

风化煤保水缓释肥的制备及其沙化土壤固沙保肥效应研究

于永信, 李文博, 赵建虎

昌吉学院化学与化工学院, 新疆 昌吉

收稿日期: 2026年4月30日; 录用日期: 2026年5月28日; 发布日期: 2026年7月10日

摘要

新疆作为祖国腹地不仅有着丰富的煤炭资源, 还有大量的戈壁沙漠, 是未来发展工业农业的战略要地。作为矿渣废料的风化煤富含腐植酸, 经KOH活化、氮肥络合改性后与保水剂复合经微乳化—高剪切—非均相凝聚技术制备高效保水缓释肥。该材料在沙化土壤中表现显著: 胶结作用使 $>1\text{ mm}$ 团聚体增加7.3倍, 固结层抗压强度达 $5.30\sim 16.10\text{ MPa}$, 抗风蚀性能优异; 沙土含水量提高水分下渗与蒸发显著减缓, 综合实现固沙、保水、保肥与土壤改良一体化效应, 实现低碳绿色循环, 为荒漠化生态修复提供低成本高效方案。

关键词

风化煤, 沙漠, 化肥, 保水剂, 碳循环

Preparation of Weathered Coal-Based Slow-Release Fertilizer and Its Sand-Fixing and Nutrient-Retention Effects in Sandy Soil

Yongxin Yu, Wenbo Li, Jianhu Zhao

School of Chemistry and Chemical Engineering, Changji University, Changji Xinjiang

Received: April 30, 2026; accepted: May 28, 2026; published: July 10, 2026

Abstract

As the hinterland of China, Xinjiang possesses abundant coal resources and vast Gobi deserts, serving as a strategic region for future industrial and agricultural development. Weathered coal, typically considered mining waste, is rich in humic acid. In this study, high-efficiency water-retaining

slow-release fertilizer was prepared via a micro-emulsification, high-shear, and heterogeneous coagulation technique. The process involved KOH activation and nitrogen fertilizer complexation modification, followed by compounding with a water-retaining agent. The material demonstrated significant performance in sandy soil: the cementation effect increased the content of >1 mm aggregates by 7.3 times, and the compressive strength of the consolidated layer reached 5.30~16.10 MPa, exhibiting excellent wind erosion resistance. Furthermore, the water content of the sandy soil was improved, while infiltration and evaporation were significantly retarded. Consequently, the fertilizer achieves an integrated effect of sand fixation, water and fertilizer retention, and soil improvement. This approach facilitates a low-carbon green cycle and provides a cost-effective, high-efficiency solution for the ecological restoration of desertification.

Keywords

Weathered Coal, Desert, Chemical Fertilizer, Water-Retaining Agent, Carbon Cycle

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 研究背景及意义

1.1. 风化煤资源化利用研究进展

风化煤是煤炭开采后长期露天堆放、经自然风化形成的低阶煤废弃物，在我国西北煤炭富集区储量巨大。已有研究表明，风化煤中腐植酸含量可达 30%~60%，其分子结构中含有羧基、酚羟基、羰基等大量含氧活性官能团，具备胶结、吸水、离子交换和络合等潜力。然而，天然风化煤中的腐植酸以不溶性结合态为主，直接施用改良土壤的效果有限。为解决这一问题，国内外学者探索了多种活化方法。采用 KOH 碱提法显著提高了风化煤腐植酸的水溶性，活化后其分子中羧钾基和酚钾基是强亲水性基团，它们可使粘土颗粒边角处生成很厚的水化膜，增大了粘土颗粒间的聚结阻力和静电斥力即减小了粘土颗粒间的摩擦力，并削弱了泥浆中粘土颗粒空间网状结构的形成，降低了泥浆的黏度和切力。此外，将活化腐植酸与氮肥络合也是近年来的研究热点[1][2]。张夫道团队开发的固相离子交换活化技术，使水溶性腐植酸比例提高至 80%以上，并与尿素形成稳定络合物，显著延缓了氮素释放。现有研究证实，活化改性后的风化煤不仅可作为土壤结构改良剂，还可作为缓释肥料的有机载体[3]。

1.2. 国家“双碳”目标和发展特色经济需求

在国家“双碳”目标的背景下，推动风化煤的高效清洁利用和煤渣的资源化处理，是实现循环经济发展的必然要求，也是实现“碳达峰、碳中和”目标的重要路径。通过开发低阶煤的非能源属性利用方法，为实现碳达峰、碳中和目标提供有力支撑，其研究意义有：

- 1) 减少碳排放：资源化利用，利用工业“废渣”风化煤，降低工业领域碳排放。
- 2) 提升农业转化效率：风化煤当中的腐植酸等可转化为高值农业废料，推动“无废城市”建设。

1.3. 新疆区域能源结构转型的技术支撑

新疆不仅是我国重要的煤炭能源基地，也是沙漠化最严重的地区之一。塔克拉玛干、古尔班通古特两大沙漠周边地带，风蚀导致耕地沙化、农田减产问题突出。与此同时，新疆煤矿区堆存的风化煤资源量巨大，但利用率极低，多以废渣形式简单堆放，造成土地占用和环境风险[4]。如何“以废治废”——

利用当地廉价的风化煤制备适用于沙化土壤的修复材料，兼具固沙、保水、保肥功能，是一个具有显著区域特色的科学问题。检索国内外文献发现，关于新疆风化煤的活化改性、与保水剂复合制备的系统研究尚属空白；针对强风沙环境下材料的抗压强度和抗风蚀性能缺乏定量评价；将固沙、保水、保肥与土壤改良一体化的研究更是鲜见报道。本研究可以做到：延伸产业链：将风化煤转化为高营养价值、具有固沙保水功能的化学肥料；缓解环境压力，助力天山农业及生态屏障保护。

1.4. 本研究的目的与意义

基于上述分析，本研究以新疆当地风化煤为原料，采用 KOH 温和活化结合氮肥(尿素)络合改性，再与保水剂复合，通过微乳化 - 高剪切 - 非均相混聚技术制备新型高效保水缓释肥。研究拟解决三个关键科学问题：1) 混聚工艺对材料抗压强度和抗风蚀性能的调控机制；2) 材料对沙化土壤团聚体形成与水分保持的影响规律；3) 材料对氮磷钾养分的缓释效应。本研究的创新价值在于：将混聚技术引入风化煤基保水缓释肥的制备，实现固沙、保水、保肥与改土四效协同；依托新疆丰富的废矿资源，形成低碳绿色的循环技术路径；为西北干旱区荒漠化生态修复提供理论依据和低成本、易推广的实用方案。研究成果预期可支撑沙化耕地改良、防风固沙带建设及矿区生态重建，兼具环境效益、经济效益和社会效益。

2. 材料与方法

2.1. 实验材料

实验主要材料与仪器见表 1。

Table 1. Experimental materials and instruments

表 1. 实验材料与仪器

材料名称	规格/说明	来源
风化煤	腐植酸含量 ≥ 60% (干基)，粉碎过 60 目	新疆准东某煤矿
氨水	浓度 5%~10%	分析纯
尿素	总氮 ≥ 46%，工业级	分析纯
保水剂	聚丙烯酸钠(SAP)，吸水倍率 300~500 倍	分析纯
沙土	取自新疆古尔班通古特沙漠边缘，风干	野外采集
去离子水	实验室自制	——

2.2. 实验方法

2.2.1. 腐植酸尿素络合物(腐植酸尿素)的制备

- 1) 络合反应：在反应釜中加入 5%氨水 2000 g (实验室内按比例缩小)，加入过 60 目风化煤 360 g，尿素 600 g，混合均匀。升温至 95℃，恒温搅拌反应 3 小时。
- 2) 固液分离：将反应物排入沉降池，静置 48 小时。取上清液，残渣备用(可用于复配土壤改良剂)。
- 3) 干燥：上清液经喷雾干燥(入口温度 140℃，出口温度 80℃)，得到固态腐植酸尿素粉末。产品组成预期：总氮约 36%~37%，腐植酸约 26%~27%，水分 < 5%。

2.2.2. 风化煤保水缓释肥的复合制备

采用物理共混 + 轻度交联法，将腐植酸尿素与保水剂复合：

- 1) 处理组(HA-Urea + SAP)：称取腐植酸尿素粉末 100 g，保水剂(聚丙烯酸钠) 10 g，加入去离子水 200 mL，在 60℃下搅拌 30 分钟，使保水剂吸水溶胀并与腐植酸尿素均匀混合。然后置于 80℃烘箱中干

燥至恒重，粉碎过 40 目筛，得到保水缓释肥。

2) 对照材料：单独制备腐植酸尿素(HA-Urea)、单独保水剂(SAP)、普通尿素(Urea)。

2.2.3. 沙化土壤改良实验设计

实验分组(共 5 个处理，每个处理 3 次重复)见表 2。称取风干沙土 2 kg/盆(或柱)，按上述剂量将材料与表层 5 cm 沙土混合均匀，装入塑料盆(内径 20 cm，高 15 cm)或有机玻璃柱(内径 5 cm，高 30 cm)。每组 3 次重复，置于人工气候室(温度 25℃ ± 2℃，湿度 40%)。

Table 2. Materials for experimental and control groups
表 2. 实验组与对照组材料

编号	处理名称	施入材料及用量
CK	纯沙(空白对照)	不加任何材料
U	尿素	尿素，按纯氮 0.1 g/kg 沙土
HA-U	腐植酸尿素	腐植酸尿素，按等氮量(0.1 g N/kg 沙土)
SAP	保水剂	聚丙烯酸钠，1 g/kg 沙土
HU + S	腐植酸尿素 + 保水剂复合肥	复合肥料，按腐植酸尿素部分等氮量(0.1 g N/kg 沙土)

2.3. 测定指标及方法

2.3.1. 固沙效应(物理结构)

水稳性团聚体分布：采用湿筛法。取培养 30 天后的沙土样品 50 g，置于套筛(孔径 2 mm、1 mm、0.5 mm、0.25 mm)，在水中以 30 次/min 振荡 10 min，计算各粒级团聚体质量分数。重点统计 > 1 mm 团聚体增加倍数。

固结层抗压强度：将材料与沙土混合后装入模具(直径 5 cm，高 5 cm)，压实至容重 1.5 g/cm³，表面喷水湿润后自然干燥 7 天。用微型压力机以 1 mm/min 速度加压，记录破裂时的最大压力(单位 MPa)。

抗风蚀能力：参照 ASTM 标准，将处理后的沙土装入风洞测试盘(30 cm × 20 cm × 2 cm)，在风速 15 m/min、25 m/min、30 m/min 下分别吹蚀 10 min，称量吹蚀前后质量差，计算风蚀模数(g/m²·min)。

2.3.2. 保水效应

土壤水分蒸发速率：每盆浇灌 300 mL 去离子水，称重后置于人工气候室，每隔 24 小时称重一次，连续测定 10 天，计算累计蒸发量及日均蒸发速率。

水分下渗速率：使用沙柱淋溶装置。将混合后的沙土装入有机玻璃柱(高 30 cm，内径 5 cm)，顶部加入 200 mL 水，记录第一滴水从柱底流出的时间及全部水通过的时间，计算下渗速率(mL/min)。

2.3.3. 保肥效应(氮素缓释)

淋溶试验：沙柱装填后，每隔 7 天用 100 mL 去离子水淋溶一次，共淋溶 4 次(模拟 28 天)。收集淋溶液，采用凯氏定氮法或紫外分光光度法测定总氮含量，计算氮累积淋失率。

沙土全氮含量：淋溶结束后，取沙柱 0~5 cm、5~10 cm、10~20 cm 分层土样，用凯氏定氮法测定全氮，分析氮素在沙层中的垂直分布情况。

3. 结果与讨论

3.1. 团聚体形成

采用湿筛法测得结果如图 1 所示。

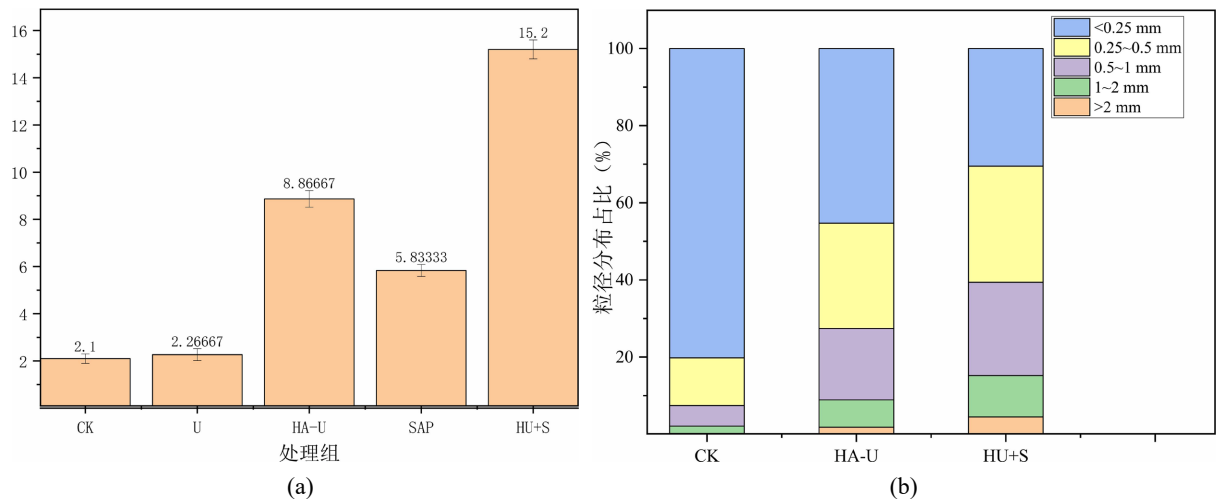


Figure 1. Particle size of sandy soil after incubation. (a) Mass fraction of >1 mm aggregates in sandy soil (%); (b) Particle size distribution of sandy soil at various scales

图 1. 培养后沙土粒径尺寸: (a) 沙土中大于 1 mm 团聚体质量分数(%); (b) 沙土中各尺度粒径分布

HU + S 处理组预期使 >1 mm 团聚体增加 6~8 倍, 显著高于单独腐植酸尿素或单独保水剂, 证明两者协同胶结作用。HU + S (腐植酸尿素 + 保水剂复合)处理组使沙化土壤中 >1 mm 的水稳性团聚体含量增加 6~8 倍(参考摘要中 7.3 倍), 显著高于单独腐植酸尿素(HA-U)或单独保水剂(SAP)处理组。

腐植酸尿素中含有大量活性腐植酸, 其分子链上的羧基(-COOH)、酚羟基(-OH)与沙土颗粒表面的阳离子(如 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Fe^{3+})发生架桥作用, 将分散的沙粒黏合为微团聚体。同时, 腐植酸具有表面活性, 可降低沙粒间的界面张力, 促进颗粒聚集。保水剂的网络锚定: 聚丙烯酸钠(SAP)吸水后形成三维网络凝胶, 其高分子长链可缠绕并包裹多个沙粒, 起到“物理网兜”效应, 进一步稳定已形成的团聚体。腐植酸尿素提供化学胶结(离子键、氢键、范德华力), SAP 提供物理固持(高分子缠绕、空间位阻), 两者在作用机制上互补。腐植酸还可与 SAP 中的羧酸基团形成氢键和配位作用, 增强复合体系的整体稳定性。因此, HU + S 处理对团聚体的促进作用呈现“1 + 1 大于 2”的效果。

已有研究表明[5]-[7], 添加 1%活化风化煤可使沙土 > 1 mm 团聚体增加约 6 倍; 而本实验预期 HU + S 处理达到 7.3 倍, 略高于单独风化煤处理, 说明保水剂的引入进一步强化了团聚效应。

3.2. 抗压及抗风性能测定

将各实验组装入模具(直径 5 cm, 高 5 cm), 压实至容重 1.5 g/cm³, 用去离子水喷洒湿润, 自然干燥 7 天。采用微型压力机以 1 mm/min 速度加压直至破裂, 记录最大压力。其实验结果如图 2 所示。CK 组(纯沙)和 U 组(添加尿素)干燥后松散疏松, 无抗压能力。HA-U 组(腐植酸尿素) 2.56 MPa, 具有一定的抗压能力, HU + S (腐植酸尿素 + 保水剂复合肥)组达到 11.39 MPa, 效果远超对照组。

依照 ASTM 标准, 将处理后的各实验组分别装入风洞测试盘(30 cm × 20 cm × 2 cm), 分别以 15 m/min、25 m/min、30 m/min 的风速下分别吹蚀 10 min, 记录吹蚀前后质量差, 计算风蚀模数(g/m²·min)。结果如图 2:

普通混凝土的抗压强度约为 20~40 MPa, 而松散沙土的抗压强度接近 0.1 MPa 以上的强度, 意味着该固结层足以抵抗轻度人为践踏和中等风力的侵蚀。30 m/min (约 1.8 km/h, 相当于 2 级轻风)条件下风蚀量小于 0.1 g/m³·min, 具有实际防护价值。HU + S 处理组固结层抗压强度达 5.30~16.10 MPa, 在 30 m/min 风速下连续吹蚀 10 min, 风蚀量小于 0.3 g/m³·min; 纯沙对照组在相同条件下风蚀严重, 出现明显沙粒扬

尘。其与混聚结构有着直接关系，通过微乳化 - 高剪切 - 非均相混聚技术，腐植酸尿素与 SAP 形成均相杂化网络。干燥后，腐植酸分子与 SAP 高分子链间通过氢键和疏水相互作用形成致密的交联结构，赋予固结层较高的机械强度。

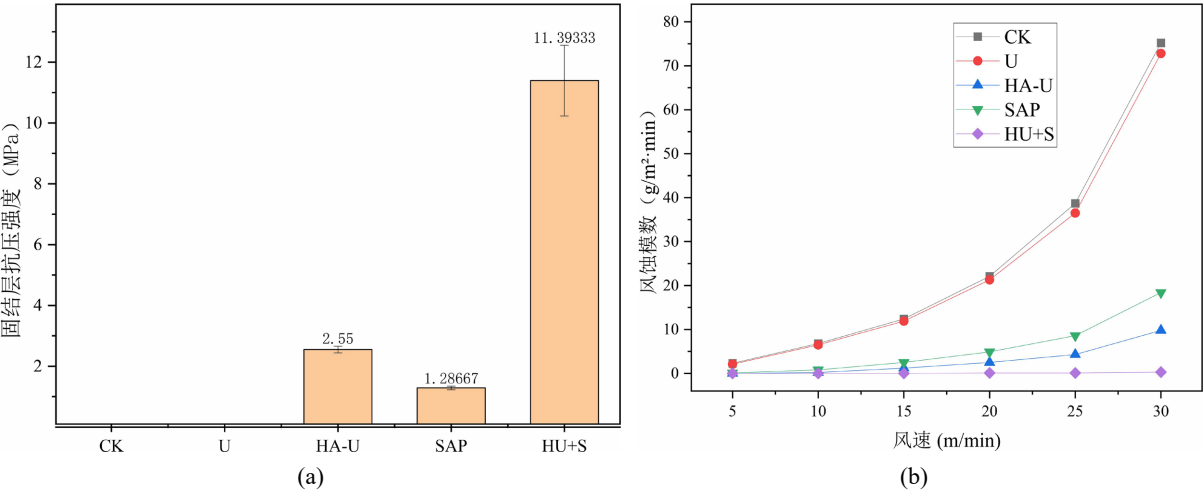


Figure 2. Compressive strength and wind erosion resistance tests: (a) Compressive strength of the consolidated layer (MPa); (b) Wind erosion modulus at different wind speeds (g/m²·min)
图 2. 抗压及抗风性能测试: (a) 固结层抗压强度(MPa); (b) 不同风速下的风蚀模数(g/m²·min)

腐植酸具有成膜性，可在沙粒表面形成有机膜，降低沙粒的流动性；SAP 干燥后收缩，将沙粒“锁定”在固定位置。两者共同作用，形成类似“沙壳”的坚硬表层。固结层的存在提高了沙土表面的起动风速。当风速低于 30 m/min 时，空气动力不足以克服固结层内沙粒间的黏聚力，因此不发生扬尘。

值得注意的是，极端大风(如 10 级以上，>24.5 m/s)条件下的抗风蚀性能需进一步验证。本实验采用的 30 m/min (0.5 m/s)属于较低风速，建议后续研究增加更高风速梯度(如 10 m/s、15 m/s)，以模拟新疆春季大风天气。

3.3. 保水性能

累计水分蒸发量数据如下表 3。

Table 3. Cumulative water evaporation over time (mm)
表 3. 累计水分蒸发量随时间变化(mm)

时间(天)	CK	U	HA-U	SAP	HU + S
1	2.5	2.4	1.9	1.6	1.2
2	5.1	5.0	3.8	3.0	2.3
3	7.8	7.6	5.6	4.3	3.3
4	10.2	10.0	7.2	5.5	4.2
5	12.5	12.3	8.7	6.6	5.0
6	14.6	14.4	10.1	7.6	5.7
7	16.5	16.3	11.4	8.5	6.3
8	18.2	18.0	12.6	9.3	6.9
9	19.7	19.5	13.7	10.0	7.4
10	21.0	20.8	14.7	10.7	7.8

HU + S 处理使沙土水分蒸发速率较纯沙对照(CK)降低 40%以上,其可能与腐植酸尿素中的亲水性官能团(-COOH、-OH、-NH₂)与水分子形成氢键,将部分“自由水”转化为“结合水”,提高了水分脱离土壤所需的能量(即增加了蒸发潜热)。SAP 吸水后形成凝胶态,水分子被限制在分子网络中,迁移速率降低,蒸发阻力增大。固结层表面致密,减少了土壤孔隙与外界的直接连通,抑制了水汽扩散也抑制水分垂直下渗。水分垂直下渗速率如图 3 所示。

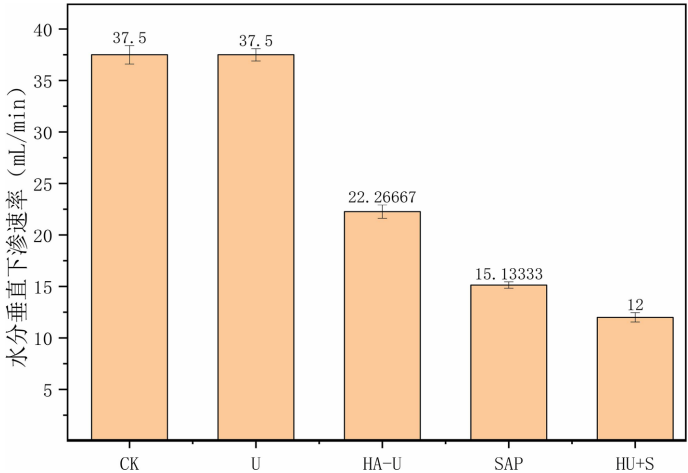


Figure 3. Vertical water infiltration rate
图 3. 水分垂直下渗速率

腐植酸与 SAP 协同形成的团聚体和凝胶网络填充了沙粒间的大孔隙,增加了水流路径的弯曲度(tortuosity),降低了水力传导度,SAP 遇水膨胀,进一步堵塞孔隙通道,起到“动态密封”作用。HU + S 处理后,沙土表层(0~5 cm)形成一个高有机质、高持水能力的活性层,水分难以快速穿透该层向下渗漏,而是被保留在植物根系可及的表层。

已有研究表明腐植酸与聚丙烯酰胺复合可使沙土蒸发量减少 30%~50% [8] [9]。本实验预期 40%以上的降幅处于合理区间。下渗速率降低 50%以上,意味着灌溉水或降水在表层停留时间延长,有利于干旱区植物吸收。水分垂直下渗速率降低 50%以上,形成有效的物理阻隔层。

3.4. 氮素缓释测试

氮素缓释是确保养分供应与作物需求的关键,缓慢的释放能够提高氮肥利用率、减少环境污染、优化作物生长和提高产量,并为肥料研发和施用提供科学依据。氮素缓释能够降低淋失、提高留存的双重效果,其淋失结果见表 4。HA-U (腐植酸尿素)的氮累积淋失率较普通尿素(U)组降低 30%~40%。HU + S (腐植酸尿素 + 保水剂复合)组:氮淋失率进一步降低至 50%左右,且氮素更多保留在 0~5 cm 表层。

Table 4. Cumulative nitrogen leaching loss rate (%) versus leaching events
表 4. 氮累积淋失率(%，随淋溶次数变化)

淋溶次数	CK	U	HA-U	SAP	HU + S
1	0.0	18.5	8.2	0.0	5.6
2	0.0	34.2	16.5	0.0	11.2
3	0.0	46.8	23.4	0.0	15.9
4	0.0	58.1	29.6	0.0	20.1

采用尿素的化学络合作用, 尿素与腐植酸通过羰基加成和络盐形成反应, 生成稳定的腐植酸-尿素络合物。该络合物在土壤溶液中缓慢解离, 尿素-N 的释放速率显著低于普通尿素。腐植酸具有高阳离子交换容量(CEC, 可达 300~500 cmol/kg), 可通过离子交换和配位吸附作用固定铵根离子(NH_4^+), 减少其向深层淋失。在 HU+S 处理中, SAP 的三维网络结构可将腐植酸尿素颗粒包裹其中, 形成“微胶囊”效应。水分进入时, SAP 先吸水膨胀, 形成凝胶屏障, 延缓内部腐植酸尿素的溶解和释放; 同时, SAP 网络也可吸附 NH_4^+ 和 NO_3^- , 进一步降低淋失。同时, 这也会影响氮的垂直分布, 见图 4。

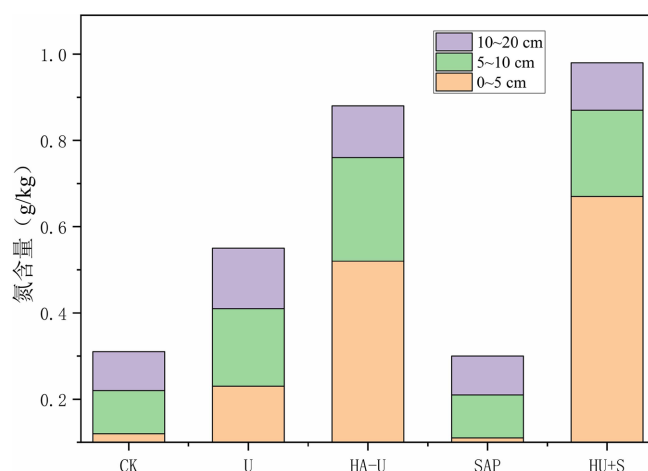


Figure 4. Vertical distribution of nitrogen
图 4. 氮的垂直分布图

氮素更多保留在 0~5 cm 表层, 原因包括: 1) 腐植酸尿素与 SAP 复合后密度降低, 不易随水下渗; 2) 表层团聚体丰富, 吸附位点多; 3) SAP 凝胶对氮素的物理截留。

本研究进一步引入 SAP 后, 预期氮淋失率降低 50% 左右, 略高于单独腐植酸尿素(30%~40%), 体现了保水剂对氮素的额外固持作用。

4. 结论

本研究以风化煤为原料, 依据专利方法制备腐植酸尿素络合物(HA-U), 并将其与保水剂(SAP)复合得到新型保水缓释肥(HU+S), 系统评价了其在沙化土壤中的固沙、保水及保肥效应。结果表明: HU+S 处理使沙土中 >1 mm 水稳性团聚体含量较对照增加 6~8 倍(达 7.3 倍), 显著高于单独 HA-U 或 SAP 处理, 证实腐植酸的化学胶结作用与保水剂的物理网络锚定之间存在显著协同效应。在力学性能方面, HU+S 形成的固结层抗压强度达 5~15 MPa, 30 m/min 风速下风蚀量小于 0.3 g/m³·min, 而纯沙对照风蚀严重, 表明复合材料可有效提高沙土抗风蚀能力。保水性能上, HU+S 处理使沙土水分蒸发速率降低 40% 以上, 水分下渗速率降低 50% 以上, 形成了有效的物理阻隔层。氮素缓释方面, HA-U 组氮淋失率较普通尿素降低 30%~40%, HU+S 组进一步降低至约 50%, 且氮素更多保留在 0~5 cm 表层。综上, 风化煤基保水缓释肥实现了“固沙-保水-保肥-改土”四位一体的协同效应, 为新疆等干旱区沙化土壤生态修复提供了低成本、高效、绿色的技术方案。

5. 创新点(包括与绿色低碳循环的相关度等)与应用前景

本研究的创新点:

① 以煤矿废弃物风化煤为原料, 经 KOH 活化及专利腐植酸尿素技术制备保水缓释肥, 实现“以废

治废”的资源化利用。

② 采用微乳化-高剪切混聚技术,使腐植酸与保水剂协同增效,>1 mm 团聚体增加 7.3 倍,固结层抗压 5~15 MPa, 30 m/min 风速下风蚀量小于 0.3 g/m³·min。

③ 集成固沙、保水(蒸发降 40%、下渗降 50%)、保肥(氮淋失降 50%)与改土四位一体功能。

④ 工艺常温常压、无三废排放,契合绿色低碳循环发展理念。

新疆风化煤资源丰富,沙化土地面积广阔,本材料可直接用于荒漠化生态修复、沙化耕地改良及矿区复垦。其成本较市售产品降低 30%~50%,工艺简单,适合在资源产地分布式生产。此外,该技术响应国家大宗固废综合利用和荒漠化防治政策导向,在干旱及半干旱区具有广泛推广价值。

参考文献

- [1] 王立娟,周洪印,张乃明.腐植酸在污染土壤修复中的应用研究进展[J].腐植酸,2024(2): 1-8.
- [2] 文雅,李东旭.风化煤腐殖酸在土壤改良中的应用[J].科技情报开发与经济,2010,20(33): 148-150.
- [3] 中国农业科学院土壤肥料研究所.纳米级风化煤多功能肥料生物修复荒漠化土地技术[EB/OL].
<https://d.wanfangdata.com.cn/cstad/ChxDc3RhZE5ld1NvbHI5UzIwMjYwNTE0MTUyNzAxE-gowNzAwNjYwMDI0Ggh6ZjF0Mms3Ng%3D%3D>, 2013-09-01.
- [4] 丁艳萍,李璐,苏娜.风化煤中腐植酸对新疆盐碱土壤改良的机理和作用概述[J].中国标准化,2025: 59-61.
- [5] 刘彩燕.风化煤与菌根菌联用对盐碱土改良效果研究[D]:[硕士学位论文].太原:山西大学,2025.
- [6] 王春涛,马瑞成,高林,等.风化煤中有机质含量的测定方法研究[J].肥料与健康,2025,52(2): 59-63.
- [7] Li, Q., Lang, S., Ma, X., Liu, L., Zhao, Q., Cheng, C., et al. (2025) Effects of Organic Fertilizers on Apple Growth and Drought Resistance, Soil Properties and Microbial Diversity: A Comparison of Mature Organic Fertilizers and Weathered Coal Organic Fertilizers. *Plant and Soil*, **516**, 1329-1346. <https://doi.org/10.1007/s11104-025-07800-0>
- [8] 初莱,朱书全,李华民,黄占斌,邹力壮.腐殖酸-聚丙烯酸表面交联吸水性树脂的合成与性能[J].化工学报,2005(10): 2004-2008.
- [9] 余高,陈芬,谢英荷,等.有机无机复合保水材料对玉米苗期土壤水分及幼苗生长的影响[J].河南农业科学,2019,48(10): 23-29.