低碳视角下太原市旅游业碳均衡分析

程占红[1*] 王 峥[1] 马子行[2]

([1]山西财经大学文化旅游学院, 太原 030031; [2]中国矿业大学管理学院, 江苏徐州 221008)

摘 要 低碳旅游是解决旅游发展与环境保护矛盾的重要途径。碳均衡分析作为新时期旅游业低碳转型的探索性工作,突破了以往研究中无法明确判断碳减排压力的困境,逐步成为新的学术热点。本文基于旅游业碳排放与生态系统碳吸收模型的构建,结合区域旅游经济贡献,对太原市旅游碳赤字进行初步估算。结果表明:2010—2016 年,太原市旅游业碳排放从 48.85×10^7 kg 增长到 66.84×10^7 kg,其中,旅游交通、住宿、购物及餐饮部门是主要碳源;旅游交通和住宿部门在选定时段内的比重不断减小,其余要素部门占比逐年增加,这在一定程度上反映了旅游消费结构的变化;太原市陆地生态系统年均碳吸收总量为 122.98×10^7 kg,其中,森林和农田系统是主要碳汇,草地和水域系统的增汇能力相对较弱;旅游业年均碳赤字的估算值为 34.30×10^7 kg,呈现严重的碳失衡状态;太原市旅游业成为一个显著的碳源,节能减排和生态增汇将是未来发展的有效途径。

关键词 低碳旅游; 碳均衡; 旅游业碳赤字; 太原市

Analysis of tourism carbon equilibrium in Taiyuan City from a low-carbon perspective.

CHENG Zhan-hong[1*], WANG Zheng[1], MA Zi-xing[2] ([1]*College of Culture Tourism, Shanxi University of Finance and Economics, Taiyuan* 030031, *China*; [2]*College of Management, China University of Mining and Technology, Xuzhou* 221008, *Jiangsu*, *China*).

Abstract: Low-carbon tourism is an important way to solve the contradiction between tourism development and environmental protection. Carbon equilibrium analysis is an exploratory work in the low-carbon transformation of tourism in the new era, as it has broken through the predicament of previous research, which cannot clearly quantify the pressure of carbon emission reduction. Consequently, carbon equilibrium analysis has become a new academic hotspot. In this study, combined with regional tourism income and GDP, we established models of carbon emission and ecosystem carbon sequestration to estimate the mean annual carbon deficit of tourism in Taiyuan City. From 2010 to 2016, carbon emission of tourism increased from 48.85×10^7 kg to 66.84×10^7 kg. Transport, accommodation, shopping, and catering sectors were the main carbon sources. The proportion of tourism transportation and accommodation sectors to carbon emission generally reduced in the selected period of time, while the proportion of other sectors increased annually, implying the change of tourism consumption structure to some extent. Mean annual carbon sequestration of terrestrial ecosystems in Taiyuan was 122.98×10^7 kg. Forest and farmland were major carbon sink, while grassland and aquatic systems were relatively weak in sequestering carbon. The estimated mean annual carbon deficit of tourism was 34.30×10^7 kg, with a serious carbon imbalance. Therefore, tourism is a significant carbon source in Taiyuan. Energy saving, emission reduction, and ecological enhancement of carbon sink should be effective ways for future development.

Key words: low-carbon tourism; carbon equilibrium; tourism carbon deficit; Taiyuan City.

国家自然科学基金项目(41571141)、教育部人文社会科学研究项目(14YJA630005)、山西省软科学研究项目(2018041065-1)、山西省哲学社会科学规划项目(2018B072)、山西省高等学校工商管理优势学科攀升计划项目(晋教研[2018]4 号)和山西省研究生教育改革研究项目(2019JG129)资助。

收稿日期: 2019-10-28 接受日期: 2020-03-09

*通讯作者 E-mail: chengzhanhong@163.com

全球气候变化背景下,区域经济发展及其与资源环境的关系问题日益受到学术界的关注。旅游业对全球温室气体排放负有近5%的责任,若继续保持传统发展模式,预计在2035年以前仍将以年均2.5%的速度增长(Whittlesea *et al.*,2012)。鉴于此,《国务院关于加快发展旅游业的意见》中大力倡导低碳旅游方式,提出旅游业节能减排的新要求。中国旅游业是全球旅游经济的重要力量,弄清旅游业能源消耗所产生的碳排放和陆地生态系统的碳吸收,是探明区域旅游业碳均衡状态、明确未来减排目标的重要前提,颇具现实意义。

旅游业碳均衡分析,是旅游与环境相互关系研究的一个新的科学命题。以往研究中多用旅游业碳排放评估区域旅游活动对环境的影响(Wang *et al.*,2019),但不同区域有不同的旅游经济发展水平,不同区域有不同的环境承载力,若仅采用碳排放指标可能会有一定的局限性(王秋贤等,2014)。陆地生态系统具有强大的碳汇功能,能够在一定程度上抵消旅游业碳排放(周年兴等,2013),减少区域旅游活动对环境的影响。因此,旅游业碳均衡分析不仅涉及旅游业各个环节的碳排放,还应考虑各类生态系统的碳吸收。

目前,国内外学者已经围绕旅游业碳排放的测算、影响因素及减排措施等方面做了大量工作,且主要集中在宏观及微观层面上:Lenzen 等(2018)利用全球多区域投入产出数据库量化了160个国家/地区与旅游业相关的碳排放;Luo 等(2020)分析了中国旅游业碳排放及其影响因素,发现游客规模效应是促进旅游业碳排放增长的主要驱动因素。Sun 等(2019)定量评估了九寨沟景区的碳排放量,并将土地利用结构的优化作为景区减排的重点;Zhang 等(2018)基于减排的经济手段角度,提出碳税补偿政策和税收回收计划有助于旅游业碳排放的有效减少。也有学者以中观层面的省级区域为研究单位(马慧强等,2019;Rico *et al.*,2019),对市级区域的研究稍显不足。在生态系统碳吸收问题上,已有研究多从国家和省域层面来探讨不同生态系统碳汇的测算(鲁丰先等,2013;Wu *et al.*,2018)、碳汇的影响因素分析(蓝家程等,2017;Xu *et al.*,2018)、碳汇空间格局分布或差异(刘双娜等,2012)等方面,但同样较少涉及市级尺度的探讨。由于旅游碳源和生态碳汇分属于不同学术领域,只有少数学者对两者进行了综合分析和比较研究(周年兴等,2013;董红艳等,2018),研究尺度也仅涉及省域和旅游地,可见相关领域的学术成果尚不充分。在以往研究中发现,仅仅依据碳排放的测度结果,仍然无法明确判断区域旅游业的减排压力。旅游业碳均衡分析,作为发展绿色低碳旅游业的探索性工作,将有助于解决这一问题。本研究以太原市为对象,通过收集旅游经济、能源消费以及各类生态系统的基础数据,结合旅游碳赤字测度模型,对区域旅游业碳均衡状态进行分析,以期丰富低碳旅游理论体系,明确太原市旅游业对当地环境的责任,为相关部门制定低碳路径提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区域概况

太原市地处山西省境中央,太原盆地的北端,位于111°30′E—113°09′E,37°27′N—38°25′N。全市总人口已突破350万,总面积约7000 km^2,其中林地、草地和耕地是主要用地类型。太原市是著名旅游城市和国家历史文化名城,拥有丰富的自然和人文旅游资源,不断吸引着海内外游客。据统计,2016年太原市旅游业接待总人数为5688.12万,同年旅游业总收入达683.98亿元,占地区生产总值的23.14%,旅游业已经成为太原市的支柱性产业之一。在全省经济结构亟需调整的背景下,太原市政府将旅游业作为全市资源型经济转型发展的突破口,旅游业的低碳化转型逐步成为区域经济深化改革的新引擎。

1.2 数据来源

原始数据均来自2010—2016年《中国能源统计年鉴》、《山西统计年鉴》、《山西省旅游星级饭店统计表》、《太原市统计年鉴》、《太原市星级饭店行业发展情况报告》、《山西河流》及太原市规划和自然资源局等,包括太原市旅游收入、游客数量、旅客周转量、能源消费量、星级饭店基本情况以及各类生态系统的基础数据,部分缺失数据以全省数据推算得到。由于各类统计资料尚未对太原市游客数量及消费构成进行详细记载,本文所需比例数据主要借鉴2010—2016年《旅游抽样调查资料》和《山西旅游发展分析与展望》。农作物相关系数、秸秆燃烧的碳排放因子参考已有文献(刘丽华等,2011;罗怀良,2014);其余各类比例系数均来自国内外学者的研

究成果。

1.3 旅游业碳排放测度模型

目前,旅游业碳排放的测算方法主要包括两大类,一类是以目的地游客数据为基础,逐步向上汇总得到总排放的"自下而上"分析法,另一类是从宏观经济与能源消费数据入手,计算完整产业碳排放的"自上而下"法(陶玉国等,2014)。客观来看,"自下而上"法对旅游碳排放的测度更为精细,同时能够识别各个要素部门排放的主要来源(董雪旺等,2016),具备较强的参考价值。基于此,本研究主要采取"自下而上"法对太原市旅游交通、住宿及游览活动碳排放进行测度,对剩余要素部门从"自上而下"的角度初步估算。

1.3.1 旅游业碳排放总量

$$C_{total}=C_t+C_a+C_h+C_r \quad (1)$$

$$C_r=C_1+C_2+C_3 \quad (2)$$

式中,C_{total}为旅游业碳排放总量;C_t、C_a、C_h 分别指旅游交通、住宿及游览活动碳排放;C_r 表示剩余要素部门碳排放;C_1、C_2、C_3 各自表示旅游餐饮、购物及娱乐活动碳排放。

1.3.2 旅游交通碳排放 基于太原市实际情况,本文选取铁路、公路及航空 3 种交通方式作为测算对象。采取模型如下:

$$C_t=T_i\times\alpha\times P_i \quad (3)$$

式中,C_t 为旅游交通碳排放量;T_i 为第 i 种交通方式的旅客周转量;P_i 指第 i 种交通方式的碳排放系数,根据已有研究成果确定铁路、公路、民航运输每位旅客每千米产生的碳排放为 0.027、0.133、0.137 kg(石培华等,2011);α 表示游客在所有旅客中所占比重,根据游客实际情况并结合专家咨询结果,确定铁路、公路和民航的 α 值为 31.6%、13.8%和 64.7%(魏艳旭等,2012)。

1.3.3 旅游住宿及游览活动碳排放

$$L_i=S_i\times F_i \quad (4)$$

式中,i 表示旅游住宿或游览活动;L_i 是第 i 类旅游活动碳排放,S_i 指旅游活动 i 环节的规模;F_i 表示进行 i 环节旅游活动所产生的碳排放。根据太原市实际情况及数据资料的可获得性,旅游住宿活动规模用星级饭店出租的床位数来表示,每张床每晚的单位能耗碳排放为 0.043 kg(Stefan *et al.*,2002)。游览活动规模以游览人数来表示,借鉴已有研究,将游览活动类型划分为观光旅游、休闲度假、商务出差、探亲访友和其他游览 5 种,每位游客在进行游览活动过程中产生的碳排放分别为 0.417、1.67、0.786、0.591、0.172 kg(石培华等,2011)。

1.3.4 剩余要素部门碳排放 为了有效地分配政策资源,必须尽可能地以旅游各要素部门的碳排放为依据。但是从当前成果来看,"自下而上"法的系统边界主要集中在交通、住宿及游憩活动(董雪旺等,2016),未能涵盖旅游各个要素活动,可能会低估实际碳排放。而对于与日俱增的旅游餐饮、购物碳排放,学界尚未形成较为成熟的估算模型。目前,国外已有学者的研究表明"自下而上"与"自上而下"两类方法的测度结果近似(Becken *et al.*,2006),但由于旅游业能耗数据难以统计、各个区域实地状况差异等原因,测度结果会有误差(Dwyer *et al.*,2010;Perch-Nielsen *et al.*,2010)。基于此,本文试从"自上而下"的角度,借鉴国内外相关学者运用两种方法测度碳排放的差异比值,对三部门测度结果进行调整,以期能够完整体现旅游业排放总量。采取的估算模型如下(陶玉国等,2014):

$$e_i^{direct}=\sum_{j=1}^{n}E_{ij}/Y_i \quad (5)$$

$$Q_i=H_i\times e_i^{direct} \quad (6)$$

式中,i 表示餐饮、购物及娱乐部门;e_i^{direct} 是 i 部门的直接能源强度(kg·10^{-4}元);E_{ij}为 i 部门对 j 种主要能源的实物消费量(标准煤);n 为能源种类;Y_i 为 i 部门的总投入,即 i 部门相关生产活动的投入量;H_i 为旅游业 i 部门的终端收入;Q_i 为旅游业 i 部门直接消耗的标准煤。这里将旅游餐饮、购物及娱乐部门分别对应投入产出表中相对契合度较高的住宿餐饮业和批发零售业及其他服务业等部门,便于合并计算能源强度。此外,由于太原市与山西省能耗结构大致相同,本文以山西能源强度替代。

$$W_i=Q_i\times K \quad (7)$$

$$C_i=W_i/\beta \quad (8)$$

式中,W_i 为旅游业 i 部门直接碳排放;K 为单位标准煤的二氧化碳排放量,根据已有研究成果,本文取值 2.45(韩元军等,2015);β 为调整系数,即综合差异比值;C_i 为调整后的剩余各要素部门碳排放。

1.4 生态系统碳吸收测度模型

陆地生态系统碳汇一般由植被和土壤两部分组成。在 1980—2009 年,中国植被和土壤的总碳汇量相当于抵消了同期化石燃料排放的 14.85% ~

27.79%(徐丽等,2018)。本文立足太原市实际情况,对森林、草地、水域及农田生态系统碳吸收进行估算。

1.4.1 森林生态系统碳吸收 对森林植被碳汇估算如下:

$$Q_a = \sum A_i \times a_i \quad (9)$$

式中,Q_a 为森林植被碳吸收;i 为植被类型,结合学者研究和实地状况,植被类型主要选取针叶林、阔叶林和混交林;A_i 为第 i 类植被覆盖面积;a_i 为第 i 类植被的年均固碳强度(kg · m^{-2}),分别定为 0.061、0.052及 0.024(刘双娜等,2012)。

1.4.2 草地及水域生态系统碳吸收

$$R_i = M_i \times b_i \quad (10)$$

式中,i 表示草地或水域生态系统,R_i 为第 i 类生态系统碳吸收量,M_i 为第 i 类生态系统面积,b_i 为第 i 类生态系统单位面积的固碳系数。太原市草地类型属于典型草地,其年均固碳系数取为 0.002 kg · m^{-2}(潘高等,2017);由于数据搜集难度,本文仅测算太原市各水系的主要支流,其固碳系数取为 0.5 kg · m^{-2}(严国安等,2001)。

1.4.3 农田生态系统碳吸收

$$C_z = C_v - C_l \quad (11)$$

式中,C_z 为生态系统净碳吸收量,C_v 为农田生态系统碳汇,C_l 为农田生态系统碳排放。

对农田植被碳汇测算如下(罗怀良,2014):

$$\sum_{i=1}^{n} S_i = \sum_{i=1}^{n} Q_i \times d_i \times (1 - f_i)/E_i \quad (12)$$

式中,i 表示不同农作物的种类;S_i 表示第 i 类作物的碳汇;d_i 表示第 i 类作物的含碳率(%);Q_i 为第 i 类作物产量;E_i 表示第 i 类作物的经济系数(%);f_i 为第 i 类作物的水分系数(%)。由于秸秆燃烧、农机使用等原因,农田生态系统碳排放已不容忽视。基于有关研究(翁翎燕等,2018)及数据可获得性,本文主要考虑以下排放途径:

$$E_a = \sum y_i \times u_i \quad (13)$$

式中:E_a 为秸秆燃烧的碳排放;i 表示不同作物的种类;y_i 为活动数据,即第 i 类作物的产量;u_i 为主要农作物秸秆燃烧的碳排放因子。

$$X_i = q_i \times \lambda_i \quad (14)$$

式中,X_i 是农业生产投入碳排放;i 表示化肥、农药、农膜;q_i 为第 i 类投入使用量(kg);λ_i 为第 i 类生产投入每千克所产生的碳排放(kg),依次为 0.8956、4.9341和 5.18(田云等,2011)。

$$E_c = B \times e + O \times g \quad (15)$$

式中,E_c 表示农业机械使用碳排放;B 表示农作物种植面积;e 为对应的碳排放系数,取值 0.0016 kg · m^{-2}(West *et al.*,2002);O 为农业机械总动力,g 为单位机械总动力对应的碳排放(kg),取值 0.18(West *et al.*,2002)。

$$E_d = Z \times w \quad (16)$$

式中:E_d 指农田灌溉过程中产生的碳排放;Z 为农业灌溉面积,w 为单位灌溉面积碳排放系数,取值 0.027 kg · m^{-2}(West *et al.*,2002)。

$$E_f = S_b \times j \quad (17)$$

式中:E_f 指农田翻耕破坏土壤有机碳库导致的碳排放;S_b 为农作物播种面积;j 为单位播种面积翻耕排放系数,取值 0.031 kg · m^{-2}(伍芬琳等,2007)。

1.5 旅游碳赤字测度模型

以往的研究大多没有考虑到生态系统碳吸收的重要性,这可能会高估碳排放对环境的不利影响(Li *et al.*,2018)。旅游碳赤字,作为区域旅游业碳均衡分析的重要指标,它既考虑了旅游经济发展水平及其排放能力,也考虑到当地生态系统的碳汇功能,是一个综合性的评价指标。本文以旅游碳赤字作为碳均衡分析的结果,通过计算区域旅游业对地区生产总值的贡献率,可以估算太原市陆地生态系统对旅游业碳排放的吸纳值。在此基础上,比较旅游业碳排放与吸纳值的差值大小,可以衡量区域旅游活动对当地环境的影响程度(董红艳等,2018)。具体模型如下:

$$U = C_{total} - \frac{I}{GDP} \times C_y \quad (18)$$

式中,U 为旅游碳赤字;I 指区域旅游收入;GDP 为地区生产总值;GDP 为生态系统碳吸收总量;C_y 为生态系统碳吸收总量;C_{total} 为太原市旅游业总碳排放。

2 结果与分析

2.1 太原市旅游业碳排放特征

2.1.1 旅游业碳排放总量分析 近年来,随着"唐风晋韵"、"清凉太原"等旅游宣传推介会在全国多地的成功举办,太原市旅游业迎来了发展的黄金期。2010—2016年,旅游收入从230.4亿元上升到

表 1 2010—2016 年太原市旅游业各部门碳排放(×10^7 kg)

Table 1 Carbon emissions for tourism sectors in Taiyuan City from 2010 to 2016 (×10^7 kg)

年份 Year	项目 Items	交通 Transport	住宿 Accommodation	游览 Sightseeing	餐饮 Catering	购物 Shopping	娱乐 Entertainment	总计 Total
2010	碳排放 Carbon emission	20.52	8.53	1.57	4.98	11.07	2.17	48.85
	占比% Percent	42.01	17.46	3.22	10.19	22.67	4.45	100
2011	碳排放 Carbon emission	22.22	10.50	2.00	4.89	11.39	2.34	53.34
	占比% Percent	41.65	19.68	3.75	9.18	21.35	4.39	100
2012	碳排放 Carbon emission	22.81	9.99	2.43	6.35	12.34	2.82	56.75
	占比% Percent	40.2	17.61	4.29	11.19	21.74	4.97	100
2013	碳排放 Carbon emission	19.53	9.56	3.05	6.99	12.74	3.77	55.64
	占比% Percent	35.1	17.19	5.48	12.57	22.90	6.77	100
2014	碳排放 Carbon emission	18.74	8.61	4.66	8.76	12.10	3.45	56.32
	占比% Percent	33.27	15.29	8.28	15.55	21.49	6.13	100
2015	碳排放 Carbon emission	19.6	6.93	5.36	9.07	12.88	5.01	58.84
	占比% Percent	33.31	11.77	9.11	15.41	21.89	8.51	100
2016	碳排放 Carbon emission	21.18	5.90	4.92	13.20	16.80	4.84	66.84
	占比% Percent	31.68	8.82	7.37	19.75	25.14	7.25	100

683.98亿元,增长近 3 倍。但是旅游业的高速发展消耗了更多的能源,导致碳排放逐年增多:从 2010 年 48.85×10^7 kg 上升到 2016 年 66.84×10^7 kg,保持着年均 5.37%的增长率(表 1)。与同期旅游收入增速的对比发现(图 1),二者的变化趋势并不一定同步:在 2011—2012、2013—2014、2015—2016 年,旅游业碳排放与收入增速呈现出完全相反的变化趋势,这可能是由于作为主要碳源的公路旅客周转量的持续减少,一定程度上影响了总排放的增速。而在 2013 年以后,太原市旅游收入的增速相对放缓,同期旅游碳排放却保持稳定增长。值得注意的是,随着太原市旅游餐饮、购物的快速发展,旅游业碳排放在 2015 年后处于加速增长阶段,到 2016 年增长率已达 13.60%,增速上升近 10%。总体来看,旅游收入的增长率始终大于碳排放,但两者的差距在逐步缩小,可见太原市旅游业的低碳发展水平还有待提高。

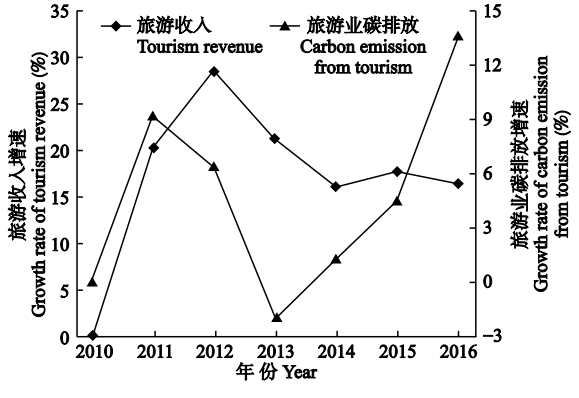


图 1 2010—2016 年太原市旅游业收入与碳排放增速变化趋势

Fig.1 Variation trend of tourism revenue and carbon emission growth rate in Taiyuan City from 2010 to 2016

2.1.2 各部门碳排放分析 在旅游交通方面,由于太原市基本没有水运交通方式,所以本文只计算了公路、铁路和民航交通碳排放。具体来看,太原市旅游交通碳排放从 2010 年的 20.52×10^7 kg 增加到 2016 年 21.18×10^7 kg,占旅游总排放的比重却由 42.01%下降到 31.68%,可见旅游交通碳排放保持缓慢增长的同时,其对总排放的影响逐年减小。各类交通方式碳排放的演化趋势并不相同(表 2),其中民航碳排放在 2010—2016 年保持着 9.36%的年均增长,在交通总排放的比重由 28.89%增加到 47.87%,成为太原市旅游交通排放的主要来源;铁路碳排放略微增加,所占比重基本不变;而公路碳排放从 2013 年起持续减少,到 2016 年仅有 5.97×10^7 kg,占当年交通总排放的 28.19%。值得一提的是,2010—2016 年铁路的旅客周转量增长了近 10%,碳排放却只增加了 0.42×10^7 kg,具有能耗小、运量大等优点,是太原市低碳旅游发展的首推交通方式。

表 2 2010—2016 年太原市旅游交通碳排放(×10^7 kg)

Table 2 Carbon emissions of tourism traffic in Taiyuan City from 2010 to 2016(×10^7 kg)

年份 Year	公路 Highway	铁路 Railway	民航 Civil aviation	合计 Total
2010	9.94	4.65	5.93	20.52
2011	9.91	5.89	6.42	22.22
2012	10.37	5.71	6.73	22.81
2013	6.33	5.41	7.79	19.53
2014	5.48	5.19	8.07	18.74
2015	5.11	4.98	9.51	19.60
2016	5.97	5.07	10.14	21.18

在旅游住宿方面,由于各类统计资料中关于星级饭店的数据最为全面,所以本文以星级饭店的床位数及单位能耗来估算旅游住宿业碳排放。具体来看,2010—2016年,太原市星级饭店碳排放除2011年有所上涨外,总体呈下降趋势:从8.53×10^7 kg减少到5.9×10^7 kg,在旅游业总排放中的比重也由17.46%下降到8.82%。与此同时,各类星级饭店出租的床位数除2011年增加到11714张,其余各年均在减少,到2016年仅有6580张。可见,星级饭店的发展规模与旅游住宿业碳排放的变化基本同步。

在游览活动方面,2010—2015年太原市游览活动碳排放显著增加,从1.57×10^7 kg到5.36×10^7 kg,年均增长20.94%,对旅游总排放的影响也在逐年扩大,到2015年占比已达9.11%。但从2015年开始,游览碳排放呈现负增长,可能是由于休闲度假游客的比重降低:到2016年底,该类游客已减少近651万人。不同游览活动类型的碳排放差异很大(表3),其中休闲度假碳排放虽在2016年有所降低,但其仍保持着22.67%的年均增长,占游览总排放的比重始终在48%以上,是太原市游览活动的主要碳源;其次为探亲访友活动,年均碳排放0.6×10^7 kg,占比17.38%;商务出差和观光旅游活动年均碳排放差异较小,所占比重较为均衡;其他游览活动碳排放最小,且无较大起伏。从整个时间段的增长趋势来看,各类游览活动碳排放都呈现波动上升的状态:其中商务出差碳排放增长最快,从2010年0.06×10^7 kg到2016年0.56×10^7 kg,年均增长率高达44.26%,其次为休闲度假游览活动,剩余各类活动也均保持着10%以上的年均增长。

从餐饮、购物及娱乐活动碳排放来看,三者在选定时间段内都呈现上升趋势。其中,购物碳排放除在2014年出现负增长外,其余年份均保持平稳增加,所占比重的均值也在20%以上,是仅次于交通的第二大旅游排放部门。餐饮碳排放在这三者之中增速最快,从2010年4.98×10^7 kg到2016年13.2×10^7 kg,年均增长17.66%,其占比也从10.19%到19.75%,对旅游业总排放的影响愈发突出。旅游娱乐部门的收入在整个时段内大幅增加,年均增长近30%,但其碳排放占比增加很小。可能的原因是,该行业对天然气等清洁能源消费的比例上升,煤炭、焦炭等传统能源比例减小,导致行业的直接能源强度逐年下降,到2016年仅39.2 kg·万元$^{-1}$。

表3 2010—2016年太原市游览活动碳排放($\times10^7$ kg)
Table 3 Carbon emissions from sightseeing activities in Taiyuan City from 2010 to 2016 ($\times10^7$ kg)

年份 Year	观光旅游 Touring	休闲度假 Leisure/vacation	商务出差 Business/meetings	探亲访友 Visiting friends/relatives	其他 Others	总计 Total
2010	0.28	0.84	0.06	0.37	0.03	1.57
2011	0.30	0.97	0.30	0.42	0.01	2.00
2012	0.35	1.21	0.30	0.56	0.02	2.43
2013	0.43	1.57	0.31	0.71	0.02	3.05
2014	0.25	3.50	0.30	0.59	0.02	4.66
2015	0.29	3.95	0.31	0.79	0.02	5.36
2016	0.70	2.86	0.56	0.74	0.06	4.92

在太原市旅游业各要素部门中,旅游交通、住宿、购物及餐饮是主要碳源部门,游览和娱乐碳排放虽在2010—2016年增长了3.13和2.23倍,但二者占比非常稳定,且均未超过10%。从整个时间段来看,只有旅游交通和住宿部门占比不断减小,其余要素部门所占比重逐年增加,这在一定程度上反映了近年来旅游消费结构的变化,游客可能更偏好购物、美食等活动。各类要素部门的增长趋势不尽相同,其中游览碳排放增速最快,实现了年均20.94%的增长;餐饮和娱乐碳排放次之,在2014年餐饮碳排放首次超过了住宿部门;交通和购物部门年均增长较慢,均未超过8%;只有住宿碳排放实现了负增长,在选定时间内减少了2.63×10^7 kg。总的来看,各要素部门对旅游总排放的影响程度依次为:旅游交通、旅游购物、旅游住宿、旅游餐饮、娱乐及游览活动。

2.2 太原市生态系统碳吸收特征

2.2.1 农田系统碳汇、碳源分析 在农田系统碳汇中,植被碳汇占主导地位。2010—2016年太原市农作物碳汇处于波动下降的趋势,从37.78×10^7 kg减少至36.80×10^7 kg,可能是由于小麦、高粱及豆类产量持续降低所致。不同作物对农田植被碳汇的贡献不同,其中玉米和蔬菜是每年的碳汇大户,二者的贡献度占到农田碳汇的90%以上;谷子、豆类、高粱的贡献超过了6%,其余作物占比很小,这在一定程度上反映了太原市的种植结构。与作物碳汇的演变趋势相反,农业碳排放总体保持着增长态势,到2016年已达14.04×10^7 kg。其中,秸秆燃烧、生产投入及农田翻耕碳排放是主要碳源;机械生产碳排放持续减少,对农业排放的影响最小(表4)。

2.2.2 综合分析 基于数据收集的现实难度,本文仅估算了太原市森林、草地、水域及农田生态系统的年均碳吸收,水域系统包括市内汾河和滹沱河水系的主要支流。除了植被系统碳吸收,对陆地生态系

表 4 2010—2016 年太原市农田生态系统碳汇碳源(×10^7 kg)

Table 4 Carbon sinks and sources of farmland ecosystem in Taiyuan City from 2010 to 2016 (×10^7 kg)

年份 Year	农田碳汇总量 Total carbon sink in farmland	秸秆燃烧碳排放 Carbon emission from straw burning	生产投入碳排放 Carbon emission from production inputs	机械生产碳排放 Carbon emission from mechanical production	农业灌溉碳排放 Carbon emission from agricultural irrigation	农田翻耕碳排放 Carbon emission from agricultural tilling	农田系统净碳吸收 Net carbon absorption of farmland systems
2010	56.05	4.77	4.32	0.21	1.02	3.55	42.18
2011	55.26	4.73	4.54	0.20	1.16	3.44	41.19
2012	55.81	4.88	4.70	0.20	1.15	3.40	41.48
2013	56.52	5.04	4.83	0.20	1.17	3.35	41.93
2014	57.74	5.18	5.01	0.19	1.14	3.19	43.04
2015	53.68	4.55	5.02	0.19	1.27	3.14	39.50
2016	54.59	4.71	4.99	0.16	1.21	2.96	40.55

统碳汇的计算还应包括土壤。本文借鉴方精云等(2007)的测算方法,按照欧洲(土壤碳汇约占总碳汇的 30%)和北美(植被碳汇的 2/3)的中值来估算太原市森林及农田生态系统土壤碳汇。

2010—2016 年,太原市陆地生态系统年均碳吸收为 122.98×10^7 kg。在各个生态系统中,森林植被和土壤系统是主要碳汇,两者对总碳吸收的贡献分别为 41%和 20%;农田生态系统也具有较强的固碳能力,其植被和土壤的年均碳汇总额已达 55.66×10^7 kg,扣除农业各类排放后仍有 41.41×10^7 kg,占陆地系统总碳汇的 33.67%;草地和水域系统碳汇能力相对较弱,二者合占 4.77%,对总碳汇的影响很小(表 5)。总的来看,陆地生态系统年均碳吸收量的大小依次为森林、农田、草地、水域。

2.3 太原市旅游碳赤字分析

由表 6 可知,2010—2016 年太原市旅游收入与地区生产总值都处于加速增长态势,年均增长率分别为 19.88%和 8.84%。其中,国内旅游收入占比始终保持在 95%以上,是旅游总收入的主要来源。从整个时间段来看,太原市年均旅游收入为 437.98 亿元,年均地区生产总值为 2410.55 亿元,占比 18.17%,说明旅游业对太原市经济增长的平均贡献率为 18.17%。若仅考虑经济因素,该值意味着太原市生态系统碳汇可用于净吸收旅游业碳排放的最大比率。

表 5 太原市生态系统年均碳吸收

Table 5 Average annual carbon absorption of Taiyuan ecosystems

类型 Type	森林 Forest	草地 Grassland	水域 Waters	农田 Farmland	合计 Total
碳吸收(×10^7 kg)	75.70	4.42	1.44	41.41	122.98
占比(%)	61.55	3.60	1.17	33.67	100.00

表 6 2010—2016 年太原市旅游收入与地区生产总值

Table 6 Tourism revenue and gross regional product of Taiyuan City from 2010 to 2016

年份 Year	国内旅游收入(亿元) Revenue from domestic tourism (×100 million yuan)	旅游总收入(亿元) Tourism revenue (×100 million yuan)	地区生产总值(亿元) Gross regional product (×100 million yuan)	旅游业贡献度 Contribution rate of tourism (%)
2010	219.27	230.40	1778.05	12.96
2011	263.55	276.70	2080.12	13.30
2012	339.69	355.55	2330.72	15.25
2013	413.52	430.90	2462.92	17.50
2014	495.33	500.01	2531.09	19.75
2015	583.34	588.35	2735.34	21.51
2016	678.66	683.98	2955.60	23.14

结合年均碳排放与生态系统碳吸收,对太原市旅游业年均碳赤字的估算值为 34.30×10^7 kg,呈现碳失衡状态(表 7)。这表明旅游业的碳排放量远超过生态系统所能提供的吸纳值,太原市旅游业成为一个显著的碳源。若继续保持传统发展模式,它将会对当地环境造成严重的负面影响。

表 7 太原市年均旅游碳赤字

Table 7 Average annual carbon deficit of tourism in Taiyuan City

旅游业贡献度(%) Contribution rate of tourism	生态系统碳吸收(×10^7 kg) Carbon absorption of ecosystem	旅游业碳排放(×10^7 kg) Tourism carbon emissions	旅游碳赤字(×10^7 kg) Tourism carbon deficit
18.17	122.98	56.65	34.30

3 讨 论

当前,多位学者们致力于旅游业碳排放的相关研究。石培华等(2011)对我国旅游业碳排放及其演化趋势进行了分析,他们发现,旅游业碳排放在研究期内均呈现增长态势,而旅游交通部门是主要碳

源。这一结论也与刘军等(2019)、韩元军等(2015)及我们以往的研究(程占红等,2015)结果基本相同。可见,各地旅游业碳减排形势不容乐观,旅游交通运输业仍是减排的重点。不同于以上研究,本文对太原市旅游业碳排放的测度结果显示了旅游购物部门的潜在排放能力,陶玉国等(2014)、赵先超等(2018)同样发现了这一点。近年来太原市旅游业逐步摆脱传统发展模式,旅游购物业成为新的经济增长点,同时也加剧了其对能源消耗的依赖程度。若不尽快提高能源利用水平,它将有望超过旅游交通碳排放,成为太原市旅游业第一大排放部门。

在生态系统碳吸收方面,鲁丰先等(2013)对中国各省区的碳汇进行了估算,研究表明,全国碳汇主要来自森林、草地和耕地,这一结论与本文的研究结果基本相符。与之相反,孙贤斌(2012)和潘高等(2017)分别对安徽、湖南等地的碳源汇进行了比较研究,他们认为耕地并不具备固碳能力,反而是区域碳排放的主要来源。从本文对太原市农田生态系统的研究结果来看,耕地同时具备碳源(农业各类碳排放)和碳汇(农田植被和土壤碳吸收)的潜质,但目前主要表现为净碳吸收,这也与翁翎燕等(2018)的研究结果一致。另外,从旅游业碳均衡的角度来看,董红艳等(2018)仅对比分析了江苏省旅游业总排放和单个森林生态系统的碳吸收。与之不同的是,本文所构建的旅游碳赤字测度模型更富理论价值和实践意义,不仅克服了已有研究大多未考虑生态系统固碳功能的局限性,而且研究系统边界更为完善,实现了对太原市旅游业碳均衡较为全面的考量。但是,受数据源所限,本研究仅选取了多年均值结果来反映旅游碳赤字情况,缺少历时动态和空间变化的全面分析,这是今后需要进一步探讨的问题。

节能减排和增汇是推动低碳旅游发展的"双引擎",只有二者同时发力,才能实现太原市旅游业的低碳转型。具体途径包括:

(1)在节能减排方面,交通在旅游业碳排放中占主导地位,控制交通出行的碳排放是太原市发展低碳旅游的重点。首先,应积极推进交通模式低碳化,构建旅游交通公共服务体系,提高单位交通周转效率,大力倡导铁路、电动车、自行车等低碳出游方式。其次,转变营销重点,加大对市内及周边地区的宣传力度,重点开发中短程旅游客源市场。关于旅游住宿碳排放,应对全市范围内的旅游饭店进行节能技术改造,包括供暖、制冷、照明、供水等方面;酒店也可以推行"绿色饭店"经营模式,以低碳环保产品代替传统高耗能产品,重视可循环物品的回收利用,减少一次性用品的提供。针对旅游购物及娱乐活动,应大力支持相关企业使用太阳能、天然气等新型能源和清洁能源,改善行业的能源消费结构,有效降低直接能源强度;还可以推广碳标签制度,优化低碳旅游购物模式并设计低碳娱乐活动,助推相关企业实现低碳经营。关于旅游餐饮碳排放,除了倡导旅游者选择绿色、环保类有机蔬菜食品外,全市旅游餐饮企业应尽量提供本地生产的食品,减少因运输、加工等过程产生的 CO_2。对于游览活动碳排放,应加快低碳旅游景区试点示范工作,建设景区旅游环境解说系统,帮助游客塑造低碳旅游行为,重点减少休闲度假游客的碳排放;此外,可以鼓励旅行社推出低碳旅游线路及"碳中和"服务产品等。

(2)在增汇方面,相关部门应积极落实林业政策,做好植树造林、防治病虫害、水土保持等工作,有效提高森林植被覆盖率,充分发挥其碳汇潜力。其次,应加强农田水利建设、因地制宜调整作物结构、改善农业生产技术条件,努力增加作物碳汇并减少农业生产过程中的碳排放。第三,加强草地的恢复与管理工作,科学测算草地系统的生产力,合理控制草地载牧量。最后,应注意保护森林植被,增加水源涵养量,适度扩大水域及周边湿地的面积,着力提高其碳吸收能力。

4 结 论

2010—2016年,太原市旅游业碳排放随着旅游规模的扩大而不断增加,从研究初期(48.85×10^7 kg)到期末(66.84×10^7 kg),年均增长超过了5%。研究期内,全市旅游收入与旅游业碳排放的增速差距在逐步缩小,旅游业的低碳发展水平尚有待提高。从碳排放结构来看,旅游交通、住宿、购物及餐饮部门是主要碳源。其中,旅游交通和住宿部门占比不断减小,其余要素部门所占比重逐年增加,这在一定程度上反映了近年来旅游消费结构的变化。

太原市陆地生态系统具有强大的固碳能力。其中,森林生态系统是主要碳汇,年均碳吸收总量高达75.70×10^7 kg。农田生态系统次之,年均净碳吸收41.41×10^7 kg。草地和水域生态系统的碳汇效应不显著,对总碳吸收的影响很小。

从净碳排放(碳赤字)的角度考虑更能反映旅游经济发展对当地环境的影响程度。太原市旅游业

年均碳赤字的估算值为 34.30×10^7 kg,呈现出严重的碳失衡状态,旅游业应该为当地环境风险承担一定的责任。同时也昭示着转变高耗能的经济增长方式,增加区域生态系统碳汇的必要性和紧迫性。

参考文献

程占红, 韩玉姣. 2015. 2000—2012 年山西省旅游业碳排放的时空差异. 陕西师范大学学报(自然科学版), **43**(6): 77-82. [Cheng ZH, Han YJ. 2015. Spatial and temporal differentiation of carbon emission of tourism industry in Shanxi Province from 2000 to 2012. *Journal of Shaanxi Normal University*(*Natural Science Edition*), **43**(6): 77-82.]

董红艳, 刘钦普, 周 丽, 等. 2018. 江苏省旅游业碳足迹与碳承载力动态对比分析. 生态经济, **34**(11): 183-187. [Dong HY, Liu QP, Zhou L, *et al*. 2018. Dynamics comparison of tourism carbon footprint with tourism carbon capacity in Jiangsu Province. *Ecological Economy*, **34**(11): 183-187.]

董雪旺, 张 捷, 章锦河, 等. 2016. 区域旅游业碳排放和旅游消费碳足迹研究述评. 生态学报, **36**(2): 554-568. [Dong XW, Zhang J, Zhang JH, *et al*. 2016. A critical review on several issues of regional tourism-related carbon emissions or its carbon footprint. *Acta Ecologica Sinica*, **36**(2): 554-568.]

方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 等. 2007. 1981—2000 年中国陆地植被碳汇的估算. 中国科学(D 辑:地球科学), **37**(6): 804-812. [Fang JY, Guo ZD, Pu SL, *et al*. 2007. Estimation of carbon sink of Chinese terrestrial vegetation from 1981 to 2000. *Science in China* (*Series D*: *Earth Sciences*), **37**(6): 804-812.]

韩元军, 吴 普, 林 坦. 2015. 基于碳排放的代表性省份旅游产业效率测算与比较分析. 地理研究, **34**(10): 153-166. [Han YJ, Wu P, Lin T. 2015. Regional tourism industry' efficiency measurement and comparative analysis based on carbon emissions. *Geographical Research*, **34**(10): 153-166.]

蓝家程, 肖时珍. 2017. 岩溶区土地利用变化对土壤有机碳与岩溶碳汇的影响研究进展. 生态学杂志, **36**(9): 2633-2640. [Lan JC, Xiao SZ. 2017. Effects of land use change on soil organic carbon and karst carbon sink in karst area: A review. *Chinese Journal of Ecology*, **36**(9): 2633-2640.]

刘 军, 问 鼎, 童 昀, 等. 2019. 基于碳排放核算的中国区域旅游业生态效率测度及比较研究. 生态学报, **39**(6): 1979-1992. [Liu J, Wen D, Tong Y, *et al*. 2019. Measuring of tourism eco-efficiency and its comparative research based on carbon emissions. *Acta Ecologica Sinica*, **39**(6): 1979-1992.]

刘丽华, 蒋静艳, 宗良纲. 2011. 农业残留物燃烧温室气体排放清单研究: 以江苏省为例. 环境科学, **32**(5): 28-34. [Liu LH, Jiang JY, Zong LG. 2011. Emission inventory of greenhouse gases from agricultural residues combustion: A case study of Jiangsu Province. *Environmental Science*, **32**(5): 28-34.]

刘双娜, 周 涛, 魏林艳, 等. 2012. 中国森林植被的碳汇/源空间分布格局. 科学通报, **57**(11): 943-950. [Liu SN, Zhou T, Wei LY, *et al*. 2012. The spatial distribution of forest carbon sinks and sources in China. *Chinese Science Bulletin*, **57**(11): 943-950.]

鲁丰先, 张 艳, 秦耀辰, 等. 2013. 中国省级区域碳源汇空间格局研究. 地理科学进展, **32**(12): 1751-1759. [Lu FX, Zhang Y, Qin YC, *et al*. 2013. Spatial patterns of provincial carbon source and sink in China. *Progress in Geography*, **32**(12): 1751-1759.]

罗怀良. 2014. 中国农田作物植被碳储量研究进展. 生态环境学报, **23**(4): 692-697. [Luo HL. 2014. Advances on carbon storage in crops of China. *Ecology and Environmental Sciences*, **23**(4): 692-697.]

马慧强, 刘嘉乐, 弓志刚. 2019. 山西省旅游交通碳排放测度及其演变机理. 经济地理, **39**(4): 223-231. [Ma HQ, Liu JL, Gong ZG. 2019. Carbon emission and evolution mechanism of tourism transportation in Shanxi Province. *Economic Geography*, **39**(4): 223-231.]

潘 高, 张合平, 潘 登. 2017. 湖南省 2000—2014 年碳排放效应及时空格局. 生态学杂志, **36**(5): 1382-1389. [Pan G, Zhang HP, Pan D. 2017. Carbon emissions and their spatial-temporal patterns in Hunan Province from 2000 to 2014. *Chinese Journal of Ecology*, **36**(5): 1382-1389.]

石培华, 吴 普. 2011. 中国旅游业能源消耗与 CO_2 排放量的初步估算. 地理学报, **66**(2): 235-243. [Shi PH, Wu P. 2011. A rough estimation of energy consumption and CO_2 emission in tourism sector of China. *Acta Geographica Sinica*, **66**(2): 235-243.]

孙贤斌. 2012. 安徽省会经济圈土地利用变化的碳排放效益. 自然资源学报, **27**(3): 394-401. [Sun XB. 2012. Effects of carbon emission by land use patterns in Hefei's economic circle of Anhui Province. *Journal of Natural Resources*, **27**(3): 394-401.]

陶玉国, 黄震方, 吴丽敏, 等. 2014. 江苏省区域旅游业碳排放测度及其因素分解. 地理学报, **69**(10): 1438-1448. [Tao YG, Huang ZF, Wu LM, *et al*. 2014. Measuring carbon dioxide emissions for regional tourism and its factor decomposition: A case study of Jiangsu Province. *Acta Geographica Sinica*, **69**(10): 1438-1448.]

田 云, 李 波, 张俊飚. 2011. 我国农地利用碳排放的阶段特征及因素分解研究. 中国地质大学学报(社会科学版), **11**(1): 59-63. [Tian Y, Li B, Zhang JB. 2011. Research on stage characteristics and factor decomposition of agricultural land carbon emission in China. *Journal of China University of Geosciences* (*Social Sciences Edition*), **11**(1): 59-63.]

王秋贤, 高志强, 宁吉才. 2014. 基于公平的中国省域碳排放差异模型构建探讨——以中国 2010 年碳排放为例. 资源科学, **36**(5): 998-1004. [Wang QX, Gao ZQ, Ning JC. 2014. Model building discussions on the provin-

cial differences of carbon emissions in China based on fairness for 2010. *Resources Science*, **36**(5): 998-1004.]

魏艳旭, 孙根年, 马丽君, 等. 2012. 中国旅游交通碳排放及地区差异的初步估算. 陕西师范大学学报(自然科学版), **40**(2): 76-84. [Wei YX, Sun GN, Ma LJ, *et al*. 2012. Estimating the carbon emissions and regional differences of tourism transport in China. *Journal of Shaanxi Normal University* (*Natural Science Edition*), **40**(2): 76-84.]

翁翎燕, 朱振宇, 韩许高, 等. 2018. 江苏省农田植被净碳汇时空格局分析. 农业工程学报, **34**(6): 233-241. [Weng LY, Zhu ZY, Han XG, *et al*. 2018. Spatial-temporal pattern of net carbon sink of farmland vegetation in Jiangsu Province. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, **34**(6): 233-241.]

伍芬琳, 李 琳, 张海林, 等. 2007. 保护性耕作对农田生态系统净碳释放量的影响. 生态学杂志, **26**(12): 2035-2039. [Wu FL, Li L, Zhang HL, *et al*. 2007. Effects of conservation tillage on net carbon flux from farmland ecosystems. *Chinese Journal of Ecology*, **26**(12): 2035-2039.]

徐 丽, 于贵瑞, 何念鹏. 2018. 1980s—2010s 中国陆地生态系统土壤碳储量的变化. 地理学报, **73**(11): 2150-2167. [Xu L, Yu GR, He NP. 2018. Changes of soil organic carbon storage in Chinese terrestrial ecosystems from the 1980s to the 2010s. *Acta Geographica Sinica*, **73**(11): 2150-2167.]

严国安, 刘永定. 2001. 水生生态系统的碳循环及对大气 CO_2 的汇. 生态学报, **21**(5): 827-833. [Yan GA, Liu YD. 2001. Aquatic ecosystem's carbon cycle and as atmospheric CO_2 sink. *Acta Ecologica Sinica*, **21**(5): 827-833.]

赵先超, 滕 洁, 谭书佳. 2018. 基于投入产出法的湖南省旅游业碳排放测算及 GRA 关联度分析. 世界地理研究, **27**(3): 164-174. [Zhao XC, Teng J, Tan SJ. 2018. Estimation of tourism carbon emissions and correlation analysis of GRA in Hunan Province based on input-output method. *World Regional Studies*, **27**(3): 164-174.]

周年兴, 黄震方, 梁艳艳. 2013. 庐山风景区碳源、碳汇的测度及均衡. 生态学报, **33**(13): 4134-4145. [Zhou NX, Huang ZF, Liang YY. 2013. Carbon sources and storage sinks in scenic tourist areas: A Mount Lushan case study. *Acta Ecologica Sinica*, **33**(13): 4134-4145.]

Becken S, Patterson M. 2006. Measuring national carbon dioxide emissions from tourism as a key step towards achieving sustainable tourism. *Journal of Sustainable Tourism*, **14**: 323-338.

Dwyer L, Forsyth P, Spurr R, *et al*. 2010. Estimating the carbon footprint of Australian tourism. *Journal of Sustainable Tourism*, **18**: 355-376.

Lenzen M, Sun YY, Faturay F, *et al*. 2018. The carbon footprint of global tourism. *Nature Climate Change*, **8**: 522-528.

Li W, An CL, Lu C. 2018. The assessment framework of provincial carbon emission driving factors: An empirical analysis of Hebei Province. *Science of the Total Environment*, **637-638**: 91-103.

Luo F, Moyle BD, Moyle CLJ, *et al*. 2020. Drivers of carbon emissions in China's tourism industry. *Journal of Sustainable Tourism*, **28**: 747-770.

Perch-Nielsen S, Sesartic A, Stucki M. 2010. The greenhouse gas intensity of the tourism sector: The case of Switzerland. *Environmental Science & Policy*, **13**: 131-140.

Rico A, Martinez-Blanco J, Montlleo M, *et al*. 2019. Carbon footprint of tourism in Barcelona. *Tourism Management*, **70**: 491-504.

Stefan G. 2002. Global environmental consequences of tourism. *Global Environmental Change*, **12**: 283-302.

Sun RH, Ye XL, Gao J, *et al*. 2019. Study on carbon footprint and spatial distribution characteristics of human activities in Jiuzhai Valley scenic area. *Applied Ecology and Environmental Research*, **17**: 7477-7493.

Wang W, Qiao JJ, Cheng JL, *et al*. 2019. Research on the impact of economic development of tourism industry based on low carbon mode. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, **14**: 241-246.

West TO, Marland G. 2002. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: Comparing tillage practices in the United States. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **91**: 217-232.

Whittlesea ER, Owen A. 2012. Towards a low carbon future-the development and application of REAP Tourism, a destination footprint and scenario tool. *Journal of Sustainable Tourism*, **20**: 845-865.

Wu SN, Li JQ, Zhou WM, *et al*. 2018. A statistical analysis of spatiotemporal variations and determinant factors of forest carbon storage under China's Natural Forest Protection Program. *Journal of Forestry Research*, **29**: 415-424.

Xu L, Shi YJ, Fang HY, *et al*. 2018. Vegetation carbon stocks driven by canopy density and forest age in subtropical forest ecosystems. *Science of the Total Environment*, **631-632**: 619-626.

Zhang JK, Zhang Y. 2018. Carbon tax, tourism CO_2 emissions and economic welfare. *Annals of Tourism Research*, **69**: 18-30.

作者简介 程占红,男,1972 年生,博士,教授,博士生导师,研究方向为生态旅游、旅游地理。E-mail: chengzhanhong@163.com

责任编辑 李凤芹