

土壤管理措施对紫色土坡耕地侵蚀耕层质量的影响

叶青¹, 史东梅¹, 曾小英², 司承静³, 江娜¹, 张健乐¹

(1.西南大学资源环境学院,重庆 400715;2.重庆市林业科学研究院,重庆 400036;3.重庆市万州区水利局,重庆 404000)

摘要: 紫色土坡耕地是我国西南地区重要的耕地类型,为了探讨土壤管理措施对紫色土坡耕地侵蚀耕层质量的影响,以紫色土坡耕地耕层土壤为研究对象,采用铲土侵蚀模拟试验小区,建立不同侵蚀程度(侵蚀年限)的坡耕地定位试验,以不施肥为对照(CK),设置了化肥管理措施(F)、生物炭+化肥管理措施(B+F),对比分析土壤管理措施对土壤理化性质及力学性能影响,采用土壤质量指数法分析紫色土坡耕地侵蚀耕层质量变化特征。对3种土壤管理条件下坡耕地耕层质量及恢复作用进行评价。结果表明:(1)土壤管理措施对紫色土坡耕地侵蚀耕层土壤理化性质影响差异显著。F管理措施不能改善土壤结构,但能提高土壤养分,B+F管理措施耕层土壤容重最小,土壤总孔隙、毛管孔隙及饱和含水量增加,有机质含量最高,为12.45 g/kg,土壤养分状况最好。(2)F和B+F 2种管理措施均能提高0—10 cm土层抗剪强度,使得表层土壤抵抗剪切破坏能力增强,有利于水土流失调控,2种管理措施下土壤贯入阻力下降,能有效促进作物根系生长发育。(3)2种管理措施对紫色土坡耕地耕层土壤质量均有恢复作用,土壤质量指数依次为B+F(0.686)、F(0.625)、CK(0.595),B+F管理措施土壤质量较对照CK(0.595)提升15.3%,较F(0.625)提升9.8%,B+F管理措施对坡耕地侵蚀耕层土壤质量恢复效果最好,能有效提高紫色土坡耕地侵蚀耕层作物产量。B+F管理措施能有效改善土壤结构,增加土壤养分含量,更适合紫色坡耕地侵蚀耕层质量恢复及土壤侵蚀防治,研究结果可为紫色土坡耕地侵蚀性耕层质量恢复提供适宜管理措施,对紫色土坡耕地持续利用具有重要意义。

关键词: 耕层质量; 坡耕地; 管理措施; 紫色土丘陵区

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2020)04-0164-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.04.025

Effects of Soil Management Measures for the Quality of Eroded Cultivated-layer in Purple Soil Sloping Farmland

YE Qing¹, SHI Dongmei¹, ZENG Xiaoying², SI Chenjin³, JIANG Na¹, ZHANG Jianle¹

(1.College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715; 2.Chongqing Academy of Forestry, Chongqing 400036; 3.Chongqing Wanzhou District Water Conservancy Bureau, Chongqing 404000)

Abstract: Purple soil sloping farmland is an important cultivated land resource in southwest China. In order to explore the influence of soil management measures on the quality of eroded arable cultivated-layer of purple soil sloping farmland, the purple soil sloping farmland cultivated-layer soil is used as the research object, the soil erosion simulation plot was used to establish different erosion degree (erosion years) of sloping farmland location test, fertilizer management measure (F) and chemical fertilizer + biochar management measure (F + B) are set up, taking no fertilizer as a control (CK). Soil quality index method is used to analyze and evaluate the quality recovery effect of eroded cultivated-layer on purple soil sloping farmland and characteristics of indicator change with different management measures. Results show: (1) The effects of the two management measures on the physical and chemical properties of the soil cultivated-layer of purple soil sloping farmland were significant. F management measure can not improve soil structure, but can improve soil nutrient. Under B+F management measure, soil bulk density is minimal, soil total pores, capillary pores and saturated water content increase, and organic matter content is the highest, 12.45 g/kg. Soil nutrient status is best. (2) Both F and B+F management measures can improve the shear strength of 0—10 cm soil layer, which makes the surface soil resist shear failure, which is conducive to soil erosion control, and the soil

收稿日期:2020-01-06

资助项目:国家自然科学基金项目(41771310)

第一作者:叶青(1995—),男,硕士研究生,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:ye01qing@163.com

通信作者:史东梅(1970—),女,博士,教授,主要从事水土生态工程、土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:shidm_1970@126.com

penetration resistance decreases under the other two management measures. Promote the growth and development of crop roots. (3) The two management measures improved the soil quality of the cultivated-layer of purple soil sloping farmland. The soil quality index was B+F (0.686), F(0.625) and CK(0.595), and the soil quality of B+F management measure was higher. Compared with CK (0.595), it increased by 15.3%, which was 9.8% higher than F (0.625). B+F management measure had the best effect on soil quality improvement of sloping farmland. B+F management measures can effectively improve soil structure and increase soil nutrient content, which is more suitable for quality restoration of cultivated-layer and soil erosion control in purple sloping farmland. The research results can provide suitable management measures for quality restoration of eroded cultivated-layer in purple soil sloping farmland. It is of great significance for the sustainable use of purple soil sloping farmland.

Keywords: quality of cultivated-layer; sloping farmland; management measures; purple hilly area

紫色土坡耕地主要分布在四川盆地丘陵和四周山区,是四川省和重庆市农业的主体区域,也是长江流域的重要侵蚀地带^[1],紫色土坡耕地侵蚀性退化严重,长江上游土壤侵蚀量的60%来自该地区的坡耕地,因此,紫色土坡耕地已成为我国水土流失最为严重的地类之一^[2]。紫色土坡耕地人为扰动最为频繁,且具有周期性、高强度的特点,坡耕地生产过程对土壤理化性质影响强烈^[3]。耕层是人类为了栽培农作物,利用工具对土壤进行扰动的深度土层^[4]。探究不同管理措施下紫色土坡耕地侵蚀性耕层质量特征,可为紫色土坡耕地侵蚀耕层恢复及农作物产出与水土流失控制有重要意义。有研究^[5]发现,土壤侵蚀造成坡耕地土壤物理特性和养分退化,侵蚀土壤退化不仅使土壤质量下降,还让土壤厚度变薄,使得土体本身逐渐消失,严重威胁区域粮食安全和农业可持续发展。目前,国内外学者对于不同管理措施对土壤理化性质和土壤质量恢复进行了大量研究。有研究^[6]表明,长期单施化肥可使土壤容重增加,土壤孔隙度和水分含量降低,破坏土壤结构,施用生物炭后紫色土和黄壤中pH和养分含量明显提升^[7];吕波等^[8]发现,施加3%生物炭后红壤和黄棕壤的pH、速效养分都得到显著提高。生物炭可以降低土壤容重,增大土壤孔隙度,增强土壤持水能力,促进土壤团聚体的形成^[9],改变了土壤理化性质,延迟产流时间、改变土壤饱和导水率,起到了减流减沙、增加土壤抗蚀性的效应^[10]。研究^[11]表明,施加生物炭不仅能提高土壤稳定性和减少土壤侵蚀,还可以达到培肥地力,提升侵蚀耕地耕层土壤质量,达到增产的目的^[12]。化肥和生物炭配施能更好地改善土壤的理化特性,进一步提高土壤的保水、保肥、保气性^[13]。也有研究^[14]表明,单施化肥能改善土壤化学性质,但会破坏土壤物理结构,而施用生物炭后能改善土壤理化性质,提升作物产量。紫色土坡耕地土体剖面结构可分为耕作层(0—20 cm)、心土层(20—40 cm)、底土层(>40

cm),其中耕作层又分为表土层(0—15 cm)和犁底层(15—20 cm),心土层土壤结构紧实,透水通气性能较差,养分水分因素比较稳定,对作物生长后期养分供应有着重要作用,坡耕地侵蚀性耕层质量恢复是提高土地生产力的重要基础^[15]。因此,本文通过建立不同侵蚀程度的坡耕地试验条件,采用不施肥为CK,设置F、B+F 2种土壤管理措施,通过对紫色土坡耕地耕层土体土壤理化、力学性能变化特征分析,研究了化肥和生物炭管理条件对紫色土坡耕地耕层质量影响的差异性及其形成原因,定量评价了2种土壤管理措施恢复作用,可为紫色土坡耕地耕层质量调控及恢复提供理论依据和技术措施。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于重庆市万州区(30°55′10″N,108°25′51″E),日照充足、雨量充沛,年平均气温17.7℃,年平均日照时间1484.4 h,年平均降水量1243 mm,无霜期305 d,土壤主要以中生代侏罗系沙溪庙组灰棕紫色沙泥页岩母质上发育的中性紫色土为主。

于2018年2月在研究区内布设铲土模拟侵蚀试验小区,试验小区侵蚀程度为10 cm^[16],小区建立时布设3种处理,分别为不施肥(CK)、化肥(F)、生物炭+化肥(B+F),每个处理设置3个重复,试验地种植玉米,玉米品种为“农详11”杂交种。目前,中国生物炭在大田中的施用量为3~40 t/hm²^[17],结合当地实际情况,小区建立时生物炭以15 t/hm²,复合肥(N:P₂O₅:K₂O为25:12:18)以277.5 kg/hm²均匀撒在相应管理措施试验小区土壤表面,经过翻耕混入到耕作层土壤,玉米期根据当地种植习惯对F和B+F管理措施进行2次追肥,分别为复合肥(N:P₂O₅:K₂O为25:12:18),尿素(总氮≥46.4%)。试验选用的生物炭原料为水稻秸秆,在400~500℃缺氧条件下热解4 h,过150目筛,其pH>7,含碳量>80%。

1.2 样品采集与分析

在 2018 年 8 月玉米收获前进行土壤样品采集, 采样时至少雨后放晴 3 天以上。在设置的试验小区以每 10 cm 为 1 个土层, 分 0—10, 10—20, 20—30, 30—40 cm 进行分层多点采集 1~2 kg 土壤混合样品进行理化分析, 每层用环刀采集土壤容重、孔隙度和田间持水性能分析的样品; 用铝盒采集含水率测定的样品; 每层进行抗剪强度、贯入阻力力学性能测定。土壤理化及力学性质测定方法^[18]为: 土壤容重、孔隙度及田间持水量测定采用环刀法; 土壤含水率测定采用烘干法; 土壤机械组成采用吸管法; 土壤 pH 采用土水比 1:1 电极法; 有机质含量采用重铬酸钾容量法—外加加热法; 全氮含量采用半微量凯氏定氮法; 有效磷含量采用 Olsen 法; 速效钾含量采用 1 mol/L NH_4Ac 提取—火焰光度法测定; 土壤抗剪强度采用便携式 14.10 Pocket Vane Tester 型测定; 土壤贯入阻力采用 PT 型袖珍贯入仪测定。

1.3 坡耕地耕层土壤质量评价

根据紫色土坡耕地合理耕层评价最小数据集^[15], 选取土壤容重、物理性黏粒、土壤有机质以及土壤全氮、土壤抗剪强度和土壤贯入阻力作为紫色土坡耕地土壤质量评价指标。采用模糊数学原理, 建立土壤性质指标与土壤质量间的隶属度函数, 根据参评指标与耕层土壤质量的正负效应, 确定指标的隶属度函数, 本研究中指标临界值的下限和上限分别取实测的最小值和最大值, 最适宜值的上下界点根据研究区域实测结果综合对比确定^[19]。

(1) S 型隶属度函数。一定范围内评价指标与土壤功能效应成正相关关系, 而低于或高于此范围的评价指标值的变化对土壤功能的影响很小。本研究中有机质和全氮属于此类型, 其隶属函数为:

$$y(x) = \begin{cases} 1 & x \geq b \\ \frac{x-a}{b-a} & a < x < b \\ 0 & x \leq a \end{cases}$$

式中: $y(x)$ 为隶属函数; x 为指标实际值; a 、 b 分别为指标临界值的下限和上限, 本研究有机质模型中 a 、 b 分别取 2.94, 14.5 g/kg, 全氮模型中 a 、 b 分别取 0.342, 0.996 g/kg。

(2) 反 S 型隶属度函数。一定范围内评价指标与土壤功能效应成负相关关系, 而低于或高于此范围的评价指标值的变化对土壤影响很小, 本研究中土壤抗剪强度和贯入阻力属于此类型, 其隶属函数为:

$$y(x) = \begin{cases} 1 & x \leq a \\ \frac{x-b}{b-a} & a < x < b \\ 0 & x \geq b \end{cases}$$

式中: $y(x)$ 为隶属函数; x 为指标实际值; a 、 b 分别表示指标临界值的下限和上限, 本研究中抗剪强度模型 a 、 b 分别取 5.51, 11.80 kg/cm²; 贯入阻力模型中 a 、 b 分别取 8.23, 47.24 kg/cm²。

(3) 抛物线型隶属度函数

评价指标对土壤功能有一个最佳适宜范围, 超过此范围, 随着偏离程度越大, 对土壤功能越不利, 直达某一值时土壤丧失其功能, 本研究中土壤容重与质地属于此类型, 其隶属度函数为:

$$y(x) = \begin{cases} 1 & b_1 \geq x \geq b_1 \\ \frac{x-a_1}{b_1-a_1} & a_1 < x < b_1 \\ \frac{x-a_2}{b_2-a_2} & a_2 > x > b_2 \\ 0 & x \leq a_1 \text{ 或 } x \geq a_2 \end{cases}$$

式中: $y(x)$ 为隶属函数; x 为指标实际值; a_1 、 a_2 分别为指标临界值的下限和上限; b_1 、 b_2 为最适宜值的上下界点。本研究中土壤容重模型 a_2 、 b_1 、 b_2 分别取 1.8, 0.9, 1.1 g/cm³, 物理性黏粒中 a_1 、 a_2 、 b_1 、 b_2 分别取 20%, 40%, 60%, 80%。

采用加权求和模型计算评价单元的土壤质量指数 (SQI), 土壤质量指数越大, 土壤质量越好, 越有利于紫色土坡耕地侵蚀耕层质量恢复, 计算公式为:

$$\text{SQI} = \sum_{i=1}^n W_i \times S_i$$

式中: SQI 为土壤质量指数 (soil quality index); W_i 为第 i 项评价指标权重; S_i 为第 i 项评价指标隶属度; n 为评价指标个数。通过主成分分析法确定各参评指标权重, 本研究中有机质、全氮、抗剪强度、贯入阻力、物理性黏粒及容重所占权重分别为 0.144, 0.128, 0.182, 0.170, 0.175, 0.201。

1.4 数据处理

采用 SPSS 22.0 软件包中的相应程序和 Excel 2010 软件对测定结果进行统计分析, 并采用 Excel 2010 软件作图。

2 结果与分析

2.1 土壤管理措施对耕层土壤理化特性影响

2.1.1 耕层土壤物理特性变化特征 土壤管理措施对耕层土壤物理特性影响明显, 由图 1 可知, 与对照 CK 相比, F 和 B+F 2 种管理措施下 0—20 cm 土层土壤砂粒 (1~0.05 mm) 含量增加, B+F 措施 0—10 cm 土层增幅最大, 为 46.67%, 粉粒 (0.05~0.001 mm) 含量减少, F 管理措施 0—10 cm 土层减少最多, 减幅为 21.12%。而与 CK 相比, 0—20 cm 土层 F 管理措施下土壤黏粒 (<0.001 mm) 含量增加, B+F 管理措施土壤黏粒 (<0.001 mm) 含量减少。与 F 相比, B+F 管理措施

0—40 cm各土层土壤砂粒含量增加,黏粒含量减少。0—20 cm 土层物理性黏粒(<0.01 mm)表现为 $B+F(31.50\%) < F(36.67\%) < CK(42.67\%)$,而有研究^[20]表明,土壤物理性黏粒含量在 25%左右时,土壤机械组成最佳,表明 F 和 B+F 都能改善土壤机械组成,但施加生物炭的改良效果更明显。2 种管理措施对土壤机械组成的影响主要表现在 0—20 cm 土层。

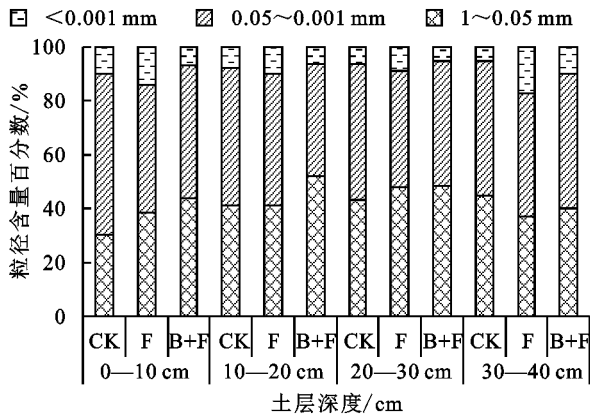


图1 坡耕地耕层土壤机械组成特征

由表1可知,不同管理措施下土壤容重依次为 B+

$F(1.41 \text{ g/cm}^3)$ 、 $F(1.47 \text{ g/cm}^3)$ 、 $CK(1.48 \text{ g/cm}^3)$,其中与 CK 相比,土壤容重降幅最大出现在 B+F 管理措施 10—20 cm 土层处,降幅为 8.8%,F 措施未能降低土壤容重,反而在耕层土壤容重还存在一定程度的增加,而 B+F 管理措施下耕层土壤容重明显减小。而土壤总孔隙依次为 B+F(46.93%)、F(44.46%)、CK(44.42%)。与 CK 相比,土壤总孔隙度增加最多的为 B+F 管理措施下 10—20 cm 土层,增幅为 11.4%,而 F 管理措施对土壤总孔隙没有显著影响,耕层土壤总孔隙还存在一定程度下降,而毛管孔隙与总孔隙变化规律一致,B+F 管理措施毛管孔隙增加,土壤持水性能更好。土壤饱和含水量依次为 B+F(24.18%)、CK(22.01%)、F(21.76%)。与 CK 相比,B+F 管理措施土壤饱和含水量增幅明显,增加 9.9%,而 F 管理措施土壤饱和含水量降低。2 种管理措施对土壤物理性质影响有明显差异,其中 B+F 管理措施能显著提高土壤孔隙状况,降低土壤容重,增加土壤饱和含水量。表明施加生物炭后,能明显改善土壤结构,对耕层改善效果最好。

表1 坡耕地耕层土壤物理性质变化特征

管理措施	土层深度/cm	土壤容重/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	总孔隙度/%	毛管孔隙度/%	饱和含水量/%
CK	0—10	1.36 ± 0.01 Aa	48.77 ± 1.03 Ac	32.07 ± 2.01 Aa	24.90 ± 1.95 Ab
	10—20	1.48 ± 0.05 Bb	44.25 ± 0.81 Ab	35.91 ± 1.59 Bb	24.64 ± 2.00 Ab
	20—30	1.51 ± 0.01 Abc	43.04 ± 1.84 Abc	34.33 ± 2.3 Aab	20.05 ± 0.87 Aa
	30—40	1.55 ± 0.03 Bc	41.63 ± 0.89 Aa	35.82 ± 0.08 Bb	19.65 ± 1.63 a
F	0—10	1.41 ± 0.03 Aa	46.74 ± 1.03 Ab	31.70 ± 1.83 Aa	24.95 ± 1.87 Ab
	10—20	1.49 ± 0.05 Bb	43.92 ± 1.10 Aa	32.08 ± 0.86 Aab	21.71 ± 1.12 Aa
	20—30	1.50 ± 0.05 Ab	43.33 ± 1.90 Aa	35.48 ± 2.77 Ab	19.94 ± 0.98 Aa
	30—40	1.49 ± 0.01 Ab	43.93 ± 0.47 Ba	34.19 ± 0.66 Aab	20.42 ± 0.57 Aa
B+F	0—10	1.34 ± 0.06 Aa	49.33 ± 2.03 Ab	36.91 ± 0.17 Bb	27.14 ± 1.43 Ab
	10—20	1.35 ± 0.03 Aa	49.14 ± 0.53 Bb	33.86 ± 1.17 ABa	25.58 ± 3.13 ABab
	20—30	1.47 ± 0.03 Ab	44.23 ± 2.10 Aa	34.51 ± 1.11 Aa	21.78 ± 2.53 Aa
	30—40	1.46 ± 0.02 Ab	45.02 ± 1.34 Ba	35.65 ± 1.09 ABab	22.22 ± 2.20 Aa

注:不同大写字母表示同一垂直层次不同措施差异显著($P < 0.05$);小写字母表示同一措施不同垂直层次差异显著($P < 0.05$)。下同。

2.1.2 耕层土壤化学性质变化特征 不同土壤管理措施对紫色土坡耕地化学性质影响存在明显差异。由表2可知,F 和 B+F 2 种管理措施均能提升土壤有机质和全氮含量,土壤有机质含量表现为 $B+F(11.12 \text{ g/kg}) > F(8.22 \text{ g/kg}) > CK(7.66 \text{ g/kg})$,全氮含量依次为 $B+F(0.78 \text{ g/kg}) > F(0.64 \text{ g/kg}) > CK(0.58 \text{ g/kg})$ 。与对照 CK 相比,B+F 和 F 2 种管理措施下有机质含量分别提升 46.0%,7.3%,全氮含量分别提升 34.5%和 10.3%。其中有机质和全氮增幅最大均出现在 B+F 管理措施的 0—10 cm 土层,分别为 68.7%和 74.2%。由表2可知,F 管理措施对全磷、全钾及速效钾含量没有明显的影响,而 B+F 管理措施能明显提升全磷、速效钾含量,对全钾含量没有显著影响。

与 CK 相比,B+F 管理措施全磷、速效钾含量分别提升 11.6%,140.7%,而表层 0—20 cm 土壤全磷和速效钾含量分别提升 17.7%,224.6%。由表2可以看出,对照 CK 与 2 种管理措施下土壤养分含量随着土层深度的加深呈减小趋势,土壤养分在 0—20 cm 土层富集,提高了坡耕地耕层肥力。结果表明,B+F 管理措施总体上能有效提升土壤养分含量,改善土壤养分状况,提升了土壤肥力,保证坡耕地土地生产力持续稳定,有利于农作物增产稳产。

由图2可知,不同管理措施下土壤 pH 依次为 B+F(7.06)、F(6.33)、CK(6.26),与对照 CK 相比,B+F 管理措施 pH 增加明显,增幅为 12.8%,其中增加最多的为 B+F 管理措施 0—10 cm 土层,增幅为 28.6%。F

管理措施对土壤 pH 没有明显影响,不能有效改善土壤酸化情况,在 10—20 cm 土层 pH 还存在轻度下降,表明单施化肥对土壤 pH 没有改善效果,还可能

造成土壤酸化。而 B+F 管理措施能使土壤由弱酸性变为中性,明显改善土壤酸化状况,耕层土壤 pH 改善效果更好。

表 2 坡耕地耕层土壤养分变化特征

管理措施	土层深度/cm	有机质/ (g · kg ⁻¹)	全氮/ (g · kg ⁻¹)	全磷/ (g · kg ⁻¹)	全钾/ (g · kg ⁻¹)	速效钾/ (mg · kg ⁻¹)
CK	0—10	7.72±0.38Aab	0.62±0.02Abc	0.71±0.03Ab	27.70±0.14ABab	60.67±1.53Ac
	10—20	9.72±2.15Ab	0.69±0.04Ac	0.63±0.08Aab	27.56±0.56Bab	51.67±2.31Ab
	20—30	6.00±0.34Aa	0.46±0.01Aa	0.58±0.01Aa	27.16±0.63Aa	48.67±1.53Aab
	30—40	7.20±0.59Ba	0.56±0.10Bb	0.59±0.07Aa	28.21±0.39Ab	47.54±2.65Ca
F	0—10	9.51±2.22ABb	0.73±0.02Ac	0.69±0.01Ab	26.84±0.56Aab	60.23±2.65Ac
	10—20	9.01±0.76Aab	0.66±0.08Abc	0.61±0.03Aa	26.51±0.36Aa	50.67±0.58Ab
	20—30	7.11±0.08ABa	0.61±0.01Bab	0.59±0.03Aa	27.66±0.48Ab	46.23±1.27Aa
	30—40	7.22±0.31Bab	0.56±0.03ABA	0.57±0.03Aa	27.15±0.6Aab	49.00±1.00Bb
B+F	0—10	13.03±2.55Ba	1.08±0.15Bc	0.82±0.11Ab	28.15±1.17Ba	232.67±2.52Bd
	10—20	11.87±0.99Aa	0.83±0.15Ab	0.75±0.13Aab	27.48±0.79Ba	132.00±4.36Bc
	20—30	8.15±1.14Bb	0.62±0.06Bab	0.67±0.08Aab	28.14±1.38Aa	76.00±5.57Bb
	30—40	7.42±0.42Ab	0.56±0.04Aa	0.57±0.07Aa	27.37±1.12Aa	49.00±2.65Aa

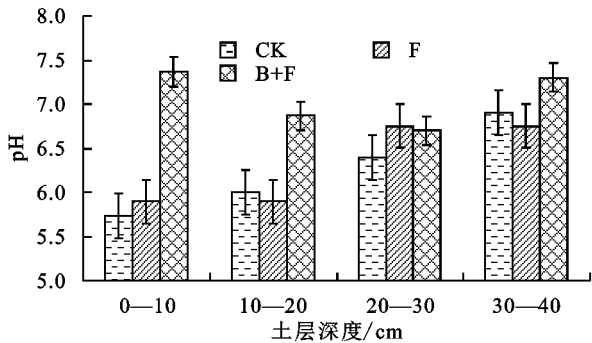
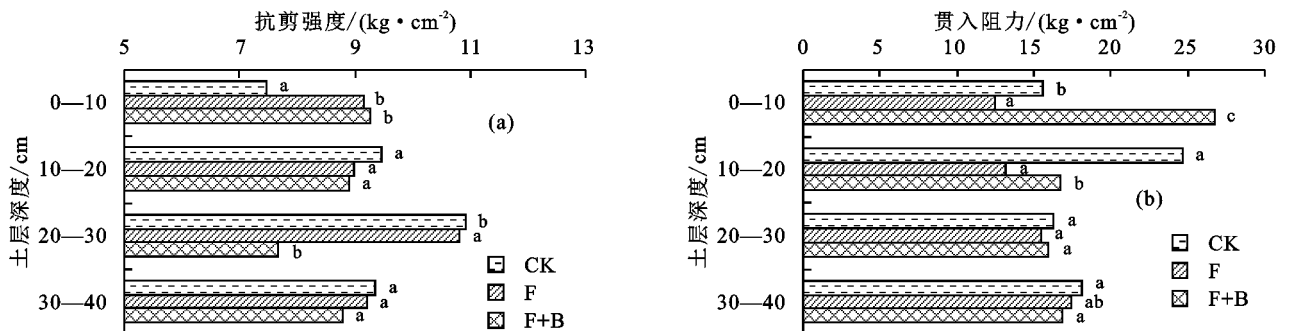


图 2 坡耕地耕层土壤 pH 变化特征

2.2 土壤管理措施对耕层土壤力学性能影响

土壤抗剪强度是指土壤受到剪切力破坏作用时土体抵抗土粒或土团剪切变形破坏的阻力,可用于评价土壤抗侵蚀性能与耕作性能,土壤贯入阻力是耕层土壤重要物理参数之一,能够反映土壤松紧程度。由图 3a 可知,不同管理措施下土壤抗剪强度由大到小依次为 F(9.54 kg/cm²)、CK(9.29 kg/cm²)、B+F(8.65 kg/cm²),与对照 CK 相比,F 管理措施除 0—10 cm 土层土壤抗剪强度提高 22.78%,其余各土层均无明显的差异,而 B+F 管理措施 0—10 cm 土层土壤抗剪强度提高 24.26%。其余各土层的抗剪强度

有不同程度的下降,说明 F 和 B+F 2 种管理措施下坡耕地表层土体抵抗剪切破坏能力加强,有利于坡耕地耕层土壤侵蚀调控。各管理措施下不同垂直深度土壤抗剪强度变化规律不一致,对照 CK 和 F 管理措施土壤抗剪强度随垂直深度增加呈现出先增大后减小的变化规律,B+F 管理措施土壤抗剪强度随垂直深度增加呈现出先减小后增加的规律。由图 3b 可知,与 CK 相比,F 管理措施各土层贯入阻力呈现下降趋势,而 B+F 管理措施除 0—10 cm 土层外,其余各土层土壤贯入阻力也有不同程度的下降,2 种管理措施降幅最大在 10—20 cm 土层,分别为 46.8%和 32.4%,20—30,30—40 cm 土层处降幅不明显,表明 F 和 B+F 2 种管理措施有利于减小土壤贯入阻力,利于作物根系生长。各种管理措施下不同垂直深度土壤贯入阻力变化各异,随着土层深度加深,土壤贯入阻力变化表现为对照 CK 先减小后增大,F 管理措施逐渐增大,B+F 管理措施逐渐减小。B+F 管理措施下 0—10 cm 土层贯入阻力异常主要原因是施加生物炭后土壤疏松多孔,人为耕作对于表层疏松土壤碾压所造成。



注:不同小写字母表示同一垂直层次不同措施差异显著(P<0.05)。

图 3 坡耕地耕层土壤抗剪强度及贯入阻力变化特征

2.3 土壤管理措施对耕层质量影响

2 种管理措施下耕层土壤质量评价指标变化差异显著。由表 3 可知,F 和 B+F 2 种管理措施下物理性黏粒含量分别为 36.7%和 35.0%,相较于对照 CK 均有不同程度下降,降幅分别为 14.1%和 18.0%,表明 2 种管理措施下均能降低土壤物理性黏粒含量。前人^[21]研究认为,物理性黏粒含量在 25%左右土壤机械组成最佳。2 种管理措施均能有效改善土壤质地,而 B+F 管理措施对

表 3 坡耕地耕层质量评价指标变化特征

管理措施	物理性黏粒/%	土壤容重/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	抗剪强度/ ($\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}$)	贯入阻力/ ($\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}$)	有机质/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全氮/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
CK	42.7	1.42	8.46	20.10	8.72	0.66
F	36.7	1.45	9.08	12.81	9.26	0.70
B+F	35.0	1.35	9.09	21.71	12.45	0.96

不同管理措施对紫色土坡耕地耕层土壤质量指数影响存在明显的差异(图 4),不同管理措施下 0—20 cm 耕层土壤质量指数依次为 B+F(0.686)、F(0.625)、CK(0.595),B+F 管理措施下土壤质量指数最大,与对照 CK 相比提升 15.3%,而 F 管理措施耕层土壤质量指数提升幅度为 5.1%。结果表明,F 和 B+F 管理措施均能提高耕层土壤质量,但 B+F 管理措施对耕层土壤的提升效果更明显,更有利于紫色土坡耕地耕层土壤质量的恢复。B+F 管理措施耕层土壤质量最好的主要原因是与 F 管理措施相比土壤容重降低最明显,耕层土壤质地以及结构性最好,土壤有机质和全氮含量最高,所以对紫色土坡耕地侵蚀耕层质量提升效果也最好,利于土地可持续利用,而对照 CK 土壤质地与结构最差,土壤养分状况不好,抵抗外力剪切变形能力弱,导致紫色土坡耕地侵蚀耕层土壤质量低,不利于土地持续利用。

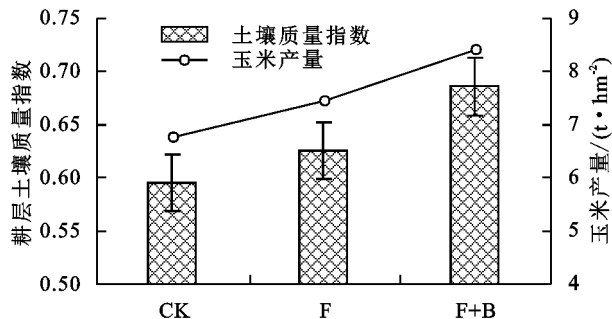


图 4 坡耕地耕层土壤质量指数及玉米产量

从图 4 可以看出,随着耕层土壤质量的提升,玉米也有一定程度的增产。B+F 管理措施下玉米产量最高($8.41 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)。与对照 CK 相比,F 措施下玉米产量提升 10.19%,B+F 措施下玉米产量提升 24.23%,表明单施化肥能提高玉米产量,但施加生物炭后对玉米的增产作用更明显,B+F 管理措施比 F 管理措施的玉米产量提升效果增加 1 倍。B+F 管理措施能更有效增加作物产出,有利于紫色土坡耕地侵蚀耕层质量恢复。

土壤质地的改善效果更明显。与对照 CK 相比,F 管理措施土壤容重、抗剪强度、有机质、全氮存在不同程度增加,增幅分别为 2.1%、7.3%、6.2%、6.1%,土壤贯入阻力减小 36.3%。而 B+F 与对照 CK 相比,土壤抗剪强度、贯入阻力、有机质、全氮均有一定程度增加,增幅分别为 7.5%、8.0%、42.8%、45.6%,土壤容重降低 5.2%,结果表明 2 种管理措施下各参评指标变化差异显著。总体看来,B+F 管理措施改善效果更好。

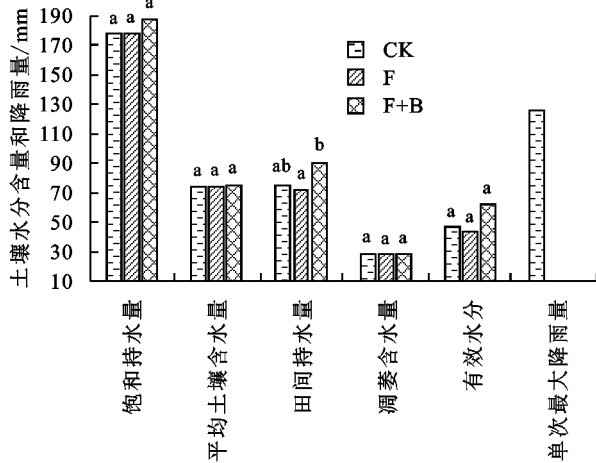
3 讨论

生物炭对土壤性状有明显的改良作用,能显著提高紫色土坡耕地耕层土壤质量。已有研究^[21]发现,生物炭施入土壤后,可使土壤容重降低 9%,总孔隙度提升 10.7%,提高土壤含水量。本试验结果表明,与 F 管理措施相比,F+B 管理措施耕层土壤容重降低 6.9%,土壤总孔隙增加 8.6%,土壤饱和含水量提高 13.0%。Glaser 等^[22]研究认为,施用生物炭使土壤容重降低,这意味着总孔隙和大孔隙增加,从而可增大土壤水分入渗速率;吴昱等^[9]认为,施用生物炭后形成了炭—土双层结构,增加了上层土壤蓄水能力,而且对下层土壤持水性能也有显著提高。有研究^[10-11,23]表明,生物炭疏松多孔,具有较强的吸附能力,能增加土壤孔隙度和对水分的蓄持性能,减少坡耕地降雨径流的产生,降低土壤可蚀性,减少坡耕地水土流失的产生。

本研究结果(图 5)表明,施加生物炭后土壤饱和持水量,田间持水量和有效水明显增加,F 和 F+B 2 种管理措施所能容纳的单次最大降雨量分别为 102.38,113.12 mm,该地区多年监测的单次最大降雨量为 126 mm,与 F 相比,F+B 管理措施单次所容纳降雨量提升 10.5%,表明施加生物炭后能有效减少降雨径流,调控坡耕地水土流失。

施加生物炭能有效提升土壤养分含量,张祥等^[24]认为,红壤和黄棕壤施加生物炭后有机质含量均有提高,且不同用量效应不同,其中添加 2.0%生物炭的管理措施有机质含量显著增加,生物炭施加 6 个月后有有机质、速效钾等养分含量明显增加^[8]。本研究结果表明,与 F 管理措施相比,F+B 管理措施 0—20 cm 耕层土壤有机质含量显著增加,增幅分别为 34.5%,pH 增大 13.0%,改善了土壤酸化情况,主要原因是生物炭本身具有碱性物质、多孔结构和较大的比表面积,

加入土壤中后释放碱性物质中和土壤酸度,且炭—土双层结构对营养元素的吸持能力增强,能降低土壤养分向地下水或地表水的淋溶与冲刷流失^[25],从而有效提高土壤养分含量和生产性能^[22]。



注:不同小写字母表示同一垂直层次不同措施差异显著($P < 0.05$)。

图 5 坡耕地耕层土壤水分变化特征

4 结论

(1) 土壤管理措施对紫色土坡耕地侵蚀性耕层土壤理化性质影响差异显著,化肥管理措施(F)未能改善土壤结构,但能提高土壤养分,而生物炭+化肥(B+F)管理措施土壤结构和肥力状况均有效改善,耕层土壤容重最小(1.40 g/cm^3),土壤物理性黏粒含量降低,孔隙度及饱和含水量明显增加,有机质含量最高(12.45 g/kg),土壤肥力状况最好。

(2) 化肥管理措施(F)和生物炭+化肥管理措施(B+F)都能减小土壤贯入阻力,有利于植物根系生长发育。化肥管理措施(F)和生物炭+化肥管理措施(B+F)能提高 0—10 cm 土层土壤抗剪强度,分别提高 22.78%,24.26%,2 种管理措施都有利于表层土壤抵抗剪切不发生变形破坏,提升土壤抗侵蚀能力。

(3) 2 种管理措施对紫色土坡耕地侵蚀耕层质量都有不同程度的提升,生物炭+化肥管理措施(B+F)耕层土壤质量指数最大(0.686),耕层质量提升效果最好,玉米产量最高。综上所述,生物炭+化肥管理措施(B+F)对紫色土坡耕地侵蚀耕层土壤结构及土壤养分状况有重要改善作用,更有利于紫色土坡耕地侵蚀耕层质量恢复。

参考文献:

[1] 赵燮京,刘定辉.四川紫色丘陵区旱作农业的土壤管理与水土保持[J].水土保持学报,2002,16(5):6-10.
 [2] Zhang J H, Ni S J, Su Z A. Dual roles of tillage erosion in lateral SOC movement in the landscape[J].European Journal of Soil Science,2012,63(2):165-176.
 [3] 史东梅.基于 RUSLE 模型的紫色丘陵区坡耕地水土保持研究[J].水土保持学报,2010,24(3):39-44,251.

[4] 韩晓增,邹文秀,陆欣春,等.旱作土壤耕层及其肥力培育途径[J].土壤与作物,2015,4(4):145-150.
 [5] 董杰,张重阳,罗丽丽,等.三峡库区紫色土坡地土壤粗骨沙化和酸化特征[J].水土保持学报,2007,21(6):31-34.
 [6] Masto R E, Chhonkar P K, Singh D, et al. Alternative soil quality indices for evaluating the effect of intensive cropping, fertilization and manuring for 31 years in the semi-arid soils of India[J].Environmental Monitoring and Assessment,2008,136:419-435.
 [7] 张旭辉,李治玲,李勇,等.施用生物炭对西南地区紫色土和黄壤的作用效果[J].草业学报,2017,26(4):63-72.
 [8] 吕波,王宇函,夏浩,等.不同改良剂对黄棕壤和红壤上白菜生长及土壤肥力影响的差异[J].中国农业科学,2018,51(22):4306-4315.
 [9] 吴昱,刘慧,杨爱峥,等.黑土区坡耕地施加生物炭对水土流失的影响[J].农业机械学报,2018,49(5):287-294.
 [10] 吴媛媛,杨明义,张凤宝,等.施加生物炭对黄绵土耕层土壤可蚀性的影响[J].土壤学报,2016,53(1):81-92.
 [11] Liu X H, Han F P, Zhang X C. Effect of biochar on soil aggregates in the Loess Plateau: Results from incubation experiments[J].International Journal of Agriculture and Biology,2012,14(6):975-979.
 [12] Haider G, Steffens D, Moser G, et al. Biochar reduced nitrate leaching and improved soil moisture content without yield improvements in a four-year field study [J].Agriculture, Ecosystems and Environment,2017,237:80-94.
 [13] Major J, Rondon M, Molina A D, et al. Maize yield and nutrition during four years after biochar application to a Colombian savanna oxisol[J].Plant and Soil,2010,333(1/2):117-128.
 [14] 魏永霞,王鹤,刘慧,等.生物炭对坡耕地土壤肥力和大豆产量的影响与预测[J].农业机械学报,2019,50(7):302-312.
 [15] 史东梅,蒋光毅,蒋平,等.土壤侵蚀因素对紫色丘陵区坡耕地耕层质量影响[J].农业工程学报,2017,33(13):270-279.
 [16] 王志强,刘宝元,王旭艳,等.东北黑土区土壤侵蚀对土地生产力影响试验研究[J].中国科学(D辑:地球科学),2009,39(10):1397-1412.
 [17] 赵红,孙滨峰,逯非,等.Meta 分析生物质炭对中国主粮作物痕量温室气体排放的影响[J].农业工程学报,2017,33(19):10-16.
 [18] 中国科学院南京土壤研究所.土壤理化分析[M].上海:上海科学技术出版社,1978.
 [19] Xu M X, Li Q, Wilson G. Degradation of soil physico-chemical quality by ephemeral gully erosion on sloping cropland of the hilly Loess Plateau[J].Soil and Tillage Research,2016,155:9-18.

- plant system; China as a case study[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2007, 29(5): 413-428.
- [6] 王孝忠, 田娣, 邹春琴. 锌肥不同施用方式及施用量对我国主要粮食作物增产效果的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(4): 998-1004.
- [7] 郭九信, 廖文强, 孙玉明, 等. 锌肥施用方法对水稻产量及籽粒氮锌含量的影响[J]. *中国水稻科学*, 2014, 28(2): 185-192.
- [8] 韩金玲, 李雁鸣, 马春英, 等. 施锌对小麦开花后氮、磷、钾、锌积累和运转的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(3): 313-320.
- [9] 曹胜, 欧阳梦云, 周卫军, 等. 石灰对土壤重金属污染修复的研究进展[J]. *中国农学通报*, 2018, 34(26): 109-112.
- [10] 侯红乾, 冀建华, 刘秀梅, 等. 土壤改良剂对鄱阳湖区潜育性稻田的改良作用研究[J]. *土壤通报*, 2016, 47(6): 1448-1454.
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2011.
- [12] 全国土壤普查办公室. 中国土种志 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1995.
- [13] 席承藩, 章士炎. 全国土壤普查科研项目成果简介 [J]. *土壤学报*, 1994, 31(3): 330-335.
- [14] 施建平, 宋歌. 中国土种数据库—基于第二次土壤普查的全国性土壤数据集 [J]. *中国科学数据*, 2016(2): 1-12.
- [15] 潘义宏, 顾毓敏, 夏贤仁, 等. 有机肥与化肥配施对土壤微生物及烟叶品质的影响 [J]. *江西农业学报*, 2019, 31(1): 30-36.
- [16] Hossain M A, Jahiruddin M, Islam M R, et al. The requirement of zinc for improvement of crop yield and mineral nutrition in the maize-mung bean-rice system [J]. *Plant and Soil*, 2008, 306: 13-22.
- [17] Potarzycki J, Grzebisz W. Effect of zinc foliar application on grain yield of maize and its yielding components [J]. *Plant Soil Environment*, 2009, 55(12): 519-527.
- [18] 董瑜皎, 袁江, 吕世华. 2 个氮水平下不同施锌方式对覆膜水稻产量及锌吸收的影响 [J]. *西南农业学报*, 2018, 31(8): 1655-1661.
- [19] 刘铮. 我国土壤中锌含量的分布规律 [J]. *中国农业科学*, 1994, 27(1): 30-37.
- [20] 郭九信, 隋标, 商庆银, 等. 氮锌互作对水稻产量及籽粒氮、锌含量的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(6): 1336-1342.
- [21] Slaton N A, Wilson C E, N tamatungiro S J. Development of acritical Mehlich 3 soil-test zinc value for rice. *Rice Research Studies* [M]. Arkansas: Agricultural Experiment Station, 2000: 412-420.
- [22] 蔡东, 肖文芳, 李国怀. 施用石灰改良酸性土壤的研究进展 [J]. *中国农学通报*, 2010, 26(9): 206-213.
- [23] 王秀斌, 唐栓虎, 荣勤雷, 等. 不同措施改良反酸田及水稻产量效果 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(2): 404-412.
- [24] 宗良纲, 张丽娜, 孙静克, 等. 3 种改良剂对不同土壤—水稻系统中 Cd 行为的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(4): 834-840.
- [25] 方方舟, 项智锋. 水稻秸秆堆沤肥对优质水稻产量及质量的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2019(1): 62-70.
- [26] 胡时友, 刘凯, 马朝红, 等. 中微量元素肥料配合施用对水稻产量和品质的影响 [J]. *农村经济与科技*, 2016, 27(23): 84-86.
- [27] 魏义长, 自由路, 杨俐苹, 等. 测土推荐施锌对水稻产量结构及土壤有效养分的影响 [J]. *中国水稻科学*, 2007, 21(2): 197-202.
- [28] 廖伟, 舒芳靖, 左业华, 等. 烤烟锌肥施用技术研究进展 [J]. *湖南农业科学*, 2015(7): 148-150, 154.
- [29] 褚天铎, 刘新保, 王淑惠, 等. 小麦施锌肥效果及使用技术的研究 [J]. *土壤肥料*, 1987(4): 24-26.
- [30] 李建军. 我国粮食主产区稻田土壤肥力及基础地力的时空演变特征 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2015.

(上接第 170 页)

- [20] 侯西勇, 孙希华. 土地资源生产力评价及粮食生产潜力估算: 以长清县为例 [J]. *地球信息科学*, 2001, 3(2): 60-65.
- [21] 王红兰, 唐翔宇, 张维, 等. 施用生物炭对紫色土坡耕地耕层土壤水力学性质的影响 [J]. *农业工程学报*, 2015, 31(4): 107-112.
- [22] Glaser B, Lehmann J, Zech W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal—a review [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 35(4): 219-230.
- [23] Li Y Y, Zhang F B, Yang M Y, et al. Effects of adding biochar of different particle sizes on hydro-erosional processes in small scale laboratory rainfall experiments on cultivated loessial soil [J]. *Catena*, 2019, 173: 226-233.
- [24] 张祥, 王典, 姜存仓, 等. 生物炭对我国南方红壤和黄棕壤理化性质的影响 [J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(8): 979-984.
- [25] Gul S, Whalen J K. Biochemical cycling of nitrogen and phosphorus in biochar-amended soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 103: 1-15.