

煤矸石生态基质的制备配方及其肥力特征研究

柯凯恩¹, 董晓芸¹, 周金星¹, 金基石², 郑景明^{1*}

[1. 北京林业大学, 北京 100083; 2. 优栽生态科技(北京)有限公司, 北京 100080]

摘要: 煤矸石是煤炭开采过程中产生的废弃物, 而制备生态基质是消纳煤矸石储量的重要途径。以煤矸石为原料, 搭配不同有机原料, 经过混合堆制后得到不同理化性质的生态基质。采用3因素4水平正交试验, 研究煤矸石粉碎粒径(A)、煤矸石含量(B)及添加堆肥种类(C)对生态基质产品的肥力影响, 并采用高羊茅盆栽试验进行验证。通过测定生态基质理化性质及植物生长的12个肥力相关特征指标, 并对其进行极差分析与方差分析, 检验各配方的差异显著性。主要研究结果如下: (1) 基质营养组成方面, 煤矸石粒径、煤矸石含量以及堆肥种类均显著影响($P<0.05$)其养分含量。综合考虑有机质、总氮、总磷指标以及经济原则, 认为C₄A₂B₂(40%污泥堆肥搭配60%大粒径煤矸石)方案, 在3项指标上都达到了较优水平。煤矸石粒径越小, 越利于养分释放; 煤矸石含量越高, 养分含量就越少; 污泥堆肥营养物质丰富, 加入基质中, 能提高基质养分含量, 但是添加污泥同时会增大基质中重金属总量。(2) 基质粒径组成中, 粘粒含量受煤矸石粒径、堆肥种类显著影响($P<0.01$); 砂粒和粉粒含量则只受堆肥种类显著影响($P<0.05$)。粘粒含量最高的最优方案为C₄A₃B₄(20%污泥堆肥搭配80%中粒径煤矸石), 而砂粒含量最高的最优配方案为C₁A₃B₄(20%植物堆肥搭配80%中粒径煤矸石)。煤矸石粒径越小, 基质粘粒含量越高; 污泥堆肥能显著提高基质粘粒百分比, 有利于保水保肥; 植物堆肥则能提高砂粒占比, 有利于透水透气。(3) 植物生长方面, 高羊茅发芽率及地上生物量积累随基质中煤矸石占比的增加而下降, 或与煤矸石重金属含量高但营养元素少有关。然而, 地上、地下生物量都受添加堆肥种类显著影响($P<0.01$)。根据各组生态基质栽培的高羊茅生长表现, 认为使用配方B₁C₁A₁(50%植物堆肥搭配50%极大粒径煤矸石)能达到最大的发芽率, 而使用配方B₂C₁A₁(40%植物堆肥搭配60%极大粒径堆肥)则在总生物量积累上能达到最优。添加植物堆肥的基质对高羊茅的总生物量积累最有利。

关键词: 煤矸石; 生态基质; 基质配比; 植物生长

煤矸石是煤炭生产和加工过程中产生的固体废弃物, 约占煤炭生产量的10%~20%, 是我国排放量和累计堆存量最大的工业固体废弃物之一^[1]。煤矸石大量的堆积会造成严重的环境效应, 比如污染效应(水、土、大气)、自燃效应、占地效应、爆炸效应、结构侵蚀效应、稳定效应等^[2]。与此同时, 煤矸石又是一种可开发利用的资源, 国家鼓励煤矸石大宗利用和高附加值利用, 包括煤矸石土地复垦及矸石山生态环境恢复中的应用等^[3]。杨尽等^[4]在缺乏营养的耕地土壤中添加煤矸石和其他固体废物进行培肥, 发现效果良好, 且价格低廉, 操作简便。钱兆淦^[5]进行田间试验, 对苹果树施

用高含碳量煤矸石制备的肥料, 结果发现施用煤矸石肥料的苹果树增产率达19%~37%。

鉴于煤矸石的施肥潜力, 可将其作为生态基质原料进行基质制备。生态基质有着很好的发展机遇和广阔的市场前景, 其本质是人工土壤, 其所有性质和成土过程均由制备技术决定^[6-7]。基质栽培领域中, 泥炭基质占据主要市场, 但泥炭为不可再生资源, 许多国家限制开采^[8]。而煤矸石含有相对较高的有机质成分和植物生长所需大量无机元素, 或可以取代泥炭制作基质。煤矸石颗粒尺寸较大且毛细孔隙率极低, 其结构和保水性差, 直接使用不利于植物生长, 因此, 应适当粉碎并添加合适的外源材料来改善煤矸石制备生态基质的理化性质^[9-10]。已有研究表明, 园林废弃物、污泥以及有机粪肥等有机残留物中含有各类营养元素和大分子有机物, 能够改善土壤结构和性能, 增加土壤养分, 从而促进植物的生长发育, 对植物生物量的积

收稿日期: 2020-04-17; 录用日期: 2020-06-18

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0502504)。

作者简介: 柯凯恩(1995-), 男(哈尼族), 云南红河人, 硕士研究生, 主要从事恢复生态学方面的研究。E-mail: kanekelion@163.com。

通讯作者: 郑景明, E-mail: zhengjm@bjfu.edu.cn。

累起到有利作用^[11-12]。因此,使用有机残留物对煤矸石制备的生态基质进行改良,是一种廉价而有效地提高其肥力的方法^[13-16]。

本研究创新性地通过向不同粒径和含量的煤矸石原料中添加不同有机肥料成分,制备不同类型的生态基质,并对其进行植物生长试验,分析其理化性质及对植物生长的影响,确定不同使用目的和环境条件下,煤矸石粒径、煤矸石含量以及不同堆肥之间的最佳配比。本研究结果可为其在矿区生态修复(如植被恢复)、退化植被恢复工程(如荒漠化、石漠化区域治理)、边坡绿化等生态环境治理方面中的应用提供理论和技术依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验用煤矸石产自内蒙古某矿区;动物堆肥为鸡粪堆肥;植物堆肥为园林废弃物堆肥;城市污泥(简称污泥)堆肥为无害化污泥堆肥;苗圃表土为北京市海淀区苗圃三顷园的表土,为潮土。上述各类生态基质原料的理化性质见表1,经检测以上所有原料中的大部分重金属元素含量远低于国家标准《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试

表1 生态基质原料的理化性质

指标	煤矸石	动物堆肥	植物堆肥	污泥堆肥	苗圃表土
电导率 ($\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$)	0.13	5.16	2.09	5.92	3.52
pH	7.98	7.40	7.55	6.36	8.13
有机质 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	26.21	11.07	12.08	18.48	11.72
总氮($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	2.59	4.37	5.51	10.02	0.11
总磷($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.18	4.12	2.16	11.51	2.27
Ca($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	16.24	18.42	19.19	31.63	11.40
Na($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	21.61	0.01	6.10	25.62	2.58
Mg($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	2.91	3.26	2.76	11.02	1.43
Al($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	19.64	16.45	18.86	32.18	18.84
Fe($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	33.88	17.88	15.73	13.42	20.12
Mn($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.59	0.41	0.38	0.44	0.39
Cu($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	—	0.06	0.01	0.15	0.03
Pb($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.08	0.08	—	0.20	0.02
Cd($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	—	—	—	—	—
Zn($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	3.12	0.94	0.05	0.47	0.07
Ni($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.03	0.03	0.02	0.05	0.02
Hg($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	—	—	—	—	—
As($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.41	—	—	2.82	—
Cr($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.07	0.05	0.05	0.05	0.05

行)》(GB 15618—2018)的农用土壤污染风险筛选值。但是,煤矸石和污泥堆肥的As、Zn元素含量以及动物堆肥的Zn元素含量都超过了农用土壤污染风险筛选值,若要采用此类原料配制的基质进行作物栽培,一定要提前对原料进行重金属元素钝化处理。因此,本次试验中某些基质配方产品不适用于农作物生产,煤矸石基质产品的应用目标定位为矿区等废弃地的生态恢复工程使用,避免重金属进入食物链。

供试植物为市场购买的高羊茅(*Festuca arundinacea* L.),品种为猎狗5号,供试前进行发芽试验,发芽率达90%以上。

1.2 试验方法

1.2.1 煤矸石制备生态基质的设计

根据《煤矸石资源再生利用技术》^[17]中煤矸石在农林业中的应用指导意见,将煤矸石按不同粒径粉碎后,添加不同类型的堆肥成分,充分混合均匀后放置室外腐熟,即制成生态基质。为分析煤矸石粒径大小(A)、煤矸石含量(B)、添加堆肥种类(C)对生态基质产品的影响,设计了 $L_{16}(4^3)$ 3因素4水平正交试验(表2、表3),进行3次重复试验。制备的各组生态基质腐熟2个月以后,取样测定生态基质中总氮、总磷、有机质含量以及粘粒、粉粒、砂粒含量,分析最佳的煤矸石生态基质制备配比方案。

表2 正交试验设计

水平	因素		
	煤矸石粒径(A)	煤矸石含量(B)	堆肥种类(C)
1	A ₁ : 极大粒径	B ₁ : 50%	C ₁ : 植物堆肥
2	A ₂ : 大粒径	B ₂ : 60%	C ₂ : 动物堆肥
3	A ₃ : 中粒径	B ₃ : 70%	C ₃ : 苗圃表土
4	A ₄ : 小粒径	B ₄ : 80%	C ₄ : 污泥堆肥

注:煤矸石粒径在2~10 mm范围内划分为 ≤ 2.36 、 ≤ 4.75 、 ≤ 9.50 、 ≤ 10.00 mm 4个水平,苗圃表土作为对照引入堆肥种类中。

1.2.2 高羊茅栽培试验

按正交试验方法^[18],将3因素4水平正交试验处理所得的16组生态基质均进行温室高羊茅盆栽试验,试验时间为2019年6月24日~9月22日。采用口径16 cm、高11 cm的塑料盆进行盆栽试验,每盆中播种高羊茅种子200粒,播种后每天定时、定量浇水,保持土壤湿润。每个处理5个重复(即5个区组),共16种配方 $\times$ 5个重复=80盆。测定高羊茅发芽率、地上与地下生物量,评估研究生态基质种类对高羊茅生长表现的影响。

表3 生态基质3因素4水平正交试验方案

组别	煤矸石粒径 (A)	煤矸石含量 (B)	堆肥种类 (C)
G ₁	A ₁	B ₁	C ₁
G ₂	A ₁	B ₂	C ₂
G ₃	A ₁	B ₃	C ₃
G ₄	A ₁	B ₄	C ₄
G ₅	A ₂	B ₁	C ₂
G ₆	A ₂	B ₂	C ₁
G ₇	A ₂	B ₃	C ₄
G ₈	A ₂	B ₄	C ₃
G ₉	A ₃	B ₁	C ₃
G ₁₀	A ₃	B ₂	C ₄
G ₁₁	A ₃	B ₃	C ₁
G ₁₂	A ₃	B ₄	C ₂
G ₁₃	A ₄	B ₁	C ₄
G ₁₄	A ₄	B ₂	C ₃
G ₁₅	A ₄	B ₃	C ₂
G ₁₆	A ₄	B ₄	C ₁

1.3 测试项目与方法

1.3.1 生态基质肥力指标

总氮、总磷、有机质含量：生态基质取样后风干过 0.149 mm 筛。有机质的测定方法采用重铬酸钾容量法^[19]，土壤全氮、全磷采用 H₂SO₄-HClO₄ 消煮，植物全氮、全磷则采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮，样品消煮完后统一使用 AMS 公司生产的 Smartchem_200 全自动间断分析仪测定。

1.3.2 生态基质粒径组成

生态基质取样风干过 2 mm 筛，采用美国麦奇克有限公司生产的激光粒度分析仪 S3500 测量土壤粒径的体积百分比，测量范围为 0.01 ~ 2800 μm，测量精度为 0.6%，测量时间为 10 ~ 30 s，所需样品量为 0.05 ~ 2.00 g。

1.3.3 高羊茅种子萌发及植株生长状况

种子发芽率：6月24日~7月1日，每天统计一次，按公式“萌发率(%) = 全部发芽种子数 / 播种种子总数 × 100”计算，一周萌发率即为发芽率。生物量：6月25日~7月21日，在植株生长8周，基本停止高生长后，所有小区进行一次刈剪，收获地上生物量，烘干后称重测定；在植株生长12周后，有植株开始成熟结穗，此时进行破坏性取样，收获地上生物量，且取出每盆中所有根置

于 0.5 mm 筛中用水冲洗，然后将全部根装入纸袋中，烘干后称量测定。第一次收获的地上生物量加第二次收获的生物量为植株总地上生物量，第二次破坏性取样的地下部分则为植株总地下生物量。

1.4 数据处理

用正交设计的极差分析确定生态基质配方因素的最优水平和最优水平组合，采用 3 因素 4 水平的方差分析以及 Duncan 组间多重比较分析来评价各因素对生态基质产品肥力、粒径组成、植物生长是否具有显著影响，以及水平间是否有显著差异 ($P < 0.05$ 时显著; $P < 0.01$ 时极显著)。采用 SPSS 25、R3.6.1 软件进行数据统计和作图。

2 结果与分析

2.1 不同因素对生态基质的肥力影响

煤矸石制备生态基质的配方对生态基质产品的有机质、总氮及总磷 3 个肥力指标影响结果见表 4。

表4 不同组生态基质的肥力指标含量 (g · kg⁻¹)

组别	有机质	总氮	总磷
G ₁	18.00 ± 0.54bc	5.99 ± 0.22g	1.72 ± 0.01c
G ₂	17.66 ± 0.20bc	4.67 ± 0.04e	2.84 ± 0.03e
G ₃	9.30 ± 0.23a	0.69 ± 0.04a	0.57 ± 0.12a
G ₄	29.16 ± 0.55f	6.92 ± 0.02i	4.82 ± 0.01g
G ₅	24.21 ± 1.06d	4.58 ± 0.03e	2.21 ± 0.01d
G ₆	19.45 ± 0.28c	5.71 ± 0.01fg	1.37 ± 0.003bc
G ₇	25.57 ± 0.51de	5.97 ± 0.11g	5.01 ± 0.03g
G ₈	17.66 ± 0.28bc	1.44 ± 0.03c	0.36 ± 0.08a
G ₉	9.24 ± 0.28a	1.38 ± 0.04bc	0.52 ± 0.11a
G ₁₀	25.33 ± 0.31de	6.40 ± 0.10h	5.40 ± 0.03h
G ₁₁	19.37 ± 0.62c	2.52 ± 0.01d	0.99 ± 0.21b
G ₁₂	19.78 ± 0.06c	2.62 ± 0.10d	1.00 ± 0.21b
G ₁₃	26.85 ± 0.84e	5.49 ± 0.05f	4.36 ± 0.03f
G ₁₄	16.40 ± 0.21b	1.49 ± 0.01c	0.41 ± 0.09a
G ₁₅	27.42 ± 1.27ef	1.12 ± 0.09b	1.07 ± 0.23b
G ₁₆	25.87 ± 0.19de	1.53 ± 0.04c	0.45 ± 0.09a

注：同列不同小写字母代表组间差异显著。下同。

根据肥力指标的极差分析结果(表5)，各因素对每个指标的影响程度均为堆肥种类(C) > 煤矸石粒径(A) > 煤矸石含量(B)，从有机质含量考虑，最佳配方为 C₄A₄B₄，从总磷含量考虑，生态基质最佳配方为 C₄A₂B₁，而从总氮含量考虑，则最佳配方为 C₄A₁B₂。

表 5 生态基质肥力指标的极差分析 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

指标	因素	K1	K2	K3	K4	R
有机质	煤矸石粒径 (A)	18.53	21.72	18.43	24.14	5.71
	煤矸石含量 (B)	19.58	19.71	20.41	23.12	3.54
	堆肥种类 (C)	20.67	22.27	13.15	26.73	13.58
总氮	煤矸石粒径 (A)	4.57	4.43	3.23	2.41	2.16
	煤矸石含量 (B)	4.36	4.57	2.57	3.13	1.99
	堆肥种类 (C)	3.94	3.25	1.25	6.20	4.94
总磷	煤矸石粒径 (A)	2.49	2.24	1.98	1.57	0.92
	煤矸石含量 (B)	2.20	2.51	1.91	1.66	0.85
	堆肥种类 (C)	1.13	1.78	0.47	4.90	4.43

注: K1 表示该因素水平 1 的平均值, K2、K3、K4 含义以此类推, R 为该因素各水平之间平均值的极差 (极大值 - 极小值)。

图 1 表明, 总磷、总氮含量随煤矸石粒径的变小而呈下降趋势, 而有机质含量则相反, 呈上升趋势。煤矸石含量在影响基质肥力指标上的趋势与煤矸石粒径相似。堆肥种类上, 使用污泥堆肥的配方总氮、总磷、有机质含量都是最高的, 作为对照的苗圃表土配方则均为最低。因素煤矸石粒径 (A)、煤矸石含量 (B) 和堆肥种类 (C) 对总氮、总磷、有机质含量影响显著 ($P < 0.01$)。综合考虑 3 个指标以及生产经济性原则, 最佳养分的生态基质配方为 $C_4B_2A_2$ (40% 污泥堆肥和 60% 大粒径煤矸石搭配)。

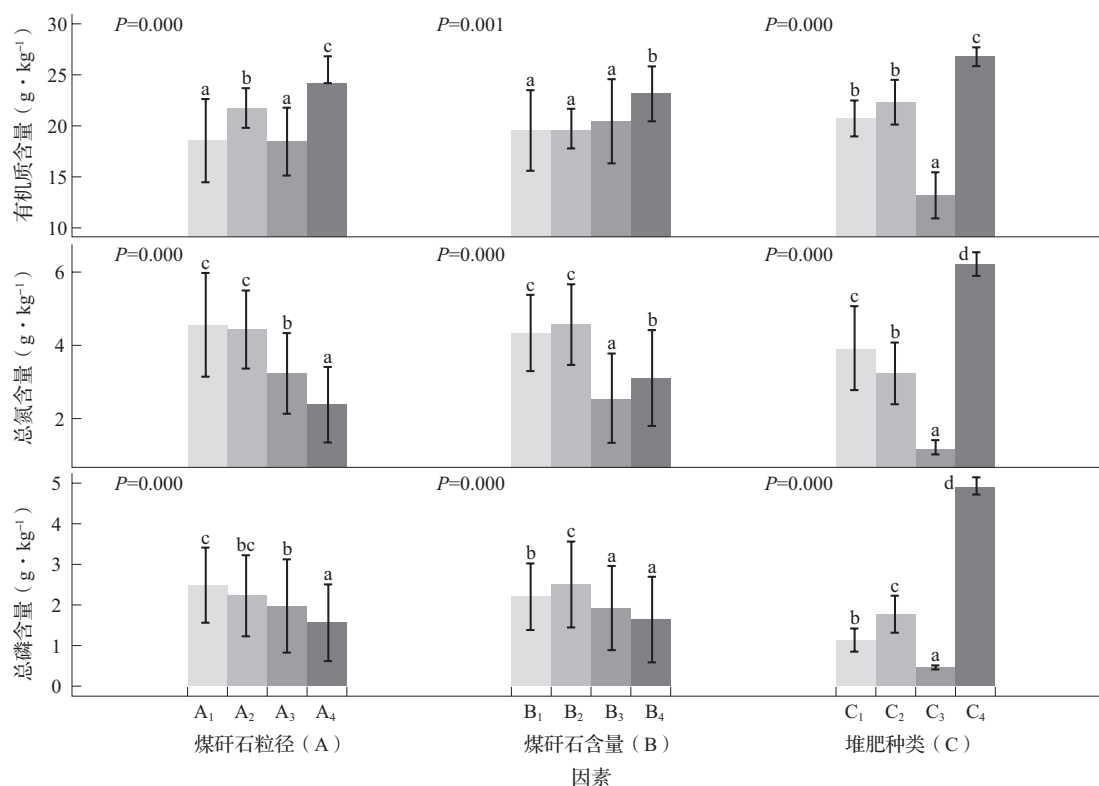


图 1 不同生态基质配方肥力的正交效应

注: 不同小写字母代表水平间差异显著。下同。

2.2 不同配方生态基质粒径组成

2.2.1 生态基质粒径组成分析

在筛选最优生态基质方案的同时, 对现有 16 组生态基质进行粒径组成分析。将各径级颗粒体积百分比进行统计, 各组均没有小于 0.001 mm 的颗粒, 而占比最大的基本都是 0.005 ~ 0.05 mm 的颗粒, G_1 、 G_6 、 G_{16} 则 0.25 ~ 0.5 mm 的颗粒含量也相较于其他组要多。根据我国土壤颗粒组成分类标准^[20], 对上述 16 组生态基质进行质地分类 (表 6)。16 组生

态基质中 G_1 、 G_6 、 G_{16} 为砂土, 进一步细分, G_1 为面砂土, G_6 、 G_{16} 为细砂土; 其他均为壤土, 其中 G_9 、 G_{14} 为粉壤土, G_{10} 为粉土, 其余均为壤土里的砂粉土。

2.2.2 不同因素对粒径组成的影响

图 2 表明, 粘粒含量受煤矸石粒径及堆肥种类的影响显著 ($P < 0.05$), 粉粒和砂粒含量则仅受堆肥种类影响显著 ($P < 0.05$)。在对粘粒含量具有显著影响的因素中, 水平 A_3 (中粒径煤矸石) 和 C_3 (苗

表 6 生态基质颗粒成分与组成结果

组别	颗粒组成 (%)				质地组	质地命名
	粘粒 (0 ~ 0.005 mm)	粉粒 (0.005 ~ 0.05 mm)	砂粒 (0.05 ~ 1 mm)	石砾 (1 ~ 10 mm)		
G ₁	2.88 ± 0.20ab	41.18 ± 2.46ab	55.82 ± 2.70bc	0.12 ± 0.12a	砂土	面砂土
G ₂	6.80 ± 1.06ab	55.88 ± 4.09b	37.32 ± 5.14abc	0.00 ± 0.00a	壤土	砂粉土
G ₃	14.69 ± 5.23abcd	47.09 ± 10.61ab	36.50 ± 16.72abc	0.00 ± 0.00a	壤土	砂粉土
G ₄	9.40 ± 0.77abc	50.25 ± 2.90ab	40.34 ± 3.67abc	0.00 ± 0.00a	壤土	砂粉土
G ₅	7.18 ± 2.41ab	48.17 ± 12.35ab	43.93 ± 14.14abc	0.72 ± 0.72b	壤土	砂粉土
G ₆	2.62 ± 1.12a	25.50 ± 7.18a	67.73 ± 6.18c	4.15 ± 2.14c	砂土	细砂土
G ₇	15.60 ± 5.08abcd	47.31 ± 8.46ab	34.55 ± 14.67abc	0.00 ± 0.00a	壤土	砂粉土
G ₈	23.59 ± 8.93d	44.53 ± 10.90ab	25.87 ± 22.74ab	0.00 ± 0.00a	壤土	砂粉土
G ₉	16.03 ± 6.14bcd	37.49 ± 8.69ab	42.93 ± 15.60abc	0.00 ± 0.00a	壤土	粉壤土
G ₁₀	24.59 ± 3.56d	60.95 ± 2.66b	10.00 ± 4.33a	0.00 ± 0.00a	壤土	粉土
G ₁₁	9.56 ± 1.25abc	48.65 ± 6.70ab	40.46 ± 7.23abc	0.86 ± 0.86b	壤土	砂粉土
G ₁₂	21.43 ± 3.14cd	50.71 ± 5.83ab	22.42 ± 9.19ab	0.11 ± 0.11a	壤土	砂粉土
G ₁₃	11.63 ± 0.05abcd	48.04 ± 1.72ab	40.07 ± 1.61abc	0.00 ± 0.00a	壤土	砂粉土
G ₁₄	12.91 ± 5.97abcd	37.59 ± 11.07ab	48.10 ± 17.86abc	0.00 ± 0.00a	壤土	粉壤土
G ₁₅	13.69 ± 1.20abcd	55.37 ± 8.05b	29.42 ± 8.69abc	0.00 ± 0.00a	壤土	砂粉土
G ₁₆	9.08 ± 1.30abc	27.12 ± 1.96a	61.19 ± 3.47bc	1.06 ± 0.61b	砂土	细砂土

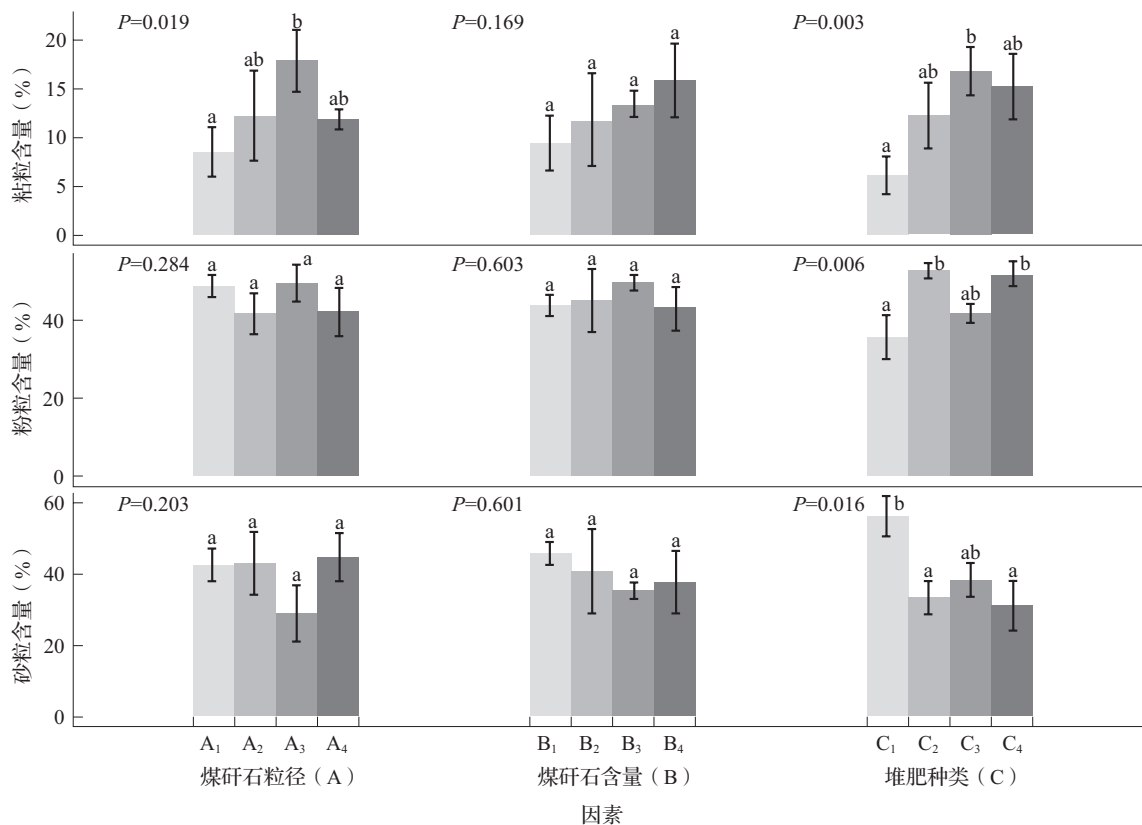


图 2 生态基质颗粒组成正交效应

圃表土)为最优水平。其次,加入污泥堆肥,粘粒含量会升高, C_4 (污泥堆肥)也接近 C_3 (苗圃表土)的表现,二者无显著差异。而在粉粒含量上,使用 C_2 (动物堆肥)效果最佳, C_4 (污泥堆肥)与其没有显著差异。砂粒含量在使用 C_1 (植物堆肥)时表现最佳。粘粒含量高,土壤保水保肥性好,但通气、透水性差;而砂粒含量高,则土壤蓄水力弱,保肥性差^[21],因此,筛选后保肥保水性最佳组合为 $C_4A_3B_4$ (80%中粒径煤矸石搭配20%污泥堆肥);而通气透水性最佳组合为 $C_1A_3B_4$ (80%中粒径煤矸石搭配20%植物堆肥)。

2.3 不同配方生态基质对高羊茅种植效果的研究

2.3.1 不同配方生态基质对高羊茅发芽率的影响

高羊茅发芽率测定结果(图3)表明,在极大粒径的4组($G_1 \sim G_4$)中,煤矸石含量50%、添加植物有机肥的基质的种子发芽率最高,达到了58.90%;在大粒径的4组($G_5 \sim G_8$)中,煤矸石含量60%、添加植物有机肥的基质的种子发芽率最高,达到了57.20%;在中粒径的4组($G_9 \sim G_{12}$)

中,煤矸石含量50%、添加苗圃表土的基质种子发芽率最高,达到了66.80%,为所有组别中发芽率最高的基质,或许与基质粘粒含量高,保水性好有关;在小粒径的4组($G_{13} \sim G_{16}$)中,煤矸石含量60%、添加植物有机肥的基质的种子发芽率最高,达到了42.90%。

在进行盆栽试验前,先进行了普通土壤与纯煤矸石种植高羊茅的预试验,结果发现普通土壤种植高羊茅发芽率为36.5%,而纯煤矸石种植的高羊茅发芽率为12.70%。而高羊茅盆栽试验结果表明生态基质中煤矸石含量过高也不利于高羊茅种子萌发,在所有粒径组别中,煤矸石含量占80%的基质(G_4 、 G_8 、 G_{12} 、 G_{16})发芽率都是最低的,为20%~30%,未达到普通土壤水平。

由表7的发芽率极差分析可知,3个因素对发芽率的影响程度排序为煤矸石含量(B)>堆肥种类(C)>煤矸石粒径(A),图4则表明3个因素均对发芽率有显著影响。

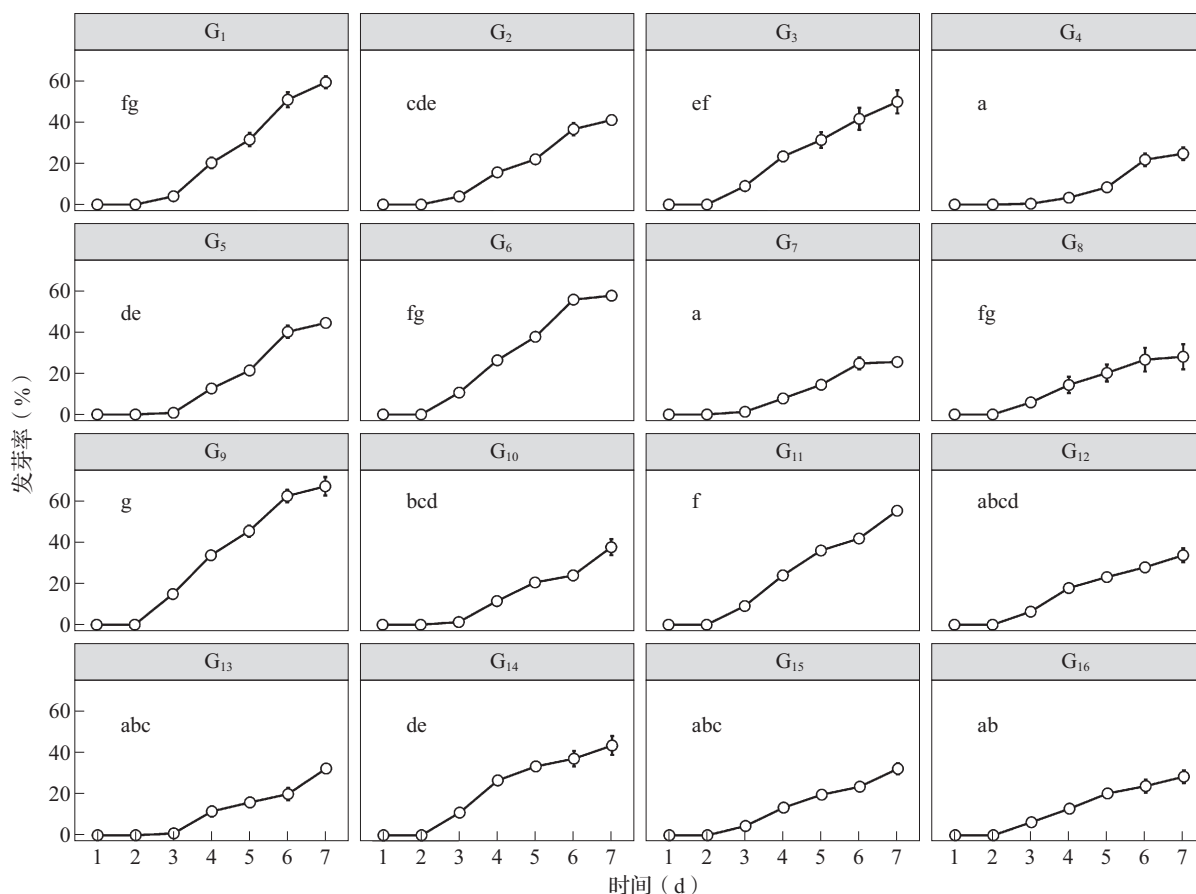


图3 各组生态基质高羊茅发芽率

注:不同小写字母代表组间发芽率差异显著。

表7 发芽率正交试验极差分析 (%)

因素	K1	K2	K3	K4	R
煤矸石粒径 (A)	43.40	38.60	48.18	33.65	14.53
煤矸石含量 (B)	50.43	44.55	40.40	28.45	21.98
堆肥种类 (C)	49.78	37.53	46.75	29.78	20.00

注: K1 表示该因素水平 1 的平均值, K2、K3、K4 含义以此类推, R 为该因素各水平之间平均值的极差 (极大值 - 极小值)。

从图 4 中可知, 要获得高羊茅最佳发芽率则应该选择的配方组合为: $B_1C_1A_3$ (50% 含量中粒径

煤矸石搭配 50% 植物堆肥)。但从经济角度出发, A_3 和 A_1 在对高羊茅发芽率影响效果上没有显著差异, 所以可选更经济的极大粒径煤矸石。同样, C_1 和 C_3 也没有显著差异, 植物堆肥已达到了和苗圃表土一样的发芽效果 (图 4)。综上, 经济性最佳的配方组合为 $B_1C_1A_1$ 。此外, 高羊茅发芽率随煤矸石含量的增加, 有显著的下降趋势; 添加了污泥堆肥的基质, 在发芽率上显著低于其他 3 种添加原料。

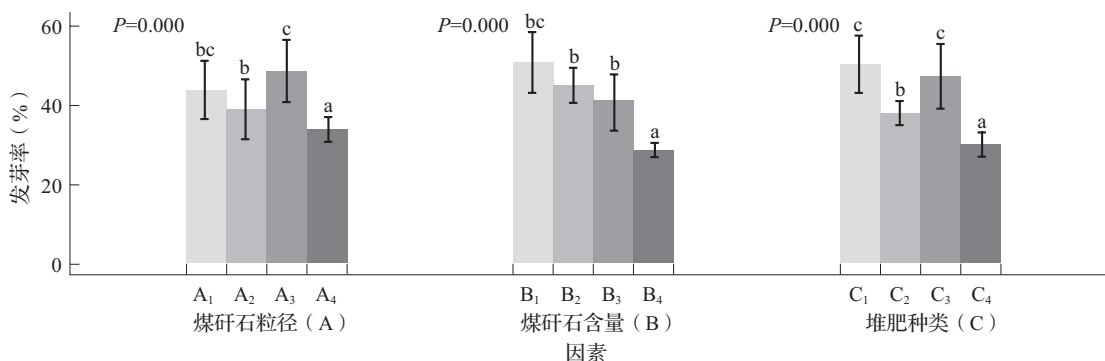


图4 发芽率正交效应

2.3.2 不同配方生态基质对高羊茅地上、地下生物量的影响

由图 5 可知, 地上生物量最高的是 G_6 , 为

$5.27 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$, 最低的是 G_8 , 为 $1.45 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$; 地下生物量最高的是 G_1 , 为 $0.93 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$, 最低的是 G_8 , 为 $0.28 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$ 。

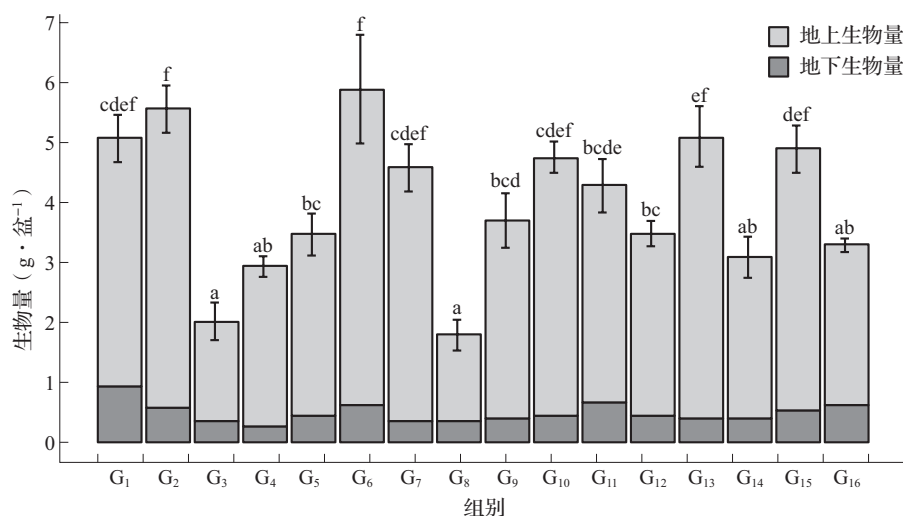


图5 不同配方生态基质栽培的高羊茅生物量

从高羊茅生物量正交效应 (图 6) 可知, 地上生物量受煤矸石含量 (B) 以及堆肥种类 (C) 显著影响, 而煤矸石粒径 (A) 则没有显著影响; 地下生物量的多少则只受堆肥种类 (C) 显著影响。煤

矸石粒径 (A) 对地上、地下生物量没有显著影响, 可以选择成本最低的 A_1 (极大粒径)。煤矸石含量 (B) 只对地上生物量有显著影响, 可以选择对地上生物量有最优表现的 B_2 (60% 煤矸石含量)。对于

堆肥种类 (C), 地下生物量在使用 C_1 (植物堆肥) 时有着最优表现, 而地上生物量则在使用 C_4 (污泥堆肥) 时表现最佳, 但是考虑到, C_1 (植物堆肥) 与 C_4 (污泥堆肥) 对地上生物量表现无显著差异, 且污

泥可能会抑制植物发芽, 所以, 选择对总生物量表现最优的 C_1 (植物堆肥)。因此, 推测获得最高生物量的配方为: $A_1B_2C_1$ (60% 含量的极大粒径煤矸石搭配 40% 植物堆肥)。

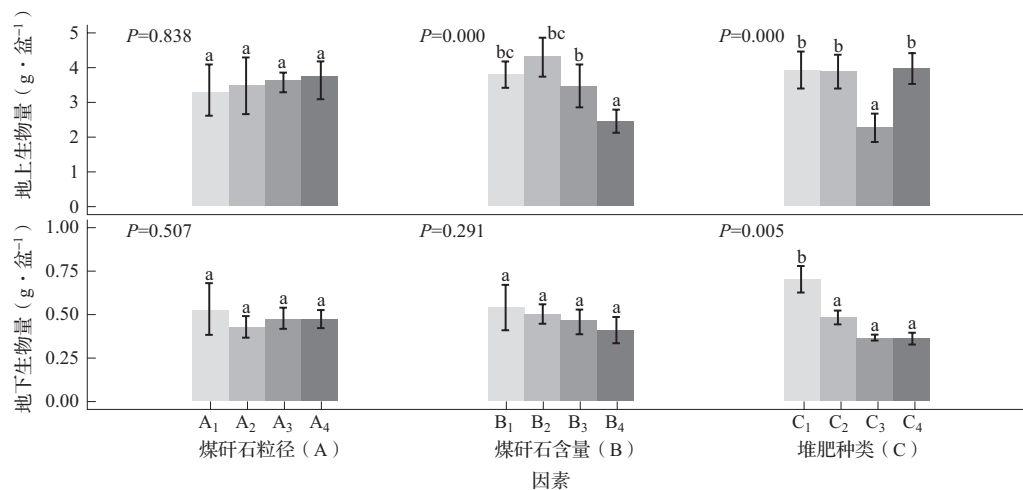


图6 高羊茅生物量正交效应

3 讨论

本研究探讨了煤矸石粒径、煤矸石含量及搭配不同有机原料对形成基质的肥力、粒径组成以及植物生长的影响。结果表明煤矸石粒径 (A) 显著影响基质肥力中的有机质、总氮、总磷含量, 土壤粒径组成中的粘粒含量, 以及种植高羊茅的发芽率。煤矸石含量 (B) 显著影响基质肥力中的有机质、总氮、总磷含量, 对土壤粒径组成中各组分含量影响都不显著, 对高羊茅的发芽率影响最为显著, 以及对高羊茅的地上生物量的影响也是显著的。堆肥种类 (C) 对基质养分、粒径组成、高羊茅生长的指标都有显著影响。 C_1 (植物堆肥) 对高羊茅的发芽率及地下生物量的影响最为显著, 在粒径组成上, 显著影响砂粒含量; C_2 (动物堆肥) 在粒径组成上, 显著影响基质粉粒含量; C_4 (苗圃表土) 在总氮、总磷、有机质含量上远低于其他 3 种堆肥, 进而也影响到其对高羊茅生物量积累作用, 然而粘粒含量最多的苗圃表土蓄水能力较好, 添加苗圃表土的生态基质在高羊茅发芽阶段优势明显。

基质肥力是评价生态基质好坏最重要的指标之一。通常煤矸石中磷以无机物的形式存在, 含量只有 0.05% ~ 0.3%, 氮则更少^[22]。氮、磷元素在煤矸石粒径变小、含量增高时, 淋溶流失风险增大; 而碳含量则高达 30%, 其中有机质为 15% 左右^[23], 煤矸石含量越高粒径越小, 越有利于基

质中有机质的积累。本研究结果与前人研究契合, 即有机质的增加会抑制磷和氮的固定, 因而增加煤矸石含量会提高氮、磷的淋溶风险^[24]。而污泥具有很高的施肥潜力, 含有丰富的有机营养物质^[25], 如氮、磷等, 本研究结果表明: 使用污泥堆肥的方案总氮、总磷、有机质含量都是最高的; 添加苗圃表土的基质, 所有肥力指标含量都很低, 这也说明表土营养物质较为匮乏。本研究在肥力指标上只进行了全效成分的测定, 而未对其速效成分进行测定。虽然全效成分大致可以反映出基质肥力的特征, 但是速效成分可能对植物生长的短期影响更大。此前有研究在进行煤矸石基质优化配方选择时, 发现速效成分指标与全效指标反映的趋势大致是一致的^[26]。煤矸石生态基质的速效成分是否与全效成分反映的肥力特征一致还有待进一步试验验证。

对于基质的粒径组成来说, 粘粒含量高, 土壤保水保肥性好, 但通气、透水性差; 高比例污泥基质粘粒含量高, 透气透水性差, 会抑制植物萌发与生长^[27]; 而砂粒含量高, 则土壤蓄水力弱, 保肥性差, 但通气、透水性强。因此在实际生产中, 一般会采用比例折中的壤土类型, 正交试验设计的 16 组配方中, 除 G_1 、 G_6 、 G_{16} 外, 均为壤土, 此类基质中和了两者的优势, 能更广泛地应用到实际生产中。

根据各组生态基质栽培的高羊茅生长表现, 添加了污泥堆肥的基质, 在发芽率上显著低于其他 3

种添加原料(图4)。有研究表明纯污泥对高羊茅发芽率有显著抑制作用^[28],可能与污泥中含有激素类物质和有机污染物质等有关^[28-29]。同时,添加植物堆肥的生态基质有着最高的生物量(图6),一般认为氮、磷、钾肥按照适当比例配合施用有利于地下生物量的累积^[30],本研究结果表明,添加植物堆肥的煤矸石生态基质的氮、磷、钾比例最适合高羊茅地下生物量积累。本研究只进行了一年生植物高羊茅的试验,对多年生草本及木本植物的发芽率及生长状况的影响有待进一步验证。

4 结论

基质营养组成方面,煤矸石粒径、煤矸石含量以及堆肥种类均显著影响($P<0.05$)其养分含量。综合考虑有机质、总氮、总磷这3个养分指标以及经济原则,认为 $C_4A_2B_2$ (40%污泥堆肥搭配60%大粒径煤矸石)这一组方案在3项指标上都达到了较优水平。污泥堆肥营养物质丰富,加入基质中,能提高基质养分含量,但是添加污泥同时会增大基质中重金属总量。

基质粒径组成中,粘粒含量显著受煤矸石粒径、堆肥种类影响($P<0.01$);砂粒和粉粒含量则只受堆肥种类显著影响($P<0.05$)。粘粒含量最高的最优方案为 $C_4A_3B_4$ (20%污泥堆肥搭配80%中粒径煤矸石),而砂粒含量最高的最优选配方案为 $C_1A_3B_4$ (20%植物堆肥搭配80%中粒径煤矸石)。污泥堆肥能显著提高基质粘粒百分比,有利于保水保肥,植物堆肥则能提高砂粒占比,有利于透水透气。

植物生长方面,高羊茅发芽率及地上生物量积累随基质中煤矸石占比的增加而下降,而地上、地下生物量都受添加堆肥种类的显著影响($P<0.01$)。根据各组生态基质栽培的高羊茅生长表现,认为使用配方 $B_1C_1A_1$ (50%植物堆肥搭配50%极大粒径煤矸石)能达到最大的发芽率,而使用配方 $B_2C_1A_1$ (40%植物堆肥搭配60%极大粒径堆肥)则在总生物量积累上能达到最优。添加植物堆肥的基质对高羊茅的总生物量积累最有利。

本研究结果可为煤矸石在矿区生态恢复(如植被恢复)、荒漠化区域治理、土壤瘠薄情况下造林(如防护林的应用)、边坡绿化等生态环境治理方面的应用提供理论和技术依据。

参考文献:

[1] 王心义,杨建,郭慧霞. 矿区煤矸石堆放引起土壤重金属污

染研究[J]. 煤炭学报, 2006(6): 808-812.

- [2] 邓丁海,岑文龙. 煤矸石堆放区的环境效应研究[J]. 中国矿业, 1999(6): 90-94.
- [3] 中华人民共和国国家发展和改革委员会, 中华人民共和国科学技术部, 中华人民共和国工业和信息化部,等. 煤矸石综合利用管理办法(2014年修订版)[J]. 国务院公报, 2015(7): 31-34.
- [4] 杨尽,刘莉,孙传敏,等. 新增耕地土壤物质组分特征及其培肥研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(7): 102-105.
- [5] 钱兆淦. 煤矸石肥料在苹果上施用效果的研究[J]. 陕西农业科学, 1997(1): 14-15.
- [6] Asensio V, Vega F A, Andrade M L, et al. Technosols made of wastes to improve physio-chemical characteristics of a copper mine soil[J]. Pedosphere, 2013, 23(1): 1-9.
- [7] 毛羽,张无敌. 无土栽培基质的研究进展[J]. 农业与技术, 2004(3): 83-88.
- [8] 周惠民,何丽斯,李畅,等. 花卉无土栽培泥炭基质的替代研究[J]. 江苏林业科技, 2019, 46(3): 45-48.
- [9] Zhang Q, Wang X. Performance of cemented coal gangue backfill[J]. Journal of Central South University of Technology, 2007, 14(2): 216-219.
- [10] Jabłońska B, Kityk A V, Busch M, et al. The structural and surface properties of natural and modified coal gangue[J]. Journal of Environmental Management, 2017, 190: 80-90.
- [11] Brown S L, Henry C L, Chaney R, et al. Using municipal biosolids in combination with other residuals to restore metal-contaminated mining areas[J]. Plant & Soil, 2003, 249(1): 203-215.
- [12] Bendfeldt E S, Burger J A, Daniels W L. Quality of amended mine soils after sixteen years[J]. Soil Science Society of America Journal, 2001, 65(6): 1736-1744.
- [13] Hemmat A, Aghilinategh N, Rezaeinejad Y, et al. Long-term impacts of municipal solid waste compost, sewage sludge and farmyard manure application on organic carbon, bulk density and consistency limits of a calcareous soil in central Iran[J]. Soil & Tillage Research, 2010, 108(1-2): 43-50.
- [14] Dowdy R H, Larson W E, Titrud J M, et al. Growth and metal uptake of snap beans grown on sewage sludge-amended soil: A four-year field study[J]. Journal of Environmental Quality, 1978, 7(2): 252-257.
- [15] Garcia-Gomez A, Bernal M P, Roig A. Growth of ornamental plants in two composts prepared from agro-industrial wastes[J]. Bioresource Technology, 2002, 83: 81-87.
- [16] 李跻,郭旭宏. 鸡粪的发酵处理方法与利用[J]. 农业科学, 2007(3): 97-98.
- [17] 张长森. 煤矸石资源再生利用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2018. 204-209.
- [18] Li S, Li Y, Shi J, et al. Optimizing the formulation of external-soil spray seeding with sludge using the orthogonal test method for slope ecological protection[J]. Ecological Engineering, 2017, 102: 527-535.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社,

2000. 25–97.
- [20] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室. 土壤物理性质测定法 [M]. 北京: 科学出版社, 1978. 27–28.
- [21] 林大仪. 土壤学 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2019. 17–20.
- [22] 张长森. 煤矸石资源化综合利用新技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2008. 20–29.
- [23] 刘迪. 煤矸石的环境危害及综合利用研究 [J]. 气象与环境学报, 2006 (3): 60–62.
- [24] 马玉玲. 钙、铁和有机质对潮土中磷环境行为的控制机制 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2019.
- [25] Kominko H, Gorazda K, Wzorek Z. The possibility of organo-mineral fertilizer production from sewage sludge [J]. Waste & Biomass Valorization, 2017, 8: 1781–1791.
- [26] Du T, Wang D, Bai Y, et al. Optimizing the formulation of coal gangue planting substrate using wastes: The sustainability of coal mine ecological restoration [J]. Ecological Engineering, 2020, 143: 105669.
- [27] 刘丽娟, 冷平生, 胡增辉, 等. 城市污泥和建筑垃圾混合基质对臭椿生长及重金属转移的影响 [J]. 应用与环境生物学报, 2018, 24 (6): 1390–1397.
- [28] 司莉青, 陈利民, 郑景明, 等. 城市污泥与园林废弃物堆肥的混合施用对高羊茅萌发与生长的影响 [J]. 生态学杂志, 2016, 35 (10): 2643–2650.
- [29] 余杰, 陈同斌, 高定, 等. 中国城市污泥土地利用关注的典型有机污染物 [J]. 生态学杂志, 2011, 30 (10): 2365–2369.
- [30] 刘玉杰, 韩建国, 刘雨坤. 不同施肥处理对高羊茅草坪质量的影响 [J]. 中国草地, 2001 (6): 28–34.

Evaluation of the formula for coal gangue ecological substrate and its fertility indexes

KE Kai-en¹, DONG Xiao-yun¹, ZHOU Jin-xing¹, JIN Ji-shi², ZHENG Jing-ming^{1*} [1. Beijing Forestry University, Beijing 100083; 2. Youzai Ecological Technology (Beijing) Co. Ltd., Beijing 100080]

Abstract: Coal gangue is the solid waste produced in coal mining and reducing the amount of coal gangue is urgent. Production of ecological substrate with coal gangue is a good way to deal with this problem. In this research, coal gangue was used as raw material along with different organic substances to produce ecological substrates for vegetation restoration. An $L_{16}(4^3)$ design, i.e., orthogonal experiment of three factors and four levels, was used in the experiment, and impact of three raw material factors on substrate properties, including coal gangue particle size (A), coal gangue content (B) and compost type (C), were determined. Furthermore, a pot experiment of *Festuca* was used to test these results. Using physical and chemical properties of the ecological substrate and plant growth indices, range analysis and variance analysis were conducted to test the significance of the differences among the 16 substrate formulas. Main findings were as follows: (1) As for the nutrient indexes of the substrates, coal gangue particle size, coal gangue content and compost type all had significant influences ($P < 0.05$) on the nutrient content. Considering the three nutrient indexes of organic matter, total nitrogen and total phosphorus as well as the economic principle, it was supported that $C_4A_2B_2$ (40% sludge compost and 60% large-size coal gangue) had reached a better level in three indexes. The smaller the coal gangue particle size is, the more favorable it is for nutrient release. The higher the coal gangue content is, the less the nutrient content is. Sludge compost is rich in nutrients. Adding sludge to substrate can increase the nutrient contents, while it also can increase the total amount of heavy metals. (2) For particle size composition of different substrates, the clay content was significantly affected by the coal gangue particle size and compost type ($P < 0.01$). The content of sand and silt was only significantly affected by the type of compost ($P < 0.05$). The optimal formula with the highest clay content was $C_4A_3B_4$ (20% sludge compost and 80% medium-size coal gangue), while the optimal formula with the highest sand content was $C_1A_3B_4$ (20% plant compost with 80% medium-size coal gangue). Clay particle content of substrate tends to increase with the decrease of coal gangue particle size, while the sludge compost has the highest clay particle content, and the addition of sludge compost can significantly improve the substrate viscosity, which is good for water and nutrients conservation. Besides, plant compost can increase the proportion of sand, which is beneficial to water and air permeability. (3) In terms of plant growth, germination rate and aboveground biomass accumulation decreased with the increase of proportion of coal gangue in the substrate, may be related to the higher content of heavy metal elements and less nutrition components in the coal gangue. However, both aboveground and underground biomass were significantly affected by compost type ($P < 0.01$). According to the growth performance of *Festuca* cultivated with ecological substrates in each group, formula $B_1C_1A_1$ (50% plant compost and 50% maximum-size coal gangue) can achieve the maximum germination rate, while formula $B_2C_1A_1$ (40% plant compost and 60% maximum-size coal gangue) can achieve the optimal biomass accumulation. Add substrate made of plant compost was superior in the accumulation of both aboveground and underground biomass.

Key words: coal gangue; ecological substrate; substrate formula; plant growth