

吴婧, 翟国方, 李莎莎, 等. 业务持续规划及其在我国防灾事业的应用展望[J]. 灾害学, 2015, 30(1): 181-186. [Wu Jing, ZhaiGuofang, Li Shasha, et al. Business Continuity Plan And The Application Of The Disaster Prevention In China [J]. Journal of Catastrophology, 2015, 30(1): 181-186.]

# 业务持续规划及其在我国防灾事业的应用展望<sup>\*</sup>

吴婧, 翟国方, 李莎莎, 何仲禹

(南京大学 建筑与城市规划学院, 江苏 南京 210093)

**摘要:** 突发性灾害事件威胁着城市的发展, 面对越来越严峻的防灾减灾形势, 欧美、日本等发达国家的业务持续规划(Business Continuity Plan, BCP)在城市公共安全建设中发挥着越来越重要的作用。依据欧美和日本制定的BCP规范、指南以及规划成果, 系统介绍了BCP的内涵、特点及内容, 并探讨了与其他城市防灾减灾相关规划的关系, 最后介绍了目前BCP在国外的情况、在城市防灾中的作用和效果, 并总结BCP对我国城市公共安全和应急管理建设的启示, 以及未来在我国的应用展望。目前我国尚未将BCP运用于城市防灾减灾中, 而这种新规划的防灾减灾观点和做法都值得我们学习和借鉴, 将来应将其应用范围拓展。

**关键词:** 业务持续规划; 城市防灾减灾; 灾害应急处理; 公共安全管理

**中图分类号:** X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2015)01-0181-06

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2015.01.034

进入21世纪以来, 威胁城市的灾害日益多样化, 这些“天灾人祸”都给社会经济发展带来了巨大的挑战。随着现代生活对信息技术依赖的不断加强, 更多风险层出不穷, 更加难以预料。此外, 随着社会联系的加强, 灾害造成外部条件的变化也可能对自身造成巨大影响。在越来越严峻的灾害形势下, 业务持续规划(Business Continuity Plan, BCP)作为防灾减灾规划的补充和拓展, 受到了发达国家的重视, 目前美国、日本的各级政府机关都已经制定了BCP, 并积极向民间企业推广, 大大提高了全社会的防灾减灾能力。经过长期的努力, BCP在整个社会公共安全系统中发挥着越来越重要的作用, 在城市防灾减灾的实践中也产生一定效果<sup>[1-3]</sup>。

我国BCP研究起步较晚, 目前仅停留在信息部门主导, 以灾害(或数据)恢复为主体的低级阶段<sup>[2]</sup>, 本文目的主要是介绍BCP及其与城市防灾减灾规划的关系, 并探讨其在我国城市防灾减灾中应用的可能性。

## 1 BCP的产生及其发展

### 1.1 BCP的内涵

业务持续规划(Business Continuity Plan, BCP)

是在突发灾害中防止由于重要业务环节断裂导致全局瘫痪的规划。BCP强调系统整体最低性能的维护和业务恢复的主次, 即在突发灾难下利用有限的人力、财力、物力优先保障最重要业务的持续, 以维持整体的基本机能不瘫痪, 即便重要业务中断, 也能集中力量在最短时间内恢复其基本运行, 将损失降到最低。BCP的主要作用是将灾害损失控制在容许的限度内, 缩短恢复正常运营的时间<sup>[4]</sup>(图1)。BCP的保障目标包括四个层面, 首先是保证生命安全, 其次是防止次生灾害的发生, 再次是保证业务的持续, 最后是在此基础上参与区域协调<sup>[6]</sup>(图2)。

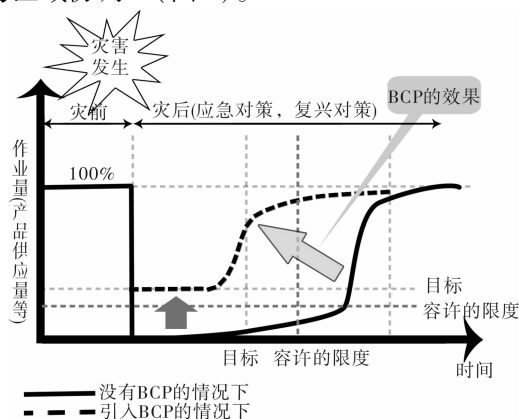


图1 BCP的概念示意图<sup>[5]</sup>

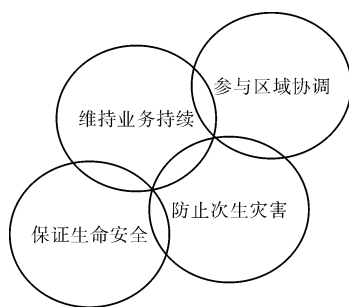
<sup>\*</sup> 收稿日期: 2014-07-31 修回日期: 2014-09-10

基金项目: 国家重点基础研究发展计划“九七三”项目(2010CB428506); 国家自然科学基金资助项目(41071325, 51308280)

作者简介: 吴婧(1989-), 女, 江苏南京人, 硕士研究生, 主要从事城市规划研究。E-mail: 176583721@qq.com

通讯作者: 翟国方(1964-), 男, 江苏江阴人, 博士, 博士生导师, 主要从事城市区域发展与规划, 城市区域风险管理研究。

E-mail: guofang\_zhai@nju.edu.cn

图2 BCP的目标示意图<sup>[6]</sup>

## 1.2 BCP 的主要内容

根据实施主体不同,BCP 可以分成政府维护城市运营的规划和企业应对风险的规划。城市层面的BCP 和企业的BCP 是相辅相成的,共同构成城市灾害应对体系。虽然不同层面BCP 针对的具体风险和防御重点不同,但制定BCP 的主体框架相似。

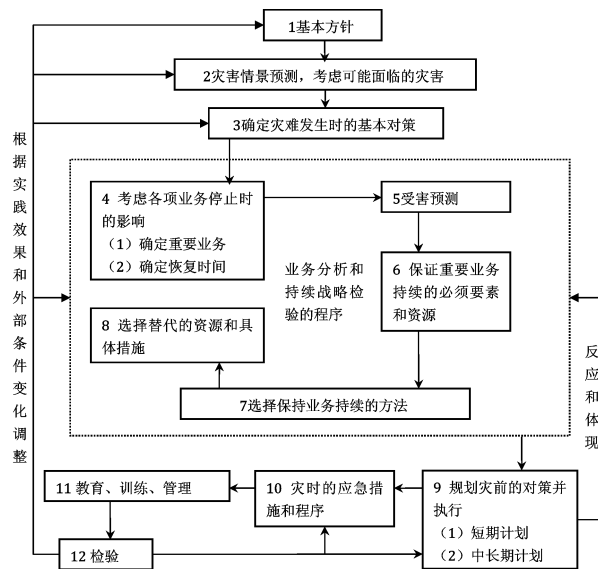
参考国外已有的市政BCP、BCP 指南以及国际相关规范,归纳BCP 的内容主要包括以下几个方面:基本方针和原则;受害预测,评估可能遭遇的损害情况;从众多业务中挑选出在非常时期需要优先保障的重要业务及其恢复的目标时间;拟定保障这些业务所需采取的措施;制定提高整体业务持续能力采取的中、长期措施。此外,为了提高各行业、各组织的业务持续能力,形成全社会的防灾体系,在制定了全市的BCP 后对企业、组织和个体进行制定BCP 的指导<sup>[7-10]</sup>。

由于BCP 制定是建立在假设受灾的条件下的,需要根据实践情况不断调整和改进,因此规划的制定是一个循环往复的过程,采用PDCA 循环(规划 plan、实践 do、评价 check、改善 act)的管理手法。将BCP 融入企业或城市的日常管理中,即业务持续管理(Business Continuity Management, BCM)<sup>[11]</sup>(图3)。

## 1.3 BCP 的特点

### 1.3.1 防灾思想的转变

BCP 防灾思想的转变首先体现在对灾难的认识上,将传统防灾的消极承受和侥幸心理转变为积极应对灾难,即承认风险和灾害必然带来损失,强调个体自主地、积极地采取措施将损失控制在一定范围,并能够在遭受灾害后快速恢复。在这种认识指导下,灾难发生后应急保障也从挽救生命、保护财产转变为保障基本安全的基础上,保证企业生产的快速恢复和城市机能的基本运行,至少保证巨大灾难下不被完全摧毁。这种转变顺应了现代风险社会的趋势,防灾减灾不仅仅是灾后的临时应急措施,而是将风险管理融入日常管

图3 BCP 流程示意图<sup>[11]</sup>

理之中,使防灾减灾成为常态。

### 1.3.2 系统性

BCP 强调灾时城市最基本机能的维持,需要从城市系统出发全面考虑。BCP 考虑的业务涵盖城市运行的各个层面,不仅包括灾后需要应急处理和恢复的事项,还包括必须优先的平时业务,如医院病患的安全、给排水管道保障、垃圾处理等。业务类型上包括政府机关运行、生命财产安全保护、生命线系统维护、社会经济维系等方面<sup>[7]</sup>。

### 1.3.3 社会性

BCP 不同于传统防灾规划,从政府单方面规划扩展到各行各业参与的全社会性防灾规划。业务持续关系到企业的切身利益,企业也乐于接受。企业个体的生存需要社会提供资源和服务,灾害中仅靠自身力量是无法实现业务持续的,广义的BCP 强调社会间的合作,通过构筑灾害信息共享平台,建立部门、企业间的合作组织作为合作的基础<sup>[12]</sup>。这大大增强了企业的社会责任意识,城市层面的BCP 的实现也离不开地方和企业的参与,BCP 使各社会主体认识到城市防灾减灾的重要性,形成全社会参与的业务持续系统,将大大提高城市抵御风险的能力。

### 1.3.4 重点性和时序性

BCP 以认识灾害发生时能够利用资源的有限性为前提,挑选出关系到全局的最主要业务优先处理,强调主次分明,而不像传统的防灾规划需要做到面面俱到。首先根据灾害情景预测,选择出重要的业务和恢复正常运营所必须的资源,再根据重要性分别确定各个业务事项的恢复目标时间,并以此为目标制定复兴计划和平时的准备<sup>[13]</sup>。

如《东京都市政 BCP(地震篇)》中将市政的平时业务、应急和复兴业务按照对“保护人民生命、生活和财产”和“维持城市机能”的影响分成: 有重大影响的业务、有较大影响的业务、有一定影响的业务和基本无影响的业务四大类。有重大影响的业务要求立即采取应急行动, 并在 3 d 之内恢复; 有较大影响的业务必须在 3 d 之内行动, 一周之内恢复; 有一定影响的业务必须在一周之内行动, 30 d 之内恢复; 基本无影响的业务可以在一周后采取行动。保证应急救援到灾后恢复都能有序进行<sup>[7]</sup>。

#### 1.4 BCP 与其他规划的关系

##### 1.4.1 BCP 与城市防灾规划的关系

传统的城市防灾规划是事先预防、事中应急、事后恢复的综合性规划, 需要全盘考虑, 面面俱到。而 BCP 前提是认识到灾时资源有限性, 在这样的条件下许多行动是无法实现的, 其主旨是灾时维护整体的最基本机能, 只需考虑关键的业务, 与防灾规划相比更具有针对性。

在保障的业务层面, BCP 虽然涉及平时业务、应急业务和复兴业务的全部业务类型, 但只要在这些业务中抽取整体运营的关键业务, 并保证这些业务的最低程度即可。而防灾规划需要综合考虑预防业务、应急业务和灾后复兴业务, 不需要考虑平时业务(图 4、图 5)。BCP 与城市防灾规划的具体异同见表 1。

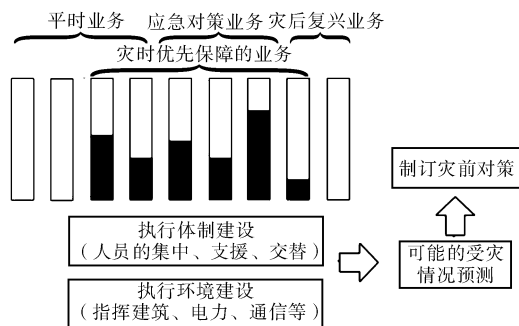


图4 BCP保障的业务示意图<sup>[7]</sup>

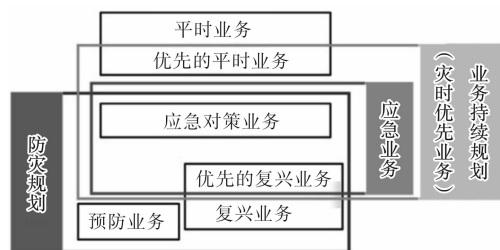


图5 BCP与防灾规划区别示意图<sup>[7]</sup>

##### 1.4.2 BCP 与灾害恢复规划的关系

业务持续的概念最早源于灾难恢复, 灾难恢复规划(Disaster Recovery Plan, DRP)是为了减少

灾难带来的损失和保证信息系统所支持的关键业务功能, 灾难发生后及时恢复和继续运作所作的事前计划和安排<sup>[14]</sup>, 主要针对信息技术与管理方面, 强调如何采取行动。可以说 DRP 是 BCP 的一部分, BCP 内涵和外延更宽泛, 以不仅仅是应对突发事件的措施和反应机制, 而是日常管理要求和规章制度<sup>[1-2]</sup>。

##### 1.4.3 BCP 与应急预案的关系

BCP 与应急预案内容有部分重叠, 但理念和重点有很大区别。应急救援预案是指针对可能发生的事故, 为迅速、有序地开展应急行动而预先制定的行动方案<sup>[15]</sup>, 一般站在政府的视角, 针对某个特定灾种, 措施主要包括人员疏散、搜救、伤亡处理、避难, 重点在于快速、高效地响应<sup>[2]</sup>。BCP 虽然无法实现所有灾害都全盘考虑, 但以风险分析为规划的前提, 需要考虑各方面遭受的破坏可能性, 不仅仅局限于灾害本身, 重点也不仅仅局限于传统救援, 更加关注生产恢复、城市运行等更高层次的内容。

## 2 BCP 在国外的实践与效果

### 2.1 发展情况

#### 2.1.1 美国

美国的 BCP 由“灾难恢复”发展而来。早在 1970 年代, 随着信息技术的迅猛发展, 美国银行、金融等行业就认识到信息恢复的重要性, 出现了数据备份的外包服务。1990 年代以后, 随着个人电脑(Personal Computer, PC)技术的迅速发展, 以大型机为代表的集中计算模式转向以 PC 为代表的分散计算模式, 这种变化使灾难恢复具有了保障业务持续的功能。特别是经历了“千年虫”和“9·11”事件之后, 业务持续的理念得到进一步验证, BCP 也受到全世界的关注。“9·11”事件后美国政府重点加强了 BCP 机制的建设, 2003 年颁布了 E. O. 13286(Executive Order, E. O.), 通过宪法维护政府的业务持续, 确立包括白宫在内的所有行政机关的持续规划(Continuity of Operations plan, COOP), 保障在非常时期的权力委任, 重要资源、设施和数据的保管, 灾后复兴的重要资源供应, 代替工厂的运行等业务持续事项。2004 年根据 COOP, 联邦政府制定了更加细化的政府准备令 FPC65(Federal Preparedness Circular, FPC), 进一步明确要求各政府机关制定 COOP。除联邦政府外, 美国各个州政府也根据自身的情况积极制定应对突发事件的规划, 大多涉及业务持续的内容。此外, 非政府组织也积极响应, 制定了各行业的

BCP 标准,促进了 BCP 在民间的普及<sup>[1,16]</sup>。

### 2.1.2 日本

虽然日本 BCP 发展相对较晚,但由于政府的重视,发展和普及十分迅速。2005 年为确保首都中枢机能的持续性,中央防灾会议通过的《首都直下地震对策大纲》中就确立了中央省厅 BCP 的战略地位。2007 年内阁府颁布《中央省厅业务持续规划指南》,包含了各省厅 BCP 的内容和指导。2010 年内阁府发表了《地震灾害地方公共团体的业务持续规划手续解说》,展示了都道府县和区市町村 BCP 的编制要领<sup>[17-18]</sup>。自上而下的行政单元基本形成了 BCP 的体系。

日本政府对于企业防灾也非常重视。2003 年内阁府确立了企业防灾和业务持续为主要课题的调查审议制度。2005 年开始相继颁布了《业务持续规划指南(第一版)》、《中小企业 BCP 运用制定指南》,对企业编制 BCP 进行指导,促进了 BCP 在全社会中的普及。2006 年至 2008 年间各行业联合会也纷纷发表本行业的业务持续规划指南,丰富了业务持续规划的内容,增强了各行业的针对性<sup>[3,19-20]</sup>。

## 2.2 发展特点

### 2.2.1 政府主导,民间积极参与

从美国和日本 BCP 的发展历程不难看出,政府在 BCP 的推广中起主导作用,由政府自上而下通过约束性的文件,首先在政府机构中普及,从中央到地方政府都制定了符合自身情况的 BCP,此外还建立健全了战略管理机构、组织协调机构和办事机构,为 BCP 提供强有力的保障。企业作为城市防灾减灾重要组成部分,政府也对其积极引导,通过宣传、制定规范等方式鼓励企业制定 BCP。此外,还充分利用非政府组织的作用,有力地推进 BCP 在全社会的普及。

### 2.2.2 与防灾减灾规划相配合

不论美国还是日本,政府层面的 BCP 都与城市防灾减灾规划紧密相连,作为防灾减灾规划的补充和拓展<sup>[21-22]</sup>。以日本为例,防灾体系最上位的规划是防灾基本规划,其次是指定行政机关和公共机关制定防灾业务规划,以及地方公共团体制定各自的地域防灾规划。中央防灾会议制定的防灾基本规划、首都直下地震对策大纲等中都提及 BCP,根据灾害对策基本法第 2 条第 3 号规定,内阁总理大臣指定的行政机关全部制定了 BCP<sup>[23]</sup>。地方政府层面,地域防灾规划大多在重新编制和修改时增加了 BCP 的相关内容,作为防灾规划的组成部分,各地方行政单元也根据自身特点制定了单独的 BCP<sup>[24]</sup>。BCP 的制定和实施主体与城市

防灾减灾规划一致,能够为其制定和实施提供一定的保障。

### 2.2.3 实践中不断完善

由于风险是变化的,人们对风险的认识也需要一个过程,在实践中不断调整是 BCP 的主要特点之一。美国和日本都十分重视 BCP 的与时俱进。如美国政府机构中有紧急事务管理局(Federal Emergency Management Agency, FEMA)作为 BCP 的支撑机构,负责监督,此外还有政府责任办公室(Government Accountability Office, GAO)作为补充,负责对各机关的 BCP 制定和实施情况调查,定期发表调查报告,并提出整改建议<sup>[16,25]</sup>。而 2011 年“3·11”东日本 9.0 级大地震以来,日本针对大地震后 BCP 暴露的问题进行了大量研究,并提出了诸多未来的研究课题。

### 2.2.4 不断推进 BCP 标准化

BCP 的标准化也是发展趋势,如英国规格协会(British Standards Institution, BCI)早在 2003 年就以《良好的实践指南》(Good Practice Guidelines)为依据制定了 PAS56,作为企业 BCM 的参考。在此基础上,2006 年 BCI 发布 BS25999,成为第一个 BCM 的国际标准<sup>[10,26]</sup>。

## 2.3 实践效果

BCP 最初效果在 2001 年的“9·11”事件中得以展现。世贸大楼中的企业中,制定了 BCP 的 400 家企业迅速地从灾害中恢复过来,而毫无防备的企业大多由于丢失了重要业务数据,业务无法恢复,最后导致破产<sup>[2]</sup>。

2011 年“3·11”9.0 级大地震是日本历史上遭遇的最大灾难之一,但巨大灾难并未造成日本社会的瘫痪,这与日本长期以来的防灾建设、灾害管理和应急体系的建设是分不开的。大地震实际的灾后恢复比预想的要迅速,根据日本政府机构同年 7 月对制造业的调查,4 个月的时间,硬件已 100% 恢复,受灾公司 90% 恢复正常生产。由于生产供应链中断,间接受害的公司中 15% 完全从地震中恢复,其余基本恢复了 80% 的水平。这种在巨灾中迅速恢复的能力是 BCP 效果的表现<sup>[27,28]</sup>。

## 3 启示和结论

2000 年以来我国经历了一系列重大自然和社会灾难的考验,全社会灾害意识不断加强,灾害迅速响应能力也不断提高,伴随着大规模的旧城改造和城市建设,城市防灾硬件建设突飞猛进。但与发达国家相比还存在许多不足,尤其体现在灾害管理比较薄弱:思想上没有树立灾害观念,

组织上没有形成稳定的灾害处理体制,民间自救、互助能力较弱等等<sup>[29-31]</sup>。

随着经济社会的发展,城市公共安全建设将越来越受到重视,BCP作为防灾规划发展到一定阶段的产物,现阶段可以鼓励有条件的企业和政府根据自身情况制定BCP,全社会范围普及还需要一个漫长的过程,但BCP的防灾理念值得我们借鉴,一些具体做法也可以作为防灾规划和应急管理的补充。

### 3.1 观念上的启示

随着市场经济的发展,计划经济时期的单中心的灾害管理模式已经不能满足需要,发挥地方力量,政府救济和自救结合成为大势所趋<sup>[32]</sup>。虽然经历了2003年“非典”、2008年汶川地震等一系列灾难后全社会对灾害的认识有了很大提升,但和发达国家相比仍有很大的差距,全民的防灾意识和能力不强,尤其是社会重要组成部分的企业防灾意识比较薄弱,大多中小企业没有树立持续发展的观念,普遍存在侥幸心理,平时没有准备,灾害发生后应对能力较差,只能被动等待救援。BCP作为一套业务运行规律的管理要求和规章制度,将防灾意识融入社会日常生活之中,使风险管理常态化。要求管理者树立全局观念,平时认清风险,做好准备,灾时统筹考虑,积极应对。通过改变传统防灾观念,尤其是提高民众和企业的防灾参与意识,为构建安全城市打下坚实基础。

### 3.2 实践上的启示

BCP中许多实践对城市规划和防灾减灾规划也有借鉴作用。主要有以下几点:

(1)BCP以受灾预测和风险分析为规划前提,首先针对一种灾害预测可能的受害情形,认清存在的主要风险,以及这些风险对业务的影响,不仅大大提高了决策的科学性也提高了措施的针对性和可操作性。目前我国城市防灾规划操作性不强很大程度和缺乏科学、准确的风险分析有关。因此,我们可以考虑将这种灾害预测和针对业务的风险影响分析的方法运用于城市防灾规划和应急管理中,作为制定规划的依据。

(2)BCP中灾时业务的区别对待的处理方法可以运用于我国应急管理中,根据风险影响分析,分清各个业务的轻重缓急,将各个时期、各个部门的行动落实到具体事项上。我国目前的应急管理的主要问题是缺乏一个统一的构架,造成各部门重叠和打架的现象,建立灾时统一的领导和管理体制十分必要<sup>[33]</sup>。而BCP这种灾时业务的处理方法有利于确保有条不紊开展应急救援,避免部

门间打架,浪费宝贵的时间和有限的资源,值得我们学习。

(3)BCP中资源备份的做法也值得学习,尤其是在城市规划时充分考虑到可能的风险,为了防止某一地区受灾无法运行,造成总体城市机能的瘫痪,尽量避免将同一个重要功能过分集中在一处,要做到留有余地。城市基础设施建设时也要保证留有余地。

此外,BCP中其他很多具体的技术性和管理措施也值得我们学习,如灾时通信手段的确保、职员的集中、情报系统的维护和物资储备等。

### 3.3 BCP未来在我国的发展展望

随着我国经济社会的发展,对安全的要求将越来越高,城市防灾硬件设施建设完备后,公共安全管理将越来越受关注。城市层面,BCP作为防灾减灾规划的补充,具有很强的可操作性,能够弥补目前我国城市防灾减灾存在的一些问题,符合城市公共安全发展的趋势;企业层面,BCP作为一种差别化、可持续化的经营策略,是企业在风险社会生存发展的保障,未来将会被更广泛地接受。

## 参考文献:

- [1] 王德迅. 业务持续管理的国际比较研究[J]. 世界经济, 2008(6): 74-80.
- [2] 靖鲲鹏, 宋之杰. 风险管理的新方法——业务持续管理[J]. 燕山大学学报: 哲学社会科学版, 2013, 14(1): 92-99.
- [3] 西川智. 防災政策としての事業継続計画の推進[J]. 総合論文志, 2009, 1(7): 41-44.
- [4] 木根原良樹. 「都市自治体と業務継続計画(BCP)」災害? 事故に直面したときに市長が取るべき行動[EB/OL]. [2014-06-12]. [http://www.toshikaikan.or.jp/shisei/pdf/201210/2012\\_10\\_special.pdf](http://www.toshikaikan.or.jp/shisei/pdf/201210/2012_10_special.pdf).
- [5] 東京都. 都政のBCP(東京都業務継続計画)地震編[EB/OL]. (2010-11)[2014-06-29]. <http://www.bousai.metro.tokyo.jp/japanese/tmg/pdf/201121bcpgaiyou.pdf>.
- [6] 企業等の事業継続? 防災評価検討委員会. 事業継続ガイドライン——わが国企業の減災と災害対応の向上のために[EB/OL]. (2007-03)[2013-06-25]. <http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chuobou/20/pdf/shiryo51.pdf>.
- [7] 東京都. 都政のBCP(東京都業務継続計画)地震編[EB/OL]. (2010-11)[2014-06-29]. <http://www.bousai.metro.tokyo.jp/japanese/tmg/pdf/201121bcpgaiyou.pdf>.
- [8] 横浜市. 横浜市業務継続計画(地震編)[EB/OL]. (2011-04)[2014-06-25]. <http://www.city.yokohama.lg.jp/so-mu/org/kikikanri/bcp/jishinbcp.pdf>.
- [9] 財団法人日本情報処理開発協会. 事業継続管理(BCM)に関するガイド[EB/OL]. (2006-03)[2014-06-25]. <http://www.isms.jp/dec.jp/doc/BCM1803.pdf>.
- [10] BIS BS 25999-1: 2006 Business continuity management[S]. British: BSI, 2006.

- [11] 静岡県経済産業部. 静岡県事業継続計画モデルプラン(第2版)[EB/OL]. [2014-07-05]. <http://www.pref.shizuoka.jp/sangyou/sa-510/bcp/modelplan.html>.
- [12] 佐藤将史. 首都直下地震に対応した業務継続計画の課題[J]. 知的資産創造, 2008, 4: 32-47.
- [13] NPO 法人事業継続推進機構. 第1部 BCPの基礎になる防災対策の実施[EB/OL]. [2013-06-05]. <http://www.pref.ehime.jp/h30100/bcpstepupguide/documents/bcpehime-1bu.pdf>
- [14] 张学军, 许彦冰. 灾难恢复规划在证券业中的应用[J]. 上海理工大学学报: 社会科学版, 2006, 28(3): 79-84.
- [15] 百度百科. 应急救援预案[EB/OL]. (2014-04-20) [2014-07-28]. [http://baike.baidu.com/link?url=2X1\\_TW4FgmWBvhtX\\_zA4T4RR2BRqURBLEZZXAcLT3-E\\_yEK-TcoDmgtG\\_pTvJUV5k](http://baike.baidu.com/link?url=2X1_TW4FgmWBvhtX_zA4T4RR2BRqURBLEZZXAcLT3-E_yEK-TcoDmgtG_pTvJUV5k).
- [16] 渡辺弘美. 米国におけるBCP(事業継続計画)DR(災害復旧)への対応状況[J]. ニューヨークだより, 2006(5): 1-29.
- [17] 目黒区. 目黒区業務継続計画(地震編)[EB/OL]. (2008-03-25) [2013-07-25]. [www.city.meguro.tokyo.jp/gyosei/. /keikakuzenbun.PDF](http://www.city.meguro.tokyo.jp/gyosei/. /keikakuzenbun.PDF).
- [18] 内閣府(防災担当). 地震発災時における地方公共団体の業務継続の手引きとその解説[EB/OL]. (2010-04) [2013-06-05]. <http://www.bousai.go.jp/taisaku/chuogyomukeizoku/chiou/pdf/h22kaisetu.pdf>.
- [19] 永井幸寿. 災害の経験からみた「事業継続計画」(BCP)[EB/OL]. (2011-04) [2013-06-05]. [www.shojihomu.co.jp/0708qa/nblpdf/877.pdf](http://www.shojihomu.co.jp/0708qa/nblpdf/877.pdf).
- [20] 中小企業庁. 中小企業の事業継続計画(災害対応事例からみるポイント)[EB/OL]. (2011-05) [2014-07-01]. <http://www.chusho.meti.go.jp/keiei/antei/download/110531Bcp-Reserch.pdf>.
- [21] 张翰卿, 戴填志. 美国的城市综合防灾规划及其启示[J]. 国际城市规划, 2007, 22(4): 58-64.
- [22] 王江波, 苟爱萍. 日本防灾基本计划及其启示[J]. 四川建筑, 2011, 31(6): 39-44.
- [23] 内閣府防災担当, 中央省庁事業継続計画(概要)[EB/OL]. (2007-06) [2014-07-28]. <http://www.bousai.go.jp/taisaku/chuogyomukeizoku/pdf/200812houkoku.pdf>.
- [24] 丸谷浩明. 事業継続計画(BCP)と普及方策について[EB/OL]. [2014-07-28]. [http://www1.gifu-u.ac.jp/~ceip/iDRiM/forum01/idrim06\\_forum01\\_maruya\\_paper.pdf](http://www1.gifu-u.ac.jp/~ceip/iDRiM/forum01/idrim06_forum01_maruya_paper.pdf).
- [25] GAO. Report to the chairman, committee on government reform, house of representatives; Continuity of operations. [EB/OL] (2005-04) [2013-07-01]. <http://www.gao.gov/new.items/d05577.pdf>
- [26] 内閣府防災担当. 企業における情報セキュリティガバナンスのあり方に関する研究会報告書[EB/OL]. (2005-08-01) [2013-07-25]. <http://www.docin.com/p-46822670.html>.
- [27] Mary. 日本 311 大地震中日本企业应对的具体案例和 BCP 的完善[EB/OL]. (2011-08-30) [2013. 6. 20]. <http://www.jifang360.com/news/2011830/n230227963.html>.
- [28] 浅野憲周. 業務継続計画(BCP)再考——大震災から企業は何を学ぶべきか[J]. 知的資産創造, 2012(2): 6-21.
- [29] 吴云清, 翟国方, 李莎莎. 3·11 东日本大地震对我国城市防灾规划管理的启示[J]. 国际城市规划, 2011, 26(4): 22-27.
- [30] 阮梦乔, 翟国方. 日本地域防灾规划的实践及对我国的启示[J]. 国际城市规划, 2011, 26(4): 16-21.
- [31] 李明力. 从“汶川地震”看中国防灾救灾体制的状况[J]. 菏泽学院学报, 2009, 31(3): 8-11.
- [32] 呼唤. 新中国灾害管理思想演变研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2013.
- [33] 唐裙裙. 城市应急管理系统框架模型的研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.

## Business Continuity Plan and its Application Prospect in Disaster Prevention in China

Wu Jing<sup>1</sup>, Zhai Guofang<sup>1</sup>, Li Shasha<sup>1</sup> and He Zhongyu<sup>1</sup>

(School of Architecture and Urban Planning, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

**Abstract:** Unexpected disaster events threaten the development of a city. In face of the more and more serious disaster prevention and reduction situation, Business Continuity Plan (BCP) of the developed countries in Europe, America, and Japan etc. plays a more and more important role in the construction of city public security. According to BCP norms, guideline and planning results in Europe, America and Japan, the connotation, characteristics and content of BCP are introduced systematically. The relation between BCP and the related prevention and reduction planning in some other cities are discussed. Finally, the current development situation of BCP in foreign countries, and its function and effect in urban disaster prevention are introduced. The Enlightenment of BCP to China's urban public security construction and disaster emergency management, and the future prospect of the application of BCP in China are summarized. At present BCP has not yet been used in urban disaster prevention and mitigation in China, however, this new planning idea and practice is worth learning and reference, and should be applied more widely.

**Key words:** Business Continuity Plan; urban disaster prevention and mitigation; disaster emergency response; public safety administration

接小峰, 徐林荣, 曹禄来, 等. 铁路水害特征与致灾概率预测模型研究[J]. 灾害学, 2015, 30(1): 187-192. [Jie xiaofeng, Xu linrong, Cao lulai, et al. Characteristics of water disaster along railway and its probability prediction model [J]. Journal of Catastrophology, 2015, 30(1): 187-192.]

# 铁路水害特征与致灾概率预测模型研究<sup>\*</sup>

接小峰, 徐林荣, 曹禄来, 吴 强

(中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075)

**摘 要:** 我国铁路水害频发且损失巨大, 如何有效防范, 已成业界难题, 更为运营部门汛期工作重点。但铁路水害泛指由降水或其他水源造成断道、限速事故的灾害, 预测预报缺乏针对性。鉴于此, 首先, 借鉴水利学水害概念, 丰富了铁路水害的机理内涵, 再结合铁路调研, 明确了预测目标的外延; 其次, 基于京广线湖(南)广(东)区段水害气象、地质与设施条件统计, 分析了铁路水害的时空分布特征, 建立了致灾因子指标体系; 最后, 针对降水这一关键诱发因子, 筛选出 1 h 与日降雨量两个相关性最强的计算参数, 建立了 logistic 概率预测模型。模型检验表明: 其统计学检验通过, 且对于灾害实际情况预测效果较好, 可为铁路水害风险管理及防范措施的制定提供参考。

**关键词:** 铁路水害; 特征分析; Logistic 模型; 概率预测; 风险管理

**中图分类号:** U298; X43      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-811X(2015)01-0187-06

**doi:** 10.3969/j.issn.1000-811X.2015.01.035

我国铁路防洪工作中采用“水害”概念。狭义的铁路水害概念最早见于 1960 年京广线洪水事件<sup>[1]</sup>, 并逐渐发展演变为水淹、崩滑流乃至路基病害等多灾种的总称<sup>[2]</sup>。广义的水害概念提出较晚, 魏庆朝<sup>[3]</sup>将由降水或者其他水源作用, 造成铁路行车中断的灾害称为铁路水害, 最早阐释了铁路水害的诱发因素与灾害后果, 形成了定义的内涵雏形; 成都铁路局<sup>[4]</sup>指因降雨或洪水侵袭, 造成路基轨道等铁路设施损毁, 甚至限速慢行或运输中断而降低了运输能力, 并可能伴有人员伤亡与其他损失的灾害, 进一步丰富了铁路水害的危害形式与后果, 并界定了滑坡、溜坍等 40 多个灾种体系的外延。但值得注意的是: 现有铁路水害定义多侧重于管理, 强调对线路运营的影响, 并没有很好地反映降雨等水体与线路基础工程、周边地质环境相互作用的机理。鉴于此, 本文借鉴水利学中水害的定义<sup>[5]</sup>(水量骤增或骤减, 水流能量及水中物理化学成分或水与周围介质作用产生的灾害), 认为铁路水害是由山洪或排水不良汇水水能量, 降雨入渗或降雨与周围地质环境作

用, 直接或由其诱发的次生灾害作用于桥隧涵等基础工程设施, 并造成断道、限速事故的灾害。结合铁路水害多年防治经验<sup>[6]</sup>, 可归类为原生灾害、次生灾害及衍生灾害, 且一般以原生灾害(地质灾害)为预测预报重点。目前, 铁路水害防治基本覆盖了汛前、汛期及灾后整个过程, 涉及规律统计、防洪区划、预警阈值及应急管理<sup>[7-10]</sup>等方面, 但因包括崩滑流、路基病害及水淹等多灾种, 预测预报难度大, 研究仍处于探索阶段。因此, 基于铁路水害新的认知, 本文开展了其发育特征分析、致灾因子指标体系构建以及预测预报方法的研究。

## 1 研究区概况

依托铁道部科技项目<sup>[6,11]</sup>, 本文以京广线湖(南)广(东)区段为研究区, 统计了 2010、2011 年造成断道、限速事故的水害情况如下:

水淹钢轨发生 53 次, 造成断道、限速事故 30

<sup>\*</sup> 投稿日期: 2014-05-05      修改日期: 2014-06-20

基金项目: 铁道部科技研究开发计划项目“高速铁路灾害防治与应急救援技术措施研究”(2011G017-C); 国家自然科学基金项目“泥石流危害桥隧工程承灾链特征与工程易损度动态评价方法研究”(41272376); 中南大学中央高校基本科研业务费专项资金资助“基于 I-D 曲线及 Logistic 分析的铁路水害雨量预警方法研究”(2013zzts239)

作者简介: 接小峰(1988-), 男, 山东烟台人, 硕士研究生, 从事地质灾害评估与防治等方向研究。

E-mail: jixiaofeng1988@163.com



次, 占同期水害总数的 63.82%, 是最主要的水害灾种。空间上集中在: ①正线 K2240 附近(里程范围约 2 km, 2 次); ②站线江村站(机 4 线、联四线及上下编场, 18 次); ③站线大朗站(货 2~6 线、走行 1 线, 6 次); ④田螺线(韶关东站, 4 次)。地质环境为平原、低矮丘陵, 地势平坦低洼及河湖毗邻的区段, 基础工程形式为路基、车站; 时间上多发于成灾日降雨量达 130~250 mm 时。

边坡溜塌发生 12 次, 造成断道、限速事故 9 次, 占 19.15%, 为区内第二大水害。空间上集中分布在以下区段: ①正线 K2080~2095(15 km、5 次); ②正线 K2049 附近(2 km、3 次); ③站线江村站(联四线, 1 次)。地质环境为山区或丘陵区, 基础工程形式为高路基、路堑工程; 时间上多发于成灾 1 h 雨量达到 40 mm 以上时。

线路下沉仅发生 6 次, 但均造成断道、限速事故, 占 12.77%, 为少发生的水害。空间上发生在琶江口采石场专用线与江村站联四线, 地质环境为平原、丘陵地带, 基础工程形式为路基工程; 时间上多发生于连续降雨量超过 30 mm 时。

崩塌、泥石流等发生 27 次, 但选线绕避了复杂地质区域, 且地质灾害属于重点防治目标, 仅造成 2 次铁路事故。分别为 2010 年 4 月 14 日京广线 K1938+805 堑坡碎石及砂土坍塌, 2010 年 5 月 6 日京广线 K2078+750 发生泥石流。两者均发生在高路堑地带, 坡体裂隙发育、松散破碎。

## 2 铁路水害发育特征分析

基于京广线湖广区段历年防洪报告<sup>[2]</sup>统计与实地调研发现, 铁路水害发生的类型及时空具有以下特性或规律:

(1) 洪涝灾害、地质灾害及路基病害是水害中的多发类型, 并多属于突变性灾害。水淹占研究区水害总数的 61%, 通常仅会造成限速事故。地质灾害占 23%, 且属于突发性灾害, 往往损坏基础设施而造成断道事故、威胁行车安全。路基病害属于缓变性灾害, 具有较为充分的响应时间, 且易于发现。因此, 铁路水害预测与防范重点应为突发性的地质灾害, 现有研究<sup>[2]</sup>也多将崩滑流等作为目标。

(2) 铁路建设本身及后期周边工程建设对水害影响突出。①铁路工程对坡度、曲率都有很高的要求, 人工开挖路堑、填筑路堤等工程活动会切割破坏原有地质单元稳定性, 施工弃土亦可促使崩滑流发生。而防护工程可改良沿线不利的地质条件; ②铁路使用年限较长, 且运输促进经济发

展, 线路周边后期会出现大量工程建设, 影响流域汇水情况, 如京广线 2013 年“8.16”乐昌水害。③桥隧、路基等基础工程易损性不同, 承灾能力也有差异。

(3) 铁路线路影响域一般为线路经过的流域周界连线, 整体呈枝叶状。京广线 K2078+750 为一处山谷, 沟道于山脚下穿过京广线汇入毗邻河道(图 1)。2010 年泥石流爆发时, 京广线与降雨地点相距较远(图中圆环标志处), 但沟道上游强降雨经流域汇水后形成的泥石流却对铁路造成了危害, 约 3 000 m<sup>3</sup> 泥石流体掩埋了 50 m 钢轨。因此, 铁路水害雨量监测点应充分考虑流域影响, 还应将流域汇水、常年流水及季节性洪水威胁予以考虑。

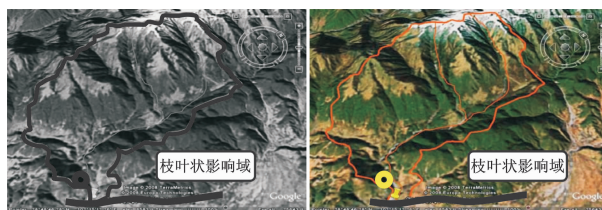


图 1 京广线 K2078+750(楔入处)与降水区域(圆环)位置

(4) 地质条件是铁路水害最重要的致灾因子(内部潜在因子)之一。调研发现, 京广线衡阳-白石渡区间里程中 K1800~K1850、K1900~K1950 等历年均有水害发生(表 1), 灾害历史丰富, 具有明显继承性特征。实地调查中依据规范进行了地质条件复杂程度划分, 灾害多发区段较少发区段地形地貌、地质构造及岩(土)体结构等更为复杂。因此, 水害历史情况、地质环境条件均应作为空间风险区划的依据。

表 1 京广线衡阳-白石渡区间水害里程统计表

年份	里程		
	K1700-K1750	K1800-K1850	K1900-K1950
2005	无 -	-	K1935+590 K1938+670
2007	-	K1803.9 - K1804.0	K1897.0 - K1903.0
2009	-	-	-
2010	-	K1812.0 - K1814.0	K1938+800 K1948+350
2011	-	K1815+900 K1837+900	-

(5) 降水也是铁路水害最重要的致灾因子(外部诱发因子)之一, 但各雨量类型与水害的相关性不同。2005-2011 年京广线衡阳-白石渡区间灾情与年平均降雨量变化并不一致(图 2), 因此, 以



表2 铁路水害致灾因子指标体系

致灾因素	指标名称	获取方式	建议参评方式(GIS)	性质	参评指标	用途
内部潜在因子	地形地貌(T)	地质勘查	地形地貌分级格栅图	定性	$S_T$	铁路水害区段的危险区划以及降雨时的发生概率预测等
	地层岩性(L)	地质勘查	地层岩性分级格栅图	定性	$S_L$	
	地质构造(S)	地质勘查	地质构造分级格栅图	定性	$S_S$	
	地震烈度(I)	地质勘查	地震烈度分级格栅图	定量	$S_I$	
	水文条件(H)	地质勘查	水系缓冲区分级格栅图	定性	$S_H$	
	植被发育(V)	地质勘查	植被覆盖率分级格栅图	定性	$S_V$	
	爆发频率(f)	地质勘查	灾害频率分级格栅图	定性	$S_f$	
	工程类型(P)	设计文件	工程易损性分级格栅图	定性	$S_P$	
	人类活动(C)	地质勘查	人类活动分级格栅图	定性	$S_C$	
外部诱发因子	月降雨量(h)	气象监测	降雨雨量分级格栅图	定量	$S_h$	
	降雨频率(v)	气象监测	降雨频率分级格栅图	定量	$S_v$	
	流域汇水(V)	DEM 文件	流域缓冲区分级格栅图	定性	$S_v$	

备注:降雨量指标还有10 min雨量、1 h雨量、3 h雨量、6 h雨量、12 h雨量、日降雨量、连续降雨量、前期有效雨量、年降雨量等

年降雨量作为易发性、危险性等空间风险区划中的雨量参评指标<sup>[12]</sup>仍需商榷。而研究区历年月平均降雨量分布更加符合多年灾情统计结果(图2),且4~10月间水害数占总数的90%,因此,建议采用汛期月降雨量作为区划评估指标。

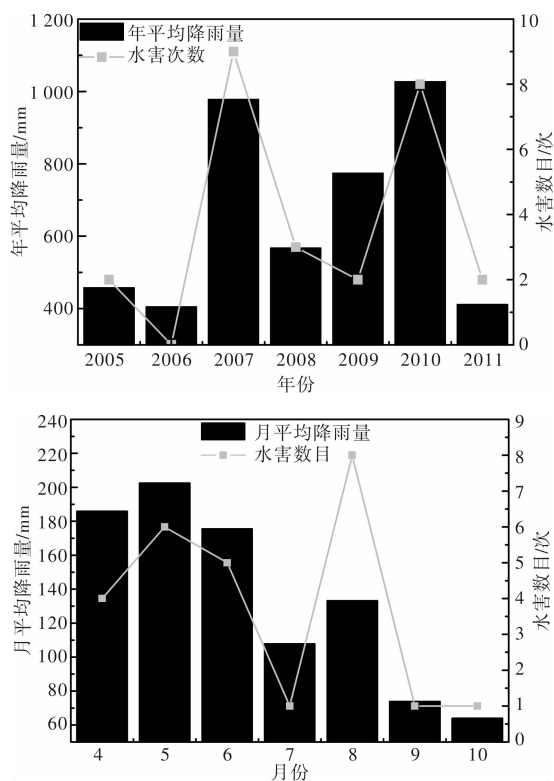


图2 京广线衡阳-白石渡区间水害数目与年或月平均降雨量关系

(6)铁路水害对降雨类型的敏感性不同,应筛选关键诱发因素指标进行预测与预警。铁路现行雨量警戒制度<sup>[13]</sup>陈列了10 min雨量、1 h雨量、3 h雨量、6 h雨量、12 h雨量、日降雨量、连续降

雨量等单一及其组合指标进行警戒。但以研究区内边坡溜坍为例,仅1 h降雨量集中于45 mm,具有临界值特征。10 min降雨量0~30 mm、连续降雨量40~280 mm,数据离散无规律(图3)。因此,需筛选关键诱发雨量指标预测水害,避免冗余工作及造成的延判、误判。

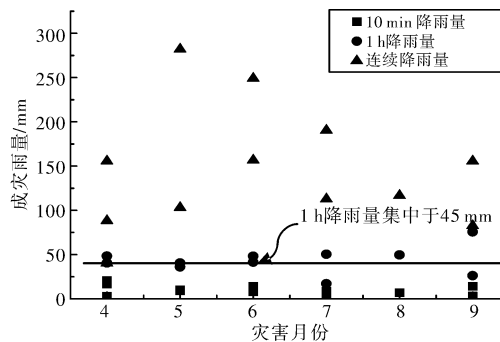


图3 京广线湖广区段边坡溜坍各类成灾降雨量值

### 3 铁路水害致灾因子确定

基于铁路水害发育特征分析,获得了基础工程类型、影响域面积、月降雨量等特有的致灾因素。借鉴预测预报研究成果(如易发性、危险性、易损性等,泊松比、回归分析等)<sup>[14-15]</sup>,可建立铁路水害的致灾因子体系如表2所示。

### 4 基于关键诱发因子的水害预测

灾害是由孕灾环境内复杂的内部潜在因子(地形地貌、地层岩性、地质构造等)和外部诱发因子(降雨、地震、人类活动等)共同作用而发生的现

表 3 京广线湖广区段断道、限速事故时各类雨量指标监测值样本数据及检验数据<sup>[18]</sup>

组别/年限	编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
样本组/ 2005 - 2010 年	10 min 雨量	8.9	8	3.4	10.3	7.8	12.1	25.2	7	8.5	7
	1 h 雨量	9.7	18.9	11.3	22.5	19	28.8	52	18	21.5	19.2
	3 h 雨量	49.2	49	15.2	56	42.8	58.9	52	33	35.2	52
	6 h 雨量	70.6	66.8	22.1	76	66.5	79.2	52	42.3	40.1	99
	12 h 雨量	88.7	82.2	18.1	105.3	80.6	103.6	52.7	66.5	113.7	121
	日降雨量	157	168	28.9	172	164	175	52.7	79.2	129.7	121
	连续降雨量	157	168	124.8	172	164	175	52.7	79.2	183.8	226
	是否发灾	Y	Y	N	Y	Y	Y	N	Y	Y	Y
	编号	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	10 min 雨量	9.1	8.5	9.0	10	8	8.3	3.4	3.5	4	5.2
	1 h 雨量	21.4	35.3	28.6	50	19.8	29.3	21.8	9.7	33	13
	3 h 雨量	48.2	35.3	48.6	62	47.9	68.3	33.5	26.5	54.5	56
	6 h 雨量	69.3	42.6	62.9	71	98.3	68.3	43.5	27.2	68.5	89
	12 h 雨量	87.6	55.2	108.2	76.8	163.8	68.3	55.1	36.4	93.5	110
	日降雨量	120	68.6	134.3	122.7	241.3	68.3	55.1	40.3	115.4	181
	连续降雨量	120	68.6	263.0	235.3	313.6	68.3	103.2	40.3	156.8	192
	是否发灾	Y	N	Y	Y	Y	Y	N	Y	Y	Y
	编号	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
	10 min 雨量	6	11.7	13	10.5	3.4	11.7	8	18	7	26.7
	1 h 雨量	15.3	29.2	32	27.9	21.8	29.1	20	61.1	30	61.7
	3 h 雨量	37	58.3	60.3	35.5	33.5	67.6	26	62.3	35.1	62.3
	6 h 雨量	42.5	84.4	88.3	46.1	43.5	81.6	31	65.3	43.2	66.5
	12 h 雨量	60	106.6	112	49.8	55.1	96.2	34	76.9	82.1	70.6
	日降雨量	78	241.2	178	59.3	55.1	104	37.3	77.8	151	70.6
	连续降雨量	85	359.4	222	109.5	103.2	359	37.7	77.8	240	70.6
	是否发灾	Y	Y	Y	N	N	Y	Y	N	N	N
检验组/ 2011 年	10 min 雨量	14.3	18.5	7.2	3.5	9.2	3	20.8	24.1	16.5	9.2
	1 h 雨量	41.4	73.1	40.5	11.5	48.2	10.8	75.8	55.3	60.1	36.2
	3 h 雨量	71.6	95.2	63.1	17.6	56.4	32.5	85.4	55.3	62.3	44.2
	6 h 雨量	93.4	120	88.6	20.5	77.2	66.2	96.5	55.3	65.3	65.9
	12 h 雨量	141.9	155.6	121.1	25.8	101.3	82.6	106.1	60	70.9	97.6
	日降雨量	223.1	198.7	140.2	30.2	101.3	82.6	116.7	60	73.8	122.5
	连续降雨量	249.4	198.7	155.6	39.4	101.3	82.6	116.7	60	73.8	156.7
	是否发灾	Y	Y	Y	N	Y	Y	Y	N	N	Y

注：采用二分类回归分析，断道、限速事故中崩滑流等灾害发生(Y)，未发生(N)。

象，而外部诱发因子是灾害发生与否的关键控制条件。因此，对于预测预报工作而言，通常通过监测雨量、水量等指标的变化信息进行判别。本文即针对铁路水害致灾因子体系中雨量指标，搜集了研究区 40 组雨量数据(表 3)，基于二分类 logistic 回归分析方法，筛选关键计算参数并建立概率预测模型，可为铁路水害风险管理及防范工作提供参考。

4.1 关键诱发因子的筛选

Logistic 回归分析<sup>[16]</sup>主要用于流行病学研究中影响因素的筛选，是医学样本数据处理应用最广泛的统计方法之一。该方法同时具有较好的预测和判别功能，尤其当样本数据无法满足 Bayes 和 Fisher 判别条件时，判别的效能与优势更加显著<sup>[17]</sup>。依托铁道部科技项目<sup>[10-11]</sup>，具体步骤如下。

- 第 1 步 原始数据整理(表 3)；
- 第 2 步 关键诱发因子筛选(表 4)。

表 4 各类雨量指标的得分与 sig. 值

	步骤 0	Score	df	Sig. (p 值)
雨量 指标	10 min 雨量	5.968	1	0.015
	1 h 雨量	7.886	1	0.005
	3 h 雨量	4.315	1	0.025
	6 h 雨量	5.244	1	0.022
	12 h 雨量	6.656	1	0.010
	日降雨量	7.465	1	0.006
	连续降雨量	4.620	1	0.032

Score 检验<sup>[19]</sup>用于建模初，可依据变量之间的结构关系判别因变量与自变量间的密切程度。由表 4 可知：各类雨量指标 p 值均小于 0.05，证实了雨量预测的可靠性；但 score 在 5.2 ~ 7.8，密切程度具有差别。借鉴 I - D 阈值法<sup>[20]</sup>，本文选取得分最高的 1 h 与日降雨量作为模型计算参数。

4.2 水害的概率预测模型

本文基于 30 组 10 min 雨量、日降雨量与水害情况的样本数据，构建了二分类 logistic 回归模型，并获得了最终模型参数估计值及其标准误差等统

计信息(表5)。

表5 各变量参数取值及相关性检验

模型参数	B	S. E.	Wald	Sig.
1 h 雨量	-0.106	0.050	4.504	0.034
日降雨量	0.038	0.018	4.549	0.033
常量	0.372	1.540	0.058	0.809

由表5可知,雨量指标的置信度均高于90%,Wald值、标准差S.E.等也满足一般要求,证明参数取值合理。据此,可拟合变量之间的线性关系为:

$$\text{灾害发生} = 0.372 - 0.106 \times 1 \text{ h 雨量} + 0.038 \times \text{日降雨量}。(1)$$

将其代入logistic概率计算公式,可得京广线湖广区间雨中水害发生概率公式为:

$$P_{\text{灾害发生}} = \frac{1}{1 + e^{-(0.372 - 0.106 \times 1 \text{ h 雨量} + 0.038 \times \text{日降雨量})}}。(2)$$

#### 4.3 模型检验

模型系数的混合检验<sup>[19]</sup>主要是针对步骤、模块和模型开展的模型系数的综合性检验。由表6可知:本文得到的logistic模型P值(即Sig.值0.001)<0.05,计算卡方值16.777>临界值5.991(即变量自由度数目df=2,显著性水平0.05时)。因此,在显著性水平为0.05的情况下,模型系数检验通过。

表6 模型系数的混合检验

检验内容	卡方	df	Sig.
步骤	16.777	2	0.000
块	16.777	2	0.000
模型	16.777	2	0.000

最大似然平方的对数值可用于检验模型的整体拟合效果<sup>[19]</sup>,该值在理论上服从卡方分布。由表7可知:最大似然平方的对数值19.881>临界值5.991,检验通过。而模型的Cox-Snell拟合优度为0.566,Nagelkerke拟合优度为0.803,表明模型拟合效果较好。

表7 模型整体拟合效果

步骤	对数似然值	Cox & Snell R <sup>2</sup>	Nagelkerke R <sup>2</sup>
1	19.881	0.566	0.803

似然比函数的自然对数值对样品数目十分敏感,需要Hosmer-Lemeshow检验作为补充<sup>[19]</sup>。检验同样以卡方分布为标准,显著性水平0.05,自由度数目df=8时,卡方临界值为15.507。由表8可知:计算卡方值12.544<15.507,P值0.129>0.05,可知检验通过。

表8 Hosmer和Lemeshow检验

步骤1	卡方	df	Sig.
	12.544	8	0.129

本文建立的二分类logistic模型各项统计学检验指标均验证合格,需进一步检验研究区水害实际情况的预测效果。由表9可知:成功预测未发生水害的铁路断道、限速事件2次、失败1次;发生水害的铁路断道、限速事件5次、失败2次,水害预测成功概率71.4%,效果较好。

表9 模型对2011年京广线湖广区段水害实况的预测效果

已观测	已预测			百分比校正
	发灾情况			
	N	Y		
发灾情况	N	2	1	66.7%
	Y	5	2	71.4%
总计百分比				70.0%

## 5 结论

基于京广铁路湖广区段水害情况统计,分析了铁路水害的发育特征,建立了空间区划与时间预测的综合指标体系,并依据后者提出了研究区水害雨中预测模型,具体结论如下。

(1)借鉴水利学水害概念,结合铁路实践,本文将铁路水害定义为由山洪或排水不良汇水水流能量,降雨入渗或降雨与周围地质环境作用,直接或由其诱发的次生灾害作用于桥隧涵等基础设施,并造成断道、限速事故的灾害,进一步丰富了铁路水害概念中对成灾机理表述。

(2)基于京广线湖(南)广(东)区段水害气象条件、地质环境与基础设施条件统计,分析获得了诸如铁路建设自身建设影响水害发育、桥隧涵等基础工程具有不同的承灾能力等6点特征,并据此建立了更为全面的铁路水害致灾因子指标体系,可为铁路水害预测预报中评价及预测工作提供基础依据。

(3)针对致灾因子体系中雨量指标类型,搜集了研究区40组雨量数据(其中,样本组30例,验组10例),基于二分类logistic回归分析方法,筛选出1h与日降雨量两个相关性最强的雨量指标作为计算参数,并据此建立了概率预测模型,其统计学检验通过且拟合优度较好,研究区2011年实际预测效果成功率70%以上,可为铁路水害风险管理及防范工作提供可靠的参考。

## 参考文献:

- [1] 铁道部科学研究院. 国铁路现代化学术讨论会各专业组讨论小结[J]. 铁道科技动态, 1980(8): 1-12.
- [2] 李晓霞,王勇,关向宁,等. 铁路水害及预警模型[J]. 干

- 旱区研究, 2011, 28(1): 181-186.
- [3] 魏庆朝, 杨永平, 张大伟. 中国铁路水害环境致灾因子分析[J]. 自然灾害学报, 2002, 11(1): 123-127.
- [4] 成都铁路局. 铁路水害有关名词解释[EB/OL]. (2013-07-08) [2014-04-20]. <http://bbs.railen.net/forum.php?mod=viewthread&tid=1119182&page=1&authorid=473486>.
- [5] 邢大伟. 对水法中“水害”一词的学习体会[J]. 陕西水利, 1990(3): 26-45.
- [6] 徐林荣, 吕大伟, 苏志满, 等. 既有线铁路地质灾害风险评估与防治对策研究报告[R]. 长沙: 中南大学, 2007.
- [7] 周华国, 魏庆朝. 近十几年来中国铁路水害的时空统计特征[J]. 自然灾害学报, 1995, 4(4): 76-81.
- [8] 徐林荣, 罗冠枝, 吕大伟, 等. 枝柳(枝江-柳州)铁路线张家界段沿线地质灾害评估[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2009, 20(02): 80-86.
- [9] 汤家法, 姚令侃, 华明. 铁路汛期行车安全对策-雨量警戒制度研究[J]. 自然灾害学报, 2002, 11(3): 131-136.
- [10] 程晓卿, 贾利民, 秦勇, 等. 铁路应急管理研究[J]. 铁道学报, 2012, 34(3): 7-13.
- [11] 徐林荣, 接小峰, 吴强, 等. 高速铁路灾害防治与应急救援技术措施研究[R]. 长沙: 中南大学, 2013.
- [12] 陈洪凯, 唐红梅. 川藏公路地质灾害危险性评价[J]. 公路, 2011, 9(9): 17-22.
- [13] 广州铁路集团公司. 关于做好普速各线2012年防洪工作的通知[Z]. 广州: 广铁集团, 2012. 3.
- [14] 陈远川, 陈洪凯. 山区沿河公路地质风险形成机制[J]. 灾害学, 2012, 27(3): 6-11.
- [15] 李铁锋, 丛威青. 基于 Logistic 回归及前期有效雨量的降雨诱发型滑坡预测方法[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006, 17(1): 33-35.
- [16] 姚魁武, 张勇, 王阶, 等. 血淤证量化诊断流行病学调查数据的 Logistic 回归分析[J]. 世界科学技术-中医药现代化, 2008, 10(4): 30-33.
- [17] 张初兵, 高康, 杨贵军. 判别分析与 Logistic 回归的模拟比较[J]. 统计与信息论坛, 2010, 1(25): 19-25.
- [18] 广州铁路集团公司. 广铁集团年度防洪工作总结[R]. 广州: 广铁集团, 2005-2011.
- [19] Jacqueline J Meulman, Willem J Heiser. SPSS advanced models-regression analysis13. 0[M]. SPSS Inc. 2010.
- [20] Guzzetti F, Peruccacci S, Rossi M, et al. Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe[J]. Meteorol Atmos Phys, 1998: 239-26.

## Characteristics of Water Disaster along Railway and its Probability Prediction Model

Jie Xiaofeng, Xu Linrong, Cao Lulai and Wu Qiang

(School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

**Abstract:** Railway water disasters occur repeatedly, and cause great losses. How to effectively monitor and prevent the disasters is a work focus of the operation unit during flood seasons and is a difficult problem. However, railway floods generally refer to disasters of off road or speed limit accidents caused by precipitation or other water causes, whose prediction and forecast lack pertinence. In view of this, first of all, the mechanism connotation of railway water disaster is enriched according to the conservancy connotation of water disaster. Combining with railway research, the extension of the forecasting target is defined. Then, based on statistics on meteorological, geological and facilities conditions of water disasters along Jing-Guang railway, temporal and spatial distribution characteristics of railway water disasters are analyzed and a disaster factor index system is established. Finally, according to the critical precipitation inducing factor, two calculation parameters with the strongest correlation are selected as 1 h and the daily rainfall, and a logistic probability prediction model is established. Model test shows that: its statistical test is passed, and the actual situation of disaster prediction is good, which could provide reference for railway flood risk management and prevention.

**Key words:** railway water disaster; feature analysis; Logistic model; probability prediction; risk management

张海涛, 程新文, 陈性义, 等. 基于ICA/MNF变换的高分影像滑坡灾害检测方法研究[J]. 灾害学, 2015, 30(1): 193-197. [Zhang Haitao, Cheng Xinwen, Chen Xingyi, et al. Research on the Landslide Disaster Detection Method of High Resolution Remote Sensing Image based on ICA/MNF [J]. Journal of Catastrophology, 2015, 30(1): 193-197.]

# 基于ICA/MNF变换的高分影像滑坡 灾害检测方法研究<sup>\*</sup>

张海涛, 程新文, 陈性义, 陈联君, 常亚洲, 马海荣

(中国地质大学(武汉)信息工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘 要:** 快速准确地从灾后影像中提取出受灾区域对于灾后救援具有重要意义。鉴于现有提取方法过度依赖滑坡在影像中的光学、纹理等特征的问题, 研究了一种结合独立成分分析(ICA)与最小噪声比率变换(MNF)的变化检测方法, 以单一时相的影像为基础, 运用基于负熵最大化的Fast-ICA算法分离出两个时相影像相互正交的独立成分, 并构建对应独立成分的差异影像, 最后用最小噪声比率变换实现分布于各个差异影像上变化信息的集中, 应用直方图阈值法得到了最终的滑坡灾害信息。选取了滑坡灾害前后两时相的高分辨率遥感影像数据进行实验, 结果证实了方法的可行性。

**关键词:** 滑坡; 独立成分分析; 最小噪声比率变换; 负熵; 差异影像; 直方图阈值

**中图分类号:** P642; X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2015)01-0193-05

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2015.01.036

近年来, 由于地震、滑坡、泥石流等地质灾害频发, 给人民带来了巨大的经济损失和人员伤亡, 比较典型的有2008年汶川8.0级地震及其引发的滑坡、泥石流等次生灾害造成约6.9万多人遇难和1.7万多人失踪, 2010年舟曲泥石流造成上千人死亡和数百人失踪。因此, 灾害发生后, 如何快速地获取灾害发生的位置及范围是实现减灾的关键。随着遥感技术的发展, 遥感影像呈现出成像速度快、覆盖范围广、高空间分辨率及高时间采集频率等特点<sup>[1]</sup>。因此, 如何从遥感影像中快速准确地检测出灾害信息对于减灾具有非常重要的应用价值。

近年来, 相关学者提出了许多利用遥感影像提取滑坡等灾害信息的方法。李松<sup>[2]</sup>等基于滑坡的地质原理, 结合多时相遥感影像的纹理信息, 利用比率变换方法实现了灾害的自动提取。赵祥<sup>[3]</sup>等深入分析了滑坡灾害在遥感影像和SAR数据中的特征, 从理论上论证了方法的可行性。陈莹<sup>[4]</sup>等结合灾前光学影像和灾后SAR数据, 分别利用NDWI指数和水体在SAR影像上的特性提取了河道以及河道变化信息, 经过去噪、膨胀等处理提取到了滑坡区域。鲁学军<sup>[5]</sup>等基于高分影像及灾前灾后的DEM数据, 探讨了滑坡灾害的1维、2维和3维三种遥感解析方法, 并建立了滑坡多维

遥感解译方法体系。现有的方法大都是基于滑坡及其要素独特的地貌特征进行提取的, 过度依赖于滑坡在影像上的色彩、纹理等光学特征。

基于以上考虑, 本文基于灾前灾后两个时相的高分影像数据, 利用负熵最大化的Fast-ICA算法实现了两个时相数据的独立成分分离, 并构建相应独立成分的差异影像, 在对差异影像进行最小噪声比率变换(Minimum Noise Fraction Transformation, MNF)实现了变化信息的集中后, 又以MNF结果变量的直方图为依据获取了变化阈值, 经数学形态学后续处理并矢量化, 得到了最终的灾害区域。算法简单, 易于实现, 不仅解决了上述问题, 还避免了数据冗余及后续变化信息集中的难题。

## 1 算法描述

### 1.1 基于负熵最大化的Fast-ICA算法

独立成分分析方法(Independent Component Analysis, ICA)是近年来发展起来的一种盲源分离算法<sup>[6-7]</sup>, 其基本原理是根据信号的统计特征, 在仅有的观测数据(信号与噪声的混合体)中分离出相

\* 收稿日期: 2014-06-11 修回日期: 2014-07-18

基金项目: “高分辨率对地观测重大专项”(07-Y30A05-9001-12/13)

作者简介: 张海涛(1987-), 男, 河南长垣人, 博士研究生, 研究领域为高分辨率遥感影像信息提取及应用研究。

E-mail: zht\_410728@126.com

互独立的源信号,进而由独立信息进行后续的数据处理,避免了数据冗余。

假设  $n$  维观测信息  $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]$  和相互统计独立的  $m$  维( $n \geq m$ ) 源信息  $S = [s_1, s_2, \dots, s_m]$  之间存在如下线性关系:

$$X = AS, \quad (1)$$

且  $S$  中至多有一个符合高斯分布的。独立成分分析法是从寻优的角度出发<sup>[8-9]</sup>,通过一个合适的目标函数和优化算法,在混合矩阵  $A$  和源信号  $S$  未知的情况下,仅利用源信号统计独立与观测信号  $X$  这一假设,寻得最优的一个解混矩阵  $W$ ,使得

$$Y = W^T X, \quad (2)$$

成为对源信号  $S$  的最佳估计。

负熵是一种量度随机变量非高斯性的有效工具<sup>[10-11]</sup>,收敛速度较快,其近似表达式为

$$J(y) \propto [E(G(y)) - E(G(v))]^2. \quad (3)$$

式中:假设变量  $y$  具有零均值和单位方差,  $v$  为零均值单位方差的高斯变量。函数  $G$  为非二次函数,取为

$$G(x) = -\exp(-x^2/2). \quad (4)$$

将式(2)代入式(3),则有

$$J(W) \propto [E(G(W^T x))]^2, \quad (5)$$

即只要寻得最佳的  $w$ ,即可得到负熵函数  $J(W)$  取得最大值。牛顿法求解得到最优解的 Fast-ICA 算法迭代模型为

$$W = E(xg(W^T x)) \Leftrightarrow$$

$$(1 + \alpha)W = E(xg(W^T x)) + \alpha W. \quad (6)$$

按照 Kuhn-Tucker 条件,在  $E((W^T x)^2) = \|W\|^2 = 1$  的约束条件下,则  $E(G(W^T x))$  的最优值点(即负熵最大)将在点

$$E(xg(W^T x)) + \beta W = 0 \quad (7)$$

处取得。对其进行近似牛顿迭代处理,则式(6)的简化模型为:

$$W^+ = E(xg(W^T x)) - E(g(W^T x))W. \quad (8)$$

对其进行迭代,直至收敛即可得到解混矩阵  $W$ 。

## 1.2 MNF 变换原理

最小噪声比率变换(Minimum Noise Fraction Transformation, MNF)以信噪比最大化为变换准则<sup>[12-13]</sup>,以上述基于 ICA 方法对应各独立成分构成的差异影像为输入数据进行线性变换,对分散在各个差异影像中包含的变化信息进行重组转换,使其集中分布到前几个变量中,得到一组新的差异影像,而在新的影像中包含的变化信息按照信噪比依序减少,甚至于第一差异影像中包含绝大部分的变化信息。MNF 变换具有正交性与线性不变性,新的结果影像不影响原始差异影像中包含的变化信息。

MNF 变换的数学模型为

$$Z(x) = \alpha^T Y(x), \quad (9)$$

即对各差异影像  $Y(x)$  进行线性变换,得到一组包含变化信息依次减少的结果影像  $Z(x)$ 。MNF 变换的流程如下:

(1) 构造噪声影像  $N$ ;

(2) 分别计算影像和噪声影像的协方差矩阵  $\Sigma, \Sigma_N$ ;

(3) 求解广义特征方程  $\Sigma a = \lambda \Sigma_N a$ , 其中特征向量  $a$  和特征值  $\lambda$  为待求值;

(4) 按特征值由大到小排序对应的各个特征向量,代入式(9)得到 MNF 结果影像。

## 1.3 变化信息提取准则

灾害信息的提取采用阈值法。在差异影像中,像元值有正值和负值,表现为两时相影像之间的增加或减少。像元值越接近于 0,说明对应位置上两时相之间的差异越小,即发生变化的可能性不大;如果像元值越远离 0,则说明对应位置上两时相之间的差异很大,即极有可能对应位置发生了变化,在影像上表现为很亮或很暗<sup>[14]</sup>。故只要找到一个适合的阈值,将像元值大于该阈值的像元提取出来,即为检测到的变化区域。

阈值选择的好坏将会直接影像到灾害检测的精度,本文根据差异影像直方图信息进行变化阈值的选取。由于在差异影像中大量存在的是变化与非变化两类像元,而介于两类之间的过渡像元很少,即直方图会存在双峰且二者呈陡状分布,因此,差异影像直方图中双峰之间的陡变点即为寻找的最优阈值。

算法流程如图 1 所示。

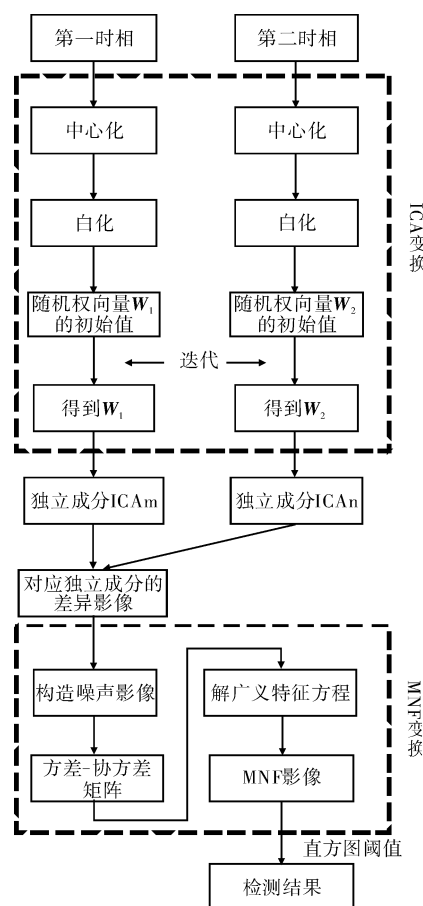


图 1 算法流程图



## 2 实验结果与分析

基于上述原理选取三处滑坡灾害进行了实验。实验中先用 Fast-ICA 算法分别计算了两时相影像的独立成分,并依次求取了对应各独立成分的差异影像,之后借助 MNF 变换实现了三幅差异影像的变化信息的集中,并结合直方图阈值信息得到了最终的结果图。

从 QuickBird 影像中裁剪了三个实验区,共有三个波段,实验区位于新疆某地,该处地质灾害频发,常有滑坡、泥石流等典型地质灾害,灾害目视特征较为明显。

实验一数据大小为  $289 \times 300$  个像元,时间分别为 3 月份和 6 月份,由原始影像上(图 2)可以看出,第一时相数据内植被生长较为茂盛、有大量裸土及部分人工构筑物(影像上侧的平坦区域,呈亮白色),而第二时相数据内由于滑坡灾害的出现,严重破坏了原来生长的植被及低处的人工地物,还在构筑物上方冲出了小水沟。

从独立成分影像中(图 3)可以看出,第一时相

影像被独立地分成了裸土、人工地物、零星地物,而第二时相影像由于灾害的原因,影像特征被破坏,独立成分信息不明显,难以从图像中判读到地表覆盖信息。

从差异影像上(图 4)可以看出,第一成分差异影像主要检测出了两景时相间的植被差异,第二成分主要检测出了裸地的变化情况,而第三成分分布均匀,无明显变化。故根据目前情况,只有结合第一、第二成分才可以得到最终的变化结果。

MNF 转换的三个结果图中可以看到,第一成分中已经涵盖了滑坡发生及受灾的绝大部分区域,并将两时相影像中包含的部分小水塘也全部实现了检测;而第二成分仅检测出了构筑物上的水流痕迹及部分零星变化,第三成分中包含变化信息



(a) 第一时相影像 (b) 第二时相影像  
图 2 实验一原始影像

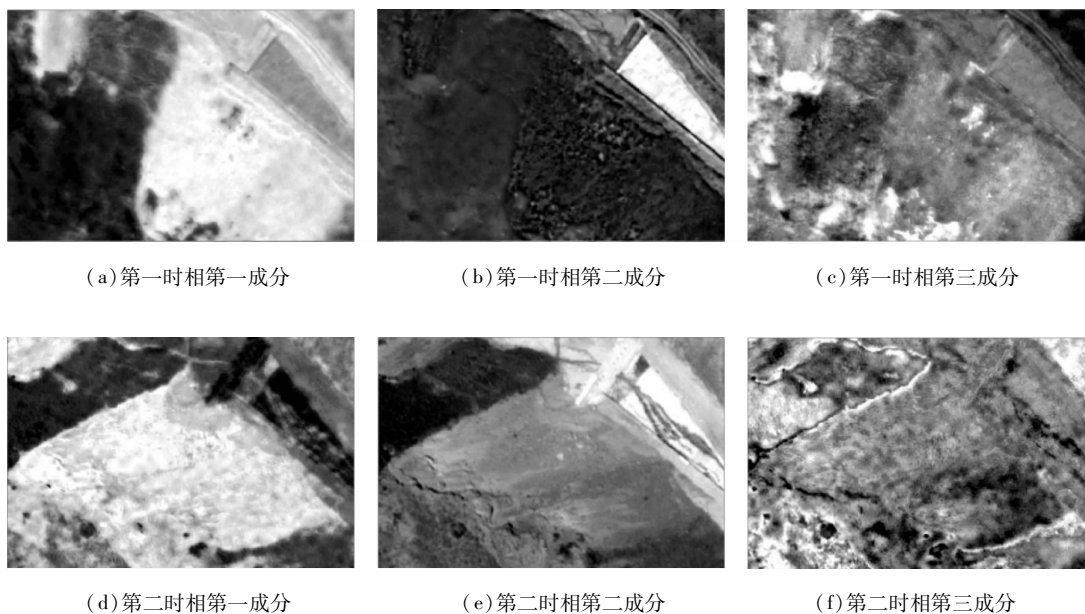


图 3 实验一数据独立成分

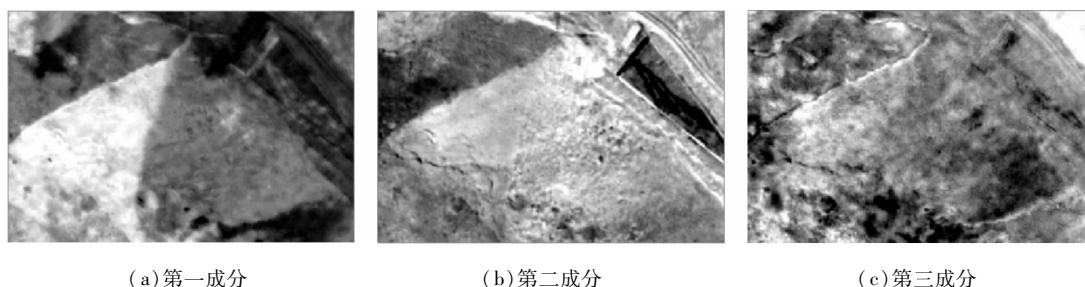


图 4 实验一对应独立成分的差异影像

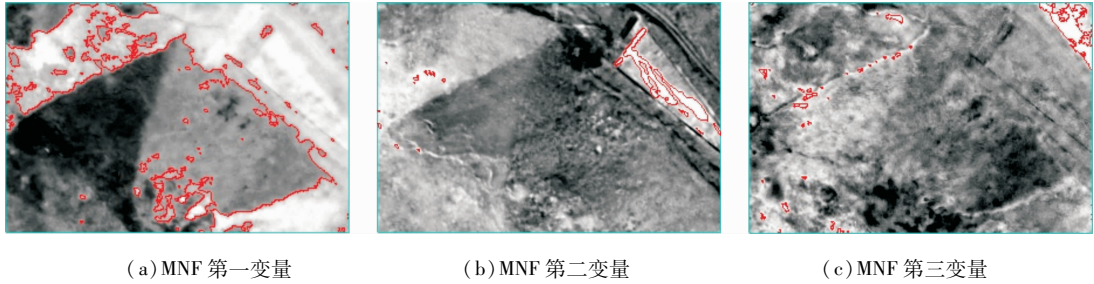


图5 实验一 MNF 结果与矢量叠加图

不显著,甚至可以忽略。MNF 变换结果与变化矢量叠加效果、最终的滑坡灾害发生区域分别如图 5、图 6 所示。

从图 6 中可以看到,检测结果中不仅将滑坡区域实现了全部提取,还将滑坡体下方构筑物由水流引起的变化(影像右上方)以及植被中由于生长问题引起的部分变化(影像左上侧)。

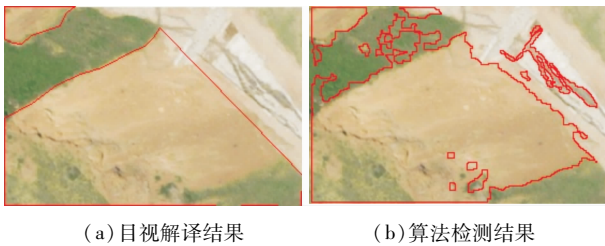


图6 实验一结果对比

实验二、实验三的原始影像及检测结果分别如图 7、图 8 所示,从图 7c、d 图中看以看到,实验二中实现了灾害区域的绝大部分提取,但是由于辐射校正精度等问题的存在,使得检测结果有小部分的漏检区域,如滑坡区域中的几个封闭区域,另外在影像中的下侧有一定的过检区域;在实验三中也较好地实现了滑坡区域的提取,但是在影像的左上侧、中部有小部分的漏检测区域,而在影像的左下侧存在过检区域。

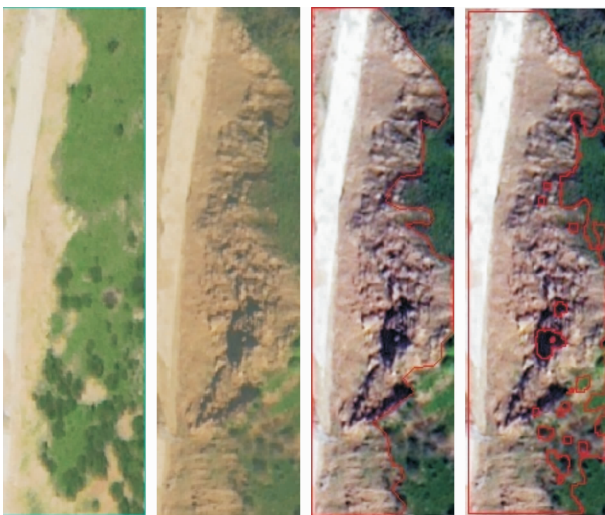


图7 实验二结果对比

在定性地评价变化检测结果的基础上,本文

以面积为量算单元,以目视解译的灾害区、非受灾区为参考数据,分别计算了生产者精度、使用者精度及  $K$  精度,定量地评价了本文方法的有效性,结果如表 1、表 2、表 3 所示。

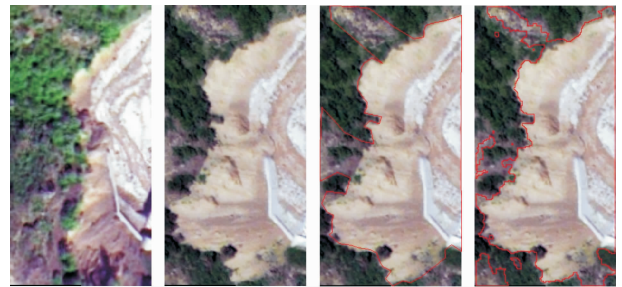


图8 实验三结果对比

表 1 实验一检测精度

参考值	检测值				m <sup>2</sup>
	未变化	变化	总计	生产者精度/%	
未变化	4 618.56	897.98	5 516.54	83.72	
变化	1 202.54	7 682.02	8 884.56	86.46	
总计	5 821.10	8 580.00	14 401.10	-	
使用者精度/%	79.34	89.53	-	-	
总体精度: 85.41%, $K$ 精度: 0.69					

表 2 实验二检测精度

参考值	检测值				m <sup>2</sup>
	未变化	变化	总计	生产者精度/%	
未变化	2 110.92	564.34	2 675.26	78.90	
变化	410.15	7 935.41	8 345.56	95.09	
总计	2 521.07	8 499.75	11 020.82	-	
使用者精度/%	83.73	93.36	-	-	
总体精度: 91.16%, $K$ 精度: 0.75					

表 3 实验三检测精度

参考值	检测值				m <sup>2</sup>
	未变化	变化	总计	生产者精度/%	
未变化	2 104.94	405.73	2 510.67	83.84	
变化	806.52	5 552.02	6 358.54	87.32	
总计	2 911.46	5 957.75	8 869.21	-	
使用者精度/%	72.30	93.19	-	-	
总体精度: 86.33%, $K$ 精度: 0.68					

从总的精度上讲,三个实验区检测的总体精度、 $K$  精度分别均达到了大于 85%、大于 0.61,即检测结果与实际情况保持高度一致性。从生产者角度考虑,变化部分的精度都达到了 86% 以上;非变化部分的检测精度分别为 83.72%、78.90%