

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2019.01.027

基于环境规制的污染企业区际间转移决策

郑云虹, 高茹, 李岩  
(东北大学工商管理学院, 辽宁沈阳 110169)

**摘 要:** 为了研究环境规制在污染企业区际间转移决策过程中的影响,将污染企业和地方政府作为博弈主体,通过构建演化博弈模型,利用演化博弈复制子动态方程模拟两者决策过程. 研究发现:影响转入区政府决策选择的因素包括共享污染企业税收支出、违约成本及对转移企业的额外支付;污染企业的决策选择主要受转出、转入两地区环境规制支出差异及政府的奖励收入的影响. 当转入区政府和污染企业均存在两种激励时,若两博弈主体的初始意愿可以激发转入区政府进一步放松环境规制力度,企业选择转移策略.

**关 键 词:** 环境规制;污染企业;区际间转移;演化博弈模型;决策

**中图分类号:** F 062.9      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-3026(2019)01-0144-06

Inter-regional Transfer Decision Making of Polluting Enterprises Based on Environmental Regulation

ZHENG Yun-hong, GAO Ru, LI Yan  
(School of Business Administration, Northeastern University, Shenyang 110169, China. Corresponding author: ZHENG Yun-hong, E-mail: yzhzheng@mail.neu.edu.cn)

**Abstract:** In order to study the impact of environmental regulation on inter-regional transfer decision making of polluting enterprises, the evolutionary game model was constructed in which the enterprises and local government were taken as the gaming subjects, and the evolutionary game replicator dynamic equation was used to simulate the decision-making process between the two subjects. The results showed that the main factors affecting decision choices of the government of target district are the tax expenditure sharing, the cost of default and additional transfer payments to the enterprises; the decision-making choices of polluting enterprises are mainly affected by the government's reward income and the difference of environmental regulation expenditure between the original district and target district. When there are two kinds of incentives for the government of target district and polluting enterprises, the polluting enterprises will choose transfer strategies if the initial will of the two players can stimulate the government to further relax environmental regulation.

**Key words:** environmental regulation; polluting enterprise; inter-regional transfer; evolutionary game model; decision making

为了遏制经济过快发展而导致的环境恶化问题,依靠第二产业得以迅速发展的东部发达地区加快了产业结构调整的步伐.在财政分权体制下,中西部地区为加速推进本地区经济发展,不惜以牺牲环境为代价吸引投资.作为污染物主要排放源的东部地区,政府制定的环境政策愈来愈严格,污染企业的生存压力也愈加增大.相对于环境规制政策实施的即时性,污染企业的技术创新存在滞后性,企业在短时间内无法创新生产技术以减少环境负外部性.面对环境规制成本及运营成本的增加,东部污染企业更趋向于寻求环境规制力度较弱的区域,实现区际间的生产转移.本文研究在环境规制约束下,转出区和转入区政府选择合作时两地区环境政策的差异对污染企业区际间转

移决策的影响,通过构建演化博弈模型分析转入区政府的违约激励及污染企业区际间转移决策的演化过程,以期为政府完善环境保护规章制度及地区产业结构发展等相关政策提供理论依据。

## 1 文献回顾与研究假设

### 1.1 环境规制与污染企业区际间转移

植草益<sup>[1]</sup>认为规制即采取一系列措施对社会中的经济活动主体实施干涉或限制的行为。环境规制主要有两项内容:一是确定目标,目的在于从根本上减少或消除环境负外部性;二是选择政策工具,两者之间密不可分。环境规制包括命令控制型与市场激励型两种类型<sup>[2]</sup>。本文特指市场激励型环境规制,即主要包括排污费和可交易排污许可证,通过市场机制,将环境负外部性内部化到排污企业的成本中,根据市场信号引导企业自主做出决策。

从长期来看,环境规制可以刺激污染企业技术创新,提高生产率,以弥补环境规制成本从而保持绩效。然而,环境规制对技术创新的影响存在滞后效应<sup>[3]</sup>。污染企业需要大量投资以改善污染现状,而这会限制企业的生产,因此严格的环境规制政策并没有使污染企业的低效率得到明显改观<sup>[4]</sup>。现阶段,我国的环境规制政策对污染企业技术创新的挤出效应较为明显,企业主要是被动应对。污染企业在短时间内无法进行技术创新,就会寻求环境规制相对较弱的地区进行生产转移。而东部地区污染企业向环境规制强度较弱的中西部地区进行区际间转移,长期发展,中西部地区可能成为污染企业的“污染避难所”,即欠发达地区成为发达地区的“污染天堂”<sup>[5]</sup>。为避免中西部地区走上“先污染,后治理”的老路,研究环境规制对污染企业区际间转移决策的影响具有重大的实践意义。

### 1.2 研究假设

企业区际间转移过程中,财政分权使地方政府具备了独立博弈主体的地位,作为理性人,其在博弈时会追求自身效用最大化,即双方政府追求各自的经济与环境效益和政绩的最大化<sup>[6]</sup>。演化博弈论可以很好地解释和预测群体行为的变化趋势。因此,在博弈中作出如下假设:

参与博弈的双方为转入区政府及污染企业,两个行为主体均为有限理性决策者<sup>[7]</sup>。转入区政府的策略空间为  $S_1 = \{\text{合作}, \text{竞争}\}$ ,当转入区政府选择合作策略时,其愿意与转出区政府共建产

业园,共享转移至本地区的企业的税收收入,共享比例为  $(f, 1 - f)$ ,其中转入区政府所享有的比例为  $1 - f$ ;当转入区政府选择竞争策略时,其会在企业转入后违背承诺不分享利益。因东部地区需进行产业结构升级、解决环境问题,因此,假设转出区政府总是选择合作策略。污染企业的策略空间为  $S_2 = \{\text{转移}, \text{不转移}\}$ 。假设只存在一家污染企业,生产过程产生较大的环境负外部性,且处于产品生命周期的衰退阶段。由于产业转移主要体现在企业资本的转移投资,各地区间劳动力数量及质量差异不大,因此本文不考虑劳动力的影响<sup>[8-10]</sup>。

转入区政府和污染企业的支付矩阵如表 1 所示。影响支付函数的具体损益变量解释如下:

$T_i$  为污染企业所在地政府向企业征收的各项税收之和,构成政府绩效评估的主体; $P_i$  为弥补污染企业的环境负外部性,政府征收的行政性罚款,即排污费; $W_i$  为污染企业所在地政府投入的环境改善支出; $C_1$  为转入区政府选择竞争策略时,与企业的沟通协调成本; $C_2$  为污染企业区际间转移成本; $P_u$  为转入区政府选择竞争策略时,因违背两地区政府利益共享合约而产生的违约成本; $M$  为转入区政府选择竞争策略时,为鼓励企业转移,需额外向转移企业支付的补偿; $R$  为污染企业的总生产净损益,转移前后保持不变; $I_i$  为污染企业在区域  $i$  时所投入的环保性创新支出; $J_i$  为转出区政府为鼓励污染企业转出该地区的奖励性支付。其中  $i = 1, 2$ , 取 1 时,代表转出区;取 2 时,代表转入区。且  $T_1 > T_2, P_1 > P_2, I_1 > I_2$ , 因  $P_i, I_i (i = 1, 2)$  的大小取决于所处地区环境规制政策的严格程度,因此本文假设  $P_i + I_i$  为污染企业的环境规制支出。

表 1 转入区政府与污染企业行为选择的博弈支付矩阵  
Table 1 Payoffs matrix of the selected behavior of the district government and polluting enterprises

污染企业	政府	
	合作	竞争
转移	$R_2, T_2(1 - f) + P_2 - W_2$	$R_2 - C_1 + M$ $T_2 + P_2 - W_2 - C_1 - P_u - M$
不转移	$R_1, W_2$	$R_1 - C_1, W_2 - C_1$

注: $R_1 = R - T_1 - P_1 - I_1$ ;  $R_2 = R - T_2 - P_2 - I_2 - C_2 + J_i$ 。

## 2 模型构建

本文假设转入区政府选择合作策略的可能性为  $m$ , 选择竞争的可能性为  $1 - m$ , 同时污染企业

选择转移策略的可能性为  $n$ , 选择不转移策略的可能性为  $1 - n$ . 本模型中所涉及的变量  $P_2, I_2, P_u, m, n$  和  $t$  为内生变量, 其余变量均为外生给定.  $m$  和  $n$  为时间  $t$  的函数, 则  $m$  和  $n$  的动态变化速度可以用演化博弈复制子动态方程表示; 其中  $m$  随时间的动态变化速度可表示为  $dm/dt = \dot{m}(t) = m(\pi_1 - \pi)$ ;  $n$  随时间的动态变化速度可表示为  $dn/dt = \dot{n}(t) = n(\tau_1 - \tau)$ . 选择合作时转入区政府的期望收益为

$$\pi_1 = n[T_2(1-f) + P_2 - W_2] + (1-n)W_2. \quad (1)$$

选择竞争时政府的期望收益为

$$\pi_2 = n(T_2 + P_2 - W_2 - C_1 - P_u - M) + (1-n)(W_2 - C_1). \quad (2)$$

由式(1), 式(2)可知转入区政府总期望收益为

$$\pi = m\pi_1 + (1-m)\pi_2. \quad (3)$$

同理, 企业选择转移策略时的期望收益为

$$J = \begin{bmatrix} (1-2m)[C_1 + n(M + P_u - T_2f)] \\ -Mn(1-n) \end{bmatrix}$$

由式(9)可得雅克比矩阵的迹为

$$\text{trace}J = (1-2m)[C_1 + n(M + P_u - T_2f)] + (1-2n)[R_2 - R_1 + (1-m)M].$$

雅克比矩阵的行列式为

$$J = (1-2m)[C_1 + n(M + P_u - T_2f)] \cdot (1-2n)[R_2 - R_1 + (1-m)M] + (M + P_u - T_2f)m \cdot (1-m)Mn(1-n).$$

### 3 模型推导

通过分析可知, 转入区政府是否选择合作策略取决于政府违约成本, 污染企业是否选择转移策略取决于其环境规制支出. 下面通过比较不同的转移成本和谈判成本, 分析污染企业和转入区政府的策略变化.

1) 当  $T_2f > C_1 + P_u + M, R_1 - R_2 < 0 < M$  时, 演化博弈复制子动态方程存在 4 个均衡点, 即为  $(0,0), (1,0), (0,1), (1,1)$ . 点  $(0,1)$  使雅克比矩阵行列式符号为正, 迹符号为负, 为演化稳定策略平衡点. 此时, 当  $R_1 - R_2 < 0$  时, 不论转入区政府选择何种策略, 企业始终会选择转移策略. 与此同时, 转入区政府向转出区政府分成的税收大于转入区政府选择竞争策略时的总成本, 因而转入区政府会在企业转入后选择违约.

2) 当  $T_2f < C_1 + P_u + M, M < R_1 - R_2$  时, 演化博弈复制子动态方程存在 4 个均衡点, 即为  $(0,$

$$\tau_1 = mR_2 + (1-m)(R_2 - C_1 + M). \quad (4)$$

企业选择不转移策略时的期望收益为

$$\tau_2 = mR_1 + (1-m)(R_1 - C_1). \quad (5)$$

由式(4), 式(5)可知企业的总期望收益为

$$\tau = n\tau_1 + (1-n)\tau_2. \quad (6)$$

由演化博弈复制子动态方程  $dm/dt$  可知:

$$dm/dt = \dot{m}(t) = m(\pi_1 - \pi) = m(1-m)[C_1 + n(M + P_u - T_2f)]. \quad (7)$$

令  $dm/dt = 0$  可得  $m$  和  $n$  的稳定状态为

$m_1^* = 0, m_2^* = 1, n_3^* = C_1/(T_2f - P_u - M)$ , 同理, 由演化博弈复制子动态方程  $dn/dt$  可知:

$$dn/dt = \dot{n}(t) = n(\tau_1 - \tau) = n(1-n)[R_2 - R_1 + (1-m)M]. \quad (8)$$

令  $dn/dt = 0$ , 可得  $m$  和  $n$  的稳定状态为

$$n_1^* = 0, n_2^* = 1, m_3^* = (M + R_2 - R_1)/M.$$

由式(7), 式(8)可以得到系统雅克比矩阵为

$$\begin{bmatrix} (M + P_u - T_2f)m(1-m) \\ (1-2n)[R_2 - R_1 + (1-m)M] \end{bmatrix}. \quad (9)$$

$0), (1,0), (0,1), (1,1)$ . 点  $(1,0)$  使雅克比矩阵行列式符号为正, 迹符号为负, 为演化稳定策略平衡点. 在转入区政府选择竞争策略时, 其与企业协商时所额外支付的补偿不足以弥补企业转移前后的利润差额, 因此不论转入区政府选择何种策略, 企业始终会选择不转移策略. 这意味着不存在激励转入区政府选择竞争策略的动力, 此时转入区政府会选择合作策略, 继续寻找合适的转移对象.

3) 当  $T_2f < C_1 + P_u + M, R_1 - R_2 < 0$  时, 演化博弈复制子动态方程存在 4 个均衡点, 即为  $(0,0), (1,0), (0,1), (1,1)$ . 点  $(1,1)$  使雅克比矩阵行列式符号为正, 迹符号为负, 为演化稳定策略平衡点. 当  $R_1 - R_2 < 0$  时, 不论转入区政府选择何种策略, 企业始终会选择转移策略. 转入区政府向转出区政府分成的税收小于转入区政府选择竞争时的总成本, 转入区政府没有违约激励, 其会选择合作策略.

4) 当  $T_2f > C_1 + P_u + M, 0 < R_1 - R_2 < M$  时, 演化博弈复制子动态方程存在 4 个均衡点, 即为  $(0,0), (1,1), (0,1), (1,0)$ . 存在两个演化稳定策略平衡点, 即点  $(1,0)$  和  $(0,1)$ , 可以使雅克比矩阵行列式符号为正, 迹符号为负. 转入区政府是否选择合作以及企业是否选择转移存在不确定因素.

4 数值模拟

结合上述 4 种参数不等式的设定,模拟分析不同参数设定值下博弈主体行为的演化过程. 因需要分析环境规制的影响力,因此假设  $R = 10$ ,  $T_1 = 3, T_2 = 2.8, P_1 + I_1 = 4, C_2 = 2, J_1 = 1.5, f = 0.5, C_1 = 0.2, M = 0.2$ , 且参数值保持不变. 下面讨论中变动的参数为  $P_2 + I_2$  以及  $P_u$ .

1) 当  $T_2 f > C_1 + P_u + M, R_1 - R_2 < 0 < M$  时, 设博弈支付矩阵中各变动参数值分别为  $P_2 + I_2 = 3.3, P_u = 0.8$ . 则演化进程如图 1a 所示.

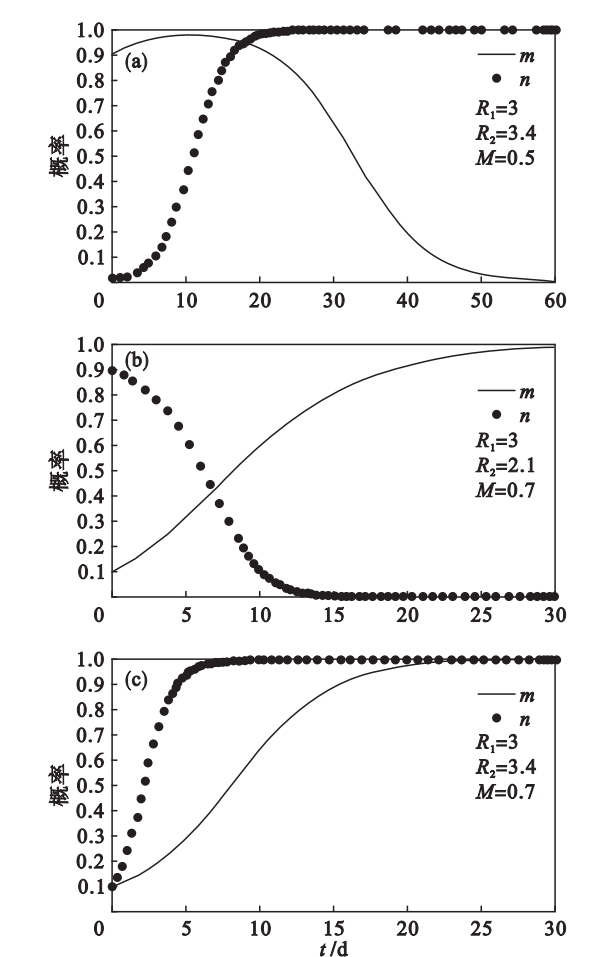


图 1  $R_2, M$  不同时博弈动态演化过程图  
Fig. 1 Game dynamic evolutionary process diagram with different  $R_2, M$

可以看出,  $m$  和  $n$  随时间变化分别向 0 和 1 趋近. 且  $n$  的变化速率很快, 即企业一旦明确转入区的环境规制强度较弱且支出相差较大时, 会直接选择转移策略, 而转入区政府的反应相对滞后, 会依据企业的决策来确定自身的策略, 因  $T_2 f > C_1 + P_u + M$ , 转入区政府的违约成本较小, 存在违约激励, 其会选择竞争策略.

2) 当  $T_2 f < C_1 + P_u + M, M < R_1 - R_2$  时, 设博

弈支付矩阵中各参数值分别为  $P_2 + I_2 = 3.95, P_u = 1.3$ . 则演化进程如图 1b 所示.

可以看出,  $m$  和  $n$  随时间变化分别向 1 和 0 趋近. 此时, 企业会因转入区环境规制成本较高、两地区支出相差较小而选择不转移. 因不存在竞争激励, 转入区政府会选择合作策略.

3) 当  $T_2 f < C_1 + P_u + M, R_1 - R_2 < 0$  时, 设博弈支付矩阵中各参数值分别为  $P_2 + I_2 = 3.3, P_u = 1.3$ . 演化进程如图 1c 所示.

可以看出,  $m$  和  $n$  的初始设定值均为 0.1 时, 接近不稳定点 (0, 0),  $m$  和  $n$  随时间变化均向 1 趋近. 因两地区的环境规制力度相差较大, 导致  $R_1 - R_2 < 0$ , 即企业转移后的净收益更高, 企业会选择转移策略. 因  $T_2 f > C_1 + P_u + M$ , 即转入区政府转移当期的违约成本较高, 其会选择合作策略. 但应注意, 在转移后期,  $C_1$  属于沉没成本, 不再发生, 若  $T_2 f > P_u + M$ , 则后期转入区政府依然存在违约激励.

4) 当  $T_2 f > C_1 + P_u + M, 0 < R_1 - R_2 < M$  时, 设博弈支付矩阵中各参数值分别为  $P_2 + I_2 = 3.8, P_u = 0.8$ . 此时存在两个演化稳定策略平衡点, 需要寻找是否存在能够激发转入区政府给予企业额外优惠的机制.

由图 2a, 图 2b 可以看出, 博弈动态演化过程的走势主要取决于  $m, n$  初始设定值, 即转入区政府和企业的初始意愿可以成为激发转入区政府给予企业额外优惠的机制. 其中  $n$  的初始取值处于主导地位. 对于企业而言, 当两地区间的环境规制支出处于中间值时,  $0 < R_1 - R_2 < M$ , 因无法获得额外补偿, 其不会选择转移策略. 当企业具有较强的转移意愿时, 其会主动与转入区政府协商确定使双方共赢的  $M$  值. 而对于转入区政府, 因  $T_2 f > C_1 + P_u + M$ , 当企业选择转移时, 存在违约激励, 因此转入区政府也会极力促进企业转移, 最终会形成企业选择转移, 而转入区政府选择竞争的策略空间.

对比图 2c 和 2d 发现, 当初始时企业的转移意愿较弱, 无论转入区政府是何种选择, 企业与转入区政府间的协商机制均不易构建, 因而企业选择不转移, 而转入区政府选择合作.

当初始设定  $m = 0.7, n = 0.7$  时, 其演化进程如图 2e 所示.

当初始时转入区政府倾向于选择合作策略, 其不会主动谈判, 企业也不会获得额外支付  $M$ . 而企业的转移驱动是基于额外支付, 一旦无法获得, 企业会选择不移.

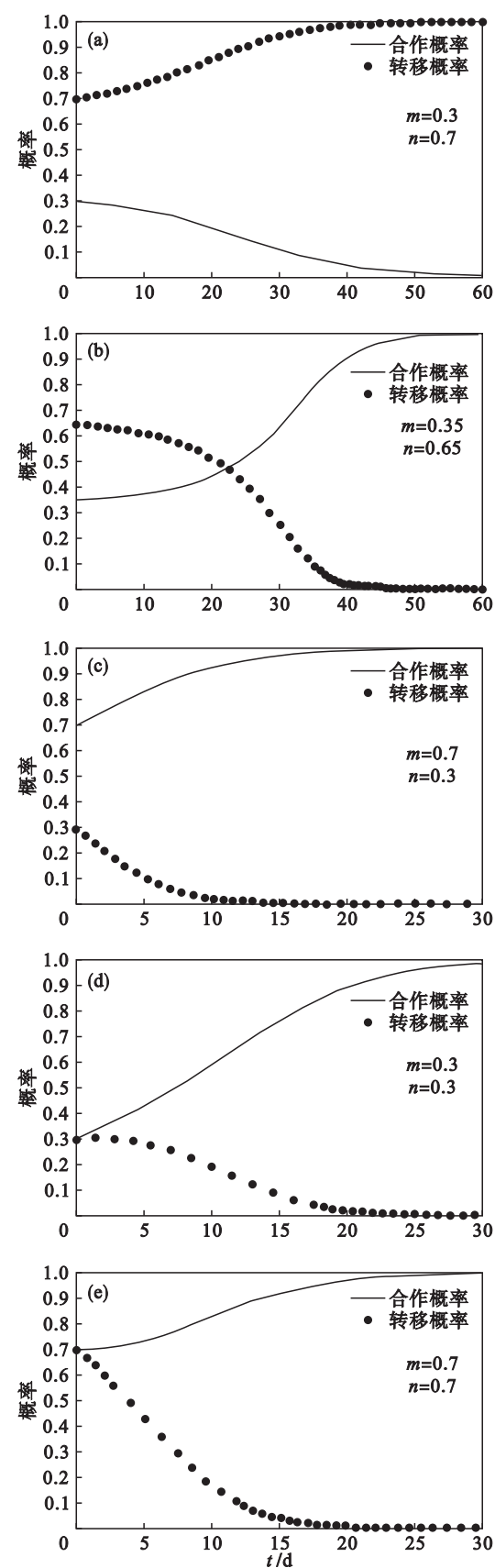


图 2 初始  $m,n$  不同时博弈动态演化过程图  
Fig. 2 Game dynamic evolutionary process diagram with different  $m,n$

由上述分析可知,当转入区政府和企业的初始意愿可以激发转入区政府进一步放松环境规制

力度时,若二者通过协调可形成一个共赢的  $M$  值,则可以形成{竞争,转移}的策略组合。

由此得出命题:在环境规制下,若企业转移前后的收益存在差异,那么在不考虑转入区政府额外优惠的情况下,企业是否转移取决于地方政府环境规制政策引导的内生结果;在考虑转入区政府额外优惠的情况下,复制动态演化博弈存在两个稳定点,即 0 和 1,此时可认为博弈初始时企业和转入区政府的意愿决定了演化进程的走向。

5 结 论

1) 影响转入区政府决策选择的主要因素是共享税支出、违约成本及对转移企业的额外支付;污染企业的决策主要受两地区环境规制支出差异及政府的奖励收入的影响。

2) 当转入区政府和污染企业均存在两种激励时,若两博弈主体的初始意愿可以激发转入区政府进一步放松环境规制力度,企业选择转移策略。

3) 本文所涉及的环境规制仅仅包括市场激励型环境规制,但是,命令控制型环境规制对污染企业区际间转移决策的影响不容忽视,将其纳入研究范围,通过构建多群体演化博弈模型寻找环境规制中政府与企业的利益连接点,将使得问题研究更加全面。

参考文献:

[ 1 ] 植草益. 微观规制经济学 [ M ]. 北京: 中国发展出版社, 1992.  
( Uekusa M. Micro-regulation economics [ M ]. Beijing: China Development Press, 1992. )  
[ 2 ] Francesco T, Fabio I, Marco F. The effect of environmental regulation on firms, competitive performance; the case of the building & construction sector in some EU regions [ J ]. *Journal of Environmental Management*, 2011, 92 ( 9 ) : 2136 – 2144.  
[ 3 ] 李平, 慕绣如. 波特假说的滞后性和最优环境规制强度分析——基于系统 GMM 及门槛效果的检验 [ J ]. *产业经济研究*, 2013, 65 ( 4 ) : 21 – 29.  
( Li Ping, Mu Xiu-ru. The hysteresis of Porter hypothesis and the optimal intensity of regulation—inspection based on system GMM and the threshold effect [ J ]. *Industrial Economics Research*, 2013, 65 ( 4 ) : 21 – 29. )  
[ 4 ] 戴越. 波特假说三个层面的当下证说与建言 [ J ]. *求索*, 2013, 63 ( 11 ) : 34 – 37.  
( Dai Yue. Porter hypothesis on the three levels of the current testimony and advice [ J ]. *Seeking*, 2013, 63 ( 11 ) : 34 – 37. )  
[ 5 ] Elliott R J R, Zhou Y. Environmental regulation induced foreign direct investment [ J ]. *Environmental and Resource Economics*, 2013, 55 ( 1 ) : 141 – 158.

[ 6 ] Walter I,Ugelow J L. Environmental policies in developing countries [ J ]. *AMBIO*,1979,8(2) :102 – 109.

[ 7 ] Pargal S,Wheeler D. Informal regulation of industrial pollution in developing countries: evidence from Indonesia [ J ]. *Journal of Political Economy*, 1996, 104 ( 6 ) : 1314 – 1327.

[ 8 ] Matthew A C, Elliott R J R, Kenichi S. Industrial characteristics,environmental regulations and air pollution:an analysis of the UK manufacturing sector [ J ]. *Journal of Environmental Economics and Management*,2005,50(1) : 121 – 143.

[ 9 ] Jose F, Arnaud R. Assessing the impact of formal and informal regulations on environmental and economic performance of Brazilian manufacturing firms [ J ]. *Environmental and Resource Economics*, 2012, 52 ( 1 ) : 65 – 85.

[ 10 ] Akamatsu K. A historical pattern of economic growth in developing countries [ J ]. *The Developing Economics*,1962, 1(1) :3 – 25.

(上接第 125 页)

[ 2 ] 肖力光,伊晋宏,崔正旭. 国内外铁尾矿的综合利用现状 [ J ]. 吉林建筑工程学院学报,2010,27(4) :22 – 26.  
( Xiao Li-guang, Yi Jin-hong, Cui Zheng-xu. Iron tailings comprehensive utilization at home and abroad [ J ]. *Journal of Jilin Institute of Architecture & Civil Engineering*, 2010, 27 ( 4 ) : 22 – 26. )

[ 3 ] Chen Y L, Zhang Y M, Chen T J, et al. Preparation and characterization of red porcelain tiles with hematite tailings [ J ]. *Construction and Building Materials*, 2013, 38 : 1083 – 1088.

[ 4 ] Zhao Y L, Zhang Y M, Chen T J, et al. Preparation of high strength autoclaved bricks from hematite tailings [ J ]. *Construction and Building Materials*, 2012, 28 : 450 – 455.

[ 5 ] Zhao F Q, Zhao J, Liu H J. Autoclaved brick from low-silicon tailings [ J ]. *Construction and Building Materials*, 2009, 23 : 538 – 541.

[ 6 ] Cheng Y H, Huang F, Li W C, et al. Test research on the effects of mechanochemically activated iron tailings on the compressive strength of concrete [ J ]. *Construction and Building Materials*, 2016, 118 : 164 – 170.

[ 7 ] 郑永超,倪文,路国忠,等. 高硅铁尾矿制备高强混凝土的实验研究 [ J ]. 建筑技术, 2011, 41 ( 4 ) : 369 – 371.  
( Zheng Yong-chao, Ni Wen, Lu Guo-zhong, et al. Study on high-strength concrete produced by high-silicon iron tailings [ J ]. *Architecture Technology*, 2011, 41 ( 4 ) : 369 – 371. )

[ 8 ] 李德忠,倪文,郑永超,等. 大掺量铁尾矿高强混凝土材料的制备 [ J ]. 金属矿山, 2010 ( 2 ) : 167 – 170.  
( Li De-zhong, Ni Wen, Zheng Yong-chao, et al. Experimental research on high-strength concrete preparation with large content of iron tailings [ J ]. *Metal Mine*, 2010 ( 2 ) : 167 – 170. )

[ 9 ] Han S H, Park W S, Yang E I. Evaluation of concrete durability due to carbonation in harbor concrete structures [ J ]. *Construction and Building Materials*, 2013, 48 : 1045 – 1049.

[ 10 ] Zhang X T, Zhou X C, Zhou H M, et al. Studies on forecasting of carbonation depth of slag high performance concrete considering gas permeability [ J ]. *Applied Clay Science*, 2013, 79 : 36 – 40.

[ 11 ] Rabehi M, Mezghiche B, Guettala S. Correlation between initial absorption of the cover concrete, the compressive strength and carbonation depth [ J ]. *Construction and Building Materials*, 2013, 45 : 123 – 129.

[ 12 ] Bellmann F, Erfurt W, Ludwig H M. Field performance of concrete exposed to sulphate and low pH conditions from natural and industrial sources [ J ]. *Cement & Concrete Composites*, 2012, 34 : 86 – 93.

[ 13 ] Lorente S, Yssorche-Cubaynes M P, Auger J. Sulfate transfer through concrete: migration and diffusion results [ J ]. *Cement & Concrete Composites*, 2011, 33 : 735 – 741.

[ 14 ] Zhang M H, Chen J K, Lyu Y F, et al. Study on the expansion of concrete under attack of sulfate and sulfate-chloride ions [ J ]. *Construction and Building Materials*, 2013, 39 : 26 – 32.

[ 15 ] 黄晓燕,倪文,祝丽萍,等. 齐大山铁尾矿粉磨特性 [ J ]. 北京科技大学学报, 2010, 32 ( 10 ) : 1253 – 1257.  
( Huang Xiao-yan, Ni Wen, Zhu Li-ping, et al. Grinding characteristic of Qidashan iron tailings [ J ]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2010, 32 ( 10 ) : 1253 – 1257. )

[ 16 ] 韩鹏. 高硅型铁尾矿对混凝土和易性及抗压强度影响试验研究 [ D ]. 沈阳: 东北大学, 2013.  
( Han Peng. Experimental study on high silicon iron tailings effect on concrete workability and compressive strength [ D ]. Shenyang: Northeastern University, 2013. )

[ 17 ] 贾艳涛. 矿渣和粉煤灰水泥基材料的水化机理研究 [ D ]. 南京: 东南大学, 2005.  
( Jia Yan-tao. The hydration mechanism of the BFS and FA cement based materials [ D ]. Nanjing: Southeast University, 2005. )