

引用本文格式 李雨佳, 康以琳, 欧阳雨芊, 等. 基于生命周期评价的苹果树修剪枝条堆肥处理环境影响及经济效益分析[J]. 农业工程, 2024, 14(4): 74-79. DOI: 10.19998/j.cnki.2095-1795.2024.04.012. LI Yujia, KANG Yilin, OUYANG Yuqian, et al. Environmental impact and economic benefits analysis of composting apple pruning branches based on life cycle assessment[J]. Agricultural Engineering, 2024, 14(4): 74-79.

基于生命周期评价的苹果树修剪枝条堆肥处理 环境影响及经济效益分析

李雨佳, 康以琳, 欧阳雨芊, 邵 蕾

(中国农业大学烟台研究院, 山东 烟台 264670)

摘要: 利用生命周期评价方法分析了苹果树修剪枝条堆肥处理模式的环境影响, 并分析其肥料化潜力与经济效益, 对枝条处理各环节进行污染物排放评估, 为苹果树修剪枝条肥料化处理工艺的改进提供参考。研究表明, 苹果树修剪枝条堆肥处理过程中, 每处理功能单位苹果树枝条产生污染物总量 76.0219 kg, 其中二氧化碳排放量占总排放量的 96.79%, 全球变暖对环境的影响高于酸化与富营养化; 粉碎包装、熟化灭菌、粉碎和堆肥阶段产生的污染物气体排放量分别占总排放量的 38.26%、27.22%、21.04% 和 10.85%; 苹果树修剪枝条堆肥处理的生产成本 515 元/t, 经济效益 285 元/t, 每处理 1 t 苹果枝条生产的有机肥, 可替代尿素、过磷酸钙、硫酸钾的量分别为 61.3、120.0 和 13.2 kg。

关键词: 生命周期评价; 苹果树; 堆肥; 环境影响潜力; 经济效益; 肥料化潜力

中图分类号: S661 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-1795(2024)04-0074-06

DOI: 10.19998/j.cnki.2095-1795.2024.04.012

Environmental Impact and Economic Benefits Analysis of Composting Apple Pruning Branches Based on Life Cycle Assessment

LI Yujia, KANG Yilin, OUYANG Yuqian, SHAO Lei

(Yantai Institute of China Agricultural University, Yantai Shandong 264670, China)

Abstract: In order to provide reference for improvement of apple pruning branch fertilization treatment process, environmental impact of apple pruning branch fermentation composting treatment mode by using life cycle assessment was analyzed, and fertilization potential, economic benefits and pollutant emissions of each step of branch treatment were assessed. Results showed that, total amount of pollutants produced per functional unit of apple pruned branches treatment was 76.0219 kg, CO₂ emissions accounted for 96.79% of total emissions, which led to a higher impact of global warming on environment than acidification and eutrophication. Pollutant gas emissions from crushing and packing process, autoclaving of materials, branch crushing and composting process stages accounted for 38.26%, 27.22%, 21.04% and 10.85% of total emissions respectively. Treatment cost of apple pruning branch was 515 yuan/t and economic benefit was 285 yuan/t. Organic fertilizer produced by processing 1 t of apple paper strips could replace urea, calcium superphosphate and potassium sulphate by 61.3, 120 and 13.2 kg, respectively.

Keywords: life cycle assessment, apple tree, composting, environmental impact potential, economic benefit, fertilization potential

0 引言

2020年山东省烟台市栖霞市苹果栽培面积 6.67 万 hm², 产量 210 万 t, 占全国总产量的 1/20。栖霞市也被誉为“中国苹果之乡”, 年修剪枝条按 7.5 t/hm² 计算, 年枝条修剪量约 50 万 t^[1-2]。果树修剪

枝条体积大、不利于收集运输、经济价值低, 农户通常将果树修剪枝条丢弃在路边、田间地头或作为柴薪使用^[3]。果树修剪枝条长期堆放不仅造成了资源浪费、环境污染, 还会引发病虫害传播和火灾隐患, 焚烧处理则会加剧空气污染^[4]。大量研究表明, 果树枝条还田处理既可以提高土壤有机质含量、改良土壤质地、

收稿日期: 2023-08-24 修回日期: 2023-12-16

基金项目: 中国农业大学烟台研究院引导类项目 (Z202201)

作者简介: 李雨佳, 本科生, 专业方向为设施农业科学与工程 E-mail: liyujiax0306@126.com

邵蕾, 通信作者, 教授, 主要从事农业土壤肥料相关研究 E-mail: shaolei6751@163.com

在线投稿
www.d1ae.com

降低化肥施用量，又可以提高作物产量和品质，具有显著的经济和环境效应^[5-8]。

生命周期评价（LCA）是一种评估产品或服务在整个生命周期系统物质、能源投入和污染物排放对环境造成的潜在影响的方法，主要应用于环境保护领域^[9]。目前利用生命周期评价方法评估好氧堆肥过程主要集中于畜禽粪污处理。张颖等^[10]利用生命周期评价对集约化牛场粪污好氧堆肥处理方式进行了评估，提出通过添加复合菌剂减少堆肥过程中污染气体的排放，降低酸化和富营养化的潜力。裴忠良^[11]采用生命周期评价方法分析了集约化猪场粪污好氧堆肥处理的环境影响潜力，建议通过调节堆肥原料碳氮比、温度及 pH 值以减少温室气体的排放。相对于畜禽粪污，枝条中纤维素、木质素等难降解的粗纤维含量更高^[12]。为促进枝条的分解，堆肥原料预处理需增加粉碎、软化等环节，而枝条肥料化生命周期评价未见报道。本研究采用生命周期评价方法分析了苹果树修剪枝条堆肥处理模式的环境影响，并分析其肥料化潜力与经济效益，对枝条处理各环节进行污染物排放评估，为苹果树修剪枝条肥料化处理工艺的改进提供参考。

1 材料与方 法

1.1 研究对象

研究对象为栖霞市某生物科技公司，主营业务为利用苹果树修剪枝条及淘汰老树加工成有机肥，年消耗苹果树修剪枝条 5 万 t（湿重），生产有机肥 4 万 t。苹果树修剪枝条经过粉碎、熟化灭菌、接种发酵菌种、搅拌和堆肥等过程生产有机肥，工艺流程如图 1 所示。

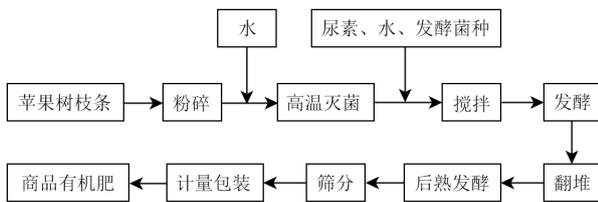


图 1 苹果树修剪枝条堆肥流程

Fig. 1 Flow chart of apple pruning branches composting

苹果树修剪枝条经过高效强制喂料式粉碎机粉碎至粒径<5 mm，将粉碎的苹果树修剪枝条添加水调整原料含水量至 30%，装入高压灭菌锅中保持 127 °C、0.25 MPa 灭菌 3 h。向冷却的物料中添加一定量的水、尿素，调整其含水量约 60%、C/N 约 30，将原料混合均匀后送至发酵车间，发酵周期 21 d。发酵产物理化性质如表 1 所示。

1.2 生命周期评价

1.2.1 目的和范围确定

为了使系统的输入和输出标准化，本研究以处理

表 1 有机肥产品理化性质

Tab. 1 Physical and chemical properties of organic fertilizer products

指标	有机质 / %	含水 / %	全氮 (N) / %	全磷 (P ₂ O ₅) / %	全钾 (K ₂ O) / %	总养分 / %	pH 值
堆肥产品	96	25	4.7	2.4	1.1	8.2	7.5
标准规定	≥30	≤30	-	-	-	≥4	5.5~8.5

注：“-”表示未做限定，标准指 NY 525—2021。

1 t 苹果树修剪枝条（湿重）为评价的功能单位。对苹果树修剪枝条堆肥处理进行生命周期污染物排放清单分析，评价该模式的环境影响潜力。生命周期的起点为苹果树修剪枝条收集转运至处理区域，终点为苹果树修剪枝条形成堆肥产品。

1.2.2 清单分析

(1) 粉碎阶段。采用强制喂料式粉碎机对苹果树修剪枝条进行粉碎处理，所用设备功率及处理能力如表 2 所示，电力生产过程中污染物排放系数如表 3 所示^[13]。

表 2 设备功率及处理能力

Tab. 2 Equipment power and processing capacity

设备名称	功率 / kW	处理能力 / (t·h ⁻¹)	功能单位耗电量 / (kW·h)
枝条高效强制喂料式粉碎机	220	15	14.67
搅拌机	46	30	1.53
粉碎包装生产线	320	12	26.67

表 3 电力生产过程中污染物排放系数

Tab. 3 Emission coefficients of pollutants in process of electricity production

污染物类别	单位: kg / (kW·h)				
	CO ₂	SO ₂	NO _x	CO	CH ₄
排放量	1.07	9.93×10 ⁻³	6.46×10 ⁻³	1.55×10 ⁻³	2.60×10 ⁻³

(2) 运输阶段。运输阶段包括运送粉碎后的苹果树修剪枝条至高压灭菌锅和运送熟化灭菌后的苹果树修剪枝条至发酵车间，运输设备为铲车，铲车的处理能力 120 t/h、耗油量 12.75 kg/h，柴油燃烧过程中的污染物排放量如表 4 所示^[14-15]。

表 4 柴油燃烧过程中污染物排放

Tab. 4 Pollutant emissions from diesel combustion

污染物类别	单位: mg/kg		
	CO ₂	SO ₂	NO _x
排放量	3.1×10 ⁶	8.8	4 280.0

注：柴油中的含硫量 4.4 mg/kg，1 kg 柴油可产生 2×S% kg SO₂，可计算得到 SO₂ 排放量 8.8 mg/kg^[16]。

(3) 熟化灭菌阶段。采用高压灭菌锅对粉碎后的枝条进行熟化灭菌处理，每批次 15 t 需消耗液化石油气 100 kg。液化石油气燃烧过程中的污染物排放量如表 5 所示^[15,17]。

(4) 搅拌阶段。采用搅拌机将原料熟化灭菌后的

表 5 液化石油气燃烧过程中污染物排放

Tab. 5 Emissions of pollutants from combustion of liquefied petroleum gas

单位: mg/kg			
污染物类别	CO ₂	CO	NO _x
排放量	3.1×10 ⁶	1 267.0	1 041.0

枝条与尿素、菌种混合均匀。

(5) 堆肥阶段。采用槽式堆肥, 主发酵期内每 7 d 用铲车翻堆 1 次, 铲车的处理能力(翻堆) 60 t/h, 辅料尿素生产过程中污染物排放如表 6 所示, 堆肥过程中单位质量物料累积氨挥发量 961.2 mg/kg, 单位质量物料 CO₂、CH₄、NO₂ 的排放速率分别为 29.97 mg/(kg·h)、0.96 mg/(kg·h)、37.66 μg/(kg·h) [18-19]。

表 6 尿素生产过程中污染物排放

Tab. 6 Emissions of pollutants during urea production

单位: g/t 产品		
污染物类别	NH ₃ -N	COD
排放系数	50	70

注: 该数据来源于第一次全国污染源普查工业污染源产排污系数手册。

(6) 粉碎包装阶段。后熟发酵产品经粉碎、履带传送、筛分、造粒和包装等流程最终形成商品有机肥, 生产率 9.6 t/h。

1.2.3 影响评价

1.2.3.1 环境影响类型

本研究主要考虑全球变暖、环境酸化和富营养化 3 种环境影响类型。

1.2.3.2 特征化

特征化是将同类型污染物通过当量系数转化和汇总成为统一的单元, 特征化的计算采用当量系数法。特征化的结果由式(1)计算

$$EP(i) = \sum EP(i)_j = \sum [Q(i)_j \times EF(i)_j] \quad (1)$$

式中 $EP(i)$ ——系统对第 i 种环境的影响潜值, kg(污染物)/t

$EP(i)_j$ ——第 j 种排放物对第 i 种环境影响的贡献大小, kg(污染物)/t

$Q(i)_j$ ——第 j 种物质排放量, kg/t

$EF(i)_j$ ——第 j 种排放物对第 i 种环境影响的当量系数, g(污染物)/g

本研究主要考虑以上 3 种环境影响类型, 不同环境影响类型及主要影响因子的当量系数如表 7 所示 [20]。

1.2.3.3 标准化

标准化过程是建立标准化基准, 目的是为各种环境影响类型的相对大小提供一个可比较的标准。标准化的计算方法是特征化的结果除以基准量, 由式(2)

表 7 环境影响类型及主要影响因子当量系数

Tab. 7 Equivalent coefficients for environmental impact types and main impact factors

环境影响类型	CO ₂	CO	CH ₄	NO _x	NH ₃	SO ₂	COD
全球变暖	1	2	25	40	-	-	-
环境酸化	-	-	-	0.7	1.88	1	-
富营养化	-	-	-	0.1	0.33	-	0.022

注: “-”表示不产生影响。

计算

$$N_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (2)$$

式中 N_i ——第 i 种环境影响标准化结果

C_i ——第 i 种环境影响特征化结果

S_i ——标准化基准值

本研究采用 STRANDDORF H K 等 [21] 2005 年 11 月发布的世界人均环境影响潜力作为环境影响基准, 如表 8 所示。

表 8 世界人均环境影响潜力

Tab. 8 World environmental impact potential per capita

环境影响类型	人均当量
全球变暖 / (kgCO ₂ eqv·年 ⁻¹)	8 700
环境酸化 / (kgSO ₂ eqv·年 ⁻¹)	35
富营养化 / (kgPO ₄ ³⁻ eqv·年 ⁻¹)	59

1.2.3.4 加权评估

加权评估是对不同环境影响类型的影响程度进行排序, 分配各自的权重, 最后评估环境影响潜力的相对大小。加权评估由式(3)计算

$$w_i = W_i N_i \quad (3)$$

式中 w_i ——加权后环境影响潜值

W_i ——第 i 种环境影响权重

N_i ——第 i 种环境影响标准化后影响潜值

本研究加权评估参考杨建新 [22] 的研究成果, 归一化处理后取全球变暖潜力、环境酸化潜力和富营养化潜力的权重系数分别为 0.36、0.32 和 0.32。

1.3 肥料化潜力

为计算苹果树修剪枝条肥料化潜力, 将苹果树修剪枝条生产的有机肥含有的氮、磷、钾折算成尿素(46-0-0)、过磷酸钙(0-12-0)、硫酸钾(0-0-50), 通过计算有机肥替代化肥的量分析苹果树修剪枝条的肥料化潜力。

1.4 经济效益

苹果树修剪枝条堆肥处理的成本投入包括原料(苹果树修剪枝条、尿素、发酵菌种、柴油、液化石油气)、包装袋、人工和电力, 不考虑场地建造、设备折旧; 收入来源于出售成品有机肥。

2 结果与分析

2.1 生命周期污染物排放清单分析

功能单位苹果树修剪枝条堆肥处理在生命周期过程中消耗电量 42.87 kW·h、液化石油气 6.67 kg、柴油 0.3188 kg，产生的污染物总量 76.0219 kg，其中 CO₂ 占总排放量的 96.79%。由表 9 可知，熟化灭菌和粉碎包装阶段排放的污染物总量分别为 20.6924 和 29.0846 kg，占整个生产工艺污染物排放总量的 27.22% 和 38.26%；粉碎包装阶段的 CO₂、CO、NO_x 和 SO₂ 排放量最大，分别占各自总排放量的 38.78%、55.14%、58.83% 和 62.20%；堆肥阶段的 CH₄、NH₃ 和 COD 排放量最大，分别占各自总排放量的 63.46%、100% 和 100%。

2.2 环境影响分析

由表 10 可知，功能单位苹果树修剪枝条堆肥处理在生命周期过程中的全球变暖潜力、环境酸化潜力和富营养化潜力分别为 93.0665、3.1573 和 0.4728。CO₂ 是造成全球变暖的主要影响因子之一，苹果树修剪枝条堆肥处理过程中全球变暖潜力大于环境酸化潜力和富营养化潜力，主要原因是在处理过程中 CO₂ 的排放量占总气体排放量的 96.79%（表 9）。由表 11 可知，功能单位苹果树修剪枝条堆肥处理在生命周期过程中的综合环境影响潜力 0.0354，全球变暖、环境酸化和富营养化的环境影响指数分别为 0.0039、0.0289 和 0.0026，即处理功能单位苹果树修剪枝条产生的全球变暖潜力、环境酸化潜力和富营养化潜力分别相当于世界人均环境影响潜力的 0.39%、2.89% 和 0.26%。

2.3 肥料化潜力分析

果树枝条还田可补充土壤有机质、氮磷钾和微量元素^[3]。本研究中年生产有机肥 4 万 t，含有全氮（N）、全磷（P₂O₅）和全钾（K₂O）的量分别为 1 880、

960 和 440 t，折算成尿素、过磷酸钙和硫酸钾的量分别为 3 065、6 000 和 660 t，按照尿素 2 390 元/t、过磷酸钙 950 元/t 和硫酸钾 4 500 元/t，有机肥还田可节省化肥投入 1 600 万元/年。

2.4 经济效益分析

年处理苹果树修剪枝条 5 万 t，需添加尿素 1 000 t、发酵菌剂 50 t，消耗液化石油气 333.5 t、柴油 15 940 kg，生产有机肥 4 万 t（40 kg/袋）。年投入 2 574 万元，销售额 4 000 万元，折合每处理功能单位苹果树修剪枝条产生成本 515 元、经济效益 285 元，如表 12 所示。

3 讨论

3.1 苹果树修剪枝条堆肥处理环境影响

苹果树修剪枝条堆肥处理过程中，全球变暖对环境的全球变化影响高于酸化，富营养化的原因是 CO₂ 的排放量高于其他污染物，占总排放量的 96.79%。

粉碎包装阶段产生的污染气体排放量占总排放量的 38.26%，其中 CO₂、CO、NO_x 和 SO₂ 排放量高于其他阶段，分别占各自总排放量的 38.78%、55.14%、58.83% 和 62.20%。为减少该阶段电力消耗所产生污染物排放，可通过散装或吨包形式销售，既节省了电力消耗，又降低了生产成本与销售价格。

熟化灭菌阶段的目的是促进果树枝条中难分解的木质素、纤维素的降解，每处理功能单位的枝条需消耗液化石油气 6.67 kg，产生的污染气体排放量占总排放量的 27.22%。取消熟化灭菌环节可显著减少污染物的排放，为促进木质素和纤维素的分解，在堆肥阶段可筛选添加分解纤维素能力强的菌种或多种微生物组成的复合菌剂^[12,23]。

粉碎阶段采用的高效强制喂料式粉碎机功率 220 kW，产生的污染气体排放量占总排放量的 21.04%。为提高粉碎效率，降低能耗，可筛选对比市场上已有

表 9 苹果树修剪枝条堆肥处理生命周期各阶段污染物排放清单

Tab. 9 Inventory of pollutant emissions at various stages of life cycle of apple pruning branches composting treatments

污染物类别		CO ₂	CO	CH ₄	NO _x	NH ₃	SO ₂	COD
粉碎阶段	产生量/kg	15.6969	0.0227	0.0381	0.0948	-	0.1457	-
	占比/%	21.33	30.31	12.50	32.37	-	34.23	-
运输阶段	产生量/kg	0.3295	-	-	0.0005	-	9.3544×10 ⁻⁷	-
	占比/%	0.45	-	-	0.17	-	0.00	-
熟化灭菌阶段	产生量/kg	20.6770	0.0085	-	0.0069	-	-	-
	占比/%	28.10	11.35	-	2.36	-	-	-
搅拌阶段	产生量/kg	1.6371	0.0024	0.0040	0.0099	-	0.0152	-
	占比/%	2.22	3.20	1.31	3.38	-	3.57	-
堆肥阶段	产生量/kg	6.7008	-	0.1935	0.0085	1.3439	1.8700×10 ⁻⁶	0.0014
	占比/%	9.12	-	63.46	2.90	100	0.00	100
粉碎包装阶段	产生量/kg	28.5369	0.0413	0.0693	0.1723	-	0.2648	-
	占比/%	38.78	55.14	22.73	58.83	-	62.20	-
产生量合计/kg		73.5782	0.0749	0.3049	0.2929	1.3439	0.4257	0.0014

表 10 苹果树修剪枝条堆肥处理环境影响潜力

Tab. 10 Environmental impact potential of apple pruning branches composting treatment

环境影响类型	全球变暖/ (kgCO ₂ eqv·t ⁻¹)	环境酸化/ (kgSO ₂ eqv·t ⁻¹)	富营养化/ (kgPO ₄ ³⁻ eqv·t ⁻¹)
环境影响影响潜力	93.066 5	3.157 3	0.472 8

表 11 苹果树修剪枝条堆肥处理环境影响指数

Tab. 11 Environmental impact index of apple pruning branches composting treatment

环境影响类型	全球变暖	环境酸化	富营养化	综合影响
环境影响指数	0.003 9	0.028 9	0.002 6	0.035 4

表 12 苹果树修剪枝条堆肥处理经济效益

Tab. 12 Economic benefits of apple pruning branches composting treatment

年产量/万 t	年总投入/万元	年总产出/万元	年经济效益/万元
4	2 574	4 000	1 426

注：①总投入=原料投入量×价格+电力消耗量×价格+包装袋数量×价格+人工费，总产出=有机肥产量×价格；②本研究中配备3名工人（每天工作8h）；③苹果树修剪枝条400元/t、尿素2390元/t、发酵菌剂20000元/t、液化石油气5200元/t、柴油7.35元/L、电力0.62元/(kW·h)、包装袋0.45元/个、人工200元/d及有机肥1000元/t。

的不同类型粉碎机，选用低碳环保、自动化、智能化的低功率粉碎设备^[24]。

堆肥阶段产生的污染气体排放量占总排放量的10.85%，其中CH₄、NH₃、COD排放量高于其他阶段，分别占各自总排放量的63.46%、100%和100%。该阶段中NH₃排放来源于两个方面：堆肥过程NH₃的挥发量占总氨气排放量的99.93%，可通过添加炉渣、除氨菌系、硫酸亚铁或明矾等方式减少NH₃的排放^[25-28]；生产尿素过程中的NH₃排放占总氨气排放量的0.07%，全部COD的排放也来自于辅料尿素的添加，实际生产可以用牛粪、鸡粪等含氮有机废弃物代替尿素调节堆肥原料的碳氮比。堆肥过程中甲烷排放量0.1935kg，可通过接种复合菌剂或添加棉秆木醋液等方式降低CH₄的排放^[29-30]。

3.2 肥料化潜力与经济效益

陈昕楠等^[31]研究表明，烟台市果园有机质含量平均11.4g/kg，仅达土壤养分分级标准的中等水平，土壤有机质含量整体偏低。苹果树修剪枝条还田既可以替代化肥，提高土壤氮磷钾和微量元素含量，又可以提高土壤有机质含量，改善土壤贫瘠化、酸化等问题，提高土壤质量和可持续生产力^[32]。本研究中，每处理1t苹果树修剪枝条生产的有机肥可替代尿素、过磷酸钙、硫酸钾的量分别为61.3、120.0和13.2kg。

宋晓勇等^[33]以鲜牛粪与花生壳粉混合后槽式好氧堆肥进行发酵处理，功能单位鲜牛粪的处理成本327.97元，而本研究中功能单位苹果树修剪枝条的处

理成本515.00元。相对于粪污秸秆等常规有机物料好氧堆肥处理工艺，果树枝条肥料化生产工艺增加了枝条粉碎（功能单位耗电量为14.67kW·h）和熟化灭菌环节（功能单位消耗液化石油气6.67kg）。

4 结束语

苹果树修剪枝条堆肥处理对环境的影响最主要的是全球变暖，因为CO₂的排放量占总排放量的96.79%，其中粉碎包装阶段CO₂的排放量最大，占总排放量的38.78%。苹果树修剪枝条堆肥处理既可以补充土壤有机质、又可以替代化肥，其生产工艺中增加了耗能大的苹果树修剪枝条粉碎和熟化灭菌环节，因此处理成本高于常规的以粪污为原料的处理工艺。

参考文献

- [1] 周丹丹, 石汝娟, 王军莉, 等. 全产业链融合助力“栖霞苹果”变身“金苹果”[J]. 农产品市场, 2022(1): 31-32.
- [2] 苟新卯, 高丹. 果树枝条粉碎还田大有可为[J]. 西北园艺(果树), 2019(2): 13-15.
- [3] 陈场, 王丽霞, 杨毅, 等. 山东省果树修剪枝条资源评估及肥料化利用潜力分析[J]. 中国果树, 2020(4): 92-95.
- [4] 毕于运. 秸秆资源评价与利用研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2010.
BI Yuyun. Study on straw resources evaluation and utilization[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2010.
- [5] 赵鹏, 詹国勤, 徐加宽, 等. 梨园秸秆和修剪枝条的还田效果研究[J]. 南京农业大学学报, 2015, 38(4): 610-616.
ZHAO Peng, ZHAN Guoqin, XU Jiakuan, et al. Research on the effects of application of straw and pruning branches in pear orchard [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2015, 38(4): 610-616.
- [6] 赵鹏. 秸秆还田和枝条堆肥对梨园土壤性状及梨果品质的影响研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2015.
ZHAO Peng. Effects of straw returning and pruning compost on the soil characteristic and fruit quality in pear orchard[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2015.
- [7] 王岩, 王素华, 张树明, 等. 基于滨海盐碱障碍土壤的果树枝条腐熟还田技术研究[J]. 农业开发与装备, 2016(9): 95-96.
- [8] 孙振钧, 孙永明. 我国农业废弃物资源化与农村生物质能源利用的现状与发展[J]. 中国农业科技导报, 2006(1): 6-13.
SUN Zhenjun, SUN Yongming. Situation and development of agricultural residues as energy resource utilization in rural areas in China [J]. Review of China Agricultural Science and Technology, 2006(1): 6-13.
- [9] 姜明红, 刘欣超, 唐华俊, 等. 生命周期评价在畜牧生产中的应用研究现状及展望[J]. 中国农业科学, 2019, 52(9): 1635-1645.
JIANG Minghong, LIU Xinchao, TANG Huajun, et al. Research progress and prospect of life cycle assessment in animal husbandry [J]. Science Agricultura Sinica, 2019, 52(9): 1635-1645.
- [10] 张颖, 夏训峰, 李中和, 等. 规模化养牛场粪便处理生命周期评

- 价[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(7): 1423-1427.
- ZHANG Ying, XIA Xunfeng, LI Zhonghe, et al. Life cycle assessment of manure treatment in scaled cattle farms[J]. Journal of Agro-Environmental Science, 2010, 29(7): 1423-1427.
- [11] 裴忠良. 集约化猪场粪便处理的生命周期评价[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2012.
- PEI Zhongliang. Life cycle assessment of manure treatment in intensive pig farm[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2012.
- [12] 杨明昊, 张艺灿, 王孝娣, 等. 果树枝条生物高效分解技术研究进展[J]. 中国果树, 2022(3): 10-14.
- YANG Minghao, ZHANG Yican, WANG Xiaodi, et al. Advances in efficient decomposition of fruit tree by microorganisms[J]. China Fruits, 2022(3): 10-14.
- [13] 金晶. 脱硫石膏综合利用途径及环境影响评价[D]. 北京: 北京科技大学, 2007.
- [14] 方品贤, 江欣, 奚元福. 环境统计手册[M]. 重庆: 四川科学技术出版社, 1985.
- [15] 省级温室气体清单编制指南(试行)[EB/OL]. (2011-05). <http://www.cbcsd.org.cn/sjk/nengyuan/standard/home/20140113/download/shengjiwenshiqiti.pdf>.
- [16] 李云. 基于荧光定硫法的汽柴油含硫量不确定评定研究[J]. 化工管理, 2022(25): 45-47.
- LI Yun. Study on uncertainty evaluation of sulfur content of gasoline and diesel based on fluorescence sulfur determination method[J]. Chemical Engineering Management, 2022(25): 45-47.
- [17] 刘君卓, 王黎华, 刘红, 等. 液化石油气燃烧产物及其对肺部的损伤[J]. 环境与健康杂志, 1990(6): 241-245.
- LIU Junzhuo, WANG Lihua, LIU Hong, et al. A primary study on the combustion products of LPG & their damage to lung[J]. Journal of Environment and Health, 1990(6): 241-245.
- [18] 关升宇. 牛粪发酵过程中的氮磷转化[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2006.
- GUAN Shengyu. Nitrogen and phosphorus transformation in dairy manure fermentation[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2006.
- [19] 陆日东, 李玉娥, 万运帆, 等. 堆放奶牛粪便温室气体排放及影响因子研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(8): 198-204.
- LU Ridong, LI Yue, WAN Yunfan, et al. Emission of greenhouse gases from stored dairy manure and influence factors[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(8): 198-204.
- [20] 籍春蕾. 规模化养殖场两种粪便处理系统环境影响生命周期评价: 以养牛场为例[D]. 南京农业大学, 2011.
- Ji Chunlei. Two large-scale farm manure disposal systems' environmental impact assessment of life cycle: a case study of large-scale cattle [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011.
- [21] STRANDDORF H K, HOFFMANN L, SCHMIDT A. Update on impact categories, normalisation and weighting in LCA-selected EDIP97-data[J]. Danish Environmental Protection Agency, Environmental Project, 2005.
- [22] 杨建新. 产品生命周期评价方法及应用[M]. 北京: 气象出版社, 2002.
- [23] 白燕燕, 杜文彪, 张彦芳, 等. 一株可降解苹果废弃枝条的生防细菌鉴定[J]. 西北农业学报, 2022, 31(8): 990-997.
- BAI Yanyan, DU Wenbiao, ZHANG Yanfang, et al. Identification of a strain of biocontrol bacteria capable of degrading abandoned apple branches[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2022, 31(8): 990-997.
- [24] 何磊, 王强, 周艳, 等. 果园枝条粉碎机的研究现状与发展对策[J]. 安徽农业科学, 2022, 50(16): 148-151.
- HE Lei, WANG Qiang, ZHOU Yan, et al. Research status and development countermeasures of orchard branch crusher[J]. Anhui Agricultural Science, 2022, 50(16): 148-151.
- [25] 黄懿梅, 苟春林, 梁军峰. 两种添加剂对牛粪秸秆堆肥化中氮素损失的控制效果探讨[J]. 农业环境科学学报, 2008(3): 1219-1225.
- HUANG Yimei, GOU Chunlin, LIANG Junfeng. Effect of two amendments on nitrogen loss from composting of cattle manure and corn straw[J]. Journal of Agro-Environmental Science, 2008(3): 1219-1225.
- [26] 齐婧媛, 徐凤花, 郭梅仙, 等. 除氨菌系对牛粪堆肥氮素转化的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2012(2): 73-77.
- QI Jingyuan, XU Fenghua, GUO Meixian, et al. Ammonia removal microorganism's effects on nitrogen transformation of cattle manure composting[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2012(2): 73-77.
- [27] 赵明德, 李惠梅, 王文颖. 青海地区不同改良剂处理下牛粪氨气排放及氮素动态研究[J]. 生态科学, 2019, 38(3): 166-173.
- ZHAO Mingde, LI Huimei, WANG Wenyong. Study on cattle manure ammonia emission and nitrogen under different ameliorant treatments in Qinghai[J]. Ecological Science, 2019, 38(3): 166-173.
- [28] 吴梦婷, 梅娟, 苏良湖, 等. 硫酸亚铁和过磷酸钙对牛粪秸秆混合堆肥氮损失和腐殖化的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(10): 1353-1361.
- WU Mengting, MEI Juan, SU Lianghu, et al. Effects of ferrous sulfate and calcium superphosphate on nitrogen loss and humification during co-composting of cattle manure with straw[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2020, 36(10): 1353-1361.
- [29] 刘飞, 周岭. 棉秆木醋液对牛粪堆肥过程中CH₄和CO₂排放的影响[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(9): 364-369.
- [30] 卢洋洋. 不同菌种组合对牛粪好氧堆肥发酵的影响研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019.
- LU Yangyang. Effects of different combinations of strains on aerobic composting fermentation of cow manure[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2019.
- [31] 陈昕楠, 王丽霞, 庞力豪, 等. 山东烟台苹果产区土壤PH值、有机质含量和速效养分含量调查[J]. 中国果树, 2019(5): 25-28, 40.
- CHEN Xinnan, WANG Lixia, PANG Lihao, et al. Analysis of soil pH, organic matter and available nutrient contents in apple growing areas of Yantai in Shandong[J]. China Fruits, 2019(5): 25-28, 40.
- [32] 徐丽萍, 梁永红. 有机肥替代化肥对土壤肥力的影响[J]. 农业工程技术, 2021, 41(5): 13-14.
- [33] 宋晓勇, 高文君, 田航飞, 等. 不同粪污处理模式的潜在环境影响和经济效益评价[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2021(24): 8-14.
- SONG Xiaoyong, GAO Wenjun, TIAN Hangfei, et al. Environmental impact and economic benefit evaluation of different treatment modes of manure[J]. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine, 2021(24): 8-14.