



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.01.016

张珂, 李庆召, 刘仁志, 等. 结合 GIS 空间分析的老灌河流域尾矿库溃坝事故模拟预警[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(1): 95-101. ZHANG Ke, LI Qing zhao, LIU Ren zhi, et al. Research on simulation and early warning of tailings dam break accident in Laoguan River Basin[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(1): 95-101. (in Chinese)

# 结合 GIS 空间分析的老灌河流域尾矿库 溃坝事故模拟预警

张珂<sup>1</sup>, 李庆召<sup>1</sup>, 刘仁志<sup>2</sup>, 张志娇<sup>3</sup>

(1. 郑州航空工业管理学院 土木建筑工程学院, 郑州 450015;

2. 北京师范大学 环境学院, 北京 100875; 3. 广东省环境科学研究院, 广州 510045)

**摘要:** 根据尾矿库溃坝特征, 引入泥流水力计算对尾矿库溃坝事故进行计算模拟, 并将模拟结果与 GIS 工具耦合, 从空间层面对溃坝事故进程和产生的影响进行动态预测和展示, 从而建立尾矿库溃坝事故预警体系, 为事故应急工作提供指导。以南水北调中线水源地支流老灌河流域为例, 选取流域上下游两个典型尾矿库进行溃坝事故情景模拟, 得出上游尾矿库溃坝事故影响范围 55 km, 对该尾矿库下游 3~5 km 处居民区有严重危害, 事故影响时间约 6~7 h; 下游尾矿库溃坝事故影响范围 13 km, 主要破坏该尾矿库周边农业资源, 事故影响时间约 2 h。模拟结果在验证本研究实用性的同时, 为该流域尾矿库溃坝事故预警应急措施和流域日常安全管理提供决策支持。

**关键词:** 尾矿库; 溃坝模拟; GIS; 事故预警

中图分类号: X936 文献标志码: A 文章编号: 1672-1683(2017)01-0095-07

## Research on simulation and early warning of tailings dam break accident in Laoguan River Basin

ZHANG Ke<sup>1</sup>, LI Qing zhao<sup>1</sup>, LIU Ren zhi<sup>2</sup>, ZHANG Zhi jiao<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Zhengzhou University of Aeronautics Industry Management, Zhengzhou 450015, China;

2. School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

3. Guangdong Provincial Academy of Environmental Science, Guangzhou 510045, China)

**Abstract:** This article was aimed to establish an early warning system of tailings dam break accidents, and provide guidance for emergency operation. The model of sand flow from tailings dam break was used to simulate accident scenarios based on the characteristic of tailings dam break. Combining simulation results with GIS tools, the process and impact of accidents were predicted and displayed spatially. The article used Laoguan River Basin, a tributary of the middle route of South to North Water Transfers, as a study case, and chose two typical tailing ponds from upstream and downstream to simulate accident scenario. The scale of the accident impact from upstream was 55 km, and the residential land in 3~5 km downstream of the tailing pond would be subjected to serious harm. The duration of accident impact was about 6~7 hours. The scale of the accident impact from downstream was 13 km, and the agricultural resources from downstream would be subjected to main harm. The duration of accident impact was about 2 hours. The simulation results have verified the practicability of the research and provided decision supports for emergency measures of tailings dam break and daily safety management in this basin.

**Key words:** tailing pond; dam break simulation; GIS; early warning of accident

收稿日期: 2016-02-30 修回日期: 2016-04-18 网络出版时间: 2017-01-04  
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20170104.0936.016.html>  
基金项目: 国家自然科学基金项目(41101473; 41271514)

**Fund:** National Natural Science Foundation of China (41101473; 41271514)

**作者简介:** 张珂(1989), 女, 河南郑州人, 助教, 主要从事环境风险评估研究工作。E-mail: po\_drama@163.com

**通讯作者:** 李庆召(1976), 男, 副教授, 主要从事污染物生态修复工程研究。E-mail: leeqz@zzia.edu.cn

尾矿库溃坝事故是各类尾矿库安全事故中破坏性最强、后果最为严重的一类。目前国内对尾矿库溃坝事故的模拟与后果分析进行了大量研究<sup>[1]</sup>，在致灾机理<sup>[2]</sup>和溃坝水流计算<sup>[3]</sup>的基础上建立尾矿库溃坝数学模型<sup>[4-6]</sup>，对溃坝后果的影响范围与程度进行计算<sup>[7-8]</sup>；从多指标入手，展开溃坝事故损失风险评估和对溃坝风险评价模型的探索<sup>[9-10]</sup>；以及根据事故特征与模拟结果，对事故应急处理措施进行的初步探究<sup>[11-12]</sup>和尾矿库安全管理措施的探索<sup>[13]</sup>。由于尾矿库溃坝事故具有突发性，溃坝速度快、波及范围广、破坏性强，因此预先做好空间层面的事故情景模拟与事故影响预测，对事故进行直观展示，有助于快速、准确合理的对快速合理应对尾矿库突发溃坝事故。本文在尾矿库溃坝事故模拟研究基础上，将 GIS 工具与溃坝模型联用，发挥其空间数据处理优势<sup>[14-15]</sup>，建立溃坝事故预警体系，对保障尾矿库密集区居民人身及财产安全具有重大意义。

## 1 基本情况

老灌河流域位于河南省境内西南部，发源于洛阳栾川县，经南阳卢氏县、西峡县，由浙川县汇入南水北调中线水源地丹江口水库。老灌河主干流长 254 km，流域面积 4 219 km<sup>2</sup>。流域内地形北高南低，落差 1 340 m，是典型的山区型河道。老灌河流域矿产资源丰富，开发主要集中在上游栾川县和卢氏县。流域上游存在大量尾矿库，是整个流域的一个巨大的潜在风险，一旦出现溃坝事故，直接威胁下游河道两岸居民安全，并可能对老灌河及丹江口水库水资源和生态环境产生较大的破坏作用。

自当地安监部门、矿区及尾矿库进行资料与现场调研得知，老灌河流域内现有主要尾矿库 34 座，其中栾川县境内 23 座，卢氏县 2 座，西峡县 5 座，浙川县 1 座。卢氏县境内还有金矿、钼矿尾渣直接堆存各 6 处。老灌河流域地理位置与各尾矿库分布见图 1。

## 2 事故模拟与展示

### 2.1 事故模拟

#### 2.1.1 情景设置

尾矿库的危险性由尾矿库的库容和坝高、尾砂毒理性质和尾矿库安全状况所决定<sup>[16-17]</sup>。根据调研所得各尾矿库信息，在流域上、下游分别选取一座综合危险性最高的尾矿库(C6、C31)作为重点事故源，模拟该流域最可能发生、潜在影响最大的溃坝事故，从而使基于上述情景所提供的预警决策参考足

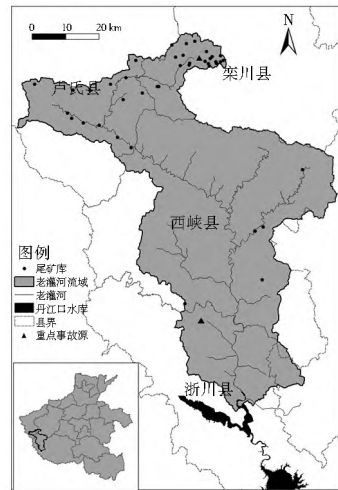


图 1 老灌河流域地理位置与尾矿库分布

Fig. 1 Distribution of tailings in Laoguan River Basin

以应对最大险情。C6、C31 号尾矿库基本信息见表 1。

表 1 C6、C31 尾矿库基本情况

Tab. 1 Information of C6 and C31 tailings

标号	矿种	设计库容/万 m <sup>3</sup>	现状库容/万 m <sup>3</sup>	坝高/m	已用年限
C6	钼矿	450	450	95	满年限
C31	金矿	30	22.5	70	21 年

情景(1):

C6 尾矿库位于老灌河流域上游栾川县境内，矿种为钼矿，为老灌河流域上游尾矿库主要矿种，尾矿库容(W)450 万 m<sup>3</sup>，坝高 95 m，使用期已满服务年限，风险性高、易发生溃坝事故。情景(1)假设 C6 尾矿库发生溃坝事故。

情景(2):

C31 尾矿库位于老灌河下游浙川县境内，距丹江口水库入库口约 32 km，矿种为金矿，为老灌河流域中下游尾矿库主要矿种，尾矿库容(W)22.5 万 m<sup>3</sup>，坝高 70 m，已投入使用 21 年，为老灌河中下游具有代表性的高危尾矿。情景(2)假设 C31 尾矿库发生溃坝事故。

#### 2.1.2 溃坝砂流计算

尾矿库溃坝过程虽与小型水库溃坝类似，但尾矿坝外坡较大，坝址处到达泥深峰值所需时间比水坝产生水深峰值所需时间长；此外，尾矿库溃坝时库内尾砂随洪水倾泻，所产生的砂流更似稀性泥石流。尾矿库溃坝事故特征决定了尾矿库溃坝与水库溃坝、泥石流各有异同。计算溃坝砂流时，可考虑采用类比方法，结合水坝溃坝与泥石流计算特点，修正土体系数，引入泥流水力计算。

(1) 溃口宽度。

采用黄河水利委员会水力科学研究院根据实际

资料统计得到的公式:

$$b = 0.1K W^{0.25} B^{0.25} H^{0.5} \quad (1)$$

式中: $b$ 为溃口平均宽度(m); $K$ 为经验系数(黏土类坝取0.65,壤土类坝取1.30); $W$ 为溃坝泄砂量,计算时考虑最坏情形,取尾矿库现状库容( $m^3$ ); $B$ 为主坝长度(m); $H$ 为溃坝时水头(m)。

(2)坝址最大流量。

尾矿库溃决时库内水位较高,矿砂处于液态,可采用圣维南公式计算最大泄砂量的极限值<sup>[18]</sup>:

$$Q_{max} = \frac{8}{27} \left( \frac{b}{B} \right)^{0.25} b \sqrt{gH_0}^{3/2} \quad (2)$$

式中: $Q_{max}$ 为最大流量( $m^3/s$ ); $b$ 为溃口平均宽度(m); $B$ 为主坝长度(m); $g$ 为重力加速度( $m/s^2$ ), $H_0$ 为坝前水深(包括行进流速水头)(m)。

(3)最大流量沿程演进。

溃坝坝址处最大流量向下游演进至坝址 $L$ 流程时的最大流量可采用下式估算<sup>[19]</sup>:

$$Q_L = \frac{W}{\frac{W}{Q_{max}} + \frac{L}{vK}} \quad (3)$$

式中: $Q_L$ 为距坝址 $L$ (m)处溃坝最大流量( $m^3/s$ ); $W$ 为溃坝泄砂量( $m^3$ ); $Q_{max}$ 为坝址处的溃坝最大流量( $m^3/s$ ); $L$ 为距坝址的距离(m); $v$ 为河道洪水期各断面最大平均流速,可采用历史最大值,如无资料,一般山区可取3.0~5.0 m/s,丘陵区取2.0~3.0 m/s,平原区取1.0~2.0 m/s; $K$ 为经验系数(山区取1.1~1.5,丘陵区取1.0,平原区取0.8~0.9)。

(4)溃坝砂流到达下游断面时间<sup>[20]</sup>。

$$t = K_1 \frac{L^{1.75} (10 - h_0)^{1.3}}{W^{0.2} H_0^{0.35}} \quad (4)$$

式中: $L$ 为距坝址的距离(m); $H_0$ 为坝前水深(m); $W$ 为溃坝泄砂量( $m^3$ ); $h_0$ 为与基流 $Q_0$ 相应的平均水深(m); $K_1 = 0.70 \times 10^{-3}$ 。

## 2.2 预警展示

在ArcGIS软件中对该区域DEM图进行水文分析,获取集水流域和河道矢量数据,结合调研所得老灌河各监测断面基本资料,对所筛选尾矿库进行溃坝砂流计算。老灌河流域DEM高程图见图2,各主要断面位置及2013年平均水位数据见表2。

将上述各要素的计算结果输入ArcGIS软件中,转化为河段矢量数据在空间上予以展示,明确不同时段溃坝事故影响区域。尾矿库发生溃坝后,在事故影响传递到下游前,将模拟计算结果与事发地土地利用矢量数据图层、行政区划矢量数据图层以及集水流域矢量数据图层等进行空间层叠,生成事

故空间图示,并依据尽快制定针对性的应对措施,最大程度减小和避免人员财产损失。

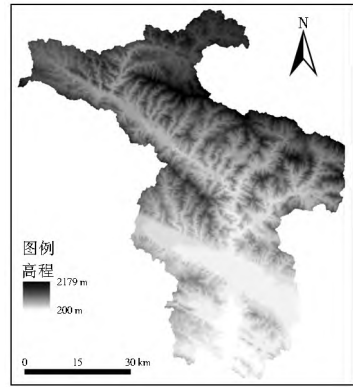


图2 老灌河流域地理位置与尾矿库分布

Fig. 2 DEM of Laoguan River Basin

表2 老灌河各主要断面基本信息

Tab. 2 Information of main sections of Laoguan River

断面名称	河底高程/m	平均河宽/m
米坪	426	150
许营	218	300
封湾	214	300
西峡水文站	203	250
党子岭	184	191
张营	166	150

## 3 结果与讨论

### 3.1 模拟结果与展示

按照尾矿库溃坝砂流计算方法,为使在实际应用中偏于安全,以库容作为泄砂量,取风险最高、事故影响最大的情况,对情景(1)、(2)溃坝事故砂流向下游的演进情况予以分析预测,并可根据含泥沙水流水位流量关系曲线求得最大流量时的含泥沙水流深度,结果如下。

情景(1):

由图3、图4和表3的溃坝事故砂流计算结果可知,事故发生地最大泄砂量高达 $20\,000\ m^3/s$ ,计算所得泥水深度为174.78 m;1 min内,泄砂量随距事发地距离的增加大幅减小,至事发地2 km处泄砂量降至 $1\,000\ m^3/s$ ,计算泥水深度降至10 m;距事发地2~20 km河段到达泄砂量仍以较明显的速度下降,泥水深度自2 km处的10 m,经60 min到达距事发地20 km处时已降至1 m。20 km后,泄砂量随事故持续时间、泥沙到达距离缓慢减小,事发6 h后尾砂到达距事发地55 km处时,泥水深度已降至0.6 m,之后变化已不明显。将砂流量、泥水深度数据在GIS中进行聚类分析可得出,C6尾矿库溃坝后,事故最大影

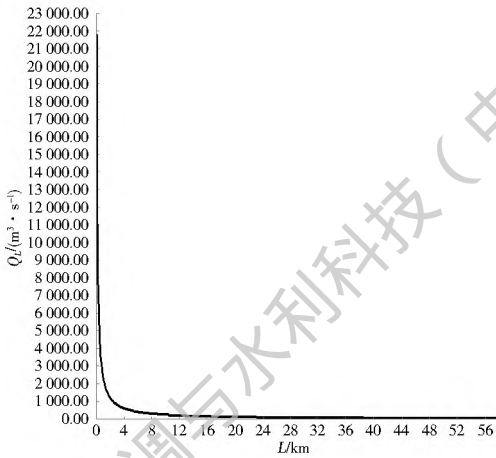


图 3 情景(1)最大泄砂流量演进曲线

Fig. 3 The max sand flow hydrograph of scenario (1)

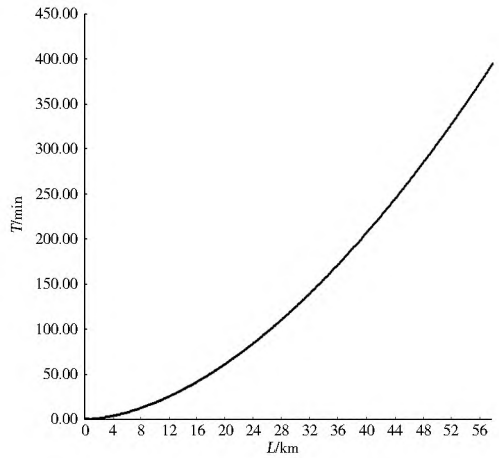


图 4 情景(1)溃坝矿砂到达时间估算曲线

Fig. 4 The estimated arriving time curve of dam break sand of scenario (1)

表 3 情景(1)溃坝砂流计算结果

Tab. 3 Simulation results of scenario(1)

距离 $L/m$	$Q_L/(m^3 \cdot s^{-1})$	$T/min$	泥水深度 $h_m/m$
100	21 817.47	0.01	174.78
500	4 820.42	0.10	38.81
1 000	2 442.17	0.33	19.78
1 500	1 635.35	0.66	13.33
2 000	1 229.24	1.09	10.08
3 000	821.32	2.22	6.81
4 000	616.68	3.68	5.18
5 000	493.67	5.44	4.19
10 000	247.17	17.97	2.24
20 000	123.67	61.52	1.23
30 000	82.46	125.08	0.90
40 000	61.85	206.93	0.74
50 000	49.49	305.79	0.64
55 000	44.99	361.29	0.60

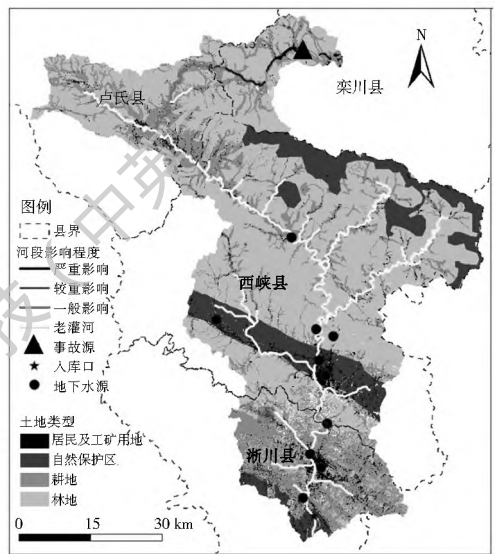


图 5 情景(1)事故模拟展示

Fig. 5 Display of simulation results of scenario(1)

响范围约为 55 km, 其中受影响严重及较严重河段约 20 km, 整个事故约历经 6~7 h, 尾砂到达下游某断面时间随断面距事故点距离的增加而增大, 即下游在承受更小泄砂量的同时也拥有更多的应急时间。情景(1)事故模拟展示见图 5。

将砂流量、泥水深度数据在 GIS 中进行聚类分析可得出, C31 尾矿库溃坝后, 事故最大影响范围约为 13 km, 其中受影响严重河段约 1.5 km, 保守估计整个事故约历经 2 h, 尾砂到达下游某断面时间随断面距事故点距离的增加而增大。

情景(2):

由图 6、图 7 和表 4 的溃坝事故砂流计算结果可知, 事故发生地最大泄砂量  $931 m^3/s$ , 计算所得泥水深度为 22.59 m; 1 min 内, 泄砂量随距事发地距离的增加大幅减小, 至事发地 1.5 km 处泄砂量降至  $65 m^3/s$ , 计算泥水深度降至 10 m; 距事发地 1.5~11 km 河段到达泄砂量仍不断下降, 但降幅逐渐减小, 泥水深度自 1.5 km 处的 10 m, 经约 40 min 到达距事发地 11 km 处时降至 1 m, 又经 20 min 后至 13 km 处泥水深度已降至 0.2 m, 之后变化已不明显。

在情景(1)C6 尾矿库库容、坝高均远大于与情景(2)C31 尾矿库的初始条件下, 计算所得情景(1)事故发生点处最大泄砂量、泥水深度远高于情景(2)所得结果, 其事故持续时间和影响河段距离也明显长于情景(2)事故; 然而由图表数据可知, 尽管事发点计算数值差距较大, 但两事故均在事发 1 min 后泄砂到达 1.5~2 km 段, 且泥水深度此时均降至 10 m。因此比较模拟结果可知, 溃坝砂流模型既反映了尾矿库库容、坝高等初始数据对事故影响距离、事故持续时间的正相关关系, 同时也表征了溃坝事故所具有的瞬时性、爆发性特征。

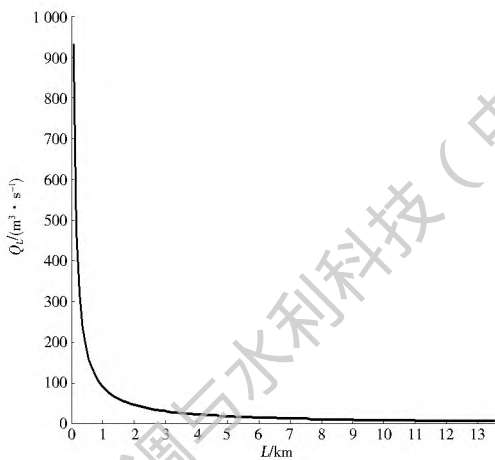


图6 情景(2)最大泄砂流量演进曲线

Fig. 6 The max sand flow hydrograph of scenario(2)

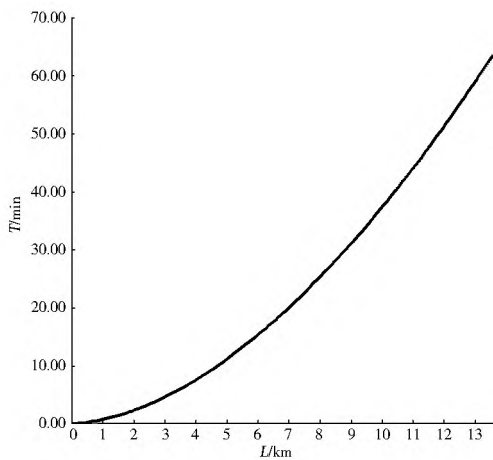


图7 情景(2)溃坝矿砂到达时间估算曲线

Fig. 7 The estimated arriving time curve of dam break sand of scenario(2)

表4 情景(2)溃坝砂流计算结果

Tab. 4 Simulation results of scenario (2)

距离 $L/m$	$Q_L/(m^3 \cdot s^{-1})$	$T/min$	泥水深度 $h_m/m$
100	930.801 3	0.01	22.586 76
500	190.209 9	0.20	14.920 04
1 000	95.364 27	0.66	11.688 47
1 500	63.634 01	1.34	9.822 937
2 000	47.747 23	2.22	8.510 845
3 000	31.845 98	4.51	6.678 038
5 000	19.114 55	11.02	4.396 603
7 000	13.655 38	19.85	2.910 703
9 000	10.621 77	30.82	1.809 573
11 000	8.691 022	43.78	0.935 664
13 000	7.354 223	63.47	0.211 748

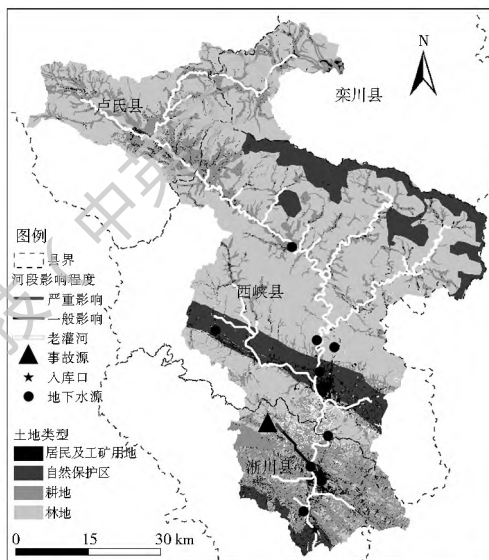


图8 情景(2)事故模拟展示

Fig. 8 Display of simulation results of scenario(2)

### 3.2 预警响应

将事故情景计算结果输入 ArcGIS 软件, 转化为河段矢量数据, 生成事故模拟结果空间展示图(见图5、图8)。图中白色线条代表老灌河, 以不同灰度线段覆盖原白色线条, 表示受事故影响的河段位置及其所受影响的轻重程度; 将河段与该流域土地利用现状图进行空间层叠, 展示受影响河段所流经的土地类别, 直观反映出可能遭受事故危害的受体类型; 同时, 将该流域最受关注的受体(丹江口水库入库口、老灌河流域地下水源)与河段进行空间层叠, 亦可从直观上判断上述受体是否受到事故源及事故波及河段的影响。

由图5可知, C6尾矿库溃坝地点下游3~5 km处分布有居住用地, 属于事故严重影响范围内。砂流从发生险情到蔓延至该居住用地区域不足5 min, 如不在其上游采取拦截措施, 该区域居民根本来不及撤离, 事故一旦发生人员将无一幸免, 居民房屋

亦将受到严重损毁。因此, 应在该尾矿库下游附近建立拦截坝, 或考虑迁移该尾矿库下游5 km范围内居住人员。事故发生后5~60 min, 溃坝砂流将流经距事故发生地下游5~20 km河段, 该段为事故影响较重区域, 砂流所到之处大多为耕地, 农业资源将遭受较严重的损失。事故发生后1 h, 砂流随河进入卢氏县, 对沿河耕地产生小范围破坏; 事故发生后5 h, 由于河流对流扩散作用和支流的汇入, 溃坝砂流产生的泥水深度已低于1 m, 对周边环境影响轻微, 同时5 h后砂流流至卢氏县居住用地区域, 该区域居民应注意远离河道。溃坝砂流对下游西峡、浙川县河段影响轻微, 下游居民区、自然保护区及丹江口水库入库口均不会受到溃坝危害, 慎重起见, 可在事故发生后1~4 d对下游断面重金属水质指标进行连续监测, 密切关注溃坝砂流携带的有害物质可能对河流下游水质产生的影响, 及时防止污

染的产生。

由图8可知, C31尾矿库溃坝事故发生后2 min, 砂流流至距尾矿库2 km处, 此段区域为事故严重影响区, 河流周边多为耕地, 泥水深度在该段区域达8 m以上, 因此老灌河该河段周边农业资源将受到巨大破坏。事故发生后2~40 min, 溃坝砂流将流经距事故发生地下游2~10 km河段, 该段为事故影响程度一般, 砂流所到之处大多为耕地, 农业资源将遭受一定损失。10 km后, 砂流开始于事故发生后约50 min汇入老灌河干流, 同时也开始流经淅川县县城人口密集区。但此时泄砂最大流量仅不到8 m/s, 属于老灌河日常流量范围, 泥水深度也已低于0.5 m, 砂流对河流及周边各敏感受体基本不产生破坏, 其影响可忽略不计。但由于自此段开始, 河流将依次流经人口密集区、地下水源地、自然保护区并到达丹江口水库入库口, 慎重起见, 可在事故发生后1~3 h内对下游断面氰化物水质指标进行连续监测, 密切关注溃坝砂流携带的有害物质对河流下游各敏感受体水质产生的影响, 及时防止污染的产生。

尾矿库溃坝事故发生突然、灾情蔓延速度快, 将对溃坝下游河流及沿岸大面积地区造成严重的物理破坏。防范尾矿库溃坝事故所造成的危害, 保护尾矿库附近居民及财产安全是应急重点。

#### 4 结论

本研究使用尾矿库溃坝砂流计算模型对尾矿库溃坝事故进行情景模拟, 反映溃坝事故不同于一般水污染事件的灾害特征, 运用模型计算溃坝砂流向下游的演进情况、溃坝砂流到达和离开下游各断面的时间和最大流量等, 并与GIS数据相结合, 对溃坝事故的进程与影响进行空间展示, 为提前做好事故应急工作提供了理论依据和直观参考, 有助于减轻尾矿库溃坝事故对下游居民人身及财产安全产生的损害。

本文所选择的研究流域为典型的山区河流流域, 河流上游存在大量尾矿库, 对流域安全构成威胁; 河流下游汇入丹江口水库, 直接关系南水北调中线供水安全。根据各尾矿库自身特征及流域分布情况, 选取两个易发生事故、事故危害严重且具有代表性的尾矿库进行事故情景模拟, 其中上游尾矿库溃坝事故波及范围广、破坏力强, 事故影响范围集中在流域上游; 下游尾矿库溃坝事故主要破坏该尾矿库周边农业资源, 砂流在进入人口密集区、地下水源地、自然保护区及南水北调中线水源地前基本消散。

本研究为达到快速预警模拟的目的, 所使用的尾矿库溃坝砂流计算模型对溃坝事故进行了简化处理, 将尾矿库溃坝事故源视为瞬时点源, 简化了尾砂下泄过程; 将水流视为裹挟了均匀浓度泥沙的水流下泻, 未考虑泥沙的沿程沉积。在今后的研究中, 应将上述问题考虑在内, 进一步提高模拟的精确性, 完善本模型。

#### 参考文献(References):

- [1] 张力霆. 尾矿库溃坝研究综述[J]. 水利学报, 2013, 44(5): 594-600. (ZHANG Li-ting. Summary on the dam break of tailing pond[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(5): 594-600. (in Chinese))
- [2] 郑欣, 许开立, 魏勇. 尾矿坝溃坝致灾机理研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2008, 4(5): 8-12. (ZHENG Xin, XU Kai-li, WEI Yong. Study on the disaster-causing mechanism of the tailings dam falling[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2008, 4(5): 8-12. (in Chinese))
- [3] 许远瑶, 乔永安. 溃坝水流计算的几个问题[J]. 人民黄河, 1983(6): 30-33. (XU Yuan-yao, QIAO Yong-an. A few questions of dam breaking flow calculation[J]. Yellow River, 1983(6): 30-33. (in Chinese))
- [4] 王纯祥, 白世伟, 江崎哲郎, 等. 泥石流的二维数学模型[J]. 岩土力学, 2007, 28(6): 1237-1241. (WANG Chun-xiang, BAI Shi-wei, ESAKI Tetsuro, et al. Two dimensional mathematical model of debris flow[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(6): 1237-1241. (in Chinese))
- [5] 郭朝阳, 唐治亚. 尾矿库溃坝模型探讨[J]. 中国安全生产科学技术, 2010, 6(1): 63-67. (GUO Chao-yang, TANG Zhi-ya. Study on the tailings dam break model[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2010, 6(1): 63-67. (in Chinese))
- [6] 张红武, 刘磊, 卜海磊, 等. 尾矿库溃坝模型设计及试验方法[J]. 人民黄河, 2011, 33(12): 1-5. (ZHANG Hong-wu, LIU Lei, BU Hai-lei, et al. Test and design of tailings dam model[J]. Yellow River, 2011, 33(12): 1-5. (in Chinese))
- [7] 陶东良. 某钼矿尾矿库洪水溃坝模型试验研究[J]. 工程设计与研究, 2011(130): 18-24. (TAO Dong-liang. Test of a molybdenum ore tailings flood dam break model[J]. Engineering Design & Research, 2011(130): 18-24. (in Chinese))
- [8] 陈星, 朱远乐, 肖雄, 等. 尾矿坝溃坝对下游淹没和撞击的研究[J]. 金属矿山, 2014(12): 188-192. (CHEN Xing, ZHU Yuan-le, XIAO Xiong, et al. Impact of tailings dam failure on the downstream flood and collision[J]. Metal Mine, 2014(12): 188-192. (in Chinese))
- [9] 束永保, 李培良, 李仲学. 尾矿库溃坝事故损失风险评估[J]. 金属矿山, 2010(8): 156-159. (SHU Yong-bao, LI Pei-liang, LI Zhong-xue. Risk Assessment on Tailings Dam Break Loss[J]. Metal Mine, 2010(8): 156-159. (in Chinese))
- [10] 李全明, 张兴凯, 王云海, 等. 尾矿库溃坝风险指标体系及风险评估模型研究[J]. 水利学报, 2009, 40(8): 989-994. (LI Quan-ming, ZHANG Xing-kai, WANG Yun-hai, et al. Risk index system and evaluation model for failure of tailings dams

- [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(8): 989-994. (in Chinese)
- [11] 敖澹, 谢朝新, 高殿森, 等. 某尾矿库溃坝后的环境影响分析与预防措施[J]. 三峡环境与生态, 2010, 3(1): 41-43. (AO Lu, XIE Chaorxin, GAO Diarsen, et al. Environment impact analysis and preventive measures to dam collapse of a tailing reservoir[J]. Environment and Ecology in the Three Gorges, 2010, 3(1): 41-43. (in Chinese))
- [12] 唐玉兰, 曹小玉, 殷婷婷, 等. 大伙房水库上游某尾矿库溃坝应急处理工程措施研究[J]. 安全与环境学报, 2013, 13(3): 180-185. (TANG Yulan, CAO Xiaoyu, YIN Tingting, et al. On the dam breaking emergency saving measures of a mining tailing stockpile at the upstream Dahuofang Reservoir[J]. Journal of Safety and Environment, 2013, 13(3): 180-185. (in Chinese))
- [13] 何衍兴, 梅甫定, 申志兵. 我国尾矿库安全现状及管理措施探讨[J]. (HE Yanxing, MEI Fuding, SHEN Zhibing. Analysis of the safety situation and discussion on the management measures of the tailing reservoir[J]. Safety and Environmental Engineering, 2009, 16(3): 79-82. (in Chinese))
- [14] Tsanis I K, Boyle S. A 2D hydrodynamic/pollutant transport GIS model[J]. Advancing in Engineering Software, 2001, 32(5): 353-361.
- [15] 饶清华, 许丽忠, 张江山. 闽江流域突发性水污染事故预警应急系统构架初探[J]. 环境科学导刊, 2009, 28(3): 69-72. (RAO Qinghua, XU Lizhong, ZHANG Jiangshan. Study on framework of the emergency warning system of sudden water pollution accidents for Minjiang river[J]. Environmental Science Survey, 2009, 28(3): 69-72. (in Chinese))
- [16] 张珂, 刘仁志, 张志娇, 等. 流域突发性水污染事故风险评价方法及其应用[J]. 应用基础与工程科学学报, 2014, 22(4): 675-684. (ZHANG Ke, LIU Renzhi, ZHANG Zhi jiao, et al. A method of environmental risk assessment for abrupt water pollution accidents in river basin[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2014, 22(4): 675-684. (in Chinese))
- [17] AQ 2006 2005. 尾矿库安全技术规程[S]. (AQ 2006 2005, Safety Technical Regulations for the Tailing Pond[S]. (in Chinese))
- [18] 袁兵, 王飞跃, 金永健, 等. 尾矿坝溃坝模型研究及应用[J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(4): 169-172. (YUAN Bing, WANG Feiyue, JIN Yongjian, et al. Study on the model for tailing dam breaking and its application[J]. China Safety Science Journal, 2008, 18(4): 169-172. (in Chinese))
- [19] 陈殿强, 何峰, 王来贵. 凤城市某尾矿库溃坝数值计算[J]. 金属矿山, 2009(10): 74-80. (CHEN Dianqiang, HE Feng, WANG Laigui. Numerical calculation of the tailings dam failure in Fengcheng City[J]. Metal Mine, 2009(10): 74-80. (in Chinese))
- [20] 徐克, 赵云胜, 张强. 尾矿库溃坝后果数值分析[J]. 工业安全与环保, 2012, 38(10): 28-30. (XU Ke, ZHAO Yunsheng, ZHANG Qiang. Numerical analysis for the tailings dam break[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2012, 38(10): 28-30. (in Chinese))

(上接第 59 页)

- [9] 陈关荣, 吕金虎. Lorenz 系统族的动力学分析、控制与同步[M]. 北京: 科学出版社, 2003. (CHEN Guanrong, LYU Jinhua. Dynamics analysis, control and synchronization of Lorenz system[M]. Beijing: Science Press, 2003.)
- [10] 王文, 许武成. 混沌时间序列可预报时间长度分析[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2004, 32(4): 367-371. (WANG Wen, XU Wucheng. Analysis of length of predictable time of chaotic time series[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2004, 32(4): 367-371. (in Chinese))
- [11] 袁鹏, 李谓新, 王文圣, 等. 月降雨量时间序列中的混沌现象[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2002, 34(1): 16-19. (YUAN Peng, LI Weixin, WANG Wensheng, et al. Chaos analysis of monthly precipitation time series[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2002, 34(1): 16-19. (in Chinese))
- [12] Alan Wolf, Jack B Swift, Harry L Swinney, et al. Determining Lyapunov exponents from a time series[J]. Physica 16D, 1985, 285-317.
- [13] Lorenz, Edward N. Dimension of weather and climate attractors[J]. Nature, 1991, 353(6341): 241-244.
- [14] 王文, 许武成. 对水文时间序列混沌特征参数估计问题的讨论[J]. 水科学进展, 2005, 16(4): 609-616. (WANG Wen, XU Wucheng. Some issues on the characteristics of chaotic properties of hydrologic time series[J]. Advances in Water Science, 2005, 16(4): 609-616. (in Chinese))
- [15] 王亦农. 浅谈混沌与水文[J]. 资源环境, 2011, 3(40): 71-72. (WANG Yinong. A brief talk about chaotic and hydrology[J]. Resources and Environment, 2011, 3(40): 71-72. (in Chinese))