朱创业，张昊斐，王勇. 河北省城市 $PM_{2.5}$ 浓度模型构建研究[J]. 灾害学，2017，32(2)：210 - 214. [ZHU Chuangye, ZHANG Haofeiand and WANG Yong. Study on $PM_{2.5}$ Concentration Model of the Cities in Hebei Province[J]. Journal of Catastrophology，2017，32(2)：210 - 214. doi：10. 3969/j. issn. 1000 - 811X. 2017. 02. 037.]

河北省城市 $PM_{2.5}$ 浓度模型构建研究*

朱创业，张昊斐，王 勇

（天津城建大学地质与测绘学院，天津 300384）

摘 要： 多年 $PM_{2.5}$ 浓度序列可用于区域大气污染的时空演变特征分析，现有 $PM_{2.5}$ 浓度监测数据积累时间短，有必要构建 $PM_{2.5}$ 浓度模型。以河北省为例，选择空气污染程度不同的 6 个城市（邢台、保定、承德、张家口、唐山、秦皇岛），开展河北省城市 $PM_{2.5}$ 浓度模型构建研究。利用 2013 - 2016 年的 $PM_{2.5}$ 浓度与 PM_{10}、大气污染物（SO_2、NO_2、CO 和 O_3）观测数据，分析 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10}、大气污染物（SO_2、NO_2、CO 和 O_3）相关性，$PM_{2.5}$ 浓度与 PM_{10}、NO_2、SO_2 和 CO 呈显著正相关，与 O_3 呈负相关。利用逐步多元回归方法分析构建基于 PM_{10} 与气态污染物的 $PM_{2.5}$ 浓度模型，模型预测 $PM_{2.5}$ 浓度与实测 $PM_{2.5}$ 浓度序列存在较高的相关性，平均偏差优于 3.5 $\mu g/m^3$。河北省城市 $PM_{2.5}$ 浓度模型预测值与 $PM_{2.5}$ 浓度观测值基本吻合。

关键词： $PM_{2.5}$；相关性分析；逐步回归；气态污染物；河北

中图分类号： X43；X513 **文献标志码：** A **文章编号：** 1000 - 811X(2017)02 - 0210 - 05

doi：10. 3969/j. issn. 1000 - 811X. 2017. 02. 037

随着工业化进程的加快和城市化建设的持续推进，城市大气污染物及颗粒污染物浓度增加，重度污染天气频发。$PM_{2.5}$ 微颗粒是重度污染天气形成的重要物质，因严重危害人们的身体健康而备受研究者的广泛关注。河北省作为环京津地区，地理位置重要，近年来霾天气的 激增备受人们的诟病，在环保部门公布的 2013、2014、2015 年全国 74 个城市空气质量状况中，河北省的石家庄、唐山、邢台、邯郸、保定、衡水连续 3 年进入污染最严重的 10 个城市榜单[1-3]。在 2016 年 5 月 14 日，世界卫生组织公布了的 2016 版世界城市空气质量数据库中显示，邢台、保定进入全球细颗粒物（$PM_{2.5}$）污染前 10 位[4]。目前国内外不少专家学者针对我国华北重点污染城市的主要污染物浓度变化开展了 $PM_{2.5}$ 的来源及形成机理研究[5-7]。定量化的 $PM_{2.5}$ 浓度序列有助于研究区域的大气污染时空演变特征。我国 $PM_{2.5}$ 的连续观测始于 2012 年，利用现有的 $PM_{2.5}$ 观测数据研究区域大气污染时空演变特征受观测年限短的限制[8]。为获得区域大气污染时空演变特征，有必要构建 $PM_{2.5}$ 浓度模型。$PM_{2.5}$ 微颗粒是组成 PM_{10} 颗粒的重要来源，气态污染物（SO_2、NO_2、CO 等）是在一定环境条件下形成 $PM_{2.5}$ 的主要气态物质[9-11]，且观测工作开展较早，故可以利用 PM_{10} 与气态污染物构建 $PM_{2.5}$ 浓度模型。

本文拟以河北省为例，利用 2013 - 2016 年的空气质量监测数据，开展 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10}、SO_2、NO_2、CO、O_3 相关性分析，在此基础上构建基于 PM_{10} 与气态污染物的 $PM_{2.5}$ 浓度模型，并对模型的可靠性进行检验。

1 研究区域选择及研究数据来源

1.1 研究区域选择

河北是全国 $PM_{2.5}$ 污染最为严重的区域，污染呈南高北低的走势[12]，邢台、保定市是河北南部雾霾最为严重的城市；张家口、承德市受季风影响整体空气质量较好；唐山市是重工业城市，污染严重；秦皇岛是沿海城市，受海洋传输影响空气质量较好[13]。从污染严重性、地理位置、城市类型、气候等因素考虑，本文选择以上 6 个城市为研究区，开展 $PM_{2.5}$ 浓度模型研究。

1.2 研究数据来源

通过天气后报（http：//www. tianqihoubao. com/aqi/）下载了 2013 年 10 月 28 日 - 2016 年 3 月 15 日邢台、保定、承德、张家口、唐山、秦皇岛 6 个城市的空气质量监测数据。选取 6 项指标 $PM_{2.5}$、PM_{10}、SO_2、NO_2、O_3、CO 的日均浓度值

* 收稿日期：2016 - 08 - 02 修回日期 2016 - 09 - 14

基金项目：河北省自然科学基金（D2015209024））；天津城建大学大学生科研立项（156410）

第一作者简介：朱创业（1992 - ），男，河南夏邑人，本科生，主要从事 GPS 气象学研究. E-mail：937276576@ qq. com

通讯作者：王勇（1978 - ），男，江西宁都人，博士，教授，主要从事 GPS 气象学研究. E-mail：wangyongjz@ 126. com

（CO 浓度单位为 mg/m^3，其他观测要素的单位为 μg/m^3）。以上数据均用于 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10}、SO_2、NO_2、CO、O_3 相关性分析。本文还将开展 $PM_{2.5}$ 浓度模型的构建与检验，实验设计如下：选取每个城市 2013 年 10 月 28 日－2015 年 12 月 30 日相关指标的监测数据，用于各城市 $PM_{2.5}$ 浓度模型的构建，选用 2016 年 1 月 1 日－2016 年 3 月 15 日的数据，用于模型可靠性检验。

2　$PM_{2.5}$ 浓度与 PM_{10} 浓度、气态污染物的相关性分析

在进行 $PM_{2.5}$ 浓度模型构建之前，需要获取 $PM_{2.5}$ 浓度与哪些要素有关，且分析 $PM_{2.5}$ 浓度与其他要素的相关性。针对 2013－2016 年各城市的大气质量监测数据，开展 $PM_{2.5}$ 浓度与 PM_{10} 浓度、气态污染物的比较研究，图 1 为邢台 $PM_{2.5}$ 浓度与 PM_{10} 浓度、气态污染物的比较（受篇幅限制仅给出邢台市相关图），并分析各城市 $PM_{2.5}$ 浓度与 PM_{10} 浓度、气态污染物的相关性（表 1）。由图 1 可见，邢台市 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10}、SO_2、NO_2、CO 质量浓度变化趋势一致，与 O_3 质量浓度变化趋势相反。

由表 1 可以知，各城市 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10}、SO_2、NO_2、CO 呈现显著正相关，相关系数均大于 0.567，除邢台、唐山，其余 4 个城市的观测要素与 $PM_{2.5}$ 相关性从大到小依次为 PM_{10}、CO、NO_2、SO_2。大气中的 SO_2、NO_2、CO 主要来自于原煤的燃烧，说明河北省以煤为主的能源结构是造成河北省 $PM_{2.5}$ 污染的重要原因。但各城市 $PM_{2.5}$ 与 O_3 则呈负相关性，因为 O_3 浓度始终与 NO_2、CO 浓度呈负相关。而 $PM_{2.5}$ 与 NO_2、CO 来源相近且呈正相关，故 $PM_{2.5}$ 浓度与 O_3 浓度表现为负相关[18]。

复相关分析是研究一个变量 x_0 与其他多个变量（x_1，x_2，…，x_n）之间线性相关程度的指标，用复相关系数来测定。取值为［0，1］，其值愈接近 1，表明线性相关程度愈密切。表 2 统计了各城市 $PM_{2.5}$ 浓度与其它观测要素的复相关分析结果。

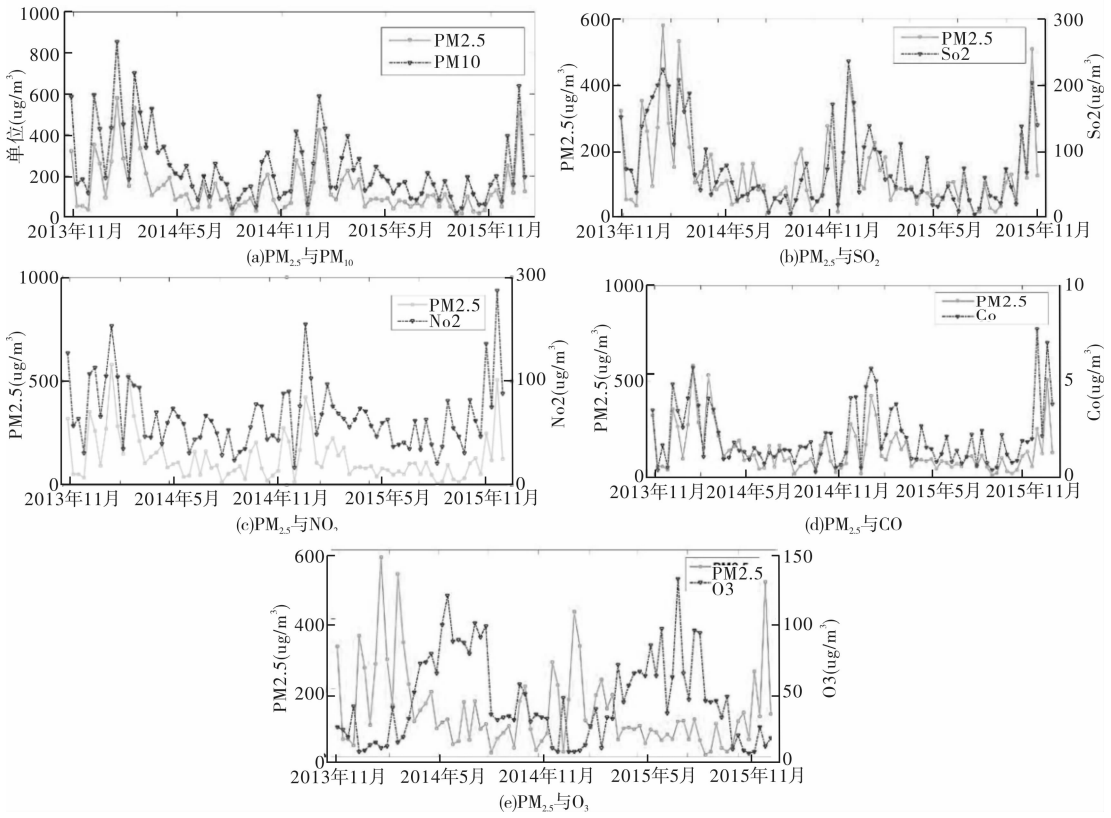


图 1　邢台 $PM_{2.5}$ 浓度与 PM_{10} 浓度、气态污染物的比较

表 1　$PM_{2.5}$ 浓度与 PM_{10} 浓度、气态污染物的相关性统计

测站	$PM_{2.5}$ 与 PM_{10}	$PM_{2.5}$ 与 SO_2	$PM_{2.5}$ 与 NO_2	$PM_{2.5}$ 与 CO	$PM_{2.5}$ 与 O_3	样本数/d
邢台	0.913**	0.706**	0.836**	0.793**	−0.409**	866
保定	0.946**	0.758**	0.841**	0.852**	−0.430**	866
张家口	0.839**	0.596**	0.684**	0.775**	−0.120**	866
承德	0.879**	0.567**	0.673**	0.787**	−0.127**	866
秦皇岛	0.905**	0.706**	0.722**	0.751**	−0.184**	866
唐山	0.942**	0.682**	0.765**	0.747**	−0.215**	866

注：** 表示在 0.01 水平（双侧）上显示相关。

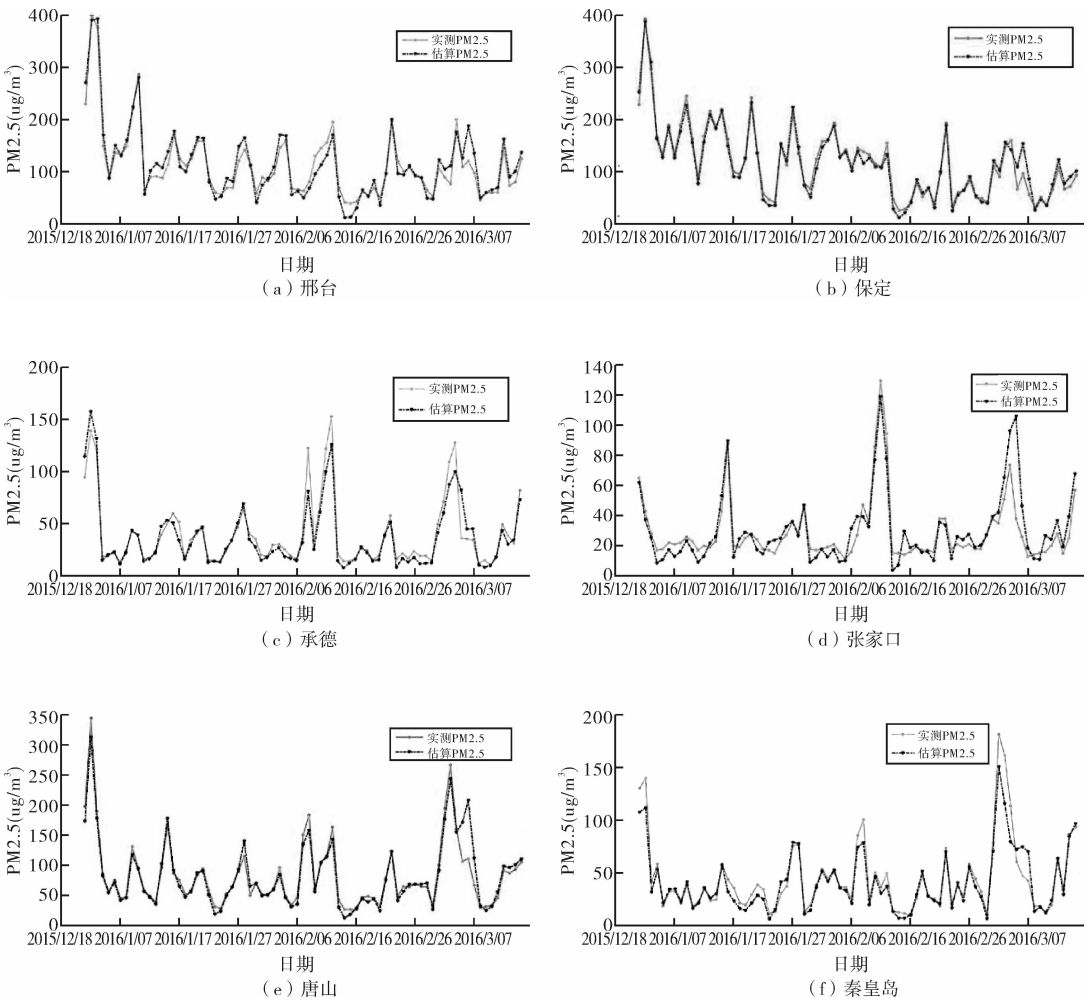


图 2 $PM_{2.5}$模型估算值与实测 $PM_{2.5}$浓度值的比较

表 2 $PM_{2.5}$与 PM_{10}、SO_2、NO_2、CO、O_3 的复相关分析结果

测站	邢台	保定	唐山	张家口	承德	秦皇岛
复相关系数 R^2	0.875	0.933	0.898	0.821	0.844	0.833

由表 2 可知，各测站复相关系数最小值为 0.821，接近于 1，表明各测站 $PM_{2.5}$与 PM_{10}、SO_2、NO_2、CO、O_3 这几个监测指标的线性相关程度密切，可用于 $PM_{2.5}$浓度估算模型的构建。

3 基于 PM_{10}与气态污染物的 $PM_{2.5}$浓度模型

3.1 模型构建

多元回归分析[15]是一种处理一个因变量与多个自变量关系的方法，通过多元回归分析，能够得到因变量与自变量的数量关系。该方法作为一种大气污染的传统预测方法，可通过回归建模对污染物质量浓度进行拟合预测。针对 2013 年 10 月 28 日－2015 年 12 月 30 日期间的各类观测数据，以 $PM_{2.5}$为因变量，PM_{10}、SO_2、NO_2、CO、O_3 观测要素为自变量，采用逐步回归方法构建多元线性回归模型。河北省 6 个城市的 $PM_{2.5}$浓度最优回归模型的常数项和各观测要素的系数见表 3。

由表 3 可知，保定市 $PM_{2.5}$浓度模型自变量 SO_2 系数为 0，被剔除。说明自变量 SO_2 在模型建立中对因变量 $PM_{2.5}$所引起的作用被其他自变量代替。

3.2 模型可靠性检验

通过实验设计，将河北省这几个重点城市 2016 年 1 月 1 日－2016 年 3 月 15 日，共计 74d 的 PM_{10}、SO_2、NO_2、O_3、CO 日均质量浓度数据代入各市已建立的 $PM_{2.5}$模型，计算出 $PM_{2.5}$浓度值，并与实测 $PM_{2.5}$浓度值进行比较(图 2)，统计结果见表 4。

由图 2 可以看出，邢台、保定、承德、张家口、唐山，秦皇岛 6 个城市的 $PM_{2.5}$模型的预测值与 $PM_{2.5}$观测值基本吻合，变化趋势一致。但在个别时间点偏差较大，如唐山市、张家口两市 2016 年 3 月 4 日 $PM_{2.5}$预测值与实测值偏差大，查询两地该日的历史天气均为小雨，可以分析到雨水对于 $PM_{2.5}$冲刷，能降低 $PM_{2.5}$的浓度值，下一步可增

表 3　各城市 $PM_{2.5}$ 浓度模型

城市名称	$PM_{2.5}$ 浓度模型系数					
	常数项	PM_{10}	SO_2	NO_2	CO	O_3
邢台	−44.7523	0.4673	−0.1189	0.7915	13.5224	0
保定	−45.5554	0.4722	0	0.4953	13.1906	0.2246
承德	−8.2977	0.4297	−0.1057	−0.308	26.8754	0
张家口	−20.0499	0.3177	−0.0437	0.1241	23.5245	0.0778
唐山	−16.4486	0.6593	0.0239	0.0368	3.6584	−0.0670
秦皇岛	−15.6749	0.4792	0.1357	5.2391	0.0677	0

加预测因子(如气象因素)等优化模型，进一步提高模型预测效果。

表 4　各城市模型检验的平均偏差、均方根误差和相关系数

测站	平均值	最大偏差	标准差
邢台	2.9124	70.1174	19.2094
保定	−0.8893	58.8764	13.7405
承德	−2.7972	45.1125	10.5895
张家口	1.3286	68.3758	11.0494
唐山	−0.6673	101.7212	18.3467
秦皇岛	−3.4946	46.8692	10.7413

从表 4 可知，估算值与实测值的平均偏差绝对值小于 3.5；标准差小于 20；对两者进行相关性分析计算，相关性大于 0.840 8。

4　结论

本文利用河北省 6 个城市(邢台、保定、承德、张家口、唐山、秦皇岛)2013 年 10 月 28 日－2015 年 3 月 15 日期间空气质量连续观测数据，进行基于 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 和气态污染物的相关性分析，建立 6 个城市的 $PM_{2.5}$ 浓度模型，并对模型的可靠性进行了检验，得到的结论如下：

(1)$PM_{2.5}$ 与 PM_{10}、SO_2、NO_2、CO 呈现显著正相关，相关系数均大于 0.567，除邢台、唐山外，其余 4 个城市的观测要素与 $PM_{2.5}$ 相关性从大到小依次为 PM_{10}、CO、NO_2、SO_2。$PM_{2.5}$ 与 O_3 则呈现负相关性。各测站复相关系数最小值为 0.821，接近于 1，表明各测站 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10}、SO_2、NO_2、CO、O_3 这几个监测指标的线性相关程度密切，可用于 $PM_{2.5}$ 浓度估算模型的构建。

(2)河北省 6 个城市的 $PM_{2.5}$ 模型的估算值与实测 $PM_{2.5}$ 值基本吻合，可利用各市 PM_{10} 及气态污染物历史数据反演 $PM_{2.5}$ 浓度值。

参考文献：

[1] 中华人民共和国环境保护部. 关于发布国家环境质量标准《环境空气质量标准》的公告[EB/OL]. [2014－05－27]. http://www.zhb.gov.cn/hjzl/zghjzkgb/lnzghjzkgb/201605/P020160526564151497131.pdf.

[2] 中华人民共和国环境保护部. 关于发布国家环境质量标准《环境空气质量标准》的公告[EB/OL]. [2015－05－29]. http://www.zhb.gov.cn/hjzl/zghjzkgb/lnzghjzkgb/201605/P020160526564730573906.pdf.

[3] 中华人民共和国环境保护部. 关于发布国家环境质量标准《环境空气质量标准》的公告[EB/OL]. [2016－04－05]. http://www.zhb.gov.cn/hjzl/zghjzkgb/lnzghjzkgb/201606/P020160602333160471955.pdf.

[4] 许凯. 世卫组织公布中国空气污染最严重的八个城市[N]. 济南日报，2015－5－31(A02).

[5] 张英娟，张培群，王冀，等. 1981－2013 年京津冀持续性霾天气的气候特征[J]. 气象，2015，41(3)：311－318.

[6] 吴兑，廖碧婷，吴蒙，等. 环首都圈霾和雾的长期变化特征与典型个例的近地层输送条件[J]. 环境科学学报，2014.34(1)：1－11.

[7] 王喜全，孙明生，杨婷，等. 京津冀平原地区灰霾天气的年代变化[J]. 气候与环境研究，2013，18(2)：165－170.

[8] 刘严萍，王勇，赖迪辉. 基于 PM_{10} 与气态污染物的北京市 $PM_{2.5}$ 浓度模型研究[J]. 灾害学，2016，31(2)：116－118.

[9] 孟琛琛，王丽涛，张芬芬，等. 邯郸市 $PM_{2.5}$ 中水溶性无机离子污染特征及来源解析[J]. 环境科学学报，2015，35(11)：3443－3451.

[10] 彭应登. 北京近期雾霾污染的成因及控制对策分析[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程，2013，5(3)：233－239.

[11] 陈仕意，曾立民，董华斌，等. 华北地区乡村站点(曲周)夏季 $PM_{2.5}$ 中二次无机组分的生成机制与来源解析[J]. 环境科学，2015，36(10)：3554－3565.

[12] 王丽涛，潘雪梅，郑佳，等. 河北及周边地区霾污染特征的模拟研究[J]. 环境科学报，2012，32(4)：925－931.

[13] 张宝贵，孙丽华. 秦皇岛市空气污染与气象要素的关系[J]. 气象与环境学报，2009，25(4)：43－47.

[14] 罗岳平，刘孟佳，甘杰，等. 长株潭城市环境空气中 $PM_{2.5}$ 和 O_3 质量浓度的相关性研究[J]. 安全与环境学报，2015，15(4)：313－317.

[15] 赵静，但琦. 数学建模与数学实验(第 3 版)[M]. 北京：高等教育出社，2000：254－269.

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. 5μg/mIn3. 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