

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2016.02.003

镇江长江征润州水源地综合风险评价

周琦^{1,2}, 逢勇^{1,3}, 罗慧萍¹

(1. 河海大学环境学院, 江苏 南京 210098; 2. 铜陵学院建筑工程学院, 安徽 铜陵 244061;
3. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要: 以镇江长江征润州水源地为例, 在考虑水源地风险类型、水源地风险控制能力的基础上构建了水源地综合风险定量评价指标体系和评价方法, 并确定各指标特征值的计算方法和风险等级划分标准, 特征值计算中提出以风险累积指数反映风险源数量和集聚程度对水源地风险的影响程度, 应用空间自相关分析方法确定风险累积指数。评价结果表明: 征润州水源地风险等级为中风险; 水源地安全威胁主要为上游 20 km 岸线内的沿江码头, 废水直排企业和污水处理厂对水源地供水安全影响较小。

关键词: 水源地供水安全; 综合风险评价; 风险累积指数; 空间自相关分析; 征润州水源地

中图分类号: X824

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2016)02-0108-07

Comprehensive risk assessment of Zhengrunzhou water source area in Zhenjiang City

ZHOU Qi^{1,2}, PANG Yong^{1,3}, LUO Huiping¹

(1. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Civil Engineering and Architecture, Tongling University, Tongling 244061, China;

3. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resources Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the risk categories and self-control capabilities of risks in water source areas, a comprehensive and quantitative risk assessment index system was established using the Zhengrunzhou water source area in Zhenjiang City as an example, and an evaluation method is put forward. The calculation method of the eigenvalue of each index and the risk level grading standards are presented. In calculating eigenvalues, a cumulative risk index was used to represent the impact of the amount and agglomeration intensity of risk sources on the risks of the water source area, and the cumulative risk index was determined using the spatial autocorrelation analysis method. The results show that the risk level of the Zhengrunzhou water source area is at a the medium grade, the main threats influencing the security of this area are the docks located on the shoreline within 20 km upstream of this area, and the directly discharged pollutants from enterprises and sewage plants have less influence on the water source area.

Key words: water supply security in water source area; comprehensive risk assessment; cumulative risk index; spatial autocorrelation analysis; Zhengrunzhou water source area

随着社会经济的发展, 原本远离城区的水源地逐渐被建成区侵占, 环境风险日益凸显^[1], 而不断增多的风险源也导致了近年来水污染事故频发, 威胁着水源地的供水安全。镇江市长江征润州水源地位于镇江市润州区征润州村, 在长江镇扬段上游的南岸, 设计取水能力为 60 万 m³/d, 总服务人口约 120 万, 是镇江市区和部分郊县乡镇自来水供应的源头。水源地上游约 11 km 处即为江苏省丹徒经济开发区, 区内企业众多, 沿

收稿日期: 2015-09-18

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2014ZX07405002); 安徽省高等学校自然科学研究项目(KJ2016A868); 安徽省高校优秀青年骨干人才国内外访学研修重点项目(gxfxZD2016244)

作者简介: 周琦(1981—), 男, 安徽铜陵人, 讲师, 博士研究生, 主要从事水资源、水环境保护与规划研究。E-mail: zq316249@sina.com

通信作者: 逢勇, 教授。E-mail: pangyonghhu@163.com

江码头密布,对征润州水源地存在极大的风险隐患。因此,为保障水源地供水的安全,有必要对征润州水源地进行风险评价。

关于区域水环境风险评价的研究和应用,国外的学者和研究机构起步较早。美国科学院和环境保护局^[2-3]1983年即开发出4步走的健康风险评估框架;Salvi等^[4]针对意外风险提出了一套有效评估方法;Jenkins^[5]于2000年介绍了多瑙河突发性事故应急预警系统;Scott^[6]提出了以确认模型为基础的环境事故指数法。相对来说,国内研究虽然起步较晚,但发展较快。程斌等^[7]构建了基于改进决策树模型的水源地健康风险评价方法;张光贵等^[8]利用美国环境保护局推荐的水环境健康风险评价模型对洞庭湖水系重金属健康风险进行评价;孙才志等^[9]对地下水污染风险评价方法进行了描述;李国银等^[10]对呼和浩特市饮用水中亚硝酸盐的危害风险进行了评估;马越等^[11]提出一套基于饮用水源地共性特征的包含环境风险源初步筛选、风险评估和风险分级3步的饮用水源地突发事故环境风险分级方法;逢勇等^[12]、尹亮等^[13]以企业风险等级及风险事故对水源地危害来描述水源地的风险等级;罗慧萍等^[14]综合考虑了废水直排企业、污水处理厂和码头等多种风险源对水源地的风险影响,以此来划分水源地的风险等级。

目前,大多数水源地风险评价研究中重点考虑了个体风险源对水源地的影响,对于集中风险源对水源地影响的研究并不深入,同时,部分评价指标为定性指标,评价过程中主观性较强。笔者以镇江长江征润州水源地为例,综合考虑水源地风险类型、水源地风险控制能力,建立水源地综合风险评价方法和定量评价指标体系,在指标计算中提出风险累积指数,并以此反映集中风险源对水源地的综合风险影响。

1 评价指标与评价方法

1.1 评价指标

水源地风险主要分为常规风险和突发事故风险^[15]。常规风险主要为正常情况下水源地受到周边风险源污染的风险,其风险大小受水源地周边风险源风险程度、水源地所在水体水质和水文状况影响。突发事故风险主要为周边风险源发生突发事故(企业偷排、码头危化品泄露与船舶溢油等)而引起的水源地取水口受到污染的风险,可以以突发污染事故对水源地造成的污染程度来反映突发事故风险大小。水源地自身的风险控制能力也影响水源地风险大小。

基于上述分析,本文构建如表1所示水源地综合风险评价指标体系。以“十二五”水专项课题“太湖流域水环境风险评估与预警技术示范”研究成果为基础,采用专家评价结合层次分析法(AHP)^[16]确定各指标风险权重(表1括号中数字为权重)。

1.2 评价方法

对水源地各评价指标进行风险评分(满分为100)计算,以风险评分值越小风险等级越高为原则,将水源地及各评价指标风险评分值划分为极低、低、中、高4个风险等级,其评分值分别为[90,100]、[80,90]、[60,80]、[0,60)。水源地风险评分计算式为

$$F = \sum_{i=1}^6 F_i \omega_i \quad (1)$$

式中: F ——水源地风险评分值; F_i 、 ω_i ——第*i*指标的风险评分值和风险权重。

采用内插法计算指标风险评分值,步骤如下:(a)根据子指标特征值由指标特征值风险等级划分标准确定风险等级;(b)根据相应风险等级特征值上下阈值及评分值上下阈值,按照线性比例计算出子指标风险评分值,若特征值阈值为无限大,以特征值及其上下阈值的倒数及评分值上下阈值按线性比例计算子指标风险评分值;(c)采用加权求和计算 F_i ,各子指标权重见下文。

2 指标特征值确定方法与分级标准

2.1 风险源

风险源对水源地常规风险的影响取决于风险源本身风险大小(即风险源风险指数^[14])、风险源距取水口距离及区域风险源的数量和集聚程度。本文以区域风险源综合风险指数、区域风险源至取水口的综合距

表1 水源地综合风险评价指标体系

Table 1 Comprehensive risk assessment index system for water source area

准则层	指标层
水源地综合 风险评价 指标体系	水源地风险影响
	风险源(0.323)
	水质(0.098)
	水文状况(0.098)
	事故影响程度(0.239)
	水源地风险控制能力
	监管能力(0.121)
	应急能力(0.121)

离2个子指标判定区域风险源对水源地常规风险的综合影响。

参考罗慧萍等^[14]的研究确定风险指数风险等级划分标准。根据中华人民共和国环境保护部文件《集中式饮用水水源环境保护指南》相关规定,风险源调查范围为水源保护区上游20 km,取风险源位于水源地保护区上游20 km为极低风险,据此确定风险源至取水口距离的风险等级划分标准。采用专家评价结合AHP^[16]确定子指标风险权重(表2)。

以风险源主体风险度、风险源控制机制2个指标采用加权求和判定个体风险源风险指数,指标权重及指标风险分级标准见文献[14]。由于空间自相关统计可以反映区域内不同单元属性值的相似程度,同时可以探测单元属性值在局部水平上的空间集聚程度^[17],因此,本文采用空间自相关分析方法确定风险源数量和聚集程度对水源地风险的影响。计算公式如下:

$$f_1 = \max(f_{j,1})(1 + \Delta) \quad (2)$$

$$\Delta = \begin{cases} 0 & I \leq 0 \\ IC & I > 0 \end{cases}$$

式中: f_1 ——区域风险源综合风险指数,最大值为4; $f_{j,1}$ ——第 j 风险源风险指数; Δ ——考虑风险源数量和聚集程度的风险源风险累积指数; I ——Global Moran's I 指数; C —— I 指数置信检验值 $Z(I)$ 的置信度,通过Excel函数NORMSDIST求取。

I 和 $Z(I)$ 的计算公式见文献[18],计算中距离阈值取5 km。区域内风险源至取水口的综合距离为

$$x = \frac{\sum_{j=1}^n (f_{j,1} x_j)}{\sum_{j=1}^n f_{j,1}} \quad (3)$$

式中: x_j ——区域内第 j 风险源至取水口距离。

2.2 水文、水质状况

根据HJ/T 2.3—1993《环境影响评价技术导则(地表水环境)》^[19]划分水源地所在水体地表水域规模,以此确定水源地水文状况风险等级。按照水质达标率和综合营养状态指数来划分湖库水质状况风险等级,权重采用专家评价结合AHP^[16]确定。按照水质达标率来划分河流水质状况风险等级,分级标准见表3。根据环境公报和流域水文资料确定各子指标特征值。

表3 水源地水文、水质状况风险等级划分标准

Table 3 Grading standards of risk levels of hydrological and water quality conditions in water source area

风险等级	水质			水文		
	河流水质 达标率/%	湖库水质 达标率/% ($w=0.67$)	湖库综合营养 状态指数 ($w=0.33$)	河流多年 平均流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	水深 ≥ 10 m 湖库枯水 期面积/ km^2	水深 < 10 m 湖库枯水 期面积/ km^2
极低	≥ 95	≥ 95	≤ 50	$\geq 1\,500$	≥ 250	≥ 500
低	$[80, 95)$	$[80, 95)$	$(50, 60]$	$[150, 1\,500)$	$[25, 250)$	$[50, 500)$
中	$[60, 80)$	$[60, 80)$	$(60, 70]$	$[15, 150)$	$[2.5, 25)$	$[5, 50)$
高	< 60	< 60	> 70	< 15	< 2.5	< 5

2.3 事故影响程度

突发污染事故对水源地的影响程度以取水口最大超标倍数、超标持续时间、污染团到达时间3个子指标来反映^[12-14]。通过对镇江新区第二污水处理厂的水处理能力调查可知^[20]:污染物去除率主要分布于60%~90%之间,换算得到当水质超标2~5倍时水厂能够处理达标,故将3倍以下水质超标倍数定为低风险;根据GB 50013—2006《室外给水设计规范》^[21]可知,水厂设计调蓄能力为最高日供水量的10%~20%,换算得知水厂的应急供水能力在2.4~4.8 h间,取平均值3.6 h以下超标持续时间作为低风险;水源地污染事故应急响应能力决定了污染团到达时间阈值,通过建立应急响应机制,能在0.5 h内反馈污染信息并对污染事故采

取相应措施,因此将 0.5 h 以上的污染团到达时间定义为低风险。参考相关文献^[12-14]并结合专家小组法^[22],在上述低风险特征阈值基础上得出风险等级划分标准,以相关文献^[12-14]和“十二五”水专项课题“太湖流域水环境风险评估与预警技术示范”研究成果为基础,采用专家评价法结合 AHP^[16]确定权重,结果见表 4。

为综合反映集中风险源对取水口的事故影响程度,将区域内位置集中的风险源概化为 m 个综合风险源,综合风险源距取水口距离按式(3)计算。

第 p 个综合风险源风险事故源强取集中区域内风险源最大事故源强的 $(1+\Delta)$ 倍。采用 90% 保证率设计水文条件下的一、二维非稳态水量水质模型,计算得到该综合风险源对取水口的事故影响程度子指标特征值,再采用内插法计算第 p 个综合风险源事故影响程度指标评分值 $F_{4,p}$,取评价区域内事故影响程度指标评分值 $F_4 = \min_{1 \leq p \leq m} F_{4,p}$ 。

2.4 水源地监管能力和应急能力

参考中华人民共和国环境保护部文件《集中式地表水水源地环境应急管理工作指南》《集中式饮用水水源环境保护指南》《全国环保部门环境应急能力建设标准(环发[2010]146号)》《突发环境事件应急预案管理暂行办法》,同时考虑可操作性确定评价指标的子指标。以《全国环保部门环境应急能力标准化建设达标验收暂行办法》《全国城市饮用水水源地环境保护规划(2008—2020年)实施情况评估技术指南》为基础,采用专家评价法结合 AHP^[16]确定子指标权重。

《江苏省城市供水安全保障评价标准》规定城市应急供水规模应达到日常供水规模的 50%^[23],将该标准定为低风险,据此确定备用水源供水保证率风险分级标准。确定备用水源供水保证率风险分级标准,依据《全国城市饮用水水源地环境保护规划(2008—2020年)实施情况评估技术指南》及江苏省环境保护厅《江苏省集中式饮用水源地环境风险等级评估报告》等确定其他子指标风险等级划分标准,见表 5。

表 5 水源地风险控制能力风险等级划分标准

Table 5 Grading standards of risk level of risk control capabilities in water source area

风险等级	水源地监管能力					
	指挥、监测设备 规模达标率/% ($w=0.253$)	人员规模 达标率/% ($w=0.092$)	人员培训 上岗率/% ($w=0.023$)	自动监测能力 覆盖率/% ($w=0.230$)	监测指标 完成率/% ($w=0.230$)	日常监督、案件执行率、 违法取缔率/% ($w=0.172$)
极低	≥90	≥90	≥90	≥90	≥90	≥95
低	[80,90)	[80,90)	[80,90)	[80,90)	[80,90)	[85,95)
中	[60,80)	[60,80)	[60,80)	[60,80)	[60,80)	[60,85)
高	<60	<60	<60	<60	<60	<60

风险等级	水源地应急能力			
	隔离防护工程 完成率/% ($w=0.279$)	备用水源供水 保证率/% ($w=0.201$)	应急设备、 物资保障率/% ($w=0.319$)	应急预案 完善率/% ($w=0.201$)
极低	≥90	≥80	≥90	≥90
低	[80,90)	[50,80)	[80,90)	[80,90)
中	[60,80)	[20,50)	[60,80)	[60,80)
高	<60	<20	<60	<60

各子指标确定方法为:依照《全国环保部门环境应急能力建设标准》(环发[2010]46号)确定指挥、监测设备规模达标率,人员规模达标率和应急设备、物资保障率;人员培训上岗率为管理部门中通过国家级或省级环保部门组织的环境应急管理培训,并取得合格证书的人员比例;依照 HJ/T 91—2002《地表水和污水监测技术规范》^[24]确定自动监测能力覆盖率、监测指标完成率;依照日常执行情况确定日常监督、案件执行率、违法取缔率;依照水源地环境保护规划要求确定隔离防护工程完成率;备用水源供水保证率为备用水源地达

标水量与常用水源地供水能力比值;依据《突发环境事件应急预案管理办法》,按照是否编制应急预案、是否评估备案应急预案、是否依照预案进行演练并进行演练评估、3 a内是否对预案进行修订等确定应急预案完善率。

3 评价结果与讨论

3.1 评价结果

3.1.1 风险源

根据江苏省环境保护厅提供的2013年江苏省污染源普查资料和江苏省海事厅提供的港口码头资料,并经实地调查可知:征润州水源保护区上游20 km范围内存在废水直排企业22家,污水处理厂2家,码头17家;风险源主要分布于长江以南,长江以北主要风险源为仪征市沿岸分布的6家造船企业;世业洲分布污水处理厂1家,17家码头主要沿长江南岸分布;长江以南16家废水直排企业和1家污水处理厂排放去向主要为运粮河、老北引河等通江水道。调查区域内中风险源35个,高风险源6个,(化工企业2个,沿江码头4个),风险指数最大值为3.175。区域风险源风险累积指数、综合风险指数和综合距离计算结果分别为0.036、3.288和12.44 km。区域综合风险指数和综合距离评分值计算结果分别为42.71和80.89,加权计算得出风险源指标风险评分值为55.31。

3.1.2 水文水质状况

根据镇江市2010—2014年环境公报,征润州饮用水源地水质满足Ⅲ类水标准,水源水质达标率均为100%。长江征润州水源地多年平均流量可参考长江大通水文站多年平均流量取 $29\,033\text{ m}^3/\text{s}$ ^[25]。水质状况和水文状况风险评分值计算结果分别为100和99.48。

3.1.3 事故影响程度

根据调查区域内风险源类型、风险源分布状况,将区域风险源概化为7个综合风险源,其中N6为沿江码头综合风险源,其他为废水直排企业和污水处理厂概化而成,如图1所示。

码头溢油事故以船舶油箱溢油为例,事故源强取5 000 kg,污染物为石油类。码头危化品泄漏事故以150 L罐装液态苯泄露为例,事故源强取132 kg。废水直排企业和污水处理厂排污口偷排事故源强取污染物产生浓度,具体数据参考江苏省环境保护厅提供的2013年江苏省污染源普查资料。不同事故对取水口的影响计算结果见表6。由于COD、NH₃-N、氰化物、重金属等污染物计算结果对取水口没有影响,因此,表6中偷排事故只列出废水排放量为4.38 L/s、挥发酚源强为290 mg/L对取水口的影响计算结果。

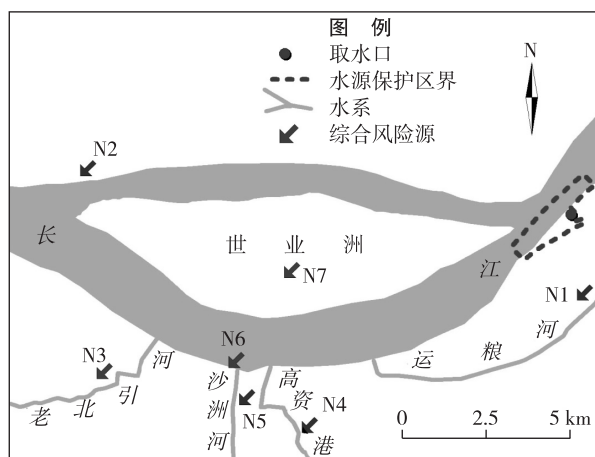


图1 水源地及综合风险源位置

Fig. 1 Locations of water source area and comprehensive risk sources

表6 污染事故影响计算结果

Table 6 Calculation results of effects of water pollution accidents

风险事故	污染物	综合风险源	至取水口综合距离/m	风险累积指数	最大超标倍数	超标持续时间/h	污染团到达时间/h
溢油	石油类	N6	10 960	0.151	9.59	5.03	0.43
泄漏	苯	N6	10 960	0.151	6.11	2.81	1.47
偷排	挥发酚	N5	12 330	0	0.14	4.28	10.28

根据表6结果,计算溢油、泄露和偷排事故的影响程度风险评分值分别为66.91、77.37、91.79,取最小值66.91为水源地风险事故影响程度指标评分值。

3.1.4 水源地风险控制能力

根据2011年调查结果,征润州水源地监管能力和应急能力各项子指标达标率均为100%,水源地监管能

力和应急能力指标评分值都为100。

3.1.5 综合风险

根据各指标评分值和权重计算得出征润州水源地综合风险评分值为77.61,为中风险水源地。

3.2 讨论

风险源和突发事件影响程度是导致征润州水源地为中风险等级的主要因素,产生该结果的原因在于:(a)征润州水源地上游约11 km 长江南岸丹徒经济开发区内码头、企业集中,且风险等级均较高,造成整个研究区域内风险源综合风险指数较高;(b)水源保护区上游20 km 岸线内共17家码头(2家为化工码头),相比于企业和污水厂概化风险源,码头概化风险源离取水口较近,同时其事故源强也较大,因此,概化码头风险事故对水源地取水口影响程度较深;(c)相对来说水源地正南方运粮河等内河岸边的废水直排企业聚集区域和世业洲上游的江北仪征船舶制造企业集聚区域,由于风险等级较低,污染物输送至取水口的距离较远,因此,2个区域内的风险源突发事件对水源地几乎没有影响,2个区域内风险源有一定聚集,对整个研究区域内的风险源风险累积有一定贡献。

通过上述分析可知,保护区上游20 km 岸线内码头是威胁水源地安全的主要风险源,应对其加强监管,建议相关部门重点对沿岸码头进行定期检查,对缺失风险预防和控制能力的单位,应督促其完成相关工作。

4 结 论

a. 综合考虑水源地风险类型、水源地风险控制能力,构建了水源地综合风险定量评价指标体系和评价方法,确定了各指标的计算方法,并采用专家分析结合AHP确定了各指标的权重。

b. 采用空间自相关分析方法计算反映风险源数量和聚集程度对水源地风险影响的风险累积指数,并将其应用到区域风险源综合风险指数和事故影响程度风险评分值的计算方法中。

c. 镇江长江征润州水源地综合风险评价和分析结果如下:征润州水源地综合风险评分值为77.61,风险等级为中风险;征润州水源地的主要风险隐患为上游20 km 岸线内码头。

参考文献:

- [1] 袁中宝. 合肥市水源地保护与水源地城镇协调发展研究[D].上海,同济大学,2007.
- [2] US NAS. Risk assessment in the federal government: managing the process [M]. Washington DC: National Academy Press, 1983.
- [3] US EPA. Risk assessment guidance and tools [EB/OL][2013-12-22]. <http://www.epa.gov/riskassessment/guidance.htm>
- [4] SALVI O, DEBRAY B. A global view on ARAMIS, a risk assessment methodology for industries in the framework of the SEVESO II directive [J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, 130(3): 187-199.
- [5] JENKINS L. Selecting scenarios for environmental disaster planning[J]. European Journal of Operational Research, 2000, 121: 275-286.
- [6] SCOTT A. Environment-accident index: validation of a model[J]. Journal of Hazardous Materials, 1998, 61(1/2/3): 305-312.
- [7] 程斌,王菲凤,张江山.改进决策树模型支持下的饮用水水源地健康风险评价[J].水资源保护,2013,29(1):27-31. (CHENG Bin, WANG Feifeng, ZHANG Jingshan. An improved decision tree model for health risk assessment of drinking water source[J]. Water Resources Protection, 2013, 29(1): 27-31. (in Chinese))
- [8] 张光贵,黄博.湖南洞庭湖水系重金属健康风险评价[J].水资源保护,2014,30(1):14-17. (ZHANG Guanggui, HUANG Bo. Health risk assessment of heavy metals in Dongting Lake water system in Hunan Province, China[J]. Water Resources Protection, 2014, 30(1): 14-17. (in Chinese))
- [9] 孙才志,陈相涛,陈雪姣,等.地下水污染风险评价研究进展[J].水利水电科技进展,2015,35(5):152-161. (SUN Caizhi, CHEN Xiangtao, CHEN Xuejiao, et al. Recent advances in groundwater contamination risk assessment [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(5): 152-161. (in Chinese))
- [10] 李国银,张福金,吴凯龙,等.呼和浩特市生活饮用水中亚硝酸盐的危害风险评估[J].水资源保护,2015,31(2):55-58. (LI Guoyin, ZHANG Fujin, WU Kailong, et al. Risk assessment on hazard factor of nitrite in drinking water of Hohhot City [J]. Water Resources Protection. 2015, 31(2): 55-58. (in Chinese))
- [11] 马越,彭剑峰,宋永会,等.饮用水源地突发事件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 Jianfeng, SONG Yonghui, 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. (in Chinese))
- [12] 逢勇,徐秋霞.水源地水污染风险等级判别方法及应用[J].环境监控与预警,2009,1(2):1-4. (PANG Yong, XU Qiuxia. Source water pollution risk discrimination technique and its application[J]. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 2009, 1(2):1-4. (in Chinese))
- [13] 尹亮,逢勇,潘晨,等.常州市水源地水污染风险等级判定[J].水资源保护,2013,29(2):28-32. (YIN Liang, PANG Yong, PAN Chen, et al. Water pollution risk discrimination in water source area of Changzhou City[J]. *Water Resources Protection*, 2013, 29(2):28-32. (in Chinese))
- [14] 罗慧萍,逢勇,罗缙,等.泰州市第三自来水厂饮用水水源地水环境风险评价[J].河海大学学报(自然科学版),2015,43(2):114-120. (LUO Huiping, PANG Yong, LUO Jing, et al. Water environment risk assessment of Taizhou Three Waterworks drinking water source area[J]. *Journal of Hohai University(Natural Sciences)*, 2015, 43(2):114-120. (in Chinese))
- [15] 曾光明,何理,黄国和,等.河流水环境突发性与非突发性风险分析比较研究[J].水电能源科学,2002,20(3):13-15. (ZENG Guangming, HE Li, HUANG Guohe, et al. Analysis and comparison for accidental and non-accidental risk for the river water environment[J]. *International Journal Hydroelectric Energy*, 2002, 20(3):13-15. (in Chinese))
- [16] 慕金波.层次分析法在评定最优环境工程方案中的应用[J].环境科学进展,1997,5(4):33-40. (MU Jinbo. Applcation of analytical hierarchy process method for selecting the optimal environmental engineering scheme[J]. *Advances in Environmental Science*, 1997, 5(4):33-40. (in Chinese))
- [17] 张树萍,胡敏杰,雷能忠.安徽省旅游开发空间自相关统计[J].合肥工业大学学报(社会科学版),2012,26(4):31-35. (ZHANG Shuping, HU Minjie, LEI Nengzhong. Spatial autocorrelation statistics of tourism development in Anhui Province[J]. *Journal of Hefei University of Technology(Social Edition)*, 2012, 26(4):31-35. (in Chinese))
- [18] 蒲英霞,葛莹,马荣华,等.基于ESDA的区域经济空间差异分析:以江苏省为例[J].地理研究,2005,24(6):965-974. (PU Yingxia, GE Ying, MA Ronghua, et al. Analyzing regional economic disparities based on ESDA[J]. *Geographical Research*, 2005, 24(6):965-974. (in Chinese))
- [19] 国家环境保护局.HJ/T 2.3—1993 环境影响评价技术导则(地表水环境)[S].北京:中国标准出版社,1993.
- [20] 王申,张有仓,陈恒宝,等.镇江市新区第二污水处理厂技术改造工程设计[J].中国给水排水,2013,29(2):37-41. (WANG Shen, ZHANG Youcang, CHEN Hengbao, et al. Design of technical reconstruction project of second wastewater treatment plant in Zhenjiang New District[J]. *China Water & Wastewater*, 2013, 29(2):37-41. (in Chinese))
- [21] 上海市市政工程设计研究总院.GB 50013—2006 室外给水设计规范[S].北京:中国计划出版社,2006.
- [22] 王凯全,李亚丽,康美华,等.化工重大危险源区域风险因素的评价与控制[J].中国安全生产科学技术,2009,5(6):72-75. (WANG Kaiquan, LI Yali, KANG Meihua, et al. Regional risk factors assessment and control of chemical industry[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2009, 5(6):72-75. (in Chinese))
- [23] 潘杰.常州市应急水源比选与论证研究[J].人民黄河,2015,37(3):54-57. (PAN Jie. Study on comparison and selection, demonstration of emergency water sources of Changzhou City[J]. *Yellow River*, 2015, 37(3):54-57. (in Chinese))
- [24] 中国环境监测总站.HJ/T 91—2002 地表水和污水监测技术规范[S].北京:中国环境出版社,2002.
- [25] 刘嘉琦,龚政,张长宽.长江入海径流量突变性和趋势性分析[J].人民长江,2013,44(7):6-10. (LIU Jiaqi, GONG Zheng, XHANG Changkuan. Study on comparison and selection, mutability and variation trend of discharges into sea from Yangtze River[J]. *Yangtze River*, 2013, 44(7):6-10. (in Chinese))