

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2024.32045

稻油轮作下秸秆还田对土壤养分和作物产量的影响

车品高¹ 陈国徽^{1,*} 曹国军¹ 高冰可¹ 陈艳芳¹ 熊文¹ 应治宏¹
周庆友²

¹ 九江市农业科学院, 江西九江 332000; ² 瑞昌市农业农村局, 江西瑞昌 332200

摘要: 为明确长江中下游稻油轮作区不同秸秆还田方式对土壤养分和作物产量的影响。试验于 2016—2023 年在江西省九江市的典型稻油轮作区进行了为期 7 年的秸秆还田定位试验, 设置稻油 2 季秸秆均不还田(CK)、仅油菜季水稻秸秆还田(T1)、仅水稻季油菜秸秆还田(T2)及稻油两季秸秆均还田(T3) 4 个处理, 分别测定了 2022 年水稻季及 2022—2023 年油菜季各作物关键生育期地上部和地下部干物质含量、成熟期作物产量和土壤养分含量。结果表明, 与不还田相比, 秸秆还田显著增加土壤 pH、有机质及 N、P、K 等养分含量。以 T3 处理较为突出, 其在水稻季和油菜季分别显著提高土壤 pH 值 9.7%和 12.9%、碱解氮 32.9%和 25.5%、有效磷 33.5%和 24.3%、速效钾 56.3%和 58.6%、全氮 22.9%和 33.0%、有机质 26.6%和 50.8% ($P < 0.05$)。水稻干物质积累随生育期延长呈先增后降趋势, T2 处理对干物质积累起到显著促进作用, 而 T3 处理对水稻生育前期干物质积累产生一定抑制。与不还田相比, 秸秆还田提高了水稻籽粒产量, 以 T2 增幅最大, 为 13.9% ($P < 0.05$)。油菜干物质积累随生育期延长持续增加, 以 T2 处理对油菜干物质积累促进最显著。与不还田相比, T2 处理油菜籽粒产量增幅最大, 为 20.0% ($P < 0.05$)。相关分析表明, 速效钾与水稻结实率呈极显著正相关($r = 0.84^{**}$, $P < 0.01$), 全氮和速效钾分别与油菜单株分枝角果数($r = 0.705^*$, $r = 0.623^*$, $P < 0.05$)、油菜籽粒产量($r = 0.623^*$, $r = 0.690^*$, $P < 0.05$)呈显著正相关, 表明秸秆还田提高了土壤全氮和速效钾含量可能是导致作物产量提高的主要原因。综合土壤养分、干物质积累及作物产量, 水稻季油菜秸秆还田表现最佳, 可在长江中下游区域进行推广与应用。

关键词: 稻油轮作; 秸秆还田; 土壤养分; 干物质积累; 产量

Effects of straw return on soil nutrients and crop yield in rice-rapeseed rotation

CHE Pin-Gao¹, CHEN Guo-Hui^{1,*}, CAO Guo-Jun¹, GAO Bing-Ke¹, CHEN Yan-Fang¹, XIONG Wen¹, YING Zhi-Hong¹, and ZHOU Qing-You²

¹ Jiujiang Academy of Agricultural Sciences, Jiujiang 332000, Jiangxi, China; ² Ruichang Bureau of Agriculture and Rural Affairs, Ruichang 332200, Jiangxi, China

Abstract: A seven-year field study from 2016 to 2023 was conducted on typical paddy soil in Jiujiang city, Jiangxi province, to evaluate the effects of different straw returning methods on soil nutrients and crop yield in a rice-rapeseed rotation system in the middle-lower Yangtze Plain of China. The study included four treatments: no straw returning (CK), rice straw returning during the rapeseed season (T1), rapeseed straw returning during the rice season (T2), and straw returning during both the rape and rice seasons (T3). Measurements of shoot and root dry matter, crop yield, and soil nutrient content were taken at key growth stages during the 2022 rice season and the 2022–2023 rape season. The results indicated that, compared with CK, straw returning significantly

本研究由江西省现代农业产业技术体系项目(JXARS-02)和九江市市级乡村振兴现代农业发展专项资金项目“水稻‘三增两减’示范项目”(九财文指[2022] 31 号)资助。

This study was supported by Jiangxi Province Modern Agriculture Industry Technology System (JXARS-02) and the Jiujiang Municipal Rural Revitalization Modern Agricultural Development Special Fund Project Rice “Three Increases and Two Reductions” Demonstration Project.

* 通信作者(Corresponding author): 陈国徽, E-mail: diyfuture@foxmail.com

第一作者联系方式: E-mail: 352526772@qq.com

Received (收稿日期): 2023-10-26; Accepted (接受日期): 2024-08-15; Published online (网络出版日期): 2024-09-02.

URL: <https://link.cnki.net/urlid/11.1809.S.20240830.1612.003>

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

increased soil pH and the contents of organic matter, and N, P, K, and other nutrients. The T3 treatment was particularly effective, significantly increasing soil pH by 9.7% and 12.9%, alkali-nitrogen by 32.9% and 25.5%, available phosphorus by 33.5% and 24.3%, available potassium by 56.3% and 58.6%, total nitrogen by 22.9% and 33.0%, and organic matter by 26.6% and 50.8% ($P < 0.05$) in the rice and rape seasons, respectively. Dry matter accumulation in rice initially increased and then decreased as the growth period extended. The T2 treatment significantly promoted dry matter accumulation, whereas the T3 treatment inhibited it during the early stages of rice growth. Compared with straw removal, straw returning increased rice grain yield, with the largest increase of 13.9% observed in the T2 treatment ($P < 0.05$). In rapeseed, dry matter accumulation continued to increase with the growth period, and the T2 treatment most significantly promoted this accumulation. Compared with CK, the T2 treatment resulted in the largest increase in rapeseed grain yield, by 20.0% ($P < 0.05$). Correlation analysis showed that available potassium was significantly positively correlated with the rice seed setting rate ($r = 0.84^{**}$, $P < 0.01$). Total nitrogen and available potassium were significantly positively correlated with the number of pods per plant ($r = 0.705^*$, $r = 0.623^*$, $P < 0.05$) and rape yield ($r = 0.623^*$, $r = 0.690^*$, $P < 0.05$). These findings suggest that the major reason for the yield increase may be the elevated content of soil total nitrogen and available potassium due to straw returning. Considering soil nutrients, dry matter accumulation, and crop yield, rape straw returning during the rice season (T2) performed best and could be recommended for promotion and application in the middle and lower reaches of the Yangtze River.

Keywords: oil rice rotation; returning straw to the field; soil nutrients; dry matter accumulation; yield

随着中国农业综合生产水平的不断提高, 中国秸秆总产量呈不断增长之势, 据统计中国已经成为世界上秸秆年产量最高的国家之一, 但秸秆利用率不足 50%^[1]。高产带来的大量秸秆逐渐成为农业生产中的废弃物, 为不影响下茬作物的生产, 农民往往采用就地焚烧的方式处理秸秆堆积等问题, 不仅浪费了资源, 且造成严重的环境污染^[2]。长江中下游平原是我国三大平原之一, 总面积达 $20 \times 10^4 \text{ km}^2$, 该区域地势低平、水热资源丰富、雨热同期适宜水稻生长, 是我国最大的水稻生产区和重要的商品粮基地^[3], 同时也是我国重要的油菜主产区^[4]。作为重要的稻油轮作区, 如何实现秸秆合理利用, 杜绝焚烧, 对能源高效利用与环境生态健康具有重要意义^[5]。秸秆还田作为一种有效的再利用秸秆资源的农业生产方式, 前人对不同秸秆还田方式对作物产量、品质及土壤养分等方面做了大量研究。已有结果表明, 秸秆还田显著影响水稻产量^[6], 增加了整精米率和食味值^[7], 显著降低土壤容重, 改善土壤结构, 提高土壤养分^[7-10]。秸秆覆盖处理的水稻产量显著高于相同施氮量下无覆盖处理, 减磷和减钾处理的水稻产量也高于无覆盖处理^[11]。然而, 也有学者认为, 大量秸秆还田会造成秸秆腐解缓慢^[12], 对水稻早期生长特别是对分蘖和根系的生长造成不利影响^[13-15]。本研究以前人研究较少的稻油双季作物不同秸秆还田方式作为切入点, 探究稻油轮作区秸秆还田对水稻、油菜干物质积累、产量及土壤养分的影响, 旨在为稻油轮作区秸秆资源高效利用以及还田模式优选提供理论支撑和实践依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验在江西省九江市农业科学院马回岭基地 (29°27'N, 115°48'E) 中低产田进行, 试验地位于长江中下游稻油轮作主产区, 属亚热带季风气候, 海拔 43 m, 2022 年和 2023 年平均气温分别为 18.4℃ 和 18.1℃, 年均降雨量分别为 947.2 mm 和 1328.1 mm (图 1)。

该长期定位试验自 2016 年开始, 试验前长年进行稻油轮作种植。试验前田块土壤 pH 6.47、有效磷 8.4 mg kg^{-1} , 速效钾 91 mg kg^{-1} , 碱解氮 97.2 mg kg^{-1} , 全氮 0.83 g kg^{-1} , 有机质 10.22 g kg^{-1} 。

1.2 试验设计

本试验采用随机区组设计, 共设 4 个处理, 油稻两季秸秆均不还田(CK)、仅油菜季水稻秸秆还田(T1)、仅水稻季油菜秸秆还田(T2)及稻油两季秸秆均还田(T3)。还田处理采取前茬秸秆机械粉碎人工翻压全量还田方式, 秸秆粉碎至 5~10 cm, 翻压深度为 0~20 cm 土层。每个处理设置 3 次重复, 小区长 6 m、宽 5 m, 面积 30 m^2 , 四周设 1 m 以上保护行。为防止水肥渗漏, 小区边缘作埂并覆膜。

供试水稻品种为丰两优香 1 号, 油菜品种为浔油 9 号。水稻每年 5 月中旬播种育秧, 秧龄 28 d, 6 月中旬移栽, 种植行距 0.25 m、株距 0.22 m, 密度为 18 万株 hm^{-2} , 9 月底收获。水稻常规施肥 N : P_2O_5 : $\text{K}_2\text{O} = 180 : 72 : 126 (\text{kg hm}^{-2})$, 磷、钾肥做基肥一次性施入; 氮肥基追比为 6 : 2 : 2, 分别在水稻分蘖期和齐穗期追施。油菜每年 9 月上旬播种

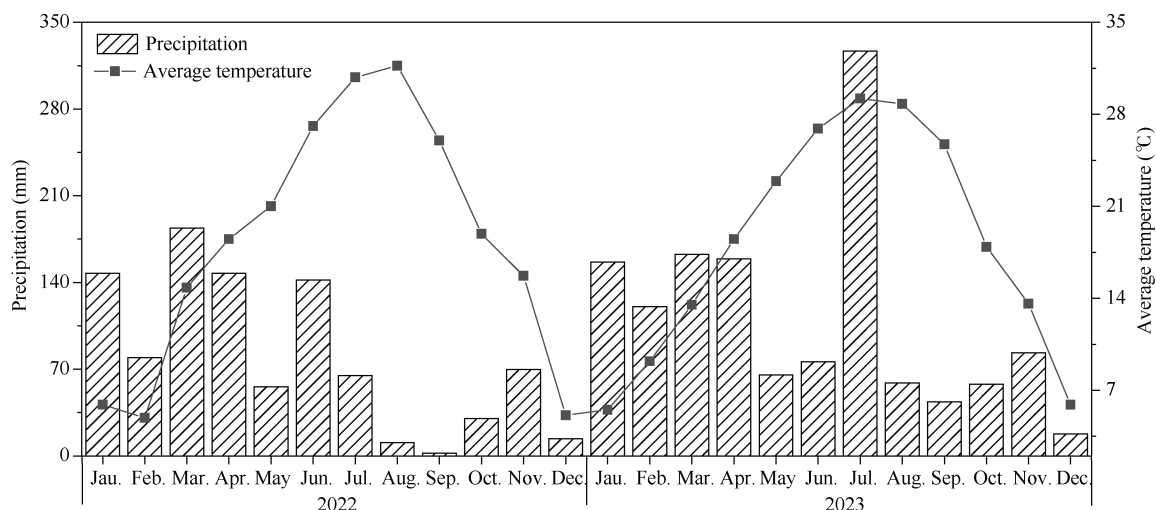


图 1 2022–2023 年试验区平均气温与降水量月变化

Fig. 1 Monthly average temperature and precipitation in the experimental area from 2022 to 2023

育苗, 10 月中旬移栽, 种植行距 0.38 m、株距 0.33 m, 密度为 8 万株 hm^{-2} , 翌年 5 月上旬收获。油菜常规施肥量 $\text{N}:\text{P}_2\text{O}_5:\text{K}_2\text{O} = 150:60:90$ (kg hm^{-2}), 磷、钾肥做基肥一次性施入; 氮肥基追比为 6:2:2, 分别在现蕾期和开花期追施。试验其他田间管理同当地大田。

1.3 项目测定及方法

1.3.1 干物质测定 分别在水稻苗期、分蘖期、齐穗期和成熟期, 油菜苗期、抽薹期、盛花期和成熟期随机选取 10 株水稻和油菜样品, 先将植株周围的土壤轻轻拨开以免损伤根系, 再轻轻晃动植株确保根部土壤已松动, 最后轻轻拔起并将根部用流水洗净。将植株样品地上地下部分开, 以 105°C 杀青 30 min, 80°C 烘干至恒重, 测定关键生育期干物质积累量。

1.3.2 作物产量及其构成因子 成熟期各小区单独采收晒干, 水分含量达 13.5% 时考种测产。此外, 每小区随机选取 10 株(穴)具有代表性植株测定产量构成因子, 其中水稻主要包括株高、有效穗、穗粒数、穗实粒数、结实率和千粒重; 油菜主要包括株高、分枝高度、一级有效分枝数、单株主角果数、单株分枝角果数和每角粒数。

1.3.3 土壤化学性质 试验在 2022 年水稻与 2023 年油菜收获后采集土样, 每个小区按 S 形随机选择 5 个点, 收集 0~20 cm 土层土壤制成混合土样, 采用“四分法”取 1 kg 带回室内风干, 剔除动植物残体和石砾, 磨细过 20 目筛备用。土壤 pH 值采用电位法(水土比 2.5:1.0), 有机质采用 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 容量-外

加热法, 全氮采用浓 H_2SO_4 消化-半微量开氏法, 碱解氮采用 1.0 mol L^{-1} NaOH 碱解扩散法, 有效磷采用 0.5 mol L^{-1} NaHCO_3 浸提-钼锑抗比色法, 速效钾采用 1.0 mol L^{-1} NH_4OAc 浸提-火焰光度法测定。土壤化学指标的测定参考《土壤农化分析》^[16]。

1.4 数据处理

数据用 Microsoft Excel 数据表统计, SPSS 软件进行方差分析, 采用最小显著法(LSD)检验试验资料的差异显著性水平($P < 0.05$), Origin 2018 制图。测算方法: 收获指数=作物经济产量/生物产量 $\times 100\%$ 。

2 结果与分析

2.1 不同处理对作物干物质积累的影响

2.1.1 水稻干物质积累 如图 2-A, B 所示, 各处理水稻地上部分干物质积累从苗期至成熟期逐渐增加, 且在成熟期达最大值, 而水稻地下部干物质积累从苗期至成熟期呈先升后降趋势, 在齐穗期达到最高值。与 CK 相比, T1 处理水稻分蘖期地下干物质重显著降低 15.7% ($P < 0.05$), 但齐穗期与成熟期地下干物质重分别显著提高 20.7% 和 31.6% ($P < 0.05$); T2 处理水稻分蘖期、齐穗期、成熟期地上干物质重分别显著提高 9.7%、2.8% 和 25.1% ($P < 0.05$), 地下干物质重分别显著提高 12.4%、22.0% 和 15.7% ($P < 0.05$); T3 处理分蘖期地下干物质重显著降低 13.8% ($P < 0.05$)。此外, T2 处理水稻齐穗期至成熟期地上干物质提升速率与地下干物质下降速率均高于其他处理。

2.1.2 油菜干物质积累 不同秸秆还田条件下油

菜干物质积累均随生育期延长而增加(图 2-C, D)。与 CK 相比, T1 处理油菜盛花期地上、地下干物质重分别显著增加 20.5% 和 22.4% ($P < 0.05$), 成熟期地下干物质重显著增加 22.8% ($P < 0.05$); T2 处理在油菜抽薹期、盛花期和成熟期地上干物质重分别显著增加 15.1%、23.0% 和 31.6% ($P < 0.05$), 地下干物质重

分别显著增加 17.6%、18.4% 和 35.2% ($P < 0.05$); T3 处理油菜盛花期和成熟期地上干物质重分别显著增加 21.7% 和 14.1% ($P < 0.05$), 地下干物质重分别显著增加 15.3% 和 20.4% ($P < 0.05$)。此外, 在盛花期至成熟期, T2 处理油菜地上、地下干物质积累速率均高于其他处理。

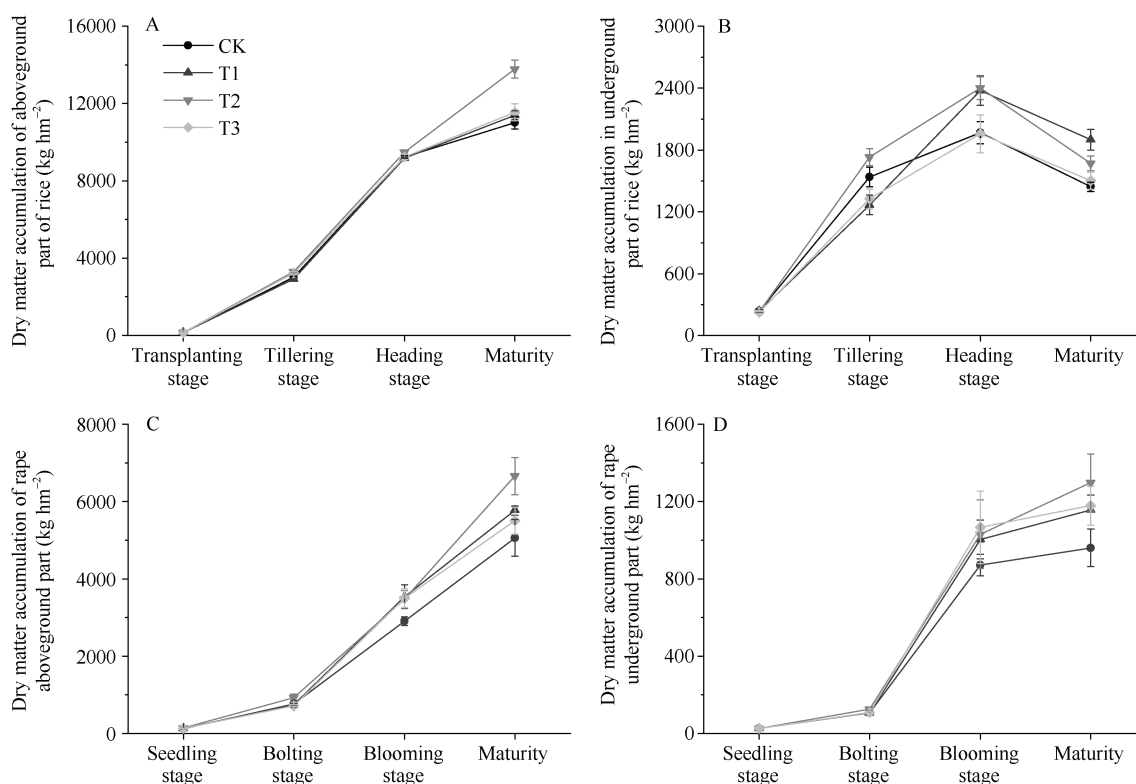


图 2 不同秸秆还田条件下作物干物质积累

Fig. 2 Dry matter accumulation of crops under different straw returning conditions

CK: 稻油 2 季秸秆均不还田; T1: 仅油菜季水稻秸秆还田; T2: 仅水稻季油菜秸秆还田; T3: 稻油两季秸秆均还田。

CK: no straw returning in both rice and rapeseed seasons; T1: rice straw returning only in the rapeseed season; T2: rapeseed straw returning only in the rice season; T3: straw returning in both rice and rapeseed seasons.

2.2 不同处理对作物产量及其构成因子的影响

2.2.1 水稻产量及其构成因子

不同秸秆还田方式对水稻产量及其构成因子影响显著(表 1)。与 CK 相比, T1 处理穗实粒数、结实率和籽粒产量分别显著增加 7.4%、7.2% 和 3.5% ($P < 0.05$), 收获指数显著降低 3.7% ($P < 0.05$); T2 处理株高、有效穗、穗粒数、穗实粒数、结实率和籽粒产量分别显著增加 3.7%、21.9%、3.0%、6.9%、3.8% 和 13.9% ($P < 0.05$), 收获指数显著降低 7.4% ($P < 0.05$); T3 处理结实率显著提高 5.2% ($P < 0.05$), 穗粒数显著降低 2.9% ($P < 0.05$)。综合来看, 不同处理间以 T2 的产量表现最好。

2.2.2 油菜产量及其构成因子

由表 2 所示, 不同秸秆还田处理对油菜产量及其构成因子的影响存在显著差异。与 CK 相比, T1 处理单株分枝角果数显著增加 45.2% ($P < 0.05$); T2 处理株高、一级有效分枝数、单株分枝角果数和籽粒产量分别显著增加 6.0%、17.0%、39.0% 和 20.0% ($P < 0.05$); T3 处理分枝高度显著降低 9.8% ($P < 0.05$), 单株分枝角果数和籽粒产量分别显著增加 24.4% 和 9.1% ($P < 0.05$)。此外, T1、T2、T3 处理油菜的收获指数分别显著降低了 3.4%、6.9% 和 3.4% ($P < 0.05$)。不同处理间, T2 处理的株高有效分枝数、单株主角果数、单株分枝角果数和籽粒产量等均表现最好。

表 1 不同处理水稻产量及构成因子

Table 1 Rice yield and component factors of different treatments

年份 Year	处理 Treatment	株高 Plant height (cm)	有效穗数 Effective panicle (hm ⁻²)	穗粒数 Grains per ear	穗实粒数 Grain number per spike	结实率 Seed-setting rate (%)	千粒重 1000-grain weight (g)	产量 Yield (kg hm ⁻²)	收获指数 Harvest index
2021	CK	107.8±1.90 b	258.3±12.68 ab	194.6±2.35 b	158.4±1.84 b	81.39±1.88 a	21.27±0.90 a	6962.00±159.19 b	0.54±0.01 a
	T1	110.5±1.90 ab	233.0±11.85 c	190.9±3.62 b	142.2±1.79 c	74.46±1.46 c	21.47±0.19 a	7198.40±154.45 ab	0.52±0.01 ab
	T2	113.4±2.26 a	274.1±9.21 a	207.3±2.08 a	164.6±1.79 a	79.38±0.10 ab	21.59±0.06 a	7923.80±61.47 a	0.49±0.01 c
	T3	107.9±1.36 b	251.3±5.12 bc	203.8±2.26 a	157.8±2.08 b	77.39±1.84 b	21.73±0.06 a	7214.75±143.82 ab	0.51±0.02 bc
2022	CK	108.9±1.62 b	233.9±8.21 b	187.0±2.21 b	144.0±2.54 b	76.97±1.40 c	20.98±0.37 a	6686.55±80.71 c	0.54±0.01 a
	T1	109.9±2.89 ab	226.1±4.20 b	187.3±1.56 b	154.6±2.18 a	82.53±0.53 a	20.78±0.41 a	6918.00±102.05 b	0.52±0.01 b
	T2	112.9±1.94 a	285.2±13.53 a	192.6±1.58 a	153.8±3.87 a	79.87±1.37 b	20.81±0.29 a	7617.90±37.53 a	0.50±0.01 b
	T3	106.1±1.15 b	220.8±4.65 b	181.9±2.70 c	147.3±2.48 b	80.98±0.90 ab	21.02±0.44 a	6829.35±80.68 bc	0.54±0.01 a

表中数据为 3 个小区均值±标准差, 不同小写字母表示在 5% 概率水平上差异显著。CK: 稻油 2 季秸秆均不还田; T1: 仅油菜季水稻秸秆不还田; T2: 仅水稻季油菜秸秆不还田; T3: 稻油两季秸秆均不还田。

The data in this table are the mean values of three replicates ± standard deviation. Different lowercase letters indicate significant differences at the 5% probability level. CK: no straw returning in both rice and rapeseed seasons; T1: rice straw returning only in the rapeseed season; T2: rapeseed straw returning only in the rice season; T3: straw returning in both rice and rapeseed seasons.

表 2 不同处理油菜产量及构成因子

Table 2 Yield and yield components of rapeseed under different treatments

年份 Year	处理 Treatment	株高 Plant height (cm)	分枝高度 Branch height (cm)	一级有效分枝数 Number of primary effective	单株主角果数 Number of main pods per plant	单株分枝角果数 Number of branch pods per plant	每角粒数 Seed number per pod	产量 Yield (kg hm ⁻²)	收获指数 Harvest index
2022	CK	153.7±2.21 a	52.00±1.15 b	6.84±0.27 a	58.84±3.10 b	125.76±8.10 c	26.92±2.74 a	1853.32±29.23 c	0.28±0.01 a
	T1	148.8±1.47 b	56.52±2.87 ab	6.83±0.18 a	64.05±4.05 ab	178.47±4.98 a	27.55±1.92 a	1964.22±57.71 b	0.27±0.01 a
	T2	153.4±2.90 a	53.87±3.39 b	6.70±0.15 a	68.29±1.11 a	175.60±7.17 a	27.71±1.06 a	2304.75±41.48 a	0.24±0.01 b
	T3	142.6±2.71 c	60.63±3.44 a	6.21±0.32 b	62.81±2.31 b	147.83±6.17 b	26.26±2.21 a	2035.68±79.74 b	0.25±0.01 b
2023	CK	147.3±4.05 b	65.89±3.42 a	5.89±0.32 b	57.44±3.02 ab	113.19±10.48 c	28.89±2.53 a	1777.78±83.85 c	0.29±0.00 a
	T1	149.9±3.02 b	65.78±2.80 a	6.25±0.38 b	54.33±3.18 b	165.11±6.85 a	29.20±1.33 a	1855.56±47.67 bc	0.28±0.01 b
	T2	156.2±4.33 a	63.22±3.29 ab	6.89±0.16 a	61.89±4.68 a	171.22±12.51 a	29.67±1.76 a	2133.30±33.30 a	0.27±0.01 c
	T3	149.2±3.97 b	59.44±3.56 b	5.94±0.31 b	55.56±1.50 b	140.78±7.03 b	30.00±0.88 a	1938.92±38.48 b	0.28±0.01 b

缩写同表 1。表中数据为 3 个小区均值±标准差, 不同小写字母表示在 5% 概率水平上差异显著。

Abbreviations are the same as those given in Table 1. The data in this table are the mean values of three replicates ± standard deviation. Different lowercase letters indicate significant differences at the 5% probability level.

2.3 不同秸秆还田处理对作物土壤养分的影响

2.3.1 不同处理水稻季土壤养分变化 不同秸秆还田方式对水稻季土壤养分具有显著影响(表 3)。与 CK 相比, T1 处理土壤有效磷和速效钾含量分别显著提高 14.4%和 40.1% ($P < 0.05$); T2 处理土壤 pH 值、

有效磷和速效钾含量分别显著提高 9.0%、25.8%和 39.2% ($P < 0.05$); T3 处理土壤 pH 值、碱解氮、有效磷、速效钾、全氮和有机质含量分别显著提高 9.7%、32.9%、33.5%、56.3%、22.9%和 26.6% ($P < 0.05$)。各处理相比, T3 处理对水稻季土壤养分影响最显著。

表 3 不同秸秆还田处理对土壤养分的影响

Table 3 Soil nutrients under different straw returning treatments

种植季 Cultivation season	处理 Treatment	pH	有效磷 Available P (mg kg ⁻¹)	速效钾 Available K (mg kg ⁻¹)	碱解氮 Alkali N (mg kg ⁻¹)	全氮 Total N (g kg ⁻¹)	有机质 Organic matter (g kg ⁻¹)
水稻季 Rice season	CK	5.78±0.06 b	15.71±0.60 c	57.22±1.34 d	98.29±1.22 b	1.09±0.08 b	16.82±0.55 b
	T1	5.95±0.17 ab	17.98±0.77 b	85.30±1.38 b	107.72±4.80 b	1.30±0.08 ab	18.68±0.81 ab
	T2	6.30±0.04 a	19.76±0.69 a	79.64±0.63 c	108.59±8.45 b	1.22±0.06 ab	18.68±1.61 ab
	T3	6.34±0.28 a	20.97±0.36 a	89.46±1.01 a	130.65±3.98 a	1.34±0.11 a	21.30±2.16 a
油菜季 Rape season	CK	5.19±0.04 b	16.92±0.29 c	56.39±1.25 c	95.82±1.92 b	1.03±0.08 b	15.19±0.23 c
	T1	5.26±0.01 b	18.81±0.03 ab	74.48±2.92 b	104.98±7.50 ab	1.27±0.06 a	19.69±0.42 b
	T2	5.46±0.11 b	18.56±0.73 b	84.84±3.83 a	97.98±6.30 b	1.33±0.05 a	19.34±0.92 b
	T3	5.86±0.18 a	21.04±1.51 a	89.46±1.01 a	120.23±6.22 a	1.37±0.08 a	22.90±0.79 a

缩略词同表 1。不同小写字母表示在 5%概率水平差异显著。

Abbreviations are the same as those given in Table 1. Different lowercase letters indicate significant differences at the 5% probability level.

2.3.2 不同处理油菜季土壤养分变化 由表 3 所示, 不同秸秆还田条件下油菜季土壤养分变化存在显著差异。与 CK 相比, T1 处理土壤有效磷、速效钾、全氮和有机质含量分别显著提高 11.2%、32.1%、23.3%和 29.6% ($P < 0.05$); T2 处理土壤有效磷、速效钾、全氮和有机质含量分别显著增加 9.7%、50.5%、29.1%和 27.3% ($P < 0.05$); T3 处理土壤 pH 值、碱解氮、有效磷、速效钾、全氮和有机质含量分别显著提高 12.9%、25.5%、24.3%、58.6%、33%和 50.8% ($P < 0.05$)。综合各处理对油菜季土壤养分的影响, T3 处理效果最好。

2.4 土壤养分与作物产量及构成因子的相关关系

2.4.1 水稻季 水稻季土壤养分与水稻产量及其构成的相关性表明(图 3-a), 长期秸秆还田下水稻土壤养分指标两两之间均呈显著或极显著的正相关关系。土壤速效钾与水稻结实率呈极显著正相关($r = 0.84^{**}$, $P < 0.01$)。水稻籽粒产量与产量构成因子间的相关性表明, 水稻有效穗、穗粒数和产量呈极显著正相关($P < 0.01$), 穗实粒数与籽粒产量呈显著正相关($r = 0.62^*$, $P < 0.05$)。

2.4.2 油菜季 同水稻季类似, 油菜季土壤养分指标两两之间也均呈显著或极显著的正相关关系(图 3-b)。土壤养分与油菜产量及其构成的相关性分

析表明, 土壤养分与油菜分枝高度均呈显著或极显著负相关关系; 土壤 pH 值与分枝高度呈显著负相关($r = -0.68^*$, $P < 0.05$); 土壤全氮、速效钾与单株分枝角果数呈显著正相关关系($r = 0.71^*$, $r = 0.62^*$, $P < 0.05$), 与籽粒产量也呈显著正相关关系($r = 0.62^*$, $r = 0.69^*$, $P < 0.05$)。油菜籽粒产量与产量构成因子间的相关性表明, 油菜株高和单株分枝角果数呈显著正相关关系($P < 0.05$)。

3 讨论

3.1 秸秆还田对作物土壤养分的影响

3.1.1 秸秆还田对水稻土壤养分的影响 本研究表明, 稻油轮作模式下秸秆还田导致水稻土壤 pH 显著上升, 与洪春来等^[17]研究结果一致。作物收获后从土壤中带走了大量碱性物质, 秸秆还田可提高土壤的酸碱度^[18-19]。吕焕哲等^[20]研究认为, 施用适量水稻秸秆可以有效提高酸性红壤的 pH。秸秆还田处理有助于土壤有机质的提高, 其中稻油两季秸秆均还田处理效果显著。土壤有机质含量取决于原有有机质的矿化速率及外源有机物的补充量^[21]。此外, 稻草腐解会释放出丰富的 C、N、P、K 及微量元素, 这可作为土壤中作物所需营养元素的有效补充, 并且对土壤有机质和养分含量增加产生积极正效应^[22]。

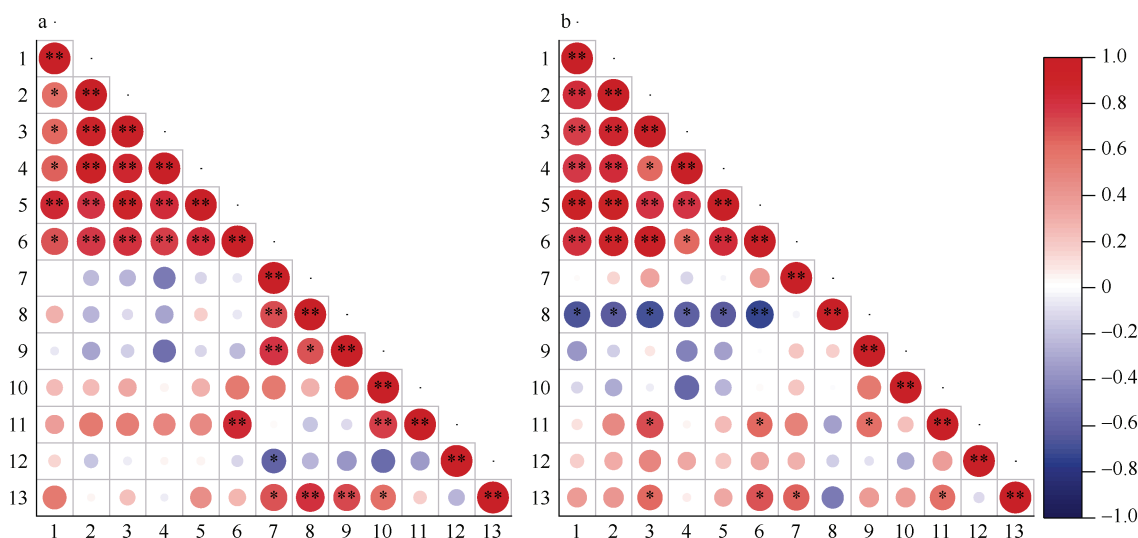


图 3 作物土壤养分与作物产量及构成因子间相关性

Fig. 3 Correlation between soil nutrients and crop yield and yield components

图 a 中数字 1~13 分别代表水稻季土壤 pH 值、有机质、全氮、碱解氮、有效磷、速效钾、水稻株高、有效穗、穗粒数、穗实粒数、结实率、千粒重和籽粒产量; 图 b 中数字 1~13 分别代表油菜季土壤 pH 值、有机质、全氮、碱解氮、有效磷、速效钾、油菜株高、分枝高度、一级有效分枝数、单株主角果数、单株分枝角果数、每角粒数和籽粒产量。* 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 概率水平(双侧)显著相关。

In Fig. a, numbers 1~13 represent the soil pH, organic matter, total N, alkali N, available P, available K, plant height, effective panicle, total grain number per panicle, filled grain number per panicle, setting percentage, 1000-grain weight, and grain yield in rice season, respectively. In Fig. b, numbers 1~13 in represent the soil pH, organic matter, total N, alkali N, available P, available K, plant height, branch height, effective branch number, main pod number, branch pod number per plant, seed number per pod, and grain yield in rape season, respectively. * and ** indicate significant correlations at the 0.05 and 0.01 probability levels (bilateral), respectively.

本试验结果表明, 秸秆还田处理显著提高了水稻土壤有效磷和速效钾的含量。这与磷、钾素在秸秆中多以离子形态存在更易被分解释放密不可分^[23], 还与新鲜有机秸秆分解产生酸类物质促进矿物晶格中磷钾元素释放有关^[24]。

3.1.2 秸秆还田对油菜土壤养分的影响 范呈根^[25]研究表明, 稻草还田可以提高土壤有机质、全氮和有效硅含量, 从而提高土壤肥力。本研究表明, 秸秆还田处理下油菜土壤 pH 均有提高, 但相较水稻季增幅较小, 这与淹水条件下高价氧化性物质发生还原反应消耗了系统中部分 H^+ ^[26]有关。秸秆还田处理下油菜土壤氮素(全氮、碱解氮)含量均有所增加, 其中 T3 处理增加显著, 这可能是由于稻油两季秸秆均还田秸秆还田量远高于其他处理, 而水稻与油菜秸秆含氮量(水稻秸秆 0.45%, 油菜秸秆 0.43%)^[27]相当, 因此 T3 处理秸秆带入土壤的纯氮总量远高于单油菜或单水稻秸秆还田。

3.2 秸秆还田对作物干物质积累的影响

3.2.1 秸秆还田对水稻干物质积累的影响 本研究结果表明, 不同秸秆还田方式下水稻干物质积累总体趋势未见差异。稻油两季秸秆还田, 水稻分蘖

期地上、地下干物质积累均显著降低, 这可能是由于双季作物秸秆还田量高于其他处理, 导致生育前期土壤微生物在分解秸秆过程中与水稻争氧, 土壤供氧减少造成水稻干物质积累减少, 这与前人研究结果^[28-31]一致。油菜秸秆还田处理, 齐穗至成熟期地上部干物质积累的上升速率与地下部干物质的下降速率最大, 这可能是秸秆还田有助于该时期地下部分氮素含量和干物质积累量的提升^[32], 在生育后期水稻大量营养物质从根系向籽粒转移导致^[33]。不同处理干物质积累总量越高, 收获指数越低, 这与李敏等^[34]研究结果一致。

3.2.2 秸秆还田对油菜干物质积累的影响 苏伟^[35]研究表明, 稻草翻压还田在整个生育期均有利于油菜的干物质积累。本研究结果与其类似, 即随生育期延长, 油菜干物质积累持续增加。此外, 研究还发现, 不同秸秆还田处理对油菜关键生育期的干物质积累存在差异, 其中 T1 与 T3 处理在抽薹期地上部干物质积累较 CK 略有降低, 但未表现出显著差异。可能是在稻秸翻压还田初期, 参与腐解的微生物对土壤氮素的固定往往导致作物氮素供应不足, 进而影响作物的生长^[36]。T2 处理在抽薹期地上部干

物质积累略有增加,这可能是由于该处理油菜季未添加秸秆,前茬水稻季将秸秆充分腐解,释放了更多养分。3种秸秆还田处理油菜地下干物质积累表现出生育前期无明显差异,生长后期促进作用明显。这可能是油菜生长初期冬季气温低,作物秸秆腐解速率较慢,而春季随着温度升高和降水增加,作物秸秆腐解速率加快^[37]。

3.3 秸秆还田对作物产量及构成因子的影响

3.3.1 秸秆还田对水稻产量及构成因子的影响

本研究发现,不同秸秆还田处理均提高了水稻产量,但处理间产量增幅存在差异。这与吴玉红等^[38]研究结果相似。从产量构成来看,不同秸秆还田处理均提高水稻的实粒数与结实率,但不同处理间存在差异,这可能是秸秆类型与还田量存在差异所致。本研究中,与不还田相比,仅油菜秸秆还田水稻有效穗提高显著,这可能是由于油菜秸秆相较于水稻秸秆更易被分解^[39],且油菜秸秆养分释放率高于水稻^[40],有利于水稻生长。碳水化合物的积累有利于水稻分蘖的维持^[41]。

3.3.2 秸秆还田对油菜产量及构成因子的影响

靳玉婷等^[42]研究表明,油菜-水稻轮作模式下秸秆还田配施化肥能够在保证作物产量的同时提高土壤养分含量,降低氮磷流失。王天尧等^[43]研究表明,不同油菜品种在不同年度秸秆还田翻耕较不还田翻耕均增产,秸秆还田有利于提高后茬直播冬油菜的产量。本研究结果表明,3种不同秸秆还田处理均提高了油菜产量,T2处理产量增幅最大且达显著性水平,这与油菜干物质积累变化一致。

本研究显示,秸秆还田处理促进了有效分枝的发育,提高了油菜单株分枝角果数、每角粒数。这与陈红琳等^[44]和吴玉红等^[45]研究结果基本一致。但本研究同时发现,不同还田处理对主角果数的影响存在差异,T3与T1处理主角果数显著降低,而T2主角果数显著增加。这可能是T3与T1处理在油菜生长初期,参与腐解的微生物迅速繁殖,土壤中的有效态氮被生物暂时固定^[46],油菜在生育前期不能积累足够营养,花期变短从而开花数目减少^[47]。

4 结论

研究表明,稻油模式下秸秆还田提高了土壤pH、有机质及N、P、K等养分含量,进而提高水稻实粒数、结实率和油菜有效分枝数、单株分枝角果数,促进了作物干物质积累和籽粒产量的形成。各

处理间,以双季秸秆还田对提升土壤肥力效果更好,而仅水稻季油菜秸秆还田对于提高作物产量效果更好。仅水稻季油菜秸秆还田综合效果更好,建议在长江中下游油稻轮作区进行推广。

References

- [1] 何虎, 吴建富, 曾研华, 胡凯, 黄山, 曾勇军, 潘晓华, 石庆华. 稻草全量还田下氮肥运筹对双季晚稻产量及其氮素吸收利用的影响. 植物营养与肥料学报, 2014, 20: 811–820.
He H, Wu J F, Zeng Y H, Hu K, Huang S, Zeng Y J, Pan X H, Shi Q H. Effects of nitrogen management on yield and nitrogen utilization of double cropping late rice under total rice straw incorporation. *J Plant Nutr Fert*, 2014, 20: 811–820 (in Chinese with English abstract).
- [2] Shi T T, Liu Y Q, Zhang L B, Hao L, Gao Z Q. Burning in agricultural landscapes: an emerging natural and human issue in China. *Landsc Ecol*, 2014, 29: 1785–1798.
- [3] 张树杰, 张春雷. 气候变化对我国油菜生产的影响. 农业环境科学学报, 2011, 30: 1749–1754.
Zhang S J, Zhang C L. Influences of climate changes on oilseed rape production in China. *J Agro-Environ Sci*, 2011, 30: 1749–1754 (in Chinese with English abstract).
- [4] 陈中督, 徐春春, 纪龙, 方福平. 2004–2015年长江中下游地区冬油菜生产碳足迹的时空变化. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27: 1105–1114.
Chen Z D, Xu C C, Ji L, Fang F P. Spatial and temporal changes in carbon footprint for oilseed rape production in the middle and lower reaches of Yangtze River during 2004–2015. *Chin J Eco-Agric*, 2019, 27: 1105–1114 (in Chinese with English abstract).
- [5] 陈国徽, 赵小敏, 谢国强, 张颂, 高冰可, 陈艳芳, 曹国军, 蒋发辉. 油稻轮作下秸秆还田对土壤化学性质及作物产量的影响. 江西农业大学学报, 2022, 44: 813–824.
Chen G H, Zhao X M, Xie G Q, Zhang S, Gao B K, Chen Y F, Cao G J, Jiang F H. Effect of straw return on soil chemical properties and crop yield in rice-rape rotation. *Acta Agric Univ Jiangxiensis*, 2022, 44: 813–824 (in Chinese with English abstract).
- [6] 伍佳, 王忍, 吕广动, 隆斌庆, 杨飞翔, 陈慧娜, 黄璜. 不同秸秆还田方式对水稻产量及土壤养分的影响. 华北农学报, 2019, 34(6): 177–183.
Wu J, Wang R, Lyu G D, Long B Q, Yang F X, Chen H N, Huang H. Effects of different straw returning ways on rice yield and soil nutrients. *Acta Agric Boreali-Sin*, 2019, 34(6): 177–183 (in Chinese with English abstract).
- [7] 吴玉红, 王吕, 崔月贞, 郝兴顺, 王保军, 田霄鸿, 李小刚, 秦宇航. 轮作模式及秸秆还田对水稻产量、稻米品质及土壤肥力的影响. 植物营养与肥料学报, 2021, 27: 1926–1937.
Wu Y H, Wang L, Cui Y Z, Hao X S, Wang B J, Tian X H, Li X G, Qin Y H. Effects of rotation mode and straw returning on rice yield, rice quality and soil fertility. *J Plant Nutr Fert*, 2021, 27: 1926–1937 (in Chinese with English abstract).
- [8] 李书田, 金继运. 中国不同区域农田养分输入、输出与平衡. 中国农业科学, 2011, 44: 4207–4229.
Li S T, Jin J Y. Nutrient input, output and balance of farmland in different regions of China. *Sci Agric Sin*, 2011, 44: 4207–4229 (in

- Chinese with English abstract).
- [9] 孙小祥, 常志州, 靳红梅, 沈明星, 陆长婴, 王海候. 太湖地区不同秸秆还田方式对作物产量与经济效益的影响. *江苏农业学报*, 2017, 33: 94–99.
Sun X X, Chang Z Z, Jin H M, Shen M X, Lu C Y, Wang H H. Effects of different straw returning methods on crop yield and economic benefit in Taihu Lake area. *Jiangsu J Agric Sci*, 2017, 33: 94–99 (in Chinese with English abstract).
- [10] 管方圆, 刘琛, 傅庆林, 李鹏, 林义成, 郭彬. 添加秸秆对水稻产量和土壤碳氮及微生物群落的影响. *农业工程学报*, 2022, 38(2): 223–230.
Guan F Y, Liu C, Fu Q L, Li P, Lin Y C, Guo B. Effects of straw addition on rice yield, soil carbon, nitrogen, and microbial community. *Trans CSAE*, 2022, 38(2): 223–230 (in Chinese with English abstract).
- [11] 刘禹池, 曾祥忠, 冯文强, 秦鱼生, 王昌全, 涂仕华, 陈道全. 稻-油轮作下长期秸秆还田与施肥对作物产量和土壤理化性状的影响. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20: 1450–1459.
Liu Y C, Zeng X Z, Feng W Q, Qin Y S, Wang C Q, Tu R H, Chen D Q. Effects of long-term straw returning and fertilization on crop yield and soil physicochemical properties under rice-tanker cropping. *J Plant Nutr Fert*, 2014, 20: 1450–1459 (in Chinese with English abstract).
- [12] 白重阳, 秦猛, 崔士泽, 赵爽, 杨丽爽, 韩文博, 郑桂萍, 刘丽华. 膨化秸秆还田对寒地水稻产量、品质及氮素利用的影响. *中国稻米*, 2022, 28: 38–40.
Bai C Y, Qin M, Cui S Z, Zhao S, Yang L S, Han W B, Zheng G P, Liu L H. Effects of expanded straw returning on yield, quality and nitrogen use of rice in cold region. *China Rice*, 2022, 28: 38–40 (in Chinese with English abstract).
- [13] 郝建华, 丁艳锋, 王强盛, 刘正辉, 李刚华, 乔晶, 刘杨, 王绍华. 麦秸还田对水稻群体质量和土壤特性的影响. *南京农业大学学报*, 2010, 33(3): 13–18.
Hao J H, Ding Y F, Wang Q S, Liu Z H, Li G H, Qiao J, Liu Y, Wang S H. Effects of wheat straw returning on rice population quality and soil characteristics. *J Nanjing Agric Univ*, 2010, 33(3): 13–18 (in Chinese with English abstract).
- [14] 刘世平, 聂新涛, 戴其根, 霍中洋, 许轲. 免耕套种与秸秆还田对水稻生长和稻米品质的影响. *中国水稻科学*, 2007, 21: 71–76.
Liu S P, Nie X T, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K. Effects of no-tillage intercropping and straw returning on rice growth and quality. *Chin J Rice Sci*, 2007, 21: 71–76 (in Chinese with English abstract).
- [15] 马宗国, 卢绪奎, 万丽, 陈祖光, 左辉. 小麦秸秆还田对水稻生长及土壤肥力的影响. *作物杂志*, 2003, (5): 37–38.
Ma Z G, Lu X K, Wan L, Chen Z G, Zuo H. Effects of wheat straw returning on rice growth and soil fertility. *Crops*, 2003, (5): 37–38 (in Chinese).
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析(第 3 版). 北京: 中国农业出版社, 2000. pp 25–109.
Bao S D. Soil agrochemical analysis, 3rd edn. Beijing: China Agriculture Press, 2000. pp 25–109 (in Chinese).
- [17] 洪春来, 魏幼璋, 黄锦法, 王润屹, 杨肖娥. 秸秆全量直接还田对土壤肥力及农田生态环境的影响研究. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2003, 29: 627–633.
Hong C L, Wei Y Z, Huang J F, Wang R Y, Yang X E. Study on the effect of total straw returning directly on soil fertility and farmland ecological environment. *J Zhejiang Univ (Agric Life Sci)*, 2003, 29: 627–633 (in Chinese with English abstract).
- [18] 于天一, 孙秀山, 石程仁, 王才斌. 土壤酸化危害及防治技术研究进展. *生态学杂志*, 2014, 33: 3137–3143.
Yu T Y, Sun X S, Shi C R, Wang C B. Research progress on soil acidification hazards and control techniques. *Chin J Ecol*, 2014, 33: 3137–3143 (in Chinese with English abstract).
- [19] 武志杰, 张海军, 许广山, 张玉华, 刘春萍. 玉米秸秆还田培肥土壤的效果. *应用生态学报*, 2002, 13: 539–542.
Wu Z J, Zhang H J, Xu G S, Zhang Y H, Liu C P. Effect of maize straw returning on soil fertility. *Chin J Appl Ecol*, 2002, 13: 539–542 (in Chinese with English abstract).
- [20] 吕焕哲, 王凯荣, 谢小立, 王开峰. 有机物料对酸性红壤铝毒的缓解效应. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13: 637–641.
Lyu H Z, Wang K R, Xie X L, Wang K F. Alleviation effect of organic materials on aluminum toxicity in acid red soil. *Plant Nutr Fert Sci*, 2007, 13: 637–641 (in Chinese with English abstract).
- [21] 高亚军, 朱培立, 黄东迈, 王志明, 李生秀. 稻麦轮作条件下长期不同土壤管理对有机质和全氮的影响. *土壤与环境*, 2000, 9(1): 27–30.
Gao Y J, Zhu P L, Huang D M, Wang Z M, Li S X. Long-term impact of different soil management on organic matter and total nitrogen in rice-based cropping system. *Soil Environ Sci*, 2000, 9(1): 27–30 (in Chinese with English abstract).
- [22] 武际, 郭熙盛, 鲁剑巍, 万水霞, 王允青, 许征宇, 张晓玲. 不同水稻栽培模式下小麦秸秆腐解特征及对土壤生物学特性和养分状况的影响. *生态学报*, 2013, 33: 565–575.
Wu J, Guo X S, Lu J W, Wan S X, Wang Y Q, Xu Z Y, Zhang X L. Decomposing characteristics of wheat straw under different rice cultivation patterns and its effects on soil biological characteristics and nutrient status. *Acta Ecol Sin*, 2013, 33: 565–575 (in Chinese with English abstract).
- [23] 李逢雨, 孙锡发, 冯文强, 秦鱼生, 王昌全, 涂仕华. 麦秆、油菜秆还田腐解速率及养分释放规律研究. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15: 374–380.
Li F Y, Sun X F, Feng W Q, Qin Y S, Wang C Q, Tu S H. Nutrient release patterns and decomposing rates of wheat and rapeseed straw. *Plant Nutr Fert Sci*, 2009, 15: 374–380 (in Chinese with English abstract).
- [24] 罗珠珠, 黄高宝, 张仁陟, 蔡立群, 李玲玲, 谢军红, Guangdi Li. 长期保护性耕作对黄土高原旱地土壤肥力质量的影响. *中国生态农业学报*, 2010, 18: 458–464.
Luo Z Z, Huang G B, Zhang R Z, Cai L Q, Li L L, Xie J H, Guangdi L. Effect of long-term conservation tillage on soil fertility in rain-fed areas of the Loess Plateau. *Chin J Eco-Agric*, 2010, 18: 458–464 (in Chinese with English abstract).
- [25] 范呈根. 稻草不同还田方式对水稻产量、养分吸收特性和土壤肥力的影响. 江西农业大学硕士学位论文, 江西南昌, 2017.
Fan C G. Effects of Different Rice Straw Returning Methods on Rice Yield, Nutrient Absorption Characteristics and Soil Fertility. MS Thesis of Jiangxi Agricultural University, Nanchang, Jiangxi, China, 2017 (in Chinese with English abstract).
- [26] 戴志刚, 鲁剑巍, 鲁明星, 杨文兵, 范先鹏. 油菜秸秆用量对淹水培养土壤表层溶液理化性质的影响. *水土保持学报*, 2010,

- 24(1): 197–201.
- Dai Z G, Lu J W, Lu M X, Yang W B, Fan X P. Effect of rape straw rate on physicochemical properties of soil surface solution under waterlogged incubation. *J Soil Water Conserv*, 2010, 24(1): 197–201 (in Chinese with English abstract).
- [27] 戴志刚, 鲁剑巍, 李小坤, 鲁明星, 杨文兵, 高祥照. 不同作物还田秸秆的养分释放特征试验. 农业工程学报, 2010, 26(6): 272–276.
- Dai Z G, Lu J W, Li X K, Lu M X, Yang W B, Gao X Z. Nutrient release characteristics of different crop straws manure. *Trans CSAE*, 2010, 26(6): 272–276 (in Chinese with English abstract).
- [28] 游来勇, 李冰, 王昌全, 杨娟, 白根川, 黄春. 秸秆还田量对麦-稻轮作体系作物产量、氮素吸收利用效率的影响. 核农学报, 2015, 29: 2394–2401.
- You L Y, Li B, Wang C Q, Yang J, Bai G C, Huang C. Effects of straw returning amount on crop yield, nitrogen uptake and utilization efficiency in wheat-rice rotation system. *J Agric Nucl Sci*, 2015, 29: 2394–2401 (in Chinese with English abstract).
- [29] 季红娟, 赵步洪, 陈刚, 郑青松, 张小祥, 李育红, 肖宁, 潘存红, 李爱宏. 扬梗 805 产量和品质对麦秸还田与施氮量的响应. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2016, 37(4): 60–64.
- Ji H J, Zhao B H, Chen G, Zheng Q S, Zhang X X, Li Y H, Xiao N, Pan C H, Li A H. Response of yield and quality of Yangjing 805 to wheat straw returning and nitrogen application rate. *J Yangzhou Univ (Agric Life Sci)*, 2016, 37(4): 60–64 (in Chinese with English abstract).
- [30] 裴鹏刚. 秸秆还田耦合施氮水平对稻田土壤生化特征及水稻生育特性的影响. 中国农业科学院硕士学位论文, 北京, 2014.
- Pei P G. Effects of Straw Returning Coupled with Nitrogen Application on Soil Biochemical Characteristics and Rice Growth Characteristics. MS Thesis of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing, China, 2014 (in Chinese with English abstract).
- [31] 苏卫, 冯跃华, 许桂玲, 管正策, 欧达, 张佳凤, 王玲莉. 秸秆还田与施氮量对喀斯特地区杂交水稻干物质积累和产量的影响. 核农学报, 2019, 33: 1856–1864.
- Su W, Feng Y H, Xu G L, Guan Z C, Ou D, Zhang J F, Wang L L. Effects of straw returning and nitrogen application rate on dry matter accumulation and yield of indica hybrid rice in Karst Region. *J Nucl Agric Sci*, 2019, 33: 1856–1864 (in Chinese with English abstract).
- [32] 马春梅, 王永吉, 于舒函, 王家睿. 稻草还田与施氮量对水稻氮素吸收及产量影响. 东北农业大学学报, 2017, 48(6): 9–16.
- Ma C M, Wang Y J, Yu S H, Wang J R. Effects of straw returning and nitrogen application rate on nitrogen uptake and yield of rice. *J Northeast Agric Univ*, 2017, 48(6): 9–16 (in Chinese with English abstract).
- [33] 周文新, 雷驰, 屠乃美. 水稻源库关系研究动态. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2004, 30: 389–393.
- Zhou W X, Lei C, Tu N M. Research trends of on source-sink relationship of rice. *J Hunan Agric Univ (Nat Sci Edn)*, 2004, 30: 389–393 (in Chinese with English abstract).
- [34] 李敏, 张洪程, 杨雄, 葛梦婕, 马群, 魏海燕, 戴其根, 霍中洋, 许轲. 水稻高产氮高效型品种的物质积累与转运特性. 作物学报, 2013, 39: 101–109.
- Li M, Zhang H C, Yang X, Ge M J, Ma Q, Wei H Y, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K. Material accumulation and transport characteristics of high-yield and high-efficiency rice varieties. *Acta Agron Sin*, 2013, 39: 101–109 (in Chinese with English abstract).
- [35] 苏伟. 稻草还田对油菜生长、土壤肥力的综合效应及其机制研究. 华中农业大学博士学位论文, 湖北武汉, 2014.
- Su W. Study on the comprehensive effect and mechanism of straw returning on rape growth and soil fertility. PhD Dissertation of Huazhong Agricultural University, Wuhan, Hubei, China, 2014 (in Chinese with English abstract).
- [36] Singh Y, Singh B, Timsina J. Crop residue management for nutrient cycling and improving soil productivity in rice-based cropping systems in the Tropics. *Adv Agron*, 2005, 85: 269–407.
- [37] 黄菲, 刘言, 李继福, 欧阳玲, 龙鹏, 李新涛. 水旱轮作条件下还田秸秆腐解和养分释放特征研究. 长江大学学报(自然科学版), 2017, 14(18): 54–60.
- Huang F, Liu Y, Li J F, Ou-Yang L, Long P, Li X T. Study on decomposition and nutrient release characteristics of straw under irrigation-drought rotation. *J Yangtze Univ (Nat Sci Edn)*, 2017, 14(18): 54–60 (in Chinese with English abstract).
- [38] 吴玉红, 王吕, 崔月贞, 郝兴顺, 王保军, 田霄鸿, 李小刚, 秦宇航. 轮作模式及秸秆还田对水稻产量、稻米品质及土壤肥力的影响. 植物营养与肥料学报, 2021, 27: 1926–1937.
- Wu Y H, Wang L, Cui Y Z, Hao X S, Wang B J, Tian X H, Li X G, Qin Y H. Effects of crop rotation pattern and straw returning on rice yield, rice quality and soil fertility. *J Plant Nutr Fert*, 2021, 27: 1926–1937 (in Chinese with English abstract).
- [39] 戴志刚, 鲁剑巍, 李小坤, 鲁明星, 杨文兵, 高祥照. 不同作物还田秸秆的养分释放特征试验. 农业工程学报, 2010, 26(6): 272–276.
- Dai Z G, Lu J W, Li X K, Lu M X, Yang W B, Gao X Z. Experiment on nutrient release characteristics of different crop straw returning to field. *Trans CSAE*, 2010, 26(6): 272–276 (in Chinese with English abstract).
- [40] 代文才, 高明, 兰木玲, 黄容, 王金柱, 王子芳, 韩晓飞. 不同作物秸秆在旱地和水田中的腐解特性及养分释放规律. 中国生态农业学报, 2017, 25: 188–199.
- Dai W C, Gao M, Lan M L, Huang R, Wang J Z, Wang Z F, Han X F. Nutrient release patterns and decomposition characteristics of different crop straws in drylands and paddy fields. *Chin J Eco-Agric*, 2017, 25: 188–199 (in Chinese with English abstract).
- [41] F. W. T. 彭宁德弗里斯, D. N. 简森, H. F. W. 坦伯杰, A. H. 贝克马. 几种一年生作物生长的生态生理过程模拟. 北京: 中国农业科技出版社, 1991. pp 102–103.
- Penningdevries F W T, Jansen D N, Tenberge H F W, Bakema A H. Simulation of Ecophysiological Processes of Growth in Several Annual Crops. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1991. pp 102–103 (in Chinese).
- [42] 靳玉婷, 刘运峰, 胡宏祥, 穆静, 高梦瑶, 李先藩, 薛中俊, 龚静静. 持续性秸秆还田配施化肥对油菜-水稻轮作周年氮磷径流损失的影响. 中国农业科学, 2021, 54: 1937–1951.
- Jin Y T, Liu Y F, Hu H X, Mu J, Gao M Y, Li X F, Xue Z J, Gong J J. Effects of continuous straw returning combined with chemical fertilizer on annual nitrogen and phosphorus runoff loss in rape-rice rotation. *Sci Agric Sin*, 2021, 54: 1937–1951 (in Chinese with English abstract).

- [43] 王天尧, 何庆虎, 周祖清, 赵永刚, 刘署艳. “稻-油”轮作秸秆还田及耕作模式对油菜产量的影响. 农业科技通讯, 2019, (9): 120–122.
Wang T Y, He Q H, Zhou Z Q, Zhao Y G, Liu S Y. Effects of rice-rape rotation straw returning and tillage patterns on rapeseed yield. *Bull Agric Sci Tech*, 2019, (9): 120–122 (in Chinese).
- [44] 陈红琳, 陈尚洪, 王昌桃, 郑开林, 蒋梁材, 刘定辉. 成都平原不同秸秆还田量对土壤水分及机播油菜生长的影响. 江西农业大学学报, 2015, 37: 264–268.
Chen H L, Chen S H, Wang C T, Zheng K L, Jiang L C, Liu D H. Effects of different straw returning amount on soil moisture and machine-sown rape growth in Chengdu Plain. *Acta Agric Univ Jiangxiensis*, 2015, 37: 264–268 (in Chinese with English abstract).
- [45] 吴玉红, 陈浩, 郝兴顺, 田霄鸿, 崔月贞, 张春辉. 秸秆还田与化肥配施对油菜-水稻产量构成因素及经济效益的影响. 西南农业学报, 2020, 33: 2007–2012.
Wu Y H, Chen H, Hao X S, Tian X H, Cui Y Z, Zhang C H. Effects of straw returning combined with chemical fertilizer on yield components and economic benefits of rape-rice. *Southwest China J Agric Sci*, 2020, 33: 2007–2012 (in Chinese with English abstract).
- [46] 王秋菊, 刘峰, 迟凤琴, 焦峰, 张春峰, 姜辉, 李鹏绯, 朱宝国. 秸秆还田及氮肥调控对不同肥力白浆土氮素及水稻产量影响. 农业工程学报, 2019, 35(14): 105–111.
Wang Q J, Liu F, Chi F Q, Jiao F, Zhang C F, Jiang H, Li P F, Zhu B G. Effects of straw returning and nitrogen control on nitrogen and rice yield in white pulpy soil with different fertility. *Trans CSAE*, 2019, 35(14): 105–111 (in Chinese with English abstract).
- [47] 方娅婷, 李会枝, 廖世鹏, 鲁飘飘, 鲁剑巍. 氮肥和磷肥用量对油菜开花性状的影响. 中国油料作物学报, 2019, 41: 199–204.
Fang Y T, Li H Z, Liao S P, Lu P P, Lu J W. Effects of nitrogen fertilizer and phosphorus fertilizer on flowering characters of oilseed rape. *Chin J Oil Crop Sci*, 2019, 41: 199–204 (in Chinese with English abstract).