

张军伟, 陈云尧, 孙毅夫, 等. 我国隧道施工坍塌事故分布特征分析(2006-2016)[J]. 灾害学, 2017, 32(4): 132-137. [ZHANG Junwei, CHEN Yunyao, SUN Yifu, et al. Analysis on Distribution Characteristics of Tunnel Collapse Accident in China from 2006 to 2016[J]. Journal of Catastrophology, 2017, 32(4): 132-137. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2017.04.023.]

# 我国隧道施工坍塌事故分布特征分析(2006-2016)\*

张军伟<sup>1,2</sup>, 陈云尧<sup>1</sup>, 孙毅夫<sup>1</sup>, 李 雪<sup>1</sup>

(1. 西南石油大学 地球科学与技术学院, 四川 成都 6101500; 2. 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116)

**摘 要:** 坍塌事故是隧道建设中最主要的事故类型, 为分析我国隧道施工中坍塌事故分布特征, 采用事故次数、死亡人数、受伤人数三项指标, 对 2006-2016 年间发生的隧道施工坍塌事故的时间分布、等级分布、空间分布特征进行了分析。通过年度、月度、星期、时段分布研究了隧道施工坍塌事故的时间分布特征, 利用死亡人数对坍塌事故的等级分布特征进行了分析, 按省区划分研究了坍塌事故的空间分布特征。结果表明自 2014 年后三项指标呈下降趋势, 坍塌事故等级以较大事故为主, 坍塌事故主要发生在我国西部地区, 特别是西南地区。旨在为管理部门及隧道建设部门防控隧道坍塌事故提供理论参考。

**关键词:** 隧道施工; 坍塌; 统计分析; 灾害防控

**中图分类号:** U455; TU714; O212; X45 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2017)04-0132-06  
doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2017.04.023

中国已是世界上隧道和地下工程最多、发展速度最快、地质及结构形式最复杂的国家<sup>[1]</sup>, 但由于隧道修建的地质环境通常十分复杂, 修建过程中难免会发生施工事故。而坍塌事故是隧道与地下施工事故的主要形式, 刘辉等<sup>[2]</sup>通过统计 2004-2008 年我国公路及铁路隧道施工 46 起事故, 得出隧道坍塌事故占总体的 52.0%。李凤伟等<sup>[3]</sup>通过对 2003-2010 年国内地铁建设中 118 起施工事故进行了统计分析, 得出塌陷和坍塌是最主要的事故类型。胡群芳等<sup>[4]</sup>通过研究 2003-2011 年我国地铁施工 89 起事故特征, 得出地铁施工事故主要类型是物体打击与坍塌。这些事故造成了严重的经济损失与人员伤亡, 在未来随着铁路、公路、市政、供水、供气、防洪、水电等隧道工程的建设, 这些都会使隧道(隧洞)的数量大幅度增多<sup>[5]</sup>, 因此有必要对隧道施工中的坍塌事故进行分析。

许多研究人员对隧道坍塌事故进行了研究, 汪成兵等<sup>[6]</sup>通过统计调研分析了影响坍塌的因素, 采用 PFC2D 程序分析了这些因素对隧道塌方的作用机制。刘乃飞等<sup>[7]</sup>通过 FLAC3D 软件对库尉输水隧洞坍塌机制进行了系统的研究, 并论证塌方

洞段的加固效果。胡永利<sup>[8]</sup>以北京地铁为例研究了暗挖施工坍塌机理及其应对措施。宋宁强等<sup>[9]</sup>以渝宜高速丰云段 16 座隧道为研究对象, 分析了隧道施工坍塌事故致灾因子。周志鹏等<sup>[10]</sup>选取国内外 95 个典型地铁事故, 基于管理因素及事故机理分析了坍塌致灾因子, 并结合杭州地铁进行了验证。李启明等<sup>[11]</sup>研究了地铁施工坍塌事故中人员的安全能力, 并以广州地铁 3 号线进行了案例分析。但以上研究主要是从坍塌机理、致灾因子、事故处理技术方面及对某一具体工程事故案例进行分析研究, 缺乏对隧道坍塌事故时间、空间分布特征、事故严重程度发展趋势的分析研究。

本文通过案例收集, 结合事故次数、死亡人数、受伤人数三项指标从坍塌事故的时间特征、等级特征、区域特征等三方面分析我国隧道施工中坍塌事故的分布特征。研究旨在为防控隧道施工坍塌事故、加强隧道建设安全提供有益参考。

## 1 数据收集

本文共统计到隧道施工坍塌事故案例 49 起,

\* 收稿日期: 2017-04-16 修回日期: 2017-05-31

基金项目: 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室开放基金资助项目(SKLG2016-1308)

第一作者简介: 张军伟(1980-), 男, 河南漯河人, 博士, 副教授, 主要从事地下工程灾害预测与控制理论领域的教学与科研工作。

E-mail: zhangjun\_wei@126.com.

死亡 208 人, 致伤 47 人。对文章的数据调研工作及分析指标做以下说明。

(1) 文章中事故案例来源包括以下途径: ① 国家安全生产监督管理总局事故查询系统; ② 媒体的公开报道; ③ 其他参考资料。文章中部分事故的伤亡人数与国家安监总局公布的不一致, 本文采用最终公开报道的数据。这可能是由于事故上报较早, 而事故的救援工作仍将持续一段时间, 部分伤者在后续治疗无效后死亡。

(2) 本文研究的隧道类型主要是三类: 铁路隧道、公路隧道、水工隧洞。

(3) 由于统计资料暂缺, 文章统计的区域不含香港特别行政区、澳门特别行政区、台湾省三地。

(4) 事故案例采集的时间段是: 2006 年 1 月 1 日至 2016 年 12 月 31 日。

(5) 采用事故次数、死亡人数、受伤人数三项指标进行分析, 分析图表采用折线图、直方图等。在部分事故案例记录中, 有关人员受伤等级描述的不清楚, 本文不区分受伤程度只统计受伤人员数值。

(6) 文章中含小数的数值均保留两位小数。

## 2 坍塌事故的时间分布特征

时间特征主要揭示隧道施工坍塌事故在时间维度上的发展趋势, 从时空角度为施工管理提供参考。以下分别从年度、月度、星期、时段四项时间指标对隧道坍塌事故的时间分布特征进行分析。

### 2.1 年度分布特征分析

2006-2016 年间发生的隧道施工坍塌事故的年度分布见图 1。其中事故次数采用直方图统计, 死亡人数和受伤人数采用折线图统计。为绘图清楚将受伤人数刻度轴的起点定为 -5。

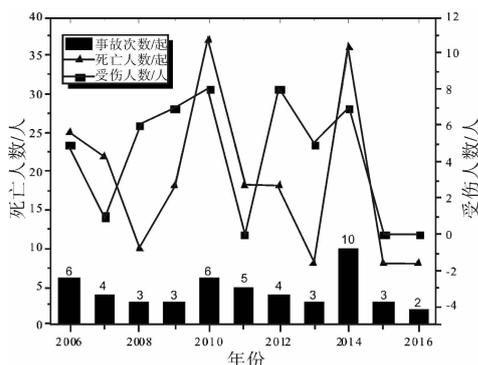


图 1 坍塌事故的年度分布

从图 1 可以看出, 事故次数分别在 2006、2010、2014 达到高峰, 在处于高峰年后均呈下降趋势, 变化趋势呈现明显的周期性, 以 4 为周期波动发展。最高值出现再 2014 年, 共发生 10 起坍塌。最低值出现在 2016 年, 出现 2 起坍塌事故。

死亡人数也出现三个高峰, 同样出现在 2006、2010、2014 年, 其波动趋势与事故次数基本一致, 表现出良好的相关性。最高值出现在 2010 年, 累计死亡 37 人。最低值出现在 2015、2016 年, 均死亡 8 人。

受伤人数波动较为剧烈, 但在 2006、2010、2014 年同样处于高峰, 且高峰年后都呈现下降趋势。最高值出现在 2008 年, 累计受伤 8 人。2015、2016 年均没有出现受伤人数。

综合分析三项指标的变化趋势, 可以发现三项指标均在波动发展且具有一定周期性, 自 2014 年后开始呈下降趋势。注意到在统计起始年 2006 年三项指标均处于高峰, 2007 年原铁道部颁布了《关于加强隧道工程安全工作的若干意见》<sup>[12]</sup> 加强施工安全监管, 随后事故次数呈现降低趋势并保持了一定年份。在 2014 年 9 月 19 日, 为加强隧道施工安全生产工作, 国家安监总局、交通部、国务院国资委、国家铁路局联合颁布了《隧道施工安全九条规定》<sup>[13]</sup> 的指导性文件, 2015、2016 年坍塌事故三项指标就表现为下降趋势。这说明加强施工监管可以有效防控坍塌事故发生, 但从年度时间轴上来看随着时间的推移, 法规的监管效力、人与企业的安全意识都会随时间将低, 因此在今后的施工中需要定期的加强安全教育培训。

### 2.2 月度分布特征分析

月度分析的目的是揭示一年中不同月份坍塌事故的分布特征, 得出一年中施工管理工作的重点月度, 1 至 12 月份的坍塌事故分布情况见图 2。其中事故次数采用直方图统计, 死亡人数和受伤人数采用折线图表示。为绘图清楚避免曲线相互干扰, 将受伤人数刻度轴起点定为 -20。

从图 2 可以看出 3、8、9 月份事故最多, 均出现 6 起事故。1、2 月份事故最少, 均出现 2 起事故。平均每月发生 4 起事故, 同时 4 也是每月事故次数的众数, 12 个月的事事故次数均在平均值上下波动 ( $\pm 2$ )。1、2 事故少的原因可能与中国春节有关, 1、2 月通常是我国春节假期, 施工人员大都会选择结束长时间的在外工作返回家乡与家人团聚, 许多项目都会减少或停止施工。

死亡人数 1 月份最低, 共死亡 3 人。从 1 到 3

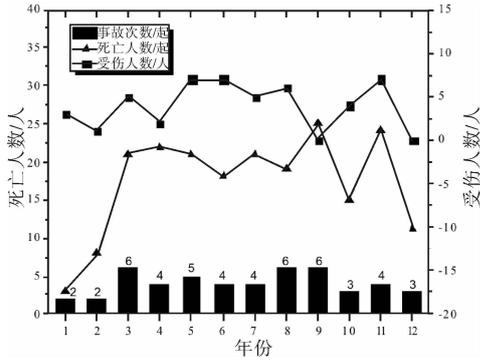


图2 坍塌事故的月份分布

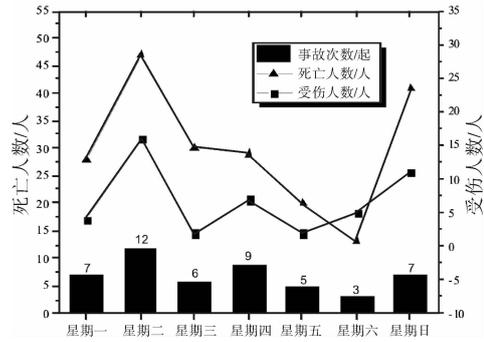


图3 坍塌事故的星期分布

月份死亡人数呈增长趋势。3到8月份死亡人数曲线较为稳定，在小范围内(20±2)波动发展。8到12月份死亡人数曲线波动幅度较大，9、11处于波峰，10、12月处于波谷，其中最大值为25，最小值为11。

受伤人数曲线整体波动较大，5、6、11月受伤人数最多，均出现7人受伤。9、12月没有出现人员伤亡。

综合分析三项指标按照通常对四季的划分，冬季(12、1、2月份)坍塌事故的三项指标均较低，春季(3、4、5月份)、夏季(6、7、8月份)三项指标均较稳定，而秋季(9、10、11月份)三项指标波动较大。通过计算各月份的伤亡率(伤亡率=(死亡人数+受伤人数)/事故次数)，得出排在前三位的是11月(7.75人/次)、7月(6.50人/次)、10月(6.33人/次)。10月、11月份伤亡率较高可能与项目岁末加快工期，监管力松懈有关，而7月份通常是我国雨季，水是隧道坍塌的地质致灾因子之一。降雨会使岩土体富含大量水体，特别是在掌子面位置开挖排水后土层中的有效应力增大，加之动水压力作用及土层抗剪强度降低常会导致坍塌事故发生。所以在每年的施工中要加强雨季7月份、年底10月与11月施工监管力度。

### 2.3 星期分布特征分析

为反映坍塌事故在一星期中不同工作日的分布特征，将49起坍塌事故按其发生的工作日分类，事故的三项指标星期分布见图3，其中事故次数采用直方图统计，死亡人数和受伤人数采用折线图表示。为绘图清楚避免曲线相互干扰，将受伤人数刻度轴起点定为-10。

从图3可以看出事故次数最多的是星期二，占总体24.49%；事故次数最少的是星期六，占总体6.12%。平均每个工作日发生7起事故，事故次数

曲线波动较大。

死亡人数星期一到星期二呈上升趋势，在星期二达到最大值，死亡47人占总体22.60%。随后曲线表现为下降趋势，并在星期六达到最低值，死亡13人占总体6.25%。星期六到星期日又表现为增长趋势。整体对比可以发现星期二、星期日的死亡人数明显高于其他工作日。

受伤人数最大值仍出现在星期二，受伤16人占总体34.04%。受伤人数最小值出现在星期三和星期五，均为2人受伤。

综合以上分析，三项指标均在星期二达到最高值。同时星期日的死亡人数、受伤人数均排在第二位，且死亡人数也明显高于其他工作日。所以在每个星期的管理工作中，要特别加强星期二、星期日坍塌事故的预防，注意调节施工人员心身状况合理安排施工作业。

### 2.4 时段分布特征分析

降低坍塌事故的关键是做好每天的安全生产工作，为分析坍塌事故在一天中的分布特征，将一天划分为四个时间段，坍塌事故时段分布见图4。其中事故次数采用直方图统计，死亡人数和受伤人数采用折线图表示。为绘图清楚避免曲线相互干扰，将受伤人数刻度轴起点定为-2.5。其中上午：06：00-12：00；下午：12：00-18：00；前夜：18：00-24：00；后夜：00：00-06：00，以上时间段包含上界不含下界，事故样本有1起事故未查询到发生时间点，此处不包括该事故样本。

从图4可以得出，事故次数最大值出现在下午，共发生16起事故。最小值出现在前夜，共发生8起事故。死亡人数最大值出现在下午，共计死亡85人，占总体40.86%。最小值出现在上午，死亡27人。受伤人数最大值出现在后夜，累计致伤20人，占总体42.55%。最小值出现在前夜，累计致伤3人。

综合对比坍塌事故一天中的事故次数、受伤

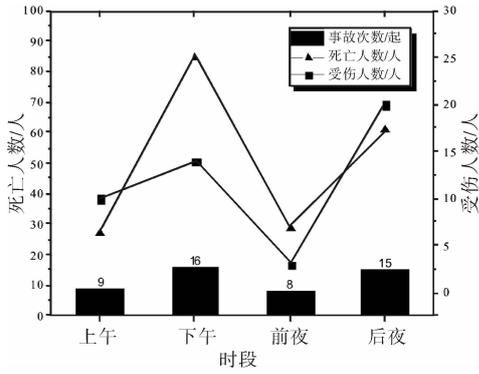


图4 坍塌事故的时段分布

人数、死亡人数, 可以发现三项指标下午均高于上午, 后夜均高于前夜。所在一天施工中要加强下午与后夜的坍塌事故预防, 合理安排一天施工中人员的轮班作息。

### 3 坍塌事故的等级分布特征

为分析坍塌事故的严重性及其变化趋势, 将隧道施工坍塌事故分为4个等级, 并绘制了4个等级的事故在2006 - 2016年间的变化情况见图5。前文已述部分样本对受伤情况记录不够清楚, 此处只依据死亡人数划分坍塌事故等级, 参考2007年国务院于颁布的第493号国务院令——《生产安全事故报告和调查处理条例》<sup>[14]</sup>中有关规定划分等级, 具体为: ①特别重大事故, 单次事故死亡30人以上; ②重大事故, 单次事故死亡10 - 30人; ③较大事故, 单次事故死亡3 - 10人; ④一般事故, 单次事故死亡0 - 3人, 各区间含上界不含下界。统计发现坍塌事故没有发生特别重大事故, 不再绘制特别重大事故变化曲线, 其余三个级别均采用折线图绘制。

图5可以发现较大事故在2006 - 2016年均出现, 累计发生39起事故占总体的79.59%, 其最大值出现在2014年, 共发生8起。从统计起始年2006年开始到2008年呈下降趋势, 2008年到2009年稳定发展。2009年后较大事故的曲线波动剧烈。2015到2016年虽呈上升趋势, 但两年事故数量较低。一般事故只出现在4个年份, 分别是2011、2013、2014、2015年, 累计出现7起事故占总体14.29%。重大事故只份2010、2011两个年份出现, 累计出现3起占总体6.12%。

综上所述坍塌事故等级以较大事故为主且在统计年份内均出现, 一般、重大事故发生的数量较小, 且重大事故2011年以后没有出现, 重大事

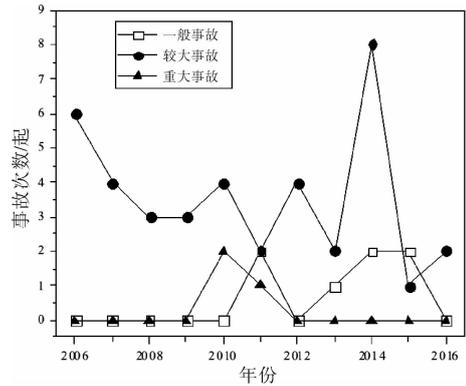


图5 事故等级的年度分布

故得到了有效的控制。降低较大事故发生率是今后减少坍塌事故损失的重点。

### 4 坍塌事故的区域分布特征

区域分析是为从空间角度揭示坍塌事故的分布特征, 样本中关于事故发生区域只记录了事故发生的行政区域, 没有记录坍塌事故在隧道内的具体位置。本文按照省级行政单位对49起坍塌事故进行了划分, 具体分布情况见图6。其中事故次数采用直方图, 死亡人数、受伤人数采用折线图。横轴按事故次数多的省区排在前面, 事故次数相同时按死亡人数多的省区排在前面, 死亡人数相同时按受伤人数多的省区排在前面。为消除曲线相互干扰, 将受伤人数刻度轴起点定为-30。

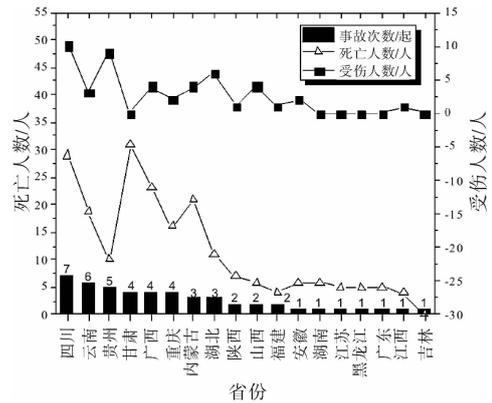


图6 坍塌事故的省份分布

从图6可以得出, 共有18个省级行政单位出现坍塌事故。事故的次数与死亡人数的相关程度较低, 坍塌事故次数最多的省份是四川, 共发生坍塌事故7起占总体14.29%。死亡人数最多的省份是甘肃, 累计死亡31人占总体的14.90%。受伤人数最多的省份同样是四川, 共致伤10人占总体21.28%。

为反映各省事故的严重程度, 定义死亡/受伤比率, 即死亡(受伤)比率 = 死亡(受伤)人数/事故个数<sup>[3]</sup>。经过计算死亡率排在前三的省区是:

甘肃(7.75人/次)、内蒙古(7人/次)、安徽(6人/次)、海南(6人/次)。受伤率排在前三位的省区:湖北(2人/次)、山西(2人/次)、安徽(2人/次)。可以发现事故数量前三的省区均并未出现在死亡率与受伤率前三。

将死亡人数与受伤人数累加在一起记为伤亡人数,分别对各省的伤亡人数与坍塌事故次数进行可视化处理,绘制省区分布示意图见图7与图8。省区事故数量分布图中按事故次数分为4个区间,将没有坍塌事故发生的省区与资料暂缺的地区归为一个区间。省区伤亡人数分布图中,按伤亡人数分为5个区间,将没有坍塌事故的省区与资料暂缺的地区归为一个区间。以上各区间包括其上下界。

从图7可以得出,2006-2016年间隧道坍塌事故主要集中于我国西部地区,特别西南地区是坍塌事故的高发区,而西南地区中的四川省是坍塌发生最多的省区。

图8反映了各省区隧道坍塌事故伤亡人数的分布特征,可以得出伤亡人数较高的地区仍是西部地区,特别是甘肃省和四川省。此外可以发现,内蒙古、山西、湖北三地虽然事故次数排在第三区间,但累计伤亡人数却排在第二区间。

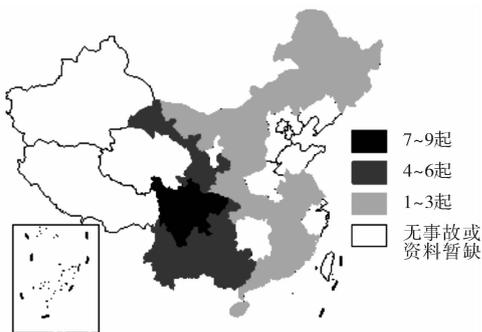


图7 事故次数省区分布示意图

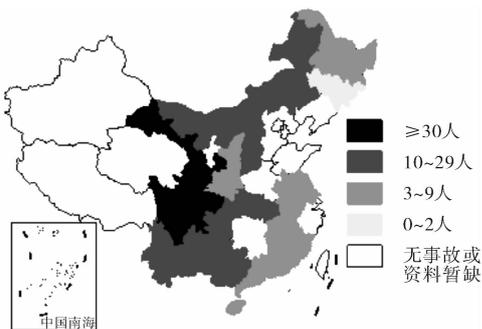


图8 伤亡人数省区分布示意图

结合事故次数与伤亡人数的分布情况,可以得出2006-2016年隧道坍塌事故的多发区域是西

部地区,特别是西南地区。这与我国地形特征有关,西部地区多山地,隧道作为一种快速穿越山体的工程在交通建设中越来越被采用。

2016-2030年是我国西部大开发加速发展时期,交通基础设施建设也将得到快速发展,在铁路、公路的建设过程中必将出现大量的特长、深埋隧道,如成兰铁路,隧道的比例高达70%以上<sup>[15]</sup>,同时西南地区蕴含着丰富的水电资源,大气污染问题日益受到国人关注,水电作为一种较环保的能源其开发量必将稳步增长,因此西南地区在铁路、公路、水工设施建设将出现大量的隧洞。综上未来西南地区是隧道坍塌事故防控的重点区域。

## 5 结论

文章对我国2006-2016年间发生的隧道施工坍塌事故进行了统计分析,结合事故次数、死亡人数、受伤人数研究了隧道施工中坍塌事故的时间分布、等级分布、区域分布特征。主要得到如下结论:

(1)坍塌事故的三项指标2014年后呈下降趋势,事故得到有效控制。但坍塌事故数量年度分布具有明显周期性,需要定期加强安全生产工作。

(2)在全年施工中要加强7、10、11月的施工监管;在每个星期的管理工作中,要特别加强星期二、星期日坍塌事故的预防;坍塌事故三项指标下午均高于上午,后夜均高于前夜,所在每一天施工中要加强下午与后夜的坍塌事故预防,合理安排施工人员作息。

(3)等级分布特征分析表明,坍塌事故等级以较大事故为主,且在2006-2016年间均出现。一般、重大事故的数量较小,且重大事故得到有效控制近5年没有出现。

(4)通过坍塌事故的区域分布特征分析得出,2006-2016坍塌事故的多发区域是西部地区,特别是西南地区。未来随着西部大开发加速进行,西南地区要加强隧道施工监管力度。

数据量较小是本文的不足之处,由于数据获取途径有限,且样本记录较为简略,研究可能不够充分。本文数据来源主要是国家安全生产监督管理局事故查询系统记录的数据,该数据库为综合性安全事故数据库,记录的内容较为简略。目前尚缺乏关于隧道及地下工程施工事故的专业数据库,即使是安全工程研究处于前沿美国,其Occupation Safety and Health Administration(OSHA)

数据库也只是针对整个建筑安全事故。因此建议政府及相关行业协会能建立起专业的隧道及地下工程施工事故数据库。希望本文揭示的坍塌事故规律特征能为隧道施工安全管理提供有益的参考。

## 参考文献:

- [1] 王梦恕. 中国铁路、隧道与地下空间发展概况[J]. 隧道建设, 2010, 30(4): 351-364.
- [2] 刘辉, 张智超, 王林娟. 2004-2008年我国隧道施工事故统计分析[J]. 中国安全科学学报, 2010, 20(1): 96-100.
- [3] 李凤伟, 杜修力, 张明聚. 地铁工程建设施工事故统计分析[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(2): 474-479.
- [4] 胡群芳, 秦家宝. 2003-2011年地铁隧道施工事故统计分析[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(3): 705-710.
- [5] 王梦恕. 中国盾构和掘进机隧道技术现状、存在的问题及发展思路[J]. 隧道建设, 2014, 34(3): 179-187.
- [6] 汪成兵, 朱合华. 隧道塌方机制及其影响因素离散元模拟[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(3): 450-456.
- [7] 刘乃飞, 李宁, 李国锋, 等. 库尉输水隧洞塌方机制分析及加固效果评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(12): 2531-2541.
- [8] 胡永利. 北京地铁浅埋暗挖施工坍塌机理及应对措施[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(1): 8-15.
- [9] 宋宁强, 田卫明, 夏文军, 等. 公路隧道施工坍塌致灾因子分析[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2010, 6(9): 23-26.
- [10] 周志鹏, 李启明, 邓小鹏, 等. 基于事故机理和管理因素的地铁坍塌事故分析——以杭州地铁坍塌事故为实证[J]. 中国安全科学学报, 2009, 19(9): 139-145.
- [11] 李启明, 王盼盼, 邓小鹏, 等. 地铁盾构坍塌事故中施工人员安全能力分析[J]. 灾害学, 2010, 25(4): 73-77.
- [12] 中华人民共和国铁道部. 关于印发《关于加强隧道工程安全工作的若干意见》的通知[EB/OL]. [2007-05-15]. <https://wenku.baidu.com/view/0a9d5d086c85ec3a87c2c5b7.html?from=search>.
- [13] 中华人民共和国国家安全生产监督管理总局, 交通运输部, 国务院国资委, 等. 关于印发《隧道施工安全九条规定》的通知[EB/OL]. [2014-09-24]. [http://www.chinasafety.gov.cn/newpage/Contents/Channel\\_4188/2014/0924/240814/content\\_240814.htm](http://www.chinasafety.gov.cn/newpage/Contents/Channel_4188/2014/0924/240814/content_240814.htm).
- [14] 中华人民共和国国务院公报. 生产安全事故报告和调查处理条例[Z]. 北京: 中华人民共和国国务院, 2007.
- [15] 洪开荣. 我国隧道与地下工程近两年的发展与展望[J]. 隧道建设, 2017, 37(2): 123-134.

## Analysis on Distribution Characteristics of Tunnel Collapse Accident in China from 2006 to 2016

ZHANG Junwei<sup>1,2</sup>, CHEN Yunyao<sup>1</sup>, SUN Yifu<sup>1</sup> and Li Xue<sup>1</sup>

(1. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

2. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** Collapse is the main type of accidents in tunnel construction, for analysis the collapse distribution characteristics during the tunnel construction in our country, we use three indexes, the number of accidents, deaths and injured, to analyze tunnel collapse accident distribution characteristics about the time, grade and region. The temporal distribution characteristics of tunnel collapse accidents are studied through the annual, monthly, weekly and time distribution, the grade distribution characteristics were analyzed by using the number of deaths and the regional distribution characteristics were studied according to the provinces. The results show that since 2014 the three indicators had a downward trend, the grade of the collapse accidents usually are major accidents, the collapse occurred mainly in the western region of China, especially in Southwest China. The paper aimed to provide theoretical reference for the management and tunnel construction departments to prevent and control the tunnel collapse accident.

**Key words:** tunnel construction accident; collapse; statistical analysis; disaster prevention and control