

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

刘晓微¹, 赵洋毅¹, 王克勤¹, 马彩霞¹, 段旭², 张洋¹

(1.西南林业大学生态与环境学院,昆明 650224; 2.西南林业大学林学院,昆明 650224)

摘要: 为探究等高反坡阶整地改良红壤坡耕地土壤质量的效果,利用田间定位试验,以滇中昆明松华坝迤者流域坡耕地试验区已实施等高反坡阶整地措施3(CRT 3),7(CRT 7),9(CRT 9)年的样地及原状坡耕地(CK)为研究对象,结合各样地玉米产量探明实施年限对土壤结构、肥力和酶活性特征的影响。结果表明:等高反坡阶整地年限显著改善坡耕地土壤的物理性状,呈现黏粒、粉粒、总团聚体和总孔隙度显著增加,砂粒和容重显著降低;提高了土壤肥力,其中全氮、全磷、全钾、速效磷、速效钾含量和含水量显著提高;显著提高土壤酶活性,其中脲酶、淀粉酶、蔗糖酶、磷酸酶、蛋白酶、过氧化氢酶较CK分别提高24.25%~117.43%,20.90%~82.82%,17.09%~99.69%,30.15%~82.63%,32.21%~66.50%和11.67%~41.39%;同时玉米产量得到显著提高,以CRT 9效果最为明显,增产达22.47%。等高反坡阶整地措施可以较好地提高坡耕地土壤肥力,且随整地年限的增加,土壤质量得到改善,有效减缓土地退化。

关键词: 等高反坡阶; 坡耕地; 土壤改良; 理化性质; 土壤酶活性

中图分类号:S158.3

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2022)01-0307-09

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2022.01.039

Effects of Site Preparation Years of Contour Reverse-slope Terrace on Soil Improvement and Corn Yield in Sloping Farmland

LIU Xiaowei¹, ZHAO Yangyi¹, WANG Keqin¹, MA Caixia¹, DUAN Xu², ZHANG Yang¹

(1. College of Ecology and Environment, Southwest Forestry University,

Kunming 650224; 2. College of Forestry, Southwest Forestry University, Kunming 650224)

Abstract: A field experiment was conducted to study the improvement effect of soil quality in sloping red cultivated land by contour reverse-slope terrace. The small watershed of Yizhe in Songhua Dam in Kunming northern suburb of central Yunnan was selected as a research area in this study, the 3-years (CRT 3), 7-years (CRT 7), 9-years (CRT 9) samples in contour reverse-slope terrace and unaltered sloping farmland (CK) were used as the research objects, combined with corn yield in various samples, the effects of implementing years on soil structure, fertility and enzymes activities were investigated. The results showed that the soil physical properties of sloping farmland were significantly improved by the growing land preparation years of the contour reverse-slope terrace. It appeared that the soil clay, silt, total aggregate and total porosity increased significantly, while the sand content and bulk density decreased significantly. It increased soil fertility, among which the concentrations of total nitrogen, total phosphorus, total potassium, available phosphorus, available potassium and water content were significantly increased, and among which urease, amylase, sucrase, phosphatase, protease and catalase activities were increased by 24.25% ~ 117.43%, 20.90% ~ 82.82%, 17.09% ~ 99.69%, 30.15% ~ 82.63%, 32.21% ~ 66.50% and 11.67% ~ 41.39%, respectively. At the same time, corn yield was significantly increased, and CRT 9 had the most obvious effect, which increased by 22.47%. Land preparation measures of contour reverse-slope terrace could improve the soil environment of sloping farmland, and with the increases of land preparation years, soil quality would be better improved, effectively reduced land degradation.

Keywords: contour reverse-slope terrace; slope farmland; soil improvement; soil physical and chemical properties; soil enzyme activity

收稿日期:2021-07-08

资助项目:云南省基础研究计划项目(202001AT070136);国家自然科学基金项目(42067005);云南省万人计划青年拔尖人才项目(YNWR-QNBJ-2019-215, YNWR-QNBJ-2019-226);国家林草局林业科技创新平台运行补助项目(2020132078, 2020132550)

第一作者:刘晓微(1996—),女,硕士研究生,主要从事坡耕地水土保持研究。E-mail:1193869893@qq.com

通信作者:赵洋毅(1980—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事水土保持与小流域环境综合治理研究。E-mail:yyz301@foxmail.com

土壤是人类赖以生存的重要资源,为植物生长提供养分供给和机械支撑^[1]。土壤质量是土壤物理性质、化学性状及生物活性的综合作用和反映,能够敏感指示土壤动态变化,揭示土壤退化,反映土壤管理水平^[2-3],了解土壤质量不仅能得出土壤养分失衡规律,还有助于保持土壤肥力水平进而提高作物品质和产量^[4]。然而近年来,我国耕地土壤质量退化明显,土壤肥力下降严重,作物产量大幅减产^[5],其中云南坡耕地尤为突出^[6],因为其复杂的地形地貌和人类不合理耕作管理,表层土体易随雨水的分散冲刷而不断流失,造成土壤侵蚀加重,引起土壤结构和生物化学性质改变、土壤养分流失加剧、土壤资源可持续利用能力减弱、土壤肥力降低,作物产量下降^[7-8]。因此,研究坡耕地水土流失治理,改良土壤质量,减少其危害是云南农业可持续发展的关键。

合理的水土流失治理措施可以削减径流泥沙流失,提高土壤质量,有效改善作物生长环境^[9]。目前常见的水土流失治理措施主要包括植物篱、坡改梯工程、保护性耕作和秸秆还田等^[10-11],张杰等^[9]研究发现,不同水土保持措施在减流减沙、减少养分流失及土壤改良等方面综合效益不同,以植物措施最优。李秋芳等^[12]在红壤坡耕地不同治理措施中发现,布设有草带的等高反坡阶土壤流失量、减流减沙效益均显著高于原状坡耕地。前人^[13-15]研究表明,等高反坡阶作为一种典型的水土流失治理措施,对坡面降水可进行再分配,阻止泥沙产生,对地表径流起调控作用,能够增加土壤入渗速率,改变土壤理化性质,提高作物对土壤水养分的吸收。然而当前有关等高反坡阶措施的研究主要集中于水分特征、土壤氮磷流失和植被恢复等方面,针对等高反坡阶不同整地年限土壤质量

变化的研究还鲜有报道。鉴于此,本研究利用前期已建立的试验区平台,探明等高反坡阶不同整地年限后,坡耕地土壤理化性状、土壤酶活性及玉米产量的变化,以期进一步了解等高反坡阶整地年限对坡耕地土壤改良的影响,同时为提高云南坡耕地玉米种植提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于云南省昆明市松华坝水库迳者村(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,海拔 2 010~2 590 m。小流域为河谷地带,气候类型属于北亚热带和暖温带综合型,年平均降水量 785.1 mm,年蒸发量 1 341 mm,年均气温 13.8 ℃,平均降雨天数 130 天,雨季(5—10 月)雨量集中在 80%以上,呈夏秋多雨、冬春干旱的特点。研究区土壤以第三纪古红土发育的赤红壤为主,零星地区有黄棕壤分布,偏酸性。

1.2 样地设置

研究样地位于松华坝水源区迳者小流域试验示范区内,包括原状坡耕地(CK)和等高反坡阶样地(CRT),共 8 块样地,水平投影面积均为 5 m×20 m,其他立地条件基本一致,其中等高反坡阶样地分别包括整地年限为 3 年(CRT 3)、7 年(CRT 7)和 9 年(CRT 9)的样地,每个样地均设有 2 组重复。等高反坡阶样地沿等高线自上而下里切外垫,修成 1 个台面,反坡 5°,阶长 5 m,阶宽 1.2 m,2 条反坡台阶之间距离 7.5 m^[12-15]。研究区样地基本情况见表 1,所有样地均选择玉米进行种植,播种时间 2020 年 5 月 20 日,种植密度 40 000 株/hm²,收获时间 2020 年 10 月 14 日,各样地施肥管理措施同步。

表 1 研究区样地基本情况

样地	海拔/ m	坡度/ (°)	坡向	种植 类型	植被 覆盖度/%	土壤容重/ (g·cm ⁻³)	毛管 孔隙度/%	通气 孔隙度/%
原状坡耕地(CK)	2220	15	南北向	玉米	80	1.23	39.28	9.09
等高反坡阶 3 年(CRT 3)	2220	15	南北向	玉米	80	1.18	42.34	10.11
等高反坡阶 7 年(CRT 7)	2220	15	南北向	玉米	80	1.15	45.02	14.09
等高反坡阶 9 年(CRT 9)	2220	15	南北向	玉米	80	1.09	61.02	16.58

1.3 土壤样品采集

在研究样地内随机设立 3 个采样点,每个采样点去除表层枯枝落叶,挖掘土壤剖面,分别在 0—10, 10—20, 20—30, 30—40 cm 土层采集 3 个环刀和 3 个铝盒,测定土壤含水量和土壤容重,并将采样点相同土层土样混匀,除去石块和残根,四分法取土装袋密封,冰袋保持土样 0~4 ℃,迅速运回实验室,一部分土样按自然结构轻轻掰成 1 cm³ 大小的土块,室内自然风干,用于测定土壤团聚体;另一部分过 2 mm

筛后再将其分为 2 份,一份放入 4 ℃ 冰箱保存,测定土壤酶活性,另一份存放于室内风干,研磨过 1,0.25 mm 筛后测定土壤理化性质。

1.4 测定方法

1.4.1 土壤理化性质测定 土壤含水量采用铝盒烘干法测定;采用环刀法称重计算土壤容重,利用容重数据计算总孔隙度^[16];全氮采用硫酸—过氧化氢消煮,定氮仪自动分析法测定;全磷采用硫酸—高氯酸消煮,钼锑抗比色法测定;速效磷采用盐酸—氟化氨

浸提,钼锑抗比色法测定;全钾采用氢氟酸—高氯酸
 消煮,火焰光度法测定;速效钾采用中性乙酸铵提取,
 火焰光度法^[17]测定;土壤机械组成和团聚体:土样过
 0.1 mm 标准套筛,分离出 2~5,1~2,0.5~1,0.25~
 0.5,<0.25 mm 粒级团聚体,将<0.1 mm 过筛土样
 洗入沉降筒进行测定^[18]。平均重量直径(MWD,
 mm)计算公式^[19]为:

$$\text{MWD}=\frac{\sum_{i=1}^nD_iW_i}{W}$$

(1)

式中: D_i 为各粒级团聚体的平均直径(mm); W_i 为第
i 个套筛的团聚体重量比例(%)。

1.4.2 土壤酶活性测定 脲酶活性采用苯酚一次氯
 酸钠比色法测定;淀粉酶和蔗糖酶活性采用 3,5-二
 硝基水杨酸比色法测定;蛋白酶活性采用比色法测
 定;酸性磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定;过
 氧化氢酶活性采用高锰酸钾滴定法^[20]测定。

1.4.3 玉米产量测定 待玉米成熟后,各样地随机选
 取 5 棵玉米测定穗行数和行粒数,同时进行脱粒,晒干
 后分别取 100 粒玉米称重,取其平均值作为玉米的百粒
 重,玉米产量以实收产量来计算,并折算单产(kg/hm²)。

1.5 数据处理

采用 Excel 软件进行数据处理,各指标的差异性
 检验采用 SPSS 软件进行分析,显著性水平 $\alpha=0.05$,
 Duncan 法进行多重比较,采用 Origin 软件制图。

2 结果与分析

2.1 等高反坡阶整地年限对土壤理化性质和酶活性的影响

对 CK 和 CRT 不同年限 4 个土层土样进行土
 壤机械组成分析(表 2)发现,试验样地土壤以粉粒
 (0.05~0.001 mm)为主,砂粒(1~0.05 mm)约占
 45%,黏粒(<0.001 mm)占 5%。CRT 3、CRT 7、
 CRT 9 中的土壤砂粒含量较 CK 分别减少 3.65%,
 8.21%,11.66%,粉粒含量增加 1.99%,3.18%,4.77%,
 黏粒含量增加 0.51%,52.26%,64.66%,不同整地年
 限样地的土壤质地彼此均存在显著差异,说明随整地
 年限的增加,砂粒含量显著下降,粉粒和黏粒含量显
 著上升。从表 2 可以看出,相同样地不同土层间土壤
 机械组成含量差异显著,砂粒含量随着土层深度的增
 加呈下降趋势,粉粒和黏粒含量呈上升趋势。

CK 和 CRT 不同年限土壤剖面各层不同粒级间
 水稳性团聚体含量差异较大,但水稳定性团聚体均以
 <0.25 mm 为主,0.25~0.5 mm 最少(表 3)。CRT
 不同整地年限样地的总团聚体含量较 CK 分别增加
 27.92%,34.87%,47.63%,均与 CK 呈显著差异,说
 明随着整地年限的增加,土壤总团聚体含量呈上升趋

势,具体表现为 CRT 9>CRT 7>CRT 3>CK。在
 垂直土层剖面中,总团聚体含量分布自上而下逐渐减
 少,规律均为 0—10 cm 土层>10—20 cm 土层>
 20—30 cm 土层>30—40 cm 土层。土壤 MWD 在
 不同整地年限样地下的变化趋势同土壤总团聚体,各
 样地间差异显著,CRT 3、CRT 7、CRT 9 较 CK 分别
 高 55.00%,62.50%,88.75%;随土层的加深,MWD
 呈下降趋势;CRT 不同土层下的 MWD 均高于 CK
 中的对应土层。

表 2 不同整地年限土壤机械组成

土层 深度/cm	样地	土壤质地分级/%		
		砂粒 (1~0.05 mm)	粉粒 (0.05~0.001 mm)	黏粒 (<0.001 mm)
0—10	CK	46.38±0.50Aa	52.65±0.56Cd	0.97±0.00Bc
	CRT3	46.13±0.26Aa	52.69±0.42Cd	1.18±0.16Bc
	CRT7	43.43±0.32Ba	54.29±0.14Bd	2.28±0.27Ab
	CRT9	42.07±0.32Ca	55.64±0.31Ad	2.29±0.13Ac
10—20	CK	35.41±0.10Ab	63.12±0.12De	1.47±0.02Bb
	CRT3	32.37±0.07Bb	66.39±0.12Cc	1.24±0.19Bbc
	CRT7	30.21±0.12Cb	67.41±0.15Bc	2.38±0.27Ab
	CRT9	29.08±0.26Db	68.47±0.26Ac	2.45±0.11Ab
20—30	CK	31.66±0.21Ac	66.31±0.34Cb	2.03±0.17Bb
	CRT3	29.46±0.51Bc	68.45±0.64Bb	2.09±0.33Bab
	CRT7	29.28±0.38Bc	68.15±0.28Ab	2.57±0.13Ab
	CRT9	28.23±0.06Cc	69.12±0.08Ab	2.65±0.14Aa
30—40	CK	27.10±0.11Ad	70.71±0.27Ba	2.19±0.16Ca
	CRT3	26.14±0.44Ad	71.64±0.39Ba	2.22±0.21Ca
	CRT7	25.01±0.27Bd	72.32±0.37Aa	2.67±0.16Ba
	CRT9	24.12±0.34Cd	72.68±0.39Aa	3.20±0.08Aa

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同大写字母表示相同土
 层不同样地数据间差异显著($P<0.05$);不同小写字母表示相
 同样地不同土层数据间差异显著($P<0.05$)。下同。

由表 4 可知,CRT 整地措施可显著改善土壤容
 重,且随着整地年限的增加,土壤容重逐渐减少,CRT 3、
 CRT 7、CRT 9 土壤容重较 CK 分别降低 0.19%,
 13.12%,16.91%;在 CRT 不同土层中土壤容重均低于
 CK,随着土层的加深,呈现出上升趋势;在 0—10,20—
 30 cm,CK 下的土壤容重与 CRT 7、CRT 9 存在显著差
 异性,与 CRT 3 差异不显著;10—20,30—40 cm,CK 与
 CRT 样地间的土壤容重均达到显著水平($P<0.05$)。

CRT 整地措施可显著提高土壤总孔隙度,各样地间
 增效显著(表 4)。随着整地年限的增加,土壤总空隙度
 大致呈上升趋势,CRT 3、CRT 7、CRT 9 土壤总孔隙度
 较 CK 分别提高 0.70%,11.68%,61.91%,且 CRT 9 与
 CRT 3、CRT 7、CK 均差异显著。随着土层深度的下移,
 土壤总孔隙度表现趋势为 0—10 cm 土层>10—20 cm
 土层>20—30 cm 土层>30—40 cm 土层。

CRT 整地措施对土壤含水量的影响不同(表 4),

随着年限的增加,土壤含水量呈上升趋势,与 CK 相比,CRT 整地措施可显著提高土壤含水量,增幅为 22.44%~55.25%。含水量随土层深度的增加而有所增加,整体上不同土层间的土壤含水量差异显著。

表 3 不同整地年限水稳性团聚体及平均重量直径(MWD)

样地	土层 深度/cm	团聚体含量/%					总团聚体/%	平均重量 直径/mm
		2~5 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm	<0.25 mm		
CK	0—10	12.42±0.43Ca	3.58±0.04Bc	9.72±0.17Ba	3.39±0.11Cc	22.71±1.16Ba	51.82±1.07Ca	0.30±0.01Ba
	10—20	6.35±0.19Db	7.51±0.28Aa	6.65±0.35Cb	7.22±0.21Ba	16.64±0.62Bb	44.37±1.68Cb	0.22±0.03Cb
	20—30	4.08±0.09Dd	5.24±0.21Bb	5.38±0.27Cc	4.95±0.06Cb	15.37±0.38Cb	35.02±1.17Cc	0.15±0.02Bc
	30—40	4.94±0.18Cc	1.07±0.04Cd	5.22±0.22Cc	4.93±0.21Bb	12.91±0.26Cc	29.07±1.08Cd	0.13±0.02Cc
CRT 3	0—10	20.79±1.79Aa	3.05±0.34Cc	4.72±0.49Cc	5.51±0.50Ba	25.02±2.21Ba	59.09±2.99Ba	0.42±0.03Aa
	10—20	10.59±0.49Cb	6.75±0.23Ba	11.17±0.86Bab	1.46±0.23Dc	21.73±0.69Aab	51.69±1.71Bb	0.30±0.02Bb
	20—30	11.38±0.12Cb	5.03±0.06Bb	12.71±1.13Aa	3.87±0.41Db	18.54±1.02Bb	51.53±1.27Bb	0.29±0.06Ab
	30—40	9.62±0.61Bb	1.19±0.18Cd	9.74±0.77Bb	1.18±0.18Dc	20.98±2.71Ab	42.71±2.89Bc	0.23±0.03Bb
CRT 7	0—10	17.73±0.67Ba	7.38±0.35Aa	10.06±0.16Bb	1.22±0.11Dd	29.89±0.98Aa	66.28±2.01Aa	0.42±0.03Aa
	10—20	12.33±0.22Bb	2.98±0.13Cd	12.66±0.66Ba	2.82±0.17Ca	22.49±1.59Ab	53.28±3.00Bb	0.30±0.01Bb
	20—30	12.41±0.20Bb	6.68±0.25Ab	7.99±0.05Bc	1.46±0.23Bc	21.73±0.69Bc	51.07±2.47Bb	0.29±0.04Abc
	30—40	10.44±0.22Bc	5.60±0.34Ac	2.02±0.07Dd	2.31±0.27Cb	23.29±1.80Ab	43.66±1.33Bc	0.25±0.02Abc
CRT 9	0—10	19.31±1.82ABa	3.93±0.23Ba	10.82±0.24Ab	8.55±0.47Aa	24.38±1.61Ba	66.99±3.73Aa	0.44±0.03Aa
	10—20	17.35±0.87Aab	1.19±0.18Dd	17.89±1.67Aa	9.25±0.82Aa	15.87±1.12Bb	61.55±3.08Aab	0.41±0.04Aa
	20—30	16.38±0.91Ab	1.91±0.11Cc	11.83±0.34Ab	6.87±0.27Ab	22.74±1.73Aa	59.73±3.84Ab	0.37±0.06Aab
	30—40	12.09±0.92Ac	2.25±0.17Bb	11.67±0.33Ab	5.96±0.26Ab	16.38±0.52Bb	48.35±1.12Ac	0.29±0.02Ab

表 4 不同整地年限土壤理化性质比较

土层 深度/cm	样地	土壤容重/ (g·cm ⁻³)	含水量/%	总孔隙度/%	全氮/ (g·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)	全钾/ (g·kg ⁻¹)	速效磷/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)
0—10	CK	1.32±0.05Ac	11.26±0.72Dc	51.08±0.75Db	2.35±0.14Ca	4.60±0.45Ca	7.13±1.07Ba	38.03±1.76Ba	62.59±0.55Da
	CRT 3	1.29±0.05Ac	14.27±1.28Cd	63.64±0.97Ca	2.50±0.14BCa	6.10±0.91Ba	10.55±1.58Aa	40.37±1.87Ba	71.25±0.55Ca
	CRT 7	1.11±0.05Bb	19.77±1.78Bc	65.27±0.80Ba	2.80±0.17Ba	6.91±0.36ABa	10.80±1.61Aa	41.43±1.92Ba	72.93±0.55Ba
	CRT 9	1.05±0.05Bc	23.06±2.07Ac	97.10±1.41Aa	4.47±0.26Aa	7.26±0.41Aa	10.94±1.64Aa	55.35±2.57Aa	85.57±0.55Aa
10—20	CK	1.40±0.05Ab	16.52±0.67Cb	54.36±1.25Ba	1.99±0.03Cb	4.77±0.34Ca	5.50±0.82Bb	23.00±2.33Cb	64.68±0.66Da
	CRT 3	1.37±0.05ABb	19.22±0.25Bc	55.53±0.36Bb	2.60±0.35Ba	5.54±0.30BCbc	8.51±1.27Abc	30.56±3.09Bb	73.34±0.66Ca
	CRT 7	1.29±0.05Ba	22.78±0.71Ab	55.95±0.78Ba	2.64±0.35Ba	6.16±0.80Bab	7.96±1.19Ab	36.30±0.92Bb	75.24±0.95Ba
	CRT 9	1.20±0.05Cb	23.86±0.74Abc	77.09±0.69Ab	3.96±0.16Ab	7.19±0.45Aab	10.35±1.55Aab	52.08±5.27Aa	79.60±0.89Aab
20—30	CK	1.49±0.01Aa	17.34±0.37Cb	47.38±0.61Dc	1.27±0.04Cc	3.61±0.74Bb	4.91±0.73Cb	14.69±1.31Cc	56.22±0.32Cab
	CRT 3	1.47±0.03Aa	21.65±0.65Bb	49.24±0.64Cc	1.90±0.06Bb	4.76±0.69ABbc	6.34±0.95BCbc	22.73±2.03Bc	64.89±0.31BCabc
	CRT 7	1.27±0.01Ba	25.40±1.42Aa	54.46±0.88Ba	1.95±0.06Bb	4.73±0.68ABbc	7.59±1.13ABbc	25.92±2.31Bc	68.63±0.89BCa
	CRT 9	1.24±0.03Ba	25.47±0.47Aab	79.49±0.99Ac	3.36±0.29Ac	6.07±0.72Abc	9.14±1.37Aab	41.02±3.66Ab	71.48±0.78Aab
30—40	CK	1.51±0.01Aa	18.77±0.70Ca	41.30±0.68Dd	1.09±0.22Cc	3.23±0.48Cb	4.16±0.62Bb	6.29±0.94Cd	50.47±0.70Db
	CRT 3	1.48±0.01Ba	23.08±0.19Ba	39.30±0.83Cd	1.71±0.34Bb	3.78±0.56BCc	4.69±0.70Bc	11.32±1.69Bd	59.14±0.71Cb
	CRT 7	1.30±0.01Ca	27.31±0.54Aa	51.11±0.76Bb	1.89±0.38ABb	4.99±0.74ABc	5.55±0.83Bc	15.28±2.28Bd	63.47±0.70Ba
	CRT 9	1.27±0.01Da	26.80±0.70Aa	60.62±0.82Ad	2.28±0.14Ad	5.09±0.76Ac	8.03±1.20Ab	24.05±3.59Ac	68.34±0.81Ab

CRT 整地年限对土壤养分含量(全氮、全磷、全钾、速效磷和速效钾)均有显著促进作用,整地年限越长,土壤养分指标含量越高(表 4)。CRT 9 的全氮含量较 CK 增量达 1.09 倍,CRT 3 与 CRT 7 较 CK 也增加了 22.92%和 38.32%,且不同整地年限样地的全氮含量彼此均达到显著水平。与 CK 相比,CRT 整地措施的全磷含量增幅为 24.47%~58.03%,CRT 9 的全磷含量与 CRT 3、CRT 7、CK 均存在显著差异。在不同样地,CRT 9 中的全钾含量最高,含量在 8.03~10.94 g/kg,较 CK 高 77.26%;CRT 7 次之,含量在 5.55~10.80 g/kg,较 CK 高 47.04%,CRT 3 较 CK 高 38.70%。速效磷含量在不同样地表现出 CRT 9> CRT 7> CRT 3> CK,CRT 9 是 CK 的 1.10 倍,CRT 3 与 CRT 7 较 CK 分别高 28.00%和 45.01%。与 CK 相比,CRT 3、CRT 7、CRT 9 的土壤速效钾含量分别高 14.81%,19.79%,30.36%,CRT 整地措施显著增加土壤速效钾含量。垂直方向,土壤表层(0—20 cm)养分含量均高于 20—40 cm,不同样地相同土层间土壤养分含量差异显著。由此可见,CRT 整地措施可显著增加土壤养分,从而改善土壤肥力。

随着土层深度的增加,CK 和 CRT 不同整地年限土壤脲酶、淀粉酶、蔗糖酶、磷酸酶、蛋白酶和过氧化氢酶活性整体均呈降低趋势。与 CK 相比,CRT 整地措施显著提高了土壤酶活性,且随整地年限的增

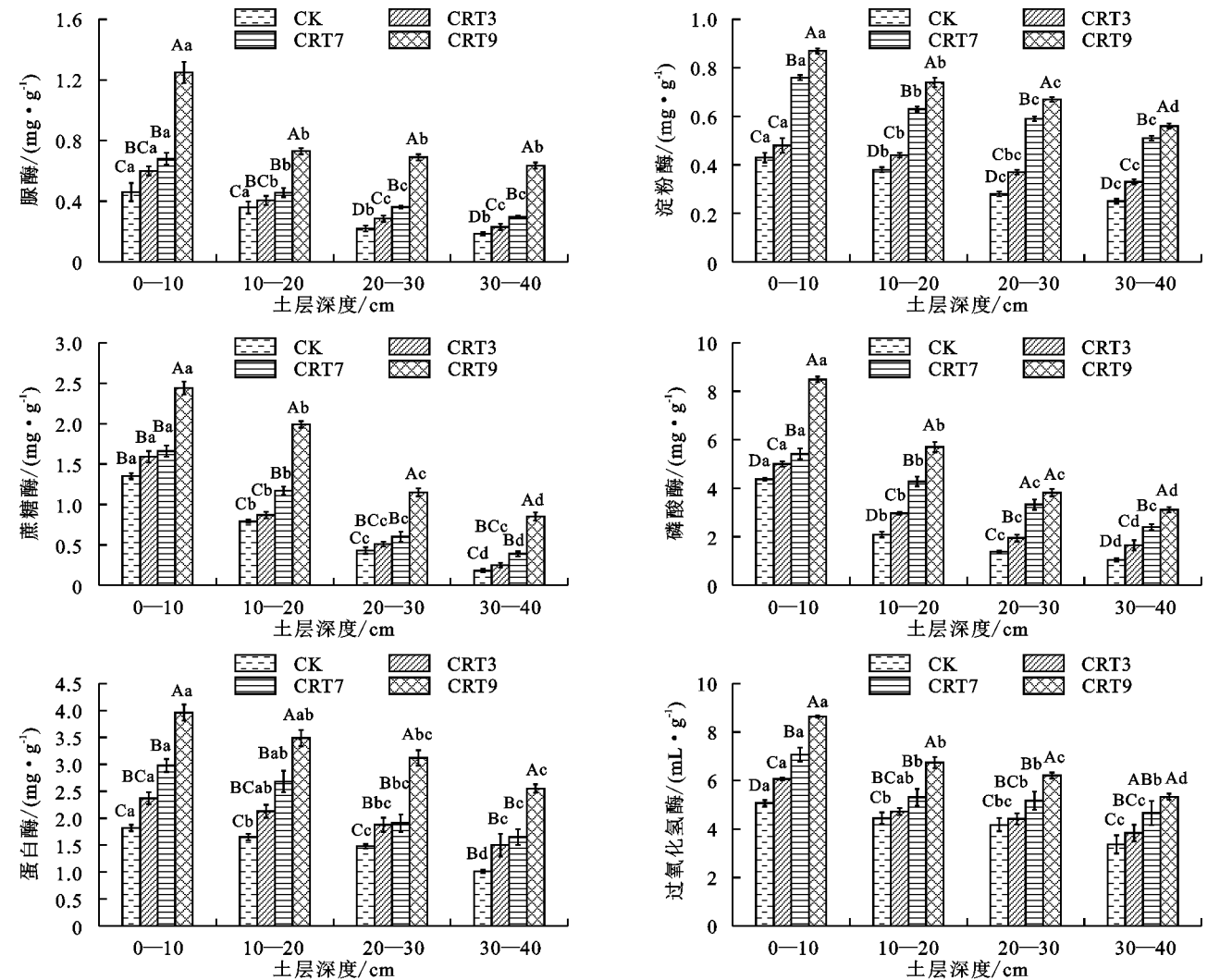
加,6 种土壤酶活性显著提高(图 1)。

脲酶活性在不同整地年限和不同土层差异显著,活性范围为 0.19~1.25 mg/g。CRT 不同整地年限措施下的脲酶活性显著高于 CK,CRT 3、CRT 7、CRT 9 较 CK 分别高出 24.25%,46.59%,117.43%,且随土层的下移脲酶活性显著降低,不同土层间存在显著性差异。

淀粉酶活性随着土层的加深呈下降趋势,且在相同土层下随整地年限的增加呈增加趋势,活性范围为 0.25~0.87 mg/g,整体上不同样地相同土层淀粉酶活性均达到显著水平。在不同整地年限样地,CRT 3、CRT 7、CRT 9

淀粉酶活性较 CK 分别高 20.90%,82.82%,75.31%。

CK 和 CRT 不同整地年限样地间土壤蔗糖酶活性范围在 0.18~2.44 mg/g,增幅为 17.09%~99.69%;磷酸酶活性在 1.05~8.49 mg/g,增幅为 30.15%~82.63%;蛋白酶活性在 1.01~3.96 mg/g,增幅为 32.21%~66.50%;过氧化氢酶活性在 3.37~8.64 mL/g,增幅为 11.67%~41.39%。4 种酶活性随整地年限的增加均表现出 CRT 9>CRT 7>CRT 3>CK,随土层增加呈现出 0—10 cm 土层>10—20 cm 土层>20—30 cm 土层>30—40 cm 土层。



注:脲酶活性以 24 h 后 1 g 土壤中 NH₃-N 质量表示,单位为 mg/g;淀粉酶活性以 24 h 后 1 g 土壤中所含麦芽糖质量表示,单位为 mg/g;蔗糖酶活性以 24 h 后 1 g 土壤中所含葡萄糖质量表示,单位为 mg/g;酸性磷酸酶活性用 24 h 后 1 g 土壤中释出的酚质量表示,单位为 mg/g;蛋白酶活性用 24 h 后 1 g 土壤中氨基酸质量表示,单位为 mg/g;过氧化氢酶活性用 20 min 后 1 g 土壤中的 0.1 mol/L 高锰酸钾的体积含量表示,单位为 mL/g;图柱上方不同大写字母表示相同土层不同样地间差异显著(P<0.05);不同小写字母表示同一样地不同土层间差异显著(P<0.05)。

图 1 不同整地年限土壤酶活性

方差分析(表 5)表明,不同整地年限样地和土层对土壤理化性质呈极显著影响,对于交互作用,物理指标中 MWD 和容重没有显著性;化学指标只有含水量、全氮和速效磷存在显著性,而不同整地年限样地、土层及其交互作用对 6 种土壤酶均有较大影响,F 值最高达 421 464.50,且均存在极显著影响。

2.2 等高反坡阶整地年限对玉米产量及其构成因素的影响

由表 6 可知,CRT 不同整地年限下的玉米百粒重均显著高于 CK,CRT 9 的百粒重最大,达 33.99 g,较 CK 提高 22.48%。CRT 不同整地年限下的玉米产量均显著高于 CK,具体表现为 CK<CRT 3<

CRT 7< CRT 9,依次显著增产 5.35%,10.66%,22.47%。CRT 下玉米穗行数、行粒数、百粒重均高于CK,且与CK 的差异均达到显著水平。在 CRT 中,除了行粒数外,其余产量指标均达到显著水平。说明布设等高反坡阶措施后,玉米产量提高,且随着整地年限延长,玉米增产效果越明显。

2.3 土壤理化性质、土壤酶活性与玉米产量的关系

玉米产量与土壤黏粒、容重、含水量、孔隙度、全氮、全磷、全钾、速效磷、速效钾、脲酶、淀粉酶、蔗糖酶、磷酸酶、过氧化氢酶和蛋白酶均呈极显著相关关系(表 7)。砂粒与粉粒、黏粒、含水量呈极显著负相关,与团聚体、MWD、全钾、速效磷、蔗糖酶、过氧化氢酶相关性均在 0.47 以上,粉粒相关性变化规律与砂粒相反。黏粒与含水量相关性达 0.86,与磷酸酶仅为 0.33。团聚体和 MWD 相关性变化规律大致相同,与大部分指标均显著相关。容重与除含水量以外的指标表现出极显著负相关,相关性高达 0.88。总孔隙度与其余指标呈现出极显著正相关,相关性在 0.70~0.92。含水量与磷酸酶、玉米产量显著相关,但与其余指标未达到显著水平。土壤化学指标(全氮、全磷、全钾、速效磷、速效钾)、土壤酶(脲酶、蔗糖酶、淀粉

酶、磷酸酶、过氧化氢酶、蛋白酶)与其他指标彼此间均呈显著正相关关系。

表 5 土壤理化性质与土壤酶活性间多因素方差分析

指标	整地年限		土层		整地年限×土层	
	F	P	F	P	F	P
砂粒	393.91	<0.001	8008.03	<0.001	24.67	<0.001
粉粒	166.24	<0.001	6033.26	<0.001	22.05	<0.001
黏粒	109.45	<0.001	62.19	<0.001	2.57	<0.050
总团聚体	149.05	<0.001	157.45	<0.001	3.57	<0.001
平均重量直径	55.42	<0.001	49.16	<0.001	1.16	0.350
容重	120.85	<0.001	78.18	<0.001	2.07	0.063
总孔隙度	3044.02	<0.001	985.39	<0.001	163.38	<0.001
含水量	208.39	<0.001	111.35	<0.001	4.00	<0.010
全氮	140.12	<0.001	81.64	<0.001	4.51	<0.001
全磷	31.62	<0.001	26.72	<0.001	0.79	0.625
全钾	25.32	<0.001	27.38	<0.001	1.13	0.372
速效磷	165.59	<0.001	289.90	<0.001	3.34	<0.010
速效钾	16.71	<0.001	12.14	<0.001	0.32	0.961
脲酶	7987.39	<0.001	5236.25	<0.001	97.52	<0.001
淀粉酶	5236.25	<0.001	2219.94	<0.001	67.03	<0.001
蔗糖酶	28136.00	<0.001	2118.83	<0.001	1542.75	<0.001
磷酸酶	4214364.50	<0.001	37904.75	<0.001	23760.83	<0.001
蛋白酶	14010.25	<0.001	346730.00	<0.001	6996.25	<0.001
过氧化氢酶	87406.00	<0.001	80203.50	<0.001	8265.50	<0.001

表 6 玉米产量及其构成因素

样地	穗行数/行	行粒数/粒	百粒重/g	产量/(kg·hm ⁻²)	增产率/%
CK	12.40±0.24c	34.00±0.71b	27.75±0.28d	9853.38±99.03d	
CRT 3	13.80±0.73bc	35.80±0.37a	29.24±0.25c	10380.91±88.44c	5.35
CRT 7	14.40±0.68ab	36.00±0.55a	30.72±0.41b	10904.18±146.15b	10.66
CRT 9	15.80±0.37a	36.40±0.51a	33.99±0.63a	12067.87±224.38a	22.47

表 7 土壤理化性质、土壤酶活性与玉米产量的相关关系

指标	LO	SA	CL	AG	MWD	BD	SWC	DE	TN	TP	TK	AP	AK	URE	AMY	SUC	PHO	PRO	CAT
SA	-0.998 **																		
CL	-0.659 **	0.605 **																	
AG	0.555 **	-0.565 **	-0.239																
MWD	0.527 **	0.541 **	-0.186	0.952 **															
BD	-0.419 **	0.467 **	-0.250	-0.597 **	-0.595 **														
SWC	-0.711 **	0.673 **	0.864 **	-0.034	-0.011	-0.219													
DE	0.261	-0.295 *	0.207	0.565 **	0.470 **	-0.737 **	0.261												
TN	0.325 +	-0.355 *	0.119	0.674	0.604 **	-0.763 **	0.225	0.906 **											
TP	0.366 +	-0.396 **	0.095	0.734 **	0.696 **	-0.765 **	0.215	0.745 **	0.881 **										
TK	0.476 **	-0.507 **	0.024	0.805 **	0.769 **	-0.705 **	0.109	0.713 **	0.820 **	0.891 **									
AP	0.559 **	-0.585 **	-0.067	0.761 **	0.689 **	-0.782 **	-0.023	0.828 **	0.913 **	0.849 **	0.875 **								
AK	0.268	-0.294 *	0.108	0.737 **	0.666 **	-0.658 **	0.268	0.723 **	0.814 **	0.823 **	0.838 **	0.812 **							
URE	0.285 *	-0.318 *	0.171	0.649 **	0.596 **	-0.723 **	0.220	0.913 **	0.886 **	0.738 **	0.753 **	0.809 **	0.702 **						
AMY	0.361 *	0.381 **	-0.019	0.776 **	0.695 **	-0.627 **	0.116	0.817 **	0.864 **	0.735 **	0.739 **	0.820 **	0.702 **	0.916 **					
SUC	0.550 **	-0.578	-0.044	0.647 **	0.590 **	-0.815 **	-0.030	0.854 **	0.898 **	0.790 **	0.762 **	0.915 **	0.709 **	0.868 **	0.804 **				
PHO	0.096	-0.133	0.338 *	0.452 **	0.382 **	-0.657 **	0.346 *	0.916 **	0.859 **	0.649 **	0.639 **	0.734 **	0.626 **	0.949 **	0.829 **	0.812 **			
PRO	0.269	-0.285 *	0.004	0.725 **	0.668 **	-0.497 **	0.084	0.729 **	0.697 **	0.633 **	0.731 **	0.689 **	0.617 **	0.857 **	0.870 **	0.623 **	0.743 **		
CAT	0.485 **	-0.526 **	0.147	0.502 **	0.498 **	-0.884 **	0.146	0.701 **	0.735 **	0.704 **	0.649 **	0.749 **	0.619 **	0.617 **	0.493 **	0.819 **	0.570 **	0.268	
CY	-0.219	0.175	0.610 **	0.327 +	0.284	-0.623 **	0.676 **	0.717 **	0.690 **	0.628 **	0.558 **	0.524 **	0.520 **	0.724 **	0.601 **	0.529 **	0.801 **	0.569 **	0.471 **

注:LO为砂粒;SA为粉粒;CL为黏粒;AG为团聚体;MWD为平均质量直径;BD为容重;SWC为含水量;DE为孔隙度;TN为全氮;TP为全磷;TK为全钾;AP为速效磷;AK为速效钾;URE为脲酶;AMY为淀粉酶;SUC为蔗糖酶;PHO为磷酸酶;PRO为蛋白酶;CAT为过氧化氢酶;CY为玉米产量;*表示相关性达P<0.01显著水平;*表示相关性达P<0.05显著水平。

3 讨论

3.1 等高反坡阶整地年限对土壤物理性状的影响

土壤机械组成是土壤物理性质的基本参数,影响土壤松紧度、通透性能以及肥力高低,是反映土壤发育程度的重要指标之一^[21]。本研究发现,CRT 和 CK 土壤机械组成含量在垂直方向和时间尺度差异显著,随土层深度和整地年限的增加,砂粒含量呈下降趋势,粉粒和黏粒含量呈上升趋势。水分是土壤颗粒在垂直方向运动的主要驱动力,水运动会驱动细颗粒向下迁移,陈雪等^[22]研究发现,CRT 能够增加土壤水分入渗,提高坡耕地保水能力,所以随土层深度的下移,黏粒含量逐渐提高,砂粒含量的比例有所降低^[23]。时间尺度上,红壤坡耕地存在较为严重的土壤侵蚀,地表松散的砂粒比致密的黏粒抗侵蚀力弱,被首先搬运^[24],布设 CRT 后,因遇 2 条反坡阶的拦截,大量细颗粒(粉粒和黏粒)沉积,粗颗粒(砂粒)流入反坡台阶,经过长时期积累,黏粒相对含量增加,砂粒含量降低,随整地年限增加,相同土层土壤砂粒含量有所下降,粉粒和黏粒含量呈上升趋势。

土壤团聚体是土壤肥力的基础,数量和质量决定土壤理化性状及其协调状况。在本研究中,随土层深度下移,水稳性团聚体总量逐渐减少,与罗晓虹等^[25]研究一致。这是因为南方红壤坡耕地团聚体的主要胶结物是有机质,而农地土壤表层因有大量的凋落物和根系分泌物通过分解转化为土壤有机碳含量进行补充,所以土壤表层有机物质和养分含量均显著高于深层土壤^[25],从而导致团聚体总量随土层增加呈现下降趋势;又因为新鲜有机物质的输入,作物根系、土壤动物、微生物及其代谢产物提高,土壤表层有机胶结物质和载体介质的量增多,利于有机质的分解,同时农地因作物生长需要会投入有机肥,有机碳的积累和固定得到加强^[26-27]。时间尺度上,土壤团聚体含量随着整地年限的增加呈现出 CRT 9>CRT 7>CRT 3>CK,说明 CRT 可改变土壤团聚体结构,也说明 CRT 整地年限的增加可以提高土壤团聚体含量,这可能是布设 CRT 后,玉米增产的同时,其生理指标也得到提高^[28],使凋落物、土壤动物及微生物随之增加,而导致有机质含量提高,土壤团聚体含量增加。MWD 是衡量土壤团聚体稳定程度的重要指标,MWD 值越大,说明土壤的团聚度和稳定性越强^[29]。本研究中,CRT 整地措施 MWD 均高于 CK,且随着土层加深,MWD 呈下降趋势,与水稳性团聚体变化规律相同,与李春越等^[30]研究结果相同。这是因为相比 CK,CRT 可以削减坡耕地径流和泥沙流失,能有效地滞留水

流,减缓雨滴对团聚体结构的冲击力^[10]。

3.2 等高反坡阶整地年限对土壤化学性状的影响

土壤环境影响作物的生长发育,对植物吸收、养分利用等至关重要^[5]。土壤水分和养分参与或控制物质循环的诸多过程,也是制约大多数农业和自然陆地生态系统初级生产过程的元素之一,含量的大小可以直观反映土壤水肥特征^[31]。本研究表明,CRT 措施对土壤含水量和养分含量有显著的促进作用,这与前人^[13-15]研究结果相同,但在本研究中还发现,随着整地年限的增加,土壤养分和含水量升高,原因可能是 CK 表层土壤松散颗粒较多,土体易受降雨和地形等影响因素而产生坡面径流,使土壤养分随着坡面径流和泥沙运移不断散失,而 CRT 措施可以减缓径流泥沙,加强土壤蓄水能力,增加土壤养分入渗^[10-15]。因此,随着整地年限的增加,坡耕地土壤养分含量和含水量显著增加。本研究中,表层土壤(0—20 cm)的养分含量均高于深层次土壤(20—40 cm),这与王帅兵等^[10]研究结果一致,一方面,因为土壤在成土过程养分会随土层加深而减少^[32];另一方面,由于微生物在表层土壤活动频繁,使土壤养分向下淋溶迁移减缓,导致深层土壤养分含量小于表层土壤^[33]。本研究还发现,相同土层不同整地年限样地间土壤养分含量差异显著,且 CRT 土壤养分含量均高于 CK,这可能由于研究区布设 CRT 后土壤团聚体数量增加、土壤容重变小、土壤孔隙度增多,土壤疏松多孔,作物根系延伸范围更广,土壤动物及微生物聚集现象明显,土壤环境条件得到不断改善,从而导致 CRT 土壤养分含量高于 CK。

3.3 等高反坡阶整地年限对土壤酶活性的影响

土壤酶是反映土壤质量的生物活性参数,与微生物一起推动着养分元素的循环转化和污染物质净化,其活性高低是土壤肥力的重要指标之一^[34]。本研究发现,CK 和 CRT 措施表层土壤酶活性均高于深层的酶活性,并表现出随土层加深而不断减小的规律,这与前人^[35]研究成果基本一致。本研究表明,CRT 样地中土壤酶活性土层垂直分布特征明显,这可能与 CRT 措施不同土层的土壤养分含量随土层深度增加而减少有关;土壤酶主要来源于土壤微生物、植物根系、土壤动物的分泌物及其残体的分解物等,微生物能分解土壤表层凋落物,使表层土壤酶活性增强,但随土层深度的加深,土壤微生物、根系、动植物残体等逐渐减少,这可能也是影响土壤酶活性变化的原因^[36]。在该研究中 CRT 措施提高土壤酶活性,且随整地年限的增加,6 种土壤酶活性显著增强,这可能

与 CRT 措施能改变土体结构,改善土壤理化性质,进而增加土壤微生物的活性有关^[35],且随时间累积,效果更加明显。

3.4 等高反坡阶整地年限对玉米产量的影响

张洋等^[28]研究发现,CRT 措施可增加玉米产量,增产效果主要表现在玉米百粒重的显著提升,这与本研究结果一致。相关性分析(表 7)表明,玉米产量与土壤物理指标(黏粒、容重和孔隙度)、化学指标(全氮、全磷、全钾、速效磷和速效钾)和土壤酶(脲酶、淀粉酶、蔗糖酶、磷酸酶、过氧化氢酶和蛋白酶)均呈极显著相关关系,这与前人^[37]研究结果一致。相关研究^[38]表明,土壤理化性质和酶活性是作物生长不可或缺的因素,各指标彼此相互作用,共同反映土壤改良状况,进而促使产量得到提高。在本研究中,CRT 措施改善土壤理化性质,提高土壤酶活性,且随整地年限的增加,土壤环境得到显著改善,使玉米穗行数、百粒重和产量显著增加,其中以 CRT 9 增产最为显著,增幅达 22.47%,说明随整地年限的延长,玉米增产效果越显著。

4 结论

(1)CRT 不同整地年限显著改善坡耕地土壤物理性状。CRT 措施提高了土壤黏粉粒含量,其提升幅度随整地年限的增加而升高,粉粒含量增幅在 1.99%~4.77%,黏粒含量增幅在 0.51%~64.66%。土壤总团聚体含量、MWD 值和孔隙度随整地年限的增加而升高,增幅分别为 27.92%~47.63%,55.00%~88.75%,0.70%~61.91%。砂粒含量和土壤容重在 CRT 9 中下降幅度最大,降幅分别为 11.66%,16.91%。

(2)CRT 措施显著增强土壤肥力,随整地年限的增加,土壤含水量提高,土壤养分含量显著增强,全磷含量增幅 24.47%~58.03%,全氮含量高出 77.26%,全氮含量增量达 1.09 倍,CRT 9 中速效磷含量是 CK 的 1.10 倍。

(3)6 种土壤酶随土层的加深,活性逐渐降低,而随整地年限的增加,其活性显著增强,其中脲酶、淀粉酶、蔗糖酶、磷酸酶、蛋白酶、过氧化氢酶较 CK 分别高 24.25%~117.43%,20.90%~82.82%,17.09%~99.69%,30.15%~82.63%,32.21%~66.50%,11.67%~41.39%。

(4)CRT 不同整地年限下玉米百粒重均显著高于 CK,CRT 9 中的百粒质量最重,增幅为 22.48%;穗行数、行粒数均高于 CK,且均达到显著水平;不同整地年限下的玉米产量表现为 CK<CRT 3< CRT 7< CRT 9,增产 5.35%~22.47%,效果显著。可见,等高反坡阶整地对红壤坡耕地土壤改良和提高玉米产量具有较好的效

果,且随着整地年限的增加效果越显著。

参考文献:

- [1] Bastida F, Zsolnay A, Hernández T, et al. Past, present and future of soil quality indices: A biological perspective [J]. *Geoderma*, 2008, 147(3): 159-171.
- [2] Saifullah, Dahlawi S, Naeem A, et al. Biochar application for the remediation of salt-affected soils: Challenges and opportunities [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 625: 320-335.
- [3] 刘占锋,傅伯杰,刘国华,等.土壤质量与土壤质量指标及其评价[J].生态学报,2006,26(3):901-913.
- [4] 董悦,张永清,刘彩彩.晋中市土壤养分空间分布与影响因子的相关性[J].生态学报,2018,38(23):8621-8629.
- [5] Liu J, Liu M, Wu M, et al. Soil pH rather than nutrients drive changes in microbial community following long-term fertilization in acidic Ultisols of southern China [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2018, 18(5): 1853-1864.
- [6] 赵成,顾小华,姜宏雷,等.云南省坡耕地现状及水土流失综合治理探索[J].中国水土保持,2015(4):11-12.
- [7] 王伟,贺莉莎.云南省坡耕地现状调查及分析[J].中国水土保持,2019(4):20-23.
- [8] Hobbs P R, Sayre K, Gupta R, et al. The role of conservation agriculture in sustainable agriculture [J]. *Philosophical Transactions: Biological Sciences*, 2008, 363(1491): 543-555.
- [9] 张杰,陈晓安,汤崇军,等.典型水土保持措施对红壤坡地柑橘园水土保持效益的影响[J].农业工程学报,2017,33(24):165-173.
- [10] 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.
- [11] Sun L, Wang Y L, Zhang Y J, et al. Conservation agriculture based on crop rotation and tillage in the semi-arid Loess Plateau, China: Effects on crop yield and soil water use [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2018, 251: 67-77.
- [12] 李秋芳,王克勤,王帅兵,等.不同治理措施在红壤坡耕地的水土保持效益[J].水土保持通报,2012,32(6): 196-200.
- [13] 陈雪,宋娅丽,王克勤,等.等高反坡阶措施对滇中红壤坡耕地土壤贮水量的影响[J].水土保持研究,2019,26(6):92-99.
- [14] 王震,王克勤,赵洋毅,等.山坡退化林地林木生长对微地形人工干预的响应[J].应用生态学报,2019,30(8): 2583-2590.
- [15] 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.

[16] 焦瑞枣,任少勇,王姣,等.炭基肥对马铃薯田土壤容重、孔隙度和养分的影响[J].华北农学报,2015,30(4): 231-238.

[17] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3 版.北京:中国农业出版社,2013.

[18] 马仁明,蔡崇法,李朝霞,等.前期土壤含水率对红壤团聚体稳定性及溅蚀的影响[J].农业工程学报,2014,30(3):95-103.

[19] 姜佰文,梁世鹏,张迪,等.耕作与施肥对黑土团聚体粒级分布及水稳定性的影响[J].东北农业大学学报,2019,50(7):76-86.

[20] 关松荫.土壤酶及其研究法[M].北京:农业出版社,1986.

[21] Simek M, Hopkins D W. Regulation of potential denitrification by soil pH in long-term fertilized arable soils [J].Biology and Fertility of Soils,1999,30(1):41-47.

[22] 陈雪,宋娅丽,王克勤,等.基于 Van Genuchten 模型的等高反坡阶下土壤水分特征[J].水土保持研究,2019,26(5):45-52.

[23] 王冬冬,高磊,陈效民,等.红壤丘陵区坡地土壤颗粒组成的空间分布特征研究[J].土壤,2016,48(2):361-367.

[24] 王晓燕,尹洁.坡面小区土壤流失过程中粒径组成变化及其影响因素[J].水土保持学报,2010,24(4):113-118.

[25] 罗晓虹,王子芳,陆畅,等.土地利用方式对土壤团聚体稳定性和有机碳含量的影响[J].环境科学,2019,40(8):3816-3824.

[26] 吕欣欣,丁雪丽,张彬,等.长期定位施肥和地膜覆盖对棕壤团聚体稳定性及其有机碳含量的影响[J].农业资源与环境学报,2018,35(1):1-10.

[27] 胡玉福,彭佳佳,蒋双龙,等.川中丘陵区不同土地利用方式土壤活性有机碳含量特征研究[J].水土保持学报,2014,28(2):221-225,231.

[28] 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.

[29] Amézket E. Soil aggregate stability: A Review [J].Journal of Sustainable Agriculture,1999,14(2/3):83-151.

[30] 李春越,常顺,钟凡心,等.种植模式和施肥对黄土旱塬农田土壤团聚体及其碳分布的影响[J].应用生态学报,2021,32(1):191-200.

[31] 史激光,锡林郭勒天然草地营养成分评价[J].草业科学,2012,29(12):1941-1944.

[32] 周永斌,郭鑫炜,魏亚伟,等.辽西北半干旱区典型人工林土壤 C, N, P 的垂直分布特征[J].沈阳农业大学学报,2016,47(4):418-424.

[33] 吴旭,牛耀彬,陈云明,等.黄土丘陵区沙棘混交林叶片、凋落物、土壤碳氮磷化学计量特征[J].水土保持学报,2021,35(4):369-376.

[34] 易艳灵,吴丽英,杨倩,等.柏木根系分泌物对盆栽香椿土壤养分和酶活性的影响[J].生态学杂志,2019,38(7):2080-2086.

[35] 曹越,赵洋毅,王克勤,等.滇中坡改梯不同种植方式对土壤酶活性的影响[J].西部林业科学,2020,49(4):91-98.

[36] 胡雷,王长庭,王根绪,等.三江源区不同退化演替阶段高寒草甸土壤酶活性和微生物群落结构的变化[J].草业学报,2014,23(3):8-19.

[37] 武晓森,周晓琳,曹凤明,等.不同施肥处理对玉米产量及土壤酶活性的影响[J].中国土壤与肥料,2015(1): 44-49.

[38] 徐国伟,段骅,王志琴,等.麦秸还田对土壤理化性质及酶活性的影响[J].中国农业科学,2009,42(3):934-942.

(上接第 306 页)

[24] 王晓英,贺明荣.追氮时期和基追比例对强筋小麦产量和品质的调控效应[J].麦类作物学报,2013,33(4): 711-715.

[25] 张敏,刘添,李亚静,等.减少灌水次数对强筋小麦氮素积累转运和籽粒蛋白质含量的影响[J].麦类作物学报,2019,39(7):802-809.

[26] 霍中洋,葛鑫,张洪程,等.施氮方式对不同专用小麦氮素吸收及氮肥利用率的影响[J].作物学报,2004,30(5):449-454.

[27] Tian Z W, Liu X X, Gu S L, et al. Postponed and reduced basal nitrogen application improves nitrogen use efficiency and plant growth of winter wheat[J].Journal of Integrative Agriculture,2018,17(12):2648-2661.

[28] 丁锦峰,成亚梅,黄正金,等.稻茬小麦不同氮效率群体花后物质生产与衰老特性差异分析[J].中国农业科学,2015,48(6):1063-1073.

[29] 杨明晓,吴伟,张钧浩,等.不同追氮时期对强筋小麦产量、品质及氮素吸收利用的影响[J].河北农业大学学报,2020,43(2):11-18.

[30] 赵士诚,魏美艳,仇少君,等.氮肥管理对秸秆还田下土壤氮素供应和冬小麦生长的影响[J].中国土壤与肥料,2017(2):20-25.