

# 黄土性土壤固化对黑麦草生长和根系活力的影响\*

刘月梅<sup>1,2</sup> 张兴昌<sup>3,\*</sup> 王丹丹<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100; <sup>2</sup>延安职业技术学院, 陕西延安 716000; <sup>3</sup>中国科学院/水利部水土保持研究所水利部水土保持生态工程技术研究中心, 陕西杨凌 712100)

**摘要** 采用盆栽试验,研究了安塞黄绵土不同容重、不同固化剂(路邦 EN-1 固化剂)掺量对黑麦草生长和根系活力的影响。结果表明:黄绵土容重在 1.2 ~ 1.4 g · cm<sup>-3</sup> 范围内,随土壤容重的增加,黑麦草叶绿素含量、根系活力、根冠比、根生物量和植株生物量均降低;各土壤容重条件下,黑麦草叶绿素含量、根系活力、根冠比、根生物量和植株生物量均高于对照,且随着固化剂掺量的增加均呈先增加后降低的趋势。土壤容重和固化剂掺量交互作用对根生物量和总生物量的影响均显著( $P < 0.05$ )。总体来看,土壤容重 1.3 g · cm<sup>-3</sup>、固化剂掺量 0.15% 处理下,各指标值均最高。

**关键词** 土壤固化剂 根系活力 叶绿素 根冠比 生物量 黑麦草

文章编号 1001-9332(2011)10-2604-05 中图分类号 S156.2 S311 文献标识码 A

**Effects of loess soil stabilization on *Lolium perenne* L. growth and root activity.** LIU Yue-mei<sup>1,2</sup>, ZHANG Xing-chang<sup>3</sup>, WANG Dan-dan<sup>1</sup> (<sup>1</sup>College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; <sup>2</sup>Yanan Vocational and Technical College, Yan'an 716000, Shaanxi, China; <sup>3</sup>Ministry of Water Resources Research Centre on Soil and Water Conservation, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi, China). -Chin. J. Appl. Ecol. 2011 22(10): 2604-2608.

**Abstract:** Taking the loess soils with bulk density 1.2 g · cm<sup>-3</sup>, 1.3 g · cm<sup>-3</sup>, and 1.4 g · cm<sup>-3</sup> from Ansai, Shaanxi Province as test objects, a pot experiment was conducted to study the effects of different amendment amount of soil stabilizer (EN-1 stabilizer) on the growth and root activity of ryegrass (*Lolium perenne* L.). Within the range of the bulk densities, the leaf chlorophyll content, root activity, root/shoot ratio, root biomass, and plant biomass of *L. perenne* all decreased with increasing soil bulk density, and were higher under the amendment of EN-1 stabilizer, as compared with the control. With increasing amendment amount of EN-1 stabilizer, the leaf chlorophyll content, root activity, root/shoot ratio, root biomass, and plant biomass had a trend of increased first and decreased then. Soil bulk density and stabilizer amendment amount had significant interactive effect on the root biomass and plant biomass. Overall, the values of the test indices were the highest under 1.3 g · cm<sup>-3</sup> soil bulk density and 0.15% EN-1 stabilizer amendment amount.

**Key words:** soil stabilizer; root activity; chlorophyll; root/shoot ratio; biomass; ryegrass (*Lolium perenne* L.).

随着经济的发展,人们对环境保护和交通安全的观念发生了转变,由高速公路工程建设引发的边坡防护问题越来越受到人们的关注<sup>[1]</sup>。土壤本身的渗透性、抗冲蚀性决定了边坡坡面抵抗冲刷的能力。黄土的母质较为松散,具有大孔性的基本结构<sup>[2]</sup>,在一定的雨强条件下,其土壤入渗量大,抗蚀性较

低。土壤固化剂是一种性能优良的土工复合材料,由多种无机和有机材料配制而成,在常温下能与土壤发生一系列的物理化学反应,可胶结土粒、填充土壤空隙,从而改善土壤的强度、耐久性等<sup>[2-3]</sup>。目前,固化剂的研究主要集中在交通道路、环保工程、水土保持及水利工程的护坡、防渗、集流面等领域<sup>[4-8]</sup>。研究表明,EN-1 固化剂可以显著增大黄土干密度,提高土壤抗剪强度、抗渗性、水稳性团聚体含量及土壤结构体的稳定性<sup>[9-11]</sup>。

\* 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-441)资助。

\*\* 通讯作者。E-mail: zhangxc@ms.iswc.ac.cn

2011-03-31 收稿 2011-07-23 接受。

植物与边坡土体的作用是相互的,植物的生存离不开土体环境,植物又可以通过力学效应和水文效应增加坡面的稳定性<sup>[12-15]</sup>。黄土边坡的生态防护应兼顾土壤抗蚀与植被生长,将边坡土壤固化与植被建设有机地结合起来,既提高边坡土质的稳定性又能实现边坡的生态防护,达到“生态、环保、绿色、高效”的效果。因此,探讨固化土壤条件下边坡植被生长调控机制对边坡生态防护具有重要意义。本文以陕北高速公路黄土边坡常用的植物黑麦草(*Lolium perenne* L.)为对象,研究黄土高原典型土壤黄绵土不同容重和不同固化剂掺量对黑麦草叶绿素含量、根系活力、根冠比和生物量的影响,为黄土边坡生态防护中固化剂的应用提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

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:种子的发芽率为76.3%,纯净度为98%,千粒重为3.76 g。

供试土样为陕西省安塞地区的黄绵土,属弃耕地耕层土壤,质地为粉壤土,有机质 $3.08 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,总氮 $0.37 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,pH 8.58,含粘粒12.0%、粉粒55.5%、砂粒32.5%。

供试固化剂为美国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,可将土壤中的矿物质和土壤分子分解,使其重新结晶形成金属盐,保持土壤持久稳定。它在浓缩状态下无挥发性,不燃烧,有强烈的刺激性酸味,稀释后无任何危害,对生态无破坏、对环保无影响<sup>[9]</sup>。

### 1.2 试验设计

2010年4月—2011年3月,试验在陕西杨凌中国科学院水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室( $108^{\circ}4'33.59'' \text{ E}$ ,  $34^{\circ}16'31.30'' \text{ N}$ )防雨棚下进行。试验采用完全随机区组设计,设3个土壤容重为1.2、1.3、1.4  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ <sup>[11,16]</sup>;5个固化剂掺量为0、0.05%、0.1%、0.15%、0.2% (以干土质量计),分别记作CK、 $G_{0.05}$ 、 $G_{0.1}$ 、 $G_{0.15}$ 、 $G_{0.2}$  5次重复。

土壤风干后过2 mm筛,按16%质量含水率<sup>[5]</sup>取一定体积的水,在水中加入一定比例的固化剂,搅拌均匀后用撒壶分层撒入土中拌匀,用塑料防水布盖好密闭24 h,待土壤水分分布均匀后,按照设计容重分层装入塑料桶,所用塑料桶规格为29 cm ×

22 cm × 26 cm (上径 × 下径 × 高)。盖上塑料防水布于室温下养护10 d后播种<sup>[9,11]</sup>。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2株,土壤含水量控制在田间持水量的80%。

### 1.3 测定方法

2010年8月20日,黑麦草生长旺盛并渡过高温季节后,取植株地上部在105 °C下杀青30 min,80 °C下烘干48 h后称量;将整盆根系取出冲洗,称取5 g鲜根低温保存,采用TTC法<sup>[17]</sup>测定根系活力,再将其余根系烘干,测干质量。参照Arnon<sup>[18]</sup>的方法测定叶绿素含量。

### 1.4 数据处理

采用Microsoft Excel 2003和SAS 9.0软件对数据进行统计分析和绘图,采用Duncan法进行多重比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同处理对叶绿素含量的影响

叶绿素是反映植物叶片光合能力的重要指标,其含量高低对光合速率有直接影响。由图1可以看

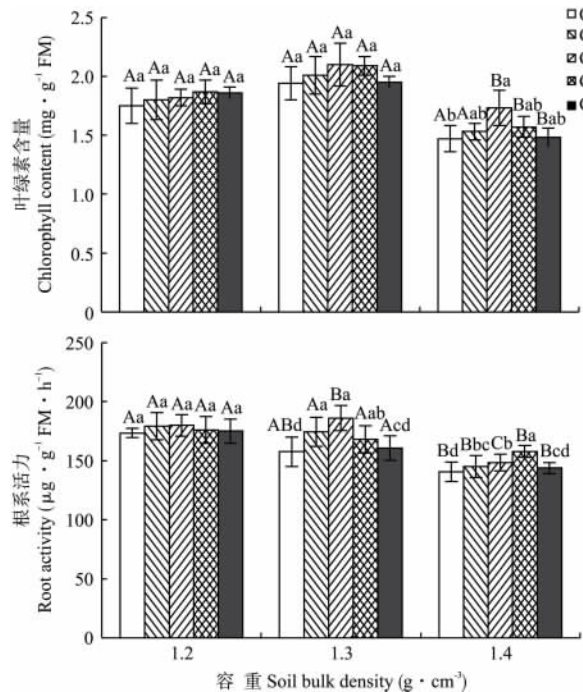


图1 不同处理下黑麦草叶片的叶绿素含量和根系活力

Fig.1 Chlorophyll content and root activity of ryegrass under different treatments.

不同小写字母表示相同土壤容重下不同固化剂掺量处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。Different small letters indicated significant difference in the same soil bulk density among different soil stabilizer content treatments at 0.05 level. 不同大写字母表示相同固化剂掺量下不同土壤容重处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。Different capital letters indicated significant difference in the same soil stabilizer content among different soil bulk density treatments at 0.05 level.

出,各固化剂掺量条件下,1.2和1.3 g·cm<sup>-3</sup>土壤容重处理下黑麦草叶绿素含量均高于土壤容重1.4 g·cm<sup>-3</sup>.其中,土壤容重1.3 g·cm<sup>-3</sup>条件下,CK、G<sub>0.05</sub>、G<sub>0.1</sub>、G<sub>0.15</sub>和G<sub>0.2</sub>处理下叶绿素含量比容重1.4 g·cm<sup>-3</sup>分别增高32.0%、31.4%、21.4%、33.1%和31.8%,反映出土壤中无论是否加入固化剂,土壤紧实都会影响叶片的光合能力.各固化剂掺量条件下,叶绿素含量在土壤容重1.2与1.3 g·cm<sup>-3</sup>处理之间的差异不显著,这可能是由于黄绵土土质松散并且孔隙较大,在黑麦草种植管理过程中,低容重(1.2 g·cm<sup>-3</sup>)的土壤在盆栽管理过程中受土壤和水自身重力的影响而下陷,部分土层土壤变得紧密,土壤容重增大,从而影响了叶片的光合能力.

各土壤容重条件下,黑麦草叶绿素含量随着固化剂掺量的增加均呈先增加后减小的趋势,但土壤容重1.2和1.3 g·cm<sup>-3</sup>条件下各固化剂掺量处理间差异不显著;添加固化剂处理的黑麦草叶绿素含量均高于对照,说明土壤中添加一定比例的固化剂能够促进黑麦草叶片的光合作用(图1).

## 2.2 不同处理对根系活力的影响

根系活力是指根系新陈代谢的活动能力,是反映根系吸收功能的重要指标.根系活力越大,其代谢、吸收矿物营养和水分的能力越强.由图1可以看出,同一固化剂掺量条件下,黑麦草根系活力随土壤容重的增大逐渐减弱.其中,除G<sub>0.1</sub>外,各固化剂掺量条件下根系活力在土壤容重1.2与1.3 g·cm<sup>-3</sup>处理间差异均不显著,但二者均显著高于土壤容重1.4 g·cm<sup>-3</sup>处理( $P<0.05$ ).这说明土壤中无论是否添加固化剂,高容重(1.4 g·cm<sup>-3</sup>)土壤对黑麦草根系活力的抑制作用均大于中(1.3 g·cm<sup>-3</sup>)、低容重土壤.

各土壤容重条件下,根系活力随固化剂掺量的增加均呈先增大后减小的趋势.同一土壤容重条件下,各固化剂掺量处理下根系活力均大于对照,其

中,土壤容重1.3和1.4 g·cm<sup>-3</sup>条件下,G<sub>0.05</sub>、G<sub>0.1</sub>和G<sub>0.15</sub>处理下差异达显著水平( $P<0.05$ ),这反映出添加固化剂可以增大黑麦草的根系活力,促进其对土壤水分和养分的吸收.

## 2.3 不同处理对根冠比的影响

由表1可以看出,各土壤容重条件下,添加固化剂处理的黑麦草根冠比均大于未添加固化剂处理,而且根冠比随固化剂掺量的增加均呈先增大后减小的趋势.综合来看,各固化剂掺量条件下,根冠比在土壤容重1.3 g·cm<sup>-3</sup>处理下最大,1.4 g·cm<sup>-3</sup>处理下最小;在土壤容重1.2、1.3和1.4 g·cm<sup>-3</sup>条件下,固化剂掺量分别为0.1%、0.15%和0.15%处理下,根冠比达最大值.

## 2.4 不同处理对生物量的影响

由表2可知,除G<sub>0.15</sub>外,各固化剂掺量条件下,黑麦草根生物量在土壤容重1.2和1.3 g·cm<sup>-3</sup>处理下均大于容重1.4 g·cm<sup>-3</sup>,其中,G<sub>0.05</sub>、G<sub>0.15</sub>、G<sub>0.2</sub>条件下不同容重处理间差异显著( $P<0.05$ ),这说明土壤紧实制约黑麦草根系生长.各固化剂掺量条件下,不同容重对黑麦草总生物量的影响规律不同,但总生物量在土壤容重1.3 g·cm<sup>-3</sup>处理下均大于容重1.4 g·cm<sup>-3</sup>,其中,G<sub>0.15</sub>、G<sub>0.2</sub>条件下不同容重处理间差异显著( $P<0.05$ ).

各土壤容重处理下,黑麦草根生物量和总生物量随固化剂掺量的增加均呈先增大后减小的趋势;而且添加固化剂处理的根生物量和总生物量均显著大于未添加固化剂处理( $P<0.05$ ),这说明固化剂对黑麦草的生长有促进作用.

土壤容重1.4 g·cm<sup>-3</sup>、固化剂掺量为0条件下,黑麦草根生物量和总生物量在各处理中均最小(表2).方差分析表明,土壤容重和固化剂掺量交互作用对根生物量和总生物量的影响均显著( $P<0.05$ ),说明在合适的土壤容重和固化剂掺量条件下,黑麦草能够生长良好,根系和植株生物量达到最大.

表1 不同处理下黑麦草的根冠比

Table 1 Root/shoot ratio of ryegrass under different treatments (mean±SD)

土壤容重 Soil bulk density (g·cm <sup>-3</sup> )	固化剂掺量 Stabilizer content (%)				
	0	0.05	0.1	0.15	0.2
1.2	1.50±0.03Ac	1.56±0.02Aab	1.57±0.02Ba	1.52±0.01Cbc	1.52±0.02Bbc
1.3	1.50±0.05Ac	1.56±0.03Ac	1.69±0.03Ab	1.78±0.03Aa	1.69±0.06Ab
1.4	1.32±0.03Bd	1.45±0.01Bc	1.55±0.01Bb	1.61±0.02Ba	1.45±0.03Bc

同行不同小写字母表示相同土壤容重下不同固化剂掺量处理间差异显著( $P<0.05$ ) Different small letters in the same row indicated significant difference in the same soil bulk density among different soil stabilizer content treatments at 0.05 level. 同列不同大写字母表示相同固化剂掺量下不同土壤容重处理间差异显著( $P<0.05$ ) Different capital letters in the same column indicated significant difference in the same soil stabilizer content among different soil bulk density treatments at 0.05 level. 下同 The same below.

表 2 不同处理下黑麦草的生物量

Table 2 Biomass of ryegrass under different treatments (mean±SD)

项目 Item	土壤容重 Soil bulk density ( $g \cdot cm^{-3}$ )	固化剂掺量 Stabilizer content (%)				
		0	0.05	0.1	0.15	0.2
根生物量 Root biomass (g)	1.2	9.17±0.21Ac	10.54±0.20Ab	11.17±0.16Aa	10.15±0.26Cb	10.23±0.16Bb
	1.3	9.29±0.42Ac	9.65±0.43ABc	11.22±0.28Ab	13.52±0.37Aa	11.15±0.76Ab
	1.4	8.67±0.35Ac	9.25±0.44Bb	10.93±0.20Aa	11.10±0.22Ba	9.76±0.19Bb
总生物量 Total biomass (g)	1.2	15.29±0.25Ac	17.30±0.36Ab	18.28±0.24Aa	16.82±0.47Cb	16.96±0.31ABb
	1.3	15.49±0.55Ac	15.85±0.59ABbc	17.88±0.48Ab	21.10±0.50Aa	17.76±1.00Ab
	1.4	15.27±0.57Ab	15.62±0.78Bb	17.97±0.28Aa	18.02±0.29Ba	16.47±0.44Bb

### 3 讨 论

高速公路边坡土壤侵蚀的内在机制是土体的分解和土粒的搬移。土壤容重越大,入渗速率越小,抗蚀性越强。同时,土壤容重作为土壤的物理特性之一,是表征土壤肥力的重要标志,与根系的穿透阻力、土壤含水量、凋萎系数、土壤通气性以及水肥的利用率等密切相关<sup>[20-21]</sup>。影响植物根系细胞和组织呼吸及养分吸收量<sup>[19]</sup>。容重大表明土壤紧实板硬,妨碍根系伸展,从而导致根系活力<sup>[19-20,22]</sup>和根系生物量下降<sup>[23-26]</sup>。Houlbrooke 等<sup>[23]</sup>研究表明,牧草地上部生物量随土壤容重的增加而降低,增大土壤容重不利于植物生长。本研究也表明,土壤容重在 1.2~1.4  $g \cdot cm^{-3}$  范围内,根系活力和根生物量随土壤容重的增加均下降(图 1 和表 2),同时说明土壤中加入 EN-1 固化剂并没有改变因土壤紧实植物生长受到影响这一规律。根冠比随土壤容重的增加而减小(表 1),表明容重的增加对根的抑制作用大于植株地上部分,这一结果与宋家祥等<sup>[22]</sup>研究不同土壤紧实度对棉花根系生长影响的结果一致。因此,考虑到 EN-1 固化剂对植物生长的影响,要使黄土边坡生态防护具有土壤抗蚀和植物生长良好的双重作用,不能完全按照最大干密度和最优含水率来设计土壤紧实度。另外有研究表明,土壤磷和钾流失量随土壤容重的增大而增大<sup>[27-28]</sup>;适当紧实的土壤能增加根系与土壤的密接度,提高根系对水肥的利用率<sup>[25]</sup>。因此,固化黄土边坡生态防护时应选择合适的土壤容重。

有研究表明,EN-1 离子固化剂有利于改善土壤结构、增加土壤的饱和导水率和有机质含量;但是随着固化剂掺量的增大,土壤水分有效性和 pH 值降低,而且固化剂掺量越大影响越大<sup>[8-11]</sup>。因此,不同掺量固化剂可以通过影响土壤理化性质,最终影响植物的生长。本研究中,各土壤容重条件下,黑麦草

叶片叶绿素含量、根系活力、根冠比、根生物量和总生物量均随固化剂掺量的增加呈先增加后降低趋势,反映出土壤中加入适量固化剂可以促进黑麦草的光合作用、根系的吸收功能及生物量的累积。综合考虑,在黄土边坡进行生态防护时,为了兼顾土壤抗蚀<sup>[10]</sup>与植物生长,建议土壤容重为 1.3  $g \cdot cm^{-3}$ 、固化剂掺量为 0.15%。

### 参考文献

- [1] Li Z-Q (李志清), Hu R-L (胡瑞林), Wu L-Z (吴礼舟), et al. Protection of ecological system in the application of expressway revetment. *Journal of Engineering Geology* (工程地质学报), 2005, 13(2): 280-284 (in Chinese)
- [2] Du Y-J (杜应吉), Zhu J-H (朱建宏). Impact on soil solidifying agent to different soil characteristics. *Agricultural Research in the Arid Areas* (干旱地区农业研究), 2004, 22(4): 229-231 (in Chinese)
- [3] Tong B (童彬), Li Z (李真). Research progress in soil consolidator. *Journal of Hefei Teachers College* (合肥师范学院学报), 2009, 27(3): 91-93 (in Chinese)
- [4] Feng H (冯浩), Wu P-T (吴普特), Peng H-T (彭红涛). Effect of the additives HEC and AAM on the efficiency and capability of rainwater catchment materials. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*. (农业工程学报), 2001, 17(3): 28-31 (in Chinese)
- [5] Han X-L (韩信来), Gao J-E (高建恩), Fan H-H (樊恒辉), et al. Study on the change rules of stabilized soil intensity in different regions of Loess Plateau. *Yangtze River* (人民长江), 2009, 40(22): 76-78 (in Chinese)
- [6] Zhang L-P (张丽萍), Zhang X-C (张兴昌), Sun Q (孙强). Study on capacity of improving loess anti-shear strength and anti-permeability of two kinds of ionic soil solidified agent. *Water Saving Irrigation* (节水灌溉), 2009(5): 35-38 (in Chinese)
- [7] Fan H-H (樊恒辉), Gao J-E (高建恩), Wu P-T (吴普特), et al. Comparison of different construction techniques for the catchment area with soil stabilizer. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*

- (农业工程学报), 2006, **22**(10): 73–77 (in Chinese)
- [8] Zhang L-P (张丽萍). Researches on Loess Slope Stability and Prevention Strategies. PhD Thesis. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2009 (in Chinese)
- [9] Zhang L-P (张丽萍), Zhang X-C (张兴昌), Sun Q (孙强). Engineering properties and influencing factors of solidified loess by EN-I solidifying agent. *Science of Soil and Water Conservation* (中国水土保持科学), 2009, **7**(4): 60–65 (in Chinese)
- [10] Shan Z-J (单志杰). Mechanism Study on the Reinforcement of EN-I Ionic Soil Stabilizer to the Loess Slope. PhD Thesis. Yangling, Shaanxi: Institute of Soil and Water Conservation, Ministry of Water Resources/Chinese Academy of Sciences, 2010 (in Chinese)
- [11] Shan Z-J (单志杰), Zhang X-C (张兴昌), Zhao W-X (赵伟霞), et al. Effects of EN-I soil stabilizer on soil anti-erodibility. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2010, **24**(5): 6–9 (in Chinese)
- [12] Qi G-Q (戚国庆), Hu L-W (胡利文). Study on mechanism and application of slope protection with vegetation. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* (岩石力学与工程学报), 2006, **25**(11): 2220–2225 (in Chinese)
- [13] Zhou Y-Y (周云艳), Chen J-P (陈建平), Yang Q (杨倩), et al. In situ measurement of mechanical effect of plant root systems on soil reinforcement and slope protection. *Journal of Beijing Forestry University* (北京林业大学学报), 2010, **32**(6): 66–70 (in Chinese)
- [14] Zhu L (朱力), Wu Z (吴展), Yuan Z-Q (袁郑棋). Mechanism study on slope protection through ecological vegetation. *Soil Engineering and Foundation* (土工基础), 2009, **23**(1): 46–49 (in Chinese)
- [15] Xiao S-X (肖盛燮), Zhou H (周辉), Ling T-Q (凌天清). Mechanism ability analysis of plant root reinforcement in slope protection. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* (岩石力学与工程学报), 2006, **25**(suppl. 1): 2670–2674 (in Chinese)
- [16] Xiao R (肖蓉), Gao Z-L (高照良), Zhang X-C (张兴昌), 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. *Science of Soil and Water Conservation* (中国水土保持科学), 2009, **7**(3): 79–85 (in Chinese)
- [17] Gao J-F (高俊凤). Laboratory Techniques for Plant Physiology. Xi'an: World Books Publishing Company, 2000 (in Chinese)
- [18] Arnon DI. Copper enzymes in isolated chloroplasts. *Polyphenoloxidase in Beta vulgaris: Plant Physiology*, 1949, **24**: 1–15
- [19] Niu W-Q (牛文全), Guo C (郭超). Effect of rhizosphere soil permeability on water and nutrient uptake by maize. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(11): 2785–2791 (in Chinese)
- [20] Li C-H (李潮海), Li S-L (李胜利), Wang Q (王群), et al. A study on corn root growth and activities at different soil layers with special bulk density. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2005, **38**(8): 1706–1711 (in Chinese)
- [21] Li Z (李卓), Wu P-T (吴普特), Feng H (冯浩), et al. Simulated experiment on effects of soil bulk density on soil water holding capacity. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2010, **47**(4): 611–620 (in Chinese)
- [22] Song J-X (宋家祥), Zhuang H-Y (庄恒扬), Chen H-Q (陈后庆), et al. Effect of soil compaction on root growth of cotton. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 1997, **23**(6): 719–726 (in Chinese)
- [23] Houlbrooke DJ, Thom ER, Chapman R, et al. A study of the effect of soil bulk density on root and shoot growth of different ryegrass lines. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 1997, **40**: 429–435
- [24] Liu W-G (刘晚苟), Shan L (山仑). Effect of soil bulk density on maize growth under different water regimes. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2003, **14**(11): 1906–1910 (in Chinese)
- [25] Zou Y-J (邹养军), Ma F-W (马锋旺), Han M-Y (韩明玉), et al. Advance in research of effect and mechanism of higher soil compaction on plant growth. *Agricultural Research in the Arid Areas* (干旱地区农业研究), 2007, **25**(6): 212–215 (in Chinese)
- [26] Cai X-L (才晓玲), Li Z-H (李志洪). Effect of bulk density and fertilizer on the corn growth. *Journal of Yunnan Agricultural University* (云南农业大学学报), 2009, **24**(3): 470–473 (in Chinese)
- [27] Wang H (王辉), Wang Q-J (王全九), Shao M-A (邵明安). Effect of soil bulk density on soil nutrient in runoff from loess slope. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2007, **21**(3): 10–18 (in Chinese)
- [28] Atwell BJ. The effect of soil compaction on wheat during early tillering. I. Growth, development and root structure. *New Phytologist*, 1990, **115**: 29–35

作者简介 刘月梅,女,1971年生,博士研究生,副教授.主要从事生态环境工程研究. E-mail: yameilin@126.com

责任编辑 孙菊