

天然椰糠粉增强陕西娄土持水性能研究

戎泽¹, 白波^{1,2}, 王洪伦², 索有瑞²

(1. 长安大学 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室 陕西 西安 710054;
2. 中科院西北高原生物研究所 青海 西宁 810001)

摘要:以天然椰糠粉为保水剂,研究其对陕西娄土土壤持水能力的增强效应。结果表明,椰糠粉表现出良好的反复吸水性;在较高温度下,椰糠粉仍具有较好的持水性;椰糠粉/陕西娄土混合物的含水量随着椰糠粉比例的增加而增大,含质量分数 10%、25% 的椰糠粉/陕西娄土混合物在 5 kPa 压力吸力下,保持的最低含水量分别增加了 127% 和 274%。Van Genuchten 模型拟合数据中参数 α 从原来的 0.397 减小至 3.90×10^{-8} 和 1.60×10^{-8} ,表明椰糠粉显著增强了陕西娄土土壤持水能力。

关键词:椰糠粉;保水剂;娄土;土壤持水性;土壤水分特征曲线

中图分类号:TQ 013.2;S 125.7 文献标识码:A 文章编号:1671-3206(2017)05-0902-05

DOI:10.16581/j.cnki.issn1671-3206.20170222.020

Enhanced performance of natural coconut powder for the water retention capacity of Shaanxi Lou soil

RONG Ze¹, BAI Bo^{1,2}, WANG Hong-lun², SUO You-rui²

(1. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effects in Arid Region, Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Northwest Plateau Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, China)

Abstract: Waste coconut bran powder have been used as a novel and natural water-retaining agent to investigate the enhancement of water holding capacity for Shaanxi Lou soil. The result showed that the repeated swelling test of coconut powder indicated that they had excellent recycle performance for the water retention. Moreover, coconut powder still exhibited a good water binding capacity at a high temperature. The water content of coconut bran powder/Lou soil mixture increased as the proportion of coconut powder increased under the same matrix suction in soil water characteristic curves. Under pressure of 5 kPa, the lowest water content of coconut bran powder/Lou soil mixture with 10% and 25% coconut bran powder were increased by 127% and 274% respectively, in comparison with the pure Lou soil. The parameter α in the Van Genuchten model is reduced from the original 0.397 to 3.90×10^{-8} and 1.60×10^{-8} . All of these showed that the coconut bran powder significantly enhanced the water holding capacity of Shaanxi Lou soil.

Key words: waste coconut bran powder; water-holding capacity; Lou soil; soil water holding capacity; soil water characteristic curve

节水农业的飞速发展促进了各种人造保水剂、半人造保水剂、纯天然保水剂在我国的广泛应用。实验表明人造保水剂如聚丙烯酸高吸水性树脂(PAA)或半人造保水剂,因其生产成本较高、耐盐性差、生物降解困难,有环境风险,因而应用范围受限^[1]。与之相比,天然保水剂尽管在保水性能上偏弱,但具有原料丰富、生成工艺简单、环境生态影响小等明显优势。据此规模化开发并利用各种天然保

水剂是我国节水农业发展的一个方向。椰糠是椰子外壳纤维粉末,归属于纯天然的生物质介质。研究表明^[2],经加工处理后的椰糠非常适合于各种植物栽培。这主要归功于椰糠纤维膨胀率高、pH 值适中,不含线虫,糠粉 EC 值低,不烧根,不烂根,天然环保。除此之外,成型后的椰糠粉水和营养组分的吸收性及保持性更加良好,可完全满足营养物质的缓释释放要求,因此椰糠粉(CBP)成为当前广泛流

收稿日期:2016-06-22 修改稿日期:2016-09-23

基金项目:中国博士后特别资助项目(201104615);中央高校基本科研业务费专项资金(310829162041)

作者简介:戎泽(1992-)男,浙江舟山人,在读硕士,师从白波教授,主要从事新型功能材料方面的研究工作。电话:13967208233, E-mail: 1029101444@qq.com

通讯联系人:白波(1972-)男,教授,博士生导师,主要从事纳米复合物的制备及应用。E-mail: baibochina@163.com

行的无土栽培介质,已被大范围应用于超喜水性农作物、花卉、果树等观赏性植物栽培。

关中娄土是自然褐土基础上经过人类长期耕作熟化的耕作土壤,主要分布在关中平原渭河各级阶段和黄土台塬区^[3]。目前,相对于大量娄土养分的有效性研究,娄土的持水性调控技术研究鲜有报道。据此,研究娄土土质的吸水和保水能力增强技术,即能够抑制娄土土壤水分的蒸发,增加娄土土壤含水量,增强娄土土壤持水功能,对娄土土壤水分调控具有重要作用^[4]。

本文以天然椰糠粉为保水剂,研究椰糠粉对陕西娄土持水性性能的影响,为天然椰糠粉保水剂在农业中的正确使用和合理配比提供理论依据。

1 实验部分

1.1 材料与仪器

椰糠粉(CBP),工业品;娄土,陕西本地重壤土。

TEN-30 型土壤张力计; LWMC-201 型粉碎机; Hitachi S-4800 扫描电子显微镜; Bio-Rad FTSI35 型傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)。

1.2 实验方法

将椰糠粉质量分数 0、10% 和 25% 的已经吸水饱和的 3 组混合土分别放入一定深度的土罐中,插入土壤张力计测量张力。常温下,因蒸发作用,土罐含水量缓慢减小,张力随之变化。每隔一段时间称量土罐质量,以得到相应的含水量,并读取张力计示数,直到张力计示数不再变化为止。绘制土壤的水分特征曲线(脱湿曲线)。

2 结果与讨论

2.1 椰糠粉的形态及表面形貌

采用光学显微镜和 SEM 对椰糠粉的形态及表面形貌进行观察。图 1a 为椰糠粉在光学显微镜下 20 倍放大图,图 1(b、c、d) 为椰糠粉的 FE-SEM 照片。

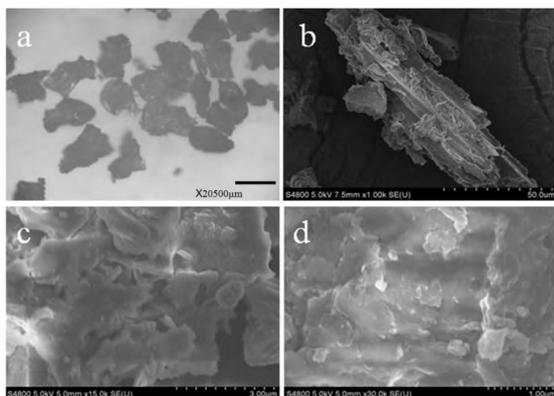


图 1 椰糠粉光学照片(a)和表面 FE-SEM 照片(b、c、d)

Fig. 1 Optical microscope photos(a) and SEM photos(b、c、d) of the surface of coconut bran powder

由图 1a 可知,椰糠粉颗粒大小均匀,表面粗糙。由图 1(b、c、d) 可知,椰糠粉呈多层褶皱状,且散落存在着一些孔径较大的孔洞。这些粗糙的褶皱层和孔洞化结构都是有效的与水分子的接触位点,是水分子向椰糠粉内部扩散的良好通道,使椰糠粉有较好吸水性。

2.2 椰糠粉在酸性、碱性及中性条件下的表面化学官能团

椰糠粉(CBP)、碱处理后的椰糠粉(CBP/OH⁻)和酸处理后的椰糠粉(CBP/H₃O⁺)的傅里叶红外光谱(KBr 压片薄片)见图 2。

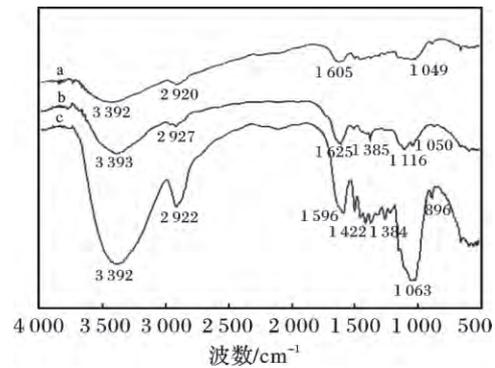


图 2 CBP/H₃O⁺(a)、CBP(b)和 CBP/OH⁻(c)的 FTIR 谱图

Fig. 2 FTIR spectra of CBP/H₃O⁺(a), CBP(b) and CBP/OH⁻(c)

由图 2b 可知,1385 cm⁻¹为 -COO⁻的对称吸收峰;1050,1116 cm⁻¹处为 CBP 的糖类物质中 β-1,4 糖苷键的特征吸收峰^[5-6];1625 cm⁻¹,3393 cm⁻¹分别属于羟基的弯曲和振动吸收峰,这表明 CBP 中有大量羟基团存在;2927 cm⁻¹为 C—H 伸缩振动吸收峰。由图 2a 可知,1049 cm⁻¹为 β-1,4 糖苷键的特征吸收峰,1400 cm⁻¹处吸收峰消失,1605 cm⁻¹和 3392 cm⁻¹也出现了羟基的弯曲和振动吸收峰。由图 2c 可知,经过碱处理的椰糠粉,896 cm⁻¹和 1063 cm⁻¹为 β-1,4 糖苷键的特征吸收峰,1384 cm⁻¹和 1422 cm⁻¹为 -COO⁻对称吸收峰,在 1596 cm⁻¹和 3392 cm⁻¹有羟基特征峰。这是由于椰糠粉主要由纤维素组成,其表面必然有大量亲水的羟基团存在,且即使在酸或者碱性环境中,羟基基团仍能保留,因而保水性能良好。

2.3 粒径对椰糠粉吸水性和保水性的影响

2.3.1 对吸水性的影响 取 1.0 g 20 目、90 目和 150 目的椰糠粉(分别记为 Y₂₀、Y₉₀和 Y₁₅₀)分别放入 3 个已经称量的尼龙茶袋中,放入自来水中并计时,每隔 1 min 拿出茶袋,并贴壁数次,使没有吸收的水挂出,放入天平中称量。随着时间的推移,吸水茶袋的质量增大的速率越来越小,当其质量增加不明显后,每隔 4 min 称量 1 次。以此类推,每隔 8,

30 60 min 称量 1 次,直到吸水茶袋的质量不再随时间增加而增加。绘制成吸水质量与时间的变化曲线,结果见图 3。

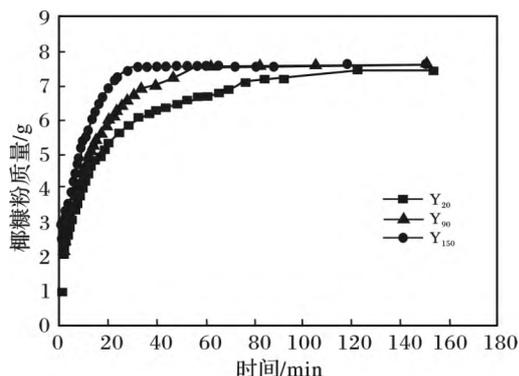


图 3 三种不同粒径的椰糠粉在常温下的吸水曲线
Fig. 3 Water absorption curves of three kinds of particle size of coconut bran powder at room temperature

由图 3 可知,在初期吸水时,粒径小的椰糠粉的吸水速率要比粒径大的快。原因是粒径小的椰糠粉颗粒拥有更大的比表面积,其表面的羟基团接触水分子的机会要更大,从而吸水更快;三者的吸水速率随着时间的增大而减少直至不再吸水;到 150 min 后, Y_{20} 、 Y_{90} 和 Y_{150} 的吸水量分别为 7.6、7.6、7.47 g/g,吸水量不再随时间的变化而变化。这表明虽然粒径影响了天然保水剂初期时的吸水速率,但它们的最大吸水倍率与粒径无关,在实际中,由于得到粒径小的椰糠粉成本较高,从经济效益与吸水率的角度考虑, Y_{20} 型椰糠粉更符合规模化要求。

2.3.2 粒径对保水性的影响 将 Y_{20} 、 Y_{90} 、 Y_{150} 的 1.0 g 样品用茶袋法在自来水中吸水 24 h,使其吸水达到饱和。再放入 30 °C 的恒温烘箱中脱水,每隔 10、30、60 min (以后均为 60 min) 测量一次茶袋的质量。直到茶袋的质量不再减少为止,绘制成脱水质量与时间的变化曲线,结果见图 4。

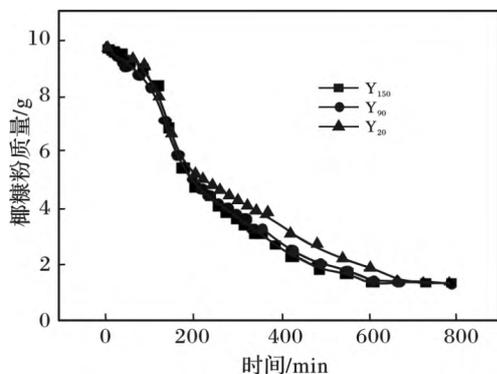


图 4 三种不同粒径的椰糠粉在常温下的脱水曲线
Fig. 4 Water dehydration curves of three kinds of particle size of coconut bran powder at room temperature

由图 4 可知,脱水实验开始时,椰糠粉的含水量较大,脱水速率比较小。这是由于温升滞后现象导致椰糠粉的表面温度没有达到脱水温度,脱水速率

在初期因而不高。当脱水时间进行到 100 min 左右,此时脱水速率达到最大值,往后缓慢减小,到 800 min 左右时接近 0,即脱水完毕。此时椰糠粉内含水为结合水而非重力水^[7]。在低温度低压力下很难再脱水,视为脱水完毕。另外,在同一时刻下,粒径较小的椰糠粉质量始终小于粒径较大的椰糠粉质量,这表明粒径较大的椰糠粉在 30 °C 下,其持水性要略优于粒径较小的椰糠粉。三者平衡时的质量相近,均为 1.5 g 左右,说明在相同温度和压力下,相同质量的椰糠粉在脱水完时的平衡持水量和所需时间是一样,而与它们的粒径大小没有关系。

由上实验结果还可以看出, Y_{20} 型的椰糠粉也保持了较好的吸水性、持水性。因此,之后的实验选择 Y_{20} 型椰糠粉进行。

2.4 环境温度对 Y_{20} 型椰糠粉保水性的影响

将 3 组干重 1.0 g 已经吸水饱和的椰糠粉样品分别放入 30、35、40 °C 的恒温烘箱中,每隔一段时间后取出称量记录,绘制脱水曲线,结果见图 5。

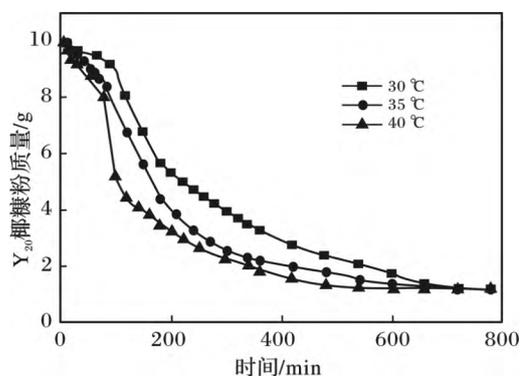


图 5 Y_{20} 型椰糠粉在不同温度下的脱水曲线
Fig. 5 Dehydration curves at different temperatures of Y_{20} type coconut bran powder

由图 5 可知, Y_{20} 型椰糠粉在 30、35、40 °C 在开始脱水的前 60 min 脱水速率相差不大且速率较小。当时间达到 100 min 后,脱水速率均逐渐变大,且温度越高,变大的程度越明显。当时间达到 180 min 后,三者的脱水速率逐渐减少,并持续到脱水平衡状态,这是该温度压力下, Y_{20} 型椰糠粉所能保持的平衡持水量。其中, Y_{20} 型椰糠粉在 30 °C 下,脱水开始 700 min 左右达到平衡。在 35 °C 和 40 °C 达到平衡的时间分别为 680 min 和 600 min 左右。虽然保水剂在不同温度下呈现出一定的差异,但较高温度情况相较于较低温度达到脱水平衡的时间只缩短了 2.9% ~ 14.3%,这相比于一些人工合成的保水剂,椰糠粉的持水性受高温影响程度较小^[8],在较高温度下仍能维持它原本的持水性。

2.5 椰糠粉的重润胀性的测定

椰糠粉重润胀性的研究,取 1.0 g 样品放入已知质量的尼龙茶袋中,将茶袋浸泡在自来水中 24 h,

使其吸水量达到饱和。吸水饱和后,放入 40 °C 的恒温烘箱中,中间每隔一段时间进行称重并记录,直到质量不再变化为止。取出椰糠粉,重复上述操作若干次。

采用恢复率来测定其恢复性,即在第 1 次吸水后失水收缩后,再放入水中,重新吸水溶胀,达到最大吸水倍率。第 n 次的最大吸水倍率与第 1 次的最大吸水倍率之比就是第 n 次的恢复率。可用下式表示^[9]:

$$N_n = \frac{m_n}{m_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中 m_n ——椰糠粉第 n 次的最大吸水量 g;
 m_1 ——椰糠粉第 1 次的最大吸水量 g;
 N_n ——第 n 次的恢复率, %。

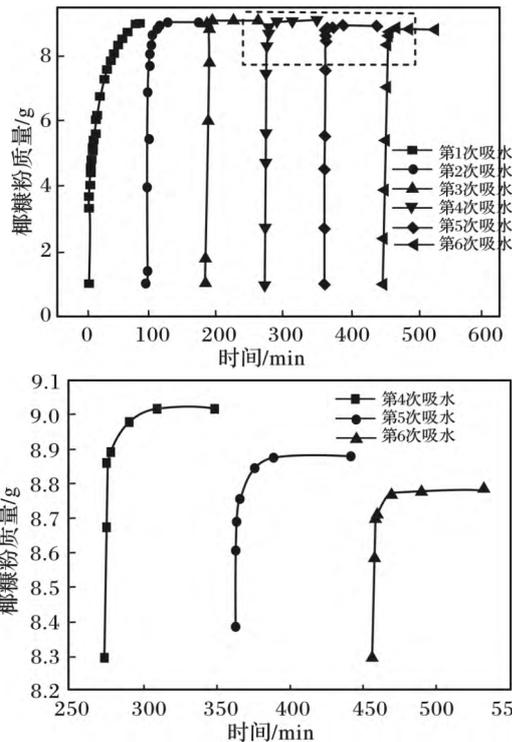


图 6 椰糠粉的重润胀性曲线图及部分曲线放大图
Fig. 6 Reswelling capacities of coconut bran powder

由图 6 可知,前 4 次的最大吸水量没有多少变化,均为 8 g/g 左右。到了第 5 次与第 6 次逐渐减小,最大吸水量分别为 8.89 g/g 与 8.79 g/g。两者的恢复率 N_i 为 98.3% 和 97.2%,说明 Y_{20} 型椰糠粉经过 6 次重复润胀后,仍然具有很好的保水性和持水性。

2.6 椰糠粉混合娄土土壤特征及吸水性能测试

Y_{20} 型椰糠粉与娄土按椰糠粉质量分数 0, 10% 和 25% 进行混合,分成 3 组。用环刀装 100 cm³,并倒入相应的铝盒中,放入 105 °C 的烘箱中 6 h,完全烘干土壤中的水分。将土壤从铝盒中倒出称重,根据以下公式计算土壤容重:

$$P_b = \frac{m}{\rho \times V_0} \quad (2)$$

式中 P_b ——土壤容重 g/cm³;
 m ——土体质量 g;
 ρ ——水的密度 g/cm³;
 V_0 ——单位体积 100 cm³。

土壤的总孔隙度一般不直接测定,各混合土的总孔隙度可以用以下公式计算求得^[4]。

$$P_i = (1 - \frac{P_b}{B}) \quad (3)$$

式中 P_i ——土壤总孔隙度, %;
 B ——土壤比重 g/cm³。

纯娄土 A_1 、混合土 A_2 和 A_3 (Y_{20} 型椰糠粉含量分别为 10% 和 25%) 的土壤容重和总孔隙度的测定结果见表 1。

表 1 三种糠粉混合娄土土壤特征参数
Table 1 Soil characteristic parameter of three kinds of mixed soil

样品	椰糠粉质量百分比 /%	土壤容重 / (g · cm ⁻³)	土壤容重减少率 /%	土壤总孔隙度 /%
A_1	0	1.32	0	50.2
A_2	10	0.95	28.0	64.1
A_3	25	0.67	49.2	74.7

土壤总孔隙度的大小和孔径分布对农作物生长有较大影响,不同农作物有不同适宜的土壤总孔隙度^[10],因此在实际应用中,要考虑不同农作物所适应的土壤总孔隙度来选择合适椰糠粉施加比例。此外,作为土壤熟化程度指标之一,土壤容重越小代表其有机质含量较多,结构好且熟化程度高。由表 1 可知,随着椰糠粉含量增加,土壤的容重随之减小,土壤总孔隙度逐渐增大。其中 A_2 和 A_3 的土壤容重分别为 0.95 g/cm³ 和 0.67 g/cm³,均小于 A_1 的 1.32 g/cm³。 A_1 、 A_2 和 A_3 的土壤总孔隙度分别为 50.2%、64.1% 和 74.7%。仅从结合成本和降低土壤容重两方面考虑,相比于 A_1 和 A_3 , A_2 椰糠粉含量仅为 10%,其土壤容重减少率高达 28%,更符合实际的应用。

土壤水分特征曲线的斜率即单位基质吸力的变化引起的含水量变化,称为比水容量(C),是反映土壤持水性能的重要参数。同一吸力下,土壤的含水率越大,C 值越大^[11],表示其持水性越好。

由图 7 可知, A_1 的曲线最平缓,斜率最小,同一吸力下的土壤含水率最小; A_3 的曲线最陡峭,C 值最大,持水性最好, A_2 次之。基质吸力达到最大值时, A_1 的含水率只有 7.5%,说明纯娄土的持水性是最差的。当添加质量分率 10% 和 25% Y_{20} 型椰糠粉, A_2 和 A_3 的含水率分别能达到 10% 和 12% 左右。土

壤含水率分别增加了 33% 和 60%。另外,在土壤吸力为 0 时,此时土壤达到饱和吸水量, A_1 、 A_2 、 A_3 的饱和吸水量分别为 30%、32% 和 32%。说明椰糠粉的施加大大增加了土壤饱和吸水量,这一特性可以在雨季充分的得到发挥,使浅层土壤能储存更多的雨水。

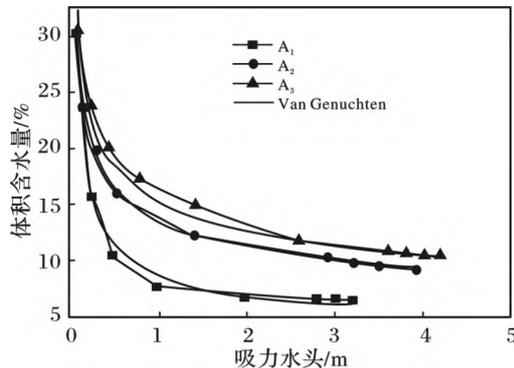


图 7 三种混合土的土壤水分特征曲线

Fig. 7 Soil water characteristic curves of three kinds of mixed soil

椰糠粉对娄土持水性影响之一是通过对其体孔隙状况的影响来实现。土壤的粒径越大,质地越粗,土壤内部的大孔隙数量就相对较多。由于大孔隙具有较小的基质势,脱湿状态下土壤水优先从大孔隙排出,使得土样在较小的吸力下快速脱水,因此持水能力较弱。相反,土壤粒径越小,质地越细,大孔隙数量较少,中小孔隙数量较多,使水分流失速率变慢,土壤水分特征曲线更加平缓,表现出了更好的持水能力^[12]。由图 7 可知,椰糠粉能减小娄土的粒径,增加其持水能力。

土壤水分特征曲线是一个高度非线性函数,它们之间的关系很复杂,难以从理论上推导出确切的关系式,但通过大量的实验研究,研究提出利用 Van Genuchten 模型^[13]经验公式来描述。

$$\begin{cases} \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = [1 + |\alpha \cdot h|^n]^{-m} & h < 0 \\ \theta(h) = \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (4)$$

其中 θ 为体积含水率; θ_s 为饱和体积含水率; θ_r 为残余体积含水率; h 为吸力水头; α 为与进气值有关的参数; m 、 n 为曲线形状参数, $m = 1 - 1/n$ 。Van Genuchten 模型参数见表 2。

表 2 Van Genuchten 模型相关参数值

Table 2 Parameters of Van Genuchten model

参数	θ_r	θ_s	α	n
A_1	0.980	1.001	0.397	-0.557
A_2	0.990	1.000	3.90×10^{-8}	-0.255
A_3	1.000	1.000	1.60×10^{-8}	-0.269

由表 2 可知,椰糠粉能增加土壤的总孔隙度,减小土壤粒径,从而使 α 值减小。 A_1 、 A_2 和 A_3 的拟合

曲线(图 7)中椰糠粉对土壤水分特征曲线的改变主要是 α 与 n 对参数 θ_r 与 θ_s 基本无影响。如对 A_1 的拟合出来的 α 为 0.397,而 A_2 和 A_3 只有 3.90×10^{-8} 和 1.60×10^{-8} 。三者的土壤水分特征曲线符合 Van Genuchten 模型。 α 值受进气值影响,一般土壤粒径越大其值越大。相同条件下测得的土壤水分特征曲线,中砂土壤 α 值要大于粉砂与粉土^[14]。

3 结论

(1) 椰糠粉作为一种天然保水剂,具有较高的吸水倍率和重润胀性。粒径对椰糠粉的吸水曲线与脱水曲线的影响不明显。相比而言,大颗粒的椰糠粉具有经济性,更能够满足土壤对保水剂的要求。椰糠粉在不同田间高温下,仍能保持其较好持水性。椰糠粉与土壤混合后,能明显降低陕西娄土土壤的土壤容重和土壤总孔隙度,椰糠粉混合的比例越大,降低程度越明显。实际应用中,可根据需要的土壤容重和土壤总孔隙度,结合保水剂的成本,选择合适的椰糠粉比例。

(2) A_1 、 A_2 和 A_3 的土壤水分特征曲线能较好地符合 Van Genuchten 模型所拟合,椰糠粉的加入能减小土壤的粒径,从而减小模型中 α 值。但同时又减小了土壤容重,相比于土壤容重较大的小粒径的土壤有更好的熟化程度。

参考文献:

- [1] Guo M, Liu M, Falu Zhan A, et al. Preparation and properties of a slow-release membrane-encapsulated urea fertilizer with superabsorbent and moisture preservation [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2005, 44 (12): 4206-4211.
- [2] 苏小育,白波,丁晨旭,等.椰糠粉/聚丙烯酸-丙烯酰胺复合吸水材料的制备及其吸保水性能[J].材料导报,2015(6):6-9.
- [3] 郑国璋.关中娄土剖面中重金属元素的垂直分布规律研究[J].地球学报,2008,29(1):109-115.
- [4] 刘多森,李伟波.土壤容重和孔隙度的简易测定法[J].土壤通报,1983(4):44-47.
- [5] Wu L, Liu M, Liang R. Preparation and properties of a double-coated slow-release NPK compound fertilizer with superabsorbent and water-retention [J]. Bioresource Technology, 2008, 99(3): 546-554.
- [6] L Rui, H Yuan, G Xi, et al. Synthesis of wheat straw-g-poly(acrylic acid) superabsorbent composites and release of urea from it [J]. British Journal of Community Nursing, 2009, 20(10): 518.
- [7] 雷志栋,谢森传,杨诗秀,等.土壤给水度的初步研究[J].水利学报,1984(5):10-17. (下转第 915 页)

是正丁醇和甲醛的2倍,这充分说明糠醛MIPs对糠醛有着专一的选择吸附性。

3 结论

采用本体聚合法制备了糠醛MIPs,通过优化制备条件得出 $n(\text{糠醛}) : n(\text{MAA}) : n(\text{EGDMA}) = 1 : 4 : 20$ 时,糠醛MIPs对糠醛呈现出较好的特异吸附性能。通过扫描电镜和红外分析可知,糠醛分子与功能单体之间是通过氢键作用相结合的。吸附动力学实验、平衡吸附实验及选择性实验结果表明,糠醛MIPs对糠醛表现出良好的吸附性能,有望作为固相萃取材料应用于食品中糠醛甚至其他有机醇、有机醛类有害物质残留的分离、富集和检测。

参考文献:

- [1] 程平言,胡峰,胡建锋,等.低度白酒发展现状[J].酿酒科技,2015(12):99-101.
- [2] 张书田,冯勇,李庆军.白酒食品安全及有害物质的控制[J].酿酒科技,2012(3):54-56.
- [3] 张玉玉,宋弋,李全宏.食品中糠醛和5-羟甲基糠醛的产生机理、含量检测及安全性评价研究进展[J].食品科学,2012,33(5):275-279.
- [4] 赵旭红,石海强,张健,等.紫外光谱定量测定木质纤维预水解液中溶解性木素和糠醛含量[J].化工学报,2015,66(6):2295-2302.

(上接第906页)

- [8] Zhang M, Cheng Z, Liu M, et al. Synthesis and properties of a superabsorbent from an ultraviolet-irradiated waste nameko mushroom substrate and poly(acrylic acid) [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2014, 131(13): 4525-4529.
- [9] 徐博函.纤维素系吸水材料的制备及性能研究[D].北京:北京林业大学,2008.
- [10] 张宝峰,曾路生,李俊良,等.优化施肥处理下设施菜地土壤容重与孔隙度的变化[J].中国农学通报,2013,29(32):309-314.
- [11] 郝振纯,杨兆,王加虎,等.淮北平原典型土壤水分特征

(上接第910页)

- [5] 吴洪达,张泽远,蔡小宇,等.缓蚀剂对超高压铝箔腐蚀扩孔的影响[J].电子元件与材料,2016,35(5):81-84.
- [6] 邵海波,王晓艳,王建明,等.碱土金属离子与EDTA对纯铝在碱性溶液中的协同缓蚀作用[J].物理化学学报,2006,22(3):312-315.
- [7] 袁龙,朱绎桦,刘建周.缓蚀剂复合乙醇胺捕集CO₂及缓蚀作用研究[J].化学通报,2014,77(3):260-264.
- [8] Amin MA, Rehim Ssa EI, Sherbini Eef EI. AC and DC

- [5] Chia Chun Loi, Huey Chern Boo, Abdulkarim Sabo Mohammed, et al. A high performance liquid chromatography method for determination of furfural in crude palm oil [J]. Food Chemistry, 2011, 128(1): 223-226.
- [6] Gras K, Luong J, Gras R, et al. Determination of furfurals in Manuka honey using piston-cylinder liquid-liquid extraction and gas chromatography [J]. Journal of Chromatography A, 2014, 1362: 43-48.
- [7] Chen Lingxin, Xu Shoufang, Li Jinhua. Recent advances in molecular imprinting technology: Current status, challenges and highlighted application [J]. Chemical Society Reviews, 2011, 40(5): 2922-2942.
- [8] Pauling L. A theory of the structure and process of formation of antibodies [J]. J Am Chem Soc, 1940, 62(3): 2643-2657.
- [9] 刘朝奇,王艳林,刘森.分子印迹技术[M].北京:化学工业出版社,2012.
- [10] Kandimalla Vivek Babu, Ju Hunagxian. Molecular imprinting: a dynamic technique for diverse applications in analytical chemistry [J]. Anal Bioanal Chem, 2004, 380(4): 587-605.
- [11] 王颖,李楠.分子印迹技术及其在应用[J].化工进展,2010,29(12):2315-2320.
- [12] 尚宏周,梁红玉,张小梅,等.分子印迹聚合物的最新研究进展[J].现代化工,2013,33(12):28-32.

曲线测定与分析[J].水电能源科学报,2013(2):106-108.

- [12] 刘晓辉,吴爱祥,王春来,等.某深井矿山岩爆预测模式研究[J].采矿安全与工程学报,2012,29(1):78-83.
- [13] Genuchten M T V. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(44): 892-898.
- [14] 赵雅琼,王周锋,王文科,等.不同粒径下土壤水分特征曲线的测定与拟合模型的研究[J].中国科技论文,2015,10(3):287-290.

studies of the pitting corrosion of Al in perchlorate solutions [J]. Electrochimica Acta, 2006(51): 4754-4764.

- [9] 迟慧,洪涛,邹道兵.特高压电容器用极箔腐蚀工艺研究[J].电子元件与材料,2009,28(5):58-61.
- [10] 李彦江,吴洪达,刁历,等.超高压电解电容器用阳极箔腐蚀工艺研究[J].轻合金加工技术,2015,43(8):49-54.
- [11] 毛卫民,何业东.电容器铝箔加工的材料学原理[M].北京:高等教育出版社,2012:1-12.