植物营养与肥料学报 2014,20(6):1450-1459
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer doi: 10.11674/zwyf.2014.0615

稻-油轮作下长期秸秆还田与施肥对作物产量和土壤理化性状的影响

刘禹池[1,2],曾祥忠[1],冯文强[1],秦鱼生[1],王昌全[2],涂仕华[1,3*],陈道全[4]
(1 四川省农业科学院土壤肥料研究所,四川成都 610066;2 四川农业大学资源环境学院,四川成都 611130;
3 国际植物营养研究所成都代表处,四川成都 610066;4 广汉市农技中心,四川广汉 618000)

摘要:【目的】研究长期秸秆还田与施肥对作物产量和土壤肥力的影响,为该种植模式下作物最佳养分管理提供技术支撑。**【方法】**自2005年起在成都平原的广汉市开展了水稻-油菜轮作下连续秸秆覆盖还田+免耕与不同施肥的长期定位试验。试验为随机区组设计,共有8个处理,3次重复。这8个处理包括对照(只施化肥、无秸秆覆盖)和秸秆覆盖还田下4个氮肥用量、2个磷肥用量和3个钾肥用量的7个组合处理。自2005年起每季收获时采集植株样本,分析不同处理下水稻和油菜的农艺形状与产量变化情况,2010年水稻收获后采取耕层(0—5 cm、5—15 cm和15—30 cm)土样,分析不同处理的土壤肥力演化趋势。**【结果】**在稻-油轮作下,同一处理水稻和油菜产量受气候变化影响存在显著的年度间差异。秸秆还田对水稻产量的影响始于覆盖后的第三年,即秸秆覆盖处理的水稻产量显著高于相同施氮量的无覆盖对照处理,油菜秸秆覆盖条件下的减磷和减钾处理的水稻产量相当或高于对照处理。按此计算,秸秆还田在水稻季每公顷可节约大约N 60 kg和K_2O 90 kg。在油菜季,稻草覆盖似乎不能明显减少氮肥投入,减磷处理的油菜产量始终最低。因此,施用充足的磷肥成为油菜高产的关键,该结果为稻-油轮作制度中磷肥的合理分配提供了科学依据,即磷肥应重点施在油菜上,水稻上可少施或不施磷肥。在油菜季,秸秆还田每公顷能节约大约N 30 kg和K_2O 90 kg。连续秸秆覆盖+免耕使土壤有机质和氮、磷、钾养分在0—5 cm土层聚集,但对下层土壤影响不大;减磷、减钾处理使土壤磷、钾耗竭,但无覆盖对照处理的土壤钾耗竭大于减钾处理;在磷钾施肥量不变的情况下,增加氮肥施用量降低了土壤速效钾与有效磷含量。长期秸秆覆盖还田+免耕能显著改善0—5 cm土层的土壤物理性状,即降低土壤容重,增加孔隙度、非水稳性和水稳性团聚体的数量,但增加了下层土壤的容重和降低了土壤孔隙度。**【结论】**长期秸秆覆盖还田+免耕能显著提高水稻-油菜轮作下的作物产量,减少肥料投入和提高表层土壤肥力水平,但油菜季必须注意施用足够的磷肥以保证油菜籽高产的需要。

关键词: 秸秆覆盖;长期试验;稻-油轮作;产量;理化性状
中图分类号: S158 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2014)06-1450-10

Effects of long-term straw mulch and fertilization on crop yields and soil physical and chemical properties under rice-rapeseed rotation

LIU Yu-chi[1,2], ZENG Xiang-zhong[1], FENG Wen-qiang[1], QIN Yu-sheng[1], WANG Chang-quan[2], TU Shi-hua[1,3*], CHEN Dao-quan[4]
(*1 Soil and Fertilizer Institute, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu 610066, China; 2 College of Resources and Environment, Sichuan Agricultural University, Chengdu Sichuan 611130, China; 3 Chengdu Office, International Plant Nutrition Institute, Chengdu Sichuan 610066, China; 4 Agricultural Technical Center of Guanghan City, Guanghan, Sichuan 618000, China*)

Abstract:【Objectives】The study of the effects of long-term returning of crop residues and fertilization on crop yields and soil fertility can offer the scientific base for the best nutrient management in cropping system. **【Methods】** A long-term field experiment with rice-rapessed rotation has been conducted in Guanghan City, Chengdu Plain since 2005. The experiment consisted of eight treatments: chemical fertilizers without straw mulch (CK), four rates of nitrogen, two rates of phosphorus and three rates of potassium under straw mulch,

收稿日期: 2013-4-27 **接受日期:** 2014-04-03
基金项目: 国际植物营养研究所研究基金;公益性行业(农业)科研专项(201003016)资助。
作者简介: 刘禹池(1985—),四川广源人,男,硕士研究生,主要从事有机肥料方面的研究。E-mail: lyc674@163.com
* 通信作者 E-mail: stu@ipni.net.

respectively. Since 2005, plant samples of each plot were collected and crop seed/grain yields were recorded at harvest, soil samples were collected at 0-5, 5-15 and 15-30 cm depths of each plot after rice harvested in 2010. **【Results】** Under rice-rapeseed rotation, crop yields vary considerably from year to year due to the weather changes. Rice yields were significantly affected by the surface mulched rapeseed residue since the third year of the experiment. The rice yield of the treatments with the straw mulch was significantly higher than those treatments receiving equal amount of N fertilizer without mulch, and equivalent or even higher rice yields were obtained in treatments of -P and -K with mulch than the CK. Thus, about 60 kg of N and 90 kg of K_2O per hectare could be cut off from the fertilizer input through rapeseed residue mulch in the rice season. In the rapeseed season, however, rice straw mulch was not able to reduce nitrogen input, the -P treatment produced the lowest rapeseed yield, indicating that P fertilizers should be applied in the rapeseed season, but less or not in the rice season. In the rapeseed season, about 30 kg of N and 90 kg of K_2O per hectare can be saved by rice straw mulch. Continued straw mulch and no-tillage mainly benefit the accumulation of soil organic matter, N, P and K at 0-5 cm soil layer, much less in the soil layers below. The -P and -K treatments obviously depleted the soil P and K reserves and the CK treatment mainly depleted soil K reserves. Under the same P and K rates, contents of soil available K and P were decreased with the increase of N input rates. Long-term straw mulch and no-tillage dramatically decreased soil bulk density, increased soil porosity, non water-stable aggregates and water-stable aggregates, improved the physical properties of the 0-5 cm soil layer. **【Conclusions】** Long-term straw mulch plus no-tillage in the rice-rapeseed rotation system could significantly increase crop yields, reduce fertilizer inputs (particularly in rice season) and improve top layer soil fertility. Adequate P fertilizer should be applied in rapeseed, less or not in rice for high yield and high profit production.

Key words: straw mulch; long-term experiment; rice-rapeseed rotation; yield; physical and chemical properties

水稻和油菜是四川的两大主要粮、油作物,水稻-油菜轮作模式遍及四川全省。每到收获季节,这两种作物都会产生大量难以处置的秸秆,导致农民随地焚烧,带来严重的空气污染问题。因此,研究寻找秸秆的合理利用途径,杜绝焚烧,变废为宝,成为政府关心和农业科研人员面临的主要生产问题之一,对秸秆资源的循环利用、利用有机废弃物料替代或部分替代化肥资源和保护生态环境具有重要意义。

秸秆还田是农业利用秸秆的常见方式之一,主要有翻埋还田和覆盖还田。由于翻埋还田前期(40 d 内)存在土壤微生物夺氮现象[1-2],因此在环境条件许可的情况下作物秸秆一般多采用覆盖还田。稻草还田能改善土壤有效养分供应能力,促进水稻根系生长和对养分的吸收,具有一定的增产作用[3-10],高量稻草的增产效果优于低量稻草[11]。此外,秸秆还田还能改善土壤的养分供应状况[5, 12-14],增加土壤温度与含水量[7],降低土壤容重[13, 15],增加土壤孔隙度[14]和水稳性团聚体(≥0.25 mm)数量[16-17]。同样,高量秸秆还田的效果优于低量。然而,以往的这些研究大多为水稻-小麦、水稻-水稻或旱作试验,在水稻-油菜轮作模式下开展长期秸秆覆盖定位试验研究鲜见报道。油菜(*Brassica napus* L.)属于直根系十字花科油料作物,与小麦之间存在诸多差异,包括矿质养分的需求量和吸收规律[18],根系分泌物和同化根系分泌物的微生物群落[19],生物量和籽粒产量(通常只有小麦的一半或更低),秸秆养分含量和腐解规律[20],这些差异必然影响其后作的施肥、生长、产量以及土壤理化性状。因此,本文旨在研究成都平原水稻-油菜轮作模式下,连续免耕秸秆还田与不同用量化肥配合施用对作物产量和土壤肥力变化的影响,为长期秸秆覆盖还田加免耕条件下的农田作物高产施肥和土壤培肥提供技术支撑。

1　材料与方法

1.1　试验地点与土壤

试验地点位于四川省广汉市西高乡,主要轮作方式为水稻-小麦(油菜)。土壤为灰棕冲积水稻土,试验前的基础土样采集于 0—20 cm 土层,试验中的土样采集于 0—5 cm、5—15 cm 和 15—30 cm 土层。供试基础土样 pH 5.5、有机质 31.3 g/kg、全氮 2 g/kg、碱解氮 189.8 mg/kg、速效磷 12.6 mg/kg、速效钾 73.9 mg/kg、缓效钾 162.7 mg/kg、容重 1.2 g/cm^3。

1.2 试验设计

试验为水稻－油菜轮作长期定位试验，始于2005年5月（水稻季）。试验设8个处理，3次重复，小区面积为3×4=12 m^2，随机区组排列。试验中水稻施肥用量列于表1和油菜施肥用量列于表2。除第一年试验的水稻没有秸秆覆盖外，随后的试验连续覆盖本小区前作的秸秆。每季水稻秸秆还田带入的养分约为每公顷N 61～75 kg、P_2O_5 8.5～10.5 kg和K_2O 193～239 kg，油菜秸秆带入的养分约为每公顷N 36～40 kg、P_2O_5 8.2～9.1 kg和K_2O 131～146 kg。

所用氮肥品种为尿素（含N 46%），磷肥为过磷酸钙（含P_2O_5 12%）、钾肥为氯化钾（含K_2O 60%）。氮肥按底肥70%、分蘖肥30%的比例施用，磷肥全部作底肥，钾肥按底肥和分蘖肥各占50%的比例施用。水稻的底肥在插秧前撒施，分蘖肥在秧苗移栽后7～10 d撒施。油菜季底肥在穴窝移栽时施于窝内，追肥分别在油菜苗期后和薹期、花期窝施后浇水。供试水稻品种为川香优9838号，由四川省农业科学院作物研究所提供。水稻于每年5月中下旬移栽，栽插密度为24×10^4 holes/hm^2，9月上旬收获。油菜于每年10月中旬移栽，翌年5月中下旬收获。水稻和油菜生长期间，进行适时除草和病虫害防治，每个小区单收单打分别计产，同时取植株样品进行室内常规考种和取土壤样品进行理化分析。

表1 油菜秆还田下水稻季的试验方案（kg/hm^2）

Table 1 Fertilizer rates used in the rice trial with rapeseed straw mulch

处理 Treatment	底肥 Basal fertilizer			分蘖肥 Tillering fertilizer	
	N	P_2O_5	K_2O	N	K_2O
$N_{165}P_{60}K_{90}$（CK）	130	60	45	35	45
$N_{75}P_{60}K_{90}$-Y	67	60	45	8	45
$N_{105}P_{60}K_{90}$-Y	89	60	45	16	45
$N_{135}P_{60}K_{90}$-Y	109	60	45	26	45
$N_{165}P_{60}K_{90}$-Y	130	60	45	35	45
$N_{105}P_{60}K_{60}$-Y	89	60	30	16	30
$N_{105}P_{60}K_{0}$-Y	89	60	0	16	0
$N_{105}P_{0}K_{90}$-Y	89	60	45	16	45

注（Note）：Y—油菜杆覆盖 Rapeseed straw mulch.

表2 稻秆还田下油菜季试验方案（kg/hm^2）

Table 2 Fertilizer rates used in the rapeseed trial with rice straw mulch

处理 Treatment	底肥 Basal fertilizer			分蘖肥 Tillering fertilizer	
	N	P_2O_5	K_2O	N	K_2O
$N_{180}P_{90}K_{90}$（CK）	108	90	45	72	45
$N_{120}P_{90}K_{90}$-S	72	90	45	48	45
$N_{150}P_{90}K_{90}$-S	90	90	45	60	45
$N_{180}P_{90}K_{90}$-S	108	90	45	72	45
$N_{210}P_{90}K_{90}$-S	126	90	45	84	45
$N_{180}P_{90}K_{60}$-S	108	90	30	72	30
$N_{180}P_{90}K_{0}$-S	108	90	0	72	0
$N_{180}P_{0}K_{90}$-S	108	0	45	72	45

注（Note）：S—全量水稻杆覆盖还田 Rice straw mulch.

1.3　测定项目与方法

本研究的土壤样品于 2010 年水稻、油菜收割后次日采集于 0—5、5—15 和 15—30 cm 土层。除 15—30 cm 土壤样品仅用于测定化学指标外，另外两个土层还测定了土壤容重（环刀法），风干土样测定了团聚体（干筛法和湿筛法）、全氮（半微量开氏法）、全磷（NaOH 熔融—分光光度计法）、全钾（NaOH 熔融—火焰光度计法）、碱解氮（碱解扩散法）、速效磷（碳酸氢钠—钼锑抗比色法）、速效钾（醋酸铵浸提—火焰光度计法）和有机质（重铬酸钾容量法）[21]。

试验数据采用 DPS 分析统计软件中的单因素 LSD 多重比较分析功能对数据进行差异显著性统计分析，并用 Excel 进行基础运算。

2　结果与讨论

2.1　长期施肥和秸秆还田对作物产量的影响

在 2005 ～ 2011 年的 7 年间，水稻产量的年度间波动很大，同一处理不同年度间的产量波动值最小为 113 kg/hm^2，最大为 1080 kg/hm^2（表 3）。这反映出在相同施肥水平和栽培管理技术条件下，不同年度间因天气、品种等变化等对水稻产量的影响很大。

表 3　2005 ～ 2011 年水稻－油菜轮作施肥量水稻产量（kg/hm^2）

Table 3　Rice yields as affected by different treatments under rice-rapeseed rotation in 2005–2011

处理 Treatment	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
$N_{165}P_{60}K_{90}$（CK）	9423 a	9776 a	10150 b	10091 c	10343 c	10267 c	9526 c
$N_{75}P_{60}K_{90}$-Y	9173 a	10253 a	10765 ab	10462 bc	11268 a	10614 bc	10906 a
$N_{105}P_{60}K_{90}$-Y	9546 a	10159 a	11117 a	10826 ab	11254 a	10676 bc	10343 b
$N_{135}P_{60}K_{90}$-Y	9467 a	10005 a	10950 a	11085 a	11293 a	11130 a	10379 b
$N_{165}P_{60}K_{90}$-Y	9175 a	9855 a	10572 ab	11256 a	11369 a	11122 a	10485 b
$N_{105}P_{60}K_{60}$-Y	9332 a	9768 a	11254 a	10979 a	10986 b	10654 bc	10349 b
$N_{105}P_{60}K_{0}$-Y	9260 a	9845 a	11165 a	10826 ab	10891 b	10709 ab	10224 b
$N_{105}P_{0}K_{90}$-Y	8866 a	10229 a	10734 ab	11188 a	10965 b	10972 ab	10344 b

注（Note）：表中每列产量平均值后相同字母表示处理间差异不显著（$LSD_{0.05}$）The yields followed by the same letters indicate no significant difference among different treatments（$LSD_{0.05}$）.

在试验开始的前两年（2005 年、2006 年），油菜秆还田条件下不同肥料处理间的水稻产量差异不显著。但从 2007 年开始，油菜秆还田处理的水稻产量都高于或显著高于对照处理（CK）。在秸秆覆盖条件下，水稻产量随氮肥用量的增加而增加，前三年氮肥用量在 N 105 kg/hm^2 时达到最高值，然后随施氮量增加而降低（后四年除外），表明油菜秸秆还田至少可节约 N 60 kg/hm^2。在油菜秆还田条件下，无钾肥处理的水稻产量除第一年略低于对照外，其余年份的水稻产量均高于对照，说明油菜秆还田在水稻一季就可以大约节约 K_2O 90 kg，同时保证生产出与常规施肥相当的产量。换句话说，秸秆还田可以替代化学钾肥[22]，至少可以部分替代[10]。这一试验结果的意义在于，在化学钾肥资源缺乏的地方，可以通过秸秆还田来缓解土壤缺钾的矛盾，至少是减少部分钾肥。在土壤钾素丰富的地方，秸秆还田则可以不施或少施化学钾肥，同时保证水稻产量不受影响。无磷肥处理的水稻产量与无钾肥处理的情况类似，但其作用原理不同。在淹水种稻情况下，土壤中磷的有效性增加归因于两方面的原因：一、淹水后土壤 pH 向中性趋近[23]，而土壤磷的有效性在 pH 中性范围内最高[24]；二、淹水后土壤处于还原条件，Fe-P 和一些闭蓄态磷因铁、锰等氧化物被还原而释放出在氧化条件下处于无效态的磷，增加了土壤磷的有效性[25-26]。在这种情况下，只要前茬作物施用了充足的磷肥或土壤含磷量丰富，水稻季则可以不施磷肥。与水稻产量的年度变化情况类似，油菜产量也存在很大的年度变化（表 4）。在试验过程中，2006 ～ 2010 年冬季出现过不同程度的干旱，尤以 2007 ～ 2008 年最为严重，因此对油菜生长的影响也最大，导致油菜籽粒产量较低；在此情况下，肥料处理未能充分显示其效果，不同处理间的差异也

较小。除2006年外,水稻秸秆覆盖+低氮处理的油菜籽产量都低于对照。这与水稻季油菜秸秆还田的肥料效应不同,这可能是因为夏季的高温和淹水条件促进了秸秆的腐解和养分的释放[20],从而促进了水稻的生长。而油菜生长在冬季,气温低且为缺少雨水的旱季,秸秆腐解较慢,秸秆中的养分难以快速释放而满足油菜生长[20],因而看不到像水稻那样显著的秸秆覆盖效果。2010～2012年的油菜产量随氮肥用量增加而显著增加。与无秸秆覆盖的对照处理相比,秸秆覆盖能节约近N 30 kg/hm^2,远远低于稻草秸秆所含的氮(N 61～75 kg/hm^2)。除2008年外,所有减钾处理的油菜产量都高于或显著高于对照,表明秸秆还田可以节约K_2O 90 kg/hm^{2}而保持与常规施肥相当的油菜产量。减磷处理的油菜籽产量低于或显著低于对照处理,同时也是所有处理中最低的,这可能是因为油菜对缺磷特别敏感的原因[27]。因此,即使在不缺磷土壤上,施用磷肥仍能显著增加油菜籽产量[27-29]。该结果表明,油菜生产必须重视施用磷肥,即使是在秸秆还田条件下。

本试验结果对秸秆还田条件下水稻-油菜轮作的养分管理具有指导意义,油菜季必须施用磷肥,才能保证油菜的持续高产;而在水稻季,则可以不施磷肥,不施或少施钾肥,同样可以保证水稻持续高产。

表4 2006～2012年水稻-油菜轮作施肥量对油菜产量的影响(kg/hm^2)

Table 4 Rape seed yields as affected by different treatments under rice-rapeseed rotation in 2006-2012

处理 Treatment	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
$N_{180}P_{90}K_{90}$(CK)	4077 cd	3770 bc	3791 a	3941 b	4087 c	4718 d	3496 b
$N_{120}P_{90}K_{90}$-S	4200 bc	3394 e	3718 a	3939 b	3915 d	4647 d	3031 d
$N_{150}P_{90}K_{90}$-S	4209 bc	3592 cd	3939 a	4018 b	4182 bc	4824 cd	3313 c
$N_{180}P_{90}K_{90}$-S	4367 ab	4371 a	3884 a	3969 b	4303 ab	5021 bc	3592 b
$N_{210}P_{90}K_{90}$-S	4303 ab	3937 b	4031 a	4215 ab	4405 a	5309 a	3811 a
$N_{180}P_{90}K_{60}$-S	4450 a	3752 bc	3644 a	4351 a	4394 a	5105 ab	3750 a
$N_{180}P_{90}K_0$-S	4231 abc	3869 b	3684 a	4186 ab	4192 bc	5114 ab	3793 a
$N_{180}P_0K_{90}$-S	3859 d	3555 de	3741 a	3093 c	3473 e	3707 e	2835 e

注(Note):表中每列产量平均值后相同字母表示处理间差异不显著($LSD_{0.05}$) The yields followed by the same letters indicate no significant difference among different treatments ($LSD_{0.05}$).

2.2 长期施肥与秸秆还田对有机质含量以及土壤养分含量的影响

2.2.1 土壤有机质含量 在秸秆还田和免耕条件下,土壤有机质存在明显的表聚现象,即主要累积在0—5 cm土层(图1)。在0—5 cm土层中,秸秆还田处理的有机质含量比CK高5.7～19.5 g/kg;在5—15 cm土层中,秸秆还田处理的有机质含量比对照处理(CK)高0.4～12.7 g/kg,处理间差异达到了显著水平;而对照处理0—5 cm土层的有机质含量却比试验前低31.3 g/kg。增加氮、磷肥用量使0—5 cm土层的有机质含量分别提高1.0 g/kg以上,在最高施氮量(水稻季135 kg/hm^{2}和油菜季210 kg/hm^2)时达到峰值。而减少钾肥用量使两土层的有机质分别降低了1.1～2.4 g/kg和3.8～4.9 g/kg,但差异未达到显著水平。这表明,秸秆还田对耕层土壤有机质累积的影响大于化学肥料的施用。在5—15 cm和15—30 cm土层中,不同处理土壤有机质的变化不显著,说明在连续免耕条件下,秸秆还田与施肥对底土层的有机质含量变化影响很小。这也印证了其他相关秸秆还田的研究结果[6-7,9],即秸秆还田能明显或显著提高耕层土壤的有机质含量。因此,秸秆还田可以作为农业废弃物资源循环利用和提升土壤有机质的有效措施。

2.2.2 土壤速效养分量 秸秆还田后,0—5 cm和5—15 cm土层的碱解氮、速效磷和速效钾含量都比对照显著增加(图1),其中碱解氮增加最大,在两个土层分别增加了15.6 mg/kg和46.0 mg/kg;速效磷分别增加了1.6 mg/kg和-0.2 mg/kg;速效钾分别增加了23.6 mg/kg和10.0 mg/kg。这三种速效养分都随土壤剖面深度的增加而降低,其中氮、磷的降低幅度比钾大,意味着钾在土壤剖面中的移动性相对较大。在0—15 cm深度,土壤速效氮含量随施

氮量的增加而增加，而土壤速效钾含量却随施氮量的增加而降低。这是因为作物产量通常随施氮量增加而增加，在施钾量不变的情况下，增加的作物产出必然加速土壤钾的耗竭。这也说明了在高产条件下应考虑各种肥料养分平衡的重要意义。在所有处理中，不施磷肥处理的土壤速效磷含量最低，对照处理的土壤速效钾含量最低，其次为不施钾肥处理。秸秆覆盖＋无钾处理的土壤速效钾略高于对照（施用化学钾肥）处理，初看起来有些难以理解，但通过计算，每年秸秆还田处理归还的钾或对照处理秸秆带走的钾（油菜秆为 131 ～ 146 kg/hm^2，稻草为 193 ～ 239 kg/hm^2）远大于施入的化学钾肥（180 kg/hm^2），这充分说明了为什么连续施用化学钾肥的对照处理土壤速效钾最低，也低于秸秆覆盖不施钾肥处理的土壤速效钾。关于秸秆还田增加土壤氮磷钾养分含量已有很多肯定的结论[3, 5, 9, 14]。但是，即使在秸秆还田条件下，如果长期不添加化学钾肥，由秸秆与土壤间循环的钾会不断减少，土壤钾素仍然一直处于亏损状态[6]。这一结果提示我们，在长期使用秸秆还田的地区，为了避免土壤钾素的过度亏损，是否需要配施化学钾肥、需要的最佳用量是多少和什么时候施用，取决于土壤钾素含量、作物需钾特性和产量水平等。

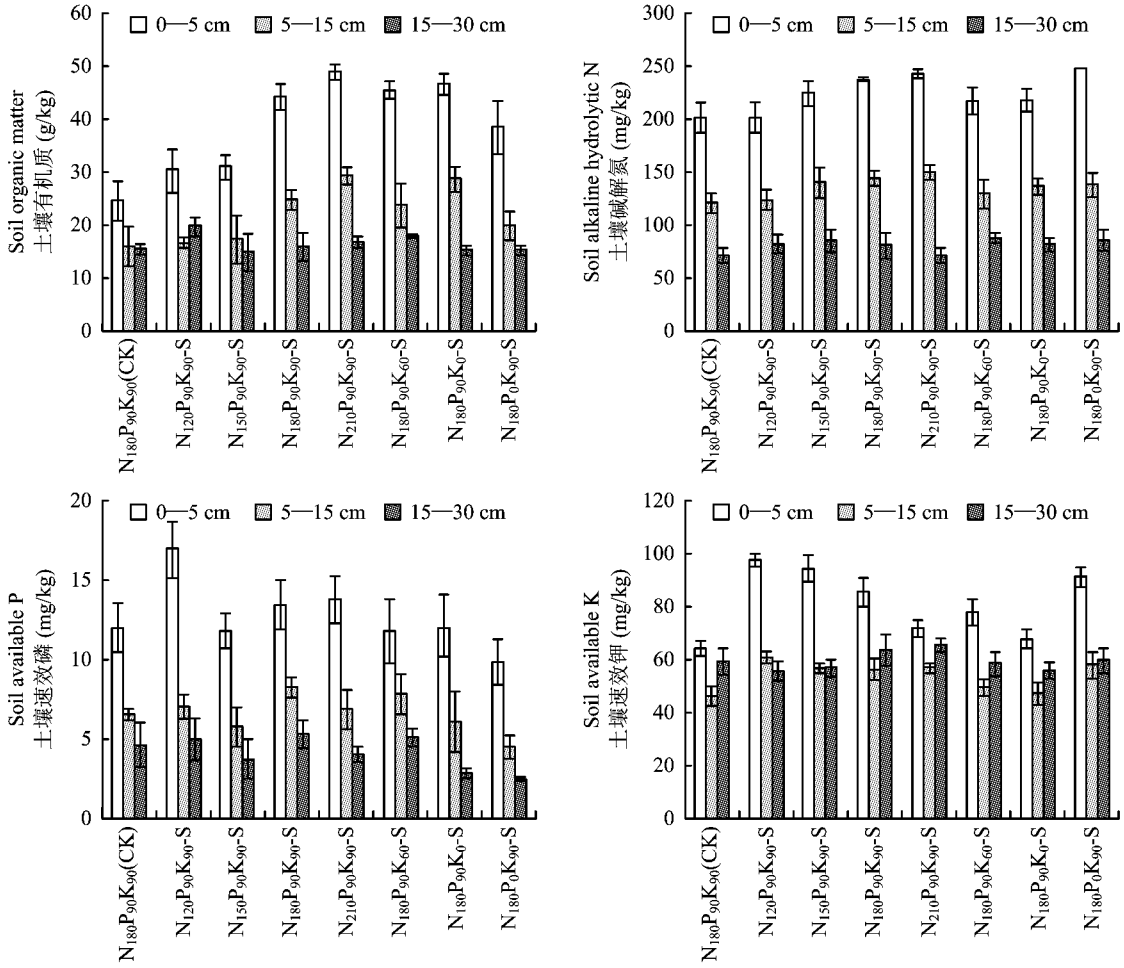

图 1　秸秆还田对土壤养分的影响

Fig. 1　Effects of straw mulching on amount of soil nutrients

总之，稻草还田配施氮、磷和钾肥不但能维持水稻持续高产，而且能增加土壤有机质和速效氮、磷、钾养分[14, 30-31]。

2.3　长期施肥与秸秆还田对土壤物理性状的影响

2.3.1 土壤容重与总孔隙度　连续五年秸秆还田后，除低氮处理外，0—5 cm 土层容重比试验开始前的基础土样容重降低了 0 ～ 0.17 g/cm^3，但 5—15

cm 土层所有处理容重比试验前高 0.17 ～ 0.24 g/cm^3(表 5)。对照处理的容重比试验前增加了 0.1 g/cm^3。容重是一个重要的土壤物理参数，它的变化可以反映土壤的松紧状况。本试验结果表明，连续秸秆覆盖能显著降低0—5 cm 土层的容重，这可能是因为连续的秸秆覆盖和免耕使有机物聚集在表层，从而降低了表层的土壤容重。但在 5 cm 以下，秸秆的腐解产物难以下移，多年的免耕使土壤变得板结，因而土壤容重显著增加。

土壤孔隙度的变化与容重变化是相互对应的，因此，0—5 cm 土层总孔隙度在连续秸秆还田后比基础土样提高了 0.9%～5.5%（低氮处理除外），高氮处理能显著提高土壤总孔隙度。在 5—15 cm 土层，总孔隙度一般比试验前约低 10%。土壤孔隙作为土壤水分和空气的通道及存储场所，其数量、大小、稳定性以及大小孔隙分配直接影响着水、热、气状况和作物根系生长。本研究中影响土壤孔隙度变化的原因与容重基本相同。其他同类研究也表明，长期秸秆还田能显著降低土壤容重，增加土壤孔隙度[32]；而连续免耕则增加耕层土壤容重，降低孔隙度[33]。

表 5 水稻－油菜轮作施肥对土壤容重和总孔隙度的影响

Table 5 Effects of fertilizer rates on soil bulk density and total porosity in rice-rapeseed rotation

处理 Treatment	土壤容重 Soil bulk density (g/cm^3)			土壤总孔隙度 Soil total porosity (%)		
	0—5 cm	5—15 cm	基础土样 Basic soil sample	0—5 cm	5—15 cm	基础土样 Basic soil sample
$N_{180}P_{90}K_{90}$(CK)	1.30 a	1.51 a	1.20	51.0 c	44.1 a	55.0
$N_{120}P_{90}K_{90}$-S	1.27 a	1.49 a	1.20	52.2 c	44.8 a	55.0
$N_{150}P_{90}K_{90}$-S	1.20 ab	1.46 a	1.20	54.3 bc	45.8 a	55.0
$N_{180}P_{90}K_{90}$-S	1.06 c	1.45 a	1.20	58.8 a	46.1 a	55.0
$N_{210}P_{90}K_{90}$-S	1.10 bc	1.50 a	1.20	57.5 ab	44.4 a	55.0
$N_{180}P_{90}K_{60}$-S	1.06 c	1.45 a	1.20	58.9 a	46.2 a	55.0
$N_{180}P_{90}K_{0}$-S	1.10 bc	1.49 a	1.20	57.8 ab	44.7 a	55.0
$N_{180}P_{0}K_{90}$-S	1.13 bc	1.49 a	1.20	56.5 ab	44.7 a	55.0

注(Note)：表中每列数值后的相同字母表示处理间差异不显著($LSD_{0.05}$) Values followed by the same letters in each column indicate no significant difference among different treatments ($LSD_{0.05}$).

2.3.2 土壤团聚体　用干筛法和湿筛法分别测定了 0—5 cm 表层土壤 >0.25 mm 的非水稳定性和水稳性团聚体(表 6)。结果表明，除低氮处理外，秸秆还田处理的土壤非水稳性团聚体比对照处理有明显提高(2.00%～3.06%)。当氮肥用量 >150 kg/hm^2 时，秸秆还田＋各种化肥处理之间的团聚体差异不明显。所有秸秆还田处理的水稳性团聚体与对照处理间的差异很大(相差 3 倍以上)，表明秸秆还田对水稳性团聚体形成的促进作用明显。在秸秆还田的处理中，减磷和减钾处理不利于水稳性团聚体的形成，其 $R_{0.25}$ 值最低。因此，秸秆还田与平衡施肥均能有效改善土壤结构性，这与其他学者[17, 34-35]的研究结果一致。

3 结论

在水稻－油菜轮作下，秸秆还田在头两年对水稻的产量无显著影响，其显著影响始于还田后的第三年。秸秆还田处理中水稻产量随施氮量的增加而增加，但获得最高水稻产量的施氮量因年份而有变化。油菜秸秆还田种植水稻的合理施氮量一般在 105 kg/hm^2 左右，比对照处理(N 165 kg/hm^2)减少大约 N 60 kg/hm^2。减磷和减钾处理(第一年除外)能获得高于对照的水稻产量，意味着长期秸秆还田在水稻上每公顷可以节约大约 K_2O 90 kg。在稻草还田条件下，油菜产量基本上随施氮量的增加而增加。由于试验的前五年出现不同程度的冬季干旱，油菜籽产量对施氮量的反映规律不强。该地区油菜高产的合理施氮量在 180～210 kg/hm^2。稻草还田

表 6　水稻－油菜轮作施肥对 0—15 cm 土中 >0.25 mm 团聚体的影响

Table 6　Effects of fertilizer rates on >0.25 mm soil aggregates in rice-rapeseed rotation

处理 Treatment	非水稳性团聚体(干筛法) Non-water-stable aggregates(dry mesh)		水稳性团聚体(湿筛法) Water-stable aggregates (wet mesh)	
	$R_{0.25}$(%)	SD	$R_{0.25}$(%)	SD
$N_{180}P_{90}K_{90}$(CK)	94.91	0.15	6.19	0.73
$N_{120}P_{90}K_{90}$-S	95.12	1.24	26.38	3.19
$N_{150}P_{90}K_{90}$-S	97.11	1.10	23.00	2.12
$N_{180}P_{90}K_{90}$-S	97.06	0.34	23.39	2.39
$N_{210}P_{90}K_{90}$-S	97.97	1.52	24.34	3.50
$N_{180}P_{90}K_{60}$-S	97.33	0.87	23.39	2.29
$N_{180}P_{90}K_{0}$-S	97.39	0.94	21.01	3.02
$N_{180}P_{0}K_{90}$-S	97.49	1.46	20.16	0.60

注(Note)：$R_{0.25}$表示粒径大于 0.25 毫米的非水稳性团聚体百分含量 $R_{0.25}$ stands for percentage of non-water stable aggregates whose particle size is greater than 0.25 mm; SD 表示标准偏差 SD stands for standard deviation.

在油菜季可以节约大约 N 30 kg/hm^2 和 K_2O 90 kg/hm^2，但不施磷肥的油菜产量最低。因此，即使在秸秆还田条件下，也必须施用足够的磷肥，才能获得油菜高产。

在免耕秸秆还田条件下，土壤有机质存在明显的表聚现象，即主要累积在 0—5 cm 土层，而对以下层次的土壤有机质影响很小。增加氮、磷肥能促进 0—5 cm 土层有机质累积，减少钾肥用量则降低土壤有机质累积。与土壤有机质相似，土壤速效氮、磷、钾养分也存在显著的表聚现象，其累积量与肥料施用量相关。因此，减磷处理的土壤速效磷含量最低，减钾处理的土壤速效钾为次低，最低为无秸秆覆盖的化肥处理。长期秸秆覆盖还田能显著降低 0—5 cm 土层容重，但增加下土层的容重；而对空隙度的影响正好相反；对 0—5 cm 土层的非水稳性团聚体影响相对较小，而对水稳性团聚体影响则非常显著。表明长期秸秆覆盖还田对表土层物理性状改善的作用与效果。

参 考 文 献：

[1] Yadvinder-Singh, Bijay-Singh, Ladha J K *et al*. Effects of residue decomposition on productivity and soil fertility in rice-wheat rotation[J]. Soil Science Society of American Journal, 2004, 68: 854-864.

[2] 李逢雨，孙锡发，冯文强，等. 不同还田方式下稻草的腐解速率及养分释放规律研究[J]. 山地学报，2006，24：92-97.
Li F Y, Sun X F, Feng W Q *et al*. Study on decomposition rates and nutrient release patterns of rice straw under different returning methods[J]. Journal of Mountain Science, 2006, 24: 92-97.

[3] 黄娅琳. 稻草还田对水稻的增产效应及对土壤肥力的影响[J]. 土壤肥料，1997，2：18-20.
Huang Y L. Effects of returning rice straw to field on rice yields and soil fertility[J]. Soil and Fertilizer, 1997, 2: 18-20.

[4] 陈敏，胡雄伟，鲁霞飞，等. 不同耕作方式下稻草还田的土壤肥力与产量效应研究[J]. 湖南农业科学，2010，23：48-50，53.
Chen M, Hu X W, Lu X F *et al*. Soil fertility and yield effects of rice straw returning under different cultivation methods[J]. Hunan Agricultural Science, 2010, 23: 48-50, 53.

[5] 陈德章. 稻草还田对土壤理化性质及产量的影响[J]. 土壤肥料，2000，(5)：24-27.
Chen D Z. Effects of returning rice straw to field on soil physio-chemical properties and rice yields[J]. Soil and Fertilizer, 2000, (5): 24-27.

[6] 谭德水，金继运，黄绍文. 长期施钾与秸秆还田对西北地区不同种植制度下作物产量及土壤钾素的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2008，14(5)：886-893.
Tan D S, Jin J Y, Huang S W. Effect of long-term K fertilizer application and returning wheat straw to soil on crop yield and soil K under different planting systems in northwestern China[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2008, 14(5): 886-893.

[7] 苏伟，鲁剑巍，周广生，等. 稻草还田对油菜生长、土壤温度及湿度的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2011，17(2)：366-373.
Su W, Lu J W, Zhou G S *et al*. Influence of straw-returning on rapeseed (*Brassica napus* L.) growth, soil temperature and moisture[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(2): 366-373.

[8] Ogbodo E N. Effect of crop residue on soil chemical properties and rice yield on an Ultisol at Abakaliki, southeastern Nigeria[J].

World Journal of Agricultural Science, 2011, 7 (1): 13-18.

[9] 胡宏祥, 程燕, 马友华, 等. 油菜秸秆还田腐解变化特征及其培肥土壤的作用[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(3): 297-302.
Hu H X, Cheng Y, Ma Y H *et al*. Decomposition characteristics of returned rapeseed straw in soil and effects on soil fertility[J]. China Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(3): 297-302.

[10] Huang S, Zeng Y J, Wu J F *et al*. Effect of crop residue retention on rice yield in China: A meta-analysis[J]. Field Crops Research, 2013, 154: 188-194.

[11] 秦华东, 张玉, 徐世宏, 等. 稻草还田对免耕水稻根系生长及产量的影响[J]. 杂交水稻, 2011, 26(4): 65-67.
Qin H D, Zhang Y, Xu S H *et al*. Effects of straw incorporation on root growth and grain yield of rice under no-tillage[J]. Hybrid Rice, 2011, 26(4): 65-67.

[12] 陈尚洪, 朱钟麟, 刘定辉, 等. 秸秆还田和免耕对土壤养分及碳库管理指数的影响研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(4): 806-809.
Chen S H, Zhu Z L, Liu D H *et al*. Influence of straw mulching with no-till on soil nutrients and carbon pool management index [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2008, 14(4): 806-809.

[13] 武际, 郭熙盛, 鲁剑巍, 等. 水旱轮作制下连续秸秆覆盖对土壤理化性质和作物产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(3): 587-594.
Wu J, Guo X S, Lu J W *et al*. Effects of continuous straw mulching on soil physical and chemical properties and crop yields in paddy-upland rotation system [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(3): 587-594.

[14] 曾研华, 吴建富, 潘晓华, 等. 稻草原位还田对双季稻田土壤理化与生物学性状的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(3): 150-155.
Zeng Y H, Wu J F, Pan X H *et al*. Effects of rice straw incorporation on soil physical, chemical and biological properties in double cropping paddy fields [J]. Journal of Soil Water Conservation, 2013, 27(3): 150-155.

[15] 姚珍, 黄国勤, 张兆飞, 等. 稻田保护性耕作研究: Ⅲ. 秸秆覆盖还田的土壤生态效应[J]. 耕作与栽培, 2006, 6: 1-10.
Yao Z, Huang G Q, Zhang Z F *et al*. Research on conservation cultivation of paddy fields: Ⅲ. Impact of crop residue returning to fields on soil ecology[J]. Tillage and Cultivation, 2006, 6: 1-10.

[16] 牛新胜, 马永良, 牛灵安, 等. 玉米秸秆覆盖冬小麦免耕播种对土壤理化性状的影响[J]. 华北农学报, 2007, 22: 158-163.
Niu X S, Ma Y L, Niu L A *et al*. Effects of corn stalk mulching on soil physio-chemical properties of no-till winter wheat field [J]. Acta Agricultrea and Boreali-Sinica, 2007, 22: 158-163.

[17] 周萍, 潘根兴. 长期不同施肥对黄泥土水稳性团聚体颗粒态有机碳的影响[J]. 土壤通报, 2007, 38(2): 257-260.
Zhou P, Pan G X. Effect of different long- term fertilization treatments on particulate organic carbon in water- stable aggregates of a paddy soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2007, 38(2): 257-260.

[18] Noack S R, McLaughlin M J, Smernik R J *et al*. Phosphorus speciation in plant parts of wheat and canola is affected by phosphorus supply[J]. Plant and Soil, 2014, 378: 125-137.

[19] Haichar F Z, Marol C, Berge O *et al*. Plant host habitat and root exudates shape soil bacterial community structure[J]. The ISME Journal, 2008, (2): 1221-1230.

[20] 李逢雨, 孙锡发, 冯文强, 等. 麦秆、油菜秆还田腐解及养分释放规律研究[J]. 植物营养和肥料学报, 2009, 15 (2): 374-380.
Li F Y, Sun X F, Feng W Q *et al*. Nutrient release patterns and decomposing rates of wheat and rapeseed straw [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15 (2): 374-380.

[21] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.
Bao S D. Soil agrochemical analysis (3rd Ed.) [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2005.

[22] 王玄德, 石孝均, 宋光煜. 长期稻草还田对紫色水稻土肥力和生产力的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2005, 11(3): 302-307.
Wang X D, Shi X J, Song G Y. Effects of long-term rice straw returning on the fertility and productivity of purplish paddy soil [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2005, 11(3): 302-307.

[23] Ponnamperuma F N. The chemistry of submerged soils [J]. Advance in Agronomy, 1972, 24: 29-96.

[24] Havlin J L, Beaton J D, Tisdale S L *et al*. Soil fertility and fertilizers: an introduction to nutrient management (7th Ed.) [M]. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2005.

[25] Stumm W, Morgan J J. Aquatic chemistry[M]. New York: Wiley (Interscience), 1970.

[26] Patrick Wm H Jr, Jugsujinda A. Redox and ph chemistry and nutrient uptake by rice in flooded oxisols of sitiung area of sumatra, indonesia[R]. Louisiana, US: Louisiana State University,1986. 1-50.

[27] Slaton N A, DeLong R E, Emerson M *et al*. Canola response to nitrogen, sulfur, phosphorus, and potassium fertilization in Arkansas[A]. Slaton N A, Wayne E. Sabbe arkansas soil fertility studies - AAES research series 569[C]. Fayetteville, US: University of Arkansas, 2009. 46-50.

[28] 孙克刚, 王亚莉, 鹿智江, 等. 油菜氮磷钾元素的需肥规律和施肥研究[J]. 土壤肥料, 2002, 4: 35-37.
Sun K G, Wang Y L, Lu Z J *et al*. Study on nutritional character of rape and potassium fertilizer application effect[J]. Soil and Fertilizer, 2002, 4: 35-37.

[29] 邹小云, 陈伦林, 李书宇, 等. 氮、磷、钾、硼肥施用对甘蓝型杂交油菜产量及经济效益的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(5): 917-924.
Zou X Y, Chen L L, Li S Y *et al*. Effect of nitrogen, phosphorus, potassium, and boron fertilizers on yield and profit of hybrid rapeseed (*Brassica napus* L.)[J]. Scientia Agricultrea

Sinica, 2011, 44(5): 917-924.

[30] 廖育林, 郑圣先, 聂军, 等. 长期施用化肥和稻草对红壤水稻土肥力和生产力持续性的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(10): 3541-3550.
Liao Y L, Zheng S X, Nie J *et al*. Effects of long-term application of fertilizer and rice straw on soil fertility and sustainability of a reddish paddy soil productivity[J]. Scientia Agricultrea Sinica, 2009, 42(10): 3541-3550.

[31] Onelio F, Llanes E, Garcia-Tellechea J *et al*. Agricultural residues increase rice yield and soil fertility in suburban agriculture in Cuba[EB/OL]. http://www.tropentag.de/2013/abstracts/links/Eichler-Loebermann_uWLHBh7A.php, 2013.

[32] 劳秀荣, 吴子一, 高燕春. 长期秸秆还田改土培肥效应的研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(2): 49-52.
Lao X R, Wu Z Y, Gao Y C. Effect of long-term returning straw to soil on soil fertility[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2002, 18(2): 49-52.

[33] 程科, 李军, 毛红玲, 等. 不同轮耕模式对黄土高原旱作麦田土壤物理性状的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(18): 3800-3808.
Cheng K, Li J, Mao H L *et al*. Effects of different rotational tillage patterns on soil physical properties in rainfed wheat fields of the Loess Plateau[J]. Scientia Agricultrea Sinica, 2013, 46(18): 3800-3808.

[34] 朱钟麟, 舒丽, 刘定辉, 等. 秸秆还田和免耕对水稻土微形态特征的影响[J]. 生态环境, 2008, 17(2): 682-687.
Zhu Z L, Shu L, Liu D H *et al*. Effect of straw mulching and no tillage to paddy soils on micro-morphology features[J]. Ecology & Environment, 2008, 17(2): 682-687.

[35] 张鹏, 贾志宽, 王维, 等. 秸秆还田对宁南半干旱地区土壤团聚体特征的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(8): 1513-1520.
Zhang P, Jia Z K, Wang W *et al*. Effects of straw returning on characteristics of soil aggregates in semi-arid areas of southern Ningxia of China[J]. Scientia Agricultrea Sinica, 2012, 45(8): 1513-1520.