

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.19308

耕作深度及培肥方式对红壤坡耕地土壤理化性质及作物产量的影响

黄尚书¹, 钟义军^{1, 2}, 黄欠如¹, 武琳¹, 何绍浪¹, 成艳红¹, 张昆¹, 吴艳¹, 叶川^{3*}

(1. 江西省红壤研究所, 江西 南昌 330046; 2. 华中农业大学资源与环境学院, 湖北 武汉 430070;
3. 江西省蚕桑茶叶研究所, 江西 南昌 330203)

摘要:针对当前红壤坡耕地耕层瘠薄化问题, 研究耕作深度及培肥方式对土壤理化性质、作物产量及耕层土壤质量的影响。试验以免耕 (NT)、耕翻 10 cm (P10)、耕翻 20 cm (P20)、耕翻 30 cm (P30) 为主处理, 以单施化肥 (NPK) 和有机无机配施 (NPK+OM) 为副处理设置裂区试验, 进行土壤理化性质及作物产量的观测, 并评价不同处理下耕层土壤质量。结果表明: (1) 与 NT 处理相比, P10、P20、P30 处理提高了 0 ~ 30 cm 土层土壤有机质及速效养分含量, 尤其以 P20 处理下 0 ~ 20 cm 土层土壤有机质及速效养分的积累效果最佳; P10、P20、P30 处理还改善了对应耕作深度土层的土壤物理性质 (土壤田间持水量除外), 但造成了对应耕作深度下层土壤压实现象; 不同耕作深度下花生、红薯产量均以 P20 处理最高, 平均比 NT、P10、P30 处理高 47.96%、33.29%、17.05%。(2) 与 NPK 培肥方式相比, NPK+OM 培肥方式有利于维持 0 ~ 30 cm 各土层土壤有机质、速效养分含量的稳定, 一定程度改善 0 ~ 40 cm 各土层土壤物理性质, 并提高作物产量 (提高 6.70%); 但 NPK+OM 培肥方式结合耕作深度处理对作物的增产效果并不一致: 在 P10、P20、P30 处理下, NPK+OM 结合 P20 处理的增产效果最佳 (增产 9.60%)。(3) 对不同处理下红壤坡耕地耕层土壤质量的评价结果表明, 不同耕作深度下耕层土壤质量指数以 P20 处理最高, 两种培肥方式下耕层土壤质量指数表现为 NPK+OM 培肥方式显著高于 NPK 培肥方式; 进一步分析发现, 作物产量与耕层土壤质量指数呈极显著正相关, 说明不同耕作深度及培肥方式通过影响耕层土壤质量进而影响作物产量的形成。因此, 对于种植典型农作物的红壤坡耕地, 耕作深度 20 cm 在改善耕层土壤物理性质的基础上, 更有利于有机质及速效养分的积累, 并使作物获得较高的产量, 且与有机无机培肥相结合可进一步获得较好的增产效果, 为红壤坡耕地合理耕层构建提供了支撑。

关键词:红壤坡耕地; 耕作深度; 培肥方式; 土壤理化性质; 作物产量

红壤坡耕地占南方红壤区旱地面积的 70%, 是丘陵山区群众赖以生存的基本生产用地, 也是南方经济作物及粮食作物的重要基地。丰富的水热资源使红壤坡耕地农业生产和经济发展潜力巨大, 在全国农业可持续发展战略中占有举足轻重的地位。受立地条件的影响, 农民习惯采用旋耕与浅翻耕相结合的作业方式, 但由于耕作机具动力不足, 难以保证作物生长所需要的耕作深度, 导致红壤坡耕地作

物生长耕层浅薄化问题越来越突出。《2016 年全国耕地质量监测报告》表明适宜作物生长的耕层厚度在 20 cm 以上, 而江西省红壤坡耕地耕层平均厚度 13.4 cm^[1], 耕层厚度明显不足。浅薄的耕层使土壤的蓄水保墒能力严重不足, 加剧了红壤坡耕地的养分流失、季节性干旱等生产障碍; 加之当地农民主要采用增施化肥的方式来获得作物高产, 但不合理施用化肥、轻施甚至不施有机肥会进一步加剧土壤有机质下降、耕层结构变差、土壤酸化等问题, 从而导致作物产量低而不稳。随着主要农作物生产全程机械化推进行动深入开展, 主要粮食产地耕地效率及耕作深度得到极大保证。在此背景下, 深入开展红壤坡耕地合理耕作深度及培肥研究, 是实现南方红壤区土地资源高效可持续利用的有效途径, 对保障区域粮食安全、社会稳定和经济的可持续健

收稿日期: 2019-07-09; 录用日期: 2019-10-19

基金项目: 公益性行业 (农业) 科研专项经费项目 (201503119-05-01); 江西省重点研发计划项目 (20181BBF68009); 江西省重点研发计划项目 (20161BBF60105)。

作者简介: 黄尚书 (1989-), 男, 江西崇义人, 助理研究员, 硕士, 主要从事红壤生态修复与改良方面研究。E-mail: hss1232005@163.com。

通讯作者: 叶川, E-mail: yechuan555@sohu.com。

康发展具有重要的现实意义。

近年来,相关学者研究了耕作深度对茶园^[2]、水田^[3-5]、旱地^[6-8]等土壤物理、化学、生物特征,作物生长发育及全球气候的影响,明确了合理耕作深度对不同类型耕地的重要作用。随着中国农业集约化程度的不断提高,化肥用量大幅度增加,有机肥施用比重逐渐减少,其造成土壤退化、环境恶化等负效应越来越严峻^[9],而有机培肥是改良土壤结构、维持土壤肥力水平,进而实现农业可持续发展的重要措施^[10]。同时,有研究表明耕作深度和培肥方式组合可对土壤某些性质及作物产量产生互作效应,将两者合理搭配有利于充分发挥其作用^[5, 11-12]。然而,耕作深度以及与培肥方式相结合对红壤坡耕地土壤理化性质及作物产量的影响尚不明确。因此,本研究依托2015年设置的红壤坡耕地耕作深度及培肥方式定位试验,研究了耕作深度与培肥方式对红壤坡耕地土壤理化性质及作物产量的影响,评价了红壤坡耕地耕层土壤质量并分析土壤质量、作物产量之间的关系,以期红壤坡耕地可持续高效利用提供理论和实践依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于江西省进贤县温圳镇东岗村(N 28° 19' 29.7", E 116° 08' 4.8"),该区属亚热带季风湿润气候,雨量充沛,四季分明;年均降水量1 537 mm,年蒸发量1 100 ~ 1 200 mm;年均气温17.7 ~ 18.5℃,最冷月(1月)平均气温为4.6℃;最热月(7月)平均气温一般在28.0 ~ 29.8℃。地

形为典型低丘,海拔在25 ~ 30 m,坡度5°左右。土壤类型为第四纪红黏土母质发育的红壤,0 ~ 40 cm土壤理化性质见表1。

表1 试验前土壤基本理化性质

土层 (cm)	pH 值	有机质 (g/kg)	砂粒 (%)	粉粒 (%)	黏粒 (%)
0 ~ 10	4.76	15.34	16.31	41.35	42.34
10 ~ 20	4.69	14.71	16.34	43.30	40.36
20 ~ 30	4.79	12.63	15.94	42.55	41.51
30 ~ 40	4.81	8.30	15.78	43.12	41.10

1.2 试验设计

试验始于2015年,选择基础肥力、地形条件一致的红壤坡耕地作为试验地,以耕作深度为主处理,培肥方式为副处理设置裂区试验。其中耕作深度设置免耕(NT)、耕翻10 cm(P10)、耕翻20 cm(P20)、耕翻30 cm(P30),具体操作方法见表2;培肥方式设置单施化肥(NPK)和有机无机配施(NPK+OM),两种培肥方式等量氮、磷、钾,具体肥料施用量和方法见表3,供试有机肥为猪粪,并结合耕作深度处理施入对应土层深度(免耕条件下施在表层),具体养分含量见表4。各处理重复4次,共计64个试验小区,小区面积为88 m²(22 m×4 m),并在试验地四周设立保护行。试验种植制度为花生/红薯周年轮作,其中试验第一年(2015年)种植花生,花生供试品种为粤油933,种植规格为33 cm×15 cm,于4月上旬播种,8月中旬收获;红薯供试品种为苏薯8号,5月下旬进行开穴移栽红薯苗,种植规格为50 cm×40 cm,10月下旬至11月上旬进行红薯收获。

表2 不同耕作深度操作方法

代码	处理	操作方法
NT	免耕	全年不耕,作物进行开穴或开沟种植。
P10	机耕 10 cm	在作物种植前进行旋耕2次,旋耕深度10 cm左右。
P20	机耕 20 cm	作物种植前耕翻,深度20 cm左右,然后旋耕2次,旋耕深度为10 cm左右。
P30	机耕 30 cm	作物种植前耕翻,深度30 cm左右,然后旋耕2次,旋耕深度为10 cm左右。

表3 不同培肥方式肥料施用量及方法

代码	处理	施用量(kg/hm ²)				施用方法
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	猪粪	
NPK	单施化肥	118	45	180	—	按基追比7:3施肥,基肥在耕作前施入,追肥在花生始花前或红薯茎叶生长期进行。
NPK +OM	有机无机配施	70	16	141	22 500	猪粪全部作基肥,N、P、K肥按NPK培肥方式追肥量进行追肥,其余作为基肥。

表 4 试验用有机肥养分状况

有机肥	含水量 (%)	有机质含量 (g/kg)	氮含量 (N, g/kg)	磷含量 (P ₂ O ₅ , g/kg)	钾含量 (K ₂ O, g/kg)
猪粪	65.60	312.5	6.23	3.75	5.01

1.3 样品采集与土壤理化性质的测定

采样在 2016 年和 2017 年进行, 其中 2016 年种植作物为红薯, 2017 年种植作物为花生, 土壤环刀样品和混合土样在作物收获前 (2016 年 10 月 25 日和 2017 年 8 月 6 日) 进行采集。具体方法为: 在各试验小区上、中、下 3 个部位挖掘土壤剖面 3 个, 并在各土壤剖面以 10 cm 为一层采集 0 ~ 40 cm 土层的环刀样品 3 个, 每个土壤剖面同一土层取环刀样品 3 个, 则小区同一土层共采集环刀样品 9 个, 考虑最大耕作深度为 30 cm, 可能会对 30 cm 以下土层产生一定影响, 因此环刀样品采集深度为 0 ~ 40 cm; 在环刀样品采集完成后, 在小区各土壤剖面以 10 cm 为一层采集 0 ~ 30 cm 土层土壤样品, 并将小区 3 个土壤剖面同一土层土壤样品混合制成混合土样。

环刀样品采集完成后立即带回试验室, 土壤容重等 7 个指标的测定方法见参考文献 [13], 最后以试验小区 3 个土壤剖面各土层相关指标的平均值代表试验小区相应土层该指标的大小。

混合土样在室内自然风干, 除去植物根系、杂物等, 研磨过 2、0.25 mm 筛, 装瓶用于土壤 pH 值、有机质、速效养分的测定。其中: 土壤 pH 值采用 pH 计测定, 土壤有机质采用 K₂Cr₂O₇-H₂SO₄ 氧化法测定, 土壤碱解氮采用碱解扩散法测定, 土壤有效磷采用 NaHCO₃ 浸提-钼锑抗比色法, 速效钾采用 NH₄OAc 浸提-火焰光度法测定。具体测定方法见参考文献 [14]。

红薯产量的测定: 在红薯收获期将各试验小区的红薯挖出, 并剔除红薯上的泥土、根系等, 称重、统计产量。花生产量: 在花生收获期将各试验小区花生收获, 晒干、称重, 统计产量。

1.4 数据处理与分析

利用 Excel 2007 对试验数据进行初步统计分析, 并用 Origin 8.1 软件作图、SPSS 18.0 软件进行方差分析及相关性分析。

1.5 耕层土壤质量评价

由于评价对象为耕层 (0 ~ 20 cm), 因此评价前除土壤容重直接将 0 ~ 10 和 10 ~ 20 cm 实测值平均化作为耕层数值外, 其余各指标需对 0 ~ 10、

10 ~ 20 cm 土层实测值进行加权平均作为耕层的数值。由于采样以 10 cm 为一土层, 因此加权平均法在考虑土壤容重、土层厚度后, 可将计算方法简化如下:

$$\overline{X_i}(0 \sim 20 \text{ cm}) = \frac{[X_i(0 \sim 10 \text{ cm}) \times D_i(0 \sim 10 \text{ cm}) + X_i(10 \sim 20 \text{ cm}) \times D_i(10 \sim 20 \text{ cm})]}{[D_i(0 \sim 10 \text{ cm}) + D_i(10 \sim 20 \text{ cm})]}$$

式中: $\overline{X_i}(0 \sim 20 \text{ cm})$ 表示 i 指标的加权平均值, $X_i(0 \sim 10 \text{ cm})$ 和 $X_i(10 \sim 20 \text{ cm})$ 表示 i 指标在 0 ~ 10、10 ~ 20 cm 的实测值, $D_i(0 \sim 10 \text{ cm})$ 和 $D_i(10 \sim 20 \text{ cm})$ 表示对应的 0 ~ 10 和 10 ~ 20 cm 的土壤容重。对数据加权平均化处理后, 土壤质量的评价利用最小数据集及隶属度函数模型方法对耕层土壤质量进行综合评价, 具体方法参考文献 [15-17]。

2 结果与分析

2.1 耕作深度及培肥方式对土壤化学性质的影响

由于 2016 和 2017 年试验数据结果趋势基本一致, 故下文土壤理化性质均以两年数据的平均值进行统计分析。

如图 1 所示, 各耕作深度处理 0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 30 cm 土层土壤 pH 值平均为 4.84、4.88、4.88。统计结果表明, 不同耕作深度处理间土壤 pH 值差异极显著 ($P < 0.01$), 0 ~ 30 cm 土层土壤 pH 值以 P20 处理最高 (4.92), 以 P30 处理最低 (4.85); 0 ~ 30 cm 土层土壤 pH 值变异系数大小为: NT(1.66%) > P20(1.57%) > P10(1.40%) > P30(0.76%)。从培肥方式来看, NPK+OM 培肥方式 0 ~ 30 cm 土层土壤 pH 值比 NPK 培肥方式低 0.21%, 但差异不显著 ($P > 0.05$)。

测试结果表明, 0 ~ 30 cm 土层土壤有机质含量介于 10.28 ~ 17.43 g/kg (图 1)。耕作深度对 0 ~ 30 cm 土层土壤有机质含量存在极显著影响 ($P < 0.01$), 其中: 0 ~ 10 和 0 ~ 20 cm 土层土壤有机质含量均表现为 P20 > P30 > P10 > NT, 20 ~ 30 cm 土层土壤有机质含量表现为 P30 > P10 > P20 ≈ NT; 从 0 ~ 30 cm 土层间土壤有机质含量的变异系数来看, 大小顺序为 P20 (18.25%) > P10 (9.23%) >

NT (6.66%) > P30 (5.54%), 说明 P30 处理 0 ~ 30 cm 土层土壤有机质含量分布较为均匀。不同培肥方式下 0 ~ 30 cm 土层土壤有机质含量差异极显著 ($P < 0.01$), NPK+OM 培肥方式下 0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 30 cm 土层土壤有机质含量分别为 14.63、13.45 和 12.48 g/kg, 比 NPK 措施高 3.67%、3.98% 和 7.15%。

不同耕作深度下 0 ~ 30 cm 土层土壤速效养分均存在极显著差异, 其中: 不同耕作深度 0 ~ 30 cm 土层土壤碱解氮含量存在极显著差异 ($P < 0.01$), 其中 0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 30 cm 土层土壤碱解氮含量均表现为 NT 低于其它处理, 以 P10、P20 处理相对较高, P30 处理次之; 0 ~ 10、10 ~ 20 cm 两个

土层有效磷含量表现为 $P20 > P30 > P10 > NT$, 20 ~ 30 cm 土层有效磷表现为 $P30 > P20 > P10 > NT$; 0 ~ 10、10 ~ 20 cm 两个土层土壤速效钾含量均以 P20 处理较高, 为 152.97 mg/kg, 分别比 NT、P10、P30 处理高 19.39%、13.57%、14.91%; 在 20 ~ 30 cm 土层土壤速效钾含量表现为 $P30 \approx P20 > P10 \approx NT$; 从变异系数来看, 0 ~ 30 cm 土层土壤有效磷与速效钾均以 P30 处理变异系数最小, 说明连年深翻可造成对应耕作深度土层土壤养分均匀化。从培肥方式来看, 不同培肥方式下 0 ~ 30 cm 土层土壤速效养分含量存在极显著差异 ($P < 0.01$), NPK+OM 培肥方式下土壤速效养分含量平均比 NPK 培肥方式高 5.30% ~ 11.73%。

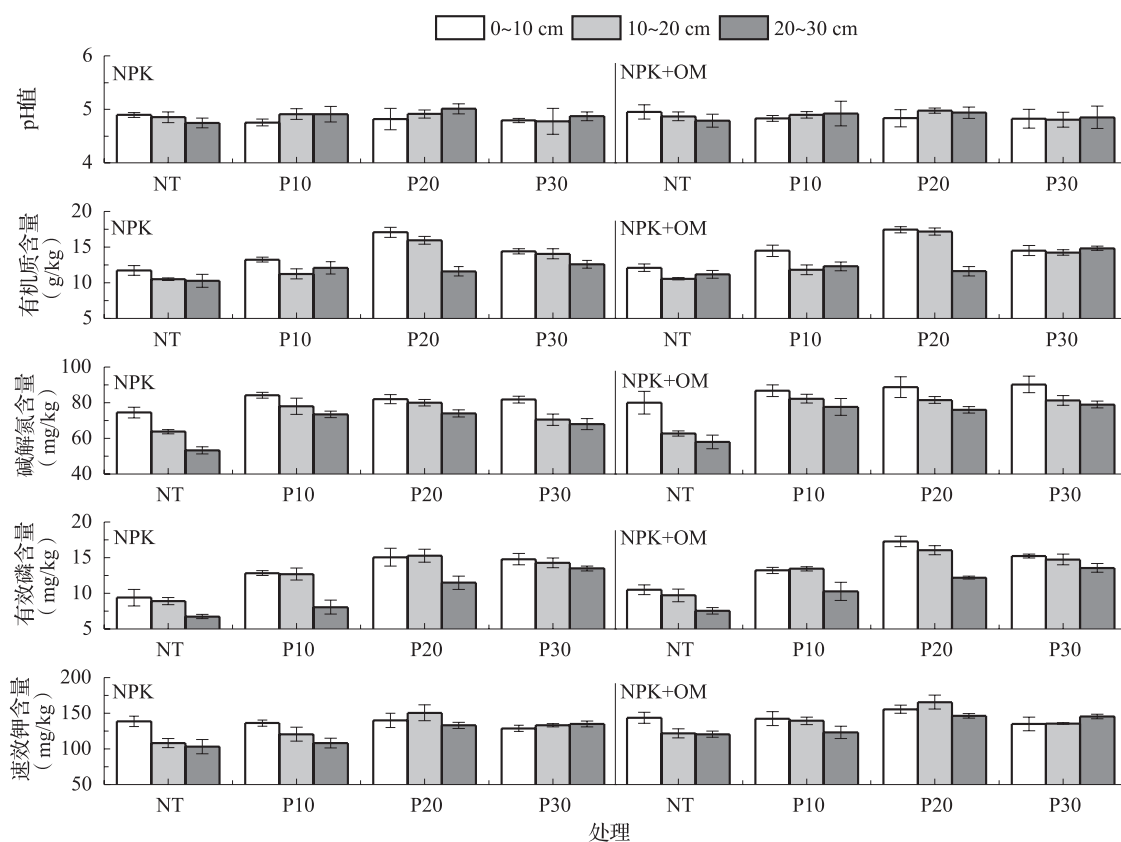


图1 耕作深度及培肥方式对土壤化学性质的影响

2.2 耕作深度及培肥方式对土壤物理性质的影响

如图2所示, 0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 30、30 ~ 40 cm 土层土壤容重分别为 1.20、1.29、1.39、1.37 g/cm³。方差分析表明, 耕作深度对 0 ~ 40 cm 土层土壤容重存在显著影响 ($P < 0.05$)。从耕作深度处理来看, 不同耕作深度各土层的大小顺序依次为: $P20 < P30 < NT \approx P10$ (0 ~ 10 cm), $P20 < P30 < NT < P10$

(10 ~ 20 cm), $P30 < NT < P10 < P20$ (20 ~ 30 cm), $NT \approx P10 \approx P20 < P30$ (30 ~ 40 cm); 与 NT 相比, 耕作处理 (P10、P20、P30 处理) 均造成了对应耕作深度下层土壤容重明显增加的现象, 如: NT 处理下 10 ~ 20、20 ~ 30、30 ~ 40 cm 土层土壤容重分别比上一土层高 3.26%、5.18%、-2.28%, 而 P10 处理 10 ~ 20 cm 土层土壤容重比上一土层高 12.04%, P20

处理 20 ~ 30 cm 土层土壤容重比上一土层高 15.63%, P30 处理 30 ~ 40 cm 土层土壤容重比上一土层高 6.55%, 说明耕作处理 (P10、P20、P30) 造成了对

应耕作深度下层的土壤压实现象。从培肥方式来看, NPK+OM 培肥方式 0 ~ 40 cm 土壤容重平均比 NPK 培肥方式低 0.93%, 但差异不显著 ($P < 0.05$)。

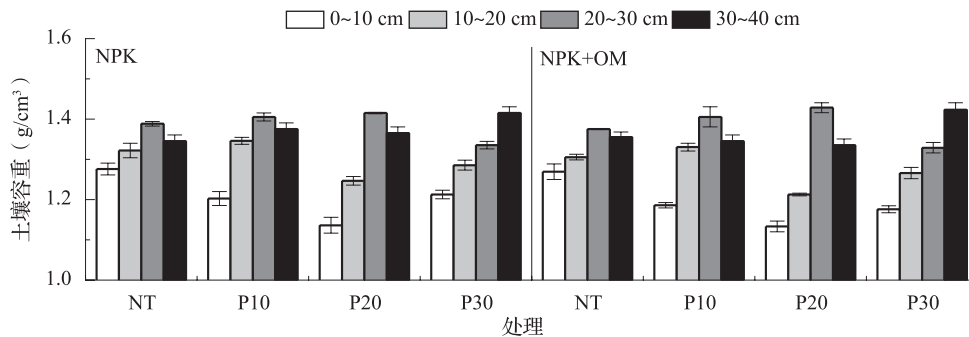


图2 耕作深度及培肥方式对土壤容重的影响

如图3所示, 0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 30、30 ~ 40 cm 土层土壤非毛管孔隙度分别为 10.76%、9.78%、7.44%、8.01%。方差分析表明, 耕作深度对 0 ~ 40 cm 土层土壤非毛管孔隙度存在极显著影响 ($P < 0.01$), 而培肥方式对 0 ~ 40 cm 土层土壤非毛管孔隙度不存在显著影响 ($P > 0.05$)。与 NT 相比, 耕作处理 (P10、P20、P30) 增加对应耕作深度土层的非毛管孔隙度, 但 P20、P30 处理造成了对应耕作深度下一土层土壤非毛管孔隙度的明显下降现象, 说明耕作造成对应耕作深度下一土层的土壤压实使非毛管孔隙度的明显下降。与 NPK 培肥方式相比, NPK+OM 培肥方式提高了

0 ~ 40 cm 土层土壤非毛管孔隙度, 平均提高 2.32% (增幅)。

不同耕作深度处理下 0 ~ 40 cm 土层土壤毛管孔隙度随土层变化规律各异, 平均为 40.53% (图3)。方差分析表明, 耕作深度对 0 ~ 40 cm 土层土壤毛管孔隙度存在极显著影响 ($P < 0.01$), 与 NT 处理相比, 耕作处理 (P10、P20、P30) 均降低了对应耕作深度土层土壤毛管孔隙度, 但 P10、P20 处理对应耕作深度下层土壤毛管孔隙度有所增加。与 NPK 培肥方式相比, NPK+OM 培肥方式一定程度提高了 0 ~ 40 cm 土层土壤毛管孔隙度 (提高 0.69%), 但两种培肥方式间差异不显著 ($P > 0.05$)。

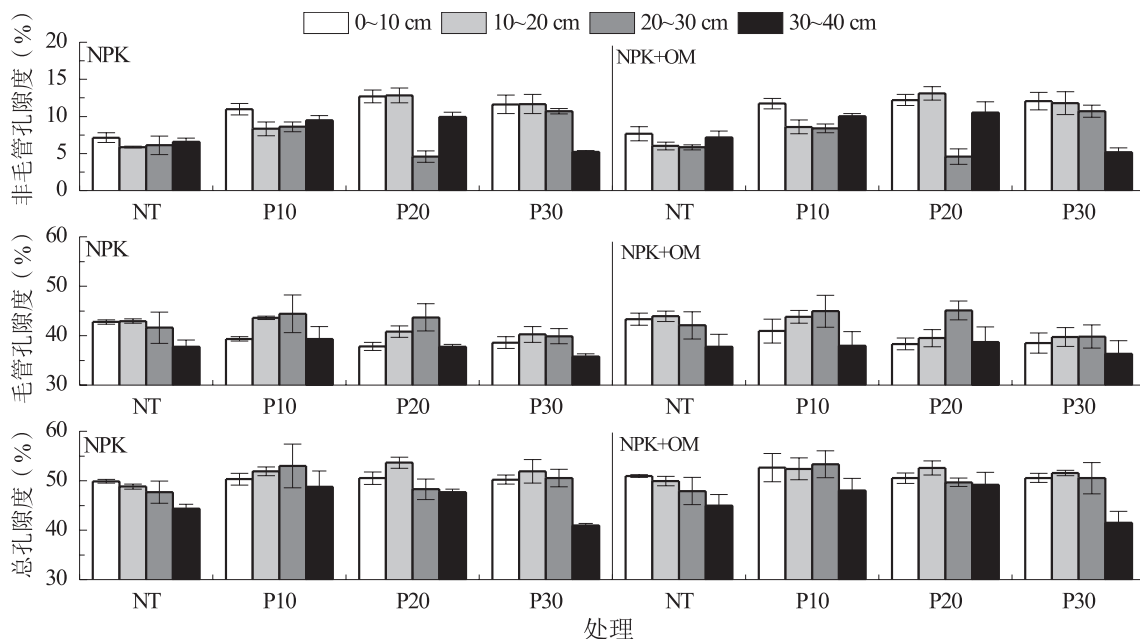


图3 耕作深度及培肥方式对土壤孔隙度的影响

各处理 0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 30、30 ~ 40 cm 土层土壤总孔隙度分别为 50.71%、51.60%、50.13%、45.68%。耕作深度对 0 ~ 40 cm 土层土壤总孔隙度存在极显著影响 ($P < 0.01$), 其中: 0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 30 cm 3 个土层土壤总孔隙度表现为耕作处理 (P10、P20、P30) 高于 NT 处理, 平均高 4.35%, 说明耕作有利于土壤总孔隙度的提高; 在 30 ~ 40 cm, 土壤总孔隙度以 P30 最低, 平均比其它 3 个处理低 14.40%。NPK+OM 培肥方式下 0 ~ 40 cm 土层土壤总孔隙度为 49.77%, 比 NPK 培肥方式高 0.98%, 但两种培肥方式间差异不显著 ($P > 0.05$)。

如图 4 所示, 0 ~ 40 cm 土层土壤最大持水量介于 291.43 ~ 443.92 g/kg。方差分析表明, 耕作深度对 0 ~ 40 cm 土层土壤最大持水量存在极显著影响 ($P < 0.01$)。不同耕作深度处理下 0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 30、30 ~ 40 cm 土层土壤最大持水量分别以 P20、P20、P30、P20 处理最高, 以 NT、P10、P20、P30 最低; 与 NT 处理相比, 耕作处理 (P10、P20、P30) 土壤最大持水量在对应耕作深度下层出现了显著下降的现象。从培肥方式来看, NPK+OM 培肥措施 0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 30、30 ~ 40 cm 土层土壤最大持水量平均为 419.25、385.46、351.44、324.13 g/kg, 分别比 NPK 处理高 3.01%、2.29%、1.29%、1.68%, 两种培肥方式下 0 ~ 40 cm 土层土壤最大持水量差异不显著 ($P > 0.05$)。

土壤毛管持水量呈现随土层深度增加而降低的变化趋势, 0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 30、30 ~ 40 cm 土层土壤毛管持水量分别为 333.20、324.39、310.52、273.20 g/kg。方差分析表明, 耕作深度对 0 ~ 40 cm 土层土壤毛管持水量存在显著影响 ($P < 0.05$)。从耕作深度处理来看, 各土层土壤毛管持水量均以 P30 处理最低, 平均比 NT、P10、P20 处理低 5.46%、5.66%、5.31%。从培肥方式来看, NPK、NPK+OM 培肥方式下 0 ~ 40 cm 土层土壤毛管持水量分别为 308.21、313.45 g/kg, 两种培肥方式下 0 ~ 40 cm 土层土壤毛管持水量不存在显著差异 ($P > 0.05$)。

如图 4 所示, 0 ~ 40 cm 土壤田间持水量平均为 297.12 g/kg, 呈现随土层深度增加而降低趋势。方差分析表明, 耕作深度及培肥措施对 0 ~ 40 cm 土层土壤田间持水量无显著影响 ($P > 0.05$)。从耕作深度处理来看, 各土层土壤田间持水量均以 P30 处理最低, 其中 0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 30 cm 土层土壤田间持水量均以 P20 处理最高, 比 NT、P10、P30 处理高 0.28%、4.28%、4.21%; 20 ~ 30 cm 土层土壤田间持水量以 NT、P20 相对较高, P30 处理最低; 30 ~ 40 cm 土层土壤田间持水量以 NT 处理最高, 比 P10、P20、P30 高 1.18%、0.37%、2.21%; 从培肥方式来看, NPK+OM 培肥方式下 0 ~ 40 cm 土层土壤田间持水量比 NPK 处理高 1.75%。

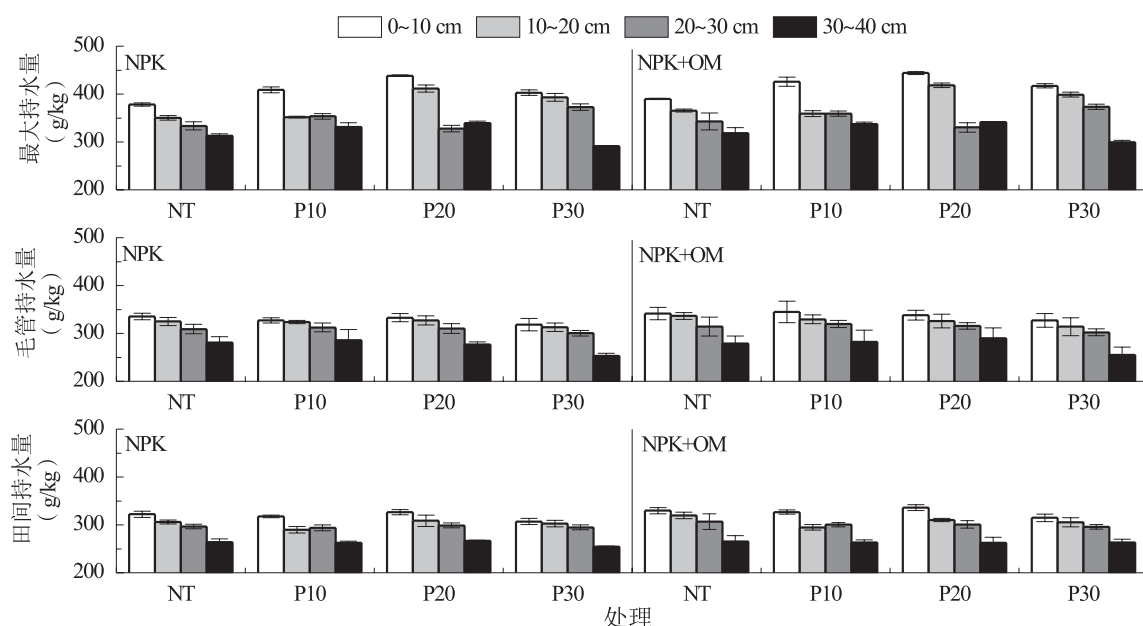


图 4 耕作深度及培肥方式对土壤持水量的影响

2.3 耕作深度及培肥方式对作物产量的影响

方差分析表明,耕作深度及培肥方式对作物产量存在极显著影响 ($P<0.01$)。对花生(2016年)、红薯(2017年)产量分析发现,不同耕作深度处理花生、红薯产量均以P20处理最高,NT处理最低。从培肥方式来看,NPK+OM培肥方式下作物产量平均比NPK培肥方式高6.70%;虽然耕作深

度及培肥方式对作物产量不存在显著的交互作用,但NPK+OM培肥方式结合不同耕作深度对作物的增产效果并不一致,在NPK+OM培肥方式结合NT处理增产效果最佳(红薯增产14.11%,花生增产16.85%),P20处理次之(红薯增产11.90%,花生增产7.31%),P30处理最差(红薯增产3.47%,花生增产1.88%)。

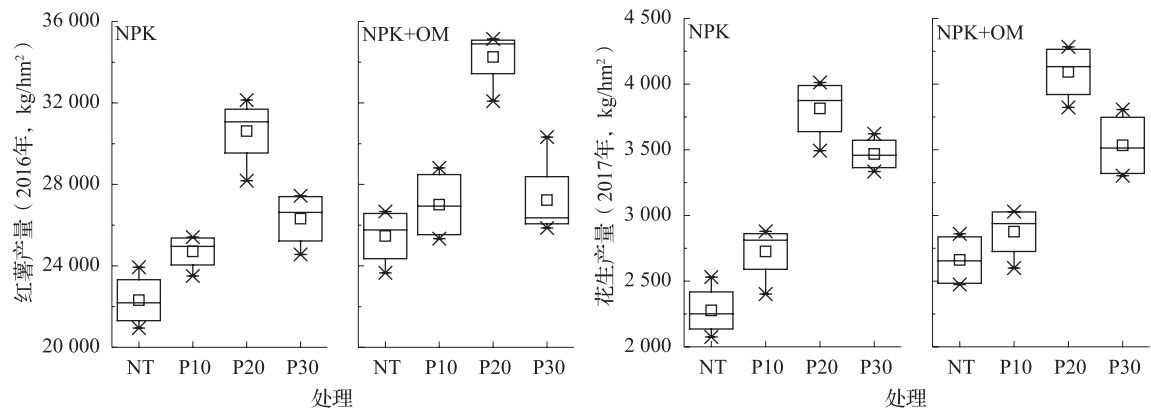


图5 耕作深度及培肥方式对作物产量的影响

2.4 耕作深度及培肥方式对耕层土壤质量的影响

首先,对0~10、10~20 cm两个土层的土壤理化性质进行加权平均值作为评价红壤坡耕地耕层质量的指标,并选取加权后的0~20 cm土层土壤pH值(X_1)、有机质含量(X_2)、碱解氮含量

(X_3)、有效磷含量(X_4)、速效钾含量(X_5)、土壤容重(X_6)、毛管孔隙度(X_7)、非毛管孔隙度(X_8)、总孔隙度(X_9)、最大持水量(X_{10})、毛管持水量(X_{11})、田间持水量(X_{12})进行相关性分析,结果如表5所示。

表5 土壤理化性质之间的相关系数

指标	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}
X_1	1											
X_2	0.02	1										
X_3	0.05	0.58**	1									
X_4	-0.17	0.84**	0.69**	1								
X_5	0.17	0.75**	0.49**	0.64**	1							
X_6	-0.02	-0.93**	-0.63**	-0.84**	-0.78**	1						
X_7	-0.24	0.85**	0.62**	0.93**	0.57**	-0.82**	1					
X_8	0.30*	-0.80**	-0.51**	-0.83**	-0.43**	0.78**	-0.85**	1				
X_9	0.01	0.39**	0.41**	0.50**	0.43**	-0.37**	0.60**	-0.09	1			
X_{10}	0.00	0.92**	0.58**	0.86**	0.77**	-0.94**	0.89**	-0.75**	0.55**	1		
X_{11}	0.11	-0.25*	-0.24	-0.24*	-0.07	0.14	-0.31*	0.45**	0.10	-0.20	1	
X_{12}	0.51**	0.17	-0.11	-0.12	0.42**	-0.26*	-0.18	0.21	-0.03	0.28*	0.20	1

注: **表示0.01水平相关显著; *表示0.05水平相关显著。

然后，对加权平均后的指标进行主成分分析（表 6），根据指标间的相关性及主成分的结果，最终确定非毛管孔隙度、速效钾、田间持水量、总孔隙度进入土壤质量综合评价的最小数据集，根据各指标公因子方差，4 个指标的权重依次为 0.256、0.281、0.254、0.209。

表 6 主成分载荷矩阵及综合荷载值

指标	主成分 1	主成分 2	主成分 3	分组	综合荷载值
有机质	0.366	0.072	-0.124	1	0.955
碱解氮	0.278	-0.037	0.088	1	0.722
有效磷	0.366	-0.108	0.086	1	0.958
容重	-0.366	-0.126	0.098	1	0.963
最大持水量	0.373	0.123	-0.002	1	0.974
非毛管孔隙度	0.367	-0.162	0.132	1	0.982
毛管孔隙度	-0.323	0.270	0.278	1	0.962
pH 值	-0.029	0.522	-0.187	2	0.777
速效钾	0.297	0.312	-0.019	2	0.883
田间持水量	0.024	0.614	-0.256	2	0.921
毛管持水量	-0.113	0.307	0.560	3	0.798
总孔隙度	0.204	0.103	0.672	3	0.903
特征值	6.612	2.043	1.150	—	—
方差贡献率 (%)	55.098	17.026	9.579	—	—
累计贡献率 (%)	55.098	72.124	81.703	—	—

根据以上最小数据集及各指标权重，利用隶属度函数，算出最终土壤质量指数如图 6 所示。由图 6 可知，不同耕作深度处理下 2016 和 2017 年度土壤质量指数均以 P20 处理最大，P10、P30 处理次之，NT 处理最小。从培肥方式来看，NPK+OM 培肥措施下土壤质量指数平均为 0.57，比 NPK 培肥方式高 32.62%。一般而言，土壤质量指数 $SQI \geq 0.5$ 为土壤质量中等以上水平，NPK 培肥方式下仅 P20 处理红壤坡耕地耕层土壤质量达到中等及以上水平，而通过结合 NPK+OM 培肥方式 P10、P30 处理可进一步提高耕层土壤质量，但对土壤质量提升效果有限。

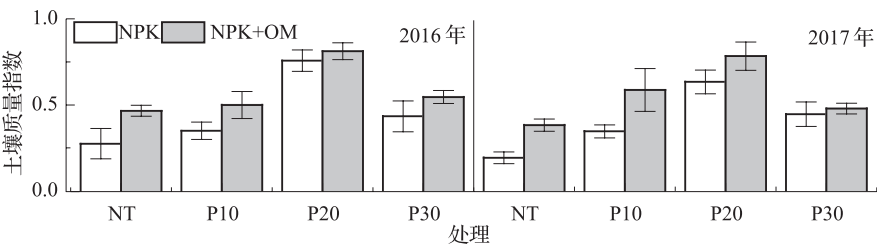


图 6 不同耕作深度及培肥方式下的耕层（0 ~ 20 cm）土壤质量指数

进一步分析土壤质量与作物产量的相关性（图 7）发现，2016 年红薯产量以及 2017 年度花生产量与土壤质量指数均呈极显著正相关（ $P<0.01$ ），线性方程分别为： $Y=17\,413.99X+18\,231.37$ 、 $Y=2\,481.98X+1\,987.02$ 。

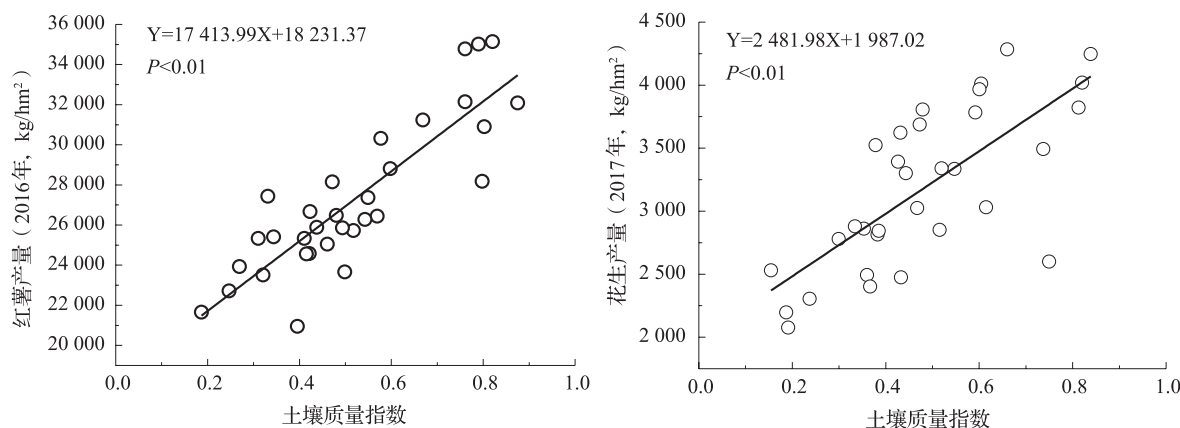


图7 作物产量与土壤质量指数的相关性

3 讨论

3.1 耕作深度及培肥措施对土壤肥力的影响

耕作深度处理对土壤 pH 值、有机质、速效养分存在显著或极显著影响,证明了耕作深度对土壤养分的影响极为重要。虽然不同耕作深度处理下各土层间土壤 pH 值差异不显著,但耕作深度处理间 0 ~ 30 cm 土层土壤 pH 值差异显著,这与耕作使土壤翻动、重新分配进而影响 pH 值有关,尤其是 P30 处理下,0 ~ 30 cm 土层土壤 pH 值变异系数最小,说明了深翻造成剖面土壤 pH 值分布均匀,体现了耕作扰动对土壤 pH 值的影响。有研究表明,翻耕条件下,有机物料容易进入土壤,而浅耕、免耕条件,土壤扰动较小,有机物料容易滞留在表层,不利于进入土层^[18-19]。本研究中 0 ~ 30 cm 土层土壤平均有机质含量以 NT、P10 处理较低,P20、P30 处理相对较高,与上述结论一致;但 P20、P30 处理间 0 ~ 30 cm 土层土壤有机质呈现不同分布特点,具体为:P20 处理下 0 ~ 10、10 ~ 20 cm 两个土层土壤有机质含量差异较小,均显著高于 20 ~ 30 cm 土层;而 P30 处理 0 ~ 30 cm 土层土壤有机质分布相对均匀,且 0 ~ 10、10 ~ 20 cm 两个土层土壤有机质含量显著低于 P20 处理,这与翻耕条件下土壤每年进行上下层换位,使有机质较均匀地分布在对应耕作深度土层有关。大量研究表明,浅耕、免耕易造成土壤养分在表层聚集^[20-21],本研究结果显示,NT、P10 处理下 0 ~ 30 cm 土层土壤碱解氮、有效磷、速效钾含量呈现随土层深度增加而减少分布规律,且变异系数相对较高,呈现了表聚化现象;另外,免耕、浅耕处理下,表层土壤养分要高于翻耕处理,而中、低层土壤养分含量要低于翻耕处理^[22-23],

本研究结果表明,NT、P10 处理 10 ~ 20、20 ~ 30 cm 两个土层土壤速效养分含量均低于 P20、P30 处理,与上述结论一致;但 0 ~ 10 cm 土层土壤碱解氮、有效磷含量表现为 NT、P10 处理下均低于 P20、P30 处理,原因在于:南方红壤区降水丰富,降水中有 88.62% 属于侵蚀性降水且主要集中在 4 ~ 8 月^[24],而免耕、浅耕处理下化肥施入耕层的深度有限,且耕层对雨水的蓄纳能力相对弱,产流作用相对明显,造成 NT、P10 处理 0 ~ 10 cm 土层氮、磷随地表径流及泥沙带走的量要高于 P20、P30 处理。与土壤碱解氮、有效磷的分布规律不同,不同耕作深度处理 0 ~ 30 cm 土层土壤速效钾含量表现为 0 ~ 10 cm 差异不大,10 ~ 20、20 ~ 30 cm 土层表现为 NT、P10 处理低于深翻处理(P20、P30),原因是红壤呈酸性,钾肥施入土壤后,主要以有效态(或水溶态)形式存在,转化为吸附态的比例很少,使得土壤中的钾素比氮素、磷素更容易发生迁移^[25]。由于表层土壤受降水影响较大,不同耕作深度处理下钾素均较容易发生迁移,使各耕作深度处理下 0 ~ 10 cm 土层钾素差异较小,区别在于:土壤扰动大的处理(P20、P30)表层土壤钾素比 NT、P10 处理更容易向下迁移,并在对应耕作深度的底部积累,这是造成 P20、P30 处理 10 ~ 20、20 ~ 30 cm 土壤速效钾含量相对较高的原因之一。除受迁移影响外,0 ~ 30 cm 土壤速效养分分布还受耕作造成土壤重新分配的影响,如:P20 处理土壤速效养分主要分布在 0 ~ 20 cm 土层,P30 处理土壤有效磷和速效钾在 0 ~ 30 cm 土层呈现均匀化现象。然而,P30 处理下 0 ~ 30 cm 土层土壤碱解氮含量并没有呈现均匀化现象,可能与花生的固氮作用^[26]及氮沉降^[27]对表层土壤提供了氮素有关。有机肥有机质

含量丰富、养分多为有机结合态,肥效缓、养分不易流失,并提高土壤养分库容总量以及速效养分的缓冲容量^[28]。本研究发现,与NPK培肥方式相比,NPK+OM培肥方式显著或极显著提高了0~30 cm土层土壤有机质、速效养分含量,与上述结论一致;但两培肥方式下土壤pH值差异不显著,原因在于:红壤缓冲性较强,短期内的有机无机培肥方式难以显著改变土壤酸碱度。

3.2 耕作深度及培肥方式对土壤物理性质的影响

研究表明,耕作深度可对土壤容重、土壤孔隙状况等产生直接影响^[6, 29]。本研究结果表明,与免耕相比,其它处理均降低了对应耕作深度的土壤容重,证实上述结论。但耕作处理(P10、P20、P30)对应耕作深度下层土壤容重较免耕有所增加,这与旋耕、翻耕切削土壤对下层土壤造成一定挤压有关^[30]。免耕等保护性耕作措施对孔隙度结构的影响主要表现在减少非毛管孔隙数量,维持土壤毛管孔隙度的稳定^[31]。与NT处理相比,耕作处理(P10、P20、P30)增加了对应耕作深度土层土壤非毛管孔隙度,降低了对应耕作深度土层土壤毛管孔隙度,与上述研究结论一致;另外,P10、P20处理降低了对应耕作深度土层土壤毛管孔隙度,这与一定程度内挤压造成大孔隙减少、小孔隙度增加有关^[32],但P30处理下30~40 cm土层土壤毛管孔隙度较NT处理有所降低,这是因为30~40 cm土层土壤熟化程度低,本身土壤容重较高,进一步挤压会造成土壤密实、土壤毛管孔隙破坏。相关性分析发现土壤最大持水量、土壤毛管持水量与土壤非毛管孔隙度、毛管孔隙度呈显著或极显著相关性,证实了不同耕作深度通过影响土壤孔隙状况进而影响土壤持水性能,但田间持水量与土壤孔隙度不呈显著相关性,这与田间持水量还受土壤有机质、质地等因素影响有关,具体原因还有待于进一步研究。有机质是形成土壤团粒结构的粘合剂,对改善土壤通透性至关重要,施用有机肥可以降低土壤容重,增加土壤孔隙度,增强土地保水和供水能力^[33]。本研究中,与NPK培肥方式相比,NPK+OM培肥方式改善土壤容重、孔隙度、持水性能等土壤物理性质,说明了有机无机配施在改善红壤坡耕地土壤物理性质方面的重要作用,但由于试验年限较短,两种培肥方式下土壤物理性质并不存在显著差异。

3.3 耕作深度及培肥方式对作物产量的影响

大量研究结果表明,在我国北方干旱区实施免

耕等保护性耕作措施可以提高作物产量^[34-35],水分是该区域影响产量高低的主要因素,免耕可以提高土壤水分涵养,有利于促进产量的形成。但本研究对象为红壤坡耕地,处在南方红壤区,降水资源丰富,红壤本身存在粘重、板结等原生障碍因子是作物生长发育的主要限制因子。因此,在没有其它措施(如生物钻孔、添加改良剂等)的辅助下,免耕可进一步加剧红壤的板结,不利于改善耕层结构、影响根系生长和养分吸收范围以及降低花生出苗率和红薯种苗存活率,导致作物产量降低;耕作处理通过改善土壤理化性质,进而促进作物生长和产量的形成^[31, 36],本研究中耕作处理(P10、P20、P30)提高了作物产量,证实耕作在促进产量方面的重要性。基于作物产量考虑,不同的区域合理耕作深度并不一致^[6, 29],本研究中作物产量以P20处理最高,这与区域土层结构、养分分布及作物生长需求关系密切。调查表明,红壤坡耕地土壤养分主要分布在0~20 cm土层,如0~20 cm土层土壤有机质含量比20~30 cm土层高52.94%,耕作深度超过20 cm,土层上下翻动可造成耕层土壤养分的稀释,同时将底层土壤熟化程度较低的翻至耕层,不利于耕层土壤物理性质的改善,且区域主要种植的作物为红薯、花生等,不像甘蔗等作物需要较深耕作深度才能满足其生长发育,因而,本研究认为红壤坡耕地合理的耕作深度为20 cm左右。研究表明,有机培肥或有机无机配施可提高作物产量^[37],本研究中通过有机无机配施显著($P<0.05$)提高了作物产量,与相关研究结论一致。而不同耕作深度下NPK+OM培肥方式增产效果不一致,与NPK培肥方式相比,NPK+OM培肥方式下作物产量平均提高8.79%,在耕作处理(P10、P20、P30)中,以NPK+OM培肥结合P20处理增产效果最佳,作物产量平均提高9.60%。说明有机无机培肥是影响红壤坡耕地作物产量的重要因素,且结合不同耕作深度对产量的提升效果并不一致。这对红壤坡耕地耕作、培肥、增效的有机结合提供了理论支撑依据。

3.4 耕作深度及培肥措施对土壤质量的影响

本研究利用土壤质量综合评价方法分析了红壤坡耕地不同耕作深度及培肥方式下的土壤质量变化,结果显示:不同耕作深度下土壤质量指数以P20处理最高;从培肥方式来看,与NPK培肥方式相比,NPK+OM培肥方式可以提高耕层土壤质量,

平均提高 43.05%，这与 P20 处理及 NPK+OM 培肥方式对土壤有机质、速效养分及部分土壤物理性质的改善作用有关。进一步分析相关性发现，作物产量与耕层土壤质量呈极显著正相关，表明耕作深度及培肥方式通过影响耕层土壤质量可对作物产量造成影响，也说明采用土壤质量综合评价方法对耕层土壤质量进行评价可反映一定红壤坡耕地生产力，对于指导红壤坡耕地耕层土壤质量评价及评价指标的选取具有一定的指导意义。

4 结论

与 NT 处理相比，P10、P20、P30 提高了 0 ~ 30 cm 土层土壤有机质、速效养分含量，尤其以 P20 处理下耕层（0 ~ 20 cm）土壤养分积累效果最佳；改善了对应耕作深度土层的土壤物理性质，但 P10、P20、P30 处理造成对应耕作深度下层土壤的压实现象不容忽视；不同耕作深度处理花生、红薯产量均以 P20 处理最高，NT 处理最低。与 NPK 培肥方式相比，NPK+OM 培肥方式有利于 0 ~ 30 cm 土层土壤有机质、速效养分含量的提高、0 ~ 40 cm 土层土壤物理性质的改善及作物产量的提高；与 NPK 培肥方式相比，NPK+OM 培肥方式结合不同耕作深度对作物的增产效果并不一致，与 P10、P20、P30 处理相结合时，以 NPK+OM 结合 P20 处理的增产效果最明显（增产 9.60%）。

利用土壤质量综合评价方法对耕层土壤质量进行评价，不同耕作深度处理下土壤质量指数以 P20 处理最高，NPK+OM 培肥方式下耕层土壤质量显著高于 NPK 培肥方式。且作物产量与耕层土壤质量呈极显著正相关，表明耕作深度及培肥方式通过影响耕层土壤质量进而影响作物产量的形成。

参考文献：

- [1] 刘志鹏, 史东梅, 金慧芳, 等. 红壤坡耕地耕层土壤质量特征及障碍因素研究 [J]. 中国土壤与肥料, 2018, (3): 7-13, 41.
- [2] 李小飞, 孙永明, 叶川, 等. 不同耕作深度对茶园土壤理化性状的影响 [J]. 南方农业学报, 2018, 49 (5): 877-883.
- [3] 王馨卉. 不同耕作深度对水稻生长和土壤养分的影响 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2018.
- [4] Yao S, Teng X, Zhang B. Effects of rice straw incorporation and tillage depth on soil puddlability and mechanical properties during rice growth period [J]. Soil and Tillage Research, 2015, 146: 125-132.
- [5] 胡心意. 有机物料和耕作深度对稻田耕层土壤生物学性状的影响 [D]. 杭州: 浙江农林大学, 2018.
- [6] 罗俊, 林兆里, 阙友雄, 等. 耕作深度对蔗地土壤物理性状及甘蔗产量的影响 [J]. 应用生态学报, 2019, 30 (2): 405-412.
- [7] Gronle A, Lux G, Böhme H, et al. Effect of ploughing depth and mechanical soil loading on soil physical properties, weed infestation, yield performance and grain quality in sole and intercrops of pea and oat in organic farming [J]. Soil & Tillage Research, 2015, 148: 59-73.
- [8] Reicosky D C, Archer D W. Moldboard plow tillage depth and short-term carbon dioxide release [J]. Soil & Tillage Research, 2007, 94 (1): 109-121.
- [9] 徐明岗, 李冬初, 李菊梅, 等. 化肥有机肥配施对水稻养分吸收和产量的影响 [J]. 中国农业科学, 2008, 41 (10): 3133-3139.
- [10] 黄东风, 王利民, 李卫华, 等. 培肥措施培肥土壤的效果与机理研究进展 [J]. 中国生态农业学报, 2014, 22 (2): 127-135.
- [11] 李春喜, 杨杰瑞, 张黛静, 等. 不同耕作和培肥模式对豫中冬小麦田土壤腐殖质及微生物区系的影响 [J]. 生态环境学报, 2014, 23 (2): 183-187.
- [12] 郭魏. 不同耕作和培肥模式下豫中麦田土壤微生物和腐殖质的研究 [D]. 新乡: 河南师范大学, 2013.
- [13] LY/T 1215-1999, 森林土壤水分-物理性质的测定 [S].
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [15] 贡璐, 张雪妮, 冉启洋. 基于最小数据集的塔里木河上游绿洲土壤质量评价 [J]. 土壤学报, 2015, 52 (3): 682-689.
- [16] 金慧芳, 史东梅, 陈正发, 等. 基于聚类及 PCA 分析的红壤坡耕地耕层土壤质量评价指标 [J]. 农业工程学报, 2018, 34 (7): 155-164.
- [17] 吴玉红, 田霄鸿, 池文博, 等. 机械化保护性耕作条件下土壤质量的数值化评价 [J]. 应用生态学报, 2010, 21 (6): 1468-1476.
- [18] 朱杰, 牛永志, 高文玲, 等. 秸秆还田和土壤耕作深度对直播稻田土壤及产量的影响 [J]. 江苏农业科学, 2006, (6): 388-391.
- [19] 杨艳, 刘丹, 张霞, 等. 渭北旱塬不同耕作措施对土壤养分分布及作物产量的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36 (1): 171-178.
- [20] Franzluebbers A J, Schomberg H H, Endale D M. Surface-soil responses to para plowing of long-term no-tillage cropland in the Southern Piedmont USA [J]. Soil & Tillage Research, 2007, 96 (1-2): 303-315.
- [21] 张英英, 施志国, 李彦荣, 等. 不同耕作方式对民勤绿洲耕层土壤理化性状及重金属含量的影响 [J]. 生态环境学报, 2019, 28 (1): 207-214.
- [22] 冯跃华, 邹应斌, 王淑红, 等. 免耕对土壤理化性状和直播稻生长及产量形成的影响 [J]. 作物研究, 2004, 18 (3): 137-140.

- [23] 王昌全, 魏成明, 李廷强, 等. 不同免耕方式对作物产量和土壤理化性状的影响 [J]. 四川农业大学学报, 2001, 19 (2): 152-154, 187.
- [24] 牛德奎. 华南红壤丘陵区崩岗发育的环境背景与侵蚀机理研究 [D]. 南京: 南京林业大学, 2009.
- [25] 洪仁辉. 氮、磷、钾素在土壤中垂直运移研究现状 [J]. 热带林业, 2011, 39 (2): 14-17, 13.
- [26] 雍太文, 陈平, 刘小明, 等. 减量施氮对玉米-大豆套作系统土壤氮素氨化、硝化及固氮作用的影响 [J]. 作物学报, 2018, 44 (10): 67-77.
- [27] 崔健, 周静, 杨浩, 等. 大气氮沉降向典型红壤区农田生态系统定量输入研究 [J]. 环境科学, 2009, 30 (8): 2221-2226.
- [28] 李燕青. 不同类型有机肥与化肥配施的农学和环境效应研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.
- [29] 邹文秀, 陆欣春, 韩晓增, 等. 耕作深度及秸秆还田对农田黑土土壤供水能力及作物产量的影响 [J]. 土壤与作物, 2016, 5 (3): 141-149.
- [30] 郭志军, 佟金, 任露泉, 等. 耕作部件-土壤接触问题研究方法分析 [J]. 农业机械学报, 2001 (4): 102-104, 112.
- [31] 郑祥楠. 耕作深度与秸秆还田对土壤性状及作物生长的影响 [D]. 昆明: 云南农业大学, 2017.
- [32] 杨金玲, 张甘霖, 赵玉国, 等. 城市土壤压实对土壤水分特征的影响——以南京市为例 [J]. 土壤学报, 2006, 43 (1): 33-38.
- [33] 曹靖, 胡恒觉. 不同肥料组合对冬小麦水分供需状况的研究 [J]. 应用生态学报, 2000, 11 (5): 713-717.
- [34] 罗珠珠, 蔡立群, 李玲玲, 等. 长期保护性耕作对黄土高原旱地土壤养分和作物产量的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33 (3): 171-176.
- [35] 杨晶, 沈禹颖, 南志标, 等. 保护性耕作对黄土高原玉米-小麦-大豆轮作系统产量及表层土壤碳管理指数的影响 [J]. 草业学报, 2010, 19 (1): 75-82.
- [36] 张亚运. 不同耕作深度对土壤结构及小麦玉米周年产量的影响 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2017.
- [37] 孙凯, 刘振, 胡恒宇, 等. 有机培肥与轮耕方式对夏玉米田土壤碳氮和产量的影响 [J]. 作物学报, 2019, 45 (3): 401-410.

Effects of tillage depths and fertilizing patterns on soil physical-chemical properties and crop yield in red soil slop field

HUANG Shang-shu¹, ZHONG Yi-jun^{1, 2}, HUANG Qian-ru¹, WU Lin¹, HE Shao-lang¹, CHENG Yan-hong¹, ZHANG Kun¹, WU Yan¹, YE Chuan^{3*} (1. Jiangxi Institute of Red Soil, Nanchang Jiangxi 330046; 2. College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan Hubei 430070; 3. Jiangxi Sericulture and Tea Research Institute, Nanchang Jiangxi 330203)

Abstract: Aiming at the problem of poor tilth soil in red soil slope field, the effects of tillage depth and fertilization methods on soil physical and chemical properties, crop yield and soil quality of tilth soil were studied. The physical-chemical properties of soil were observed and the quality of tilth soil was evaluated under the split plot experiment, which no-tillage (NT), ploughing 10 cm (P10), ploughing 20 cm (P20), ploughing 30 cm (P30) were set up as main treatments, and chemical fertilizer (NPK), organic-inorganic fertilizer (NPK+OM) as auxiliary treatment. Results showed that: (1) Compared with NT treatment, P10, P20 and P30 treatments increased the content of soil organic matter and available nutrients in 0 ~ 30 cm soil layer, and the accumulation effects of soil organic matter and available nutrients in 0 ~ 20 cm soil layer under P20 treatment were the best; Meanwhile, P10, P20 and P30 treatments also improved the physical properties of soil in corresponding tillage depth (except soil water holding capacity), but caused the phenomenon of soil compaction under the corresponding tillage depth. The yields of peanut and sweet potato were the highest at P20 treatment under different tillage depths, which were averagely 47.96%, 33.29% and 17.05% higher than NT, P10 and P30 treatments. (2) Compared with NPK fertilizing patterns, NPK+OM fertilizing patterns was beneficial to maintaining the stability of soil organic matter and available nutrients content in 0 ~ 30 cm soil layers, improving soil physical properties in 0 ~ 40 cm soil layers to a certain extent, and increasing crop yield (increased by 6.70%). However, the increasing effects of NPK+OM fertilizing patterns combined with different tillage depths treatments on crop yield were not consistent; under the treatments of P10, P20 and P30, NPK+OM combined with P20 treatment had the best yield increase (increased by 9.60%). (3) The evaluation results of soil quality under different treatments showed that the tilth soil quality index under different tillage depths was the highest at P20 treatment, and NPK+OM fertilizing pattern was higher than NPK fertilizing pattern under two fertilizing patterns. Further analysis showed that crop yield was extremely significant correlated with the tilth soil quality index, indicating that different tillage depths and fertilizing pattern affected the formation of crop yield by affecting the tilth soil quality. For red soil slop field which planting typical crops, the tillage depth of 20 cm is more conducive to the accumulation of organic matter and available nutrients content on the basis of improving the physical properties of the tilth soil, and makes the crop obtain higher yield, and combining with organic-inorganic fertilizer can further obtain better yield-increasing effect, which provides support for the rational construction of the tillage layer in red soil slop field.

Key words: red soil slop field; tillage depths; fertilizing patterns; soil physical-chemical properties; crop yield