

丘陵地形种养循环农园的产业链构建与生态价值实现

—以绿源唯品农园为例

宋怡玮, 丛磊*

(中国农业大学烟台研究院, 山东 烟台 264670)

摘要:以莱阳市绿源唯品种养结合型农园为研究对象,通过实地调研、土壤及空气质量监测数据,与莱阳市同期数据对比分析。研究表明,该农园根据丘陵地形及空间特征构建了“奶牛-沼粪-农果蔬”种养循环模式,奶牛存栏约2 200头,日产鲜奶33 t,年产粪肥1.2万t,并满足园区75%肥料需求,种植土壤有机质含量提升并稳定在3%以上;通过空间适配改善空气质量评级至I级;通过品牌差异化运营、渠道协同优化实现带动种养及加工等年综合收益超7 300万元,形成丘陵地形特征的生态循环农业模式。

关键词:丘陵地形;种养循环;生态价值;产业链;综合效益量化

中图分类号:F323.2

文献标识码:A

文章编号:2096-5877(2026)01-0093-09

Industrial Chain Construction and Ecological Value Realization of Planting-Breeding Circular Farms in Hilly Terrain

—Taking Lüyuan Weipin Agricultural Farm as an Example

SONG Yiwei, CONG Lei*

(Yantai Research Institute, China Agricultural University, Yantai 264670, China)

Abstract: The Chinese government promotes the integration of crop cultivation and livestock breeding and on-site waste absorption to advance the green and sustainable development of agriculture. This paper takes Lüyuan Weipin Crop-Livestock Integrated Farm in Laiyang City as the research object, and conducts a comparative analysis with Laiyang City's data in the same period, using data from field surveys and soil/air quality tests. The study finds that the farm has developed a "dairy cow - biogas manure - crops, fruits and vegetables" planting-breeding circular model based on the hilly terrain and spatial characteristics. It has a stock of about 2,200 dairy cows, with a daily output of 33 tons of fresh milk and an annual output of 12,000 tons of manure, which meets 75% of the farm's fertilizer demand. The organic matter content in the cultivated soil has increased and stabilized at over 3%. Through spatial adaptation (i.e., optimizing the layout of functional zones based on terrain), the air quality rating has been improved to Grade I. By virtue of brand differentiation operation and channel coordination optimization, it has driven an annual comprehensive income of over 73 million yuan from crop cultivation, livestock breeding, processing and other sectors, forming an ecological circular agriculture model with the characteristics of hilly terrain, thereby providing a quantitative basis and practical reference for the promotion of planting-breeding circular agriculture in hilly areas.

Key words: Hilly terrain; Crop-livestock recycling; Ecological value; Industrial chain; Quantification of comprehensive benefits

收稿日期:2025-09-23

基金项目:2025年度山东省重点研发计划(软科学)项目“科技赋能绿色种养循环的多域融合信息服务平台建设及产业化发展路径研究”(2025RZB0604);2022年烟台市教育局校地融合项目“绿色发展理念下县域高效循环农业系统构建与实现路径研究”

作者简介:宋怡玮(2004-),女,在读本科,主要研究方向为生态农业与产业经济。

通信作者:丛磊, E-mail: 1393276730@qq.com

“植五谷,养六畜,农桑并举,耕织结合”。自古以来,种养结合就是中华农耕文明的体现。2006年中央一号文件首次提出循环农业的概念;《全国农业可持续发展规划(2015—2030年)》明确指出:要推广种养结合循环农业模式^[1];2016年国家发展改革委、农业农村部等发布《关于加快发展农业循环经济的指导意见》;2021年农业农村部与财政部联合下发《关于开展绿色种养循环农业试点工作的通知》,提出要加快畜禽粪污资源化利用,打通种养循环堵点,促进粪肥还田,推动农业绿色高质量发展^[2];2024年中央一号文件中强调“扎实推进化肥农药减量增效,推广种养循环模式”。种养结合的循环农业模式成为推动农业绿色发展与可持续增长的实现路径^[3]。

国内外学者早期主要对循环农业理论内涵、模式分析及实践意义、发展途径进行探究和系统概括。自2018年以来农业农村部推出《畜禽粪污土地承载力测算技术指南》,对省、市、县等行政区域的土地承载力、种养产业发展目标和空间布局等普适性、量化研究增多,但对种养结合型农园的量化研究较少。本文基于胶东丘陵地形特

点,以莱阳市绿源唯品农园为例,探究空间产业结构和布局、种养循环模式、产业链构成及综合价值实现。

1 研究区域基本概况及空间规划

1.1 研究区域基本概况

莱阳市位于山东省的东部,东经 $120^{\circ}31' \sim 120^{\circ}58'$,北纬 $36^{\circ}34'10'' \sim 37^{\circ}10'$,地形为低山丘陵区,受胶东脊背地形影响,地势由北向南倾斜。平均年降水量为655.6 mm,年平均气温 11.6°C ,年平均相对湿度70%,年平均日照时数为2 609.5 h,年平均无霜期183 d。地下水资源丰富,特别是沿河地带及山群之间形成的河谷平原和山间盆地平原,为农作物提供了充足的水分保障。

绿源唯品农园位于莱阳市沐浴店镇,占地 71.72 hm^2 ,牧场养殖占地 17.62 hm^2 、办公生活加工区占地 3.00 hm^2 、有机农作物生产区 6.67 hm^2 、蔬菜生产区 13.33 hm^2 、大田作物 26.67 hm^2 、其他 4.43 hm^2 ,是一个典型的丘陵地形种养循环型农园(图1)。

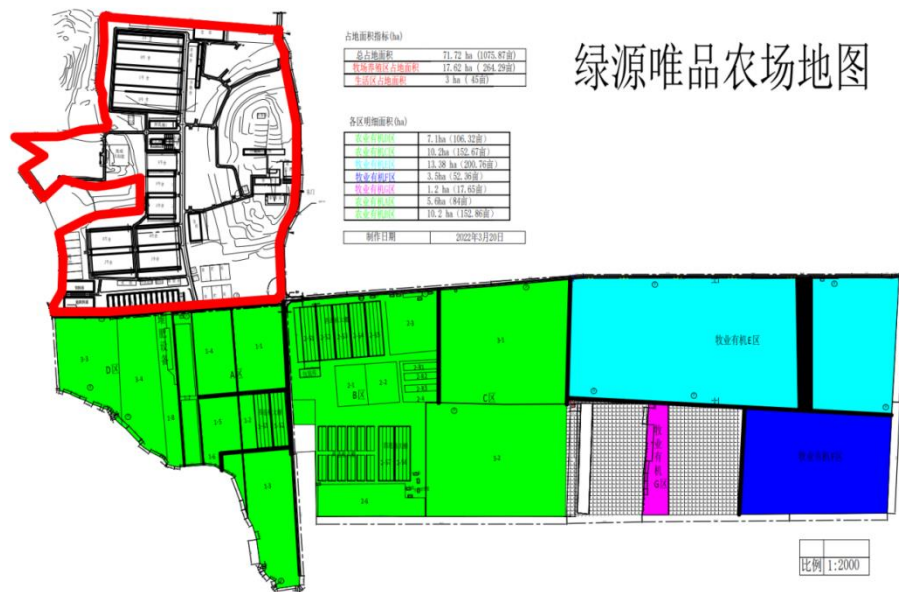


图1 绿源唯品农园的初期规划布局图

Fig.1 Initial planning and layout of Lüyuan Weipin Farm

农园始建于2006年,由三家日本企业合资建立,2016年12月由新希望乳业完成全资收购并进行技术升级^[4],现为山东省农业产业化重点龙头企业,先后荣获“国家有机产品认证基地”“山东省生态循环农业示范园”等称号。园区采用“奶牛绿色养殖-牛粪-农果菜有机生产”种养结合循环农业模式,以养殖奶牛、加工销售优质乳业为

主,兼具玉米、燕麦、果树、蔬菜等有机农产品的多元种植。养殖场现有荷斯坦奶牛存栏量约2 200头、犍牛350头、育成牛700头、成母牛1 180头,其中,泌乳牛1 020头,日产鲜牛奶约33 t。2010年3月,绿源唯品农场取得绿色食品认证,又先后取得中国、日本JAS、美国有机产品认证等,园区辐射带动了周边秋月梨绿色生产。

1.2 农园的空间利用

1.2.1 空间结构

因地形北高南低,农园空间上分为南北两块。北块土地为典型丘陵地形,东西两侧为丘陵台地,中间为浅谷河沟、南北方向通透。浅谷地为养殖区,西侧丘陵台地为玉米及燕麦作物生产

区,产出秸秆用于奶牛饲养;东侧丘陵台地为办公、加工、生活区。南块土地为北面丘陵浅谷水山洪等冲积成的平泊土壤,整个地块的西侧种植露地蔬菜、少量果树,中间主要为设施蔬菜、少量露地蔬菜,东侧为大田作物(图2)。



图2 绿源唯品农园的空间结构分析图

Fig.2 Spatial structure analysis of Lüyuan Weipin Farm

1.2.2 空间的产业布局分析

农园充分利用现状丘陵地形高差、雨水收集及地面径流、光温风向、空间围合与开敞等自然特征,构建种养结合型多元循环农业产业布局。一是浅谷河沟地,充分利用南北通风及两侧台地遮蔽的小环境,布局奶牛养殖区,隔绝外界干扰并实现废气就地消纳;利用北高南低的低缓地形,养殖废水逐层收集、逐级过滤;南侧设立荷花塘进一步沉淀过滤,水体多级净化、塘泥腐殖化后再循环利用;挤奶区粪尿收集至西侧丘陵台地沼液池贮存还田,供给农作物生产;养殖区北侧周边的开敞处堆积、发酵处理奶牛养殖区的垫料

与粪尿混合物,生产有机肥用于园区的蔬菜、大田作物及周边果树。二是丘陵台地区,东侧设置加工办公区,方便管理及生活污水收集处理,用于农田灌溉;西侧高地设置沼液池和玉米燕麦等饲草作物,收储处理养殖粪尿,确保液体粪尿全部就地消纳,保障区域土壤环境与空气质量清洁。三是南侧平泊地,分布种植露地蔬菜、设施蔬菜、大田作物及少量果树,充分利用养殖区牛粪和沼液,每年集中秋施发酵牛粪改良土壤,作物生长期选择管道及水肥一体化施用沼液,确保全程不施化肥,保障有机农产品生产(图3)。

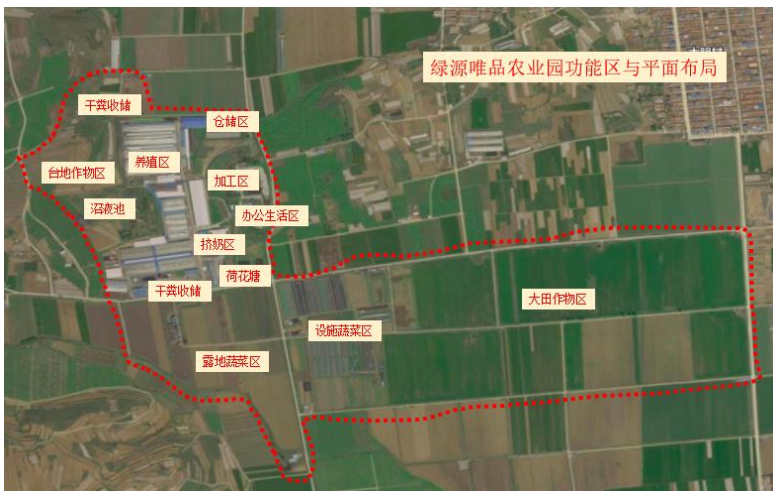


图3 绿源唯品农园的功能区与平面布局图

Fig.3 Functional zones and layout plan of Lüyuan Weipin Farm

2 种养循环与产业链构成

农园充分利用低山丘陵地形进行产业布局,产业链体系依托奶牛养殖与乳制品加工向两端延伸,整体实现生态循环。其中,奶牛养殖链条是以“奶牛-沼粪-农果蔬”种养循环为核心,围绕种

植、养殖、粪污堆肥还田、青贮、污水处理,构建五维内循环生态圈;乳制品加工链条是基于农园种养循环及有机农产品生产的生态价值,围绕乳制品加工、服务增值、品牌销售、资金与技术反哺,构建四维外循环生态圈,从而实现资源高效利用与生态保护的双重目标(图4)。

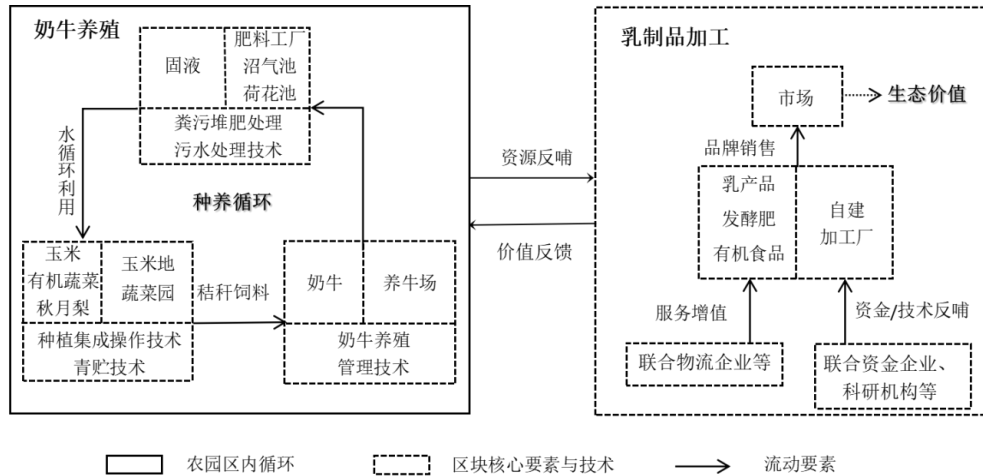


图4 绿源唯品农园的产业循环系统架构图

Fig.4 Industrial circulation system architecture of Lüyuan Weipin Farm

2.1 种养循环

一是基于丘陵地形特点,围绕奶牛养殖规模、结构、粪尿排放及收集,构建合理的种植类型、适度规模及秸秆饲喂关系。

奶牛养殖环节,园区日均产生粪污50 t(干粪30 t、污水20 t)。其中,干粪经槽式高温发酵技术处理20 d左右,可直接施用于饲料作物及蔬菜;养殖棚内牛粪通过垫料翻刨、混合,经一年层积集中取出,发酵做有机肥,总年产量达1.2万 t,可满足农园75%的肥料需求。液体废弃物转抽取到3 000 m³的黑膜沼液池,经3个月发酵后日产沼气约1 500 m³,上层污水处理后用作灌溉用水,下层沼渣直接还田。2006年建园初期,采用土地闲耕及牛粪改良5年后,全园土壤有机质含量从初始的1.1%提升至2.3%,部分有机蔬菜及农产品种植区的土壤有机质在3%以上,有效解决丘陵地

区土壤贫瘠化问题。坚持种养结合及种养规模,一直保持全园农牧有机生产,实现可持续发展。

养殖区每日清洗产生的40 t废水,通过处理池(体积4 000 m³)的厌氧发酵系统经SBR污水处理,年产沼气18万 m³,供应养殖区60%的能源供应。发酵后的沼液通过1 hm²的生态荷花塘进行沉淀净化,替代地下水灌溉量30%,缓解了区域水资源压力。

SBR即序批式活性污泥法,是一种按间歇曝气方式来运行的活性污泥污水处理技术。其核心是SBR反应池,该池集均化、初沉、生物降解、二沉等功能于一池,无污泥回流系统^[5]。处理后出水满足《农田灌溉水质标准》(GB 5084-2021)中旱作作物水质要求,可用于有机蔬菜种植和梨园用水,同时采用滴灌方式,提高水资源利用率(图5)。

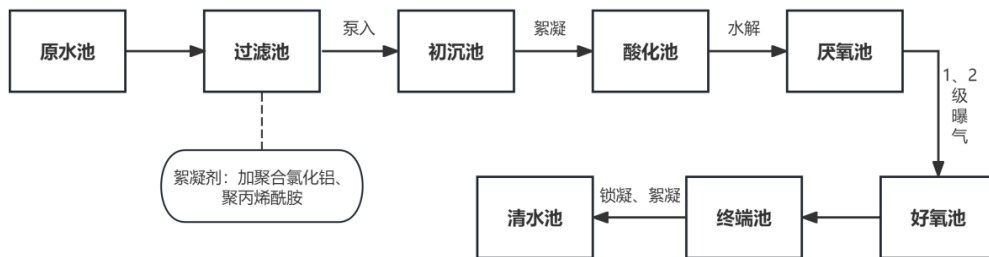


图5 污水SBR处理流程图

Fig.5 SBR sewage treatment process flow chart

粪污处理供全园 46.67 hm²耕地消纳,主要包括大田作物 26.67 hm²,即小麦、水果玉米;蔬菜生产区 13.33 hm²,即 8 公顷设施蔬菜和 5.33hm²露地蔬菜;玉米及燕麦饲草作物 6.67 hm²。这一链条通过空间适配与技术创新,将废弃物转化为资源,既降低了环境负荷,又提升了资源利用效率,实现了“污染零外排、养分全循环”的生态农业目标。

二是水循环利用与粪尿收储及利用相结合。主要利用地形高差,合理产业布局、管道排放、池塘收储体系,构建雨水收集渠及荷花塘、生活污水处理及农田灌溉、养殖冲洗用水逐级沉淀净化、挤奶区冲洗造成稀释的粪尿沼液沉淀池以及南北两端的牛粪堆肥发酵场,从而实现园区水自我循环和再利用系统、粪污收储及循环再利用系统。

2.2 种植端及经济效益

即农园有机农产品生产。利用发酵牛粪和沼液,坚持每年施用牛粪约 75 t/hm²,生长期平均

施用沼液 3 次,主要用于生产各类有机蔬菜、大田作物。有机蔬菜生产及加工区占地面积 13.33 hm²,生产各种叶菜、茄果类,设有温室及露地生产区,采用绿色生态防控技术;大田作物以玉米、小麦为主,每年产青储或黄储的秸秆约合 3 000 t 用于奶牛饲喂,青贮或黄储自产替代外购可年节约 23.4 万元,降低外购成本 15%~20%,同时提高牛的蛋白消化率和代谢能^[6],形成“种植供料、养殖供肥”的可持续循环体系。同时,发酵牛粪不断被周边梨园利用作秋施基肥,显著提升果品品质,为梨果与蔬菜产品取得了良好的口碑与品牌效益。2022 年,上海市推出唯品蔬菜牛乳组合的社区团购配送。2024 年,唯品打造“Farm to Table”早餐,用农场刚采摘的瓜果蔬菜做沙拉、营养餐包,进一步延伸产业链条,形成从田间到餐桌的闭环服务体系。种植端规模和年均收益分析见表 1。

表 1 作物类型与经济收益
Table 1 Crop types and economic benefits

作物类型与区域 Crop types and region	面积/hm ² Area	产量/t · hm ⁻² Yield	单价/元 · t ⁻¹ Unit price	总价/万元 Total price	备注 Remark	
有机农作及饲草区	玉米	6.67	60.0	600	24.0	全株青储
	燕麦	6.67	75.0	400	20.0	产品及秸秆
设施蔬菜生产区	瓜果类	8.00	60.0	25 000	1 200.0	两茬
	叶菜类	8.00	45.0	12 000	432.0	一茬
露地蔬菜生产区	瓜果类	5.33	45.0	18 000	432.0	两茬
	叶菜类	5.33	30.0	8 000	128.0	一茬
大田作物区	小麦	26.67	6.0	2 800	44.8	-
	水果玉米	26.67	4.5	3 500	42.0	-
	秸秆黄储	26.67	30.0	400	32.0	小麦、水果玉米
共计收益/万元	2 354.8					

2.3 养殖端及加工增值

一是奶牛数字化管理产出优质生牛乳,加工成有机乳制品。农园拥有有机牧场和现代化配套乳品加工厂,采用以色列先进的阿菲金管理系统,沟谷平旷地带有 18 处南北纵向平行分布的智慧牛棚,棚内装设空调,提供良好通风,并配套活动草地,提高奶牛体质与奶质。奶牛选用优质进口荷斯坦牛,在国内繁育适应后,优选疾病率低、奶质稳定的奶牛进行饲养。采用先进的电子标签 IT 牛生命体征管理技术与乳制品冷冻保存和加工技术。从奶牛育种与饲养和奶产品加工处理环节,采用电子标签技术数字化管理、追踪每头奶牛的生命体征数据与健康状况。

二是强化服务增值,乳品定位为“循环农作,自然出美味”的高价值差异化乳品。主要产品包括巴氏杀菌乳、希腊酸奶及奶酪,生产采用日本 UHT 杀菌法、ESL 杀菌技术最大限度保留乳铁蛋白、免疫球蛋白等活性成分,延长产品保质期。每头牛日均消耗饲料 50 kg/kg,日处理鲜奶 33 t,原奶中乳蛋白含量达 3.2%、脂肪 3.8%,细菌总数低于 1 万/mL,体细胞数低于 15 万/mL,为高端定位筑牢品质支撑。

市场布局上形成 B 端与 C 端双轮驱动格局。B 端精准匹配精品咖啡馆(Manner、M Stand)与高端零售渠道(Ole、盒马、山姆)需求,C 端市场依托京东、天猫官方旗舰店及小红书等内容平台,聚

焦关注健康、认同环保可持续理念的高端消费群体,产品端持续细化场景布局,主推高端品牌唯品系列产品,“有机牛乳”“牧场酪乳”等差异化品

类。定价层面采用价值锚定策略,250 mL低温奶售价12.8元,较市场同类产品溢价40%~62%,既覆盖有机养殖额外成本,又通过用户口碑巩固高端生

表2 绿源唯品农园乳品经济收益

Table 2 Economic benefits of dairy products in Lüyuan Weipin Farm

泌乳牛数量/头 Number of lactating cows	年泌乳期 天数/d Annual lactation days	单头日产奶量/ kg Daily milk yield per cow	年总产奶量/t Annual total milk yield	加工损耗率/% Processing loss rate	实际鲜奶量 /t Actual fresh milk output	每吨牛奶单价/ 万元 Unit price of milk per ton	乳品年收入/ 亿元 Annual revenue from dairy products
1 020	300	32.35	9 900	2	9 702	5.12	4.97

注:根据智慧三农网站母牛产奶性能的度量指标计算。

Note: Calculated based on the measurement indicators of cow milk production performance from the Smart Agriculture Website.

表3 绿源唯品新希望唯品系列市场售价

Table 3 Market prices of New Hope Weipin series in Lüyuan Weipin

产品 Product	唯品有机 Weipin Organic	唯品娟姗 Weipin Jersey	唯品原生 Weipin Original	唯品 Weipin
单位货币购奶量/mL·元 ⁻¹	19	20	24	32

注:参考官方小程序、公司官网、京东商城、华西证券研究所。

Note: Data sources are the official mini-program, the company's official website, JD.com, and Huaxi Securities Research Institute.

态乳品定位,形成“成本-定价-渠道”的闭环运营。

三是牛粪经济与生态价值分析。绿源唯品农园新鲜牛粪年产量约为46 667 t,按含水量70%计算,可产生干粪14 000 t。牛粪经发酵处理后,通过固液分离和沼气发酵技术,可制成高效有机肥料,富含氮、磷、钾及微量元素,肥效持久且成本

低于传统化肥,以成本估价600元/t,市场估价1 200元/t为例,有机肥可带来直接经济收益约714万元/t。同时,有机肥还可以缓解土壤板结问题,增加土壤有机质含量,促进微生物活动。发酵有机牛粪不仅带来直接经济效益,还可通过资源循环利用推动农业可持续发展^[7](表4)。

表4 绿源唯品农园牛粪经济与生态价值

Table 4 Economic and ecological values of cow dung in Lüyuan Weipin Farm

牛粪经济价值 Economic value of cow dung				干粪年产生态价值 Economic value of cow dung		
利用形式 Utilization form	年产量/t Annual output	每吨经济价值/ 元 Economic value per ton	每吨总价值/ 万元 Total value per ton	主要养分 Main nutrient	养分含量/×10 ³ kg Nutrient content	生产同质量化肥需能/ ×10 ⁶ kJ Energy required for producing chemical fertilizer of the same quality
新鲜牛粪	46 667	40	186.7	N	39.2	2 861.6
干粪	14 000	80	112.0	P(P ₂ O ₅)	25.2	352.8
发酵粪	12 600	200	252.0	K(K ₂ O)	25.2	201.6
有机发酵肥	11 900	600	714.0			

3 区域辐射及生态价值实现

3.1 农园内的种植土壤生态系统及养分状况

农园自2006年开始土壤生态修复,坚持“自然恢复为主、人工干预为辅”,通过5年的抛荒,并持续施用牛粪,以期加速土壤有机质积累、推动土壤恢复自然肥力。2011年正式开始有机蔬菜与饲用牧草的种植。农园采用有机种植方式,无农药施用。根据1996年实行的国家土壤环境质

量标准,绿源唯品农园土壤环境现状已与I类标准相当(表5)。唯品土壤有机质及养分状况达到有机农产品生产标准(表6)。绿源唯品农园土壤pH值为7.1,显著高于莱阳市的偏酸性土壤(pH值为5.45),形成接近中性的理想土壤环境。酸性土壤容易带来铝毒、养分流失等问题,中性pH值有利于土壤微生物活性,促进有机质分解和养分循环;同时,磷等养分在中性条件下的有效性高,可使土壤营养元素有效性达到最佳状态。

表5 绿源唯品农园的土壤重金属与农药残留数据表

Table 5 Soil heavy metal and pesticide residue data of Lüyuan Weipin Farm

检测项目 Test item	镉/ mg · kg ⁻¹ Cadmium	汞/ mg · kg ⁻¹ Mercury	砷/ mg · kg ⁻¹ Arsenic	铅/ mg · kg ⁻¹ Lead	铬/ mg · kg ⁻¹ Chromium	铜/ mg · kg ⁻¹ Copper	锌/ mg · kg ⁻¹ Zinc	镍/ mg · kg ⁻¹ Nickel	六六六/ mg · kg ⁻¹ BHC	滴滴涕/ mg · kg ⁻¹ DDT
检测结果	0.21	0.067	8.34	38.2	71	23	91	30	<0.10	<0.09
标准要求	≤0.3	≤2.4	≤30	≤120	≤200	≤100	≤250	≤100	≤0.10	≤0.10

表6 唯品绿源农园的土壤养分状况及检测结果

Table 6 Soil nutrient status and detection results of Lüyuan Weipin Farm

检测项目 Test item	pH值/无量纲 pH value / dimensionless	有机质/g · kg ⁻¹ Soil organic matter	全氮/mg · kg ⁻¹ Total nitrogen	有效磷/ mg · kg ⁻¹ Available phosphorus	速效钾/ mg · kg ⁻¹ Rapidly available potassium	有效硫/ mg · kg ⁻¹ Available sulfur	有效硅/ mg · kg ⁻¹ Available silicon
绿源唯品农园	7.10	22.384	419	285.354 0	321.157 0	185.688	154.597
莱阳市	5.45	9.548	665	45.612 5	161.437 5	39.725	149.975

3.2 辐射周边梨园的土壤养分状况

田间实验选取绿源唯品农园周边农户的秋月梨种植园,对连续施用发酵牛粪两年(2022—N2)、三年(2022—N3)的根际土壤(土层深度20~40 cm)进行取样检测。对照土样(CK)取自莱阳市多个丘陵地果园采集点的均值,采用相同处理方法测定土壤指标:pH值通过电位法测定,有机质通过容量法测定,全氮采用自动定氮仪测定,全磷采用森林土壤磷酸溶法测定,全钾采用火焰原子吸收分光光度法测定。经过1年生长周期后,原两年(2022—N2)和三年(2022—N3)梨园土壤分别演变为三年(2023—N3)和四年(2023—N4),固定点取样复测,各养分检测结果见表7。

从表5中可以看出,连续使用发酵牛粪对土壤肥力和养分结构改善有显著影响。对照土壤(CK)pH值为5.45,属偏酸性。连续施用牛粪后,牛粪中碱性物质(如腐殖酸、氨)得到释放,牛粪中的有机质也通过缓冲作用稳定土壤pH值,使实验组

pH值显著提升至6.05~6.15,维持在梨树适宜范围,有效缓解了土壤酸化问题。土壤有机质含量在连续施用牛粪后显著提升,牛粪作为外源有机物料输入后,通过土壤原有有机质的激发效应促进微生物活性^[8],加速有机质的矿化-腐殖化循环,改善土壤团粒结构,增强保水保肥能力^[9],为梨树生长提供有利环境。

烟台梨树每生产1 000 kg果实对氮、磷、钾的吸收比例约为1:0.5:1,对照土壤养分比约为1:0.1:0.35,比例失衡较为严重,连续施用牛粪后,2023—N3组氮磷钾比例约为1:0.3:0.6,2023—N4组氮磷钾比例约为1:0.5:0.67,基本满足梨树生长需求(图6,图7)。对照土壤全氮含量高达450 mg/kg,传统化肥过量施用导致了氮素累积问题。连续施用牛粪后,实验组2023年两组数据趋于接近且稳定在325~327 mg/kg,表明经过长期施用后,土壤氮素收支逐渐达到动态平衡,既避免了对照土壤的氮素过量累积问题,又能为梨树生长提供持续

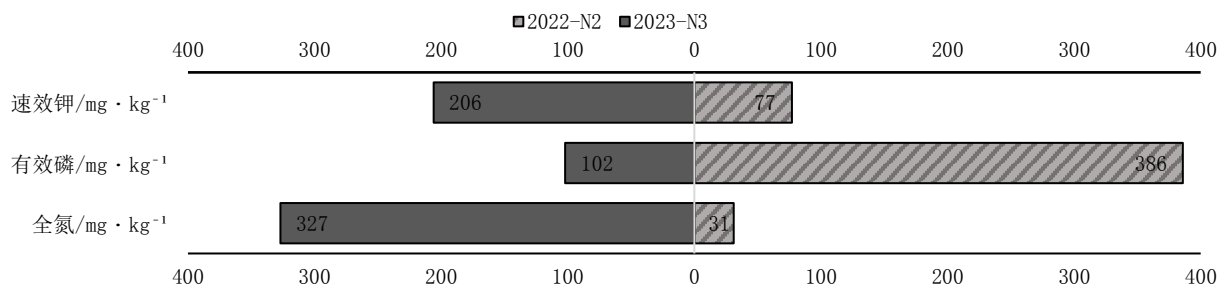


图6 两年际梨园—三年际梨园的氮磷钾含量对比

Fig. 6 Comparison of N, P, K contents between 2-year-old and 3-year-old pear orchards

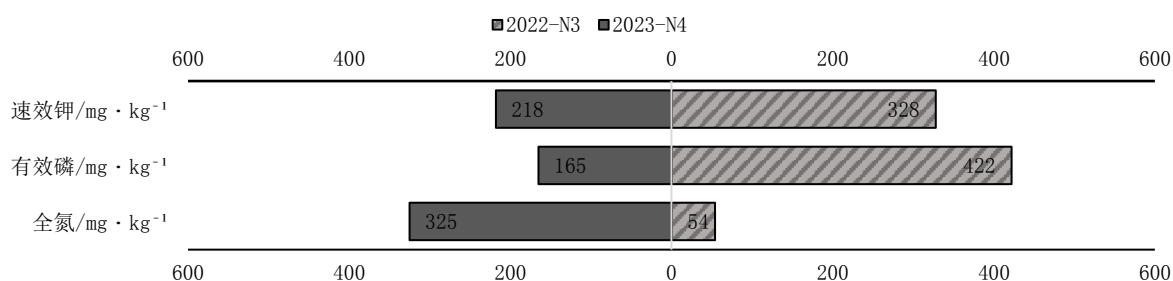


图7 三年际梨园—四年际梨园的氮磷钾含量对比

Fig. 7 Comparison of N, P, K contents between 3-year-old and 4-year-old pear orchards

表7 辐射梨园的土壤养分状况

Table 7 Soil nutrient status of irradiated pear orchards

检测项目	pH值/无量纲	有机质/g·kg ⁻¹	全氮/mg·kg ⁻¹	有效磷/mg·kg ⁻¹	速效钾/mg·kg ⁻¹
Test item	pH value / dimensionless	Soil organic matter	Total nitrogen	Available phosphorus	Rapidly available potassium
CK	5.95	9.55	450	45.61	161.44
2022-N2	6.05	10.4	310	386.00	122.00
2022-N3	6.15	10.75	540	422.00	220.00
2023-N3	6.08	11.4	327	102.00	183.00
2023-N4	6.12	11.6	325	165.00	218.00

注:2022-N2、2023-N3速效磷代替有效磷。

Note: Available phosphorus was replaced by rapidly available phosphorus in 2022-N2 and 2023-N3.

稳定的氮素供应,体现了发酵牛粪在优化土壤氮素水平方面的调控作用。磷、钾分阶段释放,优化磷素钾素供应,动态平衡至梨树养分需求,有效缓解化肥残留引发的土壤面源污染。

3.3 农园区域的空气环境质量

以2018年检测数据为例(表8),由于农园中植被覆盖率高,可通过光合作用持续固碳释氧;秸秆青贮加工可减少焚烧导致的空气污染,降低了

表8 绿源唯品农园的空气质量和莱阳市比较

Table 8 Comparison of air quality between Lüyuan Weipin Farm and Laiyang City

检测项目	SO ₂ /mg·m ⁻³	NO ₂ /mg·m ⁻³	CO/mg·m ⁻³	PM ₁₀ /mg·m ⁻³	PM _{2.5} /mg·m ⁻³	全年空气质量优良率/%	质量级别	质量类别
Test item	Sulfur dioxide	Nitrogen dioxide	Carbon monoxide	Particulate matter (≤ 10μm)	Particulate matter (≤ 2.5μm)	Annual rate of excellent & good air quality	Quality grade	Quality category
绿源唯品农园	0.008	0.001	0.9	0.020	0.010	90	I	优
莱阳市梨园	0.012	0.024	1.9	0.059	0.037	80	II	良

氮氧化物等污染物排放;种养废弃物及水循环再利用,废气废水就地消纳,种养构建共生系统。从关键指标来看,绿源唯品农园空气质量显著优于莱阳市空气质量平均水平。农园内空气质量优良率显著高于莱阳市平均水平,PM_{2.5}明显低于莱阳市,仅为莱阳市的27%,表明空气污染度较低,生态农业模式对空气质量有明显改善作用。

4 讨论与结论

莱阳市绿源唯品农园依托丘陵地形特征构建的种养循环模式,通过长期的实践探索,构建从养土、种植、育牛、牛乳生产到销售的生态产业链,实现结构复合多层、废弃资源循环利用与经济产值的有效增加和综合效益的长效保障^[10],形成了具有区域特点的以养促种的种养循环模式和量化依据。

一是从空间利用与产业布局来看,农园以71.72 hm²的丘陵地块为主,依据北高南低的地形差异形成南北分区。北块浅谷河沟布局奶牛养殖区,利用通风与遮蔽小环境实现废气就地消纳,通过序批式活性污泥法日均处理粪污50 t,实现日产沼气1 500 m³、年替代30%地下水灌溉的水循环利用。东西台地分别布局办公加工区与玉米燕麦种植区,形成“养殖-粪污-种植”的空间闭环。南块平泊地种植蔬菜与大田作物,年均施用75 t/hm²发酵牛粪与3次沼液,构建了地形与产业资源适配的循环格局。

二是在种养循环与产业链构建上,农园以2 200头奶牛为核心,形成“奶牛-牛粪-农果菜”种养循环。年产生有机肥1.2万t满足75%肥料需求,3 000 t青贮秸秆替代外购节约成本23.4万元;乳制品加工通过差异化品牌运营实现4.97亿元/年收入,叠加种植端2 354.8万元收益与714万元有机肥价值,年综合效益显著。

三是生态价值实现方面,农园经过多年实践,土壤有机质从初始1.1%提升至2.3%,目前稳定在3%左右,重金属与农药残留符合国家一类土壤标准;空气质量优良率达90%。对周边梨园的辐射显示,连续施用牛粪4年后,土壤pH值从5.45升至6.12,有机质从9.55g/kg增至11.6g/kg,氮磷钾

比例优化至1:0.5:0.67,有效缓解了土壤酸化与养分失衡问题。

本研究对丘陵地形坡度13~25°、年均降水量655.6 mm地区开展种养结合型农园的规划设计、空间构筑、种养规模、产业链建设、生态和社会价值提升等,具有可复制推广价值。

参考文献:

- [1] 刘洋.种养结合视角下农户粪肥施用行为及经济效应研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2024.
- [2] 刘趁.全国绿色种养循环农业试点初见成效[N].农民日报,2023-01-10(007).
- [3] 刘琼峰,周峻宇,吴海勇,等.国内种养复合循环农业模式应用现状[J].农学学报,2022,12(7):81-88.
LIU Q F, ZHOU J Y, WU H Y, et al. Application status of integrated planting-breeding circular agriculture mode in China[J]. Journal of Agriculture, 2022,12(7): 81-88. (in Chinese)
- [4] 刘梦霞.莱阳市沐浴店镇生态循环农业发展研究[D].烟台:烟台大学,2023.
- [5] 杨茗.基于多案例分析的污水处理PPP项目绩效管理研究[D].南京:东南大学,2021.
- [6] 陈铭哲,印遇龙,何流琴.畜禽粪污资源化处理与种养循环一体化研究与思考[J].中国科学:生命科学,2024,54(7):1211-1225.
CHEN M Z, YIN Y L, HE L Q. Research and reflection on the integration of manure resource treatment and integrated farming system in animal husbandry[J]. Sci. Sin. Vitae., 2024, 54(7): 1211-1225. (in Chinese)
- [7] 董刚,黄洁,盛清凯,等.种养结合关键技术 in 农业循环经济发展的应用与展望[J].现代农业科技,2024(1):209-212.
DONG G, HUANG J, SHENG Q K, et al. Application and prospect of key crop-livestock integration technologies in the development of agricultural circular economy[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2024(1): 209-212. (in Chinese)
- [8] 冯玥,邢亚娟.土壤有机碳分解激发效应的研究进展[J].世界生态学,2021,10(2):236-242.
FENG Y, XING Y J. Priming effects of soil organic carbon decomposition: A review[J]. International Journal of Ecology, 2021, 10(2): 236-242. (in Chinese)
- [9] 胡启成.膨润土和粪肥复合配施对废弃大理岩矿区退化土壤性质的影响[D].绵阳:西南科技大学,2024.
- [10] HAN R, HUO-GEN W. N2N regional circular agriculture model in China: A case study of Luofang biogas project[J]. Cogent Food & Agriculture, 2023, 9(1): e2222563.

(责任编辑:朴红梅)