

等高反坡阶对坡耕地产流产沙和氮磷迁移的作用研究

唐佐芯¹, 王克勤¹, 李秋芳¹, 杨寿荣¹, 李太兴², 李宝荣²

(1. 西南林业大学 环境科学与工程学院, 昆明 650224; 2. 云南省玉溪市水利局, 云南 玉溪 653100)

摘 要:在云南抚仙湖尖山河典型小流域,建立标准径流场并挖设等高反坡阶,采用野外田间试验定点监测的方法,以烤烟坡耕地为研究对象,从水平和垂直两个方向研究 2007—2008 年氮磷的迁移特征。结果表明:(1) 等高反坡阶作用下,坡耕地径流控制率和土壤侵蚀控制率分别为 61.90% 和 77.40%,雨季地表径流产生次数减少 18 次,次降雨下径流控制率为 71.27%,土壤侵蚀控制率为 84.13%,等高反坡阶对土壤侵蚀量的控制效果较好;(2) 地表径流总氮、硝态氮和总磷迁移通量控制率分别为 51.04%,45.77% 和 57.40%,径流泥沙全氮迁移通量较原状坡面减少了 81.10%,碱解氮迁移通量较原状坡面减少了 90.93%,全磷迁移通量较原状坡面减少了 92.37%,速效磷迁移通量较原状坡面减少了 88.00%;(3) 坡面 0—110 cm 内壤中流总氮浓度与土壤深度之间无显著关系,阶面 0—200 cm 内总氮浓度与土壤深度有明显的关系,0—50 cm 等高反坡阶阶面总氮浓度明显增加,是原状坡面的 1.03~2.19 倍,壤中流总氮浓度在 0—50 cm 土层对等高反坡阶响应较高;等高反坡阶措施增加或者削减坡耕地氮磷含量,且在各土层深度间有差异。

关键词:氮磷; 迁移; 等高反坡阶; 面源污染

中图分类号:S157.2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2013)01-0001-08

Study on Contour Reverse-slope Terrace Controlling Soil and Water Loss and Nitrogen and Phosphorus Transfer in the Sloping Farmland

TANG Zuo-xin¹, WANG Ke-qin¹, LI Qiu-fang¹, YANG Shou-rong¹, LI Tai-xing², LI Bao-rong²

(1. Faculty of Environment Science and Engineering, Southwest Forestry University, Kunming 650024, China; 2. Yuxi Hydrological Bureau, Yuxi, Yunnan 653100, China)

Abstract: An experiment was conducted on a slope cropland in Jianshan River basin, a typical catchment in the area of Fuxian Lake, the contour reverse-slope terrace was built in the typical catchment area of the tobacco field. The dynamic characteristics of nitrogen/phosphorus horizontal and vertical transfer in the sloping farmland from 2007 to 2008 were monitored under the condition of natural rainfall. The results showed that: (1) under the function of the contour reverse-slope terrace, it clearly reduced about 61.9% of the surface runoff and decreased 77.4% of soil erosion rate, and the events of erosion were reduced by 18 events, in the single rainfall event, the runoff and soil erosion control rate was 71.27% and 84.13%, respectively, the latter one has better function; (2) the control rates of transfer flux of TN, NO₃⁻-N and TP in the runoff were 51.04%, 45.77% and 57.40%, respectively, the control rates of transfer flux in the runoff soil TN, hydrolysis N, TP and available P were 81.10%, 90.93%, 92.37% and 88.00%; (3) there was no difference between the TN concentration and the soil deep in the soil layer from 0 to 110 cm of sloping land, but it was different in the soil layer from 0 to 200 cm in the level terrace surface, the TN concentration increased in the soil layer from 0 to 50 cm in the level terrace surface, it was 1.03~2.19 times of sloping farmland, the total nitrogen concentration in the soil deep of 0—50 cm has a high reaction to the contour reverse-slope terrace; under the condition of different rainfall intensity and different fertilizer levels, there was difference between

收稿日期:2012-06-13

修回日期:2012-07-13

资助项目:国家自然科学基金项目“微区域集水系统控制云南山区农业面源污染”(30660037);西南林业大学水土保持与荒漠化防治重点学科

作者简介:唐佐芯(1988—),女,云南丽江人,硕士研究生,主要研究方向:恢复生态及面源污染控制理论和技术应用研究。E-mail: tang-zuo1029@126.com

通信作者:王克勤(1964—),男,甘肃省庄浪县人,博士,教授,主要从事小流域环境综合治理研究。E-mail: wangkeqin7389@sina.com

nitrogen and phosphorus transfer concentrations in the different soil layers, this measure can reduce or increase the transfer concentration.

Key words: nitrogen and phosphorus; transfer; contour reverse-slope terrace; source pollution

非点源污染已经成为我国地表水体的主要污染源,来自农田径流中的氮、磷是非点源污染和引起水体富营养化的主要元素^[1-2]。我国氮肥施用量最大,约占世界总量的30%,但利用率仅为30%~45%(当季),过量氮在土壤中累积,通过农田淋洗和径流进入环境,对水环境造成极大压力^[3]。当季作物对磷肥的利用率只有5%~15%,加上其后效至多25%,其余75%~95%的磷素却留在了土壤中^[4],长期和过量施用磷肥会导致“富磷”状态,从而加速磷素随水迁移的速率^[5]。

目前定量研究农田氮磷迁移特征多采用以下两种方法:① 选择有代表性的小流域,在河道上布设水质监测点,通过分析河道水质变化间接反映农田氮素迁移^[6-7]。② 建立人工控制的径流小区,这种方法又可细分为两种类型:一是利用人工降雨装置模拟自然降雨条件,其优点在于试验条件易于控制,便于研究不同地形特征和降雨条件对氮磷迁移的影响;二是在自然降雨条件下,进行长期野外原位试验^[8],由于其试验条件更接近真实环境,试验结果能更加准确地反映氮磷在自然降雨—径流驱动下的氮素迁移特征。氮磷的迁移在很大程度上受产流产沙的影响,目前小区试验多集中于分析不同土地利用对氮磷迁移的影响,坡面调控措施作用下的氮磷迁移研究鲜有报道。反坡阶是沿等高线里切外垫,修成一反坡台面,台面外高里低,以尽量蓄水,减少流失,反坡阶的设计计算类同梯田,如采用等高反坡阶,实际相当于窄式隔坡梯田,研究表明等高反坡阶在干旱地区及雨量充沛的云南山区均具有明显的水土保持功效^[9-11],本文旨在研究等高反坡阶作用下的坡耕地氮磷水平及垂直迁移特征。

1 研究区概况

抚仙湖位于云南省中部,是我国目前已探明的第二深水湖泊,也是云南省蓄水量最大的湖泊,抚仙湖目前尚属Ⅰ类水质(GB3838—2002)^[9]。尖山河是抚仙湖的一条主要入湖河流,其外源污染对抚仙湖的水质有直接影响。研究表明,农耕区地表径流及生活污水等面源污染占抚仙湖陆源氮、磷污染负荷的99.1%和98.5%,是主要的污染源^[10],且农耕区域多为坡耕地。田间试验布设在抚仙湖尖山河小流域,地处云南省澄江县西南部(24°32′00″—24°37′38″N,

102°47′21″—102°52′02″E);最高海拔在流域北部,为2 347.4 m,最低海拔在尖山河入抚仙湖的入口处,为1 722 m,相对高差625.4 m,属澄江三级阶地。流域内山高坡陡,河床落差较大,岩石风化严重,坡积层厚,且人为开垦的>25°的坡耕地较多,水土极易流失。尖山河小流域多年平均降雨量1 050 mm,雨季为5月下旬—10月下旬,降雨量占全年总降雨量的75%。小流域土地总面积35.42 km²,其中梯坪地面积177 hm²,坡耕地面积248 hm²,次生林1 346 hm²,人工林567 hm²,退耕还林地、灌木林及草地(总称灌木林草地)共1 063 hm²,其他土地类型142 hm²(其中河道等水体5.8 hm²,村庄道路等非生产用地40.7 hm²,难利用地94.5 hm²),坡耕地占总耕地面积的58.35%,且多种植烤烟。

2 试验材料与方法

2.1 试验布置

在小流域典型坡耕地建立标准径流小区,并在径流场中部和下部挖设等高反坡阶,水平阶规格为宽1.5 m,反向坡度为5°,以2007年无调控措施的原状坡地为对照;由于径流场内不能有过多的干扰,2008年在径流场左侧相同坡耕地设相同规格反坡阶,且在反坡阶和坡面埋设土壤取样管(Φ200 mm PVC管)和土壤水分取样管(多孔陶瓷杯),坡面土壤水分取样管的埋设深度分别为32,47,77,107 cm,阶面分别为32,47,77,107,137,166,200 cm,土壤取样管的深度分别为20,40,60,80 cm。施肥水平以当地农民习惯为参考,施纯N量为135 kg/hm²、纯磷61.2 kg/hm²,氮磷钾比例为1.0:0.5:2.5~3.0,烤烟品种为K326,由玉溪市烟草公司统一调入。试验区表土土壤理化性质:容重1.39 g/cm³、pH值4.93、有机质1.08%、TN 0.068%、TP 0.094%、水解氮68.17 mg/kg、速效磷350.97 mg/kg。

2.2 样品采集

每次降雨后在标准径流场取一次地表径流样品,将集流池内的泥沙与水样混匀,取1 000 ml径流样品,将样品4℃保存并在24 h内过滤后测定其中的总氮、硝态氮和氨氮含量;取3瓶500 ml径流样品用于泥沙含量测定;收集集流池沉淀泥沙风干后用于测定全氮和碱解氮含量;烤烟移栽前及收获后期以20 cm为一层采集坡面土壤取样管内0—80 cm的土壤样品,测定

其全氮和碱解氮含量;每半月左右从土壤水分取样管取一次土壤水,测定指标与径流一致。以上各个指标测定均做 3 组平行试验,取平均值。

2.3 测定方法

降雨过程中使用数字自记雨量计测定并计算每次的降雨量和降雨强度,径流量用体积法测定,泥沙含量用置换法测定。径流总氮用碱性过硫酸钾消解—紫外分光光度法测定;总磷用过硫酸钾消解—钼酸铵分光光度法测定;铵态氮用纳氏试剂比色法测定。径流泥沙全氮用凯氏蒸馏法测定;全磷用抗坏血酸还原比色法测定;碱解氮用碱解蒸馏法测定;速效磷用盐酸—氟化氨法测定。采用 SPSS 11.5 软件做相关分析,Excel 2003 软件绘制图表。

表 1 2007 年和 2008 年雨季产流产沙比较

处理	年降雨量/mm	雨季降雨量/mm	产流次数	径流深/mm	径流系数	地表径流量/(m ³ ·km ⁻²)	土壤流失量/(t·km ⁻²)
原状坡面	887.30	739.80	35	298.20	0.50	298200	3157.20
等高反坡阶处理	923.30	731.70	17	113.60	0.25	113640	714.70
变化率/%	4.10	-1.10	-51.40	-61.90	-50.00	-61.90	-77.40

由于年际间降雨差异,铺设草带与原状坡耕地地表径流量和土壤侵蚀量之间不能直接进行比较,故对 2007 年产流产沙与降雨径流等数据进行回归分析,得到回归方程,对 2008 年产流产沙数据进行预测。根据 2007 年降雨—径流数据,对降雨量(P)、最大 10 min 和 30 min 降雨强度(I_{10} 、 I_{30})与径流深(W)和土壤侵蚀量(S)之间的关系进行线性相关分析,径流深与降雨量、 I_{10} 、 I_{30} 的相关系数分别为 0.8 ($P=0.000$),0.518 ($P=0.000$),0.864 ($P=0.000$),土壤侵蚀量与降雨量、 I_{10} 、 I_{30} 和径流深的相关关系极显著,相关系数分别为 0.711 ($P=0.000$),0.742 ($P=0.000$),0.754 ($P=0.000$),0.798 ($P=0.000$),对径流深和各个因素进行偏相关分析,变量 I_{10} 被剔除(偏相关系数为 $-0.143\ 8$, $P=0.432>0.05$),并把降雨量和 I_{30} 引入线性回归方程(式 1),说明径流深与两者的关系及其显著;同理,偏相关分析得出径流深(W)和 I_{10} 与土壤侵蚀量之间显著相关,对其相关曲线比选,发现幂函数模型与之最适配,再根据前人的研究^[9,11]得出最适回归分析模型表达式(式 2)。

$$W=0.273P+0.549I_{30}-0.04$$
$$(R^2=0.807,n=35)$$

(1)

$$S=0.51W^{1.438}I_{10}^{1.14}$$
$$(R^2=0.855,n=35)$$

(2)

式中: W ——径流深(mm); S ——土壤侵蚀量[t/(km²·a)]; P ——降雨量(mm); I_{10} ——最大 10 min 雨强(mm/h); I_{30} ——最大 30 min 雨强(mm/h); n ——样本数。

3 结果与分析

3.1 试验地产流特征

2008 年标准径流场中部和底部挖设等高反坡阶,通过雨季监测发现,与 2007 年无反坡阶比较,雨季降雨量减少了 1.1%。无反坡阶标准径流场产流 35 次,等高反坡阶调控产流 17 次,减少了 51.4%,径流深减少了 61.9%,等高反坡阶调控大大减少了地表径流量,从无调控措施的 298 200 mm 减少到 113 640 mm,径流控制率为 61.9%,土壤流失量也随之减少,泥沙控制率高达 77.4%,等高反坡阶处理后径流控制率和泥沙控制率均较高,且泥沙控制效果更好(表 1)。

3.2 等高反坡阶削减坡耕地产流产沙的作用研究

2008 年雨季 16 场有效次降雨总降雨量为 407.7 mm,根据式(1)和式(2)计算得出相应降雨条件下原状坡面的径流深和土壤侵蚀量,原状坡面径流深为 292.14 mm,等高反坡阶作用下径流深仅为 96.4 mm,前者是后者的 3.03 倍,原状坡面土壤侵蚀量为 5 286.24 t/(km²·a),等高反坡阶作用下土壤侵蚀量仅为 654.61 t/(km²·a),前者是后者的 8.08 倍,等高反坡阶对坡耕地次降雨径流和土壤侵蚀量的控制效应明显,平均径流控制率为 71.27%。土壤侵蚀控制率为 84.13%,对土壤侵蚀量的控制效果更好(表 2)。

2007 年研究区原状坡面的降雨量、径流量和土壤流失量变异系数分别为 0.87,1.08 和 1.68;2008 年等高反坡阶处理下降雨量、径流深和土壤流失量的变异系数分别为 0.46,0.79 和 1.23。两种处理下坡耕地均为:土壤流失量变异系数>径流深变异系数>降雨量变异系数。说明坡耕地存在水土流失量变异系数的放大效应,因为产流降雨是坡耕地径流产生的前提,土壤流失又是伴随径流携沙而输出,导致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。但各处理下水土流失量变异系数被放大的程度有所差异,原状坡面的径流深变异系数比降雨量变异系数增加 24.1%,土壤流失量变异系数比径流深变异系数增加 55.6%,原状坡面变异系数间增幅差异 31.4%。等高反坡阶处理的径流深变异系数比降雨量

变异系数增加 71.7%，土壤流失量变异系数比径流深变异系数增加 55.7%，等高反坡阶处理变异系数间增幅差异 16.0%。与原状坡面相比，等高反坡阶处理变异系数间增幅差异小于原状坡面，说明径流深、土壤流失量相对偏离程度较小，反映出等高反坡阶措施对径流及土壤侵蚀的调控能力相对较强。

表 2 等高反坡阶径流和土壤侵蚀量控制效果

编号	日期	降雨量/ mm	最大 10 min 雨强/ (mm·h ⁻¹)	最大 30 min 雨强/ (mm·h ⁻¹)	径流深/mm		控制率/ %	土壤侵蚀量/(t·km ⁻² ·a ⁻¹)		控制率/ %
					等高 反坡阶	原状 坡面		等高 反坡阶	原状 坡面	
1	04-25	25.0	24.0	15.6	1.2	15.35	−92.18	7.774	24.82	−68.68
2	05-05	23.6	9.6	7.2	0.8	10.36	−92.28	2.014	4.88	−58.73
3	05-18	22.1	39.6	25.6	0.8	20.05	−96.01	3.601	24.52	−85.31
4	06-11	18.4	11.2	9.5	1.0	10.20	−90.20	2.703	8.01	−66.25
5	06-16	16.6	18.4	12.6	2.8	11.41	−75.46	5.799	62.01	−90.65
6	06-17	27.4	33.6	24.8	7.5	21.06	−64.39	33.374	508.08	−93.43
7	06-27	41.6	67.2	44.8	16.8	35.91	−53.22	214.166	886.67	−75.85
8	07-02	53.2	25.2	15.6	22.0	23.05	−4.56	174.856	966.66	−81.91
9	07-12	11.0	31.2	15.2	0.7	11.31	−93.81	2.963	15.42	−80.78
10	07-14	11.6	33.6	20.4	2.4	14.33	−83.25	7.354	98.71	−92.55
11	07-15	26.3	49.2	30.8	13.6	24.05	−43.45	74.99	760.82	−90.14
12	07-20	31.5	57.6	28.0	6.4	23.93	−73.26	38.214	747.72	−94.89
13	07-22	18.1	20.4	14.8	4.6	13.03	−64.70	15.962	142.43	−88.79
14	07-25	23.4	39.6	21.6	3.4	18.21	−81.33	16.276	196.43	−91.71
15	07-27	19.8	24.0	18.8	7.4	15.69	−52.84	28.061	339.60	−91.74
16	09-03	38.1	55.2	25.2	5.0	24.20	−79.34	26.500	499.46	−94.69

3.3 等高反坡阶对氮磷水平迁移的控制作用

径流氮、磷迁移通量即产流量与各次降雨下氮、磷迁移浓度的乘积。由于 2007 年末测定硝态氮和磷酸根，只能比较总氮，铵态氮和总磷的迁移通量控制作用，等高反坡阶作用下径流减少了 66.99%，径流总氮，铵态氮和总磷迁移浓度却分别增加了90.46%，

39.13%和 22.50%，根据式(1)计算得出 2008 年 16 场次降雨在原状坡面时的径流量和原状坡面的迁移浓度，计算得出迁移通量，对等高反坡阶的控制作用进行分析，结果如表 3 所示：等高反坡阶作用下全氮迁移通量控制率为 51.04%，铵态氮迁移通量控制率为 45.77%，总磷迁移通量控制率为 57.40%(表 3)。

表 3 等高反坡阶对径流氮、磷迁移通量的控制作用

不同处理	产流量/ (m ³ ·km ⁻²)	迁移浓度/(mg·L ⁻¹)			迁移通量/(kg·km ⁻²)		
		TN	铵态氮	TP	TN	铵态氮	TP
原状坡面	292140	3.96	0.56	0.22	1156.29	163.60	63.39
等高反坡阶	96440	5.87	0.92	0.28	566.10	88.72	27.00
削减率/%	−66.99				−51.04	−45.77	−57.40

根据式(2)计算 2008 年 16 场相应降雨原状坡面的预测产沙量，并根据迁移浓度，计算出原状坡面的预测 N、P 迁移通量，相同降水、不同坡面处理下 N、P 随泥沙的迁移通量结果见表 4。

在径流小区内挖设等高反坡阶后，径流量显著减少，产沙量也明显减小，从而使 N、P 养分随泥沙迁移

通量也明显减小，全氮迁移通量较原状坡面减少了 81.10%，碱解氮迁移通量较原状坡面减少了 90.93%，全磷迁移通量较原状坡面减少了 92.37%，速效磷迁移通量较原状坡面减少了 88.00%，说明等高反坡阶可有效减少坡地 N、P 养分随径流泥沙的迁移。

表 4 等高反坡阶对径流泥沙氮磷迁移通量的控制作用

不同处理	产沙量/ (t·km ⁻²)	迁移浓度				迁移通量/(kg·km ⁻²)			
		全氮/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)	速效磷/ (mg·kg ⁻¹)	全氮	碱解氮	全磷	速效磷
原状坡面	5286.24	0.38	51.11	0.86	24.24	2008.77	270.18	4546.17	128.14
等高反坡阶	654.59	0.58	37.44	0.53	23.5	379.66	24.51	346.93	15.38
削减率/%	−87.62					−81.10	−90.93	−92.37	−88.00

3.4 等高反坡阶对氮磷垂直迁移的控制作用

原状坡面和等高反坡阶阶面壤中流总氮浓度随降雨呈现出先下降后上升的趋势,原状坡面和反坡阶阶面总氮浓度变化范围分别为 6.83~10.48 mg/L 和 4.93~12.14 mg/L,平均浓度分别为 8.04 mg/L 和 8.20 mg/L(图 1—4),等高反坡阶拦截径流,同时加快下渗,使得壤中流总氮浓度在反坡阶处较高。

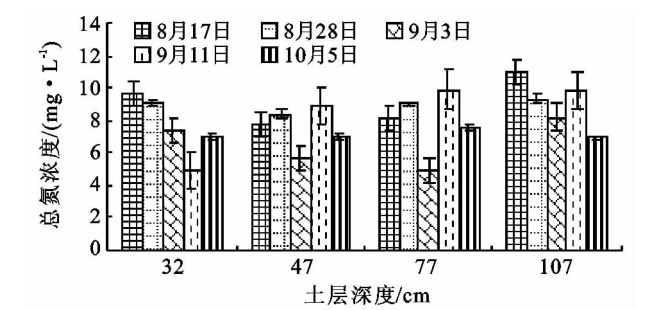


图 1 原状坡面壤中流总氮浓度变化

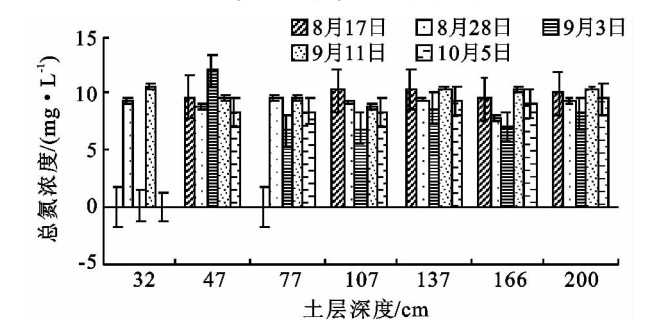


图 2 等高反坡阶阶面壤中流总氮浓度变化

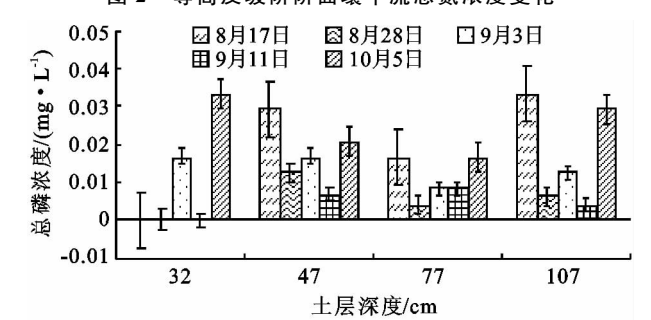


图 3 原状坡面壤中流总磷浓度变化

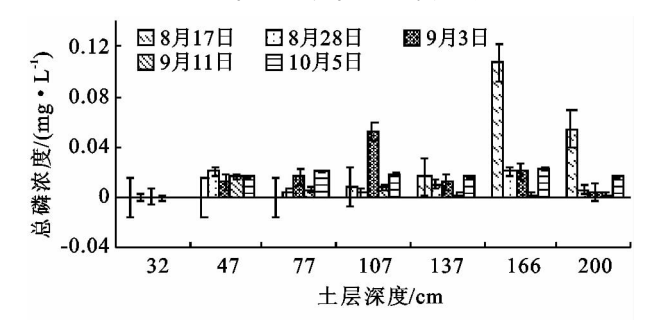


图 4 等高反坡阶阶面壤中流总磷浓度变化

坡面 0—110 cm 内土壤深度与总氮浓度之间差异均不显著,而阶面 0—200 cm 内土壤深度与总氮浓度之间关系显著,反坡阶 0—50 cm 内总氮浓度是原状坡面总氮浓度的 1.03~2.19 倍,50—110 cm 处是原状坡

面总氮浓度的 0.83~1.39 倍,0—50 cm 内总氮浓度明显增加,说明总氮浓度在 0—50 cm 土层对等高反坡阶的响应较高,反坡阶 110—200 cm 深层土壤内总氮平均浓度为 9.34 mg/L,200 cm 的土层处总氮浓度仍然较高,且壤中流过程持续时间长,土壤养分借助壤中流进入相邻受纳水体,存在污染地下水的风险,应该加强氮素径流流失,特别是加强壤中流氮素渗漏的管理。原状坡面总氮浓度随降雨先减少后增加,0—110 cm 内均呈现相似的规律,且 0—110 cm 内等高反坡阶阶面总氮浓度与坡面总氮浓度差异不大,在 0—50 cm 层坡面的各层壤中流总氮浓度 5.65 mg/L 大于等高反坡阶阶面的 5.24 mg/L,在 50—110 cm 层浓度值相近,说明等高反坡阶对壤中流氮素浓度的影响主要体现在表层 0—50 cm 层,阶面 110—200 cm 内总氮浓度平均值为 5.98 mg/L,均高于 0—50 cm 内的总氮浓度,容易引起地下水的污染。等高反坡阶坡面和阶面 0—50 cm 内总磷浓度差异不大,坡面的总磷浓度均值 0.008 mg/L 大于阶面的 0.006 mg/L,但平均浓度接近,50—110 cm 内坡面总磷浓度均值为 0.011 mg/L 小于阶面总磷浓度均值 0.019 mg/L,说明等高反坡阶对壤中流磷素浓度的影响主要体现在 50—110 cm 层,110—200 cm 阶面总磷浓度均值大于 0—110 cm,与总氮浓度的变化趋势相同。

为了反映壤中流氮、磷垂直动态变化情况,用变异系数表示其变化情况(表 5),变异系数越大表示壤中流中氮、磷浓度变化越剧烈,反之表示壤中流中氮、磷浓度差异越小。0—110 cm 土层内等高反坡阶阶面总氮浓度的标准差和变异系数均大于坡面,0—50 cm 处变幅较大,50—110 cm 内变幅差异则较小,坡面和等高反坡阶阶面总氮变异系数值随土层深度的增加逐渐减少,说明总氮浓度随土层深度的增加趋于稳定,而坡面和等高反坡坡面总磷浓度标准差和变异系数在 50—110 cm 内变幅差异较显著,且有逐渐增加的趋势,磷素浓度波动较小,等高反坡阶阶面 0—110 cm 内总磷浓度变化趋势与坡面相同,且 110—200 cm 变异系数逐渐增加,110 cm 和 200 cm 处变异系数较大,总磷浓度波动较大。

0—80 cm 内原状坡面和等高反坡阶阶面雨季前土壤全氮含量变化范围分别为 0.020%~0.025%和 0.023%~0.028%,碱解氮含量变化范围分别为 16.67~20.99 mg/kg 和 25.78~37.84 mg/kg(表 6),全氮和碱解氮含量随着降雨和作物吸收逐渐降低。等高反坡阶氮素含量较原状坡面相比,仅除茬后(10 月 5 日)对全氮含量起到了控制的效果,范围为 6.25%~23.81%,其他条件下,等高反坡阶均增加了土壤氮素含量。

表 5 壤中流 TN,TP 浓度剖面统计特征及变异系数

位置	土层 深度/cm	TN			TP		
		均值/(mg·L ⁻¹)	标准差	变异系数	均值/(mg·L ⁻¹)	标准差	变异系数
坡面	32	4.27	3.73	0.87	0.017	0.007	0.400
	47	6.21	3.28	0.53	0.013	0.010	0.755
	77	6.58	3.72	0.56	0.009	0.004	0.452
	107	7.21	3.63	0.50	0.012	0.011	0.873
阶面	32	4.57	4.57	1.00	0.000	0.000	0.000
	47	6.73	4.48	0.67	0.013	0.003	0.241
	77	5.78	3.80	0.66	0.008	0.005	0.637
	107	5.62	3.56	0.63	0.031	0.031	1.000
	137	6.33	4.09	0.65	0.010	0.006	0.557
	167	5.73	3.64	0.64	0.038	0.036	0.957
	200	6.24	4.04	0.65	0.030	0.033	1.000

原状坡面各土层深度全氮含量之间差异不显著 ($F=0.552$, Sig. = 0.657), 等高反坡阶措施下各土层深度全氮含量间差异不显著 ($F=1.264$, Sig. = 0.331), 原状坡面各土层深度碱解氮含量之间差异不显著 ($F=1.106$, Sig. = 0.385), 等高反坡阶措施下各土层深度碱解氮含量间差异显著 ($F=5.531$, Sig. = 0.013), 0—20 cm 处碱解氮含量和 20—40 cm 处碱解氮含量间差异显著 (Sig. = 0.002), 20—40 cm 处碱解氮含量和 40—60 cm 处碱解氮含量间差异显著 (Sig. = 0.015), 40—60 cm 处碱解氮含量和 60—80

cm 处碱解氮含量间差异显著 (Sig. = 0.028) (表 6)。

0—80 cm 内原状坡面和等高反坡阶阶面雨季前期土壤全磷含量变化范围分别为 0.923~1.279 g/kg 和 1.015~1.328 g/kg, 等高反坡阶阶面全磷含量高于原状坡面, 而速效磷含量变化范围分别为 10.272~19.172 mg/kg 和 3.865~7.318 mg/kg, 原状坡面速效磷含量高于等高反坡阶阶面, 随降雨的变化及作物生长全磷和速效磷含量均逐渐降低; 原状坡面全磷和速效磷含量随土层深度逐渐增加, 等高反坡阶阶面全磷和速效磷含量随土层深度逐渐降低。

表 6 坡面和等高反坡阶阶面不同土层深度氮素变化特征

取样点	土层深度/cm	4 月 20 日		7 月 27 日		8 月 28 日		10 月 5 日	
		全氮/ %	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)	全氮/ %	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)	全氮/ %	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)	全氮/ %	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)
原状坡面	0—20	0.024	20.99	0.018	19.78	0.011	18.17	0.021	15.50
	20—40	0.025	17.86	0.019	15.17	0.011	17.50	0.022	14.13
	40—60	0.021	16.67	0.017	14.70	0.010	17.44	0.015	14.11
	60—80	0.020	19.45	0.016	18.99	0.010	13.69	0.016	11.90
等高反坡阶阶面	0—20	0.027	25.78	0.019	16.26	0.020	19.89	0.016	16.60
	20—40	0.028	37.84	0.023	28.80	0.024	37.95	0.018	32.40
	40—60	0.026	32.45	0.020	28.59	0.013	31.78	0.017	27.86
	60—80	0.023	37.11	0.018	19.08	0.011	33.65	0.015	25.66

等高反坡阶阶面较原状坡面相比, 对不同土层深度磷素含量的控制效果优于全氮含量, 虽也存在削减和增加磷素含量的作用, 但削减的次数较多, 全磷含量的削减率为 0.39%~1.76%, 增加全磷含量的作用范围为 1.61%~30.17%, 等高反坡阶有效控制速效磷, 削减率为 28.76%~92.73%, 各土层深度间有差异, 等高反坡阶增加了土壤中的全磷含量, 却削减了速效磷含量。

由表 7 看出, 原状坡面土壤深度全磷含量之间差异显著 ($F=206.481$, Sig. = 0), 0—20 cm 处全磷含量和 40—60 cm 处全磷含量间差异显著 (Sig. = 0),

0—20 cm 处全磷含量和 60—80 cm 处全磷含量间差异显著 (Sig. = 0), 20—40 cm 处全磷含量和 40—60 cm 处全磷含量间差异显著 (Sig. = 0), 20—40 cm 处全磷含量和 60—80 cm 处全磷含量间差异显著 (Sig. = 0); 等高反坡阶措施下各土壤深度全磷含量间差异显著 ($F=11.581$, Sig. < 0.001), 0—20 cm 处全磷含量和 40—60 cm 处全磷含量间差异显著 (Sig. < 0.039), 0—20 cm 处全磷含量和 60—80 cm 处全磷含量间差异显著 (Sig. = 0), 20—40 cm 处全磷含量和 60—80 cm 处全磷含量间差异显著 (Sig. < 0.002), 40—60 cm 处全磷含量和 60—80 cm 处全磷含量间

差异显著 (Sig. <0.005), 原状坡面各土层深度速效磷含量之间差异不显著 ($F=1.528$, Sig. >0.258), 等高反坡阶措施下各土壤深度速效磷含量间差异不显著 ($F=0.905$, Sig. >0.467)。

表 7 坡面和等高反坡阶阶面不同土层深度磷素变化特征

取样点	土层深度/cm	4 月 20 日		7 月 27 日		8 月 28 日		10 月 5 日	
		全磷/ (g · kg ⁻¹)	速效磷/ (mg · kg ⁻¹)	全磷/ (g · kg ⁻¹)	速效磷/ (mg · kg ⁻¹)	全磷/ (g · kg ⁻¹)	速效磷/ (mg · kg ⁻¹)	全磷/ (g · kg ⁻¹)	速效磷/ (mg · kg ⁻¹)
原状坡面	0—20	1.279	10.272	0.879	9.585	0.745	11.928	0.682	10.842
	20—40	1.248	15.012	0.973	24.870	0.865	16.300	0.793	13.829
	40—60	1.318	13.278	0.981	22.117	0.840	11.809	0.841	10.748
	60—80	1.512	19.127	1.323	38.306	0.989	19.666	1.008	7.907
等高反坡阶阶面	0—20	1.328	7.318	1.071	5.294	0.892	3.297	0.857	1.567
	20—40	1.226	5.219	1.033	2.258	0.845	8.908	0.876	1.317
	40—60	1.299	4.327	1.007	2.840	0.862	1.638	0.884	1.150
	60—80	1.321	3.865	1.018	2.783	0.915	2.056	0.879	1.430

原状坡面全氮和等高反坡阶阶面全氮含量间相关性高 (Pearson=0.62, Sig. <0.01), 等高反坡阶全氮和原状碱解氮含量间相关性高 (Pearson=0.532, Sig. <0.034), 等高反坡阶全氮和全磷含量间相关性高 (Pearson=0.523, Sig. <0.038), 等高反坡阶全氮和速效磷含量间相关性高 (Pearson=0.682, Sig. <0.004), 原状坡面碱解氮和等高反坡阶阶面速效磷含量间相关性高 (Pearson=0.536, Sig. <0.033), 原状全磷和等高反坡阶全磷含量间相关性高 (Pearson=0.687, Sig. <0.003), 原状坡面全磷和等高反坡阶阶面速效磷含量间相关性高 (Pearson=0.571, Sig. <0.021)。其他氮、磷含量与原状坡面和等高反坡阶阶面间相关性均不高。

4 结论

(1) 等高反坡阶作用下雨季产流次数减少了 18 次, 径流控制率和泥沙控制率分别达到 61.9% 和 77.4%, 次降雨下等高反坡阶的径流控制率为 71.27%, 土壤侵蚀量控制率为 84.13%, 等高反坡阶对土壤侵蚀量的控制效果较好。

(2) 地表径流总氮迁移通量控制率为 51.04%, 铵态氮迁移通量控制率为 45.77%, 总磷迁移通量控制率为 57.40%, 径流泥沙全氮迁移通量较原状坡面减少了 81.10%, 碱解氮迁移通量较原状坡面减少了 90.93%, 全磷迁移通量较原状坡面减少了 92.37%, 速效磷迁移通量较原状坡面减少了 88.00%。

(3) 反坡阶 0—50 cm 内总氮浓度是原状坡面总氮浓度的 1.03~2.19 倍, 50—110 cm 处是原状坡面总氮浓度的 0.83~1.39 倍, 0—50 cm 内总氮浓度明显增加, 在 0—50 cm 土层内坡面的各层壤中流总氮浓度为 5.65 mg/L, 大于等高反坡阶阶面的 5.24 mg/L; 原状坡面总磷浓度随降雨先减少后增加, 0—

50 cm 内等高反坡阶阶面总磷浓度与坡面总磷浓度差异不大, 0—50 cm 层坡面的各层壤中流总磷浓度 0.008 mg/L 大于等高反坡阶阶面的 0.006 mg/L, 在 50—110 cm 层浓度值相近, 阶面 110—200 cm 内总氮和总磷浓度平均值为 5.98 mg/L 和 0.026 mg/L, 均高于 0—50 cm 内的氮、磷浓度, 等高反坡阶对壤中流氮磷迁移的控制效果各异, 在不同土壤深度有促进和抑制氮磷迁移的效果。

等高反坡阶对坡耕地氮磷含量有削减和增加的作用, 各土层深度间有差异。等高反坡阶对坡耕地氮素含量的作用, 仅除茬后 (10 月 5 日) 对全氮含量起到了控制的效果, 范围为 6.25%~23.81%, 碱解氮含量在不同土层深度间差异显著, 其他条件下, 反坡阶均增加土壤氮素含量; 对不同土层深度磷素含量的控制效果优于全氮含量, 磷素含量虽有增有减, 全磷含量的削减率为 0.39%~1.76%, 增加全磷含量的作用范围为 1.61%~30.17%, 等高反坡阶有效控制速效磷, 削减率为 28.76%~92.73%, 各土壤深度间有差异, 等高反坡阶增加了土壤中的全磷含量, 却削减了速效磷含量。

5 讨论

等高反坡阶对地表径流的削减作用主要表现在对径流的再分配上: 当降雨量较小时, 等高反坡阶上部产生的径流汇集到沟里, 经入渗后进入土壤, 形成地下径流; 当降雨量较大时, 形成的径流先汇集在沟里, 部分经入渗进入地下, 部分径流在沟内蓄积, 蓄满后经沟内排出, 形成“超渗”, 相当于截短坡长, 从而减少地表径流量; 等高反坡阶削减产沙的作用主要是通过减少地表径流产流量来实现的。等高反坡阶通过蓄积地表径流从而增加入渗, 减少产流量, 从而减少产沙量, 在蓄积径流的同时, 径流汇集到沟道的过程

中也减缓了径流的下移速度,从而增加了径流中泥沙的沉淀作用,大颗粒的泥沙通过沉淀而遗留在沟道中,大大削减了径流中的泥沙含量,从而减少了农地的产沙量。

拜得珍等^[12]研究表明,水平沟耕作(水平沟种草>水平沟草粮带状间作>水平沟种植谷子)在50~70 min内,降雨80~90 mm,基本上能全部拦蓄,均比传统耕作种植谷子和休闲地的控制效果好。本文研究表明坡耕地布设等高反坡阶,减小径流作用的汇流面积,增加土壤水分下渗,减缓地表径流流速,从而减少随径流流失的泥沙含量,能明显减少地表径流和土壤侵蚀量,雨季产流次数减少了18次,径流控制率和土壤侵蚀控制率分别达到61.90%和77.40%,这与王萍等^[9]和褚利平等^[10]的研究结果相似。

胡宏祥等^[13]研究表明不同下垫面径流氮磷迁移浓度随降雨径流过程呈递减规律,但不同下垫面递减幅度不同。本文研究表明坡耕地土壤侵蚀变异系数>径流深变异系数>降雨量变异系数,原状坡面变异系数间增幅差异为31.4%,等高反坡阶处理变异系数间增幅差异16.0%。与原状坡面相比,等高反坡阶处理下变异系数间增幅差异小于原状坡面,说明其径流深、土壤侵蚀量相对偏离程度较小,等高反坡阶措施对径流,土壤侵蚀的调控能力相对较强。

李英俊等^[14]的研究表明:天然降雨条件下地表径流中氮素的流失形态为硝态氮和铵态氮,其中硝态氮是农田地表径流中可溶态氮素的主要流失形态,流失浓度占全氮浓度的4%~28%。而铵态氮的流失浓度较小,流失浓度仅占全氮浓度的1%~8%,且随施肥水平增加,在最大施肥处达86.73%~88.36%,本文研究也表明地表径流氮素迁移浓度以硝态氮为主,未对磷素加以讨论;张兴昌^[15]的研究发现:5 a轮作和1 a水平沟耕作试验表明,在不同的坡度上,与传统耕作法相比,水平沟减少产流7%,径流铵态氮浓度提高19%,流失量达到13.01 kg/(km²·a),比传统耕作多流失1.11 kg/(km²·a);径流硝态氮浓度减少27%,比传统耕作减少7.68 kg/(km²·a);径流硝态氮流失减少量和铵态氮增加量相差6倍,水平沟可减少6.57 kg/(km²·a)矿质氮流失;水平沟拦截泥沙25%左右,泥沙中全氮富集率提高13%,土壤全氮流失457 kg/(km²·a),平均减少18%;本研究得出等高反坡阶作用下,地表径流总氮迁移通量控制率为51.04%,铵态氮迁移通量控制率为45.77%,总磷迁移通量控制率为57.40%,径流泥沙全氮迁移通量较原状坡面减少了81.10%,碱解氮迁移通量较原状坡面减少了90.93%,全磷迁移通量较原状坡面减

少了92.37%,速效磷迁移通量较原状坡面减少了88.00%,等高反坡阶可有效减少坡地N、P养分随径流及径流泥沙的迁移。本文仅研究坡耕地氮磷垂直迁移浓度的变化情况,未涉及对迁移通量的控制作用。目前对坡地氮磷垂直迁移通量的估算方法已有详细报道,为今后的研究奠定了坚实的理论基础,这是未来研究的方向之一。

参考文献:

- [1] Daniel T C, Sharpley A N, Edwards D R, et al. Minimizing surface water eutrophication from agriculture by phosphorus management[J]. Soil Water Conservation, 1994,49(1):30-38.
- [2] 赖格英,于革. 太湖流域1960年代营养物质转移的模拟评估研究[J]. 中国科学院研究生院学报,2007,24(6):756-764.
- [3] 王庆仁,李继云. 论合理施肥与土壤环境的可持续性发展[J]. 环境科学进展,1999,7(2):116-123.
- [4] 徐明岗. 土壤磷扩散规律及其能量特征的研究: II. 施肥量及水肥温相互作用对磷扩散的影响[J]. 土壤学报,1998,35(1):55-65.
- [5] 朱波,王涛,徐泰平,等. 紫色丘陵区典型小流域氮素迁移及其环境效应[J]. 山地学报,2006,24(5):601-606.
- [6] 杨金玲,张甘霖,张华,等. 丘陵地区流域土地利用对氮素径流输出的影响[J]. 环境科学,2003,24(1):16-23.
- [7] 李俊然,陈利顶,郭旭东,等. 土地利用结构对非点源污染的影响[J]. 中国环境科学,2000,20(6):506-510.
- [8] Barton A P, Fullen M, Mitchell D J, et al. Effects of soil conservation measures on erosion rates and crop productivity on subtropical ultisols in Yunnan province, China[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2004,104(2):343-357.
- [9] 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):1-7.
- [10] 褚利平,王克勤,白文忠,等. 水平阶影响坡地产流产沙及氮磷流失的试验研究[J]. 水土保持学报,2010,24(4):1-6.
- [11] 陈奇伯,寸玉康,刘芝芹,等. 滇西高原不同地类坡面产流产沙规律研究[J]. 水土保持研究,2005,12(2):71-73.
- [12] 拜得珍,纪中华,杨艳鲜,等. 银合欢冲沟治理水土保持效益研究[J]. 水土保持研究,2004,11(3):226-228.
- [13] 胡宏祥,任涛,黄本柱. 合肥市城区流失水土污染特征研究[J]. 水土保持研究,2008,15(3):182-187.
- [14] 李英俊. 自然降雨条件下农田地表径流氮素流失特征研究[J]. 水土保持研究,2010,17(4):19-23.
- [15] 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.