

网络出版时间:2013-12-25 13:19

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.01.011

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.01.011.html>

EN-1 固化剂、N 肥与土壤体积质量对黑麦草 生长及水分利用效率的影响

刘月梅^{1,2}, 张兴昌³

(1 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2 延安职业技术学院, 陕西 延安 716000;

3 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

【摘要】 **【目的】**研究 EN-1 固化剂、N 肥及土壤体积质量对黑麦草生长和水分利用效率的影响, 为提高黄土边坡植物生物量提供理论依据。**【方法】**以黄土边坡常见植物黑麦草为研究对象, 利用盆栽试验, 研究黄土地区典型土壤黄绵土不同土壤体积质量(1.2, 1.3, 1.4 g/cm³)、EN-1 固化剂用量((以干土质量计)0, 0.05%, 0.10%, 0.15%, 0.20%)、N 肥(0, 100, 200, 300 mg/kg)处理对黑麦草生长及水分利用效率的影响。**【结果】**固化剂 EN-1 对黑麦草株高、根表面积和根径等影响显著, 且均呈先增后减的趋势, 但与固化剂用量不成正比; 随着 N 肥水平提高, 黑麦草株高、生物量、根长、根表面积逐渐提高, 但不同 N 肥水平间差异不显著; 随着土壤体积质量增加, 黑麦草株高、总生物量、根长、根表面积等均呈下降趋势, 但在中(1.3 g/cm³)、低(1.2 g/cm³)土壤体积质量条件下差异不显著。土壤体积质量 1.3 g/cm³、N 肥用量 200 mg/kg、固化剂用量 0.15% 处理黑麦草根生物量最大, 土壤体积质量 1.2 g/cm³、N 肥用量 200 mg/kg、固化剂用量 0.10% 处理黑麦草总生物量最大。随固化剂用量增加, 黑麦草水分利用效率逐渐提高, 土壤体积质量 1.3 g/cm³、N 肥用量 200 mg/kg、固化剂用量 0.15% 处理黑麦草的 WUE 最高。黄土边坡生态防护要兼顾土体稳定与植被生长, 以土壤体积质量为 1.3 g/cm³, 固化剂用量为 0.15% 较适宜, N 肥用量应根据土壤性质等综合确定。**【结论】**适当的 EN-1 固化剂用量可以在提高黄土边坡土壤稳定的同时实现边坡的植被生态防护。

【关键词】 土壤固化剂 EN-1; 黄土边坡; 黑麦草; 根系特征; 水分利用效率

【中图分类号】 S156.2; S543+.6

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2014)01-0151-08

Effects of EN-1 stabilizer, nitrogen fertilizer and soil bulk density on growth and water use efficiency of ryegrass

LIU Yue-mei^{1,2}, ZHANG Xing-chang³

(1 College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 Yan'an Vocational and Technical College, Yan'an, Shaanxi 716000, China; 3 Institute of Soil and Water Conservation,

Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: **【Objective】** Effects of EN-1 stabilizer, nitrogen fertilizer (N) and soil bulk density on growth and water use efficiency (WUE) of ryegrass were studied to improve the plant biomass of Loess slope. **【Method】** Taking ryegrass, a common plant in Loess slope as objective, the effects of different soil bulk densities (1.2, 1.3, 1.4 g/cm³), stabilizer contents (0, 0.05%, 0.10%, 0.15%, 0.20%) and N supplement amounts (0, 100, 200, 300 mg/kg) on growth and WUE of ryegrass were studied by pot experiment. **【Result】** Stabilizer content had significant effects on height, root area and root diameter of ryegrass, and

【收稿日期】 2013-02-23

【基金项目】 中国科学院水利部水土保持研究所创新培育方向项目“水土保持工程关键技术研发与集成”

【作者简介】 刘月梅(1971—), 女, 新疆石河子人, 副教授, 博士, 主要从事生态环境工程研究。E-mail: yameilin@126.com

【通信作者】 张兴昌(1965—), 男, 陕西武功人, 研究员, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持措施研究。

E-mail: zhangxc@ms. iswc. ac. cn

they all disproportionately increased first followed by decrease as the increase of stabilizer content. Height, biomass, root length and root area of ryegrass gradually increased as the increase of N, while they all gradually decreased as the increase of soil bulk density, and the differences were not significant when density was low. Biomass of ryegrass reached the highest when soil bulk density was 1.3 g/cm^3 , N was 200 mg/kg and EN-1 stabilizer content was 0.15% , while the total biomass reached the peak value when they were 1.2 g/cm^3 , 200 mg/kg and 0.10% , respectively. Effect of stabilizer on *WUE* of ryegrass was not significant. The highest *WUE* was obtained when soil bulk density was 1.3 g/cm^3 , N was 200 mg/kg and EN-1 stabilizer content was 0.15% . Protection of Loess slope ecology should consider both soil stability and growth of planation. Soil bulk density of 1.3 g/cm^3 and stabilizer content of 0.15% were suitable for Loess soil. N supplement should be based on soil properties. 【Conclusion】 Proper use of EN-1 stabilizer can achieve vegetation protection and improve stability of Loess slope.

Key words: EN-1 soil stabilizer; Loess slope; ryegrass; root characteristics; *WUE*

黄土边坡的绿化防护是谋求保护自然环境、美化道路景观、缓解交通公害、实现可持续发展的重要手段之一。然而植物与边坡土体的作用是相互的,一方面植物的生存和生长离不开土体环境,另一方面植物可以通过力学锚固效应和水文效应增加坡面的稳定性,实现边坡的生态防护^[1-4]。因此,黄土边坡生态防护植被建设必须与边坡土壤防护有机结合起来,在确保边坡土体稳定的前提下,尽最大可能促进植被生长。要实现黄土边坡生态防护的护坡和绿化双重功能,对黄土性土壤进行改良势在必行。

EN-1 土壤固化剂是一种土工复合材料,含有多种有机、无机成分,其性能是通过与土壤发生一系列的物理化学反应来胶结土壤颗粒、增加土体稳定性^[5-7]。研究表明,EN-1 土壤固化剂可以使黄土性土壤干密度增加,土壤抗剪强度、抗蚀性、抗渗性和水稳性团聚体含量提高^[8-11],有利于黄土边坡稳定,且施用适量的土壤固化剂对植物光合作用及根系吸收均有促进作用^[12]。

黄土边坡大多土壤肥力较低、营养匮乏,植物生长缓慢,而土壤中水肥状况是土壤肥力的重要指标。大量研究表明,氮素是调节植物生命活动的主要因子,它可以通过调节植物的光合、蒸腾及呼吸作用等生理代谢提高叶片光合能力,进而促进植物生长,增加植物生物量,从而提高植物的水分利用效率^[13-15]。因此,利用 EN-1 土壤固化剂改变植物生长的土壤环境,探讨固化剂、N 肥及土壤体积质量对植物生长的影响具有重要意义。本研究以黄土地区典型土壤黄绵土和常见植物黑麦草为研究对象^[16],研究固化剂对黑麦草生长状况、根系特征及水分利用效率的影响,以期为提高黄土边坡植物生物量和边坡土壤稳定性提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 供试黑麦草 供试黑麦草为丹麦丹农种子有限公司生产的“玲珑”坪用品种。试验前对种子进行品质鉴定后发现,种子的发芽率为 76.3% ,纯净度为 98% ,千粒质量为 3.76 g 。

1.1.2 土壤固化剂 供试土壤固化剂为美国 CSS 技术公司生产的路邦 EN-1 土壤固化剂,是一种高浓缩的酸性酱棕黑色有机溶液,能将土壤中的矿物质和土壤颗粒分解,使其重新结晶形成金属盐,保持土壤持久稳定。EN-1 土壤固化剂在浓缩状态下无挥发性、不燃烧,硫酸含量大于 1% ,表面活性剂含量 6% ,密度 1.709 g/cm^3 ,沸点 282°C , 25°C 时相对体积质量为 1.70 , pH 1.05 ,稀释后无任何危害,对生态环境无破坏、对环保无影响。

1.1.3 供试土样 供试土样为采自陕西省安塞县的弃耕地耕层黄绵土,其土壤类型为砂壤土, pH 8.58 ,有机质含量 3.08 g/kg ,总氮含量 0.37 g/kg ,土壤颗粒直径 $\geq 0.02 \text{ mm}$ 的占 67.93% , $0.002 \sim 0.02 \text{ mm}$ 的占 18.61% , $< 0.002 \text{ mm}$ 的占 13.46% 。

1.2 试验设计

试验设计变量分别为 EN-1 土壤固化剂(以干土质量计)、N 肥和土壤体积质量,共 12 个处理,各处理方案见表 1。

1.3 测定项目及方法

盆栽试验于 2010-08—2011-02 在陕西杨凌中国科学院水土保持研究所气候模拟大厅内进行,控制温室日间温度为 $20 \sim 25^\circ\text{C}$,夜间温度为 $15 \sim 18^\circ\text{C}$,每天光照 12 h 。

将供试土壤风干后过 2 mm 筛,按 16% ^[9,17] 的

土壤质量含水率取一定量的水,并在水中加入一定比例的固化剂,搅拌均匀后用洒壶分层洒入土中拌匀,用塑料防水布盖好密闭 24 h,使土壤水分分布均匀,然后按照设计体积质量分层装入塑料桶(1.4 g/cm³处理边装边用木槌砸实),再盖上塑料防水布

表 1 EN-1 固化剂、N 肥与土壤体积质量盆栽试验设计方案

Table 1 Pot experiment design of EN-1 stabilizer,nitrogen fertilizer and soil bulk density							
处理 Treatment	EN-1 固化剂 用量/% EN-1 stabilizer content	N 肥/ (mg·kg ⁻¹) Nitrogen fertilizer	土壤体积质量/ (g·cm ⁻³) Soil bulk density	处理 Treatment	EN-1 固化剂 用量/% EN-1 stabilizer content	N 肥/ (mg·kg ⁻¹) Nitrogen fertilizer	土壤体积质量/ (g·cm ⁻³) Soil bulk density
G0N2R2	0	200	1.3	G2N1R2	0.10	100	1.3
G1N2R2	0.05	200	1.3	G2N2R2	0.10	200	1.3
G2N2R2	0.10	200	1.3	G2N3R2	0.10	300	1.3
G3N2R2	0.15	200	1.3	G2N2R1	0.10	200	1.2
G4N2R2	0.20	200	1.3	G2N2R2	0.10	200	1.3
G2N0R2	0.10	0	1.3	G2N2R3	0.10	200	1.4

黑麦草生长过程中,定期测定黑麦草株高。黑麦草分蘖数和根系特征测定采用收获法:首先,将植株地上部分齐地面收获,清点每株黑麦草分蘖数后于 105 ℃下杀青 0.5 h,再在 75~80 ℃下烘至恒质量后用千分位天平称质量;最后,将整盆根系取出冲洗,称取 5 g 鲜根进行扫描,其余根系烘干,测定根生物量。鲜根形态特征测定先用扫描仪在 300 dpi 像素下扫描成 TIF 图像文件,然后用 DT-SCAN 图像分析软件计算根表面积、根长、根径及根密度等指标,最后将扫描后的根样烘干后称其质量。

蒸散耗水量采用水量平衡法计算,每日 17:00 称取每盆处理质量后,按试验设定含水量(标准值)加水;以同土壤体积质量未种黑麦草盆为对照,称量值与标准值之差为当日蒸散耗水量,再减去对照盆

于室温下养护 10 d^[8-9]用于播种黑麦草。播种采用穴播,每盆固定 34 穴,每穴 4 粒。在苗期保持充足的水分供应,待出苗整齐后,每穴固定 1 株,之后按土壤田间持水量的 75%~80%控水。

水的减少量即为每盆蒸散耗水量。水分利用效率(WUE)为水分处理期间每盆植株总生物量/总蒸散耗水量。

1.4 数据处理与分析

所有试验数据均为 3 次测定的算术平均值,试验数据用 SAS 9.0 软件进行方差分析和相关分析,并在 0.05 显著水平上进行 Duncan 多重比较。

2 结果与分析

2.1 EN-1 固化剂、N 肥与土壤体积质量对黑麦草生长的影响

2.1.1 株高 EN-1 固化剂、N 肥与土壤体积质量对黑麦草株高的影响见图 1。

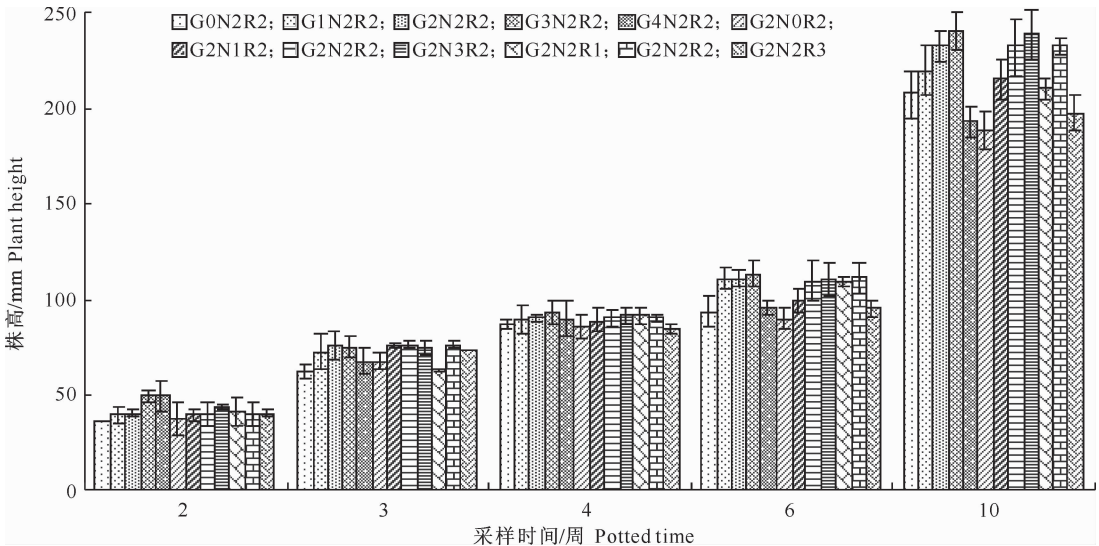


图 1 不同处理对黑麦草株高的影响

Fig. 1 Effect of different treatments on plant height of ryegrass

由图 1 可以看出,在黄绵土中黑麦草株高的变化规律基本相同,但在黑麦草不同生长阶段,不同处理略有差异。盆栽 2 周时不同处理黑麦草株高差异不明显,说明在黑麦草生长初期,EN-1 固化剂、N 肥和土壤体积质量对黑麦草株高影响不显著。盆栽 3 周时,EN-1 固化剂、N 肥和土壤体积质量对黑麦草株高均有显著影响,但黑麦草株高与固化剂用量及土壤体积质量不成正比,说明土壤中加入一定量的固化剂、N 肥,采用适当的土壤体积质量对黑麦草的生长有促进作用。盆栽 4 周以上时,各处理黑麦草株高的规律基本稳定,G3N2R2 处理黑麦草株高最高,G2N2R3 和 G2N0R2 处理黑麦草株高较低;各处理间差异均显著($P<0.05$);随着固化剂用量的增加,黑麦草株高呈先增高后降低的趋势,且均高于相应对照;固化剂用量为 0.15% 时黑麦草株高最高;随着 N 肥水平增加,黑麦草株高逐渐增大;土壤体积质量 1.2 和 1.3 g/cm³ 处理间差异不显著,但均高于 1.4 g/cm³ 处理。

综上所述可知,土壤中加入固化剂可以提升黑麦草株高,但固化剂用量与株高不成正比;在试验范围内,施 N 量增加可以提升黑麦草株高;土壤体积质量过大不利于黑麦草生长。在试验范围内,黄绵土高 N 肥处理的黑麦草株高高于高固化剂用量处理,说明 N 肥对黑麦草株高的影响大于固化剂。

2.1.2 分蘖数 从图 2 可以看出,不同固化剂用量处理之间黑麦草分蘖数差异显著($P<0.05$),固化剂用量为 0.15% 时黑麦草分蘖数最多;土壤体积质量 1.3 g/cm³ 处理黑麦草分蘖数略多于 1.2 g/cm³ 处理,但差异不显著,这可能是由于土壤和水自身重力的作用,导致低土壤体积质量(1.2 g/cm³)处理表层土壤体积质量加大,影响了黑麦草生长。

由图 2 可以看出,随着固化剂用量增加,黑麦草分蘖数呈先增加后减小的趋势,且均高于对照

(G0N2R2);随着 N 肥水平增加,黑麦草分蘖数逐渐增加,除对照(G2N0R2)外,其他 N 肥处理间差异不显著;与不施 N 肥处理相比,不加固化剂处理的分蘖数较少,说明土壤中施入适量固化剂对黑麦草分蘖有利。

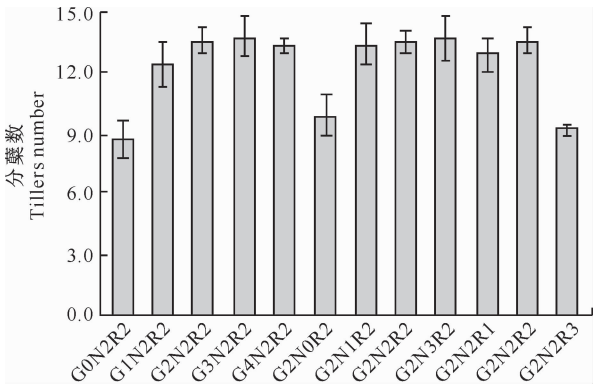


图 2 不同处理对黑麦草分蘖数的影响
Fig. 2 Effect of different treatments on tillers number of ryegrass

2.1.3 生物量 由图 3 可以看出,随着固化剂用量增加,黑麦草根生物量和总生物量均呈先增加后减小的趋势,且均高于对照(G0N2R2),固化剂用量为 0.15% 时黑麦草根生物量和总生物量均最大,说明固化剂对黑麦草的生长有促进作用;不同固化剂用量处理间黑麦草总生物量差异不显著,固化剂用量 0.05%,0.10% 和 0.20% 处理间黑麦草根生物量差异不显著。黑麦草根生物量由大到小的 N 肥处理依次是 G2N1R2、G2N0R2、G2N2R2、G2N3R2,但 G2N0R2 和 G2N2R2 处理间差异不显著;不同 N 肥处理间黑麦草总生物量差异不显著,说明 N 肥对黑麦草总生物量的影响不显著。土壤体积质量 1.3 g/cm³ 处理黑麦草根生物量最大,1.4 g/cm³ 处理根生物量最小;随着土壤体积质量加大,黑麦草总生物量逐渐减少,但 1.2 和 1.4 g/cm³ 处理间差异不显著。

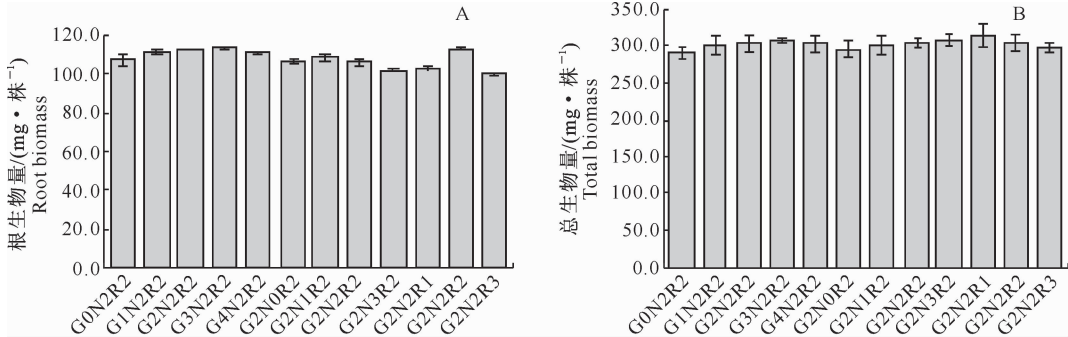


图 3 不同处理对黑麦草根生物量(A)和总生物量(B)的影响
Fig. 3 Effects of different treatments on root biomass (A) and total biomass (B) of ryegrass

从图 3 还可以看出,12 个处理中 G3N2R2 处理根生物量最大,G2N2R3 处理根生物量最小;G2N2R1 处理总生物量最大,G0N2R2 处理总生物量最小,说明土壤体积质量对黑麦草根生长影响较大,固化剂对黑麦草根系生长影响较大。

综上所述可知,固化剂和 N 肥对黑麦草的生长均有促进作用,但相比较而言,N 肥对黑麦草地上部分的生长促进作用较大;过高的土壤体积质量对黑

麦草地上和地下部分的生长均有抑制作用。
2.2 EN-1 固化剂、N 肥与土壤体积质量对黑麦草根系特征的影响

从图 4 可以看出,各处理中以 G3N2R2 处理黑麦草根表面积、根长、根径和根密度最大,G3N2R2、G2N0R2、G2N1R2、G2N2R2、G2N3R2 处理之间黑麦草根径差异不显著,但均高于其他处理。

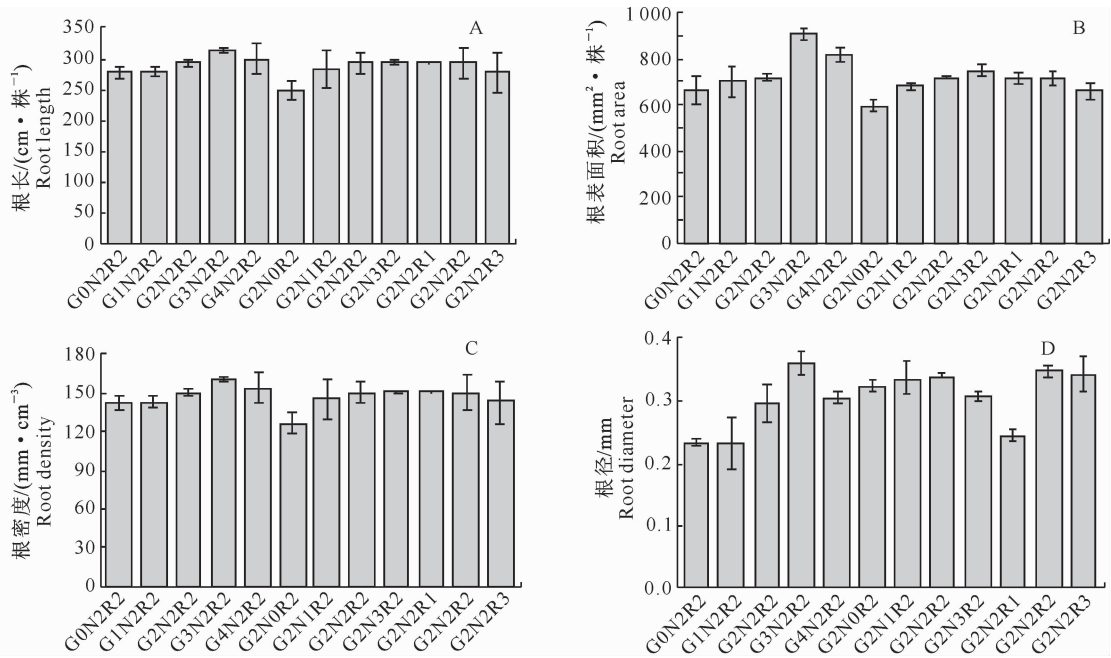


图 4 不同处理对黑麦草根长(A)、根表面积(B)、根密度(C)和根径(D)的影响
Fig. 4 Effects of different treatments on root length (A), root area (B), root density (C) and root diameter (D) of ryegrass

由图 4 可以看出,相同土壤体积质量、相同 N 肥条件下,固化剂用量 0, 0.05% 与 0.10% 处理间黑麦草根表面积差异不显著,固化剂用量 0.15% 和 0.20% 处理间根表面积差异也不显著,但均高于前 3 个处理;固化剂用量对黑麦草根长和根密度影响均显著($P < 0.05$),黑麦草根长、根密度从大到小的固化剂用量依次为 0.15%, 0.20%, 0.10%, 0.05% 和 0,说明固化剂可以促进黑麦草根系生长,增加根密度;固化剂用量为 0.15% 时,黑麦草的根表面积、根长、根密度和根径分别比对照 G0N2R2 高 37.60%, 13.46%, 14.16% 和 51.80%,说明固化剂对黑麦草根表面积和根径影响较大,土壤中添加适量的固化剂可以显著增加黑麦草根表面积和根径。相同土壤体积质量、相同固化剂用量条件下,随着 N 肥水平提高,黑麦草根表面积、根长和根密度均逐渐增大,G2N3R2 处理根表面积、根长和根密度比对照 G2N0R2 分别高 25.20%, 19.92% 和 18.92%;随着

N 肥水平提高,黑麦草根径呈先增大后减小的趋势,且均高于对照,但不同 N 肥处理间差异不显著。因此,为促进黑麦草根系生长,应该选择最适的 N 肥施用量,这样在促进黑麦草生长的同时,尽可能降低生产成本。相同固化剂用量、相同 N 肥条件下,土壤体积质量 1.2 和 1.3 g/cm³ 处理黑麦草根表面积、根长和根密度差异均不显著,但与 1.4 g/cm³ 处理相比差异显著,且各指标值均大于 1.4 g/cm³ 处理;1.3 和 1.4 g/cm³ 处理间黑麦草根径差异不显著,但显著高于土壤体积质量 1.2 g/cm³ 处理($P < 0.05$)。

综上所述可知,固化剂对黑麦草根系生长有促进作用,且以固化剂用量 0.15% 较为适宜。土壤中施入一定量的 N 肥对黑麦草根系生长有促进作用,但施 N 量越大性价比不高。为保证黑麦草健康生长,应选择中低土壤体积质量,兼顾黄土边坡土壤抗蚀性,黄绵土体积质量以 1.3 g/cm³ 较为适宜。

2.3 EN-1 固化剂、N 肥与土壤体积质量对黑麦草 WUE 的影响

EN-1 固化剂、N 肥与土壤体积质量对黑麦草 WUE 的影响见图 5。

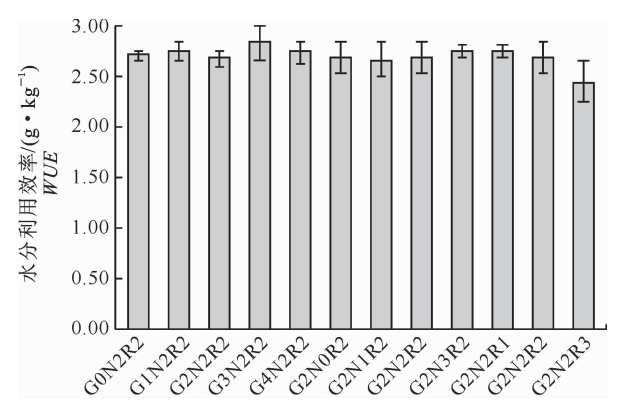


图 5 不同处理对黑麦草水分利用效率(WUE)的影响
Fig. 5 Effect of different treatments on water use efficiency (WUE) of ryegrass

从图 5 可以看出,不同处理黑麦草水分利用效率差异显著($P<0.05$),其中,G3N2R2 处理水分利用效率最高,G2N2R3 处理水分利用效率最低;相同

土壤体积质量、相同 N 肥条件下,随着固化剂用量增加,黑麦草水分利用效率逐渐提高,但固化剂用量 0,0.05%,0.10%处理间差异不显著,说明固化剂可以提高黑麦草水分利用效率,但固化剂用量较低时提高效果不明显;相同土壤体积质量、相同固化剂用量条件下,不同 N 肥处理间差异不显著;相同固化剂用量、相同 N 肥条件下,随着土壤体积质量增加,黑麦草水分利用效率逐渐降低,但 1.2 和 1.3 g/cm³ 处理间差异不显著。

2.4 黑麦草各指标的相关性分析

对盆栽各处理黑麦草生物量及根系特征各指标(总生物量、根生物量、分蘖数、根表面积、根长、根径)进行相关分析,结果见表 2。由表 2 可知,黑麦草总生物量与分蘖数、根长呈极显著正相关,与根表面积呈显著正相关;根生物量与分蘖数、根表面积呈显著正相关;分蘖数与根表面积、根长呈极显著正相关;根表面积与根长呈极显著正相关;其他各指标之间差异不显著。说明黄绵土土壤条件下,黑麦草生物量与根系各指标之间关系密切。

表 2 黑麦草各指标的相关分析
Table 2 Correlation analysis between ryegrass indexes

指标 Index	总生物量 Total biomass	根生物量 Root biomass	分蘖数 Tillers number	根表面积 Root area	根长 Root length	根径 Root diameter
总生物量 Total biomass	1	0.05	0.72**	0.57*	0.67**	0.18
根生物量 Root biomass		1	0.45*	0.44*	0.31	0.09
分蘖数 Tillers number			1	0.66**	0.81**	0.15
根表面积 Root area				1	0.88**	0.26
根长 Root length					1	0.21
根径 Root diameter						1

注: * 和 ** 表示相关性显著和极显著。
Note: * and ** indicate significant and extremely significant differences, respectively.

3 讨论

本研究结果表明,黄绵土同一土壤体积质量条件下,不同固化剂用量处理对黑麦草株高、根表面积和根径等影响显著,且随固化剂用量的增加均呈先增后减的趋势,说明黑麦草生物量的增加不仅与 EN-1 固化剂有关,还与土壤物理性质密切相关。有研究表明,EN-1 固化剂有利于改善土壤结构、增加土壤饱和导水率和有机质含量;但是随着固化剂用量的增大,土壤水分有效性和 pH 值降低,而且固化剂用量越大,降幅越大^[8-10]。由此可见,无论土壤中是否施入 N 肥,并没有改变固化剂促进植物生长这一规律^[12]。

土壤中施入 N 肥可以增加植物功能叶叶面积,

提高叶绿素和可溶性蛋白含量,增大根干质量和不定根总长度,影响其他营养元素的吸收,最终达到提高植物生物量的目的,且随着 N 肥施用量提高,效果越显著^[18-21]。本试验结果表明,随着 N 肥水平提高,黄绵土土壤环境下,黑麦草株高、根长、根表面积、根密度均有逐渐增大的趋势,同时也说明,土壤中加入固化剂并没有影响 N 肥对植物生长的促进作用,N 肥与固化剂的交互作用不明显。有研究表明,施 N 量过高有可能降低某些植物(如黑麦草)的可溶性糖含量,导致土壤中微生物活性降低,不利于植物的生长,同时 N 肥利用率降低,成本提高且污染环境^[22-26]。另外,N 肥效果的发挥与降水、气温密切相关^[27-28],黄土边坡处于干旱、高温地带,N 肥难以充分发挥其肥效。黄绵土土壤环境下不同 N 肥

水平对黑麦草生物量影响差异不显著,说明 N 肥可以促进黑麦草的生长,但考虑到经济效益及长期施用的效果,N 肥用量应根据土壤性质等综合确定,不同固化土壤环境条件下 N 肥适宜用量有待于进一步研究。从本试验结果来看,随着土壤体积质量增加,固化剂用量有减小的趋势,但固化剂并没有改变因土壤体积质量增加,土壤透气性变差带来的黑麦草生长受抑这一基本现象,说明固化剂用量与土壤体积质量存在一定的交互作用,但并没有改变土壤紧实对植物生长所带来的胁迫。

4 结 论

1)无论土壤中是否加入固化剂,N 肥和土壤体积质量对黑麦草生长及水分利用效率均有影响。随着土壤体积质量增加,黑麦草株高、总生物量、根长、根表面积等均呈下降趋势,但在中(1.3 g/cm^3)、低(1.2 g/cm^3)土壤体积质量条件下差异不显著。随着 N 肥水平提高,黑麦草株高、生物量、根长、根表面积逐渐提高,但不同 N 肥水平间差异不显著。固化剂用量对黑麦草株高、根表面积和根径等影响显著,且均呈先增后减的趋势,但与固化剂用量不成正比。

2)黄绵土土壤环境下,土壤体积质量 1.3 g/cm^3 、N 肥用量 200 mg/kg 、固化剂用量 0.15% 处理黑麦草根生物量最大,土壤体积质量 1.2 g/cm^3 、N 肥用量 200 mg/kg 、固化剂用量 0.10% 处理黑麦草总生物量最大。

3)随着固化剂用量增加,黑麦草水分利用效率逐渐提高,但固化剂用量在 $0\sim 0.10\%$ 差异不显著。土壤体积质量 1.3 g/cm^3 、N 肥用量 200 mg/kg 、固化剂用量 0.15% 处理黑麦草的 WUE 最高。

4)在兼顾土壤抗蚀与植物生长的情况下,建议黄绵土边坡土壤体积质量为 1.3 g/cm^3 、固化剂用量为 0.15% 较适宜,N 肥用量根据土壤性质等综合确定。

[参考文献]

- [1] 戚国庆,胡利文. 植被护坡机制及应用研究 [J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(11):2220-2225.
Qi G Q, Hu L W. Study on mechanism and application of slope protection with vegetation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(11): 2220-2225. (in Chinese)
- [2] 肖盛燮,周 辉,凌天清. 边坡防护工程中植物根系的加固机制与能力分析 [J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(增刊1): 2670-2674.

- Xiao S X, Zhou H, Ling T Q. Mechanism ability analysis of plant root reinforcement in slope protection [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25 (Suppl. 1): 2670-2674. (in Chinese)
- [3] 周云艳,陈建平,杨 倩,等. 植物根系固土护坡效应的原位测定 [J]. 北京林业大学学报,2010,32(6):66-70.
Zhou Y Y, Chen J P, Yang Q, et al. In situ measurement of mechanical effect of plant root systems on soil reinforcement and slope protection [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2010, 32(6): 66-70. (in Chinese)
- [4] 朱 力,吴 展,袁郑祺. 生态植被护坡作用机理研究 [J]. 土工基础,2009,23(1):46-49.
Zhu L, Wu Z, Yuan Z Q. Mechanism study on slope protection through ecological vegetation [J]. Soil Engineering and Foundation, 2009, 23(1): 46-49. (in Chinese)
- [5] 杜应吉,李元婷. 固化黄土性能的试验研究 [J]. 灌溉排水学报,2004,23(6):65-66,77.
Du Y J, Li Y T. Test research for characteristics of solidified Loess [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2004, 23(6): 65-66, 77. (in Chinese)
- [6] 杜应吉,朱建宏. 土壤固化剂对不同土质固化性能影响的试验研究 [J]. 干旱地区农业研究,2004,22(4):229-231.
Du Y J, Zhu J H. Impact on soil solidifying agent to different soil characteristics [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2004, 22(4): 229-231. (in Chinese)
- [7] 童 彬,李 真. 土壤固化剂研究进展 [J]. 合肥师范学院学报,2009,27(3):91-93.
Tong B, Li Z. Research progress in soil consolidator [J]. Journal of Hefei Teachers College, 2009, 27(3): 91-93. (in Chinese)
- [8] 张丽萍. 黄土边坡坡面稳定及防治技术研究 [D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2009.
Zhang L P. Researches on Loess slope stability and prevention strategies [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2009. (in Chinese)
- [9] 单志杰. EN-1 离子固化剂加固黄土边坡机理研究 [D]. 陕西杨凌:水土保持研究所,2010.
Shan Z J. Mechanism study on the reinforcement of EN-1 ionic soil stabilizer to the Loess slope [D]. Yangling, Shaanxi: Institute of Soil and Water Conservation, 2010. (in Chinese)
- [10] 丁小龙. 固化剂对几种土壤物理性质的影响 [D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2011.
Ding X L. Effect of stabilizer on physical properties of several soil [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2011. (in Chinese)
- [11] 苏 涛. 砒砂岩地区 EN-1 固化剂固化边坡抗冲稳定性的机理 [D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2011.
Su T. Mechanism on scouresistance stability of EN-1 solidified slope in pisha sandstone region [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2011. (in Chinese)
- [12] 刘月梅,张兴昌,王丹丹. 黄土性土壤固化对黑麦草生长和根系活力的影响 [J]. 应用生态学报,2011,22(10):2604-2608.
Liu Y M, Zhang X C, Wang D D. Effects of Loess soil stabili-

- zation on *Lolium perenne* L. growth and root activity [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22 (10): 2604-2608. (in Chinese)
- [13] Chaves M M, Maroco J P, Pereira J S. Understanding plant responses to drought-from genes to the whole plant [J]. Functional Plant Biology, 2003, 30: 239-274.
- [14] Shangguan Z P, Shao M A, Ren S J, et al. Effect of nitrogen on root and shoot relations and gas exchange in winter wheat [J]. Botanical Bulletin of Academia Sinica, 2004, 45: 49-54.
- [15] 张福锁, 李春俭, 米国华. 植物营养生理进展: 21 世纪的生命科学展望 [M]. 济南: 山东教育出版社, 2003: 206-235.
- Zhang F S, Li C J, Mi G H. Advances in plant nutrition physiology; The life sciences outlook in the 21st century [M]. Jinan: Shandong Education Press, 2003: 206-235. (in Chinese)
- [16] 肖 蓉, 高照良, 张兴昌, 等. 陕北黄土丘陵沟壑区高速公路边坡不同生物防护模式的土壤特性: 以铜(川)-黄(陵)-延(安)高速公路为例 [J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(3): 79-85.
- Xiao R, Gao Z L, Zhang X C, et al. Soil features on slopes of expressway under different biological protection models in the hilly-gully region of Loess Plateau: Taking Tongchuan-Huangling-Yan'an expressway as an example [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2009, 7(3): 79-85. (in Chinese)
- [17] 韩信来, 高建恩, 樊恒辉, 等. 黄土高原不同地区固土强度变化规律研究 [J]. 人民长江, 2009, 40(22): 76-78.
- Han X L, Gao J E, Fan H H, et al. Stabilized soil strength variation in different regions of Loess Plateau [J]. Yangtze River, 2009, 40(22): 76-78. (in Chinese)
- [18] 杜华平, 江海东, 周 琴. 氮肥对一年生黑麦草功能叶生理特性影响的研究 [J]. 上海农业学报, 2008, 24(2): 81-83.
- Du H P, Jiang H D, Zhou Q. The effects of nitrogen fertilizer on physiological characteristics of functional leaves of annual ryegrass [J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2008, 24 (2): 81-83. (in Chinese)
- [19] 董桂春, 王余龙, 吴 华, 等. 氮素对水稻不同生育阶段根系形态特征的影响 [J]. 上海交通大学学报: 农业科学版, 2003, 21 (4): 331-335.
- Dong G C, Wang Y L, Wu H, et al. Effect of nitrogen on root morphometrics at different stages in rice [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University: Agricultural Science, 2003, 21 (4): 331-335. (in Chinese)
- [20] Raun W R, Johnson G V, Westerman R L. Fertilizer nitrogen recovery in long-term continuous winter wheat [J]. Soil Science Society of America Journal, 1999, 63(4): 645-650.
- [21] Uhart S A, Andrade F H. Nitrogen deficiency in maize: I. Effects on crop growth development dry matter partitioning and kernel set [J]. Crop Science, 1995, 35(5): 1376-1383.
- [22] 杜华平, 江海东, 周 琴. 氮肥对一年生黑麦草生长和产量影响的研究 [J]. 上海农业科技, 2008(4): 28-29.
- Du H P, Jiang H D, Zhou Q. The effects of nitrogen fertilizer on growth and yield of annual ryegrass [J]. Shanghai Agricultural Science and Technology, 2008(4): 28-29. (in Chinese)
- [23] 栗方亮, 李忠佩, 刘 明, 等. 氮素浓度和水分对水稻土硝化作用和微生物特性的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2012, 20 (9): 1113-1118.
- Li F L, Li Z P, Liu M, et al. Effects of different concentrations of nitrogen and soil moistures on paddy soil nitrification and microbial characteristics [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(9): 1113-1118. (in Chinese)
- [24] 叶 静, 王建芬. 氮肥水平对黑麦草产量的影响 [J]. 上海农业科技, 2004(6): 109.
- Ye J, Wang J F. Effect of nitrogen fertilizer on yield of ryegrass [J]. Shanghai Agricultural Science and Technology, 2004(6): 109. (in Chinese)
- [25] 巨晓荣, 刘学军, 张福锁. 冬小麦与夏玉米轮作体系中氮肥效应及氮素平衡研究 [J]. 中国农业科学, 2002, 35(11): 1361-1368.
- Ju X T, Liu X J, Zhang F S. Study on effect of nitrogen fertilizer and nitrogen balance in winter wheat and summer maize rotation system [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2002, 35 (11): 1361-1368. (in Chinese)
- [26] 杨新泉, 冯 锋, 宋长青, 等. 主要农田生态系统氮素行为与氮肥高效利用研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(3): 373-376.
- Yang X Q, Feng F, Song C Q, et al. Fate and efficient use of nitrogen fertilizer in main agroecosystems [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2003, 9(3): 373-376. (in Chinese)
- [27] 关军锋, 李广敏. 干旱条件下施肥效应及其作用机理 [J]. 中国生态农业学报, 2002, 10(1): 59-61.
- Guan J F, Li G M. Effects and mechanism of fertilization under drought [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2002, 10 (1): 59-61. (in Chinese)
- [28] 周怀平, 杨治平, 李红梅, 等. 施肥和降水年型对旱地玉米产量及水分利用的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2004, 22(3): 27-31.
- Zhou H P, Yang Z P, Li H M, et al. Influence of fertilization and rainfall distribution on yield and water use efficiency of maize in dryland [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2004, 22(3): 27-31. (in Chinese)