

马颢榴, 盛浩, 潘博, 等. 双季稻-油菜耕作制对土壤肥力质量长期演变的影响[J]. 土壤与作物, 2019, 8(4): 453–461.
MA H L, SHENG H, PAN B, et al. Impacts of long-term double-cropping rice-rape rotation on soil fertility quality[J]. Soils and Crops, 2019, 8(4): 453–461.

双季稻-油菜耕作制对土壤肥力质量长期演变的影响

马颢榴¹, 盛浩^{1,2}, 潘博¹, 薛毅¹, 张亮¹, 张振华^{1,2}

(1. 湖南农业大学 资源环境学院, 湖南 长沙 410128; 2. 南方粮油作物协同创新中心, 湖南 长沙 410128)

摘要: 为了解长期双季稻-油菜耕作制下的土壤养分和肥力质量演变趋势, 选取湖南省湘南毗邻的、连续耕作>30 a 的稻-稻-油和稻-稻-闲(对照)水稻土为研究对象, 对比分析了长期稻-稻-油和稻-稻-闲土壤不同土层、根际与非根际土壤 pH、有机质、养分含量和肥力质量的差异。结果表明, 与稻-稻-闲相比, 长期稻-稻-油轮作土壤有机质含量显著下降了 9%~11%, 有效态 Ca、Mg 含量分别下降了 10%~33% 和 14%~42%; 相反, 土壤全磷和有效磷含量分别提高了 14%~56% 和 21%~46%, 有效态 Cu、Zn 含量分别提高了 20%~36% 和 7%~36%。主成分-聚类分析表明, 长期稻-稻-油轮作土壤肥力质量等级(I-III)明显高于稻-稻-闲(III-VI), 有助于提升水稻土养分有效性, 改善肥力质量。但是, 为弥补长期稻-稻-油轮作土壤有机质和 Ca、Mg 有效性的降低, 有必要适当增施有机肥和石灰。

关键词: 水旱轮作; 根际; 养分有效性; 主成分-聚类分析; 水稻土

中图分类号: X144, S151.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-2961 (2019) 04-453-09

DOI: 10.11689/j.issn.2095-2961.2019.04.013

Impacts of long-term double-cropping rice-rape rotation on soil fertility quality

MA Haoliu¹, SHENG Hao^{1,2}, PAN Bo¹, XUE Yi¹, ZHANG Liang¹, ZHANG Zhenhua^{1,2}

(1. College of Resources & Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China;

2. Southern Regional Collaborative Innovation Center for Grain and Oil Crops in China, Changsha 410128, China)

Abstract: In order to understand the impacts of long-term double-rice cropping rotation on soil fertility quality, we selected adjacent paddy soils with more than 30 a double-cropping rice-rape (DRR) rotation, and double-cropping rice-fallow (DRF) rotation, DRF as a control in southern Hunan Province. We analyzed differences of soil pH, organic matter, nutrient content, and fertility quality among soil layers, or in rhizosphere and bulk soils between the two systems. Results showed that, compared with DRF, the content of soil organic matter, available Ca and Mg significantly decreased by 9%–11%, 10%–33%, and 14%–42% in DRR, respectively, while the content of total P, available P, Cu and Zn increased by 14%–56%, 21%–46%, 20%–36%, and 7%–36%, respectively. Principal component-cluster analysis showed that the quality grade of soil fertility in DRR (I–III) was remarkably higher than that in DRF (III–VI), indicating long-term DRR rotation would be good for enhancing paddy soil nutrient availability as well as improving soil fertility quality. However, it would be necessary to add organic fertilizer and lime appropriately to offsetting the reduction of soil organic matter and Ca and Mg availability in the long-term DRR rotation system.

Key words: paddy-upland rotation; rhizosphere; nutrient availability; principal component-cluster analysis; paddy soil

0 引言

双季稻 (*Oryza sativa*) 和油菜 (*Brassica campestris*) 轮作是南方水旱轮作制的主要形式之一。与传统的双季稻-休闲耕作制度相比, 油菜季的引入不仅带来栽培方式、作物营养元素需求的差异, 也引起了土壤的干湿交替循环, 必然改变土壤养分的来源和平衡, 进而影响着土壤肥力质量的演变方向, 保障耕地资源可持续发展。已有关于稻-油轮作对土壤养分(特别是速效养分)含量影响的研究结果并不一致。李

收稿日期: 2018-11-12; 修回日期: 2019-03-12.
基金项目: 国家自然科学基金项目(41571234); 湖南农业大学“1515”创新团队计划项目; 湖南农业大学研究生科技创新项目(2018ZK28)。
第一作者简介: 马颢榴(1995-), 女, 硕士研究生, 研究方向为土壤肥力质量演变. E-mail: 1056250128@qq.com.
通信作者: 盛浩(1982-), 男, 副教授, 研究方向为土壤资源利用. E-mail: shenghao82@hunau.edu.cn.

辉等研究发现，长期稻－油轮作显著降低土壤有机质含量^[1]；但也有研究表明，稻－稻－油轮作有助于土壤有机质积累^[2-3]。研究发现，稻－油轮作还能显著提高土壤碱解氮和速效磷含量^[4-5]。目前，稻－油轮作对土壤养分的影响研究大多集中在大量元素，在中、微量元素方面仍有待深入探索。土壤中、微量元素的丰缺强烈影响作物的生长发育，董建江等^[6]研究表明，与稻－闲轮作相比，稻－油轮作能够提高土壤有效态 Cu 及 Zn 含量。土壤肥力质量是土壤特性的综合反映，对土壤条件的动态变化反应敏感^[7]。相关研究表明，长期双季稻－油菜轮作还能改良土壤结构，提升土壤肥力质量等级，但是否具有普适性仍有待验证，而肥力质量的提升机理也值得深入研究^[8-9]。

湖南省湘南地处中亚热带，水热资源丰富，一直是传统的水稻和油菜生产基地^[2]。有研究表明，与传统的双季稻－冬闲模式相比，长期的双季稻－油菜种植制度有助于提高水稻产量和养分利用率，但其潜在的机理仍不清楚^[9-10]。本研究选取湘南典型（稻－稻－油轮作）稻田为研究对象，并以毗邻的稻－稻－冬闲稻田作为对照，研究稻－稻－油轮作制下不同土层和根际/非根际土壤中大、中、微量元素含量的差异，评价水稻土的肥力质量等级，为明确南方双季稻－油菜轮作制的增产、增效机理提供基础数据和科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究样地概况

研究样地位于湖南省湘南郴州市安仁县渡口乡松林村（26°79'N，113°19'E），属油菜传统产区；研究地位于罗霄山脉中段的平原低岗地带，海拔 75 ~ 100 m。该区属亚热带湿润季风气候，年均气温 17.7 ℃，降水量 1 430 mm。据调查，自 1985 年（种植水稻），当地传统稻田耕作制度主要为稻－稻－油和稻－稻－闲，初始土壤性状良好，水稻开始轮作至 2015 年早稻季取样。成土母质为紫红色碎屑岩风化物，发育土种为紫泥田。水稻和油菜季施用的氮、磷、钾肥分别为尿素、过磷酸钙和氯化钾，折合成纯 N、P₂O₅ 和 K₂O 分别约为 180 kg·hm⁻²、90 kg·hm⁻² 和 90 kg·hm⁻²。其中，水稻季采取一次性施肥方式，油菜季氮肥（尿素）按照基肥: 苗肥: 薹肥 = 5: 3: 2 的比例施用，磷肥（过磷酸钙）、钾肥（氯化钾）全部当作基肥施用。其他农艺管理措施（如作物栽培、病虫害及灌排水）均按当地习惯进行。试验所用的水稻品种为“中华 11 号”，油菜品种为“香优 15 号”，均为当地使用的常规品种。长期稻－稻－闲轮作水稻年均产量为 14 346 kg·hm⁻²，长期稻－稻－油轮作水稻年均产量为 15 254 kg·hm⁻²。

1.2 土壤样品采集和分析

2015 年 7 月，在地势平坦的开阔地，选取长期（>30 a 以上）稻－稻－油和稻－稻－闲耕作制度的毗邻稻田各 5 块，每块面积 >2 000 m²，各田块两两相距 <200 m。早稻黄熟期，在各田块内按“S 型路线”随机挖掘土坑 10 ~ 12 个，在各土坑处分别采集 0 ~ 5 cm、5 ~ 10 cm 和 10 ~ 20 cm 土壤样品，同一田块 10 ~ 12 个土坑同一土层的样品混匀。在各土坑附近，随机选取健壮水稻植株 3 ~ 5 株，以植株为中心，挖掘 20 cm × 20 cm × 20 cm 土块，带回室内，用放大镜、镊子和软毛刷，仔细分离并收集根系 5 mm 范围内的根际土壤。

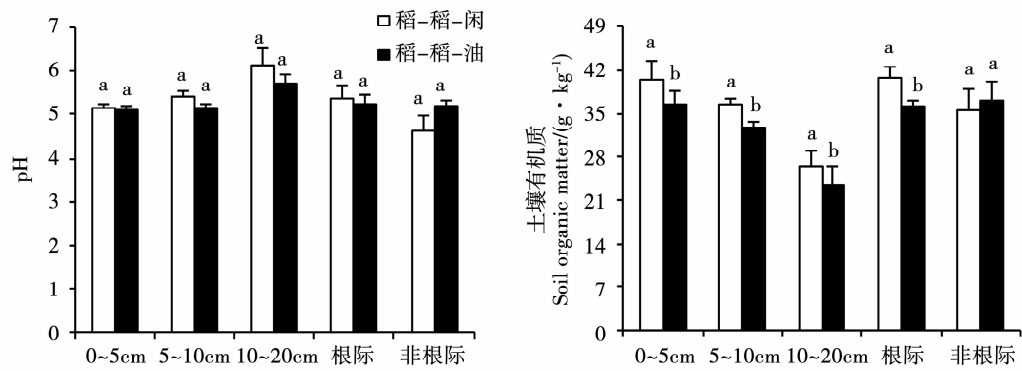
采用电位法（水: 土为 2. 5: 1）测定土壤 pH；高温外热重铬酸钾氧化－容量法测定土壤有机质；凯氏定氮法测定土壤全氮（TN）；酸溶－钼锑钨比色法测定土壤全磷（TP）；氢氧化钠熔融法测定土壤全钾（TK）；靛酚蓝比色法测定土壤碱解氮（AN）；碳酸氢钠浸提－钼锑钨比色法测定土壤有效磷（AP）；乙酸铵提取法测定速效钾（AK）；中性乙酸铵交换－ICP 法测定土壤有效态钙、镁（ACa、AMg）；盐酸浸提－ICP 法测定有效态铁、锰、铜、锌（AF_e、AM_n、AC_u、AZ_n）^[11]。

采用 Microsoft Excel 2010 软件计算变量的均值及标准差；基于 SPSS 19.0 软件，应用配对样本 T 检验，比较不同耕作制度下土层、根际和非根际变量的差异；应用主成分分析法和聚类分析（最短距离法），评价两种耕作制度的土壤肥力等级；统计显著性水平设为 0. 05。

2 结果分析

2.1 两种轮作制度下土壤 pH 和有机质的含量分析

长期稻－稻－油和稻－稻－闲耕作制度下，不同土层、根际和非根际土壤 pH 分别介于 5.08 ~ 5.71 和 4.61 ~ 6.15，未观察到显著差异（图 1）。但是，与稻－稻－闲相比，长期稻－稻－油轮作导致土壤有机质含量显著下降了 9% ~ 11%，一定程度上与水稻（稻－稻－油）根际土壤有机质的含量下降有关（图 1）。



注：不同小写字母代表处理间差异在 0.05 水平上显著。下同。
Note: Different small letters mean significant differences at 0.05 level. The same is as below.

图 1 稻－稻－油和稻－稻－闲不同土层、根际和非根际土壤 pH 和有机质含量

Fig. 1 Soil pH and organic matter contents among different soil layers, or in rhizosphere and bulk soils under rice－rice－rape and rice－rice－fallow rotation systems

2.2 两种轮作制度下土壤全量养分和速效养分含量

较稻－稻－闲轮作，长期稻－稻－油轮作不仅大幅提高了土壤 TP 和 AP 含量（19% ~ 56% 和 21% ~ 35%），也明显提高了根际土壤 TP 和 AP 含量（14% 和 46%）（图 2）。但是，长期稻－稻－油和稻－稻－闲耕作制度下，土壤 TN、TK、AN 和 AK 含量均未观察到显著差异（图 2）。其中，长期稻－稻－油和稻－稻－闲轮作土壤 TN、AN 含量分别介于 1.58 ~ 2.14 g·kg⁻¹ 和 105 ~ 175 mg·kg⁻¹ 之间，TK 和 AK 含量分别介于 19.9 ~ 22.1 g·kg⁻¹ 和 42.0 ~ 76.4 mg·kg⁻¹ 之间。

2.3 两种轮作制度下土壤中、微量元素含量分析

与稻－稻－闲相比，长期稻－稻－油轮作也显著降低了土壤有效态 Ca、Mg 含量（10% ~ 33% 和 14% ~ 42%），同时还导致根际和非根际土壤有效态 Ca 含量分别降低了 19% 和 10%、有效态 Mg 含量分别降低了 26% 和 14%；根际土壤有效态 Fe 含量显著降低了 32%（图 3）。

相反的是，与稻－稻－闲相比，长期稻－稻－油轮作大幅提高了土壤有效态 Cu、Zn 含量（20% ~ 28% 和 8% ~ 36%）及 10 ~ 20 cm 底土有效态 Fe 含量（47%），同时还导致根际和非根际土壤有效态 Zn 含量分别升高了 7% 和 22%，非根际土壤有效态 Cu 含量升高了 36%；小幅提高了根际土壤有效态 Mn 含量（8%）（图 3）。这可能与油菜根际酸化，还原土壤中的高价 Mn 有关。

2.4 基于主成分－聚类分析的土壤肥力质量评价

主成分分析表明，稻－稻－油轮作下，前 3 个主成分的贡献率分别是 61%、20% 和 12%；稻－稻－闲轮作下，前 2 个主成分的贡献率分别是 76%、18%（表 1）。长期稻－稻－油轮作下，主成分 1 携带变量：pH、土壤有机质、TN、AN、AK 和有效态 Zn；主成分 2 携带变量：AP、TK 和有效态 Fe、Mn、Cu；主成分 3 携带变量 TP 和有效态 Ca、Mg。长期稻－稻－闲轮作下，主成分 1 携带变量：pH、土壤有机质、TN、AN、AP、AK 以及有效态 Ca、Mg、Fe、Cu、Zn；主成分 2 携带变量：TP、TK、有效态 Mn（表 2）。

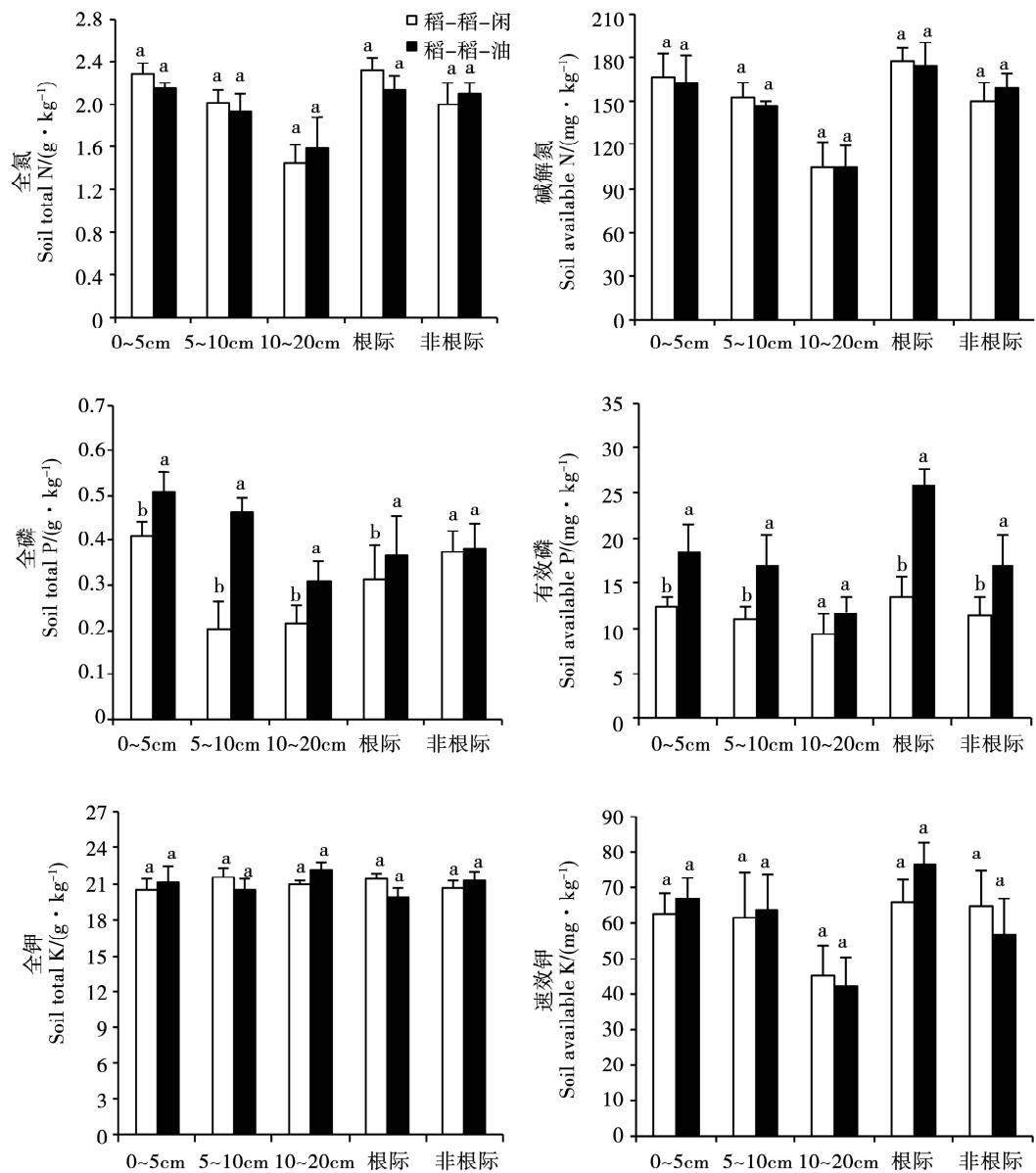


图2 稻-稻-油和稻-稻-闲不同土层、根际和非根际土壤TN、TP、TK和AN、AP、AK含量

Fig. 2 TN, TP, TK, AN, AP, and AK contents among different soil layers, or in rhizosphere and bulk soils under rice-rice-rape and rice-rice-fallow rotation systems

当主成分个数达到2个时，累积贡献率>85%，故提取前2个主成分用作综合评价，较之长期稻-稻-闲，稻-稻-油轮作明显改善了非根际土壤的肥力质量（表3）。在此基础上的聚类分析表明，稻-稻-油和稻-稻-闲轮作制度下，土壤肥力质量由高到低可划分为6个等级：I-高（NR-Y、5-10F、R-F）>II-较高（0-5Y）>III-中等（R-Y）>IV-较低（5-10Y、NR-F、0-5F）>V-低（10-20Y）>VI-最低（10-20F）（图4）。

稻-稻-油土壤肥力质量均在I-III等级（除底土层），而稻-稻-闲各土层和非根际土壤肥力质量大多在III-VI等级。0~10 cm土壤肥力质量在I-IV等级，而10~20 cm土壤肥力质量在V、VI等级。稻-稻-油根际土壤肥力质量（III级）低于非根际土壤（I级），但稻-稻-闲根际土壤肥力质量（I级）高于非根际土壤（V级）。

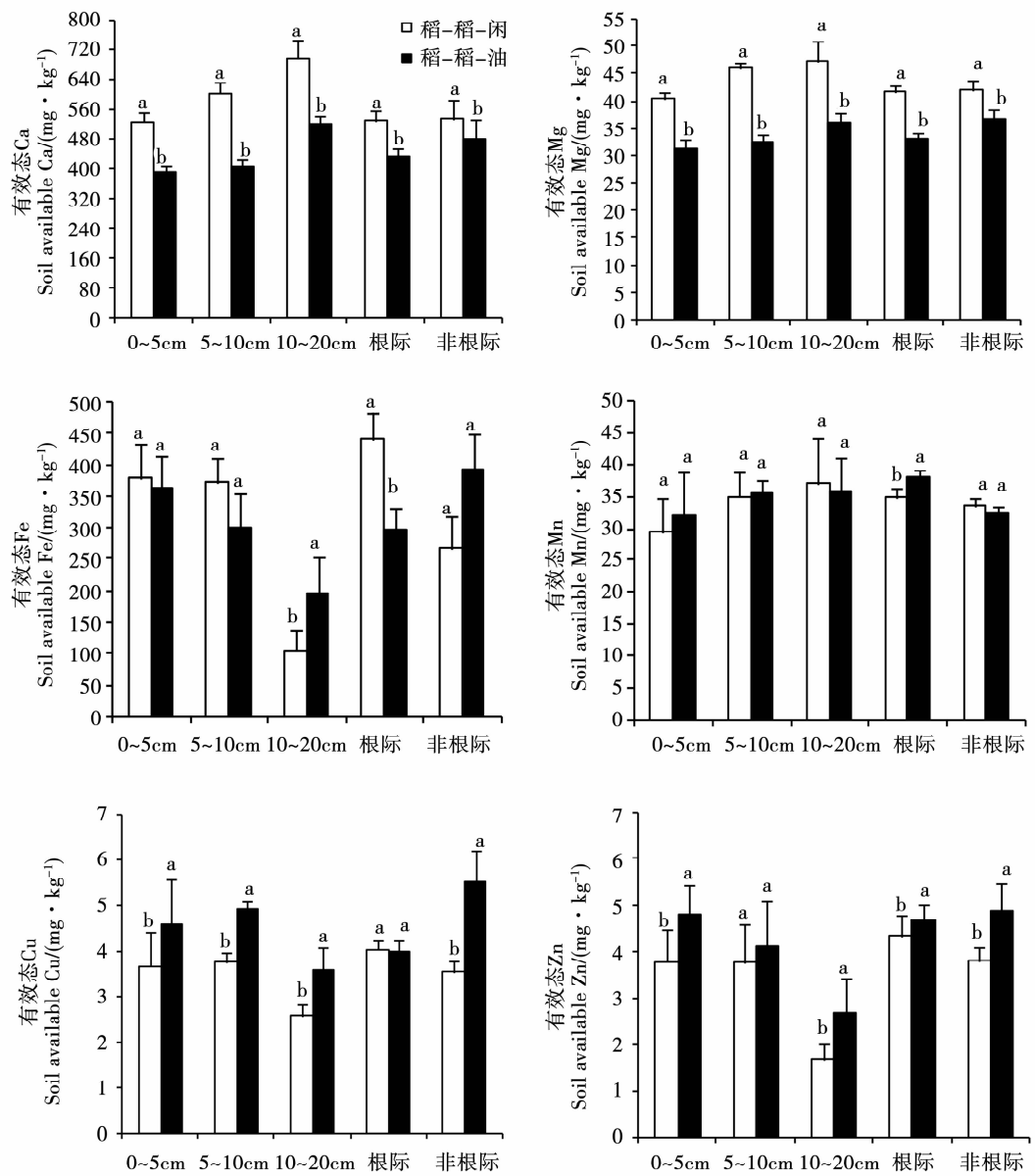


图 3 稻－稻－油和稻－稻－闲不同土层、根际和非根际土壤的中、微量养分含量

Fig. 3 Middle and micro nutrients contents among different soil layers, or in rhizosphere and bulk soils under rice－rice－rape and rice－rice－fallow rotation systems

表 1 特征值、贡献率及累积贡献率

Table 1 Characteristic value, contribution rate, and cumulative contribution rate

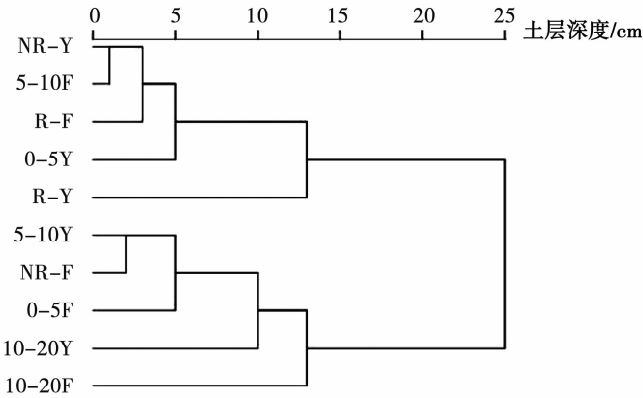
耕作制度 Rotation system	主成分 Principal component	初始特征值 Initial eigenvalue		
		特征值 Characteristic value/ λ	解释方差 Variance explained/%	累积解释方差 Cumulative variance explained/%
稻－稻－油 Rice－rice－rape	1	9.226	66	66
	2	2.774	20	86
	3	1.614	12	97
稻－稻－闲 Rice－rice－fallow	1	10.659	76	76
	2	2.535	18	94

表 2 各指标主成分的特征向量
Table 2 The principal component vectors between all the indexes

指标 Index	稻 - 稻 - 油 Rice - rice - rape			稻 - 稻 - 闲 Rice - rice - fallow	
	1	2	3	1	2
pH	-0.318	-0.103	0.115	-0.294	0.039
土壤有机质 Soil organic matter	0.316	0.090	0.182	0.302	0.055
全氮 Total N	0.318	0.042	0.159	0.303	0.037
全磷 Total P	0.241	0.118	-0.514	0.212	-0.437
全钾 Total K	-0.255	0.337	-0.110	0.010	0.623
碱解氮 Available N	0.315	-0.065	0.201	0.302	0.098
有效磷 Available P	0.242	-0.344	0.267	0.286	0.056
速效钾 Available K	0.292	-0.274	0.039	0.293	0.082
有效态钙 Available Ca	-0.276	0.113	0.399	-0.297	0.102
有效态镁 Available Mg	-0.200	0.239	0.538	-0.267	0.266
有效态铁 Available Fe	0.272	0.321	0.138	0.281	0.216
有效态锰 Available Mn	-0.086	-0.546	0.154	-0.139	0.448
有效态铜 Available Cu	0.189	0.414	0.121	0.287	0.215
有效态锌 Available Zn	0.314	0.105	0.180	0.294	0.143

表 3 主成分综合得分
Table 3 Composite scores of the principal components

耕作制度 Rotation system	土壤来源 Source of soil	主成分 1 Component 1	主成分 2 Component 2	综合得分 Composite score	排序 Order
稻 - 稻 - 油 Rice - rice - rape	0 ~ 5 cm	-0.237	0.595	0.358	3
	5 ~ 10 cm	-0.122	-0.154	-0.276	4
	10 ~ 20 cm	-1.217	-1.064	-2.281	5
	根际	1.564	-0.760	0.805	2
	非根际	0.012	1.383	1.395	1
稻 - 稻 - 闲 Rice - rice - fallow	0 ~ 5 cm	0.335	-1.352	-1.017	4
	5 ~ 10 cm	0.313	1.103	1.417	2
	10 ~ 20 cm	-1.663	0.313	-1.350	5
	根际	1.012	0.621	1.634	1
	非根际	0.001	-0.686	-0.684	3



注：NR、R、Y 和 F 分别代表非根际、根际、稻 - 稻 - 油和稻 - 稻 - 闲。
Note: NR, R, Y, and F indicate non - rhizosphere, rhizosphere, rice - rice - rape, and rice - rice - fallow, respectively.

图 4 聚类树形图
Fig. 4 Arborecence of cluster analysis

3 讨 论

南方水田引入冬种油菜后,土壤有机质和养分含量会有升高、不变或降低的变化趋势。长达30 a的定位试验和2 a短期大田试验均发现,较稻-稻-闲轮作,稻-稻-油轮作能够显著提高土壤有机质含量,原因可能是冬种油菜(用作绿肥,地上部分保留),油菜植株全部翻压还田,为土壤带来更多的有机物输入^[2,12]。有研究报道,与稻-闲轮作相比,稻-油轮作下土壤有机质含量差异不大,原因可能与样地的初始有机质含量较高有关^[5]。也有报道,稻-油轮作较之冬水田平作,土壤有机质含量降低了23%^[1]。本研究中,较稻-稻-闲轮作,长期稻-稻-油轮作土壤有机质含量下降了9%~11%,原因可能有3方在:一是稻-稻-油根际土壤有机质含量更低(图1),土壤来源于根际的有机质投入可能更低;二是在长期稻-稻-油水旱轮作过程中,频繁的土壤干湿交替、油菜栽培和耕作加速土壤有机碳的矿化损失^[13-14];而稻-稻-闲冬季保持休闲状态,几乎无人干扰,有利于有机质的保存和积累;三是油菜栽培中的施肥、慢生根瘤菌固氮为土壤带来额外的活性氮,激发土壤微生物对有机质的分解和矿化^[15-16]。本研究与高菊生等^[2]在长期定位试验中将油菜翻压入田用作绿肥不同的是,油菜生产中收获地上部分(如秸秆、角果)并移出稻田,土壤有机质归还量相对减少。由于长期双季稻-油菜轮作显著降低了土壤有机质,双季稻-油菜轮作生产中有必要适当补充土壤有机质投入(如增施有机肥、秸秆还田),弥补土壤有机质损失,以维系稻-稻-油轮作的长期可持续生产。

相反的是,水田引入冬种油菜后,一般可以较大幅度提高土壤磷素含量,以有效磷含量提高更为明显。较稻-闲轮作,稻-油轮作土壤TP、AP含量分别提高了14%~40%和31%~106%;长达10 a的定位试验表明,较稻-闲,稻-油轮作土壤TP含量差异不大,但AP含量却高出一倍;单季稻改制稻-油土壤AP含量呈上升趋势^[5,17-18]。本研究中,较稻-稻-闲,稻-稻-油轮作土壤TP、AP含量分别提高了14%~56%和21%~46%。油菜季施肥和秸秆还田显然增加了额外的土壤磷投入,同时稻-稻-油轮作土壤频繁干湿交替,促进了土壤矿物态-磷的溶解、活化和解析^[19];此外,干湿交替引起土壤有机质加速矿化的“Birch效应”,可能增加了活性磷(例如MBP)含量,由此提升了土壤AP含量^[20-22]。类似地,水田冬种油菜后,土壤TK和AK含量也小幅度提高了5%、6%^[12]。土壤的中量元素是作物生长必需的营养元素。本研究中,与稻-稻-闲相比,稻-稻-油轮作土壤的有效态Ca、Mg含量分别降低了10%~33%和14%~42%;原因可能有3方面:一是收获油菜带出Ca、Mg;二是油菜栽培、翻耕会加速表土盐基离子(如Ca、Mg)淋失^[23];三是相比稻-稻-闲以还原性为主的土壤环境,而稻-稻-油轮作干湿交替更为频繁,土壤氧化与还原环境交替,土壤排水性能增强,土壤pH呈下降趋势(图1),可能引起土壤胶体Ca、Mg吸附能力下降^[24-25]。

主成分-聚类分析是土壤肥力质量评价中的新兴手段。稻田土壤肥力的主要贡献因子一般与施肥、耕作制度和母质有关^[26-28]。本研究中,稻-稻-油和稻-稻-闲轮作下土壤肥力的主成分(1、2)携带的变量不同,反映水田不同耕作制度下土壤肥力质量具有不同的主控因素。稻-稻-油轮作土壤肥力质量等级高于稻-稻-闲轮作,可能在于稻-稻-油轮作下,土壤磷素及微量元素(如Cu、Zn)的活性明显增强;此外,水稻和油菜2种作物从土壤中吸收的养分不同,减少单一水稻对土壤中同种元素的吸收,有利于土壤养分平衡、综合肥力质量提升^[29]。稻-稻-油轮作根际土壤肥力质量等级高于非根际土壤,可能与稻-稻-油根际土壤有效态中、微量元素(Fe、Cu)低于非根际土壤有关,反映稻-稻-油轮作耕作制度下(与稻-稻-闲相比),水稻根系可能具有更强的中、微量养分吸收能力,这也可以部分解释双季稻-油菜耕作制度有助于提高水稻产量和养分利用效率^[30-31]。卢胜等^[9]研究表明,较稻-稻-闲,长期稻-稻-油轮作水稻年均增产6.3%。

4 结 论

(1) 湘南地区,较稻-稻-闲,长期稻-稻-油轮作下土壤有机质含量及中量元素Ca、Mg的有效性

显著降低;因此,稻-稻-油轮作生产中,有必要适当增加土壤有机质(如增施有机肥、秸秆还田)和石灰投入,缓解土壤有机质损失和 Ca、Mg 有效性下降,以维系稻-稻-油轮作的长期可持续生产。

(2) 较稻-稻-闲,长期稻-稻-油轮作有助于提高土壤养分有效性,可明显增加土壤有效磷及有效态 Cu、Zn 的含量。

(3) 与长期稻-稻-闲相比,长期稻-稻-油轮作较大幅度的提高了土壤肥力质量等级,改善了土壤肥力质量。

参考文献 (References):

- [1] 李 辉,张军科,江长胜,等. 耕作方式对紫色水稻土有机碳和微生物生物量碳的影响 [J]. 生态学报, 2012, 32 (1): 247-255.
LI H, ZHANG J K, JIANG C S, et al. Long-term tillage effects on soil organic carbon and microbial biomass carbon in a purple paddy soil [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32 (1): 247-255.
- [2] 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.
GAO J S, XU M G, DONG C H, et al. Effects of long-term rice-rice-green manure cropping rotation on rice yield and soil fertility [J]. Acta Agronomica Sinica, 2013, 39 (2): 343-349.
- [3] ZHANG X X, ZHANG R J, GAO J S, et al. Thirty-one years of rice-rice-green manure rotations shape the rhizosphere microbial community and enrich beneficial bacteria [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2017, 104: 208-217.
- [4] 杨滨娟,黄国勤,王 超,等. 稻田冬种绿肥对水稻产量和土壤肥力的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2013, 21 (10): 1209-1216.
YANG B J, HUANG G Q, WANG C, et al. Effects of winter green manure cultivation on rice yield and soil fertility in paddy field [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21 (10): 1209-1216.
- [5] 李清华,王 飞,林 诚,等. 水旱轮作对冷浸田土壤碳、氮、磷养分活化的影响 [J]. 水土保持学报, 2015, 29 (6): 113-117.
LI Q H, WANG F, LIN C, et al. Effects of paddy-upland rotation on the nutrient activation of soil carbon, nitrogen and phosphorus in cold waterlogged paddy field [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29 (6): 113-117.
- [6] 董建江,邵伏文,张 林,等. 不同耕作模式对稻田土壤理化性质及经济效益的影响 [J]. 土壤, 2015, 47 (3): 509-514.
DONG J J, SHAO F W, ZHANG L, et al. Effects of tillage patterns on physical and chemical properties of paddy soils and economic efficiency [J]. Soils, 2015, 47 (3): 509-514.
- [7] KARLEN D L, ANDREWS S S, DORAN J W. Soil quality: current concepts and applications [J]. Advances in Agronomy, 2001, 74: 1-40.
- [8] CHEN S, ZHENG X, WANG D Y, et al. Effect of long-term paddy-upland yearly rotations on rice (*Oryza sativa*) yield, soil properties, and bacteria community diversity [J]. The Scientific World Journal, 2012 (3): 279641.
- [9] 卢 胜,张振华. 长期稻油轮作改良土壤结构提高水稻产量 [J]. 土壤通报, 2018, 49 (2): 409-414.
LU S, ZHANG Z H. Long-term rice-rice-rape rotation significantly improved soil structure and rice yield [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2018, 49 (2): 409-414.
- [10] CHEN S, XU C M, YAN J X, 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.
- [11] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 231-233.
LU R K. Analytical methods of soil agricultural chemistry [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000: 231-233.
- [12] 黄国勤,罗晓燕,刘彬彬. 双季稻田冬种对土壤肥力的影响及相关性分析 [J]. 江西农业学报, 2013, 25 (2): 1-4.
HUANG G Q, LUO X Y, LIU B B. Effect of winter cropping system in double-cropping paddy field on soil fertility and correlation analysis [J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2013, 25 (2): 1-4.
- [13] BUTTERLY C R, BÜNEMANN E K, MCNEIL A M, et al. Carbon pulses but not phosphorus pluses are related to decreases in microbial biomass during repeated drying and rewetting of soils [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009, 41 (7): 1406-1416.
- [14] HARRISON-KIRK T, BEARE M H, MEENKEN E D, et al. Soil organic and texture affect responses to dry/wet cycles: changes in soil organic matter fractions and relationships with C and N mineralization [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, 74: 50-60.
- [15] 李梦寻,王冬梅,任 远,等. 不同干湿交替频率对土壤速效养分、水溶性有机碳的影响 [J]. 生态学报, 2018, 38 (5): 1542

- 1549.
- LI M X, WANG D M, REN Y, et al. Influence of different drying - rewetting frequencies on available soil nutrients and DOC [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38 (5): 1542 - 1549.
- [16] 方 宇, 王 飞, 李清华, 等. 连续水旱轮作对水稻冷浸田土壤细菌群落结构的影响 [J]. *土壤学报*, 2018, 55 (2): 515 - 525.
- FANG Y, WANG F, LI Q H, et al. Effect of continuous paddy - upland crop rotation on bacterial community structure in cold waterlogged paddy soil [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55 (2): 515 - 525.
- [17] 王子芳, 高 明, 秦建成, 等. 稻田长期水旱轮作对土壤肥力的影响研究 [J]. *西南农业大学学报 (自然科学版)*, 2003, 25 (6): 514 - 517, 521.
- WANG Z F, GAO M, QIN J C, et al. Effect of long - term "paddy - upland" rotation on soil fertility of paddy fields [J]. *Journal of Southwest Agricultural University (Natural Science)*, 2003, 25 (6): 514 - 517, 521.
- [18] 王 飞, 李清华, 林 诚, 等. 冷浸田水旱轮作对作物生产及土壤特性的影响 [J]. *应用生态学报*, 2015, 26 (5): 1469 - 1476.
- WANG F, LI Q H, LIN C, et al. Influence of paddy rice - upland crop rotation of cold - waterlogged paddy field on crops production and soil characteristics [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26 (5): 1469 - 1476.
- [19] 马利民, 张 明, 滕衍行, 等. 三峡库区消落区周期性干湿交替环境对土壤磷释放的影响 [J]. *环境科学*, 2008, 29 (4): 1035 - 1039.
- MA L M, ZHANG M, TENG Y X, et al. Characteristics of phosphorous release from soil in periodic alternately waterlogged and drained environments at WFZ of the three gorges reservoir [J]. *Environmental Science*, 2008, 29 (4): 1035 - 1039.
- [20] BIRCH H F. The effect of soil drying on humus decomposition and nitrogen availability [J]. *Plant and Soil*, 1958, 10 (1): 9 - 31.
- [21] TURNER B L, HMYGARTH P M. Changes in bicarbonate - extractable inorganic and organic phosphorus by drying pasture soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67 (1): 344 - 350.
- [22] LADO - MONSERRAT L, LULL C, BAUTISTA I, et al. Soil moisture increment as a controlling variable of the "Birch effect". Interactions with the pre - wetting soil moisture and litter addition [J]. *Plant and Soil*, 2014, 379 (1/2): 21 - 34.
- [23] CHIMDI A, GEBREKIDAN H, KIBRET K, et al. Status of selected physicochemical properties of soils under different land use systems of Western Oromia, Ethiopia [J]. *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences*, 2012, 2: 57 - 71.
- [24] 何春梅, 王 飞, 林 诚, 等. 不同土壤类型对硫酸钾镁肥中钾、镁、硫吸附特性研究 [J]. *土壤通报*, 2011, 42 (3): 622 - 626.
- HE C M, WANG F, LIN C, et al. Study on the soil adsorption characteristics of potassium, magnesium, and sulphur in potash magnesium sulphate fertilizer as affected by different soil types [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42 (3): 622 - 626.
- [25] 刘 琳, 李 伟, 张吴平, 等. 钙镁泥对不同土壤 pH 及部分元素有效性的影响 [J]. *水土保持学报*, 2015, 29 (6): 287 - 291.
- LIU L, LI W, ZHANG W P, et al. Effects of calcium and magnesium muds on the pH and some available elements of different soils [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29 (6): 287 - 291.
- [26] 黄 晶, 蒋先军, 曾跃辉, 等. 稻田土壤肥力评价方法及指标研究进展 [J]. *中国土壤与肥料*, 2017 (6): 1 - 8.
- HUANG J, JIANG X J, ZENG Y H, et al. A review on the evaluation methods and indexes of soil fertility in paddy fields [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2017 (6): 1 - 8.
- [27] SCHOENHOLTZ S H, VAN MIEGROET H, BURGER J A. A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities [J]. *Forest Ecology and Management*, 2000, 138 (1/3): 335 - 356.
- [28] 殷志遥, 黄 丽, 薛 斌, 等. 稻-油轮作下保护性耕作对土壤肥力的影响及评价 [J]. *中国生态农业学报*, 2017, 25 (11): 1604 - 1614.
- YIN Z Y, HUANG L, XUE B, et al. Effect of conservation tillage on soil fertility under rice - rape rotation system [J]. *Chinese Journal of Eco - Agriculture*, 2017, 25 (11): 1604 - 1614.
- [29] 张立成, 杨敬林, 肖卫华, 等. 水稻-油菜轮作不同施肥对油菜苗期生长的影响 [J]. *土壤与作物*, 2017, 6 (4): 251 - 255.
- ZHANG L C, YANG J L, XIAO W H, et al. Effect of different fertilizations on rape seedling growth in a rice - rape rotation [J]. *Soils and Crops*, 2017, 6 (4): 251 - 255.
- [30] SURALTA R R, KANO - NAKATA M, NIONES J M, et al. Root plasticity for maintenance of productivity under abiotic stressed soil environments in rice: progress and prospects [J]. *Field Crops Research*, 2018, 220: 57 - 66.
- [31] LU S, LEPO J E, SONG H X, et al. Increased rice yield in long - term crop rotation regimes through improved soil structure, rhizosphere microbial communities, and nutrient bioavailability in paddy soil [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2018, 54 (8): 909 - 923.