

基于过程控制的流域水环境安全预警模型及其应用*

王丽婧^{1**} 李小宝¹ 郑丙辉¹ 王国强² 侯西勇³

秦延文¹ 李虹¹ 田泽斌^{1,2} 翟羽佳⁴

1. 中国环境科学研究院, 国家环境保护饮用水水源地保护重点实验室, 北京 100012
2. 北京师范大学, 水科学研究院, 北京 100875
3. 中国科学院烟台海岸带研究所, 山东烟台 264003
4. 太原市环境科学研究院, 山西太原 030002

摘 要 为支撑非突发事故条件下(面向累积型风险)的流域水环境安全预警,开展了水环境安全预警需求分析,基于流域-水体作用过程,研究并系统构建了基于过程控制的流域水环境安全预警模型框架。框架设计了社会经济-土地利用-负荷排放-水动力水质(简称S-L-L-W)多个模块集成的流域水环境安全预警模型;提出了状态预警、趋势预警并重的预警级别划分和符号表达方式。应用该模型框架,筛选稳定性和实用性较好的SD模型、CA-Markov模型、SWAT模型和EFDC模型作为S-L-L-W四个模块的模拟工具,实现了三峡水库澎溪河流域3种情景的模拟预测和预警。案例研究结果显示:未来人口密度在各情景下均处于中警状态但变化态势稳定;GDP增长率近期处于中-重警状态,远期有所好转;建设用地动态度总体处于无警状态,但发出了趋势预警的警示;单位面积的污染负荷总体处于中-重警状态,尤其TP负荷预警级别在三种情景下均为重警;水环境质量以情景三条件下状态最好,但TP、TN亦出现轻-中警,水质并不乐观。案例研究证明了所提出的预警模型框架的可操作性,但当前综合预警模型中各个模块属于松散型耦合,未来各模块更有效的集成耦合应进一步考虑。

关键词 水环境安全 过程控制 预警模型 S-L-L-W框架 三峡水库 澎溪河

水环境安全预警是针对水环境安全状况的逆化演替、退化及恶化趋势的及时预测和报警,其对于保障我国区域生态和经济持续健康发展有重要意义^[1-4]。模型的研发应用则是实现预警的重要手段,尤其构建面向水环境安全预警需求的预警模型至关重要。

20世纪70年代以来,随着各种水污染突发事件的频发,国外学者开始关注水环境安全预警模型研究,其中,以欧洲针对事故应急处理建立的莱茵河国际预警系统^[5]和多瑙河水质突发事件预警系统等^[6]较具代表性。这些预警系统在多起水污染事件应急处理中得到了应用,降低了水污染突发事件的影响。90年代开始,国内学者逐步在水环境安全预警理论体系、预警技术手段方面展开探索^[7-11]。其中,预警模型相关研究亦主要侧重于突发型风险预警^[12-17]需求,多采用单一水质模拟模型、重点实现水体水质对特定污染源的响应模拟功能。其甚少考虑非突发事故条件下(亦即流域发展、土地开发等累积型风险条件下)流域-水体作用及变化过程^[18],尚未建立基于过程控制的流域水环境安全综合预警模型。

综上,水环境安全预警模型以往研究针对突发型风险预警需求较多、累积型风险预警需求的相对少;侧重于独立水动力水质模型研究较多,而针对流域不同层面模拟需求的模型之间的耦合集成研究较少。因此,本文从关注常态条件下水环境安全问题出发,拟着眼流域-水体作用过程,针对累积型的警源或警情、基于较长时间尺度、较大空间尺度,并综合考虑水环境安全状态

* 基金项目: 国家水体污染控制与治理重大科技专项(2012ZX07503-002、2009ZX07528-003)

** 作者简介: 王丽婧(1981—),女,博士,副研究员,主要从事流域水环境安全评估与预警、大型水利工程环境效应研究。

与安全状况恶化趋势,构建基于过程控制的流域水环境安全预警模型框架,并将其应用于三峡库区澎溪河流域的水环境安全模拟预测和预警。

1 基于过程控制的流域水环境安全预警模型框架

1.1 需求分析

尽管流域水环境安全的概念认识尚未统一,但其本质兼具自然和人为双重属性,其核心是水体自身的安全,其内涵是流域人类活动与水体之间的协调发展的过程^[19-21]。过程控制或过程管理的概念则源自控制论^[22],近年来,过程管理的思想和方法已经广泛渗透到各个自然科学和社会科学领域^[23],其中,环境领域普遍认可的驱动力-压力-状态-影响-响应(DPSIR)概念模型,其实质亦是过程控制在评估方法上的应用。

流域-水体作用过程是自然水循环和人工水循环的复合过程,涉及流域内人口增长、经济增长、资源开发、污染排放、水体响应等要素。流域水环境安全预警若仅针对水体自身状态进行预警,不符合水环境安全的本质内涵,亦不符合预警对于提前警示和风险管理的目标要求^[18]。据此,流域水环境安全预警模型的框架设计必须遵循从流域到水体、源头-途径-汇的“过程预警”原则,对作用过程中的上述要素在模型中尽可能予以考虑,通过各个关键要素的模拟,在集成基础上建立流域-水体的响应关系,进而提供流域-水体的预测预警信息。

1.2 模型框架

从流域-水体作用过程来看,以水环境质量为预警评价终点^[18](暂不涉及水量安全、水生生物安全),水环境质量直接受点、面源负荷排放的压力影响。点源负荷主要源自人口增长及经济增长双重驱动;非点源负荷与地表下垫面条件密切相关,主要受自然演变和流域城镇化、工业化驱动下的土地利用格局变化影响。据此,流域水环境安全综合预警模型需要至少涵盖S-L-L-W4个主要模块,即社会经济模块(Social-economics part),土地利用模块(Land use part),负荷排放模块(Load part)及水动力水质模块(Water quality part),框架设计图见1。

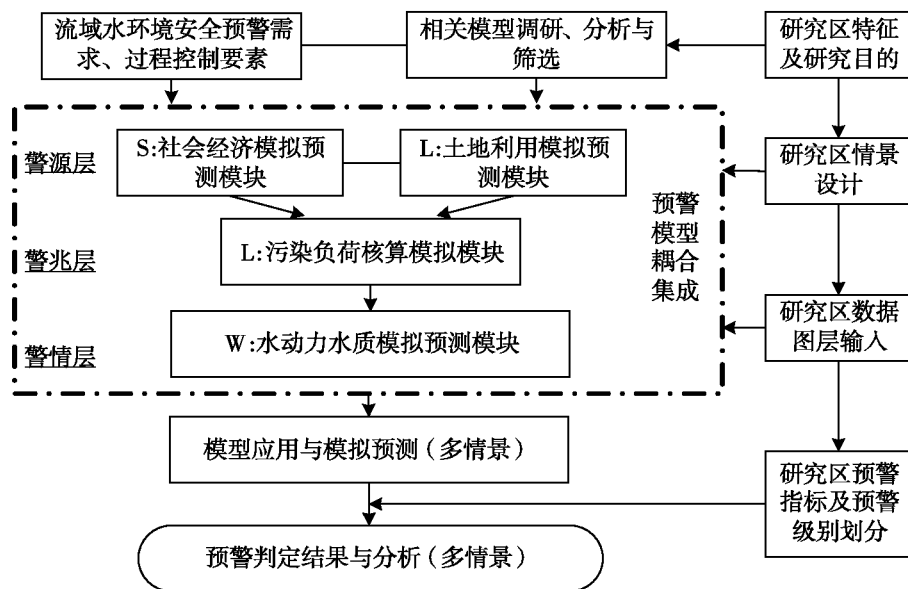


图1 流域水环境安全预警模型框架

Fig. 1 Early-warning Model Framework for Water Environment Safety in the Watershed

预警指标的选择, 仍需按照过程预警的原则, 覆盖过程预警中各关键要素, 例如, 对应 S-L-L-W4 个预警模块, 均应设置代表性预警指标。预警指标的评判标准值, 可采用文献调研、区域对比、参考国内外标准等方法予以确定。水环境安全预警的内涵包括了当前的状态预警和一个时段内的变化趋势预警。若当前的状态较差, 必然发出警示; 若当前的状态尚好, 不足以发出警示, 但当前和过去相比, 该时段内的变化幅度和恶化趋势足以值得关注, 亦应提出警示。参考美国特拉华河流域对于水环境状况和趋势的描述方式^[24], 提出了流域水环境安全预警级别的划分和表征符号。见表 1。

Tab. 1 Classification of early – warning level and its designed symbol for Water Environment Safety

类别	无警	轻警	中警	重警
状态预警（分类）	≤标准值	超标 10% 以内	超标 50% 以内	超标 50% 以上
状态预警（符号）	○	⊙	◎	●
趋势预警（分类）	年均变幅 < X%	年均变幅 ≥ X%		
趋势预警（符号）	↔	↑		

2 研究区概况

澎溪河位于三峡库区腹心地带,地理位置介于北纬 $30^{\circ}50' \sim 31^{\circ}42'$, 东经 $107^{\circ}56' \sim 108^{\circ}54'$ 之间,流域面积 5172.5km^2 , 主要分布在重庆市开县、云阳两县境内。流域总人口 196 万, 主河长 182.4km , 多年平均径流量 34.1亿 m^3 。澎溪河河口距库首约 208 km , 距库尾约 379 km , 是成库后淹没面积最大、消落面积最大的支流, 具代表性。伴随三峡工程的建设运行, 干支流物质交换加剧、支流水动力条件明显变差, 支流水质恶化及富营养化问题突出^[20,25~26]。澎溪河流域水系及水质监测断面见图 2。

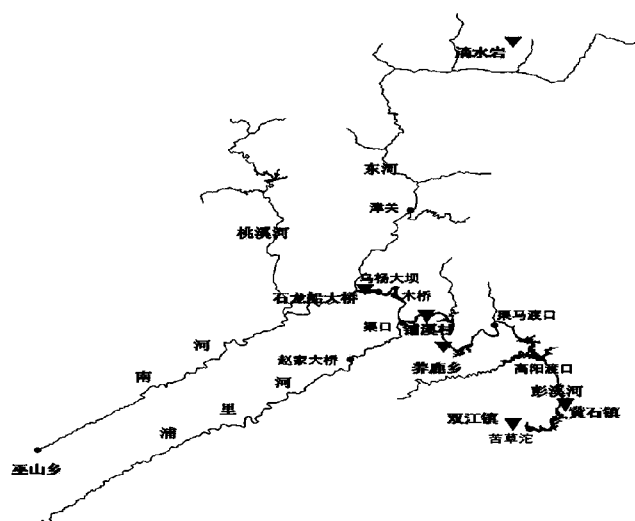


Fig. 2 Sketch map of Pengxi river watershed and its water quality monitoring sections

3 研究区流域水环境安全预警模型构建

3.1 预警模块的模型筛选

根据研究区数据可得性等实际情况,在国内外模型调研、对比分析和专家咨询基础上,,选取系统动力学 SD 模型实现社会经济模块及污染负荷模块(点源部分)^[27-28],CA - Markov 模型实现土地利用模块^[29-30],SWAT 实现污染负荷模块(面源部分)^[31-32]以及 EFDC 模型实现水动力水质模块^[33-34]。

3.2 模型耦合集成设计

SD 模型:根据不同情境对模型中所有变量进行初始化之后,最终可以输出流域内所有社会经济关键指标(如总人口、GDP)和主要污染物(如 COD_{Cr}、总氮)点源负荷的年度预测值,以 txt 或 excel 格式文件保存。与水动力水质模型耦合时,参考流域内现有的点源排污结构,将年度总负荷分配到各个污染源作为点源污染负荷输入。以人口发展规模和城镇化水平为主要表征参数、各类产业增长速度以及产业结构的变化为表征参数。

CA - Markov 模型:模型中转换规则通过用户指定的土地转换适宜性图集来演化,基于模型模拟得出不同情景各年份的土地利用情况。模型结果以 shp 文件格式保存,预测年份结果可以直接作为 SWAT 模型面源负荷预测的重要输入文件。

SWAT 模型:模型模拟的非点源污染物通量结果在子流域汇流点逐日输出,以 excel 文件格式保存,包含汇流点空间位置、流量及污染物浓度数据。与水动力水质模型耦合时,直接在模型中将汇流点对应位置的网格点设置为点源,并将该点的流量和污染物浓度时间序列拷贝到模型中对应的流量点源文件和污染物点源文件中,纳入模型整体的水动力水质计算。

EFDC 模型:将 SD 模型在预测年份的点源负荷结果和 SWAT 模型在预测年份的面源负荷预测结果转化为 EFDC 模型所需的流量和点源输入条件,综合上下游的流量和水质监测数据、已有的水下地形数据和区域内断面的水文水质数据等,在利用部分数据对模型进行率定验证的基础上,可进一步模拟得出流域内主要断面的水动力水质变化趋势。全部结果均以 .out 二进制格式输出,关注点或断面的时间序列等其他数据,可通过 EE 处理后给出。

3.3 研究区预警模型构建

澎溪河流域 SD 模型采用《重庆统计年鉴》和《开县统计年鉴》等统计数据,模拟年限为 2005 - 2020 年,仿真步长为 1 年。其中 2005 - 2009 年为历史检验年份,2009 年为预测基准年,2010 - 2020 为预测年限。模型主要包括人口子系统、经济子系统和污染子系统三个部分,由 90 个变量和系统动力学方程构成。选取人口以及各产业 GDP 作为检验对象,模拟值最大误差不超过 10%,系统仿真程度较好^[28]。

澎溪河流域 CA - MARKOV 模型构建采用 1995、2000、2005 和 2010 年四期 TM 影像解译数据。在 Arcgis 9.2 软件下,用 statistics 命令求出土地利用类型之间转换的面积,从而建立土地利用类型转移矩阵,进一步计算得出土地利用类型转移概率矩阵。以 2005 年土地利用现状作为模拟初始年,输入 MCE 模块得到的土地利用适宜性图像集以及土地利用类型转移概率矩阵,基于 CA - Markov 模型模拟得到未来年份的土地利用情况。以 2010 年模拟结果验证表明,kappa 系数达到 0.97,模型可用于未来土地方案利用的模拟。

澎溪河流域 SWAT 模型构建中采用精度为 90m × 90m 的 DEM 数据,由 DEM 生成河网,设定集水面积阈值为 3500ha,将流域共划分为 70 个子流域,433 个水文响应单元(HRU)。综合利用土地利用数据、土壤类型数据、气象数据等,实现对流域非点源污染模拟。采用流域关键断面的水文水质数据进行模型参数率定,采用历史年份 2007 - 2008 两年 24 个月的径流量、总氮和总磷数据进行验证。模拟值与实际监测值吻合良好,Nash 效率系数的值可达到 0.988,说明模型的参

数适用于上述流域的月尺度模拟^[32]。

澎溪河流域 EFDC 模型构建中,上游汉丰湖 175m 高程以下有效网格数目为 23006 个,最小空间步长 29 米,最大空间步长 91 米,空间步长平均约为 40 米,下游澎溪河 175m 高程以下有效网格数目为 11965 个,网格空间步长最大为 445 米,最小 26 米,空间步长平均约为 50 米。水动力模型中以 SWAT 模型模拟所得典型年份 2008 年日流量数据为上游入流边界条件,以实测的三峡库区万县站和巫山站水位插值得到澎溪河口水位,作为模型中下游水位边界;水质模型中污染负荷输入来自 SD 模型模拟所得 2008 年流域的点源排放数据和 SWAT 模型模拟所得 2008 年流域的面源排放数据。河床底摩擦系数 n 取值在 0.025 ~ 0.035 之间, COD_{Mn} 、总氮和总磷对应的降解系数取值范围分别为: 0.007 ~ 0.016, 0.006 ~ 0.015 和 0.005 ~ 0.012^[35]。主要监测断面的 COD_{Mn} 和总氮模拟值和实测值的平均相对误差为 8% 和 18%, 吻合良好, 但总磷模拟效果一般, 平均相对误差为 22%。

4 研究区情景设计与预测预警

4.1 情景设计

对于社会经济警源要素,着眼于澎溪河流域社会经济发展、环境治理实际、流域相关规划,在地方调研和专家咨询的基础上,设计未来发展的 3 种代表性情景方案,分别代表人口产业自然增长模式、人口产业发展实现有效调控、环境污染实现有效治理的三种状况,其运行结果代表澎溪河流域社会经济系统的不同发展态势^[28,32]。

对于土地利用警源要素,选取澎溪河流域土地利用预测的 1 种最优情景参与集成。该情景中,既考虑了历史演变规律对空间上各土地利用像元变化的驱动,亦纳入了流域宏观政策和规划对土地利用相关因子的限制(如建设用地坡度限制、三峡水库蓄水完成后水域面积拓展速度限制),代表了土地利用空间格局较为合理的发展态势。情景方案见表 2。

表 2 澎溪河流域水环境安全预警模拟情景设计

Tab. 2 Early – warning modeling scenarios for the water environment safety of Pengxi river watershed

警源要素	情景一 自然增长模式	情景二 人口产业调控模式	情景三 环境保护模式
社会经济	政策不发生重大变化情况下系统的发展趋势和状态,该模式下所有决策变量都保持系统惯性发展情况下的取值,主要利用模型对系统进行发展趋势预测。	以大力发展第三产业、有效控制人口规模和城镇化步伐为前提。设计到 2015 年、2020 年的工业增长速率分别为 10.5%、9.5%;人口增长速率分别为 7‰、6‰;城镇化率分别为 45%、50%。	在情景二的基础上以环境保护为前提的预测情景。2015 年出水水质全面达到城镇污水处理厂一级 B 标准 (COD_{Cr} 60mg/L, 总氮 20 mg/L, 总磷 1 mg/L), 2020 年达到一级 A 标准 (COD_{Cr} 50mg/L, 总氮 15 mg/L, 总磷 0.5 mg/L)。
土地利用	对流域土地利用的历史演变规律、相关规划限制因子等综合考虑,定义转换规则。		

4.2 模拟结果

对应上述情景,采用 SD 模型、CA – Markov 模型和 SWAT 模型模拟进行澎溪河流域社会经济、土地利用、污染负荷模拟预测,并将结果输入 EFDC 模块进行水动力水质预测。模拟结果表明:①自然增长模式下(情景一),伴随流域经济快速发展与人口持续增长,2020 年 COD_{Cr} 、总氮、总磷点源负荷分别为基准年的 1.7、2.0 以及 1.6 倍,水环境质量持续恶化,各水质监测断面的 COD_{Mn} 、总磷、总氮年平均浓度均持续增长。其中,上游来水断面水质影响不大,中游断面水质恶化趋势最为严重。以乌杨大坝断面为例,2020 年 COD_{Mn} 、总氮、总磷年平均浓度为

4.26mg/L, 1.9mg/L 和 0.073mg/L, 相对 2010 分别增长 52%、73% 和 28%。②经济人口调控模式下 (情景二), 放慢了工业发展速度, 但 GDP 年均增速仍在 12% 以上, 第三产业比重由基准年的 37.5% 上升至 2020 年 52.9%, 流域产业结构进一步优化, 有利于人民生活水平的提高; 污染负荷排放强度有所降低, COD_{Cr}、总氮点源负荷较情景一分别下降了 5.4%、6.3%, 水环境质量相对情景一变化不大。③环境保护模式下 (情景三), 在经济良好增长、人口稳定情况下, 随着流域污染治理力度的加大, 促进了对污染负荷的大幅削减, 与情景二相比, COD_{Cr}、总氮及总磷点源负荷分别下降了 29.6%、33.0%、71.4%, 水环境质量亦有改善, 2020 年乌杨大坝断面 COD_{Mn}、总氮、总磷年平均浓度为 3.16mg/L, 1.35mg/L 和 0.053mg/L, 相对 2010 分别增长 13%、23% 和 -7%。此外, 三种情景下, 建设用地的不断扩展是土地利用变化的重要特征, 水田、旱地、林草地有不同程度的减少, 水域面积在 2010 年三峡库区首次实现 175m 正常蓄水位后保持总体稳定。受土地利用格局转化的影响 (尤其, 二级分类体系下, 部分土地类型的增多, 如园地), 农业面源污染负荷仍呈增加态势。

表 3 澎溪河流域水环境安全多情景预警模拟结果

Tab. 3 Early-warning modeling results under different scenarios for the water environment safety of Pengxi river

类别	模拟参数	2010 年	2020 年		
			自然增长模式 (情景一)	经济人口调控模式 (情景二)	环境保护模式 (情景三)
社会经济	总人口 (万人)	196	207.4	205.7	205.7
	GDP (亿元)	169.1	755	623.8	623.6
	第三产业 GDP (亿元)	61.1	344.4	330	329.9
	用水总量 (万吨)	9914.9	14426.5	15137.9	14544.3
土地利用	水田 (hm ²)	61918	60845	60845	60845
	旱地 (hm ²)	149346	148706	148706	148706
	林地 (hm ²)	153487	153135	153135	153135
	草地 (hm ²)	94279	93724	93724	93724
	水域 (hm ²)	6308	6781	6781	6781
	建设用地 (hm ²)	2399	4461	4461	4461
点源负荷	COD _{Cr} (吨)	8065.7	13449	12721	8953
	总氮 (吨)	1193.9	2393	2243	1503
	总磷 (吨)	151.9	248.6	275.8	78.8
面源负荷	总氮 (吨)	4020	4764.9	4764.9	4764.9
	总磷 (吨)	1499.3	1874.0	1874.0	1874.0
水环境质量 (乌杨大坝断面为例)	COD _{Mn} (mg/l)	2.8	4.26	4.09	3.16
	总氮 (mg/l)	1.1	1.9	1.8	1.35
	总磷 (mg/l)	0.057	0.073	0.076	0.053

4.4 预警判定结果

考虑到数据可得性、指标代表性等因素, 根据相关文献调研、结合流域实际, 初步选取人口

密度、GDP 增长率、建设用地动态度、单位土地面积的污染负荷 ($\text{COD}_{\text{Cr}}/\text{TN}/\text{TP}$), 水体污染物浓度 ($\text{COD}_{\text{Mn}}/\text{TN}/\text{TP}$) 作为澎溪河水环境安全过程预警指标, 分别代表社会经济、土地利用、污染负荷、水环境质量 4 个方面的控制要素。其中, 水环境质量类的预警指标标准值直接采用国家地表水标准的Ⅲ类限值, 且由于三峡库区支流类似湖泊型水体^[25], TP 浓度取湖库水体限值。社会经济、污染负荷类的预警指标标准值采用历史时段 (2005 – 2010 年) 三峡库区及其上游流域的区域参照值。土地利用的预警指标标准值从统计学意义上, 将 10% 的显著变化作为状态预警限值。预警级别的判定采用 1.3 节的方法, 其中, 对于趋势预警, 考虑到澎溪河流域经济相对不发达、地处山区、且位于淡水资源战略储备库的三峡水库高功能水域, 据此, 从统计学意义上, 选择较为保守的变化幅度作为趋势预警的划分标准, 即恶化趋势 $\geq 5\%$ 则发出警示。

根据表 4 澎溪河流域水环境安全预警结果, 三种情景模式下, 人口密度均处于中警状态, 且变化态势稳定; GDP 增长率近期处于中 – 重警状态, 远期在情景二、情景三调控模式下无警, 但变化幅度在预测时段内仍较大, 未来社会经济发展成为库区水环境安全的重要胁迫。建设用地动态度总体处于无警状态, 但上升态势较明显, 发出了趋势预警的警示, 土地利用变化是水环境安全的潜在压力。单位面积的污染负荷在三种情景下总体处于中 – 重警状态, 尤其 TP 负荷的状态预警级别均为重警, 当前的污染负荷状况已然对水环境安全构成威胁。以乌杨大坝断面为代表的水环境质量在情景一和情景二下均较差, TN、TP 处于中 – 重警状态, COD_{Mn} 浓度恶化趋势明显; 情景三相对较好, COD_{Mn} 和 TP 处于无警和轻警状态, TN 处于中警状态, 各指标变化趋势平稳, 但总体上水质并不乐观。水质作为警情要素, 在各情景下的状态响应与压力要素状况体现出一致性。

表 4 澎溪河流域水环境安全预警判定结果

Tab. 4 Early – warning evaluation results for the water environment safety of Pengxi river

过程预警指标		社会经济		土地利用	污染负荷			水环境质量		
		人口密度 (人/ km^2)	GDP 增长率 (%)	建设用地 动态度 (%)	COD_{Cr} (t/km^2)	TN (t/km^2)	TP (t/km^2)	COD_{Mn} (mg/l)	TN (mg/l)	TP (mg/l)
标准参考值		352.00	12	10	1.69	1.14	0.24	6	1.0	0.05
情景一	2020 年	443.54	14.20	6.42	2.88	1.53	0.45	4.26	1.9	0.073
	预警级别	◎↔	◎↓	○↓	●↔	◎↔	●↔	○↓	●↔	◎↔
情景二	2020 年	439.91	11.70	6.42	2.72	1.50	0.46	4.09	1.8	0.076
	预警级别	◎↔	○↓	○↓	●↔	◎↔	●↔	○↓	●↔	●↔
情景三	2020 年	439.91	11.70	6.42	1.91	1.34	0.42	3.16	1.35	0.053
	预警级别	◎↔	○↓	○↓	○↔	◎↔	●↔	○↔	◎↔	○↔

5 结 论

流域水环境安全预警模型是实现非突发事件条件下 (常态条件下) 的水环境安全预警的重要工具。该研究着眼流域 – 水体作用过程, 构建了基于过程控制的流域水环境安全预警模型框架, 并将其应用于三峡库区澎溪河流域。结论如下:

①基于过程控制的流域水环境安全综合预警模型框架, 以水环境质量为预警评价终点, 其核心是社会经济 – 土地利用 – 负荷排放 – 水动力水质 (简称 S – L – L – W) 多个模块集成的流域水环境安全预警综合模型, 从而用于警源、警兆、警情等过程控制要素的模拟预测; 模型框架强调

水环境安全状态预警、趋势预警并重,并以此作为预警级别划分、表征符号设计的基础。

②结合案例区实际所构建的澎溪河流域水环境安全综合预警模型,分别采用了SD模型、CA-Markov模型、SWAT模型和EFDC模型等来完成社会经济、土地利用、面源污染和水动力水质等4个核心模块的模拟,并实现了不同模型之间的耦合集成。

③设计并实现了案例区3种情景的水质模拟与预警。案例研究证明了所提出的预警模型框架适用性。但模型框架中的预警综合模型各个模块属于松散型耦合,各模块运转的数据要求、时空尺度均有差异,模块之间的衔接仍然耗时耗力,如何实现各模块之间更有机的耦合有待下一步的研究和论证,而社会经济发展中各种不确定性因素对模型模拟结果的影响亦需要关注。

参考文献

- [1] 陈治谏, 陈国阶. 环境影响评价的预警系统研究 [J]. 环境科学, 1992, 13 (4): 20-24.
- [2] 杨建强, 罗先香, 孙培艳. 区域生态环境预警的理论与实践 [M]. 北京: 海洋出版社, 2005.
- [3] 李淑祎, 王烜. 水环境安全预警系统构建探析 [J]. 安全与环境工程, 2006, 13 (3): 79-86.
- [4] 中国环境科学研究院. 流域水环境突发型风险预警技术及其示范应用 [R]. 400011673-2009ZX07528003/01. 北京: 中国环境科学研究院. 2013.
- [5] Puzicha H. Evaluation and Avoidance of False Alarm by Controlling Rhine Water with Continuously Working Biotests [J]. Water Science & Technology, 1994, 29 (3): 207-209.
- [6] Pintér G. G. The Danube Accident Emergency Warning System [J]. Water Science and Technology, 1999, 40 (10): 27-33.
- [7] 傅伯杰. 区域生态环境预警的理论及其应用 [J]. 应用生态学报, 1993, 4 (4): 436-439.
- [8] 毕军, 曲常胜, 黄蕾. 中国环境风险预警现状及发展趋势 [J]. 环境监控与预警, 2009, 1 (1): 1-5.
- [9] 董志颖, 王娟, 李兵. 水质预警理论初探 [J]. 水土保持研究, 2002, 9 (3): 224-225.
- [10] 郭怀成, 刘永, 戴永立. 小型城市湖泊生态系统预警技术——以武汉市汉阳地区为例 [J]. 生态学杂志, 2004, 23 (4): 175-178.
- [11] 冉圣宏, 陈吉宁, 刘毅. 区域水环境污染预警系统的建立 [J]. 上海环境科学, 2002, 21 (9): 541-544.
- [12] 丁贤荣, 徐健, 姚琪, 等. GIS与数模集成的水污染突发事件时空模拟 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2003, 31 (2): 203-206.
- [13] 王庆改, 赵晓宏, 吴文军, 等. 汉江中下游突发性水污染事故污染物运移扩散模型 [J]. 水科学进展, 2008, 19 (4): 500-504.
- [14] 张波, 王桥, 孙强, 等. 基于SD-GIS的突发水污染事故水质时空模拟 [J]. 武汉大学学报信息科学版, 2009, 34 (3): 348-351.
- [15] 饶清华, 曾雨, 张江山, 等. 闽江下游突发性水污染事故时空模拟 [J]. 环境科学学报, 2011, 31 (3): 554-559.
- [16] 李林子, 钱瑜, 张玉超. 基于EFDC和WASP模型的突发水污染事故影响的预测预警 [J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20 (8): 1010-1016.
- [17] 张楚天, 杨勇, 杨中华, 等. 江河突发性水污染事故动态模拟与预警——以长江武汉段为例 [J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22 (10): 1363-1368.
- [18] USEPA, Framework for Cumulative Risk Assessment [R]. EPA/630/P-02/001F, Washington DC: USEPA.
- [19] 金相灿, 王圣瑞, 席海燕. 湖泊生态安全及其评估方法框架 [J]. 环境科学研究, 2012, 25 (4): 357-362.
- [20] 郑丙辉, 王丽婧, 李虹, 等. 湖库生态安全调控技术框架研究 [J]. 湖泊科学, 2014, 26 (2): 169-176.
- [21] 曾畅云. 水环境安全及其指标体系研究——以北京市为例 [J]. 南水北调与水利科技, 2004, 2 (4):

- 31 – 35.
- [22] 金以慧, 王诗宓, 王桂增. 过程控制的发展与展望 [J]. 控制理论与应用, 1997, 14 (2): 145 – 151.
- [23] 万百五, 韩崇昭, 蔡远利. 控制论—概念、方法与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2014.
- [24] Delaware River Basin Commission. State of the delaware river basin 2013 [R]. West Trenton: Delaware River Basin Commission, 2013.
- [25] 郑丙辉, 张远, 富国, 等. 2006. 三峡水库营养状态评价标准研究 [J]. 环境科学学报, 26 (6): 1022 – 1030.
- [26] Holbach Andreas, Norra Stefan, Wang Lijing et al. Three Gorges Reservoir: Density Pump Amplification of Pollutant Transport into Tributaries [J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48, 7798 – 7806.
- [27] 王其藩. 高级系统动力学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.
- [28] 郭长雷, 王丽婧, 梅凤乔, 等. 贵阳市环境经济系统协调发展策略分析 [J]. 长江流域资源与环境, 2006, 15 (4): 427 – 433.
- [29] Guan D J, Li H F, Inohae T, et al. Modeling urban land use change by the integration of cellular automaton and Markov model [J]. Ecological modelling, 2011, 222: 3761 – 3772.
- [30] 侯西勇, 常斌, 于信芳. 基于 CA – Markov 的河西走廊土地利用变化研究 [J]. 农业工程学报, 2004, 20 (5): 286 – 291.
- [31] Arnold JG, Srinivasan R, Muttiah RS, Williams JR. Large area hydrologic modeling and assessment. Part 1: Model development [J]. Journal of the American Water Resources Association, 1998, 34 (1): 73 – 89.
- [32] Wang G, Yang H, Wang L, et al. Using the SWAT model to assess impacts of land use changes on runoff generation in headwaters [J]. Hydrological processes, 2014, 28, 1032 – 1042.
- [33] Hamrick JM. A Three – Dimensional Environmental Fluid Dynamics Computer Code: Theoretical and Computational Aspects [R]. The College of William and Mary, Virginia Institute of Marine Science. Special Report, 1992, 317: 1 – 63.
- [34] 唐天均, 杨晟, 尹魁浩, 等. 基于 EFDC 模型的深圳水库富营养化模拟 [J]. 湖泊科学, 2014, 26 (3): 393 – 400.
- [35] 王晓青, 郭劲松. 三峡水库蓄水后小江水环境容量的变化 [J]. 环境科学研究, 2012, 25 (1): 36 – 42.