

环境分权与经济竞争背景下河流跨界污染的县域证据

宋德勇 教授

张麒 博士生

华中科技大学经济学院



引言

- 河流兼具竞争性和非排他性，决定着流域水资源的利用存在着“拥挤效应”和“过度使用”等矛盾。
- 部分学者提出通过环境分权体制来改善公共服务（Oates, 1972; Wolf et al., 2005）
- 约旦河、印度河、太湖等诸多流域的冲突，尤其是嘉兴—盛泽“零点事件”，使得学术界开始重新审视分权体制。
- 县级行政区与流域整体之间存在着收益与成本的非一致性，这可能触发各地区在流域水环境治理方面对下游的“以邻为壑”行为。

主要内容

- 一、问题提出
- 二、制度背景与研究假说
- 三、研究设计
- 四、河流污染“跨界效应”检验
- 五、稳健性和异质性分析
- 六、研究结论与政策建议

- 环境地方分权治理体制和环境质量的关系：
 - 支持：Oates(1972, 1999, 2001), Johnsson and Kemper(2005), Sigman(2014)
 - 反对：胡若隐(2006), Burgess et al. (2012)
 - 其他：Brannstrom(2004), Konisky and Woods(2016)
- 国外河流的“跨界污染”问题
 - 国际跨界：Sigman(2002), Gray and Shatnerian(2004), Bernauer and Kuhn (2010)
 - 府际跨界：Sigman(2005), Helland and Whitford(2003), Lipscomb and Mobarak (2017)
 - 异质性比较：Konisky and Woods(2010, 2012)



问题提出：研究现状

- 中国河流“跨界污染”：

- 存在性：Cai et al. (2016), 李静等(2015, 中国工业经济;2015, 中国软科学), Kahn(2015), Duvivier(2013)

- 原因剖析：Tyler(2005)

- 对策：沈大军和王浩(2004), 施祖麟和毕亮亮(2007), 李胜和陈晓春(2011)

- 国外研究，起步较早，国内相对滞后；
- 中国虽然已经认识到跨界河流污染治理的困境，但是目前的研究主要集中在定性分析和理论描述之上；
- 实证：主要集中在省际层面，或是某一流域的研究，缺乏从全国范围内对地级市乃至县域的研究；
- 跨界度量：虚拟变量的方法，无法反应背后的企业布局行为。

——在内容上而言，

探讨县域层面跨界污染的机制与证据

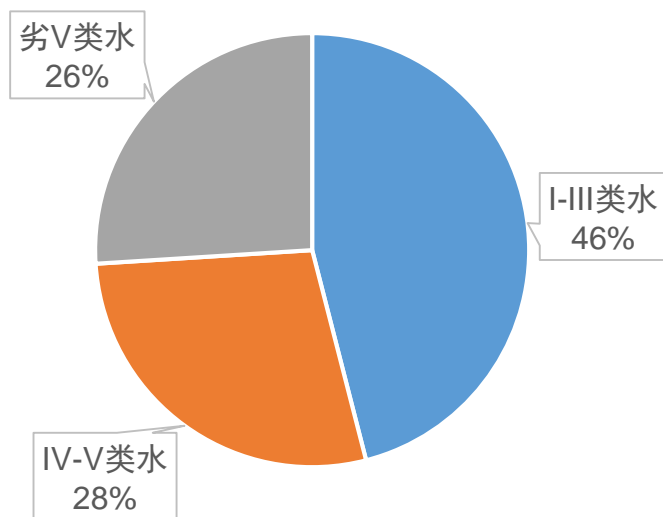
——边界变量测度，

采用边界距离的连续性数据，替代传统的虚拟变量，缓解估计的内生性问题。

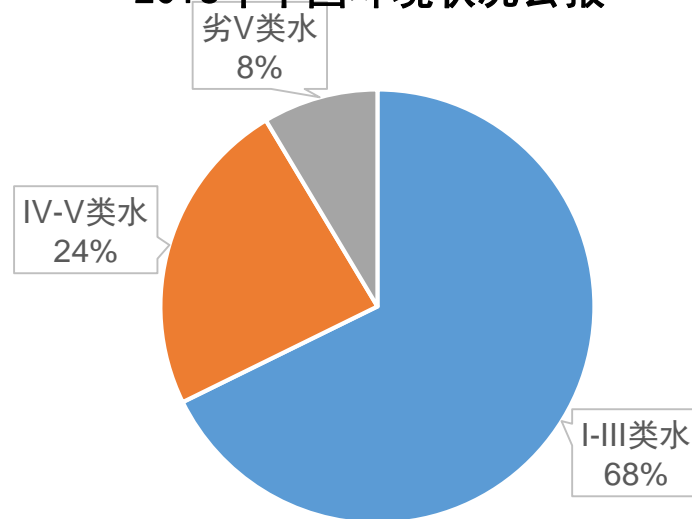
1. 工业企业布局与流域污染

- 中国七大主要河流流域占全国总面积的51%，却承担着全国84%的GDP贡献率；
- 仍有近1/3的水质达不到集中式生活饮用水标准，2016年底中央第二次环境督查结果也发现被督查省份流域污染问题依然非常突出；
- 很多地方政府凭借着优质港口和腹地滩涂等先天资源优势，都毫不犹豫把化工产业当成其发展支柱，一些以重化工为主导产业的央企更成为地方政府争夺的主要对象。

2006年中国环境状况公报



2016年中国环境状况公报



1. 工业企业布局与流域污染

- 根据右图发现，2016年中国化工企业500强呈现出鲜明的沿河布局的特征，且集中分布于东中部地区，尤其是京津冀、长三角和珠三角地区。
- 从全国来看，化工企业500强在地理位置选择上带有很强的“乞邻”行为，更倾向于在更靠近下游边界地区布局。

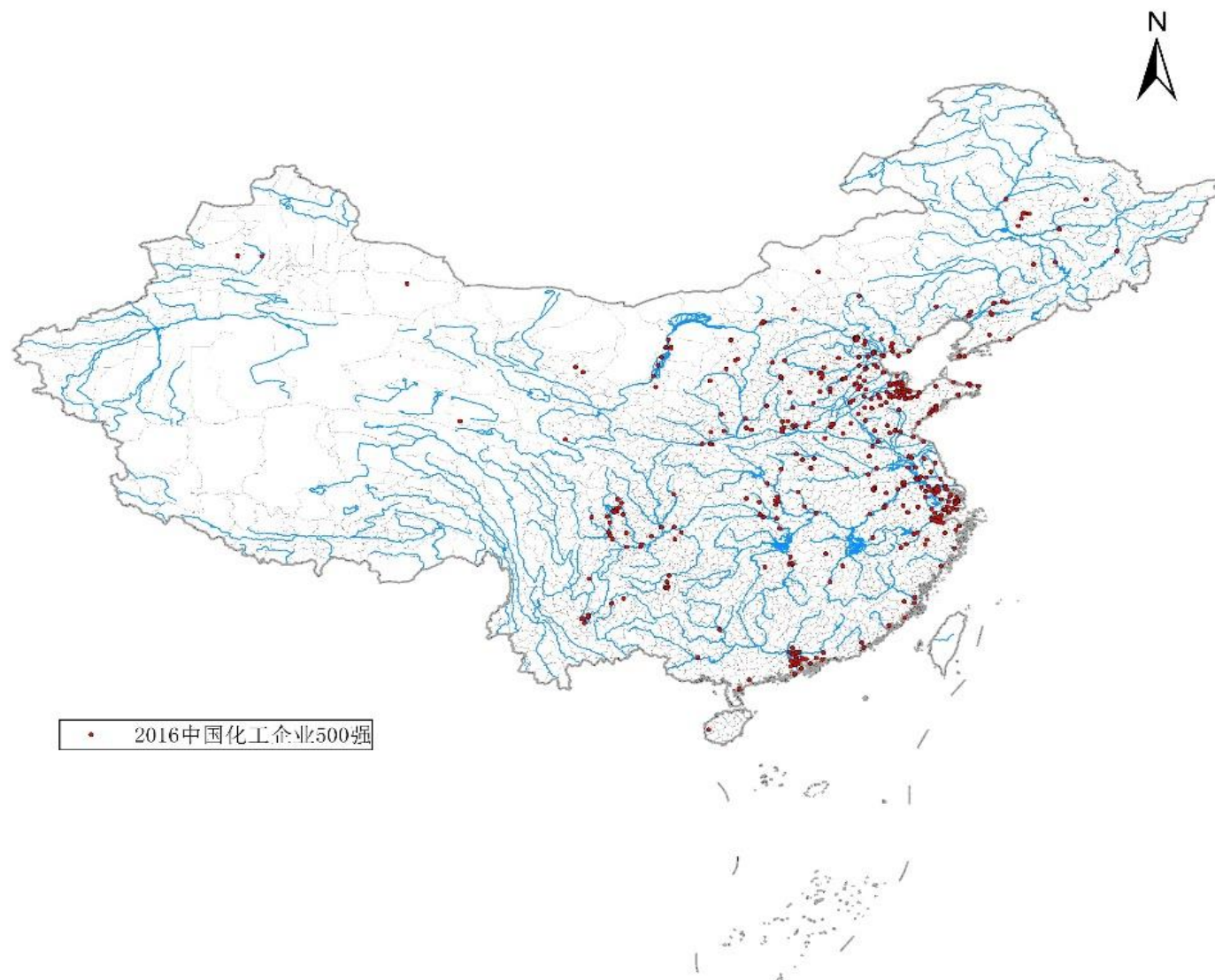


图1 2016年中国化工企业500强分布情况

1. 工业企业布局与流域污染

- 以长江三角洲为例，如右图，大部分500强化工企业选择布局在靠近县下游边界的地区，主要集中布局于长江干流以及支流（支流部分未予以呈现）、钱塘江、京杭运河等河流沿岸靠下游县界地区，县域“跨界”特征显著。



图2 长江三角洲地区化工企业中国500强分布情况

1. 工业企业布局与流域污染

典型化事实：

- 根据《中国开发区审核公告目录》，在长江沿岸，仅**省级以上化工产业园区**就有**50**余个，其中近**80%**布局在更靠近下游边界地区。
- 产业园区集中布局于**[0.6, 0.9]**区间内，即更倾向于布局于靠近下游边界地区。

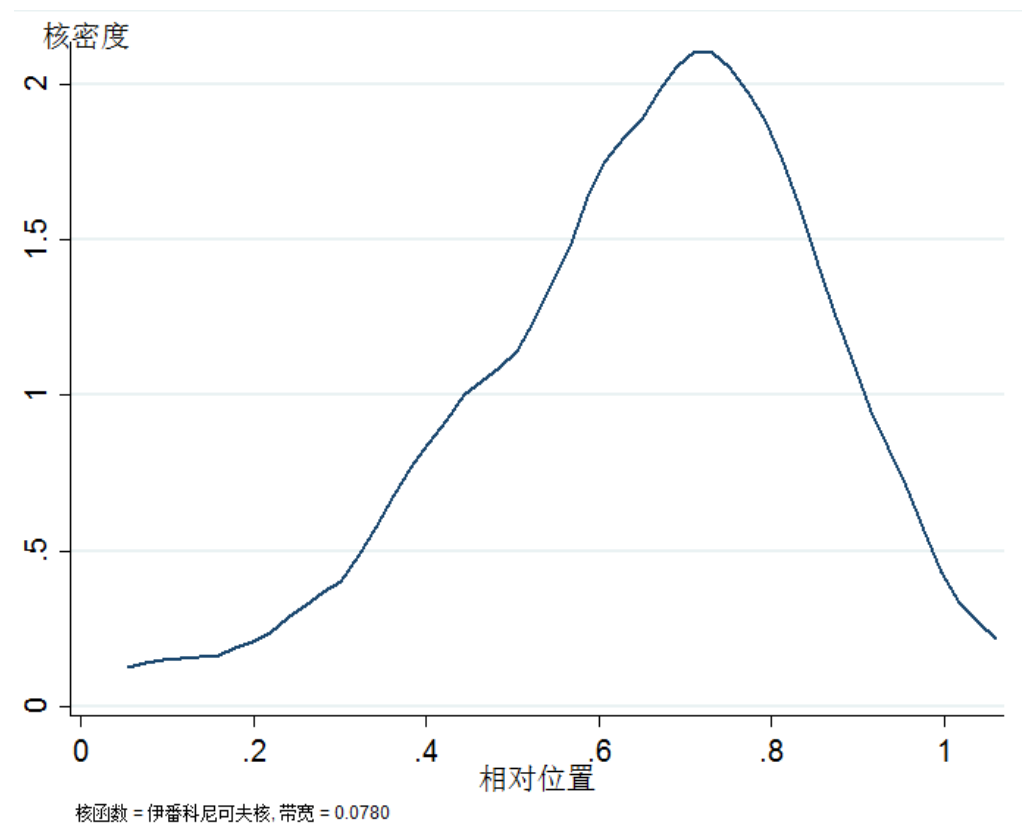


图3 长江沿岸化工产业园区布局相对位置Kernel分布

2. 流域管理体制与水污染监测

- 《水法》：国家对水资源实行流域管理与行政区域管理相结合的管理体制；
- 《环保法》：地方各级人民政府应当根据环境保护目标和治理任务，采取有效措施，改善环境质量；
- 1980年成立中国环境监测总站，1999年环保总局（现环保部）开展试点在松花江、淮河、长江、黄河及太湖流域的重点断面建设了10个水质自动监测站，并于2004年开始实行水质自动监测周报制度，2017年国控监测站点已达149个。

3. 县级政府环境治理行为

1) 环境分权导致县级政府环境治理的本位主义和污染溢出

- 行政刚性分割而衍生出的“碎片化治理”模式，缺乏同级政府间有效的横向协调机制；
- 当前中国环保垂直管理改革尚处于探索阶段，县级环保职能部门仍然处于两难的境地。

2) 县域经济竞争导致当地政府对污染项目激烈的招商竞争

- 从经济利益看，自90年代社会主义市场经济体制和分税制财政体制改革以来，县级政府在享受更大行政自主权的同时，也面临着更大的绩效考核的压力
- 各县域地区通过事前的经济计划和产业规划，使得污染企业更容易倾向性地被布局在当地下游地区而非上游地区，事中实施较为宽松的环境监管与事后实施弹性执法。

4. “累积效应”和“自净效应”的动态影响

- 随着不断接近下游边界，相对于河流“自净效应”，污染的“累积效应”居于相对主导地位。
- 跨越边界后，下游县的上游地区，污染“累积效应”减弱，河流“自净效应”相对较强并居于相对主导地位。

1. 河流污染的外部模型及假设

- 在 x 处的福利水平为：

$$\omega(x, q_x) = g(x) \left[\frac{q_x^{1-\theta}}{1-\theta} - p q_x \right] - \int_x^s q_x e^{-\alpha(v-x)} g(v) dv \quad (1)$$

- Note:

$g(x)$ —坐落于 x 处的人口概率密度函数；

$\frac{q_x^{1-\theta}}{1-\theta}$ —个体效用函数具有相对风险规避系数不变（CRRA）的特征；

p —消费 q_x 单位的边际成本；

$q_x \cdot e^{-(t-x)}$ —在 t 处感受到上游 x 排放的污染（考虑到河流“自净效应”，这种污染会随着向下游的流动呈现出指数式衰减的特征）；

$\int_x^s q_x e^{-\alpha(v-x)} g(v) dv$ —河流“自净效应”与污染“累积效应”的交互作用；

s —下游管辖边界。

1. 河流污染的外部模型及假设

- 一个管辖区的总福利：

$$W(x, q_x) = \int_0^s \left[g(x) \left[\frac{q_x^{1-\theta}}{1-\theta} - p q_x \right] - \int_x^s q_x e^{-\alpha(v-x)} g(v) dv \right] dx \quad (2)$$

- 根据变分法取一阶条件，：

$$g(x)(q_x^{*-\theta} - p) - \int_x^s e^{-\alpha(v-x)} g(v) dv = 0 \quad (3)$$

显性解：

$$q_x^{*-\theta} - p = \frac{\int_x^s e^{-\alpha(v-x)} g(v) dv}{g(x)} \quad (4)$$

1. 河流污染的外部模型及假设

- 假设1：随着河流流向下游边界，污染递增。

对（3）求全微分并整理，可得：

$$\frac{\partial q_x^*}{\partial x} = \frac{g'(x)[q_x^{*- \theta} - p] + g(x) - \int_x^s \alpha e^{-\alpha(v-x)} g(v) dv}{-\theta q_x^{*- \theta - 1} g(x)} \quad (5)$$

把（4）代入上式，并取极限，得到：

$$\lim_{x \rightarrow s} \frac{\partial q_x^*}{\partial x} = \lim_{x \rightarrow s} \frac{g'(x) \frac{\int_x^s e^{-\alpha(v-x)} g(v) dv}{g(x)} + g(x) - \int_x^s \alpha e^{-\alpha(v-x)} g(v) dv}{-\theta q_x^{*- \theta - 1} g(x)} = \frac{1}{\theta q_x^{*- \theta - 1}} > 0 \quad (6)$$

因此有 $\lim_{x \rightarrow s} \frac{\partial q_x^*}{\partial x} > 0$ ，假设1成立。

1. 河流污染的外部模型及假设

- 假设2：随着河流流向下游边界，污染递增速度越来越快

对（5）求导，并取 $x \rightarrow s$ 时的极限可得：

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow s} \frac{\partial^2 q_x^*}{\partial x^2} &= \frac{\alpha g(s) \cdot \theta q_s^{*- \theta - 1} \cdot g(s) + [(\theta + 1) q_s^{*-1} g(s) - \theta q_s^{*- \theta - 1} g'(s)] g(s)}{(\theta q_s^{*- \theta - 1} \cdot g(s))^2} \\ &= \frac{\alpha \cdot \theta q_s^{*- \theta - 1} + (\theta + 1) q_s^{*-1} - \theta q_s^{*- \theta - 1} \frac{g'(s)}{g(s)}}{(\theta q_s^{*- \theta - 1})^2} \end{aligned} \quad (6)$$

在边界附近人口增长速度经验性递减，使得 $g'(s) < 0$ ， $\theta q_s^{*- \theta - 1} \frac{g'(s)}{g(s)} < 0$

所以 $\lim_{x \rightarrow s} \frac{\partial^2 q_x^*}{\partial x^2} > 0$ ，假设2成立。

1. 河流污染的外部模型及假设

- 假设3：河流边界两侧污染排放存在结构性变化。

在行政管辖区 $[s_{k-1}, s_k]$ 内，趋近于下游边界 s_k 的污染排放：

$$\lim_{x \uparrow s_k} \frac{\partial q_b^*}{\partial x} = \frac{1}{\theta q_{s_k}^{*- \theta - 1}} > 0 \quad (7)$$

在行政管辖区 $[s_k, s_{k+1}]$ 内，趋近于上游边界 s_k 的污染排放：

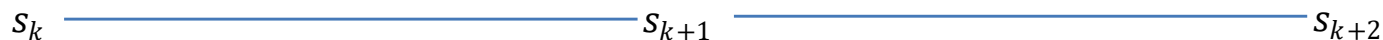
$$\lim_{x \downarrow s_k} \frac{\partial q_b^*}{\partial x} = \frac{(g'(s_k) - \alpha) \int_{s_k}^{s_{k+1}} e^{-\alpha(v-x)} g(v) dv}{g(s_k) \theta q_{s_k}^{*- \theta - 1}} + \frac{1}{\theta q_{s_k}^{*- \theta - 1}} \quad (8)$$

因此， $\lim_{x \uparrow s_k} \frac{\partial q_b^*}{\partial x} > \lim_{x \downarrow s_k} \frac{\partial q_b^*}{\partial x}$ ，假设3成立。

1. 河流污染的外部模型及假设

- 假设4：河流跨越的行政边界越多，污染排放越大。

考虑在下图中删除 s_{k+1} 处的边界：


$$s_k \quad \text{-----} \quad s_{k+1} \quad \text{-----} \quad s_{k+2}$$

经过证明：

$$\int_{s_k}^{s_{k+2}} q_x dx < \int_{s_k}^{s_{k+1}} q_x dx + \int_{s_{k+1}}^{s_{k+2}} q_x dx \quad (9)$$

因此，污染随着越过边界的总数量增加而越来越多，假设4成立。

2. 污染函数情景模拟

- 假定人口服从“三角双峰分布”。
- 考虑两个维度下的情景模拟：
 - 维度一：是否存在行政分割；
 - 维度二，环境规制程度，即排污限额 \bar{q} ，分别考虑 $\bar{q} = \infty$ （无环境规制）、 $\bar{q} = 80$ （宽松的环境规制）、 $\bar{q} = 40$ （适中的环境规制）和 $\bar{q} = 10$ （严苛的环境规制）的情况。

Note:

区间 $[0,1]$ 只囊括了上游县和下游县靠近边界 s 处部分行政区域，0并非上游县的上边界，同理点1处也并非下游县的下边界。

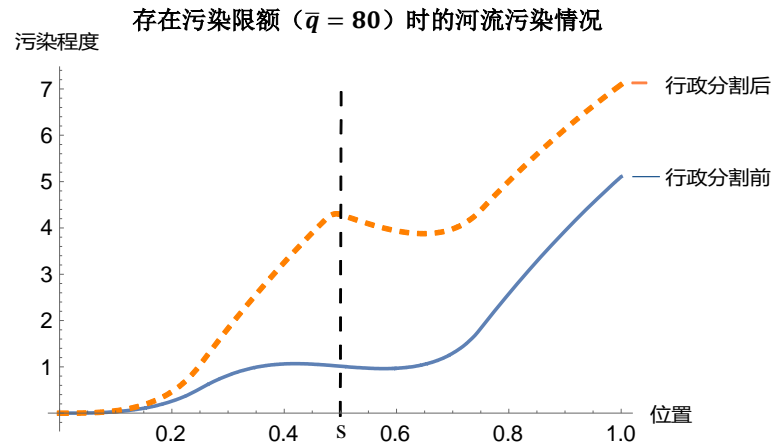
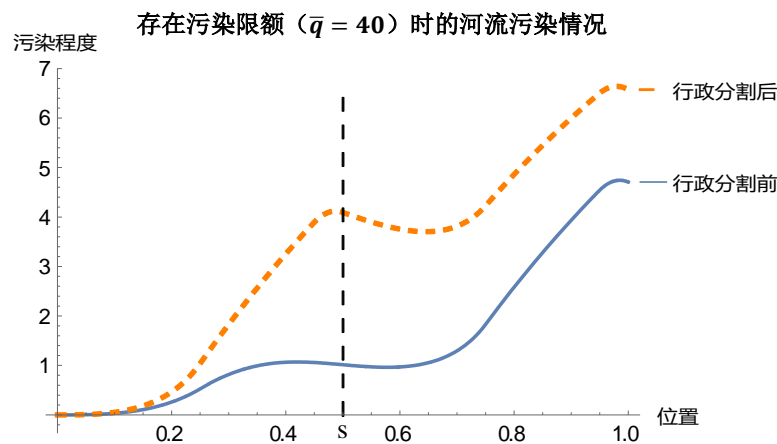
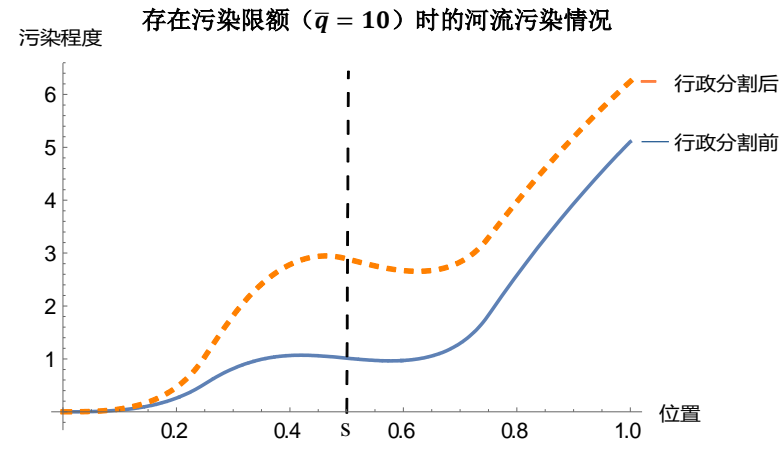
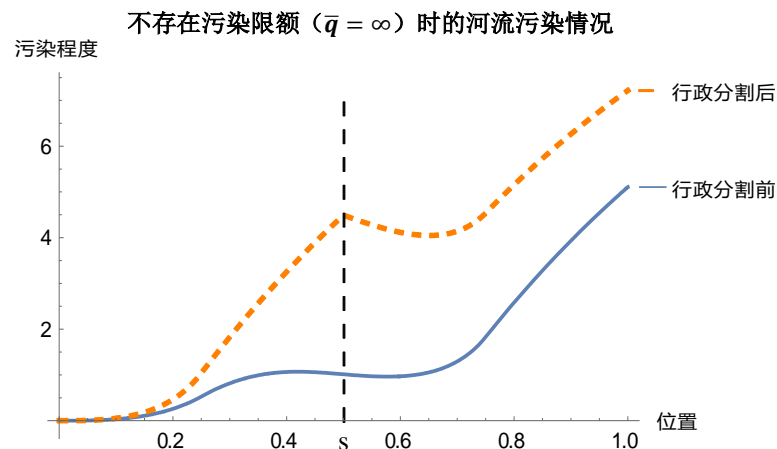


图4 不同环境规制程度下 ($\bar{q} = \infty, 10, 40, 80$) 时的河流污染情况

- 根据研究思路，建立如下估计方程：

$$\begin{aligned} Pollution_{i,t} = & \beta_1 \cdot (D1)_{i,t} + \beta_2 \cdot (D1)_{i,t}^2 + \beta_3 \cdot (U1)_{i,t} + \beta_4 \cdot (U1)_{i,t}^2 \\ & + \sum_k \lambda_k \cdot X_{i,t}^k + \sum \gamma_{year} + \sum \delta_{quarterly} + \theta_t + \mu_i \cdot \theta_t + \varepsilon_{i,t} \end{aligned}$$

$Pollution_{i,t}$ --河流断面水质的4项检测指标（COD、NH₃-N、DO和pH）的对数值；

$U1$ --表示县上游边界到监测站沿河距离的向量值（ $U1 > 0$ ）

$D1$ --县下游边界到监测站沿河距离的向量值（ $D1 < 0$ ）

Note:

由于国控水质监测站并非完全位于边界分界线上，处于省界处的监测站距离边界线仍有一定的距离，因而仅仅使用是否位于省界上的二值模型（1表示在省界，0表示其他情况），无法更加精准地量化跨界污染的问题，也无法测度一个省内部的跨界污染。

因而，对观测站距离县边界的测度成为一个更佳的选择。

- 根据研究思路，建立如下估计方程：

$$Pollution_{i,t} = \beta_1 \cdot (D1)_{i,t} + \beta_2 \cdot (D1)_{i,t}^2 + \beta_3 \cdot (U1)_{i,t} + \beta_4 \cdot (U1)_{i,t}^2 + \sum_k \lambda_k \cdot X_{i,t}^k + \sum \gamma_{year} + \sum \delta_{quarterly} + \theta_t + \mu_i \cdot \theta_t + \varepsilon_{i,t}$$

表 1 变量定义及数据来源
Tab. 1 Definition of variables and data sources

变量性质	变量名称	变量含义	数据来源
被解释变量	lnPollution	水质指标:COD(mg/L)、NH ₃ - N(mg/L)、DO(mg/L)、pHabs 的自然对数值,其中 pHabs = pH - 7 。	中国环境监测总站
核心解释变量	D1、(D1) ²	边界变量:县下游边界到监测站沿河曲线距离及平方项的向量值(km),即 D1 = - D1 。	根据 ArcGis 10.2 软件的测算得到
	U1、(U1) ²	边界变量:县上游边界到监测站沿河曲线距离及平方项的向量值(km),即 U1 = U1 。	根据 ArcGis 10.2 软件的测算得到
控制变量	lnPop	县域社会特征:常住人口(万人)的自然对数	公共卫生科学数据中心、中国经济与社会发展统计数据库、各县统计公报、各级政府统计年鉴等
	lnGDP1	县域经济特征:第一产业增加值(万元)的自然对数	
	lnnGDP2	县域经济特征:第二产业增加值(万元)的自然对数	
	lnGDP3	县域经济特征:第三产业增加值(万元)的自然对数	
	lnArea	县域自然特征:土地面积(km ²)的自然对数	
	lnRain	县域自然特征:年降水量(mm)的自然对数	
	lnTem	县域自然特征:年均气温(℃)的自然对数	
	lnLength	县域自然特征:河长(km)的自然对数	

- 河流水质的衡量指标：

化学需氧量（COD）、氨氮（ $\text{NH}_3\text{-N}$ ）、溶解氧（DO）和pH值，其数据来源于中国环境监测总站的国控水质监测站点的周数据，其研究区间为2004-2014年，共计624个周。

指标特点：

—相比于废水排放量等总量衡量指标，国控监测站的断面数据，为末端监测数据，不仅将传统工业对河流水质的影响考虑了进来，而且还考虑了农业、服务业等部门对河流直接和间接影响；

—河流的自净能力以及其他不可观测的影响因素也充分体现在水质衡量指标之中；

—国控监测站数据为实时监测数据，并直接由环保部负责，因而受到地方政府的干预可能性更小，而庞大的数据量也导致人工干预成本巨大；

表 2 各类变量的描述性统计
Tab. 2 Descriptive statistics of variables

变量		样本数	均值	标准差	最小值	最大值
水质指标	$\ln COD$	2 759	1. 265	0. 752	-0. 937	6. 078
	$\ln NH_3 - N$	2 764	-0. 919	1. 192	-3. 912	3. 534
	$\ln DO$	2 760	1. 927	0. 541	-3. 912	2. 961
	$\ln pH$	2 764	-0. 614	0. 944	-6. 477	0. 727
边界变量	$ D1 $	2 904	27. 581	23. 730	2. 600	129. 800
	$(D1)^2$	2 904	1 323. 627	2 575. 854	6. 760	16 848. 040
	$U1$	2 904	27. 842	30. 604	0. 621	135. 600
	$(U1)^2$	2 904	1 711. 499	3 888. 777	0. 385	18 387. 360
县域社会特征	$\ln Pop$	2 904	3. 925	0. 718	1. 960	5. 766
县域经济特征	$\ln GDP1$	2 904	2. 415	1. 422	-4. 605	4. 621
	$\ln GDP2$	2 904	3. 812	1. 306	-0. 788	7. 353
	$\ln GDP3$	2 904	3. 585	1. 146	0. 607	11. 803
县域自然特征	$\ln Area$	2 904	7. 277	1. 048	2. 996	9. 578
	$\ln Rain$	2 904	6. 665	0. 570	4. 040	7. 764
	$\ln Tem$	2 904	2. 586	0. 571	-4. 075	3. 174
	$\ln Length$	2 904	7. 849	0. 768	6. 908	8. 748

表3 $\ln COD$ 、 $\ln NH_3 - N$ 回归估计结果Tab. 3 Regression estimate results of $\ln COD$ and $\ln NH_3 - N$

	$\ln COD$			$\ln NH_3 - N$		
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
$D1$	0.005 86 *** (-3.62)	0.009 12 *** (-7.40)	0.012 27 *** (-9.31)	0.006 83 ** (-2.78)	0.010 10 *** (-4.54)	0.012 97 *** (-6.00)
$(D1)^2$	0.000 026 (1.59)	0.000 042 *** (3.95)	0.000 075 *** (6.65)	-0.000 007 (-0.32)	0.000 013 (0.72)	0.000 043 * (2.35)
$U1$	-0.006 98 *** (-5.85)	-0.010 30 *** (-9.75)	-0.012 40 *** (-11.08)	-0.012 50 *** (-6.43)	-0.016 20 *** (-8.76)	-0.018 20 *** (-9.88)
$(U1)^2$	0.000 066 *** (6.40)	0.000 066 *** (7.40)	0.000 086 *** (9.25)	0.000 050 *** (3.55)	0.000 056 *** (3.97)	0.000 075 *** (5.30)
$\ln Pop$		0.152 *** (6.24)	-0.018 (-0.55)		0.416 *** (10.00)	0.256 *** (4.99)
$\ln GDP1$		0.057 *** (4.57)	0.101 *** (7.91)		0.074 ** (3.10)	0.117 *** (4.83)
$\ln GDP2$		0.023 (1.04)	0.085 *** (3.71)		-0.075 * (-2.38)	-0.023 (-0.70)
$\ln GDP3$		-0.118 *** (-4.83)	-0.055 ** (-2.84)		-0.122 *** (-3.65)	-0.057 (-1.89)
$\ln Area$		-0.237 *** (-13.61)	-0.242 *** (-14.31)		-0.315 *** (-10.82)	-0.320 *** (-11.54)
$\ln Rain$		-0.332 *** (-10.99)	-0.315 *** (-10.39)		-0.493 *** (-11.25)	-0.477 *** (-10.94)
$\ln Tem$		-0.514 *** (-9.25)	-0.548 *** (-9.83)		-0.552 *** (-8.35)	-0.580 *** (-8.52)
$\ln Length$		-0.253 *** (-16.09)	-0.304 *** (-17.71)		-0.253 *** (-8.41)	-0.299 *** (-10.17)
季度效应	No	No	Yes	No	No	Yes
年度效应	No	No	Yes	No	No	Yes
样本数	2 759	2 759	2 759	2 764	2 764	2 764
调整 R^2	0.023	0.355	0.375	0.060	0.253	0.299

• COD、 NH_3-N 回归估计结果

--D1估计系数显示，随着河流每接近县下游边界1千米，COD上升近0.012%、 NH_3-N 上升近0.013%，与假设1的预测一致。

-- $(D1)^2$ 估计系数显示，随着河流越来越接近下游边界，COD的污染递增长速度以每千米0.000075%的速率增长， NH_3-N 的污染增速以0.000043%的速度增长，与假设2和图3的预测一致。

- 从县域经济因素角度看：

表3中，*GDP1*的系数在1%水平下显著为正，表明传统农业比较发达的地区，农业产业对*COD*、*NH₃-N*贡献比较大，这种影响一般是通过农田中的土粒、氮素、磷素、农药重金属、农村生活污水等有机物或无机物，在降雨和径流的冲刷下，通过农田地表径流、农田排水和地下渗透等方式，进入河流之中。农业面污染可能是当前河流污染的重要来源之一，而这与《第一次全国污染源普查公报》调查结果吻合。

表3中*GDP2*的系数也为显著正，进一步佐证了在现有的粗放式发展模式下，工业发展对河流污染的影响。而表3中*GDP3*显著为负的系数，也许能够说明转变经济发展方式、优化地方产业结构、优先发展服务业，不仅仅有利于提高中国经济的质量和竞争力，对于治理以河流污染为代表的环境问题也大有裨益。

四 河流污染“跨界效应”检验：环境地方分权与“跨界效应”检验

单一的观测站设置并不能让我们检验假设4，因为对于单个观测站，无法定义县边界的交叉数量。为此，本文通过引入变量*Crossings*来表示同一条河流上相邻两个观测站之间穿越县边界的数量，作为衡量地方分权程度的一个重要指标。模型构建如下：

$$\Delta Pollution_{i,t} = \beta_1 \cdot \text{Crossings}_i + \beta_2 \cdot (D1)_{i,t} + \beta_3 \cdot (U2)_{i,t} + \beta_4 \cdot (U1)_{i,t} + \beta_5 \cdot (D2)_{i,t} + \beta_6 \cdot (\text{Crossings} \cdot D1)_i + \sum_k \lambda_k \cdot X_{i,t}^k + \sum \delta_{month} + \sum \gamma_{year} + \theta_t + \mu_i + \mu_i \cdot \theta_t + \varepsilon_{i,t} \quad (7)$$

其中， $\Delta Pollution_{i,t} = \ln(Pollution_{i,t}^2) - \ln(Pollution_{i,t}^1)$

--预期*Crossings*的估计系数 $\beta_1 > 0$ ；

--随着河流越接近下游边界（*D1*越来越小），污染水平*Pollution*_{*i,t*}¹越来越高，进而导致 $\Delta Pollution_{i,t}$ 越来越小，因此，预期 $\beta_2 < 0$ ；

--边界两侧存在污染存在结构性变化可知 $\beta_2 \neq \beta_3$ ，或者，更理想的预期是 $\beta_3 < 0$ 。

四

河流污染“跨界效应”检验：单个站点的检验

--根据表4，从估计结果可以看出Crossings估计系数均显著为正，在 ΔCOD 估计式（3）中，随着河流穿越县域边界数量每增加一条，下游COD比上游高出0.0102%，而 NH_3-N 高出0.0125%。

--均显示Crossings估计系数显著为正，印证了假设4。

--D1估计系数显著为负，而U1估计系数符号为负，与前预期的 β_2 和 β_3 符号一致。

表 4 站组下的 ΔCOD 、 $\Delta NH_3 - N$ 估计结果
Tab. 4 Estimate result of ΔCOD 、 $\Delta NH_3 - N$

	ΔCOD			$\Delta NH_3 - N$		
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Crossings	0.011 60 *** (5.47)	0.017 42 *** (4.84)	0.016 55 *** (4.52)	0.017 17 *** (4.05)	0.026 80 *** (4.08)	0.025 26 *** (3.75)
D1	-0.000 62 (1.60)	-0.000 99 * (2.25)	-0.001 02 * (2.31)	-0.004 35 *** (4.07)	-0.009 59 *** (4.04)	-0.009 97 *** (4.13)
U2	0.001 81 *** (3.59)	0.004 44 *** (3.75)	0.004 61 *** (3.84)	-0.000 01 (-0.00)	-0.003 73 ** (-2.74)	-0.003 28 * (-2.37)
U1	0.000 69 (1.21)	-0.001 2 (-1.52)	-0.000 94 (-1.19)	0.002 51 *** (3.51)	0.002 90 *** (3.66)	0.003 00 *** (3.79)
D2	-0.004 59 *** (7.37)	-0.004 47 *** (7.13)	-0.004 11 *** (6.64)	-0.002 71 * (2.01)	-0.002 47 (1.84)	-0.001 64 (1.22)
Crossings · D1		0.000 190 * (-2.38)	0.000 185 * (-2.28)		0.000 373 * (-2.52)	0.000 372 * (-2.47)
控制变量	No	Yes	Yes	No	Yes	Yes
季度效应	No	No	Yes	No	No	Yes
年度效应	No	No	Yes	No	No	Yes
样本数	1 981	1 981	1 981	1 856	1 856	1 856
调整 R ²	0.081	0.238	0.230	0.044	0.234	0.231

--溶解氧DO是衡量河流自净能力的一个重要指标，与COD、NH₃-N相反，其含量越低，表明河流水质条件越差，因此模型1估计系数也应与COD和NH₃-N相反（ $\beta_1 < 0, \beta_2 < 0, \beta_3 > 0, \beta_4 < 0$ ）。

--pH值作为衡量河流酸碱度的指标，在测度河流污染情况时，更应该考虑其对于中性水的偏离值，即 $pHabs = |pH - 7|$ ，pHabs越大，河流污染越重。

表 5 lnDO、lnpHabs 回归估计结果
Tab. 5 Regression estimate result of lnDO and lnpHabs

	lnDO				lnpHabs	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
D1	-0.002 45 *	-0.000 25	-0.00 21	0.019 68 ***	0.018 63 ***	0.018 18 ***
	(2.40)	(0.26)	(1.96)	(-9.71)	(-9.69)	(-9.76)
(D1) ²	0.000 001	0.000 018 **	-0.000 001	0.000 163 ***	0.000 164 ***	0.000 160 ***
	(0.11)	(2.58)	(-0.13)	(10.05)	(10.93)	(10.66)
U1	0.003 97 ***	0.003 81 ***	0.005 10 ***	-0.000 25	-0.006 00 ***	-0.005 90 ***
	(5.01)	(4.30)	(5.42)	(-0.16)	(-3.66)	(-3.47)
(U1) ²	-0.000 013 *	-0.000 013	-0.000 024 ***	-0.000 026	0.000 043 **	0.000 042 **
	(-2.35)	(-1.83)	(-3.34)	(-1.84)	(3.02)	(2.82)
控制变量	No	Yes	Yes	No	Yes	Yes
季度效应	No	No	Yes	No	No	Yes
年度效应	No	No	Yes	No	No	Yes
样本数	2 760	2 760	2 760	2 763	2 763	2 763
调整 R ²	0.034	0.096	0.141	0.052	0.153	0.162

注：***、**和*分别表示1%、5%和10%的显著性水平；季度效应虚拟变量以2004年第1季度为基准，年度效应2004年为基准；括号内为t统计量，常数项予以省略。

--对于样本中每个站点的水质监测指标（*COD*、*NH₃-N*），分别剔除了1%、5%和10%的异常值进行稳健性分析。

附表1 站点下的*COD*、*NH₃-N*稳健性检验

	被解释变量 <i>COD</i>			被解释变量 <i>NH₃-N</i>		
	1% drop	5% drop	10% drop	1% drop	5% drop	10% drop
<i>DI</i>	0.00953*** (-8.19)	0.00569*** (-5.55)	0.00529*** (-5.33)	0.0101*** (-4.91)	0.00736*** (-3.92)	0.00651*** (-3.73)
<i>(DI)²</i>	0.0000530*** (5.29)	0.0000313*** (3.36)	0.0000305*** (3.36)	0.0000223 (1.26)	0.0000111 (0.68)	0.0000127 (0.81)
<i>UI</i>	-0.00949*** (-9.72)	-0.00630*** (-7.64)	-0.00474*** (-6.00)	-0.0156*** (-8.85)	-0.00936*** (-5.83)	-0.00444** (-3.00)
<i>(UI)²</i>	0.0000664*** (7.68)	0.0000385*** (5.43)	0.0000232*** (3.49)	0.0000582*** (4.24)	0.0000205 (1.63)	-0.00000761 (-0.65)
<i>Pop</i>	0.0513 (1.80)	0.116*** (4.84)	0.104*** (4.48)	0.304*** (6.19)	0.243*** (5.56)	0.157*** (3.83)
<i>GDP1</i>	0.0892*** (7.26)	0.0607*** (5.42)	0.0815*** (6.76)	0.109*** (4.45)	0.0714** (2.98)	0.0557* (2.45)
<i>GDP2</i>	0.0148 (0.84)	-0.0281 (-1.95)	-0.0364** (-2.59)	-0.0801** (-2.67)	-0.0594* (-2.25)	-0.0473 (-1.81)
<i>GDP3</i>	-0.0434** (-2.82)	-0.00592 (-0.51)	0.0157 (1.32)	-0.0446 (-1.63)	0.00942 (0.39)	0.0746** (2.71)
<i>Area</i>	-0.232*** (-14.41)	-0.200*** (-14.18)	-0.197*** (-14.51)	-0.308*** (-11.39)	-0.220*** (-8.84)	-0.136*** (-5.98)
<i>Rain</i>	-0.265*** (-9.55)	-0.197*** (-8.35)	-0.158*** (-6.36)	-0.426*** (-10.13)	-0.285*** (-7.30)	-0.193*** (-5.41)
<i>Tem</i>	-0.524*** (-9.60)	-0.505*** (-9.92)	-0.543*** (-9.95)	-0.552*** (-8.26)	-0.528*** (-8.26)	-0.495*** (-8.33)
<i>Length</i>	-0.300*** (-18.07)	-0.277*** (-20.16)	-0.235*** (-18.47)	-0.314*** (-10.88)	-0.299*** (-11.12)	-0.243*** (-9.67)
季度效应	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
年度效应	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
样本数	2731	2621	2483	2736	2626	2488
调整 R ²	0.422	0.479	0.474	0.305	0.270	0.228

五

稳健性分析：地区异质性检验

--*COD*和*NH₃-N*的估计结果在5%显著性水平下与前面结论基本一致。

--东部地区高度密集的产业园区和人口集聚，较弱的“自净效应”使得河流在跨越边界后污染程度继续增加但增速放缓（*UI*>0，*(UI)*²<0）。

--中西部相对偏弱的产业密集度和较好的生态环境，因此在中西部县域上游地区“自净效应”强于东部地区，随着跨越边界，污染呈现加速下降的趋势（*UI*<0，*(UI)*²>0）。

--中西部地区结构性差异程度高于东部地区。

表6 中国河流污染的地区异质性
Tab.6 Heterogeneity traits of pollution of Chinese rivers

	ln <i>COD</i>			ln <i>NH₃ - N</i>		
	东部	中部	西部	东部	中部	西部
<i>D1</i>	0.001 21 (0.48)	0.020 18 *** (-6.71)	0.012 27 *** (-9.31)	0.019 10 ** (-2.82)	0.009 43 (-1.89)	0.012 97 *** (-6.00)
<i>(D1)</i> ²	0.000 020 (0.40)	0.000 166 *** (5.84)	0.000 075 *** (6.65)	0.000 324 ** (2.64)	0.000 051 (1.03)	0.000 043 * (2.35)
<i>U1</i>	0.002 49 (0.91)	-0.008 94 *** (-3.56)	-0.012 40 *** (-11.08)	0.034 19 *** (3.88)	-0.019 47 *** (-4.66)	-0.018 21 *** (-9.88)
<i>(U1)</i> ²	-0.000 121 ** (-3.04)	0.000 067 *** (3.47)	0.000 086 *** (9.25)	-0.000 584 *** (-4.90)	0.000 085 ** (2.77)	0.000 075 *** (5.30)
控制变量	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
季度效应	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
年度效应	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
样本数	615	1 244	2 759	617	1 244	2 764
调整 R ²	0.689	0.346	0.375	0.516	0.321	0.299

(1) 中国河流县域“跨界污染”明显，河流每接近下游县边界1千米，*COD*上升近0.012%、*NH₃-N*上升近0.013%，表明随着河流流向下游边界，污染程度呈现出递增的态势

(2) 与下游县边界的距离影响着河流“跨界污染”的趋势，在污染“累积效应”作用下，随着河流越来越接近下游边界，*COD*和*NH₃-N*的污染程度加速递增。

(3) 河流污染并非一直递增，在跨越县边界后，在靠近县上界地区严格的环境监管和河流自净能力作用下，污染会有一定阶段的下降，即县边界两侧河流污染存在结构性变化。

(4) 河流跨越的行政边界越多，所面临的沟通与协调难度就越大，潜在的利益冲突下搭便车动机就更强，因而污染排放就更加严重。

（1）加快建立条块结合、权责明确、权威高效的[环保机构监测监察执法垂直管理制度](#)，针对目前国控监测站数量仍然较少的情况，在重点流域和重点河段增加监测站点，并在现有4类衡量指标上增加公布其他衡量指标

（2）进一步加强河湖管理保护工作，落实属地责任，建立健全[“河长制”长效机制](#)。立足不同地区不同河湖实际，统筹上下游、左右岸，实行一河一策、一湖一策，解决好河湖管理保护的突出问题。

（3）进一步完善流域政府横向协调机制。结合科层型、市场型、府际型协调机制各自的优势，解决好流域治理机构与行政机构、行政机构与经济主体等各方内在的利益冲突。

（4）进一步完善官员离任环境审计和绿色发展激励办法，制定更加科学的地方考核和官员晋升机制，鼓励区域环境联合执法与联合治理机制，建立健全环境联防联控体系。



谢谢！