# 污泥堆肥混合基质对香彩雀生长开花的影响及植物适应性评价*

储双双[1] 赖 灿[1] WEI Xiao-hua[2] 郭 艳[1] 丁雪腾[1] 肖梦蕊[1] 曾曙才[1**]

([1]华南农业大学林学院, 广州 510642; [2]Earth and Environmental Sciences, Irving K. Barber School of Arts and Sciences, University of British Columbia, Canada V1V 1V7)

**摘 要** 采用盆栽试验,研究了以城市污泥堆肥为主要原料的基质对观花植物香彩雀(*Angelonia salicariifolia* Humb.)生长和开花特性的影响,并采用熵权系数与TOPSIS集成评价法综合评价了不同基质对香彩雀的生长适应性。结果表明,经过60 d高温好氧堆制的污泥堆肥,以不同体积比与泥炭、河沙混配成的栽培基质容重和EC值比研究区的林地赤红壤低,pH值和养分含量更高。污泥堆肥混合基质栽培的香彩雀营养生长和生殖生长均优于土壤栽培,其中株高比后者增加29%~61%,分枝数增加27%~67%,鲜重增加17%~88%,干重增加4%~50%,开花时间提前2~16 d,花朵数增加49%~220%,花期延长8~22 d,花朵畸形率降低1%~5%,对氮、磷、钾的吸收能力显著提高。试验中各种污泥堆肥混合基质均适合香彩雀生长,熵权系数与TOPSIS集成评价结果显示,在所研究的污泥堆肥基质中,污泥堆肥:泥炭:河沙体积比为5∶3∶2的基质植物适应性最强,纯污泥堆肥植物适应性相对较差,但优于土壤。将污泥堆肥作为基质主要成分用于花卉生产,既可提高花卉质量,降低成本,又能消耗大量污泥,是城市污泥资源化处置和利用的重要方向。

**关键词** 污泥堆肥; 混合基质; 泥炭; 香彩雀; 生长开花特性

**中图分类号** S141.4 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2014)4-0966-07

**Effect of sludge compost-based mixed substrates on growth and blossom of *Angelonia salicariifolia* and evaluation of its suitability for plant growth.**

CHU Shuang-shuang[1], LAI Can[1], WEI Xiao-hua[2], GUO Yan[1], DING Xue-teng[1], XIAO Meng-rui[1], ZENG Shu-cai[1**] ([1] *College of Forestry, South China Agricultural University, Guangzhou* 510642, *China*; [2]*Earth and Environmental Sciences, Irving K. Barber School of Arts and Sciences, University of British Columbia, Canada V1V 1V7*). *Chinese Journal of Ecology*, 2014, **33**(4): 966-972.

**Abstract**: The effect of sludge-based mixed substrates (SBMSs) on the growth and flowering of *Angelonia salicariifolia* (ASA) was studied with a pot experimental method. The growth suitability of ASA to these substrates was then evaluated using entropy weight coefficient and TOPSIS method. The sludge was composted 60 days prior to mixing and potting with peats and sands at different ratios. Our results showed that SBMSs had lower values in bulk density and EC, but higher values in pH and nutrient content than latosolic red soil (CK) in the study region. The ASA in the differently mixed substrates all grew better than in the soil, with the increases in heights, branchlet numbers, fresh and dry weights by 29%-61%, 27%-67%, 17%-88% and 4%-50%, respectively. In addition, the first flowering of ASA in the SBMSs blossomed 2-16 days earlier, their flower numbers in the full-bloom stage increased by 49%-220%, the flowering duration prolonged 8-22 days, and the malformation rate of flowers decreased by 1%-5%. The absorption of nitrogen, phosphorus and potassium by ASA showed a significant increase over CK. All the 7 substrates in this study were suitable for ASA growth. Entropy weight coefficient

*国家自然科学基金项目(31270675)、广东省科技计划项目(2012B020310004,2008B030302008)和东莞市高等院校科研机构科技计划项目(200910810174)资助。

**通讯作者 E-mail: sczeng@scau.edu.cn

收稿日期: 2013-09-16 接受日期: 2013-12-24

and TOPSIS evaluation indicated that SBMSs with the ratio of 5∶3∶2 of sludge compost to peat to sand was most suitable for the growth of this plant, and the sludge compost alone was relatively less suitable, but still better than the soil (CK). Therefore, sewage sludge compost can improve flower quality and plant growth with a reduce cost, which is a feasible and effective way for sewage sludge reuse and disposal.

**Key words**: sewage sludge compost; mixed substrate; peat; *Angelonia salicariifolia*; growth and flowering responses.

基质栽培技术是现代无土栽培研究的一个重要内容。基质栽培中,选择适宜的基质是作物栽培成功的关键(Huang & Paul,2000)。成分单一的基质由于理化性状上的缺陷很难满足作物生长的各项要求,因此,选择用多种材料按一定比例混合形成且能够循环利用、不污染环境、栽培效果好的有机-无机复合基质是基质利用的重要发展方向(郭世荣,2005)。

继英国 John Inne Compost 公司于 1939 年开发了第一种由有机肥、泥炭和沙组成的复合堆肥栽培基质(刘庆超,2006)之后,以农业生物质原料为主的有机基质(Noguera *et al.*,2000)以及包括蛭石、炉渣、珍珠岩、河沙在内的无机基质(周跃华等,2005)相继被用作复合基质原材料。城市污泥中含有大量的有机质和植物所需的营养成分(李艳霞等,2003),作为一种有价值的生物资源,在农田、草地及森林生态系统得到有效应用(马娜等,2004;白莉萍和伏亚萍,2009)。但是,最近国家环保部(农业部)明令禁止未经无害化处置的污泥堆肥用于农田,使污泥处置和利用受到很大限制。因此,在污泥处置困难和基质用量激增的双重压力下,同时考虑到污泥在园林植物栽培中使用不进入食物链等优点,将污泥作为复合基质原料之一,用作花卉、苗木栽培逐渐成为新型的污泥生态化处置途径(李艳霞等,2002)。Coma 等(1991)发现,泥炭、污泥堆肥、珍珠岩以一定比例混合后种植橡皮树、天竺葵、龙血树等,植株均生长良好。高红真(2009)将城市污泥、树皮、秸秆、醋糠混合为栽培基质,进行了大花萱草、红花景天、串红和万寿菊 4 种花卉植物的栽培试验,结果发现,城市污泥对这 4 种花卉生长发育均有明显的促进作用。

香彩雀(*Angelonia salicariifolia* Humb.)为玄参科香彩雀属多年生草本观花植物,一年四季花开不断,花色有白色、紫色、紫白相间,可应用于花坛、组合盆栽、庭院绿化等,观赏价值高,栽培简单,具有广阔的园林应用前景。本文以广州大坦沙污水处理厂污泥为主要原料,将污泥堆肥处理后,根据其理化性状,利用泥炭、河沙作为辅料,通过盆栽实验,开展以污泥堆肥为主要原料的混合基质用于香彩雀栽培的试验研究,并筛选出适宜的基质配方,以期在植株长势良好的同时,实现城市污泥的资源化处置,减少泥炭使用,降低花卉生产成本。本文将城市污泥资源化处理与绿化工程紧密结合的环境生态技术开发的基础研究,具有较强的理论意义和实际应用价值。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

城市污泥堆肥:选用广州市大坦沙污水处理厂污泥,风干后碾碎过 2 mm 筛,以适量草木灰作为膨松剂混匀,上盖塑料薄膜保温,进行好氧堆肥处理。堆肥时间为 60 d(2011 年 6 月 3 日—8 月 3 日)。

供试土壤采自华南农业大学树木园,为典型赤红壤,呈酸性,基本理化性质见表 2。泥炭、河沙购于广州市芳村花卉市场某园林栽培基质公司。供试植物香彩雀苗购于广州市某花卉基地,供试前长势一致。栽培用盆为高 13 cm、口径 14 cm 的塑胶花盆,购于广州市芳村花卉市场。

### 1.2 试验设计

污泥经过 60 d 的高温好氧堆制后,与泥炭、河沙按不同体积配比制得。共设 7 种配比(处理),以土壤栽培作为对照(表 1),每个处理 3 次重复,每个盆中基质体积一致,均为盆容积的4/5。基质盆栽

**表 1 基质盆栽试验设计**

**Table 1 Experiment design of potting substrate**

| 处理代号 | 物料 | 体积比 |
|---|---|---|
| CK | 赤红壤 | – |
| T1 | 污泥堆肥∶泥炭∶河沙 | 3∶3∶4 |
| T2 | 污泥堆肥∶泥炭∶河沙 | 4∶3∶3 |
| T3 | 污泥堆肥∶泥炭∶河沙 | 5∶3∶2 |
| T4 | 污泥堆肥∶泥炭∶河沙 | 6∶2∶2 |
| T5 | 污泥堆肥∶泥炭∶河沙 | 7∶2∶1 |
| T6 | 污泥堆肥∶泥炭∶河沙 | 8∶1∶1 |
| T7 | 污泥堆肥∶泥炭∶河沙 | 10∶0∶0 |

试验采取完全随机区组设计。试验场地设在华南农业大学林学院温室大棚内。定期浇水,试验过程中无杂草,杀虫1次。试验前测定香彩雀原始株高并记录,生长期间观测香彩雀生长特性和开花习性。于2011年9月3日开始香彩雀盆栽试验,同年12月25日收获植株。

### 1.3 分析方法

各配比基质测定指标包括容重、毛管持水量、总孔隙度、pH、EC、有机质、全氮、碱解氮、全磷、速效磷、全钾、速效钾。测定方法均按照《土壤农化分析》进行,其中容重采用环刀法;pH采用pH计法(水土比为2.5∶1);EC用电导率仪测定;有机质采用重铬酸钾容量法;全氮、碱解氮采用碱解扩散法;全磷采用NaOH熔融-钼锑抗比色法;速效磷采用盐酸和硫酸溶液浸提-钼锑抗比色法;全钾采用NaOH熔融-火焰分光光度计法;速效钾采用醋酸铵浸提-火焰分光光度计法(鲍士旦,2000)。

植株观测指标包括株高增加量、分枝数、花朵数、花期、收获时植株鲜重和干重,其中株高增加量和分枝数分别在10月15日和收获前(12月25日)测定,株高增加量采用直尺测量,分枝数采用观测记录法。花朵数、畸形花朵数量为开花最盛期的数量(11月25日观测记录)。试验结束时,将所有试验苗木整株挖出,带回实验室,先用自来水洗净根部,再用去离子水冲洗晾干,测定鲜重。将样品装入信封,放入烘箱,在90 ℃下杀青30 min,70 ℃下烘至恒重,用电子天平称得干重。

测定植株全氮、全磷、全钾含量。测定方法为,先用浓硫酸-双氧水消煮植物样品,获得待测液,氮含量用碱解扩散法,磷含量用钼锑抗比色法,钾含量用火焰分光光度计法。

### 1.4 数据处理

用Excel 2003进行数据整理,然后用SPSS 16.0软件对数据进行统计分析。采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和Duncan多重极差检验法比较不同处理间的差异。基质最优配比的筛选用熵权系数与TOPSIS集成综合评价法(杨树佳等,2006;刘军,2010)。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同配比基质理化性质

基质的理化性质决定花卉生长状况。在早期无土栽培基质研究中,通常通过测定基质理化性质来初步判断基质好坏,国外市场上销售的一些成品基质质量多以基本理化性质测定值来衡量(Offord *et al.*,1998)。

基质较好的物理性状和丰富的营养元素是植物健壮生长的保证。本试验中,栽培基质CK(土壤)的容重最大,为1.25 g·cm$^{-3}$,其余7个处理栽培基质的容重在0.73~0.91 g·cm$^{-3}$,差异不显著(表2)。试验中栽培基质CK的总孔隙度为41.97%,显著低于其他处理,而T1~T7在59.69%~74.40%,无显著差异。从pH值可以看出,CK为强酸,其他处理呈微酸至微碱性,理想基质EC值应<2.5 mS·cm$^{-1}$,除T7略高外,其他处理的EC值均在理想范围之内。CK的有机质含量较低,仅为20.07 g·kg$^{-1}$,而T1~T7有机质含量在74.41~204.93 g·kg$^{-1}$。混合基质的养分含量丰富,全氮、全磷、全钾含量分别在2.46~5.52、1.38~1.61和23.06~27.65 g·kg$^{-1}$,而随着污泥堆肥添加比例增加,混合基质的有机

**表2 不同配比基质的理化性质**

**Table 2 Basic physicochemical properties of different substrates**

| 理化性质 | CK | T1 | T2 | T3 | T4 | T5 | T6 | T7 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 容重(g·cm$^{-3}$) | 1.25±0.01 a | 0.91±0.01 b | 0.88±0.03 b | 0.80±0.02 b | 0.73±0.01 b | 0.78±0.01 b | 0.80±0.01 b | 0.89±0.01 b |
| 孔隙度(%) | 41.97±0.25 b | 60.99±0.97 a | 56.30±0.10 a | 60.21±0.02 a | 59.21±0.23 a | 58.96±0.55 a | 60.05±0.18 a | 59.27±0.14 a |
| 毛管持水量(g·kg$^{-1}$) | 323.1±5.90 d | 744.0±2.70 a | 596.9±2.70 c | 694.2±24.0 ab | 639.1±6.10 b | 734.2±11.5 a | 737.0±10.8 a | 765.90±10.00 a |
| pH | 3.13±0.01 b | 6.24±0.03 a | 6.84±0.01 a | 6.75±0.03 a | 6.87±0.01 a | 7.02±0.03 a | 7.27±0.02 a | 7.17±0.17 a |
| EC(mS·cm$^{-1}$) | 0.17±0.01 c | 1.98±0.06 b | 2.07±0.03 b | 2.23±0.05 ab | 2.03±0.04 b | 2.21±0.03 ab | 2.37±0.04 ab | 2.56±0.04 a |
| 有机质(g·kg$^{-1}$) | 20.07±0.51 d | 74.41±0.51 d | 100.57±1.04 b | 101.67±2.25 b | 143.09±2.28 b | 144.92±1.67 b | 193.16±1.99 a | 204.93±1.31 a |
| 全氮(g·kg$^{-1}$) | 0.33±0.00 d | 2.46±0.00 d | 2.56±0.02 c | 2.85±0.03 c | 3.20±0.01 bc | 4.07±0.30 b | 4.25±0.07 b | 5.52±0.07 a |
| 碱解氮(mg·kg$^{-1}$) | 72.26±0.22 e | 194.14±2.33 d | 200.53±2.15 cd | 230.85±3.29 c | 250.09±2.39 c | 300.01±2.39 c | 319.22±1.13 b | 415.22±0.94 a |
| 全磷(g·kg$^{-1}$) | 0.44±0.01 b | 1.38±0.04 a | 1.39±0.01 a | 1.43±0.02 a | 1.44±0.07 a | 1.48±0.03 a | 1.61±0.03 a | 1.51±0.03 a |
| 速效磷(mg·kg$^{-1}$) | 4.36±0.20 c | 67.68±0.97 b | 76.06±0.45 b | 76.72±0.88 b | 84.86±3.47 b | 85.13±3.84 b | 82.41±3.84 b | 135.43±3.24 a |
| 全钾(g·kg$^{-1}$) | 13.95±0.20 b | 23.06±0.40 a | 23.49±0.68 a | 23.52±0.76 a | 23.95±0.61 a | 24.39±0.47 a | 27.65±0.33 a | 26.77±0.33 a |
| 速效钾(mg·kg$^{-1}$) | 68.84±0.72 d | 946.08±8.93 c | 1158.98±12.70 b | 1239.73±17.27 b | 1319.12±11.80 b | 1639.53±12.80 b | 2141.2±6.08 a | 1708.2±6.08 a |

数据为平均值±标准误($n$=3);多重比较采用Duncan法,同行数据后不同字母表示差异显著($P$<0.05)。

质、全氮、碱解氮、全磷、速效磷、全钾和速效钾含量大体上均呈增加趋势,CK 养分含量显著低于混合基质。纯污泥堆肥(T7)的各项性状均优于土壤(CK)。

**2.2** 不同配比基质对香彩雀生长发育的影响

2011 年 9 月 3 日移栽试验苗后,定期监测了香彩雀株高增加量及分枝数,实验结束后,测定了植株的鲜重和干重,不同处理条件下香彩雀生长状况见表 3。

由表 3 可以看出,与对照相比,污泥堆肥混合基质对香彩雀高生长及新枝分蘖能力均具有不同程度的促进作用。虽然 10 月份各处理的高生长无显著差异,而 12 月份 T1 ~ T4 均显著大于 CK 和 T7。10 月份 T3、T4 分枝数显著高于 CK,实验结束时,T3、T4 的分枝数显著高于 CK 和 T1,CK 与 T3、T4 以外的其他各处理均无显著差异。T3、T4、T5 的干重显著高于 CK、T1、T6 和 T7,T6、T7 与 CK 无显著差异。随着污泥堆肥用量增加,香彩雀株高增加量呈下降趋势,分枝数和干重则呈先增后减的趋势。盆栽 1 个月后(10 月 25 日),污泥堆肥混合基质对香彩雀株高生长并无显著影响,对分枝数则影响显著,表明不同生长指标对基质的反映不同。在香彩雀整个生长过程中,施用污泥堆肥的株高增加量比对照处理高 29.1% ~60.81%,分枝数高 26.92% ~67.30%,鲜重高 17.09% ~ 88.06%,干重高 3.7% ~ 50.46%。T7 的各项指标虽然在统计上均与土壤(CK)差异不显著,但数值均大于后者。

T3(污泥堆肥∶泥炭∶河沙比例 5∶3∶2)的香彩雀 4 个生长指标均为最高,生长最为旺盛,且与部分处理有显著差异,说明此配比基质已完全能满足其对养分的需求。继续添加污泥、减少泥炭和河沙量则不利于植株的生长(表 3)。

**2.3** 不同配比基质对香彩雀开花特性的影响

开花习性是观花植物重要的质量评价指标,它反映了该植物的观赏价值和生长状态。试验期间,观察记录了香彩雀首次开花时间和花朵全部凋落时间、盛期开花数量、盛期畸形花朵数。

由表 4 可以看出,与土壤栽培(CK)相比,城市污泥堆肥混合基质可使香彩雀开花时间提前 2 ~16 d,花期延长 8 ~22 d。开花最早是 T6,花期最长的是 T4,其次是 T3,T3、T4 显著高于 CK,而其他处理间无显著差异。T3、T4、T5 香彩雀盛花期花朵数显著高于 T6、T7 和 CK,T3 花朵最多,平均值为 545 朵·盆$^{-1}$,比土壤栽培(CK)高 220.39%,T7 的各项指标虽均与 CK 无显著差异,但花期提前了 9 d,花期平均延长了 8 d,盛花期花朵数平均增加近 80 朵。花朵畸形率 CK 最高,为 5.88%,而污泥堆肥混合基质各处理花朵畸形率明显小于 CK,最小为 T3 处理(1.10%),说明合理的污泥混合基质配比不仅可以使香彩雀提前开花,延长花期,增加花量,且对花卉品质具有一定改善作用。T3 开花时间略晚,但花朵数量、花期持续时间、花朵畸形率与其他处理相比均具有明显优势。

**2.4** 不同配比基质对香彩雀吸收氮磷钾的影响

植株氮磷钾含量或收获时的贮存量是基质养分供应状况和养分利用率的反映。污泥是一种良好的有机肥源,它对于提高基质养分、增加有机质等都有明显效果,因而以污泥堆肥为主原料的混合基质能为植物生长提供丰富的氮源、磷源和钾源。

由图 1 可知,污泥堆肥混合基质栽培香彩雀,其氮、磷吸收量(贮存量)显著高于土壤栽培处理,除 T6 以外的所有混合基质处理钾吸收量显著高于土壤处理。当污泥堆肥添加比例为 30% ~50% 时,香彩雀对总氮、总磷和总钾的吸收量随着污泥堆肥施用量的增加而增加,至50%(T3)时达到最大值,其

**表 3 不同配比基质对香彩雀生长发育的影响**

**Table 3 Effects of different substrates composition on the growth of *Angelonia salicariifolia***

| 处理 | 株高增加量(cm) | | 分枝数 | | 鲜重 | 干重 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 10 月 25 日 | 12 月 25 日 | 10 月 25 日 | 12 月 25 日 | (g·盆$^{-1}$) | (g·盆$^{-1}$) |
| CK | 9.67±1.29 a | 17.38±2.06 b | 36±3 b | 52±6 b | 35.27±2.63 e | 11.83±1.49 c |
| T1 | 11.36±2.08 a | 28.96±2.82 a | 55±2 ab | 63±7 b | 50.17±1.94 bcd | 13.90±0.44 b |
| T2 | 11.60±1.66 a | 27.45±2.10 a | 62±6 ab | 73±5 ab | 57.30±3.79 abc | 15.97±1.03 ab |
| T3 | 12.24±0.91 a | 27.95±2.02 a | 78±9 a | 87±12 a | 66.33±6.38 a | 17.80±1.53 a |
| T4 | 11.87±2.60 a | 26.61±3.76 a | 64±3 a | 82±12 a | 59.03±4.56 ab | 17.43±1.04 a |
| T5 | 9.89±1.27 a | 23.61±2.49 ab | 56±2 ab | 78±7 ab | 52.40±3.35 bcd | 16.83±0.48 a |
| T6 | 10.24±0.53 a | 22.44±0.29 ab | 55±10 ab | 66±10 ab | 44.73±4.40 cde | 12.27±0.87 c |
| T7 | 9.42±2.11 a | 22.29±3.04 b | 53±4 ab | 77±4 ab | 41.30±1.96 de | 12.93±1.11 bc |

表内数据为平均值±标准误($n$=3);多重比较采用 Duncan 法,同列数据后不同字母表示差异显著($P$<0.05),下同。

**表4 不同配比基质对香彩雀开花习性的影响**

**Table 4 Effects of different substrates composition on flowering features of *Angelonia salicariifolia***

| 处理 | 首次开花日期（月-日） | 花朵持续时间（d） | 盛期花朵数（朵·盆$^{-1}$） | 花朵畸形率（%） |
|---|---|---|---|---|
| CK | 10-24 | 47±2 b | 170±58 c | 5.88 |
| T1 | 10-19 | 63±2 ab | 397±80 abc | 1.76 |
| T2 | 10-17 | 60±1 ab | 360±41 abc | 3.09 |
| T3 | 10-22 | 67±2 a | 545±92 a | 1.10 |
| T4 | 10-13 | 69±2 a | 529±38 a | 1.47 |
| T5 | 10-20 | 56±1 ab | 535±46 a | 1.68 |
| T6 | 10-08 | 58±1 ab | 328±87 bc | 2.44 |
| T7 | 10-15 | 55±1 ab | 253±65 c | 4.74 |

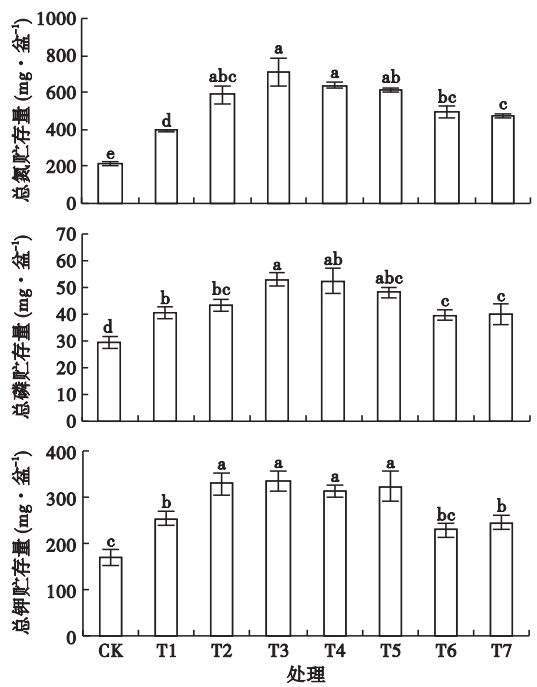



**图1 不同处理对香彩雀的氮、磷、钾贮存量的影响**

**Fig. 1 Effects of different substrates composition on nitrogen, phosphorus and potassium accumulation by *Angelonia salicariifolia***

氮、磷、钾贮存量分别为710.13、52.88和335.14 mg·盆$^{-1}$，比对照分别高出233.22%、78.32%和97.97%。当污泥堆肥添加量超过50%时，植株氮、磷、钾的贮存量反而呈现下降趋势，总体变化趋势与香彩雀干重一致。T7的氮磷钾养分全量和有效量在各配比处理中均为最高或次最高，而植物吸收的氮磷钾养分均显著低于T3、T4处理，表明植物吸收养分不仅取决于基质养分含量本身，还与基质的其他性质相关。

正常生长的植物，全氮含量一般占到干重的1.0%～5.0%，全磷在0.2%～0.5%（鲍士旦，2000）。土壤栽培的香彩雀氮、磷、钾含量分别为1.73%、0.24%、1.38%，而其他处理香彩雀氮、磷、钾含量分别在3.64%～4.16%，0.27%～0.34%和1.88%～2.07%（数据未在图表中列出），均高于土壤栽培，且均在正常范围内，表明以污泥堆肥为主原料的混合基质在栽培香彩雀的过程中，未出现因生长环境重金属含量过高而引起植物对氮、磷等营养元素吸收和转运能力下降的情况（安志装等，2002）。

**2.5** 不同配比基质对植物生长适应性的综合评价

目前，通过植物产量和品质分析来判断试验基质优劣是基质适应性评价的最常用方法。本研究采用熵权法与TOPSIS集成法，通过对不同处理香彩雀生长、开花和养分吸收状况进行综合评判，从而对不同配比基质的植物生长适应性做出综合评价。通过熵计算出香彩雀株高、分枝数、花朵数等各评价指标的权重值（表5），并以此作为TOPSIS集成评价的权重系数，最终评价指数越大说明离理想解越接近，则基质的质量越高，对植物的适应性越强（杨树佳等，2006；张强，2011）。

由表5可知，花朵数和氮贮存量在基本指标分解中的“贡献率”最大，其权重值分别为0.2976和0.2280，贡献率最小的指标为株高增加量，权重值为0.0553。由表6可知，T3处理综合评价指数为0.9931，是各处理中最大的，不同配比基质栽培的香

**表5 各监测指标客观权重值**

**Table 5 Entropy-weight of different indices of *Angelonia salicariifolia***

| 指标 | 株高增加量 | 分枝数 | 鲜重 | 干重 | 花朵数 | 花期 | 氮吸收量 | 磷吸收量 | 钾吸收量 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 权重值 | 0.0553 | 0.0702 | 0.0864 | 0.0567 | 0.2976 | 0.0306 | 0.2280 | 0.0692 | 0.1064 |

**表6 不同基质香彩雀生长质量综合评价结果**

**Table 6 Comprehensive evaluation indices of *Angelonia salicariifolia* grown in different substrates**

| 处理 | 理想值距离 | 负理想值距离 | 综合评价指数 | 排名 |
|---|---|---|---|---|
| CK | 0.1263 | 0.0006 | 0.0046 | 8 |
| T1 | 0.0639 | 0.0664 | 0.5096 | 5 |
| T2 | 0.0514 | 0.0795 | 0.6075 | 4 |
| T3 | 0.0087 | 0.1262 | 0.9931 | 1 |
| T4 | 0.0127 | 0.1157 | 0.9009 | 2 |
| T5 | 0.0181 | 0.1174 | 0.8661 | 3 |
| T6 | 0.0683 | 0.0596 | 0.4657 | 6 |
| T7 | 0.0853 | 0.0469 | 0.3546 | 7 |

彩雀生长及开花特性综合评价指数排名为: T3>T4>T5>T2>T1>T6>T7>CK,即相对于土壤而言,7 种不同配比基质均能促进香彩雀的生长,提高花卉品质,其中 T3 效果最佳,T7 效果较差,即纯污泥堆肥种植香彩雀效果比土壤好,但比添加泥炭和河沙的混合基质差。

## 3 结论与讨论

### 3.1 污泥堆肥在花卉栽培基质中的应用前景

花卉无土栽培研究始于 20 世纪 70 年代的荷兰,科研工作者经过近 40 年的研究发现,花卉采用无土栽培技术种植,不仅可以显著提高花卉产量,增进品质,并可减少多种土传病害,提高花卉的观赏性(刘云彩,2009)。我国作为世界第一园艺大国,花卉无土栽培技术研究起步较晚,目前正处于实验探索阶段,且基质栽培面积比例还不足 1%,相对于荷兰等发达国家(基质栽培面积占温室面积的 90% 以上)还有较大差距(田赟,2012)。在我国现代园艺生产中,花卉无土栽培基质以泥炭为主,但由于其资源分布不均且属于不可再生资源,泥炭的过分开采已经受到环保人士反对(Bustamante *et al.*,2008)。因此,栽培基质的研究将日益受到重视,研究开发新的基质材料用于花卉生产十分必要(Webber *et al.*,1999;李谦盛等,2002)。在此背景条件下,将污泥用于花卉栽培具有广阔前景和巨大潜力。

近年来,有关污泥堆肥用于园林绿化、花卉栽培、苗木培育已有许多报道(李艳霞等,2000;陈同斌等,2002),但其使用方法是堆肥后直接施用于林地或与土壤混合后用于基质栽培,并未大规模运用到无土栽培中。污泥堆肥能否用作无机原料配制无土栽培混合基质,关键在于其理化性质是否能满足植株生长需要。Willion(1998)提出,适宜植物生长的基质必须具有“供给植物水分、养分、保证根际间气体交换、为植物提供支撑”4 个性质。国内外学者通过大量研究,确立了理想栽培基质的基本标准,即容重 0.1 ~0.8 g · $cm^{-3}$(周跃华等,2005)、总孔隙度 54% ~96% 较为适宜(Hicklenton *et al.*,2001)、EC 以不大于 2.5 mS · $cm^{-1}$ 为宜、呈微酸性(Swanson,1989)。此外,针对污泥的性质,我国也颁布了《城镇污水处理厂污泥处置园林绿化用泥质》(CJ 248—2009),指出总养分的含量[总氮(以 N 计)+总磷(以 $P_2O_5$ 计)+总钾(以 $K_2O$ 计)]>3%。以上述标准为参比,可以看出,本实验所使用的污泥堆肥与泥炭、河沙制配的混合基质容重、总孔隙度、pH 值等均在理想范围内,而其养分含量符合污泥园林利用标准。各配比的污泥堆肥混合基质能提供稳定、缓冲性强、利于根系生长的环境条件,其养分丰富,不必添加其他肥料。因此,从营养角度来看,城市污泥是较为理想的花卉栽培基质和材料。

### 3.2 以污泥堆肥为主要原料的混合基质对花卉生长的影响

观赏植物可分为观花植物、观叶植物和观果植物 3 类。针对不同观赏植物,一些学者分别选择不同评价指标来判断基质对植物生长的适应性。香彩雀属于典型的观花植物,因此,本研究同时观测了香彩雀的营养生长和开花特性,结果发现,以污泥为主原料的混合基质能增加香彩雀株高、提高新枝分蘖能力、增加生物量、促进植株对营养元素的吸收,同时能使香彩雀开花时间提前、花朵数增加、花期延长、花朵畸形率降低。城市污泥对于花卉植物的生长适应性并非偶然,而具有广谱性,它对其他观花植物(如菊花、月季、百合花、)生长也有显著的促进作用(张增强和薛澄泽,1992;Fitzpatrick *et al.*,1998;Zaman *et al.*,2002)。此外,污泥堆肥对于观叶花卉也具有较好的生长适应性。幸宏伟和傅敏(2009)将污泥堆肥用于观叶植物银叶菊无土栽培,发现添加适宜比例的污泥,银叶菊叶、株高、冠幅均优于对照;Wilson 和 Stofflella(2001)将不同比例污泥堆肥添加于椰糠和泥炭的混合基质种植墨西哥石楠时发现,所有的植株均达到出售标准。以上研究表明,将污泥堆肥用于花卉生产,可以提高花卉质量,消耗大量污泥,是城市污泥资源化利用的重要方向。

### 3.3 污泥堆肥基质的植物适应性判别

花卉种类品种繁多,其适宜的栽培基质、营养液配方、环境因子等要求均可能有所不同,因此探索合理的基质成分配比,特别是针对不同植物制定最佳基质配比具有重要意义。但是,仅凭植物或基质的少数指标难以科学评价基质质量及对植物的适应性。

本研究依据香彩雀的营养生长状况(株高、分枝数、鲜重、干重、营养元素吸收量)和生殖生长(花朵数、花期)等指标,采用熵权系数与 TOPSIS 集成法,对基质植物适应性进行综合评价。根据各指标的联系程度或各指标所提供的信息量来确定指标权重(杨树佳等,2006),以此作为 TOPSIS 评价的权重系数。TOPSIS 中理想解是方案集中虚拟的最佳方

案,负理想解是虚拟的最差方案。若将各个备选方案与理想解和负理想解的距离进行比较,则既靠近理想解又远离负理想解的方案就是整个方案集中的最佳方案(张强等,2011)。此方法避免了传统评价中只强调花卉某一项或某几项性状而忽略其他性状的偏差。本研究中,依据不同配比花卉栽培基质对香彩雀生长及品质影响效果的综合排名,最佳基质配方为污泥堆肥∶泥炭∶河沙比例5∶3∶2(T3)。对于是否还有更好的基质配方,能在植株长势良好的同时继续降低栽培成本,还需进一步试验。

**参考文献**


安志装, 王校常, 施卫明, 等. 2002. 重金属与营养元素交互作用的植物生理效应. 土壤与环境, **11**(4): 392-396.

白莉萍, 伏亚萍. 2009. 城市污泥应用于陆地生态系统研究进展. 生态学报, **29**(1): 416-426.

鲍士旦. 2000. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社.

陈同斌, 高 定, 李新波. 2002. 城市污泥堆肥对栽培基质保水能力和有效养分的影响. 生态学报, **22**(6): 802-807.

高红真. 2009. 城市污泥在花卉栽培基质中的应用研究. 安徽农学通报, **15**(14): 182-184.

郭世荣. 2005. 固体栽培基质研究、开发现状及发展趋势. 农业工程学报, **21**(S): 1-4.

李谦盛, 郭世荣, 李式军. 2002. 利用工农业有机废弃物生产优质无土栽培基质. 自然资源学报, **17**(2): 515-519.

李艳霞, 陈同斌, 罗 维, 等. 2003. 中国城市污泥有机质及养分含量与土地利用. 生态学报, **23**(11): 2464-2474.

李艳霞, 薛澄泽, 陈同斌. 2000. 污泥和垃圾堆肥用作林木育苗基质的研究. 农村生态环境, **16**(1): 60-63.

李艳霞, 赵 莉, 陈同斌. 2002. 城市污泥堆肥用作草皮基质对草坪草生长的影响. 生态学报, **22**(6): 797-801.

刘 军. 2010. 基于熵权和TOPSIS集成的农作物综合评价. 安徽农业科学, **38**(12): 6078-6079.

刘庆超. 2006. 三种重要盆栽花卉的有机代用基质研究(博士学位论文). 北京: 北京林业大学.

刘云彩. 2009. 5个乡土绿化阔叶树种不同育苗基质的当年育苗效应试验. 西部林业科学, **38**(3): 9-15.

马 娜, 陈 玲, 何培松, 等. 2004. 城市污泥资源化利用研究. 生态学杂志, **23**(1): 86-89.

田 赟. 2012. 园林废弃物堆肥化处理及其产品的应用研究(博士学位论文). 北京: 北京林业大学.

幸宏伟, 傅 敏. 2009. 污泥堆肥用于观叶植物银叶菊无土栽培的研究. 安徽农业科学, **37**(20): 9464-9466.

杨树佳, 王爱萍, 郑新奇. 2006. 基本农田指标分解的商权系数法研究. 资源开发与市场, **22**(4): 305-306, 314.

张 强, 孙向阳, 任忠秀, 等. 2011. 园林绿化废弃物堆肥用作花卉栽培基质的效果评价. 中南林业科技大学学报, **31**(9): 7-13.

张增强, 薛澄泽. 1992. 污泥堆肥对几种花卉的生长响应研究. 环境污染与防治, **18**(5): 1-4.

周跃华, 聂艳丽, 赵永红, 等. 2005. 国内外固体基质研究概况. 中国生态农业学报, **13**(4): 40-43.

Bustamante MA, Paredes C, Moral R, *et al*. 2008. Composts from distillery wastes as peat substitutes for transplant production. *Resources, Conservation and Recycling*, **52**: 792-799.

Coma J, Jabbouri A, Grasmick A. 1991. Primary treatment of urban waste water. *Water Science and Technology*, **24**: 217-222.

Fitzpatrick GE, Duke ER, Klock-Moore KA. 1998. Use of compost products for ornamental crop production: Research and grower experiences. *HortScience*, **33**: 941-944.

Hicklenton PR, Rodd V, Warman PR. 2001. The effectiveness and consistency of source-separated municipal solid waste and bark compost as components of container growing media. *Scientia Horticulturae*, **91**: 365-378.

Huang JS, Paul V. 2000. The research of seedling quality and physiological variety affected by different nutritive environment. *HortScience*, **36**: 529-533.

Noguera P, Abad M, Noguera V, *et al*. 2000. Coconut coir dust waste, a new and viable ecologically-friendly peat substitute. *Acta Horticulturae*, **517**: 279-286.

Offord CA, Muir S, Tyler JL. 1998. Growth of selected Australian plants in soilless media using coir as substitute for peat. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, **38**: 879-887.

Swanson BT. 1989. Critical physical properties of container media. *American Nurseryman*, **169**: 59-63.

Webber CL, Whitworth J, Dole J. 1999. Kenaf (*Hibiscus cannabinus*) core as a containerized growth medium component. *Industrial Crops and Products*, **10**: 97-105.

Willion RA. 1998. Root medium physical properties. *HortTechnology*, **8**: 481-485.

Wilson S, Stofflella P. 2001. Compost amended media for growth and development of Mexican Heather. *Compost Science and Utilization*, **9**: 60-64.

Zaman M, Di HJ, Sakamoto K, *et al*. 2002. Effects of sewage sludge compost and chemical fertilizer application on microbial biomass and N mineralization rates. *Soil Science and Plant Nutrition*, **48**: 195-201.


**作者简介** 储双双,女,1987年生,硕士研究生,主要从事森林生态与森林环境学研究。E-mail: hbchushuangshuang@163.com

**责任编辑** 魏中青