

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0063

王国泰,张守平,杨清伟,等.基于空间插值方法的重庆降水信息展布[J].南水北调与水利科技,2018,16(3):18-23. WANG G T,ZHANG S P,YANG Q W, et al. Precipitation information distribution in Chongqing based on spatial interpolation method [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(3): 18-23. (in Chinese)

基于空间插值方法的重庆降水信息展布

王国泰,张守平,杨清伟,魏佳,江志航

(重庆交通大学 国家内河航道整治工程技术研究中心,重庆,400074)

摘要:不同空间插值方法在不同地区的插值精度不同。为确定重庆市降雨量的空间分布,采用重庆市12个气象站1960—2014年降水数据,运用系数为2、3、4的反距离权重法、普通克里金法、考虑高程的协同克里金法及考虑温度的协同克里金法,按多年平均、最大3个月及最小3个月不同降水量指标进行分析,并以均方根误差和纳什效率系数进行验证。结果表明,对于三种指标,不同插值方法的优劣从好到差均为考虑高程的协同克里金法、考虑温度的协同克里金法、普通克里金法、系数分别为4、3、2的反距离权重法。对于反距离权重法,系数越大则误差越小。三种降水量指标以多年平均降水量为输入数据的插值结果更加准确。考虑温度的协同克里金法在降水量较小或降水与温度相关性较强时有良好的插值精度。在重庆地表变化幅度较大的地区,考虑高程的协同克里金法更能体现高程变化对降水量的影响。

关键词:降水;空间插值;反距离权重法;普通克里金法;协同克里金法;气温;重庆

中图分类号: P339 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2018)03-0018-06

Precipitation information distribution in Chongqing based on spatial interpolation method

WANG Guotai, ZHANG Shouping, YANG Qingwei, WEI Jia, JIANG Zhihang

(National Inland Waterway Regulation Engineering Research Center, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Different spatial interpolation methods have different interpolation accuracy in different regions. In order to determine the spatial distribution of rainfall in Chongqing, we used the precipitation data of 12 meteorological stations in Chongqing from 1960 to 2014, and used the IDW method with a coefficient of 2, 3, and 4, the Ordinary Kriging method, the elevation Co Kriging method, and the temperature Co Kriging to analyze the precipitation in terms of different indexes, which were the multi year average, largest 3 month, and smallest 3 month. The results were validated with RMSE and Nash efficiency coefficients. The results showed that in Chongqing, for the three indexes, the interpolation methods from more accurate to less accurate were the elevation Co Kriging method, temperature Co Kriging method, OK, IDW4, IDW3, IDW2. For the IDW method, the larger the coefficient, the smaller the error. Among the three indexes, using the multi year average precipitation as the input data could produce a more accurate interpolated result. The temperature CK method had good interpolation accuracy when the precipitation was small or the correlation between precipitation and temperature was strong. In the areas with large surface changes in Chongqing, the Co Kriging method considering elevation can better reflect the impact of elevation changes on precipitation.

Key words: precipitation; spatial interpolation; IDW; ordinary Kriging; Co Kriging; temperature; Chongqing

收稿日期: 2017-11-23 修回日期: 2018-04-08 网络出版时间: 2018-04-24

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.tv.20180423.1519.004.html>

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2015CB452701); 国家重点研发计划(2016YFC0401301); 开放基金项目(SLK2015B05); 开放研究基金项目(IWHR-SKL-201712); 重庆市教委科学技术研究项目(KJ1600533); 重庆市基础与前沿研究计划重点项目(estc2015jcyjBX0041)

Funds: National Key Basic Research Development Plan(2015CB452701); National Key Research and Development Plan(2016YFC0401301); Open Fund Project(SLK2015B05); Open Research Fund Project(IWHR-SKL-201712); Science and Technology Research Project of the Chongqing Municipal Education Committee(KJ1600533); Key Projects of Chongqing Basic and Frontier Research Program(estc2015jcyjBX0041)

作者简介: 王国泰(1993),男,山东泰安人,主要从事水文学及水资源研究。E-mail: 635372474@qq.com

通讯作者: 张守平(1984),男,四川万源人,讲师,博士,主要从事水文学及水资源研究。E-mail: zsp19840625@163.com

降水的空间分布是影响流域产汇流的主要因素^[1],精确的降水空间分布数据为区域水资源规划与评价提供支撑。空间插值方法是一种可以计算降水空间分布的气象数据插值计算方法,主要包括传统插值方法和地统计方法。传统插值方法包括自然邻近法(NN)、泰森多边形法^[2]、反距离权重法^[3](IDW)等。地统计方法主要为克里金法^[4],包括普通克里金(OK)、协同克里金(CK)等其他克里金衍生计算方法。

不同地区的最优空间插值方法需要根据研究目的和研究区域的自然地理特征进行选择与参数优化^[5]。例如Mair等^[6]在热带地区多山的海岛上应用泰森多边形、IDW法、线性回归、克里金法、简单克里金法对降水数据进行展布分析;Ly等^[7]在比利时运用克里金法、泰森多边形和IDW法对降水日数据进行插值分析;Mendez等^[8]运用NN、IDW、二阶趋势面法、克里金法插补降水数据;郭卫国等^[9]在史灌河运用5种空间插值方法;范玉洁等^[10]在漓江流域比较了克里金法与IDW法的优劣;Xu等^[11]研究了在四川地区IDW、OK和考虑了DEM的CK方法的插值精度;王智等^[12]采用IDW法、多元二次径向基函数法及克里金法对新疆地区及周边63个气象站的降水资料进行插值;庄立伟^[13]对东北地区夏季逐日降水进行空间插值,发现IDW法插值精度高于克里金法和以高度梯度修正的IDW法(GIDW)。降水的空间分布一方面会受到当地地形、地势、坡度坡向等地表特征的影响,另一方面,会受到该地气象特征的影响,例如气温、湿度、风速、日照等。然而,上述研究仅考虑高程对插值结果的影响。针对以上问题,有学者利用多元统计回归拟合气象要素与地形因素之间的回归方程,例如王远见等^[14]建立降水与地理、地形因子间的回归方程,分析了地理、地形因子对降水的影响;张正勇等^[15]通过最小二乘法建立了天山山区降水与经纬度、坡度、坡向、温度、水气压、相对湿度之间的回归模型;Chao等^[16]建立了降水与高度、坡度、坡向、表面粗糙度、距海岸线距离及风速的回归方程。然而多元回归插值在模拟大范围空间分布时精度较差^[17]。

本文将地统计插值方法与气象因子相结合,通过分析降水与气温、湿度、日照时数的相关关系,将相关性最佳气象因子引入地统计方法进行插值计算。同时,应用不同系数的IDW法、普通克里金法和考虑高程的协同克里金法,并将插值结果进行交叉分析,最终确定在重庆地区最佳降水空间插值方法。

1 数据收集与分析

1.1 研究区概况

重庆位于东经 $105^{\circ}11'$ – $110^{\circ}11'$ 、北纬 $28^{\circ}10'$ – $32^{\circ}13'$ 之间,西邻四川,北连陕西,南接贵州,东靠湖北、湖南。地势东南、东北高,中、西部低,境内多山地丘陵,山地面积占76%,丘陵占22%,海拔在100~2700m之间(图1)。境内有两个主要河流为长江和嘉陵江。重庆气候属亚热带季风湿润气候,全年降水充沛,年降水量为1000~1350mm,降水具有明显的季风气候特征,全年降水多集中在夏、秋季。根据重庆降水量分布情况,5月–7月降水量最多约占全年降水量的44.6%,12月至次年2月降水量最小占全年降水量的0.055%。

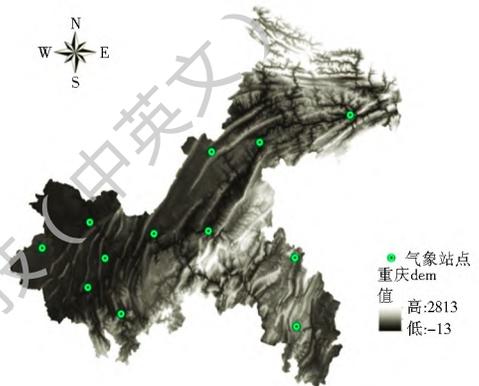


图1 重庆气象站分布

Fig. 1 Distribution of meteorological stations in Chongqing

1.2 数据收集与处理

本文对重庆地区数据较完整的12个气象站(图1)逐日气象数据(降水、气温、相对湿度、日照时数)进行分析。数据来源于中国气象科学数据网(<http://data.cma.cn>)。根据各站资料的代表性和长度,本文的研究序列采用1960年至2014年。同时,为验证降水量的大小对插值精度的影响,本文利用多年平均降水量、年降水量最大3个月及年降水量最小3个月进行分析计算。年降水量最大3个月选择5月–7月,年降水量最小3个月选择12月至次年2月。

成彩霞等^[18]在祁连山分析了降水与其他气象因子间的相关性,最终得出降水与其他气象因子相关性从强到弱依次为气温、水面蒸发、日照时数、风速、相对湿度、气压。在选择协同克里金插值的辅助因子时,需要满足较易获取、与第一信息关联度强等特点^[19]。本文分析了重庆气温、日照时数、湿度与降水的相关关系,相关关系的高低用皮尔逊相关系数 r 表示。分析结果如表1所示,降水量与气温的

相关系数最高, 最终选择与降水相关系数最高的气温作为辅助因子引入插值计算。

表 1 降水及其他气象要素相关系数(r)

Tab. 1 Correlation coefficient between precipitation and other meteorological factors

	降水	气温	日照	湿度
降水	1			
气温	0.72	1		
日照	-0.08	-0.10	1	
湿度	-0.16	-0.45	0.05	1

2 研究方法

本文选取四种空间插值计算方法: 系数为 2、3、4 的反距离权重法(分别表示为 IDW2、IDW3、IDW4)、普通克里金法(OK)、考虑高程的协克里金法(高程 CK)及考虑温度的协克里金法(温度 CK)。

2.1 反距离权重法(IDW)

反距离权重法是根据距离确定各点对插值点的影响大小, 距离待插值点越近, 权重越大, 反之权重越小^[20]。IDW 法计算方程为^[21]:

$$Z(x) = \frac{\sum_{i=1}^n Z_i \cdot W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (1)$$

$$W_i = 1/d^p \quad (2)$$

式中: $Z(x)$ 为插值点估计值; Z_i 为第 i 个样本点的降水量; W_i 为第 i 个样本点对插值点的权重; 系数 p 为距离的幂。在降水量插值中常使用系数 p 等于 2^[22]。然而, 系数 p 增大能增加临近样本点的权重, 减小远处样本点的权重^[23], 在地形起伏较大的地区插值点与临近样本点的相关性更高^[24], 选择较大的系数可能会提高插值结果的准确性。

2.2 普通克里金法(OK)

普通克里金插值基于广义线性回归^[25], 不仅考虑了样本点与插值点位置的相关关系, 同时还利用半变异理论模型得到样本点与插值点之间的空间相关关系, 是在有限区域内对区域化变量进行无偏最优化的一种方法, 是地统计学的主要内容之一^[26]。其表达式^[27]如下:

$$Z(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot Z_i \quad (3)$$

式中: $Z(x)$ 为插值点估计值; λ_i 为第 i 个样本点的权重系数; Z_i 为第 i 个样本点的降水量。

2.3 协同克里金法(CK)

协同克里金法在普通克里金法的基础上把区域化变量的最佳估值方法从单一属性发展到两个以上的协同区域化属性, 它在计算中要用到两属性各自

的半方差函数和交叉半方差函数^[21]。在进行协同克里金插值降水量时, 可以选择与降水量具有相关性的辅助因子, 例如高程、坡度、风向、温度等, 其中选择高程作为辅助因子的 CK 法较为常见。本文在研究过程中选用高程作为辅助因子, 同时选择与降水量相关性较高的气温数据作为辅助因子进行分析。协同克里金法表达式^[28]:

$$Z(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot Z_i + \lambda(y(x) - m_y + m_z) \quad (4)$$

式中: $Z(x)$ 为插值点估计值; Z_i 为第 i 个样本点的降水量; λ_i 为权重系数; $y(x)$ 为辅助因子的值; m_y 、 m_z 为辅助因子及降水量的全局平均值。

2.4 结果检验

为验证插值结果准确性, 对比各插值方法的优劣, 本文使用交叉验证^[29]来评估不同模型的最优插值结果。交叉验证首先是先删除某插值点的实测值, 通过其他点的实测值, 应用不同的插值方法对该点进行预测, 对所有点重复以上过程, 得到各点的实测值和预测值。交叉验证参数包含均方根误差(RMSE)和纳什效率系数(NS)。RMSE 用来评价预测值与观测值的接近程度, RMSE 越小说明预测值离实测值更加接近。纳什效率系数用来评判模型预测准确性是否良好, 其取值范围从负无穷至 1, 值越接近 1 说明模型模拟结果越准确, 值为 0 表示模型模拟结果等同于实测值的均值。表达式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [Z(x) - Z_i]^2}{n}} \quad (5)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [Z(x) - Z_i]^2}{\sum_{i=1}^n (Z_i - Z_i)^2} \quad (6)$$

式中: $Z(x)$ 、 Z_i 同上; Z_i 为实测降水量均值。本文通过 RMSE 和 NS 进行验证^[30]。

3 结果分析

本文用 4 种空间插值方法分别对不同降水量指标的插值结果进行验证, 不同降水量指标误差分析结果见表 2 至表 4。

表 2 多年平均降水量空间插值验证结果

Tab. 2 Spatial interpolation results of multi year average precipitation

方法	NS	RMSE
IDW2	0.208	88.515
IDW3	0.278	84.576
IDW4	0.295	83.552
OK	0.475	72.081
高程 CK	0.690	55.416
温度 CK	0.546	67.046

表3 最大3个月降水量空间插值验证结果

Tab.3 Spatial interpolation results of largest 3 month precipitation

方法	NS	RMSE
IDW2	0.139	41.718
IDW3	0.206	40.058
IDW4	0.222	39.654
OK	0.233	39.374
高程CK	0.570	29.469
温度CK	0.340	36.505

表4 最小3个月降水量空间插值验证结果

Tab.4 Spatial interpolation results of smallest 3 month precipitation

方法	NS	RMSE
IDW2	0.057	8.799
IDW3	0.144	8.385
IDW4	0.155	8.330
OK	0.396	7.039
高程CK	0.509	6.350
温度CK	0.446	6.744

(1) 由表2-表4可得,在多年平均降水量指标下,高程CK法的NS系数最大为0.690, RMSE 最小为55.416,为最优插值方法。在最大3个月降水量指标下,高程CK法NS系数最大为0.570, RMSE 最小为29.469。当降水量指标最小3个月时,高程CK法NS系数最大为0.509, RMSE 最小为6.350。综上所述,对于不同降水量指标,考虑高程的协同克里金法为最优插值方法。

(2) 图2、图3为不同降水量指标不同方法RMSE、NS系数变化趋势图,由图2-图3可知,于不同降水量指标,NS系数从大到小依次为:高程CK、温度CK、OK、IDW4、IDW3、IDW2。RMSE从小到大依次为:高程CK、温度CK、OK、IDW4、IDW3、IDW2。结果表明,插值精度为:高程CK > 温度CK > OK > IDW4 > IDW3 > IDW2。对于IDW法系数增大能提高插值精度。

(3) 分不同降水量指标,分析RMSE(图2)变化

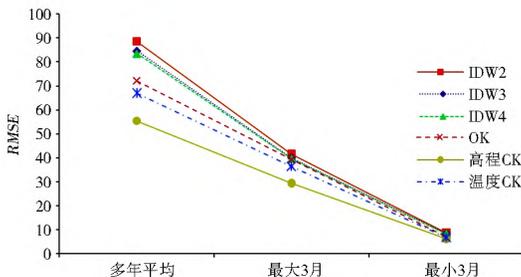


图2 不同降水量指标不同方法RMSE变化趋势

Fig.2 RMSE trend of different precipitation indexes by different methods

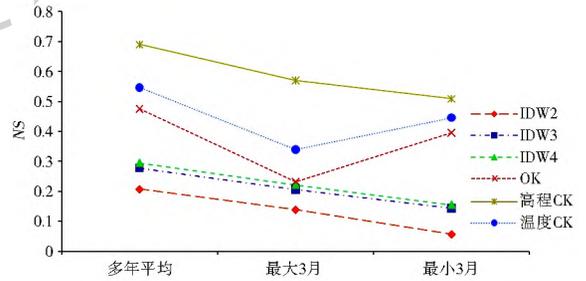


图3 不同降水量指标不同方法NS系数变化趋势

Fig.3 NS coefficient trend of different precipitation indexes by different methods

可知,不同方法的RMSE变化趋势相同均为多年平均降水量 > 最大3个月降水量 > 最小3个月降水量。RMSE计算与输入数据的大小有关,多年平均降水量输入数据最大,最小3个月降水量输入数据最小,在不同降水量指标下RMSE没有参考价值。

分析NS系数(图3)变化可知,高程CK、IDW2、IDW3、IDW4法NS系数变化均为多年平均降水量 > 最大3个月降水量 > 最小3个月降水量。OK、温度CK法NS系数变化为多年平均降水量 > 最小3个月降水量 > 最大3个月降水量,分析表明降水量最小的3个月,降水导致温度发生大幅度变化,降水变化与温度变化相关性较高。在降水量最大的3个月,气温较高,温度变化幅度较小,降水变化与温度变化相关性较弱。

综上所述,图4为最优方法:考虑高程的协同克里金法插值结果图。

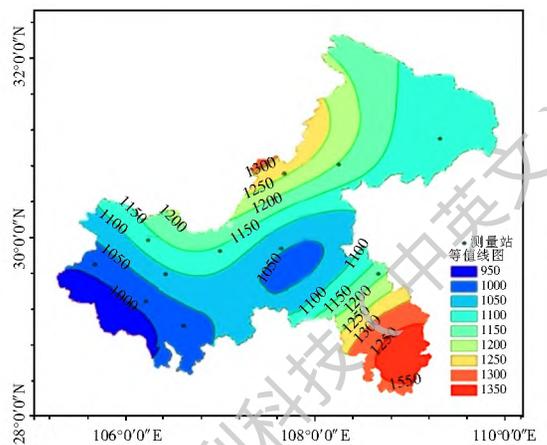


图4 重庆多年平均降水量等值线

Fig.4 Chongqing multi year average precipitation contours

4 结论与展望

本文分别以系数为2、3、4的IDW法、普通克里金法、考虑高程和温度的协同克里金法对重庆市分3种不同指标降水量(多年平均、最大3个月、最小3个月)进行插值分析,并对插值结果进行验证,最终得到最优的插值方法。主要结论如下。

(1) 在重庆市, 3种指标不同方法的插值结果精度相同, 从好到差依次为: 高程 CK、温度 CK、OK、IDW4、IDW3、IDW2。

(2) 本文分析了重庆市降水与气温、日照、湿度中气温的相关关系, 最终得出气温与降水相关性最佳。

(3) 对于不同降水量指标来说, 多年平均降水量的插值结果最准确。

(4) 温度 CK 法在降水量较小的情况下会提高插值精度, 在降水量较小或以月、日降水为输入数据的插值中可以考虑这种方法。

(5) 高程 CK 法插值结果表明, 重庆市降水量最大的区域分布于东南和西北两侧, 中间地区降水量较小, 西南地区降水量最小。

本文对于气象因子或其他地表特征因子的研究较少, 有必要加入多项辅助因子如坡度, 风向、气压等, 以确定更加准确的空间插值方法。由于重庆市地形变化较大, 考虑温度的协同克里金法虽然不是最优插值方法, 但相对 IDW 法及普通克里金法仍提高了插值精度。在平原地区或地形变化不大的地区, 考虑温度的协同克里金法对插值结果的影响有待研究。

参考文献(References):

[1] 周祖昊, 贾仰文, 王浩, 等. 大尺度流域基于站点的降雨时空展布[J]. 水文, 2006, 26 (1): 6-11. (ZHOU Z H, JIA Y W, WANG H, et al. Interpolating precipitation in space and time in large scale basin based on rain gauges[J]. Journal of China Hydrology, 2006, 26 (1): 6-11. (in Chinese)). DOI: 10. 3969/j. issn. 1000 0852. 2006. 01. 003.

[2] THIESEN A H. Precipitation averages for large areas[J]. Mon Weather Rev, 1911, 39: 1082-1089.

[3] LOUIS D E. Pollution models and inverse distance weighting: Some critical remarks[J]. Computers & Geosciences, 2013, 52: 459-469. DOI: 10. 1016/j. cageo. 2012. 11. 002.

[4] OLIVER M A, WEBSTER R. Kriging: A method of interpolation for geographical information systems[J]. International Journal of Geographical Information Systems, 1990, 4 (3): 313-332. DOI: 10. 1080/02693799008941549

[5] 何红艳, 郭志华, 肖文发. 降水空间插值技术的研究进展[J]. 生态学杂志, 2005, 24(10): 1187-1191. (HE H Y, GUO Z H, XIAO W F. Review on spatial interpolation techniques of rainfall[J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24 (10) 1187-1191. (in Chinese)). DOI: 10. 13292/j. 1000 4890. 2005. 0125.

[6] MAIR A, FARES A. Comparison of rainfall interpolation methods in a mountainous region of a tropical island[J]. J Hydrol Eng, 2011, 16: 371-383. DOI: 10. 1061/(ASCE)HE. 1943-5584. 0000330.

[7] LY S, CHARLES C, DEGRÉ A. Geostatistical interpolation of

daily rainfall at catchment scale: the use of several variogram models in the Ourthe and Ambleve catchments, Belgium[J]. Hydrol. Earth Syst. Sci, 2011, 15: 2259-2274. DOI: 10. 5194/hess-15-2259-2011.

[8] MENDEZ M, CALVO-VALVERDE L. Assessing the performance of several rainfall interpolation methods as evaluated by a conceptual hydrological model[J]. Procedia Engineering, 2016, 154: 1050-1057. DOI: 10. 1016/j. proeng. 2016. 07. 595.

[9] 郭卫国, 陈喜, 张润润. 基于降水分布不均匀性的空间插值方法适用性研究[J]. 水力发电, 2016, 42 (6): 14-18. (GUO W G, CHEN X, ZHANG R R. Study on the applicability of spatial interpolation methods based on the heterogeneity of rainfall distribution. [J]. Water Power, 2016, 42 (6): 14-18. (in Chinese)). DOI: 10. 3969/j. issn. 0559 9342. 2016. 06. 004.

[10] 范玉洁, 俞新晓, 张红霞, 等. 降雨资料 Kriging 与 IDW 插值对比分析以漓江流域为例[J]. 水文, 2014, 34 (6): 61-66. (FAN Y J, YU X X, ZHANG H X, et al. Comparison between kriging interpolation method and inverse distance weighting for precipitation data analysis: taking Lijiang river basin as a study case[J]. Journal of China Hydrology, 2014, 34 (6): 61-66. (in Chinese)). DOI: 10. 3969/j. issn. 1000 0852. 2014. 06. 011.

[11] XU W B, ZOU Y J, ZHANG G P, et al. A comparison among spatial interpolation techniques for daily rainfall data in Sichuan Province[J]. Int. J. Climatol, 2015, 35 (10): 2898-2907. DOI: 10. 1002/joc. 4180.

[12] 王智, 吴友均, 梁凤超, 等. 新疆地区年降水量的空间插值方法研究[J]. 中国农业气象, 2011, 32 (3): 331-337. (WANG Z, WU Y J, LIANG F C, et al. Study on spatial interpolation method of annual precipitation in Xinjiang[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2011, 32 (3): 331-337. (in Chinese)). DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-6362. 2011. 03. 003

[13] 庄立伟, 王石立. 东北地区逐日气象要素的空间插值方法应用研究[J]. 应用气象学报, 2003, 14 (5): 605-615. (ZHANG L W, WANG S L. Spatial interpolation methods of daily weather data in Northeast China. [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2003, 14(5): 605-615. (in Chinese)). DOI: 10. 3969/j. issn. 1001-7313. 2003. 05. 011.

[14] 王远见, 傅旭东, 高洁, 等. 雅鲁藏布江中下游地区湿季降水量的空间分布模型[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2012, 52 (6): 738-746. (WANG Y J, FU X D, GAO J, et al. Spatial precipitation distribution of over the middle and lower reaches of the Yalung Zangbo River [J]. J Tsinghua Univ (Sci & Tech), 2012, 52 (6): 738-746. (in Chinese)). DOI: 10. 16511/j. cnki. qhdxxb. 2012. 06. 002.

[15] 张正勇, 何新林, 刘琳, 等. 中国天山山区降水空间分布及成因模拟[J]. 水科学进展, 2015, 26 (4): 500-508. (ZHANG Z Y, HE X L, LIU L, et al. Spatial distribution of rainfall simulation and the cause analysis in China's Tianshan Mountains area[J]. Advances in water science, 2015, 26 (4): 500-508. (in Chinese)). DOI: 10. 14042/j. cnki. 32. 1309. 2015. 04. 006.

[16] CHAO L, ZHANG K, LI Z, et al. Geographically weighted regression based methods for merging satellite and gauge precipi

- pitiation[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 558: 275-289. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.01.042
- [17] 贺瑞敏, 张建云, 鲍振鑫, 等. 海河流域河川径流对气候变化的响应机理[J]. *水科学进展*, 2015, 26(1): 1-9. (HE R M, ZHANG J Y, BAO Z X, et al. Response of runoff to climate change in the Haihe River basin[J]. *Advances in Water Science*, 2015, 26(1): 1-9. (in Chinese)). DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2015.01.001.
- [18] 成彩霞, 牛赞, 陈刚, 等. 祁连山水源涵养林区降水与其他气象因子间的相关性分析[J]. *甘肃农业大学学报*, 2014, 49(4): 94-98. (CHENG C X, NIU Y, CHEN G, et al. The correlation analysis between precipitation and other meteorological factor in water resource conservation forest of Qilian Mountains[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2014, 49(4): 94-98. (in Chinese)). DOI: 10.13432/j.cnki.jgsau.2014.04.017.
- [19] 邓羽, 刘盛和, 姚峰峰, 等. 基于协同克里格的基准地价评估及空间结构分析[J]. *地理科学进展*, 2009, 42(3): 403-408. (DENG Y, LIU S H, YAO F F, et al. Standard land price appraisal and space structure analysis based on cokriging[J]. *Progress in Geography*, 2009, 42(3): 403-408. (in Chinese)). DOI: 10.11820/dlxxjz.2009.03.012.
- [20] 王宗敏, 张杰, 赵红领, 等. 城市暴雨内涝计算中降雨插值算法的选取[J]. *人民黄河*, 2012, 34(8): 24-26. (WANG Z M, ZHANG J, ZHAO H L, et al. Selection of the interpolations of rainfall for calculating the water logging disasters caused by the urban storms[J]. *Yellow River*, 2012, 34(8): 24-26. (in Chinese)). DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2012.08.008.
- [21] 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 X, CHENG G D, LU L. Comparison of spatial interpolation methods. *Advance in Earth Sciences*, 2000, 15(3): 260-265. (in Chinese)). DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2000.03.0260.
- [22] LLOYD C D. Assessing the effect of integrating elevation data into the estimation of monthly precipitation in Great Britain [J]. *J Hydrol*, 2005, 308, 128-150. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2004.10.026.
- [23] NIKOLOPOU LOSE I, BORGA M, CREUTIN J D, et al. Estimation of debris flow triggering rainfall: influence of rain gauge density and interpolation methods[J]. *Geomorphology*, 2015, 243: 40-50. DOI: 10.1016/j.geomorph.2015.04.028.
- [24] TOBLER W R. A Computer Movie Simulating Urban Growth in the Detroit Region[J]. *Economic Geography*, 1970, 46: 234-240.
- [25] ZIEGEL E R, DEUTSCH C V, JOURNEL A G. Geostatistical software library and user's guide[J]. *Technometrics*, 1998, 40(4): 357. DOI: 10.2307/1270548.
- [26] DU BRULE O. Cross validation of kriging in a unique neighborhood[J]. *Mathematical Geology*, 1983, 15(6): 687-699. DOI: 10.1007/BF01033232.
- [27] 王长虹, 朱合华, 钱七虎. 克里金算法与多重分形理论在岩土参数随机场分析中的应用[J]. *岩土力学*, 2014, 35(增刊2): 386-392. (WANG C H, ZHU H H, QIAN Q H. Application of kriging methods and multi fractal theory to estimate of geotechnical parameters spatial distribution[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(S2): 386-392. (in Chinese)). DOI: 10.16285/j.rsm.2014.s2.013.
- [28] 刘爱利, 王培法, 丁园圆. 地统计学概论[M]. 北京: 科学出版社, 2012. (LIU A L, WANG P F, DING Y Y. *Introduction to Geostatistics*[M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese)).
- [29] GOOVAERTS P. *Geostatistics for natural resources evaluation*[M]. New York: Oxford University Press, 1997.
- [30] P GOURBESVILLE, N D Vo. Assessment of climate change on flood dynamic with deterministic hydrological model. Application to the Vugiar thubon catchment vietnam[A]. *International Conference on Hydroinformatics Hic[C]*. New York City USA, 2014. DOI: 10.1051/1hb/20150066.