保水剂与木质素结皮相结合对沙化土地植被恢复的调控机理

张钰舒[1], 吴红慧[2], 柯玉广[2], 曹远博[2], 赵晋灵[3], 庾 强[2], 肖春旺[1]

(1.中央民族大学 生命与环境科学学院, 北京 100081; 2.中国农业科学院 农业资源与农业区划研究所/呼伦贝尔草原生态系统国家野外科学观测研究站, 北京 100081; 3.中国科学院 植物研究所 植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093)

摘 要: [目的] 阐明施用保水剂与木质素结皮结合的恢复措施对沙地植被的调控机制,为荒漠草原沙地植被恢复提供理论依据。[方法] 在内蒙古自治区乌拉特荒漠草原设置试验样地。试验处理包括对照和恢复措施(保水剂与木质素结皮结合)两个处理。测定了植物地上生物量、盖度、土壤含水量、土壤团聚体比例、土壤入渗速率、稳渗速率、碱解氮、速效磷和速效钾的含量。[结果] ①恢复措施显著提高了植物地上生物量和盖度; ②恢复措施提高了水稳性大团聚体比例、入渗速率和稳渗速率,降低了微团聚体的比例,从而显著提高了土壤含水量; ③恢复措施显著提高了土壤碱解氮、速效磷和速效钾的含量。[结论] 恢复措施提高了土壤含水量和养分含量,提高了沙地植被生产力,从而促进了沙地植被的恢复。

关键词: 沙地; 保水剂加木质素结皮; 土壤含水量; 土壤养分含量; 植被生产力

文献标识码: B **文章编号**: 1000-288X(2021)02-0142-07 **中图分类号**: S157.9

文献参数: 张钰舒, 吴红慧, 柯玉广, 等.保水剂与木质素结皮相结合对沙化土地植被恢复的调控机理[J].水土保持通报,2021,41(2):142-148.DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2021.02.019; Zhang Yushu, Wu Honghui, Ke Yuguang, et al. Regulation mechanism of combination of super absorbent polymers and lignin crust on vegetation restoration in sandy grassland [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(2): 142-148.

Regulation Mechanism of Combination of Super Absorbent Polymers and Lignin Crust on Vegetation Restoration in Sandy Grassland

Zhang Yushu[1], Wu Honghui[2], Ke Yuguang[2], Cao Yuanbo[2], Zhao Jinling[3], Yu Qiang[2], Xiao Chunwang[1]

(1.*College of Life and Environmental Sciences, Minzu University of China, Beijing* 100081, *China*; 2.*Institute of Agricultural Resources and Regional Planning/National Hulunber Grassland Ecosystem Observation and Research Station, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing* 100081, *China*; 3.*State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100093, *China*)

Abstract: [Objective] The mechanism of underlying vegetation restoration in sandy grassland when combined super absorbent polymers with lignin crust was studied, in order to provide a theoretical basis for the restoration of sandy vegetation in desert grassland. [Methods] The experiment was conducted in Urat Desert grassland in Inner Mongolia Autonomous Region. The two treatments were control and restoration measures (combined application of super absorbent polymers and lignin crust). The above-ground biomass, coverage, soil moisture content, proportion of soil aggregates, soil infiltration rate, stable infiltration rate, alkali-hydrolyzable nitrogen, available phosphorus and available potassium content were assessed. [Results] ① Restoration measure significantly increased the aboveground biomass and coverage of plants. ② Restoration measure increased the proportion of water-stable macroaggregates, soil infiltration rate, stable infiltration rate, and soil moisture content, but reduced the proportion of microaggregates. ③ Restoration measure

收稿日期:2020-12-26 **修回日期**:2021-01-13

资助项目:国家自然科学基金项目"极端干旱停止后草原生态系统土壤氮矿化及相关微生物的恢复过程"(31971533)

第一作者:张钰舒(1996—),女(汉族),山西省翼城县人,硕士研究生,研究方向为土壤荒漠化防治和生态恢复。Email:zys_sunshine341@163.com。

通讯作者:肖春旺(1969—),男(汉族),湖南省衡阳市人,博士,教授,主要从事全球变化与陆地生态系统关系的研究,重点探讨陆地生态系统地下有机碳循环及机制。Email:cwxiao@muc.edu.cn。

significantly increased the soil alkali-hydrolyzable nitrogen, available phosphorus and available potassium contents. [Conclusion] The restoration measure can increase soil moisture and nutrient contents, improve plant productivity and promote the vegetation restoration in the sandy grassland.

Keywords: sandy land; super absorbent polymers and lignin crust; soil moisture content; soil nutrient content; vegetation productivity

土地荒漠化是影响人类生存和发展的全球性环境问题之一,且随着全球变化和人类活动的增强,脆弱的荒漠生态系统极易发生崩溃[1-2]。荒漠土壤环境和植物是生态系统功能的载体,同样也是沙地生态系统状态的指示器。我国沙地面积达 1.56×10^5 km^2,约占国土面积的 1.62 %[3]。随着人类活动干扰强度的增加,改变了荒漠生态系统的结构、功能和土壤环境,造成水土流失、植被生产力降低、物种多样性下降等一系列生态问题[4-5],引起脆弱生态系统的持续退化。我国北方荒漠草原土地沙化近年来得到较大改善,但是形势依然严峻,影响了该地区生态环境及社会经济的可持续发展[6]。因此,开发和利用科学有效的恢复措施对荒漠草原植被进行生态恢复具有十分重要的意义。目前荒漠草原沙地土壤恢复措施主要包括施用保水剂或在土壤表层营造木质素结皮[7-9]。保水剂具有强大的吸水和保水能力,能够提高土壤蓄水能力[10-12];木质素结皮施加于土壤表层后能缓解风蚀和水蚀,具有保土、保肥、稳定地表土壤环境的作用[9,13]。然而,单独利用保水剂或木质素结皮对沙地植被进行恢复存在各自的缺陷。例如,Huttetmann 等人[14-15]发现保水剂施加于土壤浅层,其吸水后会造成土壤地表隆起,增大了土壤水分的蒸发面积,对表层土壤水分的保蓄不利;Yang 等人[16-17]发现木质素结皮施加于土壤表层后,虽然在地表保持了少量的水分,也减小了土壤风蚀和水蚀,但是在强烈的沙地地表辐射下,木质素结皮保持在表层的水分极易蒸发,限制植被的恢复。然而,结合保水剂高吸水倍率特性和木质素结皮增强地表稳定性的特性可以弥补以上单一恢复措施的缺陷。保水剂加木质素结皮措施中保水剂施加于土壤浅层后能有效保蓄由结皮保持的地表水分,弥补了木质素结皮保水能力有限的缺点。而木质素结皮能提高土壤表层形态稳定性,避免因保水剂吸水所导致的地表隆起,减少地表水分蒸发[18]。另外,较单一措施而言,保水剂加木质素结皮措施也可能会更有效地避免土壤养分的流失。因为,保水剂通过减少水分渗透量,进而减少了浅层土壤养分的淋溶;而木质素结皮也能够减少土壤的风蚀和水蚀量,进而减少土壤养分的流失[18]。目前,保水剂加木质素结皮措施对黄土高原地区梯田、荒地以及陡坡等不同立地条件下植被的生长恢复均有显著作用[19],但荒漠草原沙地土质粗松、贫瘠、风蚀严重,同时沙地植被的恢复受土壤沙化强度、降雨、温度等环境因素的影响[20]。因此,保水剂加木质素结皮措施对荒漠草原沙地植被的恢复效果及其恢复机制还待探究。

本研究在内蒙古乌拉特荒漠草原沙化土地开展,试验设置保水剂加木质素结皮措施和对照两个处理,测定了两种处理下植物地上生物量、盖度、土壤含水量、水稳性大团聚体比例、微团聚体比例、土壤水分入渗速率、土壤碱解氮、速效磷、速效钾的含量。本文旨在研究保水剂加木质素结皮的恢复措施对植物地上生物量和盖度的影响;同时通过土壤水分和养分的变化,阐明该恢复措施促进乌拉特荒漠草原沙地植被恢复的具体机制,为荒漠草原沙地植被恢复提供理论依据。

1　材料与方法

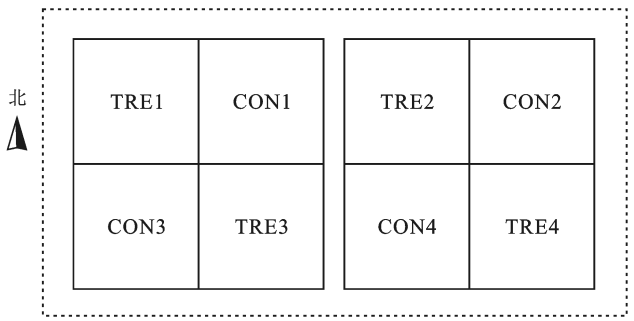
1.1　研究区概况

试验地位于中国科学院乌拉特荒漠草原生态系统研究站附近的荒漠草原(41°25′N,106°58′E,海拔 1 650 m),自 2010 年围封至今,属大陆性干旱气候。年平均气温 5.3 ℃左右,最低气温 −34.4 ℃,最高气温 37 ℃,无霜期 130 d 左右,年平均降水量约 180 mm,7—8 月的降水量约占全年的 70 %。土壤类型以棕钙土和灰棕漠土为主。优势物种为小针茅(*Stipa klemenzii*)、红砂(*Reaumuria songarica*)和芨芨草(*Achnatherum splendens*)[21-22]。

1.2　试验设计

试验采用完全随机区组设计方法,在 2018 年 5 月 12 日对所有小区统一平整沙地后,设置 2 个处理:对照和保水剂加木质素结皮措施,每个处理包含 4 个重复,共 8 个 8 m×8 m 的试验小区(图 1)。保水剂加木质素结皮措施是综合施用保水剂(聚丙烯酰胺高吸水树脂 Super Absorbent Polymer)和木质素结皮(木质素磺酸钠 Sodium ligninsulfonate、羟丙基甲基纤维素 Hydroxypropyl methyl cellulose)(图 2)。施用方法为:首先剥离 5 cm 厚地表沙土,条施 75 kg/hm^2 聚丙烯酰胺高吸水树脂,宽度为 10 cm,每条间隔为 90 cm,再将 5 cm 厚沙土回填;然后,将木质素、纤维

素和沙土按照 1 000 kg/hm^2,100 kg/hm^2,3 300 kg/hm^2 的用量混合均匀撒于样地土壤表层,最后把水(2.5 L/m^2)均匀喷洒于土壤表面,以溶解木质素结皮制剂;对照为仅在沙地表面喷洒水 2.5 L/m^2(与年降水量相比可忽略不计)。



注:CON 表示对照,仅在沙地表面喷洒水 2.5 L/m^2;TRE 表示综合施用保水剂(聚丙烯酰胺高吸水树脂 Super Absorbent Polymer)和木质素结皮(木质素磺酸钠 Sodium ligninsulfonate、羟丙基甲基纤维素 Hydroxypropyl methyl cellulose)

图 1 试验小区布设图

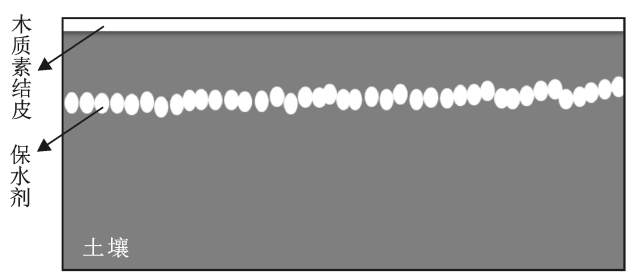


图 2 保水剂加木质素结皮措施处理

1.3 数据与方法

2018 年 9 月对地上生物量、盖度和土壤理化性质等指标进行测定。在植物生物量峰值期,用 1 m×1 m的样方采集各小区中植物的地上部分。植物样品带回实验室于 105 ℃杀青 1 h,60 ℃烘至恒重后称重;盖度百分比估测利用网络状样方格对每个植物种的盖度进行测定;土壤样品于 2018 年 9 月采集,采用环刀法测定土壤含水量[23];通过湿筛法测定>0.25 mm和<0.25 mm 粒径土壤团聚体分布情况[24];使用单环入渗仪测定土壤水分入渗速率和稳渗速率;新鲜土壤样品在自然风干过 2 mm 筛后分别测定土壤碱解氮、速效磷、速效钾的含量。土壤碱解氮采用碱解扩散法测定,速效磷采用 Mehlich3 法测定[25],速效钾采用醋酸铵浸提—火焰光度法测定。

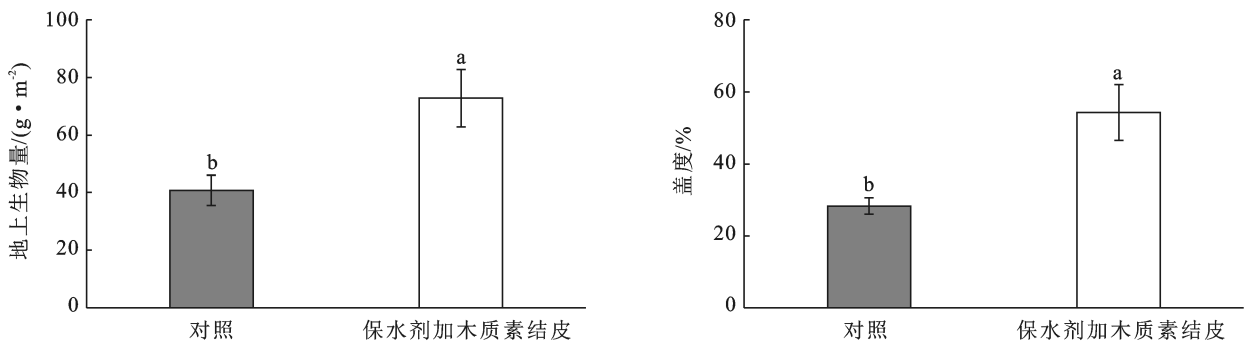
1.4 数据统计分析

利用 T 检验比较植物地上生物量、盖度、土壤含水量、土壤团聚体比例、入渗速率、稳渗速率以及土壤碱解氮、速效磷、速效钾含量在两种处理下的差异,利用 Pearson 相关分析土壤含水量与土壤团聚体、土壤入渗速率、稳渗速率之间以及地上生物量与土壤含水量、土壤养分含量之间的相关性。所有数据采用 IBM SPSS Statistics 25(SPSS Inc.,Chicago,IL,USA)进行统计分析,Origin 2018 绘图。

2 结果与分析

2.1 保水剂加木质素结皮措施对植物地上生物量和盖度的影响

由图 3 可以看出,保水剂加木质素结皮措施显著增加了植物地上生物量($p<0.05$),作为对照的荒漠草原地上生物量是 40.7 g/m^2,与对照相比,该措施处理下地上生物量增加了 79%,增加到了 72.8 g/m^2。同时,该措施处理下植被盖度显著增加($p<0.05$),植被盖度值由对照的 28%增加到了 54%,相对增加了 93%。保水剂加木质素结皮措施使荒漠草原地上生物量和盖度均发生显著变化,这说明了保水剂与木质素结皮的综合运用促进了荒漠草原沙地植被的生长。



注:图中小写字母代表不同处理下具有显著差异($p<0.05$)。

图 3 保水剂加木质素结皮措施对植物地上生物量和盖度的影响(平均值±标准误差)

2.2 保水剂加木质素结皮措施对土壤含水量的影响

保水剂加木质素结皮措施对不同土层土壤含水量的影响基本是一致的(图 4),均显著增加。在土层 1 cm 处,对照与保水剂加木质素结皮措施处理下土

壤含水量分别为 2.4%,4.1%,与对照相比,保水剂加木质素结皮措施处理下土壤含水量显著增加了 71%($p<0.001$);在土层 5 cm 处,该措施处理下土壤含水量相比于对照显著增加了 138%,由 5%增加到了 11.9%($p<0.001$)。由图 4 可知,在土层 10 cm 处,该措施处理下土壤含水量由 6.4%增加到了6.8%,相对增加了 6.3%($p<0.001$)。对照中土壤平均含水量为4.6%,该措施处理下土壤平均含水量为 7.6%,与对照相比,该措施处理下土壤含水量显著增加了 65%($p<0.001$)。通过对比不同土层土壤含水量可以发现,在 5 cm 处土壤含水量值最高且达到了 11.9%,显著高于其他土层土壤含水量。这是因为保水剂加木质素结皮措施中,保水剂施加于土壤浅层 5 cm 处,使得土层 5 cm 处土壤含水量的值要显著高于其他土层。

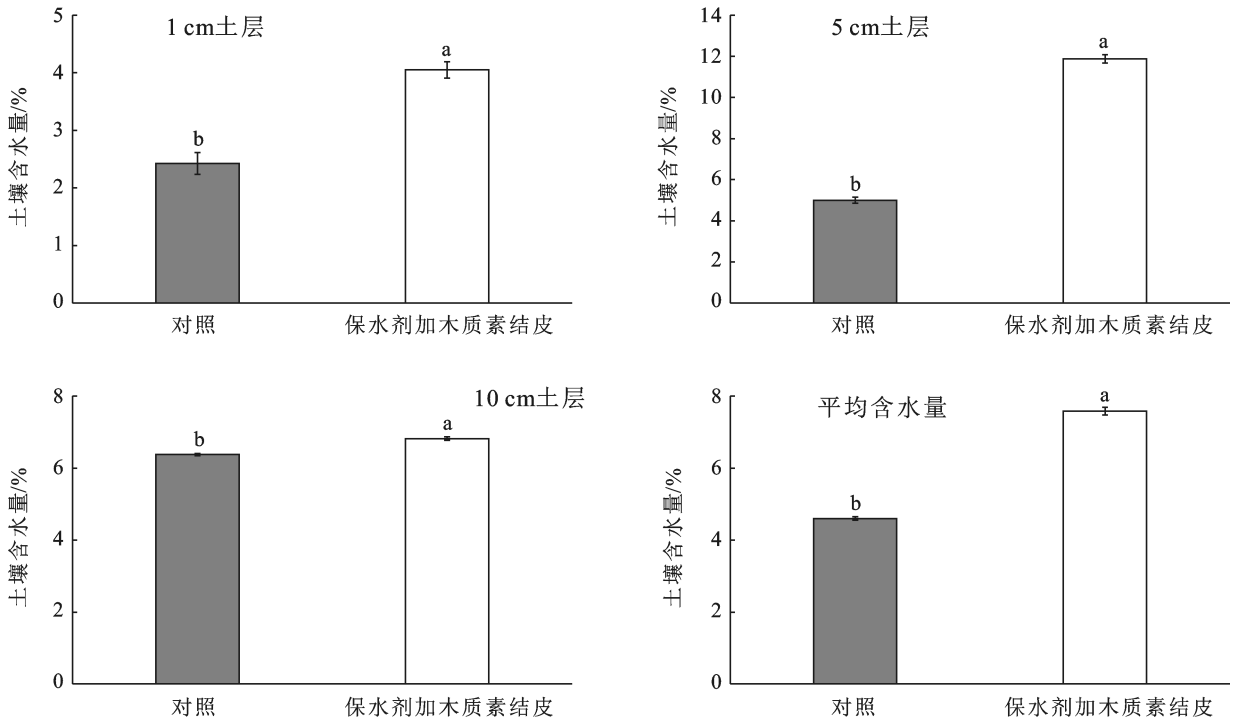


图 4　保水剂加木质素结皮措施对不同土层土壤含水量的影响(平均值±标准误差)

由图 5 可知,保水剂加木质素结皮措施处理下,土壤微团聚体(<0.25 mm)比例为 58.0%,相比于对照(65.8%)显著减少了 13.4%($p<0.05$),土壤水稳性大团聚体(>0.25 mm)比例为 42.0%,相比于对照(34.2%)增加了 23%($p<0.05$)。土壤水分入渗速率和稳渗速率也均显著增加($p<0.05$)。其中,入渗速率由 6.6 mm/min 增加到了 9.7 mm/min,相比于对照增加了 47%;稳渗速率由 1.6 mm/min 增加到了 2.0 mm/min,相比于对照增加了 25%。

表 1 列出了保水剂加木质素结皮措施处理下,土壤含水量与初渗速率、稳渗速率、土壤微团聚体比例、水稳性大团聚体比例的相关性。该措施处理下,土壤含水量与初渗速率、稳渗速率以及水稳性大团聚体(>0.25 mm)之间均呈极显著的正相关关系,相关系数分别为 0.981,0.961,0.974($p<0.001$)。而土壤含水量与土壤微团聚体(<0.25 mm)之间呈极显著的负相关关系,相关系数为−0.974($p<0.001$)。

表 1　土壤含水量与初渗速率、稳渗速率、微团聚体、水稳性大团聚体比例的关系

指 标	土壤含水量	
	Pearson 相关系数	p
初渗速率	0.981	<0.001
稳渗速率	0.961	<0.001
微团聚体(<0.25 mm)	−0.974	<0.001
水稳性大团聚体(>0.25 mm)	0.974	<0.001

2.3　保水剂加木质素结皮措施对土壤养分含量的影响

保水剂加木质素结皮措施显著增加了土壤养分含量。由图 6 可知,对照中土壤碱解氮含量为 33.3 mg/kg,保水剂加木质素结皮措施处理下碱解氮含量为 41.3 mg/kg,显著增加了 24 %($p<0.05$);相比于对照,速效磷含量在该措施处理下显著增加了 43%($p<0.05$),由 2.1 mm/kg 增加到了 3.0 mm/kg;速效钾含量在对照中为 266.8 mm/kg,在该措施下为 332.3 mm/kg,显著增加了 25%($p<0.05$,图 6)。

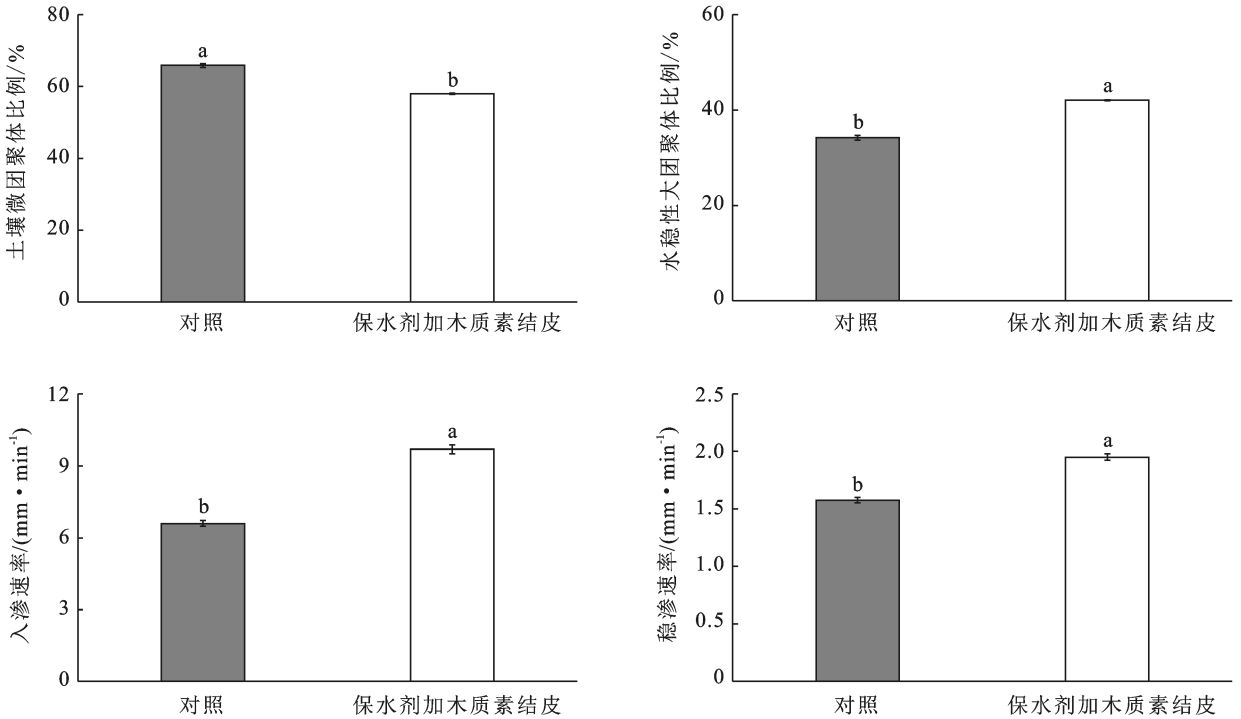


图 5 保水剂加木质素结皮措施对水稳性团聚体比例、入渗速率和稳渗速率的影响(平均值±标准误差)

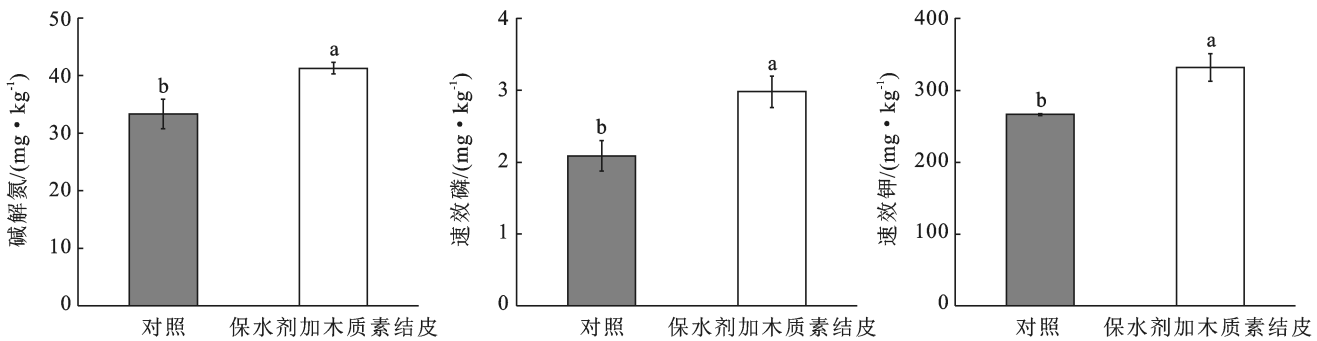


图 6 保水剂加木质素结皮措施对土壤养分含量的影响(平均值±标准误差)

2.4 地上生物量与土壤含水量和土壤养分含量的关系

表 2 列出了保水剂加木质素结皮措施处理下地上生物量与土壤含水量、土壤养分含量之间的相关性。保水剂加木质素结皮措施处理下,地上生物量与土壤含水量、碱解氮、速效钾均呈显著的正相关关系,相关系数分别为 0.732,0.848,0.777($p<0.05$),与速效磷之间存在一定的相关关系,但并不显著($p>0.05$)。

表 2 地上生物量与土壤含水量和土壤养分含量的关系

指 标	地上生物量	
	Pearson 相关系数	p
土壤含水量	0.732	<0.05
碱解氮	0.848	<0.01
速效磷	0.701	0.053
速效钾	0.777	<0.05

3 讨 论

3.1 保水剂加木质素结皮措施对植物地上生物量和盖度的影响

本研究表明,保水剂加木质素结皮措施处理下植物地上生物量和盖度显著增加了 79%和 93%(图 3)。毛思帅等人[26]在保水剂影响沙地燕麦生产的研究中发现,保水剂仅使燕麦地上生物量增加了 32%;李丹阳等人[27]在木质素结皮影响沙地植被恢复的盆栽试验中发现,木质素结皮仅使生物量增加了 59%。曹远博等人[19]在恢复措施对黄土高原公路边坡植物生物量影响的研究中也发现,单一施用结皮后地上生物量增加了 332%,单一施用保水剂后地上生物量增加了 349%,但是在保水剂加木质素结皮措施下,生物量增加了 415%。本研究中,保水剂加木质素结皮措

施结合了保水剂和木质素结皮的优势特性,较单一措施而言,在保水和改善土壤养分条件上更具优势[28-31],从而使得生物量和盖度的增加量较单一措施的效果更佳。因此,在荒漠草原沙地利用保水剂加木质素结皮措施能更有效地促进植被的恢复。

3.2　保水剂加木质素结皮措施对土壤含水量的影响

保水剂加木质素结皮措施显著增加了土壤含水量。土壤水稳性大团聚体与土壤的水分保持能力呈正相关[32],且土壤入渗速率和稳渗速率的提高也会增加土壤的含水量[33-34]。保水剂中含有的大量羟基和羧基在土壤中能够吸附较小土壤颗粒,从而促进大团聚体的形成[19],且结皮能够增加土壤颗粒的粘结能力,易于大团聚体的形成[32]。这在 Mao 和孙隆祥等人[35-36]的研究中也得到了证实。本研究中,土壤水稳性大团聚体、入渗速率和稳渗速率显著增加,而土壤微团聚体显著降低,与土壤含水量的变化显著相关。这说明保水剂加木质素结皮措施通过增加土壤水稳性大团聚体含量、入渗速率和稳渗速率,减小土壤微团聚体含量,从而提高土壤含水量。

3.3　保水剂加木质素结皮措施对土壤养分含量的影响

保水剂加木质素结皮措施显著增加了土壤碱解氮、速效磷和速效钾的含量。在沙地植被中,降低土壤风蚀和水蚀是提高土壤养分的主要机制。木质素结皮能有效减少土壤受风蚀和水蚀的程度,进而减少土壤养分的流失[18],且保水剂强大的保水、蓄水能力能使土壤浅层截留更多的水分,减少水分渗漏量,进而减少土壤养分的淋失[37-39]。保水剂与木质素结皮的互补利用增加了沙地土壤中速效氮、速效磷、速效钾的含量[19],改善了沙地土壤的养分条件。

3.4　保水剂加木质素结皮措施对植被的调控机制

土壤水肥的供给是土壤沙化地带植被恢复的决定因素[40]。本研究中,保水剂加木质素结皮措施显著增加了土壤含水量,改善了土壤养分条件。且相关分析显示土壤水肥条件与植物地上生物量呈显著的正相关关系。因此,在保水剂加木质素结皮措施下,土壤水肥条件的改善共同驱动了沙地植被的快速恢复。

4　结 论

本试验以乌拉特荒漠草原沙化土地为例,研究了保水剂加木质素结皮措施对荒漠草原沙地植被恢复的调控机制。本研究中保水剂加木质素结皮措施下的地上生物量远远高于未施用该措施的地上生物量。且与其他单一措施的研究结果相比,表现出更好的恢复效果,表明保水剂与木质素结皮的综合运用能够更加快速有效地促进沙地植被的恢复。在保水剂加木质素结皮措施下,沙地土壤物理性状发生改变,土壤水稳性大团聚体比例、土壤入渗速率、稳渗速率升高,从而增加了土壤的含水量;另外,该措施利用木质素结皮克服了因保水剂吸水后膨胀,造成土体隆起,增大土壤水分蒸发表面积的问题,减少了水分蒸发和土壤养分的流失;利用保水剂保水、蓄水的能力弥补了木质素结皮保水能力有限的缺点,减少水分渗漏量,进而减少了土壤养分的流失,促进了土壤养分的积累。因此,保水剂加木质素结皮措施可以通过改善乌拉特荒漠草原沙化土地土壤水肥状况,有效地促进植被的恢复。

致谢:感谢徐翀、柯玉广在论文撰写方面给予的宝贵意见,感谢中国科学院乌拉特荒漠草原生态系统研究站的大力支持。

[参 考 文 献]

[1] Tang Zhuangsheng, An Hui, Deng Lei, et al. Effect of desertification on productivity in a desert steppe [J]. Scientific Reports, 2016,6(1):1-8.

[2] Han Xueying, Jia Guangpu, Yang Guang, et al. Spatio-temporal dynamic evolution and driving factors of desertification in the Mu Us Sandy Land in 30 years [J]. Scientific Reports, 2020,10(1):1-15.

[3] CCICCD. China Country Paper to Combat Desertification [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1997.

[4] 苏丽德,王海兵,左合君.1986—2019 年乌拉特后旗荒漠化动态演变及其成因研究[J].绿色科技,2020(12):1-6.

[5] 彭云霄,魏威.土壤沙化的成因及危害分析[J].安徽农学通报,2019,25(10):98-99.

[6] 唐庄生.半干旱荒漠草原沙化过程中植被退化机制研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2018.

[7] 苗恒录,李泽坤,徐冰,等.保水剂在干旱沙区作物应用中的研究进展[J].北方农业学报,2018,46(1):85-89.

[8] 王瑞君,陈正华,王百田,等.生物质结皮制剂在民勤流动沙区恢复植被的作用[J].农业工程学报,2013,29(9):140-147,296.

[9] 王瑞君,王百田,张帆,等.人工生物质结皮对黄土边坡微生态环境及植被恢复的影响[J].中国水土保持科学,2015,13(2):77-82.

[10] Bai Wenbo, Zhang Henggui, Liu Benson et al. Effects of super-absorbent polymers on the physical and chemical properties of soil following different wetting and drying cycles [J]. Soil use and management, 2010, 26(3): 253-260.

[11] 杨焱威,布仁布腾,石超.沙地综合治理及水土流失防治措施研究[J].内蒙古水利,2020,213(5):39-40.

[12] 赵鑫,王振,李新民,等.高吸水性树脂对夏玉米土壤含水量及出苗率的影响[J].湖北农业科学,2019,58(3):31-33.

[13] 鲁小珍,金永灿,杨益琴,等.木质素固沙材料应用于沙漠化地区植被恢复的研究[J].林业科学,2005,41(4):67-71.

[14] Hüttermann A, Zommorodi M, Reise K. Addition of hydrogels to soil for prolonging the survival of *Pinus halepensis* seedlings subjected to drought [J]. Soil and tillage research, 1999,50(3/4):295-304.

[15] Cao Yuanbo, Wang Baitian, Guo Hongyan, et al. The effect of super absorbent polymers on soil and water conservation on the terraces of the loess plateau [J]. Ecological Engineering, 2017,102:270-279.

[16] Yang Jun, Cao Hui, Wang Fang, et al. Application and appreciation of chemical sand fixing agent-poly (aspartic acid) and its composites [J]. Environmental Pollution, 2007,150(3):381-384.

[17] 姜疆.工业木素固沙材料生物效应的评价[D].江苏 南京:南京林业大学,2011.

[18] 舒鑫,王百田,曹远博,等.人工生物质结皮在黄土山区公路边坡应用的初探[J].四川农业大学学报,2014,32(4):369-375.

[19] 曹远博.晋西黄土区土壤微环境调控措施及效应研究[D].北京:北京林业大学,2017.

[20] An Hui, Tang Zhuangsheng, Keesstra Saskia, et al. Impact of desertification on soil and plant nutrient stoichiometry in a desert grassland [J]. Scientific reports, 2019, 9(1): 1-8.

[21] 王少昆,赵学勇,贾昆峰,等.乌拉特荒漠草原小针茅(*Stipa klemenzii*)群落土壤细菌多样性及垂直分布特征[J].中国沙漠,2016,36(6):1564-1570.

[22] 张蕊,赵学勇,左小安,等.荒漠草原沙生针茅(*Stipa glareosa*)群落物种多样性和地上生物量对降雨量的响应[J].中国沙漠,2019,39(2):45-52.

[23] 许静.不同试验方法测定田间持水量的对比研究[D].吉林 长春:吉林大学,2018.

[24] 王秀颖,高晓飞,刘和平,等.土壤水稳性大团聚体测定方法综述[J].中国水土保持科学,2011,9(3):106-113.

[25] Pittman J J, Zhang Hailin, Schroder J L, et al. Differences of phosphorus in Mehlich 3 extracts determined by colorimetric and spectroscopic methods [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2005, 36(11-12): 1641-1659.

[26] 毛思帅, Robiul Islam M,贾鹏飞,等.保水剂和施肥量对沙地燕麦生产的影响[J].麦类作物学报,2011,31(2):308-313.

[27] 李丹阳,王宁,常昱,等.两种不同生物质结皮制剂影响沙地植被恢复的盆栽试验研究[J].环境污染与防治,2017,39(12):1367-1369,1374.

[28] Abrisham E S, Jafari M, Tavili A, et al. Effects of a super absorbent polymer on soil properties and plant growth for use in land reclamation [J]. Arid Land Research and Management, 2018, 32(4): 407-420.

[29] Omidian H, Rocca J G, Park K. Advances in superporous hydrogels [J]. Journal of controlled release, 2005, 102(1): 3-12.

[30] 王汉杰,景丽,刘茂松,等.木质素固沙材料田间固沙试验与成效分析[J].南京林业大学学报(自然科学版),2008,32(2):11-16.

[31] 刘洋,龙凤,李绍才,等.保水剂和PAM对人工土壤颗粒水分蒸发的影响[J].中国水土保持,2015(2): 44-46, 47.

[32] 赵允格,许明祥,王全九,等.黄土丘陵区退耕地生物结皮对土壤理化性状的影响[J].自然资源学报,2006,21(3):441-448.

[33] 吕贻忠,杨佩国.荒漠结皮对土壤水分状况的影响[J].干旱区资源与环境,2004,18(2):76-79.

[34] Zhao Wenju, Hu Jiazhen, Cui Zhen, et al. Effects of superabsorbent polymers on the vertical infiltration of soil water with sand mulching [J]. Environmental Earth Sciences, 2019, 78(23): 1-6.

[35] Mao Rong, Zhang Xinhou, Meng Henan. Effect of *Suaeda salsa* on soil aggregate-associated organic carbon and nitrogen in tidal salt marshes in the Liaohe Delta, China [J]. Wetlands, 2014,34(1):189-195.

[36] 孙隆祥,陈梦妮,薛建福,等.秸秆还田对麦粱两熟农田土壤团聚体特征的短期效应[J].水土保持研究,2018,25(6):36-44.

[37] 李佳岭,李龙保,廖宗文,等.保水剂施用层次对草坪生长及土壤水肥的影响[J].草业学报,2014,23(4):61-67.

[38] 杜建军,苟春林,崔英德,等.保水剂对氮肥氨挥发和氮磷钾养分淋溶损失的影响[J].农业环境科学学报,2007,26(4):1296-1301.

[39] 陈晓佳,吕晓男,麻万诸.保水剂对肥料淋失和百喜草生长的影响[J].浙江农业科学,2004(3):130-131.

[40] 陈秋捷,张楠楠,仲波,等.若尔盖高寒草地退化沙化过程中土壤养分与团聚体结构的变化特征[J].生态科学,2019,38(4):13-20.