

# 不同雨量次降雨空间插值对比 ——以四川省南充市降雨为例

蒲 阳, 王汝兰, 罗明良, 徐亚莉, 林叶彬

(1.西华师范大学 国土资源学院,四川 南充 637009;  
2.西华师范大学地表过程与环境变化研究所,四川 南充 637009)

**摘 要:**为对比分析大雨、中雨、小雨条件下,不同空间插值方法模拟地州市尺度降雨的差异,基于四川省南充市9个县级辖区三次24h降雨量数据,采用反距离加权(Inverse Distance Weighting, IDW)、张力样条函数(Spline with Tension, ST)、局部多项式(Local Polynomial Interpolation, LPI)、ANUDEM四种插值方法,从插值平均误差(ME)、中误差(RMSE)角度进行了对比分析。结果显示,按ME排序,大雨、中雨时 $LPI < ST < IDW < ANUDEM$ ,小雨时IDW、ANUDEM、ST基本相似,LPI最大;三种降雨条件下四种插值方法ME均小于0.5mm。从RMSE看,大雨、中雨、小雨时ANUDEM插值RMSE为1.79mm、3.07mm和0.05mm,显著小于IDW、LPI和ST;三种插值方法之间差异微小,大雨、中雨、小雨时均接近13mm、8mm和0.5mm。在降雨量等级为大雨和中雨时,ANUDEM插值方法优于其他插值方法,而在降雨量等级为小雨时,四种插值方法差异较小。

**关键词:**降水;空间插值;南充市

中图分类号:P426.61

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2018)04-0073-05

## 1 引言

降水对人类社会的发展具有重大影响,在多个领域其空间化信息具有重要意义<sup>[1]</sup>,是研究区域水资源与水环境的基础资料<sup>[2]</sup>。降水量测量站点具有空间分布不均匀的特点,所以采用一定的测量站点收集到的降水量数据,对研究区域的整体降水空间分布有着重要的研究价值<sup>[3,4]</sup>。

空间插值原理是通过现有的已知样本信息,对未知的地理空间信息及其特征进行预估<sup>[5]</sup>。通过ArcGIS平台,对雨量站获取的降雨量数据进行插值,得出研究区域整体的降水空间分布特征成为生态学、环境科学等学科研究的重要领域之一,并得到广泛应用<sup>[6,7]</sup>。Bussières<sup>[8]</sup>等在降水量的日累计插值研究中得出克里金法优于反距离权重法和简单的泰森多边形法;Dirk<sup>[9]</sup>等

比较不同插值方法在不同的时间分辨率环境下的插值结果,得到插值效果最好的为克里金法;从研究的空间尺度上看,刘登伟<sup>[10]</sup>等对海河流域的降水进行了空间插值方法的比较;王常森<sup>[11]</sup>等选取淮北平原降水量作为研究对象,对其降水量的空间插值模型优劣进行比较。从研究的时间尺度上看,庄立伟<sup>[12]</sup>等利用三种插值方法对有限的气象站多月逐日的气象要素进行空间插值方法的研究,得出对于降水而言,反距离加权法精度高于克里金法,更适用于日降水量的插值;王兆礼<sup>[13]</sup>等采用多年逐月的雨量站数据进行克里金法插值,对降雨序列进行分析;从研究内容上看,邬伦<sup>[6]</sup>等用五种不同的插值方法对深圳市某日强降水进行误差结果的对比分析;李艳<sup>[5]</sup>等对四川省月平均降水量和每月降水量通过五种插值方法进行插值试验。

收稿日期:2017-10-28

基金项目:国家自然科学基金项目(41771023);西华师范大学基本科研业务费专项资金资助项目(15C002);绵阳师范学院四川省生态安全与保护重点实验室项目(ESP1606);四川省教育厅自然科学重点项目(16ZA0168)

作者简介:蒲阳(1993-),男,四川绵阳人,硕士研究生,主要研究方向为水土保持与荒漠化防治。E-mail:270792948@qq.com

通讯作者:罗明良(1978-),男,河南信阳人,教授,主要研究方向为GIS空间分析。E-mail:lolean586@163.com

前人研究表明,由于时间和空间尺度不同,优选插值方法也存在差异。基于此,研究选取四川省南充市为研究样区,其雨量数据为数据源,利用 ArcGIS 平台使用反距离加权法、张力样条函数插值法、局部多项式插值法、ANUDEM 内插法,分别对三期大、中、小雨雨级的雨量站采样数据进行插值,比较最优插值方法。

## 2 研究区数据获取

研究区为四川省南充市 9 个县级辖区,其位于嘉陵江中游,下辖顺庆区、嘉陵区、高坪区、营山县、西充县、南部县、蓬安县、仪陇县,代管阆中市;属于中亚热带湿润季风气候区域,降雨量分配不均,夏季降雨集中,7~9 月的降雨量之和可达全年降雨量 50% 左右<sup>[14]</sup>。依据南充市气象局发布的多时段不同站点的日降雨量数据作为数据源;根据中国气象局发布的降雨量等级标准,分别选取大雨、中雨、小雨三种不同的降雨类型进行对比分析。

## 3 研究方法

### 3.1 空间插值方法

本文采用 IDW、地形转栅格、LPI、ST 四种不同的插值方法构建 DEM。

#### (1) 反距离加权插值法

反距离加权插值法 (Inverse Distance Weighting, IDW) 是基于相似相近原理,即为两个物体越相近,两者的性质就越相似,反之,两者离得越远的相似性就越小。此方法以插值点和样本点之间的距离作为权重进行加权平均,离插值点越近的样本点,赋予权重就越大。其原理与公式参见文献<sup>[15]</sup>。

#### (2) 张力样条函数插值法

张力样条函数 (Spline with Tension, ST) 是径向基函数插值法中的一种,是为了消除三次样条插值函数有时出现的多余拐点<sup>[16]</sup>。插值时,整个插值区间借助张力使其保持平滑,张力系数对插值结果具有直接影响<sup>[17]</sup>。借助直线插值与双曲函数的组合来分段插值,得到张力样条函数公式<sup>[16]</sup>。

#### (3) 局部多项式插值法

局部多项式插值法 (Local Polynomial Interpolation, LPI) 是依据采样点数据,采用多个多项式进行拟合,得到平滑的表面<sup>[15]</sup>,LPI 对已知的每个采样点建立一个多项式,通过最小二乘法求解领域内多个多项式组成的

方程来得出拟合曲面<sup>[18]</sup>。

#### (4) ANUDEM 内插法

ANUDEM 由 Michael Hutchinson<sup>[19,20]</sup> 开发,其内插法采用的是迭代有限微分内插技术,其实质是 Wahba<sup>[21]</sup> 提出的离散化薄板样条插值法,通过对其合理修改来达到更真实的插值效果<sup>[22]</sup>。引入粗糙度罚函数使预测值与测量值接近,使拟合的表面平滑,此函数用拟合表面曲率定义,在 ANUDEM 中引入三种曲率,包括坡面曲率  $J_1(f)$ 、总曲率  $J_2(f)$  以及表面重力势曲率<sup>[23]</sup>。在 ANUDEM 早期版本<sup>[19,24]</sup> 和最初的算法中, Hutchinson 提出经验公式  $J(f) = 0.5h^{-2} J_1(f) + J_2(f)$ ,将  $J_1(f)$  与  $J_2(f)$  组合定义糙度系数  $J(f)$ 。前人试验表明, $J(f)$  可以得到更好的插值效果,具体见文献<sup>[23]</sup>。

### 3.2 插值精度评价

本文采用交叉检验两种方法对插值结果进行评价<sup>[15]</sup>。评价插值精度通常使用均值误差 (Mean Error, ME) 与中误差 (Root Mean Square Error, RMSE) 作为标准<sup>[25]</sup>。其中,ME 为实测值与预测值的定量偏差, RMSE 则反映采样点数据的预测值灵敏度以及极值效应,当 ME 的绝对值趋于零、RMSE 的预测值越小时,预测的结果准确性越高。ME、RMSE 计算原理如下<sup>[26]</sup>:

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z(x_i) - \hat{z}(x_i)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [z(x_i) - \hat{z}(x_i)]^2}{n}}$$

式中:  $z(x_i)$  为  $x_i$  点的观测值;  $\hat{z}(x_i)$  为  $x_i$  的预测值。

## 4 结果与分析

### 4.1 降雨量数据趋势分析

利用 ArcGIS 平台的探索性空间数据分析 (ESDA) 工具,对于获取的降水雨量采样点数据进行数据的检查,分析数据特点。包括趋势效应、是否为正态分布、变程等多项特征。主要是通过直方图,散点图,QQplot 图等对雨量数据进行分析。

三期降水采样点数据的雨级分别为大雨、中雨、小雨,其雨量统计特征值见表 1。同时,三期降水雨量不服从正态分布,其中大雨、中雨以及小雨三期降雨均处于正偏态,高峰度的状态,最大值和最小值分别为 103mm、85.6mm、3.1mm 与 0.1mm、0.3mm、0.1mm,降雨量均值分别为 28.33mm、15.66mm 和 0.69mm。

表1 三期降水量统计特征值

Table1 The statistical characteristics of the precipitation in the three stages

雨级	总站数 /个	站点密度 /站·km <sup>-2</sup>	最大值 /mm	最小值 /mm	均值 /mm	标准差	峰度	偏度
大雨	212	0.017	103	0.1	28.33	21.06	3.40	0.83
中雨	221	0.018	85.6	0.3	15.66	15.01	8.11	1.99
小雨	158	0.013	3.1	0.1	0.69	0.61	4.92	1.42

4.2 降雨量插值结果及插值方法比较

采用 IDW、LPI、ST、ANUDEM 四种插值方法,设置参数均为默认,得到的不同插值方法的插值误差特征值(见表 2)。分析三期降雨插值的模拟情况,在大雨和中雨两种情况下,ANUDEM 插值法的 *RMSE* 显著小于其他插值方法,其 *RMSE* 分别为 1.79mm 和 3.07mm; 其中在降雨为大雨和中雨时 LPI 的 *ME* 最小,总体来看四种插值方法的 *ME* 误差差值微小; 降雨为小雨时,四种插值方法的 *ME* 和 *RMSE* 值都较接近,但 ANUDEM 的 *RMSE* 最小为 0.05mm。

表2 不同插值方法的插值误差特征值

Table2 The interpolation error eigenvalues of the different interpolation methods

降雨量等级	误差项	IDW/mm	ANUDEM/mm	LPI/mm	ST/mm
大雨	ME	0.22	0.36	-0.03	0.12
	RMSE	12.74	1.79	12.56	12.59
中雨	ME	0.39	0.45	0.1248	0.15
	RMSE	8.35	3.07	8.407	8.28
小雨	ME	-0.02	0.02	0.23	-0.02
	RMSE	0.48	0.05	0.45	0.47

四种插值方法对降水量的插值结果如图 1~3 所示,可以看出四种插值方法在整体的降水量空间预测上具有大致的相似性结果,表明了四种插值方法均具有一定的研究意义。

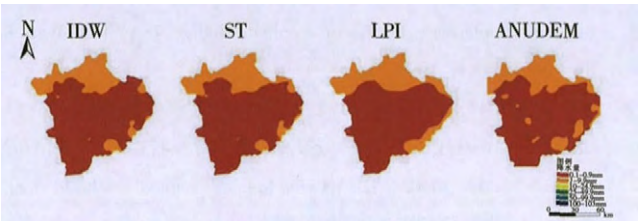


图1 小雨时降水插值结果

Fig.1 The interpolation results of the light rain

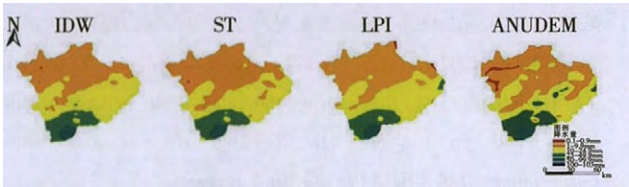


图2 中雨时降水插值结果

Fig.2 The interpolation results of the moderate rain

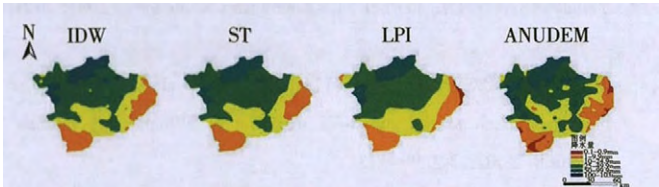


图3 大雨时降水插值结果

Fig.3 The interpolation results of the heavy rain

5 结束语

研究基于南充市气象局发布的南充市 9 个县级辖区三次 24h 降雨量数据和 IDW、LPI、ST、ANUDEM 四同插值方法进行插值,得出以下结论:

两种插值精度检查误差特征值表明,从 *ME* 来看,大雨和中雨  $LPI < ST < IDW < ANUDEM$ ,小雨时 LPI 最大,且三期降水四种插值方法的 *ME* 均小雨 0.5mm;从 *RMSE* 来看 ANUDEM 的插值在三期降水均远小于其他三种插值方法,其值为 1.79mm、3.07mm 和 0.05mm,而其他三种插值方法的 *RMSE* 在同期降水中相近,差异微小。当降雨级别为大雨和中雨时,ANUDEM 插值法的效果较好,而当降雨量级别为小雨时,IDW、LPI、ST、ANUDEM 四种插值方法的误差值均较小,其中 ANUDEM 插值误差略小于其他三种插值方法。

在数据获取,数据处理的过程中,不可避免的会出现多种误差,在一定程度上影响插值精度。同时,由于数据有限,对于其他的降雨级别如暴雨、大暴雨等降雨量的插值研究有待进一步探讨,不同地区的降雨插值可能会呈现不同的结果以及其他的插值方法对降雨插值的对比分析等问题有待考究。

参考文献:

[1] 范玉洁,余新晓,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 Yujie, YU Xinxiao, ZHANG Hongxia, et al. Comparison between Kirging interpolation method and inverse distance weighting tension for precipitation data analysis: taking Lijiang River basin as a study case [J]. Journal of China Hydrology, 2014,34 (6):61 -66. (in Chinese))

- [2] 陈贺,李原园,杨志峰,等. 地形因素对降水分布影响的研究[J]. 水土保持研究, 2007,14 (1):119-122. (CHEN He, LI Yuanyuan, YANG zhifeng, et al. Research on the relationship between terrain factors and precipitation [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007,14(1):119-122. (in Chinese))
- [3] ZHOU S, XUE G, PENG G, et al. The SIA method for spatial analysis of precipitation in the upper-middle reaches of the Yangtze River [J]. Journal of Geographical Sciences, 2005,15(2): 223-238.
- [4] DALY C, GIBSON W P, TAYLOR G H, et al. A knowledge-based approach to the statistical mapping of climate [J]. Climate Research, 2002,22(2):99-113.
- [5] 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,(1):151-154. (LI Yan, ZHU Jun, HU Ya, et al. Comparison analysis on different spatial interpolation methods to simulate monthly precipitation in Sichuan province [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017,24(1):151-154. (in Chinese))
- [6] 邬伦,吴小娟,肖晨超,等. 五种常用降水量插值方法误差时空分布特征研究—以深圳市为例[J]. 地理与地理信息科学, 2010,11(3):19-24. (WU Lun, WU Xiaojuan, XIAO Chenchao, et al. Research on the algorithms of the flow direction determination in ditches extraction based on grid DEM [J]. Journal of Image and Graphics, 2010,11(3):19-24. (in Chinese))
- [7] 蔡福,于贵瑞,祝青林,等. 气象要素空间化方法精度的比较研究—以平均气温为例[J]. 资源科学, 2005,27(5):173-179. (CAI Fu, YU Guirui, ZHU Qinglin, et al. Comparison of precision between spatial methods of climatic factors: a case study on mean air temperature [J]. Resources Science, 2005,27 (5):173-179. (in Chinese))
- [8] BUSSIERES N, HOGG W. The objective analysis of daily rainfall by distance weighting schemes on a Mesoscale grid [J]. Atmosphere-Ocean, 1989,27(3):521-541.
- [9] BRADLEY S G, DIRKS K N, STOW C D. High resolution studies of rainfall on Norfolk island, Part III: a model for rainfall redistribution [J]. Journal of Hydrology, 1998,208(3-4): 194-203.
- [10] 刘登伟,封志明,杨艳昭. 海河流域降水空间插值方法的选取[J]. 地球信息科学, 2006,8(4):75-79. (LIU Dengwei, FENG Zhiming, YANG Yanzhao. Selection of the spatial interpolation methods for precipitation in the Haihe River basin [J]. Geo-Information Science, 2006,8(4):75-79. (in Chinese))
- [11] 王常森,陶月赞,方必和. 淮北平原年降水量空间插值模型的比选[J]. 水文, 2012,32(2):49-53. (WANG Changsen, TAO Yuezan, FANG Bihe. Comparison of spatial interpolation models for annual precipitation in Huaibei plain [J]. Journal of China Hydrology, 2012,32(2):49-53. (in Chinese))
- [12] 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. (ZHUANG Liwei, WANG Shili. Spatial interpolation methods of daily weather data in northeast China [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2003,14(5):605-615. (in Chinese))
- [13] 王兆礼,陈晓宏,张灵,等. 近40年来珠江流域降水量的时空演变特征[J]. 水文, 2006,26(6):71-75. (WANG Zhaoli, CHEN Xiaohong, ZHANG Ling, et al. Spatio-temporal change characteristics of precipitation in Pearl River basin in recent 40 years [J]. Journal of China Hydrology, 2006,26(6):71-75. (in Chinese))
- [14] 何珍. 南充市水土流失变化研究 [D]. 南充: 西华师范大学, 2016. (HE Zhen. Dynamic Study on Soil Erosion in Nanchong [D]. Nanchong: China West Normal University, 2016. (in Chinese))
- [15] 汤国安,杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程[M]. 北京: 科学出版社, 2006. (TANG Guoan, YANG Xin. An Experimental Course on Spatial Analysis of Geographic Information Systems [M]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese))
- [16] 迟文学,吴信才,于海洋,等. 张力样条函数在雨量等值线光滑中的应用研究[J]. 水文, 2007,27(1):22-25. (CHI Wenxue, WU Xincan, YU Haiyang, et al. Application of the tension spline function in rainfall isoline smoothing [J]. Journal of China Hydrology, 2007,27 (1): 22-25. (in Chinese))
- [17] 王树良,史文中,李德毅,等. 基于张力样条插值函数的土地数据挖掘[J]. 计算机工程与应用, 2003,39(25):5-7. (WANG Shuliang, SHI Wenzhong, LI Deyi, et al. Land data mining based on tension spline interpolation function [J]. Computer Engineering and Applications, 2003,39(25):5-7. (in Chinese))
- [18] 宋向阳,吴发启. 几种插值方法在微 DEM 构建中的应用[J]. 水土保持研究, 2010,17(5):45-50. (SONG Xiangyang, WU Faqi. Application of the spatial interpolation methods to the study on micro-DEM [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2010,17(5):45-50. (in Chinese))
- [19] HUTCHINSON M F. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits [J]. Journal of Hydrology, 1989,106(3):211-232.
- [20] HUTCHINSON M F. Calculation of hydrological sound digital elevation models [A]. Proceedings of the International Symposium on Spatial Data Handling [C], 1988.
- [21] WAHBA G. Spline models for observational data [A]. CBMS-NSF Regional Conference Series in Applied Mathematics [C]. Watson Research Center, 1990.
- [22] 张彩霞,杨勤科,段建军. 一种高质量的数字高程模型(DEM)建立方法—ANUDEM 法[J]. 中国农学通报, 2005,21(12):411-415. (ZHANG Caixia, YANG Qingke, DUAN Jianjun. A method to build high quality DEMs—ANUDEM method [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2005,21(12):411-415. (in Chinese))



- [23] 杨勤科, R.MCVICAR T, 李领涛, 等. ANUDEM—专业化数字高程模型插值算法及其特点[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(3): 36–41. (YANG Qingke, R.MCVICAR T, LI Lingtao, et al. The evolvement characteristics and wavelet analysis of spring precipitation of last 40 years in east Qinghai [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2006, 24(3): 36–41. (in Chinese))
- [24] 周买春, 黎子浩, A.W.JAYAWARDENA. 数值地形图的生成及其水文地貌特征评价[J]. 水利学报, 2002, (2): 71–74. (ZHOU Maichun, LI Zihao, A.W.JAYAWARDENA. The generation of digital elevation model and the assessment of its hydrogeomorphological information [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, (2): 71–74. (in Chinese))
- [25] 徐亚莉, 罗明良, 梁倍瑜, 等. DEM 空间插值方法对土壤侵蚀模拟的影响研究——以 USPED 分析干热河谷典型冲沟为例 [J]. 地理科学进展, 2016, 35(7): 870–877. (XU Yali, LUO Mingliang, LIANG Beiyu, et al. Effects of different DEM spatial interpolation methods on soil erosion simulation: a case study of a typical gully of dry-hot valley based on USPED [J]. Progress in Geography, 2016, 35(7): 870–877. (in Chinese))
- [26] 易湘生, 李国胜, 尹衍雨, 等. 土壤厚度的空间插值方法比较——以青海三江源地区为例[J]. 地理研究, 2012, 31(10): 1793–1805. (YI Xiangsheng, LI Guosheng, YIN Yanyu, et al. Comparison on soil depth prediction among different spatial interpolation methods: a case study in the Three-River headwater region of Qinghai province [J]. Geographical Research, 2012, 31(10): 1793–1805. (in Chinese))

## Comparison of Spatical Interpolation between Different Rainfall Levels: A Case Study of Rainfall in Nanchong City, Sichuan Province

PU Yang, WANG Rulan, LUO Mingliang, XU Yali, LIN Yebin

(1. Land and Resources School, China West Normal University, Nanchong 637009, China;

2. Institute of Surface Process and Environmental Change, China West Normal University, Nanchong 637009, China)

**Abstract:** For discussing the distinctions of rainfall of different cities under the conditions of heavy, moderate and light rains, the spatial interpolation of different cities were simulated based on the rainfall data of three counties in Nanchong City, Sichuan Province. Four interpolation methods including Inverse Distance Weighting (IDW), Spline with Tension (ST), Local Polynomial Interpolation (LPI) and ANUDEM were used to analyze the mean error (*ME*) and medium error (*RMSE*). Sorted by *ME*: it can be seen from the results that  $LPI < ST < IDW < ANUDEM$  when the rain is heavy or moderate; IDW, ANUDEM, ST are similar and LPI is the highest when the rain is light; *ME* is less than 0.5mm under these three kinds of rainfall conditions. Sorted by *RMSE*: the *RMSE* of the ANUDEM are 1.79mm, 3.07mm and 0.05mm, which is significantly less than that of IDW, LPI and ST; There are few distinctions between these three interpolation methods, that is respectively close to 13mm, 8mm and 0.5mm; the ANUDEM interpolation method is superior to other interpolation methods when the rainfall level is heavy rain and moderate rain, and the differences of the four interpolation methods are small when the rainfall level is light.

**Key words:** precipitation; spatial interpolation; Nanchong City

(上接第 11 页)

Fourth Assessment Report based on the performance in simulating precipitation and temperature in Biliuhe Reservoir basin. Future changes of precipitation and temperature are evaluated under A2, A1B and B1 scenarios, while future change of runoff is evaluated by using ABCD model, the results of which can help provide the basis for water resources planning and management. The result shows that CNCM3, HADCM3 and IPCM4 stand out in simulating precipitation and temperature in Biliuhe Reservoir basin. Compared with baseline period, the relative change of future annual average rainfall will be  $-6.4\% \sim 3.7\%$ ; future annual average temperature will increase  $0.8^{\circ}\text{C} \sim 1.2^{\circ}\text{C}$ ; the relative change of future potential evaporation will increase  $2.4\% \sim 4.3\%$ ; range of future annual average runoff will be  $4.8 \sim 6.2 (10^8 \text{m}^3)$ , decreasing by  $-4.7\% \sim -27.1\%$ . Greater challenges will be faced in future utilization of water resources.

**Key words:** GCM; LARS-WG; Biliuhe Reservoir basin; ABCD model; runoff prediction