

厌氧发酵固体剩余物建植高羊茅草皮的生态特征

宋成军¹, 田宜水¹, 罗娟¹, 齐岳¹, 赵立欣^{1*}, 赵学兰², 田溪³

(1. 农业部规划设计研究院农村能源与环保研究所, 农业部农业废弃物资源化利用重点实验室, 北京 100125;
2. 天津生物工程职业技术学院, 天津 300074; 3. 天水国家农业科技园区管理委员会, 天水 741030)

摘要: 为了考察沼渣在草皮无土栽培中的适宜性, 该文通过大田试验, 设计单因素区组试验, 以沼渣为原料复合有机基质培植高羊茅草皮, 研究了沼渣体积分数改变对复合有机基质理化特性、高羊茅幼苗生长以及高羊茅草皮成坪性状的影响, 结果表明: 1) T60 基质(沼渣体积分数为 60%)中全氮、全磷、全钾、速效氮、速效磷、速效钾、有机质含量最高, 大于其他 3 种基质; 随着沼渣体积分数提高, 复合基质的 pH 值显著降低, 干、湿容重显著降低, 入渗率和总孔隙度显著增高, 保水性增大; 2) 复合有机基质对高羊茅幼苗生长有明显促进作用, 单位面积幼苗株数、幼苗株高、幼苗叶宽、草皮盖度、颜色等级、均一性和根层厚度均显著高于对照基质, 从高羊茅幼苗生长来看, 以 60%和 90%沼渣组成的复合有机基质适于建植高羊茅草皮; 3) 60%沼渣复合基质下, 高羊茅草皮的总生物量、地上以及地下生物量显著大于其他基质, 其草皮根冠比明显小于其他基质, 该基质显著改变了高羊茅草皮的地上和地下生物量分配格局, 促进生物量向地上部分转移, 利于草皮生长, 因此, 该复合有机基质为高羊茅最佳建植基质。

关键词: 基质; 生长; 物理特性; 化学特性; 沼渣; 草皮; 无土栽培

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.17.034

中图分类号: Q949.21

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-17-0254-07

宋成军, 田宜水, 罗娟, 齐岳, 赵立欣, 赵学兰, 田溪. 厌氧发酵固体剩余物建植高羊茅草皮的生态特征[J]. 农业工程学报, 2015, 31(17): 254—260. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.17.034 <http://www.tcsae.org>
Song Chengjun, Tian Yishui, Luo Juan, Qi Yue, Zhao Lixin, Zhao Xuelan, Tian Xi. Ecological characteristics of *Festuca arundinacea* L. turf cultivated by solid residues from anaerobic digestion project[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(17): 254—260. (in Chinese with English abstract)
doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.17.034 <http://www.tcsae.org>

0 引言

随着中国人口城市化和农业现代化迅速发展, 尤其是规模化养殖场和粮食种植带的建设, 沼气产业已从单纯的能源利用发展成为废弃物处理和生物质多层次综合利用, 在生态保护与生产生活中发挥了重要作用。2012年底, 中国处理工农业有机废弃物的大中型沼气工程(沼气产量 $>150\text{ m}^3/\text{d}$ 且厌氧消化总容积 $>300\text{ m}^3$)约 22 907 处, 总池容高达 731 万 m^3 。全国大中型沼气工程在提供大量生物燃气的同时, 产生了约 1 亿 t 厌氧发酵剩余物, 其中约 1 000 万 t 沼渣和 9 000 万 t 沼液。厌氧发酵剩余物已经成为潜在的环境污染源, 存在着较大的环境健康风险^[1-3]。沼渣处理和施用不当, 会造成二次环境问题。比如, Marcato 等^[4-5]测得猪粪干沼渣中 Zn 高达 2 628 mg/kg, Cu 高达 1 016 mg/kg, 并通过植物培养试验

发现施加沼渣试验组植物体内重金属含量增加, 增加了施加沼渣后食品安全的风险性。目前, 随着沼气生产由户用分散型向工厂集中型转移, 逐步向工厂化、规模化、集中化发展, 厌氧发酵剩余物的排放更加集中。如何合理、有效地处理和利用厌氧发酵剩余物成为制约沼气工程发展的一大难题。

无土栽培成为农业工厂化生产的重要形式, 具有省水、省肥、省工、优质、高产等优点得到广泛研究。无土栽培通常都是通过配制营养液为目标植物提供营养, 成本高, 配制和管理技术要求较高, 限制了它的推广和应用。因此, 利用农业废弃物作为原料研究和开发有机生态型栽培基质, 对于中国无土栽培的发展具有十分重要的意义。厌氧发酵剩余有机物(俗称沼渣)^[6], 纤维质量分数高达 64%, 含腐殖酸、氮、磷、钾、铜、铁、锰、锌等营养元素^[7], 具有较疏松及全营养的理化特性^[8]。针对目标植物, 厌氧发酵剩余物有机物经过人工调质优化后, 可复合成相对稳定的优良有机无土栽培基质^[9], 为无土栽培提供优良栽培基质。

沼渣用作无土栽培有机基质的研究已有较多报道^[10-14], 但是有关沼渣用作草皮建植有机基质的研究还较少。目前, 全球变暖导致干旱扩大, 加上中国城镇化进程中部分土地无序开发, 造成了以土地荒漠化、土壤肥力下降、农田生产力弱化为特征的生态环境退化。植被绿化是生态环境恢复与重建的重要方法。草坪在中国生态建设中

收稿日期: 2015-04-03 修订日期: 2015-08-07

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划课题: 农业产业园区生产生活循环技术系统构建与示范(NO. 2015BAL04B05)

作者简介: 宋成军, 男, 汉族, 主要研究方向为生态恢复与农业生物质生态化利用。北京 农业部规划设计研究院, 100125。

Email: songchengjun232@sina.com

※通信作者: 赵立欣, 女, 汉族, 主要从事生物质能技术与工程研究。北京 农业部规划设计研究院, 100125。

Email: zhaolixin5092@gmail.com

绿化、美化中起着重要的作用，是城市绿化、大地绿化、边坡绿化、西部地区沙漠化治理中一项必不可少的手段。然而传统草皮生产行业给生态环境带来严重损害。起草皮时为了保护草根一般需保留至少 2~5 cm 厚的耕层土壤，耕作层肥沃土壤（20~30 cm）将在数年内被剥离殆尽^[15-16]，导致农田贫瘠化、荒漠化，甚至抛荒。所以，近些年来，草皮无土栽培备受重视，基质原料主要为城市污泥^[17]、生活垃圾^[18]、作物秸秆^[19]及其混合物^[20-21]，但是以厌氧发酵固体剩余物作为基质培植草皮相关研究尚未见到报道。利用沼渣复合其他基质形成人工复合有机基质，用于建植草皮，无疑是一条新的利用途径，也可以节省宝贵的土壤资源。为此，本研究以沼渣和土壤复合基质栽培高羊茅（*Festuca arundinacea* L.）草皮，评

价不同基质对草坪植物生长和成坪效果的影响，旨在为厌氧发酵固体剩余物培植草皮提供基质选配等基础数据支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料

厌氧发酵固体剩余物：取自北京顺义区北郎中猪场沼气工程（发酵原料主要为猪粪），原始含水率为 61%，容重为 0.33 g/cm³，先放置在太阳下通过自然干燥去除部分水分，再利用热风干燥箱进行 60℃低温烘干，沼渣含水率约为 10%时取出，沼渣再过 1 cm 震动筛，<1 cm 沼渣收集备用，处理后的厌氧发酵固体剩余物主要特性见表 1。

表 1 试验用沼渣主要理化特性

Table 1 Key physical and chemical characteristics of biogas residue

沼渣 Biogas residue	全氮 Total nitrogen	全磷 Total phosphorus	全钾 Total potassium	速效氮 Available nitrogen	速效磷 Available phosphorus	速效钾 Available potassium	有机质 Organic matter content	粪大肠菌群数 Number of fecal coliforms	蛔虫卵死亡率 Mortality of ascarid egg
质量分数 Mass fraction	1.77	6.57	1.25	0.35	5.93	1.08	44.70	<3.00	未检出

供试土壤为耕作层（<20 cm）土壤，取自北京市顺义区李桥镇北河村农田，土壤类型为潮褐土，土壤容重为 1.44 g/cm³。从试验土壤拣出砖块、石子、农膜等杂物，用碾子将土壤压碎后，收集备用。

供试草坪植物选用多年生高羊茅（*Festuca arundinacea* L.），高羊茅种子由北京市农林科学院草业研究中心提供。

1.2 试验设计

1.2.1 制备培植基质

试验采用区组设计，设置 3 个处理和 1 个对照（CK），处理与对照设置 3 次重复（表 2），共 12 个重复。将备用沼渣和备用土壤按照 30:70（V_{沼渣}: V_{土壤}）比例称取，量取沼渣 1.08 m³和土壤 2.52 m³，搅拌机混合均匀，获得 T30 基质，即添加 30%沼渣的基质。采用相同方法制取 T60 基质和 T90 基质，即添加 60%和 90%沼渣的基质，CK 基质全部采用备用土壤，不添加沼渣。不同基质编号、组分、体积比及质量比数据见表 2。

表 2 栽培基质中沼渣土壤质量比例

Table 2 Mass ratios of biogas residue to soil in culture medium

处理 Treatments	沼渣：土壤体积比 Volume ratio of biogas residue to soil/(cm ³ :cm ³)	沼渣：土壤质量比 Mass ratio of biogas residue to soil/(g:g ⁻¹)	重复数 Replication no.
CK	0:100	0.00:144.00	3
T30	30:70	9.96:100.80	3
T60	60:40	19.92:57.60	3
T90	90:10	29.88:14.40	3

注：CK：对照；T30：添加 30%沼渣的基质；T60：添加 60%沼渣的基质；T90：添加 90%沼渣的基质。下同。
Note: CK: Control; T30: Treatment of soil with addition of 30% biogas residue; T60: Treatment of soil with addition of 60% biogas residue; T90: Treatment of soil with addition of 90% biogas residue. The same as below.

1.2.2 播种与培植草皮

试验在大棚中进行，大棚位于农业部废弃物资源化利用重点试验室在顺义区的试验基地内。将准备好的 CK 基质、T30 基质、T60 基质和 T90 基质分别均匀平铺在对应的样方田块上，每一个重复样方内，基质厚度大约 5 cm，宽度 2 m，长度 12 m。用五氯硝基苯和代森锌等量混合后，兑水 500 倍液喷洒进行基质消毒。另外，播种前，草籽用 25%三唑酮进行灭菌处理。2013 年 11 月 20 日播种，均匀播种，播种密度为 45 g/m²，11 月 29 日出苗。3~5 d 浇 1 次水，避免阳光灼伤幼苗，直至试验结束。棚内白天温度为 25~30℃，夜间为 15~20℃，相对湿度为 36%~57%，试验从 2013 年 11 月开始，到 2014 年 1 月 31 日结束，持续约 60 d。

1.3 取样与试验分析

在出苗后第 10 天（2013 年 12 月 9 日）、第 20 天（2013 年 12 月 19 日）和第 40 天（2014 年 1 月 9 日）分别测定各个处理下，草皮的幼苗种群特点，包括：幼苗密度（株/m²）、株高（cm）、幼苗叶宽（cm），以及草皮的群落特点，包括：草皮盖度（%）、草皮颜色等级和草皮均一性。出苗后第 40 天，待测量完草皮特性指标后，采用系统取样方法设置小样方（1 m×1 m），采用剪草机对地上部分进行刈割，留茬高度为 1.00 cm，测定地上生物量（kg）、地下生物量（kg）、草皮根系深度（cm），同时，对基质的容重、渗透性等物理指标进行环刀法测定，环刀容积为 100 cm³。将地上和地下生物量采用称重法测定，分别抽取约 200 g 样品，在 68℃烘箱中烘至恒量后称量。

试验结束时，对于每个样方，取表层土壤样品带回实验室，进行理化特性检测。基质和土壤有机质含量采用重铬酸钾容量法测定^[22]。有效磷采用 Na₂CO₃ 浸提-钼锑抗比色法，全氮采用半微量凯氏定氮法^[23]。

1.4 计算和分析方法

幼苗密度(株/m²)、株高(cm)、幼苗叶宽(cm)、草皮盖度(%)、草皮颜色等级和草皮均一性计算方法参照中华人民共和国国家标准《主要花卉产品等级(第7部分):草坪(GB/T 18247.7-2000)》进行。草皮根层厚度包括根系和基质构成的厚度,直接采用直尺测量。生物量采用千分之一分析天平称量。基质养分、容重、渗透性各物理性质的计算方法参照中华人民共和国林业行业标准《森林土壤分析方法》。数据分析采用SPSS17.0 软件,采用单因素方差分析(One-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)比较不同数据组间的差异。

2 结果与分析

2.1 不同基质理化特性比较

由表 3 可知,不同配比的沼渣对土壤的作用程度各异。土壤中速效氮、速效磷和速效钾、有机质、水分质量分数是草皮良好生长的重要因子。从试验结果可以看出,随着沼渣量的增加,基质中全量养分和有效养分含量均明显增加。其 pH 值降低并接近于 7,相应的营养元素含量发生变化。T90 下,全氮、全磷、全钾和有机质的

质量分数明显低于 T60,而与 T30 差别不明显,这主要是由于土壤自身养分含量较高,而其在 T90 中质量分数显著降低造成的。T90 下,速效氮、速效磷与速效钾质量分数明显低于 T60,主要是因为前者 pH 值显著小于后者造成的,这与前人研究结果一致^[24]。

随着沼渣量的增加,基质物理性质发生明显改善。湿容重以 T90 最低,T30 最高,分别比 CK 下降了 7.75%和 5.43%,T60 和 T90 湿容重差别不明显;干容重以 T60 最低,T30 最高,分别比 CK 下降了 13.92%和 6.33%,T60 和 T90 干容重差别不明显。总孔隙度以 T60 最低,T30 最高,分别比 CK 增加了 3.88%和 2.35%,T60 和 T90 差别不明显。入渗率以 T60 最高,T30 最低,分别比 CK 增加了 2.81 倍和 2.15 倍,T60 和 T90 差别不明显。

可见,3 组复合基质含有丰富的有机质和营养物质,能够充分满足草坪植物生长所需^[25]。对 3 组复合基质物理特性分析表明:基质容重显著降低,入渗率和总孔隙度显著增高,保水性增大。这主要是因为沼渣中富含腐殖酸、氮、磷、钾等营养元素^[7],具有较疏松及全营养的理化特性^[8]。沼渣是草皮生产的优良基质,且随着沼渣质量分数提高,改善效应逐渐减弱。

表 3 三种复合基质与土壤理化特性对比
Table 3 Comparison of physical and chemical properties of three kinds of compound organic substrates and soil

处理 Treatment	全氮 Total nitrogen/%	全磷 Total phosphorus /%	全钾 Total potassium/ %	速效氮 Available nitrogen /(mg·kg ⁻¹)	速效磷 Available phosphorus /(mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium /(mg·kg ⁻¹)	有机质 Organic matter content/%	含水率 Soil water content /%	pH 值 pH value	湿容重 Wet bulk density /(g·cm ⁻³)	干容重 Dry bulk density /(g·cm ⁻³)	总孔隙度 Total porosity /%	入渗率 Infiltration rate /(mL·min ⁻¹ · cm ⁻²)
CK	1.38c	1.26c	6.4b	156.01d	103.21d	100.32c	13.60c	13.00b	7.86a	1.29a	0.79a	70.34b	0.26c
T30	2.18b	2.70b	6.61b	456.21c	302.31c	209.12b	22.22b	21.01a	7.59b	1.22a	0.74a	71.99b	0.71a
T60	2.99a	4.01a	7.02a	882.31a	523.35a	385.42a	30.41a	20.61a	7.37c	1.19b	0.73b	72.57a	0.73a
T90	1.95b	2.49b	6.61b	509.40b	426.43b	268.08a	26.02b	20.38a	7.10c	1.17b	0.71b	73.07a	0.56b

注:不同字母表示 P=005 水平上差异显著。下同。
Note: Different letters in the table stands for significance at P=005. The same as below.

2.2 不同基质对高羊茅幼苗生长的影响

如图 1a 所示,萌发后第 10 天,单位面积幼苗株数以 T90 最高,达到 22 242.00 株/m²,幼苗株数比 T30 明显提高了 33.82%,比 CK 明显提高了 54.77%,但 T30 的幼苗株数较 CK 略高。萌发后第 20 天,单位面积幼苗株数以 T90 最高,达到 30 616.00 株/m²,幼苗株数比 T30 明显提高了 37.63%,比 CK 明显提高了 92.01%,T30 的幼苗株数较 CK 明显增高了 39.51%。萌发后第 40 天,单位面积幼苗株数以 T90 最高,达到 31 990 株/m²,幼苗株数比 T30 明显提高了 34.74%,比 CK 明显提高了 91.09%,但是 T30 的幼苗株数较 CK 增高了 41.83%,增高明显。

如图 1b 所示,萌发后第 10 天,幼苗株高以 T90 最高,幼苗株高为 4.00 cm,幼苗株高比 T30 显著提高了 44.37%,比 CK 显著提高了 86.36%,但是 T30 的幼苗株高与 CK 不明显。萌发后第 20 天,幼苗株高以 T90 和 T60 最高,幼苗株高达到 8.00 cm,株高比 T30 显著提高了 46.62%,比 CK 显著提高了 83.10%,T30 的幼苗株高较 CK 增高了 24.88%,增高不明显。萌发后第 40 天,幼苗株高以 T90 和 T60 最高,达到 10.00 cm,幼苗株高比 T30

显著提高了 48.57%,比 CK 显著提高了 85.71%,但是 T30 的幼苗株高较 CK 增高了 25%,增高不明显。

如图 1c 所示,萌发后第 10 天,幼苗叶宽以 T90 最高,幼苗叶宽为 1.34 cm,幼苗叶宽比 T30 显著提高了 48.89%,比 CK 显著提高了 50.56%,但是 T30 的幼苗株高较 CK 略高(1.12%),增高不明显。萌发后第 20 天,幼苗叶宽以 T90 最高,幼苗叶宽达到 1.81 cm,叶宽比 T30 显著提高了 45.97%,比 CK 显著提高了 67.59%,T30 的幼苗叶宽较 CK 增高了 14.81%,增高不明显。在萌发后第 40 天,幼苗叶宽以 T90 和 T60 最高,达到 1.87 cm,幼苗叶宽比 T30 显著提高了 48.41%,比 CK 显著提高了 94.79%,但是 T30 的幼苗叶宽较 CK 增高了 31.25%,增高明显。

3 种沼渣复合基质下,单位面积幼苗株数高于对照基质,表明高浓度沼渣的复合基质可提高草坪植物种子发芽率,促进出苗,这与厌氧发酵剩余物中含有种子萌发和发育所需要的养分和微量元素有关^[26]。另外,幼苗株高及其叶宽变化具有相似的动态变化,从第 20 天开始,

T60 和 T90 下, 幼苗株高和叶宽显著优于 T30 和 CK。可见, 随着基质中沼渣质量分数提高, 幼苗生长性状得到改善。这与李戛的结果一致^[12]。这种促生效应随着幼苗生长时间延长逐渐增加, 增长速度降低, 可能是因为幼苗密度达到一定程度后出现的自疏作用。

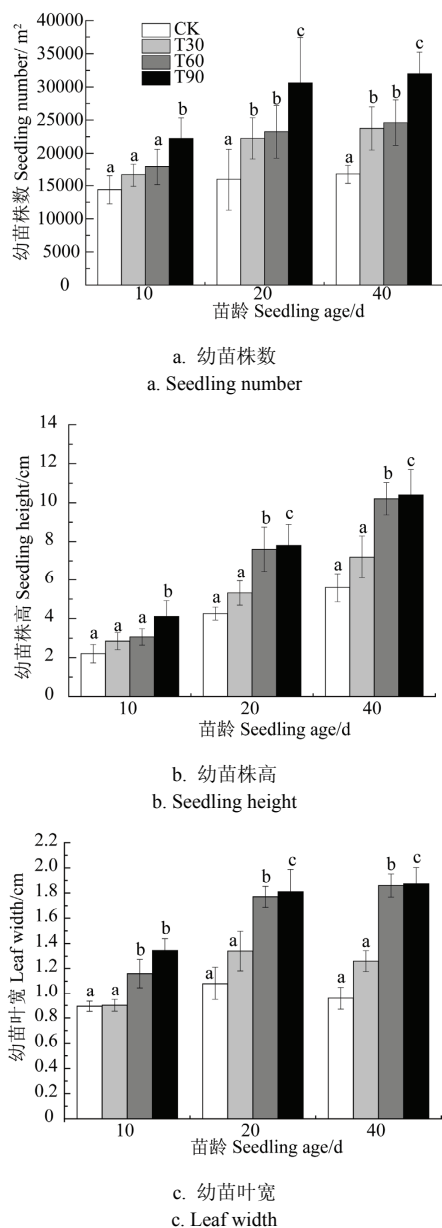


图 1 四种基质的幼苗株数、株高和叶宽动态比较

Fig.1 Dynamic of seedling number, height and leaf width on three kind of compound organic substrates and soil

2.3 不同基质培植高羊茅草皮植物生长特征

如图 2a 所示, 从盖度来看, 出苗后第 10 天, 3 种复合基质下盖度较 CK 高, 随着沼渣质量分数增加, 草皮盖度也增加, 差异不显著; 出苗后第 20 天, T60 下草皮盖度最高, 达到 81.21%, 较 T90 下盖度高出 10.06%, 差异不显著, 这 2 种基质下, 草皮盖度明显大于 T30 与 CK 基质; 出苗后第 30 天, T60 基质下盖度最高, 分别较 T90 和 T30 下盖度高出 15.32% 和 20.41%, 差异显著。T90 和 T30 下, 盖度差异不明显, 但均明显高于 CK。

可见, 4 种基质下, 草皮盖度在相同生长时间内, 盖

度变化趋势一致, 高羊茅更适在复合基质上生长。前 20 天内, 复合基质对盖度影响不明显, 20 d 后, 对盖度影响开始显现, 尤以 T60 的增加效应最为显著, 草皮高度明显高于其他 3 种基质。因此, T60 效果最佳。

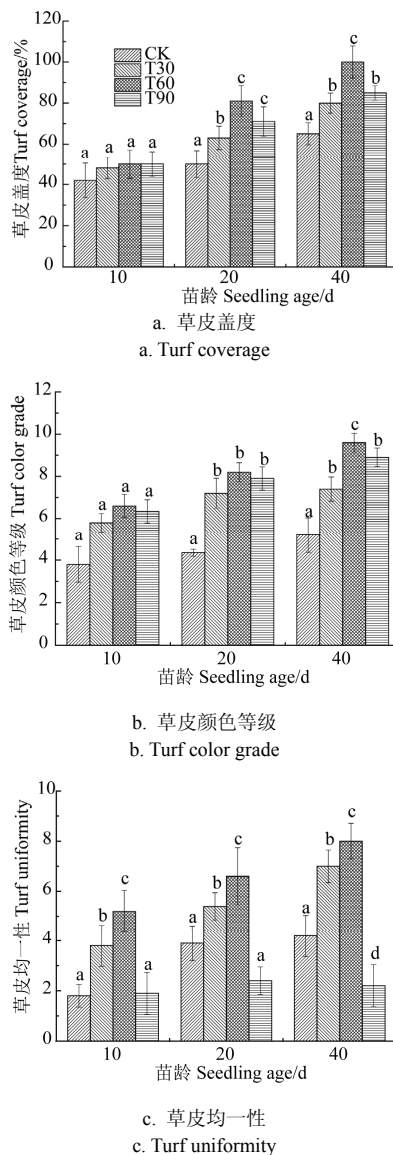


图 2 四种基质的草皮盖度、颜色和均一性动态比较

Fig.2 Dynamic of turf coverage, turf color and uniformity on three kind of compound organic substrates and soil

如图 2b 所示, 出苗后第 10 天, 4 种基质下, 草皮颜色等级差别不显著; 出苗后第 20 天, T30、T60、T90 基质下, 草皮颜色等级明显高于 CK; 出苗后第 40 天, 草皮颜色等级以 T60 处理为最高, 明显高于 T90 和 T30。可见, 随着生长时间延长, 高羊茅叶绿素含量逐渐增加, 草皮颜色等级逐渐增加。复合基质下, 草皮颜色等级显著高于对照基质, 且以 T60 基质下, 该指标保持最高。表明复合基质 T60 在提高草皮植物叶绿素含量方面效果最佳, 这与王秀娟的研究结果相一致^[27]。

如图 2c 所示, 在出苗后第 10 天, 以 T60 草皮均一性最高, 显著高于其他 2 种基质。出苗后第 20 天和第 40 天, T90 下草皮均一性最低, T60 下草皮均一性最高。可见, 在不同的生长时间, 以 T60 下的草皮均一性最优,

以 T90 最差。T30 和 T60 下, 第 40 天时的均一性显著优于第 20 天, 后者又显著优于第 10 天时的草皮均一性。T90 基质下, 第 10 天、第 20 天和第 40 天时的草皮均一性差别不明显。可见, 随着生长时间延长, 均一性逐渐增加, T60 下, 均一性明显优于其他基质。T90 下最差, 可能与沼渣质量分数过大降低了基质的均匀程度引起。

2.4 不同基质培植高羊茅草皮生物量积累与分配

经过 40 d 后, T60 下, 草皮的总生物量显著高于其他 3 种基质, 其次为 T30 基质与 CK 基质, T90 总生物量最低。T60 下, 根层厚度达到 1.98 cm, 明显超过其他 3 种基质, CK 和 T90 下, 根层厚度相差明显。这说明 T60 有利于促进高羊茅根系生长与生物量积累 (表 4)。T60 下, 单位面积草皮地上和地下生物量显著高于其他基质, 其根冠比为 3.94, 分别为 CK、T30 与 T90 的 28.10%、14.53% 与 7.94%。可见, 基质显著改变了草坪植物地上和地下生物量的分配格局, 有增加地上部分的趋势, 这与多立安等^[18]的研究相似。而如此分配格局对草坪植物而言, 可能是有益的, 根系的延长促进植物更快速生长, 地上生物量的配额增加更有利于提高成坪效率和观赏价值。

表 4 不同基质对高羊茅草皮生物量的影响

Table 4 Effects of four kinds of substrates on turf growth of *F. arundinacea*

处理类型 Treatment	地上生物量 Aboveground biomass (kg·m ⁻²)	地下生物量 Underground biomass (kg·m ⁻²)	总生物量 Total biomass (kg·m ⁻²)	根层厚度 Root length /cm	根冠比 Root shoot ratio
CK	1.13c	6.19d	7.32b	1.18c	5.48a
T30	1.27b	5.85b	7.12b	1.42b	4.61b
T60	1.60a	6.30a	7.90a	1.98a	3.94c
T90	1.20ab	5.14c	6.34b	1.16c	4.28d

2.5 较优基质的筛选

综上所述, 添加 60%沼渣的基质, 其全氮、全磷、全钾、速效氮、速效磷、速效钾、有机质含量最高, 该基质下, 草皮盖度与均一性也最高, 高羊茅草皮的总生物量、地上和地下生物量以及根层厚度显著大于其他基质, 根冠比也最小。尽管添加 90%沼渣的基质, 其幼苗株数、株高、叶宽优于 60%沼渣基质, 但是差异不显著。从高羊茅幼苗生长和成坪特征来看, 添加 60%沼渣的基质最适于建植高羊茅草皮。

3 结 论

1) 复合基质含有丰富的有机质和营养物质, 能够充分满足高羊茅草皮生长所需。添加 60%沼渣的基质, 其全氮、全磷、全钾、速效氮、速效磷、速效钾、有机质含量最高, 明显高于其他 3 种基质。随着沼渣质量分数提高, 复合基质的 pH 值显著降低, 干、湿容重显著降低, 入渗率和总孔隙度显著增高, 保水性增大, 且这种改善效应随着沼渣质量分数增大逐渐降低。

2) 3 种复合基质对高羊茅幼苗生长有明显促进作用。萌发后第 20 天, 添加 60%和添加 90%沼渣的基质下, 幼苗株高分别为 8.00 cm, 比对照显著提高了 83.10%, 第

40 天, 添加 60%和添加 90%沼渣的基质下, 幼苗株高都为 10 cm, 比对照明显提高了 85.71%。

3) 3 种复合基质对草皮植物成坪特征有明显影响。出苗后第 10 天, 3 种复合基质下草皮盖度较对照高; 出苗后第 20 天, 添加 60%沼渣的基质下草皮盖度最高, 达到 81.21%, 比对照下草皮盖度增大了 13.47%。出苗后第 40 天, 添加 60%沼渣的基质下盖度最高, 较对照下盖度显著高出 53.85%。3 种复合基质下, 草皮颜色等级显著高于对照, 且以添加 90%沼渣的基质保持最高。随着生长时间延长, 草皮均一性逐渐增加, 添加 60%沼渣的基质下, 均一性明显优于其他基质。

4) 添加 60%沼渣的基质有利于促进高羊茅草皮根系生长与生物量积累。出苗后第 40 天, 添加 60%沼渣的基质下, 高羊茅草皮的总生物量、地上和地下生物量以及根层厚度显著大于其他 3 种基质; 添加 60%沼渣的基质下, 草皮根冠比为 3.94, 分别为对照、添加 30%、90%沼渣的处理的 28.10%、14.53% 与 7.94%。添加 60%沼渣的基质显著改变了草坪植物地上和地下生物量的分配格局, 有增加地上部分的趋势。从高羊茅幼苗生长和成坪特征来看, 添加 90%和 60%沼渣的基质适于建植高羊茅草皮, 以后者为较优。

[参 考 文 献]

- [1] Jiang Xinyuan, Sommer S G, Christensen K V. A review of the biogas industry in China[J]. Energy Policy, 2011, 39(10): 6073–6081.
- [2] 谢景欢, 袁巧霞, 陈钢, 等. 施用沼渣的温室土壤氮累积及重金属污染状况研究[J]. 中国沼气, 2010, 28(6): 16–19. Xie Jinghuan, Yuan Qiaoxia, Chen Gang, et al. Effect of biogas residue application on nitrogen accumulation and heavy metal pollution in greenhouse soil[J]. China Biogas, 2010, 28(6): 16–19. (in Chinese with English abstract)
- [3] 靳红梅, 付广青, 常志州, 等. 猪、奶牛粪厌氧发酵中 Pb 的形态转化及其分布特征[J]. 农业工程学报, 2013, 29(22): 218–225. Jin Hongmei, Fu Guanqing, Chang Zhizhou, et al. Distribution of Pb and its chemical fractions in liquid and solid phases of digested pig and dairy slurries[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(22): 218–225. (in Chinese with English abstract)
- [4] Marcato E, Pinelli E, Winterton P, et al. Particle size and metal distributions in anaerobically digested pig slurry[J]. Bioresource Technology, 2008, 99: 2340–2348.
- [5] Marcato E, Pinelli E, Cecchi M, et al. Bioavailability of Cu and Zn in raw and anaerobically digested pig slurry[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2009, 27: 1538–1544.
- [6] Chen Ling, Zhao Lixin, Ren Changshan, et al. The progress and prospects of rural biogas production in China[J]. Energy Policy, 2012, 51(12): 58–63.
- [7] 靳红梅, 付广青, 常志州, 等. 猪、牛粪厌氧发酵中氮素形态转化及其在沼液和沼渣中的分布[J]. 农业工程学报, 2012, 28(21): 208–214.

- Jin Hongmei, Fu Guangqing, Chang Zhizhou, et al. Distribution of nitrogen in liquid fraction of pig and dairy manure in anaerobic digestion reactor[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(21): 208—214. (in Chinese with English abstract)
- [8] Terhoeven-Urselmans T, Scheller E, Raubuch M. CO₂ evolution and N mineralization after biogas slurry application in the field and its yield effects on spring barley[J]. Applied Soil Ecology, 2009, 42(3): 297—302.
- [9] Peter W. Biogas production: Current state and perspectives[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2010, 85(4): 849—860.
- [10] 袁巧霞, 王秀娟, 艾平. 沼渣有机栽培基质理化特性及栽培效果试验研究[J]. 农机化研究, 2008(3): 157—161.
- Yuan Qiaoxia, Wang Xiujuan, Ai Ping. Research on physico-chemical properties of biogas residue organic substrate and culture test[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2008(3): 157—161. (in Chinese with English abstract)
- [11] 朱春云. 沼渣对基质性质和温室番茄生长的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2009.
- Zhu Chunyun. Effects of Biogas Residue on the Properties of the Substrate and the Growth of Tomato in Greenhouse[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2009. (in Chinese with English abstract)
- [12] 李戡, 蒋芳玲, 刘明池, 等. 沼渣与基质配比对番茄幼苗生长和生理特性的影响[J]. 蔬菜, 2011, 6(1): 52—56.
- Li Yu, Jiang Fangling, Liu Mingchi, et al. Influence of the ratio of biogas residue and substrate on the growth and physiological characteristics of Tomato Seedlings[J]. Vegetables, 2011, 6(1): 52—56. (in Chinese with English abstract)
- [13] 赵玲. 生物预处理玉米秸秆厌氧干发酵特性及沼渣基质利用研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2011.
- Zhao Ling. Study on the Characteristics of Corn Stalk Dry Anaerobic Fermentation Based on Bio-pretreatment and the Utilization of Residue Media[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2011. (in Chinese with English abstract)
- [14] 杨敬华, 武占会, 刘明池, 等. 无机基质配比及沼渣施肥水平对无土栽培苗用型大白菜生长的影响[J]. 中国蔬菜, 2013, 6(2): 44—49.
- Yang Jinghua, Wu Zhanhui, Liu Mingchi, et al. Effect of inorganic substrate ratio and fertilization levels of biogas residue on growth of seedling-edible Chinese Cabbage in soilless cultivation[J]. China Vegetables, 2013, 6(2): 44—49. (in Chinese with English abstract)
- [15] Epstein E, Taylor J M, Chaney R I. Effect of sewage sludge compost applied to soil on some physical and chemical properties[J]. Journal of Environmental Quality, 1976, 5(4): 422—426.
- [16] 多立安, 赵树兰, 高玉葆. 草坪建植体系构建中的生态问题[J]. 生态学报, 2007, 27(3): 1065—1071.
- Duo Lian, Zhao Shulan, Gao Yubao. Probe into several ecological issues related to the establishment of urban turf systems[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(3): 1065—1071. (in Chinese with English abstract)
- [17] 李艳霞, 赵莉, 陈同斌. 城市污泥堆肥用作草皮基质对草坪草生长的影响[J]. 生态学报, 2002, 22(6): 797—801.
- Li Yanxia, Zhao Li, Chen Tongbin. The municipal sewage sludge compost used as lawn medium[J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(6): 797—801. (in Chinese with English abstract)
- [18] 多立安, 廉菲, 赵树兰, 等. 生活垃圾堆肥淋洗液栽培无土草皮的生态特征[J]. 生态学报, 2007, 27(12): 5050—5056.
- Duo Lian, Lian Fei, Zhao Shulan, et al. Ecological characteristics of soilless sods cultivated by leachate from a municipal solid waste compost[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(12): 5050—5056. (in Chinese with English abstract)
- [19] 干友民, 蒙宇, 张建波, 等. 不同稻秸基质处理对高羊茅无土草皮成坪天数及坪用价值的影响[J]. 草业学报, 2009, 18(4): 87—93.
- Gan Youmin, Meng Yu, Zhang Jianbo, et al. Influence of different treatment with straw and straw's thickness on forming-sod time and turf quality[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2009, 18(4): 87—93. (in Chinese with English abstract)
- [20] 于鑫, 孙向阳, 张骅, 等. 有机固体废弃物再生环保型无土栽培基质研究进展[J]. 北方园艺, 2009(10): 136—139.
- Yu Xin, Sun Xiangyang, Zhang Hua, et al. Advances on eco-friendly soilless substrates manufactured by organic solid wastes[J]. Northern Horticulture, 2009(10): 136—139. (in Chinese with English abstract)
- [21] 朱淑霞, 尹少华, 张俊卫, 等. 不同废弃物基质对狗牙根无土草皮生产的影响[J]. 草业科学, 2011, 28(1): 68—73.
- Zhu Shuxia, Yin Shaohua, Zhang Junwei, et al. Effects of different waste soilless medium on Bermudagrass (*Cynodon dactylon*) sod production[J]. Pratacultural Science, 2011, 28(1): 68—73. (in Chinese with English abstract)
- [22] Institute of Soil Science, CAS. Nanjing Analysis for Soil Physical and Chemical Properties[M]. Shanghai: Science and Technology Press, 1983, 132—136.
- [23] Lu P K. The Analytical Methods for Soil and Agricultural Chemistry[M]. Beijing: Agricultural Technology Publication of China, 2000, 146—195.
- [24] Gao T G, Chen N, Li W Q, et al. Effect of highly effect nutrient solution of biogas slurry on yield and quality of vegetables[J]. Agricultural Science & Technology, 2011, 12(4): 567—570.
- [25] Mcquilken M P, Whipps J M, Lynch J M. Effects of water extracts of a composted manure straw mixture on the plant pathogen *Botrytis Cinerea*[J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 1994, 10(1): 20—26.
- [26] 张夏宁. 概述沼液综合利用[J]. 广东化工, 2012, 39(6): 103—105.
- Zhang Xianing. Overview of comprehensive utilization of biogas[J]. Guangdong Chemical Industry, 2012, 39(6): 103—105. (in Chinese with English abstract)

- [27] 王秀娟. 基于沼渣的无土栽培有机基质特性的研究. 武汉: 华中农业大学, 2006.
Wang Xiujuan. Study on Properties of Organic Substrate in

Soilless Culture Based on Biogas Residue[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2006. (in Chinese with English abstract)

Ecological characteristics of *Festuca arundinacea* L. turf cultivated by solid residues from anaerobic digestion project

Song Chengjun¹, Tian Yishui¹, Luo Juan¹, Qi Yue¹, Zhao Lixin^{1*}, Zhao Xuelan², Tian Xi³

(1. Key Laboratory of Energy Resource Utilization from Agricultural Residues (MOA), Institute of Energy and Environmental Protection, Chinese Academy of Agriculture Engineering, Beijing 100125, China; 2. Tianjin Vocational College of Bioengineering, Tianjin 300074, China 3. Tianshui National Agricultural Science and Technology Park, Tianshui 741030, China)

Abstract: Biogas residue is a kind of high quality medium, being with comprehensive nutrition and rich in organic matter. In order to select new type of non-soil culture substrate, in this paper, the experiment for single factor randomized block design was carried out to study the effects of the mass fraction of biogas residue on physicochemical properties of compound organic substrate, growth characteristics of seedlings and grass turf traits of *Festuca Arundinacea*. In this experiment, biogas residue was used as raw material to compound organic substrate to plant tall fescue turf. The results were as follows: 1) For the T60 matrix (volume fraction of biogas residue was 60%), the total nitrogen, total phosphorus, total potassium, available nitrogen, available phosphorus, available potassium and organic matter content were the highest, and more than the other 3 matrices, which were CK, T30 and T90 (volume fractions of biogas residue were zero, 30% and 90%, respectively); with the increase of mass fraction of biogas residue in compound organic substrate, pH value of the compound matrix decreased significantly, both dry and wet bulk density decreased, both infiltration rate and total porosity increased, water retention increased, and this amelioration effect of biogas residue decreased with the increasing of mass fraction of biogas residue; 2) All 3 compound organic substrates had significant promoting effect on the seedling growth of *F. Arundinacea*. The seedling number per unit area growing on T90 substrate was 22242, 30616, and 31990 for the 10th, 20th, and 40th day after germination, which was increased by 54.77%, 92.01% and 91.09%, respectively, compared with CK. For the 10th day after germination, seedling height on T90 substrate was the highest, 86.36% higher than that on CK substrate. For the 20th day after germination, seedling heights on T60 and T90 substrate were the same, which were both 8 cm, 83.10% higher than that of seedling with CK substrate. In the 40th day after germination, seedling heights with T60 and T90 substrate were both 10 cm, 85.71% higher than that of seedling with CK substrate. Seedling leaf width on T90 substrate was respectively 1.34, 1.81 and 1.87cm for the 10th, 20th and 40th day after germination, and it respectively increased by 50.56%, 67.59% and 94.79% compared with that of seedling on CK substrate. From the point of view of seedling growth, both T60 and T90 substrate were suitable for the cultivation of tall fescue turf; 3) For the 10th day after germination, turf coverage on 3 compound organic substrates was higher than that of CK substrate; for the 20th and 40th day after germination, turf coverages with T60 substrate were respectively 81% and 100%, which were the highest and increased by 13.47% and 53.85% respectively compared with that of the CK substrate; the turf color and uniformity with T60 substrate was higher than that of the CK substrate; 4) For the 40th day after germination, total biomass, aboveground and underground biomass and root thickness of turf under T60 substrate were significantly greater than the other 3 substrates; root shoot ratio of turf was 3.94 on T60 substrate, which was only 28.10%, 14.53% and 7.94% of that under CK, T30 and T90 substrate, respectively. T60 substrate significantly changed the distribution of aboveground and underground biomass pattern of *F. Arundinacea*, and significantly promoted the biomass allocation to the aboveground. Therefore, T60 substrate was the most suitable compound organic substrate for the establishment of tall fescue turf.

Key words: substrates; growth; physical properties; chemical properties; biogas residue; turf grass; soilless culture