

中国沼液施用对作物产量效应的 Meta 分析

郑健^{1,2,3}, 颜斐^{1,2,3}, 潘占鹏^{1,2,3}, 冯正江^{1,2,3}, 李欣怡^{1,2,3}

(1. 兰州理工大学 西部能源与环境研究中心, 兰州 730050; 2. 甘肃省生物质能与太阳能互补供能系统重点实验室, 兰州 730050; 3. 兰州理工大学 能源与动力工程学院, 兰州 730050)

摘要: 为了探讨在中国地区施用沼液的增产效应, 文章综合 1999~2017 年间已发表的 78 组田间试验研究数据, 应用 Meta 分析方法定量分析沼液施用在不同条件下对作物产量的效应。结果表明, 施用沼液提高作物产量在西北和华北较为明显, 西南和华东地区略低; 沼液的增产效应不受作物影响, 小麦、玉米、番茄和水稻产量均有所提高, 增产率分别为 15.97%、20.62%、18.02% 和 12.57%; 沼液施用年降雨量 ≥ 500 mm 和年降雨量 < 500 mm 时均能提高作物产量; 较年平均气温 $< 12^\circ\text{C}$, 年平均气温 $\geq 12^\circ\text{C}$ 时作物增产率更为显著。该研究成果可为沼液在农业中的进一步推广应用提供理论支撑。

关键词: 沼液; 产量; 增产效应; Meta 分析

中图分类号: S216.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1166(2019)02-0078-07

Meta Analysis on the Effect of Biogas Slurry on Crop Yield in China / ZHENG Jian^{1,2,3}, YAN Fei^{1,2,3}, PAN Zhan-peng^{1,2,3}, FENG Zheng-jiang^{1,2,3}, LI Xin-yi^{1,2,3} / (1. Western energy and Environment Research Center, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Key Laboratory of the system of biomass energy and solar energy complementary energy supply system in Gansu, Lanzhou 730050, China; 3. School of energy and power engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: In order to explore the yield increase effect of biogas slurry application in China, this paper, based on the datum of 78 groups of field experiments published from 1999 to 2017, applied the Meta analysis method, the effect of biogas slurry application on crop yield under different conditions were quantitatively analyzed. The results showed that, in applying of biogas slurry, the increasing of crop yield was higher in northwest and north China than in southwest and east China. Different kind of crop were all effective for use of biogas slurry, the yield of wheat, corn, tomato and rice increased by 15.97%, 20.62%, 18.02% and 12.57%, respectively. At annual rainfall of ≥ 500 mm or < 500 mm, the use of biogas slurry was all still effective for increasing crop yield. Comparing with the annual average temperature of $< 12^\circ\text{C}$, the crop yield increase was more remarkable for annual average temperature of $\geq 12^\circ\text{C}$.

Key words: biogas slurry; yield; yield increasing effect; Meta-analysis

沼液是农作物秸秆、禽畜粪便等经过厌氧发酵后的液体残余物, 其水溶性好, 养分损失少, 虫卵病菌少, 是一种高效、优质、无污染、无公害的速效有机肥料^[1], 不仅含有植物必需的氮磷元素, 还含有大量的微量元素和多种微生物和酶类^[2-3], 可有效抑制土壤病原菌繁殖, 从而降低土传病害发生, 改善土壤理化性状, 有利于提高作物产量及品质^[4-5]。施用沼液符合农业部于 2015 年印发的《到 2020 年化肥使用量零增长行动方案》^[6] 中提倡采用有机肥替

代化肥的要求。同时, Duzheng Jie^[7] 等研究表明农作物秸秆、畜禽养殖废水、生物炭产品和沼液对土壤提供安全、高效的生物质资源, 改善了土壤结构和土壤保水能力。Abubaker J^[8] 等的研究表明沼液处理的干物质质量和产量明显高于化肥处理。国内学者黄贤贵^[9] 等通过田间试验, 研究了不同沼液施用量对玉米产量的影响, 发现施用沼液可以提高玉米果穗、秸秆的产量及其总产量。上述研究表明沼液对土壤环境的改善和作物的生长均有积极影响, 综合分析

收稿日期: 2018-05-02 修回日期: 2018-07-26

项目来源: 国家自然科学基金(51509122; 51369014); 甘肃省高等学校科技成果转化项目(2018D-04); 杨凌示范区产学研用协同创新重大项目(2018CX-Y4)。

作者简介: 郑健(1981-), 男, 副教授, 主要从事沼液灌溉技术对作物产量品质和土壤环境的影响机理研究等工作, E-mail: zhj16822@126.com

沼液施用对作物产量的影响具有重要意义。

我国集中开展作物施用沼液的相关研究开始于 20 世纪 90 年代^[10], 至 2017 年已取得大量研究成果。主要在甘肃、山东、贵州及内蒙古等地区开展, 作物有玉米、小麦、水稻、番茄、白菜、茶树等。研究结果表明, 施用沼液能够改善土壤环境, 减少病虫害, 提高作物产量及品质^[11-12], 但沼液的增产效应是否具有区域性、作物种类和气候条件等因素的影响, 是否能够替代化肥, 这些问题很难从独立的田间试验研究中得知。

Meta 分析是一种对同类单个研究结果进行统计分析的方法^[13-14], 可解决单组试验无法解决的问题, Meta 分析方法可以量化地综合现有试验数据, 系统分析某种措施的综合效应及其影响因素^[15]。目前, Meta 分析主要应用于医学领域^[16], 农业方面已应用于分析深松对小麦玉米产量的影响^[17]、中国马铃薯地膜覆盖产量的影响^[15], 而在沼液施用对作物产量影响的分析研究方面还鲜见报道。基于此, 本文搜集了 1999~2017 年间沼液施用试验的结果数据, 应用 Meta 分析方法定量研究沼液对作物产量的区域效应、作物种类以及气候条件的影响, 旨在探明中国沼液施用对作物产量变化的影响, 为沼液在中国农业生产中更好地推广应用提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

通过对中国知网、维普、万方数据库、Web of

Science、Science Direct、Taylor & Francis、Wiley 等中英文数据库进行检索, 收集截至 2017 年 12 月 31 日国内外公开发表的有关中国地区沼液对作物产量影响的田间试验研究论文, 共收集相关文献 190 余篇。

1.2 数据选取

为满足 Meta 分析对数据的要求, 基于以下标准确定该研究的样本: 1) 试验区域位于中国范围内, 试验地点明确、年份清楚; 2) 以不施沼液为对照组, 施用沼液为试验组; 3) 文中列有相关处理产量的均值及标准差, 或提供了相关处理各重复的产量; 4) 剔除试验地点、作物类型和试验成果相同的文献; 5) 为便于满足数据的统计分析, 将作物种类确定为目前已有的研究中, 应用最为集中的小麦、玉米、番茄和水稻 4 种经济作物及粮食作物。通过以上筛选标准, 从 190 余篇文献中选取 60 篇可用文献, 获得了 78 组数据。

1.3 数据分类

经筛选获得的 78 组数据, 主要涉及甘肃、贵州、内蒙古、浙江等 16 个省(自治区)。研究调查表明西北地区主要针对小麦、玉米和番茄施用沼液较多, 华东、华北和西南地区主要对小麦、番茄和水稻施用沼液。本文根据获取数据情况将数据根据区域(西北、华北、西南、华东)、作物(小麦、玉米、番茄、水稻)分类, 年降水量 350~500 mm 为半干旱地区, 小于 300 mm 为干旱地区, 大于 500 mm 为湿润地区^[18], 故本文将 500 mm 作为临界降水量对数据进行分类, 研究降水量对沼液施用效果的影响。数据基本信息如表 1 所示。

表 1 不同样本基本信息描述

地区	省或自治区	作物种类	试验时间 年份	年降水量 mm	年均气温 ℃	种植模式
西北	甘肃、新疆、宁夏、陕西	小麦、玉米、番茄	2004~2017	100~400	<10	平作、垄作
华北	内蒙古、河北、山西、北京、天津	小麦、玉米、番茄	1999~2015	400~1000	8~13	平作、垄作
西南	贵州、四川	小麦、玉米、水稻	2003~2015	1000~1400	17~21	平作、垄作
华东	山东、浙江、福建、江苏	小麦、玉米、水稻	2008~2017	550~1600	15~18	平作、垄作

1.4 Meta 分析

Meta 分析中在试验结果为物理尺寸测量时, 且结果不可能为 0 的研究领域中, 两组间的均值比可作为效应量指数即反应比 R ^[19]。利用各研究中施用沼液(处理组)和不施用(对照组)的平均产量、标准差和重复数计算效应量 $\ln R$ ^[20]:

$$\ln R = \ln(Y_e/Y_c) \quad (1)$$

式中: Y_e 为试验组产量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; Y_c 为对照组产量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

为了更直观地反映沼液的增产效应, 将效应量 $\ln R$ 转换为增产率 Z ^[20]:

$$Z = (\exp(\ln R) - 1) \times 100\% \quad (2)$$

数据采用 Metawin2.1^[21], Excel 2010, Origin 9 等软件进行处理, 采用 Meta 分析必须检验多个独立

研究的合并统计量是否具有统计学意义。Z 的 95% 置信区间若全部大于 0, 说明施用沼液对作物产量显著效应为正, 即促进作物增产; 若全部小于 0, 说明施用沼液对作物产量显著效应为负, 即对作物产量没有提高作用; 若包含 0, 则说明施用沼液对作物产量无显著影响^[22]。

2 结果与分析

2.1 数据代表性分析

笔者收集截至 2017 年 12 月 31 日国内外公开发表的有关中国地区沼液对作物产量影响的田间试验研究论文, 发现沼液施用应用研究较为广泛, 涉及 16 个省(自治区), 主要集中在西北、华北、西南、华东地区。西北地区主要有甘肃, 陕西, 宁夏和新疆; 华北地区主要有内蒙古和河北; 西南地区主要有贵州、四川; 华东地区主要有山东、浙江和江苏。从作物种类来看, 沼液施用研究在西北和华北地区以番茄、小麦和玉米为主; 西南地区以小麦和玉米为主; 华东地区以小麦和水稻为主。本研究将代表西北、华北、西南和华东 4 个区域的 78 组数据用于 Meta 分析, 只是说明有关这些区域的研究较多, 且能够符

合 Meta 数据分析的要求, 并不表明在其他地方没有沼液施用的研究存在, 也不表明在其他作物没有施用沼液的研究, 如沈祥军^[23]在东北地区的沈阳进行了沼液番茄营养液配方的研制及应用效果研究, 祁连弟^[24]在内蒙古进行了沼液对温室大棚草莓产量及品质的影响, 但发表的相关论文十分有限, 因此未能统计出沼液施用在该地区的增产效果。

检索文献中包括试验组和对照组的平均值、标准差或标准误及试验样本量, 可以直接进行 Meta 分析^[25]。但笔者对数据的综合分析发现, 大多文献中相关数据分析不全面(如标准差)。采用 Rosen-berg^[26]等提出的方法可以解决此类问题, 先用非权重平均法来计算出各指标的效应量, 效应量的显著性通过 999 次再取样进行检验, 95% 置信区间通过 Metawin2.1 软件所整合的自助法(Bootstrap)非加权数据来产生, 然后通过随机检验法来进行异质性检验结果如表 2 所示。从表中各组数据的 p 值检验结果可以看出, 各组合异质性检验结果均达到显著水平($p < 0.05$); 各组间的 95% 置信区间没有重叠, 说明各组间沼液的效应值具有显著差异; 置信区间全部为正数, 则说明施用沼液增产效益显著。

表 2 我国沼液施用对作物产量的异质性显著水平分析(随机效应模型)

变 量	分类变量	置信区间(95%)		组间异质性 (Q)	p 值
		下限	上限		
全部处理	全部	0.1363	0.1746	100.7115	0.00100
区域	西北	0.1387	0.1820	10.1736	0.02609
	华北	0.1621	0.2467	24.1430	0.04040
	西南	0.1016	0.1674	28.4861	0.02012
	华东	0.0853	0.1614	15.3819	0.01686
	作物	小麦	0.1835	19.7656	0.4088
	玉米	0.2295	24.7680	0.21045	0.04970
	番茄	0.1990	13.5448	0.63259	0.03480
	水稻	0.1544	19.6391	0.41658	0.04520
年降雨量	<500 mm	0.1352	0.1907	47.1323	0.00141
	>500 mm	0.1292	0.1786	76.8490	0.02221
年平均气温	<12℃	0.1490	0.2296	20.4770	0.03323
	>12℃	0.1222	0.1597	87.7616	0.00250

2.2 沼液增产的区域效应

从表 2 和图 1 中可以看出, 在中国西北、华北、西南和华东地区, 施用沼液与不施沼液相比, 小麦、玉米、番茄和水稻增产率的 95% 置信区间均不包含 0, 呈现出显著的增产效应($p < 0.05$)。在这 4 个地区施用沼液作物产量总体增加 16.75%, 95% 的置信区间为 13.07% ~ 22.85%。华北地区沼液增产

率最高为 22.85%, 西北地区次之为 17.41%, 西南和华东地区相对较低分别为 14.11% 和 13.07%。

2.3 沼液增产的作物效应

从图 2 中可以看出, 施用沼液对不同作物产量的影响存在一定的差异。与不施沼液相比, 施用沼液对小麦、玉米、番茄和水稻的产量增加均有显著影响($p < 0.05$), 主要研究作物小麦、玉米、番茄和水稻

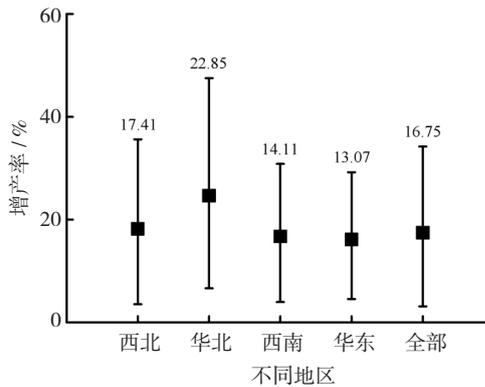


图1 施用沼液对不同地区作物增产的影响

的增产率分别为 15.97%、20.62%、18.02% 和 12.57% ($p < 0.05$), 其中, 玉米的增产率最高, 水稻最低, 但四种作物之间增产率差异不显著。

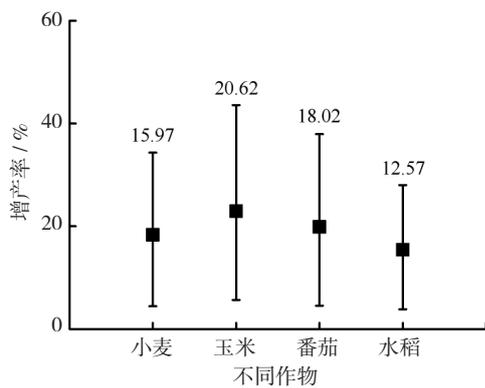


图2 施用沼液对不同作物增产的影响

2.4 不同气候条件下沼液对作物产量的影响

如图3和图4所示, 在不同的年降雨量和年平均气温条件下, 施用沼液对作物产量影响不同。由图3可知, 与不施用沼液相比, 在年降雨量 < 500 mm 和 ≥ 500 mm 的地区, 施用沼液可使作物产量显著增加 17.47%、16.46% ($p < 0.05$), 两者之间差异性不显著。如图4所示, 年平均气温 $< 12^\circ\text{C}$ 和 $\geq 12^\circ\text{C}$ 时, 作物增产率分别为 15.12% 和 20.76%, 两者差异显著 ($p < 0.05$), 表明沼液增产受气温影响明显。

3 讨论

3.1 沼液施用对作物产量的影响因素分析

本文在我国不同栽培区域、作物类型和气候特征等影响因子下, 研究施用沼液对作物产量的影响, 与不施用沼液比, 施用沼液总体增产 16.75% (见图1), 说明沼液对于土壤环境的改善和作物产量的提高均具有积极作用。沼液使作物增产的原因可能主

要包括 3 个方面:

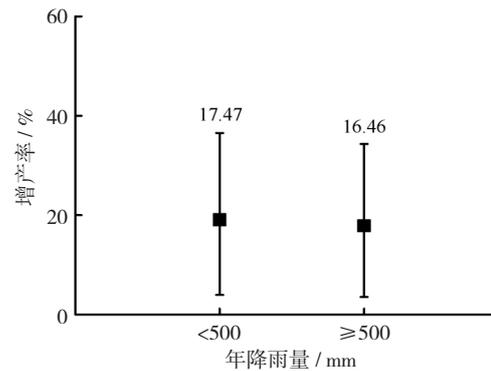


图3 沼液在不同降雨量条件下对作物产量的影响

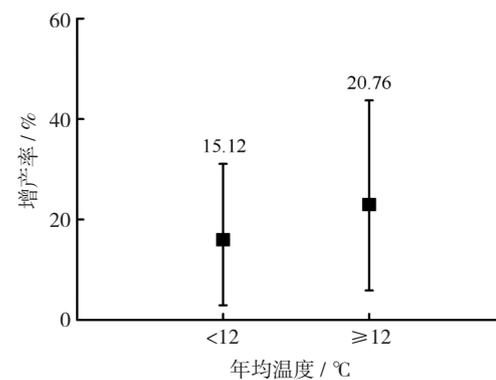


图4 沼液在不同气温条件下对作物产量的影响

(1) 土壤养分、生态环境对植物生长和产量方面具有十分重要的作用^[27], 沼液是畜禽粪便、作物秸秆等各种有机物厌氧发酵的液体残余物, 不仅 N 和 P 等作物必需元素丰富(主要以速效形态存在, 如 NH_4^+), 而且富含微量元素(S, Ca, Mg 等)。氮是植物组织中重要的结构物质, 是酶的主要成分^[28], 而磷在土壤中的含量、有效性及被根系吸收的水平严重制约植物的生长^[29], 微量元素(S, Ca, Mg 等)是植物体内酶或辅酶的组成部分, 具有很强的专一性, 是作物生长发育不可缺少的, 当植物缺乏任何一种微量元素的时候, 生长发育都会受到抑制, 导致减产和品质下降^[30]。

(2) 沼液中不仅含有 N 和 P 等作物必需元素, 而且富含各类氨基酸、赤霉素、糖类和核酸等“生理活性物质”, 这些物质可利用率高, 能迅速被作物吸收利用, 对提高作物产量和养分利用效率都有积极作用^[31]。它们对作物生长发育有调控作用^[32], 施用沼肥可以提高番茄的抗病性, 使植株生长健壮^[33]。

(3) 正确的田间管理方式, 可以提高沼液中营养成分的利用率。近年来, 国内外学者对沼液施用

模式进行了大量的研究,探索出了更科学合理的沼液施用模式(根区局部施用^[34]、滴灌^[35]等)及沼液用量,使得沼液施用对作物增产效益有所提升,沼液增产效益可能受到沼液施用技术发展的影响。

本研究定量化地综合现有 78 组试验数据,系统分析综合效应及其影响因素发现施用沼液提高了作物的产量,进一步说明了近 20 年来施用沼液对作物产量提高的重要性。

3.2 沼液增产影响因素分析

3.2.1 地域

因难以直接进行大区域、长时间研究施用沼液对作物产量的影响,前人多采用田间小区试验,本研究从大区域尺度出发,利用 Meta 分析方法综合前人田间小区试验结果,表明施用沼液能使作物产量提高 16.75%,以华北地区增产最明显为 22.85%,华北地区次之为 17.41%,西南和华东地区增产略低为 14.11%,13.07%。季节性干旱和水资源短缺是北方地区作物生产的重要威胁^[36]。干旱、半干旱及半湿润偏旱地区占整个北方地区面积的 89.5%^[37],西北、华北地区年均降雨量分别为 100~400 mm,400~1000 mm(见表 1),多年平均降雨量不超过 442 mm^[36],均为灌溉农业区。沼液以液体有机肥的形式施用,可以有效增加土壤水分,弥补了水分不足对作物的不良影响^[38];同时,沼液的连续施用能够改善土壤的理化性质,不仅补充土壤的营养还可以增加种植层深度,有利于土壤团粒结构的形成,有一定的蓄水保墒作用^[39],所以,沼液的施用,在西北、华北地区提高作物产量的同时还起到了节水、节肥和改善土壤的作用。沼液中含有大量易被植物吸收的营养元素及有机质和腐殖质,能够改善土壤理化性质,提高土壤肥力,促使了农业用地的可持续利用。西南和华东地区水资源丰富、年均气温较高(见表 1),作物生长环境适宜,这可能是西南和华东地区沼液增产效应相比华北和西北地区较低的原因。

3.2.2 作物

沼液中含有丰富的氮、磷、钾及多种活性成分,主要有氨基酸、蛋白质及腐殖质等^[40],能够有效改善小麦、玉米、番茄和水稻生长的土壤环境,促进根系和植株的生长。徐延熙^[41]等对小麦的沼液施用试验表明,与对照相比,施用沼液可以显著促进小麦生长,株高提高 3.2 cm,叶色较对照显绿,叶长提高 0.7 cm,每株平均分蘖数和次生根数分别提高 0.4

个和 0.6 条。祁连弟^[42]等对玉米的沼液施用试验表明,沼液追肥,可促进玉米株高、穗长、穗粗、穗行数、行粒数等的增长,降低秃顶长度,明显提高玉米百粒重。贾亮亮^[43]等在番茄施用沼液的试验中表明施用沼液可以促进番茄植株的生长,提高番茄的硬度、单果质量、产量、维生素 C 质量分数、可溶性糖质量分数和糖酸比,且优于常规施肥,有效改善番茄品质,提高经济效益。董园园^[44]等在对水稻施用沼液的试验中表明,与不施沼液及常规施肥相比,沼液处理水稻前期返青分蘖稍迟,但中后期生长稳健,长势整齐,穗粒数和结实率提高,从而水稻产量增加。尽管沼液对小麦、玉米、番茄和水稻的影响程度有所不同,但基于以上原因,沼液对小麦、玉米、番茄和水稻增产效应差异并不显著。虽然增产比例不同,但对小麦、玉米、番茄和水稻的产量增加均有显著影响(见图 2),进一步验证了各位学者在研究沼液对作物产量影响中所获结论的正确性,同时也说明沼液的施用对作物产量的提高,主要是基于对作物生理生态指标的改善,并不会受到作物种类的影响。

3.2.3 气候特征

降雨和气温等气候资源是农业生产的物质基础和根本保障^[45]。进一步地,本文的研究结果显示,施用沼液在年降雨量 < 500 mm 时作物增产 17.47%,年降雨量 ≥ 500 mm 时作物增产 16.46%(见图 4),增产效应无显著差异。表明沼液的增产效应受降雨影响很小,造成这种结果的可能原因是,本文利用 Meta 分析综合已发表的文献中,北方试验地区降雨量少(见表 1),土壤贫瘠,而沼液中含有 90% 以上的水分,丰富的营养物质,沼液的施用弥补了降雨量的不足和土壤营养的匮乏,而且年降雨量 ≥ 500 mm 比年降雨量 < 500 mm 更易产生土壤水蚀^[46],土壤养分易随水流失,致使产量有所下降。本研究中,沼液在年平均气温 ≥ 12℃ 时作物增产 20.76%,比在年平均气温 < 12℃ 时提高了 5.64%(见图 4)。Garcia A G Y^[47]等研究表明大气温度影响作物生长速率,植物光合速率和土壤温度的变化,林兴军^[48]等研究显示不同深度的土壤温度变化与大气温度变化呈正相关,土壤温度适宜的升高有利于作物的生长。张进^[49]也证明了沼液的施用能提高土壤保持温度的能力,有利于作物的生长。进一步说明了施用沼液随着年平均气温的升高,作物产量也增加。

3.3 本研究的局限性

本研究应用 Meta 分析对施用沼液的作物增产效应及影响因素进行了初步的定量分析和整合,一定程度上反映了施用沼液对作物产量的影响机制。但该方法也存在一定的局限性。Meta 分析在文献筛选时要求试验原文提供试验处理的标准差,或根据文中已有数据可计算标准差。现有的已发表文献或数据量不足,或数据描述不详实,或无法获得标准差。另外,施用沼液对作物产量的提升效应受多种因素的影响,这些因素之间可能存在多种交互作用。本研究只是针对数据较多的因素进行了分析,难以纳入所有研究,如沼液的施用频率、施用量等也是重要的影响因素,但由于数据较少无法分析,本研究并未涉及。

4 结论

本研究基于 1999~2017 年公开发表的数据,应用 Meta 方法定量分析了施用沼液对作物的增产效益,结果表明,施用沼液提高作物产量在西北和华北较为明显,西南和华东地区略低。施用沼液对小麦、玉米、番茄和水稻的产量增加均显著增加 ($p < 0.05$),小麦、玉米、番茄和水稻分别增产 15.97%, 20.62%, 18.02% 和 12.57%,说明施用沼液增产不受作物种类的影响。

施用沼液在年降雨量 < 500 mm 和年降雨量 ≥ 500 mm 时均能显著提高作物产量,分别是 17.47%, 16.46%; 较年平均气温 $< 12^\circ\text{C}$ (15.12%), 年平均气温 $\geq 12^\circ\text{C}$ (20.76%) 作物增产更为显著,表明施用沼液增产受降水量影响小于受气温影响,且在中国年平均气温较高的农业区施用沼液有利于作物产量的提高。

参考文献:

- [1] 邓良伟. 沼气工程 [M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [2] Liu W K, Yang Q C, Du L F. Soilless cultivation for high-quality vegetables with biogas manure in China: Feasibility and benefit analysis [J]. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 2011, (09): 300–307.
- [3] 陈豫, 杨改河, 冯永忠, 等. 沼气生态农业模式综合评价 [J]. *农业工程学报*, 2010, 26(02): 274–279.
- [4] 刘金, 李胜利, 夏亚真, 等. 沼液施用方式和浓度对小白菜生长和品质的影响 [J]. *福建农业大学学报(自然科学版)*, 2014, 43(01): 80–84.
- [5] 陶秀萍, 董红敏, 尚斌, 等. 新鲜猪沼液和牛沼液对农作物病原真菌抑制作用的比较研究 [J]. *农业环境保护*, 2011, 30(07): 1443–1449.
- [6] 杨琳昱. 浅议有机肥在化肥用量零增长中的作用及措施 [J]. *农业与技术*, 2016, 36(21): 27–28.
- [7] Du ZhengJie, Chen X, Qi X, et al. The effects of biochar and hogger biogas slurry on fluvo-aquic soil physical and hydraulic properties: a field study of four consecutive wheat-maize rotations [J]. *Journal of Soils & Sediments*, 2016, 16(8): 2050–2058.
- [8] Abubaker J, Risberg K, Pell M. Biogas residues as fertilizers—Effects on wheat growth and soil microbial activities [J]. *Applied Energy*, 2012, 99: 126–134.
- [9] 黄贤贵, 林代炎, 宋永康, 等. 沼液灌溉对玉米产量影响的研究 [J]. *中国沼气*, 2015, 33(6): 94–95.
- [10] 刘勇, 胡俊林, 刘善军, 等. 施用沼液对柑桔生长与结果的影响 [J]. *中国沼气*, 1999, 17(3): 33–34.
- [11] Radford, David E, Westreich, et al. Biogas in organic agriculture: Effects on yields, nutrient uptake and environmental parameters of the cropping system [J]. *Journal of Algebra*, 2006, 301(1): 1–34.
- [12] 鲁天文, 王勤礼, 许耀照, 等. 沼液追肥对制种玉米产量与土壤化学性质的影响 [J]. *中国沼气*, 2015, 33(2): 81–83.
- [13] Michael Borenstein, Larry V Hedges, Julian P T Higgins, et al. *Introduction to Meta-Analysis* [M]. Cornwall: A John Wiley and Sons Ltd Publication, 2009: 62–79.
- [14] Jessica Gurevitch, Peter S Curtis, Michael H Jones. Meta-analysis in ecology [J]. *Advances in Ecological Research*, 2001, 32(1): 199–247.
- [15] 赵爱琴, 魏秀菊, 朱明. 基于 Meta-analysis 的中国马铃薯地膜覆盖产量效应分析 [J]. *农业工程学报*, 2015(24): 1–7.
- [16] Plantinga N L, De A S, Oostdijk E A, et al. Selective Digestive and Oropharyngeal Decontamination in medical and surgical ICU-patients; an individual patient data meta-analysis [J]. *Clin Microbiol Infect*, 2017: 1–9.
- [17] 郑侃, 何进, 李洪文, 等. 中国北方地区深松对小麦玉米产量影响的 Meta 分析 [J]. *农业工程学报*, 2015, 31(22): 7–15.
- [18] 田康, 赵永存, 邢喆, 等. 中国保护性耕作农田土壤有机碳变化速率研究—基于长期试验点的 Meta 分析 [J]. *土壤学报*, 2013, 50(3): 433–440.
- [19] Larry V Hedges, Jessica Gurevitch, Peter S Curtis. The Meta-analysis of response ratios in experimental ecology [J]. *Ecology*, 2010, 80(4): 1150–1156.
- [20] Hedges L V, Gurevitch J, Curtis P S. The meta-analysis of response ratios in experimental ecology [J]. *Ecology*,

- 1999, 80(4): 1150 – 1156.
- [21] Rosenberg M S, Adams D C, Gurevitch J. Metawin: statistical software for meta-analysis: Version 2.0 [M]. Sunderland: Sinauer Associates Inc, 2000.
- [22] Morgan P B, Ainsworth E A, Long S P. How does elevated ozone impact soybean? A meta-analysis of photosynthesis, growth and yield [J]. *Plant Cell and Environment*, 2003, 26(8): 1317 – 1328.
- [23] 沈祥军, 孙周平, 张露, 等. 沼液番茄营养液配方的研制及应用效果研究 [J]. *沈阳农业大学学报*, 2013, 44(5): 599 – 603.
- [24] 祁连弟, 苗林. 沼肥对温室大棚草莓产量及品质的影响 [J]. *河南农业科学*, 2014, 43(3): 121 – 123.
- [25] Gurevitch J, Hedges L V. Statistical issues in ecological meta-analyses [J]. *Ecology*, 1999, 80(4): 1142 – 1149.
- [26] Rosenberg, Michael S, Adams, Dean C, Gurevitch, Jessica. Metawin: Statistical software for meta-analysis with re-sampling tests [J]. *Quarterly Review of Biology*, 2000, 73(1): 575.
- [27] 徐一兰, 唐海明, 程爱武, 等. 长期不同施肥模式对双季稻田土壤养分及水稻产量的影响 [J]. *华北农学报*, 2017, 32(06): 192 – 197.
- [28] 赵平, 孙谷畴, 彭少麟. 植物氮素营养的生理生态学研究 [J]. *生态科学*, 1998, 2: 37 – 42.
- [29] 王琪, 徐程扬. 氮磷对植物光合作用及碳分配的影响 [J]. *山东林业科技*, 2005, 5: 40.
- [30] 刘桂兰. 微量元素对植物生长发育的作用 [J]. *现代农村科技*, 2009, 3: 55.
- [31] Sieling K, Herrmann A, Wienforth B, et al. Biogas cropping systems: Short term response of yield performance and N use efficiency to biogas residue application [J]. *European Journal of Agronomy*, 2013, 47: 44 – 54.
- [32] 魏荔, 张静, 张怀文, 等. 施用沼肥对保护地番茄果实品质及产量的影响 [J]. *中国农技推广*, 2011, 27(9): 18.
- [33] 邵志鹏. 沼液对葡萄生长和产量及抗病性的影响 [J]. *黑龙江农业科学*, 2012, 10: 47 – 48.
- [34] 常健. 沼液在农业种植中的综合利用 [J]. *农业科技与装备*, 2017, 3: 62 – 63.
- [35] 王新燕, 刘永刚, 石强, 等. 沼液滴灌对加工番茄品质和产量的影响 [J]. *中国沼气*, 2013, 31(6): 59 – 62.
- [36] 高继翔, 杨晓光, 董朝阳, 等. 气候变化背景下中国北方干湿区降水资源变化特征分析 [J]. *农业工程学报*, 2015, 31(12): 99 – 110.
- [37] 农业部农业机械化管理局. 中国保护性耕作 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2008.
- [38] 巩明明. 沼液对旱作区土壤养分和玉米产量品质影响试验研究 [J]. *中国沼气*, 2017, 35(5): 62 – 64.
- [39] 王毅琪, 韩文彪, 赵玉柱, 等. 沼液对土壤理化性质的影响 [J]. *安徽农业科学*, 2016, 1: 193 – 195.
- [40] 宋成芳, 单胜道, 张妙仙, 等. 畜禽养殖废弃物沼液的浓缩及其成分 [J]. *农业工程学报*, 2011, 27(12): 256 – 259.
- [41] 徐延熙, 李连法, 袁长波, 等. 施用沼肥对小麦生长发育及产量的影响 [J]. *山东农业科学*, 2012, 44(4): 73 – 74.
- [42] 祁连弟. 沼肥对玉米生长性状及产量影响的研究 [J]. *中国沼气*, 2014, 32(2): 52 – 55.
- [43] 贾亮亮, 赵京奇, 杨晨璐, 等. 追施沼肥对番茄生长、产量和品质的影响 [J]. *西北农业学报*, 2017, 26(6): 897 – 905.
- [44] 董园园, 赖清云. 不同沼肥处理对水稻产量及土壤性状的影响初探 [J]. *农业科技通讯*, 2015, 1: 36 – 39.
- [45] 李昊, 李世平, 南灵, 等. 中国棉花地膜覆盖产量效应的 Meta 分析 [J]. *农业机械学报*, 2017, 48(7): 228 – 235.
- [46] 郑侃, 何进, 李洪文, 等. 中国北方地区深松对小麦玉米产量影响的 Meta 分析 [J]. *农业工程学报*, 2015, 31(22): 7 – 15.
- [47] Garcia A G Y, Guerra L C, Hoogenboom G. Impact of generated solar radiation on simulated crop growth and yield [J]. *Ecological Modelling*, 2008, 210(3): 312 – 326.
- [48] 林兴军. 不同水肥对日光温室番茄品质和抗氧化系统及土壤环境的影响 [D]. 北京: 中国科学院研究生院 (教育部水土保持与生态环境研究中心), 2011.
- [49] 张进, 张妙仙, 单胜道, 等. 沼液对水稻生长产量及其重金属含量的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(10): 2005 – 2009.