

## 黄土丘陵区退耕草地土壤分离能力季节变化研究\*

王长燕<sup>1, 2</sup> 郁耀闯<sup>1, 2†</sup>

(1 宝鸡文理学院地理与环境学院, 陕西宝鸡 721013)

(2 陕西省灾害监测与机理模拟重点实验室, 陕西宝鸡 721013)

**摘要** 采用变坡试验水槽的方法, 研究了黄土高原丘陵区退耕3年草地(赖草)和退耕17年草地(紫花苜蓿)在生长季土壤分离过程的季节变化及其影响因素。结果表明: 赖草和紫花苜蓿地的土壤分离能力在整个生长季均呈现显著下降的季节变化趋势( $p < 0.05$ )。赖草地的平均土壤分离能力最大( $0.076 \pm 0.036 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), 其次是紫花苜蓿地( $0.057 \pm 0.055 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ); 两种草地土壤分离能力的季节变化主要受到土壤硬化、水稳性团聚体和草地根系生长的影响, 随土壤粘结力、容重、水稳性团聚体和草地根系密度的增加, 两种退耕草地的土壤分离能力均呈指数形式下降; 两种草地土壤分离能力的季节变化可以用水流剪切力、土壤容重和草地根系密度很好的模拟。为黄土高原地区退耕还林(草)水土保持措施提供科学依据。

**关键词** 土壤分离能力; 季节变化; 土壤硬化; 根系生长; 黄土丘陵区

**中图分类号** S147 **文献标识码** A

黄土丘陵区土壤结构疏松, 降水主要集中在6—9月, 植被覆盖率较低, 水土流失较为严重, 是国家退耕还林、还草生态工程建设重点区域。剧烈的土壤侵蚀加速了河道泥沙的淤积, 并潜在地威胁着黄河流域的生态安全和人地系统的可持续发展<sup>[1-4]</sup>。近年来, 随着黄土高原地区退耕还林、还草工作的开展, 该区退耕地的水土保持效益问题引起了学术界的广泛关注。在黄土高原地区, 降雨形成的地表径流是土壤侵蚀的主要动力, 地表径流量的大小和快慢影响着土壤侵蚀过程, 该过程通常被分为分离、搬运和沉积三个阶段, 其中土壤分离是起始阶段。在坡面流侵蚀中, 土壤分离能力被定义为, 在某一特定的水动力条件下, 当水流中的沉积物浓度为0时的最大土壤分离速率。坡面流中的土壤分离过程主要受水文气象条件、土壤属性和土地

利用等多种因素的影响<sup>[5]</sup>。对于既定的土壤, 土壤分离能力通常和水动力条件有关<sup>[6-8]</sup>。

坡面流侵蚀发生在土壤和坡面水流的界面上。因此, 它受到土壤属性的影响。通常情况下, 它随着土壤含水量的增加而增加, 随着土壤黏粒含量、容重、水稳性团聚体含量、土壤切变强度和有机质的含量增加而减少<sup>[9-13]</sup>。然而, 这些土壤属性中很多是随时间变化的, 它们的变化可能导致土壤分离的季节变化<sup>[8, 14]</sup>。以往有限的研究表明, 土壤分离能力的季节变化只受到少数土壤属性动态变化的影响<sup>[8, 14-15]</sup>。例如, 土壤含水量<sup>[16]</sup>、土壤结皮和冻融循环等<sup>[17-18]</sup>。在黄土高原地区, 以退耕还林还草为主要手段的自然和人工的植被恢复已引起了土壤理化性状的明显改变<sup>[19-20]</sup>, 这可能导致土壤分离过程的变化, 进而影响土壤侵蚀过程。然

\* 国家自然科学基金项目(41371497, 41171423)和宝鸡文理学院重点科研项目(ZK15052, ZK1054)资助Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 41371497, 41171423) and the Key Fund Project of Baoji Arts & Sci. University (Nos. ZK15052, ZK1054)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: yuyaochuang@126.com

作者简介: 王长燕(1979—), 女, 山东烟台人, 博士, 讲师, 主要从事土壤侵蚀与环境效应研究。E-mail: wcyxa\_1979@163.com

收稿日期: 2015-12-10; 收到修改稿日期: 2016-01-15; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2016-03-16

而,这种变化如何影响土壤分离过程的季节变化目前还不清楚,其中对于黄土高原地区退耕草地土壤分离过程季节变化及其影响因素的研究还少见报道。

本文以黄土丘陵区自然植被恢复过程中退耕3年草地(赖草)和退耕17年草地(紫花苜蓿)为研究对象,以1年农耕地谷子作为对照,采用变坡试验水槽法,系统测定了黄土丘陵区退耕草地土壤分离过程的季节变化,同时测定土壤容重、粘结力和水稳性团聚体等土壤属性的季节变化,分析土壤属性动态变化对土壤分离能力季节变化的潜在影响。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

研究区位于中国科学院水土保持研究所安塞水土保持综合试验站(109°19'23"E, 36°51'30"N),海拔1 068~1 309m,属暖温带半

湿润向半干旱气候过渡区,年平均气温为8.8℃,年平均降雨量为505.3 mm,降雨量年内分配不均匀,6—9月集中了全年70%以上的降雨,多为短历时暴雨,常导致严重的土壤侵蚀。该区地貌类型以峁状、梁状丘陵为主,沟壑纵横,地形破碎,沟壑密度高达2.0~7.6 km km<sup>-2</sup>,沟蚀和面蚀为该区间的主要土壤侵蚀类型。土壤类型为黄绵土和沙黄土,结构较为松散,抗侵蚀能力较差,水土流失严重。

### 1.2 样地选择

选取该区典型退耕地(赖草和紫花苜蓿)作为试验样地,赖草(*Leymus secalinus* (Georgi) Tzvel.)为3年退耕地,紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)为17年退耕地,对对照样地选为1年农耕地谷子地,主要是考虑到谷子为黄土高原典型的农作物,根系密度在整个生长季的变化范围为0.01~0.16 kg m<sup>-3</sup>,平均值为0.07 kg m<sup>-3</sup>,根系不发达,固土能力较弱。样地生育期基本特征见表1。需要说明的是,本文的季节指的是退耕草地的一个生长季。

表1 退耕草地生育期基本特征

**Table 1** Basic soil properties of the grasslands rehabilitated under "Grain for Green" during the plant growing period

草被 类型	日期 Date (MM-DD) / 生育期 Growth period						
	I	II	III	IV	V	VI	VII
Grass type	04-18	05-24	06-18	07-18	08-15	09-10	09-30
赖草 Leymus	返青 Regreening	抽穗 Earing	开花 Flowering	种子成熟 Seed maturing	种子散落初期 Early seeds scattering stage	种子散落高峰期 Peak of seeds scattering	种子散落末期 Late stage of seeds scattering
紫花 苜蓿 Alfalfa	返青 Regreening	旁枝形成 Side branch forming	现蕾 Budding	开花 Flowering	结荚 Podding	种子成熟初期 Early seeds maturing stage	种子成熟末期 Late seeds maturing stage
对照 (谷子) Control (millet)	种植前 Before planting	幼苗期 Seedling stage	—	抽穗灌浆期 Heading and filling stage	—	籽粒形成期 Grain forming stage	成熟期 Maturing stage

### 1.3 样品采集

试验开始时分别在退耕3年草地(赖草)、退耕17年草地(紫花苜蓿)和对照样地(谷子地),采用内径9.8 cm、高5 cm的环刀,取靠近植株根部原状土样<sup>[7-8, 15]</sup>。采样时尽量选取地表较为平整的土壤表面。每次取样时用5个铝盒在采样点附近随机采集土壤水分含量样品,用于计算土样冲刷前的干重。

每个采样点每次均采集5个重复样品,土壤分离能力试验在2012年4月上旬开始,根据各草地生育阶段的变化特征,分别选取关键的生育阶段开展试验(表1),在赖草地、紫花苜蓿地和对照样地(谷子地)分别进行了7个生长阶段的土壤分离能力试验,共采集土壤分离样品630个。

### 1.4 试验方法

土壤分离试验采用变坡水槽系统测定(图

1), 变坡试验水槽长4 m、宽0.35 m、深0.6 m, 底部为有机玻璃板, 水槽坡度调节范围为 $0^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 。试验前将采集的地表土风干, 过1 mm筛子, 用湿油漆均匀粘在有机玻璃板上, 尽量保证水槽底部糙度与农耕地地表一致。试验设计3个坡度和4个流量的组合, 它们分别为 $10^{\circ}$ 、 $1.0 \text{ L s}^{-1}$ ,  $10^{\circ}$ 、 $2.0 \text{ L s}^{-1}$ ,  $15^{\circ}$ 、 $2.0 \text{ L s}^{-1}$ ,  $25^{\circ}$ 、 $1.5 \text{ L s}^{-1}$ ,  $25^{\circ}$ 、 $2.0 \text{ L s}^{-1}$ ,  $25^{\circ}$ 、 $2.5 \text{ L s}^{-1}$ , 对应的水流剪切力依次为5.71 Pa、8.60 Pa、10.75 Pa、13.06 Pa、15.36 Pa和17.18 Pa。用染色法测定水流表面最大流速<sup>[6-8]</sup>, 乘以修正系数0.8得到平均流速<sup>[7-8]</sup>, 径流水深 $h$ 采用流量、流速和槽宽计算<sup>[7-8]</sup>。水流剪切力计算公式为<sup>[7-8, 15]</sup>:

$$\tau = \rho g H S \quad (1)$$

式中,  $\tau$ 为水流剪切力(Pa),  $\rho$ 为水的密度( $\text{kg m}^{-3}$ ),  $g$ 为重力加速度( $\text{m s}^{-2}$ ),  $H$ 为水深(m),  $S$ 为水槽坡度( $\text{m m}^{-1}$ )。

土壤分离能力计算公式为<sup>[7-8, 15]</sup>:

$$D_c = \frac{W_a - W_b}{1000 \cdot t \cdot A} \quad (2)$$

式中,  $D_c$ 为土壤分离能力( $\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ );  $W_a$ 为冲刷前土壤干重(g);  $W_b$ 为冲刷后土壤干重(g);  $t$ 为冲刷时间(s);  $A$ 为环刀面积( $\text{m}^2$ )。土样烘干称重后, 用水洗法冲刷土样中的根系, 并置于烘箱内, 于 $65^{\circ}\text{C}$ 下烘至恒重并称重。

粘结力采用微型粘结力仪测定(Durham Geotechnical Enterprises, Inc., UK), 每次测定10个重复。土壤容重采用环刀( $100 \text{ cm}^2$ )法测定, 每次测定3个重复。土壤水稳性团聚体采用干湿筛法, 每次测定3个重复。土壤初始含水量采用烘干法测定, 每次



图1 试验水槽设计

Fig. 1 Design of the flumes in the experiment

测定5个重复。根系采用水洗法测定, 每次测定3个重复。

## 1.5 统计分析

采用SPSS 18.0统计软件进行数据分析, 土壤分离能力季节变化采用Kendall's W 检验( $p < 0.05$ ), 差异显著性检验采用LSD ( $p < 0.05$ , 双尾)。

## 2 结果与讨论

### 2.1 退耕草地土壤分离能力季节变化特征

在黄土丘陵区退耕草地生长季(四月中旬至九月底), 赖草地(退耕3年)和紫花苜蓿地(退耕17年)的土壤分离能力在不同的生长阶段具有明显下降的季节变化趋势( $p < 0.05$ ) (图2)。赖草地与对照样地(谷子地)土壤分离能力无显著性差异( $p > 0.05$ ), 紫花苜蓿地与对照样地的土壤分离能力具有显著性差异( $p < 0.05$ )。在草地生长季, 赖草地的土壤分离能力变化范围为 $0.029 \sim 0.140 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , 此变化范围分别是对照样地土壤分离能力变化范围的2.78%~36.22%, 赖草地土壤分离能力在整个生长季的均值为 $0.076 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , 该值为对照样地均值的6.32%。紫花苜蓿地的土壤分离能力变化范围为 $0.005 \sim 0.151 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , 此变化范围分别是对照样地土壤分离能力变化范围的2.84%~18.44%, 紫花苜蓿地的土壤分离能力的均值为 $0.057 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , 是对照样地均值的4.79%。赖草地的平均土壤分离能力最大, 其次是紫花苜蓿地。由此可以看出, 退耕草地的土壤分离能力要远小于农耕地的土壤分离能力, 这说明草地抵抗土壤被分离的能力要远高于农耕地。因此, 在黄土高原地区, 退耕还草有利于该区的水土保持。具体而言: 在四月中旬, 赖草和紫花苜蓿均处于返青阶段, 此时, 由于土壤刚刚解冻, 两种草地的土壤分离能力相对较高, 然后, 随着赖草和紫花苜蓿根系的生长、草地盖度的增加和雨滴打击等因素的影响, 两种草地的土壤分离能力呈下降趋势, 赖草地在种子散落初期(八月中旬)下降至最低值 $0.029 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , 在赖草种子散落的高峰期和散落末期, 该草地的土壤分离能力又呈上升趋势, 在种子散落末期(九月下旬), 土壤分离能力又上升至 $0.061 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , 上升幅度为108%。在紫花苜蓿地, 紫花苜蓿经历了返青、旁枝形成、现蕾、开

花、结荚、种子成熟初期和种子成熟末期等7个生长阶段,土壤分离能力值在 $0.005 \sim 0.151 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 之间波动,变化幅度大约为299%,在返青期至开花期,紫花苜蓿地的土壤分离能力呈快速下降趋势,下降幅度为565%,从开花期至种子成熟初期,紫花苜蓿地的土壤分离能力在 $0.020 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 至 $0.023 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 之间波动,变幅较小,仅为15%,在种子成熟末期(九月底)下降至最低值 $0.005 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。从四月中旬至九月底,对照样地土壤分离能力也呈下降趋势,在四月中旬呈现最大值 $5.04 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ,在九月底呈现最小值 $0.17 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ,平均值为 $1.21 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。总体而言,两种退耕草地的土壤分离能力在整个生长季均具有明显季节变化,并且两种草地的土壤分离能力的平均值要远小于对照样地土壤分离能力的平均值,这可能与退耕草地的土壤属性和根系生长特点有关。

本研究中,两种退耕草地和对照样地的土壤分离能力在整个生长季的平均值分别为王军光等<sup>[21]</sup>报道的亚热带季风湿润气候区8种红壤土壤分离能力( $0.026 \sim 0.18 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )的42%~290%、32%~220%和666%~4 589%,分别为Zhang等<sup>[8]</sup>研究黄土高原退耕9年沙打旺(*Astragalus*

*adsurgens* Pall.)草地结果的2.81倍、2.12倍和44.48倍,这些研究结果的不同可能与测量方法和土壤属性等因素的不同有关。本研究试验坡度的变化范围为17.4%~42.3%,然而,在王军光等<sup>[21]</sup>的研究中,它们的试验坡度变化范围为8.8%~36.4%;本研究中单宽流量是王军光等<sup>[21]</sup>研究中单宽流量的1.4倍~1.42倍。本研究中所使用的水流剪切力变化范围为 $5.71 \sim 17.18 \text{ Pa}$ ,王军光等<sup>[21]</sup>研究中的水流剪切力变化范围为 $4.54 \sim 22.54 \text{ Pa}$ ;其试验土壤黏粒含量是本试验中土壤黏粒含量的2.14倍~5.5倍。因此,本试验中所使用的土壤更容易被分离。本研究的试验结果与Zhang等<sup>[8]</sup>的试验结果不同可能是由于本试验的水动力条件较大等因素不同所导致的。例如,本试验中的单宽流量是Zhang等<sup>[8]</sup>研究单宽流量( $0.0028 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-1}$ )的1倍~2.5倍。本试验中所使用的最大水流剪切力是其研究中水流剪切力( $11.63 \text{ Pa}$ )的1.48倍。此外,其研究中测量的根系密度是本研究测量的根系密度的1.09倍~6.52倍,土壤分离能力随根系密度呈指数函数降低<sup>[8, 15]</sup>。因此,本研究测得的土壤分离能力结果较其测得的结果相对偏大。

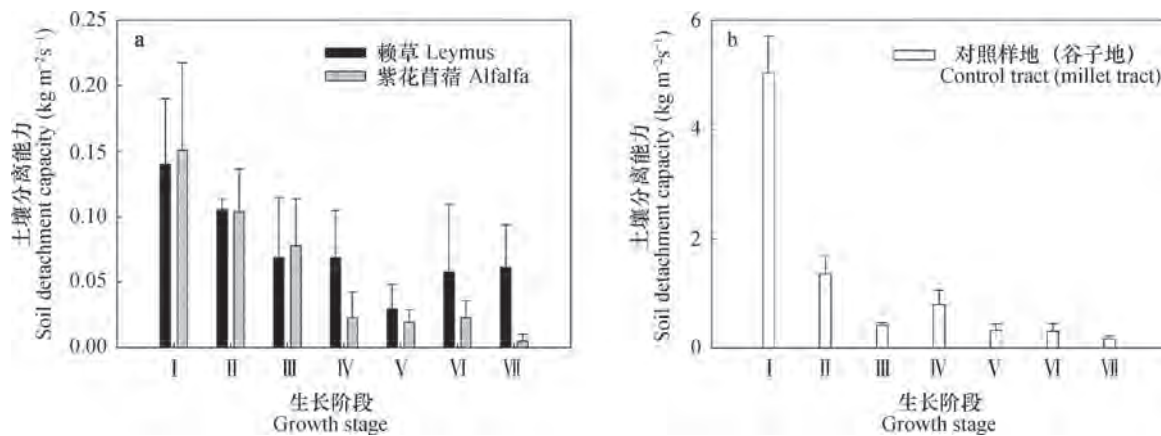


图2 赖草和紫花苜蓿地土壤分离能力的季节变化

Fig. 2 Seasonal variations of soil detachment capacity in leymus and alfalfa grasslands

## 2.2 退耕草地土壤分离能力季节变化的影响因素

在坡面流土壤侵蚀中,土壤分离能力的时间变化与土壤属性和根系密度密切相关<sup>[8, 14-15]</sup>。在整个草地生长季,受降水、风、土壤硬化、结皮发育、根系生长等综合作用的影响<sup>[22-23]</sup>,两种退耕草地的土壤粘结力、容重和水稳性团聚体等土壤属性具有明显的季节变化(图3),它们的动态变化

可能导致土壤分离能力的季节变化。

土壤固结力明显影响着土壤分离能力的季节变化,这主要反映在整个草地生长季土壤粘结力和土壤容重的增加(图3a、图3b),它们使土壤变硬,并且难以被分离<sup>[8, 15]</sup>,从而导致土壤分离能力下降。一般情况下,土壤粘结力较大时,土壤颗粒比较紧实,此时土壤的抗分离能力较强,难于被

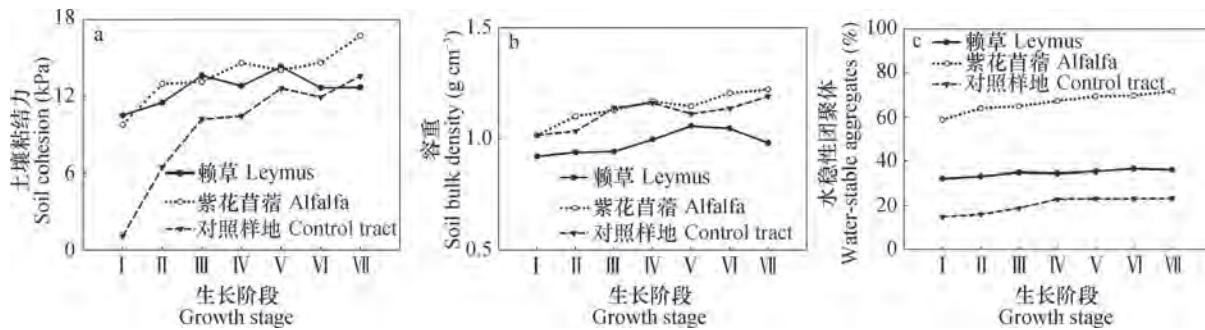


图3 退耕草地土壤属性的季节变化

Fig. 3 Seasonal variation of soil properties of the rehabilitated grasslands

径流冲刷，土壤的分离能力较小。反之，土壤的抗分离能力较弱，土壤的分离能力较大。本研究赖草地的土壤粘结力在整个生长季大致呈先增加后降低的变化趋势（图3a），在10.51~14.33 kPa之间波动，平均值为12.59 kPa，最大值出现在种子散落初期（八月中旬），最小值出现在返青期（四月中旬）。紫花苜蓿从返青期到种子成熟末期（四月中旬至九月底），土壤粘结力呈增加趋势（图3a），在9.78~16.74 kPa之间波动，平均值为13.7 kPa，最大值出现在种子成熟末期（九月底），最小值出现在返青期（四月中旬），变异系数为71.2%，属于中等变异性<sup>[24]</sup>。在草地生长季，受近地表层土壤结皮发育、雨滴打击、草被盖度、根系生长和土壤生物活动等因素的影响，近地表层的土壤结构和属性发生了变化，这可能会影响土壤的粘结程度，从而导致土壤分离能力的变化。土壤容重对土壤分离能力的影响机理与土壤粘结力对土壤分离能力的影响机理相似，这里不再重复。回归分析表明：两种退耕草地的土壤分离能力与粘结力和容重呈指数显著负相关（ $p < 0.05$ ）（图4a、图4b），这一结果与EUROSEM模型<sup>[11]</sup>、Zhang<sup>[8]</sup>、De Baets<sup>[25]</sup>和Knapen<sup>[14]</sup>、Yu等<sup>[15]</sup>的研究结果相同。

土壤水稳性团聚体是表征土壤侵蚀阻力大小的一个重要指标<sup>[26-28]</sup>。本研究两种不同退耕年限草地的土壤水稳性团聚体（ $\geq 0.25\text{mm}$ ）在整个生长季呈增加趋势，赖草地水稳性团聚体增加比较明显，在整个生长季增加了22%左右（图3c）。在草地生长季，土壤水稳性团聚体的增加可能导致土壤分离能力的季节变化，这主要是因为大颗粒的土壤水稳性团聚体的形成有利于增加土壤的抗侵蚀阻力，土壤变得难于被分离。回归分析表明，两种草地的土壤分离能力随着土壤水稳性团聚体的增加呈

指数函数递减（图4c）。

在坡面流侵蚀中，植被根系对土壤分离能力具有显著影响<sup>[24, 29-30]</sup>。根系在生长过程中通过物理作用（如根系网络串联）和化学作用（如根土粘结）等来改变土壤中有机质和水稳性团聚体的含量，从而提高土壤的抗分离能力。本研究两种退耕草地的土壤分离能力与根系密度呈指数负相关（图4d），这一结果与Gyssels<sup>[29]</sup>、De Baets<sup>[25]</sup>、Zhang<sup>[8]</sup>、Yu等<sup>[15]</sup>的研究结果相同，与Burylo等<sup>[31]</sup>在法国南部的研究结果不同。

### 2.3 土壤分离能力季节变化模拟

在野外条件下，坡面流土壤分离能力很难直接测量。但是，它对土壤侵蚀过程模型的建立是非常重要的。因此，精确模拟退耕草地土壤分离能力的季节变化是非常需要的。

本研究采用非线性回归分析方法，利用草地土壤容重、根系密度和水流剪切力能够较好地模拟土壤分离能力的季节变化：

$$D_c = a \cdot \exp(b \cdot [BD + c \cdot RD]) \cdot (\tau - d) \quad (3)$$

式中， $D_c$ 为土壤分离能力（ $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ），BD为土壤容重（ $\text{g cm}^{-3}$ ），RD为根系密度（ $\text{kg m}^{-3}$ ）， $\tau$ 为水流剪切力（Pa）， $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 分别为回归系数。

在这个模拟方程中，土壤容重、根系密度和水流剪切力分别能够解释自变量土壤分离能力73%和81%的变量。总体而言，该模拟方程高估了紫花苜蓿地土壤分离能力的4%，低估了赖草地土壤分离能力的2%。模拟方程的决定系数（ $R^2$ ）分别为0.81和0.73，ME系数分别为0.88和0.85（表2）。相比之下，紫花苜蓿地的模拟效果相对较好，模拟效果见图5。此外，土壤容重和粘结力两者均反映了土壤的硬化过程，但比较而言，容重与土壤分离

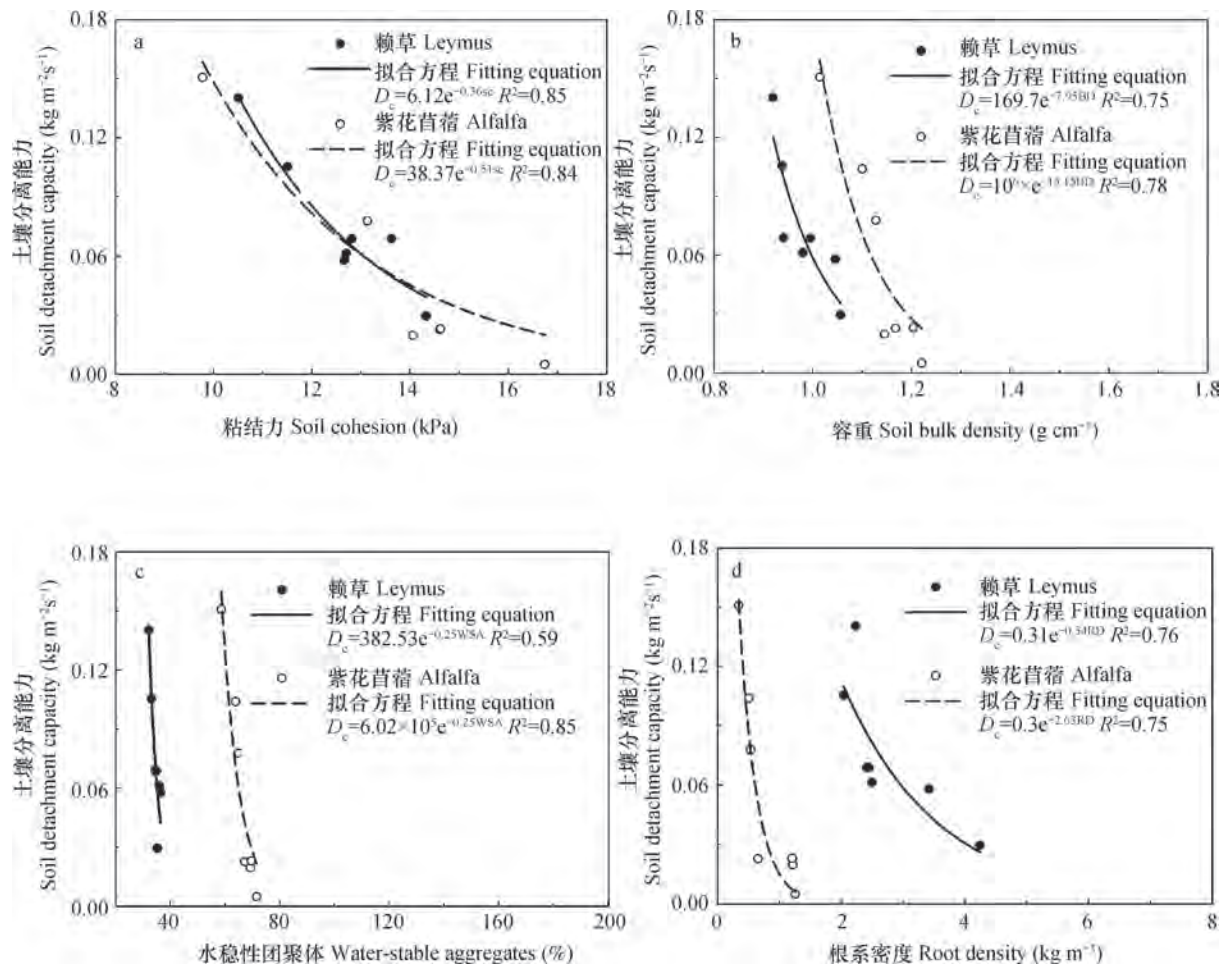


图4 土壤分离能力与土壤属性和根系密度的关系

Fig. 4 Relationships of soil detachment capacity with soil properties and root density

能力的关系更为密切。因此，在土壤分离能力模拟方程中，只考虑了容重对土壤分离能力的影响。由于本研究只考虑了土壤容重、根系密度和水流剪切力对土壤分离能力的影响，未考虑根系结构及其他因素的影响。因此，该模拟方程具有一定的偏差和局限性。在黄土高原地区，基于不同的土壤和气候条件下，进一步研究根系结构对土壤分离能力季节变化的影响是非常需要的。

表2 土壤分离能力模拟方程参数值

Table 2 Parameter values of the simulated equation of soil detachment capacity

草地类型 Grass type	a	b	c	d	R <sup>2</sup>	ME
赖草 Leymus	17.8	-6.486	-0.295	7.202	0.73	0.85
紫花苜蓿 Alfalfa	0.528	-2.477	-2.21	4.185	0.81	0.88

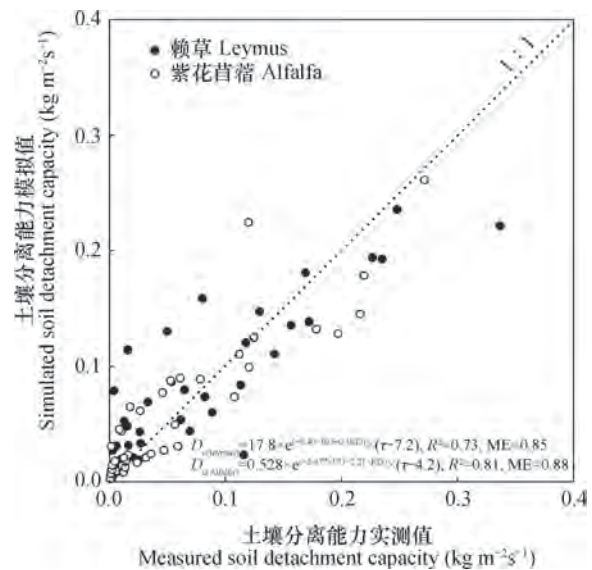


图5 土壤分离能力模拟值与实测值的关系

Fig. 5 Relationship between the simulated and measured soil detachment capacities

### 3 结 论

土壤粘结力、容重和水稳性团聚体等土壤属性的动态变化和草地根系的生长是影响黄土高原地区退耕草地土壤分离能力季节变化的主要因素。两种不同退耕年限草地的土壤分离能力均随草地土壤粘结力、容重、水稳性团聚体和根系密度的增加呈指数函数形式降低。利用两种不同退耕年限草地的土壤容重、根系密度和水流剪切力能够较好地模拟两种草地的土壤分离能力的季节变化。但是, 由于该模拟方程只考虑了土壤容重、根系密度和水流剪切力对土壤分离能力的影响, 未考虑根系结构及其他因素的影响。因此, 该模拟方程具有一定的偏差和局限性。两种不同退耕年限草地在整个生长季的土壤分离能力的平均值分别为对照样地(谷子地)土壤分离能力平均值的6.32%和4.79%, 这说明在黄土高原地区退耕还草有利于该区的水土保持。

#### 参 考 文 献

- [ 1 ] Fu B J. Soil erosion and its control in the Loess Plateau of China. *Soil Use and Management*, 1989, 5 ( 2 ) : 76—82
- [ 2 ] Kheir R B, Cerdan O, Abdallah C. Regional soil erosion risk mapping in Lebanon. *Geomorphology*, 2006, 82 ( 3/4 ) : 347—359
- [ 3 ] Shi H, Shao M A. Soil and water loss from the Loess Plateau in China. *Journal of Arid Environments*, 2000, 45 ( 1 ) : 9—20
- [ 4 ] 唐克丽, 张科利, 雷阿林. 黄土丘陵区退耕上限坡度的研究论证. *科学通报*, 1998, 43 ( 2 ) : 200—203  
Tang K L, Zhang K L, Lei A L. Study and proof of the upper limit slope for cultivation in the hilly region of the Loess Plateau ( In Chinese ). *Science Bulletin*, 1998, 43 ( 2 ) : 200—203
- [ 5 ] Scherer U, Zehe E, Träbing K, et al. Prediction of soil detachment in agricultural loess catchments: Model development and parameterisation. *Catena*, 2012, 90 ( 3 ) : 63—75
- [ 6 ] Nearing M A, Simanton J R, Norton L D, et al. Soil erosion by surface water flow on a stony, semiarid hillslope. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1999, 24 ( 8 ) : 677—686
- [ 7 ] Zhang G H, Liu B Y, Liu G B, et al. Detachment of undisturbed soil by shallow flow. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67 ( 3 ) : 713—719
- [ 8 ] Zhang G H, Tang K M, Zhang X C. Temporal variation in soil detachment under different land uses in the Loess Plateau of China. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2009, 34 ( 9 ) : 1302—1309
- [ 9 ] Nearing M A, West L T, Brown L C. A consolidation model for estimating changes in rill erodibility. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 1988, 31 ( 3 ) : 696—700
- [ 10 ] Ghebreiyessus Y T, Gantzer C J, Alberts E E, et al. Soil erosion by concentration flow: Shear stress and bulk density. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 1994, 37 ( 6 ) : 1791—1797
- [ 11 ] Morgan R P, Quilton J N, Smith R E, et al. The European soil erosion model ( EUROSEM ) : A dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1998, 23 ( 6 ) : 527—544
- [ 12 ] Zheng F L, Huang C H, Norton L D. Vertical hydraulic gradient and run-on water and sediment effects on erosion processes and sediment regimes. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64 ( 1 ) : 4—11
- [ 13 ] Knapen A, Poesen J, Govers G, et al. Resistance of soils to concentrated flow erosion: A review. *Earth Science Reviews*, 2007, 80 ( 1/2 ) : 75—109
- [ 14 ] Knapen A, Poesen J, De Baets S. Seasonal variations in soil erosion resistance during concentrated flow for a loess-derived soil under two contrasting tillage practices. *Soil & Tillage Research*, 2007, 94 ( 2 ) : 425—440
- [ 15 ] Yu Y C, Zhang G H, Geng R, et al. Temporal variation in soil detachment capacity by overland flow under four typical crops in the Loess Plateau of China. *Biosystems Engineering*, 2014, 122 ( 3 ) : 139—148
- [ 16 ] Nachtergaele J, Poesen J. Spatial and temporal variations in resistance of loess-derived soils to ephemeral gully erosion. *European Journal of Soil Science*, 2002, 53 ( 3 ) : 449—463
- [ 17 ] Van Klaveren R W, McCool D K. Erodibility and critical shear of a previously frozen soil. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 1998, 41 ( 5 ) : 1315—1321
- [ 18 ] Bryan R B. Soil erodibility and processes of water erosion on hillslope. *Geomorphology*, 2000, 32 ( 3/4 ) : 385—415
- [ 19 ] Li Y Y, Shao M A. Change of soil physical properties under long-term natural vegetation restoration in the Loess Plateau of China. *Journal of Arid Environments*, 2006, 64 ( 1 ) : 77—96
- [ 20 ] Angers D A, Caron J. Plant-induced changes in soil structure: Processes and feedbacks. *Biogeochemistry*, 1998, 42 ( 1/2 ) : 55—72

- [21] 王军光, 李朝霞, 蔡崇法, 等. 集中水流内红壤分离速率与团聚体特征及抗剪强度定量关系. 土壤学报, 2011, 48 (6): 1133—1140  
Wang J G, Li C X, Cai C F, et al. Quantitative relationship of detachment rate of red soil in concentrated flow with soil aggregate characteristics and soil shear strength (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2011, 48 (6): 1133—1140
- [22] Angulo-Jaramillo R, Vandervaere J P, Roullet S, et al. Field measurement of soil surface hydraulic properties by disc and ring infiltrometers: A review and recent developments. Soil & Tillage Research, 2000, 55 (1/2): 1—29
- [23] Imeson A C, Kwaad F J P M. The response of tilled soils to wetting by rainfall and the dynamic character of soil erodibility//Boardman J, Foster I D L, Dearing J A. Soil erosion on agricultural land. New Jersey: John Wiley and Sons, 1990
- [24] Ghorbani Dashtaki S H, Homae M, Mahdian M H, et al. Site dependence performance of infiltration models. Water Resources Management, 2009, 23 (13): 1573—1650
- [25] De Baets S, Poesen J. Empirical models for predicting the erosion-reducing effects of plant roots during concentrated flow erosion. Geomorphology, 2010, 118 (3/4): 425—432
- [26] Coote D R, Mc Govern M C A, Wall G J, et al. Seasonal variations of erodibility indices based on shear strength and aggregate stability in some Ontario Soils. Canadian Journal of Soil Science, 1988, 68 (2): 405—416
- [27] Govers G, Everaert W, Poesen J, et al. A long-flume study of the dynamic factors affecting the resistance of a loamy soil to concentrated flow erosion. Earth Surface Processes and Landforms, 1990, 15 (4): 313—328
- [28] Barthès B, Roose E. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion, validation at several levels. Catena, 2002, 47 (2): 133—149
- [29] Gyssels G, Poesen J, van Dessel W, et al. Effects of cereal roots on detachment rates of single and doubled rilled topsoils during concentrated flow. European Journal of Soil Science, 2006, 57 (3): 381—391
- [30] Zhang G H, Tang K M, Ren Z P, et al. Impact of grass root mass density on soil detachment capacity by concentrated flow on steep slopes. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 2013, 56 (3): 927—934
- [31] Burylo M, Rey F, Mathys N, et al. Plant root traits affecting the resistance of soils to concentrated flow erosion. Earth Surface Processes and Landforms, 2012, 37 (14): 1463—1470

## Seasonal Variation of Soil Detachment in Fields under “Grain for Green” in Hilly Regions of Loess Plateau of China

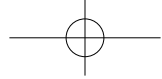
WANG Changyan<sup>1, 2</sup> YU Yaochuang<sup>1, 2†</sup>

(1 College of Geography and Environment, Baoji Arts & Sci. University, Baoji, Shaanxi 721013, China)

(2 Key Laboratory of Disaster Monitoring and Mechanism Simulating of Shaanxi Province, Baoji, Shaanxi 721013, China)

**Abstract** 【Objective】 Soil detachment is the initial stage of soil erosion, providing sediments for subsequent transport and deposition. Yet, it is governed by dynamics of the flow on slope, soil properties, and growth of the vegetation root system. During the season when vegetation grows, the growing root system may cause changes in soil properties and the seasonal variation of soil properties may affect soil detachment processes, which has been reported in just a few of the researches on loess in Europe. Most of the researches in the past used to focus on soil detachment on gentle slopes, leaving mechanisms affecting soil detachment processes on steep slopes still in haze. In hilly regions of the Loess Plateau, the growth of grass roots in rehabilitated grasslands under the practice of “Grain for Green” was found to have caused changes in soil properties of the lands and consequently in soil detachment processes. However, it is still unclear how they are related to each other quantitatively. 【Method】 In this study, an experiment was carried out using water flumes with adjustable bed gradient to investigate changes in soil detachment processes during the plant growing season and their potential affecting factors and especially effects of changes in soil properties and





growth of grass roots on soil detachment capacity in two tracts of rehabilitated grasslands different in “Grain for Green” history. One (Tract A) had been planted with *Leymus secalinus* for 3 years and the other (Tract B) with *Medicago sativa* for 17 years. 【Result】 Results show that soil detachment capacity of the two tracts of grasslands declined significantly during the whole growing season ( $p < 0.05$ ). The mean soil detachment capacity was much higher in Tract A ( $0.076 \pm 0.036 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) than that ( $0.057 \pm 0.055 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) in Tract B. They varied seasonally and were mainly affected by hardening of the soil, formation of water-stable aggregates, and root growth. With increasing soil cohesion, bulk density, content of water-stable aggregates, and grass root density, soil detachment capacity in either soil declined exponentially. Seasonal variation of the soil detachment capacities of two soils could well be simulated with soil bulk density, root density, and flow shear stress ( $R^2 > 0.73$ ,  $ME > 0.85$ ). Dynamic changes of the soil properties, such as soil cohesion, bulk density and water-stable aggregates, and growth of the grass roots are the main factors that affect the seasonal variation of soil detachment capacity in the two tracts of rehabilitated grasslands in hilly regions of the Loess Plateau of China. The mean soil detachment capacity of Tract A and Tract B during the whole plant growing season was only 6.32% and 4.79% of that of the control tract, respectively, which suggests that the practice of “Grain for Green” in hilly regions of the Loess Plateau of China is conducive to soil and water conservation in that area. 【Conclusion】 The findings of this study may serve as theoretic basis and data support in elaborating hydrodynamic mechanisms of the soil detachment processes, evaluating effect of grass roots in fields of “Grain for Green” on soil and water conservation, and rationalizing arrangement of soil and water conservation practices and measures in hilly regions of the Loess Plateau of China.

**Key words** Soil detachment capacity; Seasonal variations; Soil hardening; Root growth; hilly regions of Loess Plateau

(责任编辑：檀满枝)