

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.08.014

黄土丘陵区不同草被类型土壤细沟可蚀性季节变化研究

王长燕^{1,2} 郁耀闯^{1,2}

(1. 宝鸡文理学院地理与环境学院, 宝鸡 721013; 2. 陕西省灾害监测与机理模拟重点实验室, 宝鸡 721013)

摘要: 运用坡面径流冲刷试验, 结合土壤侵蚀过程 WEPP 模型, 研究了黄土丘陵区赖草和紫花苜蓿生长季土壤细沟可蚀性的季节变化特征及其影响因素。结果表明, 赖草地的土壤细沟可蚀性在整个生长季呈现出先升高后降低再升高的不明显的季节变化趋势 ($p > 0.05$), 紫花苜蓿地土壤细沟可蚀性在整个生长季呈现出先降低后趋于稳定再降低的明显的季节变化趋势 ($p < 0.05$)。赖草地和紫花苜蓿地土壤细沟可蚀性生长季的变化主要受到土壤硬化过程、水稳性团聚体 (大于 0.25 mm) 和草地根系生长的影响。赖草和紫花苜蓿地的土壤细沟可蚀性随着土壤粘聚力、容重、水稳性团聚体和草地根系密度的增加呈指数函数形式降低。利用土壤容重和根系密度可以很好地模拟赖草地和紫花苜蓿地土壤细沟可蚀性的季节变化 ($R^2 \geq 0.86, NSE \geq 0.85$)。为黄土高原地区植被恢复过程中的水土保持效益分析及措施优化配置提供理论基础和数据支撑。

关键词: 黄土丘陵区; 土壤细沟可蚀性; 季节变化; 土壤硬化; 根系生长

中图分类号: S147 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)08-0101-08

Seasonal Variations of Soil Rill Erodibility under Different Types of Grass in Loess Hilly Region

Wang Changyan^{1,2} Yu Yaochuang^{1,2}

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

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

Abstract: The seasonal variations of soil rill erodibility and their potential affecting factors were investigated by carrying out the experiment of water flumes with adjustable bed gradient and using the soil erosion process WEPP model, which was conducted in two tracts of rehabilitated grasslands in "Grain for Green" history during the grass growing season. One (Tract A) had been planted with *Leymus secalimus* for three years and the other (Tract B) with *Medicago sativa* L. for 17 years. Results showed that the soil rill erodibility of Tract A of grassland was increased at first and then declined and again increased during the whole growing season ($p > 0.05$), while the soil rill erodibility of Tract B of grassland was declined at first and then became stable and again declined significantly during the whole growing season ($p < 0.05$). The soil rill erodibilities of the two grasslands were varied seasonally, which were mainly affected by soil consolidation, formation of water-stable aggregates and root growth. With the increase of soil cohesion, bulk density, content of water-stable aggregates and grass root density, the soil rill erodibility in either soil was declined exponentially. Seasonal variations of soil rill erodibilities of two grasslands could well be simulated with soil bulk density and root density ($R^2 \geq 0.86, NSE \geq 0.85$). The mean soil rill erodibility of *Leymus secalimus* and *Medicago sativa* L. during the whole growing season was much less than that of the control tract, which suggested that the practice of "Grain for Green" in hilly regions of the Loess Plateau of China was beneficial to soil and water conservation. The findings of this study may do duty for data support and theoretic basis in elaborating hydrodynamic mechanisms of the soil rill

收稿日期: 2016-03-30 修回日期: 2016-05-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171423、41371497)、陕西省教育厅重点实验室项目(2009JS071)和宝鸡文理学院重点科研项目(ZK15052、ZK1054)

作者简介: 王长燕(1979—),女,讲师,博士,主要从事植被与土壤侵蚀互动效应研究,E-mail: wcyxa_1979@163.com

erodibility 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: loess hilly region; soil rill erodibility; seasonal variations; soil consolidation; root growth

引言

黄土丘陵区由于土质疏松、坡陡、降雨集中于6—9月、植被覆盖率低和人类不合理的土地利用等原因,水土流失严重,是我国退耕还林(草)生态工程建设的重点区域。剧烈的水土流失加速了黄河泥沙的淤积,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^[1-3]。近年来,随着黄土高原退耕还林、还草工作的开展,该区退耕林(草)地水土保持效益问题引起了学者的关注。截止2008年,黄土高原地区退耕面积达 $4.83 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ^[4],已引起了该区近地表层土壤理化性状^[5-6]和土壤分离过程^[7]的改变,可能会影响土壤细沟可蚀性的季节变化。目前,在黄土高原地区,退耕驱动的近地表层土壤属性变化如何影响土壤细沟可蚀性的季节变化还不清楚。因此,研究黄土高原地区退耕条件下不同植被类型土壤细沟可蚀性的季节变化问题,对于评价该区退耕的水土保持效益和水土保持措施优化配置具有重要意义。

在黄土高原地区,股状水流发育,它导致了近地表层土壤表面细沟和冲沟的发育^[8]。土壤细沟可蚀性是反映土壤抵抗径流冲刷能力的重要阻力参数之一,也是土壤侵蚀过程模型中的重要输入参数^[9-10]。在著名的土壤侵蚀过程 WEPP 模型中,细沟侵蚀通常用细沟可蚀性(K_r)来表示,它和土壤临界剪切力反映了土壤抵抗细沟股状水流作用的能力^[11],但在以往的研究中,它通常是来自参考表的参考值或是通过经验关系获得的经验值,它的时空变化未能很好地定量研究。以往的研究表明,土壤细沟可蚀性通常受到坡面流体力学条件、土壤属性和植被根系生长的影响,可能存在着明显的时间变化特征^[12-13]。

土壤细沟侵蚀发生在土壤表面,因此,它通常受到土壤属性的强烈影响。一般情况下,它随土壤黏粒含量、团聚体中值粒径、容重^[14]、抗剪强度^[15]、粘结力^[16-17]和土壤有机质含量的增加而降低^[18],并随土壤含水率的增加而增加^[19-20]。然而,这些土壤属性在植被生长季往往具有明显的动态或季节变化,它们的变化可能导致土壤细沟可蚀性的季节变化^[12-13]。目前,土壤属性的动态变化对土壤细沟可蚀性季节变化的影响机制还不清楚。以往有限的研

究表明,只有少数土壤属性的动态变化能够影响土壤细沟可蚀性的季节变化^[12-13]。KNAPEN等^[12]研究认为土壤固结力、土壤水分含量等土壤属性的变化是影响土壤细沟可蚀性季节变化的主要原因。YU等^[13]的研究结果表明,土壤粘结力、初始含水量的季节变化和根系生长是影响农耕地土壤细沟可蚀性季节变化的主要因素。此外,植被根系密度^[16-17,21-22],土壤表层结皮^[23]、冻融循环^[23]和作物收获残余物的分解^[24]等也能够影响土壤细沟可蚀性的季节变化。

在我国以往关于土壤可蚀性的研究中,梁音等^[25-31]利用 USLE 经验模型研究了红壤等不同土壤类型的土壤可蚀性及我国水蚀区土壤可蚀性 K 值的计算与分布,获得了我国不同土壤类型土壤可蚀性 K 值分布特征等重要认识。张科利等^[32]和王彬^[33]认为土壤可蚀性具有动态变化。但退耕驱动的近地表层土壤属性动态变化与土壤细沟可蚀性季节变化的定量关系尚不明确,土壤细沟可蚀性季节变化模型也尚未建立。在土壤侵蚀过程模型中,土壤细沟可蚀性的时间变化是预测土壤细沟侵蚀的基础,但在以往的研究中尚未受到学者们的广泛关注。目前,在黄土丘陵区退耕条件下,不同植被类型土壤细沟可蚀性季节变化的研究还未见报道。因此,在黄土高原退耕背景条件下,开展不同退耕植被类型土壤细沟可蚀性季节变化及其影响机制研究是非常必要的。

本文以黄土丘陵区不同人工退耕植被类型赖草和紫花苜蓿为研究对象,研究黄土丘陵区不同人工退耕草被类型土壤细沟可蚀性季节变化,探索土壤属性动态变化和草地根系生长对土壤细沟可蚀性季节变化的潜在影响,建立黄土丘陵区土壤细沟可蚀性季节变化模拟方程,为阐明黄土丘陵区退耕还林(草)背景条件下土壤细沟侵蚀过程和水土保持效益分析提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地点位于中国科学院安塞水土保持综合试验站(109°19'23"E,36°51'30"N),海拔1068~1309 m,属于典型的黄土丘陵沟壑区,是黄土高原主要的水蚀区之一,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,多为短历时暴雨,6—9 月份集中了全年 70% 以上的降雨。地貌类型上以崮状、梁状丘陵为主,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,土壤侵蚀严重,以沟蚀和面蚀为主。该区主要乔木有刺槐 (*Robinia pseudoacacia*)、小叶杨 (*Populus simonii*) 等,灌丛为沙棘 (*Hippophae rhamnoides*)、柠条 (*Caragana intermedia*) 等人工灌丛,黄刺玫、狼牙刺 (*Sophora viciifolia*)、杠柳 (*Periploca sepium*) 等天然灌丛,主要草本植被类型是茵陈蒿 (*Artemisia capillaris*)、达乌里胡枝子 (*Lespedeza davurica*)、阿尔泰狗娃花 (*Heteropappus altaicus* (Willd.) Novopokr)

等。

1.2 样地选择

选取黄土丘陵区典型人工退耕草地赖草和紫花苜蓿作为试验样地,赖草 (*Leymus secalinus* (Georgi) Tzvel.) 和紫花苜蓿 (*Medicago sativa* L.) 分别为退耕后人工种植 3 a 和 17 a 的草地,对照样地为 1 a 生谷子地,赖草、紫花苜蓿和谷子的行距分别为 70 cm、70 cm 和 50 cm,株距分别为 30 cm、30 cm 和 8 cm。在草地生育期,每 3 d 观测 1 次赖草和紫花苜蓿的生长发育状况,详细记录赖草和紫花苜蓿生育过程(表 1)。需要说明的是,本文的季节指的是赖草和紫花苜蓿的一个生长季。

表 1 退耕草地生育期基本特征

Tab. 1 Basic soil properties of rehabilitated grasslands during plant growing period

草被类型	日期						
	04-18(I)	05-24(II)	06-18(III)	07-18(IV)	08-15(V)	09-10(VI)	09-30(VII)
赖草	返青	抽穗	开花	种子成熟	种子散落初期	种子散落高峰期	种子散落末期
紫花苜蓿	返青	旁枝形成	现蕾	开花	结荚	种子成熟初期	种子成熟末期
对照(谷子)	种植前	幼苗期	拔节	抽穗灌浆期	-	籽粒形成期	成熟期

1.3 样品采集

2012 年 4—10 月份分别选取赖草与紫花苜蓿两种草被和对照样地 7 个关键生育阶段(表 1)开展土壤分离试验。在每个生育阶段,用内径 9.8 cm、高 5 cm 的环刀分别在赖草地、紫花苜蓿地和对照样地靠近植株根部取原状土样做土壤分离试验^[34-35]。每次取样设 5 个重复,每个生育阶段每个样地采集 30 个土壤分离样品,3 个样地共采集 90 个土壤分离样品,7 个生育期共采集土壤分离样品 630 个。

1.4 试验方法

用变坡试验水槽系统(长 4 m,宽 0.35 m,深 0.6 m)测定土壤分离能力(图 1)。试验分别设计 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 6 个坡度和流量组合,它们对应的水流剪切力依次为 5.71、8.6、10.75、13.06、15.36、17.18 Pa。每次冲刷试验时,每组坡度和流量组合做 5 次重复,分别对应于每个采样点的 5 个样品。坡面水流表面最大流速用染色法测定^[34-36],乘以修正系数 0.8 得到平均流速^[34-36],径流水深 H 采用流量、流速和槽宽计算^[34-36],水流剪切力计算公式^[34-35]为

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

式中 τ ——水流剪切力,Pa

ρ ——水的密度,kg/m³

g ——重力加速度,m/s²

H ——水深,m S ——坡度,m/m

土壤分离能力计算公式^[34-35]为

$$D_c = \frac{W_a - W_b}{1000tA} \quad (2)$$

式中 D_c ——土壤分离能力,kg/(m²·s)

W_a ——冲刷前土壤干质量,g

W_b ——冲刷后土壤干质量,g

t ——冲刷时间,s

A ——环刀面积,m²



图 1 试验水槽设计

Fig. 1 Design of experiment flumes

以土壤分离能力数据和水流剪切力 τ 为基础,利用 WEPP 模型简化方程计算土壤细沟可蚀性 K_r 的值^[10]。

$$D_c = K_r (\tau - \tau_c) \quad (3)$$

式中 K_r ——土壤细沟可蚀性,s/m

τ_c ——土壤临界剪切力,Pa

粘结力用粘结力仪测定,每次测定 10 个重复。容重和土壤水稳性团聚体分别用环刀法和干湿筛法

测定,每次测定3个重复。土壤初始含水量用烘干法测定,每次测定5个重复。根系采用水洗法,于65℃下置于干燥箱内烘干称量,每次测定5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,显著性检验采用方差分析ANOVA($p < 0.05$)。

2 结果与讨论

2.1 退耕草地土壤细沟可蚀性季节变化特征

由图2a可以看出,在整个生长季内赖草地土壤细沟可蚀性呈现出先升高后降低再升高的总体下降的季节变化趋势,其中,赖草地土壤细沟可蚀性的季节变化在 $\alpha = 0.05$ 水平上未达到显著性差异水平。赖草地土壤细沟可蚀性最小值出现在种子散落初期,最大值出现在抽穗期,土壤细沟可蚀性的变化范

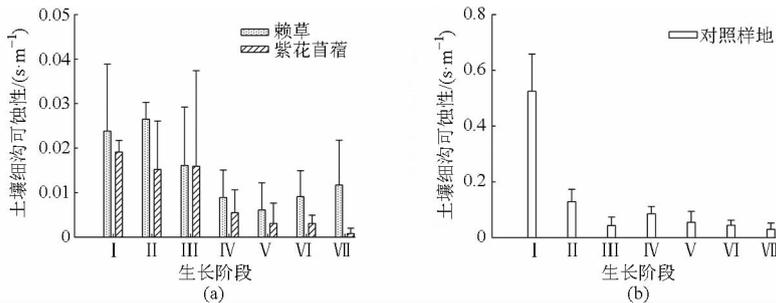


图2 赖草和紫花苜蓿地土壤细沟可蚀性季节变化

Fig. 2 Seasonal variations of soil rill erodibility in *Leymus secalinus* and *Medicago sativa* L. grasslands

紫花苜蓿地的土壤细沟可蚀性在整个生长季内呈现出先降低后趋于稳定再降低的总体下降的季节变化趋势(图2a),其中,紫花苜蓿地土壤细沟可蚀性的季节变化在 $\alpha = 0.05$ 水平上达到显著性差异水平。紫花苜蓿地土壤细沟可蚀性最小值出现在成熟期,最大值出现在返青期。土壤细沟可蚀性的变化范围为0.0008~0.0191 s/m,该变化范围分别是对照样地土壤细沟可蚀性变化范围的2.72%~3.64%,紫花苜蓿地土壤细沟可蚀性平均值为0.009 s/m,该值为对照样地均值的6.9%。与赖草地类似,在4月中旬,紫花苜蓿也处于返青期,受冻融后解冻的影响,紫花苜蓿地的土壤也较为疏松,该时期紫花苜蓿地土壤细沟可蚀性的值是生长季内的最高值点,从返青期至旁枝形成期,土壤细沟可蚀性呈下降趋势,下降幅度为20.4%,从旁枝形成期至现蕾期,紫花苜蓿地的土壤细沟可蚀性趋于稳定,在0.0152~0.0159 s/m之间波动,从现蕾期至种子成熟末期,紫花苜蓿地的土壤细沟可蚀性呈下降趋势,下降幅度为94.96%,在种子成熟末期(9月底)下降到最低值0.0008 s/m。

对照样地的土壤细沟可蚀性从4月中旬至9月

围为0.0061~0.0265 s/m,该变化范围分别是对照样地土壤细沟可蚀性变化范围的5.05%~20.75%,赖草地土壤细沟可蚀性在整个生长季的平均值为0.0146 s/m,该值为对照样地均值的11.2%。具体来讲,赖草在4月中旬处于返青阶段,此时,受冬季冻融后解冻的影响,近地表的土壤较为疏松,抵抗径流冲刷的能力较差,容易被分离,土壤细沟可蚀性相对较高,此后,赖草进入生长季,在降雨雨滴击打、草地根系生长和土壤生物活动等多种因素的影响下,从返青期至抽穗期,赖草地的土壤细沟可蚀性呈上升趋势,上升幅度为11.3%,从抽穗期至种子散落初期,赖草地的土壤细沟可蚀性呈下降趋势,下降幅度为76.98%,从种子散落初期至种子散落末期,赖草地的土壤细沟可蚀性又呈上升趋势,上升幅度为91.8%。

底总体呈下降趋势(图2b),最大值0.5251 s/m出现在4月中旬,最小值0.0433 s/m出现在9月中旬,生长季内的平均值为0.1470 s/m。

总体而言,赖草地和紫花苜蓿地的土壤细沟可蚀性在生长季内呈现出了不同的季节变化模式,这可能与两种退耕草地土壤属性的动态变化和根系的生长等因素有关。

2.2 退耕草地土壤细沟可蚀性季节变化影响因素

本研究中,赖草地和紫花苜蓿地的土壤细沟可蚀性在生长季的平均值分别是王军光等^[37]研究的第四纪红黏土土壤细沟可蚀性均值(0.0057 s/m)的255%和157%,分别是KNAPEN等^[12]报道的比利时勒芬粉砂壤土土壤细沟可蚀性均值(0.0115 s/m)、WANG等^[7]报道的黄绵土土壤细沟可蚀性(0.0002 s/m)和WEPP模型^[18]中土壤细沟可蚀性基准值(0.02 s/m)的127%、77.9%,7300%、4478.6%和73%、44.79%,试验方法和土壤属性等因素的不同可能是造成这些研究结果差异的原因。例如,本研究中,试验坡度的变化范围为17.4%~42.3%,然而,在王军光等^[37]、KNAPEN等^[12]、WANG等^[7]的研究中,它们的试验坡度变化范围分

别为 8.8% ~ 36.4%、15% ~ 35%、20.9% ~ 24.4%。本研究中的单宽流量分别是王军光等^[37]、KNAPEN 等^[12]和 WANG 等^[7]研究中单宽流量的 1.40 ~ 1.42 倍、0.46 ~ 0.93 倍和 1.05 ~ 1.67 倍。此外,本试验中的土壤黏粒含量是王军光等^[37]试验中所使用的第四纪红黏土土壤黏粒含量的 19.5% 和 22.4%。因此,本试验中的土壤要比王军光等^[37]

试验中的土壤更容易被侵蚀,土壤细沟可蚀性更大。

在赖草和紫花苜蓿生长季内,近地表层土壤属性(土壤粘结力、容重和水稳性团聚体等)在风速、降水和根系生长等多种因素的影响下^[38-39],呈现出了明显的动态变化(图 3),这影响了土壤的分离过程^[7],可能会导致土壤细沟可蚀性的季节变化。

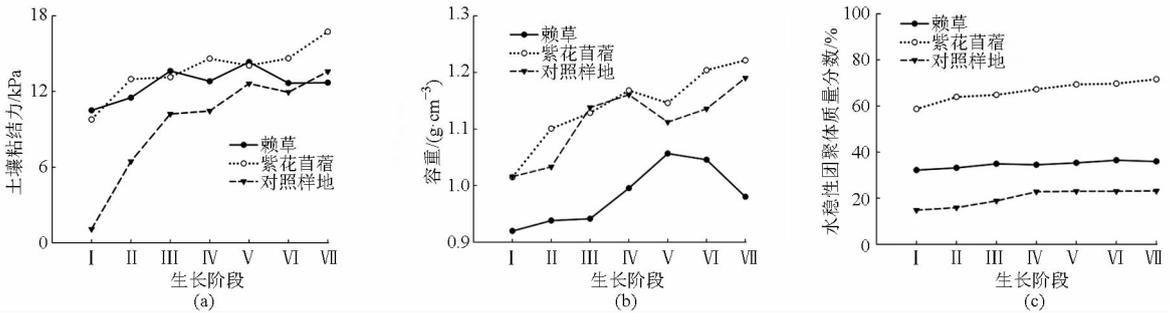


图3 退耕草地土壤属性季节变化

Fig. 3 Seasonal variations of soil properties of rehabilitated grasslands

土壤细沟可蚀性的季节变化通常受到土壤固结力动态变化的影响^[12-13]。在整个草地生长季,土壤粘结力和容重呈增加趋势(图 3a、3b),这会导致土壤变硬,土壤固结力增强,土壤抗径流冲刷的能力增强,从而导致土壤细沟可蚀性下降。一般情况下,土壤容重较大时,近地表层的土壤往往由于比较紧实而难于被径流冲刷,此时土壤的分离能力较小,土壤细沟可蚀性也较小。反之,土壤抵抗径流冲刷的能力较弱,土壤的分离能力较大,土壤细沟可蚀性较大。本研究中,赖草地的土壤容重在整個生长季呈上升趋势(图 3b),在 0.94 ~ 1.06 g/cm³ 之间变化,平均值为 1.01 g/cm³,最大值出现在种子散落末期(9月下旬),最小值出现在返青期(4月中旬)。紫花苜蓿地土壤容重在整個生长季呈现出先升高后降低再升高的变化趋势(图 3b),在 1.10 ~ 1.22 g/cm³ 之间变化,平均值为 1.15 g/cm³,最大值出现在种子成熟末期(9月下旬),最小值也出现在返青期(4月中旬)。在整个草地生长季,土壤结皮的发育、根系的生长和土壤生物的活动等综合作用可能会导致近地表层土壤理化性状的改变,这可能会影响土壤容重的大小,从而导致土壤细沟可蚀性的季节变化。土壤粘结力对土壤细沟可蚀性的影响机理与土壤容重对土壤细沟可蚀性的影响机理相似,这里不再赘述。本研究表明,随土壤粘结力和容重的增加,两种退耕草地的土壤细沟可蚀性呈指数函数形式降低(图 4a、4b),这与 KNAPEN 等^[12]和 YU 等^[13]的研究结果相同。

土壤水稳性团聚体是土壤的重要组成部分,也是表征土壤抵抗径流冲刷能力大小的关键指标之

—^[7,40-41]。在土壤侵蚀过程中,土壤水稳性团聚体通过分散和崩解等水土交互作用改变土壤表面结构,影响土壤侵蚀过程。植被根系在生长过程中通过物理、化学和生物等作用来提高土壤中水稳性团聚体的含量。本研究中,赖草地和紫花苜蓿地的土壤水稳性团聚体(大于 0.25 mm)在整个生长季分别增加了 13% 和 22% (图 3c),这有利于退耕草地大颗粒土壤水稳性团聚体的形成,会增加土壤抵抗径流冲刷的能力,土壤会变得难于被分离,从而降低土壤的细沟可蚀性。回归分析表明,随土壤水稳性团聚体的增加赖草地和紫花苜蓿地的土壤细沟可蚀性呈指数函数形式降低(图 4c)。

在坡面流侵蚀中,植被根系显著影响着土壤细沟可蚀性大小的变化^[12-13]。在植被生长季内,根系通过捆绑和粘结等作用来改变土壤中水稳性团聚体和有机质等土壤属性的含量^[42],提高土壤抵抗径流冲刷的能力,降低土壤细沟可蚀性。本研究中,赖草地和紫花苜蓿地的土壤细沟可蚀性与根系密度呈负指数相关关系(图 4d),这与 KNAPEN 等^[12]和 YU 等^[13]的研究结果较为一致。

2.3 土壤细沟可蚀性季节变化模拟

在股状水流发育的黄土高原地区,土壤细沟可蚀性时间变化的数据较为缺乏。但是,该数据对预测黄土高原地区由股状水流所导致的水土流失非常关键。因而,在黄土高原退耕背景条件下,利用土壤属性的动态变化来预测土壤细沟可蚀性的季节变化是非常需要的。

本研究中,采用非线性回归的方法,结合土壤细沟可蚀性与其影响因素函数关系方程的形式,利用

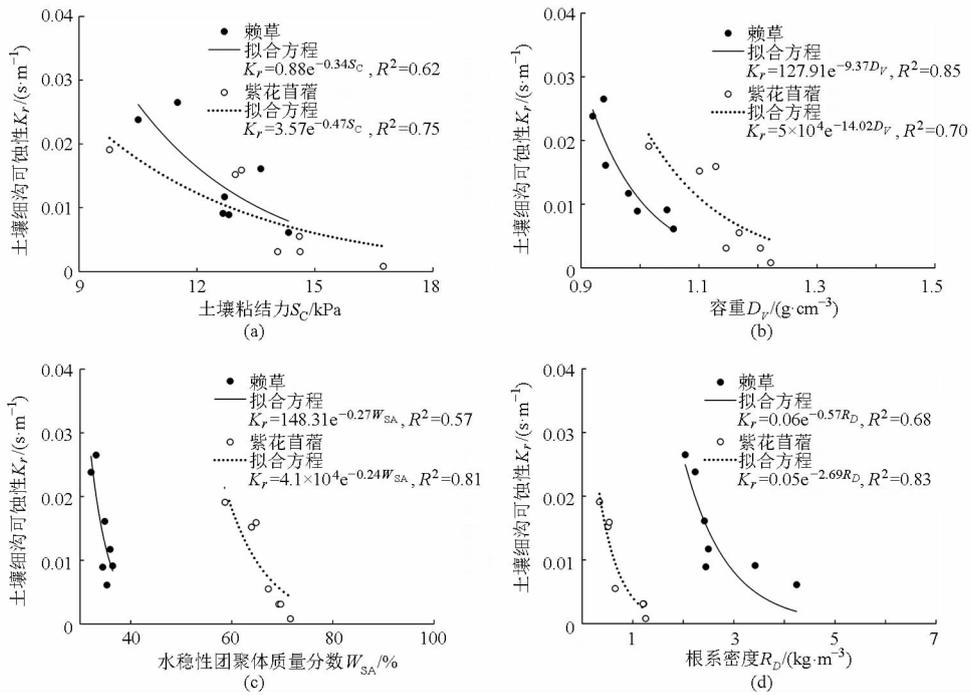


图4 土壤细沟可蚀性与土壤属性和根系密度的关系

Fig. 4 Relationships of soil rill erodibility with soil properties and root density

土壤容重和根系密度能够较好地模拟黄土丘陵区赖草地和紫花苜蓿地土壤细沟可蚀性的季节变化,即

$$K_r = a \exp \left(b \int D_v + c \int R_D \right) \quad (4)$$

式中 a 、 b 、 c ——回归参数

在模拟方程(4)中,自变量土壤细沟可蚀性86%和88%的变量能够被土壤容重和根系密度解释(表2),这表明在赖草和紫花苜蓿生长季内,两种

表2 土壤细沟可蚀性模拟方程参数

Tab.2 Parameters of simulated equation for soil rill erodibility

草地类型	a	b	c	R^2	NSE
赖草	88.639	-7.964	-0.396	0.86	0.85
紫花苜蓿	0.383	-2.246	-1.785	0.88	0.88

草地土壤细沟可蚀性的季节变化可能主要由土壤容重的动态变化和根系生长所导致。赖草地和紫花苜蓿地土壤细沟可蚀性模拟结果见图5。土壤容重和粘聚力两者都反映了土壤的硬化过程,相比之下,容重与土壤细沟可蚀性的关系更为密切。因此,在退耕草地土壤细沟可蚀性模拟方程中,只考虑了容重对土壤细沟可蚀性的影响。由于本研究中只考虑了土壤容重和根系密度对土壤细沟可蚀性的影响,未考虑其他根系特征参数以及其他因素的影响,具有一定的偏差和局限性。在黄土丘陵区,进一步研究不同植被类型根系特征参数动态变化对土壤细沟可蚀性季节变化的影响是非常需要的。

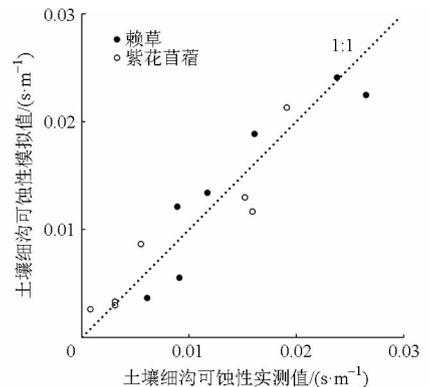


图5 土壤细沟可蚀性实测值与模拟值的关系

Fig. 5 Relationship between simulated and observed soil rill erodibilities

3 结论

(1)在黄土丘陵区赖草和紫花苜蓿生长季内,两种草地的土壤细沟可蚀性分别呈现出了升高-降低-升高和降低-趋于稳定-降低的季节变化模式。

(2)土壤容重的动态变化和根系生长可能是影响两种退耕草地土壤细沟可蚀性季节变化的主要因素。随着赖草地和紫花苜蓿地土壤容重、水稳性团聚体和根系密度的增加,两种退耕草地的土壤细沟可蚀性呈指数函数形式降低。

(3)赖草地和紫花苜蓿地土壤细沟可蚀性的季节变化可以用土壤容重和根系密度较好地模拟。

(4)在黄土丘陵区退耕还草有利于降低该区的土壤细沟可蚀性。

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 ZHANG X C, LIU W Z. Simulating potential response of hydrology soil erosion and crop productivity to climate change in Changwu tableland region on the Loess Plateau of China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 131(3–4): 127–142.
- 3 唐克利, 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.
TANG Keli, ZHANG Keli, LEI Alin. Study and proof of the upper limit slope for cultivation in the hilly region of the Loess Plateau [J]. *Science Bulletin*, 1998, 43(2): 200–203. (in Chinese)
- 4 CHEN Yiping, WANG Kaibo, LIN Yishan, et al. Balancing green and grain trade[J]. *Nature Geoscience*, 2015, 8(10): 739–741.
- 5 LI Yangyang, SHAO Ming'an. Change of soil physical properties under long-term natural vegetation restoration in the Loess Plateau of China [J]. *Journal of Arid Environments*, 2006, 64(1): 77–96.
- 6 JIAO Feng, WEN Zhongming, AN Shaoshan. Changes in soil properties across a chronosequence of vegetation restoration on the Loess Plateau of China [J]. *CATENA*, 2011, 86(2): 110–116.
- 7 WANG Bin, ZHANG Guanghui, ZHANG Xunchang, 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(2): 589–597.
- 8 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.
- 9 HIRSCHI MICHAEL C, BARFIELD BILLY J. KYERMO—a physically based research erosion model. Part I. Model development [J]. *Transactions of the ASAE*, 1988, 31(3): 804–813.
- 10 NEARING M A, FOSTER G R, LANE L J, et al. A process-based soil erosion model for USDA—Water erosion prediction technology [J]. *Transactions of the ASAE*, 1989, 32(5): 1587–1593.
- 11 KNAPEN A, POESEN J, GOVERS G, et al. Resistance of soils to concentrated flow erosion; a review [J]. *Earth-Science Reviews*, 2007, 80(1): 75–109.
- 12 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 & Tillage Research*, 2007, 94(2): 425–440.
- 13 YU Y C, ZHANG G H, GENG R, et al. Temporal variation in soil rill erodibility to concentrated flow detachment under four typical croplands in the Loess Plateau of China [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 69(4): 352–363.
- 14 BENNETT S J, CASALI J, ROBINSON K M, et al. Characteristics of actively eroding ephemeral gullies in an experimental channel [J]. *Transactions of the ASAE*, 2000, 43(3): 641–649.
- 15 LEONARD J, RICHARD G. Estimation of runoff critical shear stress for soil erosion from soil shear strength [J]. *CATENA*, 2004, 57(3): 233–249.
- 16 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.
- 17 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 ASAE*, 2001, 44(5): 1175–1181.
- 18 ALBERTS E E, NEARING M A, WELTZ M A, et al. Soil component [M] // FLANAGAN D C, NEARING M A. USDA—Water Erosion Prediction Project: Hillslope Profile and Watershed Model Documentation, NSERL Report, No. 10, USDA Agricultural Research Service National Soil Erosion Research Laboratory, 1995.
- 19 POTTER K N, VELAZQUEZ-GARCIA J de J, TORBERT H A. Use of a submerged jet device to determine channel erodibility coefficients of selected soils of Mexico [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 57(5): 272–277.
- 20 NACHTERGAELE J, POESEN J. Spatial and temporal variations in resistance of loess-derived soils to ephemeral gully erosion [J]. *European Journal of Soil Science*, 2002, 53(3): 449–463.
- 21 GYSSELS G, POESEN J, LIU G B, 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.
- 22 DE BAETS S, POESEN J, GYSSELS G, et al. Effects of grass roots on the erodibility of topsoils during concentrated flow [J]. *Geomorphology*, 2006, 76(1–2): 54–67.
- 23 BRYAN R B. Soil erodibility and processes of water erosion on hillslope [J]. *Geomorphology*, 2000, 32(3–4): 385–415.
- 24 BROWN L C, WEST L T, BEASLEY D B, et al. Rill erosion one year after incorporation of crop residue [J]. *Transactions of the ASAE*, 1990, 33(5): 1531–1540.
- 25 杨玉盛. 不同利用方式下紫色土可蚀性的研究 [J]. *水土保持学报*, 1992, 6(3): 52–58.
YANG Yusheng. A study on the erodibility of purple soil under different land utilization forms [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1992, 6(3): 52–58. (in Chinese)
- 26 梁音, 史学正. 长江以南东部丘陵山区土壤可蚀性 K 值研究 [J]. *水土保持研究*, 1999, 6(2): 47–52.
LIANG Yin, SHI Xuezheng. Soil erodible K in east hilly fields of the southern Yangtze River [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 1999, 6(2): 47–52. (in Chinese)

- 27 邓良基, 侯大斌, 王昌全, 等. 四川自然土壤和旱耕地土壤可蚀性特征研究[J]. 中国水土保持, 2003(7): 23-25.
DENG Liangji, HOU Dabin, WANG Changquan, et al. Study on soil erodibility of natural soil and dry farmland soil in Sichuan [J]. Soil and Water Conservation in China, 2003(7): 23-25. (in Chinese)
- 28 张科利, 彭文英, 杨红丽. 中国土壤可蚀性值及其估算[J]. 土壤学报, 2007, 44(1): 7-13.
ZHANG Keli, PENG Wenying, YANG Hongli. Soil erodibility and its estimation for agricultural soil in China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(1): 7-13. (in Chinese)
- 29 吴昌广, 曾毅, 周志翔, 等. 三峡库区土壤可蚀性 K 值研究[J]. 中国水土保持科学, 2010, 8(3): 8-12.
WU Changguang, ZENG Yi, ZHOU Zhixiang, et al. Soil erodibility K value in three gorges reservoir area [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2010, 8(3): 8-12. (in Chinese)
- 30 梁音, 刘宪春, 曹龙熹, 等. 中国水蚀区土壤可蚀性 K 值计算与宏观分布[J]. 中国水土保持, 2013(10): 35-40.
LIANG Yin, LIU Xianchun, CAO Longxi, et al. The calculation and macroscopic distribution of soil erodibility K value in China's water erosion area [J]. Soil and Water Conservation in China, 2013(10): 35-40. (in Chinese)
- 31 周宁, 李超, 琚存勇, 等. 黑龙江省土壤可蚀性 K 值特征分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(10): 182-189.
ZHOU Ning, LI Chao, JU Cunyong, et al. Analysis of characteristics of soil erodibility K value in Heilongjiang Province [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(10): 182-189. (in Chinese)
- 32 张科利, 蔡永明, 刘宝元, 等. 土壤可蚀性动态变化规律研究[J]. 地理学报, 2001, 56(6): 673-681.
ZHANG Keli, CAI Yongming, LIU Baoyuan, et al. Fluctuation of soil erodibility due to rainfall intensity [J]. Acta Geographica Sinica, 2001, 56(6): 673-681. (in Chinese)
- 33 王彬. 土壤可蚀性动态变化机制与土壤可蚀性估算模型[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
WANG Bin. Dynamic mechanism of soil erodibility and soil erodibility calculation model [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2013. (in Chinese)
- 34 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.
- 35 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): 1302-1309.
- 36 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.
- 37 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[J]. 土壤学报, 2011, 48(6): 1133-1140.
WANG Junguang, LI Zhaoxia, CAI Chongfa, et al. Quantitative relationship of detachment rate of red soil in concentrated flow with soil aggregate characteristics and soil shear strength [J]. Acta Pedologica Sinica, 2011, 48(6): 1133-1140. (in Chinese)
- 38 ANGULO-JARAMILLO R, VANDERVAERE J P, ROULIER S, et al. Field measurement of soil surface hydraulic properties by disc and ring infiltrometers: a review and recent developments [J]. Soil & Tillage Research, 2000, 55(1-2): 1-29.
- 39 IMESON A C, KWAAD F J P M. The response of tilled soils to wetting by rainfall and the dynamic character of soil erodibility [M] // Boardman J, FOSTER I D L, DEARING J A. Soil erosion on agricultural land. New Jersey: John Wiley and Sons, 1990.
- 40 COOTE D R, MALCOLM-MCGOVERN 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.
- 41 BARTHES 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.
- 42 寇萌, 焦菊英, 王巧利, 等. 黄土丘陵沟壑区不同植被带植物群落的细根分布特征[J]. 农业机械学报, 2016, 47(2): 161-171.
KOU Meng, JIAO Juying, WANG Qiaoli, et al. Fine root distribution characteristics of plant community in different vegetation zones in hill-gully region of Loess Plateau [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(2): 161-171. (in Chinese)