

寒旱环境植物护坡力学效应与根系化学成分响应

乔娜¹, 余芹芹¹, 卢海静¹, 胡夏嵩^{1,2}, 李国荣¹, 朱海丽¹

(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, 西宁 810008)

摘要:该项研究以试验区两种生长期为 6 a 的灌木植物柠条锦鸡儿、霸王为例, 分析了根系中所含半纤维素、木质素、纤维素和果胶质 4 种主要化学成分及其含量, 并探讨了根系力学强度与其化学成分及其含量变化之间的关系。结果表明: 柠条锦鸡儿根系平均抗拉强度为 28.36~34.75 MPa, 霸王为 4.53~6.61 MPa, 即柠条锦鸡儿根系平均抗拉强度显著大于霸王, 且这两种灌木根系所含的 4 种化学成分由多至少依次为半纤维素、木质素、纤维素、果胶质, 其中柠条锦鸡儿根系半纤维素含量为 17.8%~29.03%, 木质素为 3.41%~5.36%, 纤维素为 2.3%~2.79%, 果胶质为 1.45%~2.15%; 霸王根系半纤维素含量为 15.6%~23.04%, 木质素为 3.69%~4.89%, 纤维素为 2.1%~3.06%, 果胶质为 1.92%~2.37%。两种灌木根系纤维素含量与根径、根系抗拉强度之间均表现出一定相关性; 霸王根系半纤维素含量与其根系根径、抗拉强度之间呈相关性; 柠条锦鸡儿根系果胶质含量与其根径、根系抗拉强度间均呈相关关系。本项研究可为进一步分析植物根系力学强度及其效应与根系组成特性之间的变化关系提供理论依据。

关键词:植物根系; 力学效应; 抗拉力; 抗拉强度; 化学成分

中图分类号: S714.7

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2012)03-0108-06

Research on Mechanical Effects of the Vegetation on Slope Protection and Response of Root Chemical Compositions in Cold and Arid Environment

QIAO Na¹, YU Qin-qin¹, LU Hai-jing¹, HU Xia-song^{1,2}, LI Guo-rong¹, ZHU Hai-li¹

(1. Department of Geological Engineering, Qinghai University, Xi'ning 810016, China;

2. Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xi'ning 810008, China)

Abstract: Two kinds of shrubs named *Caragana korshinskii* and *Zygophyllum xanthoxylon* in testing area were examined. Four major chemical compositions and their contents, such as hemicelluloses, lignin, cellulose and pectin, were analyzed. Then the relationship between the tensile strength and contents of chemical compositions of roots were investigated. The test results showed: the average tensile strength of *Caragana korshinskii* roots with 28.36~34.75 MPa was significantly greater than that of *Zygophyllum xanthoxylon* roots with 4.53~6.61 MPa. And the hemicelluloses contents in two shrubs' roots were the biggest following by lignin, cellulose, and pectin, for example, the content of hemicelluloses in *Caragana korshinskii* roots was 17.8%~29.03%, the lignin was 3.41%~5.36%, the cellulose and pectin were 2.3%~2.79% and 1.45%~2.15%, respectively. In *Zygophyllum xanthoxylon* roots, contents of four chemical compositions were 15.6%~23.04% of hemicelluloses, 3.69%~4.89% of lignin, 2.1%~3.06% of cellulose, 1.92%~2.37% of pectin. A significant correlation was shown between their root diameters, the cellulose content and their tensile strength in both two shrubs. For *Zygophyllum xanthoxylon* roots, it also showed a significant correlation between its root diameter, its hemicelluloses content and its tensile strength. However, for *Caragana korshinskii*, the change of the pectin content of roots affected its diameter and tensile strength extraordinarily. The study results will provide a theoretical basis for further analyzing a relationship between plant root mechanical strength and effect of the composition characteristics of roots.

Key words: plant roots; mechanical effect; tensile force; tensile strength; chemical composition

收稿日期: 2011-11-11

修回日期: 2011-11-28

资助项目: 国家自然科学基金资助项目(40762002, 41062010); 教育部“新世纪优秀人才支持计划”资助项目(NCET-04-G983); 长安大学西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室开放基金资助(CHD2011SY016)

作者简介: 乔娜(1986—), 女, 山西忻州人, 硕士研究生, 主要从事环境岩土工程与岩土体工程稳定数值模拟计算等方面的研究工作。E-mail: qiaona1206@163.com

通信作者: 胡夏嵩(1965—), 男, 河南开封人, 教授, 主要从事环境岩土工程与工程地质等方面的教学与科研工作。E-mail: hxs@mail.tsinghua.edu.cn

植被护坡技术是一种利用植被进行坡面保护和侵蚀控制的途径和手段^[1]。关于植物根系及其根—土复合体的力学特性,国内外已有较多研究,例如 Endo^[2]、Ziemer^[3]、Wu^[4]等通过现场测试研究了植物根系对边坡土体的加强作用,Waldron^[5]、Gary^[6]、Shewbridge^[7]等通过室内直剪试验研究了根系对土体抗剪强度的作用。上述研究表明:边坡土体的抗剪强度随根系数量的增加而增大,且存在最优含根量。肖盛燮认为植物防护设计最基本的指标是植物根系的加固能力^[8];李绍才通过狗牙根—土复合体的抗拉试验认为:植物根系的存在,使根—土复合体具有了抗拉特性,其抗拉强度随含根量增加而增大^[9]。关于植物根系抗拉强度与其化学成分之间的关系研究,Marie Genet 等认为根系中纤维素含量对于木质植物的抗拉强度有一定影响,其研究结果表明:单根抗拉强度与根直径呈显著的负相关关系,与根的纤维素含量呈正相关关系^[10]。Commandeur 和 Pyles 研究表明单位质量的根系,相对细小的根系较相对粗的根系中所含纤维素含量多^[11]。Sjostrom 认为纤维素结构对于抵抗抗拉破坏方面是最理想的^[12]。肖东升等认为植物根系中木质素和纤维素的含量与植物根系的增粗生长速度相关,根系增粗生长越快、根径越大,其抗拉力和抗剪力也越大^[13]。朱海丽等认为根系中纤维素含量相对较高时,根系可视为柔性材料计算其抗拉强度与抗剪强度;根系中木质素含量相对较高时其具有一定的刚度,根系具有一定的抗拉强度、抗剪强度及抗弯强度^[14]。赵丽兵等通过对豆科的紫花苜蓿和禾本科的马唐根的抗拉力与其相应的纤维素含量试验表明,根的抗拉强度与纤维素含量正相关,并证实了纤维素含量对于维持根抗拉强度的作用大于木质素含量^[15]。

国内外诸多学者关于根系抗拉强度与其化学成分含量间关系的研究,主要表现在根系抗拉强度与纤维素、木质素及其含量变化之间的关系,但是从根系化学成分的种类,以及化学成分含量变化对根系抗拉强度影响的深层次机理方面的研究均有待于深入。本项研究通过对试验区两种灌木根系抗拉试验、根系4种主要化学成分含量测定,以及根系抗拉强度与其相应化学成分之间关系等方面做了进一步探讨与分析,其研究为进一步探讨植物根系护坡力学效应及其机理方面提供重要理论依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于青海东北部的西宁盆地,地势西高东

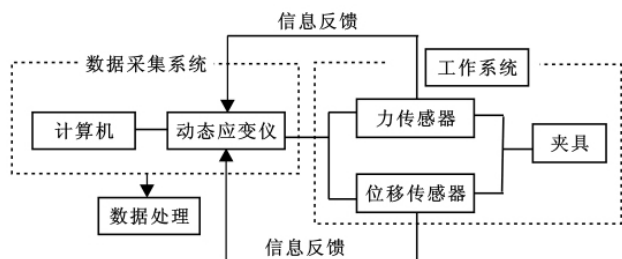
低,南、北两侧高,湟水中央谷地低陷。地貌兼具高原山地和黄土丘陵复合类型,并以显著的自然景观垂直分带和强烈的流水作用剥蚀塑造的黄土红色泥岩丘陵及河谷平原为主要特征。西宁盆地地形起伏较大,南侧为拉鸡山、北侧为达坂山、西侧为日月山,地势高耸、山峦叠嶂,是现代侵蚀作用最强烈的地区,沟间地块构成的分水岭呈梁峁状,支离破碎,水土流失严重^[16]。试验区城东中庄小寨红沟,其地理位置为东经101°50′,北纬36°35′,区内平均海拔高度约2250 m,地处青海东部湟水流域河谷,黄土高原西缘,属于高原寒冷干旱—半干旱气候,年平均气温为5.5℃,夏季日极端最高气温为33.9℃,冬季日极端最低气温为零下26.3℃^[17];该地降水量少,蒸发强烈,多年平均降水量为350 mm,蒸发量为1235.6 mm^[16]。试验区边坡属于人工堆积的土质边坡,土体类型为粉土,坡向为半阴半阳,坡度约为40°,坡高约为10 m,试验区面积约为20 m×15 m。

1.2 试验材料

试验区气候寒冷干旱,选择柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)、霸王(*Zygophyllum xanthoxylon*)两种耐寒、抗旱的乡土灌木植物作为研究对象。本试验所采用的灌木根系具体取样方法是:在城东中庄小寨红沟试验区取试验用土样,将两种灌木分别种植在盆口直径为36 cm、盆底直径为18 cm、盆高为40 cm的试验盆中,生长期为6 a。试验前将整株植物挖出来,统计其根系生长情况,统计结果如表1所示。试验过程中,同株植物的一部分根系被用于进行单根拉伸试验,另一部分根系则被用于测定其化学成分含量的样本材料,试验分2组进行,每组设3个重复。柠条锦鸡儿试样的土体含水率为10.3%、霸王试样为15.5%;柠条锦鸡儿试样的土体密度为4.28 g/cm³、霸王试样为4.35 g/cm³。

1.3 根系的拉伸试验方法

本项研究所采用的植物单根拉伸试验,使用课题组自制室内单根拉伸试验仪进行单根拉伸力测定,其工作原理及基本结构均参照材料力学电子万能试验机。该仪器主要由数据采集系统和工作系统两部分组成,其中数据采集系统可记录单根拉伸的整个过程,同时可得到不同时间、不同拉力作用下的位移以及植物单根破坏时的最大拉力。试验仪器工作原理框图如图1所示^[18]。本项试验过程中,选择测试长度10 cm的主根或侧根(不含毛根)作为供试根段夹持在工作台上的拉伸夹具间,通过转动手轮夹具向上移动,使位于夹具间的根段受到拉伸作用,直到根段被拉断为止。

图 1 单根拉伸试验工作原理^[18]

1.4 根系的化学成分测定方法

将称量好的柠条锦鸡儿根系和霸王根系各 50 g 鲜样,粉碎、烘干,按规范要求称取干燥样品,采用容量法测定其木质素含量和纤维素含量,采用重量法测定半纤维素含量和果胶质含量^[19]。

2 结果与分析

2.1 灌木植物根系形态特征

试验所采用的生长期为 6 a 的两种供试灌木植

表 1 两种灌木根系形态特征统计结果

植物名称	试验编号	主根			侧根		
		最大根径/mm	最小根径/mm	根长/cm	最大根径/mm	最小根径/mm	根长/cm
柠条锦鸡儿	1	8.015	2.327	39.5	4.162	0.602	29.125
	2	10.85	4.62	37.5	4.43	0.28	18.5
	3	6.28	1.93	42	2.75	0.28	16
霸王	4	7.98	3.23	37.5	3.35	1.76	24
	5	8.6	0.6	36	3.8	1.52	18
	6	8.99	1.75	39.5	4.36	0.75	19.5

注:试验中,两种植物分别进行 3 次重复试验,柠条锦鸡儿试验编号为 1,2,3,霸王试验编号为 4,5,6。下表同。

2.2 灌木植物单根抗拉强度特性

由植物单根拉伸试验可知,生长期为 6 a 的两种灌木根系均表现出较强的抗拉能力,霸王的平均根径较柠条锦鸡儿大,而后的平均抗拉力则显著大于前者,例如霸王其平均根径为 1.237 mm 时,平均抗拉力为 6.310 N,平均抗拉强度为 5.370 MPa;柠条锦鸡儿平均根径为 1.147 mm 时,其平均抗拉力为 31.591 N,平均抗拉强度为 30.783 MPa,且柠条锦鸡儿根系的平均抗拉力是霸王平均抗拉力的 5 倍。因此,对具有同样生长条件和生长期的柠条锦鸡儿和霸王,前者的抗拉能力相对显著高于后者(表 2),其原因与根系半纤维素、纤维素、木质素、果胶质等 4 种主要化学成分及含量有一定的关系。由该表可知,两种灌木根系的抗拉力均随根径的增大而呈增大趋势,二者之间存在显著幂函数关系;其根系的抗拉强度随根径的增加呈减小趋势,二者呈显著幂函数关系(图 2—3)。

2.3 灌木根系化学成分及其含量

植物根系可分为直根系和须根系,主要由纤维素、半纤维素、木质素、蛋白质和果胶等物质组成,具

物根系均为主直根型,选择好试验所用的根系后,从地表往下,每隔 5 cm 用游标卡尺测定一次根径,最后求得其平均根径,最大根径和最小根径相应从中选取;用卷尺测根系长度,其根系形态特征统计结果见表 1。柠条锦鸡儿为豆科锦鸡儿属(*Caragana*)多年生落叶灌木,其根系发达,主根明显,主根最大根长为 42 cm,最大根径为 6.28~10.85 mm,最小根径为 1.93~4.62 mm;侧根和毛根较发达,属于主侧根均衡发育型,其侧根最大根长为 29.125 cm,最大根径约为 2.75~4.43 mm,最小根径约为 0.28~0.62 mm。霸王为蒺藜科霸王属(*Zygophyllum*)多年生落叶灌木,其根肉质,主根粗壮,属浅根型灌木种,主根最大根长为 39.5 cm,最大根径为 7.98~8.99 mm,最小根径为 0.6~3.23 mm,侧根非常发达,其侧根最大根长为 24 cm,最大根径为 3.35~4.36 mm,最小根径为 0.75~1.76 mm。

有扩张、抗压和抗曲折性能,起坚固和支持作用^[20]。植物的细胞壁由长链大分子纤维素聚合成的微纤丝构成骨架,其内填充了木质素、半纤维素、角质、果胶质等物质,同样形成类似“钢筋混凝土”结构^[15]。试验采用的两种灌木根系化学成分含量的测定结果表明:柠条锦鸡儿根系其半纤维素、木质素、纤维素、果胶质的平均含量分别为 24.58%,4.41%,2.53%,1.83%;霸王根系其平均含量分别为 19.65%,4.39%,2.49%,2.07%(表 3)。

表 2 两种灌木根系抗拉力及抗拉强度试验结果

植物名称	试验编号	平均根径/mm	平均抗拉力/N	平均抗拉强度/MPa	样本数/个
柠条锦鸡儿	1	1.046	29.864	34.753	18
	2	1.182	32.082	29.237	18
	3	1.214	32.826	28.359	18
	平均值	1.147	31.591	30.783	—
霸王	4	1.064	5.876	6.609	18
	5	1.242	6.027	4.978	18
	6	1.406	7.026	4.525	18
	平均值	1.237	6.310	5.370	—

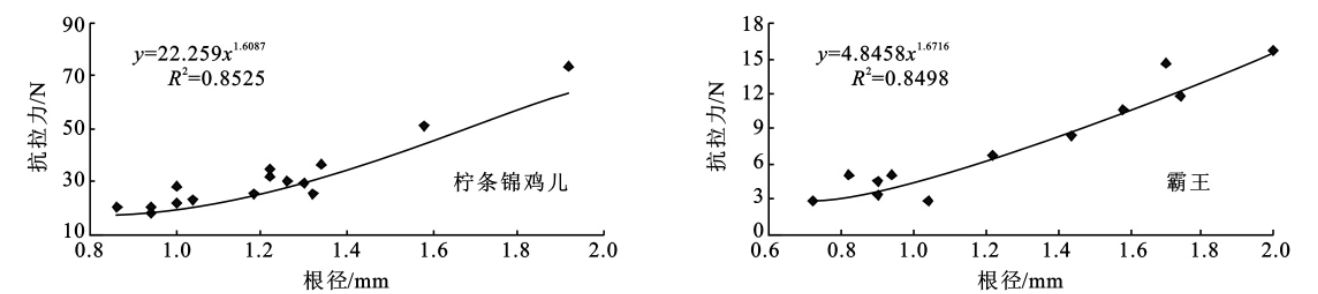


图 2 两种灌木根系抗拉力—根径关系曲线

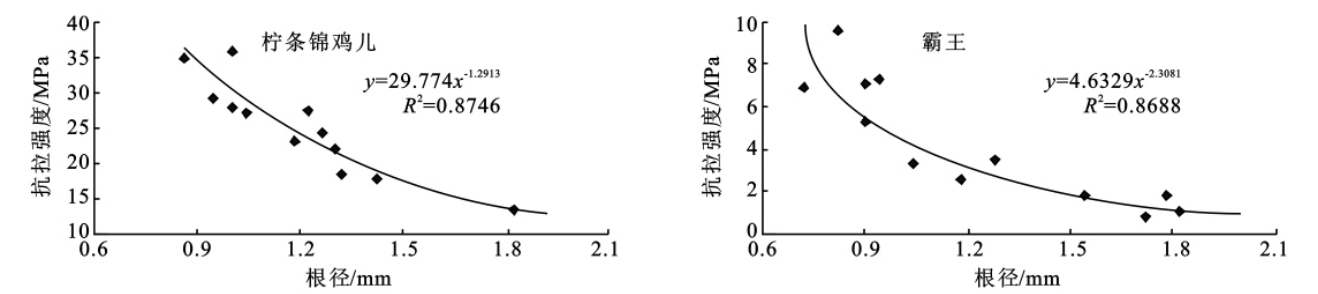


图 3 两种灌木根系抗拉强度—根径关系曲线

由试验结果可知,尽管两种灌木根系 4 种主要化学成分的含量由高至低呈一致性变化规律,经过 t 测验,对于两种灌木根系中所含 4 种化学成分的含量,均得出 $|t| < t_{0.05}, P > 0.05$,即两种灌木根系中所含 4 种化学成分的含量差异性均不显著,但柠条锦鸡儿和霸王供试种中,4 种化学成分含量高低各不相同。如表 3 所示,两种灌木其根系所含 4 种化学成分以半纤维素含量最多,分别为 24.58%,19.65%,是根系所含其它 3 种化学成分平均含量的 5~10 倍,其中柠条锦鸡儿根系其半纤维素平均含量比霸王根系高 20%;两种供试灌木根系其木质素含量相差不显著,柠条锦鸡儿根系其木质素平均含量较霸王根系略大,即分别为 4.41%,4.39%;两种供试灌木根系其纤维素含量和果胶质含量均相对较少,柠条锦鸡儿根系其纤维素含量和霸王根系相差较小,仅为 0.04%,且前者果胶质的平均含量比后者低 12%。由以上分析可知,半纤维素和木质素是构成试验区两种供试灌木根系的主要化学成分,且两种灌木根系所含 4 种主要化学成分的含量均呈逐渐降低趋势,由高至低依次为半纤维素含量>木质素含量>纤维素含量>果胶质含量。

2.4 灌木根系化学成分含量与其力学强度关系

2.4.1 根系化学成分含量与其根径关系 通过对两种灌木根系的根径统计且与其所含 4 种化学成分含量关系比较可知,随着根径的逐渐增大,其根系纤维素含量呈逐渐减少趋势,且二者之间呈负相关关系,这与有关学者对木本植物根系的研究结果相类似^[10]。此外,霸王根系其半纤维素含量随着根径增大而逐渐减少,二者之间呈负相关关系;柠条锦鸡儿

根系中果胶质含量与其根径之间呈负相关关系;两种灌木根系其木质素含量与根径之间规律性不显著。

表 3 两种灌木根系化学成分及其含量测试结果 %

植物名称	试验编号	半纤维素含量	木质素含量	纤维素含量	果胶质含量
柠条锦鸡儿	1	26.91	3.41	2.79	2.15
	2	29.03	5.36	2.49	1.89
	3	17.80	4.45	2.30	1.45
	平均值	24.58	4.41	2.53	1.83
霸王	4	23.04	4.59	3.06	1.92
	5	20.30	3.69	2.32	1.92
	6	15.60	4.89	2.10	2.37
	平均值	19.65	4.39	2.49	2.07

2.4.2 根系化学成分含量与其力学强度关系 通过分析对比 3 组试验中根系所含 4 种主要化学成分对其抗拉强度的影响,结果表明,两种灌木根系所含 4 种主要化学成分对其抗拉强度的影响程度各不相同,即两种灌木根系抗拉强度随纤维素含量变化均呈一致性变化规律,霸王根系抗拉强度受其半纤维素含量影响显著,柠条锦鸡儿根系抗拉强度与果胶质含量之间存在相关关系,两种灌木根系抗拉强度与木质素含量间均未表现出显著相关关系。

植物细胞壁具有强大的纤丝网状结构,可为细胞、组织甚至整个植物体提供机械支持作用^[21],纤维素为细胞壁最主要的化合物,是细胞壁主要的骨架成分,约占初生壁干重的 15%~30%,在次生壁中所占的比例还要大些^[22],它是由成千上万条以微纤丝为基本单位构成的网状结构,对细胞壁的机械支持特性具有不容忽视的作用^[23]。该项研究中,两种灌木根系中纤维素平均含量差别较小,即分别为 2.53%,

2.49%,但其与根系抗拉强度之间存在相关关系。由两种灌木根系中,纤维素含量与其抗拉强度之间均呈一致性规律变化,即随着纤维素含量的增大,其抗拉强度也逐渐增强,根系纤维素含量与其抗拉强度之间呈正相关关系。半纤维素是构成植物细胞初生壁的主要成分之一,它与伸展蛋白、结构蛋白、壁酶、纤维素和果胶等一起构成具有一定硬度和弹性的细胞壁^[24-25]。半纤维素以无定形态渗透在骨架物质之中,起着基体粘结作用,以增强总体纤维整体的强度^[26]。试验结果表明,霸王根系抗拉强度与其半纤维素含量间呈正相关关系。当其根系半纤维素含量逐渐增大时,抗拉强度呈逐渐增强趋势。果胶是胞间层以及初生细胞壁的主要组分之一,能结合多种金属离子^[26],对植物根系的机械力学性能具有极其重要的作用。两种灌木根系中果胶质含量均相对较少,但结果表明,柠条锦鸡儿根系所含果胶质含量逐渐增多时,其抗拉强度逐渐增强,二者之间呈正相关关系。

木质素是一种复杂酚类聚合物,具有使细胞相连的作用,填充于纤维素构架中以增强植物体的机械强度,它的强度比纤维素弱,但能提供刚度并改善耐久性^[26]。通过对两种灌木根系木质素含量与其抗拉强度关系进行分析,结果表明,两种灌木根系抗拉强度与木质素含量之间均未能构成规律性变化关系。

3 结 论

(1) 试验所选取的生长期为 6 a 的两种乡土护坡灌木根系,其抗拉力和抗拉强度差异性较为显著,即柠条锦鸡儿根系平均抗拉力为 31.591 N,平均抗拉强度为 30.783 MPa;霸王根系抗拉力为 6.310 N,抗拉强度为 5.370 MPa,柠条锦鸡儿根系的抗拉力相对高于霸王根系,且前者抗拉强度是后者的 5 倍。此外,两种灌木根系的抗拉力均随根径的增大而增大,抗拉强度随根径的增大而逐渐减小,其根系抗拉力与根径、抗拉强度与根径之间均存在显著幂函数关系。

(2) 半纤维素、木质素、纤维素和果胶质是构成植物细胞壁的 4 种主要化学成分,对增强植物根系的机械力学性能具有重要作用。试验所采用的两种灌木根系其半纤维素、木质素、纤维素、果胶质 4 种主要化学成分的含量不同,其中柠条锦鸡儿根系试样其 4 种化学成分平均含量依次为 24.58%,4.41%,2.53%,1.83%;霸王根系试样 4 种化学成分平均含量依次为 19.65%,4.39%,2.49%,2.07%。两种灌木根系其 4 种主要化学成分含量由高至低呈一致性变化规律,即半纤维素含量>木质素含量>纤维素含量>果胶质含量。

(3) 通过对柠条锦鸡儿和霸王两种灌木根系的抗拉强度与其根系化学成分含量试验结果可知,两种供试种灌木根系的抗拉强度受 4 种主要化学成分的影响而表现出不同的变化规律,根系抗拉强度与纤维素含量间的相关关系相对显著,即根系纤维素含量愈高,其抗拉强度愈大,二者之间呈正相关关系;霸王根系其半纤维含量与其抗拉强度亦呈正相关关系;柠条锦鸡儿根系果胶质含量与其抗拉强度之间表现出正相关关系;两种灌木根系其木质素含量与其相应抗拉强度之间相关性不显著。

(4) 本项研究在前人研究的基础上,对两种灌木根系(半纤维素、木质素、纤维素和果胶质)4 种不同种类的化学成分含量进行了测定,同时对其含量变化对根系抗拉强度影响的机理进行了研究。通过分析比较两种灌木根系中所含的 4 种主要化学成分与其根径、根系抗拉强度之间的相互关系可知,根系所含 4 种主要化学成分含量与根径变化有一定关系,且化学成分及含量对根系抗拉强度产生一定程度的影响。此外,根系所含以上 4 种主要化学成分含量及其变化与植物根系的生长期、生长特性、生长结构紧密相关,这方面的关系尚需进一步研究。

参考文献:

- [1] Ministry of Works and Transport. Use of bio-engineering in the road sector geo-environmental unit[R]. Nepal;Ministry of the Works and Transport,1999.
- [2] Endo T. The effect of tree roots upon the shearing strength of soil[J]. Japan Agricultural Research Quarterly,1980,14(2):112-115.
- [3] Ziemer R R. Roots and the stability of forested slopes [M]. International Association of Hydrological Sciences,1981.
- [4] Wu T H, Beal P E, Lan C. In-situ test of soil-root systems[J]. Journal of Geotech Engineering. ASCE,1988, 114(12):1376-1394.
- [5] 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.
- [6] Gray D H, Ohashi H. Mechanics of fiber reinforcements in sand[J]. Journal Geotechnical Engineering,1983,109 (3):335-353.
- [7] Shewbridge S. The influence of fiber properties on the deformation characteristics of a reinforced sand[D]. Berkely;University of California,1987.
- [8] 肖盛燮,周辉,凌天清.边坡防护工程中植物根系的加固机制与能力分析[J].岩石力学与工程学报,2006,25 (S1):2670-2674.

- [9] 李绍才,孙海龙,杨志荣,等. 坡面岩体—基质—根系相互作用力学特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(12): 2074-2081.
- [10] Marie G, Alexia S, Frank S, et al. The influence of cellulose content on tensile strength in tree roots[J]. Plant and Soil Science, 2007, 103(1): 1-9.
- [11] Commandeur P R, Pyles M R. Modulus of elasticity and tensile strength of Douglas-fir roots[J]. Canadian Journal of Forest Research, 1991, 21(1): 48-52.
- [12] Sjostrom E. Wood chemistry fundamentals and applications[M]. Second Edition Academic Press Inc., 1993.
- [13] 肖东升,张涛. 边坡土体强度与植被根系作用的研究[J]. 路基工程, 2008(1): 135-137.
- [14] 朱海丽,胡夏嵩,毛小青,等. 护坡植物根系力学特性与其解剖结构关系[J]. 农业工程学报, 2009, 25(5): 40-46.
- [15] 赵丽兵,张宝贵. 紫花苜蓿和马唐根的生物力学性能及相关因素的试验研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(9): 7-12.
- [16] 石维栋,张森琦,周金元,等. 西宁盆地北西缘地下热水分布特征[J]. 中国地质, 2006, 33(5): 1131-1136.
- [17] 赵惇廉. 西宁市山地崩塌、滑坡灾害及其防治对策[J]. 青海环境, 2004, 4(1): 29-31.
- [18] 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.
- [19] 杨月欣,王光亚. 食物营养分析使用手册[M]. 北京:中国轻工业出版社, 2002.
- [20] 肖东升. 植被增加边坡抗剪强度的量化理论[J]. 地基基础, 2004, 24(1): 63-65.
- [21] Li Y H, Qian Q, Zhou Y H, et al. *Brittle Culm₁*, which encodes a Cobra-like protein, affects the mechanical properties of rice plants[J]. Plant Cell, 2003, 15: 2020-2031.
- [22] 王健,朱锦懋,林青青,等. 小麦茎秆结构和细胞壁化学成分对抗压强度的影响[J]. 科学通报, 2006, 51(6): 679-685.
- [23] 张旭红,高艳玲,林爱军,等. 植物根系细胞壁在提高植物抵抗金属离子毒性中的作用[J]. 生态毒理学报, 2008, 3(1): 9-14.
- [24] 冼杏娟. 竹纤维增强树脂复合材料及其微观形貌[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 1995.
- [25] 郭玉华,朱四光,张龙步. 不同栽培条件对水稻茎秆生化成分的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2003, 34(2): 89-91.
- [26] 郭维俊,王芬娥,黄高宝,等. 小麦茎秆力学性能与化学组分试验[J]. 农业机械学报, 2009, 40(2): 110-114.