

一个政府—企业双层优化环境治理模型

胡长英^{1,2}, 李 飞^{2*}, 董锁成²

(1. 中国人民大学数学学院, 北京 100872; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

【摘 要】 构建以政府为主导、企业为主体的环境治理体系, 落实企业环境治理主体责任是我国的重大战略任务。目前地方政府环境监管亟待改善, 需要加强企业生产规制, 基于“污染者付费”原则促使“三废”达标排放。本研究抓住政府和企业两大主体, 建立以政府为上层、企业为下层的双层优化环境治理模型, 确定上层—下层目标函数及约束条件, 研究地方政府环境奖罚政策与企业利润及环境行为的关联性, 提出模型“乐观最优解”与“悲观最优解”及地方政府奖惩机制最优解。该模型可反映地方政府与企业的博弈过程, 为寻求合理的污染奖惩方式和税费比例, 促使企业在自身利润最大化的同时积极治理“三废”污染, 平衡经济效益和社会效益, 为企业长期粗放式生产排污严重、地方政府环境监管有待加强、西北生态安全屏障和黄河流域健康发展受到严重威胁的宁蒙沿黄地带及类似地区环境管理实践提供参考。

【关键词】 “三废”排放; 环境治理; 双层优化环境治理模型; 最优方案

【中图分类号】 X22

【文献标识码】 A

【文章编号】 1674-6252 (2019) 06.0069.06

【DOI】 10.16868/j.cnki.1674-6252.2019.06.069

引言

党的十九大报告把污染防治作为决胜全面建成小康社会的三大攻坚战之一, 提出构建以政府为主导、企业为主体的环境治理体系, 落实企业环境治理主体责任重大战略任务。排污者是污染治理的责任主体, 强化其环保责任有助于改善环境质量, 推动形成规范公平的市场竞争环境。中央政府制定了一系列的法律、法规来防治工业污染, 如《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》《中华人民共和国水污染防治法》《中华人民共和国大气污染防治法》等, 规定各方在生态环境保护、污染防治等领域全方位开展工作; 我国现行有效的国家污染物排放(控制)标准达 160 余项, 对重点地区重点行业执行更加严格的污染物排放限值, 在促进技术创新和推动企业升级改造方面发挥了重要作用。地方政府要根据改善环境质量的需要和经济、技术条件制定切实措施达到污染物排放目标; 而环境保护如何与地方产业协调发展, 是地方政府面临的突出问题。地方政府寄希望于企业自主提高环境意识, 自我环境约束达到国家排放标准目标还面临诸多问题。应规定企业对其产生的污染要承担的责任和义务, 以及采取切实可行的奖惩措施, 督促企业完成“三废”治理工作, 切实做到外部成本内部化。地方政府该如何制定奖惩措施, 才能既使企业的排污工作达到环境标准, 又不影响企业的生产积极性? 本文将尝试建立政府和企业之间的双层优化环境治理模型, 研究地方政府加强环境管理, 督促企业积极改善污染排放的可行方案。

区域环境问题的政企博弈在主导产业重工业化特征明显、企业长期粗放式生产排污严重、地方政府环境监管有

待加强、西北生态安全屏障和黄河流域健康发展受到严重威胁的宁蒙沿黄地带表现典型^[1-6], 部分文献对重污染产业区企业污染问题进行了研究^[7-18], 但很多是对企业的污染行为进行分析, 强有力的环境管治措施研究有待加强, 尤其缺乏数理推导研究。发达国家企业对其产生的污染责任明晰, 尤其是 ISO14001 环境标准颁布后, 企业相继加入环境认证。但很多企业环境责任承担严重不足, 也没有考虑加入 ISO14001 体系, 环境管理一直处于滞后状态, 很多企业为了节省成本将“三废”直接排放, 我国以宁蒙沿黄地带为代表的广大西北地区尤为典型。经调研发现, 出现污染事故的企业大多都清楚超标排放污染物属违规行为, 也清楚工业垃圾对环境的危害, 更知道该如何避免或减少环境污染。但是处理“三废”不但需要购买各种过滤、净化设备以及改进技术等, 还需要租用场所、培训工人等, 增加企业支出, 很多企业为了降低生产成本而不愿治理^[9]。双层规划法(主从决策法)在 20 世纪 70 年代由 Chandler 和 Norton 等人最早提出, 双层规划法考虑了决策过程中不同决策者(上层和下层, 又称领导与随从)的作用和表现, 现在已被广泛地应用于经济管理、金融、交通、环境保护等领域。近些年, 一些学者开始关注环保问题, 借助双层优化环境治理模型来探讨实际生产中, 如何让企业在追求经济效益的同时主动保护环境, 如基于环境保护的双层优化选址模型^[20]、产品回收再生产的闭环双层物流模型^[21]等。目前用双层优化方法来探索地方政府如何制定奖惩措施来督促企业排污达标的研究还有待完善, 尤其西北重污染区相关研究较为缺乏。本研究将建立以地方政府为上层、

资助项目: 中国科学院 A 类战略性先导科技专项(XDA2003020302); 国家科技基础资源调查专项(2017FY101300); 国家自然科学基金(41301642)。

作者简介: 胡长英(1976—), 女, 副教授, 主要研究方向为环境建模与数理分析, E-mail: hucy@ruc.edu.cn。

*** 责任作者:** 李飞(1982—), 男, 副研究员, 主要研究方向为区域可持续发展、环境经济模型, E-mail: lifeicas@163.com。

企业（尤其重污染企业）为下层的双层优化环境治理模型，讨论上层地方政府如何制定奖惩措施和污染税费比例，能使下层企业在追求经济利益的同时主动治理其产生的污染，达到环境治理目标。首先，基于地方政府决策变量与企业决策变量，确定上层一下层目标函数及约束条件，建立地方政府与企业之间关于治理废水、废气和废渣的双层优化环境治理模型，研究地方政府环境奖罚政策与企业利润及环境行为的关联性；然后，给出模型解的存在性条件，提出模型“乐观最优解”与“悲观最优解”及地方政府奖惩机制最优解；最后，进一步分析政府的环境治理奖惩方式和税费比例对企业利润及环境行为的影响，并进行政策讨论，以期为宁蒙沿黄地带及类似地区强化排污者责任、实现国家排放标准目标、实现环境经济协调可持续发展提供参考。

1 宁蒙沿黄地带环境污染状况

宁蒙沿黄地带是我国西北老工业基地和典型资源型城市的集聚区域，是我国西北乃至整个西部的重要增长极^[1]，基本形成了以能源、建材、冶金、装备制造业等为主导的重化工业体系，宁东能源重化工基地和陕北新兴能源重化工基地，也是我国“西煤东运”“西气东输”“西电东送”的重要基地之一^[2,3]。宁蒙沿黄地带总体处于工业化初中期阶段，二产比重60%左右，重工业比重在80%以上，而三产比重低，很多企业采用的是能耗高、污染重、资源利用率低的传统生产模式，给当地本来就脆弱的生态系统带来了巨大压力，如近20年内蒙古乌海、阿拉善、鄂尔多斯等地在黄河两岸数十公里的狭长地带开设工业园区，且多以高能耗、高污染的企业为引进对象，对黄河的环境安全产生了严重影响。在沿黄地区经过合理处理处置的城市垃圾、工业垃圾比重不到10%，饮用水源、大气环境影响着3/4以上的居民^[4]。宁蒙沿黄地带成为我国环境污染最为突出的区域^[1-5]，单位工业产值“三废”排放量，特别是大气污染排放量远高于全国平均水平，污染治理水平有待提高。地方政府环境规制失位、监管不力是区域环境问题的重要原因。①废水污染，主要来自化工、冶金、有色金属等行业。近20年黄河排污量增加了1倍，干流近40%的河段水体功能影响严重。从青海经甘肃、宁夏至内蒙古的黄河沿岸，能源、重化工、有色金属、造纸等高污染工业废水排放量逐年增大^[5]。②大气污染，主要来自燃料燃烧和工业生产过程。前者污染物主要为颗粒物、硫氧化物和氮氧化物等，涉及火电、钢铁、焦化等行业；后者污染物主要有粉尘、含硫化合物、VOC、含氮化合物以及卤素化合物等，涉及化工、石化、钢铁、水泥等行业。沿黄地区工业SO₂排放量仍是全国平均水平的2倍左右。在2018年全国空气污染城市排名中，石嘴山、包头、兰州、银川、呼和浩特等沿黄城市的污染程度均在前列。③固体废弃物污染，主要包括矿山尾矿、粉煤灰、锅炉渣、冶炼废渣等。很多工业垃圾未经处理直接排放，直接威胁生态系统安全^[6]。

2 企业治理“三废”优化模型

针对废水排放，设 δ_{1l} ($l=1,2,\dots,L$)表示国家规定的单位体积废水中第 l 种污染物的最高含量；针对废气排放，设 δ_{2m} ($m=1,2,\dots,M$)表示国家规定企业排放的单位体积废气中包含的第 m 种有害气体的最高含量；针对固废排放，设 δ_{3n} ($n=1,2,\dots,N$)表示国家规定的单位体积废渣中第 n 种污染物的最高含量，涉及的参数均为常量，见生态环境部政策性标准及区域性规范。假设生产技术、设备和管理模式在一段时间内是不变的，则企业在一段时间（月或年）内产生的“三废”中各种污染物的含量可以近似看成定值，故令参数 β_{1l} 和 γ_{1l} ($l=1,2,\dots,L$)表示企业治理前后单位体积废水中第 l 种污染物的含量； β_{2m} 和 γ_{2m} ($m=1,2,\dots,M$)表示治理前后单位体积的废气中第 m 种有害气体的含量； β_{3n} 和 γ_{3n} ($n=1,2,\dots,N$)表示治理前后单位体积的废渣中第 n 种污染物的含量；参数均可从企业获取。企业治理“三废”达标需要 $\gamma_{1l} \leq \delta_{1l}$ ($l=1,2,\dots,L$)， $\gamma_{2m} \leq \delta_{2m}$ ($m=1,2,\dots,M$)， $\gamma_{3n} \leq \delta_{3n}$ ($n=1,2,\dots,N$)成立。

设地方政府决策变量为 $(z,u)=(z_{1l},z_{2m},z_{3n},u_1,u_2,u_3)$ ，其中 z_{1l} ($l=1,2,\dots,L$)表示政府对企业单位体积的废水中第 l 种有毒物质含量比规定的标准 δ_{1l} 每多一单位给予的处罚金额， z_{2m} ($m=1,2,\dots,M$)与 z_{3n} ($n=1,2,\dots,N$)表示对单位体积废气与废渣中污染物含量每超过标准一单位而给予的处罚金额。 u_i , $i=1,2,3$ 表示政府根据企业治理效果给予的税收奖励比例。上层政府的目标函数为：

$$F(x,y,z,u) = \sum_{i=1}^3 y_i + \left[\sum_{l=1}^L (\delta_{1l} - \gamma_{1l}) u_1 y_1 + \sum_{m=1}^M (\delta_{2m} - \gamma_{2m}) u_2 y_2 + \sum_{n=1}^N (\delta_{3n} - \gamma_{3n}) u_3 y_3 \right]$$

其中， y_1, y_2, y_3 分别表示企业每月治理废水、废气和废渣的量，是企业决策变量； $\sum_{i=1}^3 y_i$ 表示企业治理“三废”的总和，政府希望通过调整处罚方案 $z=(z_{1l}, z_{2m}, z_{3n})$ 来促使下层企业 $\sum_{i=1}^3 y_i$ 尽可能大； $\left[\sum_{l=1}^L (\delta_{1l} - \gamma_{1l}) u_1 y_1 + \sum_{m=1}^M (\delta_{2m} - \gamma_{2m}) u_2 y_2 + \sum_{n=1}^N (\delta_{3n} - \gamma_{3n}) u_3 y_3 \right]$ 为企业治理效果的税收奖励。若企业治理

的“三废”全部达标，则 $\left[\sum_{l=1}^L (\delta_{1l} - \gamma_{1l}) u_1 y_1 + \sum_{m=1}^M (\delta_{2m} - \gamma_{2m}) u_2 y_2 + \sum_{n=1}^N (\delta_{3n} - \gamma_{3n}) u_3 y_3 \right] \geq 0$ ，企业税收奖励为正。因此，政府希望通过调整 (z,u) 来增加这一部分的值，数值越大，说明企业治理的效果越好。故上层政府的规划为：

$$\begin{aligned} \max_{z,u} \quad & F(x,y,z,u) \\ \text{s.t.} \quad & z_{1l} \geq 0, \quad l=1,2,\dots,L \\ & z_{2m} \geq 0, \quad m=1,2,\dots,M \\ & z_{3n} \geq 0, \quad n=1,2,\dots,N \\ & 0 \leq u_i < 1, \quad i=1,2,3 \end{aligned}$$

约束条件表示地方政府对企业的处罚金额是非负的(政府的处罚不能高于某个企业所能接受的最大数值);税收比例介于0和1之间。

设企业只生产一种产品(多种产品同理),其决策变量为 $(x, y) = (x, y_1, y_2, y_3)$,其中 x 表示企业每月的总产量, $y = (y_1, y_2, y_3)$ 表示企业每月治理的“三废”的量,故下层企业的目标函数利润为:

$$\begin{aligned} f(x, y, z) = & (p - c)x - \sum_{l=1}^L [c_{1l}(\beta_{1l} - \gamma_{1l})y_1 + (\beta_{1l} - \delta_{1l})(\varepsilon_1 x - y_1)z_{1l}] \\ & - \sum_{m=1}^M [c_{2m}(\beta_{2m} - \gamma_{2m})y_2 + (\beta_{2m} - \delta_{2m})(\varepsilon_2 x - y_2)z_{2m}] \\ & - \sum_{n=1}^N [c_{3n}(\beta_{3n} - \gamma_{3n})y_3 + (\beta_{3n} - \delta_{3n})(\varepsilon_3 x - y_3)z_{3n}] \\ & - [\alpha_0 + \sum_{l=1}^L (\gamma_{1l} - \delta_{1l})u_1 + \sum_{m=1}^M (\gamma_{2m} - \delta_{2m})u_2 \\ & + \sum_{n=1}^N (\gamma_{3n} - \delta_{3n})u_3]x \end{aligned}$$

其中, $\varepsilon_i x_i$ 中 $i=1, 2, 3$ 表示企业每月产生的废水、废气和废渣的量(常量); ε_i 中 $i=1, 2, 3$ 表示总产量为 x 时产生的废水、废气和废渣的比例(常量); p, c 分别表示该种产品的平均单位价格和平均单位成本(常量); $(p-c)x$ 表示企业生产该种产品的月平均利润。 c_{1l} ($l=1, 2, \dots, L$)表示企业治理单位废水中第 l 种污染物的成本(常量); $\sum_{l=1}^L c_{1l}(\beta_{1l} - \gamma_{1l})y_1$ 表示企业治理 y_1 体积废水需要花费成本; $\sum_{l=1}^L (\beta_{1l} - \delta_{1l})(\varepsilon_1 x - y_1)z_{1l}$ 则表示企业因为没有治理 $\varepsilon_1 x - y_1$ 的废水而受到的惩罚金额。若 $\varepsilon_1 x = y_1$,即企业将产生的废水全部治理,则受到的惩罚为零。同理, $\sum_{m=1}^M [c_{2m}(\beta_{2m} - \gamma_{2m})y_2 + (\beta_{2m} - \delta_{2m})(\varepsilon_2 x - y_2)z_{2m}]$ 与 $\sum_{n=1}^N [c_{3n}(\beta_{3n} - \gamma_{3n})y_3 + (\beta_{3n} - \delta_{3n})(\varepsilon_3 x - y_3)z_{3n}]$ 表示企业治理 y_2 与 y_3 的废气与废渣而花费的成本和惩罚。 $[\alpha_0 + \sum_{l=1}^L (\gamma_{1l} - \delta_{1l})u_1 + \sum_{m=1}^M (\gamma_{2m} - \delta_{2m})u_2 + \sum_{n=1}^N (\gamma_{3n} - \delta_{3n})u_3]x$ 表示企业应纳税的总额,其中 α_0 是企业的正常税费比例。 $\sum_{l=1}^L (\gamma_{1l} - \delta_{1l})u_1 + \sum_{m=1}^M (\gamma_{2m} - \delta_{2m})u_2 + \sum_{n=1}^N (\gamma_{3n} - \delta_{3n})u_3$ 表示政府对于企业已经治理的废水、废气和废渣的治理效果的纳税奖罚比例。故下层企业的规划为:

$$\begin{aligned} \max_{x, y} \quad & f(x, y, z, u) \\ \text{s.t.} \quad & 0 \leq x \leq a \\ & 0 \leq y_i \leq \varepsilon_i x \quad i=1, 2, 3 \\ & cx + \sum_{l=1}^L (\beta_{1l} - \gamma_{1l})y_1 c_{1l} + \sum_{m=1}^M (\beta_{2m} - \gamma_{2m})y_2 c_{2m} \\ & + \sum_{n=1}^N (\beta_{3n} - \gamma_{3n})y_3 c_{3n} \leq A \end{aligned}$$

其中,约束条件表示企业的月生产量非负且不超过月最大生产能力 a (a 是常量,由企业的生产能力决定);企

业治理“三废”的量 $y_i, i=1, 2, 3$ 不超过每月产生“三废”的量 $\varepsilon_i x$;企业的生产成本 cx 和治理“三废”的成本 $\sum_{l=1}^L (\beta_{1l} - \gamma_{1l})y_1 c_{1l} + \sum_{m=1}^M (\beta_{2m} - \gamma_{2m})y_2 c_{2m} + \sum_{n=1}^N (\beta_{3n} - \gamma_{3n})y_3 c_{3n}$ 总和不能超过企业所能接受的最大值 A 。

标记整个双层优化环境治理模型为(P),则由(P)可看出,地方政府每采取一个奖罚政策 (z, u) ,企业会相应地给出使自己利润最大的生产、治理方案 (x, y) ,依据该方案企业制定产量及污染治理对策。地方政府可根据企业的决策方案调整其奖罚力度,实现区域环境目标。

3 模型解的存在性以及两种特殊情形

3.1 解的存在性

记双层优化环境治理模型(P)的可行集为:

$$S = \{(x, y, z, u) | z, u\}$$

满足上层规划约束条件, x, y 满足下层规划约束条件。

上层的约束集为:

$$\begin{aligned} W = \{(z, u) | & z_{1l}, z_{2m}, z_{3n} \geq 0, 0 \leq u_1, u_2, u_3 < 1, \\ & l=1, 2, \dots, L, m=1, 2, \dots, M, n=1, 2, \dots, N\} \end{aligned}$$

对于给定的上层变量 (z, u) ,记下层可行解集为:

$$M(z, u) = \{(x, y) | x, y\}$$

满足下层规划约束条件。

下层的约束集是非空有界凸多面体,也是闭集。而下层最优解集记为:

$$\Psi(z, u) = \arg \max_{x, y} \{f(x, y, z, u) | x, y\}$$

满足下层规划约束条件。这里 $\Psi(z, u)$ 是点到集合映射。

引理1^[20]:如果上层约束集 W 是非空紧集,对于每个给定的上层变量 $(z, u) \in W$,下层至多有一个最优解,且可行集 S 非空,则双层优化问题(P)至少有一个最优解。

显然,适当选取参数,可保证双层优化问题(P)满足引理1所有条件,使该模型至少存在一个最优解。

3.2 两种特殊情形

3.2.1 乐观最优解

乐观最优解是指上层领导者(地方政府)乐观地认为其有能力去影响下层(重污染企业)的行为,使得后者选择最利于上层目标函数的行动,此时求解模型得到的解为乐观最优解。

令函数 $\varphi_o(z, u) = \max_{x, y} \{F(x, y, z, u) : (x, y) \in \Psi(z, u)\}$,则乐观的双层优化环境治理模型为:

$$\begin{aligned} \max_{z, u} \quad & \varphi_o(z, u) \\ \text{s.t.} \quad & z, u \in W \\ \text{(P1)} \quad & \varphi_o(z, u) = \max_{x, y} \{F(x, y, z, u) : (x, y) \in \Psi(z, u)\} \end{aligned}$$

引理2^[22]:对于乐观优化模型(P1),如果可行集 S 是非空紧集,下层问题在任何点 $(x, y) \in M(z, u)$ 处满足(MFCQ)

条件,则问题(P1)如果存在可行解,一定存在全局最优解。

问题(P1)的全局最优解称为原双层优化问题(P)的全局乐观最优解,在此认为不论企业是积极采取措施治理污染还是在政府的强制措施下治理污染,都是一种与政府合作的态度,故视为“乐观”情形。

3.2.2 悲观最优解

悲观最优解是指政府无法保证企业会按照自己期望的方式治理污染,此时求解模型得到的解称为悲观最优解。本文中悲观情形特指企业不愿治理污染,并将部分有害的“三废”直接排放到外界环境中。

令函数 $\varphi_p(z,u) = \min_{x,y} \{F(x,y,z,u) : (x,y) \in \Psi(z,u)\}$, 则悲观的双层优化环境治理模型为:

$$(P2) \quad \begin{aligned} & \max_{z,u} \varphi_p(z,u) \\ & s.t. \quad z,u \in W \\ & \varphi_p(z,u) = \min_{x,y} \{F(x,y,z,u) : (x,y) \in \Psi(z,u)\} \end{aligned}$$

悲观优化模型(P2)不能保证有解,但是当下层最优解集 $\Psi(z,u)$ 满足下半连续时,全局悲观最优解存在。

引理3^[22]: 对于悲观问题(P2),如果点到集映射 $\Psi(z)$ 是下半连续的,且可行集 S 是非空紧集,则问题(P2)如果存在可行解,一定存在全局最优解。

问题(P2)的全局最优解称为原双层优化问题(P)的全局悲观最优解。这样不管是企业愿意与政府合作的乐观情形,还是不愿意合作的悲观情形,只要适当地调整模型的参数,就可以找到最优解。问题(P1)和(P2)是双层优化问题(P)的两个特殊情形,下面地方政府的奖惩及税费措施对企业决策及效益的影响分析将会说明这两种特殊情形的存在条件。而对于一般的双层优化问题(P),用于求解该类模型的有效算法比较多,如罚函数算法^[22-24]、信赖域算法^[25]、SQP算法^[26]、SLP算法^[27]等。在此利用间隙函数将其转化为单层模型后,采用罚函数方法求解。

设函数 $\varphi(z,u) = \max_{x,y} f(x,y,z,u)$, 定义间隙函数为 $G(x,y,z,u) = \varphi(z,u) - f(x,y,z,u)$ 。

因此,双层优化问题(P)可以等价于下面的单层优化问题(P3)^[22, 23, 27, 28]:

$$(P3) \quad \begin{aligned} & \max_{z,u} F(x,y,z,u) \\ & s.t. \quad z,u \in W \\ & \quad (x,y) \in M(z,u) \\ & \quad G(x,y,z,u) = 0 \end{aligned}$$

(P3)中约束 $G(x,y,z,u)=0$ 使得模型不满足一般的约束规格(如MFCQ条件、LICQ条件等),模型难以求解,故研究求解模型(P3)时,先去掉该约束 $G(x,y,z,u)=0$, 求解后对于给定的任意小正数 $\varepsilon > 0$, 验证不等式 $G(x,y,z,u) \leq \varepsilon$ 是否成立,如果成立,则认为得到了近似最优解,否则继续迭代。算法结束时得到解 (x^*, y^*, z^*, u^*) , 此时 $F(x^*, y^*, z^*, u^*)$ 达到相对最大值,从而地方政府得到了最佳的奖惩政策 (z^*, u^*) , 该政策既可最大限度地保护环境,又

不影响企业的生产积极性,同时企业也相应地得到了使自己利润最大的生产和污染治理方案 $(x^*, y^*) = (x^*, y_1^*, y_2^*, y_3^*)$ 。该方案让企业在获得利润的同时,也实现了绿色生产,提高了企业的竞争力和声望,使政府和企业达到双赢。

4. 模型分析

4.1 地方政府奖惩对企业决策的影响

下面研究上层政府的处罚金额 z 对下层企业治理量 $y = (y_1, y_2, y_3)$ 的影响。因为

$$\begin{aligned} \frac{\partial f(x,y,z,u)}{\partial y} &= \left[\frac{\partial f(x,y,z,u)}{\partial y_1}, \frac{\partial f(x,y,z,u)}{\partial y_2}, \frac{\partial f(x,y,z,u)}{\partial y_3} \right] \\ &= \left\{ \sum_{l=1}^L [(\beta_{1l} - \delta_{1l})z_{1l} - c_{1l}(\beta_{1l} - \gamma_{1l})], \right. \\ & \quad \sum_{m=1}^M [(\beta_{2m} - \delta_{2m})z_{2m} - c_{2m}(\beta_{2m} - \gamma_{2m})], \\ & \quad \left. \sum_{n=1}^N [(\beta_{3n} - \delta_{3n})z_{3n} - c_{3n}(\beta_{3n} - \gamma_{3n})] \right\} \end{aligned}$$

令 $\frac{\partial f(x,y,z,u)}{\partial y_1} = 0$, 得到 $(\beta_{1l} - \delta_{1l})z_{1l} = c_{1l}(\beta_{1l} - \gamma_{1l})$, 从

而 $z_{1l} = \frac{c_{1l}(\beta_{1l} - \gamma_{1l})}{(\beta_{1l} - \delta_{1l})}$, $l=1, 2, \dots, L$ 。

令 $\theta_{1l} = \frac{(\beta_{1l} - \gamma_{1l})}{(\beta_{1l} - \delta_{1l})}$, $l=1, 2, \dots, L$ (这里由于 θ_{1l} 的表达式中各参数都是常量,故 θ_{1l} 是常数,且与企业的排污技术水平有关,以下 θ_{2m} , θ_{3n} 同理), 则 $z_{1l} = c_{1l}\theta_{1l}$, $l=1, 2, \dots, L$ 。

同理, 令 $\frac{\partial f(x,y,z,u)}{\partial y_2} = 0$, 得到 $z_{2m} = c_{2m}\theta_{2m}$, 其中

$$\theta_{2m} = \frac{\beta_{2m} - \gamma_{2m}}{\beta_{2m} - \delta_{2m}}, m=1, 2, \dots, M。$$

令 $\frac{\partial f(x,y,z,u)}{\partial y_3} = 0$, 得到 $z_{3n} = c_{3n}\theta_{3n}$, 其中 $\theta_{3n} =$

$$\frac{\beta_{3n} - \gamma_{3n}}{\beta_{3n} - \delta_{3n}}, n=1, 2, \dots, N。$$

处罚 $z_{1l} > c_{1l}\theta_{1l}$, $l=1, 2, \dots, L$ 时, $\frac{\partial f(x,y,z,u)}{\partial y_1} > 0$, 即地

方政府对企业单位体积废水中第 l ($l=1, 2, \dots, L$) 种污染物超标部分的处罚金额严格大于企业治理该种污染物的单位成本的 θ_{1l} ($l=1, 2, \dots, L$) 倍时,企业目标函数(利润)是污水治理量 y_1 的增函数,即下层企业治理的污水量 y_1 越多,利润越大。故此时企业愿意与政府合作,主动治理废水中的各种污染物。为了探寻处罚上界,令

$$(p-c)x - \sum_{l=1}^L [c_{1l}(\beta_{1l} - \gamma_{1l})y_1 + (\beta_{1l} - \delta_{1l})(\varepsilon_1 x - y_1)z_{1l}] = 0, \text{ 其中}$$

$y_1 = 0$, 则解得 $\sum_{l=1}^L (\beta_{1l} - \delta_{1l})z_{1l} = \frac{p-c}{\varepsilon_1}$ 。令 $\lambda_1 = \min\{\beta_{1l} - \delta_{1l}\}$,

则有 $\sum_{l=1}^L z_{1l} \leq \frac{p-c}{\lambda_1 \varepsilon_1}$, 即在完全不考虑废气和废渣的前提下,

政府对企业污水这一项处罚的金额总和要远小于 $\frac{p-c}{\lambda_1 \varepsilon_1}$ 。

同理可分析 z_{2m}, z_{3n} ($m=1, 2, \dots, M, n=1, 2, \dots, N$) 对下层目标函数的影响。为督促企业治理“三废”，政府的处罚值应该大于企业治理污染物的单位成本的 θ 倍，但不要超过给定的上限。

结论 1：对于双层规划模型 (P)：

(1) 当 $z_{1l} > c_{1l}\theta_{1l}, l=1, \dots, L$ ($z_{2m} > c_{2m}\theta_{2m}, m=1, \dots, M, z_{3n} > c_{3n}\theta_{3n}, n=1, \dots, N$)，且 $\sum_{l=1}^L z_{1l} < \frac{p-c}{\lambda_1 \varepsilon_1}$ ($\sum_{m=1}^M z_{2m} < \frac{p-c}{\lambda_2 \varepsilon_2}, \sum_{n=1}^N z_{3n} < \frac{p-c}{\lambda_3 \varepsilon_3}$) 时，企业利润随着废水（废气、废渣）的治理量的增加而增加，故企业愿意主动治理废水（废气、废渣）。

(2) 当 $0 \leq z_{1l} < c_{1l}\theta_{1l}, l=1, 2, \dots, L$ ($0 \leq z_{2m} < c_{2m}\theta_{2m}, m=1, 2, \dots, M, 0 \leq z_{3n} < c_{3n}\theta_{3n}, n=1, 2, \dots, N$) 时，企业的利润随着废水（废气、废渣）的治理量的增加而减少，故企业不愿意主动治理废水（废气、废渣）。

(3) $z_{1l} = c_{1l}\theta_{1l}, l=1, 2, \dots, L, (z_{2m} = c_{2m}\theta_{2m}, m=1, 2, \dots, M, z_{3n} = c_{3n}\theta_{3n}, n=1, 2, \dots, N)$ 时，企业的利润不受废水（废气、废渣）的治理量多少的影响。

模型解第一种情形为乐观最优解。地方政府需要将处罚金额定在第一种情形的范围内。第二种情形此时模型的解为悲观最优解。第三种情形中，如果政府不能劝说下层企业治理污染，政府的目标函数值有可能达到最小值零。

4.2 地方政府征收的污染税费比例 u_i ($i=1,2,3$) 对企业治理效果的影响

$\frac{\partial f(x, y, z, u)}{\partial \gamma_{1l}} = c_{1l}y_{1l} - u_1x (l=1, 2, 3, \dots, L)$ 中令 $\frac{\partial f(x, y, z, u)}{\partial \gamma_{1l}} = 0 (l=1, 2, 3, \dots, L)$ ，得 $u_1 = \frac{c_{1l}y_{1l}}{x} (l=1, 2, 3, \dots, L)$ 。当 $u_1 > \frac{c_{1l}y_{1l}}{x} (l=1, 2, 3, \dots, L)$ 时， $\frac{\partial f(x, y, z, u)}{\partial \gamma_{1l}} < 0$ ，企业的利润随着单位体积的污水中第 l 种污染物的含量 $\gamma_{1l} (l=1, 2, \dots, L)$ 的增加而下降，治理效果越差，利润越低，因为治理效果越差，收费的比例越高，故而利润越低；当 $u_1 = \frac{c_{1l}y_{1l}}{x} (l=1, 2, 3, \dots, L)$ 时， $\frac{\partial f(x, y, z, u)}{\partial \gamma_{1l}} = 0$ ，企业的废水治理耗费的成本与政府给予的纳税奖励恰好持平，治理效果差，则节省的成本与增加的税额相当，故此时企业的利润不受治理效果的响应。当 $u_1 < \frac{c_{1l}y_{1l}}{x} (l=1, 2, 3, \dots, L)$ 时， $\frac{\partial f(x, y, z, u)}{\partial \gamma_{1l}} > 0$ ，此时，单位体积的污水中第 l 种污染物的含量 $\gamma_{1l} (l=1, 2, \dots, L)$ 越高，利润越高。此时政府增加的费用额度远小于企业提高“三废”治理效果所增加的成本，治理得越差，利润越高。同理可分析 u_2, u_3 对废气和废渣中各污

染物治理效果的影响。

结论 2：地方政府制定的污染税费比例 $u = (u_1, u_2, u_3)$ 在不同范围时，企业的决策会有很大不同。

(1) 当 $u_1 > \max\left(\frac{c_{1l}y_{1l}}{x}, l=1, 2, 3, \dots, L\right), u_2 > \max\left(\frac{c_{2m}y_{2l}}{x}, m=1, 2, 3, \dots, M\right), u_3 > \max\left(\frac{c_{3n}y_{3l}}{x}, n=1, 2, 3, \dots, N\right)$ 时，企业的利润随着治理效果的提高而增加；

(2) 当 $u_1 < \min\left(\frac{c_{1l}y_{1l}}{x}, l=1, 2, 3, \dots, L\right), u_2 < \min\left(\frac{c_{2m}y_{2l}}{x}, m=1, 2, 3, \dots, M\right), u_3 < \min\left(\frac{c_{3n}y_{3l}}{x}, n=1, 2, 3, \dots, N\right)$ 时，企业的利润随着治理效果的下降而提高。

(3) 当 $\min\left(\frac{c_{1l}y_{1l}}{x}, l=1, 2, 3, \dots, L\right) \leq u_1 \leq \max\left(\frac{c_{1l}y_{1l}}{x}, l=1, 2, 3, \dots, L\right), \min\left(\frac{c_{2m}y_{2l}}{x}, m=1, 2, 3, \dots, M\right) \leq u_2 \leq \max\left(\frac{c_{2m}y_{2l}}{x}, m=1, 2, 3, \dots, M\right), \min\left(\frac{c_{3n}y_{3l}}{x}, n=1, 2, 3, \dots, N\right) \leq u_3 \leq \max\left(\frac{c_{3n}y_{3l}}{x}, n=1, 2, 3, \dots, N\right)$ 时，企业对“三废”的治理效果对于最终的利润影响不大。

对于企业治理“三废”，地方政府给予的污染税费的比例不同，企业会有不同的决策反应。当污染费用的比例大过某个数值时，企业治理效果越好，利润越高，自然会积极提高其“三废”治理水平；而当污染费用的比例小过某个数值时，企业治理效果越好，利润越低，此时企业不愿意提高治理效果；当污染税费比例在某个范围内变动时，企业治理效果不对其利润产生影响，此时企业可以选择治理达标或者不达标。

5 结论

污染防治是决胜全面建成小康社会的三大攻坚战之一。在我国环境法规与行业标准日益健全的情况下，如何加强地方环境监管，协调地方环境—经济效益至为关键。我国很多重污染区，包括西北宁蒙沿黄地区双高企业“三废”排放严重影响区域生态环境安全，严重制约区域协调可持续发展及沿黄战略性生态屏障建设；而地方政府环境管理缺位，尤其需要切实可行的奖惩机制来促使企业排污达到国家标准。如何制定奖惩标准是关键所在。为此，本研究建立了以地方政府为上层、企业为下层的双层优化环境治理模型，促使企业经济效益与环境效益共举，能够较为合理、可行地反映区域地方政府与企业的博弈过程。除了国家污染物排放标准（常数）外，模型其余参数均决定于地方企业，虽然不同企业的生产能力和排污技术水平不同，但对于每一企业在一定时期内给定的其他条件不变时其参数值与技术工艺水平关联可视为常量。对于宁蒙沿黄地区重污染企业，可应用此模型来探索督促企业“三废”治理工作，地方政府可根据不同企业类型制定不同的奖惩标准和污染税费比例，对于企业

“三废”处罚金额要定在企业治理该污染物单位成本 θ 倍以上;而对于企业治理“三废”部分,地方政府可将污染税费比例 $u = (u_1, u_2, u_3)$ 定在模型求得数值以上,使企业实现自身利润与环境治理良性循环。

参考文献

- [1] 王锁成,李雪,石广义,等.宁蒙陕甘沿黄生态经济带建设构想[J].地理研究,2010,29(2):204-213.
- [2] 王菲,董锁成,毛琦梁,等.宁蒙沿黄地带产业结构的环境污染特征演变分析[J].资源科学,2014,36(3):620-631.
- [3] 樊正德,赵锋.我国西部能源“金三角”区域构建合作机制的模型分析[J].经济研究参考,2018(41):74-80.
- [4] 王菲,毛琦梁.工业结构与环境质量耦合优化情景模拟与策略——以宁蒙沿黄地带为例[J].生态经济,2016,32(1):14-21.
- [5] 李俊,董锁成,毛琦梁,等.宁蒙沿黄地带城镇用地变化及其生态效应[J].干旱区研究,2016,33(6):1262-1269.
- [6] 仲俊涛,米文宝,侯景伟,等.改革开放以来宁夏区域差异与空间格局研究——基于人口、经济和粮食重心的演变特征及耦合关系[J].经济地理,2014,34(5):14-20,47-47.
- [7] 黄秋森,赵岩,许新宜,等.基于弹簧模型的资源环境承载力评价及应用——以内蒙古自治区陈巴尔虎旗为例[J].自然资源学报,2018,33(1):173-184.
- [8] 赵丽霞,谭超.内蒙古资源环境要素对经济增长的影响路径研究[J].干旱区资源与环境,2017,31(4):16-21.
- [9] 宋林,张杨,郭玉晶.环境约束下陕西城镇化效率的区域差异及空间格局[J].人文地理,2016,31(6):115-122.
- [10] 张晓华,杨庆,马岩红.甘肃部分农村窖水微生物污染状况调查[J].干旱区资源与环境,2016,30(5):85-91.
- [11] 甄江红,李灵敏,何孙鹏,等.内蒙古工业化进程中的生态环境影响及其响应研究[J].干旱区资源与环境,2015,29(11):86-92.
- [12] 宋敏,郭清卉.基于低碳视角的陕西能源消费与环境污染的灰色关联度研究[J].科技管理研究,2015,35(16):243-247,262-262.
- [13] 胡振通,孔德帅,焦金寿,等.草场流转的生态环境效率——基于内蒙古甘肃两省份的实证研究[J].农业经济问题,2014,35(6):90-97.
- [14] 王永坤,董锁成,毛琦梁,等.产业结构视角下的环境污染成因分析——以甘肃为例(英文)[J].资源与生态学报(英文版),2013,4(1):88-92.
- [15] 王春萍,吴媚.西北地区人口—经济—环境耦合协调度评价——以甘肃庆阳为例[J].青海社会科学,2012(5):41-45.
- [16] 郭亮,马丽,齐晔.省级政府环境政策制定过程的特征分析——以陕西和云南水土保持生态补偿政策为例[J].中国人口·资源与环境,2012,22(3):87-92.
- [17] 王彦丽.渭河流域陕西段水环境质量综合评价与对策研究[J].干旱区资源与环境,2011,25(11):34-38.
- [18] 张智渊,黄翔.农用地膜的污染现状与对策探讨——以甘肃省通渭县为例[J].农业环境与发展,2010,27(6):12-16.
- [19] 李远方.巨资兴建的污水处理厂竟直排废水[N].中国商报,2013-03-05.
- [20] 胡长英,刘国山.基于环境角度的双层选址优化模型[J].中国管理科学,2007,15(4):59-62.
- [21] 胡长英.逆向物流闭环双层优化模型及算法[J].运筹与管理,2009,16(3):26-30.
- [22] DEMPE S. Foundations of Bilevel Programming[M]. US: Kluwer Academic Publishers. 2010.
- [23] HU C Y. Exactness of penalty functions for solving MPEC model of the transportation network optimization problems with user equilibrium constraints[C]//International Conference on Management Science and Engineering. Lille, France: IEEE, 2006.
- [24] LIU G S, HAN J Y, ZHANG J Z. Exact penalty functions for convex bilevel programming problems[J]. Journal of optimization theory and applications, 2001, 110(3): 621-643.
- [25] FLORIAN M, CHEN Y. A coordinate descent method for the Bi-level O-D matrix adjustment problem[J]. International transactions in operational research, 1995, 2(2): 165-179.
- [26] CLEGG J, SMITH M, XIANG Y L, et al. Bilevel programming applied to optimising urban transportation[J]. Transportation research part B: methodological, 2001, 35(1): 41-70.
- [27] MENG Q, YANG H, BELL M G H. An equivalent continuously differentiable model and a locally convergent algorithm for the continuous network design problem[J]. Transportation research part B: methodological, 2001, 35(1): 83-105.
- [28] BROTCORNE L, LABBÉ M, MARCOTTE P, et al. A bilevel model and solution algorithm for a freight tariff-setting problem[J]. Transportation science, 2000, 34(3): 289-302.

An Approach to Bi-level Programming Model on “Three Wastes” Management

HU Changying^{1,2}, LI Fei^{2*}, DONG Suocheng²

(1.School of Mathematics, Renmin university of China, Beijing 100872, China; 2.Institute of geographic sciences and resources, Chinese academy of sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: In order to control pollution and protect our environment, the local government should make strict regulations on the discharge of “three wastes” (waste water, waste gas and solid wastes generated in the production process) of these heavy industries, and follow the environmental economics principle: polluters pay what they pollute. The government should take necessary measures and penalties to supervise and urge those enterprises to treat their pollution seriously, i.e., discharge the “three wastes” after disposing them to reach the nationally environmental standards. This article considers the relationship between the government and the enterprise, and establishes creatively a bi-level programming model in which the government is the upper level leader and the enterprise is in the lower level. The government’s goal is to protect the environment of NMZYR through developing reasonable punishment policy, which urges the enterprise to discharge their “three wastes” with standard emission, at the same time, not blow the production enthusiasm of them. On the other hand, the enterprise that is in lower level, pursuits its maximum profit, at the same time, has to comply with the emission standards given by the government. Finally, by solving the model, we explore the optimal scheme with which both the government and enterprise are satisfied, realizing the unification of economic benefit, social benefit and environmental benefit.

Keywords: discharge of “three wastes”; environmental governance; bi-level programming model; optimal schemes