

引用格式: 左琪琳, 赵娜, 段红梅. 虚拟站点在黑河流域降水模拟中的应用[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(8): 1218-1226. [ Zuo Q L, Zhao N, Duan H M. Application of virtual sites to simulate precipitation across Heihe River basin[J]. Journal of Geo-information Science, 2019, 21(8): 1218-1226. ] DOI:10.12082/dqxxkx.2019.180641

# 虚拟站点在黑河流域降水模拟中的应用

左琪琳<sup>1</sup>, 赵娜<sup>2\*</sup>, 段红梅<sup>1</sup>

1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083;
2. 中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101

## Application of Virtual Sites to Simulate Precipitation Across Heihe River Basin

ZUO Qilin<sup>1</sup>, ZHAO Na<sup>2\*</sup>, DUAN Hongmei<sup>1</sup>

1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory of Resources and Environment Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

**Abstract:** As a key factor in the climate system, precipitation plays an important role in the survival and development of human beings. Accurate precipitation information is essential for climate and environmental research, and the spatial distribution of precipitation data is important for addressing the rational use of water resources. The distribution of national meteorological stations in most areas of China is relatively scattered. In some regions, the terrain is undulating, and the original weather station cannot accurately reflect the actual situation of local precipitation. To accurately reflect the spatial distribution of precipitation in regions of this kind, this paper used the original data of the Heihe river National Meteorological Station, and built virtual sites to establish a precipitation network across the entire basin. The information network entropy and semi-variogram theory were used to optimize the precipitation network, and some existing sites were used to interpolate precipitation across the whole basin. Information entropy can calculate the value of information contained in the precipitation of each station. The larger the amount of information, the larger is the entropy value. To establish an optimal site dataset, we combined the joint entropy and conditional entropy to select sites with a large amount of information, and then combined the nugget value and range of the semi-variogram model to take account of the spatial correlation between these stations. This paper took the annual average precipitation data of 15 national meteorological stations in the Heihe River Basin from 1991 to 2003 as the raw data. According to the characteristics of elevation and vegetation growth, Heihe river is divided into three regions: upstream, midstream, and downstream. The effects of altitude, slope, and aspect on precipitation were considered for each of the three regions, and the relevant factors affecting the precipitation value were determined. We considered multiple factors to establish multiple linear regression equations to invert virtual station precipitation values. Finally, the watershed was interpolated using the drift function KED method and Co-Kriging method to compare the interpolation precision. The results show that the existence of virtual sites has effectively improved the accuracy of precipitation interpolation. Due to the appearance of the drift function, the error between the

收稿日期: 2018-12-05; 修回日期: 2019-02-26.

基金项目: 国家自然科学基金项目(41701456)。[ **Foundation item:** National Natural Science Foundation of China, No.41701456. ]

作者简介: 左琪琳(1995-), 女, 安徽宣城人, 硕士生, 主要研究方向为气候要素模拟。E-mail: xanthezql@cugb.edu.cn

\*通讯作者: 赵娜(1986-), 女, 山东莱芜人, 博士, 副研究员, 主要从事气候变化模拟与生态建模研究。E-mail: zhaon@reis.ac.cn

simulated precipitation value and the observed value in Dingxin, Jinta, and Ma Zongshan is within 5 mm. In this case, the interpolation result using the KED method is closest to the observation value.

**Key words:** information entropy; semi-variogram theory; virtual Meteorological sites; precipitation interpolation accuracy; precipitation; correlation analysis; Heihe River Basin

**\*Corresponding author:** ZHAO Na, E-mail: zhaon@lreis.ac.cn

**摘要:**降水作为气候系统的关键因素,也是影响区域植被生长以及生态变化规律的重要因子。本文针对黑河流域气象站点分布稀疏情况,采用信息熵及半变异函数理论构建该流域虚拟气象站点,并结合部分已有站点对整个流域降水进行插值模拟。信息熵可以计算每个站点降水值所包含的信息,通过联合熵以及条件熵来依次选取所含信息量多的站点,同时结合半变异函数模型来观察各站点之间的空间相关性,以此构建最优站点数据集。利用1991–2003年该流域15个气象台站的年平均降水量作为基础数据,考虑高程、坡度、坡向对降水的影响,对降水进行相关性分析,建立回归方程反演虚拟站点降水值。最后,采用协同克里金(Co-Kriging)与具有漂移的克里金(KED)方法对该流域进行插值,对比插值精度。结果表明,增加虚拟站点有效提高了降水插值精度,在该情况下使用KED方法插值结果与观测值最接近。

**关键词:**信息熵;半变异函数理论;虚拟气象站点;降水插值精度;降水;相关性分析;黑河流域

## 1 引言

降水是一项重要的气候资源<sup>[1]</sup>,也是影响区域植被生长以及生态变化规律的重要因子<sup>[2]</sup>。精确的降水数据对于气候与环境研究至关重要<sup>[3]</sup>,降水资料的分布是解决水资源合理利用的重要信息<sup>[4–5]</sup>,并对了解流域尺度的生态水文特点具有重要意义<sup>[6]</sup>。

通常降水量数据都是在点位置上获得的<sup>[7]</sup>,如气象站点。准确估计降水数据需要密集的降水网络以及遥感方法的辅助,这需要很大的安装和运行成本<sup>[5,8–9]</sup>,另一种常用且简易方法是通过已有台站资料进行插值来获得整个区域的降水空间分布。从国内外研究来看,一些研究人员考虑与降水相关的辅助地理因子(如高程、坡度、坡面等)来反演降水信息<sup>[10–12]</sup>,同时结合遥感手段监测降水的空间分布状况<sup>[13]</sup>。例如,辜智慧等<sup>[14]</sup>引入归一化植被指数(NDVI)模拟降水值,对预测误差具有一定的改善作用;李佳霖等<sup>[15]</sup>提出一种考虑风速和风向的插值方法,以北京市为例,构建基于已知气象站点的风场表面进行插值,并将该方法与普通克里金方法相比较,结果表明增加风速和风向的插值法插值精度最高。

另外,研究人员通过建立更加精密的降水网络来提高降水模拟的可靠性。例如,Chang等<sup>[16]</sup>结合遥感与灰色整数规划模型来选择水文监测站的最优站点子集;Shi<sup>[17]</sup>在雨量站之间引入了协方差因子来设计降水网络,相对误差可以通过增加降水网络的密度而减小;Adhikary等<sup>[18]</sup>基于克里金的地统计

方法,以降低克里金插值误差为指标,在澳大利亚亚拉河中游设计合适的降水网络,恰当地放置附加站点的空间位置能够显著地减少插值误差;余冲等<sup>[19]</sup>利用信息熵原理分析湖北省各站点降水的时空变化规律,结果显示大多数站点的降水量熵值低于平均值,即总体年降水量呈现下降趋势。

由于地理位置、气候因素以及大气环流等方面的影响,反映真实的降水信息非常困难<sup>[20]</sup>,且空间异质性强的地区极易受到极端降水的影响<sup>[21]</sup>。为了在地形复杂区域内更好地反映降水信息,本文采用信息熵与半变异函数理论对降水观测网进行构建。信息熵可用来描述信息的不确定性,半变异函数是反映不同距离样本点间的函数,二者结合优化站点数据集,在尽可能少的虚拟站点数量的前提下,尽可能多地反映黑河流域的降水情况。

## 2 研究区概况、数据来源与研究方法

### 2.1 研究区概况

黑河流域是一个典型的气象站点稀疏且分布不均的地区,介于98° E–101°30' E, 38° N–42° N之间,海拔最高达到5542 m,最低为865 m,地势南高北低,东高西低。降水量由东向西递减,年均降水量介于200~600 mm之间。在202 580 km<sup>2</sup>的面积上布局了18个国家气象观测站,且降水台站主要分布在海拔2800 m以下区域,在2860~3367 m高程带台站缺乏,大于3367 m的区域无站点分布。本文采用1991–2003年黑河流域的气象站点降水数据作为原始数据,选用该地区15个国家气象站点信息,分别

为马鬃山、玉门、民乐、永昌、肃南、额济纳旗、鼎新、金塔、酒泉、高台、张掖、山丹、托勒、野牛沟、祁连站。观测站点分布不均匀,多分布在南部和中部(图1)。本研究在黑河流域原国家气象台站的基础上增加虚拟站点,同时运用协同克里金方法、带有漂移函数的泛克里金方法对整个流域进行插值,分析增加虚拟站点前后对降水模拟结果的影响,比较插值精度。

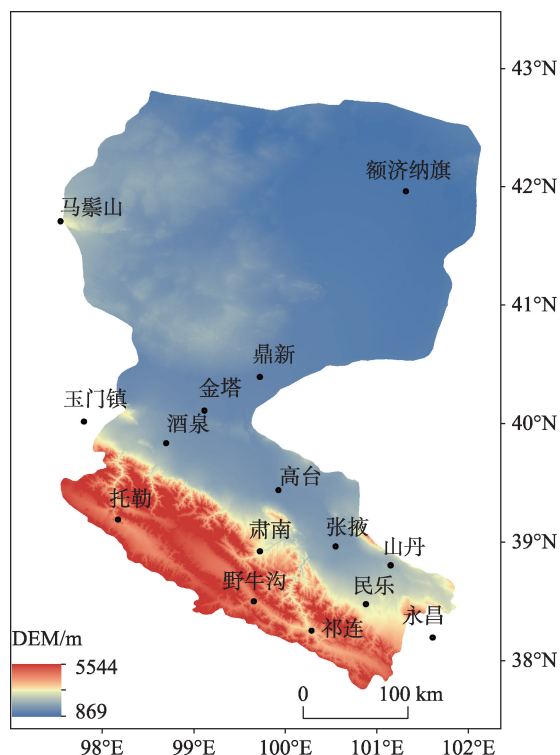


图1 黑河流域高程及国家气象站点分布

Fig. 1 Distribution of national meteorological stations in Heihe River Basin

## 2.2 数据来源

黑河流域气象站点分布以及1991–2003年逐日降水量数据来自黑河计划管理中心(<http://www.heihedata.org/>)。数字高程模型DEM以及坡度数据来自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/sear-ch>),空间分辨率为90 m,根据ArcGIS软件坡向工具对DEM数据进行处理,得到黑河流域坡向数据。

## 2.3 虚拟站点的构建

对黑河流域的15个气象站点进行地统计分析,得到40 km是一个合适的抽样间隔,因此以40 km为半径构建每个虚拟站点的影响范围,选择恰当的空间位置放置虚拟站点以覆盖整个研究区

域。该流域上游属于高寒半干旱气候区,海拔高,植被生长较好;中游属于温带干旱气候区,是重要地粮食产地;下游为暖温带极端干旱气候区,大多数为荒漠,降水稀少<sup>[22]</sup>。根据该地区地势特点及植被分布状况,将研究区分为上中下游3个区域(图2),3个区域所包含的站点分别为第一区域:额济纳旗、鼎新、马鬃山;第二区域:玉门、肃南、金塔、酒泉、高台、永昌、张掖、山丹、民乐;第三区域:祁连、托勒、野牛沟。将坡度、高程、坡向等影响因子与降水数据利用SPSS软件进行相关性分析,选择相关性较好的多个因子与降水数据进行多元回归,得到回归方程。

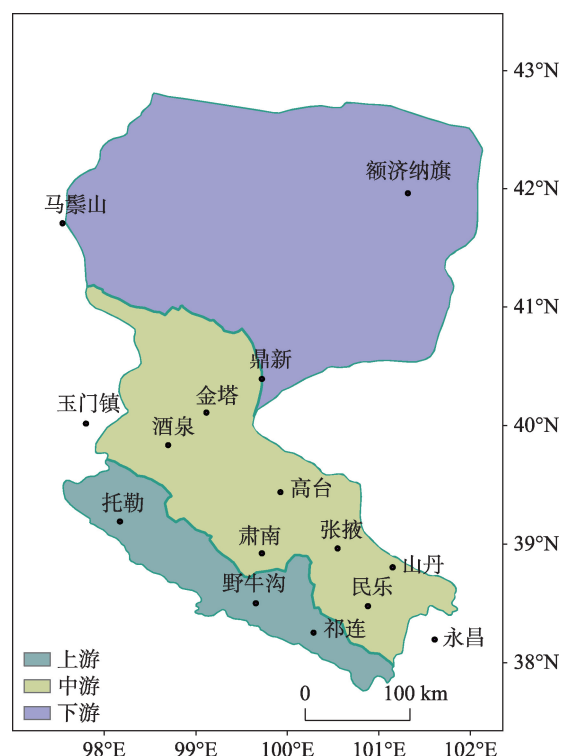


图2 黑河流域分区示意

Fig. 2 Schematic diagram of the zoning of Heihe River Basin

## 2.4 虚拟站点降水值的反演及站点优化

通过上述步骤,在研究区内共建立了40个虚拟站点以反映整个流域降水信息。根据每个区域的影响因子建立各自的回归方程,分别如下:

$$R_{up} = -521.424 + 0.367 \times E - 36.357 \times S - 0.822 \times D \quad (1)$$

$$R_{mid} = 405.612 - 0.321 \times E + 150.359 \times S + 0.582 \times D \quad (2)$$

$$R_{down} = 37.881 + 13.914 \times S - 0.018 \times E + 0.059 \times D \quad (3)$$



式中:  $Rup$ 、 $Rmid$ 、 $Rdown$  分别表示黑河流域上、中、下游的年平均降水值;  $D$  表示坡向;  $E$  表示高程;  $S$  表示坡度。根据式(1)–式(3), 即可得出每个虚拟站点的降水值。

站点的数量并不是越多越好, 过多的站点在带来数据冗余的同时还会引入误差。因此, 本研究结合信息熵与半变异函数模型对站点进行筛选, 以达到最少站点数量展现最优信息量的目的。信息熵<sup>[23]</sup>是权衡信息内容的一个标准, 它取决于当前的知识水平或不确定性<sup>[24]</sup>。信息熵将信息量化, 变量的随机性越大, 熵值越大, 信息量也就越大。其计算公式为:

$$H(X) = -\sum_{i=1}^n p(x_i) \log_2[p(x_i)] \quad (4)$$

式中:  $H(X)$  为熵值;  $x_i$  为随机变量;  $p(x_i)$  为  $x_i$  出现的概率。

2个变量之间的信息可能会重叠, 则2个变量之间的联合熵为:

$$H(X, Y) = -\sum_x \sum_y p(x, y) \log_2 p(x, y) \quad (5)$$

式中:  $p(x, y)$  为2个变量的联合概率。

在已知所有  $X$  取值的前提下,  $Y$  取值的随机性表示为条件熵。其公式为:

$$H(Y|X) = -\sum_x \sum_y p(x, y) \log_2 p(y|x) \quad (6)$$

式中:  $p(y|x)$  表示为条件概率。

半变异函数是分析区域化变量空间异质性的函数, 它可以展现区域化变量的结构性以及随机性变化<sup>[25–26]</sup>。半变异函数与数据点之间的距离有关。信息熵用来增加或删除站点<sup>[27]</sup>, 假设2个站点上的降水资料值分别为  $P1$ 、 $P2$ , 则二者之间的联合熵为  $H(P1, P2) = -\sum_i \sum_j p_{ij} \ln p_{ij}$ ,  $H(P1, P2)$  反映了2个站点之间信息的冗余,  $p_{ij}$  为  $P1, P2$  的联合概率。首先从所有站点中选择熵值最大的站点  $H(z_1)$ , 将  $z_1$  作为选出的第1个站点。由于  $H(z_2|z_1) = H(z_1, z_2) - H(z_1)$ , 从余下站点中选择  $z_2$  使得  $\min\{H(z_1) - H(z_1|z_2)\}$ , 即使条件熵  $H(z_1|z_2)$  最大。第3个站点的选择使得  $H(z_1, z_2|z_3)$  最大, 以此类推可得到一个站点数据集。随着站点数量的增加, 考察降水的半变异函数。如果块金值下降, 则说明通过增加模拟站点有效减少了随机因子的影响; 变程增大说明具有相似降水量的空间自相关距离增加。当半变异模型趋于稳定时, 所选择的

站点数趋于不变。同时考察实际站点及虚拟站点集两组数据各自的块金值、基台值、变程及半变异函数, 考察2组数据空间结构的相似性并更新虚拟站点数据集。

## 2.5 插值方法的选择

本文采用协同克里金以及泛克里金2种方法进行插值。一方面基于实际站点对黑河流域进行插值, 另一方面对2种方法增加虚拟站点进行插值, 以比较各插值方法的优劣以及增设虚拟站点插值效果的优势。

### 2.5.1 协同克里金

协同克里金(Co-kriging)是普通克里金方法的延伸, 它对于待插点的估值考虑更多的区域化属性, 用两个或两个以上的辅助信息来对待插点的数值进行估计, 利用主变量与其他变量的相关性对待插值点进行估计<sup>[28]</sup>。在运用该方法对降水量进行插值时, 一般假设区域内对降水空间插值影响的  $m$  满足二阶平稳。本研究将该区域的高程信息作为辅助数据对流域进行协同克里金插值, 考虑区域的空间变化对插值结果的影响。

### 2.5.2 带有漂移的泛克里金法

泛克里金方法(KED)引入了漂移函数, 而漂移函数是通过第二类变量获得的<sup>[29]</sup>。本研究第二类变量为虚拟站点  $L(x)$ 。对于黑河流域, 在位置  $x$  上的降水量数据为  $z(x)$ , 假设它由一个漂移函数  $m(x)$  和一个残差  $R(x)$  组成。则KED计算插值公式为:

$$z(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) = \sum_{i=1}^n \lambda_i (m(x_i) + R(x_i)) \quad (7)$$

式中:  $x_0$  是待测点;  $\lambda$  为权重;  $x_i$  表示为第  $i$  个站点;  $n$  为所有站点总数。

## 2.6 各插值结果交叉验证

交叉验证通过逐一剔除站点, 根据其他站点信息来推测该站点的降水值, 并将模拟出的降水值与实测数据进行比较, 来分析估计误差在各个站点的分布情况。采用平均绝对误差(MAE)、平均相对误差(MRE)、平方根误差(RMSE)作为评价各个方法插值效果的标准。

## 3 结果及分析

### 3.1 增加虚拟站点模拟图

图3(a)为根据各个区域地势因子建立的虚拟站

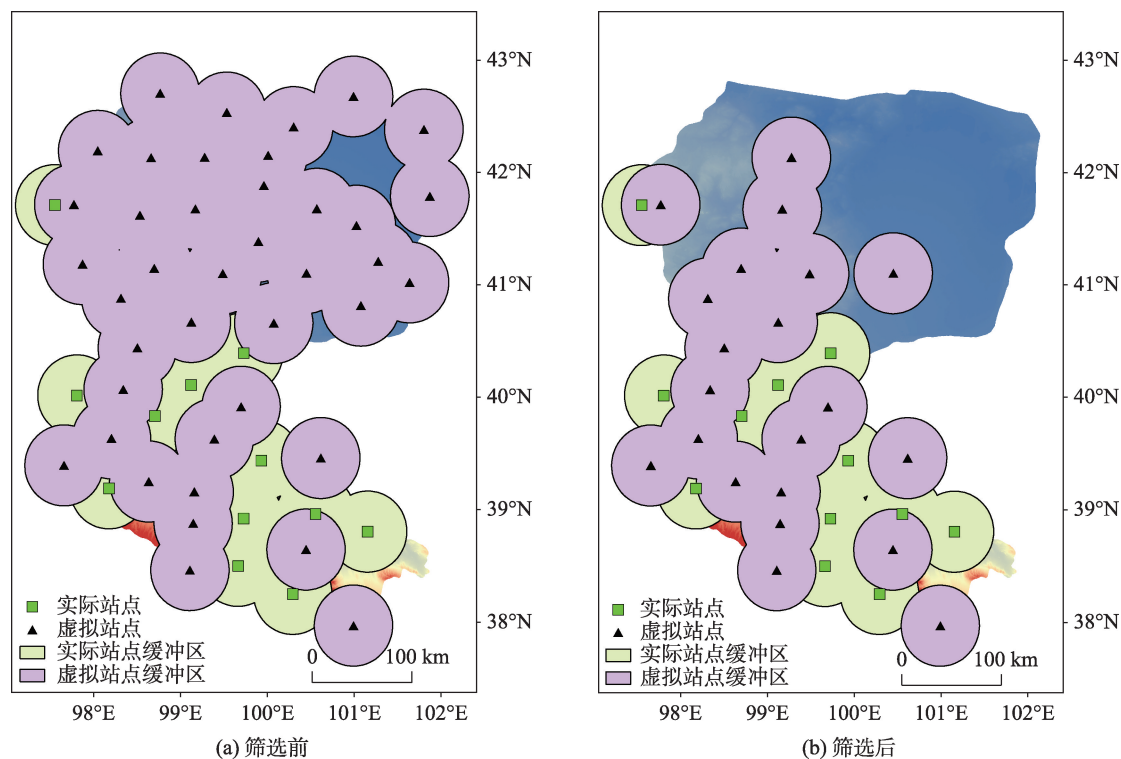


图3 1991–2003年黑河流域年均降水虚拟站点更新前后分布

Fig. 3 1991-2003 annual average precipitation virtual site distributions across Heihe River Basin from 1991 to 2003

点。从图中可以看出,站点数量过于冗杂,过多的站点数量会产生信息的冗余。因此,结合信息熵与半变异函数模型对虚拟站点进行筛选,所得结果如图3(b)所示,站点数量减少了30个。在黑河流域的上游,由于地势起伏较大,需要建立更多的虚拟站点来增加降水的异质性以提高插值精度。而对于下游,地势较为平坦,高程落差小,因此虚拟站点的分布较为稀疏,从而减少数据冗余,提高插值效率。

3.2 增加虚拟站点前后各插值方法交叉验证分析

增加站点前后交叉验证结果如表1所示。从表

表1 不同插值方法下的交叉验证结果

Tab. 1 Cross-validation results using different interpolation methods (mm)

插值法	MAE	MRE	RMSE
Co-kriging-R	8.93	0.11	9.79
KED-R	7.10	0.08	7.45
Co-kriging-S	6.38	0.08	6.67
KED-S	3.23	0.05	3.75

注: Co-kriging-R、Co-kriging-S分别表示利用协同克里金方法对国家气象站点以及国家气象站点加虚拟站点进行插值的方法, KED-R、KED-S表示基于泛克里金方法对国家气象站点以及国家气象站点加虚拟站点的插值方法。

中可看出,基于实际站点加模拟站点插值方法的MAE、MRE、RMSE值小于基于实际站点插值方法的值,可见,本研究的方法具有一定的优越性。2种基于真实站点的插值方法相比,对于MAE、RMSE的值,各插值方法值的大小为:Co-kriging > KED,且Co-kriging的MAE值比KED的值大1.83 mm, RMSE值相差2.34 mm。KED-S的MAE值比KED-R小3.87 mm, MRE值小0.03 mm, RMSE值小3.70 mm。因此,在本研究中基于实际站点加虚拟站点的泛克里金方法具有最优的插值效果。

3.3 站点数值对比验证

通过依次剔除以下10个站点值利用剩下站点降水值进行插值,并对站点观测值与4种插值方法的模拟值进行对比,结果如表2所示。

观察4种方法的降水预测值:金塔KED-S方法的预测值为53.73 mm,与观测值相差1.13 mm;张掖KED-S模拟降水值为107.54 mm,观测值为104.83 mm,相差2.71 mm;祁连Co-kriging-S预测值为346.08 mm,观测值为344.69 mm,差值为1.39 mm。对于2种基于国家气象站点进行插值的方法,在某几个站点也能很好地反映降水的实际情况:KED方法在野牛沟站点的预测值为325.74 mm,与观测值相

表2 黑河流域各气象站点观测值与模拟值结果对比

Tab. 2 Observed and simulated results at each site in Heihe River Basin (mm)					
站点	观测值	Co-kriging-R	KED-R	Co-kriging-S	KED-S
鼎新	45.40	35.50	53.14	57.13	50.13
金塔	52.60	55.41	46.34	40.35	53.73
马鬃山	57.45	49.16	49.30	63.91	54.37
高台	92.06	87.27	87.91	81.98	91.98
张掖	104.83	114.78	110.28	109.62	107.54
酒泉	66.53	74.49	75.37	54.23	65.76
永昌	176.56	183.27	182.57	182.23	172.23
托勒	242.79	249.46	233.61	227.58	248.53
野牛沟	328.85	337.78	325.74	319.43	334.17
祁连	344.69	339.68	349.61	346.08	349.11

差3.11 mm,较为接近,插值效果较好;Co-kriging-R方法在金塔站点的模拟值与观测值相差2.81 mm,较能反映该地区降水量的观测值。总得来说,基于实际站点加虚拟站点的KED插值方法得到的模拟值与气象站点的观测值最接近,插值效果最好。

在整个黑河流域中,选取10个气象站点的观测值与4种插值方法产生的预测值之间的差值进行验证,生成折线图,如图4所示。

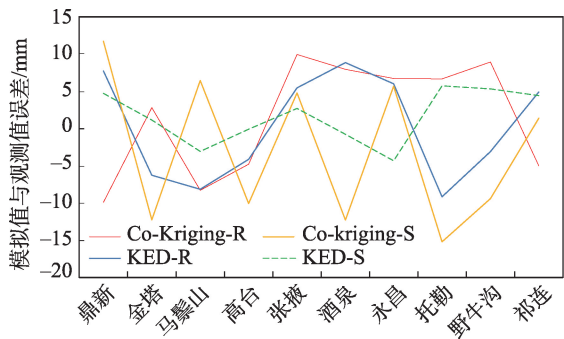


图4 1991–2003年黑河流域各站点年均降水插值模拟值与观测值误差

Fig. 4 Annual average precipitation analog value and observation value error at each site in Heihe River Basin from 1991 to 2003

从图4可看出,4种插值方法的模拟值与观测值总体上差值在16 mm以内,而增加虚拟站点的泛克里金方法与观测值更接近,尤其在鼎新、金塔、马鬃山、张掖、酒泉站点,模拟降水值与观测值差值在5 mm以内,能够较好地反映该区域降水状况。基于协同克里金真实站点加虚拟站点的插值方法在祁连、野牛沟、高台站点的模拟值与观测值较为接近,但在大多数站点的预测值与观测值之间的误差在5 mm以上。Co-kriging-R插值方法的误差最大,

且在托勒的模拟值与观测值误差约为15 mm。总体而言,误差大小为Co-kriging-R > KED-R > Co-kriging-S > KED-S,因此增加虚拟站点进行插值可以提高插值精度。

3.4 插值结果模拟比较

图5为黑河流域基于实际站点的协同克里金插值、泛克里金插值以及基于实际站点加虚拟站点的泛克里金插值模拟图。4种插值方法均能反映黑河流域降水南多北少的特点。2种基于实际站点的插值结果均呈带状分布,且在黑河流域下游的降水分布情况较为相似,而基于KED方法在下游的插值结果降水量分布细节信息更明显。KED-S方法插值结果大部分围绕站点呈环状分布,且下游的降水量范围在16~70 mm之间。

4 结论与讨论

本文以黑河流域为例,针对其气象站点分布稀疏的现象,以该流域1991–2003年气象站点逐日降水量为原始数据,考虑地势、坡度、坡向等影响因子,在不同区域建立虚拟站点,并结合信息熵与半变异函数模型更新最优站点子集,达到以最少的站点数提供最多信息量的目的。对于筛选出的最优站点集合,采用协同克里金与泛克里金两种方法进行插值,结果表明:

(1)通过地势及植被分布特征对研究区进行分级,并根据每个区域的影响因子建立各自的回归方程,反演降水值,可以充分发挥各个区域降水空间分布的不同特点,有助于提高插值精度。

(2)信息熵用来表示信息量的多少,通过计算找

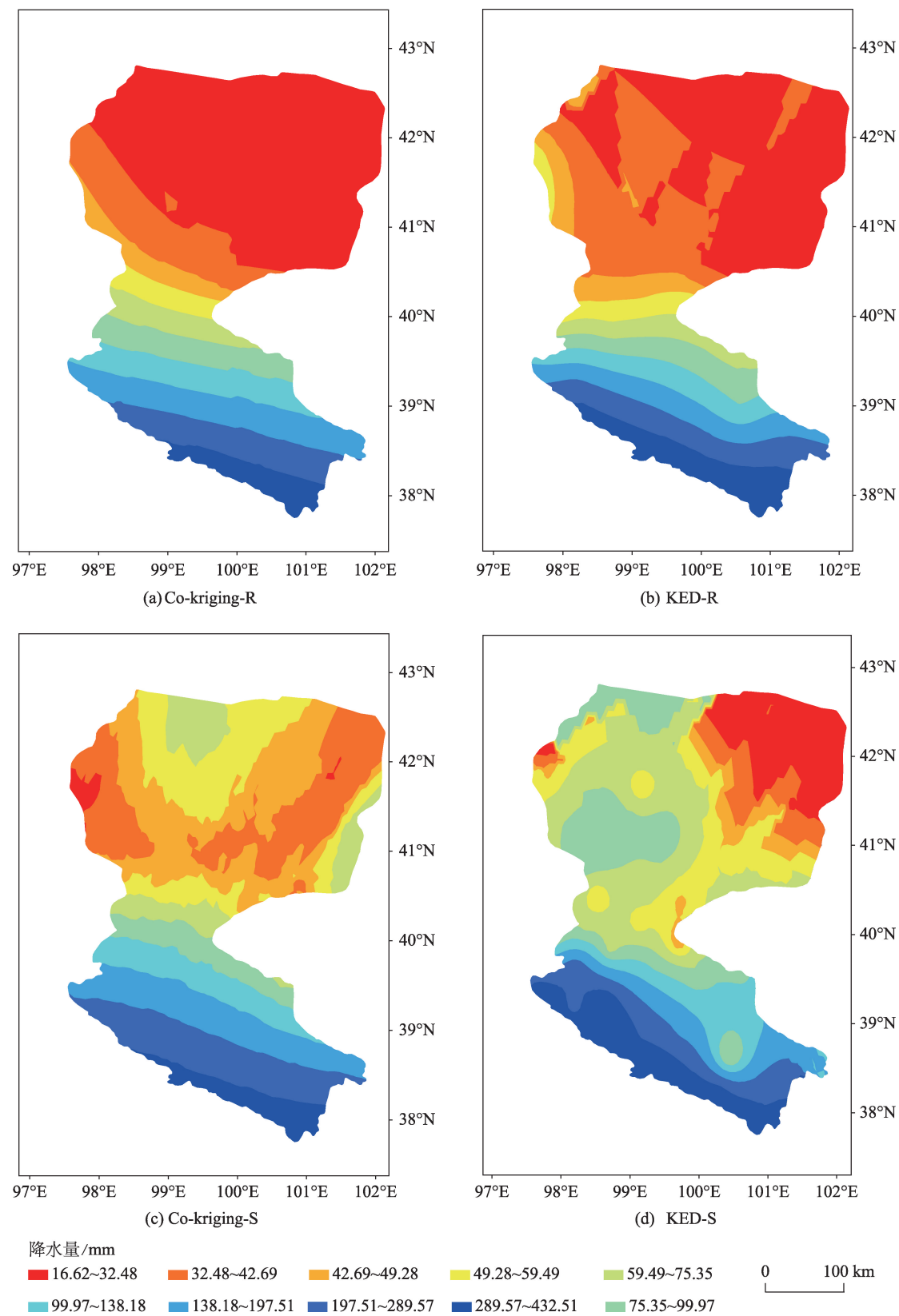


图5 基于实际站点以及实际站点加虚拟站点的Co-kriging与KED插值结果

Fig. 5 Co-kriging and KED interpolation results based on actual sites versus actual sites plus virtual sites

到与前一个站点冗余度最小的站点作为下一个站点,再结合半变异函数,当块金值不再下降、变程不

再增大时,更新的站点数量为最终站点集合,以实现最少站点数量展现最大信息量,得到最优站点子集。



(3)泛克里金方法充分考虑了样本与待估点之间的空间分布地理位置等几何特征,以及样本间的空间相关性等结构特征。在本研究中该方法结合虚拟站点对整个区域进行插值,会得到更接近观测值的模拟值。

与其他增加虚拟站点的研究相比,本文对研究区域进行分级,进一步减小了误差。此外,前人的研究普遍采用的是普通克里金(OK)、反比距离加权法(IDW)等进行插值,本文采用的协同克里金(Co-kriging)以及带有漂移函数的泛克里金(KED)2种插值方法更多地考虑到区域化特征,插值结果也比前2种方法具有更好的精度。

在今后的研究中,可以将该方法应用到更大的时空范围中去。通过对研究区进行分级,尽管能够很好地结合每个区域的空间特征,但有些区域的气象站点数量过少,根据分区后站点的影响因子计算虚拟站点降水值会引入较大的误差,具有很大的不确定性,后期研究中将针对现有的该流域再分析资料等数据对虚拟站点反演降水值进行更新。

#### 参考文献(References):

- [1] 王绍武,蔡静宁,慕巧珍,等.中国西部年降水量的气候变化[J].自然资源学报,2002,17(4):415-422. [Wang S W, Cai J N, Mu Q Z, et al. Climate change of annual precipitations in western China[J]. Journal of Natural Resources, 2002,17(4):415-422. ]
- [2] 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[J].生态学报,2004,24(9):1910-1915. [Sun P S, Liu S R, Li S W. Estimation of precipitation using altitude and prevailing wind direction effect index in Mountainous region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004,24(9):1910-1915. ]
- [3] Hu Z, Zhang C. Evaluation of reanalysis, spatially-interpolated and remote-sensing derived precipitation datasets over Central Asia[C]// EGU General Assembly Conference. EGU General Assembly Conference Abstracts, 2014.
- [4] Chapman L, Thornes J E. The use of geographical information systems in climatology and meteorology[J]. Progress in Physical Geography, 2003,27(3):313-330.
- [5] Frei C, Schär C. A precipitation climatology of the Alps from high-resolution rain-gauge observations[J]. International Journal of Climatology, 2005,18(8):873-900.
- [6] Wang Y, Yang H, Yang D, et al. Spatial interpolation of daily precipitation in a high mountainous watershed based on gauge observations and a regional climate model simulation[J]. Journal of Hydrometeorology, 2016,18(3):844-861.
- [7] Borges P D A, Franke J, Weiss H, et al. Comparison of spatial interpolation methods for the estimation of precipitation distribution in Distrito Federal, Brazil[J]. Theoretical & Applied Climatology, 2016,123(1-2):335-348.
- [8] Goovaerts P. Geo-statistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall[J]. Journal of Hydrology, 2000,228(1-2):113-129.
- [9] Mair A, Fares A. Comparison of rainfall interpolation methods in a mountainous region of a tropical island[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2011,84(1):371-383.
- [10] Drogue G, Humbert J, Deraisme J, et al. A statistical - topographic model using an omnidirectional parameterization of the relief for mapping orographic rainfall[J]. International Journal of Climatology, 2002,22(5):599-613.
- [11] Marquínez J, Lastra J, García P. Estimation models for precipitation in mountainous regions: The use of GIS and multivariate analysis[J]. Journal of Hydrology, 2003,270(1-2):1-11.
- [12] Prudhomme C, Reed D W. Relationships between extreme daily precipitation and topography in a mountainous region: A case study in Scotland[J]. International Journal of Climatology, 2015,18(13):1439-1453.
- [13] Germann U, Zawadzki I. Scale-dependence of the Predictability of precipitation from continental radar images. Part I: Description of the methodology[J]. Monthly Weather Review, 2002,130(12):2859-2873.
- [14] 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[J].北京师范大学学报(自然科学版),2006,42(2):98-102. [Gu Z H, Shi P J, Chen J. Precipitation interpolation research over regions with sparse meteorological stations: A case study in Xilinqole league[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2006,42(2):98-102. ]
- [15] 李佳霖,樊子德,邓敏.顾及风向和风速的空气污染物浓度插值方法[J].地球信息科学学报,2017,19(3):382-389. [Li J L, Fan Z D, Deng M. A method of spatial interpolation of air pollution concentration considering wind direction and speed[J]. Journal of Geo- information Science, 2017,19(3):382-389. ]
- [16] Chang N B, Makkeasorn A. Optimal site selection of watershed hydrological monitoring stations using remote sensing and grey integer programming[J]. Environmental Modeling & Assessment, 2010,15(6):469-486.
- [17] Shih S F. Rainfall variation analysis and optimization of gaging systems[J]. Water Resources Research, 1982,18(4):1269-1277.



- [18] Adhikary S K, Yilmaz A G, Muttil N. Optimal design of rain gauge network in the Middle Yarra River catchment, Australia[J]. *Hydrological Processes*, 2015,29(11):2582-2599.
- [19] 余冲,刘冀,董晓华.基于信息熵的湖北省降雨时空变化规律研究[J].*水电能源科学*,2011,29(1):6-8. [ Yu C, Liu J, Dong X H. Information entropy-based spatial and temporal variation rule of rainfall in Hubei Province[J]. *Hydro-power Energy Science*, 2011,29(1):6-8. ]
- [20] 李海燕,王可丽,江灏,等.黑河流域降水的研究进展与展望[J].*冰川冻土*,2009,31(2):334-341. [ Li H Y, Wang K L, Jiang H, et al. Study of the precipitation in the Heihe River Basin: Progress and prospect[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009,31(2):334-341. ]
- [21] 赵志龙,罗娅,余军林,等.贵州高原1960-2016年降水变化特征及重心转移分析[J].*地球信息科学学报*,2018,20(10):1432-1442. [ Zhao Z L, Luo Y, Yu J L, et al. Analysis of precipitation variation characteristics and barycenter shift in Guizhou Plateau during 1960-2016[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2018,20(10):1432-1442. ]
- [22] 王秀珍,谢宝元,王礼先.黑河流域生态环境建设分区研究[J].*中国生态农业学报*,2003,11(3):169-171. [ Wang X Z, Xie B Y, Wang L X. Division for eco-environmental construction in Heihe watershed[J]. *Chinese Journal of Eco-agriculture*, 2003,11(3):169-171. ]
- [23] Shannon C E. A mathematical theory of communication [J]. *Bell System Technical Journal*, 1948,14(4):306.
- [24] Chen Y, Wei C, Yeh H. Rainfall network design using kriging and entropy[J]. *Hydrological Processes*, 2010,22(3):340-346.
- [25] 王政权.地统计学及在生态学中的应用[M].北京:科学出版社,1999:57-69. [ Wang Z Q. Geo-statistics and its Application in Ecology[M]. Beijing: Science Press, 1999: 57-69. ]
- [26] 王军,傅伯杰,邱扬.黄土丘陵小流域土壤水分的时空变异特征:半变异函数[J].*地理学报*,2000,55(4):428-438. [ Wang J, Fu B J, Qiu Y. Spatiotemporal variability of soil moisture in small catchment on loess plateau-semi-vario-grams[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2000,55(4): 428-438. ]
- [27] Krstanovic P F, Singh V P. Evaluation of rainfall networks using entropy: II. Application[J]. *Water Resources Management*, 1992,295-314.
- [28] 胡丹桂,舒红.基于协同克里金空气湿度空间插值研究[J].*湖北农业科学*,2014,53(9):2045-2049. [ Hu D G, Shu H. Air humidity based on co-kriging interpolation[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2014,53(9):2045-2049. ]
- [29] 黄小玉,陈媛,熊毅,等.漂移克里金方法在雷达和雨量计联合估测降水中的应用[J].*气象学报*,2009,67(2):288-297. [ Huang X Y, Chen Y, Xiong Y, et al. Merging radar and rain gauge data using Kriging with external drift (KED) for quantitative precipitation estimation[J]. *Journal of Meteorology*, 2009,67(2):288-297. ]