

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2018.09.005

陕西省干线公路雪灾风险评价

尹超, 梁晓飞

(山东理工大学 建筑工程学院, 山东 淄博 255049)

摘要: 针对陕西省干线公路雪灾频发的现实, 基于风险理论开展了陕西省干线公路雪灾危险性、承灾体易损性和风险评价。选取年平均积雪深度 ≥ 1 cm 日数为空间危险性评价指标, 从空间和时间维度进行了陕西省干线公路雪灾危险性评价。选取区域路网密度为承灾体易损性评价指标进行了承灾体易损性评价。通过引入风险度指数建立了风险评价模型, 完成了陕西省干线公路雪灾风险评价, 明确了陕西省干线公路雪灾风险等级。研究结果显示: 陕西省干线公路雪灾风险度指数的区域分异特征十分明显, 榆林北部、渭南东部及汉中大部分地区风险较低, 延安、安康及商洛大部分地区次之, 秦岭山区及咸阳西北部地区最高; 陕西省干线公路雪灾风险分为低风险、中等风险、较高风险、高风险和极高风险5级, 高风险和极高风险区主要集中于秦岭山区和咸阳西北部地区, 分别占陕西省总面积的10.74%和9.42%, 计算结果与陕西省已发干线公路雪灾状况一致; G108, G210, G211, G310, G312和S101, S107, S209, S304, S306等干线公路均有部分路段位于高风险区或极高风险区内, 这些路段应加强日常养护、物资和装备储备以及编制灾害应急预案, 一旦发生灾害, 应保证抢险救灾人员和物资装备迅速到达灾害现场开展工作, 以降低灾害风险, 减轻灾害损失。

关键词: 道路工程; 风险评价; 空间分析; 干线公路; 雪灾

中图分类号: U419.92

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2018)09-0027-07

Assessment of Snow Disaster Risk of Trunk Highway in Shaanxi Province

YIN Chao, LIANG Xiao-fei

(School of Civil and Architecture Engineering, Shandong University of Technology, Zibo Shandong 255049, China)

Abstract: The hazard assessment, disaster-affected body's vulnerability assessment and risk assessment of snow disasters along trunk highways in Shaanxi Province are accomplished based on the risk theory in view of its high frequency. Selecting the average annual number of days that snow depth is not smaller than 1 cm as the spatial hazard assessment index, the hazard assessment for snow disasters along the trunk highways in Shaanxi Province is performed both from time and spatial dimensions. Selecting the density of regional highway network as the disaster-affected body's vulnerability index, the disaster-affected body's vulnerability assessment is conducted. The risk index is introduced to establish the risk assessment model, the risk assessment of snow disasters along trunk highways in Shaanxi province is conducted, and the risk level of snow disaster in Shaanxi Province is cleared. The research result shows that (1) the risk indexes of snow disasters along highways in Shaanxi province are of great regional differentiation characteristics, north Yulin, east Weinan and most of Hanzhong are comparably low, Yanan, Ankang and most of Shangluo are comparably higher, the Qinling Mountains and northwest Xianyang are the highest; (2) the snow disasters in Shaanxi Province is divided into 5 risk levels, namely low risk, middle risk, comparably high risk, high risk and very high risk, the high risk regions and very high risk regions are Qinling mountain area and northwest

收稿日期: 2017-05-08

基金项目: 山东省自然科学基金项目(2015ZR019JS); 山东理工大学博士科研启动基金项目(415046)

作者简介: 尹超(1987-), 男, 山东日照人, 博士. (yinchao1987611@163.com)

area of Xianyang, which accounts for 10.74% and 9.42% of the total area of Shaanxi Province respectively, the calculation results are in accordance with the actual condition of snow disasters along trunk highways in Shaanxi Province; (3) some sections of G108, G210, G211, G310, G312 and S101, S107, S209, S304, S306 are located in high risk region and very high risk region, we should strengthen their daily maintenance, equipment storage and disaster emergency plan formulation, and should guarantee the rescue workers and equipments reach the disaster scenes as soon as quickly to reduce disaster risk and losses in the event of disasters.

Key words: road engineering; risk assessment; spatial analysis; trunk highway; snow disaster

0 引言

2008年1月中旬至2月上旬,我国南方部分地区连续遭遇4轮低温雨雪极端天气袭击,对公路交通造成了严重危害:全国13个省(自治区、直辖市)累计23万km公路受阻,其中“五纵七横”国道主干线有9条近2万km被迫封闭交通,全国68条共13.3万km国道有21条近4万km因积雪严重及路面结冰导致通行不畅^[1]。雪灾对公路交通的危害包括:(1)道路结冰导致行车速度下降、运输受阻,甚至交通中断;(2)降低路面摩擦系数,导致车辆制动困难,易发生交通事故;(3)与温度、湿度等因素耦合作用,发生冻胀、翻浆和唧泥等病害;(4)路基路面封冻导致重金属等物质加速析出,危害环境^[2]。

鉴于雪灾对公路交通造成的严重经济损失和人员伤亡,国内外学者开展了大量研究。Kluge等^[3]分析了公路积雪深度与公路环境破坏程度的关系。Joshua等^[4]研究了降雪量、降雪时间和雨雪混合降水过程对公路交通事故发生频率的影响。吴金中等^[5]分析了危险货物道路运输风险的主要影响因素,建立了包括雪灾影响的风险评价指标体系。Rivett等^[6]研究了公路除雪盐水径流对地表水和地下水的影响。Trenouth^[7]采用人工神经网络建立了季冻区公路融雪径流模型。Yu等^[8]分析了青藏公路常年积雪区路堤沉降的形成和发展机理。刘钊^[9]提出了果洛州乡镇级公路雪灾风险评价方法。韩秀君等^[10]基于1951—2014年降雪日数资料提出了辽宁省雪灾区划。Wang等^[11]基于物元理论建立了常年积雪区公路路线优选模型。

通过分析已有文献可知,公路雪灾研究大多是针对单条公路或自然条件类似的多条公路进行的,区域性公路雪灾区划研究还未见报道。陕西省是受2008年初低温雨雪冰冻灾害影响最严重的省份之一,共造成7条高速公路(15段)共2046km、4条国

道共488km、8条省道共1276km间断性封闭,高寒山区道路和大部分县乡道路、桥面普遍结冰,直接经济损失7.5亿元^[12]。虽然陕西省灾害损失十分严重,但不同地区的受灾程度存在明显差异,主要原因有:(1)陕西省部分干线公路等级较低、抗灾能力较差的情况没有得到根本改变;(2)陕西地跨陕北黄土地区、关中平原和陕南秦巴山区3个特征迥异的自然地理单元,降雪量、气温和平均冻深等自然指标差异较大,导致雪灾的时空分异特征十分明显^[13]。鉴于此,本研究进行陕西省干线公路雪灾危险性、承灾体易损性和风险评价,明确陕西省干线公路雪灾风险等级,从而为干线公路的日常养护、灾害应急预案制订和防治资金分配提供理论基础。

1 陕西省干线公路雪灾危险性评价

公路雪灾危险性是从自然环境角度出发的,体现了公路遭受雪灾的可能性大小^[14],雪灾危险性评价的基本任务是分析雪灾的活动强度、频度和密度,即分析区域孕灾环境(时间和空间)对灾害发生的敏感性^[15],因此,本研究分别从空间和时间维度评价陕西省干线公路雪灾危险性。

1.1 陕西省干线公路雪灾空间危险性评价

1.1.1 陕西省雪灾空间分布特点

(1) 年降雪日数分布特点

陕西省年降雪日数分布具有山区多、平原少、中西部多、南部少的特点。从北部的白于山、黄龙山,经子午岭的东南部到六盘山东部和秦岭一线地区,年降雪日数约20~50d,其中大于30d的区域有延安西部的子午岭、宝鸡北部的六盘山和陕南的秦岭山区,其中秦岭主峰太白山可达50d左右。陕北的榆林,关中的西安、渭南和汉中,安康北部的部分地区年降雪日数为10~15d。汉中东部到安康西部的汉江河谷地区为降雪少发区,年降雪日数不足10d^[16]。

(2) 积雪深度分布特点

陕西省最大积雪深度分布有1个高值区,为商洛地区东南部和安康东部,大部分地区为25~30 cm,最大为30~40 cm。榆林地区东部、延安西南部、宝鸡东部、西安西南部、汉中南部有5个次高值区,年最大积雪深度为25~30 cm^[16]。

1.1.2 陕西省干线公路雪灾空间危险性评价指标

雪灾危险性评价指标较多,如降雪量、降雪强度、降雪历时、降雪频率、初雪时间、末雪时间、积雪深度、积雪天数和积雪融化速率等^[17]。根据评价对象的功能、自然环境条件等特点,在进行雪灾危险性评价时应灵活选用。

由于降雪主要影响公路的通行能力和服务水平,因此公路雪灾危险性与降雪量和积雪天数密切相关。降雪量对公路通行能力的影响十分明显,降雪量越大,公路通行能力越低。但是,由于降雪是一个时间过程,并非降雪的所有阶段都对公路通行能力有明显影响,只有路面积雪达到一定深度后,公路通行能力才会显著降低。同时,当积雪深度一定时,积雪天数与雪灾对公路通行能力的影响成正比,即积雪天数越长,公路通行能力越低。因此,公路雪灾危险性评价应综合考虑降雪量和积雪天数两方面因素,即降雪强度特征和持时特征。鉴于此,本研究结合陕西省干线公路雪灾特点,选取年平均积雪深度 ≥ 1 cm 日数作为公路雪灾空间危险性评价指标。

1.1.3 陕西省干线公路雪灾空间危险性计算

在进行陕西省干线公路雪灾空间危险性计算时,采用陕西省及周边地区52个气象站1961—2003年共43 a的观测资料^[18],对各气象站年平均积雪深度 ≥ 1 cm 日数进行计算和统计,并采用Kriging插值方法由各气象站数据得到整个研究区域的数据。根据计算结果,陕西省年平均积雪深度 ≥ 1 cm 日数的空间分布特征为:陕北、关中西北部较高,大部分地区大于15 d,其中子午岭一带最高,达到40 d左右;关中东部和南部大部分地区为5~10 d;秦岭以南的汉中、安康地区最小,大部分地区小于5 d。

1.2 陕西省干线公路雪灾时间危险性评价

从降雪的月际变化规律出发分析陕西省干线公路雪灾时间危险性。由于陕西省仅在个别年份的5—10月出现过零星降雪,因此本研究不考虑5—10月的降雪月际变化规律。表1、表2分别为陕西省10地市(咸阳市资料暂缺)11月至次年4月平均降雪日数和平均积雪深度 ≥ 1 cm 日数统计^[16]。

表1 陕西省各地市11月至次年4月平均降雪日数统计

Tab.1 Average number of snow days from November to April next year in cities of Shaanxi Province

地市名称	平均降雪日数/d					
	11月	12月	1月	2月	3月	4月
西安	1.33	3.70	4.78	4.52	1.87	0.15
渭南	1.54	3.46	4.87	4.20	1.87	0.15
铜川	2.83	5.15	6.35	6.87	4.61	0.63
宝鸡	1.67	4.43	6.65	5.93	2.37	0.17
汉中	0.54	2.26	4.22	3.43	0.80	0.07
安康	0.54	1.52	3.39	3.04	1.17	0.07
商洛	2.20	5.24	6.78	6.83	3.46	0.39
榆林	2.15	3.22	4.04	4.52	3.46	0.76
延安	2.98	4.02	4.28	5.63	4.15	0.65

表2 陕西省各地市11月至次年4月平均积雪深度 ≥ 1 cm 日数统计

Tab.2 Average number of days that snow thickness is not smaller than 1 cm from November to April next year in cities of Shaanxi Province

地市名称	平均积雪深度 ≥ 1 cm 日数/d					
	11月	12月	1月	2月	3月	4月
西安	0.00	0.64	1.95	4.93	2.54	1.08
渭南	0.00	0.51	1.68	4.03	2.44	0.72
铜川	0.00	1.50	3.79	7.00	3.80	2.80
宝鸡	0.00	0.47	1.84	3.92	3.28	0.71
汉中	0.00	0.19	0.54	1.22	0.89	0.38
安康	0.00	0.05	0.13	0.65	0.56	0.33
商洛	0.00	0.94	1.58	4.62	2.84	1.53
榆林	0.21	1.22	7.26	7.17	4.56	1.67
延安	0.07	1.38	3.08	4.53	3.31	1.86

通过分析表1、表2可得以下结论:

(1) 陕西省各地市的降雪时间主要分布于12月至次年3月,积雪深度 ≥ 1 cm 的时间主要分布于1—3月,且纬度越高,降雪日数和积雪深度 ≥ 1 cm 日数分布周期越长^[16]。

(2) 积雪深度 ≥ 1 cm 日数的时间分布受降雪日数、气温、海拔和冻深等因素共同影响,例如,榆林积雪深度 ≥ 1 cm 日数大于降雪日数的月份为1月至次年4月,而安康、商洛等陕南地市仅为4月,这是由榆林冬季气温较低,降雪后不易融化,而陕南气温相对较高造成的^[16]。

(3) 陕西省各地市降雪日数和积雪深度 ≥ 1 cm 日数除存在空间分异特征外,还存在显著的时间分

异特征。首先,降雪和积雪时间分布的相对集中缩短了公路管养部门防灾、备灾的时间周期,降低了公路雪灾防治和应急处置的难度;其次,降雪和积雪的月际变化特点加大了雪灾预测预报的难度,提高了公路雪灾危险性水平。

2 陕西省干线公路雪灾承灾体易损性

2.1 承灾体易损性及评价指标

承灾体易损性是由不利事件引起的客体遭受损失的期望值,即损失的不确定性。承灾体易损性反映灾前区域经济条件和社会发展水平对突发灾害的敏感程度,与灾害可能造成的损失密切相关。承灾体易损性包括物质易损性和社会易损性,物质易损性可用财产损失量或经济损失量度量,社会易损性可用区域抗灾能力或应急响应能力度量^[19]。

根据降雪对公路的影响特点,公路雪灾的承灾体主要为公路通行能力。公路雪灾承灾体易损性是由降雪造成公路通行能力下降导致的损失。本研究以市级行政区为研究单位,选取区域路网密度为承灾体易损性评价指标,其依据包括:

(1) 公路雪灾承灾体物质易损性主要由由车辆拥堵、滞留、封闭交通和交通事故等造成的间接经济损失,计算十分复杂且准确性较差,但可以肯定的是,间接损失与公路里程成正比,即在其他条件相同时,公路里程越长则遭遇雪灾的承灾体数量越多,易损性越大,反之亦然。

(2) 影响承灾体社会易损性的因素很多,如区域社会经济水平、区域灾害管理能力和区域灾害概况等。区域社会经济水平可以反映防灾减灾的资金投入;区域灾害管理贯彻于防灾减灾的整个阶段,可以反映区域防灾减灾的政策水平;区域灾害概况指灾害的类型、频次和数量等特点。公路灾害发生频繁的地区,公路管养人员和广大群众对灾害发生的规律和特点有较好的了解和认识,在防灾减灾方面有较大优势。公路防灾减灾投入及灾害管理工作由各地市公路管理局在省局统一要求下实施,防灾

减灾投入由省局根据各地市公路里程和灾害特点拨付,各地市局也根据辖区内的公路里程适量培训防灾人员、储备防灾物资和设备^[20],因此选取区域路网密度作为承灾体易损性评价指标。

需要指出的是,区域交通量也可体现公路雪灾承灾体易损性,但由于区域交通量具有时变特点,区域交通量不宜作为评价指标;另一方面,评价指标选取的基本原则是指标间相互独立,而区域交通量与路网密度存在正相关关系,因此,以路网密度作为公路雪灾承灾体易损性评价指标是合理的。

2.2 陕西省干线公路雪灾承灾体易损性计算

根据承灾体易损性评价指标,统计陕西省各地市的国、省道里程和国土面积,如表3所示。

表3 陕西省各地市干线公路里程和国土面积

Tab. 3 Mileages of trunk highway and areas of cities of Shaanxi Province

地市名称	西安	咸阳	渭南	铜川	宝鸡	汉中	安康	商洛	榆林	延安
国道里程/km	901	657	706	189	335	1 124	1 001	501	1 251	911
省道里程/km	466	643	550	140	863	267	547	614	1 090	1 087
国土面积/ (100 km ²)	101	103	130	39	181	271	235	196	431	370

由于国道和省道在交通量和防灾备灾能力方面存在较大差异,因此,在计算干线公路路网密度时采用文献[19]提出的方法修正国道和省道的差别,如式(1)所示:

$$D = \frac{aM + N}{A}, \quad (1)$$

式中, D 为干线公路路网密度; M 为区域国道里程; N 为区域省道里程; A 为区域国土面积; a 为调整系数。根据陕西省国、省道不同的交通定位、平均交通量和在抢险救灾等区域性政治、经济活动中担负的作用,本研究取 $a=1.5$ 。

根据表3和式(1)计算各地市干线公路路网密度,结果显示,西安市路网密度最大为18.00 km/(100 km²),延安市最小为6.63 km/(100 km²),如表4所示。

表4 陕西省各地市干线公路路网密度

Tab. 4 Densities of trunk highway network in cities of Shaanxi Province

地市名称	西安	咸阳	渭南	铜川	宝鸡	汉中	安康	商洛	榆林	延安
干线公路路网密度/[km·(100 km ²) ⁻¹]	18.00	15.81	12.38	10.86	7.54	7.21	8.72	6.97	6.88	6.63

3 陕西省干线公路雪灾风险评价

3.1 公路雪灾风险

风险是在特定环境和时间段内不利事件发生的

可能性及造成损失的可能性,体现了不利事件发生和损失的不确定性^[21-22],本研究将公路雪灾风险定义为降雪对公路交通的影响及造成损失的可能性和大小。

目前,风险计算主要按照1991年联合国提出的风险表达式进行,即:风险度=危险度×易损度,该公式较全面地反映了风险的本质^[23]。本研究在参考上述风险表达式的基础上,引入风险度指数 RI 计算陕西省干线公路雪灾风险,如式(2)所示:

$$RI = f(H) \cdot f(V) \quad (2)$$

式中, RI 为陕西省干线公路雪灾风险度指数; $f(H)$ 为公路雪灾危险度,即陕西省年平均积雪深度 ≥ 1 cm日数; $f(V)$ 为公路雪灾承灾体易损度,即陕西省各地市干线公路路网密度。

3.2 评价指标无量纲化

由于陕西省年平均积雪深度 ≥ 1 cm日数和陕西省各地市干线公路路网密度具有不同量纲,无法按式(2)直接计算,需进行处理和转化,即评价指标的公度。本研究采用评价指标分级并评分的方法进行无量纲化处理。根据陕西省年平均积雪深度 ≥ 1 cm日数的分布特征及其对公路通行能力的影响程度,采用Natural Breaks(Jenks)分级方法,将陕西省年平均积雪深度 ≥ 1 cm日数分为低危险、中等危险、较高危险、高危险和极高危险5级^[24-25],并分别评分1,3,5,7和10,如表5所示。同理,对各地市干线公路路网密度进行分级和评分,如表6所示。年平均积雪深度 ≥ 1 cm日数和各地市干线公路路网密度分级界限是根据陕西省干线公路雪灾现状和各地市公路管养部门的备灾水平、干线公路网抗灾能力等因素综合确定的。

表5 陕西省年平均积雪深度 ≥ 1 cm日数分级及评分

Tab. 5 Classification of average annual number of days that snow thickness is not smaller than 1 cm in Shaanxi Province and value of each level

危险性评价指标	危险性分级				
	低危险	中等危险	较高危险	高危险	极高危险
年平均积雪深度 ≥ 1 cm日数/d	<5	5~10	10~15	15~20	>20
危险性标度	1	3	5	7	10

表6 陕西省各地市干线公路路网密度分级及评分

Tab. 6 Classification of density of trunk highway networks in cities of Shaanxi Province and value of each level

易损性评价指标	易损性分级				
	低易损	中等易损	较高易损	高易损	极高易损
路网密度/ [km·(100 km ²) ⁻¹]	<7	7~8.5	8.5~11	11~16	>16
易损性标度	1	3	5	7	10

3.3 陕西省干线公路雪灾风险计算

根据表5、表6分别对年平均积雪深度 ≥ 1 cm日数和区域路网密度分级标度并矢量化,在此基础上,按式(2)计算得到陕西省干线公路雪灾风险度指数 RI 的分布状况。由计算结果可知,陕西省干线公路雪灾风险度指数 RI 最小为1.0,最大为70.0,其中,榆林北部、渭南东部及汉中大部分地区风险较低;延安、安康及商洛大部分地区次之;秦岭山区及咸阳西北部地区风险最高。评价结果与陕西省干线公路实际雪灾分布状况一致。

为更加直观地反映干线公路雪灾风险,根据风险度指数,将陕西省干线公路雪灾风险分为低风险、中等风险、较高风险、高风险和极高风险5级,如表7所示。风险等级划分依据包括:(1)陕西省干线公路雪灾的实际发生状况,应使灾害频发且危害较大的地区划入高风险或极高风险区内;(2)应使各级风险区的面积符合一定比例关系,即从低等级风险到高等级风险,各风险区的面积逐渐减小,且高风险和极高风险区面积之和不超过总面积的25%。

表7 陕西省干线公路雪灾风险等级划分

Tab. 7 Risk classification of trunk highway snow disaster in Shaanxi Province

风险评价指标	风险等级				
	低风险 (I)	中等风险 (II)	较高风险 (III)	高风险 (IV)	极高风险 (V)
风险度指数 RI	<5	5~10	10~25	25~35	35~70

陕西省大部分地区的干线公路雪灾风险等级为低风险和中等风险,分别占陕西省总面积的45.74%和19.58%。高风险区和极高风险区主要为秦岭山区和咸阳西北部地区,分别占总面积的10.74%和9.42%;较高风险区主要位于高风险区和极高风险区的外围,占总面积的14.52%。陕西省境内现有8条国道、24条省道,其中,G108,G210,G211,G310,G312和S101,S107,S209,S304,S306等干线公路均有部分路段位于高风险或极高风险区。这些路段应引起公路管养部门的高度重视。首先,应加强日常养护、物资和装备储备以及编制灾害应急预案;其次,一旦发生雪灾,应保证抢险救灾人员和物资装备迅速到达灾害现场开展工作以降低灾害风险,减轻灾害损失。

4 结论

(1)选取年平均积雪深度 ≥ 1 cm日数为空间危险性评价指标,从空间和时间维度进行了陕西省干

线公路雪灾危险性评价,选取区域路网密度为承灾体易损性评价指标进行了承灾体易损性评价,通过引入风险度指数建立了风险评价模型,基于GIS完成了陕西省干线公路雪灾风险评价,明确了陕西省干线公路雪灾风险等级。

(2) 陕西省干线公路雪灾风险度指数的区域分异特征十分明显。榆林北部、渭南东部及汉中大部分地区风险较低,延安、安康及商洛大部分地区次之,秦岭山区及咸阳西北部地区风险最高。干线公路雪灾风险分为低风险、中等风险、较高风险、高风险和极高风险5级。高风险区和极高风险区主要集中于秦岭山区和咸阳西北部地区,分别占陕西省总面积的10.74%和9.42%,计算结果与陕西省已发干线公路雪灾状况基本一致。G108, G210, G211, G310, G312 和 S101, S107, S209, S304, S306 等干线公路均有部分路段位于高风险区或极高风险区内,这些路段应引起公路管养部门的高度重视。

(3) 本研究进行了陕西省干线公路雪灾风险评价,取得了良好效果,但在以下方面仍可改进:(1)年平均积雪深度 ≥ 1 cm日数和区域路网密度作为评价指标虽可满足要求,但无法完全反映陕西省干线公路雪灾的危险性和易损性特点,其他评价指标的评价效果需进一步验证;(2)风险度指数等级划分通过主观判断确定,缺乏明确依据,客观上降低了雪灾风险评价的精度,基于快速聚类等方法的风险度指数划分需进一步开展。

参考文献:

References:

- [1] WANG Z J, ZHANG T, SHAO M Y, et al. Investigation on Snow-melting Performance of Asphalt Mixtures Incorporating with Salt-storage Aggregates [J]. Construction and Building Materials, 2017, 142: 187-198.
- [2] CRISTINA C, TRAMONTE J, SANSALONE J J. A Granulometry-based Selection Methodology for Separation of Traffic-generated Particles in Urban Highway Snowmelt Runoff [J]. Water Air & Soil Pollution, 2002, 136 (1/2/3/4): 33-53.
- [3] KLUGE B, WERKENTHIN M, WESSOLEK G. Metal Leaching in a Highway Embankment on Field and Laboratory Scale [J]. Science of the Total Environment, 2014, 493 (5): 495-504.
- [4] JOSHUA S, YI L. Effects of Extraordinary Snowfall on Traffic Safety [J]. Accident Analysis & Prevention, 2015, 81: 194-203.
- [5] 吴金中, 范文姬. 危险货物道路运输风险评价体系研究 [J]. 公路交通科技, 2015, 32 (12): 6-11.
WU Jin-zhong, FAN Wen-ji. Risk Evaluation System of Dangerous Goods Transport [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32 (12): 6-11.
- [6] RIVETT M O, CUTHBERT M O, GAMBLE R, et al. Highway Deicing Salt Dynamic Runoff to Surface Water and Subsequent Infiltration to Groundwater during Severe UK Winters [J]. Science of the Total Environment, 2016, 565: 324-338.
- [7] TRENOUETH W R, GHARABAGHI B. Highway Runoff Quality Models for the Protection of Environmentally Sensitive Areas [J]. Journal of Hydrology, 2016, 542: 143-155.
- [8] YU F, QI J, LAI Y M, et al. Typical Embankment Settlement/Heave Patterns of the Qinghai-Tibet Highway in Permafrost Regions: Formation and Evolution [J]. Engineering Geology, 2016, 214: 147-156.
- [9] 刘钊. 果洛州乡镇级公路雪灾风险探讨 [D]. 西宁: 青海师范大学, 2016.
LIU Zhao. Discussion of Snow Disaster Risk of Township-level Roads in Guoluo State [D]. Xining: Qinghai Normal University, 2016.
- [10] 韩秀君, 贾旭轩, 申远, 等. 辽宁雪灾区划及降雪影响预评估 [J]. 冰川冻土, 2016, 38 (1): 21-27.
HAN Xiu-jun, JIA Xu-xuan, SHEN Yuan, et al. The Snow Disaster Zoning and the Snowfall Impact Pre-assessment in Liaoning Province [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38 (1): 21-27.
- [11] WANG S J, XIONG L, ZHANG C, et al. An Optimization Model of a Highway Route Scheme in Permafrost Regions [J]. Cold Regions Science and Technology, 2017, 138: 84-90.
- [12] 国家气候中心. 2008年初我国南方低温雨雪冰冻灾害及气候分析 [M]. 北京: 气象出版社, 2008.
National Climate Center. Analysis of Disaster and Climate of Snow and Frozen in South China at Beginning of 2008 [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2008.
- [13] 尹超. 平原区路堤地震灾害风险评价研究 [D]. 西安: 长安大学, 2015.
YIN Chao. Seismic Risk Assessment of Embankment in Plain Areas [D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.
- [14] 齐洪亮, 尹超, 田伟平, 等. 基于ArcGIS的中国公路地质灾害危险性区划 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2015, 35 (5): 1-9.
QI Hong-liang, YIN Chao, TIAN Wei-ping, et al. Risk

- Regionalization of Highway Geo-hazards in China Based on ArcGIS [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2015, 35 (5): 1-9.
- [15] 尹超, 王晓原, 张敬磊, 等. 基于遗传算法和云模型的公路沿线泥石流灾害危险性区划 [J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35 (11): 2266-2275.
- YIN Chao, WANG Xiao-yuan, ZHANG Jing-lei, et al. Hazard Regionalization of Debris Flow Disasters along Highways Based on Genetic Algorithm and Cloud Model [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35 (11): 2266-2275.
- [16] 杨武圣. 陕西省志: 气象志 [M]. 北京: 气象出版社, 2001.
- YANG Wu-sheng. Records of Shaanxi Province: Meteorological Records [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2001.
- [17] SCHÖNP, PROKOP A, VIONNET V, et al. Improving a Terrain-based Parameter for the Assessment of Snow Depths with TLS Data in the Coldu Lac Blanc Area [J]. Cold Regions Science and Technology, 2015, 114: 15-26.
- [18] LI C, WU P T, LI X L, et al. Spatial and Temporal Evolution of Climatic Factors and Its Impacts on Potential Evapotranspiration in Loess Plateau of Northern Shaanxi, China [J]. Science of The Total Environment, 2017, 589: 165-172.
- [19] 李家春, 尹超, 田伟平, 等. 中国公路自然灾害易损性评价 [J]. 北京工业大学学报, 2015, 41 (7): 1067-1072.
- LI Jia-chun, YIN Chao, TIAN Wei-ping, et al. Vulnerability Assessment of Natural Disasters of Chinese Highway [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2015, 41 (7): 1067-1072.
- [20] 许薛军, 王俊喆, 潘宗俊, 等. 广东省普通国省道典型路面结构衰变规律及养护技术 [J]. 公路交通科技, 2017, 34 (8): 16-22.
- XU Xue-jun, WANG Jun-zhe, PAN Zong-jun, et al. Typical Pavement Structure Deterioration Rule and Maintenance Technology for Common Trunk Road in Guangdong Province [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2017, 34 (8): 16-22.
- [21] KITA S M. Urban Vulnerability, Disaster Risk Reduction and Resettlement in Mzuzu City, Malawi [J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2017, 22: 158-166.
- [22] 王鸣晓. 模糊综合评判法在基坑工程风险评估中的应用 [J]. 公路交通科技, 2011, 28 (6): 57-61.
- WANG Ming-xiao. Application of Fuzzy Comprehensive Evaluation Method in Risk Assessment of Excavation Engineering [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28 (6): 57-61.
- [23] ISORÉ M, SZCZERBOWICZ U. Disaster Risk and Preference Shifts in a New Keynesian Model [J]. Journal of Economic Dynamics & Control, 2017, 79: 97-125.
- [24] 马保成. 自然灾害风险定义及其表征方法 [J]. 灾害学, 2015, 30 (3): 16-20.
- MA Bao-cheng. Definition and Expression Methods for Natural Disaster Risk [J]. Journal of Catastrophology, 2015, 30 (3): 16-20.
- [25] 杨峰. 基于线形风险指数的高速公路线形风险评估方法研究 [J]. 公路交通科技, 2017, 34 (6): 149-158.
- YANG Feng. Study on Expressway Alignment Risk Assessment Method Based on Alignment Risk Index [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2017, 34 (6): 149-158.