

中小城市公共交通和城市形态协调度评价方法

吴圆圆 陈峻 何鹏

【摘要】我国城镇化进程不断加快，为深入分析中小城市公共交通和城市形态之间的协调关系，本文针对中小城市的特点，从城市结构和规模、社会经济状况、交通发展状况以及公共交通系统的线网结构、发展水平、服务水平等方面建立中小城市公共交通系统与城市形态协调发展指标体系，运用主成分分析法提取系统的序参变量，根据样本数据对协调度模型进行参数标定，运用模型计算丹阳、宿州、铜陵不同年份的协调程度，通过对比分析得出结论：公交线路数、站点覆盖率、中心区面积和人口以及道路里程是影响中小城市公共交通和城市形态协调度的主要因素。

【关键词】中小城市；公共交通；城市形态；协调度；评价指标体系

近年来，我国城镇化进程不断加快，中小城市空间形态逐渐扩展，城市交通供需矛盾日渐明显，使得“公交优先”成为城市交通发展的重点。公共交通系统与城市形态的协调发展是中小城市健康发展的重要保证。国内外研究主要集中在交通与城市空间结构相互作用机理以及交通与土地利用关系上，针对中小城市二者协调发展的研究相对较少。针对中小城市的特点，本文以协同学原理为指导核心、公共交通发展水平以及城市形态的发展为研究对象，选取有代表性的指标构建评价指标体系，对中小城市公共交通和城市形态的协调度进行定性以及定量的分析评价，给出改善建议，引导中小城市健康协调发展。

1 协调度评价指标体系

城市公共交通系统的发展引导了城市形态的演化，主要是公共交通影响沿线土地的利用价值，公交站点影响站点周边土地开发强度。而城市形态的变化也客观上影响城市公共交通的发展，城市结构影响居民出行方式的选择，影响公交走廊的形成，而公交走廊位置的合理与否直接决定公交出行比例^[5]。本文依据中小城市形态特点以及公共交通系统的特点，采用多目标原则，遵循科学性、可比性、可操作性、系统性、代表性等原则，制定二者协调度的评价指标体系。

1.1 城市形态评价指标体系

城市形态评价指标体系，应能够衡量一个城市不同时期的发展程度的变化，同时也能够评价同一时期不同城市发展水平的差异。为此，本文从城市结构和规模、社会经济状况以及城市交通发展状况三个方面选取中小城市城市形态发展的指标。

与多中心的大城市不同，中小城市大部分是单中心的城市，而影响交通需求的决定性因

素是城市中心区的大小。根据这个特点选取指标，市域面积 c_1 和城市中心区用地规模 c_2 ，二者形成对比，对不同城市从规模上进行评价，对相同城市的不同年份从不同中心区面积上进行评价对比。随着我国城镇化步伐加快和经济的不断发展，城市大量发展第二产业，农村剩余劳动力逐步涌向城市务工，城市人口增加，选取中心区人口 c_3 、全市户籍人口 c_4 指标，以及全市生产总值 c_5 、第二产业占总 GDP 比例 c_6 ，作为评价中小城市社会经济状况的指标。同时城市用地规模不断扩大，道路规模随之发展，选取道路里程 c_7 作为评价城市交通发展状况的指标。城市形态评价指标体系如下表：

表 1 中小城市城市形态评价指标体系

目标层	指标层	
城市发展 水平指标	c_1 市域面积 (km ²)	c_2 城市中心区用地规模 (km ²)
	c_3 中心区人口 (万人)	c_4 全市户籍人口 (万人)
	c_5 生产总值 GDP (亿元)	c_6 第二产业占总 GDP 比例
	c_7 道路里程 (km)	

1.2 公共交通系统评价指标体系

同理，城市公共交通系统评价指标体系应能够衡量一个城市公共交通系统不同时期的交通发展程度的变化，同时也能够评价同一时期不同城市公共交通系统发展水平的差异。针对中小城市公共交通的特点，本文从公共交通线网结构、发展水平、服务水平三个方面选取指标。

与大城市相比，中小城市常规公交发展较为缓慢，其发展的主要特点表现在：（1）公交线网布局不尽合理，公交线路往往集中于中心城区的几条主要街道上，线路非直线系数较高，因而选取指标城区公交线路数 x_1 、城乡公交线路数 x_2 、中心区公交线路总里程 x_3 、中心区公交线网密度 x_4 ，中心区公交线网重复系数 x_5 ，对中小城市公共交通线网结构进行对比评价；（2）公共交通服务面小，居民公交出行不方便，公交车辆人均拥有量偏少，大多以小型公交车为主，运送能力较低，因而选取公交站点覆盖率(300m) x_6 、(500m) x_7 ，万人拥有公交车辆数 x_8 ，作为评价指标；（3）公交场站匮乏，公交车辆基本上以路边停车为主，选取车均停车、保养面积 x_9 作为评价指标；（4）公交出行分担率偏低，出行时耗较长，因而选取日公交客流量 x_{10} 、公交出行分担率 x_{11} 和公交平均出行时耗 x_{12} 作为评价指标。则中小城市公共交通评价指标体系如表 2：

表 2 中小城市城市公共交通评价指标体系

目标层	指标层	
公共交通 系统发展 水平指标	x_1 城区公交线路数	x_2 城乡公交线路数
	x_3 中心区公交线路总里程 (km)	x_4 中心区公交线网密度 (km/km ²)
	x_5 中心区公交线网重复系数	x_6 公交站点覆盖率 (300m)
	x_7 公交站点覆盖率 (500m)	x_8 万人拥有公交车辆数 (标台)
	x_9 车均停车、保养面积 (m ²)	x_{10} 日公交客流量 (人次)
	x_{11} 公交出行分担率 (%)	x_{12} 公交出行平均时耗 (min)

2 协调度评价模型

协调发展是指，在外界提供的物质、能量、信息等的支持下，系统各要素和属性之间相互适应、相互促进、相互配合而形成的一种良好的动态发展态势的反映^[9]。城市公共交通系统与城市形态协调发展即为二者之间相互配合、彼此促进的协调发展。本文运用主成分分析法提取系统的序参变量，建立协调度评价模型，对城市形态和城市公共交通系统协调度进行计算和评价。

2.1 主成分分析法

主成分分析是利用降维的思想，将多个变量转化为少数几个综合变量（即主成分），其中每个主成分都是原始变量的线性组合，各主成分之间互不相关，从而这些主成分能够反映原始变量的绝大部分信息，且所含的信息互不重叠。主成分分析能将复杂的系统分析问题简化，抓住主要矛盾^[8]。运用主成分分析法提取序参变量的步骤如下：

(1) 首先对原始数据 X_{ij} ($i=1, 2, \dots, n$ 年; $j=1, 2, \dots, p$, 指标个数) 进行标准化处理，即令

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{\sigma_j}$$

其中 $\bar{x}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ij}$ ，是第 j 个指标的均值， σ_j 是第 j 个指标的标准差。

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2}$$

构造相关系数矩阵 R:

$$R = (\gamma_{ij})_{p \times p}$$

其中 $\gamma_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{s=1}^n y_{si} y_{sj}$, 为指标 i, j 的相关系数, p 为指标个数, $i, j=1, 2, \dots, n$.

计算相关系数的特征值和特征向量。首先假定相关系数矩阵的特征值存在 $\lambda_j \geq \lambda_{j+1}$, $j=1, 2, \dots, p$, 特征向量为: $a_j = (a_{1j}, a_{2j}, \dots, a_{pj})^T$, 选择特征值大于 1 的前 K 个主成分作为系统的主成分, 即系统的序参变量, 可以得到标准化数据的主成分得分 F_j :

$$F_j = a_{1j}X_1 + a_{2j}X_2 + \dots + a_{pj}X_{1p}, \quad j=1, 2, \dots, p$$

第 K 个主成分的贡献率为 $\beta_k = \lambda_k / \sum_{j=1}^p \lambda_j$, 这个值越大, 表明第 K 个主成分综合根据各主成分的贡献率, 计算系统综合得分, 求系统的综合发展指数, 如公式 (2.1)。

$$F_i = \sum_{m=1}^k a_m F_m \quad (2.1)$$

其中: F_i ——第 i 年各指标综合发展指数 ($i=1, 2, \dots, n$)

a_m ——第 m 个主成分的贡献率 ($m=1, 2, \dots, k$)

F_m ——第 m 个主成分在第 i 年的得分

2.2 协调度模型

协调是系统组成要素之间在发展过程中彼此之间的和谐一致, 协调度则是对其协调程度好坏程度进行定量衡量的指标。借鉴物理学中的容量耦合的系数模型^[9], 构建城市公共交通和城市形态之间的耦合协调度模型, 具体如下: F, G 两个系统函数如 (2.2) 所示, $F(x)$ 为系统 F 的评价函数, 其中包括 x_1, \dots, x_n 等 n 个描述 F 系统特征的指标; $G(y)$ 为系统 G 的评价函数, 其包含了 y_1, \dots, y_m 等 m 个描述系统 G 特征的指标。

$$F(x) = \sum_{i=1}^n a_i x_i$$

$$G(y) = \sum_{j=1}^m b_j y_j$$

$F(x)$ 和 $G(y)$ 中的系数 a_i 和 b_j 通过样本数据利用主成分分析法分别标定, 评价函数即为通过主成分分析法求得的系统综合指数函数 F_i , 如式 2.1, 则两系统的耦合度计算公式为:

$$U = \sqrt{\frac{F(x)G(y)}{[F(x)+G(y)]^2}} \quad (2.3)$$

耦合度的取值范围是 $[0, 1]$, 其中, 当 $U=0$ 时耦合度最差, $U=1$ 时耦合度最好。

协调度模型可以更好地评判系统间的交互耦合的协调程度，其算式为：

$$\Phi = \sqrt{U * T} \quad (2.4)$$

其中 T 为城市公共交通与城市形态的综合协调指数，它反映城市公共交通与城市形态的整体协同的效应或贡献， $T = \alpha F(x) + \beta G(y)$ ， α 和 β 为待定系数。在实际应用中，最好使 T 在 (0, 1) 之间，以保证 Φ 属于 (0, 1)。

通过以上步骤可以求得中小城市公共交通和城市形态的协调发展程度，对照表 3 系统协调度的等级划分，对系统的协调度进行综合评价。

表 3 系统协调度等级划分

协调度	0-0.1	0.1-0.2	0.2-0.3	0.3-0.4	0.4-0.5	0.5-0.6	0.6-0.7	0.7-0.8	0.8-0.9	0.9-1
评价	极度失调	严重失调	重度失调	轻度失调	濒临失调	勉强协调	初级协调	中级协调	良好协调	优质协调

3 实例计算及模型参数的标定

丹阳、宿州、铜陵，是我国较为典型的中小城市，目前均处于城镇化不断加速、中心区不断扩展的时期，其公共交通也在快速的发展。本文选取丹阳 2006 年、2010 年、2014 年，宿州 2006 年、2013 年，铜陵 2011 年、2012 年的相关数据作为样本，采用主成分分析法对其公共交通系统和城市形态发展进行分析，利用构建的协调度模型对二者之间的协调度进行计算和分析。样本数据如表 4：

表 4 样本数据

指标	丹阳 2006	丹阳 2010	丹阳 2014	宿州 2006	宿州 2013	铜陵 2011	铜陵 2012
x_1	3	6	17	18	15	23	27
x_2	20	20	16	44	64	26	26
x_3	26.4	64.5	216.1	169.6	236.67	365	412.1
x_4	0.88	3.18	5.40	3.46	2.74	2.81	3.41
x_5	1.31	1.69	2.2	1.93	1.74	1.95	3.07
x_6	29.34	44.67	57.2	54.9	47.6	46.85	44.06
x_7	51.23	70.00	88.3	79.6	73.9	86.35	75.83
x_8	2.8	3.3	3.9	4.71	4.87	10.3	14.83

x_9	52.6	49	68	137.98	136.2	96.02	80.242
x_{10}	60300	67888	69877	96539	114657	109585	128767
x_{11}	3.37	2.5	4	13.2	8.6	10.75	18.7
x_{12}	22.7	22.7	28	30.39	24.1	32.1	24
c_1	1047.44	1047.44	1047.44	9077	9787	1113	1187
c_2	28.3	35.8	40	36.7	68.2	48.9	50.32
c_3	25.6	24.5	30.3	41.7	57.5	43.2	44.76
c_4	80.7	80.9	81.3	600	649.2	73.99	74.21
c_5	430.2	607.67	925.15	359.01	802.4	466.6	621.3
c_6	60.0	56.8	52.3	27	40.6	72.8	73.4
c_7	1989	2084	2140	10789	12612	1109	1258

计算步骤如下：

- (1) 为了消除不同量纲的影响，将样本数据[0-1]标准化。
- (2) 利用 SPSS 软件，对城市公共交通系统样本数据，做主成分分析，得到结果如下表：

表 5 城市公共交通系统样本相关阵特征值表

成分	初始特征值			提取平方和载入		
	合计	方差的 %	累加 %	合计	方差的	累加 %
1	6.387301	53.22751	53.22751	6.387301	53.22751	53.22751
2	2.763507	23.02923	76.25674	2.763507	23.02923	76.25674
3	1.753611	14.61342	90.87016	1.753611	14.61342	90.87016
4	0.819052	6.82543	97.69559			
5	0.233145	1.942874	99.63846			
6	0.043385	0.361539	100			

表 5 是 SPSS 软件输出的样本相关阵的特征值表。由此可以看出：第一主成分的方差贡献率为 53.23%，而前三个主成分的累计方差贡献率达到了 90.87%，因此取三个主成分为宜。

- (3) 再根据 SPSS 输出的样本相关阵的特征向量表，得到第一主成分是：

$$F_1(x) = 0.989x_1 + 0.306x_2 + 0.925x_3 + 0.518x_4 + 0.790x_5 + 0.615x_6 + 0.775x_7 + 0.762x_8 + 0.573x_9 + 0.862x_{10} + 0.834x_{11} + 0.550x_{12}$$

第二主成分表达式为：

$$F_2(x) = -0.086x_1 - 0.173x_2 - 0.201x_3 + 0.731x_4 - 0.151x_5 + 0.748x_6 + 0.598x_7 - 0.501x_8 - 0.021x_9 - 0.445x_{10} - 0.444x_{11} + 0.480x_{12}$$

第三主成分表达式为：

$$F_3(x) = 0.019x_1 + 0.892x_2 - 0.193x_3 - 0.283x_4 - 0.498x_5 + 0.132x_6 - 0.0739x_7 - 0.384x_8 + 0.811x_9 + 0.191x_{10} + 0.020x_{11} + 0.157x_{12}$$

则根据公式 (2.1)，求得中小城市公共交通发展水平的评价函数为：

$$F(x) = 0.511x_1 + 0.282x_2 + 0.424x_3 + 0.379x_4 + 0.309x_5 + 0.505x_6 + 0.526x_7 + 0.242x_8 + 0.451x_9 + 0.406x_{10} + 0.362x_{11} + 0.420x_{12} \quad (3.1)$$

同理，可求得城市形态发展的评价函数为：

$$G(c) = 0.585c_1 + 0.575c_2 + 0.607c_3 + 0.582c_4 + 0.218c_5 - 0.364c_6 + 0.584c_7 \quad (3.2)$$

(4)将标准化后的数据代入式 3.1、3.2，分别求得公共交通和城市形态的综合指数如下表：

表 6 综合指数计算结果

城市年份 指数	丹阳 2006	丹阳 2010	丹阳 2014	宿州 2006	宿州 2013	铜陵 2011	铜陵 2012
公共交通综合指数	0.061	0.989	2.520	3.121	2.659	3.235	3.359
城市形态综合指数	0.160	0.227	0.355	1.999	2.998	0.315	0.445

(5)要运用耦合协调度模型，需标定 $T = \alpha F(x) + \beta G(y)$ 中 α 和 β 的值。前文已经介绍，实际应用中，最好使 T 在 $(0, 1)$ 之间，以保证 Φ 属于 $(0, 1)$ 。为满足这个条件，有不等式如下：

$$\begin{cases} 0 < 0.061 * \alpha + 0.160 * \beta < 1 \\ 0 < 0.989 * \alpha + 0.027 * \beta < 1 \\ 0 < 2.520 * \alpha + 0.355 * \beta < 1 \\ 0 < 3.121 * \alpha + 1.999 * \beta < 1 \\ 0 < 2.659 * \alpha + 2.998 * \beta < 1 \\ 0 < 3.235 * \alpha + 0.315 * \beta < 1 \\ 0 < 3.359 * \alpha + 0.445 * \beta < 1 \end{cases} \quad (3.3)$$

为得到最优解，即 $\Phi = \sqrt{U * T}$ 有最大值，利用 MATLAB 软件编写程序，得到最优解为 $\alpha=0.2918$ ， $\beta=0.0447$ ，则 $T = 0.2918F(x) + 0.0447G(y)$ 。

(6)将 $\alpha=0.2918$ ， $\beta=0.0447$ 。以及城市公共交通综合指数、城市形态综合指数代入式(2.4)，求得协调度如下表：

表 7 协调度计算结果

	丹阳 2006	丹阳 2010	丹阳 2014	宿州 2006	宿州 2013	铜陵 2011	铜陵 2012
协调度 Φ	0.11	0.34	0.50	0.70	0.67	0.52	0.57

4 实例结果分析

将求得的协调度对照表 3 协调度的等级划分，得到协调度的评价结果如下：

表 8 协调度等级评价表

	丹阳 2006	丹阳 2010	丹阳 2014	宿州 2006	宿州 2013	铜陵 2011	铜陵 2012
协调度 Φ	0.11	0.34	0.50	0.70	0.67	0.52	0.57
协调等级	极度 失调	轻度 失调	勉强 协调	初级 协调	初级 协调	勉强 协调	勉强 协调

通过对不同城市不同年份的公共交通系统和城市形态的综合指数以及二者的协调度计算，结果分析如下：

(1) 根据中小城市公共交通评价函数 (3.1) 可以看出影响中小城市公共交通综合指数占最大权重的是城区公交线路数，其次是公交站点覆盖率。城区公交线路数是公共交通评价的最简单直接的指标，覆盖率则为公交系统与城市形态联系最为直接的指标。对比三个城市的不同年份原始数据，如图 1，三个城市城区线路数、公交站点覆盖率和公共交通综合指数以及协调度都有相同的发展总体趋势——在城区线路数和公交站点覆盖率上升时协调度有所改善（丹阳）；下降时协调度也下降（宿州）。可以推论，合理增加公交线路以及合理布设公交站点增加站点覆盖率可以有效改善中小城市公共交通和城市形态发展的协调程度。

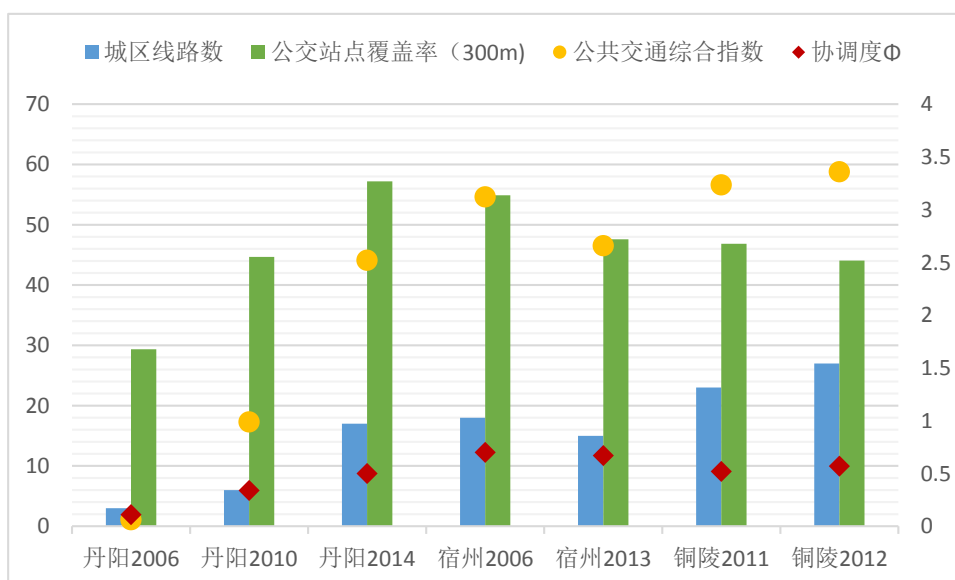


图 1 公共交通和城市形态相关数据对比

(2) 根据城市形态发展评价函数式 (3.2) 可以看出，城市中心区人口数、市域面积、城市中心区用地规模以及道路里程是影响城市形态综合指数的主要指标。市区人口数影响公

交车的服务对象,市域面积决定公交的服务里程和范围,而道路里程直接影响公交的可达性。中小城市公交和城市形态的协调发展必须做到这三个方面的协调。

(3) 将城市公共交通综合指数、城市形态综合指数以及协调度绘制成图表,如图2所示。丹阳2010年2014年以及铜陵的城市公共交通综合指数都高于城市形态综合指数,协调度也在呈上升趋势,公共交通的发展较好的引导城市的发展。而宿州2006年到2013年城市形态综合指数显著上升,公共交通未能同步协调发展,协调度有所降低。

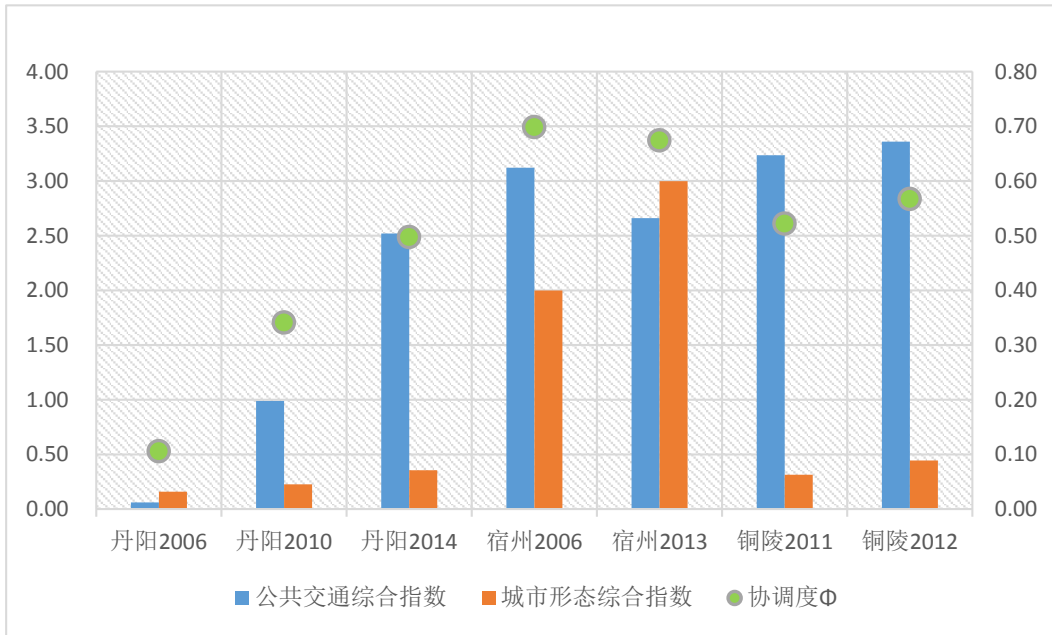


图2 城市公共交通和城市形态综合指数、协调度对比

通过几组城市不同年份的数据对比可以发现,整体上,我国中小城市以及公共交通系统都在不断地向前发展,然后二者的发展却并不协调。建议中小城市在城镇化不断发展的当前,大力发展城乡公交,引导城市合理有序沿轴线向外发展;合理规划中心区公共交通的网络结构,引导城市由单中心发展模式向多中心发展。

5 结论

本文提供了系统发展水平综合指数以及两个系统间的协调度的计算方法和模型,为其他系统的评价提供一种思路。通过实例分析,可看出,本文采用的基于主成分的协调度分析模型能有效地对中小城市公共交通和城市形态协调发展程度进行计算和综合评价。中小城市正处于城镇化不断加速时期,城市发展迅速,应大力发展城乡公交,合理规划公共交通网络结构,更好地引导城市协调发展。

【参考文献】

- [1] Dadhich, P; Hanaoka, S. Spatial investigation of the temporal urban form to assess impact on transit services and public transportation access [J]. Geo-spatial Information Science, 2012, 15(3), 87-197.
- [2] Daniel A. Badoe; Eric J. Miller. Transportation-land-use interaction: empirical findings in North America, and their implications for modeling. Transportation Research Part D, 2000, 5(4):235-263.
- [3] Messinger, T.; Ewing, R. Transit-oriented development in the sun belt. Transportation Research Record, 1996, 1552, 145-153.
- [4] 费移山. 城市形态与城市交通相关性研究[D].东南大学,2003.
- [5] 王贤. 城市公共交通与城市形态的互动关系研究——对无锡城市规划的启示[J]. 城市规划,2007,07:85-88.
- [6] 杨兴地. 中小城市常规公共交通系统评价及线网优化研究[D].哈尔滨工业大学,2012..
- [7] 黄莎,蒙井玉,王晓艺.中小城市公共交通评价指标体系研究[J].交通信息与安全,2011,01:32-36.
- [8] 童其慧.主成分分析方法在指标综合评价中的应用[J].北京理工大学学报(社会科学版),2002,01:59-61.
- [9] 吴大进. 协同学原理和应用[J].华中理工大学学报,1991,05:46.

【作者简介】

吴圆圆，女，本科，江苏省南京市东南大学交通学院，硕士研究生。电子信箱：
1064817401@qq.com

陈峻，男，工学博士，江苏省南京市东南大学交通学院，教授，博士生导师。电子信箱：
chenjun@seu.edu.cn

何鹏，男，本科，江苏省南京市东南大学交通学院，硕士研究生。电子信箱：
315211580@qq.com