

# KCFs 识别法筛查引黄济青集水区水质安全风险

王琳<sup>1</sup>, 祁峰<sup>1,2</sup>, 孙艺珂<sup>1</sup>, 李小彩<sup>3</sup>

(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; 3. 山东省建设项目环境评审服务中心, 山东 济南 250012)

**摘要:** 鉴于长距离调水工程需面临复杂多变的环境条件, 筛查其水质安全风险有利于加强受水地区饮用水安全风险管控, 保障居民饮水安全。以引黄济青集水区为例, 基于集水区沿线监测数据, 识别决定引黄济青集水区水质的关键控制因子(KCFs), 并在其范围内进一步分析筛查出的风险因子, 确定水质安全风险清单。分析结果表明, 由于取水时泥沙吸附的污染物释出及干渠后段Fe和TP等污染, 集水区水质两度变差, 是水质风险集中的区域, 但在随后的环节中水质好转, 较大程度上消除了风险; 氮和磷是影响集水区水质的主要指标, 但南水北调的水明显缓解了干渠的富营养化; 调水汇入量和pH值的变化、湿地系统和棘洪滩水库净化功能丧失则会引发潜在的安全风险。因此, KCFs识别法应用于长距离调水工程是可行的。

**关键词:** KCFs识别法; 风险因子; 水质安全; 引黄济青; 集水区

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)13-0072-06

## Screening Water Quality Safety Risks in Catchment from Yellow River to Qingdao by KCFs Recognition Method

WANG Lin<sup>1</sup>, QI Feng<sup>1,2</sup>, SUN Yi-ke<sup>1</sup>, LI Xiao-cai<sup>3</sup>

(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; 3. Shandong Construction Project Environmental Assessment Service Center, Jinan 250012, China)

**Abstract:** As long distance water diversion projects facing complex and variable environmental conditions, screening water quality safety risk is conducive to strengthening the risk management and control of drinking water in the service area and ensuring the safety of drinking water for residents. Based on the monitoring data obtained along the catchment of water diversion from Yellow River to Qingdao, the key control factors (KCFs) which determined the water quality in the catchment were identified, amongst which the risk factors were further analyzed and screened to determine the list of water quality safety risks. The results showed that the water quality of the catchment had deteriorated twice due to the release of pollutants adsorbed by sediment during water intake and iron and phosphorus pollution in the second half section of the main canal, and the catchment was a high water quality risk area. However, the subsequent improvement of water quality largely eliminated the risk. Nitrogen and phosphorus were the

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

main indexes influencing the water quality, but the water from south-to-north diversion obviously alleviated the eutrophication risks in the main canal. The change of water intake & pH and the invalidation of the wetland system & reservoir purification function could lead to potential safety risks. Therefore, it is feasible to apply KCFs recognition method in long distance water diversion projects.

**Key words:** KCFs recognition method; risk factor; water quality safety; water diversion from Yellow River to Qingdao; catchment

长距离调水工程是国家优化水资源配置、缓解水资源区域性不平衡的重大战略举措。例如,为缓解青岛地区缺水状况,通过建设引黄济青工程将黄河水引向青岛<sup>[1]</sup>。该工程在南水北调东线工程建成后成为其重要组成部分。工程建成后,外调水源一方面成为青岛居民的重要饮用水水源,目前超过青岛地区供水量的一半,其水质安全对保障青岛居民的身体健康有重大意义。另一方面,跨流域调水涉及的集水区域极大,包括了自然河段、引水工程、储水水库等环节,仅引黄济青工程全长就达290 km,包括了253 km的输水明渠,途经4个市地、10个县市区<sup>[1]</sup>。在如此漫长而环境条件变化较大的调水过程中,其水质安全必然暴露在众多风险之下<sup>[2]</sup>,分析水质监测结果和影响量化也非常困难<sup>[3]</sup>,从而使水质安全风险管控工作十分艰巨。因此,需要寻找一种简单、快速的风险筛查方法来降低长距离调水工程水质安全管理难度,并提高风险预判的准确性。

研究表明,尽管潜在的风险较多,但仅有少数因素会对饮用水水质安全起到决定性影响<sup>[4]</sup>,即关键控制因子(KCFs)。以此为据,在改进传统监测数据标准化方法和主成分分析法基础上,建立了KCFs识别法<sup>[5]</sup>。该方法先根据监测数据识别KCFs,再从KCFs中筛查集水区水质安全风险因子,不仅使风险因子筛查工作量大大减少,而且针对性大大增强,从而可以快捷准确地完成水质风险筛查工作。该方法已应用于山东引黄饮用水<sup>[5]</sup>及泰安市饮用水供应链中风险因子的筛查。由于是为筛查供应链中水质安全风险因子而设计的,该法显然也适用于长距离调水集水区的水质风险筛查。

为了了解影响青岛地区引黄集水区的潜在安全风险,笔者以集水区沿线的水质监测数据为基础,利用改进的KCFs识别法筛选出对引黄水质产生决定性影响的KCFs(包括关键控制指标、分段和元素),并明确其对水质影响贡献的大小及正负影响效应。

根据筛查出的集水区水质安全风险因子,将最有可能引发引黄水质安全危害的区域和污染物质列入水质安全影响清单,从而为集水区水质管理提供预警和预防。

## 1 研究对象和方法

### 1.1 研究对象

研究对象为青岛地区引黄饮用水的源水集水区,包括黄河干流、引黄济青主干渠和棘洪滩水库。本研究在集水区共设7个监测点(见表1),对水温、pH值、高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>)、化学需氧量(COD)、五日生化需氧量(BOD<sub>5</sub>)、氨氮、总磷、总氮、铜(Cu)、氟化物(F)、硒(Se)、砷(As)、汞(Hg)、镉(Cd)、六价铬(Cr<sup>6+</sup>)、铅(Pb)、氰化物、挥发酚、阴离子合成洗涤剂、硫化物、粪大肠菌群、硫酸盐、氯化物、硝酸盐、铁(Fe)和锰(Mn)等28个指标进行监测。除水温外,其余27项指标的监测数据将作为水质风险筛查的数据集。

表1 监测点位置及信息

Tab.1 Sites and information of monitoring points

序号	监测点名称	监测日期	监测点性质
1	黄河博兴段	2017-04-05	黄河干流
2	通滨闸后	2017-04-08	引黄济青干渠渠首
3	陈户新村	2017-04-08	与南水北调水混合后
4	丁庄小清河子闸	2017-04-08	小清河分洪道
5	宋庄分水闸	2017-04-09	至青岛与至烟威分水处
6	棘洪滩水库进水	2017-04-09	引黄济青干渠终点
7	棘洪滩水库出水	2017-05-02	水厂取水点

监测点将引黄济青集水区分分为7个部分以研究各分段对水质的影响:Ⅰ段(黄河干流自然河段)、Ⅱ段(干渠渠首)、Ⅲ段(通滨闸至陈户新村)、Ⅳ段(陈户新村至丁庄小清河子闸)、Ⅴ段(丁庄小清河子闸至宋庄分水闸)、Ⅵ段(宋庄分水闸至棘洪滩水库进水处)和Ⅶ段(棘洪滩水库)。

### 1.2 KCFs识别法及其改进

利用已在山东引黄饮用水供应链中应用过的KCFs识别法<sup>[5]</sup>完成原始数据的标准化、影响贡献率

的计算、KCFs 识别和影响效应的确定,并将结果作为水质风险筛查的依据。为了使自然河道取水时可能存在的水质风险也被列入考察范围,并适应集水区的特点,对 KCFs 识别法进行了两处改进:

① 原方法针对饮用水供应链进行分析,因此选用《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)进行标准化<sup>[5]</sup>;而本研究涉及的水体均为地表水,因此均选用《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中Ⅲ类水体限值作为标准化的依据。

② 影响贡献率的计算中涉及到第  $i$  个指标积累到  $j$  监测点的积累变化值  $\Sigma\Delta I_{i,j}$ 。原方法中,  $\Sigma\Delta I_{i,j}$  从第 1 个监测点开始计算,当  $j=1$  时,  $\Sigma\Delta I_{i,j}=0$ <sup>[5]</sup>;而本研究改进了 KCFs 识别法,考虑了  $\Sigma\Delta I_{i,j}$  第 1 个监测点前水质变化的情况,认为第 1 个监测点中所有污染均来自黄河,当  $j=1$  时,  $\Sigma\Delta I_{i,j}$  等于指标  $i$  在第 1 个监测点的监测值。

## 2 结果与讨论

### 2.1 KCFs 识别结果

利用 KCFs 对本次监测数据进行分析,共识别出 7 个关键控制指标、6 个关键控制分段和 33 个关键控制元素。

#### 2.1.1 关键控制指标

表 2 为关键控制指标识别结果。可以看出,从引黄济青集水区共识别出 7 个关键控制指标,占本研究分析指标的 25.93%,但对水质影响的贡献率达到 85.69%;涉及到 27 个关键控制元素,占识别出的关键控制元素的 81.82%。说明这些关键控制指标数量虽不多,却对水质的好坏起决定性作用。

表 2 关键控制指标识别结果

Tab. 2 Identified results of key control indexes

排序	指标	贡献率/%	影响效应	关键控制元素数量/个
1	TP	26.11	正	6
2	Fe	20.44	负	6
3	Cr <sup>6+</sup>	12.44	—	5
4	TN	11.94	正	2
5	COD	5.66	正	3
6	COD <sub>Mn</sub>	5.56	正	2
7	锰	3.54	—	3
总计		85.69		27

从筛选的关键控制指标可以看出,TP 和 TN 对水质的影响较大,分别位于第 1 位和第 4 位。特别是 TP,涉及到了 6 个关键控制元素,说明其在集水

区的 6 个分段中对水质产生了显著影响。另外,识别出 Fe、Cr<sup>6+</sup>、锰 3 个金属离子关键控制指标和 COD、COD<sub>Mn</sub> 两个有机物关键控制指标。上述指标中,尽管 Cr<sup>6+</sup> 和锰在干渠的部分分段中受到了污染而使指数上升,但由于自身的净化作用,在棘洪滩水库出水中恢复到最初(未检出)的水平;TP、TN、COD<sub>Mn</sub>、COD 总体上指数下降,说明干渠和水库的净化作用大于污染作用;Fe 的指数上升明显,说明在集水区存在明显污染,而且净化作用不足以抵消污染作用,应予以重点关注。关键控制指标仅涉及到 Cr<sup>6+</sup> 一项毒理性指标,说明引黄水中毒理性指标比较容易控制<sup>[6]</sup>,对人体健康的直接影响较小。

#### 2.1.2 关键控制分段

表 3 为关键控制分段识别结果。可以看出,集水区的 7 个分段中有 6 个被识别为关键控制分段。分析原因,相对于水质指标,集水区各分段对水质影响贡献率的差别较小,其对水质影响的差别更多地体现在影响效应为积极还是消极上。图 1 则是通过综合水质指数的变化反映集水区水质的变化趋势(图中监测点之间的连线仅表现监测点之间水质的优劣,而不反映段中的变化;假设源头水的指数为零,即不含任何污染物)。

表 3 关键控制分段识别结果

Tab. 3 Identified results of key control segmentations

排序	分段	贡献率/%	综合水质指数变化	影响效应	关键控制元素数量/个
1	I	20.13	0.880	负	10
2	Ⅶ	19.01	-0.798	正	6
3	Ⅵ	16.67	0.670	负	3
4	Ⅱ	15.21	0.687	负	4
5	Ⅲ	11.48	-0.569	正	4
6	V	8.81	0.028	负	2
总计		91.31			29

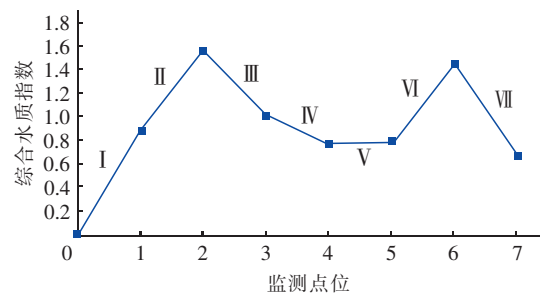


图 1 引黄济青集水区综合水质指数的变化趋势

Fig. 1 Change of comprehensive water quality index in catchment from Yellow River to Qingdao

从图1可以看出,引黄济青集水区水质变化的总趋势是变差(Ⅰ、Ⅱ段)—好转(Ⅲ段)—平稳(Ⅳ、Ⅴ段)—变差(Ⅵ段)—好转(Ⅶ段)。Ⅰ段考虑的是自然河段水质的影响,是引黄济青水质的基础。结合表3可以看出,该段不仅对水质的影响最大,而且涉及的关键控制元素最多。特别是硫酸盐、氟化物和硝酸盐等可溶性盐指标仅在Ⅰ段处被筛选为关键控制元素,说明三者 在调水过程中无明显变化,黄河水质对该类指标的好坏起决定性影响。Ⅵ段和Ⅱ段是两个对水质有负效应的分段,造成在通滨闸后和棘洪滩水库进水处成为整个集水区水质最差的点。Ⅵ段虽然水质明显下降,但 该段只涉及3个关键控制元素( $\text{Cr}^{6+}$ 、Fe和TP),可见虽然影响该段的水质指标少,但影响程度大,可能存在特定的污染源。Ⅱ段是从黄河向干渠取水的环节,泵站汲水造成吸附在黄河泥沙上的污染物释出可能是该段对水质产生负效应的原因,但释出的污染物基本在随后的沉砂池和湿地系统中被去除<sup>[1]</sup>。

Ⅶ段和Ⅲ段是两个对水质的影响有正效应的分段。Ⅶ段不仅对水质影响的排序为第2位,而且除了溶解氧和TN两个指标外,大多数指标在该段对水质的影响都具有正效应,说明水库的水质净化对保障水质安全有非常重要的意义。相对于黄河水,长江水的氮和磷含量低得多<sup>[7]</sup>,而且进行监测的4月份正是一年中黄河水氮和磷含量最高时期,因而Ⅲ段中南水北调水的汇入对TN和TP的浓度下降有很大的贡献。

此外,引黄济青沉砂池被建成了一个湿地系统,张瑞丽<sup>[1]</sup>和修春海<sup>[8]</sup>等均认为引黄干渠设置湿地对TP有明显的去除作用。Ⅳ段陈户新村至丁庄小清河子闸是对水质贡献最小的分段,仅为8.73%,是唯一未识别为KCFs的分段。而Ⅴ段丁庄小清河子闸至宋庄分水闸对水质的贡献率仅比Ⅳ段略高,说明在引黄济青的中段陈户新村到宋庄分水闸之间既没有大的污染源,也没有明显的净化效应。

2.1.3 关键控制元素

表4为关键控制元素识别结果。可以看出,从引黄济青干渠共识别出33个关键控制元素,占分析元素总数的17.46%,但它们对水质影响的贡献率达到85.30%。可见,基于这些关键控制元素进行源水集水区的安全风险分析目标性更强,并且准确性有保证。

表4 关键控制元素识别结果

Tab.4 Identified results of key control elements

排序	元素(指标-分段)	贡献率/%	影响效应
1	TN-Ⅰ	7.73	负
2	Fe-Ⅵ	6.43	负
3	Fe-Ⅶ	6.04	正
4	TP-Ⅵ	5.88	负
5	TP-Ⅶ	5.70	正
6	TP-Ⅱ	5.48	负
7	TP-Ⅲ	4.36	正
8	Fe-Ⅱ	3.66	负
9	$\text{Cr}^{6+}$ -Ⅴ	3.49	负
10	$\text{Cr}^{6+}$ -Ⅵ	3.32	正
11	$\text{Cr}^{6+}$ -Ⅱ	2.64	负
12	TP-Ⅳ	2.63	正
13	TN-Ⅲ	2.52	正
14	$\text{COD}_{\text{Mn}}$ -Ⅶ	2.12	正
15	Fe-Ⅴ	2.04	正
16	COD-Ⅶ	1.80	正
17	$\text{COD}_{\text{Mn}}$ -Ⅰ	1.65	负
18	TP-Ⅰ	1.60	负
19	$\text{Cr}^{6+}$ -Ⅳ	1.53	正
20	Fe-Ⅲ	1.41	正
21	硫酸盐-Ⅰ	1.36	负
22	Mn-Ⅲ	1.30	负
23	Mn-Ⅳ	1.30	负
24	pH值-Ⅰ	1.28	负
25	COD-Ⅱ	1.06	负
26	氟化物-Ⅰ	0.98	负
27	Mn-Ⅰ	0.93	负
28	COD-Ⅰ	0.90	负
29	Fe-Ⅳ	0.90	负
30	$\text{BOD}_5$ -Ⅶ	0.90	正
31	硝酸盐-Ⅰ	0.81	负
32	$\text{Cr}^{6+}$ -Ⅶ	0.77	正
33	$\text{BOD}_5$ -Ⅰ	0.76	负
总计		85.30	

总体来说,呈负效应的关键控制元素主要出现在Ⅰ段、Ⅱ段和Ⅵ段,包括营养指标TP、TN,一般化学性金属离子指标Fe、Mn,有机物指标 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、COD、 $\text{BOD}_5$ ,以及仅在Ⅰ段中出现的硫酸盐、氟化物和硝酸盐,重金属指标中仅有 $\text{Cr}^{6+}$ 。有10个水质指标在特定分段对水质的影响贡献率>3%,对水质产生了显著影响。其中,TN-Ⅰ和Fe-Ⅱ表现为负效应,这两个指标在引黄水到干渠时呈现出较大风险; $\text{Cr}^{6+}$ 在Ⅴ段、TP在Ⅵ段和Ⅱ段、Fe在Ⅵ段表现为较大的负效应,说明宋庄分水闸至棘洪滩水库进水



处之间存在 Fe 和 TP 的污染源,在丁庄小清河子闸至宋庄分水闸之间存在  $\text{Cr}^{6+}$  的污染源,在取水环节有明显的 TP 污染。特别是在Ⅵ段虽然仅识别出了3个关键控制元素,但 Fe 和 TP 排序比较靠前(分别为第2位和第4位),均为负效应,说明 TP 和 Fe 是引黄济青干渠后段水质恶化的主因,应予以重视。考虑到底泥中 TP 和 Fe 的释放相互影响且均受 pH 值等因素的制约<sup>[9-10]</sup>,该段处 Fe 和 TP 污染可能是底泥短期释放的结果。至于Ⅱ段中 TP 的作用,应是泵站汲水造成吸附在黄河泥沙上的磷释出的结果。不过上述3个指标在随后分段中表现为程度相近的正效应,说明后续净化作用基本抵消了污染作用。Mn、Fe 和  $\text{Cr}^{6+}$  等金属离子净化作用可能与黄河水偏碱性及泥沙的吸附作用有关<sup>[6]</sup>。然而,一旦集水区的 pH 值发生较大变化,沉积在底泥中的金属离子就有再次释出的风险<sup>[11-12]</sup>。当南水北调水和黄河水的引水量发生变化时,这种情况也有可能发生。

## 2.2 水质风险因子与安全影响清单

### ① 来源水中的水质风险

黄河来水中的高氮、磷含量会对饮用水水质带来明显的风险,而长江水的氮、磷含量相对较低,有降低该类风险的作用,因此应重视对来源地黄河和长江相应污染物的监测,努力削减黄河流域氮、磷污染的排放。黄河来水中硫酸盐、氟化物和硝酸盐等可溶性盐对水质有一定的影响,并且在调水过程中不易通过自然净化作用去除,因此应考虑在水厂处理工艺中增加一定的脱盐措施;黄河水所含泥沙含有大量污染物质,不应忽略当汲水扰动和 pH 值变化时释出的风险。

### ② 调水过程中的水质风险

从黄河取水时造成泥沙中释出污染物,以及干渠后半段,即宋庄分水闸至棘洪滩水库进水处之间明显的 TP、Fe 和  $\text{Cr}^{6+}$  污染,是调水过程中水质风险的主要来源。因此,应减少黄河取水处汲水时的扰动,并重点排查干渠后半段的污染源,控制调水过程中的水质风险。

### ③ 潜在的水质风险

南水北调水的稀释和渠首沉砂池湿地的吸附去除,对控制氮、磷以及泥沙中释出的污染物有极大贡献,因此应考虑无南水北调水汇入或湿地系统失效造成干渠水体富营养化和水质恶化的风险。而黄河

水的高 pH 值促进了 Fe、Mn 及重金属离子沉淀,有利于消除这些金属离子的污染,但也应考虑 pH 值下降使金属离子从底泥中释出的风险。棘洪滩水库对多数水质指标有明显的净化作用,属于在水厂处理前水质安全的最后屏障,应加强对水质的安全管理,充分发挥其净化功能并防止该功能的丧失。

## 2.3 KCFs 识别法的应用前景

KCFs 识别法已在饮用水供应链风险因子筛查中得到应用。该方法通过对饮用水供应链沿程监测点位的数据进行挖掘,筛查出对饮用水供应链有决定性影响的 KCFs,从中识别出主要的水质安全风险,使风险因子筛查变得简单而更有针对性。长距离调水工程面临的水质安全风险虽然种类多、分布广,但决定水质的往往只是其中较少一部分风险因子,这一点与饮用水供应链中水质安全风险的特点相似。因此,本研究尝试将 KCFs 识别法应用到引黄济青工程整个集水区的水质安全风险筛查中,将对集水区水质有决定性影响的 KCFs 从其面临的复杂多变环境中识别出来。筛查结果证实了其在该项目中应用的可行性,这无疑为我国长距离调水工程的安全保障提供了新的工具。随着对饮用水安全重视程度的提高,在长距离调水工程中将会有更多的监测点,以更高的频率监测更多的水质指标。这意味着可获得的监测数据量是十分巨大的。KCFs 识别法具备大数据信息的挖掘特征,可舍弃绝大多数的无用信息,因而在面临海量监测数据时将更有优势。因此,该方法在长距离调水工程风险因子筛查中有广阔的应用前景。

## 3 结论

本研究利用 KCFs 识别法,基于对引黄济青集水区水质监测数据,识别出了影响引黄饮用水源水水质的 KCFs,并进一步识别出其安全风险因子,提出引黄济青集水区水质安全影响清单以及应采取的措施。识别出的风险因子表明,在整个供应链中水质下降的环节是黄河来水、干渠渠首取水段和宋庄分水闸至棘洪滩水库段,而在通滨闸至陈户新村段和棘洪滩水库由人工湿地、南水北调水稀释及自然净化的作用下水质大大改善;特别是作为集水区水质的最后屏障,棘洪滩水库自净功能应予以重点保障。从水质指标上看,黄河来水中氮、磷营养物质,以及干渠后半段 Fe、TP 存在明显的安全风险,应是防控的重点;来水中可溶性盐含量高而无法在供水

过程中去除,可考虑脱盐措施;南水北调水汇入量的变化、湿地系统失效可能造成富营养化和金属离子释出的潜在风险。本研究的结果证实了KCFs识别法可用于筛查长距离调水工程水质安全的风险,并具有广阔的应用前景。

#### 参考文献:

- [1] 张瑞丽. 引黄济青输水沿程水质变化及对策研究[D]. 青岛:青岛理工大学,2011.  
Zhang Ruili. Study on the Change of Water Quality of the Process in Long Distance Water Transfer of the Project of Water Diversion from Yellow River into Qingdao [D]. Qingdao: Qingdao Technological University,2011 (in Chinese).
- [2] Tang C H, Yi Y J, Yang Z F, *et al.* Water pollution risk simulation and prediction in the main canal of the South-to-North Water Transfer Project [J]. Journal of Hydrology, 2014, 519: 2111 – 2120.
- [3] 林爱武. 饮用水水质评价体系建立的构想[J]. 中国给水排水, 2016, 32(18): 19 – 22, 28.  
Lin Aiwu. Conception of establishing drinking water quality evaluation system [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(18): 19 – 22, 28 (in Chinese).
- [4] Rak J, Pietrucha K. Some factors of crisis management in water supply system [J]. Environment Protection Engineering, 2008, 34(2): 57 – 65.
- [5] 祁峰, 王琳, 孙艺珂. KCFs识别法的建立及其在引黄饮用水中的应用[J]. 中国给水排水, 2019, 35(2): 38 – 43.  
Qi Feng, Wang Lin, Sun Yike. Establishment of KCFs identification method and its application in drinking water from Yellow River [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(2): 38 – 43 (in Chinese).
- [6] 张晓琳, 陈洪涛, 姚庆祯, 等. 黄河下游水体中重金属元素的季节变化及入海通量研究[J]. 中国海洋大学学报, 2013, 43(8): 69 – 75.  
Zhang Xiaolin, Chen Hongtao, Yao Qingzhen, *et al.* The seasonal changes and flux of trace elements in the lower reaches of Yellow River [J]. Periodical of Ocean University of China, 2013, 43(8): 69 – 75 (in Chinese).
- [7] 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).
- [8] 修春海, 焦盈盈, 武道吉. 表流人工湿地改善玉清湖入库水水质的研究[J]. 中国给水排水, 2008, 24(13): 100 – 102, 105.  
Xiu Chunhai, Jiao Yingying, Wu Daoji. Surface-flow constructed wetland for improvement of water quality into Yuqing Lake Reservoir [J]. China Water & Wastewater, 2008, 24(13): 100 – 102, 105 (in Chinese).
- [9] Zhang Y, He F, Kong L W, *et al.* Release characteristics of sediment P in all fractions of Donghu Lake, Wuhan, China [J]. Desalination and Water Treatment, 2016, 57(53): 25572 – 25580.
- [10] Ding S, Wang Y, Wang D, *et al.* In situ, high-resolution evidence for iron-coupled mobilization of phosphorus in sediments [J]. Sci Rep, 2016. DOI:10.1038/srep24341.
- [11] Chou P I, Ng D Q, Li I C, *et al.* Effects of dissolved oxygen, pH, salinity and humic acid on the release of metal ions from PbS, CuS and ZnS during a simulated storm event [J]. Sci Total Environ, 2018, 624: 1401 – 1410.
- [12] Zang F, Wang S L, Nan Z R, *et al.* Influence of pH on the release and chemical fractionation of heavy metals in sediment from a suburban drainage stream in an arid mine-based oasis [J]. Journal of Soils and Sediments, 2017, 17(10): 2524 – 2536.



作者简介:王琳(1966 – ),女,山东潍坊人,博士,现任中国海洋大学特聘教授,主要研究方向为水质评价。

E-mail: lwangouc@126.com

收稿日期:2018 – 12 – 06