

# 种子流失与迁移的人工降雨模拟试验方法研究

韩鲁艳, 焦菊英, 雷东

(西北农林科技大学 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 通过室内多组人工降雨模拟试验, 探讨了适合于研究坡面种子流失与迁移的种子布设试验方法。结果表明, 在常规人工降雨模拟试验方法的基础上, 主要需加强以下方面: (1) 供试种子要能代表研究区的主要物种及不同的形态特征; (2) 鉴于种子的流失主要发生在土壤表层, 种子适宜布设在土壤表面; (3) 染色种子以区分土壤本身携带的种子; (4) 每个物种的种子定点且物种间错位布设, 以准确测定种子在坡面上的迁移距离; (5) 种子的布设数量不宜过多, 以免影响坡面糙度; (6) 将大种子布设在种子布设区域的最下端以避免大种子对径流的影响。

**关键词:** 土壤侵蚀; 种子流失; 种子迁移; 种子形态; 人工降雨

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2010)02-0220-05

中图分类号: S154, Q948

## Method of Rainfall Simulation Experiment for Seed Loss and Displacement

HAN Lu-yan, JIAO Ju-ying, LEI Dong

(Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** The appropriate experiment method for researches on seed loss and displacement is probed through several rainfall simulation experiments on loess incline. Based on the conventional method of simulated rainfall experiment, the following aspects need to be stressed: (1) Seeds for experiment should represent the main species and different shapes in the study area. (2) Seeds should be placed on soil surface as seed loss mainly occurs on the soil surface. (3) Seeds need to be dyed to distinguish the original seeds in soil. (4) Seeds of each species should be placed in a definite location and misplaced among species in order to accurately measure the distance of seed movement. (5) The amount of seeds placed in experiment should not be too much because this way influences soil surface roughness. (6) It is better for the big seeds to be placed in the bottom of seed placement area to avoid its effect on runoff path.

**Keywords:** soil erosion; seed loss; seed displacement; seed shape; simulated rainfall

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, 不仅导致坡面水土运移与养分流失, 也会将散落到地表的种子和土壤中原来保存的种子冲移走<sup>[1-7]</sup>, 引起种子的二次传播, 改变种子的初始散落状态与存储状况而造成种子的再分布, 决定着种子的空间定居、存活与幼苗建植, 从而影响幼苗更新的空间分布, 进而对植被的恢复和演替产生重要的作用<sup>[8-9]</sup>。然而, 土壤侵蚀对种子流失影响的研究处于起步阶段, 目前只开展了坡面冲刷引起的种子流失特征<sup>[10]</sup>, 以及种子大小与形状<sup>[2]</sup>、坡度<sup>[11]</sup>、植物冠幅<sup>[12-14]</sup>、动物印<sup>[15-16]</sup>、水土保持生物工

程措施<sup>[12, 17-19]</sup>等对种子流失的影响等研究。在土壤侵蚀严重的黄土高原地区, 关于土壤侵蚀对种子流失影响的研究还尚未开展。对黄土高原地区不同形态特征的植物种子随土壤侵蚀流失特征进行研究, 可为解释黄土高原地区植被盖度低、植被恢复缓慢提供参考依据; 并可通过分析研究, 阐明具有抵抗土壤侵蚀的种子形态特征, 为加快黄土高原的植被恢复进行人工调控提供科学依据。为此, 开展了土壤侵蚀过程中种子流失与迁移的人工降雨模拟试验方法的探索, 目的在于: (1) 检验常规人工降雨模拟试验对种子流失研究的适用性, 发现可能会出现的问题并加以改进;

收稿日期: 2009-08-02

修回日期: 2009-12-08

资助项目: 国家自然科学基金项目“黄丘区土壤种子库分布格局及植被恢复的土壤侵蚀解释”(40771126)

作者简介: 韩鲁艳(1983—), 女(汉族), 山东省滨州市人, 硕士研究生, 研究方向为植被恢复与环境效益评价。E-mail: shuibao@hanluyan@163.com。

通信作者: 焦菊英(1965—), 女(汉族), 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。

(2) 分析种子流失发生的主要土壤层次, 确定种子布设层次与布设方式; (3) 选择具有代表性的种子, 并寻找适宜的种子布设数量与位置。通过本研究, 以期 为不同形态的种子随土壤侵蚀流失特征的人工降雨 模拟试验研究提供方法上的支持。

1 材料与方法

人工降雨模拟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, 采用侧喷式自动模拟 降雨系统进行<sup>[20]</sup>。

1.1 试验土槽

试验土槽的规格为 2.0 m×0.5 m×0.5 m(长× 宽×高), 槽底均匀打孔, 坡度在 0°~30°之间可调节。 供试土壤为黄土, 采自陕西省安塞县。在土槽填土之 前, 先在试验土槽底层填装 10 cm 厚的沙子, 并保证 良好的透水性; 然后在沙层上装 20 cm 厚的黄土, 分 层填土, 每层填土厚度为 5 cm, 土壤容重控制在 1.10 ~1.15 g/cm<sup>3</sup>, 在填充的同时进行压实, 以减小边坡 对入渗、产流、产沙过程及坡面微形态特征发育等诸 多方面所造成的影响; 并在填装上层土壤之前, 抓毛 下层土壤表面以减少土壤分层现象。

1.2 供试种子

供试种子均采集于黄土丘陵沟壑区的纸坊沟流 域和燕沟流域, 选择了 30 个常见主要代表性物种, 采 集果实和种子风干后备用。根据种子自身的大小, 分 成 5 个、20 个或者 50 个一组, 用万分之一天平称其 风干后重量, 每个物种 5 个重复, 然后计算每种植物 种子的平均单粒重量( $M$ )。用游标卡尺量测种子的 长( $L$ )、宽( $W$ )、高( $H$ ), 每个物种选 5 粒种子, 计算平 均值; 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 ( $S/M$ )。种子的形状采用 Posen Flatness 指数:  $FI= [(L+W)/2H]^{2[1]}$  和 Eccentricity 指数:  $EI=L/W^{[2]}$  来衡量。当  $FI$  取值为 1 时, 种子为球体状, 其值越接 近 1, 种子形状越接近球体, 其值越大, 种子越扁平; 而当  $EI$  为 1 时, 种子为圆形, 或者是椭圆形, 其值越 大, 种子越接近纺锤形。

选取不同种类和数量的种子, 置于试验土槽坡面 的不同位置 and 不同土壤深度, 以观察土壤表面种子流 失和迁移、以及土壤内部种子在降雨产流产沙过程中 的流失程度。供试种子提前用番红溶液染色, 布置在 不同土层的种子颜色不同, 以区别土壤中原有的种子 并便于观测与统计。

1.3 样品采集与数据统计

每次模拟降雨试验前对雨强进行率定; 降雨开始

后, 用秒表计时, 并记录产流时间; 观察细沟出现的出 现时间、位置、大小; 同时用高锰酸钾染色法测定径流 流速, 每隔 3 min 测定水流流过固定坡面区间的时 间; 从坡面产流开始后, 每隔 3 min 收集径流泥沙样; 在降雨 60 min 时停止降雨, 并记录径流延续时间, 径 流样全部收集。

降雨停止后, 观察记录坡面上及径流槽出口处留 下的物种种子及其数量, 并测量每个种子相对于原来 初始位置向坡下迁移的距离; 测量每一个径流泥沙样 的体积, 经过数小时静置后, 将径流样过 0.25 mm 土 壤筛后, 记录每时段径流中种子的种类和数量; 然后, 将含水泥沙样置于烘样盒中, 在 75 °C 下于烘箱中烘 干后称取烘干泥沙重; 最后, 将泥沙样轻轻敲碎分别 依次过 3, 2, 0.5, 0.25 mm 筛, 记录每个样中的种子 种类和数量。将径流槽出口、径流样和泥沙样中种子 的总和作为种子流失量, 计算种子的流失率。

2 试验结果与分析

2.1 不同土层的种子流失试验

该试验是将种子随机布设在土壤表层和不同的 土层部位, 分析不同土层存贮部位的种子流失特征。 种子分别布设于土壤表层、土壤内 1 cm 与土壤内 5 cm 处, 布设位置距试验槽上方 30 cm, 下方 30 cm, 试 验设计见表 1。

表 1 不同土层种子流失试验设计				
降雨 序号	雨强/ (mm·h <sup>-1</sup> )	坡度/ (°)	深度/ cm	物种及其数量
1	150	10	0	小扁豆(30), 绿豆(30)
			1	小扁豆(25), 绿豆(20)
			5	小扁豆(25), 绿豆(20)
2	100	20	0; 1	柠条、茶条槭、 刺槐、苜蓿、 黑麦草, 土壤
			30	内每个物种
			10	
3	100	20	0; 1	各 30 粒,
			30	表层均为 50 粒

注: 小扁豆(*Lens culinaris*), 绿豆(*Vigna radiata*), 柠条(*Caraga-  
na intermedia*), 茶条槭(*Acer ginnala*), 刺槐(*Robinia pseudoacacia*),  
紫花苜蓿(*Medicago sativa*), 黑麦草(*Lolium perenne*)。

以冰豆和绿豆为试验对象, 在雨强为 150 mm/h、坡度为 10°的试验条件下, 绿豆无种子的流 失; 冰豆只在土壤表层有流失, 流失率为 24%, 而在 土壤 1 cm 处和 5 cm 处均未发生种子的流失现象。 对于柠条、茶条槭、刺槐、苜蓿、黑麦草的种子, 只有在 土壤表层发生种子的流失, 在雨强为 100 mm/h 和坡 度为 30°的降雨模拟试验中, 黑麦草与苜蓿的流失率

分别为 30% 和 28% ; 刺槐种子在雨强 100 mm/h 与坡度 20°, 雨强 100 mm/h 与坡度 30° 的试验条件下流失率各为 4% 和 6% ; 而柠条与茶条槭的种子在这些试验条件下均无流失。可见, 在土层的垂直方向上, 种子的流失主要发生在土壤表层。

2.2 种子布设方式试验

本组试验将野外采集的供试对象 30 个物种的种子分成 A、B 组( 分别 15 个物种), 以更多的种子观察不同种子布设方式对种子流失的影响和浅层土层( 1 cm 内) 种子的流失情况, 具体设计见表 2。

表 2 土壤表面种子布设方式与连续降雨试验设计

降雨序号	雨强/(mm·h <sup>-1</sup> )	坡度/(°)	布设深度/cm	布设物种组别	种子布设总量	布设方式
4	100	20	0	B	135	随机撒播于 70 ~ 170 cm 的范围内(从上到下,下同)。
		20	0	B	135	
		30	0	B	135	
		10	0	B	135	
5	150	30			0	随机均匀布设,在最小限度减少对土壤扰动的情 况下,用镊子将种子放入土壤 1 cm 内; 24 h 后二次降雨。
		30	0	A	135	
		30	1	B	135	
		30	0	A	135	
6	100	30			0	
		30	0	A	135	
		30	1	B	135	
		30	0	A	135	
7	150	20	0	B	135	用特质小铁耙疏松土壤 0—1 cm 处土壤,然后随机均匀布设; 48 h 后二次降雨。
		30	1	A	135	
		20	1	B	1135	
		20	0	A	135	
8	50	20	0	B	135	
		30	1	A	135	
		20	1	B	135	
		20	0	A	135	

在试验中发现, 随机散播种子, 大部分种子聚集到布设范围以下, 甚至一些种子迁移到了布设范围的上方, 雨后难以确定种子个体的迁移特征。

由于受坡度、重力、土壤表面糙度、种子形状的影响, 放置在土壤表面的茜草(*Rubia cordifolia*)、狼牙刺(*Sophora viciifolia*)、酸枣(*Ziziphus jujuba*)、大豆(*Glycine max*)、柠条的种子在降雨前容易滚动流失, 种子越大越圆滚动越明显, 且大种子对径流存在分流现象; 为了避免种子提前滚落流失, 土槽填装完毕后, 用特质小铁耙疏松 0—1 cm 的土壤后均匀布设种子, 然而, 降雨后发现用特质小铁耙处理土壤表面后, 在人为改善土壤糙度的同时, 改变了表面的土壤结构, 有些大颗土粒及耙地产生横向细纹, 会影响流路; 用镊子布设土壤内部种子会引起坡面微形态的变化, 对坡面的产流产沙过程产生影响, 且种子越大影响越明显; 在 150 mm/h 降雨试验条件下, 土槽表面种子的总流失率 15% ~ 40%, 土槽 1 cm 内种子流失率只有 2% ~ 6%。

2.3 连续降雨试验

为了观察连续降雨对种子流失的影响以及雨后种子的萌发情况, 在第 5 场降雨试验的基础上, 在间隔 24 h 后进行第二次降雨( 第 6 场), 雨强为 100 mm/h( 表 2)。第一次雨后土壤内部的有些种子发芽( 玉米和大豆的萌发率达 100%), 而土壤表面的种子与坡面的接触更加牢固; 第二次降雨 12 min 左右时, 槽中土体含水量过大而发生土壤整体滑动。又在第 7 场降雨后, 在间隔 48 h 后进行了第二次降雨( 第 8 场), 雨强为 50 mm/h, 第一次雨后, 土壤内部发芽的物种种类和数量均高于表面, 由于土壤表面的种子与坡面的接触更加牢固, 种子流失主要发生在第一次降雨过程中( 流失率 24%), 二次降雨后无种子流失, 但土壤内部有些物种种子萌发( 不同物种的萌发率变化在 10% ~ 90% 之间)。同时发现, 由于装完土槽后设计坡度, 土体受力不均而结构破坏, 在第一次降雨过程中大量降水随裂缝灌入土体, 使产流推迟, 并且使土槽内土壤含水量过大, 易发生土体滑塌。

2.4  预降雨前、后布设种子试验

在总结以上试验基础上, 为了减少试验物种, 依据不同种子在极端情况下的流失情况, 降雨过程中不易流失的种子, 不常见种和其它因素(植物的繁殖方式、脱落方式、果实是否开裂), 挑选了 15 个物种的种子〔C 组: 白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)、异叶败酱(*Patrinia heterophylla*)、野胡萝卜(*Daucus carota*)、杠柳(*Periploca sepium*)、鬼针草(*Bidens bipinnata*)、达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)、灌木铁线莲(*Clematis florida*)、香青兰(*Dracocephalum moldavica*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、狼牙刺、黄刺玫(*Rosa xanthina*)、刺槐、柠条、栒子(*Cotoneaster horizontalis*)〕进行试验(表 3)。同时, 为了减少土壤表面条件的空间变异性, 试验前一天, 对试验土槽进行 30 mm/h 雨强的前期预降雨, 降雨历时为坡面出现产流为止。

表 3  预降雨前后布设种子试验设计

降雨 序号	雨强/ (mm·h <sup>-1</sup> )	坡度/ (°)	布设 种类	布设 数量	种子布设 方式
9	100	20	山杏	5	随机均 匀布设
		20	裸地	0	
		20	C(预降雨前)	150	
		20	C(预降雨后)	150	
10	100	15	C	150	用小毛 刷改变 糙度后,
		20	C	150	
		25	C	150	
		20	C	150	
11	150	15	C	150	以样方 框为参 照, 随 机均匀 布设
		20	C	150	
		25	C	150	
		20	C	150	
12	100	15	C	150	
		20	C	150	
		25	C	150	
		10	C	150	

注: 山杏(*Armeniaca sibirica*)。

第 9 场降雨试验设置了预降雨后布设种子与预降雨前布设种子作对比, 了解预降雨前或后布设种子的试验效果; 并在降雨过程中以裸地作为参照, 进一步观察坡面上大种子(山杏)对径流的影响。结果发现预降雨前布设容易导致种子吸水膨胀或发芽, 坡面径流被山杏种子阻挡并分割, 影响了径流的流路与冲刷力。为了改善地表状况与避免种子发芽与吸水膨胀, 第 10, 11, 12 场次降雨均用小毛刷处理坡面后, 先进行预降雨, 在第二天降雨开始前, 把样方框放在距试验槽上边 70~170 cm 的位置, 将种子随机均匀布

设在样方框区域的土壤表面。为了观察种子的迁移情况, 降雨前后定点定高照相, 以作为参照观察坡面上降雨前后种子位置和存储状态的变化。但通过照片可以观测到每个样方框中大种子分布的格局, 但是不能确定具体位移; 对于小种子, 降雨前后对每个种子对号入座非常困难, 雨后核对时造成遗漏, 无法确定种子的具体位移。另外, 布设种子量偏大(每个物种 10 粒), 统计工作量较大。本试验也设计了不同的坡度与降雨强度对种子流失有影响, 结果表明, 在雨强为 100 mm/h 时, 10°, 20° 和 35° 土槽坡面的种子总流失率分别为 27%, 34% 和 31%; 在雨强为 150 mm/h 时则分别为 59%, 63% 和 69%。可见, 雨强对种子的流失影响比坡度的影响大。

2.5  种子布设方法探讨

根据对上述不同试验过程和结果的对比分析, 发现降雨过程中种子的流失主要发生在土壤表面, 土壤 1 cm 处极少有种子流失, 而土壤 5 cm 处不发生种子流失; 且在土壤内部布设种子时, 会导致坡面微形态的变化, 影响坡面产流产沙过程。因此, 在模拟降雨试验中, 适合将种子布设在土壤表面。通过分析不同组别种子在不同雨强和坡度下组合下的流失情况, 最后确定具有黄土丘陵区代表性的阿尔泰狗娃花、鬼针草、香青兰、灌木铁线莲、达乌里胡枝子、杠柳、野胡萝卜、白羊草、刺槐、茜草、栒子、异叶败酱、狼牙刺、侧柏(*Platycladus orientalis*)、山杏和黄刺玫 16 个物种的种子作为供试种子。

总结试验过程发现, 雨后坡面下部的种子数量明显大于坡面上部, 当种子为随机均匀分布时, 即使有样方框作为参照也很难测出种子在坡面上的位移距离。为了较准确测定种子在坡面上的迁移情况, 最终设置为定点成堆错位布设, 将种子布设在距试验槽上边 100~120 cm 的位置, 使种子上方有 100 cm×100 cm 的汇流区; 同时, 将种子的布设数量减少 1/2, 以避免种子过多而影响坡面糙度。

种子布设数量为: 大种子如山杏、黄刺玫 2~3 个, 其它较小种子为 5 个。另外, 为了避免大种子对径流的影响, 将大种子布设在种子布设区域的最下端较适宜(表 4)。在种子流失与迁移的人工降雨模拟试验设计时, 种子要包括研究区主要的物种的种子形态特征, 布设方式既可以得到种子的流失率, 也可测量种子的迁移距离。

3  结  论

(1) 土槽处理。土槽底部要有适量的渗漏孔并

要足够坚固不易变形。在填土之前,先在试验土槽底层填装 10 cm 厚的沙子,并铺上透水纱布,并保证良好的透水性,以防止坡面出现裂缝而使大量降水随裂缝灌入土体,产流受到影响,并使土体含水量过大而发生土体滑动等问题;装土前设计好坡度,然后在沙层上装分层填装黄土并达到试验容重要求。试验前 1 d,对试验土槽进行 30 mm/h 雨强的前期预降雨,

降雨历时为坡面出现产流为止,以减少土壤表面条件的空间变异性。

(2) 种子处理。采集研究区具有代表性的植物种子,进行形态观测与分类,从而选择能代表不同形态特征种子,以减少物种数量来减少试验工作量及物种太多而影响坡面下垫面特征。然后对供试种子染色,置于不同层次的种子以不同颜色区分。

表 4 种子布设位置和种类

试验槽中布 设位置/cm		布设种类及数量			
100—105	阿泰狗娃花(5)	鬼针草(5)	香青兰(5)	灌木铁线莲(5)	
105—110	达乌里胡枝子(5)		杠柳(5)	野胡萝卜(5)	白羊草(5)
110—115	刺槐(5)	茜草(5)	栒子(5)	异叶败酱(5)	
115—120	山杏(2)		狼牙刺(5)	侧柏(5)	黄刺玫(3)

注:表中种子布设位置是种子距离试验槽最上方的距离。

(3) 种子布设层次。通过对各试验的总结和分析,发现降雨过程中种子的流失主要发生在土壤表面,土壤 1—5 cm 处很少有种子流失;而且,在土壤内部布设种子时,会导致坡面微形态的变化,影响坡面产流产沙过程。因此,将种子布设在土壤表面便于试验观测。

(4) 种子布设方式。为了较准确测定种子在坡面上的迁移情况,定点成堆错位布设种子,且种子的布设数量不宜过多而影响坡面糙度,将大种子布设在种子布设区域的最下端以避免大种子对径流的影响。总之,其它则依照常规人工降雨模拟试验进行处理,设计研究需要的雨强、坡度、下垫面特征及合理的重复。

seed dispersal rare in desert plants? [J]. *Oecologia*, 1981, 51(1): 133-144.

[ 参 考 文 献 ]

[ 1 ] Aguiar M R, Sala O E. Seed distribution constrains the dynamics of the Patagonian Steppe[J]. *Ecology*, 1997, 78 (1): 93-100.

[ 2 ] Cerda A, Gardía F P. The influence of seed size and shape on their removal by water erosion[J]. *Catena*, 2002, 48(4): 293-301.

[ 3 ] 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): 29.

[ 4 ] Gutterman Y. Environmental factors and survival strategies of annual plant species in the Negev Desert, Israel [J]. *Plant Species Biology*, 2000, 15: 113-125.

[ 5 ] Alcántara J M, Rey P J, Valera F, et al. Factors shaping the seedfall pattern of a birdspecies plant[J]. *Ecology*, 2000, 81(7): 1937-1950.

[ 6 ] Flñner S, Shmida A. Why are adaptations for long-range

[ 7 ] Gardía F P, Recataki T M, Cerda A, et al. Seed population dynamics on badland slopes in southeastern Spain [J]. *Journal of Vegetation Science*, 1995, 6: 691-696.

[ 8 ] Hampe A. Extensive hydrochory uncouples spatiotemporal patterns of seedfall and seedling recruitment in a ‘bird-dispersed’ riparian tree[J]. *Journal of Ecology*, 2004, 92(5): 797-807.

[ 9 ] 张玲, 李广贺, 张旭. 土壤种子库研究综述[J]. *生态学杂志*, 2004, 23(2): 114-120.

[ 10 ] Garcia F P, Cerda A. Seed losses by surface wash in degraded Mediterranean environments[J]. *Catena*, 1997, 29(1): 73-83.

[ 11 ] Cerda A, Gardía F P. The influence of slope angle on sediment, water and seed losses on badland landscapes [J]. *Geomorphology*, 1997, 18(2): 77-90.

[ 12 ] 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.

[ 13 ] Bochet E, Rubio J L, Poesen J. Modified topsoil islands within patchy Mediterranean vegetation in SE Spain[J]. *Catean*, 2004, 38: 23-44.

[ 14 ] Giladi I, Segoli M, Ungar E D. The effect of shrubs on the seed rain of annuals in a semiarid landscape[J]. *Israel Journal of Plant Sciences*, 2007, 55(1): 83-92.

[ 15 ] Isselin N 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.

(下转第 232 页)

地、331—阳山沟底中坡地、221—阳山沟坡缓坡地、212—阴山梁峁缓坡地、222—阴山沟坡缓坡地、231—阳山沟底缓坡地等 7 种地类所占比重介于 3.36%~1.09% 之间。其余 8 种地类所占比重不足 1%。

### 3 结论

(1) 利用高分辨率 DEM 作为母本数据集,运用 GIS 丰富的空间分析方法,可以挖掘出多种衍生数据集。其中,由坡向、坡度、地貌类型数据经过加工融合所生成的复合数据集,对于黄土高原的小流域规划,具有极为重要的意义,可作为现代小流域规划的本底数据。

(2) GIS 空间分析法可作为空间数据挖掘和指导小流域规划的重要地学方法。

(3) 利用 ArcGIS 软件提供的高效工具集,可快速完成深层次的空间数据挖掘。

(4) 实验所取得的数据派生与数据融合方法及其参数指标,可广泛用于指导黄土高原同类地区的小流域规划。

(5) 实验不足之处在于地貌分类数据挖掘没有完全实现自动化,今后还需深入研究。

致谢 中国科学院水利部水土保持研究所马家沟流域规划项目组提供数据支持,特此致谢!

#### [参 考 文 献]

- [1] 刘国彬,杨勤科,郑粉莉.黄土高原小流域治理与生态建设[J].中国水土保持科学,2004,3(1):11-15.
  - [2] 周海燕,王家耀,吴升.空间数据挖掘技术及其应用[J].测绘通报,2002(2):11-13.
  - [3] 李德仁,王树良,李德毅,等.论空间数据挖掘和知识发现的理论与方法[J],武汉大学学报:信息科学版,2002(3):221-233.
  - [4] 朱红春.数字高程模型(DEM)空间数据挖掘研究[D].西安:西北大学,2003.
  - [5] 汤国安,杨勤科,张勇,等.不同比例尺 DEM 提取地面坡度的精度研究[J].水土保持通报,2001,21(1):53-56.
  - [6] 朱红春,汤国安,张友顺,等.基于 DEM 提取黄土丘陵区沟沿线[J].水土保持通报,2003,23(5):43-45.
  - [7] 汤国安,杨昕.ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程[M].北京:科学出版社,2006.
  - [8] 陈楠,王钦敏,汤国安.基于 DEM 的坡向提取算法对比分析:以黄土丘陵沟壑区的研究为例[J].遥感信息,2007(1):70-75.
- 
- (上接第 224 页)
- [16] Isselin N 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.
  - [17] 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.
  - [18] Rey F, Isselin N 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(1-2): 149-158.
  - [19] Burylo M, Rey F, Delcros P. Abiotic and biotic factors influencing the early stages of vegetation colonization in restored marly gullies (Southern Alps, France) [J]. Ecological Engineering, 2007, 30(3): 231-239.
  - [20] 周佩华,张学栋,唐克丽.黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室土壤侵蚀模拟实验大厅降雨装置[J].水土保持通报,2000,20(4):27-30,45.
  - [21] Poesen J. Transport of rock fragments by rill flow: a field study[J]. Catean Supplement, 1987, 8: 35-54.