

杭嘉湖平原河网调水试验水质模糊风险评估

郑建根, 傅雷*, 尤爱菊 (浙江省水利河口研究院, 浙江杭州 310020)

摘要 通过引入模糊数学理论,对2015年杭嘉湖平原河网调水试验中嘉兴市的水质指标风险进行了计算与评估。结果表明,调水试验过程中,高锰酸钾指数和溶解氧的水质风险较低,总磷面临一定风险,氨氮和总氮的水质风险较高。嘉兴市周边河道的水质风险总体低于嘉兴市内河道(调水目标区域),空间差异明显。该研究结果对未来杭嘉湖平原河网开展常态化调水过程中的水质风险管控有着重要意义。

关键词 模糊数学;平原河网;区域调水;风险率计算;风险评估
中图分类号 X143 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2017)29-0056-05

Risk Assessment of Water Diversion Experiment in Hangjiahu Basin River Network Using Fuzzy Mathematics Method
ZHENG Jian-gen, FU Lei*, YOU Ai-ju (Zhejiang Institute of Hydraulics & Estuary, Hangzhou, Zhejiang 310020)
Abstract The fuzzy mathematics method has been introduced to assess the environmental risk caused by the water diversion experiment in Hangjiahu basin river network. The risk assessment indicated that during the water diversion experiment, the risk of COD_{Mn} and DO was low, the risk of TP was medium, and the risk of NH₃-N and TN was high. Moreover, the rivers outside Jiaxing City had lower risk than the rivers inside Jiaxing City, the spatial risks of those rivers were in different levels. The results of this study will play an important role in Hangjiahu basin water diversion project in the future.
Key words Fuzzy mathematics; Plain river network; Water diversion; Risk rate; Risk assessment

区域调水是缓解地区性水资源短缺和水质型缺水的重要手段。目前,我国对平原河网区域调水的研究多以水质改善效果的评估为主^[1-4],对调水过程中可能出现的水质风险研究相对缺乏^[5-7]。我国水质风险评估研究起步较晚,目前国内的水质风险评估对象多为某个特定河道或流域^[1-2,7],对平原河网地区整体的水质风险评估较少。水质指标的风险评估主要有3种方式:概率论法^[7-8]、模糊数学法^[7-10]和风险指标法^[9-12]。其中,使用概率论法得出的结论可信度较高,但概率论法对数据完整性和长序列性的要求极高,目前大多数平原河网调水的监测数据不足以支撑概率论法的计算;风险指数法计算较为简单,可操作性高,但目前对风险指数法的理论基础和评价方法仍有较大争议^[7,9,12]。基于模糊数学理论的三角模糊风险分析法是目前较为可靠的水质指标风险分析方法。金菊良等^[9]将随机模拟与三角模糊数耦合入水质风险分析中,李如忠等^[10,13]利用三角模糊数进行了简单河道的水质风险分析,吕振霖等^[12,14-16]进一步将模糊数学理论运用于望虞河引水的水质风险评估中并取得了良好的评估结果。鉴于平原河网调水试验中水质风险评估的重要性,且目前杭嘉湖平原区河网调水水质风险的研究鲜见报道。笔者利用三角模糊风险分析法对平原河网调水试验的水质风险进行计算评估。

1 调水试验概况

杭嘉湖地区属于典型的平原河网水系^[16-18],境内水质既受本地排污影响,又受入境水质影响,水环境形势既严峻又复杂,历来受到苏、浙、沪两省一市的重点关注^[16,19-20]。近年来,随着浙江省“五水共治”的推进,该地区的水质已得到

了明显的提升。2015年11月6日—12月15日,笔者参与了杭嘉湖平原河网调水试验。该研究以该次调水试验的实际监测数据为基础,引入模糊数学理论,对2015年杭嘉湖平原河网调水试验期间典型断面的水质变化情况进行了风险率计算,并根据计算结果对该调水试验的水质风险进行了评估。

调水试验以嘉兴市为试验主体,选择嘉兴市域东、西、南、北及中部具有代表性的5个监测断面作为水质风险评估的参评断面,各断面的位置分布如图1所示。

调水试验监测内容包括溶解氧、水色、水温、pH、电导率、高锰酸钾指数、总氮、总磷、氨氮9项指标,其中,水色、水温、pH、电导率在试验期间变化并不明显。因此,笔者选取高锰酸钾指数、总磷、氨氮、总氮、溶解氧5项指标作为水质风险评估的参评指标,结合图1及2015年杭嘉湖平原河网调水试验的水质监测数据。参评的5个监测断面及其水质指标背景监测值见表1。

2 三角模糊风险分析法

三角模糊风险分析法是定义风险空间并进行风险管控的有效工具,根据三角模糊数学理论,以单个风险因子而言,设 a, b, c 分别为某一模糊变量的下极限值、目标可能值和上极限值,则3个一组数 (a, b, c) 构成一个三角模糊数。其中 a, b, c 为实数,相应的函数可以定义为

$$U_A = \begin{cases} 0 & x < a, x > c \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & b < x \leq c \end{cases} \tag{1}$$

定义三角模糊数 $A(a, b, c)$,其函数表达式同式(1),根据模糊数学理论,三角模糊数 A 的 α -截集可以定义为

$$\tilde{A}^\alpha = \{x | U_A(x) \geq \alpha, x \in X\} \tag{2}$$

式中, x 为广域空间; α 为可信度水平, $\alpha \in [0, 1]$; $\tilde{A}^\alpha$ 是一个无空的闭区间,通常表示为

基金项目 水体污染控制与治理科技重大专项(2014ZX07101-011);浙江省水利科技计划项目(RB1405)。

作者简介 郑建根(1962—),男,浙江桐乡人,高级工程师,从事水资源与水环境研究。*通讯作者,工程师,博士,从事水资源与水环境研究。

收稿日期 2017-08-16

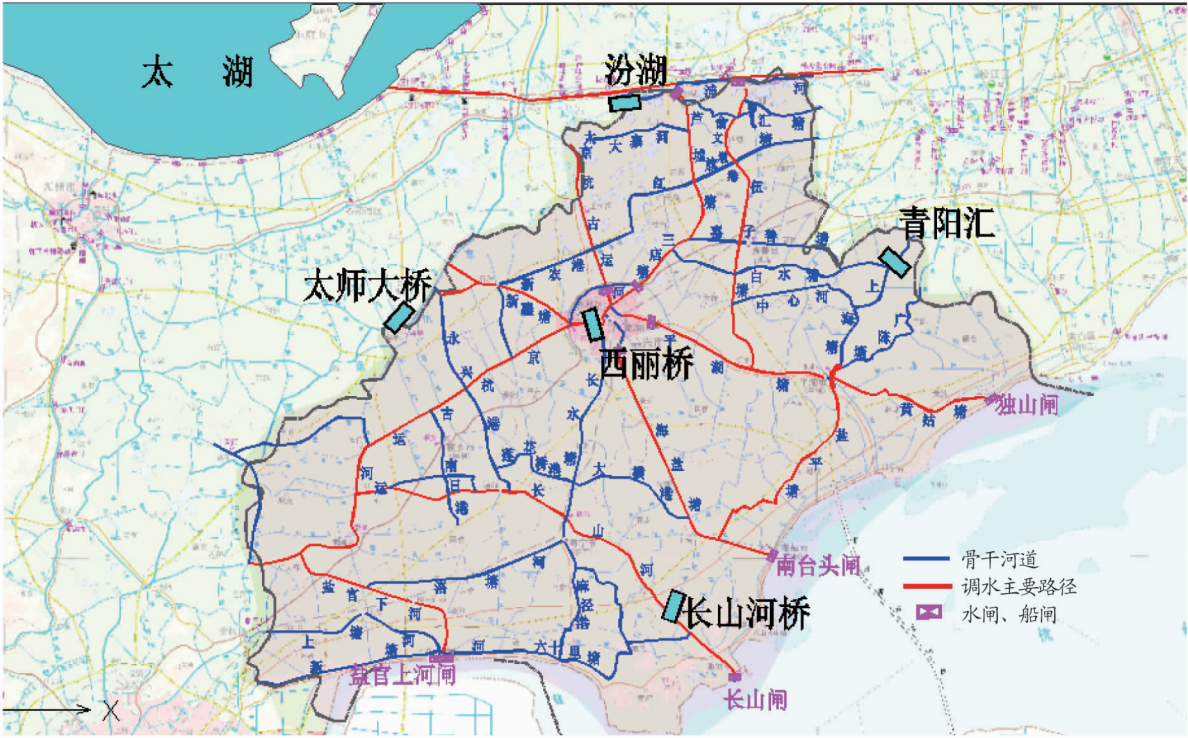


图1 2015 年杭嘉湖平原河网调水试验水质风险评估断面分布

Fig.1 Distribution of risk assessment sections of Hangjiahu basin river network water diversion experiment in 2015

表 1 2015 年杭嘉湖调水试验水质因子及背景值

Table 1 Risk assessment sections and water quality factors of Hangjiahu basin river network water diversion experiment in 2015						mg/L
断面名称 Section name	地理位置 Geographical position	高锰酸钾指数 Potassium permanganate index	总磷 Total phosphorus	氨氮 Ammonia nitrogen	总氮 Total nitrogen	溶解氧 Dissolved oxygen
汾湖 Fenhu	嘉兴北部	4.90	0.090	0.729	1.50	3.79
长山河桥 Changshanhe Bridge	嘉兴南部	4.96	0.470	0.520	4.45	2.38
太师大桥 Taishi Bridge	嘉兴西部	4.48	0.126	0.532	3.07	5.04
青阳汇 Qingyanghui	嘉兴东部	5.50	0.244	0.589	2.74	3.87
西丽桥 Xili Bridge	嘉兴中部	5.62	0.267	1.126	3.21	4.33

$\tilde{A}^\alpha = [a_L^\alpha, a_R^\alpha] = [(b-a)\alpha + a, (b-c)\alpha + c]$ (3)

显然, $\tilde{A}$ 是三角模糊数且对所有 $\alpha \in [0, 1]$ 都是如此。由式 (2)、(3), 对于给定的可信度水平 α , 三角模糊数实际上已经转化为区间数。根据模糊数学理论, 假设 $X(d, d, d)$ 为表示调水试验之前水环境污染负荷水平, 采用相同的可信度水平, 利用三角模糊数的 α -截集技术将三角模糊数 X 表示为区间数, 其模糊数学的表达式即 $\tilde{X}^\alpha = [(b-a)\alpha + a, (b-c)\alpha + c]$, X 的区间值随着可信度 α 取值的变化而改变, 即 X 是可信度水平 α 的函数, α 取遍整个可信度区间 $[0, 1]$ 。利用上述公式, 可得到三角模糊数形式的某个水质指标的质量浓度分布 (图 2)。

假设 $W(a, b, c)$ 为调水试验期间某个水质指标的三角模糊数, 令 $Z = X - W$ 。若 $Z > 0$, 即 Z 为正的三角模糊数, 表示试验前水环境污染负荷水平大于试验期间污染负荷水平, 此时水环境水质是安全的; 若 $Z < 0$, 即 Z 为负的三角模糊数, 则表示将发生失效模糊概率事件, 试验期间出现水质超标现

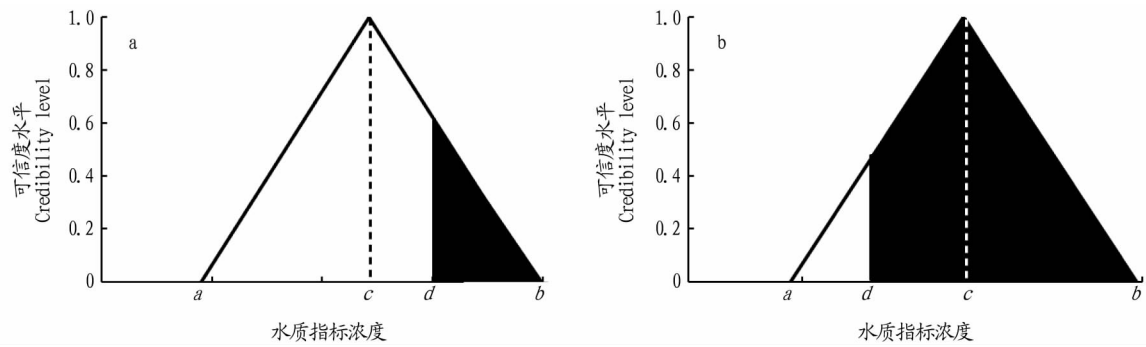
象。显然, $Z = 0$ 为临界状态。因此, 可以用式 (4) 表征污染风险发生的可能性:

$$R(\tilde{Z} < 0) = \frac{\int_{\tilde{z} < 0} U_{\tilde{z}}(\tilde{Z}) d\tilde{Z}}{\int_{\tilde{z}} U_{\tilde{z}}(\tilde{Z}) d\tilde{Z}} \tag{4}$$

由图 2 可以看出, 水质指标浓度三角模糊数的隶属函数可以近似看作是线性的。由图 2 及式 (4), 三角模糊数转换为区间数, 其风险率 R 可用式 (5) 计算。

$$R(\tilde{Z} < 0) = \frac{\int_{\tilde{z} < 0} U_{\tilde{z}}(\tilde{Z}) d\tilde{Z}}{\int_{\tilde{z}} U_{\tilde{z}}(\tilde{Z}) d\tilde{Z}} = \frac{S_1}{S_{ALL}} \tag{5}$$

式中, S_{ALL} 为图 2 中大三角形 (三角形 a, b, c) 总面积; S_1 为调水试验期间水质指标浓度超过试验前背景浓度部分的面积, 即图 2 中阴影部分的面积。水质风险的分布一般都符合正态分布。该研究中以风险率 0.2、0.5 和 0.8 作为 3 个分界值, 将水质风险从低到高分为 Low (低风险)、Low ~ medium (较低风险)、Medium ~ high (较高风险)、High (高风险) 4 个等级 (表 2)。



注:a. 低风险情况;b. 高风险情况
Note:a. Low risk;b. High risk

图 2 三角模糊数形式的污染物浓度风险分布

Fig. 2 Distribution of pollutant concentration risk using triangular fuzzy number

表 2 风险等级及描述

Table 2 Risk level and risk description

风险级别 Risk level	风险概率 Risk probability	水质风险等级 Water quality risk grade	描述 Describe
Low	[0,0.2)	低风险	基本不出现水质恶化
Low - Medium	[0.2,0.5)	较低风险	偶尔出现水质恶化
Medium - High	[0.5,0.8)	较高风险	经常出现水质恶化
High	[0.8,1.0]	高风险	经常且重复出现水质恶化

3 水质模糊风险评估算例

以汾湖断面氨氮浓度在 2015 年杭嘉湖平原河网调水试验期间的变化为例,进行风险率的计算及水质风险评估:

3.1 汾湖断面氨氮风险率公式构建 试验阶段,汾湖断面氨氮浓度的最高值为 0.99 mg/L,最低值为 0.38 mg/L,取两者的平均值为最高模糊概率值,为 0.685 mg/L。定义汾湖断面氨氮浓度在试验期间的三角模糊数 $C_{NH_3-N} = [0.380, 0.685, 0.990]$,以此构建三角模糊函数:

$$U_{NH_3-N}(x) = \begin{cases} 0 & x < 0.380, x > 0.990 \\ \frac{x - 0.380}{0.685 - 0.380} & 0.380 \leq x \leq 0.685 \\ \frac{0.990 - x}{0.990 - 0.685} & 0.685 < x \leq 0.990 \end{cases} \quad (6)$$

采用相同的可信度水平并引入 α -截集技术,其三角模糊数的区间可以表示为 $[0.685\alpha + 0.38, -0.685\alpha + 0.99]$,若 α 的可信度区间为 $[0,1]$,则得到汾湖断面氨氮浓度的三角模糊形式分布(图 3)。

3.2 汾湖断面氨氮风险率计算及评估 以汾湖断面氨氮浓度的背景监测值作为水质控制目标,构建调水试验前的三角模糊数 $C_{back} = (0.729, 0.729, 0.729)$,则根据图 3 所示,汾湖断面氨氮浓度的三角模糊风险率计算如下:

$$R(\tilde{Z} < 0) = \frac{\int_{\tilde{Z} < 0} U_{\tilde{Z}}(\tilde{Z}) d\tilde{Z}}{\int_{\tilde{Z}} U_{\tilde{Z}}(\tilde{Z}) d\tilde{Z}} = \frac{S_{\Delta_{edb}}}{S_{\Delta_{abc}}} = \frac{0.112}{0.305} = 0.366 \quad (7)$$

其中,三角形 edb 的面积为汾湖断面的氨氮在试验期间发生浓度高于背景值的风险发生概率的积分。由图 3 及式(7)可知,2015 年杭嘉湖平原河网调水试验期间,汾湖断面氨氮浓

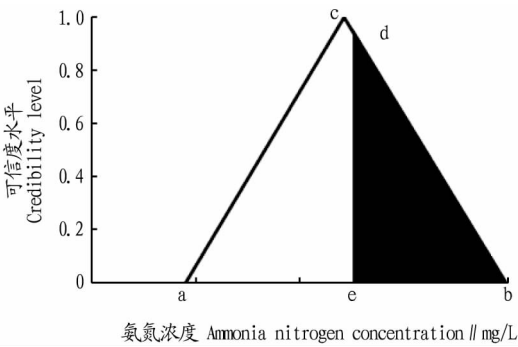


图 3 汾湖断面氨氮浓度三角模糊风险分布

Fig. 3 Distribution of NH_3-N concentration risk in Fenhu section using triangular fuzzy number

度的风险率为 0.366,属于较低风险级别,存在偶尔出现水质恶化的可能。

4 平原河网调水试验水质风险评估

以 2015 年杭嘉湖平原河网调水试验中的汾湖、长山河桥、太师大桥、青阳汇及西丽桥作为调水试验期间嘉兴市的 5 个主要控制断面,计算高锰酸钾指数、总磷、氨氮、总氮及溶解氧 5 项水质指标的风险率并进行水质风险评估。为构建各项水质指标的三角模糊数,根据监测数据,调水试验期间嘉兴市 5 个监测断面各项水质指标的极限数据见表 3。

由表 3 可知,利用式(1)~(5)计算 5 个监测断面中各项水质指标的风险率,其中,各断面水质指标背景监测值见表 1。利用三角模糊数的 α -截集技术对各断面进行风险率计算,结果见表 4。

相关水质指标风险评估显示:

(1)调水试验期间,各断面的高锰酸钾指数和溶解氧的风险率大多处于较低水平。调水试验对改善高锰酸钾指数的效果较好,大部分监测断面的高锰酸钾指数在试验期间小于背景监测值;调水试验对溶解氧浓度的改善效果尤为突出,其中,2 个断面的溶解氧风险率小于 0.2,属于低风险等级;2 个断面的溶解氧风险率小于 0.5,属于较低风险等级;仅 1 个断面的溶解氧风险率高于 0.9,属于高风险等级。由此可见,试验期间,绝大多数监测断面的溶解氧浓度长时间维持高于背景监测值。这表明 2015 年杭嘉湖平原河网调水

试验促进了嘉兴地区的水体流动,水体复氧能力大为增强, 河网溶解氧浓度的改善极为明显。

表 3 各监测断面三角模糊风险限值

Table 3 Limit values of water quality factors in risk assessment sections										mg/L
断面名称 Section name	高锰酸钾指数 Potassium permanganate index		总磷 Total phosphorus		氨氮 Ammonia nitrogen		总氮 Total nitrogen		溶解氧 Dissolved oxygen	
	下限 Lower limit	上限 Upper limit	下限 Lower limit	上限 Upper limit	下限 Lower limit	上限 Upper limit	下限 Lower limit	上限 Upper limit	下限 Lower limit	上限 Upper limit
汾湖 Fenhu	3.94	6.08	0.13	0.32	0.42	1.29	1.70	4.52	4.20	6.47
长山河桥 Changshanhe Bridge	2.82	4.29	0.07	0.12	0.38	0.99	1.37	2.91	3.60	5.80
太师大桥 Taishi Bridge	3.71	6.01	0.17	0.45	0.91	1.81	3.40	6.19	2.96	4.41
青阳汇 Qingyanghui	5.29	6.14	0.22	0.30	0.62	1.19	3.65	5.56	3.68	4.92
西丽桥 Xili Bridge	5.07	6.04	0.19	0.35	1.12	3.31	3.55	7.87	2.10	4.82

表 4 调水试验期间各监测断面水质风险率

Table 4 Risk rate of water quality factors in different risk assessment sections					
断面名称 Section name	高锰酸钾指数 Potassium permanganate index	总磷 Total phosphorus	氨氮 Ammonia nitrogen	总氮 Total nitrogen	溶解氧 Dissolved oxygen
汾湖 Fenhu	0	0.714	0.366	0.986	0.015
长山河桥 Changshanhe Bridge	0.421	0	1.000	0.717	0.320
太师大桥 Taishi Bridge	0.875	1.000	0.967	0.528	0.271
青阳汇 Qingyanghui	0.871	0.808	1.000	1.000	0.048
西丽桥 Xili Bridge	0.380	0.458	0.996	1.000	0.935

注:溶解氧的计算方式与其他指标略有不同;溶解氧浓度越高,风险越低,反之亦然
Note:The calculation method of dissolved oxygen is slightly different from other indexes;The higher the dissolved oxygen concentration is,the lower the risk is, and vice versa

(2)调水试验期间,各断面总磷的风险率有明显不同,体现出较大的空间差异。从计算结果来看,有 1 个断面风险率为 0,1 个断面的风险率小于 0.5,但也有 3 个断面风险率大于 0.7,差异明显。根据试验实际情况分析,这一方面是由于各断面总磷的背景监测浓度差异巨大(表 1),导致试验期间总磷的风险率差异较为明显;另一方面,调水试验期间,河网流动性的增加虽然会改善水体环境,但也会拉动一些水质较差的“死水”进入河道,从而影响河网水质。

(3)氨氮和总氮指标的风险率均维持在较高水平。氨氮浓度仅有 1 个断面风险率低于 0.5,属于较低风险;2 个断面风险率在 0.8~1.0;2 个断面风险率为 1.0,属于高风险等级。总氮浓度的风险率与氨氮浓度的情况类似,有 2 个断面风险率处于 0.5~0.8,属于较高风险,另有 3 个断面的风险率高于 0.8,属于高风险。这表明 2015 年杭嘉湖平原河网调水试验对氨氮和总氮浓度的改善效果不佳,试验期间部分断面反复出现氨氮和总氮浓度高于背景监测值的情况。调水试验期间频发降雨等恶劣天气情况,带动太浦河沿岸及湖州地区的生活污水进入水体,是试验期间氨氮和总氮风险率居高不下的主要原因。

从地理位置上看,该研究选择的 5 个监测断面分别位于嘉兴市东西南北及中部,可以代表调水试验期间嘉兴河网空间上的水质风险概率分布:

(1)总体来看,调水试验期间,嘉兴河网南北向河道的风险率要小于东西向河道,从该研究参评的 5 个监测断面来看,南北向河道监测断面(汾湖、长山河桥)各个水质指标的风险率,除含氮类指标外,均处于较低水平。其中,汾湖断面的高锰酸钾指数风险率为 0,氨氮风险率为 0.366、溶解氧风

险率仅为 0.015。从地理位置上看,试验期间,汾湖断面主要承接太浦河的优质来水(图 1)。因此,其水质指标的风险率很低,水质在试验期间较好;长山河桥断面位于长山闸上游的长山河,是试验期间嘉兴南排工程的主要排水河道。试验期间,长山河桥断面的总磷风险率为 0,溶解氧的风险率也仅为 0.32,表明调水试验期间,长山河桥断面在长山闸开闸拉动河网流动的有利条件下,其总磷浓度一直维持低于背景监测值,溶解氧浓度在试验期间也偶尔出现水质恶化的情况。

(2)东西向河道监测断面的水质风险率较南北向河道明显增大,西部入流断面太师大桥各项水质指标的风险率,除溶解氧为 0.271,处于较低风险外,总氮指标大于 0.50,其余 3 项指标均大于 0.80,水质风险较高。这说明调水试验期间湖州地区进入嘉兴的水质情况一般,优质的太湖来水经过湖州地区之后存在水质下降的趋势。而东部的青阳汇断面除溶解氧外,其他 4 项水质指标的风险率均大于 0.80,在调水试验期间存在较大的水质风险。

(3)调水试验期间,嘉兴市内河道的水质改善效果一般,从参评的西丽桥断面的各项水质指标风险率来看,其高锰酸钾指数和总磷的风险率为 0.380 和 0.458,属于较低风险,氨氮、总氮和溶解氧的风险率则分别高达 1.000、0.988 和 0.935,由此判断,氨氮和总氮浓度在西丽桥断面长时间出现高于背景浓度的情况。西丽桥断面溶解氧的风险率明显不同于其他断面,这是由于西丽桥断面的溶解氧背景浓度高达 4.33 mg/L,试验期间溶解氧浓度虽然也有较长时间维持高于 4.00 mg/L 的地表水Ⅲ类水标准,但 11 月 16 日左右因大雨、太浦闸流量调整及南排工程开度调整等各种因素综合作用下出现了 2.10 mg/L 的极低值,明显增大了西丽桥断面溶

解氧浓度的风险率。

5 结论

(1)该研究利用模糊数学理论对 2015 年杭嘉湖平原河网调水试验过程中的水质风险进行了计算和评估。结果表明,调水试验中高锰酸钾指数和溶解氧的水质风险较小,总磷有一定的风险,氨氮和总氮的水质风险较高。

(2)在河道流动性、天气情况、水利工程调度情况等因素的综合影响下,调水试验中嘉兴市南北向河道水质风险较低,东西向河道水质风险较高,中部河道的水质风险最高。

(3)2015 年杭嘉湖平原河网调水试验期间,太湖的优质水源从湖州和太浦河 2 个方向进入嘉兴市,在一定程度上改善了嘉兴河网的水质。但试验过程中,太湖的优质来水存在一定的沿程恶化情况,加之试验期间遭遇降雨等特殊天气,对调水试验效果产生了不利影响。在未来的杭嘉湖平原河网常态化调水实践中应对此给予高度关注。

参考文献

[1] 安国庆,贾良清,李莹. 调水工程对生态环境的影响[J]. 安徽农业科学,2008,36(25):11077-11079.
[2] 程曦,张明旭,孙从军. 综合调水前后苏州河下游水体耗氧特性比较[J]. 上海环境科学,2001(5):215-217.
[3] 邓坤,张璇,杨永生,等. 流域水资源调度研究综述[J]. 水利经济,2011,29(6):23-27.
[4] 董文平,马涛,刘强,等. 流域水环境风险评估进展及其调控研究[J]. 环境工程,2015,33(12):111-115.

[5] 顾君. 生态调水对温瑞塘河温州市区段水环境影响的研究[D]. 上海:华东师范大学,2012.
[6] 郭玲. 中国夏季降水影响因子评估和统计预测研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2011.
[7] 郝金梅. 南水北调西线一期工程调水区生态环境影响的风险评估[D]. 天津:天津大学,2008.
[8] 何理. 水环境突发性与非突发性风险分析的理论和方法初步研究[D]. 长沙:湖南大学,2002.
[9] 金菊良,吴开亚,李如忠. 水环境风险评价的随机模拟与三角模糊数耦合模型[J]. 水利学报,2008,39(11):1257-1261.
[10] 李如忠,洪天求,金菊良. 河流水质模糊风险评价模型研究[J]. 武汉理工大学学报,2007,29(2):43-46.
[11] 刘宏. 镇江市水环境安全评价及风险控制研究[D]. 镇江:江苏大学,2010.
[12] 吕振霖. 太湖水环境综合治理的实践与思考[J]. 河海大学学报(自然科学版),2012,40(2):123-128.
[13] 麻林,刘凌,宋兰兰,等. 调水过程中望虞河的水质风险分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2014,42(1):13-18.
[14] 倪彬,王洪波,李旭东,等. 湖泊饮用水源地水环境健康风险评价[J]. 环境科学研究,2010,23(1):74-79.
[15] 阮仁良. 平原河网地区水资源调度改善水质的机理和实践研究[D]. 上海:华东师范大学,2003.
[16] 宋兰兰,麻林,刘凌. 太湖流域典型调水试验水质污染风险研究[J]. 中国农村水利水电,2013(7):20-23.
[17] 孙树青,胡国华,王勇泽,等. 湘江干流水环境健康风险评价[J]. 安全与环境学报,2006,6(2):12-15.
[18] 汪明娜,汪达. 调水工程对环境利弊影响综合分析[J]. 水资源保护,2002(4):10-14.
[19] 习树峰,王本德,梁国华,等. 考虑降雨预报的跨流域调水供水调度及其风险分析[J]. 中国科学:技术科学,2011,41(6):845-852.
[20] 颜秉龙. 杭嘉湖区域改善水环境调水方案研究[D]. 南京:河海大学,2006.

(上接第 11 页)

收法、原子荧光法更低的检出限,适合对重金属元素进行痕量分析。

表 6 检出限(n=11)
Table 6 Detection limit(n=11)

元素 Elements	仪器检出限 Detection limit of instruments//ng/mL	方法检出限 Detection limit of the method//mg/kg
铅 Pb	0.053	0.009
镉 Cd	0.015	0.002
汞 Hg	0.009	0.002
砷 As	0.028	0.005
铬 Cr	0.032	0.005
铜 Cu	0.028	0.005

3 结论与讨论

试验使用电感耦合等离子体质谱法同时测定了 10 批次涪城麦冬中 6 种重金属元素的含量,线性关系良好,具有较好的精密度和准确度。同时,检测灵敏度高,能对重金属元素进行痕量分析,能有效满足对麦冬中重金属含量的测定。

国家质量监督检验检疫总局标准《地理标志产品涪城麦冬》中规定重金属限量为:铅≤5.0 mg/kg,镉≤0.3 mg/kg,汞≤0.1 mg/kg,砷≤2.0 mg/kg,铜≤20.0 mg/kg;中华人民共和国外贸行业标准《药用植物及制剂进出口绿色行业标准》中规定重金属限量为:铅≤5.0 mg/kg,镉≤0.3 mg/kg,汞

≤0.2 mg/kg,砷≤2.0 mg/kg,铜≤20.0 mg/kg,这 2 个标准仅对汞的限量要求不一样,对铬均没有规定。铬的限量要求可以参照 2017 年 9 月即将实施的《食品中污染物限量》中的要求:铬≤1.0 mg/kg(谷物)^[7]。从所测定的 10 批次涪城麦冬重金属含量结果来看,各元素含量均远低于上述标准的限量要求,从侧面反映出麦冬的生长环境良好,这可能与涪城麦冬的主要种植区三台县的生态环境和麦冬植物本身对有害重金属元素的富集能力较弱有关^[8-9]。但该试验未对其种植土壤及其他环境因素进行分析,后续试验可进一步综合考察麦冬种植环境土壤、大气等影响因素。

参考文献

[1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 地理标志产品涪城麦冬:GB/T 23400—2009[S]. 北京:中国标准出版社,2009.
[2] 刘道银. 中国食品中重金属危害现状及检测技术研究[J]. 中国农学通报,2016,32(19):194-198.
[3] 黄卫平,唐红芳,金锋,等. “浙八味”药材重金属和有机氯农药残留分析[J]. 中华中医药学药刊,2013,31(3):624-627.
[4] 张卫佳,陈家树,蒋其斌. 川产道地药材的重金属含量测定与分析[J]. 西北药学杂志,2010,25(2):104-105.
[5] 洪永发. 麦冬药材中重金属的含量考察[J]. 昌河科技,2007(4):37-39.
[6] 中华人民共和国对外贸易经济合作部. 药用植物及制剂进出口绿色行业标准[S]. 北京:中国标准出版社,2001.
[7] 国家食品药品监督管理局. 食品中污染物限量:GB 2762—2017[S]. 北京:中国标准出版社,2017.
[8] 吴发明,杨海燕,杨瑞山,等. 四川麦冬质量评价研究[J]. 中药材,2016,39(8):1803-1808.
[9] 张莲婷,郭巧生,叶正良. 麦冬类药材种植土壤和药材中有机氯农药及重金属残留分析[J]. 中国中药杂志,2010,35(9):1100-1103.