

基于 LCA 理论的典型饮品咖啡碳排放足迹分析研究

张子华 万绪同 杨雪 潘诗悦 张林杰 郭文嘉

(北京工业大学材料与制造学部, 北京 100124)

摘要: 在碳足迹研究方法的基础上, 基于生命周期评价原理, 将消费者手中的 1 杯咖啡全生命周期碳排放分为运输、加工、使用和回收 4 个环节, 并用碳排放因子法构建碳足迹核算模型, 以 1 杯普通黑咖啡为例, 核算 1 杯咖啡生命周期中各个阶段的碳排放量。分析各个阶段碳排放量大小, 从而制定有针对性的措施降低咖啡使用过程中的节能减排, 研究结论: 1 杯咖啡碳排放中的直接排放主要来源于人类的活动消耗, 而间接排放主要来源于制造成品咖啡的电机工作消耗的电量; 咖啡豆等食品其主要碳排放产生于使用阶段; 1 杯咖啡 (225mL) 的全生命周期碳排放量大约在 60~80g。

关键词: 1 杯咖啡; 全生命周期; 碳足迹; 碳排放因子; 生命周期评价

中图分类号: S181

文献标识码: A

DOI: 10.19754/j.nyyjs.20230115019

2020 年 9 月我国提出在 2030 年前实现“碳达峰”, 在 2060 年前实现“碳中和”。在此大背景下, 调查产品碳足迹可以为实现“双碳”目标贡献一份力量。咖啡作为人们日常的饮品之一, 在生产、加工、饮用等一系列过程中有着不少的碳排放。随着人口的不断增多, 经济高速发展, 在不久的将来, 咖啡的需求量将会越来越多, 对 1 杯咖啡全生命周期过程碳排放量的研究, 为食品类的碳排放测算提供了重要依据, 为降低餐饮业的碳排放策略制定及实施提供决策支持。

目前国内已经有许多全生命周期碳排放相关论文, 其中大部分论文都是用碳排放因子法对产品开展研究。碳排放因子法的研究较为成熟, 也有非常多的案例可供参考^[8,16]。除了碳排放因子法以外, 还有质量平衡法^[8,16]、实际检测法^[8,16]可以用来研究产品全生命周期碳排放。

本文采用产品全生命周期碳排放研究方法。结合相关咖啡研究论文数据, 对咖啡进行生命周期评估。参照相关文献^[1,2,4,5,7], 用碳排放因子法核算 1 杯咖啡从加工到使用再到回收中的碳排放, 梳理 1 杯咖啡全生命周期碳排放研究的思路步骤。

1 1 杯咖啡全生命周期碳排放计算方法

收稿日期: 2022-10-24

基金项目: 国家重点研发计划 (项目编号: 2019YFE0125100); 北京市博士后工作经费资助项目 (项目编号: 2021-ZZ-056); 北京工业大学“星火基金”计划项目 (项目编号: XH-2022-03-51)

作者简介: 张子华 (1990-), 男, 博士, 讲师。研究方向: 绿色、低碳、可持续设计与制造方面的研究。

1.1 系统边界的界定

在本文研究过程中, 将 1 杯咖啡的全生命周期分为 4 个阶段: 运输阶段, 加工阶段, 使用阶段, 回收阶段; 每个阶段均有碳排放的产生。将 4 个阶段进行细化研究, 流程如图 1 所示。

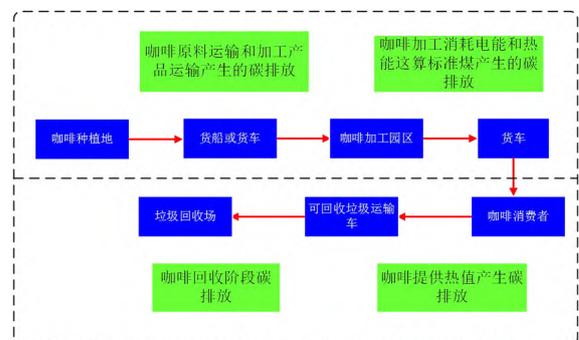


图 1 1 杯咖啡的全生命周期流程图

1.2 碳排放核算模型

目前已知的碳排放的量化方法有碳排放因子法^[1,2]、质量平衡法^[7]和实际测量法^[7]。考虑到咖啡的生命周期过程复杂, 且不易被测量, 因此采用碳排放因子法。碳排放因子, 即碳排放系数, 是指每 1 种能源燃烧或使用过程中单位能源所产生的碳排放数量^[1,7]。根据 IPCC (联合国政府间气候变化专门委员会) 的假定, 可以认为某种能源的碳排放系数是固定

不变的。组织温室气体排放主要包括 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 。因此本文将以 CO_2 作为 1 杯咖啡的碳排放核算对象,采用 CO_2 当量的方法^[1]核算 CH_4 、 N_2O 总量即在辐射强度上与某种温室气体质量相当的二氧化碳的量 (tCO_2e)。为了衡量不同温室气体对温室效应的影响,联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 以二氧化碳辐射功能为 1 单位,得到了不同温室气体的全球升温潜势值 (GWP: Global Warming Potential)。碳排放因子法公式:

$$E = AD \times EF \quad (1)$$

式中, E 为碳排放量; AD 为核算期内生产过程中化石燃料的消耗量、原材料的使用量及购入或输出的电量; EF 为碳排放因子,即碳排放系数,可由碳审计工具箱获取数据。

本文研究 1 杯咖啡的碳排放足迹,每个阶段都研究一定量的咖啡豆质量,按 1 杯咖啡 20g 咖啡豆,用每个阶段总咖啡豆质量除以 20,可以得出该阶段研究的咖啡豆质量能够制出咖啡的杯数,就可以计算出当前阶段一杯咖啡的碳排放量。公式:

$$N_i = \frac{M_i}{20} \quad (2)$$

$$k_i = \frac{1}{N_i} \quad (3)$$

$$E_{p_i} = k_i \times E \quad (4)$$

$$E_{sum} = \sum E_{p_i} \quad (5)$$

式中, N_i 为第 i 阶段的研究的咖啡豆总质量能做出的咖啡的杯数 ($i = 1, 2, 3, 4, \dots, n$); M_i 为第 i 阶段下研究的咖啡豆的总质量; k_i 为第 i 阶段的研究的咖啡豆总质量能做出的咖啡的杯数的倒数用于计算 1 杯咖啡的碳排放量; E_{p_i} 为 1 杯咖啡在第 i 个阶段的碳排放量; E_{sum} 为 1 杯咖啡全生命周期碳排放量。

1.2.1 运输阶段排放核算

运输阶段主要分为原材料运输和加工产品运输,其主要运输方式分别为水路运输和公路运输,运输阶段碳足迹主要是运输工具等设备化石燃料燃烧产生的碳排放,涉及的能源主要有柴油、汽油、航空煤油等。因此,依据运输咖啡原材料货船的发动机功率和发动机的燃油消耗率以及货船行驶时间等参数,即可算出相应的燃油消耗量;公路运输则是根据货车的发动机功率和发动机的燃油消耗率以及货车行驶时间,计算对应的燃油消耗量;海运货船以柴油燃料为主,公路运输的货车则以汽油为主,二者在核算排放量时要注意区别不同燃料碳排放因子的不同。将燃油消耗量与其相对应的碳排放因子相乘,得到该阶段的碳排放量估算值。公式:

$$x_{fuel-j} = P_e \times \eta \times T \quad (6)$$

$$E_{GHG-i, fuel-j} = x_{fuel-j} \times EF_{GHG-i, fuel-j} \quad (7)$$

式中, x_{fuel-j} 为燃料 j 消耗量; P_e 为特定发动机的额定功率; η 为特定发动机燃油消耗率; T 为特定发动机运行时间; $E_{GHG-i, fuel-j}$ 为 j 燃料燃烧产生的温室气体碳排放量; $EF_{GHG-i, fuel-j}$ 为燃烧特定燃料 j 的碳排放系数。

1.2.2 加工阶段排放核算

加工环节碳足迹核算主要涉及咖啡制作加工过程的几个步骤,步骤涉及烘焙、打磨、冲泡等过程。

其中,烘焙工艺过程需要用到高温加热。根据现阶段的调查研究显示目前烘焙过程仍然用传统的密闭容器用火加热的办法烘焙咖啡豆^[9],烘焙过程碳足迹核算采用比热容以及温度变化求热量的方法。本文中烘焙过程碳足迹核算所使用的公式:

$$Q = C \times m_{coffee} \times \Delta t + \bar{Q} \times T \quad (8)$$

$$M_{coal} = Q \times K \quad (9)$$

$$E_{GHG, coal} = M_{coal} \times EF_{coal} \quad (10)$$

式中, Q 为咖啡豆烘焙过程所需的总热量; C 为咖啡豆的比热容; m_{coffee} 为被烘焙的咖啡豆的质量; Δt 为温度变化量; \bar{Q} 为保持温度不变需要补充的热量; T 为持续加热时间; M_{coal} 为折算得到的标准煤质量; K 为消耗能量折算标准煤系数,根据单位不同选择相乘或相除形式; $E_{GHG, coal}$ 为折算得到标准煤的碳排放系数。

而打磨和冲泡可以由咖啡机实现,可以通过咖啡机的电功率以及制作 1 杯咖啡所需要的工作时间得到咖啡机的电能消耗,并将电能消耗折算为火力发电标准煤消耗,进而由标准煤的碳排放因子和折算得到的标准煤质量计算碳排放量。计算公式:

$$E_A = P \times T \quad (11)$$

$$M_{coal} = E_A \times K \quad (12)$$

$$E_{GHG, coal} = M_{coal} \times EF_{coal} \quad (13)$$

式中, E_A 为咖啡机消耗的电能; P 为咖啡机额定功率 (其余物理量与上述物理量相同,故此不再标注)。

1.2.3 使用阶段排放核算

使用阶段的研究数据来源于咖啡提供给人的热量^[1],经查询 IPCC 官网资料^[15],得到咖啡的二氧化碳碳排放系数。给出的咖啡碳排放系数为,再根据已有公式来计算咖啡的碳排放,公式:

$$E_{CO_2-eq, food} = \sum_j m_{food-j} \times SCV_{food-j} \times EF_{CO_2-eq, food-j} \quad (14)$$

式中, $E_{CO_2-eq, food}$ 为由食物 j 热值提供的二氧化碳当量; m_{food-j} 为食物 j 总质量; SCV_{food-j} 为特定食物 j 的具体热值; $EF_{CO_2-eq, food-j}$ 为特定食物 j 的二氧化碳当量碳排放系数。

1.2.4 回收阶段排放核算

1 杯咖啡全生命周期回收环节主要是对产品包装生产及回收利用过程进行碳排放核算,目前市面上咖啡的包装有纸质包装、金属包装以及塑料包装^[1],其中纸质包装和金属包装为可回收的产品包装。因此,针对2种包装使用方式的不同,将其分为一次性使用和循环回收利用,从而在核算相应的碳排放量时亦有所不同,在本文研究过程中将二者分开计算,可以看出产品包装回收利用与一次性利用的碳排放。从而可根据排放差值和回收成本,找到最经济环保的咖啡包装原材料。相应的计算公式:

$$E_{GHG-j, raw} = \sum_j m_{raw-j} \times EF_{GHG-i, raw-j} \quad (15)$$

式中, $E_{GHG-j, raw}$ 为咖啡包装原材料以及生产加工产生的碳排放量; m_{raw-j} 为已消耗原材料 j 的量; $EF_{GHG-i, raw-j}$ 为对应材料的碳排放系数(循环使用和一次性使用数据值不同)。

2 案例分析

表1 运输阶段数据模拟值以及碳排放系数

类型	发动机功率 /kW	汽油消耗率 /(g·kWh ⁻¹)	汽油密度 /(kg·L ⁻¹)	行驶时间/h	货车载重量/t	汽油碳排放系数 /(kg·L ⁻¹)
数量	96	204	0.74	1.28	3	2.645

表2 加工阶段数据模拟值与所需碳排放系数

类别	烘焙温度 /°C	咖啡豆比热容 /(kJ·kg ⁻¹)	烘焙时间 /min	咖啡机额定电功率/W	咖啡机工作时间/s	消耗能量折算标准煤系数 ^[20] /(kJ·g ⁻¹)	标准煤碳排放系数 ^[20] /(kg·kg ⁻¹) 或 (g·g ⁻¹)
数量	220	1.4	23	1400	20	29.3	0.68

确定直接排放中燃油碳排放系数、咖啡豆热值对应的碳排放系数。数据由碳审计工具箱^[1]和国际IPCC官网^[15]查询得到,见表3。

确定消耗能量折算标准煤系数、折算得到的标准煤的碳排放系数、包装原材料循环使用与一次使用的碳排放系数。本文以咖啡纸质包装袋为例研究咖啡豆包装材料循环使用与一次使用碳排放差异,以此得到减少碳排放的方法。具体数值通过查询百度百科和碳

2.1 数据获取与处理

由上文1杯咖啡全生命周期碳排放核算方法可知,1杯咖啡全生命周期的碳排放核算需要获取燃油、标准煤、发动机功率、燃油消耗率等数据。本文研究案例为国内咖啡生产运输实例,因此不涉及海运方面碳排放核算。

确定发动机功率以及燃油消耗率、燃油密度、货车载重量、1杯咖啡消耗咖啡豆质量以及咖啡豆提供的热值。本文以用潍柴3.0货车从咖啡种植地普洱市思茅区天鹅山咖啡种植场到咖啡加工地点普洱市雀巢咖啡中心运输原材料为例^[17]。模拟出以下数据,见表1。

确定烘焙温度、咖啡豆比热容、烘焙时间、咖啡机额定电功率、咖啡机制作1杯咖啡工作时间以及包装消耗原材料的质量。本文以飞利浦咖啡机(型号:EP5144/82)为例,生产1杯咖啡大约为225mL,需要20g咖啡豆。模拟出数据见表2。

审计工具箱^[1]得来,数据见表4。

表3 使用阶段数据模拟值以及碳排放系数

类别	一杯咖啡消耗咖啡豆质量/g	咖啡豆提供的热值 ^[19] /(kcal·100g ⁻¹)	咖啡豆碳排放系数 ^[15] /(g _{CO₂} ·kcal ⁻¹)
数量	20	313	0.98

表4 回收阶段数据模拟值与排放系数

类型	净含量200g咖啡豆的包装消耗原材料质量/g	消耗能量折算标准煤系数 ^[20] /(kJ·g ⁻¹)	标准煤碳排放系数 ^[20] /(kg·kg ⁻¹) 或 (g·g ⁻¹)	纸质包装循环使用的碳排放系数 ^[11] /(g _{CO₂} ·g ⁻¹)	纸质包装一次使用的碳排放系数 ^[11] /(g _{CO₂} ·g ⁻¹)
数量	50	29.3	0.68	0.78	1.55

2.2 运输阶段碳排放量计算

已知发动机功率为96kW,燃油消耗率为204g·kWh⁻¹,行驶时间为1.28h,根据式(6)、式(7)计算得到燃油消耗量,再根据汽油密度和汽油碳排放

系数与燃油消耗量相乘得到碳排放量。

$$x_{fuel-汽油} = 96 \times 204 \times 1.28 = 25067.52g$$

$$E_{GHG, fuel-汽油} = \frac{25067.52 \times 2.645}{0.74} = 89491.05g$$

再根据货车运货量 3t 和 20g 豆由式 (2) 和式 (3) 得到第 1 个阶段, 即运输阶段 1 杯咖啡的物质占总质量的比例 $k_1 = 6.7 \times 10^{-8}$, 再通过 k_1 由式 (4) 与 $E_{GHG, fuel-汽油}$ 相乘得到 1 杯咖啡在运输阶段的碳排放量。

$$E_{pGHG, fuel-汽油} = \frac{89491.05 \times 20}{3 \times 10^6} = 0.60g$$

2.3 加工阶段碳排放计算

2.3.1 烘焙环节碳排放计算

已知烘焙温度为 220℃, 按室温 26℃ (温度与季节地理位置有关, 会影响碳排放量) 计算则 $\Delta t = 194k$ 与咖啡比热容, 约为 $1.4kJ \cdot kg^{-1}$ 和质量 20g, 根据式 (8) 加号前的部分经运算得到由 26℃ 上升至 220℃ 的热量为 5.43kJ。根据实验测得由 26℃ 加热至 220℃ 需要 8min, 故不加热情况下无其他因素干扰则 8min 内温度冷却至室温, 用已求得的热量 5.43kJ, 除以 8min 得到平均每分钟散失热量为 0.679kJ。达到 220℃ 后再经过 15min 即可完成对咖啡豆的烘焙环节, 则根据式 (8) 加号后的部分经运算得到保持温度加热所需热量为 10.18kJ, 将两部分得数相加得到烘焙环节的热量。

$$Q = 194 \times 1.4 \times 20 \times 10^{-3} + \frac{5.43 \times 15}{8} = 15.61kJ$$

再用已知的消耗能量折算标准煤系数 $29.3kJ \cdot g^{-1}$ 与上文算得的热量 $Q = 15.61kJ$, 由式 (9) 得到折算标准煤质量, 并用折算得到的标准煤质量与标准煤碳排放系数由式 (10) 得到烘焙环节的碳排放量, 即 1 杯咖啡烘焙环节的碳排放量。

$$M_{coal-烘焙} = \frac{15.61}{29.3} = 0.53g$$

$$E_{pGHG, coal-烘焙} = E_{GHG, coal-烘焙} = 0.53 \times 0.68 = 0.36g$$

2.3.2 研磨、冲泡环节即咖啡机工作产生碳排放计算

已知咖啡机的额定电功率为 1400W, 工作时间为 20s, 由式 (11) 得到咖啡机制作一杯 225mL 咖啡需要消耗的电能。根据已知的消耗能量折算标准煤系数 $29.3kJ \cdot g^{-1}$ 与消耗电能由式 (12) 得到折算标准煤质量。用折算得到的标准煤质量与标准煤碳排放系数由式 (13) 得到研磨、冲泡环节的碳排放量, 即 1 杯咖啡研磨、冲泡环节的碳排放量。

$$E_A = 1400 \times 20 = 28000J = 28kJ$$

$$M_{coal-咖啡机} = \frac{28}{29.3} = 0.96g$$

$$E_{pGHG, coal-咖啡机} = E_{GHG, coal-咖啡机} = 0.96 \times 0.68 = 0.65g$$

2.4 使用阶段碳排放量计算

已知咖啡豆提供的热值为 $313kcal \cdot 100g^{-1}$ (3.13

$kcal \cdot g^{-1}$) 和咖啡豆碳排放系数 $0.98g_{CO_2} \cdot kcal^{-1}$ 以及质量 20g 经过质量换算, 再根据式 (14) 计算得到 $E_{CO_2-eq, coffee}$:

$$E_{CO_2-eq, food} = 3.13 \times 0.98 \times 20 = 61.35g$$

2.5 回收阶段碳排放计算

2.5.1 循环使用包装材料碳排放计算

用已知咖啡纸质包装材料质量 50g 与纸质包装——循环使用的碳排放系数, 由式 (16) 求出循环使用咖啡纸质包装材料的碳排放量。由于该包装下咖啡豆净含量为 200g, 而本文以制作 1 杯咖啡消耗 20g 咖啡豆为标准。因此, 要用式 (2)、式 (3)、式 (4) 得出 1 杯咖啡在回收阶段——循环使用包装材料的碳排放量。

$$E_{GHG-paper, 循环使用} = 50 \times 0.78 = 39.00g$$

$$k_2 = \frac{20}{200} = 0.10$$

$$E_{pGHG-paper, 循环使用} = 39 \times 0.10 = 3.90g$$

2.5.2 回收阶段——一次使用包装材料碳排放计算

与循环使用包装材料碳排放计算方法相同, 需要将纸质包装——一次使用的碳排放系数, 再由式 (15)、式 (2)、式 (3)、式 (4) 计算得到 1 杯咖啡在回收阶段——一次使用包装材料的碳排放量。

$$E_{pGHG-paper, 一次使用} = \frac{50 \times 1.55 \times 20}{200} = 7.75g$$

3 结论

3.1 碳排放计算总结

经过 1 杯咖啡全生命周期的碳排放计算, 得出 1 杯咖啡全生命周期的各个阶段碳排放量。将每个部分计算结果通过式 (5) 加和得到一杯咖啡 (约 225mL) 全生命周期碳排放量, 因为回收阶段不同包装材料选择, 所以分为 2 种最终计算结果。

$$E_{sum, 循环使用} = 0.60 + 61.35 + 0.36 + 0.65 + 3.90 = 66.86g$$

$$E_{sum, 一次使用} = 0.60 + 61.35 + 0.36 + 0.65 + 7.75 = 70.71g$$

针对上述结果, 提出一些减少咖啡碳排放的方法, 如, 用加工结束后剩余的咖啡渣再次提纯或将其用作燃料^[3]来减少 1 杯咖啡的碳排放量。咖啡中可以加入牛奶、糖、咖啡伴侣等一些用于增加咖啡的味道、口感的食品, 添加这食品也会增加碳排放量。本文没有对这种情况进行研究分析, 因此在今后的研究中可以研究更多不同类型的咖啡的全生命周期碳排放, 进而充实咖啡方面的碳排放数据。

3.2 结语

本文基于生命周期评价原理, 采用碳排放因子法

研究 1 杯咖啡全生命周期碳排放量,详细分析了 1 杯咖啡全生命周期的系统边界,并给出了各阶段碳足迹核算模型,对于食品类全生命周期碳足迹提供了重要参考依据。研究结果表明: 1 杯咖啡全生命周期碳排放量中的碳排放主要来源于使用阶段,其次是回收阶段,然后是加工阶段,运输阶段的碳排放量最小。按本文算法估计 1 杯咖啡(无其余物质如牛奶、糖等物质干扰下)全生命周期碳排放量在考虑多种因素影响下大约在 60~80g。根据本文的研究结果与文献调查,为饮食类全生命周期碳排放核算提供参考依据,为餐饮业节能减排贡献力量。如,使用可回收包装材料;将咖啡加工阶段留下的咖啡豆固体残渣经再提纯制咖啡;种植可持续的咖啡等一系列办法减少 1 杯咖啡全生命周期的碳排放量,从而为推动“双碳”目标的实现贡献一份微薄的力量。

参考文献

- [1] 梁国熙, 梁耀彰, 陈海寿, 等. 香港中小企业碳审计工具箱 [M]. 中国香港: 香港大学, 2010.
- [2] 周舒怡, 杨潇, 冯盼盼, 等. 陇东黄土高原旱作主要粮食和饲草生产碳足迹核算 [J]. 中国草地学报, 2022, 44 (06): 11-17.
- [3] 祝松. 咖啡渣干燥等应用项目投入使用 [N]. 中国食品安全报, 2011-02-22 (A04).
- [4] 马爱进, 赵海珍. 食品生命周期碳排放评价技术规范研究 [J]. 中国食物与营养, 2010 (12): 4-6.
- [5] 陈娟, 李文强, 李彦, 等. 基于碳足迹分布的机电产品创新设计方法 [J]. 工程设计学报, 2014, 21 (01): 6-13.
- [6] 刘卫东, 姜宛贝, 唐志鹏, 等. 中国 2030 年前实现碳达峰的路径研究——基于 GDP 增速的组合分析 [J]. 中国科学 (地球科学), 2022, 52 (07): 1268-1282.
- [7] 聂会建, 李政, 张斌. 整体煤气化联合循环 (IGCC) 全生命周期 CO₂ 排放计算及分析 [J]. 动力工程, 2004 (01): 132-137.
- [8] 白文亭. ABB: 关注产品生命周期评估以减少碳排放 [J]. 电气时代, 2009 (12): 50.
- [9] 董聪慧, 董文江, 程金焕, 胡荣锁, 何红艳, 陈小爱, 龙宇宙, 黄家雄, 陈罡, 陈舰飞. 咖啡豆烘焙过程中油脂脂肪酸组成、挥发性风味及活性成分的演变规律 [J/OL]. 食品科学: 1-18 [2022-12-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.ts.20220622.0941.033.html>.
- [10] He Yangdong, Zhu Lin, Fan Junming, Li Luling, Liu Gaihuan. Life cycle assessment of CO₂ emission reduction potential of carbon capture and utilization for liquid fuel and power cogeneration [J]. Fuel Processing Technology, 2021, 221.
- [11] Hor Rathna, Ly Phanna, Putra Agusta Samodra, Ishizaki Riaru, Ahamed Tofael, Noguchi Ryozo. Estimation of Carbon Dioxide Emissions from a Traditional Nutrient-Rich Cambodian Diet Food Production System Using Life Cycle Assessment [J]. Sustainability, 2021, 13 (7): 3660-3660.
- [12] Kante K, CesarNieto-Delgado, Rangel-Mendez J R, et al. Spent coffee-based activated carbon: Specific surface features and their importance for H₂S separation process [J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, 201 (Jan. 30): 141-147.
- [13] Hor Rathna, Ly Phanna, Putra Agusta Samodra, et al. Estimation of Carbon Dioxide Emissions from a Traditional Nutrient-Rich Cambodian Diet Food Production System Using Life Cycle Assessment [J]. Sustainability, 2021, 13 (7): 3660-3660.
- [14] Gael, Keig, Robin, et al. CSIRO and land research in Papua New Guinea 1950-2000: part 2: post-Independence [J]. Historical Records of Australian Science, 30 (2): 100-111.
- [15] EFDB 官网 [DB/OL]. <https://www.ipecc.ch/>.
- [16] 孙强, 张晓梅, 陈阳. 碳排放核算问题研究 [N]. 中国信息报, 2021-10-28.
- [17] 百度地图运输阶段模拟数据 [DB/OL]. <https://map.baidu.com>.
- [18] 京东商城咖啡机电功率数据 [DB/OL]. <https://item.jd.com/100009641531.html>.
- [19] 薄荷健康官网咖啡豆热值数据 [DB/OL]. <https://www.booh.com/shiwu/kafeidou>.
- [20] 标准煤、碳排放和二氧化碳排放量的底层逻辑关系 [DB/OL]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1713103856551332298&wf=spider&for=pc>.

(责任编辑 常佳琪)