
试验研究

天然降雨条件下等高反坡台阶整地对坡耕地氮磷输移的影响

赵露杨¹, 王克勤¹, 蹇清洪², 段旭¹, 杨佳乐¹, 赵洋毅¹

(1.西南林业大学 生态与环境学院, 云南 昆明 650224; 2.云南省水土保持生态环境监测总站, 云南 昆明 650106)

摘要: [目的] 揭示等高反坡阶整地措施对于坡耕地产流产沙及面源污染物输出的规律, 为源头控制坡耕地水土流失和农业面源污染提供科学依据和技术支撑。[方法] 以滇中昆明市松华坝迤者流域试验区内已布设等高反坡台阶措施的坡耕地(15°和 22°)径流小区样地为对象, 基于 2019—2021 年降雨、径流及水质数据, 采用对比分析的方法, 研究样地内的产流、产沙、面源污染物氮素、磷素输出的特征。[结果] 相同雨型下, 研究区样地布设等高反坡阶之后坡度为 22°的坡耕地比坡度为 15°的坡耕地有更显著的减少坡面产流产沙以及面源污染物氮、磷输出的作用。[结论] 等高反坡阶对坡耕地的产流产沙及面源污染物的输出等有显著的控制效果, 布设等高反坡阶能够有效地增加坡耕地尤其是坡度较大的坡耕地的保水保土能力。

关键词: 反坡阶; 坡耕地; 产流产沙; 氮、磷输出; 削减率

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)01-0001-07

中图分类号: S157.1

文献参数: 赵露杨, 王克勤, 蹇清洪, 等. 天然降雨条件下等高反坡台阶整地对坡耕地氮磷输移的影响[J]. 水土保持通报, 2023, 43(1): 1-7. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.01.001; Zhao Luyang, Wang Keqin, Jian Qinghong, et al. Effect of contour reverse slope terrace preparation on nitrogen and phosphorus transport in sloping cropland under natural rainfall conditions [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(1): 1-7.

Effect of Contour Reverse Slope Terrace Preparation on Nitrogen and Phosphorus Transport in Sloping Cropland Under Natural Rainfall Conditions

Zhao Luyang¹, Wang Keqin¹, Jian Qinghong², Duan Xu¹, Yang Jiale¹, Zhao Yangyi¹

(1. School of Ecology and Environment, Southwest Forestry

University, Kunming, Yunnan 650224, China; 2. Yunnan Provincial Soil and Water

Conservation Ecological Environment Monitoring Station, Kunming, Yunnan 650106, China)

Abstract: [Objective] The rules of land preparation measures on sediment production and non-point source pollutant output of sloping land were analyzed in order to provide a scientific basis and technical support for controlling soil and water loss and agricultural non-point source pollution of sloping land at the source. [Methods] The runoff plots of sloping farmland (15° and 22°) with equi-height reverse slope steps were taken as the research object in Songhuaba at Yizhe watershed experimental area of Kunming City, central Yunnan Province. Rainfall, runoff, and water quality data from 2019 to 2021 were analyzed using a comparative analysis method. The characteristics of flow production, sand production, and nitrogen and phosphorus output of surface source pollutants within the sample plots were studied. [Results] Contour reverse slope terraces used on sloping land with a slope of 22° had more significant effects on the reduction of slope flow and sand production, and the output of surface pollutants nitrogen and phosphorus than land with a slope of

收稿日期: 2022-03-08

修回日期: 2022-06-30

资助项目: 云南省基础研究计划面上项目“水文条件影响下的坡耕地红壤分形结构对土壤酸化临界负荷的作用机制研究”(202001AT070136); 国家自然科学基金项目“神胁迫高原湖滨湿地典型植物根系分泌物对磷形态转化的影响机制”(31760149); 云南省青年人才项目(YNWR-QNBJ-2019-215, YNWR-QNBJ-2019-226)。

第一作者: 赵露杨(1996—), 男(汉族), 甘肃省陇南市人, 在读硕士, 主要从事土壤学研究。Email: 332454123@qq.com。

通信作者: 赵洋毅(1980—), 男(汉族), 吉林省农安县人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水土保持和小流域环境综合治理研究。Email: yyz301@foxmail.com。

15° under the same rainfall pattern. [Conclusion] Contour reverse slope terraces had significant control effects on sediment yield and non-point source pollutant output on sloping land, and can effectively increase soil and water conservation ability on sloping land, especially on large slopes.

Keywords: reverse slope terrace; sloping farmland; erosion and sand production; nitrogen and phosphorus output; reduction rate

坡耕地是重要的农业资源,同时也是农业生态环境中最脆弱的部分,因特殊的地形和气候条件而导致的云南红壤区坡耕地水土流失问题日益严重^[1-2]。坡耕地水土流失极大地改变了土壤结构和理化特征,导致耕地资源减少,土地生产力下降,以及面源污染的扩大^[3-5]。面源污染是我国地表水体的主要污染,来自耕地中的氮、磷流失是导致面源污染、土地退化等现象的重要原因^[6-8]。而布设等高反坡阶能够一定程度上减少水土流失、提高土壤肥力、减少面源污染,具有较高的推广价值,尤其是在干旱地区或降雨分布较为集中的云南山区^[9-14]。

目前关于控制坡耕地水土流失及面源污染中氮、磷流失的研究,多以对土壤地表径流产生影响的几种因子为对象,即研究降雨强度^[15-16]、不同的土地利用方式^[17-18]、不同的耕作方式^[19]、不同肥料的使用^[20-22]、不同植被等^[23]对地表径流及污染物输出的影响以及各种整地措施对产生土壤径流的抑制作用等^[11,24-26]。这些研究中,唐佐芯、华锦欣、王帅兵等人已通过不同作物、不同土地利用类型对布设反坡阶坡耕地的产流产沙或是氮磷输出影响的研究证明了反坡阶在控制水土、氮磷流失的显著效果^[16,25-27]。但在他们的研究中,坡度均作为一个固定的参数,无法得出不同坡度对坡耕地水土流失的影响规律,因此本文将坡度作为一个重点变量来进行探讨。另王帅兵等^[16,28]明确提出降雨是水土流失的原动力,但不同降雨条件下地表径流、泥沙以及其中携带的氮磷流失途径和特征存在差异,因此降雨雨型也是本文探究重点,本文将沿用王帅兵^[28]的研究思路,结合研究区实际降雨情况将降雨雨型再次划分以更符合研究区实际情况来探究不同雨型下反坡阶的效用。

针对云南省红壤区坡耕地面源污染以及水土流失愈发严重的现状,本文以已布设有等高反坡阶措施的不同坡度的坡耕地(原状坡耕地为对照)为对象,采用对比分析法,基于 2019—2021 年实测的天然降雨通过不同雨型条件下探究等高反坡阶整地措施对面源污染物氮、磷输出的影响。通过掌握面源污染物输出的动态变化及发展趋势,深入认识土壤侵蚀规律,用量化的指标评价该流域污染物的输出和水土保持措施对污染物控制的总体效果,以期为该区域坡耕

地水土流失治理等提供数据支撑和科学依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究试验区位于昆明市盘龙区滇源街道西南部的迤者小流域。迤者小流域位于北纬 24°14′43″—25°12′48″,东经 102°48′37″—102°44′51″,小流域南北长 6.7 km,面积 13.26 km²。是滇池系统中盘龙江第一支流的源区。夏季和秋季温热,冬季和春季干凉,年平均气温为 13.8℃,属北亚热带和暖温带的混合气候。流域多年平均降雨量为 757.2 mm。年内降水量分布极不均匀,夏秋季多雨,冬春季干旱。该流域为典型的农业小流域,耕地面积约占 25%且以坡耕地为主,红壤为小流域内主要土壤类型,占流域土地总面积的 89.3%。小流域内森林覆盖率为 31.6%,林草覆盖率为 66.8%。

1.2 研究方法

1.2.1 样地布设 研究样地布设在研究区具有典型性的 4 块 5×20 m² 标准径流小区内(表 1)。按照 15°,22°的坡度分别布设 4 个径流小区,其中 1#,3# 样地在坡耕地中间隔 7.5 m 布设等高反坡阶,坡度相同的径流小区互为对照。所有样地选择同一种类作物进行种植,保持农作物种植密度、播种和收获时间及水肥管理措施基本一致。

1.2.2 样品采集及指标测定

(1) 野外数据收集。使用 HOBO RG-3 自记式雨量计记录降雨过程。在每次产流的降雨结束后,分别测定各个径流小区径流池中水位深度,计算各个径流小区的产流量。然后将径流池中水充分搅匀,迅速以去离子水洗净的 500 ml 聚乙烯采样瓶采集地表径流水沙混合样,用于测定径流中各种面源污染物浓度及泥沙含量。采集完成后,将径流池中水放空,清理其中泥沙,为下一场产流做好准备。

(2) 样品保存及测定。水样采集结束后立即带回实验室分析测定其中各面源污染物浓度。测定前,将水样经过 0.45 μm 滤膜后调节 pH 值至 7.0 左右再进行测定。以下是实验室用到的对相关因子进行测定的方法(表 2),每次测定必须测定空白样,测定时每个样品测定 3 组,最后取平均值。

表 1 迳者小流域样地基本情况

Table 1 Basic information of sample sites in the study area in Yizhe watershed

样地	小区特征						处理措施
	海拔高度/m	坡度/(°)	坡向/(°)	种植类型	土壤类型	植被覆盖度/%	
1 [#]	2 220	15	EW	玉米	红壤	90	等高反坡台阶坡面(CRT)
2 [#]	2 220	15	EW	玉米	红壤	90	原状坡面(CK)
3 [#]	2 210	22	NS	玉米	红壤	89	等高反坡台阶坡面(CRT)
4 [#]	2 210	22	NS	玉米	红壤	88	原状坡面(CK)

注:CK 为对照样地;CRT 为等高反坡台阶样地;NS 为南北坡向;EW 为东西坡向。

表 2 迳者小流域所需面源污染物指标及泥沙含量测定方法

Table 2 Indicators of non-point source pollutants required for research and determination methods of sediment content in Yizhe watershed

指标	测定方法
总氮	碱性过硫酸钾消解—紫外分光光度法测定(HJ636-2012)
铵态氮	纳氏试剂比色法测定(HJ535-2009)
硝态氮	酚二磺酸法测定(GB7480-1987)
总磷	过硫酸钾消解,抗坏血酸和钼酸铵发色后用分光光度计测定(过硫酸钾消解—钼钒酸分光光度法测定)(GB11894-89)
磷酸根	抗坏血酸和钼酸铵发色后用分光光度计测定(HJ670-2013)
泥沙含量	烘干法测定

1.2.3 数据处理与计算 为了直观地表现出不同坡度坡耕地泥沙径流及面源污染物的控制效果,分别引入减流率、减沙率、总氮削减率、铵态氮削减率、硝态氮削减率、总磷削减率、磷酸根削减率的概念,其计算公式如下所示:

$$C = \frac{R_1 - R_2}{R_1} \quad (1)$$

式中: C 为泥沙径流和面源污染物削减率; R_1 为没有布设等高反坡阶时的泥沙径流和面源污染物的浓度; R_2 布设等高反坡阶时的泥沙径流和面源污染物的浓度。

最后利用 Excel, Origin 2021 及 SPSS 22.0 软件

进行相关数据的统计及分析。

2 结果与分析

2.1 研究期间降雨和不同坡度小区的产流产沙特征

2.1.1 降雨特征 根据小流域观测站内雨量计的记录分析,年降雨统计见表 3。

如表 3 所示,研究区降雨年内分布不均,降雨多集中在雨季(5—10 月),3 a 间降雨多集中于 0—20 mm 之间,2019 年及 2020 年降雨量差异比 2021 年大(图 2 左),单次降雨量的最大值与最小值相差较大,导致降雨冲刷坡耕地地表,造成严重的水土流失。

表 3 2019—2021 年迳者小流域不同年份降雨及样品采集情况

Table 3 Rainfall and sample collection in different years in Yizhe watershed during 2019—2021

年份	年降雨量/ mm	降雨天数/ d	最大日降雨量/ mm	观测降雨 次数	总观测降雨 场次	年典型降雨 选取次数
2019	752.3	71	39.0	65		17
2020	576.9	58	62.5	44	147	17
2021	767.4	107	36.8	38		16

表 4 迳者小流域各雨型所占比例

Table 4 Percentage of each rain type in Yizhe watershed

雨型	次数	不同雨型在总观测 场次比例/%	总观测 降雨场次	分类后典型 降雨选取次数
A	15	10.20	147	7
B	28	19.05		5
C	70	47.62		5
D	34	23.13		6

为了更好的区分不同降雨类型对坡耕地的影响,本研究将沿用王帅兵等^[16,28]在降雨雨型对坡耕地影响的成果,在其分类的基础上结合研究区实际降雨情况进行再次分类,即从 2019—2021 年降雨数据中各选取部分典型降雨(表 4),将其降雨量、降雨强度、降雨侵蚀力 3 个参数进行 K-均值聚类分析、系统聚类分析后进行判别分析(图 1),根据系统聚类分析结果

可将降雨量分为 4 种类型:A 型雨(降雨量大、降雨强度小、降雨侵蚀力小);B 型雨(降雨量大、降雨强度大、降雨侵蚀力大);C 型雨(降雨量小、降雨强度小、降雨侵蚀力小);D 型雨(降雨量小、降雨强度大、降雨

侵蚀力大)。不同雨型所占比例情况见表 4。本文将分别从年际尺度(年典型降雨)和单次典型降雨(不同雨型分类下)两个方面剔除个别异常值进行不同坡度等高反坡阶对产流产沙及氮、磷输出影响的讨论。

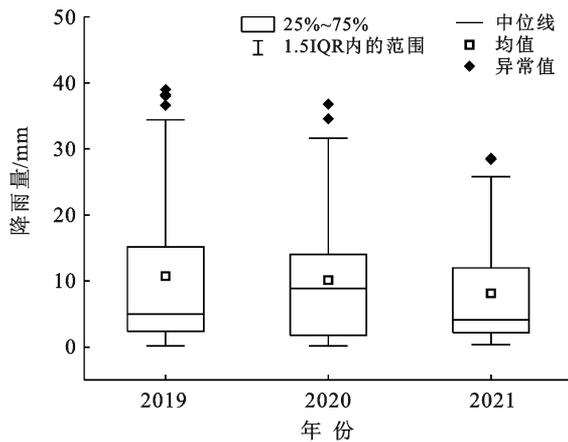


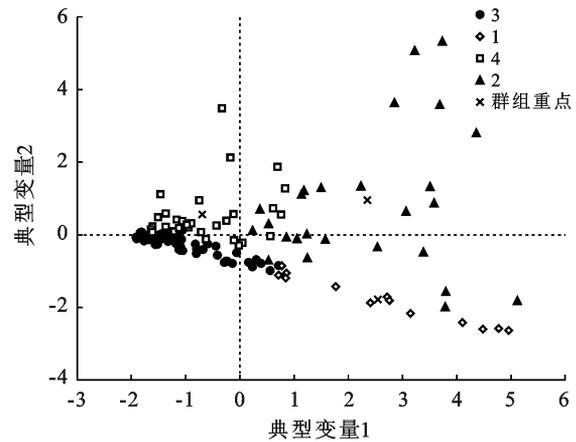
图 1 2019—2021 年迤者小流域降雨量观测箱式图及判别分析

Fig.1 Box plot and discriminant analysis chart of rainfall observation in Yizhe watershed from 2019 to 2021

2.1.2 不同坡度等高反坡阶对坡耕地产流产沙的影响 将 2019—2021 年年径流及泥沙含量数据汇总, 选取其中观测到的典型降雨场次, 按照坡耕地坡度 15° 、 22° 分别计算年平均径流、泥沙削减率(表 5)。在研究期间, 坡度为 22° 的坡耕地年平均径流削减率为 $57.54 \pm 15.1\%$, 年平均泥沙削减率为 $70.5 \pm 8.03\%$; 坡度为 15° 的坡耕地年平均径流削减率为 $51.03 \pm 11.49\%$, 年平均泥沙削减率为 $59.01 \pm 15.76\%$ 。3 a 间年平均泥沙削减率大于年平均径流削减率, 年总平均径流、泥沙削减率呈现 22° 坡耕地对照组大于 15° 坡耕地对照组的规律, 且 3 a 间各年年平均径流、泥沙削减率同样呈现出上述规律, 表明 22° 等高反坡阶坡耕地控制坡面产流产沙的效果要优于 15° 等高反坡阶坡耕地。

表 5 2019—2021 年迤者小流域年平均径流泥沙削减率统计

Table 5 Annual average runoff sediment reduction rate statistics in Yizhe watershed during 2019—2021			
年份	坡度	年平均径流削减率/%	年平均泥沙削减率/%
2019	15°	47.09 ± 11.15	57.06 ± 15.76
	22°	53.31 ± 15.1	73.56 ± 8.03
2020	15°	51.18 ± 11.49	59.24 ± 6.42
	22°	57.02 ± 10.62	68.74 ± 5.01
2021	15°	54.83 ± 5.61	60.74 ± 4.72
	22°	62.01 ± 7.1	69.21 ± 6.34
小计	15°	51.03 ± 11.49	59.01 ± 15.76
	22°	57.54 ± 15.1	70.5 ± 8.03
总计		54.29 ± 15.1	64.76 ± 15.76



根据判别分析图所得 4 种降雨类型, 分别选出不同类型降雨中具有代表性的典型降雨, 分析其产流产沙规律(图 2—3)。

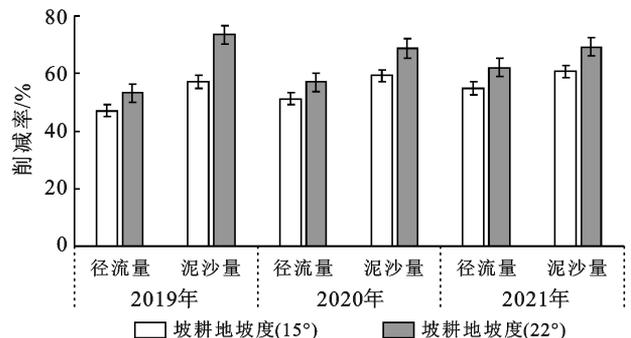
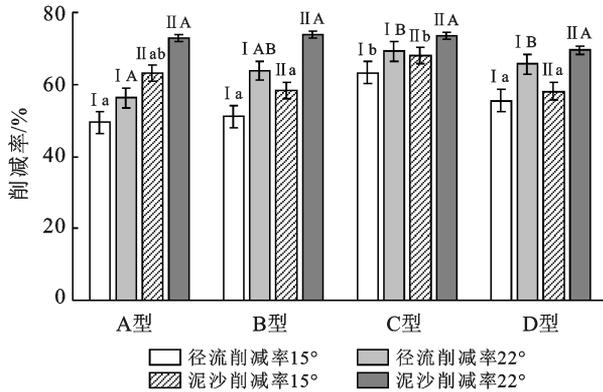


图 2 2019—2021 年迤者小流域年平均径流泥沙削减率对比

Fig.2 Comparison of annual average runoff and sediment reduction rates in Yizhe watershed from 2019 to 2021

A 型雨(降雨量大、 I_{30} 小、降雨侵蚀力小)下相同坡度年平均泥沙削减率大于径流削减率, 而坡度大的坡耕地径流及泥沙削减率大于坡度小的坡耕地; B 型雨(降雨量大、 I_{30} 大、降雨侵蚀力大)下, 不同坡度之间坡耕地径流及泥沙削减率差距较大, 22° 坡耕地的不同降雨类型之间的泥沙削减率差异不明显; C 型雨(降雨量小、 I_{30} 小、降雨侵蚀力小)下径流及泥沙削减率差距较小, 且该类型降雨下各坡度年平均径流及泥沙削减率均大于其他类型降雨; D 型雨(降雨量小、 I_{30} 大、降雨侵蚀力大)下, 相同坡度坡耕地年平均径流及泥沙削减率相近。坡度为 15° 时, A 型、B 型、

D 型降雨径流削减率差异不显著 ($p > 0.05$); B 型、D 型降雨下二者之间泥沙削减率差异不显著 ($p > 0.05$), C 型降雨下泥沙削减率显著高于 B 型、D 型。坡度为 22° 时, A 型与 C、D 型降雨之间径流削减率差异显著 ($p < 0.05$), 与 B 型降雨径流削减率差异显著 ($p < 0.05$)。



注: ab 指 15° 坡度下 4 种雨型对应的削减率数据差异显著性, 字母相同表示差异不显著 ($p > 0.05$), 字母不同代表差异显著 ($p < 0.05$); AB 指 22° 坡度下 4 中雨型对应的削减率数据差异显著性, 字母相同表示差异不显著 ($p > 0.05$), 字母不同代表差异显著 ($p < 0.05$)。

图 3 迳者小流域不同雨型影响下不同坡度坡耕地径流及泥沙削减率对比

Fig.3 Comparison of runoff and sediment reduction rates of sloping farmland with different slopes under the influence of different rainfall patterns in Yizhe watershed

同样的, 在分类过后的典型降雨中, 所有雨型均呈现出径流、泥沙削减率 22° 坡耕地对照组大于 15° 坡耕地对照组的规律, 表明 22° 等高反坡阶坡耕地控制坡面产流产沙的效果要优于 15° 等高反坡阶坡耕地。

即在相同降雨类型下, 22° 坡耕地对照组的径流及泥沙削减率均大于 15° 坡耕地对照组。相同坡度下, 不同降雨类型对径流及泥沙的削减表现为: C 型 $>$ D 型 $>$ B 型和 A 型。

2.2 不同坡度小区面源污染物氮、磷输出特征

本研究对比了年平均氮素、磷素的输出削减率 (表 6) 以及在不同降雨类型下不同坡度坡耕地氮、磷削减率的大小 (图 4)。根据 2019—2021 年各样地氮磷输出统计表数据, 等高反坡阶能有效的削减面源污染物氮、磷的输出。总磷的年平均削减率最高, 达到了 $(72.5 \pm 2.63)\%$, 远高于总氮的年平均削减率 $(58.19 \pm 6.72)\%$ 。磷酸根年平均削减率为 $(63.47 \pm 2.42)\%$, 硝态氮年平均削减率最低, 为 $(46.00 \pm 3.53)\%$, 仅次于铵态氮 $(47.8 \pm 3.71)\%$, 即削减效果为: 总磷 $>$ 磷酸根 $>$ 总氮 $>$ 铵态氮、硝态氮。说明等高反坡阶对面源污染物磷素的削减大于对氮素的削减。年总平均总氮、铵态氮、硝态氮、总磷、磷酸根削减率均呈现 22° 坡耕地对照组大于 15° 坡耕地对照组的规律, 且 3 a 间各年年平均总氮、铵态氮、硝态氮、总磷、磷酸根削减率同样呈现出上述规律, 表明 22° 等高反坡阶坡耕地控制坡面产流产沙的效果要优于 15° 等高反坡阶坡耕地。

表 6 2019—2021 年迳者小流域平均面源污染物氮、磷输出削减率统计
Table 6 Annual average surface source pollutant nitrogen and phosphorus output reduction rate statistics in Yizhe watershed during 2019—2021

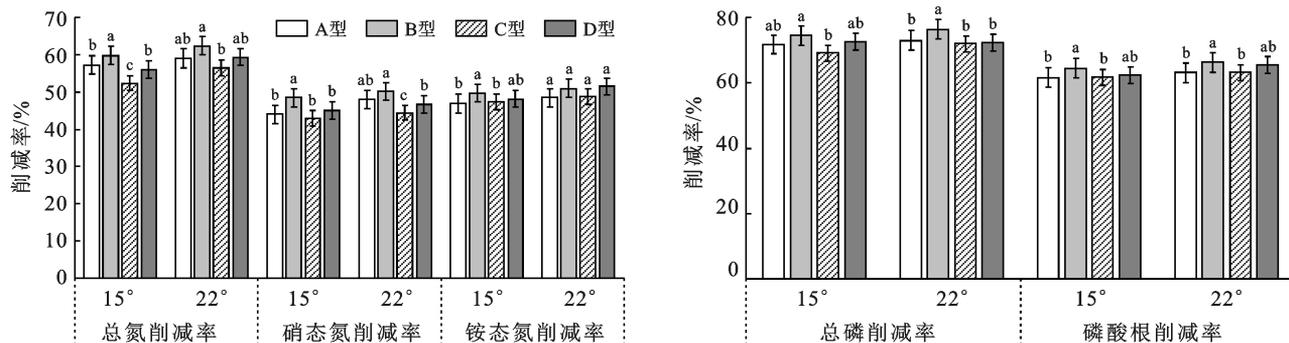
年份	坡度	年平均总氮输出 削减率/%	年平均硝态氮输出 削减率/%	年平均铵态氮输出 削减率/%	年平均总磷输出 削减率/%	年平均磷酸根输出 削减率/%
2019	15°	60.36	43.58	47.80	70.84	62.00
	22°	59.40	47.63	49.87	72.27	63.54
2020	15°	57.15	45.36	47.95	71.43	62.69
	22°	60.46	45.96	49.76	72.40	63.75
2021	15°	54.97	45.66	41.63	73.61	62.94
	22°	56.81	47.79	49.81	74.43	65.88
小计	15°	57.49	44.87	45.79	71.96	62.54
	22°	58.89	47.13	49.81	73.03	64.39
总计		58.19 ± 6.72	46.00 ± 3.53	47.8 ± 3.71	72.5 ± 2.63	63.47 ± 2.42

如图 3 所示, 相同雨型下, 22° 坡耕地对照组面源污染物氮、磷的输出削减均高于 15° 坡耕地对照组。相同坡度下, 不同降雨类型对总氮的输出影响较大, 其中不同降雨类型下坡耕地对照组的总氮削减率表现为: B 型雨 $>$ A 型雨、D 型雨 $>$ C 型雨; 硝态氮的输出受雨型影响表现为: B 型雨 $>$ A 型雨、C 型雨、D 型

雨。铵态氮受雨型及坡度的影响较小。不同降雨类型下坡耕地对照组的总磷、磷酸根输出削减率受坡度的影响较小。磷素的年平均输出削减率远高于氮素。对比 4 种雨型差异得出, 当雨量较大时 (A 型, B 型), 雨强越大则等高反坡阶坡耕地氮素和磷素的输出削减越明显; 当雨强较大时 (B 型, D 型), 雨量大的等高

反坡坡耕地氮磷输出削减会略高于或约等于同坡度下低雨量的氮磷输出削减,因此氮素和磷素输出受雨强的影响大于雨量的影响;当雨量、雨强都增大时,等高反坡阶对氮磷的输出削减率都会显著增大(B型、C

型, $p < 0.05$)。同样的,在分类过后的典型降雨中,所有雨型下氮、磷削减率均呈现出 22°坡耕地对照组大于 15°坡耕地对照组的规律,表明 22°等高反坡阶坡耕地控制坡面产流产沙的效果要优于 15°等高反坡阶坡耕地。



注: a, b 指同坡度下 4 种雨型对应的削减率数据差异显著性, 字母相同表示差异不显著 ($p > 0.05$), 字母不同表示差异显著 ($p < 0.05$)。

图 4 迤者小流域不同雨型影响下不同坡度坡耕地总氮、硝态氮、铵态氮总磷、磷酸根削减率对比

Fig. 4 Comparison of reduction rates of total nitrogen, nitrate nitrogen, ammonium nitrogen, total phosphorus and phosphate radicals in sloping farmland with different slopes under the influence of different rainfall patterns in Yizhe watershed

3 讨论

等高反坡阶具有良好的水土保持效益,能够有效的减少坡面产流产沙以及面源污染物氮、磷的输出。在降雨量较小时,等高反坡阶能够汇集已经产生的坡面径流,使之逐渐入渗,减少土壤径流,同时减少因土壤径流引起的土壤母质流失、土壤中营养元素的流失,以达到良好的水土保持效果。本研究中,布设等高反坡阶有明显的减少径流及泥沙的作用,在 22°的坡耕地对照组中,减流率达到了 $(57.54 \pm 15.1)\%$,减沙率达到了 $(70.5 \pm 8.03)\%$,均高于 15°坡耕地对照组[减流率 $(51.03 \pm 44.49)\%$;减沙率 $(59.01 \pm 15.76)\%$],这个结果与王帅兵等^[16]在对等高反坡阶的研究中的研究结果相似。结合前文分析,3 a 年间平均和各年份间径流及泥沙削减率均呈现出 22°坡耕地对照组高于 15°坡耕地对照组的规律。说明布设等高反坡阶后,22°坡耕地控制水土流失的效果更为明显,22°的坡耕地更能体现出等高反坡阶控制水土流失的能力。

以坡度作为变量来分析,本研究中 22°坡耕地对照组的总磷削减率为 $(72.5 \pm 3.71)\%$,磷酸根削减率为 $(63.47 \pm 2.63)\%$,总氮的削减率为 $(58.19 \pm 6.72)\%$,铵态氮的削减率为 $(47.80 \pm 3.71)\%$,硝态氮的削减率为 $(46.00 \pm 3.53)\%$ 。该结果与王帅兵等^[16]的研究结果相比稍低,磷素的输出削减数据与华锦欣等^[25]的研究结果相比要稍高一些,氮素与唐佐芯等^[12]的研究结果相比稍低一些。几位学者所做研究未区分坡度,故实际等高反坡阶整地措施处理下坡耕地的削减

率数据可能因坡度不同导致存在一定的波动。

对比不同坡度坡耕地对照组,本研究中 22°坡耕地对照组氮素、磷素输出削减均高于 15°坡耕地对照组对应输出削减,二者之间的差距随降雨量增大而增大。当坡度较小时,红壤区坡耕地的人渗能力更高,此时等高反坡阶起到的拦蓄地表径流作用不显著,布设等高反坡阶的坡耕地径流的输出也接近原状坡耕地,因此二者间径流、泥沙以及氮素、磷素的输出削减差异相近。随着坡度增加,氮素、磷素的输出也会随之增加^[29-30],此时等高反坡阶能更有效的拦蓄地表径流,径流削减率增大,等高反坡阶所输出的径流较原状坡耕地会更小,因此二者间径流、泥沙及氮素、磷素的输出削减差异会更大。对于氮、磷流失而言,等高反坡阶对径流的削减在很大程度上增加了坡耕地对氮、磷的吸收,即更高的径流泥沙的输出削减意味着更高的氮磷的输出削减。本研究中磷素的输出削减显著高于氮素削减,前人的研究中提出,磷素以泥沙结合态和颗粒态磷为主要流失路径,而氮素的输出径流及泥沙皆有^[12,16,31]。因此在布设等高反坡阶后,更高的泥沙输出削减则会减少更多磷素的流失,因此在相同雨型下,更高的径流输出削减意味着更高的泥沙输出削减,此时对应坡度等高反坡阶的磷素的输出削减大于对氮素的输出削减。

除去坡度外,雨量和雨强也是本研究的重点。当降雨量较小时,降雨量和降雨强度存在未超过红壤区坡耕地自身入渗能力的情况^[26,32],此时降雨强度对各坡度等高反坡阶氮素、磷素输出的影响不显著,小雨

量下铵态氮、磷素输出削减率之间差异不显著,各坡度之间差异同样不显著。当降雨量增大,超出土地自身入渗能力,此时等高反坡阶增加入渗的作用更明显,雨强即作为削减率变化的主要影响因素。雨强越大,降雨击溅侵蚀更严重,坡耕地坡面泥沙输出增大,而等高反坡阶比普通坡耕地更能减少径流、泥沙输出,即降雨量较大时,随着降雨强度增大,各坡度之间坡耕地对照组的各削减率差异更显著。

坡耕地不仅是重要的农业资源,也是农村生态环境中最脆弱的部分。如何保护和合理利用坡耕地是我们面对的重要挑战。布设等高反坡阶能够有效的增加坡耕地尤其是坡度较大的坡耕地的保水保土能力,减少坡面产流产沙,减少面源污染物氮、磷的输出,增加土壤肥力,增加土地生产力,减少流域污染,获得更好的生态、环境、经济效益,对于坡耕地以及整个流域具有重大的意义。

4 结论

(1) 等高反坡阶对于坡面产流产沙有着显著的控制效果。研究期间年平均径流输出削减率为 $(54.29 \pm 15.1)\%$,年平均泥沙输出削减率为 $(64.76 \pm 15.76)\%$ 。相同雨型下,布设等高反坡阶之后坡度为 22° 的坡耕地比坡度为 15° 的坡耕地有更显著的减流减沙效果。

(2) 等高反坡阶对面源污染物氮、磷的输出有显著的控制效果。研究期间年平均总氮输出削减率为 $(58.19 \pm 6.72)\%$,年平均硝态氮输出削减率为 $(46.00 \pm 3.53)\%$,年平均铵态氮输出削减率为 $(47.8 \pm 3.71)\%$,年平均总磷输出削减率为 $(72.5 \pm 2.63)\%$,年平均磷酸根输出削减率为 $(63.47 \pm 2.42)\%$ 。相同雨型下,布设等高反坡阶之后坡度为 22° 的坡耕地比坡度为 15° 的坡耕地有更显著的减少面源污染物氮、磷输出的作用。

[参 考 文 献]

[1] 毛妍婷,刘宏斌,郭树芳,等.耕作措施对坡耕地红壤地表面径流氮磷流失的影响[J].水土保持学报,2020,34(5):26-33.

[2] 曹媛,孙鹏,姚蕊,等.不同雨强条件下工程措施对坡地产生沙影响[J].水土保持学报,2020,34(6):1-7.

[3] Hobbs P R, Sayre K, Gupta R. The role of conservation agriculture in sustainable agriculture [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B, Biological Sciences, 2008,363(1491):543-555.

[4] 李青,高志强,孙敏,等.偏旱年休闲期施肥覆盖对旱地小麦播前土壤水分的影响及其与产量的相关分析[J].中国

农学通报,2013,29(9):112-116.

- [5] 刘一帆.半干旱区植被恢复的水土流失调控效应研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2019.
- [6] Wang Guoqiang, Wu Binbin, Zhang Lei, et al. Role of soil erodibility in affecting available nitrogen and phosphorus losses under simulated rainfall [J]. Journal of Hydrology, 2014,514:180-191.
- [7] 雷秀美,王飞,周碧青,等.长期施肥对稻田土壤可溶性有机氮和游离氨基酸剖面分异的影响[J].农业环境科学学报,2019,38(7):1550-1559.
- [8] Yu Chaoqing, Huang Xiao, Chen Han, et al. Managing nitrogen to restore water quality in China [J]. Nature, 2019,567(7749):516-520.
- [9] 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.
- [10] 褚利平,王克勤,白文忠,等.水平阶影响坡地产生沙及氮磷流失的试验研究[J].水土保持学报,2010,24(4):1-6.
- [11] 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.
- [12] 唐佐芯,王克勤,李秋芳,等.等高反坡阶对坡耕地产生沙和氮磷迁移的作用研究[J].水土保持研究,2013,20(1):1-8.
- [13] 刘晓微,赵洋毅,王克勤,等.坡耕地等高反坡阶整地年限对土壤改良和玉米产量的影响[J].水土保持学报,2022,36(1):307-315.
- [14] 张洋,王克勤,赵洋毅,等.等高反坡阶对玉米生长及光合特性的影响[J].水土保持通报,2020,40(6):71-77.
- [15] 项俊寒,李贵仁,任千铎.降雨强度对植生滤带削减农业面源污染效率的研究[J].地下水,2019,41(6):55-57.
- [16] 王帅兵,王克勤,宋娅丽,等.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[J].水土保持学报,2017,31(6):39-45.
- [17] 苏孟白,王克勤,宋娅丽,等.滇中尖山河流域不同土地利用类型产流及氮磷流失特征[J].水土保持研究,2020,27(5):24-31.
- [18] Deng Longzhou, Fei Kai, Sun Tianyu, et al. Characteristics of runoff processes and nitrogen loss via surface flow and interflow from weathered granite slopes of Southeast China [J]. Journal of Mountain Science, 2019,16(5):1048-1064.
- [19] 常松果,胡雪琴,史东梅,等.不同土壤管理措施下坡地产生沙和氮磷流失特征[J].水土保持学报,2016,30(5):34-40.
- [20] 王剑,王肖君,斯圆丽,等.平衡减量施肥和行间配植对白茶园氮磷流失的影响[J].水土保持学报,2021,35(3):69-76.

(下转第31页)

- [4] 胡昭,张懿,郭建.黄土丘陵区典型林地土壤团聚体稳定性评价[J].人民黄河,2020,42(8):104-108.
- [5] 王紫薇,邵明安,黄来明,等.青海省东部不同土地利用方式下土壤饱和导水率分布及其影响因素[J].水土保持学报,2021,35(3):150-155.
- [6] 冯璐.黄土丘陵沟壑区撂荒草地土壤性质变化特征研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2020.
- [7] 海龙,姚拓,张春红,等.黄土丘陵沟壑区不同年限苜蓿地土壤水稳性团聚体分布特征及稳定性研究[J].干旱地区农业研究,2020,38(5):51-56.
- [8] 陈文媛,张少妮,华瑞,等.黄土丘陵区林草恢复进程中土壤入渗特征研究[J].北京林业大学学报,2017,39(1):62-69.
- [9] Liu Yifan, Liu Yu, Shi Zhihua, et al. Effectiveness of re-vegetated forest and grassland on soil erosion control in the semi-arid Loess Plateau [J]. *Catena*, 2020,195:104787.
- [10] Zeng Quanchao, Darboux F, Man Cheng, et al. Soil aggregate stability under different rain conditions for three vegetation types on the Loess Plateau (China) [J]. *Catena*, 2018,167:276-283.
- [11] 赵克昌,屈连宝.兰州南北两山植被恢复策略[J].中国沙漠,2006,26(3):493-497.
- [12] 李娟.基于 GIS 和 RS 的兰州市南北两山植被覆盖动态变化研究[D].甘肃 兰州:西北师范大学,2009.
- [13] 王润泽,谌芸,李铁,等.紫色土区植物篱篱前淤积带土壤团聚体稳定性特征研究[J].水土保持学报,2018,32(2):210-216.
- [14] 邱陆畅,张丽萍,陆芳春,等.基于熵权法的林下土壤抗蚀性评价及影响因素分析[J].水土保持学报,2016,30(4):74-79.
- [15] Nimmo J R, Schmidt K M, Perkins K S, et al. Rapid measurement of field-saturated hydraulic conductivity for areal characterization [J]. *Vadose Zone Journal*, 2009,8(1):142-149.
- [16] 陈文媛,徐学选,华瑞,等.黄土丘陵区林草退耕年限对土壤团聚体特征的影响[J].环境科学学报,2017,37(4):1486-1492.
- [17] 白秀梅,韩有志,郭汉清.关帝山不同植被恢复类型土壤抗蚀性研究[J].水土保持学报,2014,28(2):79-84.
- [18] Abbas F, Zhu Zhaolong, An Shaoshan. Evaluating aggregate stability of soils under different plant species in Ziuling Mountain area using three renowned methods [J]. *Catena*, 2021,207:105616.
- [19] Wu Xinliang, Cai Chongfa, Wang Jinguang, et al. Spatial variations of aggregate stability in relation to sesquioxides for zonal soils, South-central China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2016,157:11-22.
- [20] 王辉,王全九,邵明安.表层土壤容重对黄土坡面养分随径流迁移的影响[J].水土保持学报,2007,21(3):10-13.
- [21] 刘旦旦,张鹏辉,王健,等.黄土坡面不同土地利用类型土壤抗蚀性对比[J].林业科学,2013,49(9):102-106.
- [22] 李阳芳,宋维峰,和俊,等.元阳梯田核心区不同土地利用类型土壤水文效应研究[J].水土保持研究,2012,19(6):54-57.
- [23] 杨振奇,郭建英,秦富仓,等.裸露砂岩区不同植被类型土壤团聚体稳定性与抗蚀性能[J].水土保持通报,2021,41(3):8-14.
- [24] 刘畅,张建军,张海博,等.晋西黄土区退耕还林后土壤入渗特征及土壤质量评价[J].水土保持学报,2021,35(5):101-107.
- [25] 刘效东,乔玉娜,周国逸.土壤有机质对土壤水分保持及其有效性的控制作用[J].植物生态学报,2011,35(12):1209-1218.

(上接第 7 页)

- [21] 宋科,秦秦,郑宪清,等.水肥一体化结合植物篱对减缓果园土壤氮磷地表径流流失的效果[J].水土保持学报,2021,35(3):83-89.
- [22] 缪杰杰,刘运峰,胡宏祥,等.不同施肥模式对稻田氮磷流失及产量的影响[J].水土保持学报,2020,34(5):86-93.
- [23] 黄薇,王冬梅,李平,等.青海高寒区典型植被地表径流及氮磷流失特征[J].农业工程学报,2021,37(13):92-100.
- [24] 刘晓燕,张国珍.中国水环境非点源污染负荷的估算研究[J].环境科学与管理,2007,32(6):63-66.
- [25] 华锦欣,王克勤,张香群,等.昆明松华坝水源区等高反坡阶对坡耕地土壤磷含量的影响研究[J].中南林业科技大学学报,2016,36(3):76-81.
- [26] 华锦欣,王克勤,张香群,等.等高反坡阶对松华坝水源区弃荒地植被恢复的初期影响[J].西南林业大学学报,2016,36(3):116-120.
- [27] 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.
- [28] 王帅兵,宋娅丽,王克勤,等.不同雨型下反坡台阶减少红壤坡耕地氮磷流失的效果[J].农业工程学报,2018,34(13):160-169.
- [29] Auerswald K, Fiener P, Dikau R. Rates of sheet and rill erosion in Germany: A meta-analysis [J]. *Geomorphology*, 2009,111(3/4):182-193.
- [30] 钟雄,张丽,张乃明,等.滇池流域坡耕地土壤氮磷流失效应[J].水土保持学报,2018,32(3):42-47.
- [31] 陈开放.不同降雨和施肥条件下茶园坡地地表径流和壤中流氮磷流失通量研究[D].河南 郑州:郑州大学,2020.
- [32] 王军,魏飒,刘凤婵,等.坡耕地降雨径流与土壤侵蚀特征研究[J].河北农业科学,2021,25(4):88-92.