Arkadolith 土壤改良剂对杨柴生长状况及沙土改良效果研究

张宾宾, 郭建斌, 蒋坤云, 贾子利, 吴玉晴
(北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083)

摘 要: 为探讨 Arkadolith 土壤改良剂对沙土理化性质以及沙生植物生长状况的改良效果,采用异地温室人工模拟试验的方法研究了改良剂不同施用率处理(CK:0%; A_1:4%; A_2:8%; A_3:12%; A_4:16%)对库布齐沙漠沙生植物群落优势种杨柴生长状况以及土壤理化性质的影响。试验结果表明,施用 Arkadolith 土壤改良剂能显著提高杨柴生长状况,施加改良剂 4 种处理新梢生长高比对照增加了 4.35%~43.5%,植被叶片数呈: A_4> A_2> A_3> A_1> CK,杨柴地上生物量比对照增加了 36.8%~168.5%,同时减小了植株的根冠比;施用 Arkadolith 土壤改良剂改善了植物体内的水分状况,增加了植株的吸水量,提高了杨柴在全天各时段的叶水势;施用 Arkadolith 土壤改良剂能改善土壤物理性状,降低土壤容重、提高土壤孔隙度、降低土壤渗透速度、增加田间持水量;并且能增加土壤养分储备,提高速效养分,缓解养分失衡。

关键词: Arkadolith 土壤改良剂; 沙质土壤; 杨柴; 土壤理化性质
文献标识码: A 文章编号: 1000-288X(2011)04-0190-05 中图分类号: S152.4, S156.2

Effects of Arkadolith Soil Modifier on Sand Soil's Properties and Growth of *Astragalus Mongolicum*

ZHANG Bin-bin, GUO Jian-bin, JIANG Kun-yun, JIA Zi-li, WU Yu-qing
(School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: To find out the amelioration effect of Arkadolith, a new soil modifier on sandy soil physical and chemical properties and the growth of *Astragalus mongolicum*, a dominant species in sandland community in Kubuqi Desert, effects of different application rate(CK: 0%; A_1: 4%; A_2: 8%; A_3: 12%; A_4: 16%) of Arkadolith were compared by means of simulated experiment in laboratory. The results show that the application of Arkadolith can significantly improve the growth status of *Astragalus mongolicum*, the growth of new shoots increase by 4.35%~43.5% and biomass increase by 36.8%~168.5% with the decrease of the root-shoot ratio at the same time, leaf numbers follows the order of A_4> A_2> A_3> A_1> CK. Meanwhile, use of Arkadolith increase plant water absorption, raise leaf water potential, revealing the improvement of plant water status. The total porosity of soil and field capacity increases, bulk density and soil infiltration rate decrease after application of Arkadolith, indicating that it has significantly improved soil physical properties. It also can alleviate soil nutrition imbalances by increasing soil nutrient reserves.

Keywords: Arkadolith soil modifier; sandy soil; *Astragalus mongolicum*; soil physical and chemical properties

土地沙化是指因气候变化和人类活动所导致的天然沙漠扩张和沙质土壤上植被破坏、沙土裸露的过程。土地沙化致使土地生产能力局部丧失或全部丧失,尤其是土地沙化造成土地肥力降低以致丧失的现状,对农业的可持续发展带来了严重的影响,其突出表现为土地沙化分布越来越广,程度越来越重,速度越来越快。这些最终导致了土壤理化性质恶化,养分平衡失调,地力下降,抵御自然灾害能力差,严重阻碍了当地农业生产及生态环境的良性循环[1-2]。寻求一种能够改良风沙土结构,提高土壤抗侵蚀能力的技术措施已成为风沙土领域研究的一个重要方面[3]。大量研究表明,通过在风沙区土壤添加土壤结构改良物

收稿日期: 2010-12-24 修回日期: 2011-01-26
资助项目:"948"国家林业局引进国际先进林业科学技术项目"天然高效环保土壤改良剂及应用技术引进"(2008-4-44)
作者简介: 张宾宾(1988—),男(汉族),山东省临沂市人,硕士研究生,主要研究方向为生态环境工程。E-mail: linxue631@126.com。
通信作者: 郭建斌(1962—),男(汉族),陕西省韩城市人,副教授,硕士生导师。主要从事生态环境修复和林业生态工程方面的研究。E-mail: jianbinguo@bjfu.edu.cn。

质能够改善土壤机械组成, 降低土壤容重, 提高孔隙度, 增加土壤养分含量, 防止土壤退化。

赵亮[4] 等选用粉煤灰作为沙质土壤改良剂, 有效地改善了沙质土壤的物理特性, 增强了沙土水分利用效率。魏自民等[5] 通过有机肥料培肥试验, 结果表明, 施加有机肥料能明显降低风沙土中沙粒的含量, 提高黏粒含量, 还可以降低土壤容重, 提高孔隙度。高永恒等[6] 施用康乐土壤改良剂对草坪床土理化性质的影响研究表明, 康乐土壤改良剂能够丰富土壤有机质和全氮, 调节速效养分, 能有效降低土壤 pH 值和电导率。

目前, 国内研究多关注于改良剂改善土壤物理化学性质、养分的应用或者对作物生长的影响之中的单独一个方面, 而针对土壤改良剂改良沙质土壤理化性质以及地上植被的综合研究较为缺乏。

本研究通过室内模拟实验, 探究了 Arkadolith 土壤改良剂作为沙质土壤改良剂改良沙土的理化性质及对杨柴生长状况的效应, 期望为这种新型土壤改良剂在沙区的应用与推广提供一定的理论依据。

1　材料与方法

1.1　供试材料

试验于 2010 年 4 —9 月在北京鹫峰森林公园温室内进行。供试植株为库布齐沙漠 2 年生沙生灌木杨柴(*Astragalus mongolicum*) 。供试土样采自于内蒙古自治区林业科学研究院达拉特旗沙漠综合科学研究站的风沙土。该站地处库布齐沙漠东缘。库布齐沙漠位于鄂尔多斯高原北部, 黄河南岸。北与包头市、土默特右旗、乌拉特前旗隔黄河相望, 东与准格尔旗为邻, 南靠东胜市, 西接杭锦旗。地理位置位于北纬 40°21′30″ —22′30″, 东经 109°50′30″ —51′50″, 海拔约 1 000 m, 该区位于黄河以南的二级阶地上, 属中温带大陆性季风气候, 年平均降水量一般在 240 ~ 360 mm。供试土壤的理化性质详见表 1。

表 **1**　供试土壤的理化性质

有机质/ %	全氮/ %	速效氮/ ($mg \cdot kg^{-1}$)	速效磷/ ($mg \cdot kg^{-1}$)	速效钾/ ($mg \cdot kg^{-1}$)	容重/ ($g \cdot cm^{-3}$)	孔隙度/ %
0.30	0.16	10.1	5.7	50.3	1.54	40.9

Arkadolith 土壤改良剂作为一种天然矿物的混合物, 由 9 种不同矿物(软水铝石, 三水铝石, 高岭石, 蒙脱石, 绿泥石等) 组成, 这些矿物在中国均有分布。该种混合物通过一定工艺可以去除富含营养的生活污水和特定范围内的工业废水中的阴离子(NO_3^-, PO_4^{3-}) , 同时将阴离子的养分吸附在矿物的表面, 一方面达到了净化水质的目的, 另一方面则形成富含养分的土壤改良剂。该种土壤改良剂可以根据植物对养分的需求释放适量营养物质, 作用高效持久, 同时可以改善土壤的水文特性, 提高土壤保水、持水能力, 且不会造成二次污染。该种改良剂的土壤化学性质见表 2。

表 **2**　**Arkadolith** 改良剂土壤化学性质

有机质/ %	全氮/ %	速效氮/ ($mg \cdot kg^{-1}$)	速效磷/ ($mg \cdot kg^{-1}$)	速效钾/ ($mg \cdot kg^{-1}$)	EC/ ($\mu S \cdot cm^{-1}$)
0.92	0.49	29.7	32.1	100.8	376

1.2　试验设计

试验设置为盆栽对比试验, 采用规格为 30 cm (内径) × 22 cm(高) 的花盆进行试验。试验共设置 4 个处理, 分别为: (1) CK。不添加任何改良剂; (2) A_1。改良剂的施用率为沙土质量的 4%; (3) A_2。改良剂的施用率为沙土质量的 8%; (4) A_3。改良剂的施用率为沙土质量的 12%; (5) A_4。改良剂的施用率为沙土质量的 16%。每种处理设置 5 次重复, 共计 25 盆。

人工模拟实验根据达拉特旗历年的气候资料, 结合开展实验的时间, 借助温室及其配套装置来调节和控制植物生长的环境条件, 通过对温室内所有环境因子如室内温度、湿度、光照、热的控制来大致模拟当地气候, 从而使该实验便于管理和进行数据的采集。

1.3　测定项目及方法

(1) 植物生长指标的测定。新枝生长高、植被叶片数的测定为在杨柴生长季内每隔一个月对新枝的高度进行测量; 生物量测定根、茎、叶鲜重及干重(将根、茎、叶放入烘箱中 80 ℃烘干 48 h 至恒定质量) , 根冠比等, 取其平均值;

(2) 叶水势的测定。采用美国产的 PSYPRO 露点水势仪。测试时间选取在 6: 00 —18: 00 时段进行, 每隔 2 h 选择杨柴树冠中上部向阳面、生长发育良好的枝条上部的叶片, 用打孔器取下其叶, 放入 C-52 样品室测定其水势, 测定时平衡 15 min, 设定 5 min 记录一次数据, 至少连续记录 5 次, 取平均值作为该时刻的杨柴叶水势。

(3) 土壤理化指标的测定。土壤容重和孔隙度采

用环刀法测定; 渗透系数用定水头渗透仪法; 田间持水量(%) = (湿土重- 烘干土重) / 烘干土重 × 100; 土壤有机质采用重铬酸钾法测定; 全氮采用半微量开氏法; 碱解氮用扩散法测定; 速效磷采用碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法; 速效钾采用醋酸铵浸提—火焰光度法测定。

所获得的数据采用 Excel 和 SPSS 统计软件进行分析处理。

2 结果与分析

2.1 施用 Arkadolith 对植株生长状况的影响

2.1.1 施用 Arkadolith 对新稍生长高的影响 图 1 为 5—9 月杨柴生长季节内 5 种不同 Arkadolith 土壤改良剂施用水平下新稍生长高的变化情况。从图 1 可以看出, 杨柴各处理在 5—9 月新梢高度增长基本呈 S 形, 前期生长缓慢(5—6 月), 到 9 月达到最高。杨柴新梢只是生长缓慢但并未停止生长。杨柴在 7 月份的株高生长是最快的, 其中 A_3 增长最快, 由 7 月 15 号的 15 cm 增长到 7 月 25 号的 27 cm, 这主要是由于太阳辐射强烈, 光合速率快, 树体积累营养物质能力大; 9 月份随着气温的降低株高增长速度减缓。与对照(CK) 相比, 自 6 月 15 日第二次测量之后, 添加改良剂处理后的杨柴的新梢生长高均有一定程度的提高, 至生长季节快结束时的最后一次测量(9 月 15 日) 显示, 试验各处理(A_1, A_2, A_3, A_4) 相较于对照, 新梢生长高分别增加了 4.35%, 17.4%, 47.8%, 43.5%。除 A_1 外, 其余 3 组相较于对照均具有显著性差异($LSD_{0.05}$)。

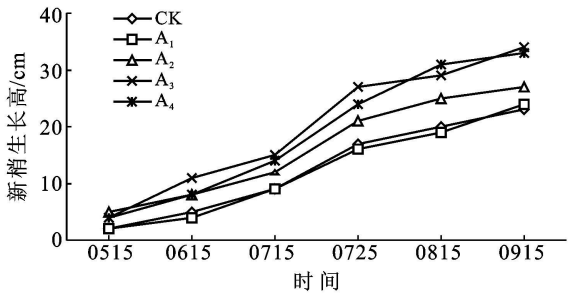


图 **1** 不同处理下杨柴新稍生长高情况

2.1.2 施用 Arkadolith 对植株叶片数的影响 用平均单株植株的叶片数表示植物生长力的大小, 由此分析改良剂对植物生长能力的影响。图 2 为 5—9 月杨柴生长季节内 5 种不同 Arkadolith 土壤改良剂施用水平下植株叶片数的变化情况。从图 2 可以看出, 施加改良剂处理的组叶片数较于对照均有一定程度的增加, 5 月 15 日和 6 月 15 日前两次测量显示各组之间无明显差异, 但一个月之后, A_2, A_3 和 A_4 这 3 个处理相比较对照, 分别增加了 17.9%, 26.3%, 21.1%。之后两次测量结果显示, 4 处理组优势继续扩大, 至 8 月 15 日测量结果显示处理组较对照的增幅在 7.6% ~ 23.3% 之间, 9 月初叶片数增长的速度减缓, 甚至有部分呈负增长, 此时叶片数由大到小呈: A_4 > A_2 > A_3 > A_1 > CK。根据观测, 该时期由于温度高(最高气温达 41.5 ℃) 虽铺设遮荫网, 但空气流通状况不乐观, 造成部分叶片受霉菌侵害并使叶片老化、脱落。

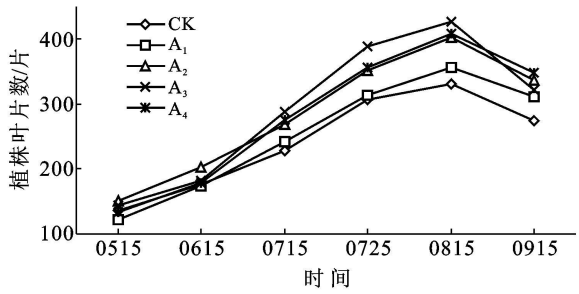


图 **2** 不同处理下杨柴叶片数情况

2.1.3 施用 Arkadolith 对生物量与根冠比的影响 表 3 为杨柴在 5 种处理方式下植物产量的对比。由表 3 可以看出, 随着改良剂使用量的增加对杨柴的生长有明显的促进作用。地上生物量可反映出草茎叶干物质积累情况, 进而可看出其光合作用的强弱。从表 3 可以看出, 杨柴地上生物量随着改良剂的施加呈递增的趋势。与对照(CK) 相比, A_1—A_4 各处理分别增加了 36.8%, 91.9%, 141.7%, 168.5%。土壤改良剂对杨柴生长的促进作用明显。

植物根部发育状况对植物生活力影响很大, 在植物生长过程中, 良好的根系有利于水分和营养元素的吸收, 发达的根系可以增强植物的抗逆性[7]。由表 3 可知, 添加改良剂处理过的杨柴地下鲜重和干重均较沙土有不同程度的提高, 植株含水量也随之增加。其中 A_3 组的根系改良效果最为明显达到 12.3 g, 相较于对照 (8.68 g) 达到极显著水平($LSD_{0.01}$)。A_4 组的土壤含水量最高, 达到 58.6%。

根冠比是牧草对环境适应能力强弱的重要指标之一, 同时也反映了地上生物量和地下生物量的相对变化情况[8]。由表 3 可以看出, 与对照相比改良剂的添加能够降低植株根冠比, 随着改良剂施用量增加根冠比下降, 呈负相关关系, 反映出牧草根系活力增大, 土壤改良剂的使用能够改善牧草的根系生长环境。鲜重状态下改良剂 4 个施用量(A_1—A_4) 与对照相比较, 根冠比分别下降了 15.8%, 35.3%, 41.4% 和 51.9%。干重状态下改良剂 4 个施用量(A_1—A_4) 与

对照相比较, 根冠比分别下降了 10.4%, 31.1%, 37.8%和 43.7%。改良剂施用量与杨柴鲜重、干重根冠比之间的线性方程分别为:

$$y = -0.043x + 1.29,\ R^2 = 0.966$$

$$y = -0.039x + 1.33,\ R^2 = 0.949$$

表 **3**　不同改良剂处理方式下杨柴的生物量与根冠比

处理	鲜重			干重		
	地下/g	地上/g	根冠比	地下/g	地上/g	根冠比
CK	8.68	6.53	1.33	4.05	3.00	1.35
A_1	10.00	8.93	1.12	4.32	3.58	1.21
A_2	10.78	12.53	0.86	4.61	4.96	0.93
A_3	12.30	15.78	0.78	5.75	6.84	0.84
A_4	11.23	17.53	0.64	4.65	6.14	0.76

注: 表中数据为 5 次重复的平均值。下同。

2.1.4　施用 Arkadolith 对叶水势的影响　植物的叶水势反映了植物的水分状况和植物从土壤中吸收水分的能力, 是土壤—植物—大气连续体(SPAC)中水分运转驱动力的重要组成部分和重要环节[9], 是衡量植物抗旱性的一个重要生理指标[10]。从图 3 可以看出, CK 和 A_1 两个处理呈现明显的双峰曲线, A_2, A_3, A_4 这 3 个处理则显示为单峰曲线。清晨 6:00 左右是其叶水势一天中的最高值, 其中 A_1, A_2, A_3, A_4 这 4 个处理清晨 6:00 叶水势比较接近, 平均数值为 -1.48 MPa, 且均高于 CK 处理(-1.89 MPa)。12:00左右杨柴林木的叶水势降至一天中的最低点。除 A_2 在 14:00叶水势低于 A_1 外, A_2, A_3 和 A_4 这 3 个处理的叶水势在全天时间内均高于其余两个处理, 日均值分别为-1.90, -1.83 和-1.68 MPa, 对照组最小为-2.40 MPa。通过植物水势的变化可以反映植物对干旱环境的适应性和植物在某一时期受干旱胁迫的程度[11-12], 可以看出, 通过添加 Arkadolith 土壤改良剂, 能改变沙土水分状况, 增加了植株的吸水量, 从而一定程度上缓解了沙土对植株的干旱胁迫, 且在试验范围内, 随着改良剂用量的增加, 这种改良效果越来越好。对杨柴林木叶水势(LWP)的日变化与其时间(T)之间的关系进行拟合, 各处理均得出二次三项式的关系方程(表 4)。

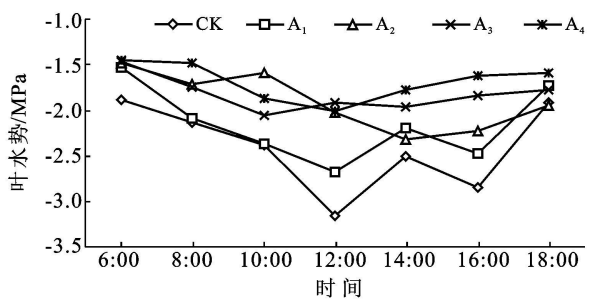


图 **3**　不同处理下杨柴叶水势的日变化情况

表 **4**　不同处理杨柴叶水势日变化拟合方程及参数

处理	拟合公式	相关系数 R^2	显著水平
CK	$LWP = 0.025T^2 - 0.619T + 1.094$	0.674	0.106
A_1	$LWP = 0.024T^2 - 0.605T + 1.226$	0.834	0.028
A_2	$LWP = 0.008T^2 - 0.250T - 0.190$	0.729	0.074
A_3	$LWP = 0.010T^2 - 0.267T - 0.280$	0.839	0.026
A_4	$LWP = 0.011T^2 - 0.282T - 0.109$	0.711	0.084

2.2　施用 Arkadolith 对土壤理化性质的影响

2.2.1　施用 Arkadolith 对土壤物理性质的影响　由表 5 可以看出, 施加改良剂后, 各处理的土壤物理性质均有了明显改善。随着改良剂用量的增加, 土壤容重减小、孔隙度增加。与 CK 处理相比, 添加改良剂各处理容重减小在 5.41%~18.2%之间, 而孔隙度与土壤容重呈负相关关系, 容重愈小, 则孔隙度愈大, 与 CK 相比, 孔隙度增加比例为 10.19%~34.47%之间。经回归分析, 得出土壤容重(ρ_b)与总孔隙度(f_0)拟合方程为:

$$f_0 = -0.482\rho_b + 1.122,\ R^2 = 0.944$$

式中: f_0 ——土壤孔隙度(%); ρ_b ——土壤容重(g/cm^3)。

经方差分析证明, 施改良剂后土壤容重和孔隙度都较对照达差异极显著水平($p < 0.01$)。

表 **5**　不同处理对土壤物理性质的影响

处理	容重/($g \cdot cm^{-3}$)	孔隙度/%	渗透系数/($cm \cdot s^{-1}$)	田间持水量/%
CK	1.48^a	41.2^e	$4.8\times10^{-3\,a}$	14.9^d
A_1	1.40^b	45.4^d	$3.6\times10^{-3\,b}$	16.6^c
A_2	1.32^c	47.2^c	$2.5\times10^{-3\,c}$	17.1^c
A_3	1.27^{cd}	49.8^b	$1.2\times10^{-3\,d}$	19.7^b
A_4	1.21^d	55.4^a	$8.1\times10^{-4\,d}$	21.2^a

注: 同一列数据末尾标注不同字母, 表示处理间差异达到 1%显著水平(LSD 法)。下同。

土壤渗透性是土壤重要的物理性能指标之一, 它反映水在土壤中的运动及储存情况[13]。由表 5 可知, 施加改良剂后, 土壤的渗透速度明显减慢, 速度由对照的 4.8×10^{-3} cm/s 可最大降低到 8.1×10^{-4} cm/s, 减小到对照的 16.9%水平, 各处理与对照差异达极显著水平($p < 0.01$), 说明该改良剂对土壤的渗透性改良效果非常明显。对田间持水量进行测定, 同样得出处理与对照差异达极显著水平($p < 0.01$), 田间持水量的提高对保证杨柴等沙生植物用水供给具有很大的作用。

风沙土土质疏松, 土壤部分或几乎全由细砂颗粒组成, 土壤透水性、透气性高。表 5 的结果说明, 施加

Arkadolith 土壤改良剂后, 因其中含有多种矿物(如高岭石, 水铝矿等), 而这些矿物具有较大的比表面和较强的静电场, 施用后可以把细土和黏粒吸附到它的周围, 形成水稳性较好的团粒结构, 有效地降低了土壤容重, 增大了土壤孔隙度, 从而有效改良了沙土结构, 土壤的物理性质得到明显的改善, 这是改变沙质土壤不良农业生产性状的基础。

2.2.2 施用 Arkadolith 对土壤养分的影响

(1) 对土壤有机质和全氮的影响。土壤养分的动态变化与植株的生长发育有着密切的关系。从表 6 可以看出, 施加土壤改良剂后, 各处理有机质、全氮均有较明显提高。各处理土壤有机质含量较对照分别增加了 32.1%, 46.4%, 75% 和 92.9%; 全氮分别增加了 50%, 64.3%, 92.9% 和 135.7%。每个处理有机质和全氮相较于对照差异均达到极显著水平($p < 0.01$)。土壤有机质是土壤中各种营养元素特别是氮、磷的重要来源, 对保持肥力和土壤结构也有重要的意义。从试验结果来看, 土壤改良剂(Arkadolith)在改善土壤物理性质的同时, 也为土壤提供了大量养分。

表 6 不同处理对土壤养分的影响

处理	有机质/%	全氮/%	速效氮/(mg·kg^{-1})	速效磷/(mg·kg^{-1})	速效钾/(mg·kg^{-1})
CK	0.28^{c}	0.14^{c}	2.73^{e}	3.71^{e}	44.26^{d}
A_1	0.37^{b}	0.21^{b}	5.58^{d}	6.13^{d}	56.89^{c}
A_2	0.41^{b}	0.23^{b}	7.31^{c}	7.53^{c}	63.71^{b}
A_3	0.49^{a}	0.27^{ab}	9.02^{b}	9.67^{b}	66.47^{b}
A_4	0.54^{a}	0.33^{a}	12.47^{a}	11.42^{a}	73.56^{a}

(2) 对速效养分的影响。速效养分是指当季作物吸收的养分, 它们对作物早期的生长发育起着重要的作用[14]。表 6 表明, 除速效钾外, 速效氮和速效磷都较对照增幅明显, 速效氮较对照的增幅在 1.04~ 3.57 倍之间, 速效磷增幅达 0.65~ 2.08 倍。各处理的土壤中速效氮、磷、钾含量与对照差异均达到极显著水平($p < 0.01$), 除速效钾中 A_2 和 A_3 这两个处理差异性不明显以外, 各个处理间速效氮、磷、钾的含量也达到了极显著水平($p < 0.01$)。

3 结 论

(1) Arkadolith 土壤改良剂能显著提高杨柴生长状况。杨柴施用改良剂后各处理(A_1—A_4)新梢生长高分别增加了 4.35%, 17.4%, 47.8% 和 43.5%, 植被叶片数由大到小呈: A_4> A_2> A_3> A_1> CK, 杨柴地上生物量分别增加了 36.8%, 91.9%, 141.7% 和 168.5%, 同时减小了植株的根冠比, 说明土壤改良剂的使用能够改善牧草的根系生长环境。

(2) 通过施加改良剂改变了沙土水分状况, 增加了植株的吸水量, 提高了杨柴在全天各时段的叶水势, 从而一定程度上缓解了沙土对植株的干旱胁迫。

(3) Arkadolith 土壤改良剂能改善土壤物理性状, 降低土壤容重、提高土壤孔隙度、降低土壤渗透速度、增加田间持水量。在本试验中, 随着施用量的增加, 改良效果愈加明显。

(4) 供试土壤施入改良剂后, 可增加土壤养分储备, 提高速效养分, 缓解养分失衡。

[参 考 文 献]

[1] Zhao H L, Zhao X Y, Zhou R L, et al. Desertification processes due to heavy grazing in sandy rangeland, Inner Mongolia [J]. Journal of Arid Environments, 2005, 62: 309-319.

[2] 杨根生, 拓万全. 风沙对黄河内蒙古河段河道淤积泥沙的影响[J]. 西北水电, 2004(3): 44-49.

[3] 曹丽花, 赵世伟, 赵勇钢, 等. 土壤结构改良剂对风沙土水稳性团聚体改良效果及机理的研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(2): 65-68.

[4] 赵亮, 唐泽军. 粉煤灰对沙质土壤物理特性的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(6): 178-202.

[5] 魏自民, 谷思玉, 赵越, 等. 有机物料对风沙土主要物理性质的影响[J]. 吉林农业科学, 2003, 28(3): 16-18.

[6] 高永恒, 孙吉雄, 王有国. 土壤改良剂对草坪床土理化性质的影响[J]. 草原与草坪, 2004(2): 34-36.

[7] 梁银丽, 陈培元. 土壤水分和磷营养对小麦根系生长生理特性的影响[J]. 西北植物学报, 1994, 14(5): 56-60.

[8] 柴丽娜, 路苹, 王金淑. 干旱胁迫冬小麦幼苗根冠比的动态变化与品种抗旱性关系的研究[J]. 北京农学院学报, 1996, 11(2): 19-23.

[9] Philip J R. Plant water relations: Some physical aspects [J]. Ann. Rev. of Plant Biology, 1966, 17: 245-268.

[10] 王沙生, 高荣孚, 吴贵明. 植物生理学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1990.

[11] 徐军亮, 马履一, 王华田. 油松林人工林 SPAC 水势梯度的时空变异[J]. 北京林业大学学报, 2003, 25(5): 1-5.

[12] 李洪建, 王孟本. 黄土区 4 个树种水势特征的研究[J]. 植物研究, 2001, 21(1): 100-105.

[13] 无蔚东, 黄春昌, 王景明, 等. 江西省山地几种森林类型下土壤物理性状的研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1997, 3(1): 50-55.

[14] 陆欣. 土壤肥料学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2001: 133-136.