

DOI: 10.5846/stxb201504150769

张丹,成升魁,高利伟,刘晓洁,曹晓昌,刘尧,白军飞,许世卫,俞闻,秦奇.城市餐饮业食物浪费的碳足迹——以北京市为例.生态学报,2016,36(18): - .

Zhang D, Cheng S K, Gao L W, Liu X J, Cao X C, Liu Y, Bai J F, Xu S W, Yu W, Qin Q. The carbon footprint of catering industry food waste: a Beijing case study. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(18): - .

城市餐饮业食物浪费的碳足迹 ——以北京市为例

张 丹¹, 成升魁^{1,*}, 高利伟², 刘晓洁¹, 曹晓昌¹, 刘 尧¹, 白军飞³, 许世卫⁴, 俞 闻⁴, 秦 奇¹

1 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

2 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心, 石家庄 050021

3 中国农业大学经济与管理学院, 北京 100083

4 中国农业科学院农业信息研究所, 北京 100081

摘要:食物浪费及其造成的环境影响已成为全球广泛关注的热点。无论从生命周期还是碳足迹的视角来看,食物浪费意味着生产、运输、加工与储存这些被浪费掉的食物过程中所投入的各种资源的浪费以及不必要的温室气体排放。本文以北京市餐饮食物浪费问题为切入点,在通过问卷调查和称重方法对餐饮食物浪费状况进行调查的基础上,将整个食物生命周期各供应链环节相应的温室气体排放纳入考量,估算了北京市餐饮食物浪费的碳排放量。研究表明:北京市餐饮食物浪费总量为 39.86×10^4 t/a。其中,蔬菜类浪费量最高,约占浪费总量的 43.16%,其次为肉类和主食类,分别占食物浪费总量的 20.59% 和 16.66%。北京市餐饮食物浪费所产生的总碳足迹为 192.51×10^4 — 208.52×10^4 t CO₂eq。其中,农业生产阶段的碳排放量最大为 99.34×10^4 t CO₂eq,占食物浪费总碳足迹的 47.64%。其次是消费阶段的碳足迹 77.96×10^4 t CO₂eq,占食物浪费总碳足迹的 37.39%,再次是餐厨垃圾处理阶段的碳足迹 28.54×10^4 t CO₂eq,占食物浪费总碳足迹的 13.68%。这些不同供应链环节的碳排放比例,为透视食物浪费所带来的环境影响提供了新的认知,也为遏制食物浪费提供了科学的理论依据。

关键词:食物浪费;碳足迹;生命周期分析;餐饮业

The carbon footprint of catering industry food waste: a Beijing case study

ZHANG Dan¹, CHENG Shengkui^{1,*}, GAO Liwei², LIU Xiaojie¹, CAO Xiaochang¹, LIU Yao¹, BAI Junfei³, XU Shiwei⁴, YU Wen⁴, QIN Qi¹

1 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050021, China

3 College of Economics & Management, China Agricultural University, Beijing 100083, China

4 Agricultural Information Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

Abstract: Recent years have seen increasing global interest in the study of food loss and waste, and their related environmental impacts. Wasted food creates carbon emissions throughout the duration of the food supply chain, from agricultural production, food processing, and distribution, to consumption and waste disposal. While it is widely known that the generation of food waste must be reduced, the lack of quantitative information on the production of household and catering food waste has led to the underestimation of waste volumes and hampered the development of proper policy

基金项目:国家自然科学基金重点项目(71233007)

收稿日期:2015-04-15; 网络出版日期:2015-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chengsk@igsnrr.ac.cn

interventions designed to decrease food waste. This study investigated the volume of catering food waste generated in Beijing and calculated its carbon footprint. In this study we focused on avoidable food waste, i.e., all wasted food and raw materials that could have been consumed had they been prepared differently. Other bio-wastes, such as vegetable peelings, bean dregs, or bones, were not measured. During first-hand surveys of the catering sector of urban Beijing in 2013, 136 restaurants were studied. These establishments can be divided into large, medium, small, canteen, and fast food restaurant categories. A total of 2704 samples were collected, each consisting of two parts: a consumer questionnaire, and the weight of each sample consumer's food waste generated by the establishment. The greenhouse gas emissions produced during each stage of the food supply chain were calculated, and then scaled up using the restaurant data to determine the total quantity of carbon emissions produced by the production of catering food waste in Beijing. The main conclusions of this study are as follows: (i) The total amount of food waste generated by the Beijing catering industry is 39.86×10^4 t/a, or about half of the total weight of food consumed in Beijing. (ii) The food waste was comprised of many different food types, the most prominent (by weight) being vegetables (43.16%), followed by aquatic products (10.51%), pork (8.79%), wheat flour (7.35%), beans and bean products (7.19%), poultry (6.93%), rice (6.09%), other grains (3.20%), mutton (1.94%), eggs (1.84%), beef (1.70%), other meat (1.23%), and dairy products (less than 1%). (iii) The total carbon footprint of the catering food waste produced in Beijing was 192.51×10^4 — 208.52×10^4 t CO₂ eq. By food category, the largest proportion of the calculated total carbon emissions was generated by meat (61.76%), vegetables (25.09%), and grains (11.30%). By process, the food production stages producing the largest proportions of the emissions are agricultural production (almost 50%), catering consumption (37.39%), and waste management (13.68%). These results reveal clear differences between the distribution of waste and the carbon footprint of different wasted products. Although food waste can be more accurately quantified in terms of mass or value, these metrics does not provide sufficient information about its potential environmental impacts. Therefore, analyzing food waste in terms of both wasted mass and the carbon footprint of the wastage is a better means of identifying priority targets for the development of efficient waste reduction measures.

Key Words: food waste; carbon footprint; life cycle analysis; catering industry

随着全球食物安全问题研究的不断深入,食物浪费越来越成为全球关注的热点^[1-7]。据估算,全球每年浪费和损失掉的食物约重 13 亿吨,相当于每年食物制造总量的三分之一^[3]。其中,工业化发达国家每年浪费和损失掉的食物约 6.7 亿吨,发展中国家对应为 6.3 亿吨,各自总量不相上下,但原因各异。

近年来,人们逐渐认识到食物浪费不仅是道德和经济问题,也是环境问题;浪费的食物在整个供应链包括农业生产、收获后处理和储存、加工、运输、消费和废弃食物处理等六个环节,都会造成温室气体排放。农业生产是温室气体的重要来源之一,全球农业生产温室气体排放量占由人类活动引起的温室气体排放量的 10%—12%^[8]。此外,农业生产资料(化肥,地膜等)的使用,储存、加工、运输等环节能源的消耗,丢弃食物的回收、焚烧、掩埋等都会导致温室气体的排放^[7,9-12]。食物损失和浪费意味着生产和制造这些食物过程中所投入的各种资源的浪费(水、土地、能源等)以及不必要的温室气体排放。全球每年浪费和损失掉的食物在整个食物供应链条中所产生的温室气体排放为 33 亿吨(CO₂eq)^[13]。

中国的食物浪费与生产投入、环境压力的矛盾尤其严重。据估算,中国近年来浪费食物年均总量折合粮食约 5000 万吨,相当于每年谷物净进口数量的 3 倍多^[14-15];中国在整个供应链的食物损失和浪费率高达 19%^[4]。另一方面,为了满足人口倍增、经济高速增长、城市化以及生活水平提高产生的巨大食物需求,我国农业生产投入不断增加^[16],而目前通过增加投入来提高单产来解决我国粮食安全却越来越难,资源与环境恶化代价越来越大。在国际舞台上,中国的温室气体排放量位居世界第一,约占世界 19.12%^[17],面对的国际减排政治外交压力和舆论形势十分严峻。由此可见,食物浪费已使我国粮食安全与减排形势陷入了“内忧外患”的窘境。

餐饮消费是食物终端消费。随着我国居民生活水平的提高和流动人口规模的扩大,餐饮消费逐渐成为居民日益普遍的生活方式。改革开放以来,经过近 30 多年的发展,餐饮业已成为我国经济运行中发展势头最猛、增长速度最快的热点行业之一^[18]。中国在餐饮食物浪费的某些方面比西方发达国家更为严重。首先,中国的公务(公款)食物消费虽得到明显遏制,但食物浪费依然严重。其次,中国传统文化对食物消费“攀比”和“面子”的过度强调,是导致食物浪费的重要原因。

然而,到目前为止,学术界对中国食物浪费的有限研究大多聚焦于宏观尺度^[4,19-20],研究数据更多地基于简单推算,大样本调研餐饮业尺度的食物浪费及其碳足迹研究甚为鲜见^[14-15]。因此,为了回答我国究竟浪费了多少食物和这些浪费掉的食物在其生命周期或供应链环节中造成了多大的环境影响这样的基本科学问题,本文以首都北京为案例区,以城市餐饮业的食物浪费为研究对象,通过问卷调查和称重方法对餐饮消费的食物浪费状况进行了调查;依据获取的大量一手食物浪费数据基础,以食物生命周期和全供应链的视角,分析浪费的不同食物及其不同供应链环节的碳排放。这种详细、深入的餐饮食物浪费的碳足迹研究不仅可以提升政府和公众对城市餐饮食物浪费温室气体排放的直观认识,而且可为北京以及其它省市的低碳城市建设和减排政策的制定提供依据和数据支持。

1 研究区概况

北京作为我国北方的中心城市和发展较快的地区,在经济文化上对周边省份影响力和辐射范围都比较大,对北京市现在的研究可以在一定程度上反应其周边地区未来的情况。因此,对北京市餐饮食物浪费的碳足迹研究具有重要的意义。2013 年,北京市常住人口 2114.8 万,社会消费品零售总额为 8375.1 亿元,其中餐饮收入 783.1 亿元,占零售总额的 9.35%^[21]。据北京市食品药品监督管理局统计数据显示,截止 2013 年 2 月,北京市已注册的餐饮服务业 62237 家,其中餐馆 27414 家,快餐店 1057 家,小吃店 7224 家,食堂 12733 家。按照经营场所使用面积或者就餐座位数,可将餐馆分为大型餐馆(含特大型)8159 家,中型餐馆 10089 家,小型餐馆 9166 家。本文的研究主要涉及餐馆和快餐店的食物浪费。

2 方法与数据

2.1 餐饮食物浪费量的获取方法

食物浪费发生在食物供应链中的各个阶段。在不同国家和不同研究领域,食物浪费具有不同定义和划分标准,目前尚未达成一致共识。本文所研究的食物浪费是指在餐饮消费环节可以避免的浪费(avoidable food waste),即由于人们不合理的消费目的和行为,以及由于缺乏节约精神等主观意识,在现有条件下本可以避免的一种食物损失。一些食物垃圾,如蔬菜去皮、豆渣、骨头等不属于食物浪费的范畴。本文的实证研究主要在 2013 年 7 月至 8 月期间开展,并在 2013 年 9 月进行了补充调查。两次调查共涉及餐饮机构 136 家,消费者 2704 桌。其中,成功调查餐饮机构 124 家,回收消费者有效问卷 2564 份。

(1)抽样方法:在北京市已注册的餐馆和快餐名录中,进行随机分层抽样。首先,将北京市 16 个城区分为中心城区、城乡结合部和郊区三层,并在这三层中随机抽取东城区、海淀区和昌平区作为研究区域;其次,将上述三个研究区域中的餐饮机构分为大型餐馆、中型餐馆、小型餐馆和快餐,同时在不同类型的餐馆中随机抽取样本餐馆。每个样本餐馆中消费者的调查样本主要采取等距抽样法确定。

(2)问卷调查:调查问卷设计为三部分:第一部分收集样本餐厅的基本信息,主要包括月耗水量、月耗电量、月耗气量、采购地、日餐厨垃圾量以及处理方式;第二部分收集消费者的就餐特征,主要包括就餐人数、是否打包、是否开具发票、就餐开始与离开时间等;第三部分收集消费者的社会经济信息,主要包括年龄、就业部门、学历、月收入、本次就餐原因、外出就餐频率等。

在调查中,调查员首先通过与样本餐厅经理面对面问卷方式收集样本餐厅的基本信息,即完成问卷的第一部分;之后,向被调查餐厅经理解释第三部分的调查内容并约好入驻餐厅开展消费者调研的时间,然后调查

员通过观察记录样本消费者的就餐特征,即完成问卷的第二部分;接着,待服务员询问消费者是否打包之后,在结账者或点菜者准备离开时,与其面对面访谈完成第三部分的问卷调查。

(3)称重:以桌为单位进行定量调研。根据每一桌的点菜单,对每一道菜品逐一称重。每一道菜品都有4个重量指标:餐盘重量 W_{plate} , 菜品重量 W_{dishes} , 打包量 $W_{\text{take out}}$, 剩余重量 $W_{\text{food residue}}$; 因此,

$$W_{\text{food waste}} = W_{\text{food residue}} - W_{\text{plate}} - W_{\text{take out}}$$

在调查中,调查员首先通过前台获得样本消费者的点菜单,之后在传菜部记录 W_{dishes} , 待消费者就餐完毕,若消费者无打包要求,则在餐厅收台人员的帮助下在洗碗间记录 $W_{\text{food residue}}$ 以及 W_{plate} ; 若消费者要求打包,则在餐厅服务员的帮助下,在打包台记录 $W_{\text{take out}}$, 然后在餐厅收台人员的帮助下在洗碗间记录 $W_{\text{food residue}}$ 以及 W_{plate} 。其中, $W_{\text{food residue}}$ 的食物组成比重分为以下几类进行确定:①菜品系区分比较明确的并便于分离的,直接对每道菜品剩余组成分别进行称量;②区分明显但不易分离的(如水煮鱼,上汤娃娃菜等),沥油(汤)后,对每道菜品剩余组成分别进行称量;③对加工和消费后不能确定其具体比例的(如饺子类),其食物组成比例采取最初加工前的比例进行计算。

本研究中将所有菜品转换为13类食物原材料,分别是猪肉、牛肉、羊肉、禽肉、其他肉类、水产品、蔬菜、蛋类、大米、面粉、其他粮食、黄豆及其他豆类、奶类。菜品转化为原材料的参数,主要来源于“中国餐饮业食物消费数据库”,“原料转换数据库”以及已发表的资料^[22-25],具体过程参见文献^[26]。

2.2 食物浪费碳足迹分析方法及数据来源

2.2.1 系统边界

系统边界包括食物生命周期内的全部直接和间接的生产、加工、运输、消费、储存和终端处理等环节。以餐饮浪费的食物为起点,上游上溯到农产品的生产,下游下沿至餐厨垃圾处理,如图1。

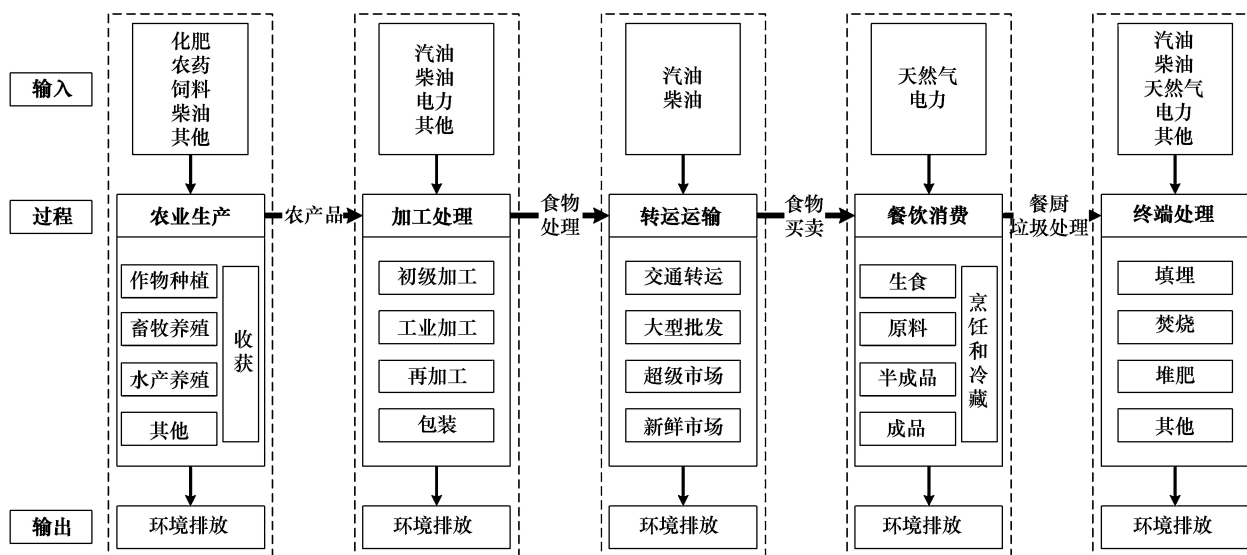


图1 食物供应链各阶段的碳排放

Fig.1 Carbon emission along the different stages of the food value chain

系统中不考虑由于修建餐厨垃圾处理厂而产生的材料和能源消耗及其温室气体排放。另外,在分析中忽略农业机械的生产过程,因为该过程的影响分摊到每个功能单位上往往非常微小(如一台收割机可用于多块田地的收割);但计算机械运行的资源能源投入,例如在某一田地工作时收割机的柴油消耗等。其他排除在系统边界外的因素是生活物资的生产、人员的运输以及劳力等。

2.2.2 碳足迹计算方法与数据来源

碳足迹是对某一产品或活动在生命周期内直接及间接引起的温室气体排放量的度量,以二氧化碳质量为单位,可参考京都议定书及其后继议定书中列明的各类温室气体定义与计量方法^[27]。基于过程分析法(PA-

LCA)的碳足迹计算公式一般形式如下:

$$CF = \sum_{i=1} Q_i \times EF_i$$

其中, CF 为碳足迹, Q_i 为物质或活动的数量或强度数据(质量/体积/千米/千瓦时), EF_i 为单位碳排放因子(CO_{2e} /单位)

(1)农业生产阶段碳足迹

由于在农产品加工获得食物原材料的过程中,不可避免会发生能量与物质散逸,使得支持单位消费产品生产的碳排放会增加。如,中国每加工生产出 1t 可供消费者食用的大米,平均需要种植业生产 1.52t 的稻谷。因此,本文将食物原材料转化为农产品,具体参数见表 1。

表 1 食物消费品农产品原料信息及需求系数
Table 1 Raw food materials and the coefficient of agricultural products information

食物原材 Raw food materials	农产品 Agricultural products	需求系数/(t/t) Coefficient	食物原材 Raw food materials	农产品 Agricultural products	需求系数/(t/t) Coefficient
大米 Rice	稻谷	1.52	鲜羊肉 Mutton	出栏肉羊	2.25
面粉 Wheat flour	小麦	1.49	禽肉 Poultry	出栏禽类	1.49
其他粮食 Other grains	其他粮食	1.20	其他肉类 Other meat	出栏牲畜	1.87
黄豆及豆制品 Bean &bean products	大豆	0.75	水产品 Aquatic products	水产品	1.18
蔬菜净菜 Vegetables	蔬菜	1.50	蛋类 Eggs	鲜蛋	1.18
生鲜猪肉 Pork	出栏生猪	1.63	奶类 Dairy products	原奶	1.05
鲜牛肉 Beef	出栏肉牛	2.11			

数据来源:表 1 中的需求系数均引自参考文献[28]。其中,其他粮食的需求系数用玉米的需求系数代替;大豆及豆制品的需求系数用豆腐丝代替;猪肉的需求系数是带骨猪肉和生鲜猪肉的平均值;牛肉的需求系数为带骨牛肉、精选鲜牛肉、普通鲜牛肉和带骨鲜牛肉的平均值;羊肉的需求系数为带骨羊肉和鲜羊肉的平均值;家禽的需求系数以生鸡、白条鸡、鲜鸡肉和鲜鸡腿的平均值代替;其他肉类的需求系数为猪、牛、羊、家禽的平均值;蛋类的需求系数为鸡蛋和蛋制品的平均值;奶类的需求系数为鲜乳品和酸奶的平均值;水产品的需求系数为养殖和捕捞的鱼、虾、蟹、贝的平均值

本文综合多位学者研究成果^[29-31],将从四方面考察农业生产阶段的碳排放量:①农用物资投入所引发的碳排放,具体包括化肥、农药、农膜、农用柴油直接使用以及农业灌溉耗费电能所导致的碳排放;②水稻生长发育过程中所产生的 CH_4 排放;③农作物种植破坏土壤所导致的 N_2O 排放;④畜禽肠胃道内发酵所引起的 CH_4 排放以及粪便管理系统中所导致的 CH_4 和 N_2O 的排放。相关排放系数见表 2。

表 2 温室气体排放系数
Table 2 Emissions coefficient of greenhouse gases

	来源 Sources	排放系数 Emissions coefficient	数据来源 References
农资投入 Agricultural production materials	化肥 Chemical fertilizers/(kg CO_2eq /kg)	3.28	[31-32]
	农药 Pesticides/(kg CO_2eq /kg)	18.09	[31-32]
	农膜 Plastic film/(kg CO_2eq /kg)	18.99	IREEA[30]
	柴油 Diesel oil/(kg CO_2eq /kg)	2.17	[33]
	灌溉 Irrigation/(kg CO_2eq /hm ²)	75.08	[34-35]
稻田 CH_4 排放 CH_4 emission from paddies	东北三省 Northeastern provinces/(kg CH_4 /hm ²)	80.13	[29, 36]
农田土壤 N_2O 的排放 N_2O emission from cropland soil	中稻 In-season rice/(kg N_2O /hm ²)	4.59	[37]
	春小麦 Spring wheat/(kg N_2O /hm ²)	0.40	[38]
	大豆 Soybean/(kg N_2O /hm ²)	2.29	[38-39]
	蔬菜 Vegetables/(kg N_2O /hm ²)	4.94	[40]

续表

	来源 Sources	排放系数 Emissions coefficient	数据来源 References
	其他粮食 Others staples/(kg N ₂ O /hm ²)	2.53	[41]
畜禽养殖肠胃发酵 CH ₄ 排放	猪 Pig/(kg CH ₄ /head · a)	1.00	[33]
CH ₄ emission from enteric fermentation	牛 Cattle/(kg CH ₄ /head · a)	59.70	[33]
by livestock and poultry	羊 Sheep/(kg CH ₄ /head · a)	5.00	[33]
	家禽 Poultry/(kg CH ₄ /head · a)	—	[33]
	其他牲畜 Others livestock/(kg CH ₄ /head · a)	5.13	[33]
畜禽养殖粪便发酵 CH ₄ 排放	猪 Pig/(kg CH ₄ /head · a)	3.50	[33]
CH ₄ emission from manure fermentation	牛 Cattle/(kg CH ₄ /head · a)	8.75	[33]
by livestock and poultry	羊 Sheep/(kg CH ₄ /head · a)	0.16	[33]
	家禽 Poultry/(kg CH ₄ /head · a)	0.02	[33]
	其他牲畜 Others livestock/(kg CH ₄ /head · a)	0.49	[33]
畜禽养殖粪便排放 N ₂ O 排放	猪 Pig/(kg N ₂ O /head · a)	0.53	[42]
N ₂ O emission from fecal by	牛 Cattle/(kg N ₂ O /head · a)	1.18	[42]
livestock and poultry	羊 Sheep/(kg N ₂ O /head · a)	0.33	[42]
	家禽 Poultry/(kg N ₂ O /head · a)	0.02	[42]
	其他牲畜 Others livestock/(kg N ₂ O /head · a)	0.71	[42]
水产品/(kg CO ₂ /kg) Aquatic products		0.97	[28, 43-44]
奶类/(kg CO ₂ /kg) Dairy products		1.19	[45]
蛋类/(kg CO ₂ /kg) Eggs		2.24	[45]

IREEA 指南南京农业大学农业资源与生态环境研究所, 此数据引自文献[30]; 调研中, 其他粮食的排放系数以玉米的碳排放系数代替; 牛的排放系数为奶牛、水牛和黄牛排放系数的平均值; 羊的排放系数为山羊和绵羊排放系统的平均值; 家禽的排放系数为鸡、鸭、鹅和火鸡排放系数的平均值; 其他牲畜的排放系数为驴、兔子排放系数的平均值; 水产品的排放系数为天然渔业和人工渔业排放系数的平均值; 奶类的碳排放系数取牛奶的排放系数; 蛋类的碳排放系数取鸡蛋的碳排放系数

农业生产的化肥、农药和农膜的消费量利用北京市主要食物来源地(表3)单位质量农产品的使用量计算得到^[46]; 生产过程中的柴油消费主要考虑农田作业机械消费的能源: 包括拖拉机, 收获机械, 种植与管理机械等, 本文中采用已有研究结果^[46], 单位农田作业的平均耗柴油为 169.89 kg /hm²; 农业生产的灌溉面积利用北京市主要食物来源地单位质量农产品的生产面积计算得到。

农业生产阶段碳足迹的计算公式如下:

$$CF_{\text{agricultural}} = \sum_{n=1}^4 CF_{\text{agricultural} \cdot n}$$

$$CF_{\text{agricultural1}} = \sum_{i=1} \frac{U_j}{Y_i} \times W_i \times EF_j + \sum_{i=1} \frac{A_i}{Y_i} \times W_i \times 169.89 \times 2.17 + \sum_{i=1} \frac{A_i}{Y_i} \times W_i \times 75.08$$

$$CF_{\text{agricultural2}} = \sum \frac{A_{\text{rice}}}{Y_{\text{rice}}} \times W_{\text{rice}} \times EF_{\text{CH}_4} \times 25$$

$$CF_{\text{agricultural3}} = \sum_{i=1} \frac{A_i}{Y_i} \times W_i \times EF_{\text{N}_2\text{O}} \times 298$$

$$CF_{\text{agricultural4}} = \sum \frac{S_k}{Y_k} \times W_k \times EF_{\text{N}_2\text{O}} \times 298 + \sum \frac{S_k}{Y_k} \times W_k \times EF_{\text{keCH}_4} \times 25 + \sum \frac{S_k}{Y_k} \times W_k \times EF_{\text{kmCH}_4} \times 25$$

其中, $CF_{\text{agricultural}}$ 为农业生产阶段的碳足迹, $CF_{\text{agricultural1}}$ 为农用物资投入所引发的碳足迹, Y_i 为第 i 种农产品的产量, U_j 为第 j 种农用物资的总使用量; W_i 为第 i 中农产品的浪费量; EF_j 为第 j 种农用物资的碳排放系数; A_i 为第 i 中农产品的播种面积; $CF_{\text{agricultural2}}$ 为水稻生长发育过程中所产生的 CH₄ 排放; A_{rice} 为水稻生产面积; Y_{rice} 为水稻产量; W_{rice} 为稻谷浪费量; EF_{CH_4} 为稻田的 CH₄ 排放系数; $CF_{\text{agricultural3}}$ 为农作物种植破坏土壤所导

致的 N_2O 排放; EF_{iN_2O} 为第 i 种农田的 N_2O 排放系数; $CF_{agricultural4}$ 为畜禽养殖的碳足迹; Y_k 为第 k 种肉类的产量; S_k 为第 k 中畜禽的出栏量; W_k 为第 k 中肉类的浪费量; EF_{kN_2O} 为第 k 种畜禽粪便管理的 N_2O 排放系数; EF_{keCH_4} 为第 k 种畜禽肠胃发酵的 CH_4 排放系数; EF_{kmCH_4} 为第 k 种畜禽粪便管理的 CH_4 排放系数; 1t CH_4 、 N_2O 所引发的温室效应分别等同于 25t CO_2 和 298t CO_2 所产生的温室效应^[33]。

表 3 北京市食物主要供应地
Table 3 Main food supply in Beijing

项目 Item	主供应地 Main supply	项目 Item	主供应地 Main supply
粮食 Grains	黑龙江/吉林	猪牛羊肉 Meat	河南/内蒙古
蔬菜 Vegetable	山东/河北/辽宁	禽类 Poultry	河南/内蒙古
蛋类 Eggs	河南/内蒙古	水产品 Aquatic products	天津
奶类 Dairy products	内蒙古	豆制品 Bean products	黑龙江

数据来源:引自参考文献[46]

(2) 加工处理阶段碳足迹

加工处理阶段的碳足迹主要包括农副产品的初级加工、深加工以及包装。本文主要考虑粮食的初加工以及豆制品的再加工^[46]。粮食加工统一考虑采用中型的碾米机加工而成,其主要参数是 4.5t/h,功率为 41 kW。植物油加工机械的主要参数 210kg/h,功率为 7.5kW。而豆制品主要按加工为豆腐来计算 30 kg/h,功率为 5.5kW。可得加工处理阶段单位质量能源耗以及碳足迹:

$$CF_{\text{processing}} = \sum_{i'=1} W_{i'}' \times Ele_{i'per} \times 0.85$$

其中, $CF_{\text{processing}}$ 为加工处理阶段碳足迹; i' 为第 i' 中食物原材料的浪费量; $Ele_{i'per}$ 为加工单位质量的第 i' 种食物原材料的耗电量; 0.85 kg CO_2eq /kW · h 为电力的碳排放系数^[46]。

(3) 运输阶段碳足迹

运输过程考虑北京的食物主要供应地(表 3),据文献[46],运进京的货物有 1/3 是通过公路,2/3 是通过铁路,因此通过中国公路网和铁路查询得到供应地到北京的路程,乘以每公里油耗或者电耗指标。可得运输阶段碳足迹。

$$CF_{\text{distribution}} = \sum_{i'=1} W_{i'}' \times D_{i'}' \times Ene_{tper} \times EF_{xenergy}$$

其中, $CF_{\text{distribution}}$ 为运输阶段碳足迹; $W_{i'}'$ 为第 i' 种食物原材料的浪费量; $D_{i'}'$ 为第 i' 种食物原材料运到北京的距离; Ene_{tper} 为第 t 种运输方式的单位能耗,具体参见表 4; $EF_{xenergy}$ 为第 x 种能源的碳排放因子,其中汽油的碳排放系数为 3.15 kg CO_2eq /kg^[47]。

表 4 公路铁路主要能耗指标
Table 4 Main technical and economic indicators of highway and railway

项目 Item	货车每百吨公里耗汽油 Petroleum consumption of trucks per 100t · km/L	货车每百吨公里耗柴油 Diesel consumption of trucks per 100t · km/L	内燃机车每万吨公里耗柴油 Diesel consumption of internal-combustion engine per 10000t · km/kg	电力车每万吨公里耗电 Electricity consumption of electric power engine per 10000t · km/kWh
能耗 Energy consumption	7.76	4.72	34.5	95.4

数据来源:引自参考文献[20]

(4) 餐饮消费阶段碳足迹

餐饮消费阶段的碳足迹主要包括炊事能源消费以及食物储存电力消费。由于数据的限制,本文只考虑炊事能源耗能,数据来自问卷调查。

$$CF_{\text{consumption}} = Ene_{\text{total}} \times \frac{\sum W_{\text{food waste}}}{\sum (W_{\text{dishes}} - W_{\text{plate}})} \times EF_{\text{natural gas}}$$

其中, $CF_{\text{consumption}}$ 为餐饮消费阶段碳足迹, Ene_{total} 为餐饮企业天然气使用总量; $EF_{\text{natural gas}}$ 为天然气的碳排放系数, $2.09 \text{ kg CO}_2 \text{ eq} / \text{m}^3$ [46]。

(5) 餐厨垃圾处理阶段碳足迹

餐厨垃圾处理阶段的碳足迹主要包括运输和处理餐厨垃圾所引起的碳排放。北京市普遍采用餐厨垃圾运输车型号为烟台海德以及济南玉林, 餐厨垃圾额定载重量一般为 3—7 t [48]。本文设定北京市餐厨垃圾运输车的容量为 5 t, 柴油油耗为 0.15 L/km , 运输距离为 15 km。假设北京的餐厨垃圾都被专业的餐厨垃圾处理厂处理, 根据已有文献 [49], 北京餐厨垃圾处理所产生的碳排放为 $161.1—337.7 \text{ kg CO}_2 \text{ eq/t}$ 。由此可计算出餐厨垃圾处理阶段碳足迹:

$$CF_{\text{management}} = \frac{\sum W_{\text{food waste}}}{W_{\text{load} \cdot \text{capacity}}} \times 2 \times D \times Ene_{\text{per}} \times EF_{\text{diesel}} + \sum W_{\text{food waste}} \times EF_{\text{management}}$$

其中, $CF_{\text{management}}$ 为餐厨垃圾处理阶段碳足迹, $\sum W_{\text{food waste}}$ 为食物浪费的总重量, $W_{\text{load} \cdot \text{capacity}}$ 为餐厨垃圾运输车的容量, D 为从餐饮机构到餐厨垃圾处理厂的距离, Ene_{per} 为餐厨垃圾运输车的单位油耗, EF_{diesel} 为柴油的碳排放系数, $EF_{\text{management}}$ 为餐厨垃圾处理的碳排放系数。

(6) 基于生命周期过程的食物浪费碳足迹: 由各阶段的碳足迹叠加得到。即:

$$CF = \sum_{p=1}^5 CF_p$$

3 结果与分析

3.1 北京市餐饮食物浪费量的构成

北京市餐饮食物浪费总量为 $39.86 \times 10^4 \text{ t/a}$ 。其中, 蔬菜类浪费量最高, 约占浪费总量的 43.16%, 其次为肉类和主食类, 分别占食物浪费总量的 20.59% 和 16.66% (图 2)。

蔬菜类中, 浪费量最多的是茄果类、叶菜类和葱蒜类, 分别占蔬菜浪费量的 15.45%、14.89% 和 13.67%。茄果类蔬菜的浪费主要集中在川菜和湘菜中, 如水煮鱼、辣子鸡等, 这些菜品中作为调味的辣椒和青椒的使用量大, 但实际食用量较小; 葱蒜类作为调味蔬菜也存在相同的原因; 叶菜类蔬菜是餐饮消费必点的菜品之一, 但调查显示, 叶菜类菜品的上菜时间大多接近消费结束, 因此浪费量较大。肉类中, 猪肉的浪费量最大, 其次为禽肉, 牛羊肉等, 分别占肉类浪费量的 42.68%、33.65%、17.71%。肉类的浪费结构与我国居民肉类消费结构密切相关。2011 年, 我国居民猪肉消费占肉类总消费量的 62.4%, 禽肉消费占肉类总消费量的 27.1%, 而牛羊肉仅占 10.5% [50]。主食浪费量最高的为面食, 占主食浪费量的 44.15%; 其次是米饭, 占主食浪费量的 36.62%; 其他类的主食共占 19.24%。除了北方饮食习惯偏爱面食外, 面食的浪费量大的主要原因是面食不像米饭可以分食。

3.2 北京市餐饮食物浪费的碳足迹

北京市餐饮食物浪费碳足迹从一个方面反映了食物浪费对资源环境的影响。北京市餐饮食物浪费所产生的总碳足迹为 $192.51 \times 10^4—208.52 \times 10^4 \text{ t CO}_2 \text{ eq}$ (表 5)。

食物浪费碳排放过程包括: 农业生产、初级加工、运输过程、消费过程以及终端处理。其中, 农业生产过程主要包括农资投入 (如化肥施用、农药使用、农田作业), 农田土壤、畜禽养殖。农田作业主要是农作物的播种, 灌溉和收割等机械使用中能源的消费而引起的碳排放, 农田土壤主要指水稻生产时其在生长发育过程中

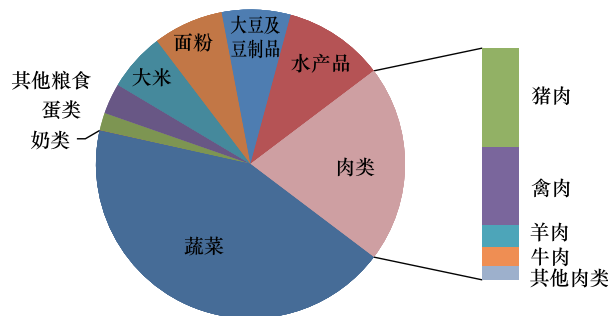


图 2 北京市餐饮食物浪费量的构成

Fig.2 The proportion of catering food waste in Beijing

所排放的 CH₄,以及农作物种植时土壤所排放的 N₂O。初级加工主要是农副产品的初级加工,主要考虑粮食和豆制品的加工;消费过程主要考虑的是炊事能源消费;终端处理主要包括收集运输餐厨垃圾的运输过程所产生的碳排放以及处理餐厨垃圾时所产生的碳排放。整个过程中,农业生产阶段的碳排放量最大为 99.34×10⁴tCO₂eq,占食物浪费总碳足迹的 47.64%。其次是消费阶段的碳足迹 77.96×10⁴tCO₂eq,占食物浪费总碳足迹的 37.39%,再次是餐厨垃圾处理阶段的碳足迹 28.54×10⁴tCO₂eq,占食物浪费总碳足迹的 13.68%,其他部分的碳排放很小,几乎可以忽略不计(图 3)。农业生产阶段中,畜禽养殖的排放量最大为 81.74×10⁴tCO₂eq,占农业生产阶段碳排放的 82.29%;其次为农资投入的碳排放 8.56×10⁴tCO₂eq,占农业生产阶段碳排放的 8.62%。由农田种植所引发的碳足迹 4.24×10⁴tCO₂eq,仅占农业生产阶段碳排放的 4.27%。由此可见,北京餐饮食物浪费碳足迹在农业生产阶段的浪费主要是肉类资源的碳排放。

表 5 北京餐饮食物浪费碳足迹
Table 5 Carbon footprint of catering food waste in Beijing

项目 Item	农业生产阶段碳足迹 CF of agricultural production 10 ⁴ CO ₂ eq	加工处理阶段碳足迹 CF of processing 10 ⁴ CO ₂ eq	运输阶段碳足迹 CF of distribution 10 ⁴ CO ₂ eq	餐厅消费阶段碳足迹 CF of catering consumption 10 ⁴ CO ₂ eq	终端处理阶段碳足迹 CF of management 10 ⁴ CO ₂ eq	小计 Subtotal	单位质量碳足迹 Per kg CF kgCO ₂ eq/kg
大米 Rice	2.92	0.02	0.11/0.24	4.75	0.84/1.74	8.64/9.68	3.56/3.98
面粉 Wheat flour	1.52	0.02	0.13/0.29	5.73	1.01/2.1	8.42/9.67	2.87/3.30
其他粮食 Other grains	0.67	0.01	0.06/0.13	2.50	0.44/0.91	3.67/4.22	2.88/3.30
黄豆及豆制品 Bean &bean products	2.05	0.45	0.13/0.28	5.61	0.99/2.05	9.22/10.44	3.22/3.64
蔬菜净菜 Vegetables	5.64	—	0.33/0.72	33.65	5.92/12.32	45.54/52.33	2.65/3.04
生鲜猪肉 Pork	17.43	—	0.08/0.19	6.85	1.21/2.51	25.57/26.97	7.30/7.70
鲜牛肉 Beef	16.20	—	0.02/0.04	1.33	0.23/0.49	17.78/18.05	26.22/26.62
鲜羊肉 Mutton	23.10	—	0.02/0.04	1.52	0.27/0.56	24.90/25.21	32.12/32.52
禽肉 Poultry	11.66	—	0.07/0.15	5.40	0.95/1.98	18.08/19.18	6.55/6.95
其他肉类 Other meat	11.39	—	0.01/0.03	0.96	0.17/0.35	12.53/12.73	25.62/26.03
水产品 Aquatic products	4.79	—	0.02/0.05	8.19	1.44/3.00	14.45/16.03	3.45/3.83
蛋类 Eggs	1.94	—	0.02/0.05	1.43	0.25/0.52	3.64/3.94	4.97/5.38
奶类 Dairy products	0.03	—	0.00/0.00	0.04	0.01/0.02	0.08/0.09	3.57/3.97
小计 Subtotal	99.34	0.50	0.99/2.20	77.96	13.72/28.54	192.51/208.52	

北京市餐饮食物浪费的碳足迹可分为粮食、肉类、蔬菜、豆及豆制品、蛋奶类和水产品 6 类(图 4)。其中,食物浪费碳足迹最主要的部分来自肉类的浪费,达到 102.14×10⁴t CO₂eq,占食物浪费总碳足迹的 48.98%。肉类浪费碳足迹中碳排放量最大的过程来自于农业生产过程,碳排放量达到 79.78×10⁴t CO₂eq,占肉类浪费碳足迹的 78.11%。蔬菜类的浪费,占食物浪费碳足迹的第二位,达到 52.33×10⁴ t CO₂eq,占食物浪费总碳足迹的 25.09%。蔬菜浪费碳足迹中碳排放量最大的过程为消费过程,为 33.65×10⁴ t CO₂eq,占蔬菜浪费碳足迹的 64.31%。粮食浪费碳足迹为食物浪费碳足迹的第三位,为 23.56×10⁴ t CO₂eq,占食物浪费总碳足迹的 11.30%。粮食浪费碳足迹中碳排放量最大的过程也来自于消费阶段,为 13.98×10⁴ t CO₂eq,占粮食浪费碳足迹的 59.34%。

从单位浪费食物的碳足迹来看(表 5),羊肉的碳足迹最大,为 32.52 kgCO₂ eq/kg,蔬菜的碳足迹最小,仅为 3.04 kgCO₂ eq/kg,前者是后者的 10.70 倍。即浪费 1kg 羊肉相当于浪费 10.7kg 的蔬菜。牛肉的碳足迹仅次于羊肉,为 26.62 kgCO₂ eq/kg,再次为其他肉类 26.03 kgCO₂ eq/kg,猪肉 7.70 kgCO₂ eq/kg,禽肉 6.95 kgCO₂ eq/kg,蛋类 5.38 kgCO₂ eq/kg。单位浪费食物碳足迹最小的后三位为分别为面粉及其他粮食 3.30 kgCO₂ eq/kg,水产品 3.83 kgCO₂ eq/kg,蔬菜 3.04 kgCO₂ eq/kg。

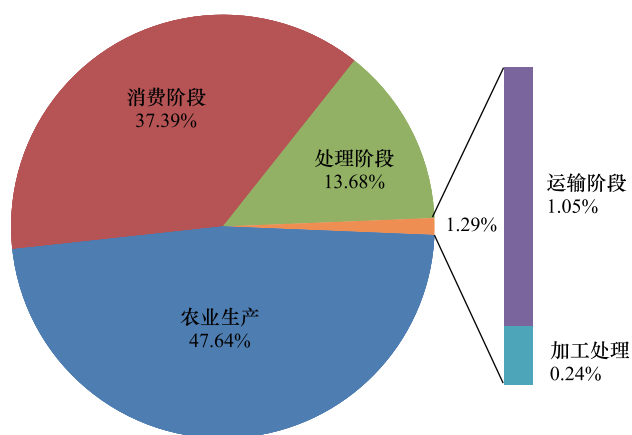


图3 北京市餐饮食物浪费过程的碳排放

Fig. 3 Contribution of different stage to the catering food wastage carbon emissions in Beijing

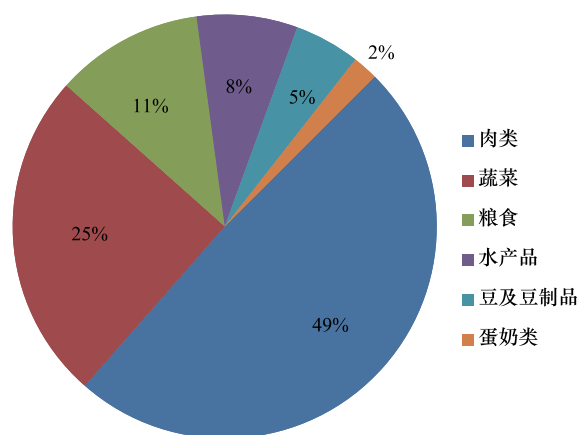


图4 北京市餐饮食物浪费中各类食物的碳足迹构成

Fig. 4 Contribution of different food to the catering food wastage carbon footprint in Beijing

4 结论与讨论

总地看,北京市餐饮食物浪费总量为 39.86×10^4 t/a,是其与浪费食物相对应的食物种类消费总量的46%,是其农产品生产总量的8.08%。北京市餐饮食物浪费所产生的碳足迹为 192.51×10^4 — 208.52×10^4 t CO₂eq。从浪费的食物种类来看,肉类浪费产生的碳足迹最大,仅这一项所占比例就超过60%。从食物供应链来看,农业生产阶段的碳排放量最大,约为食物浪费碳足迹的一半,其次是消费阶段占食物浪费碳足迹的38%,再次是餐厨垃圾处理阶段占食物浪费碳足迹的7%—14%。

从这些初步结果可以看出,北京市餐饮业的食物浪费惊人,其所造成的碳排放也是不容忽视的。就浪费的食物种类及其碳排放的贡献而言,主要是由于人们的生活水平大幅度提高,肉类消费的数量和在食物中的比例都有所增加,同时因为生产单位质量的肉类所要排放的碳足迹要比其他的食物大。它的政策隐含着减少食物浪费、减少肉类消费、均衡膳食,倡导绿色食物可持续消费是生态文明消费的重要途径之一。供应链不同环节的碳排放结果说明,减少食物生产过程中化肥、农药使用,提高化肥、农药的使用效率,或者倡导生态农业模式,尽量少施或不施化肥农药,是缓解食物浪费造成的环境影响的重要途径。需要说明的是,本文在计算过程中,运输阶段和餐厨垃圾处理阶段分别给了一个区间值,这是因为从外阜运往北京的农产品,主要有公路和铁路两种途径,每种途径又分别有两种耗能方式。货车有耗汽油和耗柴油之分;火车有耗柴油和耗电之分;同样的,北京市目前餐厨垃圾资源化处理工艺有两种,好氧堆肥和湿热处理。其中好氧堆肥对全球变暖的贡献较大,碳排放为337.7 kg CO₂eq/t。湿热处理为161.1 kg CO₂eq/t。因此,选择不同的运输方式和餐厨垃圾处理方式对碳排放的结果影响很大。建议商户选择更绿色的货运方式,政府可对选择更绿色货运方式的商家给予一定的补贴;建议政府关注餐厨垃圾处理环节,在建立餐厨垃圾处理厂时,多方考察不同处理方式对环境的影响,积极选择对环境更友好的处理方式。

由于数据的限制,在计算食物浪费碳足迹的过程中仅考虑了粮食和豆制品的初级加工过程,深加工以及其他食物的初级加工过程未包括在内。无法估算餐饮消费中食物储存环节的碳排放,未考虑植物油、动物油、酒类和饮料部分的碳排放,因此,估算结果有些偏小。此外,餐厨垃圾处理环节,本文假定餐厨垃圾均被专业的餐厨垃圾处理机构处理也会导致计算结果偏小。事实上,目前北京餐厨垃圾处理的形势并不乐观,全市餐厨垃圾处理能力仅为750t/日^[48]。其余的餐厨垃圾有的跟普通垃圾一样,或者焚烧,或者填埋,这两种处理方式远大于专业餐厨垃圾处理方式的碳排放;有的餐厨垃圾被一些地下加工厂收购,提炼地沟油;有的餐厨垃圾被一些郊区养殖场收购,用于养猪,即“泔水猪”。后两种回收处理方式严重威胁了人们的健康。在今后的研

究中,将进一步追踪北京餐厨垃圾的流向以及流向的比重,同时收集北京餐厨垃圾处理机构的处理工艺,不断完善生命周期评价的清单,使研究结果更接近现实。

本文得到的北京市餐饮食物消费单位碳足迹高于吴燕^[46]计算得出的单位食物消费碳排放。从食物种类来看,本文肉类消费的碳排放最大,蔬菜其次;而吴燕的计算结果则是粮食消费的碳足迹最大,其次是瓜果蔬菜;从食物供应链来看,本文农业生产阶段的碳排放量最大,其次是消费阶段;而吴燕的计算结果则是消费的碳足迹最大。这主要是因为吴燕在估算农业生产阶段时,只考虑了农用物资投入所引发的碳排放。而本文除此之外,还将水稻生长发育过程中所产生的 CH_4 排放,农作物种植破坏土壤所导致的 N_2O 排放,畜禽肠胃道内发酵所引起的 CH_4 排放以及粪便管理系统中所导致的 CH_4 和 N_2O 的排放,三个方面纳入了考量。其中,仅畜牧养殖所引起的碳排放就与消费阶段的碳排放量相当,因此本文的研究结果更精确。

随着中国市场经济快速发展和居民收入水平的提高,城市化的加速,消费理念的变化,特别是由于公务消费的日益普遍,节俭消费的文化传统逐渐被淡忘,食物浪费特别是发生在餐饮业中的食物浪费仍然会愈来愈严重。改革开放以来,党和政府多次掀起反对浪费、厉行节俭的浪潮,但始终未建立起防止食物浪费的长效机制。因此,从科学角度系统地梳理食物浪费的内涵、主要研究内容及其方法、重点研究领域等理论问题,对于明确我国食物浪费的规模和结构,厘清食物浪费的原因和产生的综合影响,探索减少食物浪费的潜力和系统对策等等,都具有十分重要的理论和现实意义。食物浪费不仅浪费的是食物本身,还意味着在生产和制造这些食物中所投入的各种资源的浪费以及在生产、加工、运输、消费、处理过程中所造成的环境影响。食物浪费的资源环境测度实际上也是一套方法体系的建立,其中包括两方面的内容:一是资源环境测度是调查方法、计算方法、参数获取方法以及测试方法等方法的综合;二是资源环境测度主要着重研究被浪费掉的食物去向以及对社会环境体系的潜在影响。本文率先尝试构建了餐饮食物浪费资源环境的测度方法,包括调查方法、计算方法、参数获取方法以及测试方法等,力图透过食物浪费现象,从一个方面来揭示其资源环境的代价。当然,食物浪费的资源环境代价还包括水、土地的浪费、主要营养元素的浪费及其环境压力以及经济社会因素浪费等等;估算资源环境代价也不仅仅只有生态足迹法,还可以用还原法等。这些内容将在今后研究中陆续开展。

参考文献 (References):

- [1] Hall K D, Guo J, Dore M, Chow C C. The Progressive increase of food waste in America and its environmental impact. *PLoS One*, 2009, 4 (11): e7940.
- [2] European Commission. Preparatory Study of Food Waste Across EU 27. Brussels: European Commission, 2010.
- [3] Food and Agriculture Organization of the United Nations. Global Food Losses and Food Waste: Extent Causes and Prevention. Rome: FAO, 2011.
- [4] Liu J G, Lundqvist J, Weinberg J, Gustafsson J. Food losses and waste in China and their implication for water and land. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(18): 10137-10144.
- [5] Nahman A, de Lange W. Costs of food waste along the value chain: evidence from South Africa. *Waste Management*, 2013, 33(11): 2493-2500.
- [6] Katajajuuri J M, Silvennoinen K, Hartikainen H, Heikkilä L, Reinikainen A. Food waste in the Finnish food chain. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 73: 322-329.
- [7] Scholz K, Eriksson M, Strid I. Carbon footprint of supermarket food waste. *Resources, Conservation and Recycling*, 2015, 94: 56-65.
- [8] Smith P, Martino D, Cai Z, Gwary D, Janzen H, Kumar P, McCarl B, Ogle S, O'Mara F, Rice C, Scholes B, Sirotenko O. Agriculture // Metz B, Davidson O R, Bosch P R, Dave R, Meyer L A, eds. *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 487-540.
- [9] Garnett T. Where are the best opportunities for reducing greenhouse gas emissions in the food system (including the Food Chain)? *Food Policy*, 2011, 36(S1): S23-S32.
- [10] 王晓, 齐晔. 食物全生命周期温室气体排放特征分析. *中国人口·资源与环境*, 2013, 23(7): 70-76.
- [11] Huang W F, Wang J, Dai X Y, Li M R, Harder M K. More than financial investment is needed: food waste recycling pilots in Shanghai, China. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 67: 107-116.
- [12] Chiew Y L, Spångberg J, Baky A, Hansson P A, Jönsson H. Environmental impact of recycling digested food waste as a fertilizer in agriculture — A case study. *Resources, Conservation and Recycling*, 2015, 95: 1-14.
- [13] Food and Agriculture Organization of the United Nations. Food Wastage Footprint: Impacts on Natural Resources; Summary Report. Rome:

- FAO, 2013.
- [14] 成升魁, 高利伟, 徐增让, 唐承财, 王灵恩, Dhruva B G C. 对中国餐饮食物浪费及其资源环境效应的思考. 中国软科学, 2012, (7): 106-114.
- [15] 许世卫. 中国食物消费与浪费分析. 中国食物与营养, 2005, (11): 4-8.
- [16] Shen J B, Cui Z L, Miao Y X, Mi G H, Zhang H Y, Fan M S, Zhang C C, Jiang R F, Zhang W F, Li H G, Chen X P, Li X L, Zhang F S. Transforming agriculture in China: from solely high yield to both high yield and high resource use efficiency. Global Food Security, 2013, 2(1): 1-8.
- [17] The Energy Data and Modeling Center. Handbook of Energy and Economic Statistics in Japan. Tokyo, Japan: Energy Conservation Center, 2006.
- [18] 杨柳. 中国餐饮业: 现状分析及前景展望 // 江小涓. 中国经济运行与政策报告 No.2: 中国服务业的增长与结构. 北京: 社会科学文献出版社, 2004: 238-256.
- [19] 胡越, 周应恒, 韩一军, 徐锐钊. 减少食物浪费的资源及经济效应分析. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(12): 150-155.
- [20] 高利伟, 成升魁, 曹晓昌, 张丹, 刘晓洁, 秦奇, 刘尧, 王灵恩. 食物损失和浪费研究综述及展望. 自然资源学报, 2015, 30(3): 523-536.
- [21] 北京市统计局, 国家统计局北京调查总队. 北京市统计年鉴 2014. 北京: 中国统计出版社, 2014 [2015-03-30]. <http://www.bjstats.gov.cn/nj/main/2014-tjnj/CH/index.Htm>.
- [22] 叶予舜. 各种食物制备前后成品重量增损比率表. [2015-03-30]. <http://wenku.baidu.com/view/dec4ab1414791711cc7917dd.html>.
- [23] 杨月欣, 王光亚, 潘兴昌. 中国食物成分表(第二版). 北京: 北京大学医学出版社, 2009: 1-384.
- [24] US Department of Agriculture. Food Yields: Summarized by Different Stages of Preparation. Washington D C: USDA Agriculture Research Service, 1975.
- [25] US Department of Agriculture. USDA Table of Cooking Yields for Meat and Poultry. Maryland: USDA Agriculture Research Service Beltsville Human Nutrition Research Center Nutrient Data Laboratory, 2012.
- [26] Bai J F, Wahl T I, Lohmar B T, Huang J K. Food away from home in Beijing: effects of wealth, time and "free" meals. China Economic Review, 2010, 21(3): 432-441.
- [27] 计军平, 马晓明. 碳足迹的概念和核算方法研究进展. 生态经济, 2011, (4): 76-80.
- [28] 曹淑艳, 谢高地, 陈文辉, 郭红. 中国主要农产品生产的生态足迹研究. 自然资源学报, 2014, 29(8): 1336-1344.
- [29] 闵继胜, 胡浩. 中国农业生产温室气体排放量的测算. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(7): 21-27.
- [30] 田云, 张俊飏. 中国农业生产净碳效应分异研究. 自然资源学报, 2013, 28(8): 1298-1309.
- [31] 尚杰, 杨果, 于法稳. 中国农业温室气体排放量测算及影响因素研究. 中国生态农业学报, 2015, 23(3): 354-364.
- [32] West T O, Marland G. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: comparing tillage practices in the United States. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2002, 91(1/3): 217-232.
- [33] Intergovernmental Panel on Climate Change. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use. Geneva, Switzerland: IPCC, 2006.
- [34] Dubey A, Lal R. Carbon footprint and sustainability of agricultural production systems in Punjab, India, and Ohio, USA. Journal of Crop Improvement, 2009, 23(4): 332-350.
- [35] 李俊杰. 民族地区农地利用碳排放测算及影响因素研究. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(9): 42-47.
- [36] 王明星, 李晶, 郑循华. 稻田甲烷排放及产生、转化、输送机理. 大气科学, 1998, 22(4): 600-612.
- [37] 邢光熹, 颜晓元. 中国农田 N_2O 排放的分析估算与减缓对策. 农村生态环境, 2000, 16(4): 1-6.
- [38] 于克伟, 陈冠雄, 杨思河, 吴杰, 黄斌, 黄国宏, 徐慧. 几种旱地农作物在农田 N_2O 释放中的作用及环境因素的影响. 应用生态学报, 1995, 6(4): 387-391.
- [39] 黄国宏, 陈冠雄, 吴杰, 黄斌, 于克伟. 东北典型旱作农田 N_2O 和 CH_4 排放通量研究. 应用生态学报, 1995, 6(4): 383-386.
- [40] 邱炜红, 刘金山, 胡承孝, 谭启玲, 孙学成. 种植蔬菜地与裸地氧化亚氮排放差异比较研究. 生态环境学报, 2010, 19(12): 2982-2985.
- [41] 王少彬, 苏维瀚. 中国地区氧化亚氮排放量及其变化的估算. 环境科学, 1993, 14(3): 42-46.
- [42] 胡向东, 王济民. 中国畜禽温室气体排放量估算. 农业工程学报, 2010, 26(10): 247-252.
- [43] 刘晃, 车轩. 中国水产养殖二氧化碳排放量估算的初步研究. 南方水产, 2010, 6(4): 77-80.
- [44] 陈桥驿, 杨宁生. 建立水产养殖碳排放量计算模型——以养殖场进行实证分析. 中国农学通报, 2013, 29(20): 46-51.
- [45] 黄文强, 董红敏, 朱志平, 刘翀, 陶秀萍, 王悦. 畜禽产品碳足迹研究进展与分析. 中国农业科学, 2015, 48(1): 93-111.
- [46] 吴燕, 王效科, 逯非. 北京市居民食物消费碳足迹. 生态学报, 2012, 32(5): 1570-1577.
- [47] 张社荣, 庞博慧, 张宗亮. 基于混合生命周期评价的不同坝型温室气体排放对比分析. 环境科学学报, 2014, 34(11): 2932-2939.
- [48] 刘洋. G 公司北京餐厨垃圾处理供应链物流优化研究[D]. 北京: 首都经济贸易大学, 2014.
- [49] 杜欣, 陈婷, 李欢, 任连海, 金宜英. 2 种典型餐厨垃圾资源化处理工艺的环境影响分析. 环境工程学报, 2010, 4(1): 189-194.
- [50] 陈琼, 王济民. 我国肉类消费现状与未来发展趋势. 中国食物与营养, 2013, 19(6): 43-47.