

DOI: 10.5846/stxb202202190395

庄明浩, 鲁玺, 王艳芬, 杨树. 青藏高原牧区家庭能源消费对生态环境和人体健康的影响研究现状与展望. 生态学报, 2023, 43(5): 1775-1783.

Zhuang M H, Lu X, Wang Y F, Yang S. Research status and prospect of household energy consumption impact on eco-environment and human health in the pastoral of Qinghai-Tibet Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(5): 1775-1783.

青藏高原牧区家庭能源消费对生态环境和人体健康的影响研究现状与展望

庄明浩¹, 鲁 玺^{2,3,*}, 王艳芬^{4,5}, 杨 树⁶

1 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193

2 清华大学环境学院, 北京 100084

3 环境前沿技术北京实验室, 北京 100084

4 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049

5 青藏高原地球系统与资源环境全国重点实验室, 中国科学院, 北京 100101

6 中国农业大学经济管理学院, 北京 100083

摘要:探究家庭能源消费对生态环境和人体健康的研究是系统推进家庭能源绿色低碳转型和实现联合国 2030 可持续发展目标的关键。重点综述了目前家庭能源消费、影响因素及其对生态环境和居民健康影响的国际研究现状。目前研究不足主要聚焦在以下两个方面:一方面,影响家庭能源消费因素的贡献率和影响消费行为的驱动机制尚不清晰;另一方面,目前主要针对家庭能源消费或者生态系统或者环境或者居民健康其中的某一方面或者某两个方面开展研究,鲜有研究系统的考虑家庭能源消费对生态环境和人体健康影响的综合研究。基于上述研究现状,结合青藏高原的实际情况,提出未来需要在宏观层面和微观层面加强研究。宏观层面:(1)亟需厘清青藏高原家庭能源与生态环境和人体健康之间的内在联系与驱动机制,形成青藏高原牧区“家庭能源-生态效应-环境效应-健康效应”的理论分析框架;(2)构建模块化的牧区“能源-生态-环境-健康-经济”等多学科交叉的综合评估模型,形成完整的、系统的评估方法。微观层面:(1)迫切开展青藏高原家庭能源消费特征与变化规律的研究;(2)深入开展家庭能源消费特征和变化规律与生态系统的反馈机制与量化研究;(3)加强牧区室内空气污染物浓度测定,丰富高寒地区室内污染物浓度数据以及人群暴露特征及其健康风险的研究。

关键词:青藏高原;家庭能源;生态环境;人体健康

Research status and prospect of household energy consumption impact on eco-environment and human health in the pastoral of Qinghai-Tibet Plateau

ZHUANG Minghao¹, LU Xi^{2,3,*}, WANG Yanfen^{4,5}, YANG Shu⁶

1 College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China

2 School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China

3 Beijing Laboratory of Environmental Frontier Technologies, Tsinghua University, Beijing 100084, China

4 College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

5 State Key Laboratory of Tibetan Plateau Earth System, Resources and Environment (TPESRE), Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

6 College of Economics and Management, China Agricultural University, Beijing 100083, China

Abstract: Exploring the household energy consumption and its impacts on eco-environment and human health is essential to

基金项目:国家自然科学基金项目(72174197, 41901241, 71904189);第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0304)

收稿日期:2022-02-19; **网络出版日期:**2022-10-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xilu@tsinghua.edu.cn

promote the green and low-carbon transition of household energy system and achieve the 2030 United Nations Sustainable Development Goals. This paper presents a review on the state of the art for the domestic and international research on the factors that influencing the household energy consumptions and the impacts on eco-environment and residents' health. At present, particular attention should be given to the following two research deficiencies. On one hand, the contribution rate of factors that influencing the household energy consumption and the mechanism that driving the consumption behavior are not well understood; on the other hand, the comprehensive studies that systematically consider the correlations among household energy consumption, ecological environment and human health are still lacking. Based on the research status and the actual situation of Qinghai-Tibet Plateau, this paper strengthens the study of household energy consumption and its impact on eco-environment and human health through macro level and micro level. On the macro level, we need to (1) clarify the correlation and driving mechanism between household energy, grassland ecology and human health and form the theoretical framework for analysis in the pastoral region of Qinghai-Tibet Plateau; (2) build a comprehensive modular assessment method around the energy-ecology-environment-health-economy nexus. On the micro -level, we should (1) carry out the research on the characteristics and dynamics changes of household energy consumption on the Qinghai-Tibet Plateau; (2) establish and quantify the feedback mechanism between household energy consumption and ecosystem; (3) strengthen the measurement of indoor air pollutant concentration in the pastoral areas and complete the data collection on the exposure characteristics and the associated health risks for the residents living in the alpine areas.

Key Words: Qinghai-Tibet Plateau; household energy; eco-environment; human health

家庭作为社会经济活动和能源终端消费的最基本单元,已成为全球能源消费快速增长的主要驱动力,也是全球能源转型的重点领域^[1-3]。据估算,在全球范围内,家庭能源消费占到全球能源消费的 25%—30%;在中国,家庭能源消费量占全国能源总消费量的 12.4%,已成为第二大能源消费主体^[4]。2017 年,中国发布的《能源生产与消费革命战略》报告中指出 2015—2035 年,服务业和居民生活用能增量将占终端能源需求总量增长的 60%左右。在未来一段时间内,家庭能源消费量及其所占比重将进一步增加。家庭能源消费受到地理、经济、教育、文化及政策等因素的影响,家庭能源消费量及其比重存在明显的时空异质性^[5-8]。此外,由于家庭能源消费与气候变化、生态环境质量及人群健康密切相关,家庭能源消费的时空变化格局可能会带来新的环境、生态与社会问题^[1,9-10]。因此,深入研究家庭能源消费结构变化的驱动机制及其生态、环境和健康之间的关联效应是系统推进家庭能源绿色低碳转型和实现联合国 2030 可持续发展目标(即,确保人人获得负担得起、可靠和可持续的现代能源)的关键。

相比较城市和农区家庭能源消费,作为我国能源体系建设重要组成部分的牧区家庭能源消费一直是我国能源转型建设的短板^[8,11]。长期以来,牧区一直以牲畜粪便作为主要的家庭生活能源^[12]。随着社会经济的快速发展、牧区城镇化的有序推进和游牧民定居等政策的实施,牧区牲畜粪便的大量燃烧会对草地生态、空气环境污染和牧民身体健康带来了一定的负面效应^[13-18]。近年来,牧区家庭能源发展取得了一定的进步,家庭能源消费模式也逐渐呈现多元化^[19]。然而,牧区家庭能源发展仍面临一些问题,如:牧区家庭收入偏低且不平等、过渡依赖传统能源、牧民对牲畜粪便燃烧带来的健康风险认知偏低、传统文化的影响、对清洁能源认知度较低等。这些问题在一定程度上影响了牧区家庭能源绿色低碳转型。现有研究普遍认为,牧区家庭能源消费及其对生态、环境和健康影响的研究广度和深度均相对不足^[20-22]。因此,亟待深入研究牧区家庭能源消费模式、驱动机制及其带来的生态、环境和健康效应,以详实的数据和可靠的结论为牧区能源转型和实现联合国可持续发展目标提供科学支撑,也为建立系统科学、有效的牧区能源政策制定机制提供理论支持。

1 国内外研究现状及发展动态分析

关联关系是指要素之间相互依存、相互制约^[23],目前这一概念普遍应用于多学科科学研究中,如食物-能

源-水关联关系^[24]、资源关联^[25]等等。按照关联关系这一定义,研究指出农牧区家庭能源消费与生态、环境和健康之间具有强烈的关联关系^[18-19]。基于关联关系的视角,研究重点对家庭能源消费与生态环境以及家庭能源消费与人体健康之间的关联关系相关的研究进展进行梳理和归纳。

1.1 家庭能源消费及其影响因素

研究家庭能源消费及其影响因素是实现能源转型的关键,也是目前能源领域研究的热点问题。当前家庭能源消费相关研究主要集中在两方面:(1)家庭能源消费;(2)家庭能源消费的影响因素。

国内外学者相继开展了大量家庭能源消费的研究^[26-31]。通过对国际、国家和地区间家庭能源消费模式现有研究归纳总结发现,家庭能源消费区域差异显著,主要体现在两个方面:一方面,家庭能源消费总量差异显著,通常情况下,发达地区家庭能源消费总量高于欠发达地区^[32-34];另一方面,家庭能源消费结构差异显著,一般情况下,发达地区多采用电力和天然气等清洁能源,而欠发达地区以生物质能源为主^[35-36]。研究发现,造成这种差异性的原因与所采用的研究方法不存在明显的关系,而与哪些途径和方式影响能源需求(即影响家庭能源消费的因素)有密切联系,因此,有效识别影响家庭能源消费的因素是理解家庭能源消费差异的关键^[37-41]。

依据能源阶梯假说,研究普遍认为收入是影响家庭能源消费的最直接和最主要因素,且大量的研究已证实了这一点^[42-45]。然而,也有研究显示,收入提升并不会提高家庭能源消费^[38,46]。这些不一致的结果说明,除了家庭收入外,家庭能源消费可能还受到诸多复杂因素的影响^[3,7,47]。有研究指出家庭特征、经济发展水平、地理条件、政策因素、能源可获得性与价格、文化等均是影响家庭能源消费的主要因素,而且这些影响因素的作用可能会愈加重要^[48-51]。为此,众多学者从不同视角探讨了这些因素对家庭能源消费的影响,但是往往很难得出一致的结论。例如,Kelly 等^[52]指出家庭规模对家庭能源消费贡献最大;姜璐等^[34]研究发现家庭收入、人口规模、能源可得性及受教育水平均是影响青海牧区家庭能源消费的主要因素。此外,也有研究指出文化因素逐渐成为影响家庭能源消费的主要因素^[3,47,53]。这些研究在一定程度上说明影响家庭能源消费是多因素综合作用的结果,但是综合性、系统性的集成分析各因素对于家庭能源消费贡献程度的研究相对不足,亟需探讨各种因素对家庭能源消费的影响程度,深层次揭示影响消费者决策行为的机理。

1.2 家庭能源消费对生态系统的影响

传统家庭能源以牲畜粪便、薪柴为主的生活能源显著影响了生态系统的物质循环和能量流动,对生态系统产生一定的负面作用^[5,54-56]。一方面,长期、大量的牲畜粪便和薪柴能源化利用会导致重要营养元素从生态系统中移出,降低土壤养分含量,加剧了生态系统的营养失衡,刺激了生态系统的退化^[18,57-58]。如,有研究指出传统能源(主要指牲畜粪便)的过度使用阻断了草地-牲畜-粪便-草地的物质循环,对生态系统产生明显的影响^[59-61]。另一方面,生物质能的大量粗放利用,导致大量森林被砍伐,直接破坏了林草植被,易造成土壤侵蚀和水土流失,加剧了生态系统退化^[62-65]。上述结果为深入开展家庭能源消费与生态系统的研究提供了很好的证据,然而,现有关于家庭能源消费对生态系统影响的研究主要以定性研究为主,缺少量化研究。因此,定量家庭能源消费对生态系统影响的实证研究,对于生态系统的恢复具有至关重要的作用。

近年来,有少量研究试图从另一种角度来量化家庭能源消费对生态系统的影响,即以牲畜粪便、薪柴为主的家庭生活能源回归生态系统能够带来的效益来指示牲畜粪便、薪柴能源化利用对生态系统的负面影响^[18,61,66]。目前这方面主要基于定点生态学实验研究为主,研究发现,以牲畜粪便、薪柴为主的家庭生活能源回归生态系统则会增加土壤养分含量^[67-71]和提升生态系统生产力^[72-73],进而对生态系统产生积极地作用。如,Liu 等^[18]通过对已有研究文献集成分析发现养分添加可以增加青藏高原高寒草地地上生物量 37%—110%;徐增让等^[61]研究发现牲畜粪便还田可以增加草地土壤有机质 7%,全氮 5%和地上生物量 33%。虽然定点的生态学实验证实以牲畜粪便、薪柴为主的家庭生活能源回归生态系统对生态系统产生积极作用,但是这些研究尚未与家庭能源消费之间建立联系,迄今为止仍缺乏直接量化家庭能源消费与生态系统结合的实证研究,这限制了理解家庭能源消费对生态系统的影响程度。因此,亟需建立并定量家庭能源消费与生态系统

之间的关系,有助于理解家庭能源消费对生态系统的影响,并为制定同时实现家庭能源转型和生态系统恢复的政策提供依据。

1.3 家庭能源消费对人体健康的影响

研究家庭能源消费,尤其是固体燃料燃烧(煤炭、生物质等),造成的环境大气污染物对人体有显著的健康影响^[74-76],会引发机体的氧化应激和炎症反应,从而导致呼吸系统和心血管系统相关疾病^[77]。2013 年国际癌症研究协会在发布的《空气污染与癌症》中,已经正式将大气污染物列为致癌物^[78]。一般来讲,健康风险高低取决于环境大气污染物浓度的高低^[79]。家庭室内牲畜粪便、薪柴等固体燃料燃烧会产生大量的颗粒物,不仅直接影响室内空气质量和人体健康,也是室外大气污染的重要来源^[80-83]。

过去大部分研究更多的关注室外空气污染对人体健康的影响,近年来国内外针对室内污染及其人群健康影响的研究已经有较多的成果,有研究发现室内空气污染对人体健康的危害可能更大^[84-86]。研究指出,由于固态燃料燃烧导致的室内空气污染对全球疾病负担贡献率为 5%,已成为最重要的环境风险因素^[87]。Yun 等^[86]研究指出,2014 年中国家庭部门贡献全国能源消费总量的 7.5%,但贡献了 23% 的室外 PM_{2.5} 浓度、71% 的室内 PM_{2.5} 浓度以及 67% 的 PM_{2.5} 导致的过早死亡,其中生物质燃料和煤炭对健康影响的贡献相当。现有研究对牲畜粪便、薪柴等固体燃料燃烧会影响人体健康问题已达成共识,也为后续开展相关研究提供了证据支持。先前大量的研究主要通过空气质量模型或 Rollback 系数法来模拟大气污染物的扩散以及化学反应过程,得到大气 PM_{2.5} 浓度,进而评价其对人体健康的影响^[88]。由于大气颗粒物暴露导致的相对危险度与暴露浓度之间具有直接关系,因此,暴露浓度的准确性是影响评估结果的关键性因素。然而,迄今为止仍缺少对室内 PM_{2.5} 浓度精准测量,对室内人群健康风险的精准评估产生较大的不确定性。因此,迫切需要开展家庭尺度室内 PM_{2.5} 浓度的精准测量,这有助于了解家庭能源消费对 PM_{2.5} 浓度的贡献和实现家庭能源消费对人群健康风险的精准评估。

基于上述国内外研究现状,归纳总结发现,已有的研究主要关注家庭能源消费对生态系统或者环境或者人体健康其中的某一方面或者某几个方面的研究,鲜有研究同时考虑家庭能源消费及其带来的生态系统、环境质量和人体健康的综合影响,亟需厘清家庭能源消费、生态、环境与健康之间的关系并开展相关的综合研究,这有利于从多角度提出更符合实际且更具操作性的家庭能源转型的政策建议。

2 青藏高原牧区研究进展与展望

青藏高原,地处高海拔地区,气候寒冷,是我国重要的生态安全屏障、战略资源储备基地,对人类生存环境和可持续发展起着至关重要的作用^[89-90]。青藏高原生态系统以高寒草地为主,约占总面积的 67%,支撑着 5000 万只藏系绵羊、1400 万头牦牛以及大量的野生动物(如 15 万只藏羚羊、3—5 万头野牦牛),当地 700 万百姓主要以畜牧业为生,是我国重要的高寒牧区^[58,91-92]。居住在当地的牧民一年取暖时间长达 11 个月,其中,冷季日均采暖时间达到 18—20 h,暖季日均 10—12 h^[93]。由于大部分地区很难找到木材和煤炭等能源,而牦牛粪便具有燃点低、热值高、火势持久、易收集、低成本等优点,一直是当地牧民的主要家庭生活能源^[61]。据前期调研发现,青藏高原牧区人均消耗牛粪为(1.5±0.2)t/年,年燃烧量约为(1065.5±159.1)万 t,贡献了牧区能源消费的 60%—80%^[58,90]。由此可见,牦牛粪便是青藏高原牧区传统家庭的主要生活能源^[93]。

目前在青藏高原家庭能源消费特征^[5,8,19,22,57]、家庭能源消费对生态系统^[12,60-61]、家庭能源燃烧对污染物排放的影响^[14,82,94-95]等方面开展了部分研究。对已有研究分析发现,青藏高原家庭能源相关的研究要么聚焦在某一方面或者某一地区,缺乏系统性的综合研究。例如:Jiang 等^[22]对青海牧区家庭能源调研,发现青海牧区家庭能源平均消费量为 4318.8 kgce;Xiao 等^[14]测定了青藏高原那曲牧区无烟囱的帐篷、有烟囱的帐篷和有烟囱的定居屋这三种典型的居住类型室内 6 h 细颗粒物(PM_{2.5})浓度分别为 1243、191 和 873 μg/m³,远远高于世界卫生组织规定的室内污染物浓度标准,这无疑增加了牧民的健康风险;Chen 等^[94]基于已有的排放因子和粪便燃烧量量化了西藏自治区家庭能源——粪便燃烧产生的 PM₁₀和 PM_{2.5}排放量,分别为 49741.9 t 和

46253.2 t。另外,随着青藏高原牧区社会经济的快速发展、游牧民定居政策的大力实施、城镇化进程的不断推进和人口的持续增长,牧民生活方式正在发生变化。生活方式的差异会影响家庭能源消费模式与能源选择行为,进而也会对牧区的生态环境系统产生不同的影响^[19,41,96]。然而,鲜有研究关注青藏高原牧区家庭能源消费模式及其驱动机制的研究,更缺少对家庭能源消费模式对生态系统、室内空气污染和人体健康影响的综合定量研究。因此,亟需开展从系统角度研究青藏高原牧区家庭能源消费及其带来的生态、环境和健康效应,这为从资源、生态、环境和健康多个角度为推动青藏高原牧区家庭能源转型提供科学支撑,也为设计合理的牧区家庭能源政策和干预措施提供了理论指导。

为此,本文结合国际前沿和青藏高原牧区的实际情况,提出未来需要在以下宏观层面(理论和方法)和微观层面加强研究(图1)。

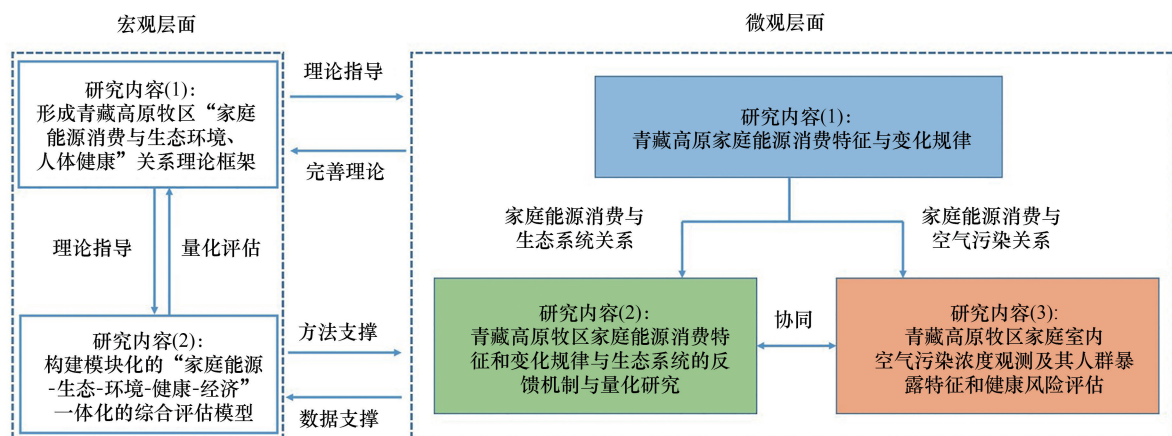


图1 青藏高原牧区家庭能源与生态环境、人体健康的未来研究展望

Fig.1 Future prospect of research on "household energy consumption and its impact on eco-environment and human health" in the pastoral of Qinghai-Tibet Plateau

宏观层面:

(1)理论层面:重点侧重“家庭能源与生态环境和人体健康”之间的内在联系与驱动机制。牧区是集环境、经济、社会多层面且系统内部元素之间相互作用的复杂社会生态系统^[97]。这一复杂系统如何影响家庭能源消费?家庭能源消费随着时间的变化又如何变化?而家庭能源消费及演变如何影响生态系统、空气污染与人体健康的?这些因素之间的内在逻辑关系及其背后潜在的驱动机制如何尚不明晰。鉴于这些问题的复杂性与学科交叉性,需要运用能源科学、社会科学、生态学与环境科学等多学科的理论知识与方法体系,厘清并完善青藏高原家庭能源消费与生态系统、空气污染以及人体健康之间的内在联系与驱动机制,形成青藏高原牧区“家庭能源消费与生态效应、环境效应和健康效应”一体化的理论框架体系,增进对青藏高原家庭能源消费及其带来的生态、环境和健康的影响的系统认识,为更加全面而客观地了解家庭能源以及带来的多维度的影响提供理论指导。

(2)方法层面:构建综合评估模型来量化家庭能源消费对生态环境和人体健康的综合影响。目前研究主要侧重单一层面的量化研究,缺少从家庭能源消费到生态、环境、健康综合影响的全链条、一体化的综合评估量化研究。因此,未来迫切需要构建模块化的家庭能源-生态-环境-健康-经济等多学科交叉的综合评估模型,诸如集综合评估模型-陆地生态系统生物地球化学循环模型-大气化学模型-健康效应模型一体化的综合模型,形成完整的、系统的综合评估方法,为系统量化青藏高原牧区家庭能源消费模式及其产生的生态、环境与健康效益提供方法支撑。

微观层面:

(1)青藏高原家庭能源消费特征与变化规律。随着牧区城镇化的推进、社会经济的发展以及太阳能、风

能、水电等清洁能源发展,加上牧区可再生能源发展政策扶持(如:光伏扶贫等),青藏高原牧区家庭生活方式以及未来能源消费结构可能发生明显变化,比如传统生物质能薪柴、畜粪下降,电力、可再生能源增加。同时,青藏高原牧区自然环境、资源禀赋、社会经济等存在较大差异,这些均是影响家庭能源选择潜在变量。不同区域能源消费特征与变化规律可能存在差异。因此,未来迫切需要开展青藏高原牧区家庭能源消费的实地调研,揭示牧区家庭能源消费特征与变化规律的时空分布格局,阐明影响家庭能源消费的因素及决策行为,为后续开展相关研究提供数据支撑。

(2) 家庭能源消费特征和变化规律与生态系统的反馈机制与量化研究:明确家庭能源消费特征与生态系统之间的关系。粪便不仅是牧区重要的家庭能生活能源,也是生态系统重要的肥料来源。若粪便从生态系统移出,会阻断养分在草地-牲畜-粪便-草地间物质循环,导致草地养分(氮,磷,钾等)含量下降,是青藏高原高寒草地退化的主要原因之一^[18,59-61]。草地退化反过来会对畜牧业生产以及家庭能源的供应可能带来负面影响^[13,18,93]。另外,未来青藏高原牧区家庭能源可能发生变化,诸如粪便等传统能源比重下降,可再生能源比重增加,其对生态系统、环境的作用机制将会有新的变化。因此,未来深入研究家庭能源消费特征与变化规律对生态系统的综合影响及其之间的反馈机制对粪便合理利用、生态系统恢复以及牧区能源发展规划的制定提供重要的科学支撑。

(3) 牧区室内大气污染物观测:明确高寒地区室内空气污染状况和人群暴露特征及其健康风险。近年来家庭能源消费特征与变化规律对室内空气污染和居民健康的影响逐步成为目前研究的热点。由于青藏高原室外空气质量较好,先前研究对于取暖和做饭的粪便燃烧造成的室内污染对牧民健康的影响相对较少。近年来零星的研究证实青藏高原牧区家庭室内具有较高的空气污染物浓度^[14]。由于青藏高原牧区气候条件、地理位置、社会经济发展水平存在较大差异,家庭能源消费特征与变化规律存在区域差异性,详细的高寒地区室内空气污染浓度数据还相对缺乏,导致该地区室内空气污染对牧民健康风险的研究相对不足。因此,亟需开展青藏高原牧区室内污染物浓度测定,开展能源消费特征区域分异与演变所带来的对人群健康新的负向或正向影响的研究,是对理解高寒地区室内污染物浓度以及人群暴露特征及其健康风险的补充。

参考文献 (References):

- [1] Han X, Wei C. Household energy consumption: state of the art, research gaps, and future prospects. *Environment, Development and Sustainability*, 2021, 23(8): 12479-12504.
- [2] Hou B D, Tang X, Ma C B, Liu L, Wei Y M, Liao H. Cooking fuel choice in rural China: results from microdata. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 142: 538-547.
- [3] Wolske K S, Gillingham K T, Schultz P W. Peer influence on household energy behaviors. *Nature Energy*, 2020, 5(3): 202-212.
- [4] 国家统计局. 中国统计年鉴-2018. 北京: 中国统计出版社, 2018.
- [5] Ping X G, Li C W, Jiang Z G. Household energy consumption patterns in agricultural zone, pastoral zone and agro-pastoral transitional zone in eastern part of Qinghai-Tibet Plateau. *Biomass and Bioenergy*, 2013, 58(9): 1-9.
- [6] Zheng X Y, Wei C, Qin P, Guo J, Yu Y H, Song F, Chen Z M. Characteristics of residential energy consumption in China: findings from a household survey. *Energy Policy*, 2014, 75: 126-135.
- [7] Wu S M, Zheng X Y, You C Y, Wei C. Household energy consumption in rural China: historical development, present pattern and policy implication. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 211: 981-991.
- [8] Jiang L, Xue B, Xing R, Chen X P, Song L, Wang Y T, Coffman D, Mi Z F. Rural household energy consumption of farmers and herders in the Qinghai-Tibet Plateau. *Energy*, 2020, 192: 116649.
- [9] 孙永龙, 牛叔文, 胡姬姬, 齐敬辉. 高寒藏区农牧村家庭能源消费特征及影响因素——以甘南高原为例. *自然资源学报*, 2015, 30(4): 569-579.
- [10] Xu X Y, González J E, Shen S H, Miao S G, Dou J X. Impacts of urbanization and air pollution on building energy demands-Beijing case study. *Applied Energy*, 2018, 225: 98-109.
- [11] Wang Z Y, Liu Z Y, Baoyin T G, Jimoh S O, Zhang T R, Cheng J W, Li F Y. Assessing the burning of household dung-cake as an energy source in different rangeland regions of Inner Mongolia. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 292: 125827.
- [12] Xu Z R, Cheng S K, Zhen L, Pan Y, Zhang X Z, Wu J X, Zou X P, Bijaya G C D. Impacts of dung combustion on the carbon cycle of alpine grassland of the North Tibetan Plateau. *Environmental Management*, 2013, 52(2): 441-449.
- [13] Ping X G, Jiang Z G, Li C W. Social and ecological effects of biomass utilization and the willingness to use clean energy in the eastern Qinghai-

- Tibet plateau. *Energy Policy*, 2012, 51: 828-833.
- [14] Xiao Q Y, Saikawa E, Yokelson R J, Chen P F, Li C L, Kang S C. Indoor air pollution from burning yak dung as a household fuel in Tibet. *Atmospheric Environment*, 2015, 102: 406-412.
- [15] Xiao Q Y, Saikawa E, Yokelson R J, Chen P F, Li C L, Kang S C. Breaking science news: yak dung burning pollutes indoor air of Tibetan households. *Atmospheric Environment*, 2015, 102: 406-412.
- [16] Li C L, Bosch C, Kang S C, Andersson A, Chen P F, Zhang Q G, Cong Z Y, Chen B, Qin D H, Gustafsson Ö. Sources of black carbon to the Himalayan-Tibetan Plateau glaciers. *Nature Communications*, 2016, 7: 12574.
- [17] Zhang Y X, Min Q W, Zhao G G, Jiao W J, Liu W W, Bijaya G C D. Can clean energy policy improve the quality of alpine grassland ecosystem? A scenario analysis to influence the energy changes in the Three-River Headwater Region, China. *Sustainability*, 2016, 8(3): 231.
- [18] Liu S B, Zamanian K, Schleuss P M, Zarebanadkouki M, Kuzyakov Y. Degradation of Tibetan grasslands: consequences for carbon and nutrient cycles. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 252: 93-104.
- [19] 孙永龙, 牛叔文, 兰忠成, 沈义. 牧民家庭能源消费模式的演变及环境效应. *农业工程学报*, 2014, 30(16): 256-262.
- [20] 邢冉, 姜璐, 薛冰, 李宏庆, 陈兴鹏. 青藏高原牧区家庭能源消费调查与结构特征——以青海省为例. *可再生能源*, 2019, 37(10): 1551-1559.
- [21] Zhao X Y, Zhao H L, Jiang L, Lu C Y, Xue B. The Influence of farmers' livelihood strategies on household energy consumption in the Eastern Qinghai-Tibet Plateau, China. *Sustainability*, 2018, 10(6): 1780.
- [22] Jiang L, Yu L, Xue B, Chen X P, Mi Z F. Who is energy poor? Evidence from the least developed regions in China. *Energy Policy*, 2020, 137: 111122.
- [23] Bleischwitz R, Hoff H, Spataru C, van der Voet E, VanDeveer S D. *Routledge Handbook of the Resource Nexus*. New York: Routledge, 2017: 3-14.
- [24] 张力小, 张鹏鹏, 郝岩, 唐守娟, 刘耕源. 城市食物-能源-水关联关系: 概念框架与研究展望. *生态学报*, 2019, 39(4): 1144-1153.
- [25] 张超, 刘蓓蓓, 李楠, 汪鹏, 陈楚珂, 陈伟强, 张力小, 刘俊国, 吕永龙. 面向可持续发展的资源关联研究: 现状与展望. *科学通报*, 2021, 66(26): 3426-3440.
- [26] O'Neill B C, Ren X L, Jiang L W, Dalton M. The effect of urbanization on energy use in India and China in the iPETS model. *Energy Economics*, 2012, 34(S3): S339-S345.
- [27] Fu C H, Wang W J, Tang J. Exploring the sensitivity of residential energy consumption in China: implications from a micro-demographic analysis. *Energy Research & Social Science*, 2014, 2: 1-11.
- [28] Alem Y, Beyene A D, Köhlin G, Mekonnen A. Modeling household cooking fuel choice: a panel multinomial logit approach. *Energy Economics*, 2016, 59: 129-137.
- [29] Rahut D B, Ali A, Mottaleb K A. Understanding the determinants of alternate energy options for cooking in the Himalayas: empirical evidence from the Himalayan region of Pakistan. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 149: 528-539.
- [30] Yu B Y, Wei Y M, Gomi K, Matsuoka Y. Future scenarios for energy consumption and carbon emissions due to demographic transitions in Chinese households. *Nature Energy*, 2018, 3(2): 109-118.
- [31] Liao H, Chen T Q, Tang X, Wu J W. Fuel choices for cooking in China: analysis based on multinomial logit model. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 225: 104-111.
- [32] 郑新业, 魏楚, 虞义华, 秦萍. 中国家庭能源消费研究报告-2016. 北京: 科学出版社, 2017.
- [33] Muller C, Yan H J. Household fuel use in developing countries: review of theory and evidence. *Energy Economics*, 2018, 70: 429-439.
- [34] 姜璐, 余露, 薛冰, 陈兴鹏. 青海省家庭能源消费调查分析研究. *经济地理*, 2019. (2019-07-10). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CJFQ&dbname=CAPJLAST&filename=JJDL20190705007>.
- [35] Pokharel S. An econometric analysis of energy consumption in Nepal. *Energy Policy*, 2007, 35(1): 350-361.
- [36] Wang X H, Li K Q, Li H, Bai D, Liu J R. Research on China's rural household energy consumption-Household investigation of typical counties in 8 economic zones. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 68: 28-32.
- [37] Pachauri S, Jiang L W. The household energy transition in India and China. *Energy Policy*, 2008, 36(11): 4022-4035.
- [38] Mishra V, Smyth R, Sharma S. The energy-GDP nexus: evidence from a panel of Pacific Island countries. *Resource and Energy Economics*, 2009, 31(3): 210-220.
- [39] Poumanyvong P, Kaneko S, Dhakal S. Impacts of urbanization on national transport and road energy use: evidence from low, middle and high income countries. *Energy Policy*, 2012, 46: 268-277.
- [40] Creutzig F, Baiocchi G, Bierkandt R, Pichler P P, Seto K C. Global typology of urban energy use and potentials for an urbanization mitigation wedge. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(20): 6283-6288.
- [41] Xie L Y, Yan H S, Zhang S H, Wei C. Does urbanization increase residential energy use? Evidence from the Chinese residential energy consumption survey 2012. *China Economic Review*, 2020, 59: 101374.
- [42] Borozan D. Regional-level household energy consumption determinants: the european perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 90: 347-355.
- [43] Damette O, Delacote P, Del Lo G. Households energy consumption and transition toward cleaner energy sources. *Energy Policy*, 2018, 113:

751-764.

- [44] Galvin R, Sunikka-Blank M. Economic inequality and household energy consumption in high-income counties: a challenge for social science based energy research. *Ecological Economics*, 2018, 153: 78-88.
- [45] Tian S J, Chang S Y. An agent-based model of household energy consumption. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 242: 118378.
- [46] Chung W, Kam M S, Ip C Y. A study of residential energy use in Hong Kong by decomposition analysis, 1990-2007. *Applied Energy*, 2011, 88 (12): 5180-5187.
- [47] Ding Y X, Qu W, Niu S W, Liang M, Qiang W L, Hong Z G. Factors influencing the spatial difference in household energy consumption in China. *Sustainability*, 2016, 8(12): 1285.
- [48] Qiu H G, Yan J B, Lei Z, Sun D Q. Rising wages and energy consumption transition in rural China. *Energy Policy*, 2018, 119: 545-553.
- [49] Jiang L, Chen X P, Xue B. Features, driving forces and transition of the household energy consumption in China: a review. *Sustainability*, 2019, 11(4): 1186.
- [50] Sovacool B K, Griffiths S. Culture and low-carbon energy transitions. *Nature Sustainability*, 2020, 3(9): 685-693.
- [51] Winkler R L, Matarrita-Cascante D. Exporting consumption: lifestyle migration and energy use. *Global Environmental Change*, 2020, 61: 102026.
- [52] Kelly S. Do homes that are more energy efficient consume less energy?: A structural equation model of the English residential sector. *Energy*, 2011, 36(9): 5610-5620.
- [53] Zheng X Z, Wang R R, Hoekstra A Y, Krol M S, Zhang Y X, Guo K D, Sanwal M, Sun Z, Zhu J M, Zhang J J, Lounsbury A, Pan X Z, Guan D B, Hertwich E G, Wang C. Consideration of culture is vital if we are to achieve the Sustainable Development Goals. *One Earth*, 2021, 4(2): 307-319.
- [54] Wei X H, Yang P, Wang Y J, Xie Z K. Use of rural energy resources and eco-environmental degradation in Tibet. *Journal of Environmental Sciences*, 2004, 16(6): 1046-1050.
- [55] Niu H W, He Y Q, Desideri U, Zhang P D, Qin H Y, Wang S J. Rural household energy consumption and its implications for eco-environments in NW China: a case study. *Renewable Energy*, 2014, 65: 137-145.
- [56] Bailis R, Drigo R, Ghilardi A, Masera O. The carbon footprint of traditional woodfuels. *Nature Climate Change*, 2015, 5(3): 266-272.
- [57] Liu G, Lucas M, Shen L. Rural household energy consumption and its impacts on eco-environment in Tibet: taking Taktse county as an example. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2008, 12(7): 1890-1908.
- [58] Chen H, Zhu Q A, Peng C H, Wu N, Wang Y F, Fang X Q, Gao Y H, Zhu D, Yang G, Tian J Q, Kang X M, Piao S, Ouyang H, Xiang W H, Luo Z B, Jiang H, Song X Z, Zhang Y, Yu G R, Zhao X Q, Gong P, Yao T D, Wu J H. The impacts of climate change and human activities on biogeochemical cycles on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Global Change Biology*, 2013, 19(10): 2940-2955.
- [59] Wang Q. Prevention of Tibetan eco-environmental degradation caused by traditional use of biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, 13(9): 2562-2570.
- [60] Ping X G, Jiang Z G, Li C W. Status and future perspectives of energy consumption and its ecological impacts in the Qinghai-Tibet region. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15(1): 514-523.
- [61] 徐增让, 成升魁, 高利伟, 陈远生. 藏北牧区畜粪燃烧与养分流失的生态效应研究. *资源科学*, 2015, 37(1): 94-101.
- [62] Cohen M J, Brown M T, Shepherd K D. Estimating the environmental costs of soil erosion at multiple scales in Kenya using emergy synthesis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2006, 114(2/4): 249-269.
- [63] Li G Z, Niu S W, Ma L B, Zhang X. Assessment of environmental and economic costs of rural household energy consumption in Loess Hilly Region, Gansu Province, China. *Renewable Energy*, 2009, 34(6): 1438-1444.
- [64] Hosonuma N, Herold M, De Sy V, De Fries R S, Brockhaus M, Verchot L, Angelsen A, Romijn E. An assessment of deforestation and forest degradation drivers in developing countries. *Environmental Research Letters*, 2012, 7(4): 044009.
- [65] Rudel T K. The national determinants of deforestation in sub-Saharan Africa. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2013, 368(1625): 20120405.
- [66] Rafiq M K, Joseph S D, Li F, Bai Y F, Shang Z H, Rawal A, Hook J M, Munroe P R, Donne S, Taherymoosavi S, Mitchell D R G, Pace B, Mohammed M, Horvat J, Marjo C E, Wagner A, Wang Y L, Ye J, Long R J. Pyrolysis of attapulgitic clay blended with Yak dung enhances pasture growth and soil health: characterization and initial field trials. *Science of the Total Environment*, 2017, 607-608: 184-194.
- [67] Wen L, Dong S K, Li Y Y, Li X Y, Shi J J, Wang Y L, Liu D M, Ma Y S. Effect of degradation intensity on grassland ecosystem services in the alpine region of Qinghai Tibetan plateau, China. *PLoS One*, 2013, 8(3): e58432.
- [68] Joseph S, Pow D, Dawson K, Mitchell D R G, Rawal A, Hook J, Taherymoosavi S, Van Zwieten L, Rust J, Donne S, Munroe P, Pace B, Graber E, Thomas T, Nielsen S, Ye J, Lin Y, Pan G X, Li L Q, Solaiman Z M. Feeding biochar to cows: an innovative solution for improving soil fertility and farm productivity. *Pedosphere*, 2015, 25(5): 666-679.
- [69] Cheng Y, Cai Y J, Wang S Q. Yak and Tibetan sheep dung return enhance soil N supply and retention in two alpine grasslands in the Qinghai-Tibetan Plateau. *Biology and Fertility of Soils*, 2016, 52(3): 413-422.
- [70] Cai Y J, Chang S X, Cheng Y. Greenhouse gas emissions from excreta patches of grazing animals and their mitigation strategies. *Earth-Science Reviews*, 2017, 171: 44-57.
- [71] Du Z Y, Wang X D, Xiang J, Wu Y, Zhang B, Yan Y, Zhang X K, Cai Y J. Yak dung pat fragmentation affects its carbon and nitrogen leaching

- in Northern Tibet, China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2021, 310: 107301.
- [72] 何奕忻, 孙庚, 罗鹏, 吴宁. 牲畜粪便对草地生态系统影响的研究进展. *生态学杂志*, 2009, 28(2): 322-328.
- [73] Bai Y F, Rafiq M K, Li S S, Degen A A, Mašek O, Sun H W, Han H W, Wang T, Joseph S, Bachmann R T, Sani R K, Long R J, Shang Z H. Biochar from pyrolyzed Tibetan Yak dung as a novel additive in ensiling sweet sorghum; an alternate to the hazardous use of Yak dung as a fuel in the home. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 403: 123647.
- [74] Cohen A J, Anderson H R, Ostro B, Pandey K D, Krzyzanowski M, Künzli N, Gutschmidt K, Pope III C A, Romieu I, Samet J M, Smith K R. Urban air pollution//Ezzati M, Lopez A D, Rodgers A, Murray C J L, eds. *Comparative Quantification of Health Risks: Global and Regional Burden of Disease Attributable to Selected Major Risk Factors*. Geneva: World Health Organization, 2004: 1353-1433.
- [75] GBD 2019 Risk Factors Collaborators. Global burden of 87 risk factors in 204 countries and territories, 1990-2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019. *The Lancet*, 2020, 396(10258): 1223-1249.
- [76] Pope III C A, Burnett R T, Thun M J, Calle E E, Krewski D, Ito K, Thurston G D. Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. *JAMA*, 2002, 287(9): 1132-1141.
- [77] Brook R D, Rajagopalan S, Pope III C A, Brook J R, Bhatnagar A, Diez-Roux A V, Holguin F, Hong Y L, Luepker R V, Mittleman M A, Peters A, Siscovick D, Smith Jr S C, Whitsel L, Kaufman J D. Particulate matter air pollution and cardiovascular disease: an update to the scientific statement from the American heart association. *Circulation*, 2010, 121(21): 2331-2378.
- [78] Straif K, Cohen A, Samet J. *Air Pollution and Cancer*. IARC Scientific Publication No.161. Lyon, France: International Agency for Research on Cancer, 2013.
- [79] WHO. *WHO Human Health Risk Assessment Toolkit: Chemical Hazards*. Geneva: World Health Organization, 2010.
- [80] Alim M A, Sarker M A B, Selim S, Karim M R, Yoshida Y, Hamajima N. Respiratory involvements among women exposed to the smoke of traditional biomass fuel and gas fuel in a district of Bangladesh. *Environmental Health and Preventive Medicine*, 2014, 19(2): 126-134.
- [81] Dutta S, Banerjee S. Exposure to indoor air pollution & women health: the situation in urban India. *Environment and Urbanization ASIA*, 2014, 5(1): 131-145.
- [82] Chen P F, Kang S C, Bai J K, Sillanpää M, Li C L. Yak dung combustion aerosols in the Tibetan Plateau: chemical characteristics and influence on the local atmospheric environment. *Atmospheric Research*, 2015, 156: 58-66.
- [83] Shen G F, Ru M Y, Du W, Zhu X, Zhong Q R, Chen Y L, Shen H Z, Yun X, Meng W J, Liu J F, Cheng H F, Hu J Y, Guan D B, Tao S. Impacts of air pollutants from rural Chinese households under the rapid residential energy transition. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 3405.
- [84] Meng W J, Zhong Q R, Chen Y L, Shen H Z, Yun X, Smith K R, Li B G, Liu J F, Wang X L, Ma J M, Cheng H F, Zeng E Y, Guan D B, Russell A G, Tao S. Energy and air pollution benefits of household fuel policies in northern China. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, 116(34): 16773-16780.
- [85] Shen G F, Du W, Luo Z H, Li Y J, Cai G S, Lu C X, Qiu Y W, Chen Y C, Cheng H F, Tao S. Fugitive emissions of CO and PM_{2.5} from Indoor biomass burning in chimney stoves based on a newly developed carbon balance approach. *Environmental Science & Technology Letters*, 2020, 7(3): 128-134.
- [86] Yun X, Shen G F, Shen H Z, Meng W J, Chen Y L, Xu H R, Ren Y A, Zhong Q R, Du W, Ma J M, Cheng H F, Wang X L, Liu J F, Wang X J, Li B G, Hu J Y, Wan Y, Tao S. Residential solid fuel emissions contribute significantly to air pollution and associated health impacts in China. *Science Advances*, 2020, 6(44): eaba7621.
- [87] Smith K R, Bruce N, Balakrishnan K, Adair-Rohani H, Balmes J, Chafe Z, Dherani M, Hosgood H D, Mehta S, Pope D, Rehfuess E, others in the HAP CRA Risk Expert Group. Millions dead: how do we know and what does it mean? Methods used in the comparative risk assessment of household air pollution. *Annual Review of Public Health*, 2014, 35: 185-206.
- [88] 蔡闻佳, 惠婧璇, 赵梦真, 高翔, 王灿. 温室气体减排的健康协同效应: 综述与展望. *城市与环境研究*, 2019, (1): 76-94.
- [89] 郑度, 姚檀栋. 青藏高原形成演化及其环境资源效应研究进展. *中国基础科学*, 2004, 6(2): 15-21.
- [90] 姚檀栋, 陈发虎, 崔鹏, 马耀明, 徐柏青, 朱立平, 张凡, 王伟财, 艾丽坤, 杨晓新. 从青藏高原到第三极和泛第三极. *中国科学院院刊*, 2017, 32(9): 924-931.
- [91] Zhuang M H, Gongbuzeren, Zhang J, Li W J. Community-based seasonal movement grazing maintains lower greenhouse gas emission intensity on Qinghai-Tibet Plateau of China. *Land Use Policy*, 2019, 85: 155-160.
- [92] Zhuang M H, Gongbuzeren, Li W J. Greenhouse gas emission of pastoralism is lower than combined extensive/intensive livestock husbandry: a case study on the Qinghai-Tibet Plateau of China. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 147: 514-522.
- [93] Zhuang M H, Lu X, Peng W, Wang Y F, Wang J X, Nielsen C P, McElroy M B. Opportunities for household energy on the Qinghai-Tibet Plateau in line with United Nations' Sustainable Development Goals. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 144: 110982.
- [94] Chen G Y, Gao K, Yan B B, Dan Z, Zhou W W, Cheng Z J. Estimation and emissions from crop straw and animal dung in Tibet. *Science of the Total Environment*, 2018, 631-632: 1038-1045.
- [95] Li C L, Kang S C, Yan F P. Importance of local black carbon emissions to the fate of glaciers of the third pole. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(24): 14027-14028.
- [96] 魏楚. 城镇化会增加居民能源需求吗——基于事实与文献的述评. *经济理论与经济管理*, 2017, (1): 95-109.
- [97] 庄明浩, 贡布泽仁, 张静, 李文军. 草原畜牧业温室气体排放现状、问题及展望. *生态学报*, 2021, 41(24): 9970-9977.