

农业面源污染管理中补偿机制设计

黄彬彬^{1,2}, 王先甲³, 胡振鹏⁴, 桂发亮²

(1. 武汉大学 系统工程研究所, 湖北 武汉 430072; 2. 江西省水文水资源与水环境重点实验室, 江西 南昌 330099;
3. 武汉大学 经济与管理学院, 湖北 武汉 430072; 4. 南昌大学 管理科学与工程系, 江西 南昌 330023)

摘要: 首先建立了完全信息下政府的管理模型, 然后利用激励理论, 在不完全信息下设计 1 组契约来揭露农户真实的产出类型, 建立了政府带审核手段的激励模型, 给出了改进的补偿机制, 并对模型的结果进行了讨论, 得到了一个面源污染补偿的形成机制. 新机制通过农户的“自我申报”实现了环境管理者的管理目标. 最后通过算例说明了机制的有效性, 并解释了效率损失的原因.

关键词: 面源污染; 机制设计; 个人理性; 激励相容; 补偿
中图分类号: F323. 22 **文献标识码:** A

Optimal Compensation Mechanism Design of Non-point Source Pollution

HUANG Binbin^{1,2}, WANG Xianjia³, HU Zhenpeng⁴, GUI Faliang²

(1. Institute of Systems Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Key Laboratory of Water Resources and Water Environment of Jiangxi Province, Nanchang 330099, China; 3. School of Economics and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 4. Department of Management Science and Engineering, Nanchang University, Nanchang 330023, China)

Abstract: A management model is first established under complete information, and then a contract is made to expose the farmers' production type under incomplete information by incentive theory. An incentive model with government's auditing is presented, which improves the compensation model. A discussion is held on the model's result, as a result, the compensation mechanism of non-point source pollution is obtained. The new mechanism can realize the management goal by farmers' self-declaration. At last, a numerical example validates the approach.

Key words: non-point source pollution; mechanism design; individual rationality; incentive compatibility; compensation

近年来, 农业面源污染已经取代点源污染成为大部分流域水体污染的主要来源. 面源污染主要来源于农业生产过程中土壤化肥、农药流失、农村畜禽养殖排污、作物秸秆等. 随着农业面源污染的日益严重和人们对生态环境的关注, 农业面源污染问题引起了国内外广大学者和政府决策部门的高度关注^[1].

环境管理方式可以大致分为命令-控制手段和经济手段^[2]. 针对点源污染常用的管理手段有排污权交易、环境资源税、自愿协商等. 点源污染是指工业废水和城市生活污水集中排放而造成的污染. 面源污染不同于点源污染的集中性, 由于它的不易监测性、分散性、不确定性、滞后性等特性^[3], 使得其管理手段不能依靠传统的针对点源污染的方法和手段, 而需要探究与面源污染特征规律相对应的政策和措施. Griffin 与 Bromley 建立了一种输入税 (input tax) 的理论体系^[4], 从源头对造成面源污染的物质进行控制, 如对施肥进行收税等. 由于部分国家的农业负担比较重, 收入不高, 所以很多人抵制输入税的实施. Shortle 和 Dunn 建立了一种激励补偿模型^[5], 并将其理论应用于实践之中 (code of good agricultural practice), 但是最终由于激励过低而导致失败. 由于点源污染的不易监测性导致了“搭便车”现象, 每个生产者都加大投入来获得更高的产出, 期望其他生产者来削减污染. Segerson 设计了一种基于周围污染的补贴或者税收体系^[6]. Hansen 基于 Segerson 的研究基础之上提出了损害税的模型^[7]. Carraro 等人建立了自愿协议式管理模式^[8], 污染生产者自发地进行污染削减. Eirik Romstad 提出了利用团队协作的方式来对农户的行为进行管理^[9]. 另外有学者研究对农户直接补偿政策 (green payment)^[10]. 国内有学者分析了我国农业现代化进

程中的环境污染问题以及农业面源污染管理的背景和演变过程^[11].

环境管理者与受规制的农户之间这种规制与受规制的关系可以置于委托-代理理论的分析框架进行讨论^[12]. 面源污染管理中,环境管理者的目标是实现社会福利最大化,并促使低产出农户减少高投入低产出的生产行为,提高生产效率. 而农户的目标则是追求利润最大化. 如果管理者能够准确知道农户的产出类型,那么他就可以通过补偿减少低产出农户的生产行为,或者同时鼓励高产出农户的生产行为,但是由于信息不对称,规制者很难准确区分农户的生产类型^[13]. 因此,为实现规制者的管理目标环境管理者可以应用委托-代理模型设计 1 组契约. 在机制设计时,要满足 2 个条件:一是参与约束. 也就是农户接受这个契约所获得的收益不小于他不接受契约时的收益;二是激励相容约束,即规制者诱导受规制农户暴露其真实信息时,农户所获得的收益不小于他藏匿信息时的收益.

将农户的类型分为高产出和低产出 2 种,政府设计一种机制分别对这 2 种类型的农户进行补偿来减少低产出类型农户低效率的生产行为(即可减少对化肥、农药等污染产品的使用),使社会福利达到最大化. 但是由于信息不对称,农户就会采取某些行为来伪装自己的产出类型,使政府产生错误的判断,从而最大化自己的收益. 本文根据激励理论,在不对称信息条件下,建立了农户向政府申报自己的产出类型、然后政府对农户进行补偿的机制,环境管理者通过农户的“自我申报”来获取农户的真实产出类型. 由于信息租金的存在,本文对激励模型进行了改进,设计了一种带政府审核手段的面源污染补偿形成机制.

1 不完全信息下政府的激励机制模型

生产者农户较环境管理部门关于产出类型有信息优势,管理者只有通过设计激励机制来克服信息不对称问题,诱导农户暴露真实产出类型. 为了分析不完全信息下的效率损失,首先求解在完全信息下的激励机制模型及其解的特征.

1.1 完全信息下政府的管理模型

用生产者的产出大小 e 来表示生产者的类型,分为高、低产出 2 种. 用 $\pi(e)$ 表示生产者的纯收益, p 为农户生产的农产品的价格, $d(e)$ 为产出为 e 时对

环境造成的损害,且 $d'(e) \leq 0, d''(e) \leq 0$, 即随着产出的增加,对环境的边际损害是递增的. 用 $c(e) = F + we$ 表示农户生产的成本函数, F 为生产的固定成本, w 为边际成本. 则农户的收益可以表示为

$$\pi(e) = pe - F - we \quad (1)$$

在完全信息下,环境管理者可以无成本地观察到农户的生产类型,因此,管理者可以设计机制来最大化社会总福利. 管理者设计契约的问题等价于求解如下的最优化问题:

$$\max_e pe - F - we - d(e) \quad (2)$$

应用一阶条件可以得到

$$d'(e) = p - w \quad (3)$$

由于 e 为共同知识,生产者的投入和收益损失信息是公开的,规制者完全掌握生产者的成本状况. 因此,规制者对生产者进行监管就如同自己进行农业生产一样. 管理者要实现的是全社会的效益最大化,而不仅仅是农户的效用最大化. 即在完全信息条件下,环境的边际损失等于农产品的价格与农户的边际成本之差,此时管理者实现目标最大化,此时农户的产量称为最优产量,用 e_{FB} 表示. 在完全信息下,管理者具有完全信息,会规定生产者采取 e_{FB} 的产出水平,从而达到全社会最优.

1.2 不完全信息下政府的激励机制模型

现实生产中,生产者具有信息优势,即生产者知道自己真实的生产类型. 环境管理者和生产者之间的信息都是不对称的,所以难以达到这种最优. 假设有 2 种产出类型的生产者 e_1 和 e_2 , 农户为 e_1 和 e_2 类型的概率分别为 v 和 $1-v$ (也可理解在农户中生产类型分别为 e_1 和 e_2 类型所占的比例), 并假设类型 1 的农户的农田产出比类型 2 的农户低, 即类型 1 为低产出农户、类型 2 为高产出类型, $w_1 > w_2$. 政府知道有 2 种类型的生产者, 但是不确定每个生产者的类型, 只有农户自己知道自己的真实类型.

为了能够进行有效的机制设计,管理者应针对不同类型的生产者提供不同的契约. 管理者为农业生产者提供如下 1 组契约配置 $\{(e_1, s_1), (e_2, s_2)\}$, s_i 为管理者针对 e_i 型生产者的补偿大小. 委托人希望所设计的契约能有效地甄别代理人的类型, 即 e_1 类型的代理人选择 (s_1, e_1) , e_2 类型的代理人选择 (s_2, e_2) . 然而由于利益驱动,生产者可能不会如实报告自己的类型,此时,政府需要设计一种机制 (e_i, s_i) ($i=1,2$),使得这种机制满足激励相容和个人理性,说实话成为生产者的最优策略. 机制 (e_i, s_i) 满足激励相容

$$pe_1 - F_1 - w_1 e_1 + s_1 \geq pe_2 - F_1 - w_1 e_2 + s_2 \quad (4)$$

$$pe_2 - F_2 - w_2 e_2 + s_2 \geq pe_1 - F_2 - w_2 e_1 + s_1 \quad (5)$$

式(4)、式(5)的激励相容条件保证了理性的生产者如实报告自己的类型,否则他得到的收益将小于说真话的收益。

为了使农户能够参与到政府的这种机制中,机制 (e_i, s_i) 必须满足个人理性约束

$$pe_1 - F_1 - w_1 e_1 + s_1 \geq 0 \quad (6)$$

$$pe_2 - F_2 - w_2 e_2 + s_2 \geq 0 \quad (7)$$

式(6)、式(7)表明生产者参加政府所设计机制时的收益不小于不参加这种机制的收益。在面源污染的补偿机制中,还必须考虑资金约束,也即通过补偿带来的环境效用不小于资金的支付,即

$$-d(e_1) - s_1 \geq 0 \quad (8)$$

$$-d(e_2) - s_2 \geq 0 \quad (9)$$

政府在做决策时,是想找到机制 (e_i, s_i) 最大化社会总福利。因此,政府的机制 (e_i, s_i) 设计问题相当于一个优化问题

$$\max_{e_i, s_i} \{v[\pi_1(e_1) - d(e_1) - s_1] + (1-v)[\pi_2(e_2) - d(e_2) - s_2]\} \quad (10)$$

$$\text{s. t. (4), (5), (6), (7), (8), (9)}$$

结论1:在不完全信息下,政府要想通过机制设计来最大化社会总福利,那么政府设计的最优补偿机制的问题等价于在满足式(4)~(9)的条件下最大化社会总福利,即最大化式(10)。

下面求该规划问题的最优解。为简化求解,先分析哪些约束条件起作用约束。由于环境管理者提供的1组契约在保证低产出类型农户不亏损的情况下高产出类型的农户也应不亏损;另外,低产出农户没有积极性伪装高产出类型的农户,而高产出农户则有积极性伪装低产出类型生产者,故约束(4)和(7)可暂且搁置一边。

$u_j, j=1, \dots, 6$ 分别为约束条件式(4)~(9)在拉格朗日函数中的乘子,由上述分析,暂且令 $u_1 = u_4 = 0$, 构造如下拉格朗日函数: $L(\cdot) = v \cdot [\pi_1(e_1) - d(e_1) - s_1] + (1-v)[\pi_2(e_2) - d(e_2) - s_2] + \mu_2[\pi_2(e_2) + s_2 - \pi_2(e_1) - s_1] + \mu_3[\pi_1(e_1) + s_1 - \pi_1(e_{1,FB})] + \mu_5[-d(e_1) - s_1] + \mu_6 \cdot [-d(e_2) - s_2]$, 分别对 e_1, e_2, s_1 和 s_2 运用一阶条件,可以得到:

$d'(e_{1,SB}) = p - w_1 - \frac{1}{1-v}(w_1 - w_2) = p - w_1 - \frac{1}{1-v} \cdot \Delta w, d'(e_{2,SB}) = p - w_2$, 其中: $e_{1,FB}$ 为类型1农户的最优策略; $e_{1,SB}, e_{2,SB}$ 分别为类型1,2农户的次优(second best)策略。

为了更好地揭示不对称信息情况下的特点,将式(4)和式(5)作如下变换:

$$R_1 = pe_1 - w_1 e_1 + s_1 \quad (11)$$

$$R_2 = pe_2 - w_2 e_2 + s_2 \quad (12)$$

将式(11)、式(12)代入激励相容约束,即式(4)、式(5)中可得 $R_1 \geq R_2 - \Delta w e_2$ 和 $R_2 \geq R_1 + \Delta w e_1$, 由于低产出类型农户的参与约束为 $R_1 \geq 0$, 管理者就会令 $R_1 = 0$. 那么高产出的生产者就会获得 $R_2 = \Delta w e_1$ 的信息租金,这个信息租金就是环境管理者为获得生产者的产出类型信息所支付的信息成本. 可以得到结论2.

结论2:① 不完全信息情形下的管理者处于信息劣势,但可以通过机制设计,在满足激励相容约束的条件下,实现农户的自我选择,从而达到揭示生产者私人信息的目的. ② 高产出类型农户的产出不发生扭曲,即 $e_{2,SB} = e_{2,FB}$, 而低产出类型农户的产量会向下扭曲,即 $e_{1,SB} < e_{1,FB}$, 并且满足 $d'(e_{1,SB}) = p - w_1 - \frac{\Delta w}{(1-v)}$.

虽然管理者可以设计激励机制来激励农户报告真实生产类型,但是当信息租金很大时,将会影响管理的效果. 这时管理者就应考虑运用其他手段对农户进行成本监管,尽可能减少信息租金,提高管理的效率。

2 带有审核手段的政府激励机制模型

信息租金是管理者为揭示农户生产信息所付出的代价,是生产者的信息优势取得的收益. 信息租金 $\Delta w e_1$ 与边际成本之差和低产出类型农户的产量有关. 当信息租金很大,管理者就需要考虑其他手段来减小信息租金. 此时,管理者可对农户的产出类型进行审核,并假定只要审核进行,就能够得到农户真实的产出类型。

当激励机制包含审核手段时,其激励可行集相应地扩大了. 除补偿数量 s 和产出 e 外,还应包括进行审核的概率 $P_r(\tilde{e})$ 以及惩罚额 $P_u(e, \tilde{e})$. 若生产者报告的类型是 \tilde{e} , 而管理者核实的类型为 e , 则给予 $P_u(e, \tilde{e})$ 额度的惩罚. 于是带审核策略的激励机制的配置集扩大为: $\{(s_1, e_1, P_{r1}, P_{u1}); (s_2, e_2, P_{r2}, P_{u2})\}$. 并假设管理者进行审核的成本为 $c(P_r)$, 且满足 $c(0) = 0, c' > 0, c'' > 0$. 将惩罚定义为外生变量,即给定的惩罚不能超过农户所能承受的最大惩罚额

$K, P_{r1} < K, P_{r2} < K$. 该情况下,模型为

$$\begin{aligned} \max_{e_1, s_1, P_{r1}, P_{r2}} \{ & v[\pi_1(e_1) - d(e_1) - s_1] + (1-v) \cdot \\ & [\pi_2(e_2) - d(e_2) - s_2] - vc(P_{r1}) - (1-v)(P_{r2}) \} \\ \text{s. t. } & pe_1 - w_1 e_1 + s_1 \geq pe_2 - w_1 e_2 + \\ & s_2 - P_{r2} P_{u1} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} pe_2 - w_2 e_2 + s_2 \geq & pe_1 - w_2 e_1 + \\ & s_1 - P_{r1} P_{u2} \end{aligned} \quad (14)$$

式(6)~(9)以及审核外生惩罚约束

$$P_{u1} \leq K \quad (15)$$

$$P_{u2} \leq K \quad (16)$$

由上节分析知道,低产出类型农户不会谎称自己是高产出类型的生产者,因此有 $P_{r2} = 0$,低产出农户的激励相容约束是严格成立的,由式(13)可得到 P_{u1} 的值不影响不等式的成立,即式(15)可暂时不予考虑.

用上节类似的方法对其进行求解,可得到结论 3.

结论 3:① 对于高产出农户不存在产出的扭曲,即 $e_{2,s} = e_{2,FB}$ (下标 s 表示审核机制下的最优解),而低产出水平的农户的产出向下扭曲,在外生给定的惩罚情形下满足 $d'(e_{1,s}) = p - w_1 - \frac{\Delta w}{[(1-v)(1-P_{r1})]}$. ② 只有声称低产出类型的农户才会受到严格正的审核,其审核概率为 $P_{r1} > 0$,对外生给定的惩罚 $c'(P_{r1,s}) = vK/(1-v)$. ③ 审核概率是审核成本与审核带来的信息租金减少量之间权衡的结果. 在外生给定惩罚情形下高产出类型农户

的信息租金为 $R_2 = \Delta w e_1 - P_{r1} K$, 即 $dR_2 = -KdP_{r1}$. 管理者增加审核低产出农户的概率 P_{r1} 一个微小增量 dP_{r1} 所带来的高产出农户信息租金的减少为 KdP_{r1} ; 与无审核时的次优结果比较,产出没有进一步扭曲,即 $e_{2,s} = e_{2,FB}$, 故审核有利于减少信息租金,而不会减少农业产出量. ④ 在带有审核策略的激励机制设计中,仍然有激励相容约束,这就激励了生产者“说实话”,惩罚实际上不会发生. 但若高产出类型农户知道审核在事后不会发生,那么他就会说谎. 因此,管理者的审核应是可置信的承诺. 如果管理者对审核缺乏承诺,则在最终结果中将出现一个混合策略:高产出类型农户以一定的概率选择说真话或说谎;管理者则以一定的概率在审核与否之间抉择.

3 算例分析

在南昌市某一地区执行该机制,该地区种植作物为水稻,灌溉方式为渠灌,土壤类型分为 2 种:粘壤土和细砂壤土,主要考虑的氮污染包括氮流失和淋溶. 该地区粘壤土面积占 71%,细砂壤土面积达到 29%,粘壤土氮流失系数比细砂壤土的小. 模型中考虑用水成本、氮肥价格、灌溉固定成本、水稻价格、每单位污染的社会成本等输入条件,输出量为水稻产量、农户收入、氮流失、政府支付和净社会剩余. 计算结果见表 1.

表 1 各种模式下的计算结果对比

Tab.1 Comparison of results of different models

情形	土壤	氮价格/ (元·亩 ⁻¹)	水价格/ (元·亩 ⁻¹)	除草价格/ (元·亩 ⁻¹)	人工费用/ (元·亩 ⁻¹)	氮流失/ (kg·亩 ⁻¹)	氮淋溶/ (kg·亩 ⁻¹)
现状	细砂壤	101	22.5	10	420	10.2	1.20
	粘壤	90	19.0	10	420	9.3	0.80
最优结果	细砂壤	91	15.5	7	420	8.0	1.10
	粘壤	86	17.0	7	420	8.5	0.90
设计机制	细砂壤	80	15.5	7	420	7.0	0.96
	粘壤	86	17.0	7	420	8.5	0.90
情形	土壤	水稻产出/ (元·亩 ⁻¹)	净收益/ 元	政府支 付/元	农民总 收益/元	污染社会 成本/元	净社会 剩余/元
现状	细砂壤	911	357.5	80	437.5	123.2	234.3
	粘壤	944	405.0	80	485.0	111.0	294.0
最优结果	细砂壤	879	345.5	01	345.5	100.1	245.4
	粘壤	930	400.0	0	400.0	103.4	296.6
设计机制	细砂壤	850	327.5	120	447.5	87.6	239.9
	粘壤	930	400.0	90	490.0	103.4	296.6

从表1可以看出,所设计的机制农民的总收益大于现状收益,农民会自愿参与所涉及的机制;最优情况下社会净剩余最大,其次是所设计的机制,最后是现行政策;所设计的机制有效地减少了氮及一些生产元素的输入(化肥使用的边际收益递减),从而达到了减少污染排放的目的。

没有实行新机制时的净社会剩余小于最优结果,差值主要来自2个方面:首先,政府对农业的投资会直接导致效率损失;其次,现行的政策没有给予农户差别化的激励,这样在生产决策时,农民就不会考虑生产对环境的影响.所设计的机制中,细砂壤土模式下的净社会剩余小于完全信息下的最优机制,此部分效率损失是政府为了获得低产出农民的生产类型所支付的信息租金。

4 结语

农村面源污染管理中补偿机制涉及目前面源污染管理政策研究中的重要问题.在设计补偿机制时,需要解决如何确定农业生产者真实产出类型的问题.本文利用委托-代理理论设计激励契约来揭示生产者的真实类型,通过求解机制设计模型得出了最优补偿机制,揭示了信息租金产生的根源.当信息租金很大时,设计了带有审核产出类型的管理模式对生产者的自我申报行为进行了规制.最后通过算例说明了所涉及机制的有效性。

设计的补偿机制没有考虑所有的生产者产出类型、生产技术的提高等因素,如何使设计机制更符合实际情况并在管理模式中吸收市场化等管理模式是下一步进行研究的问题。

参考文献:

- [1] SONG Tao, CHENG Jiemin, LI Yan. The research of agricultural non-point source pollution [J]. Environmental Science and Management, 2010, 35(2): 39.
- [2] TIAN Yaowu, HUANG Zhilin, XIAO Wenfa. Reductions in non-point source pollution through different management practices for an agricultural watershed in the Three Gorges Reservoir Area [J]. Journal of Environmental Sciences, 2010, 22(2): 184.
- [3] Horan Richard D, Ribaldo Marc O. Policy objectives and economic incentives for controlling agricultural sources of non-point pollution [J]. Journal of American Water Resources Association, 1999, 35(5): 1023.
- [4] Griffin R, Bromley D. Agricultural runoff as a non-point externality [J]. American Journal of Agriculture Economic, 1982, 64: 547.
- [5] Shortle J S, Dunn J W. The relative efficiency of agricultural source water pollution control policies [J]. American Journal of Agriculture Economic, 1986, 68: 668.
- [6] Segerson K. Uncertainty and incentives for non-point pollution control [J]. Journal of Environmental Economic and Management, 1988, 15: 87.
- [7] Hansen L G. A damage based tax mechanism for regulation of non-point emissions [J]. Environmental and Resource Economics, 1998, 12(1): 99.
- [8] Carraro C F, Lévêque. Introduction: the rationale and potential of voluntary approaches [M]. London: Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [9] Eirik Romstad. Team approaches in reducing nonpoint source pollution [J]. Ecological Economics, 2003, 47: 71.
- [10] Chambers R G. On the design of agricultural policy mechanism [J]. American Journal of Agricultural Economics, 1992, 74: 646.
- [11] 苏杨. 农村现代化进程中的环境污染问题[J]. 宏观经济管理, 2006(2): 50.
- SU Yang. The environmental problem in the process of rural modernization [J]. Macroeconomic Management, 2006 (2): 50.
- [12] Sappington D. Incentives in principal-agent relationships [J]. The Journal of Economic Perspectives, 1991, 5(2): 45.
- [13] SHEN Zhen-yao, QIAN Honga, HONG Yua. Parameter uncertainty analysis of non-point source pollution from different land use types [J]. Science of the Total Environment, 2010, 408(8): 1971.
- [1] SONG Tao, CHENG Jiemin, LI Yan. The research of