

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20220116

三种插值方法在降水等值线绘制中的对比分析

王生鑫¹, 闫文晶^{2,3}, 张海涛², 杜军凯², 赵宇翔^{2,3}

(1. 宁夏水文水资源监测预警中心, 宁夏 银川 750000;
2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 3. 华北水利水电大学, 河南 郑州 450046)

摘要:为对比不同插值方法在宁夏回族自治区的适用性,基于宁夏及其周边地区77个气象台站1956—2016年平均降水量数据,运用泰森多边形法、距离平均反比法、克里金插值法对降雨量数据进行空间插值和交叉验证,从插值方法的稳健性和准确度出发进行对比分析,得出适用于宁夏回族自治区的插值方法。研究表明:(1)从准确度来看,克里金插值法与观测值走向、位置较为相似;从稳健性来看,克里金插值法MAE平均值为4.43 mm、RMSE平均值为10.36 mm,显著小于泰森多边形法和距离平均反比法。(2)整体来看,克里金插值法更为理想,可以用于宁夏回族自治区降水量空间插值分析。

关键词:等值线;泰森多边形法;距离平均反比法;克里金插值法

中图分类号:TV125;P33

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2023)04-0021-06

0 引言

无资料/缺资料问题长期以来一直是困扰水资源开发利用和相关科学研究的一大难题,等值线图是解决这一问题的有效方法^[1-2]。常用的等值线图绘制方法有人工绘制降雨等值线法、泰森多边形法、距离平方反比加权平均法和克里金法等。空间插值方法的优劣不一,如:人工绘制降雨等值线法效率低、主观性强^[3];泰森多边形法只考虑距离因素,受样本观测值影响较大^[4];距离平方反比加权平均法易受极值的影响^[5];普通克里格法与站点密度有关,对于高密度降雨插值,不具有优势^[6];梯度距离平方反比法在地形起伏剧烈的区域插值结果会出现大的偏差^[7]。这也引发了关于流域区域内不同空间插值方法的对比分析研究,邹强^[8]采用反距离权重法和普通克里金法对流溪河流域32个站点进行插值分析,结果表明普通克里金法更适合流溪河流域降雨空间插值;李钢等^[9]基于浙江省84个气象站点30 a的日降雨数据,发现普通克里格插值法预测误差小于反距离权重插值法。不难发现:对

于不同区域,不同的插值所得到的结果可能会存在较大的差异。

随着水利计算和水文模型对降水基础数据精度的不断提高,有必要比较不同插值方法,找出适合特定流域降水等值线绘制的适宜方法。本文以宁夏水文水资源监测预警中心提供的人工绘制降雨等值线作为观测值,结合区域实测站点数据,采用泰森多边形法、距离平方反比法、克里金插值法三种插值方法,从方法的准确度和稳健性出发,探究最为适合宁夏的面雨量插值方法。

1 研究区域与数据资料

1.1 研究区概况

宁夏回族自治区位于中国西北部的黄河中上游地区,总面积为6.64万km²,海拔1100~1200 m,地形南北狭长,南北相距456 km,东西相距约250 km,属温带大陆性干旱、半干旱气候,四季分明,昼夜温差大,全年日照达3000 h。全自治区多年平均年降水量149.65亿m³,合平均年降水深289 mm;多年

收稿日期:2022-03-29

网络首发地址:https://link.cnki.net/urlid/11.1814.P.20230818.1602.004

基金项目:“十四五”重点研发计划课题(2021YFC3201101, 2021YFC3201105)

作者简介:王生鑫(1985—),男,甘肃镇原人,工程师,主要从事水文水资源及用水权改革方面的工作。E-mail:wangsx230@126.com

通信作者:张海涛(1981—),男,河南辉县人,正高级工程师,主要研究方向为流域水循环及其伴生过程。E-mail:42056345@qq.com

网络首发日期:2023-08-21

平均年水面蒸发量 1 218 mm, 变幅在 800 ~ 1 600 mm 之间, 是全国水面蒸发量较大的省区之一; 平均年径流量 9.06 亿 m³, 是黄河流域平均值的 1/4, 是全国均值的 1/15^[10]。

水文分区上, 宁夏水资源公报中显示宁夏共分为 10 个水资源四级分区, 细化后共分为 14 个分区。由于黄右分区空间上跨度较大, 基于四级区 GIS 底图数据, 将黄右分区按照空间分布分为 3 部分, 另外将较大的盐池内流区、葫芦河分区也进一步细化, 结果将宁夏共分为 19 个小区, 见表 1。

1.2 资料来源情况

选取宁夏回族自治区及其周边地区共 77 个气象台站 1956—2016 年平均降水资料, 采用算数平均法计算各个区域多年平均面雨量。研究区空间范围和站点分布情况见图 1, 宁夏回族自治区多年平均降雨等值线见图 2, 面雨量观测值为 288.63 mm, 四级分区面雨量观测值见表 1。

2 研究方法

2.1 空间插值方法

空间插值方法是一种基于流域内水文气象资料, 由已知的空间样本估算未知样本的方法^[11]。本文采用的空间插值方法包括: 泰森多边形法、距离平方反比法、克里金插值法。

泰森多边形法是一种根据离散分布的气象站的降雨量来计算平均降雨量的方法, 原理是将相邻雨量站以三角形连接, 作其垂直平分线并与之相连, 形成若干个多边形, 用各个多边形的降雨强度表示该区域降雨量估计值。具体计算方法参见文献[12]。

距离平方反比法(IDS)是以插值点与样点间距离为权重的一种加权平均法。其基本原理是: 假定样点之间的信息是相关的, 且依样点距离间隔的变化相似。其基本表达式参见文献[13]。

克里金插值法是一种用于对局部估计的方法, 能

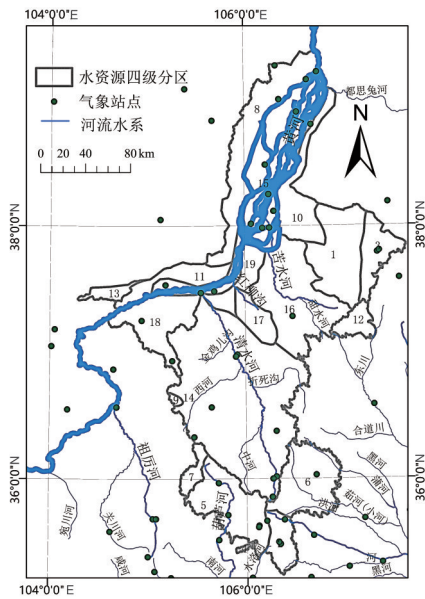


图1 宁夏回族自治区概况

Fig.1 Overview of Ningxia Autonomous Region

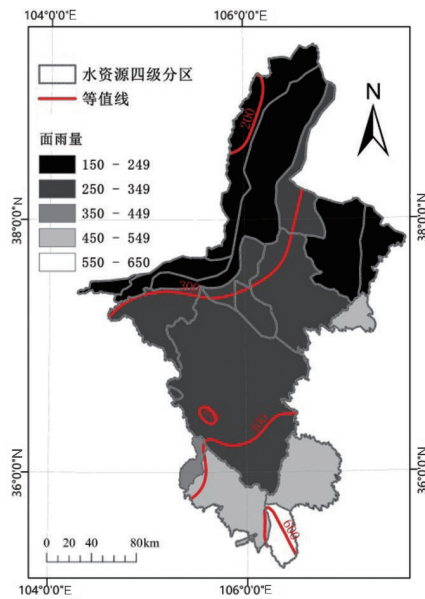


图2 宁夏多年平均降雨等值线

Fig.2 Contour map of multi-year average rainfall in Ningxia

表 1 宁夏四级分区

Table1 Water Resources Partition in Ningxia

编号	分区	编号	分区	编号	分区	编号	分区
1	盐池内流区2	6	泾河2 (洪河、茹河、蒲河)	11	贺兰山东麓	16	苦水河
2	泾河1	7	祖厉河	12	马莲河	17	红柳沟
3	盐池内流区1	8	黄左	13	甘塘内陆区	18	黄右3
4	葫芦河1	9	黄右1	14	清水河	19	黄右 (清水河与苦水河)
5	葫芦河2	10	黄右2	15	引黄灌区		

根据已知量估计未知量,克里金值能提供某个区域的最佳平均值估计值。其具体表达式参见文献[14]。

2.2 插值方法评价指标

本文通过方法准确度和稳健性两方面对插值结果进行评价。方法准确性采用平均相对误差指标(MRE)来反映,MRE值越小,方法准确度越高。评价插值稳健性利用交叉验证法,结合平均绝对误差(MAE)和均方根误差(RMSE)两种指标进行评估,MAE反映面雨量估计值的误差范围,RMSE反映面雨量估计值的灵敏度和极值情况。MAE和RMSE值越小,表明误差越小,插值精度越高,稳健性越好,MAE相等时,则RMSE越小效果越好^[15]。

$$MRE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Z_i - Z(x)}{Z_i} \right| \quad (1)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Z_i - Z(x)| \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n |Z_i - Z(x)|^2}{n}} \quad (3)$$

式中: Z_i 表示各分区面雨量观测值; n 为样本数量; $Z(x)$ 为降雨量估计值。

2.3 插值方法的比选方案

基于多年平均降雨量数据,采用泰森多边形、距离平均反比、克里金插值3种方法,一方面用生成的等值线及面雨量估计值与观测值(算术平均法)进行准确度方面的比较;另一方面将三种插值方法结果进行交叉验证,从稳健性出发分析最为稳定的插值

方法,从而得出适用于宁夏回族自治区的等值线绘制方法。

3 结果与讨论

3.1 方法的准确度

宁夏回族自治区四级分区多年平均面雨量统计结果见表2,多年平均降雨量插值结果见图4。三种方法面雨量等值线都是由南向北逐渐减小,南部地区降雨量多,北部降雨量少,但等值线和面雨量分布略有不同。泰森多边形法等值线与观测值走向较为相似,400 mm等值线差异较大;距离平均反比法200 mm等值线与观测值走向差异大,等值线位置差异也较大;克里金插值法与观测值走向、位置较为相似。

整体来看,三种插值方法所得宁夏回族自治区整体面雨量估计值均大于观测值面雨量,且相差不大。克里金插值法面雨量平均相对误差最小,泰森多边形法次之,距离平均反比法平均相对误差最大。

针对四级分区,计算经3种插值方法得到的各分区面雨量估计值(图3)与观测值(图2)之间的相对误差,并利用式(1)计算3种方法的平均相对误差MRE(表2)。结果显示:(1)19个分区的整体平均相对误差项中,距离平均反比法较小,为14.14%;克里金插值法次之,为14.60%;泰森多边形法最大,为16.16%。说明距离平均反比法的准确度最高。(2)三种方法面雨量估计值相对误差较大的区域集中在自治区中部偏东地区。距离平均反比法分区面雨量平均绝对误差大的区域集中在宁夏回族自治区中部的盐池内流区1、

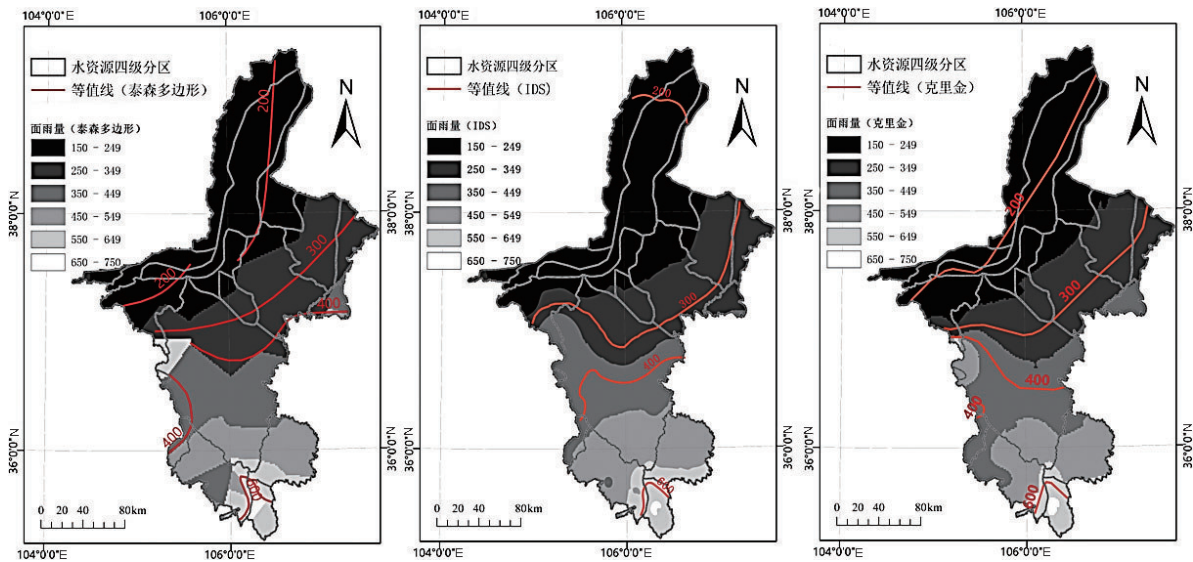


图3 宁夏回族自治区多年平均降雨量插值结果

Fig.3 The results of interpolation for multi-year average rainfall in Ningxia

表2 宁夏回族自治区多年平均面雨量

Table2 Multi-year average surface rainfall in Ningxia

类型	观测值(算术平均法) /mm	泰森多边形法 /mm	MRE/%	距离平均反比法 /mm	MRE/%	克里金插值法 /mm	MRE/%
宁夏面雨量	288.63	316.33	9.59	320.34	10.99	315.71	9.38
1	212.79	284.73	33.81	271.49	27.59	279.16	31.19
2	600.02	630.63	5.10	620.59	3.43	623.39	3.90
3	217.64	309.07	42.01	309.73	42.31	312.99	43.81
4	563.94	550.02	-2.47	563.33	-0.11	557.29	-1.18
5	479.49	490.22	2.24	505.36	5.40	487.70	1.71
6	516.19	493.38	-4.42	523.08	1.34	495.01	-4.10
7	394.07	428.11	8.64	435.91	10.62	418.23	6.13
8	197.19	203.56	3.23	202	2.44	199.44	1.14
9	335.70	546.69	62.85	383.5	14.24	483.32	43.97
四级分区面雨量	198.94	205.56	3.33	209.66	5.39	217.87	9.52
10	192.92	210.45	9.09	222.06	15.11	195.36	1.27
11	266.19	345.45	29.77	326.09	22.50	368.67	38.50
12	192.35	238.72	24.11	245.74	27.76	171.50	-10.84
13	346.69	379.42	9.44	379.63	9.50	379.96	9.60
14	197.25	205.97	4.42	206.17	4.52	202.65	2.74
15	225.73	273.64	21.23	263.98	16.95	281.77	24.83
16	223.11	268.10	20.17	270.15	21.09	262.58	17.69
17	215.28	233.66	8.54	264.91	23.05	232.83	8.15
18	197.16	221.16	12.17	227.36	13.91	230.76	14.19
19							
平均误差			16.16		14.14		14.60

盐池内流区2、黄左2、泾河3、甘塘内陆区、苦水河、红柳沟、黄右3地区,平均绝对误差都大于15%;克里金插值法平均绝对误差较大的区域位于中部偏东地区,盐池内流区1、盐池内流区2、黄右1、泾河3、苦水河、红柳沟、黄右(清水河与苦水河),平均绝对误差都大于14%;其中误差较大的区域位于盐池内流区1、盐池内流区2、黄右1、马莲河、甘塘内陆区、苦水河、红柳沟,均大于20%,说明三种方法在这些地区的准确度均不高,可能与这些地区气象站点布置较少,数据相对缺乏导致的插值效果不佳有关。

3.2 方法的稳健性

采用 k 折交叉验证法进一步分析评估三种方法的稳健性。 k 折交叉验证法是比较常用的模型方法性能评估的统计分析方法,其基本步骤为:(1)将数据集无替换地随机分为 k 份, $k-1$ 份用来训练模型,余一份采用平均误差和均方根误差评价方法的优劣;(2)重复 k 次,得到 k 个模型方法的平均误差和均方根误差值;(3)随后取各误差值的平均值来评价方法优劣^[6];(4)分别利用 k 折交叉验证法计算三种方法的平均误差MAE和

均方根误差值RMSE进行对比评价。由于在验证过程中数据划分具有随机性,数据的多样性能验证模型方法计算结果是否会随着数据改变而出现大幅度的变化,能够一定程度上反映模型方法的稳健性,误差越小证明模型方法计算结果越稳定,稳健性越好。

交叉验证结果如图4、表3。图4表明:宁夏1956—2016平均降水量插值效果依次为克里金插值法>距离平均反比法>泰森多边形法。3种插值方法,泰森多边形法插值误差最大,准确度最低,效果最差;距离平均反比法插值误差相对较小,插值效果适中且稳定;克里金插值法插值误差小,插值效果较好,但存在个别极值情况。利用式(2)、式(3)计算三种插值方法的面雨量插值结果交叉验证的平均误差和均方根误差,结果如表3:克里金插值法MAE平均值(4.43 mm)和RMSE平均值(10.36 mm)值最低,预测误差最小,说明该方法效果最好,稳健性较好;泰森多边形法MAE平均值(7.79 mm)和RMSE平均值(51.78 mm)值最高,预测误差最大,该方法稳健性最差。空间上,MAE和RMSE较大的区域有泾河1、葫芦河1、泾河2、黄右1等

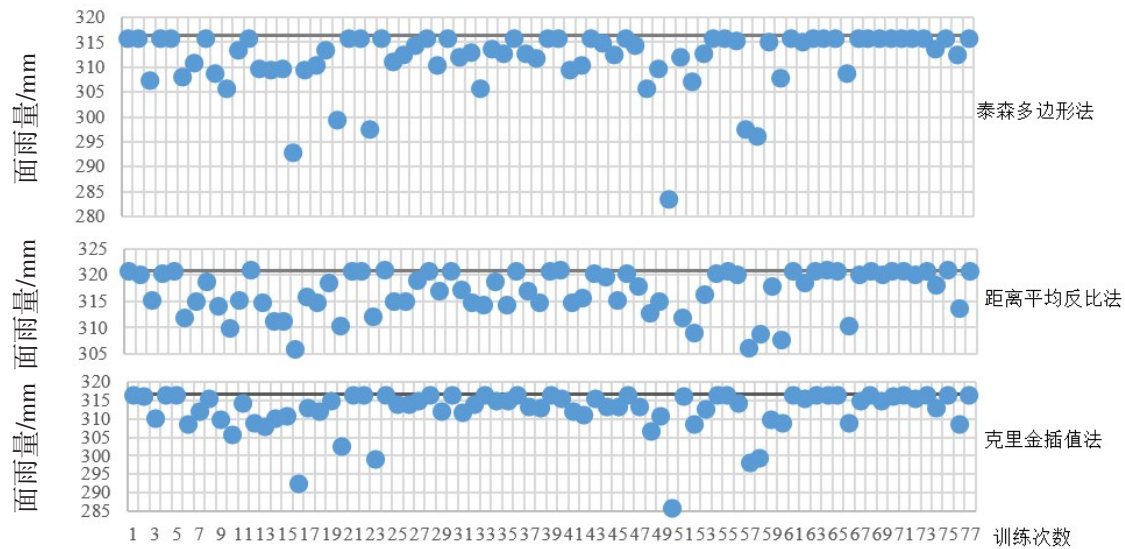


图4 宁夏面雨量交叉验证结果

Fig.4 The cross-verification results of surface rainfall in Ningxia

注:黑色实线代表宁夏区域面雨量,点代表随机剔除一个数据后区域面雨量计算值。

表3 宁夏四级区面雨量交叉验证评价指标

Table3 The evaluation indexes of cross-verification for surface rainfall in Ningxia four-level water resources partition area

四级区	MAE/mm			RMSE/mm		
	泰森多边形法	距离平均反比法	克里金插值法	泰森多边形法	距离平均反比法	克里金插值法
1	4.10	4.37	3.55	47.80	16.51	10.94
2	9.86	17.11	8.08	83.60	73.27	29.23
3	4.15	5.31	4.01	45.82	18.99	19.15
4	24.51	11.28	6.57	131.00	41.26	20.61
5	6.45	6.39	6.51	54.59	21.70	19.22
6	7.01	9.34	6.78	68.39	32.04	22.20
7	6.31	7.31	5.65	67.49	29.63	19.47
8	2.67	2.93	2.62	18.47	8.56	6.26
9	23.55	11.97	7.14	104.04	46.10	27.41
10	2.84	3.75	2.91	21.36	10.44	7.55
11	3.06	6.38	2.90	24.65	23.76	9.73
12	4.98	7.86	4.30	49.72	26.09	13.45
13	25.23	5.30	3.18	69.74	16.49	9.76
14	4.88	5.21	4.99	29.55	14.89	12.15
15	2.69	2.84	2.66	15.63	6.96	6.27
16	3.81	5.07	3.43	53.45	20.54	13.97
17	3.87	4.35	3.44	36.23	18.09	11.01
18	4.89	3.99	2.53	29.29	13.79	9.91
19	3.18	3.86	2.92	32.97	14.33	9.25
平均值	7.79	6.56	4.43	51.78	14.61	10.36

区域,分布在宁夏回族自治区南部;MAE和RMSE较小的区域有黄左、黄右2、贺兰山东麓、引黄灌区等区域,分布在宁夏回族自治区北部。

4 结论

针对目前插值方法存在缺乏有效性、适用性的问

题,以宁夏为研究区域,根据宁夏回族自治区以及周边城市自治区共77个气象站1956—2016年平均降水数据,采用泰森多边形、距离平均反比、克里金插值三种方法,从插值方法的准确度和稳健性两方面对插值结果进行分析比较,得出如下结论:

(1)准确度方面,三种方法的面雨量等值线估计

值都是由南向北逐渐减小,克里金插值法所绘的等值线与观测值走向、位置较为相似,且平均相对误差较小,准确度较高;距离平均反比法所绘的等值线与观测值所汇等值线位置、走向差异均较大,均相对误差较大,准确度较低;泰森多边形法所绘等值线与观测值走向较为相似,但400 mm等值线差异较大且平均相对误差最大,准确度最低。

(2)稳健性方面,本文采用交叉验证法确定插值效果,一定程度上对几种方法的预测稳健性进行了评估,减少过拟合。交叉验证中,克里金插值法误差小,稳健性最好,但存在个别极值情况;距离平均反比法插值误差相对较小,插值效率高,插值效果适中且稳定,但易受站点个数影响;泰森多边形法受样本观测值影响较大,插值误差最大,准确度最低,稳健性最差。

(3)从准确度、稳健性方面综合考虑,推荐宁夏回族自治区使用克里金差值法,且克里金差值法具有较符合实际情况,应用范围较广等优点。

参考文献:

- [1] CHURCH M R, BISHOP G D, CASSEL D L. Maps of regional evapotranspiration and runoff/precipitation ratios in the northeast United States[J]. *Journal of Hydrology*, 1995, 168(1).
- [2] 冶运涛,王兴奎,蒋云钟,等.虚拟环境中基于多叉树的降雨时空分布等值线填充算法研究[J]. *水力发电学报*, 2011, 30(5): 125-131.
- [3] 黄森云,张学忠,辛冬根,等.计算机图形技术[M].北京:人民交通出版社,1995.
- [4] 李少华,董增川,杨爱丽.水文要素等值线图的自动绘制方法[J]. *水文*, 2004(6): 23-25, 31.
- [5] 贾仰文,王浩.分布式流域水文模型原理与实践[M].北京:中国水利水电出版社,2005.
- [6] 段玮,樊风,杨家康.流域降水的面雨量计算与评估:以澜沧江上游流域强降水个例分析为例[J]. *环境科学前沿:中英文版*, 2014(4): 136-141.
- [7] 赵冰雪,王雷,程东亚.安徽省气象数据空间插值方法比较与分布特征[J]. *水土保持研究*, 2017, 24(3): 141-145.
- [8] 邹强.流域降雨空间插值方法比较[J]. *节水灌溉*, 2009(7): 12-14.
- [9] 李钢,田刚,张由松.浙江省降雨侵蚀力三种空间插值方法对比研究[J]. *灌溉排水学报*, 2015, 34(S1): 241-245.
- [10] 宁夏回族自治区水利厅.宁夏水资源公报[R].宁夏:宁夏回族自治区水利厅,2020.
- [11] 段玮,樊风,杨家康.流域降水的面雨量计算与评估:以澜沧江上游流域强降水个例分析为例[J]. *环境科学前沿:中英文版*, 2014(4): 136-141.
- [12] 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 & Forest Meteorology*, 2000, 101(2-3): 81-94.
- [13] 朱求安,张万昌.流域水文模型中面雨量的空间插值[J]. *水土保持研究*, 2005(2): 11-14.
- [14] 黄杏元,马劲松,汤勤.地理信息系统概论[M].北京:高等教育出版社,2005:93-97.
- [15] 徐存东,朱兴林,张锐,等.地下水埋深空间插值方法比较和空间变异性研究[J]. *节水灌溉*, 2019(1): 49-56.
- [16] 李艳,朱军,胡亚,等.不同插值方法模拟四川省逐月降水量的对比分析[J]. *水土保持研究*, 2017, 24(1): 151-154, 160.

Comparative Analysis of Three Interpolation Methods in Precipitation Contour Drawing

WANG Shengxin¹, YAN Wenjing^{2,3}, ZHANG Haitao², DU Junkai², ZHAO Yuxiang^{2,3}

(1. *Ningxia Hydrology and Water Resources Monitoring and Early Warning Center, Ningxia 750000, China;*

2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

3. North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: Tyson polygon method, inverse distance average method and Kriging interpolation method were used for spatial interpolation and cross validation of the average rainfall data of 77 meteorological stations in Ningxia Autonomous Region from 1956 to 2016. And the interpolation method applicable to Ningxia Autonomous Region was obtained through the comparative analysis of the robustness and accuracy results of the methods. The results show that, from the accuracy point of view, the Kriging interpolation method is similar to the direction and position of the observation values, and from the point of view of robustness, the average MAE of the Kriging interpolation method is 4.43 mm and the RMSE average is 10.36 mm, which is significantly smaller than the Tyson polygon method and the distance average inverse ratio. Overall, the Kriging interpolation method is more ideal and could be used for the spatial interpolation analysis of precipitation in Ningxia Autonomous Region.

Keywords: contour; Tyson polygon method; inverse distance average method; Kriging interpolation method