

黄土丘陵沟壑区坡面径流侵蚀产沙过程的环境解释

郑江坤¹, 魏天兴², 赵 健³, 陈致富⁴

(1. 四川农业大学林学院, 四川 雅安 625014; 2. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100086; 3. 辽宁江河水利水电新技术设计研究院, 辽宁 沈阳 110003; 4. 广西柳州市第二中学, 广西 柳州 545001)

摘要:应用数量分类(TWINSpan)和排序(DCCA)方法对陕北吴起县典型坡面侵蚀产沙过程进行了环境解释。结果表明:环境因子对土样侵蚀产沙量的解释量达83%,其中DCCA排序轴前4轴的解释量占总排序轴解释量的69%,且分别与坡位、土壤质量、海拔、干根重显著相关。坡面径流侵蚀产沙量随冲刷时间呈波浪式变化,环境因子对侵蚀产沙过程影响甚微。坡面径流侵蚀产沙量按地形部位表现为梁峁顶<梁峁坡<沟坡<沟底,按地类则表现为灌木林<针阔混交林<针叶纯林<阔叶纯林。

关键词:地表径流;DCCA;环境因子;侵蚀产沙;黄土丘陵沟壑区

中图分类号:F157.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-0690(2015)07-0905-07

黄土高原丘陵沟壑区是世界上土壤侵蚀最严重的区域之一^[1]。做为土壤侵蚀的一种类型,坡面径流侵蚀是指坡面地表径流沿坡面流动过程中,引起的土粒分散、剥离、泥沙输移和沉积,形成携带泥沙水流的过程^[2,3]。径流的含沙量随时间不断发生变化,变化规律与坡面形态、土壤性质、根系特征、冲刷强度等关系密切。

实地观测、人工模拟和数学模型是研究坡面侵蚀的重要方法。实地观测能够反映侵蚀产沙的真实状况,依据野外径流观测数据可探讨地面覆盖、土地利用方式、径流量和坡度等环境因子对径流侵蚀产沙的影响^[4,5];但由于实验条件和土壤性质等差异,结论难于推广。人工模拟能够根据研究需要调整环境条件,是研究土壤侵蚀的有效手段^[6]。数学模型以大量实验数据、水力学和土力学的力学方法、统计模型和分布式模型为基础,运用空间分析软件从较大尺度上反映土壤侵蚀状况,因而得到广泛运用^[7,8],但所需参数较多,构建较复杂。数量生态学通过排序轴能揭示植被-环境间关系,在生态学领域得到广泛运用^[9]。索安宁等^[10,11]利用典范主成分排序技术对黄土高原水土流失进行了环境解释并取得较好效果。彭月等^[12]和李斌

等^[13]分别采用双向指示种分析法(TWINSpan)和除趋势典范对应分析法(DCCA)探讨了景观破碎化指数和植被分区对土壤侵蚀的影响。综上所述,数量生态学能够用于评价水土流失和环境间关系。

本研究结合黄土丘陵沟壑区原状土冲刷过程中的含沙量和环境因素(植被、地形、土壤理化性质),运用TWINSpan和DCCA数量分析方法对黄土高原丘陵沟壑区坡面径流侵蚀产沙过程进行了环境解释,以期为该区域坡面土壤侵蚀防治提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于延安市西北部的吴起县县城周边,吴起县地处毛乌素沙地南缘农牧过渡地带,地貌属黄土高原梁状丘陵沟壑区。气候干燥,昼夜温差大,属温带大陆性季风气候;多年平均降水量478.0 mm,且64%以上集中在7~9月份,其它季节多为无效降水,平均气温7.8℃。自然植被属于暖温带森林草原。土壤以地带性黑垆土剥蚀后广泛发育在黄土母质上的黄绵土为主,质地为轻壤。全县面积3 791.5 km²,水土流失面积3 693.0 km²。

收稿日期:2014-02-17;修订日期:2014-06-12

基金项目:中国博士后科学基金面上项目(2012M511938)、四川省高等学校水土保持与荒漠化防治重点实验室建设项目资助。

作者简介:郑江坤(1982-),男,河北邢台人,副教授,主要从事土壤侵蚀和水文模型方面的研究。E-mail:jiangkunzheng@126.com

占全县总面积的97.4%,属极强度水土流失区^[14]。

1.2 样地选择和设置

2008年7月25日至8月12日在吴起县城附近的合家沟、柴沟、胜利山、政府沟共取原状土样23块(表1)。

1.3 坡面侵蚀产沙指标选取及测定

本实验在室外采集原状土,装入室内可调节坡度的冲刷槽中,利用放水冲刷试验研究地表径流的侵蚀产沙特性。水槽尺寸:长(180 cm)×宽(10 cm)×高(10 cm),取样器尺寸:长(20 cm)×宽(10 cm)×高(10 cm)。选择不同的地形部位和植被类型在相应地形图和植被分布图进行标注并确定采样点,结合GPS定位野外选定要采样的样地,在人为干扰小且较典型的地段选择采样器点,首

先用枝剪去掉采样点植物地上部分,尽量不扰动土壤,然后把采样器放在采样点,压采样器和地面重合,再从四周用土铲把采样器取回,用盖子把采集的土样封好带回实验室,把土样浸泡2 h以消除前期含水量的影响,最后把采样器装入冲刷槽的土样室中,使土样表面和槽面齐平。调整槽的坡度为取样点所在地的实际坡度,通过恒压水箱调整供水流量,为比较方便,流量均设计为1.8 L/min,在水流稳定后,放水冲刷34 min。在冲刷前10 min时段内,每2 min量取1次冲刷水样,10~22 min时段内每3 min量取1次,22~34 min时段内每4 min量取1次,共量取12次。用水桶收集每个时间段内试验产生的浑水,充分搅动后取样、烘干、称重。含沙量以单位取样体积浑水中泥沙的干重

表1 径流侵蚀产沙实验取样点基本情况

Table 1 Basic situation of soil samples in runoff-erosion-sediment experiment

土样 编号	取样 地点	海拔 (m)	坡度 (°)	地貌 部位	植被类型	林龄或退 耕年限(a)	整地 方法	总含沙量 (g/L)
s1	合家沟	1366	3	梁顶	针茅-毛莲蒿群落	11	自然*	0.049
s2	合家沟	1352	30	梁坡	毛莲蒿-华北米蒿群落	11	自然	0.070
s3	合家沟	1341	35	沟坡	针茅-星毛委陵菜群落	11	自然	0.201
s4	合家沟	1333	1	沟底	赖草-苦马豆群落	11	自然	2.381
s5	合家沟	1347	30	沟坡	毛莲蒿-华北米蒿群落	11	自然	0.154
s6	合家沟	1444	21	梁坡	达呼里胡枝子-针茅群落	11	自然	0.060
s7	柴沟	1529	6	峁顶	毛莲蒿-芦苇群落	8	自然	0.048
s8	柴沟	1328	3	沟底	旱柳小叶杨混交林	20	坑穴	1.250
s9	柴沟	1332	34	沟坡	甘草-针茅群落	8	自然	1.333
s10	柴沟	1391	20	梁坡	河北杨林	12	坑穴	0.769
s11	柴沟	1433	4	梁顶	沙棘林	12	坑穴	0.042
s12	胜利山	1450	26	峁坡	油松林	8	鱼鳞坑**	0.775
s13	胜利山	1470	15	峁坡	沙棘林	10	坑穴	0.219
s14	胜利山	1470	35	沟坡	针茅-百里香群落	10	自然	0.359
s15	胜利山	1481	19	峁坡	委陵菜-赖草群落	10	自然	0.218
s16	胜利山	1491	7	峁顶	油松山杏混交林	15	反坡梯田	0.278
s17	胜利山	1470	27	峁坡	油松小叶杨山杏混交林	15	水平阶	0.053
s18	胜利山	1444	34	沟坡	油松小叶杨山杏混交林	15	鱼鳞坑	0.637
s19	政府沟	1416	27	梁坡	油松林	8	水平阶阶坎	0.435
s20	政府沟	1416	27	梁坡	油松林	8	水平阶阶面	0.704
s21	政府沟	1456	5	梁顶	达呼里胡枝子-披针叶黄骠群落	13	自然*	0.084
s22	政府沟	1418	27	峁坡	沙棘林	11	坑穴	0.115
s23	政府沟	1408	26	峁坡	小叶杨山杏混交林	9	水平阶	0.094

注:*取样点附近有道路;**大苗移栽1 a左右。植物拉丁名:针茅(*Stipa capillata* Linn.)、毛莲蒿(*Artemisia vestita* Wall. ex Bess.)、华北米蒿(*Artemisia giraldii* Pamp.)、赖草(*Leymus secalinus* Tzel.)、苦马豆(*Sphaerophysa salsula* DC.)、达呼里胡枝子(*Lespedeza daurica* Schindl.)、芦苇(*Phragmites australis* Trin.ex Steud.)、甘草(*Glycyrrhiza uralensis* Fisch.)、委陵菜(*Potentilla chinensis* Ser.)、星毛委陵菜(*Potentilla acaulis* Linn.)、百里香(*Thymus mongolicus* Ronn.)、披针叶黄骠(*Thermopsis lanceolata* R.Br.)、小叶杨(*Populus simonii*)、山杏(*Armeniaca sibirica*)、河北杨(*Populus hopeiensis*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)

表示,单位 g/L,由此得到 23×12 的原始数据矩阵。总含沙量指放水冲刷 34 min 流失泥沙总干重和全部水流体积的比值。

1.4 环境指标选取与测定

环境指标选取包括地形因子(坡度、坡向、坡位、海拔)、土壤内在因子(土壤质量、毛管孔隙度、土壤 pH 值、土壤有机质)和植被因子(植被盖度、干根重),共计 10 个因子,其中坡向、坡位为定性变量,其它因子为定量变量。

表土层土壤质量、毛管孔隙度分别用环刀法、环刀渗透法来测定,土壤 pH 值和有机质含量分别用电位法、重铬酸钾容量法测定^[15],各值均为取样点附近表层土 3 个值的平均。

在每个取样点附近,用地质罗盘仪和海拔仪分别记下坡度、坡向、海拔,根据取样的位置记下坡位,坡位按照沟底、沟坡、梁峁坡、梁峁顶分别赋值 1、2、3、4。坡向以正北为起点(即 0°或 360°)顺时针表示,数据处理时采取每 45°为一个区间共划分 8 等级,数字 1~8 分别表示北向(337°30′~22°30′)、东北向(22°30′~67°30′)、西北向(292.5~337°30′)、东向(67°30′~112°30′)、西向(247.5~292°30′)、东南向(112°30′~157°30′)、西南向(202.5~247°30′)、南向(157°30′~202°30′),数字越大,表示越向阳,越干热^[16];量取土样所在点附近的优势层的覆盖度作为植被盖度,林龄通过生长锥测量,退耕年限通过询问当地居民得到;把土壤取样器中的土烘干过筛称重获得干根重;共选取以上 10 个环境指标,组成 23×10 的环境因子数据矩阵。

1.5 数量分析方法——TWINSPAN 和 DCCA

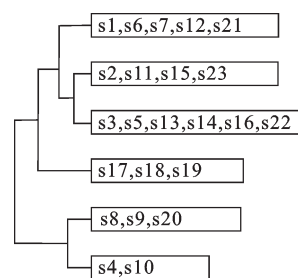
DCCA 是目前最先进的植被环境关系多元分析技术之一,它结合物种构成和环境因子并直观地把环境因子、物种、样方同时表达在排序轴的坐标平面上,已成为 20 世纪 90 年代以来植被梯度分析与环境解释的趋势性方法^[17]。本文以 23 块土样做为样方,12 个时段的产沙量做为物种,选取 10 个环境因子进行 DCCA 分析。数量分类采用 VES-PAN 软件包中 Hill 设计的 TWINSPAN;排序采用 Braak 编制的 CANOCO 软件包实现,具体计算见文献[9]。

2 结果与分析

2.1 坡面径流侵蚀产沙过程的聚类分析

利用 TWINSPAN 对 23 个土样冲刷的 12 个时

段进行聚类分析(图 1)所示,土样 s3、s5 和 s14, s1, s7 和 s21, s2, s15 和 s23 分别聚在一起,这 3 组的地形部位分别是沟坡、梁峁顶、梁峁坡;土样 s17 和 s18, s13 和 s22 分别聚在一起,这两组的地类分别为针阔混交林、灌木林地,分析得同一地貌部位同一植被类型的土样聚在一起。通过对各实验土样径流过程总含沙量的比较(表 1),坡面径流侵蚀整体上表现为:梁峁顶<梁峁坡<沟坡<沟底,灌木林<针阔混交林<针叶林<阔叶林<草地,而徐佳等^[18]基于径流小区观测数据提出延安燕沟流域的减流减沙效益表现为:坡耕地<草地<灌木地<林地,这可能和观测尺度有关系。地貌部位、植被类型以及生长状况通过影响坡度、坡长、地被物、土壤根系等,进而影响土壤的理化性质,从而对坡面径流侵蚀产生影响。



图中符号代表土样编号

图 1 实验土样径流挟沙过程聚类

Fig.1 Dendrogram of sediment carrying process among experimental soil samples

2.2 DCCA 排序轴与环境因子的相关性

DCCA 排序结果给出排序轴的特征值、坡面径流侵蚀产沙解释量、土样-环境关系解释量。所有排序轴的特征值和为 0.313,占环境解释的 83%,前四轴累计对径流侵蚀的解释量为 57.5%,对径流侵蚀-环境因子关系的累积解释量为 56.9%,而前两轴特征值占有所有排序轴的 65%,表明前 2 个轴集中全部排序轴所反映的径流侵蚀-环境关系信息的大部分(表 2)。通过蒙特卡罗置换检验,第一排序轴和所有排序轴的显著性 P 值均为 0.002,达到非常显著性水平,说明样本间差异由抽样误差所致的概率较小,与其环境因子间的关系较为密切。

由表 3 可知,第一排序轴反映了土壤 pH 值和坡位对坡面径流侵蚀的影响,第二排序轴则表现为土壤质量对径流侵蚀的作用,第三、四排序轴则

表2 DCCA排序的特征值及累积解释量				
Table 2 Eigenvalues and cumulative percentage variance of DCCA ordination				
排序轴	第一轴	第二轴	第三轴	第四轴
特征值	0.170	0.033	0.010	0.004
坡面径流侵蚀-环境因子的相关性	0.966	0.911	0.903	0.914
坡面径流侵蚀累积解释量(%)	43.1	53.8	56.5	57.5
坡面径流侵蚀-环境因子关系累积解释量(%)	45.4	56.9	-	-
蒙特卡罗置换检验显著性P值	0.002	-	-	-
排序轴特征值和为0.313,P值为0.002;特征值总和为0.377,占环境解释的83%。				
注:“-”表示无相应数据。				

分别和海拔、干根重关系密切。环境因子间,土壤pH值、海拔、毛管孔隙度和坡位的相关系数最大,分别为:-0.46、0.61、0.64;土壤质量、覆盖度和坡度之间的相关系数最大,分别为-0.63、-0.81,土壤有机质、干根重和土壤质量之间的相关系数也较大,分别为-0.37、-0.57。地形因子通过改变土壤形成条件进而影响土壤的理化性质,同时地形因子本身对径流形成和流速等也有较大影响,故而间接影响到坡面的侵蚀产沙特征。

2.3 环境因子的DCCA排序结果

图2显示了10个环境因子在DCCA排序的第1、2轴平面上的格局。各环境因子对排序轴的贡

表3 环境因子与排序轴之间的关系													
Table 3 Correlation and explain amount of environmental factors to the axes of DCCA ordination													
简称	第一轴	第二轴	第三轴	第四轴	bd	cp	ph	om	sl	sp	as	al	ac
bd	0.12	-0.42*	-0.19	-0.55	1								
cp	-0.30	-0.20	0.24	0.29	-0.53	1							
ph	0.73**	-0.23	0.02	-0.68	0.03	-0.15	1						
om	0.11	0.04	0.07	0.28	-0.37	0.09	-0.24	1					
sl	-0.09	-0.13	-0.01	0.00	-0.63*	0.50	0.26	0.18	1				
sp	-0.53*	0.15	0.23	0.61	-0.43	0.64*	-0.46*	0.05	0.27	1			
as	-0.07	0.02	-0.19	0.08	-0.20	0.18	0.04	-0.03	0.64*	0.41	1		
al	-0.33	0.08	0.46*	-0.11	-0.07	0.32	0.10	-0.34	0.19	0.61*	0.29	1	
ac	0.10	-0.13	-0.11	-0.04	0.62	-0.54	-0.30	0.13	-0.81**	-0.36	-0.53	-0.32	1
rw	-0.20	0.22	-0.30	0.40*	-0.57	0.49	-0.03	0.11	0.29	0.02	-0.25	-0.29	-0.39

注:**为 $p<0.01$; *为 $p<0.05$;bd.土壤质量(g/cm^3);cp.毛管孔隙度(%);ph.pH(5:1);om.有机质(g/kg);sl.坡度;sp.坡位;as.坡向;al.海拔;ac.植被盖度;rw.干根重

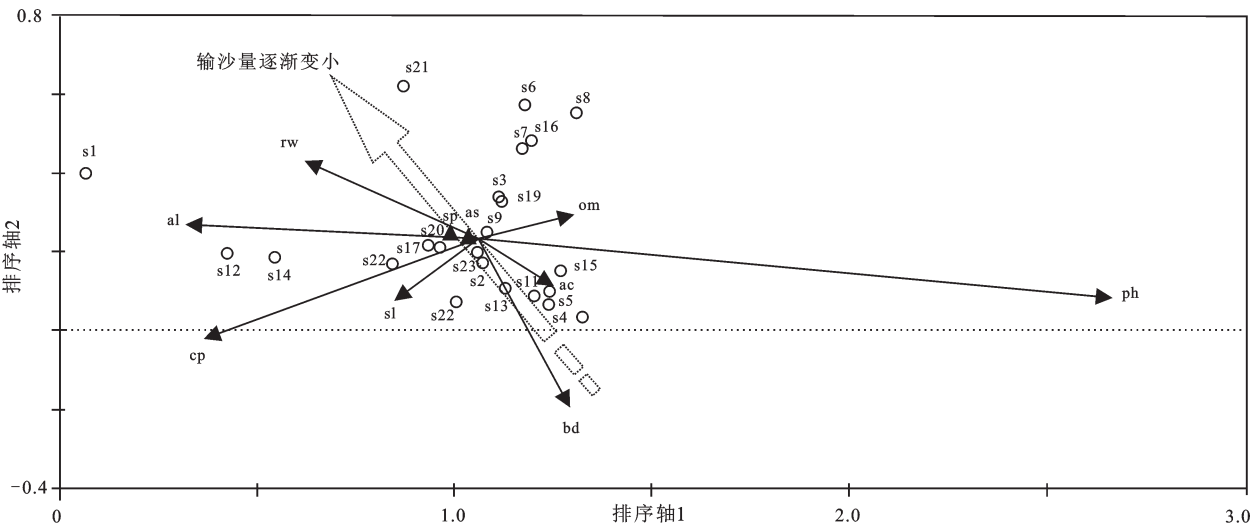


图2 实验土样环境因子的DCCA排序

Fig.2 DCCA ordination on environmental factors among experimental soil samples

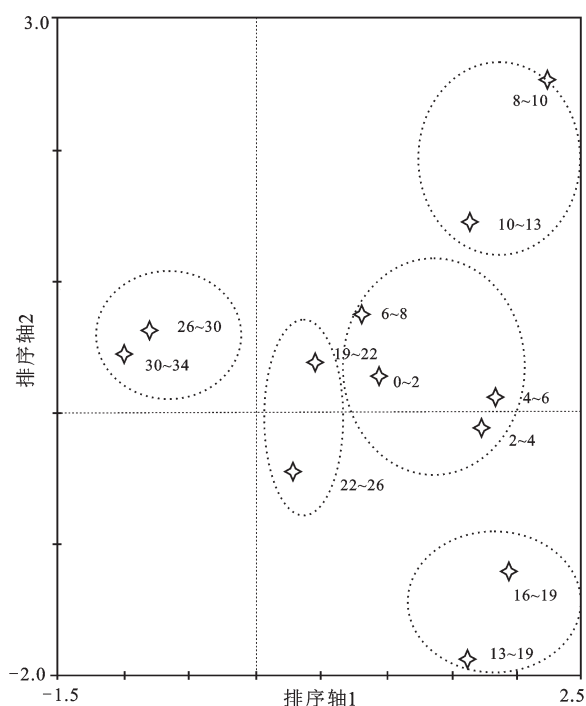
献反映为箭头的长度,彼此间的关系则反映为箭头的方向和夹角。可看出,10个环境因子可以分为4组:DCCA1轴分别与土壤pH值、有机质、覆盖度呈正相关;而与海拔、坡位、干根重、毛管孔隙度呈负相关;DCCA2轴与土壤质量和坡度呈负相关;坡向与两轴之间的相关性都不大。海拔、坡位值和土壤pH值对第一排序轴的贡献最大,且呈明显负相关关系,这可能由降水的淋溶作用导致土壤中易溶性盐基离子从高坡位值处淋失,到低坡位值处淀积所致;因此,坡位是决定坡面径流侵蚀沿第一轴分布的关键因子;土壤质量是影响第二轴的关键因素,土壤有机质含量和干根重与土壤质量呈负相关,也就是说,有机质和干根重含量越多,土壤质量越小,土壤颗粒中粘粒所占比例越大,土壤粘结能力越强,再加上根系的缠绕固结作用,使得土壤颗粒不容易被径流带走。另外,坡度和盖度表现出强烈的负相关,说明在黄土丘陵沟壑区,随着坡度的增大,水分和养分越容易被冲刷掉,植被生长越差,故植被盖度变小。

由以上分析可知,在各个环境因子的交互作用下,坡面径流侵蚀产沙量从图的右下方向左上方逐渐变小。在自然封育10余年的合家沟流域,植被类型单一,均为草本植被,各土样的坡面径流侵蚀产沙量从排序图的右下方到左上方依次为s4 (2.381 g/L)、s5 (0.154 g/L)、s2 (0.070 g/L)、s3 (0.201 g/L)、s6 (0.060 g/L)、s1 (0.049 g/L),基本表现为从沟底到梁岭顶逐渐减小。对林地流域来说,梁岭坡的各个乔灌植被土样按排序图上表现为:s8>s19/20>s17/18>s11/13/22,即阔叶林>针叶林>针阔混交林>灌木林;这和WinTWINS2.3软件聚类分析的结果基本吻合。另外,整地方式和人为活动对坡面径流侵蚀也有很大影响,通过比较得:s17>s18,s19/20>s12,说明水平阶整地的坡面径流侵蚀要大于鱼鳞坑整地,这可能和鱼鳞坑整地对地表的破坏较小有关;s1和s21位于岭顶,均有道路穿过,表现为坡面径流侵蚀非常小,由于人畜车辆的压踏,使得该地类的土壤变得紧实,抗冲刷能力增强。DCCA排序轴表现出的径流侵蚀特征和样点实际侵蚀含沙量的吻合较好,且和聚类分析的结果也较对应,说明DCCA方法在该区坡面径流产沙侵蚀分析中较适用。

2.4 坡面径流侵蚀产沙过程的DCCA排序结果

DCCA排序能较合理解释坡面径流侵蚀产沙

量和环境因子之间关系,但对坡面径流侵蚀产沙过程的解释作用甚微(图3)。通过图3的象限内土样编号的分布可知,径流侵蚀产沙过程集群分布现象显著,可分为集群1(0~8 min)、集群2(8~13 min)、集群3(13~19 min)、集群4(19~26 min);集群5(26~34 min)。这种集群分布特征和径流侵蚀产沙过程数据所表现的规律较一致,所有土样坡面径流侵蚀产沙量随时段呈多峰多谷分布,大体上呈“W”状,这和于国强等^[19]在黄土高原得出的结论一致。在前8 min径流含沙量呈逐渐减少的趋势,随后含沙量开始上升,在上升的过程中,间或有突变点的存在,到19 min时,含沙量又呈现逐渐减少的趋势,而在26~34 min时间段内,含沙量大都呈增加趋势并逐渐趋于稳定,个别土样呈减少趋势^[20]。这主要因为在开始阶段,由于表层土壤较松散,在径流的冲刷下很容易被搬移,从而导致径流含沙量大,随后逐渐变小;土壤在抗冲过程出现突变点,说明在径流挟沙过程中,随着水流对土样的不断的浸泡和冲刷,一些根系对土壤的固持能力逐渐变弱,等水流能量积聚到一定程度,某些根系的盘结固持系统瞬间瓦解,导致大量泥沙被冲出槽中,径流含沙量骤增,而剩余的土样在土壤和



注:图中数字代表土样的冲刷时间(min)

图3 实验土样径流挟沙过程的DCCA排序

Fig.3 DCCA ordination on sediment carrying process of surface runoff among experimental soil samples

根系的相互作用下,变得相对稳定,径流含沙量逐渐变小^[21]。尽管环境因子和侵蚀产沙过程间的关系较小,但通过 DCCA 可以对侵蚀产沙时段进行合理划分,且与时段内表现出来的变化趋势吻合较好,说明 DCCA 排序方法在坡面径流侵蚀产沙过程的研究中也发挥着一定的作用。

3 结论与讨论

尽管黄土高原沟谷侵蚀是塑造地表形态的重要侵蚀方式,但坡面侵蚀做为沟道侵蚀前奏,因其影响范围广引起了广泛关注^[22]。影响研究区坡面径流侵蚀产沙的因素较多,坡位和土壤质量成为控制该区侵蚀产沙量的主导性环境因子。相同地形部位同一地类的坡面径流侵蚀产沙量相差不大,聚类在一起。各土样所在坡面的侵蚀产沙量在 DCCA 的排序图上表现为从图的右下方向左上方逐渐递减。坡面径流侵蚀产沙量在地貌部位和地类间大体表现为:沟底>沟坡>梁崩坡>梁崩顶,草地>阔叶林>针叶林>针阔混交林>灌木林,另外人为活动对之也有较大影响。利用 DCCA 排序把侵蚀过程的时间段分成 5 个集群,集群内表现出相同的变化趋势,整个侵蚀产沙过程出现多个突变点并呈多峰多谷特点;环境因子对坡面径流侵蚀产沙过程的影响甚微。

本文尝试用植被-环境多元数量分析方法 DCCA 来分析坡面径流侵蚀产沙过程与环境因子之间的关系。DCCA 排序技术可以综合利用复杂的土壤、地形、植被等信息对径流侵蚀产沙特征进行定量解释与评价,体现出一定的优越性。但存在以下不足:用室内原状土冲刷法来研究坡面径流侵蚀虽多有报道,但仅用一种供试土壤,要得到更为一般性的研究结论,尚需开展一系列相关试验研究,并需要实地试验进行验证。虽然在采取原状土时会尽可能的不扰动土壤,使其保持原有特性,但原状土在采集、搬运、安装过程中不免产生扰动,从而破坏了土体原有结构,尤其是采取林地的土壤时,由于植物根系的存在,原状土的采集几乎是不可能的。同时在采集原状土时切断了根系间的相互连接,降低了林木根系对土壤的网络作用,使试验结果与实际结果有较大出入。由于该

实验采取同一流速来进行比较分析,对坡长、坡形的影响欠考虑,另外微地形、人为活动等干扰也较大,故该研究仍待完善。

参考文献:

- [1] 余新晓.水文与水资源学(第二版)[M].北京:中国林业出版社,2010:65~77.
- [2] 曾光,杨勤科,姚志宏.黄土丘陵沟壑区不同土地利用类型土壤抗侵蚀性研究[J].水土保持通报,2008,28(1):6~9,38.
- [3] 朱智勇,解建仓,李占斌,等.坡面径流侵蚀产沙机理试验研究[J].水土保持学报,2011,25(5):1~7.
- [4] 和继军,蔡强国,刘松波.次降雨条件下坡度对坡面产流产沙的影响[J].应用生态学报,2012,23(5):1263~1268.
- [5] 邵文伟,师长兴,范小黎,等.1960~1990年间渭河下游河段滩槽冲淤动态与机理研究[J].地理科学,2013,33(10):1268~1276.
- [6] 孔亚平,张科利.黄土坡面侵蚀产沙沿程变化的模拟试验研究[J].泥沙研究,2003,(1):33~38.
- [7] 张光辉.坡面水蚀过程水动力学研究进展[J].水科学进展,2001,12(3):395~400.
- [8] 谷天峰,王家鼎,付新平.基于斜坡单元的区域斜坡稳定性评价方法[J].地理科学,2013,33(11):1400~1405.
- [9] 张金屯.数量生态学(第二版)[M].北京:科学出版社,2011.
- [10] 索安宁,王兮之,胡玉喆,等.DCCA在黄土高原流域径流环境解释中的应用[J].地理科学,2006,26(2):205~210.
- [11] 索安宁,洪军,林勇,等.黄土高原景观格局与水土流失关系研究[J].应用生态学报,2005,16(9):1719~1723.
- [12] 彭月,王建力,魏虹,等.重庆市岩溶区县土地利用景观破碎化及土壤侵蚀影响评价[J].中国岩溶,2008,27(3):246~254.
- [13] 李斌,张金屯.基于GIS的黄土高原不同植被区土壤侵蚀研究[J].农业环境科学学报,2010,29(1):134~138.
- [14] 赖亚飞,朱清科,张宇清,等.吴旗县退耕还林生态效益价值评估[J].水土保持学报,2006,20(3):83~87.
- [15] 林大仪.土壤学实验指导[M].北京:中国林业出版社,2004.
- [16] 张峰,张金屯,张峰.历山自然保护区猪尾沟森林群落植被格局及环境解释[J].生态学报,2003,23(3):421~427.
- [17] 沈泽昊,张新时.三峡大老岭地区森林植被的空间格局分析及其地形解释[J].植物学报,2000,42(10):1089~1095.
- [18] 徐佳,刘普灵,邓瑞,等.黄土坡面不同植被恢复阶段的减流减沙效益研究[J].地理科学,2012,32,(11):1391~1396.
- [19] 于国强,李占斌,裴亮,等.不同植被类型下坡面径流侵蚀产沙差异性[J].水土保持学报,2012,26(1):1~5,11.
- [20] 郑江坤,吴黎军,魏天兴,等.陕北不同地貌部位土壤抗冲性特征研究[J].水土保持学报,2009,23(6):14~18.
- [21] 张颖,牛健植,谢宝元,等.森林植被对坡面土壤水蚀作用的动力学机理[J].生态学报,2008,28(10):5084~5094.
- [22] 田剑,汤国安,周毅,等.黄土高原沟谷密度空间分异特征研究[J].地理科学,2013,33(5):622~628.

Environmental Interpretation on Slope Runoff-Erosion-Sediment Process in Loess Hilly and Gully Region

ZHENG Jiang-kun¹, WEI Tian-xing², ZHAO Jian³, CHEN Zhi-fu⁴

(1. College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Ya'an, Sichuan 625014, China; 2. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100086, China; 3. New Technology Institute for River and Water Conservancy and Hydropower Design of Liaoning Province, Shenyang, Liaoning 110003, China; 4. The Second Middle School of Liuzhou City, Liuzhou, Guangxi 545001, China)

Abstract: Loess Plateau is the world's most serious soil erosion region. Slope runoff erosion, as the main type of soil erosion, has been priorities and hotspots of soil and water conservation disciplinary about its relation with environmental factors. 23 soil samples under slope runoff erosion during 12 periods were collected as the objects around Wuqi County in the northern Shaanxi, China. The methods of TWINSpan and DCCA were applied to interpret the relation between environmental factors and slope runoff-erosion-sediment. Results indicated that soil samples in same topography positions and vegetation factors gathered. Eigenvalues of all sorts axis is 0.313, accounting for 83% of environmental interpretation. The cumulative explaining amount of the first 4 axis is 57.5% for runoff erosion and 56.9% for the relationship between runoff erosion and environmental factors. Meanwhile, interpretation of the first two axis accounted for 65% of all sorts axis which indicates the first two axis reflecting the most information of runoff erosion-environment relationship. First axis reflected the influence of soil pH and slope position on runoff erosion, and second axis manifested influence of soil bulk density on runoff erosion. The third and fourth axis reflected, respectively, influences of altitude and dry root weight. Among environmental factors, correlation coefficients of slope position were -0.46, 0.61 and 0.64 to soil pH, elevation, capillary porosity respectively. The correlation coefficients were -0.63 and -0.81 between slope and soil bulk density, plant cover, and the correlation coefficients were -0.37 and -0.57 between soil bulk density and soil organic matter, root dry weight. Sediment content of runoff erosion presented as hilly top < hilly slope < gully slope < gully bottom according to the topography positions. And also presented as shrub forest < mixed wood < pure needleless forest < pure broadleaf forest according to forest types, which is similar as the result of clustering analyses. Human activities including site preparation and road construction have great impact on runoff-erosion-sediment. The erosion was stronger in level-terrace than that in scale pit. And the erosion near paths was weaker than others. Sediment concentration followed by form of wave with periods and be divided into 5 periods which were from 0 minutes to 8 minutes, from 8 minutes to 13 minutes, from 13 minutes to 19 minutes, from 19 minutes to 26 minutes and from 26 minutes to 34 minutes. Although environmental factors played a minor role on Runoff-erosion-sediment process according to DCCA analysis, periods of sediment yield can be reasonably divided by DCCA which illustrate sorting method of DCCA also played an important role describing runoff erosion process.

Key words: surface runoff; DCCA; environmental factors; erosion; loess hilly and gully region