

# 牧草调控绵沙土坡面侵蚀机理\*

赵春红<sup>1</sup> 高建恩<sup>1,2,3\*\*</sup> 徐震<sup>3</sup>

(<sup>1</sup>西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100; <sup>2</sup>中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; <sup>3</sup>西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100)

**摘要** 采用人工模拟降雨方法,从坡面水动力学角度,结合土壤抗冲性分析,对不同坡度和雨强组合下牧草调控黄土高原风蚀水蚀交错区绵沙土坡面侵蚀机理进行了定量研究,为揭示植被调控土壤侵蚀机理及黄土高原水土保持植被选择提供科学参考.结果表明:覆盖度约为40%的牧草沙打旺能够有效控制坡面土壤侵蚀,减沙效益达70%以上,而且根系减沙效益大于草冠.裸坡、只有根系作用的坡面和整株牧草作用的坡面水流流速与雨强、坡度均呈  $V = DJ^{0.33}i^{0.5}$  的函数关系,其中, $J$ 为坡度比降, $i$ 为雨强( $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ),下垫面不同,综合系数 $D$ 取值不同.牧草根系和冠层能够显著减小流速,增加阻力,根系的减速作用大于草冠,而增阻作用小于草冠.根系调控坡面阻力主要通过增加坡面泥沙颗粒阻力实现,而草冠通过增加坡面形态阻力和波阻力来实现.利用薄层水流坡面产沙概念模型对土壤抗冲性进行评价,得到试验条件下裸坡、只有根系作用的坡面和整株牧草作用的坡面的临界径流切应力分别为0.533、0.925和1.672 Pa.

**关键词** 绵沙土 根系 冠层 水动力学机理 土壤抗冲性

**文章编号** 1001-9332(2013)01-0113-09 **中图分类号** S157.1 **文献标识码** A

**Mechanisms of grass in slope erosion control in loess sandy soil region of Northwest China.** ZHAO Chun-hong<sup>1</sup>, GAO Jian-en<sup>1,2,3</sup>, XU Zhen<sup>3</sup> (<sup>1</sup>College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; <sup>2</sup>Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi, China; <sup>3</sup>College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2013, 24(1): 113-121.

**Abstract:** By adopting the method of simulated precipitation and from the viewpoint of slope hydrodynamics, in combining with the analysis of soil resistance to erosion, a quantitative study was made on the mechanisms of grass in controlling the slope erosion in the cross area of wind-water erosion in Loess Plateau of Northwest China under different combinations of rainfall intensity and slope gradient, aimed to provide basis to reveal the mechanisms of vegetation in controlling soil erosion and to select appropriate vegetation for the soil and water conservation in Loess Plateau. The grass *Astragalus adsurgens* with the coverage about 40% could effectively control the slope erosion. This grass had an efficiency of more than 70% in reducing sediment, and the grass root had a greater effect than grass canopy. On bare slope and on the slopes with the grass plant or only the grass root playing effect, there existed a functional relation between the flow velocity on the slopes and the rainfall intensity and slope gradient ( $V = DJ^{0.33}i^{0.5}$ , where  $V$  is flow velocity,  $D$  is the comprehensive coefficient which varies with different underlying surfaces,  $i$  is rainfall intensity, and  $J$  is slope gradient). Both the grass root and the grass canopy could markedly decrease the flow velocity on the slopes, and increase the slope resistance, but the effect of grass root in decreasing flow velocity was greater while the effect in increasing resistance was smaller than that of grass canopy. The effect of grass root in increasing slope resistance was mainly achieved by increasing the sediment grain resistance, while the effect of canopy was mainly achieved by increasing the slope form resistance and wave resistance. The evaluation of the soil resistance to erosion by using a conceptual model of sedi-

\* “十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAD31B05)和国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07212-002-003-002)资助.

\*\* 通讯作者. E-mail: gaojianen@126.com

2012-08-07 收稿, 2012-10-25 接受.

ment generation by overland flow indicated that the critical shear stress value of bare slope and of the slopes with the grass plant or only the grass root playing effect was 0.533, 1.672 and 0.925 Pa, respectively.

**Key words:** loess sandy soil; root; canopy layer; hydrodynamics mechanism; soil resistance to erosion.

黄土高原是我国生态环境最脆弱的地区之一,土壤侵蚀剧烈,植被和生态系统退化严重,特别是位于其西北部的风蚀水蚀交错区,由于风蚀水蚀交互作用加重了这一地区的环境负担,使其成为黄土高原土壤侵蚀最严重的地区之一<sup>[1-2]</sup>。目前,植被恢复和建设已成为黄土高原风蚀水蚀交错区控制土壤侵蚀、减少水土流失的一个重要手段。有关不同草灌植被的减水减沙效益已有大量研究<sup>[3-5]</sup>,但针对其作用机理的研究还相对较少。潘成忠和上官周平<sup>[6]</sup>以黄土区常见森林植被人工油松林和次生山杨林长期定位观测试验为基础,研究了次降雨条件下两种林地和荒地坡面径流和侵蚀产沙形成机制,认为与荒地坡地相比,林地主要通过增加土壤入渗和减小坡面径流剪切力调控坡面土壤侵蚀;秦富仓等<sup>[7]</sup>研究了坡面乔木林、草本植物和林地枯落物控制坡面侵蚀的机理,发现草本植物主要通过增加水流底层的阻力,减小床面切应力来发挥作用,而枯枝落叶则通过减小坡面水流流速,进而减小水流挟沙能力来发挥作用;姚文艺等<sup>[8]</sup>和肖培青等<sup>[9]</sup>利用人工模拟降雨试验研究了草地和灌木地的产流产沙过程,认为草地和灌木地均通过影响坡面产沙的临界条件达到控制侵蚀的作用;朱智勇等<sup>[10]</sup>利用野外模拟降雨试验,研究了不同植被类型对坡面降雨侵蚀产沙过程的调控机理,认为林地主要通过增加入渗、消减径流和缓解流速等途径实现水沙调控,而草地则主要通过地表植被拦截达到水土保持的效果。

尽管上述研究从机理角度分析了植被调控坡面土壤侵蚀的作用,但多集中在不同植被类型方面,很少涉及植被结构对坡面侵蚀的调控作用。即使有一些相关研究,也多局限于经验统计分析<sup>[11-13]</sup>,从坡面水动力学角度分析植被根系和冠层调控坡面土壤侵蚀动力机制的研究很少。植被根系和冠层对坡面产流产沙的作用是不同的,特别是对于黄土高原风蚀水蚀交错区,该区由于气候干燥,植被为减少冠层的蒸腾作用,多为根系发达冠层细小。研究黄土高原风蚀水蚀交错区植被结构对坡面水沙过程和土壤侵蚀的调控机理,对定量评价该区植被水土保持效益和水土保持植被选择具有指导意义。为此,本文利用

人工模拟降雨方法,以黄土高原风蚀水蚀交错区绵沙土为研究对象,研究了不同坡度和雨强下牧草根系和冠层对坡面流水动力学特征的影响,并对不同下垫面条件下的土壤抗冲性进行了评价,以期为牧草调控坡面土壤侵蚀动力机制研究提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验条件

试验于2010年8—11月在中国科学院水利部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人工模拟降雨大厅进行。降雨采用侧喷式降雨方式,降雨强度通过调整喷头大小和水压力阀门进行控制。降雨高度为8 m,可以保证所有雨滴都能达到终速。降雨均匀度可达85%,雨滴分布和大小都接近自然降雨。在降雨前率定雨强,保证试验雨强最大限度地接近设定雨强,并将误差控制在允许范围内。试验用土取自黄土高原风蚀水蚀交错区毛乌素沙漠南缘定边县,为绵沙土,其中值粒径为0.177 mm。

### 1.2 试验设计

试验土槽长8 m,宽1 m,深0.33 m。用PVC板将土槽隔成2个长8 m、宽0.5 m的小土槽,其中一个土槽作为重复处理,试验测定的产流量、产沙量和流速等参数均为2个小土槽的平均值。土槽坡度可以自由调整。填沙厚度为20 cm,分层填装,每层填沙厚度为5 cm,容重控制在 $2.0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。填沙前,先在槽底铺上一层纱布,增加床面糙度。装填结束后,用特制平尺将表面刮平,表面无结皮。

种草时间为2010年3月,草种为黄土高原风蚀水蚀交错区常见牧草沙打旺(*Astragalus adsurgens*)。种植方式为撒播,考虑到牧草出苗和成活率,播种密度设为 $0.05 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。模拟降雨时间为2010年8月,牧草长势良好,草高约20 cm,覆盖度约为40%。降雨前用土壤水分温度计WET(YA1-WET-2-K1, England)在土槽上、中、下部测量土壤含水量,并根据土壤含水量用喷壶对坡面均匀洒水,使土壤达到充分饱和。

试验设置3°、6°、9°和12° 4个坡度,以及0.5、1

和  $1.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  3 个雨强, 采用完全组合试验. 每次降雨结束后, 根据其产沙量, 用同等质量的沙土对土槽坡面进行修复平整, 并搁置一段时间, 保证每次降雨时下垫面条件基本一致. 牧草覆盖的坡面降雨试验结束后, 剪去植被的冠层部分, 得到仅有根系的坡面, 按照上述方法继续进行模拟降雨试验, 最后利用裸坡作为对照, 重复上述处理. 牧草覆盖、仅有根系作用的坡面和裸坡 3 个处理各进行 12 场降雨, 一共进行 36 场降雨. 由于整株牧草作用的下垫面和只有根系作用的下垫面模拟降雨试验均在 1 个月内完成, 故认为试验期间植被生长对下垫面影响不大, 对试验结果的影响可以忽略不计.

### 1.3 测定项目与方法

降雨历时 1 h, 试验过程中, 每隔 3 min 在水槽出口处收集一次坡面径流, 并通过烘干称量法测定径流泥沙含量. 流速通过高锰酸钾染色法进行测定, 测定区间为 2~3、4~5 和 6~7 m. 方法是从降雨产流开始, 每隔 3 min 测定水流流过固定坡面区间的时间, 最后选取流速基本稳定后的多次平均值作为坡面的平均流速. 考虑到用染色法测定的径流流速为坡面优势流流速, 根据 Li 等<sup>[14]</sup>的研究结果, 层流、过渡流和紊流的流速修正系数分别设为 0.67、0.7、0.8, 平均流速即为坡面优势流流速乘以修正系数得到. 利用温度计测定的水流温度来计算水流粘滞系数.

### 1.4 参数计算

**1.4.1 减沙率和减沙贡献率** 试验过程中, 牧草处于生长旺盛阶段, 枯落物较少, 所以没有考虑牧草枯落物的影响, 牧草对坡面土壤侵蚀的调控作用仅为冠层与根系之和, 因此冠层对坡面流水动力学参数和土壤抗冲性的影响为整株牧草的作用减去根系的作用.

牧草、根系和草冠减沙率的计算公式分别为:

$$\begin{aligned} CS_p &= (S_b - S_p) / S_b \times 100\% \\ CS_r &= (S_b - S_r) / S_b \times 100\% \\ CS_s &= CS_p - CS_r \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $CS_p$ 、 $CS_r$  和  $CS_s$  分别为整株牧草、根系和草冠的减沙率;  $S_b$  为裸坡产沙量 ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ );  $S_p$  为有牧草覆盖的坡面产沙量 ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ );  $S_r$  为仅有根系作用的坡面产沙量 ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ).

根系和草冠的减沙贡献率分别为:

$$\begin{aligned} R_r &= CS_r / CS_p \times 100\% \\ R_s &= CS_s / CS_p \times 100\% \end{aligned} \quad (2) \quad (3)$$

式中:  $R_r$  为根系减沙贡献率;  $R_s$  为草冠减沙贡献率.

**1.4.2 减速效益** 牧草、根系和草冠减速效益的计算公式分别为:

$$\begin{aligned} CV_p &= (V_b - V_p) / V_b \times 100\% \\ CV_r &= (V_b - V_r) / V_b \times 100\% \\ CV_s &= CV_p - CV_r \end{aligned} \quad (4)$$

式中:  $CV_p$ 、 $CV_r$  和  $CV_s$  分别为整株牧草、根系和草冠的减速效益;  $V_b$  为裸坡水流流速 ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ );  $V_p$  为有牧草覆盖的坡面水流流速 ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ );  $V_r$  为仅有根系作用的坡面水流流速 ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ).

**1.4.3 水深** 水深是反映水力特征的重要因子. 由于坡面水流水层极浅, 且下垫面条件不断发生变化, 采用实测法难以确定. 因此, 假定水流沿坡面均匀分布, 水深用以下公式计算:

$$h = 0.001ix/V \quad (5)$$

式中:  $h$  为水深 (m);  $i$  为降雨强度 ( $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ );  $x$  为断面到水槽上部的沿程距离 (m);  $V$  为断面处的水流流速 ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ).

**1.4.4 雷诺数和佛汝德数** 雷诺数 ( $Re$ ) 是水流惯性力与粘滞力的比值, 是表征水流流型的重要参数,  $Re$  越大, 说明水流惯性力越大, 水流发生紊流的可能性也就越大. 一般来说,  $Re < 500$ , 水流为层流;  $Re > 2000$ , 水流为紊流;  $Re = 500 \sim 2000$ , 水流为过渡流. 佛汝德数 ( $Fr$ ) 是表征流态的重要参数, 它反映了水流惯性力与重力之比.  $Fr > 1$ , 水流是急流;  $Fr < 1$ , 水流是缓流. 计算公式分别为:

$$Re = Vh/\nu \quad (6)$$

$$Fr = V/gb \quad (7)$$

式中:  $\nu$  为水流动力粘滞系数 ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $\nu = 0.01775 / (1 + 0.0337T + 0.000221T^2)$ , 其中,  $T$  为水温 ( $^{\circ}\text{C}$ ).

**1.4.5 阻力系数和增阻效益** Darcy-Weisbach 阻力系数 ( $f$ ) 计算公式为:

$$f = 8ghJ/V^2 \quad (8)$$

式中:  $g$  为重力加速度 ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ );  $J$  为水流能坡, 考虑到重力沿坡面分力对泥沙输移的影响, 采用公式  $J = \sin\beta \tan\varphi / [\cos\beta (\tan\varphi - \tan\beta)]$  进行计算<sup>[15]</sup>, 其中,  $\varphi$  为休止角, 一般取  $32^{\circ}$ ,  $\beta$  为坡面坡度.

根系和草冠增阻效益的计算公式分别为:

$$CF_r = (f_r - f_b) / f_b \quad (9)$$

$$CF_s = (f_p - f_r) / f_b \quad (10)$$

式中:  $CF_r$  和  $CF_s$  分别为根系和草冠的增阻效益;  $f_b$  为裸坡阻力系数;  $f_p$  为有牧草覆盖的坡面阻力系数;  $f_r$  为仅有根系作用的坡面阻力系数.

**1.4.6 土壤抗冲性** 雷俊山和杨勤科<sup>[16]</sup>通过分析

坡面土壤颗粒的受力情况,建立了适用于平整坡面薄层水流土壤侵蚀量预测和土壤抗冲性评价的产沙概念模型,该模型建立的条件为假设坡面各处土壤颗粒粒径相同,质量一样,土粒之间粘结力在坡面分布均匀,径流在坡面的渗透稳定.模型如下:

$$M=A(\tau-\tau_0)st$$

(11)

式中: $M$  为坡面产沙量(g); $A$  为与坡度、下垫面特征、土壤性质和水流特征等有关的参数( $s\cdot m^{-1}$ ); $\tau$  为水流切应力(Pa); $\tau_0$  为土粒被分散的临界切应力(Pa); $s$  为冲刷面积( $m^2$ ); $t$  为冲刷时间(s).

尽管该模型是针对理想坡面提出的,但其作用机理仍然适用于非理想坡面.在实际侵蚀过程中,由土壤、下垫面或水流性质的非均匀性和不稳定性对坡面产沙造成的影响可以通过土壤抗冲性参数  $A$  得到体现.因此,该模型同样适用于坡面降雨径流条件下的土壤抗冲性评价,只不过土壤抗冲性参数会受雨滴打击作用而发生变化.

对方程(11)的两边同时除以水流宽度( $B$ )和冲刷时间( $t$ ),方程转化为:

$$M/Bt=As(S-S_0)/B$$

(12)

令  $g=M/Bt, k=As/B$ , 则方程(12)转化为:

$$g=k(\tau-\tau_0)$$

(13)

式中: $g$  为单宽输沙率( $g\cdot m^{-1}\cdot s^{-1}$ ); $k$  为与土壤性质、地形、水流特征和降雨等有关的土壤抗冲性参数( $s^2\cdot m^{-1}$ ).水流切应力( $\tau$ )通过下式计算:

$$\tau=\gamma RJ$$

(14)

式中: $\gamma$  为土壤容重( $N\cdot m^{-3}$ ); $R$  为水流的水力半径(m),对于坡面薄层水流, $R=h$ .

1.5 数据处理

采用 Excel 2003 和 Origin 8.0 软件对数据进行统计分析和作图,采用 SPSS 12.0 软件对数据进行独立样本  $t$  检验和单因素方差分析(one-way ANOVA),采用最小显著差数法(LSD法)进行差异显著性检验( $\alpha=0.05$ ).图中数据用平均值 $\pm$ 标准差表示.

2 结果与分析

2.1 牧草不同部位减沙效益分析

由于每次降雨之前,裸坡、根系作用的坡面和整株牧草作用的坡面的土壤水分基本达到饱和状态,而且牧草冠层的截雨量可以忽略,因此,当坡度、雨强一定时,3种条件下坡面径流量基本相等,所以对于牧草对坡面径流的调控不进行分析.

牧草不同部位对坡面输沙的调控作用是不同

的.与裸坡相比,不同坡度和雨强条件下根系和牧草的平均减沙率分别为 50.5% 和 72.0%,因此,植被根系和草冠的减沙率分别为 50.5% 和 21.5%,可见,根系的减沙贡献率远大于草冠.根系和草冠的减沙贡献率随坡度、雨强的变化而变化.由图 1 可以看出,随坡度的增大,牧草根系减沙贡献率呈增大趋势,由 3° 时的 73.1% 增加到 12° 的 84.3%,平均为 78.3%,而草冠的减沙贡献率随坡度增大呈减小趋势;随雨强增大,根系减沙贡献率呈先减小后增加的趋势,平均减沙贡献率为 77.7%,而草冠减沙贡献率呈先增加后减小的趋势,平均减沙贡献率为 22.3%.

2.2 牧草不同部位对坡面流水动力学参数的影响

2.2.1 对径流流速的影响 坡面流的流速直接关系到坡面水蚀的土壤分离、泥沙输移和沉积过程,是计算其他水动力学参数的基础.裸坡不同坡度、不同雨强下的水流流速远大于根系作用的坡面和整株牧草作用的坡面.3种下垫面条件下的坡面水流流速均随坡度、雨强的增大呈增加趋势,而且与其他2种坡面条件相比,裸坡水流平均流速随坡度变化的幅度较大(图2).

对 36 组试验数据进行多元回归分析,得出 3 种下垫面条件下坡面流流速与坡度、雨强的最优拟合方程.由表 1 可以看出,3 种下垫面条件下雨强对流速的影响均大于坡度.进一步分析发现,3 种下垫面流速最优拟合方程中坡度和雨强的指数分别约为

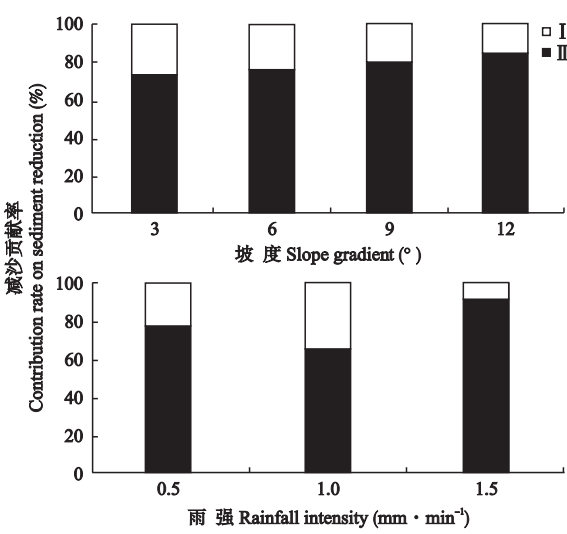


图 1 不同坡度和雨强下根系和草冠的减沙贡献率  
Fig. 1 Contribution rate on sediment reduction of grass root and canopy under different slope gradients and rainfall intensities.  
I: 草冠 Canopy; II: 根系 Root. 下同 The same below.

表 1 不同下垫面坡面流流速与坡度、雨强的关系  
Table 1 Relationships between flow velocity and slope gradient and rainfall intensity on different underlying surfaces

下垫面 Underlying surface	最优拟合方程 Optimum fitting equation	$R^2$	修正拟合方程 Amended fitting equation	$R^2$	$n$
裸坡 Bare slope	$V=10^{-0.333}j^{0.317}i^{0.594}$	0.94	$V=10^{-0.314}j^{0.33}i^{0.5}$	0.94	12
根系作用坡面 Root slope	$V=10^{-0.726}j^{0.232}i^{0.497}$	0.98	$V=10^{-0.653}j^{0.33}i^{0.5}$	0.94	12
牧草作用坡面 Grass slope	$V=10^{-0.904}j^{0.349}i^{0.490}$	0.95	$V=10^{-0.916}j^{0.33}i^{0.5}$	0.94	12

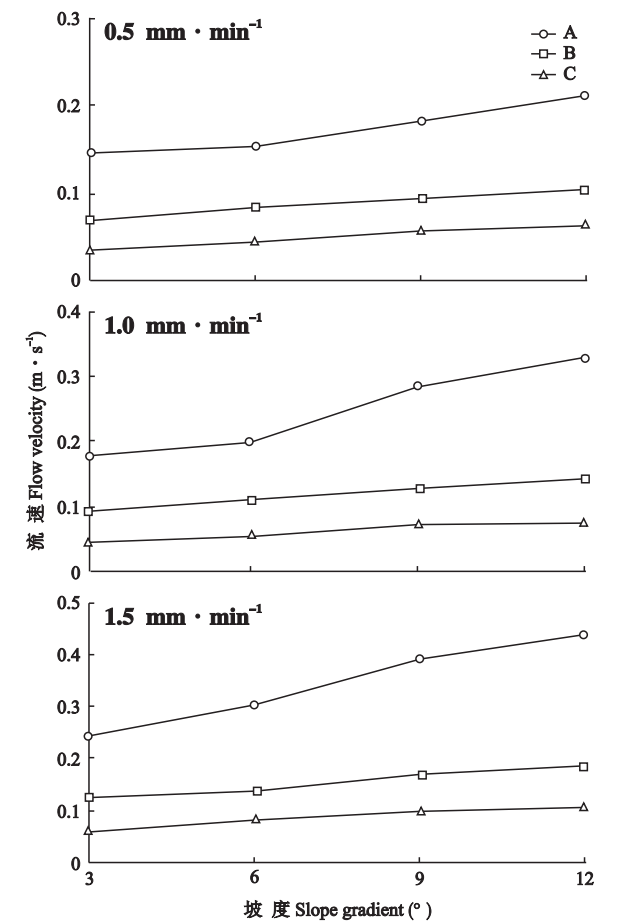


图 2 不同下垫面和雨强下流速随坡度的变化  
Fig. 2 Flow velocity changes with slope gradients under different rainfall intensities and underlying surfaces.  
A:裸坡 Bare land; B:根系作用的坡面 Root slope; C:牧草作用的坡面 Grass slope. 下同 The same below.

0.33 和 0.5, 因此, 用 0.33 和 0.5 替换流速最优拟合方程中的坡度和雨强指数, 得到 3 种下垫面条件下的流速修正拟合方程. 流速修正拟合方程模拟结果与坡面流实测流速的相关系数  $R^2$  仍然很高, 而且模拟方程与徐在庸的坡面流速公式 ( $V=KJ^{0.33}q^{0.5}$ , 其中,  $K$  为坡面粗糙系数,  $J$  为坡面比降,  $q$  为单宽流量<sup>[17]</sup>) 一致. 因此, 3 种下垫面条件下坡面流速均可表示为  $V=DJ^{0.33}i^{0.5}$ . 其中,  $J$  为坡度比降;  $i$  为雨强 ( $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ); 下垫面不同, 综合系数  $D$  取值不同.

牧草根系和草冠对坡面流具有明显的减速作

用. 不考虑枯落物的影响, 定义草冠的减速效益为整株牧草的减速效益与根系减速效益之差. 不同坡度和雨强条件下牧草根系的平均减速效益为 51.7%, 草冠的平均减速效益为 22.7%, 根系的减速作用显著大于草冠.

坡度和雨强不同, 牧草根系和草冠的减速效益也不相同. 由图 3 可以看出, 牧草根系减速效益随坡度呈先减小后增加的趋势, 坡度为 6° 时减速效益最小, 为 48.1%. 除 6° 与 12° 时减速效益变化显著外, 其他坡度的减速效益变化均不显著. 草冠的减速效益随坡度增加而逐渐减小, 坡度变化对其影响显著. 随雨强增大, 根系减速效益呈逐渐增加趋势, 草冠减速效益呈先增加后减小的趋势, 但不同雨强处理间差异均不显著.

2.2.2 对坡面流水动力学参数的影响 在黄土高原风蚀水蚀交错区, 坡面降雨径流是造成土壤侵蚀

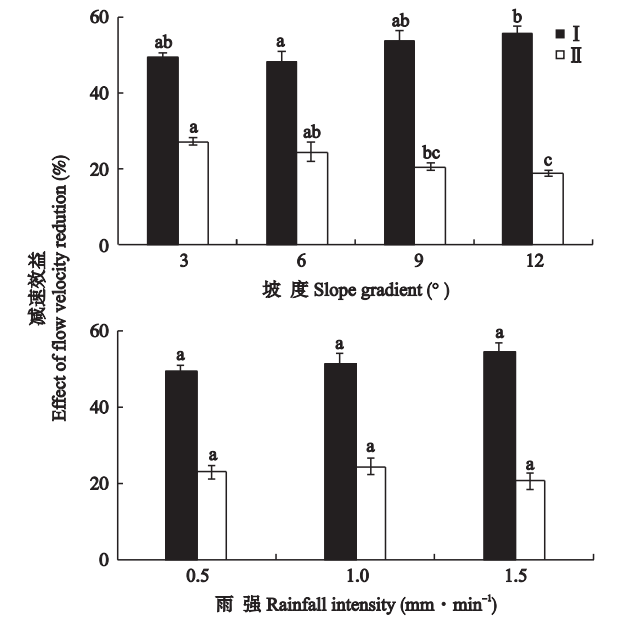


图 3 不同坡度和雨强下牧草根系和草冠的减速效益  
Fig. 3 Effects on flow velocity reduction of grass root and canopy under different slope gradients and rainfall intensities.  
不同字母表示处理间差异显著 ( $P<0.05$ ) Different letters meant significant difference among different treatments at 0.05 level. 下同 The same below.

表2 不同雨强和坡度下坡面水动力学参数特征  
Table 2 Hydrodynamic parameters of overland flow under different rainfall intensities and slope gradients

下垫面 Underlying surface	坡面流速 $V$ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	水深 $h$ (mm)	雷诺数 $Re$	弗劳德数 $Fr$	阻力系数 $f$
裸坡 Bare slope	0.145 ~ 0.438	0.312 ~ 0.823	61 ~ 172	2.059 ~ 6.544	0.056 ~ 0.184
根系作用坡面 Root slope	0.070 ~ 0.183	0.647 ~ 1.434	70 ~ 207	0.724 ~ 1.767	0.459 ~ 1.542
牧草作用坡面 Grass slope	0.033 ~ 0.106	1.058 ~ 3.333	65 ~ 207	0.234 ~ 0.779	3.730 ~ 8.877

的主要动力,对坡面流水动力学特征的研究将有助于深入认识坡面侵蚀产沙本质,揭示植被减水减沙机理.坡面流速( $V$ )、水深( $h$ )、雷诺数( $Re$ )、弗劳德数( $Fr$ )和阻力系数( $f$ )等水力要素是反映水流动力学特征的主要指标<sup>[18-19]</sup>.目前,坡面流理论多借鉴河流动力学的原理和方法,用相应的水力学公式对坡面流的上述水力要素进行测定和计算.

雷诺数( $Re$ )为表征坡面流流型的参数,它是水流惯性力与粘性力比值的无量纲数.由表2可以看出,裸坡、根系作用的坡面和整株牧草作用的坡面水流 $Re$ 分别为61~172、70~207和65~207,3种条件下 $Re$ 相差不大,这主要是因为每次降雨之前,人为控制3种条件下的坡面土壤水分基本达到充分饱和和状态,当坡度、雨强一定时,3种条件下的坡面产流量也基本相等,忽视坡面径流温度的变化后,3种条件下的 $Re$ 相当.若以 $Re=500$ 作为界限雷诺数<sup>[20]</sup>,3种条件下坡面水流都属于层流.

牧草不同部位对水深也有很大影响.试验过程中,水深很难测量,它主要通过单宽径流量和流速计算.由于3种坡面产流量基本相等,所以水深主要由流速决定.流速大,水深小.因此,植被根系和冠层对水深的影响与对流速的影响相反.水深和流速的大小决定着径流侵蚀力和泥沙搬运强度,而佛汝德数( $Fr$ )综合反映流速与水深的对比关系,是表征水流流态的重要参数. $Fr$ 越大,表明坡面水流流速越大,径流搬运泥沙的能力越强.由表2可以看出,裸坡水流的 $Fr$ 远大于根系作用的坡面和整株牧草作用的坡面.根据明渠水流判别标准<sup>[20]</sup>,裸坡水流属于急流流态,根系作用的坡面径流在大雨强、大坡度时属于急流,其他情况下属于缓流,而牧草作用的坡面水流均属于缓流,这进一步证明植被根系和冠层能够减小水流剪切力,降低径流搬运泥沙的能力.

阻力系数( $f$ )是表征坡面粗糙程度的一个属性参数, $f$ 越大,说明水流克服坡面阻力所消耗的能量就越大,而用于坡面侵蚀和泥沙输移的能量越小,坡面侵蚀产沙就越少.整株牧草作用的坡面和根系作用的坡面的 $f$ 远大于裸坡(表2).裸坡在不同坡度

和雨强下平均阻力系数为0.113,根系作用的坡面和整株牧草作用的坡面的平均阻力系数分别为0.967和6.460,分别为裸坡的8.6和57.2倍.可见,植被冠层的增阻作用远大于根系.

由图4可以看出,在各坡度和雨强处理下,根系的增阻效益均显著小于草冠.随坡度增大,根系的增阻效益呈增大趋势,除6°与12°时增阻效益变化显著外,其他坡度的增阻效益变化均不显著.草冠的增阻效益随坡度增大呈先减少后增大的趋势,除3°与6°时增阻效益变化显著外,其他坡度的增阻效益变化不显著.随雨强增大,根系的增阻效益呈增大趋势,草冠的增阻效益呈先增大后减小的趋势,但不同雨强处理间差异均不显著.

2.3 牧草不同部位对土壤抗冲性的影响

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,是评价土壤抵抗外力冲刷破坏的一个重要指标.表征土壤抗冲性的参数并不单一,其中引起土壤颗粒分离的临界径流切应力能够很好地体现不同下垫面条件下土壤抵抗径流分散和搬运能

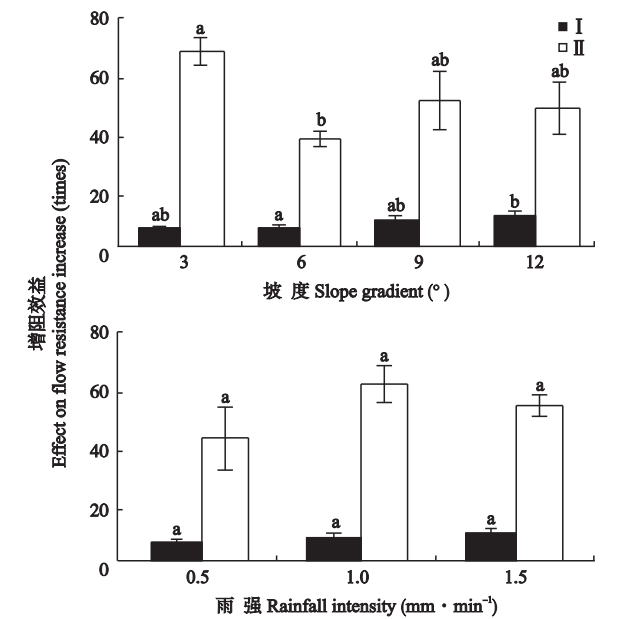


图4 不同坡度和雨强下牧草根系和草冠的增阻效益  
Fig. 4 Effects on flow resistance increase of grass root and canopy under different slope gradients and rainfall intensities.

力的强弱<sup>[9,21]</sup>. 当径流切应力大于土壤的临界径流切应力时,坡面侵蚀就会发生.

利用雷俊山和杨勤科<sup>[16]</sup>提出的薄层水流坡面产沙概念模型,建立了不同雨强和坡度下裸坡、根系作用的坡面和整株牧草作用的坡面输沙率与水流切应力的关系曲线. 由图 5 可以看出,不同下垫面条件下坡面侵蚀输沙率均随水流切应力的增大而增大,两者之间表现出明显的线性关系. 由表 3 可以看出,裸坡、根系作用的坡面和整株牧草作用的坡面的临

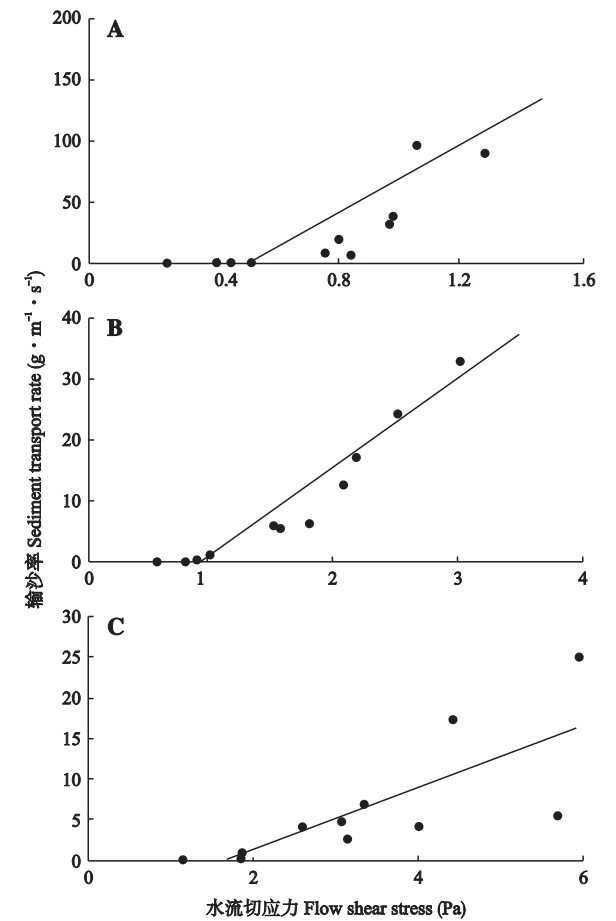


图 5 不同下垫面坡面输沙率与水流剪切力的关系  
Fig. 5 Relationships between sediment transport rate and flow shear stress on different underlying surfaces.

表 3 牧草根系和草冠对土壤临界切应力的影响  
Table 3 Effects of grass root and canopy on soil critical shear stress

下垫面 Underlying surface	模型 Model form	临界切应力 $\tau_0$ (Pa)	土壤抗冲 性参数 $k$ ( $s^2 \cdot m^{-1}$ )	$n$	$R^2$
裸坡 Bare slope	$g = 146.24\tau - 78.01$	0.533	146.24	12	0.70
根系作用坡面 Root slope	$g = 14.76\tau - 13.65$	0.925	14.76	12	0.94
牧草作用坡面 Grass slope	$g = 3.83\tau - 6.40$	1.672	3.83	12	0.60

界切应力分别为 0.533、0.925 和 1.672 Pa. 根系作用的坡面和整株牧草作用的坡面的临界切应力分别是裸地的 1.7 和 3.1 倍,表明植被根系和草冠均具有较强的抵抗径流侵蚀的能力. 由于牧草处于生长旺盛阶段,其枯落物对土壤抗冲性的影响暂不考虑,所以,由根系和草冠作用所增加的切应力分别为 0.392 和 0.747 Pa. 可见,两者分别使土壤临界切应力增加了 73.4% 和 140.0%. 植被根系主要通过改善土壤的理化性质来直接增强土壤的抗冲性能<sup>[21-22]</sup>,而草冠并不对土壤抗冲性起直接作用,草冠主要通过消减降雨动能及增加地表糙度来间接增加土壤的抗冲能力. 进一步分析发现,裸坡、根系作用的坡面和整株牧草作用的坡面水流产沙模型的土壤抗冲性参数分别为 146.24、14.76 和 3.83  $s^2 \cdot m^{-1}$ ,表明当坡面水流切应力超过土壤颗粒分离的临界切应力,坡面开始发生侵蚀时,有效水流切应力每增加一个单位,裸坡所引起的坡面输沙量远大于根系作用的坡面和整株牧草作用的坡面.

综上,植被根系和冠层均能增加土壤的临界水流切应力,但当水流切应力开始大于临界水流切应力时,坡面发生侵蚀,植被根系抵抗水流搬运土壤的能力远大于植被冠层.

### 3 讨 论

黄土高原风蚀水蚀交错区水土流失严重,植被恢复和建设已成为该区控制土壤侵蚀、减少水土流失的一个重要手段. 大量研究表明,草本植被具有显著的减水减沙效益<sup>[4-5,23]</sup>. 本研究中,覆盖度为 40% 左右的沙打旺能够有效控制坡面土壤侵蚀,减沙效益达 70% 以上,这与以往的研究结果基本一致<sup>[24-25]</sup>. 牧草的减水减沙效应主要通过植被的地上和地下两部分共同实现. 地上部主要通过截留降雨、减少地表净雨、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,而地下部分的作用主要体现在根系增加土壤抗冲性能和改善土壤结构等方面<sup>[21,26]</sup>. 牧草地上和地下两部分调控坡面侵蚀产沙的作用大小是不同的. 本研究中,牧草根系和草冠的减沙贡献率分别为 78.1% 和 21.9%,根系减沙贡献率显著大于草冠,这与甘卓亭等<sup>[27]</sup>研究黄土高原黑麦草 (*Lolium perenne*) 和红豆草 (*Onobrychis viciaefolia*) 的根系和冠层减沙作用的结论基本一致. 其原因可能是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<sup>[28-29]</sup>。

牧草调控坡面土壤侵蚀的机理主要体现为牧草能够影响坡面流水动力学特征,表现在牧草对坡面流流速、流型、流态、水深和坡面阻力等方面的影响。本研究表明,牧草根系和草冠能够减小坡面流流速,缓解坡面流流态和增加地表阻力系数,这与秦富仓等<sup>[7]</sup>的研究结论基本一致。但是,目前研究中很少从水动力学机理角度探讨牧草结构即牧草根系和冠层如何调控坡面土壤侵蚀,这也是本研究的一个创新之处。本研究中,牧草根系和草冠均能显著减小坡面流的流速,不同雨强和坡度下平均减速效益分别为 51.7% 和 22.7%,根系减速作用大于草冠,其原因可能是试验期间沙打旺处于幼苗生长阶段,其枝叶生长缓慢,但根系生长很快,根系穿插缠绕土壤颗粒,大幅提高了泥沙的抗冲刷能力,而且在试验过程中,牧草的覆盖度较低,所以表现为草冠对坡面流的减速作用远小于根系。牧草根系和草冠可以缓解坡面流流态,牧草覆盖的坡面水流属于缓流,根系作用的坡面只有在大雨强大坡面下属于急流,其余条件下也属于缓流,这进一步说明了牧草根系和草冠能够减小水流剪切力,降低径流搬运泥沙的能力。根系和草冠能够显著增加地表阻力,根系作用的坡面和整株牧草作用的坡面阻力系数分别是裸地的 8.6 和 57.2 倍,草冠增阻作用远大于根系,其原因可能是根系团聚土壤颗粒增加了坡面颗粒阻力,但这种作用是有限的,而草冠覆盖在土壤表面,大大增加了坡面的形态阻力,甚至是波阻力。

牧草能够显著增强土壤的抗冲性能<sup>[26,30]</sup>,这种作用主要通过牧草根系的直接作用和冠层的间接作用共同实现。本研究表明,一旦坡面发生侵蚀,根系抵抗水流冲刷和搬运的能力要远大于冠层。可见,牧草主要通过根系提高土壤的抗冲刷能力。吴钦孝和李勇<sup>[31]</sup>采用保留和去掉茎叶的方法对白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)等 4 种牧草进行处理,发现去掉茎叶和保留茎叶对坡面土壤侵蚀影响不大,进一步说明根系在增强土壤抗冲性能上发挥主要作用。根系提高土壤抗冲能力的机理主要表现在两个方面:第一,根系可以促进产生抗冲性强的土体构型,增强土壤水稳性团粒和有机质含量,从而稳定土壤结构,提高土壤颗粒抵抗水流分散的能力;第二,根系可以通过增强土壤的渗透性能,减弱径流冲刷能

力,从而达到增强土壤抗冲性的效果<sup>[32]</sup>。另外,有研究表明,植物根系不同径级对提高土壤抗冲性的效应不同,土壤中毛根数量是决定土壤抗冲能力的主要指标<sup>[33]</sup>。

在黄土高原植被恢复和生态建设过程中要因地利制宜,根据当地的土壤侵蚀特点,选择合适的水土保持植被。本研究中牧草处于生长旺盛阶段,枯落物较少,故本文仅对牧草根系和草冠调控坡面土壤侵蚀的水动力学机理进行了研究,没有考虑枯落物的影响,这在一定程度上会对研究结果产生影响。另外,牧草在不同生长阶段,其根系和冠层调控坡面土壤侵蚀的作用也不同,这有待进一步研究。

## 参考文献

- [1] Jia X-X (贾小旭), Shao M-A (邵明安), Wei X-R (魏孝荣), *et al.* State-space simulation of soil surface water content in grassland of northern Loess Plateau. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2010, **26**(10): 38-44 (in Chinese)
- [2] Xu Z (徐震). Effects of Grass Vegetation Structure on the Process of Flow and Sediment over Slope Lands. Master Thesis. Yangling: Northwest A&F University (西北农林科技大学), 2011 (in Chinese)
- [3] Chen Z-F (陈致富), Wei T-X (魏天兴), Zhao J (赵健), *et al.* Soil infiltration under different vegetations in water-wind erosion crisscross region of northern Shaanxi Province. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2009, **23**(3): 232-235 (in Chinese)
- [4] Ju T-J (据彤军), Liu P-L (刘普灵), Wang S-Q (王栓全), *et al.* Simulative study of process and principle of runoff-sediment yield in different land use types in loess region. *Journal of Agro-Environment Science* (农业环境科学学报), 2007, **26**(5): 1942-1947 (in Chinese)
- [5] Wu S-F (吴淑芳), Wu P-T (吴普特), Song W-X (宋维秀), *et al.* Study on the outflow processes of slope regulated by works and its effects on overland flow and sediment reduction. *Journal of Hydraulic Engineering* (水利学报), 2010, **41**(7): 870-875 (in Chinese)
- [6] Pan C-Z (潘成忠), Shangguan Z-P (上官周平). Generation mechanism of woodland runoff and sediment on Loess Plateau under hypo-rainfall: A case study of artificial *P. tabulaeformis* and secondary natural *P. dadidiana* stands. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2005, **16**(9): 1597-1602 (in Chinese)
- [7] Qin F-C (秦富仓), Yu X-X (余新晓), Zhang M-L (张满良), *et al.* Mechanism of watershed soil erosion control by vegetation. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2005, **16**(9): 1618-1622 (in Chinese)

- [8] Yao W-Y (姚文艺), Xiao P-Q (肖培青), Shen Z-Z (申震洲), *et al.* Responses of runoff processes and threshold of sediment generation for different vegetation-covered plot. *Journal of Hydraulic Engineering* (水利学报), 2011, **42**(12): 1438–1444 (in Chinese)
- [9] Xiao P-Q (肖培青), Yao W-Y (姚文艺), Shen Z-Z (申震洲), *et al.* Experimental study of critical flow energy for slope erosion under the influence of vegetation cover. *Advances in Water Science* (水科学进展), 2011, **22**(2): 229–234 (in Chinese)
- [10] Zhu Z-Y (朱智勇), Xie J-C (解建仓), Li Z-B (李占斌), *et al.* Experimental study on mechanism of slope runoff-erosion-sediment yield. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2011, **25**(5): 1–7 (in Chinese)
- [11] de Baets S, Poesen J, Gyssels G, *et al.* Effects of grass roots on the erodibility of topsoils during concentrated flow. *Geomorphology*, 2006, **76**: 54–67
- [12] Fan CC, Chen YW. The effect of root architecture on the shearing resistance of root-permeated soils. *Ecological Engineering*, 2010, **36**: 813–826
- [13] Zhou ZC, Shangguan ZP. The effects of ryegrass roots and shoots on loess erosion under simulated rainfall. *Catena*, 2007, **70**: 350–355
- [14] Li G, Abrahams AD, Atkinson JF. Correction factors in the determination of mean velocity of overland flow. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1996, **21**: 509–515
- [15] Abrahams AD, Li G, Krishnan C, *et al.* A sediment transport equation for interrill overland flow on rough surfaces. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2001, **26**: 1443–1459
- [16] Lei J-S (雷俊山), Yang Q-K (杨勤科). Experimental research on sheet flow erosion of loessial slope and evaluation on soil anti-scourability. *Journal of Sediment Research* (泥沙研究), 2004(6): 22–26 (in Chinese)
- [17] Liu B-Z (刘秉正), Wu F-Q (吴发启). Soil Erosion. Xi'an: Shaanxi People Press, 1997 (in Chinese)
- [18] Tani M. Runoff generation processes estimated from hydrological observations on a steep forested hillslope with a thin soil layer. *Journal of Hydrology*, 1997, **200**: 84–109
- [19] Romkens MJM, Helming K, Prasad SN. Soil erosion under different rainfall intensities, surface roughness, and soil water regimes. *Catena*, 2002, **46**: 103–123
- [20] Luo R-T (罗榕婷), Zhang G-H (张光辉), Cao Y (曹颖). Progress in the research of hydrodynamic characteristics of sediment-laden overland flow. *Progress in Geography* (地理科学进展), 2009, **28**(7): 567–574 (in Chinese)
- [21] Li Y (李勇), Xu X-Q (徐晓琴), Zhu X-M (朱显谟). Preliminary study on the mechanism of soil anti-scouring ability improved by plant roots in the Loess Plateau. *Science in China Series B* (中国科学 B 辑), 1992, **22**(3): 254–259 (in Chinese)
- [22] Li Y (李勇), Xu X-Q (徐晓琴), Zhu X-M (朱显谟), *et al.* Strengthening effectiveness of plant roots on soil penetration in the Loess Plateau. *Chinese Science Bulletin* (科学通报), 1992, **37**(4): 366–369 (in Chinese)
- [23] Zhang Q (张强), Zheng S-Q (郑世清), Tian F-X (田凤霞), *et al.* Runoff and sediment processes and anti-erosion effects of grass-covered earth road in loess hilly region. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(7): 1785–1791 (in Chinese)
- [24] Feng H (冯浩), Wu S-F (吴淑芳), Wu P-T (吴普特), *et al.* Study on scouring experiment of regulating runoff in grassland slope. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2005, **19**(6): 23–26 (in Chinese)
- [25] Zhang Y-L (张亚丽), Li H-E (李怀恩), Zhang X-C (张兴昌), *et al.* Runoff loss of soil mineral nitrogen and its relationship with grass coverage on Loess slope land. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2006, **17**(12): 2297–2301 (in Chinese)
- [26] Li Y (李勇), Zhu X-M (朱显谟), Tian J-Y (田积莹). Improving effectiveness of plant roots on soil anti-scouring ability in the Loess Plateau. *Chinese Science Bulletin* (科学通报), 1991, **36**(12): 935–938 (in Chinese)
- [27] Gan Z-T (甘卓亭), Ye J (叶佳), Zhou Q (周旗), *et al.* Effects of grass vegetations on the processes of soil erosion over slope lands in simulated rainfalls. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2010, **30**(9): 2387–2396 (in Chinese)
- [28] Pikul JL, Aase JK. Water infiltration and storage affected by subsoiling and subsequent tillage. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, **67**: 859–866
- [29] Martens DA. Relationship between plant phenolic acids released during soil mineralization and aggregate stabilization. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, **66**: 1857–1867
- [30] Niu H (牛皓), Gao J-N (高建恩), Yang S-W (杨世伟), *et al.* The mechanical properties of broom cypress root and the effect on road erosion. *Yangtze River* (人民长江), 2009, **40**(11): 65–67 (in Chinese)
- [31] Wu Q-X (吴钦孝), Li Y (李勇). A study on soil anti-scourability increased by root system of plant in the loess plateau. II. An experimental study on top soil anti-scourability increased by root system of herbs. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 1990, **4**(1): 11–16 (in Chinese)
- [32] Xiong Y-M (熊燕梅), Xia H-P (夏汗平), Li Z-A (李志安), *et al.* Effects and mechanisms of plant roots on slope reinforcement and soil erosion resistance: A research review. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2007, **18**(4): 895–904 (in Chinese)
- [33] Chen Y-M (陈云明), Liu G-B (刘国彬), Xu B-C (徐炳成). Effects of artificial seabuckthorn forest on soil and water conservation in loess hilly region. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2005, **16**(4): 595–599 (in Chinese)

作者简介 赵春红,女,1987年生,博士。主要从事水土保持及土壤侵蚀机理研究。E-mail: zhaochunhong1987@163.com  
责任编辑 孙菊