

生态污染协同治理会导致边界 污染再转移吗？

宋德勇 汪 涌*

摘 要：中国地方环境治理中长期存在边界污染等“以邻为壑”问题。本文以新安江流域生态补偿为切入点，探讨这一“科斯式”跨区域合作方案对边界污染的治理效果与泄漏机制。研究发现，新安江流域生态补偿有利于安徽、浙江的水污染协同治理，但边界污染再转移效应会导致邻江西的安徽省边界区县水污染程度明显上升。本文结论表明，地方政府的策略性减排行为会导致生态污染协同治理效果泄漏。

关键词：生态污染协同治理；效果泄漏；边界污染再转移

DOI: 10.13821/j.cnki.ceq.2026.04.08

一、引 言

以财政分权和政治集中为特征的中国式分权是中国经济增长奇迹的重要动力(王永钦等, 2007; 周黎安, 2007)。但在缺乏区域间协调机制的背景下, 中国式分权也造就了地方政府在诸多领域竞争中的“以邻为壑”主义, 其中以省际地区的边界污染问题尤为突出(赵阳等, 2021)。在环境属地化管理模式下, 地方政府有动机将域内污染集中分布于行政边界, 从而将经济增长收益留存本地并对外分摊污染治理成本, 形成污染排放的空间机会主义。为解决不同区域间的边界污染问题, 促进地方政府间加强环保合作的生态污染协同治理措施在中国日益兴起(李倩等, 2022; Cui et al., 2024), 而跨省流域生态补偿正是其中典型。

新安江流域生态补偿作为中国首个跨省生态补偿政策, 不仅是习近平生态文明思想的具体实践, 还有一种旨在解决污染溢出效应的“科斯式”跨区域合作

* 宋德勇, 华中科技大学经济学院、张培刚发展研究院; 汪涌, 华中科技大学经济学院。通信作者及地址: 汪涌, 湖北省武汉市洪山区珞喻路 1037 号华中科技大学经济学院, 430074; 电话: 15172430864; E-mail: wy29@hust.edu.cn。本研究得到国家社会科学基金重大项目(24&ZD103)、华中科技大学文科双一流建设项目(张培刚研究院建设项目)、华中科技大学重大研究支持项目(2025ZDZC001)的资助。感谢匿名审稿人和期刊主编的宝贵建议, 当然文责自负。

方案。Oates(2002)认为,针对跨区域的污染溢出效应,“科斯式”跨区域合作方案比统一标准形式的集权式治理更为有效。这是因为中央政府通常难以识别地方污染的边际治理成本差异,而“科斯式”跨区域合作方案允许地方政府间就自身边际治理成本与生态收益进行协商。尤其水污染物排放还具备单边溢出效应特征,即上游区域水污染会跨越行政边界影响邻近的下游区域环境质量,但反之不成立。对此,Oates(2002)强调建立补偿机制以强化污染源区域的治污激励,是双方实现跨区域合作的关键。因此,新安江流域生态补偿机制正是典型的“科斯式”跨区域合作方案,具备“科斯定理”的理论优势(Vatn, 2010;景守武和张捷,2018)。

在新安江流域生态补偿示范带动下,中国目前已有21个省份签订了跨省流域横向生态保护补偿协议,涉及20个跨省流域(河段)^①,形成了不同区域合作推进流域生态污染协同治理的“全国一盘棋”格局。那么,这种生态污染协同治理能否改善省际地区污染?其政策效果有何不足?本文试图以新安江流域生态补偿对边界污染的影响为切入点回答上述问题,这是鉴于:第一,新安江流域生态补偿基于安徽、浙江省界断面的水质达标情况进行产权交易,这使得地方政府不得不重新权衡边界污染行为的成本与收益。第二,鉴于流域内的水系连通性,跨界水污染往往不可避免,如上游区域水污染总会不断积累并顺流而下,加剧下游区域污染。边界污染虽会因污染物扩散最终演化为跨界污染,但其更能直接反映出地方政府主动调整污染排放分布的行为,更契合“以邻为壑”问题的研究内涵。

与本文相关的文献可分为三支。第一支文献是对边界污染的考察及其形成因素探讨。Sigman(2005)较早发现了美国的州际边界污染,后续文献也基于中国、巴西等数据验证了边界污染的普遍性(Duvivier and Xiong, 2013; Lipscomb and Mobarak, 2017)。大多研究认为污染物扩散特征是边界污染形成的首要条件,而过度环境分权或是造成边界污染的制度原因(Cui et al., 2024)。在基于中国的研究中,财政分权与政治激励也被视为边界污染的重要推手(赵阳等,2021)。首先,财政分权与经济增长指标考核致使中国地方政府为获得经济竞争优势更倾向于牺牲环境(李静等,2015),而环境属地化管理也为边界污染形成提供了制度条件(Cai et al., 2016)。其次,即使在地方官员政治晋升考核中纳入环保目标,其对边界污染的抑制作用也相当有限。李静等(2015)发现将约束性水污染治理指标纳入地方官员晋升考核虽能有效降低边界的指标污染物浓度,却不能降低非指标水污染物浓度。龙文滨和胡珺(2018)还发现约束性指标治理可能加剧边界污染。最后,从形成路径看,地方政府的环境执法空

^① 资料来源:董丝雨等,“绿水青山成色更足——加快推进人与自然和谐共生的现代化”,https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202408/content_6968375.htm,访问时间:2024年10月28日。

间差异化是边界污染形成的重要渠道(Cai et al., 2016)。

第二支文献是对边界污染治理措施效果的检验。边界污染治理措施大致分为经济举措与环境政策。现有文献发现数字经济、统一大市场建设等具备强正外部性的经济举措能有效抑制边界污染(余典范等, 2023; 王明益和姚清仿, 2024)。边界污染的环境政策研究主要聚焦于集权式方案。集权式方案通常具备中央政府统一规划与统一监管的环境集权特征, 减少了地方政府在环境监管中的自由裁量权。赵阳等(2021)发现, 直接向中央政府负责的跨省界区域环保督查中心设立可有效抑制边界区县企业污染排放。中央政府也可直接向地方政府分摊减排任务并强制要求地方政府间展开治污合作, 大气污染联防联控政策正是其中典型。Song et al.(2020)发现京津冀大气污染联防联控可有效加强城市间的污染治理合作, 李倩等(2022)也通过对中央政府协调长三角地区进行大气污染联合治理的检验, 得到了类似结论。然而, 也有文献指出在大气污染联防联控中, 地方政府可能会放松其与非联合区域间的环境监管(Cui et al., 2024), 造成联合治理效果的泄漏。上述研究对治理边界污染的集权式方案探讨已颇为丰富, 但在环境分权模式下如何解决边界污染问题, Oates(2002)认为“科斯式”跨区域合作或是一条可行之道。

目前第三支文献正是将新安江流域生态补偿视为“科斯式”跨区域合作方案, 发现其能在宏观层面上减少城市水污染(景守武和张捷, 2018; 吴凤平等, 2022), 并在微观层面降低域内企业水污染强度(Chen et al., 2022), 但从边界污染变化视角考察其策略性治理与效果泄漏的研究还极为匮乏。

鉴于此, 本文将横跨安徽、浙江两省的新安江流域生态补偿视为“科斯式”跨区域合作方案的典型, 在明确其生态污染协同治理效应的基础上, 重点分析新安江流域生态补偿是否会产生政策效果泄漏及其机制问题。本文贡献在如下三点:

第一, 本文拓展了环境联合治理决策的研究视角。相较于探讨经济举措或环境分权-集权结构变化如何影响边界污染的过往文献(余典范等, 2023; 王明益和姚清仿, 2024; Song et al., 2020; 赵阳等, 2021), 本文主要以旨在缓解经济与环境发展矛盾的新安江流域生态补偿为切入点, 分析具备经济激励性质的“科斯式”跨区域合作方案对边界污染的治理效果与不足, 为理解中国的地方环境联合治理决策提供了一个分权-合作模式下的新视角。

第二, 本文丰富了横向流域保护补偿政策的外溢效应研究。过往考察跨省流域生态补偿治污效应的文献大多使用城市尺度数据(景守武和张捷, 2018; 吴凤平等, 2022), 难以识别流域生态补偿中的策略性治污现象。本文基于区县尺度数据揭示了横向流域生态补偿中的策略性治理行为以及地方污染排放空间机会主义的演进, 为理解横向流域生态补偿政策的多方面影响提供了新

证据。

第三,本文基于企业水污染排放数据精准识别了边界污染再转移效应,明确了生态污染协同治理的泄漏机制。现有文献主要关注国家间、区域间乃至中心到边界的污染转移形式(Copeland and Taylor, 2004; Becker and Henderson, 2000; Cai et al., 2016),本文则主要分析边界到边界的污染转移问题。虽有少数文献基于集权式方案讨论了不同边界地区大气污染的差异性变化(Cui et al., 2024),但大气污染物来源构成与扩散方向难以确定,这为明确边界污染行为主体及合作治理的泄漏机制带来了挑战。本文基于污染企业排放数据构造区县水污染指标,并以此考察生态污染协同治理对不同省域边界污染变化的影响,不仅直接反映出影响环境质量的行为主体,还能进一步明确生态污染协同治理的泄漏机制,为更全面地评估生态污染协同治理措施的效果与不足提供新见解。

二、制度背景与理论分析

(一) 新安江流域生态补偿政策背景

新安江发源于安徽休宁县境内,经安徽歙县街口镇进入浙江,后流入下游千岛湖、富春江,是浙江省内最大河流钱塘江的主要源头之一。因此,安徽境内的新安江水质优劣很大程度上决定了浙江省乃至长三角的水生态安全。在新安江流域生态补偿政策施行前,新安江上游的安徽流域因工业化、城市化进程造成了严重水污染。新安江下游的浙江省虽屡次要求安徽政府进行新安江流域污染治理,但环保成本高昂、经济损失过大等激励不足问题导致新安江生态治理效果欠佳。2010年12月,中国财政部、原环境保护部正式将新安江流域水环境补偿作为跨省大江大河流域水环境的首个试点。^①2011年3月,上述试点正式实施。2011年9月,中国财政部、原环境保护部联合印发《新安江流域水环境补偿试点实施方案》。

在新安江流域生态补偿机制中,中央政府纵向介入流域生态治理(夏志强和唐纪航,2024),引导上、下游省级政府谈判和签订水质对赌协议:当新安江自上游安徽流入下游浙江时,其省界面水质达标,安徽获得补偿资金;若水质未达标,浙江获得补偿资金。这种未明确初始产权归属的生态污染治理合作方式带有期权合约的性质,具有强大的双向激励功能(景守武和张捷,2018),可缓解地方政府在省际地区的治污激励不足问题,但两省间展开生态污染协同治理对

^① 资料来源:朱磊,“新安江跨省流域生态补偿开始操作”,<https://news.cntv.cn/20120131/116325.shtml>,访问时间:2024年10月28日。

省际边界“搭便车”现象的实际影响尚不清楚。

(二) 理论分析

过度环境分权被视为引发边界污染的制度原因(Cui et al., 2024),因此确定一个适当的集权程度或是改善边界污染的关键,但该问题仍悬而未决。Oates(2002)认为还存在一种更有效的“科斯式”跨区域合作方案,只是当污染流具备单边溢出效应时,必须引入补偿机制以促使合作达成。在“科斯定理”的产权交易基础上,新安江流域通过引入横向生态补偿机制促成了安徽、浙江的环保合作,这也同时引发了政策主体的态度与行为转变(李坦等,2022)。一方面,新安江流域生态补偿的触发机制正是基于安徽、浙江的边界水质考核,这会明显增加安徽在邻浙江省际的边界污染成本,安徽省政府会向下级政府表达治理污染的主张,进而有利于当地边界污染治理。另一方面,根据“污染避难所”假说,新安江流域安徽段的环境规制增强会提高域内企业的合规成本,可能造成污染转移。而上游地方政府有激励采取各种措施吸引污染企业留在其他省际边界区县(龙文滨和胡珺,2018),从而造成新安江流域生态补偿的政策效果泄漏。

1. 安徽-浙江水污染协同治理的环境效应

为实现流域生态补偿承诺,安徽政府会作出更多治污努力。首先,安徽政府会直接增加新安江流域的治污投入,采取关停关闭污染企业、提高投资项目准入标准等措施;其次,流域生态补偿有利于绿色行业扩张,推动产业结构升级(吴凤平等,2022);最后,流域生态补偿能提高流域自然资源禀赋(Li et al., 2023),促进更多生态产品价值实现,加速生态人才集聚。通过上述路径,新安江流域生态补偿明显有利于安徽-浙江水污染协同治理。

而安徽-浙江水污染协同治理不仅涉及对试点区县的环境改善,还可能体现为对邻浙江安徽省边界区县的水污染治理。首先,邻浙江的安徽边界区县与流域生态补偿覆盖区域存在空间上的高度重叠:邻浙江的安徽边界区县共五个,其中绩溪县、歙县、休宁县均是政策试点区县,共计 53.6%面积与新安江流域生态补偿覆盖区域重合。现有文献已指出空间高度重叠正是新安江流域生态补偿影响当地生产生活的直接原因(李坦等,2022)。其次,新安江干流穿过休宁县、屯溪区、歙县,其中休宁县、歙县也是邻浙江的安徽省边界区县,而距离干流较近的试点区县会受到更严格的环境规制(马莉等,2024)。最后,新安江流域生态补偿触发机制正是基于安徽、浙江边界水质的监测结果,安徽地方政府不得不重点关注邻浙江省际地区的污染治理。综上,本文提出如下假说。

假说 1 新安江流域生态补偿有利于安徽-浙江水污染协同治理,从而降低

邻浙江安徽省边界区县的水污染程度。

2. 边界污染再转移效应

中国地方政府在制定决策时通常面临多重激励,必须在行政资源约束下最大化地方利益。因此,地方政府在环境保护与经济增长间存在动态权衡(Wang and Lei, 2020)。跨省流域生态补偿政策虽有利于省际水污染协同治理,然而在最大化地方利益的激励下,地方政府仍可能通过域内污染分布的重新调整实现“换邻为壑”,进而将经济收益留存本省并对外分摊污染治理成本,即边界污染再转移效应。

边界污染再转移既反映出地方政府在跨区域合作中采取的策略性减排行为,其对政策未覆盖地区而言,也是一种外源性的污染转移现象。而污染转移理论可追溯到“污染避难所”假说(Copeland and Taylor, 2004),即一国加强环境规制会增加企业合规成本,导致被规制企业转移到环境规制相对宽松的国家。“污染避难所”假说也逐渐被拓展至国家内部,即国内不同区域间环境规制差异会导致污染企业的转移(Becker and Henderson, 2000),基于中国的研究也得到了类似结论(潘郭钦等,2023)。根据“污染避难所”假说,新安江流域生态补偿会强化政策覆盖地区的环境规制,促使污染企业迁出。同时,地方政府也有激励采取各种举措吸引污染企业转移至其他省际边界区县(龙文滨和胡珺, 2018),最终表现为政策未覆盖地区的污染密集型行业扩张(Cai et al., 2016)。

从政府治理的纵向视角看,首先,中国行政体系依赖从上而下的制度安排,省政府向下级市、县政府表达主张,下级市、县政府进行响应,被称为纵向干预型政府间协作(徐换歌和王峰,2023)。其次,根据《国家计委关于取消部分行政审批事项的通知》,中央政府已在2001年起将总投资限额以下的大部分项目的审批权下放地方政府,地方政府可以利用项目审批权来策略性地进行产业布局(龙文滨和胡珺,2018)。因此,流域生态补偿的上游地方政府有能力促使下级政府配合其完成“换邻为壑”的主张。从政府治理的横向视角看,首先,地方政府一般控制着地方环保部门的财权与人事权。在经济增长激励下,地方政府有能力将环境监管资源在不同地区间重新配置,引发边界区县对水污染监管的相对宽松,为污染转移提供监管漏洞。其次,地方政府在实际上垄断了当地的城镇土地市场(Lu et al., 2024),其有能力通过调整土地出让措施为污染企业提供选址激励(Zhang and Li, 2025)。最后,地方政府还能在政策未覆盖的边界地区采取税收优惠或补贴等举措,以强化污染产业转移倾向。在上述多重因素影响下,污染企业有充分动机进行边界污染再转移行为。综上,本文提出如下假说。

假说2 新安江流域生态补偿可能会造成边界污染再转移效应,引发生态污染协同治理效果的泄漏。

三、研究设计

(一) 样本说明

鉴于目前统计资料缺乏对区县水污染排放的详细记录,本文利用中国工业企业污染数据库数据在区县层面汇总,从而得到区县污染排放指标。中国工业企业污染数据库是历年发布的《中国环境统计年鉴》的数据来源,排污量占各地区排污总量 85% 以上的工业企业均为该数据库重点调查企业,因此该数据库较为权威且全面。鉴于数据发布年份和政策时间,本文研究时期为 2001—2013 年,研究样本为安徽省 81 个县级区划。

(二) 模型设定

本文在设定模型前展示了各类边界区县的污染趋势^①,还须进行估计以检验假说。本文也基于区县尺度数据验证了新安江流域生态补偿对试点区县的减污效果,但与过往城市尺度研究不同的是,本文在区县尺度下还发现这种减污效果主要体现在邻浙江的安徽省边界区县中^②。在此基础上,正文聚焦于生态污染协同治理效果泄漏方向及其机制的检验。

1. 生态污染协同治理效果泄漏检验模型设定

本文采用双重差分(DID)方法检验新安江流域生态补偿对不同类型安徽边界区县水污染的影响^③,模型设定如下:

$$CountyWPI_{it} = \beta_0 + \beta_1 borderA_i \times post_t + \beta_2 control_{it} + \eta_i + \gamma_t + \epsilon_{it}, \quad (1)$$

其中, $CountyWPI_{it}$ 代表区县水污染程度; $borderA_i$ 表示区县 i 是否为邻近 A 省的安徽省边界区县; $post_t$ 为新安江流域生态补偿的时期虚拟变量。 $control_{it}$ 为控制变量。 η_i 为区县固定效应; γ_t 为年份固定效应; ϵ_{it} 为扰动项。系数 β_1 表示新安江流域生态补偿对邻 A 省的安徽省边界区县水污染的影响。

2. 生态污染协同治理效果泄漏机制检验模型设定

为考察治理效果泄漏机制,本文建立如下模型:

$$M_{it} = \theta_0 + \theta_1 borderA_i \times post_t + \theta_2 control_{it} + \eta_i + \gamma_t + \epsilon_{it}, \quad (2)$$

其中, M_{it} 表示机制变量。系数 θ_1 表示新安江流域生态补偿影响邻 A 省的安徽省边界区县水污染的机制效应。

① 见附录 I 图 I 1 至图 I 5。限于篇幅,附录未在正文列示,感兴趣的读者可在《经济学》(季刊)官网(<https://ceq.ccer.pku.edu.cn>)下载。

② 见附录 II (一)。

③ 本文已排除空间溢出效应,见附录 II (二)。

（三）变量定义与数据说明

1. 被解释变量

本文被解释变量是区县水污染程度(*CountyWPI*)，以区县工业废水排放强度衡量。本文分别将企业工业废水排放总量、企业工业产值在区县层面汇总，再以两者比值作为区县工业废水排放强度，单位为吨/万元。为减少异常值干扰，对该指标做对数化处理。

2. 解释变量

本文核心解释变量是 $borderA_i \times post_t$ ，若区县 i 是邻 A 省的安徽省边界区县， $borderA_i$ 则为 1，否则为 0。本文将 2011 年作为新安江流域生态补偿的政策冲击时间(李坦等, 2022)，当年份 t 在 2011 年及以后， $post_t$ 为 1，否则为 0。根据中国行政区划，安徽与浙江、山东、河南、湖北、江苏、江西六省相邻，据此将安徽的边界区县分为六类^①。

3. 控制变量

本文控制变量为经济发展水平、污染工业总产值、人口密度、区县水稻种植分布占比、各区县与省界距离，其数据来源、构建说明与主要变量描述性统计见附录Ⅲ表Ⅲ1。

四、实证结果与分析

（一）新安江流域生态补偿的污染协同治理效果

表1展示了新安江流域生态补偿对邻浙江安徽省边界区县水污染的影响^②。表1第(1)—(3)列分别为逐步加入控制变量、区县固定效应与年份固定效应的估计结果，此时 $borderZhejiang \times post$ 系数均显著为负。这说明新安江流域生态补偿使得邻浙江安徽省边界区县的水污染程度明显下降，抑制了安徽地方政府在邻浙江省际的环保“搭便车”现象。然而，流域生态补偿的上游地方政府是否会将政策覆盖地区的边界水污染转移至其他边界区县，从而达成“换邻为壑”主张？本文将对此进行深入分析。

^① 见附录Ⅰ表Ⅰ1。

^② 鉴于后文才确定政策效果泄漏方向并须满足对照组条件，此处对照组剔除邻浙江以外的其他类型边界区县。

表 1 新安江流域生态补偿对邻浙江安徽省边界区县水污染的影响

	CountyWPI		
	(1)	(2)	(3)
<i>borderZhejiang</i> × <i>post</i>	−0.6534** (0.2924)	−0.5724** (0.2550)	−0.6566** (0.2954)
控制变量	是	是	是
区县固定效应	否	是	是
年份固定效应	否	否	是
常数项	4.9063*** (1.2596)	13.8145 (11.3719)	5.4885 (12.3204)
Adj. R ²	0.2811	0.6513	0.6574
观测值	621	621	621

注：括号内为区县层面的聚类稳健标准误，***、**、* 分别表示在 1%、5% 和 10% 的统计水平上显著，下同。

（二）生态污染协同治理效果泄漏的方向性分析

1. 基于地理条件的分析

边界水污染的存在取决于地区间交界范围、水系分布与河流流向。首先，安徽仅砀山县与山东相邻，当地难以形成有效规模的边界污染。其次，安徽、山东跨界河流主要是由山东流向安徽，安徽处于相对下游位置。这导致安徽地方政府采取策略性减排难以将其环保成本外溢，还要负担额外治污成本。囿于砀山县污染企业数据匮乏，本文从历年《宿州统计年鉴》中获取砀山县污水排放总量与 GDP 数据，测算砀山县污水排放强度后发现：自新安江流域生态补偿施行以来，砀山县污水排放强度连年下降^①。因此，安徽不太可能在邻山东边界地区实施“换邻为壑”行为。

除新安江水系外，流经安徽的河流系统主要由淮河、长江两大水系构成，这两大水系均自西向东流经安徽。而河南、湖北均毗邻安徽省西部，处于安徽的相对上游位置。这导致安徽地方政府在河南、湖北省际地区进行策略性减排也难以将其环保成本外溢。本文按式(1)检验，结果见表 2。此时，*borderHenan* × *post*、*borderHubei* × *post* 系数均不显著，不支持生态污染协同治理效果泄漏至邻河南、邻湖北的安徽省边界区县的可能。

① 见附录 I 表 I 2。

表 2 协同治理效果泄漏至邻河南、邻湖北的检验

	CountyWPI	
	(1)	(2)
<i>borderHenan</i> × <i>post</i>	−0.3187 (0.2633)	
<i>borderHubei</i> × <i>post</i>		−0.4508 (0.4721)
控制变量	是	是
区县固定效应	是	是
年份固定效应	是	是
常数项	1.5537 (10.9599)	1.1258 (10.9658)
Adj. R ²	0.6264	0.6265
观测值	929	929

注：上述回归已同时剔除新安江流域生态补试试点区县和邻浙江安徽省边界区县样本，下同。

安徽同时存在若干跨界河流流向江苏、江西，也与二者存在较大交界空间，具备环保“搭便车”的地理条件。本文按式(1)考察，结果见表 3。此时，*border-Jiangsu* × *post* 系数不显著，说明无证据支持新安江流域生态补偿会影响邻江苏的安徽省边界区县水污染程度。而 *borderJiangxi* × *post* 系数显著为正，说明新安江流域生态补偿加剧了邻江西的安徽省边界区县水污染程度。

表 3 协同治理效果泄漏至邻江苏、邻江西的检验

	CountyWPI	
	(1)	(2)
<i>borderJiangsu</i> × <i>post</i>	0.0197 (0.2467)	
<i>borderJiangxi</i> × <i>post</i>		1.0229*** (0.2065)
控制变量	是	是
区县固定效应	是	是
年份固定效应	是	是
常数项	1.7297 (10.9826)	4.4086 (10.8828)
Adj. R ²	0.6250	0.6297
观测值	929	929

表 3 内容结合附录 I 的各类边界区县水污染趋势特征,足以表明新安江流域生态补偿可能引发了地方政府“换邻为壑”式的策略性减排行为,即水污染协同治理效果泄漏至邻江西的安徽省边界区县。邻江苏、邻江西的安徽省边界区县均具备边界水污染存在的地理条件,为何新安江流域生态补偿的水污染协同治理效果只泄漏至邻江西安徽省边界区县?在排除江苏、江西本身的环境因素差异后^①,本文参考过往文献,基于安徽-江苏、安徽-江西的差异视角,提出如下三种解释。

2. 安徽-江苏与安徽-江西的差异分析

第一,地方经济文化联系。安徽、江苏历史上处于同一行政区域,具有紧密的经济文化联系。及至当代社会,安徽、江苏间要素和商品流通发达,具备市场一体化趋势,能显著减少边界污染(王明益和姚清仿,2024)。据此,本文构造经济文化联系差距指标加以考察。首先,以 2003 年安徽各城市流向江苏、江西半年以上流动人口比例的对数差作为第一种经济文化联系差距指标^②。其次,方言差异也是衡量经济文化联系的重要指标(Bian et al., 2019)。据此,本文基于方言相似度构造了第二种经济文化联系差距指标^③。最后,利用调节效应模型加以检验,结果见表 4 第(1)、(2)列。

从表 4 第(1)列可知, $border \times post$ 经济文化联系差距指标一系数显著为负,而 $border \times post$ 系数显著为正。这表明当经济文化差距越大时,即安徽与该外省经济文化联系相对更紧密时,新安江流域生态补偿越不会引发协同治理效果的泄漏。表 4 第(2)列结果的经济意义与表 4 第(1)列类似。值得说明的是,表 4 第(2)列 $border \times post$ 变量虽不具备 10% 水平的统计显著性,但是其 p 值也在 15% 以内。综上,基于流动人口构成、方言相似度指标的检验均验证了经济文化联系差距的解释力。

第二,企业污染转移成本。现有研究表明污染转移限于迁移成本,通常表现为就近转移(牛坤玉等,2019)。新安江发源于安徽省休宁县,其与江西省接壤,因此邻江西的安徽省边界区县离新安江流域更近。作为江苏、安徽主要交界河流的淮河,其流域与生态补偿政策覆盖地区更远。因此,污染企业若从政策覆盖地区转移至邻江西的安徽边界区县,其迁移成本相对更低。考虑到新安江经安徽歙县街口镇进入浙江境内,并以街口(鸠坑口)断面作为新安江流域生态补偿的水质考核监测断面。为此,本文计算各区县与街口镇、街口(鸠坑口)断面的地理距离,分别得到污染转移成本一、污染转移成本二指标。最后,利用

① 见附录 I 图 I 7。

② 目前缺乏区县级的流动人口构成数据,本文基于安徽各区县上级地级市流向省外半年以上的流动人口比例进行指标构建。

③ 构造方法见附录 I (六)。

调节效应模型考察,结果见表 4 第(3)、(4)列。

此时, $border \times post$ 与污染转移成本指标的交互项系数均显著为负,而 $border \times post$ 系数均显著为正。这表明距离水质关键区域越近的非政策覆盖边界区县,其污染水平越会因新安江流域生态补偿升高。邻江西的安徽省边界区县离新安江流域更近,会因低污染转移成本更可能成为新安江流域生态补偿政策效果泄漏的方向。

第三,边际效应递减规律。边界污染治理存在边际效应递减规律(赵阳等, 2022),对于边界污染较为明显的邻江苏安徽省边界区县^①,边际效应递减规律表现为当地污染再度加剧带来的“搭便车”收益有限,会抑制其接收污染转移的空间。此外,相较于邻江西的安徽省边界区县,邻江苏的安徽省边界区县经济更为发达^②,其接受边界污染再转移的经济激励较弱。而边界污染转移至邻江西的安徽省边界区县不仅同样能完成经济收益留存安徽省域内的目标,还能促进经济相对落后的边界地区发展。鉴于此,本文以 2010 年区县工业废水强度、各区县工业废水强度在 2001—2010 年间的均值衡量政策前区县污染程度差异,同时以 2010 年区县平均夜间灯光亮度、各区县平均夜间灯光亮度在 2001—2010 年间的均值衡量政策前区县经济水平差异,利用调节效应模型考察,结果见表 4 第(5)、(6)列。

此时, $border \times post$ 与政策前污染程度的交互项均显著为负, $border \times post$ 与政策前经济水平的交互项均显著为负,而 $border \times post$ 系数均显著为正。这表明政策前水污染程度更高、经济发展水平更高的边界区县,越不可能成为新安江流域生态补偿效果泄漏的方向。因此,相较于邻江苏安徽省边界区县,此前不存在明显边界污染、经济发展更落后的邻江西南安徽省边界区县更可能成为“换邻为壑”的目标。

表 4 安徽-江苏与安徽-江西的差异分析

CountyWPI					
经济文化联系		污染转移成本		边际效应递减	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
$border \times post \times$ 经济文化联系差距指标一					
	-0.2569**				(0.1212)
$border \times post \times$ 经济文化联系差距指标二					
		-1.2131*			(0.6258)

① 见附录 I 图 I 3。
② 见附录 I 图 I 6。

(续表)

	CountyWPI					
	经济文化联系		污 染 转 移 成 本		边 际 效 应 递 减	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
<i>border</i> × <i>post</i> × 污 染 转移成本一			−0.0037** (0.0018)			
<i>border</i> × <i>post</i> × 污 染 转移成本二				−0.0037** (0.0018)		
<i>border</i> × <i>post</i> × 政 策 前污 染 程 度 一					−0.4012** (0.1619)	
<i>border</i> × <i>post</i> × 政 策 前污 染 程 度 二						−0.5172** (0.2207)
<i>border</i> × <i>post</i> × 政 策 前经济水平一					−0.9868** (0.3735)	
<i>border</i> × <i>post</i> × 政 策 前经济水平二						−0.8442*** (0.3088)
<i>border</i> × <i>post</i>	1.1960* (0.6520)	0.5811 (0.3962)	1.1099* (0.6281)	1.1378* (0.6401)	1.4616** (0.5901)	1.7943** (0.7933)
控制变量	是	是	是	是	是	是
区县固定效应	是	是	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是	是	是
常数项	2.2498 (11.4506)	4.8536 (12.5809)	3.2315 (11.6140)	3.2305 (11.6146)	10.5846 (12.0640)	11.6179 (11.9622)
Adj. R ²	0.6126	0.6244	0.6138	0.6138	0.6455	0.6228
观测值	760	721	760	760	750	760

注：为重点分析邻江苏、邻江西边界区县差异，表 4 仅保留邻江苏、邻江西的安徽省边界区县以及非边界区县，当区县为边界区县时，*border* 为 1，否则为 0；同时，表 4 剔除了新安江流域生态补偿试点区县和邻浙江安徽省边界区县样本；本表回归同时控制了 *post* 与各调节变量的交互项。

（三）稳健性检验：生态污染协同治理效果泄漏方向

本文稳健性检验包括事前趋势检验、安慰剂检验、缩短样本时间窗宽、更改控制变量集、更改被解释变量衡量方式、更换对照组、剔除可能异常样本等；本文还对水污染协同治理效果可能泄漏至邻浙江的其他弱环境监管省域边界倾向进行检验，结果均支持前文结论。^①

① 见附录 II（三）。

五、泄漏机制分析：边界污染再转移

（一）外源性转移

1. 政府策略性干预

为验证政府策略性干预的机制作用,本文首先通过各区县环境行政处罚披露信息汇总了全类型环境行政处罚总金额、水污染防治环境行政处罚总金额,以后者与前者的比值衡量环保工作结构性变化(EPS),并按式(2)检验。本文还将 EPS 分解为两个子指标:水污染防治环境行政处罚平均罚没金额与全类型环境行政处罚平均罚没金额的比值($EPS1$)、水污染防治环境行政处罚数量与全类型环境行政处罚数量的比值($EPS2$)。上述检验结果见表5第(1)—(3)列。从中可知, $borderJiangxi \times post$ 对 EPS 的影响系数显著为负,对 $EPS1$ 的影响系数显著为负,对 $EPS2$ 的影响系数不显著。

表5第(1)—(3)列结果显示:面对安徽-浙江水污染协同治理,邻江西的安徽省边界区县水污染防治环境处罚总金额占全类型环境处罚总金额的比重明显下降,这主要源于水污染防治环境处罚平均罚没金额的相对减少。上述发现综合表明环保工作存在结构性变化,引发了边界区县对水污染防治监管的相对宽松,契合外源性的边界污染再转移假说。

其次,本文基于2007—2013年土地出让结果公告数据,分别计算了区县工业土地出让面积占全类型出让土地面积比重(LAS)、土地出让平均成交单价(ALP),并按式(2)检验,上述结果分别见表5第(4)、(5)列。从中可知, $borderJiangxi \times post$ 对 LAS 的影响系数显著为正, $borderJiangxi \times post$ 对 ALP 的影响系数显著为负。这表明土地出让价格优惠与行业偏向性供给共同为边界污染再转移奠定了有利生产条件。

最后,本文基于2007—2013年中国税收调查数据,分别计算了企业所得税减免额度区县汇总值、企业补贴收入(政府补助)区县汇总值,并以二者与企业总资产区县汇总值的比值分别衡量区县税收优惠力度($TAXP$)、政府补贴力度($GOVS$),按式(2)检验。上述结果分别见表5第(6)、(7)列。从中可知, $borderJiangxi \times post$ 对 $TAXP$ 的影响系数显著为正, $borderJiangxi \times post$ 对 $GOVS$ 的影响系数不显著。这表明税收优惠也是边界污染再转移的重要选址激励。

表5 机制一:政府策略性干预

	政府环保工作结构性变化			土地出让策略性供给		税收优惠与政府补贴	
	EPS	$EPS1$	$EPS2$	LAS	ALP	$TAXP$	$GOVS$
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
$borderJiangxi \times post$	-0.1970*** (0.0635)	-0.1213** (0.0528)	-0.0016 (0.1561)	0.0442* (0.0264)	-0.6464* (0.3630)	0.0006** (0.0003)	0.0006 (0.0011)

	(续表)						
	政府环保工作结构性变化			土地出让策略性供给		税收优惠与政府补贴	
	EPS	EPS1	EPS2	LAS	ALP	TAXP	GOVS
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
控制变量	是	是	是	是	是	是	是
区县固定效应	是	是	是	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是	是	是	是
常数项	-5.2973** (2.2441)	-5.1006** (2.0331)	-3.3358** (1.2908)	-1.4265 (2.2957)	34.6804* (19.2436)	0.0237 (0.0495)	-0.2207 (0.2231)
Adj. R ²	0.1319	0.1468	0.2190	0.2207	0.3317	0.2969	0.4116
观测值	932	932	932	502	338	504	504

2. 行业偏向性扩张

本文通过天眼查网站检索并汇总了各区县制造业、水污染密集型行业^①、农林牧渔业与建筑业新增企业数量,按式(2)回归,结果分别见表6。表6第(1)列 $borderJiangxi \times post$ 系数显著为正,这与水污染很大程度上源于制造业扩张的观点一致(刘洪铎等,2023);表6第(2)列 $borderJiangxi \times post$ 系数依然显著为正。然而表6第(3)列、第(4)列 $borderJiangxi \times post$ 系数均不显著。上述结果对比表明,新安江流域生态补偿引发更多能造成大量水污染的企业进入邻近江西的安徽省边界区县,进而加剧当地边界水污染。

表 6 机制二:行业偏向性扩张

	行业规模			
	制造业	水污染密集型行业	农林牧渔业	建筑业
	(1)	(2)	(3)	(4)
$borderJiangxi \times post$	0.3913*** (0.1246)	0.6099** (0.2622)	0.0494 (0.2603)	-0.1897 (0.1946)
控制变量	是	是	是	是
区县固定效应	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是
常数项	13.4935* (6.8438)	11.8515* (6.8662)	20.6358** (8.5138)	6.7667 (4.6975)
Adj. R ²	0.7778	0.1573	0.8522	0.8660
观测值	932	932	919	923

① 见附录 I (七)。

（二）排除竞争性机制解释

第一，边界区县与非边界区县的污染企业分布相对差异也可能出现与新安江流域生态补偿相关的变化，但其由产业结构、市场竞争等内生因素驱动，不符合外源性的边界污染再转移假说。本文将区县水污染进行内源化分解，并按式(2)检验。第二，安徽政府也可能将来自省外的污染分布于省域边界，但这不能直接代表水污染协同治理效果的泄漏。本文纳入了可能吸引省外污染的政策冲击再进行验证。上述结果均支持边界污染再转移假说。^①

（三）机制成立的条件检验

1. 能力条件

为验证地方政府上下层级间的强控制权是泄漏机制形成的重要条件，本文首先检验了县级财政力量在边界污染再转移中的作用。这是因为县级政府财政力量相对越强，越可能强化其在产业布局中的独立性（蔡嘉瑶和张建华，2018），从而抵抗上级政府关于污染分布的决策。据此，本文基于纵向比较视角计算区县财政相对地位，以区县财政支出与其上级城市财政一般预算支出比值、区县财政收入与其上级城市财政一般预算收入比值之和衡量，然后利用调节效应模型加以检验，结果见表7第(1)列。此时， $borderJiangxi \times post \times$ 财政相对地位系数显著为负。这表明随县级财政力量逐渐加强，边界污染再转移效应会相应减弱。

地方政府上下层级间的强控制权若是重要机制条件，那么在省政府控制力越强的下级区县中，其边界污染再转移效应当越明显。本文以安徽2011年省直管县改革为契机，检验上述分析。从深度上看，上述省直管县改革涉及政府人事权改革，是涉及最核心权力的一次政府扁平化改革。本文据此设置省直管县虚拟变量，并用调节效应模型检验，结果见表7第(2)列。此时， $borderJiangxi \times post \times$ 省直管县系数显著为正，这说明在省政府控制力越强的下级区县中，边界污染转移效应越明显。

2. 激励条件

边界污染再转移还要考虑污染承接区县的意愿，而这取决于该行为的经济收益激励与环保“搭便车”激励。本文首先使用区县生产总值作为直接经济收益指标进行检验，结果见表7第(3)列。此时， $borderJiangxi \times post$ 系数显著为正，表明边界污染再转移会促进邻江安徽省边界区县的经济增长。本文还检验了理论上与污染排放高度相关的第二产业增加值变化，结果见表7第(4)

^① 见附录II(四)。

列。此时， $borderJiangxi \times post$ 系数显著为正，这说明边界污染再转移使得生产活动保留在邻江西安徽省边界区县，使得该地区经济效益明显增加。

表 7 机制成立的条件检验

	能力条件		激励条件	
	CountyWPI		区县生产总值	二产增加值
	(1)	(2)	(3)	(4)
$borderJiangxi \times post \times$ 财政相对地位	-3.0707*			
	(1.7904)			
$borderJiangxi \times post \times$ 省直管县		0.5333*** (0.1247)		
$borderJiangxi \times post$	1.8810*** (0.5187)	0.8458*** (0.1786)	0.0819* (0.0451)	0.1027** (0.0388)
控制变量	是	是	是	是
区县固定效应	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是
常数项	4.9916 (17.1897)	4.4385 (10.8834)	-11.3730*** (3.9814)	-1.7037 (3.6733)
Adj. R ²	0.6405	0.6296	0.9717	0.9874
观测值	557	929	558	558

注：第(4)列回归涉及产业结构，因此控制了第二产业增加值占 GDP 比重。

由于目前缺乏区县环保支出数据统计，本文对环保“搭便车”激励只能进行间接检验。当边界区县水系密布时，水污染企业进入可沿流域将更多环保成本外溢至其他区域。据此，本文基于河流密度、水体面积指标检验发现，污染承接区县水系密布会加剧边界污染再转移效应，间接验证了环保成本“搭便车”激励的机制条件作用。^①

六、结论与启示

本文发现新安江流域生态补偿虽有利于安徽-浙江水污染协同治理，却提高了邻江西安徽省边界区县的水污染程度，而外源性的边界污染再转移是新安江流域生态补偿出现协同治理效果泄漏的原因。

基于上述发现，本文启示如下：第一，地方政府间应构建“多边”生态补偿体系。“双边”环保合作虽能部分缓解地方经济-环境发展矛盾，但仍可能引发“换

① 见附录 II（五）。

邻为壑”现象。这要求以重点跨省水系为切入点,推动更多地方政府参与流域生态补偿,构建“多边”合作体系,加强全域信息共享和协同行动,也可加强省际经济合作以抵消污染负外部性,建立省际平等乃至“全国一盘棋”生态治理格局。第二,中央政府应强化主体责任纵向监管。即使在“科斯式”跨区域合作方案中,中央政府也应建立完善的水质监测和预警机制建设,用于调查污染源头与统一联合监测,及时发现并处理潜在的污染转移风险,有助于优化流域生态补偿方案设计。第三,通过提高市场化水平完善激励机制。依赖地方政府的固定标准激励通常不足,易引致协同治理效果泄漏。借鉴欧洲莱茵河、美国纽约 Catskill 流域与法国 Perrier Vittel 公司等生态服务付费实践经验,国内流域生态补偿应增加流域服务税、信贷与信托基金等渠道,推动资金筹措形式市场化;引入企业、商会与居民等更多市场主体参与,扩充生态补偿资金来源。在补偿资金来源充足的基础上,施行分档补偿标准以强化地方政府间的环保合作激励。

参考文献

- [1] Becker, R., and V. Henderson, “Effects of Air Quality Regulations on Polluting Industries”, *Journal of Political Economy*, 2000, 108(2), 379-421.
- [2] Bian, W., Y. Ji, and H. Zhang, “Does Dialect Similarity Add Value to Banks? Evidence from China”, *Journal of Banking & Finance*, 2019, 101, 226-241.
- [3] Cai, H., Y. Chen, and Q. Gong, “Polluting Thy Neighbor: Unintended Consequences of China’s Pollution Reduction Mandates”, *Journal of Environmental Economics and Management*, 2016, 76, 86-104.
- [4] 蔡嘉瑶、张建华,“财政分权与环境治理——基于‘省直管县’财政改革的准自然实验研究”,《经济动态》,2018年第1期,第53—68页。
- [5] Chen, S., J. S. G. Zivin, H. Wang, and J. Xiong, “Combating Cross-Border Externalities”, *National Bureau of Economic Research*, 2022.
- [6] Copeland, B. R., and M. S. Taylor, “Trade, Growth, and the Environment”, *Journal of Economic Literature*, 2004, 42(1), 7-71.
- [7] Cui, L., Z. Chen, Y. Huang, and H. Yu, “Window Dressing: Changes in Atmospheric Pollution at Boundaries in Response to Regional Environmental Policy in China”, *Journal of Environmental Economics and Management*, 2024, 125, 102948.
- [8] Duvivier, C., and H. Xiong, “Transboundary Pollution in China: A Study of Polluting Firms’ Location Choices in Hebei Province”, *Environment and Development Economics*, 2013, 18(4), 459-483.
- [9] 景守武、张捷,“新安江流域横向生态补偿降低水污染强度了吗?”,《中国人口·资源与环境》,2018年第28卷第10期,第152—159页。
- [10] 李静、杨娜、陶璐,“跨境河流污染的‘边界效应’与减排政策效果研究——基于重点断面水质监测周数据的检验”,《中国工业经济》,2015年第3期,第31—43页。

- [11] 李倩、陈晓光、郭士祺等,“大气污染协同治理的理论机制与经验证据”,《经济研究》,2022年第57卷第2期,第142—157页。
- [12] 李坦、徐帆、祁云云,“从‘共饮一江水’到‘共护一江水’——新安江生态补偿下农户就业与收入的变化”,《管理世界》,2022年第38卷第11期,第102—124页。
- [13] Li, T., Y. Qi, M. Chen, and J. Cao, “Balancing Crop Security and Sustainable Cropland Use: Policy Lessons from the Watershed Ecosystem Service Payments in Xin'an River, China”, *Economic Analysis and Policy*, 2023, 80, 861-879.
- [14] Lipscomb, M., and A. M. Mobarak, “Decentralization and Pollution Spillovers: Evidence from the Re-Drawing of County Borders in Brazil”, *The Review of Economic Studies*, 2017, 84(1), 464-502.
- [15] 刘洪铎、陈钊泳、陈晓珊,“数字化转型的环境绩效研究——来自中国制造业上市公司的微观证据”,《社会科学》,2023年第5期,第126—137+14页。
- [16] 龙文滨、胡珺,“节能减排规划、环保考核与边界污染”,《财贸经济》,2018年第39卷第12期,第126—141页。
- [17] Lu, M., Y. Suzuki, X. Xi, L. Xu, and Y. Zhong, “Pro-Manufacturing Land Policies of Competing Local Governments: A Quantitative Analysis of China”, *SSRN Working Paper*, 2024.
- [18] 马莉、田艳平、汪涌,“流域生态补偿与经济活动空间重配置:基于镇级面板数据”,《中国人口·资源与环境》,2024年第34卷第11期,第151—162页。
- [19] 牛坤玉、金书秦、钟钰,“基于多区域投入产出模型的国际贸易隐含水体氮排放转移研究”,《中国人口·资源与环境》,2019年第29卷第1期,第160—167页。
- [20] Oates, W. E., “A Reconsideration of Environmental Federalism”, *Recent Advances in Environmental Economics*, 2002, 1-32.
- [21] 潘郭钦、包群、黄睿,“随风而动:环境监管规避与企业选址调整”,《经济学》(季刊),2023年第23卷第3期,第913—928页。
- [22] Sigman, H., “Transboundary Spillovers and Decentralization of Environmental Policies”, *Journal of Environmental Economics and Management*, 2005, 50(1), 82-101.
- [23] Song, Y., Z. Li, T. Yang, and Q. Xia, “Does the Expansion of the Joint Prevention and Control Area Improve the Air Quality? —Evidence from China's Jing-Jin-Ji Region and Surrounding Areas”, *Science of the Total Environment*, 2020, 706, 136034.
- [24] Vatn, A., “An Institutional Analysis of Payments for Environmental Services”, *Ecological Economics*, 2010, 69(6), 1245-1252.
- [25] 王明益、姚清仿,“全国统一大市场建设会抑制行政边界污染排放吗”,《财贸经济》,2024年第45卷第2期,第141—157页。
- [26] Wang, X., and P. Lei, “Does Strict Environmental Regulation Lead to Incentive Contradiction? —Evidence from China”, *Journal of Environmental Management*, 2020, 269, 110632.
- [27] 王永钦、张晏、章元等,“中国的大国发展道路——论分权式改革的得失”,《经济研究》,2007年第1期,第4—16页。
- [28] 吴凤平、邵志颖、季英雯,“新安江流域横向生态补偿政策的减排和绿色发展效应研究”,《软科学》,2022年第36卷第9期,第65—71页。
- [29] 夏志强、唐纪航,“边界的治理与治理的边界——跨省流域科层治理反思”,《社会科学研究》,2024年第2期,第45—54页。

- [30] 徐换歌、王峰,“行政边界、纵向干预型政府间协作与企业污染减排”,《上海行政学院学报》,2023年第24卷第4期,第68—84页。
- [31] 余典范、龙睿、王超,“数字经济与边界地区污染治理”,《经济研究》,2023年第58卷第11期,第172—189页。
- [32] Zhang K., and W. Li, “Collaborative Regional Pollution Control and Industrial Land Acquired by Polluting Firms in Border Areas—Evidence from the Air Pollution Joint Prevention and Control Policy in China”. *Energy Economics*, 2025: 108709.
- [33] 赵阳、沈洪涛、刘乾,“中国的边界污染治理——基于环保督查中心试点和微观企业排放的经验证据”,《经济研究》,2021年第56卷第7期,第113—126页。
- [34] 周黎安,“中国地方官员的晋升锦标赛模式研究”,《经济研究》,2007年第7期,第36—50页。

Does Synergistic Ecological Pollution Management Lead to Border Pollution Retransfer?

SONG Deyong WANG Yong*

(Huazhong University of Science and Technology)

Abstract: Taking the ecological compensation in the Xin'anjiang River Basin (XRBE) as an entry point, this study explores the effectiveness and leakage mechanism of this Coasian pollution synergistic management measure on boundary pollution. It reveals that the XRBE facilitates the synergistic management of water pollution in Anhui and Zhejiang, but the boundary pollution retransfer effect leads to a significant increase in water pollution in the border counties neighboring Jiangxi in Anhui. The strategic emission behaviors of local governments will lead to the leakage of the effectiveness of the XRBE.

Keywords: synergistic ecological pollution management; leakage of effectiveness; border pollution retransfer

JEL Classification: D62, H77, Q53

* Corresponding Author: WANG Yong, School of Economics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China; Tel: 86-15172430864; E-mail: wy29@hust.edu.cn.