

# 基于生态足迹方法的玉米-味精生态农业及产业系统分析

闫丽珍<sup>1,2</sup>, 成升魁<sup>1</sup>, 闵庆文<sup>1\*</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 为了提高生态产业研究结果的可比性, 以味精产业为例, 用生态足迹方法分析了产业过程涉及不同子系统的资源利用和环境污染情况。味精生产由三个子系统构成, 玉米生产、淀粉生产和味精生产。计算结果表明, 从玉米到味精的生产过程也是生态足迹延长的过程, 其中玉米生态足迹占用面积最大, 主要是因为耕地和水资源占用大; 生态足迹的延长伴随着足迹效益的增加, 意味着延长产业链条可以提高资源利用效率; 系统的间接能源生态足迹较大, 因此应重点考虑降低间接能源的能耗; 味精生产系统的能耗最高, 空气和水体环境污染最为严重。研究表明, 生态足迹是一种很好的衡量复合生态产业不同子系统资源利用和环境污染状况的方法。

**关键词:** 生态足迹; 味精生产; 资源效率

**中图分类号:** S19

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-6819(2006)09-0048-05

闫丽珍, 成升魁, 闵庆文. 基于生态足迹方法的玉米-味精生态农业及产业系统分析[J]. 农业工程学报, 2006, 22(9): 48-52.

Yan Lizhen, Cheng Shengkui, Min Qingwen. Analysis of the eco-agriculture and industry systems of maize and monosodium glutamate based on ecological footprint method[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(8): 48-52. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

自工业革命以来, 产业行为在很大程度上决定了人类与环境的相互作用, 但这种相互作用一直没有引起应有的关注; 经济的发展和人们生活质量的提高使人们重新考虑产业与生态的相互作用<sup>[1]</sup>, 产业生态学就在这样的背景下产生。产业生态学的方法主要有工业代谢和生命周期评价。20 世纪 80 年代末 Frosch 模拟生物的新陈代谢过程提出“工业代谢”的概念, 通过分析系统结构变化、进行功能模拟和分析产业流(输出流、产出流)来研究产业生态系统的代谢机理和控制论方法, 通常采用“供给链网”和物质平衡核算<sup>[2]</sup>方法。生命周期评价通过对能量和物质利用及由此造成的环境废物排放进行辨识和量化来进行<sup>[3]</sup>。相比而言, 工业代谢侧重于工艺流程的代谢效率研究, 生命周期评价则侧重于过程评价和环境评价。这两种方法虽然都体现了研究的过程性、系统性, 但因为没有统一的度量单位, 最终研究结果的可比性较差。如果生产过程或阶段涉及不同部门(子系统), 这一问题更为突出。为了减轻这一问题, 本文引入生态足迹方法, 以玉米-味精的生态产业系统为例, 分析生态产业复合系统的不同子系统的生态占用和资源利用情况。

## 1 生态足迹理论与方法简介

生态足迹是由加拿大 William Rees 和 Mathis Wackernagel 教授<sup>[3]</sup>于 1992 年首先提出并在 1996 年加以完善的一种测量人类对自然资源生态消费的需求(生态足迹)与自然所能提供的生态供给(生态承载力)之间的差距的方法。它从具体的生物物理量研究自然资本消耗的空间测度问题, 通过考察自然资本的供给与需求之间的差距, 可以反映人类对自然资源的利用程度及人类生产和消费活动对环境带来的压力, 揭示不同区域范围内人类生存和持续发展面临的危机或潜力。该方法自 1992 年提出以来以其理论、方法的创新性以及可操作性, 在区域可持续发展等领域得到了广泛应用<sup>[4-7]</sup>。

生态足迹的概念可表示为“能够持续地提供资源或吸纳废弃物的、具有生物生产力的土地面积”。其基本思路是采用一组基于土地面积的量化指标, 计算维持人类自然资源消费量和同化人类产生的废弃物所需要的生产性空间。生态足迹的计算主要基于以下两个基本事实: 1) 人类可以确定自身消费的绝大多数资源及其所产生的废弃物的数量; 2) 这些资源和废弃物都可以通过折算转换成生产该消费所需的原始物质与能量的生物生产性面积。这种方法的基本假设是: 虽然各类土地在空间上是互相排斥的, 但我们能够对这类生物生产性土地面积进行加总, 从而认识人类对自然系统的总需求。

生态足迹的计算公式如下:

$$EF = N \cdot ef, ef = \sum (aa_i) = \sum (c_i/p_i)$$

式中  $EF$ ——总的生态足迹;  $N$ ——人口数;  $ef$ ——人均生态足迹;  $i$ ——消费商品和投入的类型;  $aa_i$ ——人均  $i$  种交易商品折算的生物面积;  $c_i$ —— $i$  种商品的人均消费量;  $p_i$ —— $i$  种消费商品的平均生产能力。

生态足迹由六个土地类型组成: 可耕地、能源用地、

收稿日期: 2005-03-17 修订日期: 2006-07-17

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向性项目(KZCX2-SW-318-02-04)

作者简介: 闫丽珍(1977-), 女, 山西夏县人, 博士生, 主要从事资源生态研究。北京 中国科学院地理科学与资源研究所, 100101。

Email: yanlz@igsrr.ac.cn

\*通讯作者: 闵庆文(1963-)男, 江苏沛县人, 研究员, 博士, 主要从事生态经济、资源生态与区域可持续发展。北京 中国科学院地理科学与资源研究所, 100101

建筑用地、牧地、林地、海域。由于各类生物生产性土地的生产力存在差异,用当量因子将它们调整为具有等价生产力的土地面积(以上六个土地类型的当量因子分别为 2.8、1.1、2.8、0.5、1.1、0.2)。

然而对于食品产业而言,水资源也是主要原料之一。很多学者也意识到了这个问题,并在研究中加入水体用地一项内容,但对水体用地的衡量有所不同<sup>[5,8]</sup>。在此采用徐中民<sup>[5]</sup>的计算思路,将水体用地定义为每立方米水体所占面积,水体高度由一个地区的水资源总量和该地区国土面积之比得到。最后包括水体用地在内,本文共选取 7 类计算项目。

生态足迹方法的最大优点在于可比性强,但目前该方法鲜有用于产业领域。本文选择玉米的主要加工品——味精作为研究对象,在味精生产的每个阶段运用生态足迹方法对资源、能源的利用效率以及环境污染的影响进行了评价。这种方法提高了不同部门的生产系统的可比性,对产业可持续发展也具有一定意义。

计算产品的生态足迹需要增加一个假设,即产品的生态足迹可由生产中间产品的生态足迹累计而得。

$$EF = \sum (bb_j) = \sum (x_j/y_j)$$

式中  $EF$ ——总的生态足迹;  $bb_j$ ——生产第  $j$  种中间产品的生态占用;  $x_j$ ——生产第  $j$  种中间产品的资源消费量;  $y_j$ ——生产第  $j$  种中间产品所需资源的平均生产能力。

目前,生态足迹方法除了作为一个度量单位指示区域生态平衡和可持续发展的状态和程度,还通过与相关指数关联来表示生态效率,如用单位生态足迹所创造的国内生产总值代表一个经济体的生态效率<sup>[9]</sup>或资源利用效率<sup>[10]</sup>;用单位生态足迹所承载的学生数量代表一个校园生态效率<sup>[11]</sup>。生态效率的提出旨在减少资源消费(如能源、水和原料),以及对自然的影响(如空气和水排放),同时保持或提高制造品的价值(生产同样多或更多产品)<sup>[12]</sup>,它将生态效率指数定义为产品价值与环境影响的比值,也是强度指数的倒数。本文也试图用生态足迹收益即净收入与生态足迹的比值代表生态经济复合系统的生态效率或资源利用效率。

## 2 玉米-味精(MSG)生产系统分析

我国每年生产玉米约 1 亿 t 左右,大约 15% 用于工业原料,其中最主要的是生产淀粉,淀粉的主要下游产品之一是味精。因此,玉米、淀粉、味精是玉米-味精复合系统的主要节点。

这一复合系统从原料(玉米)到产品(即味精)经历了复杂的过程,跨越了工业和农业两个部门。图 1 为玉米-味精生产系统的示意图。为了反映主要产品的资源占用情况,将这些工序划分为 3 个子系统,即玉米生产、淀粉生产、味精生产。每一子系统主产品的生态足迹作为下一个子系统的生态足迹含量延续累计。然而每一子系统均有相应副产品产生,副产品的分配通常有两种方法,即按价值分配和按物料分配法。对于本系统而言,由

于副产品具有不同性质,宜采用价值分配法计算副产品生态足迹,即用副产品价值与子系统所有产品价值的比例乘以系统生态足迹就得到副产品的生态足迹。

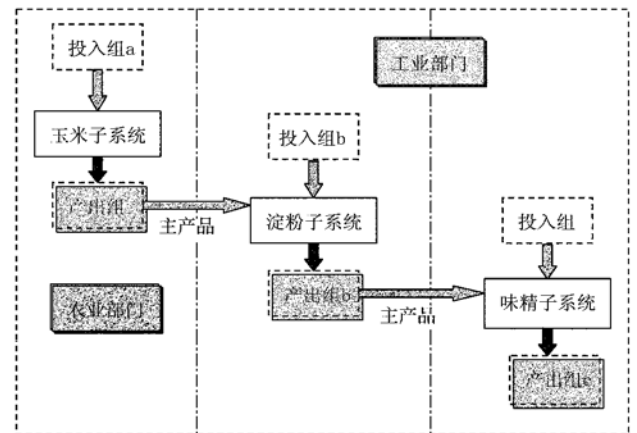


图 1 玉米-味精复合系统示意图

Fig. 1 Sketch map of the integrated systems of maize and monosodium glutamate

系统的特点是跨越了农业和工业两个部门,玉米生产属于农业部门,淀粉和味精生产属于工业部门,不同系统尤其是不同部门的原料投入、产出情况相差较大。玉米生产系统的投入品包括种子、化肥、农药、燃料、机械设备、人力、畜力,产出品包括玉米籽粒和秸秆。淀粉生产系统的直接投入品主要包括玉米籽粒、硫磺、能源、人工、制造费用,产出品包括淀粉乳、玉米胚芽、纤维、玉米浆、蛋白粉。味精生产的直接投入品主要包括淀粉乳、硫磺、硫酸、液氨、人工、制造费用,味精的产出品主要是味精和发酵液。

## 3 玉米-味精生产系统的生态足迹计算

### 3.1 资料来源

资料来源于典型调查和统计数据。淀粉和味精子系统的数据库为山东省某著名企业的实际调查数据,该企业年产味精 6.5 万 t 左右,占全国味精生产总量的 6% 左右,企业所用主要原料玉米也是该省的主要农作物之一。因此该企业的调查数据具有较高的代表性。玉米子系统的投入产出情况以该企业所在省份即山东省的统计平均数据为准。

### 3.2 计算项目选取和分类

依据投入品属性划分并计算生态足迹类型。

玉米生产系统的种子投入可根据单产水平转换为耕地类型,这里采用该省 2002 年和 2003 年的平均产量(5889 kg/hm<sup>2</sup>);化肥、农家肥、农膜、农药根据体现能(embodied energy)<sup>[13]</sup>转换为能源用地类型(1 kg 碳氨、尿素、磷肥的能耗分别相当于 7.5 MJ、23.8 MJ、3.6 MJ 的能量)<sup>[14]</sup>;柴油、电力根据平均低位发热量和热力当量折算为热量(1 kg 柴油= 42.7 MJ, 1 kW·h= 3.6 MJ)<sup>[15]</sup>,再根据能地比转换成能源用地(一般用每平方米生产 8 MJ 的乙醇净生产作为能地比);将固定资产

折旧依据钢材价格折算成钢材质量,再根据钢材耗能折算为能源用地(按照1 t 钢 5000 元计算,1 kg 钢耗能 46.8608 MJ)<sup>[16]</sup>;人工辅助能和畜力根据工作天数和每小时提供能量折算值折合能源用地(人力每工作1 h 折合0.75 MJ,畜力折合7.5 MJ)<sup>[17]</sup>;耕地和水分别根据单产和水资源需求量(1 kg 玉米需要1 t 水)折算耕地和水体用地。考虑到某些投入原料以体现能计算,实际产生的CO<sub>2</sub>并没有在本系统中排放,林业用地主要计算了吸收直接能源排放的CO<sub>2</sub>所需要的林地面积,如煤电、柴油、蒸汽,CO<sub>2</sub>排放量可通过计算标煤的二氧化碳排放系数得出(1 kg 标准煤排放0.617 kgCO<sub>2</sub>)<sup>[18]</sup>,然后根据吸收二氧化碳需要林地面积折算为林业用地(吸收1 t CO<sub>2</sub>需要0.732 hm<sup>2</sup>土地)<sup>[19]</sup>。

淀粉生产系统的硫磺投入根据体现能(以生产制造能替代,相当于1t 硫磺的能耗为80 kW·h,1 t 硫酸的能耗为120 kW·h)<sup>[20]</sup>将其划为能源用地类型;制造能费用的计算与固定资产折旧的计算相同。工资及福利根据单位产品的人工费用和月工资水平(900 元)折算成单位产品生产所需工作日,再根据年全国人均生态足迹划为各种用地类型<sup>[5]</sup>。按照水体用地计算方法虚拟水体高度为0.298 m,可将其想像为该地区国土面积上覆盖着0.298 m高的水体,其中污水用地面积根据排放达标所需稀释水量折算成水体面积。建设用地根据年产量摊分企业占地面积。

味精生产系统的计算过程与淀粉相同(由于该企业采用热电联供,因蒸汽是电能副产品不再重复计算)。

按照假设,玉米、淀粉和味精生产3个子系统的输入和输出,都是前一系统的输出和输入的累积。在实际计算模型中通过味精的功能单位进行计量。例如味精子系统的生态足迹单位为hm<sup>2</sup>/t(生产1 t 味精所需要的土地面积),因为1 t 味精需消耗1.6 t 淀粉(相当于3.57 t 淀粉乳),而1.6 t 淀粉需消耗2.5 t 玉米,因此淀粉和玉米子系统的功能单位分别为1.6 t 淀粉(3.57 t 淀粉乳)和2.5 t 玉米。

根据2002年和2003年《全国农产品成本收益资料汇编》,案例所在山东省的玉米子系统主产品价值即玉米籽粒价值,占玉米全部价值即玉米籽粒价值和秸秆价值之和的94%;根据案例调查,淀粉子系统的主产品价值占全部价值的80%,据此分配了生态占用。味精子系统的副产品主要是污水所含的有机物和无机物,严格意义上讲只是污水治理的结果,因此,没有将其纳入计算。

玉米-味精生产系统的能量投入产出情况见表1。

表1 玉米-味精生产系统投入产出表  
Table 1 Input-output table for the integrated systems of maize and monosodium glutamate

	玉米子系统		淀粉子系统		味精子系统	
投入	种子/MJ	328.7	硫磺/MJ	2.2	液氨/MJ	16841.5
	碳氢/MJ	529.8	电/MJ	445.1	硫磺/MJ	3.2
	尿素/MJ	1107.6	水/m <sup>3</sup>	7.5	硫酸/MJ	88.1
	磷肥/MJ	61.3	制造费用/元	125.1	电/MJ	3904.9
	农家肥/MJ	688.8	工资及福利	52.5	汽/MJ	19500
	农药费/MJ	250.8	/元		工资及福利	116
	柴油/MJ	914.6			/元	
	固定资产	1250.9			建设用地	2.7
	/MJ				/m <sup>2</sup>	
	电/MJ	630.5			水/m <sup>3</sup>	78.3
	水/m <sup>3</sup>	8.3			制造费用	150
	人工辅助能	365.8			/元	
	/MJ					
畜力/MJ	1829.2					
耕地/hm <sup>2</sup>	0.4					
产出	玉米/t	2.5	玉米胚芽/kg	191.8	复混肥/kg	0.4
	秸秆/t	2.5	纤维/kg	161.8	废水/m <sup>3</sup>	28.3
			玉米浆/kg	23.1		
出			蛋白粉/kg	132.7		

### 3.3 计算结果及生态效率分析

估算结果(表2)表明,每生产1 t 味精需要的生态足迹为2.44 hm<sup>2</sup>,其中2.01 hm<sup>2</sup>用于生产玉米,继续投入0.018 hm<sup>2</sup>用于生产淀粉(即淀粉的生态足迹为2.03 hm<sup>2</sup>),再继续投入0.409 hm<sup>2</sup>生产味精。

表2 玉米-味精生产系统的生态足迹计算结果

Table 2 Calculated results by ecological footprint(EF) method for maize and monosodium glutamate integrated systems

土地类型	2.5 t 玉米	在玉米子系统 中的比例/%	1.6 t 淀粉	在淀粉子系统 中的比例/%	1 t 味精	在味精子系统 中的比例/%	总计	在复合系统 中的比例/%
耕地/hm <sup>2</sup>	1.085	87.3	0.001	6.4	0.002	0.5	1.089	44.69
草地/hm <sup>2</sup>			0.001	7.1	0.002	0.5	0.004	0.15
森林/hm <sup>2</sup>	0.059	4.7	0.006	30.8	0.074	18.1	0.139	5.72
能源/hm <sup>2</sup>	0.098	7.9	0.005	39.2	0.297	72.5	0.400	16.41
建筑/hm <sup>2</sup>			0.001	4.8	0.001	0.2	0.002	0.07
海洋/hm <sup>2</sup>			0.000	1.0	0.000	0.1	0.000	0.02
水体/hm <sup>2</sup>	0.767	0.1	0.002	10.7	0.033	8.1	0.802	32.9
子系统生态足迹/hm <sup>2</sup>	2.009	100.0	0.018	100.0	0.409	100.0	2.436	100.0
生态足迹累计/hm <sup>2</sup>	2.009		2.027		2.436			
净收益/元·t <sup>-1</sup>	862.7a		244.8 b		1000c			
净收益累计/元·t <sup>-1</sup>	862.7		1107.5		1862.7			
1 hm <sup>2</sup> 生态足迹收益/元·hm <sup>-2</sup>	429.4		546.4		764.7			

注:a:生产1 t 味精所需的玉米净收益是指2.5 t 玉米的减税纯收益,数据来源于2002年和2003年《全国农产品成本收益资料汇编》中山东省的数据。

b:生产1 t 味精所需的淀粉净收益是指1.6 t 淀粉的纯收入,即价格减去成本的差值。根据资料《中国淀粉工业协会2002年玉米淀粉生产情况》的44家生产企业的有效数据,1 t 淀粉的平均成本为1404元,1 t 淀粉的价格为1557.9元。

c:生产1 t 味精的净收益即味精的价格减去成本的差值。根据该企业调查得知,1 t 味精的净收益约为1000元。

根据 1 t 味精及 1 t 味精所需玉米和淀粉的净收入, 计算了不同子系统中 1 hm<sup>2</sup> 生态足迹的生态效益。在此需要说明的是, 由于玉米在进入工业部门之前进行了一次产品和经济价值的交换, 玉米价值无论在淀粉生产系统还是味精生产系统都得到实现, 因此玉米子系统的净收益应计入淀粉和味精的净收益中; 而一般的味精生产厂家都会自行生产淀粉, 而不是外购淀粉, 因此淀粉子系统的净收益不再计入味精系统中。

假如玉米生产后作为最终产品如口粮或饲料粮直接消费, 相当于 2.009 hm<sup>2</sup> 土地的收益为 862.7 元, 即每公顷生态足迹的收益为 429.4 元; 假如玉米生产链只延伸到淀粉, 相当于 2.027 hm<sup>2</sup> 生态足迹的净收益为 1107.5 元(已计入玉米收益 862.7 元), 则每公顷生态足迹的收益为 546.4 元; 假如玉米生产链延伸到味精, 相当于 2.436 hm<sup>2</sup> 生态足迹的净收益为 1862.7 元(已计入玉米收益 862.7 元), 即每公顷生态足迹的收益为 764.7 元。这样, 玉米、淀粉和味精系统中 1 hm<sup>2</sup> 生态足迹的净收益分别为 429.4 元、546.4 元和 764.7 元。如果折算成生态占用强度即万元产值所占用的生态足迹, 则三个系统的生态占用强度分别为 24.6 hm<sup>2</sup>/万元(玉米子系统), 18.3 hm<sup>2</sup>/万元(淀粉子系统), 13.1 hm<sup>2</sup>/万元(味精子系统)。玉米子系统属于第一产业, 其生态占用强度同刘建兴等的计算结果(20~23 hm<sup>2</sup>/万元)<sup>[10]</sup>十分接近, 淀粉和味精属于第二产业, 这两者的生态占用强度偏高(刘建兴的计算结果为 2.3~6.4 hm<sup>2</sup>/万元), 这可能是受到原料即玉米的生态足迹较高的影响。

### 3.4 结果分析

1) 玉米-味精的生产过程是生态足迹增长过程, 也是生态足迹效益增加的过程。从玉米生产到味精生产, 玉米产业链得到了延伸, 虽然投入了更多的资源, 但最终产品的附加值更高。这一结果为我国发展农产品加工业提供了科学支持。同时应注意增加的附加值进入工业部门而没有对农民增收起到直接作用, 产业链的延长所起的作用只是提高了资源利用效益。

2) 玉米子系统的生态足迹面积占玉米-味精复合系统生态足迹的 82%, 其中耕地和水资源分别占该子系统的 54.0% 和 38.2%。玉米-味精生产系统的耕地和水资源占用一方面说明自然资源在产品生产中仍然占据重要地位, 另一方面也意味着要降低资源消耗或提高资源利用效率, 应主要从农业部门着手, 提高自然资源生产效率。

3) 能源占用。能源用地占有生态足迹面积的 16.4%。与能源用地相关的计算项目包括肥料、农药、柴油、固定资产折旧、电、汽、人工辅助能、畜力能、硫磺、液氨、硫酸等项, 虽然种类很多, 但液氨和电力的能源用地比例较大, 分别占到能源用地的 57% 和 18%。将柴油、电、人工辅助能、畜力能看做直接能源投入, 其用地占能源用地的 28%, 而化肥、农家肥、农药、硫磺、液氨、硫酸、固定资产折旧等间接能源投入的生态足迹占用达 72%。可以看出, 玉米到味精的生产过程中, 间接能占用

在整个系统能源用地的比例较大。

从各子系统看, 味精子系统的能源用地最多, 占有能源用地面积的 74%; 其次是玉米子系统, 占 24%; 淀粉子系统最少, 仅占 2%。玉米生产系统中, 肥料、畜力、固定资产折旧、柴油占地面积较大, 分别占到 25%、22%、16%、12%。淀粉生产系统中, 电力和硫磺分别占 61% 和 39%。味精生产系统中, 液氨和电力所占比重分别为 76% 和 20%。

4) 林地资源占用。林地面积反映了柴油、电力等燃料能源可能产生的污染情况。味精生产所需林地面积最大, 为 0.0738881 hm<sup>2</sup>, 其次是玉米生产系统, 所需林地面积为 0.058925 hm<sup>2</sup>, 略低于味精所需面积, 而淀粉生产需要林地面积仅为玉米或味精生产系统所需面积的 1/10 左右。味精直接能源多与其工艺流程较长有关, 所需的直接能源投入主要包括电力和蒸汽, 也就是说是由二次能源消耗引起的。玉米直接能源投入较高, 其中畜力能投入占到将近 50%, 其次是柴油用能, 占到 25% 左右。相比而言, 淀粉生产系统耗能较少, 并且主要是电力消耗。

5) 水资源用地。水资源用地占有生态足迹的 32.9%, 玉米子系统的水资源用地占水资源用地总量的 95.6%, 占绝对重要的位置, 而淀粉和味精子系统的相应份额仅为 4.2% 和 0.25%。玉米子系统的水资源绝大部分用于灌溉, 存在的主要问题是水资源消耗量巨大, 而淀粉和味精子系统的水资源用于工艺用水和稀释用水, 存在的主要问题是水体污染。

6) 建筑和海洋面积占用。这两类土地占用均较小, 不予详细讨论。

## 4 结论与讨论

1) 玉米-味精的加工过程实际上是足迹增长过程, 在三个子系统中玉米子系统的生态足迹最大, 主要是因为生产玉米的耕地和水资源占用较大, 这就从生态学的角度说明农业自然资源在玉米-味精生态产业中的重要性; 玉米加工链的延长伴随着足迹效益的增加, 意味着延长产业链条是提高资源效益的重要途径; 复合系统中体现能的生态足迹远高于直接能源, 意味着降低能耗应重点考虑降低体现能耗; 与其它子系统相比, 味精子系统的能源、林业用地较大, 说明应重点降低味精生产能耗; 无论淀粉还是味精子系统都应对因二次能源消耗引起的气体环境问题和因工艺需求所造成的水体环境问题给予足够的重视。

2) 生态足迹方法是评价生态产业资源利用效率的有效手段, 优点在于所分析的系统可横跨不同部门(对于本研究而言横跨了农、工两个部门), 将所有指标归为相同的六类用地, 提高了不同子系统的可比性。由于很多加工部门都涉及到水资源利用, 水资源对我国而言是一种稀缺资源, 认为可将水资源占用面积作为第 7 项占用类型, 并进一步确定其当量因子。本文的思路可以作为借鉴。

致谢:感谢中国科学院地理科学与资源研究所资源科学研究中心甄霖老师和沈镭老师对文章部分内容的修改。

#### [参 考 文 献]

- [1] Gradel T E, Allenby B R. 产业生态学[M]. 北京:清华大学出版社, 2004, 19.
- [2] Frosch R A. Industrial Ecology: A Philosophical Introduction[J]. USA: Proc National Acad Sci, 1992, 89: 800 - 803.
- [3] Wackernagel M, Rees W E. Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth [M]. Gabriola Island, B C, Canada: New Society Publishers, 1996.
- [4] 徐中民, 张志强, 程国栋, 等. 中国 1999 年生态足迹计算与发展能力分析[J]. 应用生态学报, 2003, 14(2): 280- 285.
- [5] 徐中民, 程国栋, 张志强. 生态足迹方法: 可持续性定量研究的新方法——以张掖地区 1995 年的生态足迹计算为例[J]. 生态学报, 2001, 21(9): 1486- 1495.
- [6] 闵庆文, 李云, 成升魁. 我国中等城市居民生活消费的生态系统占用分析——以泰州、商丘、铜川、锡林郭勒为例[J]. 自然资源学报, 2005, 17(2): 102- 108.
- [7] 闵庆文, 余卫东, 成升魁. 商丘市居民生活消费生态足迹的时间序列分析[J]. 资源科学, 2004, 26(5): 125- 131.
- [8] 李金平, 王志石. 澳门 2001 年生态足迹分析[J]. 自然资源学报, 2003, 18(2): 197- 203.
- [9] 刘建兴, 顾晓薇, 李广军, 等. 中国经济发展与生态足迹的关系研究[J]. 资源科学, 2005, 27(5): 34- 39.
- [10] 陈敏, 张丽军, 王如松, 等. 1978 年~ 2003 年中国生态足迹动态分析[J]. 资源科学, 2005, 27(6): 132- 139.
- [11] 李广军, 顾晓薇, 王青, 等. 沈阳市高校生态足迹和生态效率研究[J]. 资源科学, 2005, 27(6): 140- 145.
- [12] Maxime D, Marcotte M, Arcand Y. Development of eco-efficiency indicators for the Canadian food and beverage industry[J]. Journal of Cleaner Productin, 2006, 14(6-7): 636- 648.
- [13] 陶在朴. 生态包袱与生态足迹[M]. 北京: 经济科学出版社, 2003, 180.
- [14] 尹钧, 高志强, 张布雷, 等. 农田能量测算原理与指标体系的研究[J]. 山西农业大学学报, 1998, 18(2): 95- 98.
- [15] 国家统计局. 中国能源统计年鉴[R]. 北京: 中国统计出版社, 2002.
- [16] 骆世明. 农业生态学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001: 447 - 453.
- [17] 魏小红. 甘肃河西地区农田生态系统能流分析[J]. 甘肃农业大学学报, 2001, 36(1): 55- 60.
- [18] 郎一环, 王礼茂, 王东梅. 能源合理利用与 CO<sub>2</sub> 减排的国际经验及其对我国的启示[J]. 地理科学进展, 2004, 23(4): 28 - 34.
- [19] 肖寒, 欧阳志云, 赵景柱, 等. 森林生态系统服务功能及其生态经济价值评估初探——以海南岛尖峰岭热带森林为例[J]. 应用生态学报, 2000, 11(4): 481- 484.
- [20] 高庆华. 改进管理经营, 提高中小型硫铁矿制酸的竞争力——论中小型硫铁矿制酸企业的生存之道[J]. 硫酸工业, 2003, (4): 29- 32.

## Analysis of the eco-agriculture and industry systems of maize and monosodium glutamate based on ecological footprint method

Yan Lizhen<sup>1,2</sup>, Cheng Shengkui<sup>1</sup>, Min Qingwen<sup>1\*</sup>

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** To improve the comparability of the research results in ecological industry, the ecological footprint (EF) method was applied to analyze the resources utilization and environmental pollution among various sub systems of industrial process, taking maize-monosodium glutamate(MSG) industry as a case. The production of MSG is made up of three subsystems which are those of maize, starch, and MSG. Results indicate that the production process from maize to MSG is a prolonging process of the EF, in which the maize production occupied the biggest area, because its proportion of the EF of farmland and water resources is very high. It was found that the prolonging of EF follows the increase of resources profit, meaning that the prolonging of production chain is of importance to improve resources utilization efficiency. Authors augure that all three sub-systems have high proportion of the indirect energy EF, and reducing their energy consumption should become their targets sub-systems in which the air and water pollution in MSG subsystem is the most serious. Finally, it is considered that EF is a good method to measure resources utilization and environmental pollution in various subsystems of a integrated ecological industry.

**Key words:** ecological footprint; monosodium glutamate(MSG) production; resources efficiency