

# 基于RS和GIS的湘江长沙段水域风险评估方法研究

叶帮玲<sup>1</sup>, 杨波<sup>1</sup>, 曾扬<sup>2</sup>, 司云瑞<sup>1</sup>, 胡可<sup>2</sup>, 唐涛<sup>2</sup>, 李永刚<sup>2</sup>, 李景保<sup>1</sup>, 于丹丹<sup>1</sup>

(1. 湖南师范大学GIS研究中心、地理空间大数据挖掘与应用省重点实验室、资源与环境科学学院, 湖南长沙410081; 2. 湖南省水利厅, 湖南长沙410007)

**摘要:** 利用2016年9景Landsat影像以及相应时期的实测水质参数数据对湘江长沙段进行水质参数的遥感反演,并引入灾害风险中的危险性及易损性相关概念,通过ArcGIS软件的空间分析功能对湘江长沙段水域风险进行了分析。结果表明:高风险区主要分布于湘江的两岸,并且位于风险源较密集的区域;较高风险区主要位于湘江的两侧以及饮用水源区桥梁所处的位置;中等风险区主要分布于饮用水源区;较低风险区和低风险区主要位于过渡区以及景观娱乐用水区。在传统的水域风险评估中引入遥感技术使得评估方法更为多样且影响因子考虑的更为全面。研究结果对于河流水利管理部门进行水域风险评估、相关水域风险预警与整治方案的制定具有一定的参考价值。

**关键词:** 遥感; 地理信息系统; 水域风险评估; 水质反演; 湘江长沙段

中图分类号: X522; TP79 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2018)06-0041-06

## Study on risk assessment method of Changsha section of Xiangjiang based on RS and GIS

YE Bangling<sup>1</sup>, YANG Bo<sup>1</sup>, ZENG Yang<sup>2</sup>, SI Yunrui<sup>1</sup>, HU Ke<sup>2</sup>, TANG Tao<sup>2</sup>,  
LI Yonggang<sup>2</sup>, LI Jingbao<sup>1</sup>, YU Dandan<sup>1</sup>

(1. GIS research center, Geospatial Key Laboratory of big data mining and Application, College of resources and Environmental Sciences, Hunan Normal University, Changsha 410081, China; 2. Water Resources Department of Hunan Province, Changsha 410007, China)

**Abstract:** Using the 9 Landsat images in 2016 and the measured water quality data of the corresponding period, the water quality parameters were retrieved from Changsha section of Xiangjiang, and the risk and vulnerability related concepts in disaster risk were introduced, and the water risk in the Changsha section of Xiangjiang was analyzed with the spatial analysis function of the ArcGIS software. The results showed that the high risk areas are mainly distributed on both sides of Xiangjiang, and are located in the areas with dense risk sources, and the higher risk areas are mainly located on both sides of Xiangjiang and the location of the bridge in the drinking water source area, the middle risk area is mainly distributed in the drinking water source area; the lower risk area and the low risk area are mainly located in the transitional area and the recreational water consumption area. The introduction of remote sensing technology in traditional water risk assessment makes the assessment methods more diverse and the impact factors more comprehensive. The results of this study provide a certain reference value for river water management departments to carry out water risk assessment, related waters risk early warning and the formulation of regulation scheme.

**Key words:** remote sensing; geographic information system; water risk assessment; water quality inversion; Changsha section of Xiangjiang

收稿日期:2018-05-07; 修回日期:2018-07-12

基金项目:国家自然科学基金项目(41071067); 湖南省水利厅专项项目

作者简介:叶帮玲(1993-),男,江西南昌人,硕士研究生,主要从事资源环境研究。

通讯作者:杨波(1974-),男,湖南张家界人,博士,教授,硕士生导师,主要从事资源环境与灾害遥感研究。

## 1 研究背景

水资源是人类的生命之源,人的生活和生产离不开水。由于人类对水资源的过度开发导致了一系列的环境问题。樊庆铎等<sup>[1]</sup>基于水环境功能区划,采用灰色关联度法将其分成4个区域,并使用模糊综合评价法进行水环境质量评价。孙树青等<sup>[2]</sup>应用2000年的水质监测资料,对湘江干流主要断面进行了水环境健康风险评价。

常规的水质监测主要是人工监测,但是人工监测只能了解监测断面,对于整体水质状况则难以同步获得<sup>[3-4]</sup>。遥感反演技术的出现,给水质的监测评价提供了新的机遇与选择<sup>[5-6]</sup>。胡耀躲等<sup>[7]</sup>阐述了用GOCI数据对悬浮物和叶绿素a浓度反演的研究现状。在风险评估方面Maskrey<sup>[8]</sup>提出自然灾害风险是危险性与易损性的代数和。刘引鸽等<sup>[9]</sup>依据模糊理论建立了河流水质风险评价模型并对渭河干流陕西段河流水质污染进行风险评价,认为渭河主干河流中下游水质污染风险较大,上游风险相对较小。武曠等<sup>[10]</sup>利用主成分分析法及相关分析对入海河流的典型重金属等进行风险评估,得出入海河流携带的污染物浓度要高于近岸海域。刘珍等<sup>[11]</sup>结合陕西省水资源、人口和社会经济数据采用函数评价方法对陕西省水资源的脆弱性进行评价,结果表明陕西省水资源脆弱性的空间差异较大。封丽等<sup>[12]</sup>、严清等<sup>[13]</sup>分别对抗生素和医药活性物质等在水域中的分布及其生态风险评估进行了研究。在2018年3月第十三届全国人民代表大会审议的国务院机构改革方案中批准组建应急管理部,这说明我国对于突发事件等问题的日益重视,在水域方面进行相应的风险评估显得尤为重要。目前将遥感

(RS)与地理信息系统(GIS)技术综合应用于水域风险评估中的研究较少,利用RS和GIS技术能够增加风险评估的方法。研究结果对于湘江长沙段建立相应的风险防治机制、风险应对机制和风险治理机制具有十分重要的意义。

本文以湘江长沙段为例,利用遥感技术对湘江水质状况进行了反演,再引入自然灾害风险中的危险性 & 易损性相关知识,对水域风险评估方法进行了研究。

## 2 研究区域概况及数据源

### 2.1 研究区概况

湘江是长江流域洞庭湖水系中最大的一条河流,也是长江的第二大支流,径流量占长江径流量的7.5%。湘江发源于广西壮族自治区兴安县白石乡的石梯,河源为海洋河,北流至兴安县分水塘与灵渠汇合称湘江。湘江在湖南境内的长度达670 km,流域面积85 382 km<sup>2</sup>,年平均流量为2 365 m<sup>3</sup>/s,3月上旬至7月上旬一般为汛期,汛期径流量约占全年径流量的74%;12月至次年1月一般为枯水季节,占全年径流量的7%。本文以湘江长沙段为研究区,南起暮云镇,北至湘江航电枢纽,全长约55 km。

### 2.2 数据源

2.2.1 遥感数据 使用的遥感数据为Landsat7及Landsat8影像,数据从美国地质调查局网站(<https://glovis.usgs.gov/>)下载,影像的获取时间及条带号等相关信息如表1所示。在Landsat7影像中需要两幅影像才能覆盖研究区,而在Landsat8中恰好能够完全覆盖研究区。在下载影像过程中除去部分研究区域被云覆盖或者与实测数据时间相差较远的影像,共下载了2016年6个期9景影像(其中Landsat7有6景Landsat8有3景)。

表1 研究所用Landsat遥感影像数据

卫星类型	影像获取时间	影像条带号	卫星类型	影像获取时间	影像条带号
Landsat8	2016-03-01	123-41	Landsat8	2016-07-07	123-41
Landsat7	2016-05-12	123-40、123-41	Landsat7	2016-11-04	123-40、123-41
Landsat8	2016-06-05	123-41	Landsat7	2016-12-06	123-40、123-41

2.2.2 实测数据 实测数据为2016年的长沙段断面水文水质监测数据,本文选取5种水质参数作为评价指标,包括五日生化需氧量(BOD<sub>5</sub>)、总磷(TP)、氨氮(NH<sub>3</sub>-N)、高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>)和溶解氧(DO),数据由湖南省水利厅提供,该数据共有7个断面13个测点,断面名称分别为暮云、猴子石、

长沙、岳华、马厂、丁字、丁字渡口,获取时间分别为2016年3月9日、5月4日、6月6日、7月6日、11月9日、12月7日。

2.2.3 基础地理数据 本文利用相关灾害风险评估知识,使用危险性 & 易损性概念,并将其引入到风险评估体系中。危险性表示在给定地区可能发生的危

险因素。易损性是指在给定危险地区存在的任何财产由于潜在的危险因素而造成的伤害和损失程度。

对于湘江长沙段来说,危险性因素包括:部分沿江道路、桥梁、风险点等。其中沿江道路为离江边较近且发生事故时对水质有影响的道路;风险点数据包括生活排水口、工业排水口以及位于湘江边具有一定风险的油库和码头港口等,在2015年底长沙市对生活排水口完成了截污改造工程,所以将风险点分为一、二级污染源,一级污染源为工业等排水口,二级污染源为生活排污口;易损性包括自来水厂取水口以及湘江长沙段的不同水功能区(包括景观娱乐用水区、饮用水源区、过渡区)。上述基础地理数据来自于实地采集或由湖南省水利厅提供,湘江长沙段基础地理数据分布如图1所示。

### 3 研究方法

本文通过水质参数的遥感反演以及风险评估相关的技术方法,对湘江长沙段水域进行风险评估研究。湘江长沙段水域风险评估技术流程如图2所示。

由图2可知,通过水质监测数据与相应的Landsat遥感影像像元值建立不同的水质参数反演模型,对模型优选之后应用到遥感影像反演获取不同的水质数据,通过叠加分析得到综合水质图,再与基础地理数据进行空间分析得到的风险度图相结合,最终得出湘江长沙段水域风险评估图。

#### 3.1 数据预处理

对获取的9景遥感影像进行辐射定标、大气校正、几何校正、影像镶嵌、图像增强和研究区裁剪等预处理。本研究采用辐射亮度法和黑暗像元法进行了相关遥感影像的辐射定标和大气校正处理。几何校正以地形图作为参考对遥感影像进行几何精校正,通过校正处理后,保证校正误差小于1个像元。

#### 3.2 水质参数遥感反演方法

目前水质遥感反演模型的构建主要有3种方法,分别是分析方法、经验方法和半经验方法<sup>[14]</sup>。分析方法以辐射传输模型为基础,通过遥感反射率得到水体中吸收系数和后向反射系数的比值,并结合水体中各相应组分的相关参数,进而反演不同水质参数的浓度<sup>[15]</sup>;经验方法是通过建立遥感数据与地面监测的水质参数值之间的统计关系来反演水质参数值<sup>[16]</sup>;半经验方法是将已知的水质参数光谱特征与统计分析模型(或其它数学模型,如线性光谱分解模型)相结合,选择最佳的波段或波段组合作为相关变量估算水质参数值的方法,具有一定的

物理意义<sup>[15]</sup>。本文采用半经验方法对5种水质参数进行反演。顾清<sup>[17]</sup>在水质反演的研究中,给出了61种波段组合方式,通过波段之间的加减乘除混合运算,基本囊括了以往研究得出的水质遥感反演最佳的组合形式。本文使用这61种波段组合方式从中找出了最优模型的波段组合。

3.2.1 模型的建立 根据以上的波段组合方式,分别与各评价因子浓度的实测值进行相关性分析。从实测数据中随机选取一部分数据作为反演数据集,其余的作为验证数据集,本文选取的反演数据集为暮云-2、猴子石-2、长沙-1、长沙-2、岳华-2、马厂-3、丁字-2、丁字渡口-2,验证数据集为猴子石-1、猴子石-3、长沙-3、岳华-1、岳华-3,其中断面后的数字表示在某一断面自左向右监测点的顺序。通过SPSS软件求实测数据与各波段组合方式得到影像相应处像元值之间的Pearson相关系数,并从中选取Pearson相关系数最大的波段组合进行建模(注:Pearson是度量两个参数之间的相关程度,其值介于-1到1之间,绝对值越大相关程度越高)。其中2016年3月的最大Pearson相关系数如表2所示。

由表2可知,2016年3月Pearson相关系数的绝对值在0.6左右及以上,说明不同波段组合与相应的水质参数具有一定的相关性。利用office软件对各评价因子进行建模,分别建立指数模型、线性模型、对数模型、多项式模型、幂函数模型并进行比较,从中选取 $R^2$ 系数最大的模型为最优模型,对湘江水质进行反演。其中2016年3月的水质参数反演模型如表3所示。

表2 2016年3月最大Pearson相关系数

水质参数	波段组合	Pearson 系数
TP	b2 - b3	-0.658
DO	(b1 + b3) / b2	-0.592
COD <sub>Mn</sub>	(b2 + b4) / b3	-0.624
NH <sub>3</sub> -N	(b2 + b4) / b3	-0.559
BOD <sub>5</sub>	(b1 + b3 + b4) / b2	0.801

注:表中b1、b2、b3、b4分别表示遥感影像的第1、2、3、4波段即蓝、绿、红、近红外波段。

3.2.2 模型的检验 将所得到的模型分别应用到Landsat影像中,得到各时期各水质反演图。采用相地误差作为模型检验的标准,即:

$$p_i = \frac{|n_i - m_i|}{n_i} \quad (1)$$

式中: $p_i$ 为第*i*个测点的相对误差; $n_i$ 为第*i*个测点

的实测浓度,mg/L;  $m_i$  为第  $i$  个测点的估算浓度,mg/L。

表3 2016年3月水质参数反演模型

水质参数	反演模型	$R^2$ 系数
TP	$y = -0.331 \ln x + 1.899$	0.88
DO	$y = -316.9x^2 - 990.4x - 764.1$	0.88
COD <sub>Mn</sub>	$y = 5.580x^2 - 27.80x + 34.59$	0.88
NH <sub>3</sub> -N	$y = 5.229x^2 - 20.85x + 21.17$	0.69
BOD <sub>5</sub>	$y = -6.895x^2 + 33.65x - 38.92$	0.76

根据研究资料,在湖泊中反演的精度若在30%以内,则认为反演的效果较为理想。本文中由于实测数据与影像数据有数日的间隔,且河流流动性较与湖泊大,出现部分数据的精度较低但都在可控范围之内。水质参数遥感反演模型精度分析见表4。

表4 水质参数遥感反演模型精度分析

水质类别	预测值/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	实测值/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	实测值 - 预测值 / ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	相对误差/ %
BOD <sub>5</sub>	1.1713	1.0	0.1713	17.13
	0.6251	0.8	0.7251	21.86
	0.6734	0.7	0.0266	3.80
	0.4131	0.9	0.4869	54.10
	0.7210	0.8	0.0790	9.88
	2.4378	2.0	0.4378	21.89
	3.4939	2.3	1.1939	51.91
COD <sub>Mn</sub>	2.2031	1.9	0.3031	15.95
	2.2843	1.8	0.4843	26.91
	2.0516	1.9	0.1516	7.98
	8.9601	9.2	0.2399	2.61
	5.6806	9.9	4.2194	42.62
	9.5635	9.1	0.4635	5.09
	9.4984	9.0	0.4984	5.54
NH <sub>3</sub> -N	9.4993	9.5	0.0007	0.01
	0.6228	0.504	0.1188	23.57
	0.8922	0.669	0.2232	33.36
	0.4805	0.448	0.0325	7.25
	0.4688	0.369	0.0998	27.05
	0.4809	0.375	0.1059	28.24
	0.0696	0.08	0.0104	13.00
TP	0.1814	0.14	0.0414	29.57
	0.0891	0.07	0.0191	27.29
	0.0519	0.04	0.0119	29.75
	0.0893	0.04	0.0493	23.25

## 4 结果分析

### 4.1 水域风险评价指标分析

4.1.1 综合水质现状分析 通过遥感反演,每个时期共5种水质参数,故6个时期共反演出30幅水质参数图。通过ArcGIS软件对反演后的图像进行叠置分析,并通过自然间断点分类法得到湘江长沙段综合水质图,如图3所示。由于各评价指标存在量纲和数量级上的差异,不同的量纲和数量级不便于分析,为了解决这一问题,对各评价指标利用公式(2)进行归一化处理,使得取值范围在[0,1]之间。

$$X^* = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (2)$$

式中: $X_i$ 、 $X^*$ 分别为数据归一化前后的数值; $X_{\max}$ 、 $X_{\min}$ 分别为样本数据中的最大值、最小值。

由图3可知,湘江长沙段上、中游的水质状况优于下游地区,这与上游部分工业企业搬往下游周边地区以及浏阳河和捞刀河的汇入有一定关系。

4.1.2 危险性、易损性分析 利用ArcGIS软件对危险性、易损性所包含的基础数据做初步的预处理后,依据各基础数据的重要程度使用层次分析法计算各个图层相应的权重。湘江长沙段危险性、脆弱性图层各要素权重如表5、6所示。

表5 危险性图层各要素权重

沿江道路	桥梁	风险点	二级污染源
0.2093	0.2943	0.3971	0.0993

表6 易损性图层各要素权重

水厂取水口	暮云水源区	望城水源区	开福过渡区	景观娱乐区
0.3333	0.2340	0.2340	0.0727	0.1260

注:暮云水源区表示长沙暮云-傅家洲饮用水源区,望城水源区表示望城饮用水源区,开福过渡区表示望城开福过渡区,景观娱乐区表示傅家洲-月亮岛景观娱乐用水区。

根据Maskrey<sup>[8]</sup>的研究,将危险性与易损性的代数和表示为风险度。利用栅格计算将危险性以及易损性图层进行叠置,得到湘江长沙段风险度图,如图4所示。为了便于将风险度数据与综合水质图进行对比分析,应消除量纲与数量级上的差异,使用公式(2)进行归一化处理。

由图4可以看出,由于湘江长沙段中、下游脆弱性图层中景观娱乐区和危险性图层中各要素分布较少,而使得风险度偏低。其他区域风险点、沿江道路

和水厂取水口等分布相对较多则风险度偏高。

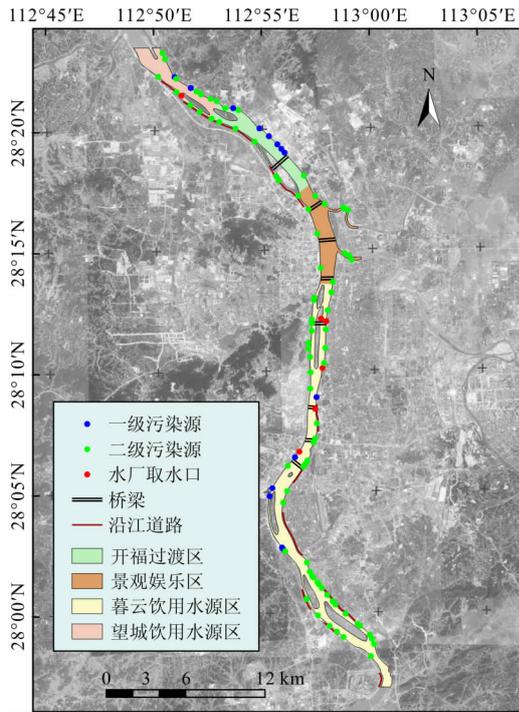


图 1 湘江长沙段基础地理数据分布图

### 4.2 水域风险评估分析

本文研究湘江长沙段水域风险,因此将危险性和易损性叠置之后的图层与湘江长沙段的综合水质现状作为水域风险的评价指标。使用公式(2)对数

据进行归一化处理,再利用 ArcGIS 软件将归一化处理后的图层进行叠置分析得到湘江长沙段的水域风险图(使用自然间断点分级法对不同的风险区进行分级),如图 5 所示。

根据所求得的湘江长沙段水域风险评估数据,从不同风险区与各风险源以及各风险区之间数量关系进行分析。风险区与风险点和水源区及其水质关联较大;总体来说湘江长沙段主要处于中等风险区及低风险区。

4.2.1 风险程度与风险源关系的分析 鉴于饮用水源区对水质要求较高,一旦水质稍微变差,就会影响到整个区域,所以景观娱乐区和过渡区相比饮用水源区的权重较低,因此大部分的景观娱乐区与过渡区的风险程度都低于饮用水源区。

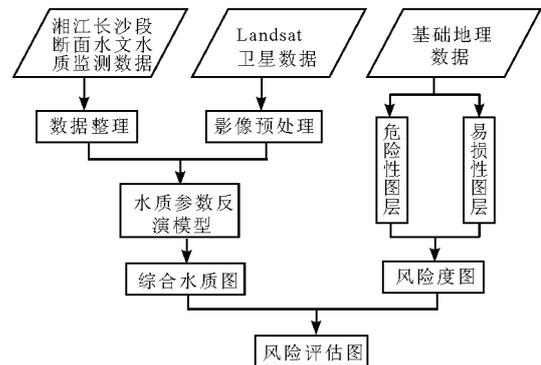


图 2 湘江长沙段水域风险评估技术流程图

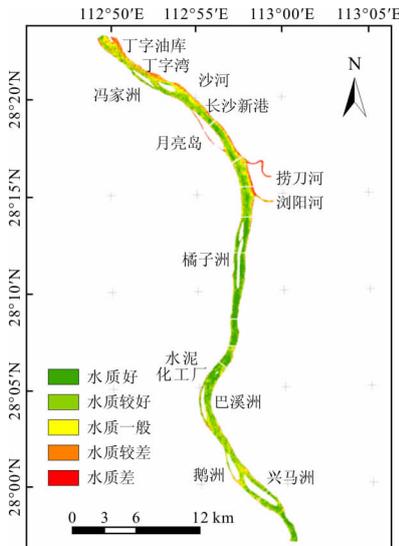


图 3 2016 年湘江长沙段综合水质图

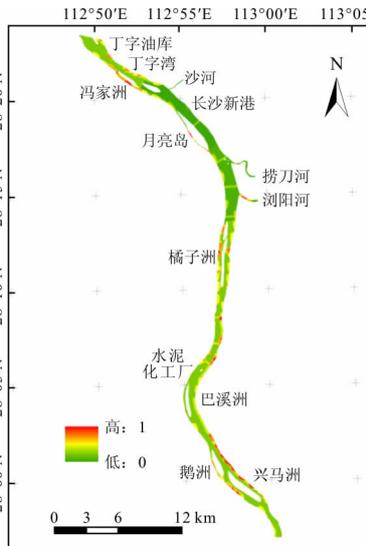


图 4 湘江长沙段风险度图

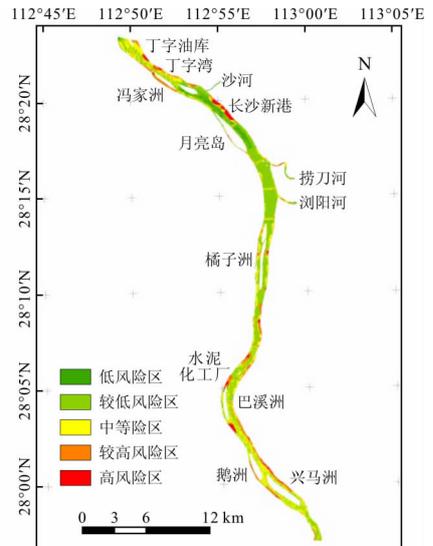


图 5 2016 年湘江长沙段水域风险评估图

在捞刀河和浏阳河入湘江处风险程度较高,原因在于这两处有污水处理厂以及一些生活排污口,且根据综合水质现状图可知此处的水质状况中等偏下,导致风险程度相对于其他地方较高。在一级污

染源中长沙新港位于沙河上游的 2~3 km 处,在该港口地区上游有两个混凝土公司,下游有中石化和霞凝港,为一级污染源的集聚区,所以长沙新港及附近水域的风险程度高于其周边地区。在湘江航电枢

纽的上游3 km左右处有一个丁字油库,油库为一级污染源,且丁字油库的上游不远处有一个丁字湾,所以该处发生风险的程度较高。在月亮岛以及冯家洲靠近河西一侧,因为水道狭窄,污染物容易在此处沉积,且这两处存在一定数量的二级污染源涵闸等,导致风险程度略微偏高。在湘江长沙库区段的上游部分区域,同样因为存在一些化工公司以及沙场等,且结合综合水质现状图,靠近河岸的区域由于水体流速小等原因导致污染物的沉积,以至于水质状况不是很理想,综合相关因素相应区域的风险程度也相对较高。

4.2.2 风险区域数量统计分析 通过对各级风险区的统计分析,可求得不同风险区所占的面积及其在总面积中的比例。湘江长沙段各级风险区数据见表7。

表7 湘江长沙段各级风险区数据

风险区类别	面积/km <sup>2</sup>	比例/%
低风险区	2.74	4.85
较低风险区	14.29	25.29
中等风险区	25.91	45.86
较高风险区	9.24	16.35
高风险区	4.32	7.65

由表7可知,中等风险区面积为25.91 km<sup>2</sup>,所占比例达到45.86%,结合上述湘江长沙段风险评估图(图5),中等风险区主要分布于水功能区中的饮用水源区以及过渡区和景观娱乐用水区中桥梁所处的位置,而饮用水源区在水功能区中所占比例较大;高风险区的面积为4.32 km<sup>2</sup>,所占比例为7.65%,结合风险评估图可以看出高风险区主要分布于湘江的两岸,并且位于风险源较密集的区域,这是由于在风险源密集的区域各风险权重产生叠加效应,导致在叠加区域的风险度高于周边区域;较高风险区面积为9.24 km<sup>2</sup>,所占比例为16.35%,由风险评估图可知,较高风险区主要位于湘江的两侧以及水功能区中的饮用水源区桥梁所处位置。湘江两侧主要是处于风险源分布区域,与高风险区不同的是,其位于风险源稀疏区域,即各风险源的缓冲区未重叠部分。桥梁部分则是由于桥梁的风险权重与饮用水源区较高的风险权重叠加,导致叠加的区域的风险度较高;较低风险区和低风险区面积为17.03 km<sup>2</sup>,所占比例达到30.14%,该区域主要位于水功能区中的过渡区以及景观娱乐用水区。

在风险源较为密集的地方应尽量减少风险源的数量,对于水质较差的区域(例如捞刀河和浏阳河

在湘江的入口处),应加强对污水处理厂的排水质量的控制,工厂以及油库等地应该加强工人的防范意识,对于湘江长沙段应建立相应的风险防治机制、风险应对机制和风险治理机制。对于不同的区域建立相应的机制,能够更加有效地应对风险。

## 5 结论与讨论

通过遥感技术利用5种实测水质参数数据和Landsat影像对湘江长沙段进行水质反演,结合灾害风险的危险性及其易损性相关概念利用ArcGIS软件进行空间分析得到风险评估图,研究结论如下:

(1)总体上湘江长沙段水质状况良好,部分水质较差的区域主要分布在下游,即捞刀河、浏阳河以及汇入湘江处和长沙新港、丁字油库附近,在一定程度上也体现在风险评估图中。

(2)湘江长沙段大部分区域主要为较低风险区和低风险区,其他风险区主要分布于下游及湘江两侧,这主要由于下游工厂及港口较多,湘江中上游高风险区则由于大多数风险点分布于两侧。

(3)传统的水域风险通过危险性、脆弱性等相关数据进行评估,而通过遥感技术为水域风险评估引入水质状况数据因子,使得在风险评估中对于影响因子的考虑更为全面。

由于实测数据为历史数据,并非根据遥感影像时期而专门获取的数据,所以遥感影像和实测数据具有一定的时间间隔以及水质参数的数量较少而存在一定的局限性。在以后的研究中,如果使用同一天同一时段实测数据与遥感影像可以提高反演的精度,同时增加水质参数的数量更能反映出水质的综合状况。

### 参考文献:

- [1] 樊庆铤,杨先兴,邱微. 松花江哈尔滨段城市水环境质量评价[J]. 中国环境科学,2014,34(9):2292-2298.
- [2] 孙树青,胡国华,王勇泽,等. 湘江干流水环境健康风险评估[J]. 安全与环境学报,2006,6(2):12-15.
- [3] 杜为静,李淑敏,李红,等. 汉石桥湿地水质参数光谱分析与遥感反演[J]. 光谱学与光谱分析,2010,30(3):757-761.
- [4] 朱吉生,叶水根,朱琴,等. 基于遥感ET的北京房山区水资源平衡分析[J]. 节水灌溉,2009(11):50-52+59.
- [5] 祝令亚. 湖泊水质遥感监测与评价方法研究[D]. 北京:中国科学院遥感应用研究所,2006.
- [6] IWASHITA K, KUDOH K, FUJII H, et al. Satellite analysis for water flow of Lake Inbanuma[J]. Advances in Space Research, 2004,33(3):284-289.

(下转第52页)

- (2):2483-2514.
- [7] WANG Yan, DING Yongjian, YE Baisheng, et al. Contributions of climate and human activities to changes in runoff of the Yellow and Yangtze rivers from 1950 to 2008[J]. Science China Earth Sciences, 2013, 56(8):1398-1412.
- [8] 代稳, 吕殿青, 李景保, 等. 气候变化和人类活动对长江中游径流量变化影响分析[J]. 冰川冻土, 2016, 38(2):488-497.
- [9] 王随继, 李玲, 颜明. 气候和人类活动对黄河中游区间产流量变化的贡献率[J]. 地理研究, 2013, 32(3):395-402.
- [10] 张调风, 朱西德, 王永剑, 等. 气候变化和人类活动对湟水河流域径流量影响的定量评估[J]. 资源科学, 2014, 36(11):2256-2262.
- [11] 夏军, 马协一, 邹磊, 等. 气候变化和人类活动对汉江上游径流变化影响的定量研究[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(1):1-6.
- [12] 郭爱军, 畅建霞, 黄强, 等. 渭河流域气候变化与人类活动对径流影响的定量分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(8):212-220.
- [13] 李春晖, 郑小康, 杨志峰, 等. 黄河天然径流量变化趋势及其影响分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2009, 45(1):80-85.
- [14] RAN Lishan, WANG Suiji, FAN Xiaoli. Channel change at Toudaoguai Station and its responses to the operation of upstream reservoirs in the upper Yellow River[J]. Journal of Geographical Sciences, 2010, 20(2):231-247.
- [15] 王随继, 闫云霞, 颜明, 等. 皇甫川流域降水和人类活动对径流量变化的贡献率分析——累积量斜率变化率比较方法的提出及应用[J]. 地理学报, 2012, 67(3):388-397.
- [16] 王彦君, 王随继, 苏腾. 降水和人类活动对松花江径流量变化的贡献率[J]. 自然资源学报, 2015, 30(2):304-314.
- [17] 刘睿, 夏军. 气候变化和人类活动对淮河上游径流影响分析[J]. 人民黄河, 2013, 35(9):30-33.
- [18] 莫淑红, 王学风, 勾奎, 等. 气候变化和人类活动对澜河流域径流情势的影响分析[J]. 水力发电学报, 2016, 35(9):7-17.
- [19] 左德鹏, 徐宗学, 隋彩虹, 等. 气候变化和人类活动对渭河流域径流的影响[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2013, 49(2):115-123.

(上接第46页)

- [7] 胡耀躲, 窦同宇, 杨波. 基于GOCI影像反演湖泊悬浮物和叶绿素a含量的研究述评[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(2):26-32+39.
- [8] MASKREY A. Disaster mitigation: a community based approach[M]. Oxford: Oxfam, 1989.
- [9] 刘引鸽, 史鹏英, 张妍. 渭河干流陕西段河流水质污染风险评估[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(3):51-54.
- [10] 武曛, 郭飞. 辽宁省入海河流及近岸海域风险评估[J]. 环境工程技术学报, 2018, 8(1):65-70.
- [11] 刘珍, 文彦君, 韩梅, 等. 人类活动影响下的陕西省水资源脆弱性评价[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(3):82-86.
- [12] 封丽, 程艳茹, 封雷, 等. 三峡库区主要水域典型抗生素分布及生态风险评估[J]. 环境科学研究, 2017, 30(7):1031-1040.
- [13] 严清, 訾成方, 张怡昕, 等. 重庆主城区水域典型PhACs污染水平及生态风险评估[J]. 环境科学研究, 2013, 26(11):1178-1185.
- [14] 王林, 白洪伟. 基于遥感技术的湖泊水质参数反演研究综述[J]. 全球定位系统, 2013, 38(1):57-61+72.
- [15] 付宇, 韦玉春, 王国祥. 水质参数的遥感反演和遥感监测[J]. 环境监控与预警, 2010, 2(6):27-30.
- [16] 刘灿德, 何报寅. 水质遥感监测研究进展[J]. 世界科技研究与发展, 2005, 27(5):40-44.
- [17] 顾清. 浙江省饮用水水库水质演变及风险评估研究[D]. 杭州:浙江大学, 2014.