

# 长期施肥对红壤稻田剖面土壤碳氮累积的影响

陈春兰<sup>1,2</sup>, 陈安磊<sup>1,2</sup>, 魏文学<sup>1,2</sup>, 张文钊<sup>1,2</sup>, 傅心赣<sup>1,2</sup>, 周华军<sup>3</sup>, 秦红灵<sup>1,2</sup>

(1.中国科学院 亚热带农业生态研究所 亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125;

2.中国科学院 桃源农业生态试验站, 湖南 桃源 415700; 3.桃源县农业技术推广中心双溪口站, 湖南 桃源 415700)

**摘 要:**为了研究长期施肥对红壤稻田剖面土壤碳氮累积的影响,基于中国生态系统研究网络(CERN)桃源农业生态试验站网络监测数据,分析了不施肥(CK)、高量氮磷钾肥(NPK)、减量化肥加秸秆还田优化施肥(OF)对红壤水稻土剖面有机碳、全氮含量及其储量的影响。结果表明:(1) OF 处理土壤碳氮含量及其储量随着土层深度的增加呈显著下降趋势( $p<0.05$ )。(2) 11 a 施肥后,各处理表层(0—20 cm)土壤有机碳含量及碳储量差异显著,且  $OF>NPK>CK$ ;表层全氮含量及氮储量在 NPK 与 OF 处理中无显著差异;40—80 cm 土壤氮储量 NPK 处理显著大于 OF 处理。(3) 各处理 0—80 cm 土体总有机碳储量差异不显著,NPK 处理全氮储量显著大于 OF 处理。(4) 与试验初期相比,各处理在 20—40 cm 土层,各指标含量增加幅度最大。(5) 0—80 cm 土体中,有机碳和全氮储量存在极显著正相关关系( $y=11.644x-0.8737, R^2=0.9759$ )。综上所述,红壤稻田土壤有机碳、全氮及碳氮储量对长期不同施肥措施的响应在表层更灵敏;在 20—40 cm 土层碳氮累积速率最大,并有向深层累积的趋势;OF 处理更显著增加表层土壤有机碳氮储量,而 NPK 处理对深层土壤碳氮储量增加较多。因此,长期高量化肥使用增加了氮素向土壤深处迁移的风险,减量施肥配以秸秆还田措施对保持红壤水稻土碳氮可持续变化更有利。

**关键词:**长期施肥; 秸秆还田; 土壤剖面; 碳氮储量

中图分类号:S158.2; S153.5

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)02-0014-07

## Effect of Long-Term Fertilization on Accumulation of Soil Carbon and Nitrogen in Reddish Paddy Soil Profiles

CHEN Chunlan<sup>1,2</sup>, CHEN Anlei<sup>1,2</sup>, WEI Wenxue<sup>1,2</sup>,

ZHANG Wenzhao<sup>1,2</sup>, FU Xingan<sup>1,2</sup>, ZHOU Huajun<sup>3</sup>, QIN Hongling<sup>1,2</sup>

(1.Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 2.Taoyuan Agro-ecosystem Research Station, Chinese Academy of Sciences, Taoyuan, Hunan 415700, China; 3. Shuangzikou Station of Agricultural Technology Promotion Center, Taoyuan, Hunan 415700, China)

**Abstract:** In order to study the effects of long-term fertilization on soil carbon and nitrogen accumulation in red paddy profiles, the data of a long-term positioning experiment were analyzed. The fertilization experiment was stated in 2004, including three treatments: CK (non-fertilizer), NPK (N, P, and K fertilizer application), and OF (reduced NPK fertilizer with rice straw application), according to the requirements of Chinese Ecosystem Research Network (CERN). The results showed that: (1) the contents and reserves of soil carbon, nitrogen significantly decreased along the depth of soil layer in OF treatment (0—80 cm,  $p<0.05$ ); (2) after 11 years of fertilization, SOC and carbon reserve in 0—20 cm were significantly different among three treatments, which followed the order:  $OF>NPK>CK$ ; TN and nitrogen reserve in 0—20 cm were not significantly different between the treatments of NPK and OF, while the nitrogen reserve in the treatment of NPK was more than that in the treatment of OF in 40—80 cm; (3) there were no significant differences of carbon storage in the 0—80 cm soil layers, while the nitrogen storage in 0—80 cm in the treatment of NPK were significantly higher than that in the treatments of OF and CK; (4) compared to the begin-

收稿日期:2020-06-01

修回日期:2020-06-22

资助项目:国家重点研发计划(2016YFD0200307, 2017YFD0301504);中国科学院 CERN 野外台站研究项目“桃源农业生态试验站长期监测研究”;科技部国家生态系统观测研究网络运行服务项目“桃源站观测研究及数据信息系统建设 II”

第一作者:陈春兰(1981—),女,四川广安人,高级工程师,主要从事农田土壤生态学研究。E-mail: ccl@isa.ac.cn

通信作者:秦红灵(1978—),女,河南南阳人,副研究员,主要从事土壤微生物生态研究。E-mail: huniu@isa.ac.cn

ning of the experiment, the increment of contents and reserves of soil carbon, nitrogen in 20—40 cm were the most among the other soil layers; (5) there was positive relationship between SOC and nitrogen reserve in 0—80 cm ( $y = 11.644x - 0.8737, R^2 = 0.9759$ ). Totally, the responses of contents and reserves of soil carbon, nitrogen in red soil paddy fields to long-term fertilization were more sensitive in surface layer than that in deep soil. The treatment of OF significantly increased the reserves of soil carbon, nitrogen in the surface soil, while the treatment of NPK increased those in the deep soil. Therefore, long-term fertilization with high amount of chemical fertilizer may increase the risk of nitrogen migration to the deep soil, while the reduced chemical fertilizer combined with straw returning can be more beneficial to maintaining the sustainability of carbon and nitrogen in the red paddy soil.

**Keywords:** long-term fertilization; straw returning; soil profile; carbon and nitrogen storages

稻田土壤是人为湿地土壤,表层土壤有机碳含量及碳储量普遍高于旱地土壤<sup>[1-3]</sup>,是我国当前固碳趋势明显和固碳潜力较大的人为耕作土壤<sup>[4]</sup>,稻田土壤每年植物残体及根系归还量以及湿地环境可能是我国稻田土壤有机碳含量普遍偏高的主要原因。近年来,秸秆还田推动了土壤有机碳含量增加速率<sup>[5-6]</sup>。为保证水稻高产,大量氮肥施用使我国稻田系统出现供氮量提高的趋势<sup>[7-8]</sup>,也成为土壤氮储量增加以及土壤氮素淋失的主要原因。长期有机物循环利用(含稻草还田)显著提高红壤性稻田土壤耕层有机碳及全氮含量,有机肥配施化肥处理对提高耕层土壤碳氮储量作用显著<sup>[9-10]</sup>。在连续 3 a 的短期研究中,即使采取不同的耕作制度,秸秆还田条件下的表层土壤有机碳及全氮含量显著高于秸秆不还田处理<sup>[11]</sup>。不管是秸秆还田还是化肥的施用,不仅影响表层土壤碳氮储量,同时对剖面土壤碳氮储量也造成不同影响。秸秆与化肥配合施用使乌栅土和红壤性水稻土剖面有机质及全氮含量均明显高于单施化肥或不施肥处理,并且红壤性水稻土长期施用秸秆有增加土壤腐殖质下移的趋势<sup>[12]</sup>。有研究<sup>[13]</sup>也显示增施有机肥和秸秆还田能显著提高水稻土 0—30 cm 土层碳储量,虽对氮储量的影响不显著,但长期不同施肥对碳氮储量的影响有向深层土壤延伸的趋势。徐虎等<sup>[14]</sup>研究结果也证明长期施用化肥和化肥配施秸秆处理使红壤剖面 0—40 cm 碳储量有所耗竭,氮储量则无明显影响,但明显增加了 40—100 cm 土层有机碳和全氮储量。长期在化学氮磷钾肥的基础上增施有机肥(包括秸秆还田)虽然增强土壤肥力,但提高了土壤氮盈余量,提高氮素淋失风险<sup>[15]</sup>。以往配施有机肥(包括秸秆还田)的研究多是在原化肥施用量基础之上进行的,在长期秸秆还田配施减量化肥的管理措施对土壤剖面碳氮含量累积的研究报道较少。并且,根据前人研究结果可以推测从土壤碳氮储量角度分析,秸秆还田配施减量化肥措施对减少化肥使用,提高土壤质量有一定积极作用。

本研究基于中国生态系统研究网络中国科学院桃源农业生态试验站长期施肥试验,在已有监测结果减量化肥配以秸秆还田(撩穗留茬)处理水稻产量与高量化肥处理无显著差异的前提下<sup>[16]</sup>,探讨减量化肥配以秸秆还田与高量化肥处理对水稻土剖面有机碳氮储量的影响,从另一个角度为合理施肥提供数据分析。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验地位于中国科学院桃源农业生态试验站内(28°55′49.8″N, 111°26′25.7″E),是中国生态系统研究网络(CERN)长期监测样地。该地年均气温 16.5℃,年均降雨量 1 440 mm,日照时数 1 520 h。供试土壤为第四纪红色黏土发育的水稻土,种植制度为双季稻和冬闲模式。为完善中国生态系统研究网络样地设置要求,2004 年建立该试验地。设置 3 个处理:(1) 不施肥(CK),且收获物移出稻田系统,作为研究对照;(2) 大量施用氮磷钾化肥(NPK),收获物移出稻田系统,代表本地区域高产高投入施肥模式;(3) 优化施肥(OF),在高量施肥基础上减氮磷少钾肥并配施稻草还田(本田撩穗留茬),代表区域优化施肥模式,监测试验始于 2005 年。每个处理小区面积为 7.0 m×14.3 m,按样地左中右分 3 个区作为重复,2015 年晚稻收获后每个分区用荷兰钻分层采集 3~4 个样品混匀(0—20, 20—40, 40—60, 60—80 cm),同时采集容重。施肥情况见表 1,其中秸秆还田量为 2005—2015 年年均还田秸秆量。

表 1 不同施肥处理年均化肥(折纯量)及秸秆投入量

kg/hm <sup>2</sup>				
施肥处理	氮肥	磷肥	钾肥	秸秆还田量
CK	—	—	—	—
NPK	348.9	108.8	305.1	—
OF	221.4	70.3	99.2	5702.0

注:“—”表示未添加。

### 1.2 试验方法

土壤样品风干后过 100 目筛,测定有机碳及全氮。土壤有机碳用硫酸—重铬酸钾外加热容量法,全氮用浓硫酸(催化剂)—流动注射仪测定。土壤容重采用环刀法取样,105℃烘干测定<sup>[17]</sup>。

### 1.3 数据分析

土壤有机碳(全氮)储量采用等体积法计算,计算公式为: $SOC_s=(C_i \times \rho_i \times T_i) \times 10^{-1}$ 。式中: $SOC_s$ 为特定深度的土壤有机碳储量( $t/hm^2$ ); $C_i$ 为第  $i$  层土壤的有机碳含量( $g/kg$ ); $\rho_i$ 为第  $i$  层土壤容重( $g/cm^3$ ); $T_i$ 为第  $i$  层土壤厚度( $cm$ )。同理计算土壤氮储量。

采用 Excel 和 DPS 分别对数据进行作图和统计分析。

## 2 结果与分析

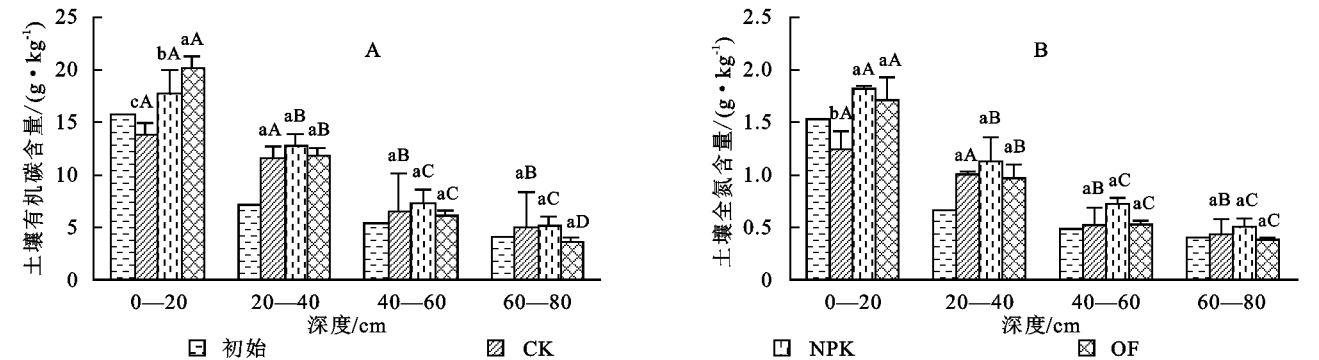
### 2.1 不同施肥处理土壤有机碳及全氮含量变化

由图 1 可以看出,随着土层深度的增加,土壤有机碳和全氮均存在下降趋势。方差分析显示(图 1A),不施肥(CK)处理在 0—20 cm,20—40 cm 有机碳含量差异不显著( $p>0.05$ ,下同),均显著大于 40—60 cm,60—80 cm 土壤有机碳含量( $p<0.05$ ,下同);高量施化肥(NPK)处理和优化施肥(OF)处理

表层土壤有机碳均显著大于次表层,次表层显著大于 40—60 cm 土层,而 NPK 处理 60—80 cm 土层有机碳含量未显著降低,OF 处理则呈现显著降低趋势。各处理土壤全氮含量在 40—60 cm 和 60—80 cm 土层趋于稳定变化,无显著降低趋势(图 1B)。0—60 cm 各土层处于显著降低趋势,说明全氮含量所受影响主要集中在 0—40 cm 土层。

经过 11 a 长期不同施肥管理,各处理表层(0—20 cm)土壤有机碳含量呈现显著差异,由大到小顺序为:OF>NPK>CK;20—80 cm 土层,各处理有机碳含量无显著差异。表层全氮含量同有机碳含量变化略有差异,NPK 处理土壤全氮含量大于 OF 处理,但差异不显著,而两处理均显著大于 CK 处理,分别是 CK 处理的 1.46,1.38 倍。

与试验初期相比(图 1),0—20 cm 耕层,CK 处理土壤有机碳及全氮含量分别降低了 12.3%,19.0%,NPK 处理分别增加了 12.8%,18.9%,OF 处理分别增加了 28.2%,12.1%;其余层次各处理土壤有机碳及全氮含量均有增加,且在 20—40 cm 处,增量最大,CK,NPK 和 OF 处理有机碳分别增加了 61.3%,78.4%,64.7%;全氮含量分别是试验初期的 1.50,1.68,1.45 倍。



注:图中小写字母表示各层不同处理间差异情况,大写字母表示各处理不同层次间差异情况( $p<0.05$ ),下同。

图 1 长期不同施肥处理土壤剖面 0—80 cm 土壤有机碳及全氮含量变化

以上说明,长期施肥管理增加了红壤水稻表土层土壤有机碳和全氮含量,在 20—40 cm 土体对有机碳和全氮的积累更为明显。表层土壤有机碳及全氮含量对不同施肥处理更为敏感。

### 2.2 不同施肥处理土壤有机碳储量变化

各处理土壤有机碳储量在土壤垂直方向上分布特征与有机碳分布特征相同,含有秸秆还田的 OF 处理土壤有机碳储量随深度加深有显著下降趋势,CK 和 NPK 处理 40—60 cm 和 60—80 cm 两土层虽呈下降趋势,但差异不显著。

与试验初期相比,经过长期水稻种植,土壤碳储量在各土层均有所增加(图 2),其中 NPK 和 OF 处理增加更为明显。表层土壤中 CK 处理土壤有机碳

储量略有增加(增加了 3.7%),NPK 和 OF 处理增量分别为 39.7%,51.7%。各处理土壤碳储量相对试验初始碳储量变化量在剖面中呈先增后减的趋势(图 3),其中 20—40 cm 土层各处理碳储量含量相对增量最大,分别为 60.4%,65.6%,59.5%。

11 a 不同施肥制度下,各处理表层土壤碳储量差异显著( $p<0.05$ ,图 2),含量高低顺序为:OF>NPK>CK;20—80 cm 土层以 NPK 处理碳储量含量最高,但各处理间差异不显著。

由此说明,长期水稻种植对不同层次土壤有机碳储量具有增加作用(碳汇),在 20—40 cm 土体中碳储量增幅最大,OF 处理更显著增加表层土壤有机碳储量,NPK 处理对深层土壤碳储量增加较多。

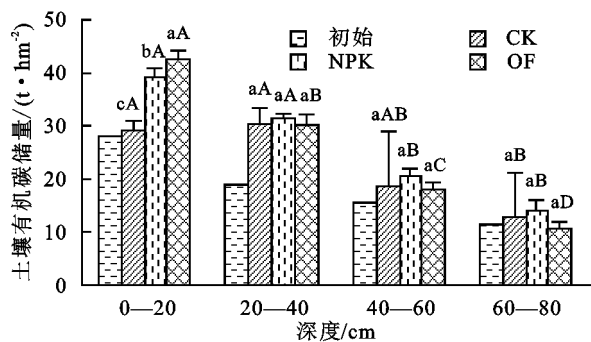


图 2 长期不同施肥处理下 0—80 cm 各层土壤有机碳储量

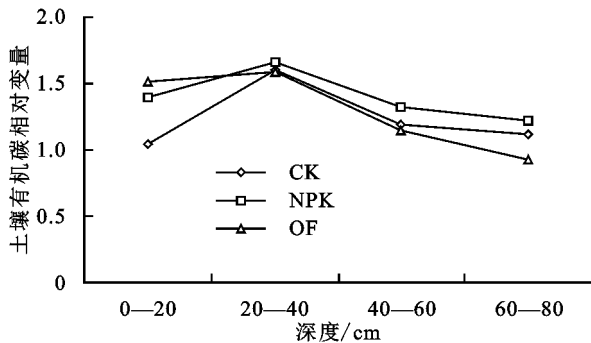


图 3 不同施肥处理 0—80 cm 各土层有机碳储量相对变化量

2.3 不同施肥处理土壤全氮储量变化

长期不施肥使水稻土表层土壤中全氮储量有所下降(图 4),降低了 4.8%。NPK 和 OF 处理使表层

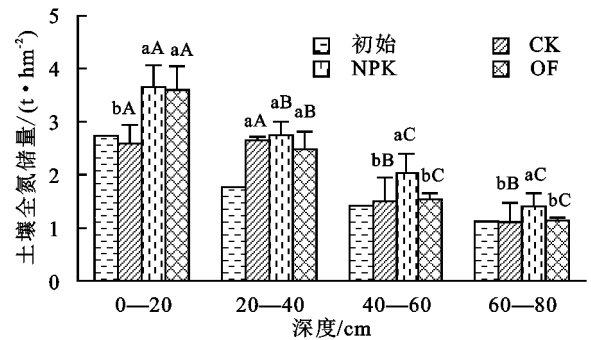


图 4 长期不同施肥处理下 0—80 cm 各层土壤全氮储量

表 2 长期不同施肥处理下 0—80 cm 土体有机碳和全氮储量  
t/hm<sup>2</sup>

处理	0—80 cm 土体储量	
	有机碳(SOC)	全氮(TN)
初始(2004)	74.1	7.0
CK	90.8±15.0a	7.8±1.1b
NPK	113.6±14.0a	10.9±1.1a
OF	101.4±3.0a	8.8±0.2b

2.5 不同施肥处理水稻土有机碳储量和全氮储量关系

对不同施肥处理水稻土剖面有机碳和全氮储量进行相关分析,结果表明,红壤水稻土有机碳和全氮储量存在极显著正相关关系( $y=11.644x-0.8737$ ,  $R^2=0.9759$ ),见图 6。根据土壤碳氮比情况来看(图 7),随着土层加深,碳氮比略有下降趋势,但不显著;并且 11 a 的不同施肥处理未显著影响各土层中碳氮

土壤全氮储量分别增加了 34.3%,31.9%。各处理在 20—40 cm 土层土壤全氮储量增幅最大(图 5),分别为 49.7%,55.2%,40.6%。总体上全氮储量增量在剖面中也呈先增后减的趋势。

施肥措施累积效应导致 NPK 与 OF 处理间表层土壤全氮储量无显著差异,均显著高于 CK 处理。20—40 cm 土层处理间无显著差异;40—80 cm 土层,NPK 处理全氮储量显著大于 OF 和 CK 处理,而 OF 与 CK 处理中全氮储量相近。

由此说明,长期不施肥使水稻土表层氮储量降低,OF 处理只显著影响表层土体中氮储量,NPK 处理显著影响 0—80 cm 各土层氮储量。

2.4 不同施肥处理 0—80 cm 土体碳氮总储量

11 a 的施肥处理均增加了水稻土 0—80 cm 土体有机碳氮储量(表 2),并且 NPK 处理增加量最大。与试验初期相比,CK,NPK 和 OF 处理土体有机碳储量分别增加了 22.5%,53.2%,36.8%。而 3 种施肥处理间有机碳储量无显著差异( $p>0.05$ )。

3 种施肥处理 0—80 cm 土体全氮储量比试验初始分别增加 12.0%,56.3%,25.1%。并且高量施肥 NPK 处理土体全氮储量显著大于 CK 及 OF 处理( $p<0.05$ )。

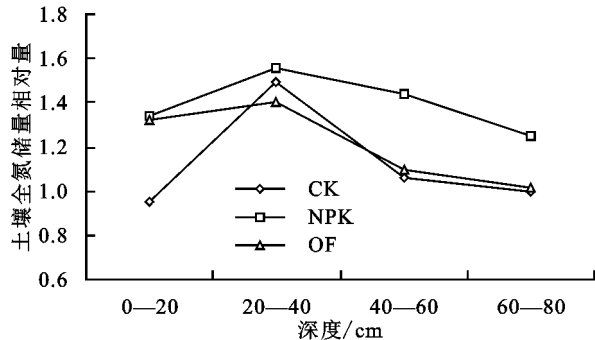


图 5 不同施肥处理 0—80 cm 各土层全氮储量相对变化量

比。总体来看,有秸秆还田的 OF 处理碳氮比较大,而高量氮肥 NPK 处理碳氮比较小,且低于 CK 处理。说明秸秆还田处理有利于增强碳氮比的趋势,大量氮肥施用有减小土壤碳氮比趋势。

3 讨论

施肥是影响土壤碳氮水平的重要因素之一。大量研究表明长期施用无机肥和有机肥均能提高土壤有机碳水平,并且对有机碳含量的影响主要表现在土壤耕作层<sup>[18-19]</sup>。本研究也发现,表层土壤有机碳对不同施肥处理表现更为敏感,在不同处理间存在显著差异,而表层以下各处理间无显著差异。这可能原因是表层是作物根系、土壤微生物与土壤营养元素作用最活跃的土壤层次,受施肥所带来的养分含量差异直接



影响最大。本研究中 OF 处理秸秆还田增加了土壤有机碳的输入,与土壤表层的碳固定直接相关<sup>[20-21]</sup>,是表层土壤有机碳含量显著高于 NPK 处理的直接原因。马力等<sup>[22]</sup>在红壤水稻土秸秆还田对土壤有机碳含量的研究中也发现,秸秆还田处理在 0—20 cm 土层对有机质的累积作用优于仅施化肥处理。孔毅明等<sup>[13]</sup>在施肥对稻田土壤碳氮含量研究中发现秸秆还田能显著提高土壤耕层碳含量,而对 30 cm 以下土层影响很小。NPK 处理表层有机碳含量显著高于不施肥处理,这可能因为 NPK 处理充足的养分条件使水稻生物量显著大于 CK 处理,每年归还土壤的凋落物及根系残留量显著大于不施肥处理<sup>[16]</sup>。本研究中各处理土壤全氮含量也只在表层表现出显著差异,并且高量氮肥 NPK 处理全氮含量大于少氮+秸秆还田的 OF 处理,但差异不显著,说明还田秸秆在微生物的分解作用下可以适当补充土壤全氮含量。以往研究也证实在施用氮磷钾肥基础上添加秸秆还田能显著增加表层土壤全氮含量<sup>[23]</sup>。因为秸秆还田后其水解产物大部分转化为固态氮,使土壤本身储存的氮矿化分解速度降低,从而增加了土壤全氮的含量<sup>[24]</sup>。秸秆还田在提高土壤有机碳及全氮上起着重要作用,有研究<sup>[25]</sup>发现不同形式的秸秆还田均能显著提高土壤有机碳和全氮含量。

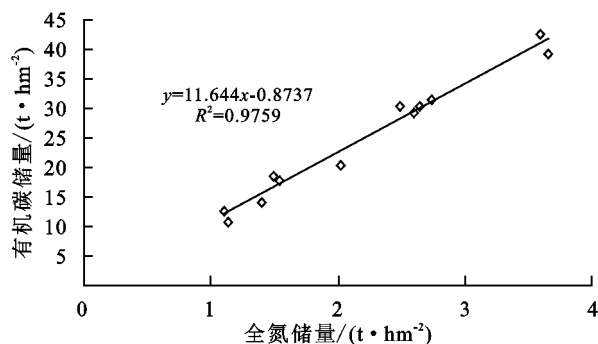


图 6 不同施肥处理下红壤水稻土有机碳储量和全氮储量的相互关系

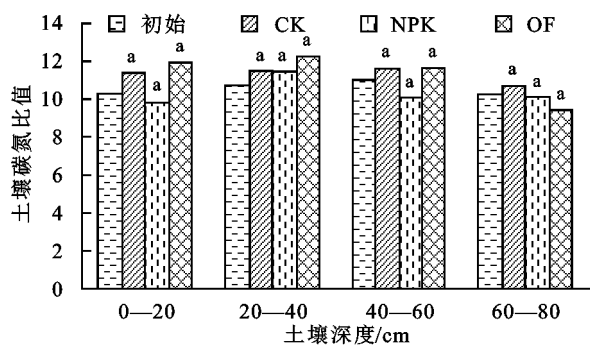


图 7 不同施肥处理红壤水稻土土壤碳氮比随深度的变化

土壤碳氮储量由土体有机碳、全氮含量及土壤容重计算而来。大量研究结果显示,土壤有机碳、全氮及其储量均随土层深度的增加而呈降低趋势<sup>[12,14,26]</sup>,

并在 40 cm 以下降幅逐渐减小<sup>[27-28]</sup>。本研究也得到类似结果,经过 11 a 不同施肥处理后,土壤碳氮含量及其储量均随土层深度加深而下降,除 OF 处理有机碳含量和碳储量外,其他处理及指标在 40 cm 以下已无显著差异。李晨华等<sup>[29]</sup>在施肥对绿洲农田土壤剖面有机碳组分影响研究中发现,化肥配施秸秆处理促进土壤有机碳含量增加,在深层土壤中也有一定增幅,而单施化肥的处理在深层土壤中 SOC 存在下降趋势。并且值得注意的是,本研究中 40—80 cm 土层,高量化肥处理土壤全氮储量显著大于 CK 及 OF 处理,这说明高量施用化肥使氮素在向土体深处迁移,增大土体氮素储量的同时也增大氮素淋失风险,这也给以往高量氮肥施用导致地下水硝酸盐含量偏高的研究结论提供了数据支持<sup>[30-32]</sup>;同时该处理 SOC 含量也略高于其他处理( $p > 0.05$ ),即使在表层中含量显著低于 OF 处理,这可能是高量化肥处理使表层土壤对 DOC 等可溶性碳的吸附能力小于减量化肥配以秸秆还田处理,使可溶性碳向深土层迁移<sup>[33-34]</sup>;换言之,减量施肥配以秸秆还田的管理措施可能对土壤碳氮元素均具有表聚效果,从而减少碳氮向深土层迁移风险。

与试验初期相比,不施肥处理(CK)表层土壤有机碳、全氮和氮储量均有降低。一方面可能是,水稻根系主要分布于表层,对表层土壤可溶性有机碳及氮素的吸收利用使碳氮含量降低,另一方面是亚热带地区适宜的水热条件使表层土壤有机碳及氮素矿化分解,向下层土壤迁移,本研究中 20—80 cm 土层不施肥处理碳氮含量及其储量均大于试验初始土壤含量。而不施肥处理表层碳储量大于初始含量可能是由水稻根系残留带入有机碳<sup>[9]</sup>和长期不施肥使表层土壤容重增加(由  $0.892 \text{ g/m}^3$  增加到  $1.07 \text{ g/m}^3$ )等综合因素引起。徐虎等<sup>[14]</sup>在红壤旱地中的研究结果与本结果有所差异,经过 24 a 的不施肥处理,0—100 cm 各层有机碳储量均有不同程度降低,全氮储量在 40—100 cm 各土层表现出累积趋势,这可能与水田和旱作不同土地利用方式相关。另外,长期施肥增加了 0—80 cm 土层有机碳、全氮及其储量,也说明施肥对碳氮储量的影响有向深层土壤延伸的趋势<sup>[13]</sup>。本研究结果发现,与试验初期相比,不管是施肥或不施肥处理,20—40 cm 土层碳氮含量及储量增幅均最大。这说明红壤水稻土 20—40 cm 土层对碳氮储蓄具有巨大潜力。长期施肥对土壤剖面碳氮含量的影响是作物、土壤、肥料与土壤中小动物及微生物等因素综合作用的结果,周建斌等<sup>[35]</sup>在旱地施肥定位试验中也发现施肥对 20—40 cm 土层土壤各种养分均有提高作用。

土壤碳氮比可以反映土壤碳氮耦合关系,是反映土壤有机碳分解的一个指标。乔云发等<sup>[36]</sup>基于长期

施肥定位试验的研究结果表明,在 0—100 cm 土壤剖面中,土壤全碳和全氮的形成与迁移是同步的,具有较好的线性相关。本研究也有相似的结果,从 0—80 cm 土壤剖面来看,有机碳和全氮储量存在极显著正相关关系。各处理碳氮比虽存在差异,但不显著。总体上,秸秆还田 OF 处理碳氮比较大,而高量氮肥 NPK 处理碳氮比较小,且低于 CK 处理。因为秸秆本身含有较高的碳氮比,分解消耗土壤氮素,使秸秆还田处理碳氮比含量较高<sup>[14]</sup>;较高的氮素输入通常会加速土壤微生物对土壤有机碳的矿化<sup>[37]</sup>,使土壤有机碳积累相对较慢,并且本研究也发现高量化肥处理土体中土壤全氮含量高于其他处理,说明高量氮素的添加使土壤氮素累积速度明显高于其他处理,从而造成较低的土壤碳氮比;长期不施肥,无外源氮的输入,并且作物带走部分土壤氮素,使土壤微生物所需的有效氮含量不足而延缓土壤有机碳的周转<sup>[38-39]</sup>,从而使土壤碳氮比处于相对较高水平。随着土层加深,碳氮比略有下降趋势,但不显著,有研究<sup>[13]</sup>也得出类似结论,这可能与稻田土壤是一种长期处于淹水状态下的熟化土有关。

## 4 结论

(1) 11 a 长期定位施肥后,红壤水稻土 0—80 cm 土壤剖面,土壤碳、氮含量及其储量均随深度加深呈下降趋势。其中减量化肥配施秸秆还田使有机碳含量及其储量随深度呈现显著下降趋势,而不施肥及只施化肥处理在 40—60 cm 和 60—80 cm 土层随深度差异不显著。各处理全氮含量及其储量在 40—60 cm 和 60—80 cm 土层随深度差异不显著。

(2) 红壤稻田土壤有机碳、全氮及碳氮储量对长期不同施肥措施的响应在表层更灵敏。长期不同施肥处理使土壤有机碳、全氮及其储量在 0—20 cm 有显著差异,20—80 cm 各层次处理间无显著差异。

(3) 高量施用化肥使氮素在向土体深处迁移,增大土体氮素储量的同时也增大氮素淋失风险。在 40—80 cm 土层,高量化肥处理土壤全氮储量显著大于 CK 及 OF 处理。

(4) 在 20—40 cm 土层碳氮累积速率最大,并有向深层累积的趋势。长期水稻种植各处理均增加了水稻土 0—80 cm 土体有机碳氮总储量,并且 NPK 处理增加量最大。

(5) 0—80 cm 土体中,红壤水稻土有机碳和全氮储量存在极显著正相关关系( $y = 11.644x - 0.8737, R^2 = 0.9759$ )。长期施肥结果显示秸秆还田有利于增加土壤碳氮比,大量氮肥施用有减小土壤碳氮比趋势。

## 参考文献:

[1] 解宪丽,孙波,潘贤章.红壤丘陵区土壤有机碳储量模拟

[J].中国人口·资源与环境,2010,20(9):146-152.

- [2] 王萍,王少先,夏文建,等.稻田湿地土壤碳固定研究进展[J].江西农业学报,2014,26(1):77-82.
- [3] 吴乐知,蔡祖聪.农业开垦对中国土壤有机碳的影响[J].水土保持学报,2007,21(6):118-121,134.
- [4] 刘守龙,童成立,吴金水,等.稻田土壤有机碳变化的模拟:SCNC 模型检验[J].农业环境科学学报,2006,25(5):1228-1233.
- [5] 吴玉红,郝兴顺,田霄鸿,等.秸秆还田对汉中盆地稻田土壤有机碳组分、碳储量及水稻产量的影响[J].水土保持学报,2017,31(4):325-331.
- [6] 李静,陶宝瑞,焦美玲,等.秸秆还田下我国南方稻田表土固碳潜力研究:基于 Meta 分析[J].南京农业大学学报,2015,38(3):351-359.
- [7] 朱兆良.中国土壤氮素研究[J].土壤学报,2008,45(5):778-783.
- [8] 张刚,王德建,俞元春,等.秸秆全量还田与氮肥用量对水稻产量、氮肥利用率及氮素损失的影响[J].植物营养与肥料学报,2016,22(4):877-885.
- [9] 陈安磊,谢小立,陈惟财,等.长期施肥对红壤稻田耕层土壤碳储量的影响[J].环境科学,2009,30(5):1267-1272.
- [10] 陈安磊,谢小立,文菀玉,等.长期施肥对红壤稻田氮储量的影响[J].生态学报,2010,30(18):5059-5065.
- [11] 成臣,汪建军,程慧煌,等.秸秆还田与耕作方式对双季稻产量及土壤肥力质量的影响[J].土壤学报,2018,55(1):246-256.
- [12] 孙星,刘勤,王德建,等.长期秸秆还田对剖面土壤肥力质量的影响[J].中国生态农业学报,2008,16(3):587-592.
- [13] 孔毅明.施肥措施对稻田土壤碳、氮积累的影响[D].西安:西安建筑科技大学,2012.
- [14] 徐虎,申华平,张文菊,等.长期不同管理措施下红壤剖面碳、氮储量变化特征[J].中国土壤与肥料,2016(4):24-31.
- [15] 盖霞普,刘宏斌,翟丽梅,等.长期增施有机肥/秸秆还田对土壤氮素淋失风险的影响[J].中国农业科学,2018,51(12):2336-2347.
- [16] 陈春兰,陈安磊,魏文学,等.稻田系统生产力及其稳定性对施肥制度的响应[J].中国生态农业学报,2012,20(10):1263-1267.
- [17] 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.
- [18] 张文锋,袁颖红,周际海,等.长期施肥对红壤性水稻土碳库管理指数和双季水稻产量的影响[J].生态环境学报,2016,25(4):569-575.
- [19] 徐香茹,蔡岸冬,徐明岗,等.长期施肥下水稻土有机碳固持形态与特征[J].农业环境科学学报,2015,34(4):753-760.
- [20] 吴建富,曾华研,潘晓华,等.稻草还田方式对双季水稻产量和土壤碳库管理指数的影响[J].应用生态学报,2013,24(6):1572-1578.
- [21] Follett R. Soil management concepts and carbon sequestration in cropland soils[J]. Soil and Tillage Research, 2001,

- 61:77-92.
- [22] 马力,杨林章,肖和艾,等.施肥和秸秆还田对红壤水稻土有机碳分布变异及其矿化特性的影响[J].土壤,2011,43(6):883-890.
- [23] 马力,杨林章,肖和艾,等.长期施肥和秸秆还田对红壤水稻土氮素分布和矿化特性的影响[J].植物营养与肥料学报,2011,17(4):898-905.
- [24] 刘继明,卢萍,徐演鹏,等.秸秆还田对吉林黑土区土壤有机碳、氮的影响[J].中国土壤与肥料,2013(3):96-99.
- [25] 贺美.秸秆还田对黑土有机质变化的影响效应[D].北京:中国农业科学院,2016.
- [26] 王伯仁,李东初,蔡泽江,等.长期不同施肥对红壤碳氮储量的影响[J].土壤通报,2011,42(4):808-811.
- [27] 张邦喜,李渝,罗文海,等.不同施肥模式下黄壤旱地土壤碳氮储量分布特征[J].西北农业学报,2018,27(5):750-756.
- [28] 谢丽娟,王伯仁,徐明岗,等.长期不同施肥下黑土与灰漠土有机碳储量的变化[J].植物营养与学报,2012,18(1):98-105.
- [29] 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.
- [30] Zhao X, Xie Y X, Xiong Z Q, et al. Nitrogen fate and environmental consequence in paddy soil under rice-wheat rotation in the Taihu lake region, China [J]. Plant and Soil, 2009,319:225-234.
- [31] 汪军,王德建,张刚,等.秸秆还田条件下氮肥用量对稻田氮素淋失的影响[J].中国环境科学,2010,30(12):1650-1657.
- [32] 王希玉.长期施肥对红壤水稻土碳氮分布影响的研究[D].长春:东北师范大学,2015.
- [33] Mccarthy J. Carbon fluxes in soil: long-term sequestration in deeper soil horizons [J] Journal Geographical Sciences, 2005,15(2):149-154.
- [34] 陆晴,王玉刚,李彦,等.干旱区不同土壤和作物灌溉量的无机碳淋溶特征试验研究[J].干旱区地理,2013,36(3):450-456.
- [35] 周建斌,李昌伟,赵伯善,等.长期施肥对类土底土养分含量的影响[J].土壤通报,1998,24(1):21-23.
- [36] 乔云发,韩晓增,赵兰坡.长期定位施肥对黑土碳氮储量的影响[J].农业系统科学与综合研究,2011,27(4):480-484.
- [37] Deng L, Peng C H, Zhu GY, et al. Positive responses of belowground C dynamics to nitrogen enrichment in China [J]. Science of the Total Environment, 2018, 616/617:1035-1044.
- [38] 杨艳华,苏瑶,何振超,等.还田秸秆碳在土壤中的转化分配及对土壤有机碳库影响的研究进展[J].应用生态学报,2019,30(2):668-676.
- [39] Chen R, Senbayram M, Blagodatsky S, et al. Soil C and N availability determine the priming effect; microbial N mining and stoichiometric decomposition theories [J]. Global Change Biology, 2014,20(7):2356-2367.

(上接第13页)

- [19] David W, Emmanuelle P, Philippe N A, et al. Tracking the sources of nitrate in groundwater using coupled nitrogen and boron isotopes: A synthesis [J]. Environmental Science & Technology, 2005,39(2):539-548.
- [20] Li W B, Song Y B, Xu H K, et al. Ion-exchange method in the collection of nitrate from freshwater ecosystems for nitrogen and oxygen isotope analysis: a review [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015,22(13):9575-9588.
- [21] Yao L X, Li G L, Tu S H, et al. Salinity of animal manure and potential risk of secondary soil salinization through successive manure application [J]. Science of the Total Environment, 2007,383(1):106-114.
- [22] Liu C Q, Li S L, Lang Y C, et al. Using  $\delta^{15}\text{N}$ - and  $\delta^{18}\text{O}$ -values to identify nitrate sources in karst ground water, Guiyang, southwest China [J]. Environmental Science & Technology, 2006,40(22):6928-6933.
- [23] Sebestyen S D, Ross D S, Shanley J B, et al. Unprocessed atmospheric nitrate in waters of the Northern Forest Region in the U. S. and Canada [J]. Environmental Science & Technology, 2019,53(7):3620-3633.
- [24] Xu S G, Kang P P, Sun Y. A stable isotope approach and its application for identifying nitrate source and transformation process in water [J] Environmental Science and Pollution Research, 2016,23(2):1133-1148.
- [25] Boshers D S, Granger J, Tobias C R, et al. Constraining the oxygen isotopic composition of nitrate produced by nitrification. environmental [J]. Science & Technology, 2019,53(3):1206-1216.
- [26] Buchwald C, Casciotti K L. Oxygen isotopic fractionation and exchange during bacterial nitrite oxidation [J]. Limnology and Oceanography, 2010,55(3):1064-1074.
- [27] Mayer B, Boyer E W, Goodale C, et al. Sources of nitrate in rivers draining sixteen watersheds in the northeastern US: isotopic constraints [J] Biogeochemistry, 2002,57(1):171-197.