{2,12}$ 为 12 个搜索站点的 IDW2 法插值结果, $I_{2,6}$ 为 6 个搜索站点的 IDW2 法插值结果, P 为降水回归模拟结果。

表 3 不同插值站点最优插值方法遴选

Table 3 Selection of the best interpolation methods of different climate stations (%)

插值方法 Interpolate methods	MRE_80	MAE_80	MRE_40	MAE_40	MRE_20	MAE_20
样条法(搜索站点 12) Spline_12	-2.81	5.50	-1.29	6.42		
反距离加权法(指数 4, 搜索站点 12)IDW4_12	-1.50	5.44				
反距离加权法(指数 2, 搜索站点 12)IDW2_12					-2.50	7.41
反距离加权法(指数 2, 搜索站点 6)IDW2_6					-3.05	7.18
多元线性回归法 Multi-linear regression	0.04	9.25	0.43	10.29	-2.89	9.73
综合方法 Integrated means	0.42(Spline_12)	5.34(Spline_12)	0.75	6.47	1.66(IDW2_12)	10.27(IDW2_12)
	0.58(IDW4_12)	5.58(IDW4_12)			1.64(IDW2_6)	10.72(IDW2_6)

综合插值结果显示:80 和 40 个站点的绝对误差 MAE 有所减小,增加了插值精度,但 20 个站点综合插值没有增加插值精度(表 3)。80 个站点的综合模拟结果降低了高值区和低值区的误差幅度,使整体插值结果主要分布在降水的正常波动范围内(5%),是对 Spline 插值的一个很好的修正。40 个站点的综合模拟使 Spline 插值方法中的中低降水区域误差偏小转变成中高降水区域误差偏小(图 2)。出现上述结果的主要原因是空间插值与回归模拟方法均存在误差,两者相结合能一定程度上降低误差(两者误差方向相反,即一个为正一个为负,则可以降低误差;两者误差方向相同则会增大误差),同时还可能改变插值误差沿降水梯度的分布规律,因此,综合插值方法提供了可能降低插值误差、满足较高精度降水特征区域(如降水高值区、低值区)插值的方法。

3.4 河北省年降水量分布特征分析

3.4.1 不同插值站点数高精度插值方法遴选

根据上述分析,河北省区域 80、40 个插值站点的最佳插值方法为综合模拟法,20 个插值站点的最佳插值方法为 6 个搜索站点的 IDW2 法。80 个站点的综合模拟插值平均绝对误差为 5.34%,平均相对误差为 0.42%,插值比实测值略偏大,但总体误差较小,能够区分出年降水的主要高值中心、低值中心;40 个站点的综合模拟插值平均绝对误差为 6.47%,平均相对误差为 0.75%,插值比实测值略偏大,总体误差高于 80 个站点的插值误差,能够区分出部分高值中心和低值中心;20 个插值站点 6 个搜索站点的 IDW2 法插值平均绝对误差为 7.18%,相对误差 -3.05%,插值比实测值低,总体误差较大,只能区分出少数高值中心和低值中心。对比分析显示,80 个站点的基于 Spline 和多元线性回归的综合插值方法是上述讨论方法中的最佳插值方法。

3.4.2 基于 80 个站点综合模拟的河北省年降水量分布特征分析

河北省及周边临近区域 80 个站点降水综合模拟结果显示:河北省年均降水量为 297 ~ 763mm。燕山南麓地带是河北降水的高值区,平均降水量在 700mm 以上,遵化—兴隆交界地区、青龙是两个降水中心。太行山东坡是河北省的次降水中心,年降水量在 600mm 左右,降水中心出现在阜平及从赞皇到涉县太行山区海拔 300m 以上区域。华北平原东部到沿海区域、冀北的崇礼、赤城交界区降水量也在 500mm 以上。降水低值区出现在张家口坝上及阳蔚盆地,年降水量在 400 mm 以下,降水低值中心在康保及宣化、涿鹿交界处。华北平

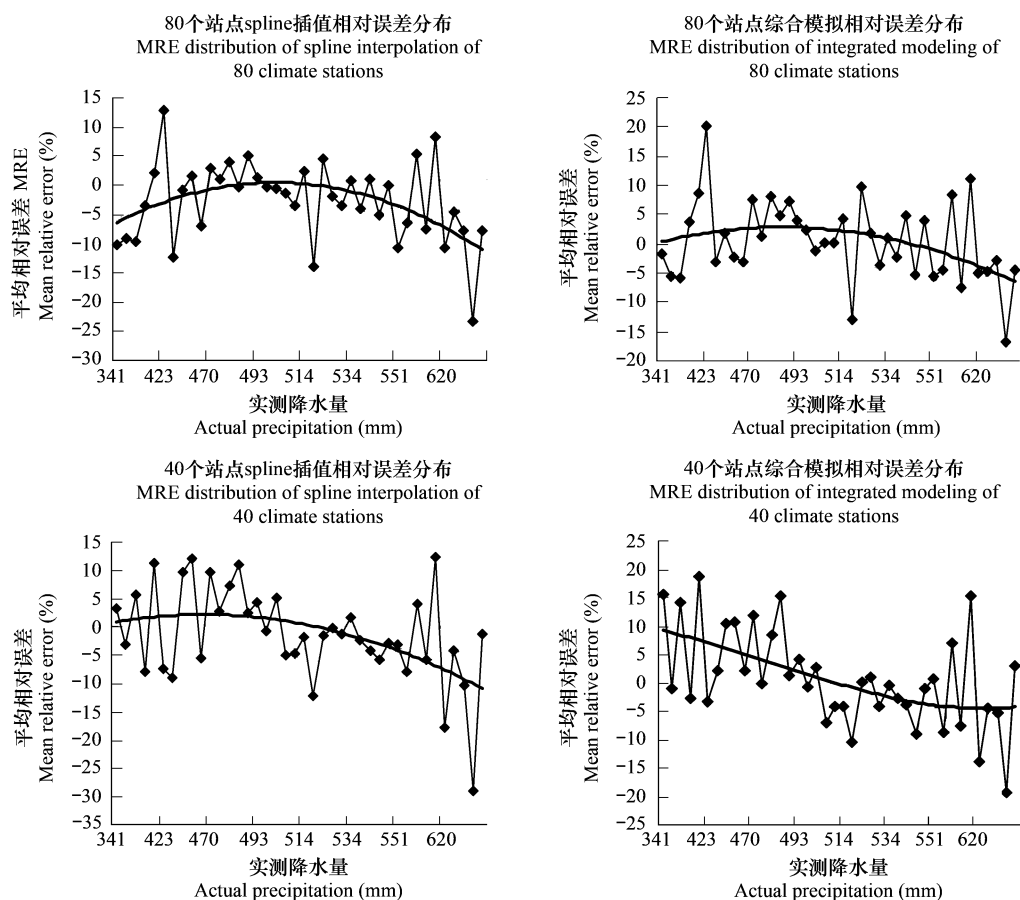


图2 80、40个插值站点模拟的年降水量误差分布比较

Fig. 2 Comparison of MRE distribution of precipitation modeling of 80 and 40 climate stations

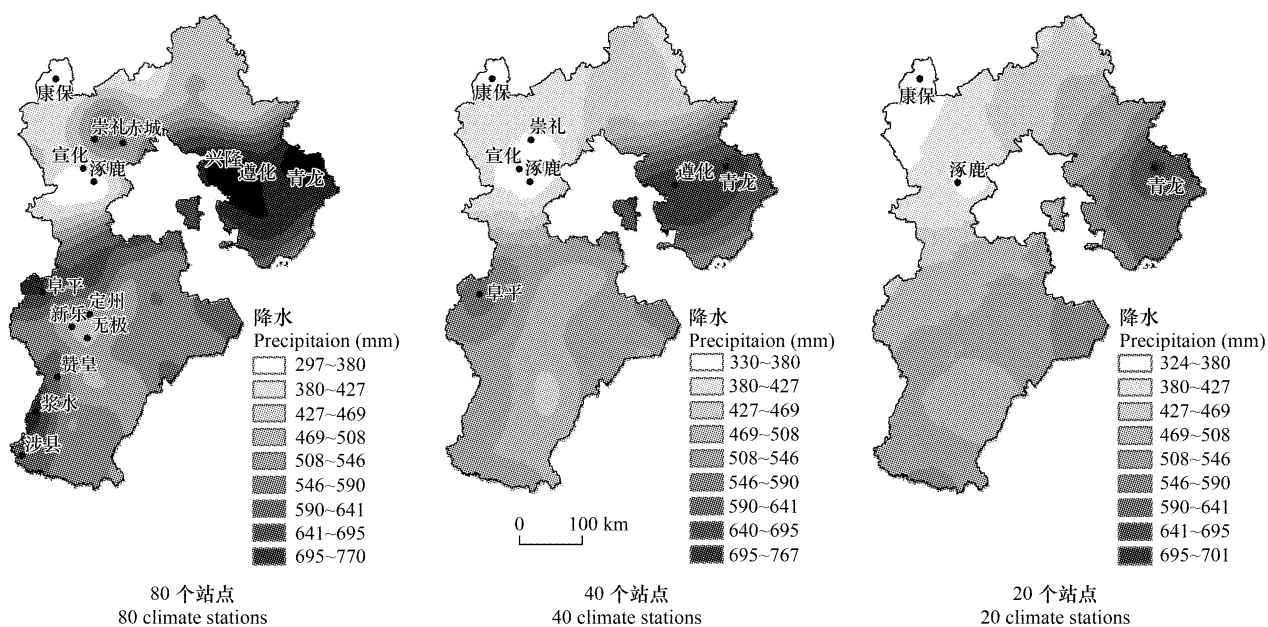


图3 不同站点数综合模拟的年降水量分布图

Fig. 3 Annual precipitation distribution of integrated modeling of different climate stations

原中部也出现相对的低值区,年降水量在 500mm 以下至 450mm,低值区出现在新乐、定州、无极交界处。

4 结论

本研究采用局部插值、整体插值、多元线性回归、综合模拟等多种插值模型对河北省年降水量的空间插值问题进行了讨论,得出主要研究结论如下:

(1) 插值站点数目影响插值精度,插值站点越多,插值精度越高。插值站点数目多的各种插值模型插值精度普遍高于插值站点少的,说明插值站点数是决定插值精度的首要因素。因此,在进行区域插值前最好的办法是搜集尽量多的实测站点数据。

(2) 选择 ArcGIS 9.0 提供的插值模型直接进行插值,局部插值模型 IDW、Spline 相对误差较小,其次为 Kriging,而整体模型 Trend 则误差较大。局部模型的搜索站点数也会影响插值精度,选择多少个要视站点分布的具体情况而定,一般选择软件默认的 12 个即可,但在实测站点稀少的情况下,可适当减少搜索站点数。

(3) 针对河北省整个区域,基于降水与经度、纬度、海拔多元线性回归的统计方法的插值精度较低,不能直接用于降水量插值,但将回归模拟结果引入综合插值模型,却能在一定程度上改善插值精度。80 个和 40 个站点降水插值的最优方法为基于 Spline 和多元线性回归的综合模拟方法,而 20 个站点的最优插值方法为 6 个搜索站点的 IDW2 法。

(4) 基于 80 个站点的年降水综合模拟结果显示:河北省年均降水量为 297 ~ 763mm,降水高值中心为燕山南麓、阜平一带及从赞皇到涉县的太行山东坡,崇礼、赤城一带也是一个相对高值区。降水的低值区为康保、宣化,河北平原中部出现相对低值区。

上述研究结果显示了降水插值的复杂性,但插值方法的选择并不是无章可循。大尺度(如全球)实测站点密度很低的插值不能用局部插值法,可引入经度、纬度、海拔等因子进行模拟;地形复杂、实测站点少的小区插值可考虑海拔、坡度、坡向等因子^[17];一般的区域插值可直接采用局部插值模型,较大区域范围(如全国)的可考虑多种局部插值法相结合(即分区插值),如果要细化插值结果,可考虑引入经度、纬度、海拔等因子与局部模型相结合。引入其他因子,如植被指数(NDVI)也是一种不错的思路^[18],但插值结果的应用范围可能会受到限制(如应用到植被环境因子关系研究上)。总之,选择插值模型的关键是了解不同插值模型的特点,及实测站点的分布密度、区域特征。

References:

- [1] Zhao C Y, Feng Z D, Nan Z R. Modelling the temporal and spatial variabilities of precipitation in Zulihe River Basin of the Western Loess Plateau. Plateau Meteorology, 2008, 27(1):208—214.
- [2] Liu D W, Feng Z M, Yang Y Z. Selection of the spatial interpolation methods for precipitation in the Haihe River Basin. Geo-information Science, 2006, 8(4):75—83.
- [3] He H Y, Guo Z H, Xiao W F, Guo Q S. Mapping monthly precipitation for Tibetan Plateau with GIS and multivariate analysis based on DEM data. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(11):2933—2938.
- [4] Ninyerola M, Pons X, Roure J M. Monthly precipitation mapping of the Iberian Peninsula using spatial interpolation tools implemented in a Geographic Information System. Theoretical and Applied Climatology, 2007(3-4), 89:195—209.
- [5] Xia Y, Winterhalter M, Fabian P. A Model to Interpolate Monthly Mean Climatological Data at Bavarian Forest Climate Stations. Theoretical and Applied Climatology, 1999, 64(1-2):27—38.
- [6] Martinez-Cob A. Multivariate geostatistical analysis of evapotranspiration and precipitation in mountainous terrain. Journal of Hydrology, 1996, 174(1-2):19—35.
- [7] Shang Z B, Gao Q, Yang D A. Digital ecological model and case study on China water condition. Ecological Modelling, 2001(2-3), 139:235—252.
- [8] Jeffrey S J, Carter J O, Moodie K B, Beswick A R. Using spatial interpolation to construct a comprehensive archive of Australian climate data. Environmental Modelling and Software, 2001, 16(4):309—330.
- [9] Hasenauer H, Merganicova K, Petritsch R, Pietsch S A, Thornton P E. Validating daily climate interpolations over complex terrain in Austria. Agricultural and Forest Meteorology, 2003, 119(1-2):87—107.

- [10] He H Y, Guo Z H, Xiao W F. Review on spatial interpolation techniques of rainfall. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(10):1187—1191.
- [11] Fang S M, Qian Z T, Li Y P. Comparison of four precipitation spatial interpolation methods in Gansu. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2005, 19(3):47—50.
- [12] Zhu H Y, Jia S F. Uncertainty in the spatial interpolation of rainfall data. *Progress in Geography*, 2004, 23(2):34—42.
- [13] Yang Q, Shi Y C, Yuan Y J, Li Y. Temperature and precipitation series in the Tianshan Mountain calculated on DEM. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(3):337—342.
- [14] Guo Y C. Precipitation calculation methods in the Taihangshan and Yanshan Mountain. *Study of Geography and Land*, 1994, 10(3):35—39.
- [15] Han Q H, Chen W M, Wang P C, Wang Y K, Yang C J. Application of PRISM spatial interpolation to the precipitation distribution in the Songhuangjiang River Basin. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2006, 29(1):56—61.
- [16] Zhu Q A, Zhang W C, Zhao D Z. Topography-based spatial daily precipitation interpolation by means of PRISM and Thiessen polygon analysis. *Scientia Geographica Sinica*, 2005, 25(2):233—238.
- [17] Sun P S, Liu S R, Li C W. Estimation of precipitation using altitude and prevailing wind direction effect index in mountainous region. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(9):1910—1915.
- [18] Gu Z H, Shi P J, Chen J. Precipitation interpolation research over regions with sparse meteorological stations: a case study in Xilingole League. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2006, 42(2):204—208.

参考文献:

- [1] 赵传燕,冯兆东,南忠仁. 陇西祖厉河流域降水插值方法的对比分析. *高原气象*, 2008, 27(1):208~214.
- [2] 刘登伟,封志明,杨艳昭. 海河流域降水空间插值方法的选取. *地球信息科学*, 2006, 8(4):75~83.
- [3] 何红艳,郭志华,肖文发,郭泉水. 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.
- [10] 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.
- [11] 方书敏,钱正堂,李远平. 甘肃省降水的空间内插方法比较. *干旱区资源与环境*, 2005, 19(3):47~50.
- [12] 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.
- [13] 杨青,史玉光,袁玉红,李杨. 基于 DEM 的天山山区气温和降水序列推算方法研究. *冰川冻土*, 2006, 28(3):337~342.
- [14] 郭迎春. 太行山燕山山地降水推算方法研究. *地理学与国土研究*, 1994, 10(3):35~39.
- [15] 韩庆红,陈渭民,王普才,王玉昆,杨昌军. PRISM 在松花江流域降水分布中的应用研究. *南京气象学院学报*, 2006, 29(1):56~61.
- [16] 朱求安,张万昌,赵登忠. 基于 PRISM 和泰森多边形地形要素日降水量空间插值研究. *地理科学*, 2005, 25(2):233~238.
- [17] 孙鹏森,刘世荣,李崇巍. 基于地形和主风向效应模拟山区降水空间分布. *生态学报*, 2004, 24(9):1910~1915.
- [18] 辜智慧,史培军,陈晋. 气象观测站点稀疏地区的降水插值方法探讨——以锡林郭勒盟为例. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2006, 42(2):204~208.