

# 基于洪水演进数值模拟的洪灾生命损失计算方法研究

李大鸣<sup>1</sup>, 范玉<sup>1,2</sup>, 赵明雨<sup>1</sup>, 李杨杨<sup>1</sup>, 王笑<sup>1</sup>

(1. 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072;

2. 华北水利水电大学, 河南 郑州 450011)

**摘要:** 通过建立的一二维衔接洪水演进数学模型, 对永定河泛区的洪水演进进行数值模拟, 得到泛区内水位、流量、淹没范围等信息。在此基础上对泛区的洪灾生命损失进行计算, 并对洪灾生命损失计算的 D&M 公式进行了修正, 从而能够更好地反映预警时间与洪水风险特征之间的关系。计算结果表明修正效果较好, 修正后的公式更具适用性。

**关键词:** 永定河泛区; 洪水演进; 一二维衔接; 洪灾生命损失; D&M 公式

doi: 10.13928/j.cnki.wrahe.2015.10.004

中图分类号: P333.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-0860(2015)10-0017-05

## Flood routing numerical simulation-based study on method for calculation of life loss from flood disaster

LI Daming<sup>1</sup>, FAN Yu<sup>1,2</sup>, ZHAO Mingyu<sup>1</sup>, LI Yangyang<sup>1</sup>, WANG Xiao<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450011, Henan, China)

**Abstract:** Through the establishing 1-D and 2-D linking flood routing numerical model, a numerical simulation is made on the flood routing of Yongding River Flood Plain, and then the data of water level, flow rate, inundated area, etc. are obtained. On the basis of this, the life loss from flood disaster within the flood plain is calculated, while D&M formula for life loss calculation is modified, thus the relationship between the time of early warning and the flood risk characteristics can be better reflected. The calculation result shows that the effect of the modification is better and the modified formula is more applicable as well.

**Key words:** Yongdinghe River Flood Plain; flood routing; 1-D and 2-D linking; life loss from flood disaster; D&M formula

## 1 研究背景

我国自古以来就是一个洪水频发的国家, 历史上洪水造成了巨大的经济损失与惨重的人员伤亡, 对洪水演进过程及洪灾生命损失计算的研究可以为防洪调度提供必要的科学依据。

1988年, Brown与Graham<sup>[1]</sup>应用经验统计的方法对24座大坝溃坝生命损失的历史数据进行分析, 建立了一个简单的溃坝生命损失经验估算公式。1993年, Michael L. Dekay与Gary H. McClelland<sup>[2]</sup>提出生命损失与洪水严重程度有较大关系, 并证明风险人口

与生命损失之间存在非线性关系, 他们依据大量历史统计数据进行分析, 改进了Brown与Graham的公式, 得到了一个包含风险人口、警报时间、洪水严重程度与生命损失关系的计算公式——D&M公式, 这个公式被广泛应用于估算洪灾生命损失。此后Peter Reiter、Graham等都进行过洪灾生命损失计算的

收稿日期: 2014-05-29

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体科学基金(51021004); 资助项目河北省水利科研计划项目(HS2007-43)。

作者简介: 李大鸣(1957—), 男, 教授, 博士。

研究,并提出了一些计算方法<sup>[3-4]</sup>。2007年,周克发结合我国国情,参考国外学者提出的方法,提出了有针对性的生命损失评价模型<sup>[5]</sup>。2008年,胡德秀等提出了基于不确定性分析和死亡率范围确定的溃坝失事洪灾生命损失概率估算方法<sup>[6]</sup>。2009年,付意成等在建立区域洪灾风险评价体系时应用D&M公式进行生命损失计算<sup>[7]</sup>。2010年,吴欢强等在总结国内外溃坝生命损失计算方法的基础上,对我国风险人口死亡率做出了调整,提出适合我国国情的溃坝生命损失计算经验公式<sup>[8]</sup>。2011年,王晓航等建立了基于地理信息系统(GIS)技术的溃坝生命损失预警综合模型,在GIS技术的支持下,考虑了风险人口中青壮年比例、建筑物的抗冲能力等因素<sup>[9]</sup>。2012年,殷丹将D&M公式应用于浑河左岸溃堤条件下的洪灾生命损失计算中<sup>[10]</sup>。同年,黄家宝等应用D&M公式对乐昌峡水利枢纽下游防护范围进行洪灾生命损失计算,并建立了GIS技术的洪灾损失评估模型<sup>[11]</sup>。2012年,黄凌等为了更好地反映致灾因子和承灾体的高度非线性、不确定性和相关性,建立了基于人工神经网络的水库溃坝生命损失估算模型<sup>[12]</sup>。2013年,赵安等基于洪灾发生的过程与生命损失的机理,建立了一种新的洪灾生命损失评估模型框架<sup>[13]</sup>。本文在Peter Reiter、Graham等人的基础上对D&M公式进行了修正,从而使之能够更好地结合洪水演进模拟结果,反映预警时间与洪水风险特征之间的关系。

2 蓄滞洪区洪水演进数值模拟

2.1 基本控制方程

用水位、流量表示的一维控制方程组如下  
连续方程

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{q}{B}$$
 (1)

运动方程

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \left( gA - \frac{BQ^2}{A^2} \right) \frac{\partial Z}{\partial x} + 2 \frac{Q}{A} \frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{Q^2}{A^2} \frac{\partial A}{\partial x} \Big|_z - g \frac{1}{AC^2 R} \frac{Q}{R} + uq$$
 (2)

式中,  $B$  为河道平均宽度;  $A$  为过流断面面积;  $C$  为谢才系数;  $R$  为水力半径;  $Q$  为过流流量;  $q$  为单宽流量;  $Z$  为水位;  $g$  为重力加速度;  $u$  为  $x$  方向的平均流速。

二维泛区洪水演进数学模型的控制方程由连续方程和水流运动方程组成。

连续方程

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = q$$
 (3)

运动方程

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial (uM)}{\partial x} + \frac{\partial (vM)}{\partial y} + gh \frac{\partial z}{\partial x} + g \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} = 0$$
 (4)

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial (uN)}{\partial x} + \frac{\partial (vN)}{\partial y} + gh \frac{\partial z}{\partial y} + g \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} = 0$$
 (5)

式中,  $H$  为水深;  $Z$  为水位;  $q$  为源汇项,  $M$ 、 $N$ 、 $u$ 、 $v$  分别为  $x$ 、 $y$  方向上的单宽流量和平均流速, 且  $M = Hu$ ,  $N = Hv$ ;  $n$  为糙率,  $g$  为重力加速度。

2.2 工程概况

1939年发生50年一遇大洪水的永定河自梁各庄改道,形成了现在的永定河泛区。一维河道沿垂直水流方向剖分为131个计算断面,二维泛区剖分为8549个计算单元,一维与二维之间通过分洪口门相连接。

2.3 泛区洪水演进模拟

在一维、二维衔接计算模型中,初始一段时间内洪水沿河道向下游演进,至西张务附近时进入二维模型,进入二维模型的洪水首先沿着主河道流动,二维河道为无水干河床起算,当洪水超过南、北围堤堤防高程时漫堤,随着流量的增加,达到分洪流量标准和进洪水位的口门依照进洪顺序先后启用,当分区内蓄水达到一定程度时,退水通道打开,洪水经河道以及各分区向屈家店枢纽汇流。图1给出了流量标准为1000 m³/s时永定河泛区典型时刻洪水演进情况。

通过计算得到不同来流情况下永定河泛区内水位、最大流量、滞洪量、淹没范围等水力信息。表1为永定河泛区不同来流下入流量、蓄水量与淹没面积统计数据。

表1 永定河泛区不同来流下水量与淹没面积统计

入流条件	入流量/亿 m³	蓄水量/亿 m³	淹没面积/km²
10 年一遇	11.504	1.148	358.231
20 年一遇	16.073	1.241	370.479
50 年一遇	20.826	2.421	378.972
100 年一遇	21.903	2.437	381.845
200 年一遇	23.471	2.455	383.373

3 洪灾生命损失计算

3.1 D&M 公式

目前估算洪灾生命损失的方法主要有统计分析法

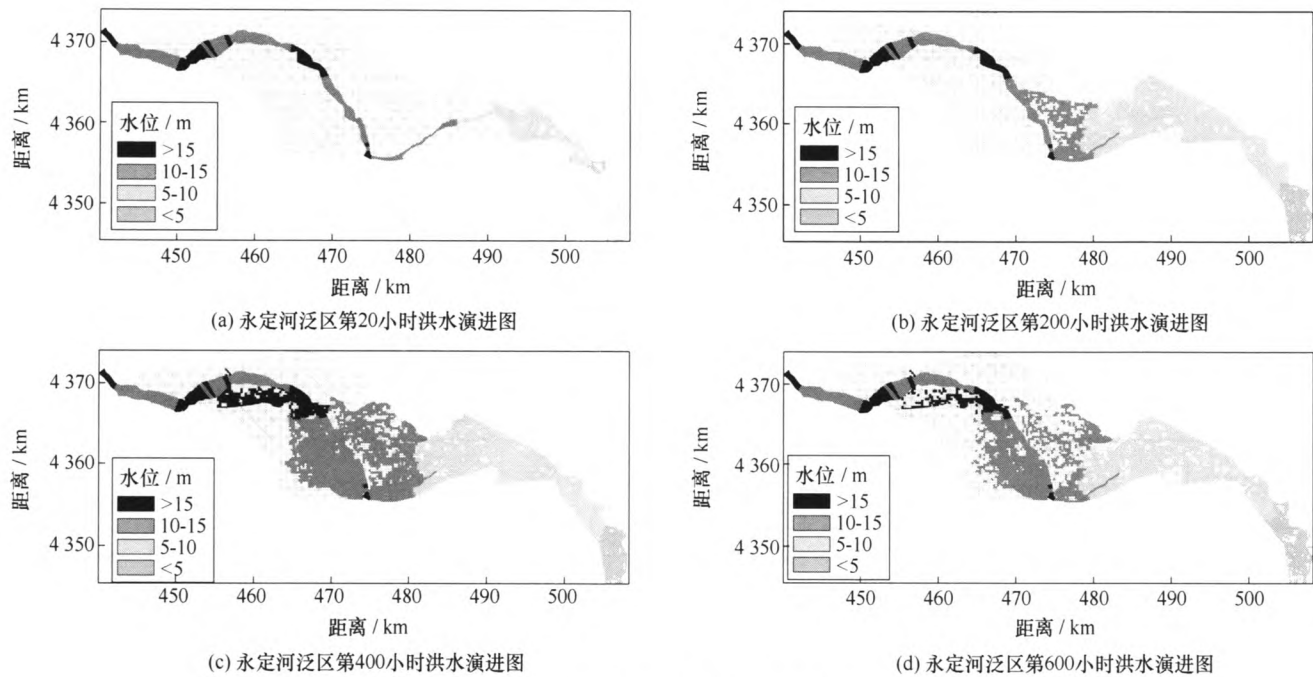


图1 永定河泛区典型时刻洪水演进

和经验分析法, 统计分析方法公式为

$$P_s = P_j P_d P_i P_a P_e \tag{6}$$

式中,  $P_s$ 、 $P_j$ 、 $P_d$ 、 $P_i$ 、 $P_a$ 、 $P_e$  分别为风险人口幸存的概率、准确预报的概率、及时传播预报的概率、居民得到预警的概率、居民对警报响应的概率、有效撤离的概率。

经验分析法为 Michael L. Dekay 与 Gary H. McClelland 根据国外大量的实际溃坝和洪水泛滥造成灾害的历史统计资料, 结合理论分析, 给出的经验公式<sup>[2]</sup>

$$LOL = \frac{PAR}{1 + 13.277(PAR^{0.46}) \exp(0.759(WT) - 3.709(Force) + 2.223(WT)(Force))} \tag{7}$$

式中,  $LOL$  为洪水灾害生命损失数;  $PAR$  为风险总人口;  $WT$  为预警时间;  $Force$  为洪水风险特征, 其值一般分为两类考虑, 高水力风险的峡谷泛区, 水深流急,  $Force = 1$ , 低水力风险的平原泛区, 水浅流缓,  $Force = 0$ 。

在以往的计算中一般将平原地区洪水特征值取为零, 这种方式计算简便, 但是这种取值方法比较粗糙, 不能有效地体现平原地区在不同来水情况下的洪水风险特征的不同, 因此有必要确定新的  $Force$  取值方式。Michael L. Dekay 与 Gary H. McClelland 将  $Force$  定义为处于潜

在致命性洪水中风险人口数与风险人口总数的比值, 从该定义不难看出, 洪水风险特征的取值与水深密切相关, 因此可以用蓄水体积与来水体积的比值表征处于平原地区的蓄滞洪区的洪水风险特征。 $Force$  的取值依赖于  $WT$ , 当  $WT$  较小时, 处于洪水风险区域中的人们没有足够的时间逃生, 此时  $Force$  的大小对  $LOL$  具有很大的影响; 当  $WT$  较大时, 不论  $Force$  取值如何, 人们都能够提前撤出受灾区域, 因此  $Force$  的大小对  $LOL$  影响很小。公式(7)中“ $2.223(WT)(Force)$ ”一项就是考虑到  $WT$  与  $Force$  之间的关系而添加的。

3.2 D&M 公式修正

D&M 公式“ $2.223(WT)(Force)$ ”一项虽然考虑了  $WT$  与  $Force$  之间的关系, 但是该项不能体现出当  $WT$  增大时,  $Force$  对  $LOL$  影响具有减小的趋势。与实际



图2 永定河泛区村庄位置及人口数目分布

表2 永定河泛区不同预警时间下预测伤亡人数

入流条件	入流量 /亿 m <sup>3</sup>	蓄水量 /亿 m <sup>3</sup>	风险人口 /人	伤亡人口/人							
				WT=0 h	WT=1 h	WT=2 h	WT=3 h	WT=4 h	WT=5 h	WT=6 h	WT=7 h
10 年一遇	11. 504	1. 148	134 506	64(56)	28(26)	12	6	3	1	1	0
20 年一遇	16. 073	1. 241	138 162	63(57)	28(27)	12	6	3	1	1	0
50 年一遇	20. 826	2. 421	140 010	67(57)	29(27)	12(13)	6	3	1	1	0
100 年一遇	21. 903	2. 437	141 938	67(58)	29(27)	13	6	3	1	1	0
200 年一遇	23. 471	2. 455	141 938	67(58)	29(27)	13	6	3	1	1	0

注：括号中数字是采用预警方案后的伤亡人数。

表3 不同来流情况不同预警时间下 Force 取值

入流条件	预警时间							
	WT=0 h	WT=1 h	WT=2 h	WT=3 h	WT=4 h	WT=5 h	WT=6 h	WT=7 h
10 年一遇	0. 099 791	0. 036 711	0. 013 505	0. 004 968	0. 001 828	0. 000 672	0. 000 247	0. 000 091
20 年一遇	0. 077 210	0. 028 404	0. 010 449	0. 003 844	0. 001 414	0. 000 520	0. 000 191	0. 000 070
50 年一遇	0. 116 249	0. 042 766	0. 015 733	0. 005 788	0. 002 129	0. 000 783	0. 000 288	0. 000 106
100 年一遇	0. 111 263	0. 040 931	0. 015 058	0. 005 539	0. 002 038	0. 000 750	0. 000 276	0. 000 101
200 年一遇	0. 104 597	0. 038 479	0. 014 156	0. 005 208	0. 001 916	0. 000 705	0. 000 259	0. 000 095

情况有所不符，为了解决这一问题，对公式(7)进行修正，取 Force 的数值为

$$Force = \frac{A_x}{A_L} \exp(-WT)$$

(8)

式中，A<sub>x</sub> 为不同来流情况下泛区内蓄水体积；A<sub>L</sub> 为不同来流情况下泛区入流总体积。

3.3 D&M 公式修正结果检验

为了统计风险人口数据，自水利部天津水利水电勘测设计研究院航测遥感院绘制的 2003 年地形图中提取了永定河泛区内村庄的占地面积和位置。泛区内共有人口 21. 322 2 万人。泛区内居民住宅占地总面积为 28. 848 55 km<sup>2</sup>，每平方千米的住宅面积上平均人口数为 0. 739 108 万人，据此得到每个居民居住地的人口概化数值。图 2 为永定河泛区内村庄位置分布，圆圈的大小代表该村庄人口数目所在的范围。

对计算结果进行整理得到各个村庄在不同来流时的平均水深和风险人口，据此进行伤亡评估。永定河泛区地处平原，根据修正前的 D&M 公式(7)，按 Force=0 考虑，不同的预警时间下永定河泛区各个村庄伤亡人数见表 2 中括号内数值，与括号外相同时省略。将公式(8)代入公式(7)重新进行计算永定河泛区不同来流情况下的洪水灾害伤亡结果见表 2 中括号外数值(Force=(A<sub>x</sub>/A<sub>L</sub>)exp(-WT))。表 3 列出了计算所需的 Force 值。

由表 3 可以看出，同一预警时间下不同来流时的 Force 值有所不同，同一来流过程下 Force 随着预警时

间的增加而减小。对比表 2 中括号内外数值可以看出：在没有预警时(WT=0)，Force 增加则 LOL 随之增加；在预警时间较短时(0<WT≤5)，Force 越大则 LOL 对 WT 的变化越敏感；在预警时间较长时，Force 对 LOL 的影响较小，Force 取不同值时的 LOL 基本相同；当预警时间达到 7 h 两种方式计算出的 LOL 均为零。

综上可知，利用修正后的 Force 计算出的 LOL 与实际情况更加相符，有效地体现出当 WT 较大时，不论 Force 取值如何，LOL 变化不大的特征，这一修正方法可以在以后的洪水生命损失计算中加以使用。同时可以看出运用数值模拟进行防洪减灾预报的重要性，越早进行洪水灾情预报越能够有效地减少人口伤亡。

4 结 论

本文根据建立的一二维衔接洪水演进数学模型，对永定河蓄滞洪区洪水演进进行数值模拟，得到了不同来流情况下泛区内水位、最大流量、滞洪量、淹没范围等水力信息。并利用 Dekay M. L. 建立的经验公式进行洪灾生命损失计算，在计算过程中发现洪水风险特征与预警时间的相互影响关系不符合实际情况，因此对该经验公式进行了修正，并比较了修正前后的计算结果，分析表明修正后的经验公式从趋势变化上更加合理，公式中的系数还有待于进一步收集资料进行验证。

参考文献:

[1] Brown C A, Graham W J. Assessing the threat to life from dam failing[R]. Water Resources Bulletin, American Water Resources Association. 1988, 24(6): 1303-1309.

[2] Michael L DeKay, Gary H McClelland. Predicting loss of life in cases of dam failure and flash flood[J]. Risk Analysis, 1993, 13(2): 193-205.

[3] Graham W J. A procedure for estimating loss of life caused by dam failing[R]. DSO-99-06(USBR), 1999.

[4] Reiter P. Loss of life caused by dam failure: the RESCDAM LOL method and its application to Kyrkosjarvi dam in Seinajoki[R]. RESCDAM project, Final report of PR Water Consulting Ltd, Helsinki, 2001.

[5] 周克发, 李雷, 盛金保. 我国溃坝生命损失评价模型初步研究[J]. 安全与环境学报, 2007, 7(3): 145-149.

[6] 胡德秀, 周孝德, 杨杰. 基于不确定性分析的溃坝失事生命损失风险概率估算方法[J]. 西安理工大学学报, 2008, 24(2):

133-138.

[7] 付意成, 魏传江, 王启猛, 等. 区域洪灾风险评价体系研究[J]. 灾害学, 2009, 24(3): 27-32.

[8] 吴欢强, 傅琼华, 董建良, 等. 我国溃坝生命损失估算方法探讨[J]. 珠江现代建设, 2010(3): 14-18.

[9] 王晓航, 盛金保, 张行南, 等. 基于 GIS 技术的溃坝生命损失预警综合评价模型研究[J]. 水力发电学报, 2011, 30(4): 72-78.

[10] 殷丹. 浑河沈阳城市段洪灾损失评估研究[J]. 水利科技与经济, 2012, 18(12): 58-60.

[11] 黄家宝, 郑泳, 徐林春. 基于 GIS 的乐昌峡水利枢纽工程防洪调度洪灾损失评估研究[J]. 广州水利水电, 2012(1): 25-28.

[12] 黄凌, 孙月峰, 王晓玲. 基于人工神经网络的水库溃坝生命损失估算模型及应用[J]. 中国农村水利水电, 2012(1): 137-140.

[13] 赵安, 王婷君. 基于过程机理的洪灾生命损失评价模型框架初探[J]. 自然灾害学报, 2013, 22(1): 38-44.

(责任编辑 欧阳越)

(上接第 6 页)

[10] 高霁, 杨红龙, 陶生才, 等. 未来情景下东北地区极端气候事件的模拟分析[J]. 中国农学通报, 2012, 28(14): 295-300.

[11] Maurer E P, Adam J C, Wood A W. Climate model based consensus on the hydrologic impacts of climate change to the Rio Lempa basin of Central America[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2009, 13: 183-194.

[12] 袁文平, 周广胜. 标准化降水指数与 Z 指数在我国应用的对比分析[J]. 植物生态学报, 2004, 28(4): 523-529.

[13] 鞠笑生, 邹旭恺. 气候旱涝指标方法及其分析[J]. 自然灾害学报, 1998, 7(3): 51-57.

[14] Shahabfar A, Eitzinger J. Spatio-temporal analysis of droughts in semi-arid regions by using meteorological drought indices[J]. Atmosphere, 2013, 4(2): 94-112.

[15] Yuan X C, Zhou Y L, Jin J L, et al. Risk analysis for drought hazard in China: a case study in Huaibei Plain[J]. Natural hazards, 2013, 67(2): 879-900.

[16] Li B, Liang Z, Yu Z, et al. Evaluation of drought and wetness episodes in a cold region(Northeast China) since 1898 with different drought indices[J]. Natural Hazards, 2014, 71(3): 2063-2085.

[17] 郭志辉, 杨贵羽, 王喜凤. 松江流域近 50 年来降水演变规律分析[J]. 人民黄河, 2012, 33(12): 35-37.

[18] 王越, 江志红, 张强, 等. 基于 Palmer 湿润指数的旱涝指标研究[J]. 南京气象学院学报, 2007, 30(3): 383-389.

[19] 马建勇, 许吟隆, 潘婕. 基于 SPI 与相对湿度指数的 1961 ~ 2009 年东北地区 5 ~ 9 月干旱趋势分析[J]. 气象与环境学报,

2012, 28(3): 90-95.

[20] 严登华, 袁喆, 杨志勇, 等. 1961 年以来海河流域干旱时空变化特征分析[J]. 水科学进展, 2013, 24(1): 2-7.

[21] 刘志雄, 肖莺. 长江上游旱涝指标及其变化特征分析[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 3: 426-430.

[22] Wu H, Hayes M J, Weiss A, et al. An evaluation of the standardized precipitation index, the China-Z index and the statistical Z-Score[J]. International journal of climatology, 2001, 21(6): 745-758.

[23] 孟莹, 卢娟, 陈传雷. 辽宁 3 种旱涝指标的对比分析[J]. 辽宁气象, 2004(2): 22-23.

[24] 林盛吉, 许月萍, 田烨, 等. 基于 Z 指数和 SPI 指数的钱塘江流域干旱时空分析[J]. 水力发电学报, 2012(2): 20-26.

[25] 邵晓梅. 劲松河北省旱涝指标的确定及其时空分布特征研究[J]. 自然灾害学报, 2001, 10(4): 133-136.

[26] 袁文平, 周广胜. 干旱指标的理论分析与研究展望[J]. 地球科学进展, 2004, 19(6): 982-991.

[27] Qian W H, Zhu Y F. Climate change in china from 1880 to 1998 and its impacts on the environmental condition[J]. Climate Change, 2001, 50: 419-444.

[28] 王遵娅, 丁一汇, 何金海, 等. 近 50 a 来中国气候变化特征的再分析[J]. 气象学报, 2004, 62(2): 228-236.

[29] 唐亚平, 张凯, 李忠娴, 等. 1964 ~ 2008 年辽宁省旱涝时空分布特征及演变规律[J]. 气象与环境学报, 2011, 27(2): 50-55.

(责任编辑 欧阳越)

欢迎投稿 欢迎订阅 欢迎刊登广告