

黄河呼和浩特段水体污染风险评估及其发生特性

冯利忠¹, 裴国霞^{1*}, 吕欣格², 张 琨², 王 超²

(1.内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018; 2.内蒙古自治区环境科学研究院, 呼和浩特 010010)

摘要:通过建立风险评估模型、风险分级级别,对2011—2013年黄河呼和浩特段不同断面、时间和指标的水质数据进行时空分布上的水体污染风险分析。结果表明:水污染风险时空分布不具有相关性,但有较强的局地性、偶发性、变化性;常规指标、金属指标、有机化合物指标、阴离子及盐类指标在时间、空间上的水污染风险值分别为5.71~7.28、1.94~17.58、1.37~1.60、0.21~1.72、1.30~0.87、0.68~3.18、1.18~1.44、0.68~0.86;浑津桥、小入黄口断面处的污水排放致使常规指标在主干流、各支流均处于高风险状态,但其他3类指标均处低风险水平及以下,且整体上各支流风险程度高于主干流。如若无重大污染事件发生,则各项指标风险值较低且稳定,也无水污染风险事件引发的趋势。

关键词:黄河;断面;水污染风险;指标;评估

中图分类号:X820.4 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2015)07-1349-07 doi:10.11654/jaes.2015.07.017

Risk Assessment and Genetic Characteristics of Water Pollution of the Yellow River at Huhhot, China

FENG Li-zhong¹, PEI Guo-xia^{1*}, LÜ Xin-ge², ZHANG Kun², WANG Chao²

(1.College of Water Resources and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, China; 2.Autonomous Region Environmental Science Research Institute, Inner Mongolia, Huhhot 010010, China)

Abstract: The Yellow River at Huhhot has suffered from industrial and agricultural pollution. Here we adopted the existing Chinese environmental standards and water pollution indexes to perform risk assessment of this water body. Eco-systems and human health index were taken as receptors. Risk assessment model and risk grades were applied to temporal and spatial risk assessments of water pollution based on the water quality data of different sections, different time and different indexes of the Yellow River, Huhhot from the year 2011 to 2013. The results were also compared by using risk index assessment method, probabilistic risk assessment method, and genetic mutation caused by accident model assessment based on the key pollutant monitoring data. Water pollution risk did not show obvious temporal and spatial distributions, but had a strong localization, contingency and variability. The temporal and spatial variation of water pollution risk values were 5.71~7.28, 1.94~17.58; 1.37~1.60, 0.21~1.72; 1.30~0.87, 0.68~3.18; 1.18~1.44, 0.68~0.86 for conventional index, metal index, organic compound index, and anion and salt index, respectively. High wastewater discharge at the sections of Hunjinqiao and Xiaoruhuangkou in which the concentrations of BOD, COD and TN were comparatively high led to a highly risk of conventional index in both the main stream and the related tributaries. However, other 3 indexes were at a low or below risk levels. Overall, the risk degree was greater in the tributaries than in the main stream.

Keywords: Yellow River; section; water pollution risk; index; assessment

黄河流域呼和浩特段干流约60 km,区间流域面积约 $0.14 \times 10^4 \text{ km}^2$,涉及内蒙古4个旗县。流域沿线分

布有养殖厂、农田、电厂、生物制药、大型能源化工等规模不一、类型复杂的敏感源和风险源^[1-2],因此黄河流域呼和浩特段是敏感性与风险性并存的水体,制定科学合理的水污染风险评估体系是目前黄河呼和浩特段水污染防治的战略所需^[3]。国内外较为常用的水污染风险评价方法众多,主要有危险指数评价法^[4-5]、概率危险性评价法^[6-7]、事故致因突变模型评价法、神

收稿日期:2015-01-27

基金项目:内蒙古自治区科技计划项目(20130427);国家自然科学基金(51169018,51369021)

作者简介:冯利忠(1986—),男,内蒙古鄂尔多斯人,博士研究生,从事水环境与水污染控制研究。E-mail:fenglizhong1@sina.com

*通信作者:裴国霞 E-mail:peiguoxia@126.com

经网络评价法^[8]、层次分析评价法、灰色系统理论评价法、模糊数学分析评价法等^[9-10]。但上述方法均需要大量参数来分析确定风险发生几率,而且所需的参数不易确定甚至无法确定,所以对同一风险源的计算往往会得出不同的评估结果。然而以国内地表水环境质量标准作为评价标准,通过计算评定、划分等级等综合评价方法的水环境风险评估体系可定量、定性相结合对流域水环境风险作出符合实际情况的合理性评定^[11]。基于此,利用上述评价法评估黄河呼和浩特段水污染风险并进行时空层面的特性分析。

1 材料选取与评估方法

选用《黄河流域(内蒙古段)水环境风险调查及防范措施研究》中2011—2013年8个断面连续10个月(除去1、2月冰封期)330个样本26项污染物水质监测数据作为本次水污染风险评估的基础数据。断面包括:头道拐、河口镇、喇嘛湾、民生渠、浑津桥、大入黄口、小入黄口、浑河入黄口;分析指标包括:溶解氧、高锰酸盐指数、化学需氧量、五日生化需氧量、氨氮、总氮、总磷、铜、锌、硒、砷、汞、镉、六价铬、铅、铁、锰、氰化物、挥发酚、石油类、氟化物(以F⁻计)、阴离子表面活性剂、硫化物、硫酸盐(以SO₄²⁻计)、氯化物(以Cl⁻计)、硝酸盐(以N计)。样本监测方法及处理按照《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中相关要求^[12]进行。

1.1 采样分析

1.1.1 采样布点

按照水体功能分布、重要水工构筑物、现有水文站点相结合的方法进行布点(图1),共布设监测断面26个,采样点60个(每个样点采集断面设置3个采



图1 样点分布图

Figure 1 Distribution of sampling points

样点,即断面左、中、右)。监测频次为每月采样一次。于每月5日至10日进行采样,采样时均选取3份同样的样品,以备BOD、DO、硫化物等的单独分析及防止样品损坏等。样品采集之后及时进行封口,并放置于样品采集箱^[13-14]。

1.1.2 样品分析

黄河呼和浩特段泥沙含量较大,所采集的样品在水质分析前应进行预处理:利用滤纸滤掉颗粒较大的泥沙;利用0.45 μm滤膜滤除极小颗粒物及大多数细菌微生物。处理后的常规样品可满足一般色谱要求。

对所采集的样品严格按照《地表水和污水监测技术规范》(HJ/T 91—2002)中的分析方法进行分析。

1.2 评估模型

黄河呼和浩特段存在的较为稳定的污染物来源主要为主流水体的流入,本次评估理念主要涉及:

(1)风险因素识别:对历史污染事件记录中的事件信息与后果之间的联系进行分析,列出事件信息中所有与事件后果影响度相关的因素。

(2)风险指标筛选:分析、识别、比较上述因素,筛选出对事故后果具有直接影响的关键指标。

(3)关键指标分级:将关键指标按权重采用五分制计,形成标量化分级表。

(4)评估公式设计:根据各指标对应的计算因子及水体实际情况,确定评估计算公式。

(5)综合指数分级:按各计算数值所占比重进行分析,得出综合指数分级表。

按照上述建模理念,本次水污染风险评估指标采取国内已有的环境标准,受体采用水生态系统和人体健康的指标。根据目前已有的重点污染物监测数据,通过与危险指数评价法、概率危险性评价法、事故致因突变模型评价法结果进行比对,结果显示此方法计算结果较稳定并可快速准确地得出风险评估结果,避免了其他水环境风险评估模型中众多参数的选取和调试,而且可以定量、定性相结合的方式评估出对应的环境风险。

将黄河流域呼和浩特段中所选取的26种风险评价因子划分为常规污染物、金属元素、有机化合物、阴离子及盐类4大类别^[15-17]。

单一污染物风险级计算方法:

$$H(J) = \frac{\sum_{i=1}^j \frac{C_i}{C_{0i}}}{n} \quad (1)$$

式中: H 为单一污染物指标值; J 为单一污染物指标; C_j 为单一污染物第 j 个数值; C_{0j} 为单一污染物 j 的标准值; n 为单一污染物数值个数。

各指标风险级计算方法:

$$H(I) = \frac{2 \sum_{i=1}^I \frac{C_i}{C_{0i}}}{N} \quad (2)$$

式中: H 为污染物指标值; I 为污染物指标; C_i 为水体中污染物 i 的含量; C_{0i} 为污染物 i 的标准值; N 为污染物指标数。

1.3 评估依据

1.3.1 标准选用

黄河呼和浩特段属集中式生活饮用水地表水源地二级保护区、鱼类越冬场、洄游通道、水产养殖区,符合《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅲ类中的相关要求,因此采用《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅲ类标准限值作为水污染风险评估指标,包括常规污染物(溶解氧、高锰酸盐指数、化学需氧量、五日生化需氧量、氨氮、总氮和总磷)7项,金属元素(铜、锌、硒、砷、汞、镉、六价铬、铅、铁、锰)10项,有机化合物(氰化物、挥发酚、石油类)3项,阴离子及盐类[氟化物(以 F^- 计)、阴离子表面活性剂、硫化物、硫酸盐(以 SO_4 计)氯化物(以 Cl 计)硝酸盐(以 N 计)6项],共计26项指标。

1.3.2 风险分级

水环境风险分级受当地实际水环境风险管理水平、事故应急救援能力、事故发生频度、事故后果严重性等外在性因素影响^[18-19]。目前,按照风险管理水平和事故应急救援能力,县级相关部门可制定Ⅳ级和Ⅲ级水环境风险应急预案,并依据应急预案负责应急调查处理水污染事件;Ⅱ级和Ⅰ级水环境风险由省级相关部门制定水环境风险应急预案,并依据应急预案由省级领导指挥小组布置应急监测、调查和处置任务。利用事故发生频率和事故后果严重程度制定水环境风险等级时,可分为:Ⅰ可忽略风险、Ⅱ可容许风险、Ⅲ中度风险、Ⅳ重大风险。

黄河呼和浩特段水环境风险分级参考目前已有的地表水环境标准和饮用水环境标准,以内蒙古自治区水环境风险管理水平、事故应急救援能力、事故发生频度、事故后果严重性等外在性因素对其内因性水环境风险分级值进行反复计算、修正,进而确定了上游输入性污染的风险分级^[20-21]。为直观、量化地判别此风险级所对应的现今较为普遍的风险 D 值^[22],本次使

用较为普遍的利用指数法计算出的风险 D 值作为各风险级的对应量化值(表1)。

2 结果与分析

2.1 水污染风险值评估

利用公式(1)、(2)对2011—2013年间8个断面26项污染指标进行计算,即可得到黄河呼和浩特段常规指标、金属指标、有机化合物指标、阴离子及盐类指标风险值(表2)。可以看出:常规指标风险发生率较大(尤其在浑津桥、小入黄口),有机化合物指标次之;金属指标、阴离子及盐类指标风险发生率极小。其原因:①排入黄河流域的工业废水为电厂、化工厂等主要含有常规指标的,且水质为可达到《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)一级标准的废水,这样极大地缩减了常规指标污染物浓度,但沿线(包括支流)工业、水产养殖、农田生产、生活等含有高浓度BOD、COD、 NH_3-N 、总N、总P的废水在未处理的情况下进行无组织排放或渗流,给水体污染增加了贡献值,致使常规指标风险值较大;②沿线(包括支流)工业、水产养殖、农田生产、生活等无组织排放及渗流含有大量有机物,因此有机化合物指标也较大;③重金属是国家严控指标,且《污水综合排放标准》(GB

表1 综合风险分级

Table 1 Grades of comprehensive risks

风险值 H	对应风险分级	对应颜色标记	指数法风险划分 D 值
$H < 2$ 类	低	绿色	< 200
2类 $\leq H < 3$ 类	较低	蓝色	200~400
3类 $\leq H < 4$ 类	中等	黄色	400~600
4类 $\leq H < 5$ 类	较高	橙色	600~800
5类 $\leq H$	高	红色	800~1000

注:指数法风险划分,依据较为普遍的指数风险 D 值=概率指数 $\times$ 频率指数 $\times$ 严重程度。

表2 水体污染风险 H 值

Table 2 H -values of water pollution risks

断面名称	常规指标	金属指标	有机化合物指标	阴离子及盐类指标
头道拐	2.43	0.21	0.68	0.71
河口镇	2.55	0.30	0.70	0.75
喇嘛湾	2.42	0.39	0.70	0.71
民生渠	2.34	1.72	0.75	0.68
浑津桥	17.58	1.43	2.36	0.73
大入黄口	4.25	1.34	3.18	0.86
小入黄口	19.72	1.12	2.57	0.77
浑河入黄口	1.94	0.91	0.73	0.77

8978—1996)一级标准中要求严格,另外沿线无组织排放或渗流基本不含有重金属,因此重金属风险值较小;④工业高盐水经晾晒池处理不排入流域,工业所排污染物及沿线无组织排放阴离子及盐类含量小且具有不稳定性,因此阴离子及盐类风险值较小^[23-24]。

2.2 风险发生程度的空间分布

由图2可以看出:各风险指标在头道拐、河口镇、喇嘛湾断面处分布均匀;阴离子及盐类指标、有机化合物指标在黄河呼和浩特段风险水平整体较为平稳;金属指标、常规指标在各支流具有很强的不稳定性。主要原因:黄河流域主干流平均流速为 $1.1\sim 1.9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,污染物较容易迁移、混合;达到《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)一级标准后的阴离子及盐类指标、有机化合物指标含量极少;各支流有历史存积的金属污染物,而且目前仍有少量金属含量不同的达标工业废水排放。

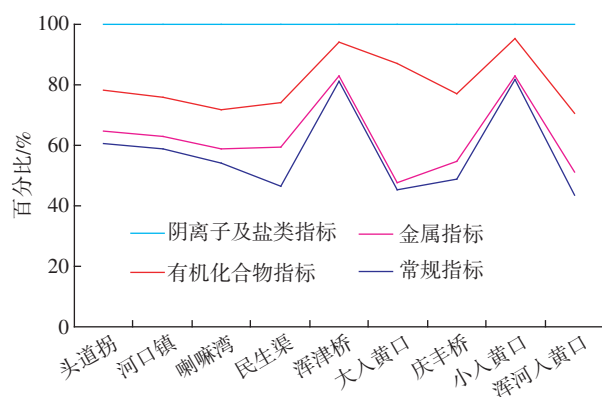


图2 风险指标百分比堆积

Figure 2 Percentages of risk indexes

将表2的风险值对照表1的综合风险分级并结合GIS等数字表达形式可得黄河呼和浩特段污染风险评估图(图3)。由于流域水体污染风险没有明显的相关性和周期性,但污染物在河段拐点较大处容易产生涡旋,不易扩散,黄河呼和浩特段水污染风险发生分布具有较强的局地性、偶发性、变化性^[25-26]。

由风险评估图可看出:①2011—2013年黄河呼和浩特段及临近上游无特大污染事件发生,水位保持在980~1024 m,流量平水期 $700\sim 1000\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 、枯水期 $300\sim 700\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 、丰水期 $800\sim 1200\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$,因此污染物迁移扩散无大变动,致使水污染风险整体较为平稳,水质适中;②由于近年来不断加大对黄河流域的污染治理和对排入黄河流域污染物的控制,且排放废水的生产单位在不断加大废水回用方案,回用率可达

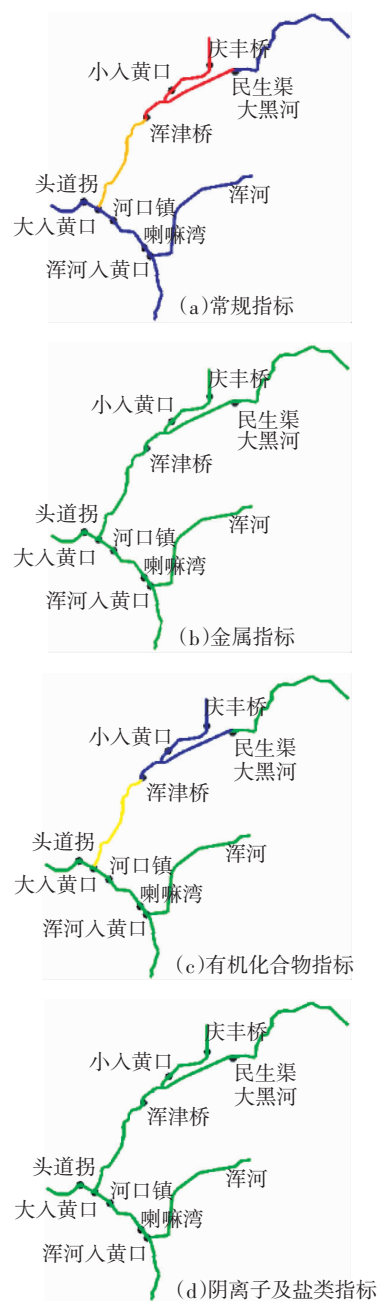


图3 污染风险评估图

Figure 3 Pollution risk assessment

70%~80%, 常规指标风险级在部分支流处于中等水平,但整体上仍处于高风险状态,金属指标、有机化合物指标、阴离子及盐类指标处于低风险级状态;③浑津桥、小入黄口常规指标风险值为17.58、19.72,处于高风险级,在2011—2013年间可能发生过小规模的不达标排放事件;④黄河呼和浩特段流量为 $200\sim 900\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 、降解率为 $10\sim 15\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$,在这种大流量且降解率较高的情况下,小入黄口、浑津桥的高风险源在流至头道拐的过程中逐渐削弱,到干流处已经处于低风

险水平以下;⑤由于沿线的农田施肥、人口增加等因素会产生大量的无组织排放,水污染风险较高的多为各支流,进一步对整个黄河干流产生影响^[27-29]。

2.3 风险指标的时间分布

2.3.1 各指标总体时间分布

进一步对 4 种指标进行总体时间分布上的定量和定性分析(图 4),由图 4 可看出:常规指标、有机物指标、阴离子及盐类指标的风险值分别为 5.71~7.28、1.37~1.60、1.18~1.44,金属离子的风险值最小,都在 1 以下。常规指标、有机物指标、阴离子及盐类指标、金属离子的变化率分别为 21.57%、14.38%、18.06%、65.52%。由此可看出:黄河呼和浩特段近三年的水污染风险水平总体较为平稳,常规指标虽处于高风险区间但具有明显下降趋势,金属指标均处于低风险水平并逐年削弱。这是因为近年来工业所排废水(主要含有常规指标)处理后的水质高于《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)一级标准,工业中水回用有所提高,沿线无组织排放无明显增加,降雨径流丰水期(5 月、6 月、7 月、8 月、9 月)2.6 m、枯水期(12 月、1 月、2 月)0.2 m、平水期(3 月、4 月、10 月、11 月)1.2 m 也无明显变化,所以常规指标、金属指标风险近三年内有所下降;此外,工业所排废水中及无组织排放中所含的有机物指标、阴离子及盐类指标含量极少,且本身具有不稳定性及转化性,所以工业废水的减排和水质提升对此无明显规律的递增或递减趋向^[30-31]。

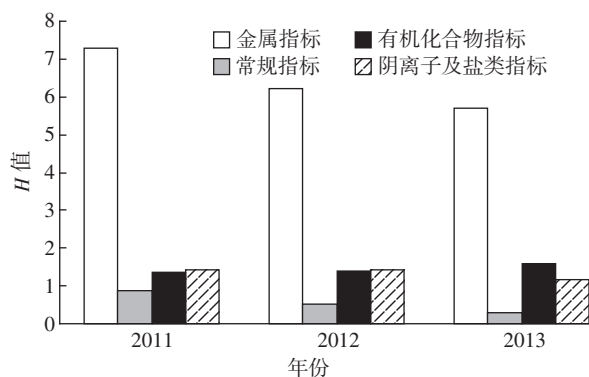


图 4 风险指标时间分布

Figure 4 Time distribution of risk indexes

2.3.2 各指标不同时期风险值分布

由于北方各季差异明显,在 2011—2013 丰水期(5 月、6 月、7 月、8 月、9 月)、枯水期(12 月、1 月、2 月)、平水期(3 月、4 月、10 月、11 月)^[32]对 4 种指标的风险值进行分析(图 5),显示:常规指标在历年均处于高风险状态,其风险值为 5.69~7.392;其次为有机化合

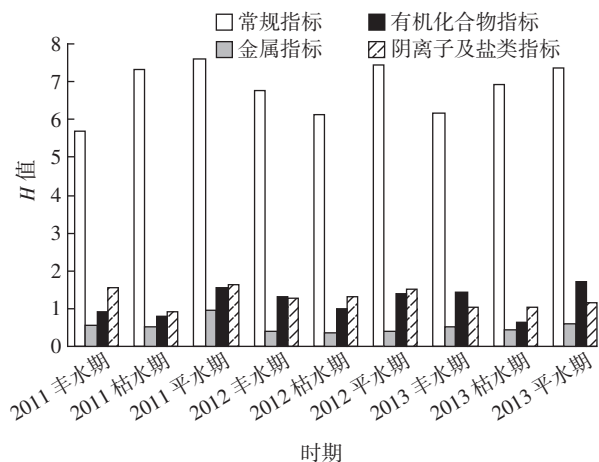


图 5 各指标不同时期风险 H 值变化

Figure 5 Risk H-value change of each index at different periods

物指标、阴离子及盐类指标和金属指标,其风险值为 0.91~1.57、0.91~1.57、0.33~0.97;各指标风险值基本上趋于平水期>丰水期>枯水期。上述现象的形成主要由于:①常规指标所包含的溶解氧、高锰酸盐指数、生化需氧量、氨氮、化学需氧量、总氮、总磷均是黄河呼和浩特段沿线支流排污口所排污水的主要成分,例如经处理后的电厂、化工厂废水及未经处理的沿线无组织排放废水中含有化学需氧量、氨氮、生物化学需氧量,尤其农作物生产产生的渗流中含有较高浓度的总磷、总氮,因此常规指标风险值较高;②枯水期各工业的冷却水用量明显下降,由于经济等多种因素生产量也有所下降,所排废水有所缩减,而且所排废水在河流中处于结冰状态,沿线径流速度也趋于零,因此枯水期水体中的污染物浓度较小;③尽管丰水期流速($3.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)大于平水期流速($1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),致使污染物在丰水期容易迁移、扩散,但沿线污染物排放集中于平水期,因此各指标风险值出现平水期>丰水期>枯水期梯度现象。

2.3.3 常规指标风险值分布

上述分析表明,各断面和不同时期常规指标风险值均较高,基本上处于高风险状态。通过对 2011—2013 常规指标风险值分析(图 6)可知:常规指标中的总氮、氨氮、总磷风险值较高,为 8.21、3.8、2.20,其中总氮处于高风险状态;溶解氧、高锰酸盐指数、化学需氧量、生化需氧量对常规指标的风险值贡献较小。主要原因:①沿线工业排污口所排的污染物中所含的生化需氧量、化学需氧量、氨氮具有严格的排放标准,且化学需氧量、氨氮为国家控制指标,但具有一定的排放量;②沿线无组织排放及由此产生的径流中含有大

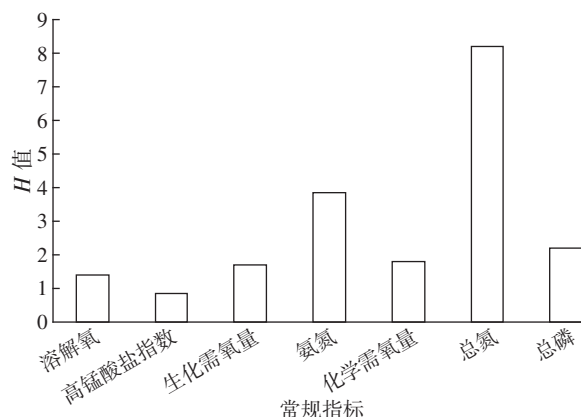


图6 常规指标风险H值分布

Figure 6 Risk H-value distribution of conventional index

量总磷、总氮(尤其是生活中所用的洗涤产品中,化学肥料的使用),尽管氨氮在工业排放上严格控制,但其他无组织排放进行了补偿,致使流域中总氮含量较高,且处于各污染物首位,其次为氨氮、总磷^[33]。

3 结论

(1)常规指标、金属指标、有机化合物指标、阴离子及盐类指标在空间上的水污染风险值为1.94~17.58、0.21~1.72、0.68~3.18、0.68~0.86,常规指标在浑津桥、小黄入口处于高风险状态,其余三类指标处于低风险状态及以下。

(2)常规指标、金属指标、有机化合物指标、阴离子及盐类指标在总体时间上的水污染风险值为5.71~7.28、1.37~1.60、1.30~0.87、1.18~1.44,常规指标在主干流和各支流目前仍具有较高的风险。

(3)从不同断面、时期角度分析,常规指标基本上处于高风险状态。整体上看常规指标中的总氮、氨氮、总磷风险值较高,分别为8.21、3.8、2.20。

(4)各支流风险度高于主干流,常规指标具有较大的波动性,其中BOD、COD、总N含量最高。如若没有重大的水污染事件,则黄河呼和浩特段水污染风险值整体较低且较为稳定。

(5)流域水体污染风险在时间上和空间上没有明显的相关性和周期性,风险发生分布具有较强的局地性、偶发性、变化性。

致谢: 数据采集及评估模型由内蒙古自治区环境科学研究所和环保部南京环境科学研究所的《黄河流域(内蒙古段)水环境风险调查及防范措施研究》中的课题组成员共同完成,在此表示感谢。

参考文献:

- [1] 张善强. 黄河流域夏季旱涝变化及气候物理因素的影响[J]. 气象与环境学报, 2007, 27(3): 40-44.
ZHANG Shan-qiang. Characteristics of changes of summer drought and flood and impact of climatic physical factors on these changes in the Yellow River valley, China[J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2007, 27(3): 40-44.
- [2] 陈小江. 可持续的黄河水资源管理[J]. 人民黄河, 2012, 34(10): 1-2.
CHEN Xiao-jiang. Sustainable water resources management of Yellow River[J]. *Yellow River*, 2012, 34(10): 1-2.
- [3] 刘晓燕. 黄河环境流研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2009: 1-3.
LIU Xiao-yan. Environmental flows of the Yellow River[M]. Zhengzhou: The Yellow River Water Press, 2009: 1-3.
- [4] 潘本锋, 李莉娜. 基于危险指数法的环境污染事故危险源分级和评估[J]. 安全与环境工程, 2010, 17(1): 13-15.
PAN Ben-feng, LI Li-na. Evaluating and grading the dangerous sources of environmental pollution accidents in Sanmenxia region by the danger index model[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2010, 17(1): 13-15.
- [5] Boriani E, Mariani A, Baderna D, et al. ERICA: A multiparametric toxicological risk index for the assessment of environmental healthiness[J]. *Environment International*, 2010, 36(7): 665-674.
- [6] 叶剑红, 崔峰, 伍法权, 等. 概率地震危险性评价系统开发[J]. 工程地质学报, 2007, 15(6): 840-848.
YE Jian-hong, CUI Feng, WU Fa-quan, et al. Development of probability seismic hazard assessment software system[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2007, 15(6): 840-848.
- [7] 钱新明, 陈宝智. 事故致因的突变模型[J]. 中国安全科学学报, 1995, 5(2): 1-5.
QIAN Xin-ming, CHEN Bao-zhi. The catastrophe model for accident-causing[J]. *China Safety Science Journal*, 1995, 5(2): 1-5.
- [8] Long J Q, Lan F C, Chen J Q, et al. Mechanical properties prediction of the mechanical clinching joints based on genetic algorithm and BP neural network[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 22(1): 36-72.
- [9] Zhang K, Xiao X T, Zhen C, et al. Optimization for hydroforming loading paths of parallel multi-branch tubes based on grey system[J]. *Theory Journal of Harbin Institute of Technology*, 2013, 20(4): 116-120.
- [10] Jiang W G, Deng L, Chen L Y, et al. Risk assessment and validation of flood disaster based on fuzzy mathematics[J]. *Progress in Natural Science*, 2009, 19: 1419-1425.
- [11] 李维新, 张永春, 张海平, 等. 太湖流域水环境风险预警系统构建[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(1): 4-8.
LI Wei-xin, ZHANG Yong-chun, ZHANG Hai-ping, et al. Construction of water environmental risk early warning system for Taihu Lake basin[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2010, 26(1): 4-8.
- [12] 中华人民共和国环境保护部. HJ/T 91—2002 地表水和污水监测技术规范 地表水监测[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
Ministry of Environmental Protection People's Republic of China. HJ/T 91—2002 Technical specifications requirements for monitoring of sur-

- face water and waste water: Surface water monitoring[S]. Beijing: Standards Press of China, 2003.
- [13] 中华人民共和国环境保护部. GB/T 14581—93 水质湖泊和水库采样技术指导 水质控制的采样点[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- Ministry of Environmental Protection People's Republic of China. GB/T 14581—93 Water quality: Guidance on sampling techniques from lakes quality control of sampling points[S]. Beijing: Standards Press of China, 1993.
- [14] 谷照升. 水库湖泊水质分析、模拟与预测的综合数学方法及其应用[D]. 长春: 吉林大学, 2006: 50—70.
- GU Zhao-sheng. The Research and application of compositive mathematical methods to water quality analysis, simulation and forecast in reservoirs and lakes[D]. Changchun: Jilin University, 2006: 50—70.
- [15] Gong Q J, Deng J, Xiang Y C, et al. Calculating pollution indices by heavy metals in ecological geochemistry assessment and a case study in parks of Beijing[J]. *Journal of China University of Geosciences*, 2008, 19(1): 230—241.
- [16] Tan Y Q, Shen Z M, Guo W M, et al. Temperature sensitivity of organic compound destruction in SCWO process[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2014, 26(3): 512—518.
- [17] 刘淑民, 姚庆祯, 刘月良, 等. 黄河口湿地表层沉积物中重金属的分布特征及其影响因素[J]. 中国环境科学, 2012, 32(9): 1625—1631.
- LIU Shu-min, YAO Qing-zhen, LIU Yue-liang, et al. Distribution and influence factors of heavy metals in surface sediments of the Yellow River Estuary wetland[J]. *China Environmental Science*, 2012, 32(9): 1625—1631.
- [18] 马 越, 彭剑峰, 宋永会, 等. 移动型环境风险源识别与分级方法研究[J]. 环境科学学报, 2012, 32(5): 1999—2005.
- MA Yue, PENG Jian-feng, SONG Yong-hui, et al. Identification and classification methods for mobile environmental risk sources[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(5): 1999—2005.
- [19] 黄 慧. 论我国突发环境事件应急预案制度[D]. 济南: 山东大学, 2012: 40—50.
- HUANG Hui. On the emergency plan system of sudden environmental accidents in China[D]. Jinan: Shandong University, 2012: 40—50.
- [20] 马 越, 彭剑峰, 宋永会, 等. 饮用水源地突发事故环境风险分级方法研究[J]. 环境科学学报, 2012, 32(5): 1211—1218.
- MA Yue, PENG Jian-feng, SONG Yong-hui, et al. Study on the classification method of environmental risk for sudden accidents in drinking water sources[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(5): 1211—1218.
- [21] 常福宣, 陈 进, 张周英. 汉江中下游水资源风险分析与对策研究[J]. 长江科学院院报, 2013, 30(7): 11—15.
- CHANG Fu-xuan, CHEN Jin, ZHANG Zhou-ying. Water supply risk in the middle and lower reaches of Hanjiang River and its countermeasures[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2013, 30(7): 11—15.
- [22] 尹荣尧, 杨 潇, 孙 翔. 江苏沿海化工区环境风险分级及优先管理策略研究[J]. 中国环境科学, 2012, 31(7): 1225—1232.
- YIN Rong-yao, YANG Xiao, SUN Xiang. Environmental risk rankings and prior management strategies on chemical industry parks in the coastal area of Jiangsu Province[J]. *China Environmental Science*, 2012, 31(7): 1225—1232.
- [23] 赵锁志, 刘丽萍, 王喜宽. 黄河内蒙古段上覆水、悬浮物和底泥重金属特征及生态风险研究[J]. 现代地质, 2008, 22(2): 304—312.
- ZHAO Suo-zhi, LIU Li-ping, WANG Xi-kuan, et al. Characteristics and ecological risk of heavy metals in overlying water, suspended particles and bed mud in the Inner Mongolia stretch of the Yellow River[J]. *Geoscience*, 2008, 22(2): 304—312.
- [24] 王益民. 黄河兰州段水环境污染对鱼类毒性效应研究[D]. 甘肃: 兰州大学, 2010.
- WANG Yi-min. The toxic effects of contaminated water on fish species in Lanzhou section of the Yellow River[D]. Gansu: Lanzhou University, 2010.
- [25] 马 媛. 黄河入海径流量变化对河口及邻近海域生态环境影响研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2006: 15—40.
- MA Yuan. Preliminary study about the effect on the ecological environment of estuary of Yellow River and its adjacent area caused by the change of Yellow River runoff[D]. Qingdao: China Ocean University, 2006: 15—40.
- [26] Zhang Y, Yang Z F, Wang X Q. Methodology to determine regional water demand for instream flow and its application in the Yellow River Basin[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2006, 18(5): 1031—1039.
- [27] Zhang J Y, Hao Z X, Ge Q S. Variation of precipitation for the last 300 years over the middle and lower reaches of the Yellow River[J]. *Science in China*, 2005, 48(12): 2182—2193.
- [28] 马海良, 包鑫宇, 李 丹. 基于污染指数法的太湖流域水污染治理效果分析[J]. 生态经济, 2014, 30(10): 183—186.
- MA Hai-liang, NIE Xin-yu, LI Dan. Study on water pollution governance effect of Taihu basin: Based on pollution index analysis[J]. *Ecological Economy*, 2014, 30(10): 183—186.
- [29] 刘 永, 阳平坚, 盛 虎, 等. 滇池流域水污染防治规划与富营养化控制战略研究[J]. 环境科学学报, 2012, 32(8): 1962—1972.
- LIU Yong, YANG Ping-jian, SHENG Hu, et al. Watershed pollution prevention planning and eutrophication control strategy for Lake Dianchi[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(8): 1962—1972.
- [30] Fu Q, Wan W K, Wu Y N. Research of the impact on the river pollution to riverside water resource[C]. Shanxi: Chang'an University Press, 2011: 1032—1035.
- [31] Wang Y, Wang L, Wang J X. Study on water pollution prevention and control in the river basin based on GIS[M]. Shanghai: Progress in Biomedical Engineering Press, 2012: 216—222.
- [32] 顾润源, 周伟灿, 白美兰, 等. 气候变化对黄河内蒙古段凌汛期的影响[J]. 中国沙漠, 2012, 32(6): 1751—1756.
- GU Run-yuan, ZHOU Wei-can, BAI Mei-lan, et al. Influence of climate change on ice slush period at Inner Mongolia section of Yellow River[J]. *Journal of Desert Research*, 2012, 32(6): 1751—1756.
- [33] 陈友媛, 申 宇, 杨世迎. 氮在高含沙水向人工浅水湖泊补水期间的变化规律[J]. 环境科学, 2013, 34(9): 3437—3444.
- CHEN You-yuan, SHEN Yu, YANG Shi-ying. Variation of nitrogen during the high suspended sediments concentration water supply in an artificial shallow lake[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(9): 3437—3444.