

种植方式和施氮量对冬油菜产量与水氮利用效率的影响

谷晓博, 李援农*, 黄鹏, 杜娅丹, 方恒, 陈朋朋

(西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 旱区农业水土工程教育部重点实验室, 杨凌 712100)

摘要: 为确定中国西北地区冬油菜适宜的种植方式及其施氮量, 该文通过3 a田间试验, 在垄沟集雨 (ridge film mulching and furrow planting, RFMF) 和传统平作 (flat planting, FP) 2种植方式下设置6个施氮量: 0、60、120、180、240和300 kg/hm² (以N计, 下同), 分别记为N0、N60、N120、N180、N240和N300, 研究不同种植方式和施氮量对冬油菜产量和水氮利用效率的影响。结果表明, 与FP相比, RFMF能显著提高冬油菜收获时的地上部干物质质量 (aboveground dry matter, ADM)、氮素累积吸收量、籽粒产量、水分利用效率 (water use efficiency, WUE) 和氮肥偏生产力 (nitrogen partial factor productivity, NPFP), 并显著降低其耗水量 (evapotranspiration, ET)。相同ET下, RFMF方式下冬油菜的籽粒产量和WUE均高于FP。RFMF方式下, 在0~240 kg/hm²施氮范围内, 冬油菜的ADM、氮素累积吸收量、籽粒产量和WUE均随施氮量的增加而显著增加, 超过240 kg/hm², ADM和氮素累积吸收量不再显著变化, 而ET显著增加, 籽粒产量和WUE显著降低。2种植方式下, 冬油菜的氮肥农学利用率 (nitrogen agronomic efficiency, NAE)、生理利用率 (nitrogen physiological efficiency, NPE) 和吸收利用率 (nitrogen recovery efficiency, NRE) 均随施氮量的增加, 先增后降, 且基本在N180处理最大; 冬油菜的NPFP随施氮量的增加而降低。RFMF方式下, N240处理冬油菜的NAE、NPE、NRE和NPFP与N180处理无显著差异; 且N240处理冬油菜的籽粒产量和净效益最高, 3a平均为3 002 kg/hm²和9 538元/hm²; FP方式下, N180处理冬油菜的籽粒产量和净效益最高, 3a平均为2 291 kg/hm²和7 498元/hm²; 2种植方式的最高产量和净效益相比, RFMF可分别提高31.0%和27.2%。综上, 在西北地区RFMF可应用于冬油菜的栽培, 且适宜施氮量为240 kg/hm²。

关键词: 肥料; 栽培; 种植方式; 施氮量; 籽粒产量; 水氮利用效率; 冬油菜

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.10.014

中图分类号: S565.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2018)-10-0113-11

谷晓博, 李援农, 黄鹏, 杜娅丹, 方恒, 陈朋朋. 种植方式和施氮量对冬油菜产量与水氮利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(10): 113-123. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.10.014 http://www.tcsae.org

Gu Xiaobo, Li Yuannong, Huang Peng, Du Yadan, Fang Heng, Chen Pengpeng. Effects of planting patterns and nitrogen application rates on yield, water and nitrogen use efficiencies of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.)[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(10): 113-123. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.10.014 http://www.tcsae.org

0 引言

干旱缺水是限制中国西北干旱半干旱地区农业发展的一个重要因素。在中国西北干旱半干旱地区, 大部分降雨小于5 mm, 不能直接被作物吸收利用。在半干旱地区, 仅有25%~30%的降雨被作物吸收利用, 而70%~75%降雨以无效蒸发和径流形式损失^[1]。据报道, 因干旱少雨、降雨分布不均和蒸发量大等原因, 西北地区春小麦和玉米的产量均很低, 基本维持在1 500~3 000 kg/hm² (小麦) 和2 500~3 500 kg/hm² (玉米)^[2-3]。因此, 研究如何使大量的无效蒸发降雨形成生产力, 探索合理的集雨保墒措施, 将小于5 mm的无效降雨转化成有效降雨, 对解决西北地区水资源缺乏、保障粮油安全具有重要意义。

垄沟集雨种植技术是结合保护性耕作和覆膜技术, 通过在田间修筑垄沟、垄面覆膜、沟内种植作物, 实现降雨由垄面向沟内汇集的田间集水农业技术。在垄沟集雨种植方式下, 覆膜垄面产生的径流与沟内降雨进行叠加, 可以将小于5 mm的无效降雨变为有效降雨贮存于土壤中^[4-5]。Li等^[6]研究指出垄沟集雨种植方式因能有效的利用小于5 mm的无效降雨, 其集雨效率能达到87%左右。近年来, 有关垄沟集雨种植方式对作物影响的报道很多。周昌明^[7]研究发现, 与传统平作相比, 垄沟集雨种植的蓄水效率提高8.2%~49.9%, 平均贮水量提高9.5%~13.2%, 玉米根系密度提高13.9%~16.9%, 玉米增产22.7%~41.4%, 水分利用效率提高32.5%~56.0%。Qin等^[8]研究表明, 垄沟集雨种植能提高马铃薯产量36.3%~86.8%, 水分利用效率65.8%~83.9%。Chen等^[9]研究指出, 垄沟集雨种植能分别提高冬小麦产量和水分利用效率35%和25%, 降低耗水量8%。目前, 国内外学者主要针对玉米^[7,10]、马铃薯^[8,11]、小麦^[9]和苜蓿^[12]等进行了大量的垄沟集雨栽培研究, 但垄沟集雨种植方式对油菜的适用性研究还很少。

油菜是世界上广泛种植的一种作物, 中国作为一个

收稿日期: 2017-11-09 修订日期: 2018-02-10

基金项目: 公益性行业 (农业) 科研专项资助项目 (201503125、201503105) 和国家高技术研究发展计划 (863 计划) 资助项目 (2011AA100504)

作者简介: 谷晓博, 河南洛阳人, 博士生, 主要从事节水灌溉新技术研究。

Email: gxb123027@163.com

*通信作者: 李援农, 陕西大荔人, 教授, 博士生导师, 主要从事节水灌溉新技术及3S技术应用研究。Email: liyuannong@163.com。

油菜种植大国,从2001年到2014年,每年平均能生产1 260万t油菜籽^[13]。近几十年来,中国油菜产量的稳步提升不仅在于品种的改良、栽培技术的进步和国家政策的大力支持^[14],肥料,尤其是无机氮肥的施入也是一个非常重要的原因。油菜是需氮量较多的一种作物,据报道,油菜累积吸收60 kg左右的氮素,才能生产1 t油菜籽^[15]。因此,为获得高产,农民常年不合理地施入大量氮肥,导致氮肥利用效率很低,而且还造成环境污染、油菜籽含油率降低等问题^[15-16]。过量施氮还能导致油菜植株旺长,茎秆充实度降低,大大增加油菜因倒伏而减产的风险^[17]。因此,确定油菜合理的施氮量,对提高油菜氮肥利用效率、实现油菜优质高产以及降低环境污染等具有重要意义。

油菜对施氮的响应取决于很多环境因素,包括水分、温度和土壤特性^[15]。垄沟集雨种植能够改变土壤水分和温度,进而影响氮素的运输和矿化^[18],这些因子的改变会影响油菜对氮素的响应,进而影响产量。本文通过3a田间试验,研究垄沟集雨种植和传统平作种植对冬油菜地上部干物质量、氮素累积吸收量、产量和水氮利用效率的影响,以及2种植方式下的适宜施氮量,以期为西北地区冬油菜的种植栽培和施氮策略提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

3a(2014年9月—2017年5月)田间试验于陕西省杨凌区西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室试验田(108°24'E, 34°17'N, 海拔521 m)进行。该区为暖温带季风半湿润气候,多年平均气温、降水量和蒸发量分别为12.9℃、550~600 mm(集中在7、8和9月)和1 500 mm。试验田土壤质地为壤土,平均干容重为1.40 g/cm³,田间持水率和凋萎系数分别为24%和8.5%(质量分数)。0~20 cm土层的土壤理化性状为:有机质13.20 g/kg,全氮0.93 g/kg,碱解氮76.27 mg/kg,速效磷25.38 mg/kg,速效钾131.97 mg/kg, pH值为8.12。

3a冬油菜种植期间各月的降水量和气温分布如图1所示。除2015年9月—2016年5月间1月的最高、平均和最低气温略低外,3a各月的气温分布趋势基本一致。

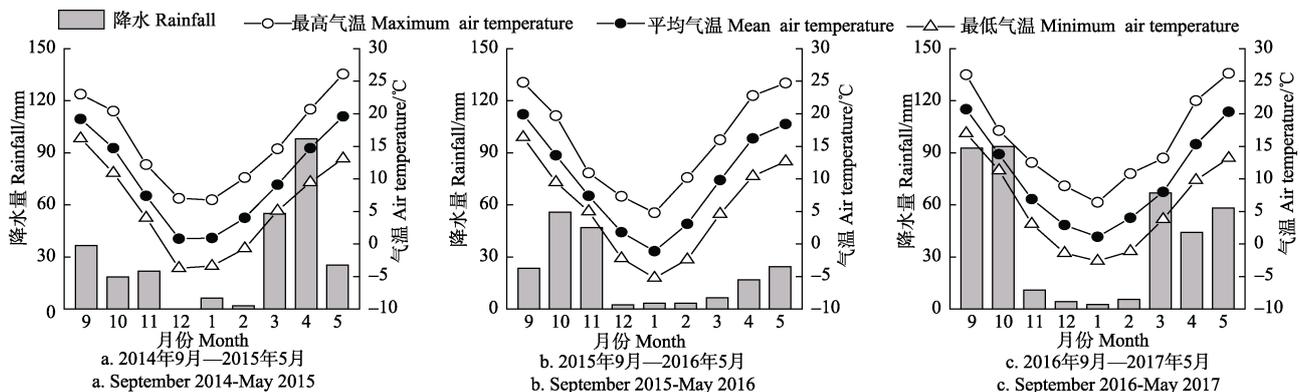


图1 试验站2014—2017年冬油菜生育期各月的降水量和温度

Fig.1 Monthly rainfall and temperature during winter oilseed rape growth season in each year of 2014-2017 at experimental site

2014年9月—2015年5月、2015年9月—2016年5月和2016年9月—2017年5月的总降水量分别为264.3、183.9和379.5 mm; 2014年9月—2015年5月降水分布呈现前期(播种后至11月底)和中期(12月初至2月底)较少、后期(3月初至收获)较多的趋势,其中178.7 mm降水集中在3、4和5月; 2015年9月—2016年5月各月降水量均较少; 2016年9月—2017年5月降水呈现前期和后期较多、中期较少的分布趋势,其中186.6 mm降水集中在9月和10月,169.3 mm集中在3、4和5月。

1.2 试验设计及过程

试验所用的冬油菜品种为“陕油107号”;所用的氮、磷、钾和硼肥分别为尿素(N≥46%)、过磷酸钙(P₂O₅≥16%)、农业用硫酸钾(K₂O≥51%)和硼砂(B≥11.5%);所用地膜为聚乙烯普通地膜(白色透明),宽0.8 m,厚0.008 mm。

试验设种植方式和施氮量2种因素,种植方式分别为:垄沟集雨种植(ridge film mulching and furrow planting pattern, RFMF, 图2a)和平作种植(flat planting pattern, FP, 图2b),其中FP为当地常规种植方式;每种种植方式下设6个施氮量:0、60、120、180、240和300 kg/hm²(以N计,下同),分别设为N0、N60、N120、N180、N240和N300。试验共12个处理,每个处理重复3次,各小区均为南北走向,面积均为4 m×5 m,完全随机排列。播种前1天旋地,划分小区,各小区按设计施氮量、90 kg/hm²(以P₂O₅计)、120 kg/hm²(以K₂O计)和15 kg/hm²(以B计)均匀撒施,翻埋后,如图2a所示起垄覆膜(1膜1垄)。分别于2014年9月21日、2015年9月16日和2016年9月10日按行距50 cm、株距约13 cm人工点播冬油菜,待长出3片真叶后按密度12万株/hm²进行间苗、定苗,其他田间生产管理均与当地保持一致。分别于2015年5月23日、2016年5月20日和2017年5月23日收获冬油菜,回收地膜。3a各小区均无灌水。

1.3 测定项目与方法

1)冬油菜地上部干物质量:冬油菜成熟后,在每小区选取5株有代表性的冬油菜,齐地剪断后,将其茎、叶和果分开,装进档案袋后放入烘箱,105℃杀青30 min,然后于75℃烘干至恒质量后,用电子天平称其干质量。

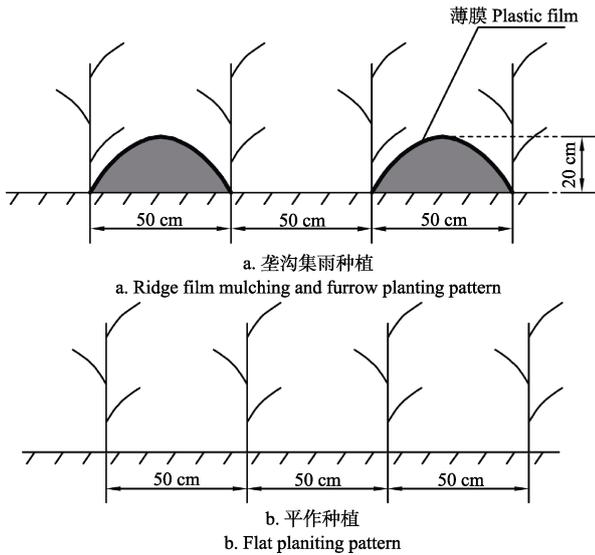


图 2 冬油菜的 2 种植方式示意图
Fig.2 Schematic diagram of two planting patterns for winter oilseed rape

2) 冬油菜地上部氮素累积量：将冬油菜各器官的干样粉碎，过 0.5 mm 筛，用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮，消煮液用连续型流动分析仪 (AA3，德国 Bran+Luebbe 公司) 测定各器官全氮含量。

各器官氮素累积量 (kg/hm²) = 各器官全氮含量 × 器官干物质量 × 种植密度；

地上部氮素累积量 (kg/hm²) = 各器官氮素累积量之和。

3) 籽粒产量：提前在各小区中间划定 1 m² 的测产区，成熟后单独收获，晒干去壳后测定籽粒产量。

4) 冬油菜耗水量和水分利用效率：在每年播前和收后测定 0~200 cm 土壤的含水率，用土钻在中间行的 2 株油菜间取土 (垄边)，每个小区 3 个测点，沿竖向每隔 10 cm 取 1 个土样，放入铝盒，在烘箱中烘干后测定土壤含水率。

播前和收后的土壤贮水量 (mm) = 10 × 土壤干容重 (g/cm³) × 土层厚度 (cm) × 土壤含水率 (%)；

冬油菜耗水量 (mm) = 灌水量 (mm) + 降水量 (mm) - 地表径流量 (mm) - 深层渗漏量 (mm) + 播前土壤贮水量 (mm) - 收后土壤贮水量 (mm)；本研究中无灌溉条件，试验期间无强降水发生，地势平坦，且各小区边

缘均设有屏障，可视地表径流量为 0；降水入渗深度不超过 2 m，可视深层渗漏量为 0。

冬油菜水分利用效率 (kg/(hm²·mm)) = 籽粒产量/冬油菜耗水量。

5) 冬油菜氮素利用效率：

氮肥农学利用率 (nitrogen agronomic efficiency, NAE)、氮肥生理利用率 (nitrogen physiological efficiency, NPE)、氮肥吸收利用率 (nitrogen recovery efficiency, NRE) 和氮肥偏生产力 (nitrogen partial factor productivity, NFPF) 的计算公式如下：

NAE (kg/kg) = (施氮区籽粒产量 - 不施氮区籽粒产量) / 施氮区的施氮量；

NPE (kg/kg) = (施氮区籽粒产量 - 不施氮区籽粒产量) / (施氮区氮素累积量 - 不施氮区氮素累积量)；

NRE (%) = (施氮区氮素累积量 - 不施氮区氮素累积量) / 施氮区的施氮量 × 100%；

NFPF (kg/kg) = 施氮区籽粒产量 / 施氮量。

1.4 数据处理与分析

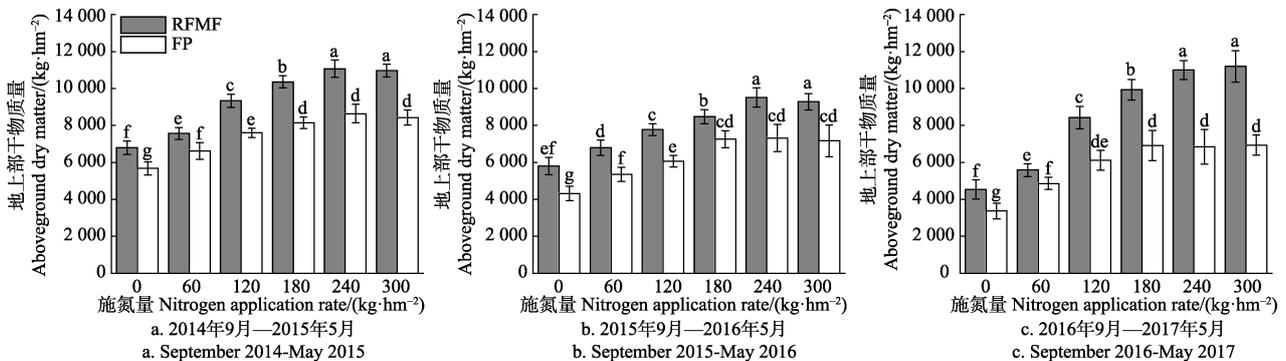
Excel 2010 软件处理试验数据；PASW Statistics 18.0 软件进行方差分析，多重比较采用最小显著性差异法 (least-significant difference, LSD)，显著性水平为 α=0.05；用 AutoCAD 2007 绘制图 2，其余各图用 OriginPro 8.5 绘制。

2 结果与分析

2.1 地上部干物质量

种植方式和施氮量对冬油菜地上部干物质量的影响显著 (图 3)。FP 下，在 0~180 kg/hm² 施氮量范围内，地上部干物质量随施氮量的增加而显著增加，当施氮量超过 180 kg/hm² 后，地上部干物质量不再随施氮量而显著变化。RFMF 下，该范围为 0~240 kg/hm²。

在相同施氮量下，RFMF 处理冬油菜的地上部干物质量均显著大于 FP 处理；与 FP 处理相比，RFMF 处理冬油菜的地上部干物质量增幅达 14.2%~61.5% (P<0.05)。在施氮量 180 kg/hm² 下，3 a RFMF 处理冬油菜的平均地上部干物质量比 FP 增加 28.9% (P<0.05)；在施氮量 240 kg/hm² 下，增幅达 38.5% (P<0.05)。



注：RFMF 和 FP 分别代表垄沟集雨种植和平作种植方式；柱上不同小写字母表示处理间在 α=0.05 水平差异显著；下同。
Note: RFMF and FP denote ridge film mulching and furrow planting pattern and flat planting pattern, respectively. Different lowercase letters on the columns mean significant difference at α=0.05 level among treatments. The same as below.

图 3 不同种植方式和施氮量对冬油菜地上部干物质量的影响

Fig.3 Effects of different planting patterns and nitrogen application rates on aboveground dry matter of winter oilseed rape

2.2 氮素累积吸收量

不同种植方式和施氮量下冬油菜的地上部氮素累积吸收量如图4所示。在相同种植方式下,冬油菜的地上部氮素累积吸收量均先随施氮量增加而增加,在RFMF方式下超过240 kg/hm²或在FP方式下超过180 kg/hm²后,地上部氮素累积吸收量不再显著变化。RFMF下,冬油菜的地上部氮素累积吸收量的变化范围为27.2~116.3 kg/hm²,而FP下为18.2~82.6 kg/hm²。

在相同施氮量下,RFMF下冬油菜的氮素累积吸收量显著大于FP。与FP相比,RFMF下冬油菜的地上部氮素累积吸收量增幅达17.4%~61.3% ($P<0.05$)。在施氮量180 kg/hm²下,2014年9月—2015年5月、2015年9月—2016年5月和2016年9月—2017年5月RFMF下冬油菜的地上部氮素累积吸收量分别比FP增加22.9%、25.5%和25.9% ($P<0.05$);在施氮量240 kg/hm²下,3a增幅分别为40.0%、61.3%和45.8% ($P<0.05$)。

2.3 籽粒产量

RFMF下,在0~240 kg/hm²施氮量范围内,冬油菜

产量随施氮量的增加而显著增加,随后显著降低(2016年9月—2017年5月除外)(图5);3a的N240处理的平均产量分别比N0、N60、N120、N180和N300处理显著增加141.3%、91.1%、41.2%、8.4%和8.8% ($P<0.05$)。FP下,3a的N180处理冬油菜的产量均最高,显著高于N0、N60和N120处理,但与N240和N300处理差异不显著 ($P>0.05$)。3a的N180处理的平均产量分别比N0、N60和N120显著增加124.3%、80.4%和29.5% ($P<0.05$)。RFMF下N240处理的平均产量为3002 kg/hm²,FP下N180处理的平均产量为2291 kg/hm²。2种方式下的最高产量相比,RFMF方式增幅31.0% ($P<0.05$)。

在相同施氮量下,3a的RFMF产量比FP显著提高15.5%~43.5%。当施氮量在0~60 kg/hm²范围内,RFMF和FP方式下冬油菜的产量分别维持在1062~1579 kg/hm²和889~1458 kg/hm²,增幅仅为15.5%~37.7%(平均22.9%);当施氮量增至240 kg/hm²时,RFMF和FP方式下的产量分别维持在2606~3202 kg/hm²和2007~2498 kg/hm²,增幅可达28.2%~43.5%(平均33.7%)。

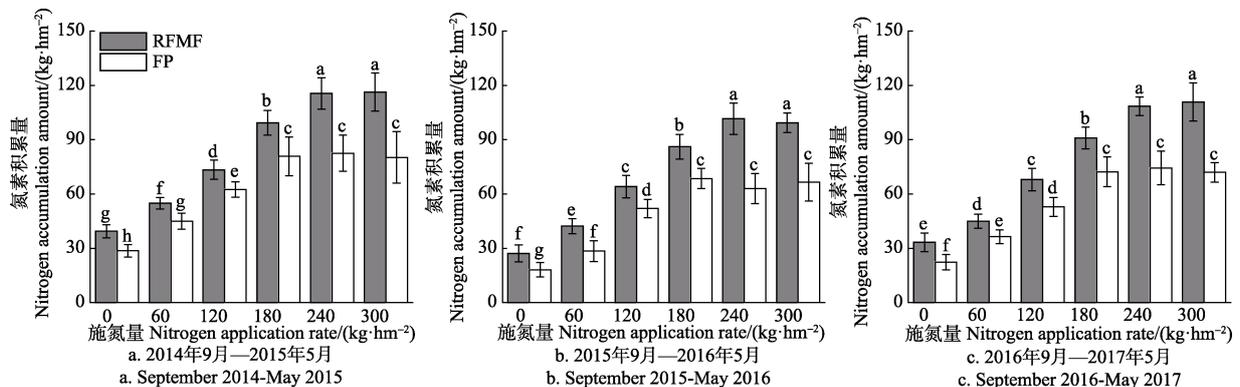


图4 不同种植方式和施氮量对冬油菜地上部氮素累积量的影响

Fig.4 Effects of different planting patterns and nitrogen application rates on nitrogen accumulation amount in aboveground of winter oilseed rape

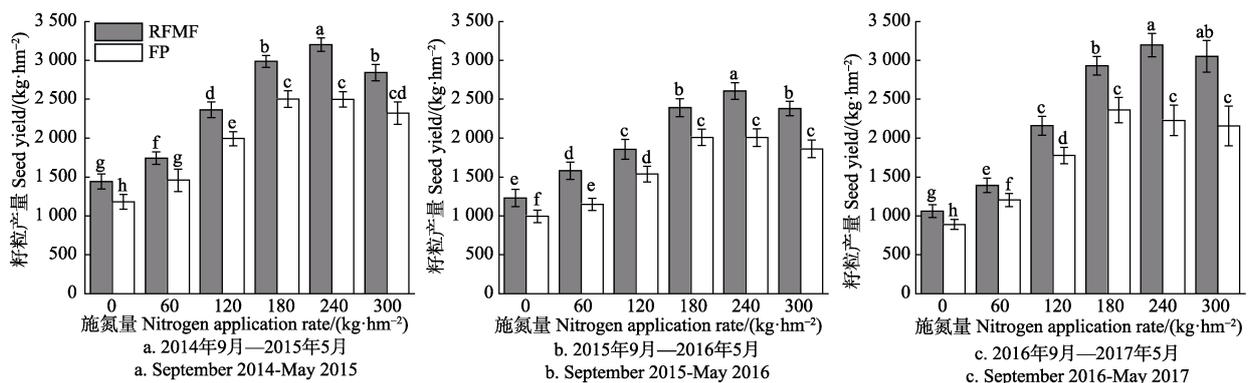


图5 不同种植方式和施氮量对冬油菜籽粒产量的影响

Fig.5 Effects of different planting patterns and nitrogen application rates on yield of winter oilseed rape

2.4 耗水量和水分利用效率

不同种植方式和施氮量下冬油菜的耗水量如表1所示。在同一种种植方式下,耗水量随施氮量的增加而显著增加,与不施氮(N0)相比,RFMF和FP下施氮处理的耗水量分别增加7.0%~33.7%和5.3%~24.9% ($P<0.05$)。RFMF下,除2016—2017年外,N240处理的耗水量与

N180处理无显著差异。在相同施氮量下,RFMF处理的耗水量均显著大于FP,降幅为3.4%~9.9% ($P<0.05$)。

种植方式和施氮量对冬油菜水分利用效率的影响显著(表1)。在相同施氮量下,RFMF显著提高冬油菜的水分利用效率,RFMF处理冬油菜的水分利用效率与FP相比提高25.5%~69.6%。当施氮量在0~60 kg/hm²范围

内, RFMF 和 FP 方式下冬油菜的水分利用效率分别维持在 3.1~5.6 kg/(hm²·mm)和 2.2~4.2 kg/(hm²·mm), 增幅为 33.3%~42.3% (平均 37.6%); 当施氮量增至 240 kg/hm² 时, RFMF 和 FP 方式下的水分利用效率分别维持在 7.8~9.5 kg/(hm²·mm)和 4.6~6.7 kg/(hm²·mm), 增幅可达 37.9%~69.6% (平均 48.0%)。在相同种植方式下, 水分利用效率随施氮量的增加先增加后降低, 其中 RFMF 在 N240 处理最大, 而 FP 在 N180 处理最大。在 RFMF 下, N240 处理的水分利用效率显著大于其他施氮处理 (2016—2017 年 N240 和 N180 无显著差异); 在 FP 下, N180 处理显著大于 N0、N60、N120 和 N300 处理, 但与 N240 处理无显著差异。

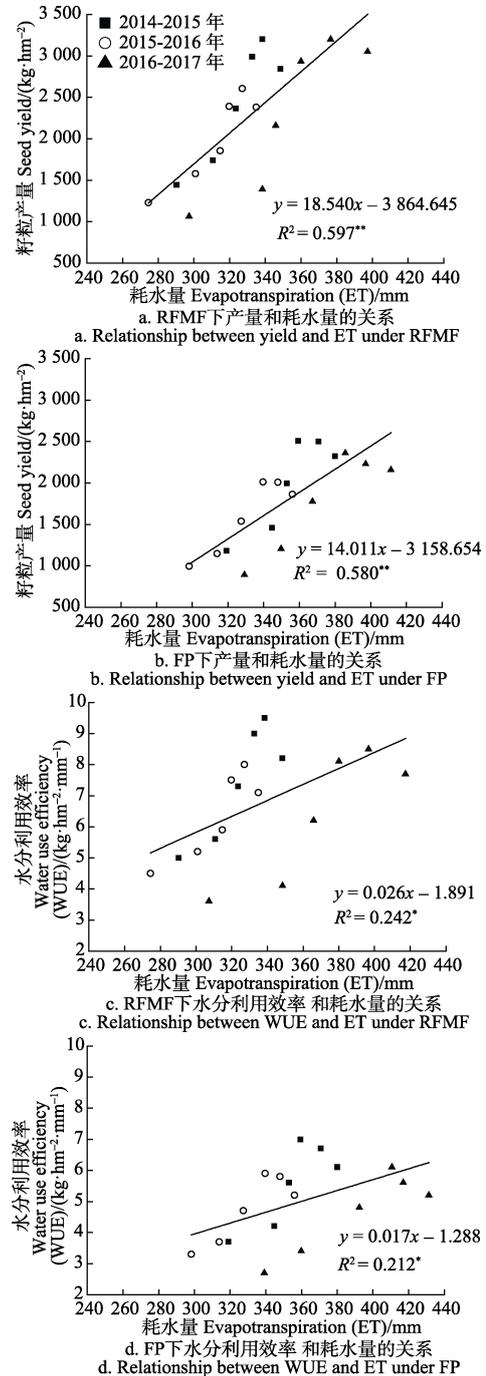
表 1 不同处理下冬油菜的耗水量 (ET) 和水分利用效率 (WUE)

Table 1 Evapotranspiration (ET) and water use efficiency (WUE) of winter oilseed rape under different treatments

年份 Year	种植方式 Planting pattern	施氮量 Nitrogen application (kg·hm ⁻²)	播前 贮水量 Soil water storage before sowing/mm	降雨量 /mm	收获后 贮水量 Soil water storage after harvest/mm	耗水量 ET/mm	水分利 用效率 WUE (kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)
2014	RFMF	0	534.3	264.3	508.3	290.3h	5.0f
		60	534.3	264.3	487.9	310.7g	5.6ef
		120	534.3	264.3	475.1	323.5f	7.3d
		180	534.3	264.3	465.9	332.7e	9.0b
		240	534.3	264.3	460.2	338.4e	9.5a
		300	534.3	264.3	450.1	348.5d	8.2c
2015	FP	0	534.3	264.3	479.5	319.1f	3.7h
		60	534.3	264.3	453.8	344.8de	4.2g
		120	534.3	264.3	445.6	353.0cd	5.6ef
		180	534.3	264.3	439.3	359.3c	7.0d
		240	534.3	264.3	427.8	370.8b	6.7de
		300	534.3	264.3	418.6	380.0a	6.1e
2015	RFMF	0	559.3	183.9	468.7	274.5f	4.5d
		60	559.3	183.9	442.3	300.9e	5.2cd
		120	559.3	183.9	428.4	314.8d	5.9c
		180	559.3	183.9	423.4	319.8cd	7.5b
		240	559.3	183.9	416.1	327.1c	8.0a
		300	559.3	183.9	408.2	335.0bc	7.1b
2016	FP	0	559.3	183.9	444.9	298.3e	3.3e
		60	559.3	183.9	429.2	314.0d	3.7e
		120	559.3	183.9	415.8	327.4c	4.7d
		180	559.3	183.9	403.6	339.6b	5.9c
		240	559.3	183.9	395.2	348.0a	5.8c
		300	559.3	183.9	387.0	356.2a	5.2cd
2016	RFMF	0	474.0	379.5	556.2	297.3h	3.1f
		60	474.0	379.5	515.1	338.4fg	3.7e
		120	474.0	379.5	507.6	345.9f	5.6c
		180	474.0	379.5	493.4	360.1e	7.4ab
		240	474.0	379.5	476.9	376.6cd	7.8a
		300	474.0	379.5	456.1	397.4b	7.1b
2017	FP	0	474.0	379.5	524.3	329.2g	2.2g
		60	474.0	379.5	503.7	349.8f	2.6fg
		120	474.0	379.5	486.1	367.4d	4.0e
		180	474.0	379.5	467.8	385.7c	5.0d
		240	474.0	379.5	456.4	397.1b	4.6de
		300	474.0	379.5	442.2	411.3a	4.3e

注：同列不同小写字母表示处理间 $\alpha=0.05$ 差异显著；下同。
Note: Different lower letters mean significant differences at $\alpha=0.05$ level within a growing season. The same as below.

RFMF 和 FP 下冬油菜耗水量与其产量和水分利用效率的关系如图 6 所示。RFMF 下冬油菜耗水量与其产量和水分利用效率的线性关系的斜率分别为 18.540 和 0.026, 而 FP 下分别为 14.011 和 0.017。这说明在耗水量相同的情况下, RFMF 下冬油菜的产量和水分利用效率均高于 FP。



注：*和**分别表示在 $\alpha=0.05$ 和 $\alpha=0.01$ 水平上显著相关。下同。
Note: * and ** denote significant correlation at $\alpha=0.05$ and $\alpha=0.01$ levels, respectively. The same as below.

图 6 不同种植方式下耗水量与冬油菜籽粒产量和水分利用效率的关系

Fig.6 Relationship between evapotranspiration and seed yield, water use efficiency of winter oilseed rape under ridge film mulching and furrow planting pattern (RFMF) and flat planting pattern (FP)

2.5 氮素利用效率

不同种植方式和施氮量对冬油菜氮肥利用效率有显著影响(表2)。在相同种植方式下, NAE、NPE和NRE均随施氮量的增加先增加后降低, NPFP随施氮量的增加而降低。在RFMF下, N180处理的NAE、NPE和NRE基本均为最大, 除2016—2017年NAE显著高于N240处理外, 其他均与N240处理无显著差异; N240与N180处理的NPFP也不存在显著差异。在FP下, N180处理的NAE、NPE和NRE基本均为最大, 且N180处理3a的NAE均显著大于N240处理, NPE和NRE与N240处理均无显著差异(除2016—2017年NRE显著大于N240处理外); N180处理的NPFP与N120处理无显著差异, 2015—2016和2016—2017年显著大于N240处理($P < 0.05$)。

在本研究中, 因为RFMF和FP下氮肥农学利用率、生理利用率和吸收利用率的计算基数不同, 故本研究采用氮肥偏生产力比较RFMF和FP处理的氮肥利用效率的差异。在相同施氮量下, RFMF处理冬油菜的氮肥偏生产力均大于FP, 3a的RFMF下N300处理的氮肥偏生产力均显著大于FP, 平均可增加30.8%; 2015—2016和2016—2017年RFMF下N240处理的氮肥偏生产力均显著大于FP, 平均可增加39.0%。

RFMF和FP下施氮量与冬油菜的氮肥农学利用效率、生理利用率和吸收利用率均呈二次抛物线关系, 与氮肥偏生产力呈线性关系(图7)。由图7也可以看出, 在相同施氮量下, RFMF下冬油菜的氮肥农学利用效率、吸收利用率和氮肥偏生产力均明显大于FP。而对于氮肥生理利用效率, 当施氮量小于 244.8 kg/hm^2 时, RFMF大于FP; 当施氮量大于 244.8 kg/hm^2 时, FP大于RFMF。

2.6 经济效益分析

表3为2014—2015年、2015—2016年和2016—2017年不同处理下冬油菜的经济效益分析。在相同种植方式下, 冬油菜的净效益均随着施氮量的增加呈先增后减趋势。在RFMF方式下, N240处理的净效益最大, 3a每公顷的平均净效益(9538 元/hm^2)分别比N0、N60、N120、N180和N300处理高8428元、6885元、4202元、1070元和1308元。在FP方式下, N180处理的净效益最大, 3a每公顷的平均净效益(7498 元/hm^2)分别比N0、N60、N120、N240和N300处理高6078元、4925元、2520元、322元和1070元。2种方式的最高净效益相比, RFMF平均可提高27.2%。

在相同施氮量下, 2种植方式下冬油菜的净效益可以 60 kg/hm^2 分为2个阶段。在N0和N60施氮处理下, RFMF方式下冬油菜的净效益小于FP方式(2015—2016年N60施氮处理除外); 在N120、N180、N240和N300施氮处理下, RFMF方式下冬油菜的净效益大于FP方式。RFMF和FP方式下冬油菜的净效益之差在N0、N60、N120、N180、N240和N300施氮处理分别为 $-560 \sim -115 \text{ 元/hm}^2$ 、 $-490 \sim 735 \text{ 元/hm}^2$ 、 $165 \sim 485 \text{ 元/hm}^2$ 、 $480 \sim 1435 \text{ 元/hm}^2$ 、 $1570 \sim 3420 \text{ 元/hm}^2$ 和 $1165 \sim 3055 \text{ 元/hm}^2$ 。可见, 在N240施氮处理下RFMF和FP方式下冬油菜的净效益之差最大。

表2 不同处理下冬油菜的氮肥农学利用率(NAE)、氮肥生理利用率(NPE)、氮肥吸收利用率(NRE)和氮肥偏生产力(NPFP)

Table 2 Nitrogen agronomic efficiency (NAE), N physiological efficiency (NPE), N recovery efficiency (NRE), and N partial factor productivity (NPFP) of winter oilseed rape under different treatments

年份 Year	种植方式 Planting pattern	施氮量 Nitrogen application rate/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	NAE /($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	NPE /($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	NRE /%	NPFP /($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
2014— 2015 年	RFMF	0	—	—	—	—
		60	5.0de	19.5b	25.7b	29.0a
		120	7.7b	27.2a	28.3ab	19.7b
		180	8.6a	25.8a	33.2a	16.6bc
		240	8.2ab	25.8a	31.7a	14.2c
	300	4.7d	18.2c	25.6b	9.5d	
	FP	0	—	—	—	—
		60	4.6d	17.2c	27.0ab	24.3ab
		120	6.8c	24.1a	28.2ab	16.6bc
		180	7.4b	25.4a	28.9ab	13.9c
240		5.5d	23.6a	23.3bc	10.4cd	
300	3.8e	21.3ab	17.8c	7.7e		
2015— 2016 年	RFMF	0	—	—	—	—
		60	5.8b	23.2a	25.2b	26.3a
		120	5.2bc	17.0b	30.8a	15.5bc
		180	6.5a	19.7ab	32.7a	13.3c
		240	6.2ab	19.9ab	31.0a	11.3c
	300	3.8d	16.0b	24.0b	7.9d	
	FP	0	—	—	—	—
		60	2.5e	14.8c	17.2c	19.1b
		120	4.5c	16.0b	28.2ab	12.8c
		180	5.6b	20.1ab	28.0ab	11.2c
240		4.2cd	19.5ab	21.6bc	8.4d	
300	2.9e	17.9b	16.1c	6.2e		
2016— 2017 年	RFMF	0	—	—	—	—
		60	5.5e	28.4ab	19.3cd	23.2a
		120	9.1b	31.7a	28.8b	18.0b
		180	10.4a	32.5a	32.0a	16.3bc
		240	8.9b	28.4ab	31.3a	13.3c
	300	6.6d	25.7b	25.8b	10.2d	
	FP	0	—	—	—	—
		60	5.3e	22.4c	23.5bc	20.1ab
		120	7.4c	29.1ab	25.4b	14.8c
		180	8.2bc	29.5ab	27.7b	13.1c
240		5.6e	25.8b	21.7c	9.3d	
300	4.2f	25.5b	16.5d	7.2e		

综合比较各处理的净效益, 3a的RFMF方式下N240处理均为最大, 排名第1; RFMF方式下N180和N300

处理的净效益也很高，排名 2 或 3 位；而 3 a 的 RFMF 方式下 N0 处理的净效益均为最低，排名第 12。可见，在 RFMF 方式下，高施氮量才能获得高效益，而低施氮量不适宜采用 RFMF 方式。

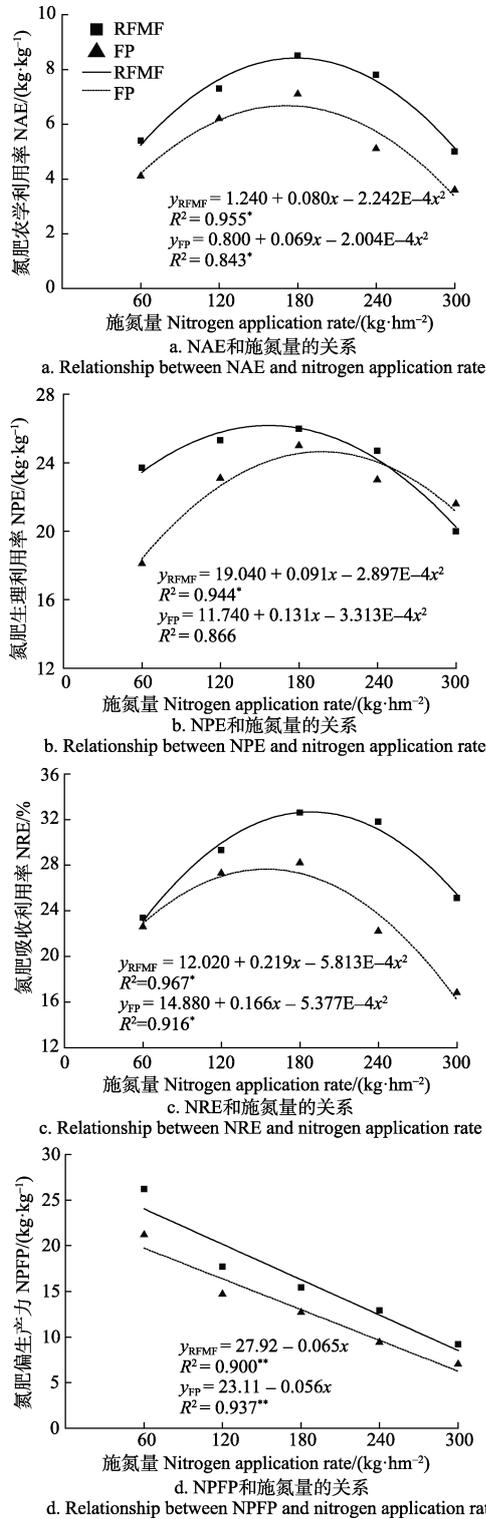


图 7 不同种植方式下施氮量与冬油菜氮肥农学利用效率(NAE)、生理利用效率(NPE)、吸收利用效率(NRE)和偏生产力(NPPFP)的关系

Fig.7 Relationship between nitrogen application rate and nitrogen agronomic efficiency (NAE), physiological efficiency (NPE), recovery efficiency (NRE), and partial factor productivity (NPPFP) of winter oilseed rape under different planting patterns

表 3 2014—2015、2015—2016 和 2016—2017 年不同处理下冬油菜的经济效益

Table 3 Economic return of winter oilseed rape under different treatments in 2014-2015, 2015-2016 and 2016-2017

年份 Year	种植 方式 Planting pattern	施氮量 Nitrogen applica- tion rate (kg·hm ⁻²)	收入 Income (元· hm ⁻²)	支出 Outcome/(元·hm ⁻²)				净效益 Economic benefit (元· hm ⁻²)	排名 Rank
				种植方式 的形 成 Establish- ment for cultivation pattern	肥料 Ferti- liser	收获 Har- vest	其他 Other		
2014 — 2015 年	RFMF	0	7 210	2 400	462	750	1 500	2 098	12
		60	8 710	2 400	552	750	1 500	3 508	10
		120	11 820	2 400	642	750	1 500	6 528	7
		180	14 935	2 400	732	750	1 500	9 553	2
		240	16 010	2 400	822	750	1 500	10 538	1
		300	14 215	2 400	912	750	1 500	8 653	3
2015 — 2016 年	FP	0	5 900	975	462	750	1 500	2 213	11
		60	7 290	975	552	750	1 500	3 513	9
		120	9 970	975	642	750	1 500	6 103	8
		180	12 515	975	732	750	1 500	8 558	4
		240	12 490	975	822	750	1 500	8 443	5
		300	11 605	975	912	750	1 500	7 468	6
2015 — 2016 年	RFMF	0	6 145	2 400	462	750	1 500	1 033	12
		60	7 895	2 400	552	750	1 500	2 693	9
		120	9 275	2 400	642	750	1 500	3 983	7
		180	11 955	2 400	732	750	1 500	6 573	2
		240	13 030	2 400	822	750	1 500	7 558	1
		300	11 900	2 400	912	750	1 500	6 338	3
2016 — 2017 年	FP	0	4 975	975	462	750	1 500	1 288	11
		60	5 735	975	552	750	1 500	1 958	10
		120	7 685	975	642	750	1 500	3 818	8
		180	10 050	975	732	750	1 500	6 093	4
		240	10 035	975	822	750	1 500	5 988	5
		300	9 310	975	912	750	1 500	5 173	6
2016 — 2017 年	RFMF	0	5 310	2 400	462	750	1 500	198	12
		60	6 960	2 400	552	750	1 500	1 758	10
		120	10 790	2 400	642	750	1 500	5 498	7
		180	14 660	2 400	732	750	1 500	9 278	3
		240	15 990	2 400	822	750	1 500	10 518	1
		300	15 260	2 400	912	750	1 500	9 698	2
2017 — 2018 年	FP	0	4 445	975	462	750	1 500	758	11
		60	6 025	975	552	750	1 500	2 248	9
		120	8 880	975	642	750	1 500	5 013	8
		180	11 800	975	732	750	1 500	7 843	4
		240	11 145	975	822	750	1 500	7 098	5
		300	10 780	975	912	750	1 500	6 643	6

注：冬油菜按 5 元·kg⁻¹；种植方式的形成包括耕地 975 元·hm⁻²、薄膜 450 元·hm⁻² 和垄沟的形成 975 元·hm⁻²；肥料包括尿素 1.5 元·kg⁻¹、磷肥 0.8 元·kg⁻¹、钾肥 3 元·kg⁻¹ 和硼肥 2 元·kg⁻¹；收获按 750 元·hm⁻² 计算；其他支出包括播种、除草和除虫按 1 500 元·hm⁻²。

Note: Rapeseed is about 5 yuan·kg⁻¹; establishment for RFMF pattern included plough (975 yuan·hm⁻²), plastic film (450 yuan·hm⁻²), and the form of RFMF pattern (975 yuan·hm⁻²); fertiliser included urea (1.5 yuan·kg⁻¹), calcium super-phosphate (0.8 yuan·kg⁻¹), potassium sulphate (3 yuan·kg⁻¹), and borax (2 yuan·kg⁻¹); harvest is about 750 yuan·hm⁻²; other included sowing, weed and pest control (1 500 yuan·hm⁻²).

3 讨论

3.1 地上部干物质质量和氮素累积吸收量

大量研究表明, 由于垄沟集雨种植方式下良好的水热条件, 作物的根系得到改善, 使土壤中的水分和养分更易被作物吸收和利用, 进而转化为生物量^[4,7,19-20]。本研究中, 垄沟集雨种植的冬油菜, 其地上部干物质质量和氮素累积吸收量分别提高了 14.2%~61.5%和 17.4%~61.3%。这与李华等^[21]的研究结果一致。

本研究中, 在 2 种植方式下, 适量施氮均能显著提高冬油菜的地上部干物质质量和氮素累积吸收量, 而过度施氮冬油菜的地上部干物质质量和氮素累积吸收量均不再显著增加, 甚至有下降趋势。这与左青松等^[22]在冬油菜、Xue 等^[23]在蓖麻、Bu 等^[24]在玉米和 Kamiji 等^[25]在马铃薯作物上的研究结果一致。

3.2 籽粒产量、耗水量和水氮利用效率

垄沟集雨种植能显著提高作物根区的土壤含水率, 增加作物根区土壤水分的有效性^[12,26], 进而提高作物产量、水分利用效率和氮肥偏生产力。本研究中, 垄沟集雨种植能显著提高冬油菜产量 15.5%~43.5%, 水分利用效率 25.5%~69.6%, 降低冬油菜的耗水量 3.4%~9.9%, 该结果与周昌明^[7]的研究结果一致, 与 Qin 等^[8]和 Zhao 等^[11]的研究结果不一致。这可能是由作物耗水特征和生育期内降雨分布等不同造成的。Qin 等^[8]研究表明, 垄沟集雨种植方式能够显著降低马铃薯生育初期和晚期的耗水量, 而马铃薯生长旺期的耗水量却显著增加。垄沟集雨种植方式下冬油菜不同生育时期的耗水特征有待进一步研究。

氮肥对于提高作物产量和水分利用效率也非常重要。在有些情况下, 即使在垄沟集雨种植条件下, 作物的产量和水分利用效率也很低, 这是由于作物的施氮量很低造成的^[13,27]。本研究中, 在垄沟集雨种植方式下, 当施氮量在 0~60 kg/hm² 范围内, 冬油菜的产量和水分利用效率维持在 1 062~1 579 kg/hm² 和 3.1~5.6 kg/(hm²·mm), 而当施氮量增加至 240 kg/hm² 时, 冬油菜的产量和水分利用效率增加至 2 606~3 202 kg/hm² 和 7.8~9.5 kg/(hm²·mm)。本研究中, 增加施氮量能显著增加冬油菜的耗水量, 这与多数学者的研究结果一致^[13,16]。这可能是因为施氮量增加后, 作物的叶面积和地上部生物量显著增加, 需要消耗更多的土壤水分^[13,28]。

Yang 等^[29]在小麦和玉米的研究中发现, 氮肥农学利用率、生理利用率、吸收利用率和偏生产力均随着施氮量的增加而直线降低。而 Xue 等^[23]在蓖麻的研究中发现, 随着施氮量的增加, 蓖麻的氮肥吸收利用率先增加后降低, 氮肥偏生产力则直线降低。本研究对冬油菜的研究结果与 Xue 等^[23]的研究结果相似, 而与 Yang 等^[29]的研究结果不一致。究其原因, 可能与作物种类及其产量大小有关。

2014—2015 年和 2016—2017 年冬油菜的产量、水分利用效率和氮肥偏生产力均明显大于 2015—2016 年, 通过分析 3 a 的降水量, 笔者发现 2014—2015 年和 2016—

2017 年 3、4 和 5 月的降水量远远大于 2015—2016 年, 而 3、4 和 5 月正值中国西北地区冬油菜的花期和角果期, 这也说明在西北干旱半干旱地区, 应将有限的灌溉水在冬油菜的花期和角果期施入。

3.3 经济效益分析

周昌明^[7]和张杰^[10]在对夏玉米的研究中发现, 与传统平作种植相比, 垄沟集雨种植能得到较高的经济效益。汪磊等^[30]在对胡麻的研究中也得到相似的结果。在本研究中, 当施氮量较低时 (0 或 60 kg/hm²), RFMF 方式冬油菜的经济效益低于 FP, 而当施氮量升高后 (120~300 kg/hm²), RFMF 方式冬油菜的经济效益远高于 FP。究其原因, 主要还是因为在低施氮量下, RFMF 方式冬油菜的增产效果不明显, 而且还有较高的薄膜和人工 (机械) 费用支出。因此, 在低施氮量情况下, 不适宜采用 RFMF 方式种植冬油菜。

张德军^[31]研究表明春玉米的经济效益随施氮量的增加呈先增后减趋势, 在施氮 150 kg/hm² 的经济效益最好; 施氮过多 (200 kg/hm²), 不仅春玉米的产量降低, 而且肥料成本增加, 使得经济效益不好; 施氮过少 (0、50 和 100 kg/hm²), 成本虽不高, 但产量很低, 其经济效益也很差。本研究中, 2 种植方式下冬油菜的经济效益均呈现出随施氮量的增加先增加后降低的趋势, 但 2 种植方式下最大经济效益的施氮量有所不同, RFMF 方式在 N240 施氮处理最大, 而 FP 方式在 N180 施氮处理最大。最主要的原因是 RFMF 方式在 N240 施氮处理下依然有增加冬油菜产量的能力, 而 FP 方式在 N240 施氮处理下的冬油菜产量却开始降低。

3.4 适宜施氮量的确定

大量研究表明, 适量施氮能显著促进作物生长、提高作物产量; 而过度施氮却阻碍作物产量的形成^[32-34]。而且, 过量施氮还会引起一系列环境问题, 比如: 土壤中的硝态氮淋洗污染地下水^[35], 温室气体 N₂O 的大量排放^[36], 果实 (籽粒) 品质下降^[37-38]等。因此, 确定不同作物在不同环境下的适宜施氮量至关重要。本文针对垄沟集雨种植和传统平作种植方式下冬油菜适宜的施氮量进行了研究。在传统平作种植方式下, 施氮量 180 kg/hm² 能显著提高冬油菜的地上部干物质质量、氮素累积吸收量、籽粒产量和水分利用效率, 且氮肥利用效率降低不多, 而当施氮量超过 180 kg/hm² 时, 冬油菜的地上部干物质质量、氮素累积吸收量和籽粒产量不再显著变化, 而水分和氮肥利用效率显著降低。因此, 在传统平作种植方式下, 冬油菜的适宜施氮量为 180 kg/hm², 这与李志玉等^[33]和邹娟等^[34]的研究结果相似。

在垄沟集雨种植方式下, 当施氮量超过 240 kg/hm² 时, 冬油菜的地上部干物质质量、氮素累积吸收量和籽粒产量不再显著变化, 而水分和氮肥利用效率显著降低。因此, 在垄沟集雨种植方式下, 冬油菜的适宜施氮量为 240 kg/hm²。垄沟集雨种植方式下冬油菜的适宜施氮量比传统平作种植高 60 kg/hm², 这可能是因为, 在垄沟集雨种植方式下, 冬油菜根区的土壤含水率较高, 能促进油菜根系对氮素的吸收。

本文主要针对不同种植方式和施氮量下冬油菜的产量和水氮利用效率进行了研究, 而不同种植方式和施氮量下土壤硝态氮分布和温室气体的排放还有待研究。

4 结 论

1) 与垄沟集雨 (ridge film mulching and furrow planting, RFMF) 相比, 传统平作 (flat planting, FP) 种植方式下冬油菜的地上部干物质质量 (aboveground dry matter, ADM) 显著增加 14.2%~61.5%、氮素累积量显著增加 17.4%~61.3%、籽粒产量显著增加 15.5%~43.5% 和水分利用效率 (water use efficiency, WUE) 显著提高 25.5%~69.6%, 同时冬油菜的耗水量 (evapotranspiration, ET) 显著降低 3.4%~9.9%。

2) RFMF 方式下, 冬油菜的 ADM、氮素累积吸收量、籽粒产量和 WUE 在 0~240 kg/hm² 施氮量范围内, 随施氮量的增加均呈显著增加趋势, 超过该范围后, ADM 和氮素累积吸收量不发生显著变化, ET 显著增加, 籽粒产量和 WUE 显著降低; FP 方式下, 该施氮量范围为 0~180 kg/hm²。2 种植方式下, 冬油菜的氮肥农学利用率 (NAE)、生理利用率 (NPE) 和吸收利用率 (NRE) 均随施氮量的增加呈先升后降趋势, 基本均在 N180 处理达到最大值; 冬油菜的 NPPF 随施氮量的增加而降低。

3) RFMF 方式下, N240 处理冬油菜的籽粒产量和净效益最高, 3 a 平均为 3 002 kg/hm² 和 9 538 元/hm²; FP 方式下, N180 处理冬油菜的籽粒产量和净效益最高, 3 a 平均为 2 291 kg/hm² 和 7 498 元/hm²; 2 种植方式的最高产量和净效益相比, RFMF 可分别提高 31.0% 和 27.2%。因此, 在中国西北地区采用垄沟集雨种植能显著提高冬油菜的生产力, 且适宜施氮量为 240 kg/hm²。

[参 考 文 献]

- [1] 王晓娟, 贾志宽, 梁连友, 等. 旱地施有机肥对土壤水分和玉米经济效益影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 144—149.
Wang Xiaojuan, Jia Zhikuan, Liang Lianyou, et al. Effects of organic fertilizer application on soil moisture and economic returns of maize in dryland farming[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(6): 144—149. (in Chinese with English abstract)
- [2] 胡伟, 李军, 孙剑, 等. 黄土高原半干旱区春小麦和春玉米产量动态与土壤干燥化效应模拟研究[J]. 水土保持研究, 2009, 16(1): 149—155, 161.
Hu Wei, Li Jun, Sun Jian, et al. Simulation of grain yield and soil desiccation of spring wheat and corn fields in semi-arid area of Loess Plateau[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2009, 16(1): 149—155, 161. (in Chinese with English abstract)
- [3] Huang Yilong, Chen Liding, Fu Bojie, et al. The wheat yields and water-use efficiency in the Loess Plateau: straw mulch and irrigation effects[J]. Agricultural Water Management, 2005, 72(3): 209—222.
- [4] 谷晓博, 李援农, 周昌明, 等. 垄沟集雨补灌对冬油菜根系、产量与水分利用效率的影响[J]. 农业机械学报, 2016, 47(4): 90—98, 112.
Gu Xiaobo, Li Yuannong, Zhou Changming, et al. Effects of ridge and furrow rain harvesting cultivation with supplemental irrigation on root, yield and water use efficiency of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.)[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 90—98, 112. (in Chinese with English abstract)
- [5] 莫非, 周宏, 王建永, 等. 田间微集雨技术研究及应用[J]. 农业工程学报, 2013, 29(8): 1—17.
Mo Fei, Zhou Hong, Wang Jianyong, et al. Development and application of micro-field rain-harvesting technologies[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(8): 1—17. (in Chinese with English abstract)
- [6] Li Xiaoyan, Gong Jiadong. Effect of different ridge: furrow ratios and supplemental irrigation on crop production in ridge and furrow rainfall harvesting system with mulches[J]. Agricultural Water Management, 2002, 54(3): 243—254.
- [7] 周昌明. 地膜覆盖及种植方式对土壤水氮利用及夏玉米生长、产量的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
Zhou Changming. Effect of Different Environmental Films Mulching and Cropping Patterns on Soil Water and Nitrogen Utilization and Summer Maize Growth[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016. (in Chinese with English abstract)
- [8] Qin Shuhao, Zhang Junlian, Dai Hailin, et al. Effect of ridge-furrow and plastic-mulching planting patterns on yield formation and water movement of potato in a semi-arid area[J]. Agricultural Water Management, 2014, 131(1): 87—94.
- [9] Chen Yanlong, Liu Ting, Tian Xiaohong, et al. Effects of plastic film combined with straw mulch on grain yield and water use efficiency of winter wheat in Loess Plateau[J]. Field Crops Research, 2015, 172(1): 53—58.
- [10] 张杰. 环保型地膜覆盖对土壤环境的影响及玉米生长的响应[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
Zhang Jie. Influences of Different Covering Materials Mulching on Soil Environment and Response of the Corn Growth[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2010. (in Chinese with English abstract)
- [11] Zhao Hong, Wang Runyuan, Ma Baoluo, et al. Ridge-furrow with full plastic film mulching improves water use efficiency and tuber yields of potato in a semiarid rainfed ecosystem[J]. Field Crops Research, 2014, 161(1): 137—148.
- [12] 寇江涛, 师尚礼, 蔡卓山. 垄沟集雨种植对旱作紫花苜蓿生长特性及品质的影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(24): 5028—5036.
Kou Jiangtao, Shi Shangli, Cai Zhuoshan. Effects of ridge and furrow rainfall harvesting on growth characteristics and quality of medicago sativa in dryland[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(24): 5028—5036. (in Chinese with English abstract)
- [13] Gu Xiaobo, Li Yuannong, Du Yadan. Effects of ridge-furrow film mulching and nitrogen fertilization on growth, seed yield and water productivity of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) in Northwestern China [J]. Agricultural Water Management, 2018, 200(1): 60—70.
- [14] 王汉中. 入世后的中国油菜产业[J]. 中国油料作物学报,

- 2002, 24(2): 82–86.
- [15] Rathke G W, Behrens T, Diepenbrock W. Integrated nitrogen management strategies to improve seed yield, oil content and nitrogen efficiency of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.): A review[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2006, 117(2/3): 80–108.
- [16] 谷晓博, 李援农, 杜娅丹. 水氮供应对冬油菜氮素积累和产量的影响[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(2): 271–278. Gu Xiaobo, Li Yuannong, Du Yadan. Effects of irrigation and nitrogen regimes on seed yield and nitrogen accumulation of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.)[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(2): 271–278. (in Chinese with English abstract)
- [17] 蒯婕, 左青松, 陈爱武, 等. 不同栽培模式对油菜产量和倒伏相关性状的影响[J]. *作物学报*, 2017, 43(6): 875–884. Kuai Jie, Zuo Qingsong, Chen Aiwu, et al. Effects of different cultivation modes on canola yield and lodging related indices[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2017, 43(6): 875–884. (in Chinese with English abstract)
- [18] Wang Xiukang, Li Zhanbin, Xing Yingying. Effects of mulching and nitrogen on soil temperature, water content, nitrate-N content and maize yield in the Loess Plateau of China[J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 161(1): 53–64.
- [19] Barber S A, Mackay A D, Kuchenbuch R O, et al. Effects of soil temperature and water on maize root growth[J]. *Plant and Soil*, 1988, 111(2): 267–269.
- [20] 康绍忠, 张建华, 梁建生. 土壤水分与温度共同作用对植物根系水分传导的效应[J]. *植物生态学报*, 1999, 23(3): 211–219. Kang Shaozhong, Zhang Jianhua, Liang Jiansheng. Combined effects of soil water content and temperature on plant root hydraulic conductivity[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 1999, 23(3): 211–219. (in Chinese with English abstract)
- [21] 李华, 王朝辉, 李生秀, 等. 地表覆盖和施氮对冬小麦干物质和氮素积累与转移的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14(6): 1027–1034. Li Hua, Wang Zhaohui, Li Shengxiu, et al. Effects of soil surface mulching and N rate on dry matter and nitrogen accumulation and translocation of winter wheat[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(6): 1027–1034. (in Chinese with English abstract)
- [22] 左青松, 杨海燕, 冷锁虎, 等. 施氮量对油菜氮素积累和运转及氮素利用率的影响[J]. *作物学报*, 2014, 40(3): 511–518. Zuo Qingsong, Yang Haiyan, Leng Suohu, et al. Effects of nitrogen fertilizer on nitrogen accumulation, translocation and nitrogen use efficiency in rapeseed (*Brassica napus* L.)[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40(3): 511–518. (in Chinese with English abstract)
- [23] Xue Xiangrong, Mai Wenxuan, Zhao Zhenyong, et al. Optimized nitrogen fertilizer application enhances absorption of soil nitrogen and yield of castor with drip irrigation under mulch film[J]. *Industrial Crops and Products*, 2017, 95(1): 156–162.
- [24] Bu Lingduo, Liu Jianliang, Zhu Lin, et al. Attainable yield achieved for plastic film-mulched maize in response to nitrogen deficit[J]. *European Journal of Agronomy*, 2014, 55(1): 53–62.
- [25] Kamiji Yoshiaki, Pang Jiayin, Milroy Stephen P, et al. Shoot biomass in wheat is the driver for nitrogen uptake under low nitrogen supply: but not under high nitrogen supply[J]. *Field Crops Research*, 2014, 165(1): 92–98.
- [26] 韩娟, 廖允成, 贾志宽, 等. 半湿润偏旱区垄沟覆盖种植对冬小麦产量及水分利用效率的影响[J]. *作物学报*, 2014, 40(1): 101–109. Han Juan, Liao Yuncheng, Jia Zhikuan, et al. Effects of ridging with mulching on yield and water use efficiency in winter wheat in semi-humid drought-prone region in China[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40(1): 101–109. (in Chinese with English abstract)
- [27] Li Hui, Cong Rihuan, Ren Tao, et al. Yield response to N fertilizer and optimum N rate of winter oilseed rape under different soil indigenous N supplies[J]. *Field Crops Research*, 2015, 181(1): 52–59.
- [28] 戚龙海, 党廷辉, 陈璐. 旱塬冬小麦水分利用特征及对施肥的响应[J]. *水土保持研究*, 2009, 16(3): 105–109. Qi Longhai, Dang Tinghui, Chen Lu. The water use characteristics of winter wheat and response to fertilization on dryland of Loess Plateau[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2009, 16(3): 105–109. (in Chinese with English abstract)
- [29] Yang Xianlong, Lu Yongli, Ding Yan, et al. Optimising nitrogen fertilization: A key to improving nitrogen-use efficiency and minimizing nitrate leaching losses in an intensive wheat/maize rotation (2008–2014)[J]. *Field Crops Research*, 2017, 206(1): 1–10.
- [30] 汪磊, 谭美莲, 叶春雷, 等. 胡麻覆膜种植模式对产量、水分利用和经济效益的影响[J]. *中国油料作物学报*, 2016, 38(4): 460–466. Wang Lei, Tan Meilian, Ye Chunlei, et al. Effects of plastic mulching modes on yield, water use efficiency and profits of linseed (*Linum usitatissimum* L.)[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2016, 38(4): 460–466. (in Chinese with English abstract)
- [31] 张德军. 施氮对春玉米产量和经济效益的影响[J]. *作物杂志*, 2010, 26(2): 83–85. Zhang Dejun. Effects of applying nitrogen fertilizer on yield and economic benefits of spring maize[J]. *Crops*, 2010, 26(2): 83–85. (in Chinese with English abstract)
- [32] Hu Hengyu, Ning Tangyuan, Li Zengjia, et al. Coupling effects of urea types and subsoiling on nitrogen-water use and yield of different varieties of maize in northern China[J]. *Field Crops Research*, 2013, 142(1): 85–94.
- [33] 李志玉, 郭庆元, 廖星, 等. 不同氮水平对双低油菜中双9号产量和品质的影响[J]. *中国油料作物学报*, 2007, 29(2): 78–82. Li Zhiyu, Guo Qingyuan, Liao Xing, et al. Effects of different amount of nitrogen on yield, quality and economics of Zhongshuang No.9[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2007, 29(2): 78–82. (in Chinese with English abstract)
- [34] 邹娟, 鲁剑巍, 陈防, 等. 冬油菜施氮的增产和养分吸收效应及氮肥利用率研究[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(4): 745–752. Zou Juan, Lu Jianwei, Chen Fang, et al. Study on yield increasing and nutrient uptake effect by nitrogen application and nitrogen use efficiency for winter rapeseed[J]. *Scientia*

- Agricultura Sinica, 2011, 44(4): 745—752. (in Chinese with English abstract)
- [35] 段文学, 于振文, 张永丽, 等. 施氮量对旱地小麦氮素吸收转运和土壤硝态氮含量的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(15): 3040—3048.
- Duan Wenxue, Yu Zhenwen, Zhang Yongli, et al. Effects of nitrogen fertilizer application rate on nitrogen absorption, translocation and nitrate nitrogen content in soil and dryland wheat[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(15): 3040—3048. (in Chinese with English abstract)
- [36] 杜娅丹, 张倩, 崔冰晶, 等. 加气灌溉水氮互作对温室芹菜地 N_2O 排放的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(16): 127—134.
- Du Yadan, Zhang Qian, Cui Bingjing, et al. Effects of water and nitrogen coupling on soil N_2O emission characteristics of greenhouse celery field under aerated irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(16): 127—134. (in Chinese with English abstract)
- [37] 赵福成, 景立权, 闫发宝, 等. 施氮量对甜玉米产量、品质和蔗糖代谢酶活性的影响[J]. 植物营养与肥科学报, 2013, 19(1): 45—54.
- Zhao Fucheng, Jing Liqun, Yan Fabao, et al. Effects of nitrogen fertilization on yield, quality and enzyme activity associated with sucrose metabolism of sweet corn[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2013, 19(1): 45—54. (in Chinese with English abstract)
- [38] 杜少平, 马忠明, 薛亮. 适宜施氮量提高温室砂田滴灌甜瓜产量品质及水氮利用率[J]. 农业工程学报, 2016, 32(5): 112—119.
- Du Shaoping, Ma Zhongming, Xue Liang. Optimal drip fertigation amount improving muskmelon yield, quality and use efficiency of water and nitrogen in plastic greenhouse of gravel-mulched field[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(5): 112—119. (in Chinese with English abstract)

Effects of planting patterns and nitrogen application rates on yield, water and nitrogen use efficiencies of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.)

Gu Xiaobo, Li Yuannong^{*}, Huang Peng, Du Yadan, Fang Heng, Chen Pengpeng

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas of Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Poor soil conditions and drought stress are 2 main factors restricting the agriculture production in arid and semiarid areas of northwest China. The ridge film mulching and furrow planting (RFMF) cultivation pattern, which employs ridges mulched with plastic film to serve as the runoff area and furrows used as the planting area, has been shown to have the ability of improving soil water availability, yield and water use efficiency (WUE) of maize, wheat and potato. However, the RFMF planting pattern has rarely been tested in oilseed rape (*Brassica napus* L.) for yield improvements in areas where soil evaporation is high. A 3-year (2014-2017) field experiment was conducted to determine whether the RFMF cultivation pattern has the potential of improving winter oilseed rape productivity. The optimal nitrogen (N) application rate for the maximum yield of winter oilseed rape under the RFMF cultivation pattern was also determined. Winter oilseed rape was planted in RFMF and flat planting (FP) patterns, both with 6 nitrogen (N) application rates: 0, 60, 120, 180, 240 and 300 kg/hm², named N0, N60, N120, N180, N240 and N300, respectively. The results showed that compared to FP, RFMF significantly increased aboveground dry matter (ADM) by 14.2%-61.5%, nitrogen accumulation amount by 17.4%-61.3%, seed yield by 15.5%-43.5%, water use efficiency (WUE) by 25.5%-69.6%, nitrogen partial factor productivity (NPF) by 15.4%-43.0%, and significantly reduced evapotranspiration (ET) by 3.3%-9.9%. It was manifested by linear fitting that seed yield and WUE were much higher in RFMF than in FP cultivation condition when the plants of winter rapeseed consumed same amount of water. ADM, nitrogen accumulation amount, seed yield, and WUE of winter oilseed rape were significantly increased with the increase of N application rates (in the range of 0-240 kg/hm²) under RFMF cultivation condition. The ADM and nitrogen accumulation amount did not vary significantly, while ET increased significantly, and seed yield and WUE reduced significantly when N application rates exceeded 240 kg/hm². Under both RFMF and FP cultivation conditions, N agronomic efficiency (NAE), N physiological efficiency (NPE) and N recovery efficiency (NRE) of the winter oilseed rape were all firstly increased and then decreased with the increase of N application rates, and reached the maximum at N180; while the NPF was consistently decreased with the increase of N application rates. No significant differences of NAE, NPE, NRE and NPF were found between N240 and N180 under RFMF cultivation condition ($P>0.05$). The highest yield and net benefits of winter oilseed rape under RFMF and FP cultivation conditions were found in N240 and N180, with the average seed yield of 3 002 and 2 291 kg/hm², and average net benefits of 9 538 and 7 498 yuan/hm² across the 3 years, respectively. The highest yield and net benefit in RFMF was improved by 31.0% and 27.2% in comparison to FP. Present study indicated that RFMF cultivation pattern has the potential of improving winter oilseed rape productivity in arid and semiarid regions of northwest China, with the optimal N application rate of 240 kg/hm².

Keywords: fertilizers; cultivation; planting pattern; nitrogen application rate; seed yield; water and nitrogen use efficiencies; winter oilseed rape