

翁玉林,王高杰,夏方招,等.鄂东地区稻田二熟制模式的生产力、温光资源利用和氮磷养分平衡比较[J].华中农业大学学报,2022,41(4): 193-201.DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2022.04.024

鄂东地区稻田二熟制模式的生产力、温光资源利用和 氮磷养分平衡比较

翁玉林¹,王高杰¹,夏方招¹,熊兴军²,李兴华³,李承力⁴,胡荣桂⁵,杨特武¹

1. 华中农业大学植物科学技术学院/农业农村部长江中游作物生理生态与耕作重点实验室,武汉 430070;

2. 中国电建集团昆明勘察设计院有限公司乡村振兴研究中心,昆明 650051;

3. 湖北省黄冈市农业科学院,黄冈 438000; 4. 湖北省种子集团有限公司,武汉 430206;

5. 华中农业大学资源与环境学院,武汉 430070

摘要 为了优化鄂东地区稻田耕作制度,挖掘作物周年生产潜力,提高作物生产效益和资源利用效率,通过连续4 a的定位试验,比较了油菜-玉米(oilseed rape-maize, O-M)、油菜-水稻(oilseed rape-rice, O-R)、油菜-节水抗旱稻(oilseed rape-water-saving and drought-resistant rice, O-WDR)、小麦-玉米(wheat-maize, W-M)、小麦-水稻(wheat-rice, W-R)、冬闲-双季稻(fallow-double season rice, F-DR)6种二熟制种植模式的周年生产力、生产效益、温光资源和氮磷利用以及土壤氮磷含量变化的差异。结果显示:周年经济产量以W-R模式最高,其次为O-R模式,而平均周年生产效益以O-R模式最高;氮利用率以O-R和W-R模式在鄂最高,磷利用率以O-R模式最高,温光资源利用效率则以F-DR模式最高。经过4轮复种后,O-R模式在鄂东地区具较高的丰产性和稳产性及良好的生产效益,并有利于维持农田土壤肥力和降低氮流失风险,具有替代传统双季稻模式的应用前景。

关键词 复种; 作物生产力; 资源利用; 土壤肥力; 稻田耕作制度; 氮磷养分; 油稻复种

中图分类号 S344.1 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2022)04-0193-09

复种是我国传统耕作制度,不仅可提高农田周年生产力和经济效益,还有利于改善土壤质量^[1-2]。黄国勤等^[3]研究表明,长期复种可显著降低稻田耕层土壤容重,增加土壤孔隙度,从而改善土壤结构。王志强等^[4]研究发现,相比于冬季休闲,冬季轮作复种显著改善稻田土壤团聚体组成及比例,减少微团聚体比例,提高大团聚体比例,从而增强土壤团聚体的水稳性。杨滨娟等^[1]研究表明,相较于休闲-双季稻复种模式,紫云英-双季稻复种显著提高土壤无机氮和微生物量氮含量,有利于维持土壤肥力。秦舒浩等^[5]研究表明,马铃薯与豆科作物复种3 a后,土壤脲酶、过氧化氢酶和碱性磷酸酶活性以及土壤氮磷有效性均显著提高,盐渍化状况得到改善。此外,多样化的复种模式还能显著提高土壤微生物特别是异养细菌的活性和多样性^[6-7]。吴宏亮等^[8]研究表明,西瓜-辣椒复种显著降低土壤真菌的相对丰度,提高细菌与真菌丰度比(B/F),从而改善土壤微生态环境,

有利于缓解西瓜连作障碍。

适宜的复种模式既取决于当地气候资源状况,也受到社会经济发展的影响^[9]。鄂东地区光热资源丰富,是湖北省重要的粮食产区,种植制度以单、双季稻为主^[10]。由于冬季存在较长时间的农田休闲,造成大量温光资源浪费,作物周年生产力水平较低;同时,近年来由于农村劳动力减少和农业生产成本升高,作物生产效益低下。因此,进一步优化耕作制度,挖掘作物的温光资源利用潜力,对于提高鄂东地区作物生产力水平和生产效益具有重要意义。本研究在鄂东地区设置长期定位试验点,通过连续4 a的试验,比较了油菜-玉米、油菜-水稻、油菜-节水抗旱稻、小麦-玉米、小麦-水稻、休闲-双季稻等6种复种连作模式的周年生产力、生产效益及其对温光资源和养分利用的差异,旨在为优化鄂东地区的作物种植制度提供试验依据。

收稿日期:2022-04-08

基金项目:国家重点研发计划专项(2017YFD0800102);云南省科技与人才平台计划(202205AF150004)

翁玉林,E-mail:1101322748@qq.com

通信作者:杨特武,E-mail:yangtewu@mail.hzau.edu.cn

1 材料与方法

1.1 试验点概况

试验于 2017 年 10 月—2021 年 10 月在湖北省黄冈市团风县梅家墩村(30°33′56.85″N, 114°54′57.52″E)进行。试验点位于鄂东沿江平原,属于北亚热带季风气候区,年均气温 16.8℃,年均降水量 1 200 mm,年均无霜期 258 d。试验地土壤为长江冲积潮土,0~20 cm 耕层土壤含有机质 11.10 g/kg、全氮 0.47 g/kg、全磷 0.66 g/kg、全钾 11.16 g/kg、碱解氮 67.4 mg/kg、速效磷 15.35 mg/kg、速效钾 63.65 mg/kg,pH 7.3。试验前长期种植水稻。

1.2 试验设计

按单因素试验设计,以当地主要作物组建油菜-玉米(oilseed rape-maize,O-M)、油菜-水稻(oilseed rape-rice,O-R)、油菜-节水抗旱稻(oilseed rape-wa-

ter-saving and drought-resistant rice,O-WDR)、小麦-玉米(wheat-maize,W-M)、小麦-水稻(wheat-rice,W-R)、冬闲-双季稻(fallow-double season rice,F-DR)6种复种模式,3次重复,随机区组排列,小区面积 4 m×6 m。小区四周筑 40 cm 宽、20 cm 高的隔离埂,小区间开 40 cm 宽、30 cm 深的隔离沟。

1.3 试验方法

各作物以当地主推品种为试验材料,双季早稻、节水抗旱稻和中稻均为籼稻品种,双季晚稻为粳稻品种。按照当地习惯方法进行作物种植、施肥和管理。4 a 各季作物的播种、移栽和收获时间见表 1。油菜种植密度为 32.5 万株/hm²,小麦按 120 kg/hm²播量条播。水稻按育秧移栽法种植,双季早稻和晚稻移栽密度为 37.5 万穴/hm²,早稻每穴移栽 3 本,晚稻每穴移栽 4 本;中稻移栽密度为 23 万穴/hm²,每穴 2 本。节水抗旱稻按 30 kg/hm²播量湿润法直播,玉米按 8 万株/hm²的种植密度穴播。

表 1 不同作物的播期、移栽日期和收获日期

Table 1 Sowing, transplanting and harvest dates of various crops

作物 Crop	农事操作 Implementation	日期 Date			
油菜 Oilseed rape	播种 Sowing	2017.09.30	2018.10.05	2019.10.04	2020.10.06
	收获 Harvest	2018.05.04	2019.05.07	2020.05.03	2021.05.07
小麦 Wheat	播种 Sowing	2017.10.30	2018.10.30	2019.10.28	2020.10.27
	收获 Harvest	2018.05.11	2019.05.15	2020.05.10	2021.05.10
玉米 Maize	播种 Sowing	2018.05.29	2019.06.15	2020.06.26	2021.06.21
	收获 Harvest	2018.09.08	2019.09.10	2020.10.04	2021.10.03
节水抗旱稻 WDR	播种 Sowing	2018.05.29	2019.06.01	2020.05.30	2021.05.30
	收获 Harvest	2018.09.15	2019.09.12	2020.09.13	2021.09.14
双季早稻 First season rice	播种 Sowing	2018.03.22	2019.03.24	2020.03.27	2021.03.27
	移栽 Transplanting	2018.04.27	2019.05.1	2020.04.28	2021.04.29
	收获 Harvest	2018.07.14	2019.07.15	2020.07.17	2021.07.19
中稻 Middle season rice	播种 Sowing	2018.05.04	2019.05.10	2020.05.10	2021.05.10
	移栽 Transplanting	2018.05.28	2019.05.30	2020.06.03	2021.06.06
	收获 Harvest	2018.09.12	2019.09.14	2020.09.08	2021.09.14
双季晚稻 Second season rice	播种 Sowing	2018.07.02	2019.06.20	2020.06.21	2021.06.20
	移栽 Transplanting	2018.07.28	2019.07.15	2020.07.25	2021.07.20
	收获 Harvest	2018.10.27	2019.10.17	2020.11.03	2021.10.24

同季作物施肥量(表 2)一致。其中,基肥用复合肥(N-P₂O₅-K₂O=15-15-15),氮肥追肥用尿素,钾肥追肥用氯化钾。

1.4 测定项目与方法

1)作物生产力。在各季作物收获时先淘汰小区边行边株,收获其余部分测定经济产量和生物学产量。

2)作物氮磷吸收量。各季作物收获前 1 d 在每小区选取典型植株 10 株,将地上部洗净后烘干、磨成粉末,用浓 H₂SO₄ 消化后采用流动分析仪^[11](AA3,德国 SEAL)测定氮磷含量,根据地上部生物学产量计算养分吸收量。

3)土壤肥力。于每轮试验夏季作物收获后,按照“5 点采样法”采集各小区 0~20 cm 耕层土样,去除

表 2 两季作物年施肥量			
Table 2 Annual fertilizer application rates in the two cropping seasons			
肥料类型 Fertilizer type	施肥形式 Application form	头季作物 First season crop	后季作物 Subsequent season crop
N	基肥 Base fertilizer	112.5	112.5
	追肥 Topdressing fertilizer	79.5	112.5
P ₂ O ₅	基肥 Base fertilizer	112.5	112.5
K ₂ O	基肥 Base fertilizer	112.5	112.5
	追肥 Topdressing fertilizer	0.0	37.5

0~2 cm 表层土及杂物,置于阴凉通风处自然风干,研磨,过孔径 1 mm 筛,采用浓 H₂SO₄消化-流动分析仪法测定土壤总氮和总磷含量^[11]。根据土壤容重和氮磷含量计算耕层土壤氮磷积累量。

1.5 计算及统计分析方法

周年积温生产效率=周年经济产量/生产季有效积温^[12](生物学零度:油菜和小麦为 0℃,玉米和粳稻为 10℃,籼稻为 12℃);

周年日照时数生产效率=周年经济产量/生产季日照总时数;

偏因子养分平衡=作物地上部养分吸收量/纯养分施用量^[13];

土壤养分表观平衡量=养分投入量-作物养分携出量^[14];

土壤养分实际盈余量=试验后土壤养分总量-

试验前土壤养分总量;
养分损失量=养分表观平衡量-养分实际盈余量。

应用 SPSS 24.0 统计软件对试验数据进行单因素方差分析,采用 Duncan’s 多重比较检验不同处理间差异显著性。数据采用“平均值±标准误”表示。

2 结果与分析

2.1 不同复种模式产量及经济效益

1)经济产量。由表 3 可知,不同复种模式的经济产量存在显著差异。2017—2018 和 2018—2019 年周年经济产量以及 4 a 平均产量均以 W-R 最高,显著高于其他模式;2019—2020 和 2020—2021 年周年产量则以 O-R 最高,但与 W-R 和 F-DR 差异不显著。4 a 平均总产量均以 O-M 最低,其次为 O-WDR 模式,二者显著低于其他模式。不同复种模式的后季作物产量均高于头季作物。头季作物 4 a 平均产量以 F-DR 模式最高,显著高于其他复种模式,而 O-WDR 模式的头季作物产量最低;后季作物 4 a 平均产量则以 O-R 和 W-R 模式最高,显著高于其他模式,而 O-WDR 和 O-M 模式的后季作物产量最低。在头季作物相同的条件下,后季作物水稻的年均经济产量显著高于玉米和节水抗旱稻;在后季作物相同的条件下,头季作物小麦的年均经济产量显著高于油菜(表 3)。

表 3 不同复种模式的经济产量													
Table 3 Economic yield of various cropping patterns													
复种模式 Cropping pattern	2017—2018			2018—2019			2019—2020			2020—2021			平均总产 Average annual
	头季 First season	后季 Second season	年总产 Annual yield	头季 First season	后季 Second season	年总产 Annual yield	头季 First season	后季 Second season	年总产 Annual yield	头季 First season	后季 Second season	年总产 Annual yield	
	season	season	yield	season	season	yield	season	season	yield	season	season	yield	
O-M	2.71c	5.70bc	8.41c	2.89c	4.57c	7.46d	3.25c	4.47c	7.72b	3.30b	7.27b	10.57b	8.54e
O-R	2.68c	7.01a	9.69b	3.55b	7.59a	11.14b	3.41bc	9.07a	12.48a	3.36b	8.64a	12.00a	11.32b
O-WDR	2.69c	5.29cd	7.98d	3.28b	5.96b	9.25c	3.56b	5.08c	8.64b	3.14b	5.70d	8.84c	8.68e
W-M	3.99a	6.00b	9.99b	4.50a	4.93c	9.44c	3.29bc	5.05c	8.34b	3.35b	7.37b	10.72b	9.62d
W-R	3.92a	7.48a	11.40a	4.62a	7.51a	12.12a	3.42bc	8.98a	12.40a	3.41b	8.44a	11.85a	11.94a
F-WDR	3.62b	4.81d	8.43c	4.63a	6.24b	10.86b	5.15a	6.90b	11.97a	5.35a	6.42c	11.70a	10.76c
方差分析结果 ANOVA results													
F	119.417	34.062	111.178	73.251	29.523	79.118	72.833	12.758	43.171	96.790	66.317	70.027	181.898
(P)	(<0.001)	(<0.001)	(<0.001)	(<0.001)	(<0.001)	(<0.001)	(<0.001)	(<0.001)	(<0.001)	(<0.001)	(<0.001)	(<0.001)	(<0.001)

注:同列不同小写字母表示 α=0.05 水平上的差异显著性。下同。Note: Different small letters mean significant difference for data in the same column at α=0.05 level. The same as follows.

2)经济效益。成本-收益核算结果表明,周年生产成本和毛收入均以 O-R 模式最高,W-M 模式最低;年均净收入以 O-R 模式最高,F-DR 模式最低, O-R 较 F-DR 高 196%;最高年净收入以 O-M 模式最高,其次为 O-R 模式,W-R 模式最低(表 4)。在头季作物相同的条件下,后季作物为水稻的复种模式年

均净收入较后季作物为玉米和节水抗旱稻的模式高;在后季作物相同的条件下,头季作物为油菜的模式高。

表 4 不同复种模式周年生产效益

Table 4 Annual economic benefit of various multiple cropping patterns Yuan/hm²

复种模式 Cropping pattern	周年成本 Annual cost	毛收入 Gross income				净收入 Net income					最高年 净收入 Max annual net income
		2018	2019	2020	2021	2018	2019	2020	2021	平均 Average	
O-M	20 722	23 942	22 970	25 611	34 786	3 219	2 247	4 889	14 064	6 105	14 064
O-R	27 603	30 424	35 880	39 135	37 985	2 821	8 277	11 532	10 382	8 253	11 532
O-WDR	23 789	26 143	30 517	29 704	29 406	2 354	6 728	5 916	5 617	5 154	6 728
W-M	18 176	21 050	20 418	19 959	27 287	2 874	2 242	1 783	9 110	4 002	9 110
W-R	25 057	28 088	29 539	30 676	29 575	3 030	4 482	5 618	4 518	4 412	5 618
F-DR	24 320	21 194	27 313	30 190	29 751	-3 126	2 993	5 870	5 431	2 792	5 870

注:周年成本包括种子、化肥、农药、人工和机械等投入成本,毛收入按作物经济产量和当年国家最低收购价格或当地平均收购价格计算,净收入为毛收入与周年成本差值。2018—2021年各类作物售价:油菜分别为4.76、4.72、4.72和4.72元/kg;小麦分别为2.36、2.30、2.30和2.34元/kg;玉米分别为1.94、2.04、2.30和2.64元/kg;早籼稻分别为2.40、2.40、2.42和2.44元/kg;节水抗旱稻和中籼稻分别为2.52、2.52、2.54和2.56元/kg;晚粳稻分别为2.60、2.60、2.60和2.60元/kg。Note: Annual cost included the investments of seed, fertilizer, chemicals, labor and machines. Gross income was calculated from the economic yield and the state protected price or local average selling price of crops in the year. Net income was the difference between gross income and annual cost. Annual selling price was 4.76, 4.72, 4.72 and 4.72 yuan/kg for rapeseed; 2.36, 2.30, 2.30 and 2.34 yuan/kg for wheat; 1.94, 2.04, 2.30 and 2.64 yuan/kg for maize; 2.40, 2.40, 2.42 and 2.44 yuan/kg for early season indica rice; 2.52, 2.52, 2.54 and 2.56 yuan/kg for WDR and middle season indica rice; 2.60, 2.60, 2.60 and 2.60 yuan/kg for late season japonica rice, respectively, in 2018—2021.

2.2 不同复种模式的温光资源利用效率

不同复种模式的温光资源利用效率存在显著差异(表5)。在所有复种模式中,周年积温生产效率和日照时数生产效率均以F-DR最高,O-M和O-WDR较低,而O-R处于中等水平。在头季作物相同的条件

下,后季作物为水稻的复种模式的周年积温生产效率和日照时数生产效率均显著高于后季作物为玉米和节水抗旱稻的模式;在后季作物相同的条件下,头季作物为小麦的复种模式的周年积温生产效率和日照时数生产效率显著高于头季作物为油菜的模式(表5)。

表 5 不同复种模式周年籽粒温光生产效率

Table 5 Annual temperature and sunshine production efficiencies of grain or seed in various multiple cropping patterns

复种模式 Cropping pattern	周年积温生产效率/(kg/(hm ² ·℃)) Annual accumulated temperature production efficiency					周年日照时数生产效率/(kg/(hm ² ·h)) Annual sunshine hours production efficiency				
	2018	2019	2020	2021	平均 Average	2018	2019	2020	2021	平均 Average
O-M	1.94e	1.87f	1.87d	2.28e	1.99e	5.39e	5.63e	4.83c	7.46e	5.83e
O-R	2.32d	2.71c	3.05b	2.73c	2.70c	6.12d	7.57c	7.59b	9.15c	7.61c
O-WDR	1.89e	2.28e	2.08cd	1.97f	2.06e	4.98f	6.41d	5.17c	6.46f	5.76e
W-M	2.53c	2.52d	2.18c	2.60d	2.46d	6.75c	7.60c	5.45c	7.93d	6.93d
W-R	3.01b	3.15b	3.27b	3.06b	3.12b	7.58b	8.75b	7.86b	9.52b	8.43b
F-DR	3.52a	4.24a	5.00a	4.53a	4.32a	8.60a	9.43a	13.96a	12.51a	11.12a
方差分析结果 ANOVA results										
F	340.484	321.118	175.589	605.039	1 037.125	244.429	115.480	241.093	367.666	750.783
(P)	(<0.001)	(<0.001)	(<0.001)	(<0.001)	(<0.001)	(<0.001)	(<0.001)	(<0.001)	(<0.001)	(<0.001)

2.3 不同复种模式的氮磷吸收

1)氮磷吸收量。图1显示,作物地上部年均氮吸收量以O-R和W-R模式最高,二者差异不显著,但均

显著($P<0.05$)高于其他模式;F-DR年均氮吸收量显著($P<0.05$)低于其他模式。在头季作物相同的条件下,后季作物为水稻的种植模式年均氮吸收量

显著($P<0.05$)高于后季作物为玉米和节水抗旱稻的模式;在后季作物相同的条件下,头季作物不同的种植模式年均氮吸收量差异不显著。作物年均磷吸收量以O-M最高,F-DR最低,与其他模式间差异显著($P<0.05$)。在头季作物相同的条件下,后季作物为玉米的种植模式年均磷吸收量显著($P<0.05$)高于后季作物为水稻和节水抗旱稻的模式;在后季作物相同的条件下,头季作物为油菜的种植模式年均磷吸收量显著($P<0.05$)高于头季作物为小麦的模式(图1)。

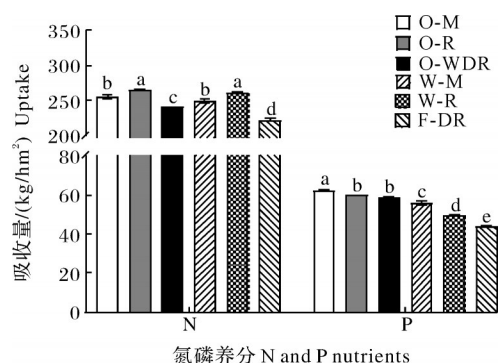


图1 不同复种模式平均周年地上部氮磷吸收量
Fig.1 Annual aboveground nitrogen (N) and phosphorus (P) uptakes on average in various multiple cropping patterns

2)氮磷偏因子养分平衡。O-R和W-R模式具有较高的周年氮偏因子养分平衡,O-M和O-R模式具有较高的周年磷偏因子养分平衡,与其他模式差异显著($P<0.05$);F-DR模式的周年氮、磷偏因子养分平衡均显著($P<0.05$)低于其他模式(图2)。在头季作物相同的条件下,后季作物为水稻的种植模式氮

偏因子养分平衡显著($P<0.05$)高于后季作物为玉米和节水抗旱稻的模式,而后季作物为玉米的种植模式磷偏因子养分平衡显著($P<0.05$)高于后季作物为水稻和节水抗旱稻的模式;在后季作物相同的条件下,不同头季作物种植模式的氮偏因子养分平衡差异不显著,而头季作物为油菜的种植模式磷偏因子养分平衡显著($P<0.05$)高于头季作物为小麦的模式(图2)。

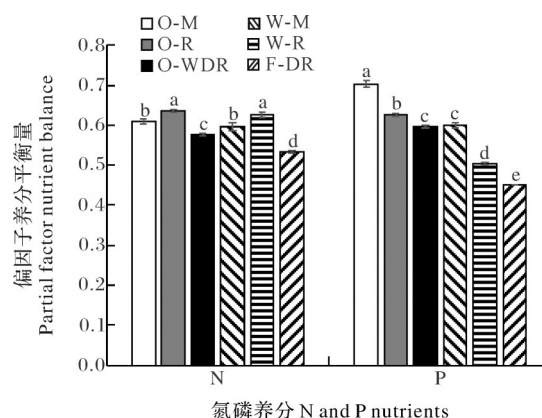


图2 不同复种模式的平均周年氮、磷偏因子养分平衡
Fig.2 Annual nitrogen (N) and phosphorus (P) partial factor nutrient balances on average in various multiple cropping patterns

2.4 不同复种模式的土壤氮磷变化与平衡

1)养分总量。后季作物收获后土样测定结果显示,不同复种模式的耕层土壤总氮和总磷含量随着种植年限呈基本升高的趋势(图3和图4)。在4轮试验中,O-R模式下土壤总氮含量最高,但与W-R和F-DR模式差异不显著;O-WDR模式的土壤总氮含量最低,但与O-M和W-M模式差异不显著(图3)。

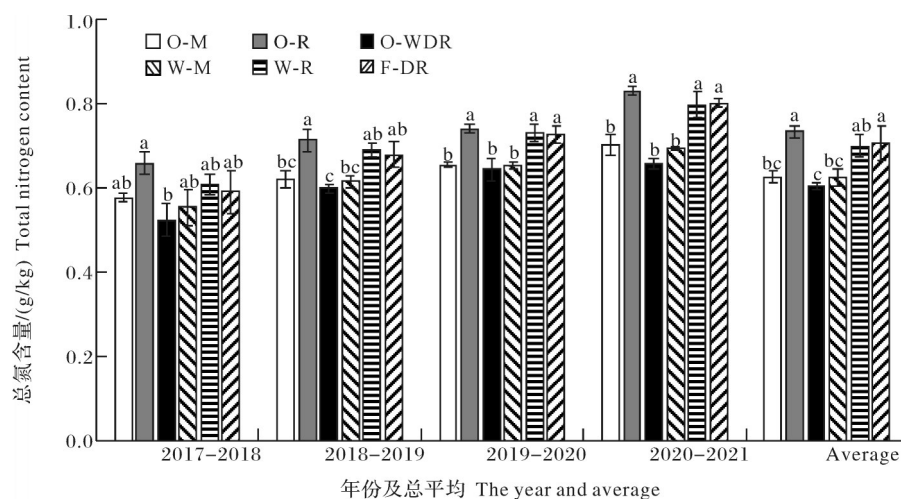


图3 不同复种模式土壤总氮含量变化

Fig.3 Changes in total nitrogen content in the soil of various multiple cropping patterns

土壤总磷含量在 4 轮试验中均以 O-M 最高,其次为 W-M 模式,二者差异不显著;在多数年份 W-R 模式的土壤总磷含量最低,其次为 F-DR 模式,而 O-R 模式的土壤总磷含量处于中等水平(图 4)。

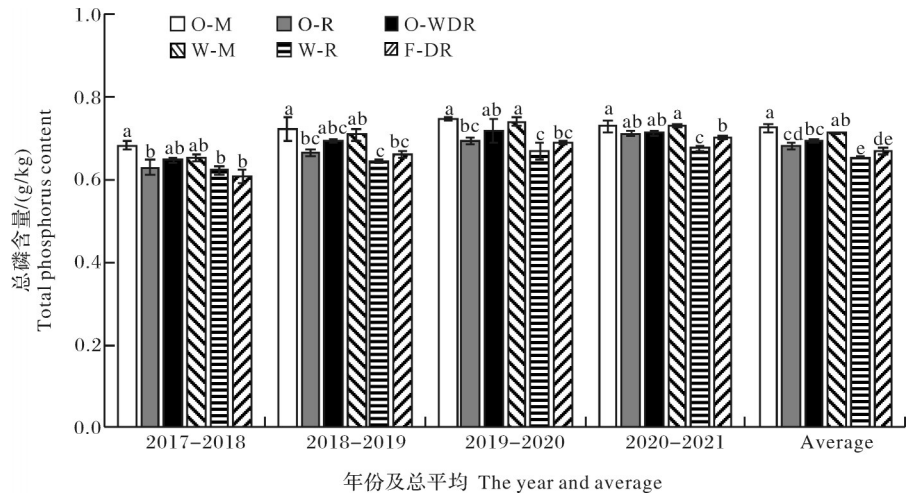


图 4 不同复种模式土壤总磷含量变化

2) 养分平衡。经过 4 轮试验后各模式的土壤氮磷含量均有不同程度的盈余(表 6)。土壤氮表观平衡量以 F-DR 最大, O-R 最小; 实际盈余量以 O-R 最大, O-WDR 最小。土壤磷表观平衡量也以 F-DR 最大, 但以 O-M 最小; 实际盈余量以 W-M 最大, W-R 最小, O-R 处于中等水平。不同复种模式 4 a 氮总损失量以 O-WDR 最大、O-R 最小; 磷总损失量以 W-R 最大, 其次为 F-DR, O-M 最小, O-R 和 O-WDR 处于中等水平(表 6)。

Table 6 N and P balances in the surface soil of various multiple cropping patterns(2018—2021) kg/hm ²										
复种模式 Cropping pattern	N					P				
	总投入 Total input	总携出 Total output	表观平衡 Apparent balance	实际盈余 Actual surplus	总损失量 Total loss	总投入 Total input	总携出 Total output	表观平衡 Apparent balance	实际盈余 Actual surplus	总损失量 Total loss
O-M	1 672	1 018	654	344	310	393	245	148	103	45
O-R	1 677	1 056	620	537	83	394	239	154	75	79
O-WDR	1 669	964	706	276	430	393	235	158	79	79
W-M	1 680	995	685	332	352	395	224	171	105	66
W-R	1 684	1 042	642	489	153	395	197	198	23	175
F-DR	1 714	889	825	494	331	398	177	221	62	159

注:总投入包括肥料、种子和秧苗输入的养分,总携出仅包括收获作物地上部输出的养分。Note: Total input included the nutrient inputs by fertilizer, seeds and seedlings; the total output included the nutrient output from the harvested abovegrounds of crops only.

3 讨 论

本研究结果显示,在 6 种复种模式中 O-R 和 W-R 模式具有较高的产量和良好的稳产性,而在 4 轮试验中 O-M 的周年经济产量均显著低于 O-R, W-M 的周年经济产量显著低于 W-R,表明玉米是影响 O-M 和 W-M 模式生产力的主要因素。在本试验过程中,由于 2018 年当地出现夏季高温干旱天气,2019 和 2020 年夏季发生严重洪涝灾害,而玉米苗期对渍水

敏感、开花结实期不耐高温^[15],因而造成玉米严重减产。此外,当地传统的 F-DR 模式也在 2018 年因夏季高温干旱而严重减产,但在其余年份其周年产量与 O-R 模式差异不显著。节水抗旱稻是在当地具有良好发展前景的一类新型水稻品种^[16]。在本研究中, O-WDR 模式下周年经济产量显著低于 O-R 模式,系 WDR 在节水栽培下产量潜力低于普通中稻所致^[17]。由于油菜籽价格高于其他作物, O-R 模式除了生产力水平较高外在生产效益上也具有较大的优

势;而W-M和F-DR模式则由于玉米产量波动较大、早稻产量及收购价格低,因而生产效益较低,尤其是2018年F-DR模式因减产幅度较大而经济收益为负值。O-M模式也具有较好的经济效益,其效益最高年份的净收入甚至高于O-R模式,但O-M模式因产量不稳而导致其生产效益波动很大。由此可见,O-M和W-M模式不适合作为当地稻田复种系统。在本研究中F-DR模式的周年积温和日照时数生产效率最高,与该模式具有较高的周年经济产量和较短的生产周期有关。O-R模式虽具有较高的经济产量,但因生产周期较长,其周年积温和日照时数生产效率处于中等水平。

农田养分投入和输出显著影响土壤肥力的平衡^[14]。油菜为油料作物,需磷量较大^[18],因而本研究中含有油菜的复种模式(O-R、O-M和O-WDR)具有较高的磷吸收量和作物携出量。由于节水抗旱稻和双季稻的生物学产量较低,因而O-WDR和F-DR模式的氮吸收量和作物携出量较低,而其他模式的氮吸收量和作物携出量差异较小。偏因子养分平衡常用于衡量作物生产对土壤肥力的影响,其值越接近于1,越有利于土壤肥力的平衡^[13]。从偏因子养分平衡量看,本研究中O-R和W-R模式最有利于土壤氮肥力的平衡,而O-M模式最有利于土壤磷肥力的平衡。不同复种模式的氮磷平衡核算结果显示,O-R模式的土壤氮盈余量最高、损失量最小,而O-M模式的土壤磷盈余量最高、损失量最小。油菜在生育前期可从土壤中吸收大量的氮磷养分,而在生育后期又通过大量落叶向土壤归还部分养分,既有利于培肥土壤,又可减少农田氮磷流失^[18-19]。农田氮磷流失是水体富营养化的重要诱因^[20-21]。因此,在鄂东地区O-R和O-M种植模式有利于降低农田面源污染负荷和水体富营养化风险。

前人研究表明,作物系统的养分损失量与作物的养分吸收量存在较大关系,较小的养分吸收量将增加作物系统的养分流失风险^[22]。在本研究中,F-DR模式的氮磷吸收量最小,其磷损失量大于除W-R外的其他模式,而氮损失量处于中等水平。农田氮损失途径具有多样性,既包括 NH_3 和 N_2O 等气体挥发损失,也包括径流和淋溶损失^[23-24]。因此,不同复种模式下氮损失量差异产生的原因还需从流失途径方面进一步探究。本研究中不同复种模式下磷损失量与磷吸收量也并非完全对应。尽管农田磷损失途径比较单一,即主要通过径流流失,但其流失强度与

土壤磷形态变化密切相关,并受到土壤和作物类型、施肥和田地管理方式等因素的影响^[25-26]。因此,有关不同复种模式下磷流失机制尚需从作物生产过程中土壤磷形态的变化上深入探讨。

鄂东地区不同复种连作模式的周年生产力、生产效益及其对温光和养分资源的利用和土壤氮磷平衡均存在显著差异。其中,油菜-水稻复种模式具有较高的丰产性和稳产性,且经济效益最高,同时油菜在生育前期大量吸收固定土壤氮磷养分,而在生育后期又通过大量落叶归还土壤部分氮磷养分,从而有利于维持土壤肥力并可降低土壤氮流失风险,具有替代当地传统双季稻模式的应用前景。

参考文献 References

- [1] 杨滨娟,王礼献,袁嘉欣,等.长江中游地区不同冬种复种方式下水稻产量和土壤氮素特征研究[J].生态科学,2021,40(6):75-82.YANG B J, WANG L X, YUAN J X, et al. Study on different winter crops and multiple cropping patterns on rice yield and soil nitrogen characteristics in middle reaches of Yangtze River [J]. Ecological science, 2021, 40(6): 75-82 (in Chinese with English abstract).
- [2] POONIYA V, BISWAKARMA N, PARIHAR C M, et al. Six years of conservation agriculture and nutrient management in maize-mustard rotation: impact on soil properties, system productivity and profitability[J/OL]. Field crops research, 2021, 260 (1): 108002[2022-04-08]. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.108002>.
- [3] 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,2006,43(1):69-78.HUANG G Q, XIONG Y M, QIAN H Y, et al. Ecological analysis of rice field rotation system [J]. Acta pedologica sinica, 2006, 43(1): 69-78 (in Chinese with English abstract).
- [4] 王志强,刘英,杨文亭,等.稻田复种轮作休耕对土壤团聚体分布及稳定性的影响[J].土壤学报,2018,55(5):1143-1155.WANG Z Q, LIU Y, YANG W T, et al. Effects of multiple cropping rotation fallow on the distribution and stability of soil aggregates in paddy field [J]. Acta pedologica sinica, 2018, 55(5): 1143-1155 (in Chinese with English abstract).
- [5] 秦舒浩,曹莉,张俊莲,等.轮作豆科植物对马铃薯连作田土壤速效养分及理化性质的影响[J].作物学报,2014,40(8):1452-1458.QIN S H, CAO L, ZHANG J L, et al. Effect of rotation of leguminous plants on soil available nutrients and physical and chemical properties in continuous cropping potato field [J]. The crop journal, 2014, 40(8): 1452-1458 (in Chinese with English abstract).
- [6] D'ACUNTO L, ANDRADE J F, POGGIO S L, et al. Diversifying crop rotation increased metabolic soil diversity and activity of the microbial community [J]. Agriculture, ecosystems & environment, 2018, 257 (7): 159-164.
- [7] TOWN J R, GREGORICH E G, DRURY C F, et al. Diverse crop rotations influence the bacterial and fungal communities in

- root, rhizosphere and soil and impact soil microbial processes [J/OL]. *Applied soil ecology*, 2022, 169 (1): 104241 [2022-04-08]. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104241>.
- [8] 吴宏亮, 康建宏, 陈阜, 等. 不同轮作模式对砂田土壤微生物区系及理化性状的影响 [J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21 (6): 674-680. WU H L, KANG J H, CHEN F, et al. Effect of different rotation patterns on soil microbial population and physiochemical properties under gravel-sand mulched field conditions [J]. *Chinese journal of eco-agriculture*, 2013, 21 (6): 674-680 (in Chinese with English abstract).
- [9] 武兰芳, 陈阜, 欧阳竹. 种植制度演变与研究进展 [J]. *耕作与栽培*, 2002, 22 (3): 1-5, 14. WU L F, CHEN F, OUYANG Z. Evolution and research progress of planting system [J]. *Tillage and cultivation*, 2002, 22 (3): 1-5, 14 (in Chinese).
- [10] 王媛媛, 刘颖, 高奇正, 等. 湖北省水稻种植模式结构和比较优势时空变化 [J]. *经济地理*, 2017, 37 (8): 137-144. WANG M M, LIU Y, GAO Q Z, et al. The spatial and temporal analysis of the comparative advantage of different rice planting pattern in Hubei Province [J]. *Economic geography*, 2017, 37 (8): 137-144 (in Chinese with English abstract).
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 39-270. BAO S D. *Soil agrochemical analysis* [M]. 3rd ed. Beijing: China Agricultural Press, 2000: 39-270 (in Chinese).
- [12] 周宝元, 马玮, 孙雪芳, 等. 播/收期对冬小麦-夏玉米一年两熟模式周年气候资源分配与利用特征的影响 [J]. *中国农业科学*, 2019, 52 (9): 1501-1517. ZHOU B Y, MA W, SUN X F, et al. Effects of different sowing and harvest dates of winter wheat-summer maize under double cropping system on the annual climate resource distribution and utilization [J]. *Scientia agricultura sinica*, 2019, 52 (9): 1501-1517 (in Chinese with English abstract).
- [13] DOBERMANN A. Nutrient use efficiency-measurement and management [C]//KRAUSS A, ISHERWOOD K, HEFFER P. Fertilizer best management practices: general principles, strategy for their adoption and voluntary initiatives versus regulations. Paris: International Fertilizer Industry Association, 2007: 1-28.
- [14] 刘瑞, 戴相林, 郑险峰, 等. 半旱地不同栽培模式及施氮下农田土壤养分表观平衡状况研究 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17 (4): 934-941. LIU R, DAI X L, ZHENG X F, et al. Net nutrient balance in soil under different cultivation pattern and nitrogen application rate in semiarid region [J]. *Journal of plant nutrition and fertilizer*, 2011, 17 (4): 934-941 (in Chinese with English abstract).
- [15] 方芳, 何序晨, 张志豪, 等. 玉米自交系苗期对高温胁迫的响应机制及其抗逆性 [J]. *浙江农业学报*, 2019, 31 (7): 1045-1056. FANG F, HE X C, ZHANG Z H, et al. Response mechanism and stress resistance of maize inbred lines to high temperature stress at seedling stage [J]. *Acta agriculturae Zhejiangensis*, 2019, 31 (7): 1045-1056 (in Chinese with English abstract).
- [16] 涂军明, 邓桥江, 曹志刚, 等. 节水抗旱稻的特性及其丰产高效栽培技术 [J]. *湖北农业科学*, 2020, 59 (20): 32-34. TU J M, DENG Q J, CAO Z G, et al. Characteristics of water-saving and drought-resistant rice and its high yield and efficient cultivation techniques [J]. *Hubei agricultural sciences*, 2020, 59 (20): 32-34 (in Chinese with English abstract).
- [17] 李兴华, 汪吴凯, 杨特武, 等. 节水抗旱稻发展现状、优势及需解决的主要问题 [J]. *华中农业大学学报*, 2022, 41 (1): 84-91. LI X H, WANG W K, YANG T W, et al. Development status, advantages and main problems to be resolved of water-saving and drought-resistant rice [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2022, 41 (1): 84-91 (in Chinese with English abstract).
- [18] 陆景陵. 植物营养学 (上册) [M]. 2版. 北京: 中国农业大学出版社, 2003: 35-36. LU J L. *Plant nutrition (Volume I)* [M]. 2nd ed. Beijing: China Agricultural University Press, 2003: 35-36 (in Chinese).
- [19] 刘晓伟, 鲁剑巍, 李小坤, 等. 冬油菜叶片的物质及养分积累与转移特性研究 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17 (4): 956-963. LIU X W, LU J W, LI X K, et al. Study on the characteristics of dry matter and nutrient accumulation and transportation in leaves of winter oilseed rape [J]. *Journal of plant nutrition and fertilizer*, 2011, 17 (4): 956-963 (in Chinese with English abstract).
- [20] LI X H, WANG B N, YANG T W, et al. Identification of soil P fractions that are associated with P loss from surface runoff under various cropping systems and fertilizer rates on sloped farmland [J/OL]. *PLoS One*, 2017, 12 (6): e0179275 [2022-04-08]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0179275>.
- [21] CHEN L, XIE H, WANG G L, et al. Reducing environmental risk by improving crop management practices at high crop yield levels [J/OL]. *Field crops research*, 2021, 265 (6): 108123 [2022-04-08]. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108123>.
- [22] ZHANG Q W, YANG Z L, ZHANG H, et al. Recovery efficiency and loss of N^{15} -labelled urea in a rice-soil system in the upper reaches of the Yellow River Basin [J]. *Agriculture, ecosystems & environment*, 2012, 158 (13): 118-126.
- [23] 田玉华, 尹斌, 贺发云, 等. 太湖地区水稻季氮肥的作物回收和损失研究 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15 (1): 55-61. TIAN Y H, YIN B, HE F Y, et al. Study on crop recovery and loss of nitrogen fertilizer in rice season in Taihu Lake area [J]. *Journal of plant nutrition and fertilizer*, 2009, 15 (1): 55-61 (in Chinese with English abstract).
- [24] 郭相平, 张展羽, 殷国玺. 稻田控制排水对减少氮磷损失的影响 [J]. *上海交通大学学报 (农业科学版)*, 2006, 24 (3): 307-310. GUO X P, ZHANG Z Y, YIN G X. Effect of controlled drainage on loss of nitrogen and phosphorus from paddy field [J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University (agricultural science edition)*, 2006, 24 (3): 307-310 (in Chinese with English abstract).
- [25] 杜映妮, 李天阳, 何丙辉. 不同施肥和耕作处理紫色土坡耕地碳、氮、磷流失特征 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27 (12): 2149-2159. DU Y N, LI T Y, HE B H. Characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus loss in sloping farmland of purple soil under different fertilization and cultivation methods [J]. *Journal of plant nutrition and fertilizer*, 2021, 27 (12): 2149-2159 (in Chinese with English abstract).
- [26] LIU J, OUYANG X Q, SHEN J L, et al. Nitrogen and phosphorus runoff losses were influenced by chemical fertilization but not by pesticide application in a double rice-cropping system in the subtropical hilly region of China [J/OL]. *Science of the total environment*, 2020, 715 (18): 136852 [2022-04-08]. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136852>.

Comparing the productivity, utilization of temperature and light resources and balance of nitrogen and phosphorus of the paddy field with double-cropping system in Eastern Hubei

WENG Yulin¹, WANG Gaojie¹, XIA Fangzhao¹, XIONG Xingjun², LI Xinghua³,
LI Chengli⁴, HU Ronggui⁵, YANG Tewu¹

1.College of Plant Sciences and Technology /Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Farming System in the Middle Reaches of the Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2.Research Center for Rural Revitalization, Power China Kunming Engineering Co., Ltd., Kunming 650051, China;
3.Huanggang Academy of Agricultural Sciences, Hubei Province, Huanggang 438000, China;
4.Hubei Seed Group Co., Ltd., Wuhan 430206, China; 5.College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

Abstract Four consecutive years of fixed field experiment were conducted to compare the differences in annual productivity, economic benefits, resources of temperature and light, utilization of nitrogen and phosphorus, and content changes of nitrogen and phosphorus in soil among six patterns of double-cropping including oilseed rape-maize (O-M), oilseed rape-rice (O-R), oilseed rape-water-saving and drought-resistant rice (O-WDR), wheat-maize (W-M), wheat-rice (W-R), and fallow-double season rice (F-DR) to optimize the farming system, promote the annual production potential of crops, and improve efficiency of crop production and resource utilization in paddy field of Eastern Hubei. The results showed that the annual economic yield of W-R pattern was the highest, followed by O-R pattern. The average annual production benefit of O-R pattern was the highest. The highest uptake rate of N was found in O-R and W-R patterns. The uptake rate of P was found in O-M pattern. The highest utilization efficiencies of light and temperature resources were found in F-DR pattern. After 4-round of double-cropping, the nitrogen surplus was the highest and the nitrogen loss was the lowest in the soil of O-R pattern. The P surplus was the highest and P loss was the lowest in the soil of O-M pattern. The oilseed rape-rice plantation pattern had higher and stable productivity, good production benefit, and better maintenance of soil N fertility and lower N loss risk from farmland. The oilseed rape-rice plantation pattern has the application prospect of replacing the conventional F-DR pattern in Eastern Hubei.

Keywords multiple cropping; crop productivity; resource utilization; soil fertility; paddy field farming system; nitrogen and phosphorus nutrients; multiple cropping of oilseed rape-rice

(责任编辑:张志钰)