

湿垃圾沼渣配施对土壤质量和园林植物生长的影响

Effect of Biogas Residue from Food Waste on the Growth of Landscape Plants and Soil Physicochemical Properties

陈 平 梁 晶*
CHEN Ping LIANG Jing*

基金项目:

上海市绿化与市容管理局项目“湿垃圾处置固态残余物资源化利用途径研究”(编号: G200202)

文章编号: 1000-0283 (2021) 10-0051-07

DOI: 10.12193/j.laing.2021.10.0051.008

中图分类号: TU986

文献标志码: A

收稿日期: 2021-07-26

修回日期: 2021-09-07

摘要

湿垃圾沼渣作为一种新兴的土壤调理剂, 具有营养高、毒性低等优点。将其应用于园林绿化是湿垃圾资源化利用的重要一环。研究将湿垃圾沼渣用于园林绿化土壤, 随着沼渣施用量的增加, 土壤的pH、EC和有机质均呈上升趋势。土壤密度呈下降趋势, 添加40% (V/V) 沼渣的处理显著低于不添加沼渣的处理 ($P<0.05$)。土壤孔隙度和土壤持水能力呈上升趋势, 添加40% (V/V) 沼渣的处理, 其饱和持水量和田间持水量均显著高于未添加沼渣的处理 ($P<0.05$)。此外, 随着沼渣添加量的增加, 乌桕成活率呈断崖式下降趋势, 株高也呈下降趋势。紫薇成活率呈缓慢下降趋势, 株高呈下降趋势。这表明, 沼渣对乌桕(乔木)和紫薇(灌木)的生长具有一定抑制作用, 但是紫薇对沼渣的耐受力优于乌桕。此外, 沼渣对乌桕和紫薇的相对叶绿素含量均无显著性差异 ($P>0.05$)。

关键词

湿垃圾; 沼渣; 园林植物; 土壤

Abstract

As an emerging soil conditioner, food waste biogas residue has the advantages of high nutrition and low toxicity. The application of biogas residue to landscaping is an important part of wet waste resource treatment. In this study, wet litter was used in landscaping soil, and the soil pH, EC and organic matter all showed an upward trend. The soil density tended to decrease with the increase of biogas residue application, and the treatment with 40% (V/V) biogas residue was significantly lower than the treatment without biogas residue ($P<0.05$). Soil porosity and soil water holding capacity tended to increase, and the treatment with 40% (V/V) biogas residue had significantly higher saturated water holding capacity and field water holding capacity than the treatment without biogas residue ($P<0.05$). In addition, with the increase of biogas residue addition, the survival rate of *Sapium sebiferum* showed a precipitous decreasing trend and the plant height also showed a decreasing trend. The survival rate of *Sapium sebiferum* showed a slow decreasing trend and the plant height showed a decreasing trend. The growth of *Sapium sebiferum* (tree) and *Lagerstroemia indica* (shrub) was inhibited by the residue, but *Lagerstroemia indica* tolerated the residue better than *Sapium sebiferum*. The relative chlorophyll content of both *Sapium sebiferum* and *Lagerstroemia indica* were not significantly different ($P>0.05$).

Key words

food waste; biogas residue; garden plants; soil

陈 平

1984年生/男/浙江人/博士/上海市园林科学规划研究院、上海城市困难立地绿化工程技术研究中心、城市困难立地生态园林国家林业局重点实验室高级工程师/研究方向为固体废弃物资源化利用(上海200232)

梁 晶

1981年生/女/山西人/博士/上海市园林科学规划研究院土壤研究所所长, 上海城市困难立地绿化工程技术研究中心、城市困难立地生态园林国家林业局重点实验室教授级高级工程师/研究方向为城市土壤质量评价、修复及有机废弃物再利用(上海200232)

*通信作者 (Author for correspondence)

E-mail: liangjing336@163.com

2017年, 中国国家发展改革委、住房城乡建设部共同发布了《生活垃圾分类制度实施方案》, 为中国生活垃圾分类制度的实施制定了路线图。2019年1月31日, 上海市人大表决通过了《上海市生活垃圾管理条例》, 明确提出在公共绿地、公益林优先使用湿垃圾资源化利用产品^[1]。目前, 城市主要通过厌氧



1. 沼渣脱水前后的外观

发酵技术处置湿垃圾，农村通过沼气工程实现畜禽粪便、秸秆、有机垃圾等农业有机废弃物的无害化处理、资源化利用。城市湿垃圾是居民日常生活及食品加工、餐饮服务、单位供餐等活动中产生的垃圾，包括丢弃不用的菜叶、剩菜、剩饭、果皮、蛋壳、茶渣、骨头、动物内脏、鱼鳞、树叶、杂草等，其主要来源为家庭厨房、餐厅、饭店、食堂、市场及其他与食品加工有关的行业，其含水率高、油脂含量高、易腐败。沼渣作为厌氧发酵技术、沼气工程的副产物，是垃圾厌氧发酵的最终固态残余物，含有大量有机质、腐殖酸、粗蛋白、氨基酸等营养成分，具有很高的再利用研究价值^[5]。

李忠琴等利用沼渣和草炭混合配制育苗基质，结果发现两份沼渣和一份草炭是黄瓜、番茄、甘蓝育苗的良好基质^[6]；王玉等研究了鸡粪沼渣、醋糟、蛭石的不同配比的黄瓜和番茄育苗基质，结果表明鸡粪沼渣处理中的黄瓜和番茄均未出苗，表明该沼渣作为基质不利于种子萌发及生长，该研究筛选出最适合黄瓜和番茄的育苗基质配方^[4]；刘娟等探讨基质中添加不同比例腐熟沼渣对西瓜幼苗生长的影响，发现腐熟沼渣40%、泥炭40%、蛭石15%、珍珠岩5%的配比不仅可以提高出苗率、株高、茎粗、地上部鲜重和根系鲜重等，同时该基质对西瓜幼苗生长具有促进作用^[5]。Abubaker等人比较了4种不同类型的沼渣对小麦生长的影响，结果表明沼渣可以明显提高小麦的生物量^[6]。但是城市湿垃圾沼渣能否直接应用于土壤，施用量及对土壤和植物的影响尚不清楚。受技术、资金、管理水平等因素

的制约，而且其成分复杂，因此相关沼渣特性及资源化利用的研究较少。基于垃圾分类国策的逐步推进，湿垃圾沼渣组分相对单一，重金属等有毒有害物质少等优点，大大增加了湿垃圾沼渣的应用前景，其正成为湿垃圾资源化利用的热点。因此，本研究以上海市城区湿垃圾厌氧发酵的沼渣为研究材料，分别探讨几种沼渣施用量对土壤性质和园林植物的影响，以期对湿垃圾沼渣的利用提供科学依据和数据支撑。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤为灰潮土，采自上海市浦东新区，土壤pH为8.24，EC为0.23 mS/cm，有机质含量为7.62 g/kg，全氮含量为1.69 g/kg。供试乔灌木为乌桕 (*Sapium sebiferum*) 和紫薇 (*Lagerstroemia indica*)，均为两年生苗。供试沼渣为沼渣烘干脱水后的产物 (图1)，由上海老港生物能源再利用中心提供。沼渣脱水后含水量为5.8%，pH为9.13，EC为3.11 mS/cm，有机质含量为44.3%，全氮含量为3.57%，C/N比为7.20。

1.2 试验设计

2020年4月，将供试沼渣按体积比10%、20%、30%和40%与供试土壤混匀装盆，分别标记为ZZ10、ZZ20、ZZ30和ZZ40，同时设未添加供试沼渣的处理作为对照 (CK)，共5个处理，每个处理分别移植乌桕10盆和紫薇10盆，每盆均种植1棵，种植过程中调节土壤含水量至最大持水量的60%~70%。

种植植物2个月后，测定土壤的密度、饱和持水量、田间持水量、非毛管孔隙度和总孔隙度等物理性质；并分别在种植乌桕和紫薇均2个月和12月后，统计植物成活率并测定植物的株高、叶绿素等指标。

1.3 研究方法

供试沼渣的pH采用电极法测定 (水土比10:1)^[7]，水溶性盐分 (EC) 采用电导法测定 (水土比10:1)^[8]，有机质含量采用重铬酸钾氧化法测定^[7]。土壤密度、饱和持水量、田间持水量、非毛管孔隙度和总孔隙度均采用环刀法采样测定，参照中华人民共和国林业行业标准《森林土壤分析方法》^[9]。植物成活率采用计数法统计后计算，植物株高用卷尺进行测定，株高为盆土表面至植株最高生长点的高度，株高为所有成活植物测定值的平均值。

1.4 数据处理

采用SPSS 16软件进行方差分析，采用Origin8.5作图。

2 结果与分析

2.1 沼渣对土壤质量的影响

2.1.1 土壤pH、EC和有机质

土壤pH、EC和有机质是评价土壤质量好坏的主控指标，表1所示为添加不同量沼渣后土壤pH、EC和有机质，从中可以发现，随着沼渣添加量的增加，土壤的pH、EC和有机质均呈上升趋势，且其添加量与土壤的pH、EC和有机质均呈正相关性。其中土壤有机质的变化尤为明显，添加40%的沼渣，土壤的有机质含量提高3.54倍。分析其原因，这可能与沼渣自身特性有关，由于沼渣是湿垃圾厌氧发酵的产物，未经过腐熟化过程，故其pH较高，因此沼渣添加量的增加导致了pH的持续升高。同时，沼渣含有大量未腐熟的小分子化合物，故添加沼渣会引入大量小分子化合物，从而增加土壤的电导率。与此类似，土壤有机质的含量也随着沼渣配施量的增加而增加，其添加量的增加给土壤带来了大量的有机质，进一步提升了土壤营养，同时增加了微生物生命活动所需的能源，微生物活性进一步增强，有利于土壤质量的提升。

表1 沼渣配施对土壤pH、EC和有机质的影响

处理	pH	EC/(mS/cm)	有机质/(g/kg)
CK	8.24 ± 0.21	0.23 ± 0.01	7.62 ± 0.59
ZZ10	8.71 ± 0.35	0.65 ± 0.02	16.17 ± 0.82
ZZ20	8.80 ± 0.28	0.98 ± 0.03	25.08 ± 1.71
ZZ30	8.82 ± 0.52	1.33 ± 0.03	36.40 ± 1.48
ZZ40	8.87 ± 0.37	1.40 ± 0.05	34.58 ± 2.91

2.1.2 土壤密度与孔隙度

土壤密度是极为重要的土壤物理指标，其大小影响着土壤水分、空气、热量、养分转化等土壤理化特性^[10]。

图2中沼渣添加量对土壤密度的影响可以看出，随着沼渣添加量的增加，土壤密度呈降低趋势，具体为ZZ40 < ZZ30 < ZZ20 < ZZ10 < CK。其中，不添加沼渣的处理(CK)土壤密度为1.42 ± 0.17 g/cm³，显著高于添加40%(V/V)沼渣的处理ZZ40 ($P < 0.05$)，这可能是由于沼渣以有机材料为主，其供试沼渣含水量极低，物理结构较为松散，自身密度较低，远低于一般

土壤密度^[11]。这与李国文等人的研究结果类似^[12]。

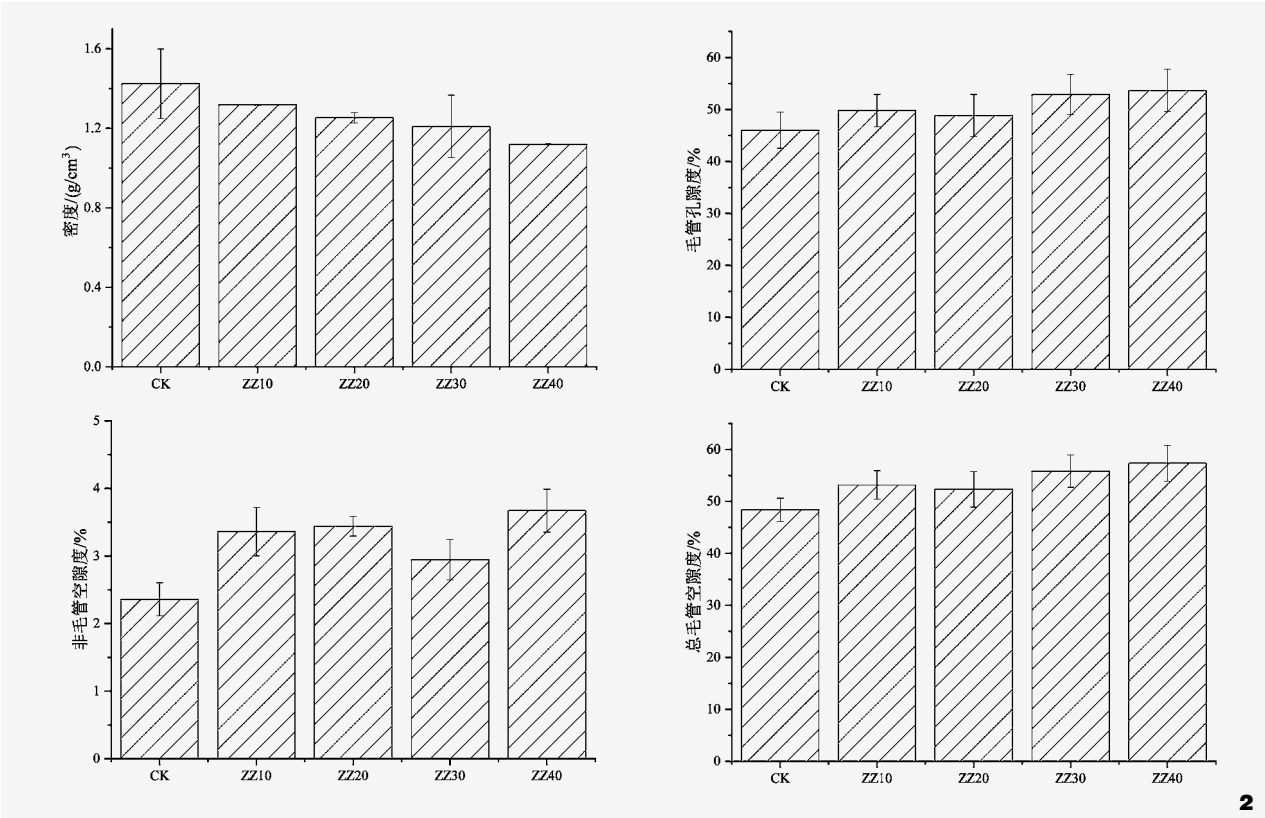
土壤总孔隙度包含非毛管孔隙度和毛管孔隙度。非毛管孔隙度的作用主要是通气透水^[13]。图2中沼渣添加量对土壤非毛管孔隙度的影响可以看出，对照处理(CK)土壤非毛管孔隙度为2.36% ± 0.24%，低于标准《绿化种植土壤》的限值要求(5% ~ 25%)^[14]，土壤通气透水性较差。添加沼渣后土壤非毛管孔隙度呈上升趋势，大小顺序为CK < ZZ30 < ZZ10 < ZZ20 < ZZ40，其中添加40%(V/V)沼渣的处理土壤非毛管孔隙度较高，为3.67% ± 0.32%，这表明添加一定量的沼渣对土壤非毛管孔隙度的提高具有一定促进作用，可见沼渣可以增加土壤的透气性。

毛管孔隙度的主要作用是贮存水分^[15]。从图2中可以看出，不添加沼渣的对照处理(CK)土壤毛管孔隙度为46.02% ± 3.49%，土壤通气性较差。添加沼渣后土壤毛管孔隙度呈上升趋势，其中添加40%(V/V)沼渣的土壤毛管孔隙度较高，为53.69% ± 4.09%。土壤孔隙度的大小说明了土壤的疏松程度及水分和空气容量的大小^[16]。CK土壤总毛管孔隙度为48.38% ± 2.45%，土壤通气性较差。添加沼渣后土壤毛管孔隙度呈上升趋势，其中添加40%(V/V)沼渣的土壤毛管孔隙度较高，为57.36% ± 3.46%，这表明添加一定量的沼渣对土壤总毛管孔隙度具有一定的提高作用，说明土壤的透气性有所提升。

2.1.3 土壤持水能力

通常，表征土壤持水能力的有土壤饱和持水量、土壤田间持水量等指标。其中，土壤饱和持水量又被称为土壤最大持水量，即土壤孔隙充满水时所保持的水量，土壤饱和持水量与土壤质地、结构等有关^[17]。图3-a为沼渣添加量对土壤饱和持水量的影响，可知对照处理(CK)土壤饱和持水量最低，为198.12 ± 40.02 g/kg，显著低于ZZ40 ($P < 0.05$)。通过向土壤中添加不同量的沼渣，土壤饱和持水量呈上升趋势，大小顺序为CK < ZZ10 < ZZ20 < ZZ30 < ZZ40。其中添加40%(V/V)的沼渣处理，土壤饱和持水量最高，达266.60 ± 12.55 g/kg，这表明添加沼渣可以大大提升土壤饱和持水量，增强土壤蓄水能力。

土壤田间持水量又被称为土壤最小持水量。田间持水量常被认为是土壤稳定保持的最高含水量，也是土壤保持悬着水的最高值，代表对植物有效的土壤最高含水量，且被认为是一个常数^[18]。图3-b为沼渣添加量对土壤田间持水量的影响，与土壤饱和持水量相似，土壤田间持水量随着沼渣添加量的增



2

2. 沼渣添加量对土壤密度和孔隙度的影响

加呈上升趋势 (CK < ZZ10 < ZZ20 < ZZ30 < ZZ40)，即对照处理 (CK) 土壤饱和和持水量最低，为 295.12 ± 39.69 g/kg，沼渣添加量最高的处理 ZZ40 土壤饱和和持水量最高，为 444.66 ± 8.78 g/kg，CK 显著的低于 ZZ40 ($P < 0.05$)。可见，添加沼渣在一定程度上可以增加土壤田间持水量，这与肖洋等人的研究类似^[19]。

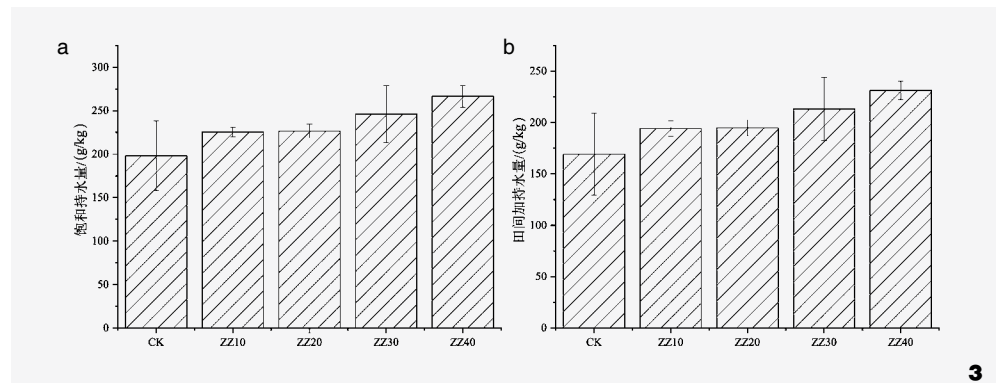
2.2 沼渣对植物生长的影响

2.2.1 沼渣对植物成活率的影响

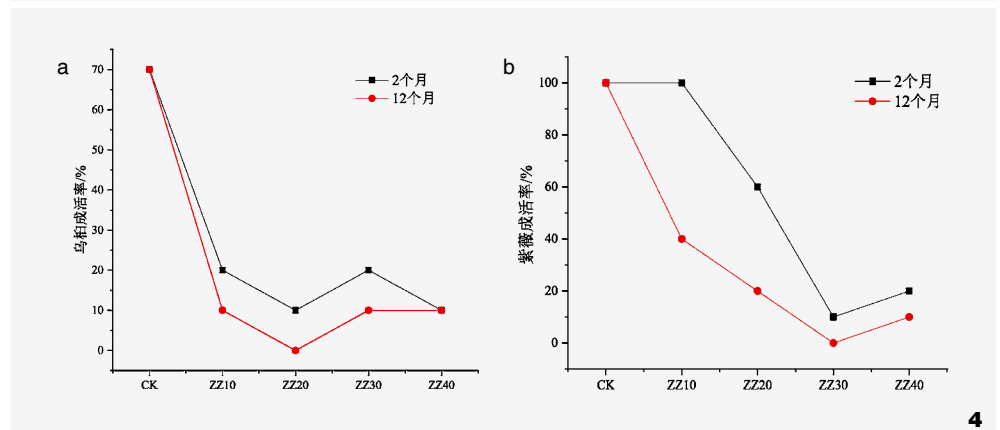
由图 4-a 可知，不添加沼渣的土壤种植乌桕 2 个月后，乌桕成活率为 70%；添加 10% (V/V) 沼渣的土壤种植乌桕 2 个月后，仅有 20% 的乌桕成活；添加 20% (V/V) 沼渣的土壤种植乌桕 2 个月后，乌桕仅有 10% 的成活率，即 10 株乌桕仅存活一株，这说明沼渣直接利用对乌桕具有毒害作用，显著降低乌桕成活率。

种植 12 个月后，监测乌桕的成活率，除不添加沼渣的对照处理 (CK) 外，添加沼渣的乌桕成活率均有明显降低，其中，添加 10% (V/V) 沼渣处理的乌桕成活率降为 10%，添加 20% (V/V) 沼渣处理的乌桕成活率降为 0，所有乌桕均未成活。添加 30% (V/V) 的成活率降为 10%，添加 40% (V/V) 的成活率仍然为 10%。这也进一步表明，沼渣直接利用，对乌桕生长具有明显的抑制作用。这可能是由于沼渣的 pH 值呈碱性 (9.13)，植物毒性高，抑制了乌桕生根，最终导致乌桕枯死^[20]。

由图 4-b 可知沼渣添加量对紫薇成活率的动态影响。不添加沼渣的处理 (CK) 和添加 10% (V/V) 沼渣的处理，紫薇具有 100% 的成活率，但随着沼渣添加量的持续增加，紫薇的成活率呈明显降低的趋势。尤其是种植紫薇 12 个月后，监测其成活率发现除不添加沼渣的对照处理 (CK) 外，添加沼渣的处理紫薇成活率大幅度降低，如添加 10% (V/V) 的沼渣处理，紫薇成



3



4

 3. 沼渣添加量对土壤持水量的影响
4. 沼渣添加量对植物成活率的影响

活率为40%，紫薇成活率降低了60%；添加20% (V/V) 的沼渣处理，紫薇成活率为20%，紫薇成活率降低了40%。这可能与乌桕的原因类似^[20]，但是相较于乌桕这类小乔木，紫薇作为灌木，可能对沼渣的耐受性更高，成活率也更高。

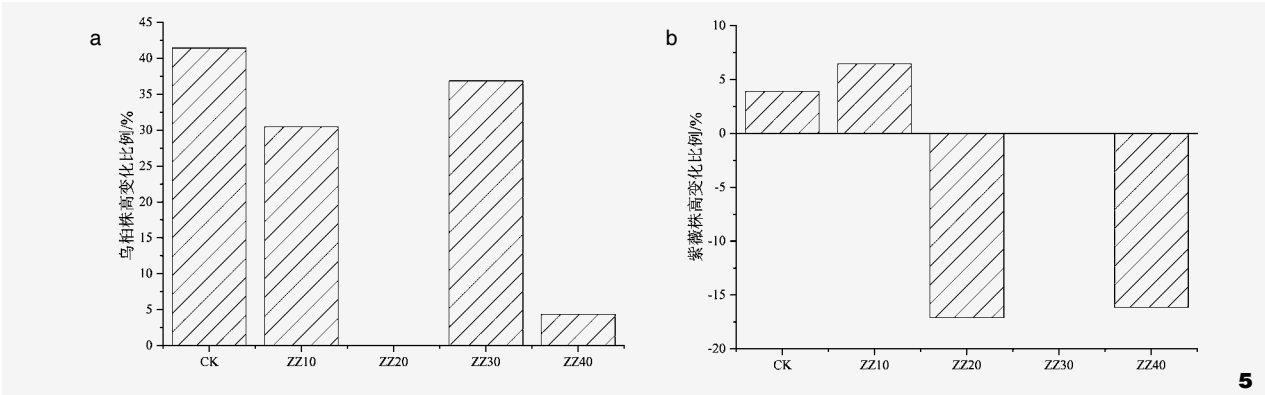
2.2.2 沼渣对植物株高的影响

对种植2个月和12个月后的乌桕和紫薇进行株高测定 (图5-a)。种植12个月后，不同沼渣添加量的乌桕株高相较于2个月时均有所提升，其提升比例顺序为CK > ZZ30 > ZZ10 > ZZ40 > ZZ20。其中未添加沼渣的处理 (CK) 株高的增长比例最大，增长了41.44%，说明添加沼渣可能会影响乌桕的生长。紫薇种植12个月后，未添加沼渣的处理其株高增长且全部存活，添加20% ~ 40%沼渣的处理均出现了不同程度的枯萎，说明沼渣对紫薇具有一定抑制作用，这与周智峰等人在香榧树上的研

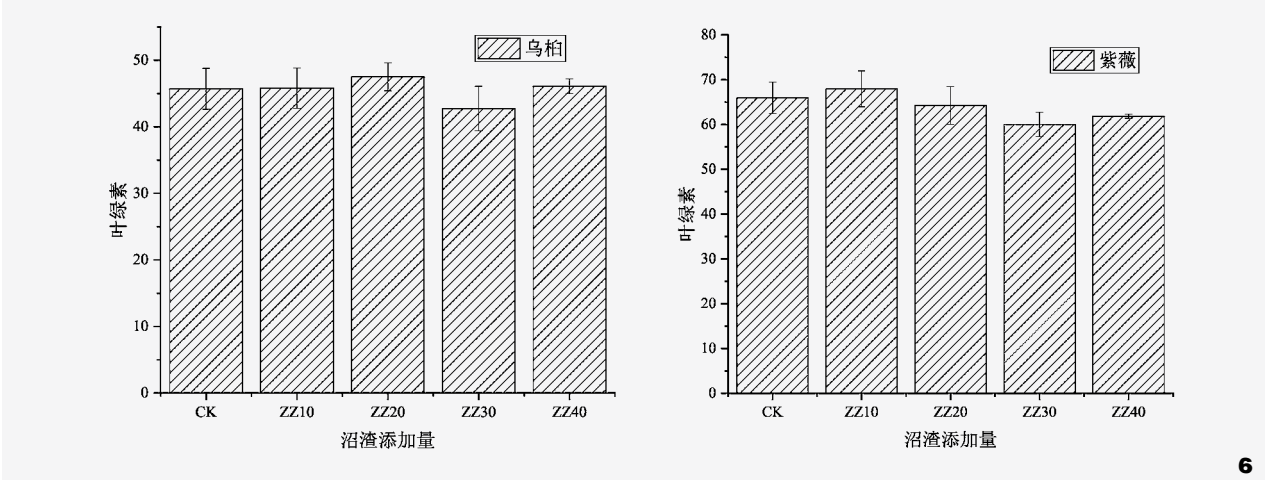
究结果相似^[21]。同时，沼渣对紫薇强烈的致死率导致12个月后，ZZ20仅存活2株，ZZ30全部枯萎，ZZ40仅存活1株，实验存活的样本量较少，因统计学上存在部分差异，所以后续实验可加大样本量，进一步验证实验。

2.2.3 沼渣对叶绿素相对含量的影响

植物叶片中叶绿素通过光合作用将二氧化碳转变为碳水化合物，以供植物的生长发育，其含量高低直接反映了植物的营养和生长状况^[22]。乌桕的叶绿素大小顺序为ZZ30 < CK < ZZ10 < ZZ40 < ZZ20 (图6)。添加20% (V/V) 沼渣的乌桕叶绿素含量最高为 47.50 ± 2.10 ，但是各处理间叶绿素差异不显著 ($P > 0.05$)。添加沼渣后，紫薇的叶绿素大小为ZZ30 < ZZ40 < ZZ20 < CK < ZZ10，添加10% (V/V) 沼渣的紫薇叶绿素含量最高为 67.94 ± 3.98 ，但是各处理的差异不显著 ($P > 0.05$)，这表明添



5



6

5. 沼渣添加量对植物株高的影响
6. 为不同沼渣添加量对乌柏和紫薇叶绿素的影响

加不同量的沼渣，对乌柏和紫薇叶绿素相对含量的影响较小，这与有婧仪等人的研究结果类似^[23]。

2.3 土壤理化指标与植物特性的相关性研究

土壤密度与乌柏株高和叶绿素的相关性分析表明（表2），土壤密度、株高、叶绿素之间没有显著性差异（ $P > 0.05$ ）。同样对紫薇进行相似的相关分析，结果表明土壤密度、紫薇株高、叶绿素之间没有显著性差异（ $P > 0.05$ ）。说明土壤密度对乌柏和紫薇的株高和叶绿素几乎没有影响。

3 结论与讨论

随着垃圾分类国策的持续推进，湿垃圾沼渣作为湿垃圾

表2 土壤密度对乌柏和紫薇特性相关性的影响

指标	乌柏			紫薇		
	密度	株高	叶绿素	密度	株高	叶绿素
密度	1	-0.612	-0.170	1	0.405	0.542
株高	-0.612	1	-0.134	0.405	1	-0.234
叶绿素	-0.170	-0.134	1	0.542	-0.234	1

注：*在0.05级别（双尾），相关性显著；**在0.01级别（双尾），相关性显著。

资源化处理的固态废弃物，正受到越来越多的关注，土地利用是其中的一个重要方面。随着沼渣施用量的增加，土壤的pH、EC和有机质均呈上升趋势。土壤密度呈下降趋势，其中不添加沼渣的处理显著地高于添加40%（V/V）沼渣的处理（ $P < 0.05$ ）。

添加沼渣后, 土壤毛管孔隙度、非毛管孔隙度和总毛管孔隙度均呈上升趋势, 实验结果与先前的研究相符^[24-26]。这可能是由于沼渣的物理结构较为松散, 且具有良好的孔隙结构, 能增加土壤的孔隙度。添加沼渣可以降低土壤密度, 提高土壤的非毛管孔隙度、毛管孔隙度和总毛管孔隙度, 这与王家军等人的报道类似^[27]。但是, 这和理想土壤结构非毛管孔隙度和毛管孔隙度各占50%的要求相差甚远^[28]。土壤中添加不同量的沼渣后, 土壤持水能力呈上升趋势, 添加40% (V/V) 沼渣的处理, 其饱和持水量和田间持水量均显著高于未添加沼渣的处理 ($P < 0.05$)。添加沼渣后, 乌桕成活率呈断崖式下降趋势, 后持续稳定在10% ~ 20%。紫薇添加沼渣后, 成活率呈缓慢下降趋势, 这说明乔木对沼渣的毒害作用具有较低的耐受性, 而灌木对沼渣具有较高的耐受性。在沼渣的直接利用中, 可以优先考虑紫薇等灌木, 减少乌桕等大型乔木的使用。随着沼渣添加量的增加, 乌桕和紫薇的株高总体呈现下降的趋势, 未添加沼渣的乌桕, 其株高的增长比例大于其他添加沼渣的处理。添加20% ~ 40%沼渣的紫薇也均出现枯萎现象, 这可能是由于沼渣的植物毒性, 抑制了植物的生长。施用不同添加量的沼渣, 乌桕和紫薇的相对叶绿素含量虽有高低, 但均没有显著性差异 ($P > 0.05$)。

综上所述, 沼渣施用于土壤可以改善土壤理化特性, 降低土壤密度, 增加土壤的孔隙度和持水能力。但由于沼渣的pH和EC较高, 且未经过熟化过程, 沼渣对乔木和灌木的生长具有一定的抑制作用。因此, 建议沼渣可直接用于裸地土壤的培育, 但若进行绿化造林, 则需进行堆肥腐熟。■

参考文献

- [1] 李刚, 卢明, 吴春强, 等. 上海湿垃圾沼渣特性及资源化利用探索[J]. 园林, 2020, 338(6): 25-29.
- [2] 牛慧婷, 冯炜弘, 尹燕, 等. 沼渣与化肥配施对甘蓝品质产量及土壤质量的影响[J]. 甘肃农业科技, 2021, 52(2): 49-53.
- [3] 李忠琴, 李洪金, 施月欢, 等. 沼渣作为工厂化育苗基质的初步研究[J]. 上海农业学报, 2008(2): 134-135.
- [4] 王玉, 易丹丹, 王健, 等. 沼渣混配基质对黄瓜和番茄生长、产量及品质的影响[J]. 长江蔬菜, 2019, 480(10): 47-53.
- [5] 刘娟, 刘凯, 朱妍妍, 等. 不同比例沼渣育苗基质对西瓜幼苗生长的影响[J]. 现代农业科技, 2019, 745(11): 52-53.
- [6] ABUBAKER J, RISBERG K, PELL M. Biogas Residues as Fertilisers-Effects on Wheat Growth and Soil Microbial Activities[J]. Applied Energy, 2012, 99: 126-134.
- [7] 中华人民共和国农业部. 有机肥料: NY 525-2012. [S]. 北京: 中国农业出版社, 2012: 2-10.
- [8] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 绿化用有机基质(GB/T 33891-2017)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [9] 张万儒, 杨光滢, 屠星南, 等. 森林土壤分析方法[M]. 北京: 中国标准出版社, 2000.
- [10] 伍海兵, 张青青, 梁晶. 城市绿地土壤肥力质量综合评价方法初探[J]. 土壤通报, 2020, 51(4): 795-800.
- [11] 刘丽雪, 陈海涛, 韩永俊. 沼渣物理特性及沼渣纤维化学成分测定与分析[J]. 农业工程学报, 2010, 26(7): 277-280.
- [12] 李国文, 李娜, 黎佳茜, 等. 北方低温条件下沼渣资源化培育佛甲草的应用研究[J]. 环境工程技术学报, 2019, 9(1): 103-110.
- [13] 程欢, 程一伦, 宫渊波, 等. 川西北高山/亚高山6种典型土壤类型水文效应[J]. 应用与环境生物学报, 2019, 25(2): 225-231.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 绿化种植土壤(CJ/T 340-2016)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [15] 周玉杰, 李建华, 王春燕, 等. 海南岛3种森林类型的土壤特性及水源涵养功能[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(36): 165-167.
- [16] 刘晓雪. 初植杉木生长量及生物量对不同立地的响应机制[D]. 北京: 北京林业大学, 2018.
- [17] 董晓勇, 齐永峰, 郝斌, 等. 集材强度对集材道土壤表层物理性质的影响[J]. 黑龙江生态工程职业学院学报, 2009, 22(4): 1-3.
- [18] 王平, 王金满, 秦倩, 等. 黄土区采煤塌陷对土壤水力特性的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(3): 297-304.
- [19] 肖洋, 田里, 路运才, 等. 沼液和沼渣及化肥配施对土壤肥力的影响[J]. 中国农学通报, 2016, 32(11): 78-81.
- [20] 王丽丽, 常鹏. 沼渣人工育苗基质中氮素变化研究[J]. 湖南农业科学, 2011, 272(17): 43-46.
- [21] 周智峰, 黄文斌, 钟子龙, 等. 不同施肥措施对初果期香榧林生长的影响[J]. 浙江林业科技, 2015, 35(3): 83-86.
- [22] 殷庆霏, 郭建斌, 倪肖卫, 等. 不同堆肥对南方屋顶绿化植物生长特性的影响[J]. 环境工程学报, 2017, 11(11): 6205-6213.
- [23] 有婧仪, 杨守军, 张忠兰, 等. 沼渣与化肥配施对玉米生长及土壤理化性状的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2018, 277(5): 97-101.
- [24] 李欣, 石春芳, 韩龙. 沼渣对土壤理化性质和糜子品质的影响[J]. 中国沼气, 2019, 37(3): 80-85.
- [25] 肖洋, 田里, 路运才, 等. 沼液和沼渣及化肥配施对土壤肥力的影响[J]. 中国农学通报, 2016, 32(11): 78-81.
- [26] TSACHIDOU B, HISSLER C, NOO A, et al. Biogas Residues in the Battle for Terrestrial Carbon Sequestration: a Comparative Decomposition Study in the Grassland Soils of the Greater Region[J]. Journal of Environmental Management, 2021: 286: 112272.
- [27] 王家军, 刘杰, 张瑞洋, 等. 沼渣与化肥配施对大豆田土壤理化性质和土壤微生物的影响[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(13): 7763-7765.
- [28] 伍海兵, 方海兰, 彭红玲, 等. 典型新建绿地上海辰山植物园的土壤物理性质分析[J]. 水土保持学报, 2012, 26(6): 85-90.