

doi: 10. 6046/zrzyyg. 2020421

引用格式: 孙昂,杨清华,刘智,等. 西里古里走廊地区道路交通: 分布特征、通行能力与地质环境[J]. 自然资源遥感,2021,33(3):138-147. (Sun A, Yang Q H, Liu Z, et al. Transportation in the Siliguri Corridor, West Bengal, India: distribution characteristics, trafficability, and geological environment[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2021, 33(3):138-147.)

西里古里走廊地区道路交通: 分布特征、通行能力与地质环境

孙 昂¹, 杨清华¹, 刘 智², 陈 华¹, 蒋 校¹, 蒋守敏², 边 宇¹, 田 立²
(1. 中国自然资源航空物探遥感中心, 北京 100083; 2. 四川省地质调查院, 成都 610036)

摘要: 基于 33 景高分一号 (GF-1) 和高分二号 (GF-2) 卫星多光谱遥感影像 (覆盖面积 154 814 km²), 对西里古里走廊地区开展了遥感解译工作, 获取了该地区各级公路里程数、路网密度、分布情况等要素, 掌握了该地区道路交通的总体特征。在此基础之上, 选取了西里古里走廊特定重点区域, 以地貌、断裂构造、岩性、地质灾害发育程度、道路状况等要素作为因子进行加权打分, 评估了重点区道路交通的通行能力。进一步地, 抓取了重点区 19 个关键节点, 运用复杂网络理论进行定量运算, 得出了关键节点全网效率变化量 ΔE 和全网效率相对下降率 e 等参量, 这些参量表征了各关键节点对于整体路网通行性的重要程度。对于重要性位于前列的 4 个关键节点, 开展了解剖研究, 分析了关键节点周缘重要目标、坡度、工程岩土体类型等地质环境特点, 提出了潜在灾害及隐患。

关键词: 西里古里走廊; 道路交通; 分布特征; 通行能力; 地质环境

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2021)03-0138-10

0 引言

道路交通是指透过器具或仅靠人力进行的人流、客流和货物的交流运输, 是一个地区内联外通和支撑经济社会发展不可或缺的基础设施。道路交通是商品交换、人员交流的先决条件, 综合反映了一个地区经济、社会发展, 也是地区工业化进程的重要基础。道路交通调查可以获知某地区人流物流交换的活跃程度, 也可以推测城市或城市群的商业化、一体化程度^[1-3]。道路交通调查对巩固边疆安全, 解决特定需求, 更是发挥着基础性、先行性的作用。

境外特定地区往往由于各种原因人员无法到达, 无法开展地面工作, 而对于该区域的信息需求却十分迫切。遥感技术在面对这种情势下, 针对各种应用领域, 发挥着难以替代的作用^[4-8]。前人在边境, 主要是境内地区, 针对道路交通调查开展了大量有益的工作, 取得了一系列基础性数据^[9]。但对于境外特定地区道路交通状况, 调查程度则相对较低。在未来不确定的时刻, 相关需求凸显或形势异动的情况下, 这将可能严重阻碍决策、迟滞部署。本文针

对南亚西里古里走廊地区, 开展道路交通调查工作, 获取道路分布特征、通行能力等信息, 探讨路网关键节点的确定、关键节点周缘可能发育的灾害隐患, 及其灾害隐患的地质环境背景等问题。

1 研究区概况及数据源

1.1 研究区概况

西里古里走廊是连接印度本土与其东北部的狭窄带状区域, 该区西北侧与尼泊尔接壤 (尼泊尔梅吉专区查巴县), 东南侧与孟加拉国为邻 (孟加拉国朗布尔专区班乔戈尔县), 东北侧与不丹王国毗邻, 最窄的区域仅有 23 km。该地区主要城市为印度西孟加拉邦的西里古里, 是连接尼泊尔、孟加拉国及印度的大吉岭县、大吉岭山、锡金的中心枢纽。

1.2 数据源及其预处理

本文工作区分为西里古里走廊 1:25 万区和 1:5 万重点区 2 个部分: ①西里古里走廊 1:25 万区数据来源为高分一号 (GF-1) 卫星多光谱遥感影像共计 10 景, 均为 1A 级, 其中 5 景影像为 WFV2, 3 景影像为 WFV3, 2 景影像为 WFV4, 覆盖总面积为 147 410 km²,

收稿日期: 2020-12-31; 修订日期: 2021-06-21
基金项目: 中国地质调查局项目“西部边境阿克苏-防城港地区综合遥感地质调查与应用”(编号: DD20190545)资助。
第一作者: 孙 昂 (1988-), 男, 博士, 工程师, 主要从事遥感地质研究。Email: sunanglu@163.com。
通信作者: 刘 智 (1972-), 男, 高级工程师, 主要从事遥感地质调查与研究。Email: 149275949@qq.com。

全部覆盖工作区范围,影像整体质量较好,可以满足本次工作需要,坐标系统为 GCS - WGS - 1984,空间分辨率优于 16 m,数据采集时间范围在 2020 年 3 月 31 日—4 月 7 日之间;②1:5 万重点区数据来源为高分二号 (GF - 2) 卫星多光谱遥感影像共计 23

景,均为 1A 级,其中 10 景影像为 PMS1,其余为 PMS2,覆盖总面积为 7 404 km²,影像整体质量较好,坐标系统为 GCS - WGS - 1984,空间分辨率全色为 0.8 m、多光谱为 3.2 m,数据采集时间范围在 2019 年 1 月 16 日—2020 年 4 月 9 日之间(图 1)。

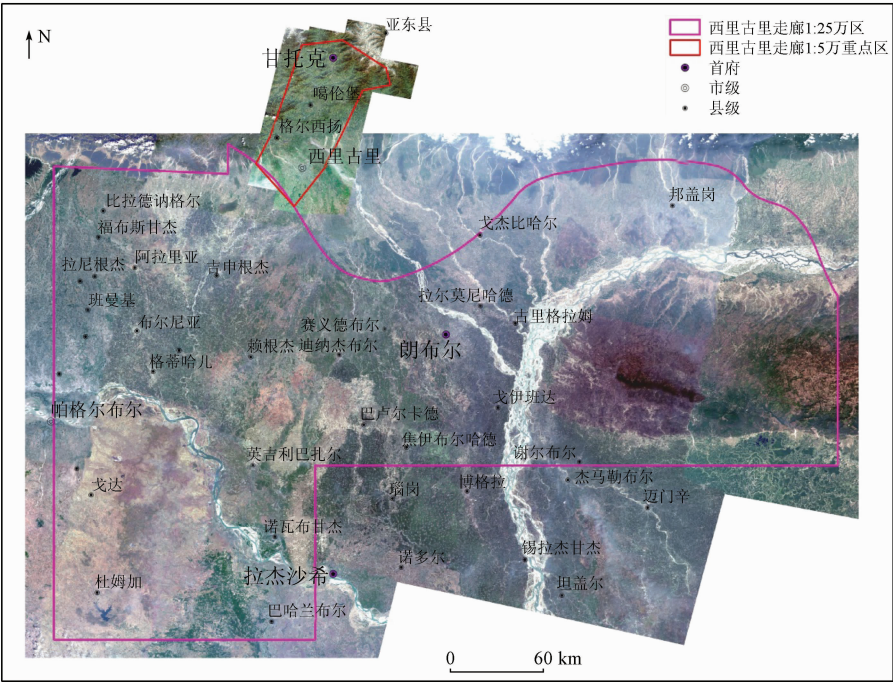


图 1 数据分布

Fig.1 Data distribution

数字高程模型 (digital elevation model, DEM) 数据来源为 ASTER GDEM,空间分辨率为 30 m。点位数据包括地名、电站、桥梁等。地名点为谷歌地名与影像相结合解译所得,电站、桥梁等点位数据均为遥感解译。

本次研究收集数据类型均为 1A 级产品,数据为 TIFF 格式,投入使用之前需要进行一系列数据预处理,主要处理流程包括多光谱影像辐射定标、大气校正、正射校正和镶嵌等。

利用 ENVI 软件,根据所需的传感器绝对辐射

定标系数完成辐射定标。辐射定标后采用 FLAASH 对影像进行大气校正。大气校正后,为了减少因地形起伏引起的变形,基于研究区内的 DEM 数据,采用 RPC (rational polynomial coefficient) 对影像进行正射校正。本研究所有影像均完成上述的预处理流程之后,采用软件自动镶嵌流程工具完成镶嵌。正射校正后的影像较处理前消除了地形起伏所造成的几何畸变,色彩平衡后影像对比度、饱和度均有明显增强,为交通信息的解译提供了更加准确的基础(图 2)。



图 2 数据处理前后影像对比

Fig.2 Image comparison before and after data processing

2 研究方法

2.1 道路可解译能力说明

以前人工作成果^[10]为依据,将公路划分为一级公路、二级公路、三级公路、四级公路和等外公路

表 1 公路等级划分标准
Tab.1 Standard of highway classification

公路等级	特征描述
一级公路	重要城市之间的连接的主干道路及重点工矿区的公路,主要旅游点、进出机场、车站、港口的主干路及其所在地路段,商业网点众多,大型文化娱乐、展览等主要公共场所所在路段,平均人流量为 100 人次/min 以上和公共交通线路较多的路段,主要领导机关、外事机构所在地,地区确定的重点道路、景观道路、快速路
二级公路	连接经济、政治中心或大工矿区等地的主干公路,城市网点较集中、占道路长度 60% ~ 70% 的路段,公共文化娱乐活动场所所在路段,平均人流量为 50 ~ 100 人次/min 的路段,有固定公共交通线路的路段
三级公路	连接县及县级以上城镇一般干线公路,城郊结合部的主要交通路段,居民区和单位相间的路段,商业网点较少的路段,人流量、车流量一般的路段
四级公路	县与乡、镇、村相连接的支线公路及连接乡镇的干线公路,居住区街巷道路,人流量、车流量较少的路段
等外公路	乡村、组之间连接的小路,乡镇与农田、农舍连接的小路,山区或牧区的砂砾石小路

表 2 GF-1 和 GF-2 影像对于不同宽度道路可解译能力对比
Tab.2 Comparison of the interpretability of roads of different widths based on GF-1 and GF-2 image

级别	GF-2		GF-1	
	遥感影像	可解译能力	遥感影像	可解译能力
一级公路		解译道路呈深灰色、浅灰色调,影像上为长条状,可见少量零散的居民地,影纹清晰,位于平原地区,可解译能力强		解译道路呈灰色、暗灰色调,影像上以规则的几何形态以及长条状的纹理为标志,可解译能力中等
二级公路		解译道路呈深灰色、浅灰色调,影像上为长条状,可见密集的居民地,影纹清晰,位于平原地区,可解译能力强		解译道路呈灰白色,影像上为一规则的长直线,位于平原区,两侧分布灰白色点簇状居民,可解译能力中等
三级公路		解译道路呈深灰色、浅灰色调,影像上为长条状,形态曲折,影纹较为清晰,位于山地地区,可解译能力强		解译道路呈灰色、浅灰色,影像上表现为规则的长直线,位于平原区,与周边地物差异不大,可解译能力一般

2.2 通行能力评估

对道路通行能力的研究主要集中在城市交通领域^[11-13],通常以“非拥堵状态下的最大小时流率”和“排队流率”来定义^[14]。本文借鉴了城市交通领域通行能力的概念,由于应用方向与工区位置特殊,与城市交通领域通行能力主要以“流率”为衡量标准有着显著区别。本文通行能力侧重于考虑道路的可通过性、通行的风险性等因素,通过地貌、断裂构造、岩性、地质灾害发育程度、道路状况等要素,采用层次分析法,综合评价道路的通行能力,并将可通行能力划分为好(75 ~ 100 分)、中等(75 ~ 50 分)、较差(25 ~ 50 分)以及差(0 ~ 25 分)4 个等级。在所有评价因子中,依据各因子对道路通行的重要性设置不同的权重值(表 3):地质灾害对道路通行有着

(表 1)。通过应用不同空间分辨率影像,对比了不同宽度道路识别的能力,相关结果如表 2 所示。交通信息解译过程中,路段名称等是难以通过影像厘定的要素,本文此部分参考了 Open street map 开源数据。表 2 中影像波段为真彩色组合。

表 3 道路通行能力评价因子系数及分值

Tab.3 The coefficients and points of the evaluation factor for traffic capacity

因子类别	评价因子	权重系数	分类	分值
地质环境特征	断裂构造	0.15	发育	40
			较发育	60
			不发育	100
	工程岩性	0.15	破碎	40
			较破碎	60
			完整	100
	地貌	0.2	V 形谷,谷底窄,谷坡陡	40
			U 形谷,谷底较宽,谷坡较缓	60
			宽谷	100
	地质灾害发育程度	0.25	高易发区	40
			中易发区	60
			低易发区	100

(续表)				
因子类别	评价因子	权重系数	分类	分值
道路特征	坡度/(°)	0.15	≤15	100
			(15, 25)	60
			≥25	40
	路面宽度/m	0.1	≤4	40
			(4, 6]	60
			(6, 8]	80
			>8	100

直接的影响,权重系数为0.25,地貌次之,为0.2,断裂构造、工程岩性、坡度的权重系数为0.15,路面宽度权重系数为0.1。

2.3 复杂网络

复杂网络是一种用来描述自然、社会科学以及工程技术中相互关联的理论,以图论为其理论基础。以复杂网络理论对道路交通网络拓扑特征进行分析,已得到国内外广泛应用^[15-19]。本文以复杂网络为理论基础,通过交通网络中关键节点的识别,分析节点效率、全网效率等,对研究区路网进行最短路径判断,最终评估其通行能力。

1) 关键节点。关键节点是指车辆线路故障、自然灾害、恐怖活动等突发事件都可能使某些交通节点或线路瘫痪,从而影响交通网络全局效率。不同节点瘫痪引起全局效率变化的大小叫作节点的脆弱性,脆弱性最大的节点对网络整体效率影响最大。

2) 节点效率。在复杂网络理论中,网络中任意2个节点 v_i 和 v_j 之间的效率,即它们之间距离 d_{ij} 的倒数,用 ε_{ij} 表示为:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{d_{ij}}。$$
 (1)

d_{ij} 越大,节点间的效率越低,联系越匮乏。当 $d_{ij} = \infty$ 时, $\varepsilon_{ij} = 0$,即节点 v_i 和 v_j 处于非连通状态,它们之间的效率为0。

3) 全网效率。若网络有 n 个节点,则全网效率是网络所有节点之间效率的平均值。全网效率越高,表明网络连通性越好,节点间的聚集程度越高,全网效率 E 表示为:

$$E = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i \neq j} \varepsilon_{ij} = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i \neq j} \frac{1}{d_{ij}}。$$
 (2)

令 $\Delta E = E - E'$,其中 ΔE 为全网效率的变化量,为节点失效前的全网效率, E' 为节点失效后的全网效率,全网效率的相对下降率 e 表示为:

$$e = \frac{\Delta E}{E} = \frac{E - E'}{E}。$$
 (3)

3 西里古里走廊地区道路交通特征

针对工作区开展了交通道路解译。综合考虑图面各要素协调性、可读性等因素,西里古里走廊1:25万区路网分布特征图显示前三级公路;西里古里走廊1:5万重点区路网分布特征图显示全部公路。

3.1 西里古里走廊1:25万区路网总体特征

西里古里走廊1:25万区公路密集,结构复杂(图3),前三级公路总里程为57 583 km。一级公路

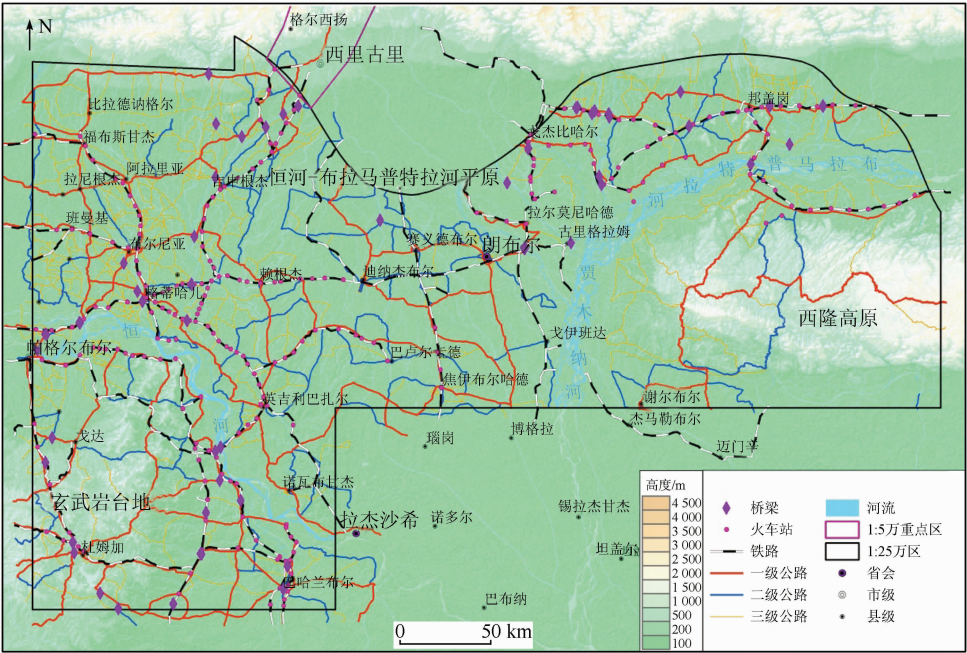


图3 西里古里走廊1:25万区路网分布特征

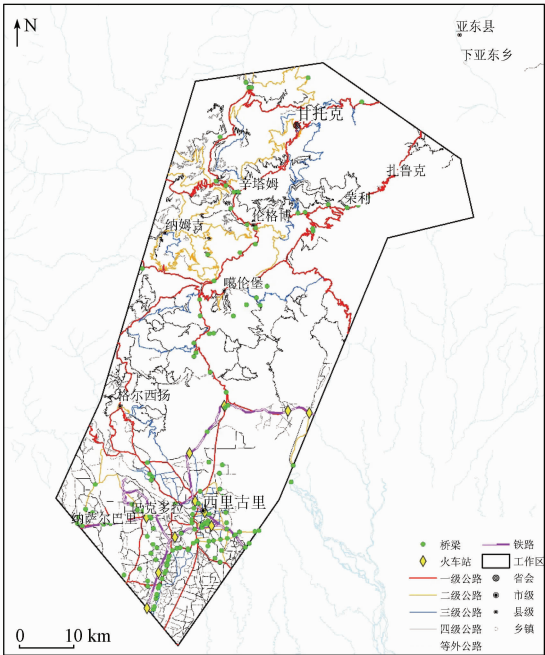
Fig.3 Road network distribution in Siliguri Corridor area(1:250 000)

里程为 47 212 km,占研究区公路总里程的 31.29%,整体分布均匀,贯穿整个研究区域,贯通山地与平原区域,承担各个城镇的主要的交流沟通;二级公路里程为 3 173 km,占研究区公路总里程的 21.02%,分布较为密集,主要分布于研究区平原区,连通几个大城镇,研究区域东部西隆高原,因地势原因,二级公路分布较少;三级公路则分布在二级道路附近,道路长度较短,但十分密集,里程为 7 198 km,占研究区总里程的 47.69%,主要增加区域内的沟通交流的便利性。整体来说,研究区公路较发达,使该区域交通便利,有利于经济发展,公路覆盖全面,并且有些公路贯穿城市,通行状况以及路面状况都较好。

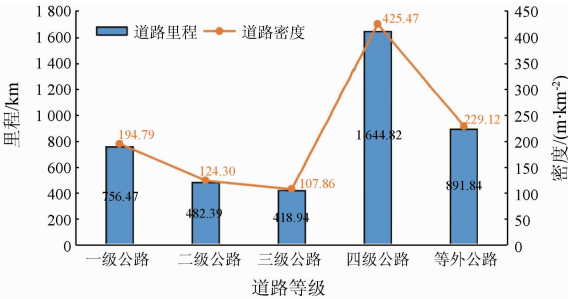
研究区地貌以布拉马普特拉河、贾木纳河、恒河为界线,总体上可划分为 3 个单元:恒河-布拉马普特拉河平原、玄武岩台地和西隆高原(图 3)。3 个地貌单元路网密度(路网长度/区域面积,单位: m/km^2)存在差异性。恒河-布拉马普特拉河平原区一级公路路网密集度为 $46 \text{ m}/\text{km}^2$,二级公路路网密集度为 $39 \text{ m}/\text{km}^2$,三级公路路网密集度为 $96 \text{ m}/\text{km}^2$ 。玄武岩台地区一级公路路网密集度为 $70 \text{ m}/\text{km}^2$,二级公路路网密集度为 $25 \text{ m}/\text{km}^2$,三级公路路网密集度为 $67 \text{ m}/\text{km}^2$ 。西隆高原区一级公路路网密集度为 $24 \text{ m}/\text{km}^2$,二级公路路网密集度为 $17 \text{ m}/\text{km}^2$,三级公路路网密集度为 $44 \text{ m}/\text{km}^2$ 。从结果来看,地形隆起区路网密度明显较低,地形低洼区路网密度则较高,显示了地形地貌与路网密度的紧密关系,地形地貌对人类社会经济活动存在着一定控制作用。

3.2 西里古里走廊重点区路网特征

进一步对西里古里走廊 1:5 万重点区开展路网特征研究,其总面积为 $3\,893 \text{ km}^2$,公路总里程为 $4\,210 \text{ km}$,路网总密度为 $1\,081 \text{ m}/\text{km}^2$,铁路总里程为 184 km ,道路主要分布在印度境内。区内桥梁密集,集中分布在平原地区,平原区内的桥梁主要集中在 2 条水渠周边,山地地区桥梁沿河流断续线状分布。共计解译桥梁 160 座,平均长度 87 m,以公路桥为主,总计 151 座,占桥梁总数的 94.4%,其余为铁路桥,共计 9 座,占桥梁总数的 5.6%。区内以四级公路及等外公路为主,其次为一级公路、二级公路及三级公路(图 4)。路网密度方面,重点区道路网密集,结构复杂,各等级公路分布均匀,道路连通性强,主要城市、乡镇之间可通行能力强。一级公路分布均匀,贯穿整个研究区,连接平原与山区各大城市,数量虽不多,但连通范围广泛,道路密度为 $195 \text{ m}/\text{km}^2$,路面宽度均值在 10 m 左右,大多数



(a) 路网分布特征



(b) 道路里程与道路密度遥感调查结果

图 4 1:5 万重点区路网分布特征

Fig. 4 Road network distribution in key area(1:50 000)

道路为全年通行,主要沿着山谷修建,由于区内地形起伏较大,山区内部分路段较曲折,弯道较多;二级公路主要分布于中山区域,噶伦堡以北,依地形而建,道路密度为 $124 \text{ m}/\text{km}^2$,将研究区各个城镇连通,路面宽度大多将近 7 m,且通行状况良好,利于城镇间交流发展;三级公路密度为 $108 \text{ m}/\text{km}^2$,路面宽度均值约为 4 m,主要分布于城镇内部,路网密集,为城镇内各大街街道,便利居民生活起居,日常交流出行;四级公路密度为 $425 \text{ m}/\text{km}^2$,路面宽度均值为 3 m,广泛分布于平原与山地区域;等外公路密度为 $229 \text{ m}/\text{km}^2$,路面宽度均值为 2 m,主要分布在平原地区。

4 西里古里走廊重点区道路通行能力与地质环境

4.1 通行能力评估

在前人资料的基础上^[20-25],运用 GF-2 卫星

多光谱数据,对重点区构造、地质灾害等要素进行了解译,查明了本区地质环境特征。选取重点区内连接甘托克、辛塔姆、伦格博、纳姆吉、噶伦堡等几个主要城市的重要交通干线,即一级公路。选取路段为重要城市之间连接的主干道路及通往重点工矿区的公路,平均人流量为 100 人次/min 以上和公共交通线路较多的路段,全长 756 km。通过 2.2 节所阐述

的方法,对其基本通行能力进行分段评估,区内主要地貌类型以山地为主,地形起伏较大,尤其是辛塔姆—噶伦堡沿线右侧属于中大起伏中山及中大起伏高山区域,岩石较破碎,断裂构造发育,地质灾害发育,本区道路通行能力评估结果及沿公路轨迹的 1~7 号点高程变化剖面图如图 5 所示。

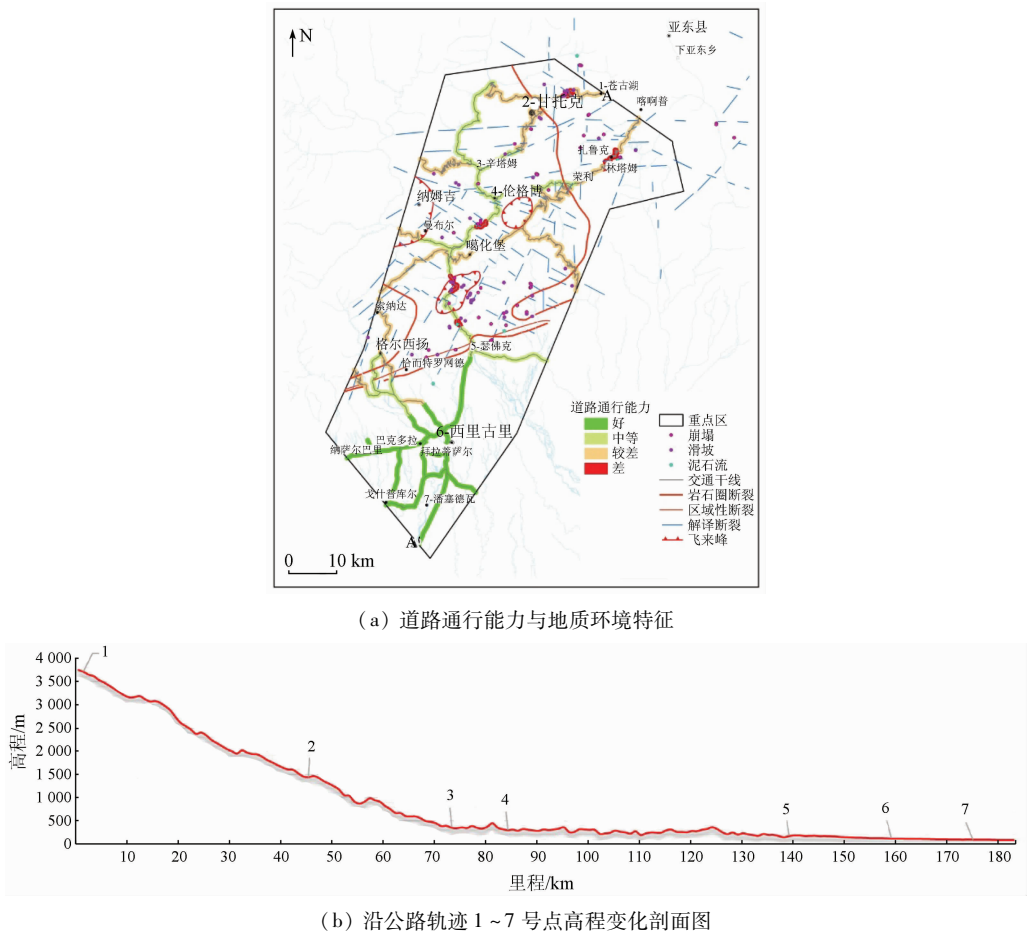


图 5 重点区道路通行能力与地质环境叠合图

Fig. 5 Superimposed map of passable capability and geological environment in key area

工作区内重要交通干线的可通行性整体情况一般。处在河谷地带的路段可通行性中等,周边山地区域内的路段通行能力普遍较差,部分区段受到地质灾害的影响通行能力差(表 4)。

表 4 重点区各路段通行能力

Tab. 4 Each section of traffic capacity in key area

路段名称	路段平均高程/m	路段高差/m	路段平均坡度/(°)	路段地质灾害描述	通行能力	路段长度/km	占比/%
1(苍古湖)–2(甘托克)	2 618	2 268	26	地质灾害发育,共计 9 处,包括 7 处滑坡与 2 处崩塌	差	54	7
2(甘托克)–3(辛塔姆)	807	1 068	24	地质灾害较发育,共计 2 处,包括 1 处滑坡、1 处崩塌	较差	383	51
3(辛塔姆)–4(伦格博)–5(瑟佛克)	293	181	22	地质灾害发育,共计 7 处,包括泥石流 1 处、滑坡 5 处、崩塌 1 处。	中等	180	24
5(瑟佛克)–6(西里古里)–7(潘塞德瓦)	120	74	1	地质灾害不发育	好	139	18

4.2 交通网络关键节点识别

依据公式计算得到节点失效前的全网效率(网络初始效率)为 0.092 33,全区共有节点 19 个。通过对 19 个节点的计算,全网效率变化量(ΔE)和全网效率相对下降率(e)前 4 位的节点分别是节点 5,6,7,15,表征了这 4 个节点对整个交通网络通行的重要性依次递减(表 5)。

表 5 重点区关键节点失效后指标值

Tab.5 Index value after key node invalid in key area

节点编号	ΔE	e	重要性排名
5	0.004 96	0.053 72	1
6	0.004 12	0.044 66	2
7	0.003 67	0.039 75	3
15	0.002 74	0.029 71	4

基于上述关键节点,采用网络分析模块对重点地区交通网络进行最短路径分析,分别将不同的关键节点设置为禁止型阻碍点,得到不同情况重点区不同的最短路径,通过对绕行路线增加的时间、距离成本反向验证关键节点的准确性。

- 1)未禁止任何节点。重点区各个节点未被禁止、通行状况良好时,公路总里程 112 km,通行时间预计 5 h,由上文对区内主要交通干线通行能力评估成果得见,该路段通行能力中等,如图 6(a)所示。
- 2)节点 5 禁止。将关键节点 5 设置为禁止型阻碍点后,甘托克—西里古里在区内将无法通行。
- 3)节点 15 禁止。将关键节点 15 设置为禁止型阻

碍点后,计算得到一条新的最短路径,总里程 129 km 左右,通行时间预计在 5.5 h 上下,该道路与关键节点 15 未禁止前增加了 17 km,通行时间增加 30 min,且绕行路段从节点 17 至节点 11 区段内,路面质量较差,公路等级三级以下,平均路面宽度为 3 m,以碎砾石硬路面为主,最小转弯半径为 4 m,转弯较多,对通行时间造成较大影响,海拔高、地势起伏较大,通行能力较差,如图 6(b)所示。

4)节点 6 禁止。将关键节点 6 设置为禁止型阻碍点后,计算得到一条新的最短路径,总里程 142 km 左右,通行时间预计在 5.5 h 上下,该道路与关键节点 6 未禁止前增加了 30 km,通行时间增加 30 min,且绕行路段从节点 6 以北转向节点 7 方向,主要以三级公路为主,平均路面宽度为 4 m,最小转弯半径为 3 m,原路线西侧的地形相对东侧平缓,属于小起伏的中低山区域,通行能力较差,如图 6(c)所示。

5)节点 7 禁止。将关键节点 7 设置为禁止型阻碍点后,计算得到一条新的最短路径,总里程 182 km 左右,通行时间预计在 10 h 上下,该道路与关键节点 7 未禁止前增加了 70 km,通行时间增加 5 h,且绕行路段从节点 10 向节点 11、节点 12、节点 8,海拔高程由低向高、地势由缓至陡、道路转弯增多,最小转弯半径为 3 m,从河谷地带进入山地区域,道路通行能力由中等转向较差,如图 6(d)所示。

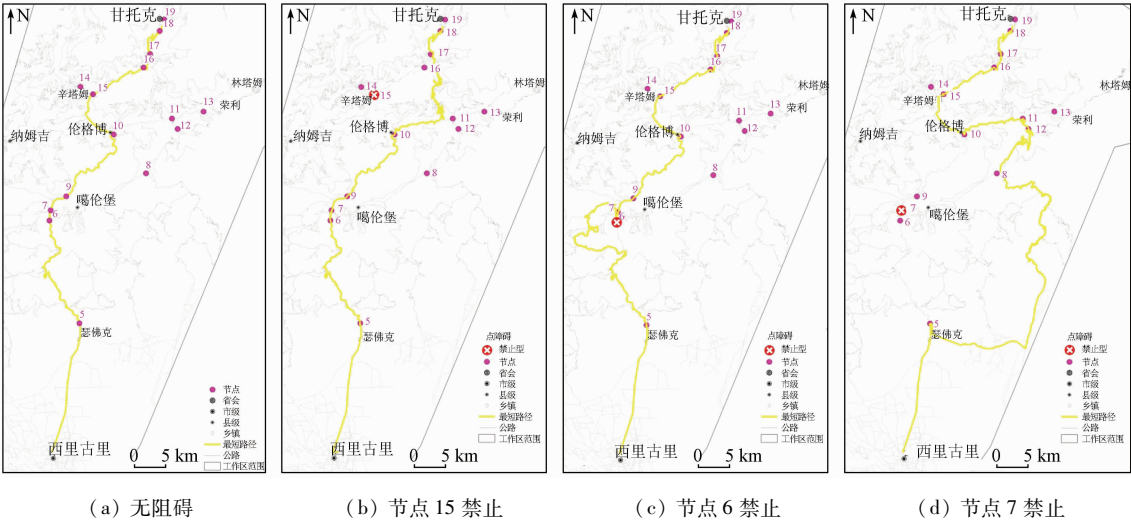


图 6 不同关键节点受阻后最短路径示意图

Fig.6 Sketch map of shortest path after different key notes blocked

4.3 关键节点周缘地质环境隐患分析

在对重点区道路通行能力、关键节点的识别、关键点受阻后最短路径特征进行了论述的基础上,再对关键点周缘(关键节点为圆心,半径 5 km)地质环境进行分析。地质环境孕育着各种灾害风险,灾害的

触发可能对关键节点造成破坏性打击,使得关键点成为禁止型阻碍点,从而对本地区整个路网系统造成重大影响,其影响结果如 4.2 节所论述。岩性与工程岩土体类型的对应关系,主要参考了相关文献^[26-27]及技术要求^[10]。

1) 关键节点 5。位于瑟佛克 (Sevoke) 周边 (图 7), 是区内主要南北向道路 NH31A 与东西向道路 NH31C 的重要节点, 点东侧连接平原进入山地区域内架设在提斯塔河上第一座公路桥。往北 3 300 m 坐落一座拦水堤坝, 属于混凝土堤坝, 未发现水电站, 坝体长度 514 m, 宽度 140 m, 蓄水容量极大。周边地层岩性以古生代 Pokhara 亚群 Seti 组 (PzSt) 灰色至绿灰色千枚岩、粗砂岩和石英岩, 含少量砾岩层和基性侵入岩、中新世—更新世西瓦里克群下亚群 (N-Q₁^X) 灰色砂岩, 夹紫色和紫红色页岩, 结节状褐红色黏土, 假砾岩等为主, 发育主边界逆冲断层 (MBT), 工程岩土体类型以较软岩 A、软岩 A 为主, 岩体破碎、节理发育, 平均坡度 18°, 点西侧山体坡度在 35° 以上, 高差 500 m 左右, 岩体抗打击能力差, 落石滚落或岩体崩塌均有可能造成关键节点 5 沿线路段阻断。

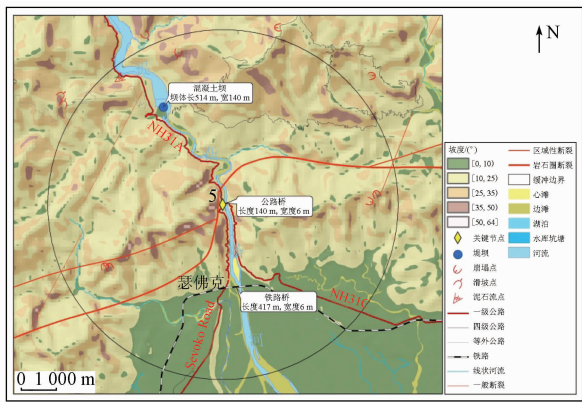


图7 关键节点5周缘地质环境

Fig. 7 Geological environment of key note No.5

2) 关键节点 6。位于噶伦堡(Kailmpong)以西 5 km(图 8), 连接 NH31A 与 Peshoke Road, 点北部 500 m 坐落一座架设在提斯塔河上的公路桥, 桥梁长度 197 m, 宽度 8 m, 属于水泥桥, 是提斯塔河上连接左右两岸的重要桥梁之一。周边地层岩性以新元

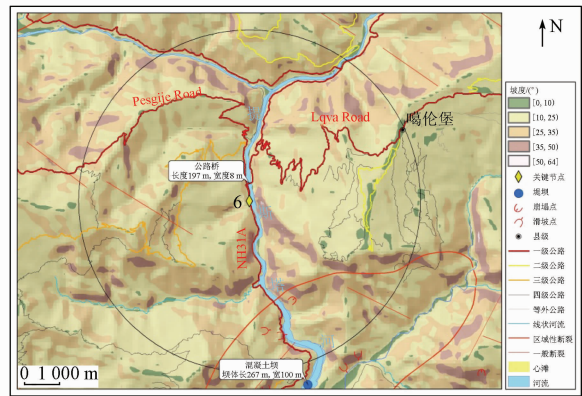


图 8 关键节点 6 周缘地质环境

Fig. 8 Geological environment of key note No. 6

古界—寒武纪 ($Pt_3 - \epsilon$) 板岩、片岩夹砂岩、石英岩或大理岩、石炭纪—二叠纪网瓦纳群 ($C - P^G$) 砂岩、石英砂岩、石墨煤、绿泥石千枚岩、煌斑岩岩床和某些地方的白云质灰岩薄层等为主,一般断裂发育,工程岩土体类型主要是较软岩 A 类,岩体较破碎、节理发育,坡度较陡,平均坡度 24° ,岩体抗打击能力较差。

3) 关键节点 7。位于关键节点 6 的北部,噶伦堡(Kailmpong)以西 4 km,连接 Peshoke Road 与 Lava Road, Lava Road 是一条通向区内重要城镇噶伦堡的一级公路(图 9)。点南侧 1 km 为连接提斯塔河两岸的重要公路桥,长度 197 m,宽度 8 m,北侧 3 500 m 为另一座公路桥梁,桥梁长度 156 m,宽度 8 m,属于水泥桥。周边地层岩性以新元古界—寒武纪($Pt_3 - \epsilon$)板岩、片岩夹砂岩、石英岩或大理岩等中低变质岩类为主,一般断裂较发育,工程岩土体类型主要是较软岩 A 类,岩体较破碎、节理发育,坡度较陡,平均坡度 24° ,最大高差 850 m,地形陡峭,岩体抗打击能力较差。

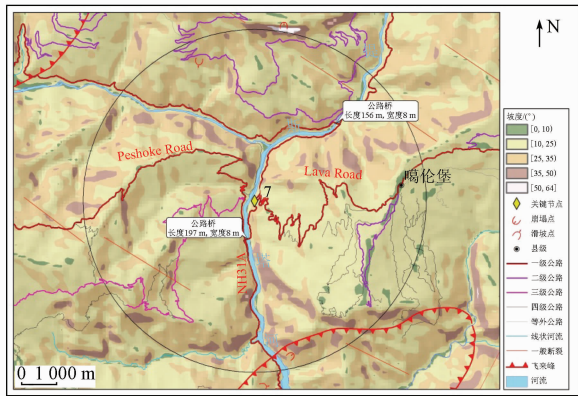


图9 关键节点7周缘地质环境

Fig. 9 Geological environment of key note No. 7

4) 关键节点 15。位于辛塔姆(Singtam)以东 100 m, 连接 NH31A 与 NH510, 点北西方向 2 300 m 坐落一座拦水堤坝(图 10), 属于混凝土坝, 位于提斯塔河上, 坝体长 100 m, 宽 42 m, 规模较小, 蓄水容量较小。点北侧连接一座公路桥, 该桥梁架设于提斯塔河左岸支流 Rongni Chhu 上, 是甘托克通往西里古里沿线的第一座公路桥, 是辛塔姆—伦格博路段的重要桥梁点。周边地层岩性以新元古界—寒武纪($Pt_3 - \epsilon$)板岩、片岩夹砂岩、石英岩或大理岩等中低变质岩类为主, 一般断裂较发育, 工程岩土体类型主要是较软岩 A 类, 岩体较破碎、节理发育, 坡度较陡, 平均坡度 26° , 地形起伏较大, 地形陡峭, 岩体抗打击能力较差。

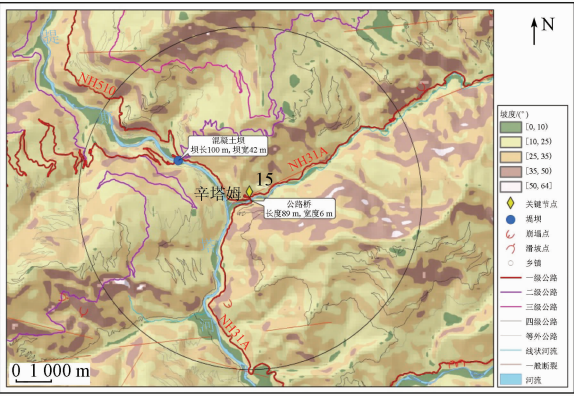


图 10 关键节点 15 周缘地质环境

Fig. 10 Geological environment of key note No. 15

5 结 论

1)西里古里走廊地区道路交通受地形地貌控制明显,道路主要集中分布在恒河-布拉马普特拉河平原,平原区道路以三级公路为主。西里古里走廊重点区道路以四级公路及等外公路为主,瑟佛克-西里古里-潘塞德瓦路段通行能力好,苍古湖-甘托克路段通行能力最差。重点区路网中的各关键节点以节点 5 最为重要,它的通行失效将导致重点区路网整体瘫痪。关键节点周缘地质环境对潜在灾害隐患存在着显著控制作用,具体表现在:关键节点周缘发育的岩性与其力学性质直接相关,即决定了节点环境的岩土体类型;构造特点控制了岩石的完整性,断裂发育区岩石破碎程度通常较严重。以上 2 个方面(岩性、构造)的地质环境背景特征,影响了岩体抗打击能力,再结合节点周缘地形地貌特征(坡度、高差等)及重要目标,分析得出了节点存在的潜在灾害与隐患。

2)遥感手段对于揭示无法到达的境外特定地区道路交通分布特征、通行能力及其与地质环境的耦合关系,发挥着不可或缺的作用。本研究为境外特定地区开展道路交通遥感调查,探索了一套方法,具有以下特点:① 采用道路特征(路面宽度、坡度等要素)与地质环境特征(基础地质、工程地质、地形地貌、地质灾害等要素)相结合的思路,赋予各要素权重进行打分,可获得特定地区路网通行能力定性-半定量的结果;② 通过最短路径分析,清晰地展现了各个关键节点失效后对路网的影响结果;③ 依据复杂网络理论,运算获取全网效率变化量、全网效率相对下降率等因子,定量获取各关键节点对于路网的重要性排名,从而有的放矢地分析关键节点周缘地质环境。

参考文献 (References) :

[1] Small K A, Verhoef E T. The economics of urban transportation [M]. London: Routledge, 2007.

[2] Vuchic V R. Urban public transportation systems [D]. Philadelphia: University of Pennsylvania, 2002.

[3] Button K. Transport economics [M]. London: Edward Elgar Publishing, 2010.

[4] 王润生, 童立强, 林 键, 等. 遥感地质勘查技术与应用研究 [J]. 地质学报, 2011, 85(11): 1699-1743.

Wang R S, Tong L Q, Lin J, et al. Remote sensing technology and its application in geological exploration [J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(11): 1699-1743.

[5] 付长亮, 杨清华, 姜琦刚, 等. 遥感技术在境外地质调查中的应用——以津巴布韦大岩墙为例 [J]. 国土资源遥感, 2015, 27(4): 85-92. doi:10.6046/gtzyyg. 2015. 04. 14.

Fu C L, Yang Q H, Jiang Q G, et al. Application of remote sensing technique to geological survey abroad: A case study of Great Dyke, Zimbabwe [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2015, 27(4): 85-92. doi:10.6046/gtzyyg. 2015. 04. 14.

[6] 于德浩, 龙 凡, 杨清雷, 等. 现代军事遥感地质学发展及其展望 [J]. 中国地质调查, 2017, 4(3): 74-82.

Yu D H, Long F, Yang Q L, et al. Development and prospects of modern military remote sensing geology [J]. Geological Survey of China, 2017, 4(3): 74-82.

[7] 张 栋, 吕新彪, 葛良胜, 等. 军事地质环境的研究内涵与关键技术 [J]. 地质论评, 2019, 65(1): 181-198.

Zhang D, Lyu X B, Ge L S, et al. Research connotation and key technology of the military geological environment in the land battlefield [J]. Geological Review, 2019, 65(1): 181-198.

[8] 徐泽鸿, 杨雪清, 李 超, 等. 基于德国国家监测数据的境外遥感抽样调查方法研究 [J]. 林业资源管理, 2014(1): 41-51.

Xu Z H, Yang X Q, Li C, et al. Research on overseas RS sampling inventory approach based on German NFI data [J]. Forest Resources Management, 2014(1): 41-51.

[9] 杨清华, 陈 华, 孟月玥, 等. 全国边海防地区基础地质遥感调查 [R]. 北京: 中国自然资源航空物探遥感中心, 2018.

Yang Q H, Chen H, Meng Y Y, et al. Geological remote sensing of national border and costal defense areas [R]. Beijing: China Aero Geophysical Survey & Remote Sensing Center for Natural Resources, 2018.

[10] 杨清华, 于德浩, 龙 凡, 等. 全国边海防地区遥感地质调查技术要求 [S]. 北京: 地质出版社, 2018.

Yang Q H, Yu D H, Long F, et al. Skills requirement of geological remote sensing of national border and costal defense areas [S]. Beijing: Geological Publishing House, 2018.

[11] 郭瑞军. 基于间隙接受理论的环形交叉口通行能力研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2013.

Guo R J. Study on capacity of roundabouts based on gap acceptance theory [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013.

[12] 陈金邕. 考虑可变通行能力及停车位约束的早高峰通勤问题研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.

Chen J Y. Study on morning commute problem considering variable capacity and parking space constraint [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019.

[13] 吴鼎新. 间歇优先公交专用道的通行能力及其影响研究[D]. 南京:东南大学,2019.
Wu D X. Study on capacity of bus lane with intermittent priority and its impacts[D]. Nanjing:Southeast University,2019.

[14] 劬长桥,张兴宇,罗 凯,等. 高速公路施工区通行能力研究综述[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2021,45(2):207-212.
Shao C Q,Zhang X Y,Luo K,et al. A review of estimating capacity in expressway work zones[J]. Journal of Wuhan University of Technology,2021,45(2):207-212.

[15] Latora V,Marchiori M. Is the Boston subway a small - world network? [J]. Physica A:Statistical Mechanics and Its Applications, 2002,314(1-4):109-113.

[16] Sen P,Dasgupta S,Chatterjee A,et al. Small - world properties of the Indian railway network[J]. Physical Review E,2003,67(3):036106.

[17] Angeloudis P,Fisk D. Large subway systems as complex networks [J]. Physica A:Statistical Mechanics and Its Applications,2006,367:553-558.

[18] 金 雷. 基于复杂网络的地域公路交通网抗毁性分析[D]. 长沙:国防科技大学,2008.
Jin L. Survivability analysis of road traffic network in the area based on the complex network[D]. Changsha:National University of Defense Technology,2008.

[19] 叶 青. 基于复杂网络理论的轨道交通网络脆弱性分析[J]. 中国安全科学学报,2012,22(2):122-126.
Ye Q. Vulnerability analysis of rail transit based on complex network theory[J]. China Safety Science Journal,2012,22(2):122-126.

[20] 潘桂堂,丁 俊,姚东生. 1:150 万青藏高原及邻区地质图[Z]. 成都:成都地图出版社,2004.
Pan G T,Ding J,Yao D S. Geological map of the Qinghai - Tibet Plateau and adjacent areas (1:1,500,000)[Z]. Chengdu:Chengdu Map Publishing House,2004.

[21] Geological Purnia Quadrangle Map (1:250,000)[Z]. Geological Survey of India,1995.

[22] Geological Dumka Quadrangle Map (1:250,000)[Z]. Geological Survey of India,1998.

[23] Geological map of Eastern Nepal (1:250,000)[Z]. ADM Carto Consult Pvt. Ltd,2006.

[24] Geological map of Bangladesh (1:1,000,000)[Z]. Geological Survey of Bangladesh,1990.

[25] Geo - India Nepal Bhutan Plot (1:1,000,000)[Z]. U. S. Department of the Interior and USGS,1990.

[26] 孙广忠,孙 毅. 地质工程学原理[M]. 北京:地质出版社,2004.
Sun G Z,Sun Y. Principles of engineering geology[M]. Beijing: Geological Publishing House,2004.

[27] 赵法锁,李相然. 工程地质学[M]. 北京:地质出版社,2009.
Zhao F S,Li X R. Engineering geology[M]. Beijing: Geological Publishing House,2009.

Transportation in the Siliguri Corridor, West Bengal, India: distribution characteristics, trafficability, and geological environment

SUN Ang¹, YANG Qinghua¹, LIU Zhi², CHEN Hua¹, JIANG Xiao¹, JIANG Shoumin², BIAN Yu¹, TIAN Li²
(1. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Natural Resources, Beijing 100083, China; 2. Sichuan Geological Survey Institute, Chengdu 610036, China)

Abstract: Remote sensing interpretation of the Siliguri Corridor, West Bengal, India was carried out based on 33 scenes of multispectral remote sensing images from GF-1 and GF-2 satellites, which cover an area of 154 814 km². As a result, the mileage, density, and distribution of highways at all levels in the Siliguri Corridor were obtained, and the overall characteristics of the transportation in the area were ascertained. Then this paper assessed the trafficability in the selected key areas using the weighted scoring method from the aspects such as landform, lithology, geologic disasters, and road conditions. Furthermore, the factors such as the variation and relative decrease rate of whole network's efficiency (ΔE and e) of 19 pivotal nodes were calculated using the complex network theory. They can be used to characterize the importance of pivotal nodes relative to the overall trafficability of the road network. For the four most important pivotal nodes, the geological environment characteristics (i. e., important targets, slope, and engineering rock and soil masses in the peripheries of the nodes) were analyzed and potential disasters and risks were proposed.

Keywords: Siliguri Corridor; transportation; distribution characteristics; trafficability; geological environment
(责任编辑: 张 仙)