

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.12.025

降解膜覆盖对油菜根系、产量和水分利用效率的影响^{*}

谷晓博 李援农 银敏华 杜娅丹 周昌明

(西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要: 通过2 a田间试验设置普通地膜覆盖(PM)、生物降解膜覆盖(JM)和露地对照(CK)3个处理,系统分析和比较了不同类型地膜覆盖对地下5 cm和25 cm深度处的土壤温度、0~100 cm土壤储水量、冬油菜生长状况、根系形态特征、产量、品质及水分利用效率的影响。结果表明,在播种后150 d前,PM和JM处理的增温保墒效果相当,均显著大于CK($P < 0.05$),在播种后150 d后,生物地膜逐渐降解,其增温保墒效果显著低于PM($P < 0.05$);JM处理冬油菜不同生育期的株高、叶面积指数、地上部干物质质量和成熟期不同深度处的主根直径与PM处理均无显著差异($P > 0.05$),但都显著大于CK($P < 0.05$),冬油菜分枝数、主花序和分枝花序的角果数、籽粒数也表现出相同的特点。与PM处理相比,JM处理更能促进冬油菜主根下扎,有效增加20~30 cm土壤深度的侧根质量密度。JM处理的节水增产效果与PM无显著差异($P > 0.05$),2种地膜覆盖下冬油菜的产量和水分利用效率均显著大于CK($P < 0.05$),PM和JM处理2 a冬油菜的平均产量和平均水分利用效率分别比CK增加45.91%、37.02%和81.68%、53.86%;与PM处理相比,JM处理还能有效降低油菜籽粒中对人体健康不利的芥酸和硫苷含量。从应用效果来看,JM可以代替PM应用于冬油菜的种植栽培。

关键词: 生物降解膜 主根形态 侧根分布 产量 品质 水分利用效率

中图分类号: S565.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)12-0184-10

Effects of Biodegradable Film Mulching on Root Distribution, Yield and Water Use Efficiency of Winter Oilseed Rape (*Brassica napus* L.)

Gu Xiaobo Li Yuannong Yin Minhua Du Yadan Zhou Changming

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

Abstract: Plastic film mulching is an efficient agronomic method to increase yield and improve water use efficiency in arid and semi-arid regions. However, with the overuse of traditional refractory plastic film, the residual of plastic film was constantly increasing in the soil during the last recent decades, which had led to some negative impacts, such as environmental pollution and land degeneration. In order to maintain the function and reduce the negative impacts of traditional refractory plastic film, some degradable films were obligatory to take place of it. Several studies had demonstrated that biodegradable film could apply to maize and cotton cultivation instead of traditional plastic film, but few of them were dedicated to studying whether biodegradable film was suitable for winter oilseed rape (*Brassica napus* L.), which is the most important oil crop in China. Three treatments, including plastic film (PM), biodegradable film (JM) and no film (CK), were conducted to systematically analyze and compare the effects of different types of film on soil temperature at 5 cm and 25 cm depths, soil water capacity in 0~100 cm depth, crop growth, root morphology characteristics, yield, quality and water use efficiency of winter oilseed rape in two growing seasons (2012—2013 and 2013—2014). The results showed that the

收稿日期: 2015-03-26 修回日期: 2015-04-30

^{*} 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2011AA100504)和公益性行业科研专项资助项目(201503105)

作者简介: 谷晓博, 博士生, 主要从事节水灌溉理论与技术研究, E-mail: gxb123027@163.com

通讯作者: 李援农, 教授, 博士生导师, 主要从事节水灌溉理论与技术研究, E-mail: liyuannong@163.com

effects of improving soil temperature and conserving soil moisture of JM were similar to PM and significantly better than those of CK ($P < 0.05$) before 150 DAS (days after sowing), but the effects were significantly lower than those of PM after 150 DAS because of the degradation of degradable film. No significant differences were found between PM and JM in plant height, leaf area index, shoot dry matter weight at different growth stages and taproot diameter of different soil depths at maturity stage ($P > 0.05$), but they were all significantly better than those of CK ($P < 0.05$). And the same characteristic was found in branch numbers, pod numbers and seed numbers of main raceme and branch raceme. Compared with PM, JM could better promote taproot to extend to deep soil layer, and effectively increase lateral root mass density in soil layer of 20 ~ 30 cm. No significant difference was found between PM and JM in saving water and increasing yield ($P > 0.05$), and yield and water use efficiency of two types of film were significantly higher than those of CK in two years ($P < 0.05$). When treated with PM and JM, the yields of winter oilseed rape were increased by 45.91% and 37.02%, respectively, and the water use efficiencies were increased by 81.68% and 53.86%, respectively. JM could also reduce erucic acid and glucosinolate content, which were harmful to human health, compared with PM. Then, from the perspective of application effects, biodegradable film could be applied to winter oilseed rape cultivation instead of traditional refractory plastic film.

Key words: Biodegradable film Taproot morphology Lateral root distribution Yield Quality
Water use efficiency

引言

近年来我国北方地区冬天温度不断升高,冬油菜种植呈现明显“北移、西扩”趋势,西北地区油菜生产不断扩展^[1-2]。但由于受干旱及冻害的影响,油菜产量一直低而不稳,水分和养分利用效率偏低^[3]。地膜覆盖具有增温、保墒、增产、控盐及促进作物生长发育等作用^[4-5],是我国西北干旱半干旱地区油菜获得高产的一条新途径。研究发现地膜覆盖能够缩短冬油菜生育期 7 ~ 11 d,提高越冬率 19% ~ 30%,增产 30% ~ 50%,含油率提高 1%^[6-7]。但普通农膜是分子结构非常稳定的高分子化合物,在自然条件下极难降解,降解周期长达上百年,降解过程中还会释放出有毒物质,很难直接回收^[8]。农用地膜的大量使用,使土壤中的残膜量日益增多,残膜的隔离破坏了土壤结构,抑制了作物根系对水分和养分的正常吸收,导致产量下降,阻碍了农业的可持续发展^[9-10]。为解决地膜给农业带来福音的同时所造成的负面影响,液体地膜、生物降解地膜、光降解地膜和光-生物降解地膜等新型环保地膜相继问世^[11-12]。尤其是可完全降解的生物地膜,在有效减少农田环境污染的同时,在提高地温、促进作物生长发育、提高作物产量和水分利用效率方面与普通农膜无显著差异,可以代替普通农膜应用于农业生产^[13-14]。目前国内对生物可降解膜的研究主要集中在不同降解材料的降解性能方面^[11-12],田间应用主要以研究玉米、棉花等作物为主^[13,15-16],

种类比较单一,而且主要集中在研究作物地上部分,而生物降解膜覆盖对冬油菜的相关研究却鲜有报道,尤其是生物降解地膜覆盖对冬油菜根系分布的研究尚未见报道。

本文通过 2 a 冬油菜田间试验,系统分析并比较生物降解膜与普通地膜对地下 5 cm 和 25 cm 土层地温、0 ~ 100 cm 土壤储水量、根系分布特征、产量、品质及水分利用效率等影响的异同,以期缓解普通地膜对农田生态的危害以及生物降解地膜向更多作物种类的推广使用提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

2012—2013 年和 2013—2014 年 2 a 试验在陕西杨凌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进行。该区地处北纬 34°17',东经 108°04',海拔高度 521 m,属暖湿带季风半湿润气候区,年均日照时数 2 163.8 h,无霜期 210 d。试验田土壤为中壤土,土壤田间持水率为 24% (质量含水率),土壤干容重 1.40 g/cm³。2012—2013 年播前 0 ~ 20 cm 耕层土壤基本理化形状为:有机质 11.20 g/kg,全氮 0.93 g/kg,硝态氮 76.27 mg/kg,速效磷 25.38 mg/kg,速效钾 131.97 mg/kg,pH 值为 8.12;2013—2014 年播前 0 ~ 20 cm 耕层土壤基本理化形状为:有机质 13.36 g/kg,全氮 0.96 g/kg,硝态氮 73.01 mg/kg,速效磷 24.07 mg/kg,速效钾 135.73 mg/kg,pH 值为 8.14。

2012—2014年和2006—2011年冬油菜生育期各月降水量和平均气温见图1。2013年1月平均气温(0.1℃)和2014年1月平均气温(1.1℃)显著大于2006—2011年1月平均气温(-1.8℃),2012—2013年和2013—2014年冬油菜生育期总降水量分别为119.6 mm和335.8 mm,2006—2011年冬油菜生育期平均总降水量为371.6 mm。在冬油菜关键生育期(3—4月份)的降水量,2012—2013年比2013—2014年少156.4 mm,2012—2013年相对为干旱年。

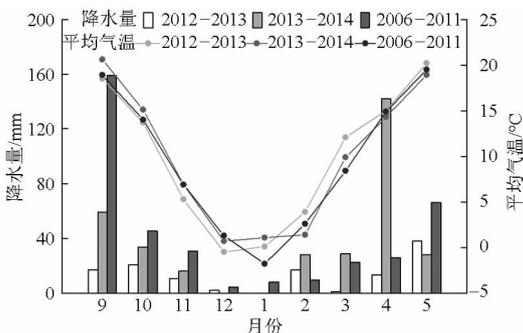


图1 试验站2012—2014年和2006—2011年冬油菜生育期各月降水量和平均气温

Fig. 1 Monthly total rainfall and mean temperature during winter oilseed rape season in 2012—2014 and 2006—2011 at experimental site

1.2 试验材料与设计

试验用普通地膜和生物降解膜宽80 cm,厚0.008 mm;生物降解膜诱导期120~150 d。供试冬油菜品种为“陕油107号”,由西北农林科技大学农学院提供。

试验设普通地膜覆盖(PM)、生物降解膜覆盖(JM)和露地对照(CK)3个处理,各处理重复4次,共12个小区,每小区面积20 m²(5 m×4 m),小区完全随机排列。采用垄沟集雨种植方式,垄宽30 cm,沟宽20 cm,垄高20 cm。播种前10 d深翻,当地普遍使用的复混肥料(N、P₂O₅、K₂O质量分数分别为20%、20%、10%) 在翻地前按600 kg/hm²均匀施入(后期不再追肥),并平整土地,挖沟起垄。在每垄中间按株距13 cm,行距50 cm人工点播1行冬油菜,播种后覆膜。出苗后及时放苗,冬油菜长出3片真叶后(2012年9月30日、2013年9月27日)按密度12万株/hm²进行间苗、定苗,其它田间生产管理均与当地农民习惯保持一致。2012—2013年在冬油菜越冬期(122 DAS, DAS:播种后天数)和花期(206 DAS)分别灌水60 mm,2013年9月由于干旱,为保证正常出苗,播种后每小区灌水30 mm。2012年9月15日播种,2013年5月20日统一收获;2013年9月12日播种,2014年5月22日统一收获。

2 a生物降解膜的降解进程差异不大,基本都在2月15日左右裂口5 cm,2月25日裂口10 cm,3月5日裂口15 cm,3月15日裂口20 cm,3月25日裂口35 cm;2 a普通农膜在全生育期均未裂化。

1.3 测定项目与方法

(1)株高、叶面积指数和地上部干物质量:分别于苗期(2012年75 DAS、2013年78 DAS)、蕾苔期(196 DAS)、花期(212 DAS)、角果期(225 DAS)和成熟期(245 DAS)在每小区随机选取5株冬油菜,用卷尺测量株高,打孔法测定叶面积,叶面积指数为叶片总面积与所占土地面积的比值。将所取冬油菜茎、叶、花、果分开,放入干燥箱,105℃杀青30 min,然后于70℃干燥至质量恒定,用电子天平称其质量。冬油菜各生育期以JM处理作参照。

(2)主根性状和侧根分布:在苗期(2012年75 DAS、2013年78 DAS)和成熟期(245 DAS)测定主根性状和侧根分布。每小区挖取5个有代表性的整根,剪去侧根后,分别用米尺和游标卡尺测定主根长和根径;用直径7 cm的根钻在植株四周分别取出0~10 cm、10~20 cm和20~30 cm根样,放在细纱网上,用水将土冲净,拣出侧根。将主根和侧根分别放入70℃干燥箱干燥至质量恒定。

(3)籽粒产量和构成要素:提前在各小区中央划定1 m²的测产区,成熟后单独收获,晒干去壳后测定籽粒产量,在各小区划定的1 m²测产区内随机选取10株分别测定其分枝数、单株角果数、每角粒数和千粒质量。

(4)籽粒品质:用近红外光谱分析仪(Foss, NIRSystem-5000型)测定油菜籽粒的含油率、蛋白质、芥酸、硫苷和油酸含量。

(5)土壤含水率:采用取土干燥法分别测定不同处理冬油菜播种、收获时0~200 cm土壤的含水率,以及从播种当天起每30 d左右0~100 cm土壤的含水率。每小区垄、沟各取2个测点,沿土壤深度方向每隔10 cm取一个土样。

土壤储水量计算式为

$$W = 10\gamma h\omega \quad (1)$$

式中 W——土壤水分总贮存量,mm

γ ——土壤干容重,g/cm³

h——土层厚度,cm

ω ——土壤含水率,%

(6)土壤温度:2013—2014年试验用曲管地温计分别测定不同处理地下5 cm和25 cm土层深度处08:00、10:00、12:00、14:00、16:00和18:00垄上的土壤温度,分别计算其平均值作为该土层的平均温度。从播种当天起每15 d左右测定一次。

(7) 生育期耗水量计算式为

$$ET = P + W_1 - W_2 + I \quad (2)$$

式中 ET ——作物耗水量, mm

P ——作物生育期降水量, mm

W_1, W_2 ——播前和收获时的土壤储水量, mm

I ——生育期灌水量, mm

水分利用效率计算式为

$$WUE = Y/ET \quad (3)$$

式中 WUE ——作物水分利用效率, $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$

Y ——籽粒产量, kg/hm^2

(8) 收获指数: 收获油菜籽粒产量 Y 与地上部干物质量的比值。

(9) 肥料偏生产力 (PFP) 计算式为

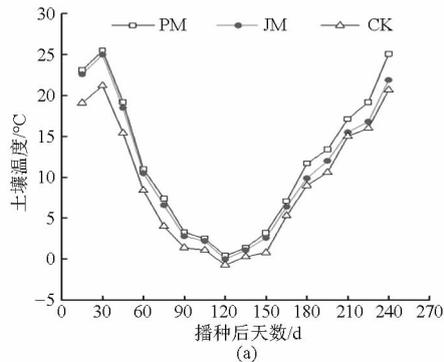
$$P_{FP} = Y/F_T \quad (4)$$

式中 P_{FP} ——肥料偏生产力, kg/kg

F_T ——投入的 N 、 P_2O_5 和 K_2O 总量, kg/hm^2

1.4 数据处理与分析

采用 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 Duncan 新复极差法, 显著性水平为 $P < 0.05$;



OriginPro 8.5 软件作图。

2 结果

2.1 不同覆膜处理对地温的影响

覆膜可有效提高土壤温度, 对油菜苗期生长有利, 能促进油菜形成壮苗越冬, 进而提高油菜产量。不同处理 5 cm 和 25 cm 深度处的土壤温度随油菜生育进程总体上呈“V”形: 在 120 DAS 前地温逐渐降低, 120 DAS 后地温逐渐回升 (图 2)。5 cm 深度处土壤温度波动幅度明显大于 25 cm 深度处土壤温度, 这可能是由于表层土壤与环境间热量交换更快所致。5 cm 深度处土壤温度在 0 ~ 75 DAS 和 180 ~ 240 DAS 比 25 cm 深度处土壤温度高 1.0 ~ 4.9°C, 75 ~ 180 DAS 间比 25 cm 深度处土壤温度低 0.5 ~ 2.6°C。

在 150 DAS 前, PM、JM 处理 5 cm 和 25 cm 土层的地温均显著大于 CK 处理, PM 和 JM 间差异不显著。PM 处理 5 cm 和 25 cm 土层地温分别比 CK 高 1.3 ~ 4.3°C 和 1.1 ~ 4.0°C, JM 处理 5 cm 和 25 cm 土层地温分别比 CK 高 1.0 ~ 3.8°C 和 0.7 ~ 2.9°C。

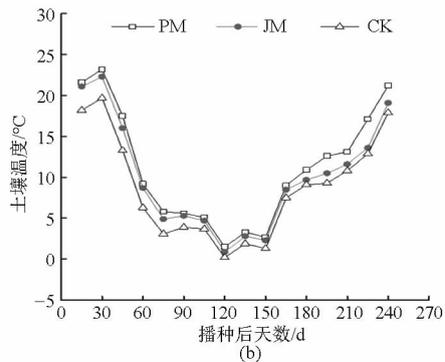


图 2 不同覆膜处理下 5 cm 和 25 cm 深度处的土壤温度

Fig. 2 Soil temperature at 5 cm and 25 cm depths under different mulching treatments

(a) 5 cm 深度 (b) 25 cm 深度

150 DAS 后, 随着生物地膜的裂口不断变大, 其增温效果也逐渐变差。PM 处理 5 cm 和 25 cm 土层地温分别比 JM 高 0.7 ~ 3.5°C 和 0.5 ~ 3.2°C, 分别比 CK 高 1.5 ~ 4.4°C 和 1.2 ~ 3.8°C。除 175 DAS 外, PM 处理 5 cm 和 25 cm 土层的地温均显著大于 JM。可见, 在油菜播种后 150 d 前, 生物地膜的增温效果与普通地膜相当; 在 150 DAS 后, 生物地膜的增温效果低于普通地膜, 但由于越冬后地温回升, 略低的地温并不会影响冬油菜生长发育。

2.2 不同覆膜处理对土壤储水量的影响

不同处理 0 ~ 100 cm 土层的土壤储水量随冬油菜生育进程的变化趋势见图 3。由于 2 a 降水分布和灌水情况的不同, 造成 2 a 冬油菜 0 ~ 100 cm 土壤储水量变化趋势不同。2012—2013 年播前降水量

较大, 而冬油菜生育期降水量较小, 0 ~ 100 cm 土壤储水量总体上呈逐渐降低趋势; 2013—2014 年生育后期降水量较大, 0 ~ 100 cm 土壤储水量总体上呈先降低后上升的趋势。

2 a 不同处理在播种当天 0 ~ 100 cm 的土壤储水量差异不显著。在 30 ~ 120 DAS 间, PM 和 JM 处理 0 ~ 100 cm 土壤储水量均显著大于 CK, PM 略大于 JM, 但差异不显著; 随着生物地膜逐渐裂口降解, 150 DAS 后, PM 处理 0 ~ 100 cm 土壤储水量均显著大于 JM, JM 显著大于 CK。2 a 成熟期 (240 DAS) PM 处理 0 ~ 100 cm 的平均储水量分别比 JM 和 CK 增加 12.9% 和 32.4%。可见, 在 150 DAS 前, 生物地膜的保墒效果与普通地膜相当; 150 DAS 后, 其保墒效果变差, 显著低于普通地膜。

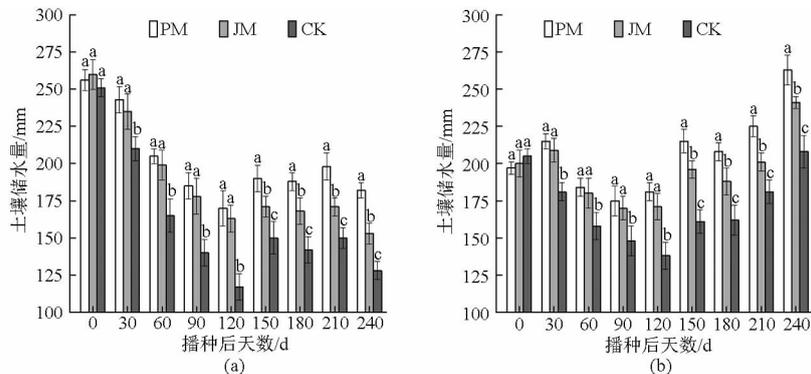


图3 不同覆膜处理下0~100 cm深度的土壤储水量

Fig. 3 Soil water storage of 0~100 cm depth under different mulching treatments

(a) 2012—2013年 (b) 2013—2014年

2.3 不同覆膜处理对冬油菜株高、叶面积指数和地上部干物质量的影响

PM、JM和CK处理对冬油菜的株高、叶面积指数和地上部干物质量均有显著影响(表1)。在2a各生育期均表现为PM和JM处理冬油菜的株高、叶面积指数和地上部干物质量明显高于CK,且差异达到显著水平;而JM冬油菜的株高、叶面积指数和地上部干物质量均略低于PM,但差异不显著。

2a各处理冬油菜的株高均在角果期达到最大,PM和JM处理冬油菜角果期2a的平均株高比CK分别增加了8.3%和6.9%。2a各处理冬油菜的叶

面积指数均在花期达到最大后,迅速降低,PM和JM处理冬油菜2a花期的平均叶面积指数相比CK分别增加了16.9%和13.7%。2a成熟期的平均地上部干物质量,PM和JM处理分别比CK增加37.3%和28.8%。2012—2013年除苗期外,各处理其他生育期的株高、叶面积指数和地上部干物质量均小于2013—2014年,这可能是由于土壤含水率的差异造成的,2012—2013年播种前降水量较大,土壤含水率相对较高,促进油菜苗期生长;而生育期内降水量很小,土壤含水率较低,油菜后期因受旱生长状况较2013—2014年差。

表1 不同地膜覆盖下冬油菜各生育期株高、叶面积指数和地上部干物质量

Tab.1 Plant height, leaf area index and above-ground dry matter at each growth stage under different mulching treatments

项目	处理	2012—2013年					2013—2014年				
		苗期	蕾苔期	花期	角果期	成熟期	苗期	蕾苔期	花期	角果期	成熟期
株高/cm	PM	30.2 ^a	79.1 ^a	140.0 ^a	153.5 ^a	151.5 ^a	28.8 ^a	85.6 ^a	151.2 ^a	165.8 ^a	164.5 ^a
	JM	28.6 ^a	78.0 ^a	138.2 ^a	151.3 ^a	150.1 ^a	27.2 ^a	82.2 ^a	145.5 ^a	163.8 ^a	162.1 ^a
	CK	24.3 ^b	65.9 ^b	125.2 ^b	140.8 ^b	138.7 ^b	22.1 ^b	73.4 ^b	139.5 ^b	154.0 ^b	153.0 ^b
叶面积指数	PM	1.43 ^a	2.99 ^a	3.34 ^a	1.12 ^a	0.38 ^a	1.21 ^a	3.28 ^a	3.58 ^a	1.63 ^a	0.46 ^a
	JM	1.35 ^a	2.90 ^a	3.27 ^a	1.06 ^a	0.36 ^a	1.18 ^a	3.15 ^a	3.46 ^a	1.58 ^a	0.42 ^a
	CK	1.08 ^b	2.63 ^b	2.86 ^b	0.81 ^b	0.21 ^b	0.92 ^b	2.89 ^b	3.06 ^b	1.09 ^b	0.29 ^b
地上部干物质量/(kg·hm ⁻²)	PM	3 395 ^a	4 617 ^a	6 002 ^a	9 104 ^a	16 261 ^a	3 233 ^a	4 731 ^a	6 451 ^a	12 599 ^a	21 046 ^a
	JM	3 340 ^a	4 526 ^a	5 884 ^a	8 591 ^a	15 304 ^a	3 185 ^a	4 627 ^a	6 186 ^a	11 822 ^a	19 692 ^a
	CK	2 956 ^b	3 654 ^b	4 650 ^b	6 835 ^b	11 496 ^b	2 609 ^b	3 802 ^b	5 028 ^b	9 817 ^b	15 667 ^b

注:同一列数据后不同字母表示处理间达到显著性差异($P < 0.05$)。下同。

2.4 不同覆膜处理对冬油菜主根性状和侧根质量密度分布的影响

2.4.1 冬油菜主根性状

发达的根系不仅有利于油菜吸收水分和养分,而且能提高油菜的抗倒伏能力,降低油菜因倒伏而减产的可能性。主根下扎深度和根干质量与油菜的抗倒伏系数显著相关^[17-18],冬油菜苗期前期主根以下扎为主,苗期后期在继续下扎的同时主根颈不断充实膨大,贮藏养分^[19-20]。PM、JM和CK处理2a

冬油菜主根生长性状的差异均达显著水平(表2)。

2a苗期(2012—2013年75 DAS、2013—2014年78 DAS)CK处理冬油菜的主根长均显著大于PM和JM,JM冬油菜的主根长大于PM,但差异不显著;2a成熟期(245 DAS),JM和CK冬油菜的主根长均显著大于PM,JM冬油菜的主根长略小于CK。这可能是由于生育后期生物降解膜裂口,甚至裂为碎片,集雨保水能力降低、土壤通气性变好,促使其主根下扎。

表 2 不同覆膜处理冬油菜的主根生长性状

Tab. 2 Taproot growth parameters of winter oilseed rape under different mulching treatments

年份	处理	苗期				成熟期				
		主根长/ cm	主根直径/mm		主根干质量/ (g·株 ⁻¹)	主根长/ cm	主根直径/mm			主根干质量/ (g·株 ⁻¹)
			顶端	5 cm 处			顶端	5 cm 处	10 cm 处	
2012—2013 年	PM	11.0 ^b	11.8 ^a	6.2 ^a	2.4 ^a	15.7 ^b	16.0 ^a	10.9 ^a	6.0 ^a	4.4 ^a
	JM	11.5 ^b	11.7 ^a	5.9 ^a	2.1 ^a	17.5 ^a	15.3 ^a	10.4 ^a	5.6 ^a	4.0 ^{ab}
	CK	13.3 ^a	10.1 ^a	4.7 ^b	1.9 ^a	17.9 ^a	13.9 ^b	9.1 ^b	4.7 ^b	3.1 ^b
2013—2014 年	PM	11.5 ^b	13.7 ^a	7.2 ^a	2.8 ^a	14.3 ^b	16.9 ^a	11.3 ^a	6.7 ^a	4.8 ^a
	JM	12.3 ^b	13.1 ^a	6.7 ^a	2.6 ^a	16.0 ^a	16.3 ^a	10.9 ^a	6.4 ^a	4.5 ^a
	CK	13.6 ^a	10.9 ^b	5.6 ^b	2.1 ^a	16.6 ^a	14.5 ^b	9.6 ^b	5.1 ^b	3.4 ^b

除 2012—2013 年苗期顶端的主根直径外, 2 a 苗期和成熟期不同深度处的主根直径, 均表现为 PM 和 JM 显著大于 CK, 且 JM 略小于 PM, 但没有达到显著性差异。2 a 苗期的主根干质量, 均为 PM > JM > CK, 但 3 处理间的差异不显著; 2012—2013 年成熟期, PM 冬油菜的主根干质量显著大于 CK, 但 JM 的主根干质量与 PM 和 CK 均没有显著差异; 2013—2014 年成熟期, PM 和 JM 冬油菜的主根干质量均显著大于 CK, 但 PM 和 JM 间无显著差异。

2.4.2 冬油菜侧根质量密度分布

不同土层深度处冬油菜侧根质量密度分布受不同覆盖处理的影响差异显著(图 4)。2 a 苗期和成熟期, 不同处理冬油菜侧根质量密度均随土层深度增加而降低。PM、JM 和 CK 处理苗期和成熟期 0~10 cm 土层深度处的侧根质量密度分别占 0~30 cm 总侧根质量密度的 67.1%、66.2%、60.1% 和 79.9%、78.4%、73.2%。

2 a 苗期和成熟期, 冬油菜 0~10 cm 和 10~20 cm 土层深度处的侧根质量密度均表现为 PM 和 JM 显著大于 CK, JM 略小于 PM, 但差异不显著。0~10 cm 和 10~20 cm 土层深度处的侧根质量密度在 2 a 间表现不同。2013—2014 年苗期 PM 和 JM 处理 0~10 cm 土层深度处的侧根质量密度明显小于 2012—2013 年苗期相应处理, 降幅分别达 13.6% 和 10.2%, 而 CK 处理基本没有变化。这可能是因为 2013 年 9—10 月份温度较高, 覆盖处理显著增加了膜下 0~10 cm 土层地温, 从而限制了根系的发育。2013—2014 年成熟期 PM、JM 和 CK 处理 0~10 cm 和 10~20 cm 土层深度处的侧根质量密度明显大于 2012—2013 年成熟期, 这可能是由于 2014 年 3—4 月份的降水量显著大于 2013 年同时期, 充足的水分供应促进了根系的进一步发育。

20~30 cm 土层深度处, 2 a 的苗期和成熟期, CK 处理冬油菜的侧根质量密度均最大, 这可能是因

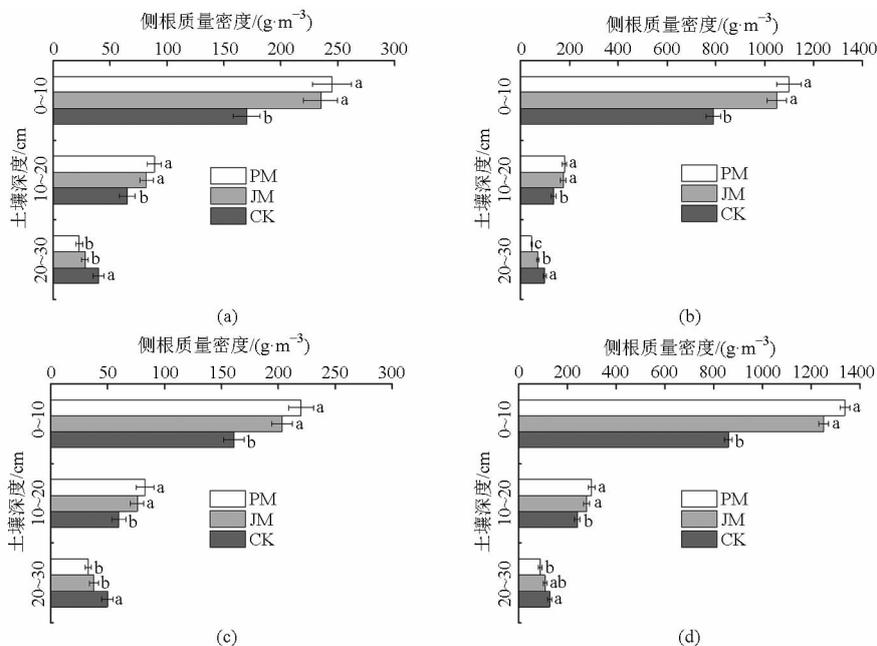


图 4 不同覆膜处理冬油菜的侧根质量密度分布

Fig. 4 Distribution of lateral root mass density of winter oilseed rape under different mulching treatments

(a) 2012—2013 年苗期 (b) 2012—2013 年花期 (c) 2013—2014 年苗期 (d) 2013—2014 年花期

为覆膜处理能形成由土壤热量梯度差异引起的提水上升保墒效应,使上层土壤保持较高的水分供根系吸收,而CK处理只能通过自身一系列的生理变化促使根系下扎,吸收深层土壤的水分。但不同年份不同生育期各处理的显著性差异也表现不同,生物膜随着时间的推移而破损以及2a冬油菜生育关键期降水量有很大差异可能是造成这种差异的原因。2a苗期,CK的侧根质量密度均显著大于PM和JM,且JM的侧根质量密度大于PM;2012—2013年成熟期,CK的侧根质量密度显著大于PM和JM,且JM的侧根质量密度也显著大于PM;2013—2014年成熟期,CK的侧根质量密度显著大于PM, JM的侧根质量密度略小于CK,略大于PM,但JM与PM、CK间均不存在显著差异。

2.5 不同覆膜处理对冬油菜产量、产量构成及水分利用效率的影响

2.5.1 冬油菜主花序和分枝花序角果产量构成

2a不同处理冬油菜主花序的角果数、角果长和千粒质量均表现为PM > JM > CK,但不存在显著差异(表3)。2a冬油菜主花序的每角籽粒数在不同处理间有显著差异,表现为PM和JM均显著大于CK,且PM大于JM,但二者差别较小。

表3 单株主花序角果产量构成要素

Tab.3 Yield components of main raceme per plant

年份	处理	角果数	角果长/cm	每角籽粒数	千粒质量/g
2012—2013年	PM	80.3 ^a	7.17 ^a	25.7 ^a	4.30 ^a
	JM	78.6 ^a	7.10 ^a	25.0 ^a	4.26 ^a
	CK	73.1 ^a	6.98 ^a	20.7 ^b	4.21 ^a
2013—2014年	PM	85.2 ^a	7.40 ^a	26.5 ^a	4.41 ^a
	JM	83.7 ^a	7.32 ^a	25.8 ^a	4.37 ^a
	CK	79.5 ^a	7.19 ^a	22.6 ^b	4.30 ^a

不同处理冬油菜分枝花序的角果产量构成见表4。2a冬油菜分枝花序的角果长和千粒质量在不同处理间的差别较小;但2a冬油菜不同处理间的分枝数及分枝花序的角果数和每角籽粒数存在显著

表5 不同覆膜处理冬油菜的产量、耗水量、水分利用效率、收获指数和肥料偏生产力

Tab.5 Yield, crop evapotranspiration, water use efficiency, harvest index and partial factor productivity of winter oilseed rape under different mulching treatments

年份	处理	产量/ (kg·hm ⁻²)	耗水量/ mm	水分利用效率/ (kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)	收获指数	肥料偏生产力/ (kg·kg ⁻¹)
2012—2013年	PM	4 553 ^a	295 ^c	15.43 ^a	0.28 ^a	7.59 ^a
	JM	4 285 ^a	331 ^b	12.95 ^a	0.28 ^a	7.14 ^a
	CK	3 104 ^b	374 ^a	8.30 ^b	0.27 ^a	5.17 ^b
2013—2014年	PM	5 472 ^a	339 ^c	16.14 ^a	0.26 ^a	9.12 ^a
	JM	5 120 ^a	372 ^b	13.76 ^a	0.26 ^a	8.53 ^a
	CK	3 760 ^b	415 ^a	9.06 ^b	0.24 ^a	6.27 ^b

差异,均表现为CK显著小于PM和JM,且JM略小于PM。PM和JM在2a间的平均分枝数分别比CK多2.5个和2个,可见普通地膜和可降解地膜覆盖可以促进冬油菜有效分枝,为冬油菜增产奠定基础。

表4 分枝花序角果产量构成要素

Tab.4 Yield components of branch raceme per plant

年份	处理	分枝数	角果数	角果长/ cm	每角籽粒数	千粒质量/g
2012—2013年	PM	10.3 ^a	358.6 ^a	6.72 ^a	23.5 ^a	4.09 ^a
	JM	9.9 ^a	345.3 ^a	6.67 ^a	22.7 ^a	4.03 ^a
	CK	8.2 ^b	313.5 ^b	6.48 ^a	18.8 ^b	3.98 ^a
2013—2014年	PM	12.5 ^a	388.5 ^a	7.18 ^a	24.3 ^a	4.36 ^a
	JM	12.0 ^a	370.7 ^a	7.12 ^a	23.8 ^a	4.32 ^a
	CK	9.6 ^b	335.8 ^b	6.89 ^a	19.9 ^b	4.21 ^a

2.5.2 冬油菜产量和水分利用效率

PM和JM对冬油菜产量、耗水量、水分利用效率和肥料偏生产力的影响与CK相比均存在显著性差异,但冬油菜的收获指数在PM、JM和CK间的差异不显著(表5)。2012—2013年不同处理冬油菜的耗水量均小于2013—2014年,CK处理冬油菜2a的耗水量均显著大于JM和PM,且JM处理冬油菜2a的耗水量也显著大于PM。2012—2013年和2013—2014年PM和JM处理冬油菜的耗水量与CK相比,分别减小了21.1%、11.5%和18.3%、10.4%。

冬油菜的产量、水分利用效率和肥料偏生产力在2a间均为PM处理最大, JM略小于PM,且PM和JM均显著大于CK。2012—2013年和2013—2014年PM和JM处理冬油菜产量相对CK分别增加46.7%、38.1和45.5%、36.2%;2012—2013年和2013—2014年PM和JM处理冬油菜水分利用效率与CK相比,分别提高了85.9%、56.0%和78.2%、51.9%;2012—2013年和2013—2014年CK处理的肥料偏生产力比PM和JM处理分别降低31.9%、27.6%和31.3%、26.5%。

2.6 不同覆膜处理对冬油菜籽粒品质的影响

含油率、蛋白质、油酸、芥酸和硫苷含量是评价油菜籽粒品质的重要指标,芥酸和硫苷含量较高会对人体营养健康不利。PM、JM 和 CK 处理间冬油菜籽粒的含油率、蛋白质含量和油酸含量不存在显著差异,但不同覆盖处理对冬油菜籽粒的芥酸和硫苷含量的影响显著(表 6)。

表 6 不同覆膜处理冬油菜籽粒品质指标含量

Tab.6 Qualities of rapeseed under different

mulching treatments

%

年份	处理	含油率	蛋白质	芥酸	硫苷	油酸
2012—2013 年	PM	40.54 ^a	24.90 ^a	3.01 ^a	31.22 ^a	60.51 ^a
	JM	40.26 ^a	24.69 ^a	2.79 ^b	28.03 ^{ab}	59.98 ^a
	CK	39.75 ^a	24.18 ^a	2.71 ^b	26.71 ^b	59.06 ^a
2013—2014 年	PM	40.34 ^a	24.81 ^a	3.08 ^a	31.98 ^a	60.99 ^a
	JM	40.05 ^a	24.31 ^a	2.83 ^b	28.16 ^{ab}	59.75 ^a
	CK	39.49 ^a	23.89 ^a	2.75 ^b	26.91 ^b	59.37 ^a

2 a 冬油菜籽粒的含油率、蛋白质含量和油酸含量均表现为 PM > JM > CK。PM 处理冬油菜籽粒 2 a 的芥酸含量均显著大于 JM 和 CK 处理,且 JM 的芥酸含量略大于 CK;冬油菜籽粒 2 a 的硫苷含量均为 PM 最大,且 PM 显著大于 CK 处理,而 JM 处理 2 a 的硫苷含量与 PM 和 CK 差别均不显著。

3 讨论

3.1 不同覆膜处理下冬油菜的根系特征

根系是作物吸收水分和养分以及合成多种生理活性物质的重要器官,作物根系功能的发挥与其生长发育状况和在土壤中的时空分布密切相关,作物对养分的吸收及最终产量的形成是根系形态特征和生理特性共同作用的结果^[21-22]。李世清等^[23]研究发现地膜覆盖能有效促进根系的早生、快扎,增加根长、根数和根质量,改善根系在土壤中的时空分布,而且还有利于延长作物生长后期部分根系的吸收功能。吕丽红等^[24]研究发现覆膜前期作物根系加快生长,中下层根系比例增加,但由于后期覆膜使土壤温度过高,根系大量死亡,活性下降,适时揭膜能改善光合产物的分配,促进根系生长下扎,维持生育后期活性。杨青华等^[25]研究发现地膜覆盖棉花前期根系生长发育加快,根系活力增强,干物质量较大,但覆盖不利于棉花根系下扎,土壤深层根系衰减较快。高家合等^[26]发现长期覆盖会使土壤温度相应较高,对根的生长不利,根的长度和数量减少较快。本研究中,苗期普通地膜覆盖(PM)和生物降解膜覆盖(JM)处理冬油菜主根的下扎深度显著小于露地对照(CK),但成熟期 PM 处理主根下扎深度显著小

于 JM 和 CK 处理,这说明地膜覆盖不利于冬油菜主根下扎,生物膜由于生育后期降解,使其土壤温度、湿度和通气性得到改善,能促进生育后期主根下扎,对吸收深层土壤的养分有利。

PM 和 JM 处理能显著增加冬油菜在 0 ~ 20 cm 土层深度的侧根质量密度,CK 处理冬油菜在 20 ~ 30 cm 土层深度的侧根质量密度大于 PM 和 JM 处理。但在 2012—2013 年成熟期, JM 处理冬油菜在 20 ~ 30 cm 土层深度的侧根质量密度显著大于 PM 处理,这主要是因为生物膜降解后,其提水保墒效应降低,上层土壤的含水率降低,迫使根系下扎吸收深层土壤的水分和养分;在 2013—2014 年成熟期, JM 处理 20 ~ 30 cm 土层深度的侧根质量密度大于 PM 处理,但差异不显著,这可能是由于 2014 年 4 月份降水量大,充足的水分供应消除了 2 种覆盖处理间的差异。

3.2 不同覆膜处理的增温、保墒和增产效果

地膜覆盖具有显著的增温保墒效果。申丽霞等^[13]研究表明可降解地膜和普通地膜覆盖均能明显提高玉米播种后 2 个月的地表和地下 10 cm 的土壤温度,增加玉米播种至大喇叭口期 0 ~ 40 cm 的土壤含水率;乔海军等^[27]研究表明,生物降解地膜覆盖在玉米生长前期的保温保水效果显著,中后期增温作用不明显;张杰等^[15]研究表明,在集雨种植条件下,生物降解膜覆盖与露地对照相比能显著提高玉米不同生育期 0 ~ 60 cm 土层土壤储水量,与普通地膜覆盖无显著差异。本研究中,在 150 DAS 前, JM 处理能显著提高地下 5 cm 和 25 cm 深度处土壤的平均温度,显著增加 0 ~ 100 cm 的土壤储水量,其增温保墒效果与 PM 处理相当;但 150 DAS 后,随着生物地膜的降解,其增温保墒效果变差,显著低于 PM 处理。

覆膜处理能显著提高作物的产量和水分利用效率。申丽霞等^[13]研究发现普通地膜和生物降解膜覆盖处理的玉米产量均显著大于露地对照,比露地对照分别提高 19.96% 和 19.67%;李仙岳等^[28]研究表明普通地膜和生物降解膜覆盖下向日葵单株产量不存在显著差异,均显著大于无覆膜处理,普通地膜和 0.008 mm 的生物降解膜覆盖处理分别比无覆膜处理增产 14.38% 和 11.21%;张杰等^[15]通过 2 a 大田试验发现普通地膜和生物降解膜覆盖处理下玉米的增产效果显著,2 a 平均分别比不覆膜处理增产 19.96% 和 19.67%,2 a 平均水分利用效率分别比不覆膜处理提高 30.66% 和 29.68%。本研究中,普通地膜(PM)和生物降解膜(JM)覆盖处理下冬油菜 2 a 的平均产量比露地对照(CK)分别增加 45.91%

和 37.02%, 2 a 的平均水分利用效率分别提高 81.68% 和 53.86%。

2013—2014 年冬油菜生育期, 尤其是在冬油菜关键生育期(盛花期和角果期)的降水量远大于 2012—2013 年, 使 2013—2014 年冬油菜的最终产量和水分利用效率相对较高。

4 结论

(1) 在 150 DAS 前, 生物降解膜(JM)和普通地膜(PM)覆盖处理的增温保墒效果相当; 150 DAS 后, 随着生物地膜的降解, JM 处理的增温保墒效果低于 PM 处理。JM 处理冬油菜的株高、叶面积指数和地上部干物质质量与 PM 处理无显著差异($P > 0.05$), 且均显著大于 CK($P < 0.05$)。

(2) 在其它根系特征没有显著差异的前提下, JM 覆盖处理比 PM 覆盖处理在生育后期更能促进冬油菜主根下扎, 有效增加 20~30 cm 土壤深度的侧根质量密度。

(3) PM 和 JM 覆盖处理的节水增产效果显著, PM 和 JM 覆盖处理冬油菜 2 a 平均产量相对 CK 分别增加 45.91% 和 37.02%; 2 a 平均水分利用效率与 CK 相比分别提高 81.68% 和 53.86%。

(4) JM 覆盖处理与 PM 覆盖处理相比, 在含油率、蛋白质和油酸含量方面不存在显著差异, 同时, 还能明显降低油菜籽粒中对人体健康不利的芥酸和硫苷含量。因此, 从应用效果来看, 生物降解膜可以代替普通地膜应用于冬油菜的种植栽培。

参 考 文 献

- 张树杰, 王汉中. 我国油菜生产应对气候变化的对策和措施分析[J]. 中国油料作物学报, 2012, 34(1): 114-122.
Zhang Shujie, Wang Hanzhong. Policies and strategies analyses of rapeseed production response to climate change in China[J]. Chinese Journal of Oil Crop Science, 2012, 34(1): 114-122. (in Chinese)
- 殷艳, 廖星, 余波, 等. 我国油菜生产区域布局演变和成因分析[J]. 中国油料作物学报, 2010, 32(1): 147-151.
Yin Yan, Liao Xing, Yu Bo, et al. Regional distribution evolution and development tendency of Chinese rapeseed production [J]. Chinese Journal of Oil Crop Science, 2010, 32(1): 147-151. (in Chinese)
- 景军胜, 董振生. 地膜油菜栽培技术发展现状及前景[J]. 作物杂志, 2004(1): 40-42.
- 张德奇, 廖允成, 贾志宽. 旱区地膜覆盖技术的研究进展及发展前景[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(1): 208-213.
Zhang Deqi, Liao Yuncheng, Jia Zhikuan. Research advances and prospects of film mulching in arid and semi-arid areas [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2005, 23(1): 208-213. (in Chinese)
- 许香春, 王朝云. 国内外地膜覆盖栽培现状及展望[J]. 中国麻业, 2006, 28(1): 6-11.
Xu Xiangchun, Wang Chaoyun. The status and development trend of cultivation mulch film at home and abroad [J]. Plant Fibers and Products, 2006, 28(1): 6-11. (in Chinese)
- 武军艳, 孙万仓, 杨杰, 等. 不同覆盖处理对甘肃中部地区甘蓝型冬油菜越冬率及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(3): 96-99.
Wu Junyan, Sun Wancang, Yang Jie, et al. Effect of different covering on the overwintering rate and yield of winter rapeseed (*Brassica napus*) in central Gansu [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2010, 28(3): 96-99. (in Chinese)
- 孙万仓, 牛俊义, 滕文惠, 等. 覆盖处理对旱寒区冬油菜越冬率和产量的影响[J]. 中国油料作物学报, 2006, 28(3): 315-318.
Sun Wancang, Niu Junyi, Teng Wenhui, et al. The effects of covering on winter-survival and yield of winter rapeseed [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2006, 28(3): 315-318. (in Chinese)
- 杨丽, 张东兴, 侯书林, 等. 玉米苗期地膜回收机结构参数分析与试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(12): 29-34.
Yang Li, Zhang Dongxing, Hou Shulin, et al. Analysis of structural parameters and experiment of plastic film collector for corn fields during seedling period [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(12): 29-34. (in Chinese)
- 严昌荣, 梅旭荣, 何文清, 等. 农用地膜残留污染的现状与防治[J]. 农业工程学报, 2006, 22(11): 269-272.
Yan Changrong, Mei Xurong, He Wenqing, et al. Present situation of residue pollution of mulching plastic film and controlling measures [J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(11): 269-272. (in Chinese)
- 毕继业, 王秀芬, 朱道林. 地膜覆盖对农作物产量的影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(11): 172-175.
Bi Jiye, Wang Xiufen, Zhu Daolin. Effect of plastic-film mulch on crop yield [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(11): 172-175. (in Chinese)
- Ammala A, Bateman S, Dean K, et al. An overview of degradable and biodegradable polyolefins [J]. Progress in Polymer Science, 2011, 36(8): 1015-1049.
- Moreno M M, Moreno A. Effect of different biodegradable and polyethylene mulches on soil properties and production in a tomato crop [J]. Scientia Horticulturae, 2008, 116(3): 256-263.
- 申丽霞, 王璞, 张丽丽. 可降解地膜对土壤、温度水分及玉米生长发育的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(6): 25-30.
Shen Lixia, Wang Pu, Zhang Lili. Effects of degradable film on soil temperature, moisture and growth of maize [J]. Transactions

- of the CSAE, 2011, 27(6): 25 - 30. (in Chinese)
- 14 Li R, Hou X Q, Jia Z K, et al. Effects on soil temperature, moisture, and maize yield of cultivation with ridge and furrow mulching in the rain fed area of the Loess Plateau, China[J]. *Agricultural Water Management*, 2013, 116: 101 - 109.
- 15 张杰,任小龙,罗诗峰,等. 环保地膜覆盖对土壤水分及玉米产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(6): 14 - 19.
Zhang Jie, Ren Xiaolong, Luo Shifeng, et al. Influences of different covering materials mulching on soil moisture and corn yield [J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(6): 14 - 19. (in Chinese)
- 16 何文清,赵彩霞,刘爽,等. 全生物降解膜田间降解特征及其对棉花产量影响[J]. *中国农业大学学报*, 2011, 16(3): 21 - 27.
He Wenqing, Zhao Caixia, Liu Shuang, et al. Study on the degradation of biodegradable plastic mulch film and its effect on the yield of cotton[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2011, 16(3): 21 - 27. (in Chinese)
- 17 马霓,李玲,徐军,等. 甘蓝型油菜抗倒伏性及农艺性状研究[J]. *作物杂志*, 2010(6): 36 - 41.
Ma Ni, Li Ling, Xu Jun, et al. Researches on the lodging resistance and agronomic traits of winter rape (*Brassica napus* L.) [J]. *Crops*, 2010(6): 36 - 41. (in Chinese)
- 18 陈新军,戚存扣,浦惠明,等. 甘蓝型油菜抗倒性评价及抗倒性与株型结构的关系[J]. *中国油料作物学报*, 2007, 29(1): 54 - 57.
Chen Xinjun, Qi Cunkou, Pu Huiming, et al. Evaluation of lodging resistance in rapeseed (*Brassica napus* L.) and relationship between plant architecture and lodging resistance [J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2007, 29(1): 54 - 57. (in Chinese)
- 19 Liu L P, Gan Y T, Bueckert R, et al. Rooting system of oilseed and pulse crops I: temporal growth patterns across the plant developmental periods [J]. *Field Crops Research*, 2011, 122(3): 256 - 263.
- 20 Liu L P, Gan Y T, Bueckert R, et al. Rooting system of oilseed and pulse crops II: vertical distribution patterns across the soil profile [J]. *Field Crops Research*, 2011, 122(3): 248 - 255.
- 21 王法宏,王旭清,刘素英,等. 根系分布与作物产量的关系研究进展[J]. *山东农业科学*, 1997(4): 48 - 51.
- 22 Lynch J. Root architecture and plant productivity [J]. *Plant Physiology*, 1995, 109(1): 7 - 13.
- 23 李世清,李凤民,宋秋华,等. 半干旱地区地膜覆盖对土壤氮素有效性的影响[J]. *生态学报*, 2001, 21(2): 79 - 84.
Li Shiqing, Li Fengmin, Song Qiuhua, et al. Effects of plastic film mulching periods on the soil nitrogen availability in semiarid areas [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(2): 79 - 84. (in Chinese)
- 24 吕丽红,王俊,凌莉,等. 半干旱地区地膜覆盖、底墒和氮肥对春小麦根系生长的集成效应[J]. *西北农林科技大学学报:自然科学版*, 2003, 31(3): 26 - 30.
Lü Lihong, Wang Jun, Ling Li, et al. The integrated effect of plastic film mulching, soil water storage amount before sowing and nitrogen fertilizer on spring wheat root growth [J]. *Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition*, 2003, 31(3): 26 - 30. (in Chinese)
- 25 杨青华,黄勇,马二培. 液体地膜覆盖对棉花根系生长发育的影响[J]. *生态学杂志*, 2006, 25(3): 299 - 302.
Yang Qinghua, Huang Yong, Ma Erpei. Effects of liquid film mulching on cotton root growth [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(3): 299 - 302. (in Chinese)
- 26 高家合,李梅云,赵淑媛,等. 地膜覆盖与烤烟根系及烟叶产量品质的关系[J]. *中国农学通报*, 2008, 24(7): 181 - 185.
Gao Jiahe, Li Meiyun, Zhao Shuyuan, et al. Correlation of film-cover and roots, yield and quality of flue-cured tobacco [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2008, 24(7): 181 - 185. (in Chinese)
- 27 乔海军,黄高宝,冯福学,等. 生物全降解地膜的降解过程及其对玉米生长的影响[J]. *甘肃农业大学学报*, 2008, 10(5): 71 - 75.
Qiao Haijun, Huang Gaobao, Feng Fuxue, et al. Degradation and its effect on corn growth of biodegradable mulch film [J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2008, 10(5): 71 - 75. (in Chinese)
- 28 李仙岳,彭遵原,史海滨,等. 不同类型地膜覆盖对土壤水热与葵花生长的影响[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(2): 97 - 103.
Li Xianyue, Peng Zunyuan, Shi Haibin, et al. Effects of different degradable films mulching on soil water potential, temperature and sunflower growth [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(2): 97 - 103. (in Chinese)