

等高反坡阶对昆明市松华坝水源区坡耕地氮、磷流失的影响

王帅兵¹, 王克勤^{1,2}, 宋娅丽², 陈雪², 王震²

(1. 东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040; 2. 西南林业大学生态与水土保持学院, 昆明 650224)

摘要: 选取昆明市松华坝水源区典型小流域——迤者小流域为试验区, 通过布设标准径流小区, 在2009—2015年对坡耕地产流产沙及氮、磷流失情况进行长期的野外观测研究, 从年际尺度上来探讨等高反坡阶对于坡耕地产流产沙及氮、磷等养分流失的影响。结果表明: 等高反坡阶对于径流和泥沙的削减效果均较为明显, 年平均减流率为50.64%, 年平均减沙率74.99%, 减沙率显著大于减流率; 等高反坡阶对于径流和泥沙中氮、磷均有较为明显的削减效果, 平均每年可以削减68.75%的氮流失和82.16%的磷流失, 其中对径流中总氮和泥沙中全氮年削减率分别达到59.51%和76.43%, 对径流中总磷和泥沙中全磷年削减率分别达到64.22%和83.73%。

关键词: 等高反坡阶; 坡耕地; 产流产沙; 氮、磷流失; 削减率

中图分类号: S157.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)06-0039-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.06.007

Effects of Contour Reverse-slope Terrace on Nitrogen and Phosphorus Loss in Sloping Farmland in the Water Resource Area of Songhua Dam in Kunming City

WANG Shuaibing¹, WANG Keqin^{1,2}, SONG Yali², CHEN Xue², WANG Zhen²

(1. Forestry College, Northeast Forestry University, Harbin 150040;

2. College of Ecological and Soil & Water Conservation, Southwest Forestry University, Kunming 650224)

Abstract: To study the influence of contour reverse-slope terrace on runoff and sediment production, nitrogen and phosphorus loss in sloping farmland, the loss of runoff, sediment, nitrogen and phosphorus of sloping farmland were monitored from 2009 to 2015 through conducting the standard runoff plots in a typical Yizhe small watershed in Water Source Area of Songhua Dam in Kunming City. The results showed that the reduction effect of contour reverse-slope terrace on runoff and sediment was significant, the annual average reduction rate of runoff was 50.64% and the annual average reduction rate of sediment was 74.99%, the latter was significantly greater than the former. The reduction effect of contour reverse-slope terrace on nitrogen, phosphorus in runoff and sediment was significant, it reduced 68.75% of nitrogen loss and 82.16% of phosphorus loss every year, the annual reduction rates of total nitrogen in runoff and in sediment were 59.51% and 76.43% respectively, and the values for total phosphorus were 64.22% and 83.73%, respectively.

Keywords: contour reverse-slope terrace; sloping farmland; runoff and sediment production; nitrogen and phosphorus loss; reduction effectiveness

松华坝水源区是昆明市最重要的饮用水源地, 区内居民人口密度相对较大, 经济收入以种植业为主, 坡耕地占有耕地的70%以上。坡耕地水土流失严重, 一方面导致土壤肥力下降, 另一方面氮、磷等养分随地表径流流出农田汇入各种水体, 引起水体的富营养化和污染^[1]。通过在坡耕地中布设合理的措施以减少坡耕地水土流失和面源污染, 可以在不影响当地居民经济发展的同时又很好的解决农业面源污染问题。

坡耕地中氮流失的途径主要包括随径流流失、随泥沙流失和壤中流流失^[2-3], 而磷素易被泥沙细颗粒

吸附从而泥沙成为坡耕地磷素养分流失的主要载体^[4], 因此拦截径流和泥沙是减少坡耕地面源污染的主要途径。目前国内外控制坡耕地水土流失及面源污染的措施主要集中于植草带、植物篱、反坡水平阶以及耕作措施等, 不同水土保持措施可以削减地表径流25%~70%, 减少泥沙流失40%~80.7%^[1,5-9], 进而减少TN和TP流失10%~70%^[1,6]。除此之外, 等高反坡阶作为坡耕地水土保持控制措施之一, 保水保土效果显著, 目前研究主要开展其对坡耕地土壤水分^[10]、土壤侵蚀^[8]、土壤理化性状^[11]及植被恢复的影

收稿日期: 2017-06-24

资助项目: 国家自然科学基金项目(30660037)

第一作者: 王帅兵(1986—), 男, 汉族, 河南偃师人, 博士研究生, 主要从事小流域面源污染控制及水土保持研究。E-mail: wsbl257@163.com

通信作者: 王克勤(1964—), 男, 汉族, 甘肃庄浪人, 博导, 教授, 主要从事小流域环境综合治理的理论与技术研究。E-mail: wangkeqin7389@sina.com

响^[12],但通过长期监测来研究等高反坡阶对小流域坡耕地氮磷流失的报道较少。

因此,本研究针对松华坝水库水源区流域农业非点源污染状况,在松华坝水库水源区遴选一个典型农业小流域——迳者小流域,通过布设标准径流小区对原状坡耕地和布设等高反坡阶坡耕地水土及氮、磷流失进行长期的野外观测研究(2009—2015 年),在年际尺度上研究等高反坡阶对坡耕地径流、泥沙及氮、磷养分流失的影响,以期为源头控制山区水土流失和农业面源污染提供科学依据和技术支撑。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于中国西南部的云南省昆明市松华坝水库源区迳者小流域(24°14′43″—25°12′48″N, 102°48′37″—102°44′51″E),流域面积 13.26 km²,呈不规则纺锤形,南北长约 6.7 km,海拔在 2 010~2 590 m。多年平均降雨量 757.2 mm,其中 5—10 月为雨季,降雨量约占全年的 85%以上,年蒸发量 1 341 mm,年均气温 13.8℃。该流域为松华坝水源区内典型的农业小流域,土壤为红壤,流域内耕地面积约占 25%,主要以坡耕地为主,林地约占 66%,以灌木林和疏林地为主。流域内主要农作物包括烤烟(*Nicotiana tabacum* Linn.)、玉米(*Zea mays* L.)、大豆(*Glycine max* (Linn.) Merr.)、马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)等,主要树种包括云南松(*Pinus yunnanensis* Franch.)、滇青冈(*Cyclobalanopsis glaucoides* Schotky)、滇石栎(*Lithocarpus dealbatus* (Hook. f. et Thoms.) Rehd.)、厚皮香(*Ternstroemia gymnanthera* (Wight et Arn.) Beddome)、杜鹃(*Rhododendron simsii* Planch.)等。

1.2 研究方法

1.2.1 试验布设 试验地选取位于昆明市松华坝水

源区迳者小流域水土保持监测站中最具有代表性的 2 块 15°坡耕地标准径流小区,始建于 2006 年,分别编号为 1#、2#小区,均位于同一坡面上,东西坡向,中坡位,海拔 2 067 m,其中 1#小区为原状坡耕地,2#小区布设两道等高反坡阶(图 1、图 2)。等高反坡阶沿等高线自上而下里切外垫,修成一台面,反坡 5°,阶宽 1.2 m,两条等高反坡阶之间距离为 7.5 m。径流小区下部设集流池,收集降雨后产生的径流和泥沙。

每年雨季前重新对等高反坡阶进行整修,用 5 点采样法分别采集两个径流小区表层(0—20 cm)土壤调查土壤养分的背景值见表 1。

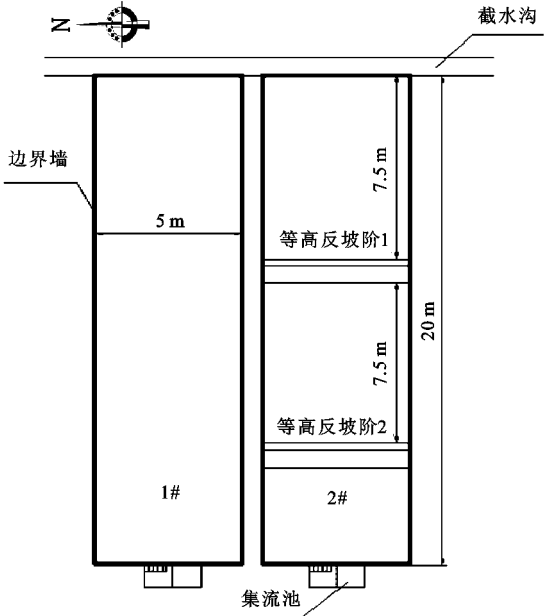


图 1 标准径流小区平面示意

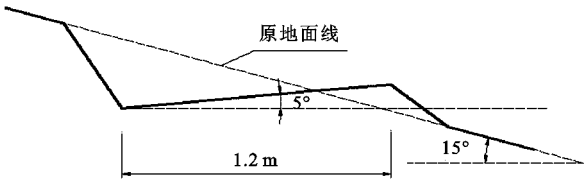


图 2 等高反坡阶剖面示意

表 1 径流小区土壤背景值

年份 (年)	容重/(g·cm ⁻³)		有机质/(g·kg ⁻¹)		全氮/(g·kg ⁻¹)		全磷/(g·kg ⁻¹)		水解氮/(mg·kg ⁻¹)		速效磷/(mg·kg ⁻¹)	
	1#小区	2#小区	1#小区	2#小区	1#小区	2#小区	1#小区	2#小区	1#小区	2#小区	1#小区	2#小区
2009	1.49	1.51	5.69	5.58	0.92	0.94	0.35	0.32	122.86	120.95	64.79	62.38
2010	1.42	1.44	5.70	5.49	0.95	0.96	0.28	0.29	121.41	124.22	67.66	64.13
2011	1.45	1.46	5.53	5.61	1.03	0.97	0.31	0.27	128.13	127.82	59.17	62.43
2012	1.45	1.48	5.48	5.36	0.94	0.93	0.30	0.27	119.52	124.65	60.35	59.62
2013	1.39	1.44	5.45	5.33	1.01	0.99	0.26	0.28	112.13	118.69	64.51	61.59
2014	1.41	1.47	5.51	5.42	0.95	0.96	0.29	0.31	121.56	119.23	61.62	64.19
2015	1.42	1.43	5.39	5.38	1.00	0.98	0.34	0.32	109.58	117.21	58.44	60.02

2009—2015 年 2 块标准径流小区种植作物种类一致,管理措施同步,作物播种及收割时间、施肥水平均保持一致。主要施肥种类包括:尿素、松华坝水源保护区测土施肥专用肥(总肥力≥32%,N:P₂O₅:K₂O 为 10:10:12)、过磷酸钙(有效 P₂O₅≥16%)、烟草

专用复混肥(N:P₂O₅:K₂O 为 12:6:24)、烤烟提苗肥(N:P₂O₅:K₂O 为 28:0:5)等,均换算为纯 N、纯 P 量(表 2)。

1.2.2 试验观测与计算 使用自记雨量计(型号 RG2—M,美国)记录降雨过程,用人工雨量计观测的

次降雨量进行校对。

降雨结束后立即量出径流池内的泥水总量,取样测定含沙量,得出单次降雨后径流小区地表径流量和土壤流失量,径流中总氮、硝态氮、铵态氮和总磷含量在取样后 24 h 内测定,径流有机态氮用总氮减去铵态氮和硝态氮得出。泥沙中全氮、水解性氮、全磷、速

效磷含量在风干后年底统一测定,测定方法均采用国家标准规定的分析方法,泥沙中有机氮用土壤全氮减去水解性氮得出。通过单场降雨径流量、土壤流失量和其中的各形态氮、磷含量估算各场降雨中径流和泥沙中氮、磷流失量,汇总各场降雨进而算出年度内氮、磷的流失量。

表 2 2009—2015 年径流小区种植及施肥情况

年份(年)	种植作物	种植密度/(株·100 m ⁻²)		植被覆盖度		施肥中含 N 量/ (kg·hm ⁻²)	施肥中含 P 量/ (kg·hm ⁻²)
		1#小区	2#小区	1#小区	2#小区		
2009	烤烟	144	126	58	55	135	61.2
2010	烤烟	144	126	54	52	135	61.2
2011	玉米	420	360	67	64	214	110
2012	玉米	420	360	71	65	214	110
2013	玉米	420	360	68	61	214	110
2014	玉米	420	360	69	66	214	110
2015	玉米	420	360	72	70	214	110

取日降雨量≥10 mm 为侵蚀性降雨标准^[13-14],用次降雨量与最大 10 min 雨强的乘积计算次降雨侵蚀力,汇总年内各场降雨进而计算年度降雨侵蚀力^[13]。根据降雨量距平百分率来划分旱情^[15]。

在本研究中,为了定量分析等高反坡阶对坡耕地水土流失面源污染的控制效果,分别引入减流率(C_R)、减沙率(C_S)、N 削减率(C_N)和 P 削减率(C_P)等概念,具体计算公式为:

$$C_R=\frac{R_r-R_c}{R_r} \tag{1}$$

$$C_S=\frac{S_r-S_c}{S_r} \tag{2}$$

$$C_N=\frac{N_r-N_c}{N_r} \tag{3}$$

$$C_P=\frac{P_r-P_c}{P_r} \tag{4}$$

式中: C_R 和 C_S 分别表示等高反坡阶的减流率和减沙率(%); R_c 和 R_r 分别表示等高反坡阶处理坡耕地和原状坡耕地的产流量(mm); S_c 和 S_r 分别表示等高反坡阶处理坡耕地和原状坡耕地的产沙量(t/km²); C_N 和 C_P 分别表示等高反坡阶对氮素和磷素的削减率(%); N_c 和 N_r 分别表示等高反坡阶处理坡耕地和原状坡耕地中磷素输出量(包

括径流、泥沙中各个形态的磷素)(kg/km²); P_c 和 P_r 分别表示等高反坡阶处理坡耕地和原状坡耕地中磷素输出量(包括径流、泥沙中各个形态的磷素)(kg/km²)。

利用 Excel 2010 进行数据处理,利用 SPSS 16.0 进行方差分析和相关性分析,利用灰色关联分析法^[16]来分析降雨指标对等高反坡阶减流率 C_R 、减沙率 C_S 、氮削减率 C_N 和磷削减率 C_P 的关联程度。

2 结果与分析

2.1 降雨量和降雨侵蚀力年际变化特征

根据 2009—2015 年降雨量观测结果(表 3),7 年间平均降雨量为 605.5 mm,降雨主要集中在 5—10 月,5—10 月降雨量占全年降雨量的 88.22%~96.65%,年内降雨量严重分布不均,雨季降雨过分集中易导致雨季的严重水土流失和旱季的干旱。试验区实测多年平均降雨量为 757.2 mm,2009—2015 年降雨量均偏小,根据降雨量距平百分率划分旱情,2012 年、2014 年均属于轻度干旱年,2011 年属于严重干旱。2009—2015 年降雨侵蚀力为 797.89~2 062.39 (MJ·mm)/(hm²·h·a),年降雨侵蚀力与降雨量之间相关系数为 0.869* ($P<0.05$),相关关系显著。

表 3 2009—2015 年降雨量、降雨侵蚀力

年份 (年)	降雨量/mm												年降 雨量/mm	距平百分 率/%	降雨侵蚀力/ (MJ·mm·hm ⁻² ·h ⁻¹ ·a ⁻¹)
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月			
2009	6.4	0.2	9.2	25.6	58.6	172.0	179.4	137.0	72.4	7.4	21.8	0.0	690.0	-8.87	2062.39
2010	0.8	0.2	0.8	6.2	19.6	111.8	107.4	157.6	81.2	121.2	21.4	22.4	650.6	-14.08	1649.18
2011	2.4	3.2	6.6	8.2	24.6	86.0	100.0	66.8	124.2	10.6	6.2	0.4	439.2	-42.00	797.89
2012	3.0	3.6	5.8	7.8	34.4	105.2	155.4	102.8	114.8	15.0	6.0	2.8	556.6	-26.49	1018.62
2013	2.2	3.4	4.6	8.2	113.4	126.0	99.2	148.8	50.3	87.0	5.2	4.6	652.9	-13.77	1258.45
2014	2.8	0.4	3.2	9.6	34.3	83.3	194.0	87.2	118.1	14.4	0.6	1.8	549.7	-27.40	1368.67
2015	0.0	2.4	9.8	39.2	37.4	151.4	140.4	141.0	38.4	108.4	23.2	7.8	699.4	-7.63	1805.21
平均	2.3	1.9	5.4	13.6	40.9	105.2	122.9	106.2	76.1	46.8	11.9	6.5	605.5	-20.04	1422.92

2.2 等高反坡阶对坡耕地产流产沙的影响

对 2009—2015 年等高反坡阶减流率与减沙率进行分析(表 4),等高反坡阶处理的年地表径流深相比原状坡面减少 50.64%±23.69%,年土壤流失量减少 74.99%±10.68%,且方差分析结果表明,2 个小区的径流量和泥沙量均存在极显著差异($P<0.01$),说明等高反坡阶对坡耕地径流、泥沙调控和拦截作用显著,且等高反坡阶对泥沙的削减效果要好于径流。

年降雨量与等高反坡阶减流率、减沙率之间相关系数分别为 0.735,0.572,年降雨侵蚀力与等高反坡阶减流率、减沙率之间相关系数分别为 0.667,0.846* ($P<0.05$),表明年降雨侵蚀力与等高反坡阶减沙率之间具有显著相关性,而年降雨侵蚀力与减流

率、年降雨量与等高反坡阶减流率和减沙率之间相关关系均较弱。相比之下,年降雨量与等高反坡阶减流率之间相关性更强,而年降雨侵蚀力与减沙率之间相关关系更强。

2009—2015 年试验区年降雨量、年降雨侵蚀力、径流量、土壤流失量年变异系数呈现土壤流失量>径流量>降雨侵蚀力>降雨量(表 5),这说明坡耕地水土流失存在变异系数的放大效应,降雨是导致水土流失的根本因素,是导致坡耕地径流产生的前提,径流又导致土壤流失,因此降雨量的变异系数通过径流流失和土壤流失而被逐级放大。而降雨侵蚀力变异系数大于降雨量变异系数,主要原因是降雨侵蚀力不但跟降雨量有关,也受降雨强度影响。

表 4 2009—2015 年等高反坡阶减流率与减沙率

年份 (年)	总径流深/mm		减流率/ %	土壤流失量/(t·km ⁻²)		减沙率/ %
	原状坡耕地	等高反坡阶处理坡耕地		原状坡耕地	等高反坡阶处理坡耕地	
2009	210.45	54.03	74.33	916.10	181.42	80.20
2010	96.80	49.68	48.68	679.20	160.80	76.33
2011	78.74	53.28	32.33	373.42	115.73	69.01
2012	122.50	69.81	43.01	1150.50	343.10	70.18
2013	130.75	86.15	34.11	882.65	126.50	85.67
2014	168.32	115.68	31.27	1023.25	288.84	71.77
2015	160.84	49.39	69.29	930.88	273.16	70.66
平均	138.34	68.29	50.64±23.69	850.86	212.79	74.99±10.68

表 5 2009—2015 年降雨量、径流量、土壤流失量年变异系数计算

项目	降雨量	年降雨侵蚀力	径流量	土壤流失量
原状坡耕地年变异系数	0.156	0.313	0.326	0.364
等高反坡阶处理坡耕地年变异系数			0.396	0.416

2.3 等高反坡阶对坡耕地氮流失的影响

2.3.1 等高反坡阶对坡耕地随径流流失氮素的影响

等高反坡阶对坡耕地径流中总氮、铵态氮、硝态氮和有机态氮均有显著的的削减作用,如图 3 所示,削减率分别达到 59.51%±11.96%,46.95%±9.52%,75.64%±11.46%,45.72%±28.17%。等高反坡阶对硝态氮削减率比减流率高 49.36%,对铵态氮削减率比减流率低 7.28%,说明等高反坡阶处理坡耕地径流中硝态氮的流失浓度小于原状坡耕地,铵态氮的流失浓度高于原状坡耕地。原状坡耕地中,径流有机态氮、硝态氮、铵态氮分别占随径流流失氮素的 42.95%±20.35%,38.88%±11.58%和 18.16%±6.68%;等高反坡阶处理坡耕地中,径流有机态氮、硝态氮、铵态氮分别占随径流流失氮素的 53.52%±19.54%,21.78%±12.62%和 24.70%±12.28%。这说明有机态氮和硝态氮是随径流流失氮素的主要存在形式,铵态氮所占比例则较少。

2.3.2 等高反坡阶对坡耕地随泥沙流失氮素的影响

等高反坡阶对坡耕地泥沙中全氮、有机氮和水解性氮的削减效果均比较明显。从图 4 可以看出,削减率分别

达到 76.43%±12.61%,76.10%±13.01%和 79.47%±9.23%。原状坡耕地和等高反坡阶处理坡耕地中,水解性氮仅占 9.86%±3.72%和 8.59%±2.10%,说明随泥沙流失的氮素以有机态氮为主。根据上述研究,原状坡耕地和等高反坡阶处理坡耕地中随径流流失氮素占分别占氮素总流失量的 49.05%±17.93%和 41.61%±16.85%,随泥沙流失氮素占分别占氮素总流失量的 50.95%±17.93%和 58.39%±16.85%,这说明在坡耕地中径流和泥沙均为氮素的流失的主要途径。

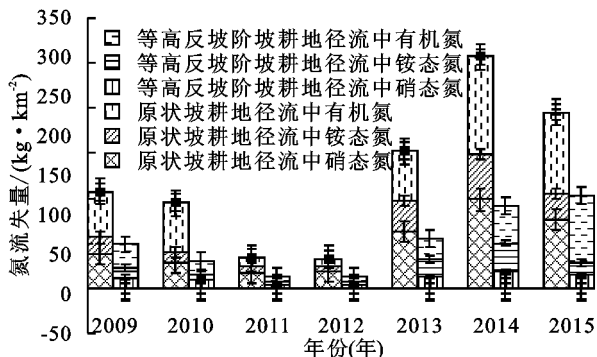


图 3 2009—2015 年坡耕地径流中各形态氮素流失

综上,等高反坡阶对径流和泥沙中氮的总削减

率达到68.75%±9.72%，且对泥沙中全氮的削减率(76.43%±12.61%)比对径流中总氮的削减率(59.51%±11.96%)大28.43%。

2.4 等高反坡阶对坡耕地磷素流失的影响

等高反坡阶对径流中总磷、泥沙中全磷和速效磷的削减效果均十分显著。从表6可以看出,削减率分别达到64.22%±19.31%,83.73%±6.37%,84.04%±4.36%,而对径流和泥沙中磷的总削减率达到82.16%±7.65%。等高反坡阶对随泥沙流失全磷、速效磷的削减效果要明显优于径流中总磷。等高反坡阶对径流中总磷削减率比减流率大26.82%,对泥沙中全磷、速效磷的削减率比减沙率大11.65%和12.07%,表明等高反坡阶对于径流中总磷和泥沙中全磷、速效磷的浓度均有一定的削减作用。原状坡耕地和等高反坡阶处理坡耕地中随径流流失的全磷占磷素总流失量的8.06%±7.81%和16.16%±16.12%,

随泥沙流失的全磷占磷素总流失量的91.94%±7.81%和83.84%±16.12%,表明磷主要以泥沙结合态磷的形式流失。综上,等高反坡阶对磷的总削减率(82.16%±7.65%)总体上要高于对氮的总削减率(68.75%±9.72%)。

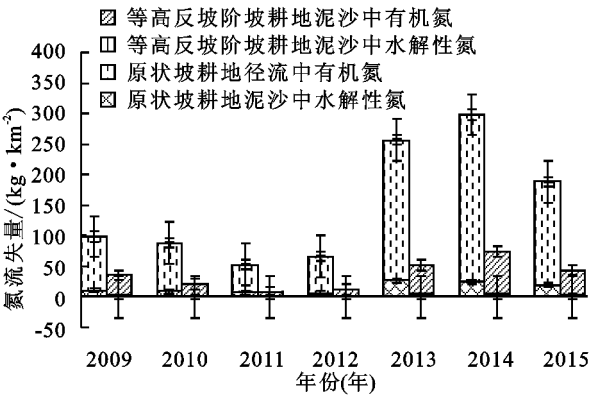


图4 2009—2015年坡耕地泥沙中各形态氮素流失

表6 2009—2015年径流、泥沙中磷流失量

年份 (年)	径流中总磷流失量/ (kg·km ⁻²)		削减率/%	泥沙中全磷流失量/ (kg·km ⁻²)		削减率/%	泥沙中速效磷流失量/ (kg·km ⁻²)		削减率/%
	原状坡	等高反坡		原状坡	等高反坡		原状坡	等高反坡	
	耕地	阶坡耕地		耕地	阶坡耕地		耕地	阶坡耕地	
2009	5.97	1.65	72.36	103.85	20.08	80.66	48.36	6.97	85.59
2010	7.03	1.53	78.24	99.31	14.68	85.22	50.12	7.28	85.47
2011	2.55	0.42	83.53	55.86	5.53	90.10	19.86	2.65	86.66
2012	8.76	1.47	83.22	76.77	9.12	88.12	22.83	3.07	86.55
2013	20.72	9.47	54.30	109.82	19.87	81.91	60.91	12.38	79.67
2014	14	6.31	54.93	185.69	35.26	81.01	96.16	14.62	84.80
2015	10.45	4.01	61.63	161.19	24.43	84.84	68.29	11.53	83.12
平均	9.93	3.55	64.22±19.31	113.21	18.42	83.73±6.37	52.36	8.36	84.04±4.36

2.5 降雨对等高反坡阶削减效果的灰色关联分析

采用灰色关联分析方法分析降雨量、降雨侵蚀力等因素对等高反坡阶减流率、减沙率、氮削减率和磷削减率的关联程度,计算结果见表7。

等高反坡阶减流率与年降雨量关联程度更大,而减沙率与年降雨侵蚀力关联程度更大,且关联度值均在0.7以上。说明等高反坡阶减流效益与减沙效益与年降雨量、年降雨侵蚀力关联程度均较大,相比之下减流效益受降雨量影响更大,而减沙效益受降雨侵

蚀力影响更大。等高反坡阶对总流失氮、径流中氮和径流中磷的削减效益与降雨量关联程度更大,而其对泥沙中氮、总流失磷、泥沙中磷的削减效益与降雨侵蚀力关联程度更大,且关联度值均在0.6以上。这表明等高反坡阶对氮、磷的削减效益与年降雨量、年降雨侵蚀力关联程度均较大,而相比之下等高反坡阶对总流失氮、径流中氮和径流中磷的削减效益受降雨量影响更大,而对泥沙中氮、总流失磷、泥沙中磷的削减效益受降雨侵蚀力影响更大。

表7 降雨与等高反坡阶削减效益灰色关联度值

指标	减流率	减沙率	氮削减率			磷削减率		
			总流失氮	径流中氮	泥沙中氮	总流失氮	径流中氮	泥沙中氮
年降雨量/mm	0.8643	0.8226	0.8233	0.8465	0.8126	0.8012	0.8104	0.7952
年降雨侵蚀力/ (MJ·mm·hm ⁻² ·h ⁻¹ ·a ⁻¹)	0.7115	0.8651	0.7246	0.6148	0.8438	0.8126	0.7094	0.8133

3 讨论

等高反坡阶对坡耕地水土流失量及氮、磷具有削减作用,其机理在于对径流的再分配,而径流是水土流失及氮、磷等养分流失的源动力。当降雨较小时,

等高反坡阶上部产生的径流可以全部拦蓄在等高反坡阶内,经入渗后进入土壤;当降雨量较大时,形成的径流量需大于等高反坡阶拦蓄容量及入渗量,方才流入阶下坡面。本研究中等高反坡阶对于坡耕地径流

削减率可达到 $50.64\% \pm 23.69\%$ 。等高反坡阶对泥沙的削减作用主要是通过减少地表径流产流量以及减小径流动能来实现的,径流动能减少对于泥沙的控制尤为显著,使等高反坡阶对泥沙的削减效果达到 $74.99\% \pm 10.68\%$,明显高于径流削减率。此外,由于等高反坡阶减缓径流流速,使径流对吸附于土壤颗粒表面的可溶性养分浸取时间延长,同时流速的减缓会增加部分溶解态养分向渗入土壤,进而影响径流、泥沙中各形态氮、磷的浓度,从而削减 $68.75\% \pm 9.72\%$ 的氮流失和 $82.16\% \pm 7.65\%$ 的磷流失。

本文采用年度尺度来研究变异系数,土壤流失量变异系数 > 径流量变异系数 > 降雨侵蚀力变异系数 > 降雨量变异系数。王萍等^[8]在研究年度内次降雨条件下的研究也得出同样结论,说明坡耕地降雨量、径流量和土壤流失量变异系数的放大效应不但适用于次降雨尺度,在年降雨尺度下也同样适用。另外,原状坡耕地的径流量、土壤流失量年变异系数普遍小于等高反坡阶处理坡耕地,说明在以年为单位计算径流量和土壤流失量时,原状坡耕地由于水土流失过程相对较简单,因此变异系数更小,布设等高反坡阶坡耕地水土流失过程更复杂,因此变异系数更大。

本研究中等高反坡阶对硝态氮削减率比减流率高 49.36% ,对铵态氮削减率比减流率低 7.28% ,等高反坡阶处理坡耕地径流中硝态氮的流失浓度小于原状坡耕地,铵态氮的流失浓度大于原状坡耕地,这主要是因为等高反坡阶能有效减缓径流流速,促使吸附于土壤颗粒表面的铵态氮向径流扩散,使径流中铵态氮浓度升高;同时使径流流速减缓使硝态氮随更容易进入壤中流,导致径流中硝态氮浓度降低。Tan 等^[17]和郑海金^[18]等的研究均认为,硝态氮很容易从作物根部淋洗而进入壤中流;张兴昌^[19]的研究表明,与传统耕作方式对比,水平沟耕作使径流中铵态氮浓度提高 19% ,使径流中硝态氮浓度下降 27% ,这与本文的研究结果一致,说明等高反坡阶可以通过拦截径流减和缓流速提高径流中铵态氮浓度并降低硝态氮浓度。同时,等高反坡阶对泥沙中水解性氮的削减效果优于全氮、有机氮,等高反坡阶坡耕地中水解性氮所占比例小于原状坡耕地,这可能是由于等高反坡阶能够促进水解性氮进入下层土壤。等高反坡阶处理坡耕地中随泥沙流失磷素所占比例比原状坡耕地低 8.10% ,说明等高反坡阶对随泥沙流失磷素的削减效果要优于随径流流失磷素。

灰色关联分析法是通过灰色关联度来分析和确定系统因素间的影响程度或因素对系统主行为的贡献测度的一种方法^[16]。本研究采用灰色关联分析法对降雨

量、降雨侵蚀力等因素对等高反坡阶减流率、减沙率、氮削减率和磷削减率的关联程度进行了分析,发现等高反坡阶减流效益及其对总流失氮、径流中氮和径流中磷的削减效益受降雨量影响更大,而等高反坡阶减沙效益及其对泥沙中氮、总流失磷、泥沙中磷的削减效益受降雨侵蚀力影响更大。在今后的研究中,需要对次降雨条件下降雨量、降雨强度和降雨侵蚀力对等高反坡阶的减流减沙效益和削减氮、磷的效益做进一步详细分析,以探究影响等高反坡阶削减效益的最大因子。

本研究中等高反坡阶具有较好的减流减沙效益,且减沙效益要大于减流效益,这与袁希平等^[5]和王萍等^[8]的研究结果一致。等高反坡阶通过削减径流和泥沙流失,从而减少氮流失 68.75% ,减少磷流失 82.16% ,表明等高反坡阶对坡耕地氮、磷流失具有极其显著的削减作用。与等高反坡阶相比,植草带和植物篱对坡耕地氮、磷同样具有削减效果,但其配置复杂,还需占用 $30\% \sim 50\%$ 的耕种面积^[1,6-7];而等高反坡阶操作简便,占用耕种面积仅为 $12\% \sim 15\%$,在实现良好减流减沙及削减坡耕地氮、磷流失的同时对耕地的利用率更高;另外,秸秆覆盖减流减沙效益较好,但其对于径流和泥沙中氮的削减率仅为 27.4% 和 63.0% ^[9],远小于等高反坡阶的削减效率。坡耕地由于蓄水保墒能力差,常常导致季节性干旱,而等高反坡阶具有很好的保墒保水功能,能够调节坡耕地土壤水分分布,改善坡耕地土壤水分状况^[10],缓解坡耕地季节性干旱。因此,等高反坡阶不仅对坡耕地水土和氮磷流失的削减效果十分明显,而且具有操作简便、占用耕种面积小和改善坡耕地土壤水分状况等优点,同时兼顾农业生产,应在广大山区坡耕地中推广使用等高反坡阶,这对于控制和减少山区水土流失和农业面源污染输出具有重要意义。

4 结论

(1) 试验区 5—10 月降雨量占全年降雨量的 $88.22\% \sim 96.65\%$,年内降雨分布严重不均;年降雨侵蚀力与年降雨量之间关系具有较显著的相关关系。

(2) 与原状坡耕地相比,等高反坡阶对于径流和泥沙的削减效果较显著,减流率为 $50.64\% \pm 23.69\%$,减沙率 $74.99\% \pm 10.68\%$,且减沙率显著大于减流率。

(3) 在坡耕地中径流和泥沙均为氮素的流失的主要途径,而磷主要通过泥沙流失。等高反坡阶对于径流和泥沙中氮、磷均有比较明显的削减效果,平均每年可以削减 $68.75\% \pm 9.72\%$ 的氮流失和 $82.16\% \pm 7.65\%$ 的磷流失,其中对径流中总氮和泥沙中全氮削减率分别达到 $59.51\% \pm 11.96\%$ 和 $76.43\% \pm 12.61\%$,对径流中总磷和泥沙中全磷削减率分别达到 $64.22\% \pm 19.31\%$ 和 $83.73\% \pm 6.37\%$ 。

(4)相比之下,等高反坡阶减流效益及其对总流失氮、径流中氮和径流中磷的削减效益受降雨量影响更大,而等高反坡阶减沙效益及其对泥沙中氮、总流失磷、泥沙中磷的削减效益受降雨侵蚀力影响更大。

(5)等高反坡阶对坡耕地水土和氮磷流失的削减效果十分明显,且优点突出,应在广大山区大力推广,可以有效控制山区坡耕地水土流失和农业面源污染输出。

参考文献:

- [1] 王帅兵,王克勤,李秋芳,等. 植草带对红壤坡耕地面源污染物输出的削减效果[J]. 水土保持通报,2013,33(1):1-7.
- [2] Zhang M, Lin Y, Zhao M, et al. Integration of urea deep placement and organic addition for improving yield and soil properties and decreasing N loss in paddy field[J]. Agriculture Ecosystems & Environment,2017,247(7):236-245.
- [3] Giménez C, Stéckle C, Suárez-Rey E M, et al. Crop yields and N losses tradeoffs in a garlic-wheat rotation in southern Spain[J]. European Journal of Agronomy,2016,73(2):160-169.
- [4] 杜祥运,梁永哲,夏振尧,等. 碎石土坡地不同植被配置下的养分流失途径[J]. 水土保持学报,2017,31(1):61-67.
- [5] 袁希平,雷廷武. 水土保持措施及其减水减沙效益分析[J]. 农业工程学报,2004,20(2):297-300.
- [6] Eghball B, Gilley J E, Kramer L A, et al. Narrow grass hedge effects on phosphorus and nitrogen in runoff following manure and fertilizer application[J]. Soil Water Conservation,2000,55(2):172-176.
- [7] 袁久芹,梁音,曹龙熹,等. 红壤坡耕地不同植物篱配置模式减流减沙效益对比[J]. 土壤,2015,47(2):400-407.
- [8] 王萍,王克勤,李太兴,等. 反坡水平阶对坡耕地径流和泥沙的调控作用[J]. 应用生态学报,2011,22(5):1261-1267.
- [9] 张亚丽,张兴昌,邵明安,等. 秸秆覆盖对黄土坡面矿物质氮素径流流失的影响[J]. 水土保持学报,2004,18(1):85-88.
- [10] 武军,王克勤,华锦欣. 松华坝水源区等高反坡阶对坡耕地雨季土壤水分空间分布的影响[J]. 水土保持通报,2016,36(1):57-60.
- [11] 冯天骄,王伟,陈利顶. 陇中黄土区坡面整地和植被类型对土壤化学性状的影响[J]. 生态学报,2016,36(11):3216-3225.
- [12] 华锦欣,王克勤,张香群,等. 等高反坡阶对松华坝水源区弃荒坡地植被恢复的初期影响[J]. 西南林业大学学报,2016,36(3):116-120.
- [13] 谢云,章文波,刘宝元. 用日雨量和雨强计算降雨侵蚀力[J]. 水土保持通报,2001,21(5):53-56.
- [14] 刘斌涛,陶和平,宋春风,等. 我国西南山区降雨侵蚀力时空变化趋势研究[J]. 地球科学进展,2012,27(5):499-509.
- [15] 中华人民共和国水利部. 中华人民共和国水利行业标准旱情等级标准(SL 424—2008)[S]. 北京:中国水利水电出版社,2009.
- [16] 任东风,尤静静,尤明英,等. 基于灰色理论与回归模型的土壤类型预测研究[J]. 土壤通报,2017,48(3):520-524.
- [17] Tan C S, Drury C F, Reynolds W D, et al. Water and nitrate loss through tiles under a clay loam soil in Ontario after 42 years of consistent fertilization and crop rotation[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment,2002,93(1/3):121-130.
- [18] 郑海金,胡建民,黄鹏飞,等. 红壤坡耕地地表径流与壤中流氮磷流失比较[J]. 水土保持学报,2014,28(6):41-45.
- [19] 张兴昌. 耕作及轮作对土壤氮素径流流失的影响[J]. 农业工程学报,2002,18(1):70-74.
- [13] 吴俊,樊剑波,何园球,等. 不同减量施肥条件下稻田田面水氮素动态变化及径流损失研究[J]. 生态环境学报,2012,21(9):1561-1566.
- [14] 郑小龙,吴家森,陈裴裴,等. 不同施肥与生物质炭配施对水稻田面水氮磷流失及产量的影响[J]. 水土保持学报,2013,27(4):39-48.
- [15] Li H, Hou J, Liu X M, et al. Combined determination of specific surface area and surface charge properties of charged particles from a single experiment[J]. Soil Science of America Journal,2011,75(6):2128-2135.
- [16] 李娟,李松昊,邬奇峰,等. 不同施肥处理对稻田氮素径流和渗漏损失的影响[J]. 水土保持学报,2016,30(5):23-28,33.
- [17] 纪雄辉,郑圣先,刘强,等. 施用有机肥对长江中游地区双季稻田磷素径流损失及水稻产量的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版),2006,32(3):283-287.
- [18] 金熠,梁新强,刘于,等. 增施有机肥对稻田田面水体磷素形态和径流流失量的影响[J]. 水土保持学报,2015,29(4):42-47.
- [19] Vadas P A. Distribution of phosphorus in manure slurry and its infiltration after application to soils[J]. Journal of Environmental Quality,2006,35(2):542-547.
- [20] 邓佳,胡梦坤,赵秀兰,等. 不同有机物料中的磷形态特征研究[J]. 环境科学,2015,36(3):1098-1104.
- [21] 石丽红,纪雄辉,李洪顺,等. 湖南双季稻田不同氮磷施用量的径流损失[J]. 中国农业气象,2010,31(4):551-557.

(上接第38页)