

DOI:10.11829/j.issn.1001-0629.2016-0346

郁耀闯,王长燕.黄土高原丘陵区冰草和柳枝稷土壤细沟可蚀性季节动态.草业科学,2017,34(5):950-957.

Yu Y C, Wang C Y. Seasonal dynamics of soil rill erodibility under wheatgrass and switchgrass vegetation in the hilly-gully region of Loess Plateau. Pratacultural Science, 2017, 34(5): 950-957.

黄土高原丘陵区冰草和柳枝稷 土壤细沟可蚀性季节动态

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: 为了评价黄土高原丘陵区退耕还草水土保持效应, 本研究以黄土丘陵区冰草(*Agropyron cristatum*)和柳枝稷(*Panicum virgatum*)为研究对象, 在不同坡度($S=17.36\% \sim 42.26\%$)和流量($Q=1.0 \sim 2.5 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$)条件下, 采用变坡试验水槽测定土壤的分离能力, 利用线性回归方法, 结合土壤侵蚀过程, 运用 WEPP 模型推求土壤细沟可蚀性(K_r), 分析了冰草和柳枝稷生育期内土壤 K_r 的季节变化规律。结果表明, 黄土丘陵区冰草生育期内土壤 K_r 具有显著的季节变化($P < 0.05$), 总体呈下降趋势; 柳枝稷生育期内土壤 K_r 无显著季节变化($P > 0.05$)。冰草土壤 K_r 表现为下降的季节变化, 变化范围为 $0.0021 \sim 0.0224 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$; 柳枝稷土壤 K_r 表现为先升高后降低的季节变化, 变化范围为 $0.0032 \sim 0.0219 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$ 。土壤黏结力、水稳性团聚体和根重密度是影响冰草和柳枝稷生育期内土壤 K_r 季节变化的主要因素。土壤细沟可蚀性与土壤黏结力、水稳性团聚体及根重密度间呈显著负相关关系。此外, 用土壤黏结力和根重密度能够较好地模拟黄土丘陵区冰草和柳枝稷生育期内土壤细沟可蚀性的季节变化。冰草和柳枝稷土壤细沟可蚀性季节变化主要由根系生长和土壤黏结力变化所致。土壤细沟可蚀性与土壤黏结力、水稳性团聚体和根重密度间呈显著负相关关系。用土壤黏结力和根重密度等参数能够较好地模拟冰草和柳枝稷土壤细沟可蚀性的季节变化规律。

关键词: 黄土丘陵区; 土壤细沟可蚀性; 季节动态; 根重密度

中图分类号: S812.2; S157.2

文献标志码: A

文章编号: 1001-0629(2017)05-0950-08*

Seasonal dynamics of soil rill erodibility under wheatgrass and switchgrass vegetation in the hilly-gully region of Loess Plateau

Yu Yao-chuang^{1,2}, Wang Chang-yan^{1,2}

(1. College of Geography and Environment, Baoji Arts and Sciences University, Baoji 721013, China;

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

Abstract: In order to evaluate soil and water conservation status in the restored grasslands in “Grain for Green” history in the hilly-gully region of Loess Plateau, wheatgrass and switchgrass plots were studied. The scouring experiments were carried out in a laboratory to simulate soil detachment by concentrated flow under six slopes ($S=17.36\% \sim 42.26\%$) and discharges ($Q=1.0 \sim 2.5 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$). Soil rill erodibility (K_r) was estimated by WEPP model. The seasonal dynamics of soil rill erodibility under wheatgrass and switchgrass vegetation were studied during the growing season. Soil rill erodibility under wheatgrass in the hilly-gully region of Loess Plateau varied significantly with season ($P < 0.05$), revealing a significant decline during the growing season. In

* 收稿日期: 2016-06-27 接受日期: 2017-01-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(41371497、41171423、41601016); 陕西省教育厅重点实验室项目(2010JS072、2009JS071); 宝鸡文理学院重点科研项目(ZK2017039、ZK2017040)

第一作者: 郁耀闯(1980-), 男, 河南南阳人, 副教授, 博士, 研究方向为土壤侵蚀与环境效应。E-mail: yuyaochuang@126.com

通信作者: 王长燕(1979-), 女, 山东招远人, 副教授, 博士, 研究方向为土壤侵蚀与植被关系。E-mail: wcyxa_1979@163.com

contrast, soil rill erodibility under switchgrass cover had no clear seasonal dynamics during the growing season ($P>0.05$). K_r values in wheatgrass plots varied from 0.002 1 to 0.022 4 $s \cdot m^{-1}$. Soil rill erodibility in switchgrass displayed a pattern of seasonal dynamics, including an initial increase, followed by decline. K_r values in switchgrass plots varied from 0.003 2 to 0.021 9 $s \cdot m^{-1}$. The seasonal dynamics of soil rill erodibility of wheatgrass and switchgrass were affected by seasonal changes in soil cohesion, water-stable aggregate content, and grass root density. Significant negative correlation between soil rill erodibility and soil cohesion, water-stable aggregate content, and grass root density were found. In addition, the dynamics of change in soil rill erodibility of wheatgrass and switchgrass plots could be predicted based on with soil cohesion and grass root density. The growth of grass root system and the seasonal change in soil cohesion emerged as the main factors affecting the dynamics of soil rill erodibility of the restored grasslands in the hilly-gully region of Loess Plateau. Soil rill erodibility of the two types of grasslands showed significant negative correlation with soil cohesion and water-stable aggregate content, which are important parameters for simulating the dynamics of soil rill erodibility of the restored grasslands in this region.

Key words: hilly-gully region of Loess Plateau; soil rill erodibility; seasonal dynamics; grass root density

Corresponding author: Wang Chang-yan E-mail: wcyxa_1979@163.com

黄土高原地区土质疏松、坡陡、暴雨集中、土地利用不合理和植被覆盖率低^[1-2],年土壤侵蚀模数为 5 000到 10 000 $t \cdot (km^2 \cdot a)^{-1}$ ^[2-3],是世界上土壤侵蚀最严重的区域之一,也是我国生态环境建设工程实施的重点区域。为控制该区土壤侵蚀,自 1999 年以来,开展了以退耕还林、还草为主要手段的自然和人工植被恢复工程。截止到 2008 年,该区退耕面积已达 4.83×10^6 hm^{-2} ^[4],地上植被的变化不但引起了地表层土壤属性^[5-7]和土壤侵蚀过程的变化,而且可能会导致近地表层土壤细沟可蚀性的变化。但目前两者的定量关系还缺乏深入系统的研究。因此,探讨黄土高原丘陵区冰草和柳枝稷土壤细沟可蚀性季节动态变化问题,对该区退耕草地的水土保持效益评价具有重要意义。

土壤细沟可蚀性(K_r)是土壤侵蚀过程模型中的重要参数^[8-10]。在 WEPP 模型中,它与土壤临界剪切力(τ_c)是反映土壤抵抗径流冲刷的阻力参数^[11],且在实际应用中能够用侵蚀率、水稳性团粒含量和土壤渗透性等土壤属性来表征^[12]。以往的研究表明,土壤可蚀性值与土壤属性密切相关^[13],且具有时空分布规律^[14-16]。但目前相关研究多集中于 K_r 的计算与分布^[17-20],对植被生育期 K_r 变化规律的研究相对薄弱。准确定量 K_r 生育期变化规律可以为土壤侵蚀过程模型建立提供数据支撑。

冰草(*Agropyron cristatum*)是禾本科冰草属植物,根系发达,具有较强的抗旱性和抗寒性,是黄土高原地区重要的优势种禾草,也是该区的优良牧草和重

要的水土保持植物。柳枝稷(*Panicum virgatum*)为禾本科草本植物,20 世纪 90 年代被引种到我国黄土高原地区,是一种需水量较少的禾本科牧草,具有优良的水土保持性能。以黄土高原丘陵区植被恢复过程中冰草和柳枝稷为对象,研究两种禾草生育期内土壤 K_r 的季节动态变化规律及其与土壤属性的定量关系,有助于黄土高原土壤侵蚀过程模型地建立。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验在陕西安塞水土保持综合试验站进行,地理位置为 $109^{\circ}19'23''$ E, $36^{\circ}51'30''$ N,海拔 1 068~1 309 m,温带半干旱气候是该区主要气候类型,年均温 8.8 $^{\circ}C$,年平均降水量 505.3 mm。峁状、梁状丘陵是该区的主要地貌类型,粉砂壤土是该区的主要土壤类型,沟蚀和面蚀是该区的主要土壤侵蚀类型。达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)、茵陈蒿(*Artemisia capillaris*)、白羊草(*Bothriochloa ischaemun*)、长芒草(*Stipa bungeana*)、冰草等是该区的主要草本植被类型,柳枝稷为该区主要的人工引种禾草之一。谷子(*Setaria italica*)为该区一年生禾本科作物。

1.2 样地选择

试验选取黄土高原丘陵区冰草和柳枝稷为研究对象,以谷子为对照。3 个样地均位于站内川地,海拔 1 070 m。冰草为退耕后人工恢复 3 年草地,柳枝稷为退耕后人工恢复 17 年草地,谷子为一年生作物。需要说明的是,农耕地是该区土壤侵蚀泥沙的主要来源,谷

子是该区农耕地种植的主要作物之一,与冰草和柳枝稷同属禾本科植物。因此,选取谷子作为对照。冰草和柳枝稷播种时采用旱作,条播(行距均为 70 cm),无灌溉和地表来水。种植后,每年成熟期,取地上部分生物量,留茬 3 cm。谷子的行距为 50 cm。从 2012 年 4 月 18 日至 9 月 30 日,每 3 d 观测冰草、柳枝稷和谷子的生长状况,详细记录 3 种禾本科植物的生长过程(表 1)。Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ和Ⅵ分别代表冰草和柳枝稷生育

表 1 冰草和柳枝稷生育期基本特征
Table 1 Basic characteristics of wheatgrass and switchgrass during the growing season

序号 Code	生育时间 Growth time/ MM-DD	草地类型 Grass type		
		冰草 Wheatgrass	柳枝稷 Switchgrass	谷子 Millet
Ⅰ	04-18	返青 Regreening	返青 Regreening	播种期 Sowing
Ⅱ	05-20	分蘖 Tillering	分蘖 Tillering	幼苗期 Seedling
Ⅲ	06-18	拔节 Jointing	拔节孕穗 Jointing and booting	拔节孕穗 Jointing
Ⅳ	07-20	孕穗 Booting	抽穗 Heading	抽穗灌浆期 Heading and filling
Ⅴ	08-10	开花 Flowering	开花结果 Blooming and fruit-bearing	籽粒形成期 Grain forming
Ⅵ	09-30	种子成熟 Seed maturing	种子成熟 Seed maturing	成熟期 Maturing

期内的 6 个关键生长阶段。

1.3 样品采集

试验开始于 2012 年 4 月上旬,9 月底结束。土壤分离能力试验分别选取冰草、柳枝稷和谷子的 6 个关键生长阶段进行。在生育期内的每个生长阶段,分别在冰草地、柳枝稷地和谷子地靠近植株根部用内径 9.8 cm、高 5 cm 的环刀取原状土^[21],利用变坡试验水槽测定土壤的分离能力,每个关键生长阶段每个样地均采集 30 个土壤分离样品,共采集 90 个环刀样品,6 个生长阶段共采集土壤分离样品 540 个,每次取样设 5 个重复。

1.4 试验方法

土壤分离能力用变坡试验水槽系统测定(水槽长 4 m、宽 0.35 m、深 0.6 m)。试验设计如表 2 所示,采用 6 组坡度和流量组合。用染色法测定坡面流表面最大流速,修正系数为 0.8^[21-22],土壤分离能力计算公式^[21-22]:

$$D_c = \frac{W_a - W_b}{1\,000 \times t \times A}$$

(1)

式中: D_c 为土壤分离能力 $[\text{kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}]$; W_a 为冲刷前环刀内土壤样品干重(g); W_b 为冲刷后环刀内土壤样品干重(g); t 为冲刷时间(s); A 为环刀面积(m^2)。

土壤细沟可蚀性(K_r)用土壤侵蚀过程 WEPP 模型计算^[12]:

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

(2)

式中: D_c 为土壤分离能力 $[\text{kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}]$; K_r 为土

壤细沟可蚀性($\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$); τ 为水流剪切力(Pa); τ_c 为土壤临界剪切力(Pa)。

表 2 试验中坡面流体力学参数
Table 2 The hydraulic parameters of overland flow used in the scouring experiment

流量 Flow/ $\text{l} \cdot \text{s}^{-1}$	坡度 Slope/%	水流剪切力 Flow shear stress/Pa
1.0	17.4	5.71
2.0	17.4	8.60
2.0	25.9	10.75
1.5	42.3	13.06
2.0	42.3	15.36
2.5	42.3	17.18

用微型黏结力仪测定土壤黏结力。用环刀法、干湿筛法和烘干法容重分别测定 0—5 cm 土层的土壤容重、水稳性团聚体和初始含水量。选取长势大致相同的植株,用土壤采样器在靠近植株根部 0—5 cm 土层取原状土。根系样品水洗后用烘干法测定根重密度。以上取样重复次数均大于 3 次。

1.5 统计方法

利用 SPSS 20.0 软件中的 Pearson 法分析土壤细沟可蚀性与土壤黏结力、容重、水稳性团聚体及根重密度的相关性,土壤细沟可蚀性季节动态显著性检验采用 ANOVA 法($P < 0.05$),多重比较采用 LSD 法,土壤细沟可蚀性季节动态模拟方程采用 SPSS 20.0 中的 Nonlinear Regression 模块构建。

2 结果

2.1 土壤黏结力、容重和水稳性团聚体季节动态

在冰草生育期内,土壤黏结力表现出明显的季节动态(图1),变化范围介于10.25~14.72 kPa,平均值为12.82 kPa,最大值出现在孕穗期(7月中旬),最小值出现在返青期(4月中旬)。柳枝稷几乎表现为持续升高的季节动态模式,变化范围介于12.21~14.54 kPa,平均值为13.46 kPa,最大值出现在开花结果期(8月上旬),最小值也出现在返青期。谷子土壤黏结力在整个生育期内表现为升高—降低的季节变化,变化范围介于1.08~12.62 kPa,平均值为8.79 kPa,最大值出现在籽粒形成期,最小值出现在播种期。

冰草土壤容重在整個生育期内表现为先升高后降低的季节动态(图1),变化范围介于1.04~1.19 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$,平均值为1.11 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$,最大值出现在8月上旬开花期,最小值出现在4月中旬返青期。柳枝稷土壤容重表现为先升高后降低再升高的季节动态,变化范围介于1.12~1.17 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$,平均值为1.15 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$,最大值出现在种子成熟期(9月底),最小值出现在返青期(4月中旬)。在谷子生育期内,土壤容重表现为先升高后降低再升高的季节变化,变化范围介于1.02~1.16 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$,平均值为1.10 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$,最大值出现在抽穗灌浆期,最小值出现在播种期。

冰草和柳枝稷土壤水稳性团聚体的季节动态总体上均呈上升趋势(图1),变化介于28.37%~35.57%和30.86%~39.82%,平均值分别为31.80%和36.20%。冰草和柳枝稷土壤水稳性团聚体的最大值均出现在种子成熟期,最小值均出现在返青期。谷子土壤水稳性团聚体的季节变化在整个生育期内增加了56%,总体呈上升趋势,变化范围介于14.84%~23.01%,平均值为19.73%,最大值出现在成熟期,最小值出现在播种期。

2.2 土壤细沟可蚀性季节动态

在整个生育期内,冰草土壤细沟可蚀性具有明显的季节动态,柳枝稷土壤细沟可蚀性在整个生育期内无明显的季节动态变化(图2)。在整个生育期内,冰草土壤细沟可蚀性为0.002 1~0.022 4 $\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$,是谷子土壤细沟可蚀性变化的4.27%~30.48%,平均值为0.011 8 $\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$,该值为谷子均值的8.1%。柳枝稷土壤细沟可蚀性在整个生育期内表现为先升高后降低的季节动态,为0.003 2~0.021 9 $\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$,是谷子土壤细沟可蚀性的3.61%~44.1%,平均值为0.013 8 $\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$,是谷子平均值的9.4%。在整个生育期内,柳

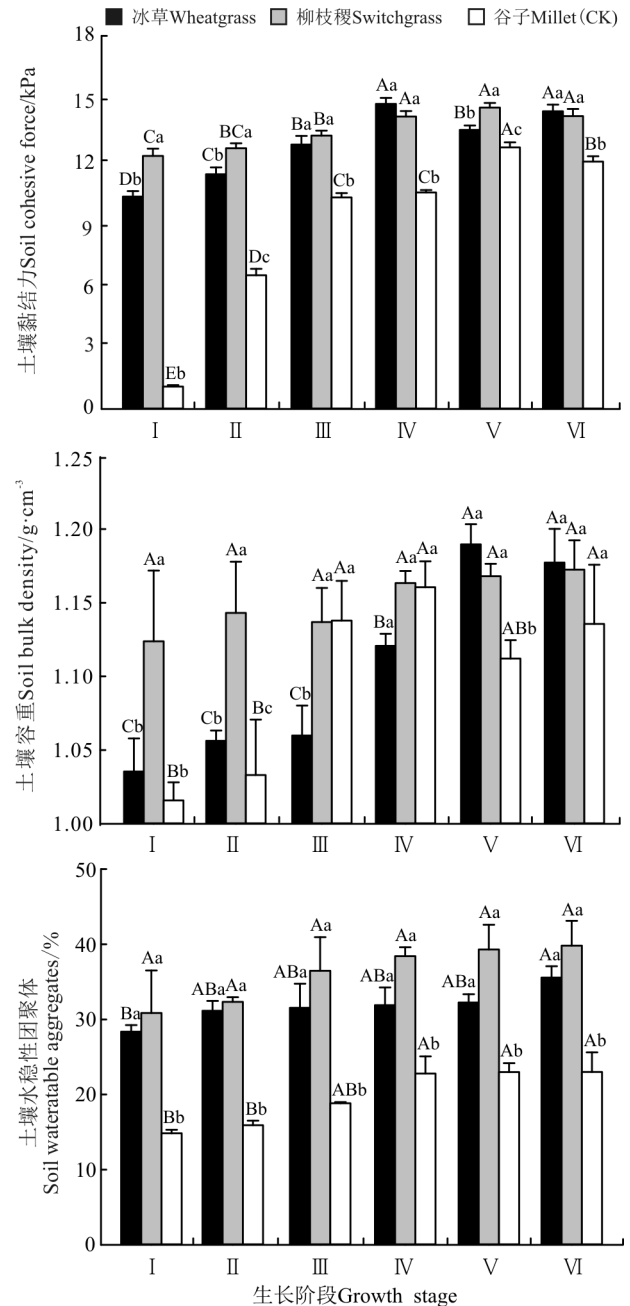


图1 冰草和柳枝稷土壤属性季节动态

Fig. 1 Seasonal dynamics of soil properties of under wheatgrass and switchgrass vegetation

注:不同小写字母表示不同物种同一生长阶段间差异显著($P < 0.05$),不同大写字母表示同一物种不同生长阶段间差异显著($P < 0.05$),I, II, ..., VI同表1。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference among the different treatments in the same growth stage at the 0.05 level, and different capital letters for the same plot indicate significant difference with the same treatment among different growth stages at the 0.05 level; I, II, ..., VI same as Table 1; similar for the following figures.

枝稷土壤 K_r 平均值是冰草土壤 K_r 平均值的1.17倍。在返青期,冰草土壤 K_r 值比柳枝稷土壤 K_r 值高

18.5%，除此之外，在Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ生育阶段，则分别低17.4%、30.8%、19.4%、24.9%和34.9%。冰草土壤细沟可蚀性总体呈下降趋势，在种子成熟末期下降到最低值 $0.0021\text{ s}\cdot\text{m}^{-1}$ ，下降幅度为91.0%。在柳枝稷生育期内，从返青期至分蘖期，柳枝稷土壤细沟可蚀性呈上升趋势，上升幅度为15.6%；从分蘖期至种子成熟期，柳枝稷土壤细沟可蚀性呈下降趋势，下降幅度为85.3%；在种子成熟期下降到最低值 $0.0032\text{ s}\cdot\text{m}^{-1}$ 。从播种期至成熟期，谷子土壤细沟可蚀性总体呈下降趋势，在4月中旬出现最大值($0.5251\text{ s}\cdot\text{m}^{-1}$)，在6月中旬出现最小值($0.0433\text{ s}\cdot\text{m}^{-1}$)，平均值为 $0.1470\text{ s}\cdot\text{m}^{-1}$ 。

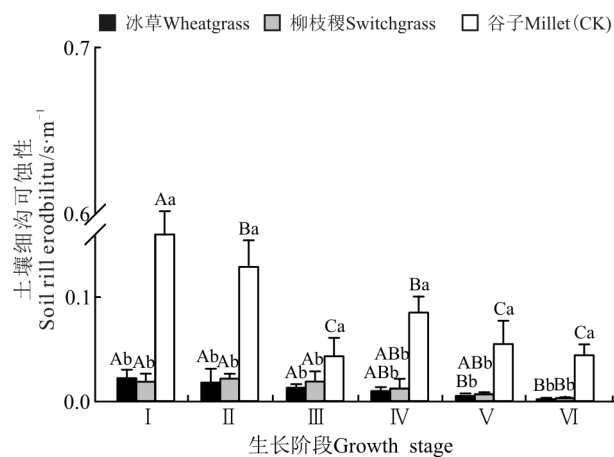


图 2 冰草和柳枝稷土壤细沟可蚀性季节动态
Fig. 2 Seasonal dynamics of soil rill erodibility in wheatgrass and switchgrass covered plots

2.3 土壤细沟可蚀性季节动态影响因素

Pearson 相关分析表明(表 3)，土壤黏结力、容重、水稳性团聚体及根重密度是影响土壤细沟可蚀性季节

表 3 土壤细沟可蚀性与影响因子的相关系数
Table 3 Correlation between soil rill erodibility and soil properties

类型 Type	K _r 冰草 Wheatgrass	K _r 柳枝稷 Switchgrass
土壤黏结力 Soil cohesion	−0.886 *	−0.859 *
土壤容重 Soil bulk density	−0.939 * *	−0.874 *
土壤水稳性团聚体 Soil water-stable aggregates	−0.908 *	−0.847 *
根重密度 Root density	−0.870 *	−0.905 *

注：“* *”表示极显著相关($P<0.01$)，“*”表示显著相关($P<0.05$)。
Note: * * and * indicate significant correlation at 0.01 and 0.05 levels, respectively.

动态变化的主要因子。两种草地的土壤细沟可蚀性与土壤黏结力、容重、水稳性团聚体及根重密度间呈显著负相关关系($P<0.05$)。

2.4 冰草和柳枝稷土壤细沟可蚀性季节动态模拟

在冰草和柳枝稷生育期内，土壤黏结力和容重是反映土壤硬化过程的两个重要指标，但土壤黏结力在整个生育期内具有显著的季节动态($P<0.05$)，柳枝稷土壤容重在整個生育期内无显著的季节动态($P>0.05$)。因此，在模拟方程(3)中没有考虑土壤容重对土壤细沟可蚀性的影响。水稳性团聚体也是影响土壤细沟可蚀性季节动态的重要因子，但整个生育期内，两种草地的土壤水稳性团聚体无显著的季节动态变化。所以，也未考虑它对土壤细沟可蚀性的影响。本研究采用非线性回归方法，利用土壤黏结力和根重密度建立了冰草和柳枝稷土壤细沟可蚀性季节动态模拟方程：

$$K_r = a \times \exp(b \times \lceil SC + c \times \lceil RD) \tag{3}$$

式中： K_r 为土壤细沟可蚀性($\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$)； SC 为土壤黏结力(kPa)； RD 为根重密度($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)； a 、 b 、 c 分别为回归参数。

在土壤细沟可蚀性模拟方程(3)中，土壤黏结力和根重密度分别能够解释自变量土壤细沟可蚀性 99% 和 89% 的变量(表 4)，这说明土壤黏结力和根重密度是影响两种草地土壤细沟可蚀性季节动态的主要因素。冰草和柳枝稷土壤细沟可蚀性模型的纳什系数(Nash-Sutcliffe efficiency coefficient, NSE)分别为 0.990 和 0.890，模拟效果较为理想(图 3)。

表 4 土壤细沟可蚀性模拟方程参数值
Table 4 Parameters of the simulated equation of soil rill erodibility

参数 Parameter	冰草 Wheatgrass	柳枝稷 Switchgrass
a	0.349	0.358
b	−0.090	−0.059
c	−1.592	−1.895
R ²	0.990	0.890
NSE	0.990	0.890

3 讨论

尽管土壤 K_r 能够反映土壤侵蚀过程中的侵蚀阻力，但有关它随时间变化的研究还很少。本研究中冰草土壤 K_r 具有显著季节变化规律，这与冬小麦

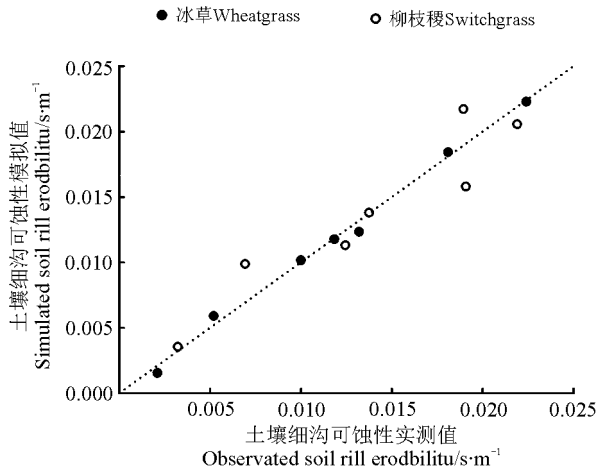


图3 土壤细沟可蚀性实测值与模拟值的关系

Fig. 3 Relationship between the simulated and observed soil rill erodibility

(*Triticum aestivum*)^[23]、玉米(*Zea mays*)^[24]和谷子^[23]等作物的研究结果是一致的。其原因可能是土壤黏结力、容重、土壤水稳性团聚体具有较大的季节波动规律(图1)。但本研究柳枝稷土壤 K_r 的季节变化规律与冰草不一致,这可能是由于种植年限的不同等所导致。

土壤黏结力与土壤颗粒的紧实程度有着密切的关系,直接影响着土壤的抗冲刷能力的大小。通常,土壤容易被径流冲刷时,土壤的分离能力较大, K_r 较大;反之,土壤难于被径流冲刷,土壤的分离能力较小, K_r 较小。在植被生长期,土壤黏结力会随着根系的生长而增加^[25],这会导致土壤可蚀性的降低^[26]。本研究中,在整个生育期内冰草和柳枝稷的土壤黏结力均呈增加趋势(图1),增幅分别为40%和19%,这会导致土壤颗粒与根土基质之间强度的增加^[27],从而使近地表层土壤变得更为紧实,难以被径流冲刷,进而导致土壤 K_r 下降。冰草和柳枝稷在整个生育期内的平均土壤黏结力(12.82和13.46 kPa)分别是谷子生育期内平均土壤黏结力(8.79 kPa)的1.46倍和1.53倍,这说明冰草和柳枝稷土壤抵抗径流被冲刷的能力强于谷子。因此,冰草和柳枝稷的土壤 K_r 要小于谷子的土壤 K_r 。这一研究结果与冬小麦^[23]和玉米^[24]的研究结果相同。土壤容重与土壤黏结力对 K_r 的影响机理类似,因此不再重复分析。

土壤细沟可蚀性与土壤水稳性团聚体在整个生育期内表现出了反相位变化,即随着土壤水稳性团聚体的增加,土壤 K_r 呈降低趋势。土壤水稳性团聚体在

土壤侵蚀过程中往往通过崩解和分散等作用来改变土壤结构,为土壤侵蚀的产生提供物质基础。在整个草地生育期内,根系生长过程中对土壤颗粒的捆绑和黏结等作用,有利于土壤水稳性团聚体的形成^[28],这会导致土壤难以被径流冲刷,从而会降低土壤 K_r 的值。冰草和柳枝稷在生育期内的平均土壤水稳性团聚体(31.8%和36.2%)分别是谷子生育期内平均土壤水稳性团聚体(19.73%)的1.61倍和1.83倍,这说明冰草和柳枝稷土壤中大颗粒土壤水稳性团聚体的数量可能要多于谷子,降低土壤 K_r 的作用要强于谷子,这一结果与Coote等^[29]的研究结果相似。

土壤细沟可蚀性与根重密度间呈显著负相关关系($P<0.05$)(表3)。这可能与冰草和柳枝稷根系生长过程中捆绑和粘结土壤颗粒,改变了土壤渗透性和黏结力等土壤属性^[30],提高了土壤的抗冲刷能力有关^[31]。在冰草和柳枝稷生育期内,根系主要通过网络串联、加筋、粘结等作用来改变土壤的理化性状,提高土壤中水稳性团聚体含量^[28],增强土壤的抗侵蚀能力,使土壤变得更加紧实,抗侵蚀阻力增强,从而导致土壤 K_r 下降。冰草和柳枝稷在整个生育期内的平均根重密度(1.59和1.38 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)分别是谷子平均根重密度(0.05 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)的31.8倍和27.6倍,这说明冰草和柳枝稷根系比谷子根系更能增加土壤的稳定性和增强土壤的侵蚀阻力。另外,冰草平均根重密度是柳枝稷平均根重密度的1.15倍,这说明冰草根系的固土能力要强于柳枝稷,这可能是导致冰草和柳枝稷土壤细沟可蚀性差异的主要原因。黄土高原不同植被类型根系结构减缓土壤侵蚀效应的作用有待于进一步研究。

4 结论

1)在黄土高原丘陵区冰草和柳枝稷生育期内,土壤细沟可蚀性分别呈现出降低和升高—降低的季节变化模式。

2)冰草和柳枝稷土壤细沟可蚀性的季节动态变化主要由土壤黏结力、水稳性团聚体和根重密度等因素所致;两种草地土壤细沟可蚀性与土壤黏结力、容重、水稳性团聚体和根重密度间呈显著或极显著负相关关系。

3)用根重密度和土壤黏结力能够较好地模拟冰草和柳枝稷土壤细沟可蚀性的季节变化规律。

4)在整个生育期内冰草和柳枝稷土壤细沟可蚀性的平均值远低于谷子土壤细沟可蚀性的平均值,这说明退耕还草是黄土高原丘陵区进行水土保持的有效措施。

参考文献 References:

- [1] Zheng F L. Effect of vegetation changes on soil erosion on the Loess Plateau. *Pedosphere*, 2006, 16(4): 420-427.
- [2] Fu B J, Liu Y, Lu Y H, He C S, Zeng Y, Wu B F. Assessing the soil erosion control service of ecosystems change in the Loess Plateau of China. *Ecological Complexity*, 2011, 8(4): 284-293.
- [3] Zhang X C, Liu W Z. Simulating potential response of hydrology, soil erosion, and crop productivity to climate change in Changwu tableland and region on the Loess Plateau of China. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2005, 131(3-4): 127-142.
- [4] Chen Y P, Wang K B, Lin Y S, Shi W Y, Song Y, He X H. Balancing green and grain trade. *Nature Geoscience*, 2015, 8(10): 739-741.
- [5] Angers D A, Caron J. Plant-induced changes in soil structure: Processes and feedbacks. *Biogeochemistry*, 1998, 42(1-2): 55-72.
- [6] 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.
- [7] Jiao F, Wen Z M, An S S. Changes in soil properties across a chronosequence of vegetation restoration on the Loess Plateau of China. *Catena*, 2011, 86(2): 110-116.
- [8] Hirschi M C, Barfield B J. KYERMO—A physically based research erosion model. Part I. Model development. *Transactions of the American Society of Agricultural Biological Engineers*, 1988, 31(3): 804-813.
- [9] Nearing M A, Foster G R, Lane L J, Finkner S C. A process-based soil erosion model for USDA-water erosion prediction technology. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 1989, 32(5): 1587-1593.
- [10] Flanagan D C, Nearing M A. Water erosion prediction project (WEPP) model. *Landscape Erosion and Evolution Modeling*, 2001, 53(5): 1399-1411.
- [11] Knapen A, Poesen J, Govers G, Gyssels G, Nachtergaele J. Resistance of soils to concentrated flow erosion: a review. *Earth Science Reviews*, 2007, 80(1): 75-109.
- [12] 杨玉盛. 不同利用方式下紫色土可蚀性的研究. *水土保持学报*, 1992, 6(3): 52-58.
Yang Y S. A study on the erodibility of purple soil under different land utilization forms. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1992, 6(3): 52-58. (in Chinese)
- [13] 邓良基, 侯大斌, 王昌全, 张世熔, 夏建国. 四川自然土壤和旱耕地土壤可蚀性特征研究. *中国水土保持*, 2003(7): 23-25.
Deng L J, Hou D B, Wang C Q, Zhang S R, Xia J G. Study on soil erodibility of natural soil and dry farmland soil in Sichuan. *Soil and Water Conservation in China*, 2003(7): 23-25. (in Chinese)
- [14] 梁音, 刘宪春, 曹龙熹, 郑粉莉, 张平仓, 史明昌, 曹全意, 袁久芹. 中国水蚀区土壤可蚀性 K 值计算与宏观分布. *中国水土保持*, 2013(10): 35-40.
Liang Y, Liu X C, Cao L X, Zheng F L, Zhang P C, Shi M C, Cao Q Y, Yuan J Q. The calculation and macroscopic distribution of soil erodibility K value in China's water erosion area. *Soil and Water Conservation in China*, 2013(10): 35-40. (in Chinese)
- [15] 张科利, 蔡永明, 刘宝元, 彭文英. 土壤可蚀性动态变化规律研究. *地理学报*, 2001, 56(6): 673-681.
Zhang K L, Cai Y M, Liu B Y, Peng W Y. Fluctuation of soil erodibility due to rainfall intensity. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56(6): 673-681. (in Chinese)
- [16] 王彬. 土壤可蚀性动态变化机制与土壤可蚀性估算模型. 杨凌: 西北农林科技大学博士学位论文, 2013.
Wang B. Dynamic mechanism of soil erodibility and soil erodibility calculation model. PhD Thesis. Yangling: Northwest Agriculture & Forest University, 2013. (in Chinese)
- [17] 刘宝元, 史培军. WEPP 水蚀预报流域模型. *水土保持通报*, 1998, 18(5): 6-12.
Liu B Y, Shi P J. Water erosion prediction project (WEPP) model for watershed scale. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1998, 18(5): 6-12. (in Chinese)
- [18] 吴昌广, 曾毅, 周志翔, 王鹏程, 肖文发, 罗翀. 三峡库区土壤可蚀性 K 值研究. *中国水土保持科学*, 2010, 8(3): 8-12.

- Wu C G, Zeng Y, Zhou Z X, Wang P C, Xiao W F, Luo C. Soil erodibility K value in three gorges reservoir area. *Science of Soil and Water Conservation*, 2010, 8(3): 8-12. (in Chinese)
- [19] 周宁, 李超, 琚存勇, 马亚怀. 黑龙江省土壤可蚀性 K 值特征分析. *农业工程学报*, 2015, 31(10): 182-189.
- Zhou N, Li C, Ju C Y, Ma Y H. Analysis of characteristics of soil erodibility K value in Heilongjiang Province. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(10): 182-189. (in Chinese)
- [20] 王莉娜, 李文龙, 王素芳, 陈迪, 许静. 基于遥感和 USLE 模型的 2000—2010 年甘肃省土壤侵蚀变化评价. *草业科学*, 2016, 33(2): 176-183.
- Wang L N, Li W L, Wang S F, Chen D, Xu J. Variation in soil erosion based on USLE model and remote sensing technology during 2000—2010 in Gansu Province. *Pratacultural Science*, 2016, 33(2): 176-183. (in Chinese)
- [21] 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.
- [22] Nearing M A, Simanton J R, Norton L D, Bulygin S J, Stone J. Soil erosion by surface water flow on a stony, semiarid hillslope. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1999, 24(8): 677-686.
- [23] 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 and Tillage Research*, 2007, 94(2): 425-440.
- [24] Yu Y C, Zhang G H, Geng R, Li Z W. Temporal variation in soil rill erodibility to concentrated flow detachment under four typical croplands in the Loess Plateau of China. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 69(4): 352-363.
- [25] Norris J E. Root reinforcement by hawthorn and oak roots on a highway cut-slope in southern England. *Plant & Soil*, 2005, 278(1-2): 43-53.
- [26] Baets S de, Poesen J, Gyssels G, Knapen A. Effects of grass on the erodibility of topsoil during concentrated flow. *Geomorphology*, 2006, 76(1-2): 54-67.
- [27] Tengbeh G T. The effect of grass roots on shear strength variations with moisture content. *Soil Technology*, 1993, 6(3): 287-295.
- [28] Wang B, Zhang G H, Zhang X C, Li Z W, Su Z L, Yi T, Shi Y Y. Effects of near soil surface characteristics on soil detachment by overland flow in a natural succession grassland. *Soil Science Society of America Journal*, 2014, 78(59): 589-597.
- [29] Coote D R, Malcolmmcgovern M C A, Wall G J, Dickinson W T, Rudra R P. 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.
- [30] 张晓艳, 周正朝. 黄土高原地区草地植被调控土壤水蚀机理的研究进展. *草业科学*, 2015, 32(1): 64-70.
- Zhang X Y, Zhou Z C. Research progress on mechanism of grassland vegetation regulating soil erosion in Loess Plateau. *Pratacultural Science*, 2015, 32(1): 64-70. (in Chinese)
- [31] 李勇, 吴钦孝, 朱显谟, 田积莹. 黄土高原植物根系提高土壤抗冲性能的研究. I. 油松人工林根系对土壤抗冲性的增强效应. *水土保持学报*, 1990, 4(1): 1-5.
- Li Y, Wu Q X, Zhu X M, Tian J Y. Studies on the intensification of soil anti-scourability by plant roots in the Loess Plateau I. The increasing effect of soil anti-scourability by the roots of Chinese Pine. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1990, 4(1): 1-5. (in Chinese)

(责任编辑 苟燕妮)