

Carbon Emission of Urban Passenger Traffic in Taiyuan, China

Ruiqiang Yuan¹, Xianglong Yang¹, Peng Wang²

¹School of Environment and Resource, Shanxi University, Taiyuan Shanxi

²Key Laboratory of Poyang Lake Wetland and Watershed Research, Ministry of Education, Jiangxi Normal University, Nanchang Jiangxi
Email: rqyuan@sxu.edu.cn

Received: Dec. 23rd, 2017; accepted: Jan. 4th, 2018; published: Jan. 12th, 2018

Abstract

Based on the statistical data, the CO₂ emission of urban passenger traffic (UPT) was studied for the period from 2000 to 2014 in Taiyuan using the so-called “down-up” method of IPCC2006. Furthermore, the “coal-electricity-vehicle” development strategy was evaluated. The most significant changes of the UPT were the exponential growth of private vehicles and the very slow development of public transport service. The average annual growth rate of the CO₂ emission from UPT was 11% with a total of 4.175×10^6 t in 2014. Since 2006, the growth was accelerated. The CO₂ emission per capital from UPT increased 63 kg CO₂/a after 2006. And the emission of road area average augmented 8 kg CO₂/(m²·a). The CO₂ emissions of private vehicles and business vehicles dominated the emission of UPT accounting for 90.4% of the total in 2014. The emissions of private vehicles increased by 22.7%/a during 2000 to 2014, which resulted in a shift of the biggest carbon source of UPT from business vehicles to private vehicles in 2011. The limited public transport service ability and the evident rise of purchasing power of residents promoted the burst of private vehicles that was considered as the major reasons for the accelerated emission of UPT since 2006. The development of UPT CO₂ emission follows the rule of Kuznets Curve. It is suggested that a decrease of the growth rate of the emission will occur in a near future with the increasing of GDP. If the strategy of “coal-electricity-vehicle” set in, the UPT CO₂ emission would decrease by 37% and the emission of unit GDP would reduce by 48.8% in 2014. However, that doesn't hit the target of 2030 emission reduction (60%~65%). Employing clean energy and reducing usage of coal power should be the appropriate way to achieve low-carbon transportation.

Keywords

Urban Passenger Traffic (UPT), Carbon Emission, Low-Carbon Transportation, Taiyuan, The “Coal-Electricity-Vehicle” Development Strategy

太原城市客运交通碳排放

袁瑞强¹, 杨向龙¹, 王 鹏²

¹山西大学环境与资源学院, 山西 太原

²江西师范大学鄱阳湖湿地与流域研究教育部重点实验室, 江西 南昌

Email: rquyan@sxu.edu.cn

收稿日期: 2017年12月23日; 录用日期: 2018年1月4日; 发布日期: 2018年1月12日

摘要

基于统计数据, 利用IPCC2006“自下而上”方法研究了太原市2000~2014年城市客运交通(UPT)碳排放发展规律, 评估了“煤-电-车”战略的减排意义。太原UPT发展最突出的变化是私人汽车数量呈指数型增长, 而公共交通的发展十分缓慢。太原UPT碳排放量年均增长约11%, 2014年达417.5万吨。2006年后碳排放增长加速, 人均UPT碳排放增速达 $63 \text{ kg CO}_2/(\text{人}\cdot\text{a})$, 单位道路面积UPT碳排放增速 $8 \text{ kg CO}_2/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 。私人汽车和经营性民用车是主要的UPT排放源, 共占2014年UPT排放量的90.4%。私人汽车碳排放量以 $22.7\%/a$ 的速度增长, 自2011年起取代经营性民用车成为最大的UPT碳排放源。公共交通服务能力有限且居民购买力显著增长促使私人汽车超高速增长, 这是UPT碳排放量自2006年加速增长的主要原因。太原UPT碳排放发展符合库兹涅茨曲线规律, 随GDP继续增长将进入增速趋缓阶段。若“煤-电-车”战略实施, 以2014年为基准的碳减排达37%, 单位GDP碳排放相对2005年下降48.8%, 效果明显。但是不能实现2030年减排60%~65%的目标。使用更加清洁的能源降低煤电比重是实现UPT低碳发展的能源战略。

关键词

城市客运交通(UPT), 碳排放, 低碳交通, 太原市, “煤-电-车”战略

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

1979年第一次气候大会召开, CO_2 浓度增加导致全球升温成为共识, 气候变化成为国际社会关注的问题。据估算, 在过去的150年里全球平均气温上升 0.6°C [1]。研究表明, 人类活动排放的 CO_2 增加是造成全球变暖的主要原因。2015年巴黎大会签订《巴黎协议》, 各国达成具有法律效力的后2020年减排协议, 以“自主贡献”的方式应对气候变化。全球将尽快实现温室气体排放达到峰值, 实现温室气体净零排放。

我国的 CO_2 排放量占世界的四分之一, 是最大的碳排放国[2]。我国的态度很大程度上决定了全球气候问题的解决。从2004年开始, 我国着手在北部和东部沿海地区推广、兴建风力发电厂。2005年2月, 在第十届全国人民代表大会第十四次会议上通过了《中华人民共和国可再生能源法》, 明确了开发可再生能源[3]。2008年11月, 联合国和中国发改委成立了一个政府间机构, 以帮助发展中国家应对气候变化[4]。2009年11月26日, 我国首次公布温室气体排放行动目标: 2020年单位GDP碳减排下降40%~45% [5]。2010年7月, 中国分批在6个省、36个城市开展低碳省区和低碳城市试点。2015年11月30日, 巴黎大会上中国承诺2030年中国单位GDP的 CO_2 排放比2005年下降60%~65%, CO_2 排放达到峰值且将努力早日达峰。这一系列举措表明我国积极承担碳减排责任, 用行动实现碳减排的决心。

在社会发展中, 交通承载着资源的流动与配置[6]。随着经济快速发展, 社会对交通运输需求不断增加, 交通运输领域的能源消费呈现快速增长态势, 成为能源消耗最密集领域之一[7]。 CO_2 被作为道路

交通温室气体最主要的排放物[8]。据统计,交通运输产生的 CO₂ 排放占全球温室气体排放的 30%以上[9]。根据中国能源统计年鉴,2000 年我国交通运输部门能源消费量为 11,241.59 万吨标准煤,到 2010 年翻一番达到 26,068.47 万吨标准煤,占我国能源消费总量的比例由 7.72%上升至 8.02% [10]。能源消耗的增长将导致交通运输业碳排放增长。构建以低碳、环保、绿色、低耗、高效、安全为特征的低碳交通发展模式是我国未来城市交通发展的必然选择。

山西省是中国第一产煤大省,形成了以煤炭为经济支柱的产业链。在国家经济新常态与发展新能源政策实施的背景下,山西身处困境正积极寻求转型路径。近来,山西省政府提出了“煤-电-车”战略,旨在破解煤炭产能过剩,推动减排。该战略被认为是山西经济转型的紧迫任务,是经济可持续发展之路。作为我国重要的重工业城市,太原市近年来城市客运交通发展迅速,率先实施“煤-电-车”战略,成为国内城市交通发展的典型代表之一。本研究回顾了太原市客运交通发展,测算并讨论了客运交通碳排放及其变化规律,为我国城市绿色低碳交通发展提供科学依据。

2. 研究方案

2.1. 研究方法

根据《IPCC 2006 国家温室气体清单指南》城市客运交通 CO₂ 排放属于移动源排放,移动排放源的计算方法分为两类[11]。第一类,“自上而下”法。根据各种交通方式燃料的总消耗量乘以对应燃料的 CO₂ 排放系数得到排放量。第二类,“自下而上”法。根据各种交通工具的实际保有量、行车里程、燃油效率以及燃料的 CO₂ 排放系数等计算 CO₂ 排放量。前者是从总体上进行计算,不能对城市交通内部结构进行分析。后者是从不同交通方式入手进行分别核算,有针对性的提出减排对策[12]。本文采用“自下而上”的方法讨论太原市客运交通 CO₂ 排放问题,计算公式如:

$$A_i = B_i \times C_i \times D_i \times E_i \quad (1)$$

上式中 i 代表交通工具的类型; A 代表 CO₂ 排放量, kg; B 代表交通工具的保有量, 辆; C 代表年行驶里程, km; D 代表能源利用效率; E 代表燃料的 CO₂ 排放系数。

城市交通一般由城市客运交通(UPT)和货运交通两部分组成。UPT 是城市交通的主要部分[13]。UPT 包括城市公共交通、出租车和民用汽车三部分。城市公共交通方式包括:城市公交车、轨道交通(地铁)和公共自行车等,民用汽车主要包括私人汽车、经营性民用汽车。目前,太原市的 UPT 主要由城市公交、民用汽车、出租车与公共自行车构成。本文选取出租车、公交车、民用汽车作为研究对象,构建了太原市 UPT 碳排放计算模型。

2.2. 数据和参数

本研究需要的数据包括车辆年保有量、年行驶里程、能源利用效率等,以及不同能源的 CO₂ 排放因子、净热值等。根据《太原市统计年鉴》、《太原市交通年鉴》等获得太原市 2000~2014 年出租车、公交车保有量以及相应的里程。民用汽车行驶里程没有明确统计数据,本文采用李永芳等的成果[14]。各交通方式能源使用效率如表 1 所示。公交车燃油效率采用《太原市统计年鉴》的数据,其余数据采用前人成果[15][16][17]的平均值。不同燃料对应的 CO₂ 排放系数如表 2 所示。CO₂ 排放系数采用 IPCC 缺省值与前人成果[18][19][20][21]的平均值。

3. 太原市客运交通发展分析

2000 年太原市公交车为 1200 辆,到 2009 年快速增长到 1887 辆;其中运营线路长度也从 2000 年 781 公里,增长到 2009 年 1960 公里(图 1)。此后太原市对城市交通规划调整,2010 年开始快速增长。截止到

Table 1. Energy efficiency of the various modes of transport
表 1. 各交通方式能源使用效率

车辆类型	燃料类型	百公里能耗
公交车	柴油	30 L
	天然气	30 m ³
	电力	92 kwh
出租车	汽油	30 L
	汽油	10 L
	天然气	9.5 m ³
民用汽车	电力	23 kwh
	汽油	9 L
	电力	15 kwh

Table 2. CO₂ emission factors for each fuel type
表 2. 各燃料类型 CO₂ 排放系数

燃料类型	碳氧化因子	净热值	IPCC 建议排放系数	排放系数不确定性(95%信赖区间)		最终排放系数
				下限	上限	
汽油	1	7800 Kcal/L	2.26 Kg CO ₂ /L	-2.6%	+5.3%	2.26 Kg CO ₂ /L
柴油	1	8800 Kcal/L	2.736 Kg CO ₂ /L	-2.0%	+0.9%	2.71 Kg CO ₂ /L
液化石油气 LPG	1	6635 Kcal/m ³	1.75 Kg CO ₂ /m ³	-2.4%	+4.0%	1.74 Kg CO ₂ /m ³
液化天然气 LNG	-	9900 Kcal/m ³	2.33 Kg CO ₂ /m ³	-3.2%	+3.9%	2.14 Kg CO ₂ /m ³
电力	-	-	0.95 Kg CO ₂ /kwh	-	-	0.9 Kg CO ₂ /kwh

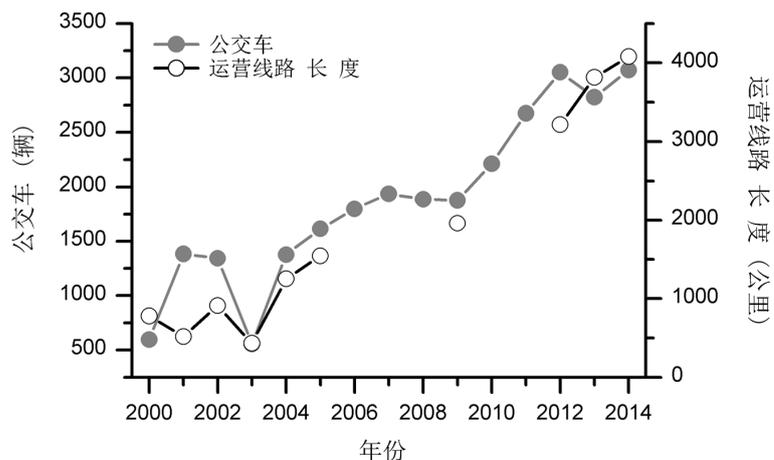


Figure 1. The number of buses in Taiyuan and operating mileage during 2000 to 2014

图 1. 太原市 2000~2014 年公交车数量及运营线路长度

2014 年年末, 太原市公交车数量达到了 3071 辆, 年均增长率约为 7.0%, 运营线路长度也增加到了 4080 公里, 年均增长率为 29.8%, 每万人拥有量达到了 10.2 标台[22]。太原市公交车燃料构成多样, 包括汽油车、柴油车、电车、双燃料汽车(天然气为主)和天然气汽车。

2000~2008年太原市的出租车数量基本保持不变,约为8300辆。到了2008年7月陆续进入报废期,之后出租车数量有了一定增加,稳定在8719辆。2006年以前出租车都是以汽油为燃料,之后进行“油改气”,燃气(天然气)出租车的比重逐渐加大。2015年太原市的出租车再次更新,现已全部更换为纯电动出租车。

民用汽车从2000年的127,676辆,以每年21%的增速增加到了2014年的1,015,786辆。其中私人汽车从2000年的50,172辆,增加到2014年的878,199辆,增速高达22.7%,远超公交车和出租车(图2)。经营性民用汽车从2000年的77,504辆,增加到2014年的137,587辆,年均增长率仅为4.2%。居民收入水平与出行特征紧密相关(郭思慧等,2017)。2000年以来太原市GDP持续增长,2014年太原市GDP超过了2500亿,年均增速为13.2%(图3);人均GDP为59,023元,年平均增速超过10%。私人汽车数量与GDP和人均GDP呈显著正相关($r > 0.9$)。同时,私人汽车平均价格和人均GDP的相关系数为-0.93(表3)。可见,经济的发展和人们购买力的持续增长推动了私人汽车数量持续快速增长。

随着经济社会的持续高速发展,太原市UPT相应快速发展。一方面表现为数量高速增长。另一方面表现为能源类型多样化,更加清洁的能源的比重在加大。其中,私人汽车的增长速度大大超过公交车和

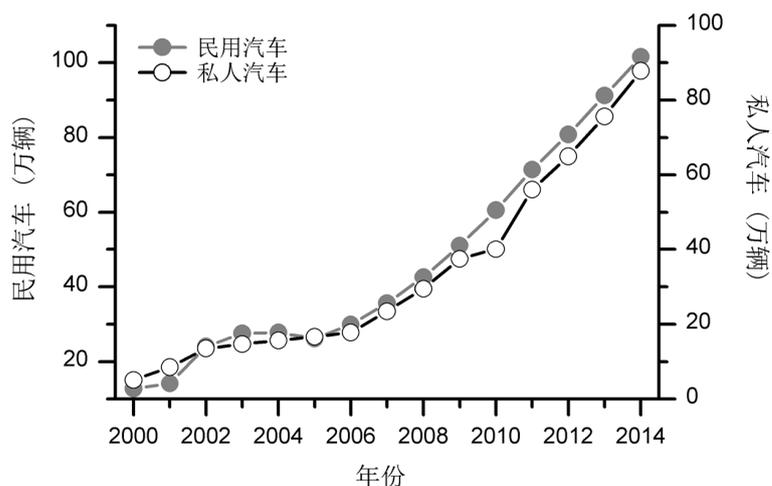


Figure 2. The number of civilian and private vehicles in Taiyuan from 2000 to 2014

图2. 太原市2000~2014年民用汽车与私人汽车数量

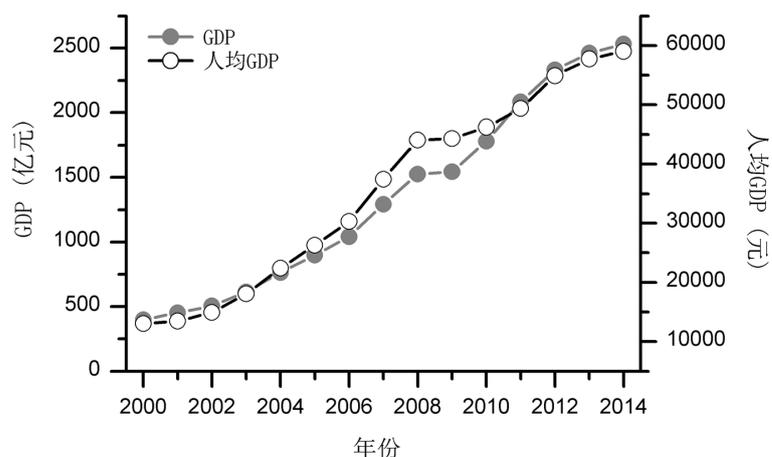


Figure 3. GDP and per capita GDP of Taiyuan from 2000 to 2014

图3. 太原市2000~2014年GDP与人均GDP

Table 3. Relevance of GDP and per capita GDP and private car in Taiyuan
表 3. 太原市 GDP、人均 GDP 与私人汽车数量相关性

	GDP-私人汽车 数量	人均 GDP-私人汽 车数量	GDP-CO ₂ 排放总量	人均 GDP-私人 汽车平均价格	人均 GDP-CO ₂ 碳排放总量	CO ₂ 排放总量 -私人汽车价格
Pearson Correlation	0.965**	0.923**	0.963**	-0.926**	0.920**	-0.855**
Sig. (2-tailed)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

注: **在 0.01 水平上显著(2-tailed)。

出租车显得十分突出。城市快速发展, 公共交通需求高速增长, 然而公交服务能力增长速度和服务水平均不能满足其需求。尤其是受到政策约束, 出租车的阶段性、小幅度增长模式明显与 UPT 需求的发展规律不匹配。这一定程度上刺激了私人汽车高速增长, 使得公共交通的出行比例较低。

为了适应 UPT 发展需求, 促进低碳出行, 太原市自 2012 年下半年开通公共自行车服务系统。到 2015 年末, 累计投放自行车 4.1 万辆, 日租骑量最高达 56.85 万人次, 累计骑行量达 4.45 亿人次, 多项数据居全国第一[22]。然而, 公共自行车服务系统仅是 UPT “最后一公里” 的补充, 难以在根本上改变人们的出行方式。因此, 其对私人汽车增长的影响十分微弱。

4. 太原市客运交通碳排放的总量分析

估算结果表明, 2014 年太原市 UPT 碳排放总量为 417.5 万吨。2000 年到 2014 年太原市 UPT 碳排放量年均增长率约为 11% (图 4)。太原市交通碳排放总量增长自 2006 年开始显示出加速趋势。

GDP 与太原市 UPT 碳排放量显著正相关($r = 0.96$), 人均 GDP 与其相关性也达到了 0.92, 显示出随着经济发展 UPT 碳排放量将增加。库兹涅茨曲线理论表明: 随着人均收入增加环境污染程度由低趋高; 当人均收入达到一定水平后, 环境污染程度将由高趋低。库兹涅茨倒 U 型曲线拟合结果表明, 目前太原市人均 UPT 碳排放处于库兹涅茨曲线左支的快速增长阶段(图 5); 随着太原市人均 GDP 持续增长, 未来一段时期内人均 UPT 碳排放仍将呈现增长, 但是增长速度将逐渐放缓。

UPT 单位道路面积碳排放量的增减是由道路面积与碳排放量的变化引起。自 2006 年起太原市 UPT 单位道路面积碳排放量增高趋势明显(图 6), 增速约 $8 \text{ kg CO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。2000 年到 2014 年太原市 UPT 人均碳排放量处于持续增长中, 平均值为 $343 \text{ kg CO}_2/(\text{人} \cdot \text{a})$ 。2006 年其增速明显加快, 约为之前的 4 倍, 达到 $63 \text{ kg CO}_2/(\text{人} \cdot \text{a})$ 。

选取 GDP、公交车数量、私人汽车数量、经营性民用车数量、出租车数量等五个指标进行回归分析(SPSS V22.0), 得到回归方程如下:

$$Y = -101.227 + 0.001X_1 + 0.01X_2 + 0.016X_3 + 0.005X_4 + 2.624E - 6X_5 \quad (2)$$

式中: Y 为太原 UPT 碳排放量(单位: 万吨); X_1 为私人汽车数量(单位: 辆); X_2 为经营性民用车数量(单位: 辆); X_3 为出租车数量(单位: 辆); X_4 为公交车数量(单位: 辆); X_5 为 GDP(单位: 万元)。拟合优度检验: 修正的可决系数为 0.991, 表明模型对样本的拟合良好。 F 检验: 给定显著性水平 95%, 得到 $F = 307.11$, 大于临界值, 说明回归方程显著。 t 检验: 给定显著性水平 95%, X_1 和 X_2 的 $P = 0.001 < 0.05$ (表 4), 表明私人汽车和经营性民用车的数量对太原市 UPT 碳排放总量影响显著。

5. 太原市客运交通碳排放的结构分析

太原市 2000~2014 年不同 UPT 方式碳排放量由高到低依次为: 民用汽车(包括经营性民用车、私人汽车)、出租车、公交车(图 4)。2000 年以来, 民用汽车一直是占比最大、增速最快的 UPT 碳排放源, 平均占比高达 $88 \pm 2\%$ 。民用汽车中私人汽车的高速发展十分突出(图 7)。2000 年, 民用车碳排放量为 82.9

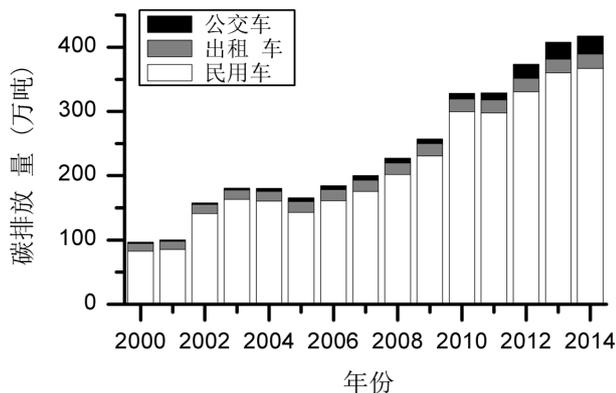


Figure 4. Results of CO₂ emissions from urban passenger transport in Taiyuan from 2000 to 2014

图 4. 太原市 2000~2014 年客运交通 CO₂ 排放量核算结果

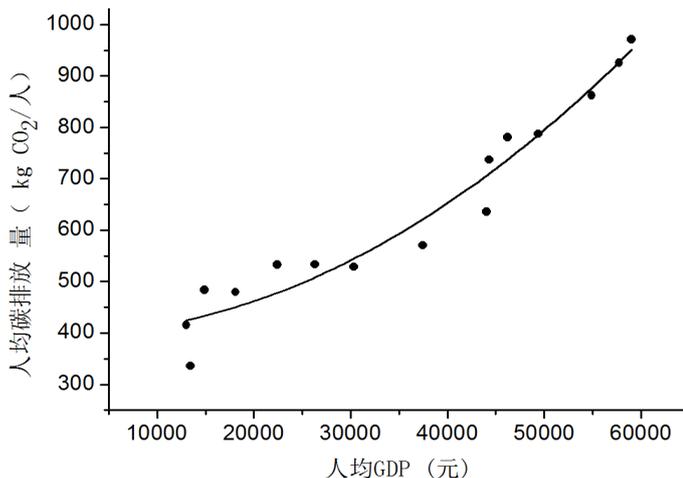


Figure 5. Kuznets Curve for carbon emissions from urban passenger traffic in Taiyuan

图 5. 太原市客运交通碳排放库兹涅茨曲线

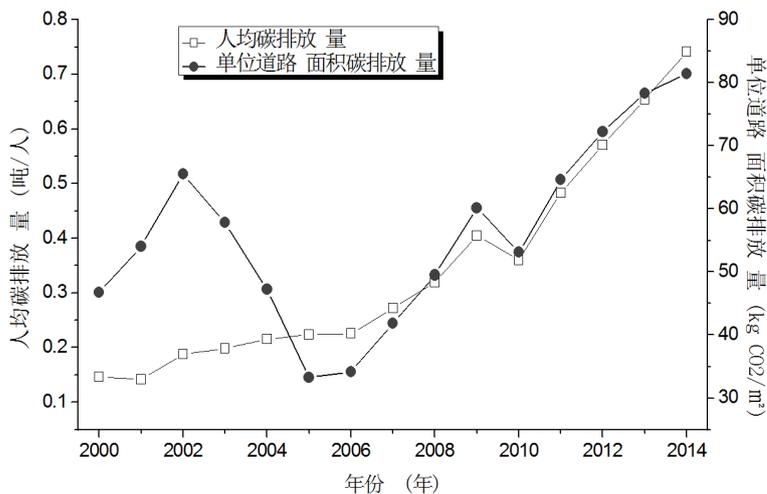


Figure 6. CO₂ emissions per unit area and passenger traffic in Taiyuan from 2000 to 2014

图 6. 太原市 2000~2014 年单位道路面积与人均客运交通 CO₂ 排放量

Table 4. Regression estimates of CO₂ emissions from passenger transport in Taiyuan
表 4. 太原市客运交通 CO₂ 排放的回归估计

模型参变量	非标准化系数		标准化系数	T统计量	显著性
	B	标准错误	Beta		
(常数)	-101.227	284.584		-0.356	0.730
X ₁	0.001	0.000	0.591	4.701	0.001
X ₂	0.01	0.000	0.221	4.657	0.001
X ₃	0.016	0.035	0.030	0.441	0.669
X ₄	0.005	0.021	0.033	0.244	0.813
X ₅	2.624E-6	0.000	-0.027	1.153	0.278

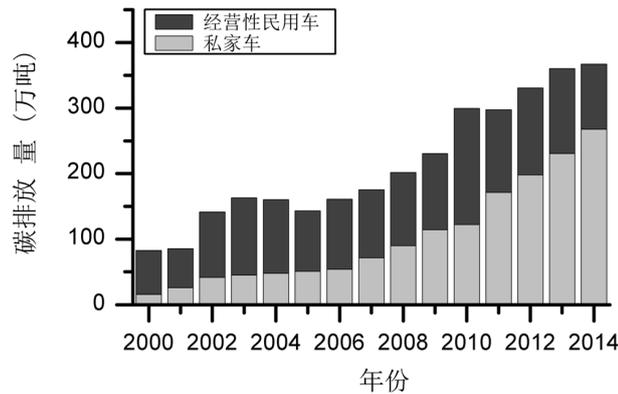


Figure 7. Structure of CO₂ emissions from civilian vehicles
图 7. 民用车 CO₂ 排放结构图

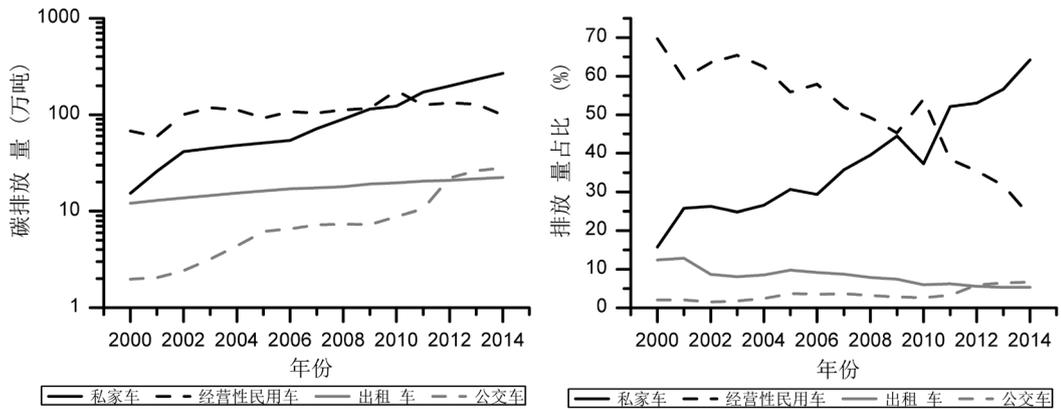


Figure 8. Carbon emissions and their share of transport in Taiyuan from 2000 to 2014
图 8. 太原市 2000~2014 年各交通方式碳排放量及其占比

万吨；2014 年，其排放量已经达到了 367.1 万吨。其中，私人汽车 CO₂ 排放量从 2000 年的 15.3 万吨，以年均 22.7% 的增速增加到 2014 年的 267.9 万吨；而经营性民用车 CO₂ 排放量从 2000 年 67.6 万吨增加到 2003 年的 118.2 万吨后进入围绕 110 万吨/年的波动阶段。从城市 UPT 碳排放总占比看，私人汽车碳排放占比持续上升，经营性民用汽车碳排放持续下降(图 8)。2010 年以后私人汽车反超经营性民用车成为最大的 CO₂ 排放源。

2000~2014年,出租车碳排放量维持缓慢增长,由2000年的12.1万吨增加到2014年的22.3万吨,然而占比却从2000年的13%降到2014年的5%,平均占比仅为 $8 \pm 2\%$ (图8)。一方面,这是由出租车的数量相对稳定造成的。另一方面,出租车能源类型逐渐向清洁化过渡。2006年开始实施油改气,到2014年全部实现油改气。期间,虽然车辆数增加了5%,但排放量却降低了3%。太原市从2015年开始进行出租车电动化换代,并于2016年成为国内首个实现出租车完全电动化的城市,实现减排2.3万吨。

2000~2014年,公交车碳排放量逐渐增长,其占比由2000年的2%持续增加到2014年的7%,平均占比仅为 $3 \pm 2\%$ (图8)。虽然公交车数量和运营线路长度持续增长,但是公交车排放量在UPT碳排放总量中的占比却保持在低位。其主要原因是太原市公交车能源类型构成多样,近年来逐渐以相对清洁能源车型为主。太原市公交车主要由双燃料车、柴油车、汽油车、天然气车、无轨电车构成。近几年太原市公交柴油车、汽油车数量均在减少,而相对低碳环保的双燃料车、天然气车、电车等数量在不断的增长。

随着我国GDP和人均GDP持续高速增长,居民收入增加,私人汽车数量呈指数增加。2000年我国乘用车市场年销量为208万辆,到2009年突1000万辆,2013年飙升至2198万辆。目前我国已成为全球第一大乘用车消费市场。同时,由于公共交通发展不能满足UPT发展的需要,使人们的出行方式更加依赖自驾车出行。因此,私人汽车数量增长是导致UPT碳排放量迅速增加的主要原因。

6. 与其他城市比较

研究表明,2000年来太原市城市UPT碳排放量整体呈现快速增长,民用汽车数量的快速增长是造成UPT碳排放快速增长的主要因素,平均占比为88%,这与郑州[23]和西安[24]的情况类似。太原市城市UPT碳排放量在2006年前为平稳增长期,之后为加速增长期。同样地,郑州市2001~2004年UPT碳排放相对平缓,2005~2010年增长加快。结构上,太原市UPT碳排放顺序为:民用车 > 出租车 > 公交车,与西安[24]和德黑兰[25]的结果(私人汽车 > 公交车 > 出租车)类似。在公交车和出租车碳排放结果的不同,主要原因是太原市公交车能源多样且已趋向于清洁化。

7. “煤-电-车”战略的减排意义

2016年12月山西省政府公布了《山西省“十三五”综合能源发展规划》,将重点建设晋北、晋中、晋东三大煤电基地,做大做强煤电支柱产业。“煤-电-车”战略将成为“十三五”发展的重点。在不考虑更新成本、技术进步、配套设施建设等实际可行性的前提下,以2014年为基准将现有的UPT全部实现电动化后,出租车可减排2.3万吨,减排效率为14.6%,民用汽车可以减排155.6万吨,减排效率为40%,减排效果明显。然而,公交车纯电动化后则会增排1.03万吨。其原因是目前太原市公交车大部分使用天然气,燃料结构相对清洁。整体上,太原UPT在“煤-电-车”战略下电动化后减排效率可达37%。同时,电动化后单位GDP碳排放相对于2005年下降48.8%,可以达到我国承诺的2020年单位GDP相对2005年下降40%~45%的目标,但还达不到2030年单位GDP相对2005年减排60%~65%的目标。长远来看,基于煤电的“煤-电-车”战略减排效能有限,而使用更加清洁的能源来降低煤电比重[26]是太原市UPT实现低碳化的方向。“十三五”期间清洁低碳能源应是能源供应增量的主体。

8. 结论

本文基于官方统计数据,利用IPCC2006自下而上方法评估了太原市城市客运交通(UPT)碳排放,着重分析了2000~2014年UPT碳排放量和排放结构的变化规律,讨论了“煤-电-车”战略的减排意义。受数据的限制,文本并未将近两年才出现的“共享单车”和“共享汽车”等作为讨论内容。主要结论如下:

- 1) 2000~2014年太原市UPT处于高速发展阶段。公交车数量和运营里程显著增加,出租车数量小幅

度增加。最突出的变化是 2006 年以来私人汽车数量呈指数型增长。然而, 公共交通的快速发展仍不能满足 UPT 需求的发展。出租车的发展模式与公共交通需求发展规律不匹配, 可能是催生共享汽车、网约车等补充 UPT 方式的一个重要原因。

2) 2000~2014 年太原市 UPT 碳排放量年均增长约 11%, 到 2014 年达 417.5 万吨。自 2006 年起太原市 UPT 碳排放量增长进入加速阶段。人均 UPT 碳排放量增速在 2006 年之后达到 $63 \text{ kg CO}_2/(\text{人}\cdot\text{a})$, 为之前的 4 倍。单位道路面积 UPT 碳排放量以约 $8 \text{ kg CO}_2/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 速度增长。私人汽车数量增长是导致 UPT 碳排放量迅速增加的主要原因。

3) 2000~2014 年私人汽车碳排放量增速最快, 对城市 UPT 碳排放量变化的影响最大。私人汽车在 2010 年后超过经营性民用车成为太原市 UPT 中最大的碳排放源。公共交通(出租车和公交车)发展落后于交通需求, 其碳排放占比仅 10% 左右。公共自行车系统仅发挥了补充作用, 目前对居民出行方式及 UPT 碳排放的影响不明显。在建的地铁有望对提高公共交通碳排放占比, 降低 UPT 总碳排放量发挥重要作用。

4) 太原市 UPT 碳排放量发展符合库兹涅茨曲线规律。UPT 碳排放量与 GDP 和人均 GDP 显著正相关。太原市 UPT 碳排放还将处于增长阶段, 但是随着 GDP 增长将进入增速趋缓阶段。

5) 基于煤电的“煤-电-车”战略减排效果明显, 但不能满足 2030 年的减排目标。使用更加清洁的能源降低煤电比重是太原市 UPT 低碳化的途径。

基金项目

本研究获得国家自然科学基金项目(41301033)资助。

参考文献 (References)

- [1] Tollefson, J. (2015) Global-Warming Limit of 2°C Hangs in the Balance. *Nature*, **520**, 14-15. <https://doi.org/10.1038/nature.2015.17202>
- [2] Qiu, J. (2013) China Gets Tough on Carbon. *Nature*, **498**, 145-146. <https://doi.org/10.1038/498145a>
- [3] Cyranoski, D. (2009) Beijing's Windy Bet. *Nature*, **457**, 357-504. <https://doi.org/10.1038/457372a>
- [4] Qiu, J. (2008) China Asks World to Step up on Climate. *Nature*, **456**, 151. <https://doi.org/10.1038/456151a>
- [5] 蒋晶晶, 叶斌, 计军平, 等. 中国碳强度下降和碳排放增长的行业贡献分解研究[J]. 环境科学, 2014(11): 4378-4386.
- [6] 姬文哲. 天津市交通碳排放计算与减排对策研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2013.
- [7] 施晓清, 李笑诺, 杨建新. 低碳交通电动汽车碳减排潜力及其影响因素分析[J]. 环境科学, 2013, 34(1): 385-394.
- [8] Grote, M., Williams, I., Preston, J., et al. (2016) Including Congestion Effects in Urban Road Traffic CO_2 Emissions Modelling: Do Local Government Authorities Have the Right Options. *Transportation Research Part D Transport & Environment*, **43**, 95-106. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.12.010>
- [9] 刘建翠. 中国交通运输部门节能潜力和碳排放预测[J]. 资源科学, 2011, 33(4): 640-646.
- [10] 国家统计局. 2010 中国能源统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2010.
- [11] 储诚山, 陈洪波, 陈军. 城市道路客运交通碳排放核算及实证分析[J]. 生态经济, 2015, 31(9): 56-60.
- [12] Kumar, M.K. and Nagendra, S.M.S. (2015) Quantification of Anthropogenic CO_2 Emissions in a Tropical Urban Environment. *Atmospheric Environment*, **125**, 272-282.
- [13] 郑大勇. 城市客运交通碳排放计算及低碳发展策略研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2011.
- [14] 李永芳, 钱宇彬. 我国家用轿车运行成本分析[J]. 汽车与配件, 2008(2): 52-54.
- [15] 闫丽丽. 低碳视角下的北京市客运交通结构优化研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- [16] 赵敏, 张卫国, 俞立中. 上海市居民出行方式与城市交通 CO_2 排放及减排对策[J]. 环境科学研究, 2009, 22(6): 747-752.
- [17] 柴泾哲. 城市交通能耗及碳排放测算研究[J]. 价值工程, 2015(7): 243-244.

- [18] 政府间气候变化专门委员会(IPCC). 2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南[M/OL]. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp>
- [19] 康在龙. 天津市低碳交通发展策略研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津理工大学, 2013.
- [20] 丁月娇. 镇江市城市居民交通出行碳排放研究[D]: [硕士学位论文]. 镇江: 江苏大学, 2015.
- [21] 苏城元, 陆键, 徐萍. 城市交通碳排放分析及交通低碳发展模式——以上海为例[J]. 公路交通科技, 2012, 29(3): 146-152.
- [22] 太原市统计局. 2015 太原统计年鉴[G]. 北京: 中国统计出版社, 2015.
- [23] 宁晓菊. 郑州城市居民交通 CO₂ 排放研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 河南大学, 2013.
- [24] 张婷. 西安市低碳交通发展战略研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013.
- [25] Kakouei, A. (2012) An Estimation of Traffic Related CO₂ Emissions from Motor Vehicles in the Capital City of Iran. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 9, 1-5. <https://doi.org/10.1186/1735-2746-9-13>
- [26] Aggarwal, P. and Jain, S. (2014) Energy Demand and CO₂ Emissions from Urban On-Road Transport in Delhi: Current and Future Projections under Various Policy Measures. *Journal of Cleaner Production*, 128, 48-61. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.12.012>

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2168-5711, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>
期刊邮箱: ccrl@hanspub.org