

# 灌木根系几何特性对拉拔力影响的试验研究

常婧美<sup>1</sup>, 王桂尧<sup>1</sup>, 胡圣辉<sup>1,2</sup>, 张永杰<sup>1</sup>, 符金良<sup>1</sup>, 周维政<sup>1</sup>

(1. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 广西路桥工程集团有限公司, 广西 南宁 530011)

**摘要:** [目的] 探究灌木根系几何特性对拉拔力的影响, 为边坡防护植物物种的选择与植物价值的充分利用提供理论参考。[方法] 以红叶石楠为例, 通过对多根系形态的灌木根系进行室外拉拔试验, 研究不同含水率、根系形态、二级侧根等情况对根土间相互作用力的影响。[结果] Y 型根系和水平根系最大拉拔力随土壤含水率的增加呈对数和指数函数减小, 而主直根系最大拉拔力随土壤含水率的增加呈先增大后减小的趋势, 最优含水率在 17.5% 左右; Y 型根系的 Y 型根系夹角的增加逐渐增大, 而根系全段激活时间随根系夹角的增加呈现先减小后增大的趋势, 在夹角为 75° 时最容易被激活; Y 型根系及主直根系的 Y 型根系的最大拉拔力均随二级侧根数的增加呈线性增加, 且主直根系最大拉拔力的增加趋势大于 Y 型根系。主直根系在土壤含水率为 10%, 20%, 25% 时, 拉拔曲线呈拉拔硬化型, 含水率为 15% 时, 拉拔曲线呈拉拔软化型; 水平根系和 Y 型根系在含水率为 15%, 17.5% 时, 拉拔曲线呈拉拔硬化型, 含水率为 20%, 22.5%, 25% 时, 拉拔曲线呈拉拔软化型。[结论] 根系形态与含水率是影响根系拉拔力的关键因素, 根系形态越复杂, 拉拔力越大; 含水率越高, 拉拔曲线逐渐由硬化向软化型转变。

**关键词:** 灌木根系; 拉拔试验; 根系特征; 根土间作用力

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2018)06-0067-07

中图分类号: U416.14

**文献参数:** 常婧美, 王桂尧, 胡圣辉, 等. 灌木根系几何特性对拉拔力影响的试验研究[J]. 水土保持通报, 2018, 38(6): 67-73. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2018.06.011. Chang Jingmei, Wang Guiyao, Hu Shenghui, et al. Experimental study on effects of geometric characteristics of shrub roots on pulling force[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(6): 67-73.

## Experimental Study on Effects of Geometric Characteristics of Shrub Roots on Pulling Force

CHANG Jingmei<sup>1</sup>, WANG Guiyao<sup>1</sup>, HU Shenghui<sup>1,2</sup>, ZHANG Yongjie<sup>1</sup>, FU Jinliang<sup>1</sup>, ZHOU Weizheng<sup>1</sup>

(1. Department of Civil and Architecture, Changsha University of Science and Technology, Changsha,

Hu'nan 410114, China; 2. Guangxi Road and Bridge Engineering Group Co. Ltd., Nanning, Guangxi 530011, China)

**Abstract:** [Objective] The effects of the geometric characteristics of the shrub root on pulling force is studied in order to provides a theoretical reference for the selection of plant species and the full utilization of plant value. [Methods] Taking photinia fraseri as an example, the outdoor pull-out test of photinia fraseri root system was carried out to study the interaction between root and soil in different water gradients, root form, secondary side root and so on. [Results] The maximum pulling force of the Y-type root system and horizontal root system decreased logarithmically and exponentially with increasing moisture content. However, the maximum pulling force of the main direct root system increased first and then decreased with the increase of water content, and the optimum moisture content was about 17.5%. The maximum pulling force of the Y-type root system increased with the increase of the root system angle. The activation time of the root system increased first and then increased with the increase of the angle of the root system. It was most easily

收稿日期: 2018-07-09

修回日期: 2018-07-24

资助项目: 国家自然科学基金项目“生态防护边坡的雨水入渗及其对植被根系固土防滑作用的影响机理研究”(51178063; 51578082); 湖南省交通科技计划项目(201514)

第一作者: 常婧美(1994—), 女(汉族), 湖南省长沙市人, 硕士, 主要从事岩土工程边坡防护方面的研究。E-mail: 1363023716@qq.com。

通讯作者: 王桂尧(1963—), 男(汉族), 湖南省长沙市人, 博士, 教授, 主要从事岩土工程及边坡防护方面的研究。E-mail: wanggy688@163.com。

activated when the angle was  $75^\circ$ . The maximum tensile force of the Y-type root system and the main direct root system increased linearly with the increase of the number of secondary lateral roots, but the increase of the maximum tensile force of the main direct root system was greater than that of the Y-type root system. The drawing curve was drawn hardened when the water content was 10%, 20% and 25%, and the drawing curve was a pull-softening type when the water content was 15%. When the horizontal root system and the Y-type root system were in the water-bearing rate of 15% and 17.5%, the drawing curve was drawn hardened, and when the water content was 20%, 22.5% and 25%, the drawing curve was a pull-softening type. Through the comparison of the effects of different root system slopes, the mechanical of the multi-form root vegetation slope was evaluated, which had a theoretical guiding effect on ecological protection. [Conclusion] Root morphology and water content are the key factors affecting the pullout force of roots. The more complex the root morphology, the greater the pulling force. As the water content increases, the drawing curve gradually changes from hardening to softening.

**Keywords:** shrubs root system; pulling test; root system characteristics; root soil inter-atomic forces

灌木根系以其根茎粗大、固土能力强的优点在边坡生态防护中得到广泛应用,不同灌木的根系形态也大不相同,根系与土体间的作用方式不同导致在边坡加固中的作用机理不同,因此对根系形态与土体作用力的研究尤为必要。在现有研究中关于影响根系拉拔力与土壤的相互作用的因素,许多学者通过获得函数关系更直观具体的说明相关关系。如曹云生等<sup>[1]</sup>认为随着根系直径的增加,根土界面的摩擦力也逐渐增大;根土摩擦力与土壤含水率呈二次函数关系。单根根土摩擦力随着根的埋置深度、加载速率的增大而增大<sup>[2]</sup>。根系与土壤发生相对滑动产生的滑动摩擦力、土层相对错动时根系受剪切作用产生的弹性张力以及机械固持力使土壤的抗剪强度增大<sup>[3]</sup>。Turmanina<sup>[4]</sup>通过大量试验得到季节与根系的抗拉强度的规律:冬季>夏季,与含水率相关。陈昌富等<sup>[5-6]</sup>通过试验研究得到含根土体存在最佳含根率。由于最优含水率的存在,拉拔力随土体含水率呈二次函数关系。关于影响根系拉拔力的因素,拉伸速率也是研究重点<sup>[7-8]</sup>,根系几何参数一定时,拉拔速率越大抗拉强度越小,快速拉拔类似于动荷载作用,根系的弹性模量来不及发挥作用就已经被拉断<sup>[9]</sup>。关于根系分布与根系和土体间作用机理的研究,国内外许多学者通过试验研究得出如下结论,如李为萍等<sup>[10]</sup>认为根土复合体抗剪强度为含 1 mm 根径<含 2 mm 根径<1.5 mm 根径;刘秀萍等<sup>[11]</sup>认为纵横交错的根系分布形态形成的根土复合体的抗剪强度比单一形态分布的强度大。对于根系形态的研究,刘亚斌等<sup>[12]</sup>认为根系生长有助于改善根土接触面土体的平整度,根土界面作用力主要取决于根系表面的粗糙程度,根系种类及根系形态对拉拔参数的影响也极大。赵晓黎

等<sup>[13]</sup>通过建立根系拉拔模型的研究,认为侧根埋深随主根长度的增大而加深,根系拉拔极限差值随之增大,对称侧根的根系夹角越大,极限荷载差值越大;Waldron<sup>[14]</sup>,Norris<sup>[15]</sup>等通过根系拉拔试验发现,根的几何力学特征影响根系抗拉拔荷载,是分析根土复合体力学效应的关键。综上所述,关于根土间作用力的研究已获得不错的进展,已有的关于灌木根系与土体的相互作用的研究主要针对不同根径、含水率、土壤干密度等因素,关于根系形态的研究较少,本文中针对同一植物根系 3 种具体的几何形态对根土间作用力的影响进行定量分析,有助于边坡防护工程中植物物种的选择,有效地提高了植物的利用价值。本文通过室外拉拔试验研究红叶石楠 3 种根系形态与根土间作用力的影响,定量地分析含水率与根系形态对拉拔力的影响,根系夹角与根系激活时间的关系,以此评价根系形态对根土间作用力及拉拔机制的影响。该研究成果对促进灌木根系坡面加固技术的创新进步具有理论与指导意义,可为边坡防护植物物种的选择与植物价值的充分利用提供理论参考。

## 1 试验方法

### 1.1 试验土样及灌木根系

试验场地为湖南长沙理工生态防护试验区,土壤以红壤为主,属于粉质黏土,土体参数详见表 1。

表 1 试验土体的物理特性指标

指标	最优含水率/%	最大干密度/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	塑限/%	液限/%
数值	20.8	1.6	24.7	41.6

由于红叶石楠根系形态种类繁多,选取红叶石楠作为试验对象,购买一年生长势相同的幼苗在试验区

栽种,栽种时间为 2016 年 6 月至 2017 年 8 月。红叶石楠拉拔根系如图 1 所示。拉拔完成后将根系放入保鲜袋带回实验室。试验有效根系共 87 株,植物一次性拔出,对根系形态进行数量统计。



图 1 红叶石楠室外拉拔根系

## 1.2 试验装置及试验方法

本研究通过对红叶石楠根系进行室外拉拔试验来探讨研究区植物根系形态对根土间作用力的影响。试验采用 HP-50 型艾德堡数显推拉力计对植物根系进行拉拔试验。

试验开始时采用铁丝与红绳将靠近根系的拉拔植物进行有效绑扎,并将拉拔仪与之相连,调整拉拔仪并对试验植株进行拉拔,通过拉拔仪与电脑相连得到拉拔力与拉拔时间关系曲线。拉拔完成后,在根系周边土体 3 个不同深度对根周土壤进行取样,采用烘干法进行土壤含水率的测试,以平均值作为土壤最终含水率。同时把拉拔试验的植物根系放入保鲜袋带回实验室,清洗干净后先将 Y 型根系进行扫描投影,测出 Y 型根系的夹角,然后将复杂根系进行分解并采用扫描仪进行扫描,提取根系有效照片,采用根系参数分析软件 WINRHIZO 进行几何参数提取。

对于数据的统计,本文通过对根周土体含水率的测量,采用 Excel 统计分析 3 种根系形态下最大拉拔力与土壤含水量的关系;对根系二级侧根及 Y 型根系夹角与最大拉拔力的关系进行统计分析;选取不同根系形态下根系表面积大致相同的根系进行土壤含水率与植物根系拉拔力—时间关系进行统计分析。

## 1.3 根系形态统计分析

根据室外拉拔试验红叶石楠根系形态统计分析,根系形态可分为水平根、主直根、Y 型根。统计分析,红叶石楠水平根约占 1/2,主直根及 Y 型根各约占 1/4(图 2)。

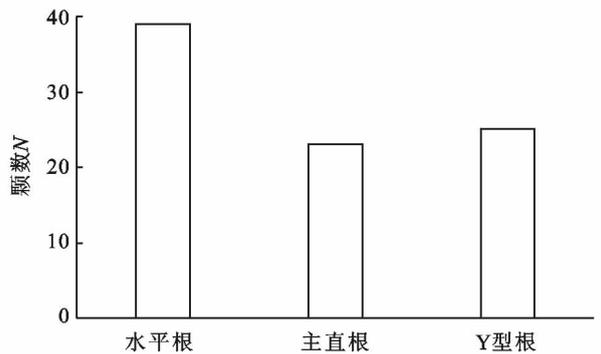


图 2 红叶石楠根系形态统计关系

## 2 试验结果及分析

### 2.1 土体含水率与根系拉拔力的关系

根据红叶石楠根系的形状特征,将根系分为 Y 型根系、主直根系、水平根系 3 种类型,3 种类型根系最大拉拔力随含水率的拟合曲线如图 3 所示。由图 3 可知,Y 型根系和水平根系最大抗拉阻力随土壤含水率的增加呈反比函数关系逐渐减小,而主直根系随土壤含水率的增加先增大后减小,且最优含水率在 17.5% 左右。分析原因如下,土体含水率较低时,土体呈坚硬状态,此时 Y 型根系及水平根系的破坏模式为根土共同破坏;根系刚开始受力时,由于根系本身存在弹性模量,虽然人工对其施加外力作用,但在土体中的位移约等于 0,随着根系所受外界拉拔力的增加,根系与土体接触面被逐渐激活,接触面土体颗粒发生错动、转动,由于根系以侧根为主,侧根沿地表生长,当根系所受到的外界拉拔力继续增大时,根系与土体接触面继续被激活,接触面土体破坏范围扩大,直到发展到地表,所有侧根附近土体被破坏,根系逐渐被拔出;含水率越大,根系附近土体破坏越快。主直根系由于主根系向土体深层生长,在受到外界拉拔力时,根系表面附近土体颗粒逐渐出现错动、转动,含水率较低时,根系与土体摩擦黏聚性较小,根系直接从土体中拔出,土体破坏较小,随着含水率的增大,当达到一定程度时,根系与土体黏聚性能达到最佳,根系的拔出伴随土体颗粒发生整体破坏,此时根系抗拉拔性最好,随着土体含水率的进一步增加,土中水逐渐发挥自身润滑作用,根系表面与土体的摩擦黏聚效应急剧下降,根系抗拉拔性减小。主直根系最大拉拔力与土体含水率呈现二次函数分布,分析原因为根土间的作用力与土颗粒表面弱结合水膜的厚度息息相关,水的润滑作用导致根系与土体间的摩擦系数减小。一般边坡失稳都是在强降雨后,随着土体含水率的增大,水分的增加造成土体固结减弱或根与土的分,降低根土间的结合力,造成边坡失稳破坏。

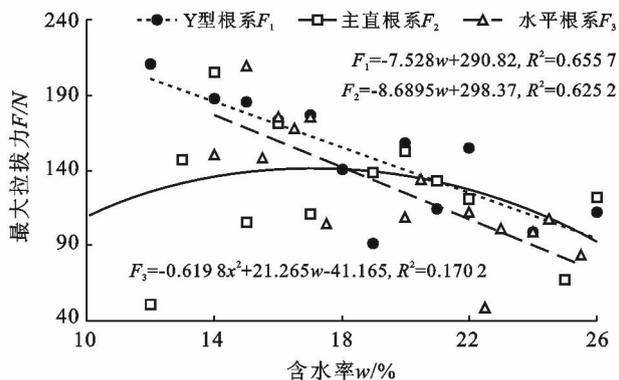


图 3 红叶石楠根系最大拉拔力与含水率的关系

土体含水率相同时, Y 型根系的最大拉拔力约大于水平根系, 主要原因主要由于 Y 型根系侧根存在夹角, 且小于水平根系的  $180^\circ$  夹角, 在根土接触面土体颗粒破坏分力一致时, Y 型根系不仅受到两分力的合力, 而且受到侧根周边土体的反作用力; Y 型根系侧根与地表的距离更大, 土体破坏及根系被拔出越难。土体含水率小于 17.5% 时, Y 型根系与水平根系的拉拔力大于主直根系, 土体含水率在 17.5%—21% 时, Y 型根系与水平根系的拉拔力约等于主直根系, 土体含水率大于 21% 时, 主直根系最大拉拔力微大于 Y 型根系与水平根系。分析原因为在受到外界作用时, 根系被拔出无非两种情况, 第一种为拉拔破坏机制(土体对根系的包裹作用减弱促使根系被迅速拔出); 第二种为土体破坏机制(根系拉拔力达

到一定程度时, 侧根周围土体承受向上的非均布力, 达到土体强度时, 根系周边土体裂缝扩展至地表, 土体发生整体连续破坏, 土体对根系的包裹作用减弱甚至消失, 根系被拔出)。含水率较小时, 土体呈坚硬状态, 主直根系被拔出只需要较小的拉拔力, 此时根土破坏为拉拔破坏, 而对夹角较小的 Y 型根系在受到外界拉力时, 根系节点微微向上移, 根系微微移动, 当侧根周边土体微微破坏时, 侧根即被拔出, 尽管单根系受力较小, 但根系所受合力较大, 此时根土破坏为拉拔破坏, 水平根系破坏模式为土体破坏机制, 根系的拔出伴随土体的破坏, 拉拔力较大; 随着含水率的增加, 主直根系根土破坏仍然为拉拔破坏, 而夹角较大的 Y 型根系与水平根系的根土破坏机制为土体破坏机制, 此时根土摩擦黏聚性增加, 但土体强度下降。含水率较小时, Y 型根系和水平根系的抗拉拔性远远大于主直根系; 含水率在约等于 17.5% 时, 三种不同根系的抗拉拔性差距不大; 在含水率较大时, 水平根系的抗拉拔性最差, 主直根系和 Y 型根系的抗拉拔性较好。

## 2.2 二级侧根对最大拉拔力的影响

通过对试验根系进行分类、处理, 截取 Y 型根系和主直根系的二级侧根进行统计分析。将最大拉拔力与二级侧根的统计数进行拟合分析(图 4)。通过对室外拉拔试验根系的处理, 将 Y 型根系处理干净, 采用投影法对根系夹角进行记录, 并采用量角器量取根系的夹角。将 Y 型根系的拉拔力及根系全段激活时间与夹角进行拟合(图 4)。

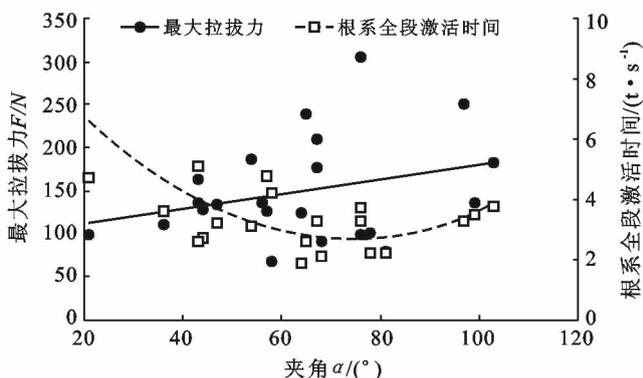
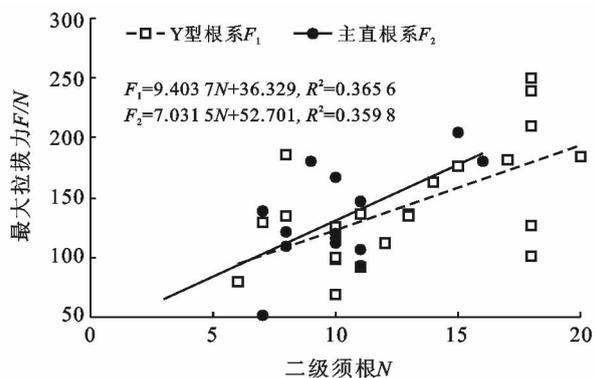


图 4 有无须根灌木根系拉拔参数与根系几何参数的关系

由图 4 可知, Y 型根系的拉拔力随根系夹角的增加逐渐增大, 而根系全段激活时间随根系夹角的增加呈先减小后增大的趋势; Y 型根系及主直根系的拉拔力均随二级侧根数的增加呈线性增加, 主直根系拉拔力的增加趋势大于 Y 型根系。分析原因为 Y 型根系相比主直根系, 破坏模式较特殊, 二级侧根对拉拔破坏机制的影响程度远大于土体破坏机

制。综合两种拉拔破坏机制, 随着根系夹角的增大, 根系更容易从土中拔出, 但根系与地表包含面积变大, 土体整体破坏需要破坏土体面积增加, 由于 Y 型根系拉拔破坏主要是由于根土破坏共同引起, 即最大拉拔力随根系夹角的增加逐渐增加; 研究根系全段激活时间时, 可以发现夹角约等于  $75^\circ$  时, 根系全段激活时间最小, 此时根系的拔出破坏与根土共同破坏的叠

加作用最低。主直根系全段激活后,根系才会被拔出,而 Y 型根系的拉拔可能发生根系被拔出或土体颗粒整体破坏两种情况。Y 型根系拉拔时,一般会伴随拉拔区土体的破坏。

### 2.3 根系形态与拉拔参数间的关系

由于根系在土体中的形态变化万千,不同形态的根系对土体加固状态有何影响。根据红叶石楠根系的形状特征,将根系分为 Y 型根系、主直根系、水平根系 3 种类型。3 种类型根系拉拔参数与根系表面积的拟合曲线如图 5—6。由图 5—6 可知,3 种根系的拉拔参数随根系表面积的增加呈对数或幂函数形式增加,且增加趋势几乎相同。分析原因为同一种根系的微观组成成分相同,根系表面积相同时,根系拉拔参数变化不大。

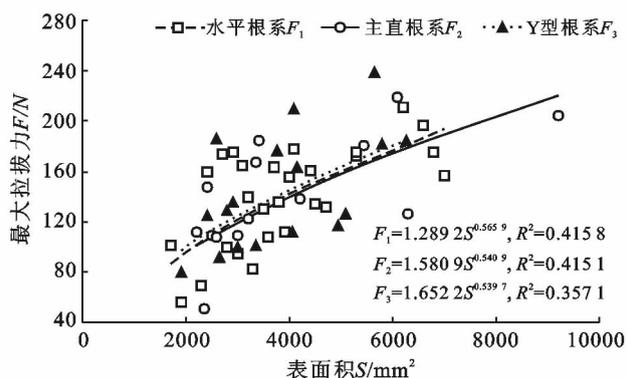


图 5 根系拉拔力与根系表面积的关系

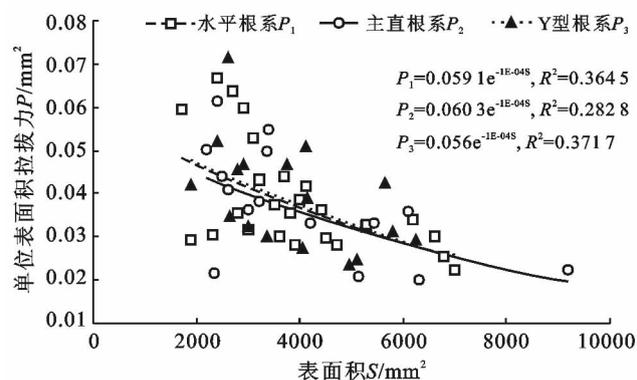


图 6 根系单位面积拉拔力与根系表面积的关系

### 2.4 根系形态与拉拔力—时间的关系

灌木根系在不同含水率下的拉拔力与时间的关系如图 7 所示。由 7 图可知,随着拉拔时间延长,根系与土体接触面开始逐渐被激活,拉拔力逐渐增加,当根土接触面强度完全被激活时,根系拉拔力达到最大值,随着拉拔位移的进一步增加,土体对根系的黏聚摩擦作用逐渐减弱,出现两种拔出情况:①土体对根系的包裹作用减弱促使根系被迅速拔出。②根系

拉拔力达到一定程度时,侧根周围土体承受向上的非均布力,达到土体强度时,根系周边土体裂缝扩展至地表,土体发生整体连续破坏,土体对根系的包裹作用减弱甚至消失,根系被拔出。拉拔力—位移曲线因人为手动拉拔,有一定的误差,拉拔曲线出现波动。由图 7 可知,灌木根系拉拔力—时间曲线主要呈两种形式,第 1 种形式呈缓慢上升、上下波动和急剧下降 3 个阶段,即拉拔硬化型;第 2 种形式呈缓慢上升、缓慢下降 2 个阶段,即拉拔软化型。由图 7 可知,主直根系的拉拔力—时间曲线在含水率为 10%,20%,25% 时,拉拔曲线呈拉拔硬化型;含水率为 15% 时,拉拔曲线呈拉拔软化型;水平根系的拉拔力—时间曲线在含水率为 15% 和 17.5% 时,拉拔曲线呈拉拔硬化型;含水率为 20%,22.5%,25% 时,拉拔曲线呈拉拔软化型;Y 型根系的拉拔力—时间曲线在含水率为 15%,17.5% 时,拉拔曲线呈拉拔硬化型;含水率为 20%,22.5%,25% 时,拉拔曲线呈拉拔软化型。分析原因为主直根系在含水率为 10% 时,由于低含水率不足以使土粒与根系间形成有效的结合水膜,产生的胶结力的大小不足以抵抗根系拔出力,因此根系容易被激活,根系激活后被迅速拔出,拉拔力—时间曲线呈拉拔硬化型;当含水率为 20%,25% 时,土粒间的结合水膜变厚,水分子间产生的润滑作用会削弱甚至消除结合水胶结作用,从而使根土之间的结合力降低,根系同样容易被激活,根系激活后被迅速拔出,拉拔力—时间曲线呈拉拔硬化型;当含水率为 15% 时,接近拉拔根系最优含水率,根土间黏聚力由生物黏聚力、根土摩擦力和结合水形成的胶结力共同组成,因此测得的黏聚力值会明显增大,根系全段激活后,根土间残余的摩擦黏聚力继续抵抗外界拉拔力,拉拔力—时间曲线呈拉拔软化型。水平根系和 Y 型根系在含水率为 15%,17.5% 时,接近拉拔根系最优含水率,同样由于结合水的胶结作用会增大根土间黏聚力值,且根系分布中与拉拔力的作用方向为非平行关系时,根系拔出过程中还需克服上覆土体的重力作用,因此根系拉拔破坏需要更大的拉拔力,但在达到根土摩擦最大拉拔力时,根系周边土体被侧根根系挤压导致破坏,根土黏聚力急剧减小甚至消失,根系被迅速拔出,拉拔力—时间曲线呈拉拔硬化型;当含水率为 20%,22.5%,25% 时,土粒间的结合水膜变厚,水分子间产生的润滑作用会削弱甚至消除结合水胶结作用,从而使根土之间的结合力降低,根系最大拉拔力相应减小,但此时土体破坏强度随着土体含水率的增加而减小,侧根根系挤压土体导致土体逐步破坏,根系逐渐被拔出,拉拔力—时间曲线呈拉拔软化型。

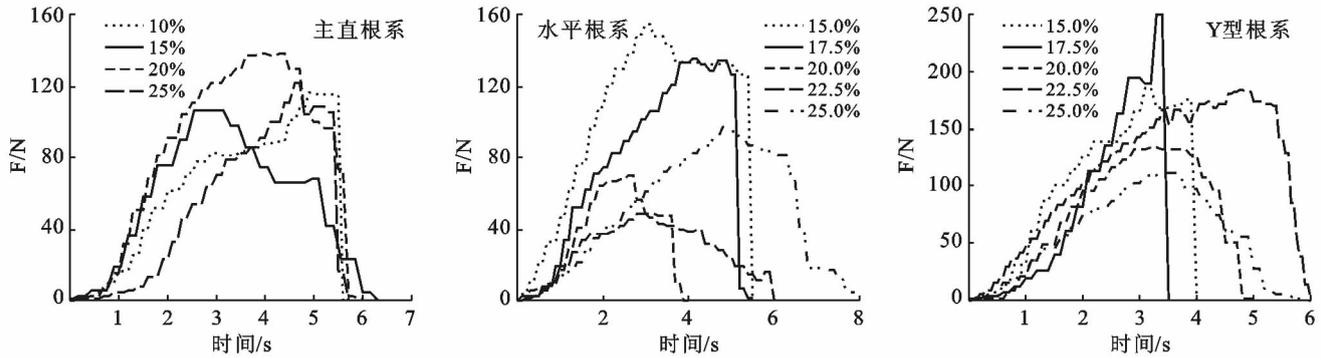


图7 3种根系形态的拉拔力—时间曲线

## 3 讨论

### 3.1 根系夹角与拉拔力的讨论

多种灌木根系与土壤相互作用的研究已比较广泛,提供了必要的借鉴作用。刘亚斌等<sup>[16]</sup>通过研究得出根土间摩擦力主要由主根根系提供,侧根主要是增大根土间摩擦力及对应的根系位移,本文结论与此一致,含有侧根的红叶石楠拉拔力大于主直根系,文中又进一步定量研究了根系夹角与拉拔力的关系,得到夹角越大拉拔力越大,原因为根系夹角越大,需要破坏的根土共同面积越大。为根系拉拔模型的研究提供了借鉴作用。

### 3.2 土壤含水率与根系拉拔力的讨论

刘小光等<sup>[6]</sup>通过对根系拉拔力与土壤含水率的关系研究后发现,根系最大拉拔力与土壤含水率呈二次函数关系,本文研究发现主直根系随土壤含水率的增加先增大后减小,呈二次函数关系,与已有结论相一致,本文进一步得出Y型根系和水平根系最大抗拉阻力随土壤含水率的增加逐渐递减,无峰值出现,分析出现该现象的原因为Y型根系及水平根系的破坏模式为根土共同破坏,根系与接触面土体颗粒发生错动、转动,含水率越大,根系附近土体破坏越快;主直根系根土间的作用力与土颗粒表面弱结合水膜的厚度息息相关,随着含水率增加,根土间黏聚力达到最大值,含水率继续增大,水的润滑作用导致根系与土体间的摩擦系数减小。

### 3.3 根系形态与固坡效果的讨论

在实际工程应用中,以主直根系为主的植被在边坡防护中应用较少,由于须根较少,在根系被拔出的过程中仅需要克服主直根系与土体间的黏聚力,锚固能力差导致边坡易由浅层失稳发展成深层破坏;应用较多的灌木种类普遍含有较丰富的主直根系并伴有大量须根,在受到外界作用力时,需同时克服主根和须根与土体间的黏聚力和摩擦力,抗拉阻力处于居中

水平;含有多种根系分布形式,且二级侧根比较发达的灌木种类,根系的受力形式丰富多彩,在受到外力作用时不仅需要克服主根及须根与土体的摩擦黏聚力,而且需克服主根与须根之间由于节点产生的特殊拉拔力,当三者均被克服时根系逐渐被拔出,其在边坡中的锚固力处于最大水平,最适合于边坡防护工程。通过以上论述在一定程度上验证了以红叶石楠为代表的多根系形态的灌木在边坡工程防护中应用的效果及价值。

## 4 结论

(1) 红叶石楠根系以水平根居多,约占1/2,主直根及Y型根其次,各约占1/4。

(2) Y型根系和水平根系最大拉拔力随含水率的增加呈对数、指数减小,而主直根系随含水率的增加呈先增大后减小的趋势,且最优含水率在17.5%左右。

(3) Y型根系的最高拉拔力随根系夹角的增加逐渐增大,而根系全段激活时间随根系夹角的增加呈先减小后增大的趋势,在夹角为75°时最容易被激活;Y型根系及主直根系的最高拉拔力均随二级侧根数的增加呈线性增加,主直根系最高拉拔力的增加趋势大于Y型根系。

(4) 3种根系的最高拉拔力随根系表面积的增加呈对数或幂函数形式增加,且增加趋势几乎相同;根系形态对拉拔参数的影响不大。

(5) 主直根系在含水率为10%,20%和25%时,拉拔曲线呈拉拔硬化型,含水率为15%时,拉拔曲线呈拉拔软化型;水平根系和Y型根系在含水率为15%和17.5%时,拉拔曲线呈拉拔硬化型,含水率为20%,22.5%,25%时,拉拔曲线呈拉拔软化型。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 曹云生,陈丽华,刘小光,等.植物根土界面摩擦力的影响因素研究[J].摩擦学报,2014,34(5):482-488.

- [2] 林木根系与土壤摩擦锚固性能研究[D]. 北京:北京林业大学,2013.
- [3] 解明曙. 树木根系固坡土力学机制研究[J]. 水土保持学报,1990,4(3):7-11.
- [4] Turmanina V. On the strength of tree roots[J]. Bulletin of Moscow of Society. Naturalists, Biol. Secramine, 1965,70(5):36-45.
- [5] 陈昌富,刘怀星,李亚平,等. 草根加筋土的室内三轴试验研究[J]. 岩土力学,2007,28(10):2041-2045.
- [6] 刘小光. 林木根系与土壤摩擦锚固性能研究[D]. 北京:北京林业大学,2013.
- [7] 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[J]. 北京林业大学学报,2002,24(4):64-67.
- [8] 张东升. 长江上游暗计叶林林木根系抗拉力学特性研究[D]. 北京:北京林业大学,2002.
- [9] 周朔. 林木根系拉伸力学特性研究[D]. 北京:北京林业大学,2011.
- [10] 李为萍,史海滨,梁建财,等. 基于三轴试验的根土复合体抗剪性能试验研究[J]. 灌溉排水学报,2013,32(2):128-130.
- [11] 刘秀萍,陈丽华,宋维峰,等. 林木根系与黄土复合体的抗剪强度试验研究[J]. 北京林业大学学报,2006,28(5):67-72.
- [12] 刘亚斌,胡夏嵩,余冬梅,等. 西宁盆地黄土区 2 种灌木植物根—土界面微观结构特征及摩擦特性试验[J]. 岩石力学与工程学报,2018,37(5):1270-1280.
- [13] 赵晓黎. 植物根系拉拔模型试验研究[D]. 四川 成都:西南交通大学,2015.
- [14] Waldron L J, Dakessian S. Soil reinforcement by roots: Calculation of increased soil shear resistance from root properties[J]. Soil Science, 1981,132(6):427-435.
- [15] Norris J N. Root reinforcement by hawthorn and oak roots on a highway cut slope in Southern England[J]. Plant and Soil, 2005,278(1/2):43-53.
- [16] 刘亚斌,余冬梅,付江涛,等. 黄土区灌木柠条锦鸡儿根—土间摩擦力学机制试验研究[J]. 农业工程学报,2017,33(10):198-205.

(上接第 66 页)

- [20] 高丽,侯金枝,宋鹏鹏. 天鹅湖沉积物对磷的吸附动力学及等温吸附特征[J]. 土壤,2013,45(1):67-72.
- [21] Ho Y S, Mckay G. Pseudo-second order model for sorption processes[J]. Process Biochemistry, 1999,34(5):451-465.
- [22] 何宗健,刘文斌,王圣瑞,等. 洱海表层沉积物吸附磷特征[J]. 环境科学研究,2011,24(11):1242-1248.
- [23] 陈春瑜,徐晓梅,邓伟明,等. 滇池表层沉积物对磷的吸附特征[J]. 环境科学学报,2014,34(12):3065-3075.
- [24] 安文超,李小明. 南四湖及主要入湖河流表层沉积物对磷酸盐的吸附特征[J]. 环境科学,2008,29(5):1295-1302.
- [25] 江敏,刘金金,胡文婷,等. 滴水湖沉积物对磷的吸附特性初探[J]. 环境科学与技术,2012,35(5):18-23.
- [26] 吕昌伟,孟婷婷,张细燕,等. 磷在不同类型湖泊沉积物上的吸附特征及形态再分布研究[J]. 农业环境科学学报,2012,31(2):402-409.
- [27] 王爱萍,杨守业,周琪. 长江口崇明东滩湿地沉积物对磷的吸附特征[J]. 生态学杂志,2006,25(8):926-930.
- [28] Tang Hu, Zhou Weijie, Zhang Lina. Adsorption isotherms and kinetics studies of malachite green on chitin hydrogels[J]. Journal of Hazardous Materials, 2012,209/210(1):218-225.
- [29] Dawood S, Sen T K. Removal of anionic dye Congo red from aqueous solution by raw pine and acid-treated pine cone powder as adsorbent: Equilibrium, thermodynamic, kinetics, mechanism and process design[J]. Water Research, 2012,46(13):1933-1946.
- [30] Lucci G M, Mcdowell R W, Condon L M. Evaluation of base solutions to determine equilibrium phosphorus concentrations(EPC<sub>0</sub>) in stream sediments[J]. International Agrophysics, 2010,24(2):157-163.
- [31] Liu Yu, Shen Liang. From Langmuir kinetics to first and second-order rate equations for adsorption [J]. Langmuir, 2008,24(20):11625-11630.
- [32] 黄利东,柴如山,宗晓波,等. 不同初始磷浓度下湖泊沉积物对磷吸附的动力学特征[J]. 浙江大学学报:农业与生命科学版,2012,38(1):81-90.
- [33] 王振华,王圣瑞,刘元英,等. Fe 和 Al 对湖泊沉积物中磷赋存形态的影响[J]. 环境科学研究,2012,25(5):556-562.
- [34] 揣小明,杨柳燕,程书波,等. 太湖和呼伦湖沉积物对磷的吸附特征及影响因素[J]. 环境科学,2014,35(3):951-957.
- [35] Karthikeyan K G, Tshabalala M A, Wang D, et al. Solution chemistry effects on orthophosphate adsorption by cationized solid wood residues[J]. Environmental Science & Technology, 2004,38(3):904-911.