

基于体能消耗的非机动交通可达性模型与应用

李聪颖^{1,2}, 周庆华¹, 吕麦霞³, 朱彤⁴

(1. 西安建筑科技大学 城乡规划学博士后流动站, 陕西 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 3. 西安市市政设计研究院有限公司, 陕西 西安 710068; 4. 长安大学 汽车学院, 陕西 西安 710064)

摘要:为建立非机动交通可达性模型,用以准确评估城市规划与交通规划方案,以体能消耗作为可达性阻抗,确立了多段式阻抗函数形式,在此基础上建立了基于体能消耗的非机动交通可达性数学模型(NABE模型),并比较了各类可达性模型计算结果。研究表明:NABE模型能够体现出机动化交通设施对于非机动交通出行圈的影响;当阻抗增加时,NABE模型能合理表现可达性变化趋势;阻抗接近于0时,模型也能在极限状态下表述出非机动化交通可达性。上述特点弥补了传统可达性模型在描述非机动化交通可达性时存在的问题,其趋势更符合非机动化交通特征,NABE模型应用于交通规划方案评估更为合理。

关键词:交通工程;可达性;非机动交通;体能消耗;数学模型

中图分类号:U491; TU984

文献标志码:A

Non-motorized accessibility model and application based on energy expenditure

LI Cong-ying^{1,2}, ZHOU Qing-hua¹, LU Mai-xia³, ZHU Tong⁴

(1. Postdoctoral Research Station of Urban and Rural Planning, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China; 2. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China; 3. Xi'an Municipal Engineering Design & Research Institute Co Ltd, Xi'an 710068, Shaanxi, China; 4. School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: This paper is aimed at building the model of non-motorized accessibility to evaluate urban planning or transportation planning scheme. Using the energy consumption as the accessibility impedance, this paper established multi-section impedance function, and the non-motor vehicle traffic accessibility mathematical model (NABE model). Comparing the various accessibility model calculation results, this paper found that NABE model could embody the influence of the motorized traffic facilities on non-motor vehicle traffic circle. When impedance increases, NABE accessibility model can reflect the trends of accessibility changing; When impedance is close to zero, this model can also express non-motor vehicle traffic accessibility under extreme condition. The characteristics above make up for problems of the traditional model in describing the non-motor vehicle traffic accessibility. In brief, it's more reasonable to apply NABE model to the evaluation of traffic planning scheme. 4 tabs, 2 figs, 13 refs.

收稿日期:2013-07-15

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(51108036);住房和城乡建设部科学技术项目(2013-K5-262);西安市科技局技术转移促进工程项目(CX1262⑧);西安建筑科技大学青年基金项目(QN1114);西安建筑科技大学人才基金项目(RC1119)

作者简介:李聪颖(1977-),女,陕西西安人,讲师,工学博士,博士后,E-mail:licongying@126.com。

Key words: traffic engineering; accessibility; non-motorized traffic; energy expenditure; mathematics model

0 引言

可达性(Accessibility)是地理科学最基本的概念之一,提出于 20 世纪 50 年代,指利用一种特定的交通系统从某一给定区位到达活动地点的便利程度^[1]。可达性反映区域之间接触的潜力,体现了空间与土地利用对交通出行最根本的作用,广泛应用于城市规划与交通规划领域,量化的可达性模型对于规划方案的制定与评价具有重大意义^[2]。

以往,可达性模型表述为一定时间约束下,交通活动的空间范围、可能涵盖的机会或相互作用的潜力,空间阻隔模型、累积机会模型、空间作用模型等在文献中出现频率较高^[3]。上述模型对于机动化交通具有适用性,已获得广泛应用。但对于非机动化交通可达性目前研究并不多,Iacono 等探讨了传统模型与非机动化交通属性的差异^[4],Litman 在分析其他交通方式对非机动化交通的影响时也曾定性分析过此问题^[5];亦有文献直接利用累积机会模型进行计算^[6]。机动化交通方式下,时间、空间是限制主体移动空间范围的主要因素与阻抗来源;非机动交通方式下,如步行、骑自行车、坐轮椅或其他非机动交通等,位移的产生依靠有限的体能而非其他能量。因此,决定区域之间便利程度、影响出行选择的本质因素是体能消耗量,而非时间、空间。以往文献并没有体现出上述特征并建立合理的非机动化可达性模型。

随着城市文明的发展,机动化交通的有限性与负外部性凸显,机动车的可移动性不再作为衡量城市交通发展的唯一标准,“人”而非“车”的可达性成为城市规划与交通规划关注的核心^[7]。其中,非机动交通可达性的量化分析,无疑是确立规划导向原则、重新审视规划方法、评估并监督方案落实的基础。

为此,本文提出基于体能消耗建立非机动交通可达性模型(non-motorized accessibility based on energy expenditure model,NABE 模型),从人体体能消耗概念、规律入手,梳理生理学、运动学研究成果,为模型奠定基础,从非机动交通特征出发,提出适用的可达性模型。最后通过案例,分析不同特征的用地与道路网络下非机动交通可达性差异,说明规划中考虑体能消耗的重要性,为工程应用提供借鉴。

1 体能消耗原理与计算

1.1 体能消耗测量原理

人体维持正常体温、进行各种活动均依靠能量。能量来源于供能物质糖、脂肪和蛋白质等,物质在人体内经过生化反应释放能量^[8]。实际体能消耗可分为安静代谢和活动代谢^[9]。常见的体能消耗计算方法包括直接测量、间接测量、主观问卷与经验模型等^[10-12]。其中,直接测量通过仪器设备直接确定能量转移。间接测量基于氧气消耗量、二氧化碳生成量与人体代谢能量之间存在的关系,采用气流技术方法、道格拉斯袋法等获得氧气、二氧化碳量间接计算能量消耗。直接测量与间接测量对试验环境与设备要求苛刻,难于实现。主观问卷则存在不确定性。考虑到城市规划和交通规划阶段,道路网络尚未建成,对于体能消耗的估计目的在于概算出行者在区域间移动的总体情况,而非精确于某种微观行为本身。因此,可选择经验模型方法,通过体能消耗与各类运动模式之间的经验关系作为可达性建模的依据。

1.2 体能消耗计算

经验模型方法指建立人体能量消耗量与运动方式之间的相关性,通过某种运动方式持续时间估计体能消耗。非机动交通出行密切相关的运动方式主要包括:步行、骑自行车。道路对体能消耗的影响体现在坡度、阶梯。生理学、运动学研究已获得了与非机动交通相关的成果,如表 1 所示。

表 1 常见出行活动体能消耗量
Tab. 1 Physical expenditure of common travel activities

运动方式	符号	体能消耗量/ (kCal · h ⁻¹ · kg ⁻¹)	参考文献
站立	B0	1.2	[12]
步行	B1	4.0	[12]
步行下楼	B2	3.1	[12]
步行上楼	B3	5.0	[12]
步行上坡	B4	6.2 *	Pandolf 公式 ^[9]
步行下坡	B5	1.84 *	Pandolf 公式 ^[9]
骑自行车	C1	4.0	[12]
负重上梯	C2	7.8	[12]
负重下梯	C3	3.6	[12]

注: * 表示计算的基础条件是 59 kg 体重下,无负重,硬质路面,行走速度为 5 km/h。

表1中未考虑道路表面铺装差异等因素,原因是考虑到可达性模型主要应用于城市规划与道路规划阶段,而上述阶段道路设计方案尚未形成。中国人口体重分布见表2^[12]。

表2 中国人口体重分布

Tab. 2 Chinese population weights distribution

群体分布	男(18~60岁)			女(18~60岁)		
	5%分位数	中位数	85%分位数	5%分位数	中位数	85%分位数
身高/mm	1 583	1 678	1 775	1 448	1 570	1 659
体重/kg	48	59	75	42	52	66

从表中可以看出,同样时间内、不同的运动方式下累计体能消耗量存在明显的差异,特别是不同的坡度、是否携带重物对于非机动车体能消耗的影响甚为突出。

2 非机动车可达性模型

除了确定各类活动的体能消耗量,还应确定合理有效、解释力强的非机动车可达性模型。目前,使用较多的包括:空间阻隔模型、累积机会模型、相互作用模型、效应模型、时空约束模型等^[2]。以下讨论几何网络模型利用体能消耗,应用于非机动车可达性的可能性。

2.1 模型分析

空间阻隔模型用两点之间的距离衡量两点之间的可达性水平,或采用某点到达兴趣点集的距离之和度量该点的可达性水平,表示为

$$A_1 = \frac{1}{i} \sum_{p=1}^i D_p \quad (1)$$

式中: A_1 为 O 点的可达性; D_p 为 O 点至机会 p 之间的距离; i 为机会数目。

累积机会模型表达的是在一定出行范围内能够接触到的服务机会的数量。通过定义1个时间阈值或费用阈值,把从某点出发在阈值允许范围内到达的所有机会数量作为某特定区位的可达性。累积机会模型关键在于如何定义费用、费用阈值与机会,表示为

$$A_2 = \sum_{p=1}^i O_p, D_p \leq D_i \quad (2)$$

式中: A_2 为 O 点的可达性; O_p 为机会 p ; D_i 为距离阈值。

相互作用模型定义可达性为空间相互作用的潜力,认为可达性不仅与两点间的空间阻隔有关,还与终点活动规模的大小有关。吸引点和度量点之间的

作用力规模越大、距离越小,则可达性水平越高。潜力模型就是空间相互作用模型的代表,其基本形式为

$$A_3 = \sum_{p=1}^i \frac{O_p}{D_p^\alpha} \quad (3)$$

式中: A_3 为 O 点的可达性; α 反映距离阻抗影响程度。

此外,还有时空约束模型以时空约束代表费用。上述模型均用时间、空间表示阻抗或费用,在计算多处不同性质、不同规模的机会时直接求和,忽略了机会类型的差异。当机会距离过近或过远时,相互作用模型定义存在困难。考虑建立新的模型表达非机动车化交通可达性,在模型中体现出机会规模、阻抗与费用、不同的机会类型。

2.2 非机动车可达性模型建立

2.2.1 基本模型

根据上述要素与要求,结合空间相互作用模型与累积机会模型,基于体能消耗特性,本文建立非机动车可达性模型。公式为

$$A_n = \sum_{k=1}^j \bar{\omega}_k \sum_{p=1}^i \frac{O_p}{f(E_p)} \quad (4)$$

式中: $f(E_p)$ 为体能消耗阻抗函数; $\bar{\omega}_k$ 为第 k 类机会的权重。

模型重要的是获得 $f(E_p)$ 与 $\bar{\omega}_k$ 。需要注意的是,仍应在一定范围内求和,否则,求和范围将会无限扩大至全部空间,可达性也将失去意义。体能消耗阈值决定了可达范围,阈值受到体能总量的限制,但出行过程更是不断权衡体能消耗量的过程。出行者愿意承受的出行阈值远低于出行体能总量,此外,不同出行目的能够承受的出行时间存在差异。在理想范围内,对体能敏感性表现的非常不明显。

2.2.2 体能阻抗函数

基于上述考虑,本文根据多个城市提供的交通调查资料建立出行调查数据,建立步行、自行车出行圈^[12]见下页表3。体能消耗 E_p 在理想体能消耗范围内时,阻抗函数恒定,说明在理想出行圈内感觉不到差异;在容忍体能消耗范围外,阻抗视为无穷大,认为非机动车出行者不考虑该范围外的机会;两者之间的部分,阻抗增大规律参照体能恢复时间的变化规律^[12]。

$$f(E_p) = \begin{cases} E_i, & E_p \leq E_i \\ k_r E_p^{1.1}, & E_i \leq E_p \leq E_t, k_r = 0.463\ 2 \\ \infty, & E_p > E_t \end{cases} \quad (5)$$

表 3 基于体能消耗量的非机动车出行圈

Tab. 3 Non-motorized travel circles based on energy expenditure

出行方式	等级	符号	工作/kCal	休闲/kCal	购物/kCal
步行	理想范围	E_i	39.3	39.30	39.30
	容忍范围	E_t	176.5	334.05	137.55
自行车	理想范围	E_i	39.3	39.30	39.30
	容忍范围	E_t	176.5	334.05	137.55

2.2.3 权重确定

根据改进层次分析方法,以各类出行目的下容忍

或接受的出行范围确定权重。通过判断矩阵、一致性、归一化等步骤获得权值矩阵,权重计算过程见表 4。

表 4 权重计算

Tab. 4 Weight calculation

判断矩阵	最优传递矩阵	一致性矩阵	行元素积	计算方根	归一化
$C=[G, W, K]$	$O_{ij}=\{o_{ij}\}$ $o_{ij}=\frac{1}{m}\sum_{k=1}^m C_{ik}+C_{ki}$	$a_{ij}=e^{o_{ij}}$	$M_i=\prod_j a_{ij}$	$\bar{\omega}_i=\sqrt[m]{M_i}$	$\bar{\omega}_i=\bar{\omega}_i/\sum \bar{\omega}_i$
$\begin{matrix} & & 0 & 1 & 1 \\ & 0 & 1 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & -1 & 0 \end{matrix}$	$\begin{matrix} & 0 & \frac{2}{3} & \frac{4}{3} \\ -\frac{2}{3} & 0 & \frac{2}{3} \\ -\frac{4}{3} & -\frac{2}{3} & 0 \end{matrix}$	$\begin{matrix} & 1 & e^{\frac{2}{3}} & e^{\frac{4}{3}} \\ e^{-\frac{2}{3}} & 0 & e^{\frac{2}{3}} \\ e^{-\frac{4}{3}} & e^{-\frac{2}{3}} & 0 \end{matrix}$	$\begin{matrix} e^2 \\ 1 \\ e^{-2} \end{matrix}$	$\begin{matrix} 1.947\ 7 \\ 1.000\ 0 \\ 0.513\ 4 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 0.562\ 7 \\ 0.289\ 0 \\ 0.148\ 3 \end{matrix}$

最终获得的权重向量为: $\bar{\omega}=(\omega_1, \omega_2, \omega_3)=(0.562\ 7, 0.289\ 0, 0.148\ 3)$, $\omega_1、\omega_2、\omega_3$ 分别为可达性中购物、工作、休闲占据的比例。在权重和体能阻抗函数明确的情况下,对于任意地点均可计算其可达性。

3 模型分析与应用

3.1 阻抗函数分析

以往计算出行范围时通常只考虑空间覆盖范围,立体过街方式对出行者的体能消耗未加以考虑。采用体能消耗作为阻抗,能够表现出道路交通规划对于

特定区域非机动车可达性的影响。图 1 圈 OP 是正常情况下可达范围,黑色边界代表某快速路,非机动车必须通过天桥等立体过街设施才能越过边界。

在以往的规划中,不考虑边界的作用,出行范围如图 1(a)所示。实际情况是出行者越过边际后,体能产生衰减,出行范围受到明显影响,如图 1(b)所示。对于体能无法满足上下立体过街设施的出行者,如老年人、残疾人,快速路等为机动化交通服务的基础设施就是限定非机动车出行的边界,如图 1(c)所示。因此,使用体能消耗作为阻抗函数能够合理体现上述问题。

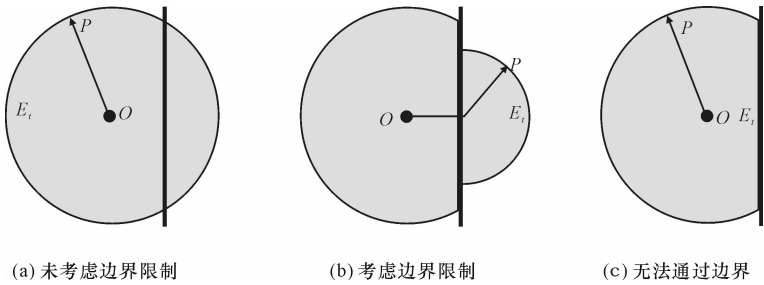


图 1 出行圈范围

Fig. 1 Travel circle range

3.2 非机动车可达性模型分析

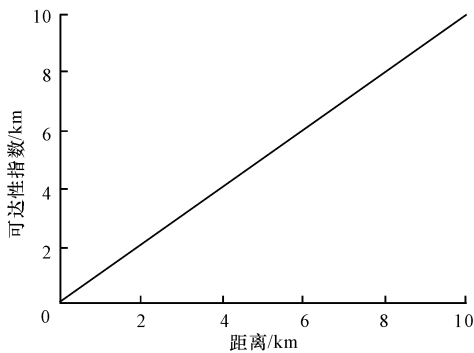
为比较非机动车可达性模型与其他模型之间的差异,定义理想购物机会 面积为 $6\times 10^4\text{ m}^2$,计算 O

点可达性值。分析当购物机会 p 与 O 点之间阻抗逐渐增大的过程,步行可达性值随距离或体能消耗量增加的变化规律。同时,观察当面积分别为 $6\times 10^4\sim$

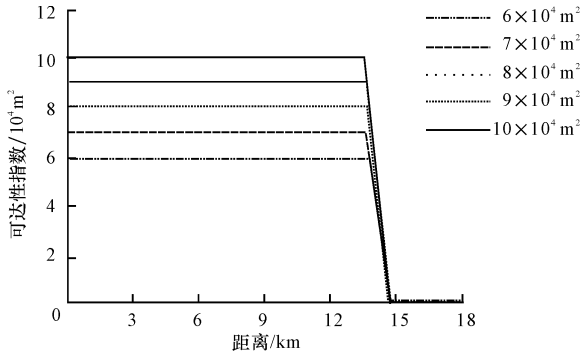
$10\times10^4\text{ m}^2$ 时可达性差异。变化趋势如图 2 所示。空间阻隔模型、累积机会模型与相互作用模型使用的参数根据相关文献案例获得^[13]。

计算结果表明,空间阻隔模型无法表述机会规模的差异性,规模的变化对于可达性未产生影响,如图 2(a)所示。此外,随着距离的增加,可达性值不断增加,这与通常的认识相悖;累积机会模型能表现出不同机会规模的差异性,但可达性在一定阈值范围内可

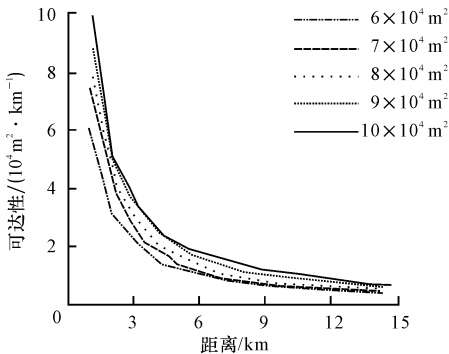
达性不变,超过可达性范围后可达性为 0,下降的速度过快,如图 2(b)所示;相互作用模型获得的可达性是逐渐降低,但在接近 O 点处,可达性无法定义,且在机会远远超过非机动车出行圈外时,还对可达性存在影响,这与实际情况不符,如图 2(c)所示;体能消耗模型结合了累积机会模型与相互作用模型的优点,既能表现随阻抗增加,可达性逐渐减少的趋势,也能定义出接近或远离 O 点处的可达性,如图 2(d)所示。



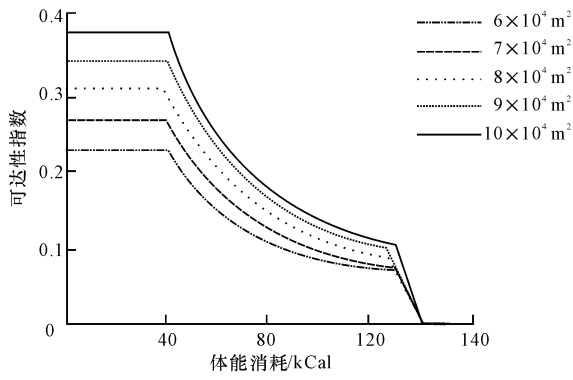
(a) 空间阻隔模型



(b) 累积机会模型



(c) 相互作用模型



(d) 体能消耗模型

图 2 可达性模型趋势比较

Fig. 2 Trend comparison of accessibility models

4 结 语

(1)非机动车可达性与机动化交通可达性特征存在较大差异,在城市规划、交通规划中应使用独立的模型进行表达。

(2)非机动车可达性阻抗应使用体能消耗量来衡量,常用的体能消耗值如表 1 所示,亦可通过设备的量测进一步细化体能消耗量。

(3)体能消耗量作为阻抗,能够更好地表现出机动化交通基础设施对非机动车的影响,还能够衡量道路建设对老年人、残疾人等特殊群体出行圈的影响。

(4)体能消耗模型结合了累积机会模型与相互作用模型的优点,既能表现随阻抗增加、可达性逐渐减少的趋势,也能定义出接近或远离 O 点处的可达性,可作为非机动车可达性的衡量标准。

参考文献:

References:

[1] 陈洁,陆锋,程昌秀.可达性度量方法及应用研究进展评述[J].地理科学进展,2007,26(5):100-110.
CHEN Jie, LU Feng, CHENG Chang-xiu. A review of measurement and application of accessibility[J]. Progress in Geography, 2007, 26(5): 100-110. (in Chinese)

