

# 基于 STIRPAT 模型的长株潭城市群 交通碳排放的影响因素及其区域差异

王兆峰\* 廖红璐<sup>1</sup>

(湖南师范大学 旅游学院, 中国 长沙 410081)

**【摘要】:** 为探究旅游发展和城市化进程中长株潭城市群交通碳排放的影响因素,采用“自下而上”的方法测算 2005—2016 年长株潭城市群交通碳排放量,利用 STIRPAT 模型及岭回归方法对长株潭城市群接待旅游人数、人均旅游收入、城镇化水平、单位 GDP 能耗及城镇化水平与其他因素的交互项与交通碳排放间的关系进行估计。结果显示:(1)长株潭地区的交通碳排放保持较高速持续增长,节能减排压力大;(2)人均旅游收入和接待旅游人数是促进长株潭城市群交通碳排放的主要影响因素,其次是城镇化水平,单位 GDP 能耗对交通碳排放有较明显的抑制作用;(3)城镇化水平与单位 GDP 能耗的交互项对长株潭城市群交通碳排放有抑制作用,而城镇化水平与接待旅游人数及人均旅游收入的交互项对长株潭城市群交通碳排放的促进作用较强。

**【关键词】:** 交通碳排放 旅游经济 STIRPAT 模型 岭回归 长株潭城市群

**【中图分类号】** F570 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 2096-5281 (2019) 05-0001-09

气温升高、全球变暖已成为威胁全球生态、社会和经济可持续发展的重要因素。党的十九大报告指出中国生态环境保护任重道远,倡导绿色出行,降低能耗及物耗。据世界资源研究所统计,2016 年全球碳排放量为 323 亿吨,而中国的碳排放量最高为 104 亿吨,占全球碳排放 29%。交通运输业、工业和发电是国家三大能源消耗碳排放源头产业<sup>[1]</sup>。根据 2017 年《中国统计年鉴》,2015 年我国交通运输业能源消耗量为 38318 万吨标准煤,仅次于工业和生活消耗,占能源消耗总量的 8.90%,相较于 2005 年上升了 1.77 个百分点,呈逐年上升趋势。交通是开展旅游活动的基础,是联系旅游者与旅游目的地的纽带,交通运输业是旅游产业必不可少的组成部分。深入考察城市旅游发展进程中交通碳排放的影响因素,对实现可持续发展具有重要意义。

国内外学者关于交通碳排放的研究主要集中于测算和影响因素。测算内容方面,对碳排放气体的测算主要有两种。Gössling 于 2005 年最早对 CO<sub>2</sub> 气体的排放量进行测算<sup>[2]</sup>。而《联合国气候变化框架公约的京都议定书》中约定的温室气体包括 CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, HFCs, PFCs 和 SF<sub>6</sub><sup>[3]</sup>。在不同交通方式的碳排放测算上,涉及了公交车、私家车、出租车、摩托车等交通工具的碳排放量测算<sup>[4,5]</sup>,也涵盖了公路、火车、飞机、海上航行等交通方式碳排放量的测算<sup>[6,7]</sup>。测算方法方面,根据数据来源角度不同,有“自上而下”<sup>[8,9,10,11]</sup>和“自下而上”<sup>[12,13,14]</sup>两种,主要依据数据的可获得性及其研究目的来确定测算方法<sup>[15]</sup>。本研究采用“自下而上”的方法,主要依据统计数据将各种交通工具消耗的能源种类与相应的碳排放系数相乘,测算出交通碳排放总量。

就交通碳排放的影响因素而言,主要的分析方法有 STIRPAT 模型运用和因素分解法。具体的影响因素包括居民出行行为、交通业发展水平、运输结构、社会经济发展、人口规模、城镇化水平等。苏涛永等研究发现,城市人口规模和车辆拥有量对城市交通碳排放产生重要影响,公交车比重对城市交通碳排放具有显著负向影响<sup>[16]</sup>。徐昔保等研究分析表明,城市居民出行交通碳排放

<sup>1</sup>基金项目:国家自然科学基金资助项目(41771162);湖南省软科学重点项目(2017ZK3063)

\*通信作者, E-mail: jdwzf@126.com

的主要影响因子为交通方式、出行距离、家庭年收入、年龄和性别<sup>[17]</sup>。较多学者根据影响因素提出发展低碳交通、节能减排措施<sup>[18,19]</sup>。武翠芳等研究发现城镇化水平对交通碳排放的增长影响最大,客运周转量、货运周转量、人均 GDP 对交通碳排放也有显著影响,并提出建设低碳交通体系是交通部门减碳的有效途径<sup>[20]</sup>。庄颖研究发现交通运输业发展水平、运输结构、私人汽车数量规模是拉动广东省交通碳排放增长的主要因素,并提出可以通过采取优化交通运输结构、使用替代清洁能源等措施减少交通碳排放<sup>[21]</sup>。

整体而言,国内外关于交通碳排放的研究已趋成熟,测算方法及其影响因素较为多样。测算方面较多是从能源消耗角度,但是对于部分城市来说,交通部门的能源消耗较难剥离。影响因素方面主要体现交通运输和经济对交通碳排放的影响,较少从旅游的角度出发研究旅游对交通碳排放的实际影响,定量研究比较薄弱;而与旅游业相关的碳排放研究也较为宏观。研究地区大多在全国层面、中观(省级)层面,或者以某个城市为研究对象,且大多为发展程度较高的大城市,很少对旅游活动、交通运输都非常集中的城市群地区进行案例研究。基于以上分析,以长株潭城市群为研究区域,运用扩展的 STIRPAT 模型,采用岭回归方法研究 2005—2016 年长株潭城市群旅游区旅游活动对交通碳排放的影响。对长株潭城市群一体化发展过程中节能减排提出科学建议,也为其他类似城市群或地区提供借鉴。

## 1 城市群旅游业发展与交通碳排放的内在机理分析

### 1.1 旅游业发展对交通碳排放的影响机理分析

新经济地理理论认为,相互关联的企业会由于区位条件、运输成本等因素的影响呈现集聚的状态<sup>[22]</sup>。而从旅游系统模型理论的视角来看,旅游业的组成部分包括客源市场系统、出行系统、目的地系统与支持系统,旅游业的综合性和关联性非常强<sup>[23]</sup>。因此,旅游业的发展极易产生集聚现象,带动技术进步,带来规模经济效应和人口规模效应,对交通碳排放量产生影响<sup>[24]</sup>。

旅游业发展带动技术进步影响交通碳排放量。技术进步一般表现为能源强度效应。一直以来,旅游业被认为是一个低污染、高附加值的产业,其能源使用效率较高,但是波动大<sup>[25]</sup>。在旅游客流量较少的旅游淡季,交通工具的使用量和频率也相对减少,因此碳排放强度相应减弱;而在旅游旺季,随着出游人数的增加,交通工具的使用量和频率上升,碳排放强度增强。旅游业技术进步既可以通过创新旅游路线、旅游景点关联度等生产组合的方式影响运输效率,使能源使用效率提高来降低交通碳排放;也能够通过优化旅游交通工具使用结构等方式改变产业结构和能源结构提高能源使用效率进而降低交通碳排放<sup>[26]</sup>。

旅游业发展带来规模经济效应影响交通碳排放量。旅游业的集聚效应能使旅游产品的生产和服务产生规模经济效应,降低成本。其对交通碳排放的影响表现在以下方面:首先,产业集聚带来的规模经济效应能够促进更节能清洁的技术和服务的使用<sup>[27]</sup>。清洁能源交通工具的使用、景区之间的有效连接能够降低交通能耗。其次,规模经济效应能够做到产品外包<sup>[28]</sup>,同区域内的旅游交通服务与管理交由更专业、系统的部门负责能够提高能源使用效率。

旅游者活动产生人口规模效应影响交通碳排放量。旅游业的发展带动大量的人口流动,旅游业更为发达的地区对交通碳排放量的贡献更加明显<sup>[29]</sup>。据联合国世界旅游组织(UNWTO)发布的统计数据显示,2018 年全球国际旅游总人次达到 14 亿,增长近 6%,高于预期的 4%~5%。在大规模人口“迁徙”的推动下,因满足游客空间位移需求所产生的交通碳排放无论是在规模上还是在速度上都会受到影响。

### 1.2 影响因素的交互作用分析

目前大部分研究只关注单一因素对交通碳排放的影响,但是旅游业的发展及其对交通碳排放的影响会受到城镇化进程的影响,且城镇化也受到旅游业发展的推进。城镇化与服务业内有相互作用的关系<sup>[30]</sup>。城镇化会使大量人口向城市流动,旅游业的集聚作用更加明显,在促进经济增长、带来技术进步的同时,人口的规模效应使交通碳排放量增加。而旅游业的发展对推动城市发

展起着至关重要的作用<sup>[31]</sup>。旅游业作为第三产业服务业带动经济发展的同时,带动了人口的集中,促进城镇化的发展,影响交通结构和居民主要交通方式,进而对交通碳排放产生影响。因此,交通碳排放量还会受到城镇化与旅游业发展、经济增长及技术进步的交互作用的影响。

## 2 研究区域与研究方法

### 2.1 研究区域概况

长株潭城市群位于湖南省中东部,是湖南省经济与城市化发展的核心地区,包括长沙市、株洲市、湘潭市 3 市,土地总面积占全省 13.3%,城镇化率为 69.6%。长株潭城市群区位优势明显,处于京广经济带、泛珠三角经济区与长江经济带的结合部,也是我国中部城市群建设的先行者、促进中部崛起的重点发展城市群。在长株潭一体化和中部崛起战略实施过程中,长株潭城市群的经济发展和城市化水平不断提高,交通网络愈加完善与便利,城市吸引力带动旅游业的蓬勃发展也愈加彰显。

据《湖南省统计年鉴》数据,长株潭地区能源消耗量由 2008 年的 5263.4 万吨标准煤上升到 2014 年的 9872.3 万吨。2016 年长株潭城市群民用汽车拥有量为 356.7 万辆,占全省民用汽车拥有量的 32.5%。且据 2017 年《湖南省统计年鉴》统计,交通部门能源消耗总量仅次于工业和生活消费。面对如此之高的耗能,节能减排是长株潭城市群建设“两型社会”的必要任务。

### 2.2 研究方法

#### 2.2.1 交通碳排放核算

本文将各类交通工具所产生的 CO<sub>2</sub> 排放量作为交通碳排放量的考察对象。由于抽样调查方法准确性较低,并且长株潭地区各类交通方式所消耗的各类能源数据难以获得。采用“自下而上”的方法测算长株潭城市群交通碳排放量,利用各类交通工具不同燃料的单位周转量能耗与相对应的周转量数据及 CO<sub>2</sub> 排放系数来测算各类交通工具的交通碳排放量<sup>[32]</sup>。交通碳排放仅测算公路、铁路、水运和航空部门直接排放的 CO<sub>2</sub>,不包括使用电力所产生的 CO<sub>2</sub>。具体测算方法:

$$E_t = \sum_{j,k} M_{j,k}^t V_{j,k}^t C_{j,k} \quad (1)$$

式(1)中:t 为年份;j 为交通类型,包括公路、铁路、水运和航空交通;k 为燃料类型,包括汽油、柴油、燃料油和煤油;E<sub>t</sub> 为第 t 年的交通碳排放量;  $M_{j,k}^t$  为第 t 年第 j 种交通类型第 k 种燃料类型的单位周转量能耗;  $V_{j,k}^t$  为第 t 年第 j 种交通类型第 k 种燃料类型的换算周转量;C<sub>j,k</sub> 为第 j 种交通类型第 k 种燃料类型的 CO<sub>2</sub> 排放因子。由于长株潭地区的能源消耗数据缺失,单位周转量能耗数据通过湖南省历年第 j 种交通工具第 k 种燃料类型的消耗量除以第 j 种交通工具第 k 种燃料类型的换算周转量获得。换算周转量是通过一定的换算系数将某种交通类型的客运周转量转换成货运周转量与本来的货运周转量相加后得到。根据我国统计制度规定的客货换算系数,铁路、远洋、沿海、内河运输按铺位折算的系数为 1;按座位折算,内河为 0.33,公路为 0.1,国内航空和国外航空分别为 0.072 和 0.075。公路运输主要消耗汽油和柴油;铁路运输主要有蒸汽机车、内燃机车和电力机车 3 种类型,2000 年以来蒸汽机车已逐渐淘汰,而电力机车不直接排放二氧化碳,因此铁路交通主要消耗柴油;水运主要消耗燃料油和柴油;航空运输主要消耗煤油<sup>[33]</sup>。CO<sub>2</sub> 排放因子根据平均低位发热量、含碳水平和碳氧化率计算,汽油、柴油、燃料油和煤油的 CO<sub>2</sub> 排放因子(单位为 kg/kg)分别为 2.98,3.16,3.24 和 3.10<sup>[21]</sup>(表 1)。

表 1 各种运输方式消耗能源类型及其 CO<sub>2</sub> 排放因子

| 运输方式 | 消耗能源类型及其 CO <sub>2</sub> 排放因子/(kg/kg) |
|------|---------------------------------------|
| 公路运输 | 汽油 (2.98); 柴油 (3.16)                  |
| 铁路运输 | 柴油 (3.16)                             |
| 水运   | 燃料油 (3.24); 柴油 (3.16)                 |
| 航空运输 | 煤油 (3.10)                             |

## 2.2. 2STIRPAT 模型

STIRPAT 模型由 Ehrlich 等提出的 IPAT 模型发展而来, Ehrlich 提出人口规模、富裕程度和技术水平会对环境状况产生影响<sup>[34]</sup>。但是由于 IPAT 模型中自变量均为等比例对因变量产生影响, 无法得出单个自变量对因变量的影响。York 等人对 IPAT 模型进行修正与扩展后产生了 STIRPAT 模型<sup>[35]</sup>, 具体形式为

$$I = aP^b A^c T^d e, \quad (2)$$

式(2)中, I, P, A 和 T 分别表示环境压力、人口规模、富裕程度和技术水平; a 代表模型的系数; b, c 和 d 为人口规模、富裕程度及技术水平指数。由于 STIRPAT 模型是多个自变量的非线性随机模型, 对其取对数后, 得到

$$\ln I = \ln a + b \ln P + c \ln A + d \ln T + \ln e, \quad (3)$$

式中  $\ln a$  是常数项, e 为误差项。

## 2.2. 3STIRPAT 模型扩展

STIRPAT 模型可以引入其他影响因素进行扩展, 用于分析对环境压力的影响<sup>[36]</sup>。交通碳排放主要受到交通自身、社会经济和技术水平等的影响<sup>[37]</sup>。长株潭城市群目前正处于城市群一体化、城镇化高速发展阶段, 人口结构变动的过程中带动社会经济的增加, 导致交通碳排放的增加。因此, 选取城镇化水平(P)代表人口规模作为影响交通碳排放的因素之一。富裕程度用人均旅游收入(A)表示, 人均旅游收入用于衡量旅游发展水平。旅游业作为支柱性产业对一个地区的经济发展产生重要影响, 人均旅游收入越高, 该地区所消耗的能源和交通所产生的碳排放将会越高。接待旅游人数(N)能够表示长株潭城市群旅游业发展的现状, 接待旅游人数越多, 对交通的需求越高, 产生的交通碳排放也越高。技术水平方面选取单位 GDP 能耗(T)表征, 单位 GDP 能耗的降低提高能源利用效率, 减少交通碳排放量。环境压力 I 用交通碳排放量表示。在此基础上, 对式(3)进行调整和扩展, 选取城镇化水平、接待旅游人数、人均旅游收入和单位 GDP 能耗 4 项变量构建了长株潭城市群交通碳排放影响模型:

$$\ln I = \ln a + \beta_1 \ln N + \beta_2 \ln P + \beta_3 \ln A + \beta_4 \ln T + \ln e, \quad (4)$$

式(4)中, N 为接待旅游人数(万人次), P 为城镇化率(%), A 为人均旅游收入(元/人), T 为单位 GDP 能耗(kg/万元)。β<sub>1</sub>, β<sub>2</sub>, β<sub>3</sub> 和 β<sub>4</sub> 为弹性系数, 表示当 N, P, A 和 T 变化 1% 时, 分别引起 I 变化 β<sub>1</sub>%, β<sub>2</sub>%, β<sub>3</sub>% 和 β<sub>4</sub>%。

为考察城镇化水平与接待旅游人数、人均旅游收入及单位 GDP 能耗的交互项对交通碳排放的作用, 加入  $\ln P \times T$ ,  $\ln P \times N$  和  $\ln P \times A$  交互项对式(4)进行扩展:

$$\ln I = \ln a + \beta_1 \ln N + \beta_3 \ln P + \beta_2 \ln A + \beta_4 \ln T + \beta_5 \ln P \times T + \beta_6 \ln P \times N + \beta_7 \ln P \times A + \ln e, \quad (5)$$

式中  $\ln P \times T$ ,  $\ln P \times N$  和  $\ln P \times A$  分别为城镇化水平与单位 GDP 能耗、接待旅游人数及人均旅游收入的交互项;  $\beta_5$ ,  $\beta_6$  和  $\beta_7$  为弹性系数。

### 2.3 数据来源

湖南省于 2006 年开始对单位 GDP 能耗进行测算,所以本研究选取数据的时间序列为 2005—2016 年。研究中所需要的长沙市、株洲市和湘潭市三城市各类交通工具客运周转量和货运周转量、旅游接待人次、年旅游业总收入、城市人口、常住人口和单位 GDP 能耗等指标的数据均来源于 2006—2017 年《湖南统计年鉴》、《长沙市统计年鉴》、《株洲市统计年鉴》、《湘潭市统计年鉴》。为消除价格变动因素的影响,旅游业总收入折算成 2010 年可比价计算。

## 3 实证分析

### 3.1 交通碳排放量变化趋势

从计算结果(图 1)可看出,2005—2016 年长株潭地区的交通碳排放量整体呈上升趋势,由 2005 年的  $32.45 \times 10^3 \text{t}$  增长到 2016 年的  $121.32 \times 10^3 \text{t}$ ,11 年间增加了  $88.86 \times 10^3 \text{t}$ ,年平均增长率达 12.73%。长株潭地区旅游业和经济的快速发展使得交通需求上涨,导致交通碳排放量上升。从时间趋势上来看,主要有 3 个变化阶段:第一阶段为 2005—2007 年,交通碳排放量增长缓慢,年均增长率为 12.07%。2008—2012 年为第二阶段,长株潭地区交通碳排放量高速增长,年平均增长率为 18.39%,其中 2008 年长株潭地区的交通碳排放量增长速度最快,达 42.82%。2013 年相对上一年减少了  $15.15 \times 10^3 \text{t}$ ,减少幅度为 13.24%。2013—2016 年为第三阶段,呈缓慢增长趋势。

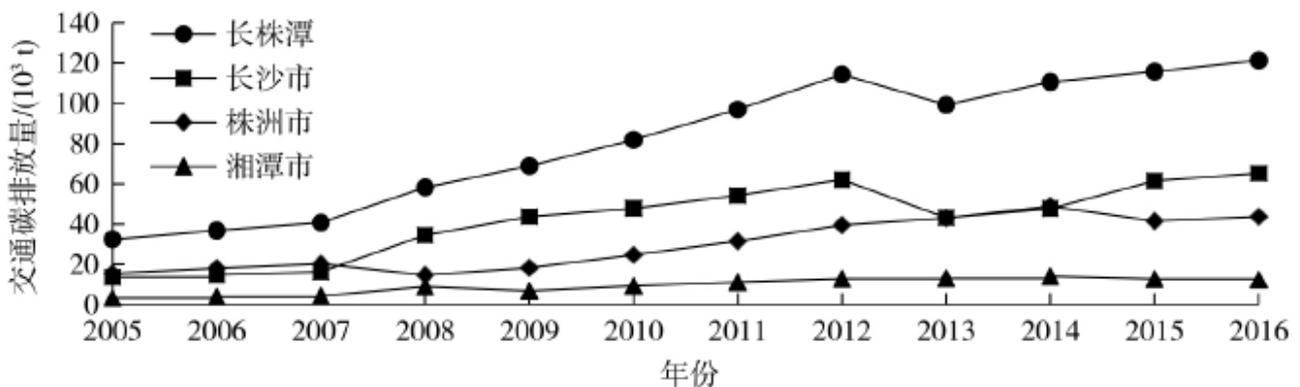


图 1 2005—2016 年长株潭城市群交通碳排放量

分地区来看,长沙市、株洲市、湘潭市 3 个城市的交通碳排放量总体均呈现上升趋势。湘潭市交通碳排放量始终低于其他,且上升缓慢。长沙市交通碳排放量变化趋势与长株潭地区变化趋势大致相同,且基本处于领先地位。株洲市交通碳排放量于 2008 年大幅下降后,呈现缓慢增长态势。

### 3.2 模型变量的变化趋势

表 2 对模型(4)中自变量的变化情况进行描述。

2005—2016 年长株潭城市群接待旅游人数在 11 年间呈连续上升趋势, 由 2005 年的 2932. 27 万人次上升到 2016 年的 18079. 7 万人次, 年平均增长率为 18. 09%。长株潭城市群接待旅游人数总体呈现两个阶段, 2005—2011 年增长速度较快, 除 2008 年增长率为 8. 21%外, 年平均增长率为 16. 95%。2012 年开始长株潭城市群接待旅游人数的增长速度较之前开始下降, 2012—2016 年平均增长率为 13. 39%。

2005—2016 年间长株潭城市群人均旅游收入整体呈上升趋势且有较大的变化, 由 2005 年的 3573. 4 元/人上升到 2016 年的 33245. 7 元/人, 增长为 9. 3 倍。2009—2011 年和 2015—2016 年两个阶段增长速度较快, 年增长率在 25%以上。长沙市的人均旅游收入最高, 增长速度较为稳定; 其次是湘潭市, 最低为株洲市。

2005—2016 年长株潭城市群城镇化率持续上升, 由 2005 年的 48. 1%上升到 2016 年的 69. 6%。长沙市的城镇化率由 2005 年的 53. 87%上升到 2016 年的 75. 99%, 城镇化水平较高; 2016 年株洲市的城镇化率为 64. 1%, 湘潭市为 60. 3%。其中, 长株潭地区在 2010 年城镇化率上升较为明显。长株潭地区单位 GDP 能耗逐年下降, 到 2016 年仅为 0. 69。其中长沙市的单位 GDP 能耗整体较低, 控制较好。

表 2 长株潭城市群交通碳排放影响因素描述统计分析

| 变量                      | 地区  | 均值        | 标准差      | 极大值       | 极小值      |
|-------------------------|-----|-----------|----------|-----------|----------|
| 接待旅游人数/万人次              | 长株潭 | 8812. 27  | 5092. 43 | 18079. 70 | 2932. 27 |
|                         | 长沙市 | 4887. 09  | 2433. 06 | 8753. 00  | 1814. 42 |
|                         | 株洲市 | 1891. 69  | 1365. 17 | 4557. 40  | 490. 72  |
|                         | 湘潭市 | 2033. 49  | 1320. 57 | 4769. 30  | 627. 13  |
| 人均旅游收入/(元/人)            | 长株潭 | 13998. 11 | 9401. 97 | 33245. 70 | 3573. 40 |
|                         | 长沙市 | 6423. 35  | 3372. 65 | 12164. 50 | 2067. 42 |
|                         | 株洲市 | 3239. 96  | 2788. 63 | 9795. 09  | 586. 57  |
|                         | 湘潭市 | 4334. 80  | 3317. 75 | 11286. 12 | 919. 41  |
| 城镇化率/%                  | 长株潭 | 59. 21    | 8. 04    | 69. 60    | 43. 50   |
|                         | 长沙市 | 66. 11    | 7. 11    | 75. 99    | 53. 87   |
|                         | 株洲市 | 54. 53    | 7. 21    | 64. 10    | 42. 50   |
|                         | 湘潭市 | 51. 70    | 5. 38    | 60. 30    | 42. 50   |
| 单位 GDP 能耗/<br>(吨标准煤/万元) | 长株潭 | 1. 12     | 0. 34    | 1. 60     | 0. 69    |
|                         | 长沙市 | 0. 74     | 0. 20    | 1. 03     | 0. 49    |
|                         | 株洲市 | 1. 13     | 0. 35    | 1. 62     | 0. 68    |
|                         | 湘潭市 | 1. 48     | 0. 46    | 2. 14     | 0. 88    |

### 3. 3STIRPAT 扩展模型回归结果分析

首先使用软件 SPSS20. 0 对 5 个变量 I, N, P, A 和 T 进行对数化处理得到变量 lnI, lnN, lnP, lnA 和 lnT。然后, 通过方差膨胀因子(VIF)对变量间的共线性进行检验, 发现各变量的 VIF 值均大于 10, 存在严重的共线性(表 3)。长株潭城市群人均旅游收入对数和接待旅游人数对数的 VIF 值远远大于 10, 分别为 225. 555 和 344. 834; 单位 GDP 能耗对数和城镇化水平对数的 VIF 值分别为 55. 521 和 14. 127。表明自变量间存在明显的共线性, 直接使用最小二乘法进行回归分析将无法正确解释自变量与交通碳排放的关系。

表 3 不同地区各变量 VIF 值

| 变量  | 长株潭地区   | 长沙市     | 株洲市     | 湘潭市     |
|-----|---------|---------|---------|---------|
| lnN | 14.127  | 70.773  | 36.110  | 28.876  |
| lnP | 344.834 | 258.724 | 338.191 | 304.043 |
| lnA | 225.555 | 144.172 | 156.194 | 223.113 |
| lnT | 55.521  | 40.523  | 126.326 | 28.334  |

为处理上述问题,采用专门用于共线性数据分析的有偏估计回归方法岭回归法。岭回归法对病态数据的耐受性远远强于最小二乘法,它通过放弃最小二乘的无偏性,丢弃少量信息和精度换来方程系数的合理估计,结果更符合实际的方程<sup>[38]</sup>。对长株潭城市群交通碳排放的影响因素方程式(5)进行岭回归,设置岭回归系数  $k \in [0, 1]$ ,步长为 0.01 进行回归,得到相应的方程系数和岭迹图。通过观察岭迹图可看出,当  $k=0.15$  时,回归系数的变化开始趋于稳定。选择  $k=0.15$  对方程再次进行岭回归分析,得到各变量的系数。此时调整后的  $R^2$  为 0.933,各变量系数和常数项均通过了 5%的显著性水平检验,模型拟合度良好,说明岭回归得出的结果能较好地解释各变量与交通碳排放间的关系。得到的回归方程为

$$\ln I = 0.303 \ln N + 0.208 \ln P + 0.286 \ln A - 0.143 \ln T + 10.899。 \quad (6)$$

就长株潭城市群而言,接待旅游人数和人均旅游收入对交通碳排放的影响最为显著,每增加 1%接待旅游人数或 1%人均旅游收入,交通碳排放量将增加 0.303%或 0.286%。旅游规模是交通碳排放的主要贡献因素,故长株潭城市群交通与旅游协调发展,促进生态环境健康发展,仍需做出较大努力。城镇化水平对长株潭城市群交通碳排放的影响也较大,城镇化水平每增加 1%,交通碳排放量就增加 0.208%。城镇化带动了城市的发展,城市人口的快速集聚使得城市交通需求增大,给长株潭城市群带来环境压力。能源强度单位 GDP 能耗对交通碳排放具有抑制作用,单位 GDP 能耗每下降 1 单位,交通碳排放将下降 0.143%。发展清洁能源交通技术对提高能源利用效率有显著成效,但是目前其控制力度不如其他因素带来的环境压力,说明今后在加强交通能源利用效率方面给予更多的技术支持。

### 3.4 交通碳排放影响因素城市差异

用相同的方法对长沙市、株洲市和湘潭市 3 个城市的交通碳排放的影响因素方程式进行岭回归,观察岭迹图,通过判断得出当  $k$  分别为 0.18, 0.19 和 0.10 时,各相应的回归系数的变化开始趋于稳定。具体回归数据见表 4。此时,各  $R^2$  分别为 0.941, 0.810 和 0.750,各变量系数和常数项均通过了 5%的显著性水平检验。说明各城市的交通碳排放影响因素模型拟合度较好,得出的各回归系数能较好地解释变量间的关系。得到的长沙市、株洲市和湘潭市交通碳排放影响因素回归方程分别为:

$$\ln I_1 = 0.275 \ln N_1 + 0.207 \ln P_1 + 0.297 \ln A_1 - 0.153 \ln T_1 + 8.533, \quad (7)$$

$$\ln I_2 = 0.462 \ln N_2 + 0.182 \ln P_2 + 0.095 \ln A_2 - 0.11 \ln T_2 + 10.231, \quad (8)$$

$$\ln I_3 = 0.473 \ln N_3 + 0.076 \ln P_3 + 0.489 \ln A_3 - 0.207 \ln T_3 + 5.417。 \quad (9)$$

根据回归方程(7),(8)和(9)可知,长沙市、株洲市、湘潭市三市的交通碳排放受各因素的影响程度存在差异。

就旅游发展方面的影响来看,对 3 个城市交通碳排放起较大促进作用的因素是接待旅游人数。每增加 1%接待旅游者人数,长沙市、株洲市和湘潭市的交通碳排放量相应增加 0.275%, 0.462%和 0.473%。长沙市作为省会城市,在交通、旅游资源等方面占据

优势,接待旅游人数远高于其他两市,但是旅游人数给交通和环境带来的压力却小于其他两市。人口密度的增加,相较于公共交通网络更加完善的长沙市,株洲市和湘潭市交通基础设施建设显得尤为迫切。人均旅游收入是对长沙市和湘潭市交通碳排放量贡献最大的因素,每增加1%人均旅游收入,长沙市和湘潭市的交通碳排放量相应增加0.297%和0.489%。收入是影响城市交通碳排放的重要因素<sup>[39]</sup>。收入增加提高居民生活水平,私家车辆拥有量上升导致交通碳排放量增加。而对于旅游资源较少的株洲市,人均旅游收入低于其他两城市,其对交通碳排放的影响较小。

城镇化率对长沙市、株洲市和湘潭市交通碳排放的影响程度低于旅游发展方面的因素对交通碳排放的影响程度。长沙市和株洲市城镇化水平对交通碳排放的贡献较湘潭市大,城镇化率每升高1%,长沙市和株洲市的交通碳排放量将增加0.207%和0.182%,而湘潭市只增加0.076%。城镇化会从产业结构调整、能源供给的最优化、技术进步和能源的高效利用四个方面对交通碳排放产生影响<sup>[40]</sup>。目前阶段长沙市和株洲市城市化发展迅速,城市人口激增,对交通能源的需求较大;而湘潭市城市化发展相对缓慢,城镇化率年均增长率仅为3.23%,对交通碳排放量影响不大。

能源消耗强度对长沙市、株洲市和湘潭市交通碳排放具有明显的抑制作用。湘潭市能源消耗强度的抑制作用最为明显,每减少1%单位GDP能耗,交通碳排放量将下降0.207%。湘潭市作为湖南省核心工业城市,较大地受到单位GDP能耗的影响,发展清洁能源技术、优化交通结构有利于节能减排。长沙市和株洲市单位GDP能耗每减少1%,交通碳排放量将下降0.153%,0.110%。长沙市是长株潭城市群核心城市,株洲市是交通枢纽和区域物流中心,控制交通运输业高耗能环节、优化交通系统能减少交通碳排放带来的环境压力。

### 3.5 影响因素的交互作用

考虑到城市群城镇化发展进程对旅游业发展的影响,加入城镇化与技术水平、旅游发展因素的交互项分析城镇化发展与旅游业发展对交通碳排放的交互作用(表4)。结果显示,城镇化水平与单位GDP能耗的交互项对长株潭城市群交通碳排放有抑制作用,而城镇化水平与接待旅游人数及人均旅游收入的交互项对长株潭城市群交通碳排放有较强的促进作用。说明,长株潭城镇化的发展带动技术进步,优化能源供给能有效抑制交通碳排放的产生;而城镇化带动旅游业发展的同时,其对交通的需求加大,对交通碳排放的压力更加显著。值得注意的是,就3个城市来看,城镇化发展较快的城市长沙市,其城镇化水平与接待旅游人数及人均旅游收入的交互项给交通碳排放带来的压力较其他两市更为明显。进一步说明,城镇化水平与旅游业发展关联性较强,城镇化与旅游业的快速发展给交通碳排放带来的挑战巨大。

表4 不同地区各变量的系数

| 变量             | 长株潭地区(k=0.15) | 长沙市(k=0.18) | 株洲市(k=0.19) | 湘潭市(k=0.10) |
|----------------|---------------|-------------|-------------|-------------|
| lnN            | 0.303**       | 0.275***    | 0.462***    | 0.473*      |
| lnP            | 0.208***      | 0.207***    | 0.182***    | 0.076*      |
| lnA            | 0.286***      | 0.297***    | 0.095*      | 0.489**     |
| lnT            | -0.143**      | -0.153*     | -0.110*     | -0.207*     |
| lnP×T          | -0.047*       | -0.071*     | -0.142*     | -0.147*     |
| lnP×N          | 0.395***      | 0.366***    | 0.273***    | 0.239***    |
| lnP×A          | 0.466***      | 0.499***    | 0.256***    | 0.264***    |
| 常数             | 10.899***     | 8.533***    | 10.231***   | 5.417*      |
| R <sup>2</sup> | 0.933         | 0.941       | 0.810       | 0.750       |

注:P\* < 0.1, P\*\* < 0.05, P\*\*\* < 0.01。

## 4 结论与讨论

通过测算 2005—2016 年长株潭城市群交通碳排放量,运用并扩展 STIRPAT 模型建立长株潭地区交通碳排放影响因素回归模型,分析各影响因素对长株潭地区交通碳排放的影响方向和影响程度,并对比长沙市、株洲市和湘潭市三市结果,得出以下结论:

(1) 总体来看,长株潭城市群的交通碳排放保持较高速持续增长,节能减排压力大,其中长沙市对交通碳排放量的贡献最大。接待旅游人数(0.303)和人均旅游收入(0.286)是促进长株潭城市群交通碳排放的主要影响因素,其次是城镇化水平(0.208),单位 GDP 能耗(-0.143)对交通碳排放有较明显的抑制作用。

(2) 各影响因素对长株潭城市群交通碳排放的影响存在地区差异。湘潭市和株洲市接待旅游人数对交通碳排放量促进作用明显,对于发展相对缓慢的城市来说,旅游人数的增加带来的交通减排压力更大。株洲市人均旅游收入对交通碳排放量的影响最小。长沙市和湘潭市人均旅游收入对交通碳排放量的增加贡献较大,旅游业的发展会给当地带来较好的经济效应,改善居民生活水平。长沙市和株洲市城镇化速度快于湘潭市,其导致的交通碳排放压力也大于湘潭市。

(3) 城镇化水平与单位 GDP 能耗的交互项对长株潭城市群各地区交通碳排放均有抑制作用;而城镇化水平与接待旅游人数及人均旅游收入的交互项对交通碳排放量的促进作用大于单个因素对交通碳排放的影响,且城镇化水平较高的城市对增加交通碳排放量的交互作用更加明显。

针对上述结果分析,长株潭城市群首要的任务应该是在城镇化和旅游经济发展过程中,建立和优化交通系统,发展能源消耗控制技术,提高交通能源使用效率。具体提出以下措施:首先建立长沙市、株洲市和湘潭市三城市的协调机制,优化交通结构。推行和发展新型模式,加强现代交通网络建设;加强高排放车辆管控,研发和推广新型节能技术,提倡使用新能源汽车,提高能源利用效率。长株潭城市群城市化的进程中可能忽略绿色发展,城市人口的增加促使能源需求加大。首先要提高城市居民环境保护意识,加大力度引导和鼓励城市居民参与到环保运动中;其次注重协调产业结构和交通布局的关系,注重可持续发展。

### 参考文献:

- [1]TIMILSINA G R,SHRESTHA A. Transport sector CO<sub>2</sub> emissions growth in Asia: underlying factors and policy options[J]. Energy Policy,2009,37(11):4523-4539.
- [2]GOSSLING S,PEETERS P,CERON J P,et al. The eco-efficiency of tourism[J]. Ecol Econ,2005,54(4):417-434.
- [3]孙晋坤,章锦河,汤国荣,等. 交通碳排放研究进展与启示[J]. 中国人口·资源与环境,2016,26(5):73-82.
- [4]赵敏,张卫国,俞立中. 上海市居民出行方式与城市交通 CO<sub>2</sub> 排放及减排对策[J]. 环境科学研究,2009,22(6):747-752.
- [5]KAKOUEI A,VATANI A, IDRIS A K B. An estimation of traffic related CO<sub>2</sub> emissions from motor vehicles in the capital city of Iran[J]. Iran J Environ Health Sci Eng,2012,9(1):1-5.
- [6]BECKEN S, SIMMONS D G, FRAMPTON C. Energy use associated with different travel choices[J]. Tourism Manag,2003,24(3):267-277.
- [7]FARRENY R, OLIVER-SOLA J, LAMERS M, et al. Carbon dioxide emissions of antarctic tourism[J]. Antar Sci,2011,23(6):556-566.

- 
- [8]SUN Y Y. A framework to account for the tourism carbon footprint at island destinations[J].*Tourism Manag*, 2014, 45:16-27.
- [9]FILIMONAU V, DICKINSON J, ROBBINS D. The carbon impact of short-Haul tourism: A case study of UK travel to southern france using life cycle analysis[J]. *J Cleaner Prod*, 2014, 64(1):628-68.
- [10]石培华, 吴普. 中国旅游业能源消耗与 CO<sub>2</sub>排放量的初步估算[J]. *地理学报*, 2011, 66(2):235-243.
- [11]袁宇杰. 中国旅游间接能源消耗与碳排放的核算[J]. *旅游学刊*, 2013, 28(10):81-88.
- [12]FANG W T, HUANG C W, CHOU J Y, et al. Low carbon footprint routes for bird watching[J]. *Sustainability*, 2015, 7(3):3290-3310.
- [13]肖潇, 张捷, 卢俊宇, 等. 交通碳排放的空间结构与情景分析[J]. *生态学报*, 2012, 32(23):7540-7548.
- [14]王立国, 廖为明, 黄敏, 等. 基于终端消费的旅游碳足迹测算——以江西省为例[J]. *生态经济*, 2011(5):121-168.
- [15]董雪旺, 张捷, 章锦河, 等. 区域旅游业碳排放和旅游消费碳足迹研究述评[J]. *生态学报*, 2016, 36(2):554-568.
- [16]苏涛永, 张建慧, 李金良, 等. 城市交通碳排放影响因素实证研究——来自京津沪渝面板数据的证据[J]. *工业工程与管理*, 2011, 16(5):134-138.
- [17]徐昔保, 陈爽, 杨桂山. 长三角地区城市居民出行交通碳排放特征与影响机理[J]. *长江流域资源与环境*, 2014, 23(8):1064-1071.
- [18]ALAM A, DIAB E, EL-GENEID Y A, et al. A simulation of transit bus emissions along an urban corridor: evaluating changes under various service improvement strategies[J]. *Trans Res Part D*, 2014, 31(5):189-198.
- [19]ALAM A, HATZOPOULOU M. Investigating the isolated and combined effects of congestion, roadway grade, passenger load, and alternative fuels on transit bus emissions[J]. *Trans Res Part D: Trans Environ*, 2014, 29(6):12-21.
- [20]武翠芳, 熊金辉, 吴万才, 等. 基于 STIRPAT 模型的甘肃省交通碳排放测算及影响因素分析[J]. *冰川冻土*, 2015, 37(3):826-834.
- [21]庄颖, 夏斌. 广东省交通碳排放核算及影响因素分析[J]. *环境科学研究*, 2017, 30(7):1154-1162.
- [22]KRUGMAN P. Increasing returns and economic geography[J]. *J Polit Econ*, 1991, 99(3), 483-499.
- [23]吴必虎, 俞曦. 区域旅游规划原理[M]. 北京:中国旅游出版社, 2010.
- [24]李炫榆, 宋海清, 李碧珍. 集聚与二氧化碳排放的空间交互作用——基于空间联立方程的实证研究[J]. *山西财经大学学报*, 2015, 37(5):1-13.

- 
- [25]李伯华,刘云鹏,窦银娣. 旅游风景区旅游交通系统碳足迹评估及影响因素分析——以南岳衡山为例[J]. 资源科学, 2012, 34(5):956-963.
- [26]黄鲜华,边娜,石欣. 能源禀赋与产业技术进步对碳排放强度的影响效应研究——来自长江经济带的实证[J]. 科技进步与对策, 2018, 35(19):59-64.
- [27]刘胜,顾乃华. 行政垄断、生产性服务业集聚与城市工业污染——来自 260 个地级及以上城市的经验证据[J]. 财经研究, 2015, 41(11):95-107.
- [28]韩峰,谢锐. 生产性服务业集聚降低碳排放了吗?——对我国地级及以上城市面板数据的空间计量分析[J]. 数量经济技术经济研究, 2017, 34(3):40-58.
- [29]魏艳旭,孙根年,等. 中国旅游交通碳排放及地区差异的初步估算[J]. 陕西师范大学学报:自然科学版, 2012, 40(2):76-84.
- [30]王晓红,胡艳君. 城市化与现代服务业发展关系的实证研究[J]. 生态经济, 2015, 31(6):98-102.
- [31]JUDD D R. Promoting tourism in US cities[J]. *Tourism Manag*, 1995, 16(3):175.
- [32]蔡博峰,曹东,刘兰翠,等. 中国交通二氧化碳排放研究[J]. 气候变化研究进展, 2011, 7(3):197-203.
- [33]HUMMERA S,WEN J D. The impact of air-railways transportation,energy demand,bilateral aid flows,and population density on environmental degradation: Evidence from a panel of next-11 countries[J]. *Trans Res Part D*, 2018, 62: 152-168.
- [34]EHRlich P R,HOLDREN J P. Impact of population growth[J]. *Science*, 1971, 171(3977):1212-1217.
- [35]YORK R,ROSA E A,DIETZ T. STIRPAT,IPAT and impact: analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts[J]. *Ecol Econ*, 2003, 46(3):351-365.
- [36]汪菲,王长建. 新疆能源消费碳排放的多变量驱动因素分析——基于扩展的 STIRPAT 模型[J]. 干旱区地理, 2017, 40(2):441-452.
- [37]杨足膺,赵媛,付伍明. 基于弹性系数的江苏省能源生态足迹影响因素分析[J]. 生态学报, 2010, 30(24):6741-6748.
- [38]张文彤. SPSS20.0 统计分析高级教程第 2 版[M]. 北京:高等教育出版社, 2013.
- [39]郑思齐,霍焱. 低碳城市空间结构:从私家车出行角度的研究[J]. 世界经济文汇, 2010(6):50-65.
- [40]ZHOU W,ZHU B,CHEN D,et al. Energy consumption patterns in the process of China' s urbanization[J]. *Popul Environ*, 2012, 33(2-3):202-220.