

长期不同轮作方式对黄壤区水稻产量和养分吸收及土壤养分含量的影响

左 琴^{1,2}, 刘彦伶^{2,3,4}, 李 渝^{2,3,4*}, 黄兴成^{2,3,4}, 张雅蓉^{2,3,4}, 朱华清^{2,3,4},
杨叶华^{2,3,4}, 熊 涵^{2,3,4}, 张文安^{2,3,4}, 蒋太明^{3,4,5}

(1. 贵州大学农学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州省农业科学院土壤肥料研究所, 贵州 贵阳 550006; 3. 农业部贵州耕地保育与农业环境科学观测实验站, 贵州 贵阳 550006; 4. 国家土壤质量贵州观测实验站, 贵州 贵阳 550006; 5. 贵州省农业科学院, 贵州 贵阳 550006)

摘 要:【目的】探讨长期不同轮作方式与施肥条件下对水稻产量、植株养分吸收利用及对土壤养分含量的影响, 为黄壤地区合理轮作方式选择提供参考。【方法】依托 25 年的黄壤(稻田)长期定位试验, 选取 4 种轮作方式: 水稻单作(RM)、水稻-小麦轮作(RWR)、水稻-油菜轮作(RRR)、水稻-绿肥轮作(RMR), 分析比较各轮作方式作物产量、植株氮磷钾养分吸收情况及土壤养分含量的差异。【结果】不同轮作方式 2016~2020 年水稻平均产量表现为 RWR>RRR>RM>RMR, 但各处理之间差异不显著。与 RM 处理相比, RWR、RRR 和 RMR 处理水稻秸秆和籽粒平均氮磷钾养分含量分别提高 10.9%~37.0%、63.6%~101.6%、11.9%~17.6% 和 7.1%~20.4%、19.7%~37.6%、6.0%~8.1%; 秸秆和籽粒平均氮磷钾养分吸收量分别提高 15.0%~45.4%、69.7%~113.9%、16.1%~24.8% 和 3.7%~22.6%、15.9%~40%、2.6%~10.1%; 水稻植株平均氮磷钾养分总吸收量分别提高 8.0%~30.2%、22.3%~44.8%、12.9%~21.3%。各轮作处理水稻秸秆和籽粒氮磷钾养分含量、吸收量及吸收效率大小均表现为: RWR>RRR>RMR。与 RM 处理相比, 各轮作处理土壤有机质提高 37.0%~41.1%、全氮提高 1.7%~28.6%、碱解氮提高 24.4%~47.5%、有效磷提高 2.2%~54.8%。【结论】在现有种植制度与施肥条件下, 多种轮作方式均可维持水稻产量不降低, 且能提高单位面积土地生产力、提高水稻植株氮磷钾养分吸收量、改善土壤肥力。

关 键 词: 黄壤; 长期轮作; 水稻; 养分吸收; 土壤养分

中图分类号: S158 文献标识码: A 文章编号: 0564-3945(2023)04-0881-08

DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2022051001

左 琴, 刘彦伶, 李 渝, 黄兴成, 张雅蓉, 朱华清, 杨叶华, 熊 涵, 张文安, 蒋太明. 长期不同轮作方式对黄壤区水稻产量和养分吸收及土壤养分含量的影响 [J]. 土壤通报, 2023, 54(4): 881-888

ZUO Qin, LIU Yan-ling, LI Yu, HUANG Xing-cheng, ZHANG Ya-rong, ZHU Hua-Qing, YANG Ye-Hua, XIONG Han, ZHANG Wen-an, JIANG Tai-ming. Effects of Long-term Different Cropping Rotations on Rice Yield, Nutrient Uptake and Soil Nutrient Contents in Yellow Soil Region[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2023, 54(4): 881-888

【研究意义】我国近一半人口以稻米为主食, 水稻是我国重要的粮食作物。研究表明, 轮作可提高单位面积耕地生产能力, 是保证粮食安全的一项重要耕作方式^[1]。因此, 为提高土壤养分、改善土壤环境, 提高作物产量, 选取合理的耕作制度尤为重要。【前人研究进展】与连作相比, 水稻合理轮作可改善土壤理化性质、促进作物根部对土壤养分吸收利用, 进而增加作物产量^[2-5]。陈鑫等^[6]研究水稻单作及水稻与小麦、紫云英、蚕豆轮作对土壤肥力和水稻产量的影响。结果表明, 与水稻单作相比, 轮作均提高了土壤肥力和水稻产量, 轮作小麦有利

于提高有效磷和速效钾含量, 轮作紫云英和蚕豆能够促进作物养分吸收, 降低施氮量。高菊生等^[7]研究双季稻单作及双季稻与紫云英、油菜和黑麦草轮作方式。结果表明, 与双季稻单作相比, 轮作能够增加双季稻产量, 且提高土壤有机质、全氮、全磷、碱解氮和有效磷含量。龙瑞平等^[8]关注了水稻与油菜、小麦和蚕豆轮作方式。结果表明, 水稻产量及土壤肥力高低表现为水稻-油菜>水稻-小麦>水稻-蚕豆轮作。

水稻-小麦轮作、水稻-油菜轮作、水稻-绿肥轮作是我国南方地区重要的轮作方式。近年来,

收稿日期: 2022-05-10; 修订日期: 2022-06-20

基金项目: 国家自然科学基金(32060302)、黔农科院国基后补助[2021]52号、黔农科院科技创新[2022]09号、黔土肥技术[2022]8号、贵州省农业科学院青年科技基金项目(黔农科院青年基金[2022]20号)和贵州省科学技术基金(黔科合基础[2020]1Y411)

作者简介: 左 琴(1991-)女, 贵州纳雍人, 硕士研究生, 土壤肥力演变研究。E-mail: wby200222@163.com

*通讯作者: E-mail: liyu83110@163.com

随着外出务工人员增加,南方冬闲田面积逐渐增大^[9],造成土地资源浪费。开发冬闲田,进行合理轮作,有利于土地资源用养结合、提高土壤肥力、促进粮食增产和农民增收。【本研究切入点】合理施肥、耕作及适宜的种植制度是提高耕地质量的重要措施,以往更多的研究主要关注施肥和耕作措施对作物产量、养分吸收利用及土壤养分转化的影响,关于耕作制度结合施肥条件下的研究相对较少,且多为短期试验,从长期试验方面来揭示耕作制度结合施肥条件下对作物产量、养分吸收及土壤肥力的影响可准确评价不同耕作制度对农田耕地质量的综合影响。【拟解决的问题】因此本文以 25 a 贵州黄壤(稻田)长期定位试验基地为平台,分析不同轮作方式对水稻产量,植株氮磷钾养分吸收利用以及土壤养分含量的影响,以评估不同轮作系统的增产及培肥效应,为黄壤地区制定合理科学的耕作制度提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本研究依托农业农村部贵州耕地保育与农业环境科学观测实验站,试验地位于贵州省农业科学院内(106°39'52" E、26°29'49" N),地处黔中丘陵区,属亚热带季风气候,平均海拔 1071 m,年均气温 15.3 ℃,年均日照时数 1354 h,相对湿度 75.5%,全年无霜期 270 d,年降水量 1100~1200 mm。土壤类型为黄壤性水稻土,各小区用水泥田埂分隔。该长期定位试验于 1994 年开始基础设施建设和匀地,1995 年开始试验并连续监测。稻田试验初始年份土壤理化性质为 pH 6.75、有机质 44.5 g kg⁻¹,全氮 1.96 g kg⁻¹,碱解氮 158.9 mg kg⁻¹,有效磷 13.4 mg kg⁻¹,速效钾 293.7 mg kg⁻¹。

1.2 试验设计

本研究选取长期定位试验中 4 个处理作为研究对象,分别是:水稻单作(RM)、水稻-小麦轮作(RWR)、水稻-油菜轮作(RRR)、水稻-绿肥轮作(RMR)。RM 处理冬季休闲,不种植作物。各处理化肥施用量见表 1,小麦和油菜季施肥量是水稻季的一半,水稻-绿肥轮作处理不施用化学氮肥。供试化肥品种为尿素(含 N 46.0%)、普通过磷酸钙(含 P₂O₅ 12.0%)和氯化钾(含 K₂O 60.0%)。化学氮肥按返青肥(40%):分蘖肥(60%)的比例分两次追施,磷、钾肥作基肥一次性基施。本研究中水

稻的品种 2016 年为“汕优 108”,2017~2020 年为“茂优 601”,种植密度为 2.08×10^5 株 hm⁻²,栽种方式为人工手插,每年 6 月初移栽,10 月初收割;小麦品种为“黔麦 18”,采用条播方式进行播种,播量 112.5 kg hm⁻²,每年 11 月中下旬播种,5 月中旬收割;油菜类型为“芥菜型”油菜,每年 11 月初播种,5 月初收割;绿肥品种为“光叶紫花苕”,于水稻收获时播种,于盛花期翻压还田,田间多年测产均值 28312 kg hm⁻²,含水率 82.55%,氮含量 4.62%,磷含量 0.455%,钾含量 3.60%。试验过程中不使用除草剂,农作物生长发育期若非必要,尽量不使用杀虫剂等化学农药。所有处理除轮作作物和 RMR 处理不施氮肥外,其他农事活动均一致。

表 1 不同轮作处理施肥量(kg hm⁻²)
Table 1 Fertilizer application amounts in different crop rotations

处理 Treatment	水稻 Rice			冬季作物 Winter crop		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
RM	165	82.5	82.5	0	0	0
RWR	165	82.5	82.5	82.5	41.3	41.3
RRR	165	82.5	82.5	82.5	41.3	41.3
RMR	0	82.5	82.5	0	0	0

1.3 样品采集与测定

分别于 2016、2018、2020 年水稻成熟期齐地收割水稻植株样品,各重复小区分别选取 5 株长势均匀具有代表性植株装于尼龙网袋中带回实验室,脱粒,将植株分为秸秆和籽粒,称其鲜重,再于 105 ℃烘箱中杀青 30 min,80 ℃烘至恒重,称重,测定干物质质量;然后将秸秆和籽粒样品粉碎后用浓 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮,凯氏定氮仪测定秸秆和籽粒氮含量,钼锑抗比色法测定秸秆和籽粒磷含量,火焰光度计测定秸秆和籽粒钾含量。水稻产量以各小区田间实际收获产量计产。土壤样品采样按每重复小区分别于 2016 年和 2020 年水稻收获后采用梅花形五点取样法采集 0~20 cm 土层土样,将采集的土样除去动、植物残体后混匀,风干后用于测定土壤基础理化指标^[10]。

1.4 相关参数计算

(1) 稳定性指数(SI)=标准差/平均产量

(2) 可持续性指数(SYI)=(平均产量-标准差)/该处理年份中最高产量

(3) 秸秆氮素(磷、钾素)养分吸收量(kg hm⁻²)=秸秆干物质重×秸秆氮(磷、钾素)养分含量

(4) 籽粒氮素(磷、钾素)养分吸收量
(kg hm⁻²) = 籽粒干物质重 × 籽粒氮(磷、钾素)
养分含量

(5) 养分氮(磷、钾)吸收效率(%) = 植株
养分吸收量/施氮(磷、钾)量

1.5 数据分析

试验数据采用 Excel 2010 软件进行计算处理;
利用 SPSS 22 软件进行统计分析和通径分析, Origin
2021 进行相关性热图分析, 差异显著性分析用
Duncan 新复极差法进行, 显著性水平设定为 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 长期不同轮作方式对水稻产量的影响

2016~2020 年不同轮作方式水稻产量动态变化
如图 1 所示, 各处理水稻产量年际间波动较大, 各
处理 5 年水稻产量平均值表现为: $RWR > RRR >$
 $RM > RMR$, 但处理之间无显著差异。各处理产量
SI(稳定性指数, 值越低表明产量越稳定)大小为:
 $RM > RRR > RWR > RMR$, 产量 SYI(可持续性指
数, 值越大作物产量可持续性越高)大小为: $RMR >$
 $RWR > RM > RRR$ (表 2), 综合来看, RMR 和
RWR 处理具有较高的稳产性和可持续性。

2.2 长期不同轮作方式对水稻植株氮磷钾养分含量的影响

除 2020 年 RM 处理秸秆氮含量高于 RMR 处理
外, 2016 年和 2018 年各轮作处理水稻秸秆氮磷钾含

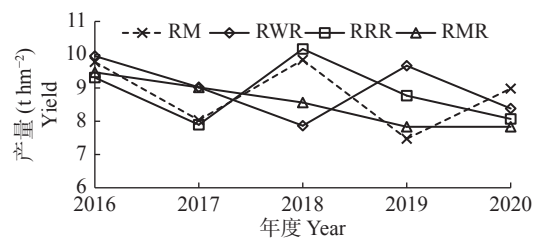


图 1 2016~2020 年不同轮作方式下水稻年际产量动态
Fig.1 Dynamics of rice interannual yield under different crop
rotation patterns from 2016 to 2020

表 2 不同轮作处理对 2016~2020 年水稻平均产量的影响
Table 2 Effects of different crop rotations on average rice yield
from 2016 to 2020

处理 Treatment	平均产量 Average yield (kg hm ⁻²)	稳定性指数 Stable index (SI, %)	可持续性指数 Sustainability index (SYI, %)
RM	8822 ± 1052 a	0.12	0.79
RWR	8980 ± 871 a	0.10	0.81
RRR	8844 ± 934 a	0.11	0.78
RMR	8543 ± 723 a	0.08	0.83

注: 表中数据为“平均值 ± 标准差”; 同列数据后不同小写字母
表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同。

量均不同程度高于 RM 处理(表 3)。与 RM 处理相
比, 各轮作处理 3 年水稻秸秆平均氮含量提高了
10.9%~37.0%, 以 RWR 处理增幅最大, RWR 和
RRR 处理与 RM 处理间差异显著; 与 RM 处理相比,
3 年水稻秸秆平均磷含量显著提高了 63.6%~101.6%,
以 RWR 处理增幅最大; 与 RM 处理相比, 3 年水稻
秸秆平均钾含量提高了 11.9%~17.6%, 其中,
RWR 和 RRR 处理与 RM 处理间差异显著。

表 3 水稻植株不同部位氮磷钾素含量
Table 3 Contents of N, P and K in different parts of rice

年份 Year	处理 Treatment	氮(%) N		磷(%) P		钾(%) K	
		秸秆 Straw	籽粒 Grain	秸秆 Straw	籽粒 Grain	秸秆 Straw	籽粒 Grain
2016	RM	0.41 ± 0.03 b	0.91 ± 0.01 c	0.05 ± 0.00 c	0.25 ± 0.03 b	1.81 ± 0.13 b	0.31 ± 0.00 b
	RWR	0.57 ± 0.05 a	1.26 ± 0.05 a	0.10 ± 0.02 a	0.34 ± 0.01 a	2.09 ± 0.04 a	0.34 ± 0.01 a
	RRR	0.51 ± 0.06 a	1.22 ± 0.06 ab	0.08 ± 0.01 b	0.31 ± 0.01 a	2.12 ± 0.05 a	0.33 ± 0.01 ab
	RMR	0.42 ± 0.05 b	1.13 ± 0.04 b	0.09 ± 0.01 ab	0.31 ± 0.02 a	2.20 ± 0.05 a	0.32 ± 0.01 ab
2018	RM	0.71 ± 0.10 b	1.25 ± 0.09 b	0.03 ± 0.01 b	0.22 ± 0.03 a	2.04 ± 0.01 b	0.24 ± 0.03 a
	RWR	0.96 ± 0.12 a	1.52 ± 0.10 a	0.08 ± 0.01 a	0.22 ± 0.03 a	2.37 ± 0.08 a	0.25 ± 0.04 a
	RRR	0.80 ± 0.08 ab	1.35 ± 0.11 ab	0.07 ± 0.02 a	0.24 ± 0.04 a	2.33 ± 0.08 a	0.25 ± 0.04 a
	RMR	0.91 ± 0.14 ab	1.31 ± 0.03 b	0.08 ± 0.01 a	0.23 ± 0.08 a	2.04 ± 0.17 b	0.26 ± 0.01 a
2020	RM	0.59 ± 0.09 b	1.32 ± 0.01 ab	0.04 ± 0.02 b	0.18 ± 0.03 c	2.53 ± 0.19 c	0.24 ± 0.00 b
	RWR	0.82 ± 0.07 a	1.36 ± 0.03 a	0.07 ± 0.01 a	0.32 ± 0.03 a	3.04 ± 0.05 a	0.26 ± 0.01 ab
	RRR	0.83 ± 0.09 a	1.38 ± 0.07 a	0.08 ± 0.02 a	0.27 ± 0.01 b	2.72 ± 0.06 bc	0.26 ± 0.01 a
	RMR	0.57 ± 0.07 b	1.25 ± 0.02 b	0.04 ± 0.00 b	0.22 ± 0.02 b	2.9 ± 0.06 ab	0.26 ± 0.01 ab
三年均值	RM	0.57 ± 0.05 c	1.15 ± 0.04 c	0.04 ± 0.01 b	0.21 ± 0.01 b	2.13 ± 0.10 c	0.26 ± 0.02 a
	RWR	0.78 ± 0.08 a	1.38 ± 0.03 a	0.09 ± 0.01 a	0.29 ± 0.02 a	2.50 ± 0.03 a	0.28 ± 0.02 a
	RRR	0.71 ± 0.07 ab	1.32 ± 0.07 ab	0.08 ± 0.02 a	0.27 ± 0.01 a	2.39 ± 0.04 b	0.28 ± 0.01 a
	RMR	0.63 ± 0.05 bc	1.23 ± 0.02 bc	0.07 ± 0.00 a	0.25 ± 0.04 ab	2.38 ± 0.02 b	0.28 ± 0.01 a

除 2020 年 RM 处理籽粒氮含量高于 RMR 处理外, 2016 年和 2018 年各轮作处理水稻籽粒氮磷钾含量均不同程度高于 RM 处理。与 RM 处理相比, 各轮作处理 3 年水稻籽粒平均氮磷含量分别提高了 7.1%~20.4%、19.7%~37.6%, 以 RWR 处理增幅最大, RWR 和 RRR 处理与 RM 处理间差异显著; 3 年各轮作处理水稻籽粒平均钾含量较 RM 处理提高了 6.0%~8.1%, 处理间差异不显著。综上, 与 RM 处理相比, RWR、RRR 和 RMR 轮作处理均不同程度提高了水稻秸秆和籽粒氮磷钾含量。

2.3 长期不同轮作方式对水稻植株不同部位氮磷钾吸收量的影响

除 2020 年氮素吸收量 RMR 处理均低于 RM 处理外, 2016 年和 2018 年各轮作处理水稻氮素吸收量均高于 RM 处理 (表 4)。与 RM 处理相比, 各轮作处理 3 年水稻秸秆和籽粒平均氮素吸收量提高了 15.0%~45.4% 和 3.7%~22.6%, RWR 和 RRR 处理与 RM 处理间差异显著; 氮素总吸收量平均显著提高了 8.0%~30.2%, 以 RWR 处理增幅最大。

表 4 不同轮作方式对水稻植株氮磷钾养分吸收量的影响
Table 4 Effects of different rotation patterns on N, P and K uptake in rice plants

年份 Year	处理 Treatment	氮 (kg hm ⁻²) N			磷 (kg hm ⁻²) P			钾 (kg hm ⁻²) K		
		秸秆 Straw	籽粒 Grain	总量 Total	秸秆 Straw	籽粒 Grain	总量 Total	秸秆 Straw	籽粒 Grain	总量 Total
2016	RM	27.0±1.7 b	79.8±0.5 c	105.9±0.2 c	3.6±0.3 b	21.9±2.8 c	25.5±3.2 c	118.9±8.8 b	27.3±0.0 bc	148.7±10.8 b
	RWR	40.0±3.6 a	113.4±4.6 a	153.5±8.2 a	7.3±1.2 a	30.8±1.0 a	38.1±0.7 a	146.1±2.6 a	30.5±1.0 a	176.6±2.5 a
	RRR	36.9±4.2 a	107.5±5.3 a	144.5±2.4 a	5.8±1.1 a	27.4±1.2 ab	33.2±1.5 b	152.5±3.4 a	29.1±1.2 ab	181.6±4.5 a
	RMR	28.9±3.3 b	96.1±3.8 b	125.0±5.7 b	6.1±0.5 a	26.3±1.9 b	32.4±2.4 b	150.0±3.3 a	26.9±0.9 c	176.9±3.9 a
2018	RM	46.6±6.4 b	110.3±7.7 b	156.9±13.3 c	2.2±0.4 b	19.8±2.4 a	22.0±2.7 a	134.0±0.8 b	20.7±2.9 a	154.7±3.5 b
	RWR	66.8±8.7 a	136.0±9.3 a	202.9±5.3 a	5.7±0.6 a	19.6±2.5 a	25.3±2.8 a	165.1±5.3 a	22.4±3.4 a	187.6±4.9 a
	RRR	57.3±5.5 ab	119.3±9.6 b	176.6±7.1 b	5.0±1.1 a	20.9±3.8 a	25.9±3.4 a	167.3±5.4 a	22.4±3.3 a	189.7±3.0 a
	RMR	61.9±9.4 a	111.9±2.8 b	173.8±7.0 b	5.7±0.6 a	19.8±6.5 a	25.5±6.8 a	139.2±11.3 b	22.1±0.9 a	161.3±10.9 b
2020	RM	39.1±6.0 b	116.3±0.7 a	155.2±7.9 b	2.6±1.1 b	15.5±3.0 c	18.3±4.3 b	166.5±12.3 c	21.2±0.0 b	191.3±15.1 c
	RWR	57.1±5.2 a	122.5±2.8 a	179.6±3.3 a	4.9±0.8 a	28.3±2.6 a	33.2±1.9 a	212.3±3.8 a	22.9±0.8 a	235.2±3.7 a
	RRR	59.6±6.8 a	122.3±6.0 a	181.9±3.0 a	6.0±1.1 a	23.6±1.1 b	29.5±1.4 a	195.8±4.4 b	23.1±0.9 a	218.9±5.3 b
	RMR	38.9±4.4 b	106.7±1.4 b	145.6±5.5 c	2.4±0.2 b	19.1±1.3 c	21.5±1.5 b	197.8±4.3 b	21.8±0.7 ab	219.6±4.8 b
三年均值	RM	37.6±3.2 c	101.2±3.1 b	137.2±0.8 d	2.8±0.3 b	18.7±1.1 c	21.6±1.5 c	139.8±6.8 c	23.0±1.4 a	164.7±7.0 c
	RWR	54.6±5.5 a	124.0±2.6 a	178.7±2.9 a	6.0±0.5 a	26.3±1.7 a	32.2±1.3 a	174.5±2.2 a	25.3±1.7 a	199.8±0.6 a
	RRR	51.3±4.8 ab	116.4±6.5 a	167.7±3.1 b	5.6±1.1 a	24.0±0.7 ab	29.5±0.6 ab	171.9±3.0 a	24.9±0.8 a	196.8±2.8 a
	RMR	43.2±3.6 bc	104.9±1.8 b	148.1±2.6 c	4.7±0.3 a	21.7±3.2 bc	26.5±3.5 b	162.3±1.2 b	23.6±0.8 a	185.9±1.1 b

除 2020 年秸秆磷素吸收量 RMR 处理低于 RM 处理外, 2016 年和 2018 年各轮作处理水稻磷素吸收量均高于 RM 处理 (表 4)。与 RM 处理相比, 各轮作处理 3 年水稻秸秆平均磷素吸收量显著提高了 69.7%~113.9%, 籽粒平均磷素吸收量提高了 15.9%~40%, 其中, RWR 和 RRR 处理与 RM 处理间差异显著; 磷素总吸收量平均显著提高了 22.3%~44.8%, 以 RWR 处理增幅最大。

除 2016 年籽粒钾素吸收量 RMR 处理低于 RM 处理外, 2016 年和 2018 年各轮作处理水稻钾素吸收量均高于 RM 处理 (表 4)。与 RM 处理相比, 各轮作处理 3 年水稻秸秆平均钾素吸收量显著提高了 16.1%~24.8%, 籽粒平均钾素吸收量提高了 2.6%~10.1%; 钾素总吸收量平均显著提高了 12.9%~

21.3%, 以 RWR 处理增幅最大。综上, 不同轮作处理提高了水稻秸秆和籽粒氮磷钾素吸收量及水稻植株总吸收量, 大小表现为 RWR > RRR > RMR > RM。

2.4 长期不同轮作方式对水稻植株氮磷钾肥吸收效率的影响

2016、2018、2020 三年 RWR 和 RRR 处理氮肥吸收效率均显著高于 RM 处理, RWR、RRR 和 RMR 处理水稻植株磷肥和钾肥吸收效率均不同程度高于 RM 处理 (图 2)。与 RM 处理相比, 3 年 RWR 和 RRR 处理氮肥平均吸收效率显著提高了 22.2%~30.2%, RWR、RRR 和 RMR 处理磷肥平均吸收效率显著提高了 22.3%~44.8%、钾肥平均吸收效率显著提高了 12.9%~21.3%。综上, 各处理间水

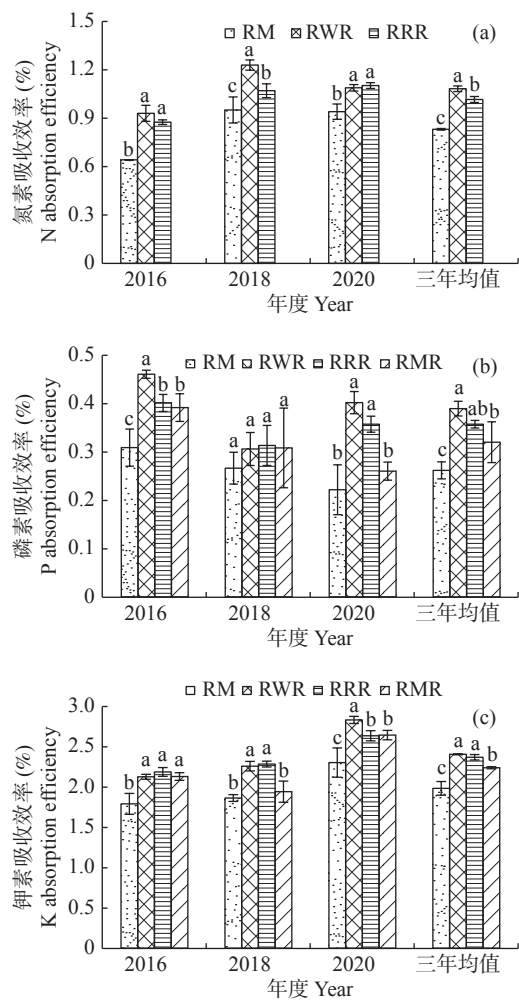


图2 不同轮作方式下3年的水稻植株氮磷钾养分吸收效率
Fig.2 N, P and K uptake efficiencies of rice plants under different cropping rotations for 3 years

稻植株对氮磷钾肥的吸收效率年际间有一定的差异,但趋势基本均表现为 RWR > RRR > RMR > RM, 水稻轮作能显著提高水稻植株对氮磷钾肥的吸收效率。

2.5 长期不同轮作方式对土壤养分含量的影响

如表 5 所示, 2016 年各处理养分含量变化与 2020 年基本一致。与 RM 处理相比, RWR 和 RRR

处理显著提高了土壤有机质、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾含量, RMR 处理在显著提高土壤碱解氮和速效钾含量的同时显著降低了有效磷含量和 pH 值, 其他养分无显著差异。

2020 年与 RM 处理相比, RWR 处理 pH 值显著提高了 0.32 个单位, RMR 处理 pH 显著降低了 0.29 个单位。与 RM 处理相比, RWR 和 RMR 处理均提高了土壤有机质、全钾、碱解氮及有效磷含量, 其中, 有机质分别提高 37.0% 和 41.1%, 全钾分别提高 25.1% 和 18.6%, 碱解氮分别提高 24.4% 和 27.6%, 有效磷分别提高 54.8% 和 61.7%。RMR 处理与 RM 处理相比, 土壤有机质和碱解氮分别显著提高了 58.2% 和 47.5%, 全钾含量显著降低了 25.0%。综上, RWR 和 RRR 处理对土壤有机质及氮磷钾养分含量均有较好的提升作用, RMR 处理在提高氮素方面虽有较好效果, 但会一定程度降低土壤全磷、全钾含量及 pH 值。

2.6 植株养分含量和养分吸收量与土壤养分含量的相关分析及通径分析

由图 3 相关分析可知, 水稻秸秆氮素含量与土壤全钾、速效钾、有效磷呈极显著 ($P < 0.01$) 或显著 ($P < 0.05$) 正相关; 秸秆磷素含量与土壤全磷呈显著正相关; 秸秆钾素含量与土壤全氮、全钾、速效钾呈极显著或显著正相关, 与全磷呈极显著负相关。籽粒氮素含量与土壤全钾、速效钾、有效磷呈极显著正相关; 籽粒磷素含量与土壤有机质、碱解氮呈极显著或显著正相关; 籽粒钾素含量与土壤有机质、全磷、碱解氮呈极显著正相关, 与速效钾呈极显著负相关。

采用逐步回归方式对水稻植株养分含量与土壤养分进行通径分析, 结果表明 (表 6), 全磷、全钾对水稻秸秆氮素含量有极显著直接影响, 全氮、全

表 5 2016 和 2020 年各处理土壤养分含量
Table 5 Soil nutrient contents of different treatments in 2016 and 2020

年份 Year	处理 Treatment	pH	有机质 SOM (g kg ⁻¹)	全氮 TN (g kg ⁻¹)	全磷 TP (g kg ⁻¹)	全钾 TK (g kg ⁻¹)	碱解氮 AN (mg kg ⁻¹)	有效磷 AP (mg kg ⁻¹)	速效钾 AK (mg kg ⁻¹)
2016	RM	7.03 ± 0.01 b	47.57 ± 1.07 b	2.63 ± 0.26 a	1.12 ± 0.02 b	10.13 ± 0.31 b	95.21 ± 1.84 c	14.90 ± 0.36 c	125.33 ± 2.52 d
	RWR	6.90 ± 0.08 c	54.43 ± 2.25 a	2.45 ± 0.06 a	1.28 ± 0.04 a	11.27 ± 0.46 a	132.51 ± 3.81 a	23.93 ± 0.15 b	186.67 ± 7.64 a
	RRR	7.27 ± 0.01 a	52.80 ± 2.97 a	2.49 ± 0.13 a	1.27 ± 0.13 a	11.3 ± 0.14 a	126.20 ± 3.71 b	33.40 ± 0.42 a	167.50 ± 3.54 b
	RMR	6.70 ± 0.05 d	47.80 ± 3.90 b	2.55 ± 0.14 a	1.05 ± 0.06 b	9.60 ± 0.53 b	128.46 ± 2.34 ab	12.37 ± 1.42 d	155.67 ± 2.08 c
2020	RM	7.00 ± 0.24 ab	32.40 ± 2.89 c	2.46 ± 0.07 b	0.96 ± 0.05 a	12.20 ± 0.53 b	85.16 ± 3.26 c	16.97 ± 1.27 b	210.00 ± 15.10 a
	RWR	7.32 ± 0.37 a	44.39 ± 0.98 b	3.17 ± 0.23 a	0.85 ± 0.21 a	15.27 ± 1.33 a	105.91 ± 1.47 b	26.27 ± 2.87 a	197.67 ± 26.39 a
	RRR	6.95 ± 0.37 ab	45.70 ± 1.00 b	2.51 ± 0.16 b	0.97 ± 0.06 a	14.47 ± 1.15 a	108.63 ± 6.13 b	27.43 ± 1.63 a	190.33 ± 7.57 a
	RMR	6.71 ± 0.12 b	51.25 ± 0.39 a	2.63 ± 0.11 b	0.77 ± 0.20 a	9.20 ± 0.72 c	125.57 ± 5.64 a	17.33 ± 1.10 b	210.33 ± 8.39 a

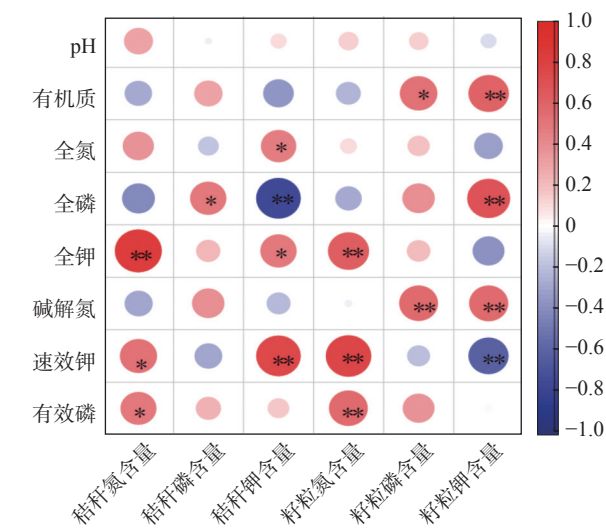


图 3 水稻植株养分含量与土壤养分含量的相关性热图
Fig.3 Heat map of correlation between rice plant nutrient content and soil nutrient content

钾、碱解氮、速效钾、有效磷对秸秆磷素含量有极显著或显著直接影响，全磷、全钾、碱解氮、速效钾对秸秆磷素含量有极显著或显著直接影响；全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效钾对水稻籽粒氮素含量有极显著或显著直接影响，全钾、碱解氮、速效钾对水稻籽粒磷素含量有极显著直接影响，全磷、碱解氮、速效钾对水稻籽粒钾素含量有极显著直接影响。

3 讨论

3.1 长期不同轮作方式对水稻产量的影响

与连作相比，轮作能促进作物生长、提高作物产量^[11-14]。本研究中 RWR 和 RRR 处理不仅能多收获一季冬季作物，且也可小幅度提升水稻产量，原因是这两种轮作方式显著提高了土壤养分，增强了土壤生产力。在施用绿肥为 22500 kg hm⁻² 时，可代替化学氮肥基本满足作物需氮量^[15]，本研究中 RMR

处理不施用化学氮肥，收获的绿肥稻前翻压还田充当氮肥肥源，既没有显著降低水稻产量，还节约了化学氮肥。不同处理年际间产量波动较大，其原因可能是年际间气候差异较大。长期不同轮作下水稻 SI 最低的是 RMR 处理，SYI 最高的是 RMR 处理，这与高菊生等^[7]认为化肥提供的矿质养分会被很快释放从而被作物吸收利用，绿肥还田，增加了土壤腐殖质，提高了土壤有机质含量，加速了土壤矿化致使有效养分释放加快，这个过程具有长效性，满足了作物整个生长发育期对养分的需求，维持了产量的稳定性和生产可持续性的研究结果基本一致。

3.2 长期不同轮作方式对土壤养分含量的影响

本研究结果表明，RWR 和 RRR 处理土壤有机质、全氮、全钾、碱解氮和有效磷含量均高于 RM 处理，土壤养分含量得到提高的可能原因有多种：一方面，上茬作物小麦和油菜生长发育过程中脱落的茎、叶及小麦和油菜收获后（秸秆移除田外）根茬翻压还田，增加了土壤腐殖质^[16-17]，秸秆还田能调节土壤理化性质、增加土壤养分、提高土壤肥力^[18]，吴玉红等^[19]的研究也证明了稻田轮作下秸秆还田可提高土壤养分；另一方面，小麦和油菜季均施了氮磷钾肥，当季作物未能全部吸收利用，土壤周年养分盈余量较高。本研究中 RWR 和 RRR 处理速效钾含量低于 RMR 和 RM 处理，原因可能在于秸秆中富含大量的钾元素，而小麦和油菜秸秆均被移除田外，携带出大量的钾元素，这与吴玉红等^[19]的研究结果一致。兰延等^[20]研究水稻-绿肥轮作表明，翻压绿肥，可作为改善土壤环境、提高土壤肥力、实现作物生产可持续性发展的重要措施。本研究也证明，RMR 处理虽不施用氮肥，但由于绿肥具有固氮作用，绿肥翻压还田后增加了土壤腐殖质，有机物料的输入，

表 6 水稻植株养分含量与土壤养分含量的直接通径系数
Table 6 Direct path coefficients of above ground plant nutrient content and soil nutrient content of rice

养分指标 Nutrient indicator	秸秆 Straw			籽粒 Grain		
	氮含量 N Content	磷含量 P Content	钾含量 K Content	氮含量 N Content	磷含量 P Content	钾含量 K Content
pH	\	\	\	\	\	\
有机质	\	\	\	\	\	\
全氮	\	-0.4859**	\	-0.368**	\	\
全磷	-0.306**	\	-0.573**	-0.228*	\	0.401**
全钾	0.790**	1.191**	0.371**	0.771**	0.735**	\
碱解氮	\	0.938**	0.194*	0.287**	0.901**	0.481**
速效钾	\	-0.497**	0.409**	0.521**	-0.443**	-0.503**
有效磷	\	-0.385*	\	\	\	\

注：数值表示直接通径系数，“\”表示直接通径系数无显著性，“***”表示极显著相关 $P < 0.01$ ，“**”表示显著相关 $P < 0.05$ 。

在一定程度上为作物生长发育提供了充足的氮素养分^[21-22]。与其他轮作处理相比, RMR 处理中土壤全磷、全钾含量均最低, 表明绿肥翻压还田对于磷素和钾素含量没有提升作用, 因此绿肥还田时需增施磷肥和钾肥。

3.3 长期不同轮作方式对水稻植株养分吸收利用的影响

RWR、RRR 和 RMR 轮作处理水稻植株氮磷钾养分含量及吸收量均不同程度高于 RM 处理, 表明轮作能促进水稻根部对矿质养分的吸收利用^[23]与高菊生等^[7]研究水稻不同轮作方式结果基本一致。相关分析和通径分析表明, 有机质、全磷、全钾、碱解氮、速效钾等土壤养分与植株氮磷钾养分含量具有显著相关性和显著直接影响, 而不同轮作处理土壤有机质、全磷、全钾、碱解氮、速效钾含量及氮磷钾养分含量均不同程度高于 RM 处理, 进而促进了轮作处理对氮磷钾养分的吸收和利用。

4 结论

在现有种植制度与施肥条件下, 与水稻单作相比, 多种轮作方式均可维持水稻产量不降低且能提高单位面积土地生产力, 提高水稻植株氮磷钾养分含量及吸收量, 增加水稻植株养分吸收效率, 并显著改善土壤肥力; 其中, 水稻-小麦轮作处理增产和培肥效果最佳, 水稻-油菜轮作其次, 水稻-绿肥轮作在氮肥减施方面效果较佳。在农业生产中, 应重视水稻与其他作物或绿肥的轮作, 以在提高耕地土壤肥力的同时提高单位面积土地生产力。

参考文献:

- [1] 王小春, 杨文钰, 任万军, 等. 小麦/玉米/大豆和小麦/玉米/甘薯套作体系中玉米产量及养分吸收的差异[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(4): 803–812.
- [2] 黄冲平, 丁鼎良. 水旱轮作对作物产量和土壤理化性状的影响[J]. *浙江农业学报*, 1995, (6): 25–27.
- [3] 丁俊男, 王 慧, 于少鹏, 等. 玉米—大豆轮作对土壤酶和根系微生物群落多样性的影响[J]. *黑龙江农业科学*, 2021, (4): 11–16.
- [4] 李文娇, 杨殿林, 赵建宁, 等. 长期连作和轮作对农田土壤生物学特性的影响研究进展[J]. *中国农学通报*, 2015, 31(3): 173–178.
- [5] 黄国勤, 熊云明, 钱海燕, 等. 稻田轮作系统的生态学分析[J]. *土壤学报*, 2006, (1): 69–78.
- [6] 陈 鑫, 刘 勤, 张 刚. 太湖地区不同轮作模式对土壤肥力和水稻产量的影响[J]. *江苏农业学报*, 2021, 37(4): 874–883.
- [7] 高菊生, 徐明岗, 董春华, 等. 长期稻-稻-绿肥轮作对水稻产量及土壤肥力的影响[J]. *作物学报*, 2013, 39(2): 343–349.
- [8] 龙瑞平, 张朝钟, 戈芹英, 等. 不同轮作模式下基于机插粳稻稳产和氮肥高效的氮肥运筹方式[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(4): 646–656.
- [9] 王积军, 熊延坤, 周广生. 南方冬闲田发展油菜生产的建议[J]. *中国农技推广*, 2014, 30(5): 6–8.
- [10] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [11] 蔡 艳, 郝明德. 轮作模式与周期对黄土高原旱地小麦产量、养分吸收和土壤肥力的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(4): 864–872.
- [12] 向晓玲, 陈松鹤, 高仁才, 等. 麦-玉轮作玉米秸秆还田与施氮对后茬玉米产量和养分吸收的影响[J]. *华北农学报*, 2021, 36(1): 169–176.
- [13] 邹梦成, 李 鹏, 张 欣, 等. 不同有机物施用对油菜-红薯轮作模式下养分吸收利用的影响[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(1): 320–326.
- [14] 胡怡凡, 刘佳坪, 王子楷, 等. 轮作提高土壤磷生物有效性改善后茬作物磷素营养[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(8): 1305–1310.
- [15] 刘小粉, 刘春增, 潘兹亮, 等. 施用绿肥条件下减施化肥对土壤养分及持水供水能力的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2017, (3): 75–79.
- [16] Zhang Y, Chen X P, Ma W Q, et al. Elucidating variations in nitrogen requirement according to yield, variety and cropping system for Chinese rice production[J]. *Pedosphere*, 2017, 27(2): 358–363.
- [17] Chen S, Xu C, Yan J, et al. The influence of the type of crop residue on soil organic carbon fractions: an 11-year field study of rice-based cropping systems in southeast China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2016, 223: 261–269.
- [18] 袁国印, 宋 航, 邹威威, 等. 稻麦轮作下长期秸秆还田和钾肥施用后效对水稻产量和土壤肥力的影响[J]. *江苏农业科学*, 2021, 49(19): 117–122.
- [19] 吴玉红, 王 吕, 崔月贞, 等. 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[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(11): 1926–1937.
- [20] 兰 延, 黄国勤, 杨滨娟, 等. 稻田绿肥轮作提高土壤养分增加有机碳库[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(13): 146–152.
- [21] 高嵩涓, 周国朋, 曹卫东. 南方稻田紫云英作冬绿肥的增产节肥效应与机制[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(12): 2115–2126.
- [22] 龚明强, 易 峰, 李进前, 等. 不同水旱轮作方式下氮肥减量对水稻产量及土壤养分的影响[J]. *安徽农业科学*, 2020, 48(13): 152–156.
- [23] Linh T B, Sleutel S, Guong V T, et al. Deeper tillage and root growth in annual rice-upland cropping systems result in improved rice yield and economic profit relative to rice monoculture[J]. *Soil & Tillage Research*, 2015, 154: 44–52.

Effects of Long-term Different Cropping Rotations on Rice Yield, Nutrient Uptake and Soil Nutrient Contents in Yellow Soil Region

ZUO Qin^{1, 2}, LIU Yan-ling^{2, 3, 4}, LI Yu^{2, 3, 4*}, HUANG Xing-cheng^{2, 3, 4}, ZHANG Ya-rong^{2, 3, 4}, ZHU Hua-Qing^{2, 3, 4}, YANG Ye-Hua^{2, 3, 4}, XIONG Han^{2, 3, 4}, ZHANG Wen-an^{2, 3, 4}, JIANG Tai-ming^{3, 4, 5}
(1. College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Institute of Soil and Fertilizer, Guizhou Academy of Agricultural Sciences, Guiyang 550006, China; 3. Guizhou Farmland Conservation and Agro-Environmental Science Observation and Experimental Station, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guiyang 550006, China; 4. National Soil Quality Observation and Experiment Station, Guiyang 550006, China; 5. Guizhou Academy of Agricultural Sciences, Guiyang 550006, China)

Abstract: [objective] The aims were to investigate the effects of long-term rotation and fertilization on rice yield, plant nutrient uptake and utilization, and soil nutrient content, so as to provide reference for rational rotation selection in yellow soil area. [Methods] Based on the 25-year yellow soil (paddy field) long-term located experiments, four crop rotation patterns were selected: rice monoculture (RM), rice-wheat rotation (RWR), rice-canola rotation (RRR), and rice-green manure rotation (RMR). The differences in crop yield, plant nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K) nutrient uptake and soil nutrients were compared among different crop rotation patterns. [Result] The average rice yield of different rotations from 2016 to 2020 was RWR > RRR > RM > RMR, but there was no significant difference among treatments. Compared to RM processing, RWR, RRR and RMR treatments increased the average N, P and K contents of rice straw and grain by 10.9%-37.0%, 63.6%-101.6%, 11.9%-17.6% and 7.1%-20.4%, 19.7%-37.6%, 6.0%-8.1%, respectively. The average N, P and K uptake of straw and grain were increased by 15.0%-45.4%, 69.7%-113.9%, 16.1%-24.8% and 3.7%-22.6%, 15.9%-40%, 2.6%-10.1%, respectively. The total uptake amounts of N, P and K were increased by 8.0%-30.2%, 22.3%-44.8% and 12.9%-21.3%, respectively. The N, P and K nutrient content, absorption amount and absorption efficiencies of rice straw and grain in each rotation treatment showed the following order: RWR > RRR > RMR. Compared with RM treatment, soil organic matter was increased by 37.0%-41.1%, total N by 1.7%-28.6%, alkali-hydrolyzed N by 24.4%-47.5%, and available P by 2.2%-54.8%. [Conclusion] Under the current cropping system and fertilization conditions, various cropping rotations could maintain rice yield without decreasing, increase land productivity per unit area, increase N, P and K uptake of rice plants, and improve soil fertility.

Key words: Yellow soil; Long-term crop rotation; Rice; Nutrient absorption; Soil nutrient

[责任编辑: 裴久渤 高晓丹]