

流域水文模型中面雨量的空间插值

朱求安, 张万昌

(南京大学国际地球系统科学研究所, 南京 210093)

摘要: 以汉江褒河流域上游的江口地区为例, 对流域水文模型中子流域面雨量的空间插值方法进行了比较, 并应用三水源新安江模型对江口流域的日流量过程进行了模拟, 模拟结果表明, 在利用一般的面雨量处理方法, 反距离加权法(IDW), 克里格插值法(Kriging)及引入面积权重的泰森多边形面雨量处理方法等4种方法中, 引入面积权重的泰森多边形面雨量处理方法取得了较其它三种方法更好的精度, 在面雨量的处理上这种方法具有一定的优势。

关键词: 面雨量; 插值; 水文模型

中图分类号: P333 文献标识码: A 文章编号: 1005-3409(2005)02-0011-04

The Interpolation of Sub-basin-averaged
Precipitation in Hydrological Models

ZHU Qiu-an, ZHANG Wan-chang

(International Institute for Earth System Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: In the studies of hydrological models analysis, precipitation whose spatial distribution information has great influence on the analysis results is one of the most important forcing data. Four interpolations including the traditional method, the inverse distance squared method, the Kriging method and the Thissen polygon method were discussed to calculate the sub-basin-averaged precipitation in hydrological models under the circumstances lacking observation stations and weak correlativity between meteorology (precipitation) and elevation. The sub-basin-averaged precipitation interpolation results of these four methods with the daily precipitation data from 1981 to 1985 over Jiangkou catchment of the Hanjiang basin were applied to the three-water-resource Xinganjiang model to simulate the daily discharge hydrographs of these five years. The analysis results show it has the best performance and the best applicability in sub-basin-averaged precipitation interpolation of the Thissen polygon method compared with the other three methods.

Key words: sub-basin-averaged precipitation; interpolation; hydrological model

在流域水文模型中, 降水量是模型最重要的输入数据之一。但由于气象站点布置的局限性, 如站点稀少, 空间分布不均匀等, 绝大多数空间位置上的数据是无法获得的, 需要通过空间插值的方法予以解决, 这对水文模型的模拟精度非常重要。雨量站观测的降雨量只代表站点处的降雨, 而形成河川径流的则是整个流域上的降雨量, 对此, 可用面雨量(即流域平均雨量)来反映。在半分布式水文模型中, 一般将所研究的流域划分为若干个子流域, 在各个子流域上进行产汇流计算, 而子流域的面雨作为模型重要驱动数据, 其计算上的适当处理是一个极为重要的环节。本文以汉江褒河流域上游的江口地区为研究区, 讨论了当气象要素(降水)与研究区地形要素的相关关系难以确定及站点数目较少的情况下, 如何对子流域面雨量进行插值计算问题。

1 研究区概况

本文的研究区江口流域, 位于汉江左岸支流褒河流域的上游, 由江口水文站控制, 其集水面积为2 341.6 km², 海拔高度变化在950~3 400 m, 年降水量变化在600~900 mm间, 且主要集中在6~9月份。

研究区江口地区有雨量站10个, 依据流域内水文站的分布, 按自然子流域将整个流域划分为5个单元流域, 各单元流域的面积, 所包括的测站, 见表1。

2 插值方法讨论

空间插值是根据获得的一定数量的反映了地理要素空间分布的全部或部分特征的空间样本, 对地理要素的未知空

① 收稿日期: 2004-05-26
基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(2001CB309404); 海外青年学者合作研究基金(40128001); 教育部科学技术重点项目(2001)
作者简介: 朱求安(1979-), 男, 硕士研究生, 主要从事遥感与地理信息系统及其在水文水资源学中的应用等方面的研究。

间特征进行预测,即根据已知的空间数据估计未知空间的数据值^[1,8]。常用于气象要素插值的方法有样条插值法,梯度距离平方反比法,PRISM 插值法,距离权重法,克立格(Kriging)插值法等。样条插值法是用多项式拟合的方法来产生平滑的插值曲线,多用于气象要素的时间序列插值^[2];梯度平方反比法(Gradient plus inverse distance squared,GIDS)是由Nalder 等 1998 年提出的,它在距离权重的基础上考虑了气象要素随海拔和经纬向的梯度变化^[4,2];PRISM(Parameter-elevation Regressions on Independent Slopes Model)插值方法由Christophor Daly 于1994 年提出,这种方法结合气象学和统计学的分析方法,以数字高程模型为基础,综合考虑高程、坡度、坡向、距离、垂直分层,距离海岸线的远近和有效地形等权重因子对气象要素的影响,对研究区利用开窗技术进行空间插值^[5,13]。距离权重法简便,易于应用;克立格法以其能提供最佳线性无偏估计而被广泛应用。

表 1 江口流域子流域概况

子流域序号	1	2	3	4	5
面积/km ²	237.2	917.8	635.1	613.8	27.7
所包含的测站	两河口	岩湾、白云、平坎、王家楞、靖口关	太白河、桑元	江口	

其中,GIDS 方法和PRISM 方法都突出体现了气象要素与高程等地形要素之间的关系。GIDS 插值方法中涉及到待估点与观测点的海拔高程值,参数中包括站点气象要素值与海拔高程的回归系数一项,而且因为在小区域的研究中经纬向的影响小,往往可忽略不计,因此它在小区域的研究中不太适合^[13]。在PRISM 方法中气象要素随高程变化的梯度是其最重要的参数,高程的权重由待估点与观测点之间的高程差体现出来,以及包括各类地形要素(坡度、坡向等)的权重因子。如果所研究区的气象要素与高程之间的相关性不高的话,GIDS 和PRISM 方法就难以很好地运用。主要表现在:①观测站点的布设并未充分考虑气象要素与高程之间的关系,各站点的分布不能较好地体现出气象要素在所研究区的高程梯度变化性状,各测站对气象要素的观测值与站点高程值之间归纳不出较好的相关性;②在所研究的区域中,由于地形地貌的复杂性,某种气象要素与高程梯度性状之间的关系同样难于表现出来,或尽管测站按高程合理分布,但通过对测站观测值与测站高程的分析,难于找出气象要素与高程的相关关系或这种相关关系很微弱。

在本文所研究的江口地区,降水与高程之间的相关性性状很弱。江口流域各测站 1981~1985 年月平均降水总量及年降水总量与测站高程间的相关系数见表 2 及表 3:

表 2 测站 1981~1985 年月平均降水与测站高程相关系数表

月份	1	2	3	4	5	6
相关系数	0.664	0.691	0.629	0.699	0.312	0.282
月份	7	8	9	10	11	12
相关系数	0.181	0.027	0.029	0.782	0.368	0.717

表 3 测站 1981~1985 年降水总量与测站高程相关系数表

年份	1981	1982	1983	1984	1985
相关系数	0.343	0.439	0.111	0.343	0.028

从表 1 表 2 中可以看出在降水丰富的 5~9 月份的月平均降水总量与高程之间的相关系数以及测站年降水总量与高程之间的相关系数都很小,说明该地区降水与高程之间的相关性微弱。本文选取了一般对子流域面雨量的处理方法,

反距离加权法,克立格方法以及引入面积权重的泰森多边形法等 4 种插值方法进行了讨论:

(1)一般面雨量的处理方法。对各子流域面雨量数据的处理根据各雨量站和各子流域的空间位置,将雨量分配到各子流域上。若某子流域内只有一个雨量站则以该雨量站的实测降水作为本子流域的面雨量,若某子流域内有多个雨量站,则以这些雨量站实测雨量的算术平均值作为本子流域的面雨量,若某子流域内没有雨量站,则以其相邻子流域内雨量站之实测雨量加权平均至本子流域以作为其面雨量。

如表 1 中子流域 4 的面雨量即取太白河和桑元站观测值的算术平均值。这种方法只是作一个简单的算术平均计算,处理上显得过于简单和粗糙。

(2)反距离平方加权法(IDSW)。反距离加权法是以插值点与样本点之间的距离为权重的插值方法,插值点越近的样本点赋予的权重越大,其权重贡献与距离成反比。可用下式表示:】

$$Z=\frac{\sum_{i=1}^n\frac{1}{(D_i)^p}Z_i}{\sum_{i=1}^n\frac{1}{(D_i)^p}}$$

(1)

式中:Z——待估栅格点气象要素值;Z_i(i=1...n)——观测站点的气象要素实测值;n——参与计算的气象站点数;D_i——待测点与第 i 个站点间的距离;p——距离的幂。当取 p=2 时,即称作反距离平方加权法。

(3)普通克立格法(Ordinary Kriging)。克立格法由南非地质学家克立格(D.G. Krige)于 1951 年提出,1962 年法国学者马特隆(G. Matheron)引入区域化变量概念,进一步推广和完善了克立格法^{[6][7]}。本文采用普通克立格法,其一般公式为:

$$Z(x_0)=\sum_{i=1}^n\lambda_iZ(x_i)$$

(2)

式中:Z(x_i)(i=1...n)——n 个气象站点的观测值;Z(x₀)——待估点值;λ_i——权重,权重由克立格方程组:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n\lambda_iC(x_i,x_j)-\mu=C(x_i,x_0) \\ \sum_{i=1}^n\lambda_i=1 \end{cases}$$

(3)

式中:C(x_i,x_j)——测站样本点之间的协方差;C(x_i,x₀)——测站样本点与插值点之间的协方差;μ——拉格朗日乘子。气象要素的空间结构特性由半变异函数描述,其表达式为:

$$\gamma(h)=\frac{1}{2N(h)}\sum_{i=1}^{N(h)}(Z(x_i)-Z(x_i+h))^2$$

(4)

式中:N(h)——被距离区段 h 分割的试验数据对数目,根据试验变异函数的特性,选取适当的理论变异函数模型。

在对各类气象要素(如降水)进行克立格插值的研究中,很多采用球状函数模型^{2,14]},在本文的讨论中,由于站点数目的限制,根据试验半变异函数得到的试验变异函数图,难以体现出球状模型函数的规律和性状,从而确定出合理的球状模型的基台值和变程值等参数,所以本文直接采用线性理论模型。

(4)引入面积权重的泰森(Thissen)多边形法。泰森多边形法是荷兰气象学家 A. H. Thiessen 提出的一种根据离散分布的气象站的降水来计算平均降水的方法^[8],用泰森多边形内所包含的一个唯一气象站的降水来表示这个多边形区域内的降水。在泰森多边形的基础上,引入面积权重因子,将由

泰森多边形划分所得的降水分配到各子流域上, 具体处理方法如下:

整个江口地区有降水测站 10 个, 划分为 5 个子流域, 以各测站为基础作泰森多边形, 将各个子流域分割为不同的区域, 如图 1 所示, 多边形内的降水值取其对应站点实测值。

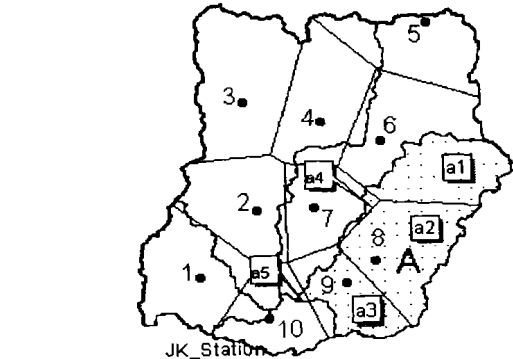


图1 江口流域子流域的泰森多边形划分及测站分布
以子流域 A 为例(图中阴影部分): 测站 6, 7, 8, 9, 10 所在的泰森多边形将子流域 A 划分为 5 个部分: a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 。子流域平均面雨量的计算公式为:

$$P = \sum_{i=1}^n W_i P_i \tag{5}$$

式中: n ——参与划分此子流域的泰森多边形数目(即相应的站点数), P_i ——对应各泰森多边形的降水值, 为面积权重, 即:

$$W_i = \frac{A_i}{A} \tag{6}$$

式中: A ——子流域面积, A_i ——子流域被泰森多边形分割开的各个部分的面积(对于子流域 A 即: a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 的面积)。计算出各部分面积权重后便可求出各子流域的面雨量。

在反距离平方加权和克里格方法中, 本文将研究区划分为 $60\text{ m} \times 60\text{ m}$ 的栅格阵, 利用这两种方法分别计算出每个栅格的降水量, 将处于同一子流域的栅格的降水的平均值作为本子流域的面雨量值。

3 应用与分析

本文选取 1981 ~ 1985 年江口流域各测站的日降水资料, 运用上述不同方法对江口地区各子流域的面雨量进行了计算, 在此基础上应用三水源新安江模型对江口流域的日流量过程进行了模拟。其中 1981 ~ 1983 年为模型参数率定期, 1984 ~ 1985 年为模型验证期。

(1) 误差分析与模型效率检验准则。Nash 与 Sutcliffe 在 1970 年提出了模型效率系数(NSC)(即确定性系数)来评价模型模拟的精度^[9], 它直观地体现了实测与模拟流量过程的拟合程度的好坏, 其表达式为:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2} \tag{7}$$

同时实测流量与模拟流量之间的相关系数(r)也是一种常用的衡量指标:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})(Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2 \sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim})^2}} \tag{8}$$

其中以上各式中: $Q_{obs,i}$ ——实测流量过程, $Q_{sim,i}$ ——模拟流

量过程, \bar{Q}_{sim} ——实测流量过程的均值, n ——模拟的时段数。

(2) 误差结果。模型率定期:

表4 模型参数率定期不同插值方法误差分析表

年份	插值方法	NSC 系数	相关系数 / %	径流总量相对误差
1981	一般算术平均法	0.900	0.950	- 0.134
	克里格方法	0.899	0.950	- 0.135
	反距离平方加权法	0.900	0.951	- 0.144
	加权泰森多边形法	0.905	0.952	- 0.124
1982	一般算术平均法	0.803	0.912	- 0.211
	克里格方法	0.815	0.916	- 0.200
	反距离平方加权法	0.821	0.919	- 0.184
	加权泰森多边形法	0.822	0.921	- 0.181
1983	一般算术平均法	0.840	0.922	- 0.171
	克里格方法	0.849	0.927	- 0.151
	反距离平方加权法	0.849	0.926	- 0.149
	加权泰森多边形法	0.853	0.929	- 0.134

模型验证期:

表5 模型验证期不同插值方法误差分析表

年份	插值方法	NSC 系数	相关系数	径流总量相对误差
1984	一般算术平均法	0.754	0.890	- 0.088
	克里格方法	0.763	0.901	- 0.112
	反距离平方加权法	0.767	0.897	- 0.089
	加权泰森多边形法	0.778	0.905	- 0.076
1985	一般算术平均法	0.786	0.889	- 0.019
	克里格方法	0.797	0.897	- 0.064
	反距离平方加权法	0.803	0.901	- 0.099
	加权泰森多边形法	0.805	0.898	- 0.050

(3) 结果分析。从上述误差结果分析表中可以看出, 引入面积权重的泰森多边形方法在江口流域得到了较好的应用, 其 NSC 系数相比其它方法而言, 整体上取得了更好的结果。在模型验证期, 对于一般算术平均法, 克里格法, 反距离平方加权法, 加权泰森多边形法四种方法, 模型模拟日流量过程的 NSC 系数, 1984 年分别为 0.754, 0.763, 0.767, 0.778, 1985 年分别为 0.786, 0.797, 0.803, 0.805, 其中加权泰森多边形法取得了最好的结果, 尤其相对于一般算术平均法, 其 NSC 系数提高了近 3 个百分点。泰森多边形方法一开始是作为一种计算区域性降水提出来的, 在加入权重因子的考虑后, 相比更适合一定面积区域上平均雨量的处理。

反距离平方加权法效果次之, 但其应用方式简单, 而一般的算术平均处理方法, 其 NSC 系数整体上最低, 说明其效果最差。

对于克里格方法, 它本身在气象要素的插值上有着广泛的应用, 往往也能取得较好的结果。但这种方法要求有足够多的观测站点提供实测数据, 以便有足够多的数据点更好地对试验变异函数图进行分析, 从而采用最为合理的理论变异函数。不足的数据点会导致变异函数的不稳定, 从而得出不恰当的理论模型^[4]。Bilouik(1983) 建议, 如要获得一个稳定的变异函数, 至少要有 50 个观测数据点作支持^[11]; Webster 和 Oliver(1992) 提出对空间分布各向同性的变量最好有 150 ~ 200 个观测数据点, 对于空间分布各向异性的变量则最好有更多的观测数据点支持^[12]。而在本文的研究区只有 10 个观测点值, 得到的变异函数图极不稳定, 难以确定采用何种理论变异函数及相应的参数(本文直接选用了最简单的线性模型), 因此克里格方法在气象要素插值上的优势当站点数

很少时便难以发挥出来。

4 结 论

流域水文模型中降水量的处理对模型效率有着重要影响。本文采用4种方法讨论了半分布式水文模型中子流域面雨量的插值计算问题,主要针对气象要素(降水)与研究区地形要素的相关关系难以确定及站点数目较少的情况,对用不同方法插值所得的子流域面雨量数据,利用三水源新安江模型进行了日流量过程的模拟,其中引入面积权重的泰森多边形空间插值方法取得了较其它三种方法(反距离平方加权法,克里格法及一般面雨量处理方法)更好的结果,说明引入面积权重的泰森多边形空间插值方法在面雨量的处理上具有一定的优势。

对于众多的空间插值方法而言,没有绝对最优的方法,只有在特定条件下的最优方法^[1]。要得到理想的空间插值效果,必须针对不同研究区的实际情况,对实测数据样本点进行充分分析,反复试验比较,以选择最佳的方法。

参考文献:

[1] 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.

[2] 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, 57(1): 47– 56.

[3] Ferenc S6RKQZY. GIS functions– interpolation[J]. Periodica Polytechnica SER. CIV. ENG. , 1999, 43(1): 63– 86.

[4] Ian A Nalder, Ross W Wein. Spatial interpolation of climatic Normals: test of a new method in the Canadian boreal forest [J]. Agric. For. Meteorol. , 1998, 92: 211– 255.

[5] Christopher Daly, Ronald P Gibson, et al. A Statistical– Topographic Model for mapping climatological precipitation over mountainous Terrain[J]. Journal of Applied Meteorology, 1994, 133(1): 35– 42.

[6] 黄维彬. 近代平差理论及其应用[M]. 北京: 解放军出版社, 1992.

[7] 侯景儒,尹镇南,等. 实用地质统计学[M]. 北京: 地质出版社, 1998.

[8] 陆守一,等. 地理信息系统实用教程[M]. 北京: 中国林业出版社, 2000.

[9] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models[J]. J. Hydrol, 1970, 10: 282– 290.

[10] U Haberlandt, G W Kite. Estimation of daily sace– time precipitation series for macroscale hydrological modeling[J]. Hydrol. Process, 1998, 12: 1419– 1432.

[11] Bilonik R A. Risk qualified maps of hydrogen ion concentration for the New York state area for 1966– 1978[J]. Atmos. Environ. , 1983, 17: 2513– 2524.

[12] Webster R, Oliver M A. Sample adequately to estimate variograms of soil properties[J]. J. Soil Sci. , 1992, 43: 177– 192.

[13] 赵登忠,张万昌,刘三超. 基于DEM 的地理要素PRISM 空间内插研究[J]. 地理科学, 2004, 24(2): 205– 211.

[14] 李丽娟,王娟,李海滨. 无定河流域降雨量空间变异性研究[J]. 地理研究, 2002, 21(4): 434– 440.

[15] 赵人俊. 流域水文模拟[M]. 北京: 水利电力出版社, 1984.

(上接第3页)

4.6 系统维护与管理

为保证分布式网络信息系统正常运行,提供了专业系统以外的系统维护功能。包括“元数据管理”、“标准代码维护”、“系统维护”等模块。

数据来源、地图投影、坐标系、比例尺、采集时间、数据规范及其版本等通过“元数据管理”来实现。

“标准代码维护”对系统采用的各种行业代码和标准分类管理,保证数据的规范性和信息共享。

“系统维护模块”提供了用户权限、日志管理、分布式网络维护、安全维护等功能。

技术关键:本系统为863重大3S应用示范项目,系统采用数据仓库技术、时空数据库技术、海量数据管理技术,支持网络分级审核上报,是RS、GIS、面向对象的数据库、多媒体技术的有机集成。底层技术采用Region Manager水土保持专业GIS软件,该软件在2002和2003年科技部测评中连续获国产优秀GIS产品。

5 新技术应用的保障体系

新技术应用改变了传统的技术路线、业务流程、管理方法和社会服务手段,需要有配套的保障体系做后盾。

5.1 政策法律保障

为使新技术在水土保持中得到快速应用,行政部门应根

据技术需要尽快出台相应的规章制度,做到有法可依有章可循。通过行政干预确保思想观念更新、业务流程重组、资金渠道畅通、技术不断创新、方法逐步完善、应用全面普及、效益显著提高、事业跨越发展。

5.2 技术规范保障

为了保证新技术应用的有序化,需要制定一系列具有可操作性、实用性、先进性、可行性的技术规范,以保证指标统一、方法一致、信息共享、效益明显。规范应包括技术指标规范、信息采集规范、设备规范、方法规范、成果规范等。

5.3 人员保障

新技术应用需要通过培训、人才引进等途径使知识得到更新,技能不断提高,观念得到转变。新技术的应用需要不同层次的人才,包括远见卓识的领导,综合型高级技术人员,专门技术人员和普通应用人员。

5.4 技术消化

高新技术从诞生到普及需要一个过程,为加快新技术应用速度,需要技术消化。技术消化是综合型水土保持技术人员的任务,通过应用开发、技术集成、组装配套等途径把先进的、尖端的、复杂的技术从水土保持应用层面转化为通俗的、简单的、易操作的技术,从而降低新技术应用的成本,提升技术价值,提高新技术应用效益。