

玉米根系原位固土力学特性研究*

郑朝元¹, 范茂攀¹, 郑毅^{1**}, Michael Augustin FULLEN², 李永梅¹, Mudhu SUBEDI²
(1. 云南农业大学 资源与环境学院, 云南 昆明 650201; 2. 伍尔沃汉普敦大学 应用科学系, 英国 伍尔沃汉普敦 WV11SB)

摘要: 通过采用自制的剪切箱和锚杆拉力计对玉米(云瑞8号, *Zea mays*. L)根系在10 cm和20 cm两个深度上和空地样方的固土能力进行了原位测定比较。结果表明, 施加相同载荷时, 两种深度空地样方位移大于有根玉米样方; 20 cm深度样方位移为4个样方中最小。作物扎根越深, 达到剪切分离样方特征点所需的载荷越大。10 cm玉米样方屈服拉力点载荷为2.7 kN, 抗拉极限点载荷为2.9 kN; 20 cm玉米样方屈服拉力点载荷为3.6 kN, 抗拉极限点载荷为3.61 kN; 10 cm空地样方两点载荷分别为2.3 kN和2.5 kN; 20 cm深度空地样方载荷分别为3.1 kN和3.4 kN。该方法可直接量化测定玉米根系固土能力, 为农业水土保持提供了有效研究手段。

关键词: 玉米根系; 固土能力; 原位测定; F-S曲线

中图分类号: S 157 文献标识码: A 文章编号: 1004-390X(2010)04-0562-06

Research on In-Situ Measurement of Soil-fixation Capability of Corn Roots

ZHENG Chao-yuan¹, FAN Mao-pan¹, ZHENG Yi¹, Michael Augustin FULLEN²,
LI Yong-mei¹, Mudhu SUBEDI²

(1. College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China;
2. School of Applied Science, University of Wolverhampton, Wolverhampton, WV11SB, UK)

Abstract: Experiments of in-situ measuring the stabilization capability of soil by corn roots (10 cm and 20 cm) and bare soil square with the anchor-shank tension meter and self-designed shear box were conducted. The results indicated that when an equally load was applied, the displacement of bare soil square was higher than that of corn square in two depths, the displacement was the lowest in 20 cm depth. The higher the root took in the soil square, the more load which made soil square separate from bulk soil was required. The bending point-F2 and plastic deformation point-F3 of soil square with corn in 10 cm were 2.7 kN and 2.9 kN, respectively; those of soil square in 20 cm were 3.6 kN and 3.61 kN; those of bare soil square in 10 cm depth were 2.3 kN and 2.5 kN; those of bare soil square in 20 cm depth were 3.1 kN and 3.4 kN. It is proposed that that is an appropriate method in fix-quantify measure corn root soil-fixation capability in the agriculture soil and water conservation.

Key words: corn root; soil-fixation capability; in-situ measurement; F-S curve

工程措施、生物措施(植物固定)等是防治水土流失的主要措施。植物固土是植株地上部和地下部共同作用的结果。地上部分主要通过拦截雨滴来减少地表径流。地下部主要有两方面, 一

收稿日期: 2009-06-03 修回日期: 2009-07-06

* 基金项目: 欧盟第六框架协议国际科技合作研究项目(INCO-CT-2005-510745); 云南省教育厅基金(09Y0199)。

作者简介: 郑朝元(1983-), 男, 黑龙江人, 在读硕士研究生, 主要从事水土保持研究。E-mail: lestat_z@163.com

** 通讯作者 Corresponding author: 郑毅(1964-), 男, 博士, 教授, 博士生导师。E-mail: zj212350@yaho.com.cn

是根系本身固土力学能力,一是根系与土壤形成复合有机整体方面的性质^[1]。

随着对植物固土研究的进一步深入,该措施研究重点也由对植物地上部的研究转移到对植物地下部的研究。

植物根系是土壤水分的重要载体,在水分—根系—植物—大气连续体中^[2]起着桥梁作用。根系一方面依靠根压作用和植物水分蒸发蒸腾与大气相互连接,一方面与土壤中水分、可溶性矿物质及土壤黏粒、微生物等相关联,从而发生水分梯度及矿物质溶液质流、物质的迁徙和富集现象^[3],从而参与和影响整个生态系统的变化,影响水分变化,物质转移^[1]。由于根系和土体的充分接触,与其中的黏粒、有机质等物质构成复杂紧密复合体,通过其复杂的植物—土体相互作用,改变土壤结构和通透性,影响土壤环境,起到保持水土的作用。

由于不能搅动原状土,因此根系—土壤有机复合体研究比较困难,大部分的研究主要集中于根际土壤理化性质,根际微生物活性,根系活动^[4],根系吸收营养的能力及微生物,矿质促进根系生长情况等方面^[5,6]。

目前国内外对于植物根系的研究主要分为单根及群根研究。单根为早期的侧重于根系侧向及垂直拉拔研究。群根更注重作物整体及原位单位土体内根系方面。

杨维西^[7]对采伐后2年、4年单根抗拉进行了研究,除得出刺槐根系的抗拉力与根径成幂函数外还得出根系单根拉力在采伐后,明显减小,其衰减率是随着伐后时间的推延而增大的,并在伐后前两年衰退速度很快,后两年稍微缓减。

群根研究方法主要分为3大类:

第1大类是最初的研究方法,即土体原位剪切箱直接剪切法。此法优点在于对比较不同根系含量和不同根系性状的土壤层抗侵蚀能力很有效,对根系定量评价意义重大。其缺点在于难以适用于从生的灌木区根系剪切实验,并且测定的土层水平和垂直范围很小。

第2大类为现场原位水平挤出法。该方法为解明曙^[8]于1997年提出。该法优点在于测试剪切面积较大,可以达到50 cm × 80 cm,并且能对黄土区丛生灌木整体根系进行直接测定。解明曙应用该法综合“U”法理论确定了根系固土有效范围,并对灌木—拧条整根根系进行了测定,提出单

位剪切面积(A)中直径大于0.4 cm的各根系横截面积和(AX)所占比重(AX/A)大于0.1%,为判定林木根系固坡力学强度有效范围的定量指标,并提出了白榆根系固坡力学强度参数值。

第3大类以周跃等^[9]为代表,以树体为支持,应用剪切箱对土壤进行采样,结合解明曙原位水平挤出剪切法优点,对整体浅层水平根系的斜向牵引效果进行研究。该法优点在于用位移表测出了剪切箱的平均位移,牵拉时,把电信号转变成电阻值,用公式算出拉力,及土方剪破时侧根牵引力和根际土层。其缺点在于不能直接读拉力,不能对抗拉过程进行分析。

群根抗拉及土壤固土能力研究成果首先表现为提高坡面稳定性。当斜坡上没有根系存在时,抗滑力主要有土壤颗粒的粘结力,和滑动时产生的摩擦力。但当有根系存在时除以上抗滑力以外,根系的存在增加了土壤的抗剪力,因而增加了坡体的稳定系数。

根据YANG^[10]的研究,当无植物生长的斜坡稳定系数为1时,有灌木生长的根系其稳定系数最大达到1.5。根系的分布范围对土壤的抗剪难度强度具有明显的增强作用,强度随着深度增加而减小。研究表明根系对土壤抗剪强度的增加值与穿透剪切面的根截面有关,呈线性关系。

植物根系作为与土体直接接触的植物器官,根土复合体之间存在着相互作用力。研究根系与土体形成的复合体样方原位抗拉能力,对根系固土意义重大。通过设计试验,对样方产生推力,测量受力与位移关系,可以很好得出根系对土体抗剪抗拉的贡献。

本研究从探讨植物根系原位固土力学机理入手,采用自制的剪切箱和锚杆拉力计对玉米根系的原位固土能力在10 cm和20 cm两个深度上进行测定。使其在农业水土保持上作为一种有效手段发挥更大作用。

1 材料与方法

1.1 试验地点

试验地点位于云南省云南农业大学教学试验农场水土保持研究区。坐标为N 24°58'35.8", E 102°40'10.3",海拔高度1950 m。

1.2 作物品种

玉米(云瑞8号), *Zea mays*. L, 单子叶禾本

科须根系作物。该型号为云南省推广种植饲料用品种。2008 年 5 月 5 日种植于云南农业大学教学试验场, 2008 年 10 月 1 日进行根系原位拉力试验。测定时期为玉米成熟期。

1.3 田间施肥管理

有机肥于种植前施进地块。基肥用量为尿素 300 kg/hm², 普钙 450 kg/hm²; 拔节期追肥(尿素 300 kg/hm²)。在玉米大喇叭口期和抽穗期, 施用“乐果”(375 mL/hm²)对玉米螟虫进行防治。

1.4 试验设计及方法

样方 1: 10 cm 剪切玉米样方; 样方 2: 10 cm 剪切空地样方; 样方 3: 20 cm 剪切玉米样方; 样方 4: 20 cm 剪切空地样方。对两个深度作物和空地样方进行拉力位移比较。分别进行 3 次重复测定。

应用 F-S 曲线表示测定结果。F-S 曲线是样方承受载荷(F)与样方位移(S)之间关系, 可反映根系与土体之间力学相互作用。

完整 F-S 曲线应反映如下 3 个阶段: 样方线性形变阶段(弹性形变); 塑性形变阶段(剪切阶段); 蠕变阶段及完全破坏阶段^[11-16]。

载荷 F: 施加给样方的载荷, 表现为由锚杆拉力计产生的沿样方滑动方向的推动力(kN)。模拟样方所受外力作用。

位移 S: 由剪切箱所固定的土壤在锚杆拉力计推动作用下的移动(mm)。模拟在外力剪切下, 样方滑动距离。

比例极限点 F1: 此点范围内根系与土体样方发生弹性形变, 呈现线性变化规律。

屈服压力点 F2: 由弹性形变进入塑性形变为主的临界点, 塑性形变是样方本身受到外力剪切, 进入位移急速增加阶段。

抗拉极限点 F3: 根系水平抗滑极限点^[17], 超出该点拉力, 样方持续滑动, 最终剪出土体。

1.5 试验器材

锚杆拉力计型号为 ML-20 型, 可以产生额定 20 t 的拉力。

剪切箱由厚度为 0.1 m 钢板制作。规格为 0.3 m × 0.3 m × 0.1 m 和 0.3 m × 0.3 m × 0.2 m 两种。用于选定并固定样方, 便于在产生拉力时测定样方位移。

锚杆拉力计上安装千分表, 观测样方位移。精确度为 1 μm, 量程 1 mm, 超过该量程后用米

尺测量。

1.6 土壤水分及土壤理化性质测定

供试土壤为旱地红壤。

“S”型 5 点取土样, 深度为 0~10 cm。水分含量采用烘干法测定; 理化性质通过常规方法^[18]测定。全氮: 半微量凯氏法; 速效磷: 0.5 mol/L 的 NaHCO₃ 法; 速效钾: NH₄OAc 浸提后, 火焰光度法; 碱解氮: 碱解扩散法; 土壤质地: 比重法。样方水分含量均经过 3 次重复测定。

土壤水分含量对土体滑动和根系生长固土能力有很大影响。水分含量较少的土壤, 土壤易板结, 土体颗粒间摩擦力大, 根系不易生长伸长。

表 1 中看出, 4 个样方水分含量分别为 27.57%, 28.75%, 29.65% 和 30.03%。接近地表土壤含水量由于受到地面蒸发等因素影响, 含水量较少, 使得土体滑动需要的剪切力小。

表 1 样方土壤理化性状及水分含量

Tab. 1 Soil properties and soil moisture content of soil squares			
样方土壤理化性状 soil properties of soil squares			
有机质/(g·kg ⁻¹) organic matter	全氮/(g·kg ⁻¹) total nitrogen	碱解氮/(mg·kg ⁻¹) available nitrogen	
19.7	0.98	61.1	
速效磷/(mg·kg ⁻¹) available phosphorus	速效钾/(mg·kg ⁻¹) available potassium	pH pH value	
11.4	229.8	6.8	
土壤质地			
soil particle size distribution	<0.01 mm/%	0.01 mm ~ 1 mm/%	
轻黏土	61.44	38.56	
样方土壤水分含量/% soil moisture content of soil squares			
样方 1 soil square 1	样方 2 soil square 2	样方 3 soil square 3	样方 4 soil square 4
27.57 ± 0.22	28.75 ± 0.10	29.65 ± 0.18	30.03 ± 0.11

土壤质地也对测定结果有影响。不同质地反映了不同作物生长的土壤环境。图 1 显示测定结果, 土壤质地含量 <0.01 mm 的占 61.44%; 0.01~1 mm 含量为 38.56%。判定该土为轻黏土。轻黏土中, 黏粒含量越高, 土体颗粒间摩擦力越大, 样方所需的推动力较大。

1.7 样方生物量

挖出样方内所有作物根系, 洗净晾干称取鲜重。放入烘箱, 105℃ 杀青 30 min 后, 65~70℃ 烘至恒重, 称取干重^[19]。

1.8 数据分析软件

数据应用 SPSS, DPS, EXCEL 软件进行分析。

2 结果与分析

2.1 生物量

生物量对水土保持的影响有两方面: 一是地上部分生物量, 地上部长势较好, 枝叶繁茂, 可以较好的阻滞水滴对地面的冲击, 从而减少径流, 较少

改变地表类型, 起到保水固土作用; 一是地下部生物量, 一般来说, 地下部长势较好, 根系在土体中扦插, 与土体纠缠, 增加根系与土体接触面积, 可增大根土之间力的相互作用, 对土体的抗冲抗剪力都有所提高。表2所示, 样方1生物量要明显小于样方3的生物量, 这对根系的固土影响较大。

表2 玉米样方生物量

Tab. 2 The maize biomass of soil squares

样方 soil square	根系密度/(kg·m ⁻³) root density	地上生物量/kg underground biomass		地下生物量/kg aboveground biomass	
		鲜重 fresh weight	干重 dry weight	鲜重 fresh weight	干重 dry weight
样方1 soil square 1	2.12	1.07 ± 0.19	0.52 ± 0.22	0.09 ± 0.06	0.02 ± 0.01
样方3 soil square 3	1.31	1.10 ± 0.19	0.57 ± 0.18	0.11 ± 0.03	0.02 ± 0.012

注: 表中根系密度中样方体积为各自深度样方体积。

Note: The volume of root density is shear boxes' volume in this table.

2.2 不同样方载荷位移关系

田间试验观察及数据结果表明: 两种深度下, 无论有无作物根系存在, 规律均为, 当施加给样方初始拉力时, 样方并不发生明显位移, 只见到剪切箱受力面上出现不同程度形变, 土体也发生一定程度微小形变, 但整体抵抗拉力不发生明显位移。此时记录的位移数值很小, 主要位移是由土体受拉力所产生的形变。当施加拉力增加到一定程度, 达到特定值时(拉力特征点)时, 拉力在一定范围内波动, 位移持续增加。继续施加推力, 位移增大, 当剪切掉土体后, 位移最大, 拉力最大。土体无根存在时, 内部存在的摩擦力主要为土粒之间的摩擦力, 抗滑抗剪的主要贡献也是由此产生。对有根样方来说, 存在根系与土体之间的摩擦力作用, 增大了根系对土体的固定作用, 并由此导致土体抗剪抗滑能力提高。

由图1分析, 当对样方施加相同载荷时, 样方2(10 cm 空地)位移大于样方1(10 cm 玉米); 样方4(20 cm 空地)位移大于样方3(20 cm 玉米)。在相同载荷下, 样方1(10 cm 玉米)和样方3(20 cm 玉米)两者位移为样方1大于样方3; 样方2(10 cm 空地)和样方4(20 cm 空地)位移为样方2大于样方4。如载荷为2.5 kN时, 样方1位移为5 mm, 样方2位移为6.5 mm, 样方3位移为4 mm, 样方4位移为4.01 mm。

在两种深度下, 有根样方位移均小于空地比照样方。在相同载荷下, 空地无根样方滑动距离较大。充分说明有根存在条件下, 对土体抵抗外

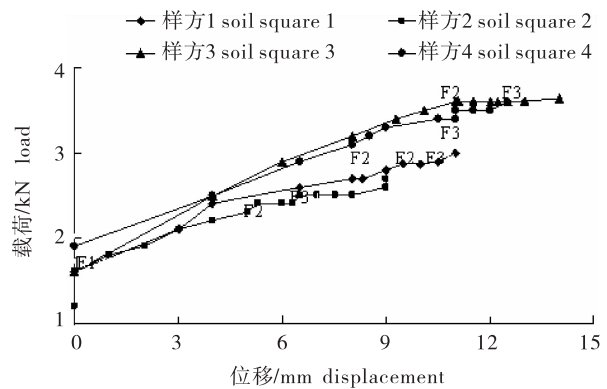


图1 不同深度样方载荷位移关系

Fig. 1 Relationship between load and displacement of different soil squares

界剪切力, 减少自身滑动, 有重要作用, 土壤固持能力在有根条件下得到极大改善。

不同深度的有根样方位移比较发现, 在相同载荷下, 10 cm 根系滑动距离要明显高于 20 cm 根系。20 cm 深度根系固持土体的能力明显高于 10 cm 深度。说明根系扎根越深, 固持土壤能力越强。

由表3看出, 样方获得的载荷和样方产生的位移之间存在非常明显的线性正相关关系。相关系数为0.8574, 0.9144, 0.9773和0.8886, 达到极显著相关水平 ($P < 0.01$)。

2.3 样方三特征点 (F1, F2, F3) 分析

2.3.1 比例极限点 (F1)

该点范围内, 作物根系与土壤之间发生的是弹性形变。该阶段受力特性是, 当撤销外力时, 样方会恢复初始位置, 根系恢复在样方中的状态。该阶段位移 (mm) 是由根系和样方内土体的弹

性形变共同决定的。样方 1 和 2 与样方 3 和 4 均符合该规律。

如表 4 所示, 不同样方深度在比例极限点处的载荷分别为 1.6 kN, 1.6 kN, 1.6 kN 和 1.9 kN。

表 3 不同深度样方载荷位移方程

Tab. 3 correlation equation between Load and Displacement of different soil squares

样方 soil square	相关方程 correlation equation	判定系数 determinant coefficient (R^2)	相关系数 correlation coefficient (R)	P 值 P value
样方 1 soil square 1	$F = 3.9961S - 2.8541$	0.7351	0.8574	0.0004**
样方 2 soil square 2	$F = 9.2799S - 16.0757$	0.9552	0.9773	0.0001**
样方 3 soil square 3	$F = 4.0073S - 3.2930$	0.8180	0.9144	0.0001**
样方 4 soil square 4	$F = 3.8180S - 3.0632$	0.7896	0.8886	0.0001**

注: ** 表示样方受到的载荷和样方产生的位移之间关系达到极显著相关水平 ($P < 0.01$)。

Note: ** mean the relationship between Load and Displacement displayed extremely significant difference ($P < 0.01$).

表 4 样方三特征点处载荷

Tab. 4 correlation equation between the 3 special points of Load of different soil squares kN

样方 soil square	F1 处载荷 load at F1	F2 处载荷 load at F2	F3 处载荷 load at F3
样方 1 soil square 1	1.6	2.7	2.9
样方 2 soil square 2	1.6	2.3	2.5
样方 3 soil square 3	1.6	3.6	3.61
样方 4 soil square 4	1.9	3.1	3.4

2.3.2 屈服拉力点 (F2)

屈服拉力点为根系与土体相互作用由弹性形变进入塑性形变为主的临界点。进入该阶段后的样方受力特性是, 当撤销外力时, 样方无法恢复初始位置, 根系也无法恢复在样方中的状态。该阶段测得的压强越大, 表明其需要的外力越大, 根系与土体之间的相互作用也越大。

不同深度对其影响不同。深度越深, 发生弹性形变时间越长, 进入塑性形变阶段越晚, 而在屈服压强点持续的时间就越长, 需要的推动力也就越大, 这样才可能使样方产生剪切效果。如表 4 所示, 样方 3 的深度为 20 cm, 达到 F2 点所需要的载荷为 3.6 kN, 高于样方 1 的 10 cm 深度的 2.7 kN。10 cm 深度的玉米根系, 由于接近地表, 抓固的土壤量较少, 该部分根系主要为节根, 比较粗大, 与土体接触面积有限, 根土之间力的作用较小, 弹性形变时间较短, 有效抵抗外力作用较弱, 因此比 20 cm 深度的玉米根系样方较早进入到塑性形变阶段。

2.3.3 抗拉极限点 (F3)

当锚杆拉力计产生的推力超过屈服拉力点 F2

后, 根系与土体相互作用进入以塑性形变为主的阶段。该阶段受力特性主要是针对作物根系, 由于土体的剪胀性和固结性都已得到发挥, 土体间作用力逐渐消失, 根系在全面松动前, 必须克服根间最大静摩擦力, 如果撤销外力, 根系不会再恢复在土体中的位置, 但根系仍未完全拉出土体或拉断。此点标志作物根系和土体同时达到塑性形变状态^[18]。达到此点后, 稍施加外力, 样方就会产生极大位移。

如表 4 所示, 该点样方 3 压强为 3.61 kN 极大高于样方 1 的 2.9 kN, 样方 2 的 2.5 kN 和样方 4 的 3.4 kN。说明了在到达该阶段后, 力的作用由根系土体互相作用转移到了以根系抗拉为主的阶段, 该深度土体主要为须根系结构, 根系的空间有效性大, 根系细胞纤维具有弹性, 要拉出或者拉断该阶段根系, 与单纯剪切 10 cm 深度根系所需外力要大。

图 1 中显示, 在达到抗拉极限点 F3 后, 样方 1, 2, 3 和样方 4 曲线均有持续上升现象。

3 讨论与结论

作物根系对土体抗滑、抗剪能力贡献较大。一方面, 作物地上部长势旺盛, 阻滞了雨滴对土壤的直接冲击, 对减缓径流产生的作用明显; 一方面, 地下部根系与土体形成复杂复合体, 如果遭受外力作用产生土体滑动及剪切时, 作用力已不是单纯的土壤本身抗剪能力, 而是加入了作物根系的贡献。不同深度根系对土体抗剪、抗滑能力贡献不同。作物扎根较深时, 一方面对从土壤内部获得更大的养分, 提高养分利用率, 促进作物生长; 一方面根系本身在土体内扦插、缠绕土壤, 形成复杂的立体空间构型, 增大了根系的空间有效性, 使得根系与土

体之间复合的力的作用增大。不同作物在不同土壤条件下,受到不同气候条件影响,根系生长状况不一,对土壤的固持作用也不一样。因此,作物根系原位抗拉研究中,对根土复合体简易量化测定十分必要,建立一套完善评价农业作物根系原位固土研究系统在农业水土保持上的应用十分必要。

毛妍婷等^[17]在深度为10 cm处对裸土样方及小麦不同根系密度的样方进行了原位测定。结果表明:小麦样方根系密度越大,所需要施加的载荷就越大,其根系固持土壤的能力就越强。施加相同载荷,裸土样方较小麦样方位移增加。

本试验对玉米10 cm和20 cm两个深度上根系的抗拉特性进行了原位测定分析。结果表明:有根作物样方和空地样方比较,有根样方固持土体能力较强;玉米根系扎根深度越深,剪切土体所需施加压强越大,剪切土体越困难,根系固持土体能力越强。F-S曲线表明,施加相同载荷,10 cm深度空地样方位移较大,10 cm深度有根样方其次,20 cm空地样方第三,而20 cm深度有根样方位移最小。通过分析可知,空地样方由于没有根系存在,其抗剪抗滑能力主要由土体间作用力提供,导致其位移较大;作物有根样方由于有根系存在,抗剪抗滑能力由根系和土体共同作用提供,位移较小。10 cm深度接近土壤表面,受降雨、耕作等影响较深,位移较20 cm深度大。20 cm深度有根样方滑动最小,深刻揭示了玉米深耕的重要性。本研究可有效评价云南主要作物玉米的根系固土能力。

本试验方法主要通过应用锚杆拉力计和自行设计的剪切箱对不同深度同一作物样方和空地样方的载荷与位移进行了测定。本试验仪器简便、易拆卸,读数方便,成本低廉,简单易行。改进了以往研究中仪器笨重、测量费时、可测数据及范围较窄的缺点。结合室内分析,拓宽了数据取得范围。本试验方法是研究不同植被条件根系力学作用的有效方法。为在农业水土保持领域开展水土保持评价提供了有效的理论、实践研究依据。在水土保持学大领域中具有较高理论及实践价值。可广泛应用于山区根系固土力学研究。

[参考文献]

[1] 程洪,颜传盛,李建庆,等,草本植物根系网的固

土机制模式与力学试验研究[J].水土保持研究,2006,13(1):62-65.

- [2] 康绍忠.土壤-植被-大气连续体水分传输理论与应用[M].北京:水电出版社,1994.
- [3] 黄昌勇.土壤学[M].北京:中国农业出版社,2000.
- [4] 刘建军.林木根系生态研究综述[J].西北林学院学报,1998,13(3):74-78.
- [5] 单建平,陶大立.国外对树木细根的研究动态[J].生态学杂志,1992,11(4):46-49.
- [6] 宋长贵,张献义.深翻对杉木根系的影响[J].湖北林业科技,1992,(4):1-3.
- [7] 杨维西.黄土高原人工造林的三大技术措施[J].水土保持通报,1995,3(15):61-64.
- [8] 解明曙.黄土地区土壤根系固土力学机理研究[D].北京:北京林业大学,1987.
- [9] 周跃,李宏伟,徐强.云南松幼树垂直根的土壤增强作用[J].水土保持学报,2000,14(5):111-112.
- [10] YANG W X. The preliminary discussion on soil desiccation of artificial vegetation in the northern regions of China [J]. Scientia Silvae Sinicae, 1996, 32 (1): 78 - 85.
- [11] YU S R. Fuzzy analysis of the mechanical properties of material [J]. Journal of Gansu University of Technology, 1999, 25 (2): 113 - 115.
- [12] LEE I W Y. A review of vegetative slope stabilization [J]. Journal of Hongkong Institute of Engineering, 1985, 13 (7): 9 - 12.
- [13] CAUVIN A, TESTA R B. Elastoplastic material with isotropic damage [J]. International Journal of Solids and Structures, 1999, 36 (5): 727 - 746.
- [14] 龚晓南,叶黔元,徐日庆.工程材料本构方程[M].北京:中国建筑工业出版社,1995.
- [15] 唐雪松,蒋持平,郑键龙.弹性损伤材料的应力-应变关系与损伤演化方程[J].长沙交通学院学报,1999,15(4):8-14.
- [16] 张淳源.粘弹性断裂力学[M].武汉:华中理工大学出版社,1994.
- [17] 毛妍婷,郑毅, FULLEN M A, 等.油菜根系固土拉力的原位测定研究[J].云南农业大学学报:自然科学版,2008,23(6):826-831.
- [18] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2005.
- [19] 黄瑞东.植物根系研究方法的发展[J].沈阳农业大学学报,1991,22(2):164-168.