

竖向荷载作用下黄茅根系抗拔承载力试验分析^①

冯国建, 朱维伟, 杜俊, 邱志刚

昆明学院 城乡建设与工程管理学院, 昆明 650214

摘要: 为了探索整株植物的抗拔承载力与生物量指标之间的关系, 以黄茅为研究对象, 采用直接施加竖向荷载的方法进行了野外原位抗拔承载力试验, 获得了黄茅的分枝数、根系质量、地上部分质量、根冠比等生物量指标以及整株植物的抗拔承载力等力学指标, 采用数理统计方法对黄茅的生物量指标和力学指标进行分析, 得到这些指标值的变化区间和分布频率. 试验结果表明: 有 73% 的黄茅分枝数低于 50 个, 根系质量和地上部分质量分别集中在 0~40 g 和 0~100 g, 69% 的黄茅根冠比小于 1, 根系抗拔承载力集中在 200~600 N. 黄茅的根系抗拔承载力与根系质量、分枝数、地上部分质量有关, 随着分枝数增多, 根系质量和地上部分质量增加, 根系抗拔承载力也随之增加, 通过数据拟合, 根系抗拔承载力与根系质量呈幂函数相关关系, 与分枝数和地上部分质量呈线性函数相关关系.

关键词: 黄茅; 抗拔承载力; 拟合; 幂函数; 线性函数

中图分类号: X173

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2018)08-0154-08

随着人们环保意识的增强, 在治理崩塌、滑坡等地质灾害时越来越注重植被护坡这一生态方式^[1-3]. 护坡植物根系与土体形成根土复合体, 在岩土体发生变形的条件下, 植物根系由于受到剪切力的作用会发生拉伸变形, 最终会转化为受到拉力的作用, 从而使得植物根系受到拉力作用的概率比受剪切力作用的概率要大^[4]. 在植物根系的抗拉性能方面, 很多研究者针对不同植物进行了相关研究, 指出根系的抗拉力与根系直径呈幂函数正相关关系^[5-9], 即随着根系直径的增大, 根系抗拉力迅速增加. 但目前的研究大多集中在单根的抗拉能力上, 而对整株植物进行抗拔承载力的研究较少. 因为植物根系的固土能力是群根共同作用的结果, 根系间的互相缠绕所产生的根网效应与单根所产生的效应是不同的. 因此, 本文对黄茅进行野外抗拔承载力试验研究, 这对认识根系固土机理, 指导生态修复工程的实施具有重要意义.

1 材料与研究方法

1.1 研究区概况

黄茅(*Heteropogon contortus*)为多年生丛生草本植物, 喜热且抗旱, 耐贫瘠土壤, 须根发达且较坚韧, 主要集中在 5~30 cm 土层中, 分蘖力较强, 可达 8~10 个枝条. 本次试验选取黄茅这种护坡植物进行根系抗拔承载力试验. 试验时间为 2017 年 10 月 15—16 日, 试验地点为昆明学院校内观物山, 山坡坡

① 收稿日期: 2017-10-28

基金项目: 云南省教育厅科学研究一般项目(2014Y385); 云南省应用基础研究计划项目(2016FD108).

作者简介: 冯国建(1979-), 男, 博士, 副教授, 主要从事环境岩土的研究.

面以红粘土为主, 边坡坡度为 50° 左右, 最冷月平均气温 7.7°C , 最热月平均气温 19.8°C , 年平均气温 15°C . 水文地质条件简单, 主要靠大气降水及地表径流补给, 年均降水量 $1\,000\text{ mm}$ 左右, 年度降水主要集中在 6—10 月, 约占全年降水的 80%. 由于坡向直接决定了植物的受光方向、光照强度及光照时数, 从而间接影响温湿度、蒸腾速率、水肥截留力等影响植物生长发育的条件^[10], 进而对植物根系会产生一定影响^[11-12], 阴坡土壤的水分及养分含量较高, 植物生长状况比阳坡好, 因此, 本次试验选取生长在阴坡上的黄茅进行研究.

1.2 取样方法

植物根系互相缠绕会影响拉拔力大小, 从而影响试验效果. 为避免出现这种情况, 选取单株生长正常且周围无其它植物生长的黄茅进行试验. 试验时, 为避免在拉拔过程中拉断植物茎叶, 把茎叶收拢到一起, 在竖直方向按照一个方向进行旋转, 使之形成一个较密实的整体, 然后在植株的某一位置进行弯折并用塑料拉条进行捆扎, 为减少弯折处出现应力集中, 拉拔时在弯折处垫上胶垫, 在胶垫的下方固定拉拔装置, 然后连接电子弹簧秤对植株施加拉力进行拉拔试验, 直到整株植物被拔出为止.

1.3 试验数据的测定

1.3.1 土壤物理性质的测定

土壤物理性质是影响植被生长以及土壤中空气、水分和养分协调的重要因素^[13], 选取土壤密度、含水量及机械组成等参数为土壤物理特性评价指标. 试验地点的土壤密度采用灌水法, 具体方法参照《土工试验方法标准》^[14]. 土壤含水量采用烘干法进行测试, 取土时先把表面浮土挖除, 然后取与根系在垂直尺度分布范围基本一致的 $5\sim 30\text{ cm}$ 的土层^[15], 取部分土样带回试验室后进行含水量测试. 由于土颗粒表面包围有强结合水, 且强结合水的沸点是 105°C , 因此在采用烘干法测试土壤含水量时, 为蒸发掉土壤中的强结合水, 烘箱的设定温度为 105°C , 烘干持续时间为 24h. 含水量试验时所用的电子天平精度为 0.01 g , 含水量测试进行 3 组试验, 然后取其平均值. 土壤机械组成是构成土壤固相结构的主要组分^[16], 决定了土壤渗透性、可蚀性^[17]等物理行为, 直接关系着土壤松紧程度、孔隙数量, 从而影响着土壤通气、透水及环境背景值等性能, 采用筛分法测试土壤机械组成, 具体方法参照《土工试验方法标准》^[14].

1.3.2 黄茅根系力学指标和生物量指标的测定

在试验场地挑选生长正常、无病虫害的 2 年生黄茅植物进行抗拔承载力试验, 根系被拉拔出来以后, 为减少水分蒸发, 立即对整株植物进行密封, 带回试验室进行室内试验. 在室内, 用剪刀将黄茅的地上部分和地下的根系部分进行分离, 分离以后, 用自来水对地下根系部分进行水下细流冲洗, 边冲洗边用毛刷轻刷根系, 去除根系间的泥土和杂质. 选取黄茅的抗拉力等力学指标以及根系质量、地上部分质量及分枝数、根冠比等生态学指标, 分别记录统计指标. 试验的植株数量共 45 株.

1) 抗拉力: 根据前述的取样方法进行黄茅的竖向拉拔, 在拉拔过程中通过便携式电子弹簧秤进行读数, 弹簧秤的最大读数即为根系的抗拔承载力 F .

2) 根系质量和地上部分质量: 根系的固土效应与根系质量存在一定的联系^[18], 选取根系质量进行测量. 测量根系质量时, 首先将冲洗干净的黄茅根系在 105°C 温度下进行 30 min 的杀青, 然后在 65°C 温度下烘干, 用电子天平(上海精科天美科学仪器有限公司 YP502N 型号)称取植物根系质量^[19], 同样的方法获得黄茅的地上部分质量.

3) 根冠比和分枝数: 根据测量得到的根系质量和地上部分质量, 两者的比值即为根冠比; 从黄茅的根茎部位刈割, 测定分枝数.

1.4 试验数据分析方法

试验记录根系的抗拔承载力 F 、根系质量 m_1 、地上部分质量 m_2 、分枝数 n 、根冠比 R_s , 应用

SPSS 软件进行指标之间的相关性分析; 应用 Curve Expert 软件对数据之间的关系方程进行拟合; 应用 Origin 进行图形绘制.

2 试验结果与分析

2.1 试验现象

在拉拔过程中, 沿着黄茅的植株最底部会出现竖向裂缝和土体隆起的现象, 随着拉拔力逐渐增加, 裂缝的开展深度和范围越来越大. 由于土体内存在大主应力和小主应力, 在这两个应力共同作用下, 土体发生剪切破坏, 剪切破坏面为与地面呈一定角度的斜截面. 并且黄茅根系密度在地表处较大, 随深度增加而降低, 具有指数型根系的特点^[20-21], 加之植物根系对土壤颗粒具有网兜包裹效应^[22], 因此在垂直方向拉拔黄茅根系时, 出现根系被拔出后, 拔出的根土复合体表面接近为圆形, 且拔出体具有一定的高度, 整个拔出体的形状接近于圆台体.

2.2 试验地点土样特性

通过试验测得取样地点的土壤天然含水量为 12.84%, 天然密度为 1.63 g/cm³. 根据筛分试验结果, 得到土的颗粒组成如图 1 所示. 植被通过与土壤之间的相互作用, 对土壤的发育产生影响^[23]. 一方面黄茅植物根系在土壤中穿插, 致使土壤颗粒变细、变小, 另一方面掉落在地表的茎叶能有效拦截土壤中的细颗粒流失, 从而使得取样地点的土壤细粒含量较多. 由于以上两方面的原因, 导致取样地点的土壤粒径主要分布在 0.1 mm 以下.

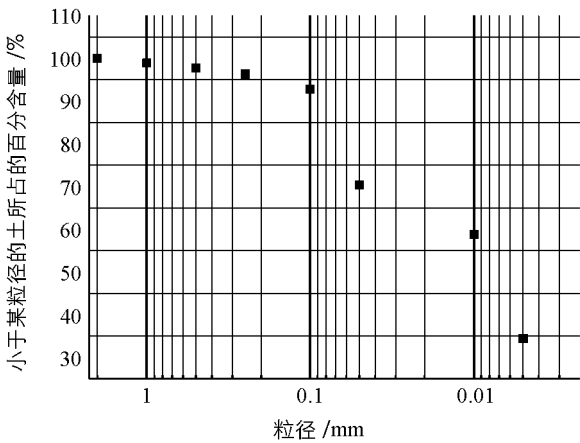


图 1 取样地点土样颗粒组成

2.3 黄茅植物抗拔承载力试验结果与分析

试验过程中记录的分枝数 n 、根系质量 m_1 、地上部分质量 m_2 、根冠比 R_s 和根系抗拔承载力 F 这 5 个参数的概率分布直方图如图 2 所示. 由直方图可知, 73% 的分枝数少于 50 个; 黄茅的根系质量主要分布在 0~40 g, 占总样本数的 69%; 地上部分质量主要分布在 0~100 g, 占总样本数的 78%, 其中 0~50 g 占 47%, 50~100 g 占 31%; 69% 的根冠比小于 1; 黄茅的根系抗拔力主要分布在 200~600 N, 占总样本数的 73%, 其中 200~400 N 占 42%, 400~600 N 占 31%.

选取根系质量 m_1 、分枝数 n 、地上部分质量 m_2 、根冠比 R_s 等因子, 对其与最大抗拔承载力 F 的关系进行相关分析, 如表 1 所示. 由表 1 可分析出黄茅根系最大抗拔承载力的影响因素排序依次是地上部分质量、分枝数、根系质量, 且呈现的是正相关关系, 即随着分枝数增多、地上部分质量和根系质量增加, 则对应的根系抗拔承载力也随之增加. 虽然通过植物的根长^[24]、根数^[25]、根的分布范围^[26]等根系因素能确定抗拔承载力, 但由于植物根系是一个非规律性的复杂形体, 并且生长于地下, 准确取样、测定存在一定困难, 而本次试验结果指出, 根系抗拔承载力的影响因素还包括地上部分质量和分枝数, 相对于根系而言, 植物的地上部分质量和分枝数这些数据是比较容易测量的, 所以, 可通过间接测定地上部分的质量和分枝数来反映植物的抗拔承载力. 通过试验结果也表明, 黄茅的根系质量与地上部分质量和分枝数呈现正相关关系, 说明地上部分质量越大、分枝数越多, 则对应的根系质量也越大.

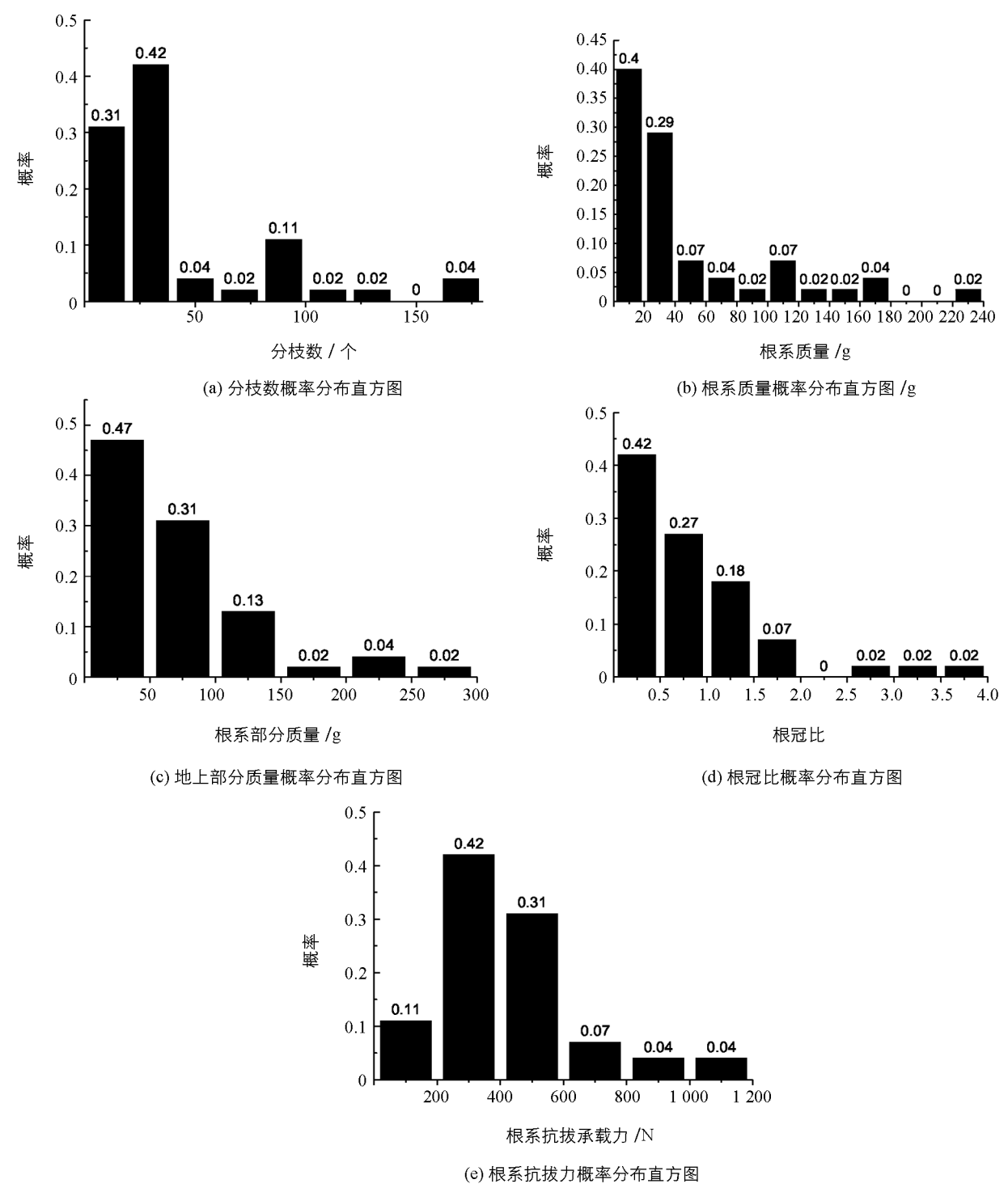


图 2 黄茅生物量指标和力学指标概率分布直方图

表 1 植物根系生物量指标和力学指标之间的相关矩阵

	根系质量	分枝数	地上部分质量	根冠比	抗拔承载力
根系质量	1	0.775	0.725	0.157	0.761
分枝数		1	0.812	0.002	0.815
地上部分质量			1	−0.238	0.829
根冠比				1	−0.014
抗拔承载力					1

枝条作为植物的重要组成部分,枝条的数量对植物的形态构成具有非常重要的影响,它直接决定着植株的外部形态、空间结构以及地上生物量的积累等^[27]. 本次试验取样为同一地点,意味着资源条件(光照、水分、土壤物理性质)相同,则植物在生长过程中的生物量积累主要受分枝数量的影响^[28]. 对黄茅植物的分枝数与地上部分质量和根系质量进行数据拟合,拟合关系曲线如图 3 所示,从图 3 可知,随着分枝数增多,地上部分质量和根系质量均线性增加.

植物根系是水分和养分吸收的主要器官,根系质量越大,说明根系体积越大,根系在土体内的扩散范围增加,从而增加了根系与土壤的接触面积. 由于植物的单个根系具有抗拉性能,所以对整株植物进行竖向拉拔试验时,所需要的抗拔承载力是每一个根系抗拔力的综合体现^[29],且随株高、根长、根径、侧根数的增加而增加^[24]. 对根系质量和抗拔承载力进行数据拟合,得到的关系曲线如图 4 所示. 从图 4 可知,随着根系质量的增加,所需的抗拔承载力也随之增加,这与文献[30]的研究结果类似.

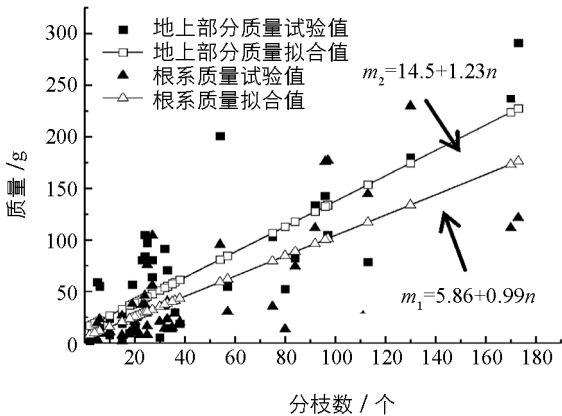


图 3 分枝数与地上部分质量和根系质量关系曲线

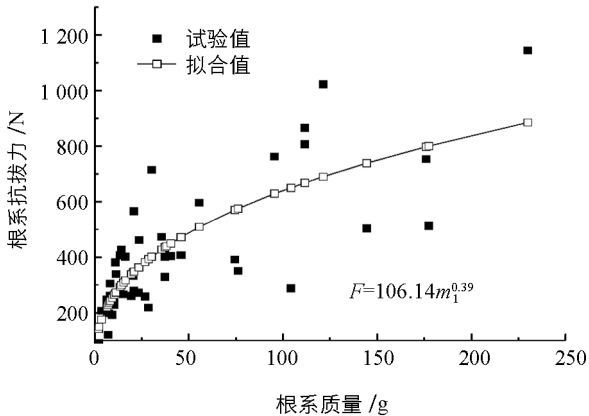


图 4 根系质量与抗拔承载力关系曲线

对分枝数和抗拔承载力进行数据拟合,得到的关系曲线如图 5 所示. 由于昆明地处云贵高原,紫外线较强,紫外光能增加植物体内吲哚乙酸氧化酶的活性,从而促进生长素氧化为 3-亚甲基氧代吲哚. 另一方面,昆明昼夜温差较大,夜间温度低致使呼吸消耗减少,从而使总光合效率提高,干物质积累增多,促进地上部各器官发育,使植物分枝数增加^[31]. 从图 5 可知,随着分枝数增多,所需的抗拔承载力也随之增加.

有研究结果表明在正常水分供应条件下,植物地上部分与地下部分生长比例基本相似^[32],即地上部分质量增加,则对应的根系质量也会变大,那对应的抗拔承载力是否也会增加. 通过图 6 表明,地上部分的质量与抗拔承载力之间存在这种对应关系.

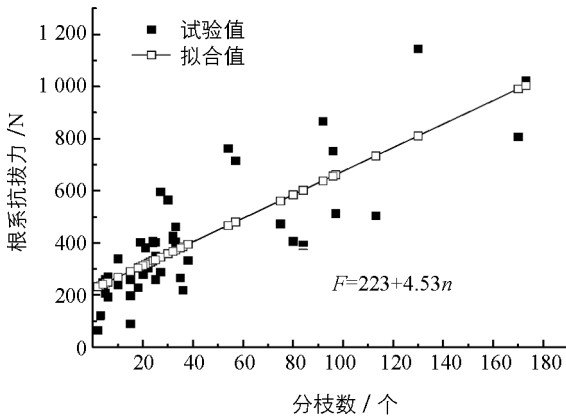


图 5 分枝数与抗拔承载力关系曲线

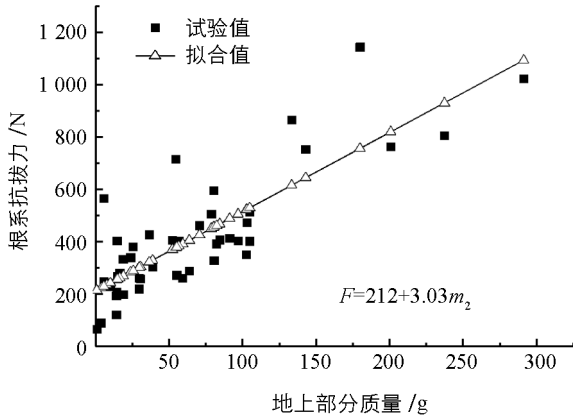


图 6 地上部分质量与抗拔承载力关系曲线

根冠比能反映植物光合产物在地上部分和地下部分的分配^[33],图 7 是根系质量和地上部分质量关系曲线,可知两者之间存在正相关关系,通过数据拟合,两者之间的关系方程为呈幂函数相关关系,与文献^[34]研究结论类似,根系性状中根质量与地上部质量呈显著相关关系^[35].本次试验结果表明大部分的根系质量要小于地上部分质量,即根冠比小于 1.主要原因是试验场地为天然边坡的阴坡,在阴坡上的光照不足,从而使植物向下输送的光合产物减少,影响了根部的生长,但对地上部分的生长相对影响较小,所以导致根冠比降低.对根冠比与抗拔承载力之间关系进行曲线拟合,曲线图的数据点比较分散,再结合表 1 的计算结果表明两者之间的相关关系不明显.

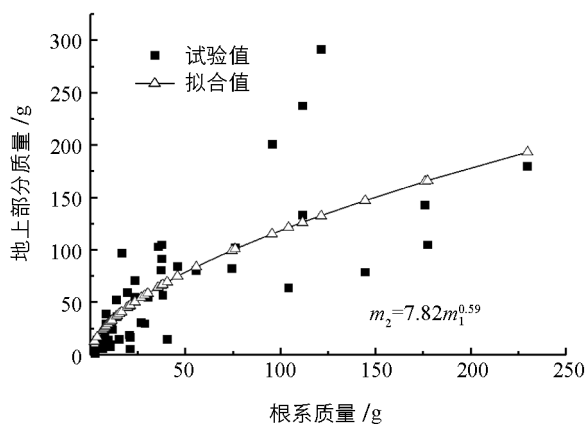


图 7 根系质量和地上部分质量关系曲线

3 结 论

通过对黄茅进行抗拔承载力试验,得到的结论如下:

- 1) 黄茅的生物量指标和力学指标统计结果为:分枝数大部分少于 50 个,根系质量和地上部分质量分别集中分布于 0~40 g 和 0~100 g,根冠比小于 1,抗拔力主要分布在 200~600 N.
- 2) 黄茅的分枝数与根系质量和地上部分质量之间存在线性关系,随着分枝数增加,根系质量与地上部分质量也随之增加.
- 3) 黄茅的抗拔承载力与根系质量、分枝数、地上部分质量有关,与根系质量存在幂函数相关关系,与分枝数和地上部分质量存在线性函数相关关系,抗拔承载力与根冠比之间的相关关系不明显.

植物根系固土能力除了受土壤本身的物理力学性质影响以外,还与根系本身的抗拉性能、根系的形态、数量等有密切关系.本试验尝试选取分枝数、根系质量、地上部分质量与根冠比等生态学指标来分析植物根系的抗拔承载力,在今后的工作中,应深入研究其它因素与根系抗拔承载力的关系,揭示根系固土内在机理.

参考文献:

- [1] ROERING JJ, STOCK J D, SCHMIDT K M, et al. Shallow Landsliding, Root Reinforcement, and the Spatial Distribution of Trees in the Oregon Coast Range [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2003, 40(2): 237—253.
- [2] 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.
- [3] 朱海丽,毛小青,倪三川,等.植被护坡研究进展与展望 [J].中国水土保持,2007(4): 26—29.
- [4] 陈丽华,及金楠,冀晓东,等.林木根系基本力学性质 [M].北京:科学出版社,2012.
- [5] 李长暄,陈丽华,周 娟,等.蒙古栎根系单根抗拉力学特性 [J].水土保持通报,2014,34(4): 232—235.
- [6] 孙丽文,史常青,赵廷宁,等.北川县 4 个树种根系抗拉特性研究 [J].四川农业大学学报,2014,32(1): 34—40, 58.
- [7] 张云伟,惠 尚,卜晓磊,等.3 种散生竹的单根抗拉力学特性 [J].林业科学,2013,49(7): 183—187.
- [8] 刘昌义,胡夏嵩,赵玉娇,等.寒旱环境草本与灌木植物单根拉伸试验强度特征研究 [J].工程地质学报,2017,25(1): 1—10.
- [9] 贺振昭,党 生,刘昌义,等.青海湖地区草本植物根系力学特性试验研究 [J].中国水土保持,2017(4): 44—48.

- [10] 王大伟, 孙 帅, 刘金平, 等. 坡向对退化冷季型护坡草坪中植物种类及多样性的影响 [J]. 草学, 2017(1): 40—44, 48.
- [11] 韩烈保, 王 琼, 王晓蓓, 等. 不同立地条件下荆条根系分布规律 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2009, 17(2): 231—237.
- [12] 王英宇, 宋桂龙, 孟 强, 等. 不同立地条件下野生荆条与胡枝子根系生长特性的比较研究 [J]. 水土保持通报, 2010, 30(4): 94—98.
- [13] 张 韪. 土壤·水·植物—理化分析教程 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2011.
- [14] 中华人民共和国水利部. 土工试验方法标准: GB/T50123-1999 [S]. 北京: 中国计划出版社, 1999: 10.
- [15] 方海东, 段昌群, 纪中华, 等. 金沙江干热河谷自然恢复区植物种群生态位特征 [J]. 武汉大学学报(理学版), 2008, 54(2): 177—182.
- [16] 黄昌勇. 土壤学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [17] YU Dong-sheng, SHI Xue-zheng, WEINDORF D C. Relationships Between Permeability and Erodibility of Cultivated Acrisols and Cambisols in Subtropical China [J]. *Pedosphere*, 2006, 16(3): 304—311.
- [18] 李绍才, 孙海龙, 杨志荣. 坡面岩体-基质-根系互作的力学特性 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(12): 2074—2081.
- [19] 唐庄生, 安 慧, 上官周平. 荒漠草原沙漠化对土壤养分与植被根冠比的影响 [J]. 草地学报, 2015, 23(3): 463—468.
- [20] NG C WW, LIU H W, FENG S. Analytical Solutions for Calculating Pore-Water Pressure in an Infinite Unsaturated Slope with Different Root Architectures [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2015, 52(12): 1981—1992.
- [21] GHESTEM M, SIDLE R C, STOKES A. The Influence of Plant Root Systems on Subsurface Flow: Implications for Slope Stability [J]. *Bioscience*, 2011, 61(11): 869—879.
- [22] 言志信, 宋 杰, 蔡汉成, 等. 草本植物加固边坡的力学原理 [J]. 土木建筑与环境工程, 2010, 32(2): 30—34.
- [23] 周园园, 谢世友, 柳 芬. 渝贵交界地区低中上土壤颗粒分形特征研究—以贵州遵义习水县寨坝镇为例 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2016, 38(6): 118—122.
- [24] 李 臻, 余芹芹, 杨占风, 等. 西宁盆地两种灌木植物原位拉拔试验及其护坡效应 [J]. 水土保持研究, 2011, 18(3): 206—209.
- [25] 胡夏嵩, 陈桂琛, 周国英, 等. 青藏铁路沱沱河段路基边坡植物护坡根系力学强度试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(1): 107—113.
- [26] LIFFENA T, GURNELL A M, O'HARE M T, et al. Biomechanical Properties of the Emergent Aquatic Macrophyte *Sparganium Erectum*: Implications for Fine Sediment Retention in Low Energy Rivers [J]. *Ecological Engineering*, 2011, 37(11): 1925—1931.
- [27] NELSON N D, BURK T, ISEBRANDS J G. Crown Architecture of Shortrotation, Intensively Cultured *Populus*: Effects of Clone and Spacing on First-Order Branch Characteristics [J]. *Canada Journal of Forest Research*, 1981, 11(1): 73—81.
- [28] 郇慧慧, 胥 晓, 刘 刚, 等. 不同分枝数对桑树幼苗生长发育的影响 [J]. 生态学报, 2014, 34(4): 823—831.
- [29] 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 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(10): 2051—2057.
- [30] 罗春燕, 吴 楚, 芦光新, 等. 三江源区植物根-土复合体的抗拉拔力特征及影响因素分析 [J]. 水土保持研究, 2014, 21(5): 260—266, 271.
- [31] 董世青, 李家纳, 梁 颖, 等. 云南超高产区甘蓝型油菜产量及相关特性研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2017, 39(3): 17—22.
- [32] WILSON J B. Shoot Competition and Root Competition [J]. *J Appl Ecol*, 1988, 25(1): 279—296.
- [33] 杨婷婷, 高 永, 吴新宏, 等. 小针茅草原植被地下与地上生物量季节动态及根冠比变化规律 [J]. 干旱区研究, 2013, 30(1): 109—114.

- [34] 马安娜, 于贵瑞, 何念鹏, 等. 中国草地植被地上和地下生物量的关系分析 [J]. 第四纪研究, 2014, 34(4): 769—776.
- [35] 石庆华, 黄英金, 李木英, 等. 水稻根系性状与地上部的相关性及根系性状的遗传研究[J]. 中国农业科学, 1997, 30(4): 61—67.

Experimental Analysis of the Tension Bearing Capacity of *Heteropogon contortus* Roots Under Vertical Load

FENG Guo-jian, ZHU Wei-wei, DU Jun, QIU Zhi-gang

Department of Urban and Rural Construction and Engineering Management, Kunming University, Kunming 650214, China

Abstract: In an in-situ pullout test carried out in the field, the method of direct vertical load was applied to *Heteropogon contortus* to explore the relationship between the tension bearing capacity of the whole plant and the biomass indexes. The biomass indexes of the plant such as branch number, root mass, shoot mass and root-shoot ratio and the mechanics indexes such as bearing capacity were obtained. These indexes were analyzed with the method of mathematical statistics, and their change intervals and distribution frequencies were obtained. The results showed that about 73 percent of the plants had a branch number of <50 , their root mass and shoot mass were mostly distributed in the range of $0-40$ and $0-100$, respectively, about 69 percent of the of the plants had a root-shoot ratio of <1 , and the tension bearing capacity was mostly in the range of $200-600$. The tension bearing capacity of *H. contortus* was associated with branch number, root mass and shoot mass. The tension bearing capacity of the root system increased with the increase in branch number, root mass and shoot mass of the plant. Data fitting showed a power function correlation between tension bearing capacity and root mass and a linear function correlation between tension bearing capacity and branch number or shoot mass.

Key words: *Heteropogon contortus*; tension bearing capacity; fitting; power function; linear function

责任编辑 汤振金