

贺兰山 3 种乔木单根及根土复合体力学特性

田佳, 卞莹莹, 于江珊, 王晓燕, 许玲玲

(宁夏大学农学院, 银川 750021)

摘要: 为研究和比较贺兰山山杨、青海云杉、油松单根和根土复合体的力学特性, 通过单根拉伸、三轴压缩、饱和和渗透试验测定了 3 种乔木单根和根土复合体的力学参数及土水特征曲线。结果表明: 3 种乔木单根力学特性存在显著差异, 且直径对单根的力学特性有显著影响。单根最大拉力与直径成幂函数相关, 随直径增大而增大; 单根抗拉强度、杨氏模量与直径成对数函数相关, 随直径增大而减小。山杨单根平均最大拉力(0.38 kN) > 青海云杉(0.25 kN) > 油松(0.17 kN); 山杨单根平均抗拉强度(33.39 MPa) > 青海云杉(27.79 MPa) > 油松(18.45 MPa); 山杨单根平均杨氏模量(0.17 GPa) > 青海云杉(0.12 GPa) > 油松(0.11 GPa)。3 种乔木根土复合体的黏聚力、弹性模量存在显著差异, 但摩擦角没有显著差异(平均值 30.48°)。山杨根土复合体的黏聚力(10.65 kPa) > 青海云杉(8.97 kPa) > 油松(7.13 kPa); 山杨根土复合体的弹性模量(2.17 MPa) < 青海云杉(2.52 MPa) < 油松(4.21 MPa)。3 种乔木根土复合体的土水特征曲线、渗透函数曲线都存在极显著差异, 山杨根土复合体的渗透能力 > 油松 > 青海云杉。研究结果对于评价山杨、青海云杉、油松稳定边坡能力和建立贺兰山边坡稳定性分析数值模型都具有重要参考价值。

关键词: 根土复合体; 单根; 根的抗拉强度; 根系固土; 贺兰山

中图分类号: S718.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2018)06-0123-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.06.019

Mechanical Properties Comparison of Single Root and Root-soil Composite of Three Arbor Species in Helan Mountain

TIAN Jia, BIAN Yingying, YU Jiangshan, WANG Xiaoyan, XU Lingling

(School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021)

Abstract: In order to study and compare the mechanical properties of the single root and root-soil composite of *Populus davidiana*, *Picea crassifolia*, and *Pinus tabulaeformis*, the single root tensile test, the triaxial compression test, and the saturated permeability test were used to get the mechanical properties and the soil-water characteristic curves of the three arbors. The results showed that there were significant differences in the mechanical properties of the single root of the three arbors, and the diameter had a significant effect on the mechanical properties of the single root. The maximum tensile force of the single root was correlated to the power function of diameter and increased with the increasing of diameter, while the tensile strength and the Young's modulus of single root were correlated with the logarithmic function of diameter and decreased with the increasing of diameter. The average of maximum tensile force of the single root of *P. davidiana* was 0.38 kN > *P. crassifolia* (0.25 kN) > *P. tabulaeformis* (0.17 kN), the average of tensile strength of *P. davidiana* (33.39 MPa) > *P. crassifolia* (27.79 MPa) > *P. tabulaeformis* (18.45 MPa), the average of Young's modulus of *P. davidiana* (0.17 GPa) > *P. crassifolia* (0.12 GPa) > *P. tabulaeformis* (0.11 GPa). There were significant differences in the cohesion and the elastic modulus of the three arbors root-soil composite, but there was no significant difference in the friction angle (the mean value was 30.48°). The cohesion of root-soil composite of *P. davidiana* (10.65 kPa) > *P. crassifolia* (8.97 kPa) > *P. tabulaeformis* (7.13 kPa), the elastic modulus of *P. davidiana* (2.17 MPa) < *P. crassifolia* (2.52 MPa) < *P. tabulaeformis*

(4.21 MPa). The soil-water characteristic curves (SWCC) and the permeability function curves of the root-soil composite of the three arbors were significantly different. The permeability of root-soil composite of *P. davidiana* was higher than that of *P. tabulaeformis* and *P. crassifolia*. The result is an important reference for evaluating the ability of the three arbors to stabilize the slope and establishing the numerical model of the slope stability analysis for Helan Mountain.

Keywords: root-soil composite; single root; root tensile strength; root reinforcement; Helan Mountain

贺兰山地处我国温带草原区与荒漠区的过渡地带,是我国西北干旱风沙地区典型的温带山地森林生态系统,是银川平原的生态屏障和水源涵养区,也是重要的风景名胜区。贺兰山地质条件复杂,自然环境条件差,属地质灾害多发区。近年来,几乎每年都有地质灾害发生,尤其是崩塌、滑坡和泥石流等突发性地质灾害,造成巨大的经济和文物损失,并不时发生人员伤亡事故,因此贺兰山已成为宁夏当前防灾减灾工作的重点地区^[1]。贺兰山的森林植被对水源涵养、水土保持起着十分重要的作用,其中山杨(*Populus davidiana*)、青海云杉(*Picea crassifolia*)和油松(*Pinus tabuliiformis*)是贺兰山最主要的3种水土保持乔木树种,在调节气候、保持水土尤其是稳定边坡方面发挥着非常重要的作用^[2]。

已有研究^[3-4]表明,单根及根土复合体的力学和渗透特性是影响植物稳定边坡的主要因素。因此,国内外学者通过室内拉伸试验获得单根的最大拉力、抗拉强度、杨氏模量、极限延伸率等指标来评估不同树种的单根力学特性^[5];利用直接剪切试验或三轴压缩试验获得根土复合体的黏聚力和摩擦角等强度指标来评价根系对土壤的加固作用^[6-7];采用测定土水特征曲线和渗透函数曲线来比较根土复合体的渗透特性^[8-9]。虽然目前众多学者对各类水土保持树种的根系固土能力开展了大量的研究,但是由于受植物自身生理与遗传特性的影响以及生境的差异,即使同一物种的单根及根土复合体的力学特性在不同地区也有所区别,从而造成植物根系的固土护坡能力存在区域差异^[10]。通过查阅相关文献发现国内外对贺兰山地区山杨、青海云杉和油松3种重要的水土保持树种的单根和根土复合体的力学特性研究未见报道。因此,尚不能对3种乔木的稳定边坡能力是不是与人们预想和期待的一致等问题给出科学的解释,而固土护坡树种的选择正确与否不仅关系到贺兰山地区水土流失现状的改善,也直接关系到该地区的生态安全。

在本研究中将借鉴国内外学者对森林植被根系和土壤力学特性的研究方法,以山杨、青海云杉和油松3种贺兰山最重要的固土、护坡水土保持乔木作为

研究对象,通过单根拉伸、三轴压缩,饱和渗透等试验,研究和比较3种乔木单根和根土复合体的力学及渗透特性。研究结果对于评价山杨、青海云杉、油松稳定边坡能力和建立贺兰山边坡稳定性分析数值模型都具有重要参考价值。

1 材料与方法

1.1 研究地点

贺兰山位于宁夏与内蒙古交界处,属典型大陆性山地气候。年均气温 $-0.9\text{ }^{\circ}\text{C}$,年均降水量 $287.2\sim 429.8\text{ mm}$,且主要集中在7—9月。主要森林植被包括:山杨(*Populus davidiana*)、青海云杉(*Picea crassifolia*)、油松(*Pinus tabuliiformis*)、白桦(*Betula platyphyl-la*)、灰榆(*Ulmus glaucescens*)和小叶金露梅(*Potentilla parvifolia*)等^[1]。土壤类型从上而下依次为山地草甸土、山地灰褐土、山地灰钙土、粗骨土和荒漠土^[2]。本研究地点位于宁夏贺兰山苏峪口国家森林公园兔儿坑护林点($38^{\circ}44'07.43''\text{N}$, $105^{\circ}54'39.10''\text{E}$,海拔 $2\ 313\text{ m}$)和青松林护林点($38^{\circ}44'32.34''\text{N}$, $105^{\circ}54'44.69''\text{E}$,海拔 $2\ 165\text{ m}$)。

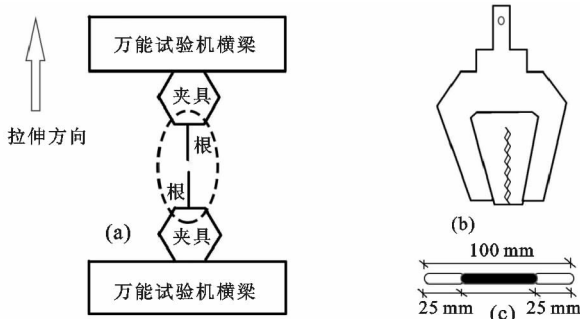
1.2 材料获取

2017年5月在贺兰山兔儿坑和青松林护林点纯林,分别随机抽取10株山杨、青海云杉和油松,测量胸径、树高、冠幅、树龄,选取与平均值最为接近的3株作为标准木。以树干中心为圆心,半径 1.0 m 的四周内挖掘土壤剖面并用环刀(120 cm^3)对土壤进行分层取样,分5层,0—20,20—40,40—60,60—80,80—100 cm,每层4个重复(东南西北各1个)。为了测定土壤的粒径级配,采用JH-100汽油镐土钻(长度为 100 cm)分3次钻得 100 cm 长土柱,将土柱装入塑料袋内带回实验室风干,过筛测定粒径级配。土壤采样的过程中同时获取不同径阶的根系,并将根系沿结点处剪断,用保鲜膜缠绕以防止根系水分的散失,到实验室后尽快完成拉伸试验以保持根的鲜活性。

1.3 单根拉伸试验

1.3.1 拉伸试样的制备 2017年5月23日将野外采回的根系试样,选取顺直、根径均一、完整无损的,

按照每 100 mm 剪为 1 段,在拉伸试验中,由于夹具钳口周边的应力集中作用,很多破坏发生在夹具钳口周围,根皮脱落现象也很常见。为了避免夹具夹断试样,在根的两端缠绕医用橡皮膏(宽 2.5 cm)3~5 圈,可以有效防止夹具周边的应力集中作用;另外,对于直径较大的根样,经常出现脱皮导致试验失败,为了防止脱皮,对试验中直径大于 3 mm 的根样,两端 25 mm 长的根皮先进行剥离,在光杆上涂抹 3 M 高强度快干胶,然后再缠绕医药橡皮膏,制作好的试样标距为 50 mm(图 1c)。



注:a 为当断裂处在根中间 1/3 段时认为是由拉伸造成的破坏;
b 为试验用楔形夹具;c 为在根试样两端缠绕橡皮膏防止在
夹具处断裂。

图 1 单根拉伸试验示意

1.3.2 拉伸方法 单根拉伸试验方法参照国家标准《金属材料拉伸试验第 1 部分:室温试验方法 GB/T 228.1—2010》执行。山杨、青海云杉、油松的单根力学性质测定包括:最大拉力 F_m 、抗拉强度 T_r 和杨氏模量 E_r 。采用的仪器为微机控制电子万能试验机(深圳“三思纵横”WDW-10E),机器最大拉力为 10 kN,精密度为 0.01%。拉伸前用 0.01 mm 精度的电子游标卡尺测量试样上中下 3 个位置的直径,取平均

直径输入拉伸系统软件,拉伸速率设置为 2.0 mm/min。为了较好地测定试样的弹性段,拉伸预紧力设置为 0.01 kN,只有当断裂处在根中间 1/3 段时才认为是由拉伸而造成的破坏(图 1a),夹具采用平钳口(0~15 mm)(图 1b)。设备自动记录拉伸过程的应力应变曲线并计算最大拉力、抗拉强度和杨氏模量。

1.4 根土复合体的三轴压缩试验与土水特征曲线的获取

1.4.1 三轴压缩试验 山杨、青海云杉、油松根土复合体的黏聚力 c 、摩擦角 φ 、弹性模量 E 由室内三轴压缩试验获得(UU 试验),试验时间为 2017 年 5 月 28 日。仪器采用南京土壤仪器厂生产的 TSZ10-1.0 型应变控制式三轴仪。之所以采用不固结不排水三轴试验(UU 试验)是考虑到土壤试样是原状土,在天然条件下已经固结;另外,滑坡灾害往往是瞬间发生,土壤来不及排水^[11-12],剪切速度设定为 0.8 mm/min(快剪)。每组试验设 4 个围压(12.5, 25, 50, 100 kPa),每个围压下 3 次重复,取均值作为该围压下的抗剪强度。试验中按照土壤自重压力公式推求试验所用的围压,作者认为这样更符合野外的实际情况。具体计算:土壤的容重(表 1,青海云杉根土复合体) $12.33 \text{ kN/m}^3 \times 1 \text{ m}$ (主要含根层) = 12.33 kPa,试验中取 12.5 kPa 作为第 1 级围压; $12.33 \text{ kN/m}^3 \times 2 \text{ m}$ (土层总厚度) = 24.66 kPa,试验中取 25 kPa 作为第 2 级围压,参照三轴压缩试验的要求选取其余的两级围压为 50, 100 kPa。三轴压缩试和其他配套试验的具体步骤参照《土工试验方法标准 GB/T 50123—1999》^[13] 执行,试验结果见表 1。

表 1 土的物理性质

土壤类型	干容重 γ_d / ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	密度 ρ / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	干密度 ρ_d / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	质量含水率 w / %	饱和度 S_r	孔隙比 e	饱和含水率 w_{sat} / %	饱和渗透系数 k_{sat} / ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)	液限 w_L / %
山杨根土复合体	7.84	1145	800	43.13	0.49	2.31	87.17	26.87	86
青海云杉根土复合体	9.31	1233	950	29.79	0.44	1.79	67.55	10.99	60
油松根土复合体	8.09	1020	825	23.64	0.28	2.21	83.40	26.57	62

1.4.2 土水特征曲线的获取 山杨、青海云杉、油松根土复合体的土水特征曲线(SWCC)采用 GEOSTUDIO 软件中的土水特征曲线预测模型来估算^[14]。估算所需要的土壤参数包括:粒径级配中的 d_{10} 、 d_{60} (由表 2 得到)、饱和体积含水率(由表 1 经过换算得到)和液限(由表 1 得到)。2017 年 6 月对土壤的粒径级配组成采用筛分法获得(土筛孔径分别为 20, 10, 5, 2.0, 1.0, 0.5, 0.25, 0.1, 0.075 mm),将土样倒入标准筛中,盖严上盖,置于振筛机上振筛

15 min。由上而下顺序称得各级土筛上及底盘内土样的质量,重复 3 次求平均值后得出各粒径百分含量(表 2),仪器采用南京土壤仪器厂生产的 GSZ-1 型高频振筛机。土壤的饱和渗透系数由 TST-70 常水头土壤渗透仪获得(北京泰达骏业试验仪器有限公司);土壤的液限含水率由 LP-100D 数显土壤液塑限联合测定仪测定(上海路达试验仪器有限公司),各试验均参照《土工试验方法标准 GB/T 50123—1999》^[13] 执行。

表 2 土的粒径级配

土壤类型	小于该粒径的土质量百分数/%									$d_{10}/$ mm	$d_{60}/$ mm
	<20 mm	<10 mm	<5 mm	<2 mm	<1 mm	<0.5 mm	<0.25 mm	<0.1 mm	<0.075 mm		
山杨根土复合体	100	73.88	51.70	26.23	19.04	8.81	2.01	0.20	0.11	0.53	6.56
青海云杉根土复合体	100	92.78	79.19	45.22	36.51	19.77	6.97	0.54	0.25	0.30	2.93
油松根土复合体	100	100	95.34	73.46	62.57	42.10	20.89	2.77	0.91	0.15	0.90

注： d_{10} 、 d_{60} 指土的质量百分数为 10%、60%所对应的粒径(mm)。

2 结果与分析

2.1 单根力学特性

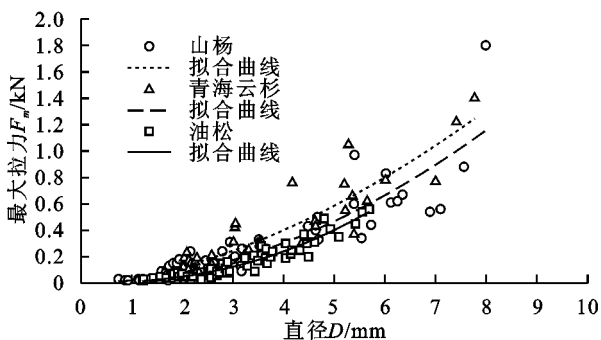
2.1.1 最大拉力(F_m) 经统计,试验成功的山杨根系样本共 38 个,成功率 30.67%,直径(D)范围为 1.64~7.77 mm,平均值为 3.59 mm,最大拉力范围为 0.05~1.40 kN,平均值为 0.38 kN。成功的青海云杉根系样本共 68 个,成功率 33.66%,直径范围为 0.74~7.99 mm,平均值为 3.10 mm,最大拉力范围为 0.02~1.80 kN,平均值为 0.25 kN。成功的油松根系样本共 56 个,成功率 37.83%,直径范围为 1.21~5.69 mm,平均值为 3.14 mm,最大拉力范围为 0.02~0.56 kN,平均值为 0.17 kN。对山杨、青海云杉、油松单根最大拉力与直径进行拟合,结果显示单根最大拉力随直径的增大而增大,呈幂函数趋势(图 2),拟合关系为:

$$\text{山杨: } F_m = 0.0376D^{1.7068} \quad (R^2 = 0.9179, \\ F = 192.5393, P < 0.0001)$$

$$\text{青海云杉: } F_m = 0.0211D^{1.9269} \quad (R^2 = 0.8939, \\ F = 262.3577, P < 0.0001)$$

$$\text{油松: } F_m = 0.0099D^{2.3021} \quad (R^2 = 0.9547, \\ F = 556.0889, P < 0.0001)$$

以直径为协变量进行协方差分析,结果表明,山杨、青海云杉、油松单根最大拉力有极显著差异($F = 23.347, P < 0.0001$);同时直径对单根最大拉力的影响也是极显著的($F = 793.138, P < 0.0001$)。平均最大拉力排序为:山杨(0.38 kN) > 青海云杉(0.25 kN) > 油松(0.17 kN),山杨比青海云杉高出 52.00%,比油松高出 123.53%;青海云杉比油松高出 47.06%。



注:山杨、青海云杉、油松单根的平均含水率分别为 50.99%、50.82%、50.76%。下同。

图 2 最大拉力与直径拟合曲线

2.1.2 抗拉强度(T_r) 利用万能试验机测定的山杨的单根抗拉强度范围为 13~68 MPa,平均值为 33.39 MPa;青海云杉的单根抗拉强度范围为 8~66 MPa,平均值为 27.79 MPa;油松的单根抗拉强度范围为 6~28 MPa,平均值为 18.45 MPa。对山杨、青海云杉、油松单根抗拉强度与直径进行拟合,结果显示单根抗拉强度随直径的增大而减小,呈对数函数趋势(图 3),拟合关系为:

$$\text{山杨: } T_r = -6.4726\ln(D) + 41.0032 \\ (R^2 = 0.0458, F = 1.7262, P < 0.1)$$

$$\text{青海云杉: } T_r = -5.9908\ln(D) + 33.6818 \\ (R^2 = 0.0596, F = 4.1799, P < 0.05)$$

$$\text{油松: } T_r = -2.2474\ln(D) + 19.4282 \\ (R^2 = 0.0325, F = 1.4464, P < 0.1)$$

以直径为协变量进行协方差分析,结果表明,山杨、青海云杉、油松单根抗拉强度呈极显著差异($F = 27.461, P < 0.0001$);同时直径对单根抗拉强度的影响呈显著差异($F = 4.274, P < 0.05$)。平均抗拉强度排序为:山杨(33.39 MPa) > 青海云杉(27.79 MPa) > 油松(18.45 MPa),山杨比青海云杉高出 20.15%,比油松高出 80.98%,青海云杉比油松高出 50.62%。

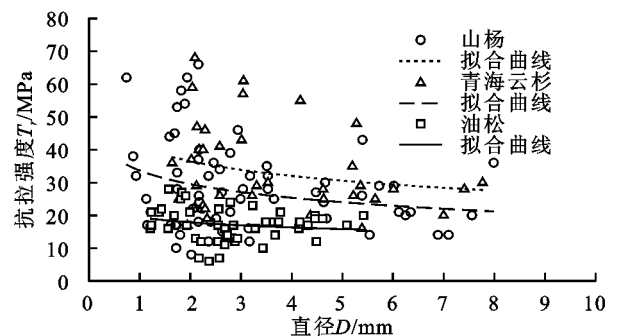


图 3 抗拉强度与直径拟合曲线

2.1.3 杨氏模量(E_r) 万能试验机测定山杨的单根杨氏模量范围为 0.06~0.41 GPa,平均值为 0.17 GPa;青海云杉的单根杨氏模量范围为 0.03~0.23 GPa,平均值为 0.12 GPa;油松的单根杨氏模量范围为 0.03~0.37 GPa,平均值为 0.11 GPa。对山杨、青海云杉、油松单根杨氏模量与直径进行拟合,结果显示单根杨氏模量随直径的增大而减小,呈对数函数趋势(图 4),拟合关系为:

$$\text{山杨: } E_r = -0.0194\ln(D) + 0.1833$$

$(R^2=0.0239, F=0.8090, P<0.1)$

青海云杉: $E_r = -0.0132\ln(D) + 0.1222$

$(R^2=0.0220, F=1.1695, P<0.1)$

油松: $E_r = -0.0273\ln(D) + 0.1436$

$(R^2=0.0368, F=1.8736, P<0.1)$

以直径为协变量进行协方差分析,结果表明,山杨、青海云杉、油松单根杨氏模量呈极显著差异($F=13.790, P<0.0001$);同时直径对单根杨氏模量的影响呈显著差异($F=2.661, P<0.1$)。平均杨氏模量排序为:山杨(0.17 GPa) $>$ 青海云杉(0.12 GPa) $>$ 油松(0.11 GPa),山杨比青海云杉高出 41.67%,比油松高出 54.55%,青海云杉比油松高出 9.09%。

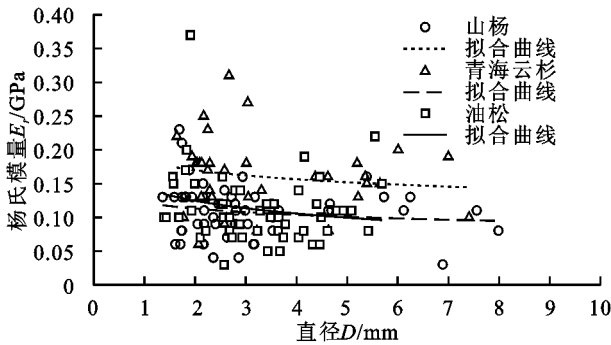


图 4 杨氏模量与直径拟合曲线

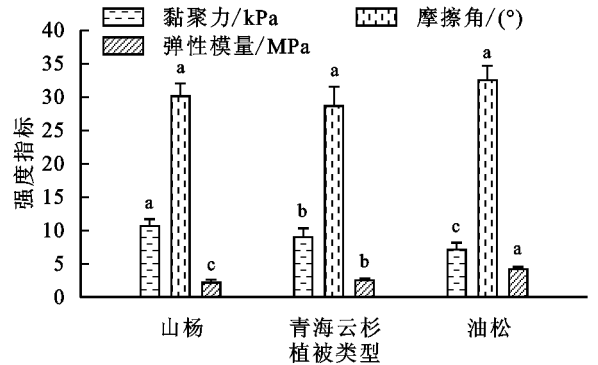
2.2 根土复合体的力学和渗透特性

2.2.1 根土复合体的强度指标比较(相同土壤含水率 $\omega=30\%$) 图 5 为山杨、青海云杉、油松根土复合体的强度指标(黏聚力 c 、摩擦角 φ 、弹性模量 E)之间的比较,可以看出山杨、青海云杉、油松根土复合体的黏聚力存在极显著差异($F=12.121, P=0.0002 < 0.01$),表现为山杨((10.65 ± 1.03) kPa) $>$ 青海云杉((8.97 ± 1.36) kPa) $>$ 油松((7.13 ± 1.02) kPa),山杨根土复合体的黏聚力比青海云杉高出 18.73%、比油松高出 49.37%,青海云杉比油松高出 25.81%。

图 5 中山杨、青海云杉、油松根土复合体的摩擦角之间无显著差异($F=0.683, P=0.5236 > 0.05$),山杨为 $(30.18 \pm 1.93)^\circ$,青海云杉为 $(28.69 \pm 2.89)^\circ$,油松

为 $(32.57 \pm 2.19)^\circ$,平均值为 30.48° 。

图 5 中山杨、青海云杉、油松根土复合体的弹性模量存在显著差异($F=4.062, P=0.0323 < 0.05$),表现为山杨((2.17 ± 0.41) MPa) $<$ 青海云杉((2.52 ± 0.28) MPa) $<$ 油松((4.21 ± 0.30) MPa)。油松根土复合体弹性模量比青海云杉高 67.06%,比山杨高 94.01%,青海云杉比山杨高 16.13%。



注:图中具有相同字母表示无显著差异,不同字母表示存在显著差异, $\alpha=0.05$ 。

图 5 根土复合体的强度指标比较

2.2.2 根土复合体的渗透特性和土水特征曲线 利用 TST-70 常水头土壤渗透仪获得山杨、青海云杉、油松根土复合体的饱和渗透系数分别为 26.87、10.99、26.57 mm/h,山杨 $>$ 油松 $>$ 青海云杉,山杨比青海云杉高 144.49%,油松比青海云杉高出 141.77%。图 6 是利用表 1,2 中的数据计算的山杨、青海云杉、油松根土复合体的土水特征曲线(图 6a)和渗透函数曲线(图 6b)。对图 6(a)以体积含水量为协变量的协方差分析显示,山杨、青海云杉、油松根土复合体的土水特征曲线存在极显著差异($F=13.059, P<0.01$);从图 6(a)可以看出,相同体积含水率下根土复合体的基质吸力(不包括边界效应段)为山杨 $>$ 青海云杉 $>$ 油松。图 6(b)中以基质吸力为协变量的协方差分析显示,山杨、青海云杉、油松根土复合体的渗透函数曲线也存在极显著差异($F=56.177, P<0.01$),相同条件下根土复合体的渗透系数表现为山杨 $>$ 油松 $>$ 青海云杉。

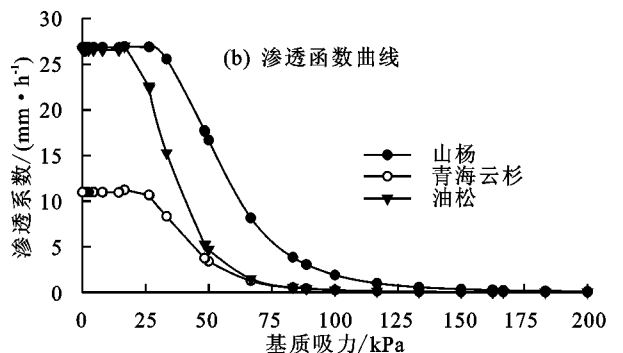
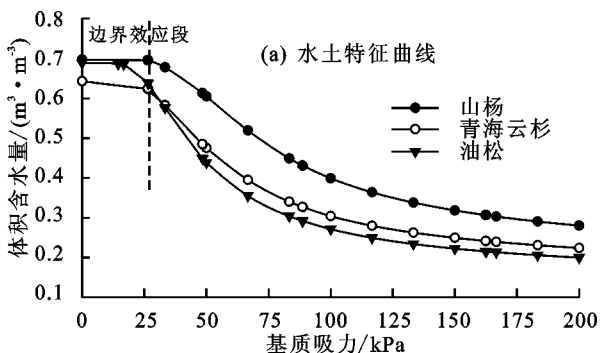


图 6 根土复合体的土水特征曲线和渗透函数曲线

3 讨论

3.1 影响植物单根力学特性的因素

从试验结果来看,树种和直径对单根的力学特性影响显著。不同树种由于其显微结构的不同,造成材料特性的差异^[5]。植物根系作为生物材料具有复杂性、多相性、非均匀性和各向异性等生命特征^[15],因此在拉伸试验中发现即使相同径级内的单根最大拉力、抗拉强度、杨氏模量变异性也很大。另外,有研究^[16]表明,植物的生长环境如土壤类型、土壤水分等对根系的力学特性也有显著影响。Hales 等^[17]研究发现,地形因素会显著影响根系的纤维素含量,凸地平均纤维素含量比凹地的高,而纤维素含量越高根系的抗拉强度越大。Vergani 等^[18]比较阿尔比斯山不同采样点同一树种根系的力学特性和直径的关系,也发现存在显著差异。就同一片纯林来说,不同深度土层中根系直径分布不同;同时,由于不同深度土层的土壤含水率不同,可能会造成根系的含水率不同,从而对根系力学特性产生影响^[19]。因此,考虑根系的含水率和直径对根系拉力等指标的影响,实际上等同于考虑了土层深度对根系力学特性的影响,两者无本质区别。文中不仅考虑到直径对单根力学特性的影响(有显著影响);同时单根拉伸试验基本在相同根系含水率下进行的(山杨、青海云杉、油松单根的平均含水率分别为 50.99%,50.82%,50.76%),作者认为只有同时考虑直径和根系含水率这 2 个因素前提下去比较单根的力学特性才有意义。综上,贺兰山山杨、青海云杉、油松单根的力学特性结果并不能完全用于其他地区的相同树种,但是文中山杨、青海云杉、油松的力学特性与直径的变化规律,如最大拉力随直径成幂函数递增以及抗拉强度、杨氏模量随直径成对数函数递减等规律(图 2~图 4),与其他学者在不同地区的研究结果相类似。

3.2 植物根系对根土复合体力学特性的影响

根土复合体的力学特性是土壤及根系界面相互作用的综合表现,不同植物的根土复合体力学特性不同,其影响因素也很多。根系主要是通过单根的杨氏模量、抗拉强度、直径和根系的密度、分布等因素影响根土复合体的力学特性^[4,20]。从试验结果看,山杨根土复合体的黏聚力显著高于青海云杉和油松(图 5),这是由于山杨单根的力学特性显著高于其他 2 种树种所导致。但是 3 种根土复合体的摩擦角并无显著差异,即根系对土壤的摩擦角影响很小,这一结果在其他学者的研究中也提及。朱锦奇等^[11]认为,影响内摩擦角的主要因素是土壤的粒径级配、颗粒形

状、矿物成分和含水量,而土壤中的根系对这些因素的影响很小。此外,根系的密度和分布方式对根土复合体的力学特性也有影响,盖小刚等^[21]和李为萍等^[22]通过三轴试验得出,根系密度会显著影响根土复合体的力学特性,但主要影响因素还是根截面积比(root area ratio, RAR);水平根系根土复合体抗剪强度最小、垂直根系居中、复合根系最大等结论。植物根系也会影响土壤的水文特性,张莹等^[23]通过分析黄土区 4 种草本、4 种灌木根土复合体的土水特征曲线和渗透系数,得出草本植物根土复合体的渗透能力高于灌木等结论。张伟伟等^[24]测定了狗牙根、高羊茅、香根草根土复合体的土水特征曲线并得出根土复合体渗透系数比裸地高 1~2 个数量级的结论。这是因为:根系的缠绕、穿插作用使土壤孔隙比变大,导致土壤渗透系数增大;另外,由于植物的蒸腾作用,通过根系吸水降低了土壤的孔隙水压力(即提高了土壤的基质吸力),导致土壤渗透率增大。根据本文的研究结果(图 6),在相同条件下山杨根土复合体的基质吸力明显高于其他 2 种树种,这也是导致山杨根土复合体的力学特性显著高于青海云杉和油松的原因之一。

3.3 土水特征曲线的获取方法

土水特征曲线是反映土壤渗透特性的重要参数,获取土水特征曲线的方法分为 2 种:试验法与经验模型法。目前常见的测定土壤特征曲线的试验方法有离心机法、非饱和土固结仪法及 GCTS 土水特征曲线仪法等^[8-9]。但是实际中由于试验仪器条件的限制,很多学者采用拟合经验模型的方法来获取土水特征曲线。常见的土水特征曲线经验模型有 Brooks 模型、Corey 模型、Van-Genuchten 模型和 Fredlund-Xing 模型等^[14]。Meskini-vishkaee 等^[25]研究认为,土水特征曲线与土的粒径级配曲线在形状上具有非常相似的特点,基于此提出了利用土的粒径分布和干重度来估算土水特征曲线的方法。此法可以最大限度的利用有限的土壤资料,而在 GEOSTUDIO 软件中就有根据土的粒径数据来估算土水特征曲线的程序。通过设置土壤基本物理性质(如:粒径级配中的 d_{10} 、 d_{60} 、饱和体积含水率、液限)即可估算出土水特征曲线(图 6a),在 GEOSTUDIO 中也可以直接调用 Van-Genuchten 等模型,用估算的土水特征曲线反算出土的渗透函数(图 6b)。实践证明,采用 Meskini-vishkaee 的方法估算的土水特征曲线和渗透函数具有很好的可靠性,能够满足实际工程的要求。

4 结论

(1)山杨、青海云杉、油松单根最大拉力与直径成

幂函数相关,最大拉力随直径增大而增大;单根抗拉强度、杨氏模量与直径成对数函数相关,抗拉强度、杨氏模量随直径增大而减小。3种乔木的单根力学特性(最大拉力、抗拉强度、杨氏模量)存在极显著差异(山杨>青海云杉>油松),且直径对单根的力学特性有显著影响。

(2)山杨、青海云杉、油松根土复合体的黏聚力、弹性模量存在显著差异,但摩擦角没有显著差异。黏聚力表现为山杨>青海云杉>油松;弹性模量表现为山杨<青海云杉<油松。

(3)山杨、青海云杉、油松根土复合体的土水特征曲线、渗透函数曲线都存在极显著差异,根土复合体的渗透能力表现为山杨>油松>青海云杉。

参考文献:

- [1] 赵晓春,刘建军,任军辉,等.贺兰山4种典型森林类型凋落物持水性能研究[J].水土保持研究,2011,18(2):107-111.
- [2] 田佳,及金楠,钟琦,等.贺兰山云杉林根土复合体提高边坡稳定性分析[J].农业工程学报,2017,33(20):144-152.
- [3] 田佳,曹兵,及金楠,等.花棒、沙柳根系生物力学特性研究[J].农业工程学报,2014,30(23):192-198.
- [4] 田佳,曹兵,及金楠,等.花棒根—土复合体直剪试验的有限元数值模拟与验证[J].农业工程学报,2015,31(16):152-158.
- [5] 吕春娟,陈丽华.华北典型植被根系抗拉力学特性及其与主要化学成分关系[J].农业工程学报,2013,29(23):69-78.
- [6] 格日乐,张成福,蒙仲举,等.3种植物根—土复合体抗剪特性对比分析[J].水土保持学报,2014,28(2):85-89.
- [7] Mao Z, Yang M, Bourrier F, et al. Evaluation of root reinforcement models using numerical modelling approaches[J]. Plant Soil, 2014, 381(1/2):249-270.
- [8] Li P, Li T L, Vanapalli S K. Prediction of soil-water characteristic curve for Malan loess in Loess Plateau of China[J]. Journal of Central South University, 2018, 25(2):432-447.
- [9] Jiang Y, Chen W, Wang G, et al. Influence of initial dry density and water content on the soil-water characteristic curve and suction stress of a reconstituted loess soil[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2016, 76(1):1-11.
- [10] 刘福全,刘静,姚喜军,等.根系固土主导力学因素与差异性评价[J].生态学报,2015,35(19):6306-6315.
- [11] 朱锦奇,王云琦,王玉杰,等.基于试验与模型的根系增强抗剪强度分析[J].岩土力学,2014,35(2):449-457.
- [12] 张超波.林木根系固土护坡力学基础研究[D].北京:北京林业大学,2011.
- [13] 中华人民共和国水利部.土工试验方法标准(GB/T 50123—1999)[S].北京:中国计划出版社,1999:110-114.
- [14] 胡欣.湿陷性黄土路基水分场及其变形特性数值分析[D].重庆:重庆交通大学,2016.
- [15] 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.
- [16] Stokes A, Douglas B G, Fourcaud T. Ecological mitigation of hill slope instability: Ten key issues facing researchers and practitioners[J]. Plant Soil, 2014, 377(1/2):1-23.
- [17] Hales T C, Ford C R, Hwang T, et al. Topographic and ecologic controls on root reinforcement[J]. Journal of Geophysical Research Earth Surface, 2009, 114(3):1-17.
- [18] Vergani C, Chiaradia E A, Bischetti G B. Variability in the tensile resistance of roots in Alpine forest tree species[J]. Ecological Engineering, 2012, 46(3):43-56.
- [19] Ji J N, Kokutse N, Genet M., et al. Effect of spatial variation of tree root characteristics on slope stability: A case study on Black Locust (*Robinia pseudoacacia*) and Arborvitae (*Platycladus orientalis*) stands on the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2012, 92(5):139-154.
- [20] 吕春娟,陈丽华,陈卫国,等.根土复合体的抗剪特性研究[J].灌溉排水学报,2016,35(3):13-19.
- [21] 盖小刚,陈丽华,蒋坤云,等.4种乔木根系不同埋根方式根—土复合体的抗剪特性[J].林业科学,2014,50(9):105-111.
- [22] 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.
- [23] 张莹,毛小青.寒旱环境黄土区草本与灌木植物根系导水作用研究[J].中国科技博览,2009(27):252-253.
- [24] 张伟伟,江朝华,程星,等.草本植物根系对黄河故道区非饱和土特性的影响[J].水利水电科技进展,2017,37(1):73-78.
- [25] Meskinivishkae F, Mohammadi M H, Vanclooster M. Predicting the soil moisture retention curve, from soil particle size distribution and bulk density data using a packing density scaling factor[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2014, 18(10):4053-4063.