

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2014-0296

张雷一, 张耀, 张静茹, 向仰州, 刘方, 姚斌. 石漠化旱地施用改良剂对黑麦草生长的影响[J]. 草业科学, 2015, 32(3): 450-457.
ZHANG Lei-yi, ZHANG Yao, ZHANG Jing-ru, XIANG Yang-zhou, LIU Fang, YAO Bin. Influence of applying improvers on growth of perennial ryegrass in rocky desertification land[J]. Pratacultural Science, 2015, 32(3): 450-457.

石漠化旱地施用改良剂对黑麦草生长的影响

张雷一^{1,2}, 张耀², 张静茹^{1,2}, 向仰州³, 刘方², 姚斌¹

(1. 中国林业科学研究院荒漠化研究所, 北京 100091; 2. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵州 贵阳 550025;
3. 贵州省林业调查规划院, 贵州 贵阳 550003)

摘要:为研究石漠化区旱地施用改良剂对多年生黑麦草(*Lolium perenne*)生长、返青及增产效果的影响, 进行外源添加牛粪炭、蚯蚓粪、保水剂、长效有机复合肥和秸秆粉等改良剂的盆栽试验。结果表明, 出苗生长期, 与对照比较, 施用蚯蚓粪处理的黑麦草出苗时间缩短 50.00%, 出苗率和分蘖数(60 d)分别提高了 46.24% 和 46.34%, 且都优于其他改良剂处理。添加复合肥对黑麦草的株高和单株鲜重增加量最大。返青恢复生长期, 添加秸秆粉处理的返青时间、株高、鲜重和分蘖数等指标表现最好。本研究得出, 施用不同改良剂对黑麦草生长适应性的提高效果为蚯蚓粪 > 复合肥、牛粪炭、保水剂 > CK > 秸秆粉, 返青恢复性为秸秆粉 > 复合肥、蚯蚓粪、保水剂 > CK > 牛粪炭。因此, 施加改良剂可促进多年生黑麦草生长。

关键词:改良剂; 多年生黑麦草; 生长状况

中图分类号: S156.92; S543+.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0629(2015)03-0450-08*

Influence of applying improvers on growth of perennial ryegrass in rocky desertification land

ZHANG Lei-yi^{1,2}, ZHANG Yao², ZHANG Jing-ru^{1,2},
XIANG Yang-zhou³, LIU Fang², YAO Bin¹

(1. Institute of Desertification Studies, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;
2. College of Resource and Environment Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China;
3. Guizhou Forestry Survey and Planning Institute, Guiyang 550003, China)

Abstract: In order to explore the influence of soil improvers on the growth, turning green and yield of perennial ryegrass in rocky desertification land, the pot experiment was conducted with exogenous cattle manure carbon, wormcast, water retaining agent, longterm organic compound fertilizer, straw powder, and so on. With application of wormcast, seedling emergence time reduced by 50.00%, seedling emergence rate and tiller number(60 d) increased by 46.24% and 46.34%, respectively, compared with the treatments without using soil improvers. This treatment was better than the treatments with other soil improvers applications. The increase of plant height and fresh weight of perennial ryegrass were the highest with the application of compound fertilizer. The turning green recovery time, plant height, fresh weight and tiller number of the treatment with straw power were the best during the turning green recovery period. In conclusion, the improving effects of different improvers on ryegrass growth decreased in the following

* 收稿日期: 2014-06-20 接受日期: 2014-10-27
基金项目: 国家林业局“948”项目(2013-4-80); 国家自然科学基金项目(31460133); 林业公益性行业科研专项(201104077)
第一作者: 张雷一(1988-), 男, 吉林蛟河人, 在读硕士生, 主要从事林草复合生态系统研究。E-mail: zhang_leiyi@126.com
通信作者: 姚斌(1973-), 男, 贵州贵阳人, 副研究员, 博士, 主要从事生态恢复及荒漠化防治研究。E-mail: acmn21@caf.ac.cn

order: wormcast>compound fertilizer, cow dung carbon, water retaining agent>CK>straw power. The improving effects of different improvers on turning green recovery decreased in the following order: straw powder>compound fertilizer, wormcast, water-retaining agent>CK>cow dung carbon. These results suggested that the optimum soil improvers can promote the growth of perennial ryegrass.

Key words: improver; perennial ryegrass; growth

Corresponding author: YAO Bin E-mail: acmn21@caf.ac.cn

贵州喀斯特地区由于地质环境脆弱、敏感度高^[1-2],又面临人口超载和经济社会落后的双重压力,致使生态环境严重退化,出现了大面积基岩裸露的石漠化问题^[3],因而恢复石漠化生态环境,提高人们的生活水平成为当前喀斯特石漠化区亟待解决的重要问题^[4]。研究证实,种植牧草是石漠化生态恢复的一种有效手段,其对植被恢复、生态环境综合整治和改善民生等方面有显著效果^[5-6]。而石漠化地区兼具季节性干旱、降雨不均、土层浅薄贫瘠等特点,如何促进牧草生长和增加生物量一直是研究的重点。

近年来,有关土壤施加改良剂可促进植物生长的研究已经引起广泛的关注。研究表明,盐碱土施加改良剂能够不同程度地提高作物(牧草)的成活以及促进植物生长和对水分、养分的吸收^[7-8];红壤旱地施加改良剂可改良土壤结构,提高土壤有机质含量,促进芝麻(*Sesamum indicum*)生长^[9],这说明改良剂能对土壤性能、作物出苗和生长有一定的促进作用^[10]。也有研究表明,土壤改良剂可以吸附重金属、改善土壤微生物和酶活性^[11-12]。

当前,新型土壤改良剂不断出现,国内外土壤改良剂在防止水土流失方面的应用研究较多^[13],极端环境下土壤改良剂的施用对植物的生长影响研究较少。同时,新型土壤改良剂不断出现,其在大田中应用时,对环境有无副作用同样值得重视。在喀斯特石漠化地区如何充分利用环境废渣、农业废弃物研制出成本更低、效果更好、更容易被农民接受的土壤改良剂是生态恢复过程中亟待解决的关键问题之一。本研究以农村畜牧业和农业的废弃物加工处理制成改良剂,利用盆栽试验研究其对贵州石漠化旱地多年生黑麦草(*Lolium perenne*)生长和返青的影响,进而筛选出对牧草生长有促进作用的改良剂,以期畜牧、农业废弃物作为改良剂在石漠化生态恢复中的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

多年生黑麦草(*L. perenne* Eminent)由新西兰林肯大学 Hong J.Di 教授提供;牛粪炭:干牛粪使用马弗炉(500 °C)烧制;长效有机复合肥购于盛茂生物科技(中国)有限公司;保水剂购于珠海农神生物科技有限公司;蚯蚓粪:利用贵阳市三联乳业黄家坝奶牛养殖场的新鲜牛粪经过脱水,使含水量达30%~35%后,堆放在有蚯蚓生长的基质旁边,蚯蚓不断繁殖及生长,养殖时间约60 d,然后取其基质即可;秸秆粉:取贵阳市周边农田玉米秸秆,实验室烘干,利用破碎机制备。

1.2 试验设计

试验设置6个处理,即对照(未施改良剂)(CK)、牛粪炭(5%)(NF)、蚯蚓粪(5%)(QY)、保水剂(1/300)(BS)、秸秆粉(5%)(JG)、长效有机复合肥(5%)(FH),每个处理3次重复。将土壤改良剂在种植多年生黑麦草前一次性均匀施入土壤中。

1.3 试验方法

盆栽试验于2013年11月13日—2014年4月18日在贵州大学资源与环境工程学院环境工程实验室楼顶进行。供试土壤采自关岭县花江镇板贵乡的旱地耕层土壤,该乡属于典型的喀斯特石漠化地区。土壤的主要理化性质:pH值7.95,有机质42.78 g·kg⁻¹,水解氮120.48 mg·kg⁻¹,有效磷1.31 mg·kg⁻¹,速效钾179.21 mg·kg⁻¹,土壤经风干后,过5 mm筛装于直径为16 cm、高12 cm的塑料盆,每盆装不同基质1 000 g。每盆分两个区域面积播种,50粒草种均匀播种一小区域,用于出苗期指标测定;剩余区域统一播种0.30 g草种,用于后续生长指标测定,两个区中间留1 cm空隙以便区分。播种完毕采用喷雾式浇水器浇水,维持基质含水量为最大田间持水量的70%左右,其后视基质干湿度浇水,满足草种发芽、植株生长需水。60 d内定期

观察种苗生长现象并作相关记录。2014年1月13日—2014年2月16日经历越冬和极端干旱后,所有处理地上部分全都枯死。从2014年2月17日起对盆栽进行定量浇水并管理,观察其返青及60 d内的生长状况。

1.4 测定指标及数据处理

计算并记录以下指标,出苗率=第14天出苗种子数/供试种子数 $\times 100\%$;出苗时间;返青时间;播种后和返青期间第30、45、60天的株高(随机测量5株植株的株高,求平均值)、分蘖数(每盆50株,求平均值);播种和返青后第60天的地上单株生物量和根长(随机测量5株植株,求平均值)。数据分析采用DPS 7.05软件对数据进行Duncan新复极差法方差分析。

2 结果与分析

2.1 不同基质处理对多年生黑麦草出苗率的影响

6个处理下,多年生黑麦草的出苗率表现为蚯蚓粪>复合肥>牛粪炭>保水剂>CK>秸秆粉(图1)。方差分析显示,添加改良剂处理的出苗率与对照之间没有显著差异($P>0.05$)。秸秆粉处理的出苗率均低于对照,而其他各处理的出苗率比对照有所增加。

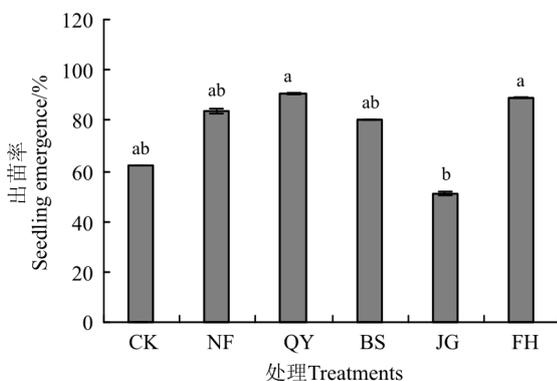


图1 不同处理对多年生黑麦草出苗的影响

Fig.1 Effect of different soil improver treatments on seed germination of *L. perenne*

注:CK、NF、QY、BS、JG和FH分别为对照、牛粪炭、蚯蚓粪、保水剂、秸秆粉、复合肥。不同小写字母表示同一指标不同处理间差异显著($P<0.05$)。图2、6同。

Note: CK, NF, QY, BS, JG and FH are control, cattle manure carbon, wormcast, water retaining agent, straw powder and long-term organic compound fertilizer, respectively. Different lower case and capital letters mean significant difference for the same parameter among different soil improver treatments at 0.05 levels, respectively. The same in Fig.2 and Fig.6.

2.2 不同基质处理对多年生黑麦草出苗和返青时间的影响

多年生黑麦草种子于2013年11月13日播种,11月16日开始出苗,到11月23日所有处理种子都已出苗,且生长正常(图2)。蚯蚓粪处理第3天开始出苗,出苗时间最短,且与对照之间存在显著差异($P<0.05$)。复合肥和保水剂处理第4天开始出苗,都与对照之间存在显著差异($P<0.05$)。牛粪炭处理第5天出苗,对照(CK)第6天出苗,秸秆粉处理第7天才开始出苗,出苗所需时间最长。可见,添加除秸秆粉外的其他基质均能缩短出苗时间,利于种子的快速出苗,这对黑麦草的后续生长有重要意义。各处理经历越冬和极端干旱,从2014年2月22日—3月3日陆续返青。牛粪炭处理的返青时间慢于对照,而其他处理都快于对照(图2)。秸秆粉处理的返青速度最快,浇水后第5天开始返青,且与对照之间存在显著差异。保水剂、复合肥和蚯蚓粪及对照分别在第7天、第8天、第8天、第9天返青;返青最慢的为牛粪炭处理,长达11 d。

2.3 不同基质处理对多年生黑麦草不同时期平均株高的影响

在宏观上,株高是反映植株生长快慢和强弱的重要指标。出苗期多年生黑麦草株高呈现整体逐渐增高趋势,但在30—60 d变化不大(图3)。30 d时各处理生长状况良好,复合肥、蚯蚓粪、保水剂、牛粪炭处理的株高分别为9.84、9.18、9.76、8.94 cm;对照和秸秆粉处理的生长相对较慢,株高分别为8.20和7.92 cm。蚯蚓粪、牛粪炭和保水剂和复合肥处理的株高与对照差异显著($P<0.05$);而秸秆粉处理与对照无显著差异($P>0.05$)。45 d时,蚯蚓粪、牛粪炭、保水剂和复合肥处理的株高与对照差异显著,秸秆粉处理与对照没有显著差异。此阶段蚯蚓粪、保水剂和牛粪炭处理的叶尖部分变黄。60 d的株高表现为复合肥>牛粪炭>保水剂>蚯蚓粪>秸秆粉>对照。这时各处理株高差异的显著性情况与45 d相同,但大部分植株出现叶尖发黄现象。总体而言,在旱地上施用不同改良剂后多年生黑麦草的株高出现明显的增加,其中以复合肥处理的生长状况最好。添加秸秆粉处理的株高最差。

多年生黑麦草各处理返青生长期内的株高呈均匀增高趋势(图4)。返青期30 d,黑麦草株高的变化规律为秸秆粉>复合肥>保水剂>蚯蚓粪>

CK>牛粪炭,各处理生长状况良好,但植株细长,不如出苗生长期的植株粗壮;秸秆粉、牛粪炭、保水剂和复合肥处理的株高与对照之间存在显著差异($P<0.05$)。45 d时,黑麦草的整体长势良好,除秸秆粉处理,其他处理的植株都有少许叶尖发黄症状,

表明此阶段各处理开始出现养分供应不足现象。这一时期的秸秆粉、牛粪炭、保水剂和复合肥处理株高与对照差异显著($P<0.05$),60 d时,蚯蚓粪处理株高高于保水剂处理,其他各处理株高排序与30 d一致;蚯蚓粪处理多年生黑麦草的株高在3个时段与

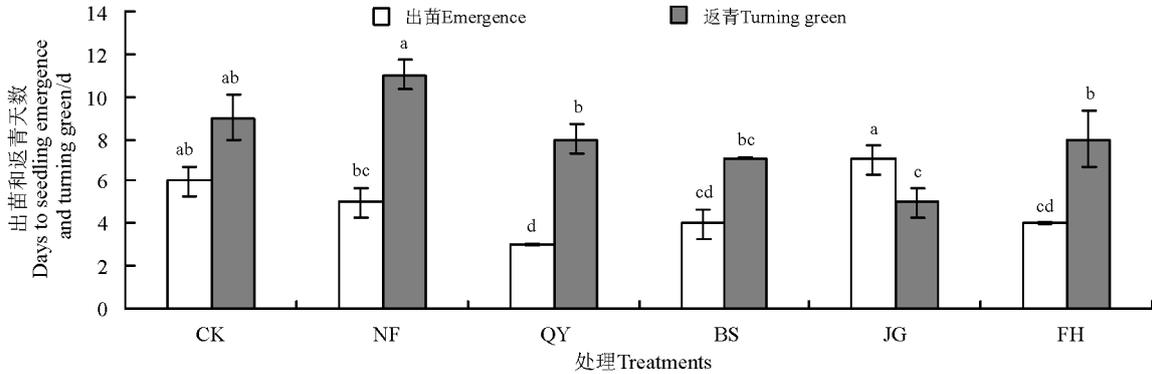


图2 不同土壤改良剂处理多年生黑麦草的出苗和返青时间

Fig.2 Seedling emergence and turning green time of *L. perenne* under different soil improver treatments

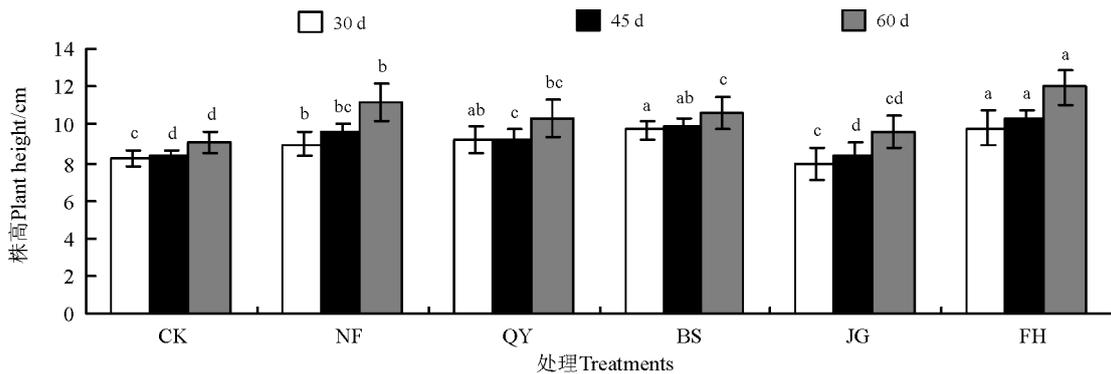


图3 不同土壤改良剂处理对多年生黑麦草出苗生长期株高的影响

Fig.3 Plant height of *L. perenne* in seedling emergence growth period with different soil improver treatments

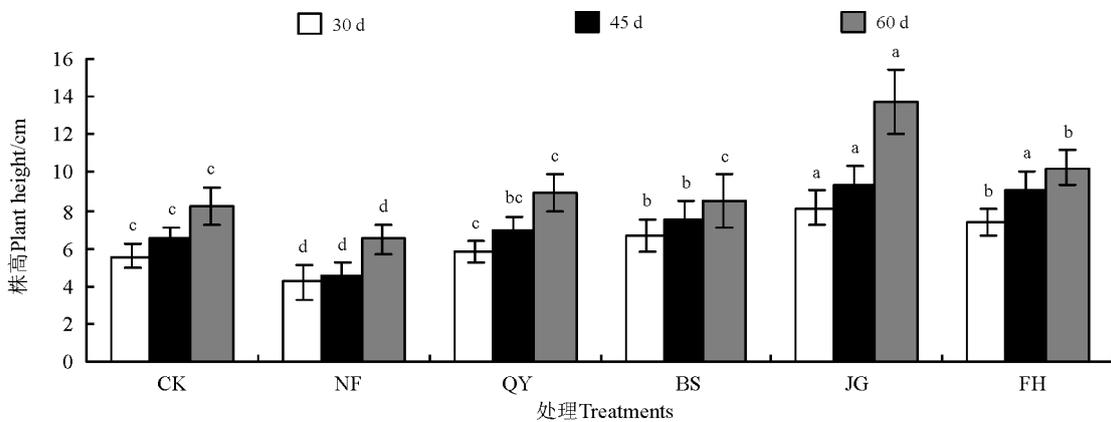


图4 不同土壤改良剂处理对多年生黑麦草返青生长期株高的影响

Fig.4 Plant height of *L. perenne* in turning green growth period with different soil improver treatments

对照均无显著性差异($P>0.05$)。所有处理开始出现养分缺乏状况,植株叶尖发黄。从上可知,整体上越冬抗旱过后添加不同改良剂对黑麦草的恢复生长有促进作用,但明显不如出苗生长期的促进作用显著。

2.4 不同基质处理对多年生黑麦草不同时期分蘖数的影响

出苗后,外源添加的改良剂都能明显地增加黑麦草的分蘖数,且呈增加趋势(图5)。60 d,不同处理分蘖数表现为蚯蚓粪>复合肥>牛粪炭>保水剂>CK>秸秆粉,其中蚯蚓粪处理分蘖效果最好,而秸秆粉效果最差,其分蘖数略少于对照组。返青后黑麦草的分蘖枝数整体上都多于出苗后;30—45 d分蘖枝数增加趋势较明显,但在45—60 d间增加趋势不明显,而且总体上添加改良剂处理的分蘖数较出苗后生长期有很大的改变。返青后60 d黑麦草分蘖数表现为秸秆粉>复合肥>蚯蚓粪>保水剂>CK>牛粪炭,可以看出,在出苗后生长期分蘖数最差的秸秆粉处理在返青后生长期内成为效果最好的处理,而牛粪炭处理分蘖数变为最少。总体而言,外源添加改良剂整体上有助于黑麦草的快速分蘖。

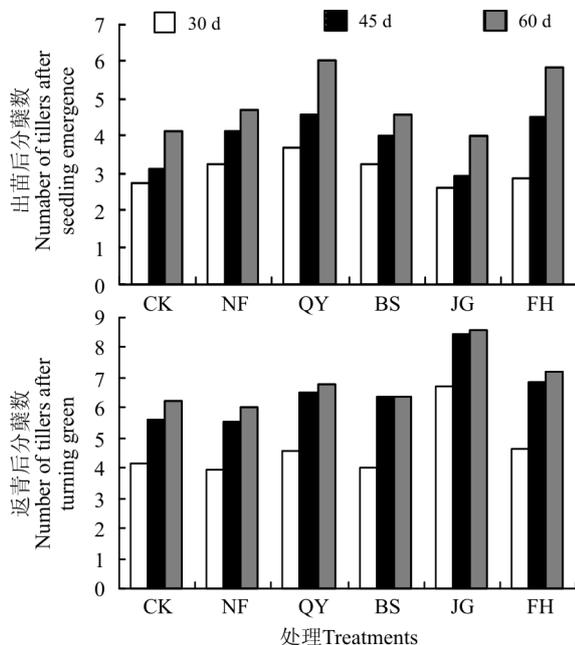


图5 不同处理不同时期多年生黑麦的分蘖数

Fig.5 Tiller number of *L. perenne* in different periods with different soil improver treatments

2.5 不同基质处理对多年生黑麦草不同时期生物量与根长的影响

添加改良剂对多年生黑麦草根长有一定的影响(图6)。出苗后,保水剂处理根毛多且根系最长,达11.44 cm,与对照差异显著($P<0.05$)。蚯蚓粪和复合肥处理根系较长,两者相差不大,且复合肥处理与对照差异显著($P<0.05$);牛粪炭和对照的根长较短;秸秆粉处理的根系最短,只有7.41 cm,而其余处理与对照都无显著差异($P>0.05$)。黑麦草返青后生长期根长整体上大于出苗生长期,除秸秆粉处理外的其他处理增幅不是很大;秸秆粉处理的增幅达49.06%,根长达14.55 cm。其他处理的根长表现为复合肥>蚯蚓粪>保水剂>CK>牛粪炭,牛粪炭根长最短,只有9.90 cm。该时期秸秆粉和复合肥处理的根长与对照差异显著($P<0.05$),而其他处理与对照差异不显著($P>0.05$),说明施加改良剂有利于根部生长,且基质的保水性对根长有一定影响。

各处理出苗后生长期的单株鲜重明显大于返青后生长期的单株鲜重(图6)。出苗生长期添加改良剂处理的单株鲜重都大于对照,表明添加改良剂有利于植株生物量的增加,能够提高牧草产量。多年生黑麦草单株鲜重表现为复合肥>保水剂>牛粪炭>蚯蚓粪>秸秆粉>CK。牛粪炭、复合肥和保水剂处理鲜重与对照之间存在显著差异($P<0.05$),而添加蚯蚓粪与对照之间存在显著差异($P<0.05$),秸秆粉处理与对照之间无显著差异($P>0.05$)。返青后生长期,牛粪炭处理植株长势不好,单株鲜重低于对照,其他处理的单株鲜重都大于对照,表明添加改良剂在返青时期对牧草的产量有一定的促进作用。秸秆粉和复合肥处理的鲜重与对照差异显著,其他处理与对照没有显著差异。添加改良剂与对照黑麦草单株鲜重表现为秸秆粉>复合肥>蚯蚓粪>保水剂>CK>牛粪炭。以上结果说明,在不同时期添加改良基质能够明显增加多年生黑麦草的产量。

3 讨论与结论

在出苗生长期施用改良剂,石漠化旱地上多年生黑麦草的出苗时间缩短、出苗率、株高、分蘖数、根长及生物量明显增加。特别是蚯蚓粪处理的多年生黑麦草出苗时间比对照平均缩短50.00%,出苗率和

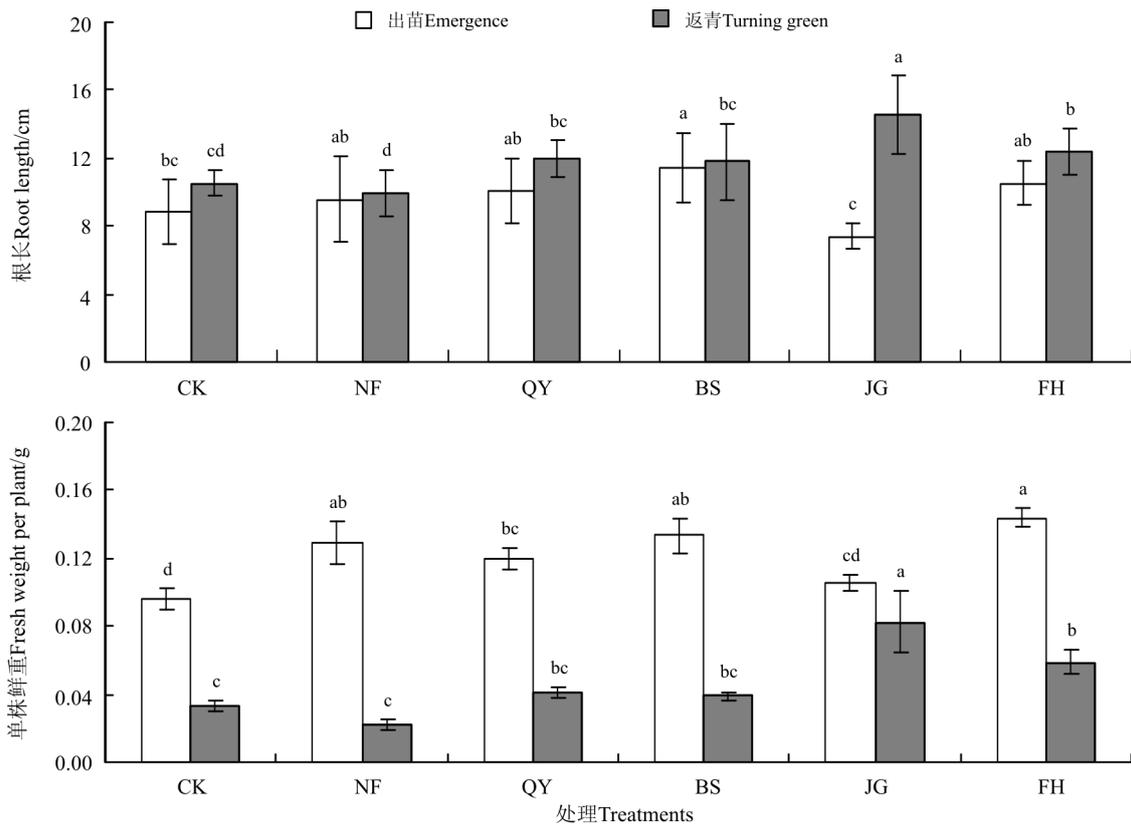


图6 不同处理不同时期多年生黑麦草的单株鲜重和根长

Fig.6 Plant fresh weight and root length of *L. perenne* in different periods with different soil improver treatments

分蘖数(60 d)分别比对照提高 46.24% 和 46.34%。结果表明,蚯蚓粪能明显缩短多年生黑麦草种子出苗时间,提高出苗率,促进幼苗的初期生长,这主要是因为蚯蚓粪具有结构性良好、持水量高和表面积大等特点,可提高土壤通透性、保温性、保水性和保肥力,为草种的萌发提供了优良的环境;且富含腐殖酸类物质和促进生根的赤霉素(GA)、生长激素(IAA)等多种植物激素和活性酶^[14-16],对植物萌发和生长有促进作用。赵洪涛等^[17]在高羊茅(*Festuca elata*)上也得到了类似的研究结果。而施用长效有机复合肥处理的株高和生物量除返青后的生物量外都与对照之间存在显著差异($P < 0.05$),且对株高和产量增加效果最明显,这与刘方等^[18]与方华舟^[19]的研究结果相似。而出苗后生长期后期各项指标的变化不大以及植株叶尖发黄,可能是由于添加的基质在生长初期提供了充足的养分和水分,使植株前期长势较快;而随着养分和水分的逐渐消耗,植株的后期生长受到一定的限制^[20]。总之,在出苗后生长期内施用蚯蚓粪和有机复合肥能促进和提高多年生黑麦草的生长与产量,有利于生态的快速恢

复。

除牛粪炭的处理,其他改良剂处理返青生长期的各项指标都呈现明显的增加趋势,且都高于对照。而在出苗生长期,牛粪炭处理的各项指标都优于对照。这可能是由于前期施加牛粪炭使土壤有效养分和微生物活动增加,利于植株生长,而后期其使土壤有机质生物活性下降,最终导致养分供应不足^[21-22],特别是本底土壤有效磷含量($1.31 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)不高,阻碍植株生长。也可能是由于旱地土壤本身偏碱性,再添加呈碱性的牛粪炭^[23],经过长时间的土壤理化反应和淋溶等作用,后期土壤碱性增强,不利于多年生黑麦草的生长。由于生物质炭的施用和用量对土壤理化性质变化、有机质和养分积累以及不同土壤类型和作物种类的最佳施炭量范围与生态环境的效应尚不明晰^[24-25],相关机理还需进一步研究。

出苗生长期秸秆粉处理的除单株鲜重外的各项指标均低于对照且是最底的,但在返青生长期其各项指标均为最高,可能的原因是秸秆粉导致土壤疏松多孔,水分下渗快,保水保肥效果较差^[26],不利于牧草种子的快速萌发。另一方面,其直接施入到土

壤后要经历腐解和熟化过程,而该过程需要消耗部分养分并释放热量,且有微生物与作物争夺氮素的现象,导致碳氮比过大、养分供应不足、持水性较弱^[27],因而影响多年生黑麦草的生长,但可以与秸秆粉配合氮肥施用,使作物生长期正常生长^[12]。而在后期,秸秆粉经过一个生长和干旱越冬期后已被充分腐解,转化为有机质、有效磷、速效氮等养分,还可以产生水分,补给土壤水分,使土壤的透气性、保温性和持水性提高,起到保墒和增墒作用^[28],为多年生黑麦草的快速返青和生长提供了最佳条件。而其他处理由于经过一个相对快速的出苗生长期,土壤养分(特别是有效磷的含量)和持水性等都不同程度下降,导致返青期各指标较秸秆粉处理差。另一方面,本底土壤的有效磷含量不高,可能也是限制各处理长势不同的原因,但是否是主要限制因子,限制程度有多大以及不同改良剂对有效磷的补充和作用机制还需进一步研究。

出苗后生长期,石漠化旱地施用长效有机复合肥对植株生物量增加效果最为显著,且与对照之间存在显著差异($P < 0.05$),与湘南红壤旱地施加复合肥可增加种植牧草产量的结果相似^[29],与范海荣等^[30]分析城市垃圾对多年生黑麦草影响的结果也一致。而黑麦草生物量的增加一方面是由于改良剂的施入直接提高了土壤的养分,另一方面,土壤理化性状的改善对其生长在一定程度上也是有利的^[31]。添加保水剂对黑麦草出苗后的根长增加量最大,有利于牧草的根系生长,这是因为保水剂可为根部的发育提供持续稳定的水分,促进根部对水分和养分

的充分利用^[32-33]。施用秸秆粉对加快和提高植株抗旱后的返青恢复速率和生物量最为显著,与对照存在显著差异。施用不同改良剂对多年生黑麦草生长适应性的提高效果为蚯蚓粪>复合肥、牛粪炭、保水剂>CK>秸秆粉,返青恢复性为秸秆粉>复合肥、蚯蚓粪、保水剂>CK>牛粪炭,所以合理的施用蚯蚓粪、长效有机复合肥和秸秆粉能显著持续提高黑麦草产量和质量,加快多年生黑麦草的返青恢复和生长速率,有利于环境的快速修复和牧草的供给。

蚯蚓粪可用牛粪养殖,长效有机复合肥可用猪粪、牛粪、鸡粪等堆制,秸秆粉可利用本地主要的农作物玉米的秸秆制备,原材料易取得。将其转化为肥料,不仅有利于牧草的生长,而且减少了农业畜牧业的废弃物排放,直接改善了农村环境面貌。牧草种植过程中,以上3种基质在不同时期合理利用,不仅能加快牧草的生长,快速覆盖石漠化裸地,加快生态修复进程,而且有利于牧草生物量的增加,为畜牧业提供充足持续的饲料,达到了增产效果,有利于提高人民的收入和生活水平。

由于条件所限,此次试验只进行了6种不同处理方式的对比,且改良剂的添加剂量一定,试验周期有限,加上盆栽试验所得数据的局限性,无法确定使用改良剂的最佳施用范围以及不同改良剂之间的最优混合配施组合和用量。此外,其改良石漠化区旱地土壤的有效期以及长期使用对土壤理化性质、微生物及酶活性等方面的影响有待于进一步研究与验证。

参考文献

- [1] Wang S J, Liu Q M, Zhang D F. Karst rocky desertification in southwestern China: Geomorphology, land use, and impact and rehabilitation[J]. *Land Degradation & Development*, 2004, 15(1): 115-121.
- [2] 刘方, 王世杰, 刘元生, 何腾兵, 罗海波, 龙健. 喀斯特石漠化过程土壤质量变化及生态环境影响评价[J]. *生态学报*, 2005, 25(3): 639-644.
- [3] 瓦庆荣. 加快石漠化地区草地植被恢复促进喀斯特地区生态环境建设[J]. *草业科学*, 2008, 25(3): 18-21.
- [4] 韦兰英, 袁维圆, 尤业明, 焦继飞, 张建亮, 黄玉清. 岩溶石漠化区牧草植物地上部分生物量的动态变化[J]. *草业科学*, 2009, 26(10): 73-79.
- [5] 李先琨, 何成新, 蒋忠诚. 岩溶脆弱生态区生态恢复、重建的原理与方法[J]. *中国岩溶*, 2003, 22(1): 12-17.
- [6] 邓菊芬, 崔阁英, 王跃东, 阙农云, 黄必志. 云南岩溶区的石漠化与综合治理[J]. *草业科学*, 2009, 26(2): 33-38.
- [7] 王文杰, 关宇, 祖元刚, 赵修华, 杨磊, 许慧男, 于兴洋. 施加改良剂对重度盐碱地土壤盐碱动态及草本植物生长的影响[J]. *生态学报*, 2009, 29(6): 2835-2844.
- [8] 田福平, 武高林, 杨志强, 时永杰. 4种土壤改良剂对多年生黑麦草的生长特性影响研究[J]. *草业科学*, 2006, 23(11):

- 28-34.
- [9] 汪瑞清,肖运萍,魏林根,袁展汽,刘仁根,林洪鑫.土壤改良剂对红壤性地产地的应用效果比较研究[J].江西农业学报,2011,23(3):75-77.
- [10] Sarkar A N,Wynjones R G.Effect of rhizosphere pH on the availability and uptake of Fe,Mn and Zn[J].Plant and Soil,1982,66:361-372.
- [11] Carcia-sanchez A,Alastuey A,Querol X.Heavy metal adsorption by different minerals:Application to the remediation of polluted soils[J].The Science of Total Environment,1999,242:179-188.
- [12] 陈义群,董元华.土壤改良剂的研究与应用进展[J].生态环境,2008,17(3):1282-1289.
- [13] 姜海燕.土壤改良剂在农业生产中的应用[J].现代化农业,2011(6):17-22.
- [14] Norman Q A,Stephen L,Ewards C A,Atiyeh R.Effects of humic acid derived from cattle,food and paper-waste vermicomposts on growth of greenhouse plants[J].Pedobiologia,2003,47:741-744.
- [15] Tomatiu U,Grappellia A,Gallie E.The hormone-like effect of earthworm casts on plant growth[J].Biology and Fertility of Soil,1988,5(5):288-294.
- [16] 王小治,王爱礼,王守红,赵海涛,单玉华,钱晓晴,封克.蚯蚓粪作为坪床基质对草坪草生长的影响[J].生态与农村环境学报,2011,27(3):64-68.
- [17] 赵洪涛,丁国际,邹联沛,焦正,占金美,黄东海,时国栋,王海松,莫弘之.蚯蚓及蚓粪改良基质对高羊茅发芽生长的影响[J].安徽农业科学,2008,36(16):6921-6923.
- [18] 刘方,罗海波,蒲通达,刘元生.喀斯特山区旱地施用生物有机肥对一年生黑麦草生长的影响[J].贵州农业科学,2011,39(12):190-193.
- [19] 方方舟.施肥对黑麦草产量和质量的影响[J].土壤肥料,2007(8):79-81.
- [20] 熬成红,刘方,罗洋.黔西北炼锌废渣基质上不同草种苗期生长状况[J].草业科学,2013,30(8):1212-1216.
- [21] 章明奎,Walelign D B,唐红娟.生物质炭对土壤有机质活性的影响[J].水土保持学报,2012,26(2):127-131.
- [22] 徐秋桐,邱志腾,章明奎.生物质炭对不同 pH 土壤中碳氮磷的转化与形态的影响[J].浙江大学学报(农业与生命科学版),2014,40(3):303-313.
- [23] 马秀枝,李长生,任乐,王鹏飞.生物质炭对土壤性质及温室气体排放的影响[J].生态学杂志,2014,33(5):1395-1403.
- [24] 刘玉学,刘微,吴伟祥,钟哲科,陈英旭.土壤生物质炭环境行为与环境效应[J].应用生态学报,2009,20(4):977-982.
- [25] 张文玲,李桂花,高卫东.生物质炭对土壤性状和作物产量的影响[J].中国农学通报,2009,25(17):153-157.
- [26] 李珊,刘方,何腾兵,杜仁凤.粉煤灰不同配比基质对黑麦草生长的影响[J].环境科学与技术,2008,31(11):54-57.
- [27] 徐娜娜,解玉红,冯焱.添加秸秆粉对盐碱地土壤微生物生物量及呼吸强度的影响[J].水土保持学报,2014,28(2):185-194.
- [28] 左玉萍,贾志宽.土壤含水量对秸秆分解的影响及动态变化[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2004,32(5):61-63.
- [29] 高菊生,曾希柏,颜钧,蒋德元.多功能含镁复合肥在湘南红壤旱地作物上的增产效果[J].湖南农业科学,2004(1):41-43
- [30] 范海荣,华璐,蔡典雄,王学江,朱风云,尹逊霄,张振贤,高娟,滑丽萍.城市垃圾堆肥及其复合肥对黑麦草草坪质量的影响[J].生态学报,2005,25(10):2694-2702.
- [31] 潘峰,刘滨辉,袁文涛,刘东兴,刘燕玲.不同改良剂对紫花苜蓿生长和盐渍化土壤的影响[J].东北林业大学学报,2011,39(5):67-76.
- [32] 陈本建.保水剂对多年生黑麦草出苗和幼苗生长的影响[J].草业科学,2000,17(3):28-32.
- [33] 王启基,王文颖,景增春,史惠兰,王长庭.保水剂对江河源区退化草地土壤水分和植物生长发育的影响[J].草业科学,2005,22(6):52-57.

(责任编辑 武艳培)