

长期不同施肥处理红壤旱地剖面养分分布差异

李大明, 柳开楼, 叶会财, 胡志华, 余喜初, 徐小林, 杨旭初,
周利军, 胡秋萍, 胡惠文, 黄庆海*

(江西省红壤研究所/农业部江西耕地保育科学观测实验站, 江西南昌 331717)

摘要: 【目的】研究长期不同施肥措施下红壤旱地的培肥效果、养分迁移特征以及环境风险, 对制定红壤旱地合理的养分管理和培肥技术, 促进畜禽粪便的循环利用具有重要意义。【方法】依托始于 1986 年的红壤旱地肥料定位试验, 选取不施肥 (CK)、氮磷钾肥配施 (NPK)、2 倍氮磷钾肥配施 (2NPK)、有机肥 (OM) 和有机肥和氮磷钾肥配施 (NPKM) 5 个处理, 采集 0—10 cm、10—20 cm、20—40 cm、40—60 cm、60—80 cm、80—100 cm 土壤样品, 分析了 pH 值、有机质及氮磷钾养分含量。【结果】连续施肥 28 年后, 红壤旱地土壤有机质、全氮、碱解氮、全磷、有效磷、速效钾等含量均随着土壤深度增加逐步降低。与对照相比, 施用有机肥显著提高了 0—40 cm 土壤的 pH 值, 其余处理 pH 有所下降。长期施用化肥后, 红壤旱地土壤有效磷、全磷、碱解氮和全氮在 0—20 cm 耕层累积, 土壤速效钾的累积则达到 40 cm 深; 与化肥处理相比, 有机肥和有机无机肥配施处理 0—40 cm 土壤的全氮、碱解氮、速效钾、有效磷和全磷的含量显著增加, 土壤全氮和碱解氮的下移累积达到 40 cm, 而土壤全磷和有效磷的下移累积则达到了 60 cm。红壤旱地长期施用猪粪等有机肥主要增加了 0—40 cm 耕层土壤的磷素累积, 而在剖面 80 cm 以下未表现出明显累积现象。【结论】长期施用化肥 (28 年) 处理养分主要在 0—20 cm 红壤旱地耕层土壤累积, 而长期施用有机肥或有机无机肥配施还可以明显提高 20—40 cm 土壤养分含量, 养分下移累积作用明显。此外, 红壤旱地长期施用有机肥可以缓解耕层土壤的酸化、提高耕层土壤肥力水平, 是增加培肥深度的有效措施, 但是长期施用猪粪导致的氮磷下渗深度增加可能引起的环境风险也应引起重视。

关键词: 红壤旱地; 定位施肥; 有机肥; 土壤养分; 土壤酸化; 剖面分布

Differences of soil nutrient distribution in profiles under long-term fertilization in upland red soil

LI Da-ming, LIU Kai-lou, YE Hui-cai, HU Zhi-hua, YU Xi-chu, XU Xiao-lin, YANG Xu-chu,
ZHOU Li-jun, HU Qiu-ping, HU Hui-wen, HUANG Qing-hai*

(Jiangxi Institute of Red Soil/Scientific Observational and Experimental Station of Arable Land Conservation in Jiangxi,
Ministry of Agriculture, Nanchang 331717, China)

Abstract: 【Objectives】 Different fertilization measurements affect the moving down behaviors of soil nutrients in upland red soil. Clarifying the fertilization effects on improving soil fertility and possible environmental risk is necessary for formulating reasonable nutrient management and promoting the utilization of livestock and poultry manure. 【Methods】 Based on a 28-years' long-term fertilization field experiment in upland red soil since 1986, soil samples were collected from five treatments, including no fertilizer (CK), nitrogen, phosphorus and potassium fertilization (NPK), double usage amount of NPK fertilizers (2NPK), piggery manure (OM), and NPK plus manure (NPKM). Soil pH, the contents of organic matter, the total and available N, P and K were analyzed for every 20 cm depth of soil till 100 cm. 【Results】 The contents of soil organic matter, total N, alkali

收稿日期: 2017-07-21 接受日期: 2017-11-14

基金项目: 江西现代农业科研协同创新专项 (JXXTCX2015003-005); 江西省科技支撑计划项目 (20151BBF60060); 国家自然科学基金项目 (41671301) 资助。

联系方式: 李大明 E-mail: lid_2005@126.com; * 通信作者 黄庆海 E-mail: hqh0791@vip.sina.com

hydrolysable N, total P, available P and readily available K decreased gradually with the increase of soil depth. The soil pH showed the trend of increase first and then decrease with the increase of soil depth. Manure significantly increased soil pH of 0–40 cm depth. The contents of total K remained stable in 0–100 cm soil layers. In NPK and 2NPK treatments, the soil total N, alkali hydrolyzable N, total P and available P were mainly concentrated in the 0–20 cm soil layers, the readily available K reached 40 cm soil layers. Compared to NPK and 2NPK, soil nutrient contents moved deeper in treatments of NPKM and OM, the soil total N and alkali hydrolyzable N reached 40 cm in depth, while the soil total P and available P reached 60 cm. Pig manure increased the P accumulation in the depth of 0–60 cm, and there was no accumulation below 80 cm.

【 Conclusions 】 The long-term chemical fertilization mainly causes soil nutrients accumulation in the topsoil of 0–20 cm, while pig manure (with or without chemical fertilizer) causes nutrients accumulation in the 0–40 cm soil depth, promotes down-movement of phosphorus even to the 60 cm soil depth. Comprehensively, application of manure could alleviate soil acidification, improve soil fertility and cultivate fertile deep soil. Although the downward leakage depth of N and P caused by long-term application of pig manure has not reached 80 cm, more attention should be paid to its potential environmental risk.

Key words: upland red soil; long-term fertilization; manure; soil nutrient; soil acidification; distribution in soil profile

红壤旱地因其分布地区水、热、光资源丰富,被认为是最具增产潜力的耕地资源之一^[1]。然而,红壤旱地的原始特性及南方独特的气候特点也使红壤旱地成为最脆弱的耕地资源之一,生产潜力一直未得到充分发挥^[2]。提高红壤旱地的肥力水平则是发挥其生产潜力的前提和基础。施肥是提高作物产量和土壤肥力水平的重要措施,上世纪八十年代以来,化肥的大面积推广应用为提高红壤农田的作物产量和肥力水平做出了巨大的贡献,但也因此带来了施肥方式的重大变革,逐步形成了以施用化肥为主的施肥方式,尤其是新世纪以来,生产上出于对化肥的过度依赖,化肥的投入量逐年增加、配施有机肥的比例降到了谷底,加之重氮轻钾等不合理施肥方式,使得化肥不合理施用引起的土壤酸化、养分表聚化、耕层变浅、化肥利用效率低等问题日益凸显。随着“到2020年化肥使用量零增长行动方案”,“藏粮于土、藏粮于技”和“化肥有机替代”等国家战略的提出和实施,探索更为科学高效的替代施肥方法就显得相当紧迫,而恢复和增加有机肥的施用将可能是其中重要的途径之一。众多研究表明,与单施化肥相比,长期施用有机肥或有机无机肥配施在改善红壤肥力水平和提高作物产量上优势明显。王小兵等^[3]和蔡泽江等^[4]基于红壤旱地长期施肥定位试验研究发现,与单施化肥相比,施用有机肥具有明显的减缓酸化甚至提高土壤pH值的作用。王伯仁等^[5]和张继光等^[6]基于长期定位试验的研究发现,与单施化肥相比,施用有机肥,尤其是有机

无机肥配施可以明显提高土壤养分含量,其中提高土壤全量养分的作用尤为突出。红壤旱地长期施用有机肥不仅可以提高作物产量和化肥农学效率,还可以提高作物的产量稳定性,对维持农业生产的可持续性具有重要意义^[7-9]。但目前有关长期施用有机肥及有机无机肥配施对土壤养分的影响研究多集中在耕层土壤,耕层土壤培肥固然重要,但要真正落实“藏粮于地”的国家战略,明确长期不同施肥方式下土壤养分的迁移特征,研发可培育肥沃而深厚的耕作层的养分管理技术将是必然要求^[10]。国内已有一些研究在关注不同施肥方式下剖面养分分布特征,吴建富等在水稻土的研究中发现,有机肥和化肥配施土壤全氮和碱解氮含量在整个剖面均比单施化肥高,但增加量主要集中在耕层,而有效磷的累积也主要集中在耕层,施用有机肥,尤其是配施猪粪,深层土壤的养分含量明显偏高^[11]。樊军等在黑垆土上的研究则发现,长期施化肥对土壤剖面有机质、全氮、全磷含量的影响深达100 cm以下,施肥增加了耕层(0–20 cm)的土壤养分含量,但造成40 cm以下土层的养分亏缺^[12]。古巧珍等研究发现,灌溉条件下长期施肥垆土0–200 cm土层的土壤有机质含量均高于不施肥处理,土壤磷素存在下移现象,而土壤钾含量在整个土层没有明显变化^[13]。这些研究表明,不同土壤类型下长期施肥对土壤剖面养分的分布影响存在明显差异^[11-14],而有关红壤旱地长期定位施肥条件下剖面土壤养分分布特征的研究相对较少,尤其缺少综合评价长期施用有机肥(猪粪)的深

层培肥效果和环境风险的研究^[5, 14-15]。因此, 本研究依托始于 1986 年的红壤旱地肥料定位试验, 选取施用化肥、有机肥 (猪粪) 及有机无机肥配施等处理, 研究长期不同施肥方式下红壤旱地剖面养分分布差异, 旨在揭示长期不同施肥方式下红壤旱地养分迁移特征, 明确红壤旱地不同施肥方式的培肥效果和差异, 分析长期施用有机肥 (猪粪) 的环境风险, 为制定红壤旱地合理的养分管理技术和提高土壤培肥深度提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地设在江西省红壤研究所 (116°20'24"E、28°15'30"N), 该地属中亚热带季风气候, 年均降雨量 1537 mm, 年蒸发量 1100~1200 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) 平均气温为 28.0~29.8℃。海拔 25~30 m, 坡度 5°, 为典型的低丘红壤地貌。土壤母质为第四纪红黏土, 试验开始前耕层土壤 pH 为 6.0, 有机碳含量为 9.39 g/kg, 土壤全氮、全磷和全钾的含量分别为 0.98 g/kg、1.42 g/kg 和 15.83 g/kg, 碱解氮、有效磷和速效钾的含量分别为 60.3 mg/kg、12.9 mg/kg 和 102 mg/kg。

1.2 试验设计

本研究以江西省红壤研究所红壤旱地肥料定位试验为对象, 试验开始于 1986 年。共设 10 个施肥处理: 1) 不施肥 (CK); 2) 单施氮肥 (N); 3) 单施磷肥 (P); 4) 单施钾肥 (K); 5) 氮、磷肥配施 (NP); 6) 氮、钾肥配施 (NK); 7) 氮、磷、钾肥配施 (NPK); 8) 2 倍的氮、磷、钾肥配施 (2NPK); 9) 氮、磷、钾肥和鲜猪粪配施 (NPKM); 10) 单施鲜猪粪 (OM)。小区面积 22.2 m², 随机区组排列, 3 次重复, 试验小区间用混凝土板块隔离, 混凝土板块宽 10 cm, 高为 50 cm (埋入地下 30 cm、地上 20 cm)。种植制度为春玉米-秋玉米-冬闲, 玉米品种为掖单 13 号。本研究选取 CK、NPK、2NPK、OM 和 NPKM 等 5 个处理。

试验肥料为尿素、钙镁磷肥、氯化钾, 有机肥为鲜猪粪, 其中磷肥、钾肥和猪粪作为基肥, 氮肥用量的 2/3 为基肥, 1/3 为追肥, 肥料施用量见表 1。其中干基鲜猪粪的有机质含量为 41.38%, N、P₂O₅ 和 K₂O 的含量分别为 20.87 g/kg、8.96 g/kg 和 11.18 g/kg, 鲜猪粪的含水量为 70%。

表 1 不同处理每季施肥量 (kg/hm²)

Table 1 Amounts of fertilizers in different treatments for each season

处理 Treatment	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	鲜猪粪 Fresh pig manure
CK	0	0	0	0
NPK	60	30	60	0
2NPK	120	60	120	0
NPKM	60	30	60	15000
OM	0	0	0	15000

1.3 样品采集与分析方法

于 2014 年秋玉米收获后, 分层采集上述处理 0—10 cm、10—20 cm、20—40 cm、40—60 cm、60—80 cm、80—100 cm 剖面土壤样品, 分别测定土壤 pH 值、土壤有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷和速效钾含量等指标, 土壤养分指标采用常规分析方法测定, 具体方法见《土壤农化分析》^[16], 其中土壤有效磷测定采用氟化铵浸提—钼锑抗比色法, 土壤速效钾测定采用醋酸铵浸提—火焰光度计法。

1.4 数据统计与分析

所有数据均采用 Excel 2003 进行处理, 统计分析采用 SPSS 11.0 软件进行, 图表采用 Origin 8.0 作图软件完成。

2 结果与分析

2.1 长期不同施肥处理红壤旱地 pH 值和有机质含量的分布差异

红壤旱地连续施肥 28 年后, 不同施肥方式下 0—60 cm 土壤的 pH 值有明显差异 (图 1)。与不施肥相比, 施用有机肥 (OM 和 NPKM) 可以显著提高 0—40 cm 土壤 pH 值, 而施用化肥 (NPK 和 2NPK) 则显著降低了 0—20 cm 土壤 pH 值, 加剧了耕层土壤的酸化。随着土壤深度的增加, 施肥处理土壤 pH 值均表现出先增加后下降的趋势, 到 60 cm 深以后, 不同施肥处理间土壤 pH 值则无显著差异, 不施肥处理土壤 pH 值随土壤深度增加保持稳定。

施肥方式对红壤旱地土壤有机质含量的影响主要集中在 0—40 cm。与不施肥处理相比, 长期施用有机肥显著提高了红壤旱地 0—20 cm 土壤有机质含量, 而长期施用化肥对土壤有机质含量没有明显影响 (图 1)。随着土壤深度的增加, 土壤有机质含量呈现出逐步下降的趋势, 60 cm 以下土壤有机质含量趋于稳定。

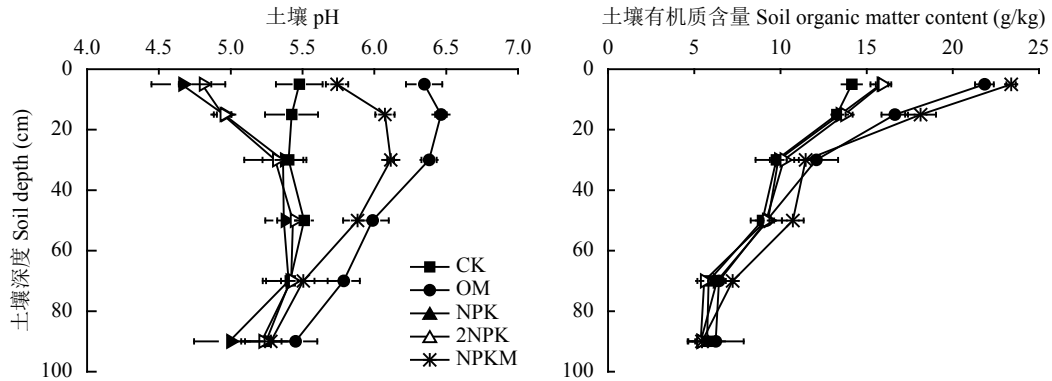


图 1 长期不同施肥处理红壤旱地剖面土壤 pH 值、有机质含量

Fig. 1 pH and organic matter content at different depths of upland red soil under different long-term fertilizations

2.2 长期不同施肥处理红壤旱地全氮和碱解氮的分布差异

红壤旱地土壤全氮和碱解氮含量均表现出随着土壤深度增加而逐渐下降的趋势，在 60 cm 深度以后，土壤全氮和碱解氮含量趋于稳定，施肥方式对土壤全氮和碱解氮含量的影响主要集中在 0—20 cm (图 2)。与施用化肥和不施肥相比，长期有机无机肥配施可以显著提高红壤旱地 0—20 cm 土壤全氮含量，长期单施有机肥可以显著提高红壤旱地 0—10 cm 土壤全氮含量。长期施用化肥对土壤全氮的累积没有明显影响。土壤碱解氮的含量与施肥密切相关，长期施肥红壤旱地 0—10 cm 土壤碱解氮含量显著高于不施肥处理，而长期有机无机肥配施、2 倍化肥用量及单施有机肥处理 0—10 cm 土壤碱解氮含量又显著高于长期单倍化肥用量处理。

2.3 长期不同施肥处理红壤旱地全磷和有效磷的分布差异

红壤旱地土壤全磷和有效磷含量也均表现出随

着土壤深度增加而逐渐下降的趋势，在 60 cm 深度以后，土壤全磷和有效磷含量也趋于稳定，施肥方式对土壤全磷和有效磷含量的影响可达到 40 cm 以下土壤 (图 3)。与单施化肥相比，长期施用有机肥或有机无机肥配施处理 0—40 cm 土壤全磷含量提高了 1 倍以上，而有效磷含量则提高了 4 倍以上，土壤磷的累积现象明显，这与本研究中有机肥是猪粪有关。与不施肥处理相比，施用化肥仅提高了 0—10 cm 土壤全磷和有效磷含量，对深层土壤没有明显影响。

2.4 长期不同施肥处理红壤旱地全钾和速效钾的分布差异

与土壤氮磷养分分布不同，红壤旱地土壤全钾含量随着土壤深度增加基本保持稳定，在不同深度土壤全钾含量没有明显差异，不同施肥方式之间土壤全钾含量也没有显著差异，只是长期有机无机肥配施处理的土壤全钾含量略低 (图 4)。土壤速效钾在土壤剖面的分布则与土壤氮磷养分分布一致，表现出随着土壤深度增加土壤速效钾含量逐渐下降的总

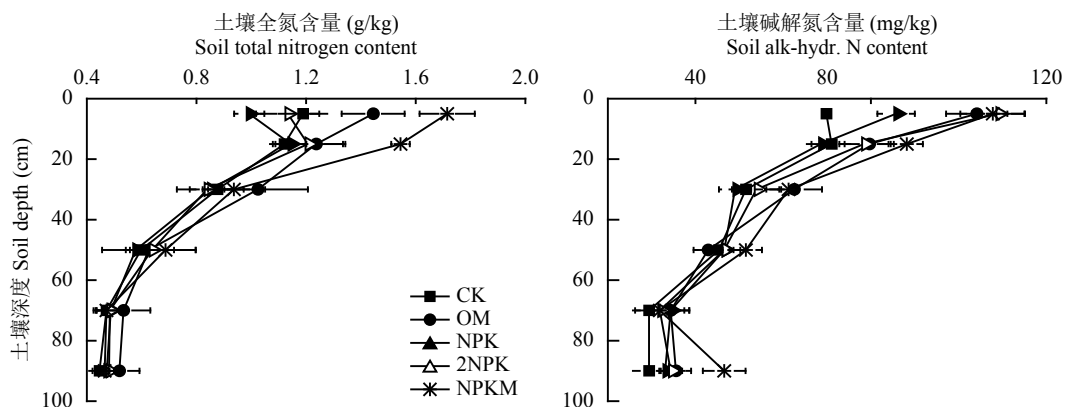


图 2 长期不同施肥处理红壤旱地剖面土壤全氮、碱解氮含量

Fig. 2 Total and alkali-hydrolyzable nitrogen contents in different profiles of upland red soil under different long-term fertilizations

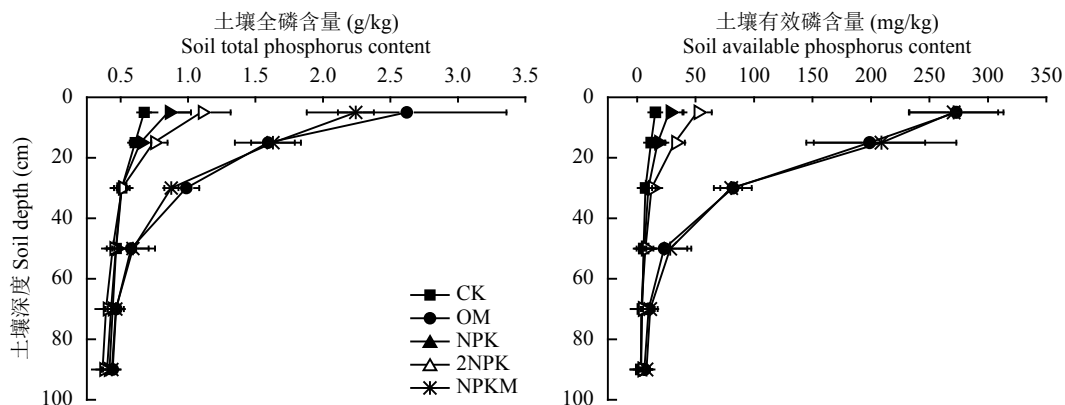


图 3 长期不同施肥处理红壤旱地剖面土壤全磷、有效磷含量

Fig. 3 Total and available phosphorus contents at different profiles of upland red soil under different long-term fertilizations

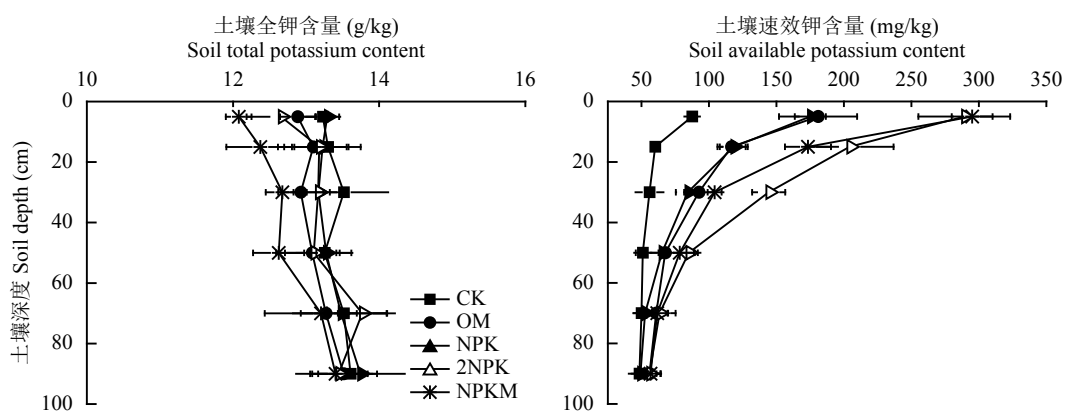


图 4 长期不同施肥处理红壤旱地剖面土壤全钾、速效钾含量

Fig. 4 Total and available potassium contents in different profiles of upland red soil under different long-term fertilizations

体趋势, 到 60 cm 深度以后土壤速效钾含量趋于稳定(图 4)。施肥方式显著影响红壤旱地 0—40 cm 土壤速效钾的分布, 其中长期有机无机肥配施和 2 倍化肥用量处理 0—40 cm 土壤的速效钾含量最高, 显著高于单施有机肥和 1 倍化肥用量处理, 而单施有机肥和 1 倍化肥用量处理 0—40 cm 土壤速效钾含量又显著高于不施肥处理。

3 讨论

3.1 不同施肥方式对红壤旱地剖面养分分布的影响

本研究中, 除了土壤 pH 值和全钾含量两个指标以外, 土壤有机质、全氮、碱解氮、全磷、有效磷、速效钾等指标均表现出随着土壤深度增加逐步下降的规律, 这与表层土壤在长期耕作过程中施肥、耕翻熟化、作物残体腐解及大气沉降带来的养分累积密切相关, 这一结果与王伯仁等在湖南祁阳红壤旱地定位试验的研究结果一致。本研究中, 不同施肥方式红壤旱地土壤的全钾含量随着土壤深度

的增加基本维持稳定, 变幅均在 1 g/kg 以内, 没有显著差异, 这与王伯仁等在红壤旱地及古巧珍等在瘠土上的研究结果一致^[5,12]。

本研究中, 施肥处理的土壤 pH 值随着土壤深度的增加均表现出先升高后下降的趋势, 王伯仁等和蔡泽江在红壤旱地上的研究也发现了相同的规律, 这与红壤旱地自身存在的因施氮及大气酸沉降引起的表层土壤酸化过程有关^[5,17]。本研究还发现, 长期施用有机肥或有机无机肥配施可以显著提高红壤旱地 0—60 cm 土壤的 pH 值, 而长期施用化肥则显著降低了红壤旱地 0—20 cm 土壤的 pH 值, 酸化趋势明显(图 1)。王伯仁等和蔡泽江在红壤旱地上的研究也发现, 红壤旱地长期施用化肥主要引起 0—20 cm 耕层土壤 pH 明显下降, 连续 18 年大致下降 1.1 个单位, 而长期有机(猪粪)无机肥配施和单施有机肥(猪粪)处理则可以提高 0—40 cm 土壤 pH 值, 其中耕层土壤分别上升了 0.7 和 0.9 个单位^[5,17], 本研究中, 与不施肥处理相比, 长期施用有机肥和有机无机肥配

施也明显提高了 0—60 cm 土壤的 pH 值, 其中耕层土壤 pH 值分别提高了 0.9 和 0.4 个单位, 而长期单施化肥也主要使耕层土壤 pH 值明显下降, 降低幅度为 0.75~0.90 个单位, 总体趋势一致, pH 值变化幅度的差异可能主要由于两组试验氮肥的投入量不同引起的, 湖南祁阳站红壤施肥定位试验氮肥的投入量为纯氮 300 kg/hm², 而本定位试验氮肥的投入量为纯氮 120 kg/hm², 氮肥年投入量偏低, 而氮肥的大量投入被认为是加剧红壤旱地酸化的重要诱因^[5, 17]。

与众多研究结果一致, 本研究中, 长期施用有机肥或有机无机肥配施显著提高了红壤旱地 0—40 cm 土壤有机质含量 (图 1), 对提升红壤旱地的肥力水平起到了重要作用^[4, 6-7]。

本研究发现, 施肥方式尤其是施用有机肥对红壤旱地剖面土壤的养分分布影响显著, 长期施用化肥使红壤旱地土壤碱解氮、全氮、有效磷和全磷在 0—20 cm 耕层累积 (图 2、图 3), 土壤速效钾的累积则达到 40 cm 深 (图 4); 而长期施用有机肥或有机无机肥配施可以促进土壤养分向深层迁移累积, 与施化肥处理相比, 施用有机肥或有机无机肥配施处理 0—40 cm 土壤的全氮、碱解氮、速效钾、有效磷和全磷的含量显著提高, 而土壤全磷和有效磷的下移累积甚至达到了 60 cm 以下 (图 3)。本定位试验的产量数据也表明, 与连续单施化肥处理相比 (NPK 和 2NPK), 连续 24 年施用有机肥或有机无机肥配施, 双季玉米的年产量明显提高; 与 NPK 相比, 施用有机肥和有机无机肥配施玉米年产量分别提高 4560 kg/hm² 和 6795 kg/hm²; 与 2NPK 相比, 施用有机肥和有机无机肥配施玉米年产量分别提高 1935 kg/hm² 和 4185 kg/hm²; 长期施用有机肥对培肥红壤旱地, 提高作物产量的作用明显^[18]。樊军等对黄土高原旱地黑垆土的研究发现, 连续施化肥 15 年后有机质、全氮、全磷、有效磷含量在耕层 (0—20 cm) 都有不同程度增加, 但 40 cm 以下土层养分含量有所下降, 这与本研究长期施用化肥处理养分主要在耕层累积的结果一致^[12]。该研究还发现, 施用氮肥造成 N 素养分下淋累积, 而施用磷肥仅使耕层土壤有效 P 含量显著提高^[2], 本研究中施用化学氮肥处理未发现明显的氮肥下移累积现象, 这可能与本研究的氮肥施用量偏低以及红壤粘重的特性有关。王伯仁等在红壤旱地的研究发现, 通过 18 年长期耕作施肥, 所有施肥处理 0—20 cm 土壤有机质、全磷、全氮、有效 P 含量比试验开始时都有明显上升; 然而施用有机肥还可以明显提高红壤旱地 20—40 cm 土壤养分含

量, 其中配施猪粪的效果要优于配施秸秆处理^[5], 这也与本研究发现施用有机肥 (猪粪) 可以促使土壤养分向深层迁移累积的结果一致。此外, 古巧珍等^[13]在瘠土及鲁如坤等^[15]在红壤旱地和水田的研究结果也发现, 长期施用化肥土壤养分虽有所下移, 但也主要在耕层累积。

3.2 红壤旱地施用有机肥 (猪粪) 的环境风险

我国红壤旱地多为低丘坡耕地, 而该区域降雨丰沛, 使得施用有机肥及过量施用化肥的红壤旱地一直被认为是本区域重要的农业面源和地下水污染源, 也是广泛关注的环境风险点。而猪粪因其富含氮磷养分, 更是受到了广泛的关注。本研究发现, 长期施用有机肥及有机无机肥配施显著提高红壤旱地耕层土壤全氮、全磷和有效磷的含量, 其中全磷含量提高了 1 倍, 有效磷含量提高了 4 倍以上 (图 3)。陈磊等对黄土高原旱地的研究发现, 施用有机肥 (厩肥) 及有机肥与化肥配施可以明显提高耕层土壤氮磷养分的含量, 其中单施有机肥处理土壤全 N 和碱解氮含量分别增加了 50.7% 和 64.6%, 土壤全磷和有效磷的含量比不施肥分别提高 53.1% 和 892.1%, 而有机无机肥配施氮磷养分的提升比例则比单施有机肥更高^[19]。王伯仁等在红壤旱地的研究结果也表明, 与单施化肥相比, 长期施用有机肥可以明显提高耕层土壤氮磷养分含量, 其中全磷含量提高 50% 以上, 而有效磷含量提高了 2~3 倍^[5], 与本研究的结果一致。张玉平等对配施猪粪、猪粪堆肥或沼渣沼液春玉米-小白菜轮作系统氮磷流失的研究发现, 虽然配施猪粪等有机肥提高了耕层土壤的氮磷含量, 且氮磷养分的有效性和利用效率明显提高, 而氮磷流失量与单施化肥处理相比明显降低^[20]。汪涛等^[21]在紫色土的研究发现, 等氮量情况下, 有机无机肥配施可以显著降低坡耕地氮素淋失量。习斌等^[22]的研究也发现, 等氮量情况下, 有机无机肥配施可以显著降低土壤全氮的淋失量。这些研究表明, 长期配施猪粪等有机肥显著提高耕层养分含量, 有引起氮磷流失的风险, 尤其是南方红壤旱地多分布于丘陵山区、年降雨量丰沛, 耕层氮磷养分易随降雨引起的地表径流流失形成面源污染, 而本研究中长期施用有机肥处理耕层土壤有效磷含量达到了 200 mg/kg 以上, 也超过了南方地区土壤有效磷含量 75 mg/kg 的环境阈值 (河流), 但其培肥土壤、改善土壤养分供应状况、提高养分利用效率的正面作用也很明显^[19-20, 23], 实际生产中应依据土壤有效磷的含量科学

确定磷肥或高磷含量有机肥的投入量,并在径流水流经区域设置缓冲带或种植牧草、植物篱等措施减缓磷素迁移或增加土壤植被覆盖度减少土壤磷素流失^[24]。氮磷养分下移是造成地下水污染的重要原因,本研究发现,长期施用猪粪红壤旱地土壤氮含量在40 cm深度与不施肥处理趋于一致,而土壤磷含量则在剖面80 cm深度才趋于与不施肥处理土壤磷含量持平,并趋于稳定,这与长期施用猪粪导致土壤中磷含量超过了土壤对磷最大吸附量,水溶性磷和吸附性磷通过土壤孔隙下移^[25]以及有机肥中含有的有机酸利于活化土壤中的磷素,降低土壤对磷的吸附,使磷素更易于向土壤深层移动有关^[26]。汪涛等在紫色土的研究发现,施用有机肥不会使中下层土壤硝态氮含量明显增加^[21];而项大力等^[27]在瘠土的研究发现,灌溉条件下,施用磷肥及磷肥与有机肥配施土壤有效磷也在剖面60 cm深度趋于稳定。张经纬等^[28]对设施蔬菜的研究发现,连续种植蔬菜3~9年及9年以上,土壤有效磷的含量也均在剖面60 cm深度趋于稳定。王伯仁等^[5]在红壤旱地的研究也发现,长期施用猪粪土壤全氮和速效氮的含量均在土壤剖面60 cm深度趋于稳定,而土壤全磷和速效磷的含量也在壤剖面60—80 cm深度趋于稳定,这些结果与本研究的结论基本一致。虽然长期施用有机肥加速了土壤磷素向深层土壤移动,但是因土壤对磷的固定能力较强,尤其是在高度风化的酸性红壤上土壤磷素的移动能力还是受到较大限制,加之红壤旱地的土壤粘性强、透水性差等原始特性,使得土壤磷含量在土壤剖面60—80 cm处趋于稳定,并与不施肥处理含量趋于一致^[29-31]。然而,进入水体的磷素在极低水平就可能引发环境风险,因而红壤旱地长期施用有机肥(猪粪)还是存在一定的环境风险,还需有针对性地开展渗漏水磷含量及剖面磷素形态的分析,以明确磷素环境风险的阈值,为确定有机肥的最适用量提供参考依据。

4 结论

1) 红壤旱地长期施用化肥(28年)仅表现出养分在表层(0—20 cm)富集,而长期施用有机肥则可以使养分下移至60 cm深度,且各层养分含量均高于施用化肥处理,培肥深度明显增加。

2) 长期施用猪粪等有机肥引起的氮、磷向下渗漏深度虽集中在剖面80 cm以上,但其引起的耕层土壤氮、磷过量累积及向下渗漏引起的环境风险也应引起重视。

参 考 文 献:

- [1] 杨芳,何园球,李成亮,等.不同施肥条件下红壤旱地磷素形态及有效性分析[J].土壤学报,2006,43(5):793-799.
Yang F, He Y Q, Li C L, et al. Effect of fertilization on phosphorus forms and its availability in upland red soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2006, 43(5): 793-799.
- [2] 中国科学院南京土壤研究所.中国土壤[M].北京:科学出版社,1978.50.
Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Soils of China [M]. Beijing: Science Press, 1978. 50.
- [3] 王小兵,骆永明,李振高,等.长期定位施肥对亚热带丘陵地区红壤旱地质量的影响 I. 酸度[J].土壤学报,2011,48(1):98-102.
Wang X B, Luo Y M, Li Z G, et al. Effect of long-term stationary fertilization on upland red soil quality in subtropical hilly regions I. Acidity[J]. Acta Pedologica Sinica, 2011, 48(1): 98-102.
- [4] 蔡泽江,孙楠,王伯仁,等.长期施肥对红壤pH、作物产量及氮、磷、钾养分吸收的影响[J].植物营养与肥料学报,2011,17(1):71-78.
Cai Z J, Sun N, Wang B R, et al. Effect of long-term fertilization on pH of red soil, crop yields and uptakes of nitrogen phosphorous and potassium[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(1): 71-78.
- [5] 王伯仁,蔡泽江,李冬初.长期不同施肥对红壤旱地肥力的影响[J].水土保持学报,2010,24(3):85-88.
Wang B R, Cai Z J, Li D C. Effect of different long-term fertilization on the fertility of red upland soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(3): 85-88.
- [6] 张继光,秦江涛,要文倩,等.长期施肥对红壤旱地土壤活性有机碳和酶活性的影响[J].土壤,2010,42(3):364-371.
Zhang J G, Qin J T, Yao W Q, et al. Effect of long-term fertilization on soil active organic carbon and soil enzyme activities in upland red soils[J]. Soils, 2010, 42(3): 364-371.
- [7] 戴茨华,王劲松,代平.红壤旱地长期试验肥力演变及玉米效应研究[J].植物营养与肥料学报,2009,15(5):1051-1056.
Dai C H, Wang J S, Dai P. Soil fertility and its effects on maize production in a long-term experiment on red soil[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15(5): 1051-1056.
- [8] Zhang H M, Wang B R, Xu M G, et al. Crop yield and soil responses to long-term fertilization on a red soil in Southern China[J]. Pedosphere, 2009, 19(2): 199-207.
- [9] Huang S, Zhang W J, Yu X C, et al. Effects of long-term fertilization on corn productivity and its sustainability in an ultisol of southern China[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2010, 138(1-2): 44-50.
- [10] 韩晓增,邹文秀,陆欣春,段景海.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.
Han X Z, Zou W X, Lu X C, Duan J H. The soil cultivated layer in dry land and technical patterns in cultivating soil fertility[J]. Soil and Crop, 2015, 4(4): 145-150.
- [11] 吴建富,王海辉,刘经荣,等.长期施用不同肥料稻田土壤养分的剖面分布特征[J].江西农业大学学报,2001,23(1):54-56.
Wu J F, Wang H H, Liu J R, et al. The characteristics of the profile distribution of nutrients in rice fields after long-term application of

- different fertilizers[J]. *Acta Agriculture Universitatis Jiangxiensis*, 2001, 23(1): 54–56.
- [12] 樊军, 郝明德, 党廷辉. 长期定位施肥对黑垆土剖面养分分布特征的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2001, 7(3): 249–254.
Fan J, Hao M D, Dang T H. Effect of long-term fertilization on nutrient distribution in profiles of black loessial soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2001, 7(3): 249–254.
- [13] 古巧珍, 杨学云, 孙本华, 等. 灌溉条件下长期定位施肥对壤土剖面养分分布特征的影响[J]. *中国农学通报*, 2004, 20(5): 139–142.
Gu Q Z, Yang X Y, Sun B H, *et al.* Effect of long-term fertilization and irrigation on soil nutrient distribution in profiles of loess soil[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2004, 20(5): 139–142.
- [14] 戴茨华, 王劲松, 徐红, 等. 旱地红壤长期定位施肥养分下移特征及作物产量效应研究[J]. *中国农学通报*, 2012, 28(9): 70–74.
Dai C H, Wang J S, Xu H, *et al.* The characteristics of nutrients downward movement and crop yield response on red soil dry lands of a long-term fertilization[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28(9): 70–74.
- [15] 鲁如坤, 时正元, 赖庆旺. 红壤长期施肥养分的下移特征[J]. *土壤*, 2000, 32(1): 27–29.
Lu R K, Shi Z Y, Lai Q W. Characteristics of nutrients move-down of red soil in long-term fertilization[J]. *Soils*, 2000, 32(1): 27–29.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
Bao S D. *Soil and agricultural chemistry analysis*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [17] 蔡泽江. 长期施肥下红壤酸化特征及影响因素[D]. 北京: 中国农业科学院硕士学位论文, 2010.
Cai Z J. *Acidification characteristics of red soil under long-term fertilization and effect factors* [D]. Beijing: MS Thesis of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2010.
- [18] 黄庆海. 长期施肥红壤农田地力演变特征[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2015. 12–14.
Huang Q H. *The evolution character of soil fertility in red soil under long-time fertilization* [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2015. 12–14.
- [19] 陈磊, 郝明德, 张少民, 樊虎玲. 黄土高原旱地长期施肥对小麦养分吸收和土壤肥力的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(2): 230–235.
Chen L, Hao M D, Zhang S M, Fan H L. Effects of long-term application of fertilizer on wheat nutrient uptake and soil fertility in Loess Plateau[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(2): 230–235.
- [20] 张玉平, 荣湘民, 刘强, 等. 有机无机肥配施对旱地作物养分利用率及氮磷流失的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(3): 44–49, 54.
Zhang Y P, Rong X M, Liu Q, *et al.* Effects of combination of organic and inorganic fertilizer on crop nutrient utilization rate, nitrogen and phosphorus loss in dry land[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(3): 44–49, 54.
- [21] 汪涛, 朱波, 况福虹, 等. 有机-无机肥配施对紫色土坡耕地氮素淋失的影响[J]. *环境科学学报*, 2010, 30(4): 781–788.
Wang T, Zhu B, Kuang F H, *et al.* Effects of a combination of organic and inorganic fertilization on nitrogen leaching from purple soil with sloping cropland[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(4): 781–788.
- [22] 习斌, 翟丽梅, 刘申, 等. 有机无机肥配施对玉米产量及土壤氮磷淋溶的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(2): 326–335.
Xi B, Zhai L M, Liu S, *et al.* Effects of combination of organic and inorganic fertilization on maize yield and soil nitrogen and phosphorus leaching[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(2): 326–335.
- [23] Sharpley A, Beegle D, Bolster C, *et al.* Phosphorus indices: why we need to take stock of how we are doing[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2012, 41(6): 1711.
- [24] 习斌. 典型农田土壤磷素环境阈值研究—以南方水旱轮作和北方小麦玉米轮作为例[D]. 北京: 中国农业科学院博士学位论文, 2014.
Xi B. *Study on the environment threshold of soil Olsen-P in farmland: case of southern paddy-upland rotation and northern wheat and maize rotation* [D]. Beijing: PhD Dissertation of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2014.
- [25] 赵晓齐, 鲁如坤. 有机肥对土壤磷素吸附的影响[J]. *土壤学报*, 1991, 28(1): 7–13.
Zhao X Q, Lu R K. Effect of organic manures on soil phosphorus adsorption[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1991, 28(1): 7–13.
- [26] Sharpley A N, McDowell R, Kleinman P. Amounts, forms, and solubility of phosphorus in soils receiving manure[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(6): 2048–2057.
- [27] 项大力, 杨学云, 孙本华, 等. 灌溉水平对土磷素淋失的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(1): 112–117.
Xiang D L, Yang X Y, Sun B H, *et al.* Impacts of irrigation regimes on phosphorus leaching in manural Loessial soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(1): 112–117.
- [28] 张经纬, 曹文超, 严正娟, 等. 种植年限对设施菜田土壤剖面磷素累积特征的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(5): 977–983.
Zhang J W, Cao W C, Yan Z J, *et al.* Effects of cropping years on the characteristics of phosphorus accumulation in soil profiles under greenhouse vegetable production[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(5): 977–983.
- [29] 张凤华, 刘建玲, 廖文华. 农田磷的环境风险及评价研究进展[J]. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14(4): 797–805.
Zhang F H, Liu J L, Liao W H. Environmental risk and assessment of agricultural phosphorus: A review[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(4): 797–805.
- [30] 章明奎, 王丽平. 旱耕地土壤磷垂直迁移机理的研究[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(1): 282–285.
Zhang M K, Wang L P. Study on mechanisms of phosphorus downward transfer in arable soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(1): 282–285.
- [31] 樊红柱, 陈庆瑞, 秦鱼生, 等. 长期施肥紫色水稻土磷素累积与迁移特征[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(8): 1520–1529.
Fan H Z, Chen Q R, Qin Y S, *et al.* Characteristics of phosphorus accumulation and movement in a calcareous purple paddy soil profile as affected by long-term fertilization[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(8): 1520–1529.