

黑土区水土保持工程措施对坡耕地 土壤生产力的空间分异效应及驱动机制

张桐桐, 刘滨辉*

(东北林业大学 林学院, 哈尔滨 150040)

摘要: 为探究不同水土保持工程措施对黑土区坡耕地土壤生产力的影响, 以东北黑土区吉林省辽源市东辽县杏木小流域的 2 种水土保持措施 (梯田、地埂) 为研究对象, 并以无措施坡耕地为对照 (CK1 和 CK2), 对比分析不同水土保持措施在不同坡位、土层土壤生产力的差异及影响土壤生产力的主导因子。结果表明, 1) 梯田和地埂显著改善土壤质量, 梯田和地埂与无措施 CK1 和 CK2 坡耕地相比, 土壤全氮、全钾、有效磷、有机质和黏粒质量分数分别提高 40.25% 和 16.16%、9.14% 和 5.57%、33.27% 和 24.50%、30.25% 和 7.94%、8.47% 和 5.03%, 砂粒质量分数降低 7.08% 和 12.35%。2) 中坡位对水土保持措施响应最为敏感, 与 CK1 和 CK2 相比, 梯田和地埂中坡位土壤全氮、全钾、有效磷、有机质和黏粒质量分数分别提高 84.58% 和 30.15%、16% 和 8.04%、48.49% 和 38.92%、38.02% 和 11.24%、18.92% 和 9.21%, 且差异显著 ($P < 0.05$)。3) 土壤生产力指数变化范围介于 0.29~0.49, 在不同措施类型下土壤生产力指数存在差异, 与 CK1 相比, 梯田土壤生产力指数上坡位、中坡位和下坡位分别提高 24.05%、65.85% ($P < 0.05$) 和 11.81%, 与 CK2 相比, 地埂土壤生产力指数上坡位、中坡位和下坡位分别提高 10.00%、49.95% ($P < 0.05$)、35.20%。4) 不同措施类型下土壤含水量及全氮、全钾、有效磷、有机质质量分数均随土层深度的增加差异逐渐减小, 且表层 0~10 cm 土层深度显著大于其他土层, 而土壤容重变化趋势相反。5) 多因素方差和冗余分析表明, 措施类型、坡位、土层、类型 × 坡位、类型 × 土层对土壤生产力存在显著影响, 土壤全氮质量分数对土壤生产力指数影响最大, 其次为土壤容重。黑土区坡耕地实施水土保持措施提高了土壤含水量及土壤养分、黏粒质量分数, 降低容重和砂粒质量分数, 表明水土保持措施能够有效提高土壤生产力, 且梯田措施优于地埂; 不同措施中中坡位改变量最为显著, 其主要通过改变中坡位土壤全氮质量分数和容重进而影响到土壤生产力的大小; 建议优先在中坡位实施梯田工程, 同时将全氮和容重作为关键监测指标, 以最大化水土保持措施的土壤改良与生产力提升效益。

关键词: 黑土区; 水土保持工程措施; 土壤生产力; 梯田; 地埂; 坡位; 土层; 土壤养分

中图分类号: S774

文献标识码: A

DOI: 10.7525/j.issn.1006-8023.2026.01.003

Spatial Differentiation Effect and Driving Mechanism of Soil and Water Conservation Engineering Measures on Soil Productivity of Slope Farmland in Black Soil Area

ZHANG Tongtong, LIU Binhui*

(College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: In order to explore the effects of different soil and water conservation engineering measures on soil productivity of slope farmland in black soil area, two kinds of soil and water conservation measures (terrace and ridge) in Xingmu small watershed of Dongliao County, Liaoyuan City, Jilin Province in northeast black soil area were taken as the research objects, and the slope farmland without measures was taken as the control (CK1 and CK2). The differences of soil productivity of different soil and water conservation measures at different slope positions and the dominant factors af-

收稿日期: 2025-03-12

基金项目: 国家重点研发计划 (2024YFD1501402)。

第一作者简介: 张桐桐, 硕士研究生。研究方向为水土保持。E-mail: 1577748823@qq.com

* **通信作者:** 刘滨辉, 博士, 教授。研究方向为水土保持与土壤侵蚀。E-mail: binhui@nefu.edu.cn

引文格式: 张桐桐, 刘滨辉. 黑土区水土保持工程措施对坡耕地土壤生产力的空间分异效应及驱动机制[J]. 森林工程, 2026, 42(1): 23-34.

ZHANG T T, LIU B H. Spatial differentiation effect and driving mechanism of soil and water conservation engineering measures on soil productivity of slope farmland in black soil area[J]. Forest Engineering, 2026, 42(1): 23-34.

fecting soil productivity were compared and analyzed. The results showed that: 1) terraces and ridges significantly improved soil quality. Compared with CK1 and CK2 slope farmland without measures, the contents of total nitrogen, total potassium, available phosphorus, organic matter and clay mass fraction in terraces and ridges increased by 40.25% and 16.16%, 9.14% and 5.57%, 33.27% and 24.50%, 30.25% and 7.94%, 8.47% and 5.03%, respectively, and the sand mass fraction decreased by 7.08% and 12.35%. 2) The middle slope position was the most sensitive to soil and water conservation measures. Compared with CK1 and CK2, the contents of total nitrogen, total potassium, available phosphorus, organic matter and clay mass fraction in the middle slope position increased by 84.58% and 30.15%, 16% and 8.04%, 48.49% and 38.92%, 38.02% and 11.24%, 18.92% and 9.21%, respectively, and the difference was significant ($P < 0.05$). 3) The soil productivity index ranged from 0.29 to 0.49, and there were differences in soil productivity index under different measures. Compared with CK1, the soil productivity index of terraced fields increased by 24.05%, 65.85% ($P < 0.05$) and 11.81% at the upper, middle and lower slopes, respectively. Compared with CK2, the soil productivity index of ridges increased by 10.00%, 49.95% ($P < 0.05$) and 35.20% at the upper, middle and lower slopes, respectively. 4) The differences of soil water content, total nitrogen, total potassium, available phosphorus content and organic matter mass fraction under different measures gradually decreased with the increase of soil depth. The depth of 0-10cm soil layer was significantly higher than that of other soil layers, while the change trend of soil bulk density was opposite. 5) Multivariate variance and redundancy analysis showed that the type of measures, slope position, soil layer, type \times slope position, type \times soil layer had significant effects on soil productivity. Soil total nitrogen mass fraction had the greatest impact on soil productivity index, followed by soil bulk density. The implementation of soil and water conservation measures on slope farmland in black soil area increased soil water content, soil nutrients, clay mass fraction, and reduced bulk density and sand mass fraction, indicating that soil and water conservation measures can effectively improve soil productivity, and terrace measures are better than ridges; among different measures, the change of middle slope position is the most significant, which mainly affects the soil productivity by changing the soil total nitrogen mass fraction and bulk density of middle slope position. It is recommended to give priority to the implementation of terrace projects in the middle slope position, and to use total nitrogen and bulk density as key monitoring indicators to maximize the benefits of soil improvement and productivity improvement of soil and water conservation measures.

Keywords: Black soil area; soil and water conservation project measures; soil productivity; terraces; ridge; slope position; soil layer; soil nutrients

0 引言

中国东北黑土区作为世界上仅有的3大黑土区之一,是我国重要的粮基生产地^[1]。然而,黑土资源正面临严峻威胁。高强度农业开垦、水土流失、有机质退化及化学污染等问题导致全球黑土区年均表层土壤流失速率高达0.3~1.5 cm,有机质质量分数较开垦初期下降30%~50%^[2]。这种退化直接威胁土壤生产力,土壤结构破坏导致持水能力降低,养分循环受阻,作物产量波动加剧,严重影响了区域生态环境和粮食生产安全^[3]。土壤生产力作为衡量土壤支持植物生长和产出能力的核心指标,不仅决定了农业的兴衰,更在生态系统稳定、资源循环利用等层面上发挥着不可替代的作用^[4]。因此,探究水土保持工程措施下土壤生产力的变化,不仅有助于优化农业生产,提高农作物产量,减少化肥使用对环境的负面影响,还能为退化土地的修复和生态系统的保护提供科学依据^[5]。

梯田和地埂作为坡面治理工程中重要的水土保持工程措施,能够有效控制坡耕地水土流失和实现当地农业生产可持续发展^[6-7],对维持生态脆弱区粮食安全

与生态安全具有重要意义。国内众多学者对坡面水土保持工程措施效益和机理作了相关研究。万怡国等^[8]研究了红壤区不同水土保持措施对土壤抗蚀性的影响,发现水土保持措施能显著提高土壤抗蚀性;薛蕙等^[9]探讨了黄土高原丘陵区坡改梯后的土壤质量效应,并称坡改梯后随改造年限的延长,土壤质量显著提高;张瑜等^[10]探究了黑土区山地丘陵区坡面水土保持措施效益,发现坡面水土保持措施稳固性、生态效益和经济效益水平梯田优于坡式梯田,而地埂植物带较差;吴家兵等^[11]研究了长江上游、黄河上中游坡耕地改为梯田(坡改梯)对径流及生态环境的影响,发现坡改梯显著降低径流和改善生态环境。以上研究针对不同地区不同土壤类型下水土保持措施在土壤抗蚀性、土壤质量、水土保持措施效应、径流以及侵蚀等方面做了相关的研究。然而,从土壤生产力角度,探究黑土区不同水土保持工程措施对土壤生产力影响机制的研究还少见报道,而土壤生产力研究关系到一个区域的社会经济发展方向,是区域土地利用和生态环境建设的重要基础条件,其变化是全球变化的重要指标,也一直是国际上备受关注的农业问题和人类发展问题的核心。

鉴于此,本研究以吉林省辽源市东辽县杏木流域实施水土保持工程措施的梯田(TT)和地埂(DG)坡面以及无措施的坡耕地坡面(CK1、CK2)为研究对象,其中CK1是TT的对照,CK2是DG的对照,采用野外调查、采样和室内分析的方法,对比分析不同坡位耕地的土壤理化性质、养分指标,进而计算出土壤生产力指数,探究不同工程措施在不同坡位下土壤理化性质、养分及土壤生产力指数的差异,分析影响土壤生产力的主导影响因子及环境影响因素,为科学评估东北黑土区土壤生产力和黑土资源的长期可持续利用提供科学依据。

1 研究区概况

本研究以吉林省辽源市东辽县安石镇杏木小流域

(125°22′40″—125°26′10″E, 42°58′05″—43°01′40″N)为研究区域,该区域为东北黑土区暗棕壤地区的一个农业坡耕地小流域,海拔约为310~370 m,如图1所示。该区域地处半湿润温带季风气候区,四季分明,年日照时间2 504.2 h,多年平均温度7.22 °C,有效积温2 700~2 800 °C,≥10 °C的积温2 900 °C。多年平均年降水量598.30 mm,降雨主要集中在5~9月,如图2所示,数据来源于杏木气象站,属于东北黑土区典型低山丘陵地貌,该地区多为坡地,坡度多为5°~15°,90%以上耕地坡度>5°,坡耕地土壤类型多以棕壤为主;水土流失主要以水蚀为主,多年平均侵蚀模数为2 085 t/(km²·a)。

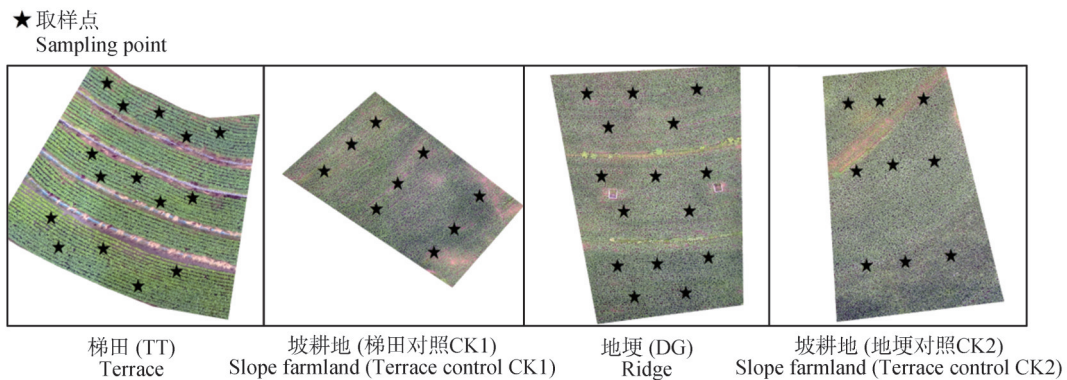


图1 研究区样点示意图

Fig. 1 The sample points of the study area

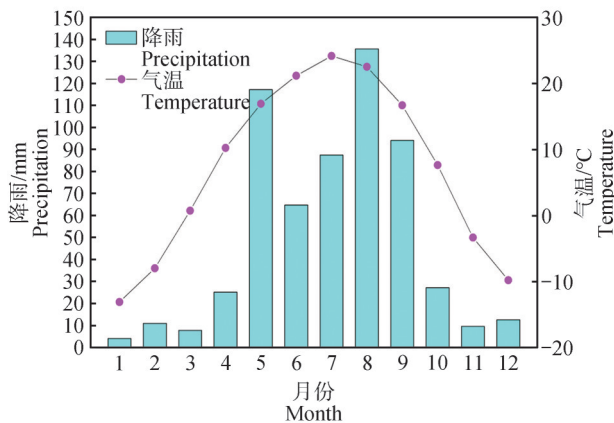


图2 研究区多年平均气温和降雨

Fig. 2 Average temperature and precipitation in the study area for many years

2 材料与方法

2.1 试验布设

在研究区内选择建有梯田和地埂(梯田和地埂是

在2014年用坡耕地改造而来,并进行了土壤地力恢复,土壤侵蚀模数43.8 t/(km²·a),坡度8°~10°,土层厚度>30 cm)的坡耕地以及无措施的坡耕地为研究对象,每种措施的坡面以及无措施的坡面各选取一个,一共选取总共4个坡面,见表1。于2024年8月(秋季)采集样品,在选取有措施坡耕地坡面的上坡位、中坡位和下坡位设置采样控制田面,每个田面按照“五点”布点法,布设5个取样点,并在无措施对照坡面的上坡位、中坡位和下坡位分别设置3个取样点,样点示意图见图1,分别在0~10、10~20、20~30、30~40、40~50 cm土层挖取土壤剖面,用100 cm³环刀取原状土测定土壤容重,一共48个坡面取样点,240份土样,同时用铝盒在每个取样点每个土层取少量土样用于测定土壤质量含水量,剖面样点土样采集前先将剖面整修清理,削去表层浮土,然后再按层次自上而下逐层从典型剖面部位采集原状土1.5 kg于塑料饭盒(避免运输过程中的挤压),带回实验室,风干(避免阳光直射),用于测定土壤理化性质、养分质量分数等。选取坡面作物类型均为玉米,耕作方式为旋耕横垄耕作。采样地块过去的3 a实行玉

米一大豆轮作,每年施复合肥(N:P₂O₅:K₂O为15:15:15,N、P₂O₅和K₂O分别表示氮、五氧化二磷和氧化钾。15:15:15表示该肥料中含有15%的氮、15%的五

氧化二磷以及15%的氧化钾)500 kg/hm²,播种前翻耕20 cm,未使用生物肥料。

表1 梯田、地埂以及坡耕地测量点的高程和坡度

Tab. 1 Elevation and slope of terraces, ridges and slope farmland measurement points

坡位 Slope position	梯田(TT) Terrace		CK1		地埂(DG) Ridge		CK2	
	海拔/m Elevation	坡度/(°) Slope	海拔/m Elevation	坡度/(°) Slope	海拔/m Elevation	坡度/(°) Slope	海拔/m Elevation	坡度/(°) Slope
坡上 Upslope	343.4	10	340.9	10	340.5	8.5	340.8	8.5
坡中 Mesoslope	341.3	10	339.1	10	339.3	8.5	339.7	8.5
坡下 Downhill	340.1	10	337.9	10	338	8.5	338.6	8.5

2.2 测定方法

对选取的有措施(梯田和地埂)和无措施坡耕地样地所获取的土样进行室内试验,测得土壤pH、有机质、全氮、全钾、速效磷、土壤容重、土壤含水量、机械组成8个指标。指标测定方法参考陈立新^[12]土壤实验实习教程。土壤生产力指数计算参考段兴武等^[13]修订的生产力指数模型,其根据东北松嫩黑土区的土壤特性对原土壤生产力指数模型(productivity index, PI)进行了修订,得到修改后生产力指数模型(BPI),并验证了修订的BPI模型在松嫩黑土区的适宜性优于原PI模型,其模型指标包括土壤含水量、容重、有机质质量分数和土壤pH。其中,土壤有机质质量分数(g/kg)采用重铬酸钾氧化外加热法测定;机械组成(砂粒、粉粒、黏粒)采用吸管法测定(质量百分比);pH采用电位法测定;全氮质量分数(g/kg)采用凯氏定氮法测定;有效磷质量分数(mg/kg)采用NaHCO₃浸提-钼锑抗比色法测定;全钾质量分数(g/kg)采用氢氧化钠(NaOH)溶解-火焰光度法;土壤容重(g/cm³)、土壤水分采用环刀法、烘干法测定。

2.3 数据处理

采用Excel2010软件和IBM SPSS26软件进行数据整理和统计分析;使用Canoco5.0软件进行冗余分析;并使用Origin2021软件进行作图;采用单因素方差法(one-way analysis of variance, ANOVA)分析不同措施类型、不同坡位和不同深度的差异性和显著性($P < 0.05$);采用Pearson相关法分析土壤性质间与土壤生产力间相关关系。

3 结果与分析

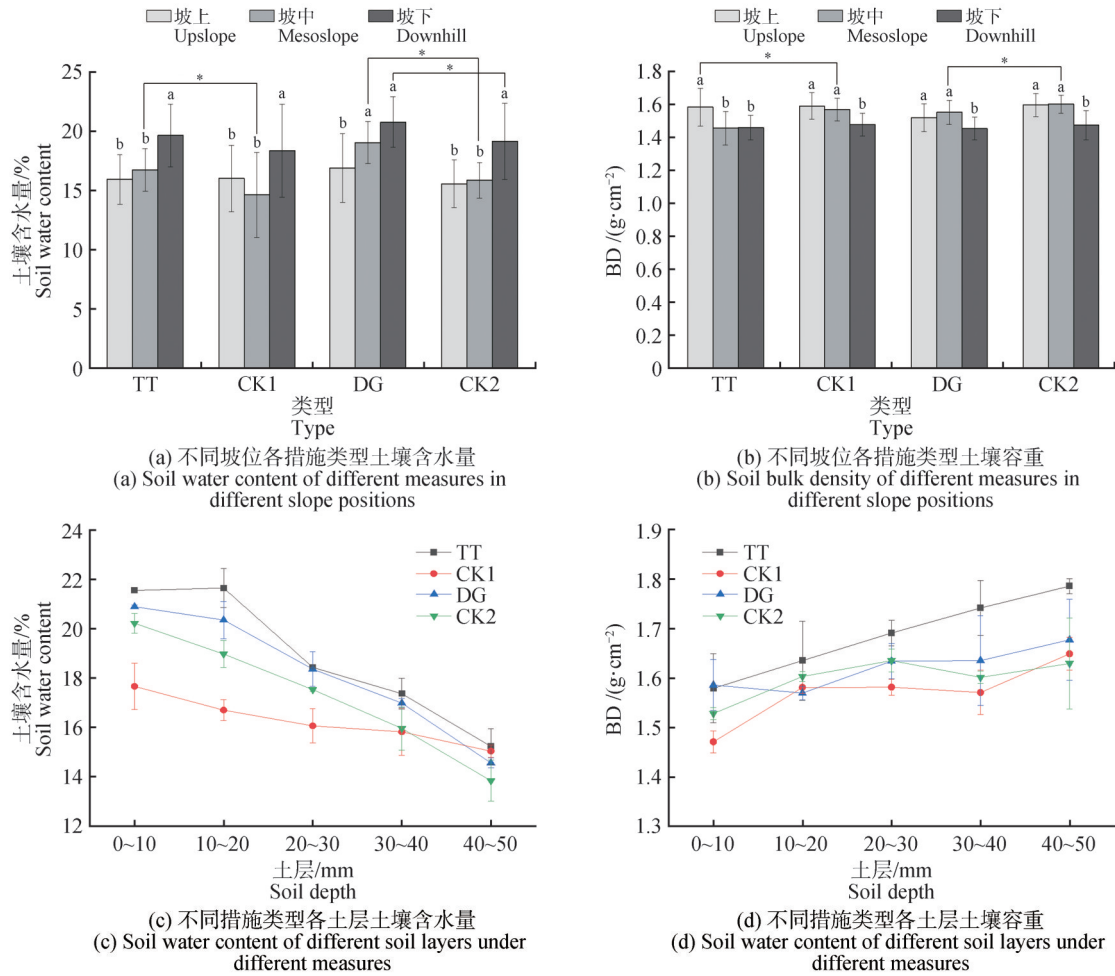
3.1 不同水土保持工程措施类型下土壤含水量和容重变化特征

由图3(a)和图3(b)可知,坡位变化对土壤含水量

和容重(bulk density, BD)存在一定的影响,其中,土壤含水量由大到小表现为坡下、坡中、坡上,且下坡位显著大于中坡位和上坡位;土壤容重由小到大表现为坡下、坡中、坡上,且下坡位显著低于上坡位。与CK1相比,上坡位和下坡位梯田(TT)土壤含水量差异不显著($P > 0.05$),中坡位梯田提高了土壤含水量和降低了土壤容重,且差异显著($P < 0.05$),其中,梯田土壤含水量较CK1显著增加14.44%($P < 0.05$),梯田土壤容重较CK1降低7.20%($P < 0.05$)。与CK2相比,上坡位地埂(DG)土壤含水量和容重差异不显著($P > 0.05$),中坡位地埂提高了土壤含水量和降低了容重,且差异显著($P < 0.05$),地埂土壤含水量较CK2提高20.11%,地埂土壤容重较CK2降低3.07%。由图3(c)和图3(d)可知,土层对土壤含水量和容重存在一定影响,其中,土壤含水量均随土层深度的增加而逐渐减小,而土壤容重变化趋势相反。综上中坡位对措施响应最敏感,梯田和地埂对水分调控能力随坡位变化呈现非线性响应,中坡位达到最优效果,而上、下坡位则效果不显著,土壤含水量地埂优于梯田,土壤容重梯田优于地埂。

3.2 不同水土保持工程措施类型土壤机械组成变化特征

不同措施类型土壤机械组成主要以粉粒质量分数占比最高,在各坡位存在差异,如图4所示。TT、CK1、DG和CK2黏粒质量分数坡下显著大于坡上($P < 0.05$),与CK1相比,上坡位、中坡位和下坡位TT黏粒质量分数分别提高0.75%、18.92%($P < 0.05$)和5.75%;与CK2相比,上坡位、中坡位和下坡位DG黏粒质量分数分别提高1.94%、9.12%($P < 0.05$)4.03%。CK1、DG和CK2砂粒质量分数由高到低呈现出坡中、坡上、坡下,TT砂粒质量分数由高到低呈现出坡上、坡中、坡下,且均表现出坡下显著大于坡上($P < 0.05$)。与CK1相比,上坡位、中坡位和下坡位TT砂粒质量分



小写字母表示相同措施类型不同坡位之间的差异性显著($P < 0.05$),下同。*表示相同坡位水土保持措施与无水土保持措施之间的差异显著。Lowercase letters indicate that the difference between different slope positions of the same measure is significant ($P < 0.05$), the same below. * indicates that the difference between soil and water conservation measures and no soil and water conservation measures at the same slope position is significant.

图 3 不同措施类型土壤含水量与土壤容重

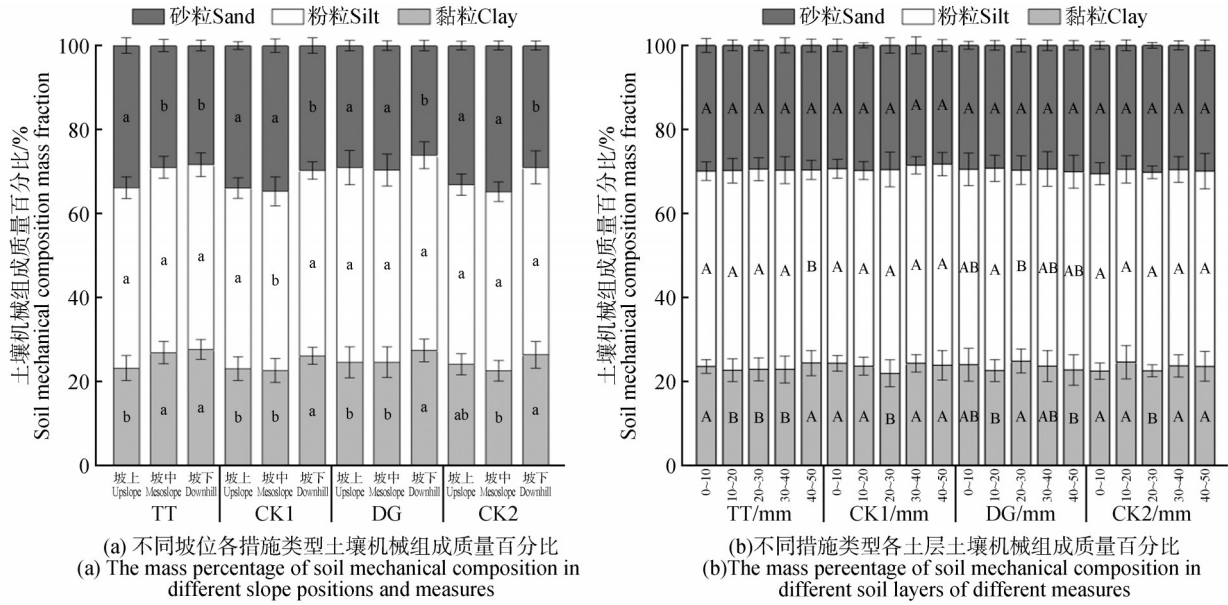
Fig. 3 Soil water content and soil bulk density of different measures

数分别降低0.25%、16.40%和4.58%;与CK2相比,上坡位、中坡位和下坡位DG砂粒质量分数分别降低12.23%、14.77%和10.05%。土壤机械组成质量百分比一定程度受土层深度的影响,总体上表现为随土层深度增加砂粒质量分数增多,黏粒质量分数减少,粉粒质量分数先增加后减的变化,且变化不明显。综上,与CK1和CK2相比梯田和地埂主要增加了中坡位黏粒质量分数和降低了中坡位砂粒质量分数,上坡位和下坡位改变不明显,且改变量梯田优于地埂。

3.3 不同水土保持工程措施类型下土壤有机质和pH变化特征

水土保持措施能够显著提高和改善坡中土壤有机质质量分数和pH,如图5所示。在梯田和地埂措施类型下坡位变化对土壤pH和土壤有机质质量分数影响显著,其中,土壤pH坡中显著大于坡下($P < 0.05$),由

大到小表现为坡上、坡中、坡下;土壤有机质质量分数坡下显著大于坡上($P < 0.05$),由大到小表现为下坡、中坡、上坡。与CK1相比较,上坡位、中坡位和下坡位梯田有机质质量分数分别提高20.57%、38.02%和32.16%,且上坡位和中坡位差异显著($P < 0.05$);与CK2相比,上坡位、中坡位和下坡位地埂有机质质量分数分别提高9.09%、11.24%($P < 0.05$)和3.50%。土层对土壤pH和土壤有机质质量分数存在一定影响,不同措施类型表层土壤pH显著低于深层土壤($P < 0.05$),且随土层深度增加逐渐增加;表层土壤有机质质量分数显著大于深层($P < 0.05$),且有机质质量分数随土层深度增加而逐渐减小。综上,与CK1和CK2相比,梯田和地埂主要通过增加坡中有机质质量分数,以坡中位置改善作用最好,且改变量梯田优于地埂。



不同字母表示相同措施类型不同土层之间的差异性显著 ($P < 0.05$), 下同。

Different letters indicate that the difference between different soil layers of the same measure is significant ($P < 0.05$), the same below.

图4 不同措施类型土壤机械组成变化

Fig. 4 Changes of soil mechanical composition under different measures

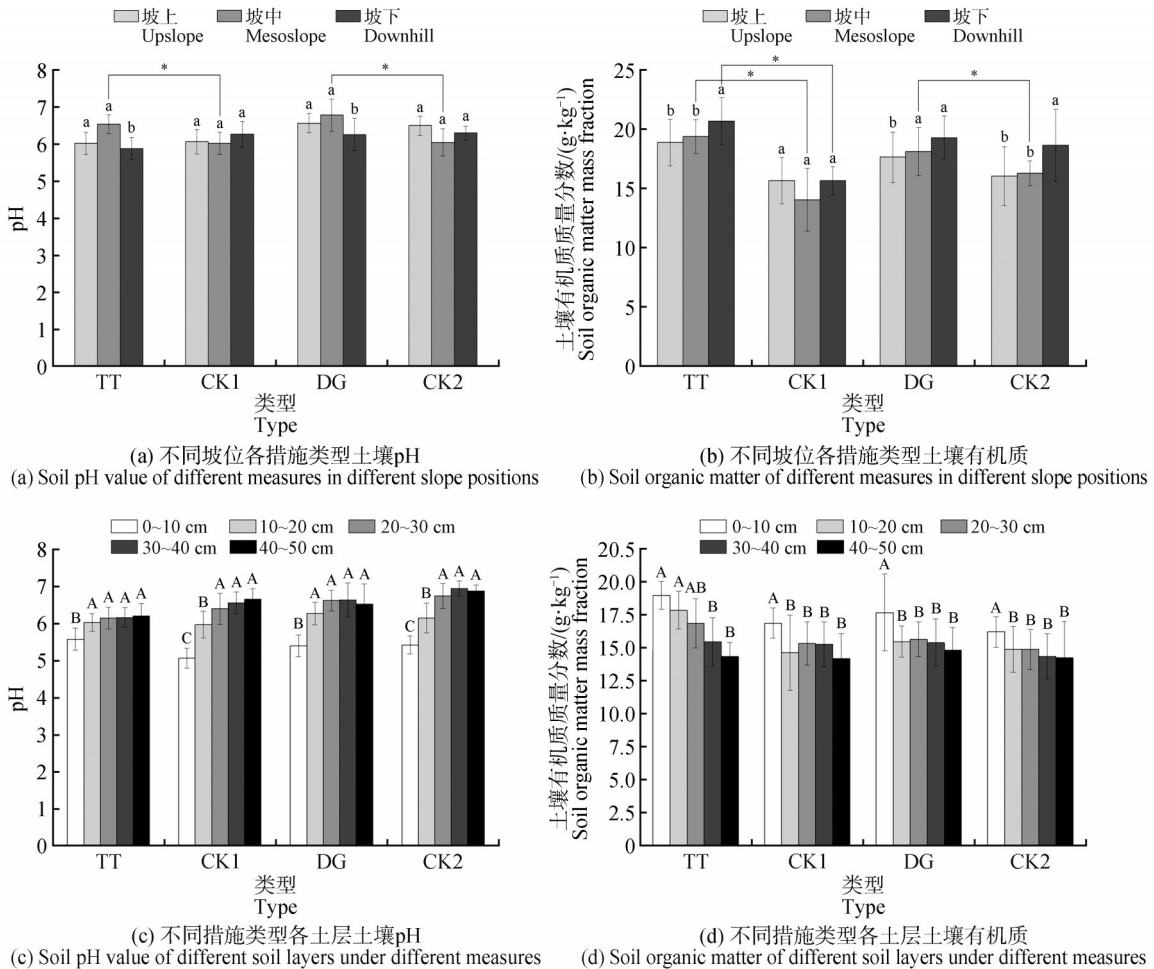


图5 不同措施类型土壤有机质和pH变化

Fig. 5 Changes of soil organic matter and pH under different measures

3.4 不同水土保持工程措施类型土壤养分变化特征

由图6可知,在0~50 cm 土层中,水土保持工程措施梯田和地埂能够显著提高坡中土壤全氮、全钾和有效磷质量分数。在梯田和地埂措施下坡位变化对全氮质量分数存在影响,梯田和地埂土壤全氮质量分数在坡位变化由大到小呈现出坡上、坡中、坡下,且梯田坡上显著大于坡下($P < 0.05$),而无措施坡地CK1由大到小呈现出坡下、坡上、坡中,CK1坡中显著低于坡上和坡中($P < 0.05$)。与CK1相比,上坡位、中坡位和下坡位梯田全氮质量分数分别提高34.14%、84.58%和

2.05%,且上坡位和中坡位差异显著($P < 0.05$);与CK2相比,上坡位、中坡位和下坡位地埂全氮质量分数分别提高12.45%、30.15%($P < 0.05$)和5.9%。梯田和地埂土壤全钾质量分数在坡位变化由大到小呈现出坡中、坡上、坡下,而无措施坡耕地CK1和CK2由大到小呈现出坡下、坡上、坡中。与CK1相比,上坡位、中坡位和下坡位梯田全钾质量分数分别提高10.96%、16%($P < 0.05$)和-0.47%;与CK2相比,上坡位、中坡位和下坡位地埂全钾质量分数分别提高0.20%、8.04%($P < 0.05$)和-8.47%。梯田有效磷质量分数在坡位变化由大到小呈现出坡中、坡下、坡上,坡中显著大于坡下

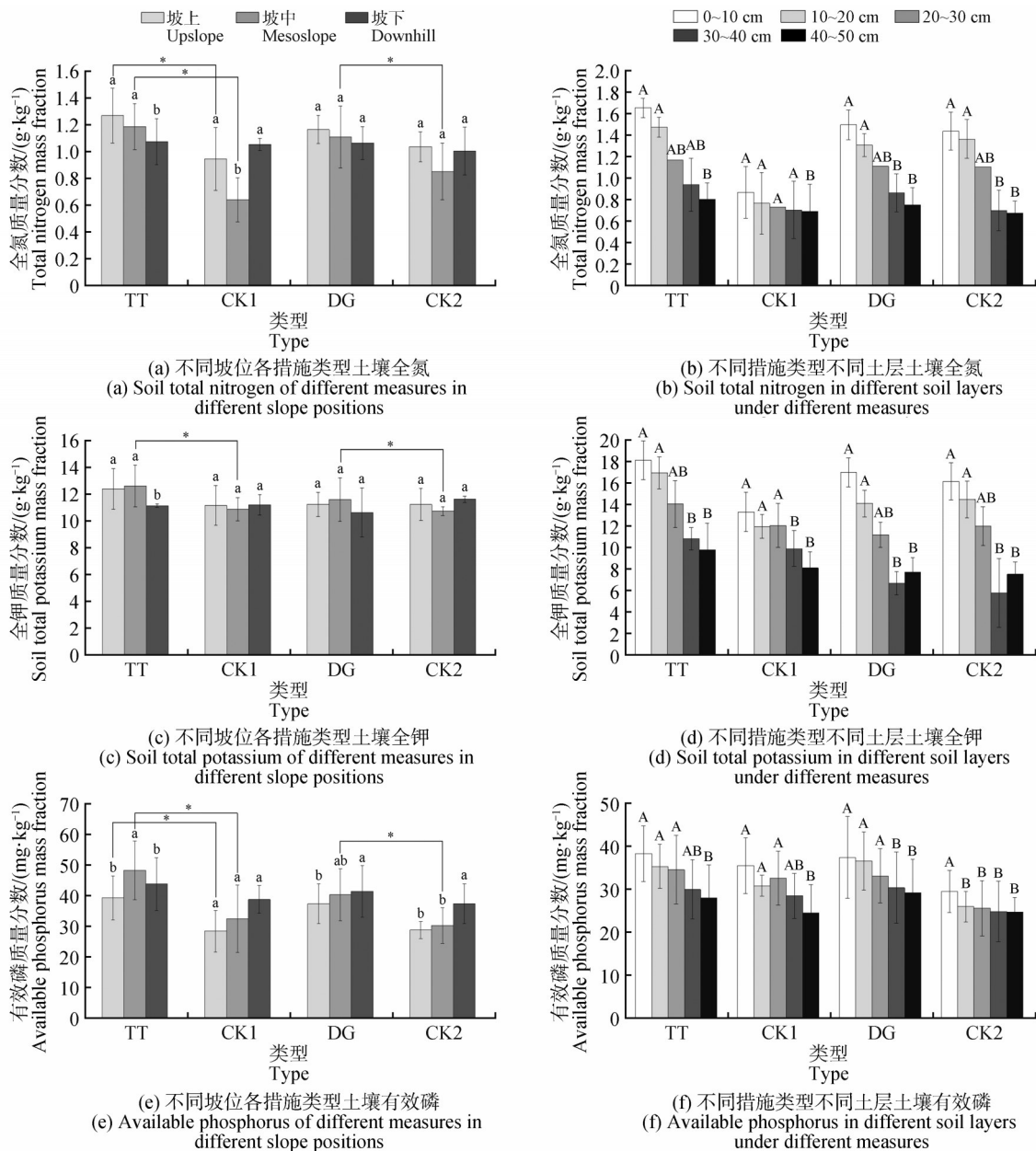


图 6 不同措施类型土壤型氮磷钾质量分数变化

Fig. 6 Changes of soil nitrogen, phosphorus and potassium mass fraction under different measures

($P < 0.05$),地埂有效磷质量分数在坡位变化由大到小呈现出坡下、坡中、坡上,各坡位差异不显著($P > 0.05$)。与CK1相比,上坡位、中坡位和下坡位梯田有效磷质量分数分别提高38.29%、48.49%和13.04%,上坡位和中坡位差异达显著($P < 0.05$);与CK2相比,上坡位、中坡位和下坡位地埂有效磷质量分数分别提高29.90%、32.92%($P < 0.05$)和10.7%。土层对全氮、全钾和有效磷质量分数存在影响,表现出表层0~10 cm土层深度显著大于其他土层。总体上,不同措施类型下全氮、全钾和有效磷质量分数均随土层深度的增加差异逐渐减小(图6)。综上所述可以发现,在坡耕地上实施梯田和地埂措施后能够有效提高不同坡位坡耕地的土壤全氮、全钾和有效磷质量分数,相比其他坡位,中坡位全氮、全钾和有效磷质量分数增加较为明显,下坡位改变不明显,以梯田优于地埂。

3.5 不同措施类型对土壤潜在生产力特征

由图7可知,应用模型BPI计算土壤生产力指数,整体上不同坡位土壤潜在生产力指数的变化范围介于0.29~0.49。在不同措施类型下土壤生产力指数由大到小表现为梯田、地埂、CK1、CK2,梯田与CK1相比,提高30.47%,地埂与CK2相比,提高30.88%。在不同坡位上,梯田和地埂土壤生产力指数由大到小表现为坡下、坡中、坡上,CK1和CK2由大到小表现出坡下、坡上、坡中。梯田土壤生产力指数与CK1相比,上坡位、中坡位和下坡位分别提高24.05%、65.85%和11.81%。地埂土壤生产力指数与CK2相比,上坡位、中坡位和下坡位分别提高10.00%、49.95%、35.20%。

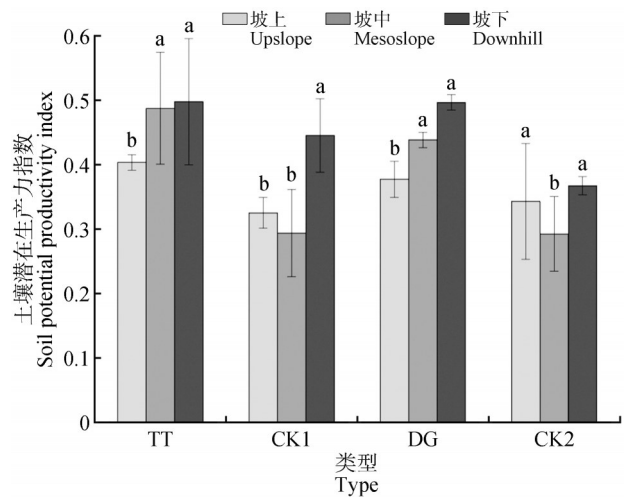


图7 不同工程措施类型土壤潜在生产力指数的变化
Fig. 7 Changes of soil potential productivity index under different engineering measures

3.6 土壤理化性质及土壤生产力指数与环境因子的关系

由表2可知,土壤全钾和全氮在措施类型、土层、类型×坡位、类型×土层下为极显著差异($P < 0.01$),在不同坡位下为显著差异($P < 0.05$);土壤容重和pH在不同类型、土层、类型×坡位下为极显著差异($P < 0.01$),在不同坡位下差异不显著($P > 0.05$);土壤含水量在措施类型、土层深度、坡位下为极其显著差异($P < 0.001$),在类型×坡位下为极显著差异($P < 0.01$);土壤生产力指数在不同土层深度、类型、坡位、类型×坡位下为极其显著差异($P < 0.001$),在类型×土层下为极显著差异($P < 0.01$),在坡位×土层、类型×坡位×土层下无显著差异($P > 0.05$)。

表2 措施类型、坡位、土层与土壤性质的交互作用显著性检验

Tab. 2 The significance test of the interaction between measure type, slope position, soil layer and soil properties

	Df		全氮 Total nitrogen	全钾 Soil total potassium	有效磷 Available phosphorus	有机质 Organic matter	砂粒 Sand	粉粒 Silent	黏粒 Clay	pH	BD	含水量 Moisture content	生产力指数 Productivity index
类型 Type	3	F	34.705	18.339	0.478	1.424	0.473	0.389	3.059	1.832	11.65	7.331	4.653
		P	**	**	ns	ns	ns	ns	*	**	**	***	***
坡位 Slope position	2	F	5.429	3.147	0.646	3.609	1.173	0.43	0.714	0.246	1.9	19.05	5.225
		P	*	*	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	***	***
土层 Soil layer	4	F	53.176	33.035	4.563	1.397	0.233	0.232	0.871	11.625	7.413	14.625	221.683
		P	**	**	*	ns	ns	ns	ns	**	**	***	***
类型×坡位 Type×slope position	6	F	4.22	4.585	1.81	2.224	1.013	0.869	1.96	0.561	4.214	3.348	3.739
		P	**	**	ns	*	ns	ns	*	**	**	**	***
类型×土层 Type×soil layer	12	F	4.555	5.771	1.791	1.462	0.929	0.715	1.023	0.435	1.778	1.307	1.455
		P	**	**	ns	ns	ns	ns	ns	**	ns	ns	**
坡位×土层 Slope position×soil layer	8	F	0.261	0.328	1.038	2.761	0.471	0.608	2.765	0.058	0.303	1.259	0.802
		P	ns	ns	ns	*	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns
类型×坡位×土层 Type×slope position×soil layer	24	F	0.639	0.454	1.199	2.145	1.316	1.248	1.201	0.074	0.945	1.161	1.09
		P	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

注:*** $P < 0.001$ 为极高度显著,** $P < 0.01$ 为极显著,* $P < 0.05$ 显著。

Note: *** $P < 0.001$ is extremely highly significant, ** $P < 0.01$ is extremely significant, * $P < 0.05$ is significant.

土壤理化性质与土壤生产力指数间的相关性分析如图 8 所示,土壤生产力指数与土壤含水量、全氮、全钾呈显著正相关,与土壤容重、pH 呈显著负相关。以生产力指数为响应变量,土壤理化性质为解释变量进行冗余分析,如图 9 所示。由图 9 可以看出,第 1 轴和第 2 轴分别解释了生产力指数变化的 42.19% 和 45.47%,

说明土壤理化性质能很好地反映生产力指数的变化。土壤全氮质量分数对土壤生产力指数影响最大,解释了生产力指数变化的 27.7%,其次为土壤容重,解释了生产力指数变化的 13%,土壤粉粒影响最小,对其解释量 < 0.1%。说明不同水土保持措施下,土壤生产力指数变化的主要影响因子及其影响程度具有差异。

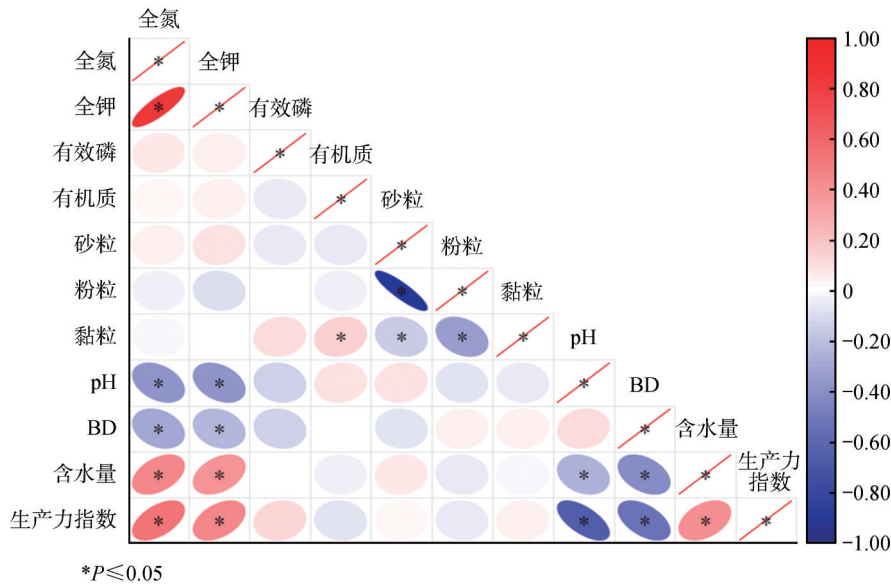
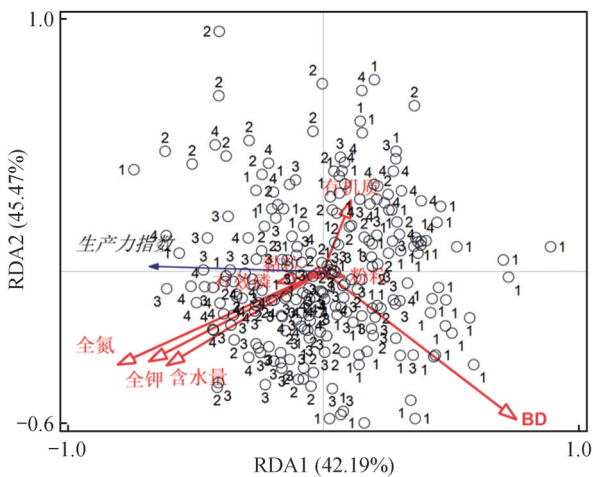


图 8 各指标与生产力指数的相关性分析

Fig. 8 Correlation analysis between each index and productivity index



1 为梯田; 2 为 CK1; 3 为地埂; 4 为 CK2。
1 is terrace; 2 is CK1; 3 is ridge; 4 is CK2.

图 9 土壤理化性质与生产力指数的 RDA 排序图

Fig. 9 RDA ordination diagram of soil physical and chemical properties and productivity index

4 讨论

土壤生产力受水分有效性和容重共同调控,适宜

的水分与容重,有助于土壤生产力提高^[14]。实施梯田和地埂措施后改变坡面坡度,减少了土壤侵蚀,增加了土壤水分涵养能力,降低了土壤容重,使得土壤生产力得到提高。本研究发现,上坡位和下坡位梯田土壤含水量较 CK1 有所提高,但差异不显著,中坡位梯田土壤含水量较 CK1 显著增加 14.44%,中坡位地埂土壤含水量较 CK2 显著提高 20.11%,表明梯田对水分再分配的调控存在空间阈值效应,且中坡位对措施响应最为敏感。这与 Li 等^[15]和 Wang 等^[16]的研究结果存在高度相似,一方面可能是梯田和地埂修筑后,中坡位形成“凹形”集水面,田坎拦截坡面径流,使降雨滞留时间延长,从而减少径流损失,促进有机质积累,但上坡位仍受原始坡面影响,仅部分径流流失,下坡位排水效应导致水分调控失效,造成上坡位和下坡位无显著差异;另一方面可能是中坡位处于侵蚀—沉积过渡带,上坡位水分难以截留,下坡位本就持水较高,导致措施效应边际递减^[17]。同时本研究还发现上下坡位对梯田和地埂土壤容重影响不显著,中坡位梯田土壤容重较 CK1 降低 7.20%,地埂较 CK2 降低 3.07%,说明梯田和地埂能够改善土壤结构,尤其中坡位改变尤为显著,地埂土壤结

构改良小于梯田,可能的原因是梯田和地埂能够阻滞泥沙的同时截留更多水分和养分,促进有机质积累,从而降低容重,因梯田从上坡位拦截泥沙和输入有机质高于地埂,因此地埂对土壤结构的改良较弱,这与Wang等^[18]的研究结果相似。

土壤颗粒组成是决定土壤物理、化学和生物学性质的基础因素,是影响土壤肥力以及土壤生产力关键指标。本研究发现在有措施(梯田和地埂)坡面的黏粒质量分数其坡位变化由大到小呈现出坡下、坡中、坡上,无措施坡耕地CK1和CK2由大到小呈现出坡下、坡上、坡中,而砂粒质量分数坡位变化相反。这主要是梯田和地埂通过阶梯式结构有效减缓径流速度,促使坡上和中部粗颗粒(砂粒)优先沉积,而细颗粒(黏粒)随径流向下坡迁移,导致坡下黏粒富集,中坡位因梯田和地埂的拦截,阻断颗粒随地表径流的运移,黏粒质量分数高于上坡位但低于下坡位,形成梯度分布;无措施坡面径流速度快,中坡位成为强侵蚀区,黏粒被大量冲刷至坡下,而坡上径流尚未充分汇集,侵蚀较轻,残留部分黏粒,导致中坡位黏粒质量分数最低,砂粒因重量大,在中坡位短暂沉积,但易被后续径流冲走,形成“坡中砂粒富集、黏粒亏损”的过渡带^[19]。研究发现梯田与CK1相比,中坡位梯田黏粒质量分数显著提高18.92%,与CK2相比,中坡位地埂黏粒质量分数显著提高9.12%,梯田对黏粒提高优于地埂。可能是梯田的平坦田面和台阶边缘能显著降低水流速度,使径流携带的细颗粒(黏粒)更容易沉降。相比之下,地埂对水流的阻滞作用较弱,部分黏粒可能越过地埂继续向下坡迁移^[20]。这与Liu等^[21]研究结果相似,研究发现梯田可拦截80%以上的悬浮泥沙,而地埂仅拦截40%~60%。

土壤生产力直接取决于氮、磷、钾的有效供给与平衡,氮促生长、磷促能量转化、钾抗胁迫^[22]。在黑土区实施梯田和地埂措施后显著改变了坡的面坡度,降低了水土流失强度,有效促进了养分的积累,并随着连年的耕作及有机和无机肥料的投入,促进了物质元素的积累,土壤碳、氮、磷和钾等元素质量分数增加,使得土壤生产力的提高^[23]。本研究发现在坡面上实施梯田和地埂措施后能够有效提高不同坡位土壤的全氮、全钾和有效磷质量分数,相比其他坡位,中坡位的全氮、全钾和有效磷质量分数增加较为显著;与CK1和CK2相比,中坡位梯田和地埂的全氮质量分数分别提高84.58%和30.15%,下坡位改变不明显,以梯田优于地埂。主要是梯田和地埂的修建使得田坎拦截坡面径流,从而减少径流损失,促进有机质积累,一定程度上会增加耕作层土壤微生物种群和数量的改变以及土壤

酶活性的提高,进而提高了土壤养分的转化能力,导致土壤氮磷钾质量分数提高;而中坡位处于侵蚀—沉积平衡带,既接受上坡径流携带的养分,又因梯田和地埂的阻滞作用减少养分向下坡流失^[24]。这与Wang等^[25]和Chen等^[26]研究结果一致,研究发现中坡位梯田的速效氮、磷、钾质量分数分别比上坡高28%、33%和19%,比下坡高12%、18%和9%。此外梯田通过阶梯式田面结构有效拦截坡面径流携带的溶解态氮和颗粒态磷钾,而地埂仅能部分阻滞粗颗粒物,因此梯田和地埂主要通过显著增加中坡位土壤氮磷钾及有机质的质量分数增加土壤养分和提高土壤生产力,且梯田优于地埂。

土层深度通过调控水分、容重、有机质分布及养分垂直分布共同决定土壤生产力。本研究发现不同措施类型下土壤含水量及全氮、全钾、有效磷、有机质质量分数均随土层深度的增加差异逐渐减小,表层0~10 cm土层深度显著大于其他土层,而土壤容重变化趋势相反。这与李翻过等^[27]关于耕作方式与秸秆还田量对土壤质量及玉米产量的影响研究以及杜豪等^[28]关于典型黑土区坡耕地土壤碳、氮垂直迁移通量研究结果相似,主要是由于与植被根系、残体分布以及微生物活动密切相关,一方面植物根系集中在表层和浅层土壤,植物吸收养分后会将部分养分以枯枝落叶、根系分泌物等形式归还到表层土壤。深层土壤根系分布少,植物对深层土壤养分吸收和归还作用弱,另一方面土壤表层有较多的动植物残体,包括落叶、枯枝、根系及微生物遗体等。

5 结论

本研究以有水土保持工程措施梯田和地埂以及无措施坡耕地为研究对象,研究了不同措施不同坡位不同土层下土壤理化性质、养分、土壤生产力的差异,结论如下。

1)水土保持措施提高了土壤理化性质和养分,与CK1相比,中坡位梯田和地埂土壤含水量、黏粒、有机质、全氮、全钾和有效磷质量分数显著增加,土壤容重和砂粒质量分数显著降低,而上坡位和下坡位改变不明显,且改变量梯田优于地埂,表明中坡位对措施响应最为敏感。

2)坡位空间变化显著影响养分及土壤理化性质,梯田和地埂土壤含水量、黏粒、有机质质量分数下坡位显著大于上坡位,土壤容重、pH下坡位显著低于上坡位,梯田土壤全氮、全钾、有效磷坡中与坡下显著差异,表明水土保持措施对水分再分配调控存在空间阈值效应,土壤黏粒、有机质、容重、pH、氮磷钾在空间上存在差异性。

3)在不同措施类型下土壤生产力指数存在差异,梯田土壤生产力指数与CK1相比,上坡位、中坡位和下坡位分别提高24.05%、65.85%和11.81%。地埂土壤生产力指数与CK2相比,上坡位、中坡位、下坡位分别提高10.00%、49.95%、35.20%。

4)多因素方差和冗余分析表明,措施类型、坡位、土层、类型×坡位对土壤生产指数呈极显著差异,对类型×土层呈显著差异;土壤全氮质量分数对土壤生产力指数影响最大,解释了生产力指数变化的27.7%,其次为土壤容重,解释了生产力指数变化的13%,土壤粉粒影响最小,对其解释量<0.1%。

综上,水土保持措施(梯田和地埂)显著提升坡耕地土壤质量与生产力,其中中坡位改良效果最佳。因此建议优先在中坡位实施梯田工程并配套深施磷肥和有机肥,同时将全氮和容重作为关键监测指标,以优化水土保持措施配置,最大化其在土壤改良与生产力提升方面的综合效益。

参 考 文 献

- [1] 王文娟,邓荣鑫,张树文. 东北典型黑土区沟蚀发生风险评价研究[J]. 自然资源学报,2014,29(12):2058-2067.
WANG W J, DENG R X, ZHANG S W. Preliminary research on risk evaluation of gully erosion in typical black soil area of Northeast China [J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(12): 2058-2067.
- [2] 丁文成,宋大利,周卫. 我国耕地质量主控因素及提升策略[J]. 植物营养与肥料学报,2024,30(8):1580-1594.
DING W C, SONG D L, ZHOU W. Dominant factors driving the farmland quality in China and strategies for improvement [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2024, 30(8): 1580-1594.
- [3] 刘殿民,沈海鸥,武佳龙,等. 黑土坡面垄侧少耕措施的土壤侵蚀特征分析[J]. 水土保持学报,2022,36(4):1-6.
LIU D M, SHEN H O, WU J L, et al. Analysis of soil erosion characteristics of half-ridge less tillage measure on the black soil hillslope [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(4): 1-6.
- [4] GANTZER C J, MCCARTY T R. Predicting corn yields on a claypan soil using a soil productivity index [J]. Transactions of the ASAE, 1987, 30(5): 1347-1352.
- [5] 陈燕. 深圳基本农田建设中的土壤质量提升路径研究[J]. 农业产业化,2024(10):74-77.
CHEN Y. Study on the improvement path of soil quality in the construction of basic farmland in Shenzhen [J]. Agricultural Industrialization, 2024(10): 74-77.
- [6] 吴发启,张玉斌,余雕,等. 黄土高原南部梯田土壤水分环境效应研究[J]. 水土保持研究,2003(4):128-130.
WU F Q, ZHANG Y B, SHE D, et al. Preliminary study on soil water environmental effect of level terrace in southern Loess Plateau [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2003(4): 128-130.
- [7] 范玉芳,罗友进,魏朝富. 西南丘陵山区坡耕地水平梯田工程设计分析[J]. 山地学报,2010,28(5):560-565.
FAN Y F, LUO Y J, WEI C F. On level terrace engineering design of slope land in the hilly and mountainous, Southwestern China [J]. Mountain Research, 2010, 28(5): 560-565.
- [8] 万怡国,谢方杰,陈晓安. 红壤区不同水土保持措施对土壤抗蚀性的影响[J]. 水土保持通报,2022,42(6):76-81.
WAN Y G, XIE F J, CHEN X A. Effects of different soil and water conservation measures on soil erosion resistance in red soil region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(6): 76-81.
- [9] 薛蕙,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.
XUE J, LIU G B, ZHANG C, et al. Effects of terracing slope cropland on soil quality in hilly region of Loess Plateau [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(4): 310-316.
- [10] 张瑜,徐子棋,杨献坤,等. 东北黑土区山地丘陵区坡面水土保持措施效益研究[J]. 中国水土保持,2022(12):36-40.
ZHANG Y, XU Z Q, YANG X K, et al. Benefits of slope soil and water conservation measures in northeast black soil region [J]. Soil and Water Conservation in China, 2022(12): 36-40.
- [11] 吴家兵,裴铁璠. 长江上游、黄河上中游坡改梯对其径流及生态环境的影响[J]. 国土与自然资源研究,2002(1):59-61.
WU J B, PEI T F. Effects of sloping fields terraced on runoff and eco-environment in upper reaches of Yangtse River and in upper and middle reaches of Yellow River [J]. Territory & Natural Resources Study, 2002(1): 59-61.
- [12] 陈立新. 土壤学实验实习教程[M]. 哈尔滨:东北林业大学出版社,2005.
CHEN L X. Soil science experimental practice course [M]. Harbin: Northeast Forestry University Press, 2005.
- [13] 段兴武,谢云,张玉平,等. PI模型在东北松嫩黑土区土壤生产力评价中的应用[J]. 中国农学通报,2010,26(8):179-188.
DUAN X W, XIE Y, ZHANG Y P, et al. Applied PI model in soil productivity assessment of song nen black soil re-

- gion in Northeast China [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(8): 179-188.
- [14] 张洁瑕, 陈佑启, 万利, 等. 我国土地生产力研究进展与展望[J]. 中国农业大学学报, 2009, 14(3): 135-144. ZHANG J J, CHEN Y Q, WAN L, et al. Main progress and prospects of land productivity research in China [J]. Journal of China Agricultural University, 2009, 14(3): 135-144.
- [15] LI L, LIU J, LIU H, et al. Effects of hillslope aspect on erosion rate of alpine meadows in the three-river headwater region, China [J]. Catena, 2024, 239: 107971.
- [16] WANG G, LIU B, HENDERSON M, et al. Effect of terracing on soil moisture of slope farmland in Northeast China's black soil region [J]. Agriculture, 2023, 13(10): 1876.
- [17] 程谅, 焦雄, 邸涵悦, 等. 不同整地措施坡面土壤水分时空分布特征[J]. 土壤学报, 2021, 58(6): 1423-1435. CHENG L, JIAO X, DI H Y, et al. Spatio-temporal distribution of soil moisture on slopes relative to land preparation measure [J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(6): 1423-1435.
- [18] WANG Q, XU Y, ZHU G, et al. Terracing increases organic carbon content in the Loess Plateau [J]. EGU sphere, 2024: 1-41.
- [19] 杨文利, 朱平宗, 闫靖坤. 水平阶种植油茶对红壤坡地土壤理化性质的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(5): 315-320. YANG W L, ZHU P Z, YAN J K. Effect of horizontal planting camellia oleifera on soil physicochemical properties in red soil slope land [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(5): 315-320.
- [20] 杜新玲, 杜新荣. 土壤侵蚀作用对黑土物理肥力的影响[J]. 吉林水利, 2013(5): 5-7. DU X L, DU X R. Effects of soil erosion on physical fertility of black soil [J]. Jilin Water Conservancy, 2013(5): 5-7.
- [21] LIU S L, DONG Y H, LI D, et al. Effects of different terrace protection measures in a sloping land consolidation project targeting soil erosion at the slope scale [J]. Ecological Engineering, 2013, 53: 46-53.
- [22] ZHENG H, WANG X, WU J, et al. Long-term impacts of extensive terracing on soil aggregates and associated C-N-P in the *Camellia oleifera* orchard of Southern China [J]. Catena, 2023, 233: 107512.
- [23] 董宏伟, 陈国建, 郭跃, 等. 三峡库区不同坡改梯年限土壤肥力质量评价研究[J]. 中国水土保持, 2014(6): 35-38. DONG H W, CHEN G J, GUO Y, et al. Study on soil fertility quality evaluation of different slope to terrace years in Three Gorges Reservoir area [J]. Soil and Water Conservation of China, 2014(6): 35-38.
- [24] LI T C, SHAO M A, JIA Y H. Application of X-ray tomography to quantify macropore characteristics of loess soil under two perennial plants [J]. European Journal of Soil Science, 2016, 67(3): 266-275.
- [25] WANG S, FENG X, WANG Y, et al. Characteristics of nitrogen loss in sloping farmland with purple soil in Southwestern China during maize (*Zea mays* L.) growth stages [J]. Catena, 2019, 182: 104169.
- [26] CHEN D, WEI W, CHEN L, et al. Response of soil nutrients to terracing and environmental factors in the Loess Plateau of China [J]. Geography and Sustainability, 2024, 5(2): 230-240.
- [27] 李翻过, 周立萍, 周甜, 等. 耕作方式与秸秆还田量对土壤质量及玉米产量的影响[J]. 西南农业学报, 2024, 37(12): 1-14. LI F G, ZHOU L P, ZHOU T, et al. The effects of tillage methods and straw returning amount on soil quality and maize yield [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2024, 37(12): 1-14.
- [28] 杜豪, 高磊, 钱芮, 等. 典型黑土区坡耕地土壤碳、氮垂直迁移通量[J/OL]. 矿物岩石地球化学通报, 1-11 [2024-12-19]. DU H, GAO L, QIAN R, et al. Vertical migration flux of soil carbon and nitrogen in sloping farmland in typical black soil areas [J/OL]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 1-11 [2024-12-19].