

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2014-0285

张晓艳,周正朝.黄土高原地区草地植被调控土壤水蚀机理的研究进展[J].草业科学,2015,32(1):64-70.

ZHANG Xiao-yan, ZHOU Zheng-chao. Research progress on mechanism of grassland vegetation regulating soil erosion in Loess Plateau[J]. Pratacultural Science, 2015, 32(1): 64-70.

黄土高原地区草地植被调控 土壤水蚀机理的研究进展

张晓艳,周正朝

(陕西师范大学旅游与环境学院,陕西 西安 710062)

摘要:作为我国水土流失最为严重的地区之一,黄土高原地区独特的地理环境条件和有限的水资源要求该区的林草植被建设以草地植被为主,草地植被在控制土壤水蚀方面已取得了重大进展。本研究根据草地植被地上和地下部分与土壤侵蚀的关系,分析得出,草地植被地上部分能够削弱雨滴击溅动力,减小坡面径流冲刷能力;根系可改善土壤结构,提高土壤入渗能力,增强土壤抗侵蚀性能。从草地植被地上部分对土壤水蚀动力的影响,以及根系增强土壤抗侵蚀性能两个主要方面归纳总结了当前的研究进展,并针对研究中存在的一些亟待解决的问题进行了探讨,以期为更好地利用植被防治土壤侵蚀提供参考。

关键词:土壤水蚀;黄土高原;土壤水蚀动力;土壤抗侵蚀能力;草地植被

中图分类号:S812.2

文献标识码:A

文章编号:1001-0629(2015)01-0064-07*

Research progress on mechanism of grassland vegetation regulating soil erosion in Loess Plateau

ZHANG Xiao-yan, ZHOU Zheng-chao

(College of Tourism Environment Science, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China)

Abstract: As one of the most serious soil erosion areas in China, grassland vegetation is priority for vegetation construction in the Loess Plateau area by its unique geographical conditions and limited water. Grassland vegetation has already contributed a lot to control soil water erosion. Based on the relationships between different parts of grassland vegetation and soil erosion, the present paper drew a conclusion that grassland aboveground parts can weaken rainfall energy and runoff erosion power, and grass roots were able to enhance soil penetrability and soil anti-erodibility by improving soil properties and winding soil mass. In order to provide references for vegetation preventing and controlling soil erosion in Loess Plateau, two aspects of current research progress were summarized including the grassland aboveground part controlling soil erosion power and grass roots enhancing soil anti-erodibility and the exiting problem were discussed.

Key words: soil erosion; Loess Plateau; soil water erosion power; soil anti-erodibility; grassland vegetation

Corresponding author: ZHOU Zheng-chao E-mail: zhouzhengchao@126.com

* 收稿日期:2014-06-13 接受日期:2014-09-29

基金项目:陕西省青年科技新星项目——黄土高原草被控制坡沟系统径流侵蚀动力机制及有效性研究(2014KJXX-52);霍英东教育基金会高等院校青年教师基金——黄土高原小流域土壤侵蚀动态对气候变化的非线性响应(131025);陕西师范大学中央高校项目——植被坡面水流水力学特性及对侵蚀输沙的影响(GK201103003)

第一作者:张晓艳(1988-),女,安徽阜阳人,在读硕士生,主要从事植被生态与土壤侵蚀关系研究。E-mail: zxy20121119@163.com

通信作者:周正朝(1980-),男,四川泸州人,副教授,博士,主要从事土壤侵蚀方面的研究。E-mail: zhouzhengchao@126.com

黄土高原地区是我国乃至世界上水土流失最为严重的地区之一。严重的水土流失与该区不合理的土地利用和植被破坏密切相关^[1]。植被在土壤侵蚀防治中具有极为重要的作用,已被大量研究和实践所证实,并得到广泛应用^[2-8]。20世纪90年代末国家实施的退耕还林还草工程,是充分利用植被治理水土流失的重大举措。

但对黄土高原而言,其水资源极其匮乏,有限的水资源并不能承载大量的林木,根据气候、地形、地貌与土壤条件,草地植被的恢复和重建应成为该区生态环境建设的主要部分^[2,9]。因此,在水土流失极为严重的黄土高原地区,更应关注草地植被的水土保持效应,这对发展可持续的水土保持植被具有极为重要的意义^[10-11]。

土壤水蚀是降雨径流营力与土壤抗侵蚀力之间相互作用的过程。Ghidey 和 Alberts^[12]认为土壤溅蚀量与降雨动能呈正相关关系,但是截至目前,关于草地植被冠层与枯落物削弱降雨击溅动力以及影响侵蚀的机制尚不明晰。坡面流为土壤水蚀的另一主要动力,其水动力参数,如流速、径流能量、剪切力与侵蚀关系一直是研究的热点^[13],但从流量、雷诺数、弗氏数水力学参数出发,系统分析草地植被通过茎秆和枯落物引起坡面流分离和能量损失而导致坡面流阻力增大的研究较少。此外,草地植物根系与土壤侵蚀的关系得到了人们的广泛关注^[14],但是由于不同类型草被根系构成、分布特征及力学特征等存在差异,目前已建立的根系参数与土壤抗蚀性、抗冲性之间的关系尚难以统一^[4,15-16],迫切需要揭示根系对土壤抗侵蚀能力的作用机制。基于此,本文总结当前黄土高原地区草地植被调控土壤水蚀机理的研究进展,分析草地植被在调控土壤水蚀机理方面存在的问题,提出草地植被调控土壤水蚀机理的研究展望,以期在理论上为全面理解和研究草地植被与土壤水蚀的关系提供参考,同时在实践中为黄土高原地区草地植被的恢复和建设提供科学依据。

1 草被地上部分控制土壤侵蚀动力研究

雨滴击溅和坡面流冲刷是土壤水蚀的原动力,草地地上部分控制土壤侵蚀主要体现于茎叶、枯落物对降雨动能以及茎秆、枯落物对坡面流冲刷的影

响两个方面。

1.1 草被地上部分削弱降雨击溅作用的研究

雨滴对地表的打击力是土壤溅蚀的直接作用力^[17]。当雨滴降落到地表时,其动能直接传递给表土,使土壤颗粒发生飞溅,与乔灌类植物相比,草被高度相对较低,紧附地表,可以更有效地减小雨滴动能、减少雨滴溅蚀量和土壤溅蚀程度。研究发现,土壤溅蚀量是降雨动能与土壤可蚀性的函数,且与雨滴动能呈正相关关系^[12];作用于土壤表面的降雨动能随冠层盖度的增大而减小^[18];草被的冠层能减小降雨动能,茎叶和枯落物层能够削弱雨滴溅蚀,具有良好的消能以及促进落淤的作用^[19-21],从而防止和减少击溅侵蚀的发生与发展。

草被地上部分对降雨击溅作用的影响主要通过冠层和茎叶拦蓄降雨、改变雨滴分布,以及减缓雨滴速度来实现。但是,由于草被茎秆较低,用滤纸法、色斑法和面粉球法等常规方法直接测定冠层以下部分的雨滴相对困难,大多通过测定雨滴大小分布及其速度来计算,或利用动能与雨强的经验关系获得^[22]。所以,有关草被地上部分与降雨动能关系的研究相对较少。此外,关于草地植被枯落物与土壤侵蚀关系的研究也不多,但秸秆以及林地枯落物减少侵蚀已被研究所证实^[2,23]。Pan 等^[24]研究认为草地枯落物对坡面泥沙输移的影响并不显著,这可能说明草地植被枯落物的作用更多的在于防止侵蚀,而不是拦蓄泥沙。因此,目前关于草被冠层、枯落物削减降雨击溅动力以及影响侵蚀的机制有待进一步加强。

1.2 草被地上部分对径流冲刷影响的研究

坡面径流是造成坡面土壤被分散、剥蚀和冲刷的关键因素^[25]。而草被地上部分具有拦蓄径流和减少侵蚀的效益,研究发现(表1),草被的茎叶部分主要在于截留降雨,枯落物层主要在于减少径流和侵蚀的发生^[19,26-27]。一般认为,草被地上部分可以减小坡面流的动能和势能,使坡面流的曼宁糙率和达西阻力系数变小;随坡面水流量的增大,草被覆盖坡面的流态由层流—缓流转变为过渡流—缓流;在有草被覆盖的断面,坡面流的雷诺数、弗氏数变化很小^[28-30]。徐震^[31]研究得出,在小雨强下,草冠能平均减小径流流速40.9%、弗氏数40.7%,增加坡面流

表 1 去茎叶和枯落后草地拦蓄径流、泥沙的效益^[26-27]

Table 1 Benefits for reducing surface runoff and sediment by grassland after different experiments^[26-27]

试验处理 Experiment treatment	径流量 Runoff yield/ m ³ · km ⁻²	减少径流效益 Benefits for reducing surface runoff	产沙量 Sediment yield/ t · km ⁻²	减沙效益 Benefits for reducing sediment
天然草地 Grassland(CK)	1 040	96%	0	100%
去茎叶 No canopy	3 640	87%	0	100%
去茎叶和枯落物 No canopy or litter	7 910	73%	693.3	95%
参考文献 Reference	[26]	[27]	[26]	[27]

水深 1.46 倍、糙率 4.8 倍、阻力 34.1 倍;在大雨强下,草冠能平均减小坡面流速 5.9%、弗氏数 4.8%,增加径流水深 0.50 倍、糙率 2.1 倍、阻力 20.4 倍。肖培青等^[32]研究发现,坡面流阻力系数 f 可表示为:

$$f = 10^{4.1} P^{-1.12} V^{-0.22} H^{0.0005} R^{1.275} C^{1.44}$$
, 相关系数为 0.92。

式中, P 为降雨强度, V 为水流速度, H 为径流水深, R 为地表粗糙度, C 为覆盖度。这也说明,草被地上部分的覆盖是阻延坡面流的主导因子和影响坡面流阻力的重要因素。

草地植被增大坡面流阻力已经成为共识,但目前的研究很少从流量、雷诺数和弗氏数等水力参数出发,系统地分析植被通过茎叶和枯落物引起坡面流分离、能量损失,进而导致形态阻力增大,以及通过草地植被冠层削减降雨打击作用而改变雨滴阻力的定量关系。也有研究表明,在坡度 $>8^{\circ}$ 的草被生长坡面,土壤水蚀超过裸露坡面,这可能是因为草被茎叶引发了向下坡的紊动涡流,增强了坡面径流的侵蚀能力^[33]。鉴于草地植被地上部分减蚀作用的复杂性和目前试验量测条件的限制,今后还需要结合更多的试验观测,进一步从理论上揭示草地植被地上部分的阻流机制及坡面径流侵蚀能力对草被地上部分的响应机理。

2 草地根系对土壤抗侵蚀性能影响研究

研究认为,植物根系强化土壤抗侵蚀性能的间接机理主要包括两个方面:一是增加土壤中水稳性团粒和有机质含量,改善土体构型,稳定土壤结构,从而增强土壤颗粒抗水流分散的能力;二是根系的存在可提高土壤的渗透能力,增加土壤入渗速率,延长汇流时间,减少坡面径流,减弱径流冲刷力。而根

系对土壤侵蚀的直接作用主要表现为增强土壤抗侵蚀能力。

2.1 草被根系稳定土壤结构、增强土壤入渗能力的间接机理研究

草地植被的根系主要分布在 0—30 cm 深的土层内,其中直径小于 1 mm 的侧根(须根)多分布在 0—20 cm 土层内。草地植被根系浅而集中,并且须根量大、根系较细,对其周围的土体能够产生“包裹缠绕”作用,使土体处于三维受力状态,进而增强土体的抗剪强度,达到稳定土壤结构的效果^[34-36]。根系在生长直至死亡腐解的过程中,可以通过穿插作用把黄土的大小颗粒和雨土(细粒团)等串联在一起,以维持、巩固黄土的疏松和通透状态,提高土体的通渗性,把上下土层连成一体,从而能够保持并巩固黄土的“点棱接触侧斜支架式多孔结构”特征^[37]。

草地植被根系在提高土壤入渗能力方面具有极其显著的作用^[38]。活根和死根都会使土壤产生较多的空隙,一旦地表产流,径流就可以顺着这些空隙、通道和根土接触面进入土壤。根系有助于持续保持土壤的这种孔隙系统,加强土壤的透水性,增强土壤渗透能力^[39]。而根系强化土壤渗透能力的剖面特征是(图 1):0—30 cm 土层内的根系能够显著提高土壤的渗透性能^[19,38]。坡面水流的入渗率是衡量土壤入渗能力的一个重要指标,不同类型的草被,其根系增强土壤入渗能力存在着很大差异性。甘卓亭等^[40]研究得出,由于黑麦草(*Lolium perenne*)根系较红豆草(*Onobrychis viciaefolia*)根系密集,能较好地强化土壤入渗的能力,所以其平均入渗率高于红豆草根系径流小区。但是,目前在草被根系稳定土壤结构和增加入渗方面,研究的还不够深入,重复性的研究较多,而对不同退耕年限及不

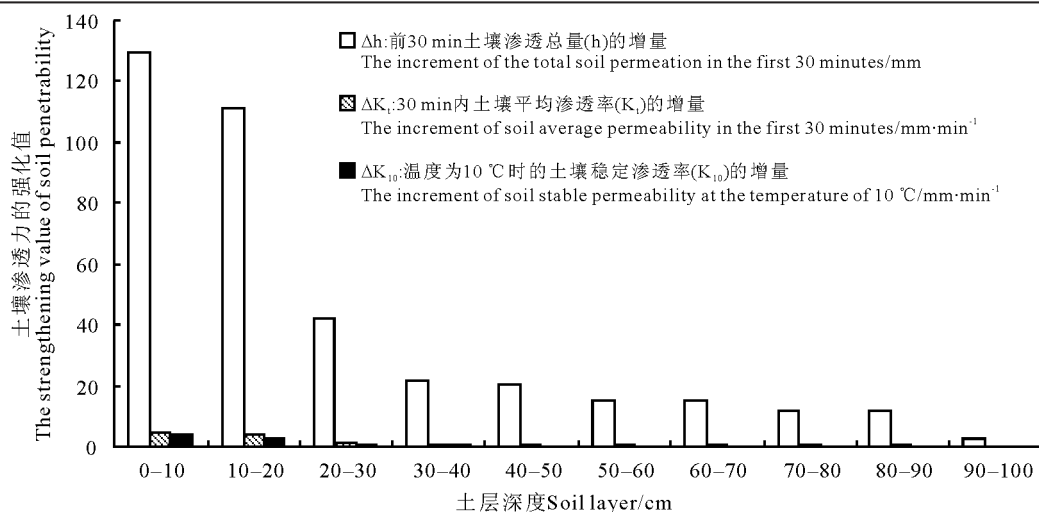


图 1 不同土层草被根系对土壤渗透力的强化值^[19,38]

Fig.1 The strengthening value of grass root of different soil layers on soil penetrability^[19,38]

同立地条件下草被根系的研究较少。

2.2 草被根系增强土壤抗侵蚀性能的直接作用研究

从侵蚀动力学机制来讲,根系主要影响土壤抗侵蚀能力。国际上多采用可蚀性指标来表征土壤抵抗雨滴打击和径流冲刷等侵蚀作用的性能,所以,植物根系与土壤可蚀性的关系一直受到广泛关注^[14]。而在研究土壤抗侵蚀能力时,经常从土壤抗冲性和抗蚀性两方面进行研究^[41]。土壤抗冲性是指土壤抵抗径流对其机械破坏和推动下移的性能^[42]。土壤抗蚀性是指土壤对侵蚀营力分解和搬运作用的抵抗能力^[43]。一般的研究方法是土壤理化参数分析以及径流小区试验法,通过分析植物根系对相关土壤理化和力学参数(如有机质、水稳性团粒含量、渗透性和剪切力等)的影响,以及土壤流失量与土壤参数的关系,进而分析根系对土壤抗侵蚀性能的影响,建立土壤可蚀性与植被根系参数(长度、密度和生物量等)的定量关系^[4,12,16,44]。

土壤抗冲性是影响土壤水蚀过程的最基本因素。所以,在侵蚀严重的黄土高原地区,针对草地植物根系与土壤抗冲性关系已展开了较为广泛的研究。不同学者通过原状土冲刷试验,测定根系和土壤的相关参数,提出了增强土壤抗冲性的敏感根系参数,如根系长度、 $\leq 1\text{ mm}$ 径级的须根密度、根系生物量和单位土体根系表面积等,并建立了二者的关系式^[15,45-48]。而针对土壤抗蚀性方面,研究认为,

草地植被根系可以显著降低土壤分离速率,减小坡面流输沙量,从而增强土壤抗蚀性,减少土壤侵蚀。植物死根能够影响径流含沙量和土壤流失量,随着死根长度和生物量的增加,细沟间土壤可蚀性的参数降低,二者之间存在指数关系;死根与土壤团聚体、分散率和径流剪切力等都有显著关系^[12,33,49]。

此外,刘国彬等^[50]研究了黄土高原不同类型牧草根系生物力学特性与土壤侵蚀关系,结果表明,牧草毛根的抗拉能力表现为禾本科>豆科>菊科,并且不同类型草被根系增强土壤抗侵蚀性能存在差异。研究认为,植物根系主要通过直接固结缠绕土体,以及间接改善土壤构型两方面来共同增强土壤抗侵蚀性能,而准确区分根系的直接和间接作用贡献对于根系与土壤抗侵蚀性能关系模型研究具有重要意义^[7,15,37]。

3 不足与展望

目前,众多的研究分别揭示了草地植被地上部分影响侵蚀动力和地下根系增强土壤抗侵蚀能力的机理,为进一步深入研究草地植被调控土壤水蚀机理奠定了重要基础。但是,由于草被茎叶和枯落物研究方法、手段的局限性以及草被生长微地形的复杂性,现有的研究成果涉及不同物种草被、不同结构草被和不同年龄草被及不同立地条件下草被的综合性研究以及实施生态修复和封禁治理后的草地植被还极为少见,并且很多结果是通过室内模拟^[51]试验

得到的,至于自然草被及其空间分布对坡面降雨侵蚀过程的影响是否与室内研究结论一致,还不得而知。同时,不同类型草被根系构成、分布特征和力学特征等存在差异,并且根系还受根际环境以及生长阶段等综合影响,目前已建立的根系参数与土壤抗冲性、可蚀性之间的关系尚难以统一,草地植被根系在时间及空间上的动态变化对土壤抗侵蚀性能的影响等亟待进一步认识。并且,目前的研究成果往往是相互割裂的,并未综合分析草被地上、地下部分控制侵蚀的联合作用及机制^[8,17]。因此,要充分认识和揭示草地植被控制土壤水蚀的机理、更好地与当前黄土高原水土保持生态建设契合还需从以下几个方面开展研究:1)在时间尺度上,需要对草地植被地上部分及根系进行长期系统的定位观察和研究,将茎叶、根系的生长及枯落物累积、土壤种子库等各部分的变化与土壤抗侵蚀能力动态进行耦合。2)在空间尺度上,大量研究主要针对单坡面,对黄土高原沟壑纵横^[52]及坡面一沟坡在土壤侵蚀过程中密不可分的实际考虑不足。因此,这方面还需要系统研究草被类型、空间配置及草被盖度、根系控制坡沟系统

土壤水蚀的机理及有效性。3)在研究内容上,①在草被地上部分抑制侵蚀动力方面,需要定量探讨草被冠层盖度、叶面积指数^[53]以及枯落物覆盖度与厚度等与降雨动能和雨滴打击力之间的关系;并加强对草被冠层等地上部分削减降雨击溅动力及影响侵蚀机制的研究,尤其需要对不同草被类型和不同空间配置进行比对研究。②在根系强化土壤抗侵蚀性能方面,需要综合考虑草地植被的根系形态学参数并进行比较研究,对各形态学参数进行综合分析,进而认识强化土壤抗侵蚀性能的关键根系形态学参数;同时,还需区分根系增强土壤抗侵蚀性能的直接作用(缠绕固结土体)和间接作用(改善土壤构型^[54]和性能等)贡献,从而较全面地理解草被根系增强土壤抗侵蚀性能的机制。③在草被地上和地下部分控制侵蚀的联合作用及机制方面^[55],需要分析草被冠层、茎秆分布、枯落物和根系等控制侵蚀的相对重要性,并分析雨强、坡度、坡长及草被生长阶段和不同类型草被等因素对其的影响,综合分析上述草地不同部分调控侵蚀的动力学机制,系统探讨草地植被控制土壤水蚀的机理。

参考文献

- [1] 唐克丽.中国水土保持[M].北京:科学出版社,2004.
- [2] 吴钦孝,杨文治.黄土高原植被建设与持续发展[M].北京:科学出版社,1998.
- [3] 焦菊英,王万忠,李靖.黄土高原林草水土保持有效盖度分析[J].植物生态学报,2000,24(5):608-612.
- [4] Gyssels G, Poesen J, Bochet E, Li Y. Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water: A review[J]. Progress in Physical Geography, 2005, 29: 189-217.
- [5] 高雅,林慧龙.草地生态系统服务价值估算前瞻[J].草业学报,2014,23(3):290-301.
- [6] Zhou Z C, Gan Z T, Shangguan Z P, Dong Z B. China's Grain for Green Program has reduced soil erosion in the upper reaches of the Yangtze River and the middle reaches of the Yellow River [J]. International Journal of Sustainable Development & World Ecology, 2009, 16(4): 234-239.
- [7] De Baets S, Poesen J. Empirical models for predicting the erosion-reducing effects of plant roots during concentrated flow erosion[J]. Geomorphology, 2010, 118: 425-432.
- [8] Osterkamp W R, Hupp C R, Stoffel M. The interactions between vegetation and erosion: New directions for research at the interface of ecology and geomorphology[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2012, 37: 23-36.
- [9] 田均良.黄土高原生态建设环境效应研究[M].北京:气象出版社,2010.
- [10] 余新晓,张晓明,牛丽丽,岳永杰,武思宏,张满良.黄土高原流域土地利用/覆被动态演变及驱动力分析[J].农业工程学报,2009,25(7):219-225.
- [11] 肖培青,姚文艺,申震洲,杨春霞.苜蓿草地侵蚀产沙过程及其水动力学机理试验研究[J].水利学报,2011,42(2): 232-237.
- [12] Ghidry F, Alberts E E. Plant root effects on soil erodibility, splash detachment, soil strength, and aggregate stability[J].

- Transactions of the ASAE, 1997, 40(1): 129-135.
- [13] Hogarth W L, Rose C W, Parlange J Y. Erosion caused by overland flow: An interpolation method[J]. Journal of Hydrology, 2011, 402: 155-158.
- [14] Fattet M, Fu Y, Ghestem M, Ma W, Fouloneau M, Nespoulous J, Stokes A. Effects of vegetation type on soil resistance to erosion: Relationship between aggregate stability and shear strength[J]. Catena, 2011, 87(1): 60-69.
- [15] 刘国彬. 黄土高原草地土壤抗冲性及其机理研究[J]. 水土保持学报, 1998, 4(1): 93-96.
- [16] De Baets S, Torri D, Poesen J, Salvador M P, Meersmans J. Modelling increased soil cohesion due to roots with EU-ROSEM[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2008, 33: 1948-1963.
- [17] 潘成忠, 上官周平. 降雨对薄层水流的水动力学参数的影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 2009(6): 843-851.
- [18] Wainwright J, Parsons A J, Abrahams A D. Plot-scale studies of vegetation, overland flow and erosion interactions: Case studies from Arizona and New Mexico[J]. Hydrological Processes, 2000, 14(5): 2921-2943.
- [19] 李鹏. 黄土区草地植被水土保持作用机理试验研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2003.
- [20] Frasson R P D, Krajewski W F. Characterization of the drop-size distribution and velocity-diameter relation of the throughfall under the maize canopy[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(9): 1244-1251.
- [21] 刘晓路, 高强, 肖衡林. 基于三维土工网垫的植草护坡技术研究[J]. 长江科学院院报, 2008, 25(3): 58-61.
- [22] Petan S, Rusjan S, Vidmar A, Mikoš M. The rainfall kinetic energy-intensity relationship for rainfall erosivity estimation in the mediterranean part of Slovenia[J]. Journal of Hydrology, 2010, 391: 314-321.
- [23] Zavala L M, Jordan A, Gil J, Bellinfante N, Pain C. Intact ash and charred litter reduces susceptibility to rain splash erosion post-wildfire[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2009, 34: 1522-1532.
- [24] Pan C Z, Ma L, Shangguan Z P. Effectiveness of grass strips in trapping suspended sediments from runoff[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2010, 35: 1006-1013.
- [25] 罗伟祥, 白立强, 宋西德, 刘天义, 马志明. 不同覆盖度林地和草地的径流量与冲刷量[J]. 水土保持学报, 1990, 4(1): 30-34.
- [26] 白红英, 唐克丽, 张科利, 陈文亮, 查轩. 草地开垦人为加速侵蚀的人工降雨试验研究[J]. 中国科学院水利部西北水土保持研究所集刊, 1993, 6(17): 87-93.
- [27] 郑粉莉, 白红英, 安韶山. 草被地上和地下部分拦蓄径流和减少泥沙的效益分析[J]. 水土保持研究, 2005, 12(5): 86-87, 111.
- [28] 李勉, 姚文艺, 陈江南, 丁文峰, 杨剑锋, 李莉, 杨春霞. 草被覆盖下坡沟系统坡面流能量变化特征试验研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(5): 13-17.
- [29] 李勉, 姚文艺, 陈江南. 草被覆盖对坡面流流速影响的人工模拟试验研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(12): 43-47.
- [30] 李勉, 姚文艺, 杨剑锋, 陈江南, 丁文峰, 李莉, 杨春霞. 草被覆盖对坡面流流态影响的人工模拟试验研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2009, 17(4): 513-523.
- [31] 徐震. 草被冠层和根系对坡面径流输沙的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011.
- [32] 肖培青, 姚文艺, 李莉, 杨春霞. 植被影响下坡面流阻力变化特征研究[J]. 泥沙研究, 2013, 3: 1-5.
- [33] de Ploey J, Savat J, Moeyersons J. The differential impact of some soil loss factors on flow runoff creep and rainsplash[J]. Earth Surface Processes, 1976(1): 151-161.
- [34] 龙忠富, 唐成斌, 刘秀峰, 刘正书, 孟军江. 喀斯特地区高等级公路边坡等侵蚀劣地草种筛选研究[J]. 公路, 2006(11): 187-193.
- [35] 张谢东, 石明强, 赵来, 刘志强. 公路边坡植物根系固土的力学分析研究[J]. 交通科技, 2008(1): 50-52.
- [36] 曹佼. 基于 8 种植物根系的抗拉模型分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- [37] 朱显谟, 田积莹. 强化黄土高原土壤渗透性及抗冲性的研究[J]. 水土保持学报, 1993, 7(3): 1-10.
- [38] 李勇, 徐晓琴, 朱显谟, 田积莹. 黄土高原植物根系强化土壤渗透力的有效性[J]. 科学通报, 1992, 37(4): 366-369.
- [39] 李勉, 姚文艺, 李占斌. 黄土高原草本植被水土保持作用研究进展[J]. 地球科学进展, 2005, 20(1): 74-80.
- [40] 甘卓亭, 叶佳, 周旗, 周正朝, 上官周平. 模拟降雨下草地植被调控坡面土壤侵蚀过程[J]. 生态学报, 2010, 30(9): 2387-

2396.

- [41] 徐少君,曾波.三峡库区5种耐水淹植物根系增强土壤抗侵蚀效能研究[J].水土保持学报,2008,22(6):13-18.
- [42] 伏耀龙,张兴昌.岷江干河谷区不同土地利用方式下土壤抗冲性试验[J].农业机械学报,2012,43(7):50-55.
- [43] 杨智,兰雪,戴全厚,杨胜权.黔中地区不同岩性土壤抗冲抗蚀性研究进展[J].水土保持研究,2010,17(4):6-9.
- [44] 郑粉莉,张锋,王彬.近100年植被破坏侵蚀环境下土壤质量退化过程的定量评价[J].生态学报,2010,30(22):6044-6051.
- [45] 李勇.黄土高原植物根系与土壤抗冲性[M].北京:科学出版社,1995.
- [46] 周正朝,上官周平.子午岭次生林植被演替过程的土壤抗冲性[J].生态学报,2006,26(10):3270-3275.
- [47] 宋坤,潘晓星,穆立蓄.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.
- [48] 李鹏,李占斌,鲁克新.黄土区草本植被根系与土壤垂直侵蚀产沙关系研究[J].植物生态学报,2006,30(2):302-306.
- [49] 唐科明,张光辉,任宗萍,汪邦稳.坡面薄层水流分离土壤的动力学机理[J].水土保持学报,2011,25(4):46-49.
- [50] 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(3):21-28.
- [51] Pan C Z, Shangguan Z P. Runoff hydraulic characteristics and sediment generation in sloped grassplots under simulated rainfall conditions[J]. Journal of Hydrology, 2006, 331: 178-185.
- [52] 苏娜,焦菊英,王巧利,杜华栋,王志杰,寇萌.黄土丘陵沟壑区不同侵蚀环境下幼苗库及其与地上植被的关系[J].草业学报,2013,22(5):154-164.
- [53] Wen Z M, Brian G L, Jiao F, Lei W N, Shi H J. Stratified vegetation cover index: A new way to assess vegetation impact on soil erosion[J]. Catena, 2010, 83: 87-93.
- [54] 曾全超,李娅芸,刘雷,安韶山.黄土高原草地植被土壤团聚体特征与可蚀性分析[J].草地学报,2014,22(4):743-749.
- [55] Jiao J Y, Zou H Y, Jia Y F, Wang N. Research progress on the effects of soil erosion on vegetation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(2): 85-91.

(责任编辑 王芳)

2015年第1期《草业科学》审稿专家

柴琦	陈兵林	陈先江	丁路明	董全民	侯扶江	金樑	李金花	李旭东
李彦忠	刘桂霞	刘权	上官周平	孙龙	王成章	王朋	王赞文	王兆龙
翁秀秀	武高林	席杰军	谢文刚	徐秉良	徐春城	徐云远	杨惠敏	杨培志
于应文	张吉宇	张晓波	赵宝玉	赵成章				

承蒙以上专家对《草业科学》期刊稿件的审阅,特此表示衷心的感谢!