

考虑季节性的青藏高原地区公路可达性评价

刘庆芳¹, 卢文清¹, 戴特奇^{1*}, 宋金平¹, 刘宇藩¹, 李洁²

(1. 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875; 2. 中国国际工程咨询有限公司, 北京 100048)

摘要:可达性是交通地理学的重要概念之一, 准确评价可达性对于交通规划和建设具有重要意义, 但目前考虑季节性变化和山区地形影响的可达性评价仍相对较少。青藏高原地区不仅雨季、雪季分明, 且具备高海拔和地形复杂等特征, 因此, 需要在可达性评价中充分考虑季节影响和地形影响。结合多源数据, 论文采用成本—距离法评价青藏高原地区公路可达性。结果表明: ① 雨季青藏高原地区到基础服务设施的最短时间较于未考虑降水影响的情况变化不大, 在雨季全域总可达性平均值增加0.011 h, 多出0.021%的地区受降水影响无法在8 h范围内到达最近服务设施。② 受积雪影响, 青藏高原全域可达性存在变差的情况, 全域雪季最短可达性时间平均增加2.04 h, 多出5.41%的地区受降雪影响无法在2 h内到达最近服务设施, 多出5.54%的地区无法在[2, 4) h范围内到达最近服务设施。③ 从雨雪季节受降水和积雪影响的可达性季节波动情况来看, 雪季可达性波动幅度更大。其中, 可达性受降水影响最大的地区主要聚集在珠穆朗玛峰附近以及雅鲁藏布江大峡谷附近地区; 可达性受积雪影响最严重的地区主要聚集在西藏自治区的东部、青海省的南部、四川省的西部, 多分布在横断山区、唐古拉山脉、巴颜喀拉山脉等地形区内。研究结果可为青藏高原地区提高交通路网的稳定性与优化交通路网布局提供科学参考。

关键词:公路可达性; 雨雪季节; 成本—距离模型; 青藏高原地区

维护道路交通系统的畅通运行是统筹推进基础设施高质量建设的重要内容, 也是建设交通强国的重要目标。但交通系统在运行过程中可能会受到如地震、洪水、雨雪等自然灾害以及人为造成的交通事故的干扰, 这在一定程度上会降低道路设施的通行能力, 使得出行者在出行过程中具有一定程度的不确定性, 进而可能造成出行者无法实现其出行目的^[1-2]。因此, 维护道路交通系统的畅通运行是“十四五”时期统筹推进基础设施建设、加快建设交通强国的重要举措。尤其在青藏高原地区, 道路交通系统畅通运行存在诸多难点, 需要在交通评价中给予格外的关注。一方面, 受经济社会发展滞后以及复杂自然环境的双重约束, 青藏高原地区的交通基础设施技术等级普遍不高, 容易受雨季、雪季等

季节性因素影响^[3]; 另一方面, 青藏高原地区一年中不是雨季即为雪季, 季节性影响持续时间长, 雪季、雨季不仅容易造成路面湿滑、道路边界掩盖难辨等问题, 且容易带来道路灾害和交通事故, 导致通行能力下降, 甚至局部地区存在大雪封路长达数月的情况^[4]。因此, 对青藏高原地区道路网络的评价, 需要充分考虑雨雪季节变化的影响。本文在青藏高原地区的交通可达性评价中充分考虑雨雪季节的影响, 希冀更准确地反映这一特殊地区的实际通行能力, 这对完善交通优势度评价方法和提高青藏公路可达性评价的准确性具有重要的理论意义。

可达性也称通达性, Hansen^[5]认为可达性实质是“交通网络中节点之间相互作用之后的机会大小”, 即通过一种特定的交通系统从某一起点位置

收稿日期: 2022-08-27; 修订日期: 2022-11-17。

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0406)。[Foundation: The Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research Program, No. 2019QZKK0406.]

第一作者简介: 刘庆芳(1994—), 女, 安徽天长人, 博士生, 主要从事城市与区域可持续发展研究。

E-mail: 202131051024@mail.bnu.edu.cn

*通信作者简介: 戴特奇(1980—), 男, 重庆人, 博士, 副教授, 主要研究方向为交通地理、城市与区域发展。

E-mail: daiteqi@bnu.edu.cn

引用格式: 刘庆芳, 卢文清, 戴特奇, 等. 考虑季节性的青藏高原地区公路可达性评价[J]. 地理科学进展, 2023, 42(4): 687-700. [Liu Qingfang, Lu Wenqing, Dai Teqi, et al. Evaluation of road accessibility in the Qinghai-Tibet Plateau region considering seasonality. Progress in Geography, 2023, 42(4): 687-700.] DOI: 10.18306/dlkxjz.2023.04.006

到达目的地的便利程度。随着地理信息技术的快速发展,部分学者从空间视角阐释可达性,认为空间可达性是指由出发地到达目的地的便捷性,即区域间互动机会的潜力^[6-7]。提高空间可达性是优化空间环境和维护空间正义的重要举措,根据考虑的主体不同可将可达性评价分为4大类,即基于设施的可达性^[8-9]、基于区位的可达性^[10-11]、基于个人的可达性^[12-13]和基于效用的可达性^[14-15]。虽然可达性的定义和测度方式并不一致,但均考虑出行成本以及需求特征,并将机会分布和空间阻抗结合在一起。然而,空间可达性受自然条件的限制较大,尤其是恶劣天气对道路速度的影响已成为学者关注的热点话题;相关研究主要集中于雨天、雪天和雾天,均指出恶劣天气对交通流特征存在影响^[16-20]。此外,已经有学者开始关注恶劣天气对山区公路的交通流特征(流量与速度)的影响,但研究结果多讨论不同恶劣天气对交通流量和车辆运行速度的降低比例^[21-22]。青藏高原地区作为世界独特的“人口—地理—生态—交通”单元,其交通网络的优化是协调地区人地关系的重要组成部分,目前有关青藏高原地区交通研究主要聚焦区域产业发展的交通运输门槛^[23]、交通路线与分区^[24]、交通通达性时间演化^[25]以及交通优势度空间分布特征^[3]等。

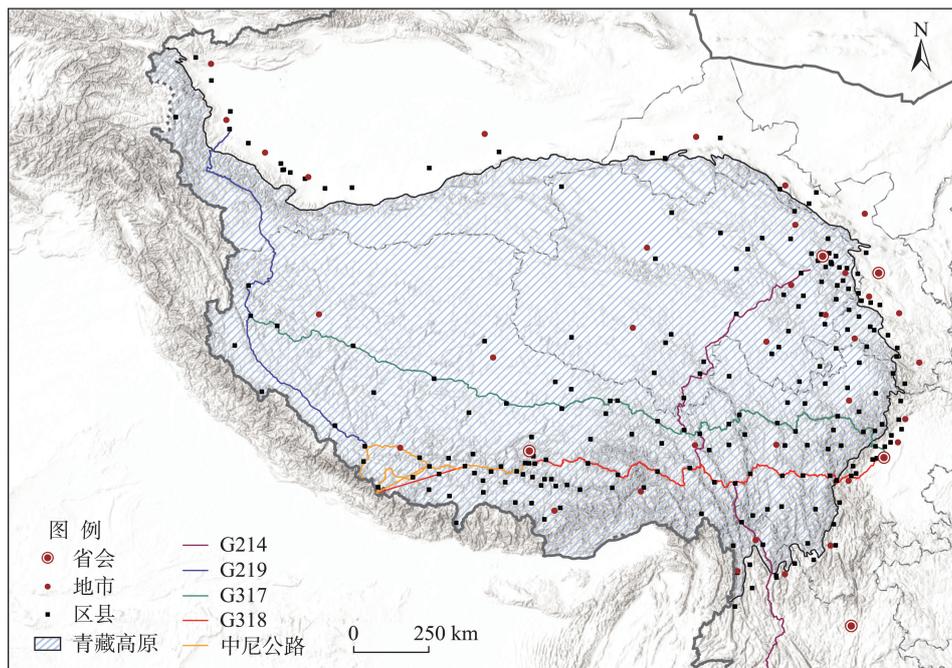
纵观已有研究,不难发现,部分研究已开始关

注恶劣天气对道路速度的影响,针对不同的标准划定恶劣天气,为恶劣天气影响下交通事故发生时可以更高效地进行应对与处理提供了一定的理论基础。但在此基础上,现有研究仍存在如下不足:一方面,虽逐步关注恶劣天气对交通流特征存在着重要影响,但在交通可达性评价体系中鲜少考虑雨雪天气的影响;另一方面,青藏高原地区被称为地球上最独特的综合单元,为典型的高海拔、高寒、生态脆弱的特殊类型地区;然而,目前针对青藏高原全域交通可达性精细化评价的研究仍相对较少,尤其在可达性评价中较少考虑季节性。鉴于此,本文基于多源数据,综合考虑降水与积雪天气以及坡度和海拔等地形特征的影响,根据恶劣天气的等级对道路速度和行人速度进行分等级折减,计算受雨雪影响可达性的波动比例,进而评价青藏高原地区的公路可达性,以期为青藏高原地区提高交通路网的稳定性与优化交通路网布局提供科学参考。

1 研究设计

1.1 研究区概况

青藏高原(25°59'37"~39°49'33"N、73°29'56"~104°40'20"E)被称为“世界屋脊”“亚洲水塔”“地球第三极”,坐落于中国西部地区(图1),主要包括青海



注:本图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为GS(2019)1822号的标准地图制作,底图无修改。下同。

图1 青藏高原的地理区位与范围

Fig.1 Location of the Qinghai-Tibet Plateau

省和西藏自治区全域以及云南省、四川省、甘肃省、新疆维吾尔自治区的部分边缘地区;南起喜马拉雅山脉,北至昆仑山、阿尔金山和祁连山,西起帕米尔高原和喀喇昆仑山脉,东及秦岭山脉西段和黄土高原接壤处,面积为258万 km²。受经济社会发展和自然生态环境的双重约束,青藏高原地区的公路网络相对落后,国道中存在断头路和低等级公路,等外公路占比高;干线公路规模不足、覆盖不广、深度不够,高等级公路匮乏且运输能力较差。主要对外交通干线为川藏公路G318、中尼公路、G219新藏公路、G317川藏北线以及G214滇藏公路。其中,川藏北线、新藏公路等进出藏公路等级低,部分路段地质灾害严重,5条国道中仍有大约12%的路段尚未铺设沥青或水泥。此外,部分既有公路进出藏通道自然灾害频发,G317和G318川藏交界路段地处横断山脉,塌方、泥石流、冬季路面结冰状况时有发生。

1.2 数据来源与预处理

道路数据主要包括Open-Street-Map官方网站上公布的2020年的路网数据和第二次青藏高原综合科学考察调研所获取的道路数据。POI数据为2020年7月青藏高原地区医疗服务、商业服务、交通服务、城市功能4大类设施,每条POI数据主要包含设施的分类、名称、坐标以及具体地址等信息。数字高程数据(DEM)来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>),中国高程空间分布数据来源于美国奋进号航天飞机的雷达地形测绘数据(SRTM),该数据集为基于最新的SRTM V4.1数据经整理拼接生成的分辨率为90 m的分省数据,数据采用WGS84椭球投影。降雨数据来源于国家青藏高原科学数据中心,空间分辨率为1 km,时间为2012年1月至2017年12月,降水单位为0.1 mm。积雪数据是从国家青藏高原科学数据中心获取的中国雪深长时间序列数据集,该数据集提供从1979年1月1日至2020年12月31日逐日的中国范围的积雪厚度分布数据,空间分辨率为25 km,单位为cm^[26]。青藏高原地区的雨季一般集中于5—9月,雪季则集中于10月至次年的5月,其中10月至次年1月为积雪增加的季节,2—5月为减少的季节。因此,本文选择降雨数据为基准年份的5—9月,而降雪的数据时段主要为基准年份的10月至次年的5月。

1.3 研究方法

本文在时间成本计算中考虑海拔与坡度对道

路速度和行人速度的影响,分别计算雨季和雪季的公路可达性,并与未考虑雨雪天气的结果进行对比,揭示雨雪天气对公路可达性的影响^[27]。本文采用的可达性为地点*i*的最短时间可达距离,定义为*T_i*,其公式为:

$$T_i = \sum_{j=1, j \neq i}^n \frac{t_{ij}}{n}, \quad i \in (1, 2, \dots, n), \quad j \in (1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中:*t_{ij}*为两节点(栅格)之间的最短可达时间;*j*为区域内除*i*以外的另一节点;*n*是区域内存在的节点数量。最短可达时间越短,可达性越高。

本文采用时间—距离模型计算栅格之间最短时间距离,进而计算节点的可达性^[28]。该方法是根据基础交通设施条件、步行速度、土地覆盖和坡度等设定通过每个网格单元的时间,利用累积最小成本路径分析确定起点和终点之间的最快路线^[29]。将公路矢量数据转换为1 km×1 km的栅格数据,以此计算时间成本栅格。栅格内有多条公路经过,则栅格速度取各公路速度的最大值(得到图层*V_{a1}*),无道路则设定为5 km/h(得到图层*V_{b1}*)^[29]。在各个栅格速度数值基础上,可计算得到通过该栅格的时间成本,得到时间成本栅格图层。本文基于时间成本栅格图层结果计算青藏高原地区不同道路数据源的公路可达性。

1.4 指标选择及权重赋值

对于偏远的西部山区而言,方便快捷地获取医疗服务、商业设施服务、城市功能服务意义重大^[30-31],据此本文基于1 km×1 km的栅格评价到医疗设施、商业设施、行政设施、交通设施4类POI的可达性。表1展现了第一级设施类型和第二级设施类型。结合第二次青藏高原综合科学考察的实地调研,发现使用微信、支付宝等App进行支付已较为普及,故

表1 青藏高原地区交通可达性评价指标

Tab.1 Evaluation indicators of transportation accessibility in the Qinghai-Tibet Plateau region

设施类型	包含的POI类型	POI数量/个
医疗服务设施	诊所	2915
	综合医院	1538
商业服务设施	购物服务:商场、超级市场、便民商店/便利店	17211
	金融保险服务:银行	2202
城市功能服务	县级政府驻地	161
	地级市政府驻地	19
交通设施服务	火车站站点	64
	机场	19

金融保险服务类别中不包含自动取款机以及居民非基本金融需求的证券公司和保险公司的POI。城市功能服务主要考虑到县级政府驻地和地级市政府驻地的可达性。交通设施服务中主要考虑铁路出行和飞机出行方式,其理由如下:青藏高原地区的机动化水平较高,部分城市千人汽车拥有量高于国内一线城市^[32];其次,根据科考调研,民航和铁路是青藏高原地区主要的对外交通方式,近60%的居民希望乘坐飞机出行,另有约30%的居民选择铁路。

本文依托第二次青藏高原综合科学考察的调查问卷,基于出行频次调查结果对不同子设施进行权重赋值^[33]。截至2021年9月1日,共收回有效问卷547份,问卷内容包括基本信息、交通出行、公共服务、能源、居住生活支撑服务等方面。其中交通出行模块中设置的相关问题包括每月出行次数、出行目的及出行方式等。根据问卷调查结果,本文研究的医疗服务、商业服务、城市功能及交通服务4类设施的权重分别为0.3822、0.1059、0.0691、0.4428。

1.5 参数及道路速度设定

1.5.1 坡度和海拔对道路速度的折损参数

参考《中华人民共和国公路工程技术标准(JTGB01—2014)》中关于等级公路下坡度限制最大速度的设定,基于青藏高原地区DEM数据生成坡度,采用赋值方法依据坡度数据对 V_{b1} 进行速度的重新设定,进而得到经过坡度校正后的公路速度 V_{b2} ,关于坡度对道路速度的影响系数赋值参考文献[3]。

根据坡度数据,参考相关研究^[29],计算人行走每1 km速度的栅格数据,即每一栅格存放着人走这1 km所用的速度,记为 V_{b1} 。其中, V_{b1} 是步行速度,单位为km/h; S 是坡度。

$$V_{b1} = 6 \times \text{Exp}(-3.5 \times |S + 0.05|) \quad (2)$$

参考既有文献^[27],本文对不同海拔范围设定不同的步行速度折扣系数,与 V_{b1} 相乘得到经过海拔校正后的各坡度行走速度 V_{b2} 。具体地,按0~3000、3001~4000、4001~5000、5001~6000、6000 m以上5个海拔区间分别施加100%、80%、60%、40%和20%的修正系数。之后将 V_{b2} 和 V_{b2} 叠加,每个栅格内的速度为 $\max(V_{a2}, V_{b2})$,从而得出具有速度值的栅格图层,进而得到最终的时间成本栅格。

1.5.2 雨雪季划分及参数设置

雨雪天气通过改变道路行车速度影响交通通达性,降低道路的平均自由流速度。青藏高原地区

分为明显的旱季与雨季,其内部降水量的时空差异较为明显;海拔平均在4000 m以上,是北半球中低纬度之间最高、积雪覆盖最大的地区^[34]。本文参考高兴川等^[25]的研究成果,对高速公路、国道、省道、县道和其他道路分别赋值速度为100、80、60、30、20 km/h,然后依据时间成本栅格考虑雨季和雪季的时间折扣。根据既有研究,雨季按降雨强度是否达到小雨、中雨、大雨强度分别设置折扣系数为2.32%、4.01%和8.57%^[22];雪季按积雪深度是否达到小雪(3 cm)和中雪(5 cm),设置折扣系数10%和20%^[35]。在上述参数设置基础上再考虑坡度和海拔影响,从而得到正常情况、雨季和雪季3种情景下的时间成本^[36-37],进而计算到4类设施的可达性。通过不同季节可达性与正常可达性的比较来反映对应的季节性波动程度:

$$L = \frac{T_1 - T_0}{T_0} \quad (3)$$

式中: L 为季节波动指标, T_1 为雨季或雪季情景下的最大通行时间成本, T_0 为不考虑雨雪季的通行时间成本。

2 结果与分析

2.1 雨季公路可达性的分布差异

2.1.1 雨季公路可达性结果

整体上,青藏高原地区到医疗、商业和城市功能等设施的最短时间与未考虑降水影响的情况变化不大,但部分地区如喜马拉雅山脉南源和雅鲁藏布江大峡谷附近存在可达性受降水影响变差的情况(图2)。

具体来看,到医疗服务设施的最短时间的极大值为137.984 h,最小值为0,平均值为15.677 h,标准差为23.708 h;相较于未考虑降水影响,到医疗服务设施的最短时间的最大值增加了0.359 h,平均值增加0.021 h。到商业服务设施的最短时间的极大值为105.420 h,最小值为0,平均值为13.010 h,标准差为19.770;相较于未考虑降水影响,到商业服务设施的最短时间的最大值未变,平均值增加0.016 h。到城市功能服务设施的最短时间的极大值为146.378 h,最小值为0,平均值为22.104 h,标准差为27.379 h,相较于未考虑降水,到城市功能服务设施的最短时间的最大值未变,平均值增加0.022 h。到交通服务设施的最短时间最大值为

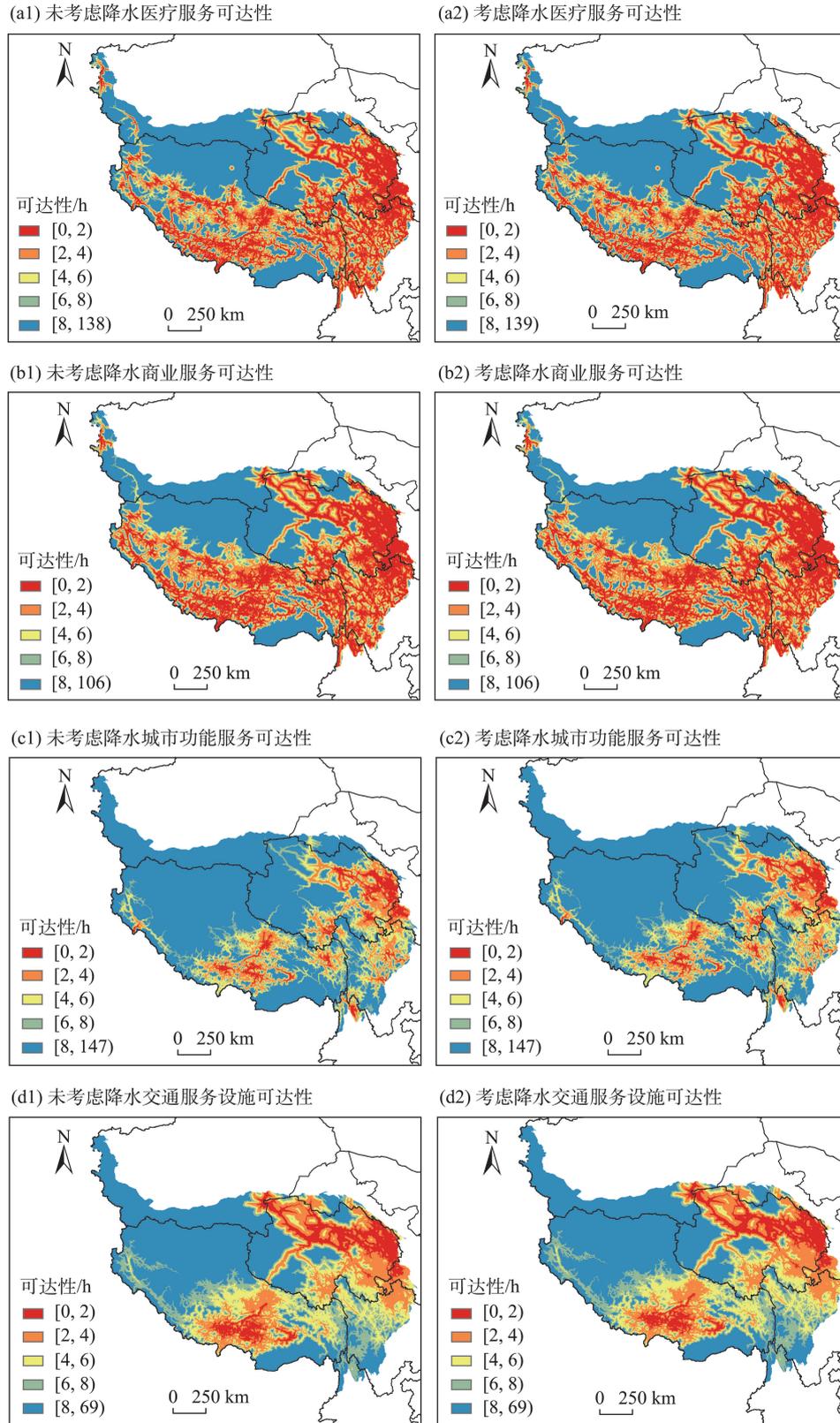


图2 未考虑降水情况下的分设施可达性(a1、b1、c1、d1)与考虑降水影响的分设施可达性(a2、b2、c2、d2)
Fig.2 Accessibility of different facilities without considering the impact of precipitation (a1, b1, c1, and d1) and considering the impact of precipitation (a2, b2, c2, and d2)

68.407 h,最小值为0.0103 h,平均值为12.061 h,标准差为12.802 h;相较于未考虑降水,到交通服务设施的最短时间的最大值未变,平均值增加0.011 h。

通过计算到达各服务设施的最短时间,以[0, 2)、[2, 4)、[4, 6)、[6, 8) h等范围计算不同可达性时段地区的面积占青藏高原全域总面积的比重,将未考虑降水影响的结果和考虑降水影响的结果进行横向对比(表2)。结果显示:青藏高原全域的可达性受降水影响而降低的比例较小,整体可达性降低地区的占比不超过1%;其中,受降水影响,青藏高原地区到城市功能服务设施有近0.026%的地区、到交通服务设施有近0.021%的地区、到商业服务设施有近0.015%的地区、到医疗服务设施有近0.014%的地区无法在8 h内到达。

具体来看,到城市功能服务设施的最短时间在[0, 2)、[2, 4)、[4, 6)、[6, 8) h的范围受降水影响均有所减少,其中减少比例最多的范围是[4, 6)、[6, 8) h,均为0.011%。到交通服务设施的可达性在[4, 6)、[6, 8) h的范围受降水影响有所减少,其中减少比例最多的范围是[6, 8) h,为0.017%。到商业服务设施的可达性在[0, 2)、[4, 6)、[6, 8) h范围内有所减少,

其中减少比例最多为[0, 2) h,为0.013%。到医疗服务设施的最短可达时间在[0, 2)、[2, 4) h范围内的面积占比减少最多,其中[0, 2) h减少0.013%, [2, 4) h减少0.002%。

2.1.2 雨季公路可达性变化

从总可达性计算结果来看(图3),未考虑降水影响的总可达性的极小值为0.012 h,极大值为74.184 h,平均值为10.367 h。考虑降水影响的雨季的总可达性最小值为0.011 h,最大值为74.079 h,平均值为10.356 h。因此,受降水影响,青藏高原全域的雨季总可达性的平均值增加了0.011 h。从空间分布来看,雨季可达性结果与未考虑降水情况的可达性结果分布基本一致;其中,雨季总可达性的最大值相较于未考虑降水情况增加了0.105 h。从研究结果来看(表3),不考虑雨季影响时,青藏高原地区约有33.589%的国土面积在8 h范围内无法达到最近服务设施,考虑雨季影响则这一比例增加至33.609%,即有0.021%的国土面积从8 h可达变为了不可达,总体结果变化不大。

计算雨季可达性相较于未考虑降水影响的可达性季节波动情况(图4),结果显示:受降水影响,青

表2 雨季分设施的不同可达性范围的面积占比

Tab.2 Areal proportion of accessibility areas of different facilities during the rainy season

设施类别	可达性范围/h	占青藏高原全域总面积的比重/%		
		未考虑降水影响	考虑降水影响	降水影响的变化
医疗服务设施	[0, 2)	21.827	21.814	-0.013
	[2, 4)	17.678	17.676	-0.002
	[4, 6)	11.821	11.822	0.001
	[6, 8)	7.763	7.762	-0.001
	≥8	40.911	40.926	0.014
商业服务设施	[0, 2)	25.887	25.875	-0.013
	[2, 4)	19.969	19.970	0.001
	[4, 6)	11.581	11.578	-0.002
	[6, 8)	6.995	6.994	-0.001
	≥8	35.568	35.584	0.015
城市功能服务设施	[0, 2)	3.912	3.911	-0.001
	[2, 4)	9.978	9.976	-0.003
	[4, 6)	12.116	12.105	-0.011
	[6, 8)	11.124	11.113	-0.011
	≥8	62.870	62.896	0.026
交通服务设施	[0, 2)	7.700	7.700	0
	[2, 4)	15.989	15.989	0
	[4, 6)	16.018	16.014	-0.003
	[6, 8)	14.851	14.833	-0.017
	≥8	45.443	45.464	0.021

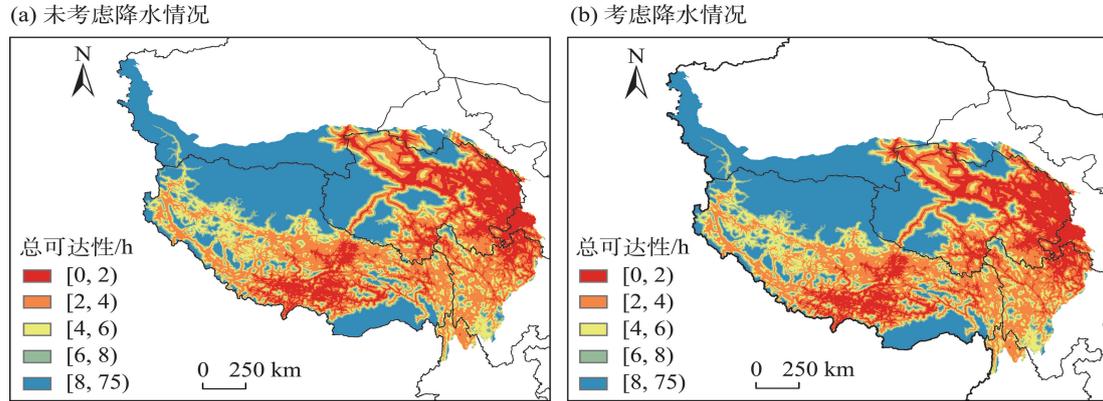


图3 未考虑降水情况下的总可达性(a)和考虑降水影响的雨季总可达性(b)

Fig.3 Total accessibility without considering the impact of precipitation (a) and total accessibility in the rainy season considering the impact of precipitation (b)

表3 雨季不同可达性范围的总可达性结果对比
Tab.3 Comparison of total accessibility of different accessibility areas in the rainy season

可达性/h	占青藏全域总面积的比重/%		
	未考虑降水影响	考虑降水影响	降水影响的变化
[0, 2)	16.237	16.235	-0.002
[2, 4)	26.394	26.369	-0.025
[4, 6)	15.784	15.789	0.005
[6, 8)	7.997	7.998	0.001
≥8	33.589	33.609	0.021

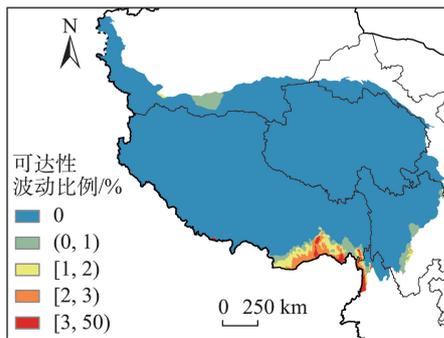


图4 雨季可达性波动比例

Fig.4 Fluctuation ratio of accessibility in the rainy season

青藏高原地区的可达性波动幅度较小,最小值为0,最大值为45%,平均值为0.07%。从分布来看,可达性受降水影响最大的地区主要聚集在珠穆朗玛峰附近及雅鲁藏布江大峡谷附近地区。从影响范围来看,可达性受降水影响的波动比例在1%以下的地区占比为97.100%;[1%, 3%)范围内地区面积占比为2.500%;[3%, 7%)范围内地区面积占比为0.386%;波动比例超过7%的地区面积占比仅为0.014%。

2.2 雪季公路可达性的分布差异

2.2.1 雪季公路可达性

受积雪影响,青藏高原全域到医疗、商业和城市功能等设施的平均最短时间较未考虑积雪影响的情况均有所增加,即受积雪影响可达性存在变差的情况(图5)。

具体来看,到医疗服务设施的平均最短时间的极大值为161.28 h,极小值为0,平均值为18.57 h,标准差为27.36 h;相较于未考虑积雪影响,到医疗服务设施的平均最短时间的最大值增加了23.65 h,平均值增加2.91 h。到商业服务设施的平均最短时间的最大值为120.91 h,最小值为0,平均值为15.42 h,标准差为22.81 h;相较于未考虑积雪影响,到商业服务设施的平均最短时间的最大值增加了15.48 h,平均值增加2.43 h。到城市功能服务设施的平均最短时间的最大值为169.02 h,最小值为0,平均值为26.54 h,标准差为31.68 h;相较于未考虑积雪影响,到城市功能服务设施的平均最短时间的最大值增加了22.64 h,平均值增加4.46 h。到交通服务设施的平均最短时间最大值为78.43 h,最小值为0.0131 h,平均值为14.61 h,标准差为14.83 h;相较于未考虑积雪影响,到城市功能服务设施的平均最短时间的最大值增加了10.02 h,最小值增加0.00271 h,平均值增加2.56 h。

计算到各服务设施的平均最短时间,以[0, 2)、[2, 4)、[4, 6)、[6, 8) h等范围计算不同可达性时段地区的面积占青藏全域总面积的比重,将未考虑积雪影响的结果和考虑积雪影响的结果进行对比(表4)。结果显示:受积雪影响,到医疗服务设施的可

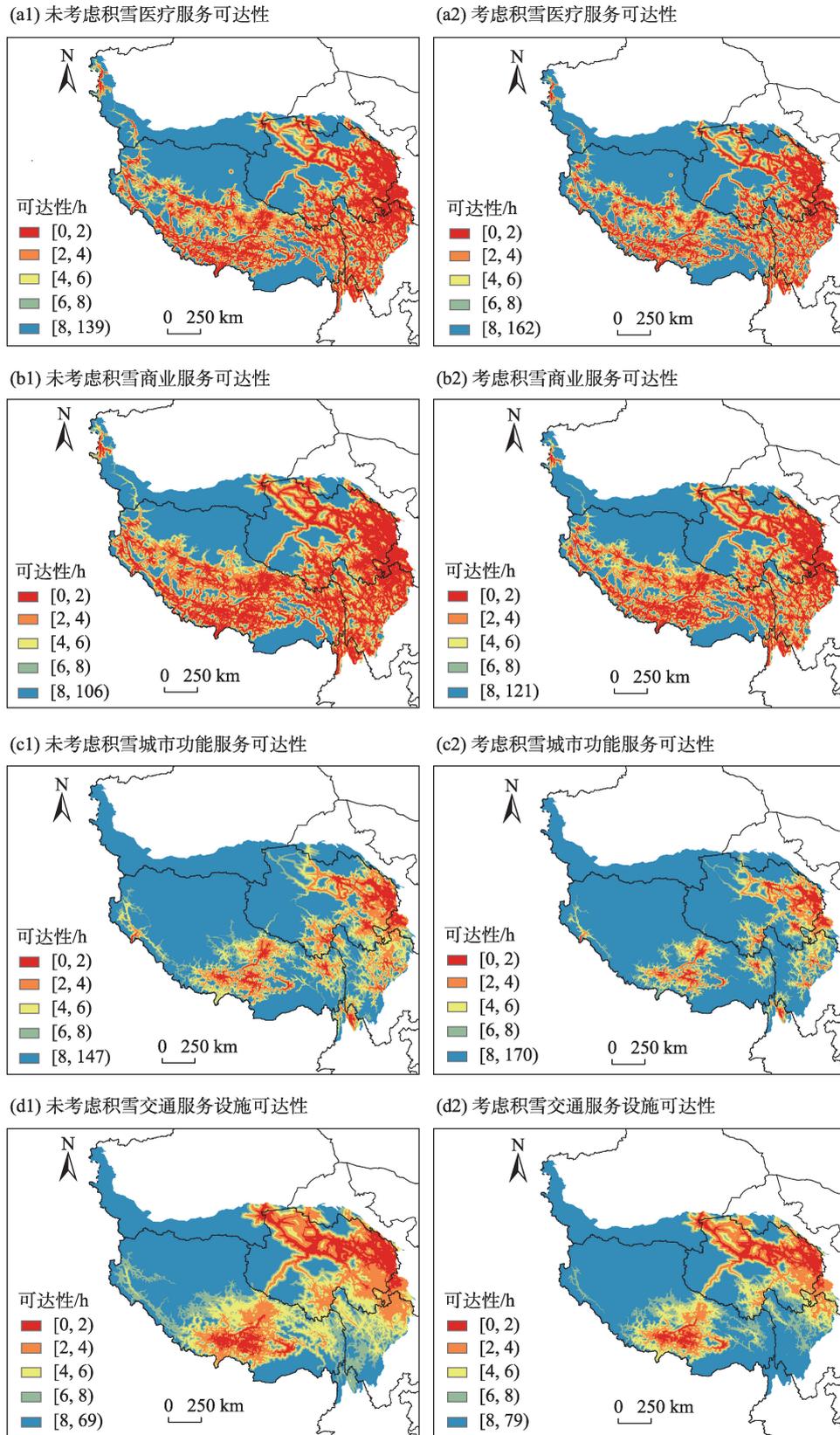


图5 未考虑积雪情况下的分设施可达性(a1、b1、c1、d1)与考虑积雪影响的分设施可达性(a2、b2、c2、d2)
Fig.5 Accessibility of different facilities without considering the impact of snow cover (a1, b1, c1, and d1) and considering the impact of snow cover (a2, b2, c2, and d2)

表4 雪季分设施的不同可达性范围的面积占比
Tab.4 Areal proportion of accessibility areas of different facilities in the snow season

设施类别	可达性范围/h	占青藏全域总面积的比重/%		
		未考虑积雪影响	考虑积雪影响	积雪影响的变化
医疗服务设施	[0, 2)	21.83	17.40	-4.43
	[2, 4)	17.68	15.72	-1.96
	[4, 6)	11.82	11.72	-0.10
	[6, 8)	7.76	8.33	0.57
	≥8	40.91	46.83	5.92
商业服务设施	[0, 2)	25.89	20.16	-5.73
	[2, 4)	19.97	18.65	-1.32
	[4, 6)	11.58	12.37	0.79
	[6, 8)	6.99	8.00	1.00
	≥8	35.57	40.83	5.26
城市功能服务设施	[0, 2)	3.91	2.63	-1.28
	[2, 4)	9.98	6.32	-3.66
	[4, 6)	12.12	8.84	-3.28
	[6, 8)	11.12	9.35	-1.77
	≥8	62.87	72.85	9.98
交通服务设施	[0, 2)	7.70	5.68	-2.02
	[2, 4)	15.99	11.72	-4.27
	[4, 6)	16.02	11.61	-4.41
	[6, 8)	14.85	11.87	-2.98
	≥8	45.44	59.13	13.68

可达性降低比例最多的范围为[0, 2) h, 该区域面积占青藏高原全域面积的17.40%, 比未考虑积雪影响的情景减少了4.43%。到医疗服务设施可达性在[2, 4) h范围内的地区面积占青藏高原全域面积的15.72%, 比未考虑积雪影响的情景下减少了1.96%。到医疗服务设施可达性在[4, 6) h范围内的地区面积占青藏高原全域面积的11.72%, 比未考虑积雪影响的情景下减少了0.10%。此外, 受积雪影响到医疗服务设施的平均最短时间超过6 h的地区所占比重超过50%, 比未考虑积雪影响的情景下增加了6.48%。

受积雪影响, 到商业服务设施的可达性降低比例最多的范围在[0, 2) h和[2, 4) h范围内, 其中平均最短时间在2 h范围内地区面积所占比重比未考虑积雪影响的情景下减少了5.73%, 这说明受积雪影响, 青藏高原多出近6%的地区无法在2 h范围内到达最近的商业服务设施。在[2, 4) h范围内的地区面积比重比未考虑积雪影响的情景减少了1.32%。同时, 相比未考虑积雪影响, 受积雪影响到商业服

务设施的平均最短时间超过4 h的地区所占比重有所增加, 其中平均最短时间超过8 h的地区范围拓展最多, 增加比例为5.26%。

整体上看, 考虑积雪影响时, 到城市的可达性在[0, 2)、[2, 4)、[4, 6)、[6, 8) h对应的国土面积均有所减少, 其中减少比例最多的是[2, 4) h, 这一区间的国土面积占全域的比例从9.98%减少为6.32%, 下降了3.66个百分点; 而区间[0, 2)、[4, 6)、[6, 8) h则分别减少了1.28%、3.28%和1.77%。此外, 超过8 h仍不可达的国土面积则从62.87%增加至72.85%, 这意味着考虑积雪影响, 青藏高原地区将多出近10%的国土面积无法在8 h内到达最近城市服务。

到交通服务设施的可达性在[0, 2)、[2, 4)、[4, 6)、[6, 8) h的范围受积雪影响均有所减少, 其中减少比例最多的范围是[4, 6) h。考虑积雪影响, 青藏高原地区将多出约14%的国土面积无法在8 h内到达最近交通设施。具体地, 青藏高原地区在2 h范围内可到达最近交通服务设施的地区减少2.02%, [2, 4) h范围内减少4.27%, [4, 6) h范围内减少4.41%, [6, 8) h范围内减少2.98%。

2.2.2 雪季公路可达性的变化

未考虑积雪影响的总可达性结果的最小值为0.012 h, 最大值为74.1 h, 平均值为10.36 h; 考虑积雪影响的雪季总可达性结果的最小值为0.012 h, 最大值为86.43 h, 平均值为12.40 h, 整体上, 受积雪影响青藏高原全域的总可达性平均增加2.04 h(图6)。表5显示: 从分布来看, 雪季可达性结果在[0, 2) h范围和[2, 4) h范围内可达的地区的面积明显小于未考虑积雪影响的可达性结果。受积雪影响, 青藏高原超过11%的地区的最短可达时间增加了4 h左右, 其中有近5.41%的地区无法在2 h内到达最近服务设施, 近5.54%的地区无法在[2, 4) h范围内到达最近服务设施。

计算雪季可达性相较于未考虑积雪影响的可达性季节波动情况(图7)。结果显示: 青藏高原地区受积雪影响可达性波动的最小值为0.71%, 最大值为116.1%, 平均值为24.5%。从分布来看, 青藏高原范围内可达性受积雪影响最严重的地区主要聚集在西藏东部、青海南部和四川西部, 多分布在横断山区、唐古拉山脉、巴颜喀拉山脉等地形区内。从影响范围来看, 可达性受积雪影响的波动比例在[0.71%, 17.5%)范围内的地区的面积占比为28.701%; 在[17.5%, 26.1%)范围内的面积占比最

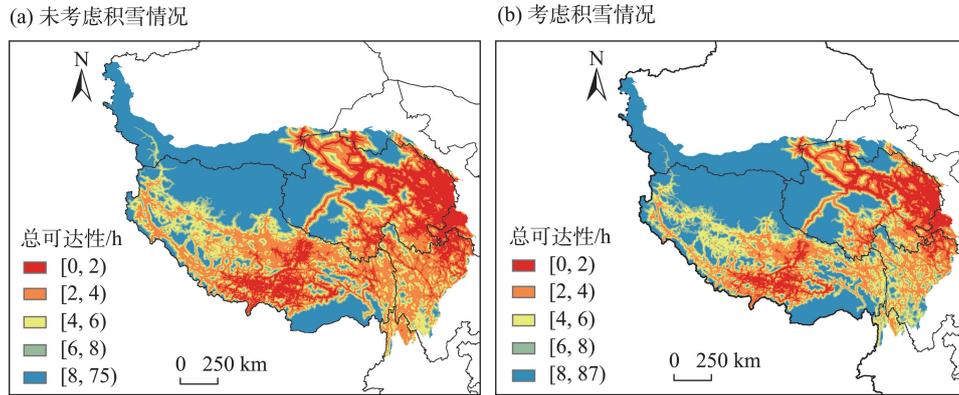


图 6 未考虑积雪情况下的总可达性(a)和考虑积雪影响的总可达性(b)

Fig.6 Total accessibility without considering the impact of snow cover (a) and considering the impact of snow cover (b)

表 5 雪季不同可达性范围的总可达性结果对比
Tab.5 Comparison of total accessibility of different accessibility areas in the snow season

可达性/h	占青藏全域总面积的比重/%		
	未考虑积雪影响	考虑积雪影响	积雪影响的变化
[0, 2)	16.24	10.83	-5.41
[2, 4)	26.39	20.85	-5.54
[4, 6)	15.78	18.14	2.36
[6, 8)	7.99	10.55	2.56
≥8	33.59	39.62	6.03

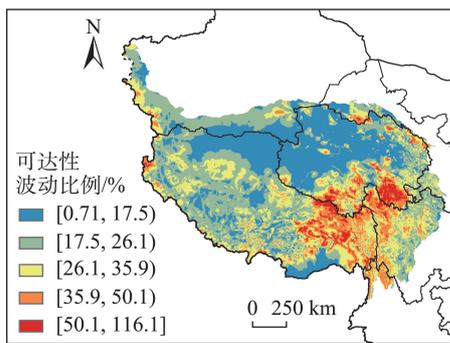


图 7 雪季可达性波动比例

Fig.7 Fluctuation ratio of accessibility in the snow season

大,为 35.790%;在[26.1%, 35.9%)范围内的面积占比为 22.141%;在[35.9%, 50.1%)范围内的面积占比为 10.109%;在 50.1%及以上的地区面积占比为 3.259%。

3 结论与讨论

3.1 结论

本文基于多源数据,以青藏高原地区为案例地,综合坡度、海拔等地形特征对交通流特征的影

响,采用成本—距离法,评价降水、积雪等恶劣天气影响下的公路可达性,测度受雨雪影响可达性波动的阈值范围并勾勒其空间分布格局。主要结论如下:

(1) 雨季青藏高原地区全域到医疗、商业、城市功能和交通服务设施的最短时间与未考虑降水影响的情况差异较小,但喜马拉雅山脉南源和雅鲁藏布江大峡谷附近存在受降水影响可达性变差的情况。青藏高原地区全域的雨季总可达性的平均值增加 0.011 h,但受降雨影响,无法在 8 h、2 h、4 h 范围内到达最近服务设施的地区分别多出 0.021%、0.001%、0.025%。

(2) 青藏高原地区可达性受降水影响最大的地区主要聚集在珠穆朗玛峰附近以及雅鲁藏布江大峡谷附近地区。具体来看,可达性受降水影响的波动比例在 1%以下的地区占比为 97.100%, [1%, 3%) 范围内的地区的面积占比为 2.500%,在 [3%, 7%) 范围内的面积占比为 0.386%,波动比例超过 7% 的地区面积占比仅为 0.014%。

(3) 青藏高原地区全域在雪季到医疗、商业、城市功能和交通服务设施的最短时间较未考虑积雪影响的情况均有所增加。受积雪影响,青藏高原地区全域雪季总可达性的最短可达时间平均增加了 2.04 h。雪季可达性结果在 [0, 2) h 范围和 [2, 4) h 范围内可达地区的面积明显小于未考虑积雪影响的可达性结果。但受降雪影响,多出 5.41% 的地区无法在 2 h 内到达最近服务设施,多出 5.54% 的地区无法在 [2, 4) h 范围内到达最近服务设施。

(4) 青藏高原可达性受积雪影响最严重的地区主要聚集在西藏东部、青海南部和四川西部,多分

布在横断山区、唐古拉山脉、巴颜喀拉山脉等地形区内。可达性受积雪影响的波动比例在[0.71%, 17.5%)范围内的地区的面积占比为28.701%;在[17.5%, 26.1%)范围内的面积占比最大,为35.790%;在[26.1%, 35.9%)范围内的面积占比为22.141%;在[35.9%, 50.1%)范围内的面积占比为10.109%;在50.1%及以上地区的面积占比为3.259%。

3.2 讨论

在交通可达性的评价中,需要在空间上考虑道路网络的连接数量、交通干线的技术等级及其影响程度,以及从宏观角度衡量特定区域的通达性态势^[38]。由于青藏高原地区存在的地面交通距离、快速可达以及与运量之间的矛盾,决定了其不能依靠或较难依靠地面交通大通道来实现快速可达。因此,需要建设布局合理的高原地区民航体系。青藏高原地区受积雪影响,可达性降低比例较大,受影响较严重的地区主要分布在西藏东部、青海南部和四川西部等,建议以规定符合高原区域特征的可达性时间为阈值,作为通用机场有效服务半径进行优化布局,发展高原机场相关机型和航线。

本文主要考虑雨雪季的时间变化对青藏高原地区交通可达性的影响,这对于构建交通可达性评价体系具有重要意义。本文降水数据为地区降水量的月均值,这削弱了日降水量和短时强降水的影响,故本文中降水对道路速度的影响评价仍然偏低。此外,降水对公路灾害的发生具有显著的影响,特别是高山峡谷地区引发泥石流、滑坡等问题的影响较大,在未来的研究中需要给予以更多的关注。

参考文献(References)

- [1] 冯凤江,程新平,孙晓宁. 高速公路雾天人工和智能网联车混行交通流仿真[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(7): 158-164. [Feng Fengjiang, Cheng Xinping, Sun Xiaoning. Simulation of mixed traffic flow with HVs and CAVs on freeways in foggy weather. China Safety Science Journal, 2022, 32(7): 158-164.]
- [2] 何杰,张长健,严欣彤,等. 基于微观动力学参数的高速公路特征路段事故风险分析[J/OL]. 吉林大学学报(工学版), 2022. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/22.1341.t.20220802.1255.006.html>. [He Jie, Zhang Changjian, Yan Xintong, et al. Analyzing traffic crash risk of freeway characteristics based on micro-kinetic parameters. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2022. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/22.1341.t.20220802.1255.006.html>.]
- [3] 苗毅,卢文清,戴特奇,等. 青藏高原市域综合交通优势度评价及空间特征:以林芝市为例[J]. 地理科学进展, 2021, 40(8): 1332-1343. [Miao Yi, Lu Wenqing, Dai Teqi, et al. Comprehensive traffic advantage degree and its spatial characteristics at the prefecture level on the Qinghai-Tibet Plateau: A case study of Linzhi City. Progress in Geography, 2021, 40(8): 1332-1343.]
- [4] 汪双杰,陈建兵,章金钊,等. 青藏高原多年冻土区公路修筑技术之进展[J]. 中国科学(技术科学), 2009(1): 8-15. [Wang Shuangjie, Chen Jianbing, Zhang Jinzhao, et al. Advances in road construction technology in the permafrost region of the Qinghai-Tibet Plateau. Scientia Sinica (Technologica), 2009(1): 8-15.]
- [5] Hansen W G. How accessibility shapes land use [J]. Journal of the American Institute of Planners, 1959, 25(2): 73-76.
- [6] Dalvi M Q, Martin K M. The measurement of accessibility: Some preliminary results [J]. Transportation, 1976, 5(1): 17-42.
- [7] Zhang Q Y, Northridge M E, Jin Z, et al. Modeling accessibility of screening and treatment facilities for older adults using transportation networks [J]. Applied Geography, 2018, 93: 64-75.
- [8] 陈卓,金凤君,王姣娥. 基于高速公路流的东北大都市区边界识别与结构特征研究[J]. 地理科学, 2019, 39(6): 929-937. [Chen Zhuo, Jin Fengjun, Wang Jiao'e. Spatial boundaries and structural characteristics of metropolitan areas in northeast China: A study using the data of expressway flows. Scientia Geographica Sinica, 2019, 39(6): 929-937.]
- [9] Tiznado-Aitken I, Muoz J C, Hurtubia R. Public transport accessibility accounting for level of service and competition for urban opportunities: An equity analysis for education in Santiago de Chile [J]. Journal of Transport Geography, 2021, 90(1): 102919. doi: 10.1016/j.jtrangeo.2020.102919.
- [10] 王菲,李善同. 交通发展、时空压缩与产业区位效应:以公路建设为例[J]. 上海经济研究, 2022, 34(4): 88-98. [Wang Fei, Li Shantong. Transport development, time-space compression and industrial location effect: Evidence from highway construction. Shanghai Journal of Economics, 2022, 34(4): 88-98.]
- [11] Acheampong R A, Asabere S B. Urban expansion and differential accessibility by car and public transport in the Greater Kumasi city-region, Ghana: A geospatial modeling approach [J]. Journal of Transport Geography, 2022,

- 98: 103257. doi: 10.1016/j.jtrangeo.2021.103257.
- [12] Bhuiya M M R, Hasan M M U, Jones S. Accessibility of movement challenged persons and challenges faced by their escorting family members: A case study of Dhaka, Bangladesh [J]. *Journal of Transport & Health*, 2022, 24: 101323. doi: 10.1016/j.jth.2021.101323.
- [13] 商硕, 蒋海兵, 韦胜. 人口流动视角下中国地级以上城市空间联系格局与影响因素 [J]. *智库理论与实践*, 2022, 7(2): 117-129. [Shang Shuo, Jiang Haibing, Wei Sheng. The spatial contact pattern and influencing factors of cities above the prefecture level in China from the perspective of population mobility. *Think Tank: Theory & Practice*, 2022, 7(2): 117-129.]
- [14] 刘建荣, 郝小妮. 到达车站的步行时间对老年人公交选择的影响 [J]. *交通运输系统工程与信息*, 2020, 20(1): 124-129. [Liu Jianrong, Hao Xiaoni. Effect of bus stop walking time on elderly's bus choice. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2020, 20(1): 124-129.]
- [15] 吕彪, 刘一骊, 刘海旭. 协同考虑脆弱性与可靠性的城市道路网络设计 [J]. *西南交通大学学报*, 2019, 54(5): 1093-1103. [Lv Biao, Liu Yiliu, Liu Haixu. Urban road network design with balance between vulnerability and reliability. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2019, 54(5): 1093-1103.]
- [16] Datla S, Sharma S. Impact of cold and snow on temporal and spatial variations of highway traffic volumes [J]. *Journal of Transport Geography*, 2008, 16(5): 358-372.
- [17] Yuan Q W, Jing L. Study of rainfall impacts on freeway traffic flow characteristics [J]. *Transportation Research Procedia*, 2017, 25: 1533-1543.
- [18] 张存保, 万平, 梅朝辉, 等. 雨天环境下高速公路交通流特性及模型研究 [J]. *武汉理工大学学报*, 2013, 35(3): 63-67. [Zhang Cunbao, Wan Ping, Mei Zhaohui, et al. Traffic flow characteristics and models of freeway under rain weather. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2013, 35(3): 63-67.]
- [19] 龚大鹏, 宋国华, 黎明, 等. 降雨对城市道路行程速度的影响 [J]. *交通运输系统工程与信息*, 2015, 15(1): 218-225. [Gong Dapeng, Song Guohua, Li Ming, et al. Impact of rainfalls on travel speed on urban roads. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2015, 15(1): 218-225.]
- [20] 孙洪运, 杨金顺, 吴兵. 暴雨对快速路速度—密度关系影响的实证分析 [J]. *交通运输系统工程与信息*, 2016, 16(3): 221-227. [Sun Hongyun, Yang Jinshun, Wu Bing. Empirical analysis of speed-density relationships for urban expressway under rainstorm condition. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2016, 16(3): 221-227.]
- [21] 戢晓峰, 张琪, 覃文文, 等. 恶劣天气对高原山区高速公路交通流特征的影响分析 [J]. *交通信息与安全*, 2020, 38(4): 10-16. [Ji Xiaofeng, Zhang Qi, Qin Wenwen, et al. An impact analysis of bad weather on traffic flow characteristics of plateau mountain expressway. *Journal of Transport Information and Safety*, 2020, 38(4): 10-16.]
- [22] 龚开江, 王洪亮, 柏小俊, 等. 降雨强度对山区高速公路运行车速的影响研究 [J]. *价值工程*, 2021, 40(15): 197-199. [Gong Kaijiang, Wang Hongliang, Bai Xiaojun, et al. Study of the effect of rainfall intensity on operating speeds on mountain highways. *Value Engineering*, 2021, 40(15): 197-199.]
- [23] 金凤君, 刘毅. 青藏高原产业发展的交通运输门槛研究 [J]. *自然资源学报*, 2000, 15(4): 363-368. [Jin Fengjun, Liu Yi. Threshold study on transportation and industrial development in Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Natural Resources*, 2000, 15(4): 363-368.]
- [24] 朱燕, 侯光良, 兰措卓玛, 等. 基于GIS的青藏高原史前交通路线与分区分析 [J]. *地理科学进展*, 2018, 37(3): 438-449. [Zhu Yan, Hou Guangliang, Lan Cuo Zhuoma, et al. GIS-based analysis of traffic routes and regional division of the Qinghai-Tibetan Plateau in prehistoric period. *Progress in Geography*, 2018, 37(3): 438-449.]
- [25] 高兴川, 曹小曙, 李涛, 等. 1976—2016年青藏高原地区通达性空间格局演变 [J]. *地理学报*, 2019, 74(6): 1190-1204. [Gao Xingchuan, Cao Xiaoshu, Li Tao, et al. Evolution of accessibility spatial pattern of the Qinghai-Tibet Plateau in 1976—2016. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(6): 1190-1204.]
- [26] Che T, Li X, Jin R, et al. Snow depth derived from passive microwave remote-sensing data in China [J]. *Annals of Glaciology*, 2008, 49: 145-154.
- [27] Banick R, Heyns A M, Regmi S. Evaluation of rural roads construction alternatives according to seasonal service accessibility improvement using a novel multi-modal cost-time model: A study in Nepal's remote and mountainous Karnali Province [J]. *Journal of Transport Geography*, 2021, 93: 103057. doi: 10.1016/j.jtrangeo.2021.103057.
- [28] 蒋海兵, 张文忠, 祁毅, 等. 区域交通基础设施可达性研究进展 [J]. *地理科学进展*, 2013, 32(5): 807-817. [Jiang Haibing, Zhang Wenzhong, Qi Yi, et al. Research progress on accessibility to regional transportation infrastructure. *Progress in Geography*, 2013, 32(5): 807-817.]
- [29] Tobler W. Three presentations on geographical analysis

- and modeling: Non-isotropic geographic modeling; speculations on the geometry of geography; and global spatial analysis [R]. Santa Barbara, USA: National Center for Geographic Information and Analysis, 1993.
- [30] 冉逸箫, 张凤荣, 张佰林, 等. 贫困山区农村衰落的特征及诊断: 以重庆市酉阳县为例 [J]. 资源科学, 2017, 39(6): 999-1012. [Ran Yixiao, Zhang Fengrong, Zhang Bailin, et al. Characterization and diagnosis of rural decline in poor mountainous areas. Resources Science, 2017, 39(6): 999-1012.]
- [31] 曾冰, 张艳, 胡亚光. 基于交通可达性与城市竞争力的城市腹地范围识别: 以长江中游城市群为例 [J]. 热带地理, 2020, 40(1): 119-127. [Zeng Bing, Zhang Yan, Hu Yaguang. Recognition of urban hinterland based on transportation accessibility and urban competitiveness: A case study on the middle reaches of the Yangtze River. Tropical Geography, 2020, 40(1): 119-127.]
- [32] 国家统计局. 中国城市统计年鉴 2021 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2021. [National Bureau of Statistics. China City Statistical Yearbook 2021. Beijing: China Statistics Press, 2021.]
- [33] 湛东升, 谢春鑫, 张文忠, 等. 基于累计机会可达性的北京城市公共服务设施复合功能识别 [J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(6): 1320-1329. [Zhan Dongsheng, Xie Chunxin, Zhang Wenzhong, et al. Identifying mixed functions of urban public service facilities in Beijing by cumulative opportunity accessibility method. Journal of Geo-information Science, 2020, 22(6): 1320-1329.]
- [34] 除多, 洛桑曲珍, 林志强, 等. 近30年青藏高原雪深时空变化特征分析 [J]. 气象, 2018, 44(2): 233-243. [Chu Duo, Luosang Quzhen, Lin Zhiqiang, et al. Spatio-temporal variation of snow depth on Tibetan Plateau over the last 30 years. Meteorological Monthly, 2018, 44(2): 233-243.]
- [35] 任园园. 冰雪条件下城市道路交通流特性及管理对策研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2008. [Ren Yuanyuan. Study on the characteristics of traffic stream and management countermeasure at urban road under condition of snow and ice. Changchun, China: Jilin University, 2008.]
- [36] 马筱栎, 樊博. 降雨对山区高速公路运行车速的影响研究 [J]. 公路与汽运, 2020(5): 33-36. [Ma Xiaoli, Fan Bo. Study of the effect of rainfall on operating speeds on mountain highways. Highways & Automotive Applications, 2020(5): 33-36.]
- [37] Esfeh M A, Kattan L, Lam W H K, et al. Road network vulnerability analysis considering the probability and consequence of disruptive events: A spatiotemporal incident impact approach [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2022, 136: 103549. doi: 10.1016/j.trc.2021.103549.
- [38] 王姣娥, 陈娱, 戴特奇, 等. 中国交通地理学的传承发展与创新 [J]. 经济地理, 2021, 41(10): 59-69. [Wang Jiao'e, Chen Yu, Dai Teqi, et al. Inheritance, development and innovation of transport geography in China. Economic Geography, 2021, 41(10): 59-69.]

Evaluation of road accessibility in the Qinghai–Tibet Plateau region considering seasonality

LIU Qingfang¹, LU Wenqing¹, DAI Teqi^{1*}, SONG Jinping¹, LIU Yufan¹, LI Jie²

(1. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. China International Engineering Consulting Corporation, Beijing 100048, China)

Abstract: Accessibility is one of the most important concepts in transportation geography. Accurate evaluation of accessibility is of great significance for transportation planning and development. However, there is a lack of literature on accessibility assessment that considered seasonal variation and mountainous terrain influence. The Qinghai-Tibet Plateau is characterized by distinct rainy season and snow season, as well as high altitude and complex terrain. Therefore, this study fully considered seasonal and terrain influences in the evaluation of accessibility. Combined with multi-source data, the cost-distance model was adopted in this study to evaluate the road accessibility in the Qinghai-Tibet Plateau region. The results are as follows: 1) The shortest time to basic service facilities in the Qinghai-Tibet Plateau region during the rainy season considering the influence of precipitation had little change compared with the situation without considering the influence of precipitation. In the rainy season, the average value of the total accessibility of the whole region increased by 0.011 hours, and more than 0.021% of the areas could not reach the nearest service facilities within 8 hours because of the impact of rainfall. 2) Affected by snow cover, the total accessibility of the Qinghai-Tibet Plateau region became worse, and the minimum road accessibility time in the snow season increased by 2.04 hours on average. Given the effect of snowfall, more than 5.41% of the areas could not reach the nearest service facility within 2 hours, and more than 5.54% of the areas could not reach the nearest service facility within 2–4 hours. 3) According to the seasonal change of accessibility affected by precipitation and snow cover in the rainy season and snow season, the fluctuation range of accessibility in the snow season was larger. The areas with the greatest impact on accessibility by precipitation mainly concentrated near the Mount Qomolangma and the Yarlung Zangbo River Grand Canyon, while the areas that were most seriously affected by snow cover mainly concentrated in the eastern part of Tibet Autonomous Region, the southern part of Qinghai Province, and the western part of Sichuan Province, which are mainly distributed in the Hengduan Mountainous area, Tanggula Mountains range, Bayan Har Mountains range, and other topographic areas.

Keywords: road accessibility; rainy season and snow season; cost-distance model; Qinghai-Tibet Plateau region