

黄土丘陵沟壑区主要物种根茎力学特性

徐海燕¹, 于卫洁², 王巧利³, 焦菊英²

(1. 西北农林科技大学 林学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学
水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 周河镇政府, 陕西 靖边 718500)

摘要:植物根茎力学特性影响着植被固定土壤和拦截的能力,是植被抗侵蚀特性研究不可缺少的一部分。在延河流域选取的 6 个典型小流域内,对铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、芨芨蒿(*Artemisia giralii*)、达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)、猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)、蒙古蒿(*Artemisia mongolica*)的根茎进行广泛采样,在测量其根直径、抗拉力、抗拉强度、茎直径、抗弯强度和刚度、木质素和纤维素含量等指标的基础上,探讨了植物根茎力学特性。结果表明:根系直径与抗拉力呈显著的正相关关系,与抗拉强度呈显著的负相关关系,且均可用幂函数进行拟合;随着茎的直径增长抗弯刚度不断加强、抗弯强度趋于稳定;猪毛蒿茎平均直径、最大抗压力和抗弯刚度较其他物种大;达乌里胡枝子的茎抗弯刚度较小,根系抗拉强度和茎抗弯强度却最大;抗弯强度与木质素含量、纤维素含量和纤维素/木质素均具有显著的相关关系。

关键词:黄土丘陵沟壑区; 抗拉力; 抗弯刚度; 抗弯强度; 力学特性

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2016)01-0313-06

Mechanical Properties of Stem and Root of Main Plant Species in the Hilly-Gully Loess Plateau

XU Haiyan¹, YU Weijie², WANG Qiaoli³, JIAO Juying²

(1. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Zhouhe Township Government, Jingbian, Shaanxi 718500, China)

Abstract: Mechanical properties of plant affect the capacity of vegetation to stabilize soil and intercept sediment and litter, and the survey on them is an indispensable part of the study on soil anti-erosion ability. Six small watersheds were selected for sampling in Yanhe River Basin. The main species were *Artemisia gmelinii*, *Artemisia giralii*, *Lespedeza davurica*, *Heteropappus altaicus*, *Artemisia scoparia* and *Artemisia mongolica*. Their mechanical properties were surveyed. The results showed that the root diameter for every species had significant correlation with its tensile resistance and tensile strength ($p < 0.05$), respectively, and both of them could be fitted by power function. As stem diameter increased, its stiffness strengthened and its strength became stable. For the stem of *Artemisia scoparia*, its main diameter, tensile resistance and bending stiffness were larger than those of the other species. Stem bending strength and root tensile strength of *Lespedeza davurica* were larger than those of the other species. Stem bending strength had significant correlation with cellulose content, lignin content and cellulose-content/lignin-content ($p < 0.05$) among the main species, respectively.

Keywords: the Hilly-Gully Loess Plateau; tensile resistance; bending stiffness; bending strength; mechanical property

收稿日期: 2015-06-18

修回日期: 2015-06-24

资助项目: 水利部公益性行业科研专项经费项目(201501045); 国家自然科学基金面上项目“黄土丘陵区坡面退耕与淤地坝对坡沟系统侵蚀产沙的阻控机理”(41371280); 国家科技支撑计划项目“黄河中游主要来沙区林草减沙作用分析”(2012BAB02B05-3)

第一作者: 徐海燕(1989—), 女(蒙古族), 内蒙古兴安盟人, 硕士研究生, 研究方向为流域生态学。E-mail: 545906813@qq.com

通信作者: 焦菊英(1965—), 女, 陕西宝鸡人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀与植被关系及水土保持效益评价的研究。E-mail: jyjiao@ms.iswc.ac.cn

黄土丘陵沟壑区由于受地理位置的过渡性、气候变化的剧烈性、地形和地貌的复杂性、土壤的易蚀性以及人类活动对植被的破坏等多种因素影响,水土流失严重、生态环境脆弱。植被恢复是退化生态系统恢复的前提与关键。黄土丘陵沟壑区“退耕还林(草)”生态工程实施后,不同立地条件下大面积土地退耕,植被得到有效恢复并显著改善了生态环境。然而,植被能否恢复到可有效防止土壤侵蚀的状态,不仅取决于侵蚀环境对植被的干扰程度,而且依赖于植物自身的抗侵蚀特性,如固土和拦截作用。植物根系是固定和支撑植物体的重要器官,而且根系力学性能也影响着植被固土的力学作用。大量的研究表明,植被可以有效拦截径流中携带的枯落物,枯落物对地表的覆盖不仅保证了地表不被径流冲刷,而且断绝径流新的泥沙来源^[1-2];植物也能有效拦截径流泥沙,在基部形成土堆,对植被及其土壤环境都有积极的影响^[3-4]。因此,不同植物根茎力学的差异性可能会导致其抵抗径流冲刷和拦截的能力不同,是植被抗侵蚀特性研究不可缺少的一部分。

近年来,植物根系的固土护坡机理、根土相互作用等研究越来越受到学者们的重视,使得根系力学特征的研究成为生态学研究的热点之一^[5-7]。例如,刘国彬等^[8]曾利用自制的毛根拉力测定装置对黄土高原 12 种常见牧草 0.1~1.0 mm 毛根的力学特性进行了系统的研究。对于植物茎的力学特性方面的研究主要集中在牧草和农作物,用于解决农业生产中的问题^[9-10];而从茎秆抵抗侵蚀的角度出发,针对自然恢复植被的研究很少。因此,本研究在结合前人研究的基础上,通过对该区域几种常见的典型植物根茎力学特征进行系统的研究,探讨植物根茎抗侵蚀的力学特性,并为进一步完善黄土高原植被与土壤侵蚀关系理论提供基础与依据。

1 研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于黄土丘陵沟壑区的延河流域(36°23′—37°17′N,108°45′—110°28′E),地处陕西省北部,是黄河的一级支流,全长 286.9 km,流域总面积为 7 687 km²。主要支流有杏子河、坪桥川、西川河、蟠龙川等^[11]。河道平均比降为 3.29‰,平均坡度为 17°,平均海拔为 1 218 m^[12]。该区域春季干旱多风,夏季早涝相间,秋季温凉湿润,冬季寒冷干燥。降水年际年内变化大且季节分配不均匀,属暖温带大陆性季风气候。

土壤类型主要为黄绵土,土质疏松,抗蚀抗冲性差。区域内广泛分布有铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、芨蒿(*Artemisia giralii*)、达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)、猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)、蒙古蒿(*Artemisia mongolica*)等植物物种。在本研究中,从北到南选取周家山流域、石子湾流域、三王沟流域、陈家圪流域、毛堡则流域和尚和年流域的自然恢复坡面作为对象进行研究。

1.2 根茎力学特性测定

1.2.1 试验材料 为了使取样具有代表性,在每个流域内,选取 10~15 个坡面作为样地进行取样。选取铁杆蒿、芨蒿、猪毛蒿、蒙古蒿、达乌里胡枝子和阿尔泰狗娃花作为研究对象,每个物种选取 10 株标准株。单根的采集主要采用挖坑的方法,采集土层深度为 0—20 cm,挖掘时应尽量避免破坏根的结构从而造成机械损伤以至影响根的抗拉力。挖出根后采集根中无病虫害,且比较直的部分,长度为 2~10 cm,标记好后放入生物干冰中保存,带回实验室在 4℃ 冰箱中保存,并在 24 h 内对根系进行拉伸试验^[6]。

茎的取样与根系取样同时进行,每个物种选取 5~15 株标准株,用枝剪剪取植物距其基部 0~20 cm 的植物茎秆,装入密封袋并编号,然后放入生物干冰中保存,带回实验室用 4℃ 冰箱中保存,并在 24 h 内对茎进行试验。由于取样量较大(每个物种共剪取的茎为 130~650 个),为了便于处理,根据直径的大小每隔 0.1 mm 进行分级,每个茎级有 5~50 个重复。

1.2.2 力学特性测试方法 采用型号为 HG-500 的数显推拉计,将其固定在 HM-1K 手动卧式拉力测试台上来进行根系抗拉力试验,测定根系拉断时的最大抗拉力。

利用植物茎秆强度仪(YXD-1),采用三点抗压的原理进行茎秆抗压强度测试。为了便于后期对相关指标的计算,按照直径大小调节支架之间的跨度 L (即茎的测试长度, $L=10 \times 2r$),其中 r 为茎半径^[13]。将茎放在仪器上,慢慢转动手柄使茎秆弯曲,直到茎秆出现断裂的瞬间,记录最大抗压力及其对应的弯曲挠度。

1.3 茎秆纤维素与木质素含量测定

纤维素是细胞壁的主要成分,植物的细胞壁强大的纤维网状结构为细胞组织以及整个植物体提供机械支撑作用。木质素是一种复杂的聚合物,具有可以使细胞相连的作用,填充于纤维素构架中从而来增强

植物茎秆的机械强度^[14]。因此,建立纤维素与木质素与力学特征值的关系,为探索是否可以运用物种纤维素与木质素测定代替力学特征值的测量而达到简化试验的目的提供依据。

与力学特性测试样品采集方法相同,用枝剪剪取植物距其基部 0~20 cm 左右的植物茎秆,装入密封袋并编号。将采回的样品在 65℃ 下烘干至恒重,然后用微型粉样机(FZ102)粉碎,并将在同一小流域中采集的样品混合后作为 1 个重复,共有 6 个。采用 72% 浓硫酸水解法测定纤维素的含量,浓硫酸法测定木质素的含量^[15]。

1.4 数据分析

根的抗拉强度(P)是指根在拉伸断裂前所能够承受的最大拉力,计算公式如下:

$$P=4F/\pi D^2 \quad (1)$$

式中: F ——最大抗拉力(N); D ——断裂处根直径(mm)。

茎的抗弯刚度是指受外力作用下材料抵抗变形的能力,EI 值越大,茎变形后的弯曲率越小。抗弯强度通常是指材料弯曲直至被破坏时其所能承受的最大的弯曲正应力。因此,可用抗弯刚度(EI)与抗弯强度(σ)来表征茎的拦截能力和抵抗自身损害的能力。计算公式分别如下:

$$EI=fL^3/48Y \quad (2)$$

式中: f ——载荷(N); L ——跨度(mm); Y ——弯曲挠度(mm)。

$$\sigma=M/W \quad (3)$$

$$M=fL/4 \quad (4)$$

$$W=\pi D^3/32 \quad (5)$$

式中: σ ——抗弯强度(MPa); M ——最大弯矩(N·mm); W ——茎秆抗弯截面系数(mm³); D ——茎的

直径(mm)。

采用 SPSS 软件对根的直径与其力学特征值、茎秆纤维素和木质素与力学特性值进行泊松相关分析。

2 结果与分析

2.1 根的力学特征

由表 1 可知,6 个物种的根的平均直径均小于 1 mm,即 6 个物种的根系均以 1 mm 以下为主,根系平均直径从大到小依次是茭蒿、铁杆蒿、阿尔泰狗哇花、达乌里胡枝子、蒙古蒿和猪毛蒿。达乌里胡枝子的抗拉力明显大于其他物种。受根系截面面积和抗拉力的影响,物种间的抗拉强度差异也较为明显,从大到小依次为达乌里胡枝子、猪毛蒿、阿尔泰狗哇花、蒙古蒿、铁杆蒿和茭蒿。

表 1 根的平均直径、抗拉力和抗拉强度

物种	样本数量/株	直径/mm	拉力/N	抗拉强度/MPa
铁杆蒿	186	0.71±0.32	7.74±4.10	19.63
茭蒿	176	0.72±0.33	6.29±3.82	15.61
蒙古蒿	68	0.52±0.34	6.44±4.38	29.83
猪毛蒿	187	0.44±0.22	5.74±3.24	38.48
阿尔泰狗哇花	147	0.54±0.24	7.04±4.97	30.30
达乌里胡枝子	228	0.53±0.30	11.95±9.09	54.29

注:表中相关数据为平均数±标准差,下表同。

由图 1 可知,根系直径与抗拉力呈显著的正相关关系,与抗拉强度呈显著的负相关关系;所有物种的根系直径和抗拉力、抗拉强度之间均可用幂函数进行拟合;由拟合曲线可知,随着根系直径的增加,抗拉力的增长率不断增加,但抗拉强度却逐渐趋于稳定,即在直径较小时,抗拉力主要受抗拉强度的影响;根系直径较大时,抗拉力主要受根系直径的影响。

表 2 茎的力学特性值

物种	样本数量/株	平均直径/mm	最大抗压力/N	弯曲挠度/mm	抗弯刚度/(N·m ²)	抗弯强度/MPa
铁杆蒿	637	2.27±0.49	14.77±7.44	4.00±1.12	901.19	72.92
茭蒿	476	2.42±0.54	16.62±7.38	4.14±1.06	1186.58	72.27
猪毛蒿	361	2.65±0.91	18.53±11.00	4.98±1.36	1435.48	67.35
蒙古蒿	130	2.26±0.40	9.96±3.77	4.24±1.14	566.59	49.53
阿尔泰狗哇花	334	2.64±0.49	12.79±5.54	4.61±1.25	1343.41	46.37
达乌里胡枝子	478	2.30±0.48	15.19±7.33	5.01±1.35	768.65	73.12

2.2 茎的力学特性

由表 2 可知,6 个物种的平均直径范围为 2.26~2.65 mm,平均弯曲挠度为 4.00~5.01 mm,平均最

大抗压力为 9.96~18.53 N。

其中,猪毛蒿茎秆的平均直径、最大抗压力和抗弯刚度较其他物种大;根据抗弯强度和抗弯刚度的

公式可知,由于抗弯强度的大小受到测试茎秆的截面的影响,尽管达乌里胡枝子的抗弯刚度较小,抗弯

强度却最大,在受到径流冲刷时,易发生变形却不易断裂。

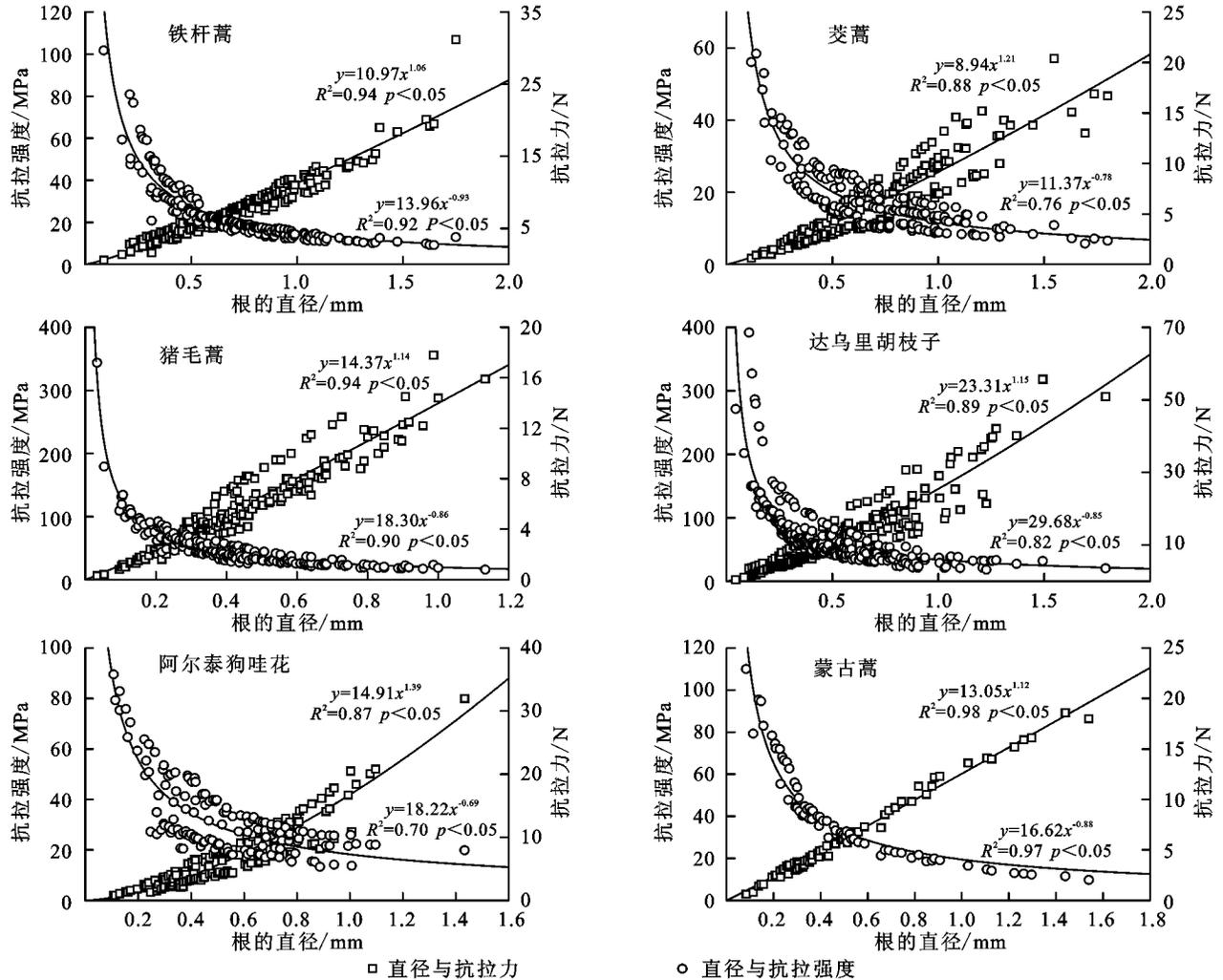


图1 根系直径与其抗拉力、抗拉强度之间的关系

随着茎的直径增长抗弯刚度不断加强,猪毛蒿的抗弯刚度可超过 $10\ 000\ \text{N} \cdot \text{m}^2$ 。阿尔泰狗娃花的抗弯强度随着直径的增加有逐渐减小的趋势;铁杆蒿、芨芨、猪毛蒿、达乌里胡枝子和蒙古蒿的茎抗弯强度随着直径的变化并无明显的增加或减小,而是达到某一个值后,抗弯强度处于相对稳定状态(图2)。

2.3 茎力学特性与其纤维素和木质素含量的关系

由表3可知,6个物种的木质素和纤维素的含量分别为 $14.33\% \sim 16.69\%$ 和 $16.62\% \sim 35.76\%$,纤维素/木质素的值为 $1.16 \sim 2.14$ 。各物种间木质素含量并无明显差异;阿尔泰狗娃花和达乌里胡枝子的纤维素含量差异较其他的物种间要大。由图3可知,不同物种间的抗弯刚度与木质素含量、纤维素含量及纤维素/木质素(纤维素与木质素含量的比值)均无显著的相关关系,而抗弯强度与木质素含量、纤维素含量和纤维素/木质素均具有显著的相关关系。

3 讨论与结论

径流产生后,植被根茎可以有效地固定土壤和拦截径流携带的枯落物和泥沙,同时,根茎也承受着径流所施加的力。本研究中,测量物种根的抗拉力、茎的抗弯刚度均随着茎秆直径的增加而增大,由此可知,对于某一物种来说,随着植被的不断生长,根的固定和茎的拦截能力不断增强;进一步可推测,在植被生长初期,如幼苗阶段,植被根茎细而脆弱,严重的侵蚀可能会造成根茎的断裂从而使植被死亡,导致自然植被恢复过程缓慢。

尽管根据定居—竞争权益法则和演替生态位理论可知,演替早期物种主要依赖繁殖力高、繁殖体传播距离远,先定居生境;演替前期与后期物种同时出现,演替前期物种短期内要比演替后期物种表现好,究其原因因为演替前期物种在资源相对丰富的条件下可迅速生长^[16-17]。然而,在黄土高原,坡面退耕初期

土壤侵蚀严重,猪毛蒿作为先锋物种在恶劣的环境中发展,其抵抗侵蚀的能力也可能是它成功建群的关键因素之一。

在本研究中,草本植物猪毛蒿的根系抗拉强度仅

次于木质化程度较高的半灌木达乌里胡枝子,茎的平均最大抗压力和抗弯刚度比 5 个演替中后期物种要大,这也从其根茎力学特性方面说明了猪毛蒿具有较强的抗侵蚀能力。

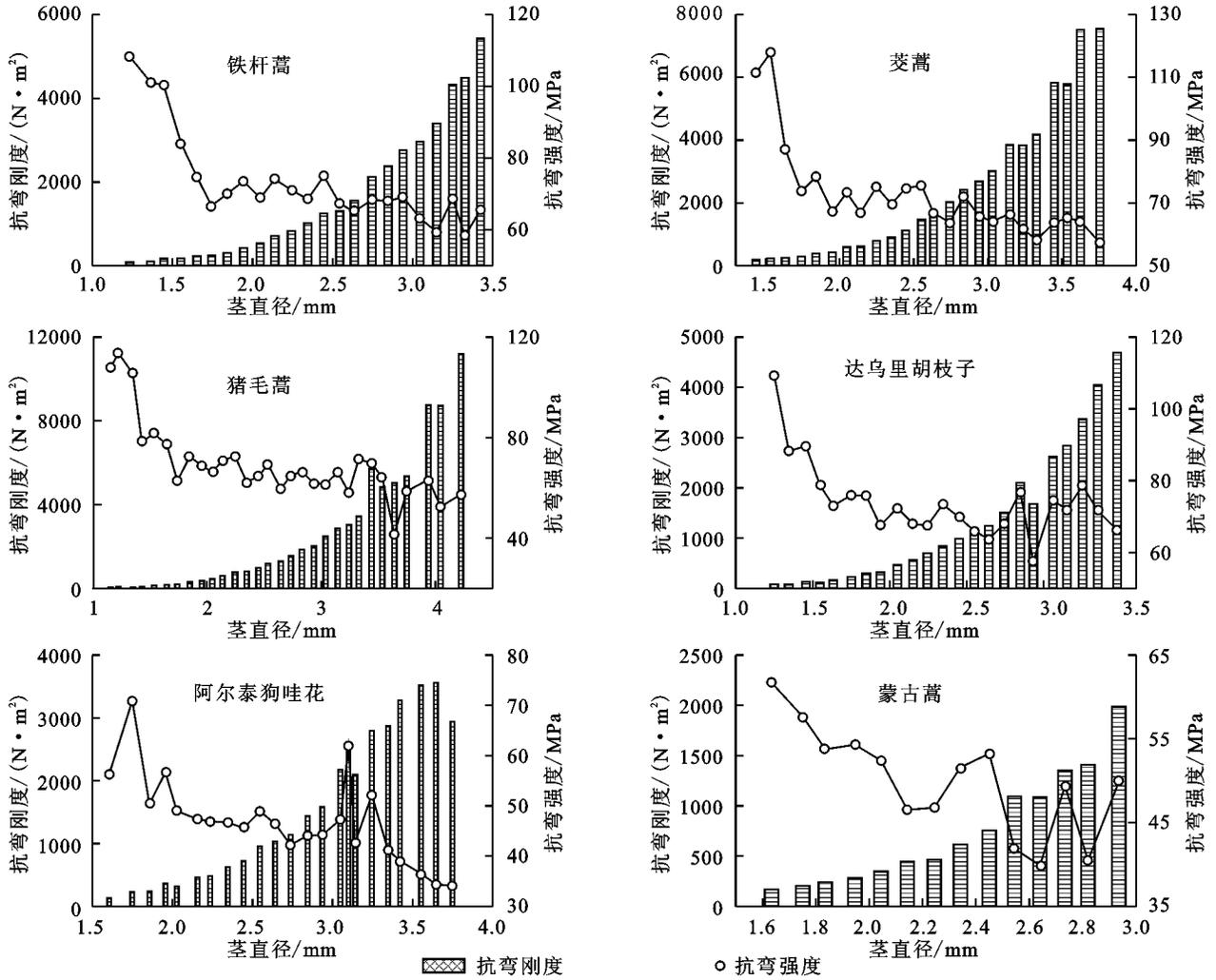


图 2 不同茎级的平均抗弯刚度和强度

表 3 茎的纤维素和木质素含量

物种	纤维素/%	木质素/%	纤维素/木质素
铁杆蒿	31.45±0.30	15.49±0.34	2.03
芨芨蒿	31.05±0.51	15.28±0.63	2.03
猪毛蒿	30.45±0.43	15.44±0.50	1.97
蒙古蒿	16.62±0.13	14.34±0.23	1.16
阿尔泰狗娃花	24.23±0.03	14.33±0.16	1.69
达乌里胡枝子	35.76±0.33	16.69±0.30	2.14

注:以小流域为调查单元进行的纤维素和木质素的测量,测量物种的样本数为 6。

由于具有操作方法简单、便于测量的特点,在以往的研究中,茎的弯曲挠度、抗弯刚度一般作为农作物抗倒伏性能指标而进行测量;弯曲挠度越大、抗弯刚度越小作物的抗倒伏能力越差,将不利于农业生

产^[10]。然而作为植被抵抗侵蚀的指标,大的弯曲挠度和小的抗弯刚度表明茎秆具有较好的柔韧性,这可能是自然植被适应环境的特性。

本研究中,弯曲挠度大、抗弯刚度小的典型物种为达乌里胡枝子,其植株高 30~80 cm,茎直立、斜生或平卧^[18]。好的柔韧性不仅可以使其植株不易在径流的冲刷下折断,在斜生和平卧的情况下,植株也可通过增加地面的覆盖度来减轻侵蚀对坡面造成的损坏。此外,与其他 5 个物种相比,达乌里胡枝子的根系抗拉强度和茎的抗弯强度均最大,可承受更大的径流所产生的压强。因此,达乌里胡枝子作为黄土高原群落演替中的典型优势群落,它的根茎力学特性可能是促进该群落在侵蚀严重的坡面发展的主要抗侵蚀策略之一。

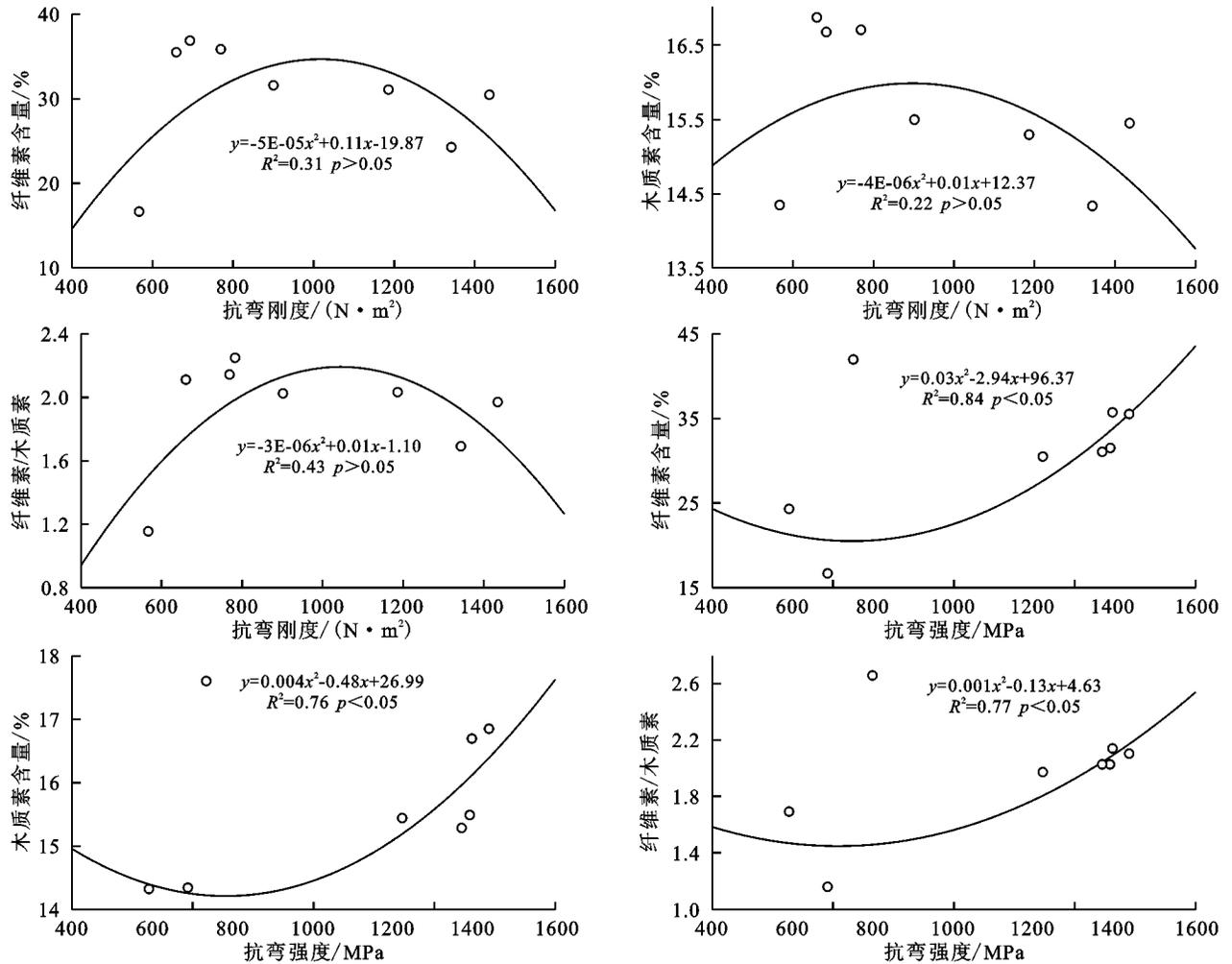


图 3 茎的纤维素和木质素含量与力学特性值的关系

茎秆主要由纤维素、木质素、蛋白质等有机高分子材料组成^[19]。木质素在植物体内具有机械支持的功能,与纤维素共同形成植物体骨架。木质素与纤维素结合紧密,其配合比和排列结构如同“钢筋混凝土”的作用决定着茎秆的强度^[20]。在黄土丘陵沟壑区,研究物种的抗弯强度与纤维素、木质素以及木质素与纤维素质量分数的比值呈显著相关关系。因此,本研究的探索说明运用物种纤维素与木质素测定可代替力学特征值的测量而达到简化试验的目的是可行的。

本研究基于大量的测量数据,建立了根系、茎秆直径与其力学特性值之间的关系模型,为简化调查根系和茎秆的力学特性提供了依据。除了根茎的力学特性,影响植被抗侵蚀特性的因素还有很多,例如,根的密度、生物量,茎的密度等^[21-22],因此还需要进一步开展研究。

参考文献:

[1] Rey F. Influence of vegetation distribution on sediment yield in forested marly gullies[J]. *Catena*, 2003, 50(2): 549-562.

[2] Pan C, Lan M, Shanguan Z. Effectiveness of grass strips in trapping suspended sediments from runoff[J]. *Earth Surface Processes & Landforms*, 2010, 35(9): 1006-1013.

[3] Bochet E, Poesen J, Rubio J L. Mound development as an interaction of individual plants with soil, water erosion and sedimentation processes on slopes[J]. *Earth Surface Processes & Landforms*, 2000, 25(8): 847-867.

[4] Du H D, Jiao J Y, Jia Y F, et al. Phytogenic mounds of four typical shoot architecture species at different slope gradients on the Loess Plateau of China[J]. *Geomorphology*, 2013, 193(4): 57-64.

[5] 罗春燕, 吴楚, 芦光新, 等. 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[J]. *水土保持研究*, 2014, 21(5): 260-266.

[6] 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 & Soil*, 2005, 278(1/2): 11-22.

[7] 王云翔, 孙海龙, 罗龙皂, 等. 人工石质边坡构树根系抗剪特性研究[J]. *水土保持研究*, 2012, 19(3): 114-118.

- [7] 李刚,程耿东. 基于投资—效益准则的现有结构抗震加固策略[J]. 大连理工大学学报, 2003, 43(4): 412-415.
- [8] 李刚,程耿东. 基于投资—效益准则的结构目标性能水平[J]. 大连理工大学学报, 2005, 45(2): 166-171.
- [9] 王亚勇,岳茂光,李宏男,等. 基于不同性能目标的 RC 结构抗震设计的效益分析[J]. 土木工程学报, 2008, 41(3): 37-45.
- [10] 邹响,吕西林,朱杰江. 基于性能的抗震设计方法在某复杂超高层结构中的应用研究[J]. 工程力学, 2008, 25(9): 93-99.
- [11] 李英民,刘建伟,周自强. 基于性能的抗震加固方法在框架结构中的应用[J]. 建筑结构, 2012, 42(7): 88-92.
- [12] 徐自国,肖从真,李勇,等. 北京当代 MOMA 结构基于性能的抗震设计及静力弹塑性分析[J]. 土木工程学报, 2008, 41(3): 58-64.
- [13] 季静,肖启艳,黄超,等. 基于性能的钢筋混凝土剪力墙受弯破坏变形限值的研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(9): 35-41.
- [14] 夏修身,陈兴冲. 客运专线桥梁基于性能的抗震设计研究[J]. 世界地震工程, 2010, 26(1): 40-46.
- [15] 张毅刚,杨大彬,吴金志. 基于性能的空间结构抗震设计研究现状与关键问题[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(6): 145-152.
- [16] 赵法锁,罗丽娟,王雷. 基于性能的拱形抗滑桩墙支护结构体系优化设计的思考[J]. 工程地质学报, 2007, 15(4): 539-544.
- [17] 金伟良,宋志刚,赵羽习. 工程结构全寿命可靠性与灾害作用下的安全性[J]. 浙江大学学报:工学版, 2006, 40(11): 1862-1868.
- [18] 陈跃,吕西林. 基于成本—效益准则的高层 RC 框架结构优化设计(1):方法[J]. 自然灾害学报, 2010, 19(1): 110-115.
- [19] 吕大刚,于晓辉,宋鹏彦,等. 抗震结构最优设防水平决策与全寿命优化设计的简化易损性分析方法[J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29(4): 23-32.
- [20] 吴培峰,陈艾荣. 基于全寿命设计理念的某长江通道桥概念设计[J]. 桥梁建设, 2007(6): 42-45.
- [21] 王中文. 大型桥梁成本控制与全寿命周期成本分析[J]. 桥梁建设, 2010(2): 25-28.
- [22] 尹玫,朱合华,闫治国. 盾构隧道全寿命周期成本分析方法研究[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(S1): 1393-1397.
- [23] 孙海,梁立孚,侯钢领. 结构最弱失效模式组的优化及投资—效益模型[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2009, 30(3): 262-266.
- [24] 卜国雄,谭平,周福霖. 基于投资—效益准则的 TMD 装置的优化设计[J]. 土木工程学报, 2011, 44(5): 24-31.
- [25] 马玉宏,赵桂峰,谭平,等. 基础隔震结构全寿命费用研究[J]. 地震工程与工程振动, 2012, 32(5): 178-185.

(上接第 318 页)

- [8] 刘国彬,蒋定生,朱显谟. 黄土区草地根系生物力学特性研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 2(3): 21-28.
- [9] 方会敏,姬长英,张庆怡,等. 小麦茎秆力学性能的国内外研究[J]. 中国农机化学报, 2014, 35(6): 304-308.
- [10] 夏来坤,刘京宝,朱卫红,等. 干旱胁迫对夏玉米不同品种茎秆力学特性的影响[J]. 中国农学通报, 2015, 31(18): 46-51.
- [11] 吴胜德. 延河流域水保减沙效益及对水库设计的影响分析[D]. 西安:西安理工大学, 2003.
- [12] 王志杰. 延河流域植被与侵蚀产沙特征研究[D]. 北京:中国科学院研究生院, 2014.
- [13] Baets S D, Poesen J, Reuben B, et al. Methodological framework to select plant species for controlling rill and gully erosion: Application to a Mediterranean ecosystem[J]. Earth Surface Processes & Landforms, 2009, 34(10): 1374-1392.
- [14] 苏工兵,刘俭英,王树才,等. 苕麻茎秆木质部力学性能试验[J]. 农业机械学报, 2007, 38(5): 62-65.
- [15] Починок X Н. 植物生物化学分析方法[M]. 荆家海,丁钟荣,译. 北京:科学出版社, 1981.
- [16] 杜峰,梁宗锁,山仑,等. 黄土丘陵区不同立地条件下猪毛蒿种内、种间竞争[J]. 植物生态学报, 2006, 30(4): 601-609.
- [17] 杜峰,山仑,陈小燕,等. 陕北黄土丘陵区撂荒演替研究:撂荒演替序列[J]. 草地学报, 2005, 13(4): 328-333.
- [18] 邢毅,赵祥,董宽虎,等. 不同居群达乌里胡枝子形态变异研究[J]. 草业学报, 2008, 17(4): 26-31.
- [19] 赵春花,韩正晟,王芬娥,等. 收割期牧草底部茎秆生物力学性能试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(4): 85-89.
- [20] Genet M, Stokes A, Salin F, et al. The influence of cellulose content on tensile strength in tree roots[J]. Plant & Soil, 2005, 278(1/2): 1-9.
- [21] Burylo M, Rey F, Roumet C, et al. Linking plant morphological traits to uprooting resistance in eroded marly lands[J]. Plant & Soil, 2009, 324(1/2): 31-42.
- [22] 刘窑军. 道路边坡不同生态防护措施侵蚀特征研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2011.