

# 植被恢复对三峡库区土质道路边坡抗剪强度的影响\*

刘密军<sup>1</sup> 王天巍<sup>1†</sup> 蔡崇法<sup>1</sup> 翟杰<sup>2</sup>

(1 华中农业大学水土保持研究中心, 武汉 430070)

(2 中国建筑材料工业地质勘查中心吉林总队, 长春 130033)

**摘要** 通过在道路边坡进行植物防护和原位剪切试验,研究了不同植被防护措施对边坡抗剪强度( $\tau$ )影响。结果表明,植被根系随土壤深度增加而减少,表层(0~10 cm)根系长度密度(Root length density, *RLD*)占总 *RLD* 的 34%~78%;植被根系含量及盖度与土壤水分含量(Soil water content, *SWC*)呈指数正相关。表层(0~10 cm)土壤抗剪强度主要受植被根系及盖度影响,随着根系长度密度(*RLD*)、根系重量密度(Root weight density, *RWD*)、植被盖度(Vegetation cover, *VC*)增加呈指数形式增大。30 cm 深度土壤抗剪强度值显著低于 10 cm 值和 50 cm 值。随着土壤深度增加,土壤容重和水分对抗剪强度影响力增大,在 50 cm 处两者分别与抗剪强度呈线性正相关和指数负相关关系。

**关键词** 土壤水分;植被防护;土质道路;边坡稳定;三峡库区

**中图分类号** S157.1 **文献标识码** A

交通不便一直是制约三峡库区农村经济发展的瓶颈。从 20 世纪 90 年代中期至今,为保证三峡工程的顺利建设和安全运行采取了一系列生态经济建设活动,导致库区景观格局发生重大改变,城镇与建设用地迅速扩张,为库区道路网络发展提供良好契机,库区交通状况有了明显改善<sup>[1]</sup>。道路网络在推动经济发展的同时,不可避免地周边生态环境产生影响,如改变地形地貌、加剧景观破碎、破坏植物群落、增加水土流失危险性等<sup>[2-4]</sup>。

山区道路建设的一个重要特征是高挖深填,形成大量高、陡的路堑边坡和土质结构松散的路堤边坡。路堑边坡容易发生滑坡、崩塌、泻溜等地质灾害<sup>[5-6]</sup>,路堤边坡降雨溅蚀、面蚀、沟蚀等水土流失现象频发<sup>[7-8]</sup>,严重威胁道路行车安全和生态环境安全。

植被措施具有防护成本低、施工简便、景观效果和环境效益明显等特点,正逐步成为山区陡坡地、浅层滑坡地段、道路边坡等区域地质灾害和水土流失的治理技术<sup>[9]</sup>。采取植被措施防治边坡的滑移变形易受植物种类、树龄、根型、根径等因素影响<sup>[10-11]</sup>。在不同土壤环境中,土壤密度特征影响土体与根系表面的摩擦系数,进而影响“根-土”复合

体的强度<sup>[12]</sup>。林木砍伐后,根系腐烂速率与边坡崩塌频率呈显著正相关<sup>[13]</sup>。

然而在三峡库区,道路边坡植被防护的机理研究严重落后于工程应用,受试验条件及取样困难的影响,植被对道路边坡的影响多集中在防治土壤侵蚀上<sup>[14-15]</sup>,且主要考虑植被地上部分,很少考虑地下植被根系作用及其对边坡土壤水分的影响。现有植被根系对土体的加固机理、模型建立等研究主要是基于室内模拟数据提出的<sup>[16]</sup>,缺少野外原位监测数据的验证,在低等级土质道路边坡上进行的相关研究还比较匮乏。土壤水分、植被根系和抗剪强度之间的关系还不是非常明确。本研究通过对道路边坡进行生态防护,分析植被和水分等因素对边坡稳定性影响,对认识道路边坡侵蚀规律,完善边坡防护理论具有重要意义。

## 1 研究区域

试验点位于湖北省宜昌市夷陵区墨子溪小流域,30°37' N, 111°30' E。流域面积 7.3 km<sup>-2</sup>,海拔在 137~675 m 之间,属典型山区小流域。气候属北亚热带大陆性季风气候区,年平均气温 17℃。降雨

\* 国家自然科学基金项目(41001164 和 41171223)资助

† 通讯作者, E-mail: wangtianwei@webmail.hzau.edu.cn

作者简介:刘密军(1986—),男,江西吉安人,博士研究生,主要从事道路侵蚀及面源污染控制方面研究。E-mail:liuyj461@163.com

收稿日期:2012-04-30;收到修改稿日期:2012-09-29

集中在4月-9月,占全年降雨总量的70%以上,年均降水量1 217 mm。土壤类型为黄棕壤,流域植被乔木主要有马尾松(*Pinus massoniana*)、杉(*Cunninghamia lanceolata*)等,灌木以牡荆(*Vitex negundo* var. *cannabifolia*)、马桑(*Coriaria nepalensis*)为优势种,草本以狗牙根(*Cynodon dactylon*)、牛筋草(*Eleusine indica*)为优势种。水稻(*Oryza sativa*)、玉米(*Zea mays*)、油菜(*Brassica napus*)、马铃薯(*Ipomoea batatas*)、柑橘(*Citrus sinensis*)为主导产业。

流域主干道为水泥路(4.1 km),村落与村落之间以砾石道路为主(9.7 km),村落与耕地之间以土质道路相连,以及大量土质和草皮田间小道存在(49.2 km),路网密度 $9.24 \text{ km km}^{-2}$ 。土质道路长度占流域总道路长度的70%以上。除主干道边坡有少量工程护坡之外,其他类型道路边坡大部分被用作农业用地。路堑边坡主要种植南瓜、西葫芦等藤本瓜果,坡度较低的路堤边坡常开垦成耕地。边坡农业利用率高,防护效果差,水土流失现象严重。流域道路状况和边坡利用现状在三峡库区有着广泛的代表性。

## 2 测定方法

### 2.1 边坡处理

实验道路为一条村落通往坡耕地的新修土质作业道。道路总长1.9 km,路宽3.2 m,路面坡度均值为 $7.2^\circ$ ,路堑边坡坡度分布在 $31.2^\circ \sim 55.6^\circ$ ,路堤边坡坡度分布在 $9.5^\circ \sim 37.8^\circ$ 之间。该作业道于2009年8月完工,主要通行小型机动车和运输柑橘、脐橙等农用车。分别在路堑和路堤边坡修建径流小区,小区结构及措施布设如图1所示。对照处理为植被自然恢复。草本和草灌采用移栽方式种植,灌木为牡荆(*Vitex negundo* var. *cannabifolia*),当年苗,株高80~100 cm,株、行间距均为60 cm;草本为狗牙根(*Cynodon dactylon*),株、行间距均为20 cm。植生带内置种子为狗牙根, $A_4$ 小区的修建标准和材质参照文献[17], $D_2$ 小区草本宽度为2 m。小区建设及植被种植工作于2009年10月底完成,2010年7月进行野外试验。

### 2.2 土壤性质测定

小区植被覆盖度采用网格法测定。每个小区按坡上、坡中、坡下设置土壤采样点。每个采样点按10 cm、30 cm、50 cm层次取边坡土壤样品和环刀样品。每层取样3个,测定土壤容重、质地、水分、有

机质等性质。采用环刀烘干法测定土壤容重,采用沉降法测定土壤质地,采用铝盒烘干法测定土壤水分(土壤水分取样之前12 h有自然降雨发生,总降雨量23.5 mm),采用重铬酸钾外加热法测定有机质<sup>[18]</sup>。

### 2.3 植被根系测定

采用10 cm × 10 cm × 10 cm铁质框格采集0~10 cm、20~30 cm、40~50 cm层土壤根系。然后将框格中土壤倒入纱布中,在静水中将泥沙、枯枝落叶和碎石等杂物清除,将采集到的根系放在 $65^\circ\text{C}$ 鼓风烘箱内烘干至恒重,用游标卡尺测量根系直径,计算直径 $>0.1 \text{ mm}$ 根系的长度,求得根系长度密度(RLD):

$$RLD = \frac{L_r}{V} \quad (1)$$

式中,RLD为根系长度密度( $\text{km m}^{-3}$ ), $L_r$ 为直径 $>0.1 \text{ mm}$ 根系的总长度(km), $V$ 为土壤样品体积( $\text{m}^3$ )。

将直径 $>0.1 \text{ mm}$ 根系称重求得根系重量密度(RWD):

$$RWD = \frac{W_r}{V} \quad (2)$$

式中,RWD为根系重量密度( $\text{kg m}^{-3}$ ), $W_r$ 为直径 $>0.1 \text{ mm}$ 根系总重量(kg), $V$ 为土壤样品体积( $\text{m}^3$ )。

### 2.4 土壤抗剪强度测定

土壤抗剪强度采用意大利MATEST公司生产的S057型野外便携式十字板剪切仪(图2)测定,仪器由1个T型把柄(把柄中安装有测试扭矩的弹簧装置)和三个可更换的不同尺寸十字板头组成。十字板头可插入土中0~10 mm进行测量,测量深度可根据延长杆增加,每根延长杆长度50 cm。三种规格十字板头(直径×高度)分别为16 mm × 32 mm、20 mm × 40 mm、25.4 mm × 50.8 mm,根据土壤紧实状况进行适当选择。最大扭剪力是根据安装在手柄下面的弹簧装置来进行测量,量程:0~240 kPa,剪力值从手柄下方的刻度盘读取。根据刻度盘上的数值和十字板头的规格,用内置弹簧装置的扭矩公式计算被测样品的抗剪强度( $\tau$ ):

$$\tau = \frac{6T}{\pi D^2 (D + 3H)} \quad (3)$$

式中, $\tau$ 为土壤抗剪强度( $\text{t m}^{-2}$ ), $T$ 为扭矩(N), $D$ 为十字板头直径(mm), $H$ 为十字板头高度(mm)。

对于 $\frac{H}{D} = 2$ 的板头,其计算公式为:

$$\tau = \frac{6T}{7\pi D^3} \quad (4)$$

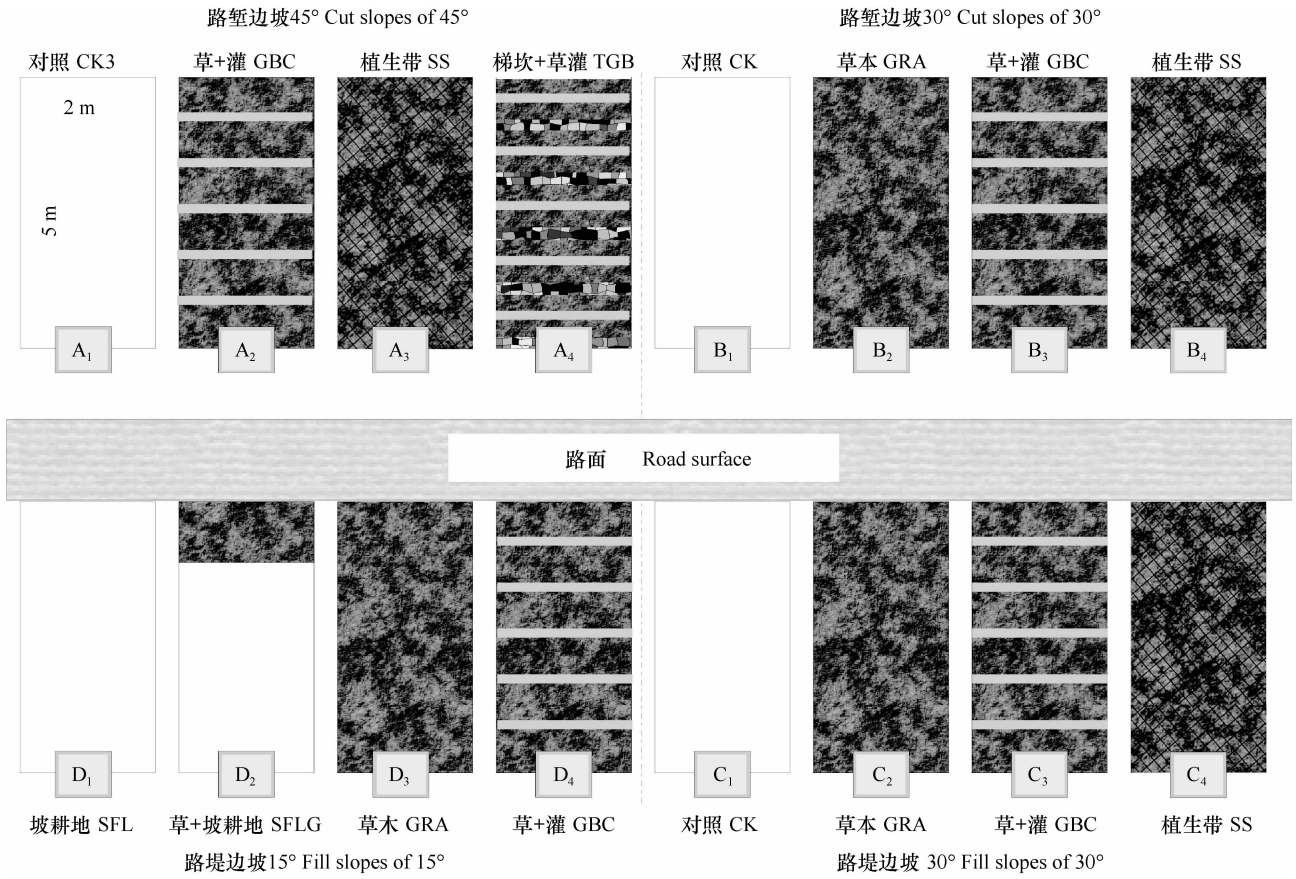


图 1 防护措施布设图

Fig. 1 Layout of the protection measures installed on the roadside slopes

CK:对照处理 Control; GBC: 草灌结合 Grass and bush combination; SS: 植生带 Sodded strips; TGB: 梯坎 + 草灌 Terrace with grass and bush; GRA: 草本措施 Grass; SFL: 坡耕地 Sloping farmland; SFLG: 草本 + 坡耕地 Sloping farmland with grass. A<sub>1</sub> ~ A<sub>4</sub>、B<sub>1</sub> ~ B<sub>4</sub>、C<sub>1</sub> ~ C<sub>4</sub>、D<sub>1</sub> ~ D<sub>4</sub>: 小区编号 Number of plot. 下同 The same below



图 2 MATEST 十字板剪切仪

Fig. 2 Field inspection pocket vane tester (MATEST)

测定深度为 10 cm、30 cm、50 cm,多次测量取平均值。

## 2.5 数据处理

采用 Excel 和 SPSS 18.0 统计分析软件对试验数据进行 Pearson 方差分析和差异显著性检验(LSD 法)。

## 3 结果与讨论

### 3.1 边坡土壤基本理化性质

路堑边坡小区间和路堤边坡小区间表层(0~10 cm)土壤质地无显著差异,表 1 中各粒径含量为

平均值。从表 1 可见,路堑边坡土壤砂粒含量显著高于路堤边坡,以砂土和砂壤土为主。路堤边坡粉粒和黏粒含量较高,属壤土和砂黏壤。表层(0~10 cm)土壤有机质含量差异明显,但含量总体偏低,土壤养分贫瘠造成植被自然恢复速度缓慢。

工程扰动之后,边坡植被恢复是一个漫长过程,人为因素介入能缩短植被自然演替时间。实验结果显示,种植 9 个月后,治理区植被盖度有了明显改善。草灌结合措施植被恢复效果最好,平均盖度达到 92%,其次为草本措施(86%)。自然恢复小区植被盖度显著低于有措施小区( $p < 0.001$ ),平均盖度 5%(表 1)。

表 1 边坡土壤(0~10 cm)基本性质和植被盖度

Table 1 General characteristics of slope soil (0~10 cm) and vegetation cover in the experiment plots

小区编号 Plot number	砂粒含量 Sand content (%)	粉粒含量 Silt content (%)	黏粒含量 Clay content (%)	有机质 Organic matter content (g kg <sup>-1</sup> )	植被盖度 Vegetation cover (%)
A <sub>1</sub>	66.75 ± 2.05bc	16.49 ± 1.43e	16.76 ± 0.64bc	7.51 ± 1.02de	5
A <sub>2</sub>	62.99 ± 0.47c	20.40 ± 0.88d	16.61 ± 1.35bc	6.17 ± 1.20e	87
A <sub>3</sub>	50.93 ± 2.33ef	31.53 ± 2.31ab	17.54 ± 1.28bc	3.77 ± 0.15fg	17
A <sub>4</sub>	68.67 ± 1.44ab	17.85 ± 0.86de	13.48 ± 1.13cd	1.46 ± 0.34g	85
B <sub>1</sub>	69.52 ± 0.67ab	18.13 ± 4.98de	12.35 ± 4.68d	1.45 ± 0.01g	1
B <sub>2</sub>	71.17 ± 0.92a	14.97 ± 2.57e	13.86 ± 2.18cd	4.36 ± 0.26f	80
B <sub>3</sub>	67.31 ± 1.59b	17.64 ± 2.95e	15.05 ± 1.88cd	11.75 ± 1.17c	93
B <sub>4</sub>	63.60 ± 0.99c	18.85 ± 2.11de	17.55 ± 2.04bc	7.96 ± 0.31de	71
C <sub>1</sub>	54.81 ± 0.70de	29.24 ± 1.94b	15.95 ± 2.53c	2.90 ± 0.01g	8
C <sub>2</sub>	49.67 ± 2.14ef	32.79 ± 1.82ab	17.54 ± 1.04bc	6.77 ± 0.36e	89
C <sub>3</sub>	46.83 ± 0.63f	35.25 ± 3.96a	17.92 ± 3.33bc	7.60 ± 0.38de	96
C <sub>4</sub>	54.55 ± 1.33de	25.39 ± 2.12b	20.06 ± 0.79b	8.46 ± 0.09d	74
D <sub>1</sub>	47.81 ± 0.31f	33.00 ± 1.54ab	19.19 ± 1.23bc	10.94 ± 1.17c	91
D <sub>2</sub>	56.57 ± 0.61d	25.09 ± 1.87b	18.34 ± 1.27bc	8.67 ± 0.09d	89
D <sub>3</sub>	51.77 ± 1.37e	21.14 ± 3.69de	27.09 ± 2.05a	13.47 ± 0.27b	78
D <sub>4</sub>	48.58 ± 3.01ef	23.34 ± 3.43c	28.08 ± 2.15a	14.84 ± 0.39a	67

注:同列不同字母表示不同处理间差异显著( $p < 0.05$ ) Note: Different letters in the same column meant significant difference between different treatments at 0.05 level

不同层次间土壤容重存在显著统计差异( $p < 0.001$ ),随着土壤深度增加,土壤容重增大(图 3)。同层次间,除自然恢复小区外,0~10 cm 层由于植被栽培对表土的扰动及改良作用, $\rho_{10}$  差异很小, $\rho_{30}$  和  $\rho_{50}$  表现为路堑边坡高于路堤边坡,原因为两种边坡形成方式不同。

### 3.2 土壤水分分布及其与植被的相互关系

土壤水分含量随土壤深度增加而降低(图 4)。SWC<sub>10</sub> 草灌结合小区最大(11.09%),其次为草本(10.07%),自然恢复小区为最低值(7.19%),相同措施下路堤水分含量高于路堑;SWC<sub>30</sub> 路堑边坡均值为 7.10%,路堤边坡为 8.58%;SWC<sub>50</sub> 路堑边坡均

值为 5.21%,路堤边坡为 7.02%。

边坡植被恢复对边坡土壤水分分布有重要影响。试验数据分析可知,土壤水分含量随植被盖度及根系含量的增加呈指数函数形式上升(图 5),植被恢复对表层土壤水分影响最明显,随着土壤深度增加,根系含量减少,对土壤水分的影响力降低。主要是因为降雨过程中,植被地上部分对降雨进行消能和截流,延缓坡面径流的形成,而表层根系存在导致坡面径流流速随草被覆盖度呈指数下降<sup>[19]</sup>,两者共同作用增加降雨入渗量。另一方面,地下根系改善了土壤结构,增加土壤中尤其毛管孔隙含量,从而增加土壤持水量。

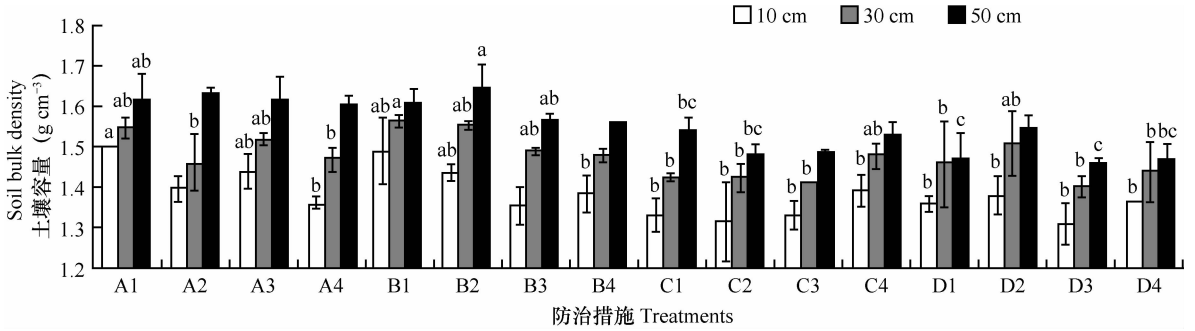


图3 边坡不同深度土壤容重分布

Fig. 3 Distribution of soil bulk in different soil depths

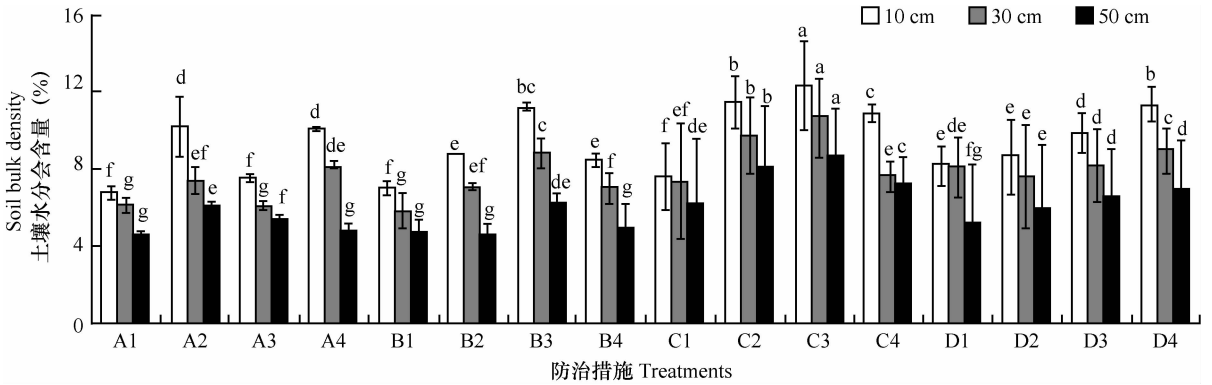


图4 不同深度土壤水分含量

Fig. 4 Soil water content in different soil depths

但是植被对土壤水分的影响是一个动态过程,这种促进作用随着降雨停止而消失。在土壤-植被-大气连续体(SPAC)内,植被的蒸腾作用高于裸地的蒸发作用,且土壤含水率与蒸散发作用呈极显著正相关<sup>[20]</sup>,通过蒸腾作用,植被能快速降低深层土壤水分含量,保持边坡土体干燥和稳定<sup>[21]</sup>。

### 3.3 土壤根系分布

植被根系长度密度(*RLD*)和根系重量密度(*RWD*)均随着土壤深度增加而显著减小(图6)。草灌结合处理*RLD*最高,均值为 $6.46 \text{ km m}^{-3}$ ,是所有处理平均值( $4.09 \text{ km m}^{-3}$ )的1.6倍,自然恢复小区( $0.59 \text{ km m}^{-3}$ )的11倍,其次为草本( $5.17 \text{ km m}^{-3}$ )和坡耕地( $4.17 \text{ km m}^{-3}$ )。图3结果还显示,根系主要分布在0~10 cm土层,该层*RLD*占总*RLD*的34%~78%。大量根系与土壤形成的“根系-土壤”复合体能显著增加浅层土壤的强度,有效抵抗雨滴击溅侵蚀和坡面径流侵蚀。

### 3.4 土壤抗剪强度

相同层次间土壤抗剪强度( $\tau$ )均存在显著差异(图7), $\tau_{10}$ 草灌结合处理最高(50.87 kPa),其次为草本的45.70 kPa。虽然自然恢复小区土壤容重显

著高于其他处理,但由于根系含量低,抗剪强度只有22.28 kPa。 $\tau_{50}$ 路堑边坡显著高于路堤边坡,最高为A<sub>1</sub>的51.23 kPa,最低为C<sub>4</sub>的27.95 kPa,容重差异是最主要的影响因素。30 cm深度由于根系和容重的交互作用,处理措施之间无差异。

### 3.5 植被与土壤水分对抗剪强度的影响

土壤的抗剪切强度值是表征边坡稳定的一个重要参数,抗剪强度越高,土体发生剪切破坏的可能性就越低,坡体愈稳定,然而影响土壤抗剪强度的因子是复杂多变的。由图8可以看出,在10 cm深度,植被对抗剪强度( $\tau$ )作用大,随着*RLD*、*RWD*、*VC*增加呈指数形式增大,回归方程系数显示呈极显著正相关( $R^2 = 0.907, R^2 = 0.873, R^2 = 0.849$ )。

需要指出的是,由于植被作用,10 cm深度土壤水分含量较自然恢复小区高(图3),分析结果显示抗剪强度随着土壤水分含量上升呈幂函数增大的趋势( $\tau = 1.041SWC^{1.602}, R^2 = 0.834$ ),这与陈红星等<sup>[22]</sup>和党进谦等<sup>[23]</sup>的研究结果相反,这是因为本试验中,在10 cm深度,土壤抗剪强度受植被影响显著,植被与抗剪强度之间的高度正相关性掩盖了土壤水分与抗剪强度之间的负相关关系。

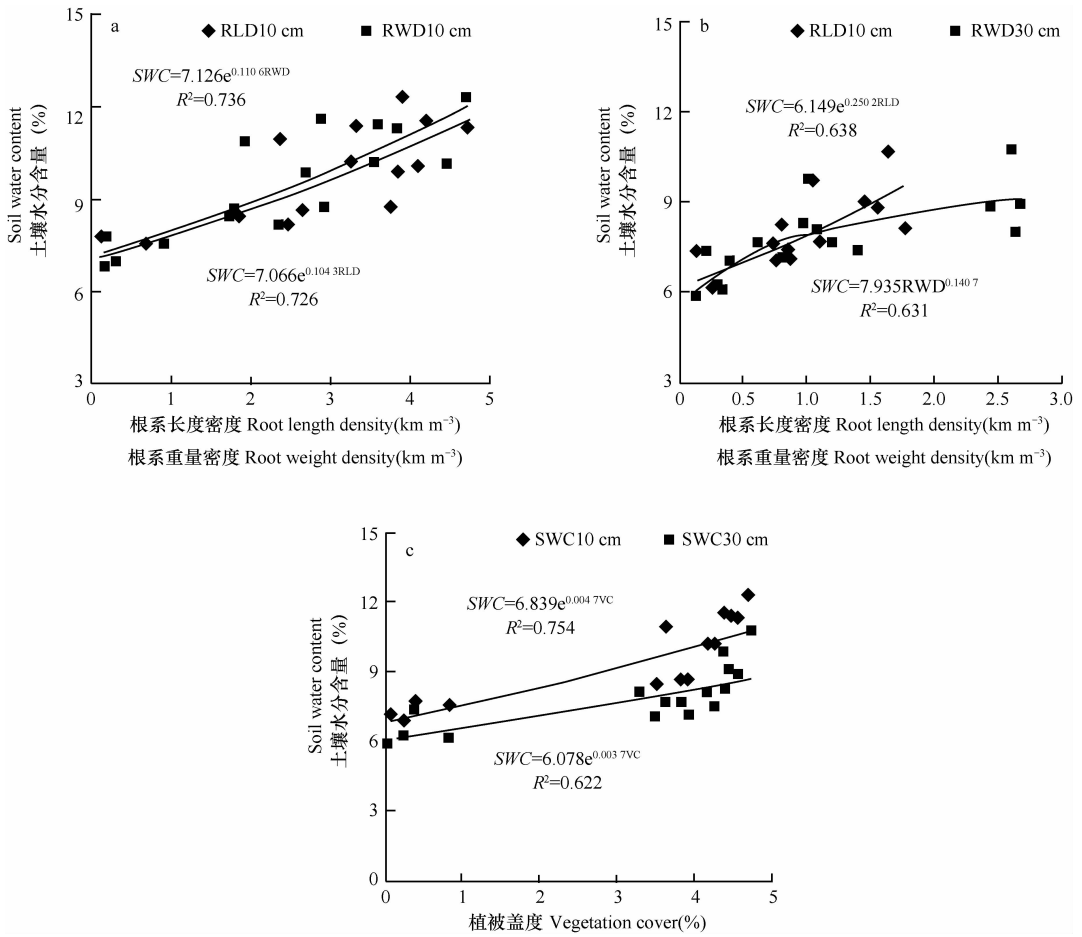


图5 土壤水分含量与边坡植被相互关系

Fig. 5 Relationship between soil water content and vegetation

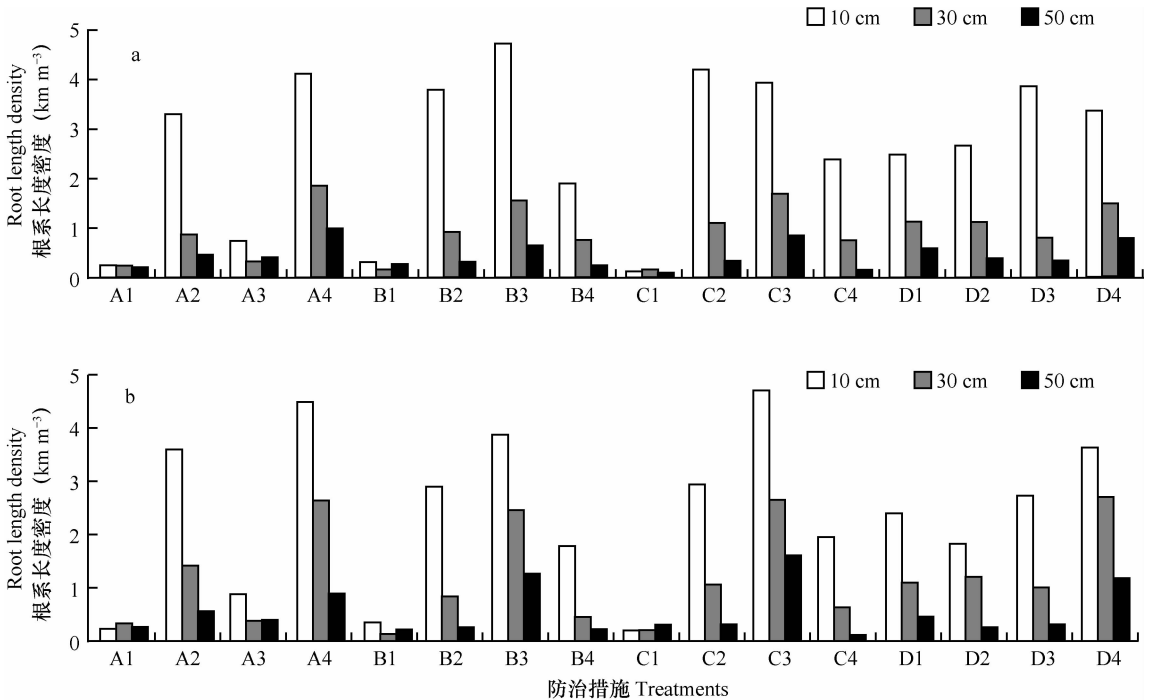


图6 不同土壤深度植被根系长度密度和重量密度分布状况

Fig. 6 Distribution of root length density and root weight density in different soil depths

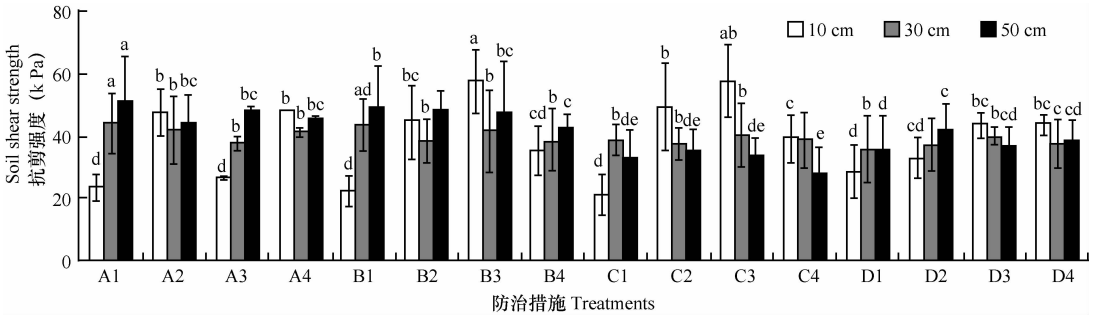


图 7 土壤剪切强度随土壤深度的变化

Fig. 7 Variation of soil shear strength with soil depth

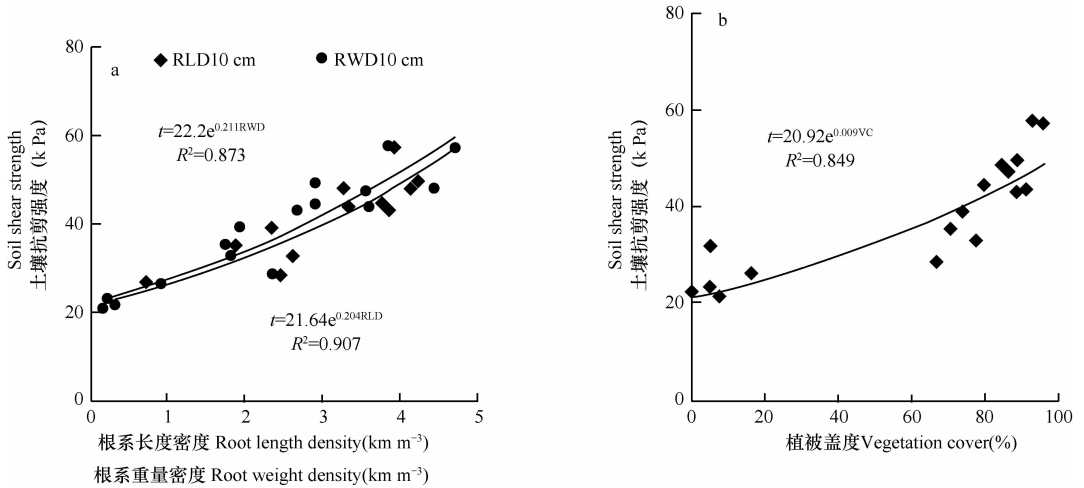


图 8 植被生长对抗剪强度的影响 (10 cm)

Fig. 8 Effect of revegetation on soil shear strength (10 cm)

对 30 cm 深度数据分析表明,并没有某一个因子起主导作用。分析原因认为,由于根系含量的显著降低(图 4),导致路堑边坡  $\tau_{30}$  反而较  $\tau_{10}$  和  $\tau_{50}$  低(图 5),形成一个过渡带,该过渡带的存在可能是某些草被覆盖良好的边坡仍发生滑坡及崩塌的一个重要原因。

随着土壤深度的增加,植被对抗剪强度的影响进一步减弱(如  $R_{RLD}^2 = 0.042$ ),边坡土壤容重和水分含量相关系数增加。抗剪强度与土壤容重呈线性正相关关系 ( $R^2 = 0.625$ ),与含水量呈指数负相关关系 ( $R^2 = 0.614$ ) (图 9)。

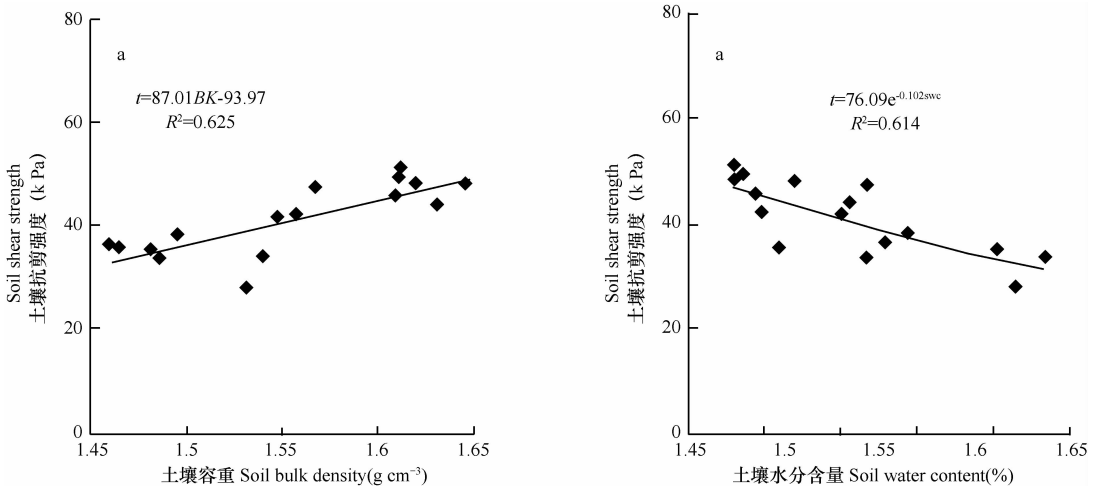


图 9 土壤容重及土壤水分含量对抗剪强度的影响 (50 cm)

Fig. 9 Effects of soil bulk density and water content on soil shear strength (50 cm)

## 4 结 论

道路边坡植被根系随土壤深度增加显著减小,10 cm 深根系长度密度占总量的 34%~78%;草灌结合措施抗剪强度最大,其次为草本,自然恢复小区土壤水分含量和抗剪强度均为最低值;土壤水分含量与植被根系含量及盖度呈幂函数正相关,对表层影响最明显,随土壤深度增加影响力降低。

抗剪强度影响因子随土壤深度增加发生变化,10 cm 深植被根系及盖度为主导因子,并能缓解水分含量增加带来的负面影响;30 cm 深根系含量骤减,土壤抗剪强度较 10 cm 深和 50 cm 深低,容易形成浅层滑坡滑塌等地质灾害;50 cm 深土壤抗剪强度与土壤容重呈线性正相关关系,与含水量呈指数负相关关系。

根据本文的研究结果,由于 30 cm 深度土壤抗剪强度存在低值,建议在山区土质道路边坡进行防护,路堑边坡需采用草本灌木相结合的方式,并且选择直根系灌木品种,能有效降低浅层滑坡危险。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] 高群. 三峡库区景观格局变化及其影响因素—以重庆市云阳县为例. 生态学报, 2005, 25 ( 15 ): 2499—2506. Gao Q. Landscape changes and human activities in Three Gorges Reservoir Area: The case of Yunyang County ( In Chinese ). Acta Ecologica Sinica, 2005, 25 ( 15 ): 2499—2506
- [ 2 ] Sidle R C, Sasaki S, Otsuki M, et al. Sediment pathways in a tropical forest: Effects of logging roads and skid trails. Hydrological Processes, 2004, 18: 703—720
- [ 3 ] Lane P N J, Hairsine P B, Croke J C, et al. Quantifying diffuse pathways for overland flow between the roads and streams of the mountain ash forests of central Victoria Australia. Hydrological Processes, 2006, 20: 1875—1884
- [ 4 ] Forsyth A R, Bubb K A, Cox M E. Runoff, sediment loss and water quality from forest roads in a southeast Queensland coastal plain *pinus* plantation. Forest Ecology and Management, 2006, 221: 194—206
- [ 5 ] Wemple B C, Swanson F J, Jones J A. Forest roads and geomorphic process interactions, Cascade Range, Oregon. Earth Surface Processes and Landforms, 2001, 26: 191—204
- [ 6 ] Larsen M C, Parks J E. How wide is a road? The association of roads and mass-wasting in a forested montane environment. Earth Surface Processes and Landforms, 1997, 22: 835—848
- [ 7 ] Nyssen J, Poesen J, Moeyersons J, et al. Impact of road building on gully erosion risk: A case study from the Northern Ethiopian Highlands. Earth Surface Processes and Landforms, 2002, 27: 1267—1283

- [ 8 ] Croke J, Mockler S. Gully initiation and road to stream linkage in a forested catchment, Southeastern Australia. Earth Surface Processes and Landforms, 2001, 26: 205—217
- [ 9 ] 杨永红, 王成华, 刘淑珍, 等. 不同植被类型根系提高浅层滑坡土体抗剪强度的试验研究. 水土保持研究, 2007, 14 ( 2 ): 232—235. Yang Y H, Wang C H, Liu S Z, et al. Experimental research on improving shear strength of soil in surface landslide by root system of different vegetation type ( In Chinese ). Research of Soil and Water Conservation, 2007, 14 ( 2 ): 232—235
- [ 10 ] 朱海丽, 胡夏嵩, 毛小青, 等. 青藏高原黄土区护坡灌木植物根系力学特性研究. 岩石力学与工程学报, 2008, 27 ( 2 ): 3445—3452. Zhu H L, Hu X S, Mao X Q, et al. Study on mechanical characteristics of shrub roots for slope protection in loess area of Tibetan Plateau ( In Chinese ). Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27 ( 2 ): 3445—3452
- [ 11 ] 李绍才, 孙海龙, 杨志荣, 等. 护坡植物根系与岩体相互作用的力学特性. 岩石力学与工程学报, 2006, 25 ( 10 ): 2051—2057. Li S C, Sun H L, Yang Z R, et al. Mechanical characteristics of interaction between root system of plants and rock for rock slope protection ( In Chinese ). Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25 ( 10 ): 2051—2057
- [ 12 ] 朱清科, 陈丽华, 张东升, 等. 贡嘎山森林生态系统根系固土力学机制研究. 北京林业大学学报, 2002, 24 ( 4 ): 64—67. Zhu Q K, Chen L H, Zhang D S, et al. Mechanisms of soil-reinforcement by roots in forest ecological systems in Gongga Mountain ( In Chinese ). Journal of Beijing Forestry University, 2002, 24 ( 4 ): 64—67
- [ 13 ] Ziemer R R, Swanston D N. Root strength changes after logging in southeast Alaska. Portland, or, USA: Forest Service, U. S. Department of Agriculture, Research Note PNW-306, 1977
- [ 14 ] 徐勤学, 王天巍, 李朝霞, 等. 紫色土坡地壤中流特征. 水科学进展, 2010, 21 ( 2 ): 229—234. Xu Q X, Wang T W, Li Z X, et al. Characteristics of interflow in purple soil of hillslope ( In Chinese ). Advances in Water Science, 2010, 21 ( 2 ): 229—234
- [ 15 ] 于国强, 李占斌, 李鹏, 等. 不同植被类型的坡面径流侵蚀产沙试验研究. 水科学进展, 2010, 21 ( 5 ): 593—599. Yu G Q, Li Z B, Li P, et al. Effects of vegetation types on hillslope runoff - erosion and sediment yield ( In Chinese ). Advances in Water Science, 2010, 21 ( 5 ): 593—599
- [ 16 ] 钟春欣, 张玮. 植被护坡抗冲模型试验方法与装置研究. 河海大学学报: 自然科学版, 2008, 36 ( 2 ): 170—174. Zhong C X, Zhang W. Method and equipment of model test for scouring resistance of riverbank with grass cover ( In Chinese ). Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2008, 36 ( 2 ): 170—174
- [ 17 ] 王天巍. 道路疏松土质边坡简易生态护坡结构; 中国, 201020547552.1, 2010 - 09 - 29. Wang T W. A simple designed revetment structure for loosen soil slope of roadside ( In Chinese ): China, 201020547552.1. 2010 - 09 - 29
- [ 18 ] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析. 上海: 上海科学技术出版社, 1978: 466—532. Institute of Soil Science, Chinese Academy Sciences. Soil physical and chemical analysis ( in Chinese ). Shanghai: Shanghai Science and Technology



- Press, 1978; 466—532
- [19] 李勉, 姚文艺, 陈江南, 等. 草被覆盖对坡面流流速影响的人工模拟试验研究. 农业工程学报, 2005, 21(12): 43—47.  
Li M, Yao W Y, Chen J N, et al. Experimental study on the effect of different grass coverages on the overland flow velocity (In Chinese). Transactions of the CSAE, 2005, 21(12): 43—47
- [20] 康绍忠, 张富仓, 刘晓明. 作物叶面蒸腾与棵间蒸发分摊系数的计算方法. 水科学进展, 1995, 6(4): 285—289. Kang S Z, Zhang F C, Liu X M. Calculation method of the ratio between crop leaf transpiration and soil evaporation from farmland (In Chinese). Advances in Water Science, 1995, 6(4): 285—289
- [21] Osman N, Barakbah S S. Parameters to predict slope stability-soil water and root profiles. Ecological Engineering, 2006, 28: 90—95
- [22] 陈红星, 李法虎, 郝仕玲, 等. 土壤含水率与土壤碱度对土壤抗剪强度的影响. 农业工程学报, 2007, 23(2): 21—25.  
Chen H X, Li F H, Hao S L, et al. Effects of soil water content and soil sodicity on soil shearing strength (In Chinese). Transactions of the CSAE, 2007, 23(2): 21—25
- [23] 党进谦, 李靖. 非饱和黄土的结构强度与抗剪强度. 水利学报, 2001, 7: 79—83, 90. Dang J Q, Li J. The structural strength and shear strength of unsaturated loess (In Chinese). Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 7: 79—83, 90

## EFFECT OF VEGETATION RESTORATION ON SOIL SHEAR STRENGTH OF ROADSIDE SLOPES OF UNPAVED ROADS IN THE THREE-GORGES RESERVOIR AREA

Liu Yaojun<sup>1</sup> Wang Tianwei<sup>1†</sup> Cai Chongfa<sup>1</sup> Zhai Jie<sup>2</sup>

(1 Research Center of Water and Soil Conservation, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

(2 Jilin Team of Geological Survey Center of China Building Materials Industry, Changchun 130033, China)

**Abstract** To study effects of roadside slope vegetation restoration on shear strength ( $\tau$ ) of and surface soil loss from the slopes, seven vegetation restoration models were adopted in in-situ shearing tests. It was found that vegetation root systems decreased in density with increasing soil depth, the root length density (RLD) in the 0 ~ 10 cm soil layer accounted for 34% ~ 78% of the total RLD. And the vegetation root magnitude was positively related to soil water content (SWC) showing an exponential function correlation. Shear strength of the surface soil layer (0 ~ 10 cm) was mainly affected by vegetation root systems and vegetation coverage and increased as an exponential function of RLD, root weight density (RWD) and vegetation cover (VC). The controlling factors on  $\tau$  varied with soil depth, and regression analysis showed RLD, RWD and VC had statistically significant effects on  $\tau$  in the 10 cm soil depth. However, none of the predominant factors on  $\tau$  were founded in the 30 cm soil depth, which was so defined as a transition layer and was the lowest shear strength  $\tau$  as compared with the 10 cm and 50 cm soil depths. The influence of soil bulk density ( $\rho$ ) and SWC got bigger on  $\tau$  with soil depth, showing a positive linear relationship and a negative exponential function relationship, respectively in 50 cm soil depth.

**Key words** Soil water content; Vegetation protection; Unpaved road; Slope stability; Three-Gorges Reservoir Area

(责任编辑:汪枳生)