

温室气体减排的健康协同 效应：综述与展望

蔡闻佳 惠婧璇 赵梦真 高翔 王灿

摘要 加强温室气体减排的健康协同效应研究，对于改变温室气体减排的成本效益的传统认识、提高应对气候变化行动的积极性、促进气候变化和人群健康问题的协同解决、推动可持续发展进程都具有重大意义。作者从减排带来健康协同效应的原因、减排健康协同效应的研究概况、减排影响健康的机制以及主要影响机制下的研究方法这四个维度，对温室气体减排的协同效应的研究进展进行了梳理和归纳，并在此基础上提出了本领域未来可能拓展的研究方向，以为气候和可持续发展政策的制定提供更坚实的科学基础。

关键词 温室气体减排 健康协同效应 空气质量 气候变化

[中图分类号] F205 [文献标识码] A [文章编号] 2095-851X (2019) 01-0076-19

应对气候变化与改善人群健康是实现可持续发展目标的重要组成部分。已有研究显示，应对气候变化，特别是温室气体减排措施可以在根本解决气候变化问题的同时带来显著的人群健康协同效应 (Haines et al., 2009; Watts et al., 2015)。因此，加强温室气体减排的健康协同效应研究，对于改变温室气体减排的成本效益的传统认识、提高应对气候变化行动的积极性、促进气候变化和人群健康问题的协同解决、推动可持续发展进程都具有重大意义。本文旨在对现有研究进展进行认真梳理，对温室

【基金项目】 国家自然科学基金项目“考虑健康协同效益的中国碳减排目标区域分解研究”（批准号：71773061）。

【作者简介】 蔡闻佳（1984-），清华大学地球系统科学系、清华大学新型城镇化研究院健康城市研究中心、清华大学中国城市研究院、清华-力拓资源能源与可持续发展研究中心副教授，邮政编码：100084；惠婧璇（1991-），国家发展和改革委员会能源研究所助理研究员，邮政编码：100083；赵梦真（1993-），清华大学地球系统科学系、清华大学新型城镇化研究院健康城市研究中心、清华大学中国城市研究院、清华-力拓资源能源与可持续发展研究中心博士研究生，邮政编码：100084；高翔（1980-），国家发展和改革委员会能源研究所副研究员；王灿（1974-），清华大学环境学院教授，邮政编码：100084。

致谢： 本文感谢国家自然科学基金委、清华-力拓资源能源与可持续发展研究中心、Delos 公司以及清华大学唐仲英基金会的支持，感谢审稿专家匿名评审，当然文责自负。

气体减排影响人群健康的具体机制和模拟方法进行归纳总结，并探讨未来可能拓展的研究方向，为进一步深化本领域的研究提供基础。

一、温室气体减排为什么能带来健康协同效应？

温室气体减排为什么能带来健康协同效应？这可以从气候变化如何影响人群健康的视角找到部分答案。根据2015年《柳叶刀》刊发的《健康与气候变化：保护公共健康的政策响应》报告（Watts et al., 2015），气候变化不仅会通过增加高温、干旱、暴雨的频次和强度等方式直接影响人群健康，还会通过加重空气污染、加速疾病媒介传播、影响粮食安全和心理健康等方式间接影响人群的健康（见图1）。

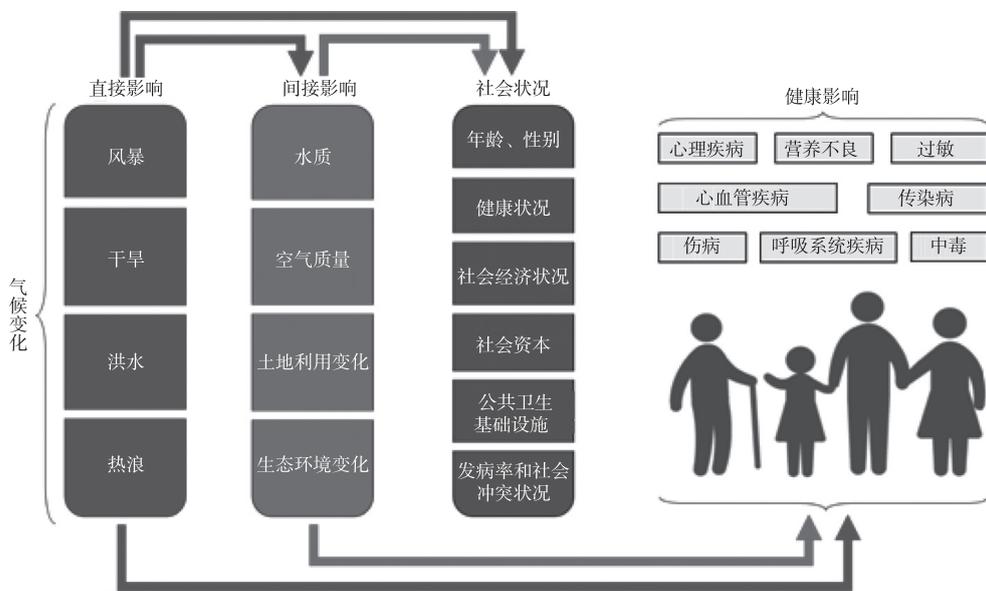


图1 气候变化对人群健康的影响链条

资料来源：Watts等（2015）。

上述影响有非常多的研究案例。高温通过暴露反应一方面可以直接导致死亡，另一方面会恶化诸如心血管疾病、呼吸系统疾病、脑血管疾病等慢性疾病（钱颖骏等，2010），并提高相关疾病的住院率。已有研究证明高温热浪与人群额外死亡具有正相关关系（Gover, 1938），而气候变化已导致全球高温热浪发生的频率和强度显著增加（Matthews et al., 2017; Mora et al., 2017）。据统计，2003年欧洲的热浪导致了2.2万~4.5万人的额外死亡（Patz et al., 2005），2010年加拿大魁北克地区因高温带来的死亡率较1981—2005年同期增加了33%（Bustinsa et al., 2013），2012年极端高温事件造成的全球死亡人数则超过了其他所有自然灾害死亡总人数。气候变化还会通过影

响水系统影响人群健康。气候变化伴随着极端水文循环,会提高降水强度,这将导致极端降水事件在统计上被证明与饮用水中病原体水平的提高(Bradbury et al., 2013)以及儿童胃肠道疾病发生率的增加(Uejio et al., 2014)有关。据估计,2039年气候变化将导致热带和亚热带地区的腹泻风险增加8%~11%(Kolstad and Johansson, 2011);气候变化造成降雨更加频繁和强烈发生,预计2100年流入芝加哥流域的污水将增加50%~120%,这将严重威胁当地人群健康和娱乐活动(Patz et al., 2008)。除了通过水质影响人群健康,气候变化可能导致的暴雨和干旱频发都会造成农作物显著减产,导致脆弱地区和人群的营养不良、饥饿甚至饥荒。Watts等(2015)甚至指出,气候变化将严重影响过去半个世纪全球在改善人群健康方面取得的成就。因此,减少温室气体的排放将缓解气候变化对人群健康的直接和间接影响,从而改善人群健康。

二、温室气体减排健康协同效应的研究概况

1990年出版的IPCC第一次评估报告确立了有关气候变化问题的科学基础,推动了《联合国气候变化框架公约》的制定,拉开了全球控制温室气体排放的帷幕。正是由于减少温室气体排放的成本大都发生在当下,而其所避免的气候损失(或者说效益)都发生在相对遥远的将来,学者们逐渐开始关注温室气体减排时能快速产生的协同效应(Wang and Smith, 1993),以此来推动温室气体减排的进展。健康效应就是协同效应中的重要组成部分。

1990年3月至2019年3月,^① Web of Science共收录了1028篇相关文章。其中,最具有里程碑意义的是《柳叶刀》在2009年11月刊发的将温室气体减排与健康协同效应联系起来的一系列文章(Haines et al., 2009)。这一系列文章提供了一种量化评估气候政策成本以及健康协同效应的方法。从此之后,温室气体减排的健康协同效应研究数量显著增加,其中以美国、英国、澳大利亚和中国的研究机构发表的文章最多(见图2)。

从研究的空间尺度上看,关注国际尺度的研究占据了所有研究的35.6%,国家尺度的研究占比为40.0%,20.1%的研究涉及区域(次国家)尺度,只有4.3%的研究关注城市尺度;并且,区域(次国家)尺度以及城市尺度的研究大多是案例研究,而非全球或者全国范围更精细分辨率的研究。从研究的时间尺度来看(见图3),有63.0%的研究关注减排对人群健康的短期尺度影响,如室外空气污染、核电厂辐射和室内空气污染等;剩余37.0%的研究关注的是气候变化对人群健康的长期尺度影响,如高温、干旱、洪水、蚊虫和病原体、严寒、风暴以及飓风等。从研究的话题上看(见图3),大部分研究集中于模拟减排通过提高室外空气质量对人群健康产生的直接影响,这主要是因为空气污染这一话题备受关注,并且该研究的机理链条明确。关注

^① 1990年3月为IPCC第一次评估报告综合报告的发布时间。

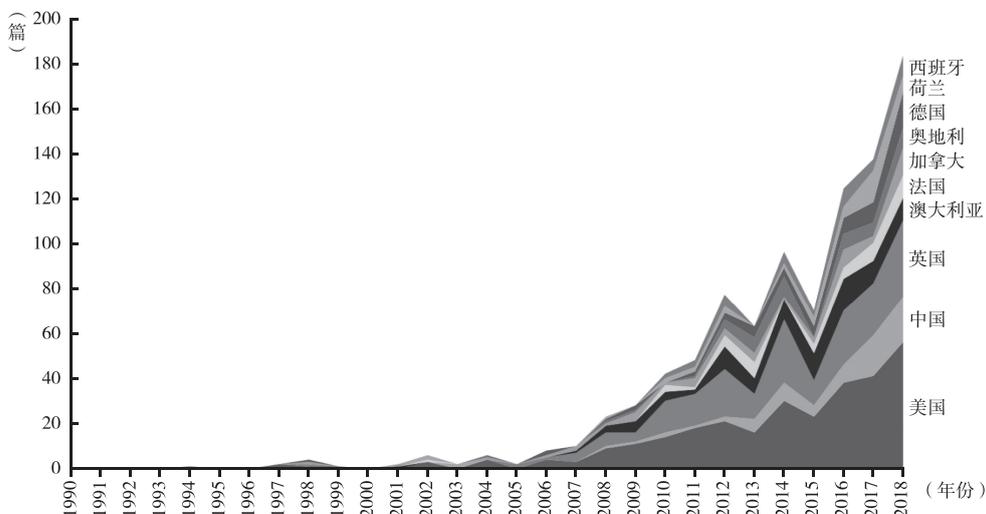


图2 1990—2018年温室气体减排的健康影响研究文章数量变化

资料来源：作者绘制。

高温和水系统变化所带来健康影响的文章分别占15.8%和10.5%，其他话题研究则相对分散，原因是这些研究在科学机理上还存在不明晰之处，所以难度较大。

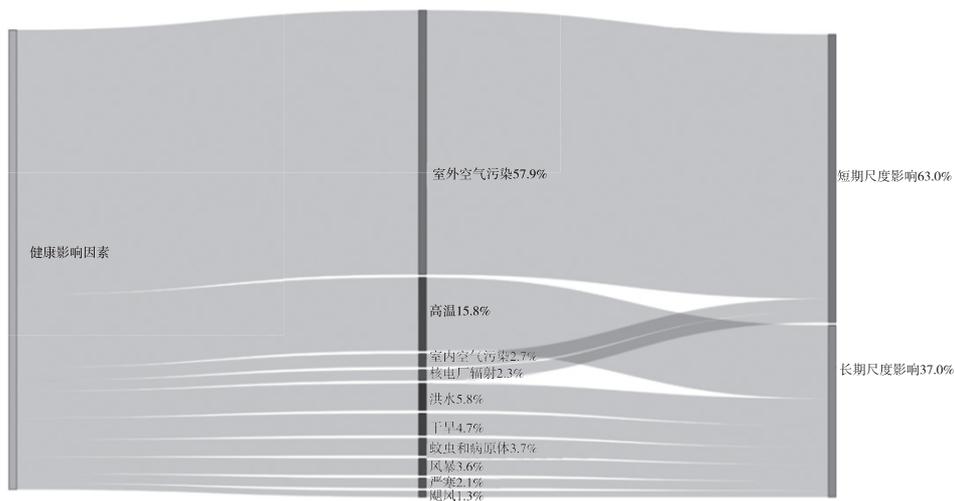


图3 1990—2019年不同时间尺度各研究数量占比

资料来源：作者绘制。

从研究结论上看，已有研究认为无论是在发展中国家还是在发达国家，温室气体减排带来的健康收益都可以抵消大部分减排成本，甚至在某些情况下抵消成本、

获得净收益 (West et al., 2013; Thompson et al., 2014; Cai et al., 2018)。Markandya 等 (2018) 的研究表明, 若实现巴黎协定下各国提交的自主减排目标, 印度将是全球健康收益最大的国家。由于其人口众多, 空气污染严重, 温室气体减排将带来巨大的空气质量改善和健康效益, 后者的大小可以完全抵消减排成本, 并最终获得 3.28 万亿~8.40 万亿美元的净收益; 中国净收益略低于印度, 为 0.27 万亿~2.31 万亿美元; 在发达国家, 尽管其健康收益难以完全抵消减排成本, 但欧盟所获得的健康收益仍可弥补 7%~84% 的减排成本, 美国健康收益仍可弥补 10%~41% 的减排成本。而如果巴黎气候协定下的 2 度温升目标得以实现, 到 2050 年, 全球仅通过协同减少空气污染就可每年避免 100 多万人早逝, 其健康收益将是减排成本的两倍 (WHO, 2018)。

不同减排目标和路径以及不同国家和地区温室气体减排成本和健康收益都会有所不同。根据 Cai 等 (2018) 的研究, 2030 年中国实现自主减排承诺目标的总成本中有 18%~62% 可以被空气质量改善所带来的健康效益抵消, 而如果到 2050 年进一步深度减排, 其健康效益将大幅增长至减排成本的 3~9 倍。Shindell 等 (2016) 认为, 美国若施行清洁交通政策, 到 2030 年可因空气质量改善减少 1.4 万人早逝, 若施行清洁能源政策, 则可减少 17.5 万人早逝, 短期健康收益达到 0.14 万亿~1.05 万亿美元, 并有可能完全弥补清洁能源政策实施的成本。根据 Aunan 等 (2006) 的研究, 中国山西在 6 种不同煤炭清洁使用方式下, 每年可带来的健康收益高达 1030 万~103090 万美元, 净收益为 1990 万~76280 万美元, 每减排 100 万吨二氧化碳净收益为 2320 万~9320 万美元。

三、温室气体减排通过哪些机制影响人群健康?

尽管图 1 能体现“温室气体减排措施是如何通过减缓气候变化减少对人群健康影响”, 但其并不能完整展现减排措施如何通过影响局地环境以及经济、社会和行为对人群健康产生的影响。目前系统梳理温室气体减排影响人群健康机制的研究还很少见。本文将尝试对这些机制进行系统的总结。

(一) 减排对人群健康的影响机制

图 4 将温室气体减排措施进行分类, 并列举了每个类别中主要的措施类型, 示意性地刻画了温室气体减排措施通过影响环境 (链条①), 影响经济、社会和行为 (链条②), 影响气候变化的幅度 (链条③), 从而影响人群健康的过程。

具体来说, 减排可以改善空气、土壤污染等环境质量, 从而在短期直接影响人群健康 (链条①), 还可以对经济社会产生影响, 例如造成财政收支 (Mao et al., 2012)、能源消费结构 (Cheng et al., 2016) 等的变化, 从而影响人群健康 (链条②), 也可以通过缓解气候变化和引致的环境变化带来健康效应 (链条③、链条④)。减缓的气候变化也会通过经济社会再次影响人群健康 (链条⑤), 例如极端天气减少

对人均收入的影响进而影响健康)。某些减缓措施还会直接影响健康,例如主动交通(骑自行车或步行)(链条⑥)。同时,减排措施带来的巨大健康效应会反过来撬动更多减排措施的积极实施(链条⑦),带来新一轮的健康影响。链条⑦采用虚线,正代表当前人们对于气候变化和减排对健康影响的认识不足,很少将健康影响(如发病率、死亡率等)与气候变化和减排挂起钩来。

无论是通过何种机制,减排对不同地区人群健康造成的影响大小都会因为地区间差异化因素(如性别、年龄、个体的健康状况、社会经济状况、公共卫生基础设施以及人口流动情况等)而产生显著差异,这些差异化因素在一定前提下可能会放大或缩小减排健康影响的区域差异(祁毓、卢洪友,2015),如老龄人口面对高温热浪天气更为脆弱,故老龄化程度高的地区可能会获得更大的健康收益。因此,在不同地区和不同人群开展相同内容和相同力度的温室气体减排行动,其健康影响可能是截然不同的。可以出台相关政策对相应的差异化影响因素进行调控,从而更大幅度地提高健康收益。

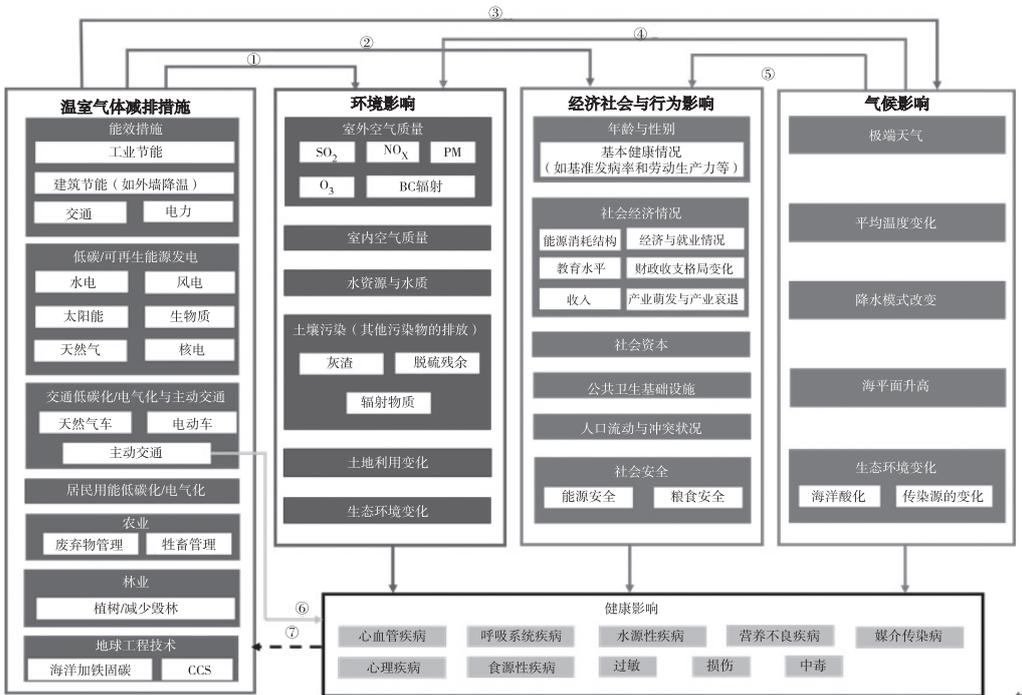


图4 温室气体减排对人群健康的影响链条

资料来源:作者绘制。

(二) 减排对人群健康影响的特点

温室气体减排对人群健康的影响具有多链条、跨系统、交互式的特点。多链条的

特点已经清晰地显示在图4中,这里不再赘述。所谓跨系统,是指图中的“温室气体减排措施”、“环境影响”、“经济、社会与行为影响”、“气候影响”和“健康影响”这五大模块中的任何一块都可以独立成为一个复杂的系统,有着各自相对成熟的模拟或研究工具。例如,学界通常使用自下而上的技术经济优化模型来模拟成本最优的减排技术组,如MESSAGE(Rao et al., 2013)和MESEIC(Hui et al., 2017);使用环境质量模拟模型来模拟环境的变化,如WRF-CMAQ(Wong et al., 2012)和GEO-Chem(Bey et al., 2001);使用自上而下的宏观经济模型来模拟社会经济系统的运行,如REMIND(Bauer et al., 2016)和CHEER(Mu et al., 2017);使用地球系统模式来模拟气候变化,如CIESM(Zhou et al., 2014)和IMAGE(Bouwman et al., 2006);使用统计学方法来模拟反映健康影响的暴露反应关系,如IER函数(Burnett et al., 2014)、LL函数(Pascal et al., 2013)和NLP函数(Chowdhury and Dey, 2016)。因此,要全面开展温室气体减排对人群健康影响的研究,并考虑五大系统之间的相互影响,必须借助于多学科交叉的研究团队,并建立跨系统的耦合模型,难度是非常大的。所谓交互式,一方面是指五大模块间普遍存在相互影响的情况(例如减排措施既会产生环境影响,也会产生气候影响,而气候影响又反过来影响环境);另一方面是指温室气体减排措施的实施影响人群健康的同时,人群健康影响的结果也可能反过来指导减排措施的选择(如链条⑦所示)。

四、主要影响机制下的具体研究方法有哪些?

鉴于温室气体减排对人群健康影响机制的“多链条”、“跨系统”和“交互式”特点,综合所有机制系统分析减排的健康协同效应是十分困难的。因此大部分研究选择其中某一或某几个影响链条进行研究分析。其中研究较多的是碳减排如何通过改变大气环境质量这一途径影响人群健康。下面对此途径的具体研究方法进行综述和总结。

碳减排主要通过两个机制来减少大气污染:一是通过能源结构的清洁化和低碳化来减少大气污染物,二是通过减少“空气污染的气候惩罚效应”(Climate Penalty)(Wu et al., 2008; Silva et al., 2013; Fiore et al., 2015)。所谓“空气污染的气候惩罚效应”,是指气候变化导致的温升通过增加颗粒物和臭氧的二次形成而使健康风险增加。例如, Li等(2017)指出,如果不采取任何缓解政策,气候变化会导致中国和印度北部2000—2100年的臭氧浓度增加5ppb。在煤炭使用增加、不优先考虑环境问题的A2情景下,同样会使美国夏季日均8小时最大臭氧浓度在1990—2050年提高4.4ppb,相当于每日总死亡率提高0.11%~0.27%(Michelle and Patz, 2007)。如果采取相应的减排措施,由气候变化导致的空气污染将减轻,通过“减少空气污染的气候惩罚效应”带来的健康效应,也可以部分弥补减排成本。总体上第一种机制相比第二种具有更显著的改善公众健康的效果(Doherty et al., 2017)。

本文将 2009 年之后研究第一个机制的代表性文献总结于表 1。这些研究基本采用的是图 5 所示的研究框架。

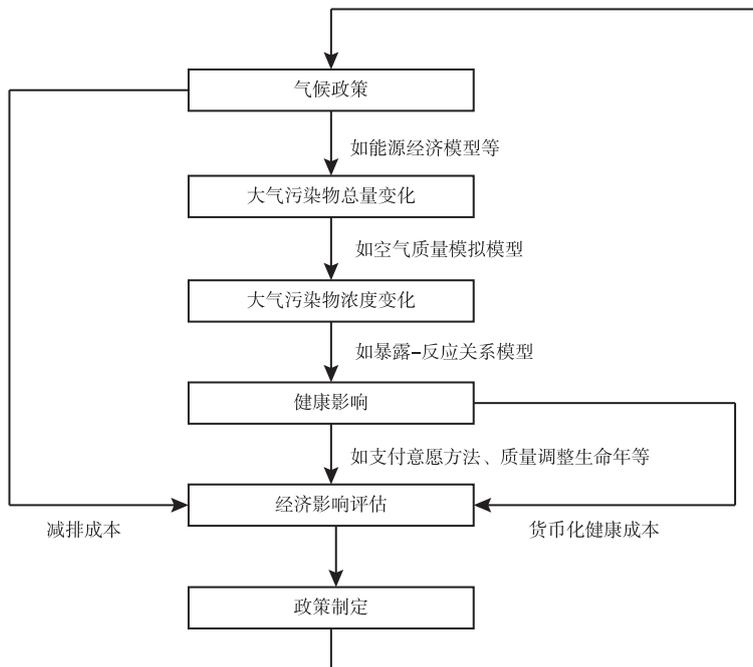


图 5 碳减排政策的健康协同效应的研究框架

资料来源：Deng 等（2017）。

第一步，在能源经济模块，通过能源经济模型来模拟不同气候政策情景下的政策成本和能源技术组合，以及与能源技术组合相对应的大气污染物排放总量。这里的能源经济模块既有自下而上的能源系统技术优化模型，也有自上而下的可计算一般均衡（Computable General Equilibrium, CGE）模型。一般来说，CGE 模型的优势在于模拟社会经济系统中各行业的相互依存关系及其对价格机制的反馈，而能源系统技术优化模型的优势在于对能源系统的能源转化利用技术、污染物排放和控制技术以及省级能源传输的刻画能力。具体研究时可以按模拟对象选取不同的模型。

第二步，在空气质量模拟模块，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，得到大气污染物的浓度。前者属于数值模拟法，即先通过排放清单明确排放源位置，再通过大气化学传输模型模拟污染物浓度分布，表 1 综述的大部分文章都使用了这种方法，这种方法精准但耗时较长；Rollback 系数法属于统计方法，它通过拟合排放量和浓度的历史变化数据，得到各种污染物总量变化对浓度变化的贡献系数，从而可以模拟污染物总量变化造成

表 1 2009 年后碳减排通过改变室外空气质量影响人群健康的研究特点对比

研究	研究区域	能源经济模块	空气质量模拟模块	健康影响物理量评价	健康影响货币量评估	政策成本 vs. 健康收益	研究结果
Markandya 等(2009)	欧洲、印度和中国	POLES	GAINS	√	√	√	长期减排 50% 情景下,到 2030 年三国每百万人的寿命将延长 1500、500、100 生命年
Gilmore 等(2010)	纽约市	×	PMCAMx	√	√	√	从人群健康角度考虑,在现有电网中加入储能设备是有利的
Anenberg 等(2012)	全球	×	GAINS + GISS + ECHAM	√	×	×	甲烷和炭黑排放控制对世界范围的空气质量和公众健康有巨大的协同效益,并可能逆转非洲、南亚、西亚、中亚地区空气污染加重和死亡率上升的趋势
Crawford-Brown 等(2012)	墨西哥	×	系数法	√	√	×	墨西哥温室气体减排政策使死亡人数下降了 3000 人/年,非致命疾病减少了 417000 例/年,节省相关疾病开支 6 亿美元/年
Partridge 和 Gamkhar(2012)	中国电网区域	×	CALPUFF	√	√	×	使用可再生能源替代化石能源发电带来的伴随效益的货币价值与额外花费相比可能是较小的
Shindell 等(2012)	全球	RAINS	GAINS + GISS + ECHAM	√	√	√	甲烷和炭黑减排计划将避免 70 万 ~ 470 万人过早死亡,并使农作物每年增产 0.3 亿 ~ 1.35 亿吨。每吨甲烷减排收益为 700 ~ 5000 美元,远高于典型的边际减排成本(250 美元)
West 等(2012)	全球	×	MOZART-2	√	√	√	在 2030 年,情景 B 中的甲烷减排措施预计将减少全球范围内 38000 例过早死亡
Crawford-Brown 等(2013)	全球	×	系数法	√	√	√	在全球 180 个国家施行温室气体减排政策的情况下,空气污染风险降低将带来的额外死亡风险下降 4×10^{-3} ,同时为全球节省略高于 100 亿美元
Rafaj 等(2013)	全球、欧洲、中国、印度和美国	POLES	GAINS	√	×	×	2℃ 目标下,与不采取减排措施相比,2050 年全球气候缓解机构在空气质量控制上将节省 25000 亿欧元。届时由空气微粒导致的人均寿命缩短时间将下降 50%。全球范围内因为臭氧浓度下降可能会减少每年 2 万例过早死亡

续表

研究	研究区域	能源经济模块	空气质量模拟模块	健康影响物理量评价	健康影响货币量评估	政策成本 vs. 健康收益	研究结果
Rao 等(2013)	全球	MESSAGE	TMS + AEROCOM	√	×	×	2030年,空气污染、气候变化、能源替代三类政策的联合作用可以使全球50%以上的人口免于暴露在超过WHO标准的PM _{2.5} 浓度下
West 等(2013)	全球分区域	GCAM	MOZART-4	√	√	√	温室气体长期减排将在2030年、2050年、2100年分别减少50±20万例、130±50万例、220±80万例过早死亡。全球因减排二氧化碳带来的边际协同收益为50~380美元/吨
Balbus 等(2014)	美国	×	系数法	√	√	×	在2020年,PM _{2.5} 暴露减少而导致的不良健康后果的减少将带来60亿~140亿美元的经济效益,具体取决于具体活动。这相当于每吨二氧化碳的健康福利在40~93美元
Thompson 等(2014)	美国	USREP (EPPA)	SMOKE + CAMx	√	√	√	由美国减排带来的健康效益货币化后可以抵消碳减排政策开销的26%~1050%
Buonocore 等(2015)	美国	EPSTEIN + PROSYM	CMAQ	√	√	√	在美国中大西洋地区和大湖南区的模拟表明,能源效率和可再生能源替换带来的收益为每年0.057亿~21亿美元(14~170MW/h)
Driscoll 等(2015)	美国	IPM	CMAQ	√	×	×	碳排放标准不仅可以扼制气候变化,还会对本地和区域范围内公众健康产生直接效益,效益的量级取决于标准的设定
Garcia-Mendez 等(2015)	美国	EPPA	CAM-chem	√	√	√	不考虑空气污染物排放的情况下,仅气候变化就将严重影响臭氧和PM _{2.5} 的浓度。而采取气候变化控制政策能有效减少这些影响,并且由空气质量提升带来的健康效益也可以抵消大部分的减排成本
Saari 等(2015)	美国分区域	USREP (EPPA)	SMOKE + CAMx	√	√	√	到2030年,碳排放减少10%,CAT政策的累计协同效应为10亿美元(-50亿~70亿美元)

续表

研究	研究区域	能源经济 模块	空气质量 模拟模块	健康影响 物理量评价	健康影响 货币量评估	政策成本 vs. 健康收益	研究结果
Shindell 等(2016)	美国	×	GISS + CMIP5 + ACCMP	√	×	×	到2030年,清洁能源政策和清洁交通分别可以防止17.5万人和12万人过早死亡
Sabel 等(2016)	欧洲和中国 的7个城市	URGENCHE	EQLS	√	×	×	电动汽车的使用对提高健康效应影响较小;减少私家车的使用可以对健康产生积极的影响;提高房屋效率对CO ₂ 的排放减少影响很小;研究中技术对城市健康和福利影响是负面的
Rao 等(2016)	全球分区域	AIM/GCAM/ IMAGE/MESSAGE /REMIND/WITCH	GAINS + TMS-FASST	√	×	×	实施严格的空气污染控制和碳排放政策,印度、中国以及中东在空气污染方面将得到最大的改善
Liu 等(2017)	中国苏州	GHG-PAM	GAINS	√	×	×	2020年,减排政策的实施将减少与空气污染相关疾病负担44.1%
Xie 等(2016)	中国分省份	CGE	GAINS	√	√	√	在WoAir情景下,2030年,控制PM _{2.5} 的排放可降低75%患病率,GDP损失为1.89%
Zhang 等(2017)	中国分省份	CREM	MEIC + CMAQ	√	√	√	2015年,全国超过一半的福利损失是长期暴露于PM _{2.5} 下产生的。山东、江苏、浙江和广东的福利损失是最大的
Lanzi 等(2018)	全球分区域	ENV-Linkages Model + GAINS	TMS-FASST	×	√	×	2060年,全球室外空气污染的成本上升到全球GDP的1%,中国、里海地区和东欧损失最大
Xie 等(2018)	亚洲分国家	AIM/CGE	CMAQ	√	√	√	在2℃目标下,2050年亚洲过早死亡减少0.79亿人,相当于节省约2.8万亿美元,超过减排成本0.8万亿美元
Cai 等(2018)	中国	MESEIC	CMAQ	√	√	√	中国碳减排政策可以在2030年和2050年分别避免9013~31320人和26061~126272人早逝,与之对应的健康效益是碳减排成本的18%~62%和1.10~12.3倍

的浓度变化，这种方法快速但精度较粗（马丁，2015；Crawford-Brown et al.，2012，2013）。

第三步，在健康影响物理量评价模块，大部分研究选择用流行病的相关模型，如暴露-反应（Exposure-Response）关系模型（Burnett et al.，2014），来模拟不同大气污染物暴露浓度下早逝人数和寿命损失年的变化，将其作为衡量健康影响的依据。也有一些研究仅使用PM_{2.5}等污染物的浓度变化来衡量健康影响（Rao et al.，2013，2016）。

第四步，在健康影响货币量评价模块，运用经济学方法将第三步得到的健康影响货币化，并与第一步得到的政策成本进行比较，得出气候政策的制定建议。常用的方法是给避免早逝的健康效益赋值，例如用一个人的统计生命价值（Value of Statistics Life, VSL）来定义这个人因避免早逝带来的健康效益。“统计生命价值”并不等同于“生命价值”，在哲学层面上人的生命是无价的，但是各种自然或人为事故却可能导致生命损失，为了对这种损失进行评估，研究者需要对人的生命进行统计学意义上的“定价”，这就是“统计生命价值”。经济学上主要用两种方法来计算VSL，一种是人力资本法，即认为人的生命价值等于人在一生中创造的财富价值总和，而不是人对生命的自我估价；另一种是支付意愿法，这种福利经济学的方法通过直接问卷调查的形式来询问人们为规避死亡风险所愿意支付的最大金额，从而间接算出人们对自我生命价值的评定，其理论基础是期望效用理论，即劳动者在选择风险水平时，会依据其预算约束力图获得期望效用的最大化（秦雪征等，2010）。基于福利经济学的支付意愿法可以更全面、更公平地表征一个人的生命价值，而人力资本法较大的缺陷是认为低收入者的生命价值将低于高收入者，人与人之间作为个体生命的平等性被忽视了，因此国内外学者更偏好于用支付意愿法来评价VSL（梅强、陆玉梅，2007）。

第五步，对比气候政策的实施成本和货币化健康协同效益并给出政策建议。目前大多数研究停留在协同效应的量化分析这一步（见表1），最多是通过比较不同政策的协同效益来对潜在的气候政策进行选择。然而只计算气候政策的健康协同效应，并不分析协同治理机制以及识别协同治理效率的关键影响因素，对于未来气候政策制定的支撑是远远不够的。评估气候政策的协同效应并不能改变气候政策本身，只有明确协同治理机制以及关键影响因素，才能对政策的制定环节形成信息反馈，让政策制定者明确怎样的措施才能最大化协同治理效果，从而有效地指导未来气候政策的制定。

五、研究展望

尽管国内外已经积累了一定研究基础，但为了给协同解决气候变化和人群健康问题提供更坚实的科学基础，未来有关“温室气体减排的健康协同效应”领域的研究

可以考虑在以下几个方面进一步推进。

（一）追求精细化——研究温室气体减排健康协同效应在区域间的分布格局

已有文献大多聚焦在国际和国家尺度，但区域或省级尺度气候政策模拟模型的开发投入不足，导致此类精度的研究数量较少。事实上，区域或省级才是减排政策的实际执行单元，急需区域级减排成本和健康影响的对比分析，以支撑其决策。已有研究指出（Thompson et al., 2014; Cai et al., 2018），由于各区域间资源禀赋、社会环境经济、气候条件和人口密度等因素的差别，国家级温室气体减排政策的减排成本和健康影响会存在显著的区域分布差异，从而影响决策者对气候政策区域间公平效果的判断。因此当前急需开发区域尺度的温室气体减排政策模拟模型（如省级尺度能源技术经济模型），并开展各区域低碳发展健康协同效应的空间分异格局研究。

（二）提高稳健性——开展研究结果的不确定性分析

如前文所述，碳减排人群健康影响具有多链条、跨系统的特点。在此背景下，直接或间接人群健康影响的模拟都需要依靠对复杂系统的简化模型，模型的结构和参数的选取都会直接影响模拟结果。而当前大多数研究仅是核算特定碳减排情景下的健康影响，缺少对模型结构和参数的不确定性分析探讨，其结论判断容易出现以偏概全的情况，因此未来还需要进一步加强对此领域的不确定性分析，以进一步提高其对决策的支撑能力。

（三）增强全面性——推进基于宏观经济联系和生命周期视角的碳减排政策健康影响研究

某个碳减排技术的推广或政策的施行不仅对当地的人群健康产生影响，同时也会因为区域间贸易和行业间的上下游关联，而对其他区域或行业产生影响。因此某个碳减排技术或政策是否真正有利于人群健康，需要结合上述因素做更全面的评估。例如Chen和He（2014）就基于CGE模型的模拟指出，在考虑火电和其他行业的间接排放后，插电式混合动力汽车仍然比内燃机车更有利于空气质量和人群健康。此外，每个技术的全生命周期的人群健康影响很可能发生在其他区域和行业，也需要开展全面的评估。

（四）提升支撑力——提出更切实际、更为量化具体的政策改进建议

至少可以考虑从以下两方面提升研究的政策支撑力。一方面，当前研究大都停留在碳减排的健康影响及其经济效益核算上，容易给读者留下“越减排越划算”的以偏概全的印象。事实上，碳减排技术和政策的选择不仅会影响环境与健康，更会影响经济、就业与社会。脱离宏观经济影响、仅依据健康影响就给出碳减排政策建议显然是远远不够的。碳减排健康影响研究扩展了传统碳减排影响研究的边界，增强了传统研究的全面性和系统性，下一步仍需要结合一国的实际发展需求、考虑上述多维影响来综合制定更实际、更具操作性的碳减排政策。另一方面，如果把政策目标从“考虑多维影响、制定可操作的碳减排政策”进一步聚焦为“如何协同减少温室气体排

放和改善人群健康”上，当前研究依然存在一定的研究不足——仅核算了特定温室气体减排情景的健康影响，仅能评价和比较这些减排情景的健康影响的正负和大小，无法给出协同解决气候变化和人群健康问题的最优实现方案。未来可以考虑将人群健康影响的模拟结果纳入传统温室气体减排的优化决策模型中，更新优化决策函数（如从传统的减排成本最低，变成考虑健康收益后的净减排成本最低），从而给出量化具体的政策改进建议，更有力地支撑未来气候政策的制定。

参考文献

- 马丁（2015）：《中国碳排放达峰路径模型体系构建与应用》，北京：清华大学核能与新能源技术研究院博士论文。
- 梅强、陆玉梅（2007）：《人的生命价值评估方法述评》，《中国安全科学学报》第3期，第56~61页。
- 秦雪征、刘阳阳、李力行（2010）：《生命的价值及其地区差异：基于全国人口抽样调查的估计》，《中国工业经济》第10期，第33~43页。
- 钱颖骏、李石柱、王强等（2010）：《气候变化对人体健康影响的研究进展》，《气候变化研究进展》第4期，第241~247页。
- 祁毓、卢洪友（2015）：《污染、健康与不平等——跨越“环境健康贫困”陷阱》，《管理世界》第9期，第32~51页。
- Anenberg, S. C., J. Schwartz and D. Shindell, et al. (2012), “Global Air Quality and Health Co-benefits of Mitigating Near-term Climate Change through Methane and Black Carbon Emission Controls”, *Environmental Health Perspectives*, 120 (6), pp. 831–839.
- Ansolabehere, S. and D. M. Konisky (2014), *Cheap and Clean: How Americans Think about Energy in the Age of Global Warming*, The MIT Press.
- Aunan, K., J. Fang and T. Hu, et al. (2006), “Climate Change and Air Quality—Measures with Co-benefits in China”, *Environmental Science and Technology*, 40 (16), pp. 4822–4829.
- Balbus, J. M., J. B. Greenblatt and R. Chari, et al. (2014), “A Wedge-based Approach to Estimating Health Co-benefits of Climate Change Mitigation Activities in the United States”, *Climatic Change*, 127 (2), pp. 199–210.
- Bauer, N., I. Mouratiadou and G. Luderer, et al. (2016), “Global Fossil Energy Markets and Climate Change Mitigation—An Analysis with REMIND”, *Climatic Change*, 136 (1), pp. 69–82.
- Bey, I., D. J. Jacob and R. M. Yantosca, et al. (2001), “Global Modeling of Tropospheric Chemistry with Assimilated Meteorology: Model Description and Evaluation”, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106 (D19), pp. 23073–23095.
- Bouwman, A. F., T. Kram and K. K. Goldewijk (2006), “Integrated Modelling of Global Environmental Change: An Overview of IMAGE 2.4”, *Iubmb Life*, 63 (9), p. 2.
- Bradbury, K. R., M. A. Borchardt and M. Gotkowitz, et al. (2013), “Source and Transport of Human Enteric Viruses in Deep Municipal Water Supply Wells”, *Environmental Science & Technology*, 47 (9), pp. 4096–4103.
- Buonocore, J., P. Luckow and G. Norris, et al. (2015), “Health and Climate Benefits of Different

Energy-efficiency and Renewable Energy Choices”, *Nature Climate Change*, 6 (1), pp. 100 – 105.

Burnett, R. T. , C. A. Pope and M. Ezzati, et al. (2014), “An Integrated Risk Function for Estimating the Global Burden of Disease Attributable to Ambient Fine Particulate Matter Exposure”, *Environmental Health Perspectives*, 122 (4), pp. 397 – 403.

Bustinza, R. , G. Lebel and P. Gosselin, et al. (2013), “Health Impacts of the July 2010 Heat Wave in Québec, Canada”, *BMC Public Health*, 13 (1), p. 56.

Cai, W. , J. Hui and C. Wang, et al. (2018), “The Lancet Countdown on PM_{2.5} Pollution-related Health Impacts of China’s Projected Carbon Dioxide Mitigation in the Electric Power Generation Sector under the Paris Agreement: A Modelling Study”, *The Lancet Planetary Health*, 2 (4), pp. e151 – e161.

Chen, S. and L. He (2014), “Welfare Loss of China’s PM_{2.5} Pollution: How to Design Personal Vehicle Transportation Policy”, *China Economic Review*, 31, pp. 106 – 118.

Cheng, B. , H. Dai and P. Wang, et al. (2016), “Impacts of Low-carbon Power Policy on Carbon Mitigation in Guangdong Province, China”, *Energy Policy*, 88, pp. 515 – 527.

Cheng, J. J. and P. Berry (2013), “Health Co-benefits and Risks of Public Health Adaptation Strategies to Climate Change: A Review of Current Literature”, *International Journal of Public Health*, 58, pp. 305 – 311.

Chowdhury, S. and S. Dey (2016), “Cause-specific Premature Death from Ambient PM_{2.5} Exposure in India: Estimate Adjusted for Baseline Mortality”, *Environment International*, 91, pp. 283 – 290.

Cohen, A. J. , M. Brauer and R. Burnett, et al. (2017), “Estimates and 25-year Trends of the Global Burden of Disease Attributable to Ambient Air Pollution: An Analysis of Data from the Global Burden of Diseases Study 2015”, *The Lancet*, 389 (10082), pp. 1907 – 1918.

Crawford-Brown, D. , T. Barker and A. Anger, et al. (2012), “Ozone and PM Related Health Co-benefits of Climate Change Policies in Mexico”, *Environmental Science & Policy*, 17, pp. 33 – 40.

Crawford-Brown, D. , P. C. Chen and H. C. Shi, et al. (2013), “Climate Change Air Toxic Co-reduction in the Context of Macroeconomic Modelling”, *Journal of Environmental Management*, 125 (1), pp. 1 – 6.

Deng, H. M. , Q. M. Liang and L. J. Liu, et al. (2017), “Co-benefits of Greenhouse Gas Mitigation: A Review and Classification by Type, Mitigation Sector, and Geography”, *Environmental Research Letters*, 12, pp. 1 – 26.

Doherty, R. M. , M. R. Heal and F. M. O’Connor, et al. (2017), “Climate Change Impacts on Human Health over Europe through Its Effect on Air Quality”, *Environmental Health*, 16 (1), p. 118.

Driscoll, C. T. , J. J. Buonocore and J. I. Levy, et al. (2015), “US Power Plant Carbon Standards and Clean Air and Health Co-benefits”, *Nature Climate Change*, 5 (6), pp. 535 – 540.

Fiore, A. , V. Naik and E. Leibensperger (2015), “Air Quality and Climate Connections”, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 65 (6), pp. 645 – 685.

Garcia-Menendez, F. , R. K. Saari and E. Monier, et al. (2015), “U. S. Air Quality and Health Benefits from Avoided Climate Change under Greenhouse Gas Mitigation”, *Environmental Science & Technology*, 49 (13), pp. 7580 – 7588.

Gilmore, E. A. , J. Apt and R. Walawalkar, et al. (2010), “The Air Quality and Human Health

Effects of Integrating Utility-scale Batteries into the New York State Electricity Grid”, *Journal of Power Sources*, 195 (8), pp. 2405 – 2413.

Gover, M. (1938), “Mortality During Periods of Excessive Temperature”, *Public Health Rep*, 53, pp. 1122 – 1143.

Haines, A. , A. J. McMichael and K. R. Smith, et al. (2009), “Public Health Benefits of Strategies to Reduce Greenhouse-gas Emissions: Overview and Implications for Policy Makers”, *The Lancet*, 374 (9707), pp. 2104 – 2114.

Hansen, J. , P. Kharecha and M. Sato, et al. (2013), “Assessing ‘Dangerous Climate Change’: Required Reduction of Carbon Emissions to Protect Young People, Future Generations and Nature”, *Plos One*, 8 (12), p. e81648.

Hui, J. , W. Cai and C. Wang, et al. (2017), “Analyzing the Penetration Barriers of Clean Generation Technologies in China’s Power Sector Using a Multi-region Optimization Model”, *Applied Energy*, 185, pp. 1809 – 1820.

Keatinge, W. R. and G. C. Donaldson (2004), “The Impact of Global Warming on Health and Mortality”, *Southern Medical Journal*, 97 (11), pp. 1093 – 1099.

Kolstad, E. W. and K. A. Johansson (2011), “Uncertainties Associated with Quantifying Climate Change Impacts on Human Health”, *Environmental Health Perspectives*, 119 (3), pp. 299 – 305.

Landrigan, P. J. , R. Fuller and N. J. R. Acosta, et al. (2017), “The Lancet Commission on Pollution and Health”, *Lancet*, 391 (10119), pp. 462 – 512.

Lanzi, E. , R. Dellink and J. Chateau (2018), “The Sectoral and Regional Economic Consequences of Outdoor Air Pollution to 2060”, *Energy Economics*, 71, pp. 89 – 113.

Li, M. , S. Zhang and F. Garcia-Menendez, et al. (2017), “Climate Penalty on Air Quality and Human Health in China and India”, *American Geophysical Union, Fall Meeting*.

Liu, M. , Y. Huang and Z. Jin, et al. (2017), “Estimating Health Co-benefits of Greenhouse Gas Reduction Strategies with a Simplified Energy Balance Based Model: The Suzhou City Case”, *Journal of Cleaner Production*, 142 (4), pp. 3332 – 3342.

Markandya, A. , B. G. Armstrong and S. Hales, et al. (2009), “Public Health Benefits of Strategies to Reduce Greenhouse-gas Emissions: Low-carbon Electricity Generation”, *The Lancet*, 374 (9706), pp. 2006 – 2015.

Markandya, A. , J. Sampedro and S. J. Smith, et al. (2018), “Health Co-benefits from Air Pollution and Mitigation Costs of the Paris Agreement: A Modelling Study”, *Lancet Planet Health*, 2, pp. e126 – e133.

Mao, X. , S. Yang and Q. Liu, et al. (2012), “Achieving CO₂ Emission Reduction and the Co-benefits of Local Air Pollution Abatement in the Transportation Sector of China”, *Environmental Science & Policy*, 21, pp. 1 – 13.

Matthews, T. K. R. , R. L. Wilby and C. Murphy (2017), “Communicating the Deadly Consequences of Gbbal Warming for Human Heart Stress”, *Proceeding of National Academy of Sciences of the United States of America*, 114, pp. 3861 – 3866.

Michelle, L. and A. Patz (2007), “Climate Change, Ambient Ozone, and Health in 50 US Cities”,

Climate Change, 82, pp. 61 – 76.

Mora, C. , B. Dousset and I. R. Caldwell, et al. (2017), “Global Risk of Deadly Heart”, *Nature Climate Change*, 7, pp. 501 – 506.

Mu, Y. , E. Samuel and C. Wang, et al. (2017), “How Will Sectoral Coverage Affect the Efficiency of an Emissions Trading System? A CGE-based Case Study of China”, *Applied Energy*, 185, pp. 1809 – 1820.

Nainggolan, D. , B. Hasler and H. E. Andersen, et al. (2018), “Water Quality Management and Climate Change Mitigation: Cost-effectiveness of Joint Implementation in the Baltic Sea Region”, *Ecological Economics*, 144, pp. 12 – 26.

Pascal, M. , M. Corso and O. Chanel, et al. (2013), “Assessing the Public Health Impacts of Urban Air Pollution in 25 European Cities: Results of the Aphekom Project”, *Science of the Total Environment*, 449, pp. 390 – 400.

Patz, J. A. , S. J. Vavrus and C. K. Uejio, et al. (2008), “Climate Change and Waterborne Disease Risk in the Great Lakes Region of the U. S. ”, *American Journal of Preventive Medicine*, 35, pp. 451 – 458.

Patz, J. A. , D. Campbell-Lendrum and T. Holloway, et al. (2005), “Impact of Regional Climate Change on Human Health”, *Nature*, 438 (7066), pp. 310 – 317.

Partridge, I. and S. Gamkhar (2012), “A Methodology for Estimating Health Benefits of Electricity Generation Using Renewable Technologies”, *Environment International*, 39 (1), pp. 103 – 110.

Rafaj, P. , W. Schöpp and P. Russ, et al. (2013), “Co-benefits of Post-2012 Global Climate Mitigation Policies”, *Mitigation & Adaptation Strategies for Global Change*, 18 (6), pp. 801 – 824.

Rao, S. , S. Pachauri and F. Dentener, et al. (2013), “Better Air for Better Health: Forging Synergies in Policies for Energy Access, Climate Change and Air Pollution”, *Global Environmental Change*, 23 (5), pp. 1122 – 1130.

Rao, S. , Z. Klimont and J. Leitao, et al. (2016), “A Multi-model Assessment of the Co-benefits of Climate Mitigation for Global Air Quality”, *Environmental Research Letters*, 11 (12), p. 124013.

Saari, R. K. , N. E. Selin and S. Rausch, et al. (2015), “A Self-consistent Method to Assess Air Quality Co-benefits from U. S. Climate Policies”, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 65 (1), pp. 74 – 89.

Sabel, C. E. , R. Hiscock and A. Asikainen, et al. (2016), “Public Health Impacts of City Policies to Reduce Climate Change: Findings from the URGENCHE EU-China Project”, *Environmental Health*, 15 (1), p. S25.

Shindell, D. , J. C. Kuylenstierna and E. Vignati, et al. (2012), “Simultaneously Mitigating Near-term Climate Change and Improving Human Health and Food Security”, *Science*, 335 (6065), pp. 183 – 189.

Shindell, D. T. , Y. Lee and G. Faluvegi (2016), “Climate and Health Impacts of US Emissions Reductions Consistent with 2 °C”, *Nature Climate Change*, 6, pp. 503 – 507.

Silva, R. A. , J. J. West and Y. Zhang, et al. (2013), “Global Premature Mortality Due to Anthropogenic Outdoor Air Pollution and the Contribution of Past Climate Change”, *Environmental Research Letters*, 8 (3), pp. 034005.

Teisberg, T. J. and R. F. Weiher (2009), Background Paper on the Benefits and Costs of Early Warning Systems for Major Natural Hazards. <https://www.gfdrr.org/sites/igfdrrfiles/Teisberg-EWS.pdf> [2019-02-25].

Thompson, T. M., S. Rausch and R. K. Saari, et al. (2014), “A Systems Approach to Evaluating the Air Quality Co-benefits of US Carbon Policies”, *Nature Climate Change*, 4 (10), pp. 917–923.

Uejio, C. K., S. H. Yale and K. Malecki, et al. (2014), “Drinking Water Systems, Hydrology, and Childhood Gastrointestinal Illness in Central and Northern Wisconsin”, *American Journal of Public Health*, 104, pp. 639–646.

Wang, X. and K. Smith (1993), “Secondary Benefits of Greenhouse Gas Control: Health Impacts in China”, *Environmental Science & Technology*, 33, pp. 3056–3061.

Watts, N., W. N. Adger and P. Agnolucci, et al. (2015), “Health and Climate Change: Policy Responses to Protect Public Health”, *Lancet*, 386, pp. 1861–1914.

West, J. J., A. M. Fiore and L. W. Horowitz (2012), “Scenarios of Methane Emission Reductions to 2030: Abatement Costs and Co-benefits to Ozone Air Quality and Human Mortality”, *Climatic Change*, 114 (3–4), pp. 441–461.

Webster, P. (2013), “Improve Weather Forecasts for the Developing World”, *Nature*, 493, pp. 17–19.

West, J. J., S. J. Smith and R. A. Silva, et al. (2013), “Co-benefits of Mitigating Global Greenhouse Gas Emissions for Future Air Quality and Human Health”, *Nature Climate Change*, 3 (10), pp. 885–889.

Wong, D. C., J. Pleim and R. Mathur, et al. (2012), “WRF-CMAQ Two-way Coupled System with Aerosol Feedback: Software Development and Preliminary Results”, *Geoscientific Model Development*, 5 (2), pp. 299–312.

World Health Organization (2014), *Quantitative Risk Assessment of the Effects of Climate Change on Selected Causes of Death, 2030s and 2050s*, Geneva: World Health Organization.

World Health Organization (2018), *COP24 Special Report: Health and Climate Change*, Geneva: World Health Organization.

Wu, S., L. J. Mickley and E. M. Leibensperger, et al. (2008), “Effects of 2000–2050 Global Change on Ozone Air Quality in the United States”, *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 113 (D06302), pp. 1–12.

Xie, Y., H. Dai and H. Dong, et al. (2016), “Economic Impacts from PM_{2.5} Pollution-related Health Effects in China: A Provincial-level Analysis”, *Environmental Science & Technology*, 50 (9), p. 4836.

Xie, Y., H. Dai and X. Xu, et al. (2018), “Co-benefits of Climate Mitigation on Air Quality and Human Health in Asian Countries”, *Environment International*, 119, pp. 309–318.

Zhang, X., X. Ou and X. Yang, et al. (2017), “Socioeconomic Burden of Air Pollution in China: Province-level Analysis Based on Energy Economic Model”, *Energy Economics*, 68, pp. 478–489.

Zhou, T., L. Zou and B. Wu, et al. (2014), “Development of Earth Climate System Models in China: A Review from the Coupled Model Inter-comparison Project Perspective”, *Journal of Meteorological Research*, 28 (5), pp. 762–779.

Ancillary Health Impacts of GHG Mitigation : A Review of the Current Status and Future Prospects

CAI Wen-jia^{1,2,3,4,5}, HUI Jing-xuan⁶, ZHAO Meng-zhen^{1,2,3,4,5},
GAO Xiang⁶, WANG Can⁷

(1. Ministry of Education Key Laboratory for Earth System Modeling, Department of Earth System Science, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Joint Center for Global Change Studies, Beijing 100875, China;

3. Institute for China Sustainable Urbanization, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

4. Tsinghua-Rio Tinto Joint Research Center for Resource Energy and Sustainable Development, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

5. Tsinghua Urban Institute, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

6. Energy Research Institute National Development and Reform Commission, Beijing 100083, China;

7. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Enhancing the research on the ancillary health impacts of GHG mitigation is of great importance to change the tradition understanding on the cost and benefit of GHG mitigation, increase the enthusiasm towards addressing climate change, facilitate the synergies between addressing climate change and improving human health, and to promote sustainable development. The authors systematically summarize and review the latest literature on the ancillary health impacts of GHG mitigation from four aspects including the reason why GHG mitigation can bring health co-benefits, overview of the research on health co-benefits of mitigation action, mechanisms of GHG mitigation affecting health and the detailed research methods under key mechanism. The paper ends with the future research needs in this field, in order to provide more solid scientific basis for climate and sustainable development policy making.

Key Words: GHG mitigation; ancillary health impacts; air quality; climate change

责任编辑: 廖茂林