

## 长期定位施肥对甘薯—小麦体系剖面土壤质量的影响<sup>①</sup>

李祥<sup>1,2</sup>, 宁琪<sup>1</sup>, 周佳逸<sup>1,3</sup>, 徐聪<sup>1,2,3</sup>, 王磊<sup>1</sup>, 袁洁<sup>1</sup>, 汪吉东<sup>1,2,3</sup>, 张永春<sup>1,2,3</sup>,  
陈亚华<sup>3</sup>, 张辉<sup>1,2,3\*</sup>

(1 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 南京 210014; 2 江苏大学环境与安全工程学院, 江苏镇江 212013; 3 南京农业大学生命科学学院, 南京 210095)

**摘要:** 为研究长期施肥对甘薯—小麦轮作体系剖面土壤质量的影响, 利用田间小区随机区组试验, 分析了不施肥、单施化肥、有机无机配施和秸秆还田配施化肥 4 种施肥处理对剖面土壤性质及作物产量的影响。结果表明: 连续施肥 13 年后, 不同施肥处理下土壤有机质、全氮、碱解氮、全磷、有效磷和速效钾的含量随着土壤深度的增加而减少。长期单施化肥会使土壤酸化, 有机无机配施能有效缓解土壤酸化; 与不施肥处理相比, 长期单施化肥处理仅对表层(0~20 cm)土壤的养分含量有显著提升效果, 而长期有机无机配施和秸秆还田配施化肥处理能显著提高 0~40 cm 土层的养分含量; 与单施化肥处理相比, 有机无机配施和秸秆还田配施化肥处理 0~40 cm 土层全氮含量分别增加 11.2% 和 22.3%; 在 0~20 cm 土层中, 有机无机配施和秸秆还田配施化肥处理的有机质、全磷和速效钾含量均高于单施化肥处理, 而且秸秆还田配施化肥处理的有机质和速效钾含量在整个剖面中均高于单施化肥处理, 表明长期秸秆还田配施化肥可以促进养分向深层土壤迁移累积。此外, 长期施肥显著提升了小麦产量, 但单施化肥、有机无机配施和秸秆还田配施化肥处理之间无显著差异; 秸秆还田配施化肥处理对土壤质量指数和甘薯产量提升的幅度最大, 与单施化肥处理相比, 秸秆还田配施化肥处理可以使土壤质量指数提高 14.9%, 甘薯产量增加 39%; 长期施肥下 60 cm 以上土层的土壤质量指数与轮作体系年产量呈现极显著正相关性, 表明剖面土壤养分含量对作物生长的影响不容忽视。综上, 相比于单施化肥和有机无机肥配施, 秸秆还田配施化肥对甘薯—小麦轮作体系土壤培肥与作物增产的提升效果最好。

**关键词:** 长期施肥; 土壤剖面; 秸秆还田; 土壤质量指数; 作物产量

**中图分类号:** S158      **文献标志码:** A

### Effects of Long-term Fertilization on Soil Profile Quality of Sweet Potato and Wheat System

LI Xiang<sup>1,2</sup>, NING Qi<sup>1</sup>, ZHOU Jiayi<sup>1,3</sup>, XU Cong<sup>1,2,3</sup>, WANG Lei<sup>1</sup>, YUAN Jie<sup>1</sup>, WANG Jidong<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Yongchun<sup>1,2,3</sup>, CHEN Yahua<sup>3</sup>, ZHANG Hui<sup>1,2,3\*</sup>

(1 Institute of Agricultural Resources and Environmental Sciences, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2 School of the Environment and Safety Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China; 3 College of Life Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

**Abstract:** A field random plot experiment was carried out on yellow-brown soil to study the effects of 4 fertilization methods including no fertilization, inorganic fertilization, organic - inorganic fertilization and straw return with inorganic fertilization on soil profile quality and crop yield. The results showed that after 13 years of continuous fertilization, the contents of soil organic matter (SOM), total nitrogen (TN), alkali-hydrolyzed nitrogen (AN), total phosphorus (TP), available phosphorus (AP) and available potassium (AK) under different fertilization treatments decreased with increasing of soil depth. Long-term application of inorganic fertilizer acidified the soil, while combined application of organic and inorganic fertilizers effectively alleviated soil acidification. Compared with no fertilization treatment, inorganic fertilization treatment only had a significant effect on nutrient contents in topsoil layer (0–20 cm), while organic-inorganic fertilization and straw return with inorganic fertilization treatments significantly increased nutrient contents in 0–40 cm soil layer. Compared with inorganic fertilization treatment, TN content in

<sup>①</sup>基金项目: 国家甘薯产业技术体系项目(CARS-10)、江苏省自然科学基金项目(BK20230749)和科技基础资源调查专项(2021FY100504)资助。

\* 通讯作者(9833672@qq.com)

作者简介: 李祥(1998—), 男, 江苏滨海人, 硕士研究生, 主要从事甘薯营养与施肥管理。E-mail: 2369841379@qq.com

0~40 cm 土壤层在有机无机复合肥和秸秆还田条件下无机肥处理比有机无机复合肥和秸秆还田条件下无机肥处理增加11.2%和22.3%，分别。在0~20 cm 土壤层，有机无机复合肥和秸秆还田条件下无机肥处理的SOM、TP和AP含量高于无机肥处理，而SOM和AK在无机肥处理条件下秸秆还田时比无机肥处理时高。整个土壤剖面的养分迁移和积累表明长期秸秆还田可以促进养分向更深的土壤层转移。此外，长期施肥显著提高了小麦产量，但不同施肥方式之间没有差异。无机肥处理下的秸秆还田取得了最大的土壤质量指数(SQI)和作物产量的改善，与无机肥处理相比，秸秆还田增加了SQI 14.9%和甘薯产量39%。SQI在60 cm以上土壤层与年度作物产量有显著的正相关，表明土壤剖面养分对作物生长的影响不容忽视。综上所述，与无机肥和有机无机复合肥相比，无机肥下的秸秆还田对施肥土壤和增加作物产量具有最好的效果。

**Key words:** Long-term fertilization; Soil profile; Straw return; Soil quality index (SQI); Crop yield

长期施肥是改善土壤质量和提高作物产量常见的农田管理措施。过度依赖化肥以及不合理的施肥方式，致使土壤酸化、耕层浅薄、化肥利用率低等问题日益突出<sup>[1-2]</sup>，而有机无机配施和秸秆还田等方式有利于维持农田生产力的可持续性<sup>[3]</sup>。长达56年的有机肥施用定位试验研究结果显示，长期有机无机配施处理的耕层土壤有机质含量比不施肥和单施化肥处理分别提高了64.9%和53.5%<sup>[4]</sup>。张继光等<sup>[5]</sup>研究发现，与单施化肥相比，长期有机无机肥配施可使土壤全氮、碱解氮和有效磷含量显著提升。张然等<sup>[6]</sup>在西北旱地长期施肥试验研究中发现，相较于单施化肥，长期有机无机配施能显著提高土壤肥力，增加耕层土壤中有机质、全氮、有效磷、速效钾等含量。此外，秸秆作为主要的农业废弃物，含有丰富的碳、氮、钾等营养元素，秸秆腐解释放的养分能及时补充植物所需的营养物质，显著改善土壤养分状况，有效培肥土壤。叶超等<sup>[7]</sup>研究表明，不同秸秆还田数量使棕壤全氮和有机氮含量分别增加了6.7%~32.9%和4.7%~25.2%。胡宏祥等<sup>[8]</sup>也发现，秸秆全量还田提高了黄褐土的氮磷钾含量，其中有效磷和速效钾含量增幅较大，分别为18.4%和33.3%。鲁彩艳和陈欣<sup>[9]</sup>研究结果表明，秸秆降解后产生的有机酸能增加钾素有效性，从而提高速效钾的含量，但由于土壤中的钾易随径流流失，单靠秸秆还田并不能大幅增加作物所需的速效钾，需要额外配合钾肥，以达到缓解钾素淋溶、保持营养元素平衡、增加土壤肥力的效果。

目前不同施肥措施和秸秆还田对不同类型土壤剖面养分分布的影响表现并不一致。徐虎等<sup>[10]</sup>在褐土长期定位试验研究中发现，长期秸秆还田配施化肥

仅显著提高0~20 cm 表层土壤的有机质含量。李晨华和唐立松<sup>[11]</sup>在长期单施化肥和化肥配施秸秆的施肥模式下发现，单施化肥下0~20 cm 表层土壤的有机碳含量增加了14%，但20~60 cm 土层却减少了25.9%，而在60~300 cm 深层土壤中化肥配施秸秆处理显著高于单施化肥处理。吴建富等<sup>[12]</sup>在水稻土长期试验中发现，与单施化肥相比，长期秸秆还田配施化肥可提高整个剖面的全氮和碱解氮含量，但差异主要表现在表层(0~20 cm)土壤中，且秸秆还田配施化肥对亚表层(20~40 cm)土壤有效磷含量增加更为明显。在壤土长期施肥试验中也发现，与不施肥处理相比，各施肥处理整个土层(0~200 cm)有机质含量均有所提高，但土壤全钾含量在整个剖面无明显变化<sup>[13]</sup>。这些研究表明长期不同施肥措施对各剖面土壤养分的影响存在差异。

土壤质量指数(Soil quality index, SQI)被广泛运用于定量评估农业生态系统中的土壤质量<sup>[14]</sup>。土壤质量通常与作物产量呈正相关关系，随着土壤质量提升，作物产量增加。研究表明，在没有明显土壤或生态环境退化的农田系统中，较高的土壤质量可以保证较高的土壤生产力<sup>[15]</sup>。娄庭等<sup>[16]</sup>通过田间试验研究不同施肥对土壤质量和作物产量的影响，结果表明，提升土壤质量有利于作物高产稳产。陈昭旭<sup>[17]</sup>在沙壤地定位试验中也发现，土壤肥力与玉米产量成正比，土壤肥力指数每增加0.1个单位，作物产量增加0.22 t/hm<sup>2</sup>。然而，长期不同施肥条件下剖面土壤质量是否与作物产量存在关联还有待进一步研究。

我国甘薯种植面积和总产量分别为216万hm<sup>2</sup>和4 680万t<sup>[18]</sup>，是世界最大的甘薯生产国。甘薯营养成

分丰富、适应性强、产量高<sup>[19]</sup>，往往与越冬作物轮作，其中甘薯与小麦轮作是主要的种植制度之一。目前有关甘薯—小麦轮作长期施肥条件对剖面土壤质量的影响研究相对较少，土壤质量与产量之间的关联也尚不清楚。因此，本研究依托始于 2011 年的甘薯—小麦长期定位试验，选取不施肥、施用化肥、有机无机配施和秸秆全量还田配施化肥 4 个处理，分析土壤剖面养分特征并进行土壤质量评价，探究长期不同施肥方式下甘薯—小麦轮作体系土壤剖面养分分布和土壤质量的差异，及其与作物产量的关系，以为制定甘薯—小麦轮作体系合理的施肥措施和提高土壤质量提供理论支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

甘薯—小麦轮作长期定位施肥试验始于 2011 年，设置于江苏省南京市六合实验基地(32°28'N, 118°37'E)。当地年均温度 16.2 ~ 17.6 °C，年均降水量 1 100 mm，无霜期约 237 d。试验地土壤类型为黄棕壤，初始耕层(0 ~ 20 cm)土壤 pH 6.48，有机质含量 13.31 g/kg，全氮含量 0.73 g/kg，碱解氮含量

68.43 mg/kg，全磷含量 0.45 g/kg，有效磷含量 7.02 mg/kg，速效钾含量 77.8 mg/kg。

### 1.2 试验设计

本研究长期定位施肥试验在夏甘薯—冬小麦一年两熟制农田进行，包括 4 个处理：不施肥(CK)、单施化肥(IF)、有机无机配施(有机肥替代 30% 氮肥，OIF)、秸秆还田配施化肥(小麦、甘薯秸秆均全部还田并配施与 IF 处理等量的化肥，SR)，每个处理设置 3 次重复，小区面积 33.3 m<sup>2</sup>(5 m × 6.66 m)，随机区组排列。氮、磷、钾肥分别选用尿素(N 460 g/kg)、过磷酸钙(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 140 g/kg)和氯化钾(KCl 600 g/kg)。有机肥来自六合养猪场，主要由秸秆和猪粪腐熟而成，其 N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 含量分别为 14.6、8.1、11.0 g/kg。小麦季氮肥分基肥(70%)和追肥(30%)施入，磷肥、钾肥、有机肥均作为基肥一次性施加；甘薯季氮、磷、钾肥和有机肥均作为基肥一次性投入；每季甘薯、小麦收获后的秸秆均全部还田。此外，甘薯季播种前进行翻耕作业，小麦季不翻耕。除施肥外，试验田管理措施与当地农田管理措施相同。长期不同施肥处理各季的具体施肥情况见表 1。

表 1 长期不同施肥处理的肥料施用量(kg/hm<sup>2</sup>)  
Table 1 Application rates of long-term different fertilization treatments

处理	小麦季					甘薯季				
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	有机肥	秸秆	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	有机肥	秸秆
不施肥(CK)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
单施化肥(IF)	210	90	90	0	0	120	60	180	0	0
有机无机配施(OIF)	147	90	90	3 060	0	84	60	180	2 040	0
秸秆还田配施化肥(SR)	210	90	90	0	13 156	120	60	180	0	8 576

### 1.3 土壤样品采集与测定

2023 年 10 月夏甘薯收获后，在每个试验小区利用土钻采集 0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 40、40 ~ 60、60 ~ 100 cm 5 个土层的土壤样品，去除杂质，自然晾干，分别研磨过 10 目和 100 目筛，装袋备用。

参照《土壤农化分析》<sup>[20]</sup>，测定土壤 pH、有机质、全氮、碱解氮、全磷、有效磷、全钾和速效钾等指标。

### 1.4 土壤质量指数计算

本研究采用全量数据集方法计算土壤质量指数。通过标准函数将上述各指标测定值转化为 0 ~ 1 之间的无量纲值，其中 pH 和有效磷采用“optimum”函数(公式(1))进行评分，其余指标使用“more is better”函数(公式(2))计算得分<sup>[21]</sup>，公式如下：

$$f(x) = \begin{cases} 0.1 & x < x_1, x > x_4 \\ 0.1 + 0.9 \times \frac{(x - x_1)}{(x_2 - x_1)} & x_1 \leq x \leq x_2 \\ 1 & x_2 \leq x \leq x_3 \\ 0.1 + 0.9 \times \frac{(x_4 - x)}{(x_4 - x_3)} & x_3 \leq x \leq x_4 \end{cases} \quad (1)$$

$$f(x) = \begin{cases} 0.1 & x < x_1 \\ 0.1 + 0.9 \times \frac{(x - x_1)}{(x_2 - x_1)} & x_1 \leq x \leq x_2 \\ 1 & x > x_2 \end{cases} \quad (2)$$

式中：x 表示指标测定值；f(x) 表示指标得分；x<sub>1</sub>、x<sub>2</sub>、x<sub>3</sub>、x<sub>4</sub> 表示函数上下限阈值。每个指标的上下限阈值(表 1)均从前人文献中获得<sup>[21-22]</sup>。

土壤指标标准化计算完成后, 土壤质量指数(SQI)采用公式(3)计算:

$$SQI = \sum_{i=1}^n W_i \times F_i \quad (3)$$

式中:  $n$  表示指标个数;  $W_i$  表示指标权重值;  $F_i$  表示

指标得分。在所有指标进行因子分析后, 将所有指标用公因子表示, 各指标的表达量由公因子方差衡量, 公因子方差值越大(大于 0.7), 说明表达越合理。各指标权重值的计算等于该指标的公因子方差与所有指标公因子方差和的比值(表 2)。

表 2 土壤质量指数权重及函数阈值  
Table 2 Weights and function thresholds of soil quality indexes

指标	评分函数	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	公因子方差	权重
pH	optimum	4.5	6.5	8	8.5	0.941	0.102
有机质(g/kg)	more is better	6	20			0.958	0.104
全氮(g/kg)	more is better	0.5	1.2			0.915	0.099
碱解氮(mg/kg)	more is better	30	150			0.887	0.096
全磷(g/kg)	more is better	0.2	1			0.862	0.094
有效磷(mg/kg)	optimum	7.5	30	75	600	0.932	0.101
全钾(g/kg)	more is better	5	25			0.994	0.108
速效钾(mg/kg)	more is better	45	400			0.896	0.097

## 1.5 数据处理与统计分析

数据均使用 Excel 2016 软件、SPSS statistics 26 软件进行处理与分析, 图表采用 GraphPad Prism 8.0.2 软件完成。

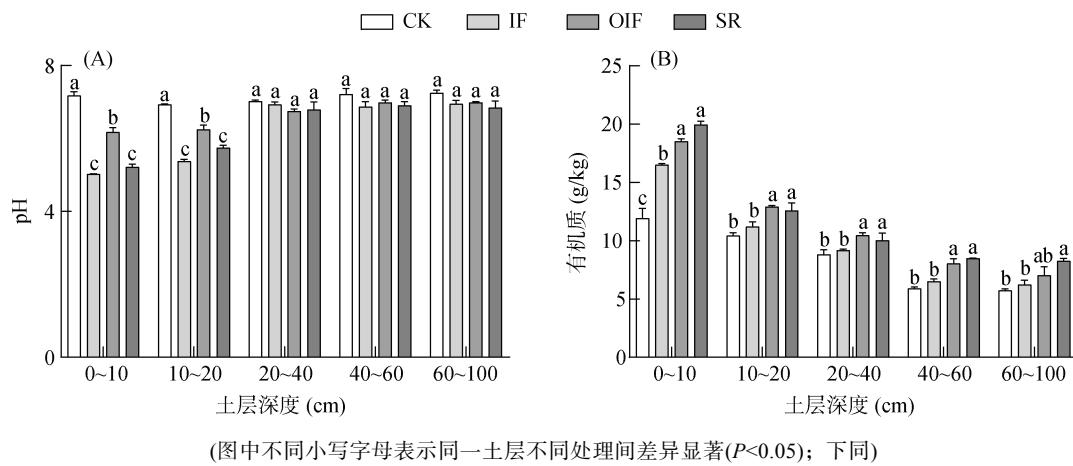
## 2 结果与分析

### 2.1 长期不同施肥土壤剖面 pH 和有机质含量差异

甘薯-小麦体系经过 13 年连续施肥后, 不同施肥处理下 0~20 cm 土壤 pH 存在明显差异(图 1A)。与 CK 处理相比, IF、OIF 和 SR 处理的 pH 在 0~20 cm 的土壤中均显著降低, 其中 IF 处理的 pH 在 0~20 cm

土壤下降最多, 平均降低了 1.8 个单位。随着土壤深度的增加, 各处理的 pH 逐渐趋于稳定, 在 20~100 cm 土壤深度, IF、OIF 和 SR 处理间的 pH 并无明显差异。

长期不同施肥处理下土壤有机质含量随剖面深度的增加呈现逐步下降的趋势(图 1B)。长期施肥对有机质含量的影响主要集中于 0~60 cm 土层, 与 CK 处理相比, OIF 和 SR 处理显著提高了 0~60 cm 土层的土壤有机质含量, 而 IF 处理的有机质含量只在 0~10 cm 土壤中有显著提升。随着土壤深度的增加, 60 cm 以下土层秸秆还田配施化肥处理仍与不施肥处理有显著差异。



(图中不同小写字母表示同一土层不同处理间差异显著( $P<0.05$ ); 下同)

图 1 长期不同施肥处理下土壤剖面 pH 及 SOM 含量

Fig. 1 pH values and SOM contents in soil profiles under long-term different fertilization treatments

### 2.2 长期不同施肥土壤剖面氮、磷、钾含量差异

随着土层深度的增加, 土壤中全氮和碱解氮含量均呈现不断下降的趋势, 且各施肥处理对土壤全氮含

量的影响与碱解氮表现一致(图 2A, 图 2D)。各施肥处理的全氮和碱解氮含量相较 CK 处理在各个剖面上均有所增加, 且施肥方式对剖面全氮和碱解氮的影

响差异主要表现在表层(0~20 cm)。在0~10 cm土层中, SR处理的全氮和碱解氮含量最高, 分别达到1.4 g/kg和129.1 mg/kg, 显著高于IF和OIF处理; 在10~20 cm深度, SR处理的全氮含量分别比IF和OIF处理增加10.9%和5.5%。相比于CK处理, OIF和SR处理的全氮含量(0~40 cm)分别增加11.2%和22.3%。

长期不同施肥处理下土壤全磷含量均随着土层深度的增加而逐渐降低(图2B), 不同施肥处理的全磷含量在40 cm以下土层无明显差异。与CK处理相

比, IF、OIF和SR处理使0~10 cm土层的全磷含量增加了66.4%、115.3%和108.1%, 10~20 cm土层的全磷含量增加了19.2%、42.9%和30.5%。IF、OIF和SR处理下0~20 cm土层全磷平均含量分别为0.77、0.96和0.91 g/kg, 与IF处理相比, OIF和SR处理的全磷含量增加了约20%。IF处理的有效磷含量在0~40 cm土层中均显著增加, 而OIF处理的有效磷含量仅在0~10 cm土层显著增加(图2E)。在0~10 cm土层中, SR处理的有效磷含量最高, 达到54.7 mg/kg, 比CK处理增长了4倍。

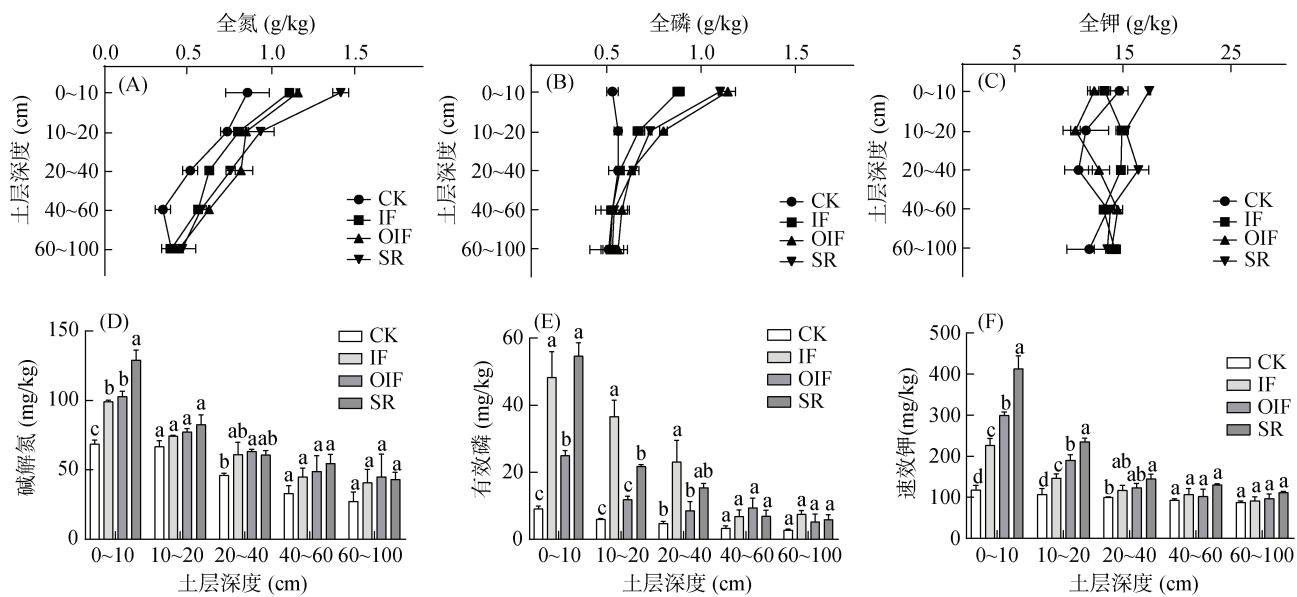


图2 长期不同施肥处理土壤剖面氮、磷、钾含量

Fig. 2 Nitrogen, phosphorous and potassium contents in soil profiles under long-term different fertilization treatments

随着土层深度的增加, 土壤中全钾含量的变化规律不明显(图2C)。速效钾在土壤剖面的分布情况与全磷相似(图2B、图2F), 不同施肥方式下土壤速效钾含量均随着土层深度的增加而逐渐下降。长期施肥显著增加了耕层(0~20 cm)土壤速效钾含量, 其中SR处理的速效钾含量最高达到413 mg/kg, 且在0~40 cm土层中SR处理的速效钾均显著高于CK处理; 与CK处理相比, IF、OIF和SR处理在0~40 cm土层中的平均速效钾含量分别增加了66.1%、117.9%和187.1%。

### 2.3 长期不同施肥土壤质量指数与作物产量差异

长期不同施肥处理土壤质量指数在整个剖面上均显著高于CK处理, 在不同剖面深度下SR处理的土壤质量指数均最高, 且SR处理在0~40 cm土层的土壤质量指数均大于0.6, 而IF和OIF处理的土壤质量指数仅在0~20 cm土层中大于0.6(图3A)。与IF处理相比, SR处理土壤质量指数提高14.9%。与CK处理相比, 长期施肥显著提升了小麦和甘薯

产量, 但小麦产量在3个施肥处理间无显著差异。SR处理的甘薯产量最高, 分别比CK和IF处理显著增加了39.0%和131.3%, 达到11 960 kg/hm<sup>2</sup>(图3B)。

### 2.4 长期不同施肥土壤剖面养分与产量的相关性

对土壤剖面养分及质量指数与作物产量的相关性分析(表3)发现, 在0~10 cm土层, 除全钾外, 其他养分指标均与作物总产量呈显著或极显著正相关; 在10~40 cm土层, 有机质、全氮、碱解氮和速效钾含量与作物总产量显著相关; 在40~60 cm土层, 有机质和全氮含量与作物总产量呈显著正相关; 在60 cm以下土层, 有机质含量仍与作物总产量表现出显著的正相关关系, 表明剖面土壤有机质是保障作物产量的重要指标。值得注意的是, 长期施肥下0~60 cm土层的土壤质量指数均与小麦产量、甘薯产量及总产量呈现显著或极显著正相关性, 说明剖面土壤质量指数能有效地对产量进行综合评价。

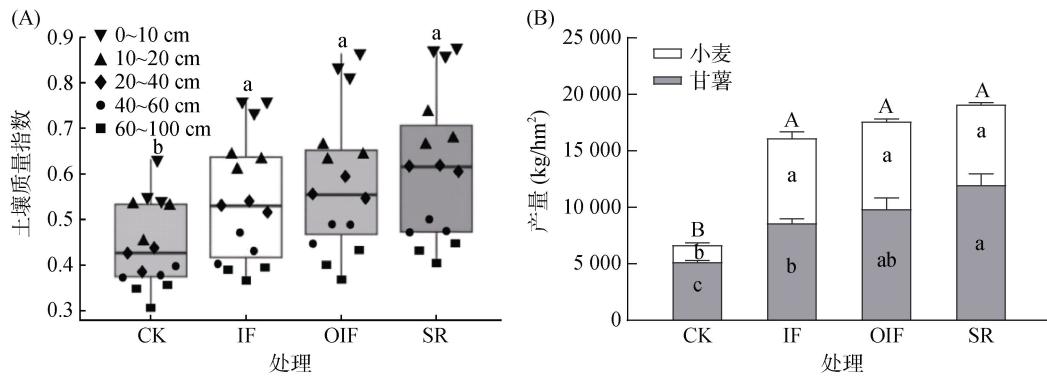
(图中不同小写字母表示不同处理间差异显著( $P<0.05$ )；不同大写字母表示不同处理间总产量差异显著( $P<0.05$ ))

图3 长期不同施肥处理土壤剖面质量指数(A)与作物产量(B)

Fig. 3 Profile soil quality index (A) and crop yields (B) under long-term different fertilization treatments

表3 土壤剖面养分和质量指数与作物产量的相关关系  
Table 3 Correlation coefficients between crop yield with soil quality index and nutrients

	剖面深度(cm)	pH	有机质	全氮	碱解氮	全磷	有效磷	全钾	速效钾	土壤质量指数
甘薯产量	0~10	-0.642*	0.909**	0.832**	0.870**	0.817**	0.690*	0.268	0.904**	0.885**
	10~20	-0.557	0.708**	0.627*	0.627*	0.696*	0.302	0.36	0.834**	0.822**
	20~40	-0.32	0.576	0.819**	0.577*	0.539	0.228	0.668*	0.737**	0.780**
	40~60	-0.373	0.810**	0.538	0.620*	0.191	0.409	0.365	0.421	0.738**
	60~100	-0.695*	0.794**	0.013	0.349	-0.009	0.4	0.448	0.419	0.549
小麦产量	0~10	-0.800**	0.864**	0.676*	0.744**	0.871**	0.682*	-0.158	0.692*	0.892**
	10~20	-0.801**	0.680*	0.472	0.545	0.808**	0.55	0.298	0.693*	0.861**
	20~40	-0.372	0.725**	0.718**	0.650*	0.344	0.443	0.628*	0.474	0.787**
	40~60	-0.506	0.908**	0.792**	0.461	0.12	0.49	0.17	0.267	0.673*
	60~100	-0.636*	0.495	-0.002	0.345	0.148	0.528	0.48	0.282	0.484
总产量	0~10	-0.760**	0.936**	0.796**	0.851**	0.890**	0.724**	0.059	0.842**	0.937**
	10~20	-0.715**	0.732**	0.580*	0.618*	0.793**	0.448	0.347	0.805**	0.888**
	20~40	-0.364	0.686*	0.811**	0.647*	0.466	0.353	0.684*	0.639*	0.827**
	40~60	-0.463	0.906**	0.701*	0.571	0.164	0.474	0.283	0.363	0.744**
	60~100	-0.702*	0.681*	0.006	0.366	0.073	0.489	0.49	0.37	0.545

注: \*代表在  $P<0.05$  水平上显著相关, \*\*代表在  $P<0.01$  水平上极显著相关。

### 3 讨论

#### 3.1 长期施肥对剖面土壤养分分布的影响

农田施肥作为主要的农业管理措施, 在不同程度上影响土壤养分的剖面分布特征。本研究结果表明, 长期施肥主要影响表层(0~20 cm)土壤pH。与不施肥相比, 长期单施化肥显著降低了土壤pH, 酸化趋势明显; 长期有机无机配施后土壤pH变化幅度较小, 这说明有机无机配施能改善土壤理化性状, 增强土壤缓冲能力, 减缓土壤酸化<sup>[23]</sup>; 而长期秸秆还田配施化肥处理后的土壤pH比有机无机配施处理低0.7个单位, 这可能与秸秆还田配施化肥产生过多的有机酸和腐殖酸有关。

长期秸秆还田配施化肥可以促进土壤养分向深

层迁移累积。本研究结果表明, 单施化肥处理的养分含量仅在表层(0~20 cm)土壤中显著提升, 而长期秸秆还田配施化肥处理的全氮含量在0~40 cm土层中增加了16.1%~27.7%, 有机质含量在整个剖面中显著高于单施化肥处理, 速效钾含量在不同剖面层也高于单施化肥处理。樊军等<sup>[24]</sup>在黑垆土长期施肥试验中研究发现, 单施化肥处理的有机质及全量养分含量在0~20 cm表层土中均有所增加, 但其余土层养分含量变化不大, 这与本研究中长期单施化肥处理的养分变化主要在0~20 cm土层的结果一致。这可能是因为长期单施化肥导致土壤板结, 影响养分的下移; 且表层土壤较深层土壤根系和微生物活动更为活跃, 更有利于土壤养分的周转积累, 因此表层土壤养分受施肥影响差异更为明显。本研究还发现, 长期不同施

肥处理对土壤碱解氮含量的影响与全氮含量的影响表现相同, 这与温延臣等<sup>[25]</sup>的潮土长期定位试验结果吻合。

本研究中, 长期施肥下, 稼秆还田配施化肥处理在0~10 cm 土层中的全磷含量显著高于单施化肥处理, 但有效磷含量与单施化肥处理无显著差异, 并且在10~40 cm 土层中低于单施化肥处理。这可能是因为稼秆本身含有的磷可以使土壤磷得到更新和补偿, 而甘薯根系深而广<sup>[26]</sup>, 对下层土壤的养分需求量大, 且稼秆还田配施化肥处理的产量显著高于单施化肥处理, 有效磷易被吸收利用而移走<sup>[25]</sup>。单施化肥和有机无机配施处理在0~10 cm 土层全钾含量均低于不施肥处理, 可能是由于作物产量较高进而增加了稼秆移除过程中的损失, 导致表层土壤的钾素亏缺。而稼秆还田配施化肥处理显著增加了剖面0~40 cm 的速效钾含量, 这一方面与稼秆本身含有较高的有效性钾素有关, 稼秆全部还田后增加了土壤速效钾的积累, 另一方面稼秆全量还田后还改善了土壤团聚体结构, 增加了土壤孔隙, 促进了钾素的迁移<sup>[27]</sup>, 致使0~100 cm 土层速效钾的含量均高于其余处理。

### 3.2 长期施肥下剖面土壤质量差异及其与作物产量的关系

本研究中, 相对于不施肥处理, 长期单施化肥、有机无机配施和稼秆还田配施化肥处理均显著提高了整个剖面的土壤质量指数; 而在0~10 cm 土层, 长期有机无机配施和稼秆还田配施化肥处理下土壤质量指数显著高于单施化肥处理, 同时, 甘薯产量也呈现出一致的结果。稼秆还田配施化肥处理对作物增产效果最显著, 这种作用可归因于土壤有机质和氮、磷、钾养分含量的提高, 并且这些养分有向深层土壤累积的趋势。相较于不施肥处理, 稼秆还田配施化肥处理下有效磷含量在0~20 cm 土层显著提高, 全钾和速效钾含量在0~40 cm 土层均显著提高, 有机质含量甚至在整个剖面的各层级中均显著高于不施肥处理, 并且土壤有机质和全氮含量不仅在耕层与作物产量呈极显著正相关, 在60 cm 及以下土壤中仍与产量显著正相关。有研究表明, 根系的分布受土壤养分分布的影响, 养分的充分供给会良性地诱导根系横向和纵向生长, 而根系生长越好, 养分积累越多, 越有利于作物生长和产量的提高<sup>[28]</sup>。本研究中, 对比单施化肥处理, 稼秆还田配施化肥处理可以使土壤质量指数提高14.9%, 甘薯增产39%。稼秆与化肥配合施用下, 不仅可以提高土壤肥力, 还可以提高腐殖质中的胡敏酸和富里酸, 增加胡敏酸比例, 改善土壤腐殖

质品质<sup>[29]</sup>。类似地, 杨志臣等<sup>[30]</sup>在稼秆还田配施化肥和有机无机配施效果对比分析中也发现, 稼秆还田配施化肥的培肥和增产效果与30% 厥肥配施化肥基本相同, 这表明稼秆还田配施化肥是替代施用有机肥培肥土壤的良好措施。本研究通过长期施肥试验同样发现, 稼秆还田配施化肥是提升土壤肥力、增加作物产量的最佳施肥方式, 也是甘薯-小麦轮作可持续发展的施肥模式。

## 4 结论

长期施肥会使表层(0~20 cm)土壤显著酸化, 长期有机无机配施可以缓解土壤的酸化。长期单施化肥的土壤养分富集仅表现在土壤表层(0~20 cm)上, 而长期有机无机肥配施和稼秆还田配施化肥处理能显著提高更深土层(20~40 cm)的养分含量。稼秆还田处理在深层(40~100 cm)土壤中的有机质及速效养分含量高于有机无机配施处理, 并且各剖面层级的土壤质量指数和作物产量均最高。因此, 长期稼秆还田配施化肥可以促进养分向深层土壤迁移累积, 有利于土壤培肥和作物增产。

## 参考文献:

- [1] 刘芳禧, 方畅宇, 庚振宇, 等. 绿肥、稼秆和石灰联用对红壤性水稻土酸度特征和水稻产量的影响[J]. 土壤学报, 2024, 61(6): 1616-1627.
- [2] Wu L, Zhang W J, Wei W J, et al. Soil organic matter priming and carbon balance after straw addition is regulated by long-term fertilization[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2019, 135: 383-391.
- [3] 彭王栋, 储诚兴, 钟雅清, 等. 甜玉米稼秆还田对土壤地力与产量、效益的影响[J]. 广东农业科学, 2015, 42(15): 25-30.
- [4] Schjønning P, Christensen B T, Carstensen B. Physical and chemical properties of a sandy loam receiving animal manure, mineral fertilizer or no fertilizer for 90 years[J]. European Journal of Soil Science, 1994, 45(3): 257-268.
- [5] 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.
- [6] 张然, 史雷, 马龙, 等. 有机无机肥配施对旱地冬小麦产量及土壤物理性质的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(6): 325-330, 336.
- [7] 叶超, 张昀, 燕香梅, 等. 稼秆还田方式和数量对棕壤有机氮活性的影响[J]. 土壤通报, 2018, 49(6): 1383-1389.
- [8] 胡宏祥, 程燕, 马友华, 等. 油菜稼秆还田腐解变化特征及其培肥土壤的作用[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(3): 297-302.
- [9] 鲁彩艳, 陈欣. 不同施肥处理土壤及不同C/N比有机物料中有机N的矿化进程[J]. 土壤通报, 2003, 34(4): 267-270.

- [10] 徐虎, 蔡岸冬, 周怀平, 等. 长期秸秆还田显著降低褐土底层有机碳储量[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(5): 768–776.
- [11] 李晨华, 唐立松. 长期施肥对绿洲农田土壤剖面有机碳及其组分的影响[J]. 干旱区地理, 2013, 36(4): 637–644.
- [12] 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.
- [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, 147.
- [14] 宫殿清, 王兆锋, 张德锂, 等. 拉萨河谷设施农地土壤质量变化及空间分异特征[J]. 土壤学报, 2023, 60(6): 1582–1594.
- [15] Griffiths B S, Ball B C, Daniell T J, et al. Integrating soil quality changes to arable agricultural systems following organic matter addition, or adoption of a ley-arable rotation[J]. Applied Soil Ecology, 2010, 46(1): 43–53.
- [16] 娄庭, 龙怀玉, 杨丽娟, 等. 在过量施氮农田中减氮和有机无机配施对土壤质量及作物产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2010(2): 11–15, 34.
- [17] 陈昭旭. 不同耕作措施和秸秆还田连续实施对土壤肥力的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2022.
- [18] FAO. FAO 作物统计数据库[DB/OL]. <http://www.fao.org/faostat/zh/#data/QC>.
- [19] 张辉, 谭诚, 周晓月, 等. 长江中下游甘薯氮磷钾肥施用效果与区域土壤养分丰缺指标研究[J]. 土壤, 2022, 54(4): 676–681.
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [21] Qi Y B, Darilek J L, Huang B, et al. Evaluating soil quality indices in an agricultural region of Jiangsu Province, China[J]. Geoderma, 2009, 149(3/4): 325–334.
- [22] Shang Q Y, Ling N, Feng X M, et al. Soil fertility and its significance to crop productivity and sustainability in typical agroecosystem: A summary of long-term fertilizer experiments in China[J]. Plant and Soil, 2014, 381(1): 13–23.
- [23] 程明琨, 萧洪东, 李学文, 等. 减氮条件下生物质炭施用对珠三角地区生菜产量、品质及土壤性质的影响[J]. 土壤, 2023, 55(1): 37–44.
- [24] 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.
- [25] 温延臣, 李海燕, 袁亮, 等. 长期定位施肥对潮土剖面养分分布的影响[J]. 中国农业科学, 2020, 53(21): 4460–4469.
- [26] 姜瑶, 汪宝卿, 袁振, 等. 甘薯耐旱性研究进展[J]. 山东农业科学, 2015, 47(8): 137–142.
- [27] 宋佳丽, 王鸿雁, 张淑香, 等. 施肥和秸秆还田对黑土农田土壤剖面养分分布的影响[J]. 生态学杂志, 2022, 41(1): 108–115.
- [28] 赵秉强, 张福锁, 李增嘉, 等. 间作冬小麦根系数量与活性的空间分布及变化规律[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(2): 214–219.
- [29] 孙星, 刘勤, 王德建, 等. 长期秸秆还田对土壤肥力质量的影响[J]. 土壤, 2007, 39(5): 782–786.
- [30] 杨志臣, 吕贻忠, 张凤荣, 等. 秸秆还田和腐熟有机肥对水稻土培肥效果对比分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(3): 214–218.