

陈方鑫, 卢少勇, 冯传平, 等. 农业秸秆复合 PAM 对湖滨带土壤改良效果的研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(4): 711-718.

CHEN Fang-xin, LU Shao-yong, FENG Chuan-ping, et al. Improvements of soil in lakeside zones using combined crop straw and PAM[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(4): 711-718.

农业秸秆复合 PAM 对湖滨带土壤改良效果的研究

陈方鑫^{1,2}, 卢少勇^{1*}, 冯传平²

(1. 中国环境科学研究院 环境基准与风险评估国家重点实验室 国家环境保护湖泊污染控制重点实验室 湖泊环境研究中心 国家环境保护洞庭湖科学观测研究站 湖泊工程技术中心, 北京 100012; 2. 中国地质大学水资源与环境学院, 北京 100083)

摘要: 为改善湖滨带土壤结构、肥力及水土保持状况, 以太湖流域贡湖湾湿地湖滨带基底为对象, 将农业秸秆和聚丙烯酰胺(PAM)按一定比例配制作作为改良材料, 研究改良材料对湖滨带土壤物理结构、团聚体组成及土壤养分的影响, 以期在探讨湖滨带土壤修复需求的同时, 为农业秸秆在生态修复中的再生利用提供科技支撑, 为农业秸秆处置提供新的途径。农业秸秆复合 PAM 材料不仅可以改善土壤养分, 保证水生植物生长, 同时能够改良土壤结构, 防治水土流失。改良效果最好的配比为 $3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 秸秆与 $1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ PAM, 具体表现为: 细粒物质含量提高, 砂粒含量降低, 容重减小 14.92%, 大团聚体含量提高 42.81%, 土壤由砂土和壤土向粘土转变; 有机质、碱解氮、速效磷、速效钾含量分别提高 42.70%、189.60%、31.80% 和 50.32%。研究发现, 有机质和大团聚体状况决定湖滨带土壤稳定性好坏。秸秆提供的有机质降解为腐殖质, 腐殖质有助于微团聚体粘聚为中粒径团聚体, 而 PAM 的吸附架桥作用可将中粒径团聚体转化为大团聚体, 从而显著改善土壤持土保肥能力。

关键词: 秸秆; 聚丙烯酰胺(PAM); 湖滨带; 土壤团聚体; 土壤结构; 修复过程

中图分类号: X712 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2016)04-0711-08 doi:10.11654/jaes.2016.04.015

Improvements of soil in lakeside zones using combined crop straw and PAM

CHEN Fang-xin^{1,2}, LU Shao-yong^{1*}, FENG Chuan-ping²

(1. Engineering and Technology Centre of Lake, State Environmental Protection Scientific Observation and Research Station for Lake Dongtinghu (SEPSORS), Research Centre of Lake Environment, State Environmental Protection Key Laboratory for Lake Pollution Control, State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. China University of Geosciences, Institute of water resources and the environment, Beijing 100083, China)

Abstract: An indoor experiment was conducted to examine the improvements of soil in lakeside zone using combined crop straw and polyacrylamide (PAM). Soil nutrients and soil aggregate stability and their correlation under different ratios of straw and PAM were investigated. Applying combined straw and PAM not only increased soil nutrients, promoting plant growth, but also improved soil structure, controlling soil erosion. The best combination was $3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ straw- $1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ PAM, which increased the content of large aggregates, organic matter, available N, and available P by 42.81%, 42.70%, 189.60%, 31.80% and 50.32%, respectively. Organic matter and large aggregates were the factors determining the stability of lakeside zone soil. The organic matter provided by straw transformed into humus, which helped form medium-aggregates by bonding micro-aggregates together. Visible PAM polymerized medium-aggregates ($< 2 \text{ mm}$) into $> 2 \text{ mm}$ macro-aggregates by bridge and adsorption. The soil porosity and water-holding capacity were thus improved. The findings would shed light on utilization of agricultural residues in the ecological restoration.

Keywords: straw; polyacrylamide (PAM); lakeside zones; soil aggregates; soil structure; repair process

收稿日期: 2015-11-15

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务专项(2012-YSKY-14); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2013ZX07101-014, 2012ZX07105-002); 国家自然科学基金项目(41373027)

作者简介: 陈方鑫(1989—), 男, 博士研究生, 从事生态修复工程研究。E-mail: chenfx@cugb.edu.cn

* 通信作者: 卢少勇 E-mail: lushy2000@163.com

在湖滨带生态系统中,土壤既是物理基础,又是物质和能量流通的媒介,是湖泊生态系统中生命的重要依托^[1]。在湖滨带土壤修复中,土壤环境的稳定性直接影响湿地植被类型与存活、生物多样性和水土流失状况,土壤缺乏稳定性可能导致湿地生态功能退化。正是这些特征决定了湖滨带土壤修复不同于农业土壤修复的特殊性。农业土壤注重土壤肥力的提高,从而提高作物产量^[2]。湖滨带土壤修复在提高养分、保证水生植物稳定生长的同时^[3],还需要改善土壤结构,以解决水土流失问题^[4-6]。目前,施加结构改良剂等是改善农业土壤结构、提高土壤养分的有效途径和措施^[7-10],而关于湖滨带土壤改良剂的研究几乎没有。通过大量文献调查,发现秸秆与聚丙烯酰胺具有修复湖滨带土壤的可能性。

我国红壤区秸秆资源丰富,秸秆特有的多糖与蛋白质连接纤维素结构,即可提供有效养分,同时纤维素能提供吸附性能^[11-12]。秸秆覆盖是改善土壤结构、提高土壤肥力的有效保育措施^[13-15]。覆盖在土壤表面的秸秆分解缓慢,被水淋失的养分较少,秸秆分解形成的有机物缓慢进入土壤,其中一部分供作物吸收,大部分形成土壤有机质^[16]。赵聚宝等^[17]的研究表明,秸秆覆盖后,土壤有机质提高了 3.9%~10.4%,土壤表层速效性养分也明显提高,0~55 cm 土层内土壤钾含量增加 385.4%。王春红等^[18]研究了秸秆覆盖对坡面径流及土壤流失的影响,结果表明秸秆覆盖可减少泥沙含量、控制土壤侵蚀(可减少 50%~80%),其效果随覆盖厚度增加而增强。聚丙烯酰胺(PAM)作为一种土壤结构改良剂,不仅可促进土壤团聚体形成、改善土壤结构,还可减少地表径流和养分流失^[19]。龙明杰等^[20]的研究结果表明,当 PAM 施用浓度为 0.025%~0.050%时,土壤水稳性团粒含量比对照增加了 29.74%~39.78%。员学锋等^[12]认为,当 PAM 用量为 0.25~1.25 g·m⁻²时,>0.25 mm 水稳性团粒含量平均增加 30.2%,能疏松土壤、减缓土壤水分蒸发、调节土壤水肥力状况。PAM 可通过创建人工团聚体结构和提高土壤团聚体结构的水稳性,改善土壤团聚体对养分元素的吸附作用,抑制养分元素随水的流失,提高肥料利用率^[21]。

目前,利用预处理后的秸秆与 PAM 按一定配比

混合后组成的复合改良材料来改良湖滨带土壤此类特殊环境基底的研究几乎没有。本文以太湖流域中贡湖湾湿地湖滨带基底为对象,将农业秸秆和聚丙烯酰胺(PAM)按一定比例配制作改良材料,研究改良材料对湖滨带土壤物理结构、团聚体组成、土壤养分的影响,对其改良土壤过程的机理进行研究,同时,为我国农业秸秆的再生利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料与土壤

秸秆:玉米、水稻、小麦秸秆,用植物粉碎机粉碎过 100 目筛。

聚丙烯酰胺(PAM):供试 PAM 由苏州晟宇公司生产,阴离子型,分子量为 1200 万,水解度为 30%(考虑阴离子聚丙烯酰胺比其他类型聚丙烯酰胺价格便宜,分子量一般比阳离子型更大,且阴离子通过阳离子疏松的吸附易跨越不同粘粒而形成网格结构)。

研究区域位于无锡贡湖退渔还湖湿地修复区试验站,年均气温 16.5 ℃,年均降雨量 1564 mm。2012 年改造了区域内原有鱼塘,建造成适宜植物种植、动物生存的湖滨带环境。该地区地带性土壤主要为红壤,成土母质以第四纪红色粘土为主。供试土壤(2013 年基底为修复时采集土样)表层的部分理化性质见表 1。

1.2 试验设计

本研究采用室内土培试验,用于探究不同配比改良剂对基底肥力及其结构的影响。选取修复区土壤为供试土壤,其基本理化性质见表 1。按研究区土壤容重装土于土培槽内,设置裸地(LD)、秸秆 3 g·kg⁻¹(D1)、秸秆 1.5 g·kg⁻¹(D2)、PAM 1 g·kg⁻¹(E1)、PAM 0.5 g·kg⁻¹(E2)、秸秆 3 g·kg⁻¹+PAM 1 g·kg⁻¹(D1E1)、秸秆 3 g·kg⁻¹+PAM 0.5 g·kg⁻¹(D1E2)、秸秆 1.5 g·kg⁻¹+PAM 1 g·kg⁻¹(D2E1)、秸秆 1.5 g·kg⁻¹+PAM 0.5 g·kg⁻¹(D2E2)共 9 种处理进行室内培养,培养期保持土壤湿度为田间持水量的 75%。培养 6 个月后,测定土壤养分及秸秆稳定性变化。

1.3 样品采集和处理

1.3.1 土样采集

室内土培试验用环刀采集混匀后装袋并标记。低

表 1 供试土壤表层的基本理化性质
Table 1 Basic physical and chemical properties of tested soil

质地	pH	有机质/g·kg ⁻¹	TN/g·kg ⁻¹	TP/g·kg ⁻¹	碱解氮/mg·kg ⁻¹	速效磷/mg·kg ⁻¹	总孔隙度/%	容重/g·cm ⁻³
红壤	5.18	9.89	0.50	0.26	16.49	32.48	40.4	1.447

温保存送回实验室,放于阴凉干燥处风干,风干后拣去石块、植物残根等杂物。先用四分法取每份土壤总量的一半、装袋备测土壤团聚体组成、土壤容重和粒径等。剩下的研磨过 100 目筛,一半装袋备测土壤 pH 值和有机质,另一半继续研磨并过 200 目筛,装袋待测土壤 TP 和全氮等。土样处理后做好标记,所有样品采集后需尽快完成测定。

1.3.2 测定方法

土壤性态测定均按常规方法^[23]:土壤 pH 值用 pH 计(土:水=1:5);团聚体稳定性用干、湿筛法;容重和孔隙结构用环刀法;土壤粒径分布用粒度仪;有机质用重铬酸钾外加热法;TN 用硫酸-高氯酸消煮,全自动凯氏定氮仪;TP 用硫酸-高氯酸消煮,分光光度计比色法;全钾用 NaOH 碱熔法提取,火焰光度计法;碱解氮用碱解扩散法;速效磷用 NaHCO_3 浸提,分光光度计比色法;速效钾用醋酸铵浸提,火焰光度计法。本文用 Origin 6.0 和 SPSS 16.0 软件进行标准差(SD)和相关性(Pearson)分析。

2 结果与分析

2.1 不同配比用量下土壤物理结构变化

室内土培试验表明,秸秆有助于减少砾石含量,增加粗砂粒含量,促使土壤结构由砂土向壤土改变,但这种改善程度有限,表现为其对细沙粒和粘粒的影响不大。PAM 能有效减少石砾和粗沙粒含量,增加细沙粒和粘粒含量。根据国际土壤质地三角形分类可得,秸秆联合 PAM 改良材料有助于土壤由砂土、壤土向粘土转变,其中 D1E1 处理组效果最佳(表 2)。对土壤结构的修复作用,改良材料中 PAM 组分改善的效果最明显^[25]。但需注意,秸秆有助于土壤容重减少,D1、D2 处理的土壤容重下降了 14.92%(图 1),表明有机质积累能对容重降低起显著影响^[26],本文 3.2 讨论部分中有机质与容重呈极显著负相关($R^2=-0.935$, $P<0.01$)也验证了此推测。施加土壤改良剂后,土壤容重下降,说明土壤变疏松,土壤孔隙增多。疏松土壤利于土壤中水、气、热等的交换及微生物活动,利于土壤养分对植物的供应,提高了土壤肥力。

2.2 不同配比用量下土壤团聚体组成

表 3 显示室内土培试验不同粒径干筛团聚体含量差异明显。 >4 mm 粒径团聚体含量为 29.19%~49.31%,0.5~0.25 mm 和 <0.25 mm 团聚体含量分别为 6.73%~9.97%、5.72%~12.90%。不同 PAM 和秸秆用量对干筛团聚体组成有显著影响。D1、D2 处理的 2~1

表 2 室内土培试验土壤粒度变化

Table 2 Changes of soil particle size under different treatments in indoor incubation experiment

修复类型	土壤粒径范围/%				土壤类别
	石砾	粗沙粒	细沙粒	粘粒	
LD	44.71±1.57	43.04±1.57	10.89±0.36	1.36±0.22	砂土
D1	42.94±2.56	42.31±2.21	12.44±0.64	2.35±0.35	壤土
D2	40.22±1.23	44.19±2.37	13.87±0.62	2.16±0.32	壤土
E1	31.73±0.94	40.68±1.87	24.18±0.86	4.22±0.18	粉质壤土
E2	34.36±0.64	40.28±0.98	22.03±1.02	3.21±0.21	粉质壤土
D1E1	26.64±0.45	35.32±0.55	30.75±0.93	6.98±0.33	粘土
D1E2	31.46±0.77	38.74±0.61	25.03±0.74	6.74±0.19	粘土
D2E1	30.53±1.02	40.44±1.25	24.53±0.77	6.54±0.37	粘土
D2E2	32.46±0.68	40.74±1.19	23.03±0.88	5.74±0.26	粘土

注:LD-裸地;D1-秸秆 $3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;D2-秸秆 $1.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;E1-PAM $1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;E2-PAM $0.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;D1E1-秸秆 $3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ +PAM $1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;D1E2-秸秆 $3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ +PAM $0.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;D2E1-秸秆 $1.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ +PAM $1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;D2E2-秸秆 $1.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ +PAM $0.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。下同。

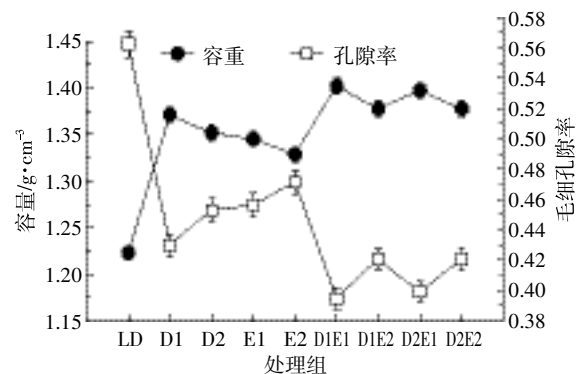


图 1 室内土培试验土壤容重与毛细孔隙率变化

Figure 1 Soil bulk density and porosity under different treatments in indoor incubation experiment

mm、1~0.5 mm 粒径团聚体含量有明显提高,且秸秆施用量越高,中粒径团聚体含量越高;E1、E2 处理的 >4 mm 粒径团聚体含量分别比 LD 提高了 41.75%、17.73%,其他粒径团聚体含量与 LD 无显著差异;同时,D1E1、D1E2 处理 >4 mm 粒径团聚体含量显著高于 D1 处理,D2E1、D2E2 处理 >4 mm 粒径团聚体含量显著高于 D2 处理。可见,PAM 可显著提高 >4 mm 干筛团聚体含量,且随 PAM 用量增加而增加,其中 D1E1 处理组对大团聚体含量 >2 mm 提高效果最为明显,达到 42.81%。

表 4 反映出室内土培试验各处理土壤湿筛后 <0.25 mm 粒径团聚体含量最多(约 60%)。对不同粒级水稳性团聚体来说,因秸秆和 PAM 用量不同,各处理同一

粒级团聚体含量不同(见表4)。LD、D1、D2处理间无显著差异,D1E1、D2E1处理间也无显著差异,而E1、E2处理的>2 mm的团聚体含量显著高于LD,<0.25 mm团聚体含量分别比LD降低了35.39%、15.42%。E1、E2处理>4 mm团聚体含量的变化趋势表现为E1>E2。可见,随PAM用量提高,>4 mm水稳性团聚体含量显著增加。稻草、PAM混施处理(D1E1、D1E2、D2E1、D2E2)<0.25 mm团聚体含量为50.52%,平均54.29%,比LD降低了21.29%。施加PAM处理的<0.25 mm的微团聚体含量显著低于不施加PAM处理的,而>2 mm的水稳性团聚体含量显著高于不施加PAM处理的,说明施加PAM可将<0.25 mm的微团聚体逐渐聚合成>2 mm的水稳性团聚体。可见室内土培试验中,单独施用秸秆对土壤水稳性团聚体含量无显著影响;PAM可显著提高>2 mm水稳性团聚体含量,且>4 mm水稳性团聚体含量随PAM用量提高显著增加^[31]。

2.3 不同配比用量下土壤养分的变化

在室内试验中,图2反映出不同秸秆用量、PAM施量及其复合使用下土壤养分变化。图2a表明不同处理下有机质含量为9.64~14.21 g·kg⁻¹,D1处理的有机质含量为13.84 g·kg⁻¹,比LD提高约42.7%,且显著高于其他处理,E1、E2、D1E2、D2E1和D2E2处理间有机质含量无明显差异,表明D1的3 g·kg⁻¹秸秆处理组对土壤有机质含量提高起主要作用。PAM对土壤有机质含量提高无显著影响。图2b表明不同处理对土壤碱解氮含量有显著影响,单用秸秆的D1、D2处理组其碱解氮含量与LD处理间无显著差异,但却显著低于其他添加PAM的处理,而E1、D1E1和D2E1处理的碱解氮含量增加明显,分别为98.87、105.56、102.42 mg·kg⁻¹,比LD组提高了约189.60%。这说明PAM不仅有助于提高土壤碱解氮含量,且PAM用量增加时可显著提高土壤碱解氮含量,与

表3 室内试验土壤干筛团聚体组成

Table 3 Composition of dry sieved aggregates under different treatments in indoor incubation experiment

处理	各级干筛团聚体含量占总团聚体百分比/%					
	>4 mm	4~2 mm	2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm	<0.25 mm
LD	34.78±0.44c	20.84±0.24ab	10.91±1.87a	16.98±0.83b	8.90±0.10b	6.87±0.56c
D1	29.19±1.98a	22.67±2.07a	13.20±0.84b	20.16±0.78ab	8.18±0.33ab	6.87±1.02c
D2	36.17±1.23c	20.76±0.10ab	13.32±1.19bc	18.02±0.76ac	6.89±2.01a	6.90±2.11a
E1	48.21±3.01a	19.67±0.98ab	8.75±0.67c	11.67±0.59c	6.75±1.28b	5.97±1.87b
E2	37.97±1.29b	18.31±2.10bc	9.47±0.71a	13.89±1.78c	9.97±0.48ab	11.29±1.35c
D1E1	48.42±3.73a	20.49±2.52c	7.32±1.42ab	11.65±0.32a	6.73±0.34c	5.72±0.55b
D1E2	34.71±1.54a	18.57±0.55c	9.84±1.10bc	17.77±0.43a	7.69±0.13a	12.61±1.34ab
D2E1	48.11±0.10a	17.69±0.58c	6.51±1.32bc	11.57±0.23bc	7.87±0.47ab	8.87±2.31c
D2E2	49.31±2.21a	18.28±2.10cd	7.10±0.34ab	9.34±0.11ab	6.73±1.37bc	8.90±2.10a

注:不同小写字母为不同处理间的差异达0.05显著水平。

表4 室内试验土壤湿筛水稳性团聚体组成

Table 4 Composition of wet sieved aggregates under different treatments in indoor incubation experiment

处理	各级湿筛团聚体含量占总团聚体百分比/%					
	>4 mm	4~2 mm	2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm	<0.25 mm
LD	1.87±0.09g	3.40±1.10d	5.76±0.37d	9.24±0.37a	9.37±0.22ab	69.12±0.45a
D1	1.68±0.73g	3.06±0.49d	5.98±0.19de	10.29±0.53ab	10.11±0.12a	69.77±2.01a
D2	2.54±0.22g	3.52±0.55cd	5.83±0.61de	9.30±0.79b	8.73±1.30ab	69.11±2.05a
E1	24.53±3.20a	3.27±0.38b	4.97±0.55e	11.67±0.35a	11.38±1.43a	44.39±2.99b
E2	10.59±0.58d	3.39±0.73bc	3.77±0.17e	12.76±2.21a	10.63±1.21b	61.22±1.31b
D1E1	12.21±1.64c	3.37±0.79b	5.78±0.49ab	13.07±1.21ab	11.25±0.44c	54.67±3.27bc
D1E2	6.37±0.44f	3.01±0.13bc	5.25±0.75b	13.25±0.67ab	13.27±2.12a	59.33±2.11b
D2E1	14.67±1.27b	3.49±0.69b	3.58±0.46b	12.83±1.46ab	12.36±0.41b	52.91±2.01c
D2E2	7.95±0.21e	4.02±0.17a	5.37±1.25a	12.98±0.74ab	12.01±1.32a	57.52±3.72bc

注:不同小写字母为不同处理间的差异达0.05显著水平。

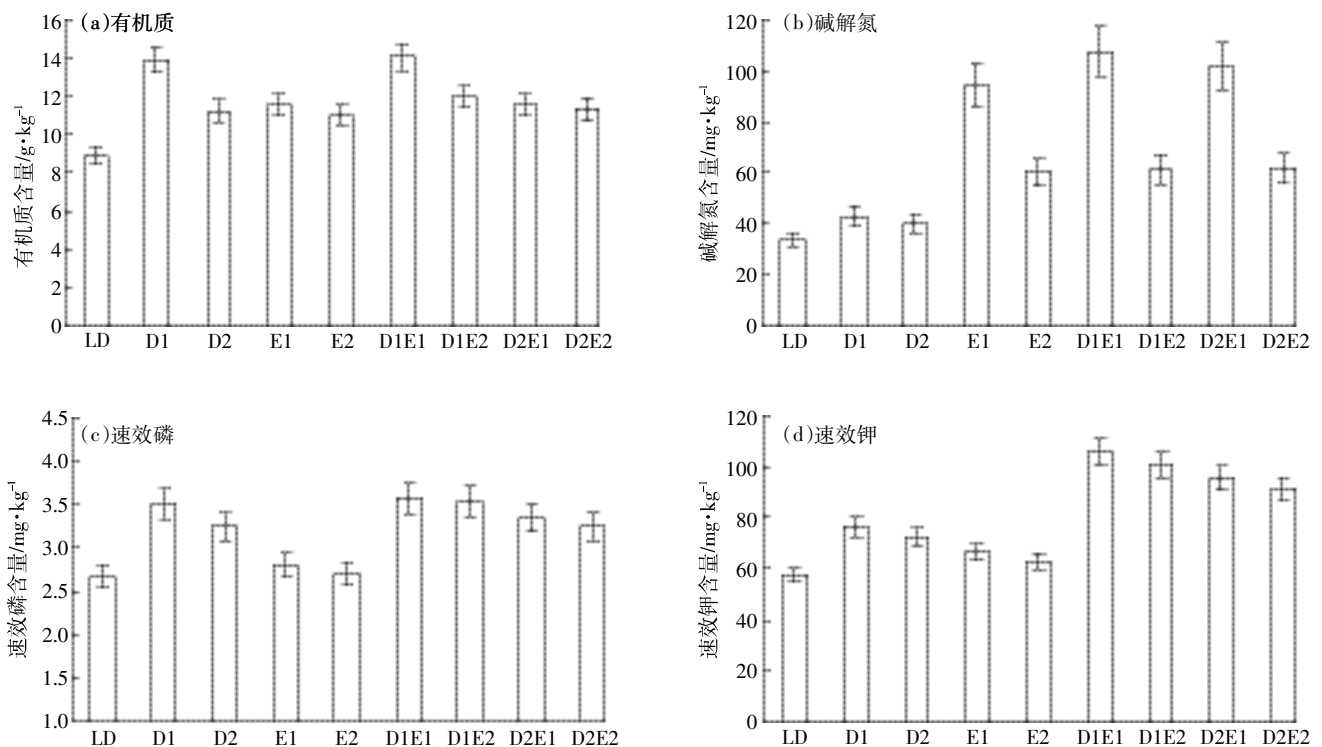


图 2 室内土培试验土壤养分变化

Figure 2 Changes of soil nutrients under different treatments in indoor incubation experiment

Kay-Shoemake 等^[27]的观点一致。图 2c 显示土培试验各处理下土壤速效磷含量为 2.68~3.62 mg·kg⁻¹, D1、D2 处理速效磷分别比 LD 增加了 30.9% 和 16.3%, E1、E2 处理与 LD 间无显著差异, 其他各联合处理均能有效提高土壤速效磷含量, 尤其添加 D1 组, 其中 D1E1 处理组速效磷含量提高了约 31.80%。可见, 秸秆可显著提高土壤速效磷含量, 而 PAM 对土壤速效磷含量无明显影响^[28-29]。由图 2d 可见, 不同量秸秆配比量对土壤速效钾含量的提高有显著影响。施加 D1、D2 的各处理的速效钾为 79.13~90.22 mg·kg⁻¹, 比 LD (57.84 mg·kg⁻¹) 平均提高 50.32%, 且 D1 处理速效钾明显高于 D2 处理。D1E1、D1E2 处理间无显著差异, D2E1、D2E2 间无显著差异, E1、E2、LD1 速效钾含量间也无显著差异。可见, 秸秆可显著提高速效钾含量, 且随秸秆施用量显著提高, 与 PAM 无明显关系, 与杨莹莹^[25]等的观点一致。

3 讨论

3.1 改良材料对土壤改良机理分析

室内研究表明, 秸秆联合 PAM 能不同程度地修复退化土壤, 主要基于两方面: 一是提升了土壤肥力, 有机质、氮磷钾含量; 二是改善了土壤结构, 提

高了稳性团聚体含量, 减缓了水土流失。通过试验数据分析, 改良材料修复土壤过程如下:

(1) 秸秆本身含各种营养元素, 秸秆翻入土壤后能增加各种土壤养分含量。秸秆中木质素及其蛋白质复合体较难分解而残留土壤中, 能逐步形成腐殖质, 腐殖质具较强粘聚性^[24]。试验中有机质含量大幅增高, 对土壤微团聚体和中粒径团聚体的组成变化进行分析, 可得出高含量有机质与上述复合体形成腐殖质(表 3 和图 2)。微团聚体在腐殖质表面粘聚作用下, 向中粒径团聚体转化, 使土壤团粒结构更稳定, 土壤疏松多孔, 利于降水就地入渗, 明显减少水土流失^[25]。

(2) 聚丙烯酰胺是一种高分子聚合物, 作为土壤结构改良剂, 可有效改善土壤结构, 提高土壤大团聚体含量, 防止水分流失^[12]。因 PAM 表面有大量亲水基团, 吸收后通过氢键对粘粒吸附、凝聚, 使体积增大成团聚体^[26]。通过室内试验土壤中粒径水稳性团聚体变化分析(表 4), 在腐殖质促进微团聚体向中粒径团聚体转化基础上, 复合的 PAM 可将 <2 mm 中团聚体逐渐聚合成 >2 mm 的水稳性团聚体, 主要利用 PAM 吸附架桥作用, 可见 PAM 利于水稳性大团聚体形成。因此, 在水作用下, PAM 能有效促成中团粒凝聚成大团粒, 改善土壤结构, 在湖滨带特有水陆环境下使用尤

为适合。

总之,秸秆提供的有机质降解为腐殖质,腐殖质有助于将微团聚体粘聚为中粒径团聚体,而PAM的吸附架桥作用可将中粒径团聚体转化为大团聚体,而大团聚体在持土保肥两方面都具有更好的效果^[25]。

3.2 湖滨带土壤稳定性显著影响因子

通过室内试验2.3节之结果可知,秸秆改性PAM可大幅提高有机质含量。为探究秸秆改性PAM对土壤改良效果的贡献,考虑从土壤各指标相关关系的角度着手。由此,对示范区土壤样品中大团聚体、容重、土壤速效磷、碱解氮、速效钾、有机质、TP、TN、全钾的含量做相关检验,结果见表5。

由表5可见有机质和大团聚体含量与其他各指标相关性最为紧密,其中有机质与大团聚体、速效磷、速效钾和TN间均极显著正相关($P<0.01$),与容重极显著正相关($P<0.05$),且相关系数达0.935。农业秸秆是土壤有机质的重要来源,说明通过秸秆联合PAM不仅可丰富土壤中营养物,还可有效改良土壤物理性状。这是因为有机质在分解过程中产生大量 CO_2 ,能引起局部pH降低,增强微生物活性,提高营养成分有效性。从秸秆联合PAM对土壤物理结构的结果分析可得(表2和图1),有机质可使水稳性团聚体和土壤孔隙率增加,容重降低,提高土壤保水保肥性能。在表5相关性结果基础上,通过对联合改良材料对改良土壤过程机理分析,认为有机质和大团聚体状况在很大程度上决定湖滨带土壤稳定性好坏,而秸秆联合PAM材料能很好地使该两项指标得到改善。

4 结论

(1)农业秸秆复合PAM材料不仅可以改善土壤

养分,保证水生植物生长。同时能够改良土壤结构,防治水土流失,其中改良效果最好的配比为 $3\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 秸秆与 $1\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ PAM。具体表现为:细粒物质含量提高,砂粒含量降低,容重减小14.92%,大团聚体含量提高42.81%,土壤由砂土和壤土向粘土转变。有机质、碱解氮、速效磷、速效钾含量分别提高42.70%、189.60%、31.80%和50.32%。有机质与大团聚体、速效磷、速效钾和TN间均极显著正相关($P<0.01$),与容重极显著负相关($P<0.05$)。

(2)土壤改良剂主要从土壤养分和结构两方面对土壤造成影响。土壤养分方面,施用PAM与秸秆能显著提高TN、碱解氮和TP含量,并随施用量增加而提高。同时,秸秆可显著提高速效磷和速效钾的含量,且秸秆用量为 $1.5\sim 3\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,表现出随秸秆施用量的增加显著提高,与PAM无明显关系($P>0.05$);土壤团聚体组成方面,施用PAM能显著提高干筛与湿筛水稳性大团聚体的含量,尤其是 $>4\text{ mm}$ 团聚体的含量。而秸秆仅能显著提高干筛大团聚体的含量,对水稳性团聚体无显著影响($P>0.05$)。

(3)有机质和大团聚体状况决定湖滨带土壤稳定性好坏。秸秆提供的有机质降解为腐殖质,有助于将微团聚体粘聚为中粒径团聚体,而PAM的吸附架桥作用可将中粒径团聚体转化为大团聚体,从而显著改善土壤持土保肥能力。

参考文献:

- [1] 姜明, 吕宪国, 杨青. 湿地土壤及其环境功能评价体系[J]. 湿地科学, 2006, 3: 168–173.
JIANG Ming, LU Xian-guo, YANG Qing. Wetland soil and its system of environment function assessment[J]. *Wetland Science*, 2006, 3: 168–173.

表5 有机质与其他理化性质的相关性

Table 5 Relationship between soil physical and chemical properties

	大团聚体	容重	TN	TP	全钾	碱解氮	速效磷	速效钾	有机质
大团聚体	1								
容重	-0.437*	1							
TN	0.372*	-0.09	1						
TP	0.191	-0.04	0.374*	1					
全钾	0.271	-0.17	-0.16	0.185	1				
碱解氮	0.473**	-0.08	0.519**	0.765**	0.039	1			
速效磷	0.621**	-0.102	0.438**	0.638**	0.274	0.801**	1		
速效钾	0.510**	-0.09	0.385**	-0.353**	-0.277	0.108	0.172	1	
有机质	0.571**	-0.935**	0.598**	-0.101	-0.121	0.283	0.612**	0.821**	1

注:*表示相关性显著水平 $P<0.05$; **表示相关性极显著水平 $P<0.01$;大团聚体为粒径 $>2\text{ mm}$ 团聚体颗粒。

- [2] Tanner C. C, D'Eugenio J, McBride G B, et al. Effect of water level fluctuation on nitrogen removal from constructed wetland mesocosms[J]. *Ecological Engineering*, 1992, 12(1): 67-92.
- [3] Baer S G, Church J M, Williard K W J, et al. Changes in intrasystem N cycling from N₂-fixing shrub encroachment in grassland: multiple positive feedbacks[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2006, 115(1/4): 174-182.
- [4] Lost S, Landgraf D, Makeshin F. Chemical soil properties of reclaimed marsh soil from Zhejiang Province P. R. China[J]. *Geoderma*, 2007, 142(3/4): 245-250.
- [5] 白文娟. 水蚀风蚀交错带植被恢复对土壤质量的影响与植物生理生态适应性[D]. 杨凌: 中国科学院研究生院, 水土保持与生态环境研究中心, 2010.
BAI Wen-juan. Effects of vegetation restoration on soil quality and plant physio-ecological adaptability in water-wind erosion region[D]. Yangling: 2010.
- [6] 王玲玲, 曾光明, 黄国和, 等. 湖滨湿地生态系统稳定性评价[J]. 生态学报, 2005, 5(12): 3406-3410.
WANG Ling-ling, ZENG Guang-ming, HUANG Guo-he, et al. Analysis of ecological benefit of ecological restoration of aquatic-terrestrial everglade from stability of ecological system[J]. *Acta Ecological Science*, 2005, 5(12): 3406-3410.
- [7] 李恋卿, 潘根兴, 张旭辉. 退化红壤植被恢复中表层土壤微团聚体及其有机碳的变化[J]. 土壤通报, 2000, 31(5): 193-195.
LI Lian-qing, PAN Gen-xing, ZHANG Xu-hui. Changes in organic carbon storage in aggregates of the surface horizon in a degraded paleudult upon vegetation recovery[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2000, 31(5): 193-195.
- [8] 史学正, 于东升. 我国亚热带土壤侵蚀的生物工程治理[J]. 水土保持研究, 1999, 6(2): 137-141.
SHI Xue-zheng, YU Dong-sheng. Bio-engineering harnessment of soil erosion for national subtropic zone[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 1999, 6(2): 137-141.
- [9] 姜培坤, 周国模, 钱新标. 侵蚀型红壤植被恢复后土壤养分含量与物理性质的变化[J]. 水土保持学报, 2004, 18(1): 12-14, 30.
JIANG Pei-kun, ZHOU Guo-muo, QIAN Xin-biao. Changes in soil nutrients and physical properties under erosion red soil by vegetation recover[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(1): 12-14, 30.
- [10] 方勇, 章勇. 南方红壤区种植黑麦草的效应研究[J]. 草业科学, 2005, 22(4): 69-71.
FANG Yong, ZHANG Yong. Effects of planting rye grass in southern red soil region[J]. *Pratacultural Science*, 2005, 22(4): 69-71.
- [11] 魏朝富, 高明, 谢德体, 等. 有机肥对紫色水稻土水稳性团聚体的影响[J]. 土壤通报, 1995, 26(3): 114-116.
WEI Chao-fu, GAO Ming, XIE De-ti, et al. Effects of organic fertilizer on purple paddy soil aggregate water stability[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1995, 26(3): 114-116.
- [12] 员学锋, 吴普特, 冯浩. 聚丙烯酰胺(PAM)的改土及增产效应[J]. 水土保持研究, 2002, 9(2): 55-58.
YUAN Xue-feng, WU Pu-te, FENG Hao. Role of polyacrylamide on soil structure and increasing yield [J]. *Research of soil and water conservation*, 2002, 9(2): 55-58.
- [13] 孙荣国, 韦武思, 马明, 等. 秸秆-膨润土-PAM改良材料对沙质土壤团粒结构的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(2): 162-166.
SUN Rong-guo, WEI Wu-si, MA Ming, et al. Effects of straw-bentonite-PAM improved material on sandy soil aggregate structure[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*. 2011, 25(2): 162-166
- [14] 王训, 闫飞, 王永敏, 等. 秸秆改良剂对沙质土有机质和阳离子交换量的影响[J]. 中国农学通报, 2010, 26(23): 224-228.
WANG Xun, YAN Fei, WANG Yong-min, et al. Effects of straw modified material on cation exchange capacity and organic matter of sandy soil[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(23): 224-228.
- [15] 朱捍华, 黄道友, 刘守龙, 等. 稻草易地还土对丘陵红壤有机质和主要物理性质的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(11): 2497-2502.
ZHU Han-hua, HUANG Dao-you, LIU Shou-long, et al. Effects of ex-situ rice straw incorporation on organic matter content and main physical properties of hilly red soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(11): 2497-2502.
- [16] 叶丽丽, 王翠红, 彭新华, 等. 秸秆还田对土壤质量影响研究进展[J]. 湖南农业科学, 2010(19): 52-55.
YE Li-li, WANG Cui-hong, PENG Xin-hua, et al. Effect of straw returning on soil quality[J]. *Hunan Agricultural Science*, 2010(19): 52-55.
- [17] 赵聚宝, 赵琪. 抗旱增产技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998: 79-93.
ZHAO Ju-bao, ZHAO Qi. Drought-resistant increasing production technology[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1998: 79-93.
- [18] 王春红, 肖娟, 王治国, 等. 秸秆覆盖对坡面径流及土壤流失影响的研究[J]. 山西农业大学学报, 1998, 15(2): 149-152.
WANG Chun-hong, XIAO Juan, WANG Zhi-guo. A preliminary study on effects of straw mulches on surfaces flow and soil erosion on slope farm land[J]. *Shanxi Agricultural University*, 1998, 15(2): 149-152.
- [19] 潘英华, 雷廷武, 张晴雯, 等. 土壤结构改良剂对土壤水力学参数的影响[J]. 农业工程学报, 2003, 19(4): 37-39.
PAN Ying-hua, LEI Ting-wu, ZHANG Qing-wen, et al. Effects of polyacrylamide on soil hydrodynamic parameters[J]. *Transactions of The CSAE*, 2003, 19(4): 37-39.
- [20] 龙明杰, 张宏伟, 陈志泉, 等. 高聚物对土壤结构改良的研究Ⅲ. 聚丙烯酰胺对赤红壤的改良研究[J]. 土壤通报, 2002, 33(1): 9-13.
LONG Ming-jie, ZHANG Hong-wei, CHEN Zhi-quan, et al. Studies on polymeric soil structure amendments Ⅲ. Amelioration to lateritic red soil by polyacrylamide[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2002, 33(1): 9-13.
- [21] Lentz R D, Sojka R E, Robbins C W. Reducing phosphorus losses from surface-irrigated fields: emerging polyacrylamide technology[J]. *Environ Qual*, 1998, 27(2): 305-12.
- [22] 张雷, 郑丙辉, 田自强, 等. 西太湖典型河口区湖滨带表层沉积物营养评价[J]. 环境科学与技术, 2006, 29(5): 4-7.
ZHANG Lei, ZHENG Bing-hui, TIAN Zi-qiang, et al. Nutrition evaluation on surface layer sediment of typical estuarine aquatic-terrestrial ecotone in west Taihu Lake[J]. *Environmental Science and Technolo-*

- gy, 2006, 29(5):4-7.
- [23] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 129-154.
BAO Shi-dan. The soil analysis[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000: 129-154.
- [24] 林大仪. 土壤学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2002: 57-67, 355-357.
LIN Da-yi. Soil science[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2002: 57-67, 355-357.
- [25] 杨莹莹. 不同修复措施下侵蚀红壤的团聚体稳定性与肥力特点[D]. 武汉: 华中农业大学, 2010.
YANG Ying-ying. The aggregate stability and fertility characteristic of eroded red soil with different restoration measures[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2010.
- [26] 吴 婕, 朱钟麟, 郑家国, 等. 秸秆覆盖还田对土壤理化性质及作物产量的影响[J]. 西南农业学报, 2006, 19(2): 192-195.
WU Jie, ZHU Zhong-lin, ZHENG Jia-guo, et al. Influences of straw mulching treatment on soil physical and chemical properties and crop yields[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2006, 19(2): 192-195.
- [27] Kay-Shoemaker J L, Watwood M E, Lentz R D. Polyacrylamide as an organic nitrogen source for soil microorganisms with potential effects on inorganic soil nitrogen in agricultural soil[J]. *Soil Biol Biochem*, 1998, 30(8/9): 1045-1052.
- [28] 康倍铭, 徐 健, 吴淑芳, 等. PAM 与天然土壤改良材料混合对部分土壤理化性质的影响[J]. 水土保持研究, 2014, 21(3): 68-73.
KANG Bei-ming, XU Jian, WU Shu-fang, et al. Effect of combination of polyacrylamide (PAM) and natural improvement material on some soil physical and chemical properties[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2014, 21(3): 68-73.
- [29] Christensen, B T. Straw incorporation and soil organic matter in macro-aggregations and particle size separates[J]. *Soil Sci*, 1986, 37: 125-135.
- [30] Horn R. Aggregate characterization as compared to soil bulk properties[J]. *Soil Till Res*, 1990, 17(3/4): 265-289.
- [31] 员学锋, 汪有科, 吴普特, 等. PAM 对土壤物理性状影响的试验研究及机理分析[J]. 水土保持学报, 2005, 19(2): 37-40.
YUAN Xue-fen, WANG You-ke, WU Pu-te, et al. Effect and mechanism of PAM on soil physical characteristics[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(2): 37-40.