

DOI: 10.14188/j.1671-8844.2021-01-005

文章编号: 1671-8844(2021)01-0028-10

基于地形加权的降水空间插值方法研究

李慧晴, 叶爱中

(北京师范大学地理科学学部地表过程与资源生态国家重点实验室, 陆地表层系统科学与可持续发展研究院, 北京 100875)

摘要: 降水的时空分布存在高度不均匀性, 而高精度的观测信息往往依靠有限的地面站点观测, 所以获得高分辨率的观测降水信息需要进行空间插值。降水的空间分布受到地形的影响, 尤其是地形雨分布在迎风坡与背风坡差距很大, 现有的插值方法很少考虑到该类地形的影响, 导致降水插值误差很大。考虑坡向与流域边界对地形的影响, 加入 2 个权重修正指数, 改进距离倒数平方方法, 开发了一种新的考虑地形影响的空间插值方法。以淮河流域蚌埠以上河源山区为研究区域, 采用 1960—2010 年间的雨量站观测降水数据, 对研究区的降水量进行插值, 然后通过交叉验证方法对插值精度进行了验证。结果表明: 考虑地形的距离倒数平方方法, 对研究区的 41% 站点有改进, 效率系数和相关系数分别最大提高 0.53 和 0.34; 对每个站点的 2 个权重指数进行优化, 新方法相较于原方法能较有效地减小插值误差, 提高插值精度; 新方法对位于山前或山间的雨量站点降水插值的改进效果较好, 一般在夏季强降水过程中表现较为明显。

关键词: 空间插值; 降水; 坡向; 子流域; 淮河流域

中图分类号: TV 124 **文献标志码:** A

Spatial interpolation method of precipitation based on topographic weighting

LI Huiqing, YE Aizhong

(State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Institute of Land Surface System and Sustainability Studies, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: There is a high degree of non-uniformity in the spatial and temporal distribution of precipitation, and high-precision observation information often relies on observations from limited rain gauges, so obtaining high-resolution observation precipitation information requires spatial interpolation. The spatial distribution of precipitation is affected by the terrain, especially the topographic rain. There is a large gap between the distributions of topographic rain in the windward slope and the leeward slope. Existing interpolation methods rarely consider the influence of this type of terrain, so it leads to a large rainfall interpolation error. This study considers the terrain effect through slope direction and watershed boundary, adds two weight correction indexes, improves the reversed distance squared method, and develops a new spatial interpolation method considering the influence of terrain. Taking the mountainous water source area upstream Bengbu City in the Huaihe River basin as the study area, the precipitation data from 1960 to 2010 were used to interpolate the precipitation, and then the interpolation accuracy was verified by the cross-validation method. The result shows that the reversed distance squared method considering terrain can improve the interpolation of 41% stations in the study area, and the efficiency coefficient and correlation coefficient are increased by a maximum of 0.53 and

收稿日期: 2020-10-25

作者简介: 李慧晴(1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向为水文学, E-mail: 201921051036@mail.bnu.edu.cn。

通讯作者: 叶爱中(1978-), 男, 博士, 教授, 主要从事水文集合预报研究, E-mail: azye@bnu.edu.cn。

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(编号: 2019QZKK0405); 国家自然科学基金资助项目(编号: 51879009)。

0.34, respectively. Compared with the original method, the new method can effectively reduce the interpolation error and improve the interpolation accuracy by optimizing the two weight indexes of each station. The new method has a better effect on the improvement of precipitation interpolation at the rainfall stations located in the piedmont or intermountain areas, and it is generally more obvious in the process of heavy rainfall in summer.

Key words: spatial interpolation; precipitation; aspect; sub-basin; Huaihe River basin

降水是最基本和最重要的气候要素之一,是驱动陆地水文过程最相关的变量^[1],也是人们生产生活所需水资源主要来源之一^[2],其时空分布状况会直接影响区域的水循环过程,影响作物的分布和生长,影响干旱、洪涝、水土流失等极端天气事件和自然灾害的分布^[3]。获取高质量的空间降水数据,准确掌握降水的空间分布信息,对水资源管理、旱涝灾害预警预报、流域水文模拟分析、水质预测、气候变化和可持续发展等方面的研究具有重要意义^[2,4-8]。降水量是主要的流域水文问题分析要素和水文模型输入参数^[4],降水量数据主要通过雨量观测站点获得,但由于经济、地形、人力、技术等原因,现有雨量站点数量有限且分布不均匀,因此得到的降水量数据特别是高精度观测数据只是点数据而非面数据,存在数据缺失、不连续、不全面和覆盖范围不广等问题^[2,4],即使近年来自动气象站点不断增加、遥感数据不断发展应用,也存在精度不高、需要地面数据校正等问题。想要通过站点数据得到准确的流域降水空间分布特征,一般采用空间插值方法,对点降水数据进行插值得到面上的信息。

对于降水的空间插值方法运用,国内外学者已开展大量研究^[5]。20世纪80年代,王广德等^[9]开始研究利用克里金空间内插技术,以某流域12个雨量站的一次降雨资料来内插该区域其他点的雨量值,可以比较精确地计算面雨量、作等值线图。随着研究不断深入,越来越多的插值方法被提出和改进,从多元回归分析、经典的统计分析发展到地统计分析^[2],从单纯考虑降水数据本身到逐渐加入高程、经纬度、坡度、坡向、风向和植被等影响因素^[5,10,11],有学者开始比较局地尺度下不同空间插值方法的适用性,发现不同的插值方法因不同的地区和研究目的产生不同的效果^[3]。陈雅婷等^[8]选取了反距离权重法、径向基函数法、全局和局部多项式法以及4种克里金法(普通、简单、泛及经验贝叶斯克里金法),利用降水量数据分别展开了整个中国区域的插值评估和基于数字高程模型(digital elevation model, DEM)分区的黄河、长江和珠江3大流域插值评估,发现全国范围采用经验贝叶斯克里金插值取得了较好效果,3大流域分别采用泛克里金法、普通克里

金法和径向基函数法最优。高歌等^[12]对26°~34°N、103°~115°E范围内2004年逐日降水量进行空间插值,结果显示普通克里金法插值效果略好于反距离权重法。赵婷等^[13]、于洋等^[14]、孟庆香等^[15]均对黄土高原地区年均降水量进行空间插值分析,均认为普通克里金法是该区域较优的插值方法。Peng等^[16]采用协同克里金和薄盘光滑样条函数法进行三江源地区58个基准气象站点月气温及降水空间插值,发现后者插值效果显著优于前者,且两种方法都是引入协变量后模型插值结果的精度更优。赵冰雪等^[17]选取反距离权重法、径向基函数法、普通克里金法和协同克里金法对安徽省境内80个气象站点降水和气温数据分别进行空间插值,结果表明考虑了纬度和高程的协同克里金插值效果最好。李艳等^[18]采用常规和考虑各点高程的反距离权重法、局部多项式法、普通克里金法和协同克里金法对四川地区月和年平均降水量进行插值,发现考虑高程的反距离权重法优于常规法,两种克里金法中与DEM结合的协同克里金法更适合四川省山区地形插值。彭晓芬等^[19]用反距离权重法、普通克里金法、基于样条函数法和回归模型计算法,对云南省134个气象站年均降雨量进行空间插值,交叉验证结果表明4种插值法均能反映年降雨空间分布特征,其中回归模型模拟插值误差较大,但能直观反映年降雨量随地理位置及海拔高度立体变化而变化的特征。王舒等^[20]在澜沧江流域提出了综合考虑观测点与插值点位置、距离和高程关系的PER(precipitation-elevation regressions)克里金插值法,并将其与普通克里金法对比,发现前者能有效消除观测点与周围区域地形差异太大造成的插值异常以及插值运算的平滑效应。Hadi等^[21]采用8种空间插值方法对土耳其Seyhan盆地日、月、年降水量和温度进行插值,验证发现在大多数时间尺度下,误差最小和最大的分别是权重为3的反距离权重法和泰森多边形法。Louvet等^[22]使用样条、克里金、反距离权重和最近邻法分析巴尼河流域降雨时空变化,通过测试水文模型(GR2M)对不同插值结果的敏感性,发现克里金法可产生最佳的水文模拟性能。Ahmed等^[23]使用地统计学和确定性插值方法来插值巴基斯坦缺乏数据的干旱地区降水量和

温度,该地区海拔和气候在短距离内变化很大,结果表明引入海拔显著提高了气候变量插值的准确性,最优的插值方法是分离和通用协同克里金法。Kebblouti等^[24]为确定最适合阿尔及利亚东部站点密度较低的沿海城市安纳巴的降雨插值方法,对3种方法进行了测试,发现通过反距离权重法表征的降雨分布效果最优。Piazza等^[25]利用意大利西西里岛247个雨量站年和月平均降雨量数据,对简单线性回归、多元回归、地理加权回归、人工神经网络以及地统计方法(普通和残差普通克里金法)进行评估,并在部分方法中引入DEM高程信息,结果发现忽略高程的单变量方法误差最大,考虑高程时误差会减小,而在降水量和海拔高度之间线性回归的普通残差克里金法表现最佳。Chen等^[26]使用普通最近邻、局部多项式、径向基函数、反距离权重和普通克里金法来插值中国753个站点日降水数据,交叉验证表明,基于季节性半变异函数的普通克里金法效果最好,其次是权重为2的反距离权重法。Castro等^[1]针对智利中南部Bio-Bio地区雨量计少且地形起伏复杂的情况,开发了一种考虑空间不连续性和地形影响的日降水量空间插值方法,该方法相较于反距离权重和简单回归法,可以更好地模拟降水的发生。由于降水的空间复杂性,越来越多的学者认识到地形的重要,考虑地形地貌相关因素变化的空间插值方法在区域降水插值中的插值精度一般要更高^[10,27,28]。

降水量数据的空间插值精度取决于降水量的实际空间变异性、插值方法的不同类型和参数、观测站数目和分布^[1,29]。在一些特殊情景下,如暴雨等极端降水事件^[5],事件发生频率和流域规模降水量可能被高估^[1],如在山区环境下降水影响因素多而杂,站点稀疏又分布不均,采用一般空间插值方法往往存在较大误差。由于雨影效应等问题,山区降水量可能会在很小的距离内变化,陡峭的斜坡甚至会增强极端降水影响,但由于缺乏数据和地形对降水的复杂影响考虑,很难对山区的降水模式进行精确预测^[30]。因此,研究考虑山区特殊地形的空间插值方法具有重要意义,本文在综合国内外研究的基础上,以淮河流域蚌埠以上河源山区为例,选取距离倒数平方法对流域降水进行空间分布研究,考虑地形雨等特殊降水模式,在原方法基础上增加2个权重指数(同一流域增加权重、同一坡向增加权重),改进现有插值方法,通过对比插值精度分析该插值方法对淮河流域山区降水的适用性。

1 研究区概况

淮河流域地处东亚季风湿润区与半湿润区,是南北气候、中低纬度和海陆相3种过渡带的重叠地区^[31],地理条件特殊,气候变化复杂,形成无降水旱、有降水涝、强降水洪的特点^[32],对区域生产生活产生重要影响,年均气温13.55~16.18℃,年均降水885mm,50%~75%的降水发生在夏季。淮河流域蚌埠以上范围地区属于淮河中上游流域,河源区地形起伏较大,中下游为平原,区域位置及地面雨量站点分布如图1所示。为研究地形对降水空间插值的影响,按子流域边界选择河源山区为研究区,其位于淮河流域的西南角,属于区域内地形起伏最大的流域,以山峦丘陵为主,面积为9718km²,采用90m分辨率DEM,选取200km²阈值将该流域划分成19个子流域。

本文在淮河流域蚌埠以上山区选取1960—2010年的站点观测逐日降水数据,降水数据来源于河南省水文水资源局和气象局、安徽省水文局和气象局。研究区包含17个雨量站点。

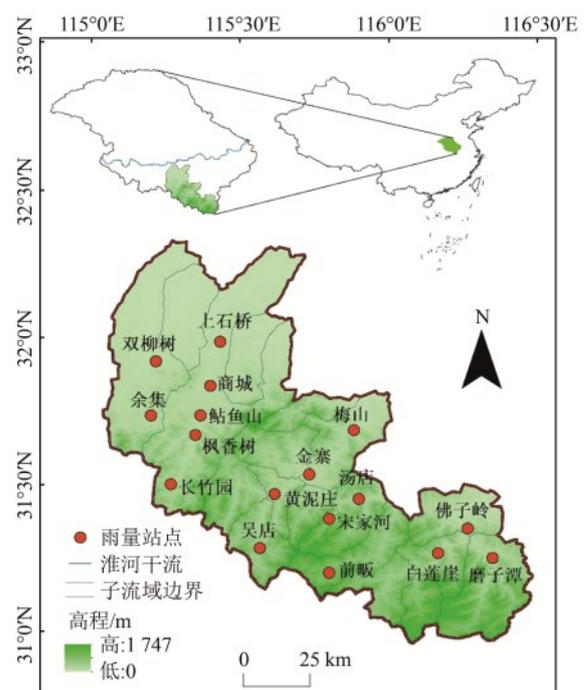


图1 研究区概况及雨量站点空间分布

Fig.1 Overview of the study area and spatial distribution of precipitation stations

2 研究方法

地形对降水的影响主要表现为地形雨的产生分布,降水量在迎风坡与背风坡会出现显著的差

异。流域边界一般为山脊线,能够明显地将迎风坡与背风坡区分开,但在同一个流域中可能会出现山谷,此时可用坡向区分迎风坡与背风坡,如图2所示。本文在传统距离倒数平方法的基础上加入子流域与坡向信息,对传统插值方法的权重因子进行校正,从而充分考虑地形对降水的影响。

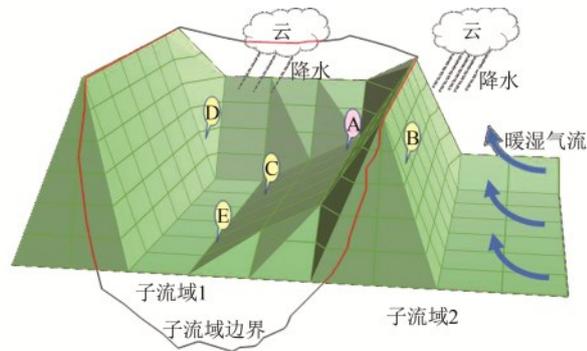


图2 山区地形雨示意图

Fig.2 Sketch map of mountain terrain rain

图2中,流域内分布有多个雨量站点,由于存在缺测值或异常值等原因,需要对A点降水进行空间插值。一般情况下,距离倒数平方法认为站点A与最近的站点相关性最大,插值时给与更大的权重。在站点A的周围找 n 个参照点,根据到A点距离给每个参照点分配1个权重,权重与距离的 b 次幂成反比。具体的计算公式如下:

$$P^* = \sum_{i=1}^n a_i P_i, \quad a_i = \frac{1/D_i^b}{\sum_{i=1}^n (1/D_i^b)} \quad (1)$$

式中: P_i 为在某个时间段第 i 个实测站点的观测值; a_i 为第 i 个实测站点被分配的权重; D_i 为待估站点到第 i 个实测站点的直线距离; n 为确定待估站点所用到的实测站点的个数,取 $n=4$; b 为权重指数, $b=2$,即与距离的平方成反比。

基于实际复杂地形,考虑待估站点A存在以下两种地形影响情况:

1) 站点A与其最邻近站点B位于一高山附近但分属高山两侧,以该高山山脊线为分界线,将站点A与站点B划分到两个子流域内,站点A属于子流域1,站点B属于子流域2(图2)。在实际降水过程中,由于高山地形的阻挡,山坡两侧的降水会有较大差异,即山脊线两侧的2个流域降水有较大差异,例如:当来自东南方向的暖湿气团向西北方向前进时,遇到高山阻挡,气流被迫缓慢上升,引起绝热降温,发生凝结,在此面迎风的山坡易成云致雨,即站点B所在迎风坡降水较多;而站点A所在背风坡气

流下沉、温度升高,难成云致雨,降水较少。这种情况下站点A相较于站点B的降水要少得多,因此采用距离倒数平方法对站点A进行空间插值时,若按距离给站点B分配最大的权重,会导致最终得到的站点A插值结果误差较大,所以要考虑增加与站点A同在背风坡一侧同属于子流域1但距离较远的站点C的权重。具体步骤如下:

① 对目标山区流域划分子流域并对子流域进行编号,统计流域内每个雨量站点所属于流域。

② 判断每个雨量站点的最近4个站点是否与其同属于一子流域内,即子流域编号是否相同,若最近的第 i 个站点与待估站点属于同一子流域,记为 $Flag_i=1$,反之,记为 $Flag_i=0$ 。

③ 对流域内在高山附近的雨量站点(待估站点A)进行空间插值时,在原距离倒数平方法的基础上增加一个与待估站点属于同一个流域的实测站点权重指数 α ,即

$$P^* = \sum_{i=1}^n \alpha_i a_i P_i, \quad a_i = \frac{1/D_i^b}{\sum_{i=1}^n (1/D_i^b)} \quad (2)$$

式中: α_i 为同一流域增加的权重指数。当 $i=1,2,3,4$ 时,判断第 i 个实测站点是否满足 $Flag_i=1$,若满足,则 α_i 为指定权重指数,且 $1 < \alpha_i \leq 100$;若不满足,则 $\alpha_i=1$ 。

2) 在站点A周围的 n 个参照点中,近处存在一站点D处于站点A对面山坡,即为异坡向站点(坡向角度差大于 180°),较远处存在一站点E与站点A处于同一山坡,即为同坡向站点。在山区降水过程中,不同山坡的降水也存在差异。同一山坡由于局地气候基本相同,地形下垫面状况相近,区域降水量差异较小,反之,不同山坡之间情况复杂差异较大。站点A和同坡向站点E的降水量要更相近,因此采用距离倒数平方法对站点A进行空间插值时,若按距离给站点D分配最大的权重,会导致最终得到的站点A插值结果存在一定误差。本文以实际坡向为依据判断是否为同一山坡,考虑增加与站点A同在一个山坡即坡向最相近的站点E的权重。具体步骤如下:

① 计算目标山区流域内每个雨量站点坡向。

② 判断每个雨量站点的最近4个站点是否为其为同一个坡向,计算待估站点与最近的第 i 个站点之间的坡向差,判断两站点坡向差是否小于 180° ,即

$$|A_{s_i} - A_s^*| < 180^\circ \quad (3)$$

式中: A_{s_i} 为第 i 个实测站点的坡向。若满足式(3),则认为最近的第 i 个站点与待估站点是同一个坡

向;反之,则不是同一个坡向。

③对流域内存在属于同一山坡参照点的雨量站点(待估站点A)进行空间插值时,在原距离倒数平方法的基础上,增加一个与待估站点为同一个坡向的实测站点权重指数 β ,即

$$P^* = \sum_{i=1}^n \alpha_i \beta_i a_i P_i, \quad a_i = \frac{1/D_i^b}{\sum_{i=1}^n (1/D_i^b)} \quad (4)$$

式中: β_i 为同一坡向增加的权重指数。当 $i=1,2,3,4$ 时,判断第 i 个实测站点是否满足 $|A_{s_i} - A_s^*| < 180^\circ$,若满足,则 β_i 为指定权重指数,且 $1 < \beta_i \leq 100$;若不满足,则 β_i 为1。

本文采用新修正的距离倒数平方法对研究区内的每个雨量站点进行空间插值。采用新插值方法时首先需要通过测试调整,找到研究区内每个雨量站点的最优权重指数。对每个雨量站点在固定 β (同一坡向增加权重)的情况下,按照每次增加1个步长的方式,不断增加 α (同一流域增加权重),将其得到的插值结果与实测降水数据进行交叉验证,计算得到相关系数 R 和效率系数 E 等验证指标。较原距离倒数平方法而言,观察计算不同站点降水量相关系数 R 和效率系数 E 改进效果,确定每一个站点对应 α 权重指数的最优值(或区间)。在固定 α 的情况下,增加 β 亦然。

3 研究结果分析

3.1 典型站点降水插值分析

在研究区中,鲇鱼山站位于陡峭山坡前方,受地形影响较大。将该站点1960–2010年的原始观测值、不考虑地形(原距离倒数平方法)以及考虑地形(新修正距离倒数平方法)的插值结果进行比较,如表1所示为验证指标,可见,考虑地形后验证指标显著提高,观察3者年降水过程(图3)可以看出,与不考虑地形的插值结果相比,考虑地形得到的降水量与原始观测值更加贴近,2000年之前考虑地形的插值误差要小得多,1980年原始观测和考虑地形插值两者的年降水量过程线几近重合。可见,增加流域和坡向权重指数后的新修正距离倒数平方法对鲇鱼山站1960–2010年的降水空间插值有一定改进。

表1中验证指标计算公式如下:

$$E = 1 - \frac{\sum (P_c - P_o)^2}{\sum (P_o - \bar{P}_o)^2}$$

$$R = \frac{\sum (P_c - \bar{P}_o)(P_o - \bar{P}_o)}{\sqrt{\sum (P_c - \bar{P}_o)^2 \sum (P_o - \bar{P}_o)^2}}$$

表1 鲇鱼山站降水插值验证指标

Table 1 Verification of precipitation interpolation for Nianyushan Station

时间尺度	效率系数 E		相关系数 R		相对偏差 $B_r/\%$	
	不考虑地形	考虑地形	不考虑地形	考虑地形	不考虑地形	考虑地形
日	0.302	0.825	0.573	0.909	-22.00	-4.50
月	0.542	0.924	0.773	0.963	-22.00	-4.50
年	-1.080	0.790	0.490	0.915	-22.00	-4.50

$$B_r = \left(\frac{\sum P_c - \sum P_o}{\sum P_o} \right) \cdot 100\%$$

式中: P_o 为观测降水; P_c 为插值降水。

图4为鲇鱼山站1960–2010年典型大场次降水过程图,由图可见,在几次强降水尤其是夏季的大暴雨过程中,考虑地形得到的降水量在大部分日数中非常贴近原始观测值,而不考虑地形得到的降水量与两者差异较大,降水量整体偏少。由于在山区强降水的暴雨中心降雨一般较大,降水范围小,降水量可能会在较短的距离内(如山前山后)变化,符合新修正距离倒数平方法考虑的实际地形情况。

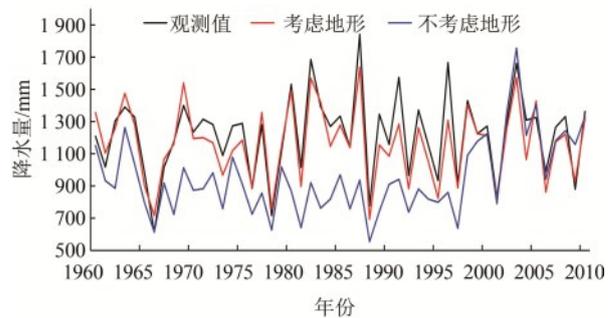


图3 鲇鱼山站1960–2010年降水过程

Fig.3 Annual precipitation of Nianyushan Station from 1960 to 2010

由鲇鱼山站1960–2010年多年平均月降水(图5)和季节降水(图6)可以看出,除8月外,考虑地形的修正距离倒数平方法对该站点降水的插值结果,都要比不考虑地形的原距离倒数平方法好,与观测值更贴近,误差更小,精度更高,其中在3、4、5、6月改进效果较为明显,主要集中在春季和初夏。

3.2 流域空间插值适用性分析

为验证该方法在山区的适用性,采用新修正距离倒数平方法对研究区17个雨量站点进行空间插值。

图7为研究区内在固定 β (或 α)权重指数情况下,不断增加 α (或 β)权重指数后各站点的改进效果

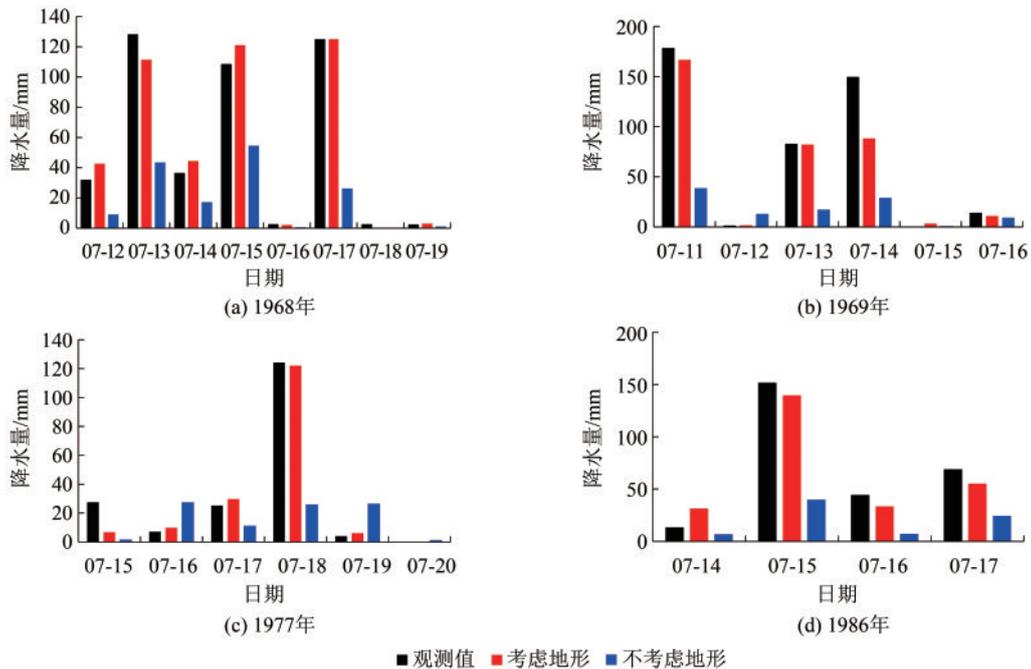


图 4 鲇鱼山站典型场次降水过程

Fig.4 Typical precipitation process of Nianyushan Station

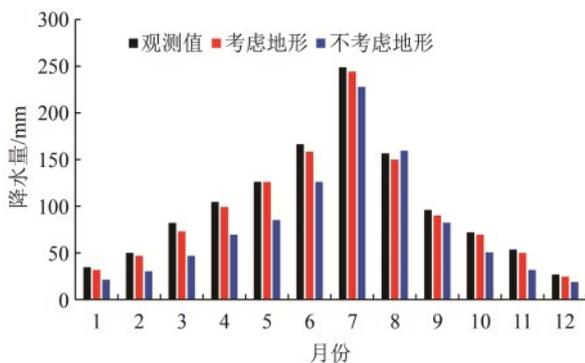


图 5 鲇鱼山站 1960–2010 平均月降水

Fig.5 Average monthly precipitation from 1960 to 2010 at Nianyushan Station

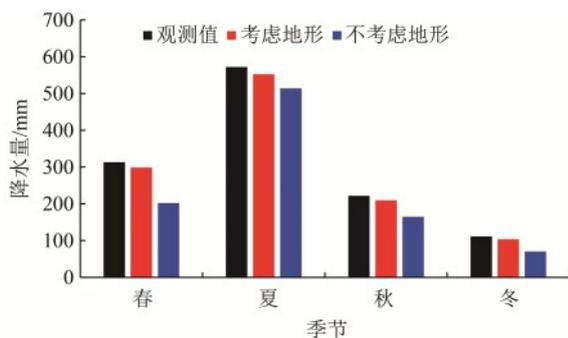


图 6 鲇鱼山站 1960–2010 平均季节降水

Fig.6 Average seasonal precipitation from 1960 to 2010 at Nianyushan Station

变化曲线,图中所示为筛选出的有效率系数 E 和相关系数 R 正面改进效果的站点。

1)加入地形修正系数 α 和 β 后,对山前及山坡上站点有效,主要原因是地形雨一般出现在山前。

2) α 和 β 存在最优值(或区间),当 α 和 β 取值很大时,会将同一个流域且同一个坡向的站点权重加大,相对减小了其他站点的权重,插值结果趋近于同一个流域且同一个坡向的站点值。

3)对于插值结果没有改进的站点的 α 和 β ,权重指数赋值为 1,即退回到原距离倒数平方插值方法。

3.3 流域降水插值效果空间分布

对研究区每个站点 α 和 β 权重指数进行优化,找到最优值(或区间),对该流域降水重新进行插值分析,交叉验证后得到的流域降水效率系数 E 和相关系数 R 改进效果空间分布如图 8 所示,图中, E_1 、 R_1 分别为不考虑地形插值得到的效率系数和相关系数, E_2 、 R_2 分别为考虑地形插值得到的效率系数和相关系数, $\Delta E = E_2 - E_1$, $\Delta R = R_2 - R_1$ 。研究区 17 个雨量站点中 41% 有改进效果,改进的 E 最大提高 0.53,改进的 R 最大提高 0.34。改进站点中,改进效果最明显的雨量站点集中在研究区西北部。改进站点多集中于山前,少部分位于山间。

3.4 讨论

1)采用考虑地形影响的新距离倒数平方法,在确定每个雨量站点的流域权重指数和坡向权重指数时,发现存在最优权重指数,权重指数为 1,表示不考虑地形影响,权重指数增加表示优先考虑同一个流域与同一个坡向的站点观测信息,权重指数超

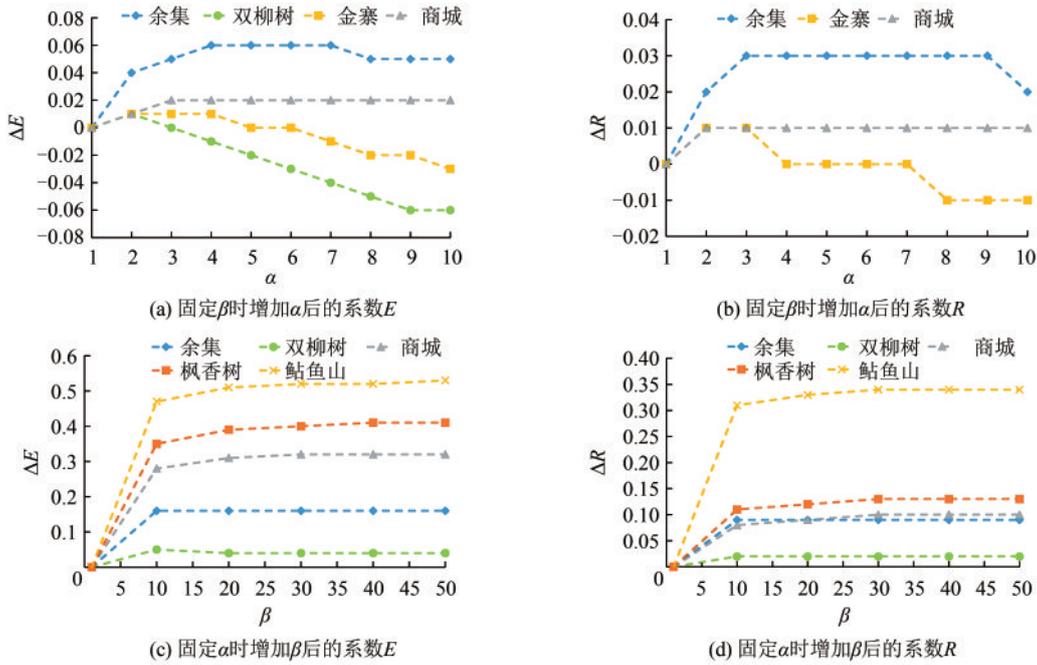


图 7 α 和 β 敏感性分析

Fig.7 Sensitivity analysis of α and β

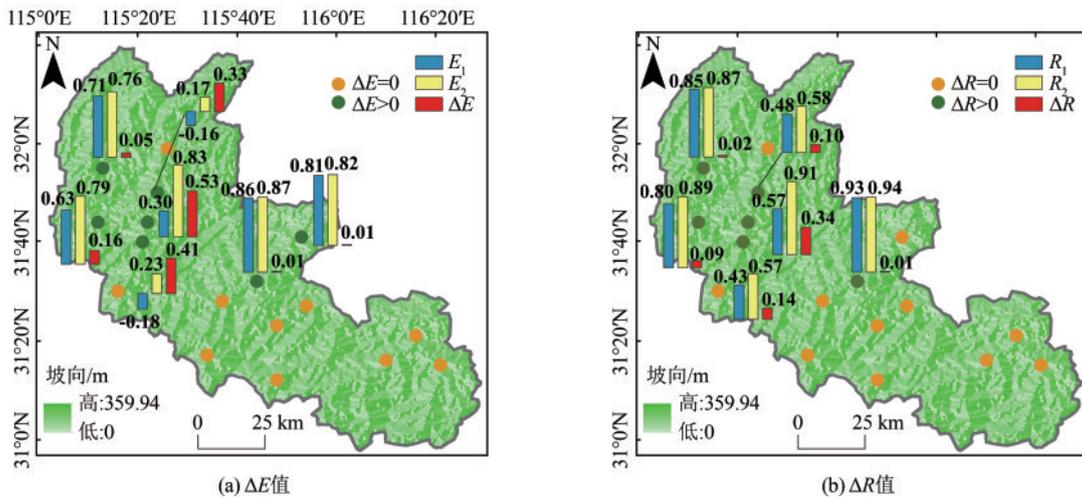


图 8 优化权重指数后的效率系数和相关系数改进值空间分布

Fig. 8 The spatial distribution of the improved values of the efficiency coefficient and correlation coefficient after optimizing the weight indexes

过最优点后有可能会过度相信同一个流域与同一个坡向的站点观测信息,忽略其他临近站点信息,导致插值结果不再变化或者变差。

2)大部分情况下2个权重指数不会同时对一个雨量站点的插值结果产生影响,基本是其中一个权重指数对该站点有改进效果。而出现2个权重指数都会对同一个站点的插值结果产生影响的情况时,即对一个站点的流域权重指数和坡向权重指数都进行增加,2个权重指数会互相影响,但表现在不同站点上存在差异,这可能与站点所处的实际地理位

置有关。对于个别雨量站点如梅山站来说,相较于原距离倒数方法,单独增加流域或坡向权重指数对该站点都不会起到改进作用,但同时增加相同值的流域和坡向权重指数时,两个权重指数会相互影响,改进插值结果。对于另外部分站点如商城站,如果增加的其中一个权重指数改进效果非常好(E 或 R 改进结果大于0.3),则该权重指数一般较大,会忽视另一权重指数影响,直接决定该雨量站点整体的改进结果。此外,还有部分站点如余集站,两个权重指数对该站点的改进结果相当或差异较小,会

产生相互抑制的情况,使得最终改进结果无法达到最优,这时需要降低其中一个权重指数才能优化改进效果。改进结果相当时,两权重指数相互削弱,任意调回其中一个权重指数为1;改进结果差异较小时,改进结果较小的权重指数会削弱另一个权重指数的改进结果,将前者调回1。

3)本文按子流域边界选择研究区,初始划定子流域时设置的子流域阈值大小会影响到流域内子流域的个数和范围,而采用新修正距离倒数平方方法中的流域权重指数需要判断站点之间是否在同一子流域内,因此,子流域阈值设置是否得当最终会影响雨量站点的插值结果。在尝试设置子流域阈值为100、200、300、400和500 km²的过程中,得到的子流域个数分别为31、19、15、10、8个,比较发现,阈值为100 km²时,子流域个数过多,许多子流域没有分配到雨量站点,且很少有2个站点在同一子流域内,不利于流域权重指数判定;阈值为400、500 km²时,子流域个数过少,单个子流域范围较大,可能包含几条山脊,也不利于流域权重指数判定;阈值为200、300 km²时较为恰当,而在这2个阈值之间,阈值为300 km²时的子流域包含了更多不一致的地形信息,因此本文选择200 km²作为划定子流域的阈值。

4 结论

本文采用淮河流域蚌埠以上河源山区17个雨量站在1960—2010年间的降水量观测数据,考虑坡向与流域边界对地形的影响,增加同一流域指数、同一坡向指数2个权重指数,改进了传统的距离倒数平方方法。将新方法和原方法进行降水插值精度和误差比较,验证了新空间插值方法对研究区降水插值的适用性。

1)在原距离倒数平方方法基础上,增加流域和坡向权重指数后的新修正距离倒数平方方法,对淮河流域蚌埠以上河源山区的山前雨量站点有改进效果。研究区有41%站点得到改进,改进的 E 最大提高0.53,改进的 R 最大提高0.34。

2)采用考虑地形影响的新修正距离倒数平方方法进行山区雨量站点降水空间插值时,确定好每个站点的两个权重指数,相较于原方法可以有效减小插值误差、提高插值精度。

3)对位于山前或山间的雨量站点,新修正距离倒数平方方法降水插值的改进效果较好,一般在由于地形产生的强降水过程中改进效果表现较为明显。

本文改进了距离倒数平方插值方法,改进方法

也适用于类似的空间插值方法,如三角剖分、克里金插值等。本文主要考虑地形产生的地形雨空间插值,平原区降水空间插值不属于本研究范围。

参考文献:

- [1] Castro L M, Gironás J, Fernández B. Spatial estimation of daily precipitation in regions with complex relief and scarce data using terrain orientation[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 517(1): 481-492.
- [2] 张深远. 小样本降水量空间插值精度比较及修正方法研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2018.
Zhang Shenyuan. Comparison and modification of spatial interpolation accuracy of precipitation with few sample points[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2018.
- [3] 朱蕾, 黄敬峰. 山区县域尺度降水量空间插值方法比较[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(7): 80-85.
Zhu Lei, Huang Jingfeng. Comparison of spatial interpolation method for precipitation of mountain areas in county scale[J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(7): 80-85.
- [4] 袁艳艳. 汉江流域降水量的空间插值研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
Yuan Yanyan. Spatial interpolation of precipitation in Hanjiang basin[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.
- [5] 贾薛, 唐彦君. 山丘区流域暴雨空间插值方法的比较[J]. *中国农村水利水电*, 2017, (2): 86-89, 93.
Jia Xue, Tang Yanjun. A comparison of watershed rainstorms spatial interpolation methods in mountainous areas[J]. *China Rural Water Conservancy and Hydropower*, 2017, (2): 86-89, 93.
- [6] 何文英, 毕孟飞, 李泽利, 等. 新安江流域降雨量空间插值方法和参数筛选[J]. *水资源与水工程学报*, 2013, 24(1): 130-134.
He Wenying, Bi Mengfei, Li Zeli, et al. Spatial interpolation method and parameters screening for precipitation in Xin'anjiang River basin[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2013, 24(1): 130-134.
- [7] 胡林涓, 彭定志, 张明月, 等. 雅鲁藏布江流域气象要素空间插值方法的比较与改进[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2012, 48(5): 449-452.
Hu Linjuan, Peng Dingzhi, Zhang Mingyue, et al. Spatial interpolation of meteorological variables in the Yarlung Zangbo River Basin[J]. *Journal of Beijing Normal University(Natural Science)*, 2012, 48(5): 449-452.
- [8] 陈雅婷, 刘奥博. 中国流域降水数据的空间插值方法评估[J]. *人民长江*, 2019, 50(4): 100-105.

- Chen Yating, Liu Aobo. Optimal spatial interpolation method for precipitation data in China's river basins[J]. Yangtze River, 2019, 50(4): 100-105.
- [9] 王广德, 过常龄. "Kriging"空间内插技术在地理学中的应用[J]. 地理学报, 1987, 42(4): 366-375.
- Wang Guangde, Guo Changling. Application of the Kriging technique in geography[J]. Acta Geographica Sinica, 1987, 42(4): 366-375.
- [10] 程柏涵. 山区降水空间分布的影响因素及插值方法研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
- Cheng Baihan. The study on multivariate spatial interpolation method of precipitation in mountainous area[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2016.
- [11] 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 Zhi, Wu Youjun, Liang Fengchao, et al. Study on spatial interpolation method of annual precipitation in Xinjiang[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2011, 32(3): 331-337.
- [12] 高歌, 龚乐冰, 赵珊珊, 等. 日降水量空间插值方法研究[J]. 应用气象学报, 2007, 18(5): 732-736.
- Gao Ge, Gong Lebing, Zhao Shanshan, et al. Spatial interpolation methods of daily precipitation[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2007, 18(5): 732-736.
- [13] 赵婷, 杨旭艳. 黄土高原降水量空间插值方法研究[J]. 地下水, 2012, 34(2): 189-191.
- Zhao Ting, Yang Xuyan. Research on spatial interpolation methods of annual average precipitation on Loess Plateau[J]. Ground Water, 2012, 34(2): 189-191.
- [14] 于洋, 卫伟, 陈利顶, 等. 黄土高原年均降水量空间插值及其方法比较[J]. 应用生态学报, 2015, 26(4): 999-1006.
- Yu Yang, Wei Wei, Chen Liding, et al. Comparison on the methods for spatial interpolation of the annual average precipitation in the Loess Plateau region[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(4): 999-1006.
- [15] 孟庆香, 刘国彬, 杨勤科. 黄土高原降水量的空间插值方法研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2006, 34(3): 83-88.
- Meng Qingxiang, Liu Guobin, Yang Qinke. Research on spatial interpolation methods of precipitation on Loess Plateau[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2006, 34(3): 83-88.
- [16] Peng H L, Liu F, Duo H R, et al. The comparison of spatial interpolation methods on temperature and precipitation of Sanjiangyuan area[J]. Meteorological and Environmental Research, 2010, 1(5): 7-11, 57.
- [17] 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.
- Zhao Bingxue, Wang Lei, Cheng Dongya. Comparison of spatial interpolation method for meteorological data and distribution characteristic in Anhui Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(3): 141-145.
- [18] 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.
- 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, 160.
- [19] 彭晓芬, 皇甫则, 周汝良. 云南省年均降雨量空间插值模拟方法比较[J]. 西南林学院学报, 2010, 30(5): 25-28.
- Peng Xiaofen, Huang Fuze, Zhou Ruliang. Comparison of spatial interpolation mimic method for the mean annual precipitation in Yunnan Province[J]. Journal of Southwest Forestry University, 2010, 30(5): 25-28.
- [20] 王舒, 严登华, 秦天玲, 等. 基于PER-Kriging插值方法的降水空间展布[J]. 水科学进展, 2011, 22(6): 756-763.
- Wang Shu, Yan Denghua, Qin Tianling, et al. Spatial interpolation of precipitation using the PER-Kriging method[J]. Advances in Water Science, 2011, 22(6): 756-763.
- [21] Hadi S J, Tombul M. Comparison of spatial interpolation methods of precipitation and temperature using multiple integration periods[J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2018, 46(7): 1187-1199.
- [22] Louvet S, Paturel J E, Mahé G, et al. Comparison of the spatiotemporal variability of rainfall from four different interpolation methods and impact on the result of GR2M hydrological modeling—case of Bani River in Mali, West Africa[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2016, 123(1-2): 303-319.
- [23] Ahmed K, Shahid S, Harun S B. Spatial interpolation of climatic variables in a predominantly arid region with complex topography[J]. Environment Systems and Decisions, 2014, 34(4): 555-563.
- [24] Keblouti M, Ouerdachi L, Boutaghane H. Spatial interpolation of annual precipitation in Annaba-Algeria—comparison and evaluation of methods[J]. Energy Procedia, 2012, 18: 468-475.
- [25] Piazza A D, Conti F L, Noto L V, et al. Comparative analysis of different techniques for spatial interpolation of rainfall data to create a serially complete monthly time series of precipitation for Sicily, Italy[J]. International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation, 2011, 13(3): 396-408.

- [26] Chen D L, Ou T H, Gong L B, et al. Spatial interpolation of daily precipitation in China:1951-2005[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2010, 27(6): 1221-1232.
- [27] Hevesi J A, Istok J D, Flint A L. Precipitation estimation in mountainous terrain using multivariate geostatistics. Part I: Structural analysis[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1992, 31(7): 661-676.
- [28] 卓静, 朱延年. 秦岭主脊区年降水量空间插值最优方法研究[J]. *干旱区地理*, 2017, 40(3): 555-563.
Zhuo Jing, Zhu Yannian. Spatial interpolation methods of annual average precipitation on Qinling Mountains [J]. *Arid Land Geography*, 2017, 40(3): 555-563.
- [29] 刘劲松, 陈辉, 杨彬云, 等. 河北省年均降水量插值方法比较[J]. *生态学报*, 2009, 29(7): 3493-3500.
Liu Jinsong, Chen Hui, Yang Binyun, et al. Comparison of interpolation methods on annual mean precipitation in Hebei Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(7): 3493-3500.
- [30] Pereira P, Oliva M, Baltreinaite E. Modelling extreme precipitation in hazardous mountainous areas contribution to landscape planning and environmental management[J]. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 2010, 18(4): 329-342.
- [31] 姚蕊, 孙鹏, 张强, 等. 基于Copula淮河流域水文干旱频率分析及影响研究[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2019, 55(6): 755-763.
Yao Rui, Sun Peng, Zhang Qiang, et al. Hydrological drought frequency based on Copula in Huaihe River basin[J]. *Journal of Beijing Normal University(Natural Science)*, 2019, 55(6): 755-763.
- [32] 温庆志, 姚蕊, 孙鹏, 等. 变异条件下淮河流域生态径流变化特征及驱动因子[J]. *生态学报*, 2020, 40(8): 2621-2635.
Wen Qingzhi, Yao Rui, Sun Peng, et al. Change characteristics and driving factors in nonstationary ecological flow condition across the Huaihe River basin, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(8): 2621-2635.