

# 西湖总磷浓度对引水配置布局的响应

朱军政, 韩曾萃

(浙江省水利河口研究院, 浙江 杭州 310020)

**摘 要:**根据实测资料,分析了西湖原有引水配置布局变化使得全湖总磷浓度趋于均匀化的效果。建立了西湖平面二维水动力水质数值模型,对西湖实测总磷浓度的平面分布进行了验证,在此基础上对西湖多个进水、出水口的布局 and 不同引水方案引起的西湖水域流场及总磷浓度改善效果做了预测分析。

**关键词:**总磷浓度;引水配置;西湖

**中图分类号:**X143

**文献标识码:**A

**文章编号:**1000-0852(2013)05-0034-05

## 1 引言

西湖位于杭州市区西面,三面环山,一面邻城,是杭州风景名胜区的核心,以其秀美的湖光山色而闻名于国内外。西湖南北长 3 km,东西宽 2.8 km,面积约 5.66 km<sup>2</sup>,平均水深 1.8 m,苏堤、白堤横贯湖中,把西湖分割成外湖、北里湖、西里湖、岳湖和小南湖 5 个湖区。但因其地理条件所限,西湖的水质属富营养化水体,多年来杭州市人民政府经历截污、底泥清淤、引钱塘江水换水等措施,控制了西湖水质恶化的趋势<sup>[1-3]</sup>,但尚未根治富营养化的影响。为了扩大杭州西湖风景点的旅游观光的容量和内涵,杭州市政府决定兴建“西湖西进”工程,为保证西进区水质的清澈,决定引钱塘江的水并经适当处理的优质水进行水体不断置换,其规模为 40×10<sup>4</sup> t/d,全年实际引水量 2003 年为 6000×10<sup>4</sup> t,2004 年以后为 1.2×10<sup>8</sup> t。为搞清楚这一引水工程对西进区及整个西湖水质改善的效果,特建立西湖二维水动力水质模型,研究引水方案及引水配置布局对改善西湖水质的效果。

## 2 原有引水配置效果分析

钱塘江引水的入口原本只有小南湖一个进水口,其引水规模为 30×10<sup>4</sup> t/d,而出水口 2001 年前只有少年宫一个出口,2002 年以后增加了岳湖一个规模约 1.7 m<sup>3</sup>/s 抽水站的出口。从西湖实测的各月总磷浓度

分布可以了解原先这样的引水布局不尽合理,未能达到全面改善西湖水质的目的。选取西湖 8 个监测点的 T-P 浓度的绝对值及相对值作比较分析,其 T-P 浓度相对值的计算公式为:

$$K_i = \frac{C_i}{C_0} \quad (1)$$

式中:  $C_i$  为任意一点的 T-P 浓度;  $C_0$  为外湖测点的 T-P 浓度。

表 1 为 2000 年全年平均、春夏季(5~10 月)、秋冬季(11~4 月)的浓度值比较值。由表可知:

(1)从全年平均值看,小南湖、外湖、少年宫三个测点(测点位置见图 1)为最低,北里湖、岳湖、西里湖为最高,其他点介于二者之间,最低点都在进口、湖心、出口等测点,这说明进口的水未能充分与全湖掺混就直接穿越全湖流出,未能充分发挥引水稀释的作用,同期最小值(小南湖)与最大值(北里湖)浓度比值达 1.83 倍,说明掺混不好。

(2)从春夏季、秋冬季分布看,情况也是小南湖、外湖、少年宫三点最低,分布的趋势相似,少数点有点例外,最大、最小的比值达 2.08 和 2.6 倍。

(3)从全年季节的浓度值看,春夏季的绝对值高,平均与冬季相差接近 2 倍,这主要是温度差别造成的,平面上最高值通常都是北里湖、岳湖、西里湖这几个主要封闭区,水流的活动性差,因此很有必要予以改进。

2002 年增加了岳湖 1.7m³/s 的排水口后情况有了变化,见表 2。由表知:

(1)从全年平均值看,最低值仍然是小南湖、外湖、少年宫。最大值仍然是北里湖、岳湖、西里湖,但显著的差别是最大、最小值的倍数由 2000 年的 1.83 降为 1.36,这说明原来相对封闭的西里湖、岳湖、北里湖三点的水体经岳湖抽排后水体流动了。

(2)从春夏季、秋冬季分布看也有所改善,均匀了,春夏季、秋冬季的最大最小比值分别为 1.65 和 1.69,比 2000 年的 2.08、2.6 小多了。

(3)全湖平均值、季节平均值之差也减少很多。

这二年的对比充分说明全湖平均浓度虽未变化,但由于增加了岳湖的出水口,全湖浓度就趋于均匀化了,年内不同季节也均匀了。这就是配水分布改善的效果。

3 平面二维动态模型

西湖湖面有 5.66 km²,主要污染源是西部山区流域产磷,且发生在 5~7 月梅雨季,引水进水口是小南湖,出水口在西湖东北角,其水流流速、流向受重力、风向、船行的影响变化很大。研究西湖总磷浓度的平面分布规律,在进一步治理中如何合理增加引水量,如何分配这些新增水量,如何达到掺混均匀,避免死水区和高浓度水区,是西湖西进工程引水配置布局的重要目的,为此建立西湖二维垂向掺混均匀非恒定水流水质模型,经 8 个测点资料的验证,再预测其配水对改善西湖

总磷浓度的效果。

造成西湖流动的主要动力是进出水时(如排水及引水、洪水)重力流的流场变化,其流速很小,大约是每秒几毫米的量级,描写这种流动的工作方程可以用浅水波方程(因西湖水深浅,可忽略垂线的变化和温度梯度对流场的影响)表述,即

$$\frac{\partial z}{\partial t}+u\frac{\partial(Hu)}{\partial x}+\frac{\partial(Hv)}{\partial y}=0$$
 (2)

$$\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}+g\frac{\partial z}{\partial x}=E[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}]+g\frac{u|u|}{C_zR}+\frac{\overline{W}_x}{H}+vf$$
 (3)

$$\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}+g\frac{\partial z}{\partial y}=E[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}]+g\frac{v|v|}{C_zR}+\frac{\overline{W}_y}{H}-uf$$
 (4)

$$\frac{\partial P}{\partial t}+\frac{\partial(HuP)}{\partial x}+\frac{\partial(HvP)}{\partial y}=E_x\frac{\partial^2 P}{\partial x^2}+E_y\frac{\partial^2 P}{\partial y^2}+P_0-kP$$
 (5)

式中:z、u、v 为任意点的水位、流速分量;H、E 为水深和涡动粘性系数;C<sub>z</sub> 为谢才系数,取 C<sub>z</sub>= $\frac{1}{n}H^{\frac{1}{6}}$  为糙率系数;f=2ωsinφ(φ 为纬度,ω 为地球自转速度)为地球自转柯氏力系数; $\overline{W}_x$ 、 $\overline{W}_y$  为风应力分量,|u|=√u<sub>x</sub><sup>2</sup>+u<sub>y</sub><sup>2</sup> 为流速分量的绝对值;P 为浓度值,P<sub>0</sub>= $\frac{q_0c_0}{\Delta_x\Delta_yH}$  为源强浓度,k 值原为沉降系数,同时要考虑每一个节点上也有底泥的释放,两者相互抵消,根据二者的负荷比

表1 西湖各测点T-P浓度分布(2000年) 单位:mg/l

Table 1 Distribution of TP concentration in the West Lake in 2000 (mg/l)

| 地点  | 名称               | 少年宫   | 北里湖  | 中山公园  | 岳湖    | 西里湖   | 外湖    | 长桥湾   | 小南湖   | 全湖平均  |
|-----|------------------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 全年  | $\overline{C}_i$ | 0.094 | 0.15 | 0.107 | 0.144 | 0.132 | 0.095 | 0.104 | 0.081 | 0.11  |
|     | K <sub>i</sub>   | 0.99  | 1.56 | 1.12  | 1.51  | 1.39  | 1.0   | 1.02  | 0.85  |       |
| 春夏季 | $\overline{C}_i$ | 0.13  | 0.16 | 0.146 | 0.19  | 0.17  | 0.12  | 0.115 | 0.095 | 0.14  |
|     | K <sub>i</sub>   | 1.08  | 1.33 | 1.21  | 1.58  | 1.41  | 1.0   | 0.96  | 0.76  |       |
| 秋冬季 | $\overline{C}_i$ | 0.05  | 0.13 | 0.06  | 0.089 | 0.087 | 0.066 | 0.075 | 0.067 | 0.072 |
|     | K <sub>i</sub>   | 0.75  | 1.96 | 0.91  | 1.35  | 1.31  | 1.0   | 1.13  | 1.01  |       |

表2 西湖各测点T-P浓度分布(2002年) 单位:mg/l

Table 2 Distribution of TP concentration in the West Lake in 2002 (mg/l)

| 地点  | 名称               | 少年宫   | 北里湖   | 中山公园  | 岳湖    | 西里湖   | 外湖    | 长桥湾   | 小南湖   | 全湖平均  |
|-----|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 全年  | $\overline{C}_i$ | 0.085 | 0.132 | 0.106 | 0.119 | 0.116 | 0.107 | 0.104 | 0.098 | 0.109 |
|     | K <sub>i</sub>   | 0.79  | 1.24  | 0.99  | 1.11  | 1.08  | 1.0   | 0.97  | 0.91  |       |
| 春夏季 | $\overline{C}_i$ | 0.092 | 0.13  | 0.128 | 0.153 | 0.194 | 0.13  | 0.128 | 0.10  | 0.126 |
|     | K <sub>i</sub>   | 0.71  | 1.0   | 0.99  | 1.17  | 1.10  | 1.0   | 0.99  | 0.77  |       |
| 秋冬季 | $\overline{C}_i$ | 0.078 | 0.133 | 0.085 | 0.085 | 0.088 | 0.084 | 0.081 | 0.096 | 0.091 |
|     | K <sub>i</sub>   | 0.93  | 1.58  | 1.01  | 1.01  | 1.05  | 1.0   | 0.9   | 1.14  |       |

值5:2,对 $k$ 值进行的率定,又参考吴根福<sup>[6]</sup>关于温度的变化对释放总磷速率的影响,全年 $k$ 值的变幅为 $1.4 \times 10^{-7}/s \sim 0.5 \times 10^{-7}/s$ 。平均为 $0.9 \times 10^{-7}/s$ 。

由于西湖内有各种岛屿、净跨为6~8m的桥孔,为满足分辨率的要求,计算网格取 $\Delta x = \Delta y = 10\text{ m}$ ,模型时间步长取 $\Delta t = 10\text{ s}$ ,通过计算得到其流场,知引水时西湖多数区域的流速为0.1~1cm/s,在穿过桥涵时为1~10cm/s。

首先针对2000年的实测资料(西湖水域管理处提供)进行验证,当时钱塘江引水入小南湖,只有西湖东北角少年宫一个出口,其总磷浓度计算的结果和湖内8个点的实测年平均监测值对比如图1所示。由图可知,浓度最大与最小值的比值可反映全湖不均匀程度的指标,实测为1.85,计算为1.74,相当接近,最高的三个点实测与计算均为北里湖、西里湖和岳湖,最小的三个点实测与计算均为小南湖、外湖和少年宫,也十分一致,再三个最高点平均值与三个最低点平均值之比,实测为1.58,计算为1.66,也相当接近,这说明数学模型在反映湖内总磷浓度的平均分布是可信的。

然后对2002年新增加岳湖出水口后西湖各点总磷浓度也进行了验证,其结果如图2所示。由图知,验证结果也较好地说明本模型可以反映西湖的总磷浓度平面分布。

#### 4 引水配置布局及效果分析

原先西湖引水是从小南湖一个进水口,出水口是少年宫处的一个排出口,这样进出未能使全湖水体充

分掺混,观测资料证明,小南湖、外湖、少年宫排放口三点的T-P浓度最低,而其他各点长桥湾,西里湖、岳湖、北里湖、中山公园等点的浓度都比这三个点高50%~100%,这就充分说明当时西湖的配水方案不合理,引进西湖的好水未能使全湖充分掺混,2002年增加了岳湖的排水口后,加大了西里湖、岳湖水体的流动性,改善这部分总磷浓度,但全湖的总磷浓度分布还不均匀,还必须进行整个西湖进水、出水口的合理布局研究,以达到全湖掺混均匀,减少死角浓度的积累,因此进行不同引水量、引水水质、进出口个数、位置的配水方案对改善西湖及西湖西进水域水质影响的研究。其最终的配水方案从水动力学模型角度应使湖内各点的进出路线上流速比较均匀,从水质浓度模型的角度应使湖内各点的总磷浓度接近均匀,这样同样的引水量可以达到更好的改善水质效果。

通过水动力学、水质模型计算西湖流场、浓度场的分布来优化西湖引水配置布局,其判别标准是:增大多点的流动速度,使湖内最大、最小浓度比值更接近1,从上述的分析可以看出,增加出水口的个数、位置,特别在死水区是有利于西湖水体流动水质分布趋于均匀化。方案设想进入西进区的引水量不是按湖水面面积进行分配,而是按陆域入湖总磷的量进行分配的,再考虑到底泥磷的释放,引水量大体是50%进入西进区比较合理,即总引水 $40 \times 10^4\text{ t/d}$ ,西进区为 $20 \times 10^4\text{ t/d}$ ,再分为4个 $5 \times 10^4\text{ t/d}$ 的入口进入西进区,另 $20 \times 10^4\text{ t/d}$ 从小南湖直接进入西湖,为 $15 \times 10^4\text{ t/d}$ ,另有 $5 \times 10^4\text{ t/d}$ 清水进入长桥溪。出水口除现已有的少年

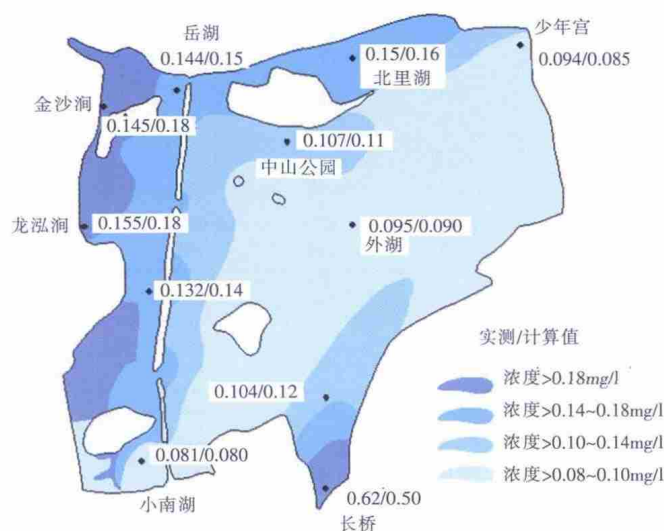


图1 2000年总磷浓度平面分布验证  
Fig.1 Calibration of TP concentration in 2000

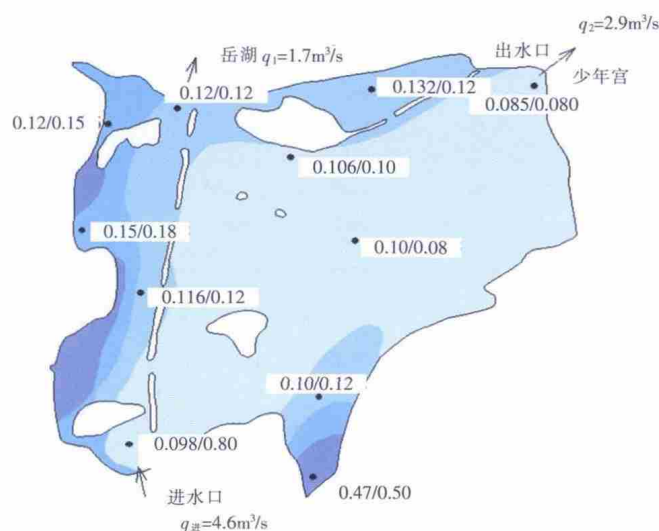


图2 2002年总磷浓度验证  
Fig.2 Calibration of TP concentration in 2002

宫、岳湖的二个出水口外,拟再增加四个出水口(见图3)。

选取湖内基本均匀布置的20个代表点的流速大小来反映各引水配置方案湖内各水域的流动分布:进、出口个数都为1个时,水流集中在进口到出口的直线范围,增加到2个时,西里湖一侧的流速增加明显,当6个进口、6个出口时,20各点平均流速由2.71 mm/s降到2.56 mm/s,均方根流速由1.65 mm/s降到1.47 mm/s,说明湖内水流整体趋向均匀(见图3)。

西湖开始换水时,前15天排放口的排水绝大部分排除原湖水水质差的水体,引入的优质水绝大多数与西湖的水进行掺混,因此这种换水方式是有效的。从图4可知,当只有2个出水口时,由于水流流动较为集中,水质改善的范围也集中在流速较快、水量较大的水域,当进、出水口都为6个时,流速趋于均匀,水质改善的范围也大为增加,水质改善直接体现了水体交换的程度,北里湖由于水体交换程度最慢,其水质改善的

效果也最差。

## 5 结论

根据实测资料的分析,提出西湖引水配置的原则:水流速度均匀化以达到全湖掺混均匀减少死角。通过不同引水量、引水水质、进出口个数、位置的配水方案对改善西湖及西湖西进水域水质影响的比较,提出西湖引水配置按6进6出方案。进入西进区的引水量不是按湖水面积进行分配,而是按陆域入湖总磷的量进行分配的。同时排放口的能力可以比进水口的能力大一些,一方面可以适应暴雨排涝的需要,另一方面可以机动灵活地调水,有利于使西湖水体更流动。

2003年10月西进区引水开始实施预处理水入湖,但未实施截污治理,10、11月引水量也未达设计值,12月~1月达到设计值,经与引水前对比,10月~1月,4月平均下降14%,12月~1月,两个月平均浓度下降了27%,(绝对值由0.08mg/L下降为0.06mg/L)效果明显。

西湖水质治理是需要多方面(物理、化学、生物)的综合治理,本文仅从物理的对流、稀释作用进行了一些探索,但已反映了引水的效果。西湖治理还需考虑截污、生态等综合措施,治理工作还需继续努力推进。

参考文献:

- [1] 梁乃杰,魏玉轮,吴志春.杭州西湖初次换水观测结果的解释[J]. 物探与化探, 1989,13(4):281-289. (LIANG Naijie, WEI Yulun, WU Zhichun. The interpretation of the observations on the first water-changing work in the Westlake, Hangzhou [J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 1989,13(4):281-289. (in Chinese))
- [2] 马玖兰. 西湖引流钱塘江水9年后的水质分析 [J]. 环境污染与防治, 1996,18(5):30-33. (MA Jiulan. Analysis of water quality after 9 years since water supply in West Lake [J]. Environmental Pollution

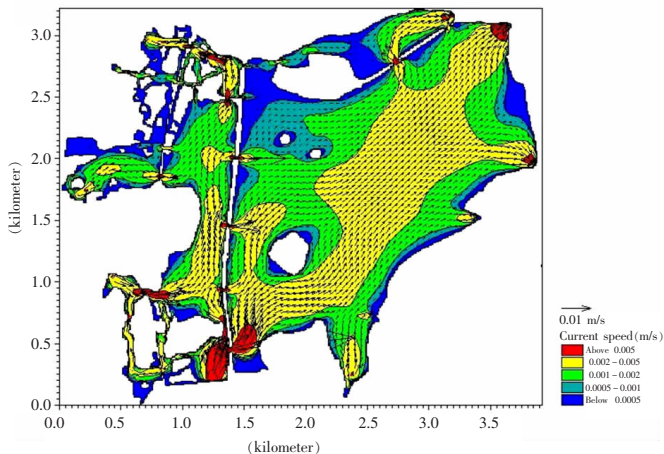


图3 西湖引水6进6出配置时流速分布

Fig.3 The distribution of velocity in the layout of 6 inlets and 6 outlets

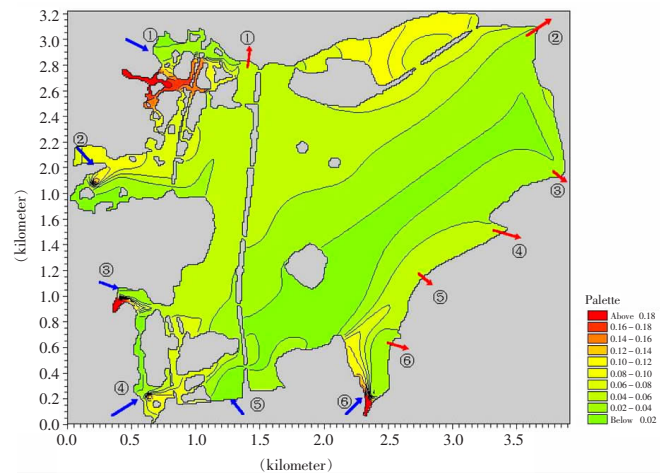
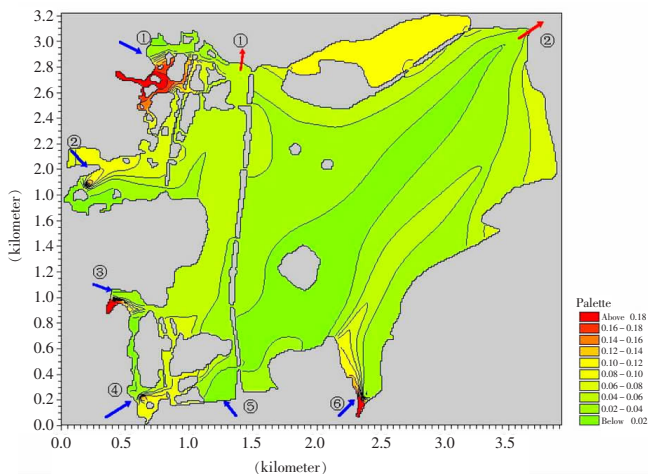


图4 西湖引水6进2出、6出配置时总磷浓度分布对比

Fig.4 Comparison between the TP concentration in the layout of 6 inlets (2 outlets) and that in the layout of inlets (6 outlets)

- & Control, 1996,18(5):30–33. (in Chinese))
- [3] 裴洪平 郑晓君. 引水后杭州西湖主要水质参数的因子分析[J]. 生物数学学报, 2005, 20 (1):86–90. (PEI Hongping, ZHENG Xiaojun. Factor analysis of water quality in West Lake, Hangzhou[J]. Journal of Biomathematics, 2005, 20(1):86–90. (in Chinese))
- [4] Mueller A. J., Thomann V. R. Principles of Surface Water Quality Modeling and Control [M]. NEW YORK: Harper & Row Publisher, 1987. (in Chinese))
- [5] Chapra C. S., Surface water–quality modeling [M]. McGraw–Hill, 1997.
- [6] 吴根福, 吴雪昌, 等. 杭州西湖底泥释磷的初步研究[J]. 中国环境科学, 1998, 18(2):107–110. (WU Genfu, WU Xuechang, et al. Preliminary studies on release of phosphorus from the sediment of West Lake, Hangzhou[J]. China Environmental Science, 1998, 18(2):107–110. (in Chinese))

## Response of Total Phosphorus Concentration to Water Diversion Allocation in West Lake

ZHU Junzheng, HAN Zengcui

(Zhejiang Institute of Hydraulics and Estuary, Hangzhou 310020, China)

**Abstract:** According to the observed data, this paper analyzed the water diversion allocation in the West Lake. The result shows that the total phosphorus concentration tends to homogenization effect after the allocation changing. A two-dimensional hydrodynamic numerical model for water quality was set up to test the planar distribution of the total phosphorus concentration in the West Lake. This paper also analyzed the rational allocation of the inlets and outlet water diversion scheme how to improve the flow field of the West Lake and how to decrease the total phosphorus concentration.

**Key words:** total phosphorus concentration; water diversion allocation layout; West Lake

(上接第 9 页)

产品研发与应用还不十分成熟,土壤墒情监测的技术和管理各个方面均亟待加强。作为近年来兴起的新生事物,土壤墒情自动监测工作的开展可能会遇到各种问题,相信随着这项工作的深入开展和经验的积累,土壤墒情自动监测的精度会得到不断提高。

参考文献:

- [1] Topp, G.C., Davis, J.L., Annan, A.P.. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines[J]. Water Resources Research, 1980, 16(3):574–582.
- [2] Lukangu, G., Savage, M.J., Johnston, M.A.. Use of sub-hourly soil water content measured with a frequency-domain reflectometer to schedule irrigation of cabbages[J]. Irrigation Science, 1999, 19(1):7–13.
- [3] 时新玲, 王国栋. 土壤含水量测定方法研究进展[J]. 中国农村水利水电, 2003, (10):84–96. (SHI Xinling, WANG Guodong. Research advances in measuring method of soil water content[J]. China Rural Water and Hydropower, 2003, 10: 84–96. (in Chinese))
- [4] 陈家宙, 陈明亮, 何圆球. 各具特色的当代土壤水分测量技术[J]. 湖北农业科学, 2001, 22 (3):25–28. (CHEN Jiazhou, CHEN Mingliang, HE Yuanqiu. Variety in contemporary soil moisture monitoring technology[J]. Hubei Agricultural Science, 2001, 22(3):25–28. (in Chinese))
- [5] Jones, S. B., Wraith, J. M., Or, D.. Time domain reflectometry measurement principle and application [J]. Hydrological Processes, 2002, 16(1):141–153.
- [6] 林成森. 数值计算方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2000:60–64. (LIN Chengsen. Numerical Method [M]. Beijing: Science Press, 2000:60–64. (in Chinese))

## A Tentative Discussion on Precision of Automatic Soil Moisture Monitoring

WANG Guangsheng<sup>1</sup>, YANG Jianqing<sup>1</sup>, DENG Yingchun<sup>2</sup>

(1. Bureau of Hydrology, MWR, Beijing 100053, China; 2. Hydrology Bureau of Anhui Province, Hefei 230022, China)

**Abstract:** This paper discussed the principle of soil moisture monitoring by Frequency Domain Reflectometry (TDR) and Frequency Domain Reflectometry (FDR). Based on the experimental data from automatic monitoring sensors at the Wangchengang Evaporation Experimental Station in Liuan City of Anhui Province, this paper analyzed the precision of automatic monitoring sensors in comparison with the manual sampling data by gravimetric method. A mean of calibrating soil water content calculation equation was further developed using the manual sampling data of gravimetric method. The improved precision of automatic monitoring data was thus obtained.

**Key words:** soil moisture; automatic monitoring; data precision