排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2015 年 9 月 Sept. 2015 | 第 33 卷 第 9 期 Vol. 33 No. 9

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.14.0212

玉米秸秆覆盖下宽幅精播冬小麦产量损失补偿效应及水分利用效率


刘馨惠

刘馨惠[1]，卞城月[1]，马长健[1]，刘泉汝[1]，魏春芝[2]，李全起[1]
（1.山东农业大学水利土木工程学院，山东 泰安 271018；2.巨野县农业局，山东 巨野 274900）

摘要：为了探索不同种植模式对秸秆覆盖的麦田产量及水分利用效率的影响，设置宽幅精播和常规种植2种种植模式，每种种植模式设0和0.6 kg/m^2 2种秸秆覆盖方式，以研究种植模式和玉米秸秆覆盖对冬小麦群体动态变化、阶段耗水量、产量以及水分利用效率等的影响. 结果表明，玉米秸秆覆盖虽然显著减少了冬小麦耗水量，但是也显著降低了冬小麦穗数和千粒质量，从而显著降低了冬小麦产量. 玉米秸秆覆盖条件下，宽幅精播种植模式通过显著增加穗数而对产量损失起补偿作用，且宽幅精播种植模式的耗水量显著低于常规种植模式，故其水分利用效率显著高于常规种植模式. 在山东地区，为了提高冬小麦的水分利用效率，宽幅精播种植与玉米秸秆覆盖相结合是一种值得推广的节水种植模式.

关键词：冬小麦；种植模式；穗数；分蘖；耗水量
中图分类号：S512.11　**文献标志码**：A　**文章编号**：1674-8530(2015)09-0811-07

刘馨惠，卞城月，马长健，等. 玉米秸秆覆盖下宽幅精播冬小麦产量损失补偿效应及水分利用效率[J]. 排灌机械工程学报，2015，33(9)：811-817.

Liu Xinhui，Bian Chengyue，Ma Changjian，et al. Yield loss compensation effect and water use efficiency of widely and precisely sowed winter wheat covered under corn stalksn[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering(JDIME)，2015，33(9)：811-817.(in Chinese)

Yield loss compensation effect and water use efficiency of widely and precisely sowed winter wheat covered under corn stalks

Liu Xinhui[1]，*Bian Chengyue*[1]，*Ma Changjian*[1]，*Liu Quanru*[1]，*Wei Chunzhi*[2]，*Li Quanqi*[1]
(1. Water Conservancy and Civil Engineering College，Shandong Agricultural University，Taian，Shandong 271018，China；2. Farm Bureau of Juye County，Juye，Shandong 274900，China)

Abstract：To develop water-saving agriculture in Shandong province，North China，a series of field experiments are conducted with two sowing patterns (wide and precise sowing pattern and conventional-cultivation pattern) and two corn stalks mulching modes (0 and 0.6 kg/m^2) to study dynamic change in wheat plants，water consumption and water use efficiency (*WUE*) in various growth stages as well as grain yield. The results show that corn mulch can significantly reduce water consumption but both number of spikes and 1 000-grain mass decrease significantly，causing a substantially reduced wheat yield. Under corn stalks mulch conditions，the wide and precise sowing pattern not only can compensate the grain yield loss by increasing number of spikes significantly，but also can lower the water consumption

收稿日期：2014-12-29；**网络出版时间**：2015-09-17
网络出版地址：http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20150917.1551.026.html
基金项目：国家自然科学基金资助项目(31101114)；国家863计划项目(2013AA102903)；山东省科技发展计划项目(2014GNC111002)
作者简介：刘馨惠(1991—)，女，黑龙江海林人，硕士研究生(liuxinhui123@yeah.net.com)，主要从事农业水土工程研究.
李全起(1976—)，男，山东昌乐人，教授，博士(通信作者，quanqili@sdau.edu.cn)，主要从事农业水土工程研究.

greatly compared with the conventional-cultivation pattern. Therefore, *WUE* is much higher in wide and precise sowing pattern than in conventional-cultivation pattern. The study indicates that the wide and precise sowing pattern combined with corn stalks mulch is a sound measure to improve *WUE* of winter wheat in Shandong province, North China.

Key words: winter wheat; planting patterns; spike; tiller; water consumption

中国华北平原的主要粮食作物为冬小麦和夏玉米,主要采用冬小麦夏玉米一年两熟种植制度.而北方冬小麦生育期间耗水量为同期降水量的2~3倍[1],常引起农田季节性干旱.随着华北地区工农业的迅速发展,需水量日益增多,农业需水与供水的矛盾日益突出.水资源短缺成为中国北方平原严重的问题[2],且其中可利用的水中只有1/3用于作物蒸腾,剩下的2/3被土壤蒸发[3],浪费严重.所以,发展节水农业势在必行.

秸秆覆盖是一种有效的农田节水措施,可以保持水土[4],减少棵间蒸发,增加植株蒸腾,从而降低水分无效消耗,但是对产量的影响没有统一的认识.有研究结果显示西北旱作雨养农区采用覆盖模式种植冬小麦可使籽粒产量提高10.9%[5].方文松等[6]在河南的研究结果表明,秸秆覆盖可使冬小麦增产8.08%~10.71%.Wu等[7]研究发现秸秆覆盖和保水剂相结合处理下的产量增加达最大(14.2%~20.1%),但是Mrabet等[8]在摩洛哥的14个试验中发现6个试验减产、8个试验增产,且其他众多资料表明,秸秆覆盖显著降低冬小麦产量.涂纯等[9]研究表明在丰水年份,覆盖处理的保水作用并不明显,反而会导致低温效应影响到小麦籽粒发育,最终影响产量.李全起等[10]与Balwinder-Singh等[11]研究表明,覆盖降低土壤温度,延缓作物发展,秸秆覆盖处理在生育后期,营养器官消耗大量的营养物质,从而导致向籽粒分配的光合产物减少,最终表现为籽粒光能利用率降低,降低了冬小麦的籽粒产量.Li等[12]研究表明,秸秆覆盖对冬小麦产量构成因素中的千粒重和穗粒数有明显的促进作用,但对穗数有抑制作用,从而降低了冬小麦产量.而陈素英等[13]研究发现,穗数降低是秸秆覆盖冬小麦产量降低的主要原因,其次是千粒质量降低.所以,穗数减少是秸秆覆盖冬小麦减产的重要原因.谢瑞芝等[14]对中国保护性耕作试验研究的产量效应分析结果表明,华北地区免耕覆盖冬小麦的减产概率最高.所以,在华北平原,虽然秸秆覆盖具有一定的节水潜力,但是,秸秆覆盖后降低了产量构成因素中的穗数和千粒质量,从而引起了冬小麦产量降低,致使秸秆覆盖下冬小麦水分利用效率并没有提高[15-16],进而影响了该项技术的推广.

为了进一步提高冬小麦产量,山东农业大学余松烈院士等[17]提出了一种新型小麦种植模式——宽幅精播,即在播种量相同的情况下,改传统播种机播幅宽3.0~5.0 cm为6.0~8.0 cm,改生产上密集一条线条播为单粒分散式粒播,该技术是对冬小麦精播高产栽培技术的继承和发展.应用该模式,2010年在中国北方冬麦区获得了大面积单产的最高纪录.赵丹丹等[18]研究表明,与常规种植模式相比,宽幅精播种植模式的冬小麦籽粒产量显著提高了7.0%,增产的原因在于穗数显著增加了9.4%.因此,宽幅精播种植模式具有增加冬小麦产量构成因素中穗数的潜力.

在秸秆覆盖条件下,借助于宽幅精播增加穗数的特性,有可能对秸秆覆盖麦田的产量损失起一定的补偿作用,从而协同提高冬小麦产量和水分利用效率.针对上述问题,文中针对玉米秸秆覆盖条件下宽幅精播麦田的产量和水分利用效率进行研究,以期为中国华北冬小麦的可持续生产提供一些理论依据和技术支持.

1 试验概况与方法

1.1 试验地概况

试验于2013—2014年冬小麦生育期间在山东农业大学农学实验站(36°10′9″N, 117°9′03″E)大田内进行.该试验点属温带大陆性半季风气候区,多年平均降水量为697.0 mm,但约70%集中在7—9月份.冬小麦为了获得高产和稳产,必须进行补充灌溉.土壤类型为壤土,0~20 cm土壤碱解氮、速效磷和速效钾质量含量分别为108.1,16.1和92.4 mg/kg,田间持水率为32.4%.每个小区面积为3 m×3 m(此为精确测量,相当于在水分池内,试验中对种植量、水分、肥料等进行精确测量后均匀撒入),小区间筑高和宽各为15 cm和20 cm的垄.各小区中央埋设深度为1.5 m的中子管,以便检测土壤水分动态变化.

试验在自然条件下进行,整个试验期间降雨量为 150.1 mm. 增加灌水量会降低水分利用效率[19],故实行亏缺灌溉. 由前期大量试验结果证明,该试验地区冬小麦生育期间灌溉 120 mm 即可获得合理的产量、水分利用效率和经济效益[1,11,20]. 由于灌拔节水可增加分蘖数和成穗率,灌抽穗水可促进干物质积累穗,增加千粒质量[21],故试验于冬小麦的拔节期(2014 年 3 月 30 日)和抽穗期(2014 年 4 月 15 日),在各小区均灌溉了 60 mm 水量,用水表严格控制. 方法是把管子安装到小区,水表安装在管子出水处. 人工往小区里灌水,各个方向灌溉均匀,使水在同一水平面上均匀入渗,以保证一定的均匀度.

1.2　试验设计

供试冬小麦品种为济麦 22,于 2013 年 10 月 8 日播种,各小区的播种量均为 94 kg/hm^2,采用人工点播. 试验采用裂区设计,主区为 2 种种植模式,分别为宽幅精播(W)和常规种植(C);副区为 2 种秸秆覆盖方式,分别为玉米秸秆覆盖(F1)和不覆盖(F0). 2 种种植模式的行距相等,但宽幅精播种植模式的播幅为 6 ~ 8 cm,而常规种植模式则为 2 ~ 3 cm. 覆盖材料为玉米秸秆,将收获后的玉米秸秆剪成 3 ~ 5 cm,于小麦整齐出苗后覆盖,覆盖量为 0.6×10^4 kg/hm^2. 每个处理重复 3 次,共 12 个小区,随机区组排列. 播种前,每小区底施尿素为 192.2 kg/hm^2、磷酸二铵为 260.9 kg/hm^2、硫酸钾为 210.0 kg/hm^2,拔节期追施尿素为 192.2 kg/hm^2. 其他管理同高产田.

1.3　项目测定和计算

1.3.1　群体动态变化

于小区中央选择生长均匀一致的 2 个 20 cm 双行做标记,在冬小麦越冬期、拔节期和抽穗期,考察其群体数量,并换算为每 m^2 上的分蘖数.

1.3.2　土壤体积含水量

采用 CNC503B 型智能中子仪每 5 ~ 7 d 测定 1 次,每 10 cm 为 1 个层次,测深为 1.2 m. 降水和灌溉前后加测 1 次. 0 ~ 20 cm 土壤体积含水量用 TDR 加以校正.

1.3.3　农田蒸散量

试验地点的地下水位在 6 m 以下,故地下水对冬小麦蒸散量的影响可忽略不计. 由于试验小区的垄高出地面为 15 cm,故降雨产生的地表径流可忽略不计. 农田水量平衡方程为

$$ET = P + I + \Delta S, \tag{1}$$

$$\Delta S = \sum(\Delta\theta_i \cdot Z_i), \tag{2}$$

式中:ET 为冬小麦生育期间蒸散量,mm;P 为冬小麦生育期有效降雨量,mm,由距试验点 50 m 的气象站提供;I 为灌溉量,mm,由水表直接读取;ΔS 为土壤蓄存水变化量,mm;$\Delta\theta_i$ 为土壤某一层次的体积含水量;Z_i 为土壤层次厚度,mm;i 为土壤层次.

1.3.4　籽粒产量

收获时,每处理随机获取除去边三行及中子管附近以外生长均匀一致的 1.5 m 双行植株考察穗数并进行测产,且折算为每 m^2 产量. 另取相邻的 20 株,于室内测定穗粒数和千粒质量.

1.3.5　水分利用效率

采用产量水平水分利用效率,计算公式为

$$WUE = \frac{Y}{ET_t}, \tag{3}$$

式中:WUE 为水分利用效率;Y 为冬小麦的籽粒产量,kg/m^2;ET_t 为冬小麦的总蒸散量,mm.

1.4　统计分析

采用 Microsoft Excel 2007 和数据处理系统(date processing system,DPS)统计分析系统进行数据处理和统计分析,采用 LSD 法进行显著性检验,置信度为 5%.

2　结果与分析

2.1　冬小麦群体动态

图 1 为各个处理下冬小麦在不同时期分蘖数 n 及不同处理间的差异,图中 CF0 为不覆盖常规种植处理;WF0 为不覆盖宽幅精播种植处理;CF1 为覆盖常规种植处理;WF1 为覆盖宽幅精播种植处理.

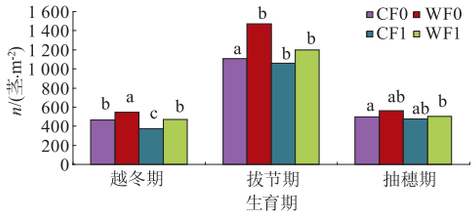


图 1　冬小麦主要生育期群体数量

Fig. 1　Number of plants of winter wheat in major growth stages

由图 1 可知,不同时期不同处理冬小麦的分蘖数不同. 越冬期,无论宽幅精播种植模式还是常规种植模式,玉米秸秆覆盖条件下的分蘖数均显著小于无覆盖处理的,且宽幅精播种植模式的冬小麦分蘖数显著大于常规种植模式的,小麦分蘖数的多少

按各处理由大至小为 WF0,WF1,CF0,CF1;拔节期,冬小麦分蘖数达到最大,处理 WF0 的分蘖数显著大于 CF0 处理的,但处理 WF1 与 CF1 间差异不具有统计学意义;抽穗期,冬小麦的群体由于分蘖消亡而减小,处理 WF0,WF1,CF0 和 CF1 的分蘖数分别较拔节期的减小了 62.06%,57.87%,55.33% 和 55.24%.虽然宽幅精播种植模式的分蘖消亡率大于常规种植模式的,但是,处理 WF0 的群体数仍然比处理 CF0 的增大了 12.86%,处理 WF1 比 CF1 的增大了 6.40%.因此,宽幅精播种植模式的群体数量大于常规种植模式的,无覆盖处理的群体数大于覆盖处理的.

2.2 冬小麦阶段耗水量

表 1 为各个处理、不同时期的耗水量,表中 W,W_t 分别为各阶段耗水量、总耗水量.由表可见,从播种期到灌浆期,常规种植模式下的耗水量显著大于宽幅精播种植模式下的;从灌浆期到成熟期,2 种种植模式间的总耗水量差异不具有统计学意义.从播种期到抽穗期,玉米秸秆覆盖显著降低了冬小麦耗水量;从灌浆期到成熟期,玉米秸秆覆盖处理的耗水量显著高于不覆盖处理的.就整个冬小麦生育期而言,玉米秸秆覆盖处理的总耗水量比不覆盖处理的显著减少了 31.8 mm.

表 1 冬小麦阶段耗水量及总耗水量

Tab.1 Water consumption and total water consumption of winter wheat in various growth stages mm

模式	处理	W				W_t
		播种–拔节	拔节–抽穗	抽穗–灌浆	灌浆–成熟	
种植模式	W	86.4b	44.1b	66.3b	147.0a	343.8a
	C	93.9a	51.2a	69.6a	136.5a	351.2a
覆盖方式	F0	109.0a	55.2a	68.4a	130.9b	363.4a
	F1	71.3b	40.1b	67.5a	152.7a	331.6b
耦合	CF0	106.2b	48.3c	74.3a	125.2c	354.0b
	WF0	111.8a	62.0a	62.5c	136.5bc	372.8a
	CF1	81.6c	54.0b	64.9bc	147.9ab	348.4b
	WF1	61.0d	26.2d	70.1ab	157.5a	314.8c

注:同列不同小写字母表示处理间差异具有统计学意义($P<0.05$).下同.

秸秆覆盖和种植模式的耦合作用显示,宽幅精播种植模式中,秸秆覆盖条件下的冬小麦耗水量比不覆盖显著减小了 58.0 mm,而常规种植模式中,覆盖方式对冬小麦总耗水量没有显著影响.因此,宽幅精播种植模式结合玉米秸秆覆盖可显著降低冬小麦的耗水量.

2.3 冬小麦产量及产量构成因素

冬小麦产量及产量构成因素如表 2 所示,表中 a,b,m,Y 分别为穗数、穗粒数、千粒质量和产量.由表可见,宽幅精播种植模式的穗数比常规种植模式的显著增多了 9.2%,其产量比常规种植模式显著提高了 5.2%.覆盖玉米秸秆后,产量构成因素中穗数显著减少了 15.9%,千粒质量显著减小了 4.9%.从而导致产量显著降低了 7.8%.

表 2 麦田产量及产量构成因素

Tab.2 Winter wheat grain yield and yield components pattern

模式	处理	a/(穗·m^{-2})	b/(粒·穗$^{-1}$)	m/g	Y/(g·m^{-2})
种植模式	W	507.9a	38.3a	46.7a	741.3a
	C	465.2b	38.2a	46.3a	704.7b
覆盖方式	F0	528.5a	38.7a	47.7a	752.4a
	F1	444.6b	37.8a	45.3b	693.7b
耦合	WF0	551.2a	39.5a	48.0a	782.0a
	WF1	464.5c	37.2a	45.3b	700.6c
	CF0	505.7b	37.9a	47.3a	722.7b
	CF1	424.7d	38.4a	45.3b	686.7d

玉米秸秆覆盖和种植模式的耦合作用显示,宽幅精播种植模式对玉米秸秆覆盖的减产作用有补偿效应.虽然 2 种种植模式覆盖玉米秸秆后的籽粒产量均显著降低,但宽幅精播种植模式的籽粒产量比常规种植模式的显著提高了 13.9 g/m^2,这主要是由于产量构成因素中穗数显著增多了 39.8 穗/m^2 所致.因此,玉米秸秆覆盖条件下,宽幅精播种植模式可通过显著增多穗数而对冬小麦的产量损失起一定的补偿作用.

2.4 冬小麦水分利用效率

图 2 为冬小麦整个生育期的水分利用效率 *WUE*,不覆盖条件下,2 种种植模式间的 *WUE* 差异不具有统计学意义;玉米秸秆覆盖条件下,宽幅精播种植模式的 *WUE* 比常规种植模式的显著提高了 13.0%.常规种植模式下,覆盖与否对 *WUE* 没有显著影响;宽幅精播种植模式下,玉米秸秆覆盖条件下的 *WUE* 显著提高了 6.2%.因此,在华北平原,宽幅精播种植模式结合玉米秸秆覆盖,有利于提高冬小麦的 *WUE*.

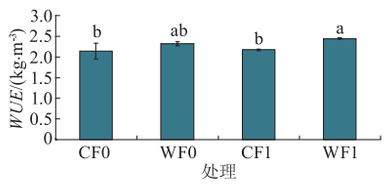


图 2 冬小麦水分利用效率

Fig.2 *WUE* of winter wheat

3 讨 论

由试验得知,无论宽幅精播还是常规种植,秸秆覆盖后均减产.主要与穗数的减少和千粒质量的

减小有关,与一些研究结果相同. 造成这一结果的可能原因有以下几方面:

1) 温度效应. 研究结果表明[22],秸秆覆盖地表后,使得根区土壤温度的日较差减小. 秸秆覆盖下根区温度的变化可能是引起冬小麦生育期推迟的重要因素,各生育期推迟使灌浆持续时间缩短,影响千粒质量的增大;并且到了生育后期,营养器官生长非常旺盛,茎和叶等营养器官的干物质积累量明显大于不覆盖处理的,消耗大量的营养物质,从而导致向籽粒分配的光合产物减少,最终造成产量降低. 另外,覆盖秸秆后,冬小麦籽粒灌浆期热胁迫可能较为严重, 对籽粒灌浆不利,造成收获指数降低[23].

2) 生化他感效应. 生化他感效应是影响种子发芽和幼苗生长的因素[24]. 杨思存等[25]的研究结果表明,玉米秸秆对小麦幼苗的相克作用最强,使小麦生物量减少 60.8%,玉米秸秆的他感强度大于小麦秸秆和大豆秸秆,且对小麦前期影响大于后期. 为了进一步探明生化他感效应对秸秆覆盖冬小麦减产的影响,在之后的试验中可以尝试利用其他当季秸秆替代玉米秸秆进行研究.

文献[15 - 16]认为冬小麦覆盖秸秆后水分利用效率并未提高,这主要与产量降低有关. 文中研究结果表明,宽幅精播种植模式中,玉米秸秆覆盖后的水分利用效率显著提高. 对于宽幅精播种植模式,玉米秸秆覆盖条件下,冬小麦在拔节期和抽穗期的叶面积指数显著大于常规种植模式的,抽穗期光合有效辐射透射率较常规种植模式的显著减小了 28.79%[26],并因此减少了土壤无效蒸发而减少了总耗水量. 灌浆期至成熟期,宽幅精播种植模式的蒸腾速率显著高于常规种植模式的[27],由于该阶段的农田耗水以蒸腾耗水为主,所以秸秆覆盖条件下宽幅精播种植模式在灌浆 - 成熟期的耗水量显著多于常规种植模式的. 相对于常规种植模式,宽幅精播种植模式可以优化冬小麦冠层结构,从而提高光合有效辐射的转化效率,这是宽幅精播种植模式高产的最重要原因. 所以,秸秆覆盖条件下,宽幅精播种植模式能显著提高水分利用效率.

玉米秸秆覆盖条件下,2 种种植模式的产量都低于不覆盖处理,但宽幅精播的水分利用效率显著高于不覆盖处理的. 在权衡产量和水分利用效率 2 个因素的条件下,如何提高秸秆覆盖条件下的产量至关重要. 玉米秸秆覆盖减产是因为减少了产量构成要素中的穗数. 而与常规种植模式相比,宽幅精播种植模式对产量损失具有一定的补偿作用,主要是宽幅精播种植模式增加了冬小麦分蘖数,进而增加冬小麦穗数,降低了秸秆覆盖对穗数的不利影响. 但是,玉米秸秆覆盖条件下,宽幅精播种植模式虽然在一定程度上减少了产量损失,但仍显著低于不覆盖处理的,而且,在产量构成因素中,仅显著增加了穗数,对穗粒数和千粒质量均没有显著影响. 因此,为了进一步提高其补偿效应,应考虑如何协同增加穗数、穗粒数和千粒质量. 有研究结果表明[26],推迟拔节水灌溉显著增加了宽幅精播麦田的穗数、穗粒数和籽粒产量,进一步减少了宽幅精播麦田的分蘖消亡. 因此,秸秆覆盖条件下,宽幅精播麦田推迟拔节水灌溉有可能实现产量和水分利用效率的共同提高. 此外,还需要探讨提高秸秆覆盖条件下宽幅精播麦田的碳吸收效率,研究冬小麦农田固碳潜力,探究实现冬小麦农田土壤由碳源变为碳汇的途径,有助于光合转换,以便进一步提高宽幅精播对产量的补偿作用.

4　结　论

玉米秸秆覆盖显著减少了冬小麦耗水量. 宽幅精播种植模式的群体数量显著大于常规种植模式的. 宽幅精播种植模式可通过显著增加穗数而对秸秆覆盖冬小麦的产量损失起补偿作用,从而显著提高了秸秆覆盖条件下的水分利用效率.

参考文献(References)

[1] Li Q Q, Chen Y H, Liu M Y, et al. Effect of irrigation to winter wheat on the soil moisture, evapotranspiration, and water use efficiency of summer maize in North China [J]. Transactions of the ASABE, 2007,50(6):2073 - 2079.

[2] Jin Liang, Hua Kelin, Deelstra J, et al. Evaluation of nitrogen fate, water and nitrogen use efficiencies of winter wheat in North China Plain based on model approach [J]. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B—Soil & Plant Science, 2014,63(S2):127 - 138.

[3] Qin Wei, Chi Baoliang, Oenema Oene. Long-term monitoring of rainfed wheat yield and soil water at the loess plateau reveals low water use efficiency[J]. Plos One, 2013,8(11):e788281 - 10.

[4] Stagnari F, Galieni A, Speca S, et al. Effects of straw mulch on growth and yield of durum wheat during transition to Conservation Agriculture in Mediterranean envi-

ronment[J]. Field Crops Research, 2014, 167: 51 – 63.

[5] 陈玉章,柴守玺, 范颖丹, 等. 覆盖模式对旱地冬小麦土壤温度和产量的影响[J]. 中国农业气象, 2014,35(4):403 – 409.
Chen Yuzhang, Chai Shouxi, Fan Yingdan, et al. Effects of mulching models on soil temperature and yield of winter wheat in rainfed area[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2014, 35(4): 403 – 409. (in Chinese)

[6] 方文松,朱自玺, 刘荣花, 等. 秸秆覆盖农田的小气候特征和增产机理研究[J]. 干旱地区农业研究, 2009,27(6):123 – 128.
Fang Wensong, Zhu Zixi, Liu Ronghua, et al. Study on microclimate characters and yield-increasing mechanism in straw mulching field[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2009,27(6):123 – 128. (in Chinese)

[7] 武继承, 管秀娟, 杨永辉. 地面覆盖和保水剂对冬小麦生长和降水利用的影响[J]. 应用生态学报, 2011,22(1):86 – 92.
Wu Jicheng, Guan Xiujuan, Yang Yonghui. Effects of ground cover and water-retaining agent on winter wheat growth and precipitation utilization[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(1): 86 – 92. (in Chinese)

[8] Mrabet R, Moussadek R, Fadlaoui A, et al. Conservation agriculture in dry areas of Morocco[J]. Field Crops Research, 2012,132:84 – 94.

[9] 涂纯,王俊,官情, 等. 秸秆覆盖对旱作冬小麦农田土壤呼吸、作物产量及经济环境 – 效益的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013,21(8):931 – 937.
Tu Chun, Wang Jun, Guan Qing, et al. Effect of straw mulching on soil respiration, crop yield, economy – environment benefit in rainfed winter wheat fields[J]. Chinese Journal of Eco – Agriculture, 2013,21(8):931 – 937. (in Chinese)

[10] 李全起,陈雨海,吴巍,等. 秸秆覆盖和灌溉对冬小麦农田光能利用率的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(2):243 – 246.
Li Quanqi, Chen Yuhai, Wu Wei, et al. Effects of straw mulching and irrigation on solar energy utilization efficiency of winter wheat farmland[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006,17(2):243 – 246. (in Chinese)

[11] Balwinder – Singh, Humphreys E, Eberbach P L, et al. Growth, yield and water productivity of zero till wheat as affected by rice straw mulch and irrigation schedule[J]. Field Crops Research, 2011,121(2):209 – 225.

[12] Li Quanqi, Chen Yuhai, Liu Mengyu, et al. Effects of irrigation and straw mulching on microclimate characteristics and water use efficiency of winter wheat in North China[J]. Plant Production Science, 2008,11(2):161 – 170.

[13] 陈素英,张喜英,孙宏勇,等. 华北平原秸秆覆盖冬小麦减产原因分析[J]. 中国生态农业学报, 2013,21(5):519 – 525.
Chen Suying, Zhang Xiying, Sun Hongyong, et al. Cause and mechanism of winter wheat yield reduction under straw mulch in the North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco – Agriculture, 2013,21(5):519 – 525. (in Chinese)

[14] 谢瑞芝,李少昆,金亚征,等. 中国保护性耕作试验研究的产量效应分析[J]. 中国农业科学, 2008,41(2): 397 – 404.
Xie Ruizhi, Li Shaokun, Jin Yazheng, et al. The trends of crop yield responses to conservation tillage in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008,41(2): 397 – 404. (in Chinese)

[15] Liu Tiegang, Luo Yi. Effects of shallow water tables on the water use and yield of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) under rain-fed condition[J]. Australian Journal of Crop Science, 2011,5(13):1692 – 1697.

[16] 刘婷, 贾志宽, 张睿, 等. 秸秆覆盖对旱地土壤水分及冬小麦水分利用效率的影响[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2010,38(7):68 – 76.
Liu Ting, Jia Zhikuan, Zhang Rui, et al. Effect of straw mulching on soil moisture and water use efficiency of winter wheat in dryland[J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2010,38(7):68 – 76. (in Chinese)

[17] 余松烈,于振文,董庆裕,等. 小麦亩产789.9 kg高产栽培技术思路[J]. 山东农业科学, 2010(4):11 – 12.
Yu Songlie, Yu Zhenwen, Dong Qingyu, et al. The techniques and thinking of high-yield cultivation in wheat that achieved 789.9 kg per yield[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2010(4):11 – 12. (in Chinese)

[18] 赵丹丹,沈加印,郎坤,等. 宽幅精播和灌溉对冬小麦干物质积累及产量的影响[J]. 灌溉排水学报,2012, 31(5):140 – 142.
Zhao Dandan, Shen Jiayin, Lang Kun, et al. Effect of wide-precision planting and irrigation on dry matter accumulation and grain yiled of winter wheat[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2012, 31(5):140 – 142. (in Chinese)

[19] Liu Xiuwei, Shao Liwei, Sun Hongyong, et al. Respon-

ses of yield and water use efficiency to irrigation amount decided by pan evaporation for winter wheat[J]. Agricultural Water Management, 2013,129:173 – 180.

[20] Li Quanqi, Zhou Xunbo, Chen Yuhai, et al. Water consumption characteristics of winter wheat grown using different planting patterns and deficit irrigation regime [J]. Agricultural Water Management, 2012, 105: 8 – 12.

[21] 党建友,裴雪霞,张晶,等. 秸秆还田条件下灌水模式对冬小麦产量和水肥利用效率的影响[J]. 应用生态学报,2011, 22(10):2511 – 2516.
Dang Jianyou, Pei Xuexia, Zhang Jing, et al. Effects of irrigation mode on winter wheat yield and water- and nutrient use efficiencies under maize straw returning to field[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(10):2511 – 2516. (in Chinese)

[22] 刘秀位,苗文芳,王艳哲,等. 冬前不同管理措施对土壤温度和冬小麦早期生长的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012,20(9):1135 – 1141.
Liu Xiuwei, Miao Wenfang, Wang Yanzhe, et al. Effects of different pre-winter management practices on soil temperature and winter wheat seedling growth[J]. Chinese Journal of Eco – Agriculture, 2012, 20(9): 1135 – 1141. (in Chinese)

[23] 张树兰, 刘俊梅, 黎青慧, 等. 秸秆覆盖下旱地小麦收获指数降低的原因解析[J]. 干旱地区农业研究, 2014,32(1):47 – 51.
Zhang Shulan, Liu Junmei, Li Qinghui, et al. Analysis of the causes of wheat harvest index reduction under straw mulching on dryland[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014,32(1):47 – 51. (in Chinese)

[24] 蔡太义,黄会娟, 黄耀威, 等. 中国旱作农区不同量秸秆覆盖综合效应研究进展——不同量秸秆覆盖的农作物生理效应及研究存在问题与展望[J]. 干旱地区农业研究, 2011,29(6):108 – 114.
Cai Taiyi, Huang Huijuan, Huang Yaowei, et al. Recent progress of research on comprehensive effects of different rates of straw mulch on rained farming areas in China—Ⅱ. Problems and prospects of study on effects of different rates of straw mulch on physiological ecology of crops[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2011,29(6):108 – 114. (in Chinese)

[25] 杨思存, 霍琳, 王建成. 秸秆还田的生化他感效应研究初报[J]. 西北农业学报, 2005,14(1):52 – 56.
Yang Sicun, Huo Lin, Wang Jiancheng. Allelopathic effect of straw returning[J]. Acta Agriculturae Boreali – Occidentalis Sinica, 2005, 14(1): 52 – 56. (in Chinese)

[26] Zhao Dandan, Shen Jiayin, Lang Kun, et al. Effects of irrigation and wide-precision planting on water use, radiation interception, and grain yield of winter wheat in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2013,118:87 – 92.

[27] 郎坤, 刘泉汝, 卞城月, 等. 推迟拔节水灌溉对宽幅精播麦田冠层温度与叶片水分利用效率的影响[J/OL]. 生态学报,2015,35(15):1 – 10[2014 – 12 – 29]. http://www.cnki.net/kcms/doi/10.5846/stxb201401130090.html.
Lang Kun, Liu Quanru, Bian Chengyue, et al. Effect of delayed irrigation at jointing stage on canopy temperature and leaf water use efficiency of winter wheat in wide-precision planting pattern[J/OL]. Acta Ecologica Sinica, 2015,35(15):1 – 10[2014 – 12 – 29]. http://www.cnki.net/kcms/doi/10.5846/stxb20140113 0090.html. (in Chinese)

（责任编辑　张文涛）