

引用格式：

王凤仁, 逢蕾, 沈健林, 李言言, 李宗明, 王娟, 吴金水. 秸秆还田下双季稻田土壤团聚体碳氮磷含量及生态化学计量比特征 [J]. 农业现代化研究, 2023, 44(3): 000-000.

Wang F R, Pang L, Shen J L, Li Y Y, Li Z M, Wang J, Wu J S. Contents and eco-stoichiometric ratios of carbon, nitrogen and phosphorus of soil aggregates in double-cropping rice fields under straw incorporation[J]. Research of Agricultural Modernization, 2023, 44(3): 000-000.

DOI: 10.13872/j.1000-0275.2023.0041



## 秸秆还田下双季稻田土壤团聚体碳氮磷含量及生态化学计量比特征

王凤仁<sup>1,2</sup>, 逢蕾<sup>1\*</sup>, 沈健林<sup>2\*</sup>, 李言言<sup>2</sup>, 李宗明<sup>2</sup>, 王娟<sup>2</sup>, 吴金水<sup>2</sup>

(1. 甘肃农业大学农学院 / 甘肃省干旱生境作物学重点实验室, 甘肃 兰州 730070; 2. 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 / 长沙农业环境观测研究站, 湖南 长沙 410125)

**摘要:** 土壤碳氮磷等养分的含量及其生态化学计量比对作物养分供应有重要影响, 长期秸秆还田如何影响稻田土壤水稳性团聚体碳氮磷含量及生态化学计量比尚不清楚。本研究以双季稻田为研究对象, 设置仅施化肥(CK)、低量秸秆还田+化肥(LS)和高量秸秆还田+化肥(HS)三个处理, 于秸秆还田后的第9~10年测定土壤水稳性团聚体组成及其碳氮磷含量, 分析土壤水稳性团聚体分布、平均重量直径及元素生态化学计量比, 旨在明确长期秸秆还田下双季稻田土壤各粒径水稳性团聚体对碳氮磷养分的贡献及其生态化学计量比特征。结果表明, 秸秆还田后的9~10年, 与CK相比, HS和LS处理显著增加了>0.25 mm粒径水稳性团聚体( $R_{0.25}$ )的占比和平均重量直径(MWD); HS处理显著提高了>2 mm、0.25~1 mm、0.053~0.25 mm和<0.053 mm粒径水稳性团聚体总碳(TC)和总氮(TN)含量, 且增加幅度最大的粒径为0.25~1 mm, 分别为28.1%和22.9%, 而对总磷(TP)含量无显著影响。HS和LS处理较CK显著提高了>2 mm粒径水稳性团聚体对于土壤TC、TN和TP的贡献率, 有助于改善水稻的氮磷吸收。与CK相比, HS处理提高了各主要粒径水稳性团聚体(>2 mm、1~2 mm、0.053~0.25 mm和<0.053 mm)氮磷比和碳磷比, 有利于提高稻田氮素有效性, 且碳磷比未达到限制磷素供应的阈值而没有降低磷素有效性。研究表明, 高量秸秆(6 t/hm<sup>2</sup>)还田提高了稻田水稳性团聚体的稳定性, 提高了土壤碳氮储量, 以及水稳性团聚体氮磷比, 对于改善稻田土壤结构和氮素供应具有较好的效果。

**关键词:** 秸秆还田; 水稳性团聚体; 养分循环; 生态化学计量比; 水稻土

中图分类号: S158.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-0275 (2023) 00-0000-00

### Contents and eco-stoichiometric ratios of carbon, nitrogen and phosphorus of soil aggregates in double-cropping rice fields under straw incorporation

WANG Feng-ren<sup>1,2</sup>, PANG Lei<sup>1</sup>, SHEN Jian-lin<sup>2</sup>, LI Yan-yan<sup>2</sup>, LI Zong-ming<sup>2</sup>,  
WANG Juan<sup>2</sup>, WU Jin-shui<sup>2</sup>

(1. College of Agronomy, and Key Laboratory of Arid Land Crop Science of Gansu Province, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China; 2. Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Regions, and Changsha Research Station for Agricultural & Environmental Monitoring, Institute of Subtropical Agriculture, Changsha, Hunan 410125, China)

**Abstract:** The contents and eco-stoichiometric ratios of soil carbon, nitrogen, and phosphorus have important effects on crop nutrient supply. It is still unclear how long-term straw incorporation affects the carbon, nitrogen, and phosphorus contents and eco-stoichiometric ratio of soil aggregates in paddy fields. In this study, the double-cropping rice field was taken as the research object, and three treatments of only applying chemical fertilizer (CK), low amount straw incorporation + chemical fertilizer (LS), and high amount straw incorporation + chemical fertilizer (HS) were set

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD1700700); 国家自然科学基金项目(42077104, 32160525)。

作者简介: 王凤仁(1996—), 女, 甘肃古浪人, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤结构与农田养分循环, E-mail: 2438054647@qq.com;

通信作者: 逢蕾(1979—), 女, 山东诸城人, 博士, 副教授, 主要从事耕作栽培对土壤生态影响研究, E-mail: pangl@gsau.edu.cn; 沈健林(1982—), 男, 湖南衡阳人, 博士, 研究员, 主要从事碳氮循环研究, E-mail: jlshen@isa.ac.cn。

收稿日期: 2023-01-10; 接受日期: 2023-04-26

**Foundation item:** National Key Research and Development Project of China (2022YFD1700700); National Natural Science Foundation of China (42077104, 32160525).

**Corresponding author:** PANG Lei, E-mail: pangl@gsau.edu.cn; SHEN Jian-lin, E-mail: jlshen@isa.ac.cn.

**Received** 10 January, 2023; **Accepted** 26 April, 2023

up. Soil aggregate composition and its contents of carbon, nitrogen, and phosphorus were measured in 9~10 years after straw incorporation, and the distribution, average weight diameter, and eco-stoichiometric ratio of soil aggregates were also analyzed, so as to clarify the contribution of soil aggregates with different particle sizes to carbon, nitrogen, and phosphorus nutrients and the characteristics of the ecological stoichiometric ratios under long-term straw incorporation in double cropping rice fields. The results showed that in 9~10 years after straw incorporation, compared with CK, HS and LS treatment significantly increased the proportion of water-stable aggregates with the particle size of  $> 0.25$  mm ( $R_{0.25}$ ) and mean weight diameter (MWD). HS treatment significantly increased the total carbon (TC) and total nitrogen (TN) contents of water-stable aggregates with the particle sizes of  $> 2$  mm,  $0.25\sim 1$  mm,  $0.053\sim 0.25$  mm and  $< 0.053$  mm, and the particle size with the largest increase of TC and TN was  $0.25\sim 1$  mm, with an increase of 28.1% and 22.9% respectively, but had no significant impact on the total phosphorus (TP) content. Compared with CK, HS and LS treatments significantly increased the contribution rate of water-stable aggregates  $> 2$  mm to soil TC, TN and TP, which was helpful to improve the nitrogen and phosphorus uptake of rice. Compared with the CK, HS treatment improved the nitrogen phosphorus ratio and carbon phosphorus ratio of water-stable aggregates ( $> 2$  mm,  $1\sim 2$  mm,  $0.053\sim 0.25$  mm and  $< 0.053$  mm), which was beneficial for improving nitrogen availability in rice fields and did not limit phosphorus supply with the carbon phosphorus ratio not exceeding the threshold. This study showed that the high amount of straw ( $6\text{ t/hm}^2$ ) incorporation at can improve the stability of water-stable aggregates, increase soil carbon and nitrogen storage, and the aggregate nitrogen phosphorus ratio, which has a good effect on improving soil structure and nitrogen supply in paddy fields.

**Key words** : straw incorporation; water-stable aggregates; nutrient cycling; eco-stoichiometric ratio; paddy soil

土壤碳、氮和磷是微生物和植物的养分来源, 其不同粒径团聚体中的含量及其生态化学计量比对养分的库容以及作物供给能力均有重要影响<sup>[1]</sup>。但当前作物生产过程中普遍存在偏施化肥现象, 造成土壤理化性质改变, 养分循环受到严重影响<sup>[2]</sup>。而秸秆作为土壤培肥物质, 可在农业生产中代替部分化学肥料, 将其还田后可改善农田土壤质量, 提高养分利用效率<sup>[3]</sup>。因此, 探明秸秆还田措施下不同粒径团聚体中碳、氮和磷养分特征及其生物有效性对提高作物养分利用效率至关重要。

秸秆还田是重要的土壤培肥方式, 对改善土壤结构, 提升土壤有机碳和养分含量均有较好效果<sup>[4]</sup>。Zhao 等<sup>[5]</sup>将玉米秸秆和小麦秸秆混合还田后, 提高了  $0\sim 20$  cm 土层  $> 2$  mm 和  $0.25\sim 2$  mm 粒径团聚体的百分含量 32.0% 和 24.0%。李新悦等<sup>[6]</sup>研究显示, 与常规化肥处理相比, 秸秆还田 + 化肥处理下不同团聚体粒径中与碳循环相关的胞外酶含量不同, 影响有机碳从微团聚体 ( $< 0.25$  mm) 转向大团聚体 ( $> 0.25$  mm), 促使土壤固碳量增加。同时, 土壤生态化学计量比也会随着秸秆还田而变化。如 Liu 等<sup>[7]</sup>通过 682 个全球数据解析土壤生态化学计量对于农田秸秆添加的响应发现, 较单施化学肥料而言, 秸秆还田增加了土壤碳氮比 (C:N) 和碳磷比 (C:P), 秸秆还田使 C:N 和 C:P 比达到饱和的年限后, 作物产量将不再呈现增加的趋势。孙娇等<sup>[8]</sup>将秸秆添加到风沙土中发现, 土壤氮磷比 (N:P) 和速效氮磷比 (AN:AP) 也会随着秸秆还田量的添加而显著增加。上述研究结果表明, 秸秆还田对改变土壤团聚体组成, 和土壤 C:N:P 计量比均有重要影响,

而秸秆还田后对不同粒径土壤团聚体中养分含量及其计量比的影响仍尚不清楚。

双季稻是我国亚热带区域的重要种植制度, 全国种植面积达  $1\ 050$  万  $\text{hm}^2$ <sup>[9]</sup>。前期研究结果表明, 双季稻田长期秸秆还田有助于提高氮肥利用效率<sup>[3]</sup>和土壤磷素有效性<sup>[10]</sup>, 表明了秸秆还田对稻田养分循环的重要影响。然而, 秸秆还田对氮磷养分有效性的影响, 除了其对有机碳的提升作用外, 是否与秸秆还田下土壤团聚体组成及其碳氮磷养分含量及其生态化学计量比的改变有关, 还有待深入研究。因此, 本研究基于不同秸秆还田量的双季稻田定位试验, 于秸秆还田后的 9~10 年测定稻田土壤团聚体的组成及团聚体碳氮磷含量, 分析土壤团聚体分布、平均重量直径及各粒径团聚体碳氮磷生态化学计量比, 旨在明确长期秸秆还田下双季稻田土壤各粒径团聚体对碳氮磷养分的贡献及生态化学计量比特征, 以期为促进秸秆还田下双季稻田氮磷养分高效利用提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验地点位于湖南省长沙县金井镇中国科学院亚热带农业生态研究所长沙农业环境观测研究站 ( $112^{\circ}80' \text{N}$ ,  $28^{\circ}37' \text{E}$ ), 海拔 80 m, 属于亚热带季风气候, 年平均气温  $17^{\circ}\text{C}$ , 年平均降雨量  $1\ 330$  mm, 且主要集中在 3—8 月份, 占全年降雨量的 60% 以上, 无霜期 300 d。试验地为典型双季稻田, 土壤为花岗岩母质发育的水稻土, 土壤发生分类名为麻沙泥, 土壤系统分类名为铁聚水耕土人

为土 (Fe-Accumulic-Stagnic)。试验开始前及开始后第 9~10 年各处理 0~20 cm 耕层土壤基础理化性质见表 1。

## 1.2 试验设计

试验于 2012 年开始, 依据当地水稻秸秆平均产量约为 6 t/hm<sup>2</sup>, 设置仅施化肥 (CK)、低量秸秆还田 (每季 3 t/hm<sup>2</sup>, 相当于一半秸秆还田) + 化肥 (LS) 和高量秸秆还田 (每季 6 t/hm<sup>2</sup>, 相当于秸秆全量还田) + 化肥 (HS) 3 个处理, 每个处理重复 3 次, 共 9 个小区。还田所用的秸秆均来自于上一稻季试验小区, 还田时, 将秸秆截为约 10 cm 长度, 均匀撒入小区, 并用旋耕机翻压于 20 cm 深度。同时, 为保证秸秆还田和未还田小区养分投入量相同, 秸秆还田小区化肥投入量减去秸秆所携带的养分含量 (N : 6.5 g/kg, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> : 1.8 g/kg, K<sub>2</sub>O : 23.4 g/kg)。各处理早稻季施用尿素 (以 N 计) 120 kg/hm<sup>2</sup>, 钙镁磷肥 (以 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 计) 75 kg/hm<sup>2</sup>, 氯化钾 (以 K<sub>2</sub>O 计) 100 kg/hm<sup>2</sup>; 晚稻季磷、钾肥用量与早稻季相同, 氮肥用量为 150 kg/hm<sup>2</sup>。磷、钾肥全部作为基肥施用, 氮肥的基肥、分蘖肥和穗肥施用比例为 5:3:2。小区面积为 35 m<sup>2</sup> (7 m×5 m), 水稻苗移栽的行距和株距均为 20 cm, 采用双季稻耕作制度。供试早稻品种为“潭两优 45”, 晚稻品种为“玉针香”。

## 1.3 样品采集与分析

于 2020 年和 2021 年 (定位试验开始后的第 9~10 年) 早稻收获前进行样品采集, 取 0~15 cm 土层深的原状土, 放入保鲜盒中, 带回实验室进行自然风干, 当土壤水分达到塑限 (含水量 22%~25%) 时将土样掰碎约 1 cm<sup>3</sup> 大小, 继续风干, 待土样完全风干后装袋, 室温保存, 以备后续水稳性团聚体测定。

采用湿筛法<sup>[11]</sup>测定土壤水稳性团聚体。并用四分法取 50 g 风干土, 放入最上部套筛 (孔径依次为 2 mm、1 mm、0.25 mm、0.053 mm) 然后把套筛慢慢浸入无气泡的水桶中进行湿润 10 min, 且使最上部筛子边缘与桶中的水相平, 再把水桶放到土壤团聚体分析仪上 (XY-100; 中国), 以振幅 3 cm,

震动频率为 50 次/min 振荡 30 min 后筛分结束, 收集留在筛子上的各粒径水稳性团聚体, 所有组分于 60 °C 烘干称重后, 将各粒径水稳性团聚体磨细, 过筛, 室温保存。

用碳氮元素分析仪 (Elementar Vario Pyro Cube, Germany) 测定各粒径水稳性团聚体总碳 (TC) 和总氮 (TN) 含量; 采用三酸 (氢氟酸、高氯酸、硝酸) 消解—连续流动分析仪 (Auto Analyzer 3, AA3, SEAL Analytical, Germany) 测定总磷 (TP) 含量。

## 1.4 数据处理与计算

评价土壤稳定性的指标, 水稳性团聚体质量百分含量、粒径 >0.25 mm 水稳性团聚体质量百分含量和平均重量直径计算方法为:

$$w_i = M_i / M_T \quad (1)$$

$$R_{0.25} = M_{T0.25} / M_T \quad (2)$$

$$MWD = \sum_{i=1}^n (x_i w_i) \quad (3)$$

式中:  $w_i$  为  $i$  粒径水稳性团聚体质量百分含量 (%),  $M_i$  为  $i$  粒径水稳性团聚体的质量 (g),  $M_T$  为水稳性团聚体总质量 (g),  $R_{0.25}$  为粒径 >0.25 mm 水稳性团聚体含量 (%),  $M_{T0.25}$  为 >0.25 mm 的水稳性团聚体总质量 (g), MWD 为水稳性团聚体平均重量直径 (mm),  $x_i$  为  $i$  粒径水稳性团聚体平均直径 (mm)。

参考邱莉萍等<sup>[12]</sup>的研究, 计算各粒径水稳性团聚体的 TC、TN 和 TP 的贡献率, 将各粒径团聚体百分比和养分含量相结合, 共同计算团聚体各粒径对于土壤养分的贡献。具体计算方法为:

$$CR_i = w_i \times TX_i / TX_T \times 100\% \quad (4)$$

式中:  $CR_i$  为  $i$  粒径团聚体对土壤总碳 (总氮、总磷) 的贡献率 (%),  $w_i$  为  $i$  粒径水稳性团聚体质量百分含量 (%),  $TX_i$  为  $i$  粒径水稳性团聚体的总碳 (总氮、总磷) 含量 (g/kg),  $TX_T$  为土壤总碳 (总氮、总磷) 含量 (g/kg)。

表 1 供试土壤基础理化性质

Table 1 The basic physical and chemical properties of soil

年份	处理	有机碳 (g/kg)	全氮 (g/kg)	全磷 (g/kg)	pH	容重 (g/cm <sup>3</sup> )
2012		17.5	1.62	0.55	5.60	1.26
	CK	17.8	1.75	0.59	5.41	1.23
2020—2021	LS	20.4	1.92	0.60	5.40	1.19
	HS	22.4	2.14	0.62	5.52	1.16

注: 2012 年为定位试验开始的时间, 2020—2021 年为定位试验开始后 9~10 年本试验采样时间。

试验数据统计及作图采用 Excel 2016 软件, SPSS 25.0 进行单因素方差分析 (One Way-ANOVA) 和 Duncan 法多重比较 ( $P<0.05$ )。

本文中的化学计量比均为质量比, 文中图表所用数据为 2020 年和 2021 年均值。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤水稳性团聚体组成及稳定性分析

各处理下,  $R_{0.25}$  均超过 80.0% (表 2), 说明试验中的稻田土壤结构主要以水稳性大团聚体 (>0.25 mm 粒径) 为主, 且 LS 和 HS 处理的  $R_{0.25}$  和 MWD 显著大于 CK 处理 ( $P<0.05$ ), 表明秸秆还田有利于提高土壤水稳性团聚体稳定性, 主要表现在 >2 mm 粒径。秸秆还田下 <0.25 mm 的粒径进一步分级后 (0.053~0.25 mm 和 <0.053 mm 粒径), 其水稳性团聚体的百分含量, 较 CK 处理显著降低 ( $P<0.05$ )。这与秸秆还田增加土壤有机质有关, 土壤有机质作为团聚体形成的重要胶体物质, 其数量和质量影响团聚体团聚的效果, 伴随着秸秆还田, 土壤有机质会变得丰富, 较小的土壤颗粒会在有机质及作物根系的作用下团聚在一起, 形成较大的颗粒。

表 2 秸秆还田下稻田耕层土壤水稳性团聚体分布特征 (%)

Table 2 Distribution characteristics of soil water-stable aggregates in the tillage layer of the paddy field with straw incorporation

指标	CK	LS	HS
>2 (mm)	42.1±1.3b	49.0±2.2a	53.0±3.3a
1~2 (mm)	14.7±0.5a	14.1±0.7ab	13.0±1.0b
0.25~1 (mm)	23.3±0.6a	21.7±2.8a	20.2±2.7a
0.053~0.25 (mm)	14.0±0.5a	11.0±0.8b	9.8±0.8b
<0.053 (mm)	5.9±0.2a	4.2±0.1b	4.0±0.2b
$R_{0.25}$ (%)	80.1±0.4b	84.8±0.9a	86.2±0.9a
MWD (mm)	1.2±0.0b	1.3±0.0a	1.4±0.0a

注: 同行数据后不同小写字母表示不同处理之间的差异显著 ( $P<0.05$ ), 下同。

### 2.2 土壤水稳性团聚体碳氮磷含量分析

5 个粒径水稳性团聚体中的碳氮磷含量测定的结果表明, 各粒径水稳性团聚体 TC 含量在 13.6~24.4 g/kg 之间 (图 1)。与 CK 相比, HS 处理使土壤获得大量的额外碳源, 促使水稳性团聚体各粒径中的 TC 含量显著增加 (除 1~2 mm 粒径) ( $P<0.05$ )。其中 0.25~1 mm 粒径水稳性团聚体增幅效果最大, 可达 28.1% ( $P<0.05$ ), 此粒径是较小的大团聚体, 既可以通过较大团聚体的崩解获得 TC, 又可以较大的面积以吸附的方式进行碳汇聚, 秸秆还田后外源碳的大量增加促进了此粒径对于 TC 的

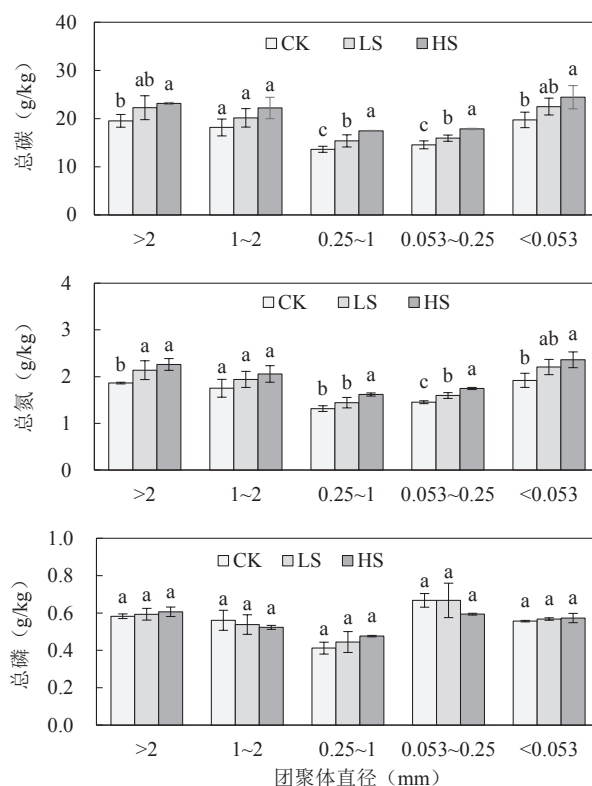


图 1 秸秆还田下稻田耕层土壤水稳性团聚体总碳、总氮和总磷含量

Fig. 1 Contents of total carbon, total nitrogen and total phosphorus of soil water-stable aggregates in the tillage layer of the paddy field with straw incorporation

注: 柱形图上方不同小写字母表示不同处理在相同粒径水稳性团聚体之间的差异显著 ( $P<0.05$ ), 下同。

储存。

各粒径水稳性团聚体 TN 含量范围为 1.3~2.4 g/kg (图 1)。碳氮作为耦合性较强的元素, 其在各粒径水稳性团聚体中的分布具有较高的一致性。本试验研究表明, TN 含量在 CK、LS 和 HS 处理下各粒径水稳性团聚体中的变化趋势与 TC 含量相似; 高量秸秆还田后, 土壤有机质增加, 促进了土壤对于无机氮的固持能力, 所以与 CK 相比, 各粒径水稳性团聚体 (除 1~2 mm 粒径) TN 含量显著增加 ( $P<0.05$ ), 其中 0.25~1 mm 粒径水稳性团聚体增幅效果最大, 增幅达到 22.9%。由于各处理氮素总投入量相同, 表明秸秆还田可以增加土壤对环境氮素 (大气沉降、灌溉和生物固氮) 的固定。

各粒径水稳性团聚体 TP 含量范围为 0.4~0.7 g/kg (图 1)。磷元素具有易被固定特点, LS 和 HS 处理下各粒径水稳性团聚体中的 TP 含量与对照没有显著差异。秸秆还田处理磷素的总投入量与对照处理相同, 表明在总投入量不变的情况下, 秸秆还田能维持土壤总磷的稳定。

### 2.3 土壤水稳性团聚体生态化学计量学特征分析

各粒径水稳性团聚体的 C:N 范围为 10.0~10.8 (图 2), 其比值相对稳定。与 CK 处理相比, 仅 HS 处理显著提高 1~2 mm 粒径水稳性团聚体 C:N, 增幅为 4.2% ( $P<0.05$ )。

各粒径水稳性团聚体的 C:P 的范围为 22.0~42.6。相同处理下 0.053~0.25 mm 粒径水稳性团聚体 C:P 较其他粒径低 (图 2), 这与该粒径较其他粒径相比 TP 含量最高而 TC 含量相对较低有关。与 CK 处理相比, LS 处理显著增加了 >2 mm 和 1~2 mm 粒径水稳性团聚体的 C:P, 增幅分别为 12.6% 和 17.0% ( $P<0.05$ ), 而 HS 处理显著增加了 >2 mm、1~2 mm、0.053~0.25 mm 和 <0.053 mm 粒径水稳性团聚体 C:P, 增幅分别为 14.0%、31.3%、38.0% 和 20.0% ( $P<0.05$ ), 这说明 HS 处理对于微团聚体 (<0.25 mm) 的影响力高于 LS 处理。

各粒径水稳性团聚体的 N:P 范围为 2.2~4.1。其变化趋势与 C:P 相似, 在 0.053~0.25 mm 粒径水稳性团聚体中出现最低值, 进一步证实水稳性团聚体粒径中的 TC 和 TN 含量具有高度的相关性。HS 处理提高了土壤 TN, 进而影响了水稳性团聚体的

N:P, 使其显著增加 (除 0.25~1 mm 粒径), 与 CK 处理相比增幅可达 16.9%~35.3% ( $P<0.05$ )。

## 2.4 水稳性团聚体对土壤养分的贡献率分析

各处理下不同粒径水稳性团聚体对土壤 TC、TN 和 TP 的贡献率由高到低依次为 >2 mm、0.25~1 mm、1~2 mm、0.053~0.25 mm、<0.053 mm (表 3), 这一结果与各粒径水稳性团聚体的分布比例大小一致, 说明水稳性团聚体分布特征对各粒径水稳性团聚体的土壤养分贡献率影响较大。与 CK 处理相比, LS 和 HS 处理下, 0.053~0.25 mm 和 <0.053 mm 粒径水稳性团聚体对土壤 TC、TN 和 TP 的贡献率显著下降, 降幅可达 20.7%~34.4% ( $P<0.05$ )。而 >2 mm 粒径水稳性团聚体对土壤 TC、TN 和 TP 的贡献率则显著增加 ( $P<0.05$ )。这主要与秸秆还田显著提高了 >2 mm 水稳性团聚体组成比例有关。

## 3 讨论

### 3.1 秸秆还田对土壤水稳性团聚体组成的影响

研究表明, 秸秆还田是土壤有机碳最直接且有效的来源, 在其分解过程中微生物以较强的活性参与其中, 促使大量糖类、有机酸和氨基酸等胶结物质产生, 将土壤砂粒、粘粒和已形成的微团聚体通过胶结和缠绕等作用形成大团聚体<sup>[13]</sup>, 提高土壤稳定性, 增加土壤孔隙度和降低土壤容重<sup>[14]</sup>。本试验显示 LS 和 HS 处理下 0.053~0.25 mm 和 <0.053 mm 粒径水稳性团聚体百分含量显著降低。这与在河北栾城潮土小麦—玉米轮作试验中秸秆还田显著提高粒径 >0.25 mm 团聚体含量<sup>[15]</sup>的研究结果相似, 主要原因在于秸秆还田后水稻根系活性增强, 根际分泌物含量提高, 且秸秆还田后微生物量也增加, 从而促进土壤颗粒团聚的胶结物质增加。依据 Six 等<sup>[16]</sup>提出的团聚体周转模型理论推测, 秸秆还田后新形成的土壤环境中团聚力高, 大团聚体抗破碎程度强, 内部崩解形成微团聚体的程度要小于无秸秆还田土壤, 从而对团聚体的周转产生影响, 进一步解释了本试验  $R_{0.25}$  和 MWD 在秸秆还田处理下呈现增加的趋势 (表 2)。宋依依<sup>[17]</sup>等在辽宁沈阳开展的棕壤玉米地秸秆还田试验也表明, 秸秆还田主要以提高 >2 mm 粒径水稳性团聚体百分含量而增加土壤团聚体稳定性。黄璐等<sup>[18]</sup>在山西洪洞县开展的石灰性褐土麦田连续 3 年秸秆还田试验发现, >0.25 mm 团聚体含量随着秸秆还田量的增加而增加, <0.25 mm 微团聚体含量则随秸秆还田量的增加而减少, 证实了秸秆还田可提高土壤大团聚体含量。土壤中 >0.25 mm 的团聚体是土壤中最好的结构体, 其数量

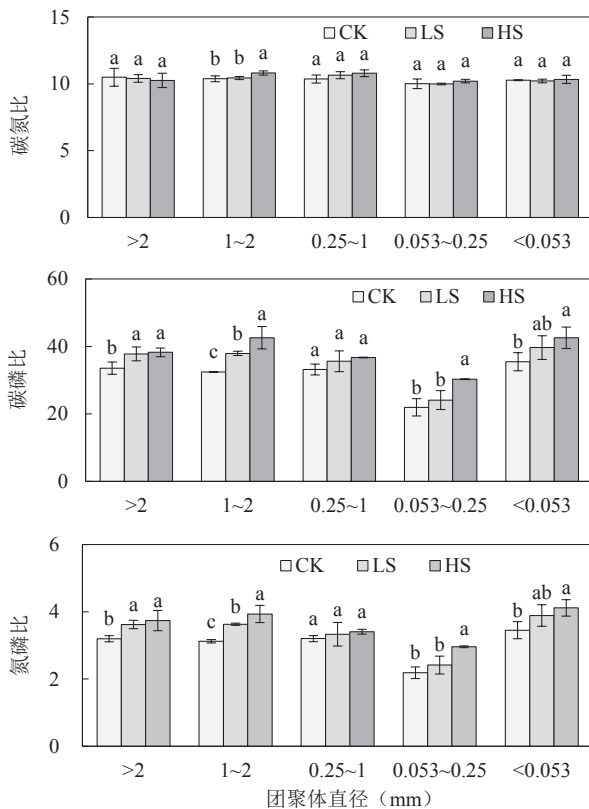


图 2 秸秆还田下稻田耕层土壤水稳性团聚体碳氮磷生态化学计量比

Fig. 2 Eco-stoichiometric ratios of carbon, nitrogen and phosphorus of soil water-stable aggregates in the tillage layer of the paddy field with straw incorporation

表 3 秸秆还田下稻田耕层各粒径水稳性团聚体对土壤养分的贡献率 (%)

Table 3 Contribution rate (%) of water-stable aggregates with different grain sizes to soil nutrients in the tillage layer of the paddy field with straw incorporation

养分	粒径分级 (mm)	CK	LS	HS
总碳	>2	47.1±2.4b	56.9±5.0a	57.7±1.9a
	1~2	15.3±1.0a	14.1±1.1a	13.1±2.3a
	0.25~1	18.3±1.1a	16.7±3.3a	15.8±2.2a
	0.053~0.25	11.7±1.0a	8.8±0.5b	7.8±0.4b
	<0.053	6.7±0.6a	4.5±0.4b	4.4±0.3b
总氮	>2	46.0±2.5b	55.9±7.4a	55.5±0.6a
	1~2	15.1±0.8a	14.6±1.5a	12.5±2.1a
	0.25~1	18.0±1.3a	16.8±2.6a	15.1±1.9a
	0.053~0.25	11.9±0.8a	9.4±0.1b	7.9±0.6c
	<0.053	6.7±0.6a	5.0±0.5b	4.4±0.2c
总磷	>2	33.8±1.5b	43.5±1.6a	47.5±5.1a
	1~2	11.7±1.2a	11.3±0.6a	10.1±1.2a
	0.25~1	13.3±1.7a	14.3±1.7a	14.2±2.2a
	0.053~0.25	12.8±0.4a	11.0±0.7b	8.6±1.2c
	<0.053	4.5±0.3a	3.6±0.1b	3.4±0.1b

与土壤肥力水平呈正相关<sup>[1]</sup>。因此,本试验中秸秆还田较对照显著增加  $R_{0.25}$ ,从而提高土壤团聚体稳定性,改善土壤肥力水平。

### 3.2 秸秆还田影响水稳性团聚体碳氮磷含量对稻田养分循环的意义

土壤养分供应是作物养分吸收的重要来源,也是实现作物高产的重要条件<sup>[19]</sup>。当农田资源秸秆被当作有机肥料归还与土壤后,在微生物的参与下,大量养分释放到土壤中,并进一步被作物吸收,使得更多的养分在生态循环的过程中发挥最大的效益。团聚体作为土壤的重要组成结构,承担着土壤养分保护功能,其中,大团聚体(>0.25 mm)会通过包裹作用维持较多的土壤碳<sup>[20]</sup>。本试验显示,较CK而言,HS处理可以促进更多的碳和氮元素存在于>2 mm和0.25~1 mm粒径水稳性团聚体中,且<0.053 mm粒径水稳性团聚体中TC和TN含量也较高(图1),这是因为微团聚会通过较大的比面积的吸附作用而减少土壤有机碳和氮损失<sup>[20]</sup>。TP在田间处理下各粒径水稳性团聚体中并没有显著性差异(图1),可能与土壤磷元素移动性低,且各处理磷素投入量相同有关。然而,稻田秸秆还田为产甲烷( $\text{CH}_4$ )微生物提供了丰富的碳源,增加 $\text{CH}_4$ 的排放,增强稻田的温室效应<sup>[21]</sup>。且秸秆还田下,土壤碳氮比的提高,会产生正激发效应,促进土壤原有有机碳的矿化<sup>[22]</sup>。综上所述,秸秆还田虽然会改善土壤团粒结构,增加土壤养分循环,但存在增加稻田原有有机碳矿化和增加 $\text{CH}_4$ 排放等不足之处,今后的研究中要综合考虑秸秆还田的养分效益

与温室效应。

本试验结果表明,与CK相比,随着秸秆还田量的提高,如0.053~0.25 mm粒径水稳性团聚体,TC和TN的幅度分别从9.5%~9.9%上升到20.2%~22.6%(图1)。这与王永栋等<sup>[23]</sup>的研究相似,在一定范围内随着秸秆量的增加,微生物可利用的碳源越丰富,而集中在秸秆附近的微生物活性越强<sup>[24]</sup>,所需氮源也随之提高,因此促进秸秆的腐解速率,从而进一步影响土壤水稳性团聚体的TC和TN含量。另一方面,各粒径水稳性团聚体TC、TN和TP含量对于土壤总养分的贡献率随着水稳性团聚体百分含量的变化而变化(表3),所以当秸秆还田显著增加 $R_{0.25}$ 时,>0.25 mm粒径水稳性团聚体的养分对于耕层总养分的贡献率有所提高。以往研究表明,土壤大团聚体是土壤养分氮、磷供应的主要结构单元<sup>[25]</sup>。因此,秸秆还田后土壤大团聚体对氮磷等养分的贡献增加将有利于提高水稻氮磷吸收。这与前期观测到的秸秆还田促进了氮磷吸收的研究结果相一致<sup>[3,10]</sup>。

### 3.3 水稳性团聚体碳氮磷生态化学计量特征对水稻养分吸收的意义

生态化学计量比特征可指示土壤养分在循环过程中的有效性。土壤C:N可指示土壤有机质分解和氮素矿化速率,C:N越低,土壤有机质分解和氮素矿化速率越高<sup>[26]</sup>。本研究显示各粒径水稳性团聚体中的C:N保持在9.8~10.8之间(图2),低于我国农田土壤均值(11.9)<sup>[27]</sup>。LS和HS处理与CK相比并未显著提高各粒径水稳性团聚体的C:N,

说明有机质分解和氮素矿化速率在各粒径水稳性团聚体之间是相似的，这与 C 和 N 同为生命体的必需元素，在生态系统中的积累和消耗相对固定有关。有研究表明土壤 C:P 可指示土壤磷的有效性，C:P 越小，土壤有效磷越高<sup>[28]</sup>。本试验中 HS 处理与 CK 处理投入等量的氮和磷，但秸秆还田会增加额外的碳源，导致 C:P 在 >2 mm、1~2 mm、0.053~0.25 mm 和 <0.053 mm 粒径水稳性团聚体中显著增加 ( $P<0.05$ )，其中 1~2 mm (40.5) 和 <0.053 mm (42.6) 粒径水稳性团聚体的 C:P (图 2) 高于我国农田土壤均值 (38.1)<sup>[29]</sup>。虽然秸秆还田下各土壤水稳性团聚体粒径的 C:P 增加，但根据蒋炳伸等<sup>[10]</sup>的研究，秸秆还田稻田水稻的磷素吸收并未受到限制。这可能与本研究土壤水稳性团聚体的 C:P 虽然增加，但并未达到限制作物磷素限制的阈值，从而不至于影响水稻磷素吸收。

土壤 N:P 可以指示土壤氮素和磷素的供应情况<sup>[30]</sup>，本研究显示 HS 处理与 CK 相比，显著提高了各粒径水稳性团聚体 (除 0.25~1 mm 粒径) 的 N:P ( $P<0.05$ )，其中 >2 mm、1~2 mm 和 <0.053 mm 粒径水稳性团聚体的 N:P 均值 (图 2) 高于我国农田土壤均值 (3.37)<sup>[29]</sup>。这一结果与秸秆还田相较于单施化肥不仅可以提高大团聚体比率而增加对土壤有机氮的固持，还可以通过缓慢的分解过程<sup>[31]</sup>，降低水稻生育期的氮素的径流、淋溶<sup>[32]</sup>和挥发损失<sup>[21]</sup>有关，从而将更多的化肥氮通过植物和微生物转化为有机氮而保存在土壤团聚体中。土壤 N:P 的提高有助于提高土壤氮素有效性，这与我们前期观测到的秸秆还田下水稻氮素利用率提高的研究结果相一致<sup>[3]</sup>。

#### 4 结论

研究表明，双季稻田秸秆还田后的第 9~10 年，土壤 >2 mm 粒径水稳性团聚体的百分含量显著增加，增加幅度 (16.4%~26.0%) 随秸秆还田量的增加而增加。同时，秸秆还田显著增加了各粒径土壤水稳性团聚体 (除 1~2 mm 外) 总碳和总氮含量，增幅分别可达 28.1% 和 22.9%，而对各粒径水稳性团聚体总磷含量没有显著影响。秸秆还田显著提高了 >2 mm 粒径水稳性团聚体对于土壤总碳、总氮和总磷的贡献率。且秸秆还田增加了 >2 mm、1~2 mm、0.053~0.25 mm 和 <0.053 mm 粒径水稳性团聚体氮磷比 (N:P) 和碳磷比 (C:P)，其中高量秸秆还田促进效果更加突出。

双季稻田秸秆还田后增加了土壤团粒结构体和

碳氮储量，对于改善土壤结构和提高土壤肥力具有较好的效果。同时，秸秆还田下土壤水稳性团聚体氮磷比的提高，有助于促进作物对于氮素的吸收和提高氮肥利用效率。

#### 参考文献：

- [1] 周虎, 吕貽忠, 杨志臣, 等. 保护性耕作对华北平原土壤团聚体特征的影响 [J]. 中国农业科学, 2007, 40(9): 1973-1979.  
Zhou H, Lü Y Z, Yang Z C, et al. Effects of conservation tillage on soil aggregate in Huabei plain, China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(9): 1973-1979.
- [2] Zhao J C, Su W H, Fan S H, et al. Ammonia volatilization and nitrogen runoff losses from Moso bamboo forests after different fertilization practices [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2018, 49(3): 213-220.
- [3] Liu J, Jiang B S, Shen J L, et al. Contrasting effects of straw and straw-derived biochar applications on soil carbon accumulation and nitrogen use efficiency in double-rice cropping systems [J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2021, 311(6): 107286. DOI: 10.1016/j.agee.2020.107286.
- [4] 谭亦杭, 沈健林, 蒋炳伸, 等. 秸秆还田与水分管理对双季水稻氮素吸收及氮肥利用率的影响 [J]. 农业现代化研究, 2018, 39(3): 511-519.  
Tan Y H, Shen J L, Jiang B S, et al. The effects of straw incorporation and water management on nitrogen uptake and nitrogen use efficiency in a double rice cropping system [J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2018, 39(3): 511-519.
- [5] Zhao H L, Shar A G, Li S, et al. Effect of straw return mode on soil aggregation and aggregate carbon content in an annual maize-wheat double cropping system [J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 175: 178-186.
- [6] 李新悦, 李冰, 王昌全, 等. 长期秸秆还田对水稻土团聚体有机碳及胞外酶的影响 [J]. 土壤学报, 2023. DOI: 10.11766/trxb202206170325.  
Li X Y, Li B, Wang C Q, et al. Effects of long-term straw returning on organic carbon and extracellular enzymes in paddy soil aggregates [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023. DOI: 10.11766/trxb202206170325.
- [7] Liu J, Qiu T Y, Penuelas J, et al. Crop residue return sustains global soil ecological stoichiometry balance [J]. *Global Change Biology*, 2023, 29(8): 2203-2226.
- [8] 孙娇, 梁锦秀, 孔德杰, 等. 生物炭与秸秆还田对风沙土壤-微生物-胞外酶化学计量特征的影响 [J]. 草业学报, 2021, 30(11): 29-39.  
Sun J, Ling J X, Kong D J, et al. Effects of biochar and straw on the C:N:P stoichiometry of soil, microbes, and extracellular enzymes in an aeolian sandy soil [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, 30(11): 29-39.
- [9] Jiang B S, Shen J L, Sun M H, et al. Soil phosphorus availability and rice phosphorus uptake in paddy fields under various agronomic practices [J]. *Pedosphere*, 2021, 31(1): 103-115.
- [10] 蒋炳伸, 沈健林, 王娟, 等. 秸秆还田稻田土壤生物有效性磷及水稻磷吸收 [J]. 水土保持学报, 2020, 34(6): 309-317.  
Jiang B S, Shen J L, Wang J, et al. Effect of straw incorporation

- on biologically-based phosphorus fractions and phosphorus uptake by rice in paddy field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(6): 309-317.
- [11] Cambardella C A, Elliott E T. Carbon and nitrogen distribution in aggregates from cultivated and native grassland soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, 57(4): 1071-1076.
- [12] 邱莉萍, 张兴昌, 张晋爱. 黄土高原长期培肥土壤团聚体中养分和酶的分布[J]. *生态学报*, 2006, 26(2): 364-372.  
Qiu L P, Zhang X C, Zhang J A. Distribution of nutrients and enzymes in Loess Plateau soil aggregates after longterm fertilization[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(2): 364-372.
- [13] Mangalassery S, Kalaivanan D, Prabha S P. Effect of inorganic fertilisers and organic amendments on soil aggregation and biochemical characteristics in a weathered tropical soil[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 187: 144-151.
- [14] Yuan H Z, Zhu Z K, Wei X M, et al. Straw and biochar strongly affect functional diversity of microbial metabolism in paddy soils[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2019, 18(7): 1474-1485.
- [15] 张玉铭, 胡春胜, 陈素英, 等. 耕作与秸秆还田方式对碳氮在土壤团聚体中分布的影响[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2021, 29(9): 1558-1570.  
Zhang Y M, Hu C S, Chen S Y, et al. Effects of tillage and straw returning method on the distribution of carbon and nitrogen in soil aggregates[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, 29(9): 1558-1570.
- [16] Six J, Paustian K, Elliott E T, et al. Soil structure and organic matter I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(2): 681-689.
- [17] 宋依依, 曹阳, 段鑫盈, 等. 秸秆还田深度对土壤团聚体组成及有机碳含量的影响[J]. *土壤*, 2022, 54(2): 344-350.  
Song Y Y, Cao Y, Duan X Y, et al. Effects of different straw-returning depths on soil aggregate composition and organic carbon distribution[J]. *Soils*, 2022, 54(2): 344-350.
- [18] 黄璐, 赵国慧, 李婷亮, 等. 秸秆还田对黄土旱塬麦田土壤团聚体有机碳组分的影响[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(13): 123-132.  
Huang L, Zhao G H, Li T L, et al. Effects of straw returning on the organic carbon components of soil aggregates in wheat fields on the loess plateau[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(13): 123-132.
- [19] Yadav A N, Kour D, Kaur T, et al. Biodiversity, and biotechnological contribution of beneficial soil microbiomes for nutrient cycling, plant growth improvement and nutrient uptake[J]. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 2021, 33: 102009. DOI: 10.1016/j.bcab.2021.102009.
- [20] Jastrow J D. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral-associated organic matter[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, 28: 665-676.
- [21] Shen J L, Tang H, Liu J Y, et al. Contrasting effects of straw and straw-derived biochar amendments on greenhouse gas emissions within double rice cropping systems[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2014, 188: 264-274.
- [22] Wang D D, Zhu Z K, Shahbaz M, et al. Split N and P addition decreases straw mineralization and the priming effect of a paddy soil: A 100-day incubation experiment[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2019, 55(7): 701-712.
- [23] 王永栋, 武均, 蔡立群, 等. 秸秆还田量对陇中旱作麦田土壤团聚体稳定性和有机碳含量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2022, 40(2): 232-239.  
Wang Y D, Wu J, Cai L Q, et al. Effects of straw returning amount on stability of soil aggregates and organic carbon content in dryland wheat field of the Loess Plateau[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2022, 40(2): 232-239.
- [24] Wang Y L, Wu P N, Mei F J, et al. Does continuous straw returning keep China farmland soil organic carbon continued increase? A meta-analysis[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 288: 112391. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112391.
- [25] Wang R Z, Wu H, Sardans J, et al. Carbon storage and plant-soil linkages among soil aggregates as affected by nitrogen enrichment and mowing management in a meadow grassland[J]. *Plant and Soil*, 2020, 457: 407-420.
- [26] 徐聪, 王策, 李明月, 等. 安新县不同利用方式土壤碳氮磷及生态化学计量特征研究[J]. *林业与生态科学*, 2020, 35(3): 304-313.  
Xu C, Wang C, Li M Y, et al. Study on ecological stoichiometry of soil carbon, nitrogen and phosphorus under different land use patterns in Anxin county[J]. *Forestry and Ecological Sciences*, 2020, 35(3): 304-313.
- [27] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, et al. Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils: A synthesis of observational data[J]. *Biogeochemistry*, 2010, 98(1-3): 139-151.
- [28] Sterner R W, Elser J J. *Ecological Stoichiometry: Overview*[M]. *Encyclopedia of Ecology (Second Edition)*, 2008, 3: 331-345.
- [29] Guo X, Jiang Y F. Spatial characteristics of ecological stoichiometry and their driving factors in farmland soils in Poyang Lake Plain, Southeast China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19(1): 263-274.
- [30] Wei X M, Razavi B S, Hu Y J, et al. C/P stoichiometry of dying rice root defines the spatial distribution and dynamics of enzyme activities in root-detritusphere[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2019, 55(3): 251-263.
- [31] Bao Y Y, Feng Y Z, Stegen J C, et al. Straw chemistry links the assembly of bacterial communities to decomposition in paddy soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, 148: 107866. DOI: 10.1016/j.soilbio.2020.107866.
- [32] 袁浩凌, 黄思怡, 孔小亮, 等. 不同施肥模式对早稻季农田氮磷径流流失的影响[J]. *农业现代化研究*, 2021, 42(4): 776-784.  
Yuan H L, Huang S Y, Kong X L, et al. Effects of different fertilization models on runoff loss of nitrogen and phosphorus in early rice paddy fields[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2021, 42(4): 776-784.