

珠江三角洲网河区水位空间插值的 kriging 方法^{*}

张 蕾¹, 陈晓宏²

(1. 广东省水文局, 广东 广州 510150;

2. 中山大学水资源与环境系, 广东 广州 510275)

摘 要: 分析了珠江三角洲网河区水位变化特征。基于区域化变量理论, 提出珠江三角洲网河区水位空间插值的 kriging 方法, 给出描述该网河区水位空间分布结构的半变异函数, 分析了网河区水位的空间分布, 以及水位的空间结构性—方向性和相关距离, 并给出了丰水期的一个应用实例, 为该地区防洪决策提供科学依据。

关键词: 水位; 空间插值; kriging; 区域化变量; 珠江三角洲网河

中图分类号: P641.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2004) 05-0112-03

珠江三角洲是世界上水系发育最复杂的三角洲之一, 研究表明^[1], 珠江三角洲网河区水文特征在 1992 年前后发生了变异, 主要特征是三角洲上部同级流量下河道水位下降, 而河口受泄流不畅及海平面上升作用形成潮流顶拖并挤压上部来水, 三角洲腹部水位上升, 水位在空间上差异性很大。

一般河流流域的许多水文地理特征如连续水体水位是连续变化的, 但其观测值或数学模拟结果大多是一维或多维离散的^[2]。空间插值方法是模拟空间离散分布特征的基本工具之一^[3], 实际上, 地质找矿及土壤生态研究中, 基于区域化变量理论的克里格空间插值方法已经得到广泛应用。本文尝试用区域化变量理论和克里格方法对珠江三角洲网河区的水位特征进行空间变化分析, 以此来分析水位在指定区域内的空间分布特点, 并对水位在网河区进行空间点估计模拟。

1 区域化变量理论与克里格估计法

设有一个以 x_0 为中心的待估域 $V(x_0)$ 和一个包含 n 个实验数据 (样本) 的信息域 V , 研究水位在待估点上的值为 Z_0 , 其估计值 Z_0^* 可用信息域上 n 个有效数据进行计算:

$$Z_0^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (1)$$

式中, λ_i 为权因子, 可以证明只要 $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$ 就满足无偏性条件。

克里格 (Kriging) 估计就是在无偏性约束下, 以

估计方差 $\text{Var}[Z_0 - Z_0^*]$ 最小为目标函数求 λ_i 的问题:

$$\text{目标函数} \quad \min \sigma_k^2 = E[Z_0 - Z_0^*]^2 \quad (2)$$

$$\text{约束条件} \quad \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (3)$$

利用拉格朗日乘数法, 得到如下的克里格方程组:

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(x_i, x_j) + u = \gamma(x_i, v), \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (5)$$

$$\sigma_k^2 = \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(x_i, v) - \gamma(v, v) + u \quad (6)$$

式中, u 为拉格朗日乘子, $\gamma(x_i, x_j)$ 为测点 x_i 与 x_j 之间的半变异函数, $\gamma(x_i, v)$ 为测点 x_i 与待估域上各点 v 之间半变异函数的平均值, $\gamma(v, v)$ 为整个待估域上每两点之间半变异函数的平均值。在式 (4)、(5) 中有 $n+1$ 个方程和 $n+1$ 个未知数 (n 个权重因子 λ_i 和拉格朗日乘子 u), 求解式 (4)、(5), 可得到权重系数 λ_i 及乘子 u , 将 λ_i 依次代入式 (1), 即可求出克里格估计值, 用式 (6) 计算克里格方差。将待估域缩小为一点 x_0 , 则为点估计。

半变异函数的一个估计是:

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (7)$$

式中, $N(h)$ 是被向量 h 相隔的实验数据对的个数。

经计算得出诸对 $h, \gamma^*(h)$ 值, 即可作出 $h - \gamma^*(h)$ 实验半变异图。

* 收稿日期: 2004-02-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (49971019); 国家杰出青年基金资助项目 (40225014)

作者简介: 张蕾 (1977 年生), 女, 硕士, 通讯联系人, 陈晓宏; E-mail: eescxh@zsu.edu.cn

在实验半变异函数的基础上，需对它拟合一个最优的理论半变异函数模型。本文经分析比较选用球状模型，用加权多项式回归法拟合球状模型半变异函数图。球状模型一般公式为：

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & h = 0 \\ C_0 + C \left(\frac{3h}{2a} - \frac{1}{2} \frac{h^3}{a^3} \right) & 0 < h \leq a \\ C_0 + C & h > a \end{cases}$$

(8)

其中， C_0 为块金常数，($C_0 + C$)为基台值， C 称为拱高， a 为变程。

实际区域化变量往往包含有各种尺度上的多层次的复杂变化性。反映在半变异函数上，就是其结构往往不是单纯的一种结构，而是多层次的结构叠加，这就是套合结构。套合结构可用反映各种不同尺度变化性的多个半变异函数之和来表示，即：

$$\gamma(r) = \gamma_0(r) + \gamma_1(r) + \gamma_2(r) + \dots$$

其中，每个成分 $\gamma_i(r)$ 可以是不同模型的半变异函数。

2 珠江三角洲网河区水位空间插值

本文验证 $\gamma(h)$ 模型及参数的方法是：对于每一已知点的水位，用克里格法对这些点利用周围的若干已知点进行估计，此时假定该点为未知，然后计算每一点估计值与已知值之间的误差，以估计误差最小为目标函数，优选出模型的参数。

本文对珠江三角洲网河区 66 个水文站的 15 个站进行克里格空间插值检验，其综合结果如表 1。结果表明，在估计点的周围如果已知点较多，用克里格法估计的效果较好，其相对误差均在 1% 以下。可见根据区域化变量原理，用克里格法估算点水位不仅是可行的，而且方法严谨，具有较高的精度，并能给出估计误差。珠江三角洲网河区典型时刻的水位空间插值等值线如图 1 所示。

3 克里格空间插值分析

克里格空间插值考虑了插值点与实际点的距离构形；考虑了实际点之间的距离构形；由 $r(h)$ 反映变量的空间结构，实际点选择时，一并考虑了空间结构的方向性和有效影响半径。水位结构的空

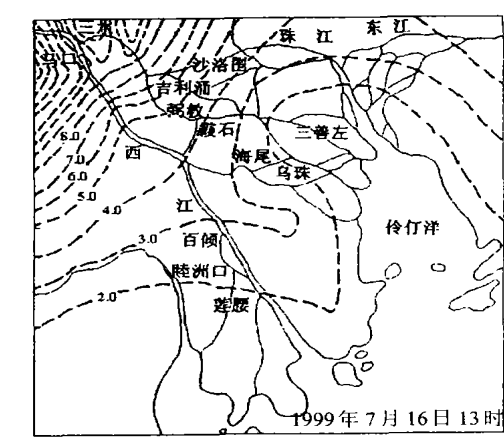


图 1 珠江三角洲水位等值线图
Fig 1 The water level contour of the Pearl River Delta

表 1 半变异函数理论模型曲线检验综合成果
Tab 1 The integration results of curve examination in the semi-variation function theory model

编号	站名	相对坐标		样本值	估计值	估计误差	
		x	y	m	m	误差值	误差/%
21	吉利涌	11	15	3.29	3.298	-0.008	-0.243
25	海尾	23	26	2.52	2.535	-0.015	-0.595
30	百倾	18	35	2.28	2.265	0.015	0.658
32	睦洲口	19	38	2.02	2.01	0.010	0.495
33	蓬腰	20	39	2.09	2.096	-0.006	-0.287
35	劳劳溪	19	41	1.71	1.719	-0.009	-0.526
40	沙洛围	22	12	1.34	1.35	-0.010	-0.746
42	弼教	19	16	2.42	2.428	-0.008	-0.331
43	碧江	22	16	2.04	2.045	-0.005	-0.245
44	霞石	20	19	2.26	2.25	0.010	0.442
45	三善左	24	19	2.09	2.082	0.008	0.383
54	大龙窖	29	26	1.90	1.911	-0.011	-0.579
55	上横	30	25	1.83	1.823	0.007	0.383
56	下横沥	30	26	1.76	1.752	0.008	0.455
57	乌珠	28	26	1.97	1.982	-0.012	-0.609

方向、南北方向上空间相关关系比较大；而在西南 45°方向、东西方向上空间相关关系小；水位在空间上表现出不同程度的带状异向性结构，东南 45°方向、南北方向的水位变异性小于东西方向、西南 45°方向水位的变异性。这与珠江三角洲网河发育的方向是一致的：汛期三角洲入口思贤与出海口潮位差值约 9 m，但思贤沿磨刀门水道至出海口（南北方向）水道长 139 km，而思贤沿北江干流—顺德水道—洪奇出海（东南 45°方向）的流路长 114 km，因此，东南 45°方向的水力坡度较南北方向水力坡度大，水系在东南 45°方向最为发育。而且近 10 多年来，随着人类活动加剧（如河道采砂

导致三角洲腹地河床下切), 上游径流沿东南 45° 方向的分流还在进一步增加, 导致腹地洪水位抬升, 洪水威胁加大, 这种水位的变化直接与东南 45° 方向上的分流增加及水位变化有关。相反, 东西方向及西南 45° 方向由于水系受堤围阻隔较多, 水位关联性相对较小, 而水位空间变化显著。

4 模型参数及克里格权重系数的分析

参数 C_0 为 0.045, 反映了在最小取样距离之内由水位变异性与测量误差所引起的系统误差, 但它的调整对成果精度影响不大; 参数 C 反映了水位在网河区上的分布均匀特性, C 越大, $\gamma(h)$ 坡度越大, 水位分布越不均匀, 一般接近于观测值的方差与 C_0 的差值, 其大小可以反映珠江三角洲网区中水位在变程范围内变异的程度; 参数 a 主要反映水文站点之间的空间相关性, 珠江三角洲水位空间变化的相关半径为 13.02 km, 超出这一距离范围, 则水位空间变化的相关性很小。据克里格方程, 计算得到的权重可以是绝对值小于或等于 1 的任何值, 同时可正可负, 它的大小表示远近不同水文站点对估计点有着不同的贡献。在一个不大的扇形区域内, 若分布有较多的测点, 则靠近估计点的权重值为较大正值, 远一点第二层为较大负值, 再远一点第三层又为较大正值等等, 初步分析认为, 这是克里格法内层对外层的“屏蔽”效应产生的。因而采用克里格法进行空间点水位插值时, 在某一夹角内选择适量的代表水文站布设即可, 站点太多并不会得到

更好的结果。

5 结 论

基于区域化变量理论和克里格方法对珠江三角洲网河区水位特征进行空间变化分析, 并对水位在网河区进行空间插值, 主要结论有: 珠江三角洲网河区水位为带状各向异性, 在东南 45° 方向、南北方向上空间相关关系比较大; 而在西南 45° 方向、东西方向上空间相关关系小; 东南 45° 方向、南北方向的水位变异性小于东西方向、西南 45° 方向水位的变异性。丰水期珠江三角洲水位变化的相关半径为 13.02 km, 超出这一距离范围, 则水位变化的相关性很小。珠江三角洲网河区 15 个站水位的克里格空间插值结果十分理想, 表明该网河区水位空间分析的克里格方法的可行性。

参考文献:

[1] 徐海亮. 河口环境变异与水文模拟计算初探——以珠江河口网河区为例[J]. 热带地理, 1998, 18(2): 162—167.
[2] CHEN X H(陈晓宏), BRIMICOMBE A J. Enhancement of three-dimensional reservoir quality modelling by GIS[J]. Geographical and Environmental Modelling, 1998, 2(2): 125—139.
[3] MITASOVA H, MITAS L, BROWN W M, et al. Modelling spatially and temporally distributed phenomena: new methods and tools for GRASS GIS[J]. Int J GIS, 1995(4): 433—446.

Spatial Interpolation of Water Level with Kriging Approach
in River Net of the Pearl River Delta

ZHANG Lei, CHEN Xiao hong

- (1. Hydrology Bureau of Guangdong Province, Guangzhou 510150, China;
2. Department of Water Resources and Environment, Sun Yat sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Based on the theory of regionalized variable and Kriging interpolation approach, spatial variations of water level in river net of the Pearl River Delta are discussed. The semi variation function serves to reveal the spatial structure of water level. The obtained results can be used for flood control.

Key words: water level; spatial interpolation; Kriging; regionalized variable; river net of the Pearl River Delta