

## 稻田不同免耕轮作模式对土壤性质的影响

李朝苏 汤永禄\* 吴晓丽 李明 刘森 熊涛

(四川省农业科学院 作物研究所,成都 610066)

**摘要** 为研究稻田不同免耕轮作模式对土壤性质的影响,基于2004年在成都平原建立的耕作定位试验,以当地传统麦稻周年旋耕+无秸秆还田(CW-CR)模式为对照,设置麦稻周年免耕+秸秆还田(ZW-ZR)和油稻周年免耕+秸秆还田(ZO-ZR)2种免耕轮作处理,2014年后分层取样测试土壤物理、化学性质和主要酶活性。结果表明:和CW-CR相比,连续免耕配合秸秆还田促进土壤有机碳和碱解氮含量的提高,土壤表层(0~7.5 cm)增幅分别为41.3%~52.2%和33.6%~33.7%,差异达显著水平。免耕模式不同土层有效钾含量显著低于对照模式,降幅19.8%~25.7%。连续免耕促进直径>2 mm的水稳性团聚体的大幅增加,但对不同土层容重、孔隙度和最大持水量等物理性质及土壤酶活性影响较小。周年免耕条件下,麦稻模式较油稻模式更利于表层土壤>5 mm水稳性团聚体的形成,其他多数指标无显著差异。0~7.5 cm土壤质量指数(Soil quality index,SQI)排序为ZO-ZR>ZW-ZR>CW-CR。连续免耕可以提高小麦和油菜产量,但水稻产量不及对照模式,ZW-ZR和ZO-ZR模式平均降幅8.7%和4.6%。本研究条件下,免耕可改善稻田土壤质量,ZO-ZR模式优于ZW-ZR模式,但土壤质量的改善与水稻生产力的提高不同步。

**关键词** 免耕; 麦稻轮作; 油稻轮作; 土壤性质; 作物产量

中图分类号 S344

文章编号 1007-4333(2019)05-0020-10

文献标志码 A

## Soil properties affected by different rotation systems under long-term zero tillage in paddy field

LI Chaosu, TANG Yonglu\*, WU Xiaoli, LI Ming, LIU Miao, XIONG Tao

(Crop Research Institute, Sichuan Academy of Agricultural Science, Chengdu 610066, China)

**Abstract** The effects of different rotation systems under zero tillage on soil properties were compared in this study. A long-term experiment involving three cropping systems was established in Chengdu Plain in 2004, which were rotary tillage without residue retention under wheat-rice rotation, which was local conventional practice (CW-CR), year-round zero tillage combined with residue mulching under wheat-rice system (ZW-ZR) and zero tillage with residue retention under oilseed rape-rice system (ZO-ZR). After 10 completed rotations, soil samples were collected from four soil layers (0–7.5, 7.5–15.0, 15.0–30.0, 30.0–45.0 cm) to determine its soil physical and chemical properties and enzyme activity. Compared with CW-CR, continuous zero tillage increased topsoil organic carbon and available nitrogen content by 41.3%–52.2% and 33.6%–33.7%, respectively. However, soil available potassium content was significantly reduced under zero tillage systems in all four soil layers. Zero tillage also had a potential to increase the formation of large water-stable aggregates (diameter > 2 mm), while, it had little effect on soil bulk density, porosity, maximum water holding capacity and enzyme activity. Under continuous zero tillage system, wheat-rice rotation was more favorable to the formation of water-stable aggregates with diameter more than 5 mm in the topsoil than oilseed rape-rice rotation, and there was no significant difference in other parameters for two systems. The highest soil quality index

收稿日期: 2018-05-10

基金项目: 四川省青年基金(2016JQ0017); 国家小麦产业技术体系(CARS-03)

第一作者: 李朝苏, 副研究员, 主要从事耕作制度与作物栽培技术研究, E-mail: xiaoli1755@163.com

通讯作者: 汤永禄, 研究员, 主要从事耕作制度与作物栽培技术研究, E-mail: ttyycc88@163.com

(SQI) in 0–7.5 cm soil depth was recorded in ZO-ZR, and the lowest was in CW-CR. Moreover, zero tillage was favorable for wheat and oilseed rape growth, but decreased rice yield by 8.7% and 4.6% averagely due to poor irrigated water retention. In the present study, zero tillage is beneficial to improve soil quality, especially ZO-ZR practice, but limits rice production incensement.

**Keywords** zero tillage; wheat-rice rotation; oilseed rape-rice rotation; soil properties; crop yield

以免耕和秸秆覆盖还田为核心的保护性耕作技术具有保水固土和节本省工等优势,已成为现代农业发展方向之一<sup>[1]</sup>。另一方面,保护性耕作对产量和土壤质量的影响还受作物种类和轮作方式的影响<sup>[2]</sup>,明确免耕和秸秆还田对稻田主导种植模式的长期效应,对于优化区域耕作技术有重要意义。

以往研究表明,免耕栽培利于稻田土壤有机质含量提升和物理性质改善,配合长期秸秆还田,这种积极作用更为明显<sup>[3-5]</sup>。南亚地区,稻麦轮作条件下连续免耕15年,土壤表层有机碳增加19.0%~38.8%<sup>[5]</sup>;而在长江流域,5年以内的稻麦免耕土壤表层有机质增幅5%~10%<sup>[3-4]</sup>。免耕减少了土壤扰动,水稳性团聚体和土壤孔隙度比例均有升高,增幅因土壤类型而异<sup>[5]</sup>。稻油轮作模式下,长期免耕配合秸秆还田,土壤表层有机质的增幅也在5%以上<sup>[6-7]</sup>。

目前,免耕对土壤养分变化的影响没有得出一致结论,短期免耕可增加土壤全氮和有效氮含量,但土壤磷钾含量有增有减<sup>[3-4,8]</sup>,这种变化也受轮作模式的影响<sup>[9]</sup>。虽然免耕秸秆还田对稻茬小麦普遍有增产作用,但对水稻产量的影响因气候条件、土壤类型和种植方式不同而异<sup>[10]</sup>。和南亚地区相比,国内稻田耕作定位试验鲜有报道,有关免耕条件下的土壤反应多是短期效应,且相关研究多是比较同一轮作模式在不同耕作处理下的反应,缺乏不同轮作模式间的比较。

本研究基于2004年秋季在四川省广汉市建立的耕作定位试验,比较不同免耕轮作模式下稻田土壤理化性质和作物产量的变化,旨在为区域稻田耕作方式优化、农业可持续发展提供理论和技术依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

定位试验位于四川省广汉市连山镇锦花村。试验区年平均气温16.3℃,最冷月平均气温5.6℃,最热月平均气温25.5℃;平均日照时数1229h,年降水量800~900mm,主要集中在夏秋季节。当地

种植模式以小麦-水稻轮作为主。供试土壤为粘壤,试验开始时0~15cm土壤有机质含量43.6mg/kg、全氮2.79mg/kg、碱解氮226.0mg/kg、有效磷26.0mg/kg和有效钾为130.6mg/kg。

试验自2004年小麦秋播时开始,3种模式,每个模式为不同耕作方式、秸秆处理方式与轮作模式的组合,分别为麦稻周年旋耕+无秸秆还田(CW-CR)、麦稻周年免耕+秸秆还田(ZW-ZR)和油稻周年免耕+秸秆还田(ZO-ZR)3种模式。其中CW-CR为试验区域传统种植模式,免耕秸秆还田小区中,小麦和水稻秸秆均全量覆盖还田,油菜仅角果皮还田,其他植株部分移出田外。小区面积89.25m<sup>2</sup>,3次重复,随机排列。

小麦品种为‘川麦42’;油菜品种2004—2007年为‘川油21’,2008—2010年为‘川油58’,2011—2012年为‘华油杂10号’,2013年以后为‘嘉油占’;水稻品种2005—2008年为‘II优838’,2009年以后为‘川香9838’。每年不同处理的小麦、水稻播栽期、播种量和施肥量保持一致,而年际间略有差异。其中小麦采用2BJ-2型简易播种机播种,播种量150kg/hm<sup>2</sup>,年际播期变幅10月28日—11月2日;全生育期施纯N135kg/hm<sup>2</sup>,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>90kg/hm<sup>2</sup>,K<sub>2</sub>O90kg/hm<sup>2</sup>。2008年以前,油菜采用育苗移栽方式种植,9月18日育苗,10月下旬移栽,移栽密度9.0×10<sup>4</sup>株/hm<sup>2</sup>,2009年后采用免耕直播方式播种,播期10月6日前后,种植密度22.5×10<sup>4</sup>株/hm<sup>2</sup>,施肥量和小麦一致。水稻采用早育秧,4月上旬育秧,移栽期受小麦收获期影响,变幅5月25日—6月3日,移栽规格27cm×20cm,全生育期施纯N165kg/hm<sup>2</sup>,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>90kg/hm<sup>2</sup>,K<sub>2</sub>O90kg/hm<sup>2</sup>。

CW-CR模式在每季作物收获后,将小区出产的秸秆全部移出田外,2008年以前采用人工翻挖方式整地,之后再行作物播栽。2009年起采用微耕机旋耕整地(动力6.3kW),旋耕深度15cm左右,小麦播前旋耕2遍,之后播种;水稻移栽前先泡田12h,之后旋耕2次,再进行栽秧。ZW-ZR模式在水稻收获后,用铡刀将秸秆切碎,小麦播种施肥后用

于盖种;小麦收获后用铡刀将秸秆切碎覆盖于地表,之后进行水稻移栽。ZO-ZR模式在水稻收获后,秸秆也用铡刀将切碎,油菜采用育苗移栽时,将粉碎的秸秆平铺于小区地表,之后移栽。采用直播后,稻草用于播后盖种。油菜收获后,将角果皮均匀铺于地表,之后进行水稻移栽,其他管理措施同当地高产田。

## 1.2 调查内容及方法

### 1.2.1 土壤养分含量测定

在定位10年后,进行土壤取样测试养分含量,取样时间为2014年水稻收获后的空闲期。每个小区4个点,分布在小区4个角上,取样点距离两侧田埂均为2 m。用取土钻分层取0~7.5、7.5~15.0、15.0~30.0和30.0~45.0 cm土壤,同一小区内同层土壤等量均匀混合,放置在阴凉处风干,之后测定土壤pH、有机碳、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷和有效钾含量,其中有机碳采用重铬酸钾法,全氮采用半微量凯氏法,全磷采用钼锑抗比色法,全钾采用火焰光度法,碱解氮采用NaOH扩散法、有效磷采用0.5 mol/L NaHCO<sub>3</sub>比色法,有效钾采用醋酸铵浸提火焰光度法<sup>[11]</sup>。

### 1.2.2 水稳性团聚体分布测定

采用1.2.1中的风干土壤进行测试,测定方法为湿筛法<sup>[12]</sup>。2015年小麦收获10 d后按照1.2.1中描述的方法再次取4个土层的土壤,风干后测定水稳性团聚体分布。

### 1.2.3 土壤容重、非毛管孔隙度、毛管孔隙度、总孔隙度和最大持水量测定

在2014年水稻收后的空闲期、2015年小麦收后10 d进行测定。每小区取对角线上分布的2点,挖开剖面后,分层(0~7.5、7.5~15.0、15.0~30.0 cm和30.0~45.0 cm)用环刀(体积100 cm<sup>3</sup>)取原状土,参考卫茂荣<sup>[13]</sup>、Liu等<sup>[14-15]</sup>的方法测定土壤容重、毛管孔隙度、非毛管孔隙度和最大持水量。

取样前,将环刀一侧有孔盖子里覆盖一层滤纸,并称量环刀+有孔盖+滤纸的总重量( $W_1$ ),取样后,测定 $W_1$ 与原状土柱总重( $W_2$ ),之后将环刀带有滤纸盖的一端放入平底容器中,注入水,水面高度低于环刀上沿1 cm,吸水14 h,之后称重( $W_3$ )。称重后,放在干沙上2 h,此时环刀中土壤的非毛细管水已全部流出,但毛细管中仍充满水分,再次称重( $W_4$ )。最后将环刀放置在75 °C烘箱中连续烘干

48 h至恒重,再次称重( $W_5$ )。

土壤容重(Bulk density, BD),非毛管孔隙度(Non-capillary porosity, NCP),毛管孔隙度(Capillary porosity, CP),总孔隙度(Total porosity, TP)和最大持水量(Maximum water-holding capacity, MWHC)按照以下公式进行计算:

$$BD = (W_5 - W_1) / 100, \text{g/cm}^3$$

$$MWHC = (W_3 - W_5) / (W_5 - W_1) \times 100\%$$

$$NCP = (W_3 - W_4) / (W_5 - W_1) \times BD \times 100\%$$

$$CP = (W_4 - W_5) / (W_5 - W_1) \times BD \times 100\%$$

$$TP = NCP + CP$$

### 1.2.4 土壤酶活性

采用1.2.1和1.2.2中水稻、小麦收获后的风干土进行测定,其中过氧化氢酶采用高锰酸钾滴定法,转化酶采用3,5-二硝基水杨酸比色法,酸性和碱性磷酸酶采用磷酸苯二钠比色法<sup>[16-17]</sup>。

### 1.2.5 土壤质量综合评价

本研究中,主要土壤参数的差异主要出现在表层0~7.5 cm,7.5 cm土层以下的多数参数差异不显著,故参考张仁陟<sup>[18]</sup>的方法计算各处理表层土壤质量指数(Soil quality index, SQI)。选取的指标包括2014年水稻收获后测定的土壤养分参数、容重、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、最大持水量、>0.25 mm的水稳性团聚体总比例以及4个酶活性参数。由于本研究中处理仅有3个,且选取的参数除容重外均与土壤质量呈正相关关系,将各参数按照如下公式进行标准化,不再进行隶属度值计算。容重与土壤质量具有负相关关系,将原始值取倒数后再进行标准化。

$$X_i = (x_i - x_{\text{mean}}) / \sigma$$

式中: $X_i$ 为各参数标准化后的数值, $x_i$ 为各参数实际测定值, $x_{\text{mean}}$ 为3个处理测定值的平均数, $\sigma$ 为3个处理测定值的标准差。在此基础上,开展主成分分析,第一、第二主成分累计贡献率为100%,基于前2个主成分因子负荷量计算各因子对土壤质量作用大小,确定其权重。

$$W_i = FL_i / \sum_{i=1}^n (FL_i)$$

式中: $W_i$ 是第*i*项参数对土壤质量影响的权重, $FL_i$ 是该参数的负荷量, $n$ 为选择的参数个数。之后按照加乘法则计算土壤质量指数。

$$SQI = \sum_{i=1}^n W_i \times X_i$$

式中:SQI 为土壤质量指数,  $X_i$  为各参数标准化后的数值,  $W_i$  为第  $i$  项参数的权重,  $n$  为选择的参数个数。

### 1.2.6 作物产量

各小区每年实收测产,小麦和水稻含水量调整至 13%,油菜以晒干后的重量计算。按照水稻 15.5 MJ/kg、小麦 15.7 MJ/kg<sup>[19]</sup> 和油菜 25.9 MJ/kg<sup>[20]</sup> 的折能系数将籽粒产量换算成能量值,用于不同处理间比较。

### 1.2.7 数据统计分析

采用 EXCELL 和 SPSS 20.0 对数据进行整理和统计分析,处理间各参数差异性检验采用新复极差法(Duncan 法,  $P < 0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同免耕轮作模式对稻田土壤养分的影响

不同耕作和轮作模式持续 10 周年后的土壤养

分含量见表 1。结果表明,不同处理下各土层土壤养分变化因指标不同而异。与 CW-CR 相比,周年免耕配合秸秆还田,可以促进 0~7.5 cm 土壤表层有机碳、碱解氮和有效磷含量的提高,增幅分别为 41.3%~52.2%、33.6%~33.7% 和 26.3%~47.5%,差异达显著水平,7.5 cm 以下各土层的有机碳、碱解氮处理间差异不显著。免耕栽培降低土壤全钾和有效钾含量,其中有效钾的降幅 19.8%~25.7%,各土层与 CW-CR 模式差异均达显著水平 ( $P < 0.05$ ),0~7.5 cm 和 15.0~30.0 cm 土层差异达极显著水平 ( $P < 0.01$ )。

免耕条件下,麦稻和油稻模式各土层多数养分参数差异不显著。麦稻模式土壤表层 pH 和全钾显著低于油稻模式。0~15.0 cm 土层,麦稻模式的有效磷含量低于油稻模式,但 15.0~45.0 cm 土层又高于油稻模式,麦稻轮作促进了有效磷向土壤深层的迁移。

表 1 长期耕作、轮作模式对稻田土壤养分的影响

Table 1 Effect of long-term tillage practices and rotations on soil nutrient contents of paddy field

土层深度/ cm Soil depth	处理 Treatment	pH	有机碳/ (g/kg) Organic carbon	全氮/ (g/kg) Total nitrogen	全磷/ (g/kg) Total phosphorus	全钾/ (g/kg) Total potassium	碱解氮/ (mg/kg) Available nitrogen	有效磷/ (mg/kg) Available phosphorus	有效钾/ (mg/kg) Available potassium
0~7.5	CW-CR	7.05 ab	23.0 b	2.29 a	1.11 a	17.4 a	143.7 b	40.0 b	199.3 a
	ZW-ZR	6.77 b	35.0 a	2.66 a	1.27 a	12.6 b	192.1 a	50.5 ab	148.8 b
	ZO-ZR	7.28 a	32.5 a	2.73 a	1.18 a	16.3 a	192.1 a	59.0 a	153.7 b
7.5~15.0	CW-CR	6.97 a	22.5 a	2.23 a	1.02 a	16.8 a	136.5 a	38.3 a	186.8 a
	ZW-ZR	7.01 a	26.7 a	2.12 a	1.13 a	13.0 a	133.4 a	33.2 a	142.0 b
	ZO-ZR	7.27 a	23.4 a	2.15 a	1.04 a	14.8 a	139.0 a	38.2 a	138.8 b
15.0~30.0	CW-CR	7.24 a	15.0 a	1.45 a	0.77a	17.0 a	76.6 a	15.9 a	190.9 a
	ZW-ZR	7.13 a	18.2 a	1.70 a	0.86 a	13.0 b	80.8 a	14.8 ab	147.0 b
	ZO-ZR	7.14 a	15.8 a	1.49 a	0.80 a	15.4 ab	115.0 a	9.5 b	143.5 b
30.0~45.0	CW-CR	7.44 a	9.4 a	0.91a	0.61 a	16.9 a	39.6 a	9.3 a	186.5 a
	ZW-ZR	7.42 a	10.6 a	0.90 a	0.59 a	13.1 b	43.0 a	8.2 ab	149.6 b
	ZO-ZR	7.58 a	12.5 a	0.93 a	0.58 a	15.0 ab	40.7 a	5.5 b	141.0 b

注: CW-CR, 麦稻周年旋耕+无秸秆还田; ZW-ZR, 麦稻周年免耕+秸秆还田; ZO-ZR, 油稻周年免耕+秸秆还田; 同一土层各参数后小写字母不同表示差异达 5% 显著水平。下同。

Note: CW-CR, rotary tillage without residue retention under wheat-rice rotation; ZW-ZR, year-round zero tillage combined with residue mulching under wheat-rice system; ZO-ZR, year-round zero tillage with residue retention under oilseed rape-rice system; The data for each parameter in the same soil depth followed by different letters are significantly different at the 0.05 probability level. The same below.

## 2.2 不同免耕轮作模式对稻田土壤物理性质的影响

本研究是在水旱轮作条件下进行,稻田耕作后会有一个浸水沉积的过程,故在试验10年后的水稻和小麦收获后分别取样测试。结果表明(表2),除0~7.5 cm土层的毛管孔隙度外,其他物理性状如

容重、非毛管孔隙度、最大持水量以及7.5 cm土层以下的毛管孔隙度处理间差异均未达到显著水平。土壤耕作后,表层毛管孔隙度略有降低;免耕条件下,麦稻模式的毛管孔隙度低于油稻模式,2个取样时期趋势一致。

表2 长期耕作、轮作模式对稻田土壤物理性质的影响

Table 2 Effect of long-term tillage practices and rotations on soil physical properties of paddy field

土层深度/ cm Soil depth	处理 Treatment	2014年水稻收获后 After rice harvest in 2014					2015年小麦收获后 After wheat harvest in 2015				
		容重/ (g/cm <sup>3</sup> ) Bulk density	最大持 水量/% Maximum water- holding capacity	非毛管孔 隙度/% Non- capillary porosity	毛管孔 隙度/% Capillary porosity	总孔隙 度/% Total porosity	容重/ (g/cm <sup>3</sup> ) Bulk density	最大持 水量/% Maximum water- holding capacity	非毛管孔 隙度/% Non- capillary porosity	毛管孔 隙度/% Capillary porosity	总孔 隙度/% Total porosity
0~7.5	CW-CR	1.23 a	41.0 a	5.79 a	44.4 b	50.2 a	1.34 a	36.5 a	8.83 a	40.0 b	48.9 a
	ZW-ZR	1.25 a	39.1 a	3.89 a	44.7 b	48.6 a	1.24 a	41.6 a	10.74 a	40.8 ab	51.5 a
	ZO-ZR	1.19 a	43.9 a	5.06 a	47.0 a	52.1 a	1.25 a	42.2 a	9.10 a	43.2 a	52.3 a
7.5~15.0	CW-CR	1.33 a	34.1 a	0.93 a	44.4 a	45.4 a	1.37 a	35.0 a	7.82 a	39.7 a	47.5 a
	ZW-ZR	1.33 a	34.7 a	2.88 a	43.1 a	46.0 a	1.43 a	31.9 a	5.69 a	39.3 a	45.0 a
	ZO-ZR	1.37 a	33.9 a	2.94 a	43.3 a	46.2 a	1.40 a	34.4 a	6.36 a	41.5 a	47.9 a
15.0~30.0	CW-CR	1.54 a	26.3 a	1.13 a	39.4 a	40.5 a	1.59 a	27.3 a	4.41 a	38.8 a	43.2 a
	ZW-ZR	1.51 a	27.9 a	1.95 a	39.9 a	41.8 a	1.59 a	27.0 a	3.60 a	39.3 a	42.9 a
	ZO-ZR	1.51 a	28.1 a	2.33 a	40.0 a	42.3 a	1.54 a	27.7 a	3.66 a	38.8 a	42.5 a
30.0~45.0	CW-CR	1.51 a	26.9 a	1.33 a	39.4 a	40.7 a	1.58 a	27.0 a	3.48 a	39.2 a	42.7 a
	ZW-ZR	1.53 a	26.5 a	1.49 a	38.9 a	40.4 a	1.57 a	26.4 a	2.72 a	38.6 a	41.3 a
	ZO-ZR	1.50 a	28.2 a	2.21 a	39.9 a	42.1 a	1.51 a	28.8 a	4.10 a	39.5 a	43.6 a

## 2.3 不同免耕轮作模式对稻田土壤水稳性团聚体分布的影响

土壤大团聚体含量是评价土壤质量的重要指标,免耕秸秆还田可促进团聚体形成并提高其水稳性<sup>[21]</sup>。本研究也证实了这一结论(表3),与CW-CR相比,持续免耕会大幅增加直径>2 mm的水稳性团聚体比例,尤其在0~15.0 cm土层增幅更为明显,2个取样时期表现一致。免耕条件下,2种轮作模式土壤表层水稳性土壤团聚体粒径分布也有明显差异,粒径>5 mm的比例,麦稻模式高于油稻模式。7.5 cm土层以下2种模式的各粒径比例差异

不显著。

## 2.4 不同免耕轮作模式对稻田土壤酶活性的影响

土壤酶对于消除土壤毒害物质、促进有机物分解和提高土壤养分供给能力有重要作用。本研究表明确(表4),除水稻收获后0~7.5 cm土层转化酶和7.5~15.0 cm土层过氧化氢酶外,其他各土层处理间4种土壤酶(过氧化氢酶、转化酶、酸性磷酸酶和碱性磷酸酶)活性差异均不显著。CW-CR模式表层土壤转化酶活性偏低。免耕条件下,油稻模式土壤表层的转化酶和碱性磷酸酶活性高于麦稻模式,但差异未达到显著水平,这可能与其土壤pH偏高有关。

表 3 长期耕作、轮作模式对稻田土壤水稳性团聚体分布的影响

Table 3 Effect of long-term tillage practices and rotations on the distribution of soil water-stable aggregates of paddy field

土层深度/ cm Soil depth	处理 Treatment	2014 年水稻收获后 After rice harvest in 2014					2015 年小麦收获后 After wheat harvest in 2015				
		>5.0	5.0~	2.0~	0.5~	<0.25	>5.0	5.0~	2.0~	0.5~	<0.25
		mm	2.0 mm	0.5 mm	0.25 mm	mm	mm	2.0 mm	0.5 mm	0.25 mm	mm
0~7.5	CW-CR	35.3 b	18.5 b	24.4 a	7.7 a	14.2 a	25.5 b	21.5a	28.1 a	9.4 a	15.5 a
	ZW-ZR	47.8 a	22.8 ab	17.2 b	3.6 c	8.6 b	40.3 a	22.9 a	20.2 c	5.7 b	10.9 a
	ZO-ZR	35.4 b	24.1 a	24.2 a	5.9 b	10.4 b	32.0 b	24.8 a	24.1 b	6.6 b	12.5 a
7.5~15.0	CW-CR	40.5b	20.0 b	21.2 a	6.1 a	12.3 a	35.6 b	24.7a	21.9 a	6.5 a	11.3 a
	ZW-ZR	47.7 ab	25.3 a	16.2 b	3.5 b	7.3 b	49.6 a	21.4 a	16.0 b	4.4 b	8.7 b
	ZO-ZR	50.0 a	23.8 a	14.2 b	3.4 b	8.7 ab	49.9 a	23.3 a	15.8 b	3.8 b	7.3 b
15.0~30.0	CW-CR	42.4 a	24.4 a	16.6 a	5.6 a	10.9 a	33.4 a	21.5 a	22.9a	8.2 a	14.1 a
	ZW-ZR	48.0 a	23.9 a	14.0 a	4.4 a	9.7 a	38.5 a	22.9 a	20.9 a	6.9 a	10.9 a
	ZO-ZR	48.9 a	21.8 a	13.9 a	4.9 a	10.6 a	41.9 a	21.1 a	19.3 a	6.5 a	11.1 a
30.0~45.0	CW-CR	25.1 a	23.8 a	22.4 a	10.0 a	18.7a	28.9 a	14.7 a	27.8 a	11.7 a	16.9 a
	ZW-ZR	36.5 a	23.4 a	18.9 a	7.4 a	13.8 a	28.3 a	23.0 a	21.9 a	10.3 a	16.5 a
	ZO-ZR	37.8 a	23.8 a	17.3 a	7.0 a	14.1 a	34.9 a	20.7 a	22.7 a	8.2 a	13.5 a

表 4 长期耕作、轮作模式对稻田土壤酶活性的影响

Table 4 Effect of long-term tillage practices and rotations on the activity of soil enzymes of paddy field

土层深度/ cm Soil depth	处理 Treatment	2014 年水稻收获后 After rice harvest in 2014				2015 年小麦收获后 After wheat harvest in 2015			
		过氧化氢酶/ 转化酶/ (U/ (g·h)) Catalase	酸性 转化酶/ (mg/ (g·d)) Invertase	酸性 磷酸酶/ (mg/ (g·d)) Acid phosphatase	碱性 磷酸酶/ (mg/ (g·d)) Alkaline phosphatase	过氧化氢酶/ 转化酶/ (U/ (g·h)) Catalase	酸性 转化酶/ (mg/ (g·d)) Invertase	酸性 磷酸酶/ (mg/ (g·d)) Acid phosphatase	碱性 磷酸酶/ (mg/ (g·d)) Alkaline phosphatase
		0~7.5	CW-CR	9.36 a	18.18 b	0.88 a	1.20 a	10.5 a	28.29 a
ZW-ZR	9.36 a		25.40 ab	1.00 a	1.13 a	9.96 a	25.83 a	3.63 a	4.12 a
ZO-ZR	9.66 a		30.11 a	1.39 a	1.34 a	10.38 a	32.29 a	3.35 a	4.47 a
7.5~15.0	CW-CR	9.06 a	11.10 a	0.70 a	1.10 a	10.38 a	13.35 a	3.45 a	3.62 a
	ZW-ZR	8.58 b	14.12 a	0.85 a	0.78 a	9.60 a	11.74 a	2.84 a	3.17 a
	ZO-ZR	8.46 b	13.63 a	1.27 a	1.07 a	9.96 a	11.71 a	2.67 a	3.63 a
15.0~30.0	CW-CR	7.56 a	5.10 a	0.57 a	0.42 a	9.12 a	4.80 a	1.40 a	2.36 a
	ZW-ZR	7.50 a	6.22 a	0.63 a	0.46 a	8.94 a	5.18 a	1.51 a	2.18 a
	ZO-ZR	7.62 a	7.54 a	0.73 a	0.41 a	9.54 a	5.47 a	1.36 a	2.49 a
30.0~45.0	CW-CR	6.96 a	3.17 a	0.38 a	0.17 a	8.76 a	1.46 a	0.70a	1.06 a
	ZW-ZR	6.60 a	2.36 a	0.41 a	0.11 a	8.52 a	1.66 a	0.59 a	0.99 a
	ZO-ZR	6.90 a	2.95 a	0.49 a	0.08 a	8.94 a	1.20 a	0.52 a	0.89 a

## 2.5 不同免耕轮作模式对稻田土壤质量指数的影响

土壤质量是土壤属性综合作用的结果<sup>[18]</sup>,在不考虑各土壤参数交互作用条件下,本研究采用加乘法则来计算土壤综合质量指数(SQI)。为消除量纲影响,各指标参数值进行了标准化处理,故 SQI 有负数出现,本研究仅比较处理间的差异,不对绝对数值进行评判。表 5 结果表明,3 个处理 0~7.5 cm 土层 SQI 排序为 ZO-ZR>ZW-ZR>CW-CR,免耕栽培的土壤综合质量普遍好于传统旋耕模式,而油稻免耕又优于麦稻免耕。

## 2.6 不同免耕轮作模式对稻田产量的影响

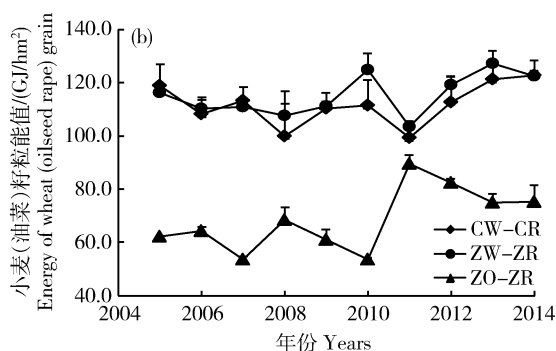
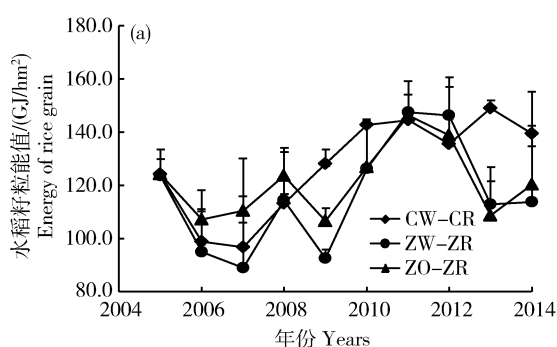
表 5 和图 1 以能量的形式比较 3 个处理 2004—2015 年作物产量变化和平均产出情况。虽然年际间作物产量有较大波动,多数年份 ZW-ZR 水稻产量低于 CW-CR(图 1(a));试验前 3 年,ZO-

ZR 水稻产量略高于 CW-CR,之后也低于 CW-CR。试验 8 年后,2 种免耕模式和 CW-CR 水稻产量差距有增大趋势。对于小麦(图 1(b)),ZW-ZR 模式产量多数年份略高于 CW-CR 模式。ZO-ZR 油菜产量随着定位时间延长也有上升趋势。从 10 年平均结果来看(表 5),ZW-ZR 和 ZO-ZR 水稻产量较 CW-CR 分别降低 8.7% 和 4.6%,周年产出降低 3.2% 和 20.6%。虽然免耕栽培有利于土壤质量的改善,但免耕系统下作物根系、土壤生物活动形成的通道保持畅通<sup>[22]</sup>,保水性下降,灌溉水渗漏加快。水稻移栽前泡田旋耕,这些通道被堵塞,保水能力增强。本研究中,因水分渗漏,免耕处理的水稻在移栽后多数时间处于水分胁迫状态,返青期延迟,分蘖力下降,导致产量下降。

表 5 长期耕作、轮作模式对稻田 0~7.5 cm 土壤质量指数(SQI)、年均作物平均籽粒能值的影响

Table 5 Effect of long-term tillage practices and rotations on soil quality index (SQI) of 0—7.5 cm depth and averaged energy of grain for each crop and annual production from 2005 to 2014

处理 Treatment	土壤质量指数 SQI	水稻籽粒能值/ (GJ/hm <sup>2</sup> ) Energy of rice grain	小麦(油菜)籽粒能值/ (GJ/hm <sup>2</sup> ) Energy of wheat (oilseed rape) grain	周年籽粒能值/ (GJ/hm <sup>2</sup> ) Energy of annual production
CW-CR	-0.39	127.2	111.7	239.0
ZW-ZR	-0.27	116.1	115.3	231.4
ZO-ZR	0.66	121.3	68.5	189.8



CW-CR, 麦稻周年旋耕+无秸秆还田; ZW-ZR, 麦稻周年免耕+秸秆还田; ZO-ZR, 油稻周年免耕+秸秆还田

CW-CR, rotary tillage without residue retention under wheat-rice rotation; ZW-ZR, year-round zero tillage combined with residue mulching under wheat-rice system; ZO-ZR, year-round zero tillage with residue retention under oilseed rape-rice system

图 1 2005—2014 年耕作、轮作模式对水稻(a)和小麦(油菜)(b)籽粒能值的影响

Fig. 1 Effect of long-term tillage practices and rotations on energy of rice grain (a) and wheat (oilseed rape) grain (b) from 2005 to 2014

### 3 讨论

大量研究证实,保护性耕作会促进土壤有机碳的增加<sup>[3-4]</sup>,本研究也不例外,和对照模式相比,2种稻田免耕模式土壤表层有机碳增幅均在40%以上。这一方面得益于的秸秆碳的分解转化,另一方面,免耕避免了对土壤结构的破坏,也减少了有机碳的氧化<sup>[23]</sup>。免耕秸秆覆盖于地表,土壤表层有机碳增幅最大,7.5 cm土层以下有机碳也有增加,但和对照模式的差异缩小。免耕条件下,麦稻模式的秸秆还田量大于油稻模式,其表层有机碳含量也较高。

耕作措施对土壤特性的影响是持续和累积的过程。本研究在定位5年时测试的土壤表层养分参数(全氮、速效氮、速效磷和速效钾)处理间差异均未达到显著水平(结果未列出)。随着定位时间的延长,处理间的差异逐渐增大。和CW-CR相比,ZW-ZR模式的土壤pH有明显下降趋势,而ZO-ZR模式土壤pH有所升高。免耕土壤pH下降在国外的研究也有报道<sup>[22]</sup>,并将这种变化归因于施肥和秸秆分解所致。本研究中2种免耕模式施肥量一致,推测这种变化可能与秸秆分解和作物根系分泌物种类都有关系。作物秸秆中含有大量营养,秸秆还田还可以增强对铵态氮的吸附作用,减少氨挥发<sup>[24]</sup>,免耕秸秆还田处理的土壤表层全氮和碱解氮含量均高于对照。但免耕模式的全钾和有效钾含量均不及对照模式。在农牧交错区实施保护性耕作,土壤表层有效钾含量较翻耕处理增加77%<sup>[25]</sup>。本研究中钾肥用量为当地作物生产推荐量,能够满足作物生长需要,水稻季灌溉水渗漏可能造成了钾肥的淋洗,具体原因还需要深入研究。免耕条件下,2种轮作模式对土壤有效磷含量影响较小,但麦稻模式促进了有效磷往深层迁移。

本研究进一步证实,对土壤物理性质的影响,耕作措施大于种植模式,影响最大的指标是水稳性团聚体分布。土壤团聚体由土壤颗粒胶联形成,高强度耕作后,大团聚体结构遭到破坏,水稳性下降。而免耕减少了土壤扰动,土壤结构相对稳定,大团聚体的稳性增强,这一结果与以往研究一致<sup>[21]</sup>。在土壤表层,免耕麦稻轮作粒径>5 mm水稳性团聚含量大于油稻轮作,这可能与其秸秆还田量更大、小麦种植密度高和根系生物量大有关。

土壤酶活性大小和土壤肥力、理化性质密切相

关,免耕土壤酶活性普遍高于翻耕土壤,这得益于土壤有机碳含量增加<sup>[26]</sup>。本研究中,不同耕作和轮作模式下土壤酶活性差异相对较小。试验地所处的成都平原土壤肥力较高,本试验中CW-CR模式10年未实施秸秆还田,有机碳含量仍在20 g/kg以上,这在一定程度上缓解了因耕作方式对土壤酶活性的影响。油稻模式下,土壤表层的pH相对较高,其碱性磷酸酶、转化酶的活性也高于其他处理,这可能是该处理表层土壤有效磷含量较高的原因之一。

本研究中,不同处理间的土壤参数差异主要出现在0~7.5 cm土壤表层,免耕模式表层土壤SQI大于旋耕模式,免耕下油稻模式高于麦稻模式。主成分分析中,对于PC1贡献较大的是碱解氮、有效磷和转化酶,对于PC2贡献较大的依次为碱性磷酸酶、总孔隙度和全钾含量。免耕和旋耕模式间碱解氮、有效磷含量和转化酶活性均有显著差异,该3个参数是本研究中免耕土壤SQI较高主要原因。和麦稻轮作相比,油稻轮作在全钾、碱性磷酸酶、有效磷方面均有优势,这可能是后者SQI较高的原因。

旱地中,土壤质量的改善与作物产量的提高具有同步性<sup>[27]</sup>。本研究中,水旱两季作物的产量变化趋势存在明显差异。对于小麦和油菜,免耕处理的优势更强,这与免耕条件下土壤质量的提升,秸秆覆盖后土壤保水性增强都有关系。而在水稻季,长期免耕造成了土壤保水性下降,水稻返青迟,分蘖力弱,产量受到严重影响,定位8年后,免耕与旋耕模式水稻产量差距有增大趋势,类似结果在南亚也有报道<sup>[28]</sup>。因此,在水旱轮作区,还需要进一步优化耕作措施及其配套技术,以实现土壤质量和作物生产力的同步提高。

### 4 结论

1)本试验条件下,免耕配合秸秆还田有利于土壤有机碳、碱解氮含量的提高,0~7.5 cm土壤表层的增幅尤为明显,免耕还利于土壤水稳性大团聚体的形成。

2)免耕持续10年,麦稻和油稻模式多数土壤参数差异不显著,表层土壤质量指数(SQI)油稻模式优于麦稻模式。

3)长期免耕降低了土壤保水性,水稻产量不及传统模式,免耕土壤质量的改善与水稻产量的提高不具有同步性。



## 参考文献 References

- [1] 高旺盛. 论保护性耕作技术的基本原理与发展趋势[J]. 中国农业科学, 2007, 40(12): 2702-2708  
Gao W S. Development trends and basic principles of conservation tillage[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(12): 2702-2708 (in Chinese)
- [2] Lindwall C W, Larney F J, Carefoot J M. Rotation, tillage and seeder effects on winter wheat performance and soil moisture regime[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1995, 75(1): 109-116
- [3] 刘世平, 聂新涛, 张洪程, 戴其根, 霍中洋, 许轲. 稻麦两熟条件下不同土壤耕作方式与秸秆还田效用分析[J]. 农业工程学报, 2006, 22(7): 48-51  
Liu S P, Nie X T, Zhang H C, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K. Effects of tillage and straw returning on soil fertility and grain yield in a wheat-rice double cropping system[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(7): 48-51 (in Chinese)
- [4] 武际, 郭熙盛, 张祥明, 王允青, 许征宇, 鲁剑巍. 麦稻轮作下耕作模式对土壤理化性质和作物产量的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(3): 87-93  
Wu J, Guo X S, Zhang X M, Wang Y Q, Xu Z Y, Lu J W. Effects of tillage patterns on crop yields and soil physicochemical properties in wheat-rice rotation system[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(3): 87-93 (in Chinese)
- [5] Singh A, Phogat V K, Dahiya R, Batra S D. Impact of long-term zero till wheat on soil physical properties and wheat productivity under rice-wheat cropping system [J]. *Soil & Tillage Research*, 2014, 140(1): 98-105
- [6] Luo Y J, Wang Z F, Guo M, Wei C F. Effects of conservation tillage on organic carbon, nitrogen and enzyme activities in a hydric anthrosol of Chongqing, China[J]. *Energy Procedia*, 2011, 5(1): 30-36
- [7] 殷志遥, 黄丽, 薛斌, 黄雅楠, 李小坤, 鲁剑巍. 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, Huang Y N, Li X K, Lu J W. Effect of conservation tillage on soil fertility under rice-rape rotation system[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(11): 1604-1614 (in Chinese)
- [8] Gangwar K S, Singh K K, Sharma S K, Tomar O K. Alternative tillage and crop residue management in wheat after rice in sandy loam soils of Indo-Gangetic Plains[J]. *Soil & Tillage Research*, 2006, 88(1-2): 242-252
- [9] 陈留根, 张宝生, 庄恒扬, 薛新红. 太湖地区稻田保护性耕作条件下水稻生育期土壤肥力的变化[J]. 江苏农业学报, 2008, 24(6): 826-832  
Chen L G, Zhang B S, Zhuang H Y, Xue X H. Effects of protective tillage of paddy fields on soil fertility under different rice growing stage in Taihu region[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2008, 24(6): 826-832 (in Chinese)
- [10] Huang M, Zhou X F, Cao F B, Xia B, Zou Y B. No-tillage effect on rice yield in China: A meta-analysis [J]. *Field Crops Research*, 2015, 183(1): 126-137
- [11] 刘光崧. 土壤理化分析与剖面描述[M]. 北京: 中国标准出版社, 1996  
Liu G S. *Soil Physical and Chemical Analysis and Description of Soil Profiles* [M]. Beijing: Chinese Standard Press, 1996 (in Chinese)
- [12] 林大仪. 土壤学实验指导[M]. 北京: 中国林业出版社, 2004  
Lin D Y. *Instruction for Soil Science Experiment* [M]. Beijing: China Forestry Press, 2004 (in Chinese)
- [13] 卫茂荣. 一次取样连续测定土壤物理性质的方法[J]. 辽宁林业科技, 1990(1): 56-57, 49  
Wei M R. A method for testing soil physical properties[J]. *Journal of Liaoning Forestry Science and Technology*, 1990(1): 56-57, 49 (in Chinese)
- [14] Liu X, Zhang G C, Heathman G C, Wang Y Q, Huang C H. Fractal features of soil particle-size distribution as affected by plant communities in the forested region of Mountain Yimeng, China[J]. *Geoderma*, 2009, 154(1-2): 123-130
- [15] Liu Y, Gao M S, Wu W, Tanveer S K, Wen X X, Liao Y C. The effects of conservation tillage practices on the soil water-holding capacity of a non-irrigated apple orchard in the loess plateau, China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2013, 130(1): 7-12
- [16] 许光辉, 郑洪元. 土壤微生物分析方法手册[M]. 北京: 中国农业出版社, 1986  
Xu G H, Zheng H Y. *Analyzing Methods Manual of Soil Microorganism* [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1986 (in Chinese)
- [17] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1986  
Guan S Y. *Soil Enzyme and Its Study Method* [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1986 (in Chinese)
- [18] 张仁陟, 罗珍珠, 蔡立群, 黄高宝, 李玲玲, 谢军红. 长期保护性耕作对黄土高原旱地土壤物理质量的影响[J]. 草业学报, 2011, 20(4): 1-10  
Zhang R Z, Luo Z Z, Cai L Q, Huang G B, Li L L, Xie H J. Effects of long-term conservation tillage on soil physical quality of rainfed areas of the Loess Plateau[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2011, 20(4): 1-10 (in Chinese)
- [19] 黄春, 邓良基, 杨娟, 周伟. 成都平原不同秸秆还田模式下稻麦轮作农田系统能值分析[J]. 水土保持通报, 2015, 35(2): 336-343  
Huang C, Deng L J, Yang J, Zhou W. Energy analysis of farmland eco-system with different straw returning models of rice-wheat rotation in Chengdu Plain[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015, 35(2): 332-343 (in Chinese)
- [20] 王方桃. 平原稻区农业生态系统能流计量的折能系数初步研究

- [J]. 生态学杂志, 1984, 3(6): 44-46
- Wang F T. The energy-releasing coefficient for energy flow measuring with combustion heat in plain rice-planting area[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1984, 3(6): 44-46 (in Chinese)
- [21] 刘波, 吴礼树, 鲁剑巍, 李小坤, 苏伟. 不同耕作方式对土壤理化性质影响研究进展[J]. 耕作与栽培, 2010(2): 55-58, 65
- Liu B, Wu L S, Lu J W, Li X K, Su W. Research progress on effects of different tillage practices on soil physical and chemical properties[J]. *Tillage and Cultivation*, 2010(2): 55-58, 65 (in Chinese)
- [22] Soane B D, Ball B C, Arvidsson J, Basch G, Moreno F, Roger-Estrade J. No-till in northern, western and south-western Europe: A review of problems and opportunities for crop production and the environment[J]. *Soil & Tillage Research*, 2012, 118(1): 66-87
- [23] 李玉洁, 王慧, 赵建宁, 皇甫超河, 杨殿林. 耕作方式对农田土壤理化因子和生物学特性的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(3): 939-948
- Li Y J, Wang H, Zhao J N, Huangfu C H, Yang D L. Effects of tillage methods on soil physicochemical properties and biological characteristics in farmland: A review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(3): 939-948 (in Chinese)
- [24] 董文旭. 华北典型农田氨挥发损失研究[D]. 石家庄: 中国科学院石家庄农业现代化研究所, 2004
- Dong W X. Study on ammonia volatilization of representative agriculture field in North China[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Institute of Agricultural Modernization, CAS, 2004 (in Chinese)
- [25] 秦红灵, 高旺盛, 马月存, 杨世琦, 赵沛义. 免耕对农牧交错带农田休闲期土壤风蚀及其相关土壤理化性状的影响[J]. 生态学报, 2007, 27(9): 3778-3784
- Qin H L, Gao W S, Ma Y C, Yang S Q, Zhao P Y. Effects of no-tillage on soil properties affecting wind erosion during fallow in Ectone of North China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(9): 3778-3784 (in Chinese)
- [26] Mangalassery S, Mooney S J, Sparkes D L, Fraser W T, Sjogren S. Impacts of zero tillage on soil enzyme activities, microbial characteristics and organic matter functional chemistry in temperate soils[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2015, 68(1): 9-17
- [27] 王碧胜, 蔡典雄, 武雪萍, 李景, 梁国鹏, 于维水, 王相玲, 杨毅宇, 王小彬. 长期保护性耕作对土壤有机碳和玉米产量及水分利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(6): 1455-1464
- Wang B S, Cai D X, Wu X P, Li J, Liang G P, Yu W S, Wang X L, Yang Y Y, Wang X B. Effects of long-term conservation tillage on soil organic carbon, maize yield and water utilization [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2015, 21(6): 1455-1464 (in Chinese)
- [28] Mohanty M, Painuli D K, Mandal K G. Effect of puddling intensity on temporal variation in soil physical conditions and yield of rice (*Oryza sativa* L) in a Vertisol of central India[J]. *Soil & Tillage Research*, 2004, 76(2): 83-94

责任编辑: 吕晓梅