

考虑路段容量降级的均衡流模式研究

况爱武, 张胜伟, 覃定明

(长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 为探究降级路网和非降级路网两种情形下交通网络流量的波动情况及演化规律, 通过均匀分布来刻画路段容量的随机变化, 在此基础上构建降级路网下基于传统路径更新规则的更新模型, 该模型利用前一天使用路径的实际出行时间和前一天感知路径出行时间期望值来更新, 并通过算例分析依赖参数和容量降级系数对降级路网交通流演化的影响。结果表明, 降级路网和非降级路网下交通网络均能演化至稳定状态, 但均演化不到随机用户均衡状态; 相较于非降级路网, 降级路网下交通网络演化至稳定状态所消耗的时间更长。

关键词: 公路交通; 网络交通流; 交通流演化; 降级路网; 路径选择; 随机用户均衡

中图分类号: U491

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2019)06-0018-05

实际出行过程中, 出行者主要通过信息系统发布的信息及自身积累的历史经验获取交通信息, 两者的区别在于出行经验通过逐日路径选择获得, 而信息系统可提供完全历史信息及预测信息等多种形式的信息。学者们针对诱导信息对交通流网络演变规律的影响开展了大量研究, 如刘天亮等采用多智能体技术分析了信息公开和不公开情况下交通流演化规律; 度巍等依据出行者遵从交通信息的程度将其分成保守和乐观两类, 并在需求发生弹性变化的情况下研究了交通流网络演变规律; 刘诗序等分析了预测信息作用下出行者进行逐日路径抉择的行为及整个路网系统演变的规律; 阎昊等研究了 ATIS (出行者信息系统) 的市场占有率对网络交通流逐日动态演化的影响; 鲍婷婷等分析了出行预测信息对个体出行者路径选择行为的作用及对整个路网交通流演化过程的影响; Zhou B. J. 等考察了精准 ATIS 市场渗透率下交通流逐日动态演化的过程; Paolo Delle Site 考虑到获得交通信息的来源不同, 将出行者分成具有预测信息的用户、具有 ATIS 提供的历史出行信息且服从的用户及未配备 ATIS 或配备该装置但未服从的用户, 研究了各类用户在交通网络系统的比例对均衡出行时间的影响; Han L. H. 等建立 ATIS 网络逐日交通分配模型, 分析了 ATIS 对交通网络系统稳定性的影响。上述研究多针对非降级路网, 但容量降级已成为城市交通系统的新常态, 了解降级路网交通流演化规律对诊断城市交通

问题的症结、科学引导城市交通发展具有重要意义。

近年来, 越来越多的学者开始研究容量降级路网的交通流演化。He X. 等在分析出行者对出行时间“预测—校正”过程的基础上研究了降级路网交通流的演变规律; Gao B. 等建立确定性动态模型来捕捉降级路网路段交通流的逐日演变过程; Lou X. M. 等采用混合随机用户均衡模型描述降级路网上配备和未配备 ATIS 驾驶员之间的交互路径选择行为; 徐红利等建立基于累计前景理论的降级路网交通流逐日演变模型, 该模型考虑了出行者路径选择过程中对参考点的依赖和有限理性特征, 结果表明, 诱导信息准确度越高, 系统能越快到达均衡状态。但没有专门针对路段容量降级的路网及不同降级程度下交通流演化规律开展研究。基于此, 该文构建降级路网下基于传统路径更新规则的更新模型, 以出行者个体为对象, 在容量随机退化的路网上, 运用 MATLAB 对每个出行者的路径选择行为进行模拟仿真, 分析出行者的选择行为及交通流演化规律。

1 降级路网下的路径出行时间

考虑交通网络 $G=(N, A)$, 其中 N 为节点集合, A 为路段集合。设 W 为 OD 对的集合, R_w 为 OD 对 w 之间路径集合, D_w 为 OD 对 w 的需求。用 C_a 表示路段 a 的实际通行能力, 假定路段 a 的通行能力上限为其设计通行能力 c_a^d 、下限为 $\theta_a c_a^d$ (θ_a 为路段容量降级系数, $0 \leq \theta_a \leq 1$), C_a 服从

* 基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(51338002); 智能道路与车路协同湖南省重点实验室资助项目(2017TP1016)

$[\theta_a c_a^d, c_a^d]$ 区间上的均匀分布。为获得降级路网下路径出行时间,选用 BPR 函数作为路段特性函数:

$$T_a(x_a, C_a) = t_a^0 \left[1 + \alpha \left(\frac{x_a}{C_a} \right)^\beta \right], \forall a \in A \quad (1)$$

式中: x_a 为路段 a 上的流量; t_a^0 、 T_a 分别为路段 a 的自由流走行时间及流量为 x_a 时的走行时间; α 、 β 为 BPR 函数的确定性参数。

路段容量 C_a 是随机变化的,而 C_a 是 T_a 的一个随机变量参数,故 T_a 也是随机变化的函数。同时假设路段容量服从均匀分布,其均值表达式为:

$$E(T_a) = t_a^0 + \alpha t_a^0 x_a^\beta \frac{1 - \theta_a^{1-\beta}}{(c_a^d)^\beta (1 - \theta_a)(1 - \beta)}, \quad \forall a \in A \quad (2)$$

设各出行路段的时间不存在相互影响关系,则路径的出行时间可由经过路段出行时间求和得到:

$$S_{rw} = \sum_a T_a \delta_{ar}^w, \forall w \in W, r \in R_w \quad (3)$$

式中: S_{rw} 为 OD 对 w 之间路径 r 上的出行时间; δ_{ar}^w 为路段路径关联变量,当 OD 对 w 之间的路径 r 经过路段 a 时,其值为 1,否则取零。

当各路段的出行时间不存在相互影响关系时,无论其服从什么分布,只要满足林德伯格条件,根据中心极限定理,路径出行时间总是服从正态分布。因此,其均值表达式为:

$$E(S_{rw}) = \sum_a \left\{ \delta_{ar}^w \cdot \left[t_a^0 + \alpha t_a^0 x_a^\beta \cdot \frac{1 - \theta_a^{1-\beta}}{(c_a^d)^\beta (1 - \theta_a)(1 - \beta)} \right] \right\}, \forall w \in W, r \in R_w \quad (4)$$

2 考虑路段容量降级的出行者路径更新模型

设每个出行者根据感知时间选择路径,感知来自前一天的出行经验,则出行者 i 在第 $(t+1)$ 天对 OD 对 w 之间路径 r 的感知出行时间 $\hat{H}_{rw}^{i,t+1}$ 为:

$$\hat{H}_{rw}^{i,t+1} = \hat{\tau}_{rw}^{i,t+1} + \hat{\epsilon}_{rw}^{i,t+1}, \forall r \in R_w, w \in W \quad (5)$$

式中: $\hat{\tau}_{rw}^{i,t+1}$ 为 $\hat{H}_{rw}^{i,t+1}$ 的期望; $\hat{\epsilon}_{rw}^{i,t+1}$ 为随机误差项。

假设 $\hat{\epsilon}_{rw}^{i,t+1}$ 是期望为零的独立同 Gumbel 分布随机变量,根据离散选择理论,OD 对 w 之间的出行者 i 在第 $(t+1)$ 天选择路径 r 的概率 $\hat{p}_{rw}^{i,t+1}$ 为:

$$\hat{p}_{rw}^{i,t+1} = \frac{\exp(-\hat{\lambda} \hat{\tau}_{rw}^{i,t+1})}{\sum_{k \in R_w} \exp(-\hat{\lambda} \hat{\tau}_{kw}^{i,t+1})}, \forall r \in R_w, w \in W \quad (6)$$

式中: $\hat{\lambda}$ 为出行者路径选择行为的随机程度,较大的 $\hat{\lambda}$ 意味着较小的感知误差。

根据式(6),路径选择概率与路径感知时间的期望有关。出行者只了解已使用路径的出行时间信息,并逐日累积形成个体出行经验,对于未选择路径的信息往往一无所知。假定出行者 i 第 t 天选择路径 r ,则第 $(t+1)$ 天该路径的期望感知时间为第 t 天路径 r 的实际出行时间与第 t 天路径期望感知时间的加权平均,否则,第 $(t+1)$ 天的路径期望感知时间与第 t 天相同,即:

$$\hat{\tau}_{rw}^{i,t+1} = \begin{cases} \eta S_{rw}^t + (1 - \eta) \hat{\tau}_{rw}^{i,t}, & \text{出行者 } i \text{ 在第 } t \text{ 天选择路径 } r \\ \hat{\tau}_{rw}^{i,t}, & \text{否则} \end{cases} \quad (7)$$

式中: η 为出行者对历史经验的依赖程度。

式(7)即为路径感知时间期望值的更新模型。

3 算例分析

3.1 基本情况

如图 1 所示,测试路网包括 12 条路段和 9 个节点。BPR 函数的参数取值为 $\alpha = 0.15$ 、 $\beta = 4$,假设 OD 需求为 $D_{1,9} = 500$,容量降级系数 θ_a 取 0.8。各路段的自由流时间和设计通行能力见表 1。

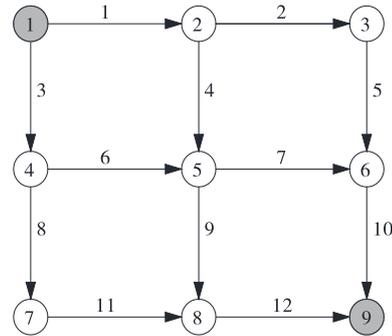


图 1 测试路网示意图

表 1 路段自由流时间 t_a 和设计通行能力 c_a^d

路段 编号	$t_a /$ min	$c_a^d /$ (pcu · h ⁻¹)	路段 编号	$t_a /$ min	$c_a^d /$ (pcu · h ⁻¹)
1	20	360	7	12	180
2	12	360	8	15	240
3	15	240	9	10	150
4	12	180	10	30	360
5	12	360	11	15	240
6	10	150	12	15	240

由于出行者没有历史经验,前一天的路径期望感知时间初始化为自由流时间,从第2天开始采用式(7)更新。测试网络OD对 $D_{1,9}$ 之间共有6条路径,为节省篇幅,只针对路径1(节点①→④→⑦→⑧→⑨)展开分析。取感知参数 $\hat{\lambda}=0.3$,得到测试网络达到静态随机用户均衡状态时路径1上的流量为105.6 pcu/h。对参数 η, θ_a 取不同值进行模拟试验,分析路径流量的波动情况。

3.2 参数 η 的变化对交通流演化的影响

固定路段容量降级系数 θ_a 的值为0.8,参数 η 分别取0.001、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8、0.9,

分析参数 η 的变化对交通流演化规律的影响,结果见表2、图2。

表2 不同参数 η 下路径1最后50 d流量的平均值和标准差

η	平均流量/标准差/ (pcu·h ⁻¹)(pcu·h ⁻¹)		平均流量/标准差/ (pcu·h ⁻¹)(pcu·h ⁻¹)		
	η	平均流量/ (pcu·h ⁻¹)	标准差/ (pcu·h ⁻¹)	η	平均流量/ (pcu·h ⁻¹)
0.001	109.0	9.19	0.5	164.7	13.02
0.1	124.0	9.92	0.6	139.3	6.86
0.2	121.8	10.72	0.7	106.4	3.42
0.3	140.4	11.35	0.8	78.4	1.32
0.4	172.0	14.16	0.9	55.4	1.37

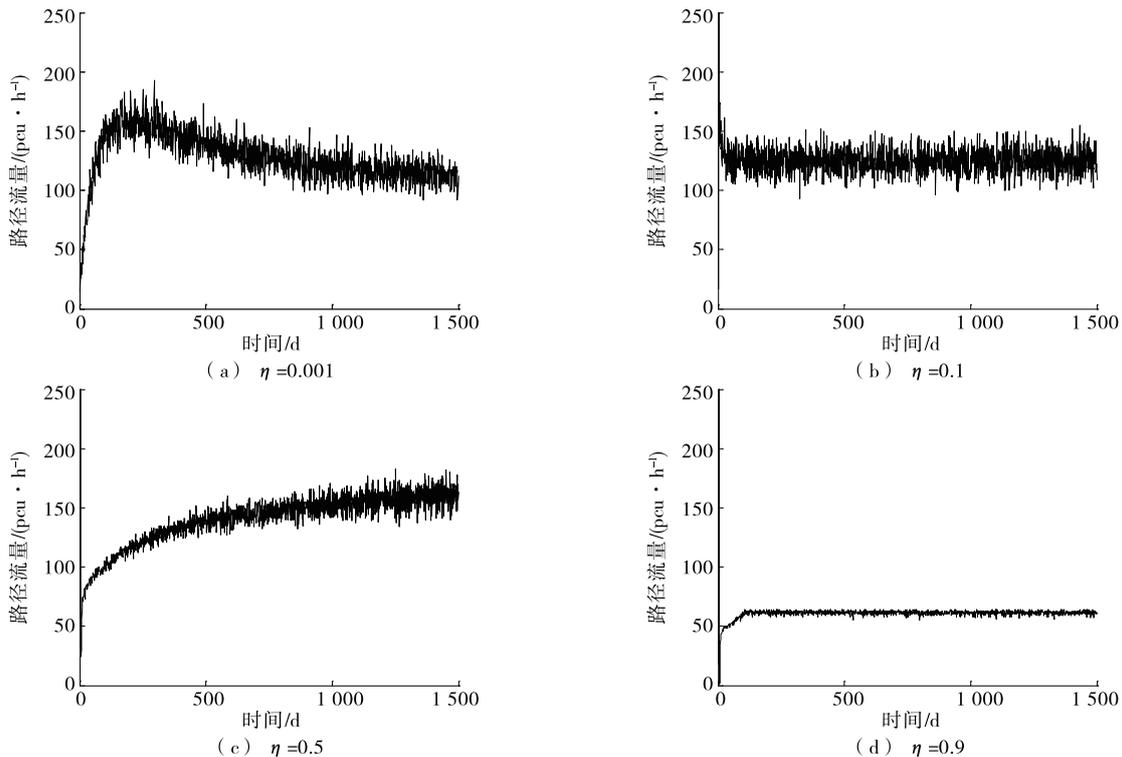


图2 参数 η 取值不同时路径1上的流量演化

由图2和表2可知:1)无论 η 取何值,测试路网路径1上的交通流量均能达到稳定状态,但演化效率较低;2)仅当 $\eta=0.7$ 时,系统能达到随机用户均衡状态;3) $\eta=0.5$ 时,系统演化至稳定状态所耗费的时间最多。

3.3 容量降级系数 θ_a 的变化对交通流演化的影响

表3为容量降级系数 θ_a 取不同值时路径1上的静态随机均衡流量,表4为路径1上最后50 d流量的平均值和标准差。

由表3、表4可知:1)容量降级系数 θ_a 为0.1~0.9时,网络交通流量都能达到某种稳定状态,但鲜有达到均衡状态的;2) θ_a 足够小时,会出现路径流

量为零和固定不变的情况。

$\theta_a=0$,表示路段由于施工或某种原因不能通行; $\theta_a=1$,表示交通网络未发生降级。非降级路网下参数 η 对交通网络演化的影响见图3。

由图3可知:1)非降级路网下,无论 η 取何值,

表3 θ_a 取值不同时路径1上的随机均衡流量

θ_a	f_1 /(pcu·h ⁻¹)	θ_a	f_1 /(pcu·h ⁻¹)
0.1	0.00	0.6	102.6
0.2	0.00	0.7	103.7
0.3	112.50	0.8	105.6
0.4	106.13	0.9	107.7
0.5	103.00		

表 4 容量降级系数 θ_a 取值不同时路径 1 最后 50 d 流量的平均值和标准差

η	项目	θ_a 取不同值时的流量/(pcu · h ⁻¹)								
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0.0	平均值	20.8	22.30	21.00	19.70	21.20	22.20	20.60	21.00	20.70
	标准差	4.8	4.80	4.20	4.60	3.90	4.60	4.20	4.30	4.20
0.1	平均值	155.0	109.00	129.20	143.10	124.20	115.80	119.80	123.40	113.60
	标准差	0.0	0.14	12.80	11.60	11.20	11.50	9.50	10.60	10.42
0.2	平均值	47.0	125.00	113.20	117.70	141.40	154.70	125.10	124.30	126.00
	标准差	0.0	0.00	0.94	2.88	14.40	10.53	9.63	7.70	9.86
0.3	平均值	56.0	128.00	77.00	70.00	101.10	153.40	166.50	141.10	131.50
	标准差	0.0	0.00	0.00	0.00	2.25	13.60	13.24	10.90	11.50
0.4	平均值	4.0	47.00	59.00	195.30	60.80	130.10	141.20	174.60	175.40
	标准差	0.0	0.00	0.00	2.80	0.44	5.64	6.92	13.86	9.20
0.5	平均值	3.0	77.00	111.00	56.00	68.50	72.50	114.80	173.90	179.00
	标准差	0.0	0.00	0.00	0.00	0.71	1.13	5.39	15.32	12.32
0.6	平均值	4.0	53.00	19.00	22.00	57.90	61.50	94.70	122.80	180.70
	标准差	0.0	0.00	0.00	0.00	0.35	0.61	2.40	4.46	13.70
0.7	平均值	2.0	16.00	13.00	20.00	46.80	39.80	75.70	145.70	173.90
	标准差	0.0	0.00	0.00	0.00	0.39	0.37	1.60	6.45	12.94
0.8	平均值	6.0	23.00	50.00	55.00	34.00	53.50	49.10	57.30	87.70
	标准差	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.71	0.99	1.34	2.63
0.9	平均值	2.0	14.00	21.00	19.00	24.00	48.90	53.60	66.00	75.50
	标准差	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.24	0.64	1.55	2.02
1.0	平均值	0.0	16.00	47.00	55.00	20.00	58.00	47.20	58.10	70.70
	标准差	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14	0.90	0.95	1.42

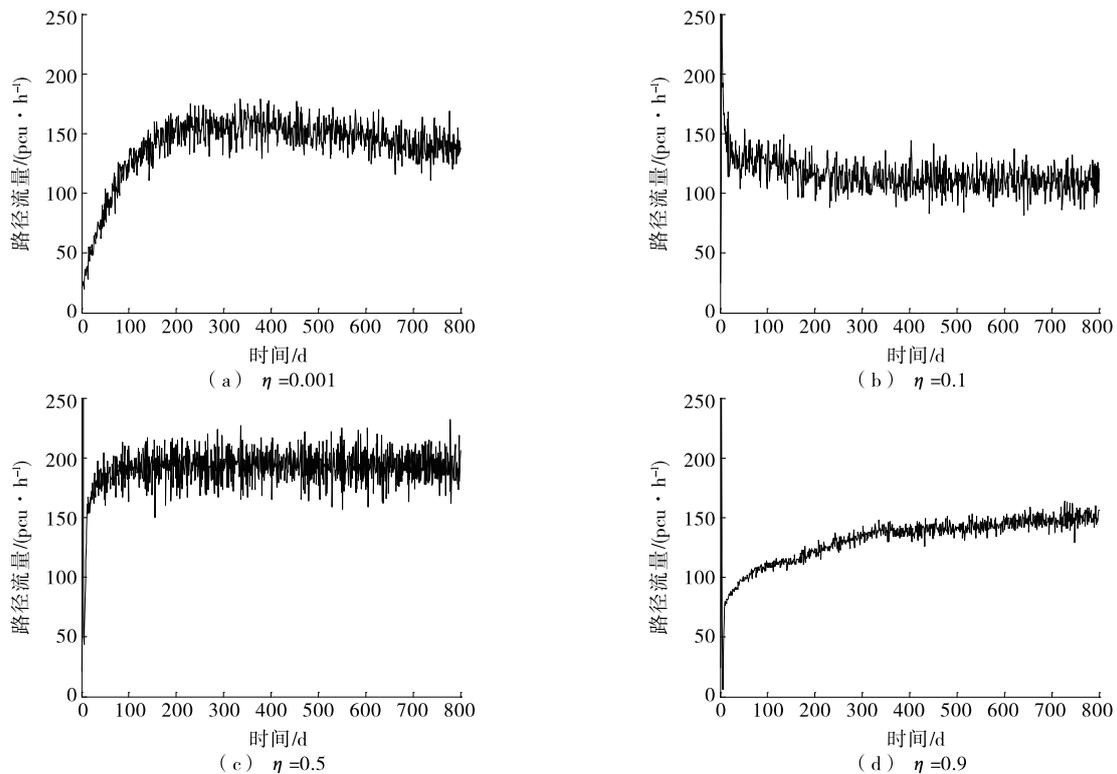


图 3 非降级路网下参数 η 取值不同时路径 1 上的流量演化

系统均能演化到稳定状态,但演化效率较低;2) 无论 η 取何值,交通网络均达不到随机用户均衡状态;3) 网络演化至稳定状态所消耗的时间随 η 的增大而增多。

4 结论

该文构建依据前一天感知行程时间期望值和前一天实际出行时间来更新的路径更新模型,分析降级路网下交通网络流量的波动情况和演化规律、容量降级系数 θ_0 及参数 η 的变化对交通网络演化的影响,并利用小型测试路网进行模拟,结论如下:

(1) 降级与非降级两种情形下,测试交通网络均能演化到某一稳定状态,但演化不到随机用户均衡状态。

(2) 降级与非降级两种情形下,参数 η 对交通网络演化的影响不同,降级路网下存在一个临界参数 $\eta=0.5$,此时系统的演化效率最低, η 取值大于或小于该临界值,系统均能较快演化到稳定状态;非降级路网下,系统演化所消耗的时间随权值参数 η 的增大而增加。

(3) 相较于非降级路网,降级路网下系统演化至某种稳定状态所耗费的时间更长、效率更低。

参考文献:

[1] 刘天亮,黄海军.日常择路行为的多智能体模拟[J].物理学报,2007,56(11).

[2] 度巍,黄崇超,肖海燕,等.信息系统下弹性需求随机用户均衡演化模型[J].交通运输系统工程与信息,2013,13(6).

[3] 刘诗序,关宏志,严海.预测信息下的驾驶员逐日路径选择行为与系统演化[J].北京工业大学学报,2012,38(2).

[4] 阎昊,刘诗序,杨少辉,等.ATIS 环境下的网络交通流逐日动态演化研究[J].福州大学学报:自然科学版,2018,46(5).

(上接第 17 页)

学学报,2018,35(4).

[8] 何楠,闫宇飞.河南公路交通与区域经济发展协调性评价[J].河南科学,2017,35(6).

[9] 彭飞云.基于 RAGA-PPC 模型鄱阳湖地区县域交通与经济协调性评价[D].南昌:东华理工大学,2017.

[10] 俞薇薇.综合运输系统各运输方式协调性评价方法研究[D].南京:东南大学,2017.

[5] 鲍婷婷,陈建良.交通预测信息对路网流量演化稳定性影响分析[J].公路交通科技,2017,34(7).

[6] Zhou B J, Xu M, Meng Q, et al. A Day-to-day route flow evolution process towards the mixed equilibria[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2017, 82.

[7] Paolo Delle Site. A mixed-behaviour equilibrium model under predictive and static advanced travel information systems (ATIS) and state-dependent route choice[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2018, 86.

[8] Han L H, Sun H J, Wu J J, et al. Day-to-day evolution of the traffic network with advanced traveler information system[J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2011, 44(10).

[9] He X, Liu H X. Modeling the day-to-day traffic evolution process after an unexpected network disruption [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2012, 46(1).

[10] Gao B, Zhang R H, Lou X M. Modeling day-to-day flow dynamic on degradable transport network [J]. PLOS ONE, 2016, 11(12).

[11] Lou X M, Cheng L, Ma J, et al. Mixed stochastic user equilibrium model considering influences of advanced traveler information systems in degradable transportation network [A]. Transportation Research Board 96th Annual Meeting [C]. 2017.

[12] 徐红利,于新莲,周晶.诱导信息下考虑路段容量退化的流量演化研究[J].管理科学学报,2015,18(7).

[13] 张安英,孙全欣,韦伟,等.动态路阻下的出行时间预测和路径选择模型[J].公路与汽运,2014(2).

[14] Lo H K, Luo X W, Siu B W Y. Degradable transport network: travel time budget of travelers with heterogeneous risk aversion [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2006, 40(9).

收稿日期:2019-04-21

[11] 郭志刚,张庆年,张秀侠.城乡公交一体化与社会经济发展适应性评价研究[J].公路与汽运,2018(3).

[12] 张矢宇,韦金汛,仲超,等.基于 PCA-DEA 的武汉城市生态交通发展综合评价[J].公路与汽运,2018(6).

[13] 陆军文,丁鹏.基于 PCA 法的浙江省县域经济差异协调发展研究[J].北方经济,2013(6).

收稿日期:2019-03-20