

文章编号: 1008-2786-(2017)6-761-08

DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000276

太行山区降水空间扩展方法与垂直地带性分析

韩 建^{1,2}, 占车生^{1*}, 王飞宇^{1,2}, 胡 实¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 山区降水影响机制复杂, 空间变异性强, 由于观测资料稀缺, 降雨数据从站点到空间的扩展一直是水文学界的难点。本文基于太行山区 34 个国家气象站和 130 个雨量站的降水实测数据, 评估了距离平方反比法 (IDS)、改进的降水海拔关系模型 (MPAR) 和两种综合方法 (MPAR-IDS 和 IDS-MPAR) 应用于太行山区降雨空间扩展的效果, 探讨了山区降雨空间扩展的影响机制及方法优劣性。结果表明, 4 种空间扩展方法中 IDS-MPAR 精度最高, 其年降水平均相对误差 (MRE) 仅 8.7%, 比 IDS 方法小 14.0%, MPAR-IDS 的误差比 IDS 低 10.4%, MPAR 与 IDS 的精度接近。基于 IDS-MPAR 插值结果的分析表明: 太行山区降水分布规律主要受地形影响, 降水等值线与山体走向基本一致; 在小五台山、南太行迎风坡山腰存在一个最大降水高度, 在恒山、五台山则存在两个最大降水高度, 分别在迎风坡山腰和山顶附近; 大同盆地等几个背风坡盆地降水很少, 而喇叭口形的长治盆地降水较多。

关键词: 降水; 地形; 垂直地带性; 空间展布; 太行山

中图分类号: P333.6

文献标志码: A

在大中尺度山区, 降雨空间分布受地形影响, 其动力、热力和微物理机制非常复杂, 影响程度甚至可以与大气环流的影响程度相比拟^[1-4]。降水与高程、坡度、坡向和遮蔽度等多种地形因子^[5, 6]的关系中, 降水与高程的关系最为关键^[7]。在降水受地形影响较大的山区, 降水海拔关系研究与降水空间展布研究相辅相成, 对降水海拔关系的进一步认识和应用, 有利于提高空间展布精度, 反过来若空间展布精度提高, 也可对降水海拔关系提供更准确的表征。

目前, 降水海拔关系的研究仍以简单统计回归方法为主。除了线性模型外, 还有抛物线模型^[8]、线性正切模型、双曲线模型^[9]和 S 曲线模型^[10]等, 该类方法假定整个山区的降水服从相同的垂直地带性规律。实际上山地降水的空间变异较大, 不同地

理位置降水随海拔的变化规律不尽相同, 因而这一假定的有效性有待商榷。考虑到整个山区降水海拔关系的复杂性, 一些研究^[7, 11-13]把山地划分成多个子区, 分别进行回归; 另外一些研究^[14-16]考虑经纬度、高程、坡度和坡向等地理地形因子, 用多元回归模型来估算降水; 此外, 地理加权回归模型 (Geographical Weighted Regression, GWR) 将简单回归方法的参数改进为与空间位置有关的变量, 能在一定程度上反映降水海拔关系的空间变异性^[17], 该方法在英国^[18]和我国东北地区^[19]、赣江流域^[20, 21]、天山山区^[22]的降水空间扩展中取得了较好的应用效果。

不同山区最大降水高度的研究结论也存在较大不确定性^[10, 11, 23]。一部分认为两者具有线性相关

收稿日期 (Received date): 2016-08-13; 改回日期 (Accepted date): 2017-10-24

基金项目 (Foundation item): 国家重点基础研究发展计划 (2015CB452701), 国家自然科学基金项目 (41571019, 41271003) [National Key Basic Research and Development Program of China (2015CB452701), National Natural Science Foundation of China (41571019, 41271003).]

作者简介 (Biography): 韩建 (1993-), 男, 陕西渭南人, 硕士, 主要从事流域水循环模拟研究 [Han Jian (1993-), male, born in Weinan, Shaanxi Province, major in hydrology and water resources.] E-mail: hanj.15s@igsnrr.ac.cn.

* 通讯作者 (Corresponding author): 占车生 (1975-), 男, 湖北黄冈人, 研究员, 主要从事气候变化对水文水资源的影响研究 [Zhan Chesheng, (1975-), male, born in Huanggang, Hubei Province, associate research fellow, mainly engaged in research of impacts of climate change on hydrology and water resources.] E-mail: zhancs@igsnrr.ac.cn.

关系^[24-26],即最大降水高度出现在山顶或山麓,但是有研究^[27]通过分析全球9个典型山区的降雨海拔关系,发现仅4个山区的高程对多年平均年降雨量的解释率(R^2)大于12%。另一部分研究认为,存在一个最大降水高度,在此高度以下降雨量随高程递增,在此高度以上则呈相反趋势,如秦岭南坡^[1]和天山山区^[28,29]。还有研究认为,可能存在两个甚至两个以上的最大降水高度,如太行山东坡^[30,31]。

制约山区降水空间展布方法和垂直地带性研究的一个重要因素是山区观测资料的不足^[28]。国家气象站数据一直是国内学者研究区域降水的重要资料^[32-34],然而气象站点多分布在平原区和低山区,在高山极其稀疏,不能准确反映高山区域的降水分布^[11,28,29]。TRMM卫星提供了从1998年以来逐日降水产品,但其精度和分辨率都较低^[35],仅能在年月尺度反映一定的区域降水分布格局^[11,36]。此外,垂直带观测是研究山地降水海拔关系的直接有效手段,王宁练等^[23]利用黑河流域上游在高海拔地区增设的雨量站进行研究,有效分析了降雨垂直分异规律,然而,垂直带观测需要投入较长周期和大量资金,不易于大范围普及推广。

本文借鉴当前各种降水海拔关系模型,并结合常用的空间插值方法,基于太行山区气象站和自动雨量站长序列降水实测数据,评估不同方法应用于太行山区降雨空间展布的适应性,探讨山区降雨空间展布的影响机制及方法优劣性,在此基础上分析太行山区的降水垂直地带性。

1 数据和方法

1.1 研究区

太行山区(图1a)是我国东部地区重要的山脉和地理分界线,东临华北平原,西靠吕梁山脉和黄土高原。大同盆地、忻定盆地和长治盆地等盆地和大小五台山、恒山和太岳山等山峰(脉)分布在太行山区及其周边。太行山北段呈东北-西南走向,南段分为两支,分别为南北和偏南走向。太行山区面积约14万 km^2 ,多年平均降雨量约510 mm。

1.2 数据

降雨数据来自中国气象局气象数据中心和地方水文气象部门,包括研究区域内及周边的34个气象站和130个雨量站共计164个站点的降雨资料(图1b)。SRTM DEM数据来自美国国家航空航天局(NASA),空间分辨率为90 m,重采样至分辨率为 0.01° (约1 km)的网格。本文采用1995—2005年的多年平均月降雨量进行分析,以减少年际差异引起的不确定性。

1.3 研究方法

1.3.1 空间扩展

本文使用了下述4种空间扩展方法将站点降水扩展到分辨率为 0.01° (约1 km)的网格:

(1)距离平方反比法(Inverse Distance Squared, IDS)。IDS是最为常用的降水空间插值模型之一,其理论基础是降水具有一定的空间自相关性。IDS

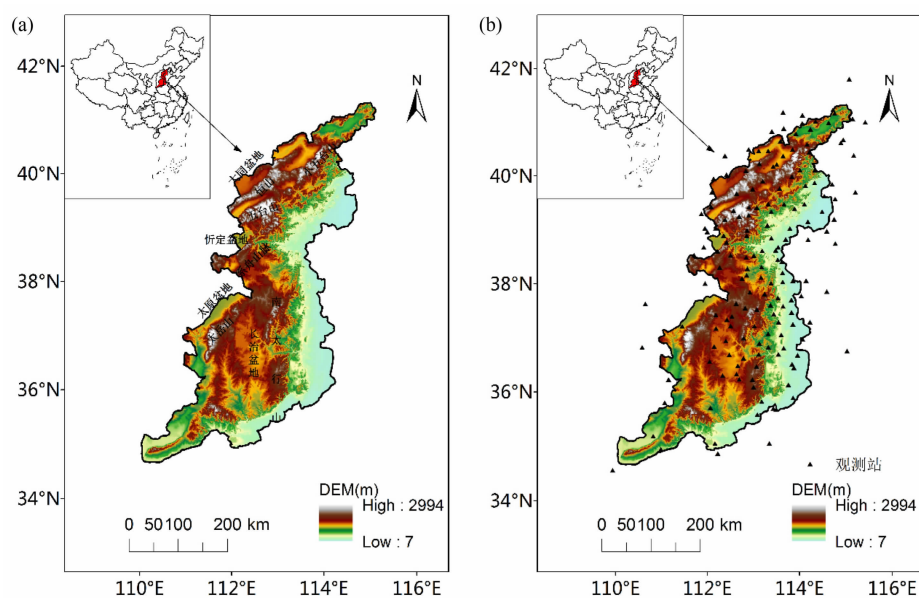


图1 研究区地形(a)和站点分布(b)

Fig. 1 Topography (a) and station distribution (b) in Taihang Mountains

使用周围站点降水的加权平均估算未知点的降水,而权重为各站点到未知点的距离平方的反比^[5]:

$$\hat{P}_{IDS}(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{P_i}{d_i^2}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{d_i^2}} \quad (1)$$

其中 $\hat{P}(x, y)$ 为待插值点年或月降水量的估算值, P_i 表示用于插值的第 i 个站点的观测值, 单位为 mm, x 和 y 分别为经纬度, d_i 为已知点到待插值点的水平距离, N 为用于插值的站点的数目。为控制空间扩展方法作为单变量, 本文使用全局窗口法, 即设定 $N=164$ 。

(2) 改进的降水垂直分布模型 (Modified Precipitation-Altitude Relationship, MPAR)。参考地理加权回归模型^[17, 18]改进传统回归模型的固定参数为随地理位置变化的参数的思想, 假设变参数与地理坐标具有线性关系, 降水海拔关系为变参数的抛物线形式, 在太行山使用回归方程:

$$\hat{P}_{MPAR}(x, y) = f_2(x, y)H^2 + f_1(x, y)H + f_0(x, y) \quad (2)$$

其中 H 为海拔高度, 单位 m; $f_k(x, y)$ 是降水海拔方程的变参数, 在本文中取 $f_k(x, y) = a_kx + b_ky + c_k$, a_k, b_k, c_k 都是待率定的参数。一定程度上 $f_0(x, y)$ 可以代表仅受大气环流控制的降水, 剩余两项可代表降水地形效应产生的部分。

(3) MPAR-IDS 方法。即用 IDS 方法对 MPAR 方法构建的趋势面的残差进行空间插值, 并与趋势面相加得到最终结果:

$$\hat{P}_{MPAR-IDS}(x, y) = \hat{P}_{MPAR}(x, y) + \frac{\sum_{i=1}^N \frac{P_i - P_{i,MPAR}}{d_i^2}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{d_i^2}} \quad (3)$$

(4) IDS-MPAR 方法。在降水的回归方程中同时将地理地形因子与 IDS 估算值作为解释变量, 也可理解为用 MPAR 方法对 IDS 插值的交叉验证残差进行回归。它是 MPAR-IDS 的对偶性方法, 两者以不同的先后顺序综合考虑了降水的空间自相关性和降水与地理地形因子的协相关性:

$$\hat{P}_{IDS-MPAR}(x, y) = f_2(x, y)H^2 + f_1(x, y)H + f_0(x, y) + \hat{P}_{IDS}(x, y) \quad (4)$$

1.3.2 精度检验

留一交叉验证 (leave one out cross validation, LOOCV) 是评估空间扩展模型精度的常用方法, 即去掉一个站点, 比较该站点的估算值与观测值, 并遍

历每个站点。本文采用以下四个指标来评估交叉验证或者回归方程的精度:

相关系数:

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})(Q_i - \bar{Q})}{[\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2]^{0.5} [\sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q})^2]^{0.5}} \quad (5)$$

平均相对误差:

$$MRE = N^{-1} \sum_{i=1}^N \frac{|P_i - Q_i|}{P_i} \quad (6)$$

平均绝对误差:

$$MAE = N^{-1} \sum_{i=1}^N |P_i - Q_i| \quad (7)$$

均方根误差:

$$RMSE = \sqrt{N^{-1} \sum_{i=1}^N (P_i - Q_i)^2} \quad (7)$$

其中 N 是站点数目, Q 是空间扩展方法估计的站点降雨量。

2 结果分析

2.1 空间展布的精度

如表 1 和图 2, 总体上四种空间展布方法的精度排序为 IDS-MPAR > MPAR-IDS > MPAR \approx IDS。IDS-MPAR 方法优于其他三种方法, 年降水的 MRE 和 MAE 分别比 IDS 减少了 14.0% 和 12.1%。其中的原因是, 以年降水为例, 地理位置和高程对 IDS 插值交叉验证残差的解释率达到了 19.6% (即 $CC = 0.44$), 当这部分残差被修正以后, 整体的回归效果就有了明显提升。除非汛期外, 各时段内 IDS-MPAR 方法的 MRE 在 8.7% 到 15.4% 之间, 能够满足山区水文模型输入或水资源评价等对降水资料精度的要求。MPAR-IDS 方法优于 IDS, 年降水的 MRE 和 MAE 分别比 IDS 减少了 10.4% 和 9.1%, 这反映了 MPAR 方法的残差仍具有一定的空间自相关性。IDS 和 MPAR 的精度差别不大, 在 6 月和 9 月 MPAR 误差略小于 IDS, 而在 7 月和 8 月 MPAR 误差略大于 IDS, 意味着在太行山区, IDS 提供的空间相关信息量与 MPAR 经验关系所提供的协相关信息量接近。计算各时段内四种方法的平均展布精度, 以 CC 为指标排序为全年 > 汛期 > 9 月 > 7 月 > 8 月 > 6 月 > 非汛期, 以 MRE 为指标排序为全年 > 汛期 > 6 月 > 9 月 > 7 月 > 8 月 > 非汛期。可以看出汛期插值精度远高于非汛期, 在汛期地形对降水的影响更大, 地理地形因子对降水的解释度更高。

表 1 四种空间展布方法 (IDS,MPAR,MPAR-IDS,IDS-MPAR) 应用于各时段多年平均降水量的精度
Tab.1 Accuracy of the four spatial expansion methods (IDS, MPAR, MPAR-IDS, IDS-MPAR)
applied to multi-year average precipitation of different periods

| 时段 | 方法 | 精度指标 | | | | 方法 | 精度指标 | | | |
|-----|------|-------|-------|--------|---------|----------|-------|-------|--------|---------|
| | | CC | MRE | MAE/mm | RMSE/mm | | CC | MRE | MAE/mm | RMSE/mm |
| 6 月 | IDS | 0.433 | 14.0% | 9.29 | 12.26 | MPAR-IDS | 0.538 | 12.6% | 8.58 | 11.50 |
| | MPAR | 0.512 | 13.6% | 9.09 | 11.67 | IDS-MPAR | 0.555 | 12.5% | 8.45 | 11.34 |
| 7 月 | IDS | 0.717 | 15.3% | 19.52 | 25.91 | MPAR-IDS | 0.719 | 14.0% | 18.43 | 24.93 |
| | MPAR | 0.629 | 16.1% | 21.22 | 27.84 | IDS-MPAR | 0.752 | 12.9% | 17.18 | 23.65 |
| 8 月 | IDS | 0.739 | 17.0% | 17.22 | 23.01 | MPAR-IDS | 0.729 | 16.4% | 17.04 | 22.54 |
| | MPAR | 0.546 | 20.5% | 21.34 | 27.46 | IDS-MPAR | 0.762 | 15.4% | 16.31 | 21.43 |
| 9 月 | IDS | 0.680 | 14.7% | 8.04 | 10.53 | MPAR-IDS | 0.699 | 14.0% | 7.75 | 10.21 |
| | MPAR | 0.733 | 13.6% | 7.67 | 9.64 | IDS-MPAR | 0.727 | 13.5% | 7.50 | 9.75 |
| 汛期 | IDS | 0.712 | 11.1% | 40.25 | 52.92 | MPAR-IDS | 0.742 | 9.9% | 36.62 | 48.76 |
| | MPAR | 0.654 | 11.6% | 42.64 | 54.93 | IDS-MPAR | 0.762 | 9.5% | 35.66 | 47.11 |
| 非汛期 | IDS | 0.390 | 59.2% | 21.28 | 31.62 | MPAR-IDS | 0.397 | 59.8% | 21.53 | 32.54 |
| | MPAR | 0.537 | 49.9% | 20.86 | 28.82 | IDS-MPAR | 0.466 | 55.6% | 20.38 | 30.64 |
| 全年 | IDS | 0.685 | 10.1% | 46.63 | 63.31 | MPAR-IDS | 0.730 | 9.1% | 42.36 | 58.67 |
| | MPAR | 0.717 | 9.6% | 45.15 | 59.65 | IDS-MPAR | 0.750 | 8.7% | 41.00 | 56.66 |

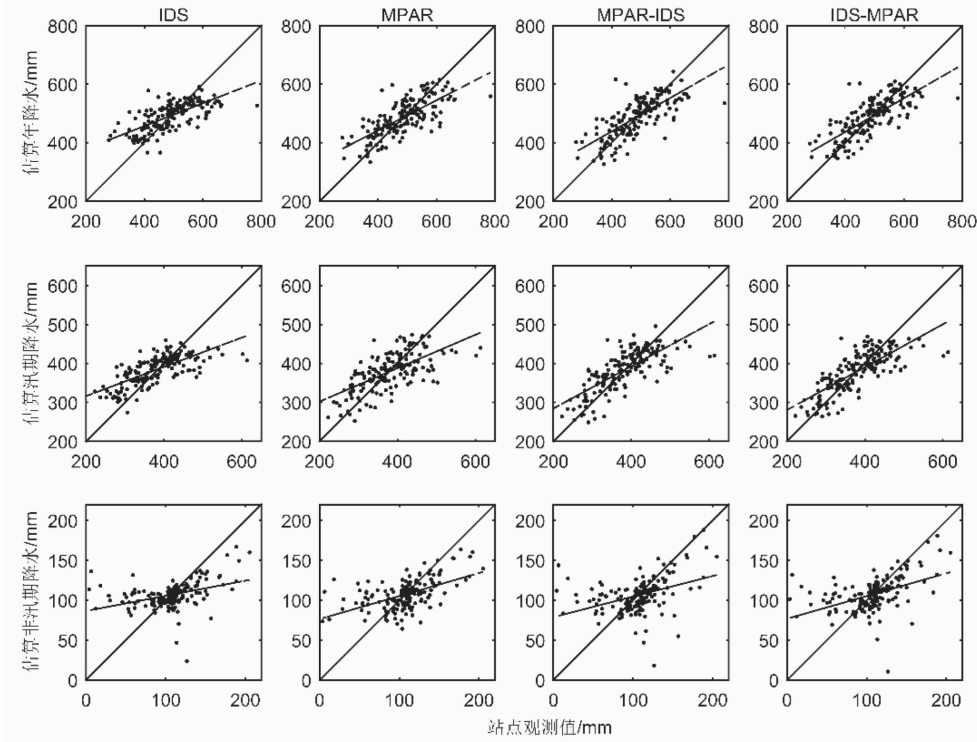


图 2 四种空间展布方法 (IDS,MPAR,MPAR-IDS,IDS-MPAR)
在不同时段上(全年、汛期、非汛期) 的站点估算值和观测值比较

Fig.2 Comparison of the estimated and the observed precipitation during different periods
(annual, flood season, non-flood season) with the four spatial expansion methods (IDS, MPAR, MPAR-IDS, IDS-MPAR)

2.2 空间展布结果

以年降水为例,四种空间展布方法的结果如图3。IDS方法在站点处完全等于观测值,“牛角”现象比较严重。另外由于IDS方法仅考虑了空间自相关性,没有考虑地形的影响,因而未能捕捉到太原盆地和忻定盆地的低雨量中心。MPAR方法仅考虑了降水与地理地形因子的协相关性,主要反映降水在空间和高程上的变化趋势,在站点处与观测值存在一定误差。相比于不考虑参数空间变异的传统降水海拔关系,对年降水的解释率从0.10提高到0.56,表明MPAR方法能比传统降水海拔模型更为准确地定量描述山区降水对地形的响应规律。MPAR-IDS方法和IDS-MPAR方法综合了前面两种方法的优点,同时考虑了以IDS方法表达的降水空间自相关性和以MPAR方法表达的降水高程协相关性,充分利用了站点观测资料和DEM提供的地形信息,得到了精度更高的空间展布结果。两种综合方法的结果仍存在“牛角”现象,与实际的降水分布不符,但相比IDS方法的结果已减弱甚多。

2.3 降水空间格局与垂直地带性

以误差最小的IDS-MPAR方法得到的空间展布结果为基础,分析多年平均降水量的空间格局和垂

直分布规律。我们发现,降水等值线的走向和山体走向基本一致。在北太行,降水等值线与山体同为西南-东北走向;在南太行东侧迎风坡,两者同为南北走向;在南太行西侧,两者同为偏南走向。这有力地证明了在大尺度上太行山区的地形对降水的显著影响。

在小太行山和大同盆地一带,沿山体垂向从东南至西北,年降水先增加后减少,最大降水高度出现在迎风坡山腰。在恒山的迎风坡,沿山体垂向从东南至西北,出现了两个最大降水高度,一个出现在迎风坡山腰,另一个出现在山顶附近。在石家庄、五台山和繁峙一带,年降水在迎风坡发生了“两次爬坡”现象,在迎风坡山腰和接近山顶出现了两个最大降水高度,同时在背风坡的忻定盆地,降水量明显降低。南太行的规律是,在迎风坡山腰出现了一个最大降水高度,但是长治盆地降水量并没有降低,这是因为长治盆地为喇叭口地形,湿润的夏季季风可以长驱直入,因而其特征为南略高于北,中部略高于东西两侧山地。郭康^[30]、侯明^[31]、程树林^[34]和王菱^[12]等通过研究认为太行山东麓存在两个最大降水高度,而本文利用更丰富的数据资料和改进的研究方法发现小太行山等部分山坡仅存在一个最大降

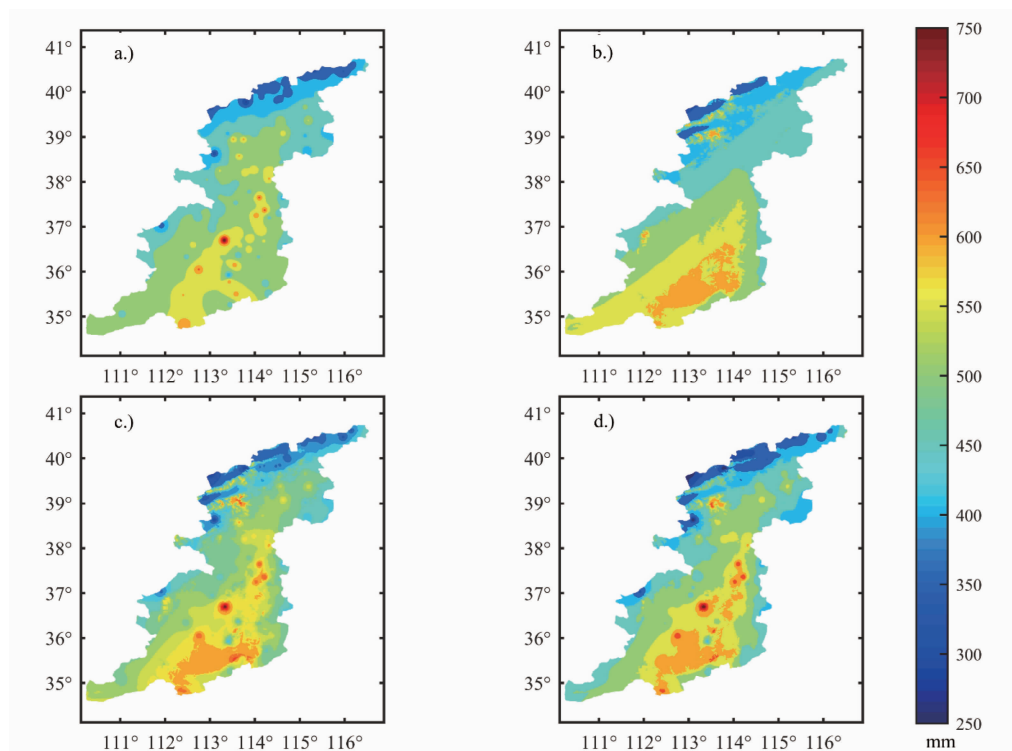


图3 四种方法的年降水展布结果,a为IDS,b为MPAR,c为MPAR-IDS,d为IDS-MPAR

Fig. 3 Spatial expansion results of annual precipitation of the four different methods;
a for IDS, b for MPAR, c for MPAR-IDS, and d for IDS-MPAR

水高度。相比前人研究,本文的空间展布结果能更准确地反映太行山地形对降水的影响。

3 结论

本文针对太行山区使用距离平方反比法(IDS)、改进的降水垂直分布模型(MPAR)和两种综合方法(MPAR-IDS 和 IDS-MPAR)对降雨进行空间展布。结论如下:

(1)IDS 能描述降水的一部分空间自相关信息,MPAR 能描述降水和地理地形因子的协相关信息,综合方法则同时考虑了这两种信息。误差分析表明,4 种空间扩展方法中 IDS-MPAR 精度最高,年降水平均相对误差(MRE)仅 8.7%,比 IDS 低 14.0%,MPAR-IDS 精度次之,年降水 MRE 比 IDS 低 10.4%,MPAR 与 IDS 的精度接近。年降水空间展布精度略高于汛期,汛期精度又显著高于非汛期。

(2)以 IDS-MPAR 方法的空间展布结果为基础分析了太行山区降水的空间格局和垂直分布。结果表明,整体上降水和地形关系密切,降水等值线与山体走向基本平行。按地形差异,在小五台山、南太行迎风坡山腰存在一个最大降水高度,在恒山、五台山则存在两个最大降水高度,分别在迎风坡山腰和山顶附近。大同盆地、忻定盆地和太原盆地降水偏少,而长治盆地降水偏多。

MPAR 及改进的两种综合方法在太行山区的应用效果较好表明,不考虑地理空间分异性的降水海拔回归关系可靠性较差,在回归模型中有必要考虑地形参数的空间变异,山区降水空间扩展方法和垂直地带性仍然需要在物理机制上进一步研究。

参考文献(References)

- [1] 傅抱璞. 地形和海拔高度对降水的影响[J]. 地理学报, 1992, 47(4): 302 - 14. [FU Baopu. The effects of topography and elevation on precipitation. *Acta Geographica Sinica*, 1992, 47(4): 302 - 314.]
- [2] 林之光. 地形降水气候学[M]. 北京: 科学出版社, 1995. [LIN Zhiguang. *Climatology of orographic precipitation*. Beijing: Science Press, 1995: 1 - 105.]
- [3] 李子良. 地形降水试验和背风回流降水机制[J]. 气象, 2006, 32(5): 10 - 5. [LI Ziliang. Simulations of precipitation induced by the reversal flow in the lee of mountain. *Meteorological Monthly*, 2006, 32(5): 10 - 15.]
- [4] 廖菲, 洪廷超, 郑国光. 地形对降水的影响研究概述[J]. 气象科技, 2007, 35(3): 309 - 16. [LIAO Fei, HONG Yanchao, ZHENG Guoguang. Review of orographic influences on surface precipitation. *Meteorological Science and Technology*, 2007, 35(3): 309 - 316.]
- [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 - 91. [HE Hongyan, GUO Zhihua, XIAO Wenfa. Review on spatial interpolation techniques of rainfall. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(10): 1187 - 1191.]
- [6] 赵娜, 岳天祥, 王晨亮. 1951 - 2010 年中国季平均降水高精度曲面建模分析[J]. 地理科学进展, 2013, 32(1): 49 - 58. [ZHAO Na, YUE Tianxiang, WANG Chenliang. Surface modeling of seasonal mean precipitation in China during 1951 - 2010. *Progress in Geography*, 2013, 32(1): 49 - 58.]
- [7] SEVRUK B. Regional dependency of precipitation-altitude relationship in the Swiss Alps[J]. *Climatic Change*, 1997, 36(3 - 4): 355 - 69.
- [8] 傅抱璞. 山地气候[M]. 北京: 科学出版社, 1983: 204 - 220. [FU Baopu. *Mountain climate*. Beijing: Science Press, 1983: 204 - 220.]
- [9] 翁笃鸣. 第五讲 山地降水状况的分析[J]. 气象, 1985, (6): 39 - 43. [WENG Duming. The fifth lesson: analysis of orographic precipitation condition. *Meteorological Monthly*, 1985, (6): 39 - 43.]
- [10] 汤懋苍. 祁连山区降水的地理分布特征[J]. 地理学报, 1985, 40(4): 323 - 32. [TANG Maochang. The distribution of precipitation in mountain Qilian. *Acta Geographica Sinica*, 1985, 40(4): 323 - 332.]
- [11] 刘俊峰, 陈仁升, 卿文武等. 基于 TRMM 降水数据的山区降水垂直分布特征[J]. 水科学进展, 2011, 22(4): 447 - 54. [LIU Junfeng, CHEN Rensheng, QING Wenwu, et al. Study on the vertical distribution of precipitation in mountainous regions using TRMM data. *Advances in Water Science*, 2011, 22(4): 447 - 454.]
- [12] 王菱. 华北山区坡方位和海拔高度对降水的影响[J]. 地理科学, 1996, (2): 150 - 8. [WANG Ling. Impacts of orientations of slopes and elevation on rainfall in mountainous regions[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1996, (2): 150 - 8.]
- [13] 伍立群, 李学辉. 高山地区年降水量随高程变化分析[J]. 云南地理环境研究, 2004, 16(2): 4 - 7. [WU Liqun, LI Xuehui. Analysis on changes of annual precipitation with altitude in high mountain areas[J]. *Yunnan Geographic Environment Research*, 2004, 16(2): 4 - 7.]
- [14] JOHANSSON B, CHEN D L. The influence of wind and topography on precipitation distribution in Sweden: Statistical analysis and modelling[J]. *International Journal of Climatology*, 2003, 23(12): 1523 - 35.
- [15] 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 - 22. [CHEN He, LI Yuanyuan, YANG Zhifeng, et al. Research on relationship between terrain factors and precipitation. *Research of Soil and Water Conservation*, 2007, 14(1): 119 - 22.]
- [16] 舒守娟, 王元, 熊安元. 中国区域地理、地形因子对降水分布影响的估算和分析[J]. 地球物理学报, 2007, (6): 1703 -

12. [SHU Shoujuan, WANG Yuan, XIONG Anyuan. Estimation and analysis for geographic and orographic influences on precipitation distribution in China [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2007, (6): 1703–12.]
- [17] BRUNSDON C, FOTHERINGHAM A S, CHARLTON M. Geographically Weighted Regression: A Method for Exploring Spatial Nonstationarity [J]. Geographical Analysis, 1996, 28 (4): 281–98.
- [18] BRUNSDON C, MCCLATCHEY J, UNWIN D. Spatial variations in the average rainfall-altitude relationship in Great Britain: an approach using geographically weighted regression [J]. International Journal of Climatology, 2001, 21(4): 455–66.
- [19] 刘小婵, 张洪岩, 赵建军等. 东北地区 TRMM 数据降尺度的 GWR 模型分析 [J]. 地球信息科学学报, 2015, 17(09): 1055–62. [LIU Xiaochan, ZHANG Hongyan, ZHAO Jianjun, et al. Spatial downscaling of TRMM precipitation databased on GWR model in Northeast China [J]. Journal of Geo-information Science, 2015, 17(09): 1055–62.]
- [20] Hu Q, Yang H, Meng X, et al. Satellite and gauge rainfall merging using geographically weighted regression [J]. Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences, 2015, 368: 132–137.
- [21] 胡庆芳. 基于多源信息的降水空间估计及其水文应用研究 [D]. 清华大学, 2013. [HU Qingfang. Rainfall spatial estimation using multi-source information and its hydrological application [D]. Tsinghua University, 2013: 29–45.]
- [22] XU Shiguang, WU Chaoyu, WANG Li, et al. A new satellite-based monthly precipitation downscaling algorithm with non-stationary relationship between precipitation and land surface characteristics [J]. Remote Sensing of Environment, 2015, 162 (119–40).
- [23] 王宁练, 贺建桥, 蒋熹等. 祁连山中段北坡最大降水高度带观测与研究 [J]. 冰川冻土, 2009, 31(3): 395–403. [WANG Ninglian, HE Jianqiao, JIANG Xi, et al. Study on the zone of maximum precipitation in the north slopes of the Central Qilian Mountains. Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, 31(3): 395–403.]
- [24] GOUVAS M A, SAKELLARIOU N, XYSTRAKIS F. The relationship between altitude of meteorological stations and average monthly and annual precipitation [J]. Studia Geophysica Et Geodaetica, 2009, 53(4): 557–70.
- [25] 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.
- [26] NALDER I A, WEIN R W. Spatial interpolation of climatic Normals: test of a new method in the Canadian boreal forest [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1998, 92(4): 211–25.
- [27] BASIST A, BELL G D, MEENTEMEYER V. Statistical Relationships between Topography and Precipitation Patterns [J]. Journal of Climate, 1994, 7(9): 1305–15.
- [28] 张正勇, 何新林, 刘琳等. 中国天山山区降水空间分布模拟及成因分析 [J]. 水科学进展, 2015, 26(4): 500–8. [ZHANG Zhengyong, HE Xinlin, LIU Lin, et al. Spatial distribution of rainfall simulation and the cause analysis in China's Tianshan Mountains area. Advances in Water Science, 2015, 26(4): 500–508.]
- [29] 穆振侠, 姜卉芳. 基于 TRMM/TMI 的天山西部山区降水垂直分布规律的研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2010, (10): 66–71. [MU Zhenxia, JIANG Huifang. The vertical distribution law of precipitation in the western Tianshan Mountain based on TRMM/TMI [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2010, (10): 66–71.]
- [30] 郭康. 气流二次爬坡和太行山东坡雨量分布特点 [J]. 气象, 1981, (3): 22–3. [GUO Kang. Twice climbing of airflow and the distribution feature of precipitation on east slope of the Taihang Mountain. Meteorological Monthly, 1981, (3): 22–3.]
- [31] 侯明. 太行山两个最大降水高度带问题探讨 [J]. 地理学与国土研究, 1992, 8(4): 23–6. [HOU Ming. Discussion on the two maximum precipitation zones of Taihang Mountain issue. Geography and Territorial Research, 1992, 8(4): 23–6.]
- [32] 徐宗学, 张楠. 黄河流域近 50 年降水变化趋势分析 [J]. 地理研究, 2006, (1): 27–34. [XU Zongxue, ZHANG Nan. Long term trend of precipitation in the Yellow River basin during the past 50 years [J]. Geographical Research, 2006, (1): 27–34.]
- [33] 林忠辉, 莫兴国, 李宏轩等. 中国陆地区域气象要素的空间插值 [J]. 地理学报, 2002, (1): 47–56. [LIN Zhonghui, MO Xingguo, LI Hongxuan, et al. Comparison of three spatial interpolation methods for climate variables in China [J]. Acta Geographica Sinica, 2002, (1): 47–56.]
- [34] 程树林. 太行山燕山气候考察研究 [M]. 气象出版社, 1993: 49–64. [CHENG Shulin. Research on the climate review of Taihang Mountain and Yan Mountain [M]. Beijing: Meteorological Press, 1993: 49–64.]
- [35] 张涛, 李宝林, 何元庆等. 基于 TRMM 订正数据的横断山区降水时空分布特征 [J]. 自然资源学报, 2015, (2): 260–70. [ZHANG Tao, LI Baolin, HE Yuanqing, et al. Spatial and temporal distribution of precipitation based on corrected TRMM data in Hengduan Mountains [J]. Journal of Natural Resources, 2015, (2): 260–70.]
- [36] 吴建峰, 陈阿林, 嵇涛等. TRMM 降水数据在复杂山地的精度评估——以重庆市为例 [J]. 水土保持通报, 2014, (4): 201–7. [WU Jianfeng, CHEN Alin, JI Tao, et al. Accuracy evaluation of Tropical Rainfall Measuring Mission precipitation data in complex mountainous areas-taking Chongqing City as an example [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014, (4): 201–7.]

Comparison of the Methods of Precipitation Spatial Expansion and Analysis of Vertical Zonality in the Taihang Mountains

HAN Jian^{1,2}, ZHAN Chesheng^{1*}, WANG Feiyu^{1,2}, HU Shi¹

(1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute
of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China.)

Abstract: The precipitation in mountainous area is complex in pattern partly because of strong spatial variability of rainfall distribution. Due to the scarcity of observation data, the expansion of rainfall data from sites to space has been a difficult issue of hydrography community. Based on the collected precipitation data from 34 national meteorological stations and 130 rainfall stations in the Taihang Mountains, in this paper it assessed the applicability of the Inverse Distance Square method (IDS), the Modified Precipitation-Altitude Relationship (MPAR) and other two approaches combined the previous two methods (i. e. , MPAR-IDS and IDS-MPAR) to the spatial expansion of rainfall distribution in the Taihang Mountains, and then it discussed the mechanism influencing the rainfall expansion, its methodological advantages and disadvantages. Four kinds of criteria including Coefficient of Correlation (CC), Mean Relative Error (MRE), Mean Absolute Error (MAE) and Root Mean Square Error (RMSE) were applied to compare the accuracy of the four interpolation methods. The pattern of spatial distribution of precipitation with the highest accuracy was used to analyze the topographic effects on precipitation, especially the issue of Maximum Precipitation Height (MPH). Results showed that the accuracy of IDS-MPAR was the highest among the four methods, with only 8.7% annual MRE, 14.0% smaller than IDS method, and the error of MPAR-IDS was 10.4% lower than that of IDS whereas MPAR and IDS had close accuracy. Based on IDS-MPAR interpolation analysis, it found that the spatial variation of precipitation in the Taihang Mountains was mainly affected by local terrain, and the contour of precipitation was basically parallel to the mountain stretch. There existed a maximum precipitation height on the hillside of Xiaowutai Mountain as well as South Taihang Mountain. Two maximum precipitation heights in Heng Mountain and Wutai Mountain was found at windward hillside and the peak, respectively, In Datong Basin and other leeward slope basin, rainfall was very low, while the bell-shaped Changzhi basin received more precipitation.

Key words: rainfall; topography; vertical zonality; spatial expansion; Taihang Mountain