

不同土地利用方式水土及养分流失响应机制研究

——以鸛鹑沟小流域为例

郭效丁¹, 刘晓君², 黄萍萍³, 成玉婷³, 靳宇蓉³

(1. 武警后勤学院, 天津 300309; 2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 3. 西安理工大学 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 西安 710048)

摘 要:以商南县鸛鹑沟小流域为研究对象, 为分析天然降雨条件下坡面产流产沙及养分流失的变化规律, 根据当地不同的种植作物, 在野外建立标准径流小区进行试验。结果表明: 坡度对径流影响不大, 但不同坡度下产沙差异显著。草地小区的径流及产沙均低于其他耕地小区, 表明了草地调节地面径流以及对于土壤的保持作用。随着径流的增加, 各小区产沙量均变大, 对于花生、辣椒和草地小区, 坡度变大时含沙量也急剧增加, 玉米缓坡小区径流含沙量较大, 但其产沙总量仍小于陡坡小区。雨型和坡度对小区氮磷养分影响不同, 其中短阵型暴雨下全磷、速效磷和氨态氮易流失, 坡度对全氮流失的影响较大; 除草地外, 陡坡小区硝态氮流失浓度普遍较低, 而草地小区更利于氨态氮的保持。

关键词:土地利用方式; 天然降雨; 径流; 养分流失

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2014)05-0018-06

Study on the Mechanism for the Response of Soil Erosion and Nutrient Losses to Different Land Uses —Taking Yingwugou Watershed As an Example

GUO Xiao-ding¹, LIU Xiao-jun², HUANG Ping-ping³, CHENG Yu-ting³, JIN Yu-rong³

(1. Logistics Armed Police Academy, Tianjin 300309, China; 2. State Key Laboratory of

Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation,

Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China;

3. Key Lab of Northwest Water Resources and Environment Ecology of MOE at XAUT, Xi'an 710048, China)

Abstract: Based on different local crops, the author studied sediment, runoff and nutrient loss in sloping land under natural rainfall by experiment conducted in the field runoff plots in Yingwugou watershed in Shangnan County. The results showed that slope gradient has little impact on runoff, sediment yields are significant difference. The sediments and runoff from grass plot are both less than other crop plots which indicates that the runoff and conversation of soil can be adjusted by land cover. With the increase of runoff, the sediments keep larger and the sediment contents increase with rise of slope gradients except the corn plots. Rainfall patterns and slope degree have different impacts on nutrient losses from plots. The short-time rainstorm is easier for the loss of total phosphorus, available phosphorus and ammonia nitrogen, so do slope gradients impact on the total nitrogen; the concentrations of nitrate nitrogen losses the plots with high gradient are generally low except grass plot; the ammonia nitrogen is more readily maintained in grass plot.

Key words: land use; rainfall patterns; sediments and runoff; nutrient losses

水土资源是人类赖以生存和生产的宝贵资源, 而控制水土流失是保护水土的主要手段^[1-2]。土壤侵蚀的直接后果是降低了土壤中有机质和各种营养元素

的含量^[3], 破坏了土体结构, 且土壤的流失养分污染下游河流、水库, 恶化了生态环境, 造成一系列环境问题。与此同时, 坡耕地水土流失状况也受到越来越

收稿日期: 2014-04-21

修回日期: 2014-05-08

资助项目: 陕西省教育厅重点实验室项目“丹汉江水源区水土流失非点源污染过程与调控”(09JS094); 陕西教育厅科研项目“淤地坝泥沙沉积与侵蚀产沙耦合关系研究”(06JK215); 国家自然科学基金“植被格局对坡沟水蚀过程调控机理研究”(41071182)

作者简介: 郭效丁(1977—), 女, 河北宁晋人, 硕士, 主要从事生态经济与管理。E-mail: ggfriendship_05@163.com

通信作者: 刘晓君(1988—), 女, 山东省泰安市人, 在读博士, 主要从事非点源污染与土壤侵蚀研究。E-mail: liuxiaojun.lxj@163.com

多的关注^[4-11]。20 世纪 70 年代水体富营养化问题日益突出时,科研人员发现对点源污染的治理并不能有效地改善水质,土壤养分的流失也是造成水体污染的重要原因^[12]。

丹汉江流域是我国南水北调的重要水源区,其水质的好坏,直接关系到国家南水北调工程的成败,更与受水地区国民经济和人民群众生活密切相关。目前,其水质总体良好,能满足调水要求,但水土流失现状堪忧。一些支流存在着严重的水污染现象,汉中市汉江河段出现Ⅴ类水,商州市丹江河段出现超Ⅴ类。水污染加剧了陕西水资源的短缺矛盾,同时对陕西的工农业生产和人民群众的身体健康造成严重危害。一些研究表明^[13-16],由水土流失携带的泥沙、氮磷、有机质等污染物是河流水质恶化的主要原因,水土流失产生的非点源污染是影响研究区水质的主要污染源。因此,为了保护丹汉江水源区的水环境,最终实现丹江口水库长期稳定达到南水北调中线工程水源地水质要求,确保一江清水送北京以及下游安全,必须要控制丹汉江水源区的非点源污染。本文以丹汉江水源区鹦鹉沟小流域野外径流小区观测数据为依据,对不同土地利用方式下的水土流失进行监测,分析坡度与土地利用方式对土壤侵蚀与养分流失的影响,旨在为防治丹汉江水源区水土流失与非点源污染提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

商南县鹦鹉沟小流域水土流失非点源污染监测径流场位于陕西省商南县城东南 2 km 处的城关镇

五里铺村,是商南县二期“长治”工程东北山流域的一条支沟,地处流域下游,土地总面积 2.04 km²。流域大部分面积为低山丘陵地貌,河谷开阔,最高海拔 824 m,最低海拔 464 m。该流域处于北亚热带和暖温带过渡区,具有气候温和、日照充足、雨量充沛、四季分明的特点。降水年内分配不均,主要集中在 7—9 月,占年降水量的 50%左右,且多以暴雨形式出现,年径流深 261.3 mm,径流总量为 5.34×10⁵ m³。流域内以黄棕壤、风化沙壤土为主,有机质、微量元素较为缺乏。人口密度 350 人/km²。土地利用结构不合理,土地利用率低。流域内水土流失面积为 130.53 hm²,占总面积的 63.8%。流失面积主要分布在坡耕地、荒山、荒坡和河滩地上。自 2000 年鹦鹉沟小流域被列为商南县二期“长治”重点治理小流域以来,采取了坡面治理措施和沟道治理措施相结合的治理方针。其中坡面治理以林草措施为主,配以适量的工程措施,采取的主要措施为在退耕的坡耕地和荒山、荒坡山共规划实施了水保林 49.87 hm²,经济林 46.27 hm²,种草 10.80 hm²。工程措施为采用钢混凝土构件筑坎造田 8.93 hm²。沟道治理措施主要为在沟道内布置了 3.8 km 的路堤结合工程,2.3 km 的防洪排涝工程,改造沟台地 23.27 hm²。

1.2 研究方法

根据地形特征,建立 8 个径流监测小区,小区均宽 2 m,详细资料见表 1。修建径流小区均为水泥砂浆抹面,挖深 60 cm,埋深 40 cm,出露 20 cm,周边用单砖浆砌,以防止小区径流流出及区外径流流入。陡坡选取 15°~20°小区,缓坡选取 5°~10°小区。

表 1 商南监测小区资料

小区编号	种植类型	坡型	坡度/(°)	坡向	坡长/m	坡宽/m	植被盖度/%
1	花生	陡坡	24	南	10	2	90
2		缓坡	12	西	10	2	90
3	辣椒	陡坡	30	南	5	2	40
4		缓坡	14	南	10	2	40
5	玉米	陡坡	20	南	10	2	65
6		缓坡	10	南	10	2	65
7	草地	陡坡	14	西	5	2	95
8		缓坡	20	西	10	2	95

试验于 2010 年 4 月开始,设置不同的种植作物,分别为花生(*Arachis hypogaea*)、辣椒(*Capsicum annuum*)、玉米(*Zea mays*)及草地,均按照当地农民的种植习惯进行整地、施肥、除草等各项农耕措施。对降雨后的小区产流产沙进行样品采集,样品送入室内实验室进行化学分析,监测指标包括:泥沙含量、全氮、全磷、硝态氮、氨态氮和速效磷。HOBO 气象站

收集同步气象数据。水样中各项指标均由 HACH 仪器分析得到。

2 结果与分析

2.1 降雨特征分析

选择 2010 年 7 月份的 5 场典型降雨及产流、产沙进行分析,5 场典型降雨基本情况见表 2。

表 2 研究区各次降雨特征

日期	降雨量/ mm	平均降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	降雨 历时/h	最大 30 min 雨强/mm
2010-07-01	15.80	31.60	0.50	15.80
2010-07-03	51.80	3.98	13.00	2.80
2010-07-08	20.80	1.93	10.75	6.80
2010-07-19	103.60	3.60	28.75	21.20
2010-07-25	12.80	4.65	2.75	7.20

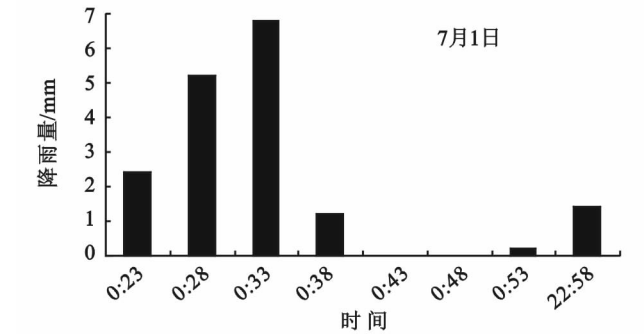


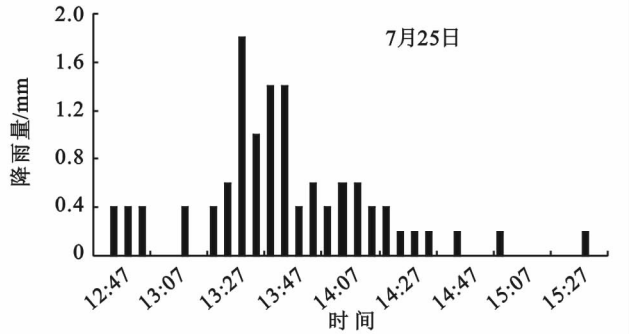
图 1 商南县鹦鹉沟小流域 7 月典型降雨过程线

2.2 小区产流产沙特征

径流是导致泥沙流失和养分流失的原动力,而次降雨产生的径流量和产沙量可以表征不同土地利用方式的水土保持特征^[17-18],降雨过程中,随着地表侵蚀的发生,土壤养分即会随泥沙及地表径流流失。

选取 2010 年 7 月所监测到的 5 场典型降雨说明鹦鹉沟小流域不同小区产流产沙情况。由表 3 可知,小区的径流量及泥沙基本随着雨强的增加而增加,但由于 7 月 1 号的降雨为短时阵型暴雨,其产沙浓度小于 26 号。并且根据观测,7 月 24—25 日均有降雨,使

由表 2 知,7 月 1 日的次降雨虽降雨量较小,但降雨强度达到 31.60 mm/h,因此属于短时阵型暴雨,与之降雨量较为接近的 7 月 9 号、7 月 26 号,降雨强度仅为 1.93 和 4.65 mm/h。另外 7 月 19 号降雨量最大,但平均雨强仅 3.6 mm/h,因此其雨型为小雨,并且历时达 28.75 h,是所监测的降雨中历时最长的。7 月份典型降雨过程见图 1。



得所监测的小区前期含水量较大,土壤可蚀性增大。

对陡、缓坡坡泥沙及径流分别进行独立样本 *T* 检验,结果显示陡坡泥沙均值明显高于缓坡泥沙,且差异较显著。与泥沙数据相反,陡缓坡所产生的径流整体差异不大,说明坡度对径流影响不大。另外,比较不同土地利用方式可知,草地小区的径流及产沙均低于其他作物,充分表征了调节地面径流以及对于土壤的保持作用。陡坡小区中花生地产沙量最大,其次为辣椒小区和玉米小区;缓坡小区中辣椒小区产沙量最大,其次为花生小区和玉米小区。

表 3 2010 年 7 月份小区降雨及径流与泥沙流失情况

坡度	降雨日期	花生小区		辣椒小区		玉米小区		草地小区	
		泥沙/ (kg·hm ⁻²)	径流/ m ³	泥沙/ (kg·hm ⁻²)	径流/ m ³	泥沙/ (kg·hm ⁻²)	径流/ m ³	泥沙/ (kg·hm ⁻²)	径流/ m ³
陡坡	2010-07-01	19.888	0.033	21.897	0.006	1.687	0.048	0.698	0.008
	2010-07-03	63.161	0.145	2.294	0.007	2.632	0.088	0.854	0.011
	2010-07-09	0.549	0.007	0.642	0.004	0.728	0.021	0.535	0.002
	2010-07-19	7.990	0.030	10.483	0.184	3.243	0.139	0.881	0.014
	2010-07-26	85.840	0.194	29.430	0.627	2.119	0.069	1.595	0.329
缓坡	2010-07-01	2.710	0.015	5.857	0.021	1.414	0.017	0.581	0.008
	2010-07-03	1.670	0.002	2.498	0.055	1.753	0.019	0.436	0.005
	2010-07-09	0.293	0.000	2.676	0.020	0.673	0.015	0.476	0.009
	2010-07-19	3.223	0.067	4.630	0.273	1.411	0.017	0.548	0.212
	2010-07-26	12.832	0.083	13.140	0.884	1.555	0.018	1.419	0.311

注:径流量及泥沙量均转化为单位面积内计算结果。

表 4 研究小区陡缓坡泥沙与径流回归方程

土地利用类型	陡坡		缓坡	
花生	$y=447.72x-1.138$	$R^2=0.9891$	$y=154.350x+0.755$	$R^2=0.9826$
辣椒	$y=44.844x+1.53$	$R^2=0.9968$	$y=10.939x+3.020$	$R^2=0.8621$
玉米	$y=20.820x+0.562$	$R^2=0.9434$	$y=290.040x-3.565$	$R^2=0.8018$
草地	$y=39.762x+0.391$	$R^2=0.9825$	$y=10.279x+0.406$	$R^2=0.9721$

注:*y* 为小区次降雨产沙量,*x* 为次降雨径流量,单位与表 3 一致。

根据监测的几场典型降雨,得到不同土地利用类型两种坡度下的泥沙径流关系如表 4 所示。回归方程中 x 系数即代表径流产沙量,因此由结果可知,各小区均随着径流的增加产沙量变大,但各小区增加速度不同。对于花生、辣椒和草地小区,当坡度变大时,产沙量也急剧增加,这表现在陡坡的径流泥沙回归方程斜率较大。而玉米小区缓坡方程斜率反而大于陡坡,表明玉米缓坡小区径流含沙量较大,但根据监测数据,其产沙总量仍小于陡坡小区。另外,草地小区产沙量基本低于其他小区,表明草地在水土保持中的

作用更明显。

2.3 不同土地利用类型/坡度径流养分特征

在土壤系统的水分分配和土壤侵蚀过程中,土地利用类型和坡度因子有显著的调节作用,因此生态系统的养分流失也会发生变化。不同的土地利用类型/坡度下,生态系统的养分流失包括径流(含泥沙)、农作物的吸收利用和气体挥发^[19]。本研究仅考虑径流,并选择生物和环境的必要元素氮(N)、磷(P)作为研究对象。为此我们对两场典型降雨(7 月 1 日和 7 月 19 日降雨)进行分析比较,结果见图 2。

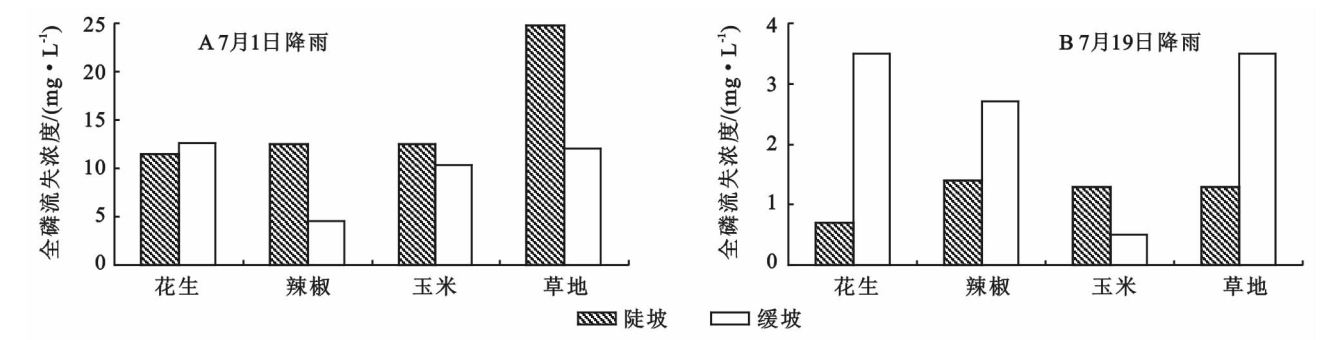


图 2 鸛鹑沟小流域全磷流失情况

从图 2 可知,7 月 1 日降雨全磷流失浓度明显高于 7 月 19 日,说明短时阵型暴雨易于全磷的流失(图 2A),历时长、雨强小的降雨对全磷流失作用相对较小,相对于雨量,雨强对全磷的流失影响更大。同时,暴雨下多数陡坡小区的全磷流失浓度高于缓坡小区,除了花生小区缓坡小区浓度(12.6 mg/L)稍高于陡坡小区(11.5 mg/L),说明暴雨下陡坡全磷流失浓度较高,缓坡全磷流失受影响相对较小;而对于 7 月 19 日的次降雨(图 2B),缓坡的全磷流失浓度反而高于陡坡(除了玉米小区情况相反),7 月 19 日的陡缓坡全磷流失差异(均值为 180.91%)高于 7 月 1 日的次降雨(76.97%),说明缓坡全磷流失浓度受小雨强降雨的影响高于陡坡受阵型强降雨对全磷流失浓度的影响。另外,草地全磷流失浓度均高于其他小区,说

明草地对全磷流失贡献较大。

图 3 显示了速效磷在不同土地利用类型/坡度下的流失情况。同全磷一样,与 7 月 19 日长时间、小雨强的次降雨相比,短时阵型暴雨更易于速效磷的流失(图 3A),并且陡缓坡差异明显。除草地小区外,短时阵型暴雨下陡坡更容易流失速效磷。19 日次降雨历时较长,使得缓坡小区的速效磷有充分的时间溶于径流,因此其浓度基本高于陡坡,辣椒和草地小区表现最明显(图 3B)。此外,对于阵型降雨,陡坡花生小区速效磷流失浓度最高(4.38 mg/L),其次为辣椒和玉米小区;对于长时小雨,则为缓坡辣椒小区的速效磷流失浓度最高,其次为草地和花生小区。因此,单以速效磷为考虑指标,研究区陡坡(10°~20°)宜种草,缓坡种植玉米。

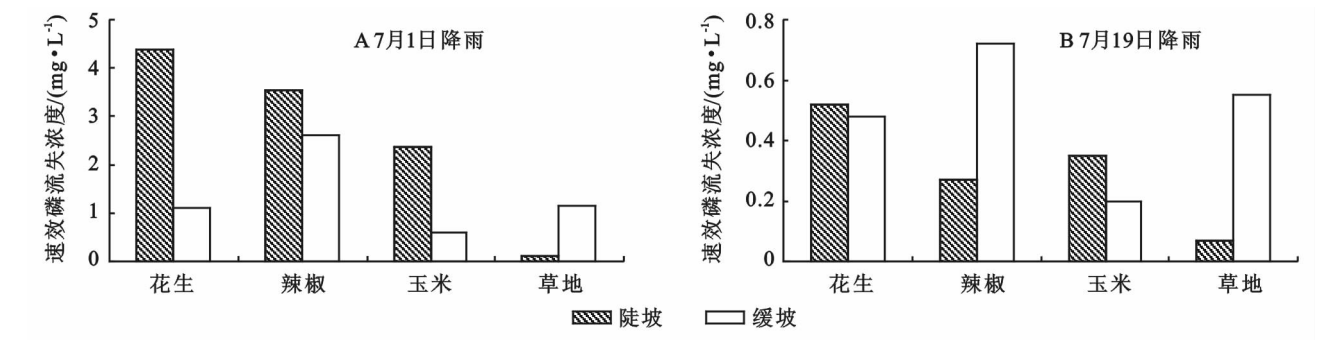


图 3 鸛鹑沟小流域速效磷流失情况

与磷的流失不同,7 月 1 日和 19 日两种雨型对全氮流失浓度的影响差异较小(图 4),但陡坡玉米小区

除外(短时暴雨下陡坡玉米小区的全氮流失浓度明显高于缓坡小区),表明全氮流失受雨型影响较小。不

论哪种雨型,陡坡小区的全氮流失浓度基本都高于缓坡小区(仅 19 日次降雨下花生小区除外),即坡度对全氮流失的影响较大,陡坡更易于其流失。因此,单以全氮为考虑指标,鹦鹉沟小流域陡坡($10^{\circ}\sim 20^{\circ}$)宜种植玉米和花生,缓坡宜种植草地和玉米。

从硝态氮两场降雨的流失对比图可知(图 5),短时暴雨易于陡坡小区硝态氮的流失,其中以玉米和花生小区流失浓度最高,辣椒次之,草地小区硝态氮流失浓度最小,而缓坡小区在短时暴雨下普遍流失浓度

降低;7 月 19 日的长时小雨反而使得缓坡草地和辣椒小区的硝氮流失浓度较高,除草地外,陡坡小区硝氮流失浓度普遍较低。因此,单以硝态氮为考虑指标,陡坡宜种草,缓坡宜种植玉米和花生。

总体来说硝氮流失浓度明显高于氨氮,但与硝氮一样,短时阵型暴雨更易于氨氮的流失。图 5 中下方两图表明坡度对于氨氮的流失浓度影响不大,但相对于其他土地利用类型,草地小区更利于氨氮养分的保持。

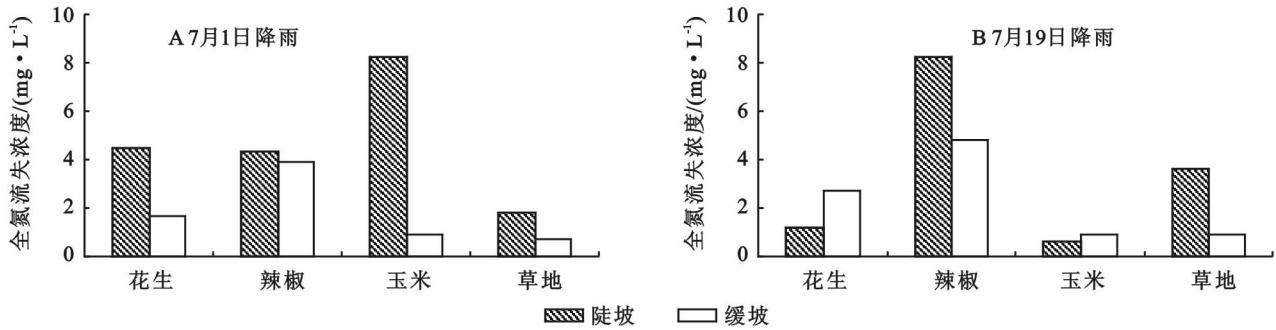


图 4 鹦鹉沟小流域全氮流失情况

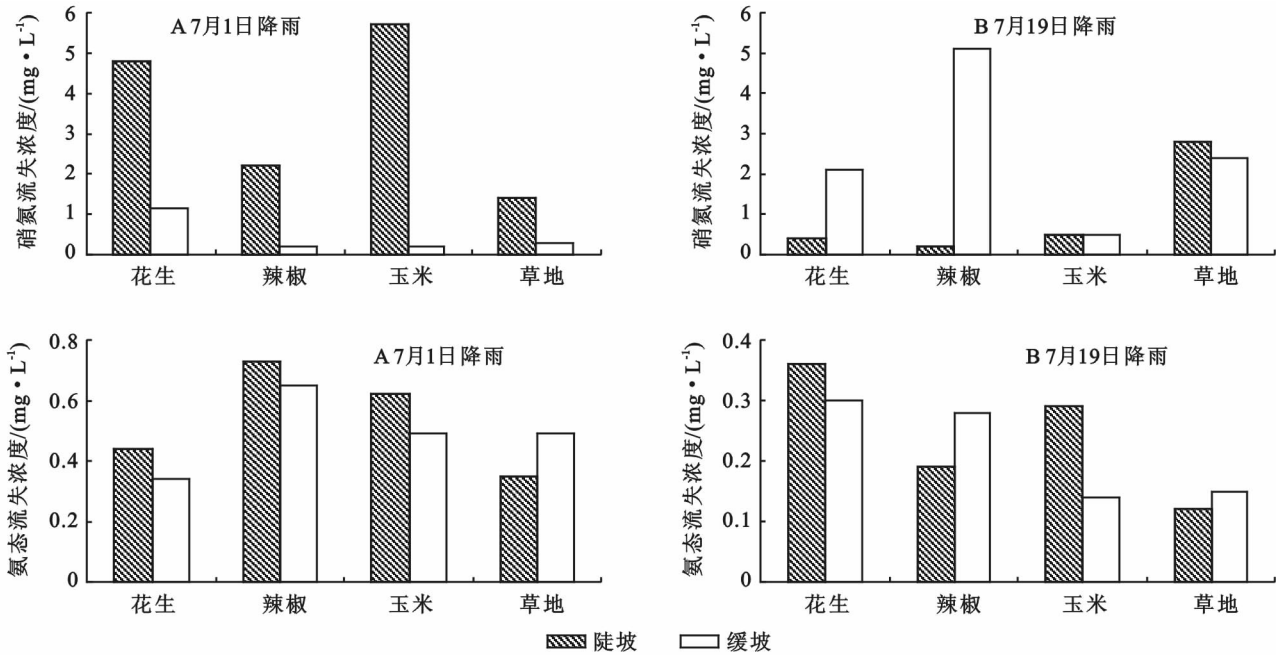


图 5 鹦鹉沟小流域硝氮、氨氮流失情况

3 结论

(1) 坡度对径流影响不大,但陡缓坡产沙差异显著。草地小区的径流及产沙均低于其他作物,充分表征了草地拦截雨滴调节地面径流以及对于土壤的保持作用。各小区均随着径流的增加产沙量变大,坡度变大时含沙量也急剧增加。

(2) 短时阵型暴雨易于养分的流失,缓坡全磷流失浓度受小雨强降雨的影响高于陡坡受阵型强暴雨对全磷流失浓度的影响。另外,草地全磷流失浓度均

高于其他小区,说明草地对全磷流失贡献较大。

(3) 雨型对全氮流失浓度的影响差异较小,但坡度对全氮流失的影响较大。短时暴雨易于陡坡小区硝态氮的流失,长时小雨反而使得缓坡草地和辣椒小区的硝氮流失浓度较高,除草地外,陡坡小区硝氮流失浓度普遍较低。坡度对于氨氮的流失浓度影响不大。

参考文献:

[1] 王莹. 全国水土保持监测公报[N]. 中国水利报, 2005: 1-

18.

[2] 王礼先. 水土保持学[M]. 北京:中国林业出版社,1995:19-30.

[3] Zhang Jianguo, Li Huixia, He Xiaorong, et al. Impoverishment of soil nutrients in gully erosion areas in Yuanmou basin[J]. Wuhan University Journal of Natural Sciences, 2003, 8(3B): 1034-1040.

[4] Carpenter S R, Caraco N F, Correll D L, et al. Non-point pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen[J]. Ecological Applications, 1998, 8(3): 559-568.

[5] 廖晓勇, 陈治谏, 刘邵权, 等. 三峡库区紫色土坡耕地不同利用方式的水土流失特征[J]. 水土保持研究, 2005, 12(1): 159-161.

[6] 赵爱军, 许克翠, 彭业轩. 紫色土坡耕地栽种植物篱笆防治水土流失的试验初报[J]. 中国水土保持, 2004(11): 23-25.

[7] 吕惠明, 王恒俊, 谢永生. 不同土类坡耕地水土流失及其治理对策[J]. 水土保持通报, 1993, 13(4): 61-63.

[8] 查世煜, 李秋洪. 三峡库区坡耕地的水土流失问题与对策[J]. 农业环境与发展, 1998, 15(2): 30-33.

[9] 孙景华, 杨玉阁, 张本家, 等. 辽北低山丘陵区坡耕地水土流失规律研究[J]. 水土保持研究, 1997, 4(4): 65-74.

[10] 水建国, 柴锡周, 张如良. 红壤坡地不同生态模式水土流失规律的研究[J]. 水土保持学报, 2001, 15(2): 33-36.

[11] 向万胜, 梁称富, 李位红. 三峡库区花岗岩坡耕地不同种植方式下水土流失定位研究[J]. 应用生态学报, 2001, 12(1): 47-50.

[12] Kuylensstierna J L, Bj? rklund G, Najlis P. Sustainable water future with global implications: everyone's responsibility [J]. Natural Resources Forum, 1997, 21(3): 181-190.

[13] 杨胜天, 程红光, 步青松, 等. 全国土壤侵蚀量估算及其在吸附态氮磷流失量匡算中的应用[J]. 环境科学学报, 2006, 26(3): 366-374.

[14] 罗专溪, 朱波, 汪涛, 等. 紫色土坡地泥沙养分与泥沙流失的耦合特征[J]. 长江流域资源与环境, 2008, 17(3): 379-383.

[15] 刘瑞民, 杨志峰, 沈枕瑶, 等. 土地利用/覆盖变化对长江流域非点源污染的影响及其信息系统建设[J]. 长江流域资源与环境, 2006, 16(3): 372-377.

[16] 唐莉华. 基于地貌特征的流域水—沙—污染物耦合模型及其应用[D]. 北京:清华大学, 2008.

[17] 杨红薇, 张建强, 唐家良, 等. 紫色土坡地不同种植模式下水土和养分流失动态特征[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(3): 615-619.

[18] Kinnell P I A, Risse L M. USLE-M: Empirical modeling rainfall erosion through runoff and sediment concentration[J]. Soil Science Society of America Journal, 1998, 62(6): 1667-1672.

[19] Osenberg C W, Sarnelle O, Cooper S D, et al. Resolving ecological questions through meta-analysis: goals, metrics, and models[J]. Ecology, 1999, 80(4): 1105-1117.

~~~~~

(上接第 17 页)

[13] 安晓娟, 李萍, 戴伟, 等. 亚热带几种林分类型土壤有机碳变化特征及与土壤性质的关系[J]. 中国农学通报, 2012, 28(22): 53-58.

[14] 谢涛, 王明慧, 郑阿宝, 等. 苏北沿海不同林龄杨树林土壤活性有机碳特征[J]. 生态学杂志, 2012, 31(1): 51-58.

[15] 马和平, 郭其强, 刘合满. 西藏色季拉山土壤微生物量碳和易氧化态碳沿海拔梯度的变化[J]. 水土保持学报, 2012, 2(4): 163-171.

[16] 刘荣杰, 吴亚丛, 张英, 等. 中国北亚热带天然次生林与杉木人工林土壤活性有机碳库的比较[J]. 植物生态学报, 2012, 36(5): 431-437.

[17] 朱志建, 姜培坤, 徐秋芳. 不同森林植被下土壤微生物量碳和易氧化态碳的比较[J]. 林业科学研究, 2006, 19(4): 523-526.

[18] Haynes R J, Francis G S. Changes in microbial biomass C, soil carbohydrate composition and aggregate stability induced by growth of selected crop and forage species under field conditions[J]. Soil Science, 1993, 44(4): 665-675.

[19] 周焱, 徐宪根, 王丰, 等. 武夷山不同海拔梯度土壤微生物生物量、微生物呼吸及其商值( $qMB$ ,  $qCO_2$ ) [J]. 生态学杂志, 2009, 28(2): 265-269.

[20] Tripathi S K, Sumida A, Shibata H, et al. Leaf litter fall and decomposition of different above and below-ground parts of birch (*Betula ermanii*) trees and dwarf bamboo (*Sasa kurilensis*) shrubs in a young secondary forest in Northern Japan[J]. Biology and Fertility of Soils, 2006, 43(2): 237-246.

[21] Dong N, Wang S L, Ouyang Z Y. Comparisons of carbon storages in *Cunninghamia lanceolata* and *Michelia macclurei* plantations during a 22-year period in southern China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, 21(6): 801-805.

[22] 李平, 王国兵, 郑阿宝, 等. 苏南丘陵区 4 种典型人工林土壤活性有机碳分布特征[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2012, 36(4): 79-83.