

技术总结

KCFs 识别法的建立及其在引黄饮用水中的应用

祁峰^{1,2}, 王琳¹, 孙艺珂¹

(1. 中国海洋大学 环境科学与工程学院, 山东 青岛 266100; 2. 山东建筑大学 市政与环境工程学院, 山东 济南 250101)

摘要: 建立了饮用水供应链关键控制因子(KCFs)风险识别的方法,该方法以饮用水供应链中监测数据标准化为统一指数的基础,利用改进的主成分分析摒弃冗余信息,将饮用水安全风险因子的识别范围缩小到对水质起决定作用的KCFs中,从而实现快捷、准确的识别。将该方法应用于山东部分引黄饮用水供应链识别风险因子中,发现除微生物与有机物为引黄饮用水的潜在风险外,氟化物和硫酸盐也会产生明显的风险,而此前未见报道。对水质的影响由强到弱依次为水处理效果、原水水质、管网污染。最后,提出了引黄饮用水安全影响清单及应采取的措施,并分析了KCFs识别法的应用前景。

关键词: 引黄饮用水; 关键控制因子; 主成分分析; 标准化指数; 风险因子

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)03-0038-06

Establishment of KCFs Identification Method and Its Application in Drinking Water from the Yellow River

QI Feng^{1,2}, WANG Lin¹, SUN Yi-ke¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. School of Municipal and Environmental Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China)

Abstract: A method for key control factors (KCFs) risk identification of drinking water supply chain was established. Based on standardization of monitoring datas of the drinking water supply chain into a unified index, rapid and accurate identification was realized through disposing redundant information by principal component analysis, and narrowing the identification range of risk factors to the KCFs which had a decisive impact on water quality. This method was applied to identify the risk factors from part of drinking water supply chains pumped from the Yellow River in Shandong. In addition to the potential risk of microorganism and organic matter of drinking water pumped from the Yellow River, fluoride and sulfate were found to pose significant risks, which were never reported before. Water quality was affected by treatment efficiency, raw water quality and pipe network pollution, and the sequence was from strong to weak. Finally, the list of safety impact factors of drinking water pumped from the Yellow River and protective measures were proposed, and the application prospect of KCFs identification method was analyzed.

基金项目: 山东省重点研发计划项目(2016GSF117018); 中国人民政治协商会议山东省委员会“实施城乡居民饮用水污染防治行动”专题调研项目

Key words: drinking water pumped from the Yellow River; key control factors; principal component analysis; standardized index; risk factor

持续保障饮用水供应安全需要对饮用水全供应链,即从集水区到用户的全过程供应链条或网络进行综合管理^[1],这就要求从中识别出威胁水质安全的风险因子。然而,相对于其他饮用水,占山东居民用水量 1/4 的引黄饮用水涉及的供应环节更多,历时更长,潜在污染因素更多^[2]。因此,从引黄饮用水中识别风险因子需考虑更多的环节和水质指标。研究表明,仅有少数因素(如特定水质指标或特定供应环节)对饮用水水质安全起决定性作用^[3],这便是饮用水安全的关键控制因子(KCFs)。例如 WHO 推荐的危害分析和关键控制点(HACCP)就是围绕确定的关键控制点来管理饮用水安全^[4]。但该方案仅以控制微生物污染为目标^[4-5],未将化学性和感官性污染纳入评价体系,并不能全面反映饮用水面临的安全威胁。因此,需要建立一种以饮用水全供应链水质监测数据为基础,从而识别出 KCFs 的方法。

笔者基于对监测数据标准化和主成分分析法的

改进,建立了一套可以用于识别饮用水安全供应链的 KCFs,包括关键控制指标和关键控制环节。该方法以山东省 4 地引黄饮用水水质监测数据为基础,识别出了引黄饮用水供应链中对水质产生决定性作用的 KCFs,并明确其对水质影响贡献的大小及其正负影响效应。同时,在 KCFs 范围内进行了深入分析,确定了引黄饮用水面临的主要水质安全风险因子,建立了水质安全影响清单,并提出了安全风险预警和管理的重点目标。

1 研究对象与方法

1.1 研究对象

研究对象为济南、青岛、滨州和聊城 4 地的引黄饮用水供水系统,共设置 19 个监测点,具体如表 1 所示。对水温、pH 值、氨氮、COD_{Mn}、总硬度、硫酸盐、氯化物、铁、锰、铜、锌、挥发酚、氟化物、氰化物、砷、汞、镉、铅、六价铬、硝酸盐、亚硝酸盐、总大肠菌群、耐热大肠菌群、色度、臭和味及游离氯等 26 个项目进行监测。

表 1 监测点位及信息

Tab. 1 Sites and information of monitoring points

序号	供应城市	监测点名称	监测日期	监测点性质
1	滨州	幸福水库引黄取水口	5 月 12 日	引黄渠闸口
2		幸福水库取水口	7 月 4 日	水库取水口
3		阳信城乡净水厂出水口	7 月 4 日	水厂出水口
4		恒泰家园小区居民水龙头处	7 月 4 日	居民龙头水
5		赵集前街村居民水龙头处	7 月 4 日	居民龙头水
6	青岛	打渔张引黄取水口	5 月 4 日	引黄渠闸口
7		棘洪滩水库取水口	7 月 4 日	水库取水口
8		仙家寨水厂出水口	7 月 4 日	水厂出水口
9		海大崂山校区学生宿舍水龙头处	7 月 4 日	居民龙头水
10	聊城	金水湖引黄取水口	6 月 12 日	引黄渠闸口
11		金水湖取水口	7 月 4 日	水库取水口
12		金水湖供水站出水口	7 月 4 日	水厂出水口
13		朱老庄镇政府院内水龙头处	7 月 4 日	居民龙头水
14	济南	玉清湖水库引黄取水口	7 月 24 日	引黄渠闸口
15		玉清水库取水口	7 月 24 日	水库取水口
16		玉清水厂出水口	7 月 24 日	水厂出水口
17		名士豪庭小区高区居民水龙头处	7 月 24 日	居民龙头水
18		名士豪庭小区低区居民水龙头处	7 月 24 日	居民龙头水
19		青龙小区居民水龙头处	7 月 24 日	居民龙头水

把 19 个监测点分布在 7 条饮用水供应链中,见表 2。每条供应链均为单源单向,即链上每一个监

测点上只有单一上游来水,且全链水为单向流动。每个供应链被4个监测点分为水源地、处理系统和配水系统3个环节。

表2 饮用水供应链

Tab.2 Seven drinking water supply chains

序号	供应城市	供应链名称	涉及的监测点
I	滨州	阳信幸福—恒泰家园	1~4
II	滨州	阳信幸福—赵集前街村	1~3、5
III	青岛	棘洪滩水库—海大崂山	6~9
IV	聊城	谭庄水库—朱老庄镇	10~13
V	济南	济南玉清—名士高区	14~17
VI	济南	济南玉清—名士低区	14~16、18
VII	济南	济南玉清—青龙小区	14~16、19

1.2 饮用水供应链 KCFs 识别方法

1.2.1 数据标准化

优化文献[6]所用的综合水质指数法中分指数的计算方法,对全供应链中除水温与游离氯外的24项指标的监测数据进行统一标准化,以便不同指标数据进行统一对比和综合计算。评价标准统一选用《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)。

① 对于规定了最高浓度限值的指标,用实测数据的占标率概念标准化,见式(1)。

$$I_i = C_i / S_i \quad (1)$$

式中: C_i 为*i*指标的实测浓度; S_i 为相应的标准值。实测值低于最低检出值时,以最低检出值的一半代替实测浓度。

② 对于有上下两个限值的指标,如pH值,指数计算见式(2)。

$$I_i = |C_i - (S_{\max} + S_{\min}) / 2| / [(S_{\max} - S_{\min}) / 2] \quad (2)$$

式中: S_{\max} 为上限值; S_{\min} 为下限值。

③ 对于微生物指标和感官指标,按式(3)、(4)进行标准化。

如细菌总数的指数,当实测值低于限值时,指数以实测值除以标准值作为分指数 I_i ;当实测值高于限值时,指数按照式(3)计算。

$$I_i = 1.00 + \lg(C_i / S_i) \quad (3)$$

如总大肠菌群、耐热大肠菌群及臭和味,若检出,则按式(4)计算指数。

$$I_i = 1.00 + \lg n \quad (4)$$

式中: n 为检出个数,未检出则记为0.5。

1.2.2 影响贡献率的计算

以特定指标在特定环节的指数变化为基本分析

元素建立指数矩阵,按以下步骤计算不同水质指标和矩阵元素对水质的影响贡献率,并按大小排序。

① 将在饮用水供应链中始终未检出和保持不变的指标筛选出来,默认这类指标对水质变化的影响贡献为零,不参与主成分分析,以避免恒量数据造成分析失败。

② 计算水质指标*i*在供水环节*j*(*j*为1、2、3,分别代表水源地、供水系统和配水系统)中的变化值 $\Delta I_{i,j}$,并计算该水质指标到*j*环节处的累积变化值,见式(5)。

$$\Sigma \Delta I_{i,j} = \sum_{j=1}^k |\Delta I_{i,k}| \quad (5)$$

③ 以同一饮用水供应链上水质指标的累积变化值 $\Sigma \Delta I_{i,j}$ 为变量进行主成分分析,将得到的各指标第一主成分的特征根向量作为该指标对水质变化影响的贡献值 ω_i^* 。然后,对指标贡献值 ω_i^* 进行标准化处理,最终得到和为1的各指标对水质的变化贡献率 ω_i 。

④ 按水质指标在同一环节变化的幅值占供应链中总积累变化值的比例,计算该水质指标在不同环节对水质影响的分担率,见式(6)。

$$P_{i,j} = \frac{|\Delta I_{i,j}|}{\Sigma \Delta I_{i,3}} \quad (6)$$

⑤ 按式(7)计算某矩阵元素的贡献率。

$$\psi_{i,j}^* = \omega_i \times P_{i,j} \quad (7)$$

对元素贡献值 $\psi_{i,j}^*$ 进行标准化处理,最终得到和为1的水质变化贡献率 $\psi_{i,j}$ 。

1.2.3 KCFs 的识别、排序与影响性质

根据水质指标和元素按贡献率大小排序的结果,筛选其中累计贡献率超过85%的前*m*个作为KCFs,并根据相应 $\Delta I_{i,j}$ 判断其影响性质:如该值为正,说明该水质指标或矩阵元素对水质安全呈正效应;反之说明趋于污染,对水质安全呈负效应。

2 结果与讨论

2.1 KCFs 识别法的改进

主成分分析法可通过消除重叠信息实现数据的降维,在损失较少数据信息的基础上把众多指标转化为少数有代表性的综合指标。但将主成分分析法用于饮用水全供应链中确定识别风险因子的研究未见报道。

① 建立统一的数据标准化方法:参照文献[6]所用的综合水质指数法中分指数的计算方法,

统一采用 GB 5749—2006 进行标准化,使供应链中的所有数据纳入统一的指数体系。同时对微生物指标的指数计算方法进行改进,使其更符合饮用水供应链中微生物消毒和生长的特征。

② 以指标指数值的累积变化量代替指数值:变量赋值就变成了单增数列,弥补了主成分分析法不考虑变量赋值的次序和供应过程中水质指数上下波动抵消部分影响的缺陷,使分析结果更准确地反映供应链中各因素对水质影响的大小。

③ 主成分分析法一般根据特征值和累计贡献率来确定主成分个数。但唐启义^[7]认为,主成分分析结果中,仅有第一主成分与评价方向一致,具有综合评价功能,是“大小因子”,其他主成分参与加权后反而不利于排序。而且,在7条供应链的主成分分析结果中,第一主成分的贡献率均不低于96%,几乎反映了全部信息,而其他主成分的特征值远远小于1。因此,本方法仅选用第一主成分进行定量评价和排序,从而大大减少了工作量且不影响分析的准确性。

2.2 引黄饮用水中的 KCFs

通过对所涉及的7条引黄饮用水供应链的分析,识别出影响饮用水水质的 KCFs。结果表明,在整个供应链中,对水质具有关键影响的 KCFs 为7~11个,占被分析元素的9.72%~15.28%,但是它们对水质的累积影响贡献率却超过85%。因此,以较小工作量分析 KCFs 就可以客观准确地了解饮用水水质在供应过程中的变化,大大缩小了风险因子的调查范围。

2.3 引黄饮用水中的关键控制因子

2.3.1 关键水质指标

在饮用水供应链中,各项水质指数涉及 KCFs 较多的分别是总大肠菌群(15项)、 COD_{Mn} (15项)、pH值(11项)、氟化物(5项)、硝酸盐(3项)以及硫酸盐(3项)。图1为上述指标在7条供应链中的指数变化情况(图中横轴1、2、3、4分别代表引黄干渠取水口、引黄水库取水口、水厂出水口、居民水龙头处,1—2为水源地环节,2—3为处理环节,3—4为配水环节)。

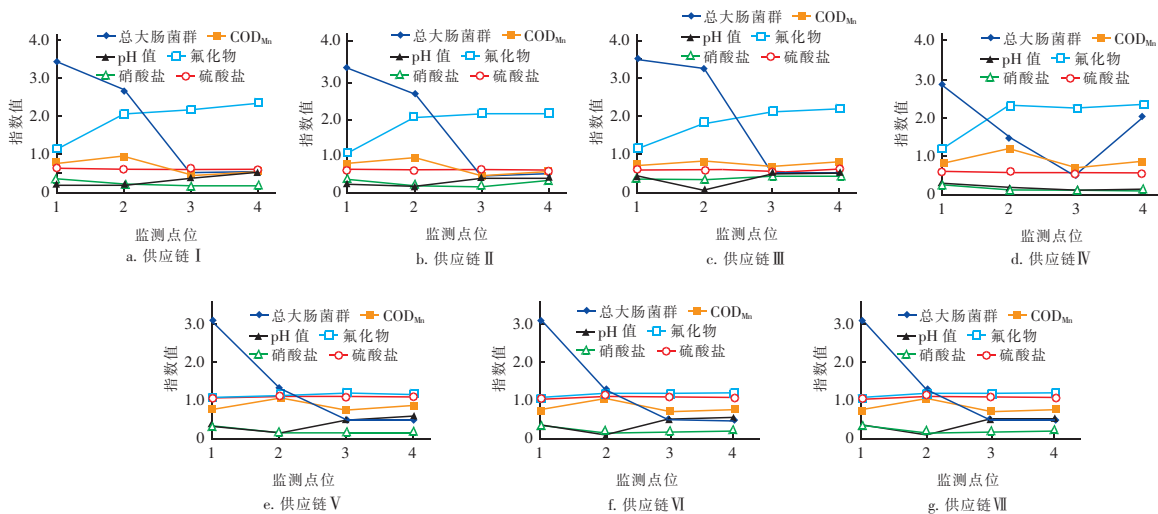


图1 引黄饮用水关键水质指标在各供应链中的变化

Fig. 1 Change of key water quality indexes in seven supply chains of drinking water from the Yellow River

从图1可以看出,在供应链中指数变化最大的指标为总大肠菌群,黄河原水中总大肠菌群远远不能满足饮用水水质要求,但经过水源地和处理环节的净化,在出厂水中已无检出,满足要求。只是在供应链IV输送至朱老庄镇时总大肠菌群又被检出。该处未检出游离氯,其原因是长距离供水使余氯耗尽。这说明,微生物指标是引黄饮用水的首要安全控制目标。以 COD_{Mn} 为代表的有机物在水源地环节均有

所上升甚至超标,这可能是黄河来水处于富营养化状态^[8-11],引黄水库经沉淀后水质清澈且水深较浅,光线充足引起藻类大量繁殖的结果。不过,经过处理环节后至居民家中虽有反弹但不超标,说明各引黄水厂对有机物的去除有效且管网供水造成的有机污染有限。pH值在整个供应链中虽然波动较大,但一直处于合格范围内,说明整个系统对酸碱度的控制是有效的。氟化物在黄河水中就已略有超标,

其后环节浓度又有升高,特别是在滨州、聊城和青岛的水源地环节浓度上升十分明显,使后续监测点测到的氟化物浓度超标1倍以上。硫酸盐在黄河水中浓度较高但不超标,但是在济南经过水源地环节时,浓度明显升高,以致超标。除氟化物和硫酸盐外,黄河水中其他溶解性盐,如氯化物、氮、磷等含量也较高,与文献[11]结果相符。这可能是由于引黄水库建库时间长,水库衬底老化且地处盐碱地区,使土壤中的苦咸离子等溶入水库水中。此外,引黄水在干渠和水库的蒸发浓缩也可能是原因之一。目前尚无引黄水厂采取对应处理措施,因此硫酸盐及氟化物只升不降。考虑到上述指标超标对人体健康不利^[12]且易造成管网黄水和口感不佳^[11],氟超量摄入会导致慢性氟骨症^[13],应加强对溶解性盐,特别是氟化物和硫酸盐的去除以控制风险。除氟化物外,饮用水健康风险评价所重视的其他评价指标,如六价铬、镉、砷、铅、汞、挥发酚、氰化物等均未对引黄饮用水水质产生影响,说明其健康风险可以忽略。

从图1还可以看出,关键水质指标的变化在同一地区的供应链中没有明显的差异,如供应链I、II和供应链V、VI、VII,而在不同地区之间差异比较明显。同一地区所选供应链在水源地和处理环节是一致的,仅在配水过程不同。因此,也可以说明配水环节对饮用水水质的影响远小于水源地和处理系统。

2.3.2 关键控制环节

处理环节涉及到的KCFs共23项,其中发生正效应有15项,负效应有8项,且正效应KCFs的影响明显高于负效应KCFs;水源地环节涉及29项,其中正效应16项,负效应13项,且正效应KCFs的影响略高于负效应KCFs;配水环节涉及5项,均呈负效应,但除供应链IV中总大肠菌群指标在配水阶段影响贡献率最大外,其他KCFs的影响均较小。上述分析说明,对引黄饮用水水质影响最大的是水处理效果,净化作用主要是在处理环节完成的,对饮用水安全保障起决定性作用;原水水质有较大影响,水源地环节总体上对水质起到了净化作用,引黄干渠和引黄水库没有受到明显污染;除个别地区外,配水环节对水质的影响不大,但管网中微生物和有机物污染的潜在风险仍存在。

2.4 水质风险因子与安全影响清单

根据以上分析,可以将引黄饮用水供应过程中的KCFs分类,从中调查安全风险因子及应采取的

措施,形成水质安全影响清单。

① 缺少控制措施的风险点:氟化物和硫酸盐,应加强引黄干渠和水库衬底维护与更新,防止盐碱地区土壤中苦咸离子溶入;在处理环节增加除氟和脱盐措施;在水源地和处理环节增加控藻和预氧化措施,以进一步降低有机物的影响。

② 有控制措施但显薄弱的风险点:虽然配水系统中有余氯进行持续消毒,但供水范围的扩大使配水系统不断延长,以及需要二次供水的高层建筑物增多,配水系统面临的污染风险加大。如本研究中就有配水系统中总大肠菌群、 COD_{Mn} 和色度产生较大负效应使水质变差的案例。因此,当配水管路过长或有二次供水时,应考虑加强水质监测和二次处理,如补充消毒剂等。

③ 依赖于现有控制措施有效性的潜在风险点:总大肠菌群涉及的KCFs在前两个环节有较高的正效应,这反而说明微生物指标合格是由于消毒杀菌措施,消毒作用失效将是引黄饮用水最大的潜在风险。因此,应设置消毒设施失效的预警条件和替代措施。

2.5 KCFs法的优点和应用前景

由于监测点位、项目和频率不断增加,现在可从饮用水供应链获得越来越多的监测数据,这反而使风险因子的识别工作变得复杂,降低了工作效率以及结果的准确性。KCFs法把识别范围缩小到风险因子可能存在的范围,舍弃了绝大多数的无用信息,使利用海量的监测数据快捷准确识别出饮用水安全风险因子成为可能。由于具有大数据信息挖掘特征,数据量越大越能体现该方法高效、准确的特点。因此,本研究是KCFs法可行性的一次简单尝试,在分析大型供水系统风险因子方面将有更佳的效果。

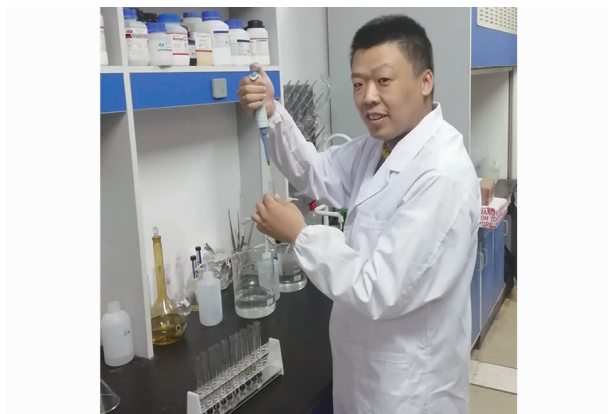
3 结论

通过对传统的监测数据标准化方法和主成分分析法进行改进,建立了一套识别饮用水供应链中KCFs的方法,以从较小范围中快捷、准确地识别风险因子。基于山东部分引黄饮用水的监测数据验证了该方法识别KCFs的可行性,并进一步识别出引黄饮用水的安全风险因子。结果表明,虽然在水源地和处理环节对微生物和有机物污染有较好的处理效果,但处理措施失效和配水系统污染是潜在的威胁;氟化物和硫酸盐产生了明显的饮水安全风险,且应对措施缺失;处理效果对饮用水水质影响最大,其

次是原水水质,除个别地区外,配水环节对水质的影响不大。同时,提出引黄饮用水安全影响清单以及应采取的措施。可以预见,具有数据挖掘特点的KCFs法将在大型供水系统中有更广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 修长昆. 我国城市饮用水全过程控制法律制度研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2014.
Xiu Changkun. Research on the Whole Process Control Legal System of Urban Drinking Water in China[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014 (in Chinese).
- [2] Sinclair M, O'toole J, Gibney K B, *et al.* Evolution of regulatory targets for drinking water quality[J]. *Journal of Water and Health*, 2015, 13(2): 413 - 426.
- [3] Rak J, Pietruch K. Some factors of crisis management in water supply system [J]. *Environment Protection Engineering*, 2008, 34(2): 57 - 65.
- [4] 孙傅, 陈吉宁, 曾思育. 城市给水系统应用 HACCP 体系的研究与实践进展[J]. *中国给水排水*, 2006, 22(12): 1 - 5.
Sun Fu, Chen Jining, Zeng Siyu. Progress in research and practice of the application of HACCP system to urban water supply system [J]. *China Water & Wastewater*, 2006, 22(12): 1 - 5 (in Chinese).
- [5] 姜晓华, 汤芳, 孙丽娟, 等. 基于 HACCP 原理的再生水粪大肠菌安全控制管理研究[J]. *中国给水排水*, 2015, 31(14): 7 - 11.
Jiang Xiaohua, Tang Fang, Sun Lijuan, *et al.* Control of fecal coliform in reclaimed water based on HACCP principles [J]. *China Water & Wastewater*, 2015, 31(14): 7 - 11 (in Chinese).
- [6] 袁东, 陈仁杰, 钱海雷, 等. 城市生活饮用水综合指数评价方法建立及其应用[J]. *环境与职业医学*, 2010, 27(5): 257 - 260.
Yuan Dong, Chen Renjie, Qian Hailei, *et al.* An integrated index approach established and its application to evaluate drinking water quality in Shanghai [J]. *Journal of Environmental & Occupational Medicine*, 2010, 27(5): 257 - 260 (in Chinese).
- [7] 唐启义. DPS® 数据处理系统[M]. 3版. 北京: 科学出版社, 2013.
Tang Qiyi. DPS® Data Processing System[M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2013 (in Chinese).
- [8] Pan G, Krom M D, Zhang M, *et al.* Impact of suspended inorganic particles on phosphorus cycling in the Yellow River(China) [J]. *Environ Sci Technol*, 2013, 47(17): 9685 - 9692.
- [9] Shan B Q, Li J, Zhang W Q, *et al.* Characteristics of phosphorus components in the sediments of main rivers into the Bohai Sea [J]. *Ecol Eng*, 2016, 97: 426 - 433.
- [10] Zhang W, Jin X, Zhu X, *et al.* Phosphorus characteristics, distribution, and relationship with environmental factors in surface sediments of river systems in Eastern China [J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2016, 23(19): 19440 - 19449.
- [11] 刘苗, 王敏, 顾军农, 等. “引黄入京”工程南输水线水源水质分析评价[J]. *中国给水排水*, 2016, 32(7): 6 - 9.
Liu Miao, Wang Min, Gu Junnong, *et al.* Analysis and evaluation on water quality of south water delivery line of water diversion project from Yellow River to Beijing [J]. *China Water & Wastewater*, 2016, 32(7): 6 - 9 (in Chinese).
- [12] 丁国玉, 张斌, 万正茂, 等. 场地健康风险评估及生物可给性的应用[J]. *环境科学与技术*, 2014, 37(6N): 372 - 376.
Ding Guoyu, Zhang Bin, Wan Zhengmao, *et al.* Health risk assessment and application of bioaccessibility [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 37(6N): 372 - 376 (in Chinese).
- [13] Guissouma W, Hakami O, Al-Rajab A J, *et al.* Risk assessment of fluoride exposure in drinking water of Tunisia [J]. *Chemosphere*, 2017, 177: 102 - 108.



作者简介: 祁峰 (1976 -), 男, 山东济南人, 博士, 副教授, 主要研究方向为水质评价。

E-mail: qifeng@sdjzu.edu.cn

收稿日期: 2018 - 07 - 12