

平原河网堤防水文失事及应急预案研究

俞妙言, 杨高升

(河海大学 工程管理研究所, 江苏 南京 211100)

摘 要: 利用河网水动力学模型模拟水位演变情况,通过可靠性分析计算水文失事概率,并结合保护区淹没损失,对堤防的水文失事风险进行评价。以苏州地区为例进行实证计算,得到现有调度方案下的水文失事概率及期望损失值。结果表明:堤防水文失事概率偏大,表现出对堤防加高应急的需求。本文在建立效益、成本、高度三者关系的基础上,通过最大化效益成本比得到堤防最优加高高度,为非汛期应急准备工作决策提供依据。

关键词: 水动力学模型; 平原河网; 水文失事; 应急预案

中图分类号: P338.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2015)03-0085-05

Research on hydrological failure of embankment of plain river network and emergency plan

YU Miaoyan, YANG Gaosheng

(Institute of Engineering Management, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: The paper used river hydrodynamic model to simulate the process of water level variation. Through the analysis of reliability to calculate hydrological failure probability, it combined with reserve drown value to evaluate embankment hydrologic crash risk. As an example for empirical calculation in Suzhou, it got hydrological accident probability and expected loss value under the existing scheduling scheme. The results showed that embankment hydrologic accident probability is so large that it shows the emergency demand for the increase of embankment height. The paper setup the base of relationship between benefit, cost and height of embankment and got the optimal height of embankment heightening in order to provide the basis for the decision-making of emergency preparation during flood season.

Key words: hydrodynamic model; plain river network; hydrological failure; emergency plan

堤防工程风险分析的安全评价以重点堤防为主(有明确的保护区,设防的标准相同),采用可靠度方法,其目的是判断堤防的防洪标准是否合理,或为确定新的防洪标准提供依据,包括防洪应急预案的制定。针对堤防失事风险的评估,常用的方法主要有历史资料回归分析法、模型定量算法以及事故树法等^[1-3]。而对于单元堤段的划分以及典型堤段的选取,张清明等^[4]将已有方法归纳为随机抽样法以及结合工程地质勘察资料和出险历史选取法。目前,针对堤防应急预案制定的研究还比较少,主要包括根据水利工程查勘提出应急加固具体的保障措施与技术指导意见^[5]以及水下模袋混凝土护岸^[6]和

土工格栅石笼^[7]在堤防应急上的应用。本文旨在利用可靠性分析进行水文失事概率计算的基础上,针对堤防加高的需求,提出使得堤防加高效益-成本比最大的最优加高高度。

1 堤防水文失事

堤防工程常常绵延数十至上千公里,是一个典型的平面应变问题。单元堤段的安全性用典型断面的分析结果来评价,既能简化堤防工程过大的问题,又能合理地反映堤防工程的典型代表情况。同时,国内外众多学者对堤防工程的研究也几乎都是将堤防工程问题看作平面问题,以堤防典型断面的安全

收稿日期:2014-10-10; 修回日期:2014-11-18

基金项目:水利部公益性行业科研专项项目(201201017)

作者简介:俞妙言(1991-),女,浙江建德人,硕士研究生,研究方向:工程管理。

通讯作者:杨高升(1966-),男,江苏高淳人,博士,副教授,研究方向:工程管理。

来评价堤防整体的安全。因此,建立单元堤段分项失事概率计算模型实际上可以通过单元典型断面的分项失事概率计算模型来实现^[8]。

1.1 单元堤段典型断面选取原则

子区域单元堤段典型断面的选取,可以重点考虑子区域内最易失事或者一旦失事后最易发生重大损失的堤段,并以此代表该子区域堤防工程。

子区域单元堤段典型断面的选取遵循最危险的原则:①堤身薄弱或地基薄弱;②堤防决堤后淹没损失较大;③河道水位接近堤顶高程。

1.2 典型堤段水文失事概率计算(P_n)

堤防水文失事功能函数可表示为:

$$Z = G(h_0, h_s, e) = h_0 - h - h_s - e \tag{1}$$

式中: h_0 为堤顶高程,m,在洪水漫顶事件概率计算中看作为随机变量; h_s 为波浪爬高,m,作为随机变量处理; e 为风壅高度,m,作为随机变量处理; h 为防洪堤临水面的洪水位,m(此时为给定的计算条件洪水位)。

$$P = P_y + P_d = P\{Z_y < 0\} + P\{Z_d < 0\} \\ = P\{h > h_0\} + P\{Z_d < 0\} \tag{2}$$

式中: P 为水文失事概率; P_y 为漫溢失事概率; P_d 为漫顶失事概率; Z_y 为漫溢事件功能函数; Z_d 为漫顶事件功能函数。

1.3 保护区淹没损失(V_n)

1.3.1 保护区范围的确定 保护区范围是指堤防不同堤段决口后所淹没的最大范围。在计算时,拟选定堤防的几个不同位置作为典型代表,计算在设计洪水条件下每一位置处堤防溃决后的淹没范围及淹没水深,再取这几个方案计算出的不同的淹没范围,计算出这几个范围的包络线,则该包络线内的区域都属于堤防的保护范围。

这里的方案设计与计算涉及专业的水利知识,除了利用对于河道的计算采用一维明渠非恒定流 Saint – Venant 方程组以及溃堤波的计算采用在有限体积无结构网格上建立的 TVD – MUSCL 格式的方法^[9]之外,确定子流域保护区范围还可以用子流域的面积 S_n 乘上一个折减系数,即淹没系数 σ_n 得到。

1.3.2 保护区淹没损失的确定 本文堤防保护区的定义为溃堤后所淹没的区域。上节已将其定义为堤防所在子区域的面积乘以淹没系数,经济价值则以保护区的面积与单位面积 GDP 的乘积来表示,保护区损失则在此基础上再乘以淹没损失率。

子区域淹没时存在一定程度的淹没损失率,该损失率与淹没深度与淹没历时有关。因此,堤防保

护区淹没价值 V_n 按下式计算:

$$V_n = \alpha_n A_n \overline{G_n} \tag{3}$$

式中: V_n 为第 n 个区域的淹没损失,亿元; α_n 为第 n 个区域的淹没损失率; A_n 为第 n 个区域的保护区面积,km²; $\overline{G_n}$ 为第 n 个区域的单位面积 GDP,亿元。

1.3.3 堤防水文失事淹没期望损失 堤防水文失事淹没期望损失是由堤防工程水文失事概率和保护区淹没价值共同决定。则堤防失事淹没期望损失可以表示为:

$$B = \sum_{n=1}^N P_n V_n = \sum_{n=1}^N P_n \alpha_n \sigma_n S_n \overline{G_n} \tag{4}$$

式中: B 表示河网区域堤防水文失事期望损失,亿元; P_n 第 n 个子流域堤防水文失事概率; α_n 为第 n 个区域的淹没损失率; σ_n 为第 n 个区域淹没系数; S_n 为第 n 个区域面积,km²; $\overline{G_n}$ 为第 n 个区域的单位面积 GDP,亿元。

2 实例分析

本文就苏州市平原河网的堤防水文失事期望损失进行分析。按照苏州的行政区划、水系分布和集水域的外包线划分子区域,将计算区域区划分为常熟、太仓、吴江等 13 个子区域。根据选取原则选择各子区域的典型堤段,并利用水动力模拟得到某一调度方案下各堤段的水位记为 h_n ($n = 1, 2, \dots, 13$)。

2.1 典型堤段的选取

符合典型堤段 3 个选取原则中任意一个的堤段均可认为是典型堤段。

① 堤身薄弱或地基薄弱;② 堤防决堤后淹没损失较大;③ 河道水位接近堤顶高程。

根据以上原则,各子流域典型堤段的选取如下表 1 所示。

表 1 各子流域典型堤段

序号	子区域	对应河道	序号	子区域	对应河道
n_1	澄湖	概化河 33	n_8	苏州 1	山塘河
n_2	吴县 3	大运河	n_9	吴县 2	望虞河
n_3	吴江	大运河	n_{10}	昆山 1	浏河
n_4	中心区	上塘河	n_{11}	昆山 2	界浦
n_5	苏州 2	大水泾	n_{12}	阳澄湖	阳澄湖
n_6	吴县 1	十字洋河	n_{13}	太仓	七浦塘
n_7	常熟	青墩塘			

2.2 典型堤段水文失事概率计算

由于苏州市城区除了京杭大运河、吴淞江以及

外城河部分段之外,河面两岸堤顶垂直距离均小于GB50286-98《堤防工程设计规范》规定的风区长度100 m 临界判断值,故此可简化认为苏州市堤防水文失事事件中的洪水漫顶事件不考虑风壅高度。但现实情况下,河道水面由于行船或堤顶线不平整等因素处于非静止状态,因此考虑波浪爬高对漫顶事件的影响。

堤防水文失事概率与洪水位关系如下:

$$P = \begin{cases} 0 & h < h_1 \\ e^{-k(h_0-h)^2} & h_1 < h < h_0 \\ 1 & h \geq h_0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: k 为系数,其大小由 h_1 决定; h_1 为河道设计洪水位,m; h_0 为堤顶高程,m。经过综合计算,模拟出式中系数 k 为31,堤防失事概率与洪水位关系曲线如图1所示。

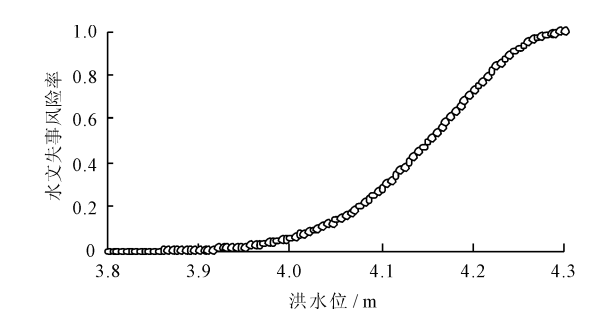


图1 水文失事概率与洪水位关系曲线

根据两者的关系曲线得到各调度方案的水文失事概率如表2所示。

表2 各子区域的水文失事概率

m					
序号	子区域	对应河道	h_0	h_1	P
n_1	澄湖	概化河 33	4.500	4.000	4.378 0.630
n_2	吴县 3	大运河	4.800	4.300	4.697 0.720
n_3	吴江	大运河	4.700	4.200	4.435 0.113
n_4	中心区	上塘河	5.000	4.500	4.982 0.990
n_5	苏州 2	大水泾	4.600	4.100	4.546 0.914
n_6	吴县 1	十字洋河	5.000	4.500	3.466 0.000
n_7	常熟	青墩塘	5.300	4.800	4.232 0.000
n_8	苏州 1	山塘河	5.200	4.700	5.063 0.559
n_9	吴县 2	望虞河	5.700	5.200	4.892 0.000
n_{10}	昆山 1	浏河	5.800	5.300	4.470 0.000
n_{11}	昆山 2	界浦	5.200	4.700	4.406 0.000
n_{12}	阳澄湖	阳澄湖	4.800	4.300	4.517 0.084
n_{13}	太仓	七浦塘	5.200	4.700	4.451 0.000

注: h_0 和 h_1 的数据取自2013年《苏州城市防洪规划》报告。

2.3 堤防水文失事期望损失

$$B = \sum_{n=1}^N P_n V_n = \sum_{n=1}^N P_n \alpha_n \sigma_n S_n \overline{G_n} \quad (6)$$

为简化计算,假设式中淹没系数 $\sigma_n = 1 (n = 1, 2, \cdots, 13)$,即淹没面积等于子区域的面积,记为 $A_n = S_n (n = 1, 2, \cdots, 13)$,淹没损失率为 $\alpha_n (n = 1, 2, \cdots, 13), 0 < \alpha_n < 1$ 。堤防保护范围的经济价值用该范围内地区的GDP近似代替,记单位面积的GDP为 $\overline{G_n} (n = 1, 2, \cdots, 13)$,保护区的经济价值为 $A_n \overline{G_n} (n = 1, 2, \cdots, 13)$,淹没损失为 $\alpha_n A_n \overline{G_n} (n = 1, 2, \cdots, 13)$ 。已有太湖地区的淹没损失率如下,苏州市可利用该数据进行淹没损失估算,见表3。

表3 太湖地区淹没损失率^[10]

淹没水深/m	农业	工业	第三产业	居民财产
<0.5	0.15	0.01	0.02	0.02
0.5~1	0.25	0.03	0.08	0.03
>1	0.50	0.06	0.15	0.04

经测算可知在假设淹没系数 $\sigma_n = 1$ 的情况下,淹没水深均<0.5 m。用农业、工业、第三产业产值和居民财产价值分别占总产值的比值作为权重,计算子区域淹没损失率的加权平均值。因《苏州统计年鉴2013》中没有关于居民财产的统计,本文按各产业2012年的生产总值(表4)的百分比作为权重划分依据。

表4 2012年苏州市分地区生产总值 亿元

项目	市区	吴江区	常熟	昆山	太仓
第一产业	72.47	34.27	37.02	24.46	33.61
工业	2965.65	709.22	952.62	1551.28	491.55
第三产业	2754.22	537.08	836.22	1069.61	401.15

注:数据来源为《苏州统计年鉴2013》。

根据苏州市行政区划图,13个子区域中阳澄湖、澄湖、吴县1、吴县2、吴县3、苏州1、苏州2以及中心区属于市区,由此可以得到13个子区域各产业的比重,如表5所示。假设某子区域各类生产总值的比重分别为农业,工业,第三产业。淹没水位<0.5 m,该子区域的淹没损失率为 α ,由此可得13个子区域在不同淹没水位范围下的淹没损失率如表5所示。

淹没面积 $A_n (n = 1, 2, \cdots, 13)$,以及该地区的平均生产总值 $G_n (n = 1, 2, \cdots, 13)$ 如表6所示。

最后,堤防水文失事期望损失为:

$$B = \sum_{n=1}^{13} P_n(\alpha_n A_n \overline{G_n}) = 19.718 \text{ 亿元}$$

表 5 各子区域生产总值比重及损失率

序号	子区域	农业	工业	第三产业	损失率
n_1	澄湖	0.013	0.512	0.475	0.017
n_2	吴县 3	0.013	0.512	0.475	0.017
n_3	吴江	0.027	0.554	0.419	0.018
n_4	中心区	0.013	0.512	0.475	0.017
n_5	苏州 2	0.013	0.512	0.475	0.017
n_6	吴县 1	0.013	0.512	0.475	0.017
n_7	常熟	0.020	0.522	0.458	0.017
n_8	苏州 1	0.013	0.512	0.475	0.017
n_9	吴县 2	0.013	0.512	0.475	0.017
n_{10}	昆山 1	0.009	0.586	0.404	0.015
n_{11}	昆山 2	0.009	0.586	0.404	0.015
n_{12}	阳澄湖	0.013	0.512	0.475	0.017
n_{13}	太仓	0.036	0.531	0.433	0.019

3 防洪应急预案

由表 2 可知,在现有调度方案下一些堤段水文失事概率偏大,表现出对堤顶高程加高的需求。防洪应急预案作为平原河网全年全过程的预防备案,

需要在非汛期提前做好应急准备。

3.1 水文失事加高应急预案

堤防工程的加高会改变原有堤顶高程,降低水文失事概率,加高方案概述见表 7。堤防加高的目的是为了确堤防不发生漫顶的险情,可以根据来水情况进行提前加高。于是可以设有加高情况下堤防不发生漫顶险情,且加高后堤防服从原水文失事风险分布。

表 6 子区域面积及其经济价值

序号	子区域	A_n / km^2	$\overline{G_n} / (\text{亿元} \cdot \text{km}^{-2})$	$A_n \overline{G_n} / \text{亿元}$	α_n	$\alpha_n A_n \overline{G_n} / \text{亿元}$
n_1	澄湖	48	2.20	105.6	0.017	1.795
n_2	吴县 3	192	2.20	422.4	0.017	7.181
n_3	吴江	614	1.21	742.94	0.018	13.373
n_4	中心区	75	2.20	165.00	0.017	2.805
n_5	苏州 2	181	2.20	398.2	0.017	6.769
n_6	吴县 1	302	2.20	664.4	0.017	11.295
n_7	常熟	981	1.71	1677.51	0.017	28.518
n_8	苏州 1	123	2.20	270.6	0.017	4.600
n_9	吴县 2	616	2.20	1355.2	0.017	23.038
n_{10}	昆山 1	369	3.15	1162.35	0.015	17.435
n_{11}	昆山 2	624	3.15	1965.6	0.015	29.484
n_{12}	阳澄湖	118	2.20	259.6	0.017	4.413
n_{13}	太仓	601	1.54	925.54	0.019	17.585

表 7 加高方案概述^[11]

名称	适用条件	施工要点	示意图
土子埝	在粘土料充足、风浪较小、无雨情况	(1)修筑子埝前要布置堤线,平整顶面,务必开挖结合槽。	
编织袋子埝	加快速度,减少土方	(2)无论抢修哪一种子埝,不得将子埝修在堤坝背水坡侧。	
木板(塌捆)子埝	取土困难地区	(3)抢修子埝必须统一指挥,同步施工,由低到高,逐步加强。	
		(4)修筑子埝必须严格控制工程质量。	

对公式(5)进行变形,取: $h_0' = h_0 + \Delta h$, 其中 h_0' 为加高后堤顶高度, h_0 为原堤顶高程, P' 为堤顶加高后失事概率。

则 $P' = e^{-k(h_0 + \Delta h - h)^2}, (h \geq h_1)$

原堤顶下: $P = e^{-k(h_0 - h)^2}, (h \geq h_1)$

由此,在有加高措施的情况下堤防失事概率的变化用加高前后堤防失事概率实际值的差来表示,为确保变化值为正,这里用加高前失事概率减去加高后失事概率,如下式:

$$P = P - P' \tag{7}$$

3.2 应急预案成本计算

各应急预案成本用调查估算法确定。参照水利部概算定额,苏州市人工、材料实时单价编制,汇总见表 8。

表 8 加高方案成本					元	
加高高度/m	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
编织袋子埝	0	27.83	64.95	111.33	167.01	231.97
木板子埝	0	137.56	214.12	268.83	335.34	413.63

注:各方案按照单元堤段(m)计算成本。

通过对表 8 单位堤段加高高度和成本进行拟合,得到了成本-高度曲线如图 2 所示。

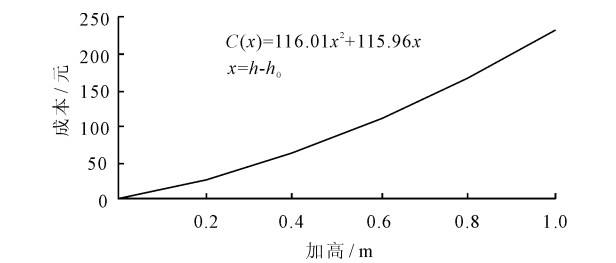


图 2 单位堤段编织袋子埝加高方案成本曲线

由图 2 可知,随着袋子埝加高高度的逐渐增加,加高方案成本逐渐增加,而且其增加的速率也逐渐加快。在防洪应急决策的加高方案选择过程中,要结合当地的实际情况,在追求防洪效益最大化的同时兼顾方案成本。

3.3 防洪应急决策过程与结果

防洪应急准备从非汛期开始,根据历年的水文资料与降雨预报来做应急预案选择。是防汛抢险的先决技术保障。

根据降雨概率分布规律,降雨概率水平落在堤顶与堤防加高之间的计算式为: $P = \int_{Q_{h_0}}^{Q_0+\Delta h} f(Q) dQ$ 。其中, Q_{h_0} 对应河道水位到达堤顶时降雨量,mm, $Q_{h+\Delta h}$ 对应河道水位到达堤顶加高时的降雨量,mm。

(1) 计算水位到达或超过堤顶的降雨概率。通过水动力模拟计算找到相应的降雨量, Q_{h_0} 对应河道水位到达堤顶时降雨量,mm, $Q_{h_0+\Delta h}$ 对应河道水位到达堤顶加高时的降雨量。雨量 Q_0 和概率 P_0 (设 P_0 对应的降雨重现期为 T_0)。

(2) 计算超堤顶水位的加高净效益。设堤防加高为 Δh ,m,即加高至 $h_0 + \Delta h$,m。利用水动力模拟计算得降雨量 Q_1 和概率 P_1 (设 P_1 对应的降雨重现期为 T_1),加高成本为 C_1 ,元。则根据加高净效益公式:

$$Z_1 = B_j \alpha \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_1} \right) - C_1 L_j \tag{8}$$

以此类推,重复模拟试算得最大净效益 maxZ,则 maxZ 对应的 Δh 即为最优加高高度。

(3) 计算结果说明。根据水动力模型模拟出重现期为 20、50、100、200 a 各河道的水位。利用 VB 程序输入堤顶高程,m、损失率、保护区经济价值,万元、到达堤顶高程降雨重现期,a、护岸长度,km 和各降雨重现期对应的河道水位,m,即可输出最优加高的高度 m 以及最大净效益,万元。

本文以苏州 1 大运河堤段为例,计算结果如下

图 3 所示。

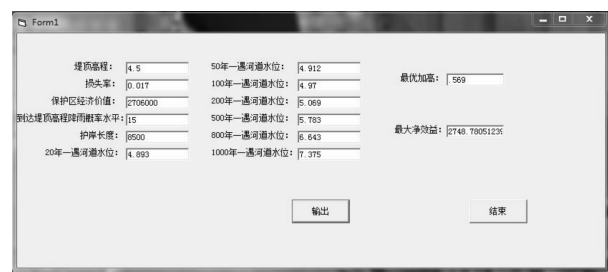


图 3 VB 程序求解苏州 1 大运河实例

分别对 13 个区域,输入上述参数,可以得到苏州地区 13 个区域的重点设防堤段的最优加高高度。最优加高高度的计算结果如表 9 所示。

表 9 子区域典型堤段堤顶最优加高高度

序号	子区域	典型堤段	最优加高/m
n_1	澄湖	概化河 33	0.917
n_2	吴县 3	大运河	0.884
n_3	吴江	大运河	0.448
n_4	中心区	上塘河	1.03
n_5	苏州 2	大水泾	0.788
n_6	吴县 1	十字洋河	1.154
n_7	常熟	青墩塘	0.287
n_8	苏州 1	山塘河	0.569
n_9	吴县 2	望虞河	2.14
n_{10}	昆山 1	浏河	0.518
n_{11}	昆山 2	界浦	0.13
n_{12}	阳澄湖	阳澄湖	1.23
n_{13}	太仓	七浦塘	0.136

4 结 语

在水动力学模拟河网水位演变的基础上,可以通过水位变化来确定最终的水文失事概率。在实践层面上,可以利用该水文失事概率评估得到的期望损失结果进行多个河网调度方案的优选。通过模拟各重现期河道水位,进行基于效益-成本分析的堤防加高方案决策,其结果可以作为河网地区汛期到达前堤顶加高物资准备的依据。为保证 200 a 及以上重现期降雨情况计算的准确性,相关数据的收集与分析有待进一步研究。

参考文献:

[1] 李青云,张建民. 长江堤防安全评价的理论方法和实现策略[J]. 中国工程科学,2005,7(6):7-13.

- [3] 徐祖信. 我国河流单因子水质标识指数评价方法研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2005, 33(3): 321 – 325.
- [4] 李录娟, 邹胜章. 综合指数法和模糊综合法在地下水质量评价中的对比——以遵义市为例[J]. 中国岩溶, 2014, 33(1): 22 – 30.
- [5] 程继雄, 程胜高, 张 炜. 地下水质量评价常用方法的对比分析[J]. 安全与环境工程, 2008, 15(2): 23 – 25.
- [6] 齐 济, 李 岩, 李德峰. 基于改进 AHP 法定权的模糊优选模型在地下水水质评价中的应用[J]. 华北水利水电学院学报, 2002, 23(2): 4 – 7.
- [7] 陈守煜, 徐冬梅, 邱 林. 地下水水质评价可变模糊评价法[J]. 中国农村水利水电, 2011(3): 1 – 5.
- [8] 寇文杰. 修正的模糊综合评判法在地下水水质评价中的应用[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(2): 71 – 75.
- [9] 安 达, 姜永海, 杨 昱, 等. 海明距离模糊法在垃圾填埋场地下水质量评价中的应用[J]. 环境工程技术学报, 2013, 3(2): 119 – 123.
- [10] 王橧橧, 吴勇, 古广华. 四川省德阳市地下水水质模糊数学综合评价[J]. 地质灾害与环境保护, 2011, 22(1): 51 – 55 + 62.
- [11] 杨小芳, 王任超, 张 蔚. 基于模糊数学的岩溶水质评价[J]. 科技信息, 2009(20): 83 – 84.
- [12] 李春萍, 李国学, 罗一鸣, 等. 北京市 6 座垃圾填埋场地下水环境质量的模糊评价[J]. 环境科学, 2008, 29(10): 2729 – 2735.
- [13] 中华人民共和国农业部. SC/T9102.3 – 2007 渔业生态环境监测规范[S]. 中国农业出版社, 2007.
- [14] Wu Huimin, Zhang Wei, Liang Chuanhui, et al. Application of fuzzy comprehensive evaluation method based on entropy weight to evaluate pond water quality[J]. Agricultural Science & Technology, 2012, 13(3): 664 – 668.
- [15] 国家环境保护总局. GB 3838 – 2002 地表水环境质量标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [16] 潘妍妍, 赵 存. 模糊评价法在潞安矿区水质评价中的应用[J]. 煤炭技术, 2010, 29(5): 10 – 12.
- [17] 王金保, 侯得印. 水质模糊综合评价模型的建立与应用[J]. 中国给水排水, 2006, 22(20): 101 – 104.
- [18] 王铁凤, 潘孝辉. 熵权模糊数学方法在水质评价中的应用[J]. 山西建筑, 2010, 36(14): 359 – 360.
- [19] 李晓钰, 于洪贤, 马成学. 松花江哈尔滨段浮游植物群落典范对应分析及多样性分析[J]. 东北林业大学学报, 2013, 41(10): 103 – 107.
- [20] 张晓举, 王丕波, 冯春辉, 等. 辽河口浮游植物的生态学研究[J]. 海洋环境科学, 2013, 32(5): 679 – 682.
- [21] 孙志强, 施心路, 徐琳琳, 等. 景观湿地夏季原生动群落结构与水质关系[J]. 水生生物学报, 2013, 37(2): 290 – 299.
- [22] 魏 鹏, 林秋奇, 胡 韧, 等. 高州水库水质与浮游生物动态分析[J]. 应用与环境生物学报, 2002, 8(2): 165 – 170.
- [23] 代龚圆, 李 杰, 李 林, 等. 滇池北部湖区浮游植物时空格局及相关环境因子[J]. 水生生物学报, 2012, 36(5): 946 – 956.
- [24] 王晓清, 曾亚英, 吴含含, 等. 湘江干流浮游生物群落结构及水质状况分析[J]. 水生生物学报, 2013, 37(3): 488 – 494.

(上接第 89 页)

- [2] 姜树海, 范子武, 吴时强. 洪灾风险评估和防洪安全决策[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
- [3] 解家毕, 孙东亚. 事件树法原理及其在堤坝风险分析中的应用[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2006, 4(2): 133 – 137.
- [4] 张清明, 徐 帅, 周 杨. 堤防工程安全评价单元堤段划分方法研究[J]. 人民黄河, 2012, 34(1): 16 – 18.
- [5] 夏仲平, 赵坤云, 张文武. 青海玉树震损水利工程查勘与应急处置[J]. 人民长江, 2010, 41(14): 6 – 8 + 19.
- [6] 江越进. 水下模袋混凝土护岸在堤防应急除险工程中的应用[J]. 甘肃水利水电技术, 2005, 41(3): 269 – 270 + 308.
- [7] 张学志, 田玉华. 土工格栅石笼在洮儿河堤防应急度汛上的应用[J]. 吉林水利, 2006(11): 52 – 53.
- [8] 邢万波, 徐卫亚, 王 凯, 等. 外秦淮河堤防水文失事风险分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2006, 34(3): 262 – 266.
- [9] 曲红玲. 河道溃堤与溃堤波的一、二维耦合计算数值模拟[J]. 水利水运工程学报, 2007(4): 49 – 54.
- [10] 王腊春, 江 南, 周寅康, 等. 太湖流域洪涝灾害评估模型[J]. 测绘科学, 2003, 28(2): 35 – 38.
- [11] 史香阁, 郑文新, 王学武. 堤防漫顶和决口的传统抢险技术[J]. 河北水利水电技术, 1998(4): 26 – 28.