

doi: 10.11838/sfsc.20180402

沼渣沼液农用安全风险

涂 成, 闫 湘*, 李秀英, 王曼如

(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘 要: 随着沼渣沼液的广泛使用, 其农用安全风险应引起足够重视。文章主要概述了国内外沼渣沼液农用过程中存在的问题: 沼液沼渣中营养成分不稳定, 无法保证其产品质量, 其大量元素、有机质含量均无法达到肥料相关标准要求; 重金属超标, 尤其是 As 超标, 其最高含量达 52.5 mg/kg; Cu、Zn 含量高, 危害农作物及农田安全, 国内有机肥料标准并未对其限量; 残留的抗生素导致抗性基因的污染等。此外, 沼渣沼液中激素含量及致病源微生物少有探索, 亟需进一步研究。最后, 对控制沼渣沼液农用安全风险提出了一些建议, 并对以后的研究方向进行了展望。

关键词: 沼渣; 沼液; 农用; 安全风险

中图分类号: S141.9; X833

文献标识码: A

文章编号: 1673-6257 (2018) 04-0008-07

在国家及各级政府的关注扶持下, 我国的沼气发展迅速, 由沼气工程产生的沼渣沼液资源越来越丰富。据报道, 我国畜禽养殖场沼气工程年生产沼肥约 3.85×10^8 t。沼液含水溶性的有机质、腐植酸、营养元素及氨基酸、维生素、酶等生物活性物质, 可被作物吸收利用。沼渣有机质和养分含量较高, 是营养元素种类齐全、速效缓释兼备的优质有机肥料^[1]。因此, 肥用是沼渣沼液目前最主要的利用方式^[2]。

现代规模化养殖为加快畜禽生长速度、提高饲料利用率和预防疾病, 常在饲料中添加铜、锌、铁、砷等元素和激素类、抗生素等物质, 这些物质过量则形成危害, 它们大部分排出畜禽体外, 导致畜禽粪便中存在重金属、兽药、抗生素等残留。将含有有害成分的沼渣沼液直接还田存在一定的安全隐患, 如土壤中重金属的富集、抗生素的增加、土壤的次生盐渍化与地下水污染等^[3]。有害物质经动植物吸收进入食物链以及在农业环境中积累将导致农业产品的污染和环境风险。国外对沼肥的安全风险有一些研究^[4-5], 而国内主要针对沼渣沼液养分的农用效果进行研究^[6-14], 对生态环境风险研究方面较少。董志新等^[1]研究不同原料沼气的重

金属含量, 发现部分沼渣沼液 As 超标。施用重金属超标的沼肥将影响农产品质量安全。研究发现, 施用沼肥后所有供试作物 Pb 含量几乎全部超出 GB 2762-2005 (食品中污染物限量) 规定的限量值^[15]。有研究对太湖地区施用沼肥后的农产品进行健康风险评估, 表明谷类和蔬菜中的 Pb、As、Cd 均超出 FAO/WHO 的限定^[16]。沼肥重金属超标同时也会导致土壤重金属富集。张利等^[17]发现沼肥农田施用会导致土壤重金属 Pb、As 和 Hg 含量的升高。段然等^[18]则对连续施用沼肥 6 年的土壤进行测定, 发现沼肥与对应土壤中重金属、兽药残留量具有相关性 (相关系数为 0.910), 长期施用沼肥存在安全风险。潜在生态风险指数 RI 分析结果表明, 云南、河南和湖北的沼液 RI 介于 130~260 之间, 属于中等生态危害, 存在一定的生态风险^[19]。此外, 我国畜禽粪便中四环素类抗生素残留量高于发达国家, 四环素和土霉素的残留量高于金霉素^[20]。通过检测猪粪和鸡粪中抗生素的含量, 发现四环素类、喹诺酮类和磺胺二甲嘧啶抗生素有不同程度的检出^[21]。张树清等^[22]对我国 7 个省、市、自治区规模化养殖场猪粪和鸡粪中残留的四环素类抗生素做了分析研究, 结果表明 3 种抗生素含量平均值为 12.20~20.94 mg/kg。畜禽粪便中抗生素含量高将导致沼液沼渣中的抗生素残留。卫丹等^[23]对嘉兴市规模化养猪场沼液水质调查, 检出 10 种不同抗生素, 其浓度范围为 10.1~1 090 µg/L。环境中存在的抗生素可能会使一些微生物产生抗性基

收稿日期: 2017-10-23; 最后修订日期: 2018-01-03

作者简介: 涂成 (1990-), 女, 湖北天门人, 硕士, 研究方向为生态系统过程与管理。E-mail: tucheng129@163.com。

通讯作者: 闫湘, E-mail: yanxiang@caas.cn。

因，导致某些致病菌对药物产生抗性，威胁人类的安全。沼渣沼液中的激素和微生物的研究较少，须进一步研究。目前我国对沼肥生产和使用管理还很薄弱，对其含有的有毒有害物质尚未制定限量标准，无法保证沼渣沼液的安全农用。因此，沼渣沼液的安全利用应深入研究。本文对沼渣沼液的农用水安全风险问题进行了分析，总结了其农田利用存在的问题，为我国沼渣沼液农田利用提供依据。

1 沼渣沼液成分分析

经厌氧消化后的沼渣沼液是一种较为复杂的有机复合体，并且根据原料的不同其成分和性状差异较大。针对沼渣沼液，目前在成分分析方面的工作开展的很少。据测定，沼渣沼液含有机质30% ~ 50%，腐植酸 10% ~ 25%，氮素 0.8% ~ 1.5%，磷素 0.4% ~ 0.6%，钾素 0.6% ~ 1.2%^[24]。沼渣沼液中的养分含量不稳定，波动范围较大。

沼渣沼液的有害物质主要为重金属、抗生素、激素类及微生物等。为了防病促长，规模养殖场普遍添加含 Zn、Cu 等重金属的添加剂，违规过量添加 As（促皮毛光滑）、Cr（替代瘦肉精）等有害重金属，导致沼液中有毒有害物质含量超标。钟攀等^[24]研究发现，在重庆地区采集的所有沼液中，As 的总超标率达到 60%，超标现象严重，是沼液的主要污染重金属，此外还含有 Cr、Hg、Cd 等重金属。养殖过程中抗生素和激素的盲目滥用，也将导致沼渣沼液含量增加。研究结果表明，以母体或代谢物的形式随尿或粪便排出体外的量约占抗生素用药量的 40% ~ 90%^[25]。此外，沼渣沼液中还含有一些致病菌。研究表明，畜禽粪便废弃物中含有 150 多种人畜共患病的潜在致病源，一旦进入适宜的环境，便会大量生长繁殖，造成疾病的爆发和流行^[26]。农村沼气池平均发酵温度在 30 ℃ 左右，高温发酵也只有 58 ~ 62 ℃，无法彻底杀灭病原微生物和寄生虫卵。

2 沼渣沼液肥用过程中存在的问题

目前，沼渣沼液主要的利用方式是农田作肥用，较为成熟的肥用模式有以下几种：一是浇灌施用；二是作为叶面肥施用；三是沼渣沼液分离后将沼渣制成有机肥料施用。沼液在农业上的应用主要包括沼液浸种、沼液作叶面肥喷施、用作生物农药等^[27]。沼渣中的有机质成分可以改善农田土壤结构，从而改良土壤^[14]。沼渣沼液肥用方面的报道多集中在其应用效果方面，尤其是对作物产量及品质方面的研究较多，另外对于土壤肥力及作物抗病效果也有些报道，但少有沼渣沼液安全性方面的研究。

2.1 营养成分不稳定

由于发酵原料及工艺的不同，导致发酵后产生的沼渣沼液中营养成分的不稳定，将直接影响其农田肥用效果。研究表明，沼液中的营养元素基本上是以速效养分形式存在的，包括氮（0.03% ~ 0.08%）、磷（0.02% ~ 0.07%）、钾（0.05% ~ 1.40%）等大量营养元素和钙、铜、铁、锌、锰等中、微量营养元素，还含有 17 种氨基酸和活性酶^[28]。沼渣原料较多，即使是单一原料，其成分变化范围也较大，若使用混合原料，将会导致其营养成分更加不稳定^[29]。沼液大量元素养分远远低于 NY 1107 - 2010 的要求，有机质含量较低也无法达到 NY 525 - 2012 要求（表 1）。沼渣有机质含量较高，但大量元素总量较低，难以满足 NY 525 - 2012 要求（表 2）。

原料不同的沼气池产出的沼渣沼液中的营养成分有所差异，并且某些营养元素的差异较大，因此在肥用时须掌握沼渣沼液的养分含量。研究表明，全施沼肥的处理可能由于沼肥的肥效不高而不能完全满足作物的需肥要求而影响产量提高，沼肥须与化肥配合施用才能提高产量^[15]。沼肥作为肥料登记时须考虑其产品的不稳定性，如何保证沼肥的产品质量须进一步研究。

表 1 不同原料沼液的理化特性

原料	有机质 (g/L)	全氮 (g/L)	全磷 (g/L)	全钾 (g/L)	文献来源
鸡粪	—	5.71	0.12	1.75	丁京涛等 ^[30]
猪粪	—	0.17 ~ 0.75	0.03 ~ 0.19	0.26 ~ 1.11	钟攀等 ^[24]
猪场废水	—	1.04	0.06	0.32	李元高等 ^[31]
猪粪	—	4.20	0.04	0.35	沈其林等 ^[32]
鸡粪	1.29	2.90	0.31	0.31	董志新等 ^[1]
猪粪	1.12	1.45	0.26	0.59	董志新等 ^[1]
秸秆	2.72	0.29	0.24	2.93	董志新等 ^[1]

表 2 不同原料沼渣的理化特性

原料	有机质 (%)	全氮 (%)	全磷 (%)	全钾 (%)	文献来源
牛粪秸秆	49.53 (a)	2.11	1.92	1.85	张颖等 ^[33]
猪粪	47.40 (a)	2.62	1.99	0.48	董志新等 ^[1]
秸秆	60.30 (a)	1.94	0.06	0.23	董志新等 ^[1]
猪粪	41.80 (b)	2.70	1.93	0.62	于晓东 ^[34]
鸭粪	53.37 (b)	3.41	1.36	0.49	于晓东 ^[34]
牛粪	55.46 (b)	1.62	0.77	1.38	于晓东 ^[34]

注：a 表示有机质测定方法为常规分析方法（鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京：中国农业出版社，2000.）；b 表示有机质测定方法按 NY 525 - 2012 标准。

2.2 重金属与微量元素

养殖过程中存在重金属过量添加的现象，造成畜禽粪便中重金属含量超标。饲料中 Cu 和 Zn 添加量最多，而 As、Cr 次之^[35]。研究表明，参照德国腐熟堆肥中部分重金属限量标准，我国有机物料一些重金属均有不同程度的超标^[36]。微量元素和重金属在沼气发酵的过程中无法分解且发酵的过程可能影响其价位导致其活性增强。如表 3，聂莹等^[37]通过研究猪粪沼液，发现各种重金属的含量低于国家《城镇垃圾农用控制标准》的标准限值。沈其林等^[32]研究发现猪粪沼液没有超出农田灌溉水质标准，不会对环境造成污染。也有一些研究表明，沼渣沼液重金属含量超标。钟攀等^[24]研究重庆地区的沼气肥，与农田灌溉水质标准（GB 5084 - 92）比较发现除 Pb 外沼液重金属均存在不同超标现象，

并以 As 较严重，超标率为 60%；而沼渣中的 As 含量最高为 11.06 mg/kg，未超出 NY 525 - 2012 中 As 的限量要求（15 mg/kg）。董志新^[1]研究猪粪沼渣重金属含量，发现猪粪 As 含量达到 21.6 mg/kg，超出 NY 525 - 2012 要求。长期施用含重金属超标的沼渣沼液导致土壤中重金属的富集，同时影响农产品质量安全。李元高等^[31]研究养猪废水经厌氧膜生物反应器发酵后产生的沼液和沼渣，表明其重金属均低于 NY 1110 - 2010 和 NY 525 - 2012，表明经过处理后的沼渣沼液可能会达到标准要求。Bo 等^[38]通过对土壤 - 植物系统的重金属进行分析，表明沼肥中 As 和 Cd 健康风险较大。就未处理的沼渣沼液而言，与 NY 525 - 2012 比较，可以得出 As 含量超标的可能性较大。若长期大量施用 As 含量较高的沼渣，将导致土壤中 As 的积累和污染。

表 3 不同原料沼渣沼液的重金属含量 (mg/kg)

原料	Hg	As	Cd	Pb	Cr	Cu	Zn	文献来源
沼液	猪粪	<0.01	<0.05	<0.03	<0.06	<0.07	—	聂莹等 ^[37]
	猪粪	0.06	31.00	0.10	0.02	2.50	140	沈其林等 ^[32]
	猪粪	—	0.176	—	—	0.10	2.13	钟攀等 ^[24]
	猪粪	—	8.21	—	4.59	20.33	124	钟攀等 ^[24]
沼渣	猪粪	0.12	52.5	0.52	9.87	19.3	1 270	董志新等 ^[1]
	秸秆	0.11	5.53	0.24	12.8	14.2	26	董志新等 ^[1]
	猪粪	—	—	—	—	853	2 628	丁京涛等 ^[30]
	猪粪	—	3.94	—	—	15	1 016	朱泉雯 ^[39]

目前，沼渣沼液污染物的研究主要以 Cu 和 Zn 为主^[29]。《畜禽养殖业水污染物排放标准》（征求意见稿）及《农用污泥中污染物控制标准》（GB 4284 - 84）均规定了 Cu、Zn 限量。但农业部发布的有机肥料标准（NY 525 - 2012）仅对 Hg、As、Cd、Pb、Cr 有限量要求，对 Cu、Zn 并未限

量。若沼渣沼液中 Cu、Zn 含量过高，则会威胁农田及农产品安全。猪粪沼渣中 Cu 和 Zn 的含量较高，分别为 853 和 2 628 mg/kg，远远超过了《德国腐熟堆肥标准》中对重金属 Zn、Cu 的限定^[30]。参照《农田灌溉水质标准》（GB 5084 - 2005）关于重金属的规定，沼液中所有的元素均超标，其中

Cu、Zn 超标率分别为 237%、1 624.5%^[39]。研究发现,猪粪沼渣 Cu、Zn 含量高达 780、2 060 mg/kg,猪粪干沼渣中 Cu、Zn 含量则达到 1 016、2 628 mg/kg^[29],干沼渣 Cu、Zn 含量高于沼渣。此外,Cu、Zn 含量也与取样时间有关。研究表明,以农业和食品废弃物为原料的沼肥中的 Cu、Zn 含量随着取样时间波动范围为 23 ~ 93、132 ~ 422 mg/kg^[40]。有机肥中的 Cu、Zn 含量随原料、时间等波动,若没有相应的限量,则难以把控。目前,农业部水溶肥料标准中规定单一微量元素含量高于 0.05% 或 0.5 g/L 时应计入技术指标,以上数据表明沼液沼渣均高于该标准。但沼肥不同于水溶肥料,其组成复杂,还含有很多微生物,Cu、Zn 的存在还可能影响细菌的耐药性^[4]。因此,沼液沼渣农用时也应重视 Cu、Zn 含量高的问题。

2.3 抗生素含量及其检测方法

抗生素被机体吸收的较少,大部分随粪尿排出体外。抗生素对土壤的微生物具有一定的影响,另外残留在土壤的抗生素也对植物生长有影响,并且能通过植物根系进入植物体内,进而通过食物链危及人类安全。粪便中的抗生素主要来源于饲料添加剂,其次还有注射用抗生素,用于治疗猪的疾病。养殖场通常使用四环素类、磺胺类、喹诺酮类和大环内酯类,其中以四环素类、磺胺类为主^[35]。目前有关畜禽粪便中抗生素的研究较多,而沼渣沼液中抗生素研究较少^[20-22]。当原料中四环素浓度为 900 mg/L 时,沼液中的四环素残留量为 14.52 mg/L,而沼渣中的残留量为 636.7 mg/kg^[41]。研究发现,猪场废水中磺胺、磺胺甲二唑含量分别为 3.1、3.2 μg/L,且在厌氧发酵中不会降解^[42]。卫丹等^[23]研究表明,猪场沼液 10 种抗生素中最高达 1 090 μg/L,远高于欧盟的水环境抗生素阈值(10 ng/L)。研究表明,施用猪粪后水稻土中抗生素抗性基因种类显著增加($P < 0.05$)^[43]。目前,关于土壤和水环境中抗生素的研究较多,而沼渣沼液中抗生素研究较少。在重金属污染的环境中,细菌不仅具备重金属抗性并且具备多种抗生素抗性,抗生素抗性基因的污染水平也随之升高。研究发现,抗生素抗性基因与某些重金属如 Cu、Zn、Hg 呈显著正相关^[44],表明重金属与抗生素的复合污染会增加抗性基因的丰度。重金属和抗生素对细菌产生抗生素和重金属抗性的协同、交叉等机制,可能会加剧抗生素抗性基因的污染。

目前,抗生素的检测方法有微生物法、酶联免疫吸附法、液相色谱法、气相色谱法等^[45]。丁佳丽等^[46]优化了固相萃取与高效液相色谱串联质谱联用的分析条件,分析了废水和污泥中常见的 11 种兽用抗生素,回收率达 73.0% ~ 105.2%,相对标准偏差为 3.1% ~ 10.2%。国家质量监督检验检疫总局、国家标准化委员会批准发布 GB/T 32951-2016《有机肥料中土霉素、四环素、金霉素与强力霉素的含量测定高效液相色谱法》,为在有机肥料产品质量指标中设定抗生素残留限值提供技术支撑。

2.4 激素和微生物风险

目前,国内从未批准过激素类药物用于促进动物生长,已批准的激素类药物主要用于治疗种畜繁殖和产科疾病,这与欧盟的规定是一致的。沼渣沼液中关于激素的研究较少。有研究通过液质联用、核磁共振等技术,首次定量分析了猪粪发酵沼液中的植物激素和喹啉类成分^[47]。有研究估算了东北三省畜禽养殖类固醇激素排放量,表明激素含量可能对当地水体有潜在污染风险^[48]。借鉴英、美等发达国家的相关研究,通过估算北京、天津、重庆及上海畜禽养殖业类固醇雌激素和雄激素的年排放量,表明其有可能对当地地表水系统产生生态危害^[49]。激素的检测方法主要有气相色谱法(GC)、液相色谱法(LC)、液-质联用法(LC-MS)、毛细管电泳检测(CE)和酶联免疫法(ELISA)等^[50]。现阶段对环境激素的检测方法有很多,都存在一定的不足,且主要以价格昂贵、步骤复杂的仪器分析方法为主,而这些方法均不适宜大量全面推广。因此,对于像环境激素这些痕量物质的检测方法,需要进一步发展和推广。此外,有机肥标准并未对激素类物质进行限定,这将导致其安全风险被忽视。

发酵过程所涉及的微生物种类复杂,各种微生物数量也在不断变化。人畜粪便中含有大量的致病微生物和寄生虫,主要有伤寒杆菌、副伤寒杆菌、痢疾杆菌、脊髓灰质炎病毒、大肠杆菌、血吸虫卵、钩虫卵、蛔虫卵等^[51]。研究表明,沼液中有些拮抗微生物有较好的抑菌防病效果^[52-53]。沼气发酵处理可以显著降低粪大肠菌群含量,平均可减少 92.9%,但厌氧消化后的沼液中仍含有较高浓度的粪大肠菌群,不能达到无害化要求^[54]。也有研究表明,沼液中含有虫卵,沼渣则含有螨卵 102 ~ 538 个/mL,户用沼气池沼渣中寄生虫卵偏多,含

蛔虫卵 68~2 700 个/g, 并含有鞭虫和活卵^[55]。有研究发现沼液中微生物含量为 $10^2 \sim 10^7$ CFU/mL, 大肠杆菌是普遍存在的^[40]。Bonetta 等^[56]发现, 沼肥中大肠杆菌含量远超出意大利肥料标准 ($<1\ 000$ CFU/g) 及欧盟相关标准, 致病菌沙门氏菌属在所有的样品中均有不同程度的检出。有些沼气池因管理不善, 会造成沼肥中仍有活卵, 不符合农用卫生标准。德国对于沼肥的安全利用有严格的规定, 如果沼肥要做饲料利用, 必须在 90 °C 的高温下处理 1 h; 如果要达到处理疯牛病菌 (BSE) 的效果, 则需要更高的温度、更高的压力和更长的时间^[57]。沼渣沼液要想作为一种肥料安全使用, 必须高温杀灭寄生虫卵和各种病原菌, 杀死危害作物的各种病虫, 并且抑制有害微生物的活性。此外, 抗生素的存在使沼肥中微生物的抗性增加, 诱导产生了具有忍耐性的抗性菌株, 农田利用必然会增加环境抗性基因的丰度。环境致病菌耐药性的增加和扩散, 将会对人类的公共健康构成潜在威胁。

目前, 沼渣沼液中激素含量和致病微生物研究较少, 其对土壤微生物及植物的具体影响尚不清楚。因此, 这方面亟需进一步研究。

3 建议与展望

沼渣沼液在提高农产品产量及品质、改善土壤理化性状等方面有显著效果, 但其生态环境安全风险不容忽视。针对沼渣沼液存在的问题, 提出以下解决方案。

(1) 沼渣沼液营养物质成份含量难以进行质量控制, 施用前应进行养分分析, 与化肥配合施用, 以满足作物生长需求。

(2) 沼渣沼液中的重金属、抗生素、激素等残留量高, 应对饲料生产加大监管力度, 同时引导养殖户合理使用兽药, 对畜禽粪便不定期抽查。

针对沼渣沼液施用所存在的环境风险, 应开展其有害物质环境风险评价的研究, 深入研究沼渣沼液主要污染物的含量和变化趋势及其作用机理, 建立沼渣沼液安全利用的标准及相关法律, 严格监督沼渣沼液的农业利用。目前, 沼渣沼液中的重金属、抗生素等的有效去除大部分处于实验室研究阶段, 须进行生产性试验研究。如何有效降低沼渣沼液有害物质将是今后其安全农用的重点研究方向。

参考文献:

[1] 董志新, 卜玉山, 续珍, 等. 沼气肥养分物质和重金属含

量差异及安全农用分析 [J]. 中国土壤与肥料, 2015, (3): 105-110.

[2] 邵玉环, 张昌爱, 董建军. 沼渣沼液的肥用研究进展 [J]. 山东农业科学, 2011, (6): 71-75.

[3] 张玲玲, 李兆华, 鲁敏, 等. 沼液利用途径分析 [J]. 资源开发与市场, 2011, 27 (3): 260-262.

[4] Christina S H, Christa M, Katrin S H, et al. Heavy metals in liquid pig manure in light of bacterial antimicrobial resistance [J]. Environmental Research, 2012, 113: 21-27.

[5] Odlaire M, Pell M, Svensson K. Changes in soil chemical and microbiological properties during 4 years of application of various organic residues [J]. Waste Management, 2008, 28 (7): 1246-1253.

[6] 田成津. 叶面喷施沼液对春小麦生产的影响 [J]. 中国沼气, 2013, 31 (2): 44-47.

[7] 夏春龙, 张洲, 张雨, 等. 喷施沼液对芸豆产量和重金属含量的影响 [J]. 环境科学与技术, 2014, 37 (1): 7-12.

[8] 刘红, 李兵. 黄瓜根部浇施沼液的效果 [J]. 安徽农学通报, 2007, 13 (18): 88.

[9] 刘丰玲, 马东辉, 刘天宏. 喷施沼液对小麦产量、品质和病虫害防治的影响 [J]. 中国沼气, 2009, 27 (6): 39-41.

[10] 王家品, 罗东黔, 隆祖燕. 沼液对白菜病虫的防治效果及其产量的影响 [J]. 贵州农业科学, 2010, 38 (5): 119-121.

[11] 雍山玉, 桑得福. 不同浓度沼液浸种对柴胡种子发芽率的影响 [J]. 中国沼气, 2013, 31 (6): 57-58.

[12] 袁大刚, 刘成, 蒲光兰. 沼液浸种对万寿菊种子发芽及幼苗生长的影响 [J]. 中国中药杂志, 2011, 36 (7): 817-822.

[13] 倪天驰, 周长芳, 朱洪光, 等. 沼液浸种对水稻种子萌发及幼苗生长的影响 [J]. 生态与农村环境学报, 2015, 31 (4): 594-599.

[14] 刘汨莎, 张亚丽. 沼肥的综合利用研究进展 [J]. 辣椒杂志, 2013, 11 (3): 30-34.

[15] 郑时选, 邱凌, 刘庆玉, 等. 沼肥肥效与安全有效利用 [J]. 中国沼气, 2014, 32 (1): 95-100.

[16] Bian B, Zhou L J, Li L, et al. Risk assessment of heavy metals in air, water, vegetables, grains, and related soils irrigated with biogas slurry in Taihu basin, China [J]. Environmental Science & Pollution Research, 2015, 22 (10): 7794-7807.

[17] 张利. 施用沼肥对保护地土壤性状及作物产量品质的影响 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2012.

[18] 段然, 王刚, 杨世琦, 等. 沼肥对农田土壤的潜在污染分析 [J]. 吉林农业大学学报, 2008, 30 (3): 310-315.

[19] 柯蓝婷, 王海涛, 王远鹏, 等. 不同来源家庭户用沼气池沼液成分分析及风险评价 [J]. 化工学报, 2014, 65 (5): 1840-1847.

[20] 王瑞, 魏源送. 畜禽粪便中残留四环素类抗生素和重金属的污染特征及其控制 [J]. 农业环境科学学报, 2013, 9 (9): 1705-1719.

[21] 王丽. 畜禽粪便中抗生素的检测、释放及削减研究 [D]. 赣州: 江西理工大学, 2013.

[22] 张树清, 张夫道, 刘秀梅, 等. 规模化养殖畜禽粪主要有

- 害成分测定分析研究 [J]. 植物营养与肥科学报, 2005, 11 (6): 822-829.
- [23] 卫丹, 万梅, 刘锐, 等. 嘉兴市规模化养猪场沼液水质调查 [J]. 环境科学, 2014, 35 (7): 2650-2657.
- [24] 钟攀, 李泽碧, 李清荣, 等. 重庆沼气肥养分物质和重金属状况研究 [J]. 农业环境科学学报, 2007, 26 (3): 165-171.
- [25] 李兆君, 姚志鹏, 张杰, 等. 兽用抗生素在土壤环境中的行为及其生态毒理效应研究进展 [J]. 生态毒理学报, 2008, 3 (1): 15-20.
- [26] 叶小梅, 常志州, 钱玉婷. 江苏省大中型沼气工程调查及沼液生物学特性研究 [J]. 农业工程学报, 2012, 28 (6): 222-225.
- [27] 林鸿雁, 叶美锋, 吴飞龙, 等. 沼液的综合利用现状综述 [J]. 福建农业科技, 2012, (1): 75-77.
- [28] 葛昕, 李布青, 丁叶强, 等. 沼液利用现状和潜在风险分析 [J]. 安徽农业科学, 2012, (30): 14897-14898.
- [29] 葛振, 魏源送, 刘建伟, 等. 沼渣特性及其资源化利用探究 [J]. 中国沼气, 2014, 32 (3): 74-82.
- [30] 丁京涛, 沈玉君, 孟海波, 等. 沼渣沼液养分含量及稳定性分析 [J]. 中国农业科技导报, 2016, 18 (4): 139-146.
- [31] 李元高, 潘海敏, 敬巧巧. 畜禽养殖废水厌氧发酵沼液及沼渣成分研究 [J]. 科技资讯, 2016, 14 (7): 53-54.
- [32] 沈其林, 单胜道, 周健驹, 等. 猪粪发酵沼液成分测定与分析 [J]. 中国沼气, 2014, 32 (3): 83-86.
- [33] 张颖, 刘益均, 姜昭. 沼渣养分及其农用可行性分析 [J]. 东北农业大学学报, 2016, 47 (3): 59-63.
- [34] 于晓东. 发酵原料对沼渣、沼液成分的影响及沼液在番茄栽培中的作用 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2016.
- [35] 王霜, 邓良伟, 王兰, 等. 猪场粪污中重金属和抗生素研究现状 [J]. 中国沼气, 2016, 34 (4): 25-33.
- [36] 刘荣乐, 李书田, 王秀斌, 等. 我国商品有机肥料和有机废弃物中重金属的含量状况与分析 [J]. 农业环境科学学报, 2005, (2): 392-397.
- [37] 聂莹, 曾晓楠. 以猪粪为原料的沼液成分分析 [J]. 安徽农业科学, 2013, (28): 11467-11468.
- [38] Bo B, Cheng L, Lin L. Health risk assessment of heavy metals in soil-plant system amended with biogas slurry in Taihu basin, China [J]. Environmental Science & Pollution Research, 2016, 23 (17): 16955-16964.
- [39] 朱泉雯. 重金属在猪饲料-粪污-沼液中的变化特征 [J]. 水土保持研究, 2014, 21 (6): 284-289.
- [40] Govasmark E, Ståb J, Holen B, et al. Chemical and microbiological hazards associated with recycling of anaerobic digested residue intended for agricultural use [J]. Waste Management, 2011, 31 (12): 2577-2583.
- [41] 朱佳, 高静思, 刘研萍. 四环素在厌氧发酵过程中的降解作用 [J]. 中国沼气, 2014, 32 (3): 23-26.
- [42] Lu F, Casas M E, Ldm O, et al. Removal of antibiotics during the anaerobic digestion of pig manure [J]. Science of the Total Environment, 2017, 603-604: 219-225.
- [43] 黄福义, 李虎, 韦蓓, 等. 长期施用猪粪水稻土抗生素抗性基因污染研究 [J]. 环境科学, 2014, (10): 3869-3873.
- [44] Ji X, Shen Q, Liu F, et al. Antibiotic resistance gene abundances associated with antibiotics and heavy metals in animal manures and agricultural soils adjacent to feedlots in Shanghai; China [J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, 235-236: 178-185.
- [45] 周志洪, 吴清柱, 王秀娟, 等. 环境中抗生素污染现状及检测技术 [J]. 分析仪器, 2016, (6): 1-8.
- [46] 丁佳丽, 刘锐, 郑炜, 等. 养猪废水和污泥中 11 种兽用抗生素的同时分析技术及其在生物降解过程的应用 [J]. 环境科学, 2015, 36 (10): 3918-3925.
- [47] 霍翠英, 吴树彪, 郭建斌, 等. 猪粪发酵沼液中植物激素及喹啉酮类成份分析 [J]. 中国沼气, 2011, 29 (5): 7-10.
- [48] 刘姝芳, 李艳霞, 张雪莲, 等. 东北三省畜禽养殖类固醇激素排放及其潜在污染风险 [J]. 环境科学, 2013, 34 (8): 3180-3187.
- [49] 李艳霞, 刘姝芳, 张雪莲, 等. 我国直辖市畜禽养殖排放类固醇激素特征及其潜在污染风险 [J]. 环境科学学报, 2013, 33 (8): 2314-2323.
- [50] 冯叙桥, 肖琳, 李乐, 等. 环境激素及其检测方法的研究进展 [J]. 食品与生物技术学报, 2013, 32 (3): 232-239.
- [51] 金淮, 常志州, 朱述钧. 畜禽粪便中人畜共患病原菌传播的公众健康风险 [J]. 江苏农业科学, 2005, (3): 103-105.
- [52] 陈超, 徐凤花, 高立洪, 等. 规模化沼气工程沼液中微生物的细菌种群分析与功能初探 [J]. 中国沼气, 2012, 30 (6): 7-11.
- [53] 马艳, 李海, 常志州, 等. 沼液对植物病害的防治效果及机理研究 I: 对植物病原真菌的抑制效果及抑菌机理初探 [J]. 农业环境科学学报, 2011, 30 (2): 366-374.
- [54] 叶小梅, 常志州, 钱玉婷, 等. 江苏省大中型沼气工程调查及沼液生物学特性研究 [J]. 农业工程学报, 2012, 28 (6): 222-227.
- [55] 黄惠珠. 沼肥营养成分与污染物分析研究 [J]. 福建农业学报, 2010, 25 (1): 86-89.
- [56] Bonetta S, Bonetta S, Ferretti E, et al. Agricultural reuse of the digestate from anaerobic co-digestion of organic waste: microbiological contamination, metal hazards and fertilizing performance [J]. Water Air Soil Pollution, 2014, 225 (8): 2046-2057.
- [57] 郑时选, 李健. 德国沼肥利用的安全性生态卫生 [J]. 中国沼气, 2009, 27 (2): 45-48.

[下转第 27 页]

ment, so as to determine soil alkali-hydrolyzable nitrogen, available phosphorus and available potassium contents, as well as soil catalase, urease, sucrase and phosphatase activities at all growth stages of *Capsicum annuum* L. The results indicated that soil alkali-hydrolyzable nitrogen, available phosphorus and available potassium contents, as well as 4 soil enzyme activities at all growth stages of *Capsicum annuum* L. were remarkably higher than those in CK when the water supply pressure was controlled at -5 kPa to -15 kPa. Among them, -5 kPa treatment significantly increased soil nutrients and enzyme activities. Correlation analyses of soil available nutrient contents and enzyme activities indicated that, under negative pressure water supply conditions, soil enzymes showed distinctly positive correlation with soil available nutrients among the 4 soil enzymes, among soil alkali-hydrolyzable nitrogen, available phosphorus and available potassium, and among soil enzymes and soil nutrients. Principal component analysis revealed that the first principal component had great contribution to the comprehensive soil fertility level. In addition, the second principal component suggested that available phosphorus and available potassium decreased as catalase and sucrase decomposed and decreased. In conclusion, adopting the negative pressure water supply manner can promote soil enzyme activities of *Capsicum annuum* L., which is beneficial to the transition of soil nutrients of *Capsicum annuum* L. Furthermore, the effect on improving soil fertility of *Capsicum annuum* L. is more outstanding when the water supply pressure is stable at -5 kPa.

Key words: continuous negative pressure water supply; soil enzymes; soil nutrients

[上接第 13 页]

The safe analysis of biogas residue and slurry in agricultural application

TU Cheng, YAN Xiang*, LI Xiu-ying, WANG Man-ru (Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Science, Beijing 100081)

Abstract: As biogas residue and slurry have been widely used in agriculture, the security risks should be seriously considered. We reviewed the problems of biogas residue and slurry in agricultural application as fertilizer. The instability of nutritional components directly affects the quality of biogas residue and slurry as fertilizer, and the content of major elements and organic matters in biogas residue and slurry is below the legal limit. The level of heavy metal, especially the arsenic (As), usually exceeds the standard of organic fertilizer, and the highest content of As can reach up to 52.5 mg/kg. High concentration of copper (Cu) and zinc (Zn) is harmful to the crops as well as the soil environment. However, the current organic fertilizer standards do not cover the content of Cu and Zn. Furthermore, antibiotic residues in biogas residue and slurry continuously contribute to the pollution of antibiotic resistant genes (ARGs) in the environment. In addition, few studies have been conducted on hormone content and pathogenic bacteria in biogas residue and slurry, and such necessary research is urgently needed in the future. Finally, some suggestions were accordingly put forward to help control or reduce the risks during the agricultural application of biogas residue and slurry, and the directions of further research were also prospected.

Key words: biogas residue; biogas slurry; agricultural application; security risks