DOI: 10.5846/stxb201412042408
沈园,谭立波,单鹏,曹慧明,邓红兵.松花江流域沿江重点监控企业水环境潜在污染风险分析.生态学报,2016,36(9): - .
Shen Y, Tan L B, Shan P, Cao H M, Deng H B. Analysisof the potential contamination risk of riverside key monitored enterprises on the aquatic environment of the Songhua River Basin. Acta Ecologica Sinica,2016,36(9): - .

松花江流域沿江重点监控企业水环境潜在污染风险分析

沈　园[1,2],谭立波[1,2],单　鹏[1,2],曹慧明[1,*],邓红兵[1]
1 中国科学院生态环境研究中心,北京　100085
2 中国科学院大学,北京　100049

摘要:为防控松花江流域水污染风险、优化流域内沿江产业带布局,本研究分析了松花江流域沿江企业潜在污染风险的大小和分布,并揭示导致不同区域间水环境潜在污染风险空间差异的原因。基于《2012 年废水国家重点监控企业名单》,本研究将沿松花江(到三级支流)1 km 范围内的 45 家重点废水产生企业识别为松花江流域水环境潜在污染风险源。以沿江企业和重点区域的废水产生量与对应河段的水质状况表征水环境潜在污染风险源强弱与流域水体对潜在污染风险的缓冲能力,并以区域总人口数、第二产业产值及珍稀濒危物种分布情况反映流域社会-经济-自然复合生态系统对潜在污染风险的敏感程度开展评价。结果表明:牡丹江市辖区(牡丹江中游河段)因潜在污染风险源强、水体对潜在污染风险的缓冲能力低且自然生态系统对潜在污染风险的敏感程度高,是松花江流域受沿江企业产生的水环境潜在污染风险最严重的地区;长春市辖区(饮马河、伊通河部分河段)、伊春市辖区(汤旺河全部河段)与敦化市(海浪河全部河段、牡丹江部分河段)由于较低的水体缓冲能力和较高的生态系统敏感程度,应加强水环境潜在污染风险的防治;污染风险源强的吉林市辖区(西流松花江部分河段)与七台河市辖区(倭肯河部分河段),须提高本区域对潜在污染的风险管理能力以降低污染事故发生的可能性。最后,本文针对不同行业类型、区域潜在污染特点与水污染风险特征,从加快污水处理研究、评估污染治理经济手段、建立产业准入机制及完善污染防治立法等多方面提出流域水环境污染风险管控的相关建议。

关键词:工业废水;突发性水污染;复合生态系统;松花江流域

Analysisof the potential contamination risk of riverside key monitored enterprises on the aquatic environment of the Songhua River Basin

SHEN Yuan[1,2], TAN Libo[1,2], SHAN Peng[1,2], CAO Huiming[1,*], DENG Hongbing[1]
1 *Research Center for Eco-environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100085, *China*
2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*

Abstract: The Songhua River Basin (SRB) is located in the northern part of Northeast China, and includes the Inner Mongolia Autonomous Region, Jilin Province, and Heilongjiang Province. The SRB is also known as the Northeast Old Industrial Base and has a reputation for industrial production, which had some negative impacts on the aquatic environment of the Songhua River. Research on the levels and patterns of the aquatic contamination risk posed by the riverside enterprises in the SRB are valuable for controlling water contamination risk and optimizing the riverside industrial layout. Thus, it is essential to investigate the industrial enterprises generating wastewater in the basin and to estimate their risk of contaminating the aquatic environment. Based on the *List of National Key Monitored Enterprises Generating Wastewater in*

基金项目:吉林省引进高层次创新人才计划; 全国生态环境十年变化(2000—2010 年)遥感调查与评估项目(STSN-13-06)
收稿日期:2014-12-04;　　**网络出版日期**:2015- -
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: hmc1983@126.com

2012, we identified 45 key enterprises distributed within 1 km of the river banks, as potential sources of contamination. We assessed the risk level of these sources by calculating the annual volume of wastewater generated by the enterprises and estimated the buffering capacity of the local waters by analyzing the background water quality. We also evaluated the sensitivity of the social-economic-natural complex ecosystem to potential water contamination by investigating the total population of the districts, the secondary industrial outputs of the districts, and the distribution ranges of rare and endangered species. The results showed that Mudanjiang City (with the middle reaches of the Mudan River) suffered the most serious contamination risk because of the large volume of wastewater generated annually, the low buffering capacity of the local waters, and the high sensitivity of the natural ecosystem to potential water contamination. Changchun City (with part of the reaches of the Yinma and Yitong Rivers), Yichun City (with all reaches of the Tangwang River) and Dunhua City (with all reaches of the Hailang River, and part of the reaches of the Mudan River) showed the low buffering capacity and the high sensitivity, and thus risk prevention should be strengthened in these districts. In addition, owing to the large volume of wastewater generated annually, Jilin City (with part of the reaches of the West-flowing Songhua River) and Qitaihe City (with part of the reaches of the Woken River), particularly the former with the higher sensitivity of its social and economic ecosystems, should improve the capacity of risk management to reduce the possibility of water contamination in these districts. This study analyzed the levels and patterns of potential water contamination risk, and revealed the causes of spatial differences in the risk of aquatic environment contamination among riverside areas in the SRB. Moreover, it provided a reference for development of riverside industrial zones, prevention and emergency response to sudden water pollution accidents, and long-term risk management of water pollution. In the short term, the key riverside enterprises should improve the efficiency of their wastewater treatment and effectively control the risk of pollution. In the long term, it is important to accelerate the adjustment of the industrial layout and to improve legislation for pollution prevention and control.

Key Words: industrial wastewater; sudden water pollution accidents; social-economic-natural complex ecosystem; the Songhua River Basin

突发性水环境污染是指由于违规排放、生产事故等突发性事件造成水资源在短时间内受到污染,此类污染具有极强的不可预测性和破坏性,即可引发突发性水污染的污染源对周边水环境存在一定程度的潜在污染风险[1-2]。随着对突发性水环境污染问题及相关领域研究的不断深入,污染源辨识[3-4]、水质变化特征分析[5-6]、评价模型建立[7-8]、风险预警[9-10]及应急[11-12]等方面已有较完善的研究成果,但已有的研究多集中于对水体中单一污染物的健康风险评价,包括多环芳烃[13]、多氯联苯[14-15]与重金属[15-16]与等。此外,大多数研究并未从污染源的潜在风险出发,仍关注于水环境质量[17-18]、水污染特征[19-20]及污染防治对策[21-22]等,在全流域尺度开展的潜在污染分析鲜有报道。而系统地对全流域进行水环境潜在污染风险分析,不仅可以为沿江产业带发展及备用水源地规划提供建议,还能为重大水污染事件的预防监控、应急处置及后续管理提供参考。

松花江流域是我国重工业基地的重要组成部分,但由于工业发展过程产生的结构性污染,使流域整体水环境问题十分严峻,并成为东北地区老工业基地振兴与可持续发展的障碍。《2012 年废水国家重点监控企业名单》中,内蒙古自治区有 110 家、吉林省有 129 家、黑龙江省有 171 家,其中约有 70%位于松花江流域内,且主要属于食品、化工、造纸、采矿等废水产生量大、污染物浓度高的行业类型[23-24]。由于生产事故、废水违规排放、人为破坏等潜在隐患的存在,可能在短时间内引发与 2005 年松花江重大水污染事件类似的突发性污染事故,并进一步引发更严重的水源地生态环境和城市供水系统问题[25]。因此,在松花江流域开展水环境潜在污染源的识别与分析,是对流域水环境风险影响研究的一次有益尝试,也可为松花江流域的水污染风险防控与管理提供指导。

1　研究方法

1.1　研究区概况

松花江流域位于我国东北地区的北部(119°52′-132°31′E ,41°42′-51°38′N),流域总面积 56.12 万 km^2,约占东北地区总面积的 60%,其中平原区面积 21.21 万 km^2、山丘区面积 34.91 万 km^2。松花江流域水系发达、支流众多,流域面积大于 1000 km^2的河流有 86 条,大于 10000 km^2的河流有 16 条。流域多年平均水资源总量 961 亿 m^3,其中地表水资源量为 818 亿 m^3、地下水资源量 324 亿 m^3、地表与地下水资源不重复量 143 亿 m^3[26]。松花江流域水质在实施《松花江流域水污染防治"十一五"规划》后已有所改善,但流域水资源可持续利用依然面临严峻挑战。根据环境保护部污染防治司的统计数据,2012 年松花江流域水质达到Ⅰ—Ⅲ类的断面占整个流域 88 个国控断面的 58.0%,Ⅳ—Ⅴ类水质断面占 36.3%,而劣Ⅴ类水质仍占 5.7%。水污染严重区域集中在城市河段,主要污染指标为化学需氧量、高锰酸盐指数和五日生化需氧量[27]。

1.2　数据来源与处理

1.2.1　数据来源

企业基本资料依据环境保护部办公厅发布的《2012 年国家重点监控企业名单》逐一调查获取;松花江流域边界及水系数据来源于"全国生态环境十年变化(2000-2010 年)遥感调查与评估项目"提供的地理信息数据;全流域水系水质数据来源于松辽水利委员会提供的重点监测站点水质数据;社会经济数据来源于 2011 年《内蒙古统计年鉴》、《吉林统计年鉴》、《黑龙江统计年鉴》;珍稀濒危物种种类与分布数据来源于《中国物种红色名录》、《中国濒危动物红皮书》、《中国植物红皮书:稀有濒危植物》,并参考各省、市动植物志与地区志。

1.2.2　数据处理

依据《2012 年废水国家重点监控企业名单》,利用 ArcMap 10.2 筛选得到位于松花江流域沿干、支流(到三级支流)1 km 范围内的重点废水产生企业共 45 家,涉及食品酿造(12 家)、化工(12 家)、造纸(4 家)、采矿(4 家)、冶金(4 家)、动物加工(3 家)、制药(3 家)、发电(2 家)和建材(1 家)共 9 个行业。

数据处理步骤:①根据收集得到的企业废水处理量,参照该企业的产品类型、生产规模、生产工艺等,推算各企业的年废水产生量(万吨);②以区县为单位对沿江企业所在区域进行年废水产生总量的统计,以企业所处位置临近的水系(到三级支流)在区域内的总长度进行河段长度(km)的统计,计算各区域的单位河长废水产生量(万吨/km);③通过 ArcGIS 10.2 软件平台定位沿江重点企业、流域各站点水质及社会-经济-自然复合生态系统敏感区,并进一步综合分析。

2　结果与分析

2.1　松花江流域水环境潜在污染风险源分析

沿江 1 km 范围内的废水国家重点监控企业较易对松花江流域水环境产生污染,即对流域水体及周边生态系统具有一定程度的潜在污染风险,因此将其识别为松花江流域水环境潜在污染风险源进行分析(图 1),以废水产生量和水质状况分别表征潜在污染风险源强弱与流域水体对潜在污染风险的缓冲能力。

2.1.1　废水产生量

与年废水排放量不同,年废水产生量是指企业或区域每年伴随生产、生活过程而产生的废水总量。据统计,沿江重点废水产生企业的年废水产生总量为 12066 万吨,45 家企业的总平均年废水产生量为 294.3 万吨。以行业分类统计,沿江化工企业的年废水产生总量高达 7223 万吨,约占全部企业废水产生总量的五分之三;造纸(2310 万吨)和冶金(1460 万吨)行业的年废水产生总量较高,分别占总量的 19.1%和 12.1%。类似地,化工、造纸和冶金 3 个行业的平均年废水产生量均超过总平均值,其中造纸(770.0 万吨)和化工(656.6 万吨)行业的平均年废水产生量达到了总平均值的两倍以上。因此,化工与造纸行业的潜在污染风险源都较其他行业强许多,其次为冶金行业。

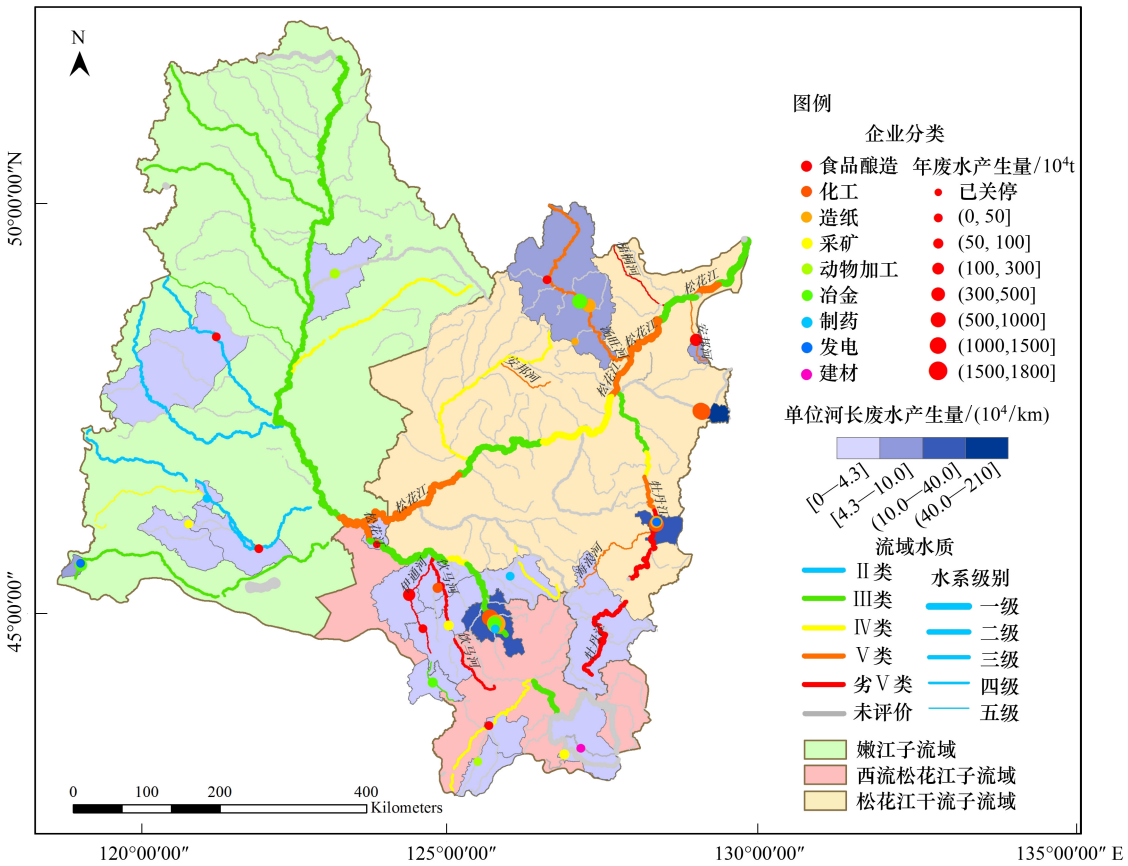

图 1 松花江流域水环境潜在污染风险源分析

Fig. 1 The analysis on the potential contamination risk sources of the aquatic environment in the Songhua River Basin

松花江流域沿江 22 个重点区域的平均年废水产生量为 548.5 万吨。吉林市辖区、七台河市辖区、伊春市辖区和牡丹江市辖区 4 个区域的年废水产生总量都超过平均值,其中吉林市辖区(4884 万吨)和七台河市辖区(4180 万吨)的年废水产生总量分别占沿江重点区域废水产生总量的 40.5%和 34.6%,即两者之和超过了总量的四分之三。从流域角度看,西流松花江子流域中游(西流松花江部分河段)、松花江干流子流域下游(汤旺河、倭肯河、安邦河部分河段)及霍林河、牡丹江部分河段的单位河长废水产生量较大,超过了流域 22 个重点区域的平均值 4.3 吨/km。其中,七台河市辖区密集分布有多家煤化工企业,且该区域内水系分布较少,导致其单位河长废水产生量高达 209.2 万吨/km,远远超过其他沿江重点区域。此外,由于造纸、化工、冶金企业的分布,吉林市辖区的单位河长废水产生量达到了 39.4 万吨/km,牡丹江市辖区也达到了 38.0 万吨/km。因此,七台河市辖区(倭肯河部分河段)、吉林市辖区(西流松花江部分河段)、牡丹江市辖区(牡丹江部分河段)的潜在污染风险源强于其他区域。

2.1.2 水质状况

当污染物进入水体后,经过一系列物理、化学、生物等方面的作用,浓度会逐渐降低,一段时间后水体往往能恢复到受污染前的状态,但是这种水体自净能力是有限度的。研究中选取水质达到 V 类及以上类别的河段作为本底污染超标河段。嫩江子流域的水质状况明显好与其他两个子流域,水体对潜在污染的缓冲能力较高。西流松花江子流域内,饮马河与伊通河的全部河段水质为劣 V 类;松花江干流子流域内,梧桐河全部河段与牡丹江的上中游河段水质为劣 V 类,松花江上下游河段、牡丹江中游河段和安邦河、海浪河及汤旺河的全部河段水质为 V 类。对比以上河段的化学指标与水环境潜在污染风险源所产废水的污染指标发现,松花江流域水质超标大多是由于化学指标 COD、BOD 和氨氮的超标引起的,而临近本底污染超标河段的 12 家沿江重点企业产生的废水中上述指标均超标,因此,这些企业所在的伊春市(汤旺河)、双鸭山市(安邦河)、牡丹

江市(牡丹江)、敦化市(海浪河、牡丹江)、九台市(饮马河)、农安县(伊通河)、长春市(饮马河、伊通河)、松原市(松花江)部分辖区对水体潜在污染风险的缓冲能力较弱。特别注意的是,牡丹江各段的水质现状与目标差距较大,其沿江企业又多为造纸、化工等废水产生量大的企业,因此,牡丹江及周边地区所受潜在污染风险较大。

2.2　松花江流域复合生态系统对水环境潜在污染风险的敏感程度

沿江企业可能导致的突发性水环境污染事故会妨碍一定范围内人们的生活、生产等社会经济活动,并对周边自然生态系统产生持久影响。本研究从社会、经济与自然三方面进行综合分析,以全面评价松花江流域复合生态系统对沿江水环境潜在污染风险的敏感程度(图 2)。

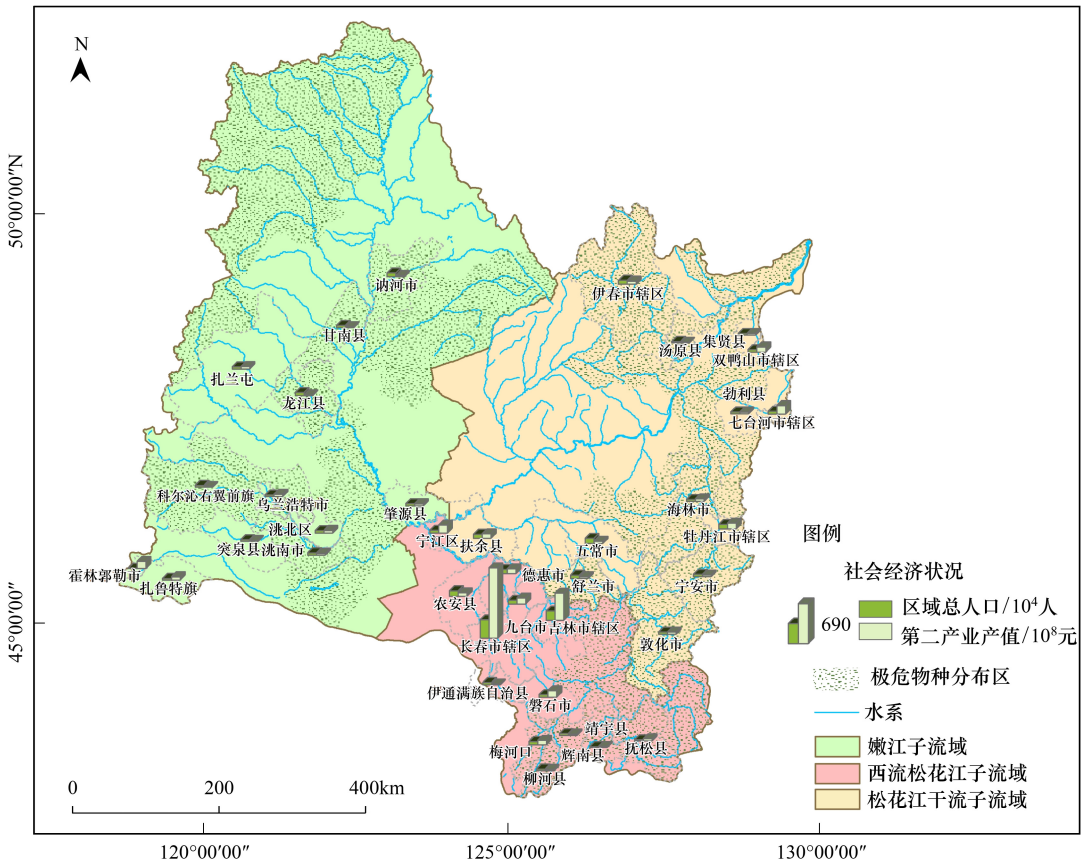

图 2　松花江流域社会-经济-自然复合生态系统的敏感程度

Fig. 2　The sensitivity of social-economic-natural complex ecosystem to the potential water contamination in the Songhua River Basin

2.2.1　流域社会、经济生态系统的敏感程度

考虑到水环境污染的迁移性与突发性污染的影响范围,研究选取沿江重点区域及其水系下游相邻区域(以下统称受影响区域)为对象,以区域总人口和第二产业产值为指标分别表征受影响区域社会与经济生态系统的敏感程度。

统计分析可知,39 个受影响区域的总人口数为 2437.3 万人,讷河市、德惠市、农安县、九台市、长春市辖区、吉林市辖区、舒兰市、牡丹江市辖区、双鸭山市辖区、扶余县、五常市共 11 个区域的总人口数都超过了区域平均总人口数(62.5 万人)。其中,城区人口数在 100 万人以上的大城市有长春市辖区(362.6 万人)、吉林市辖区(183.5 万人)、农安县(110.5 万人)与五常市(100.1 万人),其总人口数达到了全部受影响区域总人口数的 31.0%。因此,长春市辖区、吉林市辖区、农安县及五常市的社会生态系统对沿江水环境潜在污染风险的敏感度较高。相应地,39 个受影响区域的第二产业总产值达到 4058.9 亿元,霍林郭勒市、松原市宁江区、长春市辖区、吉林市辖区、七台河市辖区共 5 个区域的第二产业产值超过了区域平均第二产业产值(104.1 亿元)。

其中,长春市辖区(1377.2 亿元)与吉林市辖区(531.1 亿元)的第二产业产值之和超过了全部受影响区域第二产业总产值的 47%,其余 3 个区域的第二产业产值之和仅为全部受影响区域的 11.5%。因此,长春市辖区与吉林市辖区的经济生态系统对沿江水环境潜在污染风险的敏感度较高。综合而言,长春市辖区(伊通河部分河段)与吉林市辖区(西流松花江部分河段)的社会-经济生态系统对水环境潜在污染风险的敏感度最高。

2.2.2 流域自然生态系统的敏感程度

统计分析了流域内珍稀濒危物种的分布情况,以反映松花江流域自然生态系统对水环境潜在污染风险的敏感程度。松花江流域内分布有属于极危种的物种 7 种、濒危种的物种 16 种及部分珍稀的易危种物种 25 种;以物种属性分,鸟类和兽类为主的脊椎动物 24 种、鱼类 9 种、植物 15 种,共计 48 种。

松花江流域内珍稀濒危物种的分布较为分散。珍稀鱼类主要出现于嫩江干流、松花江干流子流域和西流松花江子流域的水系中;珍稀鸟类和兽类等脊椎动物主要分布于嫩江干流东侧地区、东北平原中南部地区和长白山山脉的老爷岭、张广才岭等地区;珍稀植物分布区较脊椎动物的更为局限,主要包括内蒙古牙克石市、科尔沁右翼,吉林省延边朝鲜族自治州和黑龙江哈尔滨市、伊春市等市辖县。年废水产生量大的沿江重点废水产生企业均靠近珍稀鱼类出现的河段,因此,西流松花江子流域中下游和松花江干流子流域下游地区自然生态系统对水环境潜在污染风险的敏感程度较高。

松花江流域内分布的 7 个极危种是白鹤、虎、豹、狗獾、松江柳、呼玛柳和杉松。“极危”表示该物种现在所面对的威胁与危机等级为最高,其分布区狭窄且种群数量持续衰退,因此对水环境潜在污染的敏感程度最高。极危种在大兴安岭东南侧的内蒙古境内有零散分布,其中鄂伦春自治旗、牙克石市和科尔沁旗右翼前旗均有极危兽类出现。白鹤作为旅鸟,在东北平原北部的齐齐哈尔市也有栖息。大多数极危种集中于长白山脉的张广才岭、老爷岭及其沿线的白城市、延边朝鲜族自治州、牡丹江市、哈尔滨市、双鸭山市、佳木斯市和鹤岗市的市辖县。在有极危种分布的区域内,讷谟尔河(南北河)、双子河、汤旺河、查巴旗河、南岔河、那金河、洮儿河、牡丹江、溪浪河、辉发河(柳河)、一统河、松江河和汤河沿岸均有水环境潜在污染风险源,因此,以上河段及周围地区自然生态系统对松花江流域水环境污染潜在风险的敏感程度高。

2.3 综合分析

由流域水环境潜在污染风险源废水产生量与水环境状况的分析,以及流域社会-经济-自然复合生态系统对潜在污染风险敏感程度的评价,得到松花江水环境潜在污染风险综合分析结果(图 3):牡丹江市辖区(牡丹江中游河段)因潜在污染风险源强、水体对潜在污染风险的缓冲能力低且自然生态系统对潜在污染风险的敏感程度高,是松花江流域受沿江企业产生的水环境潜在污染风险最严重的地区;水体缓冲能力低且社会-经济生态系统敏感程度高的长春市辖区(饮马河、伊通河部分河段),水体缓冲能力低且自然生态系统敏感程度高的伊春市辖区(汤旺河全部河段)与敦化市(海浪河全部河段、牡丹江部分河段),应分别侧重于社会经济和自然不同方面来加强水环境潜在污染风险的防治;污染风险源强的吉林市辖区(西流松花江部分河段)与七台河市辖区(倭肯河部分河段),尤其是社会-经济生态系统敏感程度也较高的吉林市,须提高本区域对潜在污染的风险管理能力以降低污染事故发生的可能性。此外,流域内其他潜在污染风险源强、水体缓冲能力低或敏感程度高的地区亦应受到关注。

3 讨论与建议

对单个项目的环境风险评价一般从风险识别、源项分析、后果计算、风险评价、风险管理这几方面展开,以使建设项目事故率、损失和环境影响达到可接受水平[28]。同时,针对不同工业企业的环境风险分析也可通过构建指标体系来完成,包括企业特征(产品类型、生产规模)、污染源(排放量、风险性)、管理水平(事故率、安全投入)及公共应急预案等多个内容[29-30]。但考虑到获取企业数据存在一定阻力,本研究从流域整体出发,从沿江重点企业与区域的废水产生量、流域各地区水环境状况及流域社会-经济-自然复合生态系统的敏感程度展开,分析比较重点区域间潜在污染风险的差异,是对流域水环境风险影响研究的一次有益尝试,也为沿江

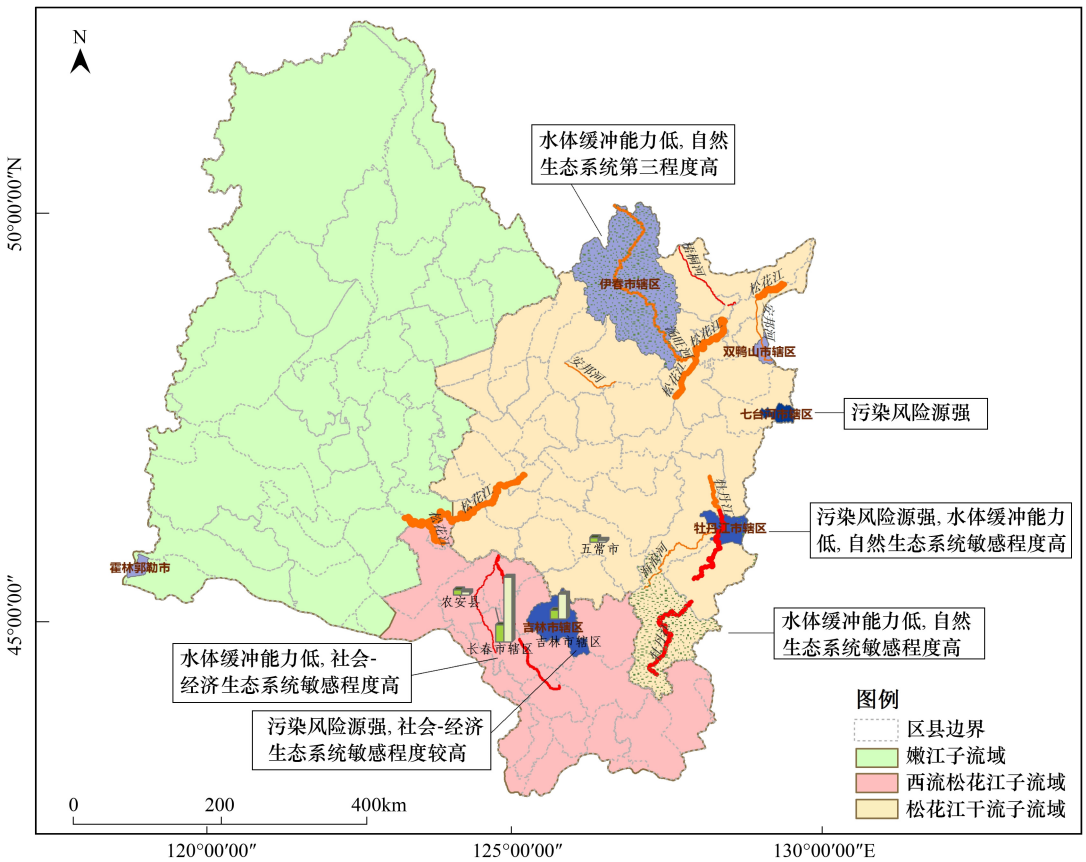

图 3　松花江流域沿江水环境潜在污染风险综合分析

Fig. 3　The synthetic analysis of the potential contamination risk on the riverside aquatic environment of the Songhua River Basin

重点监控企业潜在污染风险评价提供实践指导。

为解决因松花江流域资源和经济结构特点决定的流域水环境潜在污染风险问题,本文建议:①重点排查松花江流域内沿江化工、造纸和冶金等高废水产生企业,相关环保部门必须对这三类企业的废水处理排放进行实时监测与总量控制;②西流松花江子流域中游与松花江干流子流域下游的沿江地区,应严格按照规定配备工业污水处理设施,或推行循环经济、清洁生产,以降低本地区的潜在污染负荷;③针对饮马河、伊通河、牡丹江等本底污染超标河段,须提高沿江区域的企业“环保准入门槛”,并逐步转变已有企业尤其是临近重点企业的生产模式,对技术落后企业实行强制淘汰制度;④对人口数量大、工业生产密集的大城市,如长春市、吉林市,政府部门及相关企业应努力提高自身对污染风险的管理能力,降低潜在污染事故对居民生活生产的可能影响;⑤各级部门应加强对流域内现有野生动植物保护区的管理,同时对有珍稀物种栖息、繁殖的敏感河段及地区进行工业结构调整,以减少沿江企业废水排放对鱼类、鸟类的潜在影响。

总体而言,降低松花江流域沿江企业对水环境的潜在污染风险可分为短期与长期两个方面。从短期看,应加快污水处理的研究,改进现有的废水集中处理方法,推行污水循环利用与资源化;尝试经济手段的改革,综合利用多种污染治理经济手段,提高企业污水达标排放的管理意识,降低对水环境的潜在污染影响。从长期看,应加快产业布局,流域沿岸的重化工企业,如不能较好地解决污水处理问题,应考虑整体迁移,个别规模小效益差的企业应考虑关停;同时,完善污染防治立法,增强污染治理法律法规的可操作性[31],从制度上防治水环境污染风险,避免重大污染事故的发生。

参考文献(References):

[1]　韩晓刚. 城市水源水质风险评价及应急处理方法研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011.

[2] Zhang Y L, Xiao M, Zheng W H. Study on sudden water pollution incidents of Guangdong Huanggang River. Applied Mechanics and Materials, 2011, 99-100: 131-135.

[3] Hu J, Chu J Y, Liu J H, Qin D Y. Risk identification of sudden water pollution on fuzzy fault tree in Beibu-Gulf economic zone. Procedia Environmental Sciences, 2011, 10: 2413-2419.

[4] 蔡美芳, 李开明, 陆俊卿, 杜建伟. 流域水污染源环境风险分类分级管理研究. 环境污染与防治, 2012, 34(9): 78-81.

[5] 王磊, 张磊, 段学军, 董雅文, 秦贤宏. 江苏省太湖流域产业结构的水环境污染效应. 生态学报, 2011, 31(22): 6832-6844.

[6] Zhang B, Qin Y, Huang M X, Sun Q, Li S, Wang L Q, Yu C H. SD——GIS-based temporal——spatial simulation of water quality in sudden water pollution accidents. Computers & Geosciences, 2011, 37(7): 874-882.

[7] 于格, 陈静, 张学庆, 李正炎. 大辽河口水环境污染生态风险评估. 生态学报, 2012, 32(15): 4651-4660.

[8] Hou D B, Ge X F, Huang P J, Zhang G X, Loáiciga H. A real-time, dynamic early-warning model based on uncertainty analysis and risk assessment for sudden water pollution accidents. Environmental Science and Pollution Research, 2014, 21(14): 8878-8892.

[9] 唐行鹏. 流域突发性水污染风险区划与管理方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.

[10] 邓建明, 周萍. 突发性水污染事件风险防控对策探讨. 水利发展研究, 2013, 13(8): 66-69.

[11] Cheng C Y, Qian X. Evaluation of emergency planning for water pollution incidents in reservoir based on fuzzy comprehensive assessment. Procedia Environmental Sciences, 2010, 2: 566-570.

[12] He Q, Peng S J, Zhai J, Xiao H W. Development and application of a water pollution emergency response system for the Three Gorges Reservoir in the Yangtze River, China. Journal of Environmental Sciences, 2011, 23(4): 595-600.

[13] 聂海峰, 赵传冬, 刘应汉, 彭敏, 李括, 杨柯, 刘飞. 松花江流域河流沉积物中多氯联苯的分布、来源及风险评价. 环境科学, 2012, 33(10): 3434-3442.

[14] 孙清芳, 冯玉杰, 高鹏, 张照韩, 任南琪. 松花江水中多环芳烃(PAHs)的环境风险评价. 哈尔滨工业大学学报, 2010, 42(4): 565-572.

[15] 刘宝林. 松花江流域(吉林省部分)水环境持久性污染物的环境特征[D]. 长春: 吉林大学, 2013.

[16] 李涛, 谭雪, 买亚宗, 杨喆, 王海燕, 石磊, 马中. 海浪河流域重金属污染评价. 干旱区资源与环境, 2015, 29(1): 111-118.

[17] 许琳娟, 褚俊英, 周祖昊, 严军, 游进军. 松花江流域水环境质量特征分析. 水资源保护, 2012, 28(6): 55-58.

[18] 樊庆锌, 杨先兴, 邱微. 松花江哈尔滨段城市水环境质量评价. 中国环境科学, 2014, 34(9): 2292-2298.

[19] 张铃松, 王业耀, 孟凡生, 刘廷良, 马广文, 周岳溪, 刘允. 松花江流域氨氮污染特征研究. 环境科学与技术, 2013, 36(10): 43-48, 77-77.

[20] 马广文, 王业耀, 香宝, 王金生, 汪太明, 胡钰. 松花江流域非点源氮磷负荷及其差异特征. 农业工程学报, 2011, 27(增刊2): 163-169.

[21] 李晶, 王凤鹭, 迟晓德. 浅谈松花江流域氨氮减排对策. 环境保护与循环经济, 2013, 33(3): 59-61.

[22] 梁云凯. 松花江流域水污染防治策略. 河南科技, 2013, (11): 175-175.

[23] 环境保护部办公厅. 2012 年国家重点监控企业筛选原则和办法. 北京: 中华人民共和国环境保护部, 2011: 3-3.

[24] 环境保护部办公厅. 2012 年国家重点监控企业名单. 北京: 中华人民共和国环境保护部, 2011: 18-38.

[25] 王耕, 王利, 吴伟. 区域生态安全灾变态势分析方法——以辽河流域为例. 生态学报, 2007, 27(5): 2002-2011.

[26] 中华人民共和国水利部. 松花江流域综合规划. (2013-05-28) [2014-4-16], http://www.mwr.gov.cn/ztpd/2013ztbd/2013kqjhkfzlbhxpz/lyxj/shjly/.

[27] 中华人民共和国环境保护部. 2012 年全国水环境质量状况. (2013-06-06) [2014-4-28], http://wfs.mep.gov.cn/shj/szzk/lysz/201308/t20130823_258645.htm.

[28] 国家环保总局监督管理司. 中国环境影响评价培训教材. 北京: 化学工业出版社, 2000: 341-345.

[29] 贾倩, 黄蕾, 袁增伟, 张晓芳. 石化企业突发环境风险评价与分级方法研究. 环境科学学报, 2010, 30(7): 1510-1517.

[30] 宋雅珊. 松花江流域佳木斯段水环境风险源评价[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2013.

[31] 王威, 王金生, 滕彦国, 翟远征, 曹阳. 国内外针对突发性水污染事故的立法经验比较. 环境污染与防治, 2013, 35(6): 83-86.