
临江城市交通系统洪涝承灾能力评估研究

——以武汉市为例

周源¹

(1. 武汉理工大学, 湖北 武汉 430070;

2. 中国船舶集团有限公司第七二二研究所, 湖北 武汉 430205)

【摘要】: 针对临江城市交通系统承受洪涝灾害的能力评估问题, 从致灾因子、孕灾环境、承灾载体和应急管理4个维度分析城市交通系统承灾能力的影响因素, 并基于数据的可得性和指标的相关性, 构建城市交通系统洪涝灾害承灾能力评估指标体系和评估模型, 以武汉市为例开展临江城市交通系统承灾能力分析评估, 得到武汉市近年来交通系统承灾能力水平, 对比实际验证了结果的可信性, 进而提出提升临江城市交通系统洪涝灾害承灾能力提升的具体对策和建议。

【关键词】: 临江城市 洪涝灾害 交通系统 承灾能力

【中图分类号】: F2 **【文献标识码】:** A

0 引言

洪涝是对人类危害最大的自然灾害之一, 也是我国最主要和最严重的自然灾害之一。近年来, 受全球气候变化因素的影响, 极端天气频繁出现, 局部暴雨频次和强度加大, 我国长江流域洪涝灾害频繁发生, 尤其是长江中下游平原地区, 地形平坦开阔, 地势较低, 极易遭受洪水侵袭。由于临江城市的特殊地理环境, 在遭受长时间强降雨后, 江河水位上涨, 城市网管系统趋于饱和, 极易发生城市内涝, 在极端情况下因江河堤坝失稳或溃口, 导致洪水蔓延, 将会更加严重地威胁到临江城市的经济发展建设和人民的生命财产安全。当城市遭受洪涝灾害影响时, 首当其冲的就是城市的交通系统。稳健的城市交通系统不仅有效降低洪灾所造成的故障概率, 还能给城市其他子系统提供必要的应急救援, 减少洪涝灾害所带来的干扰和损失。为有效提升城市交通系统的“韧性”, 不仅需要从管理层面出台相关的政策和措施, 投入相匹配的人力、物力、财力进行交通基础设施“强韧”建设, 还需要从科学的层面研究城市交通系统的承灾能力构成, 通过评估城市交通系统的承灾能力, 为交通部门提供防灾建设的指导意见, 协助临江城市政府应急管理部门提前预防, 有效应对城市洪涝灾害。

从城市交通系统承灾能力科学研究层面, 目前有关城市交通系统承灾能力的研究主要集中在交通系统脆弱性上, 包括对地铁车站系统、轨道交通系统、道路交通系统等某种交通系统脆弱性的研究, 或两种及以上交通系统的复合脆弱性研究。此外, 学者还探讨了地震、洪水、空气污染等自然灾害对城市交通系统的影响, 并对其通行能力进行评估。部分学者根据城市交通系统所独具的特点和功能, 选取了城市道路交通系统、公共安全应急设施、防灾救灾专用设备、灾害防救专业人员等14个方面因素作

作者简介: 周源(1988-), 男, 汉族, 湖北武汉人, 学士, 中国船舶集团有限公司第七二二研究所文明创建主管, 助理政工师, 研究方向: 风险管理、应急管理。

为评价指标，构建城市交通系统抗灾能力模型。城市灾害功能体系由以下三部分组成：即孕灾环境的稳定性、致灾因子的风险性和承灾体的脆弱性，因此对交通系统承灾能力的评估应综合考虑孕灾环境、致灾因子和承灾体三个方面。此外，目前有关城市交通系统承灾能力的评估运用主观赋权法较多，如层次分析法、突变级数法等，而主观赋权法具有较强主观性，容易受判断者自身的经验、个人偏向等影响。

本文将从如何降低洪涝灾害对临江城市造成影响的问题出发，根据城市交通系统对城市承灾能力的重要影响，综合考虑孕灾环境稳定性、致灾因子风险性和承灾体脆弱性三个方面的相互作用，从防灾能力、抗灾能力、救灾能力和恢复能力四个能力维度，构建临江城市交通系统承灾能力评估指标体系，开展临江城市交通系统承灾能力分析评估，并以武汉市为例，分析近年来武汉市交通系统承灾能力水平，并从能力提升的视角，提出临江城市交通系统洪涝灾害承灾能力的提升对策。

1 城市交通系统承灾能力评价指标体系构建

表 1 城市交通系统洪灾承灾能力风险评估指标体系

序号	指标名称	序号	指标名称
1	暴雨强度	10	道路面积_市辖区
2	年均降雨量	11	轨道交通客运量
3	历史洪水频率	12	洪灾对城市道路交通的影响(公路客运量)
4	汽车站数量	13	常住人口密度
5	轨道交通线数	14	人均拥有道路面积
6	城铁数量	15	每万人拥有公共交通数量(按城区人口计算)
7	建成区排水管道密度	16	交通仓储邮电业从业人员数
8	排水管道长度_市辖区	17	公共管理和社会组织从业人员数
9	建成区绿化覆盖率_市辖区	18	普通高等学校学校数

目前尚未有关于城市交通系统承灾能力的相关定义，因此，本文在借鉴城市承灾能力含义的基础上，围绕城市洪涝灾害背景，将城市交通系统承灾能力定义为城市交通系统这一承灾体对城市洪涝灾害的前期预警、预测、预防、灾害期间的救灾、救护，灾后的重建和恢复的综合能力，由系统防灾能力、系统抗灾能力、系统救灾能力和系统恢复能力等四种能力组成。基于以上四种能力，对城市交通系统承灾能力评估指标体系进行科学构建。考虑到交通系统承灾体系是一个复杂系统，在对评价指标进行选择时，不仅要针对具体的评价对象、评价内容进行分析，还必须采用一些筛选方法对指标进行简化，除去不需要指标。本文采用频度统计法，基于收集的使用频率较高的指标，筛选并剔除影响力较小或者具有重复性的部分指标，从致灾因子、孕灾环境因子、承灾体因子和应急管理因子等 4 个维度初步构建了由 32 个指标所组成的城市交通系统洪灾承灾能力风险评估指标体系。为进一步开展承灾能力计算，还需要考虑指标数据的可得性和相关性，对于不可获取数据的指标要进一步舍弃，并保留高相关的指标用于评估分析。为实现这一目的，本文选取长江中下游的临江城市武汉作为研究对象，从《武汉市统计年鉴》以及中经网统计数据库、中国国家统计局、中华人民共和国水利部、湖北省水文水资源中心、武汉市水务局、武汉市统计局、百度等数据统计网站和政府部门公布的相关公告中收集 2010-2019 年的相关数据，舍弃无法获得的 14 个指标并保留 18 个数据指标，如表 1 所示。

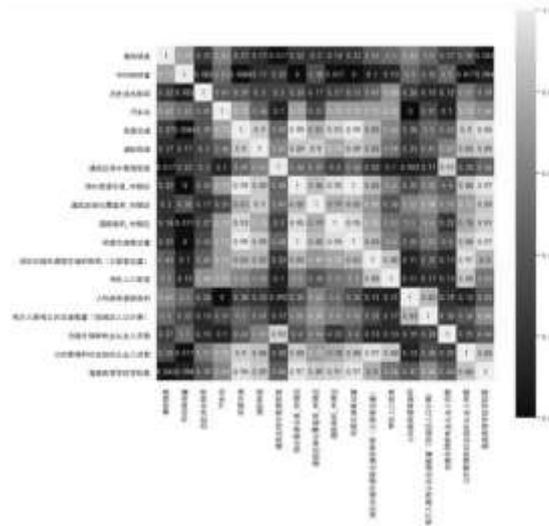


图1 指标相关系数热力图

表2 高度相关对应指标表

指标序号	高度相关指标序号
5	6、8、9、10、11、12、13、17、18
6	5、8、9、11、12、17、18
7	16
8	5、6、9、10、11、12、17、18
9	5、6、8、11、18
10	5、8、11、18
11	5、6、8、9、10、12、17、18
12	5、6、8、11、13、17
13	12、17
14	15
15	14
16	7
17	5、6、8、11、12、13、18
18	5、6、8、9、10、11、17

进一步采用 SPEARMAN 相关系数, 计算表 1 中 18 个指标间的相关系数, 将计算结果进行可视化展示, 如图 1 所示。从图 1 中, 可以看出初选出的 18 个指标间的两两相关关系。根据相关性的定义, 对相关系数大于等于 0.8 的指标进行标记, 如表 2 所示。从表 2 中可以看出, 除了第 1、2、3、4 个指标, 其他指标均有高度相关的指标。汽车站数(4)、轨道交通数(5)、城际铁路数(6)都是用于测度交通枢纽防洪条件; 轨道交通客运量(11)、公路客运量(12)都是用于测度地铁工程总长度占城市道路总长度的比重。因此, 可以进一步去掉指标 6 和 12, 简化评估指标数量。

2 临江城市交通系统洪涝风险承灾能力评估

2.1 评估模型构建

一方面考虑到主观赋权法中个人偏好的赋权可能导致评价结果产生偏差的风险较高; 另一方面系统理论中熵值法得到了普遍应用, 根据熵的大小判断综合指标离散程度取得了良好的效果。因此, 本文采取熵值法对城市交通系统洪灾承灾能力进行客观评价。

通过熵值法确定指标权重的步骤如下所示:

假设有 N 个样本, M 个指标, 则 X_{ij} 为第 I 个样本的第 J 个指标的值 ($I=1, 2, 3, \dots, N; J=1, 2, 3, \dots, M$)。

(1) 指标标准化。

由于各项指标的度量单位并不一致, 因此在计算指标权重之前, 首先需要对原始数据进行标准化处理, 即把各个指标的绝对值相对化, 从而使所有指标向量具在同一长度上进行比较。并且由于指标数值的正负包含含义不同, 针对不同性质的指标应采用不同处理方法进行的数据标准化, 本文在此处采用了 MIN-MAX 标准化, 如公式 (1) 所示。

$$X'_j = \begin{cases} \frac{X_j - \min\{X_{1j}, \dots, X_{nj}\}}{\max\{X_{1j}, \dots, X_{nj}\} - \min\{X_{1j}, \dots, X_{nj}\}} & \text{(正向数据 / 效益型指标)} \\ \frac{\max\{X_{1j}, \dots, X_{nj}\} - X_j}{\max\{X_{1j}, \dots, X_{nj}\} - \min\{X_{1j}, \dots, X_{nj}\}} & \text{(负向数据 / 成本型指标)} \end{cases} \quad (1)$$

则 X'_{ij} 为第 I 个样本的第 J 个指标归一化后的数值。

(2) 计算第 J 个指标中第 I 个样本占该指标的比重:

$$p_{ij} = \frac{X'_{ij}}{\sum_{i=1}^n X'_{ij}} \quad (2)$$

(3) 计算第 J 个指标的熵值:

$$e_j = \frac{-1}{\ln(n)} \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln(p_{ij}) \quad (3)$$

其中 $\frac{1}{\ln(n)} \geq 0$, 满足 $e_j \geq 0$ 。

(4) 计算各个指标的信息熵:

$$d_j = 1 - e_j \quad (4)$$

(5) 计算各个指标的权重:

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^m d_j} \quad (5)$$

(6) 利用熵权法得到的各个指标的权重与其规范化数据乘积计算得到综合评价:

$$S = \sum_{j=1}^m w_j X_{ij} \quad (6)$$

2.2 评估实例分析

以武汉市为例, 利用最终筛选得到的 16 个指标及数据和熵权评估模型, 对武汉市 2010-2018 年历年交通系统的洪涝灾害承灾能力进行评估计算。将 16 个指标作为模型评估指标, 即 $M=16$, 将每个指标下 2010-2018 年的数据作为样本, 即 $N=9$, 计算 16 个指标的权重结果如表 3 所示, 由表 3 可以看出, 各指标权重均在 0.051-0.075 指标, 各指标之间的权重相差不大, 这也进一步表明经过筛选的评价指标均具有典型的代表性, 是影响承灾能力评估结果的重要因素。进一步运用模型计算, 最终得到 2010-2018 年武汉市交通系统洪涝灾害承灾能力评估值如图 2 所示。

表 3 各评估指标权重计算结果

序号	指标	权重	序号	指标	权重
1	暴雨强度	0.05488964	9	道路面积_市辖区	0.06239322
2	年均降雨量	0.0529459	10	轨道交通客运量	0.05593778
3	历史洪水频率	0.06106579	11	常住人口密度	0.05198639
4	汽车站	0.06032553	12	人均拥有道路面积	0.05810613
5	轨道交通	0.07238293	13	每万人拥有公共交通数量	0.07146452
6	建成区排水管道密度	0.06836537	14	交通仓储邮电业从业人员数	0.0733865

7	排水管道长度_市辖区	0.05920006	15	公共管理和社会组织从业人数	0.07409241
8	建成区绿化覆盖率_市辖区	0.05856317	16	普通高等学校学校数	0.06489469

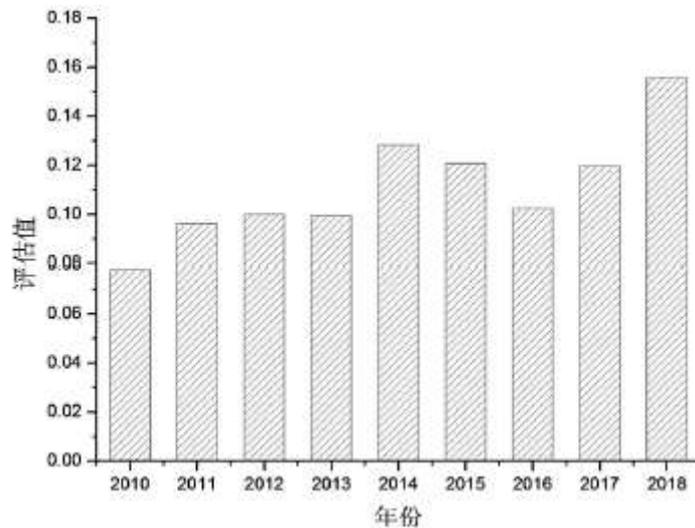


图2 武汉市 2010-2018 年交通系统洪涝承灾能力评估结果

可以看出，近十年中武汉市交通系统的洪涝承灾能力总体处于相对较低的水平，从时间上看承灾能力呈现先上升再下降之后再上升的波动趋势。在 2014 年以前，由于武汉市基础设施建设的总体发展，城市交通基础设施体量和辐射面增大，其承受自然灾害如洪涝的水平有缓慢的提升。2014 年之后，由于武汉夏季连续几年受长江流域强降雨和汛期洪峰影响，城市交通系统洪涝承灾能力面临挑战，特别是在 2016 年持续一个月的强降雨导致武汉中心城区内涝严重，城市重要交通枢纽、机场、高铁站、公共场站、部分地铁因积水被迫临时关闭，武汉市交通系统的洪涝承灾能力降到低点，这个评估结果和武汉的实际是一致的。2016 年以后，武汉市吸取了经验教训，进一步加大了城市地下管网的整治，如雨污分流工程、南湖地下通道建设等措施，城市交通系统整体防洪防涝和承灾能力不断提升，到 2018 年，其承灾能力相较 2010 年提升了 99.94%，即武汉市通过将近 10 年发展，其交通系统的洪涝灾害承灾能力提升了 1 倍，虽然在 10 年的发展中承灾能力有升有降，但总体上还是随着城市的建设不断提升。通过对比实际分析，可以证实指标体系、评估方法和评估结果的可信度。

3 临江城市交通系统洪涝承灾能力提升对策

由于长江流域地理与气候的特殊性在给沿江城市带来便利的同时也产生了一定的洪灾风险，特别是长江中下游地区，其城市交通系统存在巨大的灾害与隐患。城市交通系统不仅面临洪灾所造成的损坏，而且承担着洪灾时救援行动与人员转移的任务，因此，提升城市交通系统的承灾能力对于沿江城市的规划建设与防灾减灾工作具有重要的意义。通过分析各因素对城市交通系统承灾能力的影响情况，可以针对性地提出提升临江城市交通系统洪涝风险承灾能力的重要途径。

(1) 从致灾因子方面，引起洪灾的致灾因子为洪水，通过暴雨强度、年均降雨量、历史洪水频率三个指标进行度量，暴雨强度、年均降雨量、历史洪水频率与城市交通系统承灾能力相关系数的绝对值均小于 0.5，与城市交通系统承灾能力的相关性不高，对城市交通系统承灾能力的影响不大，且暴雨强度、年均降雨量、历史洪水频率多与自然地理和天气有关，人为无法进行较大的干预，因此对于提升城市交通系统承灾能力应从其他因素入手。

(2) 孕灾环境方面，城市承灾能力主要与其内部的交通网络有关，与其相关的主要交通工具即为汽车与地铁，汽车站作为汽车遭受洪灾的孕灾环境，在国家兴建地铁、高铁的发展趋势下，很多老旧的汽车站并没有得以改造，其防灾能力没有及时得以提升，在洪水来临时容易被淹，严重阻碍了汽车的正常运行，成为城市交通系统承灾能力的弱势，且汽车站数量与城市交通系统承灾能力相关系数为-0.5175，汽车站数量与城市交通系统承灾能力具有中度相关性，因此，可通过减少汽车站数量或提高汽车站的防洪标准来加以完善。轨道交通数量与城市交通系统承灾能力相关系数为 0.84037，由于对地铁安全建设的加强，地铁站内均设置了相关防线，抗灾能力较强，即使在较大暴雨强度下仍能保障城市内网的正常运行，为此更应该加强地铁的防洪建设，提高站点的防洪级别，完善站内的防洪水平。建议拆除防洪条件无法达标的汽车站，城市之间的通行使用城际铁路等，城内通行多使用地铁或轻轨；改善老旧汽车站的防洪条件，提高汽车站的防洪标准，改善汽车站周边地形条件，改善汽车站出入口类型，提高汽车站内台阶高度；完善地铁站的防洪条件，依据地铁的设防水准，独立设计地铁雨水排放系统、废水排放系统和污水排放系统，提升雨水排放能力，提高雨水排放标准，保障地铁周边的雨水排出路径通畅，在出入口设置防淹门，确保来水不能翻入站内，站点风亭的通风孔也应与站点防洪级别相匹配，保证有足够的防淹高度等。

(3) 承灾载体方面，城市交通系统是一个综合承灾体，对其建设的支持包括对道路基础设施、交通工具和交通出行主体等方面的支持，通过建成区排水管道密度、排水管道长度_市辖区、建成区绿化覆盖率_市辖区、道路面积_市辖区、轨道交通客运量、常住人口密度、人均拥有道路面积共 7 个指标进行度量。其中，排水管道长度_市辖区和轨道交通客运量与城市交通系统承灾能力相关系数最高，都为 0.83333，与城市交通系统承灾能力均呈高度相关，对城市交通系统承灾能力影响较大。在城市排水管道长度逐年增长的趋势下，需进一步优化排水管道技术，提高供水管道质量标准，增加使用年限；优化排水管道结构布置，降低维护成本；减少污水漏损，引入新的技术应用。在轨道交通客运量逐渐增加的趋势下，网络化效应愈发明显，提升轨道交通的承灾能力就显得特别重要，应严格执行城市轨道交通运营管理规定，不断完善轨道交通隐患排查治理制度和风险分级管控制度。道路面积_市辖区、建成区绿化覆盖率_市辖区、建成区排水管道密度、常住人口密度与城市交通系统承灾能力相关系数分别为 0.78333、0.70294、0.6、0.4，与城市交通系统承灾能力均呈中度相关。一是随着城镇化进程的加快，城市道路面积不断提升，提升道路建设质量对提高道路通行能力的意义不言而喻，是提高地面通行和畅通地下循环的重要举措，应充分利用现有的道路空间，合理布局雨水、中水、给水等各类管网，综合协调地下工程和地上工程建设。二是在城市区域植树和增加绿地面积，不仅可以美化环境，而且在减小城市区域径流量、削减洪峰流量、改善径流水质方面有很大的作用。因此，需要政府部门提高城市绿色建设的保障条件，多形式多样提升城市绿化覆盖率。三是加强对排水管网建设的支持力度，逐年对老旧排水设施建设改造，同时要加强对城市排水主干管网建设，尽快形成主干排水网络体系，使新建排水管网建成后立即投入使用不闲置。四是洪灾中的直接当事人是受灾群众，在发生灾害时受灾群众的各种行为直接影响着抗灾救灾的有效性，常住人口密度增加会增加灾害救援的难度，但同时群众在灾害救援中发挥着重要的作用，因此，应提升群众的防灾救灾能力，补齐短板，实现全民参与的社会共治模式。人均拥有道路面积与城市交通系统承灾能力相关系数为 0.14226，与城市交通系统承灾能力低度相关，随着城市发展的加快，城市人口剧增，同时城市的道路建设也在不断加强，人均拥有道路面积维持比较稳定，对城市交通系统承灾能力影响较小。

(4) 应急管理方面，每万人拥有公共交通数量与城市交通系统承灾能力相关系数为-0.1333，呈负的低度相关。根据统计数据发现，武汉市的每万人拥有公共交通数量均大于 12 台，在国家规定的全国文明城市 A 类测评标准万人拥有公交车 12 标台的标准之上，进一步提高每万人拥有公共交通数量对于提升城市交通系统承灾能力的意义不大。交通仓储邮电业从业人员数量与城市交通系统承灾能力相关系数为-0.45，呈负的中度相关。近年来，随着人工智能技术的发展，提高了道路利用率、道路交通的安全程度和道路使用的舒适性，这在一定程度上影响了交通仓储邮电业从业人员数量，但是城市交通系统承灾能力在逐步提升，更加明确了交通运输行业的发展方向。公共管理和社会组织从业人员在抗洪抢险救援工作中起着重要的带头作用，公共管理和社会组织从业人员数量与城市交通系统承灾能力相关系数为 0.7，呈正的中度相关，随着国家对应急管理社会治理的重视，公共管理和社会组织从业人员在稳步增加，提升了城市交通系统的抗灾、救灾和恢复能力，还应进一步提升公共管理和社会组织从业人员的素质，加强其专业技能培训与抗洪抢险救灾业务能力。普通高等学校数量代表了城市居民的教育素质，同时一定程度上体现了城市居民防洪管理的能力，普通高等学校数量与城市交通系统承灾能力相关系数为 0.72674，呈正的中度相关，在国家大力提倡国民素质发展作用下，高校数量得以迅速提升，一方面为城市交通系统承灾体系提供技术人员储备，另一方面居民素质的提升也能在城市抗洪中发挥作用，提升了城市交通系统的承灾能力。

4 结论与展望

本文针对构建临江城市交通系统洪涝风险承灾能力评估指标体系和基于数据驱动的评估模型等问题,从如何降低洪涝灾害对临江城市造成的影响的问题出发,根据城市交通系统对城市承灾能力的重要影响,综合考虑孕灾环境稳定性、致灾因子风险性和承灾体脆弱性三个方面的相互作用,从防灾能力、抗灾能力、救灾能力和恢复能力四个能力维度,构建临江城市交通系统承灾能力评估指标体系,开展临江城市交通系统承灾能力分析评估,并以武汉市为例,分析历年来武汉市交通系统承灾能力水平,并从能力提升的视角提出了临江城市交通系统洪涝承灾能力提升的具体对策,可为我国城市交通系统治理能力提升提供参考。

参考文献:

- [1]陆秋琴,武晓晓,黄光球,等.基于 Petri 网的地铁车站系统脆弱性评价研究[J].交通信息与安全,2020,38(01):52-60.
- [2]Sun,L.,et al.Vulnerability assessment of urban rail transit based on multi-static weighted method in Beijing,China[J].Transportation Research Part A:Policy and Practice,2018,(108):12-24.
- [3]Zhang,J. and M.Wang.Transportation functionality vulnerability of urban rail transit networks based on movingblock:The case of Nanjing metro[J].Physica A:Statistical Mechanics and its Applications,2019,(535):122367.
- [4]Hong,L.,et al.Vulnerability effects of passengers' intermodal transfer distance preference and subway expansion on complementary urban public transportation systems[J].Reliability Engineering & System Safety,2017,(158):58-72.
- [5]Tang,Y. and S.Huang.Assessing seismic vulnerability of urban road networks by a Bayesian network approach[J].Transportation Research Part D:Transport and Environment,2019,(77):390-402.
- [6]Singh,P.,et al.Vulnerability assessment of urban road network from urban flood[J].International Journal of Disaster Risk Reduction,2018,(28):237-250.
- [7]Ma,F.,et al.Assessing the vulnerability of urban rail transit network under heavy air pollution:A dynamic vehicle restriction perspective[J].Sustainable Cities and Society,2020,(52):101851.
- [8]赖芑宇.城市交通系统抗灾能力评价[J].北华大学学报(自然科学版),2012,13(04):475-479.
- [9]赵月平.城市交通系统抗灾性能模糊随机模拟评价[J].公路,2014,59(12):130-134.
- [10]赵继华.铁路防洪体系效果评价研究[D].北京:清华大学,2010.