

张玥,陶明聪,李小坤,等.免耕覆盖下配方肥与有机肥配施对直播油菜产量和水肥利用效率的影响[J].华中农业大学学报,2026,45(2):155-164.DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2026.02.016

## 免耕覆盖下配方肥与有机肥配施对直播油菜产量和水肥利用效率的影响

张玥,陶明聪,李小坤,汪社亮,丁广大,徐芳森

华中农业大学资源与环境学院,武汉 430070

**摘要** 为建立长江中下游稻-油轮作体系油菜高产和水肥高效利用的协同技术模式,以甘蓝型油菜品种‘大地199’为试验材料,开展大田小区试验。设置4个处理,分别为T1:传统种植不施肥;T2:传统种植常规施肥;T3:传统种植施用配方肥;T4:免耕覆盖+配方肥+有机肥,分析不同处理下油菜苗期光合指标,成熟期产量、产量构成因子、养分积累、水分和肥料利用效率。结果显示:相比T2和T3处理,T4处理提高油菜净光合速率、SPAD值、叶面积和瞬时水分利用效率,且与T2处理间差异显著( $P<0.05$ )。T4处理分别较T2和T3处理产量增加20.5%和12.0%,主要是通过提高单株角果数、每角果粒数、角果长度和千粒重来实现增产。不同处理中,T4处理的籽粒氮磷钾养分积累量和养分占比最高,但根部、茎秆和角果皮中的磷钾积累均小于T2处理。肥料贡献率、肥料农学利用率、肥料偏生产力、肥料生理利用率和水分利用效率均表现为 $T4>T3>T2$ ,T4较T2处理分别提高16.5%、53.1%、31.2%、48.7%和20.7%。除肥料贡献率以外,T4与T2处理之间差异显著。T3处理的水肥利用效率同样优于T2处理,但二者之间差异不显著。综上,直播油菜采用免耕覆盖+配方肥+有机肥是长江中下游地区可以推广的一种实现油菜高产和水肥高效利用的种植模式。

**关键词** 油菜;免耕;轻简化种植;覆盖;配方肥;有机肥;养分积累;水分养分利用效率  
**中图分类号** S565.4 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2026)02-0155-10

油菜是我国主要的油料作物,种植面积达到700万 $\text{hm}^2$ <sup>[1]</sup>。长江流域是我国重要的油菜产区,其产量占全国油菜总产量的96%左右,主要集中在湖南、湖北和四川三省<sup>[1]</sup>,油菜作为我国第一大油料作物,菜籽油占国产油料作物产油量的55%以上<sup>[2]</sup>。油菜生育周期长、生物量大,对于水分和肥料的需求大。在全球气候变暖条件下,我国干旱缺水的极端气候频发,严重威胁油菜生产。长江流域冬油菜产区种植季节降雨分布不均,秋季油菜播种期干旱频发,容易出现出苗难、整齐度差、植株矮小等问题;同时,油菜主产区土壤肥力不足且传统施肥方式肥料利用率较低<sup>[3]</sup>。因此,提高油菜水肥利用效率和产量对油菜产业可持续发展、保障国民食用油安全具有重要意义。

免耕加秸秆覆盖作为一种常见的耕作方式,可以减少人力物力投入,符合油菜轻简化种植目标,并且能够减少土壤水分蒸发、增加土壤孔隙度和团聚

体数量、改善土壤物理性质、提高土壤养分和有机质含量,进而达到培肥地力的目的<sup>[4-6]</sup>。鲁悦等<sup>[7]</sup>研究表明,在东北黑土区实行免耕加秸秆覆盖能够显著提高玉米光合性能且产量提高6.4%。Yang等<sup>[8]</sup>研究结果显示,免耕与秸秆覆盖能增加小麦分蘖数和有效穗数,产量提高36.8%,水分利用效率和氮素利用率相较于不覆盖分别提高16%和15%。苏伟等<sup>[9]</sup>对湖北油菜的研究发现,秸秆覆盖能够显著提高18%的籽粒产量和20%的干物质产量,氮磷钾积累量相较于秸秆不还田处理分别提高23.7%、13.3%和24.2%。除耕作措施外,增施有机肥能够改善土壤结构、活化有效养分、增加土壤湿度和酶活性,提高水肥利用效率<sup>[10-12]</sup>。同时有机肥施用还能提高作物光合作用和叶片水分利用效率,达到提高产量和水分利用效率的目的<sup>[13]</sup>。Liu等<sup>[14]</sup>发现有机肥和无机肥配施相较于单施化肥或有机肥,产量分别提高54%

收稿日期:2025-04-23

基金项目:农业科技重大项目

张玥,E-mail:zhangyue1@webmail.hzau.edu.cn

通信作者:徐芳森,E-mail:fangsenxu@mail.hzau.edu.cn

和82%,水分利用效率提高51%和77%。

与其他油菜主要生产国相比,我国油菜主产区土壤普遍存在土壤肥力较差、有机质含量低、养分种类缺乏等问题,主产区地力仅能支撑50%左右的油菜产量<sup>[15]</sup>。因此,肥料的施用是油菜增产的重要保障。湖北作为我国油菜的主产区之一,其油菜季肥料施用量和不足的问题同时存在<sup>[16]</sup>。同时,随着农村劳动力转移,青壮年人口减少,轻简化种植成为油菜种植的重要发展方向<sup>[3]</sup>。研制一次性施用的油菜配方肥成为油菜轻简化种植的重要组成部分,能够降低种植成本,简化施肥步骤、避免肥料施用不合理的情况出现。市面上的油菜专用肥质量参差不齐,且缺乏针对提高油菜水肥利用效率的专用肥<sup>[17]</sup>。由此,根据主产区的土壤养分含量、冬油菜的需肥特性和水分供应状况等,鲁剑巍等<sup>[3]</sup>研究确定了油菜配方肥的氮磷钾养分配比,另外还添加Ca、Mg、控释尿素和抗旱物质黄腐酸等,研制出油菜配方肥,对油菜可持续轻简化发展有较好的促进作用。外源钙的添加能够通过稳定细胞膜和细胞壁的结构,提高抗氧化酶活性和水分利用效率、维持光合作用等方式提高植物抗缺水胁迫的能力<sup>[18-19]</sup>。黄腐酸能够降低叶片气孔开闭程度、减少水分蒸发,同时促进根系生长、提高植物吸水能力<sup>[20-21]</sup>。控释尿素既能避免肥

料一次性施用所带来的养分淋洗损失,从而提高肥料利用率,又能减少追肥的人工成本,符合轻简化种植的理念<sup>[22]</sup>。

本研究通过田间试验,探究自主研发的油菜配方肥结合免耕秸秆覆盖和有机肥对油菜产量和水肥利用效率的提高效果,旨在为建立长江中下游稻-油轮作体系油菜高产、肥水高效利用的轻简化种植模式提供理论和技术依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

田间试验于2023年10月至2024年6月在湖北省武穴市大法寺镇上桂村(29°91'N, 115°50'E)开展。该地区属于亚热带季风性湿润气候,油菜季平均气温13.5℃,总降雨量804.6 mm。前茬作物为水稻,土壤类型为水稻土,0~20 cm耕层土壤基本理化性质为:土壤pH 6.4,有机质21.3 g/kg,碱解氮117.6 mg/kg,速效磷16.1 mg/kg,速效钾142.9 mg/kg。

### 1.2 试验设计

试验设置4个处理,分别为T1:传统种植不施肥;T2:传统种植常规施肥;T3:传统种植施用配方肥;T4:免耕覆盖+配方肥+有机肥。各处理油菜播种子量和肥料施用量如表1所示。

表1 不同处理的油菜播种子量和肥料用量

Table 1 Rapeseed seeding rates and fertilizer application rates under different treatments

处理 Treatment	播种子量/(kg/hm <sup>2</sup> ) Seeding rate	复合肥 Compound fertilizer		尿素用量/(kg/hm <sup>2</sup> ) Urea application rate	有机肥/(kg/hm <sup>2</sup> ) Organic fertilizer	总纯养分投入/(kg/hm <sup>2</sup> ) Pure nutrient input
		种类 Types	用量/(kg/hm <sup>2</sup> ) Application rate			
T1	9.0		0	0	0	0
T2	9.0	15-15-15	750	150	0	406.50
T3	9.0	25-7-10	675	0	0	283.50
T4	10.5	25-7-10	675	0	2 250	373.50

供试甘蓝型油菜品种为‘大地199’。其中T4处理的耕作方式为免耕和上一季水稻秸秆1/3覆盖还田,其余处理均为传统翻耕,无秸秆覆盖。肥料均作为基肥一次性施用。T4处理在水稻收获前1 d,即2023年9月30日人工撒播,水稻收获后人工开沟。其余处理均为2023年10月6日机械翻耕整地开沟,10月9日人工撒播。2024年5月6日收获,T4处理的生育期为210 d,其余处理的生育期为220 d。每个处理4次重复,小区面积为60 m<sup>2</sup>。按当地习惯进行病虫害防治。

试验常规施肥处理的复合肥(15-15-15)是当地农户油菜季习惯施用的肥料种类。油菜配方肥(25-

7-10)为华中农业大学与安徽茂施新型肥料有限公司合作研究,添加了钙、镁、硼(1%)和黄腐酸(5%),其中氮来自尿素、二铵和缓释60 d的树脂尿素,分别占比12.6%、2.5%和9.9%。有机肥是由湖北田申甲生物环保科技有限公司提供的蚯蚓粪源有机肥,pH为5.5~6.5,养分总量约为4.0%。

### 1.3 测定项目及方法

1)土壤样品。基础土壤样品在种植前采用“S”形采集0~20 cm耕层土壤,拣出杂草和碎石,按照“四分法”取1 kg带回实验室于阴凉通风处风干,磨细后分别过孔径为0.149、0.850 mm的筛。依据文献<sup>[23]</sup>测定基础理化性质:pH按照水土质量比2.5:1,

电位法测定;有机质用外加热-重铬酸钾容量法测定;碱解氮用碱解扩散法测定;速效磷用0.5 mol/L的NaHCO<sub>3</sub>浸提-钼锑抗比色法测定;速效钾用1 mol/L NH<sub>4</sub>OAc浸提-火焰光度法测定。

土壤体积含水量测定需要选择晴朗无雨的天气,用土壤水分速测仪TZS-1K-GF0817测定,每个处理选6个点,每个点至少测量3次。农田耗水量和水分利用效率的计算参考燕鹏等<sup>[24]</sup>的方法。

2)植物样品。油菜收获前每小区按照0.36 m<sup>2</sup>样方取地上部植株,并选取有代表性的1株取其地下部,分别装入网袋中。各处理分为地下部、茎秆、角果皮和籽粒4个部位,置于65℃烘箱中烘干,烘干至恒质量后测定各部位生物量,并取样用于测定养分含量。采用H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>联合消煮,流动注射分析仪(AA3,德国SEAL)测定植株氮和磷含量,火焰原子吸收光谱仪(240-FS)测定植株钾含量。油菜成熟后,各小区选取具有代表性的5.0 m<sup>2</sup>样方,收割全部分枝,将样品放于网袋内晾干后进行脱粒,测定籽粒千粒重和产量。

3)光合参数、SPAD值和叶面积测定。利用便携式光合系统(CIRAS-3, PP Systems)在晴朗无云天气09:00—15:00测定不同处理油菜苗期叶片净光合速率、气孔导度、胞间二氧化碳浓度、蒸腾速率和叶片瞬时水分利用效率。使用叶绿素仪SPAD-502测定叶片SPAD值。油菜叶片用相机(Nikon)拍照后,用Image J软件测量叶面积。

4)产量构成因子调查。于油菜收获前2周,各小区选取3株油菜,调查主花序长度和角果数、分枝数、总角果数,分别取5个主花序角果和10个分枝角果调查每角粒数和角果长度。

#### 1.4 主要计算公式

$$A=B \times C \times 10^{-3} \quad (1)$$

$$I_H=Y/B_a \times 100 \quad (2)$$

$$E_A=(Y_1-Y_0)/F \quad (3)$$

$$P_{FP}=Y_1/F \quad (4)$$

$$R_{FC}=(Y_1-Y_0)/Y_1 \times 100 \quad (5)$$

$$E_{FP}=(Y_1-Y_0)/(A_1-A_0) \quad (6)$$

式(1)~(6)中, $A$ 为养分积累量(nutrient accumulation), kg/hm<sup>2</sup>;其中 $B$ 为生物量(biomass), kg/hm<sup>2</sup>;  $C$ 为养分含量(nutrient content), g/kg;  $I_H$ 为收获指数(harvest index), %;  $Y$ 为产量(yield), kg/hm<sup>2</sup>,  $B_a$ 为地上部生物量(aboveground biomass), kg/hm<sup>2</sup>;  $E_A$ 为肥料农学利用率(agronomic efficiency), kg/kg;  $Y_1$ 为施肥处理产量(yield of fertilization

treatments), kg;  $Y_0$ 为不施肥处理产量(yield under non-fertilization treatment), kg;  $F$ 为肥料施用量(fertilizer application rate, 为N+P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>+K<sub>2</sub>O总和), kg;  $P_{FP}$ 为肥料偏生产力(partial factor productivity), kg/kg;  $R_{FC}$ 为肥料贡献率(fertilizer contribution rate), %;  $E_{FP}$ 为肥料生理利用率(physiological efficiency), kg/kg;  $A_1$ 为施肥处理养分积累总量(total nutrient accumulation under fertilization treatments), kg;  $A_0$ 为不施肥处理养分积累总量(total nutrient accumulation without fertilization), kg。

#### 1.5 数据处理

使用GraphPad Prism 8(USA)进行数据统计分析与可视化处理,采用Duncan's法进行多重比较。

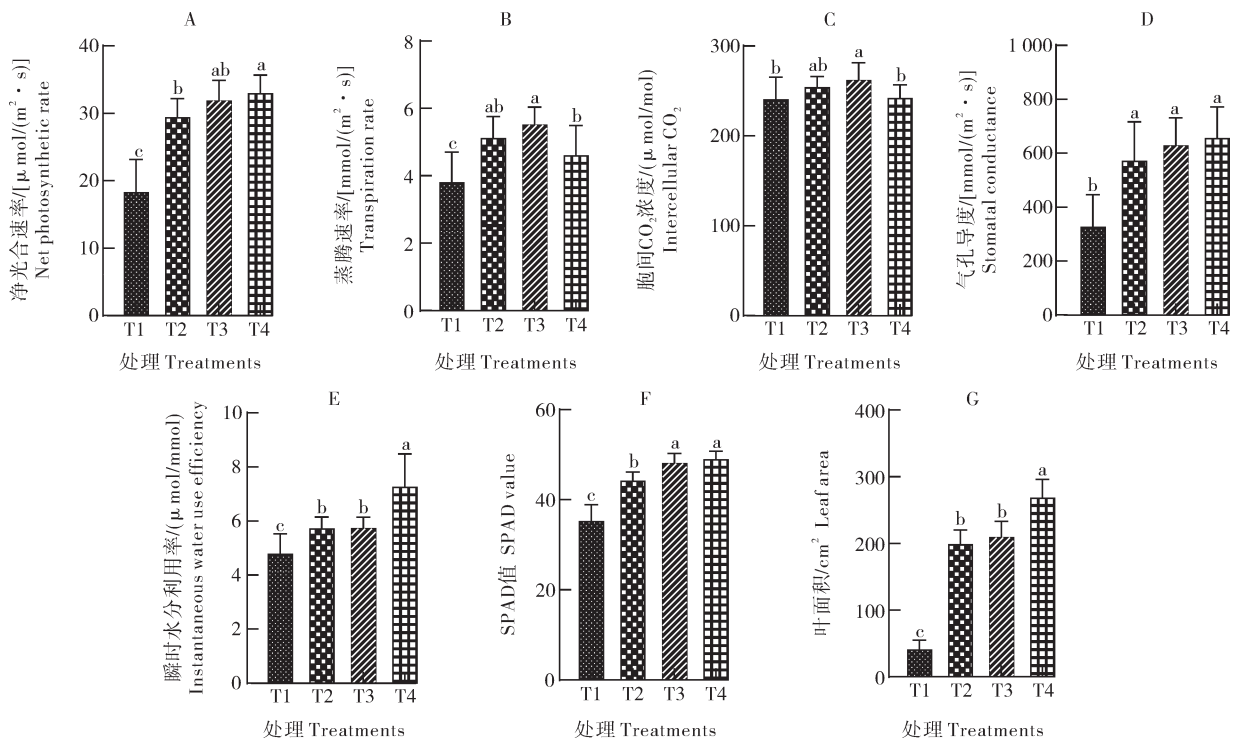
## 2 结果与分析

### 2.1 不同处理对油菜苗期光合相关指标的影响

由图1可知,T4处理的净光合速率相较于T2和T3处理分别提高11.9%和3.3%,T4与T2之间差异显著;T4处理的气孔导度也有所提高,但三者之间差异不显著( $P>0.05$ )。与T2和T3处理相比,T4处理的蒸腾速率分别下降9.9%和16.4%,与T3处理之间差异显著( $P<0.05$ )。由于净光合速率的提高和蒸腾速率的下降,T4处理的瞬时水分利用效率相较于T2和T3处理分别显著提高26.8%和26.3%。T4处理的胞间CO<sub>2</sub>浓度相较于T2和T3处理分别下降4.8%和7.6%,与T3处理存在显著差异( $P<0.05$ )。与T2处理相比,施用配方肥的T3和T4处理油菜苗期叶片的SPAD值分别显著提高8.8%和10.8%。T4处理的叶面积相较于T2和T3处理显著提高34.8%和27.9%。上述结果表明,免耕覆盖+配方肥+有机肥模式对油菜苗期的光合作用有显著的提升效果。

### 2.2 不同处理对油菜产量和生物量的影响

由表2可见,T4处理的根系生物量较T2和T3处理分别提高16.2%和16.9%。T4处理地上部茎秆和角果皮的生物量相较于T2处理和T3处理分别提高4.2%和0.5%,三者之间差异不显著。T4处理的籽粒产量和收获指数相较于T2显著提高( $P<0.05$ ),但T2处理和T3处理之间差异不显著( $P>0.05$ )。T4处理较T2和T3处理分别增产20.5%和12.0%,收获指数分别提高11.2%和7.9%。结果表明,免耕覆盖+配方肥+有机肥的种植模式对油菜生物量和籽粒产量的提高效果最为显著。



不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。下同。Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments ( $P < 0.05$ ). The same as below.

图1 不同处理下油菜苗期净光合速率(A)、蒸腾速率(B)、胞间  $\text{CO}_2$  浓度(C)、气孔导度(D)、瞬时水分利用效率(E)、SPAD值(F)和叶面积(G)

Fig. 1 Net photosynthetic rate(A), transpiration rate(B), intercellular  $\text{CO}_2$ (C), stomatal conductance(D), instantaneous water use efficiency(E), SPAD value(F) and leaf area(G) during the rapeseed seedling stage under different treatments

表2 不同处理下的油菜产量和生物量

Table 2 Rapeseed yield and biomass under different treatments

处理 Treatments	根/(kg/hm <sup>2</sup> ) Root	茎+角果皮/(kg/hm <sup>2</sup> ) Stem+Siliqua wall	籽粒产量/(kg/hm <sup>2</sup> ) Seed yield	收获指数/% Harvest index
T1	746.7±73.07c	2 205.6±315.22b	1 015.7±173.11c	31.8±2.9a
T2	1 743.5±86.78b	5 906.0±396.43a	2 058.6±203.75b	25.9±1.2c
T3	1 732.9±122.10b	6 121.3±577.6a	2 214.7±346.91ab	26.7±1.8bc
T4	2 025.2±100.08a	6 152.2±422.79a	2 481.3±310.21a	28.8±1.4b

### 2.3 不同处理对油菜产量构成因子的影响

由表3可见,T2处理的株高和主花序长度相较于T3和T4处理均有所提高,但差异不显著 ( $P > 0.05$ )。而T4处理的主花序角果数和一级分枝数均大于T2和T3处理,分别提高7.1%、7.7%和3.3%、6.3%,三者之间同样差异不显著 ( $P > 0.05$ )。但与T2和T3处理相比,T4处理的角果总数分别提高20.5%和15.3%,说明T4处理角果数的提高主要是通过增加分枝数和分枝角果数来实现;且T4处理的角果长度和每角果粒数相较于T2和T3处理均显著提高 ( $P < 0.05$ ),角果长度分别提高7.5%和6.2%,每

角果粒数分别提高10.5%和6.6%。与T2和T3处理相比,T4处理的千粒重提高7.6%和5.2%,均存在显著差异 ( $P > 0.05$ )。综上,免耕覆盖+配方肥+有机肥模式(T4处理)通过提高分枝数、单株角果数、角果长度、角果粒数和千粒重,最终实现油菜籽粒产量的增加。

### 2.4 不同处理对油菜各部位养分积累量及分配比例的影响

不同处理下油菜养分积累和占比如表4所示。植株氮磷积累量表现为籽粒>茎秆+角果皮>根。与T2和T3处理相比,T4处理籽粒中氮积累量分别

表3 不同处理下油菜的农艺性状和产量构成因子

Table 3 The agronomic traits and yield components of rapeseed under different treatments

处理 Treat- ments	株高/cm Height	茎粗/mm Stem diameter	主花序长度/cm Main inflorescence length	主花序角果数 Number of siliques on main inflorescence	一级分枝数 Number of primary branches	单株角果数 Number of siliques per plant	角果长 度/cm Silique length	每角果粒数 Number of seeds per siliques	千粒重/g 1 000- grains weight
T1	113.8± 5.28b	11.9± 1.85b	45.4± 8.15b	49.9± 8.51b	2.2± 0.97b	67.0± 20.05c	7.8± 0.91c	20.2± 1.38c	3.32± 0.09ab
T2	164.3± 6.11a	20.8± 1.83a	56.2± 5.57a	75.8± 8.77a	7.8± 1.66a	252.7± 71.57b	8.0± 0.75bc	21.9± 1.75b	3.17± 0.13c
T3	158.5± 1.80a	21.0± 1.34a	53.8± 6.70a	78.6± 4.62a	7.9± 0.99a	264.1±3 8.17ab	8.1± 0.82b	22.7± 1.47b	3.24± 0.12bc
T4	160.0± 4.16a	21.0± 1.52a	53.6± 4.56a	81.2± 5.64a	8.4± 1.50a	304.6± 59.34a	8.6± 0.77a	24.2± 0.64a	3.41± 0.09a

表4 油菜各组织中氮磷钾养分的积累及其分配比例

Table 4 The accumulation of NPK and their proportion in various tissues of rapeseed

养分类型 Nutrient	处理 Treatment	根 Root		茎秆+角果皮 Stem + Silique wall		籽粒 Seed		整株 Plant
		养分积累/(kg/hm <sup>2</sup> ) Nutrient accumulation	占比/% Percentage	养分积累/(kg/hm <sup>2</sup> ) Nutrient accumulation	占比/% Percentage	养分积累/(kg/hm <sup>2</sup> ) Nutrient accumulation	占比/% Percentage	养分积累/(kg/hm <sup>2</sup> ) Nutrient accumulation
N	T1	4.6±0.45b	13.7±0.72b	7.2±1.02c	21.2±2.00d	21.9±3.73c	65.1±2.72a	33.7±1.47d
	T2	13.2±0.66a	15.5±0.41a	23.5±1.34b	27.7±0.91b	48.1±4.76b	56.8±1.30c	84.8±1.99c
	T3	13.2±0.93a	14.3±0.46b	27.8±2.55a	29.9±1.60a	51.7±8.09ab	55.8±2.06c	92.7±3.48b
	T4	13.8±0.68a	13.8±0.36b	25.3±1.65b	25.3±1.07c	60.9±7.62a	60.9±1.43b	100.0±2.33a
P	T1	0.5±0.05d	6.1±0.45c	1.2±0.17d	13.3±1.63c	7.1±1.21b	80.7±1.99a	8.8±0.22c
	T2	2.6±0.13a	10.9±0.43a	4.8±0.19a	19.9±0.58a	16.6±1.64a	69.2±0.83c	24.0±0.29a
	T3	1.6±0.11c	7.6±0.40b	3.1±0.25c	14.6±0.94b	16.5±2.58a	77.8±1.33b	21.2±0.37b
	T4	1.8±0.09b	7.6±0.29b	3.5±0.19b	14.6±0.63b	18.7±2.34a	77.9±0.89b	24.1±0.27a
K	T1	18.6±1.82c	22.9±0.44a	54.9±7.84c	67.5±1.48d	7.7±1.32b	9.6±1.04a	81.2±9.65c
	T2	43.5±2.16ab	18.2±0.16c	177.6±11.86a	74.4±0.57a	17.5±1.73a	7.3±0.42b	238.5±14.03a
	T3	45.1±3.17a	19.3±0.23b	171.0±16.15a	73.2±0.83b	17.4±2.72a	7.5±0.60b	233.5±19.32a
	T4	41.4±2.05b	19.6±0.15b	150.3±9.96b	71.1±0.68c	19.6±2.44a	9.3±0.53a	211.3±12.01b

增加 26.6% 和 17.8%，氮分配占比增加 7.2% 和 9.1%，三者籽粒中的磷积累量无显著差异，但 T4 处理的籽粒磷占比相较于 T2 和 T3 处理增加 12.6% 和 0.1%。而与 T2 处理相比，T4 处理其他部位的氮积累略高，但氮分配占比略低，磷含量在根、茎秆和角果皮中的积累量和分配比例均降低。说明 T4 处理的氮磷吸收量多且向籽粒中转移的效率更高。植株钾积累量表现为茎秆+角果皮>根>籽粒，三者籽粒中钾积累量无显著差异 ( $P>0.05$ )，但与 T2 和 T3 处理相比，T4 处理的籽粒中钾占比提高 27.4% 和 24.0%。T4 处理在根中的钾积累量低于 T3 和 T2 处理，但占比提高 7.7% 和 1.6%。钾积累量的差异主要在茎秆和角果皮中，T4 处理的茎秆和角果皮中钾积累量和占比相较于 T2 和 T3 处理显著减少 15.4%、4.4% 和 12.1%、2.9%。这一结果说明，虽然

钾积累量主要存在于茎秆和角果皮中，但相较于 T2 和 T3 处理，与氮磷分配类似，T4 处理的钾含量同样向籽粒中的转移效率更高。

## 2.5 不同处理对油菜水分和肥料利用率的影响

不同处理下油菜肥料和水分利用效率如表 5 所示。T3 和 T4 处理的肥料贡献率较 T2 处理分别提升 6.0% 和 16.5%，但均不存在显著差异 ( $P>0.05$ )。T3 和 T4 处理的肥料农学利用率和肥料偏生产力较 T2 处理提高 25.4%、17.2% 和 53.1%、31.2%。说明单位养分投入下 T4 处理能获得更高的油菜增产量和产量。T4 处理的肥料生理利用率和水分利用效率相较于 T2 处理显著提高 48.7% 和 20.7%，但 T3 与 T2 处理间差异不显著。与 T2 和 T3 处理相比，T4 处理吸收的单位养分和水分能够形成更多的产量。这些结果表明，免耕覆盖+配方肥+有机肥的种植模

式(T4)能显著提高油菜的水分和肥料利用率,而单施配方肥(T3)的提升效果不显著。

表5 不同处理下油菜的水肥利用效率

Table 5 Water and fertilizer utilization rate in rapeseed under different treatments

处理 Treatment	肥料贡献率/% Fertilizer contribution rate	肥料农学利用率/ (kg/kg) Agronomic efficiency	肥料偏生产力/(kg/kg) Partial factor productivity	肥料生理利用率/ (kg/kg) Physiological efficiency	水分利用效率/ [kg/(mm·hm <sup>2</sup> )] Water use efficiency
T1	—	—	—	—	1.48±0.25c
T2	50.3±4.73a	2.56±0.50b	5.06±0.50b	4.66±0.91b	3.00±0.30b
T3	53.3±8.00a	3.21±0.93ab	5.93±0.93ab	5.36±1.55ab	3.24±0.51ab
T4	58.6±4.64a	3.92±0.83a	6.64±0.83a	6.93±1.47a	3.62±0.45a

注:—表示该数据无法计算。Note:— indicates that this data is not calculable.

### 3 讨论

#### 3.1 免耕覆盖下配施配方肥和有机肥对油菜苗期叶片光合作用的影响

光合作用是植物干物质积累的基础,与产量的形成呈正相关。前人研究表明免耕结合秸秆覆盖能够减少土壤水分蒸发、减少土壤被翻动频次、避免土壤孔隙度被破坏、具备保温隔热作用,使土壤温度相对稳定,同时秸秆分解能够为植物生长提供大量有机质和养分,从而间接促进光合作用<sup>[25-26]</sup>。叶片作为光合作用的重要器官,其叶面积的增加和叶绿素含量的提高均能增强植物对光能的利用<sup>[27]</sup>。有机肥除了提高土壤有机质等养分含量、改善土壤结构外,还能够通过提高光合酶活性、增加叶片厚度和维管束面积来增强植物的光合作用<sup>[28]</sup>。有研究表明叶片厚度和维管束面积与植物净光合速率强度呈正相关,维管束面积增大,提高水分、养分和光合产物的运输效率<sup>[29]</sup>。Yang等<sup>[13]</sup>的研究表明,秸秆覆盖结合有机肥能够有效提高小麦的净光合速率和叶片瞬时水分利用效率。在烟草中的研究表明,黄腐酸的施用能够通过增加叶绿素含量,提高光合作用,促进作物生长<sup>[30]</sup>。在本研究中,T3处理油菜叶片的叶绿素含量优于T2处理可能是由于配方肥中黄腐酸的添加。T4处理相较于其他处理,净光合速率、叶面积和SPAD值有所提高,可能是免耕秸秆覆盖结合有机肥为油菜的苗期生长提供了良好的水热条件,同时提高了土壤养分含量,改善叶片结构,提升了植物的光合效率(图1)。说明相较于单施黄腐酸,结合免耕秸秆覆盖和有机肥对植物光合性能提升更明显。

#### 3.2 免耕覆盖下配施有机肥对油菜生物量和籽粒产量的影响

保护性耕作作为一种轻简化耕作措施,越来越

受到关注。目前,我国保护性耕作面积达到979万hm<sup>2</sup>,主要集中在东北和新疆地区<sup>[31]</sup>。保护性耕作主要包括免耕、少耕和秸秆覆盖。免耕结合秸秆覆盖能够提高土壤保水保墒能力,为土壤微生物繁殖提供良好条件,从而促进秸秆分解,提高有机质、速效磷、速效钾、矿质氮等土壤养分含量<sup>[13]</sup>;同时,增加土壤孔隙度、减小容重,有利于植物根系生长<sup>[32]</sup>。Yang等<sup>[13]</sup>的研究表明,免耕加秸秆覆盖能够有效提高0~20 cm根系的表面积和总根长,有利于植物对土壤养分的吸收利用。此外,有机肥的施用能够提高根系活力和氮代谢酶活性,促进水肥吸收<sup>[33]</sup>。本研究中,油菜成熟期T4处理的根系生物量相较于T2和T3处理分别增加16.2%和16.9%(表2),与前人研究结果<sup>[13,36]</sup>一致。免耕结合秸秆覆盖的耕作方式和有机肥的施用除促进根系生长外,还对地上部生物量和产量的形成产生重要影响。研究表明,干旱地区小麦免耕加秸秆覆盖的种植模式能够通过提高穗数、每穗粒数和千粒重较常规模式增产18.6%~27.3%<sup>[34]</sup>。秸秆覆盖加化肥相较于单施化肥,大豆的生物量和产量能够提高4.8%和20.3%<sup>[35]</sup>。Zhai等<sup>[36]</sup>的研究表明,适宜的有机肥用量能够通过促进根系生长、提高光合能力等实现夏玉米产量提高8.3%。在本研究中,T4处理茎秆+角果皮的生物量相较于T2和T3处理分别提高4.2%和0.5%,产量相较于T2和T3处理分别提高20.5%和12.0%,主要是通过增加单株角果数、每角果粒数、角果长度和千粒重来增产(表2、表3)。与生物量的增加相比,籽粒产量的提高更明显,说明T4处理能够促进光合产物向籽粒转移,实现增产。这可能与有机肥的施用能够增加维管束面积<sup>[28]</sup>有关。在水稻中的研究表明,维管束面积的增加有助于光合产物从源到库的运输,促进籽粒灌浆,实现增产<sup>[37]</sup>。此

外,免耕和秸秆还田提高植物光合性能的同时还能保水培肥,为光合产物向籽粒转移提供良好基础<sup>[25,38]</sup>。

### 3.3 免耕覆盖下配施配方肥和有机肥对油菜养分积累和水肥利用效率的影响

成熟期油菜氮磷主要积累在籽粒中,钾主要积累在茎秆和角果皮中,其次是根部。除籽粒外,T2处理各部位的磷钾含量高于T3和T4处理(表4)。这可能是由于T2施用了更多的 $P_2O_5$ 和 $K_2O$ 。相较于T2处理,T4处理的产量显著增加,籽粒中能够积累更多的磷和钾,而油菜大部分磷积累在籽粒中,因此T4的总磷积累增加,但总钾积累降低。在T4处理各部位的氮积累量均高于其他处理,总氮积累量较T2和T3处理分别增加17.9%和7.9%(表4)。这可能是因为免耕和秸秆覆盖提高土壤养分含量,增加了团聚体含量,提高土壤对肥料的保持能力,减少损失<sup>[39]</sup>。T4处理所施用的9.9%氮肥为控释60d的树脂尿素,此时正好是越冬期,可减少人工投入,同时避免一次性施用带来的肥料损失,提高氮肥利用率。此外有机肥为油菜生长提供氮磷钾和其他微量元素营养,增加土壤养分有效性。

从水肥利用效率来看,免耕和秸秆覆盖减少水分蒸发量,提高土壤水分含量,有助于水肥协同,促进作物生长,提高水肥利用效率<sup>[4]</sup>。渭北旱地冬小麦相较于传统栽培,秸秆覆盖条件下小麦水分利用效率提高11.2%<sup>[40]</sup>。有机肥和无机肥配施相较于化肥和有机肥单独施用,水分利用效率提高51%和77%<sup>[14]</sup>。除此以外,研究表明,黄腐酸能够促进根系生长,增加侧根数量,提高水分利用效率<sup>[41]</sup>。本研究中T4处理较T2和T3处理水分利用效率分别提高20.7%和11.7%,与前人研究结果<sup>[14,40-41]</sup>一致(表5)。这可能是因为配方肥中黄腐酸对提高油菜水分利用效率有一定效果,但结合免耕秸秆覆盖和有机肥的耕作措施后,对水分利用效率提升效果更明显。此外,免耕秸秆覆盖和有机肥的施用同样影响作物的肥料利用率。在水稻和油菜上的研究表明,秸秆还田后钾肥施用量较推荐用量分别减少42.2%和31.2%,达到与单施推荐用量钾肥相比相持或更高的产量,获得更高的肥料利用率<sup>[42]</sup>。Yang等<sup>[8]</sup>研究结果显示,免耕与秸秆覆盖能增加小麦分蘖数和有效穗数,产量提高36.8%,氮素利用率相较于不覆盖分别提高14.8%。付强等<sup>[43]</sup>在马铃薯上的研究表明,25%的有机肥替代化肥较单施化肥产量提高5.5%,

氮肥农学效率和氮肥利用率分别提高12.6%和12.1%。除了改善耕作措施和施用有机肥外,调整肥料养分配比,使肥料施用既能满足植物生长又能避免损失,同时还能有效提高氮磷钾肥料利用率<sup>[3]</sup>。本研究中,肥料贡献率、肥料农学利用率、肥料偏生产力和肥料生理利用率均表现为 $T4>T3>T2$ ,且T4与T2处理之间差异显著(表5)。原因可能是:(1)免耕秸秆覆盖和有机肥为油菜生长提供更多的土壤养分和更适宜的土壤环境。(2)配方肥提供了更适宜的养分比例和用量,相较传统施肥减少氮肥和磷肥的投入,其中的树脂包膜尿素减少了氮肥损失;黄腐酸的添加有利于提高油菜水分利用效率。(3)在秸秆覆盖的基础上减少钾肥投入还能不减产。

本研究在研发油菜配方肥的基础上,探究配方肥结合有机肥和免耕覆盖的种植模式对油菜产量和水肥利用效率的影响,结果表明,该模式相比常规施肥栽培和单施配方肥能够有效提高油菜苗期的净光合速率、SPAD值和叶面积,降低蒸腾速率,提升油菜籽粒氮磷钾的积累和占比,并最终实现油菜籽粒产量和水肥利用效率的协同提高。可见,直播油菜采用免耕覆盖+配方肥+有机肥是我国长江中下游流域实现油菜高产高效的有效轻简化种植模式。

### 参考文献 References

- [1] 中华人民共和国国家统计局.中国统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2023.National Bureau of Statistics of People's Republic of China.China statistics year book[M].Beijing:China Statistics Press,2023(in Chinese).
- [2] 王汉中.以新需求为导向的油菜产业发展战略[J].中国油料作物学报,2018,40(5):613-617.WANG H Z.New-demand oriented oilseed rape industry developing strategy[J].Chinese journal of oil crop sciences,2018,40(5):613-617(in Chinese with English abstract).
- [3] 鲁剑巍,任涛,李小坤,等.我国冬油菜养分精准调控策略与高效施肥技术体系[J].华中农业大学学报,2023,42(6):18-25.LU J W,REN T,LI X,K et al.Strategy of precisely controlling nutrient and system of efficient fertilization technology for winter rapeseed in China[J].Journal of Huazhong Agricultural University,2023,42(6):18-25(in Chinese with English abstract).
- [4] 田肖肖,吕慎强,张亮,等.免耕覆盖有效提高夏玉米产量及水氮利用效率[J].植物营养与肥料学报,2017,23(3):606-614.TIAN X X,LÜ S Q,ZHANG L,et al.No-tillage with straw mulching could increase grain yield,water and nitrogen use efficiencies of summer maize[J].Journal of plant nutrition

- and fertilizer, 2017, 23(3): 606-614 (in Chinese with English abstract).
- [5] 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]. Journal of plant nutrition and fertilizers, 2012, 18(3): 587-594 (in Chinese with English abstract).
- [6] ZHANG X F, XIN X L, ZHU A N, et al. Effects of tillage and residue managements on organic C accumulation and soil aggregation in a sandy loam soil of the North China Plain[J]. CATENA, 2017, 156: 176-183.
- [7] 鲁悦, 鲍雪莲, 霍海南, 等. 免耕条件下不同量秸秆覆盖还田提高东北黑土区玉米光合性能和产量的效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2023, 29(5): 840-847. LU Y, BAO X L, HUO H N, et al. Effects of different amounts of staw mulching on improving photosynthetic characteristics and yield of maize in mollisol of Northeast China under long-term no-tillage[J]. Journal of plant nutrition and fertilizers, 2023, 29(5): 840-847 (in Chinese with English abstract).
- [8] YANG H K, WU G, MO P, et al. The combined effects of maize straw mulch and no-tillage on grain yield and water and nitrogen use efficiency of dry-land winter wheat (*Triticum aestivum* L.) [J/OL]. Soil and tillage research, 2020, 197: 104485 [2025-04-23]. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104485>.
- [9] 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 (in Chinese with English abstract).
- [10] 黄星瑜, 朱安繁, 姚锋先, 等. 有机肥替代部分化肥对油菜产量和品质、肥料利用率及土壤性质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2024(1): 141-148. HUANG X Y, ZHU A F, YAO F X, et al. Effects of partial substitution of chemical fertilizer by organic fertilizer on rapeseed yield, quality and fertilizer utilization rate as well as soil properties[J]. Soil and fertilizer sciences in China, 2024(1): 141-148 (in Chinese with English abstract).
- [11] YANG Y H, LI M J, WU J C, et al. Impact of combining long-term subsoiling and organic fertilizer on soil microbial biomass carbon and nitrogen, soil enzyme activity, and water use of winter wheat[J/OL]. Frontiers in plant science, 2022, 12: 788651 [2025-04-23]. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.788651>.
- [12] KARAMI A, HOMAEI M, AFZALINIA S, et al. Organic resource management: impacts on soil aggregate stability and other soil physico-chemical properties[J]. Agriculture, ecosystems & environment, 2012, 148: 22-28.
- [13] YANG Y H, LIU H, WU J C, et al. Soil enzyme activities, soil physical properties, photosynthetic physical characteristics and water use of winter wheat after long-term straw mulch and organic fertilizer application[J/OL]. Frontiers in plant science, 2023, 14: 1186376 [2025-04-23]. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2023.1186376>.
- [14] LIU C G, LI F R, ZHOU L M, et al. Effect of organic manure and fertilizer on soil water and crop yields in newly-built terraces with loess soils in a semi-arid environment[J]. Agricultural water management, 2013, 117: 123-132.
- [15] 徐华丽. 长江流域油菜施肥状况调查及配方施肥效果研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2012. XU H L. Huazhong agricultural university: master s degree dissertation[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2012 (in Chinese with English abstract).
- [16] 徐华丽, 鲁剑巍, 李小坤, 等. 湖北省油菜施肥现状调查[J]. 中国油料作物学报, 2010, 32(3): 418-423. XU H L, LU J W, LI X K, et al. Investigation of present fertilization on rapeseed in Hubei Province[J]. Chinese journal of oil crop sciences, 2010, 32(3): 418-423 (in Chinese with English abstract).
- [17] 周鹍, 鲁剑巍, 刘涛, 等. 油菜长效专用配方肥施用效果研究[J]. 中国土壤与肥料, 2015(4): 71-75. ZHOU L, LU J W, LIU T, et al. Effects of the slow-released special formula fertilizer on oilseed rape (*Brassica napus* L.) [J]. Soil and fertilizer sciences in China, 2015(4): 71-75 (in Chinese with English abstract).
- [18] FENG D, WANG X J, GAO J P, et al. Exogenous calcium: Its mechanisms and research advances involved in plant stress tolerance[J/OL]. Frontiers in plant science, 2023, 14: 1143963 [2025-04-23]. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1143963>.
- [19] LI H, HUO Y, WENG X H, et al. Regulation of the growth of Mongolian pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) by calcium-water coupling in a semiarid region[J/OL]. Ecological indicators, 2022, 137: 108736 [2025-04-23]. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108736>.
- [20] CANELLAS L P, OLIVARES F L, AGUIAR N O, et al. Humic and fulvic acids as biostimulants in horticulture[J]. Scientia horticultrae, 2015, 196: 15-27.
- [21] 郭世文, 李品芳, 芦谅, 等. 不同土壤水分条件下施用黄腐酸与保水剂对玉米生长、耗水及水分利用效率的影响[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(1): 1-11. GUO S W, LI P F, LU L, et al. Maize (*Zea mays*) growth, water consumption and water use efficiency by application of a super absorbent polymer and fulvic acid under two soil moisture conditions[J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22(1): 1-11 (in Chinese with English abstract).
- [22] 姚媛媛, 王晓琪, 杨越超, 等. 控释尿素与黄腐酸提高稻麦轮作系统产量和效益的协同效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(12): 2122-2132. YAO Y Y, WANG X Q, YANG Y C, et al. Yield and economic profit synergism of controlled release urea and fulvic acid in rice-wheat rotation system[J]. Journal of plant nutrition and fertilizers, 2019, 25(12): 2122-

- 2132 (in Chinese with English abstract).
- [23] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000. BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000 (in Chinese).
- [24] 燕鹏,崔红艳,方子森,等.补充灌溉对土壤水分和胡麻籽粒产量的影响[J].水土保持研究,2017,24(1):328-333. YAN P, CUI H Y, FANG Z S, et al. Effects of supplemental irrigation on soil moisture and grain yield of *Linum usitatissimum* linn[J]. Research of soil and water conservation, 2017, 24(1): 328-333 (in Chinese with English abstract).
- [25] ZHANG Y Q, WANG J D, GONG S H, et al. Straw mulching improves soil water content, increases flag leaf photosynthetic parameters and maintains the yield of winter wheat with different irrigation amounts [J/OL]. Agricultural water management, 2021, 249: 106809 [2025-04-23]. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106809>.
- [26] YANG H K, LI J G, WU G, et al. Maize straw mulching with no-tillage increases fertile spike and grain yield of dryland wheat by regulating root-soil interaction and nitrogen nutrition [J/OL]. Soil and tillage research, 2023, 228: 105652 [2025-04-23]. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105652>.
- [27] HAFEEZ A, ALI S, MA X L, et al. Photosynthetic characteristics of boll subtending leaves are substantially influenced by applied K to N ratio under the new planting model for cotton in the Yangtze River Valley [J]. Field crops research, 2019, 237: 43-52.
- [28] 杨丽佩,韩世健,韦本辉,等.有机肥与粉垄互动对甘蔗光合生理特性及组织细胞结构的影响[J].作物杂志,2024(1):148-156. YANG L P, HAN S J, WEI B H, et al. Effects of interaction between organic fertilizer and Fenlong on photosynthetic physiological characteristics and tissue and cell structure of sugarcane [J]. Crops, 2024 (1) : 148-156 (in Chinese with English abstract).
- [29] 岑慧芳,钱文武,朱慧森,等.干旱胁迫对草地早熟禾叶片显微结构和光合特征的影响[J].草地学报,2023,31(5):1368-1377. CEN H F, QIAN W W, ZHU H S, et al. Effects of drought stress on leaf microstructure and photosynthetic characteristics of *Poa pratensis* [J]. Acta agrestia sinica, 2023, 31 (5): 1368-1377 (in Chinese with English abstract).
- [30] 赵永长,宋文静,邱春丽,等.黄腐酸钾对渗透胁迫下烤烟幼苗生长和光合荧光特性的影响[J].中国烟草学报,2016,22(4):98-106. ZHAO Y C, SONG W J, QIU C L, et al. Effects of fulvic acid potassium on growth and photosynthetic fluorescence characteristics of flue-cured tobacco seedlings under osmotic stress [J]. Acta tabacaria sinica, 2016, 22(4): 98-106 (in Chinese with English abstract).
- [31] 卢彩云,罗锡文,李洪文,等.我国保护性耕作的发展与政策建议[J].中国工程科学,2024,26(2):103-112. LU C Y, LUO X W, LI H W, et al. Progress and suggestions of conservation tillage in China [J]. Strategic study of CAE, 2024, 26 (2): 103-112 (in Chinese with English abstract).
- [32] TANGYUAN N, BIN H, NIANYUAN J, et al. Effects of conservation tillage on soil porosity in maize-wheat cropping system [J]. Plant, soil and environment, 2009, 55(8): 327-333.
- [33] 费聪.有机肥替代部分化肥氮对晋西南旱区玉米根系生长及其生理活性的影响[J].中国土壤与肥料,2024(9):94-103. FEI C. Effects of organic fertilizer substitution of chemical nitrogen on root growth and physiological activity of maize in arid area of Southwest Shanxi Province [J]. Soil and fertilizer sciences in China, 2024(9): 94-103 (in Chinese with English abstract).
- [34] YIN W, FAN Z L, HU F L, et al. No-tillage with straw mulching boosts wheat grain yield by improving the eco-physiological characteristics in arid regions [J]. Journal of integrative agriculture, 2023, 22(11): 3416-3429.
- [35] AKHTAR K, WANG W Y, REN G X, et al. Integrated use of straw mulch with nitrogen fertilizer improves soil functionality and soybean production [J/OL]. Environment international, 2019, 132: 105092 [2025-04-23]. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105092>.
- [36] ZHAI L C, WANG Z B, ZHAI Y C, et al. Partial substitution of chemical fertilizer by organic fertilizer benefits grain yield, water use efficiency, and economic return of summer maize [J/OL]. Soil and tillage research, 2022, 217: 105287 [2025-04-23]. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105287>.
- [37] ZHAI L Y, YAN A, SHAO K T, et al. Large vascular bundle phloem area 4 enhances grain yield and quality in rice *via* source-sink-flow [J]. Plant physiology, 2023, 191(1): 317-334.
- [38] 李向东,季书勤,张德奇,等.豫南雨养区周年不同耕作模式对小麦花后干物质动态和产量的影响[J].生态学杂志,2011,30(9):1942-1948. LI X D, JI S Q, ZHANG D Q, et al. Effects of different corn/wheat year-round tillage modes on post-anthesis dry matter accumulation and transfer and grain yield of wheat in rain-fed farming area of Southern Henan Province [J]. Chinese journal of ecology, 2011, 30(9): 1942-1948 (in Chinese with English abstract).
- [39] ZHU M T, YUAN L, ZHOU F, et al. Time-dependent regulation of soil aggregates on fertilizer N retention and the influence of straw mulching [J/OL]. Soil biology and biochemistry, 2024, 198: 109551 [2025-04-23]. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2024.109551>.
- [40] 刘高远,杨玥,张齐,等.覆盖栽培对渭北旱地冬小麦生产力及土壤肥力的影响[J].植物营养与肥料学报,2018,24(4):857-868. LIU G Y, YANG Y, ZHANG Q, et al. Effects of three mulching modes on winter wheat productivity and soil fertility in dryland of Weibei Rainfed Area [J]. Journal of plant nutrition and fertilizers, 2018, 24 (4) : 857-868 (in Chinese with English abstract).
- [41] CANELLAS L P, OLIVARES F L. Physiological responses

- to humic substances as plant growth promoter[J/OL]. Chemical and biological technologies in agriculture, 2014, 1(1): 3 [2025-04-23]. <https://doi.org/10.1186/2196-5641-1-3>.
- [42] 李继福,薛欣欣,李小坤,等.水稻-油菜轮作模式下秸秆还田替代钾肥的效应[J].植物营养与肥料学报,2016,22(2): 317-325.LI J F, XUE X X, LI X K, et al. Substituting effect of crop residues for potassium fertilizer in rice-rapeseed rotation system [J]. Journal of plant nutrition and fertilizer, 2016, 22(2): 317-325 (in Chinese with English abstract).
- [43] 付强,张平良,刘晓伟,等.有机肥替代部分化肥对半干旱区马铃薯产量、水分和氮素利用率的影响[J].中国土壤与肥料,2023(10):143-149.FU Q, ZHANG P L, LIU X W, et al. Effects of organic fertilizers partial replacing chemical fertilizers on potato yield, water and nitrogen utilization in semi-arid areas[J]. Soil and fertilizer sciences in China, 2023(10): 143-149 (in Chinese with English abstract).

## Effects of combined application of formula fertilizer and organic fertilizer on yield and water-fertilizer use efficiency of direct-seeded rapeseed under no-tillage and mulching

ZHANG Yue, TAO Mingcong, LI Xiaokun, WANG Sheliang, DING Guangda, XU Fangsen

*College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China*

**Abstract** *Brassica napus* cultivar ‘Dadi 199’ was used to conduct a field plot experiment to establish a collaborative technical mode for high-yield rapeseed and efficient utilization of water-fertilizer in the rice-rapeseed rotation system in the middle and lower reaches of the Yangtze River. Four treatments including T1 (conventional cultivation without fertilization), T2 (conventional cultivation with conventional fertilization), T3 (conventional cultivation with formula fertilizer), and T4 (no-tillage and mulching combined with formula and organic fertilizers) were set up. The effects of different treatments on the photosynthetic parameters, yield, components of yield, nutrient accumulation, and water-fertilizer use efficiency were analyzed. Results showed that the net photosynthetic rate, SPAD value, leaf area, and instantaneous water use efficiency in T4 was enhanced compared to that in T2 and T3, with a significant difference between T4 and T2 ( $P < 0.05$ ). T4 achieved a 20.5% and 12.0% increase in yield compared to that in T2 and T3 mainly by increasing the siliques per plant, seeds per silique, silique length and 1 000-seed weight. Among different treatments, T4 had the highest accumulation and proportion of nitrogen, phosphorus, and potassium nutrients in seeds, but the accumulation of phosphorus and potassium in the roots, stems, and silique walls was lower than that in T2. The contribution rate, agronomic utilization rate, partial productivity, physiological utilization rate of fertilizer, and the use rate of water followed the order of  $T4 > T3 > T2$ , with an increase of 16.5%, 53.1%, 31.2%, 48.7%, and 20.7% in T4, respectively, compared to that in T2. There was a significant difference between T4 and T2, except for the contribution rate of fertilizer. The water-fertilizer utilization efficiency in T3 was better than that in T2, with no significant difference between the two. It is indicated that T4 (no-tillage and mulching combined with formula and organic fertilizers) for direct-seeded rapeseed is a planting mode suitable for promotion in the middle and lower reaches of the Yangtze River region to achieve the high-yield and efficient utilization of water-fertilizer of rapeseed.

**Keywords** rapeseed; no-tillage; light and simplified planting; straw mulching; formula fertilizer; organic fertilizer; nutrient accumulation; water-fertilizer use efficiency

(责任编辑:张志钰)