等高反坡阶对玉米生长及光合特性的影响

张 洋[1], 王克勤[1], 赵洋毅[1], 冷 鹏[2], 闫腾云[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] 探讨坡耕地等高反坡台阶措施对玉米生长及光合特性的影响,为云南省坡耕地作物种植提供科学依据。[方法] 以玉米(云瑞 668)为供试材料,采用田间试验,试验设置 2 个布设有反坡台阶的坡耕地样地(2# 和 3#,CR)及 1 个未扰动的对照样地(1#,CK),通过野外定位监测方法,测定玉米生长相关指标,净光合速率、蒸腾速率、水分利用效率以及作物产量,研究等高反坡阶对玉米生长特征、光合特性的影响。[结果] 等高反坡阶措施对玉米茎粗、穗位高影响不显著。反坡阶坡中地块对玉米株高促进作用最为显著,增幅为 27.9%;反坡阶样地玉米叶面积指数显著高于原状坡耕地,LAI 最高达 5.01~5.78,灌浆期后可维持相对较高的 LAI,而 CK 组 LAI 范围为 3.78~4.79,且下降较快;反坡阶处理下玉米叶片净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、叶片瞬时水分利用效率(WUE_L)、作物水分利用效率(WUE)均高于坡耕地;玉米产量分别较坡耕地提高了 9.6%,13.8%。[结论] 在云南省坡耕地作物种植地区,通过布设等高反坡阶减少水土流失,提高土壤水分,增加土壤贮水量,进而使叶片维持较高的光合作用以及生理状态,为玉米干物质生产奠定了生理基础,提高了作物产量。自然降雨情况下,坡耕地坡度为 15°时布设高反坡阶对玉米光合特性、WUE 及产量促进作用最佳。

关键词: 等高反坡阶; 光合特性; 作物水分利用效率; 作物产量

文献标识码: A **文章编号**: 1000-288X(2020)06-0071-07 **中图分类号**: S157.2

文献参数: 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. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2020.06.011; Zhang Yang, Wang Keqin, Zhao Yangyi, et al. Effects of contour reverse-slope terrace on growth and photosynthetic characteristics of maize [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020,40(6):71-77.

Effects of Contour Reverse-slope Terrace on Growth and Photosynthetic Characteristics of Maize

Zhang Yang[1], Wang Keqin[1], Zhao Yangyi[1], Leng Peng[2], Yan Tengyun[1]

(1. *College 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 effects of contour reverse-slope steps on the water use efficiency and yield of maize crops in sloping land were explored in order to provide scientific basis for crop cultivation in sloping land in Yunnan Province. [Methods] Maize (Yunrui 668) was used as test material. Two sloping farmland plots with contour reverse-slope (2# and 3#, CR) and 1 undisturbed control plot (1#, CK) were set up in the field experiment. The maize growth index, net photosynthetic rate, transpiration rate, water use efficiency and crop yield were measured by field monitoring method to investigate the effects of contour reverse-slope order on maize growth and photosynthetic characteristics. [Results] The effect of contour reverse-slope measure on the ear height of maize and stem diameter was not significan, while the promotion effect on the height of maize plant was the most significant, with an increase of 27.9%. The leaf area index (LAI) of the contour

收稿日期:2020-07-22 **修回日期**:2020-09-07

资助项目:云南省重点研发计划项目"坡耕地土壤肥力提升关键技术研究与集成"(2018BB018); 云南省教育厅研究生资助项目(2019Y0135); 云南省基础研究计划项目(202001AT070136)); 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:张洋(1996—),男(汉族),山东省泰安市人,硕士研究生,研究方向为坡耕地水土保持。Email:992309159@qq.com。

通讯作者:王克勤(1964—),男(汉族),甘肃省庄浪县人,教授,博士生导师,主要从事小流域环境综合治理方面的研究。Email:wangkeqin7389@sina.com。

reverse-slope sample plot was significantly higher than that of the undisturbed slope land, with LAI as high as 5.01～5.78. After the grouting stage, relatively high LAI could be maintained, while the LAI of the CK group was ranged from 3.78 to 4.79, which decreased rapidly. The net photosynthetic rate, stomatal conductance, WUE_L(instantaneous water use efficiency) and water use efficiency of maize leaves under the contour reverse-slope was higher than that of sloping land. Maize yield increased by 9.6% and 13.8%, respectively, compared with sloping farm land. [Conclusion] In the slope cultivated land area in Yunnan Province, by increasing soil moisture and soil water storage, the contour reverse-slope measure can promote photosynthesis of leaves and physiological status, which lays a physiological foundation for dry matter production of maize and improves the crop yield. Under the condition of natural rainfall, when the slope was 15°, the contour reverse-slope measure has the best promotion effect on WUE of photosynthetic characteristics and yield promotion of maize.

Keywords: contour reverse-slope; crop water use efficiency; photosynthetic characteristics; crop yield

坡耕地目前是广大山区群众赖以生存和发展的生存用地,但也是水土流失的主要策源地[1],受地理条件制约,云南省 8.20×10^4 km^2 耕地中有坡耕地 6.60×10^4 km^2,其中坡耕地水土流失面积为 4.50×10^4 km^2,占该省水土流失面积的 43.29%,大量不合理的耕作方式(顺坡种植,大坡度种植等)造成严重的水土流失,影响作物的生长发育,导致较低的作物产量[2]。云南地区降雨季节性分布不均的特点加剧了土壤肥力流失,坡耕地土壤持续利用能力减弱[3-6]。如何在坡耕地现有基础上,短周期,用工量小的前提下显著提高作物产量的整地措施尤为重要。人工微地形整地——反坡台阶作为坡耕地水土保持措施之一,具有蓄水保墒、减少径流及减少面源污染的功能,与工程量较大的坡改梯工程相比,等高反坡阶整地则同样具有较高的推广价值。光合作用是作物生长发育和物质形成的基础,作物产量 90%以上来自于光合作用,因此,光合作用的强弱是决定作物产量的重要因素之一[7]。已有研究[8-13]指出,作物光合作用受到水分胁迫、土壤温度、耕作方式、施肥等的影响。耕作方式作为农业生产的重要环节之一,通过不同的耕作措施,改善土壤环境,促进作物生长发育,提高作物叶面积和光合作用,最终提高作物产量[14]。有研究[15]表明,合理深耕土壤,既可以改变耕层结构,为作物生长提供良好的土壤环境,还能提高作物光合特性,提高作物产量。此外,翻耕、深松能较为显著地提高玉米生长后期的生理特性,提高作物光合性能[16]。马丽等[17]研究发现在黄淮海地区,垄作可以提高夏玉米的光合作用,促进干物质的积累,减少光能损失,提高叶面积指数并提高作物产量;宋振伟等[18]研究表明,平原耕作中起垄耕作可以提高土壤水热,提高作物水分利用率,提高作物光合性能,提高籽粒产量。前人的相关研究大多针对平原地区,对于西南山区坡耕地实施等高反坡阶整地的相关研究主要集中在对坡耕地面源污染、土壤侵蚀、土壤理化性质的影响等方面[19-24],关于该措施对于作物生长发育以及光合特性的影响研究尚未进行。因此,本试验以玉米云瑞 668 为作物供试材料,对坡耕地实施等高反坡台阶水土保持耕作措施,调控管理玉米的生长状态,研究该措施对玉米光合特性,作物生长和产量的影响,为坡耕地治理和作物高产种植管理提供一定的科学依据。

1 材料与方法

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源区迤者小流域,流域面积 13.26 km^2,呈不规则纺锤形,南北长约 6.7 km,海拔高度 2 010～2 590 m。多年平均降雨量 757.22 mm,其中 5—10 月为雨季,降雨量约为全年的 85%以上,年蒸发量为 1 341 mm,年平均气温为 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。流域内主要农作物为玉米、烤烟、辣椒等。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置与试验设计 研究区位于云南省昆明市松华坝水源区迤者小流域试验基地,已有 3 块 5 m×20 m的标准径流小区固定样地。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。1# 坡度为 15°的无处理,原状坡耕地径流小区;2# 小区布设两道等高反坡阶,坡度为 12°;3# 小区布设两道等高反坡阶,坡度为 15°,进行对比重复试验。选用云南红壤坡耕地常作作物玉米品种云瑞 668 为试验材料,由西南林业大学重点实验室提供。玉米在 2019 年 5 月 20 日播种,10 月 14 日收获。种植密度为 40 000 株/hm^2,管理措施同步,作物播种及收割时间、施肥水平均保持一致。施肥主要施肥种类包

括:尿素、松华坝水源保护区施肥专用肥(总肥力32%,N∶P_2O_5∶K_2O 为 10∶10∶12)、过磷酸钙(有效P_2O_5≥16%),土壤调查土壤养分的背景值详见表 1。

表 1　试验样地基本概况

样地	坡度	措施	土壤容重/(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#	15°	无处理(CK)	1.46	5.44	0.98	0.32	114.65	62.71
2#	12°	等高反坡阶(CR)	1.41	5.45	1.00	0.29	117.96	59.17
3#	15°	等高反坡阶(CR)	1.39	5.47	0.97	0.31	120.43	60.04

1.2.2　*叶面积指数(LAI)等生理指标和光合特性的测定方法*　分别在拔节期,抽雄期,吐丝期,灌浆期,成熟期对玉米叶片采用 LAI-2200C 冠层分析仪测定。每个小区选择 5 株长势一致并具代表性的植株,在灌浆期和成熟期将植株分为茎秆、叶片、穗轴和籽粒 4 个部分,于 105 ℃杀青 30 min 后 80 ℃烘干至恒重,称重。成熟期(2019 年 10 月 10 日),各小区全部收获、测量各小区坡上、坡中、坡下 3 个地块的玉米株高、茎粗、穗位高和基部三节总长等指标;采用电子天平测量百粒质量,小区玉米产量以实收产量来计算,并折算为单产(kg/hm^2),所有指标均为 3 次重复。在玉米的抽雄期、吐丝期、乳熟期进行数据采集。采用 Li-6400XT 便携式光合仪在开放气路系统自然光照下测定作物的净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r),气孔导度(Cond)并计算叶片瞬时水分利用效率(leaf water use efficiency, LWUE),LWUE=P_n/T_r。测定均在晴朗无云的天气下进行;每个小区选取坡上、坡中、坡下 3 个样点,每样点选取 3 株长势相似且具代表性的植株,重复测 3 次,上午 9:00 到 11:00,每隔 1 h 测定 1 次,随机选取植株;每次选取植株最上端的完全展开叶进行测量。

1.3　数据处理

农田耗水量和水分利用效率的计算方法为在玉米播种前,拔节期、吐丝期和收获期后,使用 TDR 土壤水分测定仪在样地坡上、坡中、坡下分别测定 0—100 cm 土壤水分动态空间变化,每隔 10 cm 测 1 次。

土壤贮水量(W,mm)计算公式为:

$$\upsilon=\rho\cdot h\cdot\omega\%\times 10$$

式中:υ 为土壤贮水量(mm);ρ 为地段实测土壤容重(g/cm^3);h 为土层厚度(cm);ω 为土壤第 i 层的体积含水量(%);

水分利用效率计算公式为:

$$WUE=Y/ET$$

式中:Y 为籽粒产量;ET 为玉米生育期内耗水量。

使用 Excel,Sigmaplot 12.5 对数据进行作图和处理,采用 SPSS 25.0 软件对各处理数据进行统计分析。

2　结果与分析

2.1　等高反坡阶措施对玉米生长影响

2.1.1　*叶面积指数(LAI)变化特征*　作物通过叶面积截获光能以及吸收 CO_2,对光合作用有重要的影响。由表 2 可知,叶面积指数(LAI)随着生长周期的变化先增长后缓慢降低,在吐丝期达到峰值的一个单峰趋势。对比 1#,等高反坡阶处理在作物整个生长期内对植株总 LAI 的影响显著($p<0.05$)。而在同一种植区块,在作物拔节期至吐丝期,反坡台阶对植株 LAI 也有较为明显的增幅,2# 样地比 1# 样地坡上、坡中、坡下 LAI 分别提高了 36.01%,40.95%,10.22%;3# 样地比 1# 样地分别提高了 36.86%,43.38%,10.78%。在作物成熟期前后,表现为 LAI 缓慢减小,该措施使玉米在生育后期保持相对较高的 LAI,2# 样地比 1# 样地提高了 26.62%;3# 样地比 1# 样地提高了 23.82%。这可能是由于反坡阶扩大了土壤表面积,增强了对光的截获,在玉米生长后期,仍有效地提供玉米叶片生长所需要的水分和养分,保持较高的 LAI。在样地内,不同区块表现出不同的作物叶面积指数变化幅度,LAI 在坡中的提高效果最为明显,坡下次之,坡上最小。在作物出苗到拔节期间,等高反坡阶对作物 LAI 促进没有到达显著水平,而在作物抽雄吐丝期阶段,2# 样地内坡中、坡下玉米 LAI 比坡上分别提高了 14.2%,6.08%;3# 样地内坡中、坡下玉米 LAI 比坡上分别提高了 15.46%,6.00%。2#,3# 相同坡位之间 LAI 没有达到显著差异;3# 样地措施对 LAI 促进效果更加显著。同一坡位,2#,3# 样地之间差异不显著,但都高于 1# 样地,3# 样地促进效果更明显。

2.1.2　*植株形态特征*　由表 3 可知,等高反坡阶对玉米的影响主要表现在株高和基部三节总长上,2# 地比 1# 地坡上、坡中、坡下平均株高增加了 4.3%,21.0%,4.2%;3# 地比 1# 地平均株高分别增加了 5.8%,27.9%和 7.5%,可以看出该措施坡中对玉米生长促进最为显著,可能是与坡中的上反坡减少来自

坡上的水土流失,拦截坡上的地表径流;下反坡拦蓄地表径流,保水蓄水的作用有关。反坡台阶对于其他植株形态特征影响不大。反坡台阶坡中玉米株高最高,无处理坡中株高最低,不同种植区块之间差异显著;2#,3#样地之间差异不显著,说明坡度改变对作物植株形态影响不大。

表 2 不同种植区块植株叶面积指数(LAI)

样地	种植区块	不同生长周期叶面积指数				
		拔节期	抽雄期	吐丝期	灌浆期	成熟期
1#	坡上	1.30±0.2^{e}	3.08±0.2^{f}	3.84±0.2^{e}	3.38±0.2^{c}	1.75±0.3^{e}
	坡中	1.44±0.3^{c}	3.41±0.1^{e}	4.21±0.2^{d}	3.17±0.1^{c}	2.06±0.3^{d}
	坡下	1.59±0.1^{c}	4.79±0.3^{d}	4.36±0.1^{d}	2.54±0.3^{e}	2.20±0.2^{d}
2#	坡上	1.56±0.2^{cd}	4.74±0.4^{d}	4.88±0.1^{c}	4.12±0.2^{b}	2.43±0.2^{bc}
	坡中	1.78±0.3^{ab}	5.78±0.2^{a}	5.21±0.1^{ab}	4.48±0.2^{a}	2.58±0.2^{ab}
	坡下	1.63±0.1^{c}	5.22±0.3^{c}	5.01±0.2^{bc}	4.43±0.1^{a}	2.22±0.3^{cd}
3#	坡上	1.57±0.2^{bc}	4.75±0.4^{d}	4.93±0.3^{c}	4.16±0.3^{b}	2.08±0.1^{d}
	坡中	1.80±0.3^{a}	5.82±0.3^{ab}	5.37±0.1^{a}	4.54±0.4^{a}	2.63±0.2^{a}
	坡下	1.66±0.1^{bc}	5.41±0.4^{bc}	4.85±0.2^{c}	4.39±0.3^{a}	2.36±0.2^{c}

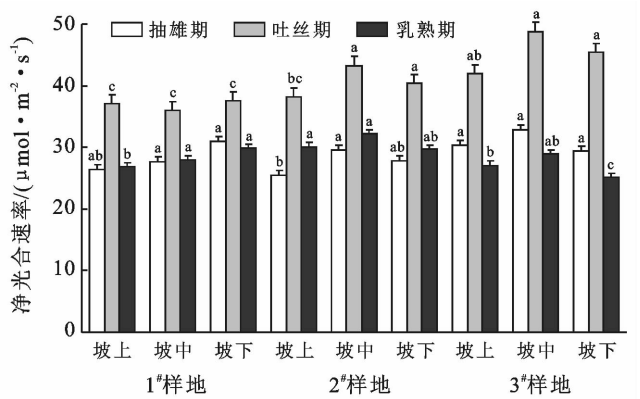
注:同列小写字母表示在不同处理间差异显著($p<0.05$,$n=3$)。下同。

表 3 不同种植区块植株生理形态特征

样地	种植区块	株高/cm	茎粗/cm	穗位高/m	基部三节总长/cm
1#	坡上	208.0±2.4^{c}	3.00±0.0^{a}	0.74±0.1^{a}	28.7±0.4^{c}
	坡中	186.0±2.0^{d}	3.10±0.1^{a}	0.71±0.0^{a}	29.5±0.3^{c}
	坡下	213.0±1.8^{c}	3.07±0.1^{a}	0.82±0.1^{a}	30.4±0.4^{bc}
2#	坡上	217.0±2.4^{bc}	3.03±0.0^{ab}	0.73±0.0^{a}	32.4±0.7^{ab}
	坡中	225.0±3.6^{ab}	3.13±0.2^{a}	0.72±0.3^{a}	35.8±1.1^{a}
	坡下	222.0±4.1^{b}	3.07±0.1^{a}	0.74±0.4^{a}	34.6±1.0^{a}
3#	坡上	220.0±2.8^{bc}	3.10±0.2^{a}	0.72±0.2^{a}	31.8±1.0^{bc}
	坡中	238.0±4.0^{a}	3.15±0.1^{a}	0.73±0.2^{a}	36.1±0.7^{a}
	坡下	229.0±3.5^{a}	3.10±0.0^{a}	0.71±0.1^{a}	33.7±0.8^{ab}

2.2 等高反坡阶措施对玉米光合特性的影响

2.2.1 净光合速率变化特征 各处理下玉米净光合速率(P_n)表现为先上升后下降的趋势,并在吐丝期达到峰值(图 1)。在抽雄期,各处理之间差异未达到显著水平。当各处理 P_n 处于峰值时,2# 样地坡中、坡下 P_n 值分别为 43.31 和 40.44 μmol/(m^2 · s),3# 样地坡中、坡下分别为 48.81,45.45 μmol/(m^2 · s);2#,3# 相较 1# 样地坡中 P_n 值增幅分别为 20.2%,35.5%,坡下 P_n 值增幅分别为 7.6%,20.8%。2#,3# 样地坡中、坡下在吐丝期的净光合速率与 1# 相比差异均达到显著水平。在乳熟期,1# 样地玉米 Rn 值从坡上、坡中到坡下逐渐增大;虽然在生育后期,玉米 P_n 值下降,但在 2#,3# 样地中,坡中 P_n 值仍高于其他地块。在玉米整个生育期内,等高反坡阶措施对玉米生长中期前后影响较大,说明该措施在作物需水量高的时期提高了作物的光合作用,进而提高产量。



注:不同小写字母表示在同一生育期玉米光合特性指标差异显著($p<0.05$,$n=3$)。下同。

图 1 等高反坡阶对玉米不同生长周期净光合速率的影响

2.2.2 蒸腾速率变化特征 玉米叶片蒸腾速率(T_r)变化趋势与净光合速率(P_n)相似,均随着生育期的推进先升后降,在吐丝期达到峰值,只是 T_r 的变化幅度比 P_n 大,除吐丝期之外,各处理之间虽有差异,但未达到显著水平。从图 2 可以看出,1# 样地坡下地块玉米 T_r 明显高于其他地块,说明自然降雨条件下土壤水分变化对玉米蒸腾速率有一定程度的影响,原状坡耕地地表径流严重,坡下玉米蒸腾速率高。当 T_r 达到峰值时(吐丝期),2# 样地坡中、坡下 T_r 值为 8.14,7.72 mmol/(m^2 · s)。2#,3# 样地玉米 T_r 值有差异,2# 样地比 3# 样地坡上、坡中、坡下的增幅分别为23.4%,29.6%,25.4%。可能是坡度抬升,导致土壤水分下降,引起轻微水分胁迫,由于短时间的水分胁迫对 P_n 影响小于对 T_r 的影响[25],导致 3# 样地比 2# 样地 T_r 小。

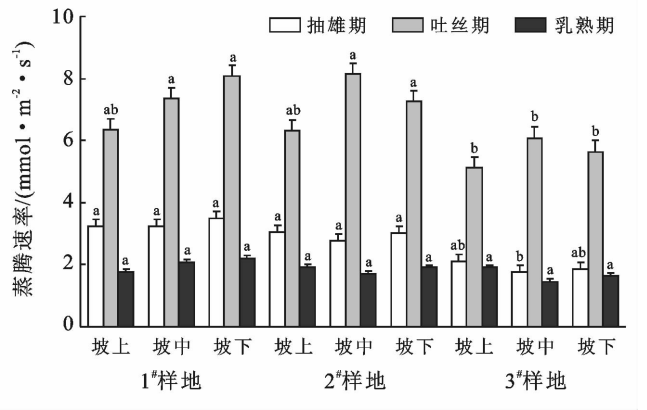


图 2　等高反坡阶对玉米不同生长周期蒸腾速率的影响

2.2.3　气孔导度变化特征　气孔控制着作物与外界环境的水气交换,其开闭程度对光合作用有很大的影响。玉米气孔导度(G_s)随生育进程呈下降趋势(图 3)。除乳熟期外,2#,3#处理下 G_s 显著高于 1#处理,2#,3#之间没有显著差异。样地内呈现出:坡中>坡下>坡上,且差异显著。坡中地块,抽雄期 2#比 1#提高了 41.7%,3#比 1#提高了 49.0%;吐丝期 2#比 1#提高了 29.0%,3#比 1#提高了 39.5%。该措施对玉米吐丝期前气孔导度有明显促进作用,提高了玉米发育前期的光合作用。

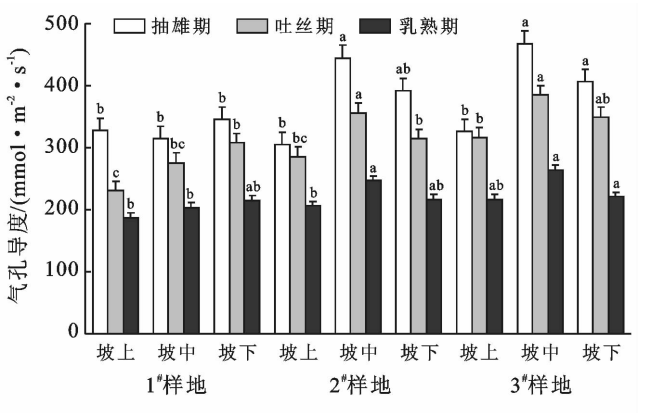


图 3　等高反坡阶对玉米不同生长周期气孔导度的影响

2.2.4　叶片水分利用效率变化特征　由图 4 可以看出,3 个处理下的叶片水分利用效率(LWUE)曲线与 P_n,T_r 曲线不同,在玉米吐丝期出现了“低谷”现象,在抽雄期和乳熟期表现较高的 LWUE 值。在样地内,LWUE 值表现为:坡中>坡下>坡上。坡中地块促进效果最具有代表性。抽雄期,2#,3#样地 LWUE 较 1#样地提高了 25.4%,37.3%,平均提高 31.3%;吐丝期,分别提高了 13.9%,31.7%,平均提高 22.8%;乳熟期,分别提高了 42.2%,54.7%,平均提高 48.4%。在玉米整个生长周期内,等高反坡阶(2#,3#)样地均表现出高于原状坡耕地(1#)的 LWUE 值,说明该措施有利于提高叶片水分利用效率,并且在玉米生长中后期大幅提高叶片的水分利用能力。

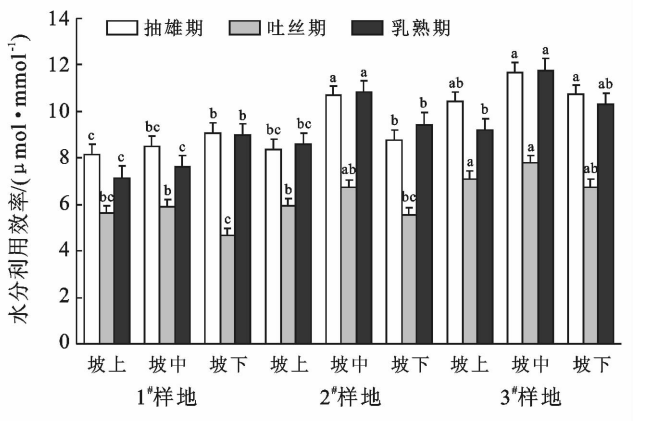


图 4　等高反坡阶对玉米不同生长周期作物水分利用效率的影响

2.3　等高反坡阶措施对玉米产量及其构成的影响

从玉米产量结果(表 4)可以看出,与原状坡耕地相比,等高反坡阶实施后有一定的增产效果。作物产量表现为:3#>2#>1#。由表 4 可知,3#样地的百粒质量,产量均与其他处理有显著差异。3#样地与 1#样地水分利用效率有显著差异,与 2#有差异,但没有达到显著水平。说明该措施增强了玉米光合能力,促进干物质的积累,提高玉米籽粒质量,进而提高了群体的作物产量。可能是玉米生育前期降雨量较少,原状坡耕地土壤水分流失严重,不能满足作物生长的水分需要,造成水分亏缺,玉米叶片光合和蒸腾作用受到较大影响,造成玉米产量的降低。2#,3#样地平均产量比 1#样地提高 9.6%,13.8%;而 3#样地比 2#样地产量提高不明显,为 3.9%,表明反坡台阶坡度的变化对产量影响不大。反坡阶措施能够显著提高产量水分利用效率,2#,3#样地玉米平均产量水分利用效率比原状坡耕地处理提高 8.4%,10.2%。同样与作物产量类似,2#和 3#样地之间,水分利用效率没有显著性差异。可见,等高反坡阶能够提高玉米的籽粒质量和产量,一定程度上提高作物水分利用效率。

表 4　等高反坡阶对玉米产量构成因素的影响

样地	措施	百粒质量/g	产量/(kg·hm⁻²)	耗水量/mm	产量水分利用效率/(kg·hm⁻²·mm⁻¹)
1#	CK(15°)	27.6±1.1^{c}	9 807±156.4^{b}	484.1±2.5^{b}	20.3±0.4^{b}
2#	CR(12°)	29.2±0.7^{b}	10 747±195.7^{b}	489.2±2.8^{ab}	22.0±0.3^{ab}
3#	CR(15°)	31.4±0.8^{a}	11 165±248.6^{a}	500.2±1.5^{a}	22.3±0.9^{a}

3 讨 论

不同地区实施水土保持耕作措施，其作用有所不同。坡耕地水土保持耕作措施是为了防止水土流失，改善土壤理化环境，有利于提高作物光合特性以及作物生长，进而保证农作物稳产高产[26]。马丽等[17]研究表明，在北方平原地区，通过垄作措施可以改善玉米的立地条件，提高土壤表面积，改善群体的透光条件，提高作物叶面积指数，进而提高玉米光合特性，促进光合产物的积累，提高籽粒产量和作物产量。本试验在西南坡耕地地区，通过人工微地形整地——等高反坡阶，在坡上、中、下 3 个地块进行玉米种植，结果表明，该措施可以提高叶片光合速率、叶片水分利用效率，促进光合产物的合成，提高籽粒产量，进而提高作物产量。在西南地区，垄作耕作模式（平地耕作）可以显著提高土壤贮水量（10.0%），提高土壤有机质含量以及氮磷钾含量，缓解夏季季节性高温对玉米后期生长的伤害，垄作后，玉米光合特性比普通耕地显著提高，从而提高作物产量[27-28]，在坡耕地，等高反坡阶措施也可提高土壤氮磷钾，且提高土壤贮水量的效果更为明显（13.5%，雨季；23.9%，旱季）。径流作为氮磷钾流失的源动力，当降雨较小时，该措施可将径流全部拦蓄在反坡内，后入渗至土壤；降雨较大时，需要径流量超过反坡的拦蓄量与入渗量之和，径流方可流入下一反坡[19]。通过布设该措施，玉米净光合速率比其他耕作措施（垄作、横坡耕作）高，而蒸腾速率差异不大，因此叶片瞬时水分利用效率远高于其他措施，获得显著高于坡耕地玉米的光合特性。

尽管该措施对玉米生理生态影响差异并不显著，但理论上，在一定范围内，基部三节总长越长，作物抗倒伏能力越强[29]，1# 样地和 3# 样地坡上、坡中存在差异，说明布设等高反坡阶措施能提高玉米抗倒伏能力。适宜的茎粗，株高，穗位高可以增强玉米对环境的抵抗力，是作物高产的基础。

作物通过叶片截获光能，叶面积大小以及光合作用的强弱对玉米的生长和产量有重要的影响。大量研究表明，玉米在整个生长周期内 LAI 表现为单峰曲线变化，叶面积增大，叶片光合速率高，作物光合能力强[30]，本试验变化与张瑞富等[31]的研究结果基本一致，样地布设反坡台阶措施后，延缓了玉米叶片衰老，促进光合产物向籽粒转移，LAI 峰值持续时间延长，提高作物光合能力，提高产量。闫腾云[20]研究指出，等高反坡阶通过增加作物蒸腾，减少土壤蒸发，对比坡耕地，增加了作物生育前期的供水量，促使作物更早进入发育期，延长了玉米的结实时间，提高作物产量。这与本试验结果一致。因此，等高反坡阶不仅能提高作物生长，增大叶面积，还能提高作物光合特性，作物水分利用效率以及作物产量。

4 结 论

（1）对坡耕地实施等高反坡阶整地措施，减少水土流失，通过反坡减少氮磷钾的流失，有效地提高玉米叶面积指数（LAI），延缓叶片衰老；同时显著提高玉米株高，促进玉米生长发育；样地“坡中”相对于其他地块促进幅度最大，LAI 和株高增幅分别为 43.38%，27.90%，表现出高效的作物冠层结构和生长特征。

（2）等高反坡阶通过提高土壤贮水量以及土壤水分，进而显著提升玉米叶片光合特性，叶片净光合速率平均增幅在 24.9%，叶片瞬时水分利用效率平均提高 34.2%；2#，3# 样地产量作物水分利用效率分别较 1# 提高了 8.4%，10.2%；2#，3# 样地作物产量分别较 1# 提高了 9.6%，13.8%。从产量指标看，该措施能有效弥补坡耕地种植作物产量低的缺点，提高作物光合作用以及水分利用效率。等高反坡阶整地在云南坡耕地地区具有良好的推广潜力，能有效促进云南地区农业经济发展。

[参 考 文 献]

[1] 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.

[2] 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.

[3] 陈正发，史东梅，何伟，等. 云南省降雨侵蚀力时空分布与演变趋势研究[J]. 农业机械学报，2017，48(10)：209-219.

[4] Dong Wenlin, Zhang Lizhen, Duan Yu, et al. Ridge and furrow systems with film cover increase maize yields and mitigate climate risks of cold and drought stress in continental climates [J]. Field Crops Research, 2017, 207: 71-78.

[5] Ding Risheng, Kang Shaozhong, Zhang Yanqun, et al. Partitioning evapotranspiration into soil evaporation and transpiration using a modified dual crop coefficient model in irrigated maize field with ground-mulching [J]. Agricultural Water Management, 2013, 127: 85-96.

[6] 云南省政府系统决策咨询研究课题组. 云南省坡耕地高效水土保持对策研究[J]. 水利发展研究，2013，13(1)：34-38.

[7] 唐江华，苏丽丽，李亚杰，等. 不同耕作方式对复播大豆光合特性、干物质生产及经济效益的影响[J]. 应用生态学报，2016，27(1)：182-190.

[8] 刘小飞，李彪，孟兆江，等. 隔沟调亏灌溉对冬小麦旗叶生理特性与产量形成的影响[J]. 农业机械学报，2019，

50(9):320-328.

[9] 王飞,刘领,武岩岩,等. 玉米花生间作改善花生铁营养提高其光合特性的机理[J]. 植物营养与肥料学报,2020,26(5):901-913.

[10] Zhang Xudong, Muhammad K, Xue Xuchke, et al. Ridge-furrow mulching system drives the efficient utilization of key production resources and the improvement of maize productivity in the Loess Plateau of China [J]. Soil & Tillage Research, 2019,190:10-21.

[11] Li Shuxin, Yang Wenyi, Guo Junhong, et al. Changes in photosynthesis and respiratory metabolism of maize seedlings growing under low temperature stress may be regulated by arbuscular mycorrhizal fungi [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2020,154:1-10.

[12] Wu Wenming, Wang Shiji, Zhang Lin, et al. Subsoiling improves the photosynthetic characteristics of leaves and water use efficiency of rainfed summer maize in the Southern Huang-Huai-Hai Plain of China [J]. Agronomy, 2020,10(5):465-476.

[13] José M Tarjuelo, Juan A Rodriguez-Diaz, Richardo A, et al. Efficient water and energy use in irrigation modernization: Lessons from Spanish case studies [J]. Agricultural Water Management, 2015,162:67-77.

[14] 焦念元,宁堂原,杨萌珂,等. 玉米花生间作对玉米光合特性及产量形成的影响[J]. 生态学报,2013,33(14):4324-4330.

[15] 张倩,张洪生,宋希云,等. 种植方式和密度对夏玉米光合特征及产量的影响[J]. 生态学报,2015,35(4):1235-1241.

[16] 于文颖,纪瑞鹏,冯锐,等. 不同生育期玉米叶片光合特性及水分利用效率对水分胁迫的响应[J]. 生态学报,2015,35(9):2902-2909.

[17] 马丽,李潮海,付景,等. 垄作栽培对高产田夏玉米光合特性及产量的影响[J]. 生态学报,2011,31(23):156-165.

[18] 宋振伟,郭金瑞,任军,等. 耕作方式对东北雨养区玉米光合与叶绿素荧光特性的影响[J]. 应用生态学报,2013,24(7):1900-1906.

[19] 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.

[20] 闫腾云,王克勤,赵洋毅,等. 等高反坡台阶整地对坡耕地农田耗水及水量平衡的影响[J]. 水土保持研究,2020,27(4):93-98,104.

[21] 陈雪,宋娅丽,王克勤. 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.

[22] 陈雪,宋娅丽,王克勤,等. 基于 VanGenuchten 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] 陈雪,宋娅丽,王克勤,等. 布设等高反坡阶对滇中松华坝水源区坡耕地土壤饱和导水率的影响[J]. 福建农林大学学报(自然科学版),2019,48(5):649-655.

[24] 唐佐芯,王克勤,李秋芳,等. 等高反坡阶对坡耕地产流产沙和氮磷迁移的作用研究[J]. 水土保持研究,2013,20(1):1-8.

[25] 郝卫平. 干旱复水对玉米水分利用效率及补偿效应影响研究[D]. 北京:中国农业科学院,2013.

[26] 杨爱民,孙彦坤,孟莉,等. 坡耕地垄作区田保水增产效益的研究[J]. 干旱地区农业研究,1997,15(4):8-11.

[27] 王龙昌,邹聪明,张云兰,等. 西南"旱三熟"地区不同保护性耕作措施对农田土壤生态效应及生产效益的影响[J]. 作物学报,2013,39(10):1880-1890.

[28] 王成雨,张丽琼,宋贺,等. 宽行垄作增强苗期淹水夏玉米光合和抗倒性提高产量[J]. 农业工程学报,2015,31(18):129-135.

[29] 吕丽华,陶洪斌,夏来坤,等. 不同种植密度下的夏玉米冠层结构及光合特性[J]. 作物学报,2008(3):447-455.

[30] 张文超. 耕作方式对土壤主要理化性状及玉米产量形成的影响[D]. 黑龙江 大庆:黑龙江八一农垦大学,2017.

[31] 张瑞富,杨恒山,高聚林,等. 深松促进春玉米干物质和磷素的积累与转运[J]. 农业工程学报,2016,32(19):106-112.

(上接第 70 页)

[25] 张露,韩霁昌,马增辉,等. 山地丘陵区不同复垦年限空心村整治后土壤特性[J]. 水土保持学报,2015,29(5):176-180.

[26] 董博,张东伟,郭天文,等. 长期定位施肥对土壤有机碳和微生物量碳的影响[J]. 土壤通报,2012,43(6):193-198.

[27] 王瑗玲,赵庚星,王庆芳,等. 丘陵区土地整理对土壤理化性状的影响[J]. 农业工程学报,2011,27(9):311-315.

[28] 王宏庭,金继运,王斌,等. 土壤速效养分空间变异研究[J]. 植物营养与肥料学报,2004,10(4):349-354.

[29] 肖波,王庆海,李翠,等. 黄土高原退耕地复垦对土壤理化性状及空间变异特征的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2011,39(7):185-192.

[30] 刘彦随,李裕瑞. 黄土丘陵沟壑区沟道土地整治工程原理与设计技术[J]. 农业工程学报,2017,33(10):1-9.

[31] 薛萐,刘国彬,张超,等. 黄土高原丘陵区坡改梯后的土壤质量效应[J]. 农业工程学报,2011,27(4):310-316.