

天然草本植被根系对表层土壤抗剪强度的影响

张惠忍 李法虎* 张心平

(中国农业大学 水利与土木工程学院,北京 100083)

摘要 利用直剪仪在试验室测定了一年生天然草本植被(主要为稗草和狗尾巴草)根系特征参数对土壤-根系复合体抗剪强度的影响。结果显示,土壤-根系复合体抗剪强度与根重密度的相关性大于其与根长密度或根-土面积比的相关性。土壤-根系复合体抗剪强度随着土壤干密度和根重密度的增大而增大,但随土壤含水量的增大而减小。土壤干密度和土壤含水量对土壤-根系复合体抗剪强度的影响程度大于根重密度的影响程度,其与土壤-根系复合体抗剪强度的标准回归系数(Beta值)分别为0.456、-0.321和0.186。当根重密度为5~10 kg/m³时,一年生天然草本植被根系可增大土壤-根系复合体抗剪强度19.8%~39.5%。

关键词 稗草;狗尾巴草;土壤-根系复合体;土壤含水量;直剪试验

中图分类号 S 157.2; TU 411.7

文章编号 1007-4333(2015)04-0189-07

文献标志码 A

Effects of wild herbaceous vegetation roots on undisturbed surface soil shear strength

ZHANG Hui-ren, LI Fa-hu*, ZHANG Xin-ping

(College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract Current researches on soil slope protection with herbaceous vegetation are focused on the aboveground parts of vegetations. There is little knowledge on the role of vegetation roots. In this study, the effects of herbaceous vegetation root parameters on shear strength of soil-root composite were carried out by direct shear apparatus in laboratory on undisturbed soil samples collected at different growth stages of annual wild herbaceous vegetations. The investigated annual wild herbaceous vegetations mainly were *Echinochloa crusgalli* (L.) Beauv. and *Setaria viridis* (L.) Beauv.. The results indicated that the correlation of soil-root composite shear strength with root weight density was greater than that with root length density or root-soil area ratio. The shear strength of soil-root composite increased with the increase of dry soil density and root weight density, but decreased with the increase of soil water content. The effect degrees of soil density or soil water content on soil-root complex shear strength was greater than that of root weight density. The standard regressive coefficients (Beta values) of root-soil composite shear strength with soil density, soil water content, and root weight density were 0.456, -0.321, and 0.186, respectively. A significant enforcement role was found for the annual wild herbaceous vegetation root system on soil-root composite shear strength. The wild herbaceous vegetation roots could increase soil shear strength by 19.8% - 39.5% when root weight density was 5 - 10 kg/m³.

Key words *Echinochloa crusgalli* (L.) Beauv.; *Setaria viridis* (L.) Beauv.; soil-root composite; soil water content; direct shear test

收稿日期: 2014-11-08

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金(博导类)(20120008110024); 国家自然科学基金重点项目(41230746); 中央高校基本科研业务费专项资金(2013YJ009)

第一作者: 张惠忍, 硕士研究生, E-mail: airen1223@sina.com

通讯作者: 李法虎, 教授, 主要从事农业水土工程与水土保持领域研究, E-mail: lifahu@cau.edu.cn

土壤水力侵蚀是影响水土环境的重要因素,大规模工程建设形成的人工坡面以及天然坡面的水土流失预防与治理是水土流失控制的关键。随着人们生态意识的增强,植被固土护坡技术已在坡面治理工程中得到越来越多的应用。

活性植物根系一方面可通过物理作用(如根系生长及其死亡腐烂等)或生理化学作用(如根系分泌物、土壤水分吸收利用等)改善土壤物理性状,增大土壤入渗和传导能力^[1-5],降低地表径流强度或集中流引起的土壤侵蚀^[6-7];另一方面,相对于土体而言,植被根系本身具有较强的抗拉能力^[8-10],从而增强整个土壤-根系系统的抗剪切破坏能力^[3]。所有这些因素,都会在一定程度上减少坡面水土流失。

大量研究表明,土壤-根系复合体的抗剪强度由土壤本身的抗剪强度以及根系系统增加的抗剪强度两部分组成^[11-13],即:

$$\tau_f = \tau_{fs} + \tau_{fr} \quad (1)$$

式中: τ_f ,土壤-根系复合体抗剪强度,kPa; τ_{fs} ,无根系土壤抗剪强度,kPa,其大小主要与土壤质地、密度以及含水量等土壤性质有关; τ_{fr} ,因土壤中存在植被根系而增加的土壤抗剪强度,kPa。一般认为,土壤中根系的存在只增大土壤粘聚力而对土壤内摩擦角的影响较小^[14-15]。

不同的植物种类及其根系类型以及同种植物的不同生长阶段和生长环境,其根系性质及其固土作用差异极大^[3,12,16]。一年生草本植物根系浅且细,根系直径一般小于1 mm,多分布在20~30 cm的表层土壤内^[9,16-20]。草本植物根系可增大土壤的抗冲抗蚀能力^[17,21],抑制土壤水力侵蚀^[6,21-23]。草本植物对改善土壤团聚体的稳定性以及增强土壤粘聚力、表土加固和土壤抗剪强度的作用明显优于乔灌木^[3-4,12,14-15,18]。Mickovski等^[22]的研究结果显示,人工种植的幼年香根草可增大土壤抗剪强度36%或2.7 kPa。Cammeraat等^[24]对一年生天然草本植被(主要为二穗短柄草、香草科、景天属和蜡菊属等混合植被)的测试结果显示,草本植被根系平均可增大土壤抗剪强度0.6 kPa。Burylo等^[15]通过模型计算,认为草本植被根系可增大表层20 cm土壤抗剪强度5 kPa以上。我国北方常见的稗草和狗尾巴草等一年生天然草本植被根系对土壤抗剪强度的影响作用尚未见报道。

人们对木本植被(乔灌木)根系对土坡稳定性的影响已经有了较深入的理解和认识^[25-26]。由于试验

方法的局限性以及研究对象的复杂性,草本植被对土壤侵蚀影响的研究目前较多集中在植被的地上部分,研究对象主要针对人工植被系统或是人工加根的扰动土样^[6,14,17,27-28],这与自然植被条件下土壤中根系分布以及根系与土壤之间的接触状况有较大差别。而对天然草本植物的关注,主要集中在如何控制对农田作物生长的影响方面,而较少关注其有利的方面特别是天然草本植被地下部分对生态环境的影响^[9]。因此,本研究针对一年生天然草本植被,探讨其根系对土壤抗剪强度的影响效果,旨在对自然条件下草本植被固土护坡作用加深理解,以期为建立生态环保型水土流失防护技术体系提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 试样采集

试样采自北京市昌平区沙河镇满井西村苗圃园中的林间空地(N40°9',E116°15',海拔高度45 m)。昌平区属于暖温带大陆性季风气候区,年均降水量和年均气温分别为550.3 mm和11.8℃。取样地土壤无生活垃圾或工业垃圾,其天然植被主要是稗草(*Echinochloa crusgalli* (L.) Beauv.)和狗尾巴草(*Setaria viridis* (L.) Beauv.)。测试土壤的粘粒、粉粒和砂粒含量分别为16.0%、50.5%和33.5%,其质地属于粉质壤土。

选择地势平坦、天然草本植被类型均一、且植被覆盖度与周边环境相对一致的大约4 m²区域作为试样采集区。在试样采集区内,采集点随机布置。为使采样点更具代表性,采样点避开植株位置处。土壤取样深度为5~20 cm。采集试样时,首先清除取样点地表以上部分的植被,将地表铲平(2~5 cm)。在环刀(内径61.8 mm,高20 mm)内壁涂一薄层凡士林,将环刀刃口向下、水平放置在取样点,然后用静力缓慢施压环刀。待环刀压入土中一定距离后,用削土刀切去环刀外部周边土体,以便环刀顺利压入土中。当环刀中土体伸出环刀上边沿一定距离后,将环刀及其周边土体一块取出,用削土刀削去环刀周边及其上、下面以外多余的土体。将初步修整后的环刀土体用塑料布包裹实后放入试样箱内,带回试验室。在运输过程中,避免因振动而破坏土体的原状结构。在取环刀试样的同时,对每个取样点同步取一定质量的土样放进铝盒中密封,以测定土壤含水量。

根据一年生天然草本植物的生长阶段,本研究

共取试样 4 次,时间分别为 3 月 10 日、4 月 10 日、6 月 10 日和 8 月 10 日。第 1 次采集有效试样 13 组,第 2 次和第 3 次各 50 组,第 4 次 29 组,共 142 组有效试样。

1.2 试验方法

试验采用南京土壤仪器厂生产的 ZJ 电动应变控制式直剪仪,按《土工试验方法标准 GB/T 50123—1999》规定的程序和要求测定土壤-根系复合体抗剪强度^[29]。测定时,仔细将环刀上、下部土体用削土刀刮平,并将环刀外部用洁净干布擦拭干净后称重。剪切速度设定为 0.8 mm/min(4 转/min),垂直竖向应力设为 50 kPa。

试样所受的剪应力按式(2)计算:

$$\tau = \frac{C \times R}{A_0} \times 10 \quad (2)$$

式中:τ,土壤-根系复合体剪应力,kPa;R,量力环测表读数,0.01 mm;C,量力环校正系数,1.838 N/0.01 mm;A₀,试样受力面积,cm²。

在土壤-根系复合体抗剪强度测试时,若果量力环读数达到稳定或出现峰值后显著减小,则在剪切位移量为 4 mm 时停止剪切试验;若果量力环读数一直增大,则在剪切位移量为 6 mm 时停止剪切试验。根据式(2)计算的剪应力数据和位移计测定的数据,以剪应力为纵坐标、剪切变形量为横坐标,绘制剪应力与剪变形量关系图。选取剪应力与剪变形

关系曲线上的峰值点或稳定值为土壤-根系复合体抗剪强度;若无明显峰值点或稳定值时,取剪切变形量为 4 mm 时所对应的剪应力为抗剪强度。

土壤密度按环刀法测定,土壤质量含水量采用电烘箱烘干法测定,土壤质地采用筛分与密度计联合测定法测定^[29]。直剪试验完成后,采用钢尺、千分尺和电子天平测定每个试样中所有根系的特征值如根系长度、根系直径和根系重量。根系横断面面积根据根系直径计算。

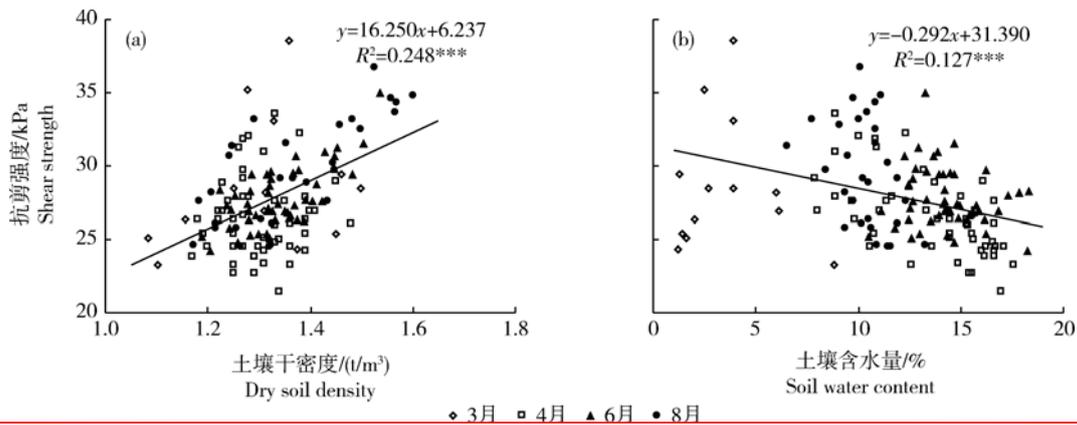
1.3 数据处理与分析

采用 SPSS 20.0(SPSS Inc.,Chicago,USA)双变量相关分析法,分析试验数据各变量之间的相关性;根据偏相关分析法(双尾检验)和逐步回归分析法(P≤0.05),确定各影响因素对土壤-根系复合体抗剪强度的贡献程度。

2 结果与分析

2.1 土壤密度与含水量对抗剪强度的影响

不同取样时间土壤-根系复合体抗剪强度随土壤干密度的变化(图 1(a))。土壤-根系复合体抗剪强度随着土壤干密度的增加而线性增大,两者显著相关(P<0.001)。6 和 8 月份的土壤-根系复合体抗剪强度随土壤干密度的增大程度稍微大于 3 和 4 月份,这可能与土壤中植被根系数量的增多及其力学性能的增强有关。



*** 代表在 0.001 统计水平显著。*** refers to statistical significance at 0.001 level.

图 1 不同取样时间土壤-根系复合体抗剪强度随土壤干密度(a)和土壤含水量(b)的变化

Fig. 1 Variation of soil-root complex shear strength with dry soil density (a) and soil water content (b) at different sampling times

4 次取样的测试结果显示,土壤-根系复合体抗剪强度随土壤含水量的增加而线性减小(图 1(b)),两者显著相关(P<0.001)。这一试验结果与

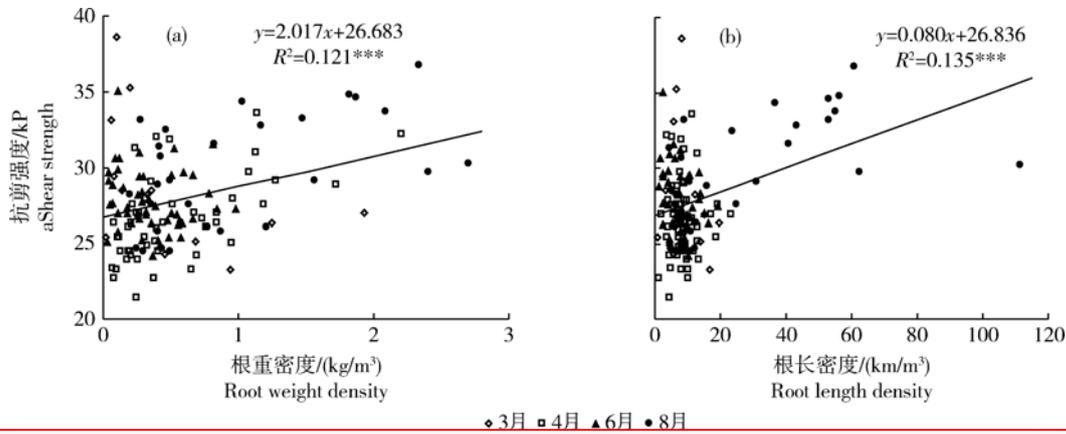
Osman 和 Barakbah、杨亚川等以及 Fan 和 Su 的结论一致^[2,21,30-31]。水分是土壤颗粒之间的润滑剂。当水分增多时,土壤颗粒在外力作用下更容易发生

相对位移,从而导致土壤-根系复合体抗剪强度随土壤含水量的增加而降低。

2.2 植被根系对抗剪强度的影响

土壤含根量一般可用单位体积土壤所含的植被

根系总质量和总根长或单位面积土壤所含的根面积即根重密度、根长密度和根-土面积比表示。根重密度和根长密度对土壤-根系复合体抗剪强度的影响(图2)。



*** 代表在 0.001 统计水平显著。*** refers to statistical significance at 0.001 level.
图2 不同取样时间土壤-根系复合体抗剪强度随根重密度(a)和根长密度(b)的变化
Fig.2 Variation of soil-root complex shear strength with root weight density (a) and root length density (b) in soil at different sampling times

土壤-根系复合体抗剪强度随着根重密度或根长密度的增加而增大(图2),且抗剪强度与根重密度或根长密度均呈显著正相关($P \leq 0.001$)。这与已有的研究结论相似^[2,6,14,22,28,31]。不同月份之间的根重密度差异相对较小(图2(a)),但8月份的根长密度显著大于其他月份(图2(b)),这可能与植被在不同生长期的根茎变化有关。根-土面积比对土壤-根系复合体抗剪强度的影响不显著(数据未给出)。

2.3 土壤和根系因子对抗剪强度的贡献

土壤-根系复合体抗剪强度与土壤干密度、土

壤含水量以及植被根系各参数之间的偏相关系数 R^2 见表1。从表1可以看出,虽然土壤-根系复合体抗剪强度与土壤干密度、土壤含水量、根重密度、根长密度以及根-土面积比之间的偏相关系数在不同的取样时间各不相同,但土壤干密度、土壤含水量以及根重密度和根-土面积比是影响土壤-根系复合体抗剪强度的主要因子,且土壤-根系复合体抗剪强度与土壤干密度或土壤含水量的相关程度大于其与根重密度或根-土面积比的相关程度。

表1 土壤-根系复合体抗剪强度与土壤干密度、土壤含水量以及植被根系参数之间的偏相关系数 R^2

Table 1 Partial correlation coefficient (R^2) of soil-root complex shear strength with dry soil density, soil water content, and vegetation root system parameters

月份 Month	土壤干密度/ (t/m^3) Dry soil density	土壤含水量/% Soil water content	根重密度/(kg/m^3) Root weight density	根长密度/(km/m^3) Root length density	根-土面积比/% Root-soil area ratio
3	0.022	0.011	0.320	0.065	0.235
4	0.031	0.320***	0.142**	0.019	0.004
6	0.452***	0.003	0.002	0.015	0.008
8	0.533***	0.491***	0.000	0.035	0.042
4次取样合计	0.207***	0.183***	0.042*	0.000	0.053**

注: *、**、*** 分别代表在 0.05、0.01 和 0.001 统计水平显著。

* , ** , and *** refer to statistical significance at 0.05, 0.01, and 0.001 levels, respectively.

为了进一步区分土壤干密度、土壤含水量、根重密度、根长密度和根-土面积比对土壤-根系复合体抗剪强度的贡献大小,对4次取样的抗剪强度与土壤干密度、土壤含水量、根重密度、根长密度和根-土面积比之间进行逐步线性回归分析。分析结果显示,土壤-根系复合体抗剪强度与土壤干密度、土壤含水量以及根重密度在 $P < 0.001$ 统计水平显著相关。由于对土壤-根系复合体抗剪强度的贡献较小,根长密度和根-土面积比2个参数被剔除。以土壤干密度、土壤含水量和根重密度作为土壤抗剪强度的影响因子,全部4次取样数据的多元线性回归方程为:

$$\tau_f = 10.824 + 14.767\rho_d - 0.262\theta + 1.077\rho_{rw} \quad (3)$$

$$R^2 = 0.405^{***}$$

式中: τ_f , 土壤-根系复合体抗剪强度, kPa; ρ_d , 土壤干密度, t/m^3 ; θ , 土壤含水量, %; ρ_{rw} , 根重密度, kg/m^3 。

土壤-根系复合体抗剪强度与土壤干密度、土壤含水量以及根重密度之间的标准回归系数(Beta值)分别为0.456($P < 0.001$)、-0.321($P < 0.001$)和0.186($P < 0.01$)。这些数值再一次证实,影响土壤-根系复合体抗剪强度各因子的大小顺序为:土壤干密度 > 土壤含水量 > 根重密度。决定系数 R^2 由一般回归分析的0.438减小到目前的0.405,但自变量数量由5个减少到3个,更便于应用。

各次取样以及全部4次取样数据的统计结果显示,根重密度与根-土面积比之间在 $P \leq 0.01$ 统计水平显著相关(数据未给出)。除4月份外,根重密度与根长密度也在 $P \leq 0.05$ 统计水平相关。而根长密度与根-土面积比之间的相关性较差。由于根重密度易于测定,且可较好地代表根长密度和根-土面积比这2个表征土壤含根量的参数,因此在研究一年生草本植被根系对土壤-根系复合体抗剪强度的影响时,可采用根重密度作为代表草本植被根系的特征参数。

3 讨论

稗草和狗尾巴草属于一年生须根系禾本科草本植物^[32-33]。作为活性材料,一年生草本植被的固土护坡作用效果与其生长阶段密切相关。北京地区冬季干燥少雨,降水主要集中在6—9月份(78.3%)。3月份平均气温大约为0~12℃,稗草和狗尾巴草

等草本植物尚未开始正常生长^[32-37],此时土壤中的根系为上一年度植物的遗留根系,根系直径明显大于其他取样时间(3月份平均根系直径为0.164±0.084 mm)。但经过整个冬季的腐烂后,这些残余的植物根系虽然具有一定的质量、长度和直径,但其抗拉强度已显著降低,它对土壤-根系复合体抗剪强度并无显著的促进作用(表1),反而可能会因为根系占据一定的土壤空间而导致土壤-根系复合体抗剪强度稍微减小(图2);4月份平均气温为8~20℃,此时草本植物刚开始萌芽生长,其根系主要为初生根系,根系生长速度快但数量少^[38],根系直径相对较大(平均0.060±0.029 mm);6月份平均气温为19~30℃,北京地区开始进入雨季。随着降雨量增加和气温的明显升高,稗草和狗尾巴草等草本植物进入快速生长发育期^[32-33,35-36];8月份以后,草本植物进入生长旺盛期。虽然6和8月份草本植被的根系直径并不大(分别为0.038±0.020和0.032±0.013 mm),但此阶段的植被根系数量较多,根系长且壮,根系抗拉强度也较大。稗草和狗尾巴草的生育期一般为75~150 d,在9月份以后逐渐进入成熟期。因此,草本植被根系对土壤-根系复合体抗剪强度的强化作用在8月份时明显大于本试验中的其他取样月份,且随着土壤含根量的增加而显著增大(图2)。一年生草本植被根系在不同生育阶段的力学性能以及在土壤含水量较大条件下植被根系对土壤-根系复合体抗剪强度的增强效果尚需进一步调查研究。

在测试的土壤环境(土壤干密度(1.33±0.10) t/m^3 和土壤含水量 12.28%±3.82%)条件下,根据式(3)计算可知,一年生草本植物的根重密度每增加1.0 kg/m^3 ,土壤-根系复合体的抗剪强度可增大1.077 kPa。由于本研究的取样点位置避开了植物主根区,且为人类生产活动干扰较大的苗圃林间空地,因此测定的土壤含根量相对较低(图2)。一般温带的天然草本植物根重密度可达5~10 kg/m^3 甚至更大^[18-20]。当土壤中植被根重密度为5和10 kg/m^3 时,土壤-根系复合体的抗剪强度比无根系土壤的抗剪强度可分别增大19.8%和39.5%。这一贡献程度与 Loades 等报道的大田大麦根系对土壤抗剪强度29%的贡献率相似^[6]。因此,一年生天然须根系草本植被对表层土壤抗剪强度的强化作用是显著的。从力学角度来看,这将会增大表层土壤的运移阻力从而有助于抑制土壤水力侵蚀^[23]。

4 结 论

1) 土壤-根系复合体抗剪强度随着土壤干密度的增大而增大,但随土壤含水量的增大而减小。

2) 土壤-根系复合体抗剪强度与根重密度的相关性大于它与根长密度或根-土面积比的相关性。土壤-根系复合体抗剪强度随着根重密度的增大而增大。根重密度可以作为表征一年生草本植被根系对土壤-根系复合体抗剪强度影响的根系特征参数。

3) 土壤干密度和土壤含水量对土壤抗剪强度的影响程度大于一年生天然草本植被根系的影响程度,但一年生天然草本植被根系对土壤-根系复合体抗剪强度的强化效果显著。在根重密度为 $5 \sim 10 \text{ kg/m}^3$ 时,土壤-根系复合体抗剪强度比无根系土壤抗剪强度可增大 $19.8\% \sim 39.5\%$ 。

参 考 文 献

- [1] 李建兴,何丙辉,谌芸. 不同护坡草本植物的根系特征及对土壤渗透性的影响[J]. 生态学报,2013,33(5):1535-1544
- [2] Osman N, Barakbah S S. The effect of plant succession on slope stability[J]. Ecological Engineering,2011,37:139-147
- [3] Reubens B, Poesen J, Danjon F, et al. The role of fine and coarse roots in shallow slope stability and soil erosion control with a focus on root system architecture: A review[J]. Trees, 2007,21(4):385-402
- [4] Fattet M, Fu Y, Ghestem M, et al. Effects of vegetation type on soil resistance to erosion: Relationship between aggregate stability and shear strength[J]. Catena,2011,87:60-69
- [5] 赵洋毅,王玉杰,王云琦,等. 渝北水源区水源涵养林构建模式对土壤渗透性的影响[J]. 生态学报,2010,30(15):4162-4172
- [6] Loades K W, Bengough A G, Bransby M F, et al. Planting density influence on fibrous root reinforcement of soils[J]. Ecological Engineering,2010,36:276-284
- [7] De Baets S, Torri D, Poesen J, et al. Modelling increased soil cohesion due to roots with EUROSEM[J]. Earth Surf Process Landforms,2008,33:1948-1963
- [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] De Baets S, Poesen J, Reubens B, et al. Root tensile strength and root distribution of typical Mediterranean plant species and their contribution to soil shear strength[J]. Plant and Soil, 2008,305:207-226
- [10] Comino E, Marengo P. Root tensile strength of three shrub species: *Rosa canina*, *Cotoneaster dammeri* and *Juniperus horizontalis*-Soil reinforcement estimation by laboratory tests [J]. Catena,2010,82:227-235
- [11] Hudek C, Burylo M, Rey F. Root system traits of *Mahonia aquifolium* and its potential use in soil reinforcement in mountain horticultural practices [J]. Scientia Horticulturae, 2010,125:504-511
- [12] Mattia C, Bischetti G B, Gentile F. Biotechnical characteristics of root systems of typical Mediterranean species[J]. Plant and Soil,2005,278:23-32
- [13] Pollen N. Temporal and spatial variability in root reinforcement of streambanks: Accounting for soil shear strength and moisture[J]. Catena,2007,69:197-205
- [14] Comino E, Marengo P, Rolli V. Root reinforcement effect of different grass species: A comparison between experimental and models results[J]. Soil & Tillage Research,2010,110:60-68
- [15] Burylo M, Hudek C, Rey F. Soil reinforcement by the roots of six dominant species on eroded mountainous marly slopes (Southern Alps, France)[J]. Catena,2011,84:70-78
- [16] Pohl M, Stroude R, Buttler A, et al. Functional traits and root morphology of alpine plants[J]. Annals of Botany,2011,108:537-545
- [17] 宋坤,潘晓星,穆立蕾. 6种草本植物根系土壤抗冲性[J]. 国土与自然资源研究,2013(3):82-83
- [18] De Baets S, Poesen J, Knapen A, et al. Root characteristics of representative Mediterranean plant species and their erosion-reducing potential during concentrated runoff[J]. Plant and Soil,2007,294:169-183
- [19] Jackson R B, Canadell J, Ehleringer J R, et al. A global analysis of root distributions for terrestrial biomes[J]. Oecologia,1996,108:389-411
- [20] 李建兴,何丙辉,谌芸,等. 不同护坡草本植物的根系分布特征及其对土壤抗剪强度的影响[J]. 农业工程学报,2013,29(10):144-152
- [21] 杨亚川,莫永京,王芝芳,等. 土壤-草本植被根系复合体抗水蚀强度与抗剪强度的试验研究[J]. 中国农业大学学报,1996,1(2):31-38
- [22] Mickovski S B, van Beek L P H. Root morphology and effects on soil reinforcement and slope stability of young vetiver (*Vetiveria zizanioides*) plants grown in semi-arid climate[J]. Plant and Soil,2009,324:43-56
- [23] De Baets S, Poesen J, Knapen A, et al. Impact of root architecture on the erosion-reducing potential of roots during concentrated flow[J]. Earth Surf Process Landforms,2007,32:1323-1345
- [24] Cammeraat E, van Beek R, Kooijman A. Vegetation succession and its consequences for slope stability in SE Spain[J]. Plant and Soil,2005,278:135-147
- [25] Hubble T C T, Docker B B, Rutherford I D. The role of riparian trees in maintaining riverbank stability: A review of Australian experience and practice[J]. Ecological Engineering, 2010,36:292-304
- [26] 解明曙. 林木根系固坡土力学机制研究[J]. 水土保持学报, 1990,4(3):7-14,50

- [27] Zhang C B, Chen L H, Liu Y P, et al. Triaxial compression test of soil - root composites to evaluate influence of roots on soil shear strength[J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36: 19-26
- [28] Comino E, Druetta A. The effect of *Poaceae* roots on the shear strength of soils in the Italian alpine environment[J]. *Soil & Tillage Research*, 2010, 106: 194-201
- [29] 国家质量技术监督局, 中华人民共和国建设部. 土工试验方法标准(GB/T50123—1999)[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999
- [30] Fan C C, Su C F. Role of roots in the shear strength of root-reinforced soils with high moisture content [J]. *Ecological Engineering*, 2008, 33: 157-166
- [31] Osman N, Barakbah S S. Parameters to predict slope stability- Soil water and root profiles[J]. *Ecological Engineering*, 2006, 28: 90-95
- [32] Douclns B J, Thomas A G, Morrison I N, et al. The biology of Canadian weeds 70 *Setaria viridis* (L) Beauv[J]. *Can J Plant Sci*, 1985, 65: 669-690
- [33] Maun M A, Barrett S C H. The biology of Canadian weeds. 77. *Echinochloa crus-galli* (L) Beauv[J]. *Can J Plant Sci*, 1986, 66: 739-759
- [34] Rahman M, Ungar I A. The effect of salinity on seed germination and seedling growth of *Echinochloa crusgalli*[J]. *Ohio J Sci*, 1990, 90(1): 13-15
- [35] Dekker J. The foxtail (*Setaria*) species-group[J]. *Weed Sci*, 2003, 51: 641-656
- [36] Born W H V. Green foxtail: Seed dormancy, germination and growth[J]. *Can J Plant Sci*, 1971, 51: 53-59
- [37] Wiese A M, Binning L K. Calculating the threshold temperature of development for weeds[J]. *Weed Sci*, 1987, 35: 177-179
- [38] Cheng W, Coleman D C, Box Jr J E. Root dynamics, production and distribution in agroecosystems on the Georgia piedmont using minirhizotrons [J]. *The Journal of Applied Ecology*, 1990, 27(2): 592-604

责任编辑: 王燕华