

## 城市污泥堆肥用于生产碱茅草无土草坪的研究

张宏忠<sup>1,2</sup>, 霍晶<sup>1</sup>, 马闯<sup>1,2</sup>, 赵继红<sup>1,2</sup>, 李水旺<sup>3</sup>

1. 郑州轻工业学院 材料与化学工程学院, 河南 郑州 450001;
2. 环境污染治理与生态修复河南省协同创新中心, 河南 郑州 450001;
3. 河南希芳阁绿化工程股份有限公司, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 根据混料设计 {3, 2} 单形格子理论设计, 分别从理化性状、碱茅草生长生理指标、草坪综合质量和草坪生产周期等方面分析了稻糠、污泥堆肥和蛭石不同比例混合基质的优劣。研究表明: 稻糠与堆肥混合基质 (T4), 蛭石与堆肥混合基质 (T6), 稻糠、蛭石和堆肥混合基质 (CK1) 的容重适中, 营养充足, pH 和 EC 值适宜, 适合草坪草生长。与大田 (CK2) 相比, 含堆肥基质可显著提高叶绿素含量; T6、CK1 的根系活力稍有降低, 但提高了草坪草过氧化氢酶活性, 而 T4 根系活力和过氧化氢酶活性稍有降低; 且三者的游离脯氨酸含量虽有所增加, 但无显著差异 ( $P > 0.05$ )。综合评价草坪草质量以 CK1 最高, T4、T6 次之。通过建立基质配比与生产周期的关系模型模拟优化共得 5 151 套基质组合方案, 其中生产周期最短为 18 d, 共 1 335 套方案, 体积分数范围分别为:  $0 \leq x_1$  (稻糠)  $\leq 90\%$ ,  $10\% \leq x_2$  (污泥堆肥)  $\leq 30\%$ ,  $0 \leq x_3$  (蛭石)  $\leq 84\%$ ; 因此, 以稻糠、蛭石和污泥堆肥等开发高质量碱茅草无土草坪栽培基质是完全可行的。

**关键词:** 稻糠; 蛭石; 污泥堆肥; 混合基质; 无土草坪

**中图分类号:** S141.6; S688.5

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-6257 (2015) 06-0115-07

传统草坪用土一般取自农田, 对土壤结构破坏严重, 病虫害和杂草难以控制<sup>[1]</sup>。而常规无土栽培基质如蛭石、岩棉等虽具有理想的理化性状, 但因养分不足、价格昂贵, 在实际生产中并未得到推广和普及<sup>[2]</sup>。因此, 草坪栽培基质的紧缺成为草坪业发展中亟待解决的重大问题。而城市污泥堆肥具有轻质、无害、富含氮磷等养分的特点<sup>[3]</sup>, 是一种潜在的理想草坪基质<sup>[4]</sup>。单一污泥堆肥不利于草坪草生长, 国外研究多是将其与土壤或砂石等按一定比例混合, 即作为中等肥料或土壤改良剂建立草坪草<sup>[5]</sup>。国内一般是将其与生活垃圾、工农业废弃物等混合, 综合各种材料的优良理化性质, 利于提高草坪栽培效果<sup>[6-7]</sup>。如陈同斌<sup>[8]</sup>将城市污泥、秸秆等经堆肥化处理后加入蛭石等配料开发的地

毯式草皮基质已得到了广泛应用。然而, 不同草种, 不同陪选料所得污泥堆肥混合基质的优化配方不同, 如最适合高羊茅无土草毯配方为 50% 污泥堆肥 + 20% 河沙 + 30% 珍珠岩和 60% 污泥堆肥 + 20% 河沙 + 20% 珍珠岩<sup>[9]</sup>, 而马尼拉结缕草无土草毯优化配方为 50% 菇渣 + 20% 河沙 + 30% 污泥堆肥或 40% 菇渣 + 20% 河沙 + 40% 污泥堆肥<sup>[10]</sup>。所以本研究选用来源广泛, 价格低廉的污泥堆肥、稻糠和缺乏养分的无机基质蛭石作为组成物料, 并根据三组分混料设计的 {3, 2} 单形格子理论<sup>[11-12]</sup>, 利用污泥堆肥混合基质对碱茅草进行栽培试验, 采用数学模糊法分析各基质草坪草的综合质量, 旨在探讨稻糠、蛭石和污泥堆肥开发无土草皮栽培基质的可行性及三组分体积配比与碱茅草无土草皮生产周期之间的关系, 以期对相关研究在基质选配上提供科学依据。

### 1 材料与方法

#### 1.1 供试材料

**碱茅草:** 多年生禾本科冷季型草种, 根系发达, 抗盐碱、抗旱能力较强, 主要用于盐碱地区草坪建植<sup>[13]</sup>, 发芽率  $\geq 90\%$ 。

**大田土壤:** 黄河滩土。

收稿日期: 2014-09-16; 最后修订日期: 2014-10-29

**基金项目:** 国家水体污染控制与治理科技重大专项子课题 (2012ZX07204-001); 河南省重大公益招标项目 (101100910300); 河南省科技攻关项目 (142102310063); 河南省教育厅科学技术研究重点项目 (14A610009)。

**作者简介:** 张宏忠 (1968-), 男, 河南省新乡市人, 博士, 教授, 河南省教育厅学术技术带头人, 河南省高校科技创新人才, 主要从事环保及三废综合利用等方向的研究。E-mail: zhz@zzuli.edu.cn。

蛭石：河南郑州陈寨花卉市场购置。

稻糠：未经炭化，由河南某公司提供。

污泥堆肥：由郑州市八岗污泥处置厂提供。处理工艺采用高温固态好氧槽式发酵（翻抛 + 好氧堆肥）工艺。物料配比为花生壳（kg）：污泥（kg） = 1:3。发酵时间 20 d，温度 55 ~ 70℃，风干，过筛，粒径 2 mm。

## 1.2 供试基质成分配比

供试基质的成分配比<sup>[14]</sup>如表 1 所示。

表 1 各基质的成分组成

处理	基质成分配比（体积）		
	稻糠	污泥堆肥	蛭石
T1	1	0	0
T2	0	1	0
T3	0	0	1
T4	1/2	1/2	0
T5	1/2	0	1/2
T6	0	1/2	1/2
CK1	1/3	1/3	1/3
CK2	大田	大田	大田

注：CK1 用于回归方程适合度检验，CK2 基质类型为全量大田土壤，用作对比生长试验。

## 1.3 草坪坪床准备及布设

试验在温室和黄河滩生产基地同时进行，要求地表平整且紧实，利于基质铺设均匀；铺设隔离层，利于根系横向缠结；铺设预先混匀的基质，保证基质厚度在 2.5 cm 左右；草种播量为 25 g/m<sup>2</sup>，样方面积 2 m × 1.5 m，每处理重复 3 次，对各小区采取同样养护管理措施。试验时间为 2014 年 3 月 14 日 ~ 5 月 18 日，草皮种植过程中共刈割 3 次。

## 1.4 分析方法

基质容重、持水量测定用环刀法；pH 值用饱

和浸提法；EC 用浸提法；全氮测定用半微量凯氏法；全磷用 NaOH 熔融 - 钼锑抗比色法；全钾用 NaOH 熔融 - 火焰光度法<sup>[15]</sup>。重金属离子测定用微波高压消解后电感耦合等离子体发射光谱法，详见 CJT 221 - 2005 城镇污水处理厂污泥检测方法。叶绿素含量用无水乙醇提取，紫外分光光度计测定；游离脯氨酸用茚三酮溶液显色法；根系活力用 TTC 法<sup>[16]</sup>。于 2014 年 4 月 12 日采集和测量草坪草的各项生长生理指标。

## 2 结果与分析

### 2.1 各处理基质的理化性状

各处理基质的理化性状如表 2 所示。与土壤相比，污泥堆肥中含有大量有机物和 N、P、K 等营养元素，虽含有较多的重金属元素，但各处理基质的重金属含量均未超过《城镇污水处理厂污泥处置园林绿化用泥质》（GB/T 23486 - 2009）污染物指标的限值。研究发现，重金属对草坪草的生长没有负面影响，而且其高含量的有机质可增加重金属在植物中的吸收和绑定<sup>[17]</sup>。pH 值直接影响养分的形态和有效含量，最好呈中性或微酸性，播种前，各基质 pH 值均在草坪草适宜范围内，因此，其不作为限制草坪草生长的主要因素。容重大小与基质松散程度和孔隙度密切相关，当容重在 0.1 ~ 0.8 g/cm<sup>3</sup> 时，适合大多数草坪草的生长，而以 0.5 g/cm<sup>3</sup> 最为理想<sup>[18]</sup>。由表 2 可知，CK2 容重过大，不利于搬运，T1、T5 容重偏小，植株易倒伏，T6、T4、CK1 容重适中可用作栽培基质。在草坪的生长过程中，需要源源不断地补充水分，才能促进草坪草的生长，水分在 35% ~ 50% 时有较好的水气比，从持水量的角度来看，CK2 的持水率最差，T2、CK1 比较适宜，其次为 T6、T4。

表 2 各处理基质的理化性状

处理	pH 值	容重 (g/cm <sup>3</sup> )	持水率 (%)	EC 值 (mS/cm)	速效钾 (mg/kg)	有机质	全 K	全 P	全 N	Cu	Zn	Pb	Cr	Cd	Ni
T1	6.30	0.11	74.61	1.05	123	669.24	7.32	4.48	8.49	11.5	37.2	28.2	22.2	2.1	21.3
T2	6.85	0.64	54.48	7.41	239	206.02	19.77	110.28	16.9	161.0	235.9	32.6	177.5	0.74	46.0
T3	6.77	0.23	76.46	0.17	9	17.38	41.52	4.91	0.93	177.8	470.8	12.3	173.1	1.8	60.0
T4	6.74	0.41	61.40	6.01	272	168.51	20.55	97.58	14.19	158.7	401.6	7.2	140.4	1.7	87.1
T5	6.60	0.19	74.94	0.66	64	354.51	20.19	3.15	3.45	16.7	56.3	24.9	49.2	1.7	40.4
T6	6.74	0.44	60.08	4.89	191	205.06	27.85	87.15	12.80	149.1	417.4	39.6	188.5	3.5	74.9
CK1	6.81	0.36	58.11	5.23	192	301.72	24.14	58.14	10.07	118.5	401.6	128.9	176.8	4.2	87.5
CK2	7.21	1.06	26.87	0.89	6	5.78	20.02	7.16	1.29	7.5	16.2	14.6	27.1	0.8	14.1

基质的 EC 值在 2.1 ~ 3.5 mS/cm 范围内适合大多数草坪草生长。各基质的 EC 值随时间变化如图 1 所示, T1、T3、T5 和 CK2 的 EC 值均较低且变化较小。T4、T6 和 CK1 播种前 EC 值均较高, 随着灌溉、降水和草坪草不断吸收, 其 EC 值可快速降至草坪草生长适宜水平。而 T2 降低缓慢, 可能原因是其 EC 值过高需要更多水淋洗盐分才可降至较低水平。因此, 含堆肥基质 EC 值的急剧变化是草坪草根系的吸收和水分灌溉综合作用的结果。其值的高低会影响种子最早发芽时间, 草坪出苗情况及生产周期。

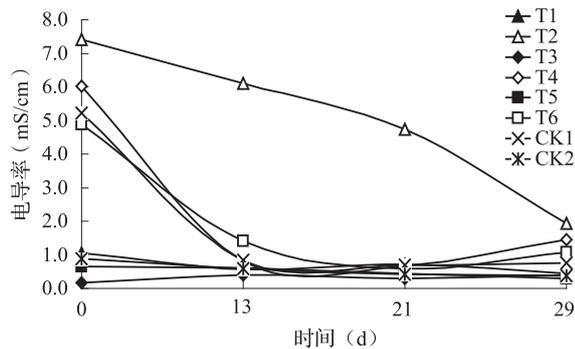


图 1 各处理基质电导率值随时间的变化

综合比较各处理基质的理化性状, 以 CK1、T4、T6 营养充足, pH 值、容重适宜, 持水量好, 比较适合用作草坪栽培基质。

## 2.2 各处理基质草坪草的生长指标

### 2.2.1 叶绿素含量

叶绿素含量与其外部色泽的深浅以及光合作用的强弱呈显著相关关系<sup>[19]</sup>。各处理基质草坪草叶绿素含量如图 2 所示。叶绿素含量由多至少依次为 T2 > T4 > CK1 > T6 > CK2 > T3 > T5 > T1。由多重比较分析可知, T2、T4、CK1 的叶绿素总量明显高于 CK2 ( $P < 0.05$ ), 且达到极显著水平 ( $P < 0.01$ ),

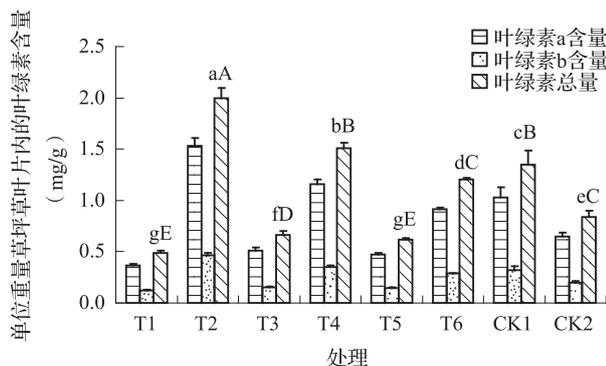


图 2 播种 28 d 时各处理基质草坪草的叶绿素含量

注: 大、小写字母不同分别表示处理间差异达到 0.01、0.05 显著水平。下同。

T6 稍高于 CK2 ( $P < 0.05$ ), 但未达到极显著水平 ( $P > 0.01$ )。T1、T3、T5 的叶绿素总量明显低于 CK2 ( $P < 0.05$ ), 且差异极显著 ( $P < 0.01$ )。由此可知, 含堆肥基质处理 T2、T4、CK1 为叶绿素合成提供了充足的营养, 使得草坪草叶绿素含量明显高于大田土壤, 而不含堆肥基质处理因根系吸收矿质不足而叶绿素合成不足, 如 T1、T3、T5。

### 2.2.2 根系活力

还原 TTC (四氮唑) 能力与呼吸作用强弱密切相关, 干旱胁迫及盐碱胁迫均能引起根系活力的增加。各处理基质草坪草的根系活力对比如图 3 所示, CK2 根系活力最强, 而其他基质根系活力均有不同程度地降低。由方差分析可知 T1、T2、T4、T5 根系活力明显降低, 与 CK2 间有极显著差异 ( $P < 0.01$ )。T3 根系活力虽有明显降低 ( $P < 0.05$ ), 但与 CK2 相比, 尚未达到极显著水平 ( $P > 0.01$ )。T6、CK1 根系活力与 CK2 相比差异不明显 ( $P > 0.05$ )。由此可知, 与大田土壤相比, 单一基质营养不足或过盛均不利于提高草坪草根系活力, 如 T1、T2、T3 的根系活力处于较低水平。污泥堆肥与其他组分的配比在某一范围内时, 其培育的草坪草根系活力保持良好, 如 T6、CK1 活力较高。组成物料的选择必须具有科学性, 并应根据不同基质材料理化性质及不同植物幼苗生物学特性进行配比, 否则污泥堆肥混合基质生长效果不如单一基质, 如 T4、T5 根系活力较差。

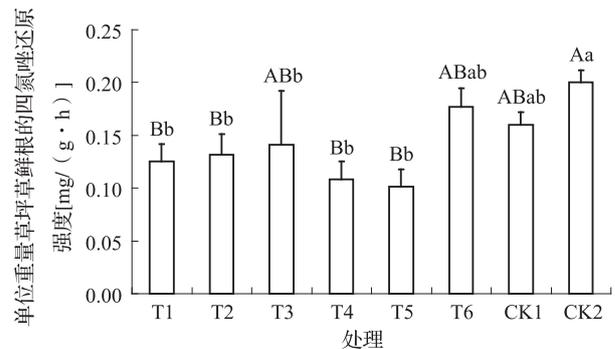


图 3 各处理基质草坪草的根系活力

### 2.2.3 过氧化氢酶活性

植物在衰老或处于逆境条件时, 会加强植物体内活性氧代谢累积  $H_2O_2$ , 其会直接或间接地氧化蛋白质、核酸等生物分子, 从而加速植物体衰老, 而过氧化氢酶可清除  $H_2O_2$ , 因此, 其活性的大小可反映植物体内某一时期代谢的变化。过氧化氢酶活性与温度、重金属离子、pH 值, 基质中有机质、

碱解氮、硝态氮含量等因素有关。各处理叶片内过氧化氢酶活性对比如图 4 所示, 各基质过氧化氢酶活性以 T6 最高, T5 最低。由方差分析可知: 与 CK2 相比, 除 T6 酶活性明显增强 ( $P < 0.05$ ) 外, CK1 活性有所增加, 其他处理活性降低, 但均无明显差异 ( $P > 0.05$ )。T1、T2、T3、T5 基质栽培的草坪草过氧化氢酶活性普遍较低, 可能是因为其营养不足 (T1、T3、T5) 或高含量重金属离子 (T2) 不利于提高草坪草的过氧化氢酶活性所致, 而 T4、T6 均为与污泥堆肥混合的两组分基质, 但过氧化氢酶活性相差较大, 这可能与 T6 比 T4 含有更多的有机物有关, 酶活性大小不仅与草坪草自身因素有关, 基质陪选料也会影响草坪草的过氧化氢酶活性。

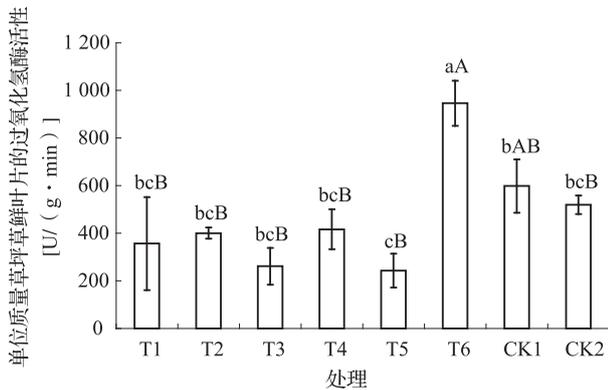


图 4 各处理基质草坪草叶片内的过氧化氢酶活性

### 2.2.4 游离脯氨酸含量

游离脯氨酸在一定程度上反映逆境对植物的危害程度, 在正常条件下, 植物体内游离脯氨酸含量较低, 但在干旱、低温、盐渍或植物衰老时会大幅度增加。各处理基质草坪草游离脯氨酸含量对比如图 5 所示, 在相同管理水平下, T2、T3 与 CK2 间有显著差异 ( $P < 0.05$ ), 且达到极显著水平 ( $P < 0.01$ ), T2 游离脯氨酸含量最多, 这是草坪草在盐分胁迫下做出适应性反应的结果。而 T3 很有可能是基质中营养成分供给不足, 植株衰老引起游离脯氨酸含量明显升高。T4、T6、CK1 叶片中游离脯氨酸含量虽有所增加, 但与 CK2 间无显著差异 ( $P > 0.05$ ), 表明当污泥堆肥体积分数为 30% ~ 50% 时, 其盐分含量随灌溉已降至较低水平, 并未对草坪草的生长产生较大影响; T1 游离脯氨酸虽处于较高水平, 但与 CK2 间无显著差异 ( $P > 0.05$ )。与 CK2 相比, 除 T2、T3 外, 其他各基质游离脯氨酸含量无显著差异 ( $P > 0.05$ ), 表明当污泥堆肥含量在 30% ~ 50% 时, 草坪草可避免受到盐分毒害的作用。

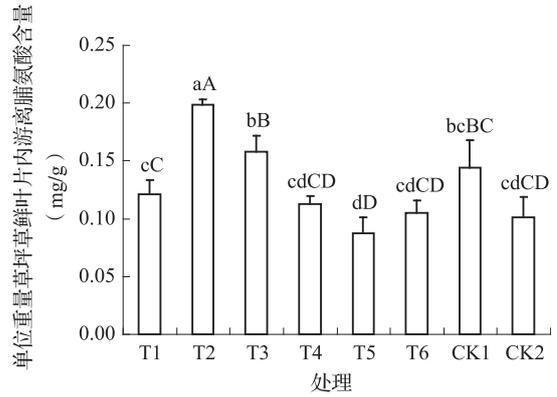


图 5 各处理基质草坪草叶片内游离脯氨酸含量

### 2.3 各处理基质草坪草的综合质量评价

采用模糊数学综合评判法对决定草坪质量的各项主要指标进行评价。主要包括外观质量, 生态质量, 实用性指标 3 个方面; 同时利用层次分析法确定各指标对综合评价目标的权重值, 并引入 T. L. Satty 1-9 尺度方法, 使思维判断数量化。综合专家意见, 构建观赏性草坪的一级矩阵 A<sup>[20]</sup>。

$$\text{建植草坪 } A = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 \\ 1/3 & 1 & 2 \\ 1/5 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}$$

对应特征向量  $W_A = (0.65 \quad 0.23 \quad 0.12)$

选用外观质量评价指标草坪密度、色泽 (单位重量叶片内叶绿素总含量)、质地和均一性构建二级判断矩阵 A1, 采用 NTEP9 分制评价均一性<sup>[21]</sup>; 选用生态评价指标分蘖数、草坪盖度及抗逆性 (单位重量叶片内游离脯氨酸含量) 构建二级判断矩阵 A2; 选用使用性指标草坪出苗势、生长速率及成坪时间构建二级判断矩阵 A3。

$$A1 = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 3 & 7 \\ 1/3 & 1 & 1 & 6 \\ 1/3 & 1 & 1 & 6 \\ 1/7 & 1/6 & 1/6 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A2 = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 7 \\ 1/3 & 1 & 3 \\ 1/7 & 1/3 & 1 \end{bmatrix} \quad A3 = \begin{bmatrix} 1 & 5 & 9 \\ 1/5 & 1 & 2 \\ 1/9 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}$$

对应的特征向量分别为  $W_{A1} = (0.521 \quad 0.216 \quad 0.216 \quad 0.047)$ ,  $W_{A2} = (0.669 \quad 0.243 \quad 0.088)$ ,  $W_{A3} = (0.761 \quad 0.157 \quad 0.082)$ 。

因表 3 中各指标是按评语等级成线性上升或下降的, 故可做出评定草坪质量各指标的线性隶属函数。

表 3 草坪质量的评价指标集及评语集的划分

评语	指标集									
	密度 (枝/100 cm <sup>2</sup> )	质地 (mm)	色泽 (mg/g)	均一性 (NTEP9 分制)	抗逆性 (Pro mg/g)	分蘖数 (个)	盖度 (%)	出苗势 (%)	生长速率 (cm/周)	成坪时间 (d)
很差	<40	>5	<0.6	1	<0.08	1	<60	<20	>5	>75
差	40~50	3~5	0.6~0.8	1~6	0.08~0.10	1~2	60~70	20~40	4~5	40~75
一般	50~60	2~3	0.8~1.0	6~7	0.10~0.12	2~3	70~80	40~60	3~4	31~40
好	60~70	1~2	1.0~1.2	7~8	0.12~0.14	3~4	80~90	60~80	2~3	21~30
很好	>70	<1	>1.2	>8	>0.14	>4	>90	>80	<2	<20

将表 4 各基质草坪草生长指标综合评价数据与对应的隶属函数进行模糊化, 得到模糊关系矩阵 R1、R2、R3。通过选用数学模型 M(., +), 其公式为  $B = W_{Ai} \cdot Ri$ , 由此得到综合评价集 B1、B2、

B3, 由其组成综合评价模糊矩阵 C, 由  $D = W_A \cdot C$  得出草坪综合评价集 D。

$$D = (0.537 \quad 0.394 \quad 0.599 \quad 0.683 \\ 0.622 \quad 0.735 \quad 0.871 \quad 0.629)$$

表 4 各处理基质草坪草生长指标综合评价

处理	指标集									
	密度 (枝/100 cm <sup>2</sup> )	质地 (mm)	色泽 (mg/g)	均一性 (NTEP9 分制)	抗逆性 (Pro mg/g)	分蘖数 (个)	盖度 (%)	出苗势 (%)	生长速率 (cm/周)	成坪时间 (d)
T1	51	2.00	0.661	6.33	0.120 8	3	65	70	2.18	21
T2	39	4.33	2.000	5.67	0.198 4	6	40	15	6.29	75
T3	51	1.00	0.491	7.67	0.157 7	2	80	87	1.83	23
T4	63	3.33	1.510	8.67	0.112 5	6	85	28	5.47	26
T5	67	2.33	0.621	7.33	0.087 2	3	79	89	2.10	22
T6	66	3.33	1.201	8.67	0.105 1	4	90	52	4.89	25
CK1	78	3.00	1.349	9.00	0.144 0	6	95	54	6.60	21
CK2	60	2.33	0.841	7.33	0.101 4	3	75	91	3.02	29

将各处理基质草坪的综合评价由大到小排序为 CK1 > T6 > T4 > CK2 > T5 > T3 > T1 > T2, 草坪综合质量评价表及各基质等级情况如表 5 所示。

表 5 草坪综合质量评价表及所设基质等级情况

等级	草坪综合评价指标 D	质量优劣	各基质等级情况
I 级	$D \leq 0.2$	很差	
II 级	$0.2 < D \leq 0.4$	差	T2
III 级	$0.4 < D \leq 0.6$	中等	T1、T3
IV 级	$0.6 < D \leq 0.8$	好	T4、T5、T6、CK2
V 级	$D > 0.8$	很好	CK1

## 2.4 草坪的生产周期

当草皮覆盖均匀致密、根系发达、草皮能够卷起且无病斑即可认为草皮成坪<sup>[6]</sup>。各处理基质的生产周期如表 6 所示, T2 生产周期最长, 而无机基质

与污泥堆肥混合如 T4、T6、CK1 可明显缩短生产周期, 这对指导生产有重要的作用<sup>[22]</sup>。

表 6 各处理基质草坪草生产周期实际值与计算值比较

处理	生产周期实际值 (d)	生产周期计算值 (d)	$(y - \hat{y})^2 / \hat{y}$
T1	21	21	0
T2	75	75	0
T3	23	23	0
T4	26	26	0
T5	22	22	0
T6	25	25	0
CK1	21	19	0.21
CK2	30	—	—

用  $\chi^2$  法测定该回归式可以很好地反映实际情况。对于基质组合对生产周期的影响采用 C 语言程

序设计, 建立  $P\{3, 2\}$  单形格子二次曲面模型:

$$\hat{y} = E(y) = \sum_{i=1}^3 b_i x_i + \sum_{i < j}^3 b_{ij} x_i x_j$$

$$= Ax_1 + Bx_2 + Cx_3 + Dx_1 x_2 + Ex_1 x_3 + Fx_2 x_3$$

$x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$  分别代表稻糠、污泥堆肥、蛭石的体积分数, 成分的取值为:  $x_i = 0, 1/2, 1$ , 而且  $x_1 + x_2 + x_3 = 1$ 。y 代表生产周期,  $y_1$ 、 $y_2$ 、 $y_3$ 、 $y_{12}$ 、 $y_{13}$ 、 $y_{23}$  分别代表 T1、T2、T3、T4、T5、T6 的生产周期。其中  $A = y_1$ 、 $B = y_2$ 、 $C = y_3$ 、 $D = 4y_{12} - 2(y_1 + y_2)$ 、 $E = 4y_{13} - 2(y_1 + y_3)$ 、 $F = 4y_{23} - 2(y_2 + y_3)$ 。

对数据统计可知: 基质混合配比共 5 151 组方案。生产周期最短为 18 d,  $0 \leq x_1 \leq 90\%$  且  $10\% \leq x_2 \leq 30\%$  且  $0 \leq x_3 \leq 84\%$  共 1 335 组。y  $\in [19, 20]$  时:  $0 \leq x_1 \leq 98\%$  且  $2\% \leq x_2 \leq 39\%$  且  $0 \leq x_3 \leq 93\%$  共 1 375 组; y  $\in [21, 30]$  时:  $0 \leq x_1 \leq 100\%$  且  $0 \leq x_2 \leq 59\%$  且  $0 \leq x_3 \leq 100\%$  共 1 525 组; y  $\in [31, 75]$  时:  $0 \leq x_1 \leq 42\%$  且  $58\% \leq x_2 \leq 100\%$  且  $0 \leq x_3 \leq 40\%$  共 916 组。

### 3 结论

综合考虑基质的理化性状, 以 CK1、T4、T6 营养丰富, pH 值适宜, 容重较低, 持水量好, 比较适合草坪草的生长。

与 CK2 相比, 含堆肥基质显著提高叶绿素含量和草坪草的分蘖能力; T6、CK1 草坪草的根系活力稍有降低, 但提高了草坪草过氧化氢酶活性; T4 的根系活力和过氧化氢酶活性稍有降低; 且三者的游离脯氨酸含量虽有所增加, 但无显著差异 ( $P > 0.05$ ), 表明含堆肥基质具有较好的抗逆性。

比较不同污泥堆肥配比基质的无土草坪的草坪综合质量评价, 以 T2 最差, 其值为 0.394; 以 CK1 最优, 其值为 0.871, 其次为 T6、T4, 其综合评价分别为 0.735、0.683, 与基质的理化性状所得结论相似。

调节稻糠、堆肥、蛭石三组分混合基质的比例, 可在最短时间 18 d 内获得成坪质量良好的无土草坪。各组分体积分数依次为  $0 \leq x_1$  (稻糠)  $\leq 90\%$ 、 $10\% \leq x_2$  (污泥堆肥)  $\leq 30\%$  和  $0 \leq x_3$  (蛭石)  $\leq 84\%$ 。将来可分别从草坪的生产周期、尽量使用污泥堆肥、污泥堆肥混合基质的成本或草坪质量等方面选择基质的配比。

### 4 讨论

在试验中可能会存在以下 3 方面的问题:

(1) 在草坪草的质量评价中, 其出苗势是由温室数据所得, 与草坪生产基地的外部环境稍有差异, 会产生一定的试验误差。

(2) 因地域性和外界环境的不同会对城市污泥堆肥的成分含量以及草坪草的生产周期产生影响。但对混合基质的优化配比不会产生较大影响。

(3) 在草坪草的灌溉过程中, 混合基质的重金属及某些盐分可能会渗入土壤中, 对土壤及地下水造成潜在的威胁, 对其应用安全性需要做进一步的试验分析和研究。

污泥堆肥混合基质不仅可以提高草坪品质, 降低生产及建植成本, 节约土地和水资源, 是一个极具应用价值, 可持续的污泥资源化途径, 具有较好的经济效益、环境效益和社会效益。

### 参考文献:

- [1] 张晓娇. 浅谈城镇园林绿化用土问题 [J]. 大观周刊, 2012, 31: 177.
- [2] Wang Z Q, Gan D X, Long Y L. Advances in soilless culture research [J]. Agricultural Science & Technology, 2013, 14 (2): 269-278, 323.
- [3] Zhang J H, Tian G M, Zhou G D, et al. Evaluation of organic solid wastes composts as peat substrates for seeding production [J]. Journal of Plant Nutrition, 2013, 36 (11): 1780-1794.
- [4] Jayasinghe G Y. Sugarcane bagasses sewage sludge compost as a plant growth substrate and an option for waste management [J]. Clean Technologies and Environmental Policy, 2012, 14 (4): 625-632.
- [5] Cheng H F, Xu W P, Liu J L, et al. Application of composted sewage sludge (CSS) as a soil amendment for turfgrass growth [J]. Ecological Engineering, 2007, 29 (1): 96-104.
- [6] 尚昆仑. 垃圾和污泥堆肥用作高羊茅草皮基质的研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2008.
- [7] 徐伟朴. 污泥与猪粪堆肥用于草坪生产基质的研究 [D]. 保定: 河北农业大学, 2002.
- [8] 陈同斌. 一种地毯式草皮基质的制备方法: 中国, 1505920 [P/OL]. 2004-06-23.
- [9] 王建湘, 周杰良, 张扬珠. 城市污泥用于高羊茅无土草毯生产研究初报 [J]. 湖北农业科学, 2010, 49 (5): 1096-1098.
- [10] 邓荟芬, 王建湘. 3 种基质不同配比对马尼拉结缕草无土草毯生产的影响研究 [J]. 湖南农业科学, 2013, (19): 103-105.
- [11] Cornell A J. Experiments with mixtures; designs, models, and

- the analysis of mixture data (3th ed) [M]. USA: John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- [12] Özenç, Bender D. Effects of composted hazelnut husk on growth of tomato plants [J]. *Compost Science & Utilization*, 2006, 14 (4): 271–275.
- [13] 孙吉雄. 草坪学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2003.
- [14] 朱淑霞, 张俊卫, 尹少华. 污泥无土草皮基质配方优化研究 [J]. *草业科学*, 2012, 29 (4): 513–520.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析 (第三版) [M]. 北京: 中国农业出版社, 2008.
- [16] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [17] Kitzczak T, Czyz H, Kiepas – Kokot A. Possibilities of organic waste utilisation as a source of organic matter in the construction of lawn [J]. *Rocz Ochr Sr*, 2012, 14: 407–416.
- [18] 武良, 边秀举, 徐秋明, 等. 草坪无土栽培基质的研究进展及发展趋势 [J]. *中国农学通报*, 2008, 24 (8): 295–299.
- [19] Schumann G, Soares H, Holden C, et al. Relationship of traditional parameters of compost stability to turfgrass quality [J]. *Environmental Technology*, 1993, 14 (3): 257–263.
- [20] 武良. 脲醛泡沫栽培基质在草坪上的应用研究 [D]. 保定: 河北农业大学, 2009.
- [21] 刘金荣. 草坪综合评价体系的构建及干旱荒漠绿洲区草坪建植技术的研究 [D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2008.
- [22] 张继澍. 植物生理学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006. 405–447.

### The planting of alkali thatch by using urban sludge compost as the substrate of soilless lawn

ZHANG Hong-zhong<sup>1,2</sup>, HUO Jing<sup>1</sup>, MA Chuang<sup>1,2</sup>, ZHAO Ji-hong<sup>1,2</sup>, LI Shui-wang<sup>3</sup> (1. School of Material and Chemical Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou Henan 450001; 2. Collaborative Innovation Center of Environmental Pollution Control and Ecological Restoration, Henan Province, Zhengzhou Henan 450001; 3. Henan Xifangge Greening Project Co. Ltd., Zhengzhou Henan 450001)

**Abstract:** According to the mixture design {3, 2} simplex lattice theory, the merits of different proportions of rice chaff, sludge compost and vermiculite mix substrates were analyzed from the physical and chemical properties, the growth of alkali thatch physiological indices, the turf comprehensive quality and grass production cycle, respectively. The results showed that all the substrate of sludge compost mixed with rice chaff (T4) and the substrate of sludge compost mixed with vermiculite (T6), the substrate of sludge compost mixed with rice chaff and vermiculite (CK1) had excellent physicochemical properties with plenty nutrients, low bulk density and the suitable values of pH and EC, and were suitable for cultivating turf grass. Comparing with the field soil (CK2), the substrate contains sludge compost increased the turf chlorophyll content. The root activity of T6 and CK1 decreased slightly but the catalase activity of them increased. Both the root activity and the catalase activity of T4 decreased slightly. The free proline content of T4, T6 and CK1 increased but didn't reach significant difference ( $P > 0.05$ ). For the turf-grass comprehensive quality, the highest value occurred in CK1, followed by T4 and T6. A model was established based on the ratio of the mixtures combined with the production cycle, a total of 5 151 combing schemes were obtained by simulation and optimization, in which the shortest production cycle scheme was 18 days which contained 1 335 combing schemes, the scopes of rice chaff ( $x_1$ ) sludge compost ( $x_2$ ), vermiculite ( $x_3$ ) were  $0 \leq x_1 \leq 90\%$ ,  $10\% \leq x_2 \leq 30\%$ ,  $0 \leq x_3 \leq 84\%$ , respectively. Therefore, it was completely reliable and feasible to adopt rice chaff, vermiculite and sludge compost mixtures to cultivate the high quality alkali thatch soilless lawn.

**Key words:** rice chaff; vermiculite; sludge compost; the mixtures; soilless lawn