

半干旱黄土丘陵沟壑区降水特征值和 下垫面因子影响下的水土流失规律

卫 伟^{1,2}, 陈利顶^{1,*}, 傅伯杰¹, 巩 杰³

(1. 城市与区域生态国家重点实验室, 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039; 3. 兰州大学资源环境学院, 兰州 730000)

摘要:水土流失是多种因素交互作用的结果,尤其在半干旱黄土丘陵沟壑区更具有典型性。选择定西市安家沟小流域(35°35' N, 104°39' E)为典型区域,在其阴坡中部布设了 15 个径流小区,包括 5 种土地利用类型(农田、牧草地、灌丛、乔木林、自然草地)和 3 个坡度(10°、15°、20°),进行径流、侵蚀和降雨前期土壤水分的测定。利用偏相关和方差分析等统计方法,研究了降水特征值及不同下垫面因子对水土流失的影响规律。结果表明,在黄土丘陵沟壑区:径流量主要受降水量、最大 30min 雨强、以及降水量与最大 30min 雨强之积的影响。影响侵蚀量的决定性降水因子为降水量和最大 30min 雨强的乘积 P_{30} 与最大 30min 雨强,而与降水量、平均雨强的相关性较差;坡度在 10°~20°范围内的变化对径流量没有显著影响,而对侵蚀量有显著影响,在该范围内随着坡度的升高侵蚀量增加(尤以 15°~20°范围内增加较快);土地利用类型是影响径流侵蚀的一个极其关键的因素。在坡度和土地利用类型双重作用下,以土地利用为主导因素,坡度作用次之。即在一定范围内,人为扰动强烈且坡度高的农田和人工草地最易遭受土壤侵蚀;径流与侵蚀主要与表层 0~20cm 的土壤水分呈正相关关系,而与下部其他层次土壤水分无明显相关关系。

关键词:水土流失;降水;坡度;土地利用类型;前期土壤水分

文章编号:1000-0933(2006)11-3847-07 **中图分类号:**S152.7;S161.6;S157 **文献标识码:**A

Mechanism of soil and water loss under rainfall and earth surface characteristics in a semiarid loess hilly area

WEI Wei^{1,2}, CHEN Li-Ding^{1,*}, FU Bo-Jie¹, GONG Jie³ (1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. Graduate University of CAS, Beijing 100039, China; 3. College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China). Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(11): 3847~3853.

Abstract: Soil and water loss in the semiarid loess hilly area is influenced by many factors. In this study, fifteen experimental plots were established and located on the north-facing hill-slopes of Anjiapo catchment (35°35' N, 104°39' E) in Dingxi, Gansu province. Three replications (10°, 15° and 20° slope degree, separately) with the following five land cover types were investigated: cropland (*Triticum aestivum* L. cv Leguan), pastureland (*Medicago sativa* L.), shrubland (*Hippophae rhamnoides* L.), woodland (*Pinus tabulaeformis* Carr.) and grassland (*Stipa bungeana* Trin.). Surface runoff, erosion amount and initial soil water content were measured. Using partial correlation and analysis of variance (ANOVA), soil erosion and water losses influenced by rainfall features and earth surface characteristics were studied. Results showed some important facts as follows. Runoff rate has significantly positive relations with rainfall values, maximum 30min rainfall intensity and the product of these two

基金项目:国家“十五”科技攻关资助项目(2001BA606A-03);国家自然科学基金资助项目(40321101)

收稿日期:2006-04-10; **修订日期:**2006-08-10

作者简介:卫伟(1978~),男,河南封丘人,博士生,主要从事景观格局与生态过程研究。E-mail: wei7822@163.com

*通讯作者 Corresponding author. E-mail: liding@rcees.ac.cn

Foundation item: The project was financially supported by National Advanced Project of the Tenth Five-year Plan of China (No. 2001BA606A-03); National Natural Science Foundation of China (No. 40321101)

Received date: 2006-04-10; **Accepted date:** 2006-08-10

Biography: WEI Wei, Ph.D. candidate, mainly engaged in landscape pattern and ecological process. E-mail: wei7822@163.com

factors. Erosion rate, however, is highly influenced by the product of rainfall and maximum 30min intensity, and has weak correlation with other rainfall features such as rainfall amount and average intensity. Land use type is the most vital factor which could reinforce or weaken the soil erosion and water loss. Slope steepness ranging 10° to 20° contributes nothing on runoff but erosion, and erosion rate increases obviously with slope steepness, especially from 15 degree to 20 degree. In general, cropland and pastureland with higher slope degree and severe human disturbance are very prone to occurrence of runoff and soil erosion. Furthermore, antecedent soil moisture in the surface layer (0 ~ 20cm) has a more significant positive correlation with rates of runoff and soil erosion than that in other layers.

Key words: soil and water loss; rainfall; slope degree; land use type; initial soil moisture

水土流失继续对干旱半干旱地区的生态环境和人民生产生活构成严重制约和威胁。目前关于影响地表径流与土壤侵蚀规律的研究已经很多,概括起来主要包括 3 个方面,即下垫面性质(如坡度^[1]、坡形^[2,3]、坡长^[4,5]、植被^[6,7]、土壤结构^[8])、气候因素(如降水量^[9]、降雨动能^[10,11]、雨滴击溅^[12])、人为干扰(如农业实践^[13,14])等因子对径流产沙的影响。这些研究针对某一特定因子对径流侵蚀的影响做了大量详细的探讨。然而,影响水土流失的因素以及水土流失发生发展的过程极为复杂,各个因子之间互相作用,互相叠加或抵消,共同导致了径流和土壤侵蚀。尽管也有不少学者探讨了降雨及下垫面等综合作用下的地表径流与土壤侵蚀规律^[15,16],但多是基于短期零散的观测数据、模拟实验以及模型预测的研究,长期连续的定点监测研究则相对较少。而后者能够有效避免片面结论的产生以及由于模型模拟失误所造成的预测失实问题^[17,18],是研究长期生态演变过程所必需的。

本文基于典型黄土丘陵沟壑小流域内多年连续的实测数据,运用统计分析的方法,分析了降水因子(降水量、降水历时、平均雨强、最大 30min 雨强、降水量与最大 30min 雨强的乘积)、下垫面性质(坡度、土地利用类型、前期土壤水分)等指标及其综合影响对径流侵蚀的作用,试图明确回答以下两个问题:(1)半干旱黄土丘陵沟壑区多因子组合对径流量和侵蚀量影响的规律性;(2)在此基础上对比分析不同土地利用方式的土壤侵蚀特征,从而提出何种土地利用即植被配置能最有效地遏制或降低干旱半干旱区的土壤侵蚀。

1 研究区概况

研究区位于甘肃省陇中地区的定西市安家沟小流域(35°35'N, 104°39'E),属于典型的半干旱黄土丘陵沟壑区。流域内多年年平均气温 6.3℃, ≥5℃ 年积温 2933.5℃, ≥10℃ 年积温 2239.1℃,极端最高气温 34.3℃,极端最低气温 -27.1℃。年均降水量 427.0mm,其中 60%以上集中在 7~9 月份,且多暴雨。年蒸发量 1510mm,空气相对湿度 65.8%,太阳辐射 591.1J/cm²,年日照时数 2409h,无霜期 141a,干燥度 1.15,属于中温带半干旱气候。

该地区的土壤主要是黄土母质基础上发育起来的灰钙土和盐渍土,平均厚度为 40~60m。土壤粘粒介于 33.12%~42.17%,有机质含量介于 0.37%~1.34%之间,2m 土层内的土壤容重介于 1.09~1.36g/cm³,平均 1.2g/cm³,孔隙率在 50%~55%之间。土壤具有垂直节理,土质疏松,湿陷性强,极易发生土壤侵蚀。侵蚀模数可高达 1.0 万 t/km²·a⁻¹,这几年经过连续治理,情况虽有所好转,但侵蚀依然严重。

流域内自然植被覆盖度低。自然覆盖度阳坡一般在 25%~35%,阴坡及部分梁顶在 50%~60%之间。植被带属于森林草原带干草原区。乔木种主要有油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.)、侧柏(*Platycladus orientalis* L.)、山杏(*Prunus armeniaca* L.)等,灌木有沙棘(*Hippophae rhamnoides* L.)、柠条(*Caragana* spp.),草本植物为紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)、红豆草(*Onobrychis viciifolia* Scop.)、针茅(*Stipa bungeana* Trin.)。主要的农作物有马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)、春小麦(*Triticum aestivum* L. cv Leguan)、玉米(*Zea mays* L.)、胡麻(*Linum usitatissimum* L.)及豌豆(*Caragana kansuensis* Pojark.)等。

2 研究方法

2.1 试验小区的布设

试验小区布设在安家沟小流域阴坡中部,位于定西市水土保持研究所的野外气象站附近,海拔 2115m。

共设有 15 个径流小区,小区的垂直投影面积为 5m × 10m(农田、人工草地、自然草地)和 10m ×10m(灌丛和乔木林)。包括 5 种土地利用类型:农田、人工草地、自然草地、灌丛和乔木林,主要作物分别是春小麦 (*Triticum aestivum* L. cv Leguan)、紫花苜蓿 (*Medicago sativa* L.)、针茅 (*Stipa bungeana* Trin.)、沙棘 (*Hippophae rhamnoides* L.) 和油松 (*Pinus tabuliformis* Carr.);各类型小区分别按照 10°、15°、20°3 个等级的坡度布设(详见表 1)。小区于 1985 年建成,农田内为春小麦单作。沙棘和油松的初始定植密度分别为 1m ×1m 和 2m × 3m。针茅群落盖度为 85 % ~ 100 %,草本层高度 20 ~ 40cm。

2.2 数据的测定与处理

利用 SM_I 型雨量计和 SJ_I 型虹吸式雨量计测算降水数据;同时监测每次降水是否产生径流和侵蚀,记录对应的径流量和侵蚀量;根据天气预报对每次降雨来临前的前期土壤水分进行测量,利用土钻取 1m 深土样,共分 5 个层次,即 0 ~ 20cm、20 ~ 40cm、40 ~ 60cm、60 ~ 80cm、80 ~ 100cm。每个层次两个重复,装入铝盒内。采用电子天平称其初始重量,然后采用烘干法(105 ℃ 烘箱内,8h)烘干,二次称重后计算土壤含水量。

选择整理 1986 ~ 1998 年的 13a 连续的实测配套数据进行分析处理,利用 SPSS13.0 中的相关分析、偏相关分析以及方差分析等统计方法进行降水特征值和下垫面性质因子与径流量、侵蚀量的关系探讨。

3 结果分析

3.1 降雨因子(特征值)与水土流失

在黄土高原半干旱地区,降水是唯一的水分输入渠道,同时也是该地区径流侵蚀发生发展的原动力^[10]。分析降水因子与径流侵蚀之间的关系,必须从降水量、降水历时、平均雨强等相关指标入手,但由于这些因子之间存在显著的自相关关系,利用一般的相关分析难以排除这种干扰,从而对结果造成影响。而利用偏相关分析的手段,不仅可以有效剔除干扰因子,还可以准确判断对因变量贡献更大的因子。因此本研究采用偏相关方法分别对安家沟小流域的多年降水特征值与对应不同处理下的径流量和侵蚀量进行了分析,结果见表 2 和表 3。

表 2 不同处理下的径流量与各降雨因子偏相关分析

Table 2 Partial correlation analysis between runoff and precipitation features					
处理类型 Treatments	降雨量 P	降水历时 D	平均雨强 A. I	最大 30min 雨强 I ₃₀	雨量 ×雨强 PI ₃₀
R ₁₋₁	0.257 **	- 0.097	- 0.177	0.296 **	0.376 ***
R ₂₋₁	0.317 ***	- 0.072	- 0.056	0.266 ***	0.242 **
R ₃₋₁	0.287 **	- 0.048	- 0.007	0.004	0.275 **
R ₄₋₁	0.305 ***	- 0.177	- 0.088	0.271 **	0.192 *
R ₅₋₁	0.414 ***	- 0.152	- 0.161	0.332 **	- 0.100
R ₁₋₂	0.283 **	- 0.125	- 0.202 *	0.401 ***	0.154 *
R ₂₋₂	0.327 ***	- 0.128	- 0.151	0.440 ***	0.147 *
R ₃₋₂	0.272 **	- 0.066	- 0.045	0.046	0.150
R ₄₋₂	0.229 *	- 0.131	- 0.045	0.182 *	0.270 **
R ₅₋₂	0.492 ***	- 0.158	- 0.151	0.292 ***	- 0.039
R ₁₋₃	0.344 ***	- 0.197	- 0.222 *	0.485 ***	0.024
R ₂₋₃	0.300 ***	- 0.187 *	- 0.110	0.311 ***	0.039 *
R ₃₋₃	0.311 ***	- 0.068	- 0.059	0.068	0.133
R ₄₋₃	0.318 ***	- 0.204 *	0.121	0.291 **	0.143
R ₅₋₃	0.414 ***	- 0.150	0.142	0.372 ***	0.084

*0.01 < p < 0.05; ** 0.001 < p < 0.01; *** p < 0.001

由表 2 可知,在控制其他降水特征值不变的条件下,不同处理下的径流量和降水量、最大 30min 雨强呈显著正相关关系;其次为 PI₃₀(降水量和最大 30min 雨强的积);和平均雨强的相关性较差,只有个别处理与之呈现出

较为显著的相关性。因此可以认为,主要影响径流量的降水特征值为降水量、最大 30min 雨强、以及二者之积。

表 3 不同处理下的侵蚀量与各降雨因子偏相关分析

Table 3 Partial correlation analysis between erosion and precipitation features

处理类型 Treatments	降雨量 P	降水历时 D	平均雨强 $A. I$	最大 30min 雨强 I_{30}	雨量 $\times$ 雨强 PI_{30}
E_{1-1}	- 0.128	- 0.069	- 0.102	0.014 *	0.366 **
E_{2-1}	- 0.111	- 0.035	- 0.026	- 0.013	0.306 **
E_{3-1}	0.151	- 0.093	- 0.032	0.058	- 0.041
E_{4-1}	- 0.192 *	0.030	0.012	- 0.149	0.420 **
E_{5-1}	0.094	- 0.124	- 0.155	0.221 *	- 0.074
E_{1-2}	- 0.145	- 0.038	- 0.031	- 0.065	0.386 **
E_{2-2}	- 0.063	- 0.079	- 0.055	0.075 *	0.196 *
E_{3-2}	0.092	- 0.059	- 0.149	0.194 *	- 0.063
E_{4-2}	- 0.192 *	0.033	- 0.014	- 0.111	0.396 **
E_{5-2}	0.102	- 0.120	- 0.180	0.261 **	- 0.099
E_{1-3}	- 0.160	- 0.041	- 0.052	- 0.026	0.378 **
E_{2-3}	0.164	- 0.091	- 0.264 **	0.337 **	- 0.195 **
E_{3-3}	- 0.175	- 0.012	0.001	- 0.098	0.372 **
E_{4-3}	- 0.086	- 0.042	- 0.103	0.023 *	0.261 **
E_{5-3}	0.133	- 0.146	- 0.173	0.283 **	- 0.082

* $0.01 < p < 0.05$; ** $0.001 < p < 0.01$

表 3 的侵蚀量与降水因子偏相关分析表明,在控制对应其他变量的条件下,主要影响侵蚀量的因子为降水量和最大 30min 雨强的乘积 PI_{30} ,其次为最大 30min 雨强,与降水量、平均雨强的相关性较差。因此, PI_{30} 和 $\text{Max } I_{30}$ 是降水因子中影响侵蚀量的两个决定性因子。对比表 2 和表 3,发现一个有趣的规律:降水量的多少直接影响着径流量,但从降水量的多少来判断是否产生侵蚀或产生多少侵蚀是不可靠的。

3.2 下垫面性质与水土流失

3.2.1 坡度、土地利用类型与水土流失 对 15 个不同处理类型,3 个等级的坡度,以及 5 种土地利用类型进行归类,分别利用方差分析(ANOVA)分析、LSD 多重比较(最小显著性差异, $p < 0.05$)对这 3 组影响因子和径流量与侵蚀量的关系进行方差差异性分析,结果如下。

从图 1 中可以看出,在坡度和土地利用类型共同作用下,不同下垫面之间的径流量差异显著;而相同土地利用类型下,不同坡度之间径流量无明显差异($F = 0.84, p > 0.05$);不同土地利用类型之间的径流量差异极为显著。可知土地利用类型是影响径流量的一个关键因素。

至于坡度对径流量的作用,由于本研究布设的径流小区的坡度等级较少,且范围仅局限于 $10 \sim 20^\circ$,因此并不能简单地认为坡度的变化对径流没有影响,但至少在上述变化范围内对径流量的影响极小($p > 0.05$)。

从图 1 中同时看出不同坡度和土地利用类型处理下的侵蚀量差异极为显著($p \leq 0.001$),说明这两个因素

对侵蚀量的影响都比较大。依据统计学基本原理,对变异的度量,方差分析中唯一有用的就是离差平方和。方差分析方法就是从总离差平方和中分解出可追溯到指定来源的部分离差平方。因而离差平方和越大,可认为对总体的贡献率越高。单因素方差分析结果显示,土地利用的离差平方和(其值为 351019.2)远大于坡度的离差平方和(其值为 86265.5)。因而,认为土地利用类型的作用要大于坡度对侵蚀量的影响。

进一步分析不同坡度因子对侵蚀量的贡献大小,由于均数的相对值比较能够说明各个自变量对因变量的效应大小,利用方差分析中的 LSD 多重比较的方法,求得均差如图 2。

由图 2 知, $20 \sim 15^\circ$ 、 $20 \sim 10^\circ$ 、 $15 \sim 10^\circ$ 之间的均差分别达到 12.24、16.64、4.41。尽管 $15 \sim 10^\circ$ 之间的 p 值差

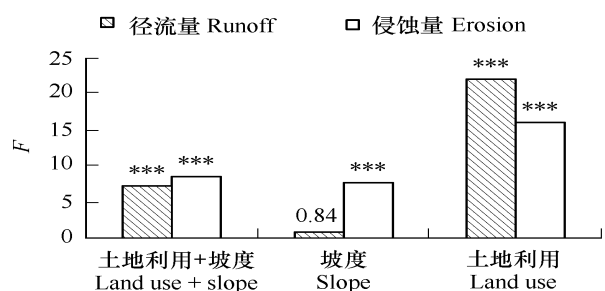


图 1 坡度、土地利用类型等因子与水土流失的 F 值检验

Fig. 1 ANOVA analysis and F value test between soil erosion and land use-slope degree

*** $p < 0.001$

异性不够显著,但均差仍达到 4.41。说明在 10~20° 坡度范围内,侵蚀量随着坡度的增加而增加,在 10~15° 范围内增加较缓慢,15~20° 范围内增加较快。

利用相同的方法进行不同土地利用类型对径流量和侵蚀量的方差分析,比较其均差,结果分别见表 4 和表 5。

由表 4 可知,5 种土地利用类型中,小麦和其他 4 种土地利用类型之间的均差均为正,可知 5 种土地利用类型中,农田最容易产生径流;牧草地仅次于农田,也比较容易产生径流;乔木林比自然草地更易产生侵蚀;径流量最小的是灌丛。农地和牧草地受到人为的扰动最剧烈最频繁;多年的油松林下形成了大量的针叶枯落物,对于改善土壤结构,提高蓄水能力发挥了作用;特别是多年生的沙棘在黄土高原地区阴坡长势极好,其良好的覆盖度、特有的根蘖繁殖能力、发达的根系、以及枯枝落叶层使得其对径流产生了极大的降低和削弱作用。这方面的研究已有很多,如准格尔旗德胜西乡黑毛兔沟种植沙棘 7a 后,植被覆盖度达 61%,侵蚀模数由 4 万 t·km⁻²·a⁻¹ 下降至 0.5 万 t·km⁻²·a⁻¹[19]。国内研究表明,根系固土作用的大小,与根系生物量和分布密切相关。沙棘根系分布较浅,多呈水平分布,水平根幅度一般在 2m×2m,最大可达 6m×8m,在土壤表层形成网状的根系层,对保持水土具有很大的作用[20]。

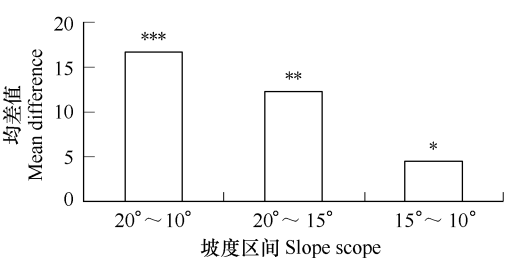


图 2 不同坡度因子作用下的侵蚀量均差及显著性比较

Fig.2 Mean differences of erosion under different slope degree

*0.01 < p < 0.05; **0.001 < p < 0.01; ***p < 0.001

表 4 不同土地利用类型作用下的径流量均差比较

Table 4 Mean differences of runoff amount under different land use types					
	农田 Cropland	牧草地 Pastureland	灌丛 Scrubland	乔木林 Woodland	自然草地 Natural grassland
农田 Cropland	—	0.17	1.18 ***	0.44 **	0.86 ***
牧草地 Pastureland		—	1.02 ***	0.29	0.69 ***
灌丛 Scrubland			—	- 0.75 ***	- 0.32 *
乔木林 Woodland				—	0.43 **
自然草地 Natural grassland					—

*0.01 < p < 0.05; **0.001 < p < 0.01; ***p < 0.001

表 5 不同土地利用类型作用下的侵蚀量均差比较

Table 5 Mean differences of erosion amount under different land use types					
	农田 Cropland	牧草地 Pastureland	灌丛 Scrubland	乔木林 Woodland	自然草地 Natural grassland
农田 Cropland	—	33.50 ***	39.96 ***	34.02 ***	31.88 ***
牧草地 Pastureland		—	6.46	0.52	1.62
灌丛 Scrubland			—	- 8.08	- 2.14
乔木林 Woodland				—	5.94
自然草地 Natural grassland					—

***p < 0.001

由表 5 知,小麦和另外 4 种土地利用类型的均差明显,其产生的侵蚀量最大;苜蓿的侵蚀量次之。这和径流量的分析相一致。其余几种土地利用类型之间均差的 p 值不显著 (p > 0.05),说明其对侵蚀量的影响差异不太明显,但从均差的比较可以看出,仍以沙棘的抗侵蚀作用最好,其次为荒草地和油松。

综合表 4 和表 5,发现受干扰最严重的农田和人工草地产生了较严重的水土流失;而灌丛和荒草地的水土保持效果最佳;另外栽植多年的针叶林(如油松林)具有较强的水土保持能力,其原因可能是由于地表凋落物的累积和土壤性状的改善,从而较好地控制了径流侵蚀。

3.2.2 前期土壤水分状况与水土流失 由于降雨之前的土壤含水量状况影响土壤保持水土的能力、下渗速率、土壤的通透性以及土体的物理结构,对地表径流和土壤侵蚀会产生一定的作用[21]。因而研究分析不同层次土壤水分状况和水土流失的关系,也应该成为探讨水土流失成因的一个重要方面。由于土壤水分的不同层

次之间存在自相关关系,为避免其对结果造成干扰,对不同层次的土壤水分和径流量与侵蚀量进行偏相关分析,结果见图 3。

由图 3 可知,径流量和侵蚀量和 0~20cm 表层的土壤水分呈现较为显著的相关关系,径流量还与 20~40cm 土壤水分有微弱的相关性,但由于作用很小,故可以不予考虑。因此,表层土壤水分含量的高低,会对径流和侵蚀发生发展产生一定的影响,而下层的土壤水分状况则基本上不影响径流侵蚀。这可能与黄土高原多暴雨,径流多为瞬时超渗产流有直接关系。

4 讨论与结论

4.1 讨论

(1) 本文对影响地表径流与土壤侵蚀的输入因子(降水)和承受因子(下垫面)进行了重点探讨。但事实上,影响径流和侵蚀过程的因素是错综复杂的,各个因素之间相互影响、叠加或消减。比如:在研究土壤侵蚀时,地表径流本身的作用也不容忽视。径流是降雨和下垫面作用的产物,而其本身也是产生侵蚀的一个重要因子。利用斯皮尔曼相关分析得到径流量和侵蚀量的相关系数为 0.337 ($p < 0.001$),相关关系显著。表明产生径流是发生水力侵蚀的先决条件,即径流是产生水力侵蚀的必要非充分条件。因此,在考虑影响侵蚀的因素时(如回归模拟分析等),应该将径流量当作一个变量列入。

(2) 关于降雨历时与径流侵蚀的关系。在控制其它因子不变的情况下,降雨历时和径流侵蚀均无明显相关性(表 2 和表 3)。但在降雨强度不变的情况下(如模拟降雨),降雨量和降雨历时呈显著正相关^[22],降雨历时和径流侵蚀的关系变得较为复杂^[23]。一种情况是降雨强度弱,只有地表径流产生,降雨历时和径流量呈显著正相关,而与侵蚀量无关;第二种情况是降雨强度大,发生超渗产流,径流和侵蚀都有发生,降雨历时和径流量及侵蚀量呈显著正相关。但在自然界,天然降雨强度时刻处于随机变化中^[24],因此偏相关分析不太适合模拟降雨。对于降雨历时和径流侵蚀的关系探讨,下结论时需要慎重。

(3) 关于最大降雨强度。截至目前,关于黄土丘陵区最大雨强方面的研究已经很多,如最大 5、10、15、30、60min 降雨强度等^[25,26]。具体哪一个降雨强度指标与径流侵蚀的关系最为显著,有待进一步比较。本文选择较为常用的最大 30min 降雨强度作为指标,旨在说明最大降雨强度对径流侵蚀具有显著的影响。

4.2 结论

分析表明,在半干旱黄土丘陵沟壑区,不同土地利用类型坡地径流量和侵蚀量与降雨特征值(雨量、雨强、历时等)和下垫面因子(坡度、土地利用、前期土壤水分状况等)关系密切。

(1) 径流量主要受降水量、最大 30min 降雨强度、以及二者之积的影响。影响侵蚀量的因子为降水量和最大 30min 降雨强度的乘积 PI_{30} ,其次为最大 30min 降雨强度,与降水量、平均雨强的相关性较差。降水量的多少直接影响着径流量,但根据降水量的多少来判断是否产生侵蚀或产生多少侵蚀则是非常不可靠的。

(2) 坡度在 10~20 范围内的变化对径流量没有显著影响,而对侵蚀量有显著影响,在该范围内随着坡度的增加,侵蚀量增加(尤以 15~20 范围内增加较快)。

(3) 土地利用类型是影响径流侵蚀的一个极其关键的因素,不同土地利用类型之间的径流与侵蚀存在显著差异。5 种土地利用类型中,农田(小麦)和人工草地(苜蓿)最易产生径流和侵蚀;以在黄土高原区长势旺盛的灌木丛(沙棘)和人为干扰少的荒草地降低和遏制径流侵蚀的效果最佳;多年生常绿乔木林(油松)的作用次之。

(4) 在坡度和土地利用类型双重作用下,以土地利用为主导因素,坡度次之。即在研究所涉及的几种土地利用类型中,低坡度下的灌木及荒草地抵御土壤侵蚀的效果最佳,而坡度高的农田和人工草地最易遭受土

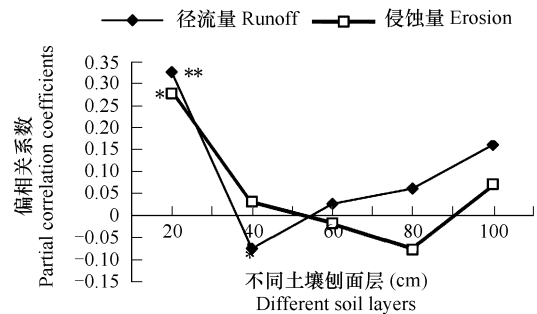


图 3 不同层次前期土壤水分与水土流失量的偏相关分析

Fig. 3 Partial correlation analysis on soil erosion and soil moisture of rainfall prophase

* $0.01 < p < 0.05$; ** $0.001 < p < 0.01$

壤侵蚀。

(5) 降雨前的土壤水分状况也是影响径流和侵蚀的一个重要因子。径流量和侵蚀量主要与表层 0~20cm 的土壤水分呈现正相关关系,而与下部其他层次土壤水分无明显的相关关系。

References:

- [1] Dennis M F, Bryan R B. The relationship of soil loss by interrill erosion to slope gradient. *Catena*, 2000, 38 (3) : 211 ~ 222.
- [2] Heerdegen R G and Beran M A. Quantifying source areas through land surface curvature and shape. *Journal of Hydrology*, 1982, 57 (3 ~ 4) : 359 ~ 373.
- [3] Wheeler H S, Shaw T L, Rutherford J C. Storm runoff from small lowland catchments in southwest England. *Journal of Hydrology*, 1982, 55 (1 ~ 4) : 321 ~ 337.
- [4] Li S L, Cai Q G, Wu S A. Effect of slope length on runoff and soil erosion. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 1998, 12 (1) : 29 ~ 35.
- [5] Kong Y P, Zhang K L, Tang K L. Impact of slope length on soil erosion process under simulated rainfall. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, 15 (2) : 17 ~ 24.
- [6] Chirino E, Bonet A, Bellot J, Sánchez J R. Effects of 30-year-old Aleppo pine plantations on runoff, soil erosion, and plant diversity in a semi-arid landscape in south eastern Spain. *Catena*, 2006, 65 (1) : 19 ~ 29.
- [7] Arsenault É, Bonn F. Evaluation of soil erosion protective cover by crop residues using vegetation indices and spectral mixture analysis of multispectral and hyperspectral data. *Catena*, 2005, 62 (2 ~ 3) : 157 ~ 172.
- [8] Ludwig B, Boiffin J, Chadæuf J, et al. Hydrological structure and erosion damage caused by concentrated flow in cultivated catchments. *Catena*, 1995, 25 (1 ~ 4) : 227 ~ 252.
- [9] Nearing M A, Jetten V, Baffaut C, et al. Modeling response of soil erosion and runoff to changes in precipitation and cover. *Catena*, 2005, 61 (2 ~ 3) : 131 ~ 154.
- [10] Hammad A H A, Børresen T, Haugen L E. Effects of rain characteristics and terracing on runoff and erosion under the Mediterranean. *Soil and Tillage Research*, 2006, 87 (1) : 39 ~ 47.
- [11] Hamed Y, Albergel J, Pöhl Y, et al. Comparison between rainfall simulator erosion and observed reservoir sedimentation in an erosion-sensitive semiarid catchment. *Catena*, 2002, 50 (1) : 1 ~ 16.
- [12] Erpul G, Gabriels D, Janssens D. Assessing the drop size distribution of simulated rainfall in a wind tunnel. *Soil and Tillage Research*, 1998, 45 (3 ~ 4) : 455 ~ 463.
- [13] Zhang G S, Chan K Y, Oates A, et al. Relationship between soil structure and runoff/soil loss after 24 years of conservation tillage. *Soil and Tillage Research*, 2006.
- [14] Chan K Y. Impact of tillage practices and burrows of a native Australian anecic earthworm on soil hydrology. *Applied Soil Ecology*, 2004, 27 (1) : 89 ~ 96.
- [15] Lu J F, Liu A X. Relationship between grain size of suspended sediment and rainfall characteristics in the middle reaches of the Yellow River Basin. *Scientia Geographica Sinica*, 2002, 22 (5) : 552 ~ 556.
- [16] Zhang L P, Ni H B, Wu X Y. Soil water erosion processes on sloping land with different material in the wind-water interaction zone in the Loess Plateau. *Research of Soil and Water Conservation*, 2005, 12 (5) : 126 ~ 127.
- [17] Nearing M A, Jetten V, Baffaut C. Modeling response of soil erosion and runoff to changes in precipitation and cover. *Catena*, 2005, 61 : 131 ~ 154.
- [18] Aizen V, Aizen E, Glazirin G. Loaiciga Simulation of daily runoff in Central Asian alpine watersheds. *Journal of Hydrology*, 2000, 238 : 15 ~ 34.
- [19] Wu S F, Liu J K. Review on the study of anti-erosion of Hippophae Rhamnoides Stand. *International Research and Development of Sea buckthorn*, 2005, 3 (2) : 43 ~ 47.
- [20] Zhang Y. study on soil erosion control and seabuckthorn restoration on the Loess Plateau. *Hippophae*, 2005, 18 (3) : 33 ~ 35.
- [21] Castillo V M, Gómez-Plaza A, Martínez-Mena M. The role of antecedent soil water content in the runoff response of semiarid catchments: a simulation approach. *Journal of Hydrology*, 2003, 284 : 114 ~ 130.
- [22] Chen H S, Shao M A, Zhang X C, et al. Field experiment on hillslope rainfall infiltration and runoff under simulated rainfall conditions. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19 (2) : 5 ~ 8.
- [23] Gan Z M ed. Landforms and Soil Erosion of the Loess Plateau. Xi'an: Shaanxi People Press, 1990.
- [24] Chang F X, Ding J, Yao J. Scaling property of the rainfall variation in relation with duration. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2002, 11 (1) : 79 ~ 83.
- [25] Xie Y, Liu B Y, Zhang W B. Study on standard of erosive rainfall. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2000, 14 (4) : 6 ~ 11.
- [26] Tian F X, Wang Z L, Niu Z H, et al. Experimental research on soil erosion process in loess hill slope. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2005, 23 (6) : 141 ~ 146.

参考文献:

- [5] 孔亚平,张科利,唐克丽. 坡长对侵蚀产沙过程影响的模拟研究. *水土保持学报*, 2001, 15 (2) : 17 ~ 24.
- [15] 卢金发,刘爱霞. 黄河中游降雨特性对泥沙粒径的影响. *地理科学*, 2002, 22 (5) : 552 ~ 556.
- [16] 张丽萍,倪含斌,吴希媛. 黄土高原水蚀风蚀交错区不同下垫面土壤水蚀特征实验研究. *水土保持研究*, 2005, 12 (5) : 126 ~ 127.
- [19] 吴淑芳,刘建凯. 黄土高原沙棘林抗侵蚀性能研究综述. *国际沙棘研究与开发*, 2005, 3 (2) : 43 ~ 47.
- [20] 张勇. 浅论黄土高原水土流失治理与沙棘生态建设. *沙棘*, 2005, 18 (3) : 33 ~ 35.
- [22] 陈洪松,邵明安,张兴昌,等. 野外模拟降雨条件下坡面降雨入渗、产流试验研究. *水土保持学报*, 2005, 19 (2) : 5 ~ 8.
- [23] 甘枝茂主编. 黄土高原地貌与土壤侵蚀研究. 西安:陕西人民出版社, 1990.
- [24] 常福宣,丁晶,姚健. 降雨随历时变化标度性质的探讨. *长江流域资源与环境*, 2002, 11 (1) : 79 ~ 83.
- [25] 谢云,刘宝元,章文波. 侵蚀性降雨标准研究. *水土保持学报*, 2000, 14 (4) : 6 ~ 11.
- [26] 田凤霞,王占礼,牛振华,等. 黄土坡面土壤侵蚀过程试验研究. *干旱地区农业研究*, 2005, 18 (6) : 141 ~ 146.