

紫色土坡耕地侵蚀耕层土壤养分变化特征

王荣浩¹, 史东梅¹, 于亚莉², 夏蕊¹, 倪书辉¹, 张健乐¹

(1.西南大学资源环境学院,重庆 400715;2.重庆市水利电力建筑勘测设计研究院,重庆 400020)

摘要: 通过设置侵蚀模拟小区,研究紫色土坡耕地耕层质量退化过程中土壤养分的变化特征。以三峡库区紫色土坡耕地侵蚀耕层土壤为研究对象,基于铲土侵蚀模拟法建立 5 种侵蚀程度(0,5,10,15,20 cm)和 2 种管理措施[不施肥(CK)、常规耕作(F)]的原位试验,采用田间原位检测、土壤化学性质分析等手段,对常规耕作侵蚀耕层土壤养分的恢复效应和土壤养分的年际变化趋势进行研究。结果表明:(1)耕层土壤养分各项指标均表现为 F>CK,表明 F 较 CK 改善土壤养分效果较好,且对有机质、全氮和有效磷改善效果明显。(2)紫色土坡耕地耕层土壤养分主要富集在 0—20 cm 表土层,整体随侵蚀程度加剧,随剖面呈下降的趋势,F 下 0—30 cm 土层土壤养分含量增加明显,对 10—20 cm 土层有机质含量增幅效果最优。(3)经过连续 4 年的定位试验,CK 下有机质、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾含量较背景值增长 4.33%~15.89%,全氮含量较背景值无明显变化,全磷含量较背景值降低 11.78%;F 土壤养分含量较背景值增长 4.51%~49.46%。研究成果可为坡耕地合理耕层调控途径、提高土地生产力提供基础参数。

关键词: 土壤养分; 土壤侵蚀; 耕层; 施肥; 紫色土坡耕地

中图分类号:S158.3

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2023)01-0065-06

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.01.010

Change Characteristics of Soil Nutrient in Eroded Topsoil of Purple Soil Sloping Farmland

WANG Ronghao¹, SHI Dongmei¹, YU Yali², XIA Rui¹, NI Shuhui¹, ZHANG Jianle¹

(1.College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715;

2.Chongqing Surveying and Design Institute of Water Resources, Electric Power and Architecture, Chongqing 400020)

Abstract: By setting up erosion simulation plots, the change characteristics of soil nutrients in the process of quality degradation of the cultivated layer of purple soil sloping farmland were studied. In this paper, taking purple soil slope cultivated land in the Three Gorges Reservoir area as the research object, five erosion degrees (0, 5, 10, 15 and 20 cm) and two management measures (no fertilization (CK) and conventional tillage (F)) in situ experiments, using field in situ detection, soil chemical property analysis and other means were used to study the restoration effect of conventional tillage on soil nutrients in eroded topsoil and the interannual variation trend of soil nutrients. The results showed that: (1) All indicators of soil nutrients in the topsoil showed that F>CK, indicating that F was better than CK in improving soil nutrients, and it had a better effect on soil nutrients. The improvement effect of organic matter, total nitrogen and available phosphorus was obvious. (2) The soil nutrients of the arable layer of the purple soil slope farmland were mainly enriched in the topsoil layer of 0—20 cm. The soil nutrient content in the 30 cm soil layer increased significantly, and the effect on the increase of the organic matter content in the 10—20 cm soil layer was the best. (3) After a continuous 4 years positioning test, the organic matter, total potassium, alkali-hydrolyzed nitrogen, available phosphorus, and available potassium increased by 4.33%~15.89% under CK compared with the background value, the total nitrogen content did not change significantly compared with the background value, and the total phosphorus content decreased by 11.78% compared with the background value; the F soil nutrient increased by 4.51%~49.46% compared with the background value. The results provide basic parameters for the regulation of the plough layer and the improvement of land productivity.

收稿日期:2022-05-23

资助项目:国家自然科学基金项目(41771310)

第一作者:王荣浩(1999—),男,硕士研究生,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:531713576@qq.com

通信作者:史东梅(1970—),女,教授,博士生导师,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

Keywords: soil nutrient; soil erosion; cultivated-layer; fertilization; purple soil sloping farmland

土壤养分指土壤中能直接或经转化后能被植物根系吸收的矿质营养成分,是植物生长所必需的营养元素的主要来源和作物生长状况和产量的关键影响因素^[1-3],而土壤养分的数量、形态是评价土地生产力高低的重要指标之一^[4]。当前关于耕地土壤养分国内外已经进行大量研究,如盘礼东等^[5]研究表明,耕层土壤有机碳、全氮及全磷含量总体上随秸秆覆盖量增加而增加,而全钾则随着覆盖量的增加而减少;Haider 等^[6]研究表明,施加生物炭对改善土壤肥力,提高作物产量效果显著;Jessica 等^[7]研究表明,甜瓜/豇豆间作能显著提升土壤的有机质、全氮和有效磷水平;Li 等^[8]研究表明,大麦种植对耕层土壤碳、氮的减少幅度大于燕麦种植,而短期封育能显著提升耕层土壤中碳、氮含量。

紫色土坡耕地作为我国西南地区主要耕地资源类型,是重要的粮食和农产品生产基地^[9]。但紫色土具有矿质养分丰富、成土速度快、土壤生产力高,土层浅薄、侵蚀性高、抗旱性差、退化严重等特点^[10-11]。采用合理的管理措施改良耕层土壤养分对提高土地生产力、保证作物产量具有重要意义。但目前国内外对土壤养分的研究主要集中在耕作方式、耕作制度对土壤养分的影响,对坡耕地侵蚀性退化耕层土壤养分的研究较少,因此本文以重庆市三峡库区紫色土坡耕地耕层为研究对象,基于不同侵蚀条件(0, 5, 10, 15, 20 cm)的不施肥(CK)和常规耕作(F)2 种措施下紫色土坡耕地耕层土壤养分变化情况,分析常规耕作对侵蚀耕层土壤养分的恢复效应和土壤养分的年际变化趋势,可为坡耕地合理耕层调控途径、提高土地生产力提供基础参数。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验小区位于重庆市万州区熊家镇(108°25′51″E, 30°55′10″N),位于长江上游、三峡库区腹地,属亚热带季风气候,年平均气温 17.7℃,年平均日照时间 1 484.4 h,无霜期 305 天,年平均降水量 1 243 mm,且多集中于 5—9 月,土壤类型以紫色砂泥页岩母质上发育的中性紫色土为主,坡耕地主要种植方式为玉米/油菜。

1.2 试验设计

于 2018 年 2 月建立铲土侵蚀模拟试验小区,田面坡度为 15°,共设无侵蚀(S_0)、侵蚀 5 cm(S_5)、侵蚀 10 cm(S_{10})、侵蚀 15 cm(S_{15})和侵蚀 20 cm(S_{20})共 5 个侵蚀程度和不施肥(CK)、常规耕作(F)2 种管理措施,以 CK 为对照组,各处理设置 3 次重复,共 30 个小区,各小区面积 12 m²(3 m×4 m),F 为施复合肥(N:P₂O₅ :

K₂O 为 25:12:18) 277.5 kg/hm²,每年追施尿素(总氮≥45%) 2 次,并采用人工翻耕将化肥混入耕层。本文采用的铲土侵蚀模拟法属模拟试验研究,即人为运用试验手段加速侵蚀过程,通过铲除表土构建不同侵蚀程度小区开展研究^[12]。

1.3 土壤样品采集与测定

试验于 2018 年 1 月小区建设前采集土壤样品测试背景值,于 2018 年 8 月、2019 年 8 月、2020 年 8 月和 2021 年 8 月玉米收获前 1 周进行采样。在每个小区中部挖掘土壤剖面(1 m×1 m×0.4 m)进行垂直分布样品采集,以 0—10, 10—20, 20—30, 30—40 cm 土层分层采样,分别采 3 kg 左右散样并用塑料薄膜密封好带回室内风干,用于土壤基本理化性质测定,各样品采集 3 份,重复 3 次测试。

土壤养分常用指标包括土壤有机质、土壤氮磷钾全量(全氮、全磷、全钾)及有效量(碱解氮、有效磷、速效钾),这些指标不仅能较好地反映土壤养分的丰富程度,容易测定且含量稳定性较高^[13],因此本文将土壤有机质、全氮、全磷、碱解氮、有效磷和速效钾含量作为土壤养分指标。土壤有机质采用重铬酸钾容量法—外加热法,全氮采用半微量凯氏定氮法,全磷采用 NaOH 熔融—钼锑抗比色法,全钾采用 NaOH 熔融—火焰光度计法,碱解氮采用碱解扩散法,有效磷采用 Olsen 法,速效钾采用 NH₄Ac—火焰光度计法^[14]。

1.4 数据处理

采用 SPSS 24.0 统计软件进行统计分析、相关性分析和单因素方差分析,采用 Excel 2016 软件制作图表。

2 结果与分析

2.1 土壤侵蚀和管理措施对耕层土壤养分的影响

2.1.1 不同管理措施对耕层土壤养分的影响 不同管理措施对紫色土坡耕地耕层有机质、全氮、全磷和有效磷含量的影响存在显著差异($p<0.05$)。F 对紫色土坡耕地耕层土壤养分不同指标的改善效果不同(图 1),F 土壤有机质、全氮、全磷和有效磷含量较 CK 大幅度增加,分别较 CK 提升 34.40%, 28.19%, 18.52%, 35.46%;F 土壤全钾、碱解氮、速效钾含量较 CK 小幅度增加,分别较 CK 提升 3.07%, 1.06%, 2.74%。表明 F 对土壤有机质、全氮、全磷和有效磷改良效果较优。

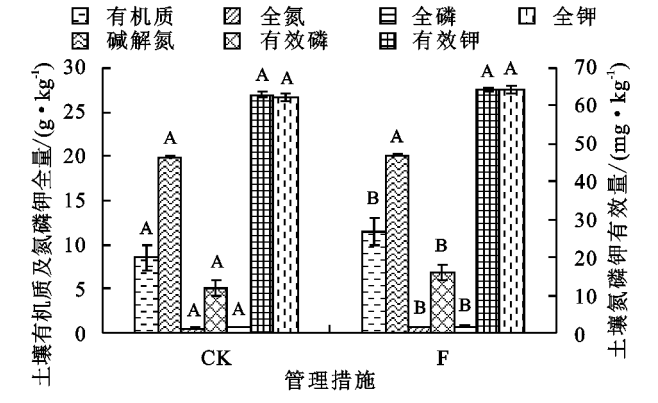
2.1.2 不同侵蚀程度对耕层土壤养分的影响 紫色土坡耕地耕层土壤养分各项指标均随侵蚀程度加剧而降低。由图 2 可知,土壤侵蚀能显著降低 CK 土壤有机质、全氮、碱解氮、有效磷、速效钾含量($p<0.05$),其中全氮含量降幅最大, $S_5 \sim S_{20}$ 较 S_0 分别下降 10.63%, 19.22%, 32.69%, 41.38%;土壤 F 全氮、碱解氮、有效磷、

速效钾含量随侵蚀程度加剧而显著下降($p<0.05$),其中有效磷含量降幅最大, $S_{-5} \sim S_{-20}$ 较 S_0 分别下降 1.19%,16.64%,33.33%,39.27%。F 土壤养分随侵蚀程度变化幅度整体小于 CK,表明 F 能降低土壤侵蚀对土壤养分造成的影响。

2.2 耕层土壤养分剖面分布

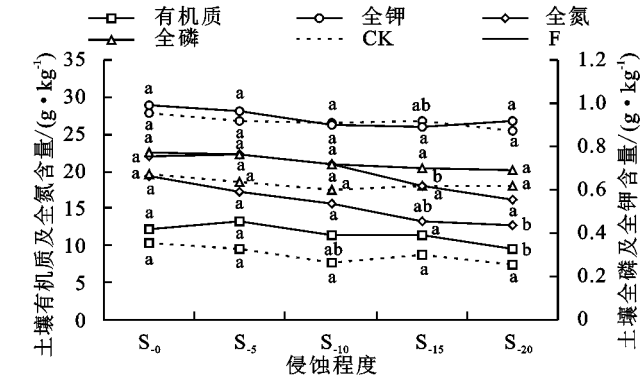
2.2.1 不同管理措施下耕层土壤养分剖面分布 紫色土坡耕地剖面不同垂直层次上管理措施的恢复作用差异性显著($p<0.05$)。由图 3 可知,F 较 CK 在 0—10,10—20,20—30,30—40 cm 土层上,有机质分别增加 34.56%,48.06%,47.88%,2.99%,全氮分别增加 28.81%,47.92%,34.62%,12.77%,全磷分别增加 23.08%,15.87%,22.03%,12.28%,全钾分别增加 0.77%,4.23%,9.82%,1.27%,碱解氮分别增加 7.66%,7.41%,16.40%,16.54%,有效磷分别增加 28.23%,40.08%,47.38%,4.89%,速效钾分别增加

3.80%,7.69%,17.17%,2.14%。表明相比 CK,F 下 0—30 cm 土层土壤养分含量增加明显,其中增加最多的为 10—20 cm 土层有机质含量,增幅为 48.06%,但对于全钾含量改良效果不明显。



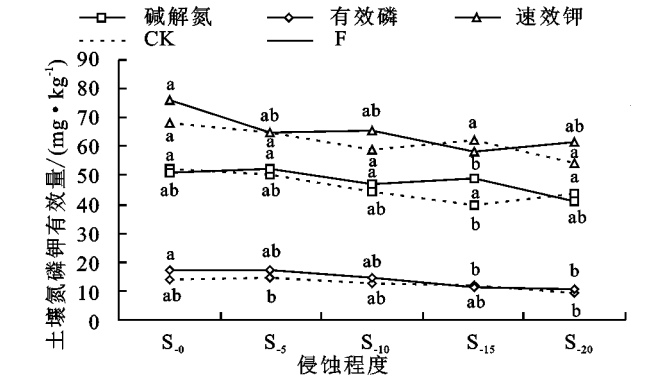
注:图柱上方不同大写字母表示土壤养分在不同措施间的显著性差异($p<0.05$)。

图 1 不同管理措施对耕层土壤养分的影响



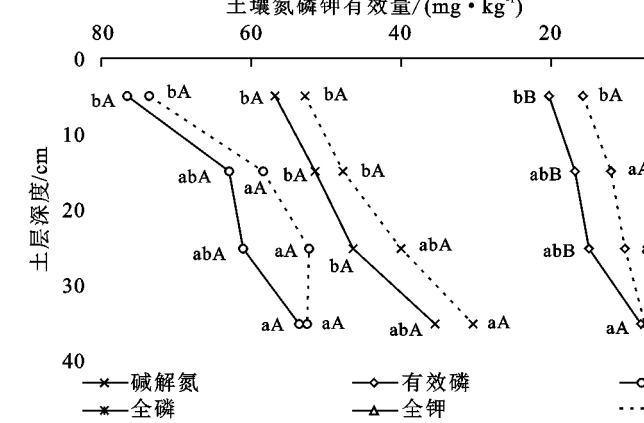
注:不同小写字母表示土壤养分在同一措施下具有显著性差异($p<0.05$)。

图 2 土壤侵蚀对耕层土壤养分的影响



注:不同小写字母表示同一措施下不同土层间土壤养分具有显著性差异($p<0.05$);不同大写字母表示在同一土层不同措施下土壤养分具有显著性差异($p<0.05$)。

图 3 不同管理措施下耕层土壤养分变化特征



注:不同小写字母表示同一措施下不同土层间土壤养分具有显著性差异($p<0.05$);不同大写字母表示在同一土层不同措施下土壤养分具有显著性差异($p<0.05$)。

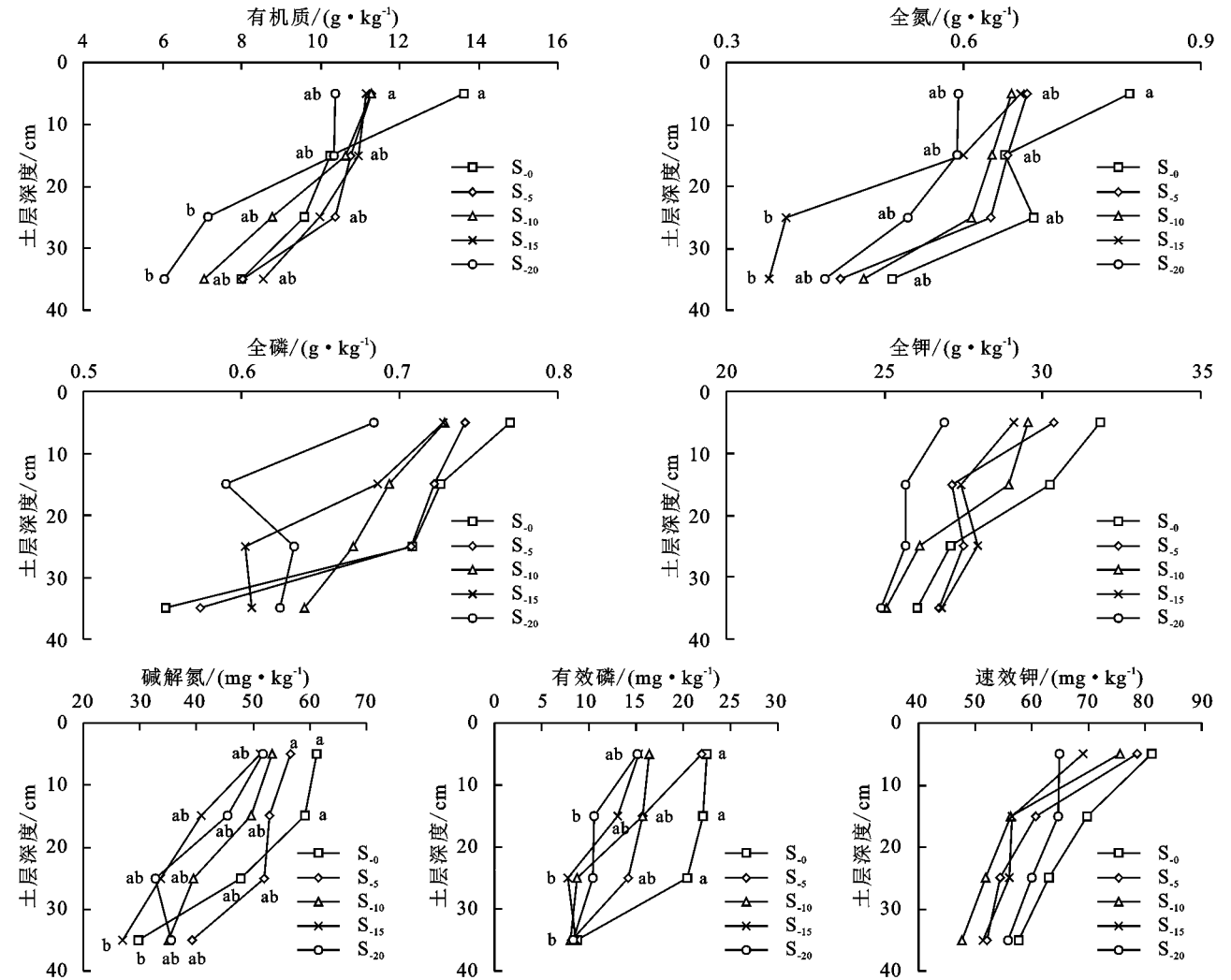
图 4 不同管理措施下耕层土壤养分变化特征

2.2.2 不同侵蚀程度下耕层土壤养分剖面分布 不同侵蚀程度下紫色土坡耕地土壤有机质、全氮、碱解氮和有效磷含量随剖面变化差异性显著($p<0.05$),全磷、全钾、速效钾含量差异性不显著($p>0.05$)。由图 4 可知,不同侵蚀程度下紫色土坡耕地土壤养分含量在 0—10 cm 土层均高于 10—40 cm 土层,且整体

上表现出随剖面深度增加差异减小的趋势。其中有效磷含量随土壤剖面下降幅度最大, S_0 下各土层有效磷含量分别在 8.69—22.04 g/kg 变化, $S_{-5} \sim S_{-20}$ 有效磷含量对比 S_0 分别下降 18.74%,33.63%,39.37%,39.78%。 S_0 时 10—40 cm 土层有效磷含量较表层分别下降 2.26%,9.36%,61.44%; S_{-5} 时 10—40 cm

土层有效磷含量较表层分别下降 28.69%,35.90%,63.06%; S_{-10} 时 10—40 cm 土层有效磷含量较表层分别下降 3.56%,46.15%,50.88%; S_{-15} 时 10—40 cm 土层有效磷含量较表层分别下降 13.98%,49.30%,

43.01%; S_{-20} 时 10—40 cm 土层有效磷含量较表层分别下降 30.04%,31.55%,45.36%。表明土壤侵蚀对 0—10 cm 土层土壤养分含量影响较大,但随剖面加深影响逐渐降低。



注:不同小写字母表示不同土层间土壤养分的显著性差异($p<0.05$);没有字母表示差异性不显著。

图 4 不同侵蚀程度耕层土壤养分变化特征

2.3 紫色土坡耕地侵蚀性耕层土壤养分年际变化

2.3.1 不同管理措施下耕层土壤养分年际变化 经过连续 4 年定位试验不同措施下紫色土坡耕地耕层有机质、全氮、有效磷、速效钾含量差异性显著 ($p < 0.05$),全磷、全钾、碱解氮含量差异性不显著 ($p > 0.05$)。2018 年土壤养分背景值为有机质含量为 7.70 g/kg,全氮含量为 0.54 g/kg,全磷含量为 0.70 g/kg,全钾含量为 24.81 g/kg,碱解氮含量为 43.20 mg/kg,有效磷含量为 11.79 mg/kg,速效钾含量为 56.11 mg/kg。由图 5 可知,CK 土壤有机质、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾含量较背景值分别增长 15.89%,7.31%,6.45%,4.33%,11.03%,全氮含量较背景值无明显变化,全磷含量较背景值降低 11.78%,年均降低 4.09%;F 土壤有机质、全氮、有效磷含量较背景值显著提升,分别增加 49.46%,25.02%,35.66%,年均增长率分别为

14.33%,7.73%,10.70%,全磷、全钾、碱解氮、速效钾含量较背景值分别增长 4.51%,10.83%,8.62%,14.66%。表明 F 较 CK 能显著提高有机质、全氮、有效磷含量,且随试验周期差异逐渐增加。

2.3.2 不同侵蚀程度下耕层土壤养分年际变化 经过连续 4 年定位试验不同侵蚀程度下紫色土坡耕地耕层土壤养分差异性不显著 ($p > 0.05$),但整体上年增长量呈随侵蚀程度加剧而降低的趋势(图 6)。在 S_0 下,CK 土壤有机质、全钾、碱解氮、速效钾含量较背景值分别增长 22.60%,5.99%,5.43%,14.92%,全磷、有效磷含量较背景值分别降低 11.45%,3.48%,全氮含量无明显变化;F 土壤有机质、全氮、碱解氮、速效钾含量较背景值有明显提升,年均分别增长 16.42%,5.12%,19.72%,10.01%,全磷、全钾、有效磷较背景值分别增长 2.35%,10.22%,6.29%。在 S_{-20} 下,CK 土壤有机质、

全钾、碱解氮、有效磷、速效钾含量较背景值年均分别增长 1.91%,3.07%,20.66%,16.67%,19.70%,全氮、全磷含量较背景值年均分别降低 3.65%,9.06%;F 土壤有机质、全氮、有效磷含量较背景值明显提升,年均分别增长 10.39%,6.87%,9.45%,全磷、全钾、碱解氮、速效钾较背景值分别增长 12.34%,5.57%,14.09%,11.01%。表明在未发生侵蚀的耕层,F 对耕层土壤有机质、全氮、全磷、有效磷和速效钾有明显的改良作用,但改良效果随侵蚀程度的增加而降低,在发生严重侵蚀的耕层,仅对土壤有机质、全氮、全磷含量有较明显的改良作用,对有效磷的改良作用大幅度降低,且对碱解氮无明显改良效应。

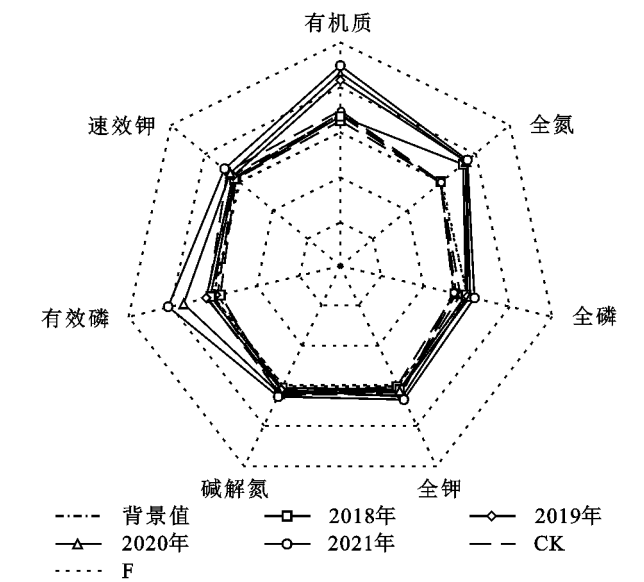


图 5 不同管理措施下耕层土壤养分年际变化特征

3 讨论

3.1 土壤侵蚀对坡耕地土壤养分的影响

土壤养分中的土壤有机质主要来源于土壤表层的微生物、动物残体及凋落物和根系分解,全氮主要来源于植物根系的固氮作用,而氮是影响淋溶层土壤磷的主要因子^[15],土壤微生物活动、植物根系固氮作用随着土层的加深而下降^[16],导致土壤有机质、磷素含量和固氮水平下降,所以土壤养分主要分布在土壤表层,受土壤侵蚀影响较为强烈。相关研究^[17-19]均表明,土壤侵蚀与土壤养分流失关系密切。魏晗梅等^[20]通过对土壤养分对侵蚀—沉积的响应的研究表明,侵蚀部位土壤有机碳、全氮、硝态氮和速效磷含量较沉积部位分别降低 27.4%,21.1%,29.2%和 54.1%,土壤有机碳、全氮和速效磷含量与土壤侵蚀速率呈极显著负相关关系($p<0.01$);周华坤等^[21]研究也表明,土壤养分含量在表层因土壤侵蚀流失严重,养分含量下降反作用于作物,抑制作物生长,使得土壤抗蚀性下降,更易发生土壤侵蚀,导致土壤养分持续流失;Kristensen 等^[22]研究表明,生物扰动和土壤侵蚀使

得土壤养分储量长期下降(100~1 000 年)。

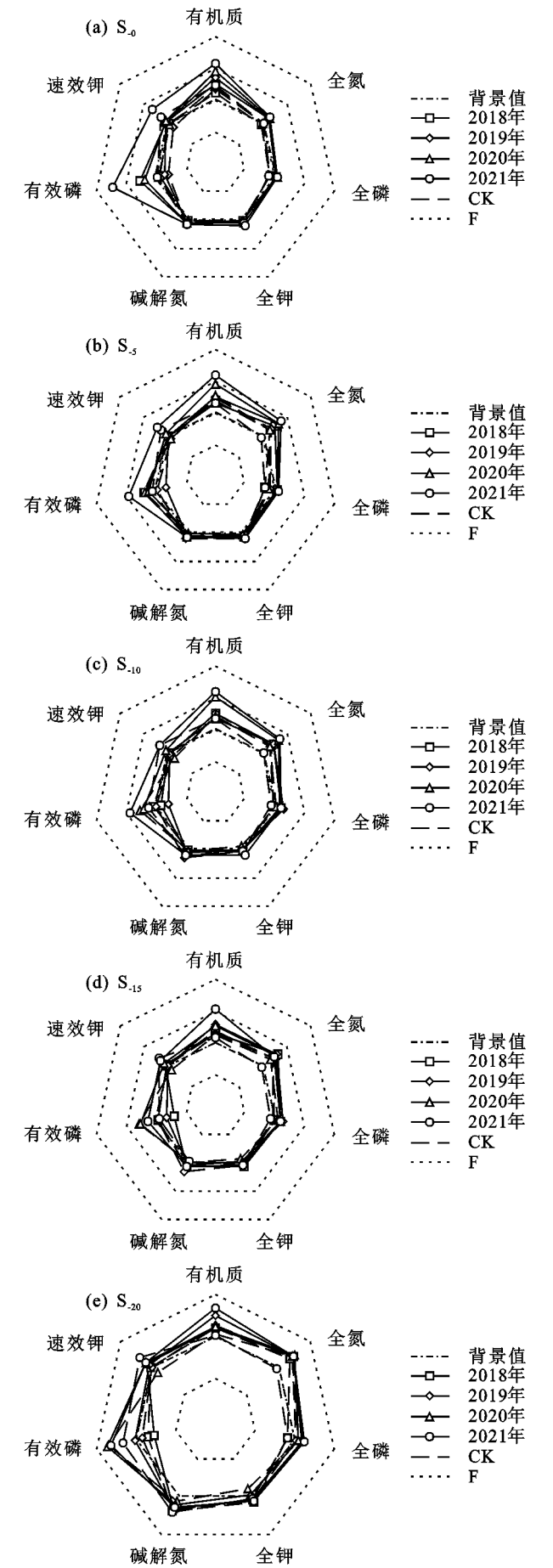


图 6 不同侵蚀程度耕层土壤养分年际变化特征

3.2 土壤侵蚀对作物产量的影响

土壤侵蚀对土壤养分和作物产量存在一定影响。Zhang 等^[23]研究表明,侵蚀深度小于 5 cm 时,作物产量没有明显下降,但当侵蚀深度大于 20 cm 时,作物产量无法恢复到侵蚀前水平;Mahadevan 等^[24]对斐济农村的研究表明,土壤侵蚀程度较低时作物产量下降 17%,土壤侵蚀程度中等到高,则作物产量下降 27%。在本研究中,土壤侵蚀导致土壤养分水平下降,对耕层土壤养分各项指标与作物产量进行相关性分析发现,有机质含量与作物产量相关性系数分别为 0.852,呈极显著相关($p < 0.01$),因此采用有机质含量和作物产量作为反映土壤养分变化情况的指标(图 7)。在侵蚀程度较低时,F 下 S_0 、 S_5 、 S_{10} 有机质含量较 CK 分别提高 20.20%,38.19%,46.66%,玉米产量分别提高 17.29%,15.45%,15.52%,而在侵蚀程度较高时,F 下 S_{15} 、 S_{20} 有机质含量较 CK 分别提高 28.80%,32.03%,玉米产量分别提高 52.27%,55.71%,说明土壤侵蚀对作物产量的影响随侵蚀程度加剧而增大,与鄂丽丽等^[25]的研究结果相符。

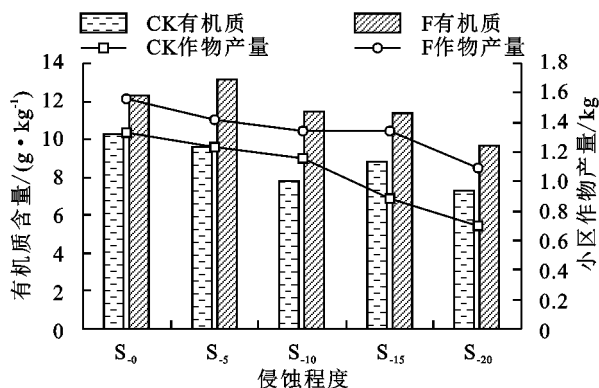


图 7 不同侵蚀程度下土壤有机质和玉米产量变化特征

4 结论

(1) F 较 CK 能显著提升紫色土坡耕地耕层有机质、全氮和有效磷含量。F 土壤有机质、全氮和有效磷含量较 CK 分别提升 34.40%,28.19%,35.46%。土壤侵蚀显著降低有机质、全氮、碱解氮、有效磷、速效钾含量。F 下有效磷含量受土壤侵蚀影响最大, $S_5 \sim S_{20}$ 较 S_0 分别下降 1.19%,16.64%,33.33%,39.27%。

(2) F 较 CK 能显著提升 0—30 cm 土层土壤养分含量,对 10—20 cm 土层有机质含量改善效果最明显,较 CK 提升 48.06%。紫色土坡耕地耕层土壤养分主要富集在 0—20 cm 表土层,且整体呈随侵蚀程度加剧剖面下降的趋势。

(3) 经过连续 4 年定位试验紫色土坡耕地耕层土壤养分含量年际变化差异性显著。与背景值相比,CK 有机质、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾增长 4.33%~15.89%,全氮含量无明显变化,全磷含量降低 11.78%;F

下土壤养分含量增长 4.51%~49.46%。综上所述,F 措施对侵蚀耕层土壤养分水平有较好的改良作用。

参考文献:

- [1] 孙权,陈茹,宋乃平,等.宁南黄土丘陵区马铃薯连作土壤养分、酶活性和微生物区系的演变[J].水土保持学报,2010,24(6):208-212.
- [2] 陈轩敬,赵亚南,柴冠群,等.长期不同施肥下紫色土综合肥力演变及作物产量响应[J].农业工程学报,2016,32(增刊 1):139-144.
- [3] 胡琴,陈为峰,宋希亮,等.开垦年限对黄河三角洲盐碱地土壤质量的影响[J].土壤学报,2020,57(4):824-833.
- [4] 周健民,沈仁芳.土壤学大辞典[M].北京:科学出版社,2013.
- [5] 盘礼东,李瑞,张玉珊,等.西南喀斯特区坡耕地秸秆覆盖对土壤生态化学计量特征及产量的影响[J].生态学报,2022,42(11):4428-4438.
- [6] 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.
- [7] Jessica C, Antonio P J, Juana-Maria V, et al. A first-year melon/cowpea intercropping system improves soil nutrients and changes the soil microbial community[J].Agriculture, Ecosystems and Environment, 2022,328:e107856.
- [8] Li Y, Degen A A, Sun T, et al. Three years of cultivating or fencing lands have different impacts on soil nutrients and properties of a subalpine meadow in the Tibetan plateau[J].Catena, 2019,186:e104306.
- [9] 中国科学院成都分院土壤研究室.中国紫色土.上篇[M].北京:科学出版社,1991.
- [10] 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.
- [11] Fan F L, Xie D T, Wei C F, et al. Reducing soil erosion and nutrient loss on sloping land under crop-mulberry management system[J].Environmental Science and Pollution Research International, 2015, 22(18): 14067-14077.
- [12] 姜义宝,史东梅,江娜,等.土壤侵蚀对坡耕地土壤水分及入渗特性影响[J].土壤学报,2020,57(6):1399-1410.
- [13] 郑姗姗,吴鹏飞,马祥庆.森林土壤养分空间异质性研究进展[J].世界林业研究,2014,27(4):13-17.
- [14] 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.
- [15] 曾晓敏,高金涛,范跃新,等.中亚热带森林转换对土壤磷积累的影响[J].生态学报,2018,38(13):4879-4887.
- [16] 王宪伟,孙丽,杜宇,等.大兴安岭多年冻土区泥炭地土壤性质与微生物呼吸活性研究[J].湿地科学,2021,19(6):682-690.

[23] 陶婷婷,陈晓燕,陈仕奇,等.饱和紫色土初始态和稳定态细沟水力学特征研究[J].土壤学报,2022,59(1):129-138.

[24] Han Z, Chen X Y, Li Y H, et al. Quantifying the rill-detachment process along a saturated soil slope[J].Soil and Tillage Research,2020,204:e104726.

[25] 刘森,杨明义,张风宝.黄土坡面细沟发育及细沟与细沟间侵蚀比率研究[J].水土保持学报,2015,29(1):12-16.

[26] 裴冠博,龚冬琴,付兴涛.晋西黄绵土坡面细沟形态及其对产流产沙的影响[J].水土保持学报,2017,31(6):79-84,182.

[27] 倪世民,冯舒悦,王军光,等.不同质地重塑土坡面细沟侵蚀形态与水力特性及产沙的关系[J].农业工程学报,2018,34(15):49-156.

[28] 韩珍,陈晓燕,李彦海,等.近饱和与非饱和土壤细沟水流输沙能力的对比研究[J].山地学报,2020,38(6):841-850.

[29] 薛姣姣,王健,李鹤,等.重粉质壤土坡面细沟侵蚀发育规律实验分析[J].灌溉排水学报,2016,35(1):67-70.

[30] 王健,李鹤,孟秦倩,等.黄土坡面细沟横断面形态及其水流动力学与挟沙特性[J].水土保持学报,2015,29(3):32-37.

[31] 龙琪,韩剑桥,何育聪,等.黄土坡面细沟侵蚀强度的空间分布及形态分异特征[J].水土保持学报,2022,36(1):1-7.

[32] 郝好鑫,郭忠录,王先舟,等.降雨和径流条件下红壤坡面细沟侵蚀过程[J].农业工程学报,2017,33(8):134-140.

[33] 严冬春,文安邦,史忠林,等.紫色土坡面跌坑贯穿发生细沟的水动力过程[J].长江流域资源与环境,2012,21(1):94-99.

(上接第 70 页)

[17] 王永平,周子柯,滕昊蔚,等.东大河小流域林地土壤侵蚀及养分特征研究[J].核农学报,2021,35(7):1658-1667.

[18] 邓威,汪晶晶,白云,等.苦驴河上游小流域土壤侵蚀及其养分流失特征[J].水土保持通报,2020,40(1):85-90,2.

[19] 刘丹,丁明军,文超,等.赣南红壤丘陵区¹³⁷C示踪土壤侵蚀对土壤养分元素的影响[J].水土保持学报,2019,33(1):62-67.

[20] 魏哈梅,郑粉莉,冯志珍,等.薄层黑土区流域尺度土壤养分对侵蚀—沉积的响应[J].水土保持学报,2021,35(4):49-54.

[21] 周华坤,赵新全,周立,等.青藏高原高寒草甸的植被退化与土壤退化特征研究[J].草业学报,2005,14(3):31-40.

[22] Kristensen J A, Boëtius S H, Abekoe M, et al. The combined effect of termite bioturbation and water erosion on soil nutrient stocks along a tropical forest catena in Ghana[J].Catena,2019,178:307-312.

[23] Zhang L L, Huang Y, Rong L, et al. Effect of soil erosion depth on crop yield based on topsoil removal method: A meta-analysis[J].Agronomy for Sustainable Development,2021,41(5):1-13.

[24] Mahadevan R, Gonemaituba W. A note on soil erosion and the loss in crop production: Case study of Fiji’s ginger farms[J].Journal of the Asia Pacific Economy,2013,18(3):502-511.

[25] 鄂丽丽,胡伟,谷思玉,等.黑土农田极端侵蚀对土壤质量及作物产量的影响[J].水土保持学报,2018,32(2):142-149,172.

(上接第 76 页)

[17] 张光辉.土壤分离能力测定的不确定性分析[J].水土保持学报,2017,31(2):1-6.

[18] 张风宝,杨明义,李占斌.微小区土壤侵蚀试验中田口方法代替全因子设计的可行性分析[J].农业工程学报,2015,31(13):1-9.

[19] Wang E H, Cruserichard M, Chen X W, et al. Effects of moisture condition and freeze/thaw cycles on surface soil aggregate size distribution and stability[J].Canadian Journal of Soil Science,2011,92(3):529-536.

[20] 高广磊,丁国栋,赵媛媛,等.生物结皮发育对毛乌素沙地土壤粒度特征的影响[J].农业机械学报,2014,45(1):115-120.

[21] 余韵.黄土丘陵区人工培育生物结皮对坡面水蚀的影响研究[D].南昌:江西农业大学,2014.

[22] 王军光,李朝霞,蔡崇法,等.集中水流内红壤分离速率与团聚体特征及抗剪强度定量关系[J].土壤学报,2011,48(6):1133-1140.

[23] 王芳芳,肖波,李胜龙,等.黄土高原生物结皮对土壤养分的表层聚集与吸附固持效应[J].植物营养与肥料学报,2021,27(9):1592-1602.

[24] 高丽倩.黄土高原生物结皮土壤抗水蚀机理研究[D].北京:中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心,2017.

[25] 冯梦蝶,陈展鹏,何丙辉,等.不同土壤容重水平下喀斯特黄壤分离能力水动力学特性[J].水土保持学报,2021,35(2):1-7.

[26] Zhang G H, Liu B Y, Liu G B. Detachment of undisturbed soil by shallow flow[J].Soil Science Society of America Journal,2003,67(3):713-719.

[27] 王展,张玉龙,虞娜,等.冻融作用对土壤微团聚体特征及分形维数的影响[J].土壤学报,2013,50(1):83-88.