

## 油菜根系固土拉力的原位测定研究\*

毛妍婷<sup>1</sup>, 郑毅<sup>1\*\*</sup>, Michael Augustin FULLEN<sup>2</sup>, 李永梅<sup>1</sup>, Mudhu SUBEDI<sup>2</sup>

(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:**应用锚杆拉力计和自行设计的剪切箱对不同根系密度的油菜根系固土能力在 10 cm 深度进行了原位测定。结果表明, 当施加载荷达到 3.5 kN 时, 生长有油菜的土壤样方 1 (根系密度为 1.11 kg/m<sup>3</sup>) 位移为 38.0 mm, 生长有油菜的土壤样方 2 (根系密度为 0.57 kg/m<sup>3</sup>) 位移为 46.0 mm, 而裸土样方位移为 49.7 mm。土壤样方内根系密度越大, 达到土壤样方与土体分离的特征点所需要施加的载荷就越大。土壤样方 1 的屈服拉力点为 3.5 kN, 抗拉极限点为 4.0 kN; 而土壤样方 2 的屈服拉力点为 3.1 kN, 抗拉极限点为 3.5 kN。该测定方法可以在水土保持上作为评价不同作物(植物)固土能力的有效参考手段。

**关键词:**油菜; 根系密度; 固土能力; 原位测定

**中图分类号:** S 565.4.04 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-390X (2008) 05-0826-06

## Researches on In-situ Measurement of the Soil Fixing Capability of Rape Roots

MAO Yan-ting<sup>1</sup>, ZHENG Yi<sup>1</sup>, Michael Augustin FULLEN<sup>2</sup>, LI Yong-mei<sup>1</sup>, Mudhu SUBEDI<sup>2</sup>

(1. Faculty of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China;

2. School of Applied Science, University of Wolverhampton, WV11SB, UK)

**Abstract:** Experiments of in-situ measuring the stabilization capability of soil by rape roots in 10 cm depth with the anchor-shank tensiometer and self-designed shear box were conducted. The results showed that when a 3.5 KN load was applied, the displacements of sample plot 1 (roots density = 1.11 kg/m<sup>3</sup>), sample plot 2 (roots density = 0.57 kg/m<sup>3</sup>) and control plot reached 38.0 mm, 46.0 mm and 49.7mm, respectively. The higher the root density was in the sample plot, the more loads which made sample plot separate from bulk soil was required. The bending point-F2 and plastic deformation point-F3 of sample plot 1 were 3.5 kN and 4.0 kN, respectively; those of sample plot 2 were 3.1 kN and 3.5 kN. It is proposed that this is an appropriate method to evaluate the root function of different crops or plants in maintaining slope stability.

**Key words:** rape; root density; soil fixing capability; in-situ measurement

生物措施、耕作措施和工程措施是人们进行水土流失治理的三大主要措施, 其中以生物措施最为有效。植被具有显著的水土保持功能, 这种功能所产生的巨大作用, 使林草植被建设在防治

土壤侵蚀和控制水土流失的各项措施中, 成为一项有效而长远的根本性措施, 是融生态、经济和社会效益于一体的协调人与自然关系的生态工程, 因而受到人们的重视<sup>[1]</sup>。而植物根系在稳定土壤

收稿日期: 2008-02-18 修回日期: 2008-04-22 \* \* 通讯作者 E-mail: zj212350@yahoo.com.cn

\* 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)。

作者简介: 毛妍婷(1982-), 女, 云南昆明人, 在读硕士研究生, 主要从事水土保持研究。

E-mail: maomaokm@yahoo.com.cn

结构、提高土壤抗冲性、防治土壤侵蚀方面的作用往往是地上部分所无法比拟的,具有不可忽视的作用。因此,植被,尤其植物根系是改善土壤侵蚀环境的重要因素<sup>[2]</sup>。

郭维俊等<sup>[3]</sup>从根系的力学特性,固土机理等方面概括了植物根系力学涉及的主要内容和现状,阐述了“土壤—根系”复合体稳定土体与抗侵蚀机理研究取得的主要成果。认为在根系固土抗侵蚀研究方面,应加强对林草植被,农作物根系抗侵蚀能力及有效性的研究。通过多学科,多领域联合攻关,深入系统的研究植物根系稳定土壤结构的基本原理。

植物固土是植株地上部分与地下部分的作用。地上部主要靠拦截雨滴来减少径流,效果取决于冠层的高度,连续性,植株密度和冠层密度<sup>[4]</sup>。在植物生长早期地上部数量较少且柔弱,植物根系在增强土壤凝聚力,增加土壤入渗能力,减少侵蚀率的作用是十分关键的<sup>[5]</sup>。地下部分—根系固土包括两方面,一是根系本身固土力学能力,二是根系与土壤形成复合有机整体方面的性质。程洪等在刘国彬根系固土力学机制的理论模式基础上又做了一定的补充,并通过对选取的草本植物根系进行了固土力学测试,为运用生物措施代替或部分代替某些工程措施进一步提供了力学理论依据<sup>[6]</sup>。

国内外的许多学者从不同的角度进行了根系抗拉和固土机制方面的研究。总体上主要分为单根抗拉研究与群根抗拉研究两大方面。单根抗拉研究主要是早期进行的根系侧向和垂直拉拔方面的研究。而群根抗拉研究则更注重植物整体根系及单位面积土壤内的根系。以周跃<sup>[7]</sup>为代表,应用最初实验装置中使用的剪切箱直接对土壤进行采样这一方法,并且结合解明曙<sup>[8]</sup>原位水平挤出法剪切法的优点,用树体作为支持点,对云南松根系增强土壤的作用进行了研究。

本研究试图从探讨植物根系固土力学机制方面入手,应用锚杆拉力计和自行设计改进的剪切箱,对不同根系密度的油菜和油菜的根系固土能力在深度为10 cm进行原位测定,以期在较大范围内,将这种方法作为评价水土保持研究中农作物和草本植物根系固土能力的一个有效的参考手段。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地点

试验地点位于昆明云南农业大学试验农场,经纬度: N24°58'35.8", E102°40'10.3"; 海拔: 1950 m。

### 1.2 供试作物及田间管理

油菜(甘蓝型花油3号), *Brassica napus*, 双子叶直根系植物。于2006年10月28日播种,2007年3月26日进行油菜根系拉力原位试验,油菜生育期150 d。

施肥及管理: 氮肥(尿素, 560 kg/hm<sup>2</sup>), 磷肥(普钙, 750 kg/hm<sup>2</sup>), 钾肥(硫酸钾, 200 kg/hm<sup>2</sup>)。磷肥和钾肥作为基肥一次施入, 氮肥1/3作为基肥, 其余2/3分别在油菜抽薹期和花期追施。

### 1.3 试验设计

土壤样方处理: 生长有油菜的土壤样方1; 生长有油菜的土壤样方2; 裸土样方为对照。样方大小依据剪切箱规格(长×宽×深=30.0 cm×30.0 cm×10.0 cm)而定。数据分析用Excel软件。

### 1.4 土壤水分含量和土壤理化性质测定

土壤水分含量用烘干法测定, 土壤理化性质用常规方法测定<sup>[9]</sup>, 全氮: 半微量开氏法; 速效磷: 0.5 mol/L NaHCO<sub>3</sub>法; 速效钾: NH<sub>4</sub>OAc浸提, 火焰光度法; 碱解氮: 碱解扩散法; 土壤质地: 比重法。数据分析用SPSS软件。土壤样方均采用5点取样法, 采集0~10 cm土样。

### 1.5 植被样方生物量

采用全挖法挖出剪切箱内的所有根系, 冲洗晾干后称鲜重。置入烘箱内在65~70℃烘至恒重, 记录干重<sup>[10]</sup>, 然后根据公式(RD=活根干重 kg/取样器体积 m<sup>3</sup>)将其转化为根系密度。

### 1.6 锚杆拉力计和剪切箱

锚杆拉力计型号为: ML-20; 产地: 浙江土工仪器制造有限公司; 可产生额定拉力20 T。

剪切箱: 采用厚度为1.0 cm的钢板制作, 规格为长×宽×深=30.0 cm×30.0 cm×10.0 cm。用于选定土墩样方的固定, 以便测定在设定负荷下土墩样方的位移。剪切箱的设计应充分考虑农作物和草本植物的根系生长状况, 使测定结果能真实反映根系对土壤的固定能力。在锚杆拉力计上安装千

分表,用于观测样方土墩的位移。精度为 1  $\mu\text{m}$ ,量程为 1 mm,超出量程用米尺测量。

### 1.7 原位土壤根系水平抗拉研究方法

通过 F-S 曲线<sup>[11]</sup>来表示原位土壤根系水平抗拉过程。F-S 曲线代表的是各样方的载荷 (F) 与位移 (S) 之间的关系,通过该曲线可以充分反映样方中根系本身抗拉特性与土壤力学特性的相互作用。完整的 F-S 曲线反映了以下 3 个阶段<sup>[12~17]</sup>①土墩的线性变形阶段 (弹性形变阶段);②塑性变形阶段 (剪切阶段);③蠕变阶段及完全破坏阶段。

比例极限点:此点范围内根系与土壤之间发生的是弹性形变,简称 F1。

屈服拉力点:根系与土壤的相互作用由弹性形变为主进入以塑性形变为主的临界点,简称 F2。

抗拉极限点:根系水平抵抗滑坡的极限点,简称 F3。

载荷:施加给土墩样方的拉力。由锚杆拉力计产生。

位移:土墩样方移动的距离。由千分表和米尺测量。

## 2 结果与分析

### 2.1 测定土壤样方的土壤理化性状和土壤水分含量

表 1 测定样方的土壤理化性状和土壤水分含量

Tab. 1 Soil properties and soil moisture content of sample plots

样方的土壤理化性状		
soil properties of sample plots		
有机质 / ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	pH 值	全氮 / ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )
organic matter	pH value	total nitrogen
18.77	6.2	0.93
速效磷 / ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	速效钾 / ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	碱解氮 / ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )
available phosphorus	available potassium	available nitrogen
11.19	98.82	79.20
土壤质地	<0.01 mm / %	1 ~ 0.01 mm / %
soil particle size distribution		
轻粘土 light clay	62.47%	37.53%
样方的土壤水分含量 / %		
soil moisture content of sample plots		
样方 1	样方 2	对照样方 (裸土)
sample plot 1	sample plot 2	control plot (bare soil)
27.44% $\pm$ 0.01 a	26.49% $\pm$ 0.03 a	25.74% $\pm$ 0.02 a

注:平均值后不同字母表示在  $P < 0.05$  水平内差异显著,  $n = 9$

Notes: Different letters indicated significant difference at 5% level,  $n = 9$ .

原位测定土壤样方的根系固土拉力时土壤的含水量大小对测定影响很大,一般来讲,土壤水分含量越高,土壤结构体 (颗粒) 之间的摩擦力就越小,测定的土壤样方与土体之间的分离所需载荷就越小,因此在测定时保持土壤含水量的基本一致对测定结果的分析比较很重要。从表 1 可知,测定时的 3 个样方土壤含水量基本保持一致,没有显著差异。

土壤质地对测定土壤样方的根系固土拉力也有影响。质地越粘 (粘粒含量越高),土壤结构

体 (颗粒) 之间的摩擦力就越大,测定的土壤样方与土体之间的分离所需载荷就越大。从表 1 中可以看出,本试验中 3 个测定的土壤样方质地均为轻粘土。

### 2.2 生物量

一般而言,植物地上部生物量的大小可以影响植物对雨水的截获和雨滴对土壤的击溅,从而影响土壤的表面结构;植物地下部的生物量大小则可反映出植物根系与土壤在单位土体中根-土的接触面积,根系生物量越大,对于同种植物来

讲其接触面积就越大。从表2可以看出, 油菜土壤样方1的地上部和地下部生物量都大于油菜土

壤样方2, 这对其根系的固土拉力大小有着直接的影响。

表2 油菜样方生物量

Tab. 2 Rape biomass of 2 sample plots

样方 sample plot	地上生物量鲜重 /g FW of aboveground biomass	地上生物量干重 /g DW of aboveground biomass	地下生物量鲜重 /g FW of underground biomass	地下生物量干重 /g DW of underground biomass	根系密度/(kg·m <sup>-3</sup> ) root density
样方1 sample plot 1	306.0	55.58	89.90	9.99	1.11
样方2 sample plot 2	169.0	30.71	55.67	5.11	0.57

注: FW: 鲜重; DW: 干重

Note: FW: fresh weight; DW: dry weight.

## 2.3 不同样方载荷与位移的关系

### 2.3.1 试验观察

对试验地的油菜样方均做原位土壤根系水平抗拉试验。试验过程均表现出这样一个现象: 在试验的一开始阶段, 通过拉力机对剪切箱的作用, 受测土墩并不明显发生位移, 而只看到剪切箱的受力面上出现了不同程度的变形。土壤因为受到挤压的作用也向上膨胀, 拉力在不断上升, 但整个土墩却抵抗着拉力而不发生明显位移。这时位移计记录的位移非常微小, 所发生的位移一部分是由于土体受到挤压的作用而发生变形引起的, 另一部分是产生于肉眼不易发现的拉力使土墩向前移动。随着拉力机的不断作用, 作用到土墩上的载荷不断增加, 当载荷增加到一个特定的值时, 位移也达到一个特定的距离, 这时载荷就开始在一个小的范围内波动, 但位移仍然在增加。这个过程在持续几秒钟后, 载荷继续增大, 位移迅速增加, 很快压力计的读数就到达最大量程。

试验中裸土样方与油菜样方土墩的载荷变化情况大体相似, 但到破坏阶段就有区别。裸土样方土墩因水土流失没有表层土, 土壤比较板结, 使该样方一开始要较大载荷才能发生较小位移, 但此过程时间持续不长。油菜样方的土墩位移随载荷增大而增大, 并且压力表在一定范围内波动上升, 但在剪破后压力表读数并未迅速降低, 有时还有一定的回升。是因为根没被完全拉断, 在短时间内仍有抵抗力。而无根的裸地样方位移先

随载荷增大而增大, 增到一定程度后土墩被剪破, 压力表读数不再上升而是降低。这是无根与有根样方最明显的区别。

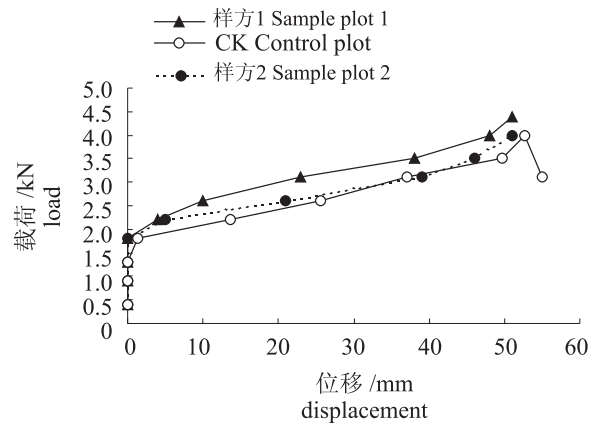


图1 不同样方载荷与位移的关系

Fig. 1 Relationship between Load (kN) and displacement (mm) of different sample plots

### 2.3.2 10 cm 深度不同样方的载荷与位移的关系分析

图1反映了不同样方的载荷与位移的关系。由图1可看出: 当对样方施加相同的载荷时, 油菜样方1(根系密度为1.11 kg/m<sup>3</sup>)发生的位移小于油菜样方2(根系密度为0.57 kg/m<sup>3</sup>)发生的位移, 如当施加的载荷为3.5 kN时, 油菜样方1位移为38.0 mm 小于油菜样方2的位移46.0 mm。而裸土样方在施加相同的载荷时发生的位移最大, 如在3.5 kN时位移为49.7 mm。

表 3 不同样方的载荷与位移相关方程表

Tab. 3 Correlation equation between the load and the displacement of different sample plots

样方 sample plot	相关方程 correlation equation	判定系数 determinant coefficient( $R^2$ )	相关系数 correlation coefficient(R)	F 值 F value
样方 1	$F = 0.0591 S + 1.3916$	0.8575	0.9260	48.160**
样方 2	$F = 0.0515 S + 1.2729$	0.8516	0.9228	40.162**
对照样方 (裸土)	$F = 0.0465 S + 1.1966$	0.8569	0.9257	47.912**

注: \*\* 表示样方载荷与位移之间关系均达到显著相关水平。

Note: \*\* Meant the relationship between load and displacement displayed significant difference at 5% level.

由表 3 可看出, 样方载荷与位移之间都存在着非常明显的线性正相关关系, 相关系数分别为 0.9260, 0.9228, 0.9257 均达到显著相关水平。

### 2.4 样方载荷三特征点与根系密度 (RD) 的关系

表 4 样方载荷三特征点与根系密度 (RD)

Tab. 4 Correlation equation between the 3 special points of load and root density of sample plots

样方 sample plot	根系密度 /( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) root density	F1 处载荷 /kN load at F1	F2 处载荷 /kN load at F2	F3 处载荷 /kN load at F3
样方 1 sample plot 1	1.11	1.8	3.5	4.0
样方 2 sample plot 2	0.57	1.8	3.1	3.5
对照样方 control plot	0.00	1.3	3.1	4.0

#### 2.4.1 比例极限点 (F1) 处载荷与根系密度 (RD) 的关系分析

在比例极限点之前, 根系与土壤之间发生的是弹性形变。此阶段只要消除拉力, 土墩就能回到原来初始位置, 土墩中的根系就能恢复原来在土壤中的状态。此时土墩发生的位移 (S) 是由根系弹性形变量与土壤弹性形变共同作用的结果。也就是说, 这一阶段中起主要作用的是土体的凝聚力和根系的弹性形变。当停止外力作用后根系和土壤都能恢复原位。由表 4 可以看出, 在比例极限点处, 油菜根系密度对其有一定影响, 裸土样方的 F1 为 1.3 kN 要小于油菜样方 1 F1 为 1.8 kN 和油菜样方 2 F1 为 1.8 kN。

#### 2.4.2 屈服拉力点 (F2) 处载荷与根系密度 (RD) 的关系分析

屈服拉力点是根系与土壤的相互作用由弹性

形变为主进入以塑性形变为主的临界点, 到达这个点所需要的载荷越大, 就说明根系发生塑性形变所需要的载荷越大。当根系与土壤的相互作用进入塑性形变阶段, 即使停止外力作用后根系和土壤也不能恢复原位。在屈服拉力点处, 相同类型样方根系密度越大, 所需要施加的载荷就越大, 也就是说相同类型样方根系密度越大的样方, 根系发生弹性形变的阶段就越长, 进入塑性形变阶段的时间就越晚。如表 4 所示, 油菜样方 1 的地下根系密度为  $1.11 \text{ kg/m}^3$ , 其根系的屈服拉力点处载荷为 3.5 kN; 油菜样方 2 的地下根系密度为  $0.57 \text{ kg/m}^3$ , 其根系的屈服拉力点处载荷为 3.1 kN 与裸土样方相同。由此可以看出, 地下根系密度小接近裸土, 载荷要达到其屈服拉力点处载荷值越容易, 其弹性形变阶段短, 有效抵抗外力的能力相对较弱, 因此相对早地进入塑性形变阶段。

#### 2.4.3 抗拉极限点 (F3) 处载荷与根系密度 (RD) 的关系分析

随着载荷的不断增大, 当增大到超过屈服拉力点 F2 时, 根系与土壤的相互作用进入塑性形变阶段, 此阶段土剪胀性及固结性都已发挥出来, 土体间咬合作用逐渐消失, 在根系土体全面松动前, 必须先克服根间最大静摩擦阻力, 使根系在土体中全面松动, 此时如果停止外力作用, 根系已不再恢复原位, 但全部根系仍未拉出土体。此阶段的抗拉极限点为根系水平抵抗滑坡的极限点。此点是根系本身和土壤都达到塑性形变状态的标志点。到达此点以后, 施加给土墩的载荷稍有增加根系就会产生较大的位移。如表 4 所示, 油菜样方 1 的地下根系密度为  $1.11 \text{ kg/m}^3$ , 其根系抗拉极限点处载荷为 4.0 kN; 油菜样方 2 的地下根系密度为  $0.57 \text{ kg/m}^3$ , 其根系的抗拉极限点处载荷为 3.5 kN。土壤样方 1 和 2 到达 F3 后曲线都有

上升趋势,而裸土样方到达抗拉极限点 F3 为 4.0 kN 后曲线有下降趋势。

### 3 讨论和结论

作物根系对土壤侵蚀和滑坡具有很好的抵抗作用。对坡耕地而言,由于有作物的生长,降雨对坡耕地造成的水土流失和滑坡可以得到有效地减轻,其原因在于作物的生长,减轻了雨滴对土壤的直接击溅导致的土壤结构破坏和地表径流的快速形成,另一方面由于作物根系在土壤中的生长形成的土壤——根系复合体使表层土壤能更紧密地与土体结合。但不同的作物根系的生长状况,根系的内在结构,根系构型是不一样的,同一作物在不同的土壤、气候条件下生长状况也有差别,因此对土壤的固定能力也会有所不同。采用一种简便易操作的方法在田间进行原位测定,用量化的数据来评价不同作物或同一作物的固土能力十分必要。

本试验在深度为 10 cm 处对裸土样方及油菜不同根系密度的样方进行了原位测定,结果表明:油菜样方根系密度越大,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,裸土样方较油菜样方位移增加。F-S 曲线表明:达到抗拉极限点后,油菜样方承受载荷的能力没有迅速下降还有上升的趋势,而裸土样方承受载荷的能力明显下降,在载荷为 4.0 kN 时陡然下降。该测定方法可以在水土保持上作为评价不同作物(植物)固土能力的有效参考手段。

#### [参考文献]

- [1] 吴钦孝,赵鸿雁. 植被保持水土的基本规律和总结 [J]. 水土保持学报, 2001, 15 (4): 13-19.
- [2] 刘定辉,李勇. 植物根系提高土壤抗侵蚀性机理研究 [J]. 水土保持学报, 2003, 17 (3): 34-37.
- [3] 郭维俊,黄高宝,王芬娥,等. 植物根系若干力学问题研究 [J]. 中国农机化, 2006, (2): 84-88.
- [4] MORGAN R P C. Soil Erosion and Conservation (the 3rd edition) [M]. UK: Blackwell Science Ltd, 2005.
- [5] GYSSELS G, POESEN J. The Importance of Plant Root Characteristics in Controlling Concentrated Flow Erosion Rates [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2003, 28: 371-384.
- [6] 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.
- [7] 周跃. 云南松林侵蚀控制潜能 [M]. 昆明: 云南科技出版社, 1999.
- [8] 解明曙. 黄土地区土壤根系固土力学机理研究 [D]. 北京林业大学博士论文, 1987.
- [9] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [10] 黄瑞冬. 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.
- [11] 中国机械工业教育协会组. 土力学及地基基础 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [12] 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.
- [13] CAUVIN A, TESTA R B. Elastoplastic Material With Isotropic Damage [J]. Institution of Solids Structure, 1999, 36: 727-746.
- [14] 张淳源. 粘弹性断裂力学 [M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1994.
- [15] 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.
- [16] LEE IW Y. A Review of Vegetative Slope Stabilization [J]. Hong Kong Institution of Engineer, 1985, 13 (7): 9-12.
- [17] YU S R. Fuzzy Analysis of the Mechanical Properties of Material [J]. Gansu University of Technology, 1999, 25 (2): 113-115.