

管理科学

考虑环境影响的产业规划决策

王剑婷, 胡山鹰, 李有润, 薛东峰

(清华大学化工系生态工业研究中心, 北京 100084)

摘要:在工业规划决策中,引入环境价值与环境容量的概念对环境影响因素进行量化的评估,纳入经济效益优化,以达到经济、环境效益的综合最优。提出了以绿色效益 F 、绿色效率 E 来量化产业发展的经济和环境效益的总体优劣,建立了以绿色效益 F 为目标函数的产业规划决策数学模型。以某磷化工产业为背景,进行了案例计算分析。

关键词:环境价值;环境容量;产业决策;优化

中图分类号:TQ-9;F205

文献标识码:C

文章编号:0253-4320(2005)04-0058-05

Industrial planning decision with consideration of environmental effects

WANG Jian-ting, HU Shan-ying, LI You-run, XUE Dong-feng

(Eco industrial Research Center, Department of Chemical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In this paper, the concepts of environmental value and environmental carrying capacity are introduced into quantification of the impact on environment by the industrial processes, and applied in the optimization of the industrial planning decision to determine the optimal production scale that maximizes the profit with relatively least loss of environmental value. For obtaining an overall optimum of economic and environmental benefits, two indices of a green benefit and a green benefit ratio are defined. A mathematic model with an objective of green benefits is then established for the industrial production decision optimization. A case with a phosphoric industrial system is studied and analyzed using this mathematic model.

Key words: environmental value, environmental carrying capacity, industrial scale decision, optimization

自工业化以来,“高生产、高消耗、高污染”的传统发展模式,虽然实现了国民生产总值的迅速增长,但这种发展以破坏生态环境,牺牲农业、林业、牧业为代价,造成了严重的、长效的环境恶化。近年来,人们已经认识到经济发展是在一定环境中的发展,环境恶化了,就不利于或制约经济发展,甚至给人类带来灾难性后果。因此,目前产业发展的核心内容就是实现环境与经济的协调发展。

为了实现经济与环境的协调发展,在产业规划中,必须要考虑环境因素。近年来,产业规划中的环境规划逐渐受到重视,并被广泛应用。目前这方面的工作内容主要有以下几个方面:

(1)对工业生产的环境影响进行定量或定性评价,对其环境负荷进行定量计算。其中主要是对工业的排放数据进行调查,对各项指标进行评估和预测。

(2)对环境容量进行分析,也就是环境承载力法。环境容量对工业规模进行了限制,国内在这方

面进行了不少的研究和探索。北京大学环境科学中心在进行福建湄洲湾生态环境规划时就应用了环境承载力分析方法^[1]。

(3)在上述分析的基础上,提出建议方案:规定工业生产的污染物排放浓度、总量上限,并提出保护和建设环境的方案。

在产业规划决策实践中,现有的环境规划还存在着不足。目前的环境规划主要是把经济发展约束在一定的环境负荷和环境容量之下,经济与环境目标是分别考虑的,缺乏有机的统一。其次,即使在环境容量之内,废物的排放仍会造成环境损害,必须在产业规划中考虑环境代价,使得工业以相对较小的环境代价获取最大的经济效益。本文提出在产业规划决策中应考虑两项环境影响因素,一是把环境容量作为产业发展的规模约束,二是在经济效益中减去废物排放造成的环境价值损失,以经济效益与环境价值损失之差值作为经济与环境综合效益指标来优化产业发展规模,从而求得工业规划的最优方案。

收稿日期:2004-11-01

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(No. 20436040)

作者简介:王剑婷(1983-),女,硕士生,从事生态工业及循环经济方面的研究, wangjianting99@mails.tsinghua.edu.cn; 胡山鹰(1965-),男,教授,从事生态工业及循环经济方面的研究, 010-62794513, hxr-dce@tsinghua.edu.cn。

1 环境价值与环境容量

1.1 环境价值

环境价值是将环境损害或者环境效益货币化的方法,即以经济价值为量度,来计量人类活动对环境的影响。环境价值首先取决于其对人类的有用性,其价值的大小则决定于它的稀缺性(体现为供求关系)和开发利用条件。

从概念可以看出,环境价值仍是功利的,它是从人的各种需求出发,依据市场关系计量环境损失的,因此在哲学本质上仍是反生态主义的。但是与环境负荷等从环境出发的环境量化技术相比,它将环境影响的计量单位与经济效益的单位统一起来,在产业规划中有利于将环境效益与经济效益有机地结合。

我国的环境价值评估研究始于20世纪80年代初,到90年代不同层次的评估结果陆续面世。如过孝民等对全国环境污染损失进行评估^[2]、傅绥宁等对三峡工程的生态环境损失进行评估^[3]等,都采用了多种方法进行了比较全面评估。

1.2 环境容量

环境容量是指某环境区域能够容纳污染物质的最大数量^[4]。它是从环境的角度出发,根据环境对污染物的自净能力、污染物在环境中的累积情况、污染物浓度的安全阈值,给出环境一定时间内可接纳的污染物上限,依此对工业生产排放总量进行约束。在环境容量之内,污染物的排放与环境自净能力达到平衡,将污染物排放浓度控制在国家标准之中。

某环境区域容量的大小,与该环境区域本身的组成、结构及其功能有关,如该环境的物理、化学及生物过程,物质的循环转化方式等。因此,环境容量具有地带性规律和地区性差异。

环境容量可以分为整体环境区域的容量和单一环境要素的容量。若按照环境要素,又可细分为大气环境容量、水环境容量(其中包括河流、湖泊和海洋环境容量等)、土壤环境容量和生物环境容量等。此外,还有人口环境容量、城市环境容量等。如果按照污染物划分的话,可分为有机污染物(包括易降解和难降解的)环境容量和重金属与非金属污染物的环境容量。

2 产业规划决策模型

在产业规划中,一项重要内容是寻找产品的最佳生产规模。随着产量的增加,工业所带来的经济效益与环境价值损失如图1所示。

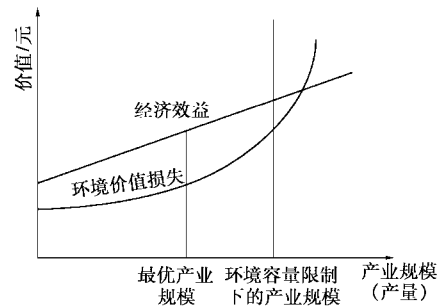


图1 产业规模与经济效益、环境价值损失的关系图

这里简化地认为产业的经济效益与生产规模成线性关系,而环境损失通常是非线性,并且多为边际效益递增的,因此产业存在一个规模上的最优点。在这一点,产业的经济效益与环境价值损失的差值最大,产业规模达到经济与环境效益的总体最优。同时为了避免发生环境的持久性破坏,必须要利用环境容量对工业生产的排放总量进行约束。

本文中以绿色效益 F 来表征产业的净收入与环境损失的差值:

$$F = R(X, U, C) - V(X, U, B, C) \quad (1)$$

式中, R 为经济效益; V 为环境价值损失; X 为状态向量,包括输入输出变量,如原料、产品流量、污染物排放量等; U 为决策变量,为所规划的产业规模,如年产量; C 为价格向量; B 为当地环境参数,如污染物浓度背景值,气候条件,以及安全浓度阈值等。

因此,在工业规模决策中,应当在环境容量的约束之下,寻找产业的绿色效益 F 最大的解。产业规划的数学模型如下:

$$\begin{aligned} \max F &= R(X, U, C) - V(X, U, B, C) \quad (2) \\ \text{s.t. } H(X, U, B, C) &= 0 \\ W(X, U, B) &\geq 0 \end{aligned}$$

式中, H 为状态方程,如物料守恒等; W 为环境容量。

其中,当当地初始环境条件 B_0 、市场状况 C 一定时,可依此模型对决策变量 U 进行求解计算,得到经济、环境综合效益最优的生产规模。

模型中,环境容量的计算如下:

根据环境容量的概念,区域绝对环境容量为

$$w = m \times (s - b) \quad (3)$$

式中, w 为绝对环境容量; s 为污染物浓度的安全阈值,通常采用国家环境标准; m 为介质质量; b 为环境污染物的背景值,与环境固有的性质和之前的污染物排放、累积情况有关。

在土壤中,假设年净化率为 k 。由于随着污染

物的累积,土壤中污染物的背景值 b 也在改变,假设从第 0 年起,每年外界输入污染物质的量为 p ,则第 n 年的环境容量为:

$$w_n = m \times (w - b_0) - \frac{(1 - k) - (1 - k)^{n+1}}{k} \times p \quad (4)$$

污染物在大气中存留和累积的状况跟天气状况有很大关系,因此在计算环境容量时,应根据当地长期气象数据,按一定概率选择最不利于扩散的气象条件为对象,如选取发生概率为 5% 的最不利天气为条件,在这种天气状况下使排放的污染物不在空气中累积超标。

环境价值的计算分为使用价值和非使用价值^[5]。使用价值主要包括可直接消耗的食物、生物量和间接使用的生态功能等;非使用价值包括了生物多样性、生存栖息地濒危物种等的价值。在实际应用中,计算一项工业生产的环境价值,可以分别对以下的指标进行计算:人体健康(包括医疗费用、误工损失、死亡损失、风险损失)、对人类的其他直接影响(美学、能见度、噪声、臭味引起的不快)、农业(各种作物)、工业(材料、建筑物、工业用水、工厂的运行)、林业、渔业、牧业、交通运输业、旅游业、房地产业、土地资源、生态服务价值、环境投资等。环境价值评估方法包括^[6]直接观察、间接观察、间接假设、直接假设 4 种方法。

由于环境价值的计算内容复杂,应根据具体案例,抓住主要矛盾计算主要污染物的环境影响。

3 案例研究

根据上述模型,以某磷化工产业为背景,该磷化工产业体系如图 2 所示。

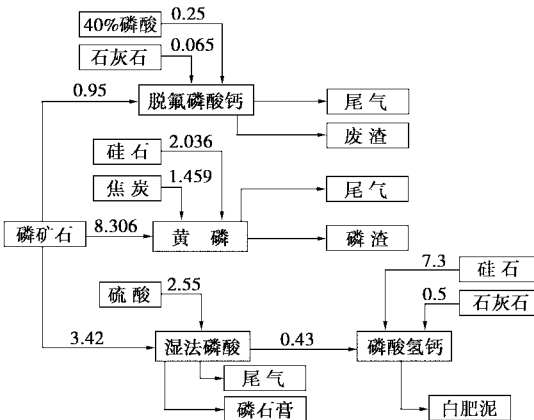


图 2 产业物流图

分别以黄磷、脱氟磷酸钙、湿法磷酸、饲料磷酸氢钙 4 种产品作为规模决策对象,进行优化计算。

决策变量为所选取的 4 种产品的年产量 $U(u_1, u_2, u_3, u_4)$;约束条件为环境容量限制和消耗磷矿总量限制。产业体系的主要污染物来自尾气和废渣中的砷、氟污染,因此环境容量部分为计算生产区环境对大气氟、土壤砷、土壤氟的年容纳上限;环境价值损失部分计算废渣占地费用(机会成本法);大气氟污染、土壤氟污染、土壤砷污染造成的农业、林业、养殖业损失(市场价值法)。

3.1 产品经济效益的计算

产品的经济效益 $R = (\text{产品单价} - \text{单位产品的原料、能量消耗价值} - \text{管理成本}) \times \text{产量}$ 。

产品体系如图 2 所示,其中灰色图框代表最终产品,物流线上方的数字为单位产品对原料的消耗(t/t)。产品、物料价格如表 1 所示。

表 1 产品及原料价格表

	品名	规格	价格/元·t ⁻¹
产品	脱氟磷酸钙		1200
	黄磷		9500
	湿法磷酸	85%	4000
	饲料级磷酸氢钙		3600
原料	磷矿石	30%	170
	硅石	100%计	90
	焦炭	固定炭 84%	710
	磷酸	40%	1500
	硫酸	98%	250
	石灰石	CaO 75%	170

3.2 环境容量的计算

工业生产对自然环境的影响主要源于工业“三废”的排放,“三废”中的有害物质大量进入土壤、大气和水环境,就会危害生物圈的正常代谢。该磷化工产业对农、林、养殖业形成直接作用的主要是土壤和大气。

污染物排放现状见表 2。

表 2 生产过程有害物质的排放

	污染物	排放量 ^① /t	所含有害 物质	有害物质 含量/g
黄磷	磷渣	9	砷	28.3 ^①
			氟	3024 ^②
脱氟磷酸钙	黄磷尾气	3219 m ³	氟	0.68 ^③
	废渣	0.665	—	—
湿法磷酸	尾气		氟	1100 ^③
	磷石膏	5	氟	1.43%
饲料级磷酸氢钙	尾气		氟	800 ^③
	白肥泥	2.0	氟	97000 ^④

注:①为每吨产品的排放量;②为每吨渣的有害物质含量;③为每立方米尾气的有害物质含量;④为每吨产品的有害物质含量。

3.2.1 土壤环境容量的计算

以黄磷废渣带来的砷污染为例。

根据国家土壤环境质量标准,所取土地范围内土壤砷浓度上限为 30 mg/kg。该磷化工的黄磷生产主要有 6 个厂区,以各厂址为中心,以距厂区 1 km 以内的地区作为研究对象。土壤层厚度取 0.5 m,土壤密度一般为 1.5 g/cm³,则介质质量 $m = 14.13 \times 10^6$ t; b_0 为区域内土壤背景值。该地区平均砷含量取 20.5 mg/kg。k 值为土壤对砷的年净化率,根据文献[7],取年净化率 $k = 20\%$ 。

要使土壤环境中的砷保持在安全的浓度下,即使式(3)大于等于 0。计算得 $n = \infty$ 时, $p = 33.56$ t。

由于该地区降雨充沛,假设长期冲刷,磷渣中的砷有 50% 转化为可溶性砷迁移到土壤中,则根据黄磷生产排放数据,此时 $u_1 = 26.35$ 万 t,即为黄磷产量的上限。

3.2.2 大气氟环境容量的计算

根据文献[8],氟化氢每天对一般植物产生 5% 伤害所需浓度为 3.0 ~ 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,据此在本例工业区的大气氟浓度限制取 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。计算得每个生产厂区内允许氟的日排放量上限为 0.2826 t。

根据生产排放关系,算得各产品的年产量上限,计算结果见表 3。

表 3 环境容量对产业规模限制的计算结果

产品	土壤环境容量限制下的最大产业规模/ $10^4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$		大气环境容量限制下的最大产业规模/ $10^4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$	约束
	砷	氟	氟	
黄磷	26.35	73.32	28.13	26.35
脱氟磷酸钙	—	—	18.754	18.754
湿法磷酸	—	13.91	51.05	13.91
饲料级磷酸氢钙	—	6.95	—	6.95

3.3 环境价值的计算

环境价值的计算参考第 2 部分所述内容。在此案例中,由于工业区处于农业林业区中,选取废渣占地费用、土壤污染造成的农业、林业损失,大气氟污染造成的农业、养殖业损失以及森林生态效益损失进行计算。该地区周边林业、农业、养殖业占地百分比分别为 70%、20%、10%。

3.3.1 废渣占地费用

占地成本采用机会成本法计算。假设土地如果不被废渣占用,则按比例作为林业、农业与养殖业用

地。每万吨废渣占地约 1.2 亩,年利率 i 取 10%。则由机会成本法计算,废渣的占地 n 年的费用为:

$$V_1 = \sum_j (Q_j \times X_j) \times \frac{1.2 \times a}{10000} \times [1 + (1+i)^{-1} + \dots + (1+i)^{-(n-1)}]$$

式中, $Q_j (j = 1, 2, \dots)$ 为林业、农业、养殖业的年生态经济效益; a 为废渣质量, t; $x_j (j = 1, 2, \dots)$ 为林业、农业、养殖业的占地比例; i 为年利率。

3.3.2 土壤砷、氟污染造成的农业、林业经济损失

根据土壤中污染物浓度与作物相对产量的关系曲线,以及污染物在土壤中的扩散模型,可以得到污染物排放量与作物减产损失之间的关系。

$$V_2 = \sum_j Q_j \times f(X, U, B) \times x_j \quad (5)$$

式中, f 为作物相对产量与造成污染的企业产量函数。

在本例中,简化地认为污染物在一定范围内(以 1 km 为半径的圆周内)的土壤中平均分布,累积情况与前面环境容量部分的计算相同。根据文献[9-10],拟合得到土壤砷、氟浓度与冬小麦产量之间的函数关系。并且在超过一阈值时,小麦制得的面粉中含氟量超过国家标准 1.0 mg/kg,此时产量计为 0。由于数据缺乏,假设林业损失与土壤砷、氟含量有上述相似关系。近似地假设污染物浓度与林业生态经济效益也有相似关系。

3.3.3 大气氟污染造成的农业、林业、养殖业经济损失

根据文献[10],可以拟合得到大气氟浓度与冬小麦减产量的二次曲线,根据式(5)计算大气氟污染造成的作物减产损失。林业、养殖业损失与大气氟浓度关系根据相关的大气氟浓度对环境的影响调研数据,并进行假设得到。

3.4 计算结果与讨论

模型的计算结果见表 4。

表 4 磷化工产业规模优化结果

	最优产量/ $10^4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$	环境容量限制下的产量上限/ $10^4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$	绿色效率率 E
	黄磷	10.182	
脱氟磷酸钙	18.754	18.754	0.4208
湿法磷酸	13.909	13.909	0.6594
饲料级磷酸氢钙	6.954	6.9540	0.6715

为了比较不同产业和方案的经济、环境综合效益,本文提出绿色效率率 E 来量化经济、环境效益的总体优劣:

$$E = \frac{R(X, U, C) - V(X, U, B, C)}{R(X, U, C)}$$

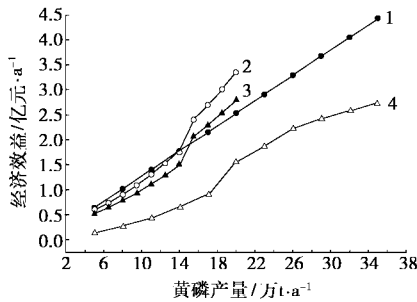
从结果中可以看出,黄磷生产的环境价值损失相对最大,污染严重;如果不加污染治理,黄磷生产造成的环境价值损失是巨大的,并随生产规模呈单调递增的凹函数关系。在产量为 10.18 万 t 时,绿色效率 E 最大,为 0.1118。

根据计算,可以对工业规划起到指导作用。如要提高产量上限,减小环境损失,通过废弃物的减排、再利用,可以使环境容量限制下的生产规模增大,并改变环境成本曲线,使其上升变缓,或向下、向右移动,则最优点也向右移动,最优规模增大,绿色效率 E 增大。

以黄磷为例,笔者提出考虑两种改进方案:

(1)假设黄磷生产的磷渣有 50% 可用于水泥和建材生产,相应地废渣堆放造成的土壤砷、氟污染减少 50%,则土壤环境对黄磷生产规模的容纳上限为 52.85 万 t/a。此时大气环境容量对黄磷生产规模的容纳上限为 28.13 万 t,因此总的黄磷生产规模的上限为 28.13 万 t。计算得最优黄磷生产规模为 13.62 万 t,此时绿色效率 $E = 0.2002$ 。

(2)如磷渣全部加以利用,同时通过对尾气的净化利用,使尾气排放的氟降低 20%,则环境容量对黄磷规模的限制为 33.01 万 t。此时计算得到最优生产规模为 33.01 万 t,绿色效率 $E = 0.3698$ 。见图 3。



1—经济效益;2—原方案的损失环境价值;3—改进方案 1 的损失环境价值;4—改进方案 2 的损失环境价值

图 3 不同方案中黄磷产量与经济效益、环境价值损失之间的关系

从表 5 的比较可以看出,通过废物的减排、再利用,可以使环境所能容纳的产业规模增大,从而取得更高的经济、环境综合效益,使得产业所带来的相对环境价值损失减小,绿色效率 E 可以量化地表示

其考虑环境代价的经济效益效率。同样,如果其他磷化工产业进行废物的减排和再利用,也可以使环境所能容纳的产业规模增大、产业所带来的相对环境价值损失减小。

表 5 不同方案比较

	原方案	方案 1	方案 2
最优产量/ $10^4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$	10.18	13.62	33.01
净收入/亿元	1.2872	1.7221	4.1738
绿色效率 E	0.1118	0.2002	0.3698

4 结语

在产业发展规划决策一类经济活动中,采用环境价值评估的手段对环境影响进行量化评估是意义、可操作的。在工业决策中,利用环境价值的计算,可以将经济效益、环境效益这两个对立矛盾的量有机地结合起来,寻求二者综合最优点。而使用环境容量对生产规模进行约束,可以保证环境的安全与可持续发展。本文提出了考虑环境容量约束,以经济效益与环境价值损失之差为绿色效益的产业规模优化决策模型,以某磷化工产业为实例进行了计算,结果表明,本文提出的绿色效益指标及其优化计算可以更有效地指导产业发展的科学决策,进一步建立更完善成熟的环境价值评估体系,推广考虑环境价值、环境容量的决策方法,将其纳入国家经济决策、政策法规等领域是很有意义的。

参考文献

- [1] 陈燕.[J].云南环境科学,1998,12(4):6-8.
- [2] 过孝民,等.公元 2000 年中国环境预测与对策研究[M].北京:清华大学出版社,1990.
- [3] 傅绥宁,王建国.长江三峡工程对生态与环境影响及其对策研究论文集[C].北京:科学出版社,1987.
- [4] 周密.环境容量[M].长春:东北师范大学出版社,1987,12-35.
- [5] 王金南.环境经济学:理论·方法·政策[M].北京:清华大学出版社,1994.
- [6] Myrick Freeman A. The Measurement of Environmental and Resource Values: theory and Methods[M]. Washington, D. C.: Resources for the Future, 1993.
- [7] 华路,韦东普,白玲玉,等.[J].土壤,1996,(2):69-71.
- [8] 任丽军,王建春.[J].山东环境,2001,(3):24.
- [9] 许嘉琳,杨居荣,荆红卫.[J].土壤,1996,(2):88.
- [10] 张玉峰,尹志良,贾小成,等.[J].重庆环境科学,1998,2(1):25-26. ■