

沼液农业利用 理论与实践

伍 钧 杨 刚 沈 飞 / 著

Anaerobic Digestion Slurry for Agricultural
Applications: Theory and Practice

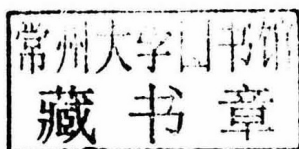
非·外·借



科学出版社

沼液农业利用理论与实践

伍钧 杨刚 沈飞 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书针对我国西南地区主栽作物轮作模式,开展了沼液还田多年定位研究,是作者团队长期从事沼液肥料化教学及科研的成果总结。本书全面、系统地介绍了畜禽粪便沼液基本肥料特征、相关利用途径和潜在的环境风险;此外,基于水稻-油菜的轮作模式,研究了当季沼液还田对水稻和油菜产量、品质的影响及对土壤肥力性能的改善,并系统地评价了介入重金属对大米和油菜籽的食品安全风险和土壤环境质量的影响;另外,本书对三年长期施用沼液对大米和油菜籽的品质、土壤环境质量和土壤微生物变化等关键性状进行了定位跟踪观测,明确沼液还田在西南水稻-油菜轮作模式下,土地的沼液承载量。

本书可供从事畜禽养殖废物资源化、生态农业、农业资源利用等领域的高等院校师生、研究人员、管理人员和技术推广人员参考阅读。希望本书的出版能为我国农业生产中种养循环模式的发展发挥积极推动作用。

图书在版编目(CIP)数据

沼液农业利用理论与实践 / 伍钧, 杨刚, 沈飞著. —北京: 科学出版社, 2019.6

ISBN 978-7-03-060320-3

I. ①沼… II. ①伍… ②杨… ③沈… III. ①有机肥料-液体肥料-农田-利用-研究 IV. ①S141②S28

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 298810 号

责任编辑: 华宗琪 / 责任校对: 彭 映
责任印制: 罗 科 / 封面设计: 墨创文化

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号
邮政编码: 100717
<http://www.sciencep.com>

成都锦瑞印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年6月第一版 开本: 787×1092 1/16

2019年6月第一次印刷 印张: 17

字数: 400 000

定价: 136.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《沼液农业利用理论与实践》

著者名单

主要著者：伍 钧 杨 刚 沈 飞

著者成员：徐 敏 唐 微 杨 琴 李 艳

刘 敏 李小宇 张璘玮 冯丹妮

王静雯 吕汶霖 赵麒淋 陈璧瑕

卢多威 毛晓月 张智慧 罗 伟

赖 星 肖 亨

前 言

近年来,随着中国沼气行业的快速发展,沼气工程(即:厌氧发酵处理技术)对新农村建设的贡献和农村清洁能源的供应在不断增加。沼气工程作为一种处理废弃物、回收再生能源的环境工程技术,不但能够有效合理地利用农业废弃物来解决部分农村能源短缺问题,而且还能在改善农业生态环境,保护森林资源,促进生态与经济系统良性循环等方面作出贡献,是一项带动农民脱贫致富,实现社会、经济、生态效益相统一的生态建设工程,对当代推动生态型农业发展有着重要意义。

现代农业种植模式下,农户过分追求作物高产而向土壤投入的过量化肥,已引起土壤不同程度的板结,原始肥力下降显著,且随着雨水的冲刷,化肥流失严重,污染了地表水和地下水。农业生态环境恶化,农产品品质下降,生产成本大幅度上升问题凸显。随着农业结构的调整和新农村建设的实施,规模化、集约化畜禽养殖业发展迅速,养殖废水猛增,这是农村水污染的主要来源。沼气工程作为处理农村生活污水和畜禽养殖废水的主要技术,在此得到了广泛有效的利用。沼液是沼气工程中人畜粪便和农作物秸秆等有机物经厌氧池厌氧发酵后的固液残余物。沼液成分复杂,因发酵原料种类、配比和发酵条件不同而有所差异,其含有较高浓度的化学需氧量(chemical oxygen demand, COD)、总氮、总磷,且其中的氨氮易挥发,产生异味,这些发酵残余物若不加以利用、随意排放,势必会导致较高的环境污染风险,不仅造成资源的浪费,还将成为新的农业污染源,影响我国农业的可持续发展。2016年我国畜禽粪便年产生量约38亿t,但安全利用率不到50%,畜禽污染跃居农业污染源之首。因此,如何将沼液有效合理地利用在农业生产上成为亟待解决的问题。

沼液是利用畜禽养殖粪便、废水和作物秸秆经厌氧发酵而来,其组分受养殖场喂养饲料的影响很大。近年,采用配合饲料养殖畜禽的农户越来越多,沼液所含成分及其所占的比例发生了明显改变,除含有以往的营养成分外,还增加了重金属、致病菌、农药残留物等危害性物质。研究表明,沼液中所含的重金属、抗生素、激素等有毒有害物质,其含量与喂养方式及发酵原料密切相关。若发酵过程管理不善,沼液中还会存在致病菌。因此,在施肥过程中,控制好沼液的施用量至关重要,若过多施用,会造成重金属、抗生素等物质在土壤中累积,再通过食物链转移到农产品中,导致农产品污染,品质下降;若过少施用,虽然重金属、抗生素等物质在土壤中的含量得到一定控制,但由于营养成分相对减少,将不能满足作物正常生长的需求。因此,开展沼液农业利用研究对于沼液的有效利用、畜禽养殖业的可持续发展都具有重要意义。

本书在国家科技支撑项目“南方山丘区沼液生态达标处理型沼气工程示范”(2008BAD4B04)和四川省科技支撑计划项目“乡村生产生活废弃物资源化利用技术体

系研究与示范”(2014NZ0045)的支持下,通过多年的田间定位试验,探讨了水稻—油菜轮作体系下,沼液农用对土壤环境质量和水稻、油菜品质的影响。研究成果可为沼液施用模式、沼液农用土壤承受力研究和沼液安全农用标准的建立提供数据支撑和科学依据。可供从事农业环境保护和农业废弃物利用领域的高等院校师生、研究人员、管理人员和工程技术人员参考。

本书素材主要来源于四川农业大学环境学院承担的多项项目,以及伍钧教授指导完成的多篇硕士学位论文和发表的学术期刊论文,在此对参与此项工作的研究人员和研究生表示诚挚的谢意。本书在编写的过程中,参考了大量国内外同行专家及学者撰写的著作和论文,在此表示深深的谢意。科学出版社的华宗琪编辑对本书的撰写给予了热情的帮助和指导,在此表示感谢。

由于本书内容涉及面较广,加之编者学识和水平有限,书中难免存在疏漏和不足之外,敬请专家和读者批评指正。

目 录

第 1 章 沼液特性及农用现状	1
1.1 沼气发酵的国内外现状	1
1.2 沼液的成分	2
1.2.1 丰富的营养元素和矿物质元素	2
1.2.2 B 族维生素类	3
1.2.3 生物活性的物质	3
1.3 沼液的利用途径	4
1.3.1 肥料利用	5
1.3.2 生物农药	5
1.3.3 饲料利用	7
1.3.4 培养料液	7
1.4 沼液农用对土壤环境的影响	7
1.4.1 对土壤环境质量的改良作用	7
1.4.2 沼液长期农用的环境风险	9
1.5 基于沼液长期施用对主栽农作物品质及土壤质量影响的核心研究思路	10
参考文献	11
第 2 章 沼液农用对单季水稻品质及土壤环境质量的影响	15
2.1 材料与方法	15
2.1.1 试验材料	15
2.1.2 试验地点及条件	15
2.1.3 试验设计	16
2.1.4 主要栽管措施	16
2.1.5 调查测定项目与方法	17
2.2 沼液不同施用量对水稻生长发育的影响	19
2.2.1 沼液不同施用量对水稻生育期的影响	19
2.2.2 沼液不同施用量对水稻分蘖的影响	19
2.2.3 沼液不同施用量对水稻生育期叶绿素变化的影响	21
2.2.4 沼液不同施用量对水稻株高和穗长的影响	22
2.2.5 沼液不同施用量对水稻干物质积累及成熟期叶面积指数的影响	23
2.3 沼液不同施用量对水稻产量及其产量构成因素的影响	25
2.3.1 沼液农用的产量效应	25

2.3.2	沼液农用对水稻产量构成因素的影响	25
2.3.3	水稻产量与产量构成因素的相关性分析	26
2.4	沼液不同施用量对大米品质的影响	27
2.4.1	沼液不同施用量对大米蛋白质及矿质元素的影响	27
2.4.2	沼液不同施用量对大米重金属含量的影响	29
2.5	沼液不同施用量对土壤基本理化性质的影响	33
2.5.1	沼液农用后土壤基本理化性质的变化	33
2.5.2	土壤理化性质的变异性分析	38
2.6	沼液不同施用量对土壤中微量元素的影响	39
2.6.1	土壤中微量元素含量的变化比较	39
2.6.2	土壤中微量元素的变异性分析	43
2.7	沼液不同施用量对土壤重金属含量的影响	44
2.7.1	土壤 Pb 含量的变化比较	44
2.7.2	土壤 Cd 含量的变化比较	45
2.7.3	土壤 Cr 含量的变化比较	45
2.7.4	土壤 As 含量的变化比较	46
2.7.5	土壤 Hg 含量的变化比较	47
2.7.6	土壤 Ni 含量的变化比较	48
2.8	沼液施用后的安全性评价	49
2.8.1	水稻的安全性评价	49
2.8.2	土壤环境质量评价	52
2.9	本章总结	54
	参考文献	54
第 3 章	沼液农用对单季油菜品质及土壤环境质量的影响	56
3.1	材料与方法	56
3.1.1	供试材料	56
3.1.2	试验地点及条件	57
3.1.3	试验设计	57
3.1.4	主要栽培管理措施	58
3.1.5	调查测定项目与方法	58
3.1.6	沼液的分析测定	59
3.1.7	数据处理	60
3.2	沼液农用对油菜生长发育的影响	60
3.2.1	沼液农用对油菜生育进程的影响	60
3.2.2	沼液农用对油菜株高的影响	61
3.2.3	沼液农用对油菜分枝及角果的影响	61
3.2.4	沼液农用对油菜成熟期干物质重的影响	63
3.3	沼液农用对油菜产量及其构成因素的影响	63

3.3.1	沼液农用对油菜产量的影响	63
3.3.2	沼液农用对油菜产量构成因素的影响	64
3.3.3	油菜产量与产量构成因素的相关性分析	65
3.4	沼液农用对油菜品质的影响	66
3.4.1	沼液农用对油菜营养物质的影响	66
3.4.2	沼液农用对油菜籽粒氮、磷、钾含量的影响	70
3.4.3	沼液农用对油菜矿质元素含量的影响	71
3.4.4	沼液农用对油菜重金属含量的影响	73
3.4.5	沼液农用的油菜安全性评价	76
3.5	沼液农用对土壤理化性质的影响	77
3.5.1	土壤 pH 的变化比较	77
3.5.2	土壤养分的变化比较	78
3.5.3	土壤交换离子的变化比较	82
3.5.4	土壤理化性质的变异分析	84
3.6	沼液农用对土壤矿质元素含量的影响	85
3.6.1	土壤矿质元素含量的变化比较	85
3.6.2	土壤矿质元素含量的变异分析	90
3.7	沼液农用对土壤重金属含量的影响	90
3.7.1	土壤重金属含量的变化比较	90
3.7.2	土壤重金属含量的变异分析	95
3.7.3	沼液农用的土壤重金属安全性评价	96
3.8	沼液农用对土壤微生物和酶活性的影响	96
3.8.1	沼液农用对土壤微生物数量的影响	96
3.8.2	沼液农用对土壤酶活性的影响	97
3.9	本章总结	99
3.9.1	提高油菜产量及品质的沼液最佳施用量	99
3.9.2	兼顾土壤质量的沼液最佳施用量	99
	参考文献	100
第 4 章 水稻-油菜轮作模式下三年连续施用沼液对水稻生产及土壤环境质量的影响		
		102
4.1	材料与方法	102
4.1.1	供试材料	102
4.1.2	试验地点	104
4.1.3	试验设计	104
4.1.4	主要栽培管理措施	106
4.1.5	试验项目及方法	106
4.1.6	实验仪器	108
4.1.7	数据统计分析方法	108

4.2	对水稻农艺性状及产量的影响	108
4.2.1	对水稻农艺性状的影响	108
4.2.2	对水稻产量的影响	113
4.3	对大米品质的影响	115
4.3.1	糙米率	115
4.3.2	对大米蛋白质含量的影响	115
4.3.3	对大米总氨基酸含量的影响	116
4.4	对大米矿质元素的影响	117
4.4.1	三季大米 Mg 含量的比较分析	118
4.4.2	三季大米 Fe 含量的比较分析	118
4.4.3	三季大米 Mn 含量的比较分析	119
4.5	对大米重金属元素的影响	120
4.5.1	三季大米 Ni 含量的比较分析	120
4.5.2	三季大米 Cr 含量的比较分析	121
4.5.3	三季大米 Pb 含量的比较分析	123
4.5.4	三季大米 Cd 含量的比较分析	124
4.5.5	三季大米 As 含量的比较分析	126
4.5.6	三季大米 Hg 含量的比较分析	127
4.6	对土壤养分含量的影响	127
4.6.1	对土壤 pH 的影响	128
4.6.2	对土壤全氮含量的影响	129
4.6.3	对土壤碱解氮含量的影响	130
4.6.4	对土壤速效磷含量的影响	131
4.6.5	对土壤速效钾含量的影响	132
4.6.6	对土壤有机质含量的影响	133
4.6.7	对土壤阳离子交换量的影响	134
4.7	对土壤有效态矿质元素的影响	135
4.7.1	对土壤有效 Fe 含量的影响	135
4.7.2	对土壤有效 Cu 含量的影响	136
4.7.3	对土壤有效 Mn 含量的影响	136
4.7.4	对土壤有效 Zn 含量的影响	137
4.8	对土壤微生态环境的影响	138
4.8.1	对土壤微生物数量的影响	138
4.8.2	对土壤酶活性的影响	141
4.9	对土壤重金属含量的影响	145
4.9.1	对土壤 Ni 含量的影响	146
4.9.2	对土壤 Cr 含量的影响	147
4.9.3	对土壤 Pb 含量的影响	148

4.9.4	对土壤 Cd 含量的影响	149
4.9.5	对土壤 As 含量的影响	150
4.9.6	对土壤 Hg 含量的影响	151
4.10	对大米重金属的安全性评价	152
4.10.1	不同处理下精米对重金属的富集	152
4.10.2	精米的重金属安全性评价	153
4.10.3	连续三年定位施用沼液后土壤重金属的污染评价	156
4.11	本章总结	159
	参考文献	160
第 5 章 水稻—油菜轮作模式下三年连续施用沼液对油菜生产及土壤环境质量的影		162
5.1	材料与amp;方法	162
5.1.1	供试材料	162
5.1.2	试验地点	163
5.1.3	试验设计	163
5.1.4	样品采集及指标测定	164
5.1.5	数据统计分析方法	166
5.2	水稻—油菜轮作模式下沼液连续三年施用对油菜生长的影响	166
5.2.1	油菜生育期变化	166
5.2.2	油菜生理性状变化	168
5.3	水稻—油菜轮作模式下沼液连续三年施用对油菜产量及干物质重的影响	172
5.3.1	油菜产量三年变化	172
5.3.2	油菜干物质重变化	173
5.4	水稻—油菜轮作模式下沼液连续三年施用对油菜籽品质的影响	173
5.4.1	对油菜籽氮、磷、钾的影响	173
5.4.2	对油菜籽营养指标的影响	175
5.4.3	对油菜籽矿质元素的影响	177
5.4.4	对油菜籽重金属的影响	179
5.5	水稻—油菜轮作模式下沼液连续三年施用对土壤理化性质的影响	181
5.5.1	沼液施用对土壤肥力的影响	181
5.5.2	沼液施用对土壤盐基离子的影响	184
5.5.3	沼液施用对土壤微量元素的影响	186
5.5.4	沼液施用对土壤重金属元素的影响	187
5.6	水稻—油菜轮作模式下沼液连续三年施用对土壤微生物的影响	190
5.7	水稻—油菜轮作模式下沼液连续三年施用油菜重金属安全性评价及土壤重金属评价	191
5.7.1	单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数法	191
5.7.2	评价标准的选择	192

5.7.3	油菜重金属安全性评价	192
5.7.4	土壤重金属安全性评价	194
5.8	本章总结	196
5.8.1	油菜高产、优质的沼液最佳施用量范围	196
5.8.2	综合土壤质量与土壤安全的沼液最佳施用量范围	196
	参考文献	197
第6章	水稻—油菜轮作模式下三年连续施用沼液对土壤物质纵向迁移的影响	198
6.1	材料与方法	198
6.1.1	试验材料	198
6.1.2	试验地点及条件	199
6.1.3	试验设计	199
6.1.4	田间主要栽管措施	200
6.1.5	样品采集与制备	200
6.1.6	测定方法	201
6.1.7	评价方法	202
6.1.8	数据处理	203
6.2	沼液不同施用量对土壤机械组成及团粒结构的影响	203
6.2.1	土壤机械组成	203
6.2.2	土壤团聚体	206
6.3	沼液不同施用量对土壤盐分累积及盐基离子纵向运移的影响	209
6.3.1	电导率	209
6.3.2	pH	212
6.3.3	水溶性钙	212
6.3.4	水溶性镁	214
6.3.5	水溶性钾	215
6.3.6	水溶性钠	216
6.4	沼液不同施用量对土壤重金属累积及纵向运移的影响	217
6.4.1	Pb	217
6.4.2	Zn	220
6.4.3	Cu	221
6.4.4	Cd	222
6.4.5	Cr	224
6.4.6	As	225
6.4.7	Hg	226
6.5	沼液施用后对土壤物质纵向运移的综合评价	227
6.5.1	土壤团粒结构评价	227
6.5.2	土壤盐渍化风险的评价	229
6.5.3	土壤重金属污染安全评价	229

6.6 本章总结	232
参考文献	233
第7章 水稻—油菜轮作模式下三年连续施用沼液对土壤微生物学特性的影响	234
7.1 材料与方法	234
7.1.1 试验地概况	234
7.1.2 供试材料	234
7.1.3 田间设计	235
7.1.4 样品采集与处理	235
7.1.5 测定项目及方法	237
7.1.6 数据处理	240
7.2 连年施用沼液对水稻—油菜轮作土壤微生物数量及空间分布的影响	241
7.2.1 对水稻—油菜轮作土壤细菌数量及空间分布的影响	241
7.2.2 对水稻—油菜轮作土壤真菌数量及空间分布的影响	242
7.2.3 对水稻—油菜轮作土壤放线菌数量及空间分布的影响	243
7.2.4 水稻—油菜轮作0~20cm层土壤细菌、真菌比值变化	245
7.3 连年施用沼液对水稻—油菜轮作0~20cm层土壤细菌种群多样性的影响	245
7.3.1 土壤总DNA提取与PCR扩增	245
7.3.2 对水稻—油菜轮作0~20cm层土壤细菌群落结构的影响	246
7.3.3 对水稻—油菜轮作0~20cm层土壤细菌多样性的影响	247
7.3.4 水稻—油菜轮作0~20cm层土壤细菌群落的聚类分析	248
7.4 连年施用沼液对水稻—油菜轮作土壤酶活性及空间分布的影响	249
7.4.1 对水稻—油菜轮作土壤脲酶活性及空间分布的影响	249
7.4.2 对水稻—油菜轮作土壤蔗糖酶活性及空间分布的影响	250
7.4.3 对水稻—油菜轮作土壤过氧化氢酶活性及空间分布的影响	251
7.4.4 对水稻—油菜轮作土壤磷酸酶活性及空间分布的影响	253
7.5 本章总结	254
参考文献	255

第 1 章 沼液特性及农用现状

1.1 沼气发酵的国内外现状

1896 年,英国埃克塞特市用马粪发酵制取沼气点燃街灯是人类首次开发应用经济型生物能源。1936 年,英国首先在泰晤士河畔的废水工厂中应用厌氧消化技术,并将回收的沼气用作本厂的补充能源。但直到 20 世纪 70 年代,随着世界性能源危机和环境污染问题的产生,利用厌氧消化器分解各种有机物来获得能源并资源化利用废弃物的沼气发酵系统才真正引起人们的关注^[1]。沼气技术在实现废弃物资源循环利用,改善农村能源、环境、卫生条件等方面发挥着巨大作用,而且还能减少温室气体的排放。沼气技术的这些作用日益受到世界各国政府的重视,沼气发酵处理畜禽粪污的卫生效果和缓解能源危机的潜力成为许多国家应用和推广沼气技术的重要动力^[2-5]。这有利于世界经济朝着可持续、循环型和可再生能源的方向发展。

据国际能源署 2010 年统计数据^[6,7],经济合作与发展组织成员国 2008 年沼气产量为 265 亿 m^3 。到 2009 年,欧盟 25 国生产了约 840 万吨油当量沼气(约 167 亿 m^3 沼气),其中市政、工业污泥厌氧消化所产沼气占 12%,垃圾填埋所产沼气占 36%,市政固体废弃物沼气工程、分散农场沼气工程、集中联合发酵沼气工程所产沼气共占 52%。德国是欧洲沼气工程发展最好的国家,在 2009 年,生产了 450 万吨油当量沼气,占欧洲沼气产量的 50%,沼气发电量占欧洲总量的 50%,截至 2009 年底,沼气工程已达 5000 座。英国 2009 年沼气产量约为 35 亿 m^3 ,其中填埋沼气为 29.5 亿 m^3 ,占总量的 86%。意大利作为欧洲第四大沼气生产国,农业沼气是其沼气工程发展的主力,2009 年产量达 44.5 万吨油当量(约 8.9 亿 m^3)。美国作为全球最大的能源消费国,其沼气规模位居欧美前列,在 20 世纪 80~90 年代,建造了 140 座沼气工程,2009 年产沼气约 101.9 亿 m^3 。据美国环境保护署 2010 年数据,美国沼气工程的平均投资为 100 万美元。沼气在印度有着很长的使用历史,但真正得到发展是在 1981 年提出沼气发展国家计划之后。此计划在 1985~1992 年间取得了巨大发展,在此阶段,每年都有 16 万~20 万口农村沼气池被安装利用。

与欧美国家相比,我国沼气工程整体技术水平和经济效益差距明显。中国沼气建设起步于 1970 年,经历三个阶段。1973~1983 年,为高速发展与回落阶段,政府急于解决农民生活燃料短缺问题而在全中国推广沼气。1976 年达到高潮,当年统计推广 257 万户,紧跟着是大回落阶段,从 700 多万户回落到约 400 万户。1984~1991 年,为调整阶段。该阶段重视沼气工程技术系统研究,暂时放慢发展速度。1992~1998 年,为回升发展阶段,每年建池在 50 万户左右。截至 2002 年底,我国户用沼气池达 1110 万口,年产沼气

37 亿 m^3 ，综合利用率达 50% 以上；生活污水净化沼气池累计 12 万处，年处理污水 385 万 t；以处理规模化畜禽场粪污为主的大中型沼气工程累计 1560 处，总容积达 77 万 m^3 ，年产沼气 1.9 亿 m^3 ，年处理粪污 5000 万 $\text{t}^{[8]}$ 。成都凤凰山畜牧场沼气工程是我国最早的养殖场沼气工程，具有很强的代表性。现今，我国每年养殖场沼气工程建设投资达 10 亿元以上规模。全国沼气用户超过 4000 万户，沼气工程达 7.27 万处，其中小型沼气工程为 4.53 万处，中型沼气工程为 2.28 万处，大型沼气工程为 4634 处，形成的年节能相当于 2400 多万吨标准煤，减排 CO_2 约 5000 万 t，减排化学需氧量(chemical oxygen demand, COD)约 76 万 t。

沼气具有高效、清洁、可再生、安全四大特征。在我国，沼气研究是与沼肥综合利用、废弃物资源化处理、生态环境保护等活动紧密联系的。目前，世界经济正朝着可再生能源、循环型经济和可持续发展的方向发展，因此沼气工程在实现废弃物资源回收利用，生物质多层次利用，改善农村能源经济、环境卫生条件，减少温室气体排放等方面逐渐引起世界各国的重视。

1.2 沼液的成分

沼液是发酵后残留的液体，主要包括发酵过程中分解释放的有机、无机盐类，如钾盐、磷酸盐等可溶性物质，总固体含量小于 1%。由于发酵物长期浸泡在水中，一些可溶性养分自固相转入液相，提高了速效养分含量^[9]。沼液不仅含有丰富的氮(0.03%~0.08%)、磷(0.02%~0.07%)、钾(0.05%~1.40%)等大量常量营养元素和钙、铜、铁、锌、锰等微量营养元素，还含有丰富的氨基酸、B 族维生素、各种水解酶、某些植物激素、对病虫害有抑制作用的物质或因子等^[10]，在工农业生产和生活中应用广泛。此外，人们发现沼液能显著地改善土壤环境，有效地调节土壤中的水、肥、气、热，促进土壤生态环境良性循环。

1.2.1 丰富的营养元素和矿物质元素

沼气发酵原料中的营养元素在发酵完成后基本已转化为简单的、易于动植物直接吸收的状态。因发酵原料的差异，沼气发酵残留物中各种养分的含量有所差异，具体参见表 1-1。

表 1-1 沼气发酵残留物中矿物质元素的含量

单位: mg/kg

元素	粪便+秸秆 (沼液)	猪粪+稻草 (沼液)	猪粪+稻草 (沼渣)	人畜粪+玉米秸秆 (沼液)	猪粪 (沼液)	粪水 (沼渣)
铁(Fe)	0.82	9.87	44.3	3.406	10.4	1.6
锌(Zn)	0.39	2.558	35.09	0.618	2.45	4.5
铜(Cu)	0.13	0.662	8.768	0.105	1.62	0.80
镍(Ni)	<0.04	0.1170	1.009	0.018		
钒(V)	0.003			0.11		

续表

元素	粪便+秸秆 (沼液)	猪粪+稻草 (沼液)	猪粪+稻草 (沼渣)	人畜粪+玉米秸秆 (沼液)	猪粪 (沼液)	粪水 (沼渣)
锰(Mn)	1.27	3.309	69.35	0.696	1.39	0.30
铬(Cr)	0.02	0.148	1.62		<0.02	
钴(Co)	<0.02	0.46	0.349		0.027	
硼(B)	0.52	0.362	1.15			
锂(Li)	0.03	0.06	0.699			
铝(Al)	3.41					
钡(Ba)	0.35	0.668	1.164		0.27	
钛(Ti)						
硒(Se)						0.0028
镁(Mg)		125.8	164.6			49.0
钙(Ca)		397.6	338.2	237		130
磷(P)	56.88	112.9	29.35	20.1	113	43.0

1.2.2 B 族维生素类

沼气发酵残留物中含有丰富的 B 族维生素。目前, 人们已测定了不同发酵原料的沼气发酵残留物中 B 族维生素的含量, 见表 1-2。

表 1-2 沼气发酵残留物中 B 族维生素的含量

样品	B ₁	B ₂	B ₅	B ₆	B ₁₁	B ₁₂
秸秆+粪便的沼液/(mg/L)	0.089	0.022		0.53	0.078	0.0093
玉米酒糟/(mg/kg)		2.91	36.50			2.65
玉米酒糟的 MFR/(mg/kg)		3.89	72.56			21.66

注: MFR(methane fermentative residues)为沼气发酵残留物。

1.2.3 生物活性的物质

沼气发酵过程中微生物的复杂代谢产生一些具有生物活性的物质, 如氨基酸类、B 族维生素类、植物激素类、抗生素类、抗冷物质和各类水解酶类等。

1. 氨基酸类

沼气发酵残留物中既有必需氨基酸, 又有非必需氨基酸。在对沼气发酵原料和其残留物的氨基酸分析中发现, 残留物中各种氨基酸的含量明显增加^[11]。1996 年, 山东医学院的孟庆国等^[12]对鸡粪、猪粪及猪皮汤三种原料厌氧发酵残留液中游离氨基酸的测定结果表明, 鸡粪厌氧发酵残留液中氨基酸种类最多, 且含量比其他两种残留液高, 鸡粪残留液更适于作为饲料添加剂, 已测的主要氨基酸含量见表 1-3。

表 1-3 沼液中的氨基酸含量

单位: mg/L

氨基酸	天冬氨酸	苏氨酸	谷氨酸	甘氨酸	丙氨酸	半胱氨酸	缬氨酸
含量	12.30	5.42	14.01	8.07	6.56	26.79	12.7
氨基酸	异亮氨酸	亮氨酸	苯丙氨酸	赖氨酸	色氨酸	天冬酰胺+谷氨酰胺	
含量	7.16	1.24	12.03	7.65	7.10	356.03	

2. B 族维生素类

B1、B2、B5、B6、B11 和 B12 等 B 族维生素类可促进植物的生长发育, 增加作物抵抗病虫害的能力。日本小野英男于 1950 年就报道了测定酒精沼气残留物中维生素 B12 的含量; 美国的石家兴教授研究发现鸡粪沼液中维生素 B12 比原鸡粪高 6 倍; 冉隆勋研究发现以猪粪和秸秆、果品饮料、酒精废液为厌氧发酵原料的残留物中维生素含量为 209~1923ng/g^[13]。目前, 人们已测定了不同发酵原料的沼气发酵残留物中维生素 B1、B2、B5、B6、B11、B12 等的含量^[14]。

3. 植物激素、抗生素、腐殖酸

植物激素能有效地促进及刺激植物的生长发育, 而多烯类等抗生素则能抑制和杀灭植物病原菌, 从而增强植物的抗病能力^[15,16]。沼液中的腐殖酸可增加土壤团粒结构, 改善土壤理化性质, 有效地调节土壤中的水、肥、气、热, 促进土壤生态环境的良性循环^[17-19]。上海市农科院土肥所于 20 世纪 80 年代在应用沼液进行蔬菜肥效试验时, 就注意到沼液中激素的问题, 他们应用物理、化学及生物测定等方法多方面探测激素的存在状况, 并初步发现沼液中存在赤霉素、吲哚乙酸等激素。目前, 已从沼液中检测到细胞分裂素、吲哚乙酸、赤霉素等植物激素, 以及多烯类抗生素, 同时沼液中还含有大量的腐殖酸。

4. 水解酶类

沼气发酵残留物中存在脂肪酶、蛋白质酶、纤维素酶、淀粉酶等, 并具有一定的活性, 具体参见表 1-4。

表 1-4 沼气发酵残留物中的水解酶活性

样品	蛋白酶活性	淀粉酶活性	纤维素酶活性
玉米酒糟的 MFR/(100mL·h)	82.35mg 酪素	2678.25mg 淀粉	1775.14mg 葡萄糖
玉米秸秆+人畜粪/(U/mL)	1.43		7.65
猪粪的 MFR/(U/mL)	5.7	15.6	5.6

1.3 沼液的利用途径

沼气综合利用的重点研究方向是沼液的资源化利用。所谓沼液综合利用, 是指把沼液多种类、多层次地利用到农业生产中, 从而达到降低成本, 获得经济、生态等综合效