

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.4
第41卷 第4期

目次

基于深度学习的华东地区 PM_{2.5} 浓度遥感反演 刘林钰, 张永军, 李彦胜, 刘欣怡, 万一(1513)

秋冬季区域性大气污染过程对长三角北部典型城市的影响
..... 李瑞, 李清, 徐健, 李亮, 葛朝军, 黄凌, 孙登红, 刘子义, 张坤, 周国柱, 王杨君, 胡子梅, 宋燕西, 陈勇航, 李莉(1520)

基于 GAM 模型的西安市 O₃ 浓度影响因素解析 黄小刚, 邵天杰, 赵景波, 曹军骥, 吕晓虎(1535)

北京及周边 6 个城市大气 PM_{2.5} 中左旋葡聚糖及其异构体的时空分布特征 朱红霞, 陶雪梅, 王超, 张霖琳, 郑晓燕(1544)

典型沿海城市采暖期细颗粒物组分特征及来源解析 李明燕, 杨文, 魏敏, 朱红晓, 刘厚凤(1550)

成都地区黑碳气溶胶变化特征及其来源解析 王璐, 袁亮, 张小玲, 贾月涛(1561)

天津夏季郊区 VOCs 对臭氧生成的影响 姚青, 韩素芹, 张裕芬, 毕晓辉, 王晓佳, 蔡子颖(1573)

涂料制造行业挥发性有机物排放成分谱及影响 吴健, 高松, 陈曦, 杨勇, 伏晴艳, 车祥, 焦正(1582)

典型超低排放燃煤电厂可凝结颗粒物特征和成因 邓建国, 王刚, 张莹, 李妍菁, 段雷, 蒋靖坤(1589)

中国地表水硝酸盐分布及其来源分析 张鑫, 张妍, 毕直磊, 山泽萱, 任丽江, 李琦(1594)

中、韩滨海城市化区域水体全氟化合物的空间特征及生态风险 杨洪法, 史斌, 周云桥, 杨璐, 孟晶, 陈礼强, 王铁宇(1607)

小清河入海口近十年水质变化及驱动因素分析 范新风, 韩美, 王磊, 李秀萍, 周璟(1619)

浙江省 H 市水处理及供水系统 4 种人工甜味剂的分布特征 马晓雁, 胡慧, 陆思嘉, 李青松, 薛乐飞, 李雪纯, 邓靖(1629)

三峡库区支流梅溪河附石藻类群落变化及其与环境因子的关系 米文梅, 施军琼, 杨燕君, 杨宋琪, 何书哈, 吴忠兴(1636)

骆马湖浮游植物演替规律及驱动因子 张庆吉, 王业宇, 王金东, 王日昕, 邓建明, 蔡永久, 彭凯, 陈业, 龚志军(1648)

拉鲁湿地水生植物群落多样性与水环境因子的关系 王佳俊, 田瀚鑫, 周磊, 徐德福, 张建伟, 彭措次仁(1657)

基于网络分析解析水源水库春季水体反硝化群落演变特征及驱动因素
..... 周石磊, 孙悦, 张艺冉, 黄廷林, 张春华, 方凯开, 曾明正, 李再兴, 崔建升(1666)

岱海水体氮、磷时空分布特征及其差异性分析 赵丽, 陈俊伊, 姜霞, 郑朔方, 王书航(1676)

巢湖滨岸水塘洼地沉积物反硝化速率及对外源碳氮的响应 李如忠, 王莉, 刘超(1684)

镁改性芦苇生物炭控磷效果及其对水体修复 丁玉琴, 李大鹏, 张帅, 陈丽媛, 徐楚天, 陈姝彤, 朱企, 黄勇(1692)

氢氧化镁对水体内源磷释放的控制作用 杨春懿, 詹艳慧, 林建伟, 邱波, 徐文隆, 俞阳, 黄良君(1700)

北京市道路雨水径流溶解性有机物化学组分特性 陈梦瑶, 杜晓丽, 于振亚, 朱英杰, 梁卉, 吴凡(1709)

新型三维多孔光热材料制备及其高盐废水处理应用 黄乐, 徐颖峰, 谢茜青, 赵娟, 冯华军(1716)

Ni 掺杂 Sb-SnO₂ 瓷环粒子电极电催化氧化磺胺嘧啶 石秋俊, 刘安迪, 唐柏彬, 魏世强, 张进忠(1725)

磁性 Fe₃O₄-CuO 非均相活化过碳酸钠降解 A07 徐劫, 王琳, 陈家斌, 许芬, 王柯晴, 侯梓峰, 黄天寅(1734)

赤泥活化过一硫酸盐降解环丙沙星, 性能和机制 史京转, 魏红, 周孝德, 李克斌, 史颖娟(1743)

工业废水水质对微气泡臭氧氧化深度处理影响 张静, 张守敬, 刘春, 施佳泽, 陈晓轩, 张磊, 张瑞娜(1752)

污泥水热炭对亚甲基蓝的吸附特性 陈丽媛, 李大鹏, 朱文娟, 徐楚天, 丁玉琴, 黄勇(1761)

改性西瓜皮生物炭的制备及其对 Pb(II) 的吸附特性 毕景望, 单锐, 韩静, 袁浩然, 史月月, 张兴庆(1770)

A²/O 短程硝化耦合厌氧氨氧化系统构建与脱氮特性 刘小钗, 荣懿, 汶丽杰, 李党勇, 金鹏康(1779)

基于甲烷氧化菌的城镇污水厂尾水极限脱氮系统构建及机制 杨娅男, 李彦澄, 李江, 吴攀, 杨钊, 向福亮(1787)

HRT 对 CSTR 亚硝化颗粒污泥性能影响 王建芳, 齐泽坤, 钱飞跃, 刘文如, 张俊, 王伟, 沈聪(1794)

低基质颗粒污泥反应器中亚硝化的实现过程及其污泥变化特征 朱琳, 程诚, 宋家俊, 郭凯成, 汪倩, 刘文如, 沈耀良(1801)

不同 HRT 下污水中有机物在 ABR 中的转化过程及污泥形态特征 程诚, 朱琳, 郭凯成, 汪倩, 宋家俊, 刘文如, 沈耀良(1808)

投加颗粒活性炭和二氧化锰对剩余污泥厌氧消化的影响 杨波, 贾丽娟, 徐辉, 李方, 刘艳彪(1816)

中国 193 个城市规划区土壤微量元素污染与健康风险
..... 李括, 彭敏, 杨峥, 杨柯, 刘飞, 赵传冬, 成晓梦, 马宏宏, 郭飞, 唐世琪, 刘应汉, 成杭新(1825)

基于随机森林评价的兰州市主城区校园地表灰尘重金属污染 胡梦瑶, 王佳, 张亚云, 李春艳, 李娜娜(1838)

扬州市不同功能区表层土壤中多环芳烃的含量、来源及其生态风险 姚成, 倪进治, 刘瑞, 杨柳明, 陈卫锋, 魏然(1847)

桂西南土壤镉地质异常区水稻种植安全性评估 陈同斌, 庞瑞, 王佛鹏, 周浪, 宋波(1855)

重庆市主要农耕地土壤 Cd 生物有效性及影响因素 王锐, 胡小兰, 张永文, 余飞, 朱海山, 李瑜(1864)

棉秆炭对碱性水稻土壤-水稻中镉迁移转化的阻控作用 刘师豆, 朱新萍, 韩耀光, 赵一, 金航, 贾宏涛(1871)

连续 4 a 施有机肥降低紫泥田镉活性与稻米镉含量 薛毅, 尹泽润, 盛浩, 马颖榴, 周清, 宋达清, 张杨珠(1880)

纳米氢氧化镁对不同类型土壤镉形态的影响 邓继宝, 张春来, 徐卫红(1888)

矿业废弃地复垦土壤-作物晒吸收特征及其对重金属拮抗效应 尹炳, 汪建飞, 师胜, 卜中原, 霍天满, 张世文(1904)

不同生物炭对酸性农田土壤性质和作物产量的动态影响 杨彩迪, 宗玉统, 卢升高(1914)

化肥减量有机替代对紫色土旱坡地土壤氮磷养分及作物产量的影响 朱浩宇, 高明, 龙翼, 徐国鑫, 王富华, 王子芳(1921)

紫色土旱坡地氮流失通量对减肥施肥秸秆的响应 熊子怡, 王子芳, 龙翼, 严冬春, 徐国鑫, 高明(1930)

浒苔生物炭对滨海盐碱土壤改良的效果及途径 吴丹, 孙萍, 路鹏展, 陈友媛, 郭嘉梦, 刘明, 王磊, 张彩杰(1941)

极端干旱区咸水灌溉人工防护林土壤可溶性碳的垂直分布及其影响因素 孟天歌, 吴路遥, 张少磊, 徐燕莹, 李雄, 张建国(1950)

红松人工林土壤酶活性与化学性质对氮添加的响应 吕来新, 宋蕾, 刘志理, 张金波, 金光泽(1960)

稻田土壤 N₂O 消纳能力及 nosZ-I 型功能种群应答机制 郭俊丽, 田美洁, 葛体达, 魏文学, 王光军, 孙志龙, 刘毅(1968)

京津冀电子废弃物回收利用潜力预测及环境效益评估 陈盼, 施晓清(1976)

中国城市工业化发展与 PM_{2.5} 的关系: 兼论 EKC 曲线形成的内在机制 李雅男, 丁振民, 邓元杰, 侯孟阳, 姚顺波(1987)

《环境科学》征订启事(1618) 《环境科学》征稿简则(1635) 信息(1724, 1769, 1800)

中国城市工业化发展与 PM_{2.5} 的关系:兼论 EKC 曲线形成的内在机制

李雅男, 丁振民, 邓元杰, 侯孟阳, 姚顺波*

(西北农林科技大学经济管理学院, 资源经济与环境管理中心, 杨凌 712100)

摘要: 选取 2000、2005、2010 及 2015 年 4 期的中国 255 个地级及以上城市数据, 构建空间杜宾模型, 研究中国工业化对 PM_{2.5} 浓度影响; 同时引入以林草覆盖度为核心的环境治理工具, 探讨 EKC 曲线的内在形成机制. 结果表明: ① 工业化对 PM_{2.5} 浓度的影响呈现显著的倒“U”型, EKC 假说得到验证. ② EKC 曲线的形成是外部因素作用的结果, 并非经济增长内生机制所导致的, 林草覆盖度在工业化发展与 PM_{2.5} 浓度的关系中起负向调节作用, 即 EKC 的倒 U 型结构并非是经济增长自动调节, 而是由于以林草覆盖度为主的环境治理工具作用的结果. ③ 工业化发展对 PM_{2.5} 浓度的影响存在空间溢出效应, 城市工业化发展不仅对本地区 PM_{2.5} 浓度有影响, 对邻近地区 PM_{2.5} 浓度也有影响.

关键词: PM_{2.5}; 工业化; 林草覆盖度; 调节作用; 环境库兹涅茨曲线(EKC)

中图分类号: X22 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)04-1987-10 DOI: 10.13227/j.hjkk.201910042

Relationship Between Urban Industrialization and PM_{2.5} Concentration in China and the Internal Mechanism of EKC

LI Ya-nan, DING Zhen-min, DENG Yuan-jie, HOU Meng-yang, YAO Shun-bo*

(Resource Economy and Environmental Management Center, College of Economics and Management, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Based on the panel data of 255 cities in China, this study built a spatial Durbin model to study the impact of China's industrialization on the PM_{2.5} pollution level. Meanwhile, an environmental governance tool characterized by forest and grass coverage was introduced to explore the internal mechanism and exogenous driving force of EKC. The results show that ① the relationship between industrialization and PM_{2.5} concentration is obviously an inverted u-shaped, and the EKC hypothesis was verified. ② The formation of the EKC curve was caused by the external factors and not the endogenous mechanism of economic growth. Forest-grass coverage plays a regulating role in the relationship between industrialization and PM_{2.5} pollution level, namely the inverted u-shaped structure of environmental EKC results from environmental governance tool with forest and grass cover rather than the automatic adjustment of economic growth. ③ The influence of industrialization on PM_{2.5} concentration has a spatial spillover effect. Urban industrialization not only affects the PM_{2.5} concentration in local regions but also its neighboring region.

Key words: PM_{2.5}; industrialization; forest-grass coverage; regulating effect; Environmental Kuznets Curve(EKC)

改革开放 40 多年来,快速工业化在实现经济高速增长的同时,加剧了生态环境的破坏与恶化,特别是霾问题日趋凸显,以 PM_{2.5} (可入肺颗粒物)为核心污染物的霾长时间和大范围在我国多个区域集中连片暴发,对人体健康和大气环境质量造成了严重威胁. 国务院颁布了《打赢蓝天保卫战三年行动计划》(国发[2018]22号),着力解决突出环境问题,要求进一步实施“退工还林还草”和大力提高城市建成区绿化覆盖率以改善空气质量.

工业化是影响城市空气质量的主要因素,原因在于工业化过程中第二产业比重变化,其排放的大量废气加剧了空气 PM_{2.5} 污染^[1,2]. Li 等^[3]运用面板格兰杰因果检验方法证实第二产业比重的增加会持续加剧 PM_{2.5} 污染水平. Jiang 等^[4]用全国中低收入城市的社会经济数据,通过结构方程得出工业化对空气质量的影响模式为正向线性. 杨昆等^[5]以中国

71 个城市 454 个监测点 2013 年的截面 PM_{2.5} 数据,选取人口等社会经济数据,运用空间滞后模型(SAR)证实 PM_{2.5} 浓度与第二产值比例的平方成正比. 回莹等^[6]采取主成分分析方法和区位商方法,得出河北省霾污染综合指数和河北省产业结构间呈倒“U”型曲线. 卢华等^[7]通过选取 2003~2011 年省会城市的社会经济数据,引用空间计量模型证明空间和非空间状态下“经济-环境”关系轨迹均呈倒“N”型. 由此可见,现有研究对工业化发展与 PM_{2.5} 浓度间的关系尚未达成一致. 而大量的研究已表明,气象要素在空气污染中扮演重要角色^[8-10],包括气

收稿日期: 2019-10-09; 修订日期: 2019-11-28

基金项目: 林业公益性行业科研专项(201504424); 国家自然科学基金项目(71473195); 教育部人文社会科学重点研究基地基金项目(14JJD790031)

作者简介: 李雅男(1992~),女,硕士研究生,主要研究方向为资源经济与环境管理, E-mail: 15191570687@163.com

* 通信作者, E-mail: yaoshunbo@163.com

温^[11]、降水^[12]和风速^[13,14]等对大气污染有重要的影响.另外,植被覆盖等^[15]自然环境因素对大气污染物的扩散也有着显著负向影响作用.即在不考虑自然因素的条件下考察工业化对 PM_{2.5}浓度的影响会发生估计结果的高估;其次,PM_{2.5}作为一种扩散性较强的污染物,建立在样本之间相互独立假设的一般计量模型会造成内生性偏误.这两种因素的存在导致现有的研究难以全面考察工业化与 PM_{2.5}浓度之间的真实关系,以致于上述研究结果不尽相同.而目前研究^[16]多集中于局部时空维度,还无法全面把握其形成和运行的相关规律,所以从更长的时间维度和更大的空间维度对 PM_{2.5}进行研究十分必要.在工业化加速过程中,PM_{2.5}浓度与工业化发展究竟有何具体关联仍需要进一步实证检验.

现有研究已把工业化发展与 PM_{2.5}浓度的关系纳入环境库兹涅茨曲线 (Environmental Kuznets Curve, EKC) 理论框架下进行分析^[2,6,17,18].且部分学者^[18,19]认为 EKC 曲线的形成是外部因素作用的结果,而不是经济增长内生机制所导致的,即环境污染问题不能在经济增长过程中自动得到解决.同时,有研究^[20,21]提出严格的生态环境保护政策等是形成 EKC 曲线下降部分的重要原因.但是从实验设计方案来看,多数研究主要通过将更多的控制变量以观察核心变量估计系数的变化.而控制变量的增加只能解决因遗漏变量带来估计系数的有偏性,依然无法证实 EKC 曲线形成是由外部因素作用结果的^[21~23].自 20 世纪 80 年代以来,中国相继实施了退耕还林(草)、天然林保护和三北防护林等生态工程,使中国林草植被有所恢复.近些年,沙尘天气的强度和频度出现了明显下降,生态建设和环境保护取得了积极成效^[24].那么,在工业化的发展进程中,林草覆盖地增加究竟对 PM_{2.5}浓度发挥怎样的作用仍值得进一步探讨.

综上所述,首先本文综合考虑自然环境与社会经济影响因素,以中国 2000、2005、2010 以及 2015 年的 255 个地级及以上城市为研究单元,构建大范围、长时间的面板数据以保证研究结果可靠性与代表性;其次,在描述分析地级及以上城市 PM_{2.5}浓度时空格局演化特征的基础上运用空间计量模型考察工业化发展与 PM_{2.5}浓度之间的关系以解决样本非独立带来的估计偏差;并且引入以林草覆盖度为主要的环境治理工具,探讨 EKC 曲线的内在形成机制,以期降低 PM_{2.5}污染水平提出有效解决方案.

1 材料与方法

1.1 研究方法

1.1.1 空间相关分析

为定量测度临近区域大气污染的空间依赖程度,本文选用经典的全局空间自相关指数 Moran's I 来计算^[25],计算公式为:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}} \quad (1)$$

式中, \bar{x} 为所有 k 个位置 (区域) 观测值的均值; x_i 和 x_j 表示在空间位置 i 和 j 的观测值; W_{ij} 为空间权重矩阵,其设定原则为:

$$W_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{当区域 } i \text{ 与区域 } j \text{ 相邻} \\ 0, & \text{当区域 } i \text{ 与区域 } j \text{ 不相邻} \\ 0, & \text{当 } i = j \end{cases} \quad (2)$$

Moran's I 指数的取值范围为 $[-1, 1]$, 小于 0 表示负相关, 等于 0 表示不相关, 大于 0 表示正相关. 通常采用标准化统计量 Z 值对研究单元空间自相关进行显著性检验, Z 值的计算公式如下:

$$Z = \frac{I - E(I)}{\sqrt{\text{VAR}(I)}} \quad (3)$$

式中, $E(I)$ 表示 I 的均值; $\text{VAR}(I)$ 表示 I 的方差; 当 Z 值为正且显著时, 表明存在正的空间自相关, 也就是说相似的观测值 (高值或低值) 趋于空间集聚; 当 Z 值为负且显著时, 表明存在负的空间自相关, 相似的观测值趋于分散分布; 当 Z 值为 0 时, 观测值呈独立随机分布.

1.1.2 空间计量模型

样本间非独立性带来的内生性问题容易导致回归估计的有偏, 因此本文选取面板空间计量模型以解决内生性问题. 空间计量模型一般有空间滞后模型 (spatial lag model, SLM) 和空间误差模型 (spatial error model, SEM). Lesage 等^[26]在此基础上, 构建了同时包含因变量和解释变量空间滞后项的空间杜宾模型 (spatial durbin model, SDM). 当模型的误差项在空间上相关时, 即为空间误差模型 (SEM); 当被解释变量间的空间依赖性对模型显得非常关键而导致了空间相关时, 即为空间滞后模型 (SLM). 而空间杜宾模型 (SDM) 是空间滞后模型的更一般形式, 同时将因变量的空间滞后和解释变量的空间滞后引入模型, 并能分解出各变量的直接效应与间接效应.

$$Y = \beta X + \rho WY + \theta WX + \mu \quad (4)$$

$$\mu = \lambda W\mu + \varepsilon \quad (5)$$

式中, X 与 Y 分别是空间计量模型的自变量与因变

量, W 是区域间邻接权重矩阵; ρ 表示因变量空间回归系数; β 是自变量的回归系数; λ 表示空间误差回归系数. 当 $\rho \neq 0$ 而 $\theta = 0$ 时, 式(4)为空间滞后模型(SLM); 当 $\lambda \neq 0$ 而 $\rho = 0$ 时, 式(4)为空间误差模型(SEM); 当 $\rho \neq 0$ 和 $\theta \neq 0$ 而 $\lambda = 0$ 时, 式(4)为空间杜宾模型(SDM). 目前国内大多数研究是采用 LM-Lag、Robust LM-Lag(空间滞后稳健性检验)及 LM-Error 和 Robust LM-Error(空间误差稳健性检验)相结合的方式来选择模型.

1.2 变量选取与数据来源

工业化发展对 PM_{2.5} 浓度的影响主要在于第二产业排放的大量废气加剧了 PM_{2.5} 的污染, 本文选取第二产业占 GDP 的比重表征工业化发展水平, 作为核心解释变量^[27]. 同时, 自然条件是 PM_{2.5} 污染集聚、转移与扩散的重要影响因子, 社会经济要素是 PM_{2.5} 污染频发的根本性原因^[28], 因此, 本文将社会经济因素与自然因素变量同时纳入回归模型之中.

气温、降雨和风速影响大气污染物的扩散与沉降, 进而影响 PM_{2.5} 污染水平, 根据相关研究选取年均气温、年均降雨量及年均风速^[1, 6, 7] 自然指标; 煤炭、石油和生物质能源消费^[29]、汽车尾气^[30] 等是大气污染的主要来源, 而经济的发展给环境污染带来双重影响, 在经济发展的初级阶段, 粗放型的增长方式会促进污染, 随着经济的发展, 生产方式的改进、产业结构的调整可能使污染改善^[31], 另外, 人口的集聚^[32] 在一定程度上会对生态环境造成压力, 为使结果更加稳健, 选取能源消费指数、地区 GDP 和人口密度社会经济指标作为控制变量; 其中, 能源消费指数涵盖了日常生活、汽车行驶等的煤炭、石油和生物质等能源类型的消费, 由于 DMSP-OLS 夜间灯光数据与能源消费存在显著的线性相关性, 故利用 DMSP-OLS 数据, 构建能源消费指数来间接表征不同城市的能源消费指数^[1]. 各变量的描述性统计通过 Stata 14.0 计算得到(表 1).

表 1 变量选取及描述性统计¹⁾

Table 1 Variables and descriptive statistics

变量类型	变量名称	变量说明	样本量	均值	最大值	最小值	标准差
因变量	年均 PM _{2.5} 浓度 (PM _{2.5})	遥感数据提取 / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	1 020	40.040	84.461	8.834	16.710
核心变量	工业化水平 (INS)	第二产业占 GDP 比重/%	1 020	47.558	89.750	15.170	11.008
	林草覆盖度 (FGC)	$\frac{\text{林地面积} + \text{草地面积}}{\text{总用地面积}}\%$	1 020	0.438	0.896	0.000	0.264
调节变量	人口密度 (PD)	全市人口密度 / 万人 $\cdot\text{km}^{-2}$	1 020	0.045	0.267	0.002	0.033
	能源消费指数 (EN)	DMSP-OLS 稳定夜间灯光数据	1 020	7.481	57.073	0.262	8.417
控制变量	地区 GDP (GDP)	地区生产总值/亿元	1 020	1 360	25 000	17.930	22 600
	年均风速 (WS)	遥感数据提取 / $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	1 020	20.567	35.011	5.840	4.927
	年均气温 (TEMP)	遥感数据提取 / $^{\circ}\text{C}$	1 020	14.217	26.980	-0.054	5.452
	年均降水量 (RF)	遥感数据提取 / mm	1 020	1 091.805	2 679.600	88.320	566.070
	交互项 (JH)	工业化水平 \times 林草覆盖度	—	—	—	—	—

1) “—”表示文章中没有相关数据, 下同

本文应用的 PM_{2.5} 原始数据来源于哥伦比亚大学社会经济数据和应用中心 (SEDAC) (<https://sedac.ciesin.columbia.edu>) 公布的 2000、2005、2010 以及 2015 年 PM_{2.5} 浓度年均值的遥感数据; 年均气温、年均降水量和年均风速源于中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/site/index.html>), 通过 ArcGIS 10.2 中的克里金插值法 (Kriging) 对降水、气温、风速进行空间插值处理, 从而获得研究区以上指标的空间分布栅格数; 夜间灯光数据来自美国国家海洋和大气管理局 (<https://www.ngdc.noaa.gov/eog/download.htm>) 公布的 DMSP-OLS 稳定夜间灯光数据集, 其中 2015 年夜间灯光数据以 2013 年的灯光数据进行代替^[33]; 林草覆盖数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn/>) 生产的土地利用分类数据, 该数据集的生产是

以各期 Landsat TM、ETM+ 及 OLS 遥感影像为数据源, 通过人工目视解译生成. 并经过实地验证, 误差修正后的土地利用以及类型综合评价精度达到 94.3% 以上, 二级类型分类综合精度达 91.2% 以上^[34~36], 数据空间分辨率为 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$. 此外, 其他社会经济数据人口密度、第二产业占 GDP 比重以及 GDP 等社会经济数据来自文献^[37].

2 地级及以上城市 PM_{2.5} 时空格局演化特征

为刻画中国 PM_{2.5} 浓度变化与污染的空间特征, 本研究以地级及以上城市级行政区划为基本单元, 通过栅格运算详细地统计全国 255 个地级及以上城市单元 2000~2005 年、2005~2010 年与 2010~2015 年 3 个阶段 PM_{2.5} 浓度值的升降情况, 依据 3 个时段的浓度升降变化特征将其划分为 7 种时间序

列类型(表 2 和图 1).

表 2 中国地级及以上城市 $PM_{2.5}$ 浓度时间变化的 7 种类型

Table 2 Seven types of time variations of $PM_{2.5}$ concentration in prefecture-level cities in China

序号	变化类型 ¹⁾	数量	占比/%
1	R-D-D	64	25.10
2	D-D-D	1	0.39
3	D-R-D	8	3.14
4	D-R-R	2	0.78
5	R-D-R	25	9.80
6	R-R-D	88	34.51
7	R-R-R	67	26.27

1) R 表示该时段区域 $PM_{2.5}$ 浓度上升, D 表示该时段区域 $PM_{2.5}$ 浓度下降

2000 ~ 2005 年与 2005 ~ 2010 年两个时间段 $PM_{2.5}$ 污染程度持续上升 (R-R-D 和 R-R-R 类型) 的城市共占总数的 60.78%, 其主要分布在中国的广东省珠三角地区、浙江省南部地区以及中国东北部大部分地区, 并且山西的太原市、四川的成都市以及甘肃的兰州市及其周边均出现 $PM_{2.5}$ 污染持续上升的现象, 其变化与“十一五”期间推进形成与优化主体功能区, 振兴东北地区等老工业基地、促进中部地区崛起发展的区域发展总体战略布局紧密关联. 该时段内 $PM_{2.5}$ 污染加剧是全国大多数地区的总体趋势, 同时也是中国工业化和城市化发展速度最快的时期.

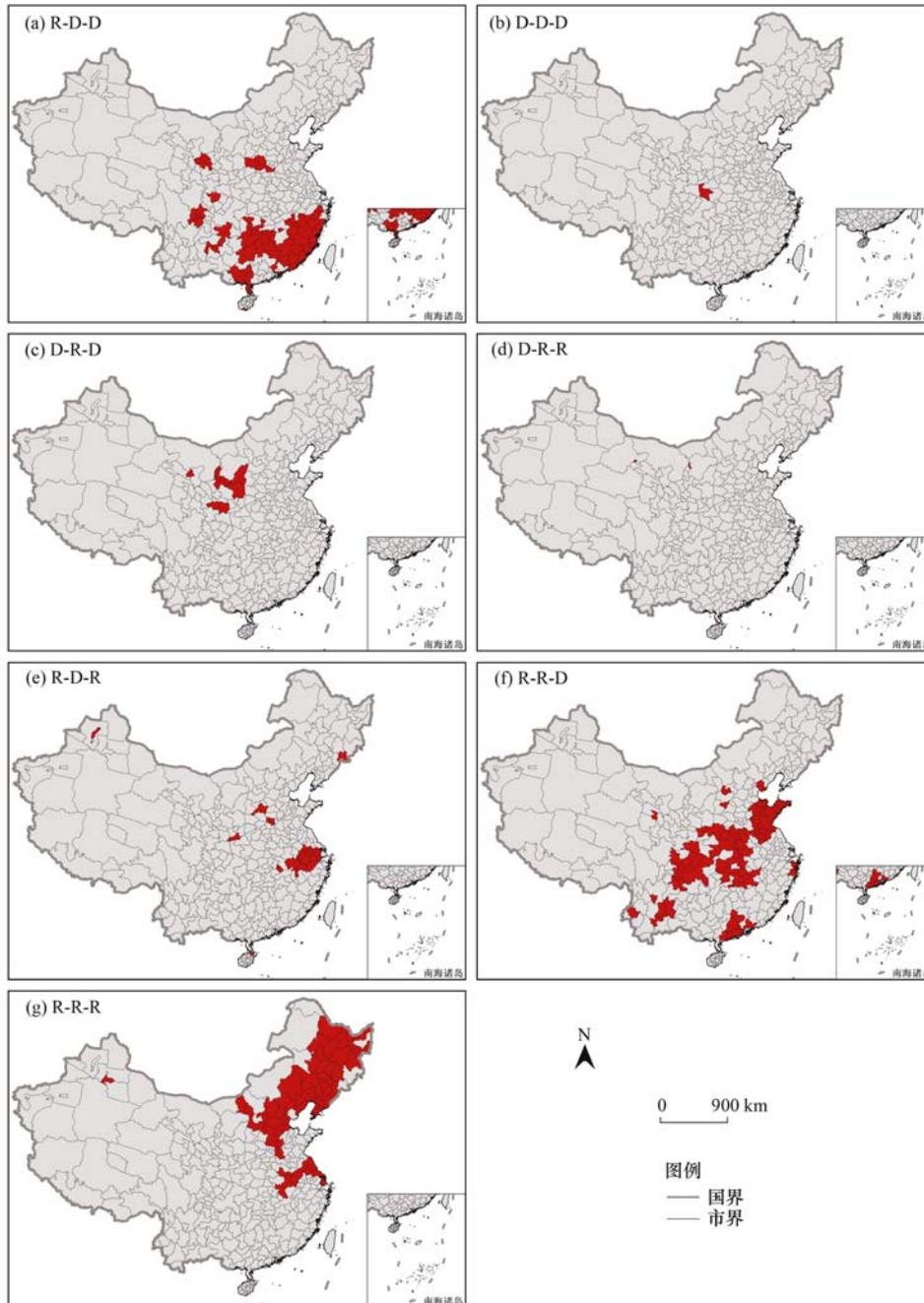


图 1 中国地级及以上城市 $PM_{2.5}$ 浓度 7 种时间序列类型演变趋势

Fig. 1 Evolution trend of seven time series types of $PM_{2.5}$ concentration in cities at prefectural level or above in China

2000~2015 年间 $PM_{2.5}$ 污染先上升后下降 (R-R-D 类型和 R-D-D 类型) 的城市主要分布在我国东南部地区与中部地区, 共占总数的 59.61%。R-D-D 类型主要分布在中国的福建省、广西区北部湾、浙江省南部地区以及湖南省大部分地区; R-R-D 类型主要分布在山东、河南、湖北以及重庆等省(市)的大部分地区, 同时在广东省珠三角地区、陕西省关中平原城市群有零星分布。这与“十一五”、“十二五”期间国家生态文明建设、产业转移(东部向中西部)和东部环保要求提升较相吻合。

2000~2015 年间 $PM_{2.5}$ 污染持续上升 (R-R-R 类型) 的城市个数占总数的 26.27%, 主要分布在中国东北三省、京津冀地区、内蒙古东部以及长江中下游城市群等区域。具有明显空间集聚性。全国范围内 $PM_{2.5}$ 浓度持续呈现下降趋势 (D-D-D 类型) 的城市仅有 1 个(陕西省安康市), 占总数的 0.39%, 进一步证明了 $PM_{2.5}$ 仍是中国大气污染防治的重点与难点。

3 工业化发展与 $PM_{2.5}$ 关系的实证检验

3.1 空间关系检验与模型的选择

为检验城市 $PM_{2.5}$ 浓度及第二产业占 GDP 比重

表 4 基于 LM 的空间计量模型检验¹⁾

Table 4 LM test for spatial econometric models

项目	LM-Lag	Robust LM-Lag	LM-Error	Robust LM-Error
非空间线性模型	920.175 ***	138.147 ***	785.522 ***	3.494 *

1) *** 表示 1% 的显著性水平; * 表示 10% 的显著性水平

基于无空间效应线性模型拒绝了所有原假设, 因此可以同时接受 SLM 模型和 SEM 模型, 根据 Elhorst 的研究^[38], 该情况下通常优先考虑空间杜宾模型 (SDM), 同时, 对模型进行 Hausman 检验后发现 P 值等于 0.001 2, 拒绝原假设, 选取固定效应模型要优于随机效应模型, 为保证结果的稳健性, 本文选取空间杜宾的固定效应模型进行回归。

将工业化发展水平与年均 $PM_{2.5}$ 浓度放入模型中进行检验, 研究在没有林草覆盖度作为调节变量情况下, 工业化水平对 $PM_{2.5}$ 浓度的影响。在检验之前进行了 $PM_{2.5}$ 浓度与工业化发展水平散点图的拟合, 简单了解两者之间关系的走势特征, 由图 2 可得, $PM_{2.5}$ 浓度随着工业化发展水平的提升持续增加, 但二者具体关系仍需进一步检验。

3.2 回归结果分析

本文主要通过空间杜宾模型研究工业化水平对 $PM_{2.5}$ 浓度的影响, 同时探讨 EKC 曲线形成的内在

是否存在空间相关关系, 采用 Moran's I 指数对其空间依赖性和关联性进行检验。2000~2015 年 $PM_{2.5}$ 浓度的 Moran's I 指数为正 (0.782~0.844), 第二产业占 GDP 比重的 Moran's I 指数同样为正 (0.118~0.313), 两变量均在 1% 的显著性水平上通过检验, 表明中国工业化发展水平与年均 $PM_{2.5}$ 浓度存在显著的空间溢出性 (表 3)。

但空间溢出效应可能由 $PM_{2.5}$ 空间滞后相关引起, 也可能由空间残差相关引起。依据 Anselin^[25] 的研究方法对空间面板模型进行 LM 检验, 其检验结果如表 4 所示。

表 3 $PM_{2.5}$ 与第二产业占 GDP 比重的 Moran's I 指数及检验

Table 3 Moran's I index and test of $PM_{2.5}$ and the proportion of secondary industries in GDP

项目	年份	I	Z	P
$PM_{2.5}$	2000	0.782	23.210	0.000
	2005	0.821	24.432	0.000
	2010	0.831	24.644	0.000
	2015	0.844	25.025	0.000
INS	2000	0.284	6.337	0.000
	2005	0.313	6.847	0.000
	2010	0.118	2.687	0.007
	2015	0.205	4.590	0.000

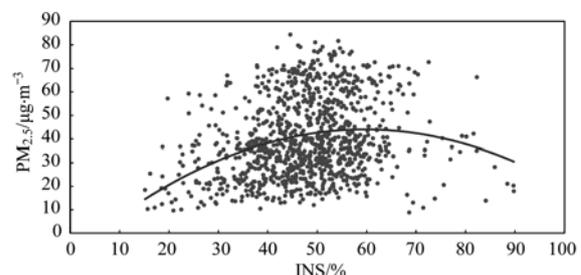


图 2 工业化发展与 $PM_{2.5}$ 浓度散点图

Fig. 2 Scatter diagram of industrial development and $PM_{2.5}$ concentration

机制 (表 5)。模型 1 为 OLS 模型作为 SDM 模型的参照; 模型 2 利用 SDM 模型考察工业化水平对 $PM_{2.5}$ 浓度的线性影响; 模型 3 引入工业化发展水平的平方项以检验在空间杜宾模型下是否存在 EKC 效应; 模型 4 引入林草覆盖度为环境治理工具的替代变量, 考察林草覆盖度在工业化发展水平与 $PM_{2.5}$ 浓度关系之间的调节效应, 以验证 EKC 曲线形成的内在机制。

表 5 空间计量模型估计与检验结果¹⁾

Table 5 Estimation and test results of spatial econometric model

变量	模型 1:OLS (无交互项)	模型 2:SDM (无交互项与平方项)	模型 3:SDM (引入平方项)	模型 4:SDM (引入调节变量)	模型 5:SDM (剔除直辖市)	模型 6:SDM (增加控制变量)
INS	0.351*** (0.05)	0.046(0.03)	0.551*** (0.11)	0.050* (0.03)	0.082*** (0.02)	0.053* (0.03)
JH	—	—	—	-0.373*** (0.10)	-0.203** (0.09)	-0.385*** (0.10)
INS ²	—	—	-0.005*** (0.00)	—	—	—
PD	-0.002(0.00)	-0.001(0.00)	-0.001(0.00)	-0.001(0.00)	-0.004* (0.002)	-0.001(0.00)
EN	1.141*** (0.14)	0.290*** (0.08)	0.330*** (0.08)	0.279*** (0.08)	0.363*** (0.06)	0.251*** (0.08)
GDP	0.085*** (0.03)	0.041*** (0.01)	0.047*** (0.01)	0.043*** (0.01)	0.022(0.02)	0.042*** (0.01)
WS	-0.760*** (0.09)	-0.173** (0.09)	-0.127(0.09)	-0.177** (0.09)	-0.202** (0.09)	-0.161* (0.09)
FGC	-133.3** (60.75)	12.360(29.78)	25.500(29.56)	10.540(29.61)	-22.420(30.53)	-12.060(15.47)
TEMP	1.484*** (0.34)	0.944*** (0.27)	0.925*** (0.27)	0.900*** (0.27)	0.521** (0.243)	0.889*** (0.270)
RF	-0.000(0.00)	-0.002* (0.00)	-0.002* (0.00)	-0.001(0.00)	0.001(0.00)	-0.001(0.00)
QY	—	—	—	—	—	0.331** (0.16)
W × INS	—	0.097** (0.04)	-0.173(0.18)	0.085** (0.04)	0.568*** (0.22)	0.106*** (0.04)
W × JH	—	—	—	0.152(0.16)	-1.501* (0.91)	0.108(0.16)
W × INS ²	—	—	0.003(0.00)	—	—	—
W × PD	—	-0.002(0.00)	-0.002(0.00)	-0.002(0.00)	-0.032(0.03)	-0.003(0.00)
W × EN	—	0.073(0.12)	0.023(0.12)	0.069(0.12)	0.175(0.67)	0.041(0.12)
W × GDP	—	-0.080(0.02)	-0.018(0.02)	-0.066(0.02)	0.028(0.18)	-0.111(0.02)
W × WS	—	-0.238** (0.12)	-0.286** (0.12)	-0.215* (0.12)	-1.010** (0.50)	-0.289** (0.12)
W × FGC	—	-77.130* (40.60)	-90.740** (40.50)	-69.730* (40.41)	-441.2(395.3)	-91.59*** (22.87)
W × TEMP	—	-0.481(0.35)	-0.473(0.34)	-0.477(0.35)	1.090(1.37)	-0.400(0.35)
W × RF	—	0.003* (0.00)	0.003* (0.00)	0.002(0.00)	0.002(0.01)	0.003* (0.02)
W × QY	—	—	—	—	—	-0.428* (0.26)
Constant	66.140** (26.52)	—	—	—	—	—
ρ	—	0.742*** (0.02)	0.748*** (0.02)	0.742*** (0.02)	0.926*** (0.01)	0.726*** (0.02)
Sigma ²	—	16.890*** (0.78)	16.470*** (0.76)	16.640*** (0.76)	4.213*** (0.20)	16.410*** (0.75)
R ²	0.319	0.445	0.447	0.456	0.454	0.503
LogL	—	-2 974.354	-2 963.150	-2 966.831	-2 320.703	-2 954.710

1) 数值表示系数(标准误);***表示1%的显著性水平,**表示5%的显著性水平,*表示10%的显著性水平; ρ 表示空间自相关系数;Sigma²表示随机干扰项的方差;R²表示拟合优度系数;LogL表示对数似然函数值

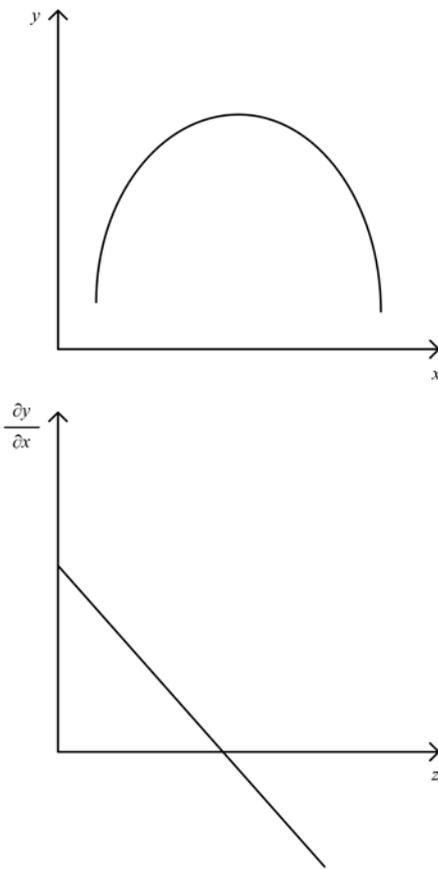
首先,考虑工业化发展对PM_{2.5}浓度的线性影响.在OLS模型中工业化发展对PM_{2.5}浓度具有显著的正向影响,并且达到显著性1%水平(模型1).考虑到被解释变量PM_{2.5}浓度与工业化发展均存在显著的空间依赖性,可能会导致普通OLS回归估计结果存在偏误.为此,引入空间杜宾模型(SDM),如模型2.在SDM模型中,其空间自相关系数 ρ 的估计值为0.742,且通过了1%显著性水平的检验,意味着本地区PM_{2.5}浓度的提升对邻近地区有显著的辐射扩散效应,也再次证明了PM_{2.5}浓度在中国各城市之间存在显著的正向空间溢出效应.然而从核心变量来看,工业化发展对PM_{2.5}浓度的影响不显著.因此,推测可能是由于工业化发展与PM_{2.5}浓度之间并非简单线性关系.

其次,检验工业化发展对PM_{2.5}浓度的非线性影响.根据EKC理论,在SDM模型中引入工业化发展的平方项(INS²),如模型3.相比模型2引入工业化发展的平方项之后,模型的拟合优度系数R²得到提高;并且工业化发展一次项系数与平方项系数均通

过1%的显著性水平检验.表明工业化发展与PM_{2.5}浓度之间呈明显倒“U”型关系,即工业化发展在一定区间内增加会对PM_{2.5}浓度产生正向影响,而超过阈值之后工业化发展对PM_{2.5}浓度产生负向影响,符合EKC的一般假说.但是随着经济的发展,经济能力真的可以自动调节环境污染物的排放?EKC曲线是否仅是环境与经济发展的表现形式,而不是内在作用机制?

然后,考察EKC曲线形成的内在形成机制.引入以林草覆盖度与工业化发展的交互项以检验林草覆盖度对工业化发展与PM_{2.5}浓度的关系是否存在调节作用,如模型4.从变量系数看,多数变量均通过显著性检验,并且模型拟合优度进一步提升.工业化发展对PM_{2.5}浓度具有显著正向影响,林草覆盖度与工业化发展的交互项(JH)也在1%的显著性水平上通过了检验.这表明林草覆盖变量是工业化发展对PM_{2.5}浓度影响的边际效应的减函数,以林草覆盖度为主要的环境治理工具对工业化发展的边际贡献具有显著的负项调节作用,即随着林草覆盖度的增

加,工业化发展对 PM_{2.5} 浓度的边际作用在不断减弱.因此,EKC 曲线仅是环境与经济发展的表现形式,而深层次的内在作用机制来源于环境治理工具的运用(图 3).



y 污染物排放量, x 经济发展水平, z 环境治理

图 3 EKC 的外在表现形式与内在驱动机制

Fig. 3 External manifestation and internal driving mechanism of EKC

另外,根据极值求解原理可知,当林草覆盖度为 66% 时,工业化发展对本地区 PM_{2.5} 浓度的边际贡献为 0. 而由遥感影像数据统计可得中国 2015 年林草覆盖度仅为 55%,表明还需通过生态修复工程的实施进一步提高林草覆盖度才能有效地抑制 PM_{2.5} 浓度增加.

最后,进一步考察各变量的空间溢出效应.空间杜宾模型可以将总空间溢出效应分解为直接效应和间接效应(表 6).直接效应代表城市各解释变量对本地区 PM_{2.5} 浓度的影响,间接效应表示城市各解释变量对邻近城市 PM_{2.5} 浓度的影响.

核心变量与调节变量的直接效应与间接效应.工业化发展(INS)直接效应与间接效应系数均为正,并且在 1% 显著水平上通过检验;表明城市工业化发展的提高不仅对本区域 PM_{2.5} 浓度的提高有直接的贡献,并且对邻近城市也有辐射扩散效应.林草覆盖度与工业化发展的交互项(JH)的间接效应系

数虽然为负,但未通过显著性检验,说明林草覆盖度对工业化发展的边际贡献的调节作用不存在空间溢出效应,即本城市的林草覆盖度的提高对邻近城市 PM_{2.5} 浓度没有显著缓解的作用.而交互项(JH)直接效应系数为负,且在 1% 水平上显著,表明城市林草覆盖度的提高可有效地降低当地工业化发展对本城市 PM_{2.5} 浓度的边际贡献.

表 6 空间杜宾模型的直接效应和间接效应分解¹⁾

Table 6 Direct and indirect effect decomposition of SDM

项目	直接效应	间接效应	总效应
INS	0.089 *** (0.03)	0.424 *** (0.12)	0.513 *** (0.13)
JH	-0.409 *** (0.12)	-0.418 (0.55)	-0.827 (0.63)
WS	-0.282 *** (0.09)	-1.180 *** (0.32)	-1.462 *** (0.35)
TEMP	0.960 *** (0.26)	0.754 (0.84)	1.714 * (0.91)
EN	0.374 *** (0.08)	0.962 *** (0.34)	1.336 *** (0.37)
GDP	0.496 *** (0.02)	0.081 (0.075)	0.013 (0.086)
FGC	-7.763 (34.71)	-221.100 (140.10)	-228.900 (163.30)
PD	-0.002 (0.00)	-0.012 (0.01)	-0.013 (0.01)
RF	-0.001 (0.00)	0.005 (0.01)	0.004 (0.01)

1) 数值表示系数(标准误);***表示 1% 的显著性水平,*表示 10% 的显著性水平

控制变量的直接效应和间接效应.风速(WS)不仅对本城市的 PM_{2.5} 浓度,而且对邻近城市的 PM_{2.5} 浓度也有负向削减的作用,原因是风速对大气颗粒污染物有很好的稀释与消散作用.而气温(TEMP)仅存在直接效应,且不存在空间溢出效应;气温越高,本城市的 PM_{2.5} 污染越严重.此外,能源消费指数(EN)的直接和间接效应系数显著为正,表明能源消费的提高对本城市和邻近城市的 PM_{2.5} 浓度均具有显著地促增效应.城市 GDP 对当地 PM_{2.5} 浓度具有显著直接影响,没有溢出效应.

本研究中降雨(RF)对 PM_{2.5} 浓度影响并不显著,而降水在“日”尺度上对 PM_{2.5} 浓度有一定影响^[39].在不同时间尺度(日、月、年)和不同空间尺度(街区、城市、区域)下,降水对于大气污染的影响机理会有所不同^[40],在分析大气污染驱动因素时应充分考虑时空的尺度效应.人口密度(PD)对 PM_{2.5} 浓度呈不显著的影响,可能是因为使用城市人口密度未准确捕捉到城市结构导致的 PM_{2.5} 污染加重效应^[41].

3.3 稳健性检验

为了验证实证结果具有稳健性,本研究从样本选择和控制变量两个层面对结论进行了稳健性检验:①考虑到 4 个直辖市受中央政府直接管辖,行政地位特殊,为了排除行政因素对基准回归结果的干扰,本文将北京、上海、天津和重庆等 4 个直辖市从全样本中剔除后再回归^[41],结果见表 5 中模型 5,变量系

数的稳健性检验结果与原模型估计结果显著性、符号方向基本一致,且系数差距较小,进一步说明以林草覆盖度为主要的环境治理工具对工业化发展的边际贡献具有显著的负项调节作用,结果相对稳健且符合理论分析.②在上文的SDM回归模型中,本文仅控制了气温、降水、风速、林草覆盖度、能源消费指数、地区GDP与人口密度的影响,但考虑到遗漏变量会对估计结果造成影响,而相关研究已经证明气压与PM_{2.5}浓度间的相关性^[42~44],本文在原有控制变量的基础上,再加入年均气压(QY)这一影响PM_{2.5}浓度的关键气象条件以检验估计结果的稳健性,从表5中的模型6可以看出,在增加控制变量之后,工业化发展对PM_{2.5}浓度具有显著正向影响,林草覆盖度与工业化的交互项(JH)也在1%的显著性水平上通过了检验,负向调节效应依然存在且符合理论分析,以上结论均与基准回归模型的估计结果基本一致,再次证明了本文研究结论的稳健性.

除此之外,原回归模型在新增加控制变量后,原控制变量的影响方向和显著性均与基准回归模型一致,且研究结果显示年均气压(QY)对本城市的PM_{2.5}浓度呈正向影响,且具有空间溢出效应,即对邻近城市的PM_{2.5}浓度有负向削减的作用,这与马小倩等^[28]的研究结果极其相似.

4 结论

(1)工业化发展对PM_{2.5}浓度的影响呈明显倒“U”型,在一定区间内,PM_{2.5}浓度随工业化的不断发展而增加,其边际效应为正,超过阈值之后,PM_{2.5}浓度会随工业化的不断发展而减少,边际效应为负,符合EKC假说.在一定程度上也表明,未来一段时间内各城市的PM_{2.5}污染与工业化发展将处于或逐渐进入负相关阶段.

(2)EKC曲线的形成是外部因素作用的结果,并非经济增长内生机制所导致的.通过引入以林草覆盖变量为主的环境治理工具以此作为调节变量,发现林草覆盖变量是工业化发展对PM_{2.5}浓度影响的边际效应的减函数,验证了林草覆盖程度在工业化发展与PM_{2.5}浓度的EKC形成机制中起负向调节作用,间接显示了林草覆盖度作为环境治理的重要抓手在缓解环境恶化创造外生驱动条件上的重要价值.同时通过空间杜宾模型计算得到我国林草覆盖度为66%时,城市工业化发展对本地区PM_{2.5}浓度的边际贡献为0,此时可以有效地解决因工业化发展带来的PM_{2.5}浓度的增加,而由遥感影像数据(1km×1km)统计可得中国2015年林草覆盖度仅为55%,也意味着中国土地资源进一步充分合理利

用的空间仍然存在,我国的生态修复工程需进一步深入实施.

(3)工业化发展对PM_{2.5}浓度的影响存在空间溢出效应,城市工业化发展不仅对本地区PM_{2.5}浓度有影响,对邻近地区PM_{2.5}浓度也有影响.各城市在发展第二产业的同时应重视制造业集聚的空间溢出作用,从而打破地区间制造业封锁及利益藩篱,强化扩散效应,辐射带动周边区域的发展,缩小邻近市域间发展差距.

参考文献:

- [1] 刘海猛,方创琳,黄解军,等.京津冀城市群大气污染的空间特征与影响因素解析[J].地理学报,2018,73(1):177-191.
Liu H M, Fang C L, Huang J J, et al. The spatial-temporal characteristics and influencing factors of air pollution in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration [J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(1): 177-191.
- [2] 郭爱君,胡安军.中国城市雾霾的影响因素研究[J].统计与决策,2018,34(19):105-108.
Guo A J, Hu A J. Research on influencing factors of urban haze in China [J]. Statistics and Decision, 2018, 34(19): 105-108.
- [3] Li G D, Fang C L, Wang S J, et al. The effect of economic growth, urbanization, and industrialization on fine particulate matter (PM_{2.5}) concentrations in China [J]. Environmental Science & Technology, 2016, 50(21): 11452-11459.
- [4] Jiang P, Yang J, Huang C H, et al. The contribution of socioeconomic factors to PM_{2.5} pollution in urban China [J]. Environmental Pollution, 2018, 233: 977-985.
- [5] 杨昆,杨玉莲,朱彦辉,等.中国PM_{2.5}污染与社会经济的空间关系及成因[J].地理研究,2016,35(6):1051-1060.
Yang K, Yang Y L, Zhu Y H, et al. Social and economic drivers of PM_{2.5} and their spatial relationship in China [J]. Geographical Research, 2016, 35(6): 1051-1060.
- [6] 回莹,戴宏伟.河北省产业结构对雾霾天气影响的实证研究[J].经济与管理,2017,31(3):87-92.
Hui Y, Dai H W. Empirical analysis on Impact of Hebei province industrial structure on fog pollution [J]. Economy and Management, 2017, 31(3): 87-92.
- [7] 卢华,孙华臣.雾霾污染的空间特征及其与经济成长的关联效应[J].福建论坛(人文社会科学版),2015,(9):44-51.
- [8] 徐冉,张恒德,杨孝文,等.北京地区秋冬季大气污染特征及成因分析[J].环境科学,2019,40(8):3405-3414.
Xu R, Zhang H D, Yang X W, et al. Concentration characteristics of PM_{2.5} and the causes of heavy air pollution events in Beijing during autumn and winter [J]. Environmental Science, 2019, 40(8): 3405-3414.
- [9] 赵建平,姚天雨,王明虎,等.中国雾霾天气成因及防治对策的系统思考[J].系统科学学报,2018,26(3):102-107.
Zhao J P, Yao T Y, Wang M H, et al. Systems thinking on the cause and responses of the haze weather in China [J]. Chinese Journal of Systems Science, 2018, 26(3): 102-107.
- [10] 江琪,王飞,张恒德,等.北京市PM_{2.5}和反应性气体浓度的变化特征及其与气象条件的关系[J].中国环境科学,2017,37(3):829-837.
Jiang Q, Wang F, Zhang H D, et al. Analysis of temporal variation characteristics and meteorological conditions of reactive gas and PM_{2.5} in Beijing [J]. China Environmental Science, 2017, 37(3): 829-837.

- [11] Duo B, Cui L L, Wang Z Z, *et al.* Observations of atmospheric pollutants at Lhasa during 2014-2015: pollution status and the influence of meteorological factors[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2018, **63**: 28-42.
- [12] Xie C K, Yan L B, Liang A Z, *et al.* Understanding the washoff processes of PM_{2.5} from leaf surfaces during rainfall events[J]. *Atmospheric Environment*, 2019, **214**: 116844, doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.116844.
- [13] Wang X Y, Wang K C, Su L Y. Contribution of atmospheric diffusion conditions to the recent improvement in air quality in China [J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**, doi: 10.1038/srep36404.
- [14] Zhang Y J. Dynamic effect analysis of meteorological conditions on air pollution: a case study from Beijing[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **684**: 178-185.
- [15] Zheng Y, Li S, Zou C S, *et al.* Analysis of PM_{2.5} concentrations in Heilongjiang province associated with forest cover and other factors[J]. *Journal of Forestry Research*, 2019, **30**(1): 269-276.
- [16] 李光勤, 秦佳虹, 何仁伟. 中国大气 PM_{2.5} 污染演变及其影响因素[J]. *经济地理*, 2018, **38**(8): 11-18.
Li G Q, Qin J H, He R W. Spatial-temporal evolution and influencing factors of China's PM_{2.5} pollution [J]. *Economic Geography*, 2018, **38**(8): 11-18.
- [17] 刘华军, 裴延峰. 我国雾霾污染的环境库兹涅茨曲线检验[J]. *统计研究*, 2017, **34**(3): 45-54.
Liu H J, Pei Y F. An empirical test of the environmental Kuznets curve of China's haze pollution[J]. *Statistical Research*, 2017, **34**(3): 45-54.
- [18] 陈向阳. 环境库兹涅茨曲线的理论与实证研究[J]. *中国经济问题*, 2015, **1**(3): 51-62.
Chen X Y. A theoretical and experimental research of the environmental Kuznets curve [J]. *China Economic Studies*, 2015, **1**(3): 51-62.
- [19] 杨林, 高宏霞. 经济增长是否能自动解决环境问题--倒 U 型环境库兹涅茨曲线是内生机制结果还是外部控制结果[J]. *中国人口·资源与环境*, 2012, **22**(8): 160-165.
Yang L, Gao H X. Whether economic growth will automatically solve the environmental problems? —inverted u-shaped environmental kuznets curve is the result of endogenous mechanisms or external control results [J]. *China Population Resources and Environment*, 2012, **22**(8): 160-165.
- [20] 李佳佳, 罗能生. 制度安排对中国环境库兹涅茨曲线的影响研究[J]. *管理学报*, 2017, **14**(1): 100-110.
Li J J, Luo N S. The influence of institutional arrangement to environmental kuznets curve for China[J]. *Chinese Journal of Management*, 2017, **14**(1): 100-110.
- [21] 张华明, 范映君, 高文静, 等. 环境规制促进环境质量与经济协调发展实证研究[J]. *宏观经济研究*, 2017, (7): 135-148.
- [22] 周国富, 李时兴. 偏好、技术与环境质量——环境库兹涅茨曲线的形成机制与实证检验[J]. *南方经济*, 2012, **30**(6): 85-95.
Zhou G F, Li S X. Preference, technology and environmental quality—the formation mechanism and empirical test of the environmental kuznets curve [J]. *South China Journal of Economics*, 2012, **30**(6): 85-95.
- [23] 孙英杰, 林春. 试论环境规制与中国经济增长质量提升--基于环境库兹涅茨倒 U 型曲线[J]. *上海经济研究*, 2018, (3): 84-94.
Sun Y J, Lin C. Study on the relationship between environmental regulation and the quality of China's economic growth—a perspective based on environmental Kuznets Curve[J]. *Shanghai Economic Review*, 2018, (3): 84-94.
- [24] Bryan B A, Gao L, Ye Y Q, *et al.* China's response to a national land-system sustainability emergency [J]. *Nature*, 2018, **559**(7713): 193-204.
- [25] Anselin L. Spatial econometrics: methods and models [J]. *Economic Geography*, 1989, **65**(2): 160-162.
- [26] LeSage J P, Pace R K. Introduction to spatial econometrics[M]. New York: Chapman and Hall, CRC, 2009.
- [27] 刘遥, 陈子韬, 吴建南. 中国城市雾霾的形成与治理: 从分析框架到实践创新[J]. *城市发展研究*, 2019, **26**(5): 86-93.
Liu Y, Chen Z T, Wu J N. Formation and governance of urban haze in China: from analysis framework to practical innovation [J]. *Urban Development Studies*, 2019, **26**(5): 86-93.
- [28] 马晓倩, 刘征, 赵旭阳, 等. 京津冀雾霾时空分布特征及其相关性研究[J]. *地域研究与开发*, 2016, **35**(2): 134-138.
Ma X Q, Liu Z, Zhao X Y, *et al.* The spatial and temporal variation of haze and its relativity in the Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. *Areal Research and Development*, 2016, **35**(2): 134-138.
- [29] 王彤, 华阳, 许庆成, 等. 京津冀郊区站点秋冬季大气 PM_{2.5} 来源解析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(3): 1035-1042.
Wang T, Hua Y, Xu Q C, *et al.* Source apportionment of PM_{2.5} in suburban area of Beijing-Tianjin-Hebei region in autumn and Winter[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(3): 1035-1042.
- [30] 段杰雄, 翟卫欣, 程承旗, 等. 中国 PM_{2.5} 污染空间分布的社会经济影响因素分析[J]. *环境科学*, 2018, **39**(5): 2498-2504.
Duan J X, Zhai W X, Cheng C Q, *et al.* Socio-economic factors influencing the spatial distribution of PM_{2.5} concentrations in China: an exploratory analysis [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(5): 2498-2504.
- [31] 徐娟, 祁毓. 经济增长、环境管制和雾霾污染关系的实证[J]. *统计与决策*, 2019, **35**(19): 140-144.
- [32] 王桂林, 张炜. 中国城市扩张及空间特征变化对 PM_{2.5} 污染的影响[J]. *环境科学*, 2019, **40**(8): 3447-3456.
Wang G L, Zhang W. Effects of urban expansion and changes in urban characteristics on PM_{2.5} pollution in China [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(8): 3447-3456.
- [33] 吴健生, 牛妍, 彭建, 等. 基于 DMSP/OLS 夜间灯光数据的 1995-2009 年中国地级市能源消费动态 [J]. *地理研究*, 2014, **33**(4): 625-634.
Wu J S, Niu Y, Peng J, *et al.* Research on energy consumption dynamic among prefecture-level cities in China based on DMSP/OLS nighttime Light[J]. *Geographical Research*, 2014, **33**(4): 625-634.
- [34] 刘纪远, 宁佳, 匡文慧, 等. 2010-2015 年中国土地利用变化的时空格局与新特征 [J]. *地理学报*, 2018, **73**(5): 789-802.
Liu J Y, Ning J, Kuang W H, *et al.* Spatio-temporal patterns and characteristics of land-use change in China during 2010-2015 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, **73**(5): 789-802.
- [35] 刘纪远, 匡文慧, 张增祥, 等. 20 世纪 80 年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局 [J]. *地理学报*, 2014, **69**(1): 3-14.
Liu J Y, Kuang W H, Zhang Z X, *et al.* Spatiotemporal characteristics, patterns and causes of land use changes in China since the late 1980s [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, **69**(1): 3-14.

- [36] 刘纪远, 张增祥, 徐新良, 等. 21 世纪初中国土地利用变化的空间格局与驱动力分析[J]. 地理学报, 2009, **64**(12): 1411-1420.
Liu J Y, Zhang Z X, Xu X L, *et al.* Spatial patterns and driving forces of land use change in China in the early 21st century[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009, **64**(12): 1411-1420.
- [37] 国家统计局城市社会经济调查司. 中国城市统计年鉴(2001, 2006, 2011, 2016 年)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2001, 2006, 2011, 2016.
- [38] Elhorst J P. Spatial panel data models[A]. *Spatial Econometrics* [M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2014. 37-93.
- [39] 张淑平, 韩立建, 周伟奇, 等. 冬季 PM_{2.5} 的气象影响因素解析[J]. 生态学报, 2016, **36**(24): 7897-7907.
Zhang S P, Han L J, Zhou W Q, *et al.* Relationships between fine particulate matter PM_{2.5} and meteorological factors in winter at typical Chinese cities[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(24): 7897-7907.
- [40] 尹晓梅, 李梓铭, 熊亚军, 等. 2014 ~ 2017 北京市气象条件和人为排放变化对空气质量改善的贡献评估[J]. 环境科学, 2019, **40**(3): 1011-1023.
Yin X M, Li Z M, Xiong Y J, *et al.* Contribution assessment of meteorology conditions and emission change for air quality improvement in Beijing During 2014-2017 [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(3): 1011-1023.
- [41] 邓慧慧, 杨露鑫. 雾霾治理、地方竞争与工业绿色转型[J]. 中国工业经济, 2019, **36**(10): 118-136.
Deng H H, Yang L X. Haze governance, local competition and industrial green transformation[J]. *China Industrial Economics*, 2019, **36**(10): 118-136.
- [42] 刘炳杰, 彭晓敏, 李继红. 基于 LUR 模型的中国 PM_{2.5} 时空变化分析[J]. 环境科学, 2018, **39**(12): 5296-5307.
Liu B J, Peng X M, Li J H. Analysis of the temporal and spatial variation of PM_{2.5} in China based on the LUR model [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(12): 5296-5307.
- [43] 张琛, 倪志伟, 姜婷. 基于 WPTMM 的 PM_{2.5} 与气象条件关系的联合多重分形分析[J]. 系统工程理论与实践, 2015, **35**(8): 2166-2176.
Zhang C, Ni Z W, Jiang T. Joint multifractal analysis of relationship of PM_{2.5} and meteorological condition based on WPTMM[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2015, **35**(8): 2166-2176.
- [44] 周曙东, 欧阳纬清, 葛继红. 京津冀 PM_{2.5} 的主要影响因素及内在关系研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, **27**(4): 102-109.
Zhou S D, Ouyang W Q, Ge J H. Study on the main influencing factors and their intrinsic relations of PM_{2.5} in Beijing-Tianjin-Hebei[J]. *China Population Resources and Environment*, 2017, **27**(4): 102-109.



CONTENTS

PM _{2.5} Inversion Using Remote Sensing Data in Eastern China Based on Deep Learning	LIU Lin-yu, ZHANG Yong-jun, LI Yan-sheng, <i>et al.</i> (1513)
Regional Air Pollution Process in Winter over the Yangtze River Delta and Its Influence on Typical Northern Cities	LI Rui, LI Qing, XU Jian, <i>et al.</i> (1520)
Influencing Factors of Ozone Concentration in Xi'an Based on Generalized Additive Models	HUANG Xiao-gang, SHAO Tian-jie, ZHAO Jing-bo, <i>et al.</i> (1535)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Levoglucosan and Its Isomers in PM _{2.5} in Beijing and Six Surrounding Cities	ZHU Hong-xia, TAO Xue-mei, WANG Chao, <i>et al.</i> (1544)
Characteristics and Sources Apportionment of Fine Particulate Matter in a Typical Coastal City During the Heating Period	LI Ming-yan, YANG Wen, WEI Min, <i>et al.</i> (1550)
Characteristics and Source Apportionment of Black Carbon in Chengdu	WANG Lu, YUAN Liang, ZHANG Xiao-ling, <i>et al.</i> (1561)
Effects of VOCs on Ozone Formation in the Tianjin Suburbs in Summer	YAO Qing, HAN Su-qin, ZHANG Xiao-ling, <i>et al.</i> (1573)
Source Profiles and Impact of Volatile Organic Compounds in the Coating Manufacturing Industry	WU Jian, GAO Song, CHEN Xi, <i>et al.</i> (1582)
Characteristics of Condensable Particulate Matter in Ultra-low Emission Coal-Fired Power Plants	DENG Jian-guo, WANG Gang, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1589)
Distribution and Source Analysis of Nitrate in Surface Waters of China	ZHANG Xin, ZHANG Yan, BI Zhi-lei, <i>et al.</i> (1594)
Spatial Characteristics and Ecological Risks of Perfluoroalkyl Substances in Coastal Urbanized Areas of China and South Korea	YANG Hong-fa, SHI Bin, ZHOU Yun-qiao, <i>et al.</i> (1607)
Analysis of Water Quality Change and Its Driving Factors of the Xiaqing River Estuary in Recent Ten Years	FAN Xin-feng, HAN Mei, WANG Lei, <i>et al.</i> (1619)
Distribution of Four Artificial Sweeteners in Water Treatment and Water Supply System in City H of Zhejiang Province	MA Xiao-yan, HU Hui, LU Si-jia, <i>et al.</i> (1629)
Changes in Epilithic Algae Community and Its Relationship with Environmental Factors in the Meixi River, a Tributary of the Three Gorges Reservoir	MI Wen-mei, SHI Jun-qiong, YANG Yan-jun, <i>et al.</i> (1636)
Succession Pattern of Phytoplankton and Its Drivers in Lake Luoma, Jiangsu Province	ZHANG Qing-ji, WANG Ye-yu, WANG Jin-dong, <i>et al.</i> (1648)
Relationship Between Diversity of Aquatic Plant Communities and Water Environmental Factors in Lhalu Wetland	WANG Jia-jun, TIAN Han-xin, ZHOU Lei, <i>et al.</i> (1657)
Evolution Characteristics and Driving Factors of Denitrification Community Based on Network Analysis in the Process of Spring Thermal Layer Formation in Zhoucun Reservoir	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, ZHANG Yi-ran, <i>et al.</i> (1666)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Difference Analysis of Nitrogen and Phosphorus in Daihai Lake	ZHAO Li, CHEN Jun-yi, JIANG Xia, <i>et al.</i> (1676)
Sediment Denitrification Rate and Its Response to Exogenous Carbon and Nitrogen in the Ponds and Bottomland of the Chaohu Lakeshore Zone	LI Ru-zhong, WANG Li, LIU Chao (1684)
Phosphate Control Effect and Water Body Remediation of Magnesium Modified Reed Biochar	DING Yu-qin, LI Da-peng, ZHANG Shuai, <i>et al.</i> (1692)
Efficiency of Magnesium Hydroxide Capping and Amendment to Control Phosphorus Release from Sediments	YANG Chun-yi, ZHAN Yan-hui, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (1700)
Characteristics of Chemical Fractions of Dissolved Organic Matter in Road Runoff in Beijing	CHEN Meng-yao, DU Xiao-li, YU Zhen-ya, <i>et al.</i> (1709)
3D Porous Photothermal Materials for High Salt Wastewater Treatment	HUANG Le, XU Ying-feng, XIE Qian-qing, <i>et al.</i> (1716)
Electrocatalytic Oxidation of Sulfadiazine with Ni-Doped Sb-SnO ₂ Ceramic Ring Particle Electrode	SHI Qiu-jun, LIU An-di, TANG Bo-bin, <i>et al.</i> (1725)
Degradation of AO7 with Magnetic Fe ₃ O ₄ -CuO Heterogeneous Catalyzed Sodium Percarbonate System	XU Jie, WANG Lin, CHEN Jia-bin, <i>et al.</i> (1734)
Red Mud-activated Peroxymonosulfate for Ciprofloxacin Degradation: Efficiency and Mechanism	SHI Jing-zhuan, WEI Hong, ZHOU Xiao-de, <i>et al.</i> (1743)
Influence of Industrial Wastewater Quality on Advanced Treatment of Microbubble Ozonation	ZHANG Jing, ZHANG Shou-jing, LIU Chun, <i>et al.</i> (1752)
Adsorption Properties of Sludge-hydrochar for Methylene Blue	CHEN Li-yuan, LI Da-peng, ZHU Wen-juan, <i>et al.</i> (1761)
Preparation of Modified Watermelon Biochar and Its Adsorption Properties for Pb(II)	BI Jing-wang, SHAN Rui, HAN Jing, <i>et al.</i> (1770)
Construction and Denitrification Performance of A ² /O Based on Partial Nitrification Coupled with an ANAMMOX System	LIU Xiao-chai, RONG Yi, WEN Li-jie, <i>et al.</i> (1779)
Construction and Mechanism of Methanotroph-based Ultimate Denitrification System for Tailwater of Urban Sewage Plants	YANG Ya-nan, LI Yan-cheng, LI Jiang, <i>et al.</i> (1787)
Impact of Hydraulic Retention Time on Performance of Partial Nitrification Granular Sludge in Continuous Stirred-Tank Reactor	WANG Jian-fang, QI Ze-kun, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (1794)
Realization Process of Nitrification and Changes in Sludge Characteristics in Granular Sludge Reactor for Low Strength Sewage Treatment	ZHU Lin, CHENG Cheng, SONG Jia-jun, <i>et al.</i> (1801)
Characteristics of Organics Transformation and Sludge Morphology in an ABR for Sewage Treatment with Different HRTs	CHENG Cheng, ZHU Lin, GUO Kai-cheng, <i>et al.</i> (1808)
Effect of Adding Granular Activated Carbon (GAC)/Manganese Dioxide (MnO ₂) for the Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge	YANG Bo, JIA Li-juan, XU Hui, <i>et al.</i> (1816)
Trace Metals Pollution and Health Risks for Planning Area Soils of 193 Chinese Cities	LI Kuo, PENG Min, YANG Zheng, <i>et al.</i> (1825)
Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Dust of Lanzhou Schools Based on Random Forests	HU Meng-jun, WANG Jia, ZHANG Ya-yun, <i>et al.</i> (1838)
Contents, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Soils of Various Functional Zones in Yangzhou City, China	YAO Cheng, NI Jin-zhi, LIU Rui, <i>et al.</i> (1847)
Safety Assessment of Rice Planting in Soil Cadmium Geological Anomaly Areas in Southwest Guangxi	CHEN Tong-bin, PANG Rui, WANG Fo-peng, <i>et al.</i> (1855)
Bioavailability and Influencing Factors of Soil Cd in the Major Farming Areas of Chongqing	WANG Rui, HU Xiao-lan, ZHANG Yong-wen, <i>et al.</i> (1864)
Control of Cadmium Migration and Transformation in Alkaline Paddy Soil-Rice Using Cotton Stalk Biochar	LIU Shi-dou, ZHU Xin-ping, HAN Yao-guang, <i>et al.</i> (1871)
Reduction of Soil Cadmium Activity and Rice Cadmium Content by 4-year-consecutive Application of Organic Fertilizer	XUE Yi, YIN Ze-run, SHENG Hao, <i>et al.</i> (1880)
Effects of Nano-magnesium Hydroxide on the Forms of Cadmium in Different Types of Soil	DENG Ji-bao, ZHANG Chun-lai, XU Wei-hong (1888)
Selenium Uptake Characteristics of Reclaimed Soil-Crop from Mining Wasteland and Its Antagonistic Effects on Heavy Metals	YIN Bing, WANG Jian-fei, SHI Sheng, <i>et al.</i> (1904)
Dynamic Effects of Different Biochars on Soil Properties and Crop Yield of Acid Farmland	YANG Cai-di, ZONG Yu-tong, LU Sheng-gao (1914)
Effects of Fertilizer Reduction and Application of Organic Fertilizer on Soil Nitrogen and Phosphorus Nutrients and Crop Yield in a Purple Soil Sloping Field	ZHU Hao-yu, GAO Ming, LONG Yi, <i>et al.</i> (1921)
Response of Nitrogen Loss Flux in Purple Soil Sloping Field to Reduced Fertilizer and Combining Straw	XIONG Zi-yi, WANG Zi-fang, LONG Yi, <i>et al.</i> (1930)
Effect and Approach of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochar to Improve Coastal Saline Soil	WU Dan, SUN Ping, LU Peng-zhan, <i>et al.</i> (1941)
Vertical Distribution of Soil Dissolved Carbon and Its Influencing Factors in the Artificial Shelterbelt Irrigated with Saline Water in an Extreme Drought Desert	MENG Tian-ge, WU Lu-yao, ZHANG Shao-lei, <i>et al.</i> (1950)
Response of Soil Enzyme Activity and Chemical Properties to Nitrogen Addition in a Korean Pine Plantation	LÜ Lai-xin, SONG Lei, LIU Zhi-li, <i>et al.</i> (1960)
Consumption Capacity of N ₂ O in Paddy Soil and the Response Mechanism of <i>nosZ-I</i> -containing Communities	GUO Jun-li, TIAN Mei-jie, GE Ti-da, <i>et al.</i> (1968)
Predicting the Recycling Potential and Evaluating the Environmental Benefits of Waste Electrical and Electronic Equipment in Beijing-Tianjin-Hebei	CHEN Pan, SHI Xiao-qing (1976)
Relationship Between Urban Industrialization and PM _{2.5} Concentration in China and the Internal Mechanism of EKC	LI Ya-nan, DING Zhen-min, DENG Yuan-jie, <i>et al.</i> (1987)