

西柏店村级养殖种植园区氮素流和能量流分析

黄治平¹, 郝利^{2*}, 高尚宾¹, 周连第², 张克强¹, 王风¹, 钟春艳², 刘刚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, 长春 130062)

摘要:将西柏店村畜禽养殖规模折合为 1.50 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 a 为系统边界,通过数据调查、已有资料研究和小区种植试验,采用物质流和能量流分析方法分析了该村养殖种植园区在整个生产工艺过程的氮素和能量流动, 以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。园区养殖种植过程的氮素分析表明,养殖阶段年输入 N 素总量为 7.14×10^4 kg,其中猪身总固氮量为 2.68×10^4 kg,粪氮和尿氮总量为 3.93×10^4 kg,氮损耗为 0.53×10^4 kg。废弃物处理阶段输入的氮主要为粪氮 3.28×10^4 kg,而 0.65×10^4 kg 尿氮直接进入种植阶段,粪氮通过厌氧处理由有机氮转变为无机氮,其中有 2.78×10^4 kg 无机氮通过沼渣和沼液进入种植阶段,有 0.50×10^4 kg 氮损失。由于作物对氮的吸收,植株增加氮为 7.53×10^4 kg,土壤减少氮为 6.37×10^4 kg,不计其他作物种植,如果沼渣、沼液能满足施用于全村 43 hm² 农田,若以保持土壤中 N 素计算,种植一季玉米土壤还需氮素 2.94×10^4 kg,若以作物需求的 N 素计算,种植一季玉米土壤还需氮素 4.10×10^4 kg。整个园区能量流分析表明,饲料投入能为 443.51×10^8 kJ,产出的畜产品能 179.94×10^8 kJ,养殖阶段能量产出率为 40.57%,废弃物处理阶段沼气能产出为 26.30×10^8 kJ,种植阶段一季玉米产出能为 198.84×10^8 kJ,其中玉米籽粒 81.22×10^8 kJ 的能量可用于饲料进入新的循环,要满足养殖种植园区的能量循环,以一季玉米种植计算,还需补充饲料能量 362.29×10^8 kJ。由氮素流动分析可知,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,还可加强养殖业的发展,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。由园区的能量流分析表明,该园区能较好地实现系统的能量投入产出。

关键词:物质流分析;养殖种植园区;氮;能量;低碳;养殖废弃物

中图分类号:S181 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2011)02-0395-09

Material Flow Analysis on Nitrogen Cycle and Energy Flow Analysis of Planting and Breeding Park of Village Scale at Xibaidian Village

HUANG Zhi-ping¹, HAO Li^{2*}, GAO Shang-bin¹, ZHOU Lian-di², ZHANG Ke-qiang¹, WANG Feng¹, ZHONG Chun-yan², LIU Gang³

(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: Xibaidian Village 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 the system boundary for 1 year and not considering the hidden flow, through data investigation, the previous research and plot experiments, we applied the material flow analysis (MFA) and energy flow analysis (EFA) methods to analyze the nitrogen and energy flow of Xibaidian Village. The objective of this study was to provide a new method and a new perspective for PBP of village scale to develop low-carbon economy and to provide a feasible solution for PBP of village zone to promote cycle economy and sustainable development and decrease the environmental pressure. Results of the nitrogen flow analysis showed that the total amount of N annual input was 7.14×10^4 kg during the breeding stage, among which the amount of N sequestration in swine body was 2.68×10^4 kg, the

收稿日期:2010-08-27

基金项目:首都高端农业建设路径研究(2010A014)

作者简介:黄治平(1972—),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 E-mail:haoli9090990@163.com

amount of N in feces-nitrogen and urine-nitrogen was 3.93×10^4 kg, and the amount of N loss was 0.53×10^4 kg. During the waste treatment stage, the N input was mainly feces-nitrogen with an annual amount of 3.28×10^4 kg entering biogas plants where organic nitrogen was converted to inorganic nitrogen, and 0.65×10^4 kg of urine-nitrogen entered the planting stage directly. Among the inorganic nitrogen, the amount of N which entered the planting stage through biogas slurry and residue was 2.78×10^4 kg and approximately 0.50×10^4 kg N was lost. Because of the absorption of nitrogen by the plants, the nitrogen in the soil decreased 6.37×10^4 kg, while in plants increased to 7.53×10^4 kg. It still needed 2.94×10^4 kg N in the soil to keep the amount of nitrogen in the soil during a quarter of corn planting, without considering other crop planting and assuming 43 hm² of arable land in the village could be applied of biogas slurry and residue. And still needed 4.10×10^4 kg N in soils meeting the plant's nitrogen during a corn planting season. Analysis of energy flow shows that the total amount of energy annual input was 443.51×10^8 kJ and the annual energy output in animal products was 179.94×10^8 kJ during the breeding stage, and the energy conversion ratio was 40.57%. The amount of annual energy output in biogas in the waste treatment stage was 26.30×10^8 kJ compare with 198.94×10^8 kJ in a corn planting season, among which 81.22×10^8 kJ of energy in maize enters into next circle as feed. It still needed 362.29×10^8 kJ feed energy, meeting the requirement of the new energy circle in the village. The nitrogen flow analysis showed that 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 attention should be paid to strengthening the management and treatment of the breeding wastes, and to increasing the efficiency of wastes reuse. From the energy flow analysis, it is known that the village can achieve more in energy management.

Keywords: material flow analysis(MFA); planting and breeding park; nitrogen; energy; low carbon; breeding waste

物质流分析(Material Flow Analysis, MFA 或 Substance Flow Analysis, SFA)是指对全球、某个国家、地区或某一区域内特定的某种物质(如 C、N、P、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, net addition to stock)^[3-5]。物质流模型已用于表示生产过程和生命循环评价(life-cycle assessment, LCA)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新的思路^[8-9]。

能量是生态系统的基础,能流是生态系统的基本功能。以能量的观点对农业生态系统加以分析,能客观、全面和定量地反映农业生态系统各成分间最基本和最本质的关系。能量的高效产出是人们对生态系统追求的目标,农业生态系统能量产出水平是衡量农业生态系统功能的重要指标。能量流分析能为合理调整村级农业生态系统能量流动途径、方向和养分投入提供依据,提高系统能量产出,促进农业生态系统的良性循环和农业又好又快发展^[10-12]。

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,而畜禽养殖是导致全球变暖

的 6 种温室气体中 CO₂、N₂O 和 CH₄ 的主要来源,其中 N₂O 的温室气体效应为 CO₂ 的 296 倍^[13]。村集体统一进行小区管理的畜禽养殖模式为中国养殖小区的组织运作模式之一^[14],养殖废弃物无害化处理后可作为有机肥循环利用于作物种植,形成村级养殖种植园区模式。村级养殖种植园区的生产伴随着 N 素和能量在不同生产流程中的流动和转化。能量是物质的本质,根据爱因斯坦的理论, $E=MC^2$,世界上所有物质都可以换算成能量,不管是物质流,还是能量流,都可以换算为碳当量,低碳经济是碳当量趋于最小化的经济模式^[15]。因此,村级养殖种植园区低碳经济模式分析与物质流和能量流分析法在科学理念、发展主体、发展目标和路径选择上是统一的^[16-17]。

为了合理利用村级养殖种植园区废弃物资源,减少 N 的排放和提高系统的能量产出,本文对西柏店村村级养殖种植一体化园区的 N 元素和能量在不同生产流程中进行分析,以期对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年建成日产400 m³沼气的沼气工程用于处理猪场等畜禽废弃物。

1.2 物质流和能量流模型建立

鉴于西柏店村养殖种植园区主要是生物质资源和能量在流动,N素和能量流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 a计;(2)园区养殖规模折合为年出栏1.50万头猪场,暂不考虑其他畜禽养殖和猪场基础设施建设的物质流和能量流分析;(3)综合养殖-种植一体化的特点,以养殖、废弃物处理和种植3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;(7)种植阶段数据采集主要为北方大田作物玉米施用沼肥田间试验。

氮素流模型见图1,能量流模型见图2。

1.3 种植阶段田间试验

1.3.1 试验设计

试验共设4个处理,重复3次,随机排列。小区周围设保护行,小畦面积为12 m²(3 m×4 m),畦间筑埂。玉米品种为华农118,生长期约100 d,于2009年6月24日左右直接点种,行距50 cm,株距25 cm。整个生长期追施沼液,分别于施基肥、拔节期和抽穗期灌溉沼液,灌溉方式为渠灌,10月11日收获。试验设计见表1。

1.3.2 采样方法

土壤样:每个试验小畦施基肥前基础样和玉米收获后随机取2点不同深度土样(0~20 cm、20~60 cm)分别混匀,风干碾磨待测。

沼肥样:分别随机取3个沼渣和沼液样品,沼液直接测定,沼渣风干碾磨待测。

植株样:每畦随机取3棵玉米,风干碾磨待测。

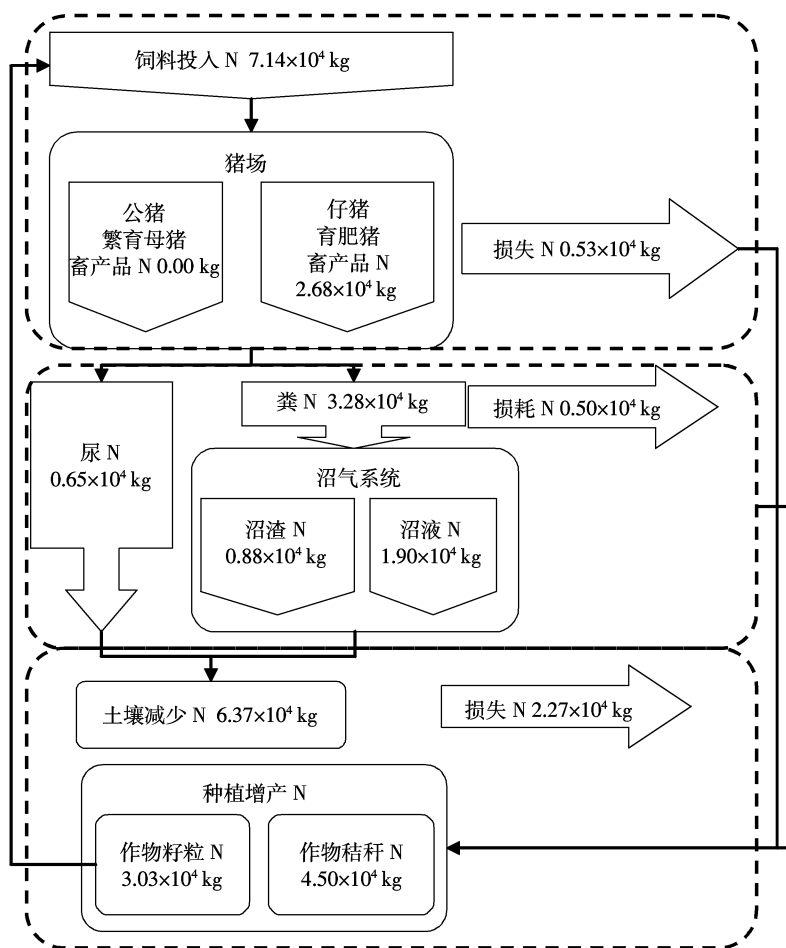


图1 村级养殖种植园区氮素循环示意图

Figure 1 Chart of N circle in Planting and Breeding Park of village scale

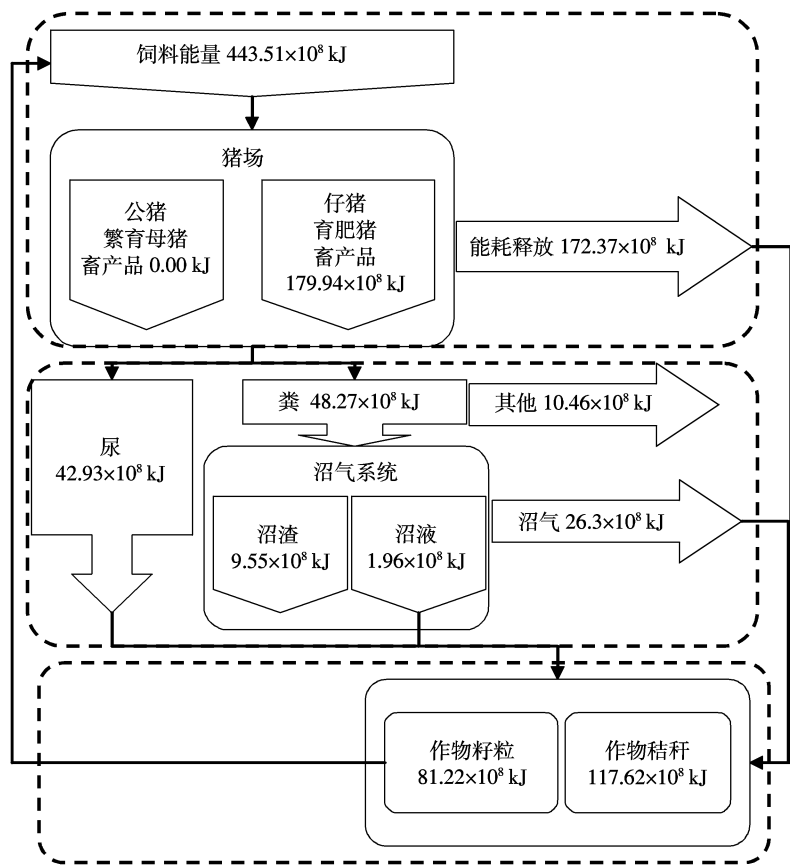


图 2 村级养殖种植园区能量循环示意图

Figure 2 Chart of energy circle in planting and breeding Park of village scale

表 1 试验设计

Table 1 Experimental design

处理	沼液用量	备注
A	沼渣 30 000 kg·hm ⁻² ,沼液 7 500 kg·hm ⁻² 为基肥; 分别在苗期和穗期施用沼液 45 000 kg·hm ⁻²	沼渣 3 kg·m ⁻² ,与 0~20 cm 土壤混合,沼液 0.75 kg·m ⁻² , 作为基肥,分别在苗期和穗期施用沼液 4.5 kg·m ⁻²
B	沼液 30 000 kg·hm ⁻² 为基肥; 分别在苗期和穗期施用沼液 45 000 kg·hm ⁻²	沼液 3 kg·m ⁻² ,与 0~20 cm 土壤混合, 分别在苗期和穗期施用沼液 4.5 kg·m ⁻²
C	沼液 30 000 kg·hm ⁻² 为基肥; 分别在苗期和穗期施用沼液 22 500 kg·hm ⁻² +清水 22 500 kg·hm ⁻²	沼液 3 kg·m ⁻² ,与 0~20 cm 土壤混合, 分别在苗期和穗期施用沼液 2.25 kg·m ⁻² +清水 2.25 kg·m ⁻²
CK	基肥 225 kg·hm ⁻² +水 45 000 kg·hm ⁻²	尿素 0.025 kg·m ⁻² ,水 4.50 kg·m ⁻²

饲料样:分别随机取 3 个饲料样风干碾磨待测。

1.3.3 测定指标

土样分别测定 TN(total nitrogen)和 NO₃-N,其中 NO₃-N 测土壤鲜样;沼肥分别测定沼液和沼渣的 TN;植株为一次性收获,风干称重测产,分别计算玉米籽粒和秸秆干物质产量,并测定玉米籽粒和秸秆的 TN;饲料样测 TN。

1.3.4 测定方法

TN 采用定氮蒸馏滴定法测定,NO₃-N 含量采用 2 mol·L⁻¹ 氯化钾浸提,紫外分光光度法测定^[18]。

2 结果与分析

2.1 田间试验结果分析

玉米干物质产量见表 2,玉米试验土壤 NO₃-N 和 TN 含量见表 3。根据试验结果,试验处理 A 较好,即以沼渣 3.00 kg·m⁻² 与 0~20 cm 土壤混合、沼液 0.75 kg·m⁻² 作为基肥,并在苗期和穗期分别施用沼液 4.50 kg·m⁻²,该处理 NO₃-N 向土壤深层淋溶少,玉米产量相对高。在本文种植阶段 N 素流和能量流分析中,以处理 A 为基准。

表 2 玉米干物质产量(kg)

Table 2 The dry matter yield of corn(kg)

试验处理	地上部产量	标准差	籽粒产量	标准差	地上部总产量	籽粒总产量
A	1.88	0.16	0.71	0.02	2 155 719	814 119
B	1.51	0.08	0.60	0.03	1 731 438	688 000
C	1.37	0.09	0.53	0.03	1 570 919	607 719
CK	1.19	0.01	0.53	0.03	1 364 519	607 719

注:总产量为假设全村 43 hm² 耕地全部种植玉米;n=3。

表 3 玉米试验土壤 NO₃-N 和 TN 含量(n=3)

Table 3 The content of NO₃-N and TN in corn soils(n=3)

0~20 cm 试验处理	NO ₃ -N	标准差	TN	标准差	20~60 cm 试验处理	NO ₃ -N	标准差	TN	标准差
	mg·kg ⁻¹		g·kg ⁻¹			mg·kg ⁻¹		g·kg ⁻¹	
基础	0	0	1.02	0.17	基础	0	0	0.92	0.36
A	0.52	0	1.03	0.02	A	0.2	0	0.63	0.09
B	0.35	0.03	1.09	0.08	B	0.21	0.02	0.56	0.05
C	0.22	0.01	0.90	0.27	C	0.23	0.05	0.57	0.24
CK	0.27	0.04	0.93	0.15	CK	0.20	0.02	0.71	0.03

2.2 N 素流分析

2.2.1 养殖阶段 N 元素分析

根据西柏店村养殖饲料调查数据以及已有研究,折算出年养殖阶段 N 素进入总量和排出总量(见表 4 和表 5)。由表 4 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 N 素总量为 7.14×10⁴ kg。

由表 5 可知,猪身总固 N 量为 2.68×10⁴ kg,饲料 N 的转化率为 37.53%。粪 N 和尿 N 总量为 3.93×10⁴

kg,氮的回收率为 55.04%。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 N 的损失为 0.53×10⁴ kg,占 7%。

2.2.2 废弃物处理阶段 N 元素分析

进入废弃物处理阶段 N 主要为猪粪中的 N,总量为 3.28×10⁴ kg。在厌氧处理过程中,氨基酸、蛋白质等有机氮转化为植物可利用的无机氮,大部分氮通过沼液、沼渣进入种植阶段,同时存在氨、氧化亚氮挥发等氮的损耗。

通过沼渣、沼液产量和氮的含量,可估算沼渣、沼液的氮总量。其中沼渣肥产量为 800×10³ kg·a⁻¹,N 含量 1.10%,折算 N 素为 0.88×10⁴ kg;沼液产量为 2.42×10⁴ m³·a⁻¹,N 含量为 0.08%,折算 N 素为 1.90×10⁴ kg,合计 N 素为 2.78×10⁴ kg,损失氮为 0.50×10⁴ kg。

表 4 养殖阶段 N 素输入总量

Table 4 Total inputs N during breeding

项目	玉米面	麸皮	精料	总计
饲料量/×10 ⁴ kg	160.17	49.68	55.29	265.14
含 N 量/g·kg ⁻¹	14.69	25.60	63.63	-
总 N 量/×10 ⁴ kg	2.35	1.27	3.52	7.14

注:a,饲料量根据北京市平谷区西柏店村调查数据。下同。

表 5 园区猪场 N 的转化(×10⁴ kg)

Table 5 Translation of N in swine farm of agriculture park(×10⁴ kg)

项目	猪数量/头 ^①	肉产量 ^②	猪身固 N 量 ^③	排尿量 ^④	排粪量 ^⑤	尿 N 总量	粪 N 总量
繁育猪	900	0.00	0.00	103.75	75.75	-	-
仔猪	6 000	11.12	0.26	20.16	16.20	-	-
育肥猪	9 000	101.95	2.42	486.96	390.33	-	-
公猪 ^⑥	45	0.00	0.00	2.43	1.95	-	-
总计	-	113.08	2.68	613.30	484.24	0.65	3.28

注:①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 1.50 万头计;②肉产量根据已有文献折算^[9],其中繁育猪和公猪的肉增产量计为 0;③猪身固 N 量根据已有文献折算^[9],其中仔猪肉为 0.023 4 kgN·kg⁻¹ 肉,育肥猪为 0.023 8 kgN·kg⁻¹ 肉;④尿 N 含量为 1.00%;⑤粪 N 含量为 6.78%;⑥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。

2.2.3 种植阶段 N 元素分析

由废弃物处理阶段可知,进入种植阶段的 N 素主要为尿 N、沼渣和沼液的 N 素,合计为 3.43×10^4 kg。

以根系土层取样为 0~60 cm,土壤容重为 1.30×10^3 kg·m⁻³,试验处理 A 中,0~20 cm 土层土壤 N 含量比基础平均增加 0.01 g·kg⁻¹,则 43 hm² 0~20 cm 土壤 N 增加为 1.12×10^3 kg,而 20~60 cm 土层土壤 N 含量比基础平均减少 0.29 g·kg⁻¹,则 43 hm² 该层土壤 N 减少为 64.84×10^3 kg,折算土壤氮减少 6.37×10^4 kg,而减少的氮主要为植株吸收和以 N₂O 等形式挥发。由此可知,沼肥中的氮素还不能满足种植阶段的需求,要保持土壤中的氮素,种植一季玉米土壤还需沼肥中的氮素为 2.94×10^4 kg。

由沼肥施用玉米试验还可知,一季玉米施用沼液、沼渣处理 A 比 CK 地上部增产 1.84×10^4 kg·hm⁻²,籽粒增产 0.48×10^4 kg·hm⁻²,玉米秸秆 N 含量为 7.70%,玉米粒 N 含量为 14.69%。由此可知,通过施用沼液、沼渣估算,全村 43 hm² 农田可提高玉米秸秆 N 的生产量为 4.50×10^4 kg,籽粒 N 增产为 3.03×10^4 kg,植株总氮增量为 7.53×10^4 kg。若以作物需求的 N 素计算,种植一季玉米土壤还需氮素 4.10×10^4 kg。

通过整个园区 N 素分析,西柏店村养殖种植园区环境容量能完全利用该村的畜禽废弃物的氮,较好地实现养殖废弃物循环利用,促进村级可持续发展,还可以加大养殖量。

2.3 能量流分析

本研究中作物光能利用率是指作物在生长期内对太阳总辐射的利用效率;作物和饲料等的燃烧热换算为能值,根据有关资料把物质折成能量。有关物质的输入输出系一年的定位调查、观测和取样分析结果,其能量折算值见表 6^[20-21]。

表 6 各种物质能量折算值

Table 6 Emergy of different matter

项目	能量折算值
人力/ $\times 10^4$ kJ·h ⁻¹	0.075
电力/ $\times 10^4$ kJ·kW ⁻¹ ·h ⁻¹	0.112
农用物资运输/ $\times 10^4$ kJ·kg ⁻¹	0.108
玉米粉/ $\times 10^4$ kJ·kg ⁻¹	1.65
稻糠/ $\times 10^4$ kJ·kg ⁻¹	1.89
麦麸/ $\times 10^4$ kJ·kg ⁻¹	1.66
精料/ $\times 10^4$ kJ·kg ⁻¹	1.75
生猪(100 kg 以下)/ $\times 10^4$ kJ·kg ⁻¹	1.33
生猪(100 kg 以上)/ $\times 10^4$ kJ·kg ⁻¹	1.62
猪粪尿/ $\times 10^4$ kJ·kg ⁻¹	0.10

2.3.1 养殖阶段能量流分析

根据西柏店村养殖饲料调查数据以及已有研究,折算出年养殖阶段能量进入总量和释放总量,见表 7 和表 8。由表 7 可知,养殖阶段饲料主要由玉米面、麸皮和精料组成,其年输入总能量为 443.51×10^8 kJ。

园区猪场能量的转化见表 8,猪身总固能量为 179.94×10^8 kJ,饲料能量转化率为 40.51%。

一个 1.5 万头猪场,按照集约化猪场节约管理需 33 人,每人每日工作 10 h,则一年人力资源能量输入 0.90×10^8 kJ,在能量投入上占总量的 0.21%。耗电量每日约 300 kW·h,则一年的电力能量输入为 1.22×10^8 kJ,在能量投入上占总量的 0.28%。

表 7 养殖阶段能量输入总量

Table 7 Total inputs energy during breeding

项目	玉米面	麸皮	精料	总计
饲料量/ $\times 10^4$ kg	160.17	49.68	55.29	265.14
总能量/ $\times 10^8$ kJ	264.28	82.47	96.76	443.51

表 8 园区猪场能量转化(产量 $\times 10^4$ kg,能量 $\times 10^8$ kJ)

Table 8 Translation of energy in swine farm of Agriculture Park(yields $\times 10^4$ kg,energy $\times 10^8$ kJ)

项目	猪数量/头 ^①	肉产量 ^②	猪身固能量	排尿量	排粪量	尿能总量 ^④	粪能总量 ^⑤
繁育猪	900	0.00	0.00	103.75	75.75	—	—
仔猪	6 000	11.12	14.78	20.16	16.20	—	—
育肥猪	9 000	101.95	165.16	486.96	390.33	—	—
公猪 ^③	45	0.00	0.00	2.43	1.95	—	—
总计	—	113.08	179.94	613.30	484.24	42.93	48.27

注:①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;②肉产量根据已有文献折算^[20],其中繁育猪和公猪的肉增产量为 0;③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;④尿能为 0.07×10^4 kJ·kg⁻¹;⑤粪能(干物质重)为 0.356×10^4 kJ·kg⁻¹,猪粪含水率 72%。

2.3.2 废弃物处理阶段能量流分析

干清粪进入沼气站,猪尿作为肥料直接施入农田,则猪尿的能量 42.93×10^8 kJ 直接进入种植阶段的能量循环。

根据 1 t 鲜粪可产生 50 m^3 沼气,可估算沼气热值为 26.30×10^8 kJ,见表 9。沼渣、沼液的热值由沼气的 C 当量估算,其中沼气的 C 含量为 11.02×10^4 kg,其 C 当量热值为 2.39×10^4 kJ·kg⁻¹,而沼渣和沼液的 C 含量分别为 4.00×10^4 kg 和 0.82×10^4 kg^[22],其热值分别为 9.55×10^8 kJ 和 1.96×10^8 kJ。而由养殖污水通过 CH₄ 排放及由其他途径的粪污能量损失为 10.46×10^8 kJ。由能量分析可知,粪便转化为沼气的能量转化率为 54.49%。

表 9 沼气能量的输出量

Table 9 Total outputs energy of biogas

项目	沼气产量/ $\times 10^4 \text{ m}^3$	沼气热值/ $\times 10^4 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$	沼气中能量/ $\times 10^8 \text{ kJ}$
数量	24.21	2.09	26.3

2.3.3 种植阶段能量流分析

假设 43 hm^2 农田全部以处理 A 设计种植玉米,则玉米的能量总产为 328.85×10^8 kJ,见表 10。

以处理 A 作为合理使用沼液、沼渣量计算,全村沼液、沼渣只可满足 26 hm^2 农田的施用,则玉米的总能量为 198.84×10^8 kJ,其中玉米粒能量为 81.22×10^8 kJ,秸秆能量为 117.62×10^8 kJ。玉米籽粒的能量可用于饲料中进入新的循环,要满足养殖种植园区的生态循环,还需补充饲料能量 362.29×10^8 kJ。

由废弃物处理阶段可知,进入种植阶段的废弃物能量为 54.44×10^8 kJ,但是种植阶段的总产能量为 198.84×10^8 kJ,这主要是由于太阳能的输入以及其他人力等辅助能量所致。而通常在农业生态系统能量分析中不将太阳能输入计入总能量输入之中,因为太阳能是一个与其他各种辅助能量完全不同的能源,其输入到农业生态系统中的能量要比其他能量输入大几个数量级,而仅有不到百分之几的太阳能转化为生物质中的化学能^[23],因而本文种植阶段能量分析侧重废弃物等辅助能源。

3 讨论

(1)有研究表明,猪的 N 素生物转化率一般为 27%,有的可达 28.8%^[24],本研究种植园区在养殖阶段饲料 N 转化率为 37.53%,达到较高水平。以粪 N 和尿 N 计的氮回收率为 55.04%,高于已有文献氮回收率的 53%^[24],而 N 损失为 7%,说明该村对畜禽废弃物处理和利用水平较高,但还需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,保证园区可持续发展。

(2)本文主要研究以废弃物处理和利用为纽带的种植养殖园区为系统的可持续发展的可行性,以大田作物 N 素的需求量来分析园区接纳养殖废弃物的环境容量,种植阶段的 N 素流动模型做了部分简化和假设,这与有关种植生态系统通过分析系统内 N 等元素的盈余以及调控肥料的输入等有不同之处^[25-26]。由种植阶段 N 素分析可知,以处理 A 作为合理使用沼液、沼渣量计算,全村沼液、沼渣只可满足 26 hm^2 农田的施用。不计其他作物种植,如果沼液、沼液能满足施用于全村 43 hm^2 农田,若以保持土壤中 N 素计算,种植一季玉米土壤还需氮素 2.94×10^4 kg,若以作物需求的 N 素计算,种植一季玉米土壤还需氮素 4.10×10^4 kg,仅以 N 素分析说明该村还有相当的容纳养殖废弃物的环境容量。

(3)对整个系统能量投入除太阳辐射外主要包括两类辅助能:一是有机能,主要包括饲料、劳动力、畜力、种子和有机肥料等;二是无机能,主要包括化肥、农药、农业机械、农具、柴油、塑料薄膜和电力等。已有研究表明^[27-28],作为一个人控循环性的农业生态系统,种植阶段能量流主要分析其辅助能。本研究主要分析系统饲料和有机肥等有机能的转化,其中养殖阶段饲料投入能为 443.51×10^8 kJ,畜产品产出能 179.94×10^8 kJ,能量产出率为 40.57%,高于已有研究的 25.8%^[20],这主要由于本研究仅考虑精料的输入而没有将其他的能量计算在内。废弃物处理阶段沼气能产出为 26.30×10^8 kJ,能量转化率为 54.49%,种植阶段一季玉

表 10 玉米能量输出量

Table 10 Total outputs energy of corn

玉米粒产量/ $\times 10^4 \text{ kg}$	玉米粒热值/ $\times 10^4 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	玉米粒能量/ $\times 10^8 \text{ kJ}$	秸秆产量/ $\times 10^4 \text{ kg}$	秸秆热值/ $\times 10^4 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	玉米秸秆能量/ $\times 10^8 \text{ kJ}$	总能量/ $\times 10^8 \text{ kJ}$
81.41	1.65	134.32	134.16	1.45	194.53	328.85

米产出能为 198.84×10^8 kJ, 远远大于进入种植阶段的废弃物能量 54.44×10^8 kJ, 这主要是由于太阳能的输入以及人力等其他辅助能量所致。能量分析表明, 该系统能量转换率和利用率较高, 符合循环农业可持续发展的要求。

4 结论

(1) 通过整个园区 N 素和能量流分析, 西柏店村养殖种植园区环境容量能完全利用该村的畜禽废弃物的氮, 能较好地实现养殖废弃物循环利用和实现系统的能量投入产出, 还可以加强养殖业的发展。

(2) 物质流和能量流分析法可以监测村级养殖种植园区 N 和能量的流动途径, 通过优化物质流和能量流管理, 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 Qi-hong, LI Yan-ping, 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 He-ping, 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 Jin-hua, 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 Xiao-jie. 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 He-ping, 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化分析 [J]. 资源科学, 2006, 28(4): 145—150.
ZHANG Si-feng, LEI Juan. Analyzing dematerialization of Shaanxi Province based on MFA [J]. *Resources Science*, 2006, 28(4): 145—150.
- [10] 蓝盛芳, 钦 佩. 生态系统的能值分析 [J]. 应用生态学报, 2001, 12(1): 129—131.
LAN Sheng-fang, QIN Pei. Emergy analysis of ecosystems [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(1): 129—131.
- [11] 陆宏芳, 蓝盛芳, 陈飞鹏, 等. 农业生态系统能量分析 [J]. 应用生态学报, 2004, 15(1): 159—162.
LU Hong-fang, LAN Sheng-fang, CHEN Fei-peng, et al. Advances in energy analysis of agro-ecosystems [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(1): 159—162.
- [12] 陈冬冬, 高旺盛, 隋 鹏, 等. 现代种植业系统及粮食生产能量转化效率的动态分析: 以山前平原河北栾城县为例 [J]. 地理科学进展, 2008, 27(1): 99—104.
CHEN Dong-dong, GAO Wang-sheng, SUI Peng, et al. Dynamic analysis on energy efficiency of modern planting system and grain production: A case study of Luancheng, Hebei [J]. *Progress in Geography*, 2008, 27(1): 99—104.
- [13] 廖千家骅, 颜晓元. 农业土壤氧化亚氮排放模型研究进展 [J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(5): 817—825.
LIAO Qian-jia-hua, YAN Xiao-yuan. Models of N_2O emission from agricultural fields: A review [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(5): 817—825.
- [14] 韦秀丽, 李 萍, 高立洪. 我国畜禽养殖小区发展现状分析 [J]. 南方农业, 2007, 1(5): 77—79.
WEI Xiu-li, LI Ping, GAO Li-hong. Status analysis of livestock breeding area development in China [J]. *South China Agriculture*, 2007, 1(5): 77—79.
- [15] 崔大鹏. 关于发展低碳经济之己见 [E]. <http://www.crf.org.cn/a/20090707.htm>.
CUI Da-peng. How to develop the low carbon economy in my view [E]. <http://www.crf.org.cn/a/20090707.htm>.
- [16] 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 Qi-guo, QIAN Hai-yan. Low carbon economy and thinking of agricultural development [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(5): 1609—1614.
- [17] 马友华, 王桂苓, 石润圭, 等. 低碳经济与农业可持续发展 [J]. 生态经济, 2009, 6: 116—118.
MA You-hua, WANG Gui-ling, SHI Run-gui, et al. Low carbon economy and sustainable development of agriculture [J]. *Ecological Economy*, 2009, 6: 116—118.

- [18] 国家环境保护总局,水和废水监测分析方法编委会.水和废水监测分析方法[M].第4版.北京:中国环境科学出版社,2002:266-268.
- Bureau of Environmental Protection of China, Editorial Board of Water and Exhausted Water Monitoring Analysis Method. Water and exhausted water monitoring analysis method[M]. Forth edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002:266-268.
- [19] 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 Ji-hong, 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.
- [20] 姜 勇,张继宏,张玉阁,等.西安生态养殖模式能流特征分析[J].生态学杂志,1995,14(3):1-4.
- JIANG Yong, ZHANG Ji-hong, ZHANG Yu-ge, et al. Energy-flow analysis in Xi'an eco-animal breeding model[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1995, 14(3):1-4.
- [21] 牛若峰,刘天福.农业技术经济手册[M].北京:农业出版社,1984:819-831.
- NIU Ruo-feng, LIU Tian-fu. Agricultural technical and economic handbook[M]. Beijing: Agriculture Press, 1984:819-831.
- [22] 黄治平,郝 利,高尚宾,等.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[J].生态环境学报,2010,19(4):962-966.
- HUANG Zhi-ping, HAO Li, GAO Shang-bin, et al. Material flow analysis on carbon cycle in planting and breeding park of village scale: A case study of Xibaidian Village in Pinggu District, Beijing[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(4):962-966.
- [23] 闻大中.农业生态系统能流的研究方法(三)[J].农村生态环境,1986(2):48-51.
- WEN Da-zhong. Methods of agriculture ecosystems energy-flow research(Third)[J]. *Rural Eco-Environment*, 1986(2):48-51.
- [24] 张继宏,姜 勇,关连珠,等.辽宁西安农场生态养殖模式中有肥料氮素循环转化和利用的研究[J].土壤通报,1994,25(7):16-18.
- ZHANG Ji-hong, JIANG Yong, GUAN Lian-zhu, et al. A study of transformation and reuse of nitrogen of organic fertilizer in Xi'an eco-animal breeding model, Liaoning[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1994, 25(7):16-18.
- [25] 余 伟,蒋菊生,张木兰.海南农垦橡胶园生态系统养分的物质流分析[J].热带农业科学,2007,27(1):15-18.
- YU Wei, JIANG Ju-sheng, ZHANG Mu-lan. Material flows analysis of nutrients in rubber plantation ecosystem in Hainan State Farms[J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2007, 27(1):15-18.
- [26] 黄宗文,孙凤华,肖立国.东北农田林网区林农牧生态系统物质流分析[J].延边大学农学学报,2002,24(1):5-9.
- HUANG Zong-wen, SUN Feng-hua, XIAO Li-guo. Material current analysis of farming and animal husbandry ecosystem of northeast agriculture and forestry[J]. *Journal of Agricultural Science Yanbian University*, 2002, 24(1):5-9.
- [27] 卞有生.留民营农业生态工程能量流分析与计算[J].生态农业研究,1999,7(3):71-72.
- BIAN You-sheng. Analysis and calculation of energy flow on agro-ecological engineering of Liuminying[J]. *Eco-Agriculture Research*, 1999, 7(3):71-72.
- [28] 王 芳,陈俊安.循环型农户系统能量流投入产出调控机理分析[J].农机化研究,2009,8:15-20.
- WANG Fang, CHEN Jun-an. A case of study on energy control in a recycle agricultural household system based on input-output model[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2009, 8:15-20.