

DOI:10.13718/j.cnki.xsxb.2023.06.013

# 土壤改良剂 PAM 在生土改良中的应用及效果<sup>①</sup>

邵社刚<sup>1</sup>, 李婷<sup>2</sup>, 朱立安<sup>2</sup>, 曾清苹<sup>2</sup>, 倪栋<sup>1</sup>, 林梓<sup>2</sup>

- 交通运输部公路科学研究院 公路交通环境保护技术交通运输行业重点实验室, 北京 100088;
- 广东省科学院生态环境与土壤研究所/华南土壤污染控制与修复国家地方联合工程研究中心/  
广东省农业环境综合治理重点实验室, 广州 510650

**摘要:** 以狗牙根为供试作物, 通过盆栽试验, 研究不同聚丙烯酰胺(polyacrylamide, PAM)用量与蚯蚓粪、复合生物菌剂混施对新造生土作物生长和土壤养分的影响. 结果表明, 与 CK 处理相比, 不同用量 PAM 配合施肥处理的狗牙根地上部和根系生物量均显著增加, 与 CK 处理相比增幅为 36.1~48.7, 3.8~8.4 倍, 根冠比显著降低 83.1%~92.3%, 以 0.1%PAM 处理狗牙根生物量最高; PAM 处理显著增加了土壤全磷、碱解氮含量, 以 0.1%PAM 处理增幅最高, 分别为 12.3%和 119.0%; 土壤 >0.25 mm 水稳性团聚体含量显著增加 20.2%~70.6%, 以 0.3%PAM 处理为最大值. 综合而言, 以 PAM 施用量 0.1%对狗牙根生长的促生作用和土壤全磷、碱解氮含量的培肥作用最佳, 以 0.3%对土壤水稳性团聚体改良作用最好.

**关键词:** 土壤改良; 聚丙烯酰胺; 生土; 狗牙根; 土壤养分; 团聚体

中图分类号: S156

文献标志码: A

文章编号: 1000-5471(2023)06-0097-07

## Application and Effect of Soil Conditioner PAM in Improve Immature Soil

SHAO Shegang<sup>1</sup>, LI Ting<sup>2</sup>, ZHU Li'an<sup>2</sup>,  
ZENG Qingping<sup>2</sup>, NI Dong<sup>1</sup>, LIN Zi<sup>2</sup>

- Key Laboratory of Road Traffic and Environmental Protection Technology, Ministry of Transport, and Research Institute of Highway, Ministry of Transport, Beijing 100088, China;
- National-Regional Joint Engineering Research Center for Soil Pollution Control and Remediation in South China, Guangdong Key Laboratory of Integrated Agro-environmental Pollution Control and Management, Institute of Eco-environmental and Soil Sciences, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China

**Abstract:** Bermudagrass was used as the material and a pot experiment was conducted to explore the effects of polyacrylamide (PAM) mixed with the vermicompost and compound biological inoculants on plant growth and soil nutrients of immature soil. The results showed that compared with CK treatment, the

① 收稿日期: 2022-07-13

基金项目: 广东省重点领域研发计划(2020B020214001); 海南省自然科学基金(421RC658); 国家自然科学基金项目(41771232)和公路交通环境保护技术交通运输行业重点实验室项目资助.

作者简介: 邵社刚, 研究员, 主要从事交通生态环境保护研究.

通信作者: 朱立安, 副研究员.

shoot and root biomass of Bermudagrass were significantly increased under the PAM mixed with the vermicompost and compound biological inoculants treatments, which was 36.1~48.7 and 3.8~8.4 times of CK treatment, respectively, while the root-shoot ratio was about 83.1%—92.3% lower than the CK. The biomass of Bermudagrass reached the highest under the 0.1% PAM treatment. The contents of soil total phosphorus and alkali-hydrolyzed nitrogen were significantly increased under PAM treatments, AND the highest increasing rate was under 0.1% PAM treatment, which were 12.3% and 119.0%, respectively. The >0.25 mm water stable aggregates content was significantly increased by 20.2%~70.6% under PAM treatment, and reached the highest under the 0.3% CMC treatment. In conclusion, the 0.1% PAM treatment had the best effect on the growth promotion of bermudagrass and the increase of soil total phosphorus and alkali-hydrolyzable nitrogen content, while the best effect on the improvement of soil water-stable aggregate was 0.3%.

**Key words:** soil condition; polyacrylamide; immature soil; bermudagrass; soil nutrients

表土(熟土)资源是一种不可再生资源,随着持续的社会经济发展,人地矛盾突出,诸如工程建设破坏表土资源、占用耕地等问题日益加剧,致使生土裸露、耕地资源数量减少和质量下降<sup>[1-3]</sup>.在土地复垦过程中,土壤的快速熟化成为恢复土地生产力的关键<sup>[3]</sup>.生土即是深层土壤,未经过耕作及利用,具有较强母质属性,土壤物理、化学性质不良,缺少有益微生物、内生物小循环和抗生机制.而熟土是具备生物循环、抗生功能的土壤<sup>[4-5]</sup>.生土熟化是生土逐渐向熟土转化的过程,但其在自然条件下尤为漫长.许多工程迹地、高标准农田建设等表土资源缺乏,往往拆东墙补西墙,造成资源的二次破坏,因此有针对性地提出改良土壤的具体措施,从根本上实现生土快速熟化成为研究者的重要任务.

深耕、秸秆还田和施用土壤改良剂等措施是农业生产中促进生土熟化的常用方法,其中施用土壤改良剂具有增加土壤养分、优化土壤结构、提高微生物活性、改善土壤微环境等作用,是土壤农艺调控措施的重要手段<sup>[6-8]</sup>.其中,研究者通过模拟天然高分子物质的分子结构和性质并通过人工合成高分子聚合物作为土壤改良剂,结果表明,该类高分子材料在改善土壤物理结构,提高土壤稳定性方面均有良好的效果<sup>[9-10]</sup>.高分子材料如聚丙烯酰胺(polyacrylamide, PAM)因具有独特分子结构、丰富的活性基团和良好的黏结性,在土壤物理性质改良方面具有实质效果,受到广泛关注<sup>[10]</sup>.PAM是一种线型水溶性高分子聚合物,水溶性好,无毒,具有很强的黏聚作用<sup>[11]</sup>.研究表明,PAM可通过降低土壤容重,增加大团聚体含量,改善土壤结构,增强土壤保水、持水性能<sup>[11-13]</sup>,可吸附固定土壤养分,具有较好的保肥能力,减少土壤养分流失<sup>[14-15]</sup>.此外,PAM还可促进作物生长,提高作物产量<sup>[16]</sup>.但其施用效果因施用量、土壤和养分类型等不同而存在差异.研究表明,不同有机和无机土壤改良剂可通过改善土壤理化和生物学特性等方式增加土壤养分、提高土壤质量<sup>[17]</sup>.且目前施加PAM对生土土壤养分改良效果的研究尚缺乏报道,基于此,本研究开展了室内盆栽模拟试验,分析不同PAM施用量配施生物肥和微生物肥对生土土壤养分含量、水稳性团聚体结构和作物生长的影响,以期PAM在生土土壤改良中的应用提供参考依据.

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料

供试生土土壤基本理化性质为:pH值为6.39,全氮为0.03 g/kg,全磷为0.65 g/kg,全钾为2.00 g/kg,碱解氮为5.95 mg/kg,速效磷为5.68 mg/kg,速效钾为108.96 mg/kg.供试菌剂为复合菌剂,主要菌种为巨大芽孢杆菌和胶冻样类芽孢杆菌,有效活菌数超过1.0亿个/g,购于河北润沃生物技术有限公司.供试蚯蚓粪购于佛冈沃土农业科技有限公司,其养分含量为有机质61.7%,全氮为2.6%,全磷为3.5%,全钾为0.9%,总养分(N+P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>+K<sub>2</sub>O)为7%.供试聚丙烯酰胺PAM,阴离子型,相对分子质量15万左右,购于巩义市振宇净水材料厂.

## 1.2 试验设计

采用室内盆栽模拟试验, 风干过筛的土样充分混合后, 分别称取 2.0 kg, 置于口径 16.6 cm、高 14 cm 内衬塑料袋的塑料盆中。

设置不同施用量梯度 PAM 配施蚯蚓粪和复合生物菌剂, 蚯蚓粪与土样按质量比 5% 进行混合, 复合生物菌剂与土样按质量分数 0.1% 均匀层施于 6~8 cm 处。其中, 设 5 个 PAM 施用量梯度, 即 PAM 施量与土样按质量分数 0.1%, 0.2%, 0.3%, 0.4%, 0.5% 进行混合; 另设不加入改良剂 (CK) 和单施 5% 蚯蚓粪和 0.1% 复合生物菌剂 (CK1) 作为对照处理。共 7 个处理, 每处理重复 3 次, 共 21 盆。

于 2021 年 8 月 20 日播种, 将 1 g 狗牙根净种均匀撒播于表层土壤 1~2 cm 处, 作物生长期间每天进行必要的水分灌溉管理, 控制土壤含水量为田间持水量的 80%, 于 10 月 23 日收获。

## 1.3 测定指标与方法

作物生长 9 周后收获, 植株地上部和地下部分别收获, 洗净后 105 °C 杀青 30 min, 70 °C 烘干至恒质量, 测定并记录干质量。

植株根冠比计算方法: 根冠比 = 根系生物量 / 地上生物量

供试土壤有机质测定采用高温外热重铬酸钾氧化—容量法; 全氮测定采用硫酸消煮, 碱解扩散法; 全磷和全钾采用氢氧化钠熔融法, 分别用钼锑抗比色法和火焰光度计测定。土壤水稳性团聚体测定采用 Elliott<sup>[18]</sup> 土壤团聚体湿筛法测定。

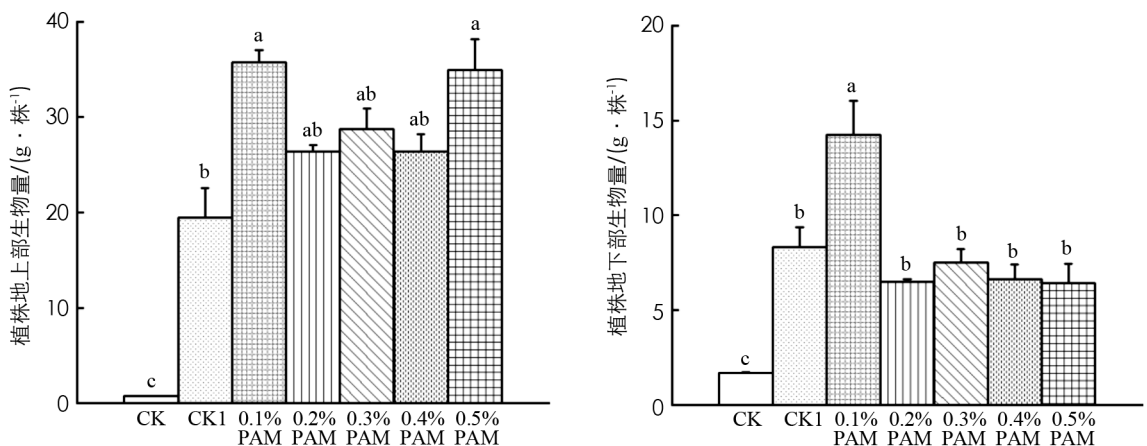
## 1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2010 对试验数据进行统计处理, 运用 SPSS 21.0 进行数据分析, 对所有数据进行正态性和方差齐性检验; 符合正态分布和方差齐次, 则对不同施用量处理梯度的差异进行单因素方差 (One-way ANOVA) 分析, 使用 Tukey 检验, 反之则使用韦尔奇方差 (Welch's ANOVA) 分析, 使用 Games-Howell 检验,  $p < 0.05$  表示差异有统计学意义; 使用 Origin 2021 绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同 PAM 施用量对植株生长的影响

CK1 和 PAM 配合施肥均可使狗牙根地上部和根系生物量显著增加 (图 1)。与 CK 处理相比, 在 CK1 处理下, 狗牙根地上部和根系生物量分别显著增加 26.7 和 4.9 倍 ( $p < 0.01$ ); 施用 PAM 配合施肥处理狗牙根地上部和根系生物量分别显著增加 36.1~48.7, 3.8~8.4 倍 ( $p < 0.05$ ), 说明施用 PAM 配合施肥可促进作物生长, 提高作物产量。但其促生作用随施用量的增加而存在差异, 各处理中以 0.1% PAM 对狗牙根生长的促生作用最佳。



注: 图中小写字母不同表示不同处理间差异有统计学意义 ( $p < 0.05$ )。

图 1 不同 PAM 施用量对植株生长的影响

## 2.2 不同 PAM 施用量对植株根冠比的影响

CK1 和 PAM 配合施肥处理均可使狗牙根根冠比显著降低( $p < 0.001$ )(图 2), 但两者差异无统计学意义. 与 CK 相比, CK1 可使狗牙根根冠比显著降低 81.7%, PAM 配合施肥处理可使狗牙根根冠比均显著降低 83.1%~92.3%, 其中 0.5%PAM 可使狗牙根根冠比降低 92.3%.

## 2.3 不同 PAM 施用量对土壤养分的影响

CK1 处理显著降低了土壤速效钾含量, 但对其他土壤养分含量无显著影响. PAM 配合施肥处理显著增加了生土土壤全磷、碱解氮含量( $p < 0.01$ ), 显著降低了土壤速效钾含量(表 1). 随着 PAM 施用量的增加, 土壤有机质、全氮、全磷、全钾和速效钾含量总体表现为下降趋势, 在 0.1%PAM 处理下为最大值, 而土壤碱解氮和速效磷含量总体表现为增加趋势, 其最大值分别出现在 0.4%PAM 和 0.5%PAM 处理下. 与 CK 处理相比, 0.1%PAM 处理下土壤全磷、碱解氮含量分别显著增加 12.3%和 119.0%( $p < 0.01$ ).

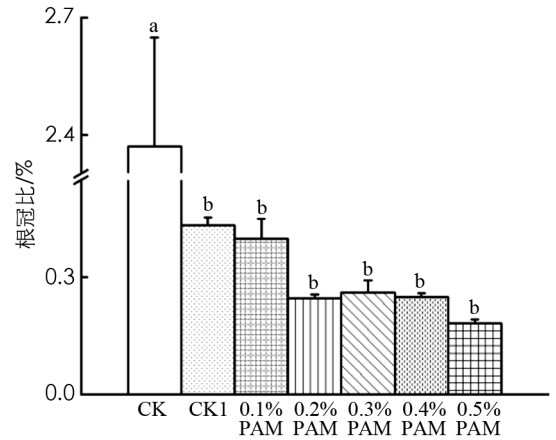
表 1 不同 PAM 施用量对土壤养分的影响

处理	有机质 g/kg	全氮 g/kg	全磷 g/kg	全钾 g/kg	碱解氮 mg/kg	速效磷 mg/kg	速效钾 mg/kg
CK	3.36±0.18a	0.059±0.01a	0.83±0.00b	2.15±0.13a	7.70±2.57d	5.23±1.73ab	90.61±4.24a
CK1	3.75±0.22a	0.057±0.01a	0.84±0.02b	2.35±0.08a	7.35±2.86d	3.08±0.49b	53.86±0.71b
0.1%PAM	4.26±0.13a	0.064±0.01a	0.95±0.01a	2.22±0.18a	16.10±1.01c	6.13±0.31ab	23.85±0.35c
0.2%PAM	3.78±0.12a	0.060±0.02a	0.90±0.01ab	1.74±0.38a	14.35±0.00c	8.48±0.76a	16.50±0.35c
0.3%PAM	3.55±0.22a	0.052±0.01a	0.90±0.02ab	2.42±0.07a	19.48±1.30bc	6.87±0.60ab	15.89±0.71c
0.4%PAM	3.42±0.29a	0.048±0.01a	0.89±0.03ab	2.22±0.16a	34.65±1.62a	5.85±0.25ab	19.56±0.71c
0.5%PAM	3.68±0.16a	0.062±0.01a	0.89±0.01ab	2.09±0.19a	25.90±0.61b	8.61±0.18a	16.70±0.41c

注: 表中同列小写字母不同表示不同处理间差异有统计学意义( $p < 0.05$ ).

## 2.4 不同 PAM 施用量对土壤水稳性团聚体结构的影响

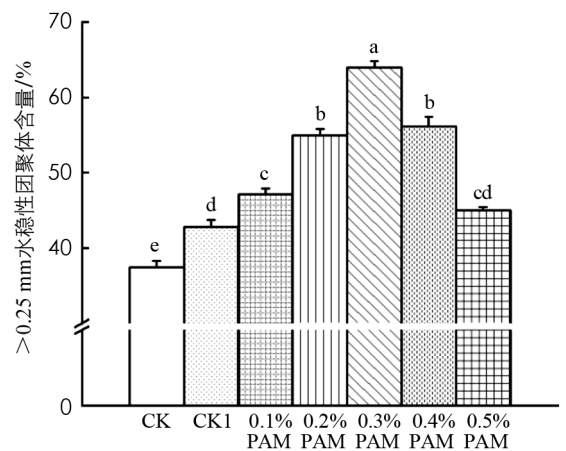
CK1 和 PAM 配合施肥处理均对生土土壤  $>0.25$  mm 水稳性团聚体含量有显著影响( $p < 0.001$ )(图 3). 与 CK 处理相比, CK1 处理显著增加了生土土壤  $>0.25$  mm 水稳性团聚体含量( $p < 0.05$ ), 增幅为 14.2%; 在 PAM 配合施肥处理下, 生土土壤  $>0.25$  mm 水稳性团聚体含量显著增加 20.2%~70.6%( $p < 0.001$ ). 其中, 随着 PAM 施用量的增加, PAM 对土壤水稳性团聚体形成的促进作用呈先增后减趋势, 在 0.3%PAM 处理下,  $>0.25$  mm 水稳性团聚体含量为最大值, 随后其含量显著降低, 说明 PAM 施用量超过一定限度对土壤水稳性团聚体形成的促进作用减弱, 在本试验条件下, 以 0.3%PAM 对土壤  $>0.25$  mm 水稳性团聚体形成的促进作用最佳.



注: 图中小写字母不同表示不同处理间差异有统计学意义( $p < 0.05$ ).

图 2 不同 PAM 施用量对植株根冠比的影响

与 CK 处理相比, 0.1%PAM 处理下土壤全磷、碱解氮含量分别显著增加 12.3%和 119.0%( $p < 0.01$ ).



注: 图中小写字母不同表示不同处理间差异有统计学意义( $p < 0.05$ ).

图 3 不同 PAM 施用量对土壤  $>0.25$  mm 水稳性团聚体的影响



由表 2 可知, CK1 和 PAM 配合施肥处理均显著影响生土土壤各粒级团聚体含量( $p < 0.05$ ), 主要是使 2.00~0.25 mm 水稳性团聚体含量增加, <0.25 mm 水稳性团聚体含量降低. 0.3% PAM 处理下, 土壤 1.00~2.00, 0.50~1.00 和 0.25~0.50 mm 水稳性团聚体含量为最大值, 较 CK 处理分别显著增加 472.6%, 33.7% 和 52.4% ( $p < 0.001$ ); <0.25 mm 水稳性团聚体含量为最小值, 较 CK 处理显著降低 42.3% ( $p < 0.001$ ). 当 PAM 施用量超过 0.3% 时, 1.00~2.00, 0.50~1.00 和 0.25~0.50 mm 水稳性团聚体含量呈下降趋势, <0.25 mm 水稳性团聚体含量呈上升趋势, 对生土土壤水稳性团聚体含量改良作用降低.

表 2 不同 PAM 施用量对土壤各粒级团聚体含量的影响

粒径 /mm	各级团聚体含量/%						
	CK	CK1	0.1%PAM	0.2%PAM	0.3%PAM	0.4%PAM	0.5%PAM
>5.00	0.00±0.00e	0.00±0.00e	0.07±0.07de	0.70±0.06bc	1.13±0.15a	0.43±0.09cd	0.87±0.09ab
3.00~5.00	0.00±0.00c	1.07±0.09b	0.63±0.07bc	0.87±0.15b	0.70±0.17bc	3.20±0.35a	1.30±0.15b
2.00~3.00	0.70±0.17ab	0.13±0.09b	0.80±0.21ab	0.87±0.22ab	0.83±0.15ab	1.40±0.29a	0.77±0.15ab
1.00~2.00	2.07±0.24d	4.77±0.43cd	6.73±0.61bc	8.60±0.21b	11.83±1.16a	9.37±0.64ab	7.03±0.50bc
0.50~1.00	18.40±0.38c	19.27±0.49bc	20.10±0.78bc	21.33±0.62b	24.60±0.56a	20.70±0.35bc	18.80±0.79bc
0.25~0.50	16.30±0.67d	17.53±1.39d	18.83±0.84cd	22.60±0.20ab	24.83±0.15a	21.03±0.24bc	16.27±0.64d
<0.25	62.53±0.81a	57.23±0.95b	52.80±0.69c	45.03±0.84d	36.07±0.90e	43.87±1.30d	54.97±0.43bc

注: 表中同列小写字母不同表示不同处理间差异有统计学意义( $p < 0.05$ ).

### 3 讨论

施用 PAM 可促进作物生长, 这已在较多作物中得以证实. 许景钢等<sup>[19]</sup>的研究表明, 常规施肥配施 PAM 可使大豆根长增加, 大豆增产 3.1%~9.4%; 廖丽佳等<sup>[20]</sup>的研究表明, 施用 1% PAM 浸种后栽种, 马铃薯产量和商品薯率较对照分别提高 24.8% 和 63.3%; 刘小三等<sup>[21]</sup>的研究表明, 施用 PAM 能不同程度地提升糯玉米鲜棒产量和地上部鲜生物量, 其平均增幅分别为 8.5% 和 12.0%; 丁宇等<sup>[22]</sup>的研究表明, 施用 PAM 有利于平邑甜茶幼苗的生长, 植株的株高和总鲜样质量均显著高于对照. 在本研究中, 添加 PAM 的处理均促进了狗牙根地上部生物量的增加, 增幅为 36.1~48.7 倍, 综合植株地上、地下部生物量均表现为 0.1% PAM 促生效果最好, 与文献<sup>[19-22]</sup>的研究具有一致性. PAM 对狗牙根生长存在促生作用, 究其原因, 首先, PAM 作为一种保水剂, 具有保肥效果, 对养分释放具有缓释作用, 可满足狗牙根生长过程中对养分的需求<sup>[22-24]</sup>; 其次, PAM 可将 <1 mm 的水稳性团聚体聚合为更大粒径的水稳性团聚体, 使 >1 mm 的水稳性团聚体含量增加, 从而有效改善土壤物理性状和水分运移, 满足狗牙根生长对水、气的要求, 为其生长创造适宜的生长环境<sup>[12-13, 21]</sup>; 此外, PAM 能提高可提取态 P 含量和土壤中微量元素的有效性, 这些物质通过范德华力与 PAM 结合, 参与根际反应, 最终被植株吸收利用<sup>[25-26]</sup>, 从而促进其生长.

土壤养分是土壤综合肥力评价的根本, 是土壤肥力的核心, 对维持生态系统的可持续性和生产力发挥着关键性作用. 而土壤理化性质与土壤养分状况息息相关, 可体现土壤质量, 其中, 氮、磷等是影响生态系统结构和功能的主要因素之一, 其含量的高低对植物的生长和生产力水平起着十分重要的影响作用<sup>[27-28]</sup>. 刘慧军等<sup>[29]</sup>的研究表明, PAM 施入燕麦田土壤, 可提高土壤有机质、碱解氮、速效磷和速效钾的含量; 刘海林等<sup>[30]</sup>的研究表明, PAM 与肥料混合施用可使胶园肥穴 0~20 cm 土层中硝态氮、速效钾含量显著增加 138.6% 和 117.4%, 铵态氮含量增加 32.7%; 王峻<sup>[26]</sup>的研究表明, PAM 施于河道底泥可不同程度地提高底泥硝态氮、铵态氮和碱解氮的含量, 且 1 350 mg/kg PAM 处理可显著提高底泥速效钾含量. 在本研究中, 施用 PAM 配合施肥处理显著增加了生土土壤全磷、碱解氮含量, 与文献<sup>[26, 29-30]</sup>的研究具有相似性. 这可归因于 PAM 对土壤结构的改善, 使土壤具有良好的气相、液相、固相, 进而改善土壤质量, 提高土壤养分<sup>[29]</sup>. 此外, 在本研究中, 施用 PAM 配合施肥处理下生土土壤速效磷含量无显著变化, 而速效钾含

量显著降低,表明植株对土壤养分的吸收利用程度存在差异。

适宜的固、液、气三相组成良好的土壤结构,而土壤团聚体作为土壤结构的基本单位,其数量和质量是衡量土壤结构性好坏的重要指标<sup>[31]</sup>。土壤水稳性团聚体指由性质稳定的胶体胶结团聚而形成的粒径 $>0.25\text{mm}$ 的土壤团粒,具有抵抗水破坏能力,在水中浸泡、冲洗而不易崩解的特点<sup>[12]</sup>。对土壤养分循环、调节水肥气热和维持作物生长等具有重要作用<sup>[26]</sup>。Lentz 等<sup>[32]</sup>在黏壤土中施用 PAM 后发现土壤水稳性团聚体的含量比未施用 PAM 土壤显著增加 3~4 倍;曹丽花等<sup>[12]</sup>将 PAM 施于黑垆土、黄绵土、风沙土发现,随着 PAM 施用量的增加大于  $0.25\text{mm}$  水稳性团粒含量明显增加;王峻<sup>[26]</sup>施用 PAM 于河道底泥,结果表明,添加 PAM 处理的水稳团聚体含量分别显著提高了  $14.0\%\sim 24.8\%$ 。在本研究中,施用 PAM 处理的生土土壤 $>0.25\text{mm}$  水稳性团聚体含量显著增加  $20.2\%\sim 70.6\%$  ( $p<0.001$ ),与文献<sup>[12,26,32]</sup>的研究具有相似性。这可归因于 PAM 对土壤 $<0.25\text{mm}$  颗粒的吸附作用,使其聚合为粒径更大的水稳性团聚体<sup>[12,26]</sup>。

## 4 结论

在本试验条件下,不同 PAM 用量与蚯蚓粪、复合菌剂混合施用对狗牙根生长及生土土壤养分、水稳性团聚体结构的影响显著,与 CK 相比,均显著促进了狗牙根的生长,降低了根冠比,增加了生土土壤全磷、碱解氮含量,提高 $>0.25\text{mm}$  水稳性团聚体含量,其中以 PAM 施用量  $0.1\%$  对狗牙根生长的促生作用和生土土壤全磷、碱解氮含量的培肥作用最佳,以  $0.3\%$  对生土土壤水稳性团聚体含量改良作用最好。因此应用农艺措施改良生土土壤,应依据具体改良目标,合理调整 PAM 用量。

## 参考文献:

- [1] 梁鑫源,金晓斌,孙瑞,等.多情景粮食安全底线约束下的中国耕地保护弹性空间[J].地理学报,2022,77(3):697-713.
- [2] 何新莹,聂艳,王朴,等.基于改进灰靶模型的耕地质量评价方法与实证[J].土壤学报,2023(待发表).
- [3] 黄懿梅,安韶山,曲东,等.黄土丘陵区植被恢复过程中土壤酶活性的响应与演变[J].水土保持学报,2007,21(1):152-155.
- [4] 魏静,武丹.滤泥在生土熟化和土壤改良方面的应用[J].乡村科技,2019(33):114-115.
- [5] 魏静,胡雅.果渣在生土熟化和盐碱土改良方面的应用探讨[J].南方农业,2019,13(23):181-182.
- [6] 李文广,苏志峰,李学浩,等.施肥和降水对生土熟化的影响[J].激光生物学报,2019,28(2):144-154.
- [7] 崔丙健,崔二苹,刘春成,等.土壤改良剂对再生水滴灌根际土壤菌群多样性及病原菌和抗生素抗性基因丰度的影响[J].环境科学,2022,43(10):4765-4778.
- [8] 刘娇娴,崔骏,刘洪宝,等.土壤改良剂改良酸化土壤的研究进展[J].环境工程技术学报,2022,12(1):173-184.
- [9] 黄占斌,孙朋成,钟建,等.高分子保水剂在土壤水肥保持和污染治理中的应用进展[J].农业工程学报,2016,32(1):125-131.
- [10] 聂天宏,杨兴,李永春,等.高分子材料在土壤物理性质改良方面的研究进展[J].土壤通报,2020,51(6):1504-1512.
- [11] 韩凤朋,郑纪勇,李占斌,等.PAM对土壤物理性状以及水分分布的影响[J].农业工程学报,2010,26(4):70-74.
- [12] 曹丽花,赵世伟,梁向锋,等.PAM对黄土高原主要土壤类型水稳性团聚体的改良效果及机理研究[J].农业工程学报,2008,24(1):45-49.
- [13] 吕春娟,毕如田,陈卫国,等.土壤结构调理剂 PAM 对复垦铁尾矿砂物理性状的影响[J].农业工程学报,2017,33(6):240-245.
- [14] 王辉,王全九,邵明安.PAM对黄土坡地水分养分迁移特性影响的室内模拟试验[J].农业工程学报,2008,24(6):85-88.
- [15] 张艳艳,唐泽军.PAM调控土壤养分元素迁移与流失试验研究[J].水土保持通报,2017,37(4):33-39,46.
- [16] 单德鑫,李淑芹,张丹,等.聚丙烯酰胺对土壤性质及玉米生育和产量影响[J].东北农业大学学报,2008,39(8):

- 43-46.
- [17] 刘著文,杨龙飞,刘茂林,等.不同土壤改良剂对土壤养分及烤烟内在品质的影响[J].中国农业科技导报,2022,24(11):190-198.
- [18] ELLIOTT E T. Aggregate Structure and Carbon, Nitrogen, and Phosphorus in Native and Cultivated Soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1986, 50(3): 627-633.
- [19] 许景钢,单德鑫,李淑芹,等.聚丙烯酰胺对大豆生育及产量的影响[J].大豆通报,2007(6):21-24.
- [20] 廖佳丽,徐福利,赵世伟.不同保水剂对宁南山区马铃薯生长发育和产量的影响[J].西北农业学报,2009,18(1):238-242.
- [21] 刘小三,叶川,肖国滨,等.聚丙烯酰胺型保水剂对土壤水分及秋糯玉米生长的效应[J].中国农学通报,2012,28(30):22-27.
- [22] 丁宁,陈倩,徐海港,等.聚丙烯酰胺用量对盆栽平邑甜茶幼苗生长及<sup>15</sup>N-尿素吸收、利用和损失的影响[J].水土保持学报,2014,28(5):297-301.
- [23] 刘世亮,寇太记,介晓磊,等.保水剂对玉米生长和土壤养分转化供应的影响研究[J].河南农业大学学报,2005,39(2):146-150.
- [24] 李永胜,杜建军,谢勇,等.聚丙烯酰胺型保水剂对基质持水性和菜心生长的影响[J].中国农学通报,2005,21(10):402-404,424.
- [25] LENTZ R D, SOJKA R E. Long-Term Polyacrylamide Formulation Effects on Soil Erosion, Water Infiltration, and Yields of Furrow - Irrigated Crops [J]. Agronomy Journal, 2009, 101(2): 305-314.
- [26] 王峻.聚丙烯酰胺(PAM)对河道底泥性质及白菜生长和品质的影响[D].杭州:浙江大学,2020.
- [27] 侯建伟,邢存芳,邓晓梅,等.花椒园土壤养分质量比特征对秸秆生物质炭类型与施用量的响应[J].西南师范大学学报(自然科学版),2021,46(2):80-85.
- [28] 房雪,杨涵童,邢金月,等.延边州农田栽参后地土壤肥力评价[J].西南大学学报(自然科学版),2022,44(2):28-38.
- [29] 刘慧军,刘景辉,于健,等.聚丙烯酸盐类土壤改良剂对燕麦土壤微生物量氮及酶活性的影响[J].中国土壤与肥料,2013(1):25-31.
- [30] 刘海林,雷菲,华元刚,等.聚丙烯酰胺对胶园肥穴养分垂直分布的影响[J].热带作物学报,2017,38(12):2221-2225.
- [31] 高阿祥,周鑫斌,徐宸,等.土壤调理剂对新整理烟田土壤结构改良效应研究[J].西南师范大学学报(自然科学版),2016,41(7):171-176.
- [32] LENTZ R D, SOJKA R E. Field Results Using Polyacrylamide to Manage Furrow Erosion and Infiltration [J]. Soil Science, 1994, 158(4): 274-282.

责任编辑 潘春燕