

# “国家的碳源”抑或“国家的碳汇”？ ——基于武夷山国家公园碳均衡分析

曹辉<sup>1</sup>, 吴慧珍<sup>1</sup>, 沈珊珊<sup>1</sup>, 詹欣滢<sup>1</sup>, 闫淑君<sup>2</sup>

(1. 福建农林大学经济与管理学院, 福州 350002; 2. 福建农林大学风景园林与艺术学院, 福州 350002)

**摘要:** 以国家公园为主体的自然保护地体系是中国陆地和海洋生态系统碳汇的重要来源。利用生命周期评估(LCA法)和武夷山国家公园GIS平台数据,研究了武夷山国家公园全周期旅游碳足迹测算、不同土地类型的碳吸存能力、碳源碳汇的路径和均衡、碳中和策略等四个方面内容,结果表明:(1)2019年国家公园总碳排放为2864481.86 t,其中旅游碳足迹为2836467.58 t,交通、餐饮和住宿是碳足迹最高的三个环节;(2)2019年国家公园碳吸存量为126862.61 t,乔木林地、竹林地、灌木林地是碳吸存能力最高的三种土地类型;(3)国家公园区内可实现碳中和,净碳汇值为88241.86 t,综合全生命周期结果却是显著的碳源,碳吸排比为4.48%,净碳源值为2737619.25 t;(4)构建游客、企业和法律三方面体系是国家公园重要的碳中和路径选择。

**关键词:** 国家公园;碳源;碳汇;碳均衡;武夷山

碳达峰碳中和是全球应对气候变化的政治共识和重大行动,也是中国基于推动构建人类命运共同体的责任担当和实现可持续发展的内在要求而作出的重大战略决策<sup>[1,2]</sup>。随着以国家公园为主体的中国自然保护地体系的建设与发展,截至2020年底,中国自然保护地总数量达到1.18万个,占国土面积18%以上,其中包括国家公园体制试点区10个,世界自然遗产13项,世界地质公园37处,国家级海洋特别保护区71处。自然保护地已成为中国生态文明建设的核心载体,也是中国陆地和海洋生态系统碳汇的重要来源。不低估、不高评<sup>[3]</sup>,科学客观地分析与评价国家公园等自然生态系统的碳源碳汇能力,探索与总结发展变化的动态规律,对深化自然生态系统保护修复,提升自然生态系统碳汇增量,中国的“双碳”目标和减排工作的实施都具有较为重要的理论意义与实践价值<sup>[4,5]</sup>。武夷山国家公园不仅是中国第一批5处国家公园之一,在发展建设过程中也成为世界文化与自然遗产地和中国知名的旅游目的地,同时具备了碳源与碳汇两方面的明显特征,样本对象具有较好的国家认同度、全球价值和研究代表性。

碳排放问题领域是全球应对气候变化的研究热点,呈现出多尺度、多领域、多产业共同关注、定量研究为主、定性研究为辅的特点<sup>[6]</sup>。就旅游目的地区域、旅游产业和旅游者而言,一方面该领域内的碳排放定量研究多从“自上而下”(Top-down Approach)和“自下而上”(Bottom-up Approach)两种总体思路方法展开,两种方法各有优缺点,但结果可能是相似的,Becken的新西兰旅游碳足迹测算表明了这一点<sup>[7]</sup>。生命周期评价法(Life Cycle Assessment, LCA)、情景分析法(Scenario analysis)、旅游业FML模型等方

收稿日期: 2022-02-01; 修订日期: 2022-07-11

基金项目: 国家社会科学基金项目(19BJY204)

作者简介: 曹辉(1973-),男,福建长汀人,博士,副教授,研究方向为生态旅游。E-mail: fjch2000@gmail.com

通讯作者: 闫淑君(1975-),女,河南长葛人,博士,教授,研究方向为园林生态学。

E-mail: ysjch2000@gmail.com

法是重要的旅游碳足迹计量模型方法，在旅游住宿<sup>[8]</sup>、旅游交通方式<sup>[9]</sup>、旅游吸引和活动、能源与可持续旅游发展等方面得到了广泛应用，研究者在欧洲、澳洲和亚洲都进行了模型方法的案例研究，研究范围也拓展至旅游业温室气体排放认知、能源消耗方式与旅游业、旅游业生态效率和旅游食物管理等方面。在不同尺度空间上（国家、省、市、区域或景区）中国学者取得了许多值得深入探讨的案例研究结论，如石培华等<sup>[10]</sup>估算出2008年中国旅游业CO<sub>2</sub>排放比例为0.86%，远低于全球的5%平均水平；肖建红等<sup>[11]</sup>的舟山群岛旅游生态效率值达0.0369 kg/元，非常高效率水平；窦银娣等<sup>[12]</sup>的黄山索道旅游交通碳排的27%的特殊总占比；马慧强等<sup>[13]</sup>的山西省旅游交通碳排放量与人均旅游消费水平的正效应关系；郑伯铭<sup>[14]</sup>的“一带一路”沿线省份旅游经济与碳排放的脱钩现象等。另一方面，旅游产业的碳吸存研究，始于2008年2月联合国环境规划署理事会摩纳哥全球部长级环境论坛第十次会议的全球气候中和网络（climate neutral network）<sup>[15]</sup>，有趣的是其实践活动先于理论，挪威、新西兰、苏格兰、斯里兰卡、哥斯达黎加等国家陆续确立了“碳中和”旅游目的地的目标和实施方法<sup>[14]</sup>；Gössling等<sup>[16]</sup>通过对塞舌尔岛这种小岛屿发展中国家的研究，分析了旅游业“碳中和”发展的可行性。在较大的尺度空间上，方精云等<sup>[3]</sup>利用了中国的森林资源、农业统计、气候和卫星遥感的数据，全面性地估算了森林、草地、灌木丛、以及农作物等陆地植被碳汇；李威等<sup>[17]</sup>测算出中国国家森林公园在1982—2017年间的平均固碳速率是0.45 t C · hm<sup>-2</sup>。在中国，旅游目的地的碳中和研究关注度还较低，国家公园作为中国自然保护地体系建设的主体，其生态旅游部分的碳排放碳中和研究还未受到足够的重视。

国家公园的建设不是搞“无人区”，提供优质的生态旅游服务也正是国家公园全民公益性的重要体现。那么在考虑旅游者带来的“巨大碳源”的外在条件下，国家公园还能体现“国家的碳汇”的特征吗？“双碳”战略实施的时势背景要求下，区域内碳源、碳汇能实现“碳中和”吗，该如何实现呢？因此，本文结合武夷山国家公园试点伊始的前期调查数据，通过武夷山国家公园旅游—生态系统的分析，运用LCA旅游碳足迹分析法研究国家公园的碳综合排放，基于ArcGIS平台上对国家公园的林地、耕地、草地、水体等类型进行碳吸存能力测算，从碳排放碳汇两个角度，综合研究分析武夷山国家公园的碳均衡过程与碳中和策略选择，从而为丰富中国国家公园建设和“双碳”行动的理论与实践、中国自然保护地和国家公园后续阶段的建设与发展提供科学的参考依据。

## 1 研究方法与数据来源

### 1.1 研究思路与方法

武夷山国家公园区位于福建省北部武夷山脉北段东南麓，117°24′13″~117°59′19″E、27°31′20″~27°55′49″N，森林覆盖率为87.86%，属中亚热带气候，四季气温较均匀、温和湿润，年均气温约17~19℃，年均降水量1684~1780 mm<sup>2</sup>，是福建省降水量最多地区，相对湿度高达85%，雾日在100天以上。武夷山国家公园总面积1001.41 km<sup>2</sup>，划分为特别保护区、严格控制区、生态修复区和传统利用区等四个功能区，园区国有土地面积334.51 km<sup>2</sup>，占总面积比例的33.40%；集体土地面积666.90 km<sup>2</sup>，占总面积比例的66.60%。2021年10月12日，在《生物多样性公约》第十五次缔约方大会领导人峰会上，武夷山宣布成为中国第一批设立的5处国家公园之一。

武夷山是“儒、释、道”三教名山、世界生物圈保护区、全国重点文物保护单位和世界自然与文化遗产地，也是地球同纬度地区保护最好、物种最丰富的区域生态系统，在世界国家公园中具有一定的代表性和典型性，并拥有较高的自然保护、科研开发和休闲游憩的价值。2019年生态旅游收入363.66亿元，旅游接待总人数1625.66万人次。

## 1.2 研究思路与方法

武夷山国家公园在面积上属于较小尺度的空间范围，借鉴 Beckens 等<sup>[7]</sup>、Fang 等<sup>[18]</sup>、Cadarso 等<sup>[19]</sup>、Kuo 等<sup>[20]</sup>、张瑞英等<sup>[21]</sup>、周年兴等<sup>[22]</sup>的研究结果，研究主要采用“自下而上”的思路和 LCA 法，将国家公园区域碳排放区分为生活居民碳排放和旅游者碳排放两个部分。生活居民碳排放主要测算生活食物碳足迹、交通碳足迹和日常生活能源消耗碳足迹3个大类，旅游者碳排放按其旅游活动的一般规律，分成“吃、住、行、游、购、娱”等六个环节要素进行分类测评；碳汇测算主要结合武夷山国家公园 GIS 平台综合数据信息，分别国家公园内主要土地类型，对林地、耕地、草地、水体、未利用地、建设用地和无林地等碳汇测算，其中未利用地、建设用地、无林地碳汇能力较弱且差异不大，故进行合并碳汇计算，林地则进一步细分为乔木林、竹林地、灌木林地、疏林地和其他林地等类型进行碳汇测算。综合碳源碳汇两方面结果，对武夷山国家公园旅游目的地—自然生态系统进行碳均衡分析，进而研究探讨国家公园碳中和策略与措施，测算模型与方法见图1。

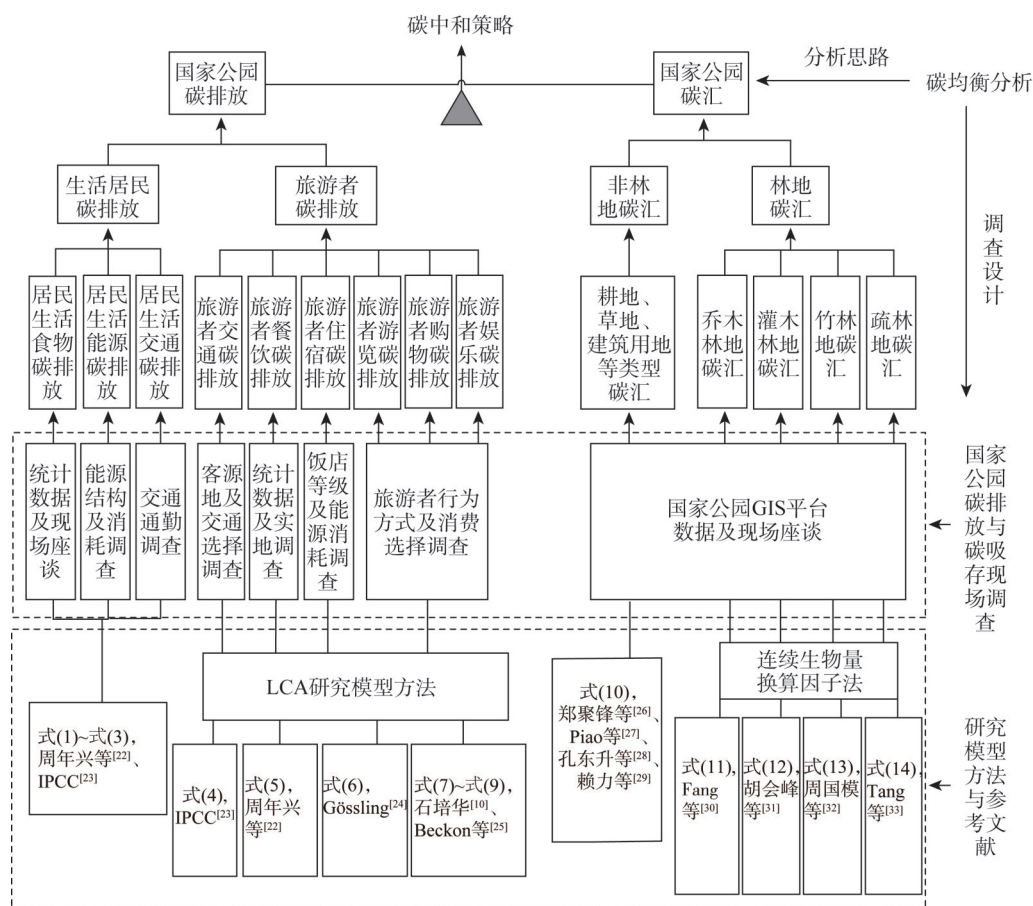


图1 国家公园碳中和研究方法与估算框架

Fig. 1 Carbon neutrality research methodology and estimation framework for national parks

$$\text{生活食物碳足迹: } LCF_a = N_a \times \partial \quad (1)$$

$$\text{生活能源消耗碳足迹: } LCF_b = N_a \times \beta \quad (2)$$

$$\text{居民交通能源消耗碳足迹: } LCF_c = D_c \times \chi \times N_c \quad (3)$$

$$\text{旅游者交通碳足迹: } TCF_t = \sum \partial_i \times \beta_i \times \chi_i, \chi_i = \sum (A_j \times B_j \times C_i) \quad (4)$$

$$\text{旅游者餐饮碳足迹: } TCF_f = N \times D \times E \times \partial_f \quad (5)$$

$$\text{旅游者住宿碳足迹: } TCF_a = C_1 + C_2 + C_3, C_1 = \sum_{i=1}^n E_i \times D_i, C_2 = \sum_{i=1}^n G_i \times U_i, C_3 = \sum_{i=1}^n R_i \times W_i \quad (6)$$

$$\text{旅游者游览碳足迹模型: } TCF_v = N \times D \times a_v \quad (7)$$

$$\text{旅游者购物碳足迹模型: } TCF_s = N_s \times E_s \times K_s \quad (8)$$

$$\text{旅游者娱乐碳足迹模型: } TCF_e = N_e \times E_e \times K_e \quad (9)$$

$$\text{非林地碳汇: } C_s = \sum S_i = \sum_{i=1}^n A_i \times \partial_i \quad (10)$$

$$\text{乔木林地碳汇估算: } C_t = B_t \times C_c, B_t = aV_t \times bA_t \quad (11)$$

$$\text{灌木林地碳汇估算: } C_l = W_l \times C_c, W_l = A_l \times \partial_a \quad (12)$$

$$\text{竹林林地碳汇估算: } C_n = A_n \times \partial_b \quad (13)$$

$$\text{疏林地及其他林地碳汇估算: } C_m = A_m \times \partial_i \quad (14)$$

式中： $N_a$ 为国家公园居民人数（个）； $\partial$ 为食物碳排放系数； $\beta$ 为日常生活能源碳排放系数； $D_c$ 为生活交通的平均距离（km）； $N_c$ 为乘车人次（人）； $\chi$ 为交通碳排放系数； $\partial_i$ 为*t*类型交通工具的碳排因子； $\beta_i$ 为*t*类型交通工具的碳放均衡因子；*j*为客源地到武夷山的过程； $A_j$ 为*j*过程中乘坐*i*类交通工具的人数（人）； $B_j$ 为*j*过程中的大圆距离（great circle distance）； $C_i$ 为乘坐*i*类交通工具的绕道平均因子，用以将大圆距离转换为实际距离（km）； $N$ 为旅游人次（人）； $D$ 为平均停留天数（天）； $E$ 为餐饮平均能耗（MJ）； $\partial_f$ 为餐饮能耗碳排放系数； $C_1$ 为酒店能源消耗碳排（MJ）； $E_i$ 为酒店能源消耗量，一般包括电能消耗、燃气、燃油消耗等； $D_i$ 为消耗能源的碳排放因子； $C_2$ 为酒店一次性用品碳排（MJ）； $G_i$ 为一次性用品消耗量（kg）； $U_i$ 为消耗一次性用品单位碳排量（kg）； $C_3$ 为酒店可循环用品碳排（kg）； $R_i$ 为可循环用品数量（kg）； $W_i$ 为清洗可循环用品的单位碳排量（kg）；旅游住宿能源消耗的CO<sub>2</sub>转换因子计为0.1585 kg·MJ； $a_v$ 表示游览过程每天平均碳排量（kg）； $N_s$ 为购物人次（人）； $E_s$ 为购物平均能耗； $K_s$ 为购物的单位能耗碳排放系数；对旅游娱乐的平均能源消耗量进行估算，得出其平均能源消耗量为9.45 MJ/（人·次）；电力的碳排放系数为0.001007 t/(kW·h)； $N_e$ 为参与娱乐人次（人）； $E_e$ 为娱乐项目平均能耗[MJ/（人·次）]； $K_e$ 为娱乐的单位能耗碳排放系数；旅游者平均能源消耗量10 MJ/（人·次）； $S_i$ 为第*i*种土地利用类型碳汇量（t）； $A_i$ 为第*i*种土地利用类型面积（hm<sup>2</sup>）； $\partial_i$ 为第*i*种土地利用类型的碳汇系数。参考郑聚锋等<sup>[26]</sup>的中国农田土壤固碳速率在20~25 Tg·a<sup>-1</sup>，可得耕地平均碳汇系数为0.1721 t·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>；参照Piao等<sup>[27]</sup>的草地碳汇系数为0.1380 t·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>；参考孔东升等<sup>[28]</sup>河渠的水体碳汇系数为0.6710 t·hm<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>；未利用地、建设用地、无林地三种土地类型用地碳汇系数按0.0005计<sup>[29]</sup>； $C_t$ 为*t*种树种的碳吸收量； $B_t$ 为*t*种乔木树种的生物量（t）； $C_c$ 为含碳系数； $a$ 和 $b$ 为生物量与蓄积量转换模



型的参数;  $V_i$  为  $i$  种树种的总蓄积量 ( $\text{m}^3$ );  $A_i$  为  $i$  种树种的面积 ( $\text{hm}^2$ );  $C_i$  为  $i$  种树种的碳吸收量 ( $\text{t}$ );  $W_i$  为  $i$  种灌木树种的生物量 ( $\text{t}$ );  $A_i$  为  $i$  种灌木; 参照胡会峰等<sup>[31]</sup>的研究方法, 温带、亚热带落叶灌丛矮林的生物量系数为  $12.48 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ;  $C_n$  为  $n$  种竹林的碳吸收量 ( $\text{t}$ );  $A_n$  为  $n$  种竹林的面积 ( $\text{hm}^2$ );  $\partial_b$  为碳汇系数;  $C_m$  为  $m$  种土地产生的碳吸收量 ( $\text{t}$ );  $A_m$  为  $m$  种林地的面积 ( $\text{hm}^2$ );  $\partial_c$  为  $c$  种林地的碳汇系数。参考 Fang 等<sup>[30]</sup>、Tang 等<sup>[33]</sup>的研究方法, 疏林地碳汇系数取  $0.5800 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , 其他林地碳汇系数取  $0.2327 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

### 1.3 数据收集与调查

碳汇测算所需数据主要参考武夷山国家公园本底资源调查结果和 GIS 平台集成数据信息, 其主要包含有武夷山国家公园历史土地分类统计信息、林业小班主要树种、树龄、平均胸径、平均树高、面积、蓄积及其相关信息资料。

碳排放分为生活居民碳排放和旅游者碳排放两个部分。前者所需数据主要参考福建省、南平市和武夷山市等统计年鉴数据和相关资料报告, 如本地居民生活消费数据、国家公园居民数量、交通、能源消耗等情况。后者的数据问题是运用“自下而上”方法研究旅游者碳排放的主要困难之一, 研究主要采用随机抽样方式进行。在 2015—2020 年间通过“面对面”形式对武夷山国家公园旅游者进行访谈, 调查共进行 12 次, 每次调查期约为 3~7 天不等, 季节主要集中在 1 月、3 月、7 月和 10 月, 基本上覆盖了武夷山国家公园旅游淡旺季。研究共发放问卷 1966 份, 回收有效问卷 1719 份, 问卷总体有效率为 87.44%, 其中 2019 年、2020 年的问卷增加了旅游者行为和意愿的选择实验法 (Choice Experiment, CE 法) 调查<sup>[34]</sup>。在此期间, 还对武夷山旅游产业情况进行多次座谈访问, 得到所涉及行业部门或企业的直接或间接的相关数据, 这两部分调查数据主要包括了旅游者社会经济状况、旅游行为方式与消费选择、国内外旅游接待量、旅游产业经济规模、行业企业能源消耗量、住宿企业和餐饮企业经营管理等基础数据。

研究还通过参阅相关统计资料、文献及前人研究成果的分析得到测算所需的其他数据, 如世界平均旅游碳排放强度系数、福建省第三产业、交通住宿餐饮等各行业的能源消耗系数、福建省碳排放强度系数和经换算分析而得的能源强度系数等 (表 1)。

## 2 结果分析

表 1 能源强度系数

Table 1 Energy intensity coefficient

### 2.1 本地居民碳足迹测算

2019 年武夷山国家公园内居民人口为 3352 人, 本地居民碳足迹主要包括了食物碳足迹、交通碳足迹和生活能源碳足迹两大部分。本地居民生

活食材一般可分为粮食、油脂、蔬菜及菜制品和肉类等 9 个类别, 结合 2019 年福建省居民人均食品消耗数量和各食物类型碳排放系数, 依据式 (1), 可得出 2019 年武夷山国家公园本地居民食物碳足迹为 24436.92 t。

本地居民生活主要消耗的能源为煤炭、汽油、液化石油气、天然气和电力等五个类别, 结合 2019 年福建省居民人均生活能源消耗数量 428.44 kg 标准煤, 汇总统一折算成标准煤计量, 依据式 (2), 可得出 2019 年武夷山国家公园本地居民生活能源碳足迹为 3518.52 t。

年份	2015	2016	2017	2018	2019
第三产业	0.2868	0.2708	0.2451	0.2376	0.2298
交通运输业	0.6855	0.6596	0.6373	0.9352	0.9362
住宿餐饮业	0.7097	0.7244	0.7175	0.6200	0.6266

注: 数据来源于 2016—2020 年《福建省统计年鉴》。

本地居民的交通碳排放主要统计公园内居民至市区的公共交通和私家车交通这两种方式，桐木村到市区每日发车2班，路程72 km，每车旅客按12人计，私家车2019年按300辆计，每车按5人计，依据式（3）可得2019年武夷山国家公园本地居民交通碳足迹为58.84 t。

## 2.2 旅游者碳足迹测算

### 2.2.1 旅游餐饮碳足迹

旅游餐饮碳足迹主要包括食材生命周期过程中所产生的碳足迹，以及餐饮企业使用燃煤、天然气、电力等产生的碳足迹。借鉴周年兴等<sup>[22]</sup>、IPCC<sup>[23]</sup>（Intergovernmental Panel on Climate Change，联合国政府间气候变化专门委员会）的食材分类和计算方法，结合2015—2019年《福建省统计年鉴》的人均食品消耗和人均生活能源消费量数据，旅游餐饮碳足迹根据旅游者数量、平均逗留天数、不同食材生命周期过程的消耗量与各自的生产排放系数、加工排放系数乘积加总而得。其中旅游者食品消费量按居民人均消费量的1.5倍估计，加工能源类主要按电能、燃气等统计，依据式（5）测算，结果表明：2019年武夷山旅游餐饮人均每日碳排放32.84 kg/人/天，总量为818603.78 t。

### 2.2.2 旅游住宿碳足迹

武夷山三姑旅游度假区内住宿类型众多，包含了武夷山悦华酒店、武夷山庄、维也纳酒店、如家酒店等单体或连锁型酒店，五星级豪华型酒店至经济舒适型酒店等多种酒店类型，是大多数旅游者住宿的主要选择地，故对武夷山酒店经营管理的实地访谈与相关数据调查主要在武夷山三姑旅游度假区内展开。

旅游住宿的碳足迹主要包括了能源消耗、一次性用品和可循环用品三个部分。依据式（6）测算。酒店的能源消耗水平主要参照国内外学者李鹏等<sup>[8]</sup>、Gössling<sup>[24]</sup>的研究结果，不同星级酒店每床能源消耗量不同，五星级计为每床150 MJ、四星级计为每床70 MJ、三星级及以下计为40 MJ。一次性用品一般包括酒店六小件（一次性香皂、牙刷等6项）以及其它酒店配套生活用品（卷纸、浴帽等20余项），可循环用品一般包括桌布、床单、被套、浴巾、毛巾等。一次性用品和可循环用品消耗量主要通过酒店的总床位数与抽样调查所得的年客房出租率估算确定。酒店的等级划分主要参考武夷山旅游行业统计资料，未参与星级评定的酒店参照携程、美团等网站的划分结果，详见表2。

### 2.2.3 旅游交通碳足迹

武夷山国家公园的旅游交通碳足迹包括了外部交通和内部交通两大部分，依据式（4）测算。内部交通主要计算三条不同游览线路的旅游者数量和距离各自形成的碳排放；外部交通距离根据旅游者居住城市至武夷山市之间的距离测算，目的地终点主要包括了武夷山国际机场、南平市站（2019年12月14日前名为武夷山站）、武夷山北站和

表2 不同等级酒店的碳足迹量表

Table 2 Carbon footprint scale for different classes of hotels

等级	床位数 /个	平均出租 率/%	每床耗能量 /MJ	能源消耗的CO <sub>2</sub> 因子 /(kg/MJ)	可循环用品碳排 放/t	一次性用品碳排 放/t	住宿碳足 迹/t
五星级	970	65	150		11.51	4.60	5487.51
四星级	2466	75	70	0.1585	33.75	13.50	7537.13
三星级及以下	40007	79	40		576.80	230.72	73945.88
总计	43443	73					86970.52

武夷山汽车站。根据旅游者选择的不同交通方式,交通距离分别以中国铁路12306网站数据、中国航空网和高德地图为主要参考标准,同时依据不同的运载工具和距离情况乘以对应的均衡因子与绕道因子。

可以得出景区内部交通碳足迹逐年递增,2015年为14560.54 t,2019年为24647.48 t。外部交通随着游客数量的增加而增加,2019年达到近五年最高值为1819222.85 t。在2019年外部交通碳足迹中,通过航空交通方式所产生碳足迹为1203863.62 t,通过火车所产生碳足迹为222759.03 t,通过汽车所产生碳足迹为171191.94 t,通过私家车所产生的碳足迹为221408.25 t,其中选择航空交通方式的人数占全部游客占比最小为10.66%,但其产生的碳足迹为最高的,详见表3。

#### 2.2.4 旅游者游览、娱乐和购物碳足迹

武夷山国家公园属于较典型的观光型旅游目的地,游览的方式主要涉及登山(天游峰)、竹筏漂流(人工撑运)、徒步(一线天、大王峰)等形式,景点之间主要由游览大巴或中巴进行换乘,景区之内基本形成封闭式的管理。依据式(7),参考石培华等<sup>[10]</sup>的游览碳排放系数和各年度旅游者平均停留天数,可得旅游者游览碳足迹为10395.91 t。

旅游者娱乐活动平均能源消耗量参照Beckon等<sup>[25]</sup>、汤姿等<sup>[35]</sup>的研究,娱乐活动主要来源于观看印象大红袍和周边卡拉OK以及酒吧等娱乐活动,按百分之十的游客参与此类娱乐活动进行测算。

旅游购物碳足迹主要考虑旅游购物点的能源消耗,依据式(9)计算,2019年旅游购物碳足迹为46186.11 t。

综上所述,结合2015—2019年数据可得武夷山国家公园5年间碳排放测算结果(表4)。从总体上看,2015—2019年武夷山总排放量呈上升趋势,由2127940.53 t到2864481.86 t,碳足迹总量同游客量呈正相关的关系,人均碳排放呈先上升后下降的趋势,2017年达到最大值为229.00 kg/人次。通过生命周期模型计算的碳足迹结果中,2019年交通碳足迹占比最高为65.28%,其次是娱餐饮和住宿,分别为28.58%和3.40%,旅游交通对碳排放有非常重要的影响。

### 2.3 碳汇量测算

#### 2.3.1 非林地碳汇

武夷山国家公园森林覆盖为87.86%,以亚热带森林生态系统为主要特征。根据2019年武夷山国家公园森林资源二类清查数据和GIS平台土地覆被情况,将武夷山国家公园生态系统碳汇分别林地和非林地两个部分进行测算,其中非林地依据式(10)测算,主要包括了耕地、草地、水体、未利用地、建设用地和无林地等类型,面积与分布情况可见图2。

公园耕地主要种植茶叶及其他农作物,主要考虑农田土壤碳汇,参考郑聚锋等<sup>[26]</sup>的测算方法,可得武夷山国家公园耕地碳汇总量为154.6681 t/a。

草地具有一定的碳汇潜力,在陆地碳循环过程中具有重要地位<sup>[36]</sup>。武夷山国家公园的草地类型多为中高山草甸,草地面积为0.9641 hm<sup>2</sup>。参照Piao等<sup>[27]</sup>的草地碳汇系数,经测算可得武夷山国家公园草地碳汇总量为0.1330 t/a。

水体碳汇包含江河、湖泊、水库、坑塘等类型,武夷山国家公园水体属山地溪流,面积为57.3009 hm<sup>2</sup>,参考孔东升等<sup>[28]</sup>河渠的水体碳汇系数,经测算可得武夷山国家公园

表3 武夷山旅游者外部交通碳排放量表

Table 3 Carbon emission statistics for external transportation of tourists in Wuyi Mountains

省份	航空		火车		汽车		私家车		总碳排放量 /t	人均碳排放 /kg
	航线距离/km	碳排放量/t	路程距离/km	碳排放量/t	路程距离/km	碳排放量/t	路程距离/km	碳排放量/t		
江西	237	0	314	1029.91	309	5568.99	309	7202.55	13801.45	20.91
福建	232	1319.17	304	3768.70	348	16658.07	348	21544.44	43290.38	22.65
浙江	500	94885.16	495	6183.27	438	28919.52	438	37402.58	167390.55	65.79
安徽	462	0	776	1747.90	625	6379.96	625	8251.41	16379.27	42.03
湖北	932	27833.45	651	1297.99	658	3874.34	658	5010.81	38016.59	136.52
江苏	481	40186.32	998	6882.33	709	10304.77	709	13327.50	70700.92	87.51
湖南	496	21324.30	674	1934.60	647	5484.26	647	7092.98	35836.15	86.48
上海	600	169114.34	679	6388.63	611	25330.77	611	32761.14	233594.89	118.32
广东	650	37793.73	1079	9696.29	945	10902.04	945	14099.97	72492.03	95.92
河南	952	0	1289	8599.39	1245	24528.22	1245	31723.17	64850.79	76.62
山东	978	86541.03	1843	10922.44	1250	22224.17	1250	28743.26	148430.90	172.91
广西	819	0	1549	2080.49	1070	4244.04	1070	5488.95	11813.48	69.70
陕西	1153	0	1551	10788.50	1386	0	1386	0	10788.50	40.71
贵州	1138	0	1498	1316.03	1406	624.10	1406	807.17	2747.31	57.17
重庆	1142	0	1982	1473.18	1544	1721.44	1544	2226.39	5421.01	86.79
海南	1168	4596.68	1760	462.44	1539	0	1539	0	5059.12	289.66
河北	1205	0	1607	12047.68	1530	0	1530	0	12047.68	42.18
山西	1237	0	1838	23496.53	1590	0	1590	0	23496.53	48.25
天津	1266	108685.43	1566	0	1553	0	1553	0	108685.43	577.85
北京	1383	354350.59	1763	29560.77	1649	0	1649	0	383911.36	338.76
四川	1396	11231.88	1949	7286.07	1848	2987.46	1848	3863.78	25369.18	128.64
黑龙	2159	36024.91	2982	11420.72	2712	0	2712	0	47445.63	305.07
云南	1547	5816.16	2157	2681.73	1906	1439.80	1906	1862.14	11799.83	161.18
内蒙	1592	0	2174	3421.89	2027	0	2027	0	3421.89	57.07
宁夏	1623	0	2592	1813.26	2111	0	2111	0	1813.26	68.04
甘肃	1628	33014.65	1998	7971.44	2037	0	2037	0	40986.09	225.10
辽宁	2044	70780.85	2442	19409.59	2160	0	2160	0	90190.44	281.32
青海	1822	14885.98	2185	1195.62	2276	0	2276	0	16081.59	444.49
吉林	1905	0	2596	27881.64	2458	0	2458	0	27881.64	68.15
香港	727	85478.96	0	0	0	0	0	0	85478.96	331.83
合计	1203863.62		222759.03		171191.95		221408.25		1819222.85	71.74
比例/%	66.17		12.24		9.41		12.17		100.00	

水体碳汇总量为38.4489 t/a。

公园内未利用地主要指低植被覆盖度的土地，建设用地主要包括居民地、交通过用地及商用地等，无林地主要为一些采伐、火烧、其他迹地以及规划造林地、其他宜林地，三者土地碳汇能力较弱，面积合计为471.5549 hm<sup>2</sup>，按赖力等<sup>[29]</sup>的土地碳汇系数测算，可得武夷山国家公园未利用地碳汇总量为0.2358 t/a（表5）。



表4 国家公园碳排放汇总表  
Table 4 Summary of carbon emissions from national parks

类别	碳排放分类	碳排放量/(TCF/t)				
		2015年	2016年	2017年	2018年	2019年
本地居民	食物碳排放	26281.42	26902.98	26262.62	25853.54	24436.92
	交通碳排放	55.91	56.64	57.37	58.11	58.84
	能源碳排放	2845.35	3067.00	3287.42	3390.65	3518.52
	居民总碳排	29182.68	30026.63	29607.41	29302.30	28014.28
	人均碳排放	8.71	8.96	8.83	8.74	8.36
旅游者	餐饮碳排放	893348.00	1028781.86	1186181.23	741359.33	818603.78
	住宿碳排放	74160.25	79861.62	81567.87	84210.34	86970.52
	交通碳排放	1090589.01	1332369.97	1587483.51	1722541.19	1869946.67
	游览碳排放	10783.19	12087.92	14179.01	8969.09	10395.91
	娱乐碳排放	2579.64	2891.77	3392.01	4004.21	4364.59
	购物碳排放	27297.76	30600.70	35894.31	42372.63	46186.11
总计	人均碳排	218.07	230.06	229.00	173.82	173.50
	碳排总量	2127940.53	2516620.47	2938305.36	2632759.09	2864481.86
	变化率/%	—	18.27	16.76	-10.40	8.80

2.3.2 林地碳汇

武夷山国家公园林地按优势树种可分为乔木林地、竹林地、灌木林地、疏林地和其他林地等类型，依据式（11）~（14）进行测算。

乔木林包括了马尾松（*Pinus massoniana* Lamb.）、杉木 [*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.]、栎类、其他硬阔类等 15 个类型，不同优势树种不同龄组，生物量不同，碳汇能力也不同。武夷山国家公园乔木林地碳汇采用连续生物量换算因子法<sup>[30,37]</sup>，估算各森林类型的生物量密度及碳转换系数，结合乔木树种的平均年龄 54.80 年，测算可得武夷山国家公园乔木林地碳汇总量为 103664.98 t/a，详见表 6。

武夷山国家公园竹林地中毛竹林面积为 12304.24 hm<sup>2</sup>，杂竹林的面积为 69.70 hm<sup>2</sup>，由于杂竹林地面积比例较小且种类不一，计算时将其归入毛竹林地合并处理。参照周国模<sup>[32]</sup>等

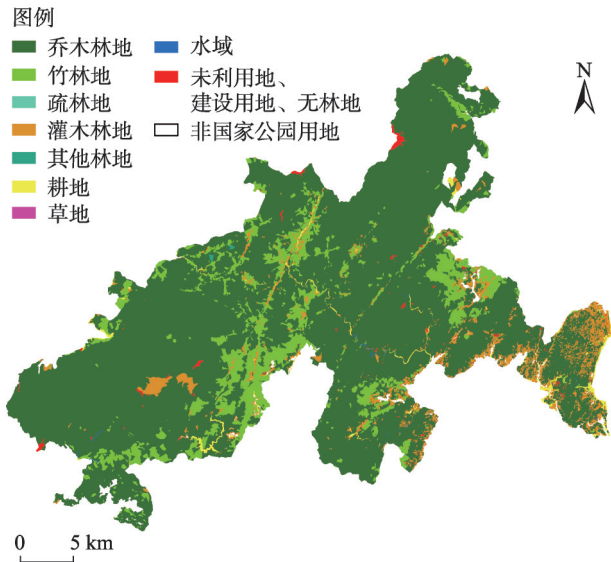


图2 武夷山国家公园土地覆被  
Fig. 2 Land cover map of Wuyi Mountain National Park

表5 非林地碳汇测算 Table 5 Non-forest land carbon sink measurement			
土地类型	面积/hm <sup>2</sup>	系数	碳汇/t
耕地	898.7109	0.1721	154.6681
草地	0.9641	0.1380	0.1330
水域	57.3009	0.6710	38.4489
未利用地、建设用地、无林地	471.5549	0.0005	0.2358

表6 乔木林地碳汇测算表  
Table 6 Tree woodland carbon sink estimation

优势树种	面积/hm <sup>2</sup>	林分蓄积/m <sup>3</sup>	系数a	系数b	生物量/t	碳汇/t
马尾松	27380.81	3909395	0.5101	1.0451	2022798.07	1011399.04
黄山松 ( <i>Pinus taiwanensis</i> Hayata)	179.87	14898	0.5101	1.0451	7787.45	3893.72
杉木	5337.13	1036452	0.3999	22.5410	534781.37	267390.68
柳杉 ( <i>Cryptomeria fortunei</i> Hooibrenk ex Otto et Dietr)	1.35	112	0.4158	41.3318	102.29	51.14
水杉 ( <i>Metasequoia glyptostroboides</i> Hu & W. C. Cheng)	0.51	81	0.5168	33.2378	58.81	29.40
刺柏 ( <i>Juniperus formosana</i> Hayata)	1.64	16	0.6129	46.1451	85.40	42.70
红豆杉类	0.30	4	0.5168	33.2378	12.01	6.01
其他杉类	1.16	106	0.5168	33.2378	93.32	46.66
栎类	1013.25	144219	1.1453	8.5473	173834.58	86917.29
赛山梅 ( <i>Styrax confusus</i> Hemsl. var. <i>confusus</i> )	0.12	15	1.0357	8.0591	16.49	8.24
樟树类	0.17	3	1.0357	8.0591	4.47	2.24
木荷 ( <i>Schima superba</i> Gardn. et Champ.)	6.29	128	1.0357	8.0591	183.24	91.62
其他硬阔类	48037.40	6783604	0.6255	91.0013	8614609.71	4307304.85
无患子 ( <i>Sapindus mukorossi</i> Gaertn.)	0.15	0.11	1.0357	8.0591	1.34	0.67
其他软阔类	44.66	5521	0.6255	91.0013	7517.83	3758.92
碳汇总和				5680943.18		
年碳汇				103664.98		

的研究方法，竹林生长周期以60年计，测算可得武夷山国家公园竹林地碳汇总量为21935.1070 t/a。

武夷山国家公园灌木林地面积包含了灌木经济林面积3465.42 hm<sup>2</sup>和一般灌木林面积760.82 hm<sup>2</sup>，树种树龄集中分布在20~30年之间。参照胡会峰等<sup>[31]</sup>的研究方法，灌木龄组按中间值25年计，测算可得武夷山国家公园灌木林地碳汇总量为1054.8711 t/a。

参考Fang等<sup>[30]</sup>、Tang等<sup>[33]</sup>的研究方法，武夷山国家公园其他林地面积为59.5412 hm<sup>2</sup>（主要包括未成林地和苗圃地），疏林地的面积为0.5374 hm<sup>2</sup>，测算可得武夷山国家公园灌木林地碳汇总量为0.3117 t/a，武夷山国家公园其他林地碳汇总量为13.8552 t/a。

2.4 碳均衡分析

旅游者活动是一种从定居地到目的地之间的空间位移活动，具有多环节、跨区域的特点。因此从碳排放的空间上分析，可以将旅游活动引致的碳排区分为武夷山国家公园区内和区外两个部分，区内主要包括了旅游者内部交通和游览活动等2个环节碳排放，区外主要包括了旅游者外部交通、餐饮、住宿和娱乐等4个环节碳排放；相应地，本地居民碳排放也可以分为公园区内居民碳排（交通和能源部分）和公园区外居民碳排（食物部分）。

2019年武夷山国家公园生态系统碳汇为126862.61 t。2019年武夷山国家公园区内总排放，包括了居民碳排放3577.36 t，占比为0.13%；旅游者碳排放35043.39 t，占比为1.24%；区外总排放，包括了居民碳排放24436.92 t，占比为0.86%；旅游者碳排放2767865.50 t，占比为97.77%。从碳均衡的角度上看，2019年武夷山国家公园生态系统碳汇量大于国家公园内的总碳排放量，年均净碳汇量为88241.86 t，实现了“碳中和”，

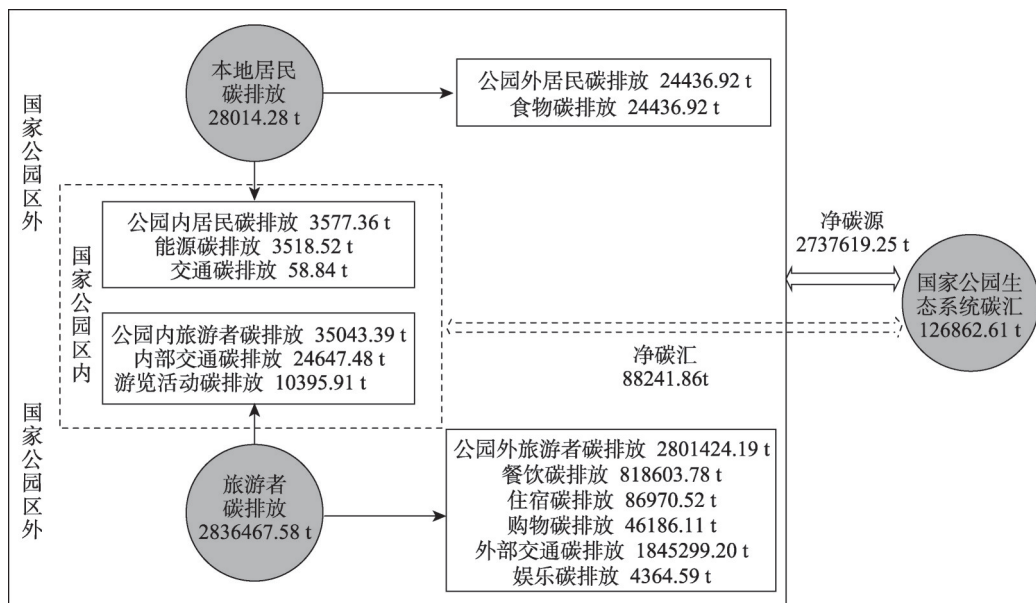
是一种“碳汇”的状态；而国家公园生态系统碳汇量国家公园内外的总碳排放量，即小于旅游者活动全生命周期碳足迹所带来的排放，年均净碳源量为2737619.25 t，表现为“碳赤字”，是一种“碳源”的状态，其碳源、碳汇及碳均衡情况参见图3。

根据方精云等<sup>[3]</sup>2007年的估算，美国陆地生态系统吸收了国家工业碳排放的30%~50%，欧洲陆地生态系统吸收了其国家工业碳排放的7%~12%，中国陆地生态系统则吸工业碳排放的20.8%~26.8%。李威等<sup>[17]</sup>2021年测算出中国881处国家森林公园总碳储量为3.56 Pg C，约为全国森林生态系统总碳储量的11.0%~12.2%，1982—2017年国家森林公园平均固碳速率为 $0.45 \text{ t C} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，国家森林公园的森林生态系统表现出较强的碳吸收能力。武夷山国家公园森林覆盖率为87.86%，假定2015—2019年间武夷山国家公园生态系统每年碳吸存量保持不变，则公园生态系统分别吸收了2015—2019年旅游者活动全生命周期碳足迹的6.04%、5.11%、4.35%、4.86%和4.48%，总体吸收水平较低。与其他区域的旅游碳排比较，肖建红等<sup>[11]</sup>2011年测算舟山群岛旅游过程（包括旅游交通、住宿和景区游览等）碳足迹为376587.8606 t CO<sub>2</sub>-e，旅游交通碳足迹最大，为291770.0365 t CO<sub>2</sub>-e，旅游碳效率较高，其值为0.0369 kg CO<sub>2</sub>-e/元，国外旅游碳生态效率一般在0.0131~1.6080 kg CO<sub>2</sub>-e/元之间，武夷山国家公园效率情况正常。总的来说，武夷山国家公园旅游者活动是一种对自然资源要求较高、碳排放消耗较高的活动方式。

### 3 结论与讨论

#### 3.1 结论

国家公园的碳源碳汇的综合评估是计量自然保护地碳能力、提高自然保护地碳效用



注：区内指武夷山国家公园1001.41 km<sup>2</sup>面积范围内，其包括了桐木村、麻栗村等社区居住地，主要考虑园内居民和旅游者的活动碳排；区外指武夷山国家公园边界以外，主要考虑在园内生活的居民的外部食物供给碳排，为了进入园内的旅游者在外部的交通碳排、住宿（毗邻国家公园的三姑度假区为代表）碳排和餐饮碳排等。

图3 武夷山国家公园碳源、碳汇均衡

Fig. 3 Balance of carbon sources and sinks in Wuyi Mountain National Park

的重要基础，是中国自然保护地体系应对目的地对全球气候变化的影响，为政府科学制定节能减排政策的重要依据。通过对武夷山国家公园碳源、碳汇和碳均衡的综合分析，可以得出以下几点结论：

(1) 采用自下而上的思路 and 全生命周期 (LCA) 旅游碳足迹分析法对武夷山国家公园进行测算，得出 2015—2019 年武夷山国家公园旅游者活动总体碳排放分别为 2127940.53 t、2516620.47 t、2938305.36 t、2632759.09 t、2864481.86 t，总体呈上升趋势，这与旅游者数量逐年增长方向一致。但值得注意的是，其与碳排放增长率的变化趋势并不一致，如 2018 年旅游者数量增长率为 18.05%，碳排放增长率为 -10.40%。在总体碳排放中，比例最高是旅游者交通、餐饮和住宿等三个环节，2019 年分别占比 65.28%、28.58% 和 3.04%。

(2) 通过对土地覆被的分类细化计算，可知在武夷山国家公园生态系统中，林地是碳汇能力最重要的土地类型，碳汇占比为 99.85%。在林地中，硬阔类和马尾松是是碳汇能力最重要的森林类型，其面积和碳汇能力分别为 48037.40 hm<sup>2</sup>、27380.81 hm<sup>2</sup> 和 4307304.8534 t、1011399.0353 t。按《京都协议》确定清洁发展机制 (CDM) 价格 24.2 美元/t 和 2020 年美元人民币平均汇率 6.4512 估测，年均碳汇价值为 3070075.21 美元或 1980.57 万元。

(3) 从武夷山国家公园管理边界来看，武夷山国家公园旅游—生态系统是一个碳汇，年均净碳汇量为 88241.86 t，旅游者在国家公园内的主要活动碳排放是可以实现碳均衡的，也符合“碳中和”目标要求。但从旅游者活动的全生命周期碳足迹来分析，武夷山国家公园则成为一个显著的碳源，年均净碳源量为 2737619.25 t。虽然从经济效率角度来分析，2019 年从旅游碳足迹效率为 12698.28 元/t，与全球平均水平 1430 美元/t 相比，是一个较高的效率水平，但从长远的发展看，节能减排仍是武夷山国家公园区域需持续加强的重要工作。

### 3.2 讨论

综合武夷山国家公园的研究分析和中国自然保护地体系的发展情况，可以从旅游者、企业、政府管理和法律保障几个角度出发，促进中国国家公园的碳中和管理的实现 (图 4)。首先，应提高碳经济效率，构建旅游者成长体系。从碳价值与使用价值实现过程中，一方面“减量”，通过各种渠道与教育技术形式，提升旅游者个体对“双碳”目标的认知和低碳意识的培养；另一方面是“增效”，不片面倡导低能耗的交通方式或行为的强制选择，“以最小的碳排放换取最大的生态经济收益”。不同环节和行业部门的碳效率是不同的，徒步、竹筏、登山等自然体验环节应多加引导和鼓励，努力将中国国家公园打造成世界标准的“碳中和”旅游目的地<sup>[14]</sup>。其次，应合理碳排放布局，强化企业碳中和行为促进体系。国家公园生态旅游产品经营企业可从内部激励和外部激励两方面入手，强化相关企业或组织碳中和与碳达峰的行为责任，在内部主动生产和提供负责任的低碳旅游产品，激励旅游者产品消费时的低碳选择行为，如在武夷山开展的低碳积分、低碳护照等形式行动。在外部努力对区域环境与社区承担企业社会责任，武夷山国家公园区内的“碳盈余”情况则主要受益于区域合理的协调与设计，这一点与其他景区的情况有较明显差别<sup>[22]</sup>。最后，应做好监督管理，完善自然保护地相关法制保障体系。在碳



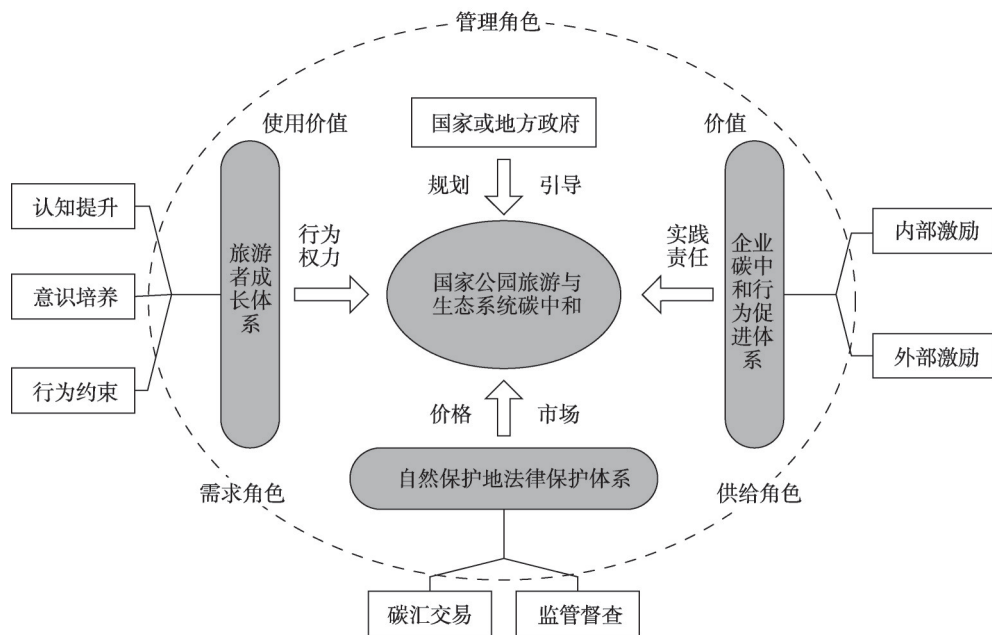


图4 国家公园碳中和目标管理

Fig. 4 Carbon neutrality target management in national parks

汇市场交易体系中，国家公园、国家及地方政府管理扮演的是管理者角色，这并不妨碍其管理资源的碳汇价值的市场化体现，也不影响国家公园或自然保护地公益性的地位。2021年成立的三江源国家公园面积为12.31万 km<sup>2</sup>，约为武夷山国家公园面积的125倍，其碳汇价值虽未见正式报道，但相应推算其碳汇结果应是一个较为可观的数值。科学客观地分析国家公园及自然保护地的生态系统碳吸存价值<sup>[1]</sup>，建立相关资源资产交易的法律保障规则体系，有利于中国碳排放交易市场的建立、对国际碳配额交易规则的主动适应和国家利益话语权的积极维护<sup>[38]</sup>。

由于研究在碳汇和碳排放估算中，引用的相关的核心参数源于国内外已有调查研究的经验数据或分析结果，尤其部分是国外相关研究成果或全球平均水平的估算，其是否合适中国或武夷山国家公园碳源碳汇的综合测算，值得进一步分析和讨论。值得指出的是，本文对武夷山国家公园碳源碳汇测算结果可能有所偏差，主要原因在于：（1）对于旅游者活动环节碳排放的不同理解，如肖建红等<sup>[11]</sup>对于旅游废弃物的计量，虽然黄和平等<sup>[39]</sup>、王立国等<sup>[40]</sup>大多数旅游碳足迹研究并未将其包括在内。当然也有学者认为由于旅游者活动涉及环节和产业范围很广，旅游碳足迹应仅限于旅游目的地边界范围之内，泛化计算旅游者的所有活动轨迹并不具有实际意义和理论价值。（2）为了便于比较和简化计算方法，研究并未将武夷山国家公园的基础设施建设、国家公园内居民的生产建设活动等影响考虑在内，基础设施未考量的原因同前，而居民生产建设主要指武夷山金骏眉等红茶的生产活动，自武夷山国家公园管理局成立以来，受到管理方和区域政府的严格约束，主要生产加工环节已逐步移至国家公园区域外进行。（3）武夷山国家公园生态系统实际上地跨福建省与江西省的武夷山脉体系，故对其生态系统碳吸收的估算，由于目

前国家公园行政边界的限制，其结果可能较保守。（4）交通碳排放是武夷山国家公园碳源组成中占比最大的部分，其测算可能有两方面的偏差，一是对于碳排放系统的边界的处理，如前所述是仅限于目的地边界范围之内，还是包括了旅游者从居留地至目的地的交通活动全过程，从碳足迹的理念和目前研究结果来看，偏于后者，这也是“自下而上”碳排放计算结果偏大的主要原因；二是交通活动全过程的碳排放比例分配问题，武夷山国家公园可能并不是旅游者一次旅游活动的唯一旅游目的地，尤其是境外、福建省外游客群体，本文分别采用的经济地理距离（境外）和平均距离（省外）是一种简便化的折中处理方法。更为精确化地划分旅游者的活动轨迹、处理多旅游目的地之间环节分配和适当增加调查样本量，有利于减少碳排放生命周期法的测算误差。

### 参考文献(References):

- [1] WANG J, FENG L, PALMER P I, et al. Large Chinese land carbon sink estimated from atmospheric carbon dioxide data. *Nature*, 2020, 586(7831): 720-723.
- [2] 周迪, 王雪芹. 中国碳排放效率与产业结构升级的耦合度及耦合路径. *自然资源学报*, 2019, 34(11): 2305-2316. [ZHOU D, WANG X Q. Research on coupling degree and coupling path between China's carbon emission efficiency and industrial structure upgrade. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(11): 2305-2316.]
- [3] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 等. 1981—2000年中国陆地植被碳汇的估算. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 2007, 37(6): 804-812. [FANG J Y, GUO Z D, PIAO S L, et al. Estimation of terrestrial vegetation carbon sinks in China from 1981 to 2000. *Scientia Sinica: Terrae*, 2007, 37(6): 804-812.]
- [4] 谢高地, 李士美, 肖玉, 等. 碳汇价值的形成和评价. *自然资源学报*, 2011, 26(1): 1-10. [XIE G D, LI S M, XIAO Y, et al. Value of carbon sink concept and evaluation. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(1): 1-10.]
- [5] 薛龙飞, 罗小锋, 李兆亮, 等. 中国森林碳汇的空间溢出效应与影响因素: 基于大陆31个省(市、区)森林资源清查数据的空间计量分析. *自然资源学报*, 2017, 32(10): 1744-1754. [XUE L F, LUO X F, LI Z L, et al. Spatial spillover effects and influencing factors of forest carbon sink in China: Spatial econometric analysis based on forest resources inventory in 31 provinces of the mainland of China. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(10): 1744-1754.]
- [6] 黄贤金, 张秀英, 卢学鹤, 等. 面向碳中和的中国低碳国土开发利用. *自然资源学报*, 2021, 36(12): 2995-3006. [HUANG X J, ZHANG X Y, LU X H, et al. Land development and utilization for carbon neutralization. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(12): 2995-3006.]
- [7] BECKEN S, FRAMPTON C, SIMMONS D. Energy consumption patterns in the accommodation sector: The New Zealand case. *Ecological Economics*, 2001, 39(3): 371-386.
- [8] 李鹏, 黄继华, 莫延芬, 等. 昆明市四星级酒店住宿产品碳足迹计算与分析. *旅游学刊*, 2010, 25(3): 27-34. [LI P, HUANG J H, MO Y F, et al. Calculation and analysis of carbon footprint of accommodation products in four-star hotels in Kunming. *Tourism Tribune*, 2010, 25(3): 27-34.]
- [9] 鉴英苗, 罗艳菊, 毕华, 等. 海南环东线旅游路线碳足迹计算与分析. *海南师范大学学报: 自然科学版*, 2012, 25(1): 99-103. [JIAN Y M, LUO Y J, BI H, et al. Calculation and analysis of carbon footprint of Hainan eastern tour route. *Journal of Hainan Normal University: Natural Science*, 2012, 25(1): 99-103.]
- [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. *地理学报*, 2011, 66(2): 235-243. [SHI P H, WU P. A rough estimation of energy consumption and CO<sub>2</sub> emission in tourism sector of China. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(2): 235-243.]
- [11] 肖建红, 于爱芬, 王敏. 旅游过程碳足迹评估: 以舟山群岛为例. *旅游科学*, 2011, 25(4): 58-66. [XIAO J H, YU A F, WANG M. Process carbon footprint assessment of tourism: Take Zhoushan Islands as an example. *Tourism Science*, 2011, 25(4): 58-66.]
- [12] 窦银娣, 刘云鹏, 李伯华, 等. 旅游风景区旅游交通系统碳足迹评估: 以南岳衡山为例. *生态学报*, 2012, 32(17):

- 5532-5541. [DOU Y D, LIU Y P, LI B H, et al. Carbon footprint evaluation research on the tourism transportation system at tourist attractions: A case study in Hengshan. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(17): 5532-5541.]
- [13] 马慧强, 刘嘉乐, 弓志刚. 山西省旅游交通碳排放测度及其演变机理. *经济地理*, 2019, 39(4): 223-231. [MA H Q, LIU J L, GONG Z G. Carbon emission and evolution mechanism of tourism transportation in Shanxi province. *Economic Geography*, 2019, 39(4): 223-231.]
- [14] 郑伯铭, 张宣, 明庆忠. “一带一路”沿线省份旅游经济与碳排放脱钩态势及影响因素研究. *生态经济*, 2021, 37(11): 136-143. [ZHENG B M, ZHANG X, MING Q Z. Research on the decoupling situation and influencing factors of tourism economy and carbon emissions in the provinces along the "One Belt and One Road". *Ecological Economy*, 2021, 37(11): 136-143.]
- [15] UNWTO-UNEP-WMO. *Climate change and tourism: Responding to global challenges*. Madrid: UNWTO, UNEP & WMO, 2008: 169-172.
- [16] GÖSSLING S, SCHUMACHER K P. Implementing carbon neutral destination policies: Issues from the Seychelles. *Journal of Sustainable Tourism*, 2010, 18(3): 377-391.
- [17] 李威, 黄玫, 张远东, 等. 中国国家森林公园碳储量及固碳速率的时空动态. *应用生态学报*, 2021, 32(3): 799-809. [LI W, HUANG M, ZHANG Y D, et al. Spatial-temporal variations of carbon storage and carbon sequestration rate in China's national forest parks. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(3): 799-809.]
- [18] FANG J Y, YU G R, LIU L L, et al. Climate change, human impacts, and carbon sequestration in China. *PNAS*, 2018, 115(16): 4015-4020.
- [19] CADARSO M Á, GÓMEZ N, LÓPEZ L A, et al. Calculating tourism's carbon footprint: Measuring the impact of investments. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 111: 529-537.
- [20] KUO N W, LIN C Y, CHEN P H, et al. An inventory of the energy use and carbon dioxide emissions from island tourism based on a life cycle assessment approach. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 2012, 31(3): 459-465.
- [21] 张瑞英, 席建超, 葛全胜. 基于生命周期理论的旅游者碳足迹分析: 一种“低碳旅游”测度框架及其实证研究. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(6): 169-175. [ZHANG R Y, XI J C, GE Q S. Analysis of carbon footprint of tourists based on life cycle theory: A measurement framework of "low-carbon tourism" and its empirical research. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2015, 29(6): 169-175.]
- [22] 周年兴, 黄震方, 梁艳艳. 庐山风景区碳源、碳汇的测度及均衡. *生态学报*, 2013, 33(13): 4134-4145. [ZHOU N X, HUANG Z F, LIANG Y Y. Carbon sources and storage sinks in scenic tourist areas: A Mount Lushan case study. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(13): 4134-4145.]
- [23] IPCC. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories, 2006.
- [24] GÖSSLING S. Global environmental consequences of tourism. *Global Environmental Change*, 2002, 12(4): 283-302.
- [25] BECKEN S, SIMMONS D G. Understanding energy consumption patterns of tourist attractions and activities in New Zealand. *Tourism Management*, 2002, 23(4): 343-354.
- [26] 郑聚锋, 程琨, 潘根兴, 等. 关于中国土壤碳库及固碳潜力研究的若干问题. *科学通报*, 2011, 56(26): 2162-2173. [ZHENG J F, CHENG K, PAN G X, et al. Perspectives on studies on soil carbon stocks and the carbon sequestration potential of China. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(26): 2162-2173.]
- [27] PIAO S, FANG J, ZHOU L, et al. Changes in vegetation net primary productivity from 1982 to 1999 in China. John Wiley & Sons, Ltd, 2005, 19(2): B2027, Doi: 10.1029/2004GB002274.
- [28] 孔东升, 张灏. 张掖黑河湿地自然保护区生态服务功能价值评估. *生态学报*, 2015, 35(4): 972-983. [KONG D S, ZHANG H. Economic value of wetland ecosystem services in the Heihe National Nature Reserve of Zhangye. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(4): 972-983.]
- [29] 赖力, 黄贤金, 刘伟良, 等. 基于投入产出技术的区域生态足迹调整分析: 以2002年江苏省经济为例. *生态学报*, 2006, 26(4): 1285-1292. [LAI L, HUANG X J, LIU W L, et al. Adjustment for regional ecological footprint based on input-output technique: A case study of Jiangsu province in 2002. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(4): 1285-1292.]
- [30] FANG J Y, CHEN A, PENG C, et al. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Sci-*

- ence, 2001, 292(6): 2320-2322.
- [31] 胡会峰, 王志恒, 刘国华, 等. 中国主要灌丛植被碳储量. 植物生态学报, 2006, 30(4): 539-544. [HU H F, WANG Z H, LIU G H, et al. Vegetation carbon storage of major shrubs in China. Chinese Journal of Plant Ecology, 2006, 30(4): 539-544.]
- [32] 周国模, 姜培坤. 毛竹林的碳密度和碳贮量及其空间分布. 林业科学, 2004, (6): 20-24. [ZHOU G M, JIANG P K. Density, storage and spatial distribution of carbon in phyllostachy pubescens forest. Scientia Silvae Sinicae, 2004, (6): 20-24.]
- [33] TANG C, ZHONG L, NG P. Factors that influence the tourism industry's carbon emissions: A tourism area life cycle model perspective. Energy Policy, 2017, 109(7): 704-718.
- [34] 曹辉, 林施琦, 张静娴, 等. 福利值与异质性: 武夷山国家公园旅游者的选择实验分析. 生态与农村环境学报, 2022, 38(1): 126-135. [CAO H, LIN S Q, ZHANG J X, et al. Welfare value and heterogeneity: An experimental analysis of tourists' choice in Wuyishan National Park. Journal of Ecology and Rural Environment, 2022, 38(1): 126-135.]
- [35] 汤姿, 毕克新. 旅游业能源消耗与碳排放研究进展及启示. 世界地理研究, 2014, 23(3): 158-168. [TANG Z, BI K X. Review on energy consumption and carbon emission of tourism industry. World Regional Studies, 2014, 23(3): 158-168.]
- [36] 范月君, 侯向阳, 石红霄, 等. 气候变暖对草地生态系统碳循环的影响. 草业学报, 2012, 21(3): 294-302. [FAN Y J, HOU X Y, SHI H X, et al. Effect of carbon in grassland ecosystems on climate warming. Acta Prataculturae Sinica, 2012, 21(3): 294-302.]
- [37] 徐冰, 郭兆迪, 朴世龙, 等. 2000—2050年中国森林生物量碳库: 基于生物量密度与林龄关系的预测. 中国科学: 生命科学, 2010, 40(7): 587-594. [XU B, GUO Z D, PIAO S L, et al. China's forest biomass carbon pool from 2000 to 2050: Prediction based on the relationship between biomass density and forest age. Scientia Sinica: Vitae, 2010, 40(7): 587-594.]
- [38] 田云, 林子娟. 巴黎协定下中国碳排放权省域分配及减排潜力评估研究. 自然资源学报, 2021, 36(4): 921-933. [TIAN Y, LIN Z J. Provincial distribution of China's carbon emission rights and assessment of its emission reduction potential under the Paris Agreement. Journal of Natural Resources, 2021, 36(4): 921-933.]
- [39] 黄和平, 王智鹏, 宋伊瑶. 乡村振兴背景下乡村旅游目的地碳足迹与生态效率研究: 以江西婺源篁岭景区为例. 农业现代化研究, 2019, 40(4): 683-691. [HUANG H P, WANG Z P, SONG Y Y. Carbon footprint and eco-efficiency of rural tourism destination under the background of rural revitalization: A case study of Huangling scenic spot in Wuyuan of Jiangxi province. Research of Agricultural Modernization, 2019, 40(4): 683-691.]
- [40] 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. 生态经济, 2011, (5): 121-124. [WANG L G, LIAO W M, HUANG M, et al. Calculation of tourism carbon footprint on final consumption: A case of Jiangxi province. Ecological Economy, 2011, (5): 121-124.]



## "National carbon source" or "national carbon sink"? Based on the carbon balance analysis of Wuyi Mountain National Park

CAO Hui<sup>1</sup>, WU Hui-zhen<sup>1</sup>, SHEN Shan-shan<sup>1</sup>, ZHAN Xin-ying<sup>1</sup>, YAN Shu-jun<sup>2</sup>

(1. College of Economics and Management, Fujian Agricultural and Forestry University, Fuzhou 350002, China;

(2. College of Landscape Architecture and Art, Fujian Agricultural and Forestry University,  
Fuzhou 350002, China)

**Abstract:** The nature reserve system, mainly national parks, is an important source of carbon sinks for China's terrestrial and marine ecosystems. Taking the Wuyi Mountain National Park tourism-ecosystem as the main research object, using a bottom-up approach and the whole life cycle (lca) tourism carbon footprint analysis method, and using data from the national park's land geographic information system (GIS) platform, we focused on the Wuyi Mountain National Park's full-cycle carbon footprint measurement, the carbon sequestration capacity and analysis of different land types, the carbon source and carbon sink. The results show that: (1) The total carbon emission of the national park in 2019 was 2864481.86 t, of which the carbon footprint of tourism was 2836467.58 t. Transportation, catering and accommodation were the three segments with the highest carbon footprint, accounting for 65.28%, 28.58% and 3.04% respectively, and the overall carbon emission of tourism in general showed a more obvious upward trend between 2015 and 2019, but the growth rate of carbon emissions was not entirely consistent with the trend of changes in the growth of the number of tourists. (2) The carbon sequestration in national parks in 2019 was 126862.61 t. Tree woodland, bamboo woodland and shrub woodland were the three land types with the highest carbon sequestration capacity, at 103664.98 t, 219035.11 t and 1054.87 t, hard broad species and horsetail pine are the forest types with the most important carbon sink capacity. (3) Wuyi Mountain National Park tourism-ecosystem is a carbon sink with an average annual net carbon sink of 88241.86 t. However, the national park is a significant carbon source based on the analysis of the whole life cycle results, with the ratio of ecosystem carbon uptake to total carbon emission of 4.48% and the net carbon source value of 2737619.25 t. The carbon footprint efficiency of ecotourism in national parks in 2019 was 12698.28 yuan/t, which is a high efficiency level globally. (4) Building a tourist growth system, developing a carbon neutral behaviour promotion system for enterprises and improving the legal protection system for nature reserves are important carbon neutrality path options for national parks.

**Keywords:** national park; carbon source; carbon sink; carbon balance; Wuyi Mountains