

村级养殖种植园区碳素物质流分析

——以北京市平谷区西柏店村为例

黄治平¹, 郝利^{2*}, 高尚宾¹, 周连第², 张克强¹, 王凤¹, 钟春艳², 王栋³

1. 农业部环境保护科研监测所, 天津 300191; 2. 北京市农林科学院农业综合发展研究所, 北京 100097; 3. 吉林大学农学部, 吉林 130062

摘要: 将西柏店村畜禽养殖规模折合为 1.5 万头猪场当量污染负荷, 并将整个园区生产工艺分为养殖、废弃物处理和种植 3 个阶段, 不考虑隐藏流的情况下, 以 1 年为系统边界, 通过数据调查、已有资料研究和小区种植试验, 采用物质流分析方法分析了西柏店村养殖种植园区在整个生产工艺的碳素流动, 以期为村级养殖种植园区大力发展低碳经济提供新的方法和视角, 为村级区域循环经济及可持续发展提供减少环境压力解决方案的科学依据。通过园区养殖种植过程的 C 素分析表明, 养殖阶段年输入 C 素总量为 112.52×10^4 kg, 其中猪身总固碳量为 40.04×10^4 kg, 粪碳和尿碳总量为 49.29×10^4 kg, 以 CO_2 形式代谢排出的 C 为 23.19×10^4 kg。废弃物处理阶段输入的碳主要为粪碳和尿碳, 其总量为 49.29×10^4 kg, 其中 9.79×10^4 kg 尿碳直接进入种植阶段, 39.50×10^4 kg 粪碳进入沼气站处理, 沼气转化出的碳为 11.02×10^4 kg, 其中 CH_4 为 8.43×10^4 kg, CO_2 为 2.59×10^4 kg, 养殖污水中通过 CH_4 排放再加上其他途径释放的碳约有 23.66×10^4 kg, 占粪碳量的 59.89%。进入种植阶段的碳素主要为尿碳、沼渣和沼液的碳素, 合计为 14.61×10^4 kg, 假设该村 43 hm^2 耕地能全部施用沼肥, 不计其他作物种植, 1 季玉米种植土壤可库存有机碳为 60.50×10^4 kg, 为进入种植阶段碳素 14.61×10^4 kg 的 4 倍, 还可增加植物有机碳 27.31×10^4 kg。由 C 素流动分析可知, 西柏店村具有可容纳该村养殖废弃物的环境容量, 有较好实现养殖废弃物循环利用的条件, 但需大力加强畜禽废弃物的管理和处理, 提高园区养殖废弃物循环利用效率。

关键词: 物质流分析; 养殖种植园区; 碳; 养殖废弃物

中图分类号: X32

文献标识码: A

文章编号: 1674-5906 (2010) 04-0962-05

物质流分析 (Material Flow Analysis, MFA 或 Substance Flow Analysis, SFA) 为对全球、某个国家、地区或某一区域内对特定某种物质 (如 C、N、P、Cu 等重金属、水泥、PVC、纸张等) 或一组这样的物质进行其流动过程的分析^[1,2]。物质流分析可通过物质总量来分析一定的经济规模所需的物质总投入量、物质总消耗量和物质循环总量。无论哪种层面上的物质流, 不管物质形态如何, 其总量都遵循质量守恒定律, 即: 物质的输入量 (Inputs) = 物质的输出量 (Outputs) + 库存净增量 (NAS)^[3-5]。

目前, 可持续发展和零排放已成为很常见的关键词, 物质流模型已用于表示生产过程和生命循环评价 (LCA, life-cycle assessment) 详细过程的形成基础^[6,7]。物质流在工业分析中应用广泛, 在农业生态系统中也有研究, 物质流分析方法可以为资源、废弃物和环境管理提供方法学上的决策支持工具, 也可为区域循环经济的评价与研究提供了新的思路^[8,9]。

目前, 如何发展低碳农业成为一个热点问题, 农业生产与全球气候变化息息相关, 农业是温室气

体的第二大重要来源, 畜禽养殖在农业生产中比重很大, 第一次全国污染源普查结果表明, 在农业源污染中, 比较突出的是畜禽养殖业污染问题, 不仅排放大量废水, 还是导致全球变暖的六种温室气体中的 CO_2 、 N_2O 和 CH_4 的主要来源, 有学者采用质量流方法列出了法国畜禽粪便管理过程中温室气体 CH_4 、 N_2O 、 NH_3 的排放清单, 而农业低碳经济与物质流分析法 (MFA) 在科学理念、发展主体、发展目标 and 路径选择上是统一的^[10-12]。

村级养殖种植园区的生产伴随着 C 元素在不同生产流程中的流动和转化。为了合理利用养殖废弃物资源, 本文对西柏店村村级养殖种植一体化园区在不同生产流程中的 C 元素进行分析, 以期为村级养殖种植园区大力发展低碳经济提供新的方法和视角, 为村级区域循环经济及可持续发展提供减少环境压力解决方案的科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

西柏店村位于北京市平谷区西部, 共有 220 户村民, 常住人口 707 人, 农业人口 576 人, 劳动力

基金项目: 北京市循环农业模式研究与示范; 西柏店村循环农业模式研究与示范

作者简介: 黄治平 (1972 年生), 男, 博士, 副研究员, 主要从事农业资源生态研究。E-mail: bjhuangzp@126.com

通讯作者: 郝利 (1969 年生), 男, 博士, 主要从事农业资源和农业经济研究。E-mail: haoli9090990@163.com

收稿日期: 2010-01-04

人口 420 人，耕地 43 hm²，土壤为潮褐土和湿潮土，呈弱酸性或中性。全村养殖小区已发展到 4 处，主要饲养畜禽为生猪，1998 年被平谷区政府命名为“养猪专业村”，目前存栏约 5 000 头，年出栏生猪 15 000 头，主要分散于各养殖户进行养殖，大部分为干清粪工艺。2007 年建有日产 400 m³ 沼气的沼气工程用于处理猪场等畜禽废弃物。

1.2 物质流模型建立

鉴于西柏店村养殖种植园区主要是生物质资源在流动，C 元素数据收集和整理分析时重点考虑以下几个方面：（1）系统边界以 1 年计；（2）园区养殖规模折合为年出栏 1.5 万头猪场，暂不考虑其他畜禽养殖和猪场基础设施建设的物质流分析；（3）综合养殖—种植一体化的特点，以养殖、废弃物处理和种植三个生产工艺阶段为研究对象；（4）根据实际调查，确定猪场猪的种类组成和分布；（5）

综合调查了资源、中间消耗及产品情况，估算出物质出口的数量；（6）其他隐藏流暂不予考虑。模型见图 1。

2 结果与分析

2.1 养殖阶段 C 元素分析

根据西柏店村养殖饲料调查数据以及已有研究^[13,14]，折算出年养殖阶段 C 素进入总量和排出总量（见表 1 和表 2）。由表 1 可知，养殖阶段饲料主要由玉米面、麸皮和精料组成，其年输入 C 素总量为

表 1 养殖阶段碳素输入总量

Table 1 Total inputs of C during breeding

项目	玉米面	麸皮	精料	总计
饲料量 ^a (×10 ⁴ kg)	160.17	49.68	55.29	265.14
含碳量 ^b g·kg ⁻¹	653.25	663.90	563.70	—
总碳量(×10 ⁴ kg)	69.75	21.99	20.78	112.52

a, 根据北京市平谷区西柏店村调查数据; b, 参照有关文献[8]估算

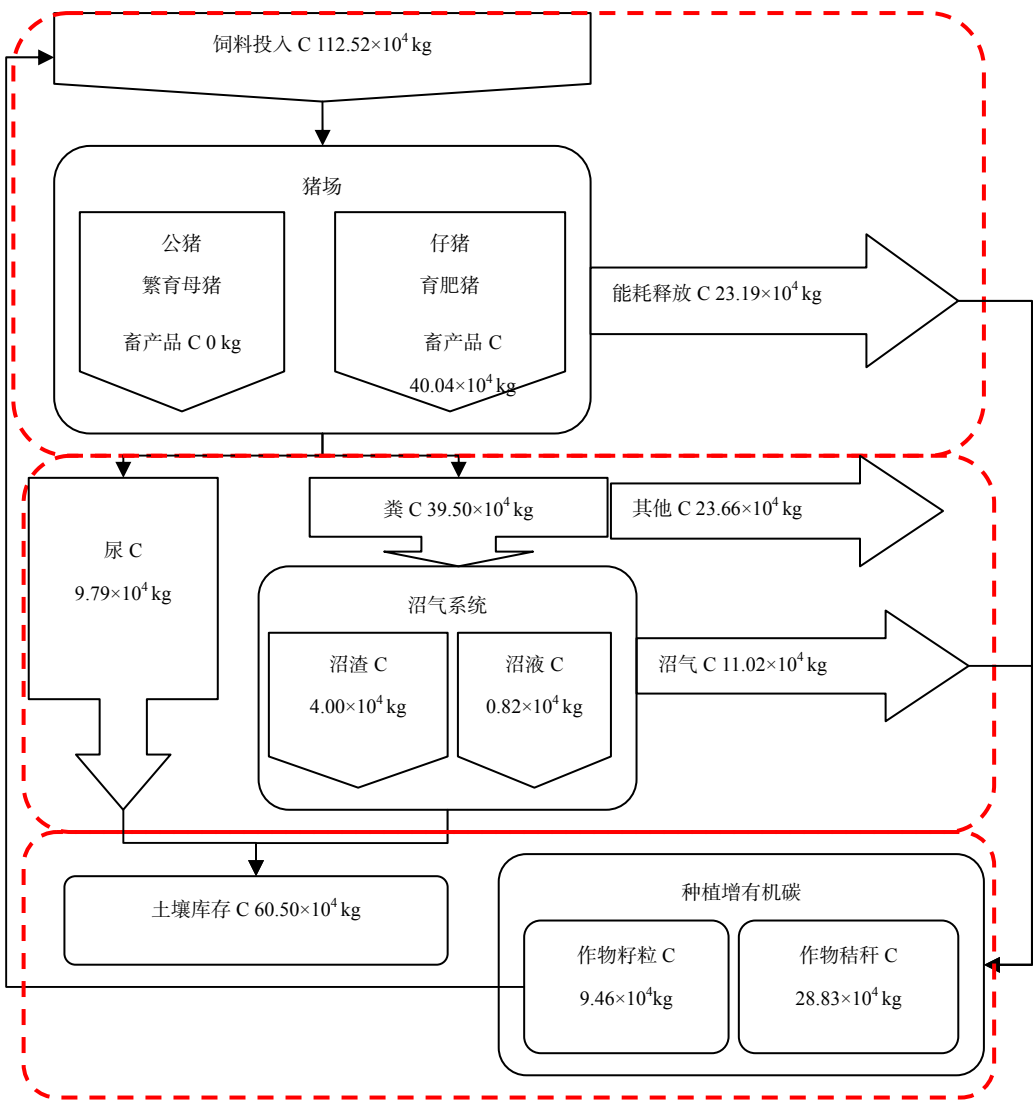


图 1 村级养殖种植园区碳素循环示意图

Fig.1 Chart of C circle in Planting and Breeding Park of village scale

表 2 园区猪场碳的转化
Table 2 Translation of C in swine farm of Agriculture Park

项目	猪数量(头) ^a	肉产量 ^b	猪身固碳量	排尿量	排粪量	尿碳总量 ^d	粪碳总量 ^e
繁育猪	900	0.00	0.00	103.75	75.75	1.68	6.38
仔猪	6000	11.12	3.94	20.16	16.20	0.32	1.35
育肥猪	9000	101.95	36.10	486.96	390.33	7.75	31.61
公猪 ^c	45	0.00	0.00	2.43	1.95	0.04	0.16
总计	—	113.08	40.04	613.30	484.24	9.79	39.50

a, 取值为根据万头猪场不同类型猪构成的调查和统计数据, 猪场以年出栏 1.5 万头计; b, 肉产量根据已有文献折算^[13], 其中繁育猪和公猪的肉增产量计为 0; c, 为便于估算, 单位公猪的粪尿产量约等于单位繁育猪的粪尿产量; d, 尿 C 含量为 1.61%; e, 粪 C 含量为 8.19%

112.52×10⁴ kg。

园区猪场C的转化见表2, 由表2可知, 猪身总固碳量为 40.04×10⁴ kg, 粪碳和尿碳总量为 49.29×10⁴ kg。由畜牧学可知, 养猪过程中, 部分C作为猪生理活动的主要能量给源, 在其生理活动过程中被同化, 部分C以粪C和尿C排出体外, 还有部分C以CO₂的形式转化为无机碳释放到大气中去^[8]。由物质的输入量 (Inputs) = 物质的输出量 (Outputs) + 库存净增量 (NAS) 可知, 养殖阶段以CO₂形式排出的C为23.19×10⁴ kg。

2.2 废弃物处理阶段 C 元素分析

养殖阶段的粪碳和尿碳可作为废弃物处理阶段的总碳输入量, 其总量为 49.29×10⁴ kg, 其中 9.79×10⁴ kg 尿碳直接进入种植阶段, 39.50×10⁴ kg 粪碳通过沼气站处理转化为沼气和沼渣的碳, 沼渣、沼液和沼气产量通过村沼气站的调查取得, 其中沼渣肥产量为 800 t·a⁻¹, 沼渣 C 素根据沼渣有机质含量 8.62% 折算为 4.00×10⁴ kg, 沼液产量为 2.42×10⁴ m³·a⁻¹, 沼液的 COD 浓度为 900 mg·L⁻¹, 有资料表明^[15], 氧化 1 kg COD 约产生 1.38 kg CO₂, 由此可估算沼液中 C 量为 0.82×10⁴ kg。

沼气中 CH₄ 和 CO₂ 的含量根据调查数据估算, 其中 1 t 鲜粪可产生 50 m³ 沼气, 沼气中 CH₄ 体积分数为 65%, CO₂ 体积分数为 20%, 依据标准状态下气体方程可估算出沼气中转化出的碳为 11.02×10⁴ kg, 其中 CH₄ 为 8.43×10⁴ kg, CO₂ 为 2.59×10⁴ kg, 见表 3。

表 3 沼气中碳的输出量
Table 3 Outputs of C in biogas

项目	沼气产量 ^a ×10 ⁴ m ³	沼气产量×10 ⁴ mol	沼气中 CH ₄ ×10 ⁴ mol	沼气中 CO ₂ ×10 ⁴ mol	CH ₄ 碳含量×10 ⁴ kg	CO ₂ 中碳含量×10 ⁴ kg
数量	24.21	1080.80	702.52	216.16	8.43	2.59

a, 沼气中 C 质量含量根据标准状况下气体体积估算, 即 1 mol 气体体积等于 22.4 L

村 43 hm² 农田可提高玉米秸秆有机碳的生产量为 28.83×10⁴ kg, 籽粒有机碳增产为 9.64×10⁴ kg。

3 结论与讨论

(1) 通过整个园区 C 素分析, 西柏店村养殖种植园区环境容量能较好地实现养殖废弃物循环利

用, 有研究表明^[16], 一个存栏 1 800 头的猪场, 每年通过蓄污池排放甲烷约 1 500 t。由于该村主要由村保洁员负责将各养殖户的干清粪收集输送到沼气站, 而养殖场冲刷废水没有收集处理, 由物质的输入量 (Inputs) = 物质的输出量 (Outputs) + 库存净增量 (NAS) 可知, 本园区年养殖污水通过 CH₄ 排放再加上粪污其他途径碳的释放, 约有 23.66×10⁴ kg。

2.3 种植阶段 C 元素分析

由废弃物处理阶段可知, 进入种植阶段的碳素主要为尿碳、沼渣和沼液的碳素, 合计为 14.61×10⁴ kg。

植物通过光合作用将水、CO₂ 和其他营养元素合成有机物质, 生产大量的碳水化合物, 因此, 植物生长主要为大气中的 CO₂ 转化为有机碳的积累过程, 而土壤中 C 的库存主要来自沼渣沼液等有机肥和尿碳中的碳。沼液沼渣和尿碳主要施用于该村 43 hm² 农田, 通过该村沼肥施用玉米试验 (试验结果见另文), 以根系土层取样为 0~60 cm, 土壤有机质质量分数平均增加 3.11 g·kg⁻¹, 土壤容重为 1.30×10³ kg·m⁻³, 则 43 hm² 土壤有机质增加为 104.31×10⁴ kg, 折算土壤有机碳库存量为 60.50×10⁴ kg。

通过沼肥施用玉米试验, 1 季玉米施用沼液沼渣比当地习惯施肥地上部产量增产 1.84×10⁴ kg·ha⁻¹, 籽粒增产 0.48×10⁴ kg·ha⁻¹, 根据元素分析测定玉米秸秆的含碳量为 49.30%, 玉米粒的含碳量为 46.70%, 由此可知, 通过施用沼液沼渣估算, 全

用, 促进村级可持续发展。通过养殖阶段, 可得到畜产品—猪肉, 通过废弃物处理, 可以取得可再生能源—沼气, 通过施用沼液沼渣, 可以增加土壤有机质, 增加土壤 C 的库存量, 并通过种植阶段将无机碳转化为有机碳, 从而提供养殖阶段的碳源。

(2) 由种植阶段 C 素分析可知, 不计其他作物种植, 如果全村农田均施用沼渣沼液, 1 季玉米种植土壤可库存有机碳为 60.50×10^4 kg, 为进入种植阶段碳素 14.61×10^4 kg 的 4 倍, 还可提高植物有机碳 27.31×10^4 kg, 仅以 C 素分析说明该村还有相当的容纳养殖废弃物的环境容量。由于沼气主要供该村村民炊事, CH_4 燃烧后转化为 CO_2 , 则养殖阶段和废弃物处理阶段通过 CO_2 排出的 C 素为 34.21×10^4 kg, 该村 1 季玉米通过施用沼液沼渣可提高玉米有机碳的生产量为 27.31×10^4 kg, 如果考虑除玉米季种植其他作物如小麦、大豆等, 则作物吸收的碳可与养殖阶段和废弃物处理阶段排出的碳相当。

(3) 园区养殖阶段输入 C 素总量为 112.52×10^4 kg, 园区循环可补充的 C 素为种植阶段可做饲料的籽粒碳, 如以园区施用沼液沼渣可增玉米籽粒碳为 9.64×10^4 kg 来估算, 需从外界补充 102.88×10^4 kg 有机碳供养殖。

(4) 养殖污水中通过 CH_4 排放再加上其他途径释放的碳约有 23.66×10^4 kg, 占粪碳量的 59.89%, 说明该村需大力加强畜禽废弃物管理和处理, 提高园区废弃物循环利用效率, 降低废弃物对园区生态环境的影响, 保证园区的可持续发展。

(5) 物质流分析法 (MFA) 可以监测村级养殖种植园区 CO_2 等温室气体的排放途径, 查找高碳排放原因, 通过优化物质流管理, 可以有效调控经济系统与生态环境物质的流动方向, 为村级养殖种植园区大力发展低碳经济提供新的方法和视角, 为进一步改善经济结构和能源结构提供技术支持。

参考文献:

- [1] 孙启宏, 李艳萍, 段宁, 等. 基于 EW-MFA 方法的我国 1990-2003 年资源利用与环境影响特征研究[J]. 环境科学研究, 2007, 20(1): 108-113.
SUN Qihong, LI Yanping, DUAN Ning, et al. Study on resource utilization and environmental impact characteristics for China in 1990-2003 based on Economy-Wide material flow analysis[J]. Research of Environmental Science, 2007, 20(1): 108-113.
- [2] 黄和平, 毕军, 张炳, 等. 物质流分析研究述评[J]. 生态学报, 2007, 27(1): 368-379.
HUANG Heping, BI Jun, ZHANG Bing, et al. A critical review of material flow analysis(MFA)[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(1): 368-379.
- [3] 王军, 周燕, 刘金华, 等. 物质流分析方法的理论及其应用研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2006, 16(4): 60-64.
WANG Jun, ZHOU Yan, LIU Jinhua, et al. Study on theory and application of material flow analysis[J]. China Population, Resources and Environment, 2006, 16(4): 60-64.
- [4] 沈镭, 刘晓洁. 资源流研究的理论与方法探析[J]. 资源科学, 2006, 28(3): 9-16.
SHEN Lei, LIU Xiaojie. Discussion on theories and methods of resources flow[J]. Resources Science, 2006, 28(3): 9-16.
- [5] TACHIBANA J, HIROTA K, GOTO N, et al. A method for regional-scale material flow and decoupling analysis: A demonstration case study of Aichi prefecture, Japan[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2008, 52: 1382-1390.
- [6] GELDERMANN, J. RENTZ, O. Multi-criteria analysis for technique assessment: Case study from industrial coating[J]. Journal of Industrial Ecology, 2005, 9(3): 127-142.
- [7] 黄和平, 毕军. 基于物质流分析的区域循环经济评价-以常州市武进区为例[J]. 资源科学, 2006, 28(6): 20-27.
HUANG Heping, BI Jun. Evaluating regional circular economy based on MFA: A case study in Wujin District of Changzhou City[J]. Resources Science, 2006, 28(6): 20-27.
- [8] SONG B H, XU S B. The theory of material flow substance[J]. Systems Research and Behavioral Science, 2009, 26: 251-258.
- [9] 张思锋, 雷娟. 基于 MFA 方法的陕西省物质减量分析[J]. 资源科学, 2006, 28(4): 145-150.
ZHANG Sifeng, LEI Juan. Analyzing dematerialization of Shaanxi province based on MFA[J]. Resources Science, 2006, 28(4): 145-150.
- [10] 赵其国, 钱海燕. 低碳经济与农业发展思考[J]. 生态环境学报, 2009, 18(5): 1609-1614.
ZHAO Qiguo, QIAN Haiyan. Low carbon economy and thinking of agricultural development[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(5): 1609-1614.
- [11] GAC A, BÉLINE F. A French inventory of gaseous emissions(CH_4 , N_2O , NH_3) from livestock manure management using a mass-flow approach[J]. Livestock Science, 2007, 112(3): 252-260.
- [12] 万宇艳, 苏瑜. 基于MFA分析下的低碳经济发展战略[J]. 中国能源, 2009, 31(6): 8-11.
WAN Yuyan, SU Yu. Strategies for low-carbon economy development by using MFA[J]. Energy of China, 2009, 31(6): 8-11.
- [13] 姜勇, 颜丽, 张继宏, 等. 辽宁西安生态养殖模式中碳钾物流研究[J]. 沈阳农业大学学报, 1995, 26(2): 152-156.
JIANG Yong, YAN Li, ZHANG Jihong, et al. A study of carbon and potassium flows in Xi'an eco-animal breeding model, Liaoning[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 1995, 26(2): 152-156.
- [14] 段然, 王刚, 杨世琦, 等. 沼肥对农田土壤的潜在污染分析[J]. 吉林农业大学学报, 2008, 30(3): 310-315.
DUAN Ran, WANG Gang, YANG Shiqi, et al. Preliminary research of potential pollution on farmland soil after using Biogas[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2008, 30(3): 310-315.
- [15] 王本洋. 含钙污水生化处理装置的开车调试[J]. 工业用水与废水, 2001, 32(1): 45-47.
WANG Benyang. Start-up and adjustment of a biochemical treatment plant for calcium-containing wastewater[J]. Industrial Water & Wastewater, 2001, 32(1): 45-47.
- [16] 高新星, 赵立欣. 规模化猪场甲烷排放通量测量与分析[J]. 农业工程学报, 2006, 22(增刊 1): 248-252.
GAO Xinxing, ZHAO Lixin. Measurement and analysis of methane flux emitted from animal manure lagoon of livestock farm[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(Suppl 1): 248-252.

Material flow analysis on carbon cycle in planting and breeding park of village scale: A case study of Xibaidian village in Pinggu District, Beijing

HUANG Zhiping¹, HAO Li², GAO Shangbin¹, ZHOU Liandi², ZHANG Keqiang¹,
WANG Feng¹, ZHONG Chunyan², WANG Dong³

1. Institute of Agro-environmental Protection, Ministry of Agriculture, Tianjin 300191, China;

2. Institute of Agricultural Integrated Development, Beijing Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Beijing 100097, China;

3. Jilin University, Changchun 130062, China

Abstract: In this paper, the case study area is Xibaidian village in Pinggu District, Beijing which is a representative planting and breeding park (PBP) of village scale. The pollution load of Xibaidian village's livestock breeding quantity is equivalent to a scale swine farm with 15 000 pigs, and the production in this village is divided into breeding stage, waste treatment stage and planting stage. Taking one year as the system boundary and without considering hidden flow, through data investigation, the previous research and plot experiments, a material flow analysis (MFA) method is applied to analyze carbon flow of Xibaidian village's production. The aim is to provide a new method and perspective for PBP of village scale to develop low-carbon economy and sustainable development and to provide a feasible solution for PBP of village zone to decrease the environmental pressure. Through the analysis of carbon flow, the total amount of C annual input is 112.52×10^4 kg during the breeding stage, among which the amount of C sequestration in swine body is 40.04×10^4 kg, the amount of C in feces-carbon and urine-carbon is 49.29×10^4 kg, and the amount of C in the form of CO_2 emissions is 23.19×10^4 kg which is metabolized by swine. The total amount of C annual input including feces-carbon and urine-carbon is 42.29×10^4 kg during the waste treatment stage, in which the urine-carbon 9.79×10^4 kg enters into planting stage directly, and the feces-carbon 39.50×10^4 kg enters into biogas plant. The amount of C of biogas converted by feces-carbon is 11.02×10^4 kg, among which the amount of C of CH_4 and CO_2 is 8.43×10^4 kg and 2.59×10^4 kg respectively. And the amount of C releases from CH_4 by wastewater discharging together with other means of carbon emission is 23.66×10^4 kg, which takes up 59.89% of the total amount of feces-carbon. The total amount of C annual input including urine-carbon and the C in biogas slurry and residue is 14.61×10^4 kg during the planting stage, assuming the 43 hectares arable land in the village could spread the biogas slurry and residue, without considering other crops planting, the organic carbon stored in soil could be 60.50×10^4 kg during a quarter of corn planting, which is 4 times of C input quantity 14.61×10^4 kg, and the organic carbon of plant could increase 27.31×10^4 kg. From the above analysis, Xibaidian village has the environmental capacity to accommodate the breeding wastes, and has the conditions to carry out the recycling use the breeding wastes. But the attentions should be paid to strengthen the management and treatment of the breeding wastes, and to increase the efficiency of wastes reuse.

Key words: material flow analysis; MFA; planting and breeding park; carbon; breeding waste