

非连续河道地形插值方法的比选

华祖林^{1,2,3}, 王海燕^{1,2}, 汪 靓^{1,2}, 王玉琳^{1,2}

(1. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098; 3. 河海大学水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心, 江苏 南京 210098)

摘要:针对在许多河道水动力及水环境模拟计算过程中仅有一定间距下的断面地形数据的实际情形,以黄浦江为例,分别采用三角网格法、反距离权重法和克里金法3种方法对强弯段、干支流交汇处及复式分汊河道的水下地形进行插值,以对比分析3种方法的适应性。结果表明,对于强弯段、干支流交汇处及复式分汊河道等地形起伏变化较大区域,三角网格法会造成插值结果不稳定,误差及波动大,未能反映部分地形起伏实际情况,反距离权重法可能出现“牛眼”现象,克里金法表现出较好的适应性;在减少测量断面时,克里金法的插值结果误差最小,强健性较好;将3种插值方法获得的黄浦江全河段插值地形用于整体潮位计算,克里金法计算精度最高。

关键词:非连续河道;地形插值;三角网格法;反距离权重法;克里金法;黄浦江

中图分类号:P217 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2016)03-0016-04

Comparison of different methods for interpolation of topography of discrete rivers//HUA Zulin^{1,2,3}, WANG Haiyan^{1,2}, WANG Liang^{1,2}, WANG Yulin^{1,2} (1. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. National Engineering Research Center of Water Resources Efficient Utilization and Engineering Safety, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: According to the actual situation in which the cross-sectional topographic data are discontinuous for hydrodynamic and aquatic environmental simulations, topographic interpolations for strongly curved reaches, river confluence, and braided rivers were conducted with the triangular mesh method, inverse distance weighting method, and Kriging method using the Huangpu River as an example. The reliability of these three interpolation methods was analyzed and compared. The results show that, for strongly curved reaches, river confluence, and braided rivers where topography varies significantly, the interpolation results of the triangular mesh method are unstable, with high errors and significant fluctuations, indicating that this method failed to reflect the actual topographic situation. The “buphthalmos” phenomenon may appear when the inverse distance weighting method is used. Compared with other methods, the Kriging method shows higher reliability. When fewer cross-sectional data are used, the results of the Kriging method show lower error and higher robustness than the other two methods. Based on the interpolation results of the topography of the Huangpu River with the above-mentioned three interpolation methods, a mathematical model was used to compare the tidal level processes, and the results show that the computational precision of the Kriging method is the highest.

Key words: discrete river; topographic interpolation; triangular mesh method; inverse distance weighting method; Kriging method; Huangpu River

在水动力及水环境数值模拟中,计算网格上地形值能否反映真实地形非常重要,会直接影响计算精度。对河道来讲,在许多实际情况下没有整个河道的连续地形数据,只有一定间距下的断面地形数据,数值模拟计算时需要通过插值方法由断面数据得到网格地形值,尤其河道转弯或河流交汇等起伏变化很大处的地形,因此插值方法是否适用极为重要。

插值方法有很多,在进行空间地形插值时,构造地形插值曲面的常用方法主要有三角插值和距离加权插值两类,目前使用最为广泛的是三角网格法、反距离权重法及克里金法,其中三角网格法为三角插值法,反距离权重法和克里金法为距离加权插值法。很多水动力计算软件如 Mike 使用的地形插值方法为三角网格法,三角网格法插值速度快,更适合于大面积且均匀化分布数据的网格化;Delft3D 使用的是三角网格法及反距离权重法,EFDC 使用的是反距

离权重法,反距离权重法可以通过权重调整空间插值等值线的结构。克里金法也是一种常用的空间插值方法,具有很好的空间相关性,其结果是一种无偏最优估计量,适于各种类型的离散数据。这3种方法在地形插值中得到了广泛的应用,如何磊等^[1]利用三角形网格法得到了珠海的三维地形图;陈中等^[2]利用改进的三角形网格法对某河道地形进行了地形插值;刘兆平等^[3]用克里金法、三角形网格法和反距离权重法分别绘制了河北省某市郊区垃圾填埋场的等值线断面图,得到了垃圾填埋厂的垃圾分布情况;牛文杰^[4]运用克里金法和改进的反距离权重法对某矿区煤层数据及某油田地震测线数据分别进行了插值,得到煤层分布及地层深度等值线图;Detweiler等^[5]利用反距离权重法和克里金法计算得到了三维地形;李晓军等^[6]借鉴地质统计学的Kriging方法给出了一种距离加权插值算法;张殿新等^[7]用改进的克里金法得到了珠海港的网格数字地形;包世泰等^[8]利用克里金法对广州市南沙区进港大道进行了地形高程插值;杜国明等^[9]用克里金法得到了珠江河道地形阴影图;曾怀恩等^[10]利用改进变异函数估计的方法对某次地形测量的数据进行了插值。

但是,有关不同方法的比较和适合性研究成果还较少,由于通过插值得到的网格地形数据对数值计算结果有重要影响,尤其是河道地形起伏较大的地方,可通过比较选择适应性更好的插值方法来提高数值模拟的精度。本文采用上海黄浦江干流地区的实测地形数据,选取强弯段、干支流交汇处及复式分汊河道3种类型的地形,分别用三角网格法、反距离权重法和克里金法进行插值和对比分析。

1 空间插值方法及数据来源

1.1 空间插值方法的选取

三角网格法、反距离权重法和克里金法是水动力模型中常用的插值方法,本文选用这3种方法进行对比分析。

三角网格法是通过空间坐标与水下地形高程的关系式求得未知点高程值的,即求解如下空间上*i*个点组成的方程式得到任意未知点高程:

$$z_i = ax_i + by_i + c_i \quad (1)$$

反距离权重法和克里金法均是通过权重估计待测点的值(计算公式见式(2)^[11]),但不同的是,反距离权重法的权重仅与距离有关,而克里金法则同时考虑了距离及空间相关性,通过变异函数^[12]来刻画区域化变量的空间结构性变化和描述其随机性变化。

$$z = \sum_{i=1}^n z_i w_i \quad (2)$$

式中:*z*为估计值;*z_i*为已知点高程值;*w_i*为权重;*n*为空间内已知坐标点的个数。

1.2 数据来源

采用的黄浦江地形数据为断面数据,干流断面间距约0.5 km,每个断面上有150~200个实测地形数据,支流断面间距约0.4 km,每个断面上约有50~100个实测地形数据。黄浦江潮位数据为河祝、金泽、东团及吴淞口共4个站点的实测数据,每5 min一个值,数据均由上海市水文总站提供。

2 不同河道形态的地形插值结果比较

对于水动力及水环境模型计算而言,对河道断面地形量测的间距是需要根据国家规范要求布设的,根据SL257—2000《水道观测规范》,黄浦江实测地形断面间距为0.4~0.5 km。本文采用黄浦江干流的实测地形数据,分别选取强弯段、干支流交汇处(吴淞口)及上游分汊河段3种不同类型地形(位置关系见图1),用三角网格法、反距离权重法和克里金法进行插值。

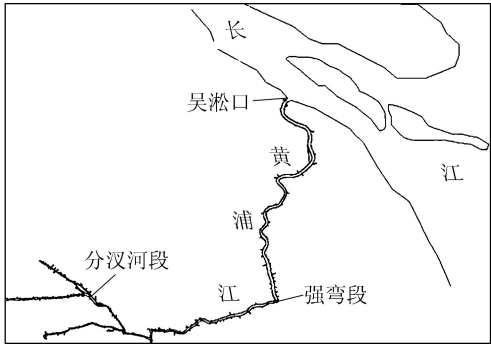


图1 研究河段位置示意图

2.1 强弯段

考虑到在转弯处河道受凹凸不同的水流作用,会产生不同于顺直河道的特殊地形,选取强弯段7个断面进行插值,3种方法等值线插值结果如图2所示。

从图2可以看出,三角网格法插值结果从某个平稳高程陡变为另一个高程,结果不够光滑,且忽略了地形的部分起伏变化。反距离权重法出现“牛眼”现象,即很多计算值把实测值包围在中间的情况,这表明反距离权重法的权重仅与距离有关,没有空间方向相关性,不能判断待测点的方位,对于河道等狭长型地形来说,极易将边界处与河道中心等权处理,尤其在转弯处无法判别有效待测点,使插值结果失真。克里金法则克服了“牛眼”这一缺点,其最大的特点就是可以通过改变变异函数的结构及参数从不同的角度反映空间变异性,解决空间连续变化的属性非常不规则时数据的插值问题,从而对空

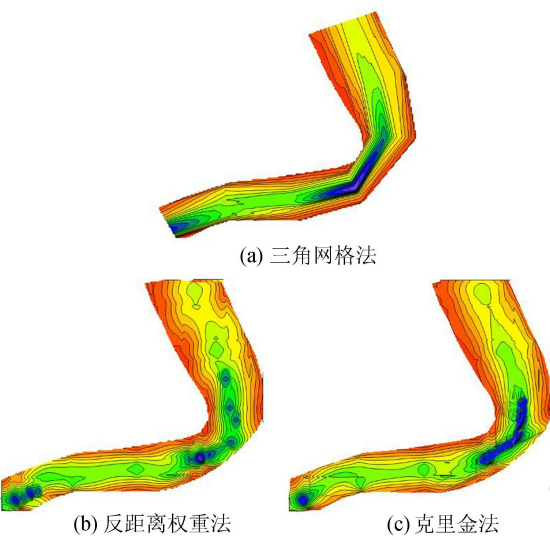


图2 强弯段等值线插值结果

间变量的连续性、相关性、影响范围、间断性等要素进行描述,因而具有很好的适应性,对于不同复杂程度的地形,插值结果都较好。

2.2 干支流交汇处

吴淞口位于黄浦江与长江汇流处,干支流在交汇处发生强烈交互,水流能量损失大,容易在不同时期表现出不同的地形形态。因此,选取吴淞口处3个断面数据,用相同方法对地形数据插值,3种方法插值得到的三维图如图3所示。

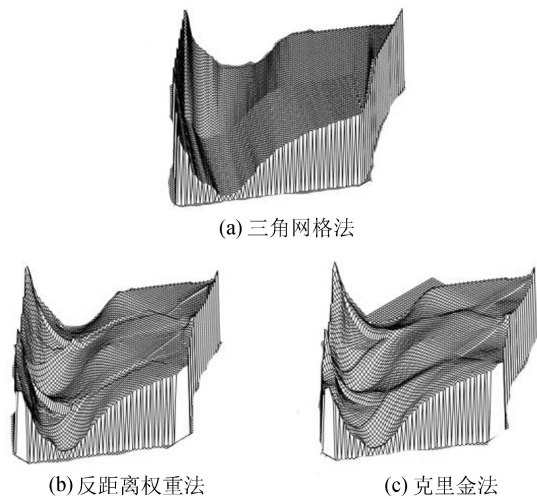


图3 干支流交汇处地形插值三维结果

从图3可以看出,反距离权重法和克里金法在河口位置的插值结果没有很大区别,在一定程度上反映出地形明显起伏情况;但三角网格法插值结果平坦化,忽略了地形起伏较剧烈的部分,未能很好地反映出吴淞口的地形变化,使地形插值结果产生部分失真。

2.3 复式分汊河道

对于复式分汊河道,选取黄浦江上游一段如图4所示的分汊河道进行对比分析,中间部分为凸起

的小岛,将该河道分割为两个支汊。图4所示断面为实测断面位置,是根据复式河道测量的规范要求布设的,断面间距平均0.4 km左右。采用3种方法对分汊河道进行插值得到的等值线如图5所示。

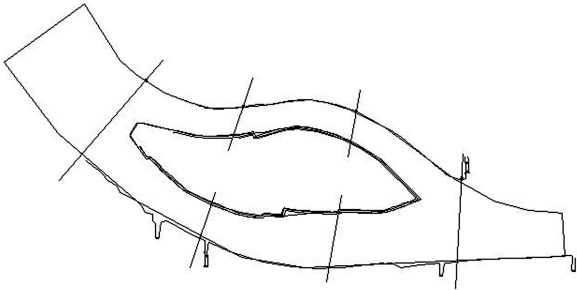


图4 黄浦江复式分汊河道示意图

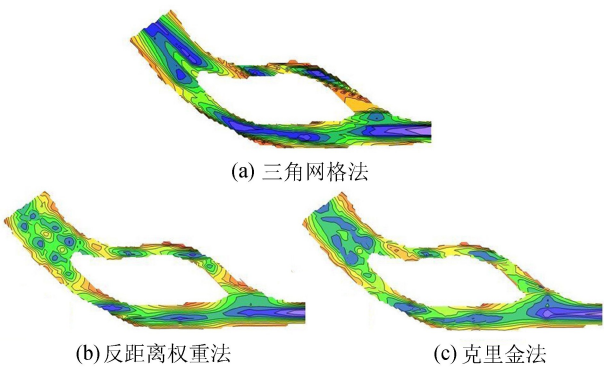


图5 分汊河道等值线插值结果

由图5可知,在断面满足规范要求的情况下,将小岛边界作为固定边界,相邻汊道的水下地形插值过程互不影响,3种方法均能实现对分汊河道的水下地形插值,但三角网格法仍忽略了部分地形实际起伏情形,反距离权重法仍然出现了“牛眼”现象,相对于三角网格法和反距离权重法,克里金法得到了较好的插值结果。可见,在断面合理布设条件下,3种方法均可以应用到复式河道中进行插值,且相较于其他两种方法而言,克里金法对复式河道仍然表现出较好的适应性及强健性。

3 断面减少情况下的插值结果比较

为了考量克里金法插值效果的高强健性,开展了减少断面数量测试检验,并对其精度进行了定量分析。

3.1 干支流交汇处

选取吴淞口处的两个间隔断面,在断面量减少的情况下,用同样方式进行插值,与原实测断面数据进行对比,并对其插值结果进行误差分析,结果见表1。

表1 干支流交汇处插值结果误差分析

方 法	最大误差/m	平均误差/m	方差/m ²
三角网格法	1.60	0.95	1.17
反距离权重法	0.60	0.16	0.09
克里金法	0.20	0.10	0.02

根据插值结果,3种插值方法得到的地形数据与实测值有一定差异,三角网格法的地形数据变化较剧烈,与实测值相差较大,反距离权重法和克里金法的插值结果变化梯度则较小。从误差分析结果来看,三角形网格法误差最大,反距离权重法次之,克里金法误差最小。实测值与计算值的方差结果表明,三角网格法方差最大,克里金法最小。

3.2 复式分汊河道

用相同方法对复式分汊河道进行插值及误差分析,结果见表2。

表2 复式分汊河道插值结果误差分析

方 法	最大误差/m	平均误差/m	方差/m ²
三角网格法	1.20	0.75	0.95
反距离权重法	0.40	0.20	0.11
克里金法	0.30	0.04	0.03

根据插值结果,克里金法在原断面处的插值结果与实测结果比较接近,表明在断面减少情况下,该方法仍能得到理想的插值结果,与不减少断面情况下插值效果最为接近。同时由表2可知,复式分汊河道的误差分析结果仍是三角形网格法误差最大,反距离权重法次之,克里金法误差最小,表明克里金法具有一定的稳定性。

克里金法通过设计变差函数来实现局部加权插值,克服了其他方法对起伏地形插值不稳定的问题,克里金法能够保持实测值与估计值的偏差期望为零,其结果是一种最优无偏估计量,在实际应用中保持插值误差小是其一个显著特点,因此在断面减少的情况下仍能保持较强的健壮性和较高的精度。

4 黄浦江潮位模拟结果比较

用3种方法对整个黄浦江干流地形进行插值,用得到的地形数据采用EFDC模型对黄浦江潮位进行模拟,计算时段为2014年7月1—5日,除地形外,在其他计算条件相同情况下,潮位模拟结果如图6所示。

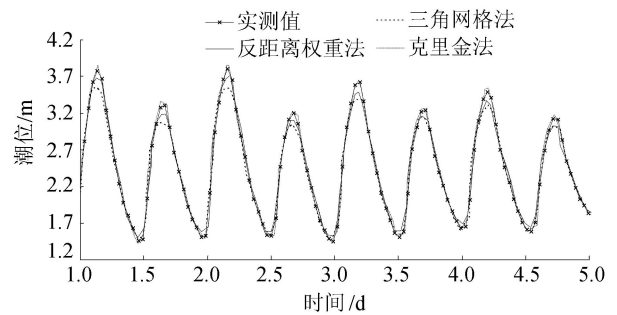


图6 潮位模拟结果对比

由图6可知,以2014年7月1日的首个最高潮位误差来看,实测潮位值为3.80m,三角网格法地形

插值结果得到的模拟潮位值为3.62m,误差18cm,反距离权重法地形插值结果得到的模拟潮位值为3.73m,误差7cm,克里金法插值得到的模拟潮位值为3.83m,误差3cm,后续计算时段高潮位误差与首个高潮位误差接近。在其他条件保持不变的情况下,克里金法插值地形数据得到的潮位模拟结果误差最小,反距离权重法次之,三角网格法误差最大。由此可知,不同地形插值方法对数值模拟的计算精度有显著影响,插值结果越接近真实地形,其模拟精度越高,克里金法对黄浦江地形插值效果最好,反距离权重法次之,三角形网格法最差。

5 结 论

a. 对河道强弯段、干支流交汇处及复式分汊河道区域,克里金法较好地避免了反距离权重法出现的“牛眼”现象,且比三角网格法能更好表现地形实际起伏变化。

b. 克里金法通过设计变差函数来实现局部加权插值,其结果是一种最优无偏估计量,在断面数量减少的条件下仍能表现出其较强的健壮性及较高的插值精度。

c. 其他计算条件相同的情况下,3种方法对黄浦江全段地形插值并进行潮位模拟计算的精度仍是克里金法最高。

参考文献:

[1] 何磊,袁德奎,陶建华.一种适用波浪潮流计算的地形插值算法[J].港工技术,2004(4):4-6. (HE Lei, YUAN Dekui, TAO Jianhua. An interpolation method for generating topography for computation of wave and tide [J]. Port Engineering Technology, 2004 (4): 4-6. (in Chinese))

[2] 陈中,夏云峰,闻云呈.一种适用于河道水流数值模拟的地形插值方法[C]//第十四届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集:下册.北京:海洋出版社,2009:1230-1233.

[3] 刘兆平,杨进,武炜.地球物理数据网格化方法的选取[J].物探与化探,2010,34(1):93-97. (LIU Zhaoping, YANG Jin, WU Wei. The choice of gridding methods for geophysical data [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2010, 34(1): 93-97. (in Chinese))

[4] 牛文杰.基于变异函数的距离加权反比法[J].东华大学学报(自然科学版),2011,37(3):362-367. (NIU Wenjie. Inverse distance weighting method based on variogram [J]. Journal of Donghua University (Natural Science), 2011, 37(3): 362-367. (in Chinese))

(下转第51页)

117. (CHEN Qiang, LIU Guoxiang, LI Yongshu, et al. Automated detection of permanent scatterers in radar interferometry; algorithm and testing results [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2006, 35 (2): 112-117. (in Chinese))
- [5] 黄其欢,张理想. 基于 GBInSAR 技术的微变形监测系统及其在大坝变形监测中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31 (3): 84-87. (HUANG Qihuan, ZHANG Lixiang. Ground based synthetic aperture radar Interferometry and its application to deformation monitoring[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31 (3): 84-87. (in Chinese))
- [6] STROZZI T, FARINA P, CORSINI A, et al. Survey and monitoring of landslide displacements by means of L-band satellite SAR interferometry[J]. Landslides, 2005, 2 (3): 193-201.
- [7] NOFERINI L, PIERACCINI M, MECATTI D, et al. Using GB-SAR technique to monitor slow moving landslide[J]. Engineering Geology, 2007, 95 (3/4): 88-98.
- [8] LUZI G, NOFERINI L, MECATTI D, et al. Using a ground-based SAR interferometer and a terrestrial laser scanner to monitor a snow-covered slope: results from an experimental data collection in Tyrol (Austria) [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47 (2): 382-393.
- [9] TARCHI D, CASAGLI N, FANTI R, et al. Landslide monitoring by using ground-based SAR interferometry: an example of application to the Tessina landslide in Italy [J]. Engineering Geology, 2003, 68 (1/2): 15-30.
- [10] LEVA D, NICO G, TARCHI D et al. Temporal analysis of a landslide by means of a ground-based SAR interferometer [J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2003, 41 (4): 745-752.
- [11] HERRERA G, FERNÁNDEZ-MERODO A, MULAS J, et al. A landslide forecasting model using ground based SAR data: the portalet case study [J]. Engineering Geology, 2009, 105 (3/4): 220-230.
- [12] LUZI G, PIERACCINI M, MECATTI D, et al. Monitoring of an alpine glacier by means of ground based SAR interferometry [J]. Geoscience and Remote Sensing Letters, 2007, 4 (3): 495-499.
- [13] ALBA M, BERNARDINI G, GIUSSANI A, et al. Measurement of dam deformations by terrestrial interferometric techniques [EB/OL]. (2008-06-23) http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/1_pdf/23.pdf.

(收稿日期: 2015 - 04 - 21 编辑: 郑孝宇)

(上接第 19 页)

- [5] DETWEILER Z R, FERRIS J B. Interpolation methods for high-fidelity three-dimensional terrain surfaces [J]. Journal of Terramechanics, 2010, 47 (4): 209-217.
- [6] 李晓军,王长虹,朱合华. Kriging 插值方法在地层模型生成中的应用[J]. 岩土力学, 2009 (1): 157-162. (LI Xiaojun, WANG Changhong, ZHU Hehua. Kriging interpolation and its application to generating stratum model [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009 (1): 157-162. (in Chinese))
- [7] 张殿新,袁德奎,陶建华. 波浪、潮流数值模拟中的网格数字地形的生成及可视化[J]. 港工技术, 2005 (4): 5-8. (ZHANG Dianxin, YUAN Dekui, TAO Jianhua. Digital terrain is produced and visualized in wave and tide [J]. Port Engineering Technology, 2005 (4): 5-8. (in Chinese))
- [8] 包世泰,廖衍旋,胡月明,等. 基于 Kriging 的地形高程插值[J]. 地理与地理信息科学, 2007 (3): 28-32. (BAO Shitai, LIAO Yanxuan, HU Yueming, et al. Terrain interpolation based on Kriging method [J]. Geography and Geo-Information Science, 2007 (3): 28-32. (in Chinese))
- [9] 杜国明,汪光松,吴超羽,等. 克里金在珠江河道地形空间数据内插中的应用[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2007, 46 (1): 119-122. (DU Guoming, WANG Guangsong, WU Chaoyu, et al. Application of Kriging interpolation to spatial data of Pearl River riverway [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2007, 46 (1): 119-122. (in Chinese))
- [10] 曾怀恩,黄声享. 基于 Kriging 方法的空间数据插值研究[J]. 测绘工程, 2007, 16 (5): 5-8. (ZENG Huaien, HUANG Shengxiang. Research on spatial data interpolation based on Kriging interpolation [J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2007, 16 (5): 5-8. (in Chinese))
- [11] 蔡迪花,郭锐,李崇伟. 基于 DEM 的气温插值方法研究 [J]. 干旱气象, 2009, 27 (1): 10-17. (CAI Dihua, GUO Ni, LI Chongwei. Interpolation of air temperature based on DEM over eastern region of Gansu [J]. Journal of Arid Meteorology, 2009, 27 (1): 10-17. (in Chinese))
- [12] 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. (LI Xin, CHENG Guodong, LU Ling. Comparison of spatial interpolation methods [J]. Advances in Earth Science, 2000, 15 (3): 260-265. (in Chinese))

(收稿日期: 2015 - 10 - 16 编辑: 熊水斌)