

饶为胜, 杜成斌, 江守燕, 等. 土坝震害分类快速预测的模糊概率方法[J]. 灾害学, 2017, 32(2): 206–209, 214. [RAO Weisheng, DU Chengbin, JIANG Shouyan, et al. Fuzzy Probability Method for Fast Predicting Earthquake Damagetype of Earth Dam [J]. Journal of Catastrophology, 2017, 32(2): 206–209, 214. doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2017.02.036.]

土坝震害分类快速预测的模糊概率方法^{*}

饶为胜, 杜成斌, 江守燕, 钱向东

(河海大学工程力学系, 江苏 南京 210098)

摘 要: 为了进行土坝震害类别的快速预测, 使用模糊概率方法建立震害预测模型。将坝型、坝料、坝基、施工质量、水深比和地震烈度作为影响因子, 引入模糊动态权重, 建立了土坝震害分类预测模型。模型反映了土坝震害影响因子权重的模糊性和动态性, 更加符合实际。采用该模型对历次地震中的30座土坝震害情况进行了分类预测, 预测结果与实际震害较为一致, 表明该模型具有较高精度, 具有实用价值。

关键词: 土坝; 震害预测; 模糊概率; 模糊权重

中图分类号: X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–811X(2017)02–0206–05

doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2017.02.036

土坝在我国分布广泛, 其中以小型土坝为主。在历次大地震中, 这一类土坝均是受灾最为严重的水利设施。小型土坝在遭遇地震后, 其破坏形式往往表现为坝体裂缝、滑坡、渗漏和附属设施损坏等。这些受损土坝一旦不及时处理, 其破坏可能会随着时间的推移进一步加重, 从而导致溃坝, 造成严重的人民生命财产损失。在震后救灾工作中, 快速进行受损土坝的震害程度预测, 确定震损土坝的破坏等级, 可以为合理分配救灾资源提供帮助。因此, 土坝震害快速预测方法的研究在震后救灾工作中具有重要地位。

我国对土石坝震害快速预测方法的研究起步较晚。目前, 对单体土坝进行快速震害预测的方法主要有以下几种: ①运用数理统计方法, 将震害指数作为因变量, 震害因子作为自变量, 进行统计回归分析, 进而得到震害预测的经验公式^[1]; ②建立模糊矩阵和震害因子权重集, 利用模糊综合评判法进行单体土坝震害的快速预测^[2]; ③基于BP算法的人工神经网络方法^[3]; ④灰色综合评判法^[4]。数理统计方法主要依靠震害与震害影响因子间的关系进行预测, 但这种关系往往是复杂而且不确定的, 这种方法不能很好的考虑土坝震害中的随机性和模糊性; 利用模糊综合评判法进行预测时, 震害等级与影响因子间的模糊关系可以充分的被模糊矩阵所反映, 但是在该方法中, 权重集是一组确定数, 而实际上, 权重应该是一个不断变化的模糊数, 这一缺陷使得在土坝震害预测中使用模糊综合评判法是不尽合理的; 人工

神经网络方法可以充分考虑震害与震害影响因子间的复杂关系以及这种关系的模糊性, 但这种方法需要大量的基础性震害数据对系统进行训练, 而且存在收敛速度慢的缺点; 基于灰色理论的灰色综合评判法, 对原始数据的离散程度很敏感, 当原始数据序列有较大波动且信息过于离散时, 其预测精度将会降低。综上所述, 考虑到影响土坝震害的因素具有复杂性和不确定性的特点, 这种不确定性, 有的是由于影响因子的随机性引起的, 有的是由于影响因子自身所固有的模糊性引起的^[5]。因此, 利用模糊数学中的模糊概率理论来进行土坝的震害预测是更加合理的。本文尝试将模糊概率理论应用于土坝震害预测中, 并用模糊动态权重代替权重, 从而避免权重取值的不确定性带来的评判失误, 使该模型更加合理。

1 模糊概率理论及震害预测模型

1.1 模糊概率理论

模糊与概率的关系包括三种类型: 一类是事件本身是模糊的, 而概率值是普通数值, 称为模糊事件的概率; 另一类是事件本身明确, 但概率是模糊的, 称为事件的模糊概率; 再一类则是事件和概率都是模糊的, 称为模糊事件的模糊概率^[6]。本文中, 土坝震害预测这一事件可以描述为: 预测在一定地震作用下, 可能出现的土坝破

^{*} 收稿日期: 2016–09–11 修回日期: 2016–10–24

基金项目: 国家科技支撑项目资助(NO. 2015BAB07B10)

第一作者简介: 饶为胜(1991–), 男, 湖北黄冈人, 硕士, 主要从事土石坝抗震研究. E-mail: raoweisheng@hhu.edu.cn

通讯作者: 杜成斌(1965–), 男, 江苏盐城人, 教授, 博士生导师, 主要从事混凝土坝抗震分析. E-mail: cbdu@hhu.edu.cn

坏的程度。震害程度可以用基本完好、轻微破坏、中等破坏、严重破坏和毁坏 5 个等级来描述^[7]。因此,这属于模糊事件的模糊概率的范畴。

模糊事件可以用基本空间的模糊子集表示,对于模糊事件的模糊概率可以利用以下公式计算:

$$p(A) = A(u_1)p_1 + A(u_2)p_2 + \cdots + A(u_n)p_n. \quad (1)$$

式中: $u_i \in U$, U 为有限集合, A 为 U 的模糊子集, $A(u_i)$ 为隶属函数, p_i 为其通常意义下的概率测度。

对于模糊概率,不是像经典概率用 $[0, 1]$ 中的数表示,而是将普通概率模糊化,用模糊语言来描述。所以,又将事件的模糊概率称为模糊语言概率,简称为语言概率。由于经典概率 $p \in [0, 1]$, 故语言概率是以 $[0, 1]$ 为论域的模糊子集,它的值域称为语言概率的值空间,记为 ε , 概率语言值是 ε 中的元素。语言概率值空间要满足两个条件: ①具有一定的语言特点; ②能适应概率运算的要求。也就是说, ε 是一个模糊语言系统,在这个系统中包含若干原始单词,它们对模糊算子运算封闭。即: 在系统中的任一概率语言值,经过逻辑运算和模糊算子作用后仍在系统中——还是概率语言值。

为了将概率语言值的支集限制在 $[0, 1]$ 内,概率语言值的运算法则定义如下:

定义 1 设 $\pi_i \in \omega$, $a_i \in [0, 1]$, $i = 1, 2, \dots, n$, 则 $\{\pi_i\}$ 的线性组合被定义成为一个模糊语言值:

$$(a_1\pi_1 + a_2\pi_2 + \cdots + a_n\pi_n)(p) \triangleq \bigvee_{\substack{a_1p_1 + \cdots + a_np_n = p \\ p_1 + \cdots + p_n = 1}} (\pi_1(p_1) \wedge \cdots \wedge \pi_n(p_n)). \quad (2)$$

式中: 算子“ \vee ”表示“加”的运算, 算子“ \wedge ”表示“取小”的运算。

因此, π_1, \dots, π_n 的线性组合仍将支集限制在 $[0, 1]$ 内, 即: 概率语言值对于这样规定的运算是封闭的。

对于模糊事件的模糊概率的计算,只需将公式(1)中的普通概率测度 p_i 用模糊概率 π_i 替换, 即:

$$p(A) = A(u_1)\pi_1 + A(u_2)\pi_2 + \cdots + A(u_n)\pi_n. \quad (3)$$

1.2 土坝震害预测模型

结合模糊概率理论和土坝震害的特点,土坝震害预测的步骤可以概括如下。

(1) 确定土坝震害的主要影响因子 u_i ($i = 1, 2, \dots, n$), 建立评判影响因子集合 U , 即:

$$U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}. \quad (4)$$

(2) 利用历史资料, 确定主要震害影响因子 u_i 与震害等级 A_j ($j = 1, 2, \dots, q$) 间的模糊关系, 选择合适的隶属函数 $A_j(u_i)$, 即确定了震害等级 A_j 是影响因子集合 U 的一个模糊子集:

$$A_j = \frac{A_j(u_1)}{u_1} + \frac{A_j(u_2)}{u_2} + \cdots + \frac{A_j(u_n)}{u_n}. \quad (5)$$

式中: $A_j(u_i)$ 为影响因子 u_i 对震害等级 A_j 的隶属度。

(3) 确定土坝震害影响因子的权重集, 即: $R = \{\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n\}$ 。在本文中, 将模糊权重引入到土坝震害预测模型中, 把 π_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 处理为模糊权重(模糊数), 即:

$$\pi_i = \frac{\beta_{i1}}{\lambda_{i1}} + \cdots + \frac{\beta_{im}}{\lambda_{im}} + \frac{1}{\lambda_{i0}} + \frac{\beta_{i,m+1}}{\lambda_{i,m+1}} + \cdots + \frac{\beta_{i,2m}}{\lambda_{i,2m}}. \quad (6)$$

式中: $\sum_{i=1}^n \lambda_{i0} = 1$; $\{\lambda_{i1}, \dots, \lambda_{im}, \lambda_{i0}, \lambda_{i,m+1}, \dots, \lambda_{i,2m}\}$ 为模糊数 π_i 的论域, β_{ij} ($j = 1, 2, \dots, 2m$) 及 1 分别为相应的隶属度, λ_{ij} 和 β_{ij} 可以根据实际情况合理取值。

(4) 利用公式(2)和(3)计算单体土坝的各震害等级 A_j 的模糊概率 $p(A_j)$, 即:

$$p(A_j) = A_j(u_1)\pi_1 + A_j(u_2)\pi_2 + \cdots + A_j(u_n)\pi_n \triangleq \bigvee_{\substack{A_j(u_1p_1 + \cdots + A_j(u_n)p_n \\ p_1 + \cdots + p_n = 1}} (\pi_1(p_1) \wedge \cdots \wedge \pi_n(p_n)) \quad (7)$$

(5) 利用信息集中原则确定震害评判结果。信息集中原则可以表述为, 若第 j 个震害等级 A_j 的模糊概率为:

$$p(A_j) = \frac{\alpha_{j1}}{x_{j1}} + \frac{\alpha_{j2}}{x_{j2}} + \cdots + \frac{\alpha_{jk}}{x_{jk}}. \quad (8)$$

式中: α_{ji} ($i = 1, 2, \dots, k$) 为 x_{ji} 的隶属度。记:

$$\sigma_j = \sum_{i=1}^k \alpha_{ji} x_{ji}. \quad (9)$$

对上式进行归一化处理, 即:

$$\bar{\sigma}_j = \sigma_j / \sum_{i=1}^q \sigma_i. \quad (10)$$

根据信息集中最大原则, 如果:

$$\sigma_N = \max_{j=1,2,\dots,q} [\bar{\sigma}_j]. \quad (11)$$

则: 震害等级为 A_N 。

2 土坝震害预测的模糊概率方法

2.1 土坝震害的主要影响因子

影响土坝震害的因素众多, 但考虑到现场勘察的简便性要求, 一般只考虑几个比较重要的影响因素, 这样也可以避免因指标过多而导致的各指标权重分配过小的问题。在袁一凡的模型中^[7], 考虑了坝型、坝料、坝基、液化、施工质量和地震烈度六个影响因子, 张丽娜将其中的液化去掉, 得到了一个改进模型^[8]。但是, 地震时坝前水位作为一项重要影响因素, 应该被考虑进模型, 此处用地震时坝前水深与坝高之比表征这个影响因子, 简称水深比。综合所述, 本文将坝型、坝料、坝基、施工质量、水深比和地震烈度作为影响因子, 即:

$$U = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6\} = \{\text{坝型, 坝料, 坝基, 施工质量, 水深比, 地震烈度}\}. \quad (12)$$

2.2 隶属度的确定

2.2.1 震害影响因子与震害等级的模糊关系

震害影响因子与震害等级之间的关系是复杂而且不确定的。有些学者直接利用震害历史数据,按照震害等级划分,以每一个震害等级中各个震害因子的均值作为阈值,以此代表震害等级与震害因子间的关系^[9];另外有些学者利用历史数据,直接建立了各个震害因子与震害等级间的函数关系^[2]。对于前者,由于缺乏土坝在毁坏情况下的历史数据,往往无法建立完整的模糊关系;对于后者,由于直接用数学函数表达式表示震害等级与震害因子间的关系,忽略的这种关系的模糊性,得到的数据有严重失真的可能。针对这些不足,本文结合这两种方法,综合考虑,采用文献^[8]中对坝型、坝料、坝基和施工质量的量化标准,得出的模糊关系如表1所示。

表1 影响因子与震害等级的模糊关系

	基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	毁坏
坝型 u_1	≤ 1.57	1.73	1.78	2.04	≥ 2.5
坝料 u_2	≤ 1.15	1.42	1.89	2.26	≥ 2.67
坝基 u_3	≤ 1.43	1.79	2.12	2.58	≥ 3
施工质量 u_4	≤ 1.43	1.91	2.11	2.5	≥ 3.37
水深比 u_5	≤ 0.35	0.47	0.55	0.64	≥ 0.7
地震烈度 u_6	≤ 6.91	7.48	8.15	9.25	≥ 10.5

2.2.2 隶属函数及模糊矩阵的确定

在土坝震害预测中,震害等级是用语言描述的,这里采用五态准则对土坝震害情况进行分级,分级标准如表2所示,由此建立土坝震害等级集合:

$A = \{A_1, A_2, A_3, A_4, A_5\} = \{\text{基本完好, 轻微破坏, 中等破坏, 严重破坏, 毁坏}\}$ 。(13)

表2 土坝震害等级划分标准

震害等级	震害轻重	修复难易
基本完好	大坝基本完好, 附属建筑物略有损害	经简单处理, 即可正常使用
轻微破坏	局部出现裂缝, 未贯穿; 没有出现超过50cm的沉陷	经短时间修理, 可恢复使用
中等破坏	坝体出现贯穿裂缝, 渗漏量增大, 或出现大面积滑坡	需要大修, 一年之内可投入使用
严重破坏	出现深度很大的贯穿裂缝, 渗漏量增大, 出现大面积滑坡	需要按基建程序进行大修
毁坏	坝体垮塌, 无法继续蓄水	重修

由震害等级的描述可知,震害等级是一个模糊的语言描述,它是影响因子论域 U 的一个模糊子集,其隶属度由各个影响因子与震害等级之间的隶属函数决定。常见的隶属函数一般有三角形分布、梯形分布、正态分布和岭形分布等。考虑到土坝的地震破坏机制尚不是很清楚,各震害因子与土坝震害的具体联系尚无法确定,本文采用三角形隶属函数计算隶属度,具体表达式如下:

$$A_1(U_i) = \begin{cases} 1, & u_i \leq a_{1i}; \\ \frac{u_i - a_{1i}}{a_{2i} - a_{1i}}, & a_{1i} < u_i < a_{2i}; \\ 0, & u_i \geq a_{2i}. \end{cases} \quad (14)$$

$$A_j(u_i) = \begin{cases} 0, & u_i \leq a_{j-1,i}; \\ \frac{u_i - a_{j-1,i}}{a_{ji} - a_{j-1,i}}, & a_{j-1,i} < u_i \leq a_{ji}; \\ \frac{a_{j+1,i} - u_i}{a_{j+1,i} - a_{ji}}, & a_{ji} < u_i < a_{j+1,i}; \\ 0, & u_i \geq a_{j+1,i}. \end{cases} \quad (j=2, 3, 4) \quad (15)$$

$$A_5(u_i) = \begin{cases} 0, & u_i \leq a_{5i}; \\ \frac{u_i - a_{5i}}{a_{5i} - a_{5i}}, & a_{5i} < u_i < a_{5i}; \\ 1, & u_i \geq a_{5i}. \end{cases} \quad (16)$$

式中: a_{ji} ($i=1, 2, \dots, 6$) 为相应影响因子的阈值,具体取值见表1。

2.3 模糊权重集的确定

对于各个影响因子的实数型权重的取值,已经有很多学者进行了研究,这里参考文献^[8-9]对影响因子权重的取值,并进行综合,本文采用如下的模糊权重:

$$\pi_1 = \text{“接近于0.05”} = \frac{\beta_{11}}{0.03} + \frac{\beta_{12}}{0.04} + \frac{1}{0.05} + \frac{\beta_{13}}{0.06} + \frac{\beta_{14}}{0.07};$$

$$\pi_2 = \text{“接近于0.2”} = \frac{\beta_{21}}{0.1} + \frac{\beta_{22}}{0.15} + \frac{1}{0.2} + \frac{\beta_{23}}{0.25} + \frac{\beta_{24}}{0.3};$$

$$\pi_3 = \text{“接近于0.1”} = \frac{\beta_{31}}{0.04} + \frac{\beta_{32}}{0.06} + \frac{1}{0.1} + \frac{\beta_{33}}{0.08} + \frac{\beta_{34}}{0.12};$$

$$\pi_4 = \text{“接近于0.3”} = \frac{\beta_{41}}{0.2} + \frac{\beta_{42}}{0.25} + \frac{1}{0.3} + \frac{\beta_{43}}{0.35} + \frac{\beta_{44}}{0.4};$$

$$\pi_5 = \text{“接近于0.05”} = \frac{\beta_{51}}{0.03} + \frac{\beta_{52}}{0.04} + \frac{1}{0.05} + \frac{\beta_{53}}{0.06} + \frac{\beta_{54}}{0.07};$$

$$\pi_6 = \text{“接近于0.3”} = \frac{\beta_{61}}{0.2} + \frac{\beta_{62}}{0.25} + \frac{1}{0.3} + \frac{\beta_{63}}{0.35} + \frac{\beta_{64}}{0.4}。$$

式中:系数 β_{ij} ($i=1, 2, 3, 5; j=1, 2, 3, 4$) 均取0.7,以此反映影响因子 u_i ($i=1, 2, 3, 5$) 权重的模糊性。由于施工质量和地震烈度对震害等级的影响较大,为了反映真实情况下影响因子间的耦合效应,这里采用动态模糊权重,其系数取值如表3所示。

表3 系数取值

地震烈度	VI	VII	VIII	IX	X	XI
β_{1i} ($i=4, 6$)	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4
β_{2i} ($i=4, 6$)	0.8	0.7	0.7	0.6	0.6	0.5
β_{3i} ($i=4, 6$)	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8
β_{4i} ($i=4, 6$)	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9

综上所述,震害影响因子权重具有模糊性和动态性的特点。本文通过对权重进行模糊化和动态化处理,从而可以将模糊概率理论应用于土坝震害预测中,而且更加符合实际情况。

表 4 土坝震害预测实例

序号	实例	影响因子					实际震害等级	模糊概率综合评判法			
		坝型	坝料	坝基施工质量	水深比	地震烈度		归一化后的信息集中值		评判结果	
1	1970 年通海 7.8 级地震	通海三岔河	2	1	2	2	0.95	VIII	2	(0.2, 0.27, <u>0.44</u> , 0.04, 0.05)	3
2		建水山后	1	2	3	3	0.81	VIII	3	(0.05, 0.07, <u>0.37</u> , 0.19, 0.32)	3
3		建水老红山	1	1	1	1	0.15	IX	1	(<u>0.7</u> , 0, 0.07, 0.23, 0)	1
4	1975 年海城 7.3 级地震	海城苇子沟	1	2	2	2	0.89	IX	3	(0.05, 0.2, <u>0.41</u> , 0.29, 0.05)	3
5		海城王家坎	1	2	3	3	0.6	IX	4	(0.05, 0, 0.23, <u>0.45</u> , 0.27)	4
6	1976 年唐山 7.8 地震	北京密云	3	3	2	1	0.65	VI	1	(<u>0.59</u> , 0.04, 0.07, 0.04, 0.27)	1
7		迁西房官营	2	1	1	1	0.25	VII	1	(<u>0.9</u> , 0.05, 0.01, 0.04, 0)	1
8		卢龙沙河	3	1	1	1	0.43	VII	1	(<u>0.87</u> , 0.08, 0, 0, 0.05)	1
9		抚宁黄金山	1	1	1	1	0.38	VII	1	(<u>0.94</u> , 0.06, 0, 0, 0)	1
10		迁安麻地	1	1	1	1	0.33	VII	1	(<u>0.95</u> , 0.05, 0, 0, 0)	1
11		迁安万宝沟	1	2	1	1	0.2	VII	1	(<u>0.75</u> , 0.05, 0.14, 0.06, 0)	1
12		玉田围子沟	1	1	1	2	0.44	VII	1	(<u>0.62</u> , 0.25, 0.13, 0, 0)	1
13		迁西马家沟	3	2	1	2	0.36	VII	2	(<u>0.4</u> , 0.21, 0.28, 0.06, 0.05)	1
14		迁西黑佳	3	1	1	2	0.57	VII	1	(0.56, 0.21, 0.17, 0.01, 0.05)	1
15		迁西长山沟	2	1	2	2	0.4	VII	1	(0.48, 0.27, 0.21, 0.04, 0)	1
16		蓟县于桥	1	2	3	2	0.52	VII	2	(0.3, 0.23, <u>0.31</u> , 0.06, 0.1)	3
17		卢龙亮甲欲	3	2	2	2	0.54	VII	3	(0.25, 0.25, <u>0.39</u> , 0.06, 0.05)	3
18		卢龙迷谷	2	1	1	2	0.38	VIII	2	(0.34, 0.24, <u>0.37</u> , 0.04, 0)	3
19		抚宁曹西庄	2	1	2	1	0.55	VII	1	(<u>0.75</u> , 0.08, 0.12, 0.04, 0)	1
20		卢龙马家沟	3	1	1	1	0.36	VII	1	(<u>0.9</u> , 0.05, 0, 0, 0.05)	1
21		昌黎果香	1	1	2	1	0.54	VII	1	(<u>0.8</u> , 0.09, 0.11, 0, 0)	1
22		遵化接官厅	3	1	1	1	0.75	VII	1	(<u>0.85</u> , 0.05, 0, 0, 0.1)	1
23	1976 年和林格尔 6.2 级地震	内蒙永兴	1	2	2	1	0.41	VI	1	(<u>0.66</u> , 0.06, 0.21, 0.06, 0)	1
24		内蒙石峡口	4	1	1	1	0.21	VI	1	(<u>0.95</u> , 0, 0, 0, 0.05)	1
25		内蒙红崖沟	4	1	2	2	0.41	VI	1	(<u>0.53</u> , 0.22, 0.2, 0, 0.05)	1
26	1976 年龙陵 7.4 级地震	龙陵木鱼坡	1	1	1	1	0.56	VIII	1	(<u>0.65</u> , 0.07, 0.27, 0.01, 0)	1
27	2008 年汶川 8.0 级地震	和平	1	2	2	3	0.95	VIII	3	(0.05, 0.1, <u>0.44</u> , 0.19, 0.22)	3
28		安家嘴	1	2	2	3	0.81	VIII	3	(0.05, 0.1, <u>0.44</u> , 0.19, 0.22)	3
29		上游	1	2	2	3	0.81	VIII	3	(0.05, 0.1, <u>0.44</u> , 0.19, 0.22)	3
30		狮儿河	1	2	3	4	0.83	VIII	4	(0.05, 0.07, 0.37, 0.06, <u>0.45</u>)	5

3 土坝震害预测实例

为了对本文方法的合理性和可靠性进行验证, 从土坝震害的资料中随机抽取了 30 组数据, 利用模糊概率方法进行分析^[10-11], 计算过程可以通过程序快速实现。对预测结果和实际震害等级进行了对比(表 4)。从表 4 中的预测结果来看, 30 例震害数据中, 有 25 例的预测结果与实际震害等级完全吻合, 其余 5 例的预测结果与实际震害等级均只相差一个等级。另外, 以第一组数据为例, 由归一化后的信息集中值可以看到, 虽然评判结果为中等破坏, 但是偏向于轻微破坏, 这与实际震害等级是一致的。

4 结论

本文将权重处理为模糊权重(模糊数), 从而把模糊概率理论引入到土坝震害预测中, 建立了土坝震害预测的模糊概率方法。事实上, 土坝震

害评估中各个影响因子权重取值具有模糊性和动态性的特点, 采用模糊动态权重更加符合实际情况。通过对历次地震中的 30 座受损土坝震害等级进行评估, 表明该方法具有较高的准确率, 而且可以给出土坝震害的趋势。因此, 将该方法应用于土坝震害预测是有效而且合理的。

参考文献:

- [1] 黄代清. 土坝震害预测[J]. 云南农业大学学报, 1992, 7(1): 1-5.
- [2] 梁海安. 土石坝震害预测及快速评估方法研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2012: 9-11, 105-124.
- [3] 常宝琦, 梁纪彬. 土坝的震害预测——人工神经网络方法的应用[J]. 华南地震, 1998, 18(1): 71-75.
- [4] 刘春辉, 景冰冰, 李永强. 土石坝震害快速评估方法研究[J]. 地震工程与工程振动, 2013, 33(2): 156-162.
- [5] 刘章军, 叶燎原. 基于模糊概率的震害预测模型及其应用[J]. 自然灾害学报, 2005, 14(4): 115-120.
- [6] 杨纶标, 高英仪. 模糊数学原理及应用[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2001: 212-216.

(下转第 214 页)

Study on $PM_{2.5}$ Concentration Model of the Cities in Hebei Province

ZHU Chuangye, ZHANG Haofei and WANG Yong

(*School of Geology and Geomatics, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China*)

Abstract: $PM_{2.5}$ concentrations sequence for many years can be used to temporal and spatial evolution characteristic of regional air pollution. Due to the short data of the existing $PM_{2.5}$ concentrations, it is necessary to construct a $PM_{2.5}$ concentration model. Taking the example of Hebei province, it was selected six cities with different air pollution levels (Xingtai, Baoding, Chengde, Zhangjiakou, Tangshan and Qin hangdao) to construct the models of $PM_{2.5}$ concentration. Using the observation data of $PM_{2.5}$, PM_{10} and gaseous pollutants from 2013 to 2016, it was analyzed the correlation between $PM_{2.5}$, PM_{10} and gaseous pollutants. There was notable positive correlation existing in PM_{10} , NO_2 , SO_2 and CO , and negative correlation in O_3 . It was constructed the models of $PM_{2.5}$ concentrations in different cities based on PM_{10} and gaseous pollutants by using the stepwise regression analysis method. There was a high correlation of $PM_{2.5}$ concentration between the predicted value and the measured value which the average deviation was better than 3. $5\mu g/m^3$. Indeed, the $PM_{2.5}$ concentration model is in agreement with its observed values.

Key words: $PM_{2.5}$; correlation analysis; stepwise regression; gaseous pollutants; Hebei

(上接第 209 页)

- [7] 袁一凡. 岩土工程结构震害预测方法研究[R]. 哈尔滨: 中国地震工程力学研究所, 2000: 3-22.
- [8] 郭恩栋, 张丽娜, 王亚东, 等. 土坝震害评估模型研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(12): 3667-3671.
- [9] 伍阳. 土石坝震害分析及震害预测[D]. 广州: 广州大学,

2013: 50-58.

- [10] 刘春辉. 中小土石坝震害评估方法研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2012: 27-34.
- [11] 何丹, 刘超. 基于统计分析的土石坝震害预测[J]. 大坝与安全, 2010(6): 21-26.

Fuzzy Probability Method for Fast Predicting Earthquake Damage Type of Earth Dam

RAO Weisheng, DU Chengbin, JIANG Shouyan and QIAN Xiangdong

(*Department of Engineering Mechanics, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract: For the fast prediction to the kind of earthquake damage to earth dams, we use fuzzy probability method to establish seismic damage prediction model. Taking the type, the material, the base condition, construction quality, the water deep ratio and the seismic intensity as influence factors, we built a dividing model to predict earthquake damage of earth dams by introducing fuzzy dynamic weighted value. At the same time, the introduction of fuzzy dynamic weighted value can reflect the fuzzy and dynamic of earth dam better, which is more realistic. Taking this method to predict the earthquake damage of 30-earth dam from previous earthquake, the results show that the method has high accuracy, and has practical value.

Key words: earth dam; earthquake damage prediction; fuzzy probability; fuzzy weighted values