

黄土区不同植被类型条件下土壤分离速率变化特征及其影响因素

蒋平海, 周正朝, 李 静, 葛芳红

(陕西师范大学 地理科学与旅游学院, 西安 710062)

摘 要:为比较土壤理化性质与根系特征对土壤分离速率的影响强度,采用模拟冲刷试验与室内分析相结合的方法,探究了黄土区不同植被类型在 3 种处理下(含根系、含冠层、含结皮)土壤分离速率变化特征及其影响因素。结果显示:(1)不同植被类型间,狼牙刺群落下土壤分离速率最小,显著低于达乌里胡枝子;不同处理下,含结皮土壤分离速率最大,含根系土壤次之,含冠层土壤最小。(2)土壤分离速率与容重呈显著正相关关系($p < 0.05$),与有机质、团聚体呈显著负相关关系($p < 0.05$)。只考虑土壤理化性质对土壤分离速率的影响时,影响狼牙刺、白羊草群落下土壤分离速率的主导因素是容重;影响铁杆蒿、达乌里胡枝子群落下土壤分离速率的主导因素为有机质。(3)根系特征也是影响土壤分离速率的因素,土壤分离速率与根系生物量密度、根长密度、根系表面积密度、根体积密度呈负相关关系。只考虑根系特征对土壤分离速率的影响时,影响狼牙刺、铁杆蒿、白羊草群落下土壤分离速率的主导因素是根长密度;影响达乌里胡枝子群落下土壤分离速率的主导因素是根系表面积密度。(4)本研究中,土壤分离速率回归方程 $D_r = 0.086 - 0.035X_1 + 1.367X_2$, ($R^2 = 0.767$, $N = 36$, $p = 0.000$; X_1 为土壤有机质, X_2 为土壤容重),土壤理化性质对于分离速率的作用强于根系的作用;不考虑植被类型时,土壤有机质、土壤容重是影响土壤分离速率的主导因素。

关键词:黄土区; 植被类型; 土壤分离速率; 土壤理化性质; 根系特征

中图分类号: S152

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)02-0105-07

Changes and Influences of Soil Detachment Rate Under Different Vegetation Types in the Loess Plateau

JIANG Pinghai, ZHOU Zhengchao, LI Jing, GE Fanghong

(School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China)

Abstract: In order to compare the effects of soil physical and chemical properties and root characteristics on soil detachment rate, using the method of erosion simulation test and laboratory analysis, we examined the changes and influences of soil detachment rate under different vegetation types in 3 kinds of treatments (root, canopy, and crust) in the Loess Plateau. The results showed that: (1) between different vegetation types, the soil detachment rate of *Sophora viciifolia* community was the lowest, significantly lower than *Lespedeza davurica* community; under different treatments, the detachment rate of crustal soil was the largest, followed by root soil, and then canopy soil; (2) the soil detachment rate was significantly positively related to soil bulk density ($p < 0.05$), the soil detachment rate was significantly negatively related to soil organic matter, soil aggregate ($p < 0.05$); If the influence of physical and chemical properties of soil on the soil detachment rate was only considered, the dominant factor influencing the soil detachment rate of *S. viciifolia* community and *Bothriochloa ischaemum* community was soil bulk density; the dominant factor influencing the soil detachment rate of *Artemisia gmelinii* community and *L. davurica* community was soil organic matter; (3) root characteristics were also the factors that influence the soil detachment rate; the soil detachment rate was negatively related to root biomass density, root length density, root surface area density and root volume density; If the influence of root characteristics on the soil detachment rate was only considered,

收稿日期: 2017-05-07

修回日期: 2017-06-26

资助项目: “十三五”国家重大研发计划(2017YFC0504702); 国家自然科学基金(41571260)

第一作者: 蒋平海(1992—), 男, 四川遂宁人, 硕士研究生, 研究方向为水土资源评价与规划。E-mail: jph161998@163.com

通信作者: 周正朝(1980—), 男, 四川泸州人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事环境变化与土壤侵蚀研究。E-mail: zhouzhengchao@126.com

the dominant factor influencing the soil detachment rate of *S. vicii* *folia* community, *A. gmelinii* community and *B. ischaemum* community was the root length density, the dominant factor influencing the soil detachment rate of *L. davurica* community was the root system surface area density; (4) in this study, the regression equation of soil detachment rate was expressed as $D_r=0.086-0.035X_1+1.367X_2$, ($R^2=0.767$, $N=36$, $p=0.000$, X_1 is soil organic matter, X_2 is soil bulk density); the influence of physical and chemical properties of soil on the detachment rate was stronger than that of the root system; without considering the vegetation types, soil organic matter and soil bulk density were the key factors to decrease the soil detachment rate.

Keywords: Loess Plateau; vegetation types; soil detachment rate; soil physical and chemical properties; root characteristics

黄土高原是我国乃至世界上水土流失最为严重的地区之一^[1-2]。严重的土壤侵蚀导致土壤肥力下降、耕地资源减少等生态问题,制约了当地经济发展并加剧下游河流洪涝灾害,阻碍了区域的可持续发展^[3]。为有效治理和解决严重的生态退化和水土流失问题,1999 年我国启动退耕还林(草)工程,以期缓解水土流失、改善生态环境。土壤侵蚀过程包括土壤分离、输沙及泥沙沉积等过程^[4],其中土壤分离是指在降雨溅击和径流冲刷作用下,土壤颗粒脱离土体的过程^[5-6],是土壤侵蚀的起始阶段^[1],该过程的强弱直接影响水土流失的大小^[7]。土壤理化性质、根系特征对土壤分离速率的影响研究较多。Govers 等^[8]研究表明,土壤分离速率与容重呈负相关关系。Gyssels 等^[9]研究显示土壤分离速率与根长密度呈负相关关系。李静等^[10]对子午岭连家砭林场不同退耕年限草地土壤分离速率的研究表明,土壤分离速率与土壤有机质含量、团聚体含量均呈负相关关系;唐科明等^[11]研究了根系对土壤分离速率的影响,结果显示,植被根系能显著降低土壤分离速率,且随根系密度的增大,土壤分离速率逐渐下降,土壤分离速率与根系密度拟合曲线为指数函数。此外,水蚀因子也是影响土壤分离速率因素之一。任乐等^[12]对贵州耕地土壤分离速率研究显示土壤分离速率与流量、坡度呈显著正相关。张光辉^[7]、王军光^[13]等研究结论与之一致,且比较了坡度、流量对土壤分离速率影响的强度,即坡度对分离速率的影响大于流量。同时,土地利用方式^[14]、土壤类型^[15]、植被类型^[16]等因素均影响土壤分离速率。目前,关于土壤分离速率以及植被生态功

能的研究主要集中于不同土层深度的研究^[1,17-19],对同一土层深度下含冠层土壤、含根系土壤、含结皮土壤的分离速率及其影响因素研究相对较少,且土壤理化性质与根系特征对土壤分离速率影响作用的对比分析还鲜有报道。

本研究选取黄土区典型植被群落下同一深度不同处理的土壤,用模拟冲刷试验与室内分析相结合的方法,围绕土壤分离速率变化,探寻不同植被群落下同一深度不同处理土壤分离速率变化特征及其影响因素,对比分析土壤理化性质与根系特征对土壤分离速率的影响强度以及不同植被保持水土的作用,以期为我国黄土区植被恢复、生态建设提供科学参考与指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕北黄土丘陵沟壑区延安市安塞区坊塌流域(东经 109°15′48″—109°16′51″,北纬 36°41′24″—36°51′32″),流域面积 8.66 km²^[20],海拔为 997~1 731 m。地表千沟万壑,支离破碎,地貌类型以黄土梁涧、梁峁状丘陵和沟谷为主^[21]。该区域年均降水量 549 mm 左右,分布不均,降水集中在夏季 7—9 月,且多暴雨。年均蒸发量为 1 463 mm,年均气温为 8.8℃^[22],属于典型的温带大陆性干旱半干旱气候。地带植被属于暖温带落叶阔叶林向草原过渡的森林草原区^[23]。土壤类型处于沙黄土与黄绵土过渡区,土质疏松,抗侵蚀能力弱,易发生水土流失。

本研究选取黄土区常见的植被群落草地为样地,具体样地信息见表 1。

表 1 不同植被群落草地试验样地概况

群落类型	盖度	生物量/ (mg·cm ⁻²)	坡度/(°)	坡位	坡向	恢复年限
狼牙刺群落(<i>Sophora vicii</i> <i>folia</i>)	70	41.72	30	坡上	南偏西 15°	老荒坡
铁杆蒿群落(<i>Artemisia gmelinii</i>)	35	28.71	15	坡中—坡下	正北	10 a
白羊草群落(<i>Bothriochloa ischaemum</i>)	50	13.95	30	坡中—坡下	西偏南 18°	老荒坡
达乌里胡枝子群落(<i>Lespedeza davurica</i>)	30	9.43	0	无	无	5 a

1.2 研究方法

1.2.1 采样方法 2016年8月进行采样,按照S型线路,选择长势均匀的植株,确定采样点,每个样地选择9个样点。在每个样点开挖一个30 cm深的土壤剖面,以备土壤样品采集。挖出土壤剖面后,去除地表枯落物,用取样器(土槽15 cm×10 cm×10 cm)采集土壤样品。采样时在取样器上方垫一结实木板,用锤将取样器顺坡垂直砸下。然后去掉周边土壤,将取样器完整取出,再用剖面刀沿取样器底部将土样削平后垫上带有小孔的铝制底片。

土壤样品有3种处理,分别是含冠层土壤、含根系土壤和含结皮土壤。首先在样点选择具有代表性的植株,然后采集含有代表性植株地上部分的冲刷土样为含冠层土壤;再在代表性植株附近的位置,剪去植被地上部分后,采集的冲刷土样为含根系土壤;最后在远离代表性植株的位置,且有结皮发育的地方采集冲刷的土样为含结皮土壤。每一个处理3个重复,共36个土样。

1.2.2 坡面放水冲刷试验及土壤分离速率的计算 采用固定坡度与流量水槽冲刷法,水槽长宽高分别为2.0 m,0.1 m,0.05 m。坡度20°,冲刷流量5.0 L/min,冲刷历时为15 min。

放水产流后的前3 min用取样桶每1 min收集1次径流泥沙样,之后每2 min收集1次,共取9次样,然后关闭水流,且记录下冲刷时间。径流泥沙样静置后倒掉表层清水后倒入铝盒中,然后将铝盒放入烤箱烤至恒重(105℃,12 h),用该恒重减去铝盒重量可得试验过程收集的泥沙样品干重。试验中径流水流分离能力为单位时间(s)单位面积(m²)内径流分离土壤的质量(kg),即土壤分离速率^[24]。公式如下:

$$D_r = \frac{W}{t \cdot A} \quad (1)$$

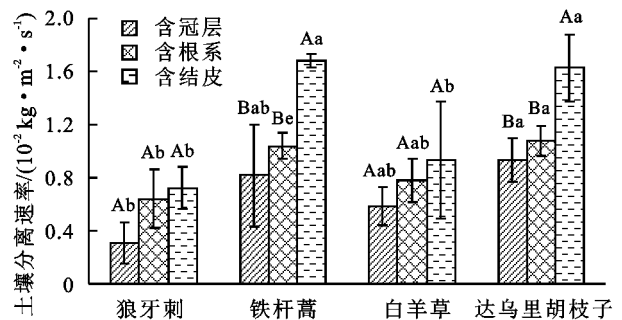
式中: D_r 为土壤分离速率[kg/(m²·s)]; W 为试验过程中收集的泥沙样品干重(g); t 为水流冲刷时间(s); A 为取样器投影的面积(m²)^[1]。

1.2.3 测定方法及数据处理 土壤容重测定采用环刀法;土壤有机质测定用重铬酸钾容量法;团聚体测定采用维切诺夫湿筛法(仪器型号为ZY200-IV型土壤团粒分析仪)。根系生物量密度(mg/cm³)、根长密度(cm/cm³)、根系表面积密度(cm²/cm³)、根体积密度(10⁻² cm³/cm³)的计算方法参照文献[25]测定。室内试验与分析于2016年12月完成。将相关试验数据输入Microsoft Excel 2010中进行初步整理,再运用SPSS 20.0进行双变量相关分析、单因素方差分析和多重线性回归分析。

2 结果与分析

2.1 不同植被条件下土壤分离速率变化特征

土壤分离速率是土壤抗侵蚀能力的重要指标。狼牙刺群落下土壤分离速率最小,为 5.56×10^{-3} [kg/(m²·s)],分别是达乌里胡枝子、铁杆蒿、白羊草群落下土壤分离速率的45.87%,47.11%,72.54%。狼牙刺群落下土壤分离速率在含冠层土壤中,显著低于达乌里胡枝子;在含根系、含结皮土壤中,显著低于达乌里胡枝子、铁杆蒿(图1)。主要是因为狼牙刺为半灌木植物,根系较为发达,且地上部分生物量较大,保持水土的能力较强。表明研究区不同植被类型对土壤分离速率影响较大。不同处理下,含结皮土壤的分离速率最大,是含冠层土壤的1.81~2.35倍,含根系土壤的1.13~1.56倍。表明不同处理方式下土壤分离速率差异较大。狼牙刺、白羊草群落,不同处理下土壤分离速率差异不显著。铁杆蒿、达乌里胡枝子群落下,含结皮土壤分离速率显著高于含根系、含冠层土壤分离速率;且含根系、含冠层土壤分离速率之间无显著性差异。



注:不同小写字母表示不同群落同一处理下数据有显著性差异($p < 0.05$),不同大写字母表示同一群落不同处理下数据有显著性差异($p < 0.05$),字母相同表示在显著水平 $p < 0.05$ 水平上没有显著性差异,下同。

图1 不同植被群落的土壤分离速率

2.2 不同植被条件下土壤分离速率的影响因素

2.2.1 土壤理化性质对分离速率的影响

(1) 不同植被条件下土壤理化性质的差异。土壤容重是土壤的基本物理性质,容重的大小直接反映土壤紧实度状况^[26]。不同处理下,含结皮土壤容重最大,为含冠层土壤的1.17~1.21倍,含根系土壤的1.04~1.11倍(表2)。这主要是因为含冠层土壤不仅可以通叶子、茎秆来降低雨水的打击力,避免土壤遭受打击而变得更紧实^[27],还可以通过根系穿插作用来疏松土壤,减少单位体积里的土壤重量^[27-28]。另外,根系可通过生物作用、化学作用改善土壤结构,使土壤结构良性发展,土质更疏松。不同植被类型

间,狼牙刺群落下土壤容重(1.167 g/cm^3)最小,分别为达乌里胡枝、铁杆蒿、白羊草群落下土壤容重的 82.36% , 87.08% , 92.11% 。主要由于狼牙刺系较为发达,对土壤的穿插作用强烈,土壤孔隙度大。

土壤有机质不仅是土壤肥力的重要指标,还可加快土壤团粒结构的形成,增强土壤的透水性^[29]。该研究土样的有机质为 $20.01\sim 36.22\text{ g/kg}$,低于全球土壤有机质含量均值^[30]。土壤有机质主要来源于腐烂分解有机物或其再合成产物^[31],枯落物的分解是土壤有机质的主要来源^[32],是有机质含量不断增加的过程。水土流失是土壤有机质降低的主要原因之一^[33],是有机质含量不断降低的过程。土壤中有有机质的含量是枯落物的分解与水土流失动态变化的结果。含结皮土壤地表无植被,无枯落物腐烂以补充有机质,加之无植被冠层保护、无枯落物的持水作用,水土流失量大,有机质损失严重,有机质含量最低(表 2)。含冠层土壤在冠层的截流作用、枯落物的持水作用下,水土流失减轻,加之枯落物量大,腐烂后补充土壤有机质,使得有机质含量最高(表 2)。

表 2 不同植物群落下土壤理化性质

不同处理类型		土壤容重/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	土壤有机质/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	土壤 团聚体/%
狼牙刺	含冠层土壤	$1.033\pm 0.069\text{Bb}$	$36.218\pm 0.246\text{Aa}$	$60.933\pm 5.431\text{Aa}$
	含根系土壤	$1.218\pm 0.086\text{Aa}$	$33.753\pm 2.475\text{Aa}$	$57.686\pm 0.601\text{Aa}$
	含结皮土壤	$1.249\pm 0.033\text{Ac}$	$25.564\pm 2.003\text{Ba}$	$40.460\pm 2.347\text{Ba}$
铁杆蒿	含冠层土壤	$1.267\pm 0.013\text{Ba}$	$26.995\pm 2.077\text{AC}$	$44.766\pm 6.218\text{Ab}$
	含根系土壤	$1.330\pm 0.087\text{ABa}$	$25.917\pm 2.868\text{Abc}$	$36.366\pm 6.260\text{Ab}$
	含结皮土壤	$1.422\pm 0.027\text{Ab}$	$20.006\pm 1.573\text{Bbc}$	$32.686\pm 1.172\text{Ab}$
白羊草	含冠层土壤	$1.270\pm 0.027\text{Bab}$	$32.040\pm 1.585\text{Ab}$	$45.960\pm 4.499\text{Aab}$
	含根系土壤	$1.230\pm 0.043\text{Ba}$	$30.713\pm 2.803\text{Aab}$	$50.666\pm 5.072\text{Aa}$
	含结皮土壤	$1.303\pm 0.034\text{Ac}$	$24.561\pm 1.853\text{Bab}$	$36.420\pm 3.453\text{Bab}$
达乌里胡枝子	含冠层土壤	$1.317\pm 0.154\text{Aa}$	$22.472\pm 1.849\text{Ad}$	$44.506\pm 4.655\text{Ab}$
	含根系土壤	$1.396\pm 0.0100\text{Aa}$	$20.163\pm 2.176\text{Ac}$	$34.873\pm 5.371\text{ABb}$
	含结皮土壤	$1.537\pm 0.024\text{Aa}$	$17.912\pm 3.337\text{Ac}$	$32.826\pm 3.030\text{Bb}$

注:不同小写字母表示不同群落同一处理下数据有显著性差异($p<0.05$),不同大写字母表示同一群落不同处理下数据有显著性差异($p<0.05$),字母相同表示在显著水平 $p<0.05$ 水平上没有显著性差异,下表同。

(2) 不同植被条件下土壤理化性质对分离速率的影响。土壤分离速率受到容重、团聚体、有机质等土壤自身性质与坡面水蚀因子共同作用的影响^[13]。在水蚀因子条件一致的情况下,主要从土壤自身性质的角度分析土壤分离速率的影响因子。运用相关性分析可得表 3,各种植物群落下土壤分离速率随着容重的增大而增加,二者呈显著正相关;土壤分离速率与有机质、团聚体呈显著负相关,有机质与团聚体的增加将导致土壤分离速率减小。表明土壤理化性质是分离速率的重要影响因素。

土壤理化性质与不同植物群落下土壤分离速率相

不同植被间,狼牙刺群落下土壤有机质含量最高,主要由于狼牙刺群落植被盖度高、生物量大(表 1),为有机质的形成提供来源。

土壤团聚体由土壤有机质胶结而成,能够改善土壤结构,且遇水不易分散具有较高的稳定性,对土壤分离速率有重要影响^[34]。含冠层土壤中,狼牙刺群落下土壤团聚体显著高于达乌里胡枝子、铁杆蒿群落。含根系土壤中,狼牙刺群落、白羊草群落下土壤团聚体显著高于铁杆蒿群落、达乌里胡枝子群落。含结皮土壤中,狼牙刺群落土壤团聚体显著高于铁杆蒿、白羊草群落、达乌里胡枝子群落(表 2)。其主要原因是狼牙刺为半灌木植被,又伴生铁杆蒿、芨芨草等草本植物,根系较发达,有利于团聚体形成。白羊草是须根系草本植被,根系广布,根系数量较多,有利于土壤形成团聚体。因此,白羊草群落和狼牙刺群落土壤团聚体含量较高。铁杆蒿样地和达乌里胡枝子样地,植被盖度较低,退耕时间相对较短(表 1),土壤形成的团聚体含量也会相对较少。

关程度有差异。容重与狼牙刺群落下土壤分离速率的相关程度最高,达乌里胡枝子次之,铁杆蒿再次之,白羊草最低。有机质与铁杆蒿群落下土壤分离速率的相关程度最高,达乌里胡枝子次之,狼牙刺再次之,白羊草最低。团聚体与铁杆蒿群落下土壤分离速率的相关程度最高,达乌里胡枝子次之,白羊草再次之,狼牙刺最低。运用逐步回归可得表 4,不同植物群落下土壤分离速率的主导因素也有差异,影响狼牙刺、白羊草群落下土壤分离速率的主导因素是容重;影响铁杆蒿、达乌里胡枝子群落下土壤分离速率的主导因素为有机质。在不考虑植被类型差异的情况下,团聚体对土壤分离

速率的影响作用弱于容重和有机质。

表 3 土壤理化性质与土壤分离速率相关性

项目	狼牙刺	铁杆蒿	白羊草	达乌里胡枝子
容重	0.952**	0.773*	0.758*	0.789*
有机质	-0.758*	-0.911**	-0.717*	-0.866**
团聚体	-0.672*	-0.826**	-0.700*	-0.787*

注:*表示在 0.05 水平上显著相关,**表示在 0.01 水平上显著相关,下表同。

表 4 土壤理化性质与土壤分离速率回归方程

	回归方程	R ²	调整 R ²	p
狼牙刺	$D_r = -1.859 + 2.071X_1$	0.907	0.894	0.000
铁杆蒿	$D_r = 3.699 - 0.104X_2$	0.830	0.805	0.001
白羊草	$D_r = -4.428 + 4.191X_3$	0.575	0.514	0.018
达乌里胡枝子	$D_r = 3.169 - 0.097X_4$	0.749	0.713	0.003

注: D_r 为土壤分离速率, X_1 为狼牙刺群落的土壤容重, X_2 为铁杆蒿群落的土壤有机质, X_3 白羊草群落的土壤容重, X_4 为达乌里胡枝子群落的土壤有机质。

2.2.2 不同植被条件根系特征对分离速率的影响

(1) 不同植被条件下根系特征的差异。狼牙刺、铁杆蒿群落下含冠层土壤根长密度、根系表面积密度大于含结皮土壤(表 5)。主要是因为含冠层土壤是以植株为

中心采取,靠近根系;含结皮土壤是在无植株覆盖的地面上采取,离根系远。根系的各个指标数值随取样位置与植株距离的增加而减少,表明取样位置是影响根系的各个指标因素之一。在含冠层土壤中,铁杆蒿群落的根系生物量密度值大于白羊草群落,主要因为白羊草根系无明显主根,微根发达,根径较小,烘干后根系质量较轻,而铁杆蒿有明显主根,其主根较白羊草根系较粗、长,烘干后质量较重。在含根系土壤中,根长密度、根系表面积密度表现为狼牙刺>白羊草>达乌里胡枝子(表 5),主要因为达乌里胡枝子群落盖度低、生物量小;而狼牙刺群落盖度高、生物量大,且自身根系发达。

铁杆蒿为直根系草本植物,须根少,水平方向上根系不发达,含结皮土壤中基本无根系分布,故其根系特征各项指标中含冠层土壤显著高于含结皮土壤。白羊草属于须根系草本植被,毛根较多,水平方向上分布范围广,其含结皮土壤有其根系生长,故白羊草群落含冠层土壤、含根系土壤、含结皮土壤的根长密度、根系表面积密度、根体积密度之间无显著性差异。达乌里胡枝子群落为豆科植被,须根较直根系发达,有侧根生长,故其根系表面积密度、根长密度在不同处理下无显著性差异。

表 5 不同植物群落下根系特征

不同处理类型		根系生物量密度/ (mg·cm ⁻³)	根长密度/ (cm·cm ⁻³)	根系表面积密度/ (cm ² ·cm ⁻³)	根体积密度/ (10 ⁻² cm ³ ·cm ⁻³)
狼牙刺	含冠层土壤	7.064±0.689Aa	13.123±1.043Aa	2.061±0.373Aa	5.576±0.807Aa
	含根系土壤	5.460±0.897Aa	8.069±2.001Ba	1.536±0.196ABa	5.143±1.655Aa
	含结皮土壤	5.082±1.346Aa	7.187±2.547Ba	1.142±0.173Ba	3.321±1.841Aa
铁杆蒿	含冠层土壤	5.671±1.990Aa	1.682±0.331Ac	0.459±0.137Ab	3.025±1.147Ab
	含根系土壤	0.266±0.062Bb	1.333±0.436Ac	0.133±0.049Bc	0.207±0.082Bb
	含结皮土壤	0.117±0.067Bb	0.281±0.035Bb	0.030±0.003Bc	0.053±0.024Bb
白羊草	含冠层土壤	2.111±0.362Ab	4.810±1.563Ab	0.662±0.324Ab	1.790±1.147Abc
	含根系土壤	0.942±0.375Bb	4.336±0.878Ab	0.587±0.225Ab	1.549±0.970Ab
	含结皮土壤	0.631±0.098Bb	3.593±1.451Ab	0.405±0.169Ab	1.020±0.482Ab
达乌里胡枝子	含冠层土壤	1.500±0.580Ab	0.579±0.114Ac	0.084±0.025Ab	0.349±0.110Ac
	含根系土壤	0.288±0.153Bb	0.555±0.271Ac	0.045±0.026Ac	0.048±0.034Bb
	含结皮土壤	0.166±0.021Bb	0.339±0.066Ab	0.033±0.005Ac	0.041±0.007Bb

(2) 不同植被条件根系特征对分离速率的影响。运用相关性分析可得表 6,在狼牙刺、铁杆蒿群落下土壤分离速率与根系生物量密度、根长密度、根系表面积密度、根体积密度呈显著负相关,体现了根系穿插固结土壤从而提高土壤抗侵蚀能力的作用。白羊草群落下土壤分离速率与根长密度、根系表面积密度、根体积密度呈显著负相关,与根系生物量密度无相关性。达乌里胡枝子群落下土壤分离速率与根系表面积密度呈显著负相关,与根系生物量密度、根长密度、根体积密度无相关性。

表 6 根系特征与土壤分离速率相关性

项目	狼牙刺	铁杆蒿	白羊草	达乌里胡枝子
根系生物量密度	-0.940**	-0.762*	-0.576	-0.625
根长密度	-0.945**	-0.936**	-0.878**	-0.577
根系表面积密度	-0.844**	-0.852**	-0.776*	-0.690*
根体积密度	-0.761*	-0.772*	-0.691*	-0.652

根系特征与不同植物群落下土壤分离速率的相关程度有差异。根系生物量密度与狼牙刺群落下土壤分离速率的相关程度大于铁杆蒿。根长密度与狼牙刺群落下土壤分离速率的相关程度最高,铁杆蒿次

之,白羊草最低。根系表面积密度与铁杆蒿群落下土壤分离速率的相关程度最高,狼牙刺次之,白羊草再次之,达乌里胡枝子最低。根体积密度与铁杆蒿群落下土壤分离速率的相关程度最高,狼牙刺次之,白羊草最低。运用逐步回归可得表 7 可知,不同植物群落下土壤分离速率的主导因素也有差异。影响狼牙刺、铁杆蒿、白羊草群落下土壤分离速率的主导因素是根长密度;影响达乌里胡枝子群落下土壤分离速率的主导因素是根系表面积密度。在不考虑其他因素的作用下,根系生物量密度、根体积密度对土壤分离速率的影响作用弱于根长密度、根系表面积密度。

表 7 根系特征与土壤分离速率回归方程

	回归方程	R^2	调整 R^2	p
狼牙刺	$D_r=1.250-0.0731X_1$	0.893	0.874	0.000
铁杆蒿	$D_r=1.840-0.600X_2$	0.875	0.857	0.000
白羊草	$D_r=1.598-0.196X_3$	0.771	0.738	0.002
达乌里胡枝子	$D_r=1.642-7.949X_4$	0.477	0.402	0.039

注: D_r 为土壤分离速率, X_1 为狼牙刺群落的根长密度, X_2 为铁杆蒿群落的根长密度, X_3 白羊草群落的根长密度, X_4 为达乌里胡枝子群落的根系表面积密度。

2.3 土壤分离速率回归方程

为了准确描述土壤分离速率与土壤理化性质、根系特征间的关系,将所有的分析因子都纳入分析,运用 SPSS 20.0 进行多元线性回归分析试验数据。可得土壤分离速率回归方程 $D_r=0.086-0.035X_1+1.367X_2$ ($R^2=0.767, N=36, p=0.000, X_1$ 为土壤有机质; X_2 为土壤容重)。

从方程可以看出,土壤团聚体以及根系生物量密度、根长密度、根系表面积密度、根体积密度经逐步回归分析后被剔除出回归方程。可见土壤理化性对土壤分离速率的作用强于根系的作用,其中土壤有机质、土壤容重起关键作用。

3 讨论与结论

(1) 不同植被类型间,狼牙刺群落下土壤分离速率最小,显著低于达乌里胡枝子,与铁杆蒿、白羊草群落下土壤分离速率差异性不显著;不同处理下,含结皮土壤分离速率最大,含根系土壤次之,含冠层土壤最小。

(2) 土壤分离速率随着容重的增大而增加,二者呈显著正相关,与 Bennett^[35]、Zhang^[16] 等研究结论不一致,因为本研究中,土壤分离速率的关键因素不止有容重,还有有机质,且还受到根系的制约。当其他因素对分离速率的影响大于容重的作用时,分离速率不会随土壤容重增大而变小^[10];土壤分离速率与有机质,团聚体呈显

著负相关,有机质与团聚体的增加将导致土壤分离速率减小,与李静^[10]、刘红岩^[36] 等结论一致。从土壤理化性质的角度分析,不同植物群落下土壤分离速率的主导因素不同,影响狼牙刺、白羊草群落下土壤分离速率的主导因素是容重;影响铁杆蒿、达乌里胡枝子群落下土壤分离速率的主导因素为有机质。

(3) 土壤分离速率与其根系生物量密度、根长密度、根系表面积密度、根体积密度呈负相关,与吕刚^[37]、Zhou^[38] 等结论一致,体现了根系在土壤中的串连、盘结以及分泌物的固结作用,从而降低土壤分离速率。从根系特征的角度分析,不同植物群落下土壤分离速率的主导因素不同。影响狼牙刺、铁杆蒿、白羊草群落下土壤分离速率的主导因素是根长密度;影响达乌里胡枝子群落下土壤分离速率的主导因素是根系表面积密度。

(4) 土壤分离速率可用回归方程 $D_r=0.086-0.035X_1+1.367X_2$ ($R^2=0.767, N=36, p=0.000; X_1$ 为土壤有机质, X_2 为土壤容重) 表示。土壤理化性对土壤分离速率的作用强于根系的作用。其中土壤有机质、土壤容重起关键作用。本文中土壤分离速率回归方程与张晓艳^[1] 研究结论不一致,可能是由于样地间植被特征差异以及土壤取样方式差异导致。张晓艳采用垂直剖面采样,其土壤理化性质与根系特征与本文差异显著,在其研究中,土壤分离速率受到理化性质与根系特征共同影响。

本研究在固定坡度、径流量的前提下,探讨土壤理化性质与根系特征对土壤分离速率的影响。后续研究中,可以设置不同的坡度与流量进行土壤分离速率研究,增强研究结论的广泛代表性。本文涉及到冠层因素、根系因素、土壤特性对分离速率的影响,还有其他的影响因素,如枯落物、腐殖质,土壤含水量、孔隙度等未被考虑在内。另外,根系与土壤理化性质间的相互关系以及根系强化土壤抗分离能力的生物作用、物理作用、化学作用的大小关系有待继续研究。

参考文献:

[1] 张晓艳. 黄土区草地植被恢复对土壤抗分离的影响及其作用机制研究[D]. 西安:陕西师范大学,2015.

[2] 水利部. 中国水土流失防治与生态安全:西北黄土高原区卷[M]. 北京:科学出版社,2010.

[3] Fu B, Yu L, Lü Y, et al. Assessing the soil erosion control service of ecosystems change in the Loess Plateau of China[J]. Ecological Complexity, 2011, 8(4): 284-293.

[4] 高光耀,傅伯杰,吕一河. 干旱半干旱区坡面覆被格局的水土流失效应研究进展[J]. 生态学报,2013,33(1):12-22.

- [5] 柳玉梅,张光辉,李丽娟. 坡面流水动力学参数对土壤分离能力的定量影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(6): 96-98.
- [6] Owoputi L O, Stolte W J. Soil detachment in the physically based soil erosion process: A Review[J]. Transactions of the Asae, 1995, 38(4): 1099-1110.
- [7] 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): 48-51.
- [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] Gyssels G, Poesen J, Bochet E, et al. Impact of plant roots on the resistance of soils to erosion by water: a review[J]. Progress in Physical Geography, 2005, 29(2): 189-217.
- [10] 李静,周正朝,张强,等. 黄土区不同退耕年限草地土壤分离速率及其理化性质[J]. 干旱区研究, 2017, 34(3): 504-510.
- [11] 唐科明,张光辉,任宗萍,等. 坡面薄层水流分离土壤的动力学机理[J]. 水土保持学报, 2011, 25(4): 46-49.
- [12] 任乐,张科利,郭继成. 基于冲刷试验的贵州耕地土壤抗冲性研究[J]. 水土保持学报, 2013, 27(1): 56-59.
- [13] 王军光,李朝霞,蔡崇法. 坡面冲刷过程中红壤分离速率定量研究[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(1): 96-99.
- [14] 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.
- [15] Elliot W J. A compendium of soil erodibility data from WEPP cropland soil field erodibility experiments 1987 & 88[R]. West Lafayette, Indiana, USA: US Department of Agricultural Research Service, 1989.
- [16] 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 Asabe, 2008, 51(3): 883-890.
- [17] 姚小萌,周正朝,王凯博. 黄土丘陵沟壑区天然植被恢复类型对土壤微生物碳的影响[J]. 干旱区研究, 2016, 33(6): 1287-1293.
- [18] 张俊华. 渭北黄土高原植被恢复过程土壤肥力质量研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2004.
- [19] 董莉丽,郑粉莉. 黄土丘陵沟壑区植被类型对土壤质量的影响[J]. 干旱区研究, 2011, 28(4): 616-621.
- [20] 严方晨,焦菊英,曹斌挺,等. 黄土丘陵沟壑区撂荒地不同演替阶段植物群落的土壤抗蚀性: 以坊塌流域为例[J]. 应用生态学报, 2016, 27(1): 64-72.
- [21] 李奇睿,王继军,郭满才. 安塞县农林牧土地利用结构及其功能分析[J]. 农机化研究, 2011, 33(12): 14-19.
- [22] 王国梁,周东. 黄土丘陵区退耕地先锋群落演替过程中细根特征的变化[J]. 西北植物学报, 2009, 29(2): 356-364.
- [23] 冉红,杨晓,贺春明. 基于 SWOT 分析的安塞县水土保持发展研究[J]. 安徽农学通报, 2016, 22(14): 106-107, 161.
- [24] 王秋霞,丁树文,夏栋,等. 花岗岩崩岗区不同层次土壤分离速率定量研究[J]. 水土保持学报, 2016, 30(3): 65-70.
- [25] 覃森. 黄土区典型草被生长过程中根系对土壤抗冲性影响的试验研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2016.
- [26] 刘晚苟,李良贤,谢海容,等. 土壤容重对野生香根草幼苗根系形态及其生物量的影响[J]. 草业学报, 2015, 24(4): 214-220.
- [27] 徐宁,吴兆录,李正玲. 滇西北亚高山不同土地利用类型土壤容重与根系生物量的比较研究[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(5): 1961-1963.
- [28] 冯强,段宝玲,姜硕. 小流域尺度土壤容重及其影响因素的空间变异[J]. 山西农业大学学报, 2016, 36(1): 39-45.
- [29] Chepil W S, Siddoway F H, Armbrust D V. Climatic factor for estimating wind erodibility of farm fields[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1962, 17(4): 162-165.
- [30] 张文博,张福平,苏玉波,等. 渭河干流沿岸土壤有机质空间分布特征及其影响因素[J]. 水土保持通报, 2014, 34(1): 138-143.
- [31] 马红菊,付梦洋,代天飞,等. 德阳旌阳区土壤有机质的空间变异性及其影响因素分析[J]. 西南农业学报, 2016, 29(6): 1375-1380.
- [32] 寇萌,焦菊英,尹秋龙,等. 黄土丘陵沟壑区主要草种枯落物的持水能力与养分潜在归还能力[J]. 生态学报, 2015, 35(5): 1337-1348.
- [33] 杨才敏. 土壤有机质与水土流失的关系定量研究[J]. 水土保持研究, 2008, 15(5): 177-179.
- [34] 王向栋,戴全厚,李翠莲,等. 草海上游石漠化过程中土壤抗蚀性变化[J]. 水土保持研究, 2017, 24(3): 13-18.
- [35] Bennett S J, Robinson K M, Kadavy K C. Characteristics of actively eroding ephemeral gullies in an experimental channel. [J]. Transactions of the Asae, 2000, 43(3): 641-649.
- [36] 刘红岩,周正朝,刘俊娥,等. 黄土区草被生长过程中土壤抗冲性及其与影响因素的关系[J]. 水土保持学报, 2017, 31(2): 72-78.
- [37] 吕刚,刘红民,高英旭,等. 排土场边坡根系分布及其对土壤抗冲性的影响[J]. 土壤通报, 2014(3): 711-715.
- [38] 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.