文章编号:1672-3031(2019)04-0293-06

洪水污染的生态环境影响评估体系构建与研究

俞 茜[1,2], 李 娜[1,2], 王艳艳[1,2], 丁留谦[1,2], 杜晓鹤[1,2], 王 静[1,2]
(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 2. 水利部防洪抗旱减灾工程技术研究中心, 北京 100038)

摘要: 洪水是全世界范围内最严重的自然灾害之一, 不仅会造成严重的经济社会损失, 而且流经污染源的洪水可能对当地的生态环境造成负面影响, 然而目前针对洪水的生态环境影响评估方法的研究较为缺乏。本文构建了一套可以半定量地评估洪水污染的生态环境影响的评估体系, 该评估体系主要包括四部分: (1)识别与筛选洪水可能造成的生态环境后果类型, (2)确定洪水淹没范围内潜在污染源的危害程度等级, (3)确定洪水淹没范围内的受体敏感度等级, (4)综合污染源危害程度和受体敏感度两个指标, 确定生态环境影响严重性程度。将构建的评估体系应用于南水北调中线一期工程某高填方渠段, 分析了12个溃堤洪水方案对当地的生态环境影响的严重性程度, 研究结果表明12个洪水方案对当地的生态环境的影响均较小, 该评估体系可以较好地分析对比不同洪水方案造成的生态环境影响严重性程度。

关键词: 洪水; 生态环境影响; 污染源; 受保护对象
中图分类号: TV122; X828 **文献标识码:** A **doi:** 10.13244/j.cnki.jiwhr.2019.04.007

1 研究背景

当洪水流经范围内有废水处理厂[1]、垃圾填埋场[2]等暴露污染源时, 洪水有可能冲坏污染源并被释放出的污染物所污染, 被污染的洪水可能会造成流经区域的土壤污染、水质恶化或者其他负面的生态环境后果[3-5], 而污染的土壤和水体可能会进一步对人体健康造成威胁[3,6-7]。

相较于较为成熟的洪水经济损失评估理论与方法[8], 生态环境影响由于较难被定量评估, 因此目前针对洪水的生态环境影响评估的研究较为缺乏。奥地利、比利时等国将洪水淹没图与受保护对象图叠加形成洪水的生态环境风险图, 其中的编制差别在于各国的受保护对象不同[9]。尽管该方法能显示洪水淹没范围内可能受影响的自然保护区等受保护对象, 但是无法比较不同洪水情况下生态环境受影响的程度。随着气候变化[10]和人类活动的加剧[11], 极端暴雨事件频发, 如何增加生态环境系统韧性, 减少洪涝对其造成的负面影响是非常重要的研究课题。

本文构建了一套可以半定量地评估洪水污染造成的生态环境负面影响的方法体系, 并以南水北调中线一期工程某高填方渠段为例, 分析了溃堤洪水对当地生态环境的影响, 旨在对比不同洪水情况可能造成的生态环境影响的严重性程度, 为增强生态环境系统韧性提供技术支撑。

2 评估体系构建与评估方法

当洪水流经区域存在潜在污染源时, 洪水演进过程中造成潜在污染源释放污染物并导致洪水被污染, 则有可能对当地的饮用水源区等受保护对象造成威胁。因此, 本文构建评估体系时, 选择潜在污染源危害程度和受体敏感度两个评价指标, 通过专家判断等方法辅助确定污染源危险分级、潜

收稿日期: 2019-05-31
基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1508003); 南水北调中线一期工程安全风险评估项目Ⅲ标段—洪水风险评估(JZ0203A242016); 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室开放基金(sklhse-2019-B-06)
作者简介: 俞茜(1987-), 博士, 高级工程师, 主要从事洪水风险管理、水环境与水生态、海绵城市研究。E-mail: yqcherie@126.com

在污染源危害程度的等级阈值以及受体敏感度等级阈值，采用矩阵法综合潜在污染源危害程度与受体敏感度两个指标得到生态环境影响严重性程度，洪水污染的生态环境影响评估体系流程图见图1。

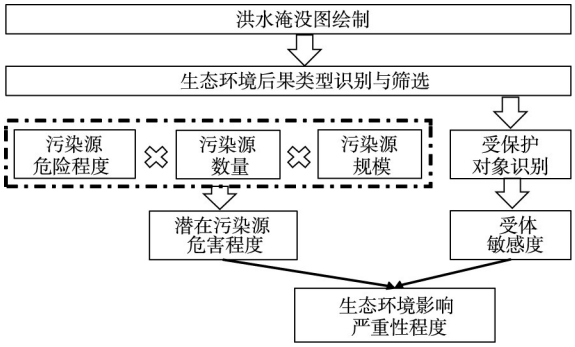

图1　洪水污染的生态环境影响评估体系流程图(流程图中叉号代表潜在污染源危害程度同时考虑了潜在污染源危险程度、数量与规模三方面，而并非由这三部分直接相乘得出结果)

2.1　生态环境影响类型识别　采用事件树分析法(ETA)分析洪水可能造成的生态环境后果类型，见图2。当洪水流经潜在污染源后，被污染的水体进入饮用水源区、自然保护区、受保护地下水等保护对象时，会造成受保护对象被污染。若洪水流经区域无潜在污染源，但是区域存在水土保持能力较差等问题，则有可能造成水土流失或者土壤盐渍化。洪水的生态环境影响具有连锁反应等特征，例如，当洪水造成饮用水源区被污染后，可能继续引发城市水源污染事故，从而造成人群健康等问题，被污染的水体同样会对农业、渔业等造成威胁。本文构建的生态环境影响评估体系针对洪水流经污染源造成研究区域的受保护对象的负面影响进行分析。此外，由于水污染造成人群健康出现问题等次生灾害难以直接定量评价，因此，本文构建的评估体系仅评估洪水污染造成的直接生态环境影响。

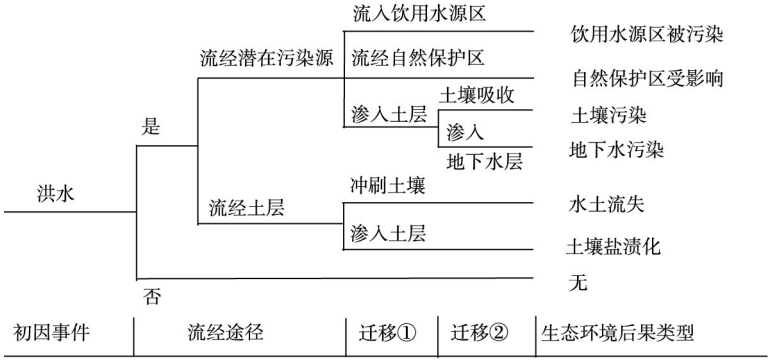

图2　ETA分析洪水可能造成的生态环境后果影响类型

2.2　潜在污染源危害程度等级制定　潜在污染源危害程度根据洪水淹没范围内潜在污染源可能会释放的特征污染物的危险程度、潜在污染源数量以及规模三方面确定。当潜在污染源规模难以获取时，可以假设不同潜在污染源的规模一致，即均取值为1。由于：(1)污染源的释放量除了本身的设计堆放量以外，与洪水对污染源的冲击力及自身防御力等很多因素相关，而这是一个非常复杂的问题；(2)从偏安全的角度考虑，可以选择所有污染源中的最大释放量进行分析，因此针对潜在污染源规模的假设是合理的。

通过专家判断法，本文根据各污染源可能释放的特征污染物的危害程度将所有潜在污染源划分为表1中的5级，并赋予对应的污染源危险分值。

除了潜在污染源的危险等级，潜在污染源的数量与规模也是影响洪水淹没范围内潜在污染源危害程度的重要指标。潜在污染源的危害由洪水淹没范围内所有潜在污染源的危险分值乘以对应的污

表1　潜在污染源危险分值

危险分值L	潜在污染源类型	可能的污染源	可能释放的特征污染物
5	化工厂等	化工厂、制药厂、造纸厂、洗煤厂等	有机有毒污染物、无机有毒污染物、固废，等
4	金属制造厂等	铁矿厂、铸铁厂等	金属、固废，等
3	普通工厂等	砖厂、禽畜养殖厂等	颗粒物、需氧污染物、固废，等
2	弃渣场等	弃渣场、建筑垃圾堆放场、生活垃圾堆放场等	颗粒物、固废，等
1	农田	农田、蔬菜大棚等	总氮、总磷，等

染源规模后相加求和得出，计算公式如下：

$$S=\sum_{i=1}^{5}L_i\sum_{j=1}^{n}M_{ij} \tag{1}$$

式中，S为洪水淹没范围内所有潜在污染源危害程度分值；L_i为洪水淹没范围内第i级危险级别的潜在污染源危险分值(见表1)，i=1，2，3，4，5；n为洪水淹没范围内不同危险级别的潜在污染源数量；M_{ij}为第i级第j个污染源的规模(规模不同时采用数据标准化后的数值，规模均相同则均取值为1)，j=1，2，……，n。

根据式(1)，计算得出每一个洪水方案淹没范围内的潜在污染源危害程度分值，当所有洪水方案的潜在污染源危害程度分值均计算得出后，根据专家打分法将不同分值的潜在污染源危害程度划分为5级，见表2。

表2　潜在污染源危害程度等级示例

等级	潜在污染源危害程度分值S
5	20及以上
4	15~19
3	10~14
2	5~9
1	0~4

2.3　受保护对象确定和受体敏感度等级制定　通过ETA识别出多种生态环境后果影响类型，但只有当受体对象为研究区域的受保护对象时才需要进行评估。本文以南水北调中线一期工程某高填方渠段为例，根据《建设项目环境影响评价分类管理名录》，跨流域调水等引水工程的环境敏感区包含：(一)自然保护区、风景名胜区、世界文化和自然遗产地、饮用水水源保护区；(二)资源性缺水地区、重要水生生物的自然产卵场、索饵场、越冬场和洄游通道等；(三)文物保护单位等。结合研究区域的实际情况，本文研究的敏感受体共包括三类，分别是自然保护区/风景名胜区(文物保护单位)、受保护地表水(地表饮用水源区、水功能区划中要求水质目标Ⅲ类水及以上)、受保护地下水(饮用水源区、水质量为Ⅲ类水及以上)。根据保护级别，给不同的受保护对象赋予不同的敏感度分值，见表3。

表3　受体敏感度赋值

自然保护区/风景名胜区(文物保护单位)		地表水		地下水	
保护级别	赋值A	保护级别	赋值B	保护级别	赋值C
世界级、国家级	10	水质目标Ⅰ类	10	水质量Ⅰ类	10
省(自治区、直辖市)级	5	水质目标Ⅱ类	5	水质量Ⅱ类	5
市、县级	1	水质目标Ⅲ类	1	水质量Ⅲ类	1

注：地表水的保护级别根据《水功能区划分标准(GB/T50594-2010)》确定，地表水水质目标执行《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)，地下水水质量执行《地下水质量标准》(GB/T 14848-93)和《地下水水质标准(报批稿)》。

针对每一个洪水方案，采用式(2)计算洪水淹没范围内所有受保护对象的敏感度分值T，T值四舍五入后对照表4进行受体敏感度等级划分，得出对应洪水淹没范围内的受体敏感度等级。其中，由于洪水在流经非硬化地表后下渗，部分水体会在下渗后的数小时至数天后流回河流等地表水体，其余部分入渗水体可能会进入地下含水层，相较于洪水对于地表水体的直接影响，洪水对地下水造成影响的可能性相对较小，因此在计算地下水敏感度时乘以一个系数k，本文在案例研究时取值为0.5。

$$T=A+B+kC \tag{2}$$

2.4　影响严重性程度确定　采用矩阵法，将潜在污染源危害程度等级与受体敏感度等级相结合，得出不同的洪水淹没情况对当地的生态环境影响严重性程度，影响严重性程度为1～25，见图3。

表4　受体敏感度等级示例

等级	受体敏感度分值T	等级	受体敏感度分值T
5	10及以上	2	3~4
4	8~9	1	0~2
3	5~7		

受体敏感度等级 →

潜在污染源危害程度等级 ↓

	1	2	3	4	5
1	1	2	3	4	5
2	2	4	6	8	10
3	3	6	9	12	15
4	4	8	12	16	20
5	5	10	15	20	25

图3　生态环境影响严重性程度矩阵

3　案例研究

3.1　研究区域　本文以南水北调中线一期工程某高填方渠段为研究对象，该研究渠段总长5.7 km，研究范围包括中线总干渠左岸向外延伸5 km、右岸向外延伸10 km范围的两岸区域。

3.2　污染源和受保护对象　研究范围内包括农耕区、工业区和居民住宅区[12]。据统计，本次研究范围内共分布有30个潜在点源污染源，包含垃圾堆放场、水泥厂等，点源污染源分布不均匀，在城区附近分布较为集中。研究区域内的受保护对象包括水质为Ⅲ类的地下水以及1个全国重点文物保护单位，因此，研究区域可能发生的生态环境影响类型为地下水污染和自然保护区/风景名胜区(文物保护单位)受影响。

3.3　研究方案　基于最可能、最不利和代表性等原则，本文在该高填方渠段的左右岸不同位置共设置了12个可能的溃口，溃口宽度均为32 m，溃决方式为较不利的瞬间全溃，溃口底高程为堤底高程和堤外地面网格高程中的较大值。

3.4　研究结果　本文针对该高填方渠段的12个溃堤洪水方案对总干渠两岸生态环境影响进行评估，12个方案的生态环境影响严重性程度见图4。

以其中两个代表性溃口洪水方案为例(见图5)，左图中的左堤溃决洪水流经农田以及2个普通工厂后，在非硬化地表下渗进入地下水，由于流经范围内污染源危害程度较低(2级)，且受体敏感度较低(1级)，因此该溃决洪水对于左岸区域的生态环境影响较低，严重性程度为2；而右图的右堤溃决洪水在演进过程中流经农田、1个化工厂、2个金属制造厂和1个普通工厂后，在非硬化地表下渗进入地下水(1级)，由于洪水淹没范围内的污染源的危害程度较高(4级)，因此，该溃决洪水对当地的生态环境可能造成一定的影响，严重性程度为4。

研究结果表明，该高填方渠段研究范围内发生溃堤洪水对当地的生态环境影响普遍较小，其中11个洪水方案造成的生态环境影响严重性程度为1或2，这是因为：(1)本次研究的洪水淹没范围内没有保护等级较高的受保护对象；(2)大部分方案的洪水淹没范围内污染源较少。仅有方案12造成的生态环境影响严重性程度为4，这是因为：相较于其他溃堤洪水方案，方案12的溃堤位置靠近城区，污染源分布较为集中，因此，尽管受保护对象一样，但是由于洪水淹没范围内有较多的污染源，导致生态环境影响严重性程度较高。综上，采用本文构建的洪水生态环境影响评估体系可以半定量地评估并对比分析不同洪水方案造成的生态环境影响严重性程度，且结果合理。

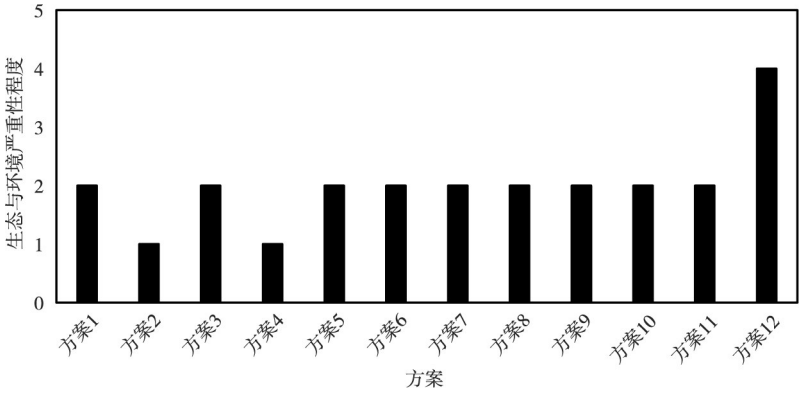

图4　12个溃堤洪水方案造成的生态环境影响严重性程度

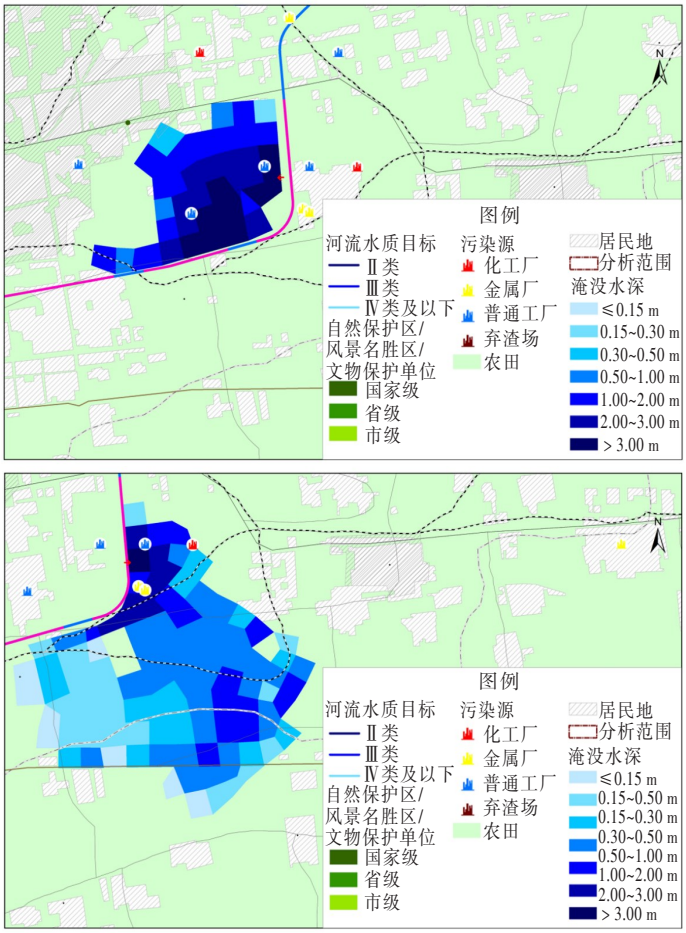

图5　典型溃堤洪水方案对当地的生态环境影响

4　结论

本文构建了一套可以半定量地评估洪水污染造成的生态环境影响的方法体系，该方法同时考虑了洪水淹没范围内的潜在污染源的危害程度和保护受体的敏感度两方面，其中，潜在污染源危害程度又同时考虑了污染源数量、规模及不同污染源可能释放的污染物的危险程度；将构建的评估体系应用于南水北调中线一期工程某高填方渠段，识别了地下水被污染和自然保护区/风景名胜区(文物保护单位)受影响两种可能发生的生态环境影响类型，同时识别了研究区域的30个潜在污染源，分析了12个溃堤洪水方案对当地的生态环境影响的严重性程度。研究结果表明12个洪水方案造成的生态环境影响均较小，只有一个洪水方案造成的生态环境影响严重性程度为4，其余均为1或2。

参 考 文 献：

[1] ARRIGHI C, MASI M, IANNELLI R. Flood risk assessment of environmental pollution hotspots[J]. Environmental Modelling & Software, 2018(100): 1-10.

[2] LANER D, FELLNER J, BRUNNER P H. Flooding of municipal solid waste landfills-an environmental hazard?[J]. Science of the Total Environment, 2009, 407: 3674-3680.

[3] ALBERING H J, LEUSEN S M V, MOONEN E J C, et al. Human health risk assessment: a case study involving heavy metal soil contamination after the flooding of the river meuse during the winter of 1993-1994[J]. Environmental Health Perspectives, 1999, 107(1): 37-43.

[4] COZZANI V, CAMPEDEL M, RENNI E, et al. Industrial accidents triggered by flood events: analysis of past accidents[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 175(1/3): 501-509.

[5] LYNCH S F L, BATTY L C, BYRNE P. Critical control of flooding and draining sequences on the environmental risk of Zn-contaminated riverbank sediments[J]. Journal of Soils and Sediments, 2017, 17(11): 2691-2707.

[6] ZELEŇÁKOVÁ M, ZVIJÁKOVÁ L. Environmental impact assessment of structural flood mitigation measures: a case study in Šiba, Slovakia[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(9): 1-10.

[7] DE JESUS CRESPO R, WU J, MYER M, et al. Flood protection ecosystem services in the coast of Puerto Rico: associations between extreme weather, flood hazard mitigation and gastrointestinal illness[J]. Science of the Total Environment, 2019(676): 343-355.

[8] 王艳艳，刘树坤. 洪水管理经济评价研究进展[J]. 水科学进展，2013，24(4)：598-606.

[9] NIXON S. EU overview of methodologies used in preparation of flood hazard and flood risk maps[R]. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2016.

[10] HIRABAYASHI Y, MAHENDRAN R, KOIRALA S, et al. Global flood risk under climate change[J]. Nature Climate Change, 2013(3): 816-821.

[11] 张志彤. 实施洪水风险管理是防洪的关键[J]. 中国防汛抗旱，2019，29(2)：1-2.

[12] 李建林，林璐，王万雄，等. 南水北调中线焦作段干渠潜在污染分析[J]. 甘肃农业大学学报，2018，53(4)：124-129.

A methodology developed to assess the impacts of polluted floods on ecology and environment

YU Qian[1, 2], LI Na[1, 2], WANG Yanyan[1, 2], DING Liuqian[1, 2], DU Xiaohe[1, 2], WANG Jing[1, 2]

(1. *China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, *Beijing* 100038, *China*;

2. *Research Center on Flood & Drought Disaster Reduction of the Ministry of Water Resources*, *Beijing* 100038, *China*)

Abstract: Flood is one of the most serious natural disasters worldwide. It not only has significant and negative impacts on the economy and society, but also has potentially adverse consequences on ecology and environment when floods are polluted by the flood-exposed pollutant sources. However, few studies focus on ecological and environmental impact assessments under different flood scenarios. In this paper, a methodology is developed which is able to half-quantitatively evaluate the effects of floods on ecology and environment. The methodology consists of four parts. First, the negative ecological and environmental consequences caused by floods are identified. Second, the hazard level of potential pollutant sources within the flood extents is identified. Third, the protection level of protected areas within the flood extents is identified. Last, we use matrix method to comprehensively combine aforementioned two levels and then get the severity level of the ecological and environmental impacts. We apply this methodology to a part of high fill channel of the South-to-North Water Diversion Middle Route Project and evaluate the ecological and environmental impacts under 12 different levee break flood scenarios. The results show that all of the flood scenarios have small adverse impacts on local ecology and environment. The developed methodology can be well used to analyze and compare the degree of impacts on ecology and environment under different flood scenarios.

Keywords: flood; ecological and environmental impacts; pollutant sources; protected area

（责任编辑：杨　虹）