

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

罗春燕¹, 吴楚², 芦光新³, 德科加⁴, 张明⁴, 王军邦⁵

(1. 青海大学 土木工程学院, 西宁 810003; 2. 长江大学 园艺园林学院, 湖北 荆州 4340252;

3. 青海大学 农牧学院, 西宁 810033; 4. 青海省畜牧兽医科学院, 810016; 5. 中国科学院 地理科学与资源研究所, 北京 100094)

摘 要:为研究高寒地区草地恢复过程中牧草根系固土稳定性机制,在青藏高原三江源区对燕麦根—土复合体进行原位拉拔试验,系统分析了燕麦根—土复合体抗拉力的表现特征及影响因素。结果表明:(1)根—土复合体的抗拉力在不同地形、种植方式等不同情况下,表现出的特征不一致。高密度区比低密度区的抗拉力小,撒播区比条播区的抗拉力小,高坡度区比低坡度区抗拉力小,远离冲蚀沟区比冲蚀沟区附近抗拉力小,且差异显著($P < 0.05$)。(2)根—土复合体的抗拉力与地上生物学性状相关性低,与根系生物学性状相关性高。(3)复合体的抗拉力与根径(RD)、须根条数(RN)呈极显著正相关($P < 0.01$),与根长(RL)、单根生物量(RW)呈显著正相关($P < 0.05$)。

关键词:三江源区;植物根—土复合体;抗拉力;生物学特性;燕麦

中图分类号:TU411.7

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2014)05-0260-07

Tensile Resistance Characteristics of Root-Soil Composite System and Influence Factor Analysis in Sanjiangyuan Regions of Qinghai-Tibet Plateau

LUO Chun-yan¹, WU Chu², LU Guang-xin³, DE Ke-jia⁴, ZHANG Ming⁴, WANG Jun-bang⁵

(1. College of Civil Engineering, Qinghai University, Xi'ning 810016, China; 2. College of Horticulture and Gardening, Yangtze University, Jingzhou, Hubei, 434025, China; 3. College of Agriculture and Animal Husbandry, Qinghai University, Xi'ning 810016, China; 4. Qinghai Academy of Animal Science and Veterinary Medicine, Xi'ning 810016, China; 5. Institute of Geographic Sciences and Nature Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: To study the stability mechanism of the root-soil complex in restored alpine meadow, the tests for the tensile resistance of plant roots were carried out in Sanjiangyuan Regions of Qinghai—Tibet Plateau. The performance characteristics of the root tensile resistance and factors affecting root-soil complex were analyzed. All the results showed that: (1) the root-soil complex showed different characteristics under the conditions of different terrain and different planting way, the root tensile resistance in the area with high density of oats is smaller than that in the area with low density of oats, sowing ways affected the root tensile resistance, the root tensile resistance in the area with drilling sowing way is smaller than that in the area with scattering sowing way, slopes affect the root tensile resistance, the root tensile resistance in the area with greater slopes is smaller than that in the area with less slopes, in addition, the distances from the planting sites to the erosive ditches also affect the root tensile resistance, the root tensile resistance in the areas far away from the erosive ditches is significantly less than that in the area near the erosive ditches ($P < 0.05$); (2) the correlation between root tensile resistance and the biological characteristics of the ground-above parts of oat plants was low, but is high between root tensile resistance and the biological characteristics of the ground-below parts of oat plants; (3) there are significant positive correlations with root diameters (RD), root numbers ((RN), root length (RL), the biomass of single roots (RW) ($P < 0.05$).

收稿日期:2013-11-27

修回日期:2013-12-19

资助项目:国家自然科学基金项目“青藏高原耐低温纤维素分解真菌多样性的研究”(41261064);农业部公益性行业(农业)科研专项项目“青藏高原社区畜牧业关键技术与示范”(201203007)

作者简介:罗春燕(1974—),女,重庆市人,副教授,研究方向:土力学。E-mail:1196810929@qq.com

通信作者:王军邦(1974—),男,青海省湟中县人,博士,研究方向:全球变化生态学。E-mail:jbwang@igsnr.ac.cn

Key words: Sanjiangyuan Regions of Qinghai-Tibet Plateau; root-soil complex; root tensile resistance, biological characteristics; Oats

植物的根系是植物重要的组成部分之一,它既是源器官,也是汇器官。从生物学和生态功能来看,根系具有吸收、输送水分和营养物质的生物学功能,同时参与土壤—环境之间物质循环和能量流动生态过程^[1];从根系固土力学模型来看,主要体现在两方面:其一,深粗根系的锚固作用和浅细根系的三维加筋作用^[2]。根系在生长发育过程中,通过穿插、缠绕、固结等形式与土体发生相互作用,促使土—土以及根—土间的摩擦力以及土体的黏聚强度增加^[3-4];其二,根系自身具备的抗拉、抗剪的性能,从而增强了土体的抗剪强度^[5-8]。因此,根系与土壤的相互作用对于稳定土体、增强土体抗风蚀和水蚀的能力具有重要的意义^[9-12]。

青藏高原由于地处特殊的环境地理位置,其生态系统极其脆弱性。草地一旦破坏,地表 10—20 cm 土壤在风蚀、水蚀作用下极易产生水土流失,形成荒漠化土地。近年来,由于气候变化和人类扰动的影响,青藏高原因水土流失造成的荒漠化问题日趋严重,在世界范围内引起了高度的关注。面对草原退化、水土流失、荒漠化这一严峻问题,近些年来,有关部门和学者对退化草地的恢复和治理等方面开展了大量的研究工作^[13-15]。但是荒漠化的土壤营养匮乏、土壤水分含量低,牧草根系难以固土,土壤经常遭受雨水冲蚀的危害,这不仅造成经济损失,而且还会引起再次退化的可能,从某种程度上说,无法实现真正意义上的植被恢复和退化草地的治理。因此,针对这种特殊生境,有必要从生物学特性和生物力学特性的层面上重新认识植物对复杂环境的适应能力及其对恶劣气候造成灾害的抵抗能力。鉴于植物根系在固土和对土壤抗冲方面的强大作用,从植物根系及其根—土复合体力学特性的角度,研究植物根系的固土机制和土壤的抗冲性能,对退化草地的治理与植被恢复具有重要的意义。

植物根系的抗拉拔力是表征植物根系固持土体力学作用机理的一个重要参数。当土体遭受破坏产生滑动面时,植物根系的较大变形可以将植物根系所受到的拉拔力传递到稳定的深层土体,也可以将植物根系所受的拉拔力转化为植物根系的侧向摩擦阻力,从而降低植物根系本身所受到的拉拔力,这样即可增加植物根系固持土体的能力^[16]。目前根—土复合体的研究主要从准黏聚力原理^[17]、摩擦加筋原理^[18]和等效围压原理^[19]3个方面揭示了根—土复合体的力

学特性变化机制。根—土加筋复合体力学效应的试验表明,根—土复合体达到极限强度发生破坏时,根系很少被拉断,而更多的是根系从土体中被拉出,因此分布在土体浅层的细根系对土体加固作用的实质是根系通过与土体的接触作用,将部分甚至全部抗拉能力转化为土体的抗剪切强度^[20-21]。因此,通过研究根—土复合体的抗拉力比测定单个根系的抗拉力及拉力强度,在反映根系固土和稳定土体方面更具有实际的意义。

本研究通过原位根—土复合体的拉拔试验,对青藏高原三江源区燕麦种植区根—土复合体的抗拉力进行研究,分析燕麦种植区不同地形、种植方式等条件下,根—土复合体抗拉力的表现特征,结合燕麦生长期植株和根系等的生物学指标,分析根—土复合体的抗拉力与生物学性状之间的相互关系。旨在明确青藏高原三江源区人工草地植物根—土复合体抗拉力的变化规律,揭示根—土复合体稳定性的影响因素,以期为研究区及其周边地区退化草地恢复和治理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验样区概况

试验选在青海大学—清华大学三江源高寒草地生态系统野外观测站进行,观测站所处位置为 214 国道 716 km 处,青海省玉树州称多县珍秦镇,地理坐标为北纬 33°24′30″,东经 97°18′00″,海拔高度为 4 270 m,气候为典型的高原大陆性气候,年平均气温为 -5.6~3.8℃,年均降水量为 562.2 mm,年度降水主要分布在 6—9 月份,约占全年降水的 75%。

1.2 试验种植区及植物

试验种植区面积为 14.53 hm²,地处冲积扇下方的二级阶地,北部地势高且坡度较大,平均坡度为 15°~20°,南部地势低且稍微平整,从东向西形成一个缓坡,平均坡度为 5°~10°,坡向北偏西 10°,土壤为典型砂壤土,整个种植区砾石较多。

根据试验区气候特点,选取对当地环境适应性较好的燕麦品种(青海 444),2013 年 5 月 15 日播种,种植方式主要采用条播和撒播,以磷酸二铵和市售成品有机肥作为基肥。采用的种植流程是:地表适度平整、表层翻耕、磨耙开沟、种子播种、磨耙覆土填压。

1.3 根—土复合体的拉拔力测定

目前没有适宜的拉力仪。拉拔力测定参照刘国

彬^[22]的方法,稍有改动。主要采用以弹簧秤为主体的记录仪。测定时用特制的曲面根夹,夹紧齐地面部分燕麦根茎的两端,用两根尼龙绳与弹簧秤相连,并保持垂直,尼龙绳的长度视田间燕麦植株的平均高度而定,测定时采用的尼龙绳长度一致。记录以植株周围土壤开始松动并拔起的瞬间刻度值,作为衡量拉力(F_1)的相对大小,再测定拔起的植物根—土复合体(拔起的根—土复合体大小尽可能保持一致,以植株为中心直径 d 值为 5 cm,多余的土体人为切去)的重力为(F_2),以 $\Delta F = F_1 - F_2$ 作为衡量根—土复合体拉拔力的相对大小。 ΔF 的统计单位采用力的国际单位,用 N 表示。

1.4 测定内容

在燕麦抽穗期,以种植密度、种植方式、坡度及冲蚀沟作为 4 种不同处理,分别测定燕麦根—土复合体相对拉拔力。根据燕麦种植区种植、地形及冲蚀程度等实际情况,燕麦种植密度分为 5 个水平,即 0~50 株/ m^2 、50~100 株/ m^2 、100~150 株/ m^2 、150~200 株/ m^2 、200 株以上/ m^2 ;种植方式主要分条播和撒播 2 个水平;坡度分 0~10°,10~20°,20~30°,30°以上 4 个水平;按离开冲蚀沟的距离分 0—5 cm,5—10 cm,10—15 cm,15—20 cm,20—25 cm。

1.5 燕麦生物学指标的测定

在现场采用钢卷尺测定燕麦植株的高度(H),清点分蘖数(MN),并逐一做好标记并编号,抖落燕麦植株根部的土壤,避免损伤根,尽可能保证根在土壤中的原位形状,测定根自然分散宽度的最大值,作为根分散幅度值(RF)。将完整植物带回室内,用自来水冲去根周围的土壤,自然晾干,自根茎处剪断,测定单株地上生物量(SW)及单根生物量(RW),燕麦根系指标主要有根径(RD)、根长(RL)、须根条数(RN)。除根径直径采用游标卡尺量测外,其它均用直尺测定,单株地上生物量和地下生物量采用便携式天平称重。

1.6 数据统计与分析

所有数据均用 Microsoft Excel 录入并作图,采用 DPS 6.55 进行数据分析^[25]。方差分析差多重比较采用 LSD 法,两对平均数的比较采用 t 检验。

2 结果与分析

2.1 燕麦根—土复合体抗拉拔力的原位表现特征

在试验种植区主要针对播种情况和地形条件,进行燕麦根—土复合体抗拉力试验。图 1 可以看出,在燕麦不同种植密度与根—土复合体的拉拔力有关。本研究设置的 5 个种植密度水平下,100~150 株/ m^2

的密度是抗拉拔力由大变小的一个“拐点”,在低密度种植区,燕麦根—土复合体抗拉拔力大,在高密度种植区,燕麦根—土复合体抗拉拔力小,低密度种植区和高密度种植区的抗拉力值有差异显著性($P < 0.05$)。这一结果可能的原因是,当燕麦种植密度较小时,燕麦植株高度高,分蘖数多,叶片数多,且可以充分进行光合作用,这样,地上部分可为根系生长和发育提供大量的光合作用的产物,单个根发育健全,且其长度和粗度相对较大,对土体的紧密地进行包裹和缠绕,因而其根系对土体的凝聚能力强,土体的稳定性好,因此根—土复合体的抗拉力大。条播的方式与撒播方式相比,根—土复合物的抗拉力较大,且差异显著($P < 0.05$) (图 2)。这可能的原因与种植的深度有关,在三江源地区,燕麦条播时的开沟深度一般为 5~8 cm,种子播种萌发后,其根系很快能够入土,因土壤相对较松软,根系的生长发育速度比较快。在不同坡度的种植区,燕麦根—土复合体的抗拉力大表现为:坡度大的地段(20°以上),根—土复合体的抗拉力较小,而在相对平整的地段上(20°以下),根—土复合体的抗拉力较大(图 3)。根—土复合体的抗拉力随着坡度增加而变小,可能与土壤含水量、紧实度和容重等物理性质有关。坡度相对较大的地段,土层含水量低,土壤结构相对松散,土层相对薄,这些因素影响了燕麦根系生长发育,也影响了根系和土壤的结合力,因此,根—土复合体的抗拉力减小。图 4 所示的结果表明,离冲刷沟越近,抗拉力越小,相反,离冲刷沟越远,抗拉拔力越大。在野外,可以肉眼观察到,暴雨冲蚀形成的细沟两侧,存留的细根仍呈网状分布而土粒已全流失,在有的沟壁发现土粒和团聚体被根系串连呈念珠状悬于沟沿,因此,根—土复合体中的根密度,可能也是影响抗拉拔力的一个因素。从上述试验结果可以看出,植物的生长状况、根系的发育以及根—土复合体中根密度,与根—土复合体的抗拉力有一定的关系,尤其是单根平均直径与根—土复合体的抗拉力,不同种植方式下,燕麦地上生长过程中光合作用的产物在根部的积累不同,单根平均直径也不尽相同,单根直径大,抗拉拔力也大,因此表现出的原位拉拔力的结果是:高密度区比低密度区的抗拉力小,撒播区比条播区的抗拉力小,高坡度区比低坡度区的抗拉力小,远离冲刷沟区比冲刷沟区附近抗拉力小。

2.2 燕麦地上生物学性状与抗拉力关系

为了进一步研究影响燕麦根—土复合体拉拔力的影响因素,选取表征试验期燕麦地上生物学性状、根系生物学性状指标,主要以两个变量间相关系数最大的趋势曲线方程和决定系数,研究燕麦根—土复合

体拉拔力与这些因素的相互关系,由图 5 可以看出,植株高度、分蘖数、单株地上生物量、叶生物量、茎生物量及总叶片数等表征燕麦地上生物学性状的 6 个指标与燕麦根—土复合体拉拔力相关系数较小,说明燕麦的地上生物学性状对燕麦根—土复合体拉拔力的直接作用较小。

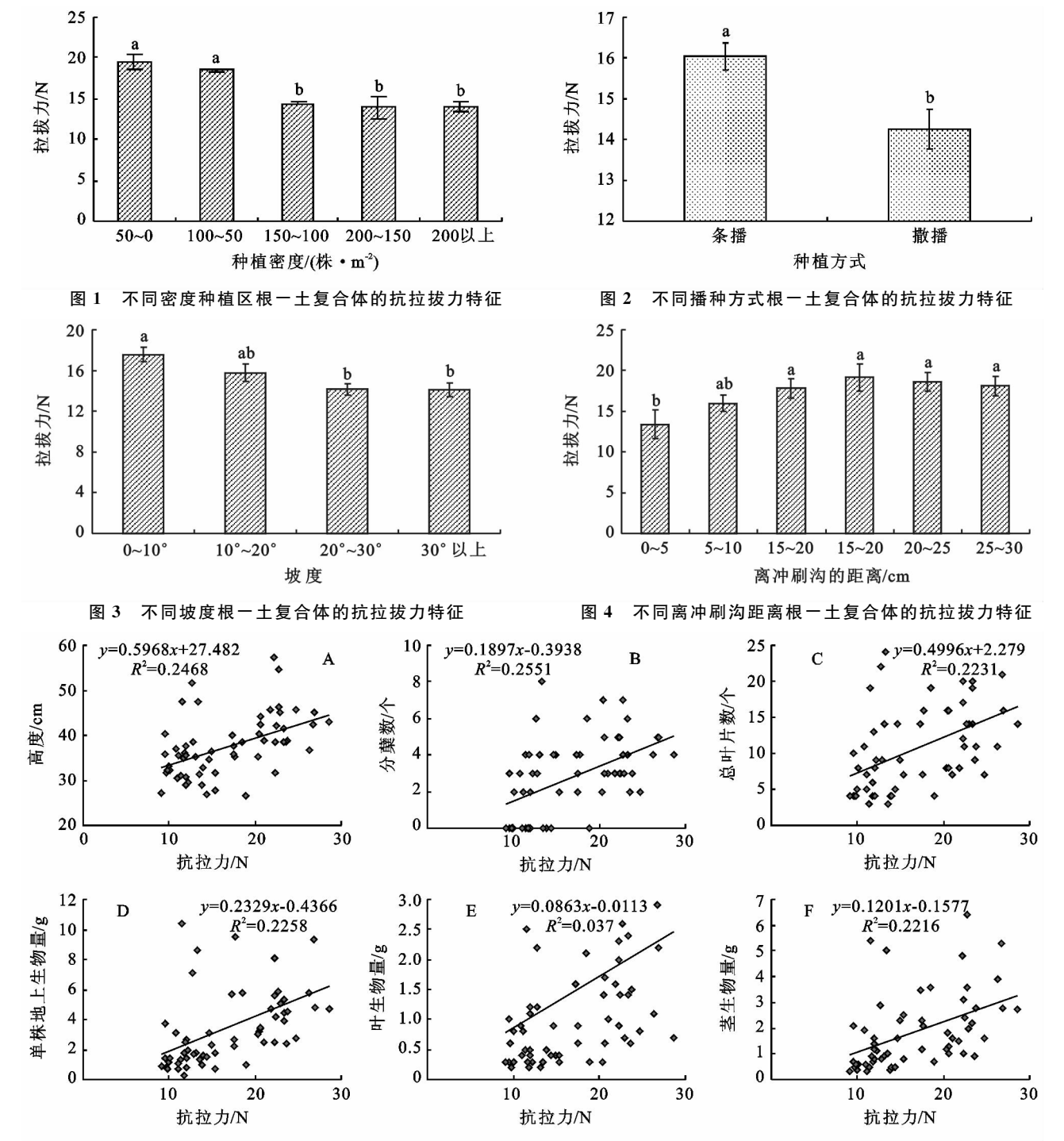


图 5 燕麦地上生物学特性与抗拉力的关系

2.3 燕麦地下生物学性状与抗拉力关系

由图 6 可以看出,表征根系的地下生物学性状与根—土复合体拉拔力关系的相关系数高,尤其是须根条数和根径的相关系数高达 0.900 0 以上,其中须根条数与抗拉力的相关系数为 $R^2 = 0.903\ 3$,根径与抗拉力的相关系数为 $R^2 = 0.953\ 7$ 。其次是单根生物量和根长,与根分散幅度的相关系数最低。由于受试验条件限制,对根在土壤中的原位分布状况,采用根分散幅度,具体测定方法是,抖落燕麦植株根部的土壤,小心地放到铺有白纸上,测定根自然分散宽度的最大值,作为根分散幅度值。实际上根在土壤中的分布形式比较复杂,如果仅仅通过测定根自然分散宽度的最大值来作为衡量根在土壤中分布情况,难免有

些不足,因此,在今后的研究中,量化根在土壤中分布的指标比较关键。

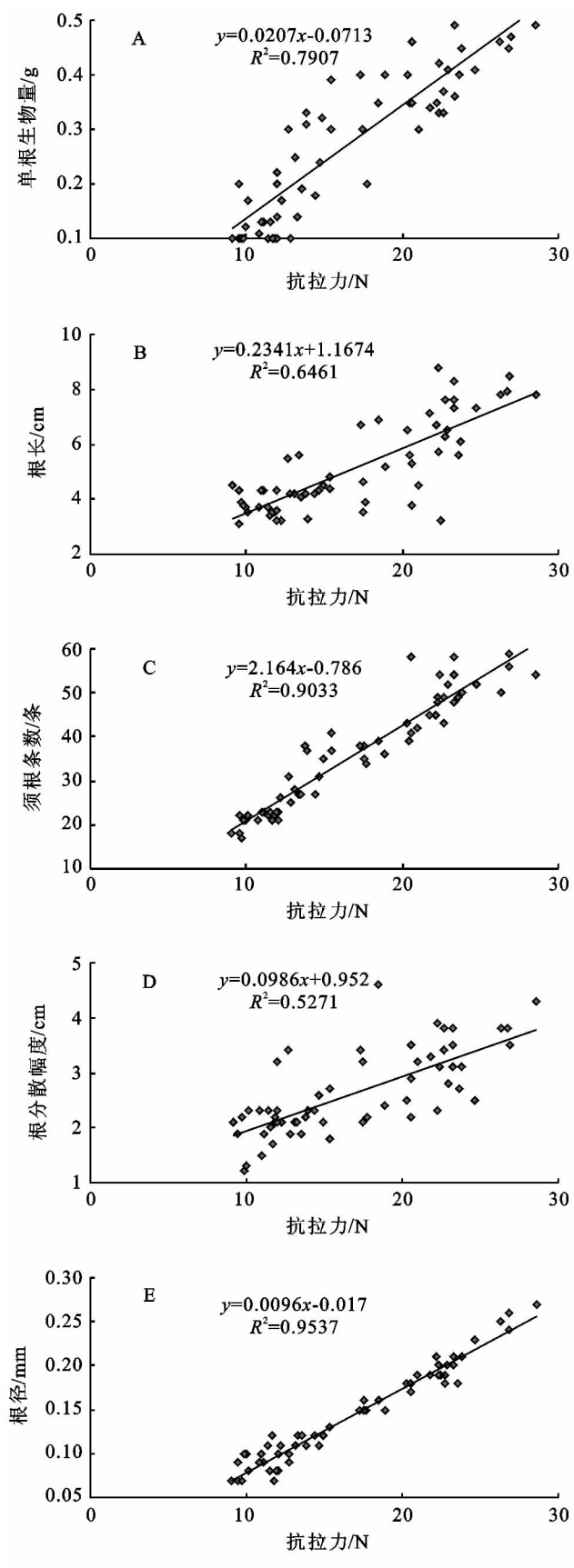


图 6 燕麦根系生物学特性与抗拉力的关系

2.4 根—土复合体抗拉力与生物学指标的相关性分析

相关分析有助于分析根—土复合体抗拉力及根系相关性状的相互关系,对生物学相关性状 6 个因子和根—土复合体抗拉力进行相关分析,所得各变量之间相关系数及各系数差异显著性结果如表 1 所示。根—土复合体抗拉力(F)与根径(RD)、须根条数(RN)呈极显著正相关($P<0.01$),与根长(RL)、单根生物量(RW)呈显著正相关($P<0.05$),与根分散幅度(RF)相关性较小。其相关系数大小排序为:根径(RD)>须根条数((RD)>单根生物量(RW)>根长(RL)>根分散幅度(RF)。根系生物学性状之间也存在相互联系,单根生物量(RW)与须根条数(RN)和根径(RD)呈极显著正相关($P<0.05$),根长(RL)与须根条数((RN)和根径(RD)显著正相关($P<0.05$);根径(RD)和须根条数((RN)呈极显著正相关($P<0.01$)。

表 1 根—土复合体抗拉力及生物学相关性状的相关性						
因子	RW	RL	RN	RF	RD	F
RW	1.0000	0.6000	0.8771*	0.4689	0.7449*	0.7907*
RL		1.0000	0.5810	0.5086	0.6361*	0.6461*
RN			1.0000	0.4537	0.8676*	0.9033**
RF				1.0000	0.4869	0.5271
RD					1.0000	0.9536**
F						1.0000

注: ** 表示在 0.01 水平上显著; * 表示在 0.05 水平上显著。

3 讨论与结论

植物根系在生长发育过程中,缠绕和固结土壤^[23]、增强土层团聚体^[24]、强化土壤渗透力^[25]以及根分泌物及有机质增加土壤中大粒级水稳性团聚体^[26]等对根系提高根土复合体的稳定性起着非常重要的作用。植物根系对土体锚固作用和加筋作用是提高土体稳定性最主要的效应和最明显的原因^[27]。稳定的土体根—土复合体增强了植物抵抗风化吹蚀、流水冲刷和重力侵蚀的能力,对促进植物根系的生长发育具有重要的意义。因此,从根土复合体稳定性的角度研究植物根系固土能力,为草地退化和植被恢复提供了一个新的思路。

根系因子与土体稳定性方面有很好的相关性^[28-29]。本研究选取单根生物量、根长、须根条数、根分散幅度及根径 5 个根的参数,同时也选取了单株生物量、分蘖数和高度 3 个表征植物地上生物性状的指标,初步得出结论,根—土复合物抗拉力主要与根系因子关系密切,包括:根的分布形式、根的数量和根的质量。大量的研究也证实了植物的根量、根径以及根长与抗拉力有一定的关系。Burroughs^[30]比较研究

了两者针叶树种根系的密度和木材采伐后根系强度,研究得出松树根系的抗拉强度在采伐后的3~5年间会下降大概50%,40个月后,根系的抗拉强度基本会消失,在林木被砍伐后的3 a内,根系数量会出现显著的下降趋势,而且单个根系所具有的抗拉强度也会有所下降。方便等^[31]在研究三叶草根系与土体的抗剪强度关系时发现,根—土复合体在同一含根量下,其抗剪强度均随着法向应力的增加而增加,在同一法向应力下,随着含根量的增大,根—土复合体的抗剪强度、粘聚力和内摩擦角均呈现出先增大后减小的趋势。无论是对乔、灌木还是草本根系的研究,都认为土壤表层有根系土壤的抗冲性高于底层土壤,根量,尤其是细根的根长、根量与土壤抗冲性的关系密切^[32]。但封金财和王建华^[33]研究发现当有少量根存在时,土层的抗剪强度可被提高,会很大程度上对边坡的稳定性产生影响。但并不是根量越多对边坡土体的加筋作用越大,而存在一个最佳值,即为临界含根量。钟亮根^[34]也认为,当土中的含根量较少时,根—土可充分接触并发挥摩阻作用,另一方面,根系的深入形成根—土复合体,使根的抗拉及抗剪能力传入到土的抗剪能力中,进而约束了土体在横向和轴向的变形,且随着含根量的增大其抗剪强度也增大,直到达到一个峰值。因此粘聚力、内摩擦角增大,但是,当根系含量达到一定含量时,因为根系数量过度增加会使根系之间互相交错,导致根系与土体不能充分形成根土复合体,因此对土体的加筋效应有所减低。本研究发现,燕麦根—土复合体的抗拉力与根量(单根生物量和徐根条数)有一定的相关性,但不是影响抗拉力的主要因素。

很早以前就有学者提出不同直径的根系对根系抗拉强度的影响非常显著,并认为直径小的细根所具有的抗拉强度比粗根要高出数倍^[35]。Bischetti认为植物的根系尤其是小于1.0~2.0 mm径级的植物根系,具有稳定土层结构、增加大于2 mm粒级水稳性团粒和有机质含量、创造抗冲性土体的生物动力学性质功能^[36]。刘国彬等^[22]对草本毛根即根径在0.1~1.0 mm范围内的根系的力学特性进行了测定,结果显示,这个直径范围内的根系同样也具有一定的机械强度、弹性和塑性。大量的研究发现,单根抗拉强度与根径间呈幂函数或指数函数的关系^[37-41]。李绍才等^[41]通过试验分析,得出根系达到最大伸长和根系直径有直接关系。这可能与木质素的含量有关。需要对根系做形态上的解剖加以证实。

关于根长和拉伸速率对根系抗拉强度的影响方面,张东升^[42]对长江上游针叶林的研究表明,根系的

抗拉强度随着根长的增加减小,且两者的相关关系并不是正相关,而是多数表现为幕函数关系,朱清科等^[43]对长江上游地区的峨眉冷杉、冬瓜杨和杜鹃的根系进行了研究,得出在根系弹性形变范围内,在根径相同的情况下,根长不同其弹性模量不同。但在草本植物根系方面的研究较少。

研究认为,有根系的土壤比没有根系的土壤在达到土体破坏前,能承受较大的剪切位移^[44-45]。通过试验认为,植物影响土壤剪切强度的主要因素是植物根系的形态和根系在土体中的几何分布^[46-48],随着对植物根系研究技术的不断成熟^[49-50],近年来对根系分布的研究较多,夏振尧等^[2]研究发现,含根量多并且根系分布相对均匀的土层根系分形维数较大,土层粘聚力增加值与土层内根系分形维数存在显著正相关关系。因实验条件限制,本实验没有进行根系分形维数,但采用根分布幅度作为量化根分布的大致情况,发现根分布幅度与抗拉力有一定的相关性,认为与根的分布有密切的关系。

本研究在不同坡度、不同播种方式、不同离开冲蚀沟的距离、不同种植密度等条件下,根—土复合体的抗拉力表现不同。除了上述影响抗拉力的根系因子因素,立地因子(包括当地环境、土壤环境、季节等)对根系的抗拉强度有一定的影响。对于根系深浅不同的植物,其根系固持土体的作用机理也不相同^[51]。这说明研究根—土相互作用力学效应时还有许多其他植物根系特性应该考虑,其中包括植物根系与土壤的材料特性、分布形态、根—土复合体的根系含量以及水分含量,还有根系与土、土与土之间的内摩擦角和粘聚力、不同根系特性植物的固土差异、根—土复合体中土体和根的结合方式。因此,通过定量测定根系抗拉强度、根系生物量、根系分布方向角、根系面积比(根系面积比是指剪切面上所有发挥作用的根的截面积之和与土体截面积之比)等指标,通过综合评价指标,研究根系对土体浅层加固作用是非常有必要的。

参考文献:

- [1] 郑湘如. 植物学[M]. 北京:中国农业出版社,2006.
- [2] 夏振尧,周正军,黄晓乐,等. 植被护坡根系浅层固土与分形特征关系初步研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011,30(2):3641-3647.
- [3] Abe K, Iwamoto M. An evaluation of tree-root effect on slope stability by tree-root strength[J]. J. Jpn. Forestry Sci., 1986,69:505-510.
- [4] Waldron L J. The shear resistance of root-permeated homogeneous and stratified soil[J]. Soil Science Society

- of America Journal, 1977, 41(5): 843-849.
- [5] Cammeraat E, van Beek R, Kooijman A. Vegetation succession and its consequences for slope stability in SE Spain[J]. Plant and Soil, 2005, 278(1/2): 135-147.
 - [6] Gyssels G, Poesen J, Bochet E, et al. Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water: A review[J]. Progress in Physical Geography, 2005, 29(2): 189-217.
 - [7] Stokes A, Lucas A, Jouneau L. Plant biomechanical strategies in response to frequent disturbance: uprooting of *Phyllostachys nidularia* (Poaceae) growing on landslide-prone slopes in Sichuan, China[J]. American Journal of Botany, 2007, 94(7): 1129-1136.
 - [8] Mickovski S B, van Beek L P H, Salin F. Uprooting resistance of vetiver grass (*Vetiveria zizanioides*) [M]// eco-and Ground Bio-Engineering: The Use of Vegetation to Improve Slope Stability. Springer Netherlands, 2007: 53-60.
 - [9] Operstein V, Frydman S. The influence of vegetation on soil strength [J]. Proceedings of the ICE-Ground Improvement, 2000, 4(2): 81-89.
 - [10] Ekanayake J C, Phillips C J. A method for stability analysis of vegetated hillslopes: an energy approach [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, 36(6): 1172-1184.
 - [11] Nilaweera N S, Notalaya P. Role of tree roots in slope stabilisation[J]. Bulletin of engineering Geology and the Environment, 1999, 57(4): 337-342.
 - [12] 胡夏嵩, 李国荣, 朱海丽, 等. 寒旱环境灌木植物根—土相互作用及其护坡力学效应[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(3): 613-620.
 - [13] 尚占环, 龙瑞军. 青藏高原“黑土型”退化草地成因与恢复问题的研究评述[J]. 生态学杂志, 2005, 24(6): 652-656.
 - [14] 周华坤, 周立, 赵新全, 等. 江河源区“黑土滩”型草场的形成过程与综合治理[J]. 生态学杂志, 2003, 22(5): 51-55.
 - [15] 马玉寿, 朗百宁, 李青云, 等. 江河源区高寒草甸退化草地恢复与重建技术研究[J]. 草业科学, 2002, 19(9): 1-5.
 - [16] 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.
 - [17] Gray D H, Alrefeai T. Behavior of fabric vs. fiber-reinforced sand[J]. Journal of the Geotechnical Engineering, ASCE, 1986, 112(8): 804-820.
 - [18] 赵丽兵, 张宝贵, 苏志珠. 草本植物根系增强土壤抗剪切强度的量化研究[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(3): 718-722.
 - [19] 邓卫东, 周群华, 严秋荣. 植物根系固坡作用的试验与计算[J]. 中国公路学报, 2007, 20(5): 7-12.
 - [20] 陈昌富, 刘怀星, 李亚平. 草根加筋土的室内三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(10): 2041-2045.
 - [21] 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.
 - [22] 刘国彬, 蒋定生, 朱显漠. 黄土区草地根系生物力学研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 2(3): 21-28.
 - [23] 朱显漠. 黄土高原地区植被因素对于水土流失的影响[J]. 土壤学报, 1960, 8(2): 110-120.
 - [24] 查轩, 唐克丽. 植被对土壤特性及土壤侵蚀的影响研究[J]. 水土保持学报, 1992, 6(2): 52-58.
 - [25] 李勇, 朱显漠. 黄土高原土壤抗冲性机理的初步研究[J]. 科学通报, 1990(5): 390-393.
 - [26] 吴彦. 植物根系提高土壤水稳性团粒含量的研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1997, 3(1): 45-49.
 - [27] Gray D H. Reinforcement and Stabilization of Soil by Vegetation[J]. J. Geotech. Engrg., 1974, 100(6): 695-699.
 - [28] 李勇. 黄土高原植物根系提高土壤抗冲性的有效性[J]. 科学通报, 1991(12): 935-938.
 - [29] 李勇, 徐晓琴. 黄土高原植物根系提高土壤抗冲性机制初步研究[J]. 中国科学 B 辑, 1992(3): 254-259.
 - [30] Burroughs E R, Thomas B R. Declining root strength in Douglas-fir after felling as a factor in slope stability [J]. USDA Forest Service Department of Agriculture, Research Paper, 1977: 181-190.
 - [31] 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.
 - [32] 封金财, 王建华. 乔木根系固坡作用机理的研究进展[J]. 铁道建筑, 2004(3): 29-31.
 - [33] 石焜尘, 杨军, 李秀明, 等. 林地根系对土壤抗冲性影响[J]. 中国水运, 2011, 11(11): 165-166.
 - [34] 钟亮根. 紫穗槐在赣南红层路基边坡防护应用的试验研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2008.
 - [35] Fogel R. Root turnover and productivity of coniferous forests[M]// Tree Root Systems and Their Mycorrhizas. Springer Netherlands, 1983: 75-85.
 - [36] Bischetti G B, Chiaradia E A, Simonato T, et al. Root strength and root area ratio of forest species in Lombardy (Northern Italy) [J]. Plant and Soil, 2005, 278(1/2): 11-22.
 - [37] Tosi M. Root tensile strength relationships and their slope stability implications of three shrub species in the Northern Apennines (Italy) [J]. Geomorphology, 2007, 87(4): 268-283.
 - [38] 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): 38-43.

明植物可通过根系输氧和根系微生物来影响污水中磷素的净化^[11]。同时氧气的传输,使根系周围依次形成好氧、缺氧和厌氧环境,好氧和厌氧微生物的大量存在可以使硝化和反硝化作用同时进行^[12],加强对 TN 的吸收。薄荷和水芹可能在吸收氮时优先选择吸收氨态氮,而且水芹发达的根系也大大扩展了其净化污水的空间。蘆草在实验期间不断有新芽冒出,长成完整的植株,使得试验种植密度增大,其突出的 COD 去除能力不排除这个原因。具体的原因和机理有待于进一步的试验研究,而对于富营养化水体的净化,或许可以考虑在此基础上多种优势植物的搭配使用。

试验水体富营养化浓度的设置由低到高逐渐增加,植物对主要污染物的去除率也逐渐降低,表现出一定的负相关现象。这也与很多学者的研究结果一致^[13-14]。当然去除率降低的程度和植物本身有关,不同的植物之间存在一定的差异。由于不同植物对水体中营养盐的净化优势不同,所以在具体实践操作中,要针对富营养化水质的特点,有选择地构建人工湿地进行修复,同时还要考虑到水体富营养盐的浓度。

参考文献:

- [1] 黄聪,冯宝平,张展羽.基于生态足迹的生态清洁小流域评价研究[J].中国农村水利水电,2011(6):40-43.
- [2] 杨胜敏,杨林林.北京市生态清洁小流域治污技术探讨[J].中国水土保持,2011(4):60-61.
- [3] 杨俊鹏,王铁良,范昊明,等.河流生态修复研究进展

(上接第 266 页)

- [39] 孙立达,朱金兆.水土保持林体系综合效益研究与评价[M].北京:中国科学技术出版社,1995.
- [40] 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(Z2):3445-3452.
- [41] 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.
- [42] 张东升.长江上游暗针叶林林木根系抗拉力学特性研究[D].北京:北京林业大学,2002.
- [43] 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.
- [44] Gray D H. Role of woody vegetation in reinforcing soils and stabilizing slopes[C]//Proc. Symp. Soil Reinforcing and Stabilising Techniques, Sydney, Australia, 1978:253-306.
- [45] Ekanayake J C, Marden M, Watson A J, et al. Tree roots and slope stability: a comparison between *Pinus radiata* and *kanuka*[J]. New Zealand Journal of Forest-

[J]. 水土保持研究,2012,19(6):299-304.

- [4] 张秋蕾.环境保护部发布《2012 中国环境状况公报》[N].中国环境报,2013-06-05(1).
- [5] 吴树彪,董仁杰,翟旭,等.组合家庭人工湿地系统处理北方农村生活污水[J].农业工程学报,2009,25(11):282-287.
- [6] 林文周,李莹莹.人工湿地在水体富营养化治理中的应用[J].市政技术,2012,30(4):98-99.
- [7] 邵莹.哈尔滨市人工湿地植物净污能力研究[D].哈尔滨:黑龙江大学,2012.
- [8] 常会庆,王世华,徐晓峰,等.两种水生植物对重富营养化水体修复效果研究[J].水土保持研究,2012,19(5):262-265.
- [9] 国家环境保护总局,国家质量监督检验检疫总局. GB3838—2002 地表水环境质量标准[S].北京:中国环境科学出版社,2002.
- [10] 国家环境保护总局,水和废水监测分析方法-编委会.水和废水监测分析方法[M].4版.北京:中国环境科学出版社,2002.
- [11] 李晓东,孙铁珩,李海波,等.人工湿地除磷研究进展[J].生态学报,2007,27(3):1226-1231.
- [12] 翟旭,邱凌,吴树彪,等.人工湿地植物氧传输作用与研究进展[J].农机化研究,2010(8):204-207.
- [13] 袁东海,高士祥,任全进.几种挺水植物净化生活污水总氮和总磷效果的研究[J].水土保持学报,2004,18(4):77-80.
- [14] 凌祯,杨具瑞,于国荣.污水浓度对高原湖泊人工湿地处理率的影响研究[J].水力发电学报,2012,31(5):133-140.
- ry Science,1997,27(2):216-233.
- [46] Wu T H, Watson A J, El-Khouly M A, et al. Soil-root interaction and slope stability[C]//First Asia-Pacific Conference on Ground and Water Bioengineering for Erosion Control and Slope Stabilization, Manila, Philippines, April 1999. Science Publishers, Inc., 2004:183-192.
- [47] 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.
- [48] Watson A, Phillips C, Marden M. Root strength, growth, and rates of decay: root reinforcement changes of two tree species and their contribution to slope stability[J]. Plant and Soil,1999,217(1/2):39-47.
- [49] 王义琴,张慧娟,白克勇,等.分形几何在植物根系研究中的应用[J].自然杂志,1999,21(3):143-146.
- [50] 廖成章,余翔华.分形理论在植物根系结构研究中的应用[J].江西农业大学学报,2001,23(2):192-196.
- [51] Gray D H, Ohashi H. Mechanics of fiber reinforcement in sand[J]. J. Geotech. Eng.,1983,109(3):335-353.