

柴达木盆地 4 种盐生植物根系力学特性及 根—土复合体抗剪强度研究

许桐¹, 刘昌义¹, 胡夏嵩¹, 周林虎¹, 申紫雁¹, 余冬梅²

(1.青海大学 地质工程系, 西宁 810016;

2.中国科学院 青海盐湖研究所, 中国科学院 盐湖资源综合高效利用重点实验室, 西宁 810008)

摘 要:以柴达木盆地柯柯盐湖地区作为研究区,选取芦苇(*Phragmites australias* Trin.)、盐爪爪(*Kalidium foliatum* Moq.)、无脉苔草(*Carex enervis* C.A.Mey.)、盐地风毛菊(*Saussurea salsa* Spreng.) 4 种优势盐生植物作为供试种,开展室内单根拉伸、剪切试验,及根—土复合体试样直接剪切试验。结果表明:4 种盐生植物平均单根抗拉力由大至小依次为盐地风毛菊(20.511 N)、芦苇(2.227 N)、盐爪爪(1.944 N)、无脉苔草(0.642 N);平均单根抗剪力由大至小依次为盐地风毛菊(25.243 N)、芦苇(12.035 N)、盐爪爪(9.073 N)、无脉苔草(3.484 N),4 种盐生植物其单根抗拉力、抗剪力与根径之间均符合指数函数关系;平均单根抗拉强度由大至小依次为芦苇(281.208 MPa)、无脉苔草(114.798 MPa)、盐爪爪(33.159 MPa)、盐地风毛菊(14.824 MPa);平均单根抗剪强度由大至小依次为无脉苔草(157.428 MPa)、芦苇(110.836 MPa)、盐爪爪(26.657 MPa)、盐地风毛菊(9.105 MPa),单根抗拉强度、抗剪强度与根径之间均呈幂函数关系。进一步研究表明,随着试验区地表以下取样深度的增加,4 种盐生植物根—土复合体黏聚力 c 值呈逐渐减小的变化趋势,芦苇、盐爪爪、无脉苔草、盐地风毛菊分别降低了 60.3%,60.1%,10.2%,28.3%;在 50 kPa,100 kPa,200 kPa,300 kPa 垂直压力下,4 种植物根—土复合体抗剪强度均显著大于素土,表现在地表以下 0—20 cm 深度处根—土复合体黏聚力 c 值增加幅度为 9.9%~213.0%。该项研究结果对于通过盐生植物来防治盐渍土地地区地质灾害现象的发生,具有一定的研究价值和实际指导意义。

关键词:柴达木盆地; 盐生植物; 单根抗拉力; 单根抗剪力; 根系力学强度; 根—土复合体

中图分类号:TU413

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)03-0101-10

Study on the Mechanical Properties of Roots and the Shear Strengths of Four Halophytic Plants in Qaidam Basin

XU Tong¹, LIU Changyi¹, HU Xiasong¹, ZHOU Linhu¹, SHEN Ziyang¹, YU Dongmei²

(1.Department of Geological Engineering, Qinghai University, Xining 810016, China; 2.Key Laboratory of Comprehensive and Highly Efficient Utilization of Salt Lake Resources of CAS, Qinghai Institute of Salt Lakes, CAS, Xining 810008, China)

Abstract:Four dominant species of halophytes growing in Keke Salt Lake area of Qaidam Basin were chosen as experimental species. Four dominant species of halophytes were *Phragmites australias* Trin, *Kalidium foliatum* Moq, and *Carex enervis* C. A. Mey., *Saussurea salsa* Spreng. The indoor tensile test and shear test of single root, as well as the indoor direct shear test of four kinds of plant root-soil composite system were conducted. The results showed that the average single root tensile forces of the four halophytes from big to small were *Saussurea salsa* Spreng.(20.511 N), *Phragmites australias* Trin.(2.227 N), *Kalidium foliatum* Moq.(1.944 N), and *Carex enervis* C. A. Mey.(0.642 N); the average single shear forces descended in the order: *Saussurea salsa* Spreng.(25.243 N), *Phragmites australias* Trin.(12.035 N), *Kalidium foliatum* Moq.(9.073 N), and *Carex enervis* C. A. Mey. (3.484 N); the relationship between single root tensile force, single shear force and root diameter of four halophytes could be described by the exponential function; the

收稿日期:2020-05-12

修回日期:2020-07-06

资助项目:青海省自然科学基金资助项目(2020-ZJ-906,2014-ZJ-906);国家自然科学基金项目(41572306,42041006);中国科学院“百人计划”资助项目(Y110091025)

第一作者:许桐(1993—),男,青海省海东市人,硕士研究生,主要从事地质工程方面的研究工作。E-mail:601429807@qq.com

通信作者:胡夏嵩(1965—),男,河南省开封市人,博士,教授,主要从事环境岩土工程与地质工程等方面的教学与研究工作。E-mail:huxiasong@tsinghua.org.cn

average tensile strength of single root decreased in the order: *Phragmites australias* Trin.(281.208 MPa), *Carex enervis* C. A. Mey. (114.798 MPa), *Kalidium foliatum* Moq.(33.159 MPa), and *Saussurea salsa* Spreng. (14.824 MPa); the average shear strength of single root decreased in the order: *Carex enervis* C. A. Mey.(157.428 MPa), *Phragmites australias* Trin.(110.836 MPa), *Kalidium foliatum* Moq.(26.657 MPa), and *Saussurea salsa* Spreng. (9.105 MPa), the relationship between single root tensile strength, shear strength and root diameter could be described by the power function. Further studies showed that with the increase of sampling depth below the surface of the test area, the c values of the cohesion of the root-soil composite system of the four halophytes showed a trend of gradually decreasing, and decreased by 60.3%, 60.1%, 10.2% and 28.3% under *Phragmites australias* Trin., *Kalidium foliatum* Moq., *Carex enervis* C. A. Mey. and *Saussurea salsa* Spreng., respectively. Under the vertical pressures of 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa and 300 kPa, the shear strengths of the root-soil composite system of the four plants were significantly higher than those of the sample of soil without roots, indicating that the c value of the root-soil composite system increased by 9.9%~213.0% in 0—20 cm layer below the ground. These results of this study have important theoretical values and practical significance for the effective prevention and control of soil erosion and other geological disasters by using halophytes in the study area.

Keywords: Qaidam Basin; halophytes; tensile force; shear force; root strength; root-soil composite system

近年来,利用草本植物有效防治地表土壤侵蚀,减少水土流失,增强土体抗剪强度,已被国内外学者普遍认可并开展了广泛研究和普遍应用^[1-7]。植物根系不仅可从土壤中吸收植物生长过程中所需要的水分和养分,且对于改良土壤结构和成分,增强土壤的抗侵蚀能力和抗剪切能力方面有着重要作用^[8-10]。本项研究其研究区位于柴达木盆地东部,柴达木盆地是我国四大内陆盆地之一,区内拥有丰富的矿产资源,是西部地区重要资源富集区,被誉为“聚宝盆”^[11]。但由于近年来受到全球气候变暖以及区域性风蚀、水蚀和人类工程活动等因素的综合影响,使得区内发生因植被退化、河湖萎缩等现象所引发的水土流失、土地沙化等灾害现象较为严重,且一定程度地对当地工农业和城镇居民生产生活带来影响和产生潜在危害,因此开展柴达木盆地及其周边生态地质环境的科学保护是一项亟待解决的重大问题。

近年来,国内外诸多学者通过开展植物根系力学强度研究,探讨植物有效防治地表水土流失和浅层滑坡方面,取得了较为丰富研究成果。Stokes 等指出根的抗拉强度与根系的抗拔力和抗剪强度成正比关系,故在根面积比一定的条件下,数量相对愈多的细根较数量相对较少的粗根,表现出具有相对更为显著的固土护坡能力^[12]。Capilleri 等以意大利西西里岛芦笋(*Asparagus officinalis*)作为研究对象,通过室内单根拉伸试验得到芦笋单根抗拉强度为 2.5~8.0 MPa,并指出根系抗拉强度受多种因素影响,其因素分别为根径、根系水分和植株生长位置等,认为草本植物可用于浅层滑坡防治^[13]。武艺儒等以柠条锦鸡儿(*Car-*

agana korshinskii)、沙柳(*Salix cheilophila*)和沙棘(*Hippophae rhamnoides*)为研究对象,通过测定 3 种灌木根系抗剪特性及纤维素、半纤维素、木质素 3 种化学成分含量,分析其化学成分对抗剪特性的影响,结果表明区内 3 种灌木直根抗剪力、抗剪强度均存在显著差异,种间变化为柠条锦鸡儿(172.68 N, 17.18 MPa) > 沙柳(124.99 N, 12.49 MPa) > 沙棘(68.49 N, 6.76 MPa),且 3 种直根抗剪力与根径均呈幂函数正相关关系,抗剪强度与根径均呈幂函数负相关关系^[14]。

与此同时,Comino 等通过对意大利北部典型高山禾本科植物早熟禾(*Poa annua*)、黑麦草(*Lolium perenne*)开展根—土复合体抗剪强度试验,其试验结果表明 2 种植物根—土复合体抗剪强度明显高于不含根素土的抗剪强度,其黏聚力增长 9.6~12.6 kPa^[15]。祁兆鑫等选取柴达木盆地尕斯库勒盐湖区及周边地区海韭菜(*Triglochin maritimum*)、芦苇(*Phragmites australias*)、无脉苔草(*Carex enervis*)等 5 种优势盐生植物为研究对象,通过直剪试验分析根—土复合体抗剪强度的影响因素,结果表明土体含水率的提高导致根—土复合体黏聚力 c 值降低,并指出盐生植物根—土复合体与素土相比抗剪强度增加了 3.26%~57.18%^[16]。栗岳洲等通过对大柴旦盐湖区海韭菜(*Triglochin maritimum* Linn)、赖草(*Leymus secalinus* Tzvel)、毛穗赖草(*Leymus paboanus* Pilger)、无脉苔草(*Carex enervis* C.A.Mey)复合体进行直剪试验,其试验结果表明,根系提高土体的抗剪强度存在一个最优含根量,当根—土复合体中的含根量为最优含根量时,土体的抗剪强度为最大,

分别得到海韭菜为 27.42 kPa, 赖草为 20.9 kPa, 毛穗赖草为 18.11 kPa, 无脉苔草为 17.84 kPa^[17]。

综上所述,已有研究结果关于通过植被防治水土流失、浅层滑坡等灾害大多是单独讨论有关植物根系力学特性或植物根—土复合体力学强度研究方面,相比较而言,采用将植物单根抗拉、抗剪强度与根—土复合体抗剪强度二者结合起来的综合研究方法,综合探讨植物根系增强土体抗剪强度效应和有效提高土体抗侵蚀能力等方面的研究相对较少,尤其是位于青藏高原腹地地处高寒干旱区柴达木盆地及其周边地区。因此,本研究以柴达木盆地柯柯盐湖区作为研究区,通过对区内4种不同优势盐生植物开展单根拉伸、剪切和根—土复合体抗剪强度试验,分析地表0—20 cm深度处复合体黏聚力与含根量的变化规律及两者间的关系,并探讨4种不同盐生植物根系力学强度特性,以及根—土复合体随取样深度变化其抗剪强度的变化特征。

1 研究区概况

研究区柯柯盐湖位于柴达木盆地东部,地理坐标为东经 97°58′—98°30′,北纬 36°50′—37°06′,东西长约 28 km,南北平均宽约 4~5 km,总面积约 119 km²^[18]。柯柯盐湖隶属于青海海西蒙古族藏族自治州乌兰县柯柯镇境内。研究区柯柯盐湖及其周边地区地势平坦,海拔高度为 3 010 m 左右,区内气候属于大陆性干旱气候^[18],多年平均降水量为 107.4~139.9 mm,蒸发量为 2 172.6~2 483.3 mm,蒸发量为降水量的 20 倍以上^[19],年平均最高气温在 7—8 月份,为 22.9℃,最低气温在上年 12 月至次年 1 月份,为 -19~-23℃,年温差为 41~46℃^[20]。区内地层主要为变质岩系和中生界侏罗系及新生界第三系,其岩石类型由下而上分别为细粉砂、砂质黏土、淤泥、石盐层^[20]。区内土壤类型以盐渍土为主,适宜于当地生长的优势盐生植物主要为芦苇(*Phragmites australis* Trin.)、盐爪爪(*Kalidium foliatum* (Pall.) Moq.)、赖草(*Leymus secalinus* (Georgi) Tzvel.)、无脉苔草(*Carex enervis*)、盐地风毛菊(*Saussurea salsa* Spreng.)、海韭菜(*Triglochin maritimum*)等。

2 试验材料与方法

2.1 试验材料

本研究选取适宜于研究区柯柯盐湖区及周边地区气候条件下生长的4种优势盐生植物,即芦苇(*Phragmites australis* Trin.)、盐爪爪(*Kalidium foliatum* Moq.)、无脉苔草(*Carex enervis*)、盐地风毛菊(*Saussurea salsa* Spreng.)作为试验供试种,这4种盐生草本植物具

有耐寒、耐旱、耐贫瘠等生物学特性,且水土保持效果较为显著。本研究通过野外试验区现场采集盐生植物试样,原位制取4种根—土复合体试样等方法,并将所采集到的试样及时带回实验室,在室内进行单根拉伸、剪切试验和根—土复合体剪切试验。

2.2 试验方法

2.2.1 试验样地及其设置 本研究通过对研究区柯柯盐湖及其周边地区盐生植物类型、生长情况等进行原位调查的基础上,在区内选择了植被类型丰富、植物生长正常,且植物类型及其组合具有代表性的样地布设了实测剖面。该实测剖面线位于区内盐湖区东南方向,剖面线起点距盐湖约 1 000 m 处,剖面起点位置地理坐标为 36°58′8″N, 98°15′19″E,海拔高度为 2 881.22 m,剖面总长为 1 000 m,坡度为 2°。首先,沿该剖面线方向依次划分出不同盐生植物种类和组合类型;其次,沿剖面线方向选择盐生植物生长良好的位置作为试样采集点,并分别制取不同盐生植物根—土复合体试样。沿剖面线方向每种盐生植物按照 20~80 m 间距进行采样,且每种盐生植物其根—土复合体试样进行 3 次重复。

2.2.2 单根拉伸试验 本研究通过野外现场制取盐生植物根系试样,将原位采集完的整植物根系放置在试样盆中并做标记,将试样及时带回实验室开展相应试验。在室内首先将植物根系挑选出来并用清水冲洗干净,选取较为完整的根系,截取单根长度为 10~20 cm 根段,然后选取 3 个不同部位采用游标卡尺测量其根径,并取其平均值作为该根段的根径^[21]。在进行根系拉伸试验过程中,需调整好拉伸仪夹具与根系之间的摩擦力,防止试验进行过程中发生滑动现象,根系从夹具中间发生断裂计为有效数据,若根系与夹具发生滑动,数据视为无效,需重新进行试验^[22]。根据试验得到的单根最大抗拉力和实测得到的根径,即可计算出4种草本单根抗拉强度,其计算公式^[23]为:

$$P = \frac{4F}{\pi D^2} \quad (1)$$

式中: P 为根段抗拉强度(MPa); F 为最大抗拉力(N); D 为根段直径(mm)。

2.2.3 单根剪切试验 本研究在进行室内单根剪切试验时,将预先挑选好的根系穿过剪切试验装置中的小孔进行剪切,试验过程中根系试样未完全被剪断则视为无效数据,重新进行剪切试验。根据单根剪切试验结果得到的单根最大抗剪力,以及对通过单根测量得到的根径值,即可计算出4种盐生植物的单根抗剪强度,其计算公式^[23]为:

$$\tau=\frac{F_s}{2A}=\frac{2F_s}{\pi D^2}\tag{2}$$

式中： τ 为单根抗剪强度(MPa)； F_s 为单根最大抗剪力(N)； A 为根系的原始截面积(mm^2)； D 为根段直径(mm)。

2.2.4 根—土复合体直剪试验 在野外试验区样地制取根—土复合体试样过程,首先是将取样位置处的植物修剪至与地表土体平行,并在地表土体垂直向下深 0—10 cm,10—20 cm 处,将内径 61.8 mm、高 20 mm 的环刀垂直压入土体中,直到试样完全压入环刀为止,使用小刀和剪刀修整环刀两侧土体,待两侧土体平整后立即装入环刀盒中,贴上标签,并用胶带将环刀盒封口,防止水分蒸发。同样,选择未生长植物区域,用相同的方法制取相应的素土试样作为试验对照组,同时准备原位直剪样品时,完成相应位置处样品的含水量和密度的制取工作,并密封样品并把所有样品带回实验室进行相应的测试。室内直剪试验采用应变控制式直剪仪,试样剪切位移为 4 mm,剪切速度 2.4 mm/min,施加垂直压力依次为 50 kPa,100 kPa,200 kPa,300 kPa^[24]。

3 结果与分析

3.1 单根抗拉力和抗拉强度与根径之间的关系

由表 1 所示可知,区内 4 种盐生植物平均根径由大至小依次为盐地风毛菊(1.376 mm)、盐爪爪(0.282 mm)、芦苇(0.109 mm)、无脉苔草(0.088 mm),盐地风毛菊平均根径显著大于其他 3 种盐生植物($p<0.05$),盐爪爪平均根径显著大于芦苇和无脉苔草($p<0.05$),而无脉苔草和芦苇未表现出显著性差异。4 种盐生植物平均单根抗拉力由大至小依次为盐地风毛菊(20.511 N)、芦苇(2.227 N)、盐爪爪(1.944 N)、无脉苔草(0.642 N);其中,盐地风毛菊平均单根抗拉力显著高于其他 3 种($p<0.05$),即分别为芦苇、盐爪爪、无脉苔草平均单根抗拉力的 9.210,10.550,37.843 倍。芦苇单根其平均抗拉力显著高于苔草($p<0.05$),盐爪爪与无脉苔草之间无明显差异。区内 4 种盐生植物其平均单根抗拉强度由大至小依次为芦苇(281.208 MPa)、无脉苔草(114.798 MPa)、盐爪爪(33.159 MPa)、盐地风毛菊(14.824 MPa),其中,芦苇单根抗拉强度为无脉苔草 2.45 倍,盐爪爪 8.48 倍,盐地风毛菊 18.97 倍,芦苇单根抗拉强度与盐爪爪、无脉苔草、盐地风毛菊之间的差异显著($p<0.05$),无脉苔草的平均单根抗拉强度显著大于盐爪爪与盐地风毛菊($p<0.05$),而盐爪爪与盐地风毛菊之间未表现出显著性差异。

相应地,由图 1 可知区内 4 种盐生植物单根抗拉

力随根径增加而增大,且单根抗拉力与根径符合指数函数关系。由图 2 所示可知,4 种盐生植物单根抗拉强度随根径增大而减小,且单根抗拉强度与根径之间符合幂函数关系;其中以盐爪爪为例,盐爪爪根径在 0.35~0.6 mm 比 0.13~0.35 mm 时单根抗拉力随根径增大的速率更大,同时其单根抗拉强度随着根径的增大其减小速率更缓慢,因此盐爪爪根径在 0.35 mm 时单根抗拉力学特性表现相对较好。该试验结果与刘昌义等^[25]对西宁盆地细茎冰草(*Agropyron trachycaulum*)、霸王(*Zygophyllum xanthoxylon*)、白刺(*Nitraria tangutorum*)等 5 种草本和灌木根系单根拉伸试验结果,以及与李可等^[26]对柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)和草地早熟禾(*Poa pratensis*)根系单根拉伸试验结果相一致。

表 1 试验区 4 种盐生植物单根拉伸试验结果

植物名称	平均根径/mm	平均单根抗拉力/N	平均单根抗拉强度/MPa	样本数量/根
芦苇	0.109±0.039 ^c	2.227±0.802 ^b	281.208±128.020 ^a	20
盐爪爪	0.282±0.122 ^b	1.944±1.130 ^{bc}	33.159±9.781 ^c	20
无脉苔草	0.088±0.023 ^c	0.642±0.190 ^c	114.798±42.707 ^b	19
盐地风毛菊	1.376±0.290 ^a	20.511±4.228 ^a	14.824±4.636 ^c	17

注:同列不同字母表示,不同盐生植物间有显著性差异($p<0.05$)。

3.2 单根抗剪力、抗剪强度与根径之间的关系

由表 2 所示可知,区内 4 种盐生植物平均根径由大至小依次为盐地风毛菊(1.360 mm)、盐爪爪(0.475 mm)、芦苇(0.286 mm)、无脉苔草(0.132 mm),盐地风毛菊平均根径显著大于无脉苔草、盐爪爪、芦苇($p<0.05$),盐爪爪平均根径显著大于芦苇和无脉苔草($p<0.05$),而芦苇的平均根径显著大于无脉苔草($p<0.05$)。4 种盐生植物平均单根抗剪力由大至小依次为盐地风毛菊(25.243 N)、芦苇(12.035 N)、盐爪爪(9.073 N)、无脉苔草(3.484 N),其表现出的变化规律与平均单根抗拉力相一致。其中,盐地风毛菊的平均单根抗剪力显著大于其他 3 种盐生植物($p<0.05$),芦苇的平均单根抗剪力显著大于盐爪爪和无脉苔草($p<0.05$),盐爪爪显著大于无脉苔草($p<0.05$)。进一步研究表明,同种盐生植物之间其单根抗剪力均大于单根抗拉力,表现在盐地风毛菊、芦苇、盐爪爪、无脉苔草单根抗剪力较抗拉力其增长幅度分别是 23.0%,440.4%,367.7%,442.6%。

区内 4 种盐生植物其平均单根抗剪强度由大至小依次为无脉苔草(157.428 MPa)、芦苇(110.836 MPa)、盐爪爪(26.657 MPa)、盐地风毛菊(9.105 MPa),无脉苔草平均单根抗剪强度与芦苇、盐爪爪、盐地风毛菊间存在显著性差异($p<0.05$),芦苇的平均单根抗剪强度显著大

于盐爪爪和盐地风毛菊($p<0.05$),而盐爪爪与盐地风毛菊之间无明显差异。其中,无脉苔草其抗剪强度为芦苇1.42倍、盐爪爪5.91倍、盐地风毛菊17.29倍;此外,由图3所示还可知,区内4种盐生植物其单根抗剪力随根径增加而增大,且单根抗剪力与根径符合指数函数关系。另外,由图4所示可知,4种盐生植物其单根抗剪强度随根径增大而减小,且单根抗剪强度与根径之间符合幂函数关系;其中以芦苇为例,芦苇根径在0.30~0.45 mm较0.15~0.30 mm时单根抗剪力随

根径增大的速率更大,同时其单根抗剪强度随着根径的增大其减小速率更缓慢,因此芦苇根径在0.30 mm时单根抗剪力性能相对较好。该结果与贺振昭等^[27]对青海湖地区赖草(*Leymus secalinus* Tzvel)、紫花针茅(*Stipa purpurea* Griseb)等7种植物根系单根剪切试验结果,以及与李成凯等^[28]对西宁盆地披碱草(*Elymus dahuricus*)、细茎冰草(*Agropyron trachycaulum*)、赖草(*Leymus secalinus*)等4种植物根系单根剪切试验结果相一致。

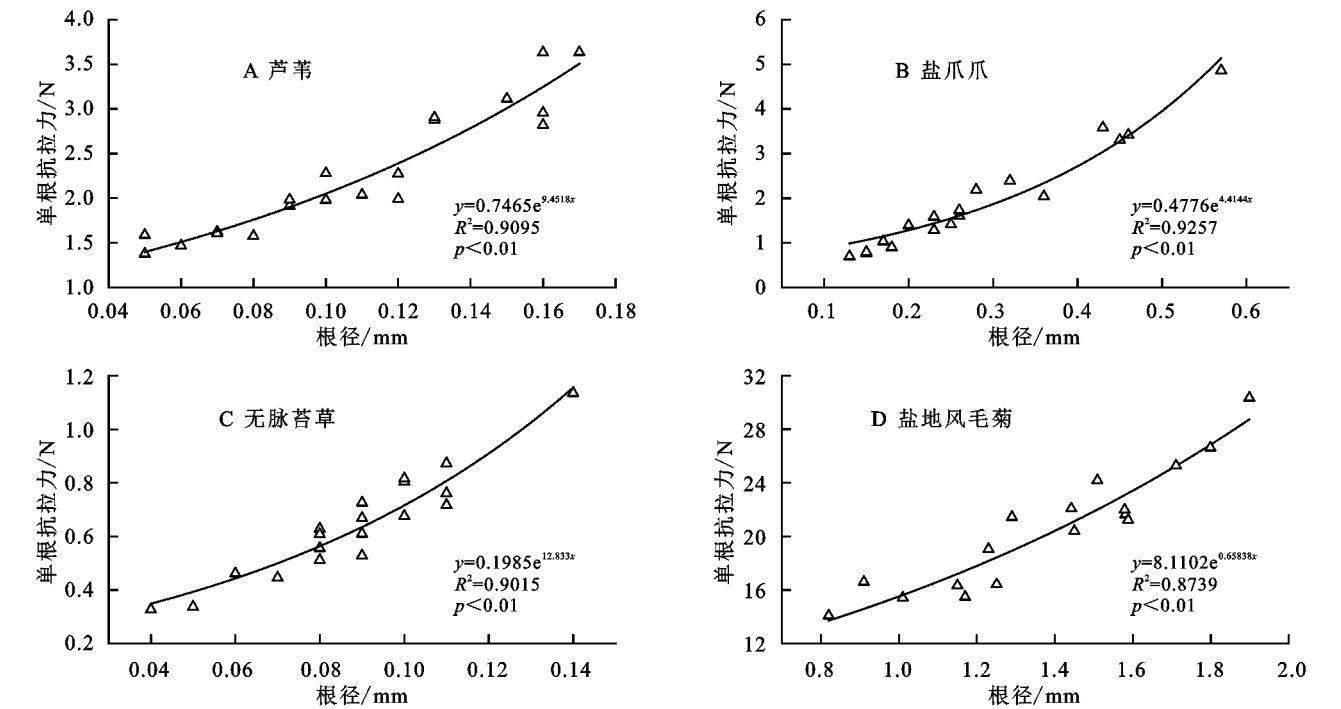


图1 研究区4种盐生植物单根抗拉力与根径之间的关系

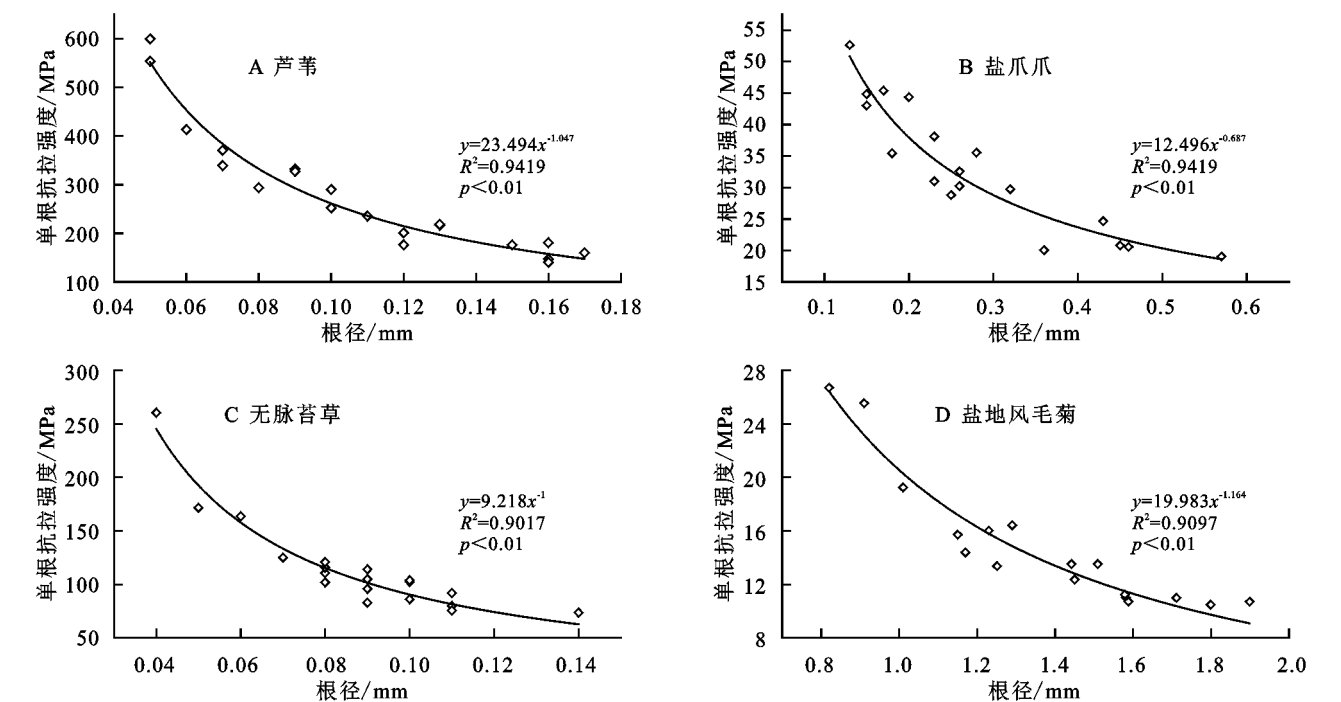
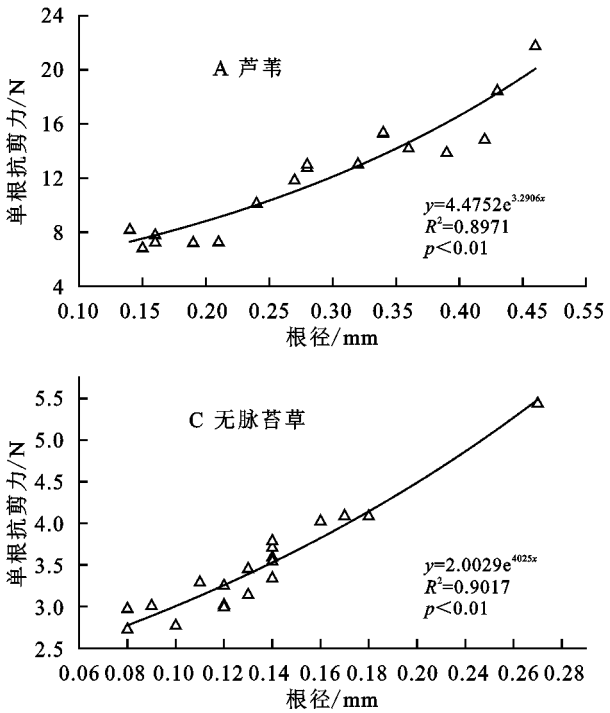


图2 研究区4种盐生植物单根抗拉强度与根径之间的关系

表 2 试验区 4 种盐生植物单根剪切试验结果

植物名称	平均根径/mm	平均单根抗剪力/N	平均单根抗剪强度/MPa	样本数量/根
芦苇	0.286±0.100 ^c	12.035±4.278 ^b	110.836±53.289 ^b	18
盐爪爪	0.475±0.146 ^b	9.073±3.761 ^c	26.657±7.358 ^c	15
无脉苔草	0.132±0.041 ^d	3.484±0.618 ^d	157.428±88.136 ^a	19
盐地风毛菊	1.360±0.223 ^a	25.243±3.310 ^a	9.105±2.212 ^c	19

注：同列不同字母表示，不同盐生植物间有显著性差异（ $p<0.05$ ）。



3.3 根—土复合体试样中的根系特性

本项研究中,盐地风毛菊、芦苇、盐爪爪 3 种盐生植物根系多呈近似垂直分布,而无脉苔草根系则相对较细,且多在土体中呈水平或倾斜分布。区内 4 种盐生植物根—土复合体试样中含根数、含根量、根系质量计算结果见表 3。待室内完成根—土复合体直剪试验后即对剪切后试样进行冲洗,从根—土复合体试样中清洗出分布于其中的根系,然后将洗净的根系晾干至根系表面未见水滴时,便对根径、根系鲜重、根数、含根量等指标进行统计^[17]。

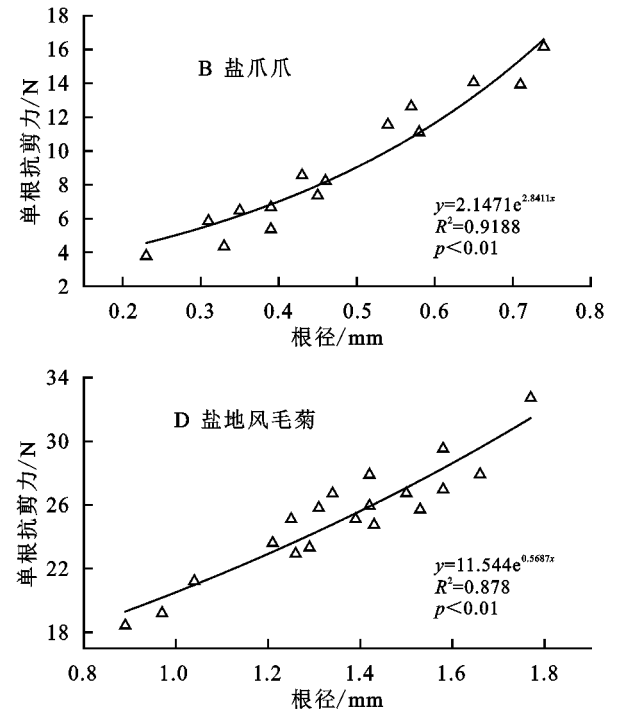


图 3 研究区 4 种盐生植物单根抗剪力与根径之间的关系

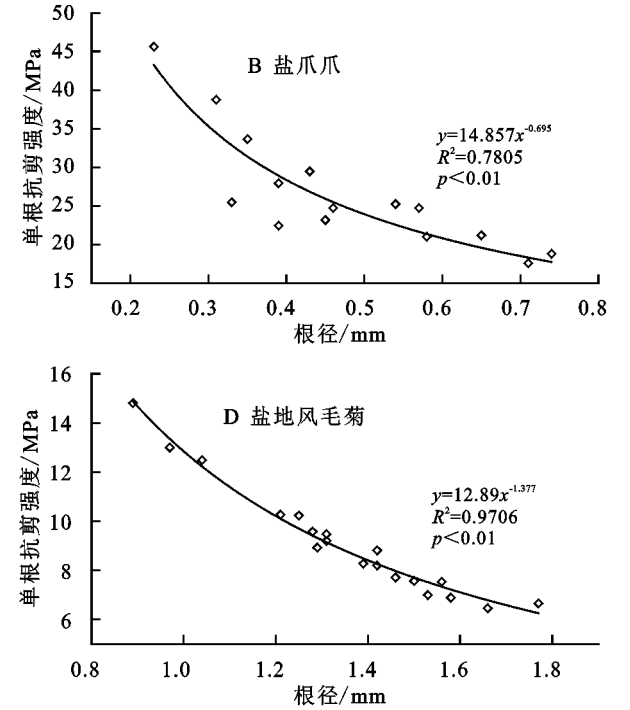
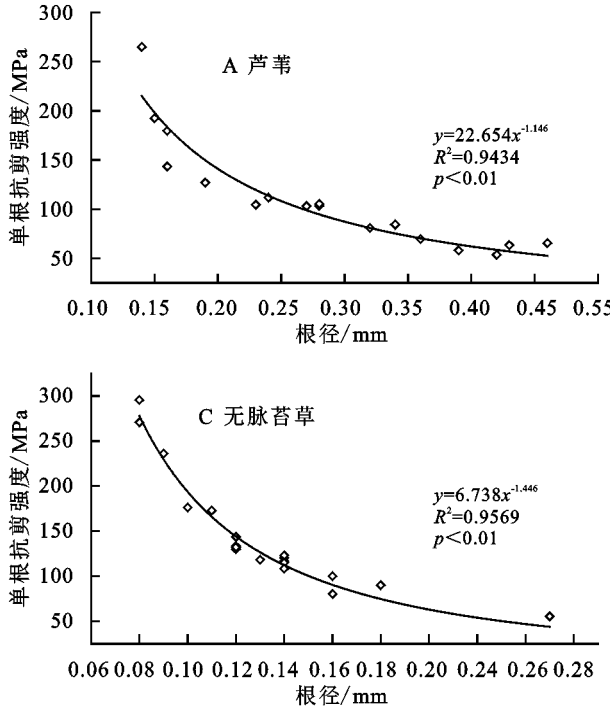


图 4 研究区 4 种盐生植物单根抗剪强度与根径之间的关系

表 3 试验区 4 种盐生植物复合体中鲜根质量、含根量及含根数计算结果

复合体类型	鲜根质量/mg		含根量/(g·cm ⁻³)		含根数/根	
	0—10 cm	10—20 cm	0—10 cm	10—20 cm	0—10 cm	10—20 cm
芦苇复合体	0.997	0.622	0.016	0.010	9	9
盐爪爪复合体	0.442	0.152	0.007	0.003	6	4
无脉苔草复合体	3.791	0.659	0.063	0.011	16	12
盐地风毛菊复合体	0.317	0.032	0.005	0.001	5	4

注:(1)表中环刀半径 d 为 30.9 mm,高 h 为 20 mm;(2)环刀内鲜根质量为一组剪切试样种每个环刀内的平均值;(3)含根量指的是单位体积内根—土复合体所含植物根系的质量,即为环刀内鲜根质量与环刀体积之比;(4)含根量即根—土复合体试样内植物根系的新鲜质量与根—土复合体的体积之比值^[29]。

由表 3 所示可知,区内 4 种盐生植物根—土复合体在地表以下 0—10 cm 深度处(即上层),土体含根量均大于 10—20 cm 处(即下层),4 种盐生植物芦苇、盐爪爪、无脉苔草、盐地风毛菊其根—土复合体其上层含根量分别为 0.016 g/cm³,0.007 g/cm³,0.063 g/cm³,0.005 g/cm³,下层含根量分别为 0.010 g/cm³,0.003 g/cm³,0.011 g/cm³,0.001 g/cm³;进一步研究表明,含根量由上层至下层其降低幅度分别为 38%,57%,83%,80%,其中,无脉苔草试样由上层至下层含根量降低幅度是相对最大的,即分别为芦苇复合体试样降低幅度的 2.20 倍,盐爪爪试样降低幅度的 1.44 倍,盐地风毛菊试样降低幅度的 1.03 倍。

3.4 不同取样深度根—土复合体抗剪强度特征

区内 4 种盐生植物根—土复合体原状试样和素土试样抗剪强度与垂直压力关系见图 5。由该图可知,4 种盐生植物根—土复合体及素土抗剪强度与垂直压力间呈线性相关关系,表现在随着垂直压力的增加,土体抗剪强度亦随之增强,这与摩尔—库伦准则相一致。此外,由该图还可知,区内 4 种植物根—土复合体抗剪强度与垂直压力关系曲线位于素土抗剪强度与垂直压力关系曲线上方,说明在四级垂直荷载作用下,素土抗剪强度均显著低于根—土复合体,其中芦苇、盐爪爪、无脉苔草、盐地风毛菊在地表以下 0—10 cm 深度处,其根—土复合体平均抗剪强度分别为 75.675 kPa,128.575 kPa,95.450 kPa,78.150 kPa,地表 10—20 cm 深度处 4 种植物复合体平均抗剪强度分别为 76.450 kPa,91.200 kPa,96.700 kPa,85.375 kPa。相应地,与 4 种盐生植物所对应的素土试样平均抗剪强度为 69.650 kPa,86.725 kPa,84.875 kPa,74.850 kPa,与复合体试样相比较,素土抗剪强度降低幅度分别为 8.9%,5.9%,12.2%,12.3%。

在地表以下 0—10 cm,10—20 cm 深度处,4 种盐生植物根—土复合体平均抗剪强度均显著大于所对应素土,其主要原因是在 0—10 cm 深度处复合体含根量大于 10—20 cm 深度处,同时,反映出区内 4 种盐生植物根系对土体具有显著加筋作用,进而使得土体抗剪强度得

到显著性提高^[30]。本项研究,通过对比区内 4 种盐生植物根—土复合体与素土试样的抗剪强度可知,盐爪爪根—土复合体、无脉苔草根—土复合体抗剪切能力相对较强,表现在盐爪爪、无脉苔草其根—土复合体较芦苇、盐地风毛菊其抗剪强度平均增加幅度分别为 44.4%,34.3%,25.3%,17.5%。

区内 4 种盐生植物在地表以下 0—10 cm,10—20 cm 深度处,其根—土复合体黏聚力 c 值与相应素土黏聚力 c 值对比结果见图 6。芦苇、盐爪爪、无脉苔草、盐地风毛菊 4 种植物地表以下 0—10 cm,10—20 cm 深度处,其根—土复合体黏聚力值 c 分别为 4.87~12.27 kPa,6.75~16.91 kPa,16.34~18.19 kPa,11.96~16.96 kPa,4 种植物根—土复合体试样对应素土黏聚力 c 值分别为 3.92 kPa,6.12 kPa,11.32 kPa,9.76 kPa;以上 4 种盐生植物与素土相比,黏聚力 c 值增幅分别为 24.2%~213.0%,9.9%~176.3%,44.3%~60.7%,22.5%~71.0%。4 种盐生植物根—土复合体试样黏聚力 c 值随着取样深度增加而逐渐降低,尤其是地表以下 0—10 cm 处根—土复合体与素土之间的黏聚力 c 值存在较大的差值,即分别为 8.35 kPa,10.79 kPa,6.87 kPa,6.93 kPa,黏聚力 c 值的减小幅度分别为 60.3%,60.0%,10.1%,29.5%。在地表以下 0—10 cm 深度处 4 种植物根—土复合体黏聚力 c 值相对较大,反映出区内植物根系在表层以下 0—10 cm 深度其所具有的浅层加筋作用相对更为显著。

3.5 相同取样深度根—土复合体抗剪强度特征

研究区 4 种盐生植物根—土复合体试样在相同位置处(地表以下 0—10 cm,10—20 cm 深度处)黏聚力 c 值对比结果见图 7,由该图所示可知,位于地表以下 0—10 cm 深度处,4 种植物根—土复合体黏聚力 c 值为 12.27~18.19 kPa,与素土相比复合体黏聚力 c 值增幅为 60.7%~213%,平均增幅为 130.2%。黏聚力 c 值由大至小依次为无脉苔草、盐爪爪、盐地风毛菊、芦苇。相应地,在地表以下 10—20 cm 深度处,4 种植物根—土复合体黏聚力 c 值为 4.87~

16.34 kPa,与素土相比黏聚力 c 值增幅为9.9%~44.3%,平均增幅为 25.2%,黏聚力 c 值由大至小依次为无脉苔草、盐地风毛菊、盐爪爪、芦苇。由以上分析结果可知,区内地表以下 10—20 cm 深度处 4 种植物根—土复合体黏聚力 c 值明显小于 0—10 cm 处,且 4 种植物根—土复合体在地表以下 10—20 cm 深度处黏

聚力 c 值,略高于素土的黏聚力 c 值,这表明区内 4 种植物根—土复合体愈接近表层位置处,其黏聚力 c 值表现出愈大的规律,这主要归因于植物根系在表层位置处含根量相对较多,即表现在地表以下 10—20 cm 深度处,4 种盐生植物含根量较 0—10 cm 处降低 38%,57%,83%,80%。

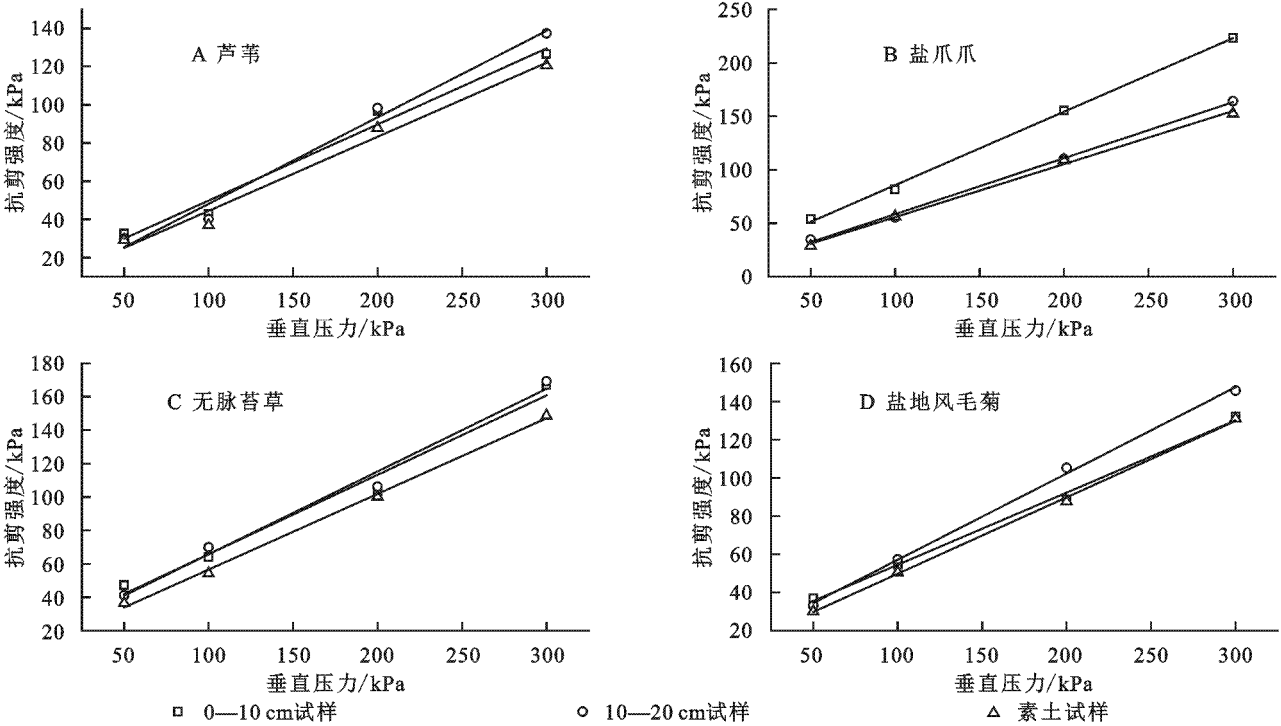


图 5 研究区 4 种盐生植物根—土复合体抗剪强度与垂直压力关系

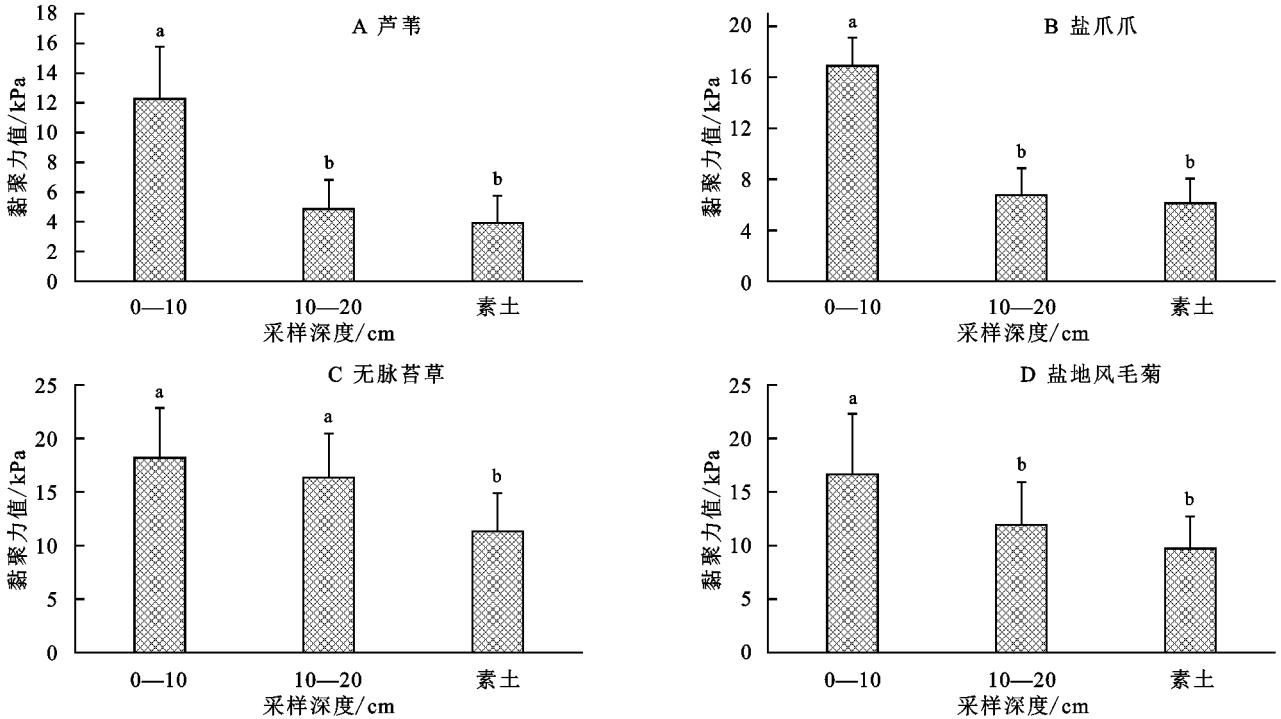


图 6 研究区 2 种不同深度 4 种盐生植物根—土复合体和素土黏聚力与深度之间的变化关系

区内 4 种植物根—土复合体抗剪强度指标与取样深度之间变化关系见表 4。由该表可知,随着 4 种

植物根—土复合体取样深度增加,4 种植物根—土复合体黏聚力 c 值呈逐渐降低的变化趋势,例如芦苇

根—土复合体随着取样深度由地表以下 0—10 cm 增加至 10—20 cm 深度处时,其黏聚力 c 值则由 12.27 kPa 降低为 4.87 kPa,降低幅度为 60.3%;相类似地,对于其他 3 种植物的黏聚力 c 值亦呈现出上述相类似的变化规律。另外,在地表以下 0—10 cm 深度处,无脉苔草和盐爪爪根—土复合体黏聚力 c 值显著大于盐地风毛菊和芦苇($p<0.05$),盐地风毛菊和芦苇

黏聚力 c 值相对较小,即 4 种草本无脉苔草、盐爪爪、盐地风毛菊和芦苇其黏聚力 c 值分别为 18.19 kPa, 16.91 kPa, 16.69 kPa, 12.27 kPa;相应地,在地表以下 10—20 cm 深度处,无脉苔草的平均黏聚力 c 值显著大于盐地风毛菊、盐爪爪、芦苇($p<0.05$),盐地风毛菊的平均黏聚力 c 值显著大于盐爪爪和芦苇($p<0.05$),盐爪爪与芦苇未表现出显著性差异。

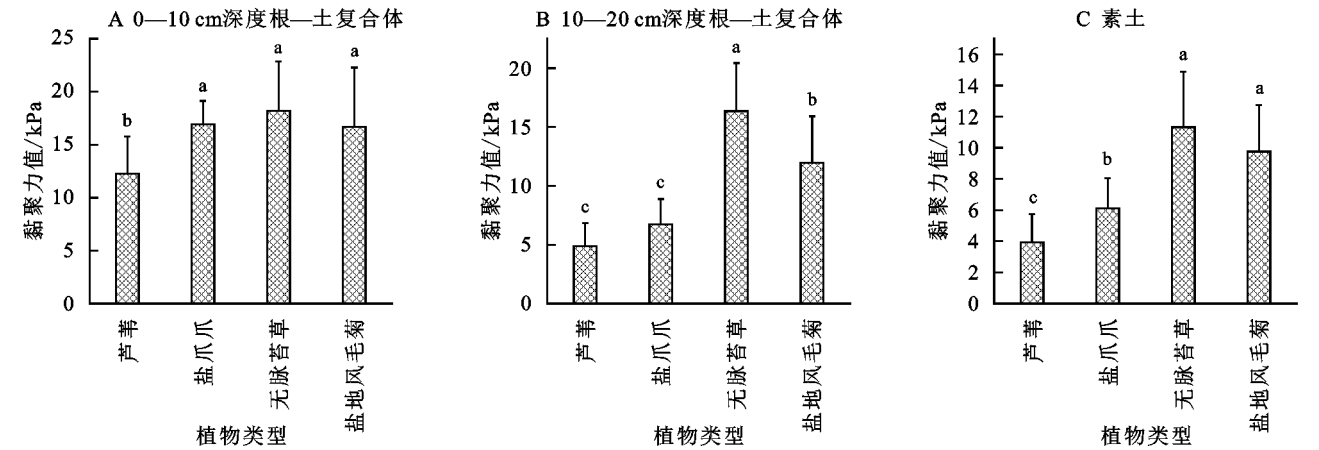


图 7 研究区 4 种盐生植物相同深度处 4 种植物根—土复合体与素土试样黏聚力对比

试验区地表以下 10~20 cm 深度处,4 种盐生植物其平均黏聚力 c 值分别为 16.34 kPa, 11.96 kPa, 6.75 kPa, 4.87 kPa。由区内 4 种盐生植物在地表以下 2 种深度位置处的复合体黏聚力值及变化规律可知,区内增强土体抗剪强度作用相对较为显著的

植物种分别为无脉苔草、盐地风毛菊,其黏聚力平均值分别是 17.25 kPa, 14.46 kPa;另外,区内 4 种盐生植物根—土复合体内摩擦角与采样深度之间则未表现出显著性关系,二者间的关系尚有待于进一步深入研究。

表 4 试验区 4 种植物根—土复合体的抗剪强度指标试验结果

类型	0—10 cm		10—20 cm		素土试样	
	c /kPa	φ /($^{\circ}$)	c /kPa	φ /($^{\circ}$)	c /kPa	φ /($^{\circ}$)
芦苇	12.27±3.50 ^b	21.03±9.81	4.87±1.95 ^c	24.23±8.77	3.92±1.83 ^c	26.47±11.33
盐爪爪	16.91±2.21 ^a	34.49±12.6	6.75±2.13 ^c	26.36±7.31	6.12±1.94 ^b	26.96±10.12
无脉苔草	18.19±4.65 ^a	21.11±7.21	16.34±4.10 ^a	6.32±9.51	11.32±3.57 ^a	26.18±9.89
盐地风毛菊	16.69±5.58 ^a	20.72±9.12	11.96±3.95 ^b	24.32±11.20	9.76±2.99 ^a	25.68±13.51

注:同列不同字母表示,相同取样深度,不同盐生植物间有显著性差异($p<0.05$)。

综合表 1,表 2 和图 6 所示可知,区内 4 种盐生植物其平均单根抗拉力与平均抗剪力的变化规律基本相一致,但 4 种盐生植物根—土复合体黏聚力值的变化未体现出一致性的规律。其次,通过综合分析区内 4 种盐生植物其单根抗拉、抗剪强度,以及复合体抗剪强度指标黏聚力 c 值的大小可知,在 4 种盐生植物中,无脉苔草相对具有更为显著的固土护坡效果,其次为芦苇、盐爪爪,而盐地风毛菊相对不及前 3 种。

4 结论

(1) 试验区 4 种盐生植物平均单根抗拉、抗剪力由大至小顺序一致,依次为盐地风毛菊、芦苇、盐爪爪、无脉苔草,其单根抗拉、抗剪力变化范围分别为 20.511~0.642 N, 25.243~3.484 N, 且单根抗拉、抗剪力

均随着根径增加而增大,且均与根径符合指数函数关系;4 种盐生植物平均单根抗拉强度由大至小依次为芦苇、无脉苔草、盐爪爪、盐地风毛菊,其变化范围为 281.208~14.824 MPa;单根抗剪强度由大至小依次为无脉苔草、芦苇、盐爪爪、盐地风毛菊,其变化范围为 157.428~26.657 MPa,且单根抗拉、抗剪强度均随根径增大而减小,均与根径之间符合幂函数关系。

(2) 区内芦苇、盐爪爪、无脉苔草、盐地风毛菊 4 种盐生植物根—土复合体试样含根量变化,表现在由地表以下 0—10 cm 至 10—20 cm 深度处逐渐降低,其降低幅度为 37.5%~80%;4 种盐生植物根—土复合体的黏聚力 c 值与不含根系素土相比,4 种植物根系对土体黏聚力平均增幅为 46.7%~118.6%;根—土复合体试样黏聚力 c 值随着取样深度的增加而减小,复合体含根量也表

现出了相同的变化规律,因此,根—土复合体试样含根量对黏聚力 c 值的影响较为显著。

(3) 区内4种盐生植物根—土复合体在地表以下0—10 cm深度处,黏聚力 c 值由大至小依次为无脉苔草、盐爪爪、盐地风毛菊、芦苇,其黏聚力 c 值变化范围为18.19~12.27 kPa;在地表以下10—20 cm深度处,黏聚力 c 值由大至小依次为无脉苔草、盐地风毛菊、盐爪爪、芦苇,其黏聚力 c 值变化范围为16.34~4.87 kPa;4种植物根—土复合体试样黏聚力 c 值,表现出在地表以下0—10 cm深度处相对大于10—20 cm深度,说明区内4种盐生植物根系具有显著增强浅层土体抗剪强度的作用。

参考文献:

- [1] 赵丹,余冬梅,胡夏嵩,等.盐生植物根系增强土体抗剪强度效应试验研究[J].水土保持研究,2017,24(4):259-265,273.
- [2] Matti C, Bischetti G B, Gentile F. Biotechnical characteristics of root systems of typical Mediterranean species [J]. Plant and Soil, 2005,278(1):23-32.
- [3] De Baets S, Poesen J, Reubens B, et al. Root tensile strength and root distribution of typical Mediterranean plant species and their contribution to soil shear strength [J]. Plant and Soil, 2008,305(1/2):207-226.
- [4] 刘昌义,窦增宁,胡夏嵩,等.黄河源区高寒草地植物组合对根—土复合体抗剪强度的影响[J].草地学报,2019,27(1):43-52.
- [5] Ding J, Dang F, Wang S. A Simple Model for Estimating Shear Strength of Root-Soil Composite[R]// Proceedings of China-Europe Conference on Geotechnical Engineering. Springer, Cham, 2018.
- [6] Xu W, Wang X, Zhang Y, et al. A comparison among root soil-conservation effects for nine herbs at the cold region highway in north-eastern China[J]. Eurasian Soil Science, 2014,47(12):1274-1282.
- [7] Capilleri P P, Cuomo M, Motta E, et al. Experimental Investigation of Root Tensile Strength for Slope Stabilization[J]. Indian Geotechnical Journal, 2019, 49(6): 687-697.
- [8] 曹波,曹志东,王黎明,等.植物根系固土作用研究进展[J].水土保持应用技术,2009(1):26-28.
- [9] 朱显谟,田积莹.强化黄土高原土壤渗透性及抗冲性的研究[J].水土保持学报,1993,7(3):1-10.
- [10] 王治国.林业生态工程学:林草植被建设的理论与实践[M].北京:中国林业出版社,2000.
- [11] 马顺清.柴达木盆地及其周边矿产资源开发利用的建议与设想[J].青海国土经略,2005(2):6-8.
- [12] Stokes A, Atger C, Bengough A G, et al. Desirable plant root traits for protecting natural and engineered slopes against landslides[J]. Plant and Soil, 2009, 324(1/2): 1-30.
- [13] Capilleri P P, Motta E, Raciti E. Experimental study on native plant root tensile strength for slope stabilization[J]. Procedia Engineering, 2016,158:116-121.
- [14] 武艺儒,刘静,张欣,等.3种灌木直根抗剪特性及其与化学组分的关系[J].干旱区资源与环境,2019,33(4): 129-133.
- [15] Comino E, Druetta A. The effect of *Poaceae* roots on the shear strength of soils in the Italian alpine environment[J]. Soil and Tillage Research, 2010,106(2):194-201.
- [16] 祁兆鑫,余冬梅,刘亚斌,等.寒旱环境盐生植物根—土复合体抗剪强度影响因素试验研究[J].工程地质学报,2017,25(6):1438-1448.
- [17] 栗岳洲,付江涛,余冬梅,等.寒旱环境盐生植物根系固土护坡力学效应及其较优含根量探讨[J].岩石力学与工程学报,2015,34(7):1370-1383.
- [18] 郑如清.柯柯盐湖资源综合开发探析[J].柴达木开发研究,2012(3):33-34.
- [19] 朱俊才.茶卡及柯柯盐湖地质条件与建设盐田的可能性[J].柴达木开发研究,1991(4):15-17.
- [20] 柴丽红,崔晓龙,彭谦,等.青海两盐湖细菌多样性研究[J].微生物学报,2004,44(3):271-275.
- [21] 周林虎,刘昌义,胡夏嵩,等.寒旱区4种草本根系力学特性试验研究[J].人民黄河,2019,41(5):90-95.
- [22] 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.
- [23] 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[J].岩石力学与工程学报,2008,27(S2):3445-3452.
- [24] 虎啸天,余冬梅,付江涛,等.柴达木盆地盐湖区盐生植物根—土复合体抗剪强度试验研究[J].冰川冻土,2015,37(6):1579-1590.
- [25] 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.
- [26] 李可,朱海丽,宋路,等.青藏高原两种典型植物根系抗拉特性与其微观结构的关系[J].水土保持研究,2018,25(2):240-249.
- [27] 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):44-48,69.
- [28] 李成凯.青藏高原黄土区4种草本植物单根抗拉特性研究[J].中国水土保持,2008(5):33-35,60.
- [29] 方便,罗海波,魏华炜.三叶草根—土复合体抗剪切强度试验研究[J].贵州大学学报:自然科学版,2012,29(2):29-32.
- [30] 余芹芹,乔娜,卢海静,等.植物根系对土体加筋效应研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(S1):3216-3223.