文章编号:1000-7601(2018)01-0050-06

# 黄土区大豆和马铃薯田土壤临界剪切力季节动态

# 郁耀闯1,2,王长燕1,2

(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: 以黄土区大豆和马铃薯田为研究对象,在6组不同水动力条件下( $\tau$ =5.71~17.18 Pa),借助坡面径流 冲刷试验,结合土壤侵蚀过程 WEPP 模型,探讨了黄土区大豆和马铃薯田土壤临界剪切力( $\tau_c$ )的季节动态变化规律(P < 0.05)。大豆田  $\tau_c$ 表现为降低-升高-降低-升高-降低的季节动态模式,变化范围为1.66~5.37 Pa,平均值为3.34 Pa,最小值(1.66 Pa)出现在播种期,最大值(5.37 Pa)出现在收获期;马铃薯田  $\tau_c$ 表现为升高-降低-升高-降低-升高-降低-升高-降低-升高-降低-升高-降低)出现在播种期,最大值(5.37 Pa)出现在收获期;马铃薯田  $\tau_c$ 表现为升高-降低-升高-降低-升高-降低-升高-降低-升高-降低-升高-降低)出现在播种期,最大值(5.26 Pa)出现在开花期。两种作物田土壤临界剪切力与土壤黏结力、容重、水稳性团聚体和根重密度间呈 正相关关系,其中,土壤容重和根重密度是影响土壤临界剪切力季节动态变化的重要因子。用土壤容重和根重密度能够较好地模拟大豆和马铃薯田土壤临界剪切力的季节动态( $R^2 > 0.50$ , NSE > 0.50)。

关键词: 黄土区;土壤临界剪切力;季节动态;根系生长

中图分类号: S157.1 文献标志码: A

# Seasonal dynamics of soil critical shear stress in soybean and potato farmlands in the loess plateau

YU Yao-chuang<sup>1,2</sup>, WANG Chang-yan<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: In order to provide reference data for establishing the soil erosion process model in the loess plateau. The research take soybean and potato farmlands in the hilly region of the Loess Plateau as a target. The scouring experiments in a laboratory flume to simulate soil detachment by concentrated flow was conducted under the different condition of six flow shear stress ( $\tau = 5.71 \sim 17.18$  Pa). Based on data of soil detachment capacity and flow shear stress, and combined the famous soil erosion process WEPP model, the seasonal dynamics of soil critical shear stress were discussed for soybean and potato farmlands during the crop growing season. Results showed that the seasonal dynamics of soil critical shear stress under soybean and potato farmlands in loess areas increased significantly during the whole growing season (P <(0.05). During the growing season, soil critical shear stress for soybean fluctuated over time with a pattern of double peak curve.  $\tau_c$  values varied from 1.66 Pa to 5.37 Pa, with a mean value of 3.34 Pa. The minimum and maximum values of soil critical shear stress for soybean appeared in the seeding stage and harvesting stage, respectively. Soil critical shear stress for potato displayed similar a pattern of the seasonal variation f.  $\tau_c$  values varied from 1.06 Pa to 5.26 Pa, with a mean value of 3.12 Pa. The minimum and maximum values of soil critical shear stress for potato occurred in the squaring stage and blooming stage, respectively. Positive relations were detected between soil critical shear stress and soil cohesion, bulk density, content of water-stable aggregates, and root weight density. Among them, soil bulk density and root weight density were important factors affecting seasonal dynamic of soil critical shear stress. Seasonal dynamics of soil critical shear stress under soybean and potato farmlands could well be simulated with soil bulk density and root weight density  $(R^2 > 0.50, NSE > 0.50)$ .

Keywords: loess areas; soil critical shear stress; seasonal dynamics; root growth

收稿日期:2016-08-12 修回日期:2017-01-13

基金项目:国家自然科学基金项目(41371497,41171423,41601016);陕西省重点实验室项目(2018JS009);宝鸡文理学院重点科研项目 (ZK2017039,ZK2017040)

作者简介:郁耀闯(1980—),男,河南南阳人,副教授,博士,主要研究方向为土壤侵蚀与环境效应。E-mail:yuyaochuang@126.com。

黄土高原是我国土壤侵蚀最严重的地区之一, 农耕地是该区土壤侵蚀泥沙的重要来源<sup>[1-2]</sup>。严重 的水土流失导致了该区大规模的土地退化和土地生 产力下降<sup>[3-5]</sup>,潜在地威胁着该区的粮食安全<sup>[4,6]</sup>。 土壤临界剪切力(*τ<sub>c</sub>*)是土壤侵蚀过程 WEPP 模型中 表征土壤抵抗侵蚀阻力大小的重要参数<sup>[7-8]</sup>,它随 时间的变化规律是建立土壤侵蚀过程模型的基础。 因此,在黄土高原地区,探讨典型作物大豆和马铃薯 生长季土壤临界剪切力的季节变化规律,对于该区 土壤侵蚀过程模型的建立是很必要的。

土壤侵蚀是指土壤颗粒在坡面径流作用下发生 的分离和输移过程<sup>[9-10]</sup>,它导致了细沟和冲沟的发 育[9]。当坡面径流施加给坡面表层土壤的剪切应力 超过土壤临界剪切力时,细沟和冲沟中的土壤开始 发生分离,土壤侵蚀过程开始<sup>[11]</sup>。τ<sub>c</sub>在该过程中反 映了土壤抵抗细沟股流作用而发生剪切形变破坏的 能力[12],它通常受到土壤颗粒大小、有机质和土壤 水分含量等[12-17]的影响。在不同林地类型条件 下,土壤孔隙度和含水率等土壤属性能够较好地表 征土壤临界剪切力的变化<sup>[16]</sup>。土壤初始含水量往 往通过影响土壤切变强度的大小,进而导致土壤临 界剪切力的变化[17]。在作物生长季内,根系生 长[18-19]、土壤含水量干湿交替的变化、土壤物理结 皮的发育、冻融作用<sup>[20]</sup>和作物残渣的分解<sup>[21-22]</sup>等 是影响土壤临界剪切力季节变化的重要因素。以往 的研究较多地关注了不同土壤类型 τ。值的确 定<sup>[23-25]</sup>和单一土壤属性<sup>[17,26-27]</sup>对  $\tau_c$ 的影响等方 面,对作物生长季内τ。季节变化规律的认识还比较 少,揭示 τ<sub>e</sub> 的季节变化规律有助于土壤侵蚀过程模 型的建立。

在黄土高原作物生长季,受降雨和作物根系生 长等因素的影响,土壤容重和黏结力等属性发生了 明显的季节变化<sup>[2,27]</sup>,这可能会导致土壤临界剪切 力生长季的变化,目前这方面的研究还相对较少。 以黄土区典型作物大豆和马铃薯为研究对象,开展 土壤临界剪切力季节变化研究,揭示 τ<sub>e</sub>季节变化规 律及其影响因素,建立 τ<sub>e</sub>季节变化模拟方程,以期 为建立黄土高原土壤侵蚀过程模型提供数据支撑。

1 材料与方法

## 1.1 研究区概况

研究区位于中国科学院安塞水土保持综合试验 站墩山(109°19′23″E,36°51′30″N),属于典型的黄土 丘陵区,该区气候属暖温带半湿润向半干旱气候过 渡区,年均温 8.8℃,年均降雨量 505.3 mm,且集中 在 6—9 月。该区地貌类型主要有峁状和梁状丘陵, 土壤类型为结构松散的黄绵土和沙黄土,土壤侵蚀 以沟蚀和面蚀为主。该区农作物主要有谷子、大豆、 马铃薯和荞麦等。

# 1.2 土样采集

试验选取黄土区典型农耕地(大豆和马铃薯田) 为采样对象,于2012年4-10月进行土样采集(表 1)。土壤分离样品用环刀(内径 9.8 cm、高 5 cm)采 集,每次取样时,选择同期长势大致相同的5株植 株,用环刀靠近植株根部取原状土[1-2,27],每次取样 设5个重复,每个生长阶段每个样地采集30个原状 土壤样品,两种作物田每个生长阶段共采集 60 个原 状土壤样品,7个生长阶段共采集420个原状土壤 分离样品。土壤初始含水量样品用轻型人力钻采 集,取样深度为土壤表层 5 cm,每次取样设 5 个重 复;土壤容重用环刀(100 cm<sup>2</sup>)采集,取样深度为土 壤表层5cm,每次取样设3个重复;土壤水稳性团聚 体样品用铝制盒采集,取样在土不沾铲,接触不变形 时进行,每次取样设3个重复;作物根系样品用土壤 分离样品采样器采集,采样方法与土壤分离样品采 集方法相同。

表1 大豆和马铃薯生育期

Table 1 Growth	period	of	soybean	and	potate
----------------	--------	----	---------	-----	--------

采样时间	生育期	生育阶段 Growth stages	
(M – d)	大豆 Soybean 马铃薯 Potato		
04 - 30	播种期 Seeding time	_	Ι
05 – 27	幼苗期 Seedling stage	播种期 Seeding time	Ш
06 - 04	—	幼苗期 Seedling stage	Ш
07 – 22	开花期 Blooming stage	现蕾期 Squaring stage	IV
08 - 02	结荚期 Podding stage	开花期 Blooming stage	V
08 – 12	鼓粒期 Pod filling stage	淀粉积累期 Starch accumulation stage	VI
09 – 20	成熟期 Maturing stage	成熟期 Maturing stage	VII
09 - 30	收获期 Harvesting stage	收获期 Harvesting stage	VIII

#### 1.3 测定项目及方法

土壤分离样品用变坡试验水槽系统测定<sup>[1-2,27]</sup>;土壤初始含水量用烘干称重法测定<sup>[28]</sup>; 土壤黏结力用微型黏结力仪测定<sup>[1-2,27]</sup>;土壤容重 用环刀法测定<sup>[29]</sup>;土壤水稳性团聚体用干湿筛法测 定<sup>[30]</sup>;根重密度用水洗、烘干称重法测定<sup>[31]</sup>。

# 1.4 土壤临界剪切力计算

土壤临界剪切力采用下列公式计算[8]:

$$D_c = K_r(\tau - \tau_c) \tag{1}$$

式中, $D_c$ 为土壤分离能力(kg·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>); $K_r$ 为土壤 细沟可蚀性(s·m<sup>-1</sup>); $\tau$ 为水流剪切力(Pa); $\tau_c$ 为土 壤临界剪切力(Pa)。

## 1.5 数据处理

数据分析采用 SPSS 18.0 统计软件进行,季节 动态显著性检验采用 Kendall's W 法(*P* < 0.05),均 值比较采用 LSD 法,作图采用 Excel 软件。

# 2 结果与分析

## 2.1 土壤黏结力和容重季节动态

大豆和马铃薯田土壤容重在整个生长季内分别 呈现出先升高后降低又升高和先降低后升高又降低 的明显的季节动态变化(*P* < 0.05)(图 1a),变化范 围分别介于 1.02~1.16 g·cm<sup>-3</sup>和 0.99~1.21 g·cm<sup>-3</sup>之间,平均值均为 1.1 g·cm<sup>-3</sup>。大豆田土壤 容重最大值出现在开花期,最小值出现在播种期;从 播种期至开花期,大豆田土壤容重呈上升趋势,上升 幅度为 14%;从开花期至成熟期,呈下降趋势,下降 幅度为 7%;成熟期至收获期大豆田土壤容重又略 有上升,上升幅度为 5%。马铃薯田土壤容重最大 值出现在成熟期,最小值出现在幼苗期;从播种期至 幼苗期,呈下降趋势,下降幅度为4%;从幼苗期至 成熟期,呈上升趋势,上升幅度为22%;从成熟期至 收获期,呈下降趋势,下降幅度为14%。

大豆和马铃薯田土壤黏结力在整个生长季内分 别呈现出先升高后降低再升高和先降低后升高又降 低后趋于稳定的明显的季节动态变化(P<0.05) (图 1b),土壤黏结力的值分别在 1.08~14.13 kPa 和 5.04~12.31 kPa 之间变化,平均值分别为9.96 kPa 和 9.76 kPa, 大豆和马铃薯田土壤黏结力的最大 值分别出现在收获期和成熟期,最小值分别出现在 播种期和幼苗期。大豆田土壤黏结力从播种期至鼓 粒期,呈上升趋势,上升幅度为1138%;从鼓粒期至 成熟期,呈下降趋势,下降幅度为10%;成熟期至收 获期又呈上升趋势,上升幅度为17.7%。马铃薯田 土壤黏结力从播种期至幼苗期,呈下降趋势,下降幅 度为33%;从幼苗期至现蕾期,呈上升趋势,上升幅 度为103%;从现蕾期至开花期,呈下降趋势,下降 幅度为9%;从淀粉积累期至收获期,马铃薯田土壤 黏结力基本趋于稳定。

# 2.2 水稳性团聚体季节动态

大豆和马铃薯田土壤水稳性团聚体在整个生长 季内的变化总体呈上升趋势(图 1c),上升幅度分别 为58%和9%(图 1c)。统计分析表明,大豆和马铃 薯田的土壤水稳性团聚体无明显的季节变化规律 (*P*>0.05)。





Fig.1 Seasonal dynamics of soil properties of soybean and potato croplands

#### 2.3 根系密度季节动态

在大豆和马铃薯生长季,2种作物根系呈先增加 后期略有降低的变化趋势(图 1d)。从播种期至收获 期,2种作物根系密度增幅分别为8.7%~108.8%和 4.0%~182.1%,平均增加71.4%和98.5%。

## 2.4 土壤临界剪切力季节动态

大豆和马铃薯田土壤临界剪切力在整个生长季 内均呈现出明显上升的季节动态变化(P<0.05) (图 2)。大豆田土壤临界剪切力表现为先降低后升 高再降低又升高再降低的季节动态,τ。的变化范围 为1.66~5.37 Pa,平均值为3.34 Pa。马铃薯田土 壤临界剪切力表现为先升高后降低再升高又降低再 升高又降低的季节动态(图 2),  $\tau_{0}$ 的变化范围为 1.06~5.26 Pa,平均值为3.12 Pa。具体来讲,在播 种期,受农事活动影响,大豆和马铃薯田土壤较为松 散,抗分离能力较差,容易被径流冲刷,此时,两种作 物田土壤临界剪切力值较小。大豆田 τ。从播种期 至幼苗期,呈下降趋势,下降幅度为24%;从幼苗期 至开花期,τ。呈上升趋势,上升幅度为148%;从开 花期至结荚期,大豆田τ。呈下降趋势,下降幅度为 22%。此后,大豆田τ。又有所上升,在成熟期达到 最大值 5.37 Pa, 在收获期又略有下降, 下降幅度为 40%。马铃薯田τ。从播种期至幼苗期呈上升趋势, 上升幅度为 65%;从幼苗期至现蕾期,τ。呈下降趋 势,下降幅度为61%;从现蕾期至开花期,马铃薯田

 $\tau_c$ 增加幅度较大,增幅为 396%;  $\tau_c$  在开花期达到最 大值(5.26 Pa),开花期过后,马铃薯田  $\tau_c$  又有所下 降,下降幅度为 44%;马铃薯田  $\tau_c$  在成熟期又有所 上升,上升幅度为 57%;从成熟期至收获期,  $\tau_c$  呈下 降趋势,下降幅度为 25%。总体来看,大豆和马铃 薯田  $\tau_c$ 的季节动态变化明显。



Fig.2 Seasonal dynamics of soil critical shear stress in soybean and potato croplands

#### 2.5 土壤临界剪切力季节动态影响因素

Pearson 相关分析表明,土壤黏结力、容重、水稳 性团聚体及作物根系是影响大豆和马铃薯田土壤临 界剪切力季节动态变化的重要因子。由表2可以看 出,大豆和马铃薯田土壤临界剪切力与土壤黏结力、 容重、水稳性团聚体和根重密度间呈正相关关系。

类型 Type	土壤黏结力 Soil cohesion /kPa	土壤容重 Soil bulk density /(g•cm <sup>-3</sup> )	土壤初始含水量 Soil initial moisture content/%	土壤水稳性团聚体 Soil water-stable aggregates/%	根重密度 Root weight density ∕(kg•m <sup>-3</sup> )
$ au_{c ext{Soybean}}$	0.603	0.474	- 0.037	0.735 * *	0.452
$ au_{c ext{Potato}}$	0.315	0.666	-0.186	0.728*	0.701*

表 2 土壤临界剪切力与影响因子的相关系数

Table	2	Correlation	coefficients	between	soil	critical	shear	stress	and	impact	facto
-------	---	-------------	--------------	---------	------	----------	-------	--------	-----	--------	-------

注:\*表示相关显著(P<0.05),\*\*表示相关极显著(P<0.01)。

Note: \* and \* \* indicate significant correlation at 0.05 and 0.01 levels, respectively.

## 2.6 土壤临界剪切力季节动态变化模拟

土壤临界剪切力(τ<sub>c</sub>)是土壤侵蚀过程 WEPP 模型中的重要参数。在野外条件下,τ<sub>c</sub>通常是难以直接获取的,但是,它随时间变化的规律对于建立土壤 侵蚀过程模型是非常关键的。因此,在土壤侵蚀较 为严重的黄土高原地区,利用土壤属性动态变化来 模拟土壤临界剪切力的季节动态是非常需要的。

在大豆和马铃薯生长季内,受多种因素交互影响,τ<sub>e</sub>季节动态变化较为复杂。基于对τ<sub>e</sub>有重要影响的各相关因子,利用非线性回归方法,建立了黄土 区大豆和马铃薯田τ<sub>e</sub>季节动态模拟方程:

$$\tau_c = a \times \exp\left(b \times \int BD + c \int RD\right)$$
(2)

式中, $\tau_c$ 为土壤临界剪切力(Pa); *BD*为土壤容重(g · cm<sup>-3</sup>); *RD*为根重密度(kg·m<sup>-3</sup>); a、b和 c 为回归 参数。

在模拟方程(2)中,土壤容重和根重密度能够解释自变量 $\tau_c$ 50%的变量(表 3),这说明土壤容重和根重密度是影响 $\tau_c$ 季节动态变化的重要因子。大豆和马铃薯田模拟方程的模型有效系数分别为0.48和0.49。在大豆生长季幼苗期、结荚期、鼓粒期和收获期,模拟方程(2)分别高估了大豆田 $\tau_c$ 的45.6%、13.7%、18.6%和20%;在开花期和成熟期模拟方程(2)分别低估了大豆田 $\tau_c$ 的31.7%和22.3%。在马铃薯生长季播种期、现蕾期、淀粉沉积

期和成熟期,模拟方程(2)分别高估了马铃薯田  $\tau_c$ 的 33.5%、138.4%、25.8%和4.1%;在幼苗期、开花期和收获期,模拟方程(2)分别低估了马铃薯田  $\tau_c$ 的 27.2%、29.2%和 27.4%,两种作物田  $\tau_c$ 季节动态变化模拟具有一定偏差,这可能是由于作物生长季内土壤物理结皮发育和根系结构等不同所致。

#### 表 3 土壤临界剪切力模拟方程参数

Table 3	Parameter values of the simulated equation
	of soil critical shear stress

作物类型 Crop type	模拟方程 Simulated equation					
	$\tau_c = a \times \exp\left(b \times \int BD + c \times \int RD\right)$					
	a	b	с	$R^2$	NSE	
大豆 Soybean	0.59	1.29	2.72	0.48	0.48	
马铃薯 Potato	0.16	2.54	2.22	0.49	0.49	

# 3 讨 论

在土壤侵蚀过程 WEPP 模型中,土壤临界剪切 力( $\tau_c$ )是表征土壤侵蚀阻力大小的重要参数,探讨  $\tau_c$ 随时间变化的规律可为建立土壤侵蚀过程模型 提供数据支撑。目前, $\tau_c$ 随时间变化的少量研究仅 集中在欧洲比利时的黄土地带。Knapen 等<sup>[32]</sup>认为, 在欧洲比利时黄土地带冬小麦作物生长季, $\tau_c$ 受多 种因素影响,季节变化过程较为复杂。在我国黄土 高原典型农耕地大豆和马铃薯生长季,发现  $\tau_c$ 具有 明显的季节动态(P < 0.05),这可能与土壤属性的 季节变化和作物根系的生长有关。

Pearson 相关分析表明,  $\tau_c$ 与土壤容重间呈正相 关关系(表 2),这可能与土壤容重的季节变化改变 了土壤的紧实程度有关。一般情况下,土壤容重较 大时,土壤较为紧实,此时,近地表层土壤若受到径 流冲刷,则需要经历较长时间的蓄能后,才能够被径 流分离,土壤临界剪切力较大;反之,土壤临界剪切 力较小。唐科明<sup>[33]</sup>研究认为土壤临界剪切力与土 壤容重间没有明显函数关系,这可能是由于植被类 型和土壤属性等不同所致。例如,本研究所使用的 植被类型为直根系作物大豆和马铃薯,这与唐科明 所使用的须根系植被无芒雀麦和柳枝稷是不同的。 土壤黏结力对  $\tau_c$ 的影响与土壤容重对 $\tau_c$ 的影响类 似,这里不再讨论。

本研究中,土壤临界剪切力与土壤初始含水量 间没有明显函数关系(表2),这一结果与 Singh 等<sup>[17]</sup> 研究结果土壤中的初始含水量在达到临界值(31%) 前与 τ<sub>c</sub> 间呈正相关关系不同。以往的研究表明,土 壤初 始 含 水 量 是 影 响 坡 面 水 文 过 程 的 重 要 因 素<sup>[34-35]</sup>,它对土壤侵蚀预报具有重要影响。目前 研究认为,土壤初始含水量对土壤侵蚀影响的机制 较为复杂<sup>[36]</sup>,存在着崩解和微观裂隙发育两种交互作用<sup>[37]</sup>。在作物生长季内,土壤初始含水量受降雨和作物生长等因素影响,出现了干湿交替的变化,这可能会影响近地表层土壤崩解和微裂隙的发育过程,从而导致土壤颗粒内部的破坏,进而影响土壤临界剪切力季节动态的变化,但本研究中二者没有明显函数关系,这说明土壤临界剪切力与土壤初始含水量间关系较为复杂,土壤初始含水量对<sub>c</sub>的影响机制有待于进一步研究。

土壤临界剪切力与水稳性团聚体间呈显著正相 关关系(表 2)。水稳性团聚体作为土壤中具较强黏 结作用的土壤颗粒,在土壤侵蚀过程中会通过崩解 和分散等水土交互作用,使土壤表面结构发生变化, 为土壤侵蚀提供物质来源。Amezketa<sup>[38]</sup>认为植被根 系在生长过程中通过捆绑和粘结等作用,促进了大 颗粒土壤水稳性团聚体的形成<sup>[39]</sup>,这有助于增加土 壤的抗分离能力,从而导致土壤临界剪切力的增加, 本研究结果也证明了这一观点。

土壤临界剪切力与根重密度间呈正相关关系 (表2),这可能与作物根系在生长过程中,通过物 理、化学以及生物等作用改变了土壤的属性结构有 关<sup>[40-41]</sup>。在植被生长季,根系生长导致了土壤中 土、水运移机械屏障的形成,这有助于土壤机械加固 作用<sup>[42-43]</sup>和土壤稳定性的增强,从而导致土壤临 界剪切力增加。

# 4 结 论

 1) 在黄土区大豆和马铃薯生长季,两种作物田 的土壤临界剪切力均表现出明显上升的季节动态变 化规律(P < 0.05)。</li>

2)大豆和马铃薯田土壤临界剪切力与土壤黏 结力、水稳性团聚体和根重密度间呈正相关关系,其 中,土壤容重和根重密度是影响两种作物田土壤临 界剪切力季节动态变化的重要因子。

 3)用土壤容重和根重密度能够较好地模拟大 豆和马铃薯田土壤临界剪切力的季节动态。

#### 参考文献:

- [1] Zhang G H, Liu G B, Tang K M, et al. Flow detachment of soils under different land uses in the Loess Plateau of China[J]. Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2008,51(3):883-890.
- [2] Zhang G H, Tang M K, Zhang X C. Temporal variation in soil detachment under different land uses in the Loess Plateau of China[J]. Earth Surface Processes & Landforms, 2009, 34(9):1302-1309.
- [3] Zhang X, Quine T A, Walling D E. Soil erosion rates on sloping cultivated land on the Loess Plateau near Ansai, Shaanxi Province, China: An investigation using 137 Cs and rill measurements[J]. Hydrological Processes, 1998,12(1):171-189.

- [4] Shi H, Shao M A. Soil and water loss from the Loess Plateau in China[J]. Journal of Arid Environments, 2000,45(1):9-20.
- [5] Zheng F L. Effects of accelerated soil erosion on soil nutrient loss after deforestation on the Loess Plateau[J]. Pedosphere, 2005, 15(6):707-715.
- [6] Fu B J. Soil erosion and its control in the Loess Plateau of China[J]. Soil Use & Management, 1989,5(2):76-82.
- [7] Hirschi M C, Barfield B J. KYERMO—A physically based research erosion model. Part I. Model development [J]. Transactions of the American Society of Agricultural Biological Engineers, 1988, 31(3): 804-813.
- [8] Nearing M A, Foster G R, Lane L J, et al. A process-based soil erosion model for USDA – Water Erosion Prediction Project technology [J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 1989,32(5):1587-1593.
- [9] Govers G, Everaert W, Poesen J, et al. A long flume study of the dynamic factors affecting the resistance of loamy soil to concentrated flow erosion [J]. Earth Surface Processes & Landforms, 1990, 15(4):313-328.
- [10] Flanagan D. Erosion Encyclopedia of Soil Science[M]. New York: Marcel Dekker, 2002:395-398.
- [11] Toy J T, Foster G R, Renard K G. Soil Erosion: Processes, Prediction, Measurement and Control[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- [12] Gilley J E, Elliot W J, Laflen J M, et al. Critical shear stress and critical flow rates for initiation of rilling[J]. Journal of Hydrology, 1993,142(1-4):251-271.
- [13] Smerdon E T, Beasley R P. Critical tractive forces in cohesive soils
  [J]. Agriculture Engineer, 1961,42(1):26-29.
- [14] Neill C R. Guide to Bridge Hydraulics[M]. Toronto, Canada: University of Toronto Press, 1973.
- [15] Elliott W, Liebenow A, Laflen J, et al. A compendium of soil erodibility data from WEPP cropland soil field erodibility experiments 1987 and 1988[R]. Lafayette, Indiana: Ohio State University and USDA Agricultural Research Service National Soil Erosion Research Laboratory Report, 1989.
- [16] 李云鹏,王云琦,王玉杰,等.重庆缙云山不同林地土壤剪切破 坏特性及影响因素研究[J].土壤通报,2013,44(5):1074-1080.
- [17] Singh H V, Thompson A M. Effect of antecedent soil moisture content on soil critical shear stress in agricultural watersheds[J]. Geoderma, 2016, (262):165-173.
- [18] Mamo M, Bubenzer G D. Detachment rate, soil erodibility and soil strength as influenced by living plant roots part I: Laboratory study [J]. Transactions of the ASAE, 2001,44(5):1167-1174.
- [19] Mamo M, Bubenzer G D. Detachment rate, soil erodibility and soil strength as influenced by living plant roots part []: Field study[J]. Transactions of the ASAE, 2001,44(5):1175-1181.
- [20] Van Klaveren R W, McCool D K. Erodibility and critical shear of a previously frozen soil[J]. Transactions of the ASABE, 1998,41(5): 1315-1321.
- [21] Brown L C, Foster G R, Beasley D B. Rill erosion as affected by incorporated crop residue and seasonal consolidation [J]. Transactions of the ASABE 1989, 32(6):1967-1978.
- [22] Brown L C, West L T, Beasley D B, et al. Rill erosion one year after incorporation of crop residue [J]. Transactions of the ASABE, 1990, 33(5):1531-1540.
- [23] 雷俊山,杨勤科,郑粉莉.黄土坡面细沟侵蚀试验研究及土壤 抗冲性评价[J].水土保持通报,2004,24(2):1-4.

- [24] 张光辉,刘宝元,何小武.黄土区原状土壤分离过程的水动力 学机理研究[J].水土保持学报,2005,19(4):48-52.
- [25] 丁文峰.紫色土和红壤坡面径流分离速度与水动力学参数关系研究[J].泥沙研究,2010,(6):16-22.
- [26] Léonard J, Richard G. Estimation of runoff critical shear stress for soil erosion from soil shear strength[J]. Catena, 2004,57(3):233-249.
- [27] 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[J]. Biosystems Engineering, 2014, 122(3): 139-148.
- [28] 杨文治,邵明安.黄土高原土壤水分研究[M].北京:科学出版 社,2002.
- [29] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000.
- [30] Otu Onofiok, Michael J. Singer. Scanning electron microscope studies of surface crusts formed by simulated rainfall[J]. Soil Science Society of America Journal, 1984,48(5):1137-1143.
- [31] Zhou Z C, Shangguan Z P. The effects of ryegrass roots and shoots on loess erosion under simulated rainfall[J]. Catena, 2007,70(3):350-355.
- [32] Knapen A, Poesen J, Baets S D. Seasonal variations in soil erosion resistance during concentrated flow for a loess-derived soil under two contrasting tillage practices [J]. Soil & Tillage Research, 2007, 94 (2):425-440.
- [33] 唐科明.草地土壤侵蚀季节变化及其影响机制[D].北京:北 京师范大学,2012.
- [34] Norris J E. Root reinforcement by hawthorn and oak roots on a highway cut – slope in southern England[J]. Plant & Soil, 2005, 278(1 – 2):43-53.
- [35] Gyssels G, Poesen J, Liu G, et al. Effects of cereal roots on detachment rates of single – and double – drilled topsoils during concentrated flow[J]. European Journal of Soil Science, 2006,57(3):381-391.
- [36] Wynn T, Mostaghimi S. The effects of vegetation and soil type on streambank erosion, southwestern Virginia, USA [J]. Journal of American Water Resources Association, 2006,42(1):69-82.
- $\label{eq:gamma} \begin{array}{l} [37] & Tengbeh \mbox{ G } T. \mbox{ The effect of grass roots on shear strength variations} \\ & \mbox{ with moisture content} [J]. \mbox{ Soil Technology, } 1993, 6(3): 287-295 \,. \end{array}$
- [38] Amezketa E. Soil aggregate stability: a review[J]. Journal of Sustainable Agriculture, 1999, 14(2):83-151.
- [39] Wang B, Zhang G H, Zhang X C, et al. Effects of near soil surface characteristics on soil detachment by overland flow in a natural succession grassland[J]. Soil Science Society of America Journal, 2014, 78(59):589-597.
- [40] Radatz T F, Thompson A M, Madison F W. Soil moisture and rainfall intensity thresholds for runoff generation in southwestern Wisconsin agricultural watersheds [J]. Hydrological Processes, 2013, 27 (27):3521-3534.
- [41] 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(2):194-201.
- [42] Greenway D R. Vegetation and slope stability[C]//Anderson M G, Richards K S. Slope Stability: Geotechnical Engineering and Geomorphology. Wiley: Chichester, 1987;187-230.
- [43] Waldron L J, Dakessian S. Soil reinforcement by roots: calculation of increased soil shear resistance from root properties[J]. Soil Science, 1981,132(6):427-435.