

模拟降雨条件下黄土丘陵区主要植物种子的流失特征

雷东¹, 韩鲁艳^{2,3}, 焦菊英^{1,2}, 温仲明^{1,2}

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院

水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 山东民族技师学院, 山东 青州 262500)

摘要:黄土丘陵沟壑区植被稀疏,土壤侵蚀严重,会造成种子随地表径流和泥沙运移发生流失,从而对植被恢复产生影响。采用人工模拟降雨试验,研究了该区29个主要物种种子在不同降雨侵蚀条件下(降雨强度100 mm/h和150 mm/h与坡度15°、20°、25°和30°的不同组合,降雨历时为1 h)的流失特征,分析了黄土丘陵区主要物种种子的流失特征。结果表明:在所有供试的物种中有79.3%的物种种子发生了流失,平均流失率为27.4%。雨强越大,种子流失率越高,而坡度的影响不如雨强明显。种子的流失特征也受其质量、形状、大小和生理特征等的影响,发生流失的种子质量(M)多在50 mg以下,当 $M < 10$ mg时,种子质量越小,流失率越大,而当 $10 \text{ mg} < M < 50 \text{ mg}$ 时,种子流失主要受形状特征及附属物的影响,圆形和椭圆形的种子发生流失的机率最大。

关键词:降雨侵蚀; 种子流失; 种子形态; 黄土丘陵区

中图分类号: S154; S157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2011)01-0001-06

Seed Loss Characteristics of Main Species in Loess Hilly-gullied Area by Simulated Rainfall Erosion

LEI Dong¹, HAN Lu-yan^{2,3}, JIAO Ju-ying^{1,2}, WEN Zhong-ming^{1,2}

(1. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi

712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Shandong National Technician College, Qingzhou, Shandong 262500, China)

Abstract: For sparse vegetation and serious soil erosion in Loess Hilly-gullied area, the seed loss by surface runoff and sediment transport may have impacts on vegetation restoration. To analyze the seed loss characteristics of the main species in the loess hilly-gullied area, rainfall simulation experiments were carried out over 1 m² plots on 15°, 20°, 25° and 30° loess slopes for a 60-minute duration with intensities of 100 mm/h and 150 mm/h. The results showed that, there were 23 species (accounting for 79.3%) having seed loss with an average seed loss rate of 27.4%, heavier rainfall leads to higher seed loss ratio on same slope, while the effect of slope on seed loss was not more significant than rainfall intensity. The seed loss was also affected by the mass, shape, size and physiological feature of seed itself. Most seeds occurred seed loss with a mass below 50 mg, seed loss ratio has negative correlation with seed mass when it below 10 mg; when $10 \text{ mg} < \text{seed mass} < 50 \text{ mg}$, seed shape and appendices come to be the main factors affecting seed loss, the round and oval seeds were prone to loss.

Key words: water erosion; seed loss; seed morphology; loess hilly-gullied area

在干旱半干旱地区,由于植被盖度低,降雨强度大,土壤表面容易产生坡面径流^[1],在导致坡面土粒与养分流失的同时,也会将散落到地表的种子和土壤中原来保存的种子移走,在很大程度上将会改变种子

的初始散落与存储状态而造成种子的再分布,引起种子的二次传播,决定着种子的空间分布,进而影响幼苗的萌发、存活与定植格局,最终影响地上植被的空间分布^[2-8]。因而种子流失被认为是阻碍植被恢复和

收稿日期: 2010-11-16

修回日期: 2010-11-29

资助项目: 国家自然科学基金面上项目“黄土丘陵沟壑区土壤种子库分布格局及植被恢复的土壤侵蚀解释”(40771126); 西北农林科技大学基本科研业务费专项“黄土高原植被发育与恢复演替研究”(CX200906)

作者简介: 雷东(1986—),男,河南省漯河市人,硕士研究生,研究方向为植被恢复与水土保持。E-mail: ld04109@nwsuaf.edu.cn

通信作者: 焦菊英(1965—),女,陕西省宝鸡市人,博士,研究员,研究方向为恢复生态与水土保持环境效应评价。E-mail: jyjiao@ms.iswc.ac.cn

解释荒坡地植被稀疏的一个主要因子^[6,9-11]。为此,水蚀引起的种子流失也受到了关注,主要研究有西班牙东南地区水蚀引起的种子流失特征^[6,9]及种子尺寸和形状^[3,12]、坡度^[13]对种子流失及植被更新的影响,埃塞俄比亚北部地区植被防止种子流失的作用^[14],法国阿尔卑斯山区生物工程^[15]、植被覆盖和动物蹄印^[16-17]对种子流失的影响。这些研究表明种子随坡面径流的流失不仅受坡度、地表糙度、降雨强度等的影响,同时也受种子自身特点即形状和大小的影响;而且认为在西班牙东南部地区水蚀引起的种子流失不是解释植被稀少的关键因素,而种子萌发与幼苗存活等因素可能起着重要的作用^[6,9]。然而,在我国土壤侵蚀非常严重且植被恢复难度大的黄土丘陵沟壑区^[18],由于降雨特性、地形地貌与植被物种组成等与以上研究区的不同,土壤侵蚀引起的该区主要植物种子的流失特征必定也不相同,这可能是造成该区植被恢复演替状况不佳的一个原因,但有关此方面的研究在国内尚未见报道。为此,本文通过室内人工模拟降雨试验,分析黄土丘陵区 29 个主要物种的种子在不同降雨侵蚀条件下随坡面径流和泥沙搬运流失的特征,探明影响种子流失的主要因素和能够抵抗土壤侵蚀的种子形态特征,不仅可为黄土高原地区植被盖度低、植被恢复速度慢提供土壤侵蚀学的解释;而且可为黄土高原地区植被建设的物种选择提供一定的参考依据,为加速植被恢复进行人为适度干预与调控提供一定的理论基础。

1 材料与方法

本试验在黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室降雨大厅内进行,采用侧喷式自动模拟降雨系统^[19],降雨高度 16 m,满足所有雨滴达到终点速度,降雨强度变化范围为 40~260 mm/h,降雨均匀度大于 80%,观测黄土坡面不同植物种子在降雨侵蚀过程中的流失特征。

1.1 试验土槽

试验土槽的规格为长(2 m)×宽(0.5 m)×高(0.5 m),底部有均匀的小孔。供试土壤为黄绵土,采自陕西省安塞县。装填土槽前先将试验用土除去碎石块、植物根系等杂质,并过 6 mm 筛网,将土均匀混合后备用。填土时先将土槽底部铺垫 10 cm 厚沙子,并铺上一层纱布,以保证良好的透水性。在沙子上层填土 30 cm,为了土层的均匀性,采用分层填土的方法,共装 6 层,每层 5 cm 厚,并将土壤容重控制在 1.10~1.15 g/cm³。

1.2 供试种子

依据种子不同的形态特征,选取了 29 个物种,在黄土丘陵区安塞纸坊沟和延安燕沟流域采集这些植物的种子(表 1)。进行降雨试验时将供试种子随机播撒在距土槽顶部边缘 70~170 cm 且距土槽两侧各 10 cm 的范围内,以特制的样方框(100 cm×30 cm)为参照,保证种子能尽量均匀分布。除亚麻(*Linum usitatissimum*)、酸枣(*Ziziphus jujuba* var. *spinosa*)、山杏(*Armeniaca sibirica*)、大豆(*Glycine max*)、玉米(*Zea mays*)和山荆子(*Malus baccata*)的种子各布设 5 粒外(由于试验土槽尺寸较小,且这些种子较大,布设数量多会分割径流),其余所有物种的种子均布设 10 粒,每场降雨同时设置 4 个土槽,每个土槽内选 15 个物种布设。

1.3 种子形态量测与估算

种子质量测定:根据种子尺寸的大小,分成 5 粒(>100 mg)、10 粒(10~100 mg)或 100 粒一组(<10 mg),用万分之一天平称其质量,每种植物 5 个重复,然后计算每种植物种子的平均质量(M)。禾本科植物带外稃和芒(如果有芒)测量,菊科植物果实测量时带冠毛。

种子形状量测:对不同大小的种子分别以游标卡尺和螺旋测微器为量测工具,量测种子的长(L)、宽(W)、高(H)。禾本科植物不带外稃测量,菊科植物不带冠毛测量,杠柳等种子不带绢毛测量。每种植物测量 5 个重复,然后计算其平均值作为该物种的尺寸。同时,计算种子的表面积($S=L \times W$)、体积($V=L \times W \times H$)、种子密度($D=M/V$)和比表面积($S_w=S/M$)。种子的形状用 Posen Flatness Index (FI)^[20]和 Eccentricity Index (EI)^[3]来衡量,两个指数的计算如公式如下:

$$FI=(L+W)/2H$$

$$EI=L/W$$

1.4 降雨模拟试验

根据预试验结果及前人有关黄土坡面人工降雨试验^[21-22],模拟降雨强度设置为 100 mm/h 和 150 mm/h。坡度采用 15°、20°、25°和 30°,每个降雨强度、坡度和不同组合条件下的物种均设置 3 个重复。

降雨前对降雨强度进行率定,确保降雨的强度和均匀度达到试验要求。降雨过程中坡面开始产流时,记录产流时间,从坡面产流开始,用塑料桶将径流泥沙样全部收集,每隔 3 min 收集一次,降雨历时 60 min。降雨结束后分别观察径流和泥沙样中流失种子的数量。径流量的测定采用量筒量取法,产沙量的测定采用烘干称重法。

1.5 数据分析

采用 Excel 和 SPSS Statistics 17.0 软件包对数据进行统计分析,采用双因素方差分析方法研究降雨强度和坡度对种子流失率产生的影响,利用相关分析探讨径流量、侵蚀量和种子各个形态特征指标与流失率之间的关系。

2 结果与讨论

2.1 不同植物种子的流失特征

不同物种的种子在不同降雨强度与坡度条件下的流失率见表 1。供试的 29 个植物平均种子流失率为 27.4%,且有 82.7%物种的种子流失率不超过 50%。种子平均流失率大于 50.0%的物种包括达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)、白羊草(*Bothriochloa*

ischemum)、杠柳(*Periploca sepium*)和刺槐(*Robinia pseudoacacia*);种子平均流失率在 10%~50%范围内的物种有异叶败酱(*Patrinia heterophylla*)、灌木铁线莲(*Clematis fruticosa*)、谷子(*Setaria italica*)、狼牙刺(*Sophora viciifolia*)、黄刺玫(*Rosa xanthina*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、火炬树(*Rhus typhina*)、鬼针草(*Bidens pilosa*)、柠条(*Caragana intermedia*)、野萝卜花(*Daucus carota*)、水栒子(*Cotoneaster multiflorus*)、紫丁香(*Syringa oblata*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、拉拉藤(*Galium aparine* var. *echinos permum*)和亚麻;种子平均流失率低于 10%的物种有茶条槭(*Acer ginnala*)和大针茅(*Stipa grandis*);而香青兰(*Dracocephalum moldavica*)、小麦(*Triticum aestivum*)、酸枣、山杏、大豆、玉米和山荆子的种子在任何条件下均没有发生流失。

表 1 不同降雨强度下不同植物的种子流失率 %

物种	生活型	100 mm/h				150 mm/h			
		15°	20°	25°	30°	15°	20°	25°	30°
白羊草	PH	55.0	50.0	70.0	50.0	80.0	60.0	90.0	—
阿尔泰狗娃花	PH	55.0	70.0	70.0	—	70.0	80.0	80.0	80.0
异叶败酱	PH	35.0	32.5	30.0	20.0	70.0	70.0	80.0	—
紫丁香	S	—	20.0	—	10.0	—	30.0	—	—
野萝卜花	BH	30.0	30.0	15.0	0.0	30.0	40.0	50.0	—
大针茅	PH	—	10.0	—	0.0	—	0.0	—	—
杠柳	S	65.0	36.0	70.0	30.0	100.0	76.7	100.0	35.0
侧柏	A	—	20.0	—	0.0	—	30.0	—	—
鬼针草	AH	10.0	3.3	15.0	—	40.0	43.3	50.0	45.0
达乌里胡枝子	SS	60.0	60.0	70.0	—	100.0	86.7	80.0	90.0
拉拉藤	AH	10.0	23.3	20.0	20.0	—	10.0	—	—
灌木铁线莲	S	30.0	10.0	30.0	—	40.0	65.0	80.0	55.0
茶条槭	A	—	10.0	—	0.0	—	0.0	—	—
香青兰	AH	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
柠条	S	10.0	8.0	5.0	20.0	40.0	30.0	90.0	—
沙棘	S	10.0	13.3	15.0	—	80.0	36.7	60.0	35.0
狼牙刺	S	0.0	36.7	15.0	—	60.0	53.3	70.0	50.0
黄刺玫	S	15.0	14.0	15.0	—	60.0	56.7	70.0	30.0
刺槐	A	30.0	6.7	15.0	—	100.0	85.0	100.0	35.0
水栒子	S	10.0	6.7	15.0	—	20.0	30.0	50.0	—
火炬树	A	—	—	—	—	—	20.0	—	50.0
谷子	AH	—	—	—	—	—	50.0	—	35.0
亚麻	AH	—	—	—	—	—	10.0	—	—
小麦	ABH	—	0.0	—	0.0	—	0.0	—	—
酸枣	S	—	0.0	—	0.0	—	0.0	—	0.0
山杏	S	—	0.0	—	0.0	—	0.0	—	—
大豆	AH	—	0.0	—	0.0	—	0.0	—	—
玉米	AH	—	—	—	—	—	0.0	—	0.0
山荆子	S	—	—	—	—	—	0.0	—	0.0

物种生活型: AH——一年生植物; ABH——一、二年生植物; BH——二年生植物; PH——多年生草本; S——灌木; SS——半灌木(小灌木); A——乔木; “—”表示物种没有参与该组试验。

2.2 降雨强度与坡度对种子流失率的影响

统计所有供试物种的种子在 2 个降雨强度、4 个坡度不同组合条件下的流失率,先将数据进行方差齐性检验(Homogeneity Test),然后与降雨强度、坡度这两个因素进行双因素方差分析,结果见表 2。由表中可以看出:降雨强度和坡度两个因素对种子流失率都产生了显著的影响($p<0.001$),并且降雨强度对种子流失产生的影响比坡度大,但二者的交互作用对种子流失率的影响不显著。

表 2 基于种子流失率的降雨强度和坡度双因素方差分析

数据源	离差平方和	自由度	均方差	F 值	P 值
修正模型	5.911a	7	0.844	16.164	0.000
	28.218	1	28.218	540.148	0.000
雨强	5.009	1	5.009	95.888	0.000
坡度	1.027	3	0.342	6.552	0.000
雨强×坡度	0.281	3	0.094	1.792	0.150

2.3 种子形态特征对种子流失的影响

对种子流失率和种子形态特征值之间的相关性分析(表 3)表明,种子质量(M)、长(L)、宽(W)、高(H)、比表面积(S_w)和体积(V)都对种子流失率产生了显著性影响。所有供试种子,除去明显受附属物和形状、生理特征影响比较大的物种(包括香青兰、野萝卜花、大针茅和鬼针草),将其余物种种子的质量和 FI 值与种子平均流失率进行相关性分析,得出种子质量

与流失率之间的 Pearson 系数为 -0.527 ,在 0.01 水平上显著相关,且为负相关,说明种子质量越小,流失的机率越大;种子 FI 值与流失率之间的 Pearson 系数为 0.461,在 0.05 水平上显著相关,为正相关,说明种子越接近圆形,流失的几率越大。随降雨发生流失的种子质量大都分布在 $M\leq 50\text{ mg}$ 的范围内(图 1)。

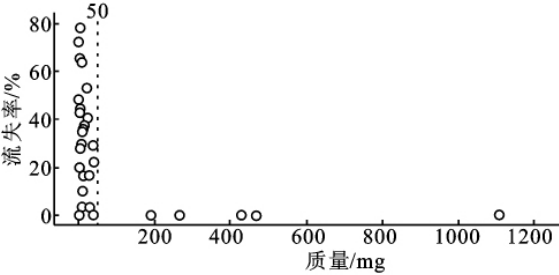


图 1 种子质量和流失率散点分布图

在 $M<50\text{ mg}$ 的范围内,除香青兰和大针茅外,质量比较小的种子流失率大多都比较高。 $M<10\text{ mg}$ 的种子(占 54%)流失率变化在 10.0%~78.1%之间,平均为 48.4%。质量在 10~50 mg 之间的种子(占 46%)流失率变化为 3.3%~53.1%,平均 31.8%。当 $M<10\text{ mg}$ 时,种子流失率受种子质量影响较大,当 $10\text{ mg}<M<50\text{ mg}$ 时,种子的体积对流失率呈显著性影响(表 3)。但不是所有物种的种子都遵循这个规律,有些种子由于具有附属物或特殊的生理特性而比较特殊。为此,按影响种子流失的形态特征指标,可将种子流失划分为以下 4 种情况。

表 3 种子流失率与形态特征值之间的相关系数

供试种子	M	L	W	H	S	V	FI	EI	D
所有供试种子	-0.440*	-0.484**	-0.546**	-0.574**	-0.504**	-0.419*	0.207	0.045	-0.097
$M<10\text{ mg}$	-0.566*	-0.292	-0.040	-0.470	-0.318	-0.275	0.004	-0.178	-0.200
$10\text{ mg}<M<50\text{ mg}$	-0.474	-0.513	-0.527	-0.295	-0.534	-0.616*	-0.356	-0.346	0.489

* 和 ** 分别表示该值在 $p<0.05$ 和 $p<0.01$ 水平上差异显著。

(1) 种子流失主要受种子质量的影响:主要表现为种子质量大于 50 mg 和小于 10 mg 的种子两种情况。种子质量大于 50 mg 的植物包括大豆、山荆子、玉米、酸枣和杏,这些植物的种子由于质量比较大,在降雨过程中基本不发生流失;种子质量小于 10 mg 的植物如白羊草、阿尔泰狗娃花、达乌里胡枝子、谷子、杠柳等,由于种子质量很小,降雨过程中容易发生流失,它们的流失率分别为 65.0%、72.1%、78.1%、42.5%和 64.1%。

(2) 种子流失主要受种子形状特征的影响。形状特征对种子流失的影响比较复杂,不同的种子表现不同。如狼牙刺、水栒子、火炬树和沙棘,这些物种的种子呈圆形或椭圆形,在降雨侵蚀作用下容易随坡面

向下滚动,发生流失,其流失率分别为 40.7%、21.9%、35.0%和 35.7%;刺槐和柠条的种子呈扁椭圆形或具有棱角,不容易在坡面发生滚动,却容易随泥沙的搬运而流失,这些物种的流失率分别为 53.1%和 29.0%,其种子随泥沙的流失率是随径流的流失率的 12.2 倍和 3.1 倍。

(3) 种子流失主要受种子附属物的影响:有些种子的附属物有利于种子的流失,如异叶败酱的种子呈椭圆形,略扁平,周围具翅,在径流作用下产生较大的浮力,主要以悬浮方式发生流失,流失率达到 48.2%,其随径流的流失率是随泥沙流失率的 6.7 倍;也有些种子的附属物有抵抗种子流失的作用,如大针茅的种子具有一呈螺旋状芒针,容易刺入土壤中,抵抗降雨

侵蚀作用,因而流失率也较小仅为 3.33%;还有野萝卜花的刺毛和鬼针草的芒刺,二者流失率为 27.9%和 29.5%,而与其质量相似的达乌里胡枝子和杠柳的种子流失率分别达到了 78.1%和 64.1%。

(4) 种子流失主要受种子生理特性的影响:香青兰的种子在任何不同降雨条件下都不发生流失,是由于该物种种子在开始降雨以后,经过受潮、吸水,表面会产生一层粘液,与土壤表面粘附在一起,产生较大的粘结力,同时种子本身质量由于吸水而大大增加,增强了抵抗径流冲刷的能力,所以没有流失现象发生。

2.4 讨论

关于降雨强度和坡度对种子流失特征的影响,Aerts 等^[14]在埃塞俄比亚半干旱地区采用野外人工模拟降雨试验(降雨强度 120 mm/h,降雨历时 10 min)的研究表明坡度对种子流失率的影响较小;而 García-Fayos 等^[6]的野外降雨模拟试验(降雨历时 40 min,降雨强度 55 mm/h)表明山麓侵蚀平面(2°)的土壤侵蚀速率比坡面(22°~55°)低 40 倍,而种子流失却高出 6 倍,认为主要差别在于种子流失的时间动态。然而,两个坡面相差 20°,是很难得出种子流失与坡度成反比关系的;而且在坡度为 22°~55°的坡面,试验研究数据却表现出种子流失与坡度成不显著正比关系;本研究中坡度对种子流失率虽然产生显著性影响,但是具体的流失率随坡度变化并没有呈现出明显的相关关系,可能是由于不同种子的抗蚀策略,致使种子流失与坡度之间的关系在不同的研究中结果有所不同。由于降雨强度和降雨历时是影响水文过程的重要因子,种子在不同的降雨强度和历时条件下将会产生不同的响应特征^[23]。

关于种子形状特征对种子流失率的影响,Cerdà and García-Fayos^[3]的研究表明:当种子小于 50 mg 时,种子的流失率主要决定于种子的大小,而当种子大于 50 mg 时,种子的形状将影响种子的流失率,当种子在 10~50 mg 范围时,具有最低的流失率。但这个结论是在特定试验条件(26 cm×26 cm 小区,坡度 11°,雨强 55 mm/h,历时 25 min)下取得的,当供试物种、降雨强度、坡度、地面糙度等条件发生改变时,结果可能会随之而发生变化。

本研究采用黄土裸坡,且只控制了降雨强度与坡度两个影响因子,与野外黄土坡面实际情况差异还很大。在野外条件下影响种子流失的因素还有很多,如地表结皮、灌草丛、微地形特征等。研究表明灌丛下

面储存的种子即使在极端降雨条件下也不易随坡面径流流失,而储存于裸露地的种子容易流失^[14,24];蹄印中的土壤种子数量和物种数是邻近裸露地面的 2 倍^[17];水土保持生物工程如植物篱^[16]、垂直于坡面的措施^[25]能有效地截获和保持种子。因此,可以推断本研究的种子流失率会比在自然条件下的大,但对植被恢复的物种选择具有一定实践参考价值。

3 结论

(1)在黄土丘陵沟壑区,土壤表面散落的种子在可蚀性降雨条件下很容易发生流失,本研究中发生流失物种的种子占供试物种总数量的近 80%。

(2)降雨强度和坡度是影响种子流失的外部因素,都产生显著性影响。种子流失率随着降雨强度的增大而增大,而随坡度的变化规律不明显,说明降雨强度产生的影响比坡度大。

(3)种子质量及形态特征是影响其发生流失的自身因素。种子质量越小发生流失的几率越大,其中低于 10 mg 的种子主要受自身质量的影响,而质量为 10~50 mg 的种子则主要受形态特征及附属物的影响;圆形和椭圆形的种子最容易发生流失,而狭长形,具附属物的种子抵抗流失的能力较强;也有部分种子由于遇水后会分泌一层粘液附着于土壤表面,通过与土壤表面的粘结力而不发生流失。

(4)根据本研究所选用的 29 个物种种子的流失特征,可为黄土高原植被恢复的选种提供几点建议:可选用种子质量较大($M>50$ mg)的物种,如山荆子、酸枣和大豆等,在本试验条件下不发生种子流失;选取具有分泌粘液特性的种子如香青兰;选取种子体积较小,很容易进入土壤缝隙中形成土壤种子库的猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)、铁杆蒿(*Artemisia sacrorum* Ledeb)和醉鱼草(*Buddleja lindleyana*)等;选用带附属物(刺毛、芒)的种子,如物种野萝卜花、鬼针草和大针茅都具有抵抗土壤侵蚀流失的作用;尽量避免选用圆形或椭圆形种子,如本试验中狼牙刺、火炬树和沙棘等。

参考文献:

- [1] 焦菊英,王万中,李靖. 黄土高原林草水土保持有效盖度分析[J]. 植物生态学报,2000,24(5):608-612.
- [2] Aguiar M R, Sala O E. Seed distribution constrains the dynamics of the Patagonian Steppe[J]. Ecology,1997,78(1):93-100.
- [3] Cerdà A, García-Fayos P. The influence of seed size and

- shape on their removal by water erosion[J]. *Catena*, 2002,48:293-301.
- [4] Chambers J C, Macmahon J A. A day in the life of a seed: movements and fates of seeds and their implications for natural and managed systems[J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1994,25:263-292.
- [5] Fllner S, Shmida A. Why are adaptations for long-range seed dispersal rare in desert plants[J]. *Oecologia*, 1981, 51:133-144.
- [6] Garcia-Fayos P, Recatalá T M, Cerdà A, et al. Seed population dynamics on badland slopes in southeastern Spain[J]. *Journal of Vegetation Science*, 1995, 6: 691-696.
- [7] Gutterman Y. Environmental factors and survival strategies of annual plant species in the Negev Desert, Israel [J]. *Plant Species Biology*, 2000,15:113-125.
- [8] Alcantara J M, Rey P J, Valera F, et al. Factors shaping the seedfall pattern of a bird-species plant[J]. *Ecology*, 2000,81(7):1937-1950.
- [9] Garcia-Fayos P, Cerdà A. Seed losses by surface wash in degraded Mediterranean environments[J]. *Catena*, 1997,29(1):73-83.
- [10] Jones F E, Esler K J. Relationship between soil-stored seed banks and degradation in eastern Nama Karoo rangelands (South Africa)[J]. *Biodiversity and Conservation*, 2004,13(11):2027-2053.
- [11] Li F R, Zhao L Y, Zhang H, et al. Habitat degradation, topography and rainfall variability interact to determine seed distribution and recruitment in a sand dune grassland[J]. *Journal of Vegetation Science*, 2009,20 (5): 847-859.
- [12] 武高林,杜国祯,尚占环. 种子大小及其命运对植被更新贡献研究进展[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(10): 1969-1972.
- [13] Cerdà A, Garcia-Fayos P. The influence of slope angle on sediment, water and seed losses on badland landscapes[J]. *Geomorphology*, 1997,18(2):77-90.
- [14] Aerts R, Maes W, November E, et al. Surface runoff and seed trapping efficiency of shrubs in a regenerating semiarid woodland in northern Ethiopia[J]. *Catena*, 2006,65(1):61-70.
- [15] Rey F, Isselin-nondedeu F, Bedecarrats A. Vegetation Dynamics on Sediment Deposits Upstream of Bioengineering Works in Mountainous Marly Gullies in a Mediterranean Climate (Southern Alps, France)[J]. *Plant and Soil*, 2005,278:149-158.
- [16] Isselin-nondedeu F, Rey F, Bedecarrats A. Contributions of vegetation cover and cattle hoof prints towards seed runoff control on ski pistes[J]. *Ecological Engineering*, 2006,27(3):193-201.
- [17] Isselin-nondedeu F, Bedecarrats A. Soil microtopographies shaped by plants and cattle facilitate seed bank formation on alpine ski trails[J]. *Ecological Engineering*, 2007,30(3):278-285.
- [18] 邹厚远. 陕北黄土高原的植被概况及各植被区农林牧业的发展[J]. *植物生态学报*, 1981,5(3):169-176.
- [19] 郑粉莉,赵军. 人工模拟降雨大厅及模拟降雨设备简介[J]. *水土保持研究*, 2004,11(4):177-178.
- [20] Poesen J. Transport of rock fragments by rill flow—a field study[J]. *Catena Supplement*, 1987,8:35-54.
- [21] 周佩华,王占礼. 黄土高原土壤侵蚀暴雨标准[J]. *水土保持通报*, 1987,7(1):38-44.
- [22] 周佩华,王占礼. 黄土高原土壤侵蚀暴雨的研究[J]. *水土保持学报*, 1992,6(3):1-5.
- [23] Dunne T, Zhang W, Aubry B F. Effects of rainfall, vegetation and microtopography on infiltration and runoff[J]. *Water Resour. Res.*, 1991,27(9):2271-2285.
- [24] Bochet E, Rubio J L, Poesen J. Modified topsoil islands within patchy Mediterranean vegetation in SE Spain[J]. *Catena*, 1999,38(1):23-44.
- [25] Urbanska K M. Restoration ecology research above the timberline: colonization of safety islands on a machine-graded alpine ski run[J]. *Biodiversity and Conservation*, 1997,6(12):1655-1670.