

黄土丘陵区须根系作物地土壤分离季节变化研究^①

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: 采用变坡试验水槽的试验方法, 研究了黄土丘陵区典型须根系作物玉米和谷子在生长季土壤分离能力的季节变化及潜在影响因素。结果表明: 在作物生长季, 须根系作物玉米地和谷子地的土壤分离能力具有明显的季节变化($P < 0.05$), 并表现出了相似的季节变化模式; 两种作物地土壤分离能力的季节变化主要受到农事活动、土壤硬化、水稳性团聚体和作物根系生长的影响; 两种作物地的土壤分离能力可以用土壤粘结力、作物根系密度和水流剪切力很好地拟合($R^2 > 0.75$, $NSE > 0.74$)。

关键词: 黄土丘陵区; 土壤分离能力; 季节变化; 土壤硬化; 根系生长

中图分类号: S147

黄土丘陵区土壤结构疏松, 植被覆盖率较低, 降水多为短历时暴雨, 主要集中于 6—9 月, 水土流失较为严重, 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^[1-4]。在黄土高原地区, 农耕地是黄河泥沙的主要来源^[5-6]。黄土高原现有耕地 $1.46 \times 10^5 \text{ km}^2$, 分别为该区总面积和水土流失面积的 22.5% 和 30.9%^[7]。随着黄土高原地区人口的增多, 该区农耕地的水土保持问题引起了学术界的广泛关注。土壤分离是土壤颗粒在侵蚀动力的搬运作用下离开土壤母质的过程^[6], 它是土壤侵蚀过程的起始阶段, 决定着泥沙输移和泥沙沉积过程量的多少。因此, 研究黄土高原地区典型农耕地土壤分离过程问题, 对于该区水土流失的控制具有重要意义。

在坡面流侵蚀中, 土壤分离能力通常被定义为, 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。坡面流土壤侵蚀发生在土壤和坡面水流的界面上。因此, 它受到土壤属性和坡面水动力条件的影响。水动力条件(如流速、坡度、水深、摩擦力和输沙量等)^[6,8-9]、土壤属性(如土壤初始含水量, 土壤粘粒含量、体积质量、水稳性团聚体含量、土壤切变强度和有机质的含量等)^[10-14]、植被根系^[6,15-17]、农事活动^[6]等都是影响土壤分离过程变化的重要因素。在黄土高原地区, 受气候变化、农

事活动、作物根系生长等多种因素的综合影响, 农耕地土壤属性具有明显的季节波动^[6], 这可能导致土壤分离过程的季节变化。然而, 目前对于黄土高原地区土壤分离过程季节变化及其影响因素的研究还相对较少。

以黄土丘陵区典型农耕地须根系作物玉米和谷子为研究对象, 采用变坡水槽的试验方法, 系统研究了黄土丘陵区典型农耕地玉米和谷子地土壤分离能力的季节变化, 同时分析土壤粘结力、体积质量、水稳性团聚体和作物根系密度等的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 研究区域概况

试验地点位于中国科学院安塞水土保持综合试验站墩山 ($109^\circ 19' 23'' \text{E}$, $36^\circ 51' 30'' \text{N}$), 该区水土流失严重, 属于黄土丘陵沟壑区。气候类型属于温带大陆性气候, 年均温 8.8°C , 年降水量的变化范围为 297 ~ 645 mm, 6—9 月的降水占全年的 70%, 多为短历时降雨, 通常导致严重的土壤侵蚀。海拔 1 068 ~ 1 309 m, 土壤类型以黄绵土为主。

如图 1 所示, 在试验期内, 研究区的累积降水量为 472.5 mm, 主要集中在 7—9 月, 这 3 个月的降水量占到试验期降水量的 69.3%。4 月中旬后, 研究区

基金项目: 国家自然科学基金项目(41371497, 41171423)、陕西省教育厅重点实验室项目(2009JS071)、陕西省教育厅项目(14JZ013)、宝鸡文理学院重点科研项目(ZK15052, ZK1054)和陕西省自然地理学重点学科项目资助。

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

的日平均气温稳定在 10℃ 以上, 与多年平均状况相比, 相对偏低。

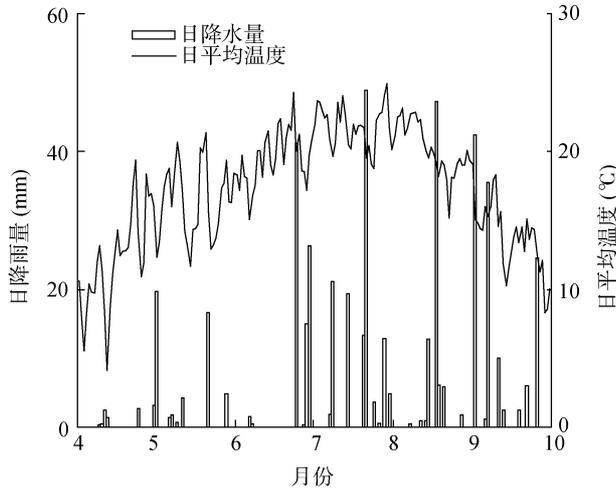


图 1 试验区气温与降水量季节变化

Fig. 1 Changes of temperature and rainfall in the experimental zone

1.2 作物选择

选取黄土丘陵区典型须根系作物玉米和谷子作为研究对象。试验样地在 2012 年 4 月上旬采用大板

犁(黄土高原传统的耕作方式)深翻 15~20 cm, 人工移去土壤中的植物残体。将整个试验样地分成长 20 m, 宽 14 m 左右的两个试验小区。玉米和谷子均采用播种机种植, 行距均为 50 cm, 株距分别为 35 cm 和 8 cm, 种植时间均为 4 月 30 日, 玉米地和谷子地分别在 6 月 1 日和 7 月 1 日各锄草一次, 锄草深度小于 5 cm, 玉米和谷子均在 9 月 28 日收获, 玉米采用人工锄收获, 谷子采用镰刀收获。需要说明的是, 本文的季节指的是玉米和谷子的一个生长期。

1.3 样品采集

试验开始时分别在玉米地和谷子地采集原状土壤样品。采样时尽量选取地表较为平整的土壤表面用内径 9.8 cm、高 5 cm 的环刀, 靠近植株根部取原状土^[6,18]。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, 土壤分离能力试验开始于 2012 年 4 月上旬, 根据各作物生育期的变化特征, 分别选取关键的生育期开展试验(表 1), 在玉米地和谷子地均进行了 12 次土壤分离能力试验, 共采集土壤分离样品 720 个。

表 1 作物生育期时间特征
Table 1 Information of plant growing period

作物	4 月 10 日	4 月 30 日	5 月 27 日	6 月 1 日	6 月 30 日	7 月 22 日	9 月 4 日	9 月 24 日	9 月 28 日
玉米	种植前	播种期	幼苗期	五叶期	拔节期	抽雄吐丝期	成熟期	-	收获期
谷子	种植前	播种期	幼苗期	-	拔节期	抽穗灌浆期	籽粒形成期	成熟期	收获期

1.4 试验方法

土壤分离试验采用变坡水槽系统测定, 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°~60°。试验前将在试验样地采集的地表土风干, 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试验样地地表一致。试验设计 3 个坡度和 4 个流量组合, 分别为 10°、1.0 L/s, 10°、2.0 L/s, 15°、2.0 L/s, 25°、1.5 L/s, 25°、2.0 L/s, 25°、2.5 L/s, 每组坡度和流量组合的冲刷试验做 5 次重复, 分别对应每个采样点的 5 个样品。用染色法测定水流表面最大流速, 乘以修正系数 0.8 得到平均流速, 径流水深采用流量、流速和槽宽计算^[6,18-19]。水流剪切力计算公式为^[6,18-19]:

$$\tau = \rho gHS \quad (1)$$

式中: τ 为水流剪切力 (Pa), ρ 为水的密度 (kg/m^3), g 为重力加速度 (m/s^2), H 为水深 (m), S 为水槽坡度 (m/m)。

土壤分离能力计算公式为^[1,19-20]:

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

式中: D_c 为土壤分离能力 ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$), 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 (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℃ 下烘至恒重并称重。需要说明的是, 每次冲刷试验时, 当采样器内的土壤样品被冲刷至大约 2 cm 深度时^[5-6, 21-22], 结束该次冲刷试验。

粘聚力采用微型粘聚力仪测定 (Durham Geotechnical Enterprises, Inc., UK), 每次测定 12 个重复。土壤体质量用环刀 (100 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。根系采用水洗法测定, 每次测定 3 个重复。

1.5 统计分析方法

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 两种作物地土壤分离能力季节变化特征

在黄土丘陵区典型须根系作物玉米和谷子生长

季(4月中旬至9月底),两种作物地的土壤分离能力均呈现出明显的先升高后降低再升高的相似的季节变化模式 ($P<0.05$)(图 2)。玉米地的平均土壤分离能力最大 ($1.37 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$),其次是谷子地($1.15 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$)。在种植期前(4月上旬),两种作物地的土壤分离能力都相对较小。4月底受种植活动的影响,玉米地和谷子地的土壤分离能力明显从 $1.21 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 增加到 $5.04 \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ($P<0.05$),并达到了作物生长季中的最大值。4月下旬以后,随着雨滴的打击和土壤自身沉降等作用的影响,两种作物地的土壤体积质量和粘结力呈增加趋势,土壤固结力逐渐增强,玉米地和谷子地的土壤分离能力呈现下降趋势(图 2)。6月份以后,黄土高原开始进入雨季,玉米经历了五叶期、拔节期、

抽雄吐丝期和成熟期等 4 个生长阶段,谷子经历了幼苗期、拔节期、抽穗灌浆期、籽粒形成期和成熟期等 5 个生长阶段,在这些不同的生长阶段中,随着玉米和谷子作物根系的生长、盖度的增加,土壤硬化过程进一步增强,两种作物地的土壤分离能力呈现明显下降趋势 ($P<0.05$)(图 2),下降幅度分别为 975% 和 767%,玉米地和谷子地的土壤分离能力均在成熟期(9月下旬)达到最小值。9月底,玉米和谷子进入收获期,玉米采用人工锄收获,谷子采用镰刀收获,收获使两种作物地的土壤分离能力又有所增加,增幅分别为 453% 和 194%,其中,玉米地的收获方式使玉米地土壤分离能力的增加值在统计学上达到显著性差异水平 ($P<0.01$)。

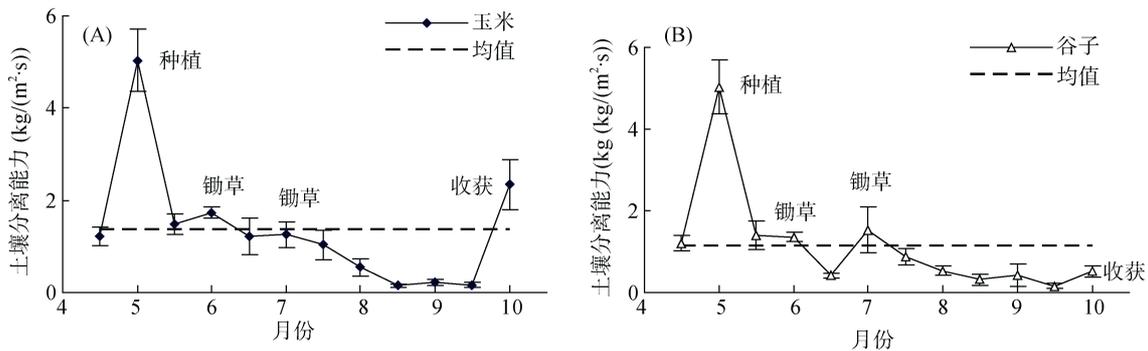


图 2 玉米地和谷子地土壤分离能力季节变化

Fig. 2 Seasonal changes of soil detachment capacities in corn and millet fields

本研究中,玉米地土壤分离能力在整个生长季的平均值是 Mamo 等^[15]研究结果的 856 倍左右,是 Zhang 等^[6]黄土高原农耕地研究结果的 6.5 倍,这可能与试验测量方法、土壤属性和农事活动方式等因素有关。本研究与 Zhang 等^[6]的研究结果存在不同的原因可能是由于研究期的气候条件、作物轮作、干湿循环、作物根系生长等因素的不同所造成。例如,本研究中,试验期内 7、8 月份降水量分别比 Zhang 等^[6]2006 年试验期 7、8 月份降水量少 28% 和 25%。在黄土高原地区,7、8 月份是作物生长的关键时期,该时期降水的多少对作物的生长具有重要影响,也会影响到作物根系密度的大小,这可能是导致 Zhang 等^[6]研究结果中的根系密度是本研究中测量的根系密度 4.7~49.8 倍的主要原因。土壤分离能力随根系密度增加呈指数函数降低^[6,16,18-19]。此外,本试验中的单宽流量是 Zhang 等^[6]研究单宽流量($0.0028 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$)的 1~2.5 倍。本试验中所使用的最大水流剪切力是 Zhang 等^[6]研究中水流剪切力(11.63 Pa)的 1.48 倍。因此,本研究中测定的土壤分离能力结果比 Zhang 等^[6]测得的结果相对偏大。本

研究中须根系作物玉米和谷子的根系密度在整个生长季的平均值具有统计学显著性差异,但两种作物地的土壤分离能力季节变化的平均值之间并未达到统计学显著性差异水平 ($P>0.05$),Mamo 等^[15]和 Ghidey 等^[20]的研究结果也证明了这一结论,这说明土壤分离能力的减小并不完全是根系的作用,也可能与农事活动、土壤物理结皮的发育和土体沉降等因素有关。

2.2 土壤分离能力季节变化的潜在影响因素

坡面流水动力条件、土壤属性和植被根系的生长都是土壤分离过程的重要影响因素。降雨强度、土壤属性季节变化和植被根系生长等都可能引起土壤分离能力的动态变化。本研究中,由于不同试验周期水动力条件相同。因此,不考虑水动力条件对土壤分离过程季节变化的影响,只讨论土壤属性和作物根系动态变化对土壤分离能力季节变化的影响。本研究中,土壤粘结力、体积质量和水稳性团聚体等土壤属性具有明显的季节变化(图 3),斯皮尔曼相关分析表明,两种作物地的土壤分离能力与土壤属性和作物根系密度关系密切(表 2)。

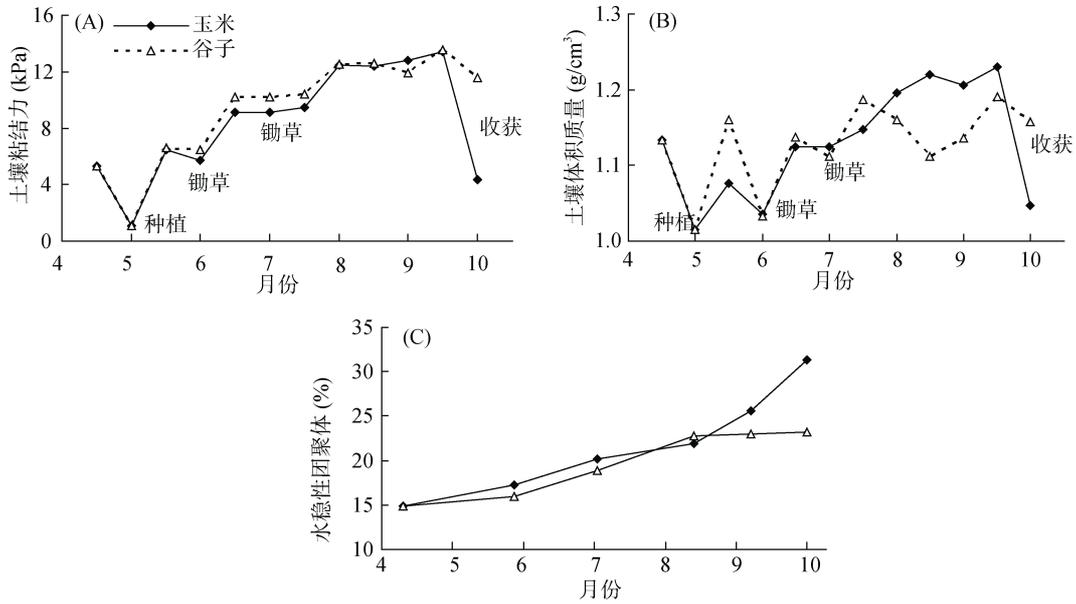


图 3 土壤属性季节变化

Fig. 3 Seasonal changes of soil properties in crop fields

表 2 土壤分离能力与土壤属性和根系密度关系矩阵

Table 2 Correlation matrixes of soil detachment capacities with soil properties and root densities

作物	参数	D_c	SC	BD	WSA	RD
玉米	D_c (kg/(m ² ·s))	1.000				
	SC (kPa)	-0.886**	1.000			
	BD (g/cm ³)	-0.984**	0.895**	1.000		
	WSA (%)	-0.943**	0.870*	0.058	1.000	
	RD (kg/m ³)	-0.857*	0.955**	0.450	0.943**	1.000
谷子	D_c (kg/(m ² ·s))	1.000				
	SC (kPa)	-0.837**	1.000			
	BD (g/cm ³)	-0.497	0.588*	1.000		
	WSA (%)	-0.886*	0.870*	0.086	1.000	
	RD (kg/m ³)	-0.893**	0.901**	0.393	0.943**	1.000

注： D_c 、 SC 、 BD 、 WSA 和 RD 分别代表土壤分离能力、粘结力、体积质量、水稳性团聚体和根系密度。**表示达到 $P<0.01$ 显著水平，*表示达到 $P<0.05$ 显著水平。

土壤粘结力和体积质量的动态变化显著影响着土壤分离能力的季节变化^[6]，土壤粘结力和体积质量的增加，会使土壤变得更为紧实，从而难于被分离^[6]，进而导致土壤分离能力降低。本研究中，玉米地和谷子地的土壤粘结力和体积质量在整个生长季呈增加趋势(图 3A、3B)，土壤分离能力随土壤粘结力和体积质量的增加呈指数函数降低(图 4A、4B)，这一研究结果与 Morgan 等^[12]及 De Baets 和 Tang^[17]的研究结果相同。斯皮尔曼相关分析表明，玉米地和谷子地的土壤分离能力与土壤粘结力和土壤体积质量间呈显著负相关(表 2)。

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^[23-25]。本研究中，玉米地和谷子地的土壤水稳性团聚体在整个生长季呈增加趋势(图 3C)，

玉米地增加尤其明显，在整个生长季增加了 111%左右，谷子地在整个生长季增加了 59%，土壤分离能力随着土壤水稳性团聚体的增加呈指数函数降低(图 4C)，这说明在作物生长季土壤水稳性团聚体的显著增加可能影响了土壤分离能力的季节变化，这可能与大颗粒土壤水稳性团聚体的形成，有利于增加土壤的侵蚀阻力，土壤变得难于被分离有关(图 4C)。

植被根系对土壤分离能力也有重要影响^[16-18]。本研究中，土壤分离能力与根系密度间呈指数负相关(图 4D)，这一研究结果与 Gyssels 等^[16]，De Baets 和 Poesen^[17]，Zhang 等^[18]的研究结果相同，与 Burylo 等^[26]的研究结果不同(土壤分离与植被根系没有直接关系)。

玉米地和谷子地的土壤分离能力(D_c , $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)与根系密度(RD , kg/m^3)的关系可以用下列方程拟合：

$$D_c = a \cdot \exp(b \cdot RD) \quad (3)$$

式中：系数 a 和 b 为回归参数 (表 3)。

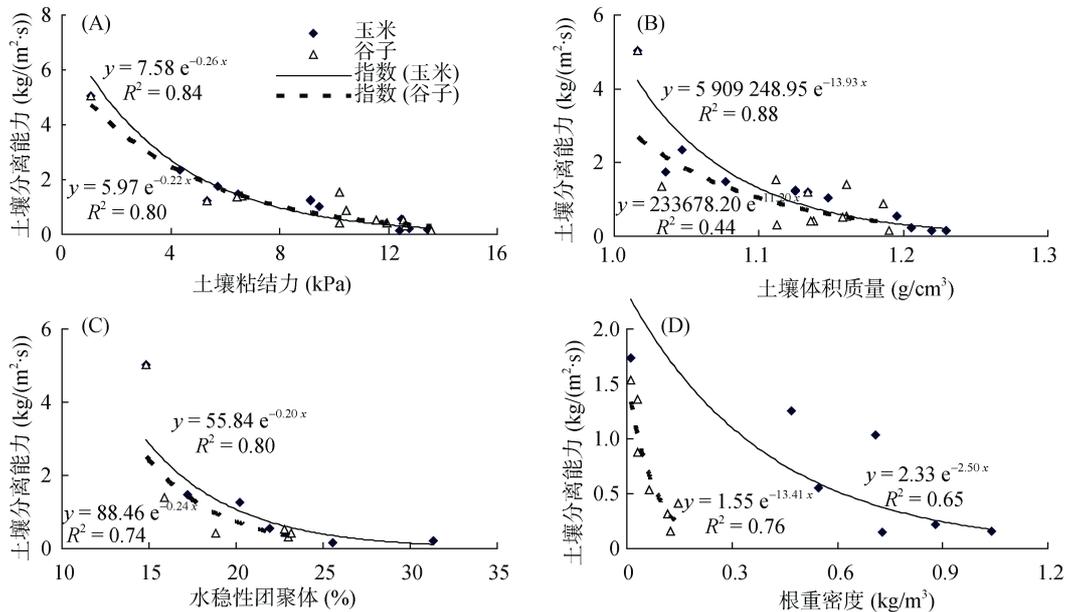


图 4 土壤分离能力与土壤属性和根系密度的关系

Fig. 4 Relationships of soil detachment capacities with soil properties and root densities

表 3 土壤分离能力拟合方程参数 a , b 和 c 值

Table 3 Values of parameter a, b and c in the simulated equation of soil detachment capacity

作物	拟合方程								
	$D_c = a \cdot \exp(b \cdot RD)$				$D_c = a \cdot \exp(b \cdot RD + c \cdot D)$				
	a	b	R^2	NSE	a	b	c	R^2	NSE
玉米	1.85	-1.69	0.72	0.72	2.28	-1.78	-7.15	0.74	0.73
谷子	1.82	-8.07	0.84	0.73	1.16	-9.66	7.86	0.89	0.86

玉米和谷子地土壤分离能力与根系密度间的决定系数(R^2)分别为 0.72 和 0.84, 这一研究结果说明须根系作物抵抗土壤被分离的能力较强。斯皮尔曼相关分析表明玉米和谷子的土壤分离能力与作物平均根径间呈正相关关系。当作物平均根径被添加到土壤分离能力拟合方程 (3) 中时, 玉米地和谷子地土壤分离能力拟合方程的拟合精度均有所提高, 谷子地拟合方程的模型有效系数 NSE 提高了 0.13。玉米和谷子地的土壤分离能力(D_c , $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)与根系密度(RD , kg/m^3)和平均根径(D , mm)的关系可以用下列方程拟合：

$$D_c = a \cdot \exp(b \cdot RD + c \cdot D) \quad (4)$$

式中： D 是平均根径 (mm)。这一研究结果与 De Baets 和 Poesen^[17]的研究结果较为一致。但是, 当平均根茎被添加到土壤分离能力拟合方程时, 玉米地拟合方程的精度没有明显的变化, 这说明平均根径在本研究中并不是一个很好的拟合土壤分离能力季节变化的

参数。

农事活动对土壤分离能力也有重要的影响。例如, 玉米和谷子都采用播种机播种, 播种后, 与种植前相比玉米地和谷子地的土壤分离能力都明显增加了 416% ($P < 0.05$)。锄草对作物地的土壤分离能力的变化也有影响。第一次锄草, 玉米地的土壤分离能力增加了 17.4%, 谷子地的土壤分离能力增加不明显。第二次锄草, 谷子地伴随着定苗, 土壤分离能力增加了 255%, 玉米地则增加不明显。玉米地采用人工锄收获, 谷子地采用镰刀收获, 受收获的影响, 玉米地的土壤分离能力增加了 453%, 达到统计学显著性水平 ($P < 0.05$), 谷子地的土壤分离能力增加 194%, 未达到统计学显著性水平 ($P > 0.05$)。农事活动对土壤分离能力的影响的多少主要与农事活动对近地表层土壤干扰程度的大小有关, 通常随作物的种类和时间的变化而变化^[6]。农事活动通常使农耕地近地表层的土壤变得更加容易被分离^[6]。

2.3 土壤分离能力拟合方程

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,精确模拟土壤分离能力是非常需要的。

本研究基于不同季节土壤属性的动态变化和根系生长特征,利用作物地土壤粘结力、根系密度和水流剪切力构建了两种作物地土壤分离能力的季节变化拟合方程:

$$D_c = d \cdot \exp(e \cdot RD + f \cdot SC) \cdot (\tau - g) \quad (5)$$

在这个拟合方程中,根系密度、土壤粘结力和

水流剪切力分别能够解释土壤分离能力自变量 92% 和 75% 的变量。总体而言,该拟合方程分别高估了玉米地和谷子地土壤分离能力的 3% 和 7%。拟合方程的决定系数 R^2 分别为 0.92 和 0.75, NSE 系数分别为 0.91 和 0.74 (表 4)。相比之下,玉米地的拟合精度较高(图 5)。土壤体积质量和粘结力都反映了土壤的硬化过程,但相比之下,粘结力与土壤分离能力的关系更为密切。因此,在土壤分离能力拟合方程中,只考虑了粘结力对土壤分离能力的影响。

表 4 土壤分离能力拟合方程参数 d , e , f 和 g 值
Table 4 Values of parameter d , e , f and g in the simulated equation of soil detachment capacity

作物	拟合方程: $D_c = d \cdot \exp(e \cdot RD + f \cdot SC) \cdot (\tau - g)$					
	d	e	f	g	R^2	NSE
玉米	3.55	-0.74	-0.32	2.3	0.92	0.91
谷子	0.43	-2.24	-0.14	2.62	0.75	0.74

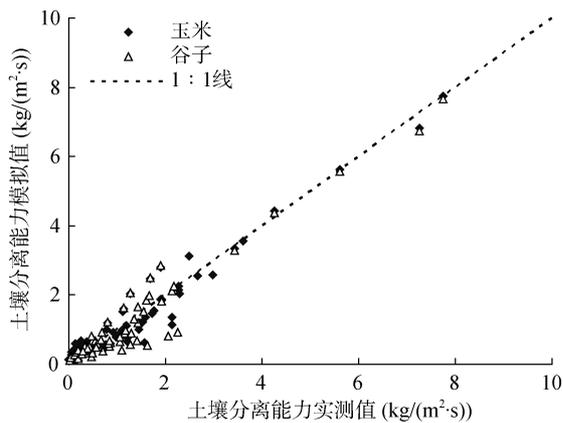


图 5 土壤分离能力实测值与模拟值的关系

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

3 结论

1) 在黄土丘陵区典型农耕地玉米和谷子作物生长季,它们的土壤分离能力在整个生长季都表现出了先升高后降低再升高的明显的季节变化($P < 0.05$),并表现出了相似的季节变化模式。

2) 黄土丘陵区农耕地土壤分离能力季节变化主要受控于农事活动、土壤属性的季节变化和作物根系的生长。两种作物地的土壤分离能力随作物根系密度、土壤粘结力和水稳性团聚体的增大呈指数函数形式下降。

3) 在黄土丘陵区,利用作物地土壤粘结力、根系密度和水流剪切力能够较好地拟合两种作物地的土壤分离能力。

4) 针对黄土高原降雨主要集中在 6—9 月和坡耕地土壤分离能力存在季节变化的特点,可考虑在黄土高原坡耕地周围修建不同组合模式的植物篱^[27-28],来

减缓和降低坡耕地进入河流的泥沙。

参考文献:

- [1] Fu B J. Soil erosion and its control in the Loess Plateau of China[J]. Soil Use and Management, 1989, 5(2): 76-82
- [2] Kheir R B, Cerdan O, Abdallah C. Regional soil erosion risk mapping in Lebanon[J]. Geomorphology, 2006, 82(3/4): 347-359
- [3] 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
- [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[J]. 科学通报, 1998, 43(2): 200-203
- [5] 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
- [6] Zhang G H, Tang K M, Zhang X C. Temporal variation in soil detachment under different land uses in the Loess Plateau of China[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2009, 34(9): 1 302-1 309
- [7] 国家发展改革委, 水利部, 农业部, 国家林业局. 黄土高原地区综合治理规划大纲[Z]. 2011. 1, 17. <http://www.sdpc.gov.cn/>
- [8] Nearing M A, Simanton J R, Norton L D, et al. Soil erosion by surface water flow on a stony, semiarid hillslope[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1999, 24(8): 677-686
- [9] Zhang G H, Liu B Y, Liu G B, et al. Detachment of undisturbed soil by shallow flow[J]. Soil Science Society of America Journal, 2003, 67(3): 713-719
- [10] Nearing M A, West L T, Brown L C. A consolidation model for estimating changes in rill erodibility[J]. Transactions of

- the American Society of Agricultural Engineers, 1988, 31(3): 696–700
- [11] Ghebreyessus Y T, Gantzer C J, Alberts E E, et al. Soil erosion by concentration flow: Shear stress and bulk density[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 1994, 37(6): 1 791–1 797
- [12] Morgan R P, Quito 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[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1998, 23(6): 527–544
- [13] 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[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(1): 4–11
- [14] Knapen A, Poesen J, Govers G, et al. Resistance of soils to concentrated flow erosion: A review[J]. Earth-Science Reviews, 2007, 80(1/2): 75–109
- [15] Mamo M, Bubenzer G D. Detachment rate, soil erodibility and soil strength as influenced by living plant roots part II: Field study[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 2001, 44(5): 1 175–1 181
- [16] Gysse G, Poesen J, Van Dessel W, et al. Effects of cereal roots on detachment rates of single and doubled rilled topsoils during concentrated flow[J]. European Journal of Soil Science, 2006, 57(3): 381–391
- [17] De Baets S, Poesen J. Empirical models for predicting the erosion-reducing effects of plant roots during concentrated flow erosion[J]. Geomorphology, 2010, 118(3/4): 425–432
- [18] 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[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 2013, 56(3): 927–934
- [19] 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: 139–148
- [20] Ghidry F, Alberts E E. Plant root effects on soil erodibility, splash detachment, soil strength, and aggregate stability[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 1997, 40(1): 129–135
- [21] 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[J]. Soil and Tillage Research, 2007, 94(2): 425–440
- [22] Nearing M A, Bradford J M, Parker S C. Soil detachment by shallow flow at low slopes[J]. Soil Science Society of America Journal, 1991, 55(2): 339–344
- [23] 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[J]. Canadian Journal of Soil Science, 1988, 68(2): 405–416
- [24] 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[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1990, 15(4): 313–328
- [25] Barthès B, Roose E. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion, validation at several levels[J]. Catena, 2002, 47(2): 133–149
- [26] Burylo M, Rey F, Mathys N, et al. Plant root traits affecting the resistance of soils to concentrated flow erosion[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2012, 37(14): 1 463–1 470
- [27] 李聪会, 朱首军, 陈云明, 等. 黄土丘陵区牧草篱对坡耕地土壤抗侵蚀性的影响[J]. 西北林学院学报, 2013, 28(5): 41–46
- [28] 袁久芹, 梁音, 曹龙熹, 等. 红壤坡耕地不同植物篱配置模式减流减沙效益对比[J]. 土壤, 2015, 47(2): 400–407

Seasonal Changes of Soil Detachment Capacity Under Two Typical Fibrous Crops in Hilly Region of Loess Plateau of China

YU Yaochuang^{1,2}, WANG Changyan^{1,2}

(1 College of Geography and Environment, Baoji University of Arts and Sciences, 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 scientific basis for soil and water conservation measurements of the loess plateau, overland flow with a hydraulic flume with adjustable bed gradients was used to study the seasonal changes in soil detachment capacity and the potential influential factors during one growing season of maize and millet in 2012. The results showed that the soil detachment capacity for each fibrous crop fluctuated significantly over time with a similar pattern of seasonal change. The seasonal changes of soil detachment capacity were affected by tillage practices, soil consolidation, water-stable aggregates, and root growth. Soil detachment capacities of two fibrous crops could be estimated by using flow shear stress, soil cohesion and root density ($R^2 > 0.75$, $NSE > 0.74$).

Key words: Hilly regions of Loess Plateau; Soil detachment capacity; Seasonal variations; Soil consolidation; Root growth