

DOI:10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221488

# 基于量水堰的大坝渗流含砂量测量技术研发

娄凤锦<sup>1</sup>, 丁 勇<sup>1</sup>, 李登华<sup>2</sup>, 谢东辉<sup>3</sup>

(1. 南京理工大学理学院, 江苏 南京 210094; 2. 南京水利科学研究所, 江苏 南京 210029;  
3. 浙江省宁波市皎口水库, 浙江 宁波 315161)

**摘要:** 针对传统量水堰无法测量径流含砂量且传统的测量方法精度不高, 难以在大坝的量水堰现场实现在线测量的不足, 提出了一种基于量水堰的大坝渗流含砂量测量技术, 通过分析量水堰水流含砂量与图像灰度值之间的负相关性关系, 自动测量量水堰水流含砂量。试验结果表明, 含砂量的检测结果与实际值偏差较低, 是一种具有一定的便捷性、高效性、实时性的测定方法。研究结果对坝体渗流监测具有参考价值。

**关键词:** 含砂量; 图像灰度值; 率定试验; 数据拟合; 量水堰

**中图分类号:** TV697.2      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-7709(2023)06-0082-05

## 1 引言

近年来, 随着我国水利工程的全面发展, 大坝在各种长期荷载及自然灾害因素的影响下, 运行风险增加, 安全问题日益突出。量水堰不能测量水流中的含砂量, 不能全面反映坝体和基础的健康状况<sup>[1-3]</sup>。而目前水流中含砂量的测量多采用干燥法、振动法、光电法、激光法、伽马射线法等<sup>[4-7]</sup>, 这些方法有的测量时间长, 有的成本高且对人体具有一定的危害性。随着视觉成像技术与数值化分析结合的越来越广泛<sup>[8,9]</sup>, 罗东城等<sup>[10]</sup>根据土壤灰度值与含水率的相关特征建立数学模型, 对水稻田土壤和花生田土壤进行了有效测定; 毛天旭等<sup>[11,12]</sup>指出土壤表层的灰度值与其含水率呈指数负相关性。但关于量水堰水流含砂量的测量没有一套便利、有效的测量系统<sup>[13,14]</sup>。对此, 本文通过研究水流含砂量与图像灰度值的关系, 探究出一种较为便捷、精准测量量水堰径流含砂量的方法。

## 2 量水系统组成及基本原理

量水系统由水渠、量水堰堰板、测量板、球型摄像机组成, 见图 1。测量板安装在量水堰板上

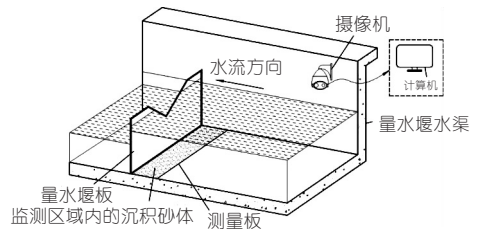


图 1 量水系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of system

游的后方, 测量板面与水渠底面在同一水平面内, 以消除测量板对泥砂沉积的阻碍影响, 利用球型摄像机将采集图像传送给计算机, 对监测区域内沉积的砂体进行相关处理分析。

采集图像灰度值的计算方法为图像是由像素点逐个组成, 每个像素的颜色由红、绿、蓝三种基本颜色组成。每个底色的值在 0~255 之间。将其转换为灰度值的方法是将像素点上的每个基本颜色值乘以 1/3。结果在 0~255 之间, 其中 0 为黑色, 255 为白色。数字图像的本质为数学矩阵, 图像的像素是矩阵的元素。平均灰度值是将图像中每个像素点的三种基本颜色的转换灰度值相加, 再乘以像素的个数<sup>[10]</sup>。

由于量水堰水流较缓, 当携带泥砂经过量水堰板时, 泥砂会沉积, 当泥砂慢慢累积增多时, 其

收稿日期: 2022-07-19, 修回日期: 2022-08-29

基金项目: 浙江省水利厅科技计划项目(RB2035); 国家自然科学基金项目(51979174); 国家自然科学基金联合基金项目(U2040221); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项基金项目(Y321004); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(Y322008)

作者简介: 娄凤锦(1994-), 男, 硕士研究生, 研究方向为大坝渗流监测技术, E-mail: 1746997233@qq.com

通讯作者: 丁勇(1977-), 男, 副教授、硕导, 研究方向为智能材料与结构, E-mail: njustding@163.com

图像的灰度值也在发生变化,利用此变化特征建立数学模型可较精确地监测量水堰径流的含砂量。

量水系统流程见图 2。

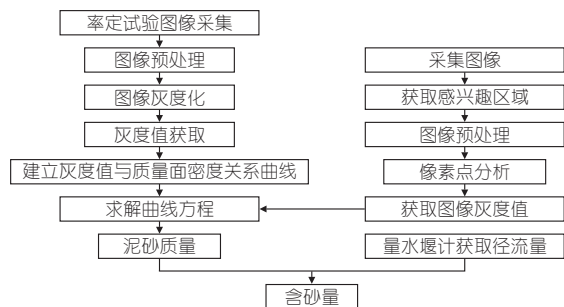


图 2 量水系统流程图

Fig. 2 System flow chart

### 3 图像灰度值与含砂量关系的率定

为了率定实际含砂量与其图像灰度值之间的关系,利用粒径小于 0.075 mm 的特细砂进行了多组率定试验。将测量板放入试验容器中,并将试验容器置于球型摄像机下方,将球型摄像机相关参数调设完毕后保持不变。

使用精度为 0.01 g 的电子秤,每次称取 0.05 g 的砂放入测量板上一个尺寸大小为 5 cm×5 cm 的框内,待砂完全沉淀后,再采集图像,且整个试验过程均处于黑暗环境下。对于率定试验中采集的图像信息,首先进行滤波、降噪图像预处理<sup>[15-17]</sup>,并识别出图像中的监测区域,最后对图像进行灰度化处理,部分图像灰度化结果见图 3。



图 3 率定试验图像(0.00~1.20 g)

Fig. 3 Calibration test image (0.00-1.20 g)

图 4 为图像灰度值与质量面密度的率定曲线。由图 4 可知,当质量面密度小于 12 mg/cm<sup>2</sup> (即含砂量小于 0.3 g)时,含砂量与其图像平均灰度值呈良好的负线性相关性,当质量继续增加时,图像平均灰度值减小缓慢,曲线逐渐平缓,且当质量面密度大于 40 mg/cm<sup>2</sup> (即含砂量大于 1.00 g)时,曲线接近水平,图像灰度信息接近饱和,故本文所述方法比较适合监测量水堰径流较低含砂量。

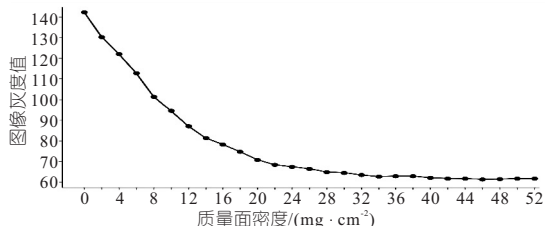


图 4 图像灰度值与质量面密度的率定曲线

Fig. 4 Calibration curve of image gray value and mass surface density

含砂量的分析是根据图像灰度值与质量面密度关系曲线,求解出每个质量区间内的线性方程,根据待测含砂量图像的灰度值,利用求解出的线性方程,按灰度区间,将其代入,从而反向获得含砂量。

## 4 灰度值法测量含砂量试验

### 4.1 静态试验

#### 4.1.1 试验材料及设备

室内试验的模型槽外径尺寸为 93 cm×60 cm (长×宽),槽底外径尺寸为 83 cm×50 cm (长×宽),高度为 25 cm。采用乳白色亚克力测量板,便于与沉积在其上的砂体形成鲜明对比,在试验过程中选用 20 cm×40 cm (方形)、20 cm×20 cm (矩形)两种尺寸的测量板。试验中用以采集图像信息的摄像机采用海康威视型号为 iDS-2DC7823IX-A 的一款球型摄像机,见图 5。

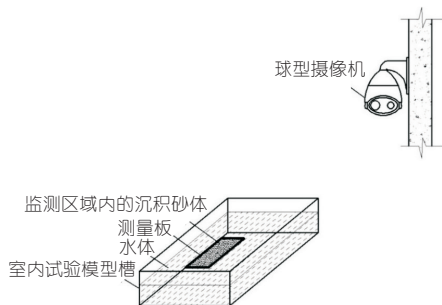


图 5 试验装置系统示意图

Fig. 5 Schematic diagram of test device system

#### 4.1.2 试验方法

每次称取 1.00 g 的砂量,使用孔径为 0.080 mm 的小筛子将砂体均匀的投放至测量板上,在每次投砂过程中将测量板严密地围挡起来,避免影响测量结果的精度。待砂体完全沉积后,使实验室处于完全黑暗的环境。不同测量板静态试验图像信息见图 6。

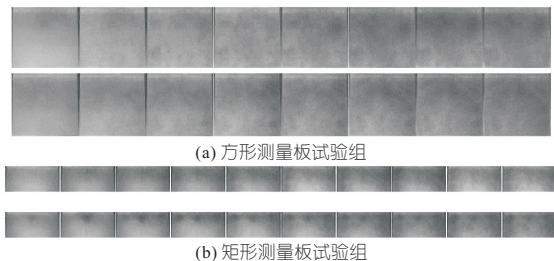


图 6 不同测量板静态试验图像信息

Fig. 6 Static test image information of different measuring plates

#### 4.1.3 试验结果与分析

表 1 为不同测量板的试验结果数据。表 1 中每

表 1 不同测量板的试验结果数据

Tab. 1 Test result data of different measuring boards

实际值/g	两种测量板的测量值/g									
	方形测量板					矩形测量板				
1	1.26	1.13	1.20	1.18	1.03	0.86	1.07	1.18	1.23	1.16
2	2.39	2.28	2.36	2.33	2.18	1.78	2.16	2.30	2.14	2.26
3	2.86	3.19	3.33	3.35	3.26	3.12	3.28	3.34	2.93	3.30
4	4.35	4.39	4.23	4.43	4.34	4.53	4.36	4.42	4.22	3.89
5	5.39	5.42	5.46	5.54	5.48	5.76	5.53	5.21	5.22	5.31
6	5.76	6.24	6.65	6.76	6.59	6.72	6.64	6.57	6.32	5.77
7	7.28	6.79	7.66	7.73	7.88	7.84	7.26	7.56	6.88	7.54
8	8.45	7.69	8.97	8.69	9.02	9.03	8.67	8.68	7.87	8.21
9	9.46	8.42	10.12	9.68	9.89	9.75	9.56	9.83	8.88	9.47
10	9.89	9.36	11.38	10.37	11.35	11.61	10.88	11.32	9.45	12.16

列数据为一组测量试验中的数据,每组试验分别投砂 1,2,⋯,9,10 g,每组试验测量 10 次,方形测量板与矩形测量板各进行 5 组测量试验。由表 1 可看出,数据比较稳定,尤其实际含砂量在 5.00 g 及以内的测量结果精度较高,数据波动较小,随着实际含砂量的不断增加,误差也逐渐增大。最精确的测量数据为 1.03 g,误差仅为 0.03 g,误差最大的测量数据为 12.16 g,误差为 2.16 g。100 条测量数据中误差 ≤ ±0.50 g 的有 61 条数据,实际值在 1.00~5.00 g 的占了其中的 46 条数据。

图 7 为两种测量板的测量含砂量与实际含砂量比较。由图 7 可看出,测量数据整体均呈良好的正比例关系。实际含砂量在 1.00~5.00 g 范围时,对比曲线起伏微弱,各曲线之间紧凑密实;实际含砂量在 5.00~10.00 g 范围时,对比曲线起伏较大,波动明显,各曲线之间比较离散,且随着实际含砂量的增加,此情况愈加明显,这与表 1 中的结果分析相对应。根据表 1、图 7 可看出,方形测量板的测量效果优于矩形测量板,因为当测量板尺寸较大时,投砂时更易发生砂体沉积分布不均匀现象,另外采集图像时也会对曝光产生一定的影响。

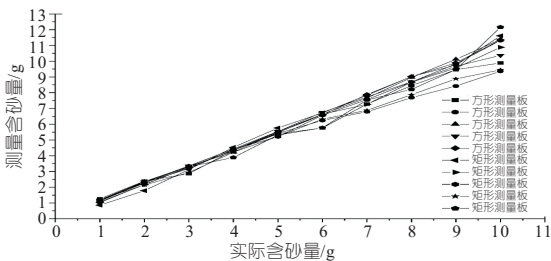


图 7 两种测量板的测量含砂量与实际含砂量比较  
Fig. 7 Comparison between measured sand content and actual sand content of two measuring plates

综上所述,本文方法具有一定的实用性和准确性,尤其是在水体含砂量较低的情况下测量效果更佳,在一定程度上能实现小量程、高精度的目标。

## 4.2 现场试验

现场试验在南京水利科学研究院当涂科学试验及科技开发基地进行,采用引调水试验厅内的一个回水槽作为量水堰水渠,回水槽净宽 2.2 m,高 1.6 m,水流测试可控制范围为 0.2~5.0 m/s,水位高度控制范围为 0~1.5 m。

### 4.2.1 材料设备及试验方法

室内试验采用常见的建筑用砂,粒径小于 0.075 mm。用于采集图像信息的摄像机采用浙江大华股份有限公司生产的一款型号为 DH-SD6C84GX-GN-A 的球型摄像机。

在回水槽内部砌高 60 cm、宽 240 cm 的水墙模拟量水堰堰板,使其对水流中的砂体有一定的阻挡作用。将一块 20 cm×20 cm 的乳白色亚克力测量板铺设在水墙的墙脚位置,测量板上表面与水泥砂浆的表面保持在同一水平面内。将网络球机安装在水墙上游位置,网络球机与水墙水平距离约为 1 m,高度为 1.3 m。

考虑水流冲刷的影响,利用辅助装置防止砂体在沉积到底部时向四周扩散。将水流速度设置为 0.2 m/s,由于标定试验每次投砂量很少,为防止砂体在沉落过程中流失,利用圆管向辅助装置内每次投入 0.05 g 的砂体,等待砂体沉落完毕后采集图像,以保证试验的准确性和严谨性。

图 8 为图像灰度值与质量面密度曲线。由图 8 可知,现场标定试验结果与静态试验结果吻合,曲线的走势完全相同。但现场标定试验的曲线整体比静态试验标定曲线的波动大,因为现场试验水体是流动的,所以在试验结果中,曲线会产生一些波动,导致曲线并非十分光滑。

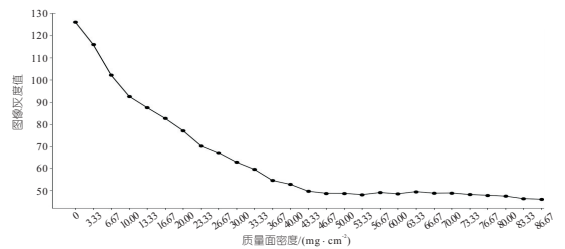


图 8 图像灰度值与质量面密度曲线

Fig. 8 Curve of image gray value and mass surface density

将水流速度分别设置为 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 m/s 五种情况,每种流速进行两个小组试验,每组试验的投砂梯度为 1.0 g,每组试验采集 10 张图像。试验均在黑暗环境下进行。

### 4.2.2 结果与分析

表 2 为五种水流速度情况下含砂量测量结果。表 2 中试验 1、2 为相同水流速度下进行的两次试验。由表 2 可看出,整体数据良好,即使是在

表 2 五种水流速度情况下含砂量测量结果  
Tab. 2 Sand content measurement results under five water flow velocities

实际值/g	不同水流速度下测量值/g									
	0.2 m/s		0.4 m/s		0.6 m/s		0.8 m/s		1.0 m/s	
	试验 1	试验 2	试验 1	试验 2	试验 1	试验 2	试验 1	试验 2	试验 1	试验 2
1	1.32	1.28	1.22	1.39	1.03	0.76	1.37	1.09	1.36	1.22
2	2.26	2.16	2.39	2.22	2.28	1.83	2.28	2.04	1.76	2.39
3	3.37	3.27	3.03	3.19	3.43	2.97	3.11	2.92	3.28	3.03
4	4.54	4.37	3.69	4.35	3.81	4.32	4.21	4.38	4.65	3.69
5	5.30	4.88	4.81	5.45	5.45	5.30	4.92	5.33	5.31	4.81
6	6.63	5.62	6.08	5.97	6.34	5.83	6.39	6.32	6.65	6.08
7	7.22	7.05	6.73	7.28	6.71	6.65	7.42	7.77	7.83	6.73
8	8.66	7.45	6.70	8.25	7.59	7.38	8.69	8.52	8.78	6.70
9	10.58	8.21	8.10	8.81	8.47	8.23	8.96	8.88	9.90	8.10
10	11.32	8.78	8.84	10.28	8.93	8.89	9.01	9.46	11.35	8.84

不同的水流速度下,测量结果仍呈较好的准确性,未出现很大的波动起伏。最精确的数据为 1.03 g,误差仅为 0.03 g,误差最大的数据为 11.35 g,误差为 1.35 g。100 条测量数据中误差  $\leq \pm 0.50$  g 的有 70 条数据,实际值在 1.00~5.00 g 的占了其中的 48 条数据。现场试验与室内试验的测量结果呈相同规律,实际值在 1.00~5.00 g 范围时,精度更高,数据波动更小。水流速度增大的情况下,对测量结果的精度也产生了一些不良影响。水流速度为 1.0 m/s 下的两组测量结果的差距比其他水流速度下的测量结果更大,尤其是实际值在 6.00~10.00 g 范围内,最小误差为 0.5 g,最大误差为 2.51 g。

图 9 为不同水流速度下测量含砂量与实际含砂量对比。由图 9 可看出,整体测量数据仍呈良好的比例关系。实际含砂量在 1.00~5.00 g 范围时,曲线紧密聚集,起伏波动很小;当实际含砂量在 6.00~10.00 g 范围时,曲线比较离散,起伏波动较大,这与表 2 中的分析结果相符,即实际含砂量在小范围内时,测量结果精度高,在大范围时,精度有所降低。在实际含砂量较低时,测量结果仍能保持很好的精度,说明本文方法比较适用于低含砂量监测。

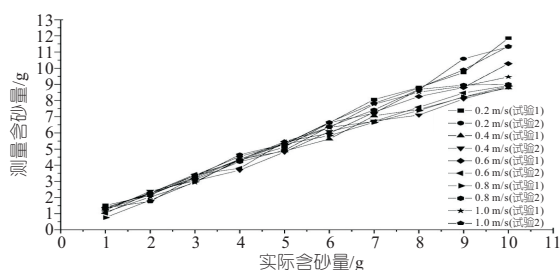


图 9 不同水流速度下测量含砂量与实际含砂量对比

Fig. 9 Comparison of measured sand content and actual sand content under different water flow rates

综上所述,尽管水流速度的增大会对结果产

生一定的不良影响,但在含砂量较低的情况下,本文方法仍能适用,且准确性较高。

## 5 结论

a. 为实现远程自动测量量水堰径流含砂量,提出了根据含砂量与其图像灰度值之间的关系测量水流含砂量的方法。该方法具有极佳的便携性,且实时性好,可实现远程定期自动测量,为监测大坝坝体、坝基的健康状况提供了一条新途径。

b. 本文解决了传统量水堰不具备测量径流含砂量的缺陷,试验验证了该技术具有较强的准确性、可靠性和稳定性,可实现小量程、高精度的要求,能用于实际工程。

c. 含砂量较高时,本文方法精度欠佳,有待进一步研究解决。

## 参考文献:

- [1] WANG J, QU Z, XU Z, et al. Measurement of sediment concentration of the oscillatory flow in the surf- and swash-zone [J]. Journal of coastal research, 2018, 85: 47-61.
- [2] 王欢, 夏超, 封一波, 等. 矩形量水堰在黑林水文站低水流量测验中的运用 [J]. 水利信息化, 2019 (2): 44-48.
- [3] 胡民泉, 李登华, 乔金明, 等. 基于机器视觉的量水堰堰上水头自动量测技术 [J]. 水电能源科学, 2022, 40 (5): 194-197, 177.
- [4] ZHANG BING, GAO YEXIN, CUI HAOHAO. A brief introduction to the measuring methods for sediment concentration of runoff and providing a new idea [J]. Applied mechanics and materials, 2014, 530-531: 141-145.
- [5] SHAO YUYANG, MAA J P Y. Comparisons of different instruments for measuring suspended cohesive sediment concentrations [J]. Water, 2017, 9 (12): 968.
- [6] 付艳红, 时铁彬, 徐岩. 含沙量测量方法及比较分析 [J]. 东北水利水电, 2010, 28 (9): 35-36, 45.
- [7] 陈敏杰, 王伟聪. 浅析含沙量的测量 [J]. 价值工程, 2010, 29 (3): 37.
- [8] WILFRIED KUBINGER, BERNHARD PESCHAK, WILFRIED WÖBER, et al. Bildgebende sensorsysteme für robotische systeme in der agrar- und landtechnik [J]. Elektrotechnik und informationstechnik, 2017, 134 (6): 316-322.
- [9] 杨志, 王建中, 范红霞, 等. 三维全景成像声呐系统在水下细部结构检测中的应用 [J]. 水电能源科学, 2015, 33 (6): 59-62, 47.

[10] 罗东城,张立成,廖健程,等.基于图像灰度值模型测定土壤含水量研究[J].山东农业科学,2020,52(7):89-94.

[11] 毛天旭,朱元骏,邵明安.土壤表面灰度值与表层土壤含水量关系研究[J].水土保持学报,2011,25(1):245-248.

[12] ZHU YUANJUN,WANG YUNQIANG,SHAO MINGAN, et al. Estimating soil water content from surface digital image gray level measurements under visible spectrum[J]. Canadian journal of soil science,2011,91(1):69-76.

[13] 毛倩倩,梁忠民,霍世青,等.黄河中游龙门含沙量过程统计预报模型研究[J].水电能源科学,2012,30(4):83-86.

[14] 夏威夷,赵晓冬,张新周.椒江河口挟沙能力经验公式在其河床冲淤预测中的应用[J].水电能源科学,2017,35(1):101-103.

[15] RASHA ABDUL RAZAK A P,HARISH BINU K P. An overview of various image filtering techniques for image sharpening[J]. Journal of research in science and engineering,2020,2(9):69-76.

[16] KANG CHANGHEE,KANG SANGUG. Self-supervised denoising image filter based on recursive deep neural network structure[J]. Sensors,2021,21(23):27-37.

[17] 陈妍,徐海黎,邢强,等.结合小波变换和双边滤波的SICM图像降噪算法[J].电子测量技术,2022,45(4):114-119.

## Research and Development of Dam Seepage Sand Content Measurement Technology Based on Water Weir

LOU Feng-jin<sup>1</sup>, DING Yong<sup>1</sup>, LI Deng-hua<sup>2</sup>, XIE Dong-hui<sup>3</sup>

(1. School of Science, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 3. Jiaokou Reservoir, Ningbo City, Zhejiang Province, Ningbo 315161, China)

**Abstract:** Aiming at the shortcomings that traditional water weirs cannot measure the sand content of runoff and the traditional measurement methods are not accurate, it is difficult to realize online measurement in the field of dam water weirs. By analyzing the negative correlation between the sand content of the water flow of the water weir and the gray value of the image, sand volume measurement technology was proposed to automatically measure the sand content of the water flow of the weir. The test results show that the deviation between the detection result of sand content and the actual value is low, and it is a convenient, efficient and real-time determination method. The research results have certain reference value for dam seepage monitoring.

**Key words:** sand content; image gray value; calibration test; data fitting; weir

(上接第 81 页)

[3] 孙章丽,朱秀芳,潘耀忠,等.洪水灾害风险分析进展与展望[J].灾害学,2017,32(3):125-130,136.

[4] 刘媛媛,王绍强,王小博,等.基于AHP\_熵权法的孟印地区洪水灾害风险评估[J].地理研究,2020,39(8):1892-1906.

[5] 田义超,王世杰,白晓永,等.桐梓河流域输沙量变化及其对气候和人类活动的响应[J].自然资源学报,2019,34(12):2701-2716.

[6] 史培军,三论灾害研究的理论与实践[J].自然灾害学报.2002,11(3):1-9.

[7] CAI TIAN,LI XINYU,DING XIANG, et al. Flood risk assessment based on hydrodynamic model and fuzzy comprehensive evaluation with GIS technique [J]. International journal of disaster risk reduction, 2019,35(1):101077.

[8] DZ A, XS B, HE X, et al. A GIS-based spatial multi-index model for flood risk assessment in the Yangtze River Basin, China- ScienceDirect[J]. Environmental impact assessment review, 2022,DOI: 10.1016/j.eiar.2020.106397.

[9] 黎树式,黄鹄,戴志军.近60年来广西北部湾气候变化及其适应研究[J].海洋开发与管理,2017,34(4):50-55.

## Temporal and Spatial Variation Characteristics of Flood in Nanliu River of Beibu Gulf and Its Risk Assessment

ZHU Wen-xuan<sup>1,2</sup>, LIANG Zhi-yong<sup>1</sup>, LI Shu-shi<sup>1,3</sup>, ZHAO Jun<sup>1</sup>, HUANG Shu-ting<sup>1</sup>, YAN Ru-fei<sup>1</sup>

(1. School of Resources and Environment Beibu Gulf University, Qinzhou 535011, China;

2. School of Geography and Planning Nanning Normal University, Nanning 530001, China;

3. Guangxi Key Laboratory of Marine Environmental Change and Disaster in Beibu Gulf, Qinzhou 535011, China)

**Abstract:** Under the background of global climate change, river flood risk assessment is of great significance to disaster prevention and mitigation in river basins. By analyzing the spatiotemporal change characteristics of floods in the Nanliu River Basin from 1960 to 2021, a flood risk assessment index system was established for flood risk assessment. The results show that the interannual variation of flood disaster in Nanliu River shows a fluctuating upward trend; 1993 was a big catastrophe year of flood disaster change; On the whole, the upstream basin, the middle river valley and the downstream estuary plain are the flood prone areas, and the flood risk shows a distribution pattern of high in the southeast and low in the northwest, which is consistent with the characteristics of historical flood data. The results can provide scientific basis for the comprehensive management of Nanliu River Basin.

**Key words:** flood; spatiotemporal variation characteristics; risk assessment; Nanliu River