油松根系的固土力学机制

曹云生，陈丽华，盖小刚，刘小光，李长暄

（北京林业大学 水土保持学院，教育部 水土保持与荒漠化防治重点实验室，北京 100083）

摘　要：为深入了解林木根系固土力学机制，探讨不同条件下的根系固土作用，对油松根系进行了拉伸、拔出和根土复合体三轴试验。结果表明，油松根系的抗拉力随根系直径的增大成幂函数关系增加，而抗拉强度随直径的增大无明显变化规律；根系受拉的应力—应变曲线特征参数不同，以二次多项式模型拟合效果最好，均为单峰曲线，具有弹塑性材料的特征，极限应力和极限延伸率的大小与根系直径无明显的关系；根土界面最大摩擦力随着根径的增加呈现出近似线性的增长趋势。根径越大，根系越深，根土界面摩擦力就越大，进而对土壤的摩擦锚固作用就越强。相同根径时，根土复合体的抗剪强度随围压的增加而增大。相同围压下，根土复合体的抗剪强度随着根径的增加而增大。相同的根径和围压下，垂直埋根方式的根土复合体抗剪效果好于水平埋根方式。

关键词：根系；固土力学；抗拉特性；摩擦特性；抗剪强度

文献标识码：A　　**文章编号**：1000-288X(2014)05-0006-05　　**中图分类号**：S157.5，S714.7

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.05.008

Soil Reinforcement by *Pinus Tabuliformis* Roots

CAO Yun-sheng, CHEN Li-hua, GAI Xiao-gang, LIU Xiao-guang, LI Chang-xuan

(*School of Soil and Water Conservation, Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification of Education Ministry, Beijing Forestry University, Beijing* 100083, *China*)

Abstract: In order to understand soil reinforcement by root, to explore the role of soil-reinforcement by roots in soil conservation under different conditions, *Pinus tabulaeformis* roots anti-tensile strength and anchoring force, and the root-soil composite triaxial compression apparatus tests were carried out. Results showed that tensile resistance of *Pinus tabulaeformis* roots increased with increasing diameter according to a power function, but tensile strength had no obvious change rule with the increasing diameter. The root stress-strain parameters were different in different curves, and the quadratic polynomial model was very reasonable to describe its stress—strain response. All of them showed the single-peak curves with elastic-plastic material characteristics. Ultimate stress and ultimate elongation had no significant correlation with their diameters. There was an approximate linear relationship between root soil friction and root diameter. The larger diameter and deeper depth of root were, the bigger root-soil interface friction and the stronger anchoring role were. With the same diameter, it was found that root-soil complex shear strength increased with the increase of confining pressure. With the same confining pressure, shear strength of root-soil complex increased with the increasing diameter, and with the same diameter and confining pressure, the increasing influence with vertical root was better than that with horizontal root.

Keywords: roots; soil-reinforcement mechanics; stress mechanical properties; friction properties; shear strength

根系是土壤和植物的动态界面，植物根系具有锚定植株、吸收和运输土壤中的水分及养分、合成和贮藏营养物质等重要功能[1]。其中植物根系的锚定固坡功能的研究和应用，在中国已越来越受欢迎。20世纪以来，中国大陆大型滑坡发育最根本的原因是有利的地形地貌条件和人类活动影响，其中植被的破坏是滑坡发生的主要原因之一。植物根系对土壤的固持作用，主要通过根与土壤的结合，使得土壤在发生变形和位移变化趋势时，根土接触面产生抵抗滑移的摩擦力，从而阻止含根土壤的相对运动趋势，以达到固持土体的效果。

乔木作为森林生态系统的主体，以其强大的根系

收稿日期：2013-03-03　　修回日期：2013-09-26

资助项目：国家“十二五”重大林业科技支撑课题“‘三北’地区水源涵养林体系构建技术研究与示范”(2011BAD38B05)；林业公益性行业科研专项“森林对 PM2.5 等颗粒物的调控功能与技术研究”(20130430104)

作者简介：曹云生(1985—)，男(汉族)，山东省淄博市人，博士研究生，研究方向为水土保持、生态环境工程。E-mail:cys888cys888@163.com。

通信作者：陈丽华(1957—)，女(汉族)，北京人，教授，主要从事土壤侵蚀、森林水文、城镇规划研究。E-mail:c_lihua@bjfu.edu.cn。

对土壤具固持作用，可保持水土，减缓浅层滑坡等重力侵蚀。因此，国内外许多学者对林木根系固土机制进行了研究。杨维西等[2]通过对油松单根固持力和根系直径关系的研究，发现林龄越大林分对土壤的固持力越强。张金池等[3]对苏北海堤林根系固土功能进行了研究，发现有效根密度(≤2 mm 的须根)能够加强土壤抗侵蚀的作用和改善土壤物理性状的效应。解明曙[4]通过全根系拉拔试验法，研究了榆树(*Ulmus pumla*)根系的固土能力，认为根系对于增强土的抗剪能力有极大作用。周跃等[5-6]对云南松(*Pinus yunnanensis*)侧根以及幼树垂直根与土体的水平牵引效应、斜向牵引效应以及侧根摩擦型根土黏合键的破坏机制进行研究，认为森林植被固土护坡的力学特性主要源于树干和根系与斜坡土壤间的机械作用，包括对土壤的加强作用、锚固作用、斜向支撑作用等，根际土的抗滑力能增加 40%左右。朱清科等[7]和谢春华等[8]对长江上游贡嘎山森林生态系统主要树种根系的长度、直径和根系在土壤中的分布状况和土壤的性状对根系抗拉强度的影响进行了研究。刘秀萍等[9]对油松根系的分形结构和单根抗拉应力与应变全曲线理论进行了研究，认为三阶抛物线数学模型能较好表达其变化规律。刘小光等[10]对油松和华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)根土界面的摩擦特性进行了研究，认为在土壤性状相同的条件下，根土摩擦力与根径和根系埋深有关。陈丽华等[11]则从不同角度对根系抗侵蚀以及对边坡稳定性的作用等方面进行了研究。

国外对于林木根系固土的研究可追溯到 20 世纪 30 年代，Holch[12]首次提出有关不同森林植被根系对坡面稳定的影响。Ziemer 等[13]，Burroughs 等[14]的研究表明，林木根系具有维持坡面稳定、防止坡面崩塌和固持土壤的能力，并随着林木的砍伐逐渐衰退。Gray 等[15]对生物护坡技术进行了研究，并分析了林木根系对自然边坡稳定性的影响。Wu[16]，Waldron[17]通过把根系作为一种完全弹性材料进行根系固土力学研究，并提出了基于摩尔—库伦定律的根系固土理论模型。森林生态系统中树种根系的分布形态、根系与土体结合的紧密程度以及根系抗拉特性对于滑坡的发生发展均具有重要的控制作用。但是，以往的研究仅对林木根系固土的某一特性进行了分析，不能全面的对林木根系固土的机制进行阐述。因此，本文以油松为例，对油松单根的抗拉特性、根土界面的摩擦特性及根土复合体的抗剪特性进行了研究，以期全面表述油松根系固土的力学机制。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究区位于河北省围场县木兰围场自然保护区内，属于蒙古高原以南和燕山以北的汇接地带，包括阴山山脉、大兴安岭山脉的尾部向西南延伸和燕山山脉余脉的结合部。地理坐标为北纬 41°47′—42°06′，东经 116°51′—117°45′；属于中温带向寒温带过渡、半干旱向半湿润过渡、大陆性季风型高原山地气候。区内地貌类型多样，海拔高度在 750～1 829 m 年均降水量 380～560 mm，气候多变，水热同季，年平均气温－1.4～4.7 ℃，无霜期 67～128 d。主要树种为油松、白桦(*Betula platyphylla*)、山杨(*Populus davidiana*)、华北落叶松、蒙古栎(*Quercus mongolica*)等等。

1.2　根系材料

试验材料于 2012 年 7 月取自河北木兰林管局下属北沟林场，为使根样具有代表性，选取不同坡面、不同坡度上生长正常的油松若干棵，为保证林木的成活，对油松某一生长方向的根系进行半挖掘法，在采掘过程中尽量避免对根系的机械损伤。对挖掘出的根系，随机选取生长正常、茎杆通直均匀、径级为 1～8 mm 左右的鲜活根，清洗后，分径级将其用密封袋密封，在实验室冰箱 4 ℃环境中冷藏保存。应尽快测定根系材料，以保证试验时根系材料的新鲜状态，同时采集实验区土壤用于实验室模拟根系生长环境。

1.3　根系力学特性测定与数据分析

本研究根系拉力学特性测定选用微机控制电子万能试验机，型号 WDW-100E，试验力测量范围 400～100 kN，试验力分辨力 0.001%，位移分辨力 0.001 mm，速度范围 0.001～500 mm/min，根系拉伸试验根系范围 1.0～8.0 mm，标距 100 mm，拉伸速率 10 mm/min。以单根在夹具中部或接近中部处破坏时数据为有效数据，保证根系的断裂是由于拉力引起的而不是由于其他的因素导致的。根土界面摩擦特性的测定选用北京林业大学植被力学实验室自主研发的根系拉拔试验机，加载横梁移动速度 $V=0.01\sim5$ mm/s(1 kHz)；定位精度±0.05，重复定位精度±0.03；最大拉力 10 kN；试验根系范围 1.0～8.0 mm，加载速度为 10 mm/min；土壤的物理特性会影响试验测定结果，本研究中土壤质地为砂壤土，为了符合实验地实际情况，将土壤条件控制干密度在 1.52 g/cm^3，含水率为 12.72%。

根土复合体的抗剪特性采用 ZS08-D3 全自动三轴仪，选取油松根系和实验地土壤，依据国标《GB-

T50123—1999 土工试验方法标准》，以固结不排水(CU)的方式对不同直径的根系进行试验，试验根系直径为 3，5，7 mm；根土复合体抗剪强度根据摩尔—库伦定律：

$$\tau=\sigma\tan\varphi+C$$

式中：τ——根土复合体抗剪强度值(kPa)；σ——对根土复合体施加的轴向正应力值(kPa)；C——根土复合体的内黏聚力(kPa)；φ——根土复合体的内摩擦角(kPa)。

采用 SPSS 18.0 对试验数据进行分析。数据分析前对原始数据进行 Kolmogorov—Smirnov 检验，以确保试验数据满足正态分布。如不满足正态分布，则要对数据进行对数转化。根系直径与抗拉力和抗拉强度的关系采用回归分析，摩擦力与根系直径的关系也采用回归分析($p=0.05$)。

2 结果与分析

2.1 根系抗拉力学特性

Wu 氏模型认为，根纤维提高土壤的抗剪强度主要是通过根土接触面的摩擦力把土壤中的剪应力转换成根的拉应力来实现的[18]，所以根系抗拉特性是研究根系固土机制的基础。本试验共获得有效根系 123 根，抗拉力与直径的关系如图 1 所示。在 1～8 mm 内，根系抗拉力的最小值为 10 N($D=1.0$ mm)，最大值为 643 N($D=7.75$ mm)，抗拉力大小随直径的增大而增加。油松根系抗拉力与直径之间存在幂函数关系 $y=9.268x^{2.078}$($R^2=0.971$，$p<0.001$)，根系抗拉力随根径增加增长较快。

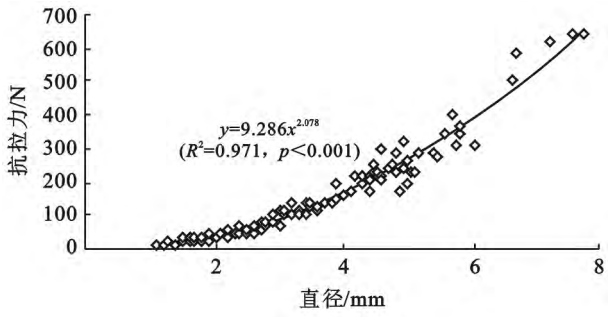


图 1 土壤抗拉力与直径的关系

抗拉强度是材料拉断前承受的最大应力值，能够反应材料的平均受力情况。油松根系的抗拉强度随根径的变化规律如图 2 所示。抗拉强度最大值为 18.41 MPa($D=1.6$ mm)，最小值为 9.02 MPa($D=4.89$ mm)，根系抗拉强度大致沿平均抗拉强度(13.17 MPa)在±5 MPa范围内均匀分布，抗拉强度随直径的增加无明显的变化规律。说明在 1.0～8.0 mm内油松根系抗拉强度与直径无明显相关性，单根抗拉强度沿平均抗拉强度上下波动。

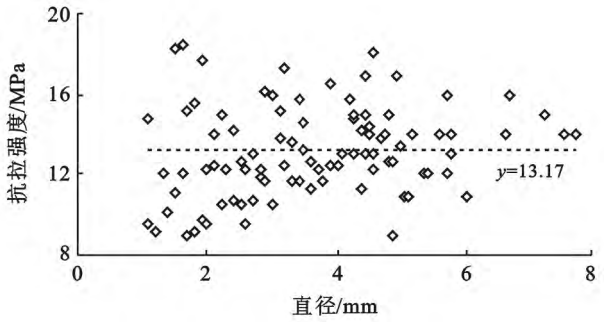


图 2 土壤抗拉强度与直径的关系

根系受拉的应力—应变关系，是根系的一个重要力学特征，是研究根系结构、强度、变形、损伤和断裂理论以及对根土复合体进行力学分析的主要依据之一。本研究选取不同直径的油松根系进行应力—应变分析，结果如图 3 所示。图 3 中实线为不同直径根系的实际应力—应变过程，极限应力大小为：D_4(14.48 MPa)＞D_1(14.21 MPa)＞D_3(11.40 MPa)＞D_2(9.32 MPa)，根系的极限延伸率为：D_2(0.151)＞D_1(0.127)＞D_4(0.119)＞D_3(0.109)；对不同直径的应力—应变关系进行曲线拟合(如图 3 中虚线所示)，以多项式方程拟合度最高(表 1)，拟合度均大于 0.97，说明多项式方程可以较好的模拟油松根系的应力—应变关系。

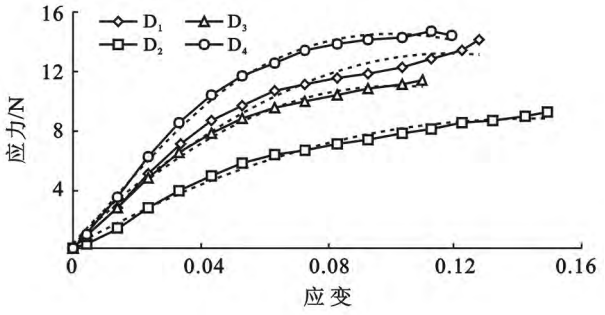


图 3 不同根径的应力－应变关系曲线

表 1 不同根径应力－应变关系回归方程

编号	直径/mm	拟合方程	R^2	p
D_1	1.3	$y=-917.7x^2+218.3x+0.267$	0.986 8	＜0.001
D_2	2.1	$y=-429.9x^2+123.0x+0.100$	0.991 6	＜0.001
D_3	3.6	$y=-1100.x^2+220.3x+0.098$	0.996 6	＜0.001
D_4	4.0	$y=-1468.x^2+293.0x+0.029$	0.995 9	＜0.001

从油松根系受拉过程曲线可以看出，不同直径根系的应力—应变曲线都为单峰曲线，没有出现较为明显的“缩颈”现象，应力—应变曲线都表现出根系的弹

塑性材料特征,在受拉的初期阶段,荷载、变形、应力和应变都按一定比例增加,表现出弹性材料特征,而随着应力的增大,当应力超过弹性极限,根系的变形就迅速进入弹塑性变形阶段,应变加速增长,而应力却没有相应的加速增长,因此应力—应变曲线变的平缓上凸、斜率减少,最终达到根系的极限应力,根系断裂。

2.2　根系与土壤摩擦特性研究

摩擦加筋理论认为,自然状态下,当根系受到外力荷载被拔出时,土壤与根系之间的摩擦力将阻止根系被拔出,只要根系具有足够的强度,并与土壤产生足够的摩阻力,则存在林木根系的土体就可保持稳定。因此,根系与土壤界面摩擦性能是根系固土机制研究的另一重要方面。

油松根系在拔出荷载作用下的试验结果有根系被拔出和被拉断两种基本情况,无论是被拔出或者拔断,以拔出过程中的最大摩擦力作为油松根土界面摩擦的极值。在 3 种埋深情况下,每种埋深分别选择不同直径的根系进行 18 次试验,从油松根土摩擦力与根系直径的关系(图 4)可以看出,在不同埋深情况下,根土摩擦力均随着根系直径的增大而增大。这是由于根系直径的增大,根系与土壤之间接触面积增大所导致的。最大摩擦力随着根系埋深的增加而增大,这是由于随着埋深的增加,土壤对根系的压力增大,从而增大根土界面的摩擦力。在 3 种埋深情况下,摩擦力随直径的变化规律都近似线性($p<0.01$),埋深越大,摩擦力增长越快。

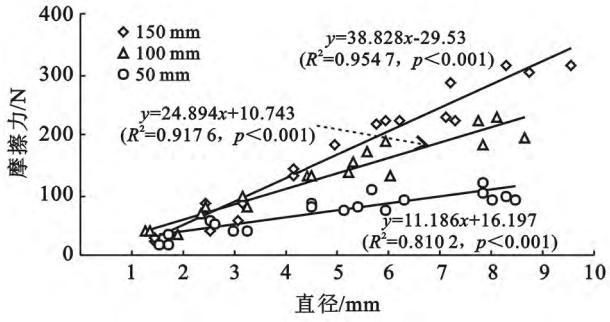


图 4　不同埋深下摩擦力与根系直径的关系

2.3　根土复合体抗剪效果研究

不同围压下素土和不同埋根方式的根土复合体抗剪强度如表 2 所示。200 kPa 围压下,素土的内摩擦角、黏聚力和抗剪强度最小,分别为 20.5°,19 和 93.8 kPa;600 kPa 围压下 7 mm 垂直根的根土复合体的内摩擦角、黏聚力和抗剪强度最大,分别为 32.1°,63 和 439.4 kPa;相同围压下的两种不同埋根方式,内摩擦角、黏聚力和抗剪强度都随根径的增大而增大,且垂直根根土复合体抗剪强度大于水平根根土复合体。相同根径下,垂直根根土复合体抗剪强度>水平根根土复合体>素土;相同埋根方式下的根土复合体抗剪强度随围压的增大而增加,600 kPa 围压时根土复合体抗剪强度>400 kPa 围压时抗剪强度>200 kPa 时抗剪强度;说明水平和垂直两种埋根方式对含有不同直径油松根系的土壤抗剪强度有增强作用,其中垂直埋根方式效果更明显,根系直径越大,所受的围压越高,根土复合体的抗剪强度就越大。

表 2　根土复合体抗剪强度计算结果

试 样	根径/mm	内摩擦角/(°)	内黏聚力/kPa	不同围压下根±复合体抗剪强度/kPa		
				200 kPa	400 kPa	600 kPa
素 土	—	20.5	19	93.8	168.6	243.3
根土复合体(水平根)	3	24.3	36	126.3	216.6	306.9
	5	27.5	48	152.1	256.2	360.3
	7	29.5	59	172.2	285.3	398.5
根土复合体(垂直根)	3	28.2	39	143.2	250.5	357.7
	5	30.3	56	172.9	289.7	406.6
	7	32.1	63	188.5	313.9	439.4

3　结 论

油松根系的平均抗拉力大小随根系直径成幂函数关系快速增长,平均抗拉强度随根径的增长没有明显的变化规律,且变化幅度较小。这与多数学者对于根系直径与抗拉力的关系研究结论相同,但是和直径与抗拉强度的关系研究所得出的结论不同[19-20]。这说明,直径是影响油松抗拉力大小的直接因素,而抗拉强度作为反映材料平均受力情况的指标在一定程度上不受根径影响,这与材料力学对抗拉强度的定义相同[21],而油松根系的这一现象主要是由于根系材料的非均一性导致的。由于抗拉强度与直径关系的不确定性,根系抗拉强度的研究仍是今后研究的重点,还需要通过改进夹具来实现极细根和极粗根的测

量，以丰富根系测量的试验范围。

不同直径油松根系的极限应力大小为：D_4（4.0 mm）＞D_1（1.3 mm）＞D_3（3.6 mm）＞D_2（2.1 mm），根系的极限延伸率为：D_2＞D_1＞D_4＞D_3，根系的极限应力和极限伸长率与直径无明显的关系，这种现象主要是由于根系的组织成分含量不同所引起的，需对根系进行成分分析后才能作出合理的解释[22-24]；结果表明，直径很小的根系也能表现出很强的应力特性，说明细根具有非常显著的固持土壤和防止浅层滑坡的作用。所有的应力—应变关系规律，均以二次多项式方程拟合效果最好，说明二次多项式方程能够较好的反应油松根系应力—应变的关系，这与陈丽华等[25]对林木根系本构方程的研究结论相一致。

当拔出荷载大于根系抗拉力而小于根土界面摩擦力的时候，根系被拔断；当拔出荷载小于根系抗拉力而大于根土界面摩擦力的时候，根系被拔出。无论是被拔出还是拔断，由于根土界面的摩擦特性，都阻止了根土之间的相对位移，从而起到锚固土体的作用。根土界面最大摩擦力随根径增加近似线性增长，根径越大，根系越深，根土界面摩擦力就越大，对土壤的摩擦锚固作用越强，这是由土体压力和根土界面的摩擦系数决定的。

相同根径时，根土复合体的抗剪强度随围压的增加而增大；相同围压下，复合体的抗剪强度随根径的增加而增大；相同的根径和围压下，垂直埋根方式的抗剪效果好于水平埋根方式。张超波等[26]，杨璞等[27]关于根对土壤加强作用的研究也说明根系的存在对增加根土复合体的黏聚力和抗剪强度有促进作用。因此，在自然状态下，根系越粗，垂直生长的深度越深，固土效果就越好，防止滑坡的能力就越强。

综上所述，油松根系的固土机制除与根系形态有关外，其力学机制主要包含根系的抗拉力学特性和根土界面的摩擦特性。根土复合体的三轴试验，验证了根系存在对增加土壤抗剪性能的积极作用，当土体间出现滑坡裂缝时，含根土壤的根系快速增长的应变有利于把根系所受的拉力通过根土界面的摩擦力向土体深层传递，同时在根系伸长系数较大的情况下，在受拉过程中根系较大的形变量也有利于缓冲土壤的下滑力，提高根系固土能力，维持坡面稳定。

[参 考 文 献]

[1] 严小龙. 根系生物学：原理与应用[M]. 北京：科学出版社，2007.

[2] 杨维西，赵廷宁，李生智，等. 人工刺槐林和油松林的根系固土作用初探[J]. 水土保持学报，1988，2(4)：38-44.

[3] 张金池，康立新，卢义山，等. 苏北海堤林带树木根系固土功能研究[J]. 水土保持学报，1994，8(2)：43-47.

[4] 解明曙. 林木根系固坡力学机制研究[J]. 水土保持学报，1990，4(3)：7-14.

[5] 周跃，陈晓平，李玉辉，等. 云南松侧根对浅层土体的水平牵引效应的初步研究[J]. 植物生态学报，1999，23(5)：458-465.

[6] 周跃，李宏伟，徐强. 云南松幼树垂直根的土壤增强作用[J]. 水土保持学报，2000，14(5)：110-113.

[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] 谢春华，关文彬，张东升，等. 长江上游暗针叶林生态系统主要树种的根系结构与土体稳定性研究[J]. 水土保持学报，2002，16(2)：76-79.

[9] 刘秀萍，陈丽华，宋维峰，等. 油松根系抗拉应力—应变全曲线试验研究[J]. 中国水土保持科学，2006，4(2)：66-70.

[10] 刘小光，赵红华，冀晓东，等. 油松和落叶松根与土界面摩擦特性[J]. 摩擦学学报，2012，32(6)：550-556.

[11] 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.

[12] Holch A E. Development of roots and shoots of certain deciduous tree seedlings in different forest sites[J]. Ecology, 1931,12(2):259-298.

[13] Ziemer R R, Swanston D N. Root strength changes after logging in Southeast Alaska [R]. Washington: Forest Service, U. S. Department of Agriculture, Research Note PNW306, 1977.

[14] Burroughs E R, Thomas B R. Declining root strength in Douglas-fir after falling as a factor in slope stability [M]. Research Paper INT-190, USDA Forest Service. Intermountain Forest and Range Experiment Station, 1977.

[15] Gray D H, Sotir R B. Biotechnical and soil bioengineering slope stabilization: A practical guide for erosion control[M]. Chichester: John Wiley and Sons, 1996.

[16] Wu T H. Investigation of landslides on prince of Wales Island, Alaska [R]. Columbus: Department of Civil Engineering, Ohio State University, Geotechnical Engineering Report No15, 1976:94-101.

[17] Waldron L J. The shear resistance of root-permeated homogenous and stratified soil [J]. Soil Science of America Journal, 1977,41(5):843-849.

[18] Wu T H, Beal P E, Lan C. In situ shear test of soil root systems [J]. Journal Geotechnical Engineering, 1988,114(12):1376-1394.

[19] 宋维峰，陈丽华，刘秀萍. 树木根系固土力学机制研究综述[J]. 浙江林学院学报，2008，25(3)：376-381.

（下转第 14 页）

2.46 cm，是对照点的 45 倍。地表粗糙度的增加，能提高起沙风速，从而减少风蚀量。

表 2 高立式格状沙障内地表粗糙度 cm

风速仪编号	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	平均	对照点
粗糙度	2.50	4.37	2.77	0.64	2.01	2.46	0.05

3 结 论

本文对一种新型的防沙措施——高立式格状沙障(高 1 m，长×宽＝8 m×8 m)的防风效益进行了观测。研究表明该沙障明显降低了风速，增大了地表粗糙度，从而能有效地减少沙障内风蚀的发生。高立式格状沙障除了在沙障内起固沙作用以外，由于其高度比较大，还能起到阻沙的作用；即使高立式格状沙障前沿积沙高度和格状沙障的高度持平后，还能继续起到阻固沙的作用，可以大大延长沙障的使用年限。

本文中高立式格状沙障内设置了 5 套梯度风速仪，观测系统本身也会对障内风速和风向产生一些影响。为了减小这种影响，野外风速观测系统应该尽可能地轻便，以减少仪器本身对空气流场的影响。此外，今后可以对不同规格(高度、长度、宽度和孔隙度等)高立式格状沙障的防风防沙效益进行系统研究，以得到高立式格状沙障的最佳配置。

[参 考 文 献]

[1] 吴正. 风沙地貌与治沙工程学[M]. 北京：科学出版社，2003：319-324.

[2] 屈建军，井哲帆，张克存，等. HDPE 蜂巢式固沙障研制与防沙效应实验研究[J]. 中国沙漠，2008，28(4)：599-604.

[3] 常兆丰，仲生年，韩福桂，等. 黏土沙障及麦草沙障合理间距的调查研究[J]. 中国沙漠，2000，20(4)：111-113.

[4] 张克存，屈建军，牛清河，等. 青藏铁路沿线砾石方格固沙机理风洞模拟研究[J]. 地球科学进展，2010，25(3)：284-289.

[5] 凌裕泉. 草方格沙障的防护效益[C]// 中国科学院兰州沙漠研究所沙坡头沙漠科学研究站. 流沙治理研究. 银川：宁夏人民出版社，1980：1-50.

[6] 钟卫，刘涌江，杨涛. 3 种沙障防风固沙效益比较的风洞实验研究[J]. 水土保持学报，2008，22(6)：7-12.

[7] 王涛. 中国风沙防治工程[M]. 北京：科学出版社，2011：171-186.

[8] Stanhill G. A Simple instrument for the field measurement of turbulent diffusion flux[J]. Journal of Applied Meteorology, 1969, 8(4): 509-513.

[9] Judd M J, Raupach M R, Finnigan J J. A wind tunnel study of turbulent flow around single and multiple windbreaks(part I): Velocity fields [J]. Boundary-Layer Meteorology, 1996, 80(1/2): 127-165.

[10] 吕萍，董治宝. 戈壁风蚀面与植被覆盖面地表性质粗糙度长度的确定[J]. 中国沙漠，2004，24(3)：279-285.

[11] 刘小平，董治宝. 砾石床面的空气动力学粗糙度[J]. 中国沙漠，2003，23(1)：40-47.

[12] 张瑞麟，刘果厚，崔秀萍. 浑善达克沙地黄柳活沙障防风固沙效益的研究[J]. 中国沙漠，2006，26(5)：717-721.

(上接第 10 页)

[20] 吕春娟，陈丽华，周硕，等. 不同乔木根系的抗拉力学特性[J]. 农业工程学报，2011，27(S1)：329-335.

[21] 陈忠安，王静. 材料力学[M]. 北京：北京大学出版社，2009.

[22] Marie G, Alexia S, Franck S, et al. The influence of cellulose content on tensile strength in tree roots[J]. Plant and Soil, 2005, 278(1/2): 1-9.

[23] 蒋坤云，陈丽华，盖小刚，等. 华北护坡阔叶树种根系抗拉性能与其微观结构的关系[J]. 农业工程学报，2013，29(3)：115-123.

[24] 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.

[25] 陈丽华，余新晓，刘秀萍，等. 林木根系本构关系[J]. 山地学报，2007，25(2)：224-228.

[26] 张超波，陈丽华，刘秀萍. 林木根系黄土复合体的非线性有限元分析[J]. 北京林业大学学报，2008，30(S2)：221-227.

[27] 杨璞，向志海，胡夏嵩，等. 根对土壤加强作用的研究[J]. 清华大学学报：自然科学版，2009，49(2)：305-308.