

环境社会学视野中的空气质量问题

——大气细颗粒物污染(PM2.5)影响因素的跨国数据分析

王 琰

内容提要:大气细颗粒物污染(PM2.5)已经成为世界上主要的环境问题之一。本文试图通过政治经济学、生态现代化理论和世界体系理论等分析框架,在世界范围内解释细颗粒物污染现象的影响机制。对114个国家的分析结果表明,生态现代化理论对细颗粒物污染的解释得到较好的支持,PM2.5问题随着现代化进程的深入得到有效治理,其中城市化水平和PM2.5质量浓度呈倒U型曲线关系,国家科技水平和政府环境治理程度的提高都会显著降低PM2.5质量浓度。政治经济学理论强调的经济发展对环境的线性负面影响没有得到支持。研究还发现对细颗粒物浓度的环境风险转移确实存在,世界体系理论得到部分支持。

关键词:大气细颗粒物污染;环境社会学;生态现代化理论;政治经济学;世界体系理论

人类的现代化进程实现了生产力的大幅度进步和生活水平的显著提高,但同时也给自然环境带来了巨大压力,产生了诸多的环境问题。其中,大气细颗粒物(PM2.5)污染因为对人体健康、大气能见度和地球辐射平衡的严重危害,^①受到民众广泛关注。PM2.5是指空气动力学直径小于或者等于2.5微米的颗粒物,其化学组成由于各地污染源的不同而有所差别,是构成雾霾的主要成分。因为直径极小,PM2.5可以通过呼吸系统沉积到呼吸道和肺泡,甚至进入其他器官。PM2.5极易吸附有毒重金属、有机污染物、细菌和病毒等,^②人体暴露在PM2.5浓度较高的环境下会导致呼吸系统和心血管疾病,^③甚至引发癌症。^④现有研究多将PM2.5污染现象作为一个纯粹的物理化学过程,从自然科学的角度对其化学组成成分和污染源进行分析。但PM2.5作为主要由人类活动导致的大气污染现象,^⑤对它的研究理应将经济、社会和政治过程纳入分析框架,从社会和环境互动的角度来讨论社会架构对细颗粒物水平的影响,从根本上探寻有效治理措施。

环境社会学研究社会因素如何对自然环境加以塑造以及自然环境如何影响或建构社会事实的双向过程。^⑥在分析社会因素对环境的影响时,环境社会学研究者提出了三个主要分析框架:政治经济学范式、生态现代化理论和世界体系理论。

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(NKZXB1481)。

作者简介:王琰,南开大学周恩来政府管理学院社会学系讲师,主要研究方向为环境社会学、社会分层和定量研究方法。

这些理论为我们理解影响PM2.5的社会性因素提供了一个相对完整的理论框架,遗憾的是在现有研究中,学者们往往只是进行政治、经济等单一维度检验,例如政策调控、^⑦经济活动、^⑧人口结构^⑨等因素的影响,较少对这些因素进行综合考虑。此外,研究者的关注焦点主要集中在传统的空气污染,如二氧化碳、甲烷等温室气体和二氧化硫、氮氧化物等酸性气体,^⑩针对近年来民众极为关注的PM2.5污染的社会学研究仍然是很少。相比于其他污染气体,PM2.5的组成更为复杂;相比于粗颗粒物(PM10),PM2.5污染元素富集程度更高;^⑪PM2.5这些特点使它的发展和治理过程与其他空气污染物会有所差别,要求我们进行细致的研究。本文希望借鉴环境社会学的三个核心理论,从国家经济、社会发展程度和国际地位等角度对PM2.5污染进行多面向的社会学分析,探讨影响PM2.5的社会机制,弥补现有研究的不足。

一、理论背景:现代化过程对环境的影响

(一)政治经济学范式

基于新马克思主义理论传统,政治经济学范式在讨论现代社会对自然环境的影响时,通常将经济发展和城市化过程视为自然环境恶化的罪魁祸首,强调二者和生态环境保护的对立性和冲突性。其中比较有代表性的理论包括生产跑步机理论(Treadmill of Production)^⑫和城市代谢失衡理论(Metabolic Rift Thesis)^⑬。

生产跑步机理论将资本主义经济模式比作一个永不停歇的、机械重复的生产跑步机,“由于经济自由竞争和资本的集中,经济增长成为社会发展的唯一动力和最终目的”。^⑭资本主义生产模式下的各个主体都被卷入到这一过程中。为了在竞争中处于优势地位,企业需要扩大生产规模,将先进的科学技术运用在生产中,从而降低产品的单位成本。经济规模的扩大有助于劳动者降低失业风险,因此劳动者也是经济发展的支持者。由于经济生产是财政收入的主要来源,再加上受到大型财团和民众意愿的影响,政府往往是扩大经济规模的支持者和赞助者。^⑮多元行动主体共同形成的支持经济增长的强力联盟使得资本主义社会缺乏从内部停止生产对环境的破坏的动力,经济增长成为各主体的“理性”选择,忽视了经济对生态环境造成的非理性后果,不可避免地带来自然资源的耗竭和生态环境的破坏。^⑯

通过对马克思关于社会—自然互动论述的总结,福斯特(Foster)提炼出城市代谢失衡理论。^⑰该理论强调城市化过程带来的人与自然关系的异化,认为城市和乡村的对立反映了人类和土地之间的代谢失衡,产生了以土壤退化和人类废弃物对城市空间的侵蚀为代表的一系列生态危机。具体来说,城市化使人类活动脱离了与土地的直接联系,人类产生的有机废弃物无法像农业社会中一样循环返回土地,人地的平衡状态被打破。有机肥料的缺失催生了农业肥料工业的产生和发展,造成了包括地下水污染、湖泊水质恶化等大量的环境问题。城市化带来的大规模工业生产也隔绝了农业社会中传统的社会和自然环境的互动,导致对矿产资源的消耗、对森林的破坏和大量生产生活废弃物的产生。

在经济发展和人口向城市集中的过程中,至少会在以下三个方面促使PM2.5浓度大幅度提高。首先,经济增长的一个重要动力是工业化水平的提升,比起农业耕作,工业生产需要更多的化石能源,同时也会排放出更多硫、氯、溴、铜、锌等工业污染元素,富集在细颗粒物中,提高细颗粒物质量浓度。^⑱第二,为了满足城市人口需要而进行的城市建设会导致大量的施工和道路扬尘,研究发现这些扬尘对细颗粒物的贡献率至少占到五分之一以上。^⑲第三,人类生产生活半径的扩大促进了交通方式的转变,机动车使用增加,排放的尾气中除了一次颗粒物之外,还包括挥发性有机物等可以催化二次颗粒物形成

的气态污染物。

这两个理论都强调人类物质需要的无限性和自然资源环境的有限性存在着根本矛盾,科技的进步和环保政策的实施不可能从根本上解决人类社会和自然环境的对立。新兴科技的使用会降低单位成本,提高资源利用率,创造更多的利润,但同时也会刺激生产者扩大生产规模,消耗更多的能源和资源,向自然环境排放包括细颗粒物在内的更多的废弃物。^③在经济发展模式保持不变的前提下,环保政策只能在小范围内减轻人类生产生活对环境造成的压力,长远看来无异于杯水车薪。生产跑步机理论提出,解决生产—环境二元困境的唯一有效途径是彻底解构现有的社会结构,改变生产者在人类发展进程中的核心地位。^④代谢失衡理论同样认为环境恶化的核心在于城市中组成的社会关系和自然的不相容性,因此只有根本上的人地关系转型才能解决环境问题。^⑤

(二)生态现代化理论

生态现代化理论发源于新经典主义传统,该理论基本上同意政治经济学理论对于工业化初期环境问题的论述,但坚持随着人类社会的发展,生态问题会“逐步纳入现代化进程”,^⑥现代化与自然环境将表现出相互促进的关系。如果说政治经济学假设了工业化和环境问题的线性关系,生态现代化理论则认为人类社会的现代化进程对环境的影响呈倒U型曲线(即“环境库兹涅茨曲线”)——环境问题在现代化初期加剧,但随着现代化的继续发展会得到缓解。^⑦

生态现代化理论根植于环境社会学家在20世纪90年代初期对工业化国家生产和消费模式转型、环境政策、制度变迁和环保对话体系等社会实践的观察。^⑧当社会发展到一定水平时,人们会越来越意识到环境问题的危害和保护自然环境的重要性。^⑨20世纪后期,发达国家出现大规模的群众性环境保护运动,呼吁国家、企业和民众采取措施来减少化石能源的使用,保护生态多样性,对工业生产实行严格的管理。^⑩受到大众传媒、公众压力和非政府组织的推动,政府出台了大量保护环境政策法规,引导企业发展绿色科技,加大对环境保护的公共投资,使工业化过程中一度恶化的空气质量问题得到了有效的改善。

相对于政治经济学以经济生产为理论核心,生态现代化理论更强调现代科技、市场经济和政府行政力量的共同介入。以化工产业为例,摩尔(Mol)描述了这些因素的共同作用如何在日本、瑞士等国家使工业生产实现与环境保护的有机融合。^⑪在公司层面,环保部门成为公司的重要机构,负责将政府的环境要求转化为公司的具体规定和产品标准。到90年代后期,企业30%到80%的研发费用投入在环保相关的研究上。在行业层面,环保因素已经成为化工产业竞争的重要着眼点,消费者组织和第三方机构不仅对产品的环境风险进行检验,同时也要求企业提供细致的生产过程中的环境管理流程。在这些监管机制下,不符合国家环保规定、含有环境风险的生产工艺和产品被逐步淘汰。

根据生态现代化的理论逻辑,大气细颗粒物浓度随着经济水平和城市化的发展可能会呈现出先上升后下降的趋势,其中科技水平的提高和政府的有效治理是导致细颗粒物浓度下降的重要直接推动力。美国加利福尼亚州的空气治理过程有效地阐释了现代化过程中科技和政府治理的相互配合在降低细颗粒物浓度上的作用。1943年洛杉矶市光化学烟雾爆发初期,科学家对污染物的来源、组成成分、治理方法几乎一无所知。严重的污染问题和民众的呼吁促使加州政府开始了空气治理之路,在健康部之下设立了烟雾治理部门(Bureau of Smoke Control)。1946年,雷蒙德·塔克(Raymond R. Tucker)教授在洛杉矶进行了实地调查,试图寻求解决方法。1947年,加州州长厄尔·沃伦(Earl Warren)签署《空气污染控制法案》(Air Pollu-

tion Control Act),并依法在州内的每个郡成立空气污染控制区。1952年,加州大学洛杉矶分校的生物化学家哈根—斯米特博士(Arie Haagen-Smit)成功鉴定出光化学烟雾的成分和来源,对空气污染的研究终于取得了突破性进展。1955年,美国颁布了《联邦空气控制法案》,为空气污染的研究和技术发展提供了大量的资助;同年,加州建立了专门处理烟雾事件的法庭,并开始对违规者进行处罚。1963年,《联邦清洁空气法案》颁布,并于1970年、1977年、1990年陆续推出修正案,制定了更严格的空气污染物控制标准。1970年,加州空气资源局(California Air Resources Board)设立捆绑法规,强制要求汽车制造商执行新的汽车尾气减排标准。经过数十年的治理,加州的空气质量已经得到明显好转。目前加州细颗粒物的年均值已经低至 $12\mu\text{g}/\text{m}^3$,低于美国平均水平。^⑨在英国等其他发达国家,空气污染的治理也经历了类似的过程。

(三)世界体系理论

进入21世纪,随着全球化的大规模发展和全球意识的崛起,环境社会学研究者开始借助世界体系理论,在全球范围内考察人类行为对生态环境的影响。世界体系理论认为,世界由核心国家、半边缘国家和边缘国家构成,在不同的历史时期内,国家在世界体系内的绝对位置可能会上升或下降,但这种分层结构本身会保持相对稳定。^⑩国家位置在很大程度上是由其世界经济体系中的“融合程度(incorporation)”决定的,这种融合主要体现在对生产产品的种类、资源获取方式、资本分配和劳动力状况等方面。

世界体系理论为解释全球范围内的环境问题提供了一个可行的分析框架。支持此理论的研究者认为,占据不同位置的国家在生产、消费、资源分配、废弃物排放等方面都处于两极分化的地位。核心国家在技术、经济和政治影响力上的优势地位使他们有能力从半边缘和边缘国家获取资源和能源,同时将污染严重的生产企业和生产生活垃圾转嫁给这些国家。非核心国家自身的不发达状况也使他们迫切地希望通过引入外国资本和扩大进出口规模来融入全球市场、发展本国经济,即使这种经济模式会造成环境和生态的后果。因此,相比于核心国家,非核心国家不得不更多地承受生态环境恶化的影响。^⑪

实证研究发现,国家在世界体系中的位置与环境问题有密切的关系,国家在国际贸易结构中的地位显著影响了该国居民的人均资源消耗和环境质量。^⑫现有文献专门针对世界体系理论对大气细颗粒物在不同国家中的分布情况的解释仍不多见,但已有研究表明,近年来核心国家通过向边缘和半边缘国家外包耗能较高的产业,造成不发达国家人均氮氧化物、一氧化碳、二氧化碳等大气污染物排放量的显著提高。^⑬秋元矢立(Hajime Akimoto)发表在《科学》杂志上的论文也发现,由于气溶胶的生命周期一般在一到两周,扩散范围有限,因此大气细颗粒物在全球的分布与污染源头紧密相关。卫星监测数据表明,细颗粒物在全球的分布呈现出明显的地区不平衡状态。^⑭利用化学输送模型(Chemical transport model),研究者同样发现细颗粒物浓度在东亚、南美、非洲等地区较高,而在北美和大洋洲等核心国家和地区明显偏低。^⑮

世界体系理论在某种程度上可以看作是政治经济学范式在全球范围内的延伸,该理论认同政治经济学对经济过程和权力分配的关注,但坚持在全球化时代,与环境问题息息相关的经济过程发生在全球市场之中,环境社会学的分析应该着眼于全球的生态环境,而不是局限在一国之内。^⑯基于全球视角,该理论的研究者并不完全认同生态现代化理论的论述,^⑰认为很多发达国家随着工业化的现代化的发展出现污染减少的情况是因为重污染企业从发达国家到发展中国家的转移。在全球范围内,环境问题和经济发展仍然呈正相关关系,环境问题不仅没有随着经济发展而减缓,反而日益严重。但是,世界体系理论在分析发达国家环境改善的原因时,过于强调国家之间经济和资源的交换和流动关系,因此无法解释一些核心国家内

部通过科技更新、产业升级带来的环境质量提高的结果。

二、数据和研究方法

现有研究表明细颗粒物浓度很大程度上受到地形特点、季节性因素(如燃煤取暖)、气候条件等特定地理环境和自然环境的影响,鉴于本研究希望关注社会经济因素,而并非对造成细颗粒物污染的多方面因素进行综合梳理,因此,为了尽可能减少地区性和季节性波动因素的影响,本文选择国家作为分析单位,对年均细颗粒物质量浓度(而非日均值或月均值)进行考察,以期得到较为稳定的分析结果。

本研究主要考察的变量为大气细颗粒物年均质量浓度,数据来源于由耶鲁大学环境法规政策中心、哥伦比亚大学国家地球科学信息网络中心、瑞士世界经济论坛和意大利欧洲委员会联合研究中心联合发布的2012年环境绩效指标(Environmental Performance Index),该数据的客观性和准确性已经在国际上得到广泛承认。在测量各国PM_{2.5}年均浓度时,本数据根据冯·丹克拉(Van Donkelaar)等学者的模型,^⑧利用中分辨率成像光谱仪观测到的气溶胶光学厚度(MODIS Aerosol Optical Depth)和地表大气细颗粒物集中水平的关系得到计算结果。其中距今最近的PM_{2.5}数据是在2010年采集的,每一年的数据为前后三年的数据结合人口密度加权平均后获得。本研究采用各国2010年PM_{2.5}年均浓度作为因变量,鉴于变量呈右偏分布,在模型中使用了该变量的自然对数形式。

在自变量的选择上,考虑到因果关系以及影响变量的时滞性问题,^⑨笔者选择了2009年的数据^⑩进行分析。为了对上述理论进行具体检验,笔者参考现有文献,针对每个理论选取了若干核心指标。除特别说明,分析中数据均来源于世界银行数据库。

政治经济学理论 生产跑步机理论认为资本主义制度是造成环境污染的罪魁祸首,参考约克等人的数据,^⑪资本主义制度被编码为一个虚拟变量。经济水平和经济增长也是该理论的主要关注点,遵循学术惯例,^⑫本文也加入人均GDP和GDP年增长率作为检验生产跑步机理论的指标。考察城市失衡理论时,除了检验城市化水平和城市人口年增长率,^⑬笔者还加入了三大产业占GDP的比重来衡量各国的经济结构,化石燃料能耗和GDP单位能源消耗来衡量能源结构。^⑭

生态现代化理论 对生态现代化理论的检验主要涵盖经济、科技水平和政府功能三个部分。首先,人均GDP和人均GDP的平方形式以及城市化和城市化的平方形式将被引入模型,以考察环境库兹涅茨曲线所展示的现代化过程和环境问题的非线性关系。^⑮其次,综合科技水平被用于检验各国的科学技术发展水平,该变量来源于环境可持续发展指标体系(Environmental Sustainability Index)最新的2005年数据。这一变量整合了世界经济论坛发布的创新指标、国际电讯联盟发布的数字接入指标、以及联合国教科文组织发布的女性初等教育完成率、高等教育毛入学率和每百万居民中研究人员数量五个指标,可以全面地衡量公众知识水平、国家研发能力和社会技术更新的能力。第三,本文用政府的环境治理指标(Environmental Governance),用以反映各国政府对环境问题的认知水平、立法情况和制度管理状况。该指标来源于环境可持续发展指标体系,整合了包含联合国环境项目发布的处于保护状态下的土地面积占总国土面积的百分比、世界经济论坛发布的政府环境治理状况等十二个变量。

世界体系理论 综合前人研究,^⑯本文通过国际援助情况、外国资本流入情况和贸易往来等几个主要变量揭示占据不同世界体系位置的国家如何通过资本和产业的转移影响其他国家的自然和生态环境。借

鉴约克等学者^⑤的方法,笔者使用已收到的净官方发展援助和官方援助这一变量构建了表示世界体系位置的三个二分变量:核心国家,半边缘国家和边缘国家。其中核心国家为主要提供援助的国家;半边缘国家包括接受援助但总额不超过GDP的0.5%的国家;边缘国家包括其他接受援助额度较大的国家。第二个变量是外国直接投资净流入占GDP的百分比,用于反映外国资本对本国产业的影响以及该国对外国资本的依赖性。^⑥最后,国际贸易水平常用来检验各国对世界经济体系的融入程度,^⑦本文利用货物和服务进出口总额占GDP比重来表示国际贸易水平。同时,为了更好地揭示与出口和进口份额相关联的经济活动对空气质量造成的影响,出口和进口份额也将被分别带入模型进行检验。

最后,考虑到新马尔萨斯主义对于人口与环境关系的论述,^⑧在模型中包括了人口、人口密度和总和生育率,以控制这些因素对核心考察变量与因变量关系的影响。表1展示了研究中使用的所有变量的描述性统计值。

表1 变量情况的描述性统计

变量	平均值	标准差	最小值	最大值
因变量				
大气细颗粒物质量浓度(对数)	2.14	0.66	0.30	3.91
核心自变量				
按购买力平价(PPP)衡量的人均GDP(2005年不变价国际元)(对数)	8.84	1.13	5.77	10.76
GDP增长率(年百分比)	-0.37	5.51	-17.95	12.77
资本主义制度	0.65	-	0	1
城镇人口(占总人口比例)	57.61	20.78	15.06	97.42
城镇人口增长率(年增长率)	2.06	1.74	-0.58	13.11
农业增加值(占GDP百分比)	12.34	10.71	0.65	47.71
工业增加值(占GDP百分比)	32.54	12.18	6.75	75.50
服务业增加值(占GDP百分比)	55.12	12.60	20.54	77.70
化石燃料能耗(占总量百分比)	63.87	29.87	0.00	100.75
GDP单位能源消耗(2005年不变价购买力平价美元/千克石油当量)	7.77	13.22	0.83	143.36
国家综合科技水平	0.14	0.81	-1.41	2.15
政府环境管理	0.09	0.70	-1.35	1.62
核心国家	0.22	-	0	1
半边缘国家	0.21	-	0	1
边缘国家	0.57	-	0	1
外国直接投资净流入(占GDP百分比)	4.32	5.62	-3.69	37.26
贸易额(占GDP百分比)	81.16	33.49	22.12	164.35
货物和服务进口(占GDP百分比)	43.46	19.16	11.14	123.33
货物和服务出口(占GDP百分比)	37.70	18.30	4.53	91.42
控制变量				
总人口数(对数)	16.41	1.56	12.54	20.99
总和生育率	2.69	1.33	1.15	6.35
人口密度(对数)	4.03	1.19	0.54	7.05

排除含缺失值的国家后,样本总量为包括中国在内的114个国家,涵盖世界人口的91%,经济生产总值的94%,很大程度上可以代表世界范围内的普遍情况。所有模型采取最小二乘法线性回归技术进行估计。

三、分析结果

(一)对政治经济学解释的实证检验结果

表2展示了政治经济学相关变量对PM2.5浓度的影响,为避免多元共线性问题,四个模型分别对每一个理论变量进行了检验。模型1和2说明,与生产跑步机理论的预测相反,资本主义制度对PM2.5没有显著影响。同时,人均GDP和GDP增长率没有提高PM2.5浓度,相反在控制人口变量后,人均GDP每增长1%,年均PM2.5浓度降低约20%。考虑到经济水平的重要作用,在后面的模型中也控制了人均GDP水平。

表2 预测PM2.5浓度的政治经济学理论变量的回归分析

	模型1	模型2	模型3	模型4	模型5
总人口数(对数)	0.163*** (0.035)	0.154*** (0.036)	0.164*** (0.035)	0.129*** (0.032)	0.111** (0.036)
总和生育率	0.003 (0.062)	-0.025 (0.063)	-0.067 (0.069)	-0.053 (0.055)	0.079 (0.065)
人口密度(对数)	0.096* (0.048)	0.091+ (0.048)	0.080 (0.049)	0.155*** (0.045)	0.117* (0.046)
人均GDP(对数)	-0.192* (0.075)	-0.215** (0.073)	-0.166+ (0.099)	-0.174+ (0.097)	-0.273*** (0.068)
资本主义制度	-0.153 (0.114)				
GDP年增长率		0.008 (0.012)			
城镇人口(占总人口比例)			-0.004 (0.004)		
城镇人口增长率			0.073+ (0.037)		
工业增加值(占GDP百分比)				0.006 (0.009)	
服务业增加值(占GDP百分比)				-0.018+ (0.010)	
(参照值:农业增加值占GDP百分比)					
化石燃料能耗(占总量百分比)					0.008** (0.002)
GDP单位能源消耗					-0.003 (0.004)
常数项	0.863 (0.980)	1.224 (0.955)	0.847 (1.050)	1.855* (0.872)	1.561+ (0.925)
N	114	114	114	114	114
R ²	0.372	0.364	0.389	0.496	0.430

注:括号内为标准误;显著性水平:***p<0.001, **p<0.01 *p<0.05, +p<0.1。

模型3到模型5用于检验城市代谢失衡理论,模型3表明城市化水平与PM2.5浓度之间没有显著的线性关系。模型4引入三大产业在GDP比重的变量,结果表明,相比于农业生产,工业比重的增加并不会影响PM2.5浓度,而服务业比重的增加会在一定程度上减少细颗粒物质量浓度(p<0.1),更改参照群体后结果不变。^⑤说明控制了人口和经济水平后,服务业的增加可以改善大气细颗粒物情况,而农业和工业的影响相对较小。前人研究也得出过类似的结论,例如,乔根森(Jorgenson)同样发现三大产业对各国的甲烷排

放量没有显著的影响,这是因为相比于三大产业本身,各产业消耗能源的组成成分对甲烷排放有更直接的影响。^⑧模型5对能源结构和能源利用效率对PM2.5浓度的影响进行了检验。^⑨与乔根森^⑩的发现一致,化石燃料在全部能源中比重的增加会带来PM2.5浓度的同步增加,每增加1%的化石燃料,PM2.5浓度会提升近1%($=e^{0.008}=1.008$),与此同时,GDP单位能源消耗对PM2.5浓度没有显著影响,说明即使能源利用效率较高,如果能源中化石燃料占较大比重,依然会带来严重的细颗粒物富集现象。

最后,新马尔萨斯理论在所有模型中都基本得到证实,人口总数越多、密度越大,一般来说PM2.5浓度也更高,但总和生育率对PM2.5浓度并没有显著影响。

(二)对生态现代化理论的实证检验结果

表3报告了对生态现代化理论模型的参数估计。为了检验环境库兹涅茨曲线,模型1和2加入了人均GDP和城市化水平的平方形式。比较表2和表3的对应模型,可以发现经济发展水平与城市化对PM2.5浓度呈现出不同的作用方式。经济发展水平对PM2.5浓度的影响呈线性关系:随着人均GDP的增加,PM2.5浓度显著下降。城市化水平与PM2.5浓度符合环境库兹涅茨曲线,呈倒U型关系:经计算,当一个国家城市人口接近总人口的一半时(48%),PM2.5浓度达到顶点,之后随着城市化的进一步发展逐渐降低。经济较为发达、城市化程度较高的国家的PM2.5浓度都比较低,因此两个变量的不同影响主要体现在变量值较低时对应的PM2.5浓度的差别:PM2.5浓度在经济发展水平较低的国家相对较高,在城市化水平较低的国家相对较低。研究发现,人为污染源是造成空气中细颗粒物污染的主要原因,在人口密集的城市污染更为严重,污染从城市到郊区到农村呈逐渐下降的趋势。^⑪处在城市化初期的国家,其人口多居住在乡村,人为

表3 预测PM2.5浓度的生态现代化理论变量的回归分析

	模型1	模型2	模型3	模型4
总人口数(对数)	0.157*** (0.036)	0.169*** (0.034)	0.137*** (0.037)	0.093* (0.036)
总和生育率	-0.004 (0.069)	-0.052 (0.068)	-0.003 (0.059)	0.073 (0.058)
人口密度(对数)	0.097* (0.049)	0.086+ (0.048)	0.118* (0.045)	0.165*** (0.046)
人均GDP(对数)	0.339 (0.679)	-0.150 (0.098)	0.012 (0.093)	0.013 (0.085)
人均GDP的平方项(对数)	-0.031 (0.038)			
GDP年增长率	0.007 (0.012)			
城镇人口(占总人口比例)		0.024+ (0.013)		
城镇人口(占总人口比例)的平方项		-0.025* (0.011)		
城镇人口增长率		0.079* (0.036)		
国家综合科技水平			-0.426*** (0.116)	
政府环境管理				-0.449*** (0.102)
常数项	-1.344 (3.273)	-0.104 (1.116)	-0.612 (1.136)	-0.304 (1.026)
N	114	114	106	106
R ²	0.368	0.416	0.444	0.472

注:括号内为标准误;显著性水平:***p<0.001, **p<0.01 *p<0.05, +p<0.1。

污染源较少且相对分散,因此PM2.5浓度较低。但经济水平较低的国家可能对待空气污染的相关经验不足,无力发展新型环保的产业,新型能源所占比重较低,等等,这些都可能导致较高的PM2.5污染水平。在后文我们可以看到科技和政府工作在经济水平对细颗粒物污染的影响中所起到的中介作用。

模型3和4阐释了科技水平和政府管理对PM2.5浓度的影响。从模型中可以看到,与理论预测一致,科技水平和政府管理程度每提升一个单位,PM2.5浓度相应下降35%或36%。需要注意的是,加入生态现代化理论变量后,人均GDP对PM2.5浓度的影响程度降低,显著性消失,说明由经济水平提高导致的空气质量提升在很大程度上是通过科技水平和政府管理的改善实现的。

(三)对世界体系理论的实证检验结果

对世界体系理论的实证检验结果参见表4。模型1通过加入国家在世界体系中的位置的虚拟变量,提供了对世界体系理论的直接检验。结果表明,世界体系位置与PM2.5浓度高度相关,核心国家的PM2.5浓度约为边缘国家的一半(52%),半边缘国家约为边缘国家的五分之二(39%)。

表4 预测PM2.5浓度的世界体系理论变量的回归分析

	模型1	模型2	模型3	模型4
总人口数(对数)	0.230*** (0.037)	0.173*** (0.037)	0.212*** (0.041)	0.183*** (0.044)
总和生育率	0.030 (0.059)	-0.013 (0.061)	-0.014 (0.060)	-0.023 (0.059)
人口密度(对数)	0.095* (0.046)	0.097* (0.048)	0.070 (0.048)	0.091+ (0.049)
人均GDP(对数)	0.010 (0.091)	-0.223** (0.070)	-0.241*** (0.069)	-0.296*** (0.075)
核心国家	-0.736*** (0.193)			
半边缘国家(参照群体:边缘国家)	-0.493** (0.147)			
外国直接投资净流入(占GDP百分比)		0.012 (0.010)		
贸易额(占GDP百分比)			0.004* (0.002)	
进口额(占GDP百分比)				-0.003 (0.004)
出口额(占GDP百分比)				0.011** (0.004)
常数项	-1.924 (1.184)	0.870 (0.989)	0.209 (1.025)	1.180 (1.144)
N	114	114	114	114
R ²	0.450	0.370	0.392	0.410

注:括号内为标准误;显著性水平:***p<0.001, **p<0.01 *p<0.05, +p<0.1。

世界体系理论认为,外国资本较少考虑对投资国的环境影响,因此大量的外国资本可能会引发所在国严重的环境问题。模型2发现,外国资本可能会产生其他的环境问题(如对生态多样性和森林覆盖率的负面作用等),^⑤但并没有对PM2.5浓度产生显著的影响。以往的研究也得出了类似的结论,如约克发现外国资本对能源生产没有影响。^⑥但国际贸易水平的作用却是显著的(模型3),与PM2.5浓度呈正相关。模型4将国际贸易水平拆分为出口和进口两个部分,发现国际贸易对PM2.5浓度的影响主要体现在出口额上。

(四)对三个理论的综合检验

为了进一步理解核心国家、半边缘国家和边缘国家PM2.5差异性的主要原因,笔者对上面模型中影响

较大的变量进行进一步检验(参见表5)。

表5 预测PM2.5浓度的综合回归分析

	模型1	模型2	模型3	模型4
总人口数(对数)	0.187*** (0.039)	0.179*** (0.039)	0.159*** (0.039)	0.204*** (0.042)
总和生育率	0.098 (0.062)	0.054 (0.062)	0.056 (0.060)	0.039 (0.059)
人口密度(对数)	0.108* (0.045)	0.103* (0.042)	0.126** (0.043)	0.109* (0.042)
人均GDP(对数)	-0.081 (0.093)	0.065 (0.099)	0.136 (0.101)	0.093 (0.100)
核心国家	-0.573** (0.194)	-0.123 (0.213)	-0.010 (0.213)	-0.033 (0.208)
半边缘国家 (参照群体:边缘国家)	-0.477** (0.142)	-0.504*** (0.135)	-0.486*** (0.132)	-0.517*** (0.129)
化石燃料能耗(占总量百分比)	0.007** (0.002)	0.007** (0.002)	0.005* (0.002)	0.005+ (0.002)
国家综合科技水平		-0.521*** (0.132)	-0.434** (0.134)	-0.425** (0.131)
政府环境管理			-0.277* (0.118)	-0.256* (0.115)
出口额(占GDP百分比)				0.007* (0.003)
常数项	-1.113 (1.177)	-2.188+ (1.218)	-2.482* (1.197)	-2.932* (1.179)
N	114	106	106	106
R ²	0.491	0.552	0.577	0.603

注:括号内为标准误;显著性水平:*** $p < 0.001$, ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$, + $p < 0.1$ 。

模型1加入政治经济学理论中的能源结构变量,与表4的模型1相比,核心国家与边缘国家的差异下降了约10% (=52%-44%),半边缘国家和边缘国家的差异基本保持不变(38%),说明化石燃料的使用并不能完全解释三类国家的PM2.5浓度的差异。生态现代化理论中的重要解释变量,国家综合科技水平和政府环境治理,被依次加入到模型2和3中。模型2控制国家科技水平后,核心国家的回归系数变小,显著性消失。模型3中,其他变量的影响基本保持不变,政府对环境的有效管理的回归系数仍然为负且保持显著。这些结果表明核心国家和边缘国家空气质量差异的重要原因在于科学技术水平和政府对环境的管理强度和力度的不同。模型4加入检验世界体系理论中比较重要的出口额变量,结果仍然与原有分析一致。

需要注意的是,表5中24个半边缘国家与65个边缘国家PM2.5浓度的差异基本不变,说明能源结构、国家综合科技水平、政府效力和出口额等变量并不能解释二类国家的差异。通过均值检验发现,与核心国家和边缘国家($t=12.39$, $p < 0.001$)不同,半边缘国家和边缘国家的科技水平并不存在显著的差异($t=1.92$, $p > 0.05$),因此可能是其他一些未能检测到的因素导致了二者PM2.5浓度的差异。

(五)对研究方法的进一步检验

最后,为了保证研究结果的稳健性,笔者分别对多重共线性、影响观察值和不同年份的变量进行了分析,发现模型中不存在多重共线性问题;去除对估计值较大的观测个案后,基本结论保持不变;采用2006-2008年的自变量后仍得到同样的发现。^⑧

四、结论和讨论

本文通过对国家层次数据的分析,对影响空气细颗粒物的社会经济因素进行了检验。在现有的几个主要理论流派中,生态现代化理论认为现代化的进程伴随着人类的环境自觉和环保技术手段的提高,带来自然与社会的协调发展。政治经济学范式和世界体系理论则分别从国内外两个维度分析了经济发展和生态保护之间不可调节的矛盾。

研究结果首先支持了生态现代化理论在预测空气质量时的乐观态度。城市化对PM2.5的影响验证了环境库兹涅茨曲线,同时也部分地反驳了政治经济学视角下的城市失衡理论。对于处于城市化初期的国家,空气质量确实会随着城市人口规模的扩大而恶化,但城市化也并不完全像城市失衡理论所描述的那样,仅仅意味着人口从乡村到城市的聚居和与有机生活方式的隔绝。城市化的过程包含着更深刻的社会结构的转变,如更加细致的社会分工、更为多元的价值取向、民间团体和志愿组织的发展等等。这些变化蕴含着对工业思考逻辑的反思,环保主义思潮的兴起,群众性环保运动的发展,环保科技的进步等,这些都会促使人类逐渐有意识地减少或避免对环境的破坏,同时也有能力降低环保行为的经济成本,从而实现人地关系的动态平衡。研究特别关注了科学技术在消减PM2.5浓度中的作用,发现公民文化程度的提高、信息的开放和国家整体科技水平的提高能够有效降低PM2.5浓度,改善空气质量。根据世界卫生组织的报告,在欧洲,可以利用现有技术减少80%的细颗粒物污染。^⑨政府管理是现代化进程中治理PM2.5污染的另一个重要手段。保护自然环境已经被公众看作重要的公共事业,环境保护也成为政府的重要日常职责之一。以上模型都控制了人均收入,因此这一结论对于人均收入较低的发展中国家也是基本适用的。政治经济学范式对PM2.5浓度的解释没有得到验证。该范式一个重要的理论缺陷在于将经济发展过程等同于从农业社会向工业社会的转变,忽视了服务业的兴起所带来的社会结构性变迁。经济发展水平较高的国家往往服务业比重很高而工农业比重很低,因此化石燃料使用较少,再加上前文提到的科技和政府能力的同步提高,这些国家空气质量通常较高,没有产生政治经济学范式所预期的灰暗图景。除了本国的环保行动,我们也不能否认环境风险的全球转移过程在发达国家空气质量改善中所起到的作用。PM2.5严重程度随着国家世界体系位置的边缘化呈现出递增的趋势,核心国家空气中的PM2.5浓度远低于非核心国家。一个潜在原因可能是一些危害环境的商品在非核心国家的生产和出口。核心国家对这类商品严格的生产规定提高了在本国的生产成本,为其他国家提供了生产和出口的贸易机会,但同时也带来了对这些国家的环境破坏。^⑩本研究还发现核心国家和边缘国家不同污染水平的重要原因在于科技水平和政府环境管理程度的差异,较高的科研水平和民众的文化素质使核心国家对空气污染,尤其是危害较大的PM2.5污染的容忍度较低,政府对环境问题的重视也可以在宏观政策层面采取有效的治理措施,与此同时,较高的技术水平也使生产和消费在全球范围内的转移得以实现。

虽然本文的分析基于多个国家的横截面比较数据,但研究结果也在一定程度上呼应了我国大气细颗粒物污染和治理的状况。在全球化过程中,发达国家的产业转移使中国成为“世界工厂”,进出口规模迅速扩大,在世界贸易总额中所占的比重也稳步提高,到2013年中国已经成为世界第一货物贸易大国。我国用三十年的时间走完了发达国家一百年的工业化进程,但是,中国经济在得到迅速发展的同时环境问题也日益严峻。早在20世纪90年代,我国科学家已经开始对细颗粒物的浓度、组成特征和来源进行了分析,发

现当时几个大城市的采样点的细颗粒物污染水平已经相当严重。^⑥但在当时这些讨论仍局限在学术界,并没有引起民众的注意。直到2010年年末,美国大使馆对周围的PM2.5水平的测定和公布才使细颗粒物问题进入公众视野。2011年,民众通过对微博等社交媒体的使用推动了官方数据的公开。正如生态现代化理论所预期的那样,经济发展不会自动地带来环境的改善,但在经济发展到一定阶段时,民众会逐步意识到环境保护的重要性,并期冀在发展和环保中间寻求平衡点,而公众参与和政府治理相辅相成,都是促进环境问题倒U型拐点的重要手段。2012年,国务院要求各地向社会公布PM2.5数值;新修订的《环境空气质量标准》发布,增设了PM2.5平均浓度限值。2013年,国务院发布了《大气污染防治行动计划》(以下简称“国十条”),明确设定了到2017年治理细颗粒物污染的具体指标和十条措施。2014年,修订后的环保法出笼,并将在2015年施行,新修订的环保法在明确责任、惩罚力度、信息公开等方面均有重要突破。同年,74个主要城市PM2.5平均浓度下降11.1%。

本文研究结果表明,在世界范围内,造成雾霾问题的重要原因之一是国家的能源结构,尤其是化石能源的使用,而科技的进步和生态型国家的建构可以有效降低大气中的细颗粒物水平,“国十条”中也反复提到政府环境治理、能源结构调整和科技创新的重要作用。2014年APEC期间,中美发布联合声明,中国首次正式提出2030年中国碳排放有望达到峰值,并将于2030年将非化石能源在一次能源中的比重提升到20%。我国作为发展中的社会主义国家,政府掌握着大量的政治、经济和文化资源,对政府资源的合理使用,如提高向公民教育领域的投入、发展绿色环保的科学技术、协调各方利益、减少行业垄断、引进市场机制、加强环境立法和执法等措施都会减轻雾霾污染状况。但同时也要注意核心国家、半边缘和边缘国家之间的环境鸿沟确实存在,在经济全球化的过程中既要充分发挥本国优势,也要减少粗放型的国际贸易增长方式,在保护环境的基础上实现出口贸易的良性发展。

本文利用跨国数据,在世界范围内讨论了政治经济等重要的社会性因素对空气质量的影响机制,很大程度上弥补了现有实证研究的空白。在未来研究中,还有以下几项工作需要研究者作进一步探讨。首先,出于对宏观制度的关注,本研究以国家作为基本分析单位,没有进行城镇和乡村层次的研究。空气质量在一国之内的差别有时甚至会超过国与国的差别,后续的研究可以深入到更基础的分析单位,对社会经济政治等多元主体的态度和行为对空气质量的影响进行更具体的剖析。其次,本文运用的理论框架更多地强调了政治和经济因素对空气质量的影响,因此没有对不同文化范式影响下的人类活动所导致的环境后果做进一步分析。第三,本文希望深入理解全球范围内空气污染的现状和影响因素,因此主要进行了同一时间点上不同国家的横截面分析。未来研究的一个重要着眼点是了解随着时间的发展,各社会性因素如何同步影响了PM2.5的产生和发展,因此需要获取多个时间点上的数据进行纵贯分析。这种分析也可以对变量的因果关系提供更准确的检验。最后,在自然和社会的互动中,本研究关注了社会对自然环境的影响,在此基础上,未来的研究可以继续讨论自然环境对社会产生的影响,即PM2.5这一主要由人类活动所引发的环境问题如何通过“环境社会化”的过程,^⑦经由个体和社会组织的建构,造成对社会结构的影响。

本文曾在第四届中国环境社会学学术研讨会“气候变化与环境政策”专题上宣读,包智明教授、洪大用教授、陈阿江教授及与会学者对本文的修改和完善提出了宝贵的意见,本研究还得到了刘集林副教授、宣朝庆教授和赵万里教授的支持和帮助,在此一并致谢。文责自负。

注释:

- ①朱先磊、张远航、曾立民、王玮:《北京市大气细颗粒物PM2.5的来源研究》,载《环境科学研究》,2005(5)。
- ②张文丽、徐东群、崔九思:《空气细颗粒物(PM2.5)污染特征及其毒性机制的研究进展》,载《中国环境监测》,2002(1)。
- ③⑤⑨World Health Organization. Health Effects of Particulate Matter, <http://www.euro.who.int/>, 2013, p. 6.
- ④ World Health Organization. Outdoor Air Pollution: A Leading Environmental Cause of Cancer Deaths, <http://www.euro.who.int/>, 2013-10-17.
- ⑤Judith C. Chow, John G. Watson, Zhiqiang Lu, Douglas H. Lowenthal, Clifton A. Frazier, Paul A. Solomon, Richard H. Thuillier, and Karen Magliano. Descriptive Analysis of PM2.5 and PM10 at Regionally Representative Locations during SJVAQS/AUSPEX. *Atmospheric Environment*, 1996, 30(12), pp. 2079-2112.
- ⑥洪大用:《西方环境社会学研究》,载《社会学研究》,1999(2)。
- ⑦Dana R. Fisher and William R. Freudenburg. Postindustrialization and Environmental Quality: An Empirical Analysis of the Environmental State. *Social Forces*, 2004, 83(1), pp. 157-188.
- ⑧⑫⑭Andrew K. Jorgenson. Global Warming and the Neglected Greenhouse Gas: A Cross-National Study of the Social Causes of Methane Emissions Intensity, 1995. *Social Forces*, 2006, 84(3), pp. 1779-1798.
- ⑨Richard York and Eugene A. Rosa. Choking on Modernity: A Human Ecology of Air Pollution. *Social Problems*, 2012, 59(2), pp. 282-300.
- ⑩Andrew K. Jorgenson. Global Warming and the Neglected Greenhouse Gas: A Cross-National Study of the Social Causes of Methane Emissions Intensity, 1995. *Social Forces*, 2006, 84(3), pp. 1779-1798; J. Timmons Roberts, Peter E. Grimes, and Jodie Manale. Social Roots of Global Environmental Change: A World-Systems Analysis of Carbon Dioxide Emissions. *Journal of World-Systems Research*, 2003, 9(2), pp. 277-315; Richard York. De-Carbonization in Former Soviet Republics, 1992-2000: The Ecological Consequences of De-Modernization. *Social Problems*, 2008, 55(3), pp. 370-390.
- ⑪⑬魏复盛、滕恩江、吴国平、胡伟、W. E. Wilson、R. S. Chapman、J. C. Pau、J. Zhang:《我国4个大城市空气PM2.5、PM10污染及其化学组成》,载《中国环境监测》,2001(7)。
- ⑫Kenneth A. Gould, David N. Pellow, and Allan Schnaiberg. Interrogating the Treadmill of Production: Everything You Wanted to Know about the Treadmill but Were Afraid to Ask. *Organization & Environment*, 2004, 17(3), pp. 296-316; Allan Schnaiberg and Kenneth A. Gould. *Environment and Society: The Enduring Conflict*. New York, NY: St. Martin's Press, 1994; Allan Schnaiberg. *The Environment: From Surplus to Scarcity*. New York, NY: Oxford University Press, 1980.
- ⑬⑰John Bellamy Foster. Marx's Theory of Metabolic Rift: Classical Foundations for Environmental Sociology. *American Journal of Sociology*, 1999, 105(2), pp. 366-405; John Bellamy Foster. Marx's Ecology in Historical Perspective. *International Socialism*, 2002(96), pp. 71-86.
- ⑭Allan Schnaiberg. *The Environment: From Surplus to Scarcity*. New York, NY: Oxford University Press, 1980, pp.230.
- ⑮⑲⑳㉑Richard York., Eugene A. Rosa, and Thomas Dietz. Footprints on the Earth: The Environmental Consequences of Modernity. *American Sociological Review*, 2003, 68(2), pp. 279-300.
- ⑯Kenneth A. Gould, David N. Pellow, and Allan Schnaiberg. Interrogating the Treadmill of Production: Everything You Wanted to Know about the Treadmill but Were Afraid to Ask. *Organization & Environment*, 2004, 17(3), pp. 296-316; Allan Schnaiberg and Kenneth A. Gould. *Environment and Society: The Enduring Conflict*. New York, NY: St. Martin's Press, 1994.
- ⑰Mei Zheng, Lynn G. Salmon, James J. Schauer, Limin Zeng, C. S. Kiang, Yuanhang Zhang, and Glen R. Cass. Seasonal Trends in PM2.5 Source Contributions in Beijing, China. *Atmospheric Environment*, 2005, 39(22), pp. 3967-3976; 朱先磊、张远航、曾立民、王玮:《北京市大气细颗粒物PM2.5的来源研究》,载《环境科学研究》,2005(5)。
- ⑲Brett Clark and John Bellamy Foster. William Stanley Jevons and The Coal Question: An Introduction to Jevons's of the Economy of Fuel. *Organization & Environment*, 2001, 14(1), pp. 93-98; Kenneth A. Gould, David N. Pellow, and Allan Schnaiberg. Interrogating the Treadmill of Production: Everything You Wanted to Know about the Treadmill but Were Afraid to Ask. *Organization & Environment*, 2004, 17(3), pp. 296-316.
- ⑳John Bellamy Foster. Marx's Theory of Metabolic Rift: Classical Foundations for Environmental Sociology. *American Journal of Sociology*, 1999, 105(2), pp. 366-405.
- ㉑Arthur P. J. Mol. *The Refinement of Production: Ecological Modernization Theory and the Chemical Industry*. Utrecht, the Netherlands: Van Arkel, 1995.
- ㉒James Van Alstine and Eric Neumayer. The Environmental Kuznets Curve. In K. Gallagher (Ed.), *Handbook on Trade and the Environment*. Cheltenham, UK/Northampton, MA: Edward Elgar, 2008, pp. 49-59.
- ㉓⑳ Arthur P. J. Mol. Ecological Modernization: Industrial Transformations and Environmental Reform. In M. Redclift and G. Woodgate (Eds.), *The International Handbook of Environmental Sociology*. Cheltenham, UK/Northampton, MA: Edward Elgar, 1997,

pp.138-149.

②⑥洪大用、范叶超:《公众环境风险认知与环保倾向的国际比较及其理论启示》,载《社会科学研究》,2012(6)。

②⑦Frederick H. Buttel. Ecological Modernization as Social Theory. *Geoforum*, 2000, 31(1), pp. 57-65; 叶平:《全球环境运动及其理性考察》,载《国外社会科学》,1999(6)。

②⑧Chip Jacobs, *Smogtown: The Lung-Burning History of Pollution in Los Angeles*. Woodstock, NY: Overlook Press, 2008; California Environmental Protection Agency, Key Events in the History of Air Quality in California, <http://www.arb.ca.gov/html/brochure/history.htm>, 2015.

②⑩Immanuel Wallerstein. *The Modern World-System I: Capitalist Agriculture and the Origins of the European World-Economy in the Sixteenth Century*. New York, NY: Academic Press, 1974.

②⑪Rebecca Clausen and Stefano Longo. Forest, Food, and Freshwater: A Review of World-Systems Research and Environmental Impact. In S. Babones and C. Chase-Dunn (Eds.), *Routledge International Handbook of World-Systems Analysis*. New York, NY: Routledge, 2012, pp. 422-433; J. Timmons Roberts., Peter E. Grimes, and Jodie Manale. Social Roots of Global Environmental Change: A World-Systems Analysis of Carbon Dioxide Emissions. *Journal of World-Systems Research*, 2003, 9(2), pp. 277-315.

②⑫Thomas J. Burns, Edward Kick, and Byron Davis. A Quantitative, Cross-National Study of Deforestation in the Late 20th Century: A Case of Recursive Exploitation. In Andrew K. Jorgenson and Edward Kick (Eds.), *Globalization and the Environment*. Leiden, the Netherlands: Brill Academic Press, 2006, pp. 37-60; James Rice. Ecological Unequal Exchange: International Trade and Uneven Utilization of Environmental Space in the World System. *Social Forces*, 2007, 85(3), pp. 1369-1392.

②⑬Andrew K. Jorgenson, Christopher Dick, and Matthew C. Mahutga, Foreign Investment Dependence and the Environment: An Ecostructural Approach. *Social Problems*, 2007, 54(3), pp. 371-394; Andrew K. Jorgenson, Does Foreign Investment Harm the Air We Breathe and the Water We Drink? A Cross-National Study of Carbon Dioxide Emissions and Organic Water Pollution in Less-Developed Countries, 1975 to 2000. *Organization & Environment*, 2007, 20(2), pp. 137-156.

②⑭Hajime Akimoto. Global Air Quality and Pollution. *Science*, 2003, 302(5651), pp. 1716-1719.

②⑮V. Ramanathan and Y. Feng. Air pollution, Greenhouse Gases and Climate Change: Global and Regional Perspectives. *Atmospheric Environment* *Atmospheric Environment - Fifty Years of Endeavour*, 2009, 43(1), pp. 37-50.

②⑯Stephen G. Bunker and Paul S. Ciccantell. Economic Ascent and the Global Environment: World-Systems Theory and the New Historical Materialism. In Walter L. Goldfrank, David Goodman, and Andrew Szasz (Eds.), *Ecology and the World-System*. Westport, CT: Greenwood Press, 1999, pp. 107-122.

②⑰J. Timmons Roberts and Peter E. Grimes. Carbon Intensity and Economic Development 1962-1991: A Brief Exploration of the Environmental Kuznets Curve. *World Development*, 1997, 25(2), pp. 191-198.

②⑱Aaron Van Donkelaar, Randall V. Martin, Michael Brauer, Ralph Kahn, Robert Levy, Carolyn Verduzco, and Paul J. Villeneuve. Global Estimates of Ambient Fine Particulate Matter Concentrations from Satellite-Based Aerosol Optical Depth: Development and Application. *Environmental Health Perspectives*, 2010, 118(6), pp. 847-855.

②⑲⑳Evan Schofer and Ann Hironaka. The Effects of World Society on Environmental Protection Outcomes. *Social Forces*, 2005, 84(1), pp. 25-47.

④⑩出于对样本量以及数据可得性的考虑,少数变量选择了2009年以前的数据,笔者在后文对此问题做了更详细的说明。

④⑫Dana R. Fisher and William R. Freudenburg. Postindustrialization and Environmental Quality: An Empirical Analysis of the Environmental State. *Social Forces*, 2004, 83(1), pp. 157-88; Andrew K. Jorgenson, Christopher Dick, and Matthew C. Mahutga. Foreign Investment Dependence and the Environment: An Ecostructural Approach. *Social Problems*, 2007, 54(3), pp. 371-394.

④⑬参见 Richard York., Eugene A. Rosa, and Thomas Dietz. A Rift in Modernity? Assessing the Anthropogenic Sources of Global Climate Change with the STIRPAT Model. *International Journal of Sociology and Social Policy*, 2003, 23(10), pp. 31-51.

④⑭前期分析时,机动车占有率也作为考察城市失衡理论的变量,被引入模型中进行检验,检验结果表明机动车占有率对PM2.5年均值并没有显著影响。然而以往的研究表明,机动车对细颗粒物排放的影响不仅要考虑机动车占有率,还要考虑车辆的使用率、燃料燃烧效率、燃料构成情况等诸多问题(参见A.W. Gertler, J. A. Gillies, and W. R. Pierson. An Assessment of the Mobile Source Contribution to PM10 and PM2.5 in the United States. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2000, 123(1-4), pp. 203-214)。鉴于这些变量并非理论考量的核心变量,同时国家数据中并没有相关情况记录,因此本研究对这一污染源的研究囊括在能源构成中,没有进行更直接的考察。

④⑮Karen Ehrhardt-Martinez. Social Determinants of Deforestation in Developing Countries: A Cross-National Study. *Social Forces*, 1998, 77(2), pp. 567-586; James Van Alstine and Eric Neumayer. *The Environmental Kuznets Curve*. In K. Gallagher (Ed.), *Handbook on Trade and the Environment*. Cheltenham, UK/Northampton, MA: Edward Elgar, 2008, pp. 49-59.

④⑯Kenneth Bollen. World System Position, Dependency, and Democracy: The Cross-National Evidence. *American Sociological Review*, 1983, 48(4), pp. 468-79; J. Timmons Roberts, Peter E. Grimes, and Jodie Manale. Social Roots of Global Environmental Change: A World-Systems Analysis of Carbon Dioxide Emissions. *Journal of World-Systems Research*, 2003, 9(2), pp. 277-315.

④⑰Glenn Firebaugh. Does Foreign Capital Harm Poor Nations? New Estimates Based on Dixon and Boswell's Measures of Capital Penetration. *American Journal of Sociology* 1996, 102, pp. 563-575; Jorgenson, Dick, and Mahutga. Foreign Investment Dependence

and the Environment; Jeffrey Kentor and Terry Boswell. Foreign Capital Dependence and Development: A New Direction. *American Sociological Review*, 2003, 68(2), pp. 301-313.

⑨Evan Schofer and Ann Hironaka. The Effects of World Society on Environmental Protection Outcomes. *Social Forces*, 2005, 84(1), pp. 25-47.

⑩William Robert Catton. *Overshoot: The Ecological Basis of Revolutionary Change*. Chicago, IL: University of Illinois Press, 1982.

⑪更改参照群体后(结果未显示,可向作者索取结果),相比于工业生产,农业生产的比重对因变量没有影响,但服务业比重的增加会显著降低细颗粒物质量浓度($p < 0.001$)。

⑫为了保证样本量一致,这里笔者使用了2007年的能源数据进行分析。前期研究也检验了2009年数据,统计结果基本不变,因为时效性的原因模型解释力度更强。化石燃料能耗占总量的百分比的回归系数为0.010($p < 0.001$),GDP单位能源消耗的回归系数为-0.037($p > 0.05$),拟合优度为48%。鉴于6个国家2009年数据缺失,因此模型中采用了2007年的能源数据。

⑬Christoph Hueglin, Robert Gehrig, Urs Baltensperger, Martin Gysel, Christina Monn, and Heinz Vonmont. Chemical Characterisation of PM_{2.5}, PM₁₀ and Coarse Particles at Urban, Near-City and Rural Sites in Switzerland. *Atmospheric Environment*, 2005, 39(4), pp. 637-651.

⑭Nick Mabey and Richard McNally. *Foreign Direct Investment and the Environment: From Pollution Havens to Sustainable Development*. World Wildlife Foundation, 1999.

⑮Richard York. Structural Influences on Energy Production in South and East Asia, 1971-2002. *Sociological Forum*, 2007, 22(4), pp. 532-554.

⑯首先,针对模型中是否存在多重共线性问题,笔者考察了所有不含平方形式变量模型中的方差膨胀因子(VIF)。最大的VIF值为7.08,仍然小于公认的判断值10,不存在多重共线性问题。对于含有平方形式的变量,即表3中的模型1和模型2中的人均GDP和城市化变量,鉴于对应的标准误较小,表明由平方形式导致的多重共线性没有造成不稳定的参数估计。第二个需要考察的是影响观察值,笔者计算了所有模型中每个个案对应的残差项、帽值(hat value)、Cook距离,去除对估计值较大的观测个案后,基本结论保持不变。第三,为了保证样本量的一致,少数变量选择了2009年前的数据,包括三大产业比重(2006年)、能源结构和能源利用效率(2007年)。笔者做了两项检验以保证结果的有效性,首先使用2009年样本较小的数据,其他变量保持不变,发现结果基本一致。其次,笔者分别采用了对应年份的因变量和自变量,即针对2006年经济结构,使用2007年的细颗粒物质量浓度和2006年的其他自变量,针对2007年的能源相关变量,使用2008年的细颗粒物质量浓度和2007年自变量,结果仍然与现有发现一致。

⑰Larry Karp. The Environment and Trade. *Annual Review of Resource Economy*, 2011, 3(1), pp. 397-417.

⑱滕恩江、胡伟、吴国平、魏复盛:《中国四城市空气中粗细颗粒物元素组成特征》,载《中国环境科学》,1999(3);董金泉、杨绍晋:《华北清洁地区气溶胶特征及其来源研究》,载《环境化学》,1998(1)。

⑲吕涛:《环境社会学研究综述——对环境社会学学科定位问题的讨论》,载《社会学研究》,2004(4)。

Sociological Perspectives on Air Pollution: A Cross-National Analysis of Social Determinants of Fine Particulate Matter (PM_{2.5})

WANG Yan

Abstract: The fine particulate matter (PM_{2.5}) pollution is one of the major environmental problems in the world. Based on the theoretical frameworks of political economy, ecological modernization, and world systems, this paper explains how societal factors influence PM_{2.5} using data from 114 countries. The overall findings support the ecological modernization theory. The level of PM_{2.5} substantially decreases with the progress of modernization. More specifically, the relationship between urbanization and PM_{2.5} takes an inverted U-shaped form. Science, technology and environmental governance all contribute to the decline of PM_{2.5}. The findings also contradict the claims of political economists that economic development has a linear effect on environmental degradation. The author also finds evidence for the transfer of environmental risk worldwide and world systems theory is partially supported.

Key words: fine particulate matter; environmental sociology; ecological modernization; political economy; world systems theory

(责任编辑:王水雄)