

两种草本植物根系对土壤可蚀性的影响

秦嘉惠, 程 谅, 曹丹妮, 郭忠录

(华中农业大学 水土保持研究中心, 武汉 430070)

摘 要:为揭示草本植物根系对土壤抗侵蚀能力的影响,选取白三叶(*Trifolium repens* L.)、黑麦草(*Lolium perenne* L.)及两者混播根系为研究对象,通过冲刷试验,研究了 3 种植类型的根系特征及对土壤可蚀性影响。结果表明:(1)白三叶、黑麦草及混播草的根长密度(RLD)、根面积比(RAR)及根重密度(RMD)由春季到秋季呈现先升高后降低最后趋于稳定的变化趋势。(2)试验期内,土壤可蚀性大小顺序为白三叶<黑麦草<混播草<裸地。3 种植类型的土壤可蚀性与土壤容重、水稳性团聚体、RLD、RAR 及 RMD 呈指数函数形式下降($R^2 > 0.70$)。(3)土壤可蚀性与 0~1.0 mm 径级根系极显著正相关($p < 0.01$),与 1.0~2.0 mm, 0~2.0 mm 显著正相关($p < 0.05$)。

关键词:草本植物;黄棕壤;土壤可蚀性;土壤性质;根系特性

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)02-0055-07

Effects of Root System of Two Herbs on Soil Erodibility

QIN Jiahui, CHENG Liang, CAO Danni, GUO Zhonglu

(Research Center of Soil and Water Conservation, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: In order to explore the effect of herbaceous roots on anti-erodibility, three treatments (i. e. sole *Trifolium repens* L., sole *Lolium perenne* L. and mixed sowing of *Trifolium repens* L. and *Lolium perenne* L.) were employed. The root characteristics of the three planting types were measured, of which effects on soil erodibility were compared. Soil detachment capacity by concentrated flow was measured in a hydraulic flume with the fixed bed under five different flow shear stresses to determine soil erodibility. The results showed that: (1) the root length density (RLD), root area ratio (RAR) and root weight density (RMD) of *Trifolium repens*, perennial ryegrass and mixed sowing of grass first increased from spring to autumn, then decreased and finally stabilized; (2) the soil erodibility increased in the order: *Trifolium repens* < perennial ryegrass < mixed sowing grass < bare soil. The soil erodibility of three planting types declined exponentially with the increase of soil bulk density, water-stable aggregates, RLD, RAR and RMD ($R^2 > 0.70$); (3) soil erodibility was significantly and positively correlated with 0~1.0 mm root diameter ($p < 0.01$), and positively correlated with 1.0~2.0 mm, 0~2.0 mm root diameter ($p < 0.05$).

Keywords: herb plants; yellow brown soil; soil erodibility; soil properties; root characteristics

土壤抗侵蚀能力是影响土壤侵蚀的重要因子之一,通常用土壤可蚀性来衡量^[1]。土壤可蚀性受土壤性质、植物和耕作等多种因素的综合影响^[2-3],反映了土壤对侵蚀营力剥蚀和搬运的敏感性,是评价土壤应对外部侵蚀能力的重要指标^[4],也是定量研究土壤侵蚀的基础。如 USLE 及 WEPP 模型常用于土壤可蚀性的量化,但 USLE 模型属于经验模型缺乏对侵蚀过程及机理的深入剖析且较费时^[5],WEPP 模型则

可以模拟不同条件下的土壤侵蚀过程^[6],WEPP 模型中的土壤可蚀性及临界剪切力是反映土壤抵抗径流冲刷的阻力参数^[2]。研究表明土壤可蚀性会因表层土壤理化性质的变化而变化,如:土壤黏粒、土壤团聚体、容重、抗剪强度、土壤粘结力及有机质等^[1,7-8],Ghebreyessus 等^[9]发现当土壤容重从 1 400 kg/m³减少到 1 200 kg/m³,土壤可蚀性增加了 470%,杨帆等^[10]发现水稳性团聚体(>0.25 mm)的增加会降低

土壤可蚀性。土壤性质及植被呈现明显的季节变化,进而导致土壤可蚀性也具有季节变化的特点^[11-12]。

植被主要从以下两方面减少土壤侵蚀:一是通过草冠层叶片减少降雨雨滴打击,二是通过根系部分拦截地表径流固持土壤^[13]。土壤可蚀性受根系影响较大,与根系直径、根长或质量密度、根面积比和根系结构有关^[14]。研究表明,土壤可蚀性会随着根长或根重密度、根面积比的增加而下降^[15-16],以及根径 <1 mm的根系是影响土壤理化性质(土壤容重、有机质、团聚体)的主要径级^[17],因此细根对土壤可蚀性的影响要大于主根的作用^[16]。根系的生长也与植物种类密切相关,不同植物根系形态和生理特性均不同。

运用 Web of Science 数据库和 CNKI 数据库,依据研究领域核心关键词制定了中英文检索式,检索 2000—2015 年 SCI 和 CSCD 论文,利用 Citespace 对共被引网络进行聚类^[18],以发掘“植物根系控蚀”领域的研究热点,结果表明 root 和根系分别排第 6 位和第 1 位,而黄土丘陵区则进入中文热点词汇前 10。这说明植物根系对土壤侵蚀的研究是近年国内外学者的研究热点,但研究大多集中于北方黄土丘陵区^[1,7,14,17,19],而关于南方红壤区的研究较少,因此研究南方红壤区植物根系对土壤可蚀性的影响具有重要意义。本文选取白三叶及黑麦草两种南方较为常见的水土保持物种,通过测定土壤物理性状以及根系特性,研究春季到秋季期间 2 种草本植物土壤可蚀性的变化,以及土壤性质、根系特性与土壤可蚀性之间的关系,以期对南方红壤区水土保持植被的构建及土壤侵蚀防治提供科学参考。

1 材料与方方法

1.1 研究区概况

研究区位于武汉市华中农业大学水土保持试验基地(114°22'E,30°29'N),属亚热带季风湿润气候,年平均气温 16.9℃,年平均降水量约 1 260 mm,主要集中在 4—8 月,占全年降水量的 70%。土壤为第四纪红黏土发育的黄棕壤,阳离子交换量(CEC)19.29 cmol/kg,土壤质地为粉质黏土(美国制粒径分级标准),其中砂粒 11.6%、粉粒 46.3%、黏粒 42.1%。

1.2 试验设计和样品采集

试验以南方较为常见的水土保持物种白三叶(*Trifolium repens* L.)、黑麦草(*Lolium perenne* L.)为研究对象,两者均为须根系的多年生草本植物,生长迅速,适用范围广,白三叶在东北、华北、华

中、西南、华南各地有栽培种,黑麦草则在长江中下游及其以南各地栽培利用。设置单播白三叶、单播黑麦草、混播白三叶+黑麦草(1:1 质量比)和裸地 4 个 10 m×5 m 试验小区,小区地势平坦,土壤质地均一,周围无高大乔木,于 2016 年 3 月底同时撒播,播种前先平整土地,松动小区表土,以 10 g/m² 均匀播种,保证小区充分的水分供给。

于 4—9 月期间每月月底,按照 S 型曲线选择采样点,采集样品带回室内。用直径 14 cm、高 10 cm 的钢环取样器在靠近植物根部的位置取原状土样进行冲刷试验以及测定植物根系特性,每次取样设 3 个重复,每月每个样地采集 15 个样品,整个试验期共采集 360 个样品。

1.3 分析方法

土壤可蚀性采用冲刷试验测定。试验是在长 4 m、宽 0.2 m、深 0.2 m 的钢制变坡水槽内进行(图 1),水槽上端高度可调,坡度在 8.8%~46.6% 变化。水槽顶端另有规格大小为 0.4 m×0.2 m×0.4 m 水箱,下端距出口 20 cm 处有一放样室,规格大小为 0.39 m×0.1 m×0.09 m。试验设计 5°,0.4 L/s;10°,0.4 L/s;15°,0.8 L/s;20°,0.8 L/s;25°,1.2 L/s 共 5 个坡度和流量组合,对应的水流剪切力分别为 4.54,9.05,15.01,19.84,31.54 Pa。每次冲刷试验时,每个坡度和流量组合做 3 个重复,分别对应每个采样点的 3 个样品。

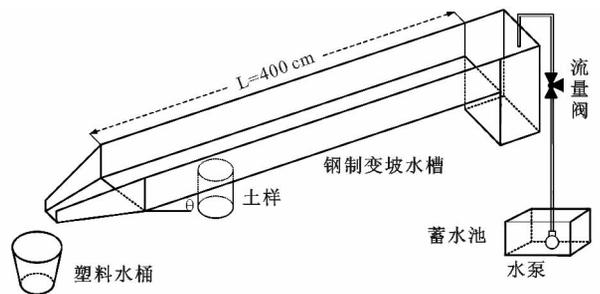


图 1 冲刷试验装置

坡面水流流速用染色法^[20]测定,记录染色水流流过水槽区域 2.4 m 长所用时间,获得水流表面流速,流速测定重复 12 次,去除最大值及最小值后的平均值则为平均水流表面流速,将平均水流表面流速乘以 0.8,获得水流平均流速。水深计算公式为:

$$H = \frac{Q}{vB} \quad (1)$$

式中: H 为水深(m); Q 为流量(m³/s); v 为流速(m/s); B 为水槽宽度(m)。

水流剪切力的计算公式^[21]为:

$$\tau = \rho g H S \quad (2)$$

式中: τ 为水流剪切力(Pa); ρ 为水的密度(kg/m³); S

为坡度正弦值。

待冲刷土样流出水槽时开始用塑料桶接水并计时,整个冲刷时间为 2 min,接到的水样静置 5 h 后倒去上清液,过滤含水土样,过滤后的土样在 105℃ 下烘干 24 h,用于计算土壤分离能力^[13]。

$$D_c = \frac{M_c}{A_t} \quad (3)$$

式中: D_c 为土壤分离能力 $[g/(m^2 \cdot s)]$; M_c 为泥沙烘干重(g); A 为取样器面积(m^2); t 为冲刷历时(s)。

以水流剪切力和土壤分离能力为基础,结合 WEPP 模型简化方程计算土壤可蚀性公式^[22]为:

$$D_c = K_r (\tau - \tau_0) \quad (4)$$

式中: K_r 为土壤可蚀性(s/m); τ_0 为临界剪切力(Pa)。

土壤容重、孔隙度采用环刀法测定,水稳性团聚体通过湿筛法测定。

根系参数的测定。在每次冲刷试验结束后,将土样放置于在 0.5 mm 的筛网上反复冲洗,洗出土壤中所有的根系且无杂物,把洗净的根系放置于自封袋中。之后采用 EPSONLA 在 400 dpi 下进行灰度扫描,利用 WinRHIZO 2009 根系分析系统分析总根长 L , 总表面积 S , 平均直径 D 等参数,最后将根系装入纸信封内在 65℃ 条件下,烘干 72 h, 获得根系生物量。计算得到根长密度(RLD)、根重密度(RMD)及根面积比(RAR),具体计算公式为:

$$RLD = \frac{L}{V} \quad (5)$$

式中:RLD 为根长密度(m/m^3); L 为根系总长度(m); V 为取样器容积(m^3)。

$$RMD = \frac{M_r}{V} \quad (6)$$

式中:RMD 为根重密度(kg/m^3); M_r 为取样器内烘干根系生物量(kg)。

$$RAR = RLD \cdot RCSA \quad (7)$$

式中:RAR 为根表面积比;RCSA 为平均单根面积(m^2)。

1.4 数据分析

用 Excel 2013 进行数据处理和图表的绘制,在 SPSS 21.0 软件上进行 Pearson 相关分析,并采用非线性回归分析各参数与土壤可蚀性的关系。

2 结果与分析

2.1 根系参数的变化特征

由图 2 可知,在试验初期白三叶、黑麦草及混播草的 RLD, RAR 及 RMD 较小,之后气温升高,降雨量增大,植物快速生长,RLD, RAR, RMD 也迅速增大,7 月底达到峰值,整体表现为春季<秋季<夏季。RLD, RAR,

RMD 最大值、最小值分别出现在 7 月底、4 月底,白三叶根系参数最大值为最小值的 14.84, 26.95, 4.33 倍,黑麦草为 12.24, 22.46, 4.69 倍,混播草为 15.08, 28.10, 3.79 倍。在 5 月后植物快速生长,7 月底(夏季)时,RLD 表现为:白三叶($4.6285 m/m^3$)<混播草($5.1939 m/m^3$)<黑麦草($5.7269 m/m^3$),RAR 表现为:混播草(0.0486)<黑麦草(0.0528)<白三叶(0.0535),RMD 表现为:白三叶($0.3380 kg/m^3$)<混播草($0.3445 kg/m^3$)<黑麦草($0.3965 kg/m^3$)。黑麦草为禾本科植物,虽然 RAR 大于白三叶,但其根冠较小,生长较浅,不利于深层养分和水分的吸收和利用。本研究中黑麦草、白三叶及混播草的 RLD, RAR, RMD 在 7 月底(夏季)表现均不同,但王计磊等研究发现土壤抗冲性与 RMD、根表面积显著正相关,说明随着植物生长,土壤抗冲性会得到有效提高^[23]。刘子壮等^[24]通过对比黄土丘陵区白三叶及黑麦草根土复合体抗崩解性,发现黑麦草的抗崩解性大于白三叶;但袁雪红等^[25]研究发现白三叶根系的固土护坡能力更强,因此 3 种植类型根系对于土壤可蚀性的影响需要结合其他因素综合考虑。

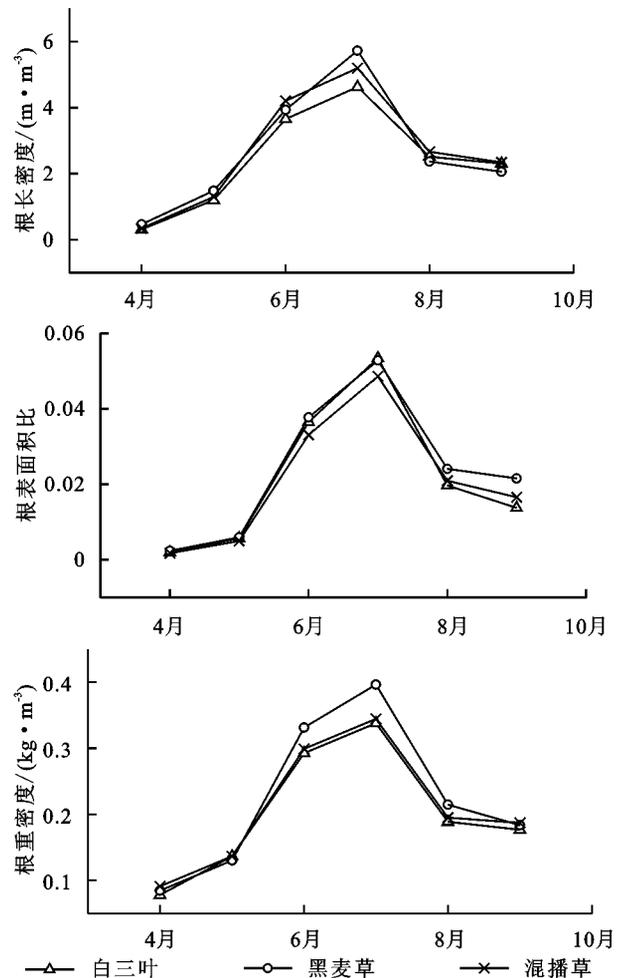


图 2 根系参数季节变化

2.2 根系参数与土壤性质的关系

水稳性团聚体是土壤结构的基本单元,是影响土壤可蚀性的重要因素,研究表明增加 $>0.25\text{ mm}$ 团聚体含量能够降低土壤可蚀性,增强土壤的抗侵蚀能力^[10]。白三叶、黑麦草及混播草的土壤水稳性团聚体

表 1 根系参数与土壤性质的相关性

土壤性状	白三叶			黑麦草			混播草		
	RLD	RAR	RMD	RLD	RAR	RMD	RLD	RAR	RMD
水稳性团聚体	0.901*	0.802*	0.833*	0.943**	0.911*	0.944**	0.955**	0.942**	0.934**
容重	0.833*	0.688	0.753	0.675*	0.754	0.689*	0.710*	0.674*	0.659*
孔隙度	-0.833*	-0.688	-0.753	-0.675	-0.753	-0.689	-0.710*	-0.674*	-0.659*

注:样本数 $n=6$, * 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。

土壤可蚀性作为土壤对外营力侵蚀作用敏感程度的体现,受到土壤结构、胶结物质状况的影响而产生相应的变化^[10]。土壤容重、水稳性团聚体 ($>0.25\text{ mm}$) 是影响土壤结构的重要因子,由图 5 可知,白三叶、黑麦草及混播草的土壤可蚀性均呈现先降低后升高再降低的变化趋势。白三叶、混播草的土壤可蚀性与容重、水稳性团聚体显著负相关 ($p<0.05$),与孔隙度显著正相关 ($p<0.05$),但黑麦草的土壤可蚀性与容重及孔隙度相关性不好 ($p>0.05$) (表 2)。3 种植类型的土壤可蚀性与水稳性团聚体均呈显著负相关 ($p<0.05$) 且相关系数较大,这与沈慧等^[26]的研究结果一致。由于水稳性团聚体的增加能显著提高

($>0.25\text{ mm}$) 与根系参数呈显著正相关 ($p<0.05$) 且相关系数较大,但土壤容重、孔隙度与根系参数相关性不明显,这说明植物根系对水稳性团聚体 ($>0.25\text{ mm}$) 影响较大,随着根系生长土壤水稳性团聚体也不断增加,土壤结构越稳定(表 1)。

土壤抵抗径流冲刷的能力,降低土壤可蚀性。将土壤可蚀性与土壤容重、水稳性团聚体作回归分析可知,随着白三叶、黑麦草及混播草的容重、水稳性团聚体的增加,土壤可蚀性呈指数函数形式降低(图 3)。王长燕等^[7]对整个生长季内两种退耕草地的土壤可蚀性和容重作回归分析可知,草地土壤可蚀性与容重呈负指数函数关系,这与本文的研究结论一致。

表 2 土壤可蚀性与土壤性质的相关性

种植类型	容重	孔隙度	水稳性团聚体
白三叶	-0.888*	0.888*	-0.960**
黑麦草	-0.794	0.794	-0.908*
混播草	-0.884*	0.879*	-0.934**

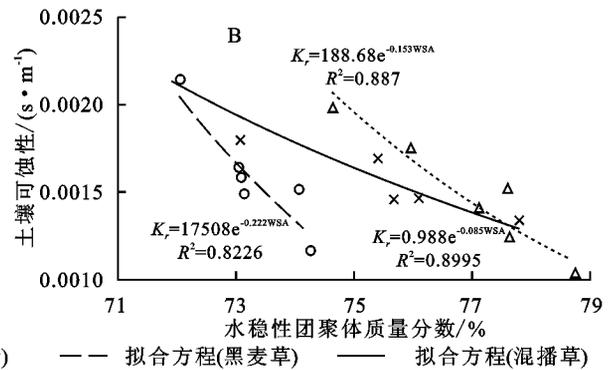
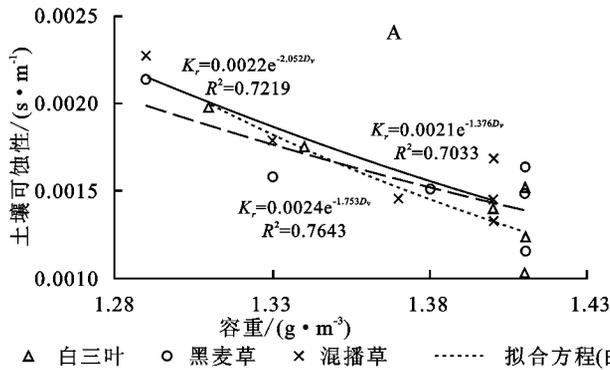


图 3 土壤容重、水稳性团聚体与土壤可蚀性关系

2.3 土壤性质的变化特征

土壤容重、孔隙度及水稳性团聚体在试验期内有明显的动态变化(图 4)。4 月底—7 月底期间白三叶、黑麦草、混播草的容重、孔隙度快速上升,之后保持稳定,最大值、最小值分别出现在 7 月底、4 月底,最大值为最小值的 1.08, 1.09, 1.09 倍。但在黄土丘陵区黑麦草的根系活力和根生物量会随着土壤容重的增加而下降^[27],与本研究结果不一致,这与土壤类型与环境的差异有关。4 月后由于植物快速生长,根系网络串联、穿插土壤能够增大土壤的孔隙度^[28],提高土壤水分入渗,因此随着孔隙度的增大土壤可蚀性减小。

土壤水稳性团聚体是表征土壤抵抗径流冲刷能

力的关键指标之一,也是评价土壤可蚀性的重要指标^[29]。4 月底—7 月底期间,白三叶、黑麦草和混播草的水稳性团聚体 ($>0.25\text{ mm}$) 持续升高,之后小幅下降直至稳定,最大值、最小值分别出现在 7 月底、4 月底,最大值为最小值的 1.05, 1.03, 1.08 倍。试验期内,水稳性团聚体表现为:黑麦草 $<$ 混播草 $<$ 白三叶,土壤水稳性团聚体含量越高,土壤结构稳定性和抗侵蚀性越强,但增加土壤中有机质或黏粒的含量也能够改善土壤团聚结构降低土壤可蚀性^[10],因此需要进一步深入分析。

由图 5 可知,白三叶、黑麦草及混播草土壤可蚀性在试验期内大致呈“V”型分布,春季和秋季较大,

夏季较小。4月底土壤可蚀性较高,至7月底土壤可蚀性下降,8月有小幅上扬,8月底直至试验结束,土壤可蚀性快速下降,试验末期土壤可蚀性值小于试验初期。在试验期内,白三叶、黑麦草、混播草土壤可蚀性最大值、最小值分别出现在4月底、7月底,最大值分别为0.0020,0.0021,0.0023 s/m,最小值为0.0010,0.0012,0.0013 s/m。最大值为最小值的

1.92,1.84,1.71倍,试验期均值分别为0.0015,0.0016,0.0017 s/m。裸地土壤可蚀性在试验期内波动下降,夏季<秋季<春季。4月底—7月底裸地土壤可蚀性快速下降,之后至8月底有小幅上扬,裸地土壤可蚀性最大值与最小值分别出现在4月底、7月份,分别为0.0186,0.0139 s/m,最大值为最小值的1.34倍,试验期均值为0.0158 s/m。

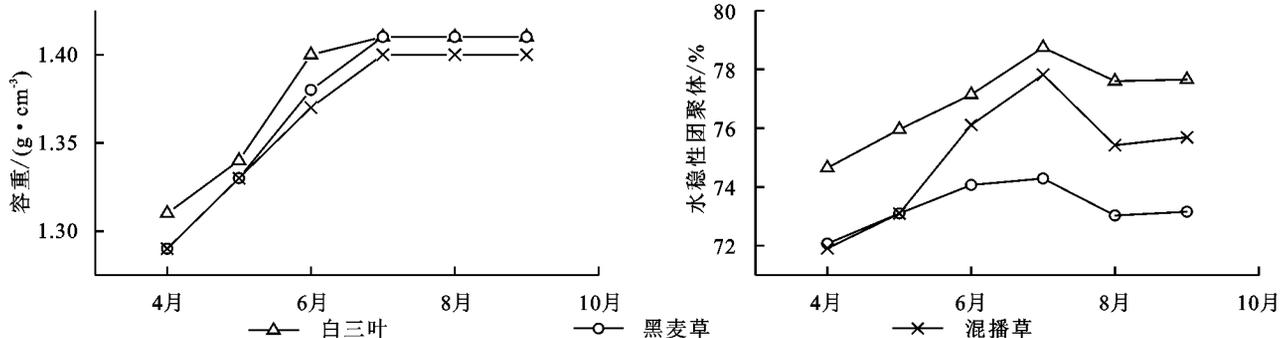


图4 土壤容重、水稳性团聚体季节变化

在试验期间,草地土壤可蚀性显著小于裸地,说明有植物生长的样地能够明显降低土壤可蚀性,提高土壤的抗侵蚀能力。试验期内土壤可蚀性均值表现为:白三叶<黑麦草<混播草<裸地,其中白三叶土壤可蚀性下降幅度最大,说明白三叶降低土壤可蚀性的效果要大于黑麦草及其混播草,其根系更能增加土壤的稳定性,这是由于白三叶侧根、须根较为发达,穿插串联土壤颗粒的能力较强。7月底—8月底,土壤可蚀性小幅上升是由于期间气温较高,降雨少,导致表层土壤缺少水分,8月后植物凋落,在地表形成保护层,部分根系腐烂分解以至于土壤可蚀性又略微下降。袁雪红等^[25]通过对比4种草本植物固土护坡能力发现白三叶的护坡效益最好,说明其减少土壤侵蚀的能力最强,这与本研究结果基本一致。

土壤可蚀性与根系密度呈负指数相关关系;此外Zhang等^[3,15]研究发现土壤可蚀性会随着RLD或根系密度的增加呈指数函数形式降低,与本研究结论一致。根系参数与土壤可蚀性显著负相关($p < 0.05$) (表3),说明随着植物根系的生长土壤可蚀性显著减小,土壤抵抗径流冲刷的能力明显提高。在根系参数中RLD与土壤可蚀性关系较为密切,RLD可以表示植物根系的生长活力,表明根系吸收土壤养分、水分的表面积越大,根系抵抗土壤侵蚀的能力越强^[10],RMD是单位体积所含根系生物量的大小,其大小反映了根系吸收养分和水分的能力。在7月(夏季),RLD表现为:白三叶<混播草<黑麦草,RMD表现为:白三叶<混播草<黑麦草,但土壤可蚀性表现为:白三叶<黑麦草<混播草,这是由于土壤可蚀性受土壤性质及根系的共同影响。

为进一步说明植物根系对土壤可蚀性的影响,本研究将各径级根长与土壤可蚀性作相关性分析,结果显示土壤可蚀性与0~1.0 mm径级根系极显著正相关($p < 0.01$),与1.0~2.0 mm,0~2.0 mm显著正相关($p < 0.05$),与>2.0 mm相关性不好($p > 0.05$),且与0~2.0 mm的相关系数较大,说明径级<2.0 mm根系对土壤可蚀性有重要影响,其中根径<1.0 mm细根作用最为显著,这与刘定辉^[30]、熊艳梅^[31]等所得研究结果一致。这主要是因为根径小的根系能够更好地穿过土壤孔隙,对土壤颗粒进行缠绕,进而提高了土壤颗粒间的粘结力,根径越小,根系的抗拉能力也越强,增强了土壤抵抗径流冲刷的能力,减少土壤侵蚀。

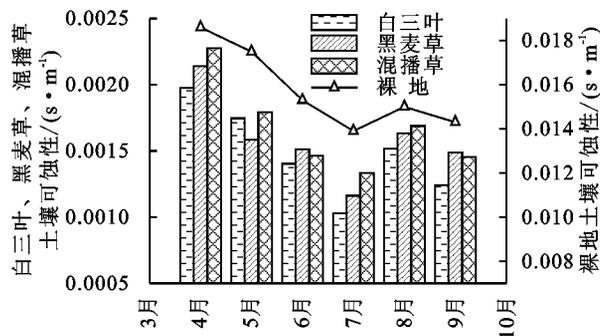


图5 土壤可蚀性季节变化

2.4 根系参数与土壤可蚀性关系

在本研究中,白三叶、黑麦草及混播草的根系参数与土壤可蚀性均呈现 $K_r = ae^{-br}$ 的指数关系(图6),随着RLD,RAR,RMD的增加土壤可蚀性呈指数函数形式下降。王长燕等^[7]通过对赖草地和紫花苜蓿地的土壤细沟可蚀性与根系密度关系的研究表明,

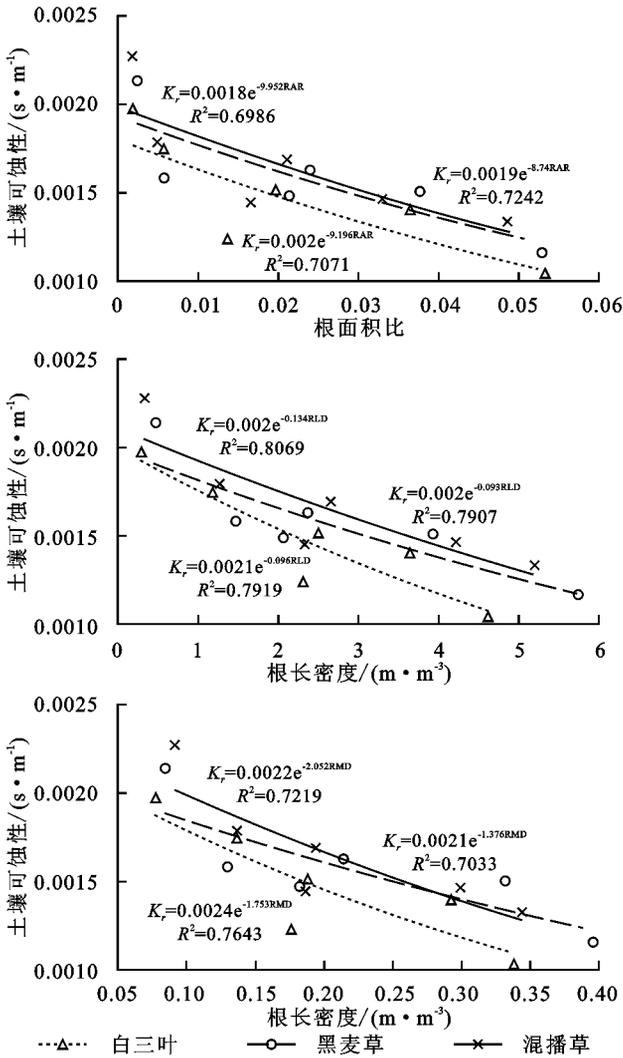


图 6 土壤可蚀性与根系参数关系

表 3 根系参数与土壤可蚀性相关性

种植类型	RLD	RAR	RMD
白三叶	-0.905*	-0.822*	-0.853*
黑麦草	-0.858*	-0.824*	-0.816*
混播草	-0.871*	-0.812*	-0.852*

3 结论

(1) 在春季到夏季期间,白三叶、黑麦草、混播草的 RLD, RAR, RMD 迅速升高,夏季以后各根系参数逐渐下降然后趋于稳定。

(2) 试验期内,白三叶、黑麦草、混播草土壤可蚀性均呈现先降低后升高再降低的变化趋势,表现为:白三叶 < 黑麦草 < 混播草 < 裸地,说明种植草本植物能显著降低土壤可蚀性,白三叶增强土壤抗侵蚀能力的效果大于黑麦草及混播草,3 种植物类型的土壤可蚀性最小值均出现在夏季(分别为 0.001 0, 0.001 2, 0.001 3 s/m),最大值在春季(分别为 0.002 0, 0.002 1, 0.002 3 s/m)。

(3) 土壤可蚀性与白三叶、黑麦草及混合草的土壤容重、水稳性团聚体、RLD、RAR 及 RMD 均呈现

$K_r = ae^{-bR}$ 的指数关系,土壤可蚀性会随着参数的增加呈指数函数形式下降($R^2 > 0.70$)。3 种植物类型的土壤可蚀性与水稳性团聚体及根系参数显著负相关($p < 0.05$)。

(4) 土壤可蚀性与 0~1.0 mm 径级极显著正相关($p < 0.01$),与 1.0~2.0 mm, 0~2.0 mm 显著正相关($p < 0.05$),说明径级 < 2.0 mm 根系对土壤可蚀性有重要影响,其中根径 < 1.0 mm 细根作用最为显著。

本研究分析了两种草本植物对土壤可蚀性的影响,阐明了植物根系及土壤性质与土壤可蚀性的关系和根系对于土壤性质的影响,有助于构建南方红壤区水土保持植被,为研究区内水土保持物种的选择提供了参考。后续研究中,应将土壤性质和根系参数结合以进一步模拟草地土壤可蚀性的季节变化,深入说明植物根系对土壤可蚀性的影响,增强研究结果的广泛代表性。本文涉及到根系特性及土壤性质对土壤可蚀性的影响,还有其他影响因素,如土壤剪切强度、入渗能力、土壤粘结力、有机质及根系密度等^[3,7,10,19]未被考虑在内。另外根系与土壤性质间的函数关系以及根系降低土壤可蚀性的生物作用、物理作用及化学作用的大小有待深入研究。

参考文献:

- [1] 朱冰冰,李占斌,李鹏,等. 土地退化/恢复中土壤可蚀性动态变化[J]. 农业工程学报, 2009, 25(2): 56-61.
- [2] 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.
- [3] Zhang G, Tang K, Sun Z, et al. Temporal variability in rill erodibility for two types of grasslands[J]. Soil Research, 2014, 52(8): 781-788.
- [4] 翟子宁,苏备. 土壤可蚀性研究进展[J]. 土壤通报, 2016, 47(1): 253-256.
- [5] 雷廷武,李法虎. 水土保持学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2012.
- [6] 郭铃莉,杨文涛,王云琦,等. 基于 WEPP 模型的水土保持措施因子与侵蚀量关系研究[J]. 土壤通报, 2017, 48(4): 955-960.
- [7] 王长燕,郁耀闯. 黄土丘陵区不同草被类型土壤细沟可蚀性季节变化研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(8): 101-108.
- [8] 徐燕,龙健. 贵州喀斯特山区土壤物理性质对土壤侵蚀的影响[J]. 水土保持学报, 2005, 19(1): 157-159.
- [9] Ghebreyessus Y T, Gantzer C J, Alberts E E, et al. Soil erosion by concentrated flow: shear stress and bulk density[J]. Transactions of the Asae, 1994, 37(6): 1791-1797.
- [10] 杨帆,张洪江,程金花,等. 北京市延庆县不同土地利用

- 方式下的土壤可蚀性研究[J]. 水土保持通报, 2013, 33(6):19-23.
- [11] Wang B, Zhang G H, Shi Y Y, et al. Effects of near soil surface characteristics on the soil detachment process in a chronological series of vegetation restoration[J]. Soil Science Society of America Journal, 2015, 79(4):1213-1222.
- [12] 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.
- [13] 杨帆, 程金花, 张洪江, 等. 坡面草本植物对土壤分离及侵蚀动力的影响研究[J]. 农业机械学报, 2016(5):129-137.
- [14] Li Z W, Zhang G H, Geng R, et al. Rill erodibility as influenced by soil and land use in a small watershed of the Loess Plateau, China[J]. Biosystems Engineering, 2015, 129:248-257.
- [15] Zhang G H, Tang K, Ren Z, et al. Impact of grass root mass density on soil detachment capacity by concentrated flow on steep slopes[J]. Transactions of the Asabe, 2013, 56(3):927-934.
- [16] Baets S D, 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.
- [17] 葛芳红, 周正朝, 刘俊娥, 等. 黄土丘陵区 4 种典型植物根系分布特征及对土壤分离速率的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(6):164-169.
- [18] 陈悦, 陈超美, 刘则渊, 等. CiteSpace 知识图谱的方法论功能[J]. 科学学研究, 2015, 33(2):242-253.
- [19] 唐科明. 草地土壤细沟可蚀性季节变化研究[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(25):71-73.
- [20] 张光辉. 冲刷时间对土壤分离速率定量影响的试验模拟[J]. 水土保持学报, 2002, 16(2):1-4.
- [21] Zhang G, Liu B, Liu G, et al. Detachment of undisturbed soil by shallow flow[J]. Soil Science Society of America Journal, 2003, 67(3):713-719.
- [22] Nearing M A. A process-based soil erosion model for USDA-water erosion prediction project technology [J]. Trans. Asae, 1989, 32(5):1587-1593.
- [23] 王计磊, 吴发启. 不同生长期大豆坡耕地土壤抗侵蚀能力特征[J]. 土壤学报, 2016, 53(6):1389-1398.
- [24] 刘子壮, 高照良, 杜峰, 等. 黄土高原高速公路护坡植物根系分布及力学特性研究[J]. 水土保持学报, 2014, 28(4):66-71.
- [25] 袁雪红, 高照良, 张翔, 等. 护坡植物根系分布及抗拉力学特性[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(5):117-123.
- [26] 沈慧, 姜凤岐, 杜晓军, 等. 水土保持林土壤抗蚀性能评价研究[J]. 应用生态学报, 2000, 11(3):345-348.
- [27] 刘月梅, 张兴昌, 王丹丹. 黄土性土壤固化对黑麦草生长和根系活力的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(10):2604-2608.
- [28] 王润泽, 谌芸, 李铁, 等. 香根草和马唐的根系特征及对坡地紫色土抗侵蚀性的影响[J]. 草业学报, 2017, 26(7):45-54.
- [29] Bernard Barthès, Eric Roose. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion; validation at several levels[J]. Catena, 2002, 47(2):133-149.
- [30] 刘定辉, 李勇. 植物根系提高土壤抗侵蚀性机理研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(3):34-37.
- [31] 熊燕梅, 夏汉平, 李志安, 等. 植物根系固坡抗蚀的效应与机理研究进展[J]. 应用生态学报, 2007, 18(4):895-904.

(上接第 54 页)

- [25] 徐晓明, 张迎信, 王会民, 等. 水稻氮, 磷, 钾吸收利用遗传特征研究进展[J]. 核农学报, 2016, 30(4):0685-0694.
- [26] 陈波浪, 吴海华, 罗佳, 等. 施磷对立架甜瓜干物质累积及磷肥利用效率的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(2):511-518.
- [27] 张亚洁, 杨建昌, 杜斌. 种植方式对陆稻和水稻磷素吸收利用的影响[J]. 作物学报, 2008, 34(1):126-132.
- [28] 隗英华, 孙文涛, 韩晓日, 等. 春玉米土壤矿质氮累积及酶活性对施氮的响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(6):1368-1377.
- [29] Smiciklas K D, Below F E. Role of nitrogen form in determining yield of field-grown maize[J]. Crop Science, 1992, 32(5):1220-1225.
- [30] 薛晓辉, 郝明德. 小麦氮磷肥长期配施对土壤硝态氮淋溶的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(3):918-925.
- [31] 王婷, 李利利, 周海燕, 等. 长期不同施肥措施对雨养条件下陇东旱塬土壤氮素的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53(1):177-188.