

四川丘区猪肉生产生命周期资源消耗和环境污染研究

白 林¹, 李学伟¹, 何佳果², 岳铁军¹

(1.四川农业大学动物科技学院, 四川 雅安 625014; 2.四川省汉源县畜牧局, 四川 汉源 625300)

摘 要:采用生命周期方法学和情景分析法相结合的方式,对四川丘区 3 种典型的养猪生产情景进行了猪肉生产生命周期资源消耗和环境污染分析。结果表明,设定参数下不同的生产系统具有不同的环境影响方式:情景 A(散养模式)具有最大的气候变暖潜势($4.812\ 8\ \text{kgCO}_2\text{-eqv}\cdot\text{FU}^{-1}$),情景 B(适度规模养猪)具有土地占用最多($12.13\ \text{m}^2\cdot\text{FU}^{-1}$)、不可更新能源消耗最大($18.2\ \text{MJ}\cdot\text{FU}^{-1}$)、酸化效应($0.064\ 366\ 5\ \text{kgSO}_2\text{-eqv}\cdot\text{FU}^{-1}$)和富营养化($1.816\ 95\ \text{kgO}_2\text{-eqv}\cdot\text{FU}^{-1}$)最严重等,而情景 C(集约化养猪)水资源消耗($1\ 942.69\ \text{kg}\cdot\text{FU}^{-1}$)最大。此研究揭示了四川丘区主要养猪模式中的污染物排放和资源消耗差异及其影响因素,为养猪业可持续发展规划提供了一定的参考依据。

关键词:猪肉生产;生命周期;情景分析;资源;污染物排放

中图分类号:X820.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)05-0976-06

Resource Depletion and Pollution in Life Cycle of Pork Production at Foothill of Sichuan Province

BAI Lin¹, LI Xue-wei¹, HE Jia-guo², YUE Tie-jun¹

(1.College of Science and Technology, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, China; 2.The Bureau of Livestock Industry, Hanyuan 625300, China)

Abstract: The Scenario Analysis and Life Cycle Assessment(LCA) methods were combined to conduct a Life Cycle resource depletion and pollution analysis on three typical pork production scenarios at foothill of Sichuan Province, so that serious environment issues underlying the different systems of pork production could be profoundly understood. The results showed that global warming potential was maximum in scenario A (focusing on farmer family backyard breeding, $4.812\ 8\ \text{kgCO}_2\text{-eqv}\cdot\text{FU}^{-1}$), but land use and unrenewable resources depletion, eutrophication potential and acidification potential were maximum in scenario B (focusing on 100-head size farm, $12.13\ \text{m}^2\cdot\text{FU}^{-1}$, $18.2\ \text{MJ}\cdot\text{FU}^{-1}$, $0.064\ 366\ 5\ \text{kgSO}_2\text{-eqv}\cdot\text{FU}^{-1}$, $1.816\ 95\ \text{kgO}_2\text{-eqv}\cdot\text{FU}^{-1}$, respectively), water use was maximum in scenario C(intensive farm, $1\ 942.69\ \text{kg}\cdot\text{FU}^{-1}$). The profiles of pollutants emission and resource efficiency were discovered so that an important foundation of environmental impact assessment for current pork production was set up.

Keywords: pork production; Life Cycle; scenario analysis; resource; pollutant emission

由于自然和社会环境的复杂性,在四川形成了复杂多样的养猪生产模式,而目前对各种养猪模式的具体环境影响和资源利用效率尚不清楚,使得养猪业可持续发展规划缺乏必要的科学依据。国际标准草案“ISO14040—97 环境管理—生命周期评估—原则与框

架”中定义的生命周期评估(Life Cycle Assessment, LCA)方法是一种可以彻底、全面、综合地了解各类生产过程的资源消耗和环境影响的方法。然而,由于农产品生产过程十分复杂,并受到各种不确定因素影响,采用单一的LCA方法开展环境影响评估的难度很大。因此,为了不受生产过程的细节束缚并避开不确定因素影响,本文把生命周期分析(LCA)方法和情景分析法结合起来^[1-2],分析四川丘区主要养猪模式中的污染物排放和资源消耗,以提供环境友好养猪业的决策依据。

收稿日期:2009-09-07

基金项目:四川省科技厅“丘区射洪县循环经济型现代农业科技集成研究与示范”;四川省农业厅“国家现代农业产业技术体系四川创新团队建设项目”

作者简介:白 林(1970—),男,四川汉源人,副教授。

E-mail:blin16@126.com

1 方法

采用 LCA 方法和情景分析法结合进行研究。

情景分析法是在对经济、产业或技术的重大演变提出各种关键假设的基础上,通过设定一系列情景,进而对比分析各情景下的人类行为和相应的环境状况,来评价不同情景下的环境影响,分析区域内不同时段、不同组合的人类行为对环境影响的贡献。但是,情景分析法只是建立了一套进行环境影响评价的框架,分析每一情景下的环境影响还必须依赖于其他一些更为具体的评价方法,需要与其他评价方法结合使用。LCA 是指汇总和评估一个产品(或服务)体系在其整个生命周期中的所有投入及产出对环境造成的潜在影响的方法,其实施步骤分为目标和范围定义、清单分析、环境影响评估、解释 4 个部分。其主要思路是:通过收集与产品相关的环境清单数据,应用 LCA 定义的一套计算方法,从资源消耗、人体健康和生态环境影响等方面对产品的环境影响做出定性和定量的评估,并进一步分析和寻找改善产品环境表现的时机与途径。在 LCA 分析中,生产过程的不确定性对数据质量有很大影响,为了对某种生产模式有定量的评估,需要引入情景分析,在可能的取值范围内对特定情况进行假设。这就是说,LCA 方法与情景分析结合起来,就能获得不确定性的生产过程中特定情景的评估结果,以建立某种生产模式环境影响状况的参考指标。

1.1 研究范围

本研究分析了猪肉生产过程主要阶段的环境影响,包括原料生产、运输和养猪生产过程。但没有包括猪舍修建、屠宰、加工、包装等过程。

1.2 情景设定

1.2.1 3 种养猪生产系统的情景描述和参数设定

以下设定的情景参数来源于抽样调查和专家咨询,部分是对未来可能情况的估计,但不代表同种养猪模式下的所有类型。

情景 A:以四川丘陵区农户养猪方式为背景(金华镇和广兴镇 20 个农户),将其主要情景状态和参数设定为:①饲料以自种玉米、蔬菜和其他农副产物为主,浓缩料(豆粕 70%、菜籽粕 10%)的添加量平均为 $50 \text{ kg} \cdot \text{头}^{-1}$;耕地面积假设为 $0.168 \text{ hm}^2 \cdot \text{户}^{-1}$,青饲料生产中自己种植的农资消耗为谷物生产消耗的 $1/4$ 。②出栏猪数量平均 $3 \text{ 头} \cdot \text{户}^{-1}$,品种为地方母猪与外种猪杂交生产,屠宰率平均为 68%。③饲养管理方式粗放,饲养期长,猪平均饲养 270 d 左右,出栏重平均为

110 kg。④粪便处理和利用:粪尿直接扫入沼气池存贮(太脏时用少量水清洗,污水入池),80%还田,其中 48%在农忙季节直接还田,长期存贮量占 32%(不定时还田);20%粪水在粪池中或还田时渗漏,渗出水化学耗氧量(COD)为 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

情景 B:丘陵区专业户适度规模饲养(金华镇和广兴镇 6 个养猪大户,平均年出栏猪 100 头左右)。这种养猪情景的主要情景状态和设定参数为:①饲料来源:能量饲料为本省玉米为主的谷物,蛋白饲料以购买浓缩饲料为主。谷物全部本省购买,运输距离假设为 100 km。饲料原料生产的能量消耗和化肥、农药、地膜等使用量按《中国统计年鉴-2006》计算四川平均水平^[3]。饲养期 160 d 左右,出栏平均重量为 85 kg。②品种 50%为洋二元杂猪(两品系外种猪间杂交后代),屠宰率 73%,50%为洋三元(如杜长大,DLY),屠宰率 76%,全程料肉比 3.6:1。③粪便处理及利用:部分粪便干清,部分冲入贮粪池,80%直接还田,20%贮存后利用,还田后渗漏污水 COD 为 $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

情景 C:丘陵区集约化饲养(射洪两个场为背景,平均年出栏猪 10 000 头左右)。提供了丘区大约 0.6%的商品猪,在丘区养猪业中起着主要的现代养猪示范作用。这种养猪情景的主要情景状态和设定参数为:①能量饲料以玉米等谷物为主,全部饲料原料从全国各地购买,饲养期 175 d 左右,出栏平均为 100 kg;饲料原料生产的能量消耗和化肥、农药、地膜等使用量按《中国统计年鉴-2006》计算全国平均水平作为相关参数,运输距离平均按 1 000 km 计算。②品种多数为 DLY 或 PIC 猪,屠宰率 76%,全程料肉比 3.4:1。③粪便处理及利用:采用干清粪和水冲清粪结合工艺,粪便和污水分别进行厌氧发酵处理。85%运出还田,长期存贮量占 15%,排出水 COD 为 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

1.2.2 边界限制

本研究没有包括养猪设备、机械和建筑方面,并按照 ISO14041 中关于物质材料舍弃原则的规定,对小于总量 5%或环境关联性小的材料进行了剔除^[4]。设定浓缩料中含豆粕 70%、菜籽粕 10%,全价饲料中玉米为主的谷物 70%,豆粕 25%,其余成分的资源消耗数据不清楚,没有加以考虑。

1.3 功能单元(Functional Unit)

本研究中功能单元(FU)定义为“1 kg 猪胴体”。

1.4 物流、能流和排放分配

根据环境毒物学与化学学会(SETAC)提出的对等分配法^[5],本文中饲料作物不再单独考虑如何分配

污染物排放,全部按土地占用对等分配(根据饲料原料使用量和该原料平均单产,计算土地面积;根据作物种植对资源的消耗和污染排放的统计数据或文献报道结果,计算平均数据,再按面积分配)。在情景 A 中,农户自种的玉米、蔬菜和其他农副产物 50%用于养猪,故按此比例分担相应的物质消耗和污染物排放。

1.5 清单分析及资源消耗估算

清单分析首先对饲料原料生产过程中饲养每头猪的饲料生产占用土地面积,每功能单元的产品所需农资投入量,不可更新能源消耗及浓缩饲料加工和运输中的能源消耗进行了计算;然后对养猪生产过程中粪便和尿液养分的产生量、主要的温室气体排放量(氧化亚氮和甲烷)、NH₃ 的排放量均进行了估算,并确定研究系统的资源消耗与污染物排放及其对外部环境的影响。

2 结果与分析

根据四川丘区猪肉生产的生命周期清单分析^[6],可得出各种情景下的资源消耗和污染排放环境类型参数估计量。

2.1 资源消耗

本文主要分析 3 种情景的水资源消耗、不可更新能源消耗和土地占用。

2.1.1 水资源消耗

按中国统计年鉴(2006)中 2005 年的全国和四川有效灌溉面积和农业用水量数据计算饲料作物生产部分的用水量,动物生产部分的用水量分为猪的平均饮水量和冲洗水量两部分,猪的平均饮水量参考《养猪大全》^[7]计算。特别说明:水量计算在清单分析中有详细说明,作物生产是按主要饲料原料的土地占用面积当量和平均用水量计算,动物生产的用水量是以粪池或污水处理池容积、出水量和动物饮

用水量推算。

在动物生产的水消耗量构成中,冲洗水量占的比重较大,由于情景 A 中冲洗水量少,水的消耗量最少,而情景 C 中冲洗水量大,造成水资源消耗最大。从表 1 可以看出,饲料生产是猪肉生产生命周期中水消耗最大的环节。在情景 C 的饲料原料生产中和动物生产中水消耗比情景 A 分别高出 29.38%和 13.04%,而还田水量则少 55.39%,导致最终水消耗比情景 A 高出 29.55%。特别说明:这里的用水量差异是因情景设定或实测参数不同而引起,与规模大小不一定相关。

表 1 3 种情景下水消耗量(kg·FU⁻¹)
Table 1 Water use in the three scenarios(kg·FU⁻¹)

项目	情景 A Scenario A	情景 B Scenario B	情景 C Scenario C
饲料作物生产 Feed production process	1 464.60	1 759.67	1 894.92
动物生产 Animal production process	44.57	55.17	50.83
还田水量 Water recycled to the field	6.86	6.60	3.06
合计 Sum	1 499.57	1 808.24	1 942.69

2.1.2 不可更新能源消耗

每功能单元不可更新能源消耗的计算根据王明新等的计算方法(91.63 MJ·kg⁻¹ N)得出氮肥生产的能耗^[10],其余农资根据李震钟的能量折算系数计算^[8]。结果见图 1。

从图 1 可以看出,总的不可更新能源消耗量最大的是情景 B,最小的是情景 A。能量消耗中占比重最大的是氮肥生产,达 50%左右,其次为电力、运输、煤炭、柴油和饲料加工等。从 2005 年统计数据中发现,四川的农业生产氮肥投入远高于全国平均水平(485.595 kg·hm⁻² 对 405.105 kg·hm⁻²),因此饲料生产对能源的消耗较大。3 种情景中差异最大的是氮肥生产、电力、运输和饲料加工过程,与国外相关文献报道

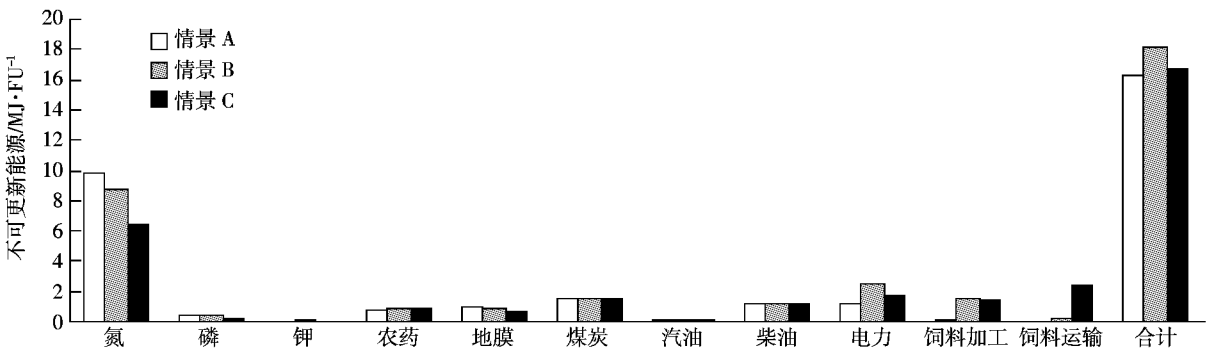


图 1 3 种情景下的不可更新能源消耗
Figure 1 Unrenewable energy use in the three scenarios

表 2 3 种情景下土地占用

Table 2 Land use in the three scenarios

项目	情景 A Scenario A	情景 B Scenario B	情景 C Scenario C
每头饲料生产面积/m ² ·头 ⁻¹ Land area of feed production per pig/m ² ·head ⁻¹	721.38	701.36	841.24
每功能单元土地占用/m ² ·FU ⁻¹ Land use per FU/m ² ·FU ⁻¹	10.35	12.13	11.68

基本一致^[9]。由于我国的饲料原料以本土生产为主,饲料运输不是主要的不可更新能源消耗过程,而氮肥投入过多是饲料生产中能源消耗高的主要原因。因此,通过养猪生产过程的有机废物还田是降低猪肉生产能耗的重要措施。

2.1.3 土地占用

在情景 A 中土地占用面积为调查的实际用地面积平均值与浓缩料主要原料生产面积之和,而情景 B 和情景 C 中主要考虑了大宗饲料原料如玉米和豆粕生产的土地面积。动物生产中占用土地面积参数为:情景 A 中 3 m²·头⁻¹,情景 B 和情景 C 中 2 m²·头⁻¹。结果见表 2。

综合来看,每功能单元土地占用面积为 10.35~12.13 m²,低于 Cederberg C 等对瑞典平均每功能单元土地占用面积为 12.4 m² 的水平^[9],这主要与国外室外养猪占用土地较多有关。3 种情景之间比较,情景 A 的土地占用最少,主要原因在于情景 A 中猪的饲料原料多样化,野草替代了部分饲料,虽然猪的饲养期较长,但节省了较多的精料。情景 C 由于集约化程度高,饲养管理科学,猪的饲料转化率高于情景 B,因而土地资源消耗比情景 B 低 0.45 m²·FU⁻¹。

2.2 温室气体(GHG)排放

本文中作物生产释放的温室气体量参考王明新等对冬小麦的生命周期环境影响研究^[10],养猪生产中猪的 CO₂ 排放按赵书广等^[7]《养猪大全》中每头猪平均 CO₂ 排放量计算,粪便贮存过程的 CO₂ 排放量按模拟试验结果估算(将猪粪自然堆放于铺有塑料纱网的小红砖上,以薄膜覆盖,在 1 个月内每日 3 次测定顶部 2 cm² 出口处 CO₂ 浓度和气流大小,以平均数计算当日 CO₂ 气体产生总量,然后根据每种模式的粪便量和贮存时间估算。结果变异较大,全部以平均数计算),其余部分按清单分析结果计算。生产过程的温室气体排放通过 IPCC(1997)确定的当量系数(CH₄、N₂O 分别为 21 和 310)转化为 CO₂ 当量,从而实现数据特征化(见表 3)。

本文研究结果与 Stern S 等的结果比较^[12],总的 GHG 排放量除了情景 A 明显高于各研究报告结果,

其他两种情景的结果基本一致。在国外的研究报告中,一般是 N₂O 的排放比例最高,这主要是由于饲料中蛋白水平较高的原因。Atakora 等和 Misselbrook 等研究表明,与常规饲料(CP16.3%)相比,低蛋白日粮(13.0%)可使育肥猪的 GHG 总生成量减少 25%,其中 N 排泄减少 24%,可极大地降低 N₂O 的排放量^[13-14]。国内的养猪生产中饲料蛋白水平通常偏低,有利于降低 N₂O 的排放,但由于粪便污水处理方式落后,以厌氧消化处理为主,因而增大了 CH₄ 气体的排放(实际利用沼气作燃料的养猪户或养猪企业比例较少)。

表 3 3 种情景下的全球变暖潜势(GWP)(kgCO₂-eqv·FU⁻¹)Table 3 The GWP values in the three scenarios(kgCO₂-eqv·FU⁻¹)

项目	情景 A Scenario A	情景 B Scenario B	情景 C Scenario C
CO ₂	1.060 0	1.320 0	0.970 0
CH ₄	3.668 0	2.558 2	1.978 0
N ₂ O	0.084 8	0.118 9	0.086 3
合计 Sum	4.812 8	3.997 1	3.034 3

3 种情景之间比较表明,情景 A 由于饲养期长,废弃物在粪池中发酵时间长,造成 CH₄ 排放量较高,这说明鼓励农户修建沼气池并利用沼气作燃料具有极其重要的意义。而情景 B 的 CH₄ 和 N₂O 排放分别比情景 C 高出 29.3%和 37.8%,原因主要是情景 B 管理不善,饲料效率低,废物处理方式也比情景 C 落后。3 种情景中 CH₄ 气体排放量均比发达国家报道的结果高,因而在养猪业中一方面应当收集沼气作为燃料,另一方面应当积极推广堆肥技术,通过好氧发酵处理固体废物,减少 CH₄ 的排放。

2.3 富营养化

由于缺乏我国农资生产的污染排放数据,作物生产的污染物排放参考王明新等的研究结果进行相应推算得到^[10]。动物生产的富营养化特征化数据根据清单分析结果和 Lindfors 等^[11]研究的各种富营养化物质的特征化因子(NO_x、NH₃、NO₃、PO₄³⁻分别为 6、16、4.4、46)进行特征化(见表 4)。

从富营养化特征化数据可以看出,情景 B 对水

体的污染情况十分严重,应当重点进行治理。情景 A 由于基本上是污水“零排放”,富营养化效应最小,而情景 C 则因处理废水的方式过于简单导致水体富营养化效应也较大。特别说明:这里的结果是因情景设定而产生差异,主要原因与规模无关,也许说明规模大小不是直接导致环保问题的主要因素。

2.4 酸化潜势

酸化效应物质 NO_x 和 NH₃ 的特征化因子分别为 0.71 和 1.9,采用与富营养化特征化数据相同的计算方法得出酸化效应结果(见表 5)。

根据以上结果,情景 B 酸化效应最严重,主要原因是 NH₃ 的排放量较大。

3 讨论

本文通过生命周期分析,揭示了四川养猪业中各种环境影响的主要原因。每功能单元的土地占用比例偏大主要与四川人均耕地少有关,此外,饲料作物生产水平和养猪生产效率较低也间接造成土地占用的增加。富营养化的影响主要产生于作物生产中施肥方法不当造成的养分渗滤流失和养猪生产过程中废物处理和利用少而直接向水体排放,其中规模化、集约化养猪生产的废物处理和利用少是最重要的因素。水资源消耗大主要是由于作物生产的灌溉用水量过大,规模化、集约化养猪生产的冲洗水量过大也是一个原因。气候变暖潜势较大的主要原因是废物处理中以厌氧消化处理为主而未对处理产生的甲烷加以充分利

用。石化能源耗竭指数大的主要原因是饲料作物生产的氮肥使用量偏高,动物生产中饲料效率较低则是间接造成石化能源耗竭指数增大的重要原因。

4 结论

对四川丘区 3 种典型的养猪生产情景进行猪肉生产的生命周期资源消耗和环境污染分析反映出,设定参数下不同的生产系统具有不同的环境影响方式:情景 A(散养模式)具有最大的气候变暖潜势(4.812 8 kgCO₂-eqv·FU⁻¹);情景 B(适度规模养猪)具有土地占用最多(12.13 m²·FU⁻¹),不可更新能源消耗最大(18.2 MJ·FU⁻¹),酸化效应(0.064 366 5 kgSO₂-eqv·FU⁻¹)和富营养化(1.816 95 kgO₂-eqv·FU⁻¹)最严重等;而情景 C(集约化养猪)水资源消耗(1 942.69 kg·FU⁻¹)最大。

参考文献:

[1] 岳 珍,赖茂生. 国外“情景分析”方法的进展[J]. 情报杂志, 2006 (7):59-61.
YUE Zhen, LAI Mao-sheng. Research progress abroad on scenario analysis[J]. *Journal of Information*, 2006(7):59-61.
[2] 曾忠禄,张冬梅. 不确定环境下解读未来的方法:情景分析法[J]. 情报杂志, 2005(5):14-16.
ZENG Zhong-lu, ZHANG Dong-mei. The method of scenario analysis: A way to understand the future in an uncertain environment [J]. *Journal of Information*, 2005(5):14-16.
[3] 中国统计年鉴-2006[Z]. 中国国家统计局, 2006, 10.
China Statistical Yearbook-2006[Z]. National Bureau of Statistics of China, 2006, 10.

表 4 3 种情景下富营养化潜势(kgO₂-eqv·FU⁻¹)
Table 4 Eutrophication potential values in the three scenarios(kgO₂-eqv·FU⁻¹)

项目	情景 A Scenario A	情景 B Scenario B	情景 C Scenario C
挥发到空气中的 NO _x NO _x to Air	0.019 68	0.019 73	0.019 01
挥发到空气中的 NH ₃ NH ₃ to Air	0.353 76	0.475 18	0.359 34
进入水体的 NO ₃ NO ₃ to Water	0.350 15	0.601 74	0.676 71
进入水体的 PO ₄ ³⁻ PO ₄ ³⁻ to Water	0.119 60	0.699 66	0.228 39
COD(Chemic Oxygen Demand)	0.000 33	0.020 64	0.004 42
合 计 Sum	0.843 52	1.816 95	1.287 87

表 5 3 种情景下酸化效应结果(kgSO₂-eqv·FU⁻¹)
Table 5 Acidification potential values in the three scenarios(kgSO₂-eqv·FU⁻¹)

项目	情景 A Scenario A	情景 B Scenario B	情景 C Scenario C
挥发到空气中的 NO _x NO _x to Air	0.002 327 7	0.002 333 5	0.002 248 4
挥发到空气中的 NH ₃ NH ₃ to Air	0.042 080 3	0.056 523 6	0.042 744 2
挥发到空气中的 SO ₂ SO ₂ to Air	0.005 497 1	0.005 509 4	0.005 292 6
合 计 Sum	0.049 905 2	0.064 366 5	0.050 285 2

- [4] Cederberg C, Flysjo A. Life cycle inventory of 23 dairy farms in south-western sweden[R]. Swedish Institute for Food and Biotechnology(SIK), Goteborg, Sweden, 2004.
- [5] 杨建新, 王寿兵, 徐 成. 生命周期清单分析中的分配方法[J]. 中国环境科学, 1999, 19(3):23-24.
YANG Jian-xin, WANG Shou-bing, XU Cheng. Allocation rule in life-cycle inventory[J]. *China Environmental Science*, 1999, 19(3):23-24.
- [6] 白 林, 李学伟, 龚兰芳, 等. 四川丘区猪肉生产情景的清单分析[J]. 四川农业大学学报, 2009, 27(2):234-238.
BAI Lin, LI Xue-wei, GONG Lan-fang, et al. The LCI of pork production scenarios in foothill of Sichuan Province[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2009, 27(2):234-238.
- [7] 赵书广. 养猪大全[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001:851.
ZHAO Shu-guang. Compilation of pig production technology[D]. Beijing: China Agricultural Press, 2001:851.
- [8] 李震钟. 家畜生态学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1995:127.
LI Zhen-zhong. Ecology of domestic animal[M]. Beijing: China Agricultural Press, 1995:127.
- [9] Cederberg C, Flysjo A. Environmental assessment of future pig farming systems—quantifications of three scenarios from the FOOD 21 synthesis work[R]. Swedish Institute for Food and Biotechnology(SIK), Goteborg, Sweden, 2004:723-777.
- [10] 王明新, 包永红, 吴文良, 等. 华北平原冬小麦生命周期环境影响评价[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(5):1127-1132.
WANG Ming-xin, BAO Yong-hong, WU Wen-liang, et al. Life cycle environmental impact assessment of winter wheat in North China Plain [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(5):1127-1132.
- [11] Lindfors L G, Christiansen K, Hoffman L, et al. Nordic guidelines on life-cycle assessment[R]. Copenhagen(Denmark), 1995:224.
- [12] Stern S, Sonesson U, Gunnarsson S, et al. Sustainable development of food production: A case study on scenarios for pig production [J]. *Ambio. Royal Swedish Academy of Sciences, Stockholm, Sweden*, 2005, 34:402-407.
- [13] Mohn S, Atakora J K A, McMillan D J, et al. Low protein diets reduce greenhouse gas production by sows [R]. Progress in research on energy and protein metabolism. International Symposium, Rostock-Warнемunde, Germany, 13-18 September, 2003. Wageningen Academic Publishers, Wageningen, Netherlands, 2003:425-427.
- [14] Misselbrook T H, Chadwick D R, Pain B F, et al. Dietary manipulation as a means of decreasing N losses and methane emissions and improving herbage N uptake following application of pig slurry to grassland[J]. *Journal of Agricultural Science*, 1998, 130:2, 183-191.