

磷矿粉和糠醛渣不同配比对沥青拌合站回收粉性状及黑麦草生长的影响

李佳明¹, 万里², 张海峰², 王庆良¹, 苏毅², 宁国强³, 宋付朋^{1*}

1. 山东农业大学资源与环境学院, 土肥高效利用国家工程研究中心, 山东 泰安 271018
2. 山东鲁东路桥有限责任公司, 山东 东营 257000
3. 东营市东营区农业农村局, 山东 东营 257000

摘要: 为了探讨磷矿粉和糠醛渣不同配比对沥青拌合站回收粉改良为园林绿化用土的效果及其最优配比, 采用黑麦草盆栽试验, 研究磷矿粉和糠醛渣分别占回收粉干重 10%、15%、20% 和 1%、3%、5%、10% 添加比例组合的 12 个配比处理和 1 个未添加对照处理对回收粉养分、酶活性和黑麦草长势的影响。研究表明: 与未添加对照处理相比, 磷矿粉和糠醛渣不同配比处理均显著降低了回收粉 pH, 最大降幅达 9.85%, 改善了回收粉养分状况; 提高了黑麦草旺长期回收粉脲酶、蔗糖酶、过氧化氢酶和磷酸酶活性, 平均增幅达 63.66%; 提升了黑麦草植株鲜重、根尖数、总根长、根直径、总根表面积、总根体积, 平均增幅分别达 47.04%、57.98%、57.97%、2.25%、68.13%、87.61%。根据主成分综合得分, 磷矿粉 10%、15% 和 20% 与糠醛渣 1% 三个配比处理在改善回收粉养分、酶活性和促进黑麦草生长方面均具有显著的改良效应。因此, 在本试验条件下, 磷矿粉 10% 与糠醛渣 1% 为沥青拌合站回收粉改良为园林绿化用土最优的物料配比。

关键词: 沥青拌合站回收粉; 磷矿粉; 糠醛渣; 黑麦草; 改良效应

中图分类号: S156.99

文献标识码: A

文章编号: 1000-2324(2025)05-0890-09

Different Ratios of Phosphate Rock Powder and Furfural Residue on the Properties of Recycled Powder from Asphalt Mixing Plants and the Growth of Ryegrass

LI Jia-ming¹, WAN Li², ZHANG Hai-feng², WANG Qing-liang¹, SU Yi², NING Guo-qiang³, SONG Fu-peng^{1*}

1. College of Resources and Environment/Shandong Agricultural University, National Engineering Research Center for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer, Tai'an 271018, China
2. Shandong Ludong Road and Bridge Co., Ltd., LTD, Dongying 257000, China
3. Dongying District agriculture and Rural Affairs Bureau of Dongying City, Dongying 257000, China

Abstract: To investigate the effects of different mixing ratios of phosphate rock powder (PRP) and furfural residue (FR) on the improvement of recycled powder from asphalt mixing plants (RPAMP) for use as landscaping soil, as well as to determine the optimal mixing ratio, this study conducts a ryegrass pot experiment. It examines the effects of 12 proportion treatments with PRP and FR accounting for 10%, 15%, 20% and 1%, 3%, 5%, 10% of the recycled powder (RP) dry weight, respectively, as well as one control treatment with no additives, on the RP nutrients, enzyme activities and ryegrass growth performance. The results show that compared with the control treatment without any additives, all treatments with different ratios of PRP and FR significantly reduce the RP pH, with the maximum decrease of 9.85%, thereby improving RP nutrient status. These treatments also enhance the activities of urease, sucrase, catalase and phosphatase in RP during the vigorous growth stage of ryegrass, with an average increase of 63.66%. Additionally, they promote the fresh weight of ryegrass plants, the number of root tips, total root length, root diameter, total root surface area and total root volume of ryegrass, with increases of 47.04%, 57.98%, 57.97%, 2.25%, 68.13% and 87.61% on average, respectively. According to the comprehensive score of principal components, the three ratio treatments of 10%, 15% and 20% PRP combined with 1% FR all have significant improvement effects in enhancing the nutrients and enzyme activities of RP and the growth of ryegrass. Therefore, under the experimental conditions of this study, the optimal material ratio for amending recycled asphalt mixture into soil suitable for landscaping is 10% PRP combined with 1% FR.

收稿日期: 2025-02-16

修回日期: 2025-08-27

基金项目: 沥青拌合站回收粉农林业资源化利用关键技术研发与应用(2022-LDSYS-001)

第1作者简介: 李佳明(2002-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 土壤改良与培肥。E-mail: jiamLi2024@163.com

*通讯作者: Author for correspondence. E-mail: fpsong@126.com

Keywords: Recycled powder from asphalt mixing plants(RPAMP); phosphate rock powder(PRP); furfural residue(FR); ryegrass; improvement effect

公路建设需要沥青拌合站生产以沥青、石料、填料等为原料的铺设材料,其中石料是由矿山石块破碎成一定粒径的碎石,这些碎石表面黏附大量粒径 ≤ 0.075 mm的石料废粉影响沥青混合料的黏结力、均匀度和固化强度以至于降低路面铺设质量,因而由沥青拌合站集中清洁石料收集为回收粉^[1-4]。据估算,铺设沥青路面一般每公里约需500 t沥青混合料,每生产1 t沥青混合料约产生80~100 kg的回收粉^[5,6],也即每公里沥青路面产生40~50 t回收粉,产生量巨大,而且随着我国公路铺设里程日益增多,沥青混合料中石料的需求量也越来越多,回收粉的产生量也就越来越多。

由于回收粉具有粒度小、含泥量高、塑性低、内聚力弱、水稳性差等特点及其工业再利用技术不成熟、应用后存在易产生微裂缝等各种次生问题,极大地限制了回收粉的工业再利用^[7-15]。因而大多数回收粉因无法再利用而废弃堆积,不仅占压大量土地资源,而且还因其颗粒细微、易扬尘污染周边环境,危害人体健康^[16,17]。同时回收粉虽然为路桥施工企业副产的大量固体废弃物,而路桥工程却极缺园林绿化用土。磷矿粉是中低品位磷矿粉末,主要应用是在土壤中作为缓释磷源直接施用,其磷素的持续活化能有效调节回收粉有效磷缺乏的问题^[18-20];糠醛渣为工业废弃物,主要是用作有机肥原料、土壤改良剂等,因富含游离酸和有机质,既能调节回收粉的酸碱性,也能增加其有机质含量^[20-22]。

因此,根据回收粉的特性,采用磷矿粉和糠醛渣作为改良剂,以黑麦草为园林绿化指示植物,研究磷矿粉和糠醛渣的不同配比对沥青拌合站回收粉性状和黑麦草生长的影响,探讨最优的回收粉园林绿化用土改良利用配比处理,能够有效促进回收粉的农林资源化利用,不仅变固废为资源、降低了污染生态环境与危害人类健康的风险、解决了路桥施工企业固废回收粉产量大且不易利用同时缺乏园林绿化用土的难题,而且显著增加了经济、社会和生态效益,这对进一步促进工农业的生态循环和绿色高效可持续发展具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 试验地点

盆栽试验于2023年7月-2023年11月山东省泰安市岱岳区山东农业大学泮河校区资源与环境学院试验站(N36°10'12", E117°8'55")网室内进行。该地区属暖温带大陆性季风气候,年平均气温12.9℃,年平均降水量688.3 mm。

1.2 供试材料

供试沥青拌合站回收粉(Recovered Powder from Asphalt Mixing Plant, RPAMP):取自山东省东营市广饶县的山东鲁东路桥有限责任公司,理化性状为:pH 10.45,容重1.49 g/cm³,有机质0.27 g/kg,全氮0.04 g/kg,碱解氮27.72 mg/kg,有效磷1.78 mg/kg,速效钾160.40 mg/kg。

供试磷矿粉(Phosphate Rock Powder, PRP):购自山东省泰安市肥城市明瑞化工有限公司,粒径0.05 mm左右,pH7.25,全磷175.35 g/kg。

供试糠醛渣(Furfural Residue, FR):购自山东联友生物科技有限公司,其粒径2 mm左右,pH 2.26,有机质含量758.50 g/kg,全氮6.15 g/kg,速效氮0.43 g/kg,全磷3.75 g/kg,全钾11.9 g/kg。

供试肥料:尿素(N 46%)、磷酸二铵(N 18%, P₂O₅ 46%)、硫酸钾(K₂O 50%),均购自泰安市岱岳区生产资料有限公司。

供试作物:多年生黑麦草(*Lolium perenne* L.),草种购自泰安市岱岳区生产资料有限公司。

1.3 试验设计

依据前期预试验糠醛渣添加比例超过回收粉干重10%黑麦草不能出苗的研究结果以及所有改良剂总添加比例不能超过回收粉干重30%的要求,盆栽试验设置了在添加磷矿粉分别占沥青拌合站回收粉干重10%(P1)、15%(P2)、20%(P3)的3个添加比例基础上,添加糠醛渣分别占沥青拌合站回收粉干重1%(F1)、3%(F2)、5%(F3)、10%(F4)4个添加比例的12个改良物料配比处理:P1F1、P1F2、P1F3、P1F4、P2F1、P2F2、P2F3、P2F4、P3F1、P3F2、P3F3、P3F4,同时设置1个未添加改良物料的对照处理P0F0,共有13个处理,每个处理重复3次,共39盆,试验处

理随机排列。

试验塑料盆上口直径 40 cm、下底直径 25 cm,高 34 cm,底部带有托盘,花盆底部漏水孔塞有防止漏土的细密网眼纱布。

供试沥青拌合站回收粉自然风干后,筛除杂物,每盆称取风干沥青拌合站回收粉 20 kg,每盆添加根据黑麦草需肥规律计算的尿素 6.48 g、磷酸二铵 6.24 g、硫酸钾 4.96 g,并与按添加比例称取的磷矿粉、糠醛渣掺混均匀装盆,浇水至相对含水量 75%,放置平衡 5 d 左右,每个花盆播种 50 粒饱满均匀的黑麦草种子。根据回收粉干湿情况每隔 7 d~10 d 补水 1 次,保持沥青拌合站回收粉相对含水量在 70% 左右。

1.4 测定项目指标与方法

1.4.1 回收粉性状指标 回收粉容重采用环刀法测定;田间持水量采用威尔克斯法测定;pH 采用酸度计测定(水土比=2.5:1);有机质采用重铬酸钾外加热法测定;全氮采用凯氏定氮法测定;碱解氮采用碱解扩散法测定;有效磷采用 0.5 mol/L NaHCO_3 溶液浸提-钼锑抗比色法测定;速效钾采用 1 mol/L NH_4OAc 溶液浸提-火焰光度法测定;脲酶活性采用硝基酚比色法、蔗糖酶活性采用 3,5-二硝基水杨酸比色法、过氧化氢酶活性采用苯酚法、磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定^[23,24]。

1.4.2 黑麦草长势指标 在黑麦草旺长期,每盆随机拔取 10 株黑麦草洗净晾干,测定黑麦草植株鲜重。黑麦草根系长势指标的测定:每盆随机选取 5 株黑麦草,拔取后剪下其根部,再用去离子水冲洗掉根系表面回收粉,然后使用万深 LAS 根系扫描仪及 WinRHIZO 根系分析软件对根系进行扫描分析获得总根长、根尖数、根直径、总根表面积、总根体积。

1.5 统计分析

回收粉性状指标的测定数据和盆栽黑麦草生长指标监测数据均采用 Microsoft Excel 2019 进行数据整理和计算,运用 SAS 9.3(SAS Institute 2012)以及邓肯最小二乘法进行差异显著性统计分析($P \leq 0.05$)和主成分分析,采用 OriginPro 2019b (OriginLab Corporation) 作图。

2 结果与分析

2.1 磷矿粉和糠醛渣不同配比处理对黑麦草旺长期回收粉养分状况的影响

与 P0F0 处理相比,P1F1-4 和 P2F1-4 处理均显著降低了黑麦草旺长期回收粉酸碱度 pH,平均降幅分别为 7.13% 和 2.86%,而 P3F1-4 则差异不显著,其中 P1F1 降幅最大达 9.85%(表 1)。这说明,随着磷矿粉添加比例的增大回收粉酸碱度降幅减小;在磷矿粉添加比例 10% 时随着糠醛渣添加比例的增大回收粉酸碱度降幅逐渐减小,而在磷矿粉添加比例 20% 时则相反。

除了 P2F4 处理全氮含量与 CK 差异不显著外,其他所有添加磷矿粉和糠醛渣的配比处理回收粉有机质、全氮、碱解氮、有效磷和速效钾含量均显著高于 CK,平均升幅分别达 118.07%、45.38%、389.23%、199.43% 和 54.15%。在磷矿粉 10%、20% 和 30% 相同添加比例条件下,随糠醛渣添加比例的增大回收粉有机质、碱解氮、有效磷和速效钾均呈升高趋势,而全氮则呈先升高后降低趋势。在糠醛渣 1%、3% 和 5% 相同添加比例条件下,随磷矿粉添加比例的增大,回收粉有机质含量逐渐降低,有效磷基本上呈逐渐增大趋势,全氮、碱解氮和速效钾变化不明显。以上说明,通过适量施用改良物料磷矿粉和糠醛渣均能有效改善回收粉的养分状况。

2.2 磷矿粉和糠醛渣不同配比处理对黑麦草旺长期回收粉酶活性的影响

在黑麦草旺长期,磷矿粉和糠醛渣的不同配比处理回收粉脲酶、蔗糖酶、过氧化氢酶、磷酸酶活性分别高于相应未添加处理 P0 和 F0 处理,平均达 35.58% 和 35.49%、189.75% 和 180.81%、83.78% 和 79.88%、59.68% 和 56.51%;随磷矿粉添加比例的增加回收粉仅脲酶降低,其他酶活性无显著变化;随糠醛渣添加比例增加仅回收粉脲酶活性无明显差异,其他酶活性均逐渐降低(图 1 和图 2)。

黑麦草旺长期 P1F1-4 处理回收粉脲酶之间及其与 P2F1-3 处理差异不显著,但均显著高于其他配比处理,平均提高 28.31%;P1F1 处理回收粉蔗糖酶活性除了与 P2F1 处理差异不显著外,显著高于其他配比处理平均达 106.35%;P3F1 处

表 1 不同处理黑麦草旺长期回收粉养分状况

Table 1 Nutrient status of recycled powder under different treatments during the vigorous growth period of ryegrass

处理 Treatment	酸碱度 pH	有机质/(g/kg) Organic matter	全氮/(g/kg) Total N	碱解氮/(mg/kg) Available N	有效磷/(mg/kg) Available P	速效钾/(mg/kg) Available K
P0F0	8.49a	6.40h	0.99h	27.60i	10.70f	221.38g
P1F1	7.66g	11.73e	1.30ef	50.00h	22.62e	314.06f
P1F2	7.66g	14.41d	1.47bc	119.10f	32.38c	323.59de
P1F3	7.91f	14.86d	1.44cd	118.81f	31.33c	335.07c
P1F4	8.33bcde	23.21a	1.27fg	139.18de	31.18c	355.39b
P2F1	8.31bcde	8.68g	1.36de	113.66f	23.77de	316.74ef
P2F2	8.27cde	12.14e	1.32ef	127.92ef	27.29d	325.93d
P2F3	8.24de	15.05d	1.50bc	153.76c	25.03de	356.27b
P2F4	8.19e	20.10b	0.94h	200.33b	44.56b	382.97a
P3F1	8.34abcde	8.37g	1.20g	86.71g	25.11de	315.85ef
P3F2	8.43ab	9.77f	1.55b	128.12ef	31.23c	325.88d
P3F3	8.41abc	12.82e	1.73a	145.00cd	32.36c	359.21b
P3F4	8.39abcd	16.36c	1.68a	237.63a	57.49a	384.15a
P(PRP)	**	**	**	**	**	**
F(FR)	**	**	**	**	**	**
P*F	**	**	**	**	**	**

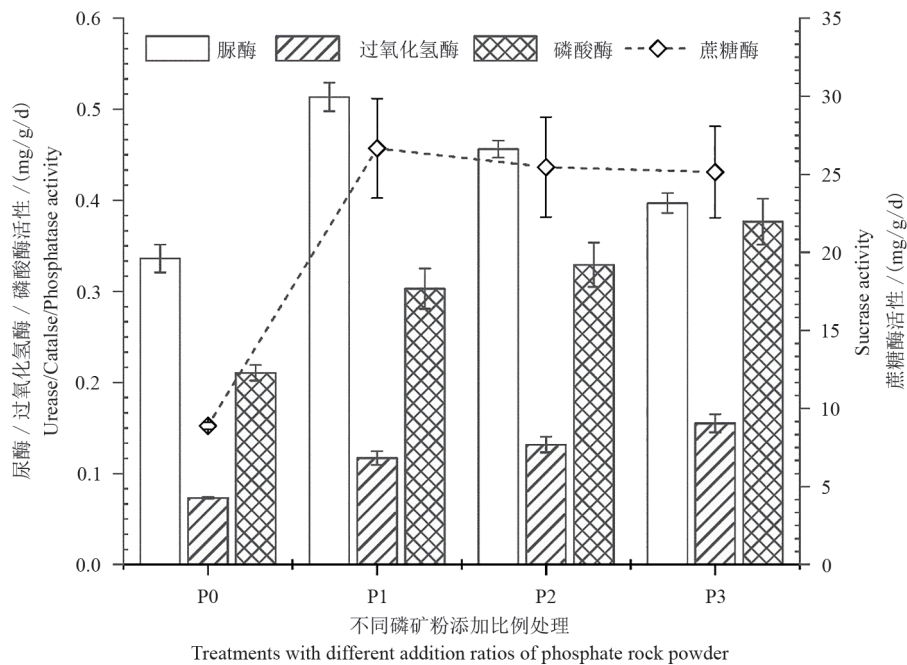


图 1 磷矿粉不同添加比例处理酶活性

Fig. 1 Enzyme activities under different addition ratios of phosphate rock powder

理回收粉过氧化氢酶和磷酸酶活性分别平均高于其他配比处理 61.56% 和 58.41%(图 3)。这说明磷矿粉和糠醛渣适量添加能提高黑麦草旺长期回收粉的脲酶、蔗糖酶、过氧化氢酶和磷酸酶活性,平均增幅 63.66%;而随糠醛渣添加比例的增大反而降低。

2.3 磷矿粉和糠醛渣不同配比处理对黑麦草旺长期长势指标的影响

不同磷矿粉添加比例处理黑麦草旺长期植株鲜重、根尖数、总根长、根直径、总根表面积、总根体积均显著高于未添加处理 P0,平均分别达

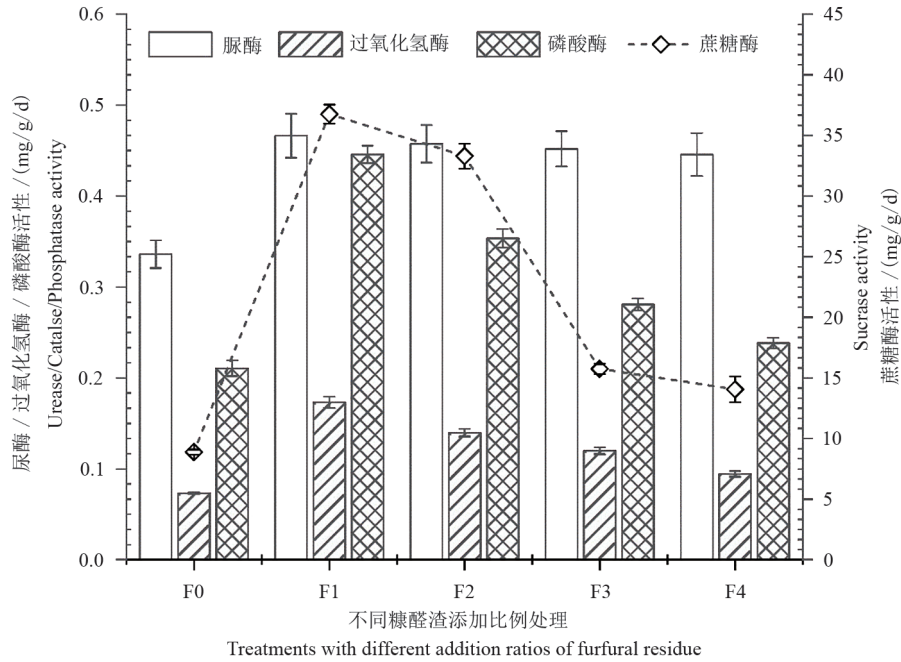


图 2 糠醛渣不同添加比例处理酶活性

Fig. 2 Enzyme activities under different addition ratios of furfural residue

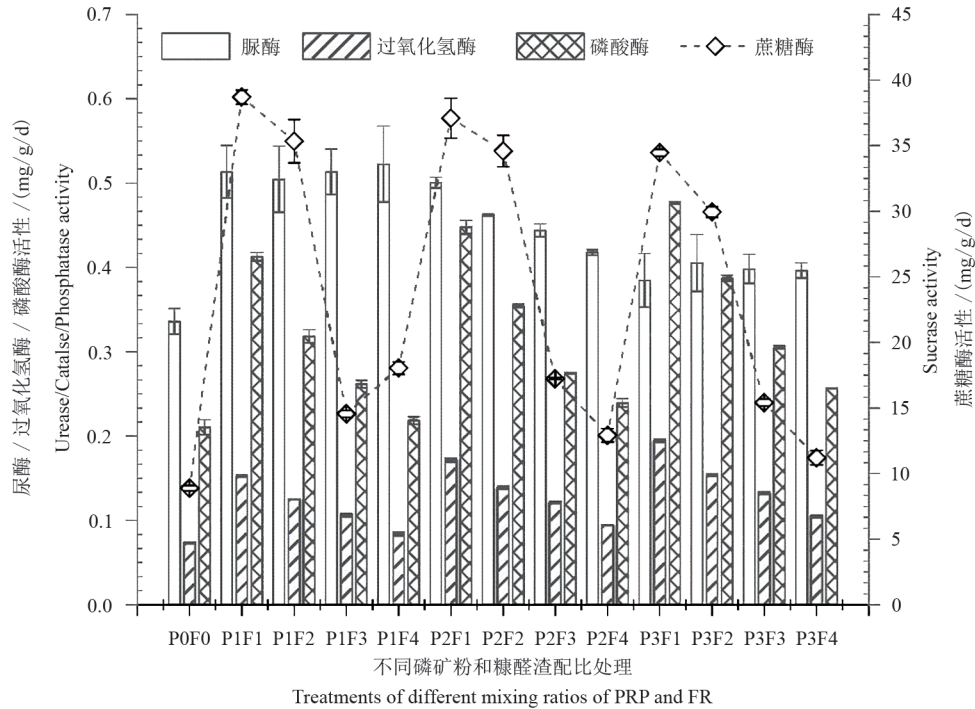


图 3 磷矿粉和糠醛渣不同配比处理酶活性

Fig. 3 Enzyme activities under different mixing ratios of phosphate rock powder (PRP) and furfural residue (FR)

47.04%、57.98%、57.97%、2.25%、68.13%、87.61%；且随磷矿粉添加比例增加，黑麦草根直径、总根表面积、总根体积均增大外，植株鲜重、根尖数、总根长均无显著变化(表2)。

与糠醛渣未添加处理 F0 相比，除了糠醛渣添加比例 10% 处理 F4 外，其他糠醛渣添加处理均显著提高了黑麦草旺长期长势指标，其中植株鲜重 74.77%、根尖数 81.63%、总根长 75.35%、根

表2 不同处理黑麦草旺长期生长状况
Table 2 Growth status of ryegrass during the vigorous growth period under different treatments

处理 Treatment	植株鲜重/(g/株) Shoot biomass	根尖数 Root tips	总根长/(cm/株) TRL	根直径/mm RD	总根表面积/ (cm ² /株) TRSA	总根体积/ (cm ³ /株) TRV
P0	8.36b	836.33b	102.94b	0.82c	26.58d	0.15c
P1	12.32a	1 288.75a	158.36a	0.84b	42.22c	0.27b
P2	12.40a	1 332.58a	160.45a	0.85a	44.72b	0.27b
P3	12.18a	1 342.33a	169.04a	0.85a	47.13a	0.28a
P(PRP)	**	**	**	**	**	**
F0	8.36d	836.33d	102.94d	0.82d	26.58d	0.15d
F1	22.18a	2 153.56a	240.59a	0.86a	87.59a	0.45a
F2	11.39b	1 364.11b	159.66b	0.85b	45.52b	0.29b
F3	10.27c	1 039.44c	141.26c	0.84c	31.15c	0.21c
F4	5.34e	727.78e	108.95d	0.82d	14.49e	0.15d
F(FR)	**	**	**	**	**	**
P0F0	8.36e	836.33e	102.94e	0.82de	26.58f	0.15i
P1F1	22.63a	2 100.67a	229.76b	0.86a	87.95a	0.44c
P1F2	11.32c	1 355.33b	164.47c	0.85b	44.52d	0.29d
P1F3	10.27d	1 080.00c	144.45cd	0.84c	30.60e	0.21f
P1F4	5.05g	619.00f	94.74e	0.80f	5.81h	0.14i
P2F1	21.46b	2 173.00a	238.27ab	0.87a	89.52a	0.45b
P2F2	11.55c	1 379.00b	159.94c	0.86a	47.62c	0.29d
P2F3	10.33d	1 079.33c	146.74cd	0.84c	31.96e	0.22f
P2F4	6.24f	699.00f	96.85e	0.82e	9.77g	0.13j
P3F1	22.46a	2 187.00a	253.72a	0.87a	85.32b	0.46a
P3F2	11.31c	1 358.00b	154.59cd	0.85b	44.44d	0.29e
P3F3	10.22d	959.00d	132.59d	0.83d	30.88e	0.21g
P3F4	4.74g	865.33de	135.27d	0.84c	27.90f	0.17h
P*F	**	**	**	**	**	**

注:TRL为Total root length, RD为Root diameter, TRSA为Total root surface area, TRV为Total root volume。

Note: TRL represents as Total root length, RD represents as Root diameter, TRSA represents as Total root surface area, TRV represents as Total root volume.

直径3.15%、总根表面积106.00%、总根体积116.37%;且随着糠醛渣添加比例的增大黑麦草所有的长势指标均降低。

在黑麦草旺长期,除了P1F4和P2F4的所有长势指标及P3F4植株鲜重、根尖数和总根表面积外,其他磷矿粉与糠醛渣配比处理的长势指标均显著高于未添加处理P0F0,平均升幅分别达植株鲜重74.77%、根尖数73.81%、总根长70.93%、根直径3.02%、总根表面积95.90%、总根体积106.57%。

P1F1处理黑麦草的长势指标除了植株鲜重与P3F1处理、根尖数与P2F1和P3F1处理、根直径与P2F1和P2F2及P3F1处理、总根表面积与

P2F1处理差异不显著外,均显著高于其他处理相应的长势指标,平均高出植株鲜重165.57%、根尖数120.40%、根直径3.39%、总根表面积317.25%、总根体积113.98%;P3F1处理黑麦草总根长与P2F1处理差异不显著,但均显著高于其他处理,平均高出90.11%。

2.4 磷矿粉和糠醛渣不同配比处理对回收粉改良效应的综合评价

主成分分析表明,第一主成分PC1、第二主成分PC2、第三主成分PC3可以解释所有处理指标的88.59%方差,为有效主成分(表3)。

由主成分特征向量,构建不同处理PC1、PC2和PC3与回收粉改良效应之间的线性关系式 Y_1 、

表 3 盆栽试验 16 个指标的主成分分析
Table 3 Principal component analysis of 16 indexes in the pot experiment

指标 Index	代码 Code	PC1	PC2	PC3
酸碱度	X_1	-0.28	-0.29	0.78
有机质	X_2	-0.69	0.52	-0.39
全氮	X_3	0.01	0.58	0.32
碱解氮	X_4	-0.56	0.72	0.32
有效磷	X_5	-0.48	0.75	0.24
速效钾	X_6	-0.37	0.88	0.09
脲酶	X_7	0.17	0.47	-0.78
蔗糖酶	X_8	0.87	0.22	-0.21
过氧化氢酶	X_9	0.90	0.29	0.23
磷酸酶	X_{10}	0.94	0.20	0.20
植株鲜重	X_{11}	0.97	-0.01	-0.06
根尖数	X_{12}	0.99	0.09	0.00
总根长	X_{13}	0.96	0.18	0.05
根直径	X_{14}	0.90	0.23	0.18
总根表面积	X_{15}	0.98	0.05	0.04
总根体积	X_{16}	0.99	0.13	0.00
初始特征值		9.30	3.06	1.82
方差百分比/%		58.13	19.10	11.36
累积/%		58.13	77.23	88.59
权重/%		65.62	21.56	12.82

$Y_2、Y_3$, 如下:

$$Y_1 = -0.093X_1 - 0.227X_2 + 0.002X_3 - 0.184X_4 - 0.156X_5 - 0.123X_6 + 0.056X_7 + 0.285X_8 + 0.296X_9 + 0.308X_{10} + 0.318X_{11} + 0.324X_{12} + 0.315X_{13} + 0.294X_{14} + 0.322X_{15} + 0.323X_{16};$$

$$Y_2 = -0.167X_1 + 0.295X_2 + 0.329X_3 + 0.415X_4 + 0.43X_5 + 0.503X_6 + 0.268X_7 + 0.127X_8 + 0.166X_9 + 0.117X_{10} - 0.008X_{11} + 0.051X_{12} + 0.0104X_{13} + 0.134X_{14} + 0.03X_{15} + 0.073X_{16};$$

$$Y_3 = 0.575X_1 - 0.289X_2 + 0.236X_3 + 0.237X_4 + 0.18X_5 + 0.069X_6 - 0.582X_7 - 0.155X_8 + 0.171X_9 + 0.149X_{10} - 0.042X_{11} + 0.001X_{12} + 0.037X_{13} + 0.137X_{14} + 0.031X_{15} - 0.003X_{16}。$$

根据主成分线性关系式计算的得分和以各个主成分方差贡献率占三个主成分总方差贡献率的比率为权重计算得出综合得分(表 4)。P3F1、P2F1、P1F1 综合得分均远大于其他处理, 因此均为改良效应较优处理, 因三者综合得分相近(最大差值为 0.54 分), 考虑改良物料的用量, 其中 P1F1 为回收粉改良效应最优和改良物料用量最省的配比处理。

表 4 不同处理对回收粉性状改良效应的综合评价结果

Table 4 Comprehensive evaluation results of improvement effects on properties of RP under different treatments

处理 Treatment	主成分得分 Principal component score			综合得分 Composite score	排名 Sequence
	PC1	PC2	PC3		
P3F1	4.79	-0.56	1.44	2.84	1
P2F1	4.49	0.30	0.25	2.70	2
P1F1	4.32	0.08	-2.00	2.30	3
P3F2	0.85	0.05	1.43	0.66	4
P2F2	1.01	0.07	0.06	0.61	5
P1F2	0.77	0.92	-1.71	0.43	6
P3F3	-1.36	0.44	1.45	-0.54	7
P2F3	-1.10	0.31	0.20	-0.56	8
P1F3	-1.10	0.34	-1.35	-0.73	9
P3F4	-3.11	2.35	1.91	-1.14	10
P0F0	-1.76	-5.32	0.32	-2.00	11
P2F4	-3.87	0.72	-0.33	-2.15	12
P1F4	-3.93	0.28	-1.69	-2.43	13

3 讨论

3.1 磷矿粉和糠醛渣不同配比处理黑麦草旺长期回收粉养分状况

黑麦草旺长期回收粉 pH 随着磷矿粉和糠

醛渣的添加比例增大而降低, P1F1 处理 pH 与 P0F0 处理相比降幅最大达 9.85%, 这是由于糠醛渣含有游离硫酸、磷矿粉可分解活化为磷酸且具有稀释作用, 因而能降低回收粉酸碱度 pH^[18,21]。

与P0F0处理相比,黑麦草旺长期回收粉有机质、碱解氮、有效磷和速效钾均随糠醛渣添加比例增大而升高,除了有效磷随磷矿粉添加比例的增大而升高外,其他指标基本是降低和无显著变化,这主要是因为磷矿粉和糠醛渣成分改善了回收粉的养分状况,这与磷矿粉对石灰性土壤和糠醛渣对菱镁矿粉尘污染土壤的改良效应研究结果一致^[19,20]。

3.2 磷矿粉和糠醛渣不同配比处理黑麦草旺长期回收粉酶活性

黑麦草旺长期回收粉脲酶、蔗糖酶、过氧化氢酶、磷酸酶活性分别显著高于相应未添加处理;P1F1与P2F1脲酶、蔗糖酶及P3F1过氧化氢酶和磷酸酶高于其他处理,平均增幅为63.66%,但随糠醛渣添加比例的增大而酶活性降低。这是由于适量添加磷矿粉和糠醛渣能够有效调控回收粉养分性状促进了黑麦草生长,从而提高了黑麦草旺长期回收粉酶活性;但糠醛渣添加比例过大则因其游离酸过多抑制黑麦草生长而降低酶活性,这与糠醛渣对滨海盐碱地土壤酶活性的影响状况相一致^[22]。

3.3 磷矿粉和糠醛渣不同配比处理黑麦草旺长期生长状况

磷矿粉不同添加比例处理相比未添加磷矿粉处理均显著提高了黑麦草长势指标,其中仅黑麦草根直径、总根表面积、总根体积随磷矿粉添加比例增加而升高。这或许是由于磷矿粉添加适量促进黑麦草的生长,而添加过多则抑制了黑麦草对养分的吸收,迫使其通过增大根系的吸收面积和体积提高养分吸收能力,这与颗粒磷矿粉或磷灰石对黑麦草生长影响的研究结果一致^[25-27]。除了糠醛渣添加比例10%处理外,其他糠醛渣添加比例处理均比未添加处理显著提高了黑麦草旺长期长势指标,而随着糠醛渣添加比例的增大,黑麦草长势指标均降低,这是因糠醛渣本身性质所致^[21,28]。

除P1F4、P2F4、P3F4外,其他磷矿粉和糠醛渣配比处理均显著提高了黑麦草长势指标。这是因为糠醛渣添加比例增大则游离酸过多^[21],其添加比例1%为最优;而磷矿粉与糠醛渣配合既能调控回收粉酸碱度又能提供更多的磷素养分^[26,27],促进了黑麦草的生长。

3.4 磷矿粉和糠醛渣不同配比处理对回收粉的综合改良效应

主成分综合评价表明,P3F1、P2F1、P1F1处理改良效应均优于其他处理,P1F1为回收粉成本和改良效应最优处理。这是由于磷矿粉10%、15%和20%与糠醛渣1%的配比不仅能改善回收粉养分状况和酶活性,而且有效促进了黑麦草的生长,其中磷矿粉10%与糠醛渣1%配比是改良回收粉为园林绿化用土最优的物料配比。

4 结论

与未添加处理相比,磷矿粉和糠醛渣不同配比均显著降低了回收粉pH,最大降幅达9.85%;有效改善了回收粉养分状况、脲酶、蔗糖酶、过氧化氢酶和磷酸酶活性;显著提升了黑麦草旺长期植株鲜重、根尖数、总根长、根直径、总根表面积、总根体积。

与其他配比相比,磷矿粉10%、15%和20%与糠醛渣1%三个配比在改善回收粉养分状况、调节回收粉脲酶活性和促进黑麦草生长方面具有显著的改良效应,其中磷矿粉10%与糠醛渣1%是本试验条件下改良沥青拌合站回收粉为园林绿化用土最优的物料配比。

参考文献

- [1] 邢峰,苏洪建,蒋应军,等.沥青拌合楼回收粉对水泥稳定碎石耐久性的影响[J].四川水泥,2023(08):195-197.
- [2] 马骏,高莉春.沥青拌和站粉尘回收装置的设计与应用[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2009,28(06):1049-1051.
- [3] Reñones A, Vega C, Rosa M. Vibration-based smart sensor for high-flow dust measurement[J]. Sensors, 2023,23(11): 5019.
- [4] Usanga IN, Imoh U, Imitini E, et al. Evaluation of mechanical properties of asphalt-concrete using baghouse dust as filler material[J]. International Journal of Innovative Research in Science Engineering and Technology,2021,6(08):609-614.
- [5] 彭锦红,徐世红,周翔,等.一种沥青混凝土拌合站回收废粉的资源化处理方法.中国,CN201710145594[P].2018-09-25.
- [6] 刘克.沥青拌合楼粉尘排放量估算[J].公路交通技术,2017,33(02):130-134.
- [7] 张岩,樊亮,侯佳林,等.高强度防水性盐渍粉土固

- 化剂及固化方法. 中国, CN202010810257[P]. 2020-11-17.
- [8] 郑德荣, 庞秋阳, 邓景辉, 等. 沥青拌合站回收粉再利用技术研究[J]. 施工技术, 2017, 46(S2): 996-999.
- [9] 裴旭. 沥青拌合站回收矿粉性能研究[J]. 市政技术, 2020, 38(05): 290-292.
- [10] 秦祎, 闫卫喜. 回收粉对沥青路面用矿粉性能指标的影响研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2017, 13(11): 160-162.
- [11] Grabowski W, Wilanowicz J, Sowik M, et al. The assessment of the stiffening properties of mineral fillers obtained from a dust extractor installed in an asphalt plant[J]. Foundations of Civil and Environmental Engineering, 2007(10): 25-38.
- [12] Wilanowicz J, Grabowski W, Andrzejczak M, et al. Assessment of the suitability of baghouse dusts from a dust extractor as fillers for Hot-mix asphalt[J]. Procedia Engineering, 2013, 57(01): 1269-1277.
- [13] 吴琦璇. 沥青拌合站尾尘水泥流动材料基层水泥混凝土农村公路路面结构设计[D]. 西安: 长安大学, 2022.
- [14] 徐勤敏, 朱亚光, 徐培蓁. 沥青拌和站回收粉制备泡沫混凝土的性能研究[J]. 青岛理工大学学报, 2024, 45(01): 59-64.
- [15] 张彦锋. 回收粉对沥青混合料性能的影响研究[J]. 北方交通, 2020(12): 60-64.
- [16] Jitsanigam P, Biswas WK, Compton M. Sustainable utilization of lime kiln dust as active filler in hot mix asphalt with moisture damage resistance[J]. Sustainable Materials and Technologies, 2018, 17: e00071.
- [17] 宋淑琴, 刘芝敏, 齐庆辉, 等. 一种含沥青拌合站回收粉尘的混凝土材料及其制备方法与应用. 中国, CN202310518602[P]. 2023-08-22.
- [18] 穆淑红, 孙运杰, 董海凤, 等. 磷矿粉的有效利用途径综述[J]. 生物灾害科学, 2014, 37(01): 79-82.
- [19] 李亚娟, 姜智英, 胡蕊梅, 等. 磷矿粉在石灰性土壤中对紫花苜蓿的施用效果[J]. 草业科学, 2024, 41(01): 77-88.
- [20] 杨丹. 糠醛渣和磷石膏对菱镁矿粉尘污染土壤的改良效果研究[J]. 环境污染与防治, 2017, 39(03): 295-300.
- [21] 尹玉磊, 李爱民, 毛燎原. 糠醛渣综合利用技术研究进展[J]. 现代化工, 2011, 31(11): 22-24+26.
- [22] 崔向超, 胡君利, 林先贵, 等. 造纸干粉和糠醛渣对滨海盐碱地玉米生长和土壤微生物性状的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2014, 30(03): 331-335.
- [23] 全国农业技术推广服务中心(第二版). 土壤分析技术规范[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006.
- [24] 章家恩. 生态学常用实验研究方法与技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [25] 臧莉. 生物炭基磷肥对排土场黑麦草生长及土壤磷流失影响研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
- [26] 胡蕊梅, 李亚娟, 姜智英, 等. 石灰性土壤磷矿粉直接施用对紫花苜蓿生长的影响[J]. 草原与草坪, 2024, 44(05): 220-227.
- [27] 杜志敏, 向凌云, 杜凯敏, 等. 磷灰石、石灰对Cd胁迫下黑麦草根形态及Cd吸收影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(01): 92-101.
- [28] 李梦雨, 杨鹏, 常春, 等. 糠醛渣高值化利用的研究进展[J]. 林产化学与工业, 2021, 41(06): 117-126.