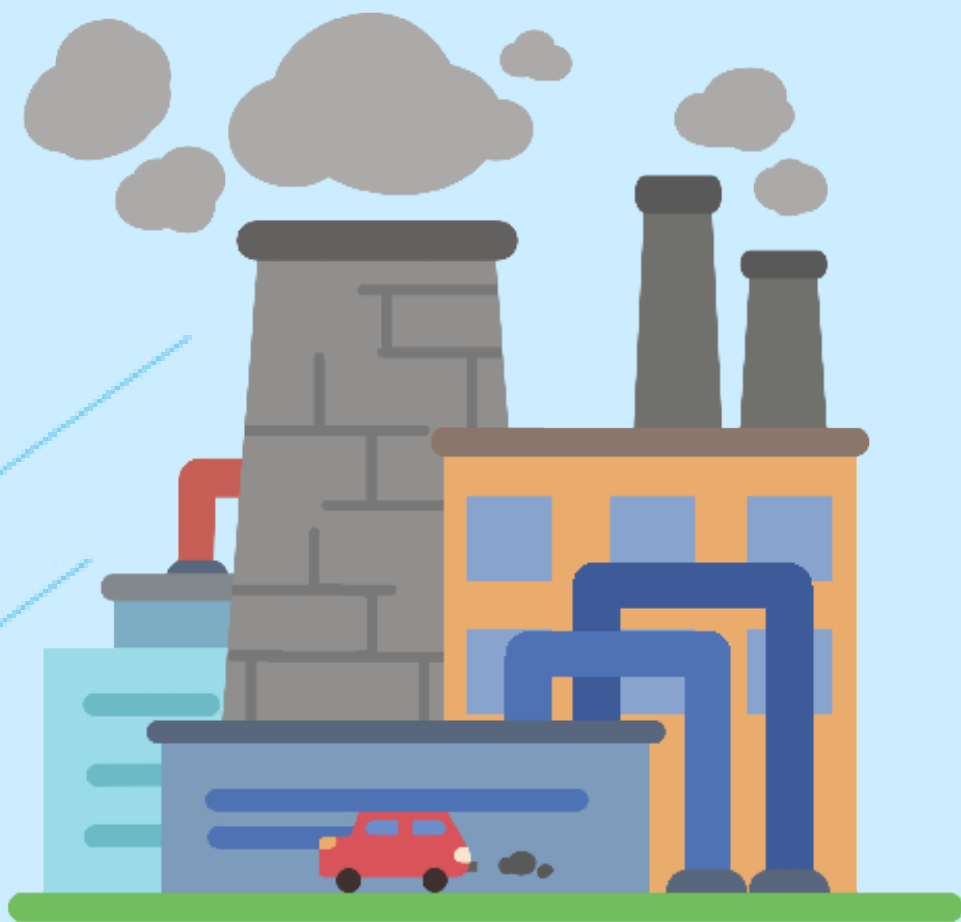


固体燃料燃烧造成的室内 空气污染及其健康影响





关于亚洲清洁空气中心

亚洲洁空气中心（Clean Air Asia，简称 CAA）是一家国际非营利性组织，致力于改善亚洲区域空气质量，打造健康宜居的城市。CAA 成立于 2001 年，是联合国认可的合作伙伴机构。

CAA 总部位于菲律宾马尼拉，在中国北京和印度德里设有办公室。CAA 拥有来自全球的 261 个合作伙伴，并建立了六个国家网——印度尼西亚、马来西亚、尼泊尔、菲律宾、斯里兰卡和越南。

CAA 自 2002 年起在中国开展工作，专注于空气质量管理与绿色交通两个领域。2018 年 3 月 12 日，CAA 获得北京市公安局颁发的《境外非政府组织代表机构登记证书》，在北京设立亚洲清洁空气中心（菲律宾）北京代表处，在公安部及业务主管单位生态环境部的指导下，在全国范围内开展大气治理领域的能力建设、研究和宣传教育工作。

关于亚洲季风区可持续发展集成研究项目

亚洲季风区可持续发展集成研究项目（Monsoon Asia Integrated Research for Sustainability-Future Earth, MAIRS—FE）是“未来地球计划”旗下唯一亚洲区域研究项目，旨在通过研究促进对亚洲季风区域人类活动与自然环境之间相互作用及其对地球系统影响的理解，以支持该区域国和地区的可持续发展战略制定。研究重点为亚洲季风区环境健康、水—能源—食物及自然灾害等与可持续发展相关的重大环境问题。

MAIRS 国际项目办公室设立在北京大学，利用北京大学的人文社会学科及环境生态资源等学科的优势，通过组织研究活动、发起国际合作，推动跨学科、跨区域研究，为亚洲国家与地区发展中出现的典型性问题提供解决方案。

作者：刘莘 徐东昊 策划 & 编辑：万薇

目 录

前言

常见室内污染物及其危害

室内空气污染暴露及健康影响

中国室内空气污染现状

室内污染主要受影响人群

参考文献

前言

家用固体燃料，如散煤、薪柴等，因其使用方便且容易获取，许多家庭将其用作烹饪和取暖。然而研究表明，家用固体燃料燃烧，特别是燃煤污染，是室内空气污染（Household Air Pollution, HAP）的主要来源，其不完全燃烧和房屋较差的通风措施会给许多家庭带来严重的健康风险^[1-3]。

国家统计局数据表明，我国 2018 年煤炭消费量占能源消费总量的 59.0%，其中 80%的农村能源消耗用于采暖需求^[4,5]，而在我国北方广大农村地区，取暖使用能源仍以燃煤为主。2017 年底，十部委印发了《北方地区冬季清洁取暖规划（2017-2021 年）》，推进清洁取暖替代传统散煤取暖，其重要的政策目标即是减少取暖季雾霾天，但清洁取暖对于减轻室内空气污染及其健康风险的重大意义往往容易被忽视。

本文将重点介绍散煤等固体燃料燃烧对室内空气的影响及其健康风险。

常见室内污染物及其危害

二十世纪中期，“煤烟型”和“光化学烟雾型”两类大气污染给人群健康造成了严重损害，而随着人类社会的发展，室内空气污染已经成为了第三类空气污染^[6]。HAP 的污染源主要来自燃料燃烧、挥发性有机物、以及吸烟等其他人类活动^[7]。

数据表明，全球大约有 30 亿人仍在会使用会产生污染的固体燃料（如煤炭、薪柴、粪便、煤油和农作物废料）和落后炉具来做饭、取暖和照明^[8]。固体燃料燃烧产生的污染物已经成为室内空气污染的主要来源，在发展中国家，这些污染物还是大气污染的重要来源^[9]。理想情况下，这些燃料在适当均匀受热后与氧气（O₂）充分接触，完全燃烧后只会产生二氧化碳（CO₂）和水蒸气（H₂O）。

而家用炉具并不是最理想的燃烧器，固体燃料往往难以充分燃烧反应，在实际使用时就会排放污染物并造成严重的健康风险。通风不良会加剧固体燃料燃烧带来的健康风险。

大量调查资料显示，不通风房屋的 HAP 危害程度是室外空气污染（Ambient Air Pollution, AAP）的 2~5 倍，有的甚至超过 100 倍^[10]。常见的固体燃料不完全燃烧排放的有害健康的污染物主要包括颗粒物（PM）、一氧化碳（CO）和多环芳烃（PAH）。

颗粒物 (PM) 除了是环境空气污染对人体健康影响的最重要的指标性污染物, 同样也是重要的室内污染物。细颗粒物 $PM_{2.5}$ 能通过呼吸系统被直接吸入人体, 沉积到肺泡, 还可能通过肺到达体内其他器官。长期吸入含有 $PM_{2.5}$ 的污染空气, 会对心脑血管和呼吸系统造成严重影响, 加大心脑血管和呼吸系统疾病的发病和死亡风险。

Pope 等^[11]对美国癌症协会进行的一项队列研究分析表明, 在 1982-1998 年间, $PM_{2.5}$ 每增加 $10 \mu g M^{-3}$, 全死因死亡率、心肺疾病死亡率和癌症死亡率分别升高 4%、6% 和 8%; 2013 年 $PM_{2.5}$ 被国际癌症研究机构 (IARC) 确认为致癌物, 致癌级别与吸烟、食用发霉食物、遭受紫外线辐射和呼吸甲醛等归为一类^[3]。

一氧化碳(CO)是简易炉灶不完全燃烧会产生的排放物, 一氧化碳扩散穿过肺泡膜, 溶解在血液中, 并以比氧更大的亲和力结合血液中的血红蛋白, 从而减少血液中氧合血红蛋白的量并导致组织缺氧。

暴露于一氧化碳有许多健康风险, 包括运动能力降低, 心绞痛时间减少, 儿童哮喘发病率增加, 细支气管炎发病率增加, 心血管疾病, 心脏病, 心力衰竭和缺血性心脏病发病率增加在老人中间。暴露于高浓度的一氧化碳可能是致命的, 也是人们常说的一氧化碳中毒或煤气中毒。

多环芳烃(PAH)是焦炭、薪柴燃烧产生的一组化合物, 是以颗粒物的形式存在于大气中的有机污染物。PAH 是人们最早发现的强致癌物质, 占已被发现致癌芳烃总数的 1/3 以上, 即芳香族碳氢化合物^[12]。长期暴露于多环芳烃会导致肺癌。

室内空气污染暴露及健康影响

根据美国健康效应研究所 (Health Effects Institute, HEI) 发表的 2019 年全球空气质量状况年度报告 (The State of Global Air, SOGA), 空气污染已经成为了全球造成死亡的第五大危险因素, 超过诸多如营养不良、酗酒、缺乏运动等众所周知的危险因素: 2017 年全球死亡人口中, 每 10 个人中就有 1 人的死因是与空气污染有关^[2]。据该组织统计, 2017 年全球约 36 亿人暴露于因使用固体燃料做饭带来的室内空气污染, 主要集中在撒哈拉以南的非洲地区、东亚和南亚地区 (图 1-1)。

在大多数发展中国家，由于贫穷和技术落后，清洁燃料的使用仍不普及。在众多非洲和东南亚国家，超过 90%的人在使用污染性固体燃料，在我国仍有超过 5 亿的人使用污染性固体燃料做饭，取暖和照明。中国和印度人口众多，即使接触 HAP 的比例不高（分别约为 32%和 60%），暴露总人数却分别达到了 4.5 亿人和 8.4 亿人，远远超过其他国家和地区。有研究显示，2010 年由于使用固体燃料做饭造成的 HAP 导致我国约 82 万人过早死亡^[13]。

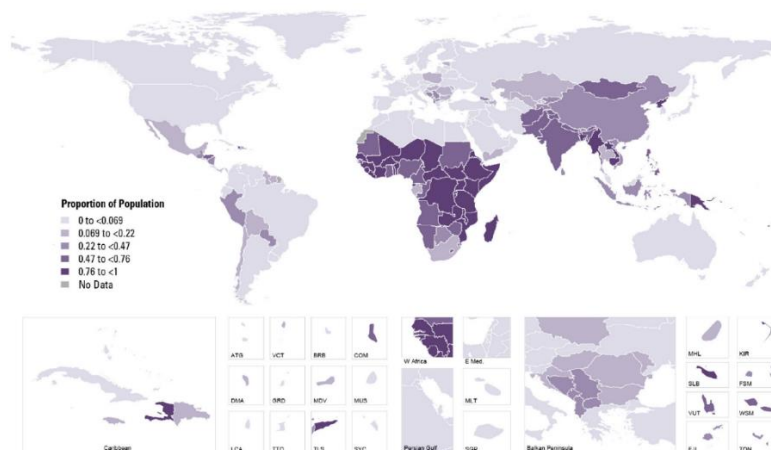


图 1 - 2017 年暴露于因使用固体燃料做饭带来家庭室内空气污染的全球人口分布^[2]

如果仅考虑 PM 和 CO 等气体污染，在室内燃烧木材和其他生物质与吸烟的危害相当，有研究显示，使用固体燃料烹饪时产生的烟雾通常含有高达 $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的 PM^[9]。

印度的一项调查显示，在使用固体燃料烹饪的家庭，厨房的空气中可吸入颗粒物 PM_{2.5} 24h 平均浓度能够达到 $609 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，日常生活区域达到 $163 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ^[14]，远远超过世界卫生组织（WHO）给出的日均浓度指导值 $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

2018-2019 年采暖季，亚洲清洁空气中心支持北京化工大学和中国农村能源行业协会民用清洁炉具专业委员会联合开展了针对中国北方典型地区农村的大规模调研和测试，结果表明，使用燃煤取暖的农户室内日均 PM_{2.5} 浓度为 $255 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。37%的家庭 CO 室内日均浓度超过了 WHO 提出的日均浓度指导值（ $7 \text{mg}/\text{m}^3$ ）。

不仅如此，我国的一项研究表明，使用固体燃料后室内空气的超细颗粒物 PM_{1.0} 是使用清洁燃料的 2 倍^[15]。PM_{1.0} 具有较高的比表面积，能通过呼吸抵达肺泡，进入人体的血液组织中，而在 PM_{2.5} 中，80%的颗粒物为 PM_{1.0}^[16,17]。当 PM_{2.5} 年均浓度达到 $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 时，人患病并致死的几率将大大增加，而 2017 年中国约有 55%的人口生活在 PM_{2.5} 年均浓度 $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上的室内环境^[18]。

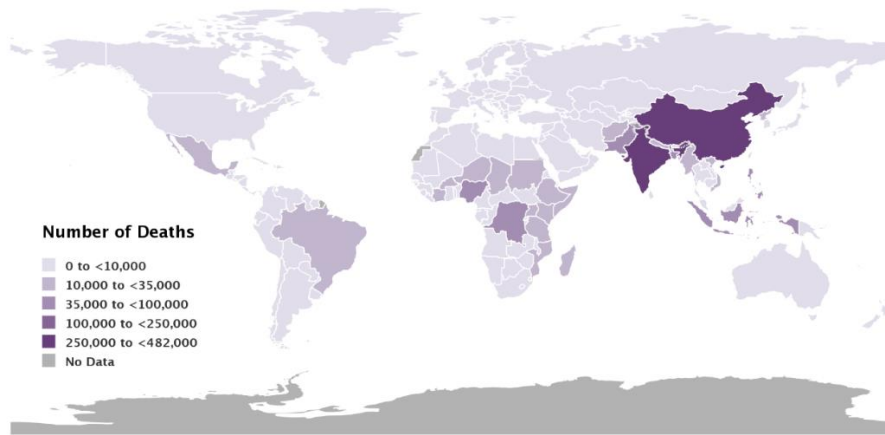


图 2 - 2017 年全球因固体燃料燃烧造成家庭室内空气污染导致的全球死亡人口分布^[2]

中国室内空气污染现状

自 1990 年以来，更多的家庭开始使用清洁能源代替固体燃料，加上政府积极的管控和相关政策的提出，我国的固体燃料使用比例持续降低，HAP 在近些年有了显著下降。在 1990 年，我国约 84% 的人口使用固体燃料，到 2017 年，这个比例仅有 32%（见图 4-1）。图中数据还显示，由于使用固体燃料做饭导致的过早死亡人数由 1990 年的 79 万人/年降低到 2017 年的 27 万人/年^[2]。2000 年我国有 71.7% 的家庭使用固体燃料做饭，而这个比例在 2010 年下降到了 46.8%^[19]，到 2017 年只有 32%^[2]，其主要原因在于使用燃气做饭的比例上升。Zhao 等^[13]的研究表明，2005-2015 年间全国平均 HAP 暴露量降低了一半以上。在 2005 年，HAP 暴露量占全国平均综合加权人口暴露的 69%，到 2015 年，这个比例降低到了 57%。

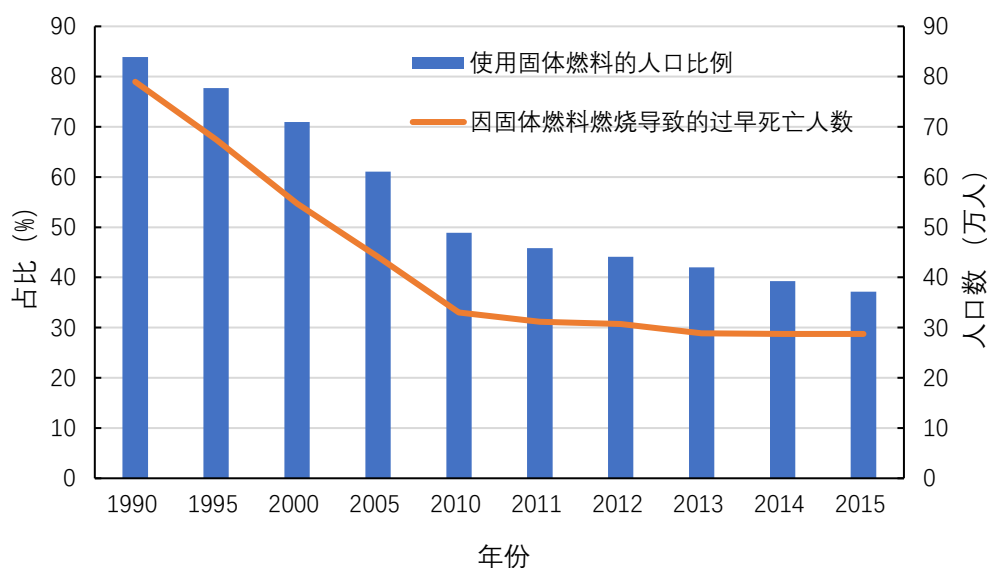


图 3 - 1990 年-2017 年中国使用固体燃料的人口比例和因固体燃料燃烧导致的过早死亡人数^[2]

尽管使用固体燃料做饭的人数降低了，仍然有几乎相同比例的人数使用固体燃料取暖，其中农村居民和低收入人群是主体^[19]。中国环科院的调查结果显示，近 20 年来尽管家用化石能源的比例呈现下降趋势，但煤炭仍是我国室内采暖的重要能源之一，其中农村为 21.4%，城市为 10.5%^[3]。

并且，亚洲清洁空气中心联合研究单位发布报告指出，中国北方地区居民生活散煤消费量被严重低估。据报告估算，山西省、陕西省、黑龙江省农村居民取暖年散煤的实际消费量分别是政府统计年鉴数据的 2.69 倍、2.08 倍、14.87 倍。

因为固体燃料如煤炭和生物质燃料的燃烧，HAP 在农村地区尤为严重。2005 年农村地区的 HAP 暴露量是城市的 7 倍，到 2015 年，尽管全国平均 HAP 暴露量降低了，但农村地区 HAP 暴露量超过城市的 9 倍，两个地区间的 HAP 严重程度差距进一步加大^[13]。其中一个主要原因在于 2005 年-2015 年间城市的煤炭消费降低了一半以上，而农村的煤炭消费几乎没有变化^[13]。由于文化程度与家庭收入低，清洁燃料的使用在这些人群中普及很困难，这意味着降低我国室内污染仍然面临着很大挑战^[20]。

2017 年 12 月，国家十部委印发了《北方地区冬季清洁取暖规划(2017-2021)》，提出固体燃料的使用比例要进一步降低。到 2021 年，预计超过 60%的家庭将不再使用固体燃料。有研究预测，与不执行该规划相比，届时由于固体燃料燃烧产生的 PM_{2.5} 排放预计降低 70%，冬季室内平均 PM_{2.5} 浓度降低约 40%（从 209 μg/m³ 降至

125 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)^[21]。

室内污染主要受影响人群

室内空气污染情况和家庭收入密切相关，贫困地区人们往往会选择使用固体燃料进行做饭，取暖和照明，而非相对昂贵的清洁能源。因而受室内空气污染影响最大的也是贫困人口，具有不公平性的特点。

据 Zhao 等 (2018) 报道, 2015 年我国超过 120 万死亡人口与 $\text{PM}_{2.5}$ 污染有关, 其中至少 43% 是由于使用室内燃料造成的, 在农村地区这个比例约为 60%, 而城市地区仅为 20%^[13]。

慢性阻塞性肺疾病 (COPD) 是一种具有气流阻塞特征的慢性支气管炎和 (或) 肺气肿, 可进一步发展为肺心病和呼吸衰竭的常见慢性疾病。据 WHO 统计, COPD 在 2015 年造成了 317 万人死亡, 占当年全球死亡人数的 5%, 其中 90% 以上发生在中低收入国家^[22]。我国多项研究表明, 室内空气污染与 COPD 的发生有直接关系, 其中固体燃料燃烧和居民取暖是主要影响因素^[23]。

肺癌是危害人类健康常见的恶性肿瘤之一。云南宣威室内燃煤排放出大量致癌性多环芳烃类物质是导致当地肺癌高发的主要原因, 而改灶以后, 室内空气质量明显好转, 肺癌发病率明显下降^[23,24]。室内燃料燃烧造成的室内空气污染与居住者呼吸系统症状的发生和肺功能的下降也有密切关系^[23]。

特别需要注意的是, 室内空气污染对女性和儿童的影响尤其大。在发展中国家, 相当大比例的 COPD 发生在从未吸食烟草制品的人身上, 其中很大一部分是受室内空气污染影响的女性。来自印度的更大规模的人口调查发现, 即使在控制了许多潜在混淆因素的影响之后, 生活在使用生物质和固体燃料的家庭中的成年女性患哮喘的风险显著高于使用清洁燃料的家庭^[25]。

在发展中国家的农村地区, 女性是家务劳动的主要承担者, 在空气污染重的室内逗留时间比男性长^[23]。而婴儿和幼儿经常在母亲身边, 因此从婴儿早期就开始受到健康危害。同时, 儿童的身体抵抗能力还不够强大, 所以生病也会更加频繁。对于儿童, 空气污染造成过早死亡的最大风险因素是肺炎。肺炎是 5 岁以下儿童死亡的主要原因, 在固体燃料使用最多的国家和地区, 相关发病率和死亡率通常最高^[26]。许多研究已经量化了暴露于家庭固体燃料烟雾的儿童急性下呼吸道感染 (ALRIs) 的相对风险, 其中大多数来自发展中国家^[27]。在我国 5 岁以下儿童的健康危险因素中, 由于固体燃料燃烧导致的室内空气污染排在第一位^[3]。

室内污染物给健康带来巨大风险，在受影响人群中却往往被忽视。在前文所述北方地区的调研中，高达 65%的受访者并不知道室内燃煤取暖排放会对自身的健康带来危害。农村散煤取暖的排放强度远高于其它能源利用方式，且对室内空气质量影响很大，清洁取暖替代的意义不止于蓝天，还关乎健康。目前政策在制定和实施过程中均以解决雾霾这一公共问题为主要导向，很多农户在缺乏对自身影响认知的情况下难免主动性不足。

清洁取暖工作不仅应考量其对室外空气质量的影响，也应更加着力于室内空气质量的改善，并重视健康影响的宣传，使得农户在经济条件允许的情况下有意识地自主转向清洁取暖。

*更多研究发现可见《北方典型地区农村居民冬季取暖研究》报告。

参考文献

- [1] Smith K R, Samet J M, Romieu I 等. Indoor air pollution in developing countries and acute lower respiratory infections in children[J], 2000, 1(6): 427-429.
- [2] World Health Organization. Joint statement WHO/UNDP: Indoor air pollution--the killer in the kitchen[J], 2004, 58(10): 458.
- [3] 国际环保机构自然资源保护协会, 世界自然基金会. 煤炭消费减量化对公众健康的影响和可避免成本[R]. 2015.
- [4] 赵俊兰, 龚娴, 孙鹏程 等. 我国北方农村地区的供暖形式比较[J]. 节能, 2019(6).
- [5] 中华人民共和国国家统计局. 中华人民共和国 2018 年国民经济和社会发展统计公报[J]. 中国统计, 2019(3): 6-9.
- [6] 田仁生, 严刚. 我国室内空气污染控制对策研究[J]. 中国环境管理(04): 2-4.
- [7] 袁晶, 夏世钧. 室内空气污染与健康[J]. 医学与社会(02): 23-26.
- [8] 北方地区冬季清洁取暖规划 (2017-2021 年) . 发改能源[2017]2100 号文件: 十部委印发, 2017. 12.
- [9] Balmes J R. Household air pollution from domestic combustion of solid fuels and health[J]. Journal of Allergy and Clinical Immunology, 2019, 143(6): 1979-1987.
- [10] 李伟华, 李连泉, 王军杰 等. 现代建筑室内空气污染物的危害与防治[J]. 洁净与空调技术(3): 71-75,共 5 页.
- [11] Pope Iii C A, Burnett R T, Thun M J 等. Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution[J]. Jama, 2002, 287(9): 1132-1141.
- [12] 王桂山, 仲兆庆, 王福涛. PAH(多环芳烃)的危害及产生的途径[J]. 山东环境, 2001(2): 41-41.
- [13] Zhao B, Zheng H, Wang S 等. Change in household fuels dominates the decrease in PM_{2.5} exposure and premature mortality in China in 2005–2015[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2018, 115(49): 12401-12406.
- [14] Balakrishnan K, Ghosh S, Ganguli B 等. State and national household concentrations of PM_{2.5} from solid cookfuel use: results from measurements and modeling in India for estimation of the global burden of disease[J]. Environmental Health, 2013, 12(1): 77.
- [15] Du W, Yun X, Luo Z 等. Submicrometer PM_{1.0} Exposure from Household Burning of Solid Fuels[J]. Environmental Science & Technology Letters, 2019.
- [16] Wang Y, Zhang X, Sun J 等. Spatial and temporal variations of the concentrations of PM₁₀, PM_{2.5} and PM₁ in China[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015, 15(23): 13585-13598.
- [17] Wang Y-Y, Li Q, Guo Y 等. Association of long-term exposure to airborne particulate matter of 1 μm or less with preterm birth in China[J]. JAMA pediatrics, 2018, 172(3): e174872-e174872.
- [18] 向建帮, J.Weschler C, 王清勤 等. 加强室内 PM_{2.5}控制:减少因空气污染过早死亡人数的重要手段[C]. 2017 环境与公共健康学术会议暨中国环境科学学会环境医学与健康分会、中国毒理学会生化与分子毒理专业委员会 2017 年年会, 2017.
- [19] 李嘉琛, 吴曼, 余灿清 等. 中国 10 个地区成年人生活燃料使用情况的流行病学特征分析[J]. 中华流行病学杂志, 2018, 39(11): 1426-1431.
- [20] Liao H, Tang X, Wei Y-M. Solid fuel use in rural China and its health effects[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 60: 900-908.

- [21] Meng W, Zhong Q, Chen Y 等. Energy and air pollution benefits of household fuel policies in northern China[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2019, 116(34): 16773-16780.
- [22] World Health Organization. Chronic obstructive pulmonary disease (COPD)[EB/OL]. [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/chronic-obstructive-pulmonary-disease-\(copd\)](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/chronic-obstructive-pulmonary-disease-(copd)).
- [23] 张金良, 帕拉沙提, 刘玲 等. 中国农村室内空气污染及其对健康的危害[J]. *环境与职业医学*, 2007, 24(4): 412-416.
- [24] 何兴舟. 室内燃煤空气污染与肺癌及遗传易感性--宣威肺癌病因学研究 22 年[J]. *实用肿瘤杂志*, 16(6): 369-370.
- [25] Fagbule D, Ekanem E. Some environmental risk factors for childhood asthma: a case-control study[J]. *Annals of tropical paediatrics*, 1994, 14(1): 15-19.
- [26] Stanaway J D, Afshin A, Gakidou E 等. Global, regional, and national comparative risk assessment of 84 behavioural, environmental and occupational, and metabolic risks or clusters of risks for 195 countries and territories, 1990–2017: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2017[J]. *The Lancet*, 2018, 392(10159): 1923-1994.
- [27] Nair H, Simões E A, Rudan I 等. Global and regional burden of hospital admissions for severe acute lower respiratory infections in young children in 2010: a systematic analysis[J]. *The Lancet*, 2013, 381(9875): 1380-1390.

