

严海,贾博浩.基于DFS算法的路内停车预约车位设置方法[J].长安大学学报(自然科学版),2021,41(3):116-126.

YAN Hai, JIA Bo-hao. Setting of curbside parking reserved-parking spaces based on DFS algorithm[J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition), 2021, 41(3): 116-126.

DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2021.03.012

基于 DFS 算法的路内停车预约车位设置方法

严海,贾博浩

(北京工业大学 北京市交通工程重点实验室,北京 100124)

摘要:为充分研究预约停车位设置方法对路内停车巡航时间的影响,根据深度优先搜索(depth first search,DFS)算法设计了停车寻位的流程、设计仿真运行程序以及仿真的一般场景,提出了包含节约巡航时间比例、服务车辆数、总停车时长、平均停车时长 4 项指标的预约停车位设置方案的模糊综合评价方法。仿真案例基于 DFS 算法,根据出行者对于停车预约系统及停车位置选择偏好,设置仿真停车时所需参数以及仿真算图,共设计 20 组仿真方案和 2 组对照方案,得到各方案下各类车辆的巡航时间。结果表明:随着预约停车位比例增加,预约车辆平均巡航时间节约比例最高达 21.6%,服务预约车辆数增加,但总服务车辆数并未保持上升趋势,总停车时长逐渐下降,同时平均停车时长无明显变化;预约停车位置设置不同(近目的地或远目的地),对于巡航时间有显著影响。各方案为优的隶属度最高为 0.68,即 80%预约停车位比例,最外侧设置 4 个预约停车位,解得为案例场景最优方案;相同比例预约停车位,设置一定数量最外侧预约停车位方案具有较高评价价值。该研究验证了预约车位位置和比例对停车效率的影响,并得到在当前场景以及选择模型下预约停车位设置最优方案。

关键词:交通工程;路内停车;预约优化;DFS 算法;仿真模拟

中图分类号:U491.7

文献标志码:A

文章编号:1671-8879(2021)02-0116-11

Setting of curbside parking reserved-parking spaces based on DFS algorithm

YAN Hai, JIA Bo-hao

(Beijing Key Laboratory of Traffic Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: In order to fully study the influence of the setting method of reserved parking space on the cruising time of in-road parking, the flow of parking search was designed based on the depth first search algorithm (DFS). A method of allocation of reserved parking spaces based on fuzzy comprehensive evaluation was proposed, which included the saving ratio of cruising time, the number of vehicles, the total parking time and the average parking time. The simulation case was based on the preferences of the traveler for parking booking system and parking location, the parameters needed for simulation parking, with different proportions and positions of 20 simulation schemes and 2 control schemes were setted. The cruising time of various vehicles under

收稿日期:2020-12-19

基金项目:国家自然科学基金项目(71971005)

作者简介:严海(1977-),女,上海市人,副教授,工学博士,E-mail: yhai@bjut.edu.cn.

each scheme was obtained. The results show that the proportion of reserved parking spaces increases, the cruising time saving ratio of reserved vehicles decreases, and the maximum ratio reaches 21.6%. The cruising time saving ratio of all vehicles increase, and the number of vehicles with service reservations increases, but the number of total service vehicles does not maintain an upward trend, and the total parking time gradually decrease, with no significant change in the average parking time. The excellent membership of each scheme is 0.68, as 80% of the parking space is reserved, and 4 parking spaces are set at the outermost, which is the optimal solution for the case scenario. With the same proportion of reserved parking spaces, setting a certain number of the outermost reserved parking spaces has a high evaluation value. This study verify that the location and proportion of reserved parking spaces have an impact on cruising time and parking efficiency. The optimal scheme for reserving a parking space under the current scenario and the selection model is obtained. 8 tabs, 13 figs, 30 refs.

Key words: traffic engineering; on-street parking; reservation optimization; DFS algorithm; simulation

0 引言

随着城市私家车保有量的不断提高,机动车停车位供给不足问题日益凸显,加之停车位使用效率不高,造成当前停车难^[1]、违章停车^[2]等问题。在城市用地紧张的情况下,大规模增加停车位供给并不现实,因此,提高停车位使用效率是解决停车难问题的关键。

传统停车场管理以人工为主,专业化低、小散乱且智能化水平较低^[3]。无法有效诱导车辆寻泊^[4],导致用户停车耗时长、停车场车位不能高效利用。随着停车智能化的发展,采用计算机和通讯技术,整合停车泊位资源,提供泊位信息和实现泊位预定功能,可达到提升泊位利用效率,减少用户巡航时间的效果^[5]。目前中国智能停车管理系统研究主要为用户信息需求、管理系统框架、管理手段等^[6-7]。吴青林等设计了基于手机移动终端的城市智能停车引导系统的模型,解决有限资源的分配问题并减少用户的交易时间^[8]。陈杰等针对出行者寻找停车位的问题,分析了用户出行需求,构建了基于用户出行需求控制,旨在减少私家车出行需求总量的停车预约平台,提出了该系统总体结构设计和功能实现框架,并结合手机APP进行停车泊位预定,减少停车需求矛盾,使停车预约不成功的私家车出行者放弃私家车出行或者采取换乘的方式前往目的地,该研究具有重要的现实意义和发展前景^[9-10]。李扬威等以系统整合为目标,重点研究了智能停车系统的主要功能,并提出了系统的逻辑架构、物理架构、系统组成和功能实现的技术方法^[11-13]。该系统为解决城市停车

难问题提供了一种可靠途径。孙红霞等提出了停车场停车诱导信息配置优化模型,并通过实例计算指出,停车诱导信息配置优化模型所设置的道路信息诱导系统可从城市整体停车场服务区域内提高各停车场空闲停车泊位的利用率,优化停车需求者在高峰期间的车流合理停放分布^[14-16]。尹露等研究了新加坡的城市智能交通管理系统,全面介绍了新加坡智能交通系统以及基于该系统的交通管理情况^[17]。张泽建等基于停车管理的现状,提出了新一代智能停车整体解决方案,将室内停车与路边停车完美结合,在智能停车管理平台上实现统一管理^[18]。江浩斌等针对自动泊车系统利用视觉方法识别车位线的需求,提出了一种基于图像梯度和高斯加权余弦距离的车位线识别算法,实现了对不同工况下多种车位的识别,具有识别速度快、不易受光照和路面裂纹等因素影响的优点^[19]。

国外学者主要开展停车巡航时间、智能停车管理系统可行性以及在智能停车管理系统下节约巡航时间比例研究。Van Ommeren等研究了可以减少停车巡航时间的政策,研究表明巡航停车不是随机的,并且随着行驶时间和停车时间的增加而增加,巡航在不同时间具有不同的特性,可以考虑通过对停车位灵活定价行为以及改建停车位信息减少巡航时间^[20]。Liu等研究发现,适当将预留车位和未预留车位结合起来,可以分散早晨通勤者的出行时间,从而降低他们的总出行成本^[21]。Carvalho等通过设置一种在线管理停车位的系统,消除了导致停车巡航的不确定性因素,并利用仿真系统验证该系统的有效性,证明了带有预约停车方案的有效性^[22]。Jin

等提供了一种通用的用来评估巡行时间节省的方法,基于概率论和宏观停车模型,对具有和不具有智能停车管理系统的巡航条件进行了仿真,且通过比较这 2 组条件,可以估计总的节约巡航时间比例^[23]。Behrang 等从多个角度考虑了影响巡航时间的因素,结果表明出行目的会对巡航时间造成影响,同时验证了实时停车信息的必要性^[24]。

关于停车场评价方面的研究,李进龙等建立 3 种组合评价模型:基于综合权重的层次分析法、基于综合权重的模糊综合评价法和基于综合权重的灰色关联分析法,并对路内停车场类别进行排序调整^[25]。白锐等初步探索建立了公共停车场后评价指标体系,并采用模糊综合评价方法对公共停车场建设项目进行后评价研究^[26]。

综上所述,现有研究大多是对停车预约系统框架的构想和研究,但智能停车系统对于停车效率的解决,以及实际产生的驾驶人或停车场的收益方面的研究相对较少。现有研究表明预约停车系统会提高停车效率以及停车位利用率,减少停车巡航时间,并且已有较为成熟的巡航时间计算方法。路内停车通常满足短时停车需求,并不适合全部设置为预约停车位,预约停车位的具体位置设置对于驾驶人巡航时间有直接影响,并且会间接影响到服务车辆数、总停车时长等评价停车场指标。因此,设置多少预约车位,在什么位置设置预约车位是一个需要定量讨论的问题。

本文在借鉴他人研究的基础上,运用深度优先搜索(DFS)算法建立仿真模型,对路内预约停车位设置方法进行研究,分析不同设置方案对巡航时间、服务车辆数、总停放时长、平均停放时长 4 项指标的影响,并通过模糊综合评价法对各预约停车位设计方案进行评价,研究其对预约停车系统效率的影响,得到最优预约停车位设置方案。

1 影响停车效率的主要因素分析

效率通常指单位时间完成的工作量。停车效率可以从驾驶人效率和停车场效率 2 个角度进行阐述。在路内停车时,影响驾驶人效率主要是巡航时间、缴费时间等^[27],影响停车场使用效率的是停车场服务车辆数、车辆总停车时长以及平均停车时长^[25]等指标。因此,在预约车位设置时,可以从这两方面指标进行考虑。

出行者由于行程不确定或其他因素,并不会在出行时均选择进行停车预约。使用预约的出行者,

在预约时间到达停车场后,可以在预约车位停放,其巡航时间将缩短;不使用预约的出行者到达停车场时,可能会无空余停车位,这时需巡航或等待空余停车位,也可驶离该停车场,寻找其他停车场,巡航时间将增加。同时,提高预约车位比例,尽管会减少预约出行者巡航时间,但对于停车场服务车辆数、车辆总停车时长却不一定是正相关关系。因此,需要从设置不同比例的预约车位角度探讨其对停车效率的影响。

路内停车位沿道路通常呈单列纵向或成角度布局,通过调查发现,出行者选择预期停车位停车通常分为以下 2 种情况:第 1 种为司机偏好近目的地车位停车;第 2 种为司机偏好在其行驶方向上的第 1 个空车位停车。在无预约条件下,2 种行为偏好会对巡航时间产生不同的影响。第 1 种偏好下,可能出现错过远处空车位,而近处无空车位,需绕行返回二次择位停车。第 2 种偏好下,可能会产生 2 种结果:有空车位,直接停车;无空车位,选择换其他停车场停车。因此,预约车位位置设置也对停车效率有着直接的影响。

综合上述分析,本文将从比例和位置 2 个角度讨论预约车位设置问题。

2 场景设置

2.1 道路场景假设

本文使用 Python 软件搭建路内预约停车设置仿真试验场景,如图 1 所示,该场景包括 3 类要素:吸引点、停车位和生成车辆。场景设置为远位置停车位 k 个;近位置停车位 $(n-k)$ 个, n 为停车位数; A 为停车吸引点。可通过对不同试验方案下停车效率评价指标计算,得到最优的预约车位设置方案。

2.2 要素属性设置

吸引点 A 位于路侧,该点为出行者停车后的目的地。停车位:场景设置了 $2n$ 个路内停车位,在吸引点 A 两侧对称布置。每个停车位都赋予 3 个属性,分别为位置属性,远/近停车位(相对于吸引点 A),其中远位置停车位共 $2k$ 个,近位置停车位共 $2(n-k)$ 个;预约属性,是/否预约停车位;相对行驶方向属性,停车位根据车辆行驶方向分为前/后半段。生成车辆属性如表 1 所示。

2.3 停车过程的时长表达

仿真系统在运行过程中,每辆车按相同步骤寻找停车位并完成停车过程,每一步骤对应时长取值

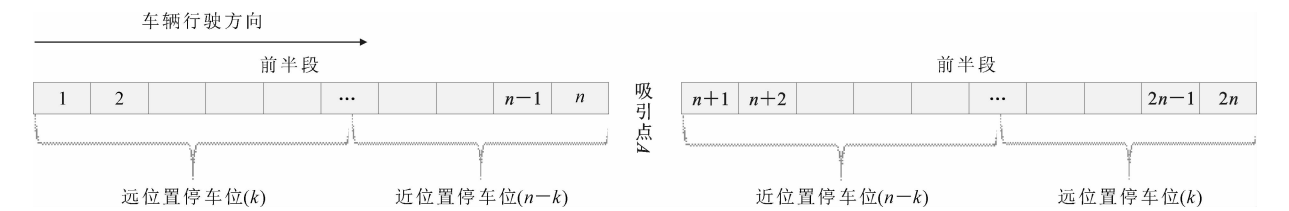


图 1 道路场景假设

Fig. 1 Road scenario hypothesis

表 1 生成车辆属性

Tab. 1 Properties of generate vehicle

参数	参数描述
N_i^s	车辆序号为 i 的生成车辆
R_p	是否预约车辆;非预约车辆取 0;预约车辆取 1
R_d	对停车位位置有无要求;无要求取 0;有要求取 1

不全为常量,应结合具体的停车过程去标定,如表 2 所示。

表 2 仿真系统车辆停车过程的时长参数

Tab. 2 Vehicle movement time parameters in simulation system

参数	参数描述
T_{mol}/s	第 i 辆车寻位时,每通过 1 个车位的时间
T_y/s	寻位过程中,第 i 辆车无法找到空停车位,去其他区域寻位的时间
T_{back}/s	寻位过程中,当第 i 辆车 2 次巡游在该停车位区域再次寻找空车位的时间,即车位车辆从 20 号车位重新回到 1 号车位的所需时间
T_{gap}/min	第 i 辆车停车结束后, $i+1$ 辆车出现的生成间隔
T_{stop}/s	车辆在停车位停放时间的生成区间

2.4 结果输出

通过仿真试验,可以得到 2 类输出结果,见表 3,一类是车辆停放属性,另一类是停车位信息。

表 3 输出结果

Tab. 3 Output results

输出结果	数据描述
车辆属性	N_i^{cs} 第 i 辆车停放的车位编号,区间为 $[1,20]$
	t_i/s 系统生成第 i 辆车的时间
	T_i^{stop}/s 第 i 辆车停放时长
	T_i^s/s 第 i 辆车巡航花费时间
停车位信息	P_k 第 k 个($k=1,2,\dots,20$)停车位的信息
	$N_k^p/辆$ 系统运行时间内,第 k 个停车位停放过车辆数
	O_k 第 k 个停车位被占用时间与系统运行时间之比
	$N_s/辆$ 所有停车位一共服务车辆总数

3 车辆寻位算法

路内停车过程可视为一种搜索过程,即车辆在道路一侧向前行驶,在即将到达目的地时,开始寻找可用停车位。从第 1 个停车位开始,驾驶人会按照对于停车位的期望开始逐步判断停车位是

否为空停车位、是否为预约停车位、距离目的地远近等,若按顺序逐一匹配后发现某一项并不满足标准,则继续行驶至下一停车位继续逐一匹配,直到找到匹配停车位。所以仿真模型中使用搜索算法进行仿真较为合理且符合实际的停车过程。

一般的搜索算法包括 DFS,广度优先搜索、A* 算法、回溯算法、蒙特卡洛树搜索、散列函数算法等,每种算法都有其对应的搜索顺序和搜索树,将预计的停车位搜索过程与各类搜索算法相比较,与 DFS 算法相符,所以在仿真模拟中采用 DFS 算法进行停车位搜索^[28]。

3.1 DFS 算法

DFS 算法属于图算法的一种,是图论中的经典算法,是一个针对图和树的遍历算法,利用该算法可以产生目标图的相应拓扑排序表,方便地解决很多相关的图论问题,如最大路径问题等。一般可以用堆数据结构来辅助实现 DFS 算法。

基于 DFS 算法设计仿真系统运行流程如图 2 所示。

步骤 1,系统生成带有 2 种属性的车辆元素。

步骤 2,车辆进入系统中,与 1 号停车位属性匹配。

步骤 3,依次检测停车位属性,是/否空车位、是/否预约停车位、是/否满足位置要求停车位。

步骤 4,若都与车辆属性匹配,则最终找到满意解,记录此车辆输出结果;若不满足任一属性,则车辆与下一停车位属性进行匹配,重复步骤 3,直至匹配到第 $2n-k$ 号停车位。

步骤 5,若车辆到达第 $2n-k$ 号停车位仍不能匹配成功,则后续车辆属性匹配时,仅匹配是/否空车位、是/否预约停车位 2 种属性。

步骤 6,若车辆到达第 $2n$ 号停车位时仍未匹配成功,则出现 2 种情况:

① $2n$ 个停车位中,存在满足是/否空车位、是/否预约停车位 2 种属性的停车位,则车辆返回第 1 个满足 2 种属性停车位停放,并记录输出结果;

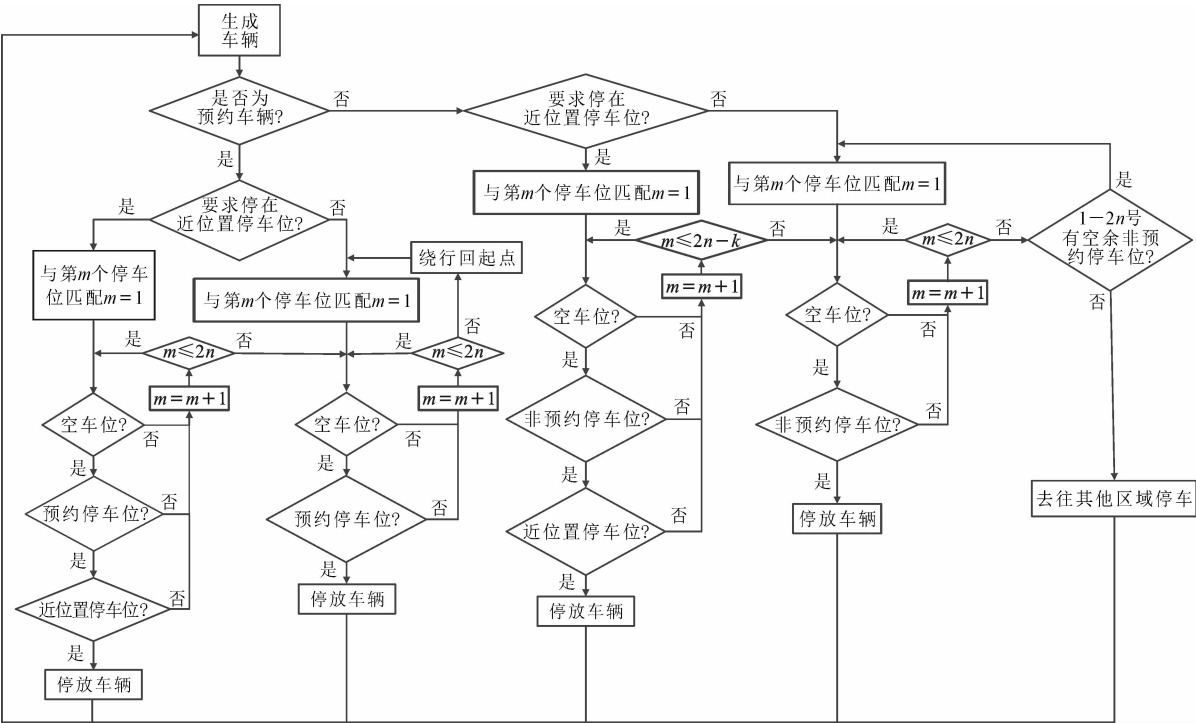


图 2 仿真运行算法
Fig. 2 Simulation operation algorithm

② $2n$ 个停车位中,不存在满足是/否空车位、是/否预约停车位 2 种属性的停车位,则车辆驶离不在此区域中。

步骤 7,更新停车位信息,生成下一车辆元素。

通过上述仿真算法,可以根据输出结果计算得到巡航时间、服务车辆数、总停车时长等评价停车场效率的评价指标。

仿真输出结果如表 4~表 5 所示,表 4 为车辆信息,包含车辆编号、停放停车位编号、生成时间、是否为预约车辆、对停车位是否有要求、停放时长以及巡航时间;表 5 为停车位信息,包含停车位编号、停放车辆数以及停车位使用率。

表 4 仿真结果(车辆信息)

车辆编号	1	2	3
停放停车位编号	7	8	1
生成时间/s	0	253	509
是否为预约车辆	0	0	0
对停车位是否有要求	1	1	0
停放时长/s	4 674	5 677	3 575
巡航时间/s	14	16	2

3.2 评价模型

3.2.1 评价指标选取

通过前述对停车效率影响因素的分析,选取节约巡航时间比例、服务车辆数、总停车时长、平均停

表 5 仿真结果(停车位信息)

Tab. 5 Simulation results (parking space information)

停车位编号	停放车辆数	停车位使用率
1	5	0.914 1
2	5	0.917 2
3	5	0.868 6

车时长 4 项指标构建评价指标体系。根据表 3 中 2 类输出结果,可以计算得到相应指标。

(1)节约巡航时间比例 E_c ,指无预约停车位和预约方案下的巡航时间差值与无预约停车位时巡航时间的比,即

$$E_c = \frac{T^z - T^c}{T^z} \tag{1}$$

式中: T^z 为无预约停车位时车辆平均巡航时间; T^c 为各个方案下停在此处路内停车区域车辆平均巡航时间。

计算巡航时间时包括停放在此区域车辆巡航时间以及停放至其他区域车辆巡航时间,停放在此区域车辆又分为绕行车辆和未绕行车辆。

绕行车辆巡航时间 T_i^{dc} 计算为

$$T_i^{dc} = T_{mol} N_i^{cs} + T_{back} + T_{2n} \tag{2}$$

非绕行车辆 i 巡航时间 T_i^{fc} 为

$$T_i^{fc} = T_{mol} N_i^{cs} \tag{3}$$

停放至其他区域车辆巡航时间 T_o 为

$$T_o = T_{2n} + T_y \tag{4}$$

式中: T_y 为车辆驶离此区域去往另一个停车区域停车所需要的时间, 车辆只在此区域无停车位时才选择去往其他区域停车, 所以会驶过全部 $2n$ 个停车位。

(2) 服务车辆数 N_s , 指停车场在工作时段内累计服务车辆数量。

(3) 总停车时长 T_{all} , 指在工作时段内所有机动车累计停放时间, 计算如下

$$T_{all} = \sum_{i=1}^{N_s} T_i^{\text{stop}} \quad (5)$$

(4) 平均停车时长 \bar{t} , 指总停车时长与服务车辆数的比值, 即

$$\bar{t} = \frac{\sum_{i=1}^{N_s} T_i^{\text{stop}}}{N_s} \quad (6)$$

3.2.2 综合权重

首先对4项指标进行1~9标度打分, 通过层次分析法得到主观赋值权重; 客观赋值权重根据信息熵算法, 通过各指标的信息熵矩阵计算得出。取偏好系数 $\mu=0.5$, 通过综合主观赋值权重与客观赋值权重得到各指标的综合权重^[25], 如图3所示。

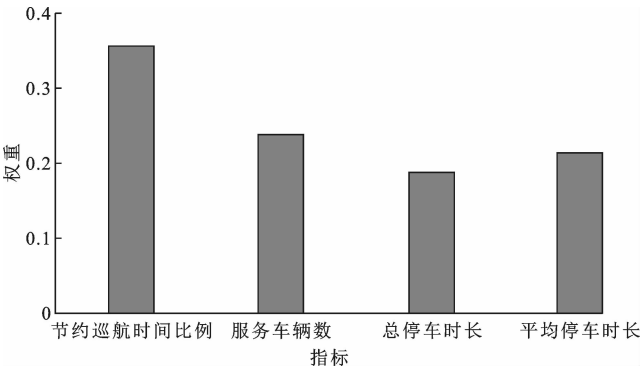


图3 各指标综合权重

Fig. 3 Comprehensive weights of each indicator

3.2.3 基于综合权重的模糊综合评价方法

模糊综合评价法是一种基于模糊数学的综合评价方法, 应用模糊关系合成的原理, 将一些边界不清, 不易定量的因素定量化, 进行综合评价。它具有结果清晰, 系统性强的特点, 能较好地解决模糊的、难以量化的问题。

步骤1, 确定备选对象集 X

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_p\}$$

式中: x_p 为第 p 种方案。

步骤2, 确定因素集 U

$$U = \{u_1, u_2, u_3, u_4\}$$

式中: u_1, u_2, u_3, u_4 分别为节约巡航时间比例, 服务

车辆数, 总停车时长, 平均停车时长。

步骤3, 确定权重矢量 A

$$A = \{0.412, 0.239, 0.122, 0.227\}.$$

步骤4, 确定评价集 V

$$V = \{\text{优}, \text{良}\}.$$

步骤5, 确定评价矩阵 R_{x_p} , 对路内停车场4项评价指标进行隶属度计算

$$R_{x_p} = \frac{(\omega - \omega_{lmin})}{(\omega_{lmax} - \omega_{lmin})} \quad (7)$$

式中: ω_{lmin} 为评价指标 l 的评价等级的下限值; ω_{lmax} 为评价指标 l 的评价等级的上限值; ω 为该参数的数值大小。

步骤6, 合成模糊综合评价结果向量 B : 将评价因素的权重矢量与各种方案的评价矩阵 R 进行模糊合成变换, 即模糊综合评价模型

$$B = AR \quad (8)$$

步骤7, 对模糊综合评价结果向量进行分析。

4 仿真案例

4.1 场景设计

依据《城市道路路内停车泊位设置规范》(GA/T 850—2009)的相关要求^[29], 停车位尺寸一般设计长6 m, 宽2.5 m。本仿真案例将路内停车设置进行简化设计, 假设路内停车设置在支路一侧的中间路段, 共20个路内停车位, 吸引点设定为小型超市, 停车位沿超市两侧对称设置, 靠近超市出入口的8个停车位定义为近位置停车位, 其余12个停车位为远位置停车位。仿真场景示意如图4所示。

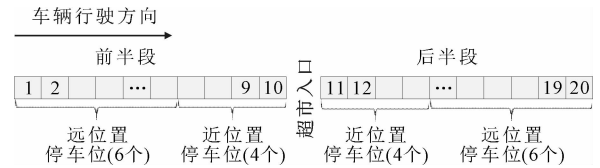


图4 仿真场景示意

Fig. 4 Schematic of simulation scenario

4.2 方案设计

仿真试验通过输入预约停车位设置方案, 得到每种方案下车辆巡航时间、总停车时长以及服务车辆数等输出结果。

方案设计原则是将不同比例预约停车位分别设置在远/近位置停车位区域, 考虑到预约停车位用户优先服务的原则, 将远位置停车位分为最外侧与非最外侧2种情况。

参考文献^[24]得知, 预约停车位应不少于40%, 故设置40%~80%预约停车位比例为试验组, 0%

与 100% 预约停车位比例 为 对照 组。所有 仿真 方案 设计 如 表 6 所示。

表 6 仿真方案设计

Tab. 6 Simulation scheme design

方案编号	预约停车位比例/%	停车位置设置	停车位个数设置
1	40	最外侧预约	4
2		最外侧预约	0
3		最外侧非预约	4
4	50	最外侧预约	6
5		最外侧预约	4
6		最外侧非预约	6
7	60	最外侧预约	8
8		最外侧预约	6
9		最外侧预约	4
10		最外侧非预约	4
11	70	最外侧非预约	8
12		最外侧预约	10
13		最外侧预约	8
14		最外侧预约	6
15		最外侧预约	4
16	80	最外侧非预约	6
17		最外侧预约	12
18		最外侧预约	8
19		最外侧预约	4
20		最外侧非预约	4
21	0		
22	100		

4.3 参数标定

车辆在巡航时会保持较低的行驶速度,设置车辆行驶过一个停车位的时间为 2 s(车辆以 10 km/h 的速度驶过 6 m 的距离)。车辆从 20 号车位回到 1 号车位的所需时间应等于调头时间(20 s)与车辆驶过 20 个停车位的时间(2 s×20)之和为 60 s。为与停在此区域车辆巡航时间相区别,车辆去往其他区域寻找停车位的时间取 100 s,本文对 231 位出行者进行了问卷调查,获得 209 份有效样本,得到出行者以超市为出行目的停车时长区间在[1 200 s,7 200 s]之间。可以得到仿真场景的部分参数标定结果如表 7 所示。

表 7 参数标定

Tab. 7 Parameters calibration

参数	T_{mol}/s	T_y/s	T_{back}/s	T_{gap}/min	T_{stop}/s
参数值	2	100	60	4	[1 200,7 200]

4.4 仿真结果分析

对 22 种方案分别进行了 5 次试验,对试验结果进行了方差计算,证明相关结果具有稳定性。

4.4.1 巡航时间

(1)预约车辆巡航时间

图 5 为各方案预约车辆巡航时间,从图 5 可以看出,随预约停车位设置比例增加,预约车辆巡航时间整体呈减少趋势,巡航时间最少为方案 19 的 16.7 s。

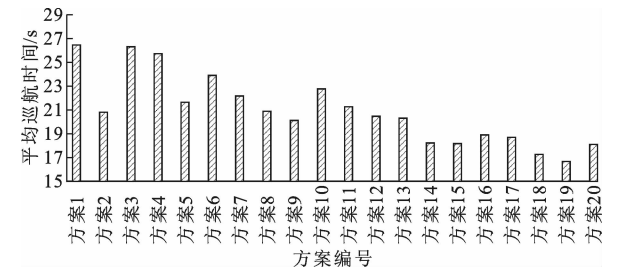


图 5 各方案预约车辆巡航时间
Fig. 5 Reserved vehicle cruising time for each program

(2)非预约车辆巡航时间

图 6 为所有非预约车辆巡航时间,由图 6 可知:所有非预约车辆巡航时间随预约停车位比例增加整体呈上升趋势,增加幅度较大,巡航时间最多为方案 19 的 83 s;但停在此区域的非预约车辆巡航时间在预约停车位比例达到 60% 后趋于稳定(20~23 s),且都低于无预约停车位时车辆巡航时间(已知当预约停车位比例为 0% 时,所有停放车辆巡航时间为 23.6 s),如图 7 所示。

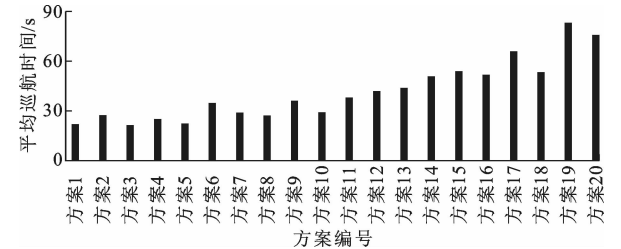


图 6 所有非预约车辆巡航时间
Fig. 6 Cruise time of all non-reserved vehicles

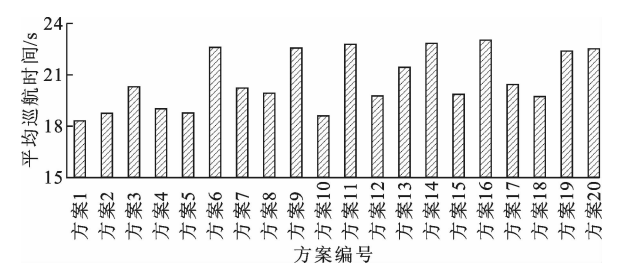


图 7 停在此区域非预约车辆巡航时间
Fig. 7 Cruise time of non-reserved vehicles parked in this area

(3)停放在此区域车辆巡航时间

图 8 为停放在此区域车辆巡航时间。可见所有停放在此停车区域车辆巡航时间也呈减少趋势,巡

航时间最少为方案 18 的 18.3 s。所有方案巡航时间均小于无预约停车位时车辆巡航时间,说明预约停车系统可以有效减小车辆巡航时间。

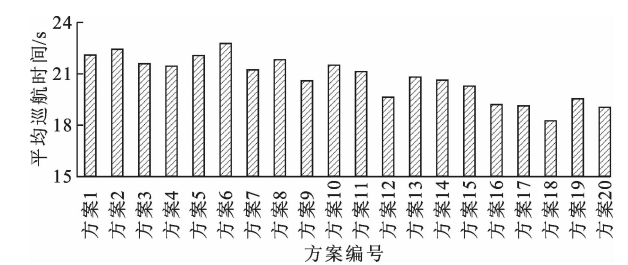


图 8 停放在此区域车辆巡航时间

Fig. 8 Vehicle cruising time parked in this area

(4) 总生成车辆巡航时间

仿真试验生成的所有车辆巡航时间随预约停车位比例增加呈上升趋势,如图 9 所示,随预约停车位比例增加,行驶至其他停车区域停放的车辆增加,总巡航时间增加。

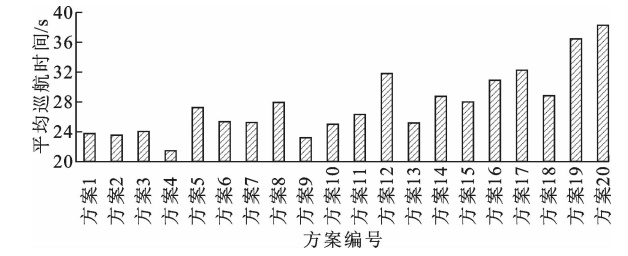


图 9 所有车辆巡航时间

Fig. 9 Cruising time of all vehicles

(5) 节约巡航时间比例

节约巡航时间比例通过式(1)计算得到,各方案节约巡航时间比例计算结果如图 10 所示。由图 10 可知:70%、80%预约比例停车位均具有较高的节约巡航时间比例;其中,预约停车位比例从 70%开始,相同设置原则方案的节约巡航时间比例已达到稳定状态,没有太大程度提升;方案 22 为 100%预约停车情况,节约巡航时间比例甚至出现下降情况。

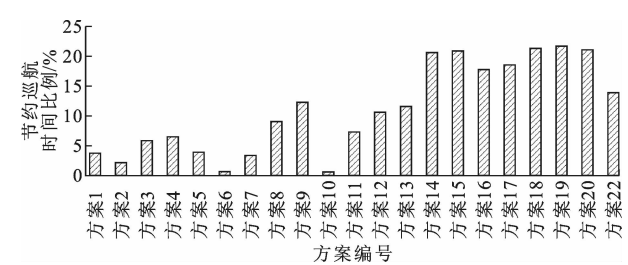


图 10 节约巡航时间比例

Fig. 10 Saving ratios of cruise time

4.4.2 服务车辆数

图 11 为服务预约车辆数与服务总车辆数。由

图 11 可知:随预约停车位比例增加,服务预约车辆数呈上升趋势,服务预约车辆数最多为 52 辆(方案 18),服务最多车辆数为 82 辆(方案 5);预约停车位比例达到 60%时趋于平稳(48~52 辆),说明预约停车位设置比例增加会服务更多预约车辆,但对停车场效益影响不大。故 $w_{2\max}$ 取 82 辆(方案 5), $w_{2\min}$ 取 65 辆(方案 19)。

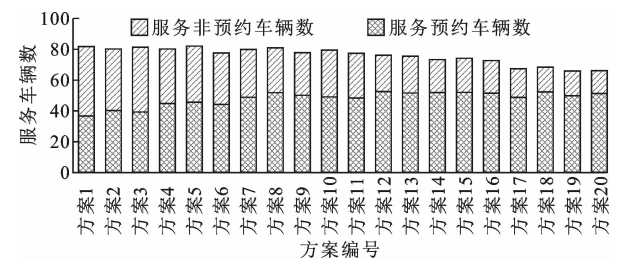


图 11 服务预约车辆数与服务总车辆数

Fig. 11 Number of vehicles reserved for service and total number of vehicles served

4.4.3 总停车时长

根据式(5)计算各方案停在此区域车辆总停车时长,结果如图 12 所示。可见,随预约停车位比例增加,总停车时长呈下降趋势,其中 $w_{3\max}$ 为 5 588.55 min(方案 1), $w_{3\min}$ 为 4 096.03 min(方案 20)。

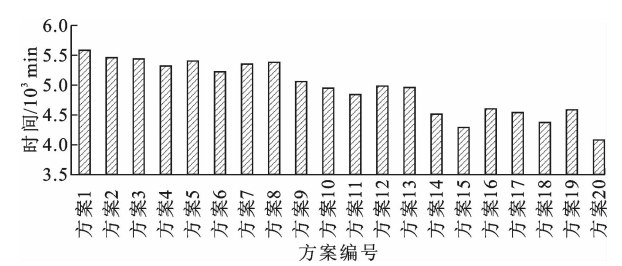


图 12 各方案总停车时长

Fig. 12 Total parking time of each scheme

4.4.4 平均停车时长

通过式(6)计算各方案平均停车时长,如图 13 所示,其中 $w_{4\max}$ 取 70.22 min(方案 19), $w_{4\min}$ 取 58.15 min(方案 15)。

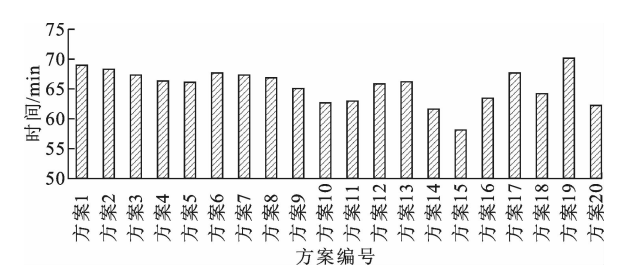


图 13 各方案平均停车时长

Fig. 13 Average parking time of each scheme

4.5 模糊综合评价

根据式(7)计算各评价指标隶属度可得各类指标的评价矩阵 R_{x_p} 如下

$$R_{x_1} = \begin{bmatrix} 0.148 & 0.852 \\ 0.963 & 0.037 \\ 1.000 & 0.000 \\ 0.899 & 0.101 \end{bmatrix}$$
$$R_{x_2} = \begin{bmatrix} 0.071 & 0.929 \\ 0.889 & 0.111 \\ 0.913 & 0.087 \\ 0.850 & 0.150 \end{bmatrix} \dots$$

$$R_{x_{19}} = \begin{bmatrix} 0.969 & 0.031 \\ 0.000 & 1.000 \\ 0.332 & 0.668 \\ 1.000 & 0.000 \end{bmatrix}$$
$$R_{x_{20}} = \begin{bmatrix} 0.148 & 0.852 \\ 0.025 & 0.975 \\ 0.000 & 1.000 \\ 0.340 & 0.660 \end{bmatrix}$$

表 8 各方案评价隶属度

Tab. 8 Evaluation memberships of each program

方案编号	优	良	方案编号	优	良
1	0.617	0.383	11	0.452	0.548
2	0.546	0.454	12	0.566	0.434
3	0.576	0.423	13	0.576	0.424
4	0.585	0.415	14	0.608	0.392
5	0.561	0.439	15	0.540	0.460
6	0.448	0.552	16	0.582	0.418
7	0.536	0.464	17	0.593	0.407
8	0.656	0.344	18	0.584	0.416
9	0.620	0.380	19	0.680	0.320
10	0.375	0.625	20	0.482	0.518

根据模糊分布原则,各方案的隶属度见表 8,可见方案 19(80%预约停车位比例,最外侧设置 4 个预约停车位)为最优方案。

5 结 语

(1)随着预约停车位比例增加,预约车辆平均巡航时间减少,节约比例最高达 21.6%;服务预约车辆数增加,但总服务车辆数并未保持上升趋势;总停车时长逐渐下降,同时平均停车时长无明显变化;预约停车位位置设置不同(近目的地或远目的地)对于巡航时间有显著影响。

(2)不同停车区域间的综合预约停车位设计,以及大型停车场内预约停车位设计方法需要更加复杂的仿真算法和选择决策模型来实现。本文只讨论了路内停车场预约停车位设计方案,在仿真算法中加入不同位置停车位的价格因素影响^[30]是下一步的研究方向。

参考文献:

References:

[1] 北京交通发展研究院. 2017 年北京交通发展年报

[M]. 北京:北京交通发展研究院,2017.

Beijing Transportation Development Research Institute. Beijing transportation development annual report 2017[M]. Beijing: Beijing Transportation Development Research Institute,2017.

[2] 季彦婕,高良鹏,陈丹丹,等. 基于博弈理论的弹性停车激励机制运营效益评估模型[J]. 交通运输工程学报,2019,19(4):161-170.

Ji Yan-jie, GAO Liang-peng, CHEN Dan-dan, et al. Operational benefit evaluation model of flexible parking incentive mechanism based on game theory[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2019,19(4):161-170.

[3] ETCP 智慧停车产业研究院. 2017 年中国智慧停车行业大数据报告[M]. 北京:ETCP 智慧停车产业研究院,2017.

ETCP Smart Parking Industry Research Institute. Big data report of China's smart parking industry in 2017 [M]. Beijing:ETCP Smart Parking Industry Research Institute,2017.

[4] 王建军,金书鑫,李维佳,等. 多方综合效益最大化的社会公共停车场停车收费定价方法[J]. 交通运输工程学报,2017,17(2):126-135.

WANG Jian-jun, JIN Shu-xin, LI Wei-jia, et al. Parking pricing method of public parking lots based on multi-aspect comprehensive benefit maximization[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2017,17(2):126-135.

[5] 张 益,杨 桦,索彦彦. 城市智能停车联网平台[J]. 现代电子技术,2015,38(13):156-159,162.

ZHANG Yi, YANG Hua, SUO Yan-yan. Urban intelligent parking networking platform[J]. Modern Electronic Technology, 2015,38(13):156-159,162.

[6] 何惠倩,张瑞秋,孙 炜,等. 基于霍尔三维模型的智能停车系统设计[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2019,44(6):1675-1682.

HE Hui-qian, ZHANG Rui-qiu, SUN Wei, et al. Design of intelligent parking system based on Hall 3D model[J]. Journal of Guangxi University(Natural Science Edition)2019,44(6):1675-1682.

[7] 张水潮,蔡逸飞,黄 锐,等. 基于预约需求的共享停车平台泊位分配方法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2020,20(3):137-143,162.

ZHANG Shui-chao, CAI Yi-fei, HUANG Rui, et al. Berth allocation method of shared parking platform

- based on reservation demand[J]. Journal of Transportation System Engineering and Information Technology, 2020, 20(3): 137-143, 162.
- [8] 吴青林, 周天宏. 基于移动终端预约的城市智能停车引导系统研究[J]. 现代电子技术, 2016, 39(4): 12-15.
- WU Qing-lin, ZHOU Tian-hong. Research on urban intelligent parking guidance system based on mobile terminal reservation[J]. Modern Electronic Technology, 2016, 39(4): 12-15.
- [9] 陈杰, 胡郁葱, 黄靖翔, 等. 基于用户出行需求的停车预约系统设计[J]. 公路与汽运, 2017(6): 38-41.
- CHEN Jie, HU Yu-cong, HUANG Jing-xiang, et al. Design of parking reservation system based on users' travel needs[J]. Highway and Automobile Transportation, 2017(6): 38-41.
- [10] 贺康康, 任刚. 动态停车预约收费条件下的出行行为选择研究[J]. 交通运输工程与信息学报, 2020, 18(1): 53-60.
- HE Kang-kang, REN Gang. Study on travel behavior choice under dynamic parking reservation pricing[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2020, 18(1): 53-60.
- [11] 李扬威, 焦朋朋, 杜林. 城市智能停车管理系统研究[J]. 交通信息与安全, 2014, 32(4): 160-164.
- LI Yang-wei, JIAO Peng-peng, DU Lin. Research on urban intelligent parking management system[J]. Traffic Information and Safety, 2014, 32(4): 160-164.
- [12] 刘鑫, 赵梦彤, 张加民, 等. 智能车位预定与场内停车导航系统的设计与开发[J]. 智能城市, 2018, 4(9): 1-4.
- LIU Xin, ZHAO Meng-tong, ZHANG Jia-min, et al. Design and development of intelligent parking space reservation and parking navigation system[J]. Intelligent City, 2018, 4(9): 1-4.
- [13] 季彦婕, 王炜, 邓卫. 基于模糊逻辑的停车泊位预约实时决策方法[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2010, 38(10): 100-104.
- JI Yan-jie, WANG Wei, DENG Wei. A real-time decision-making method for parking berth reservation based on fuzzy logic[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2010, 38(10): 100-104.
- [14] 孙红霞. 北京荟聚商场大型停车场交通组织优化设计[J]. 交通与运输, 2019, 35(6): 18-20.
- SUN Hong-xia. Beijing Huiju large parking lot traffic organization optimization design [J]. Traffic and Transportation, 2019, 35(6): 18-20.
- [15] 席建中. 物联网停车场车位信息发布及预约停车装置[J]. 计算机应用, 2014, 34(增1): 306-308.
- XI Jian-zhong. Internet of things parking information release and reservation parking device[J]. Computer Applications, 2014, 34(S1): 306-308.
- [16] 杨兆升, 陈晓冬. 智能化停车诱导系统有效停车泊位数据的预测技术研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2003, 3(4): 12-15.
- YANG Zhao-sheng, CHEN Xiao-dong. Research on prediction technology of effective parking data of intelligent parking guidance system [J]. Journal of Transportation System Engineering and Information Technology, 2003, 3(4): 12-15.
- [17] 尹露, 宋晓鹏, 郑纲. 新加坡城市智能交通管理系统[J]. 交通与运输, 2018, 34(1): 12-14.
- YIN Lu, SONG Xiao-peng, ZHENG Gang. Singapore urban intelligent transportation management system [J]. Traffic & Transportation, 2018, 34(1): 12-14.
- [18] 张泽建, 王晓东, 张斐. 智能停车管理系统研究[J]. 物流技术, 2018, 37(6): 139-141, 155.
- ZHANG Ze-jian, WANG Xiao-dong, ZHANG Fei. Research on intelligent parking management system [J]. Logistics Technology, 2018, 37(6): 139-141, 155.
- [19] 江浩斌, 王成雨, 马世典, 等. 基于图像梯度匹配的自动泊车系统车位识别方法[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2020, 41(6): 621-626.
- JIANG Hao-bin, WANG Cheng-yu, MA Shi-dian, et al. Parking space recognition method of automatic parking system based on image gradient matching[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2020, 41(6): 621-626.
- [20] VAN OMMEREN J N, DERK W, PIET R. Empirical evidence on cruising for parking[J]. Transportation Research Part A, 2012, 46: 123-130.
- [21] LIU W, YANG H, YIN Y F. Expirable parking reservations for managing morning commute with parking space constraints[J]. Transportation Research Part C, 2014, 44: 185-201.
- [22] CARVALHO E F D, DE ABREU E S J. Tackling cruising for parking with an online system of curb parking space reservations[J]. Case Studies on Transport Policy, 2017, 5: 179-187.

- [23] JIN C, MONICA M. Quantification of potential cruising time savings through intelligent parking services [J]. *Transportation Research Part A*, 2018, 116: 151-165.
- [24] BEHRANG A, DOUGLAS B, ALEXANDER P. Searching for on-street parking: An empirical investigation of the factors influencing cruise time[J]. *Transport Policy*, 2020, 97: 186-196.
- [25] 李进龙, 鲍鸿庆, 张奕源, 等. 基于组合评价模型的城市路内停车场类别调整研究[J]. *交通运输工程与信息学报*, 2019, 17(1): 79-86, 116.
LI Jin-long, BAO Hong-qing, ZHANG Yi-yuan, et al. Study on the type adjustment of urban road parking lot based on the combined evaluation model[J]. *Journal of Transportation Engineering and Information*, 2019, 17(1): 79-86, 116.
- [26] 白 锐, 向 超, 李 量. 基于模糊综合评价法的山地城市停车场后评价研究[J]. *城市建设理论研究(电子版)*, 2017(34): 84-85.
BAI Rui, XIANG Chao, LI Liang. Research on post-evaluation of parking lots in mountain cities based on fuzzy comprehensive evaluation method [J]. *Urban Construction Theory Research (Electronic Version)*, 2017(34): 84-85.
- [27] 王 灏, 李瑞敏, 刘志勇. 基于前景理论的机动车路内停车行为研究[J]. *交通信息与安全*, 2018, 36(6): 123-129.
WANG Hao, LI Rui-min, LIU Zhi-yong. Research on parking behavior of motor vehicles in road based on prospect theory [J]. *Traffic Information and Safety*, 2018, 36(6): 123-129.
- [28] 胡 媛, 魏宗寿. 采用 DFS 策略的进路搜索算法研究[J]. *铁路计算机应用*, 2007, 16(9): 4-6.
HU Yuan, WEI Zong-shou. Research on approach search algorithm using DFS strategy [J]. *Railway Computer Application*, 2007, 16(9): 4-6.
- [29] GA/T 850—2009, 城市道路路内停车泊位设置规范[S].
GA/T 850—2009, Code for parking spaces on urban roads[S].
- [30] 孙振东, 张生瑞, 李 运, 等. 停车换乘与路票交易组合措施下居民出行特性建模分析[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2018, 38(3): 88-96, 106.
SUN Zhen-dong, ZHANG Sheng-rui, LI Yun, et al. Analysis of travel characteristics under combination of TCS and P & R [J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2018, 38(3): 88-96, 106.