



文章栏目：固体废物处理与资源化

DOI 10.12030/j.cjee.202101124

中图分类号 X701

文献标识码 A

张崇森, 葛玲芝, 左浩. 以绿化废弃物为原料的复合型抑尘剂的制备及其综合性能[J]. 环境工程学报, 2021, 15(5): 1688-1696.

ZHANG Chongmiao, GE Lingzhi, ZUO Hao. Preparation and comprehensive performance of a composite dust suppressant using greening wastes as raw material[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(5): 1688-1696.

## 以绿化废弃物为原料的复合型抑尘剂的制备及其综合性能

张崇森<sup>1,2,3,\*</sup>, 葛玲芝<sup>1,2,3</sup>, 左浩<sup>4</sup>

1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055
2. 西安建筑科技大学陕西省环境工程重点实验室, 西安 710055
3. 西安建筑科技大学西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 西安 710055
4. 陕西常青实业有限公司, 西安 710061

第一作者: 张崇森(1978—), 男, 博士, 教授。研究方向: 功能材料的开发与应用。E-mail: [cmzhang@xauat.edu.cn](mailto:cmzhang@xauat.edu.cn)

\*通信作者

**摘要** 针对建筑施工场地扬尘和绿化废弃物资源化率低的问题, 利用绿化废弃物悬铃木枝条为原料制备羧甲基纤维素钠(CMC), 将其与聚乙烯醇(PVA)和辛癸基葡糖苷(APG0810)进行复配, 制备出了一种复合型抑尘剂。以黏结性、润湿性、抗风蚀性和生物毒性为指标, 探究了各组分用量对各种性能的影响, 并利用TOPSIS法对复合型抑尘剂的综合性能进行了分析。结果表明, 该复合型抑尘剂的黏结性和抗风蚀性主要受CMC和PVA含量的影响, APG0810是影响抑尘剂润湿性和生物毒性的主要组分。当CMC、PVA、APG0810的质量分数分别为0.20%、2.00%、0.10%时, 制得的复合型抑尘剂综合性能最佳。以最佳配比制得的抑尘剂在25℃下的黏度为41.97 mPa·s; 该抑尘剂润湿土壤的性能较好, 粉尘在抑尘剂中沉降时间为68.62 s; 而且其抗风蚀性较好, 在风速5.6 m·s<sup>-1</sup>吹蚀5 min的条件下, 质量损失率为0.57%; 该抑尘剂生物毒性较低, 小麦种子发芽率可达到70%。该研究结果可为绿化废弃物的资源化利用和复合型抑尘剂的制备提供参考。

**关键词** 复合型抑尘剂; 大气扬尘; 绿化废弃物; TOPSIS法; 综合性能

大气扬尘造成的污染, 严重影响着人群健康, 会导致相关心血管和呼吸道疾病的发生<sup>[1-2]</sup>。扬尘排放已成为空气中PM<sub>2.5</sub>的重要来源<sup>[3-5]</sup>。其中, 建筑施工所产生的扬尘是重要原因之一<sup>[6-8]</sup>。因此, 施工扬尘问题亟待解决。

目前, 施工扬尘的主要解决措施有洒水、绿网覆盖及喷洒抑尘剂。喷洒抑尘剂具有抑尘效率高的优点, 近年来受到了广泛关注。抑尘剂是一种多组份单相混合物, 常根据其主要组分类型和作用特点将抑尘剂分为润湿型、黏结型、复合型等。润湿型抑尘剂中通常含有大量的表面活性剂类物质, 以发挥对粉尘的润湿效果; 例如, 利用C9脂肪醇聚氧乙烯醚和十二烷基苯磺酸钠可制备出抑制煤尘的润湿型抑尘剂<sup>[9]</sup>。黏结型抑尘剂则常以高分子有机物等具有良好黏结性的物质为主;

收稿日期: 2021-01-20; 录用日期: 2021-03-29

基金项目: 陕西省重点研发计划项目(2020ZDLNY06-07)

例如,以木质素磺酸盐作为主要原料,将甲基硅酸钠、四硼酸钠等为辅助剂可制成黏结型抑尘剂<sup>[10]</sup>。

随着全社会环境和生态意识的提高,抑尘剂的制备越来越重视其综合性能,绿色、安全的复合型、环保型抑尘剂是未来的发展方向。瓜尔胶<sup>[11-12]</sup>、海藻酸钠<sup>[13]</sup>等天然高分子都被作为原料来制备抑尘剂。更多研究者践行“以废治废”的理念,利用甘蔗渣<sup>[14]</sup>、秸秆<sup>[15]</sup>、塑料瓶<sup>[16]</sup>、废纸<sup>[17]</sup>等固体废弃物制备抑尘剂。城市绿化废弃物的产生量大,是现代城市发展中普遍面临的问题<sup>[18]</sup>。对其传统处理方式填埋、焚烧和堆肥<sup>[19]</sup>,一直以来较少有规范、有效的处理方法。本研究中利用典型的绿化废弃物——悬铃木枝条作为原料,探索制备复合型抑尘剂的途径;并阐明抑尘剂各组分对其各方面性能的影响。在以上研究的基础上,还利用TOPSIS法确定复合型抑尘剂各组分的最佳配比,以期为复合型抑尘剂的制备提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验原料

采集城市绿化树种二球悬铃木 (*Platanus acerifolia*) 修剪下来的枝条为原料。实验用土样为自采黄土,采自西安建筑科技大学校园。

氯化胆碱 ( $C_5H_{14}ClNO$ )、辛癸基葡糖苷 (APG0810)、聚乙烯醇 ( $[C_2H_4O]_n$ , PVA)、乙二醇 ( $(CH_2OH)_2$ )、无水乙醇 ( $CH_3CH_2OH$ )、硝酸 ( $HNO_3$ )、氢氧化钠 (NaOH)、氯乙酸 ( $C_2H_3ClO_2$ )、盐酸 (HCl)、硫酸铜 ( $CuSO_4$ ) 均为分析纯。

### 1.2 实验方法

1) 悬铃木枝条的预处理。将悬铃木枝条置于鼓风干燥箱中  $100\text{ }^\circ\text{C}$  下干燥,使用分级式连续投料粉碎机 (LF-40,河北本辰科技有限公司) 将干燥的枝条粉碎后,过 200 目筛后获得木粉。称取一定质量的木粉,加入到三口烧瓶中,按 20:1 的质量液固比加入低共熔溶剂 (deep-eutectic solvents, DES)(氯化胆碱和乙二醇按 1:3 的质量比在  $60\text{ }^\circ\text{C}$  下混合均匀,搅拌 30 min 制得)。之后,使用加热套 (SZCL,天津工兴实验室仪器有限公司) 加热烧瓶内的液体至  $160\text{ }^\circ\text{C}$ ,搅拌维持 6 h。最后,加入 20 mL 无水乙醇终止反应。将三口烧瓶置于冷水中冷却后,离心分离,所得固体残渣用无水乙醇洗涤 2~3 次,直至滤液无色。

2) 纤维素提取和羧甲基纤维素钠的制备。采用硝酸-乙醇法<sup>[20]</sup>从上述固体残渣中提取纤维素,即配制体积比为 4:1 的硝酸-乙醇混合溶液作为提取溶剂;固体残渣和硝酸-乙醇溶液加热搅拌反应,多次提取直至纤维变白,然后洗涤烘干得到纤维素样品。

在 500 mL 烧杯中,加入 2.5 g 从悬铃木枝条中提取出来的纤维素和 100 mL 混有 4 g NaOH 的 70% 乙醇水溶液,在  $40\text{ }^\circ\text{C}$  下恒温搅拌反应 60 min,制得碱纤维素;向碱纤维素中加入含有 6 g 氯乙酸的 70% 乙醇水溶液 25 mL,升温到  $70\text{ }^\circ\text{C}$  反应 30 min;再加入含有 2 g NaOH 的 70% 乙醇水溶液 25 mL 作为碱性催化剂,在  $80\text{ }^\circ\text{C}$  下醚化反应 90 min。待反应结束冷却后,用稀盐酸调节 pH 至中性,进行抽滤,然后将滤饼依次用 75% 和 95% 乙醇分别洗涤 2 次,  $60\text{ }^\circ\text{C}$  下干燥,即制得羧甲基纤维素钠 (carboxymethyl cellulose sodium, CMC)<sup>[21]</sup>。

将制得的羧甲基纤维素钠进行初步鉴别<sup>[22]</sup>:取 1 g 制得的 CMC,加温水 50 mL,搅拌混匀,制成悬浊液,冷却后备用;取悬浊液 25 mL,加  $20\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  的  $CuSO_4$  溶液 5 mL,观察是否生成淡蓝色绒毛状沉淀。

3) 复合型抑尘剂的制备和单因素实验的设计。将制得的 CMC 粉末溶于纯水,充分搅拌混匀,得到 CMC 溶液。将絮状 PVA 和纯水混合,加热溶解得到 PVA 溶液。取 APG0810 和纯水进行搅拌,混合均匀得到 APG0810 溶液。按照一定的质量分数将三者进行配比混合,在水浴  $25\text{ }^\circ\text{C}$  下搅拌混匀,即制得复合型抑尘剂。

选取黏结性、润湿性、抗风蚀性和生物毒性作为对复合型抑尘剂进行考察的评价指标。分别测定不同浓度 CMC、PVA 和 APG0810 溶液的黏度；在此基础上，选定合适的组分质量分数范围，通过单因素实验分别探究各组分用量对复合型抑尘剂的黏结性、润湿性、抗风蚀性、生物毒性的影响。

### 1.3 分析方法

1) 表征分析。利用傅里叶漫反射红外光谱仪 (Nicolet iS5, 美国 Thermo Scientific 公司) 对提取产物和反应产物进行表征和确认。用扫描电子显微镜 (JSM-6510LV, 日本电子公司) 观察复合型抑尘剂喷洒前后的土样表面的微观形貌。

2) 复合型抑尘剂性能测定。复合型抑尘剂的黏结性决定了对尘土黏结、凝并的效果，以黏度为指标反映复合型抑尘剂的黏结性。用超声波黏度计 (LVDV-2-PRO, 美国 Brookfield 公司) 测量复合型抑尘剂黏度。

润湿性可反映复合型抑尘剂渗入土层内部的能力，采用沉降时间和接触角可反映复合型抑尘剂的润湿性。在比色管中加入 50 mL 复合型抑尘剂，然后取 1 g 干燥的土粉碎至 200 目，将土沿漏斗倒入比色管中，准确记录土从接触抑尘剂至沉底所用的时间，即为沉降时间<sup>[12]</sup>。采用接触角测定仪 (SL200A, 美国科诺公司) 测量抑尘剂液滴的接触角。

抗风蚀性可直接反映复合型抑尘剂的抑尘效果。以粉尘被吹蚀后的质量损失率为指标来反映复合型抑尘剂的抗风蚀性。称取 25 g 过 200 目烘干的土样于直径 9 cm 的培养皿中，堆成小土堆，向上面均匀喷洒 10 mL 复合型抑尘剂 (满足喷洒量  $\geq 1.5 \text{ L}\cdot\text{m}^{-2}$  的要求<sup>[23]</sup>)。自然晾干 8 h，土样表面形成固化层，进行称重。使用吹风机模拟自然风，进行风蚀实验。用风速仪 (MS6252B, 杭州 HYELEC 公司) 测定土样表面的风速为  $5.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (相当于四级风，可吹起沙粒和纸张)，风蚀 5 min 后再次称重，按式 (1) 计算质量损失率<sup>[14, 24]</sup>。

$$\text{质量损失率} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中： $m_1$  为吹蚀前土样和培养皿的总质量，g； $m_2$  为吹蚀后土样和培养皿的总质量，g。

生物毒性可反映复合型抑尘剂对土壤中生物的毒性，本实验中以种子发芽率为指标来反映复合型抑尘剂的生物毒性。使用饱满、无霉的小麦种子，用纯水冲洗后过夜浸泡备用。在培养皿内放入 1 张滤纸作发芽床。每个发芽床上放置 10 粒种子，加入 10 mL 抑尘剂。将培养皿放入 28 °C 恒温培养箱中进行培养，48 h 后观察结果，按式 (2) 计算种子发芽率。

$$\text{种子发芽率} = \frac{X_1}{X_2} \times 100\% \quad (2)$$

式中： $X_1$  为发芽的种子数量，个； $X_2$  为实验种子数量，个。

3) TOPSIS 法分析。TOPSIS 法是一种逼近理想解的排序法，常用于多目标决策分析。若方案最靠近最优解，同时又最远离最劣解，则为最好。利用该方法对复合型抑尘剂的黏结性、润湿性、抗风蚀性和生物毒性进行综合性能分析，以确定各组分的最优配比。

黏度和种子发芽率属于极大型指标，沉降时间和质量损失率属于极小型指标。将极小型指标数据按式 (3) 进行正向化；为了消除数据量纲的影响，按式 (4) 分别进行标准化。

$$\bar{x}_i = \frac{1}{x_i} \quad (3)$$

$$Z_i = \frac{x_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2}} \quad (4)$$

经过正向化和标准化之后的黏度、沉降时间、质量损失率和种子发芽率指标分别记为  $Z_1$ 、 $Z_2$ 、 $Z_3$  和  $Z_4$ ，对应权重分别为 0.2、0.2、0.4 和 0.2。

最优配比分析：指标到最优解的距离记为  $D^+$ ，按式 (5) 计算；指标到最劣解的距离记为  $D^-$ ，按式 (6) 计算；综合性能指标为  $C$ ，按式 (7) 计算。 $C$  越接近于 1，就说明该方案更优。

$$D^+ = \sqrt{0.2(Z_{1i} - Z_{1\max})^2 + 0.2(Z_{2i} - Z_{2\max})^2 + 0.4(Z_{3i} - Z_{3\max})^2 + 0.2(Z_{4i} - Z_{4\max})^2} \quad (5)$$

$$D^- = \sqrt{0.2(Z_{1i} - Z_{1\min})^2 + 0.2(Z_{2i} - Z_{2\min})^2 + 0.4(Z_{3i} - Z_{3\min})^2 + 0.2(Z_{4i} - Z_{4\min})^2} \quad (6)$$

$$C = \frac{D^-}{D^+ + D^-} \quad (7)$$

## 2 结果与讨论

### 2.1 利用悬铃木枝条制备的羧甲基纤维素钠的性质

悬铃木枝条经预处理后得到黑褐色的固体残渣，从中提取产物则呈米白色；进一步碱化和醚化反应的产物为白色粉末，如图 1(a) 所示。白色粉末可溶于水形成淡黄色溶液，加入  $\text{CuSO}_4$  后有蓝色絮状物生成，见图 1(b)。这初步证明，利用悬铃木枝条制得的白色粉末为 CMC。

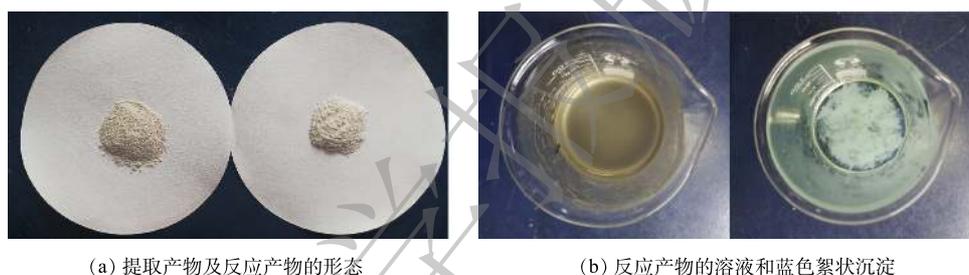


图 1 悬铃木枝条的提取产物和反应产物形态

Fig. 1 Morphology of extracted products and reaction products from the Platanus branches

自悬铃木提取的米白色产物红外吸收光谱见图 2(a)。其中， $3\ 400\sim 3\ 600\ \text{cm}^{-1}$  ( $3\ 425\ \text{cm}^{-1}$ ) 为羟基 ( $-\text{OH}$ ) 的伸缩振动吸收峰； $2\ 911\ \text{cm}^{-1}$  为亚甲基  $-\text{CH}_2-$  伸缩振动吸收峰； $1\ 000\sim 1\ 200\ \text{cm}^{-1}$  ( $1\ 066\ \text{cm}^{-1}$ ) 为纤维素分子链中  $-\text{C}-\text{O}-\text{C}-$  伸缩振动吸收峰； $899\ \text{cm}^{-1}$  处为纤维素分子中葡萄糖单元之间  $\beta$ -糖苷键的吸收峰。

白色反应产物的红外吸收光谱见图 2(b)。可以看出，在  $1\ 600\ \text{cm}^{-1}$  左右出现的强烈吸收峰为

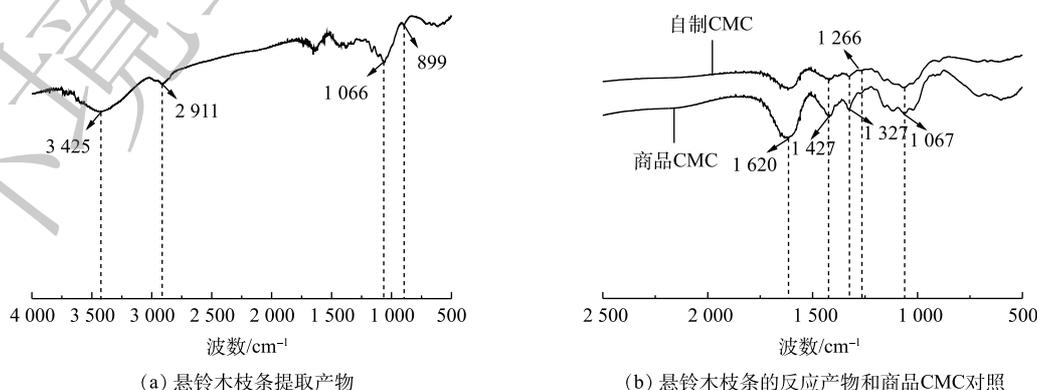


图 2 悬铃木枝条提取产物和反应产物的红外吸收光谱

Fig. 2 FTIR of extracted products and reaction products from the Platanus branches

CMC的特征峰； $1\ 427\ \text{cm}^{-1}$ 、 $1\ 327\ \text{cm}^{-1}$ 分别为 $-\text{CH}_2-$ 、 $-\text{OH}$ 的弯曲振动吸收峰； $1\ 266\ \text{cm}^{-1}$ 处小峰为羧酸基团中 $\text{C}-\text{O}$ 伸缩振动吸收峰； $1\ 020\sim 1\ 160\ \text{cm}^{-1}$  ( $1\ 067\ \text{cm}^{-1}$ )处为纤维素结构中 $-\text{C}-\text{O}-\text{C}-$ 的对称与不对称振动吸收。

以上结果证明，从悬铃木枝条中提取出的米白色物质为纤维素，该纤维素制品经过碱化和醚化反应后可制得CMC。

## 2.2 各组分用量对复合型抑尘剂性能的影响

我国现有的技术标准<sup>[23]</sup>对抑尘剂的黏度要求为：25℃温度条件下，抑尘剂黏度需大于 $5\ \text{mPa}\cdot\text{s}$ 。通过前期预实验发现，当CMC的质量分数为0.20%时，其溶液黏度为 $7.32\ \text{mPa}\cdot\text{s}$ ；如果进一步增大CMC的质量分数，溶液中会产生较多不溶物。PVA溶液质量分数在0.10%~2.00%时，黏度由 $1.28\ \text{mPa}\cdot\text{s}$ 增大到 $5.52\ \text{mPa}\cdot\text{s}$ 。APG0810含量较高时，溶液会产生较多泡沫，不易喷洒。因此，本研究选择质量分数分别为0.01%~0.20%、0.10%~2.00%、0.01%~0.30%的CMC、PVA、APG0810来考察各组分对复配抑尘剂各性能指标的影响。在探究某一组分对抑尘剂某一性能的影响时，需要控制其他2种组分的含量，控制的CMC、PVA、APG0810质量分数分别为0.10%、0.50%、0.10%。

1) 各组分含量对复合型抑尘剂黏结性的影响。由图3可以看出，CMC质量分数越大，复合型抑尘剂的黏度亦越大。在CMC的质量分数大于0.10%时，复合型抑尘剂的黏度均在 $5\ \text{mPa}\cdot\text{s}$ 以上，可满足现行技术标准的要求。复合型抑尘剂的黏度亦随着PVA质量分数的增大而增加，当PVA质量分数在1.00%以上时，复合型抑尘剂的黏度增幅变大。而APG0810的质量分数对复合型抑尘剂黏度无明显影响。由以上结果可知，CMC的用量是决定复合型抑尘剂黏度的最主要因素。这是因为，CMC和PVA是良好的黏结剂，他们混合之后会比单组分的黏度更大，而APG0810是表面活性剂，无黏结性。

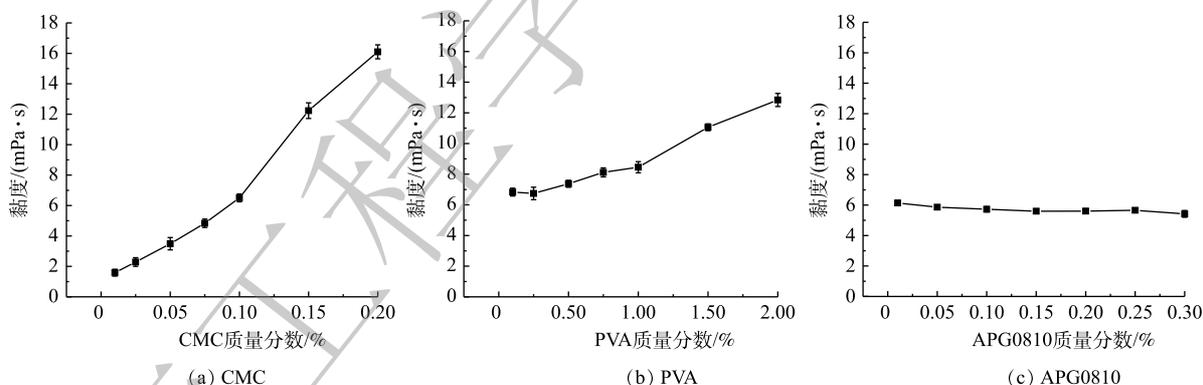


图3 不同CMC、PVA、APG0810含量条件下复合型抑尘剂的黏度

Fig. 3 Viscosity of the composite dust suppressant with different CMC, PVA, APG0810 contents

2) 各组分含量对复合型抑尘剂润湿性的影响。图4显示了复合型抑尘剂的沉降时间和接触角随各组分的质量分数的变化情况。沉降时间和接触角均会随着CMC质量分数的增大而增加，这说明复合型抑尘剂的润湿性在逐渐降低。这很大程度上与复合型抑尘剂的黏度有关，CMC用量多，复合型抑尘剂黏度增加，但流动性和渗透性也随之变差，不易润湿尘土。在PVA质量分数小于1.50%时，沉降时间基本不变；但当PVA质量分数大于1.50%时，沉降时间则出现大幅增长。这与复合型抑尘剂黏度随PVA含量变化的规律十分相似。这也进一步说明，过大的黏度会导致抑尘剂润湿性下降。APG0810是表面活性剂，能使溶液表面张力显著下降，其质量分数越大，复合型抑尘剂的接触角和沉降时间越小，润湿性越好。

3) 各组分含量对复合型抑尘剂抗风蚀性的影响。复合型抑尘剂的质量损失率大致随各组分质

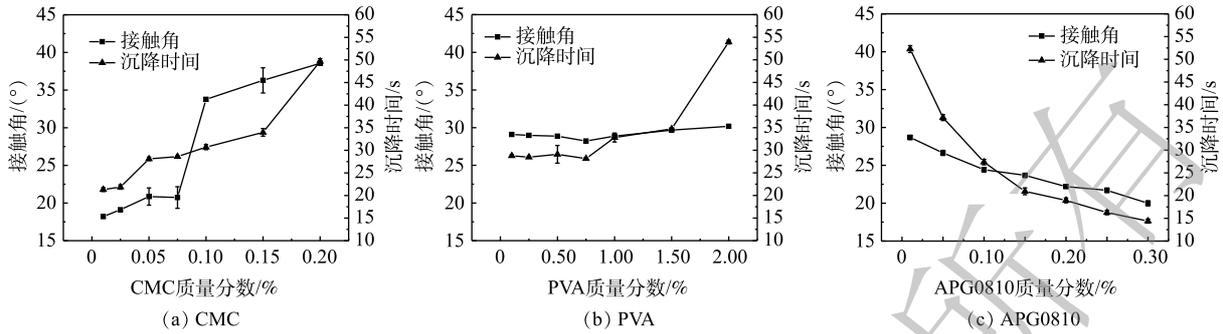


图 4 不同 CMC、PVA、APG0810 含量条件下复合型抑尘剂的沉降时间和接触角

Fig. 4 Settlement time and contact angle of the composite dust suppressant with different CMC、PVA、APG0810 contents

量分数的增加而减小，但变化程度有差别 (图 5)。其中，PVA 含量对质量损失率影响最大；当 PVA 含量从 0.10% 增加到 2.00% 时，复合型抑尘剂的质量损失率从 2.21% 降至 1.06%。其中，仅在 PVA 质量分数为 0.10%~0.50% 时，质量损失率的降幅就高达 32%。这说明，PVA 对该抑尘剂的抗风蚀性贡献很大。这是因为，PVA 具有良好的成膜性和吸湿保水性，使尘土潮湿结壳，不易扬起。CMC 能够使粉尘颗粒黏结起来，而 APG0810 会使抑尘剂更易渗透入粉尘下层。这三者组分各自发挥相应的作用，可协同提高复合型抑尘剂的抗风蚀性。

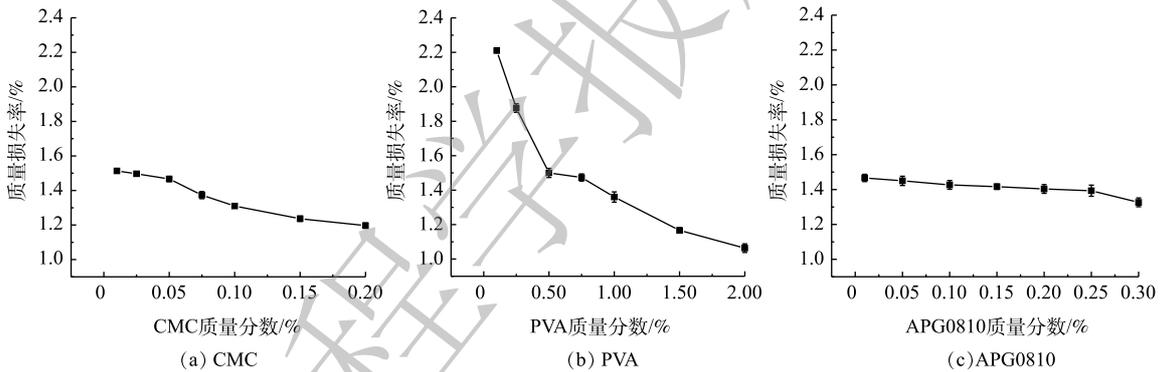


图 5 不同 CMC、PVA、APG0810 含量条件下复合型抑尘剂的质量损失率

Fig. 5 Mass loss rate of the composite dust suppressant with different CMC, PVA, APG0810 contents

4) 各组分含量对复合型抑尘剂生物毒性的影响。由图 6 可以看出，CMC 和 PVA 对小麦种子发芽率的影响不明显，而 APG0810 则表现出明显的抑制作用。当 APG0810 质量分数在 0.10% 以下

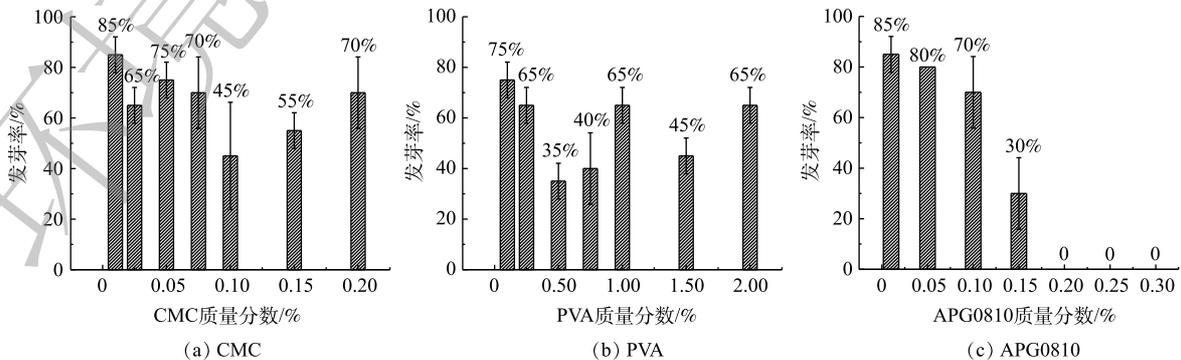


图 6 不同 CMC、PVA、APG0810 含量条件下复合型抑尘剂的小麦发芽率

Fig. 6 Wheat germination rate of the composite dust suppressant with different CMC, PVA, APG0810 contents

时, 种子发芽率基本维持在 70%~85%; 而当 APG0810 质量分数增至 0.15% 时, 种子发芽率就骤降至 30%; 待 APG0810 含量进一步升高后, 种子发芽率均为 0。这说明, 表面活性剂类物质是造成抑尘剂生物毒性的主要成分。

5) 土样表面喷洒抑尘剂前后的微观形貌。喷洒抑尘剂前后土样表面的微观形貌见图 7, 通过观察可发现, 原本的土样表面有很多分散、细小的颗粒, 粒径大都在 20  $\mu\text{m}$  以下。而当在土样表层喷洒复合型抑尘剂之后, 原本的细小颗粒黏聚成团, 其粒径至少增大了数 10 倍。由此可知, 喷洒抑尘剂后, 尘土颗粒黏结、凝并的效果较好。

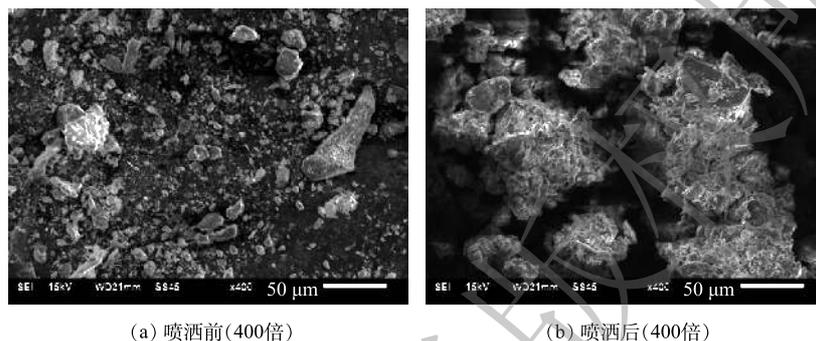


图 7 复合型抑尘剂喷洒前后土样表面的微观形貌

Fig. 7 Surface micromorphology of soil samples before and after the composite dust suppressant spraying

### 2.3 复合型抑尘剂各组分的优化配比

利用 TOPSIS 法计算出 CMC、PVA 和 APG0810 不同用量时的复合型抑尘剂综合性能指标  $C$  (表 1)。如表 1 所示, 随着各组分在复合型抑尘剂中的质量分数的增大, 综合性能指标  $C$  并非呈现单纯的递增或递减趋势。这表明, 黏结性、润湿性、抗风蚀性和生物毒性之间存在交互作用。当  $C$  最接近 1 时, 该组分质量分数下获得的复合型抑尘剂综合性能最好。由表 1 还可以看出, 在这 3 种主要组分的用量范围内, 对应的最优综合性能指标  $C$  值分别为 0.698 4、0.704 1 和 0.646 3。因此, 具有最佳综合性能的复合型抑尘剂中 CMC、PVA 和 APG0810 的质量分数分别为 0.20%、2.00% 和 0.10%。按此组分配比制得的抑尘剂在 25  $^{\circ}\text{C}$  下, 黏度为 41.97  $\text{mPa}\cdot\text{s}$ 、沉降时间为 68.62 s、质量损失率为 0.57%、小麦种子发芽率为 70%。

## 3 结论

1) 悬铃木枝条经氯化胆碱-乙二醇低共熔溶剂法预处理后, 再通过硝酸-乙醇法可提取出纤维素; 之后, 再通过碱性的醚化反应可制备出 CMC。

2) 悬铃木来源的 CMC 与 PVA、APG0810

表 1 各组分不同用量时的复合型抑尘剂综合性能指标  $C$   
Table 1 Comprehensive performance index  $C$  of the composite dust suppressant with different dosages of each component

复配组分		$D^+$	$D^-$	$C$
名称	质量分数/%			
CMC	0.01	0.297 1	0.160 6	0.351 0
	0.025	0.287 4	0.130 7	0.312 6
	0.05	0.265 0	0.111 2	0.295 6
	0.075	0.238 9	0.116 0	0.326 9
	0.10	0.228 8	0.119 3	0.342 7
	0.15	0.136 0	0.224 8	0.622 9
	0.20	0.131 1	0.303 6	0.698 4
PVA	0.10	0.199 4	0.146 1	0.422 9
	0.25	0.181 5	0.127 9	0.413 4
	0.50	0.181 5	0.111 5	0.380 6
	0.75	0.161 8	0.122 0	0.429 8
	1.00	0.114 1	0.147 5	0.564 0
	1.50	0.103 9	0.168 3	0.618 5
	2.00	0.091 6	0.218 0	0.704 1
APG0810	0.01	0.179 2	0.273 6	0.604 3
	0.05	0.152 7	0.258 5	0.628 7
	0.10	0.127 6	0.233 1	0.646 3
	0.15	0.193 7	0.139 8	0.419 1
	0.20	0.279 8	0.119 2	0.298 8
	0.25	0.274 8	0.149 8	0.352 8
	0.30	0.273 6	0.179 1	0.395 7

复配制得复合型抑尘剂,该抑尘剂的黏结性与抗风蚀性紧密联系,CMC和PVA对其有主要贡献;而APG0810则是影响抑尘剂润湿性和生物毒性的主要组分。

3)通过TOPSIS法优化出的最佳综合性能复合型抑尘剂具有良好的黏结性,可以较好地润湿土壤,抗风蚀性良好,生物毒性较低。

## 参 考 文 献

- [1] 陈菁,彭金龙,徐彦森.北京市2014~2020年PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>时空分布与健康效应评估[J/OL].环境科学:1-24[2021-03-29].  
<https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202101033>.
- [2] 李勇,廖琴,赵秀阁,等.PM<sub>2.5</sub>污染对我国健康负担和经济损失的影响[J].环境科学,2021,42(4):1688-1695.
- [3] 耿天召,朱余,魏帧,等.基于多种源解析技术的合肥市环境空气PM<sub>2.5</sub>来源解析[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2020,43(6):830-838.
- [4] 张毅.长治市秋冬季PM<sub>2.5</sub>组分特征及来源解析[J].环境化学,2020,39(6):1699-1708.
- [5] 段文娇,周颖,李纪峰,等.邯郸市PM<sub>2.5</sub>污染特征及来源解析[J].中国环境科学,2019,39(10):4108-4116.
- [6] LI Z D, ZHAO Y Y, XU X X. Investigation of dust exposure and control practices in the construction industry: Implications for cleaner production[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 227: 810-824.
- [7] WU Z Z, ZHANG X L, WU M. Mitigating construction dust pollution: State of the art and the way forward[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 112(2): 1658-1666.
- [8] CHERIYAN D, CHOI J H. A review of research on particulate matter pollution in the construction industry[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 254: 120077.
- [9] 程淑艳,程芳琴,常婷.润湿性煤尘抑制剂在火电厂中的应用研究[J].电功率,2012,27(6):611-614.
- [10] 李凯崇,杨柳,蒋富强,等.改性木质素磺酸盐煤炭抑尘剂的制备与研究[J].环境工程,2012,30(1):66-69.
- [11] ZHOU L, YANG S Y, YUAN Z L, et al. Inhibition of fine particles fugitive emission from the open-pit lignite mines by polymer aqueous solutions[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical & Engineering Aspects*, 2018, 555: 429-439.
- [12] ZHANG H H, NIE W, YAN J Y, et al. Preparation and performance study of a novel polymeric spraying dust suppression agent with enhanced wetting and coagulation properties for coal mine[J]. *Powder Technology*, 2020, 364: 901-914.
- [13] YAN J Y, NIE W, ZHANG H H, et al. Synthesis and performance measurement of a modified polymer dust suppressant[J]. *Advanced Powder Technology*, 2020, 31(2): 792-803.
- [14] 王永慧,贾志超,蒋林天等.甘蔗渣抑尘剂的微波聚合制备及性能表征[J].环境工程学报,2017,11(7):4202-4209.
- [15] 梁文俊,任思达,马贺,等.环境友好型煤尘抑制剂的制备[J].环境工程学报,2017,11(9):5091-5096.
- [16] 曹丽琼,程芳琴,武海波,等.以废可乐瓶为原料提取乙二醇制备煤尘抑制剂[J].山西化工,2010,30(6):1-4.
- [17] LI S L, ZHOU G, LIU Z Q, et al. Synthesis and performance characteristics of a new ecofriendly crust-dust suppressant extracted from waste paper for surface mines[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 258: 120620.
- [18] SHI Y, GE Y, CHANG J, et al. Garden waste biomass for renewable and sustainable energy production in China: Potential, challenges and development[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 22: 432-437.
- [19] 刘瑜,赵佳颖,周晚来,等.城市园林废弃物资源化利用研究进展[J].环境科学与技术,2020,43(4):32-38.
- [20] 蒋建新.生物质化学分析技术[M].北京:化学工业出版社,2013:97-98.
- [21] 傅丹宁,黄彪彪,王占彬,等.利用废纸纤维制备羧甲基纤维素的工艺研究[J].纸和造纸,2018,37(5):16-22.
- [22] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会.食品安全国家标准 食品添加剂 羧甲基纤维素钠:GB 1886.232-2016[S].北京:中国标准出版社,2016.

[23] 中华人民共和国铁道部. 铁路煤矿运输抑尘技术条件: TB/T 3210.1-2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.

[24] 郑云海, 田森林, 李林, 等. 基于表面活性剂的施工扬尘抑尘剂及其性能[J]. *环境工程学报*, 2017, 11(4): 2391-2396.

(责任编辑: 金曙光)

## Preparation and comprehensive performance of a composite dust suppressant using greening wastes as raw material

ZHANG Chongmiao<sup>1,2,3,\*</sup>, GE Lingzhi<sup>1,2,3</sup>, ZUO Hao<sup>4</sup>

1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China

2. Shaanxi Key Laboratory of Environmental Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China

3. Key Laboratory of Northwest Water Resource, Environment and Ecology, Ministry of Education, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China

4. Shaanxi Changqing Industrial Company Limited, Xi'an 710061, China

\*Corresponding author, E-mail: cmzhang@xauat.edu.cn

**Abstract** Aimed at suppression of the dust raising at construction sites and resource utilization of the urban greening wastes, the Platanus branches were used as raw material to prepare sodium carboxymethyl cellulose (CMC), a composite dust suppressant, by compositing it with polyvinyl alcohol (PVA) and octyl decyl glucoside (APG0810). The effects of the amount of each component on the performance of the dust suppressant were evaluated in terms of adhesiveness, wetting ability, wind-resistance and biotoxicity. The comprehensive performance of the dust composite suppressant was analyzed by using the TOPSIS method. The results showed that the cohesiveness and wind-resistance are mainly affected by CMC and PVA content, and APG0810 is the main component that affects the wetting ability and biotoxicity. When CMC, PVA and APG0810 are 0.20%, 2.00% and 0.10%, respectively, the composite dust suppressant shows the best comprehensive performance. In this ratio, the viscosity at 25 °C is 41.97 mPa·s, showing good adhesiveness. The settling time of dust in the suppressant is 68.62 s, indicating good soil-wetting ability. With good wind erosion resistance, the mass loss rate is 0.57% under the wind speed of 5.6 m·s<sup>-1</sup> for 5 min. The dust suppressant has low biotoxicity, and the germination rate of wheat seeds can reach 70%. The research results provide a new approach for the resource utilization of greening wastes and the preparation of the composite dust suppressant.

**Keywords** composite dust suppressant; atmospheric dust; greening wastes; TOPSIS method; comprehensive performance