

# 荒漠草原两种沙化草地对浅耕翻的响应

曲文杰, 宋乃平, 陈林, 刘秉儒, 杨新国

(宁夏大学 西北土地退化与生态恢复国家重点实验室培育基地, 银川 750021)

**摘 要:**浅耕翻是退化草地改良的一项技术措施,其效果往往与表层土壤的退化程度与类型相关。为进一步认识荒漠草原退化草地浅耕翻措施的适用性及其作用机理,在宁夏盐池县选取覆沙草地(片沙覆盖型)和侵蚀草地(侵蚀粗化型)当地两种较为典型的退化草地类型,分别进行深翻(20 cm)和浅耕(5 cm)两种浅耕翻处理,分析其植被更新和土壤水分变化情况。结果表明,浅耕翻可有效减少猪毛蒿当季发生数量,激活土壤种子库,提高两种退化类型草地植被均匀性和多样性水平,但是深翻处理下植被盖度下降幅度较大。其中覆沙草地物种丰富度保持稳定,一年生的狗尾草和画眉草占据更为优势的地位,深翻处理下土壤水分向下层蓄积;侵蚀草地物种数明显下降,但指示种胡枝子在群落中的优势地位进一步提高,土壤水分则沿垂直剖面均匀增加,0—100 cm 土壤蓄水量显著提高。浅耕翻是推动退化草地恢复演替的有效手段,其中浅耕更具普适性;但是综合植被更新和水分蓄积情况,深翻措施更适宜覆沙草地,浅耕措施对侵蚀草地则较为适宜。

**关键词:**荒漠草原;浅耕翻;植被更新;覆沙草地;侵蚀草地

**中图分类号:**Q948.12<sup>+</sup>3

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2014)01-0085-05

## Responses of Two Types of Desertification Grasslands in Desert Steppe to Shallow Ploughing

QU Wen-jie, SONG Nai-ping, CHEN Lin, LIU Bing-ru, YANG Xin-guo

(State Key Laboratory Breeding Base of Northwest

Land Degradation and Restoration, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

**Abstract:**Shallow ploughing is an improvement technology on the degraded vegetation, and its effect is often strongly related to the soil conditions. To further study the applicability and mechanism of shallow ploughing in degraded desert steppes, covering sand grassland (sheet sand cover type) and erosion grassland (erosion coarsening type) were selected in Yanchi of Ningxia Hui Autonomous Region, vegetation update and soil moisture changes were analyzed for the deeply ploughed (20 cm) and shallowly ploughed (5 cm) treatments. The results showed that shallow plowing effectively suppressed scoparia quarter, activated the soil seed bank and raised uniformity and diversity of two degradation types of grassland vegetation, but deep plowing under vegetation cover declined a lot. Species richness in sand covering grassland remained stable, with dominant annual *Setaria viridis*(L.) Beauv and *Eragrostis pilosa*, and the soil moisture concentrated to the lower layer in deep plowing treatment. While the number of species in erosion coarsening type sand decreased sharply, but indicator *Lespedeza bicolor* in the community of the dominant position further improved, with soil moisture in the vertical profile uniform increasing, and 0—100 cm soil water storage capacity significantly improving. Shallow plowing is an effective means to promote the restoration of degraded grassland succession; the shallow plowing is more universal. But in view of vegetation regeneration and moisture accumulation, the deep plowing measure is more suitable for sand covered grassland, and shallow plowing is more appropriate measures in erosion grassland.

**Key words:**desert steppe; shallow ploughing; vegetation update; sand-covered grassland; erosion grassland

收稿日期:2013-04-13

修回日期:2013-05-16

资助项目:973 前期研究专项(2012CB723206);国家自然科学基金(41101301)

作者简介:曲文杰(1982—),女,山东龙口人,在读硕士,研究方向为草地生态与恢复重建。E-mail:wenjiequ2012@163.com

通信作者:杨新国(1976—),男,山东肥城人,副研究员,主要从事农业生态与生态恢复方面的研究。E-mail:xinguoyang1976@163.com

浅耕翻是退化草场人工改良的一项重要措施<sup>[1]</sup>,但其实施效果因草场本底的土壤和植被条件、干扰环境等而不尽相同,因此浅耕翻措施的适用性评价需要就具体对象进行具体分析。鉴于以往研究主要集中在典型草原,特别是退化羊草草原<sup>[2-6]</sup>。而荒漠草原鲜见报道,有必要开展针对性研究。风蚀沙化是旱区草地退化的主要表现形式<sup>[7-10]</sup>,因退化形态的不同,又可以分为侵蚀粗化、表土剥蚀、片沙覆盖和流动(固定)沙丘等类型<sup>[11]</sup>。本文选取当地最为常见的侵蚀粗化和片沙覆盖两种沙化类型草地作为研究对象,分别设置不同深度的浅耕翻处理,分析其植被与土壤水分效应的差异、影响因素以及技术的适用性等问题,以摸清和积累荒漠草原退化草地土壤浅耕翻的一般规律和技术措施。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于宁夏盐池县柳杨堡乡杨寨子村(37°04′—38°10′N,106°30′—107°41′E),该区地处宁夏回族自治区东部,北与毛乌素沙地相连,南接黄土高原。气候属典型的中温带大陆性气候,年均气温 8.1℃,无霜期 120 d,年降水量 250~350 mm,主要集中在 7—9 月,占全年降水量的 60%以上,且年际变率大,年平均蒸发量 2 710 mm。土壤类型以灰钙土为主,其次是黑垆土和风沙土,此外还有黄土及少量的盐土和白浆土等,表层土壤质地多为轻壤土、沙壤土和沙土,结构松散,肥力较低。该区主要植被类型有灌丛、草原、草甸、沙地植被和荒漠植被,其中人工灌丛、草原、沙地植被分布较广,当地荒漠草原典型建群种短花针茅呈散落的斑块化小面积分布,退化严重。主要草本植物有猪毛蒿、白草、草木樨状黄芪、山苦荬、胡枝子、苦豆子等。

### 1.2 试验设计

选取空间上相邻、地势较平坦的覆沙草地和侵蚀草地作为实验样地。侵蚀草地系长期耕作、表土不断风蚀退化的产物,后弃耕恢复,形成当前以胡枝子为指示种的较为稳定的群落类型;土壤为沙化灰钙土,0—15 cm 表土由于耕作干扰,土体相对松散,粗砂粒含量高,20 cm 以下土质坚硬,以细砂粒和粉粒为主。表层土壤物理结皮发育明显。覆沙草地与侵蚀草地紧邻,有短期的耕作历史,后弃耕;表层为风沙土,覆沙厚度平均 30~40 cm,沙层以下与侵蚀草地同为典型的淡灰钙土,当前形成以苦豆子为指示种的群落类型;表层土壤生物结皮发育典型。丰水年份两块草地猪毛蒿大量生长,占据群落优势地位。

于 2012 年 5 月上旬分别在两块草地的控制实验样地内,采用草地旋耕机按长 50 m,宽 4 m 的带状耕翻方式(带间距 8 m),分别设置浅耕(5 cm)、深翻(20 cm)和对照(不耕翻)三种处理,每种处理重复三次。

### 1.3 测定项目与方法

植被调查采用样方法,每个重复处理小区内随机测定 3 个 1 m×1 m 样方,测定指标包括密度、盖度、高度和生物量(鲜重)等,同一处理的样方调查数据汇总合并,计算重要值和群落结构特征指数。物种丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、均匀度指数的计算方法参考文献[12]。其中物种重要值的计算公式如下:

种的重要值( $P_i$ )=(相对盖度+相对密度+相对株高+相对生物量)/4

每个处理小区内布设 1 m 的 TDR 土壤水分探针 1 根。土壤含水量采用美国产便携式水分监测仪(TDR-100)获取。于是 2012 年 9 月完成植被调查和剖面水分含量获取工作。

### 1.4 数据处理与分析

土壤储水量计算公式如下<sup>[13]</sup>:

$$\text{土壤储水量} = \sum Wh$$

式中:W——体积含水量(%);h——土层厚度(cm)。

所有数据采用 SPSS 软件进行统计分析。采用单因素方差分析(One-way ANOVA)和多重比较法(LSD)分析土壤水分数据组间的差异。

## 2 结果与分析

### 2.1 浅耕翻对覆沙草地植被的影响

对于覆沙草地而言,土壤耕翻处理尽管对群落的丰富度指数影响不大,但是可以明显提高物种分布的均匀性,大幅提高群落多样性水平,其中浅耕措施综合表现最为理想,总盖度没有大幅降低,而群落结构得到了明显改善(表 1)。

表 1 浅耕翻对覆沙草地群落特征的影响

	物种数	丰富度 指数	多样性 指数	均匀度 指数	总盖度
对照	17	3.47	1.40	0.25	0.55
浅耕	18	3.69	2.02	0.45	0.40
深翻	17	3.47	2.45	0.72	0.22

覆沙草地群落结构的改善主要是基于猪毛蒿在群落中相对重要值大小的变化(表 2)。伴随土壤干扰强度的增加,猪毛蒿重要值大幅降低,同时胡枝子和苦豆子等多年生植被,以及狗尾草(*Setaira viridis Beauv*)和画眉草(*Eragrostis pilosa*)等一年生植被在群落中的相对重要性明显提高。深耕 20 cm 处理下,狗尾草的重要性甚至超过猪毛蒿,居于群落显要

地位,但同时胡枝子的重要值也有小幅降低,相伴随的是大量毒杂草开始侵入覆沙草地,一些多年生禾本科植物消失,土壤干扰的负面效应有所体现。综合来看,猪毛蒿在覆沙退化草地过于突出的优势地位是导

致群落结构不良和多样性水平不高的主要原因,土壤耕翻可以压制猪毛蒿的种群规模,起到改善群落结构和多样性水平的作用,而这种作用以浅耕翻 5 cm 更为适宜。

表 2 浅耕翻对覆沙和侵蚀草地的物种组成及其重要值大小的影响

植物分类	植物名称	覆沙草地			侵蚀草地		
		对照	浅耕	深翻	对照	浅耕	深翻
豆科	胡枝子( <i>Lespedeza bicolor</i> )	9.9	10.4	6.3	20.4	28.1	42.0
	苦豆子( <i>Sophora alopecuroides</i> )	2.0	4.7	9.2	0.6		
	甘草( <i>Glycyrrhiza uralensis</i> )	1.3					
	米口袋( <i>Gueldenstaedtia multiflora</i> )	1.2	1.5		0.8	1.1	1.6
	草木樨状黄芪( <i>Astragalus melilotoides</i> )	6.7	3.3	3.7			
	披针叶黄华( <i>Thermopsis lanceolata</i> )			5.5	1.6		
	砂珍棘豆( <i>Oxytropis racemosa</i> )			1.8			
	乳浆大戟( <i>Euphorbia esula</i> )		1.1	2.6		1.3	
禾本科	短花针茅( <i>Stipa breviflora</i> )	1.4					
	中亚白草( <i>Pennisetum centrasiatricum</i> )	0.9	1.4				
	蒙古冰草( <i>Agropyron mongolicum</i> )		1.0				
	糙隐子草( <i>Cleistogenes squarrosa</i> )	0.8	1.1		0.6		
	狗尾草( <i>Setaira viridis</i> )	1.0	13.6	22.5	0.6	12.3	23.4
	画眉草( <i>Eragrostis pilosa</i> )	0.7	8.4	13.4		9.4	9.1
菊科	猪毛蒿( <i>Artemisia scoparia</i> )	66.3	43.0	15.5	70.8	40.7	17.3
	凤毛菊( <i>Saussurea salsa</i> )		4.1				
	山苦荬( <i>Ixeris denticulata</i> )	0.7	1.0	1.8	0.8	1.1	
	阿尔泰狗娃花( <i>Heteropappus altaicus</i> )	4.2	1.2		0.6	2.4	
	叉枝鸦葱( <i>Scorzonera divaricata</i> )			1.8	2.3	3.6	2.1
旋花科	银灰旋花( <i>Convolvulus ammannii</i> )	0.7					
	菟丝子( <i>China Dodder</i> )	0.8					
远志科	远志( <i>Polygala tenuifolia</i> )	0.7		3.3			
藜科	猪毛菜( <i>Artemisia scoparia</i> )			4.0			2.4
	角果藜( <i>Ceratocarpus arenarius</i> )			1.5			
	虫实( <i>Corispermum hyssopi folium</i> )		1.4	2.6			
蒺藜科	蒺藜( <i>Tribulus terrestris</i> )		1.1	2.6			2.1
葡萄科	地锦( <i>Parthenocisus tricuspidata</i> )	0.7	1.0		0.6		
茄科	灯笼草( <i>Clerodendrum fortunatum</i> )		1.0	1.8			

2.2 浅耕翻对侵蚀草地植被的影响

土壤耕翻措施可以明显降低侵蚀退化草地群落的物种丰富度和总盖度,但是对群落多样性的改善作用依然存在,这种效果也是通过提高物种分布均匀性达到的(表 3)。

表 3 浅耕翻对侵蚀草地群落特征的影响

	物种数	丰富度 指数	多样性 指数	均匀度 指数	总盖度
对照	12	2.39	0.97	0.15	0.83
浅耕	9	1.74	1.57	0.48	0.48
深翻	8	1.52	1.54	0.53	0.33

侵蚀草地群落结构的改善也主要是基于猪毛蒿

在群落中相对重要值大小的变化(表 2)。伴随土壤干扰强度的增加,猪毛蒿在群落中的地位大幅降低,同时胡枝子等多年生植被,以及狗尾草和画眉草等一年生植被,在群落中的相对重要性明显提高。深耕 20 cm 处理下,胡枝子超过猪毛蒿,居于群落显要地位。与覆沙退化草地不同的是,胡枝子的重要值一直维持一种上升的趋势,毒杂草的侵入也不甚明显。综合来看,土壤耕翻可以有效压制侵蚀退化草地猪毛蒿种群的规模,提高胡枝子在群落中的相对重要性,起到改善群落结构和多样性水平的作用,而这种综合效果以浅耕翻 5 cm 更为突出。

### 2.3 浅耕翻对两种类型草地 0—100 cm 土壤水分含量的影响

对不同退化类型草地而言,相同的土壤干扰措施对土壤水分状况的影响不尽相同。相对而言,侵蚀草地土壤水分的改善效果更为显著,在各个土层间的分布也较为均匀,特别是深翻处理,对 0—100 cm 土壤剖面水分含量的改善作用最为显著。但是浅耕对覆沙退化草地土壤水分垂直分布没有明显的影响,深翻处理的效果主要是体现在 40—100 cm 土层,使 0—

100 cm 土壤水分垂直分布格局发生了显著改变,由均匀分布转变为底聚型。深翻可以显著提高侵蚀草地 0—100 cm 土壤储水量(增量为 45.3 mm,  $p < 0.05$ ),浅耕也表现出与深翻相似的作用(增量为 29.9 mm,  $p < 0.05$ ),但是对覆沙退化草地而言,浅耕翻对 0—100 cm 土壤总储水量的影响不明显( $p > 0.05$ ) (图 1)。综合来看,深翻处理下 0—100 cm 土体储水量都有增加的趋势,但是不同类型草地对不同耕翻措施 的响应存在明显的差异。

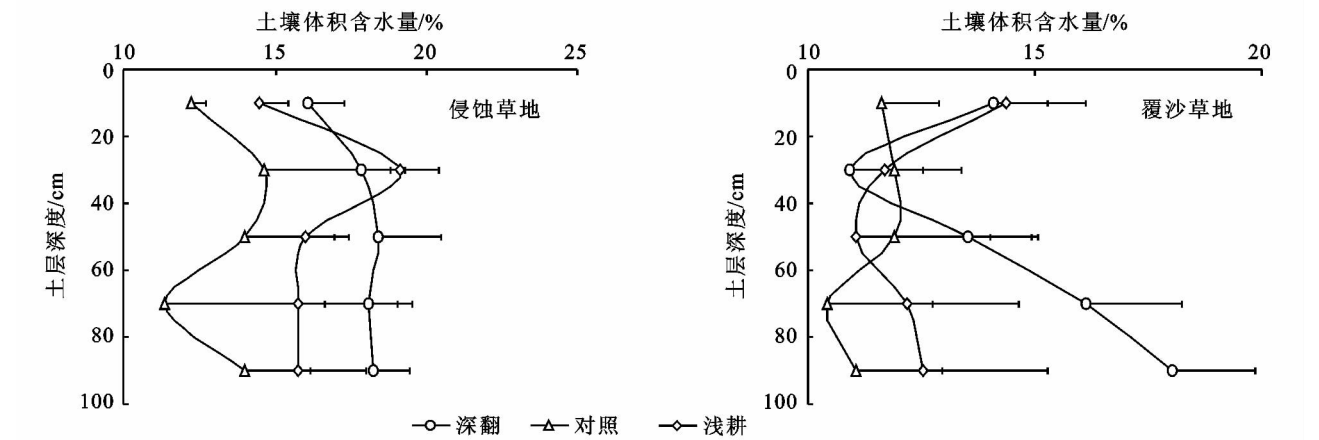


图 1 浅耕翻对 0—100 cm 土壤水分含量的影响

### 3 讨论

(1) 尽管两种类型草地在土壤耕翻后,植被均匀性和多样性普遍得以改善,但是覆沙退化草地在物种丰富度和植被盖度方面的表现要优于侵蚀草地,说明覆沙草地抗土壤干扰能力和群落更新能力更强。但是,就具体的优势物种替代后果来看,侵蚀草地原有指示种胡枝子随耕翻深度的增加其重要值持续增加,由于其所具有的抗逆性和分蘖力强、根系发达和覆盖度高等特性<sup>[14]</sup>,对群落稳定性的维持具有重要价值。覆沙草地耕翻后,狗尾草和画眉草则占据了过于重要的地位,由于其机会种的属性约束<sup>[15-16]</sup>,群落演替可能还要面临一些不确定的因素,也有可能表现出类似退化羊草草地的“开口向上的抛物线状”群落多样性和均匀性变化趋势<sup>[2]</sup>。这种效应也可以从多年生和一年生(含毒杂草)植物的相对重要性大小的变化趋势反映出来(表 4)。也有研究发现,退化羊草草地土壤浅耕翻后物种均匀性指数、丰富度指数和多样性指数下降,而植被盖度、高度和地上生物产量提高<sup>[6]</sup>,这与本研究的结果有所区别。除调查时期、草原类型和研究地域的差异外,究其原因,可能与群落优势种的可采食性、耕翻前群落的本底结构等因素有关,其中猪毛蒿过于优势的地位对短命杂类植物的直接压制应该是一个最重要的因素;其次无论苦豆子还是胡枝

子,其可食性相对羊草都要差得多,所以放牧间接导致的物种多样性增加效应<sup>[6]</sup>较弱。

表 4 浅耕翻对草地不同功能群落植被重要值的影响

草地类型	功能群	深翻	浅耕	对照
侵蚀草地	一年生和毒杂草	37.0	22.9	2.7
	多年生植物	45.7	36.4	26.5
覆沙草地	一年生和毒杂草	58.3	31.6	3.2
	多年生植物	22.9	25.4	29.8

注:上表植物中不含猪毛蒿。

(2) 浅耕翻对猪毛蒿的作用主要体现在密度、盖度的显著降低上;但是对生物量的作用不明显,甚至在侵蚀草地浅耕处理下其生物量反而有所上升(表 5),这可能是干旱环境下猪毛蒿作为机会物种对干扰的长期适应所形成的一种生存策略<sup>[17-18]</sup>。如果猪毛蒿生物量与有效种子形成量存在简单的正比关系,从抑制猪毛蒿种群长期存在或扩散趋势的角度,耕翻措施的优化还需要综合考虑时间、深度以及生物间相互作用等因素<sup>[5,18-19]</sup>,直接或间接的生物措施可能依然是抑制猪毛蒿种群规模的重要途径,如提高群落中多年生草本,特别是根茎型和丛生型禾草的比重<sup>[19]</sup>,但是就研究草地的当前演替阶段和物种构成来看,多年生禾本科植物依然十分匮乏,这可能也是造成猪毛蒿种群泛滥的一个重要因素。浅耕翻对苦豆子和胡枝子的重要值和生物量都具有一定的正效应(表 2,表

5),是引导各自群落恢复演替的有效手段。但是由于苦豆子后期有效覆盖度差、生长期短<sup>[20]</sup>,胡枝子植株过于低矮<sup>[14]</sup>等问题,为猪毛蒿种群的侵入和扩散提供了较多的空间。所以浅耕翻措施的进一步完善和改进,需要从抑制猪毛蒿、激活苦豆子(胡枝子)的角度进行统筹考虑。

表 5 两种类型草地植被地上生物量对浅耕翻的响应 g/m<sup>2</sup>

草地类型	植被	深耕	浅翻	对照
侵蚀草地	猪毛蒿	57.48	81.33	68.15
	胡枝子	86.26	102.11	63.94
	其他	99.44	21.04	39.51
	合计	243.18	204.47	171.61
覆沙草地	猪毛蒿	60.71	47.97	71.94
	苦豆子	13.51	10.71	9.50
	其他	125.48	66.86	44.23
	合计	199.70	125.54	125.67

(3) 总体而言,浅耕翻对土壤水分具有一定的改善作用,这可能与表层土壤结皮的破坏,导致土壤水分入渗能力提高有直接的关系,植被盖度降低所导致的蒸腾耗水减少也是一个间接的因素。相对而言,覆沙草地对降水的接纳和入渗效果更好一些,深翻处理下呈现出的底聚型水分垂直分布格局甚至与一般的沙地无异。土壤水分储量及其垂直分布格局的改变,也可能会影响现存植被间的竞争关系及其后续群落变化<sup>[21]</sup>。胡枝子作为一种耐旱性植物,水分利用效率较低,主要利用 1 m 以上土层的水分,且主要利用生长季前期降水完成主要生长活动<sup>[22]</sup>,侵蚀草地生长季后期 0—100 cm 土层较为均匀而显著的水分储备的增加,对来年胡枝子的生长具有积极的促进作用,但是一些水分利用效率较高的杂类草,包括猪毛蒿,依然可能利用前期有利降水条件迅速萌发,并竞争利用土壤深层的水分储备,因此连续、适时的浅耕干扰依然是一个必要的调节措施,以持续提高胡枝子在群落中的重要性,进一步压缩杂类草生存空间。而苦豆子作为一种根茎克隆植物,有效吸收根系主要分布在 10—30 cm 沙土层,以利用短期降水和上层水分为主,水分利用效率较高<sup>[20,23]</sup>。从水分竞争利用的角度来看,苦豆子对猪毛蒿等杂类草的抑制作用相对胡枝子更强一些,深翻措施通过切断根茎,一般可以有效提高苦豆子一类根茎克隆植物的种群规模和更新能力,快速提高其在群落中的优势地位<sup>[2,24]</sup>,同时深层水分条件的改善也为覆沙草地主要的伴生优势种胡枝子的生长提供了良好的条件。从水分改善和植被更新的角度,深翻措施更适用于以苦豆子为指示种的覆沙草地,但其实施的频次,要综合考虑植被、水分和风蚀环境等方面的因素,进一步摸索优化。

4 结 论

浅耕翻是推动荒漠草原覆沙与侵蚀退化草地恢复演替的一种有效措施,可有效压制机会种——猪毛蒿的当季发生数量,激活土壤种子库,提高植被均匀性和多样性,增加侵蚀草地 0—100 cm 土壤蓄水量。浅耕对两种类型草地群落结构的改善作用具有普适性,但是综合植被更新和水分蓄积情况,深翻更适宜覆沙草地,浅耕对侵蚀草地则较为适宜,但是深翻后植被盖度的可恢复程度及风蚀等次生问题、不同降水年型下浅耕翻措施的实施效果等还需要进一步监测。

参考文献:

[1] 吴广富. 浅翻轻耙改良草原效果的研究[J]. 中国草地, 1993(1):73.

[2] 宝音陶格涛,刘美玲,李晓兰. 退化羊草草原在浅耕翻处理后植物群落演替动态研究[J]. 植物生态学报,2003, 27(2):270-277.

[3] 宝音陶格涛,刘美玲. 退化羊草草原在浅耕翻处理后植物群落生物量组成动态研究[J]. 自然资源学报,2003, 18(5):544-551.

[4] 高天明,张瑞强,刘铁军,等. 阴山北麓浅耕翻季节对草地植被和土壤的影响[J]. 草业科学,2012,29(5):676-680.

[5] 姜世成,周道玮. 过牧、深翻及封育三种方式对退化羊草草地的影响[J]. 中国草地,2002,24(5):5-9.

[6] 张洪生,邵新庆,刘贵河,等. 围封、浅耕翻改良技术对退化羊草草地植被恢复的影响[J]. 草地学报,2010,18(3): 339-344,351.

[7] 安韶山,常庆瑞,刘京,等. 农牧交错带土地沙化的本质及其形成研究[J]. 生态学报,2003,23(1):106-111.

[8] 许冬梅,刘彩凤,谢应忠,等. 盐池县草地沙化演替过程中土壤理化特性的变化[J]. 水土保持研究,2009,16(4): 85-88.

[9] 朱丽,秦富仓,杨翠林. 阴山北麓农牧交错带土壤侵蚀驱动机制研究[J]. 水土保持研究,2008,15(5):34-37.

[10] 程中秋,张克斌,刘建,等. 宁夏盐池荒漠草原区天然草地植物生态位研究[J]. 水土保持研究,2011,18(3):36-40,47.

[11] 李顺江,胡霞,刘连友. 开垦对退化沙质草地土壤机械组成及有机碳分布的影响[J]. 水土保持研究,2011,18 (4):150-152.

[12] 任继周. 草业科学研究方法[M]. 北京:中国农业出版社,1998:1-41.

[13] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京:中国农业出版社,2000.

[14] 赵杨,陈晓阳,骈瑞琪,等. 胡枝子属研究进展[J]. 西北林学院学报,2006,21(2):71-75.

[15] 刘志民,李雪华,李荣平,等. 科尔沁沙地 15 种禾本科植物种子萌发特性比较[J]. 应用生态学报,2003,14 (9):1416-1420.

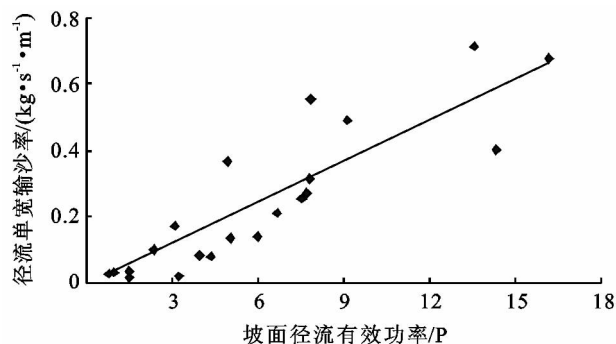


图4 坡面径流单宽输沙率与水流有效功率的关系

通过对试验数据的回归分析求得(11)式中 $k$ 的取值为0.251,因此本次试验条件下径流单宽输沙率公式可以表示为:

$$G_s = 0.251 \frac{\gamma}{(\gamma_s - \gamma)g} \tau (U - U_c) \quad (12)$$

式中: $U, U_c$ ——坡面径流流速和泥沙的起动流速(m/s); $\tau$ ——水流切应力(N/m<sup>2</sup>); $g$ ——重力加速度(N/kg); $G_s$ ——坡面径流单宽输沙率[kg/(s·m)],经过回归分析可得相关系数为0.7993。

## 4 结论

在前人研究的基础上,通过室内坡面径流冲刷试验对坡面径流输沙过程进行了研究,主要得到以下结论:

(1) 不同坡度、流量组合条件下,坡面平均流速和径流不同时段的产沙分配比例随冲刷历时的变化总体上具有同步性。

(2) 在试验条件下,坡度对流速的变化影响与对不同时段坡面产沙比例的影响相反,即坡度越陡,流速变化过程阶段性越明显,产沙比变化越平缓,反之亦然。

(3) 坡度越陡,坡面流达到侵蚀平衡的时刻越早,同时坡面侵蚀变化规律受制于流量和坡度之间的相互对比情况。

(上接第89页)

- [16] 李雪华,李晓兰,蒋德明,等.画眉草种子萌发对策及生态适应性[J].应用生态学报,2006,17(4):607-610.
- [17] 祝东立,贺学礼,石硕.小五台山15种蒿属植物种子形态及萌发特性研究[J].西北植物学报,2007,27(11):2328-2333.
- [18] 王宗灵,徐雨清,王刚.沙区有限降雨制约下一年生植物种子萌发与生存对策[J].兰州大学学报:自然科学版,1998,34(2):98-103.
- [19] 杜峰,梁宗锁,山仑,等.黄土丘陵区不同立地条件下猪毛蒿种内、种间竞争[J].植物生态学报,2006,30(4):601-609.
- [20] 祁燕蓉,何生虎,史光亮.苦豆子的研究进展[J].甘肃畜牧兽医,2008,38(6):36-38.
- [21] Rodriguez M V, Bertiller M B, Bisigato A. Are fine

(4) 建立了坡面径流输沙理论公式,试验数据的回归分析得相关系数为 $R^2 = 0.7993$ ,由于试验条件的限制,公式的普适性还需要进一步扩大。

## 参考文献:

- [1] 姚文艺.坡面流阻力规律试验研究[J].泥沙研究,1996(1):74-82.
- [2] Abrabams A D, LI G, Parsons A J. Rill hydraulics on a semiarid hillslope, Southern Arizona[J]. Earth Surface Processes and landforms 1996,21(1):35-47.
- [3] Yoon Y N, Wenzel H G. Mechanics of sheet flow under simulated rainfall[J]. Journal of the Hydraulics Division, 1971, 97(9):1367-1386.
- [4] 吴长文,王礼先.林地坡面的水动力学特性及其阻延地表径流的研究[J].水土保持学报,1995,9(6):32-38.
- [5] 江忠善,宋文经.坡面流速的试验研究[J].中国科学院西北水土保持研究所集刊,1988(7):46-52.
- [6] 吴普特,周佩华.坡面薄层水流流动形态与侵蚀搬运方式的研究[J].水土保持学报,1992,6(1):16-24.
- [7] 张科利,秋吉康弘.坡面径流冲刷及泥沙输移特征的实验研究[J].地理研究,1998,17(2):163-170.
- [8] 李占斌,鲁克新.黄土坡面土壤侵蚀动力过程试验研究[J].水土保持学报,2002,16(2):5-8.
- [9] 李鹏,李占斌,郑良勇.黄土坡面径流侵蚀产沙动力过程模拟与研究[J].水科学进展,2006,(7):444-449.
- [10] 雷廷武,张晴雯.细沟侵蚀动力过程输沙能力试验研究[J].土壤学报,2007,39(4):476-482.
- [11] Nearing M A, Foster G R, Lane L J, et al. A process-based soil erosion model for USDA-Water Erosion Prediction Project technology[J]. Trans. ASAE, 1989, 32(5):1587-1593.
- [12] Govers G, Rauws G. Transporting capacity of overland flow on plane and on irregular beds[J]. Earthsurf, processes Landforms, 1986, 11(5):515-524.
- [13] 窦国仁.再论泥沙起动流速[J].泥沙研究,1999,6(1):1-9.

roots of both shrubs and perennial grasses able to occupy the upper soil layer? A case study in the arid Patagonian Monte with non-seasonal precipitation[J]. Plant and Soil, 2007, 300(1/2):281-288.

- [22] 张晓红,王惠梅,徐炳成,等.黄土塬区3种豆科牧草对土壤水分的消耗利用研究[J].西北植物学报,2007,27(7):1428-1437.
- [23] Zhang Z S, Li X R, Wang T W, et al. Distribution and seasonal dynamics of roots in a revegetated stand of *Artemisia ordosica* Krachsh. In the Tengger Desert (North China)[J]. Arid Land Research and Management, 2008, 22(3):195-211.
- [24] 杨辉.苦豆子种群扩散的生物生态学基础[D].乌鲁木齐:新疆大学,2005:12-16.