

文章编号:1007-2284(2015)06-0070-05

河道流量测量与计算方法研究

邓数学¹,叶爱中¹,童洪福²,徐静¹,毛玉娜¹,马凤¹

(1. 北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院全球变化协同创新中心,北京 100875;
2. 广东省水文局清远水文测报中心,广东 清远 511510)

摘要:获得河道流量常用的方法是实测流速乘以面积法和实测水位转换法。测流速精度高但成本高,而直接由水位估算流量经济但精度不够高。采用飞来峡水文站实测的流速与流量,对中泓一点法、水位流量法和水位—流速—流量拟合法3种方法进行了对比研究。发现在传统的水位流量关系中加入了一个点的流速后能够显著的提高流量的计算精度。基于现在流速仪技术的发展,可以在河道断面长期布置—单点流速仪,实时观测一点流速,所以采用水位—流速—流量法是未来获得高精度河道流量的可行方案。

关键词:流速;流量;水位;测量;计算

中图分类号:P332 **文献标识码:**A

The Study of Measurement and Calculation Method on River Discharge

DENG Xiao-xue¹, YE Ai-zhong¹, TONG Hong-fu², XU Jing¹, MAO Yu-na¹, MA Feng¹

(1. College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;
2. Qingyuan Hydrological Forecast Center Hydrology Bureau of Guangdong Province, Qingyuan 511510, Guangdong Province, China)

Abstract: There are two methods that we used to obtain the river flow, one is the flow velocity multiplied by the area, the other one is getting river discharge by water level. If we want to get high precision flow velocity, we must have high costs, and estimating by water level is economical but the accuracy is not high enough. In this paper, we compare three methods. We have found that after the flow velocity is added into stage-discharge relation, the accuracy of results is significantly improved. Now based on technology development of current meter, we can arrange a single-point current meter in river section for a long time to observe flow velocity in real-time. Therefore, the water level-flow velocity-flow method is a feasible solution to get highly accurate river flows in the future.

Key words: flow velocity; discharge; water level; measurement; calculation

水资源管理、防洪抗旱需要实时快捷地获得高精度的河道流量数据。常用获得河道流量的方法有两种^[1]:实测河道断面流速法,即先实测河道断面上多个点的流速,然后用流速乘以面积获得流量;水位流量相关法,即通过历史资料建立水位流量相关曲线,然后通过实测的水位获得流量。实测河道断面流速方法的优点是精度高,但是测河道断面多点流速费时费力,并且遇到大洪水时,测验人员测流速会非常不安全。水位流量

相关法虽然简单,但随着河道的动态变化,测得的流量误差较大。随着现代测量流速的技术发展,多普勒超声波流速仪^[2-4]、双向声传播测流仪^[5]、高精度定点式宽带测流速方案^[6]等仪器及方法的提出降低了获得流速的难度,并提高了测量流速的精度,使实时、长期获得单点流速可行。

为了简便的获得高精度的流量,中泓一点法^[7]简化河道断面流速法,只在河道中间0.8倍水深处测得单点流速即可得到流量,计算精度达到80%。水位流量法^[8,9]可以根据理论公式的推导,通过参数化给出涨洪与落洪时不同的参数,但是实际应用中如何判断涨洪与落洪以及如何给出参数都存在一定的困难。通过动力学求解^[10-13]或回归流速分布^[14]都能够得到很好的模拟结果,但这些理论公式如何应用到实际中仍存在很大的困难,因为实际中我们很难实时获得河道的断面变化信息,以及很难拟定模型的参数。胡云进等人^[1,15,16]提出“流速—水位法”,该法可以有效地减少了实测流速的点数,但仍要将断面

收稿日期:2014-08-07

基金项目:国家自然科学基金项目(41475093);中央高校基本科研业务费专项资金(2013YB32)。

作者简介:邓数学(1991-),男,硕士研究生,研究方向为水文水资源。E-mail: dengxxtj@163.com。

通讯作者:叶爱中(1978-),男,副教授,研究方向为水文水资源。E-mail: azyc@bnu.edu.cn。

划分成多个分区,仍需要测得多个点的流速,在业务化中仍有一定的难度。

基于现有的研究与流速测量技术的发展,找到一种理论合理,并且能够业务化的流量测量方法非常有必要。本文采用飞来峡水文站实测的流速与流量信息,统计分析流速与流量的关系,并对比分析多种简单易行的由流速和水位计算流量的方法,最终给出基于现有技术 with 理论的可行的测量、计算河道流量的方案。

1 计算方法

考虑到现在测量流速越来越简单快捷,因此,本文在计算流量的过程中,利用流速来提高测得河流流量的准确性。本文采用3种方法对河道流量进行对比计算:中泓一点法^[7]、水位—流量拟合法和水位—流速—流量拟合法。其中后两种是本文利用最小二乘法拟合参数。

中泓一点法:利用测速仪器测得断面中泓0.6~0.8倍水深处的平均流速,认为此处观测的流速值为河流的平均流速,再测量水位求得过水断面的面积,利用流速乘以过水断面的面积,即可得到流量。根据计算数据发现,80%河流中泓0.6~0.8倍水深处的平均流速与河流平均流速相对误差在30%以内。利用此方法可以快速便捷的测得河流的流量,若要保证流量精度在70%,可在河流中泓0.6倍水深处或0.8倍水深中进行中泓一线一点测流,其中0.8倍水深处计算的断面流量更加精确。如要保证精度在80%左右,需要在中泓0.8倍水深处测流速计算流量。选取每个数据文件的中泓0.8倍水深处流速数据,来计算河流流量,公式如下:

$$Q = v s \tag{1}$$

水位—流量拟合法:基于最小二乘法对河流水位和河流流量进行二次拟合,来分析比较计算河流流量的结果,公式如下:

$$Q = a_0 + a_1 h + a_2 h^2 \tag{2}$$

水位—流速—流量拟合法:为提高拟合流量的准确性,在进行数据拟合的过程中加入流速值,来更准确的计算流量。利用多项式公式拟合水位—流速—流量关系式,公式如下:

$$Q = a_0 + a_1 h + a_2 h^2 + a_3 v h + a_4 v + a_5 v^2 \tag{3}$$

式中:Q为计算得到的流量,m³/h;v为流速,m/s;s为河道断面面积,m²;h为水位,m;a₀、a₁、a₂、a₃、a₄、a₅为参数。

2 数据说明

本文使用的数据是飞来峡水文站河道断面实测流速数据,观测时间是2012年1月1日到2012年10月28日,观测次数为29次,本文分别对其编号为1~29号。流速的测量方法是在河道断面上相对均匀地分布多条垂线,根据水深每条垂线上测2~5个点流速。图1是2012年29次测量的流速、水位和流量的情况,表1给出了每次测量的详细信息。

3 计算结果与分析

3.1 流量拟合结果

为了拟合不同流量计算方法,在29个观测样本中,均匀选取20个观测流速点实测的水位、流速拟定参数,模拟流量。

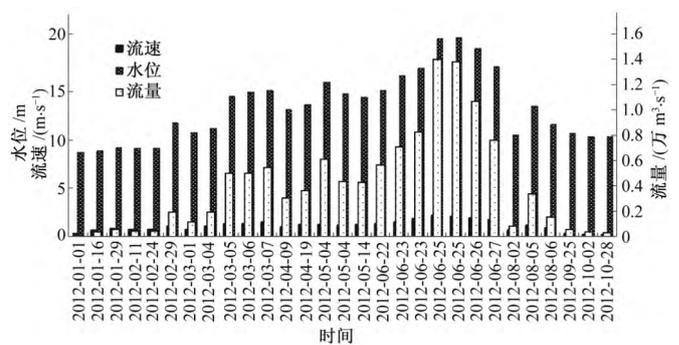


图1 观测流量变化信息

Fig. 1 The information of measured flow

表1 实测流速信息

Tab. 1 The information of measured flow velocity

观测序号	观测时间	垂线数	总点数	实测流量/(m ³ ·s ⁻¹)	中点流速/(m·s ⁻¹)	水位/m
1	2012-01-01	9	17	142	0.35	8.69
2	2012-01-16	10	18	406	0.71	8.94
3	2012-01-29	11	20	582	0.87	9.20
4	2012-02-11	11	21	491	0.72	9.12
5	2012-02-24	11	20	470	0.79	9.13
6	2012-02-29	14	27	2 000	1.07	11.76
7	2012-03-01	14	30	1 200	0.74	10.82
8	2012-03-04	15	29	1 940	1.10	11.24
9	2012-03-05	15	30	5 000	1.37	14.49
10	2012-03-06	15	30	5 040	1.37	14.92
11	2012-03-07	15	30	5 500	1.49	15.14
12	2012-04-09	15	30	3 070	1.03	13.14
13	2012-04-19	15	30	3 640	1.25	13.65
14	2012-05-04	15	30	6 110	1.29	15.97
15	2012-05-04	15	30	4 370	1.20	14.80
16	2012-05-14	15	30	4 290	1.25	14.48
17	2012-06-22	15	30	5 670	1.39	15.12
18	2012-06-23	23	115	7 110	1.49	16.68
19	2012-06-23	15	30	8 250	1.89	17.45
20	2012-06-25	15	30	14 000	2.23	20.51
21	2012-06-25	15	30	13 800	2.16	20.56
22	2012-06-26	15	30	10 700	1.95	19.48
23	2012-06-27	15	30	7 650	1.74	17.57
24	2012-08-02	14	26	836	0.66	10.56
25	2012-08-05	15	30	3 390	1.20	13.52
26	2012-08-06	13	23	1 560	0.89	11.65
27	2012-09-25	15	27	582	0.35	10.66
28	2012-10-02	14	26	380	0.26	10.35
29	2012-10-28	14	25	344	0.24	10.35

中泓一点法模拟的流量与实际观测流量间相关系数达到0.996 5,均方根误差为954 m³/s。通过最小二乘法拟合出水位—流量法与水位—流速—流量法参数。水位—流量法拟合的计算式如下:

$$Q = 1\,704 - 727.9 h + 63.03 h^2 \quad (4)$$

模拟的流量与实际观测流量间相关系数达到0.994 6,均方根误差为 391 m³/s。水位—流速—流量法拟合的计算式如下:

$$Q = 698.1 - 364.1 h + 29.08 h^2 + 274.8 v h - 1\,302 v - 351.2 v^2 \quad (5)$$

模拟的流量与实际观测流量间相关系数达到0.996 7,均方根误差为 302 m³/s。

从统计指标可以看出水位—流速—流量法的相关系数最高,均方根误差也最小,说明加入河道中点流速后的能够获得更高精度的流量。利用3种方法模拟20次观测的河道流量结果见图2。从图2可以看出水位—流速—流量法在大部分观测点都同实测流量一致,次优的是水位—流量法,表现最差的是中泓一点法,尤其对大流量的计算,明显偏大。

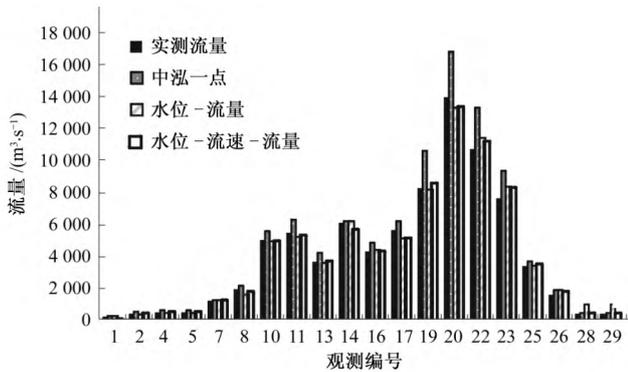


图2 不同流量计算方法计算结果

Fig. 2 The result of flow calculations in different methods

图3给出了不同流量计算方法在不同观测点的相对误差和绝对误差。水位—流速—流量法的相对误差大部分都在10%以内,1号观测点由于实测流量非常小而导致相对误差过

表2 流量拟合结果与绝对误差和相对误差数据

Tab. 2 The data of flow calculations, relative error and absolute error in different methods

观测序号	实测流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	中泓一点			水位—流量			水位—流速—流量		
		拟合结果/ (m ³ ·s ⁻¹)	绝对误差/ (m ³ ·s ⁻¹)	相对误差/ %	拟合结果/ (m ³ ·s ⁻¹)	绝对误差/ (m ³ ·s ⁻¹)	相对误差/ %	拟合结果/ (m ³ ·s ⁻¹)	绝对误差/ (m ³ ·s ⁻¹)	相对误差/ %
1	142	177.1	35.1	24.7	138.3	3.7	2.6	67.2	74.8	52.7
2	406	437.4	31.4	7.7	234.2	171.8	42.3	410.0	4.0	1.0
4	491	517.0	26.0	5.3	308.0	183.0	37.3	481.2	9.8	2.0
5	470	536.4	66.4	14.1	312.3	157.7	33.6	532.2	62.2	13.2
7	1 200	1 147.0	53.0	4.4	1 207.2	7.2	0.6	1 207.5	7.5	0.6
8	1 940	2 068.0	128.0	6.6	1 485.5	454.5	23.4	1 820.0	120.0	6.2
10	5 040	5 562.2	522.2	10.4	4 874.6	165.4	3.3	4 913.2	126.8	2.5
11	5 500	6 213.3	713.3	13.0	5 131.3	368.7	6.7	5 330.8	169.2	3.1
13	3 640	4 162.5	522.5	14.4	3 512.1	127.9	3.5	3 658.9	18.9	0.5
14	6 110	6 114.6	4.6	0.1	6 154.7	44.7	0.7	5 697.2	412.8	6.8
16	4 290	4 800.0	510.0	11.9	4 379.5	89.5	2.1	4 320.8	30.8	0.7
17	5 670	6 171.6	501.6	8.8	5 107.7	562.3	9.9	5 128.1	541.9	9.6
19	8 250	10 640.7	2 390.7	29.0	8 194.9	55.1	0.7	8 547.2	297.2	3.6
20	14 000	16 903.4	2 903.4	20.7	13 289.0	711.0	5.1	13 381.9	618.1	4.4
22	10 700	13 299.0	2 599.0	24.3	11 442.5	742.5	6.9	11 204.6	504.6	4.7
23	7 650	9 343.8	1 693.8	22.1	8 372.5	722.5	9.4	8 350.4	700.4	9.2
25	3 390	3 600.0	210.0	6.2	3 384.1	5.9	0.2	3 481.2	91.2	2.7
26	1 560	1 815.6	255.6	16.4	1 778.6	218.6	14.0	1 815.4	255.4	16.4
28	380	319.8	60.2	15.8	922.2	542.2	142.7	422.0	42.0	11.1
29	344	324.0	20.0	5.8	922.2	578.2	168.1	394.7	50.7	14.7

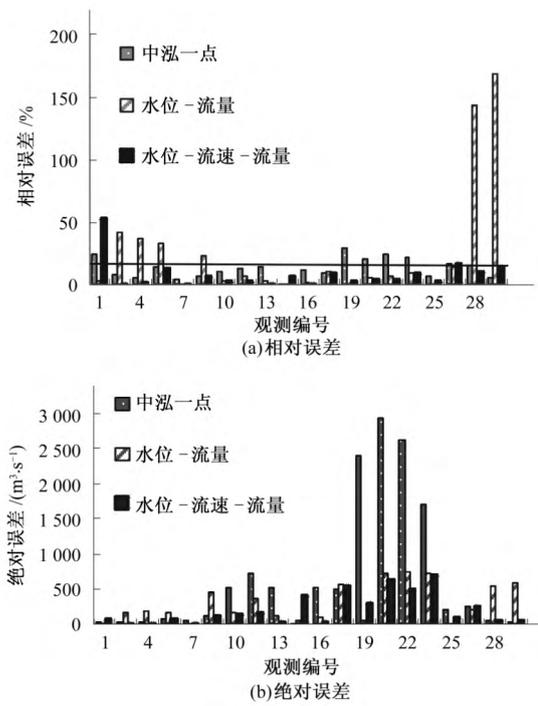


图3 不同流量计算方法相对误差与绝对误差

Fig. 3 The relative error and absolute error in different methods

大。水位—流速—流量法的绝对误差也最小。进一步说明水位—流速—流量法要比中泓一点法及水位—流量法精度高。基于统计学理论,在统计中加入更多有用的信息,会得到更优的结果。所以当我们在水位流量关系中加入实测的一点流速就能够非常有效地提高流量计算精度。

为了便于定量分析比较,表2给出了流量拟合结果的数据与观测流量和拟合流量的绝对误差和相对误差数据。

3.2 流量验证结果

利用取出的 9 个观测流速点作为检测样本,对本文使用的 3 种计算流量的方法进行验证。中泓一点法模拟的流量与实际观测流量间相关系数达到 0.998 1,均方根误差为 897 m³/s。而水位—流量法拟合公式计算结果的相关系数达到 0.996 9,均方根误差为 346 m³/s。利用水位—流速—流量法拟合公式计算的结果相关系数达到 0.999 2,均方根误差为 271 m³/s。

从统计指标可以看出,将检测样本代入公式的计算结果,水位—流速—流量法要比其余两种方法的相关系数高,均方根误差也要小,从整体上验证了水位—流速—流量法能够非常有效地提高流量计算精度。图 4 是利用 3 种方法计算剩余样本的流量,可以明显看出,3 种方法均可基本算出流量的大小,其中水位—流速—流量法更加接近真实流量。图 5(a)中展示了利用检测样本点验证 3 种方法结果的相对误差,根据流量大小对不同方法计算结果的影响,可以看出当流量偏大时,中泓一点法的相对误差相对较大,最大达到 20%左右;当流量较小时,

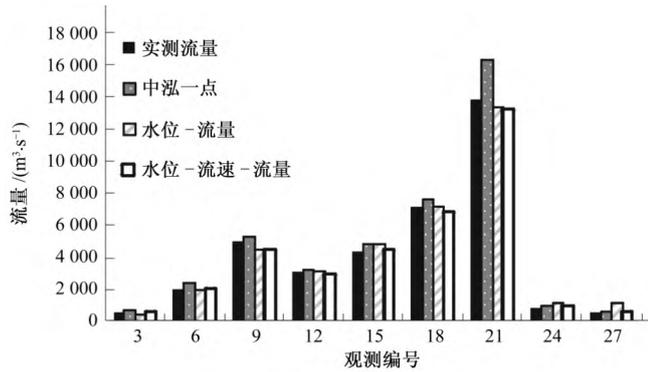


图 4 3 种方法计算流量验证结果

Fig. 4 The verification result of three calculation methods

表 3 流量验证结果与绝对误差和相对误差数据

Tab. 3 The data of verification result, relative error and absolute error in different methods

观测 序号	实测流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	中泓一点			水位—流量			水位—流速—流量		
		验证结果/ (m ³ ·s ⁻¹)	绝对误差/ (m ³ ·s ⁻¹)	相对误差/ %	验证结果/ (m ³ ·s ⁻¹)	绝对误差/ (m ³ ·s ⁻¹)	相对误差/ %	验证结果/ (m ³ ·s ⁻¹)	绝对误差/ (m ³ ·s ⁻¹)	相对误差/ %
3	582	607.3	25.3	4.3	342.2	239.8	41.2	610.6	28.6	4.9
6	2 000	2 364.7	364.7	18.2	1 860.8	139.2	7.0	2 100.6	100.6	5.0
9	5 000	5 233.4	233.4	4.7	4 390.5	609.5	12.2	4 540.2	459.8	9.2
12	3 070	3 172.4	102.4	3.3	3 022.1	47.9	1.6	2 940.3	129.7	4.2
15	4 370	4 788.0	418.0	9.6	4 737.2	367.2	8.4	4 491.4	121.4	2.8
18	7 110	7 599.0	489.0	6.9	7 099.0	11.0	0.2	6 825.6	284.4	4.0
21	13 800	16 372.8	2 572.8	18.6	13 382.0	418.0	3.0	13 257.6	542.4	3.9
24	836	917.4	81.4	9.7	1 046.1	210.1	25.1	999.0	163.0	19.5
27	582	507.5	74.5	12.8	1 107.0	525.0	90.2	647.9	65.9	11.3

综上所述,利用检测样本点对上述的 3 种方法进行了验证计算,结果表明,3 种方法均能大致计算出流量的大小,但是在大量时,中泓一点法存在一定误差,在小流量时水位—流量法存在较大误差,验证了水位—流速—流量法能够快速准确的

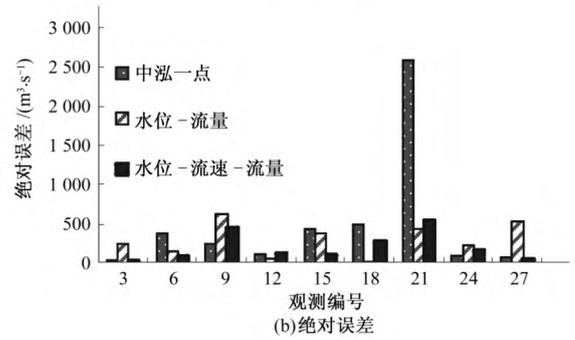
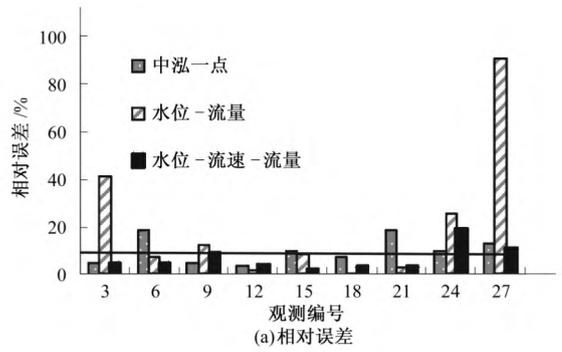


图 5 3 种方法计算流量验证结果的相对误差和绝对误差

Fig. 5 The relative error and absolute error of verification result in three calculation methods

水位—流量法计算结果的相对误差较大,最大达到 90%。而水位—流速—流量法在这两种情况下都能够保持相对稳定。在图 5(b)绝对误差中也可以得出同样的结论,中泓一点法和水位—流量法在流量较大较小时,都存在相对较大的偏差,水位—流速—流量法则能够相对稳定的计算出流量的大小。

为了便于定量分析比较,表 3 给出了流量验证结果的数据与观测流量和验证结果的绝对误差和相对误差数据。

计算出流量。

4 结 语

河道流量的测量已超过百年的历史,高精度的流量数据是

水文学研究、水资源管理重要的支撑。而如何简单、实时并且经济的获得高精度的流量数据是一个难题。本文采用飞来峡水文站实测的河道断面流速数据,统计分析了不同观测点数量,不同方法对流量计算的影响。传统的单点流速(中泓一点)测算流量与单水位(水位流量关系)测算流量方法都存在一定的缺陷,将这两个方法结合形成水位一流速一流量法,利用此方法测算流量精度将有很大的提高,并且这种方法在文中验证了其可靠性,能够准确计算出流量值。

随着流速测量技术的发展,在河岸设置一固定自动测流速装置已经可行。所以今后在长期观测的水文站的河道断面上,在布设自动水位计的同时加装一个自动流速计,实时的观测河道断面的水位与一固定点的流速。通过水位一流速一流量法即可获得实时的高精度的河道流量。

现有的研究工作仅仅是基于观测数据的统计结果,下一步的研究将采用水力学的理论进行推导,给出具有物理机制的水位一流速一流量计算公式。 □

参考文献:

- [1] 蔡甫款. 明渠流量测量的关键技术研究[D]. 杭州:浙江大学, 2006.
- [2] 梁后军, 刘小虎, 蔡国成, 等. 二垂线式 ADCP 流量测量系统[J]. 水利信息化, 2013, (4): 26—29.
- [3] 赵新智. 宽带 ADCP 在河流流量测验中的实用性研究[J]. 中国农村水利水电, 2007, (6): 27—28.
- [4] Lee K, Ho H C, Marian M, et al. Uncertainty in open channel discharge measurements acquired with StreamPro ADCP [J]. Journal of Hydrology, 2014, 509: 101—114.
- [5] 朱小华, 江田惠彰, 吴清松, 等. 一种浅水河道声学测流仪[J]. 电

子测量技术, 2009, 32(2): 166—169.

- [6] 赵新智, 席东杰, 席占平. 受工程及人类活动影响的流量测验解决方案的探讨[J]. 中国农村水利水电, 2009, (12): 87—88.
- [7] 张祥志, 王经顺. 太湖入湖河流流量简易测量法——中泓一点法[J]. 环境监测管理与技术, 2004, 16(4): 28—29.
- [8] 门玉丽, 夏 军, 叶爱中. 水位流量关系曲线的理论求解研究[J]. 水文, 2009, 29(1): 1—3, 62.
- [9] 董晓华, 薄会娟, 邓 霞. 基于最小二乘法的绳套型水位流量关系最优定线研究[J]. 中国农村水利水电, 2010, (1): 51—55.
- [10] Federico I, Marrone S, Colagrossi A, et al. Simulating 2D open-channel flows through an SPH model [J]. European Journal of Mechanics-B/Fluids, 2012, 34: 35—46.
- [11] Maghrebi M F, Ball J E. New method for estimation of discharge[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 132(10): 1 044—1 051.
- [12] Maghrebi M F, Rahimpour M. A simple model for estimation of dimensionless isovel contours in open channels[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2005, 16(6): 347—352.
- [13] Maghrebi M F, Rahimpour M. Streamwise velocity distribution in irregular shaped channels having composite bed roughness[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2006, 17(4): 237—245.
- [14] Lyn D A. Regression residuals and mean profiles in uniform open-channel flows [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, 126(1): 24—32.
- [15] 胡云进, 陈国伟, 郜会彩. 明渠规则断面流量测量方法研究[J]. 水文, 2009, (5): 39—41.
- [16] 陈国伟. 流速—水位法测量明渠断面流量[D]. 杭州:浙江大学, 2009.

(上接第 69 页)

4 结 语

本章在分析影响新农村水安全主要因素基础上,建立了新农村水安全评价指标体系,水安全评价指标包括人口密度、人均日生活用水量、水源地水质达标率、水质监测比率、保护区覆盖率、脆弱度评价系数和水费占农民人均纯收入的比例共 7 个指标;提出新农村水安全状况的评价标准;针对水安全系统特点采用模糊及熵权理论建立了水安全综合评价模型。最后,本章选取山东省 5 个典型农村区域作为代表进行了农村水安全评价,结果显示大部分典型地区水安全处于基本安全与安全之间。 □

参考文献:

- [1] 宋全香, 左其亭, 杨 峰. 城市化建设带来的水问题及解决措施[J]. 水资源工程学报, 2004, 15(1): 56—58.
- [2] 衣 强. 集中式地表饮用水水源地安全评价方法研究[D]. 北京:中国水利水电科学研究院, 2007.
- [3] 傅 春, 杨志峰, 刘昌明. 水利现代化的内涵及评价体系的建立

[J]. 水科学进展, 2002, 13(4): 502—506.

- [4] 秦秋莉, 陈景艳. 我国城市供水安全状况分析及保障对策研究[J]. 水利经济, 2001, 19(5): 27—31.
- [5] 王 郑, 王祝来, 张 勇, 等. 城市供水安全应急保障体系研究[J]. 灾害学, 2006, 21(6): 106—109.
- [6] 仇雁翎, 陈 玲, 赵建夫. 饮用水水质监测与分析[M]. 北京:化学工业出版社, 2006: 151—153.
- [7] 吴一繁, 高乃云, 乐林生. 饮用水消毒技术[M]. 北京:化学工业出版社, 2006: 27—29.
- [8] 王 珮, 谢崇宝, 张国华, 等. 村镇饮用水水源地安全评价研究进展[J]. 中国农村水利水电, 2013, (4): 5—7.
- [9] 陈守煜, 徐冬梅, 邱 林. 地下水水质评价可变模糊评价法[J]. 中国农村水利水电, 2011, (3): 1—5.
- [10] 侯 新. 农村集中式饮用水水源地水资源保护规划——以重庆市铜梁县为例[J]. 节水灌溉, 2012, (1): 48—50.
- [11] 石志民, 李析男. 城市水循环对城市供水量的影响分析[J]. 节水灌溉, 2012, (6): 49—51.
- [12] 习树峰, 谢志高, 吴恒卿, 等. 基于城市供水布局需求的水库功能定位分析[J]. 中国农村水利水电, 2014, (1): 54—56.