

三峡库区江段潜在水环境污染风险评价研究

朱惇¹ 徐芸^{1,2} 贾海燕¹ 雷俊山¹ 陈炼钢³ 杨叶涛²¹

(1. 长江水资源保护科学研究所, 湖北 武汉 430051;

2. 中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院, 湖北 武汉 430074;

3. 南京水利科学研究院水文水资源与

水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029)

【摘要】: 三峡库区的水环境安全不仅关系到库区周边省市用水安全, 更与长江流域的生态安全以及整个中国的可持续发展密切相关。基于压力-状态-响应(PSR)模型, 综合考虑风险源危险性、风险受体敏感性以及区域环境风险可接受水平等因素构建水环境污染风险分级评价指标体系与量化方法, 运用冷热点格局分析等空间统计方法, 以行政区为单元综合评价三峡库区潜在水环境污染风险分布状况。结果表明:(1)云阳县风险源数量最多, 万州区风险受体数量最多, 但重庆主城区及周边地区高风险污染源和高敏感受体分布最为密集, 且区域环境风险可接受水平最低。(2)研究区区县级风险源危险性和风险受体敏感性指标统计结果均呈集聚分布格局, 热点区域集中在库区上游重庆主城区及周边地区, 且该区域风险可接受水平表现为冷点区域, 而在其它区域基本呈现为均衡的分布格局, 未形成明显的热点或冷点区域。(3)库区水污染高风险江段包括九龙坡区、渝北区、沙坪坝区、渝中区和南岸区等5个县, 中风险江段包括长寿区、北碚区、江北区、大渡口区、涪陵区、石柱县和巴东县等7个县, 低风险江段主要分布在库区上游的江津区和库区腹地及下游区域。最后, 针对不同区域潜在水污染风险分布特征, 从产业优化布局、预警与应急能力建设以及企业污废水处理技术升级等方面提出风险管控的相关建议。

【关键词】: 水环境污染 潜在风险评估 三峡水库 GIS分析

【中图分类号】: X52 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2021)01-0180-11

水环境安全直接关系到国家安全与社会稳定。随着社会发展, 水污染事故已成为危害人民生存健康的重大环境问题之一, 尤其是突发性重大水污染事故不仅给人民生活安全带来极大危害, 对生态环境影响也极其严重^[1]。突发性水污染事件具有发生突然、扩散迅速、危害严重及污染物不明等特点, 能在瞬时或短时间内大量排放污染物质, 对水环境造成严重污染和破坏, 极易造成巨大的经济损失和社会恐慌^[2~4]。区域大尺度范围内水环境风险涉及因素较多, 且污染发生发展过程复杂。水环境风险评估研究最初侧重于对所造成危害的定性描述, 然后研究重点转向如何建立科学的风险评价指标体系及定量评估模型, 以便于准确量化风险程度。但目前大多数研究主要集中在单一的环境风险研究, 或将单一的污染物超标程度作为环境风险的表征, 或将污染物对人类健康的危害程度作为环境风险的表征^[5~10]。而针对风险源特性、风险受体敏感度和风险发生发展过程等进行全方位综合评估

作者简介: 朱惇(1979~), 男, 高级工程师, 主要研究方向为水资源保护. E-mail: zhudun@126.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0402207; 2017YFC0505302); 国家自然科学基金(51679143)

的研究相对较少。三峡水库地处我国中西部的长江咽喉地带,水库水环境安全问题受到国内外的广泛关注。尤其是水库蓄水运行后,随着库区水文状态改变,水环境安全面临越来越大的压力,水污染事件时有发生且发生频率及带来的危害呈逐年上升之势,给库区水环境安全带来了一定隐患^[11~15]。针对突发性水污染事件具有极强的不可预见性和多样性,本研究重点关注可能引发大尺度环境风险的污染源,基于既定的区域环境敏感目标及区域可承受的风险程度及损害水平,开展库区潜在水环境污染风险评估研究,通过风险分区评价水环境污染事故发生的可能性,有助于总结出库区潜在水环境污染风险分布特征,以期为三峡库区江段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。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

三峡库区位于东经 105° 44' ~111° 39', 北纬 28° 32' ~31° 44' 之间,东起湖北省宜昌市夷陵区,西至重庆市江津区,沿长江狭长分布,属长江上游下段,涉及重庆市和湖北省两地共 25 个县区,是长江经济带的重要组成部分(图 1)。库区水系发达,其中长江干流全长约 600km,主要支流有嘉陵江和乌江。库区属于亚热带季风气候,多年年均气温为 14℃~18℃;降水量时空分布不均,多年平均年降雨量为 1200~1400mm。三峡库区江段是长江上游珍稀特有鱼类自然保护区最下游的江段,是关系到上游保护区内珍稀特有鱼类生存和三峡水库渔业资源增殖的重要通道。三峡工程建设以来,移民资金的大量投入和国家优惠政策的大力扶持,使得库区经济获得较快发展。但在库区人口、经济增长和城市快速发展的同时也加剧了污染物排放。库区沿岸工业污水和生活污水、农田及地表径流所带入农田和化肥、船舶等流动载体所带入油类等流动污染源是影响三峡库区水质的 3 个主要污染源,其中工业污水和生活污水影响所占比例最大。据统计 2017 年库区工业污染源废水排放量 1.06 亿 t,城镇生活污水排放量为 12.52 亿 t,库区全年化肥流失总量为 0.92 万 t,船舶污染物排放 18.0 万 t^[16]。



图 1 研究区位置及相关空间数据分布

1.2 数据来源

整理 2017 年长江流域入河排污口专项整治工作调查成果资料, 筛选出三峡库区内规模较大的入河排污口 317 处; 详细调查各入河排污口设置单位所属行业类型、生产规模、生产工艺, 以及企业生产过程中所涉及的危险物质类型和数量等基本信息, 统计各企业入河排污口年废水产生量。整理 2012 年水利普查取水口调查资料, 筛选非农取水口 438 处; 详细调查各非农取水口年最大取水量、供水影响人口数量等基本信息。研究区江段入河排污口和取水口的空间分布情况如图 1(a) 所示。收集三峡库区江段寸滩、清溪场、沱口、奉节、碛石、太平溪、黄陵庙、南充、临江门、小河坝和武隆等 11 个断面 2016 年逐月水质监测数据, 断面位置如图 1(b) 所示。并收集研究区范围内各级行政区社会、经济和人口等统计资料。

2 研究方法

2.1 水环境污染风险等级评价指标体系构建

水环境污染风险等级评价指标体系构建是突发水污染风险评价的关键环节。而风险等级划分的核心在于指标的选取、赋值和标准值的建立^[17~19]。联合国规划署 (UNEP) 和经济合作与发展组织 (OECD) 共同提出的压力—状态—响应模型 (PSR) 具有较好的系统性、灵活性和可操作性, 可用于构建水环境污染风险评价指标体系^[20, 21]。所选指标既能充分反映评价区域的水环境整体状况和水环境安全内涵, 又便于通过统计资料和监测资料获取所需指标数据, 还能反映研究区自然环境、社会经济的具体特点。为消除指标间数量级和量纲差异的影响, 对各类数据采用归一标准化处理, 并采用变异系数法确定指标权重, 详见表 1。其中:

(1) 压力层对应环境风险源危险性。主要反映了对区域环境状况起驱动作用的压力, 描述自然过程或人类活动给环境带来的影响和胁迫。本研究以重要排污口为风险源, 考虑风险源类别、排污量和排污口距离水系的距离 3 项指标, 将风险源分为重大风险源、较大风险源和一般风险源。

(2) 状态层对应环境风险受体敏感性。主要反映了自然环境状况和人类生活质量的影响因素。本研究以重要取水口为主要风险受体, 考虑其供水人口、主要取水用途、所在江段水质状况 3 项指标, 将风险受体划分为重大敏感目标、较大敏感目标和一般敏感目标。

(3) 响应层对应区域环境风险可接受水平。主要反映了环境风险受体对其可能遭受的损失和危害客观上的接受能力或主观上愿意接受的程度。本研究主要评价各县区国内生产总值、人口密度和是否位于珍稀鱼类保护区范围内 3 项指标, 将区域环境风险可接受水平划分为极高可接受水平、较高可接受水平和一般可接受水平。

表 1 水环境污染风险评价指标体系

目标层	指数层	指标	指标权重
压力层 (P)	环境风险源危险性 (S ₁)	风险源类别 I ₁	0.1472
		污水排放量 I ₂	0.3147
		距离水系的距离 I ₃	0.0580
状态层 (S)	环境风险受体敏感性 (S ₂)	取水口供水人口 I ₄	0.1684

		主要取水用途 I ₅	0.1095
		水质类别 I ₆	0.0281
响应层 (R)	区域环境风险可接受水平 (S ₃)	是否位于保护区 I ₇	0.0580
		国内生产总值 I ₈	0.0580
		人口密度 I ₉	0.0580

2.2 水环境污染风险评价方法

2.2.1 区域冷热点格局分析

以研究区乡镇街道或县区行政区为分区评价单元,根据各单元环境风险源危险性、环境风险受体敏感性和区域环境风险可接受水平指标评价得分,分析各单元3种评价指标统计值的空间自相关性和冷热点格局。

(1) 空间自相关分析

空间自相关分析(Spatial Autocorrelation Analysis)主要用于检验空间单元与其相邻空间单元的属性之间是否具有相似性,利用空间自相关分析判别各类污染风险评价指标是否存在集聚的趋向^[22,23]。其计算公式如下:

$$Moran's I = \frac{N \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N W_{ij} (X_i - \bar{X}) (X_j - \bar{X})}{\left(\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N W_{ij} \right) \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \quad (1)$$

$$Z = \frac{1 - E(i)}{\sqrt{V(i)}} \quad (2)$$

式中: X_i 和 X_j 分别为 i 和 j 所在位置的观测值; W_{ij} 为权重; E 为标准化统计量值; $E(i)$ 为理论期望; $V(i)$ 为理论方差。

(2) 区域冷热点分析

$$G_i^*(d) = \sum_{j=1}^n w_{ij}(d) X_j / \sum_{j=1}^n X_j \quad (3)$$

冷热点分析(HotSpotanalysis)是探索局部空间聚类分布特征的方法,通过计算要素集中每个要素的Getis-Ord G_i^* ,判别其是否存在高值聚类或低值聚类,并对其位置进行识别。而统计值 $Z(G_i^*)$ 得分的显著程度则用于识别不同区域单元热点与冷点的空间分布,并将其划分为极显著热点、显著热点、热点、非显著点、冷点、显著冷点和极显著冷点区域^[24~27]。

$$Z(G_i^*) = (G_i^* - E(G_i^*)) / \sqrt{Var(G_i^*)} \quad (4)$$

本研究用冷热点来描述各行政区评价单元内风险源、风险受体及区域环境风险可接受水平评价结果的空间关联程度。

2.2.2 潜在污染风险分区评价

以县级行政区边界划分长江干流及嘉陵江、乌江两条重要支流江段,对于无主要江段过境的县区(如开县、巫溪县和兴山县),根据其境内其它入库支流汇水方向与下游县区进行归并评价,并考虑评价江段左右岸关系共划分为 22 个江段区间。将不同级别的风险源、风险受体及环境风险可接受水平归并到不同江段区间内,将各县区对应江段区间内的风险源、受体以及各县区环境风险可接受水平评价得分分别累加求和,并依照自然间断点法(Natural Breaks)分类确定不同拐点值来定义分区标准,将水环境污染风险区划分为 3 种类型,即高风险区、中风险区和低风险区。研究中利用以下公式进行评分:

$$R_k = \left(\sum_i^n (\alpha P_{s_i}) + \sum_j^m (\beta S_{s_j}) + \gamma T_{s_k} \right) / S_k \quad (5)$$

式中: R_k 为第 k 个县级行政区单元江段区间的潜在水环境污染风险评估值; n 为该单元范围内风险源数目; P_{s_i} 为第 i 个风险源危险性评价得分; m 为该单元范围内风险受体数目; S_{s_j} 为第 j 个风险受体敏感性评价得分; T_{s_k} 为该单元区域环境风险可接受水平评价得分; α 、 β 、 γ 为风险等级评价指标体系中各指标层对应的权重; S_k 为第 k 个单元区间江段占库区评价江段总长度比例。

3 结果与分析

3.1 评价指标空间分布特征

根据水环境污染风险评价指标体系等级标准,对风险源、风险受体及区域环境风险可接受水平进行评价。研究区范围内的风险源为 317 家重点废水产生企业的入河排污口,涉及化工、电力、冶金、污水处理厂、医药、食品和造纸纸浆等行业,重点污染源年废水产生总量约为 14.5 亿 t。经评价,有重大风险源 14 个,较大风险源 72 个,一般风险源 231 个,不同危险等级风险源空间分布详见图 2(a)。其中,重大水污染风险源主要以大型污水处理厂为主,其污水排放量大,其次是化工、医药等企业涉及污染物毒性较强,发生污染事故的概率相对较高。单从地域分布上看,云阳县风险源数量最多共 37 个,其中较大风险源 6 个、一般风险源 31 个,但无重大风险源。而重庆主城区长江和嘉陵江沿岸分布着大量工业园区,是高风险污染源最为密集地区。

研究区范围内的环境风险受体为 382 个大型非农取水口,包括城乡供水饮用水源地取水口 222 个,一般工业企业取水口 146 个,火电厂取水口 4 个,其它生态环境取水口 10 个,影响人数累计达 1052 万人。经评价,有重大敏感目标 25 个、较大敏感目标 101 个、一般敏感目标 251 个,不同敏感等级环境受体空间分布详见图 2(b)。其中,万州区受体数量最多共 67 个,但大多属于较低敏感环境受体,而地处长江和嘉陵江交汇的重庆主城区密集着分布近 20 个集中式城市饮用水源取水口,多属于高敏感环境受体。研究区主要水质断面春秋两季监测数据显示,长江干流明显好于嘉陵江、乌江等支流。干流断面春季符合 II~III 类标准,秋季符合 II~V 类标准,秋季寸滩和官渡口断面超标。支流断面大多符合 III-V 类标准,个别断面为劣 V 类水,主要超标因子为总磷。

研究区区域环境风险可接受水平等级分布见图 2(c)。其中 4 个县区的区域环境风险可接受水平为一般水平,主要分布重庆主城区、涪陵区和万州区等城镇化率高的地区;12 个县区为较高水平,主要分布在库区上中游江段;9 个县区为极高水平,主要分布在库区中下游江段。研究区范围内水库尾水江段与长江上游珍稀特有鱼类自然保护区相衔接,主要分布在江津、巴南、九龙坡和大渡口江段,其中核心区江段长 26km,缓冲区江段长 94km,试验区江段长 27km,这些江段自然生态系统受库周水环境污染潜在风险的影响较大。

表 2 水环境污染风险评价指标全局自相关分析

	Moran' sI	Z 得分	P 值	结果
环境风险源危险性 (S_1)	0. 022577	3. 921581	0. 000088	集聚
环境风险受体敏感性 (S_2)	0. 429131	4. 668468	0. 000003	集聚
环境风险可接受水平 (S_3)	0. 822385	5. 008633	0. 000001	集聚

3.2.2 区域冷热点格局特征

各行政区评价单元风险源危险性、风险受体敏感性和区域环境风险可接受水平的指标评估得分的冷热点分布情况见图 3。由于重庆主城区及周边地区工业化程度高、大型工业企业众多,排污口及取水口分布密集,生产生活废水排放量大;同时城市生活和工业需水量也逐年迅猛增长,水资源承载压力日益增大,水质安全保障要求高,因此该区域的风险源危险性、环境风险受体敏感性均形成了极显著热点区。而该区域的环境风险可接受水平则呈现相反分布特征,形成了极显著冷点区,主要由于该区域城镇化率高、区域经济较为发达,城镇人口聚集,是水污染事件发生的频发、高发和多发区域,一旦发生严重的水污染事件,将直接影响到库区供水安全,因此存在着较大的水环境安全隐患。

3.3 潜在水环境污染风险分区

统计各县区评价单元风险源危险性、风险受体敏感性以及区域环境风险可接受水平综合评价结果,按式(5)经空间统计后绘制三峡库区江段潜在水环境污染风险分区图(图 4)。可以看出:

(1)高风险区江段共 5 个,分布在九龙坡区、渝北区、沙坪坝区、渝中区和南岸区。大部分属于重庆市都市功能核心区范围,是重庆集约发展的现代制造业基地,这些区域内高等级风险源和高敏感受体数量密集,水污染事件发生概率较高;同时又临近长江上游珍稀特有鱼类自然保护区,社会经济及自然生态系统对潜在污染风险敏感程度较高,在较大潜在水环境污染风险。

(2)中风险区江段共 7 个,分布在长寿区、北碚区、江北区、大渡口区、涪陵区、石柱县和巴东县。多属于重庆都市功能拓展区,是未来承接工业经济发展的主要区域。这些地区城镇化相对发达,区域工业产值较大,风险源和敏感受体数量相对较多。此外,由于流经石柱县和巴东县境内江段长度较短,而其境内风险源和敏感受体分布相对较为密集,也存在一定的潜在污染风险隐患。

(3)低风险区江段共 10 个,除库区上游江津区外,主要集中在中下游的重庆市渝东北生态涵养发展区及湖北省鄂西生态圈范围内。这些地区基本上处于“产业空心”状态,风险源数量少、等级相对较低,发生重大环境污染事件可能性较小,对水环境带来的风险目前尚未显现出来。

4 结论与讨论

4.1 结论

三峡库区空间范围较大、涉及的水环境风险源及水环境风险受体众多,不适用于完全定量的环境风险评估方法。因此,本研究通过 GIS 冷热点分析对评估单元进行风险量化,综合评价环境风险源危险性、环境风险受体敏感性和区域环境风险可接受水平,

探明了研究区潜在水环境污染风险等级空间分布状况, 得出以下主要结论:

(1) 三峡库区江段内潜污染在风险源、受体和区域环境风险可接受水平均呈分布不均衡。重点风险源和受体主要分布于库区上游长江干支流江段, 库区下游江段则分布较少。云阳县的风险源数量最多, 万州区的风险受体数量最多。重庆主城区范围内高风险污染源和高敏感受体均最密集, 且区域环境风险可接受水平最低。

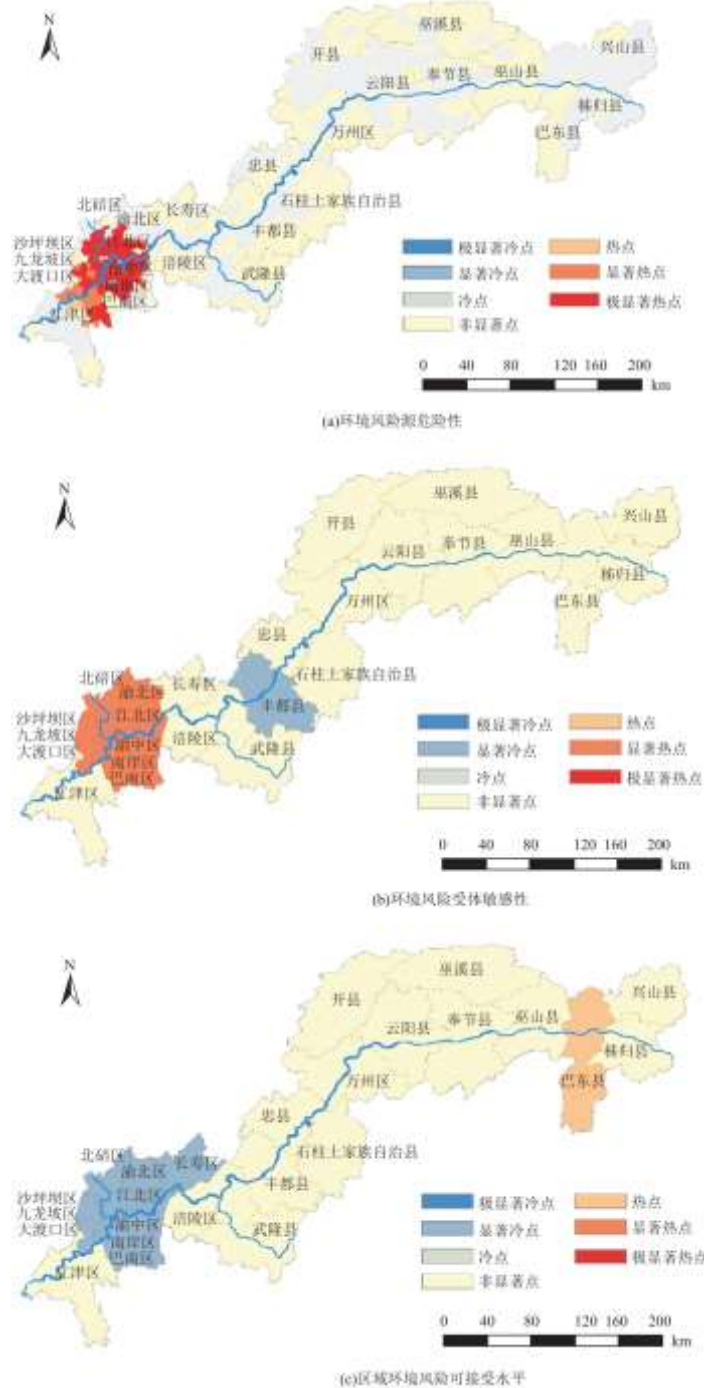


图 3 各评价指标冷热点区域分布



图 4 潜在水环境污染风险分区

(2) 环境风险源危险性、环境风险受体敏感性和区域环境风险可接受水平得分均具有空间正相关, 呈现集聚分布格局。研究区上游江段重庆主城区及周边的风险源危险性及其受体敏感性呈现为极显著的热点区域, 同时区域环境风险可接受水平在此表现为较明显的冷点区域, 表明该区域水污染潜在风险较大, 其它县区江段评价得分较为均衡, 并未形成特别显著的热点或冷点区域。

(3) 水环境污染高风险江段集中分布在重庆主城区, 该江段潜在水污染风险源强、环境风险受体敏感程度高, 江段水体缓冲能力低且区域环境风险可接受水平低, 是研究区水环境污染风险最严重的地区, 也是研究区水环境潜在风险监督与管理的重点区域; 而中低风险区江段主要集中分布在三峡腹地及下游地区。

4.2 讨论与建议

近年来, 库区各级政府坚持以“共抓大保护、不搞大开发”为导向, 加大对长江三峡生态环境的保护力度。但三峡生态系统目前仍处于急剧演替阶段, 水生态系统抵御外部环境压力和自我调节能力相对脆弱。长期以来库区及上游沿岸城市化工产业所占比重较大, 水污染治理体系也不尽合理。虽然各级政府根据产业发展和城市化进程明确划出相应的取水口岸线或水源保护岸线, 但对取水口岸线及水源保护区上下游水域范围、库周陆源污染物的控制及城镇化发展进程的影响欠缺综合平衡和协调^[28]。由于潜在水污染风险源对库区生态环境的影响具有持久和累积效应, 使得库区水环境安全风险、饮用水源地健康隐患以及珍稀鱼类栖息、繁殖的敏感生境均受到一定威胁。本文结合库区风险评估结果, 提出相应的突发性水环境风险管控对策建议:

(1) 按照“优化升级发展、适度发展、有选择地发展”原则, 调整发展方向、优化库区沿岸不同类型风险区域的产业布局。高风险区域是突发水污染事件监管的重点区域, 应限制高污染高耗能行业发展, 推动产业升级和发展转型, 加快落后产能退出, 有序引导产业结构调整和优化布局, 有效降低潜在污染输出负荷。中风险区应选择环境风险相对较低的产业发展, 保持适度发展规模, 提高技术准入门槛; 在布局上应必须避免对水源涵养、饮用水源的影响和长期累积风险。低风险区应以预防为主保护优先, 合理安排工业企业发展, 优先选择水环境风险较低的产业布局, 进一步做好环境风险防范措施。

(2) 大力推进水环境污染预警与应急能力建设。实施应急监测是做好突发水环境污染事故处理、处置的前提和关键。只有对突发水污染事故的类型、污染危害状态提供了准确的数据资料, 才能为正确决策事故处理、处置和善后恢复等提供科学依据。基于环境风险“全过程管理”与“优先管理”理念, 综合分析库区社会经济发展、人口增长与水环境质量变化关系的基础上, 结合库区水环境风险预警需求, 基于库区整体性和系统性理念, 建立库区突发水环境事件应急监测技术支持系统^[29,30]。

(3) 加快重点工业企业污水处理技术升级。全面提升污水集中处理能力, 进入工业园区污水处理设施或城镇污水处理设施的企业污水, 须经预处理达到集中处理要求; 推行污水循环利用与资源化、暴雨径流控制与管理、环境风险防范的一体化水污染

控制管理体系建设;开展企业生产区域地面径流污染物处置与管理体系建设,全面评估重点企业的风险防范与事故后处置体系有效性;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

参考文献:

- [1]ALVAREZ P J J, CHAN C K, MENACHEM E, et al. Emerging opportunities for nanotechnology to enhance water security [J]. *Nature Nanotech*, 2018, 13 (8) :634-641.
- [2]李林子, 钱瑜, 张玉超. 基于 EFDC 和 WASP 模型的突发水污染事故影响的预测预警[J]. *长江流域资源与环境*, 2011, 20 (08) : 1028.
- [3]YANG H D, LIU B Y, HUANG J H. Forecast model parameters calibration method for sudden water pollution accidents based on improved Bayesian-Markov chain Monte Carlo[J]. *Control and Decision*, 2018, 33 (4) :679-686.
- [4]丁凡, 黄立勇, 王锐, 等. 中国 2004-2015 年突发水污染事件监测数据分析[J]. *中国公共卫生*, 2017, 33 (1) :59-62.
- [5]HUANG L, WAN W B, LI F Y, et al. A two-scale system to identify environmental risk of chemical industry clusters[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 186 (1) :247-255.
- [6]YANG H D, LIU B Y, HUANG J H. Forecast model parameters calibration method for sudden water pollution accidents based on improved Bayesian-Markov chain Monte Carlo[J]. *Control and Decision*, 2018, 33 (4) :679-686 pHam.
- [7]祝慧娜, 袁兴中, 梁婕, 等. 河流水环境污染风险模糊综合评价模型[J]. *中国环境科学*, 2011 (3) :166-171.
- [8]HU J, CHU J Y, LIU J H, et al. Risk identification of sudden water pollution on fuzzy fault tree in Beibu-Gulf economic zone. *Procedia Environmental Sciences*, 2011, 10:2413-2419.
- [9]ZHANG B, QIN Y, HUANG M X, et al. SD-GIS-based temporal-spatial simulation of water quality in sudden water pollution accidents. *Computers & Geosciences*, 2011, 37 (7) :874-882.
- [10]HOU D B, GE X F, HUANG P J, et al. 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.
- [11]赵宝利. 重庆市化工企业危险源辨识与风险评估[D]. 重庆:重庆大学, 2009.
- [12]王丽婧, 席春燕, 付青, 等. 基于景观格局的三峡库区生态脆弱性评价[J]. *环境科学研究*, 2010, 23 (15) :1268-1273.
- [13]张艳军. 三峡库区突发性水环境风险分区应用研究[J]. *环境科学与技术*, 2015, 38 (11) :77-81.
- [14]曹宝, 王秀波, 薛婕, 等. 三峡库区潜在水环境风险源识别与分级评价方法研究[J]. *环境工程*, 2016, 34 (2) :138-142.

-
- [15]卓海华, 吴云丽, 刘旻璇, 等. 三峡水库水质变化趋势研究[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(6):925-936.
- [16]中华人民共和国生态环境部. 长江三峡工程生态与环境监测公报[R]. 2018.
- [17]陈秋颖, 刘静玲. 流域水环境风险评价研究展望[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2015(2):202-205.
- [18]贾倩, 曹国志, 於方, 等. 基于环境风险系统理论的长江流域突发水污染事件风险评估研究[J]. 安全与环境工程, 2017, 24(4):84-88, 93.
- [19]肖瑶, 黄岁樑, 孔凡青, 等. 基于水功能区控制单元的流域突发性水污染事件风险评价区划及其应用[J]. 灾害学, 2018, 33(3):222-228.
- [20]COSTANZA R, NORTON B, KASKEII B. Ecosystem health:New goals for environmental management[M]. Washington D C:Island Press, 2002.
- [21]ADRIAANSE A. A study on the development of indicators for environmental policy in the Netherlands. Environmental Policy Performance Indicators, 2006.
- [22]巩杰, 谢余初, 赵彩霞, 等. 甘肃白龙江流域景观生态风险评价及其时空分异[J]. 中国环境科学, 2014, 34(8):2153-2160.
- [23]赵科理, 傅伟军, 叶正钱, 等. 电子垃圾拆解区土壤重金属空间异质性及分布特征[J]. 环境科学, 2016, 37(8):3151-3159.
- [24]ANSELIN L. Local indicators of spatial association -LISA[J]. Geogr Anal, 1995, 27:93-115.
- [25]GETIS A, ORD J K. Local spatial statistics:An overview[C]//LONGLEY P, BATTY M. Spatial analysis:Modelling in a GIS environment. Cambridge, England:John Wiley & Sons, 1996:261-277.
- [26]Ned levine & associates, national institute of justice. Crime Stat IV:A spatial statistics program for the analysis of crime incident locations[R]. Washington, DC:Houston, TX/ National Institute of Justice, 2013:7-9.
- [27]李芳林, 蒋昊. 长江经济带城市环境风险评价研究[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(5):939-948.
- [28]刘婷, 赵伟, 张智红, 等. 三峡库区重庆段城市空间扩展及形态时空演变研究[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(9):1342-1350.
- [29]李凤英, 毕军, 曲常胜, 等. 环境风险全过程评估与管理模式研究及应用[J]. 中国环境科学, 2010, 30(6):858-864.
- [30]张艳军, 秦延文, 张云怀, 等. 三峡库区水环境风险评估与预警平台总体设计与应用[J]. 环境科学研究, 2016, 29(3):391-396.
- [31]沈园, 谭立波, 单鹏, 等. 松花江流域沿江重点监控企业水环境污染风险分析[J]. 生态学报, 2016, 36(9):2732-2739.
- [32]王威, 王金生, 滕彦国, 等. 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.

[33]李二平. 跨界突发性水污染事故预警系统研究与应用[D]. 哈尔滨工业大学, 2012.