

长江流域油-稻与麦-稻轮作体系周年养分收支差异

朱芸, 廖世鹏, 刘煜, 李小坤, 任涛, 丛日环*, 鲁剑巍

(华中农业大学资源与环境学院/农业部长江中下游耕地保育重点实验室/华中农业大学微量元素研究中心, 武汉 430070)

摘要:【目的】评估 1990—2017 年长江流域不同轮作体系周年养分收支平衡, 比较油-稻与麦-稻轮作体系养分收支差异, 为提高周年养分利用效率、优化水旱轮作区域养分资源的合理分配提供依据。【方法】收集了长江流域[四川、重庆、贵州、湖北、湖南、江西、安徽、江苏、浙江和上海等省(市)] 513 个试验的油-稻与麦-稻轮作体系各季作物施肥量、生物量(含秸秆和根茬及落叶归还)、养分含量、积累量, 分析了油-稻与麦-稻轮作体系周年氮、磷、钾养分收支平衡, 比较和评估了两种轮作体系氮的损失量(包含 NH_3 挥发、 N_2O 排放以及氮的径流和淋溶)。【结果】油-稻轮作周年平均化肥投入量为 N 378.5 kg/hm^2 、 P_2O_5 169.9 kg/hm^2 和 K_2O 225.7 kg/hm^2 , 麦-稻轮作为 N 394.4 kg/hm^2 、 P_2O_5 172.5 kg/hm^2 和 K_2O 210.8 kg/hm^2 , 两种轮作方式施肥量未表现出明显差异。油-稻轮作还田生物量(18984 kg/hm^2) 高于麦-稻轮作(18123 kg/hm^2)。油-稻轮作周年养分归还量为 N 142.5 kg/hm^2 、 P_2O_5 46.4 kg/hm^2 和 K_2O 441.3 kg/hm^2 , 较麦-稻轮作分别高出 9.7%、6.7% 和 27.4%。落叶是油菜季养分归还的重要部分, 其带入的氮、磷、钾养分分别占到油菜还田养分总量的 29.3%、18.5% 和 16.3%, 使得油菜季养分输入量明显高于小麦季; 而小麦由于群体生物量大, 两种轮作模式水稻季的养分输入以麦-稻轮作优势明显(钾素除外)。麦-稻轮作周年地上部养分带走量为 N 333.9 kg/hm^2 、 P_2O_5 125.8 kg/hm^2 和 K_2O 379.3 kg/hm^2 , 分别较油-稻轮作高出 14.6%、2.1% 和 -13.4%。油-稻与麦-稻轮作周年氮损失量分别为 N 96.7 和 88.8 kg/hm^2 , 占周年施氮量的 22.5%~25.5%。油菜季氮损失量平均 N 34.5 kg/hm^2 , 略高于小麦季的 N 29.8 kg/hm^2 。水稻季氮损失量明显高于旱季作物, 两种轮作体系相差较小(N 59.0~62.2 kg/hm^2)。不同氮损失途径中, NH_3 挥发损失的氮所占比例最大, 占各季施氮量的 7.2%~18.4%; 其次是氮的淋溶和径流损失, 约为 6.7%~12.7%; N_2O 排放所占比例最小(1.1%~2.1%)。秸秆不还田时, 油-稻轮作体系氮素盈余 N 37.3 kg/hm^2 , 麦-稻体系持平或略有亏缺(N -6.0 kg/hm^2), 两种轮作体系 P_2O_5 盈余 53.3~58.4 kg/hm^2 、 K_2O 亏缺 138.3~145.0 kg/hm^2 。秸秆还田后, 油-稻轮作体系周年养分收支平衡量为 N 133.0 kg/hm^2 、 P_2O_5 93.1 kg/hm^2 和 K_2O 229.0 kg/hm^2 , 分别较麦-稻轮作高出 30.9%、3.2% 和 28.7%。【结论】水旱轮作体系在秸秆不还田时, 油-稻体系氮盈余, 麦-稻体系氮持平或略有亏缺, 两个体系磷均有盈余而钾素处于亏缺状态。秸秆还田时, 两种轮作体系氮、磷、钾均表现为盈余, 说明秸秆还田能够增加养分输入, 维持土壤养分的平衡。由于油菜落叶归还大量氮素, 油-稻轮作较麦-稻轮作体系氮素盈余量高, 因此, 油-稻轮作可考虑降低氮肥的施用。

关键词: 油-稻轮作; 麦-稻轮作; 养分收支差异; 长江流域

Differences of annual nutrient budgets between rapeseed-rice and wheat-rice rotations in the Yangtze River Basin

ZHU Yun, LIAO Shi-peng, LIU Yu, LI Xiao-kun, REN Tao, CONG Ri-huan*, LU Jian-wei
(College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University/Key Laboratory of Arable Land Conservation in Middle and Lower Reaches of Yangtze River, Ministry of Agriculture/Microelement Research Center, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: 【Objectives】The differences of annual nutrient budgets were evaluated and compared between rapeseed-rice (R-R) and wheat-rice (W-R) rotations in the Yangtze River Basin during 1990 to 2017, aiming to

收稿日期: 2018-01-24 接受日期: 2018-07-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(41571284); 国家油菜产业技术体系建设专项(CARS-12); 中央高校基本科研业务费专项资金(2662017JC010)资助。

联系方式: 朱芸 E-mail: yunzhu@webmail.hzau.edu.cn; * 通信作者 丛日环 E-mail: congrh@mail.hzau.edu.cn

provide basis for improving annual nutrient use efficiency and optimizing rational distribution of nutrient resources in paddy-upland rotation systems. **【 Methods 】** Total of 513 field experiments for R-R and W-R rotations were collected, covering Sichuan, Chongqing, Guizhou, Hubei, Hunan, Jiangxi, Anhui, Jiangsu, Shanghai and Zhejiang provinces, China. The data included fertilizer rates, crop biomass, nutrient concentration, nutrient accumulation, nitrogen losses and so on, and the return of straw, stubble and litter loss were involved in crop biomass, and ammonia volatilization, nitrous oxide emissions, nitrogen leaching and runoff were involved in nitrogen losses. Then annual nutrient budgets of nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K) were analyzed, and the nitrogen losses were calculated. **【 Results 】** There was no significant difference in fertilizer rates for the two rotation systems. The average annual N, P₂O₅, K₂O rates were 378.5 kg/hm², 169.9 kg/hm², 225.7 kg/hm² for the R-R rotation and 394.4 kg/hm², 172.5 kg/hm², 210.8 kg/hm² for the W-R rotation. The returning biomass of R-R rotation was 18984 kg/hm², which was higher than that of 18123 kg/hm² in W-R rotation. The average annual N, P₂O₅ and K₂O returning for R-R rotation were 142.5 kg/hm², 46.4 kg/hm² and 441.3 kg/hm², which were 9.7%, 6.7% and 27.4% higher than those of W-R rotation, respectively. The N, P₂O₅ and K₂O returning by litter loss accounted for 29.3%, 18.5% and 16.3% of the total nutrient returning of rapeseed, as a result, the nutrient inputs of rapeseed season were significantly higher than those of wheat season. For the rice season, nutrient inputs in the W-R rotation showed an obvious advantage (except for K) due to the large population of wheat biomass. Averaged annual N, P₂O₅ and K₂O uptake of W-R rotation were 333.9 kg/hm², 125.8 kg/hm² and 379.3 kg/hm², which were 14.6%, 2.1% and -13.4% higher than those of R-R rotation. Annual N loss from R-R and W-R rotations were respective N 96.7 and 88.8 kg/hm², accounting for 22.5%–25.5% of the annual fertilizer N input. The N loss in rapeseed season was 34.5 kg/hm², slightly higher than that of 29.8 kg/hm² in wheat season, and that in rice season was N 59.0–62.2 kg/hm², significantly higher than that in winter crops, so there was little difference between the two rotations. The highest N loss proportion (7.2%–18.4%) was from NH₃ volatilization, then was from N runoff and leaching (6.7%–12.7%), and the lowest (1.1%–2.1%) was from N₂O emission. When there was no straw returned, there was N surplus of 37.3 kg/hm² in R-R rotation and -6.0 kg/hm² in W-R rotation, P surplus of P₂O₅ 53.3–58.4 kg/hm² and K deficit of K₂O 138.3–145.0 kg/hm² in both the rotations. In case of straw returning to the field, the average annual nutrient budgets of R-R rotation were N 133.0 kg/hm², P₂O₅ 93.1 kg/hm² and K₂O 229.0 kg/hm², which were 30.9%, 3.2% and 28.7% higher than those of W-R rotation. **【 Conclusions 】** Without straw returning, N is surplus in rapeseed-rice rotation and keeps balanced or slightly deficit in wheat-rice rotation, P is surplus and K is deficient in both rotations. With straw returning, all the N, P and K nutrients are surplus in both the rotations. Straw returning is thus an important factor for annual nutrient balance in soil. As the large amount of N returning brought by high biomass of rapeseed, N fertilizer could be minimized to some extent in rapeseed-rice rotation.

Key words: rapeseed-rice rotation; wheat-rice rotation; nutrient budgets differences; the Yangtze River Basin

长江流域拥有优越的光、温、水、热条件,是我国十分重要的农业生产基地。种植模式以水旱轮作为主,油菜-水稻和小麦-水稻轮作的种植面积所占比例最大,亦是粮食增产的优良制度^[1]。氮、磷、钾是提高作物产量的重要营养元素,对作物生长起着不可替代的作用。然而化肥的施用却存在诸多弊端,不少地区施肥过量,造成肥料利用效率低下,增加了环境风险^[2-4]。农田养分的基本状况决定了农田养分水平的发展趋向^[5]。比较和评估长江流域两种主要轮作模式下氮、磷、钾养分的收支差异,有利

于明确轮作周年养分平衡状况,对长江流域的养分资源管理和农业可持续发展有着积极的意义。养分平衡是衡量土壤养分库状况的重要方法,国内许多学者对农田的养分收支状况进行了研究。上世纪90年代,鲁如坤等对鹰潭、封丘等5个生态站的养分平衡进行了计算,并对农田养分收入参数给出了建议^[6];邓美华等^[7]根据2002年年鉴资料和前人研究结果对长江三角洲的氮素收支和环境影响进行了评估,表明该区域年均氮素盈余量为0.99~1.28 Tg; Ti等^[8]对常熟试验点的谷类、油料和蔬菜作物的氮平

衡进行了计算,表明化肥为氮素投入的主要来源,氮素盈余约 30% 左右;许仙菊等^[9-11]对上海郊区不同轮作模式的养分平衡分别进行了估算,作物轮作中氮素整体呈现平衡的状态,磷素亏缺 P_2O_5 84.2 kg/hm²,钾素亏缺 K_2O 471.4 kg/hm²;李书田等^[12]对中国不同区域农田养分的输入与输出进行了估算,认为氮、磷各地区均有盈余,钾素总体平衡,但区域间分布不均衡。不论是基于单个或几个田块尺度,还是宏观区域上的养分评估,这些研究对农田生产都起到了很好的指导作用。但在轮作周年的养分收支方面,大部分学者或是对单个田块进行研究,或是缺少不同轮作间的对比。本研究通过文献收集分析,采用多年多点数据对长江流域油-稻和麦-稻轮作在 1990—2017 年的周年氮、磷、钾养分收支差异进行评估和比较,以期对水旱轮作体系养分高效利用和资源的合理分配提供依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

文献数据来源于中国知网 CNKI 和 Web of Science 数据库,试验区域为长江流域,包括四川、重庆、贵州、湖北、湖南、江西、安徽、江苏、浙江和上海等省(市)。通过输入冬油菜、小麦、水稻、轮作、干物质、养分以及氨挥发、氧化亚氮排放、径流、淋溶等主题进行检索。统计油菜季、小麦季、水稻季以及轮作周年的养分输入与输出参数。文献必须满足:1) 试验均为大田试验;2) 轮作方式为“油菜-水稻”或“小麦-水稻”轮作;3) 水稻为中稻或单季稻;4) 肥料均为化肥。整理并筛选出 1990 年至 2017 年的有效文献共 380 篇,其中油-稻轮作共 165 篇,包括油菜 89 篇,水稻 76 篇;麦-稻轮作共 215 篇,包括小麦 93 篇,水稻 122 篇;总共 513 个试验,其中油-稻轮作 229 个,麦-稻轮作 284 个。本研究中各养分输入和输出参数采用多年多点的统计结果数据。不同轮作试验点的土壤基

础养分状况如表 1 所示。

1.2 数据分析

养分平衡量 = 养分输入 - 养分输出

养分输入 = 当季肥料投入 + 前季秸秆 + 前季根茬 + 当季落叶

养分输出 = 当季地上部养分带走量 + 当季养分损失量

式中:“当季肥料投入”为化肥氮、磷、钾用量;“前季秸秆”为前季作物成熟收获期秸秆的养分积累量,参考氮收获指数(NHI, kg/kg) = 籽粒氮积累量/地上部氮积累量^[13],故秸秆氮积累量 = 地上部氮积累量 × (1 - NHI),同理计算秸秆磷、钾积累量;“前季根茬”为前季作物成熟收获期根茬的养分积累量,根茬养分积累量 = 根茬生物量 × 根茬养分含量,根茬生物量 = 地上部生物量 × 根冠比^[14];“当季落叶”为当季作物全生育期落叶的总养分积累量,落叶养分积累量 = \sum 各时期落叶生物量 × 各时期落叶养分含量;“当季地上部养分带走量” = 地上部生物量 × 地上部养分含量;“当季养分损失量”主要为当季氮素损失量,包括 NH_3 挥发、 N_2O 排放以及淋溶和径流损失。

以上所有参数中,若文献中已提供,则直接录入;若未提供,则通过上述相关参数计算获得。

文中计算所涉及的参数(加权平均数)如表 2 所示。

氮损失主要包括 NH_3 挥发、 N_2O 排放、氮的淋溶和径流。文献筛选条件为各指标必须是作物全生育期监测数据才能够代表每季作物生育期中的氮损失,筛选后收集到的相关文献数量分别为 52、106、21 和 62 篇。

在养分收支平衡计算中,各指标均选择各个试验正常施肥量条件下的监测数据。

利用 Excel 2013 软件进行数据的收集和整理,Origin 8.0 软件进行制图和方程拟合,SPSS20.0 进行

表 1 长江流域不同轮作种植区土壤基础性状

Table 1 Soil basic properties in the planting area of different rotations in the Yangtze River Basin

轮作 Rotation	项目 Item	有机质 (g/kg) OM	全氮 (g/kg) Total N	碱解氮 (mg/kg) Available N	有效磷 (mg/kg) Available P	速效钾 (mg/kg) Available K	pH
油菜-水稻 Rapeseed-rice	均值 Mean	25.0	1.5	115.2	16.1	104.6	6.5
	范围 Range	6.0~53.6	0.3~3.2	9.8~203.0	3.9~51.8	29.2~242.5	3.9~8.4
小麦-水稻 Wheat-rice	均值 Mean	23.5	1.5	81.3	13.6	103.4	6.9
	范围 Range	8.8~57.9	0.8~2.8	12.4~210.0	4.0~49.9	46.0~246.8	5.1~8.3

表 2 油-稻与麦-稻轮作体系作物根冠比、各部位养分含量和养分收获指数

Table 2 Root/shoot ratios, nutrient concentrations and nutrient harvest index in rapeseed-rice and wheat-rice rotation systems

项目 Item	部位 Part	养分 Nutrient	油菜-水稻 Rapeseed-rice		小麦-水稻 Wheat-rice		参考文献 Reference
			油菜 Rapeseed	水稻 Rice	小麦 Wheat	水稻 Rice	
根冠比 Root/shoot ratio			0.14 (12)	0.08 (7)	0.11 (4)	0.08 (7)	[15-18]
养分含量 (g/kg) Nutrient concentration	地上部 Shoot	N	13.7 (28)	9.7 (14)	12.0 (9)	10.4 (14)	[16, 19-23]
		P	2.9 (11)	1.7 (4)	2.3 (5)	1.5 (2)	
		K	18.8 (10)	11.8 (5)	10.7 (5)	10.8 (3)	
	根 Root	N	5.7 (6)	8.0 (4)	6.6 (3)	8.0 (4)	[16, 17, 24, 25]
		P	1.0 (3)	1.1 (1)	0.9 (1)	1.1 (1)	
		K	8.9 (3)	8.0 (1)	8.2 (2)	8.0 (1)	
	落叶 Litter loss	N	10.8 (2)				[16, 26]
		P	1.7 (1)				
		K	19.3 (1)				
养分收获指数 (%) Harvest index		N	70 (6)	64 (14)	73 (13)	63 (15)	[27-29]
		P	78 (4)	66 (7)	72 (6)	69 (3)	
		K	12 (4)	17 (5)	15 (4)	17 (4)	

注 (Note): 表中数值为平均值, 括号内数据为其所来源的文献篇数 The data inside brackets after the mean is the number of papers cited.

统计分析, 独立样本 T 检验分析两种作物间的差异显著性 ($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同轮作体系作物养分输入差异

2.1.1 不同轮作体系氮磷钾肥投入分析 长江流域不同轮作体系施肥量如表 3 所示, 旱季作物油菜与小麦的平均氮肥投入量分别为 N 184.9 kg/hm² 和 192.2 kg/hm², 变幅均在 50~300 kg/hm², 小麦季略高, 但整体相差不大; 水稻季氮肥用量也基本保持一致, 约为 N 200.0 kg/hm²。各季作物平均磷肥用量无明显差异, 油菜季与小麦季的施磷量均为 P₂O₅ 90.0 kg/hm² 左右, 水稻季约 80.0 kg/hm²。钾肥用量在旱季作物和水稻季均未表现出明显的差别, 但油菜季略高于小麦季。从整个轮作体系看, 两种轮作体系周年磷肥用量无明显差异, 氮肥用量以麦-稻轮作较高, 钾肥则以油-稻轮作体系较高。

2.1.2 作物还田生物量及养分归还量差异分析 油菜季和小麦季平均投入的生物总量分别为 10880 kg/hm² 和 8999 kg/hm², 油菜季生物量投入高出小麦季 20.9% (图 1a)。各还田物质中, 水稻秸秆与根茬的投入量均相差不大, 合计 9000~9200 kg/hm², 油菜季

落叶还田生物量较高, 平均为 1655 kg/hm², 占整个还田生物量的 15.2%。油-稻和麦-稻轮作体系水稻季平均投入的生物量分别为 8104 kg/hm² 和 9124 kg/hm², 投入的小麦根茬和秸秆均明显高于油菜。虽然油菜的收获指数较低, 还田比例高, 但小麦拥有较大的群体生物量, 约为油菜的 1.4 倍 (图 2a), 故麦-稻轮作水稻季投入的生物量更高。不同轮作体系周年平均还田生物总量以油-稻轮作较高, 油-稻与麦-稻轮作体系还田生物量分别达到 18984 kg/hm² 和 18123 kg/hm²。

油菜季和小麦季平均氮累积还田量分别为 N 96.8 kg/hm² 和 73.0 kg/hm², 其中, 还田水稻秸秆和根茬氮积累量均无明显差异, 而油菜季落叶平均氮累积量为 N 28.4 kg/hm², 占还田总氮量的 29.3%; 麦-稻轮作水稻季平均氮素还田量为 N 56.9 kg/hm², 明显高于油-稻轮作 (N 45.7 kg/hm²) (图 1b)。不同轮作体系磷累积还田量呈现出类似的规律, 油菜季平均磷累积还田量为 P₂O₅ 30.8 kg/hm², 明显高于小麦季 (P₂O₅ 20.2 kg/hm²), 其中油菜季落叶磷积累量为 P₂O₅ 6.0 kg/hm², 占还田总磷量的 18.5%; 水稻季以麦-稻轮作磷还田量较高 (图 1c)。油菜季和小麦季平均钾累积还田量分别为 K₂O 246.1 kg/hm² 和 189.0 kg/hm², 油菜季落叶钾积累量为 K₂O 40.0 kg/hm², 占还田总

表 3 油-稻与麦-稻轮作体系氮、磷、钾养分用量 (kg/hm^2)
Table 3 Rates of N, P_2O_5 and K_2O in rapeseed-rice and wheat-rice rotation systems

轮作 Rotation	作物季型 Crop season	<i>n</i>	项目 Item	N	P_2O_5	K_2O
油菜-水稻 Rapeseed-rice	油菜季 Rapeseed	115	均值 Mean	184.9	89.6	113.1
			范围 Range	50~300	38~150	45~225
	水稻季 Rice	106	均值 Mean	193.6	80.3	112.6
			范围 Range	122~330	30~150	45~240
			周年 Annual	378.5	169.9	225.7
小麦-水稻 Wheat-rice	小麦季 Wheat	74	均值 Mean	192.2	93.8	103.7
			范围 Range	50~300	45~150	60~150
	水稻季 Rice	58	均值 Mean	202.2	78.7	107.1
			范围 Range	135~300	30~150	45~225
			周年 Annual	394.4	172.5	210.8

注 (Note): *n* 为试验数 *n* is the number of experiments.

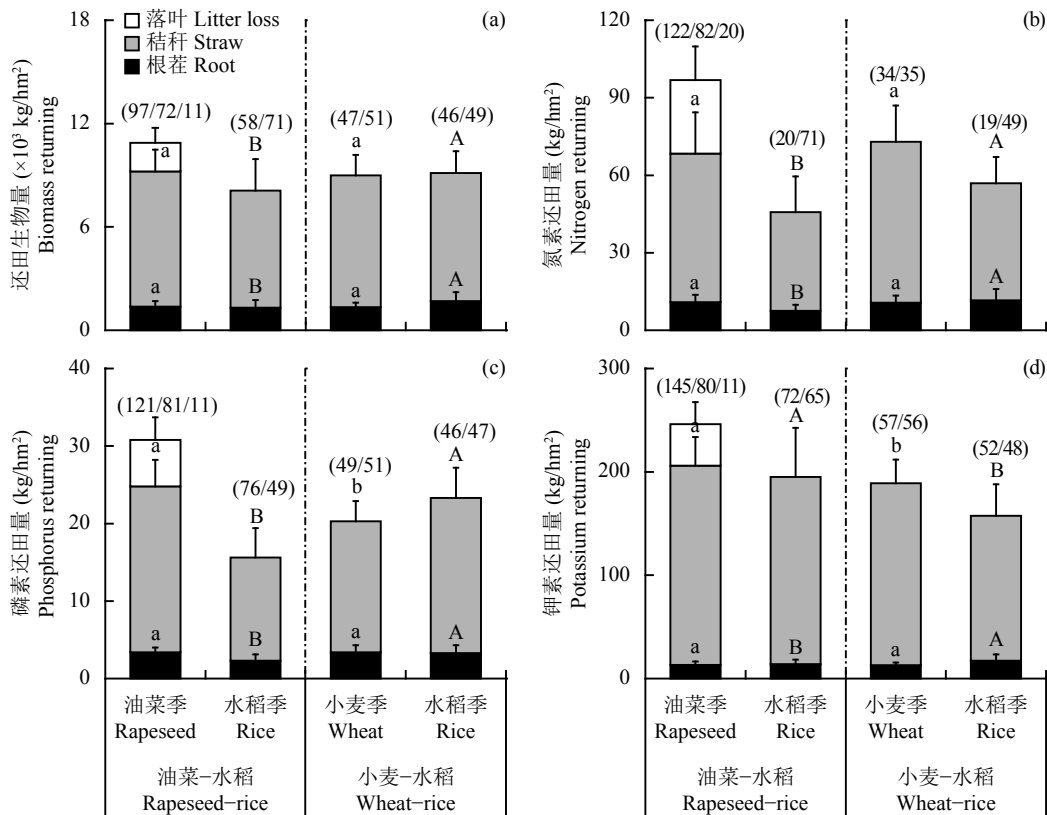


图 1 油-稻与麦-稻轮作体系还田生物量及氮、磷、钾养分积累量

Fig. 1 Crops biomass and nitrogen, phosphorus and potassium accumulation of returning matter in rapeseed-rice and wheat-rice rotations

[注 (Note): 油菜与小麦季输入的还田物质包括前季水稻根茬、秸秆, 油菜季还包含油菜生育期内落叶; 水稻季输入的还田物质包括前季油菜或小麦根茬和秸秆。柱上不同小写字母表示各指标油菜季与小麦季间差异达到显著水平 ($P < 0.05$), 柱上不同大写字母表示各指标两种轮作水稻季间差异达到显著水平 ($P < 0.05$); 括号内数据依次表示为秸秆、根茬和落叶样本数。For the rapeseed and wheat seasons, returning matter included rice root and straw, and fallen leaves in the rapeseed season; the returning matter of rice season included rapeseed or wheat root and straw. Different small letters above the bars indicate significant differences between rapeseed and wheat seasons at 0.05 level, and different capitals above the bars indicate significant difference between the two rice seasons at 0.05 level. The digitals in brackets represent sample numbers of straw, root and litter loss, respectively.]

钾量的 16.3%。与氮、磷表现相反, 油-稻轮作水稻季钾累积还田量 (K_2O 195.2 kg/hm²) 高于麦-稻轮作 (K_2O 157.5 kg/hm²), 这主要与油菜对钾素的需求有关 (图 1d)。从不同轮作体系周年养分还田量看, 油-稻轮作周年养分还田量为 N 142.5 kg/hm²、 P_2O_5 46.4 kg/hm² 和 K_2O 441.3 kg/hm², 分别较麦-稻轮作高出 9.7%、6.7% 和 27.4%。

2.2 不同轮作体系作物养分输出差异

2.2.1 不同轮作体系地上部生物量及养分积累

油菜地上部平均生物量为 9525 kg/hm², 显著低于小麦 (16606 kg/hm²), 两种轮作体系水稻地上部生物量相差不大 (图 2a)。从养分输出来看, 油菜地上部平均氮积累量为 N 130.8 kg/hm², 明显低于小麦 (N 168.2 kg/hm²), 水稻地上部氮积累量相差不大, 平均维持在 N 160.0 kg/hm² 左右 (图 2b)。地上部磷积累量表现

相似, 油菜和小麦地上部平均磷积累量分别为 P_2O_5 60.7 kg/hm² 和 71.4 kg/hm², 而油-稻轮作水稻地上部磷积累量高于麦-稻轮作 (图 2c)。旱季作物的地上部钾积累量呈现相反的结果, 油菜地上部钾积累量为 K_2O 206.0 kg/hm², 明显高于小麦 (166.1 kg/hm²), 水稻季也以油-稻轮作较高 (图 2)。麦-稻轮作周年地上部养分积累量为 N 333.9 kg/hm²、 P_2O_5 125.8 kg/hm² 和 K_2O 379.3 kg/hm², 分别较油-稻轮作高出 14.6%、2.1% 和 -13.4%。两种轮作体系以麦-稻轮作带走的氮素较多, 钾素较低, 磷素相差不大。

2.2.2 不同轮作体系氮素损失差异

农田氮素损失的途径主要包括 NH_3 挥发、 N_2O 排放、氮的径流和淋溶等^[30]。通过文献分析发现 (图 3), 油菜季氮损失总量为 N 34.5 kg/hm², 略高于小麦季 (29.8 kg/hm²), 水稻季表现类似, 油-稻与麦-稻轮作水稻季氮损失量分别为 N 62.2 kg/hm² 和 59.0 kg/hm²。油-稻与麦-

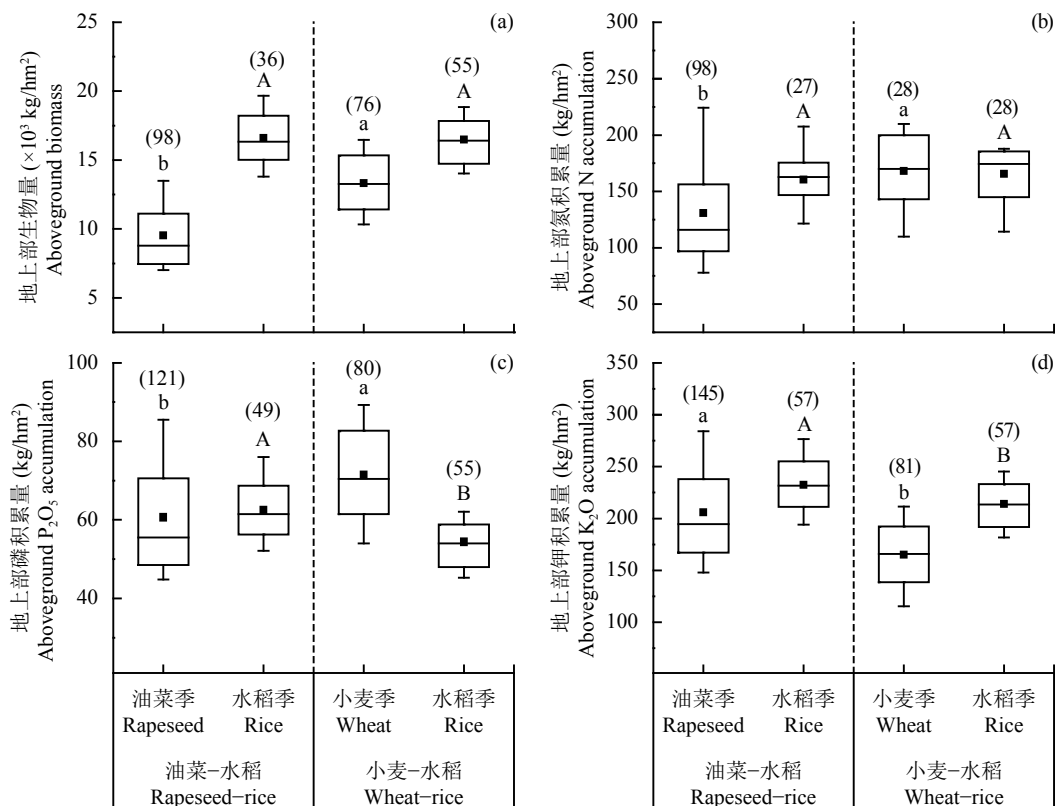


图 2 油-稻与麦-稻轮作体系作物地上部生物量及氮、磷、钾养分带走量

Fig. 2 Aboveground biomass and nitrogen, phosphorus and potassium uptakes in the rapeseed-rice and wheat-rice rotations

[注 (Note): 箱形框中的横线和正方形分别表示数据集的中值和平均值, 上下边界分别表示数据集的 25% 和 75% 点位, 上下水平短线表示数据集的 10% 和 90% 点位; 箱子上不同小写字母表示各指标油菜季与小麦季间差异达到显著水平 ($P < 0.05$), 箱子上不同大写字母表示各指标两种轮作水稻季间差异达到显著水平 ($P < 0.05$); 括号内的数字表示样本数。The horizontal lines and solid squares inside boxes indicate the median and the mean of dataset, the upper and lower box edges represent 25% and 75% percentiles of dataset, the upper and lower short lines outside box indicate the 10% and 90% percentiles of dataset, respectively. Different small letters above the boxes indicate significant differences between rapeseed and wheat seasons at 0.05 level, and different capitals above the boxes indicate significant difference between the two rice seasons at 0.05 level. The digitals in bracket indicate the sample number.]

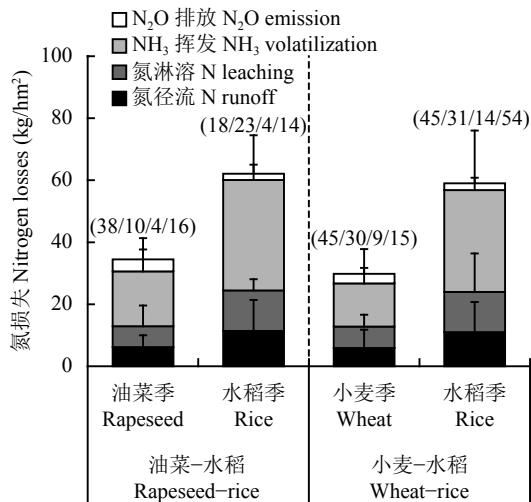


图3 油-稻与麦-稻轮作体系氮损失量

Fig. 3 Nitrogen losses of rapeseed-rice and wheat-rice rotations

[注 (Note): 括号内的数据依次表示 N₂O 排放、NH₃ 挥发、氮淋溶和氮径流的样本数 The digitals in brackets indicate the sample numbers of N₂O emission, NH₃ volatilization, N leaching and N runoff.]

稻轮作体系周年氮损失量分别为 N 96.7 kg/hm² 和 88.8 kg/hm²。其中, NH₃ 挥发损失的氮所占比例最大, 为各季氮损失总量的 46.6%~57.2%, 占施氮量的 7.2%~18.4%; 其次是淋溶和径流损失, 约为 37.4%~43.0%, 占施氮量的 6.7%~12.7%; N₂O 排放所占比例最小 (3.4%~11.3%), 占施氮量的 1.1%~2.1%。

2.3 不同轮作体系作物养分收支差异

将油-稻和麦-稻两种轮作体系的养分输入和输出比较, 计算周年养分收支平衡 (表 4) 发现, 秸秆不还田时, 油菜季氮平衡量较小麦季高出 N 54.0 kg/hm²; 水稻季氮素均处于亏缺状态, 其中麦-稻轮作较油-稻轮作高出 10.7 kg/hm²。周年氮素收支表现为麦-稻轮作略有亏缺, 油-稻轮作体系则盈余 N 37.3 kg/hm²。秸秆还田情况下, 各季氮素平衡量均明显增加, 油-稻轮作周年氮素收支平衡量为 N 133.0 kg/hm², 较麦-稻轮作高出 30.9%。

油-稻和麦-稻轮作体系周年磷平衡均表现为盈余。在没有秸秆还田的条件下, 油菜季较小麦季磷素平衡量增加 49.0%, 水稻季则表现为麦-稻轮作的磷平衡量较高 (表 4)。两种轮作体系周年的磷素收支平衡未表现出明显差异 (P₂O₅ 53.3~58.4 kg/hm²)。如果秸秆还田, 则两种轮作周年磷素盈余量均明显提高 (P₂O₅ 90.2~93.1 kg/hm²)。

在秸秆不还田条件下, 油-稻和麦-稻轮作体系不论是单季还是周年钾素收支平衡均处于亏缺状态。其中, 油菜季和小麦季钾素亏缺量分别为 K₂O

39.6 kg/hm² 和 49.5 kg/hm² (表 4), 水稻季钾素亏缺量则在油-稻轮作体系亏缺量更大 (K₂O 105.4 kg/hm²); 两种轮作体系周年钾素亏缺量达到 K₂O 138.3 kg/hm² 和 145.0 kg/hm²。当秸秆还田时, 秸秆钾素投入量大幅增加, 且油菜季钾素盈余量较小麦季提高 21.0%, 而水稻季则由于上季油菜秸秆的投入, 使得油-稻轮作钾素盈余量 (K₂O 229.0 kg/hm²) 明显高于麦-稻轮作 (K₂O 178.0 kg/hm²), 提高幅度达到 28.7%。

3 讨论

本研究通过对长江流域油-稻与麦-稻轮作农田养分数据的收集与分析发现, 长江流域油菜、小麦和水稻三种作物秸秆不还田时养分收支平衡整体呈现出氮、磷盈余, 钾素亏缺的状态。这与大多数的研究结果一致^[31-34]。油-稻轮作周年氮素平衡量高于麦-稻轮作, 一方面与油菜季大量落叶有关, 同时, 相比小麦秸秆, 油菜秸秆更有利于促进有机碳的矿化及土壤有效氮素的释放^[35]; 另一方面, 小麦群体生物量大, 氮素带走量显著 ($P < 0.05$) 高于油菜 (图 2)。从氮损失角度而言, 两种轮作体系周年氮素损失量达到 N 88.8~96.7 kg/hm², 占周年施氮量的 22.5%~25.5%。NH₃ 挥发、N₂O 排放在造成肥料浪费的同时, 也易造成大气污染。因此, 降低养分盈余、减少环境风险、优化资源配置是轮作系统中需要关注的重要问题。大量研究发现, 通过更改肥料剂型、调整氮肥运筹方式均可以有效减少氮素损失^[36-37]。此外, 秸秆还田能够提高土壤保肥性能, 增加土壤养分含量, 因此长期秸秆还田时可适当减少肥料的投入^[38]。

本文研究发现, 油-稻和麦-稻轮作体系中周年磷素盈余量均较高 (秸秆不还田条件下达到 P₂O₅ 53.3~58.4 kg/hm²)。但是土壤中有效磷含量为 13.6~16.1 mg/kg (表 1), 处于正常水平。这可能主要与磷在土壤中极易被固定的特性有关。同时, 长江流域雨水充沛, 部分磷素也会随雨水发生磷的径流或淋洗损失。朱文彬等^[39]在太湖流域麦-稻轮作系统上的研究表明将稻季磷肥转移到麦季能够减少径流总磷浓度 12.0%。因此, 从磷盈余的情况而言, 需要进一步考虑磷肥的合理运筹和如何充分利用磷的后效, 减少水稻季磷的径流损失。就钾素而言, 秸秆是一种宝贵的钾素资源。大量研究表明秸秆还田能够将钾素收支平衡扭亏为盈, 并且能够在一定程度上减少肥料的施用^[40-42]。随着秸秆还田在我国大力推进, 轮作体系的钾素盈余量将不断加大, 进而提高土壤钾库容量。

表 4 油-稻与麦-稻轮作体系养分收支估算 (kg/hm^2)
Table 4 Nutrient budget in rapeseed-rice and wheat-rice rotations

轮作 Rotation	作物季型 Crop season	输入 Input				输出 Output		平衡 Budget	
		施肥 Fertilizer	根茬 Root	落叶 Litter	秸秆 Straw	收获 Harvest	氮损失 N loss	-S	+S
N									
油菜-水稻 Rapeseed-rice	油菜季 Rapeseed	184.9	10.9	28.4	57.5	130.8	34.5	58.9	116.4
	水稻季 Rice	193.6	7.5	—	38.2	160.5	62.2	-21.6	16.6
	周年 Annual	378.5	18.4	28.4	95.7	291.3	96.7	37.3	133.0
小麦-水稻 Wheat-rice	小麦季 Wheat	192.2	10.7	—	62.3	168.2	29.8	4.9	67.2
	水稻季 Rice	202.2	11.6	—	45.3	165.7	59.0	-10.9	34.4
	周年 Annual	394.4	22.3	—	107.6	333.9	88.8	-6.0	101.6
P_2O_5									
油菜-水稻 Rapeseed-rice	油菜季 Rapeseed	89.6	3.4	6.0	21.4	60.7	—	38.3	59.7
	水稻季 Rice	80.3	2.3	—	13.3	62.5	—	20.1	33.4
	周年 Annual	169.9	5.7	6.0	34.7	123.2	—	58.4	93.1
小麦-水稻 Wheat-rice	小麦季 Wheat	93.8	3.3	—	16.9	71.4	—	25.7	42.6
	水稻季 Rice	78.7	3.3	—	20	54.4	—	27.6	47.6
	周年 Annual	172.5	6.6	—	36.9	125.8	—	53.3	90.2
K_2O									
油菜-水稻 Rapeseed-rice	油菜季 Rapeseed	113.1	13.3	40.0	192.8	206.0	—	-39.6	153.2
	水稻季 Rice	112.6	14.0	—	181.2	232.0	—	-105.4	75.8
	周年 Annual	225.7	27.3	40.0	374	438.0	—	-145.0	229.0
小麦-水稻 Wheat-rice	小麦季 Wheat	103.7	12.9	—	176.1	166.1	—	-49.5	126.6
	水稻季 Rice	107.1	17.3	—	140.2	213.2	—	-88.8	51.4
	周年 Annual	210.8	30.2	—	316.3	379.3	—	-138.3	178.0

注 (Note): -S—秸秆不还田 No-straw returned; +S—秸秆还田 Straw returned.

由于可获得样本数较少, 因此本研究未考虑灌溉水、大气沉降以及非生物固氮等养分投入和磷、钾损失等养分输出。参考李书田和金继运^[12]、刘晓燕^[43]的研究, 农田中由灌溉水带入的养分约为 N $9.0\sim 11.2 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 、 P_2O_5 $1.4\sim 1.5 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 和 K_2O $8.1\sim 14.8 \text{ kg}/\text{hm}^2$; 湿沉降带入的养分约为 N $4.5\sim 18.2 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 、 P_2O_5 $1.2\sim 1.4 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 和 K_2O $2.7\sim 8.3 \text{ kg}/\text{hm}^2$; 此外, 由于土壤中某些微生物能够固定空气中的氮素, 非共生固氮量约为 N $15.0 \text{ kg}/\text{hm}^2$ ^[44]。在养分损失方面, 有研究表明磷、钾也存在一定的损失, 农田磷径流损失约为 P_2O_5 $1.4\sim 7.3 \text{ kg}/\text{hm}^2$ ^[45-46], 水田钾素淋溶能达到 K_2O $12.0 \text{ kg}/\text{hm}^2$ ^[34]。将上述参数的均值带入本研究结果中评估发现, 两种轮作体系氮平衡量有所增加, 但仍然表现为油-稻高于麦-稻

轮作, 磷、钾平衡量变化不大。说明本研究结果一定程度上能够很好地反映养分的收支平衡状况, 为轮作体系的养分资源优化配置提供依据。

4 结论

1) 油-稻轮作体系周年养分归还量高于麦-稻轮作体系, 而麦-稻轮作体系周年地上部养分带走量高于油-稻轮作体系。

2) 两种轮作体系周年氮素损失量占周年施氮量的 $22.5\%\sim 25.5\%$, 其中水稻季的氮素损失量约为油菜季或小麦季的 $1.7\sim 2.1$ 倍。

3) 秸秆不还田时, 周年养分平衡表现为油-稻轮作氮盈余而麦-稻轮作氮持平或略有亏缺。两种轮作体系磷、钾平衡无差异, 均表现为磷盈余、钾亏缺。

参考文献:

- [1] 石孝均. 水旱轮作体系中的养分循环特征[D]. 北京: 中国农业大学博士学位论文, 2003.
Shi X J. Characteristics of nutrient cycling in the rice-wheat rotation system[D]. Beijing: PhD Dissertation of China Agricultural University, 2003.
- [2] 巨晓棠, 谷保静. 我国农田氮肥施用现状、问题及趋势[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4): 783-795.
Ju X T, Gu B J. Status-quo, problem and trend of nitrogen fertilization in China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(4): 783-795.
- [3] 习斌, 翟丽梅, 刘申, 等. 有机无机肥配施对玉米产量及土壤氮磷淋溶的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(2): 326-335.
Xi B, Zhai L M, Liu S, et al. Effects of combination of organic and inorganic fertilization on maize yield and soil nitrogen and phosphorus leaching[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(2): 326-335.
- [4] Wang G L, Chen X P, Cui Z L, et al. Estimated reactive nitrogen losses for intensive maize production in China[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2014, 197(Suppl. 1): 293-300.
- [5] 鲁如坤, 时正元, 施建平. 我国南方6省农田养分平衡现状评价和动态变化研究[J]. 中国农业科学, 2000, 33(2): 63-67.
Lu R K, Shi Z Y, Shi J P. Nutrient balance of agroecosystem in six provinces in southern China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2000, 33(2): 63-67.
- [6] 鲁如坤, 刘鸿翔, 闻大中, 等. 我国典型地区农业生态系统养分循环和平衡研究: II. 农田养分收入参数[J]. 土壤通报, 1994, 27(4): 151-154.
Lu R K, Liu H X, Wen D Z, et al. Nutrient cycling and balance of agricultural ecosystem in different typical regions of China. II Parameters of nutrient input to farm land[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1994, 27(4): 151-154.
- [7] 邓美华, 谢迎新, 熊正琴, 等. 长江三角洲氮收支的估算及其环境影响[J]. 环境科学学报, 2007, 27(10): 1709-1716.
Deng M H, Xie Y X, Xiong Z Q, et al. Nitrogen budgets of the Yangtze delta region and their effect on the environment[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2007, 27(10): 1709-1716.
- [8] Ti C P, Xia Y Q, Pan J J, et al. Nitrogen budget and surface water nitrogen load in Changshu: a case study in the Taihu Lake region of China[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2011, 91(1): 55-66.
- [9] 许仙菊, 武淑霞, 张维理, 等. 上海郊区农田氮养分平衡及其对土壤速效氮含量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2007, (3): 24-28.
Xu X J, Wu S X, Zhang W L, et al. Nitrogen nutrient balance and its impact on soil available nitrogen content in Shanghai suburb farmlands[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2007, (3): 24-28.
- [10] 许仙菊, 张维理, 张永春, 等. 不同轮作模式农田磷养分平衡及其对土壤Olsen-P含量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2015, (6): 28-33.
Xu X J, Zhang W L, Zhang Y C, et al. Phosphorus nutrient balance and its impact on soil Olsen-P content in Shanghai suburb farmlands[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2015, (6): 28-33.
- [11] 许仙菊, 赵坚, 张维理, 等. 不同轮作模式农田钾养分平衡及其对土壤速效钾含量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2016, (3): 37-42.
Xu X J, Zhao J, Zhang W L, et al. Potassium nutrient balance and its impact on soil available K content in Shanghai suburb farmlands[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2016, (3): 37-42.
- [12] 李书田, 金继运. 中国不同区域农田养分输入、输出与平衡[J]. 中国农业科学, 2011, 44(20): 4207-4229.
Li S T, Jin J Y. Characteristics of nutrient input/output and nutrient balance in different regions of China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(20): 4207-4229.
- [13] 邹娟, 鲁剑巍, 陈防, 等. 冬油菜施氮的增产和养分吸收效应及氮肥利用率研究[J]. 中国农业科学, 2011, 44(4): 745-752.
Zou J, Lu J W, Chen F, et al. Study on yield increasing and nutrient uptake effect by nitrogen application and nitrogen use efficiency for winter rapeseed[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(4): 745-752.
- [14] 王金洲. RothC模型模拟我国典型旱地土壤的有机碳动态及平衡点[D]. 北京: 中国农业科学院硕士学位论文, 2011.
Wang J Z. RothC model simulation of soil organic carbon dynamics and equilibrium point of typical upland soils in China[D]. Beijing: MS Thesis of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2011.
- [15] 蒯婕, 孙盈盈, 左青松, 等. 机械收获模式下直播冬油菜密度与行距的优化[J]. 作物学报, 2016, 42(6): 898-908.
Kuai J, Sun Y Y, Zuo Q S, et al. Optimization of plant density and row spacing for mechanical harvest in winter rapeseed (*Brassica napus* L.)[J]. Acta Agonomica Sinica, 2016, 42(6): 898-908.
- [16] 刘晓伟. 冬油菜养分吸收规律及不同养分效率品种特征比较研究[D]. 武汉: 华中农业大学硕士学位论文, 2011.
Liu X W. Study on nutrient absorption of oilseed rape and characteristics compare in different nutrient efficiency types[D]. Wuhan: MS Thesis of Huazhong Agricultural University, 2011.
- [17] 寇太记, 于伟伟, 朱建国, 等. 臭氧污染对不同品种小麦干物质与生物量碳积累与分配的影响[J]. 环境科学, 2012, 33(8): 2862-2867.
Kou T J, Yu W W, Zhu J G, et al. Effects of ozone pollution on the accumulation and distribution of dry matter and biomass carbon of different varieties of wheat[J]. Environmental Science, 2012, 33(8): 2862-2867.
- [18] 田玉华, 贺发云, 尹斌, 等. 太湖地区氮磷施用对稻田氮挥发的影响[J]. 土壤学报, 2007, 44(5): 893-900.
Tian Y H, He F Y, Yin B, et al. Ammonia volatilization from paddy fields in the Taihu lake region as affected by N and P combination in fertilization[J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(5): 893-900.
- [19] 王寅, 李雅颖, 鲁剑巍, 等. 栽培模式对直播油菜生长、产量和养分吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(3): 597-607.
Wang Y, Li Y Y, Lu J W, et al. Effects of cultivation pattern on growth, seed yield, nutrient uptake and utilization of direct-sowing oilseed rape (*Brassica napus* L.)[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2013, 19(3): 597-607.
- [20] 邹娟. 冬油菜施肥效果及土壤养分丰缺指标研究[D]. 武汉: 华中农业大学博士学位论文, 2010.
Zou J. Study on response of winter rapeseed to NPKB fertilization and abundance & deficiency indices of soil nutrients[D]. Wuhan: PhD Dissertation of Huazhong Agricultural University, 2010.
- [21] 鲁剑巍, 陈防, 张竹青, 等. 磷肥用量对油菜产量、养分吸收及经济效益的影响[J]. 中国油料作物学报, 2005, 27(1): 73-76.
Lu J W, Chen F, Zhang Z Q, et al. Effect of phosphorus suppletion rate on rapeseed yield, nutrient absorption and profit[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2005, 27(1): 73-76.
- [22] 武际, 郭熙盛, 王允青, 等. 氮钾配施对弱筋小麦氮、钾养分吸收利用及产量和品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(6): 1054-1061.
Wu J, Guo X S, Wang Y Q, et al. Effects of combined application of nitrogen and potassium on absorption of N and K, grain yield and quality of weak gluten wheat[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2007, 13(6): 1054-1061.
- [23] Tian Z, Li Y, Liang Z, et al. Genetic improvement of nitrogen uptake and utilization of winter wheat in the Yangtze River Basin of China[J]. Field Crops Research, 2016, 196: 251-260.
- [24] 王米. 施氮水平对水稻生育期氮素利用率及稻田氮淋失动态的研究[D]. 杭州: 浙江大学硕士学位论文, 2008.
Wang M. The effects of N application levels on N use efficiency in

- rice growth stages and the dynamic variation of N leaching in paddy field[D]. Hangzhou: MS Thesis of Zhejiang University, 2008.
- [25] Li C, Zhu J G, Sha L N, *et al.* Rice (*Oryza sativa* L.) growth and nitrogen distribution under elevated CO₂ concentration and air temperature[J]. *Ecological Research*, 2017, 32(3): 405–411.
- [26] 左青松, 杨海燕, 冷锁虎, 等. 施氮量对油菜氮素积累和运转及氮素利用率的影响[J]. *作物学报*, 2014, 40(3): 511–518.
Zuo Q S, Yang H Y, Leng S H, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer on nitrogen accumulation, translocation and nitrogen use efficiency in rapeseed (*Brassica napus* L.)[J]. *Acta Agonomica Sinica*, 2014, 40(3): 511–518.
- [27] 易琼, 张秀芝, 何萍, 等. 氮肥减施对稻-麦轮作体系作物氮素吸收、利用和土壤氮素平衡的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(5): 1069–1077.
Yi Q, Zhang X Z, He P, *et al.* Effects of reducing N application on crop N uptake, utilization, and soil N balance in rice-wheat rotation system[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(5): 1069–1077.
- [28] 王伟妮, 鲁剑巍, 何予卿, 等. 氮、磷、钾肥对水稻产量、品质及养分吸收利用的影响[J]. *中国水稻科学*, 2011, 25(6): 645–653.
Wang W N, Lu J W, He Y Q, *et al.* Effects of N, P, K fertilizer application on grain yield, quality, nutrient uptake and utilization of rice[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2011, 25(6): 645–653.
- [29] 郭九信, 孔亚丽, 谢凯柳, 等. 养分管理对直播稻产量和氮肥利用率的影响[J]. *作物学报*, 2016, 42(7): 1016–1025.
Guo J X, Kong Y L, Xie K L, *et al.* Effects of nutrient management on yield and nitrogen use efficiency of direct seeding rice[J]. *Acta Agonomica Sinica*, 2016, 42(7): 1016–1025.
- [30] 朱兆良. 中国土壤氮素研究[J]. *土壤学报*, 2008, 45(5): 778–783.
Zhu Z L. Research on soil nitrogen in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 778–783.
- [31] 吴靛. 稻麦轮作下施氮量对氮素损失影响及氮肥投入阈值研究[D]. 合肥: 安徽农业大学硕士学位论文, 2016.
Wu L. Study about the effect of nitrogen application rate on nitrogen loss and threshold of nitrogen fertilizer input under rice-wheat rotation[D]. Hefei: MS Thesis of Anhui Agricultural University, 2016.
- [32] 串丽敏, 何萍, 赵同科, 等. 中国小麦季氮素养分循环与平衡特征[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(1): 76–86.
Chuan L M, He P, Zhao T K, *et al.* Nitrogen cycling and balance for wheat in China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(1): 76–86.
- [33] 冀宏杰, 张怀志, 张维理, 等. 我国农田磷养分平衡研究进展[J]. *中国生态农业学报*, 2015, 23(1): 1–8.
Ji H J, Zhang H Z, Zhang W L, *et al.* Research progress on cropland phosphorus balance in China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(1): 1–8.
- [34] 冀宏杰, 张怀志, 张维理, 等. 我国农田土壤钾平衡研究进展与展望[J]. *中国生态农业学报*, 2017, 25(6): 920–930.
Ji H J, Zhang H Z, Zhang W L, *et al.* Farmland potassium balance in China: A review[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(6): 920–930.
- [35] Sarkera J R, Singha B P, Cowiea A L, *et al.* Carbon and nutrient mineralization dynamics in aggregate-size classes from different tillage systems after input of canola and wheat residues[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 116: 22–38.
- [36] 侯朋福, 薛利祥, 俞映惊, 等. 缓控释肥侧深施对稻田氨挥发排放的控制效果[J]. *环境科学*, 2017, (12): 1–10.
Hou P F, Xue L X, Yu Y L, *et al.* Control effect of side deep fertilization with slow-release fertilizer on ammonia volatilization from paddy field[J]. *Environmental Science*, 2017, (12): 1–10.
- [37] Li P F, Lu J W, Wang Y, *et al.* Nitrogen losses, use efficiency, and productivity of early rice under controlled-release urea[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2018, 251: 78–87.
- [38] 张磊, 张维乐, 鲁剑巍, 等. 秸秆还田条件下不同供钾能力土壤水稻、油菜、小麦钾肥减量研究[J]. *中国农业科学*, 2017, (19): 3745–3756.
Zhang L, Zhang W L, Lu J W, *et al.* Study of optimum potassium reducing rate of rice, wheat and oilseed rape under different soil K supply levels with straw incorporation[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, (19): 3745–3756.
- [39] 朱文彬, 汪玉, 王慎强, 等. 太湖流域典型稻麦轮作农田稻季不施磷的农学及环境效应探究[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(6): 1129–1135.
Zhu W B, Wang Y, Wang S Q, *et al.* Agronomic and environmental effects of P fertilization reduction in rice-wheat rotation field in Taihu Lake region of Southeast China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(6): 1129–1135.
- [40] 孙丽敏, 李春杰, 何萍, 等. 长期施钾和秸秆还田对河北潮土区作物产量和土壤钾素状况的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(5): 1096–1102.
Sun L M, Li C J, He P, *et al.* H. Effects of long-term K application and straw returning on crop yield and soil K status in fluvo-aquic soil of Hebei Province[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(5): 1096–1102.
- [41] 谢佳贵, 侯云鹏, 尹彩侠, 等. 施钾和秸秆还田对春玉米产量、养分吸收及土壤钾素平衡的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(5): 1110–1118.
Xie J G, Hou Y P, Yin C X, *et al.* Effect of potassium application and straw returning on spring maize yield, nutrient absorption and soil potassium balance[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(5): 1110–1118.
- [42] 张维乐, 戴志刚, 任涛, 等. 不同水旱轮作体系秸秆还田与氮肥运筹对作物产量及养分吸收利用的影响[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(7): 1254–1266.
Zhang W L, Dai Z G, Ren T, *et al.* Effects of nitrogen fertilization managements with residues incorporation on crops yield and nutrients uptake under different paddy-upland rotation systems[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(7): 1254–1266.
- [43] 刘晓燕. 我国农田土壤肥力和养分平衡状况研究[R]. 北京: 中国农业科学院博士后出站报告, 2008.
Liu X Y. Study on the farmland soil fertility and nutrient balance in our country[R]. Beijing: Past-Doctoral Report of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2008.
- [44] 朱兆良, 文启孝. 中国土壤氮素[M]. 江苏: 江苏科学技术出版社, 1992. 228–231.
Zhu Z L, Wen Q X. Soil nitrogen in China[M]. Jiangsu: Jiangsu Science and Technology Press, 1992. 228–231.
- [45] 易时来. 稻-麦/油轮作体系中氮素淋失与利用研究[D]. 重庆: 西南农业大学硕士学位论文, 2005.
Yi S L. Study of nitrogen leaching loss and fertilizer utilization in rice-wheat/rice-rape rotation[D]. Chongqing: MS Thesis of Southwest Agricultural University, 2005.
- [46] 杨旺鑫, 夏永秋, 姜小三, 等. 我国农田总磷径流损失影响因素及损失量初步估算[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(2): 319–325.
Yang W X, Xia Y Q, Jiang X S, *et al.* Influencing factors and estimation of total phosphorus runoff from farmlands in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(2): 319–325.