

基于灰色预测与BP神经网络的极端降水事件预测

王建华, 安海钰, 张敬

辽宁师范大学数学学院, 辽宁 大连

收稿日期: 2022年3月20日; 录用日期: 2022年4月14日; 发布日期: 2022年4月21日

摘要

极端降水事件会对人们的生命、安全和财产构成严重的威胁, 因此建立极端降水事件的预测模型是非常有必要的。本文采用灰色预测模型与BP神经网络两种方式对郑州、北京、太原的极端降水事件进行预测, 绘制了相应图像, 并且进行了误差分析。结果推断未来郑州降水量仍然偏高, 北京未来可能会出现极端降水情况, 太原发生极端降水的可能性很小。

关键词

降水量, 灰色预测, BP神经网络

Prediction of Extreme Precipitation Events Based on Grey Prediction and BP Neural Network

Jianhua Wang, Haiyu An, Jing Zhang

School of Mathematics, Liaoning Normal University, Dalian Liaoning

Received: Mar. 20th, 2022; accepted: Apr. 14th, 2022; published: Apr. 21st, 2022

Abstract

Extreme precipitation events pose serious threats to people's lives, security and property. Therefore, it is necessary to establish a prediction model for extreme precipitation events. In this paper,

the grey prediction model and BP neural network are used to predict the extreme precipitation events in Zhengzhou, Beijing and Taiyuan. The corresponding images are drawn and the statistical errors are analyzed. The results show that the precipitation in Zhengzhou is still high in the future, Beijing may have extreme precipitation in the future, and the possibility of extreme precipitation in Taiyuan is very small.

Keywords

Precipitation, Grey Prediction, BP Neural Network

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 研究背景

全球变暖愈演愈烈,气候系统变得越来越不稳定,极端天气事件频发,摧毁着我们赖以生存的家园。过去“几十年一遇”甚至“百年一遇”的极端天气正在成为新常态,严重影响人们的生产工作生活。近两年来,我国河南、陕西、湖北等地遭遇了极为罕见的强降水天气,部分北方城市也遭遇了历史罕见的暴雪天气。这些极端降水事件给当地群众的生命财产造成了极大威胁,严重影响了他们的生产生活。因此,建立不同潜在极端降水事件城市的预测模型,提高气象灾害预警具有重要意义。本文收集了郑州、北京、太原的降水信息,对降水量变化特征进行分析,建立了两种预测模型,对未来一段时间中国哪些城市会出现极端降水事件做出预测,同时对不同模型产生的结果进行对比分析。

2. 数据来源与研究方法

我们通过国家气象科学数据共享中心网站和美国国家海洋和大气管理局网站相结合的方式,下载了郑州、太原、北京 1951 年到 2021 年 71 年间的降水量观测值,并且对降水量单位进行统一化处理,计算出了每年的平均日降水量以及总量。

本文建立了不同潜在极端降水事件城市的预测模型,应用灰色预测和 BP 神经网络两种方法预测未来两年郑州、太原、北京三地是否会出现极端降水事件,并对结果进行对比分析,找到存在潜在极端降水的城市。

3. 极端降水事件预测模型

3.1. 灰色预测模型

灰色预测模型是通过少量的、不完全的信息,建立数学模型做出预测的一种预测方法[1]。灰色预测模型的核心体系是灰色模型(Grey Model, GM),它通过计算各因素之间的关联度,确定各因素之间发展趋势的相异程度[2]。

3.1.1. 模型建立

记原始序列为:

$$X_0 = (x_0(1), x_0(2), \dots, x_0(n))$$

一次累加生成序列(1-AGO)为:

$$X_1 = (x_1(1), x_1(2), \dots, x_1(n))$$

其中:

$$x_0(k) = \sum_{i=0}^k x_0(i) = x_1(k-1) + x_0, \quad (k = 2, 3, \dots, n)$$

令 Z_1 为 X_1 的紧邻均值生成序列:

$$Z_1 = (z_1(2), z_1(2), \dots, z_1(n))$$

其中:

$$z_1(k) = \frac{1}{2}(x_1(k) + x_1(k-1)), \quad (k = 1, 2, \dots, n)$$

得到 GM(1,1)模型的基本形式:

$$x_0(k) + az_1(k) = b$$

其中 a 称为发展系数, $z_1(k)$ 称为白化背景值, b 称为灰作用量。

令参数列为:

$$u = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}$$

且有:

$$Y = \begin{bmatrix} x_0(2) \\ x_0(3) \\ \vdots \\ x_0(n) \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} -z_1(2) & 1 \\ -z_1(3) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -z_1(n) & 1 \end{bmatrix}$$

此时模型转化为 $Bu = Y$, 利用矩阵运算, 则 GM(1,1)模型 $x_0(k) + az_1(k) = b$ 的最小二乘估计参数列满足:

$$u = (B^T B)^{-1} B^T Y$$

得到灰色方程的白化方程:

$$\frac{dx_1(t)}{dt} + ax_1(t) = b$$

且有 $x_1(t_0) = x_1(1)$, 解得:

$$x_1(t) = \left(x_0(1) - \frac{b}{a} \right) e^{-a(t-1)} + \frac{a}{b}$$

3.1.2. 结果分析

首先, 我们用灰色预测模型根据郑州地区 1995 年到 2021 年的降水量数据, 对郑州 2022、2023 年的降水量数据进行预测, 得到如下结果。

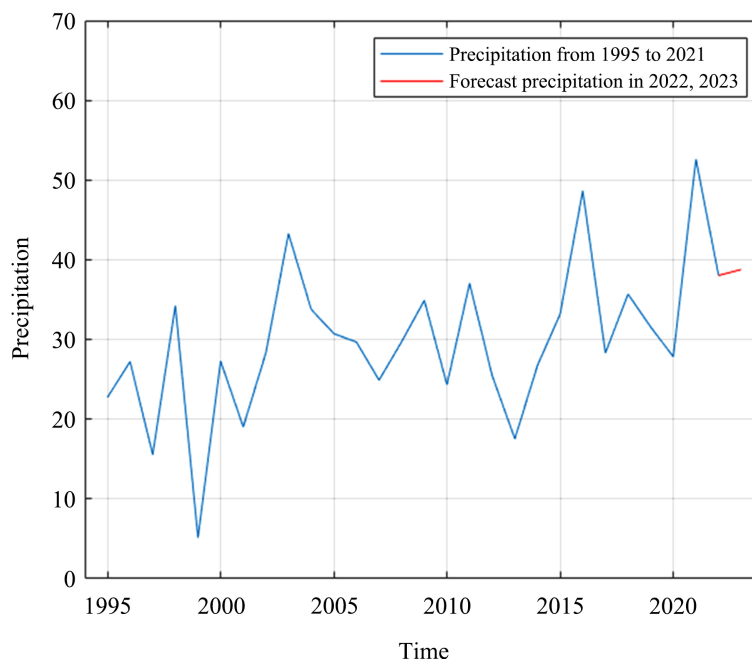


Figure 1. Forecast chart of precipitation in Zhengzhou in the next two years
图 1. 郑州未来两年降水量预测图

Table 1. The output of grey prediction
表 1. 灰色预测输出结果

年份	2022	2023
预测值	38.0354	38.7665
相对误差	6.8832%	

图 1 中红线为预测曲线，表 1 为灰色预测输出结果，由灰色预测结果可以看出，郑州未来两年出现极端降水的可能性较小，但降雨量仍有走高趋势。同时，虽然降雨量数值与 2021、2016 年相比低一些，但是相较郑州 6 年前的数据有明显的增多，这也能看出来近年来郑州气候受全球气候变暖影响巨大，因此有关部门还需提高防洪防涝意识，才能对极端天气、气候做出更好地把控，把风险降到最低。

接下来，我们用灰色预测根据山西省太原市 1990 年到 2021 年的降雨量数据，对太原市未来降水量进行预测，见图 2。

Table 2. The output of grey prediction
表 2. 灰色预测输出结果

年份	2022	2023
预测值	17.0831	17.0709
相对误差	3.4808%	

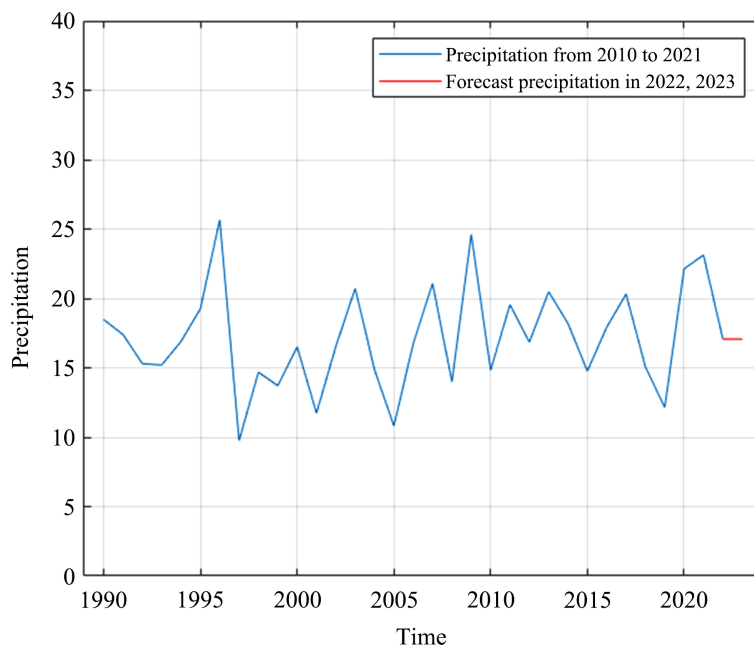


Figure 2. Forecast chart of precipitation in Taiyuan in the next two years
图 2. 太原未来两年降水量预测图

由表 2 灰色预测模型的结果可以看出，太原市未来两年降水量走势平缓，变化不大，无极端降水事件出现，从这一点上看气候适宜。

最后，我们用灰色预测模型根据北京地区 1995 年到 2019 年的降水量数据，对北京 2022、2023 年的降水量数据进行预测，得到如下结果，见图 3。

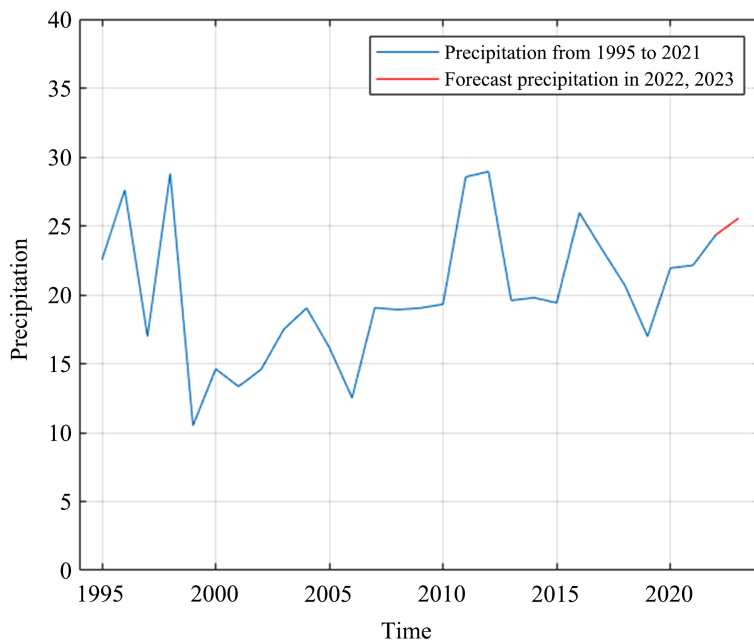


Figure 3. Forecast chart of precipitation in Beijing in the next two years
图 3. 北京未来两年降水量预测图

Table 3. The output of grey prediction
表 3. 灰色预测输出结果

年份	2022	2023
预测值	22.1401	22.5564
相对误差	3.9433%	

由表 3 灰色预测结果可以看出，北京未来两年降雨量有持续走高趋势，且 2023 年降雨量与 2016 年接近，考虑有极端降水出现的可能性，有关部门应多加防范，提前部署极端降水紧急情况处理工作。

3.2. BP 神经网络模型

BP 神经网络称反向传播神经网络，通过样本数据的训练，不断修正网络权值和阈值使误差函数沿负梯度方向下降，逼近期望输出。它是一种应用较为广泛的神经网络模型，多用于函数逼近、模型识别分类和时间序列预测等[3]。其处理信息的单元一般分为三类：输入单元、输出单元和隐含单元，即输入单元接受外部给的信号与数据，输出单元实现系统处理结果的输出，隐含单元处在输入和输出单元之间，从网络系统外部是无法观测到隐含单元的结构[4]。除了上述三个处理信息的单元之外，神经元间的连接强度大小由权值等参数来决定。

3.2.1. 模型建立

将相关降水量数据分为训练集与测试集，其中 1951 年到 1990 年的降水量作为训练集，使用 Matlab 的神经网络相关函数用训练集进行训练，输入层是前四年的降水量，用 x_1, x_2, x_3, x_4 来表示，隐藏层的个数设置为 9 个，用 k_1, \dots, k_9 来表示，输出层只有一个，即要预测的降水量的值，见图 4。

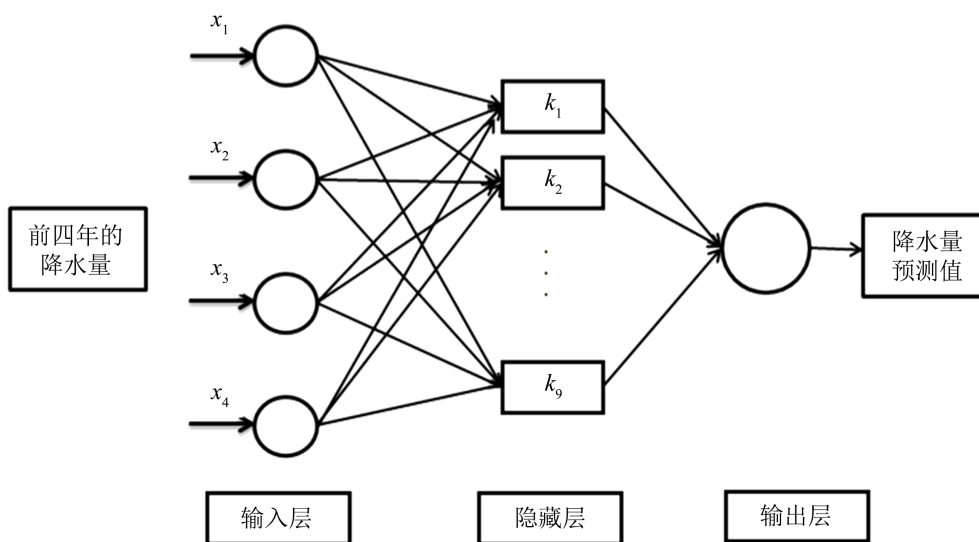


Figure 4. BP neural network diagram
图 4. BP 神经网络图

利用 2016 年到 2019 年的降水量数据作为测试集量化神经网络的泛化能力，并计算平均相对误差，平均相对误差计算公式为

$$r_i = \frac{|x_i^* - x_i|}{x_i}, (i = 1, 2, 3, 4)$$

$$\bar{r} = \frac{\sum_{i=1}^4 r_i}{2}$$

其中, x_i^* 为 BP 神经网络的第 i 个预测值, x_i 为第 i 个真实值, r_i 为第 i 个预测值的相对误差, \bar{r} 为平均相对误差。若平均相对误差较大, 则重新调整隐含层结点数, 训练次数等参数重新训练, 得到了训练集平均相对误差较小的郑州、太原、北京的 2022, 2023 年降水量的预测值。

最后使用 Matlab 对往年降水与预测降水的图像进行绘制。

3.2.2. 结果分析

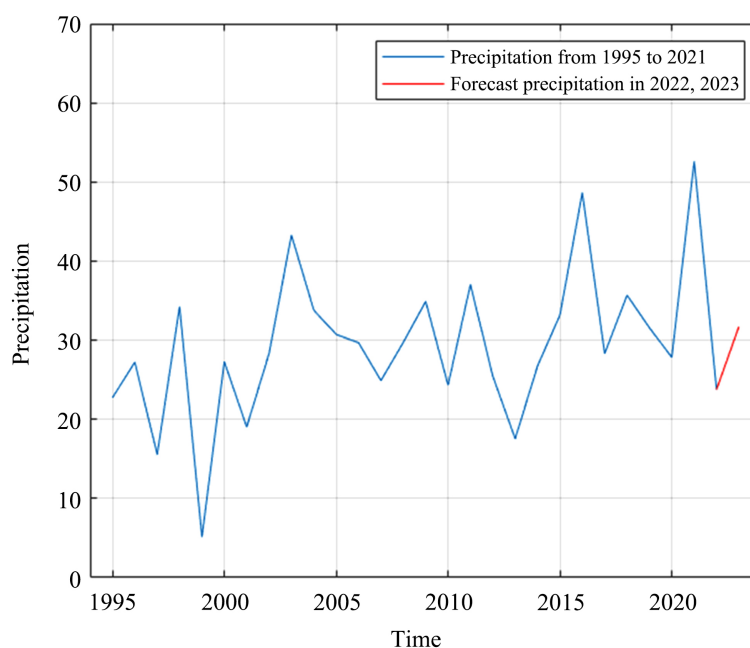


Figure 5. Forecast chart of precipitation in Zhengzhou in the next two years
图 5. 郑州未来两年降水量预测图

Table 4. The output of BP neural network
表 4. 神经网络输出结果

年份	2022	2023
预测值	23.7673	31.7225
相对误差	16.37%	

图 5 为郑州未来两年降水量预测图, 从表 4 BP 神经网络结果可以看出, 郑州未来两年降水量不大, 不用担心极端降水事件的出现。

接下来, 我们对太原市的降水量数据进行训练, 预测 2022 与 2023 的降水量, 同时保证神经网络训练集相对误差为 20.59%。

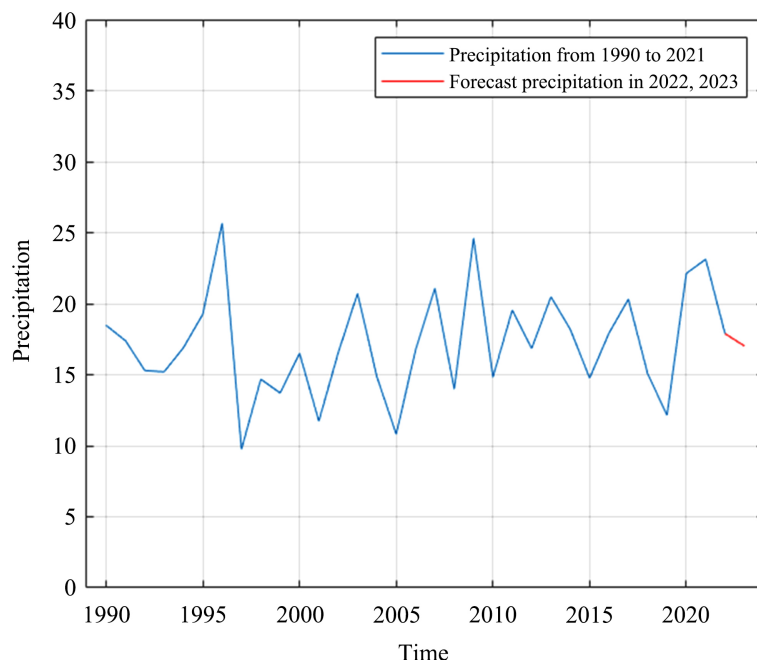


Figure 6. Forecast chart of precipitation in Taiyuan in the next two years
图 6. 太原未来两年降水量预测图

Table 5. The output of BP neural network
表 5. 神经网络输出结果

年份	2022	2023
预测值	17.8884	17.0213
相对误差	20.59%	

从图 6 中可以看出，太原市未来两年降水量呈现下降趋势，不需要担心极端天气的出现，表 5 为神经网络输出结果。

最后，我们对北京地区的降水量数据进行训练，预测 2022 与 2023 的降水量，同时保证神经网络训练集相对误差为 13.42%，见图 7。

从表 6 BP 神经网络预测结果可以看出，北京地区未来两年降水量持续走高，2023 年降水量更是达到了 27.4550，可以认定为极端降水事件出现，从折线图中可以看出 2023 年年均降水量虽不及 2012 年北京“721”暴雨事件[5]，但也是十年以来降水量最高的一年，这一点需要引起我们的重视。

Table 6. The output of BP neural network
表 6. 神经网络输出结果

年份	2022	2023
预测值	25.6442	27.4550
相对误差	13.42%	

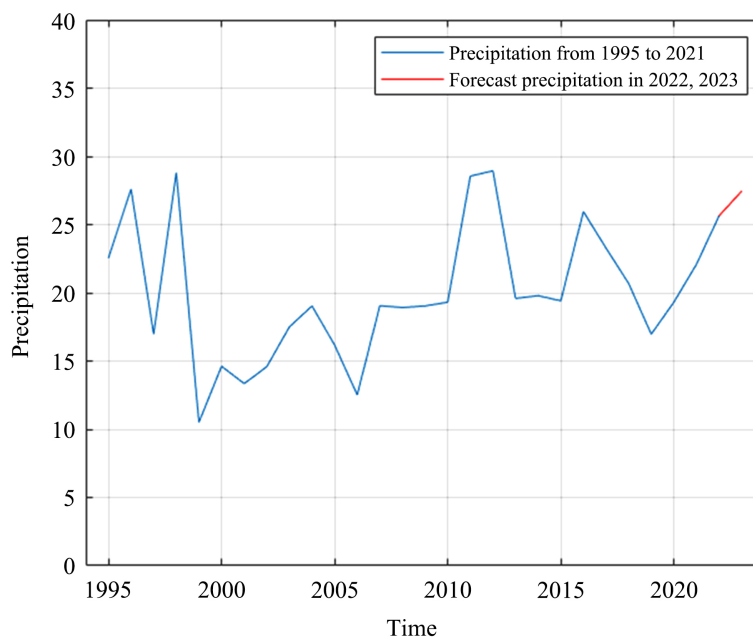


Figure 7. Forecast chart of precipitation in Beijing in the next two years
图 7. 北京未来两年降水量预测图

按照国家气候中心统计的数据显示，2021 年入秋以来，我国北方的降水明显已超过了南方，并且出现了“北涝南旱”现象，在我国的雨水明显大规模增加的同时，降水的分布出现了不均匀的状态[6]。按照数据显示，北方降水量较常年同期偏多 1.4 倍，是 1961 年有完整气象记录以来最多的一年。这也为北京 2023 极端降水事件提供了佐证。

4. 预测结果对比分析

本文建立了潜在极端降水事件的灰色预测模型和 BP 神经网络预测模型。灰色预测模型即使在数据量很小的情况下也能预测出近似的结果；BP 神经网络模型则是在非线性预测中最常用的神经网络，具有广泛的适应能力、学习能力和映射能力，具有高度的容错性，这为我们精准预测提供了工具[7]。

我们采用了标准误差(RE)、平均绝对误差(MAE)和平均相对误差(MRE)检测预测模型的精度，两种方法在预测过程中的准确性有明显差异。

$$RE = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i^* - x_i)^2}$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i^* - x_i|$$

$$MRE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|x_i^* - x_i|}{x_i} * 100\%$$

其中 n 为测试集的样本数， x_i 为真实值， x_i^* 为预测值。

如表 7 所示，在本次研究中，灰色预测模型的预测精度相对较高，对各城市极端降水预测的误差较小。从结果我们可以看出两个模型对于三个地区的预测结果基本差别不大，在考虑误差允许的范围内，我们可以看到，二者对于降水量的变化趋势的预测结果相同：郑州降水量有持续走高趋势，但无极端降

水出现；太原降水量呈缓降趋势；相比之下北京 2023 年极端降水事件潜在可能性极大，灰色预测结果接近 2016 年，BP 神经网络结果接近 2012 年，这都是北京发生极端降雨的年份，因此对比之后可以看出，对北京建立极端降水防控预案已经迫在眉睫。

Table 7. The output of statistical error analysis
表 7. 统计误差分析结果

模型	RE	MAE/mm	MRE/%
灰色预测模型	0.53	0.91	4.77
BP 神经网络模型	1.94	3.36	16.79

5. 结论与建议

气候系统是一个复杂的体系，受到多种因素影响，近年来温室效应加剧，极端天气、气候频繁出现。上一年郑州、山西等地接连受到暴雨侵袭，耗费国家大量人力物力，对人民生活造成不小的冲击。因此，建立数学模型对极端降水事件进行预测，极具现实意义。本文建立灰色预测、BP 神经网络模型对三个地区未来两年降雨量数据进行预测，得出重要结论：郑州和太原未来两年出现极端降水的可能性很小，北京 2023 年有潜在极端降水事件发生。

结合 2021 年郑州暴雨事件，我们给出如下建议：首先，加强灾害天气的预报预警，针对不同的天气情况制定相应的工作计划，为防汛工作争取时间；其次，极端大暴雨将造成外洪内涝叠加，因此需从流域、区域、城市层面加强水利工程设施和市政排涝设施联合调度，防洪和内涝统筹兼顾；最后，建立高水平的洪涝防控管理体系，郑州水灾中民间救援组织利用在线文档收集整理求救人员和志愿者信息，这些文档在此次水灾中起到了关键作用，为救援工作节约了很多时间，被称为“救命文档”。这启示我们，可以利用 5G、大数据、物联网等信息化手段，实现市、区两级相关专业运行单位之间的汛情、灾情数据共享。建立市、区两级城市雨水管渠和排水河道水文监测体系，市管和区管河道及排水管渠由相应管理单位依据规范建立监测系统，统一纳入全市水文监测体系，数据共享[8]。

参考文献

- [1] 刘思峰. 灰色系统理论的产生、发展及前沿动态[J]. 浙江万里学院学报, 2003(4): 19-22.
- [2] 钱旻. ETC 门架系统多维数据融合应用探析[J]. 中国交通信息化, 2021(6): 109-112.
- [3] 鲁娟娟, 陈红. BP 神经网络的研究进展[J]. 控制工程, 2006(5): 449-451+456.
- [4] 邱世卉. 小波神经网络在模拟电路故障诊断中的应用研究[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(30): 8042-8046.
- [5] 湛芸, 孙军, 徐珺, 等. 北京 721 特大暴雨极端性分析及思考(一)观测分析及思考[J]. 气象, 2012, 38(10): 12.
- [6] 徐海亮. 六十年来全国与西南地区气象干旱及气候环境变化——以云南为例[J]. 昆明学院学报, 2020, 42(2): 23-35.
- [7] 安永林, 彭立敏. BP 与 GM(1,1)预测隧道涌水对比分析和实证[J]. 科技导报, 2008, 26(13): 71-74.
- [8] 张书函, 郑凡东, 邸苏闯, 等. 从郑州“2021.7.20”暴雨洪涝思考北京的城市内涝防治[J]. 中国防汛抗旱, 2021, 31(9): 5-11.