

金勇根, 吴凡, 袁正国, 等, 2019. 诱发沪昆铁路江西段沿线水害和地质灾害的临界雨量初探[J]. 气象与减灾研究, 42(2):127-132.

Jin Yonggen, Wu Fan, Yuan Zhengguo, et al, 2019. Preliminary study on critical rainfall inducing water and geological disasters along Shanghai-Kunming railway in Jiangxi province[J]. Meteorology and Disaster Reduction Research, 42(2):127-132.

诱发沪昆铁路江西段沿线水害和 地质灾害的临界雨量初探

金勇根¹, 吴凡², 袁正国³, 龙余良²

1. 江西省气象灾害防御技术中心, 江西 南昌 330046
2. 江西省气象服务中心, 江西 南昌 330096
3. 江西省气象灾害应急预警中心, 江西 南昌 330096

摘要: 利用 2008—2015 年南昌铁路局管辖内沪昆铁路沿线(以下称沪昆线)的灾情资料、工务段编组站监测雨量和沿线附近的自动站雨量数据, 分析了沪昆线由降雨诱发的水害和地质灾害特征, 以揭示其与降雨强度的关系。结果表明: 沪昆线降雨诱发的水害和地质灾害种类多、发生频率高, 灾害年度差异较大; 边坡、堤坡和堑坡的溜坍占全部水害和地质灾害事件的一半以上, 且发生的时间集中在 4—8 月, 与江西的主汛期时间一致; 暴雨和连续性降雨是引起沪昆线水害和地质灾害的主要原因。最后基于警戒雨量临界值, 将致灾前 1 h 最大降水量、3 h 降水量、24 h 降水量和连续降水量作为初始预报因子, 采用事件概率回归法, 建立了沪昆铁路江西段出巡、限速、封锁警戒的概率预报模型。

关键词: 铁路, 水害, 地质灾害, 临界雨量

中图分类号: P49

文献标识码: A

文章编号: 1007-9033(2019)02-0127-06

doi: 10.12013/qxyjzjy2019-020

Preliminary Study on Critical Rainfall Inducing Water and Geological Disasters along Shanghai-Kunming Railway in Jiangxi Province

Jin Yonggen¹, Wu Fan², Yuan Zhengguo³, Long Yuliang²

1. Disaster Prevention Technology Center of Jiangxi, Nanchang 330046, China
2. Meteorological Service Center of Jiangxi, Nanchang 330096, China
3. Meteorological Disaster Emergency Warning Center of Jiangxi, Nanchang 330096, China

Abstract: Based on the geological and water disaster data along Shanghai-Kunming Railway and the precipitation data of marshalling stations and automatic stations from 2008 to 2015, the temporal and spatial distribution characteristics of geological and water disasters caused by rainfall along Shanghai-Kunming Railway were analyzed, and the relationship between precipitation intensity and geological disasters was discussed. The results showed that geological and water disasters along Shanghai-Kunming Railway were various and occurred frequently, the annual variations of the disasters were quite different. Among all of the geological and water disasters, the slump of slope, embankment and cutting slope accounted for more than half of the total, and the occurrence of disasters was concentrated in April – August, which coincided with the main flood season in Jiangxi province. Rainstorm and continuous rainfall process were the main causes for the geological and water disasters along Shanghai-

收稿日期: 2019-01-28; 修订日期: 2019-04-24.

基金项目: 江西省科学技术厅社会发展领域项目(编号:20142BBG70035).

作者简介: 金勇根, 高级工程师, 主要从事应用气象研究, E-mail: 1298706237@qq.com.

吴凡(通信作者), 硕士, 工程师, 主要从事应用气象服务研究, E-mail: wufan_1988@163.com.

Kunming Railway. Based on the 1-hour maximum precipitation, 3-hour precipitation, 24-hour precipitation and continuous precipitation that caused disasters, the probabilistic prediction model of disasters along Shanghai-Kunming Railway Line was established using probability regression method.

Key words: railway; water disasters; geological disasters; rainfall thresholds

0 引言

铁路在我国社会经济发展中起重要作用,安全是铁路运输的基本要求,然而各类灾害性天气的发生会严重影响铁路运输安全(安志山等,2014)。南昌铁路局管辖内的沪昆铁路沿线处于亚热带季风气候区,为江西的降水多发区和暴雨中心,加之地形地貌多为山地丘陵,导致沪昆铁路沿线水害和地质灾害频发,严重影响到铁路的运输安全。如2010年5月,连续性强降雨引发沪昆铁路沿线山体滑坡,造成列车脱轨重大事故(李磊和王富章,2012)。目前,针对铁路气象灾害的研究较多。例如,杨思全等(2002)分析了铁路气象灾害的致灾机理,并构建了相关的危险度计算模型;李晓霞等(2011)基于铁路水害的时空演变特征建立了铁路水害预警模型;吴艳华等(2012)利用铁路事故统计数据,以灾害风险评估模型为核心技术,研发了铁路灾害监测预警系统;吴凡等(2017)基于降水资料和铁路水害资料,研究了不同地形的铁路水害分级警戒概率预报模型。然而,针对铁路水害和地质灾害的分级警戒临界雨量阈值的研究相对偏少。文中利用南昌铁路局管辖内沪昆铁路沿线的雨量观测数据和灾情资料,研究了由降雨诱发的铁路沿线水害和地质灾害的时空分布特征,分析了造成铁路水害和地质灾害的主要降雨类型和临界雨量,建立了铁路出巡、限速、封锁三类防灾措施的警戒概率预报模型,以期提高气象保障铁路安全运行的能力,为铁路部门提供具有针对性且更加精细化的气象服务。

1 沪昆铁路概况

沪昆铁路是一条连接上海市和云南省昆明市的东西向铁路干线,沿线自然资源丰富,从江南的鱼米之乡到西南的苗族村寨,是一条旅游业黄金带。沪昆铁路全长2 633 km,其中江西段长555 km,浙赣铁路玉山段(玉山至南昌)长292 km,浙赣铁路南萍段(南昌至萍乡)长263 km,主要经过上饶、鹰潭、抚州、南昌、宜春、新余和萍乡7市(曾光,2016)。沿线共有58个工务段编组站(图1),处于亚热带季风气候区,汛期暴雨频繁,经常出现洪涝灾害(孙素琴等,

2016),年平均降水量达1 600—1 700 mm。

2 资料与方法

沪昆铁路江西段沿线的水害和地质灾害数据来自南昌铁路局,文中使用的时间为2008—2015年。同期的雨量数据有铁路工务段的监测站雨量和沿线附近的自动站雨量,雨量数据包括了工务段各个编组站的逐日雨量、当日10 min最大雨量、当日小时最大雨量。为准确分析降雨和铁路水害和地质灾害的关系,本研究仅选取灾害发生当日及前3 d雨量之和大于10 mm的灾害事件作为铁路水害和地质灾害分析样本(周雨等,2015)。研究方法主要采用相关分析、事件概率回归等统计方法(赵声蓉等,2009)。

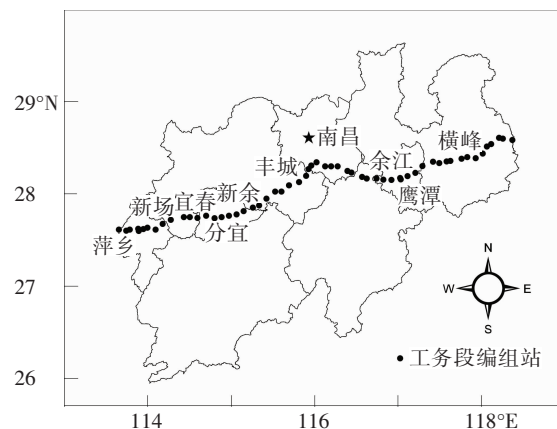


图1 沪昆铁路沿线工务段编组站示意图

Fig. 1 Marshalling stations of work section along Shanghai-Kunming Railway

3 水害和地质灾害的特征分析

3.1 基本特征

2008年1月—2015年8月,沪昆铁路江西段沿线由降雨诱发的水害和地质灾害事件共355例,主要包括边坡、堤坡和堰坡溜坍、水淹道床、陷穴下沉和滑坡等(表1)。其中边坡溜坍、堤坡溜坍和堰坡溜坍占比52%,是铁路沿线中较常见的水害和地质灾害,主要由于边坡、堤坡、堰坡受地表水下渗或地下水增多,地表层饱和而失去稳定性,造成表土覆盖层下滑或错落的现象;其次是水浸路基,占比24%,

主要是铁路沿线路基浸泡造成路基不稳或其他病害(李国辉和李英斌,2012)。

表1 2008年1月—2015年8月沪昆铁路江西段沿线水害和地质灾害类型

Table 1 Geological and water disasters along Shanghai-Kunming Railway in Jiangxi from January 2008 to August 2015

水害和地质灾害类型	占比/%	水害和地质灾害类型	占比/%
溜坍	52	崩塌落石	2
水浸路基	24	风化剥落	2
滑坡	4	路堤河道冲刷	5
陷穴或下沉	6	其他	5

分析2008—2015年沪昆铁路沿线的水害和地质灾害年际变化(图2)发现,2008—2015年灾害发生频次年际变化差异较大,其中2014年发生频次最高,达100次,其次是2008年的84次和2015年的59次。一年中灾害发生的时段主要集中在4—8月,该时段与江西省的汛期降水集中期相对应(卞洁等,2012;孙素琴等,2016)。在此时段内,沪昆铁路沿线出现连续性降雨过程和暴雨过程的频次明显较非汛期偏多,因此,降水是沪昆铁路沿线水害和地质灾害发生的主要影响因素之一。

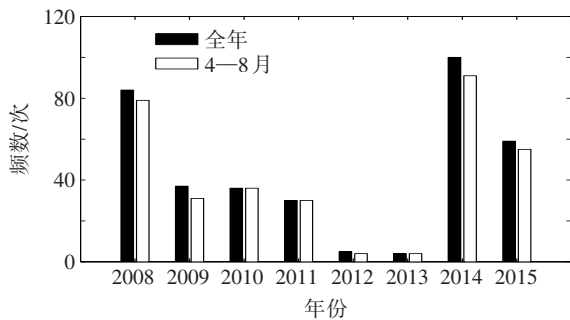


图2 2008—2015年沪昆铁路江西段沿线水害和地质灾害发生频数

Fig. 2 Frequency of geological and water disasters along Shanghai-Kunming Railway in Jiangxi from 2008 to 2015

表2 2008—2015年沪昆铁路江西段沿线降雨类型和致灾情况

Table 2 Rainfall types and the disasters of Shanghai-Kunming Railway Jiangxi from 2008 to 2015

降雨类型	主要致灾时间	致灾次数	致灾类型	雨情
系统性暴雨	1—12月	203	溜坍、落石、河道冲刷、泥石流	24 h 雨量 > 50 mm
台风暴雨	7—8月	6	溜坍、崩塌、滑坡、坡面风化破碎	取决于台风强度和路径
对流暴雨	4—7月	99	溜坍、陷穴、河道冲刷、水浸路基、泥石流	1 h 雨量 > 30 mm
连续性降雨	3—9月	155	溜坍、落石、水浸路基、滑坡	24 h 雨量 < 50 mm 且过程雨量 > 50 mm

4 致灾临界雨量分析

为综合考虑暴雨和连续性降雨对沪昆铁路江西

3.2 相关性分析

分析2008年1月—2015年8月沪昆铁路江西段沿线由降水引发的水害和地质灾害事件发现,造成铁路水害和地质灾害的主要降水过程可以概括为两类:一是暴雨,共发生308次,包括系统性暴雨、台风暴雨和对流性暴雨,二是连续性降雨,共发生155次(表2)。系统性暴雨造成沪昆铁路江西段沿线致灾203次,灾害类型包括溜坍、河道冲刷和泥石流等,系统性暴雨的降水量比较均匀,影响范围主要集中在系统附近,24 h内灾害点的雨量大于50 mm,容易造成地表径流和雨水对铁路路基和道床的冲刷,破坏路基的稳定性,引起水害和地质灾害发生。台风暴雨造成沪昆铁路沿线致灾6次,主要出现在7—8月,灾害类型包括溜坍、崩塌、滑坡等,致灾点取决于台风强度和移动路径。台风暴雨的突发性强、降雨强度大、破坏力大、影响范围较广(吴丹等,2017),极易引起铁路路基发生溜坍、崩塌、滑坡等水害和地质灾害。对流性暴雨造成沪昆铁路江西段沿线致灾99次,致灾时间多集中在4—7月,灾害类型包括溜坍、河道冲刷、水浸路基等。对流性暴雨持续时间长、突发性强,一般1 h降雨量超过30 mm(史纬恒等,2014),会造成路基填土被雨水冲刷流失,路基变型路肩坍塌,引起泥石流灾害发生。此外,地势较低地段的路基受周边地势较高区域雨水的汇入,也会造成铁路路基和道床被淹受灾。连续性降雨过程造成沪昆铁路沿线致灾155次,主要出现时间集中在3—9月,一般从降雨开始到结束,持续时间较长、强度变化较小,灾害类型包括溜坍、水浸路基、滑坡等,这类降雨影响周期长,一般是指连续几天的过程雨量为50—150 mm。长期的雨水冲刷、浸泡和软化作用,破坏了受灾点路基的土体结构,增大了孔隙水压力和土体自重,使路基的稳定性受到破坏,抗剪强度和抗冲刷力下降,导致溜坍或坍塌的发生。此外,连续性降雨也会引起河水倒灌侵入铁路路基,造成路基被毁(高小峰等,2016)。

段沿线水害和地质灾害的影响,对2008年1月—2015年8月期间发生的水害和地质灾害影响行车的次数与不同时间尺度降水量的相关性进行分析。

结果显示,致灾前 1 h 最大降水量、致灾前 3 h 降水量、致灾前 24 h 降水量、致灾前连续降水量与铁路水害和地质灾害影响行车次数的相关系数分别为 0.692、0.686、0.565、0.527,均呈正相关,且均通过信度为 0.01 的显著性检验。因此,文中选取这 4 个因子(表 3)作为影响铁路水害和地质灾害发生的初

始预报因子。另外,分析 2008 年 1 月—2015 年 8 月发生水害和地质灾害期间 1 h 最大降水量、致灾前 3 h 降水量、致灾前 24 h 降水量、致灾前连续降水量的 $q-q$ 图(图略)可知,这 4 个因子在低分位的值基本在一条直线上,而高分位相对较离散,总体上服从近似正态分布,因此满足回归分析的条件。

表 3 2008 年 1 月—2015 年 8 月沪昆铁路江西段沿线水害和地质灾害对应的降水因子统计结果

Table 3 Statistical results of precipitation factors corresponding to geological and water disasters along Shanghai-Kunming Railway in Jiangxi from January 2008 to August 2015

指标	平均值/mm	标准差/mm	标准误差均值/mm	分位数/%				
				100	90	75	50	25
致灾前 1 h 最大降水量	17.36	16.08	0.85	82	50	30	14	5
致灾前 3 h 降水量	21.17	19.71	1.04	109	55	37	17	6
致灾前 24 h 降水量	45.78	51.33	2.72	318	100	60	32	12
致灾前连续降水量	111.50	98.27	5.22	494	218	152	86	43

4.1 出巡警戒

将致灾前 1 h 最大降水量、致灾前 3 h 降水量、致灾前 24 h 降水量、致灾前连续降水量的 50%分位数(分别为 14、17、33、86 mm)作为沪昆铁路江西段出巡的初始临界值,并进行“0、1”化处理,在此基础上,采用事件概率回归法求得回归系数,得到铁路水害和地质灾害出巡的概率预报方程为

$$p = -0.0022 + 0.3214x_1 + 0.3166x_2 + 0.1183x_3 + 0.2696x_4 \quad (1)$$

其中, x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 分别为致灾前 1 h 最大降水量、致灾前 3 h 降水量、致灾前 24 h 降水量、致灾前连续降水量。采用平均值法求得预报临界值 $\bar{p} = 0.4929$ 。当 $p > \bar{p}$ 时,判别为“y=1”类,否则判别为“y=0”类。根据式(1)对铁路水害和地质灾害资料进行回报检验,结果显示,预报准确率为 89.9%,空报率为 3.7%,漏报率为 6.4%。其中空报率指预报为需要出巡检查铁路水害和地质灾害而实际上不需要出巡,漏报率指实际上需要出巡检查铁路水害和地质灾害而预报为不需要出巡。

4.2 限速警戒

铁路部门一般将线路区段致灾雨量的 75%作为限速警戒基准值,文中以 4 个预报因子的 75%分位数为限速警戒的初始临界值,即致灾前 1 h 最大降水量 30 mm、致灾前 3 h 降水量 37 mm、致灾前 24 h 降水量 60 mm、致灾前连续降水量 152 mm 作为沪昆铁路江西段限速运行的警戒雨量临界值,并求得预报方程为

$$p = -0.0348 + 0.3832x_1 + 0.3402x_2 + 0.1140x_3 + 0.3752x_4 \quad (2)$$

采用平均值法求得预报临界值 $\bar{p} = 0.3042$,当 $p > \bar{p}$ 时,判别为“y=1”类,否则判别为“y=0”类。根据上述结果对铁路限速回报检验,结果显示,限速预报准确率为 90.4%,空报率为 7.4%,漏报率为 2.2%。

4.3 封锁警戒

铁路部门一般将线路区段致灾雨量的 90%作为封锁警戒基准值,文中以 4 个预报因子的 90%分位数为封锁警戒的初始临界值,即致灾前 1 h 最大降水量 49 mm、致灾前 3 h 降水量 55 mm、致灾前 24 h 降水量 100 mm、致灾前连续降水量 218 mm 作为沪昆铁路江西段的封锁初始警戒值,并求得预报方程为

$$p = -0.0123 + 0.2125x_1 + 0.1694x_2 + 0.6129x_3 + 0.3964x_4 \quad (3)$$

采用平均值法求得预报临界值 $\bar{p} = 0.1352$,当 $p > \bar{p}$ 时,判别为“y=1”类,否则判别为“y=0”类。根据上述结果对铁路因水害和地质灾害影响而封锁铁路进行回报检验,结果显示封锁预报准确率为 90.2%,空报率为 9.8%。

反查 3 种警戒方式的漏报情况发现,有 62%为仅其中 1 个降水因子的雨量超过警戒值,27%为其中 2 个降水因子的雨量超过警戒值,其他因子的降水量均小于警戒临界值。利用沪昆铁路江西段水害和地质灾害警戒雨量概率预报模型,对 2016 年铁路沿线的 3 次暴雨过程进行预报,共发布警戒 65 站次,其中出巡警戒 56 站次,限速警戒 4 站次,封锁警戒 5 站次,南昌铁路局实际共发布雨量重点出巡警戒 49 站次,限速报警 5 站次,封锁报警 3 站次。对比发现,文中提出的警戒雨量概率预报模型预报的

警戒情况与实际警戒情况基本一致。

5 结 论

文中基于 2008—2015 年沪昆铁路江西段沿线的灾情资料、工务段编组站监测雨量和沿线附近的自动站雨量数据,分析了沪昆线由降雨诱发的水害和地质灾害特征,研究了其与降雨强度的关系。最后将致灾前 1 h 最大降水量、3 h 降水量、24 h 降水量和连续降水量作为初始预报因子,采用事件概率回归法,建立了沪昆铁路江西段出巡、限速、封锁警戒的概率预报模型。得到以下结论:

1) 由降雨引发的沪昆铁路江西段沿线的水害和地质灾害事件的主要特征有事件类型多、发生频率高、年际差异大,发生时段集中在主汛期,其中 6 月份发生频次最多。

2) 造成沪昆铁路江西段沿线的水害和地质灾害的主要降水天气过程可以概括为两类:一是暴雨过程,包括系统性暴雨、台风暴雨以及对流暴雨;二是连续性降雨过程。暴雨过程容易造成铁路灾害点路基受雨水冲刷、填土冲失,进而破坏路基的稳定性,导致路基沉降变形,引发溜坍、崩塌、滑坡等水害和地质灾害的发生;连续性降雨过程造成铁路灾害点的路基遭长期冲刷、渗流、浸泡和软化,使得土体抗剪强度下降,失去稳定发生变形、破坏,从而引发溜坍、水浸路基、滑坡等水害和地质灾害的发生。

3) 引发铁路水害和地质灾害的降雨因子主要是致灾前 1 h 最大降水量、致灾前 3 h 降水量、致灾前 24 h 降水量、致灾前连续降水量,基于上述四个因子作为初始预报因子,建立了铁路出巡、限速、封锁三类防灾措施的概率预报模型,该概率预报模型能有效判断沪昆铁路江西段的警戒级别。

参考文献 (References)

安志山,张克存,屈建军,等,2014. 青藏铁路沿线风沙灾害特点及成因分析[J]. 水土保持研究,21(2):285-289. An Z S, Zhang K C, Qu J J, et al, 2014. Sand Hazard characteristics and genetic analysis along the Qinghai-Tibet Railway[J]. Res Soil Water Conserv,21(2):285-289.(in Chinese)

卞洁,何金海,李双林,2012. 近 50 年来长江中下游汛期暴雨变化特征[J]. 气候与环境研究,17(1):68-80. Bian J, He J H, Li S L, 2012. Heavy rain variation characteristics in flood seasons in the middle and lower reaches of Yangtze River in the last 50 years[J]. Climatic Environ Res,17(1):68-80.(in Chinese)

高小峰,蒋鑫,邱延峻,2016. 降雨条件下斜坡弱地基路堤瞬态稳定性分析[J]. 中国铁道科学,37(1):1-8. Gao X F, Jiang X, Qiu Y J, 2016. Transient stability of embankment over sloped weak

ground subjected to rainfall condition[J]. China Railway Sci,37(1):1-8.(in Chinese)

李国辉,李英斌,2012. 浅谈既有铁路路基病害及整治措施[J]. 内蒙古科技与经济,(17):73-74. Li G H, Li Y B, 2012. Brief talk on diseases of existing railway subgrade and rehabilitation measures[J]. Inner Mongolia Technol Economy,(17):73-74.(in Chinese)

李磊,王富章,2012. 铁路突发事件应急决策体系研究[J]. 防灾科技学院学报,14(3):58-63. Li L, Wang F Z, 2012. Railway incident and emergency decision-making research[J]. J Ins Disas Prev Sci Technol,14(3):58-63.(in Chinese)

李晓霞,王勇,关向宁,等,2011. 铁路水害及预警模型[J]. 干旱区研究,28(1):181-186. Li X X, Wang Y, Guan X N, et al, 2011. Flood disasters and the development of early warning model for railway[J]. Arid Zone Res,28(1):181-186.(in Chinese)

史纬恒,胡友彬,林晓霞,等,2014. 2008—2012 年东北三省强对流天气的统计分析[J]. 气象与减灾研究,37(4):33-41. Shi W H, Hu Y B, Lin X X, et al, 2014. Statistical analysis of the strong convective weather in the northeast China[J]. Meteor Disaster Reduction Res,37(4):33-41.(in Chinese)

孙素琴,许爱华,郑婧,等,2016. 江西省汛期暴雨时空分布及区域性暴雨分区[J]. 气象与减灾研究,39(2):90-97. Sun S Q, Xu A H, Zheng J, et al, 2016. The regionalization and spatial-temporal characteristics of the torrential-rain in Jiangxi province during the flood season[J]. Meteor Disaster Reduction Res,39(2):90-97.(in Chinese)

吴丹,黄泓,吕梅,等,2017. 台风“灿鸿”、“莲花”和“浪卡”共存期间路径、强度及相互作用分析[J]. 气象与减灾研究,40(4):282-291. Wu D, Huang H, Lyu M, et al, 2017. Study on the track, intensity and interaction of the coexistent typhoons “Chan hom”, “Linfa” and “Nangka”[J]. Meteor Disaster Reduction Res,40(4):282-291.(in Chinese)

吴凡,阙志萍,2017. 基于多分类 logistic 模型的铁路水害分级警戒概率预报研究[J]. 灾害学,32(1):17-21. Wu F, Que Z P, 2017. Graded alerting probability forecast of railway water disaster based on the multinomial logistic regression model[J]. J Catastroph,32(1):17-21.(in Chinese)

吴艳华,何峰林,王富章,等,2012. 基于灾害风险评估模型的铁路灾害监测预警系统研究[J]. 中国铁道科学,32(1):121-125. Wu Y H, He F L, Wang F Z, et al, 2012. Research on railway disaster monitoring and warning system based on disaster risk assessment model[J]. China Railway Sci,32(1):121-125.(in Chinese)

杨思全,陈亚宁,王昂生,等,2002. 基于灰色理论的铁路环境水害危险度计算模型构建研究[J]. 中国科学院大学学报,19(4):366-371. Yang S Q, Chen Y N, Wang A S, et al, 2002. Research in the establishment of a model to evaluate fatality of railway flood disaster on the basis of gray theory[J]. J Univ Chinese Academy Sci,19(4):366-371.(in Chinese)

曾光,2016. 高铁经济带的基本内涵与发展策略——以江西沪昆高铁经济带为例[J]. 井冈山大学学报(社会科学版),37(4):96-100. Zeng G, 2016. Basic connotations and development strategy of high-speed railway economic belt: a case of Shanghai-Kunming high-speed railway economic belt in Jiangxi[J]. J Jing-

gangshan Univ(Social Sci),37(4):96-100.(in Chinese)

周雨,刘志萍,张国平,2015. 鹰厦铁路降水诱发地质灾害概率预报模型及应用[J]. 应用气象学报,26(6):743-749. Zhou Y, Liu Z P, Zhang G P, 2015. Probability forecasting model of geological disaster along the Yingxia railway induced by precipitation and its application[J]. J Appl Meteor Sci, 26(6): 743-749.

(in Chinese)

赵声蓉,赵翠光,邵明轩,2009. 事件概率回归估计与降水等级预报[J]. 应用气象学报,20(5):521-529. Zhao S R, Zhao C G, Shao M X, 2009. Regression estimate of event possibility and precipitation categorical forecast[J]. J Appl Meteor Sci,20(5): 521-529.(in Chinese)