

张琪琳,王占礼,王栋栋,等.黄土高原草地植被对土壤侵蚀影响研究进展[J].地球科学进展,2017,32(10):1093-1101,doi:10.11867/j.issn.1001-8166.2017.10.1093.[Zhang Qilin,Wang Zhanli,Wang Dongdong,et al. Advances in researches of the effects of grassland vegetation on soil erosion in Loess Plateau[J]. Advances in Earth Science,2017,32(10):1093-1101,doi:10.11867/j.issn.1001-8166.2017.10.1093.]

黄土高原草地植被对土壤侵蚀影响研究进展*

张琪琳¹,王占礼^{1,2*},王栋栋¹,刘俊娥³

(1.西北农林科技大学水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,陕西 杨凌 712100;2.中国科学院水利部水土保持研究所 陕西 杨凌 712100;
3.陕西师范大学地理科学与旅游学院 陕西 西安 710119)

摘 要:黄土高原土壤侵蚀严重,草地植被具有良好的水土保持作用,能很好地改善其生态环境。学者们对草地植被盖度与土壤侵蚀的关系、草地植被对水力学参数的影响、草地植被对土壤性质的影响、草地植被减水减沙效应以及草地坡面土壤侵蚀过程等几个方面开展了大量研究;但是关于草地覆盖诱发的侵蚀作用研究较少。将前人的研究成果进行归纳总结,并补充关于草地诱发侵蚀的一些研究结果,继而指出目前研究中存在的问题以及今后需要加强的方面,旨在减少黄土高原土壤侵蚀。

关 键 词:黄土高原;草地植被;土壤侵蚀

中图分类号: P934

文献标志码: A

文章编号: 1001-8166(2017)10-1093-09

土壤侵蚀是限制人类生存与发展的全球性严重环境问题,我国由于特殊的自然地理和社会经济条件,土壤侵蚀强度大,危害严重,其中黄土高原地区尤为突出^[1]。因此,防治水土流失,减少黄土高原土壤侵蚀已成为解决该区环境问题的关键。植树种草进行生态恢复是控制土壤侵蚀、减少水土流失的有效途径之一^[2],地球陆地表面草地覆盖接近40%^[3],并且主要分布在干旱半干旱地区。黄土高原退耕还草工程实施后,生态效益主要集中在水土保持效益、土壤改良效益、水源涵养效益和物种多样性效益等方面^[4],草地植被在黄土高原生态环境建设中有不可替代的作用,因此,草地植被在防止土壤侵蚀中的作用受到了越来越多的关注。

总结前人关于黄土高原草地植被对土壤侵蚀影响的研究,主要从草地植被盖度与土壤侵蚀的关系、

草地植被对水力学参数的影响、对土壤性质的影响、减水减沙效应以及草地坡面土壤侵蚀过程等几个方面开展。草地植被盖度影响因子众多,但很少从动力学机理上探讨其与侵蚀的关系;目前还没有发展出完善的坡面流侵蚀理论,从而限制了对草地坡面水力学参数的研究;草地植被盖度与土壤抗冲性之间数学模型的建立,可以加快定量化分析草地植被对侵蚀影响的步伐;草地植被减水减沙效应影响因素综合分析不足;运用坡面水力学特性分析草地坡面侵蚀过程的机理还不多;此外,关于草地诱发侵蚀的研究成果较少,今后还应继续加强。

1 草地植被覆盖度与土壤侵蚀关系

植被盖度指植物群落总体或个体的地上部分垂直投影面积与样方面积之比的百分数。为了更好地

* 收稿日期: 2017-05-10; 修回日期: 2017-07-25.

* 基金项目: 国家自然科学基金项目“应用三区土盘实验解析黄土坡面片蚀动力学过程”(编号: 41471230); 国家重点研发计划项目“黄河流域水沙多时空演变及其分异规律”(编号: 2016YFC0402401) 资助.

作者简介: 张琪琳(1991-) 男,山西运城人,硕士研究生,主要从事土壤侵蚀研究. E-mail: zhangqilin1116@163.com

* 通信作者: 王占礼(1960-) 男,陕西榆林人,研究员,主要从事土壤侵蚀过程及预报模型研究工作. E-mail: zwang@nwsuaf.edu.cn

表述草地植被盖度对侵蚀的影响,研究者们引入了草地有效盖度和临界盖度的概念,有效盖度即草地土壤流失量达到允许流失量时的盖度,临界盖度指草地植被水土保持作用达到最大或极限时的盖度^[5]。对于黄土高原地区,多数学者将 60%~70% 的盖度作为草地植被的有效盖度^[6-8];焦菊英等^[9]通过小区资料分析得出,林草措施在十年一遇的暴雨条件下,坡度为 20°、25°、30°和 35°的小区,草地植被有效盖度分别达到 63.4%、71.1%、77.3%和 82.6%时才能有效发挥水土保持作用;孙佳美等^[10]试验得出黑麦草的减水效果存在临界盖度,其值在 60%左右。

关于草地植被盖度与侵蚀之间的关系,研究者们得出了许多结论(表 1)。对比这些公式可以看出,虽然侵蚀与盖度间的函数关系形式多样,包括指数、对数和幂函数,但它们之间都是负相关关系,即土壤侵蚀量随盖度增大均减少,说明草地植被具有很好的水土保持作用。导致多种结论出现可能是由于对盖度不能进行精确控制,草地种植方式、草地类型以及分析数据时采用的方法不同等造成的。Zhou 等^[16]总结前人研究成果,基于气候变化、生态压力和人类活动等因素开发了一个关于草地植被盖度与土壤侵蚀关系的模型,能够很精确地模拟黄土高原草地植被盖度与侵蚀间的动态关系。

表 1 草地植被盖度与侵蚀之间的关系式

Table 1 The relationship between grass coverage and erosion

研究者	关系式
罗伟祥等 ^[11]	$W = -11.180 + 1099.801 \times \frac{1}{V}$, W 为冲刷量(kg)
江忠善等 ^[12]	$C = e^{-0.0418(V-5)}$ $V > 5\%$, C 为草地土壤流失系数
石生新等 ^[13]	$Q = 8.622e^{-3.42V}$, Q 为累计产沙量(kg)
董荣万等 ^[14]	$M = 22.2707 - 4.4438 \ln V$, M 为平均侵蚀量(t/km^2)
郑良勇 ^[15]	$W = 28157.53 \times Q^{2.38} \times V^{-2.82}$, W 为径流输沙率(g/min), Q 为径流流量(L/min)

注: V 为草地覆盖度(%);将草地小区侵蚀模数与对照裸露农地小区侵蚀模数的比值定义为草地土壤流失系数 C ,并将植被覆盖度小于或等于 5% 时的草地土壤流失系数取为 1

2 草地植被对坡面流水力学参数的影响

草地植被对侵蚀的影响实质上是通过改变水力学参数,使坡面产流产沙条件发生变化,从而影响土壤侵蚀过程。总结前人研究成果发现,随着草地植被盖度增加,水流流速、径流深、雷诺数和弗劳德数均减小,阻力系数则增大^[17,18];而随着坡度增大,水流流速和弗劳德数均有增大趋势,径流深和阻力系数则有减小趋势^[19]。

草地植被不同部位对水力学参数影响不同,赵春红等^[20]研究认为根系减速作用大于冠层,而增阻作用小于冠层。徐震^[21]研究发现,在小雨强(30,60 mm/h)时草地冠层对减小坡面流流速、减小弗劳德数、增加水深的贡献均高于根系,而在大雨强(90 mm/h)时却相反,根系较高。

多数研究认为草地植被可以通过增加水流阻力,减小切应力,降低流速,提高坡面产沙临界条件来控制土壤侵蚀。郭雨华等^[22]野外放水冲刷试验得出草地能显著减小坡面流流速,减缓流态,但对水深并无太大影响,能增大阻力系数;杨春霞等^[23]试验

得出草地可降低坡面流流速、径流水深、水流的紊动性以及输沙能力,且随着盖度增加这种削弱作用越明显;张思毅等^[24]研究表明草地对坡面径流雷诺数影响较小,能够降低坡面流流速,减小弗劳德数,增大阻力系数,从而减少坡面土壤侵蚀。

总结前人结论,草地“增阻减速”机理如下:增阻作用是通过草地植被地上和地下部分共同实现的,草冠增加了坡面形态阻力和波阻力,根系调控坡面阻力主要通过团聚土壤颗粒,增加坡面泥沙颗粒阻力来实现。减速是由于在草地植被坡面上,一方面,草地植被在消减径流能量和分散径流的同时,还增加了地表糙率,对延缓坡面流流速起到了重要作用;另一方面,草地植被抑制了侵蚀的发展,其形成的细沟不能充分发育,径流水力能坡始终变化很小,加上放水流量又比较稳定,因此,草地植被覆盖断面的坡面流流速变化很小^[25]。

3 草地植被对土壤性质的影响

草地植被在生长发育过程中,通过其茎叶、根系和根系分泌物等多种因素来影响草地—土壤之间的关系,从而减少侵蚀的发生。Rutigliano 等^[26]研究

发现豆科植物能较好地提高土壤有机质、全氮、全磷和速效氮含量;贾倩民等^[27]对 6 种不同人工牧草野外试验后得出同样结论。董智等^[28]认为不同草地植被改善土壤理化性质、改良土壤程度不同;且在其衰败之前,培肥土壤能力随种植时间的延长而越发显著^[29]。

草地植被对土壤抗冲性及抗蚀性的增减效应实质上是草地植被对土壤可蚀性的影响。我国学者朱显谟^[30]指出草地可以提高土壤的抗冲性和抗蚀性;此后,李勇等^[31]建立了关于根系提高土壤抗冲性的数学模型,不仅有助于阐明草地根系提高土壤抗冲性的主导因素,而且能准确进行草地对有关变量的定量评价。国外学者 Ghidry 等^[32]研究死根对土壤可蚀性的影响认为,死根对径流没有太大作用,但明显影响土壤流失量和径流含沙量;李鹏^[33]总结前人研究得出,在黄土高原地区,草地减少水土流失的本质,是由于削减了径流侵蚀动力,提高了土壤抗冲性能,增强了土壤强度,从而大大提高了土壤抗冲和抗蚀性。

4 草地植被的减水减沙效应

研究草地植被减水减沙效应对科学评价其防止土壤侵蚀的作用有重要意义,一方面,草地植被能明显延迟产流和汇流过程,这不仅增加了径流在草地坡面入渗时间,还明显提高了草地坡面径流入渗量;另一方面,草地坡面较大的糙率使水流流速明显降低,导致径流搬运泥沙和剪切土壤能力下降,从而使侵蚀产沙量减少。

4.1 草地植被不同部位减水减沙效应

草地植被具有减水减沙效应,是由于其地上部分紧靠地表,通过截留降雨、消减降雨动能、减少降雨侵蚀力、增加地表糙度、降低径流对地表冲刷能力等方面来实现;而地下部分主要体现在根系改善土壤结构、增加土壤抗冲性能和入渗能力等方面。

减沙效益:甘卓亭等^[34]研究发现根系对减少坡面侵蚀产沙有很大的贡献率。张思毅等^[24]也得出根系减沙贡献大于冠层。郑粉莉等^[35]在草地覆盖度 90% 地面枯落物厚 2 cm 的试验条件下得出,草地根系对拦蓄泥沙的贡献高于地上部分;且天然草地与草地开垦(模拟开垦裸露地)处理相比,拦蓄泥沙效益为 100% 结果如表 2 所示。

减水效益:郑粉莉等^[35]研究得出草地根系对拦蓄径流的贡献高于地上部分;且天然草地与草地开垦处理相比,拦蓄径流效益为 96.4%。

研究人员都得出了根系减沙贡献大于草冠的结论,其原因可能是草地植被根系通过对土壤颗粒的穿插和缠绕作用,促进了土壤团聚体的形成和抗冲刷能力的增强,特别是随着根系生物量的增加,土壤抗侵蚀能力也大大增强,因此,在去除地表冠层后,坡面侵蚀产沙量并不比有冠层覆盖时增加太多,从而表现出较大的根系减沙贡献率^[36]。

表 2 草地植被不同部位拦蓄径流、泥沙效益
Table 2 Runoff and sediment reducing benefits of different parts of grass

草地不同部位	减少径流 $l/(m^3/km^2)$	减水效益 /%	减少侵蚀量 $l/(t/km^2)$	减沙效益 /%
茎枝	2 600	8.96	—	—
枯落物层	4 270	14.71	693.3	44.6
土壤体	21 120	72.75	861.2	55.4
三部分之和	27 990	96.40	—	100

4.2 不同覆盖度下草地坡面减水减沙效应

草地植被覆盖度、流量以及坡度等都是影响坡面产流产沙的重要因素。减沙效益:潘成忠等^[37]室内模拟不同盖度草地坡面产沙过程试验得出,减沙效益随着盖度增大而增大;朱冰冰等^[38]研究得出,天然荒草地盖度为 0~60% 时,产沙量随盖度增加均迅速降低;盖度大于 80% 后,盖度增加不能引起产沙量大幅度下降,植被水沙调控作用趋于稳定。减水效益:潘成忠等^[37]试验得出草地削减径流作用随着盖度增大而增大,且盖度对减水作用影响小于对减沙作用的影响。

4.3 不同放水流量下草地坡面减水减沙效应

王玲玲等^[18]通过低流量(5 L/min)室内放水冲刷试验得出,草地植被覆盖坡面径流含沙量明显低于裸坡,并随着盖度增大而明显减少;而在高流量(8 L/min)冲刷时,草地坡面出流含沙量也明显低于裸坡,但不同覆盖度坡面之间差异较小;这说明草地植被盖度对坡面流的阻滞作用随着流量的增加被削弱。

4.4 不同坡度下草地坡面减水减沙效应

郑粉莉等^[35]野外人工降雨试验得出,坡度增大,减水效应降低;潘成忠等^[19]降雨试验研究不同坡度下草地拦蓄泥沙机理得出,草地拦沙效应随坡度增大而减小,且主要体现在对粗颗粒泥沙拦蓄上。总结前人结论,草地植被减沙效应与坡度呈负相关关系的原因,可能是由于随着坡度增大,顺坡方向分力增大,土粒稳定性降低,泥沙量增大;而草地植被

减水效应随坡度增大而减小,可能是由于坡度增大,径流流速增大,相对减少了径流停留和入渗时间,使稳定入渗量减少,径流量增大^[39]。

从上述结论中发现,草地植被相较于其他土地利用方式,其减水减沙效益非常显著,原因可能是草地植被叶片离地面高度极小或紧贴地面,当雨滴透过多层叶到达地面时,速度缓慢,动能减弱,几乎削弱了所有的降雨溅蚀能量,对地表起到更好的保护作用;并且草地植被根系多而细,能很好地固结和改善土壤,使其抗冲性能更好,因此,草地植被表现出更好的减水减沙效益。

5 草地坡面土壤侵蚀过程

国内外学者对草地坡面土壤侵蚀过程的研究相对较少,一般是通过不同草地坡面的野外径流小区试验,研究不同草地类型、盖度、坡度和降雨强度(放水流量)等条件下的径流泥沙变化过程,或通过室内外人工降雨试验进一步阐明其减水减沙过程。

5.1 不同盖度草地坡面土壤侵蚀过程

研究发现,草地植被盖度与径流起始时间、降雨初损量、产流产沙时间等都有显著的关系:张光辉等^[40]在黄土丘陵区野外人工模拟降雨试验,研究人工草地径流起始时间与草地盖度关系时发现,随着草地盖度增加,径流起始时间基本呈线性增大,草地盖度越大,草地开始产流所需时间越长;初损降雨量与盖度间具有显著的相关关系,随着盖度的增大,初损降雨量呈指数增加。孙佳美等^[41]在 1 个雨强(30 mm/h)和 2 个坡度(10°, 20°)条件下进行人工模拟降雨试验,研究不同盖度黑麦草草地的产流、产沙过程变化规律,发现坡面产流过程呈先增加后达到稳定的趋势,随盖度增加,坡面产流强度减小,达到稳定需要的时间增长;产沙过程呈先快速增加到最大值然后逐渐减小最后达到稳定状态,随盖度增加产沙强度减小。

草地植被能够有效地增长产流时间,而产流时间是产流过程的一个重要转折点和参数,延长产流时间能够促进土壤水分入渗,提高坡面水分利用效率,减少地表径流,从而减弱土壤侵蚀。

5.2 不同条件草地坡面土壤侵蚀过程

由于草地植被覆盖度、坡度以及流量等都是影响坡面产流产沙的重要因素。马春艳^[42]野外人工放水冲刷试验,对原生荒草地坡面侵蚀过程研究发现,坡面侵蚀率在不同供水流量和坡度下都表现为先呈减小后趋于相对稳定的趋势,可分别用对数方

程和幂函数方程描述;坡面产流率在不同供水流量和坡度下随供水过程的变化总体上具有相似性,都是随供水历时呈先增大后趋于稳定的趋势,差异性在于供水开始的前期产流率增长速率不同^[43];而坡面水流含沙量在不同供水流量与坡度下随时间的动态变化皆可用幂函数描述,含沙量随时间的变化呈先减小后趋于稳定的趋势^[44]。邢恩德等^[45]放水冲刷试验表明,草地坡面径流平均输沙率随坡度变化呈抛物线形式变化,刚开始随着坡度增加而增大,当坡度达到临界极值 25°后,随着坡度增加而减小。

肖培青等^[46]在不同雨强下试验得出,苜蓿草地累积径流量和累积产沙量与降雨时间均呈良好的幂函数关系,随着降雨时间的增加而增大;在小雨强(45 mm/h, 87 mm/h)时,草地径流量和侵蚀产沙量均呈高一低一稳定的变化趋势;大雨强(127 mm/h)时则呈高一低一高的变化趋势。坡面径流量和产沙量变化过程是降雨和下垫面条件共同作用的结果,在小雨强时,草地截留和根系固土作用相对较强,草地形态变化很小,因而草地径流量和产沙量波动较小;而大雨强时,坡面断续细沟的出现和发展,使径流产沙过程呈波动的增加趋势。

吴普特^[47]在高强度(放水流量为 5~22.5 mm/min)放水冲刷条件下得出,径流变化率在草地产流初期和终期有一个突增突降的急变过程,而在其产流中期径流强度的变化是相对缓慢的。这是因为草地植被茎、叶的存在对于径流在坡地上的流动起着“阻挡”和“缓冲”的作用,这种作用的存在,从客观上对坡地径流的顺利运动起着约束作用,其结果就使得坡地径流的增加、减少相对于无草地植被存在时缓和一些。但在产流初期,由于放水是一个突变的过程,加上土壤颗粒较疏松分散,所以会出现突增;而终期由于放水突降至零,引起产流强度突降。

5.3 草地覆盖诱发的土壤侵蚀

虽然草地植被在黄土高原生态环境建设中有着不可替代的作用,但也有一些研究发现,在黄土高原地区,连续种植多年的苜蓿草地会出现土壤干层现象^[48, 49],苜蓿生长年限越长,根系分布越深,对深层土壤水分消耗越多,土壤干层厚度越大,土壤干层程度越严重^[50],且不同草地类型下的土壤干层深度不同^[51]。

6 存在的问题及研究展望

国内外学者关于黄土高原草地植被与土壤侵蚀

的关系做了大量研究,取得了丰硕的成果,但仍有一些问题尚未解决,归纳如下:

(1) 在草地植被减蚀作用机理微观研究方面,对于草地植被对坡面径流阻力特性的影响,草本植被蓄水减蚀最大能力与力学作用机理,以及宏观方面坡面草地植被恢复后,对沟道侵蚀过程的影响程度等都急待开展^[52]。

(2) 草地植被的死根对土壤有机质含量、剪切力、水稳性团聚体等物理性质的影响程度以及与土壤抗蚀性、抗冲性的关系研究缺乏。

(3) 草地植被水保效益计量化研究匮乏。

基于以上问题,要充分认识草地植被与土壤侵蚀的关系,了解草地坡面土壤侵蚀过程的机理,还需从以下几点做起:

(1) 今后应充分考虑黄土高原野生草本植物资源在抗寒、抗旱、抗病虫、适应性等方面的特点,进一步加强草种筛选和利用。加强草种抗逆机理的研究,建立包括形态指标、生理生化指标等的综合评价体系和特殊性状快速测定方法,提高草种筛选效率。

(2) 加大对草地植被坡面径流阻力特性的研究,从其蓄水减蚀力学作用出发,解释其机理。

(3) 注重探讨多草种组合、草灌乔结合的种植模式,建立不同种植模式下的侵蚀模型,深入研究其侵蚀机理,提高水土保持效益。

(4) 草地植被死根对土壤理化性质的改善,与土壤抗蚀性、抗冲性的关系,以及对坡面流体力学参数的影响,都可作为今后死根与侵蚀关系研究的重点。

(5) 草地植被枯落物研究方法和技术的探索与改进,对不同草地植被、结构、年龄及立地条件下的草地植被枯落物的变化与侵蚀动态耦合,探讨其对侵蚀的贡献模型。

(6) 定量探讨草地植被盖度、枯落物覆盖度和厚度、根系数量和根系分布比例等与径流量及泥沙量的关系,对土壤抗剪切强度影响,建立起不同部位的侵蚀模型。

(7) 草地坡面形态演变过程各不相同,导致草地坡面侵蚀规律变化多端,加强对坡面侵蚀形态差异的分析和量化描述;应用 GIS 和三维激光扫描技术等开展坡面侵蚀形态发展过程研究,进一步揭示坡面侵蚀规律。

7 结 语

总结前人成果发现,在不同坡度下,对不同雨强

和草地植被而言,其有效盖度是不一样的;因此,有效盖度应该是降雨、地形、土壤和植被等因子的函数。前人对草地植被盖度的测量多采用目估法、网格法和照相法等地表实测法,近年来发展的遥感图像解译法,在大范围的草地植被盖度监测中发挥首要作用,是基于草地植被指数并利用高光谱遥感法估算草地植被盖度的现代方法,可以更加精确地得出所测草地植被盖度值^[53]。

草地对坡面流体力学参数影响的结论不尽相同,一方面可能是由于试验时的外界条件(草地植被类型、盖度、雨强、坡度、土壤类型等)不同,控制因子有所差异,参数测定方法、手段以及计算方法等不同造成的;另一方面,目前还没有完善的坡面侵蚀输沙理论,所以只能借助于河流动力学及其理论来研究草地坡面侵蚀产沙和输沙,从而产生误差。

在黄土高原地区,草地植被减少水土流失主要在于削减了径流侵蚀动力,提高了土壤抗冲性能。因此进一步深入分析草地植被盖度与土壤抗冲性之间关系,建立二者间关系模型,有助于草地植被覆盖下土壤侵蚀定量化的发展。

草地植被对侵蚀的影响最终体现在减水减沙效益上,而减水减沙效益影响因素较多,现有的研究只是将各因素单独的进行试验分析,得出对侵蚀的影响;今后可将各因素的贡献量化,运用系统思维建立综合所有因素的数学模型。

草地坡面侵蚀过程的研究主要集中在对不同盖度、坡度、放水流量(雨强)等条件下的物理过程分析,从坡面水力学特性分析草地植被固土作用的机理并不多;而对其研究能阐明草地植被对坡面径流和泥沙调控的作用机理。

参考文献(References):

- [1] Yao Wenyi, Xiao Peiqing. Research direction of the study of soil erosion in the Loess Plateau [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2012, 32(2): 73-78. [姚文艺,肖培青.黄土高原土壤侵蚀规律研究方向与途径[J].水利水电科技发展,2012,32(2):73-78.]
- [2] Morgan R P C. *Soil Erosion and Conservation* [M]. Oxford: Blackwell Publishing, 2005.
- [3] Steffen W L, Chapin F S, Salao E. Global change and ecological complexity: An international research agenda [J]. *Trends in Ecology and Evolution*, 1996, 11(4): 186-186.
- [4] Wang Dandan, Wu Pute, Zhao Xining. Benefit evaluation of conversion of cropland to forest project in the Loess Plateau: A review [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2010, 25(3): 223-228. [王丹丹,吴普特,赵西宁.黄土高原退耕还林(草)效益

- 评价研究进展[J]. 西北林学院学报, 2010, 25(3): 223-228.]
- [5] Guo Zhongsheng. Effective critical and potential coverage of vegetation community for soil and water conservation [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation* 2000, 20(2): 60-62. [郭忠升. 水土保持植被的有效盖度, 临界盖度和潜势盖度[J]. 水土保持通报, 2000, 20(2): 60-62.]
- [6] Wang Youke, Liu Baoyuan, Jiao Juying. Perspective of recovering the vegetation and cover percentage of forest and grass on the Loess Plateau [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1992, 12(2): 55-60. [汪有科, 刘宝元, 焦菊英. 恢复黄土高原林草植被及盖度的前景[J]. 水土保持通报, 1992, 12(2): 55-60.]
- [7] Zhang Guanghui, Liang Yimin. A summary of impact of vegetation coverage on soil and water conservation benefit [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 1996, 3(2): 104-110. [张光辉, 梁一民. 植被盖度对水土保持功效影响的研究综述[J]. 水土保持研究, 1996, 3(2): 104-110.]
- [8] Yuan Jianping, Jiang Dingsheng, Gan Shu. Simulated experiment on normal integral model of different control degrees for small watershed [J]. *Journal of Natural Resources* 2000, 15(1): 91-96. [袁建平, 蒋定生, 甘淑. 不同治理度下小流域正态整体模型试验——林草措施对小流域径流泥沙的影响[J]. 自然资源学报, 2000, 15(1): 91-96.]
- [9] Jiao Juying, Li Jing. Effective cover rate of woodland and grassland for soil and water conservation [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(5): 608-612. [焦菊英, 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.]
- [10] Sun Jiamei, Yu Xinxiao, Liang Hongru, et al. Reduction benefits of different land cover on runoff-sediment and its erosion factors under simulated rainfall [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation* 2015, 35(2): 46-51. [孙佳美, 余新晓, 梁洪儒, 等. 模拟降雨条件下不同覆被减流减沙效益与侵蚀影响因子[J]. 水土保持通报, 2015, 35(2): 46-51.]
- [11] Luo Weixiang, Bai Liqiang, Song Xide, et al. Runoff and scouring amount in forest and grassland with different cover rate [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1990, 4(1): 30-35. [罗伟祥, 白立强, 宋西德, 等. 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): 30-35.]
- [12] Jiang Zhongshan, Wang Zhiqiang. Quantitative study on spatial variation of soil erosion in a small watershed in the loess hilly region [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1996, 2(1): 1-9. [江忠善, 王志强. 黄土丘陵区小流域土壤侵蚀空间变化定量研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1996, 2(1): 1-9.]
- [13] Shi Shengxin, Jiang Dingsheng. Impacts of several soil and water conservation measures on strengthening rainfall infiltration and reducing sediment yield [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 1994, 1(1): 82-88. [石生新, 蒋定生. 几种水土保持措施对强化降水入渗和减沙的影响试验研究[J]. 水土保持研究, 1994, 1(1): 82-88.]
- [14] Dong Rongwan, Zhu Xingping. Laws of soil erosion in loess hilly and gully region of Dingxi prefecture [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1998, 18(3): 1-9. [董荣万, 朱兴平. 定西黄土丘陵沟壑区土壤侵蚀规律研究[J]. 水土保持通报, 1998, 18(3): 1-9.]
- [15] Zheng Liangyong. Experimental Study on Dynamic Process of Soil Erosion on Loess Slope [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2003. [郑良勇. 黄土地区陡坡水蚀动力过程试验研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2003.]
- [16] Zhou Z C, Shanguan Z P, Zhao D. Modeling vegetation coverage and soil erosion in the Loess Plateau area of China [J]. *Ecological Modelling*, 2006, 198(1): 263-268.
- [17] Xiao Peiqing, Yao Wenyi, Shen Zhenzhou, et al. Study on runoff and infiltration process and hydraulic parameters characteristics with grass coverage [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(4): 50-53. [肖培青, 姚文艺, 申震洲, 等. 草地植被覆盖下坡面径流渗入过程及水力学参数特征试验研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(4): 50-53.]
- [18] Wang Lingling, Yao Wenyi, Shen Zhenzhou, et al. Effects of grass coverage on shallow flow hydraulic parameters and sediment reduction [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2009, 7(1): 80-83. [王玲玲, 姚文艺, 申震洲, 等. 草地植被覆盖度对坡面流体力学参数的影响及其减沙效应[J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(1): 80-83.]
- [19] Pan Chengzhong, Shanguan Zhouping. Hydraulic characteristics of silt-laden flow on different gradient grassplots and its mechanism of sediment retention [J]. *Advances in Water Science*, 2007, 18(4): 490-495. [潘成忠, 上官周平. 不同坡度草地含沙水流水力学特性及其拦沙机理[J]. 水科学进展, 2007, 18(4): 490-495.]
- [20] Zhao Chunhong, Gao Jian'en, Xu Zhen. Mechanisms of grass in slope erosion control in loess sandy soil region of Northwest China [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(1): 113-121. [赵春红, 高建恩, 徐震. 牧草调控绵沙土坡面侵蚀机理[J]. 应用生态学报, 2013, 24(1): 113-121.]
- [21] Xu Zhen. Effects of Canopies and Roots of Grass on Runoff and Sediment Transport over Slope Lands [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2011. [徐震. 草地植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.]
- [22] Guo Yuhua, Zhao Tingning, Sun Baoping, et al. Study on the dynamic characteristics of overland flow and resistance to overland flow of grass slope [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2006, 13(4): 264-267. [郭雨华, 赵廷宁, 孙保平, 等. 草地坡面水力学特性及其阻延地表径流机制研究[J]. 水土保持研究, 2006, 13(4): 264-267.]
- [23] Yang Chunxia, Wang Dan, Wang Lingling, et al. Influence of grass cover degree to hydrodynamic parameters of slope water [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2008, 13(9): 36-38. [杨春霞, 王丹, 王玲玲, 等. 草地植被覆盖度对坡面流体力学参数的影响[J]. 中国水土保持, 2008, 13(9): 36-38.]
- [24] Zhang Siyi, Liang Zhiquan, Xie Zhenyue, et al. Effects of different parts of *Trifolium repens* L. on sediment reduction and runoff hydrodynamic parameters [J]. *Ecology and Environmental Sciences* 2016, 25(8): 1306-1314. [张思毅, 梁志权, 谢真越, 等. 白三叶不同部位减沙效应及其对径流水力学参数的影响

- [J]. 生态环境学报 2016 ,25(8) : 1 306-1 314.]
- [25] Li Mian , Yao Wenyi , Chen Jiangnan , *et al.* Experimental study on the effect of different grass coverages on the overland flow velocity [J]. *Transactions of the CSAE* ,2005 ,21(12) : 43-47. [李勉,姚文艺,陈江南等. 草地植被覆盖对坡面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.]
- [26] Rutigliano Fa , D' Ascoli R , De Santo Avirzo. Soil microbial metabolism and nutrient status in a Mediterranean area as affected by plant cover [J]. *Soil Biology and Biochemistry* ,2004 ,36(11) : 1 719-1 729.
- [27] Jia Qianmin , Chen Yanyun , Yang Yang , *et al.* Effect of different artificial grassland on soil physico-chemical properties and microbial quantities of abandoned land in arid area [J]. *Journal of Soil and Water Conservation* ,2014 ,28(1) : 178-182. [贾倩民,陈彦云,杨阳等. 不同人工草地对干旱区弃耕地土壤理化性质及微生物数量的影响[J]. 水土保持学报 ,2014 ,28(1) : 178-182.]
- [28] Dong Zhi , Li Hongli , Ren Guoyong , *et al.* Study on soil amelioration effect of planting grasses in wind-sandy land of Yellow River floodplain [J]. *Chinese Journal of Grassland* ,2008 ,30(3) : 84-87. [董智,李红丽,任国勇等. 黄泛平原风沙化土地种植牧草改良土壤效果研究[J]. 中国草地学报 ,2008 ,30(3) : 84-87.]
- [29] Wang G L , Liu G B , Xu M X. Effect of vegetation restoration on soil nutrient changes in Zhifanggou watershed of loess hilly region [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation* ,2001 ,22(1) : 1-5.
- [30] Zhu Xianmo. Effects of vegetation factors on soil and water loss in loess area [J]. *Acta Pedologica Sinica* ,1960 ,8(2) : 110-121. [朱显谟. 黄土地区植被因素对于水土流失的影响[J]. 土壤学报 ,1960 ,8(2) : 110-121.]
- [31] Li Yong , Xu Xiaoqin , Zhu Xianmo. Preliminary study on the mechanism of soil anti-scourability by plant roots in Loess Plateau [J]. *Science in China (Series B)* ,1992 ,35(3) : 254-259. [李勇,徐晓琴,朱显谟. 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 ,35(3) : 254-259.]
- [32] Ghidex 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.
- [33] Li Peng. Experimental Studies on the Functional Mechanics of Soil and Water Conservation of Grassland Vegetation in Loess Area [D]. Yangling: Northwest A & F University 2003. [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.]
- [34] Gan Zhuoting , Ye Jia , Zhou Qi , *et al.* Effects of grass vegetations on the processes of soil erosion over slope lands in simulated rainfalls [J]. *Acta Ecologica Sinica* ,2010 ,30(9) : 2 387-2 396. [甘卓亭,叶佳,周旗等. 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) : 2 387-2 396.]
- [35] Zheng Fenli , Bai Hongying , An Shaoshan. The benefit analysis for different layers of grass vegetation reducing surface runoff and sediment yield [J]. *Research of Soil and Water Conservation* ,2005 ,12(5) : 86-87. [郑粉莉,白红英,安韶山. 草地植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.]
- [36] Martens Dean A. Relationship between plant phenolic acids released during soil mineralization and aggregate stabilization [J]. *Soil Science Society of America Journal* ,2002 ,66(6) : 1 857-1 867.
- [37] Pan Chengzhong , Shangguan Zhouping. Influence of forage grass on hydrodynamic characteristics of slope erosion [J]. *Journal of Hydraulic Engineering* ,2005 ,36(3) : 371-377. [潘成忠,上官周平. 牧草对坡面侵蚀动力参数的影响[J]. 水利学报 ,2005 ,36(3) : 371-377.]
- [38] Zhu Bingbing , Li Zhanbin , Li Peng , *et al.* Effect of grass coverage on sediment yield of rain on slope [J]. *Acta Pedologica Sinica* ,2010 ,47(3) : 401-407. [朱冰冰,李占斌,李鹏等. 草本植被覆盖对坡面降雨径流侵蚀影响的试验研究[J]. 土壤学报 ,2010 ,47(3) : 401-407.]
- [39] Zheng Fenli , Gao Xuétian. Soil erosion processes and modeling at loessial hillslope [M]. Xi'an: Shaanxi People's Publishing House 2000. [郑粉莉,高学田. 黄土坡面土壤侵蚀过程与模拟[M]. 西安: 陕西人民出版社 ,2000.]
- [40] Zhang Guanghui , Liang Yimin. Study on runoff beginning time of artificial grassland in loess hilly region [J]. *Journal of Soil and Water Conservation* ,1995 ,9(3) : 78-83. [张光辉,梁一民. 黄土丘陵区人工草地径流起始时间研究[J]. 水土保持学报 ,1995 ,9(3) : 78-83.]
- [41] Sun Jiamei , Fan Dengxing , Liang Hongru , *et al.* Experimental study on runoff and erosion process of ryegrass land [J]. *Journal of Soil and Water Conservation* ,2014 ,28(2) : 36-39. [孙佳美,樊登星,梁洪儒等. 黑麦草调控坡面水沙输出过程研究[J]. 水土保持学报 ,2014 ,28(2) : 36-39.]
- [42] Ma Chunyan. Study of Main Slope Erosion Dynamic Processes on Project Area of Banduo Hydropower Station of Yellow River [D]. Yangling: Northwest A & F University 2009. [马春艳. 黄河班多水电站工程区主要地类坡面侵蚀动力学过程试验研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学 ,2009.]
- [43] Zhu Wenjie , Wang Zhanli , Yuan Yin , *et al.* Experimental study of runoff processes on waste grassland in project area of Banduo hydropower station of Yellow River [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation* ,2009 ,29(5) : 7-11. [朱文杰,王占礼,袁殷等. 黄河班多水电站工程区荒草地坡面产流过程试验研究[J]. 水土保持通报 ,2009 ,29(5) : 7-11.]
- [44] Zhang Xiaozhong , Wang Sha , Shen Nan , *et al.* Experimental study on variations of sediment concentration in water flow on waste grassland in Banduo hydropower station construction area of Yellow River [J]. *Research of Soil and Water Conservation* ,2014 ,21(2) : 72-75. [张孝中,王莎,申楠等. 黄河班多水电站工程区荒草地坡面水流含沙量变化过程试验研究[J]. 水土保持研究 ,2014 ,21(2) : 72-75.]
- [45] Xing Ende , Cui Wei , Liu Yanping , *et al.* Simulation experimental study on hydrodynamics process of erosion and sediment by runoff on grassland [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences* ,

- 2012, 40(24): 12 212-12 213. [邢恩德, 崔崑, 刘艳萍, 等. 草地坡面径流侵蚀产沙过程模拟试验研究[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(24): 12 212-12 213.]
- [46] Xiao Peiqing, Yao Wenyi, Shen Zhenzhou, *et al.* Experimental study on erosion process and hydrodynamics mechanism of alfalfa grassland[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 42(2): 232-237. [肖培青, 姚文艺, 申震洲, 等. 苜蓿草地侵蚀产沙过程及其水力学机理试验研究[J]. 水利学报, 2011, 42(2): 232-237.]
- [47] Wu Pute. Research on the runoff generated process of field pouring water scouring experiment on the Loess slope land[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 1997, 4(5): 74-84. [吴普特. 黄土坡地放水冲刷试验产流过程研究——II. 产流过程分析[J]. 水土保持研究, 1997, 4(5): 74-84.]
- [48] Li Yushan. Productivity dynamic of alfalfa and its effects on water eco-environment[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(3): 404-411. [李玉山. 苜蓿生产力动态及其水分生态环境效应[J]. 土壤学报, 2002, 39(3): 404-411.]
- [49] Wan Sumei, Jia Zhikuan, Han Qingfang, *et al.* Dry soil layer forming and soil moisture restoration of alfalfa grassland in the semi-humid region of the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(3): 1 045-1 051. [万素梅, 贾志宽, 韩清芳, 等. 黄土高原半湿润区苜蓿草地土壤干层形成及水分恢复[J]. 生态学报, 2008, 28(3): 1 045-1 051.]
- [50] Wang Meiyun, Li Jun, Sun Jian, *et al.* Soil desiccation characteristics of alfalfa grasslands and soil water restoration effects in alfalfa-grain crop rotations on the semi-arid areas of the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(8): 4 526-4 534. [王美艳, 李军, 孙剑, 等. 黄土高原半干旱区苜蓿草地土壤干燥化特征与粮草轮作土壤水分恢复效应[J]. 生态学报, 2009, 29(8): 4 526-4 534.]
- [51] Shao Ming'an, Jia Xiaoxu, Wang Yunqiang, *et al.* A review of studies on dried soil layers in the Loess Plateau[J]. *Advances in Earth Science*, 2016, 31(1): 14-22. [邵明安, 贾小旭, 王云强, 等. 黄土高原土壤干层研究进展与展望[J]. 地球科学进展, 2016, 31(1): 14-22.]
- [52] Li Mian, Yao Wenyi, Li Zhanbin. Progress of the effect of grassland vegetation for conserving soil and water on Loess Plateau[J]. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(1): 74-80. [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.]
- [53] Chen Jiao, Zhang Li. Estimating grassland coverage based on hyperspectral remote sensing in the northern Tianshan Mountains[J]. *Pratacultural Science*, 2017, 34(1): 30-39. [陈佼, 张丽. 天山北坡草地盖度高光谱遥感估算[J]. 草业科学, 2017, 34(1): 30-39.]

Advances in Researches of the Effects of Grassland Vegetation on Soil Erosion in Loess Plateau*

Zhang Qilin¹, Wang Zhanli^{1,2*}, Wang Dongdong¹, Liu Jun'e³

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation of CAS and MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

Abstract: Soil erosion is a serious global environmental problem which limits the survival and development of human beings. In our country, due to the special physical geography and socio-economic conditions, soil erosion intensity is great, which is particularly prominent in Loess Plateau region. Therefore, preventing and controlling soil erosion, as well as reducing soil erosion in Loess Plateau have become the key to solving environmental problems in the region. Soil erosion on Loess Plateau is serious, and grassland vegetation has good effects on soil and water conservation, which can improve ecological environment well. After the implementation of the project about returning

* **Foundation item:** The National Natural Science Foundation of China "Application of three-zone soil plate experiment analysis of loess slope surface erosion mechanics process" (No.41471230); The National Key R & D Plan "Yellow River Basin water and sediment evolution and its variation" (No.2016YFC0402401).

First author: Zhang Qilin (1991-), male, Yuncheng County, Shanxi Province, Master student. Research areas include soil erosion research. **E-mail:** zhangqilin1116@163.com

* **Corresponding author:** Wang Zhanli (1960-), male, Yulin County, Shaanxi Province, Professor. Research areas include soil erosion process and forecast model. **E-mail:** zwang@nwsuaf.edu.cn

farmland to grassland on Loess Plateau ,the ecological benefits mainly focused on soil and water conservation benefits ,soil improvement benefits ,water conservation benefits and species diversity benefits ,*etc.* Grassland vegetation has an irreplaceable role in the construction of the ecological environment on Loess Plateau. Therefore ,the role of grassland in preventing soil erosion has received more and more attention. Scholars have done lots of research involved in the relationship between grassland coverage and soil erosion ,impacts of grassland on hydrodynamic parameters ,effects of grassland on soil properties ,reduction effects of grassland on runoff and sediment ,and soil erosion process on grassland slope. However ,there is little research on erosion effect induced by grassland cover. This paper mainly pointed out the following questions: First ,grassland cover is influenced by many factors ,but the relationship with soil erosion from the dynamic mechanism is rarely discussed; Second ,there is no well-developed theory of overland flow erosion at present ,which limits the study of hydrodynamic parameters on grassland slope; Third ,establishment of mathematical model between grassland cover and soil resistance can accelerate the quantitative analysis of grassland influence on erosion; Fourth ,comprehensive analysis of influencing factors on water reduction and sediment reduction effect on grassland are insufficient; Fifth ,there are not many mechanisms to analyze the erosion process of grassland slope by using the hydrodynamic characteristics of slope; sixth ,research results on grassland-induced erosion are mainly focused on leading to soil dry layer and we should continue to strengthen in the future. This paper summarized the previous results ,and supplemented some studies about erosion caused by grassland ,then pointed out the existing problems in current research and the areas that need to be strengthened in the future ,aiming at reducing soil erosion on the Loess Plateau.

Key words: Loess Plateau; Grassland vegetation; Soil erosion.

2017 年第 11 期要目

- 巽他陆架——淹没的亚马逊河盆地? 汪品先
 上新世以来巽他陆架海平面变化研究 李 丽 徐 沁
 冰期出露的巽他陆架: 重要的陆地碳储库 贾国东
 重大生态工程生态效益监测与评估研究 邵全琴 樊江文 刘纪远 ,
 杨 帆 刘 华 杨秀春 许明祥 侯 鹏 郭兴健 黄 麟 李愈哲