

适宜播期提高农牧交错带春小麦产量和水氮利用效率

杨 宁^{1,2}, 潘学标^{1,2*}, 张立祯^{1,2}, 王 靖^{1,2}, 董宛麟^{1,2,5}, 胡 琦^{1,2},
李秋月^{1,2}, 王潇潇^{1,2}, 唐建昭^{1,2}, 刘 哲^{1,2}, 赵沛义^{3,4}

(1. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193; 2. 农业部武川农业环境科学观测实验站, 呼和浩特 011705;
3. 内蒙古农牧业科学院植物营养与分析研究所, 呼和浩特 010031;
4. 农业部内蒙古耕地保育科学观测实验站, 呼和浩特 011705; 5. 长春市双阳区气象局, 长春 130600)

摘 要: 为了明确农牧交错带播种期对春小麦的产量、生育期和资源利用效率的影响, 从2011年到2012年在内蒙古进行了小麦分期播种试验。试验共设置了5个播种期, 从4月26日开始至6月5日结束, 每播期间隔10 d。结果表明, 随着播期的推迟, 5月6日之后播种的各处理小麦产量显著降低, 最后播种的小麦产量相比4月26日播种的减产63.3%~72.3%, 对应的收获指数和千粒质量也大幅下降, 主要是由于小麦晚播后抽穗至成熟阶段日平均温度降低所致。播期导致各生育阶段所需要的天数特别是播种到出苗期产生差异, 但全生育期所需要的生理发育时间(发育最低温度 T_b 为0, 最适温度 T_o 为20℃)在不同年份和播种期处理下均没有显著差异, 稳定为95.3个生理日数(当每日平均温度均为最适温度时所需要的发育天数)。水分利用效率随着播期推迟呈现明显降低的趋势, 与4月26日播种处理相比, 最后播种处理的水分利用效率降低了68.8%~74.3%, 主要是晚播小麦麦穗干物质质量占地上部干物质质量的比例降低, 营养体生长过旺, 增加了各生育期内的日耗水量。不同播期下, 春小麦地上部植株氮素累积吸收量为14.0~17.0 g/m²。播种期对春小麦氮素累积吸收量没有显著影响。但由于早播处理小麦的收获指数和产量较高, 所以氮素的吸收转化利用效率显著高于晚播处理。在农牧交错带适时早播春小麦不但可提高产量, 而且还能大幅度提高水氮资源的吸收利用效率, 这对该区域实现春小麦高产和稳产有着实际指导意义。

关键词: 水分; 氮素; 作物; 播期; 春小麦; 生育期; 产量

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2014.08.010

中图分类号: S512.1+2

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2014)-08-0081-10

杨 宁, 潘学标, 张立祯, 等. 适宜播期提高农牧交错带春小麦产量和水氮利用效率[J]. 农业工程学报, 2014, 30(8): 81-90.

Yang Ning, Pan Xuebiao, Zhang Lizhen, et al. Optimal sowing dates improving yield, water and nitrogen use efficiencies of spring wheat in agriculture and pasture ecotone[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(8): 81-90. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

中国北方农牧交错带地处东部季风气候与西北大陆性气候的交汇带, 是从半干旱区向干旱区, 从高原地区向丘陵平原地区的过渡带, 是农区与牧区的结合带, 亦是对气候变化的影响较为敏感的生态脆弱带^[1-2]。长期以来, 农牧交错带并没有发挥对农区应有的生态屏障作用、对牧区的系统耦合作用以及对中、东部农区的良好水源涵养功能^[3]。

近年来, 中国北方农牧交错带范围增加了约 $3.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[4], 气候变化对该区域农业产生了很多负面影响^[5]。因此, 农牧交错带如何因地制宜地充分利用降水资源和养分资源, 最大限度地提高作物生产力和适应气候变化是当前的研究重点。

小麦作为主要的粮食作物, 在农牧交错带地区有较大面积的种植, 但自20世纪90年代以来由于降水量减少使春小麦产量下降, 2002—2006年平均种植面积与20世纪80年代相比减少了近1/2。气候暖干化对雨养农业区喜凉作物春小麦和马铃薯的气候产量产生不利影响^[6-7]。Waha等研究指出为了适应某地区气候条件的变化, 通过选取适宜的播种时间、以及合理的管理措施, 可以获得高产或最佳的效益^[8]。气候暖干化背景下该区域春小麦最适播种期的研究较少, 播期推后对小麦产量影响的研究不够。通过调整作物的播种期, 改变其生育环境可获得更高的水分利用效率。对于受到水分条件

收稿日期: 2014-01-25 修订日期: 2014-03-28

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)(2012CB956204);
国家“十二五”支撑计划项目课题(2012BAD09B02, 2012BAD20B04)
作者简介: 杨 宁(1984—), 女, 博士生, 研究方向: 气候资源利用
与农业减灾。北京 中国农业大学资源与环境学院 100193。
Email: bsyangning@163.com

*通信作者: 潘学标(1962—), 教授, 博士生导师, 研究方向: 气候
资源利用与农业减灾。北京 中国农业大学资源与环境学院 100193。
Email: panxb@cau.edu.cn

限制的雨养地区农业生产具有重要的现实意义。

孙本普等从 1972 年到 2004 年历时 32 a, 对小麦的生育期进行了观察, 同一品种在适期播种条件下, 同一生育期的时间在年份间存在很大差异^[9], 因此, 生育期的实际间隔日数并不能准确描述不同气候条件下小麦的发育进程。张立祯等采用生理发育时间作为定量棉花发育进程的尺度, 将棉花在最适温光条件下生长的一天定义为一个生理发育日。对于某一特定的遗传型品种而言, 完成某一特定的发育阶段所需的生理发育日数基本恒定^[10]。刘铁梅等用生理发育时间较好地预测小麦抽穗后的主要生育期^[11]。王冀川等用生理发育时间模拟了番茄的生育期^[12]。目前关于小麦生理发育时间等研究多集中于冬小麦, 冷凉地区春小麦生育期的定量研究偏少。

本研究旨在通过分期播种的试验方法, 分析不同气候条件下, 春小麦的产量、生育期变化、水分条件、氮素生理利用效率, 量化研究农牧交错带春小麦完成生育过程需要的热量、水分和养分条件, 明确暖干化趋势下春小麦最适合播种期。以期

为分析气候变化下农牧交错带春小麦产量及资源利用率变化和应对气候变化的小麦生产管理提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况与试验设计

试验于 2011 年至 2012 年在内蒙古呼和浩特市农业部武川环境观测试验站进行 (41°06'N, 111°28'E), 试验地点属于干旱半干旱大陆性气候, 海拔 1 756 m, 年平均气温 3.1℃, 0 以上的年积温平均为 2 553(℃·d), 多年平均降水量为 342 mm, 降水主要集中在 7—8 月份, 占整个生长季的 60%~70%左右, 无霜期 95~105 d, 年日照时数 2°947 h, 年光合有效辐射 2°858 MJ/m², 年平均风速 3 m/s。试验区域土壤以栗钙土为主。土壤容重为 1.5 g/cm³, 0~30 cm 表土中含全氮 1.51 g/kg, 速效磷 9.41 mg/kg, 速效钾 145.08 mg/kg, 有机质 14.75 g/kg, 土壤 pH 值 8.26, 地下水埋深 20 m。试验年份作物生长季的气象条件及多年平均水平 (1960—2010 年) 详见表 1。

表 1 研究区作物生长季的气象条件
Table 1 Climate data during crop growing seasons in study area

气象因子 Climate data	年份 Year	月份 Month						生长季 Growing season
		4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	
平均温度 Average temperature/℃	2011	4.7	10.9	18.8	18.9	19.3	10.5	13.9
	2012	7.2	13.9	16.4	19.7	17.8	10.3	14.2
	多年平均	4.8	12.0	16.9	19.0	17.0	11.3	13.5
降雨量 Precipitation/mm	2011	4.9	8.9	39.0	96.8	61.1	16.4	227
	2012	9.4	28.1	75.0	102.3	54.0	70.8	340
	多年平均	13	25	44	93	90	42	307
日照时数 Sunshine hours/h	2011	278.0	293.3	278.0	241.4	236.2	250.3	1577
	2012	299.4	314.1	260.0	260.9	265.4	223.4	1623
	多年平均	264	291	284	274	262	246	1621

注: 降雨量和日照时数为每月累计值。多年平均的数据由 1960—2010 年的计算得到。

Note: Precipitation and sunshine hours were cumulative. Annual average temperature, precipitation and sunshine hours were calculated from 1960 to 2010.

试验选取当地大面积种植的小麦品种蒙麦 33 号 (*Triticum aestivum* L.) 为供试品种。试验共设置了 5 个播种时期, 从 4 月下旬开始至 6 月初, 每间隔 10 天设一播期。其中 2011 年播种日期依次为 4 月 26 日、5 月 6 日、5 月 16 日、5 月 26 日和 6 月 5 日, 2012 年试验中, 前 4 个播期时间未变, 第 5 播期提前至 5 月 31 日。小区面积 25 m² (5 m×5 m) 东西行向, 小区四周设置 30 cm 高土埂, 采用完全随机区组方式排列, 设置 4 个重复。肥料施用量参考当地常规用量, 尿素为 37.5 kg/hm² (氮质量分数为 46.3%), 磷酸二铵为 75 kg/hm² (氮质量分数为 18%, P₂O₅ 质量分数为 46%), 氯化钾为 37.5 kg/hm²

(K₂O 质量分数为 60%), 所有肥料均做底肥一次性施入, 不施用农家肥等。由于研究区域为干旱半干旱区, 年降雨量偏少, 且降雨主要集中在 7、8 月份, 播种后近 2 个月的时间内, 几乎无有效降水, 影响氮肥的肥效, 因此当地农民为节约成本, 化肥施用量较其他地区偏低。作物生长期人工去除杂草。试验地为非灌溉的雨养农田, 试验期间仅当作物接近萎蔫时进行少量补水以避免作物死亡, 如有补水则将补灌量计入同期降雨量中进行分析。

1.2 测定项目与方法

从小麦出苗至收获的全生育期内, 每间隔 15 d 进行 1 次田间取样调查, 测定作物株高、密度等指

标,并按器官将植株分为根、茎、叶、穗4部分,称鲜样质量后,分别装于纸袋中,置于烘箱内在105℃杀青30 min后,用80℃烘干至质量恒定,称量各器官干物质质量。并留存样品进行植株全氮含量的测定。采用凯氏定氮法测定植株各器官的全氮含量。使用便携式叶面积仪(LI-3000C)测定植株叶面积,换算成叶面积指数(LAI)。采用烘干法测定土壤含水率,用土钻垂直地表向下取土测定深度依次为0~5 cm, >5~10 cm之后每10 cm为一层至100 cm。

产量的测定:小麦成熟时各小区单独收获,晾晒、脱粒并计产,以4次重复产量的平均值来代表该处理的实际产量。

1.3 数据分析和处理

应用水量平衡公式来估算作物田间耗水量:

$$\Delta W = P - R - U - E - TR - I + Q + Ir \quad (1)$$

式中: ΔW 为土壤水分在某时段内的变化值, mm; P 为降水量, mm; R 为径流量, mm; U 为渗漏量, mm; E 为土壤蒸发量, mm; TR 为植株蒸腾量, mm; I 为作物截留的降水量, mm; Q 为毛管上升水量, mm; Ir 为灌溉量, mm。因为该区过程降水量小,多日连续降雨量最大值仅为41.6 mm(2011—2012年),且集中在7月中下旬作物耗水量较大的时间段,在降雨过后的24、48和72 h分别测定土壤含水量,水分存在轻微下移现象,但集中在地下50~70 cm左右,地下1 m深土壤含水量数值基本保持不变,故忽略渗漏量 U ; 由于该区域地下水埋藏深,多数地区超过20 m,计算过程中,忽略毛管上升水 Q ; 试验小区间有土埂隔离,小区较平坦,所以在本研究中忽略径流量 R ; 雨养农业条件下,未进行灌溉, Ir 值为0; 因此农田实际蒸散简化为 $\Delta W = P - E - TR - I$, 研究中将作物与土壤作为一个系统去考虑,需要计算的蒸散量(ET)包括土壤的蒸发量 E , 植株的蒸腾量 TR 和作物表面截留的水分的蒸发量 I , 即 $ET = E + TR + I$, 由此可知 $ET = P - \Delta W$ 。

作物水分利用效率由作物籽粒产量和实际测定的全生育蒸散量计算而得,计算公式:

$$WUE = Y/ET \quad (2)$$

式中: Y 为经济产量, g/m²; ET 为全生育期的作物耗水量, mm。

作物收获指数(HI)是指收获时作物经济产量与地上部总生物学产量的比值^[13],是评价作物光合产物转化为经济产量的重要指标。

作物的氮素生理利用效率是指作物地上部吸收的氮总量转化成籽粒经济产量的效率,用来评价地上部氮素吸收量对产量的贡献,计算公式:

$$NUE = Y/NU \quad (3)$$

式中: NU 为植株的氮吸收量, g/m², 由测定的各器官的全氮的含量累加得到,计算植株吸氮量时并没有区分土壤的有效氮还是化肥中的氮。

作物完成某一生育过程所需要的积温(热时间, TT),为大于0春小麦生物学下限温度的温度累积。生理发育时间采用温度三基点的方法计算^[14],由于研究区域属于冷凉地区出现高温的日数很少,所以忽略了上限温度的影响,采用作物的生物学下限温度和最适温度来计算。春小麦发育的最适温度为20℃。计算公式如下:

$$PDT = (T - Tb)/(To - Tb) \quad (4)$$

式中: Tb 、 To 分别对应为生物学下限温度和最适温度,℃。

试验数据用EXCEL2003和SPSS17.0软件进行计算和统计分析,在 $\alpha=0.05$ 水平上用LSD方法多重比较各处理间的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 播期对春小麦产量和收获指数的影响

播期对春小麦产量有显著影响(表2)。在2011年各处理中5月16日播种的小麦产量达到最高值为2911 kg/hm²,第1、第2播期处理的小麦产量较次之,5月26日和6月5日播种的小麦产量相比最高产量分别减产40.12%和66.78%。2012年前两期的的小麦产量最高达到2981 kg/hm²,5月16日后各播期产量明显降低,相对于当年最高产量分别减产50.01%、57.93%和73.36%。2012年与2011年相比,前2个播期处理的小麦产量分别增加了13.13%和22.72%,5月16日以后播种各处理产量低于2011年对应播期产量。

表2 不同处理间小麦产量和千粒质量比较

Table 2 Yield and grain weight per 1000 seeds at different sowing dates in 2011-2012

播种日期 Sowing date	产量 Yield/(kg·hm ⁻²)		千粒质量 Grain weight per 1000 seeds/g	
	2011	2012	2011	2012
04-26	2 342b	2 874a	44.38a	42.83a
05-06	2 635ab	2 981a	42.80a	44.65a
05-16	2 911a	1 490b	43.74a	30.35b
05-26	1 743c	1 254b	23.40b	28.24b
06-05 (05-31)	967d	794c	20.73c	24.26c
标准误差 Standard error	155.3	129.4	0.75	0.81
P 值	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001

注: 括号内的数值为2012年的最后一个播种日期。不同小写字母表示同年不同播期处理差异显著。

Note: The last sowing date for 2012 was on 31 May. The different small letter indicates significantly difference at $\alpha=0.05$.

不同播期处理对春小麦的千粒质量也产生显著

影响(表2)。2011年5月16日之前播种的小麦千粒质量均超过42.80 g,播期间差异不显著,之后播种的小麦千粒质量明显降低,与早播存在显著差异。2012年的趋势与2011年基本一致,早播的2个处理小麦千粒质量差异不显著(42.83~44.65 g),5月16日之后播种的小麦千粒质量逐渐降低。综上,不同播期处理间小麦产量和千粒质量均呈现极显著差异,5月16日以后播种的各处理,随着播期的推迟上述二指标均表现出显著降低的趋势。

不同播期处理的小麦产量和千粒质量与对应的抽穗至成熟阶段的日平均温度显著相关(图1),日平均温度维持在18.5℃以上时,产量可稳定在2342 kg/hm²以上,且千粒质量的数值也超过42.80 g,随着温度的降低产量和千粒质量均显著降低,抽穗之后的温度成为产量的重要限制因素。5月6日之后播种的各处理中,收获指数随着播期的推迟显著降低(图2)。从抽穗至成熟阶段的日平均温度与收获指数呈现显著的相关关系。

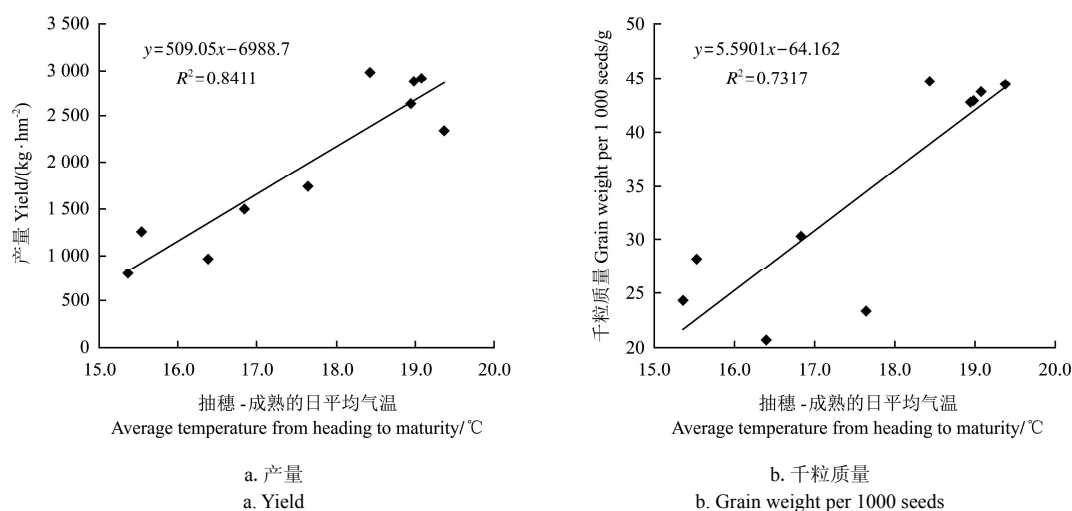


图1 不同年份小麦的产量和千粒质量与抽穗-成熟的日平均温度的关系

Fig.1 Relationship between yields and harvest index with daily temperature from heading to maturity in 2011 and 2012

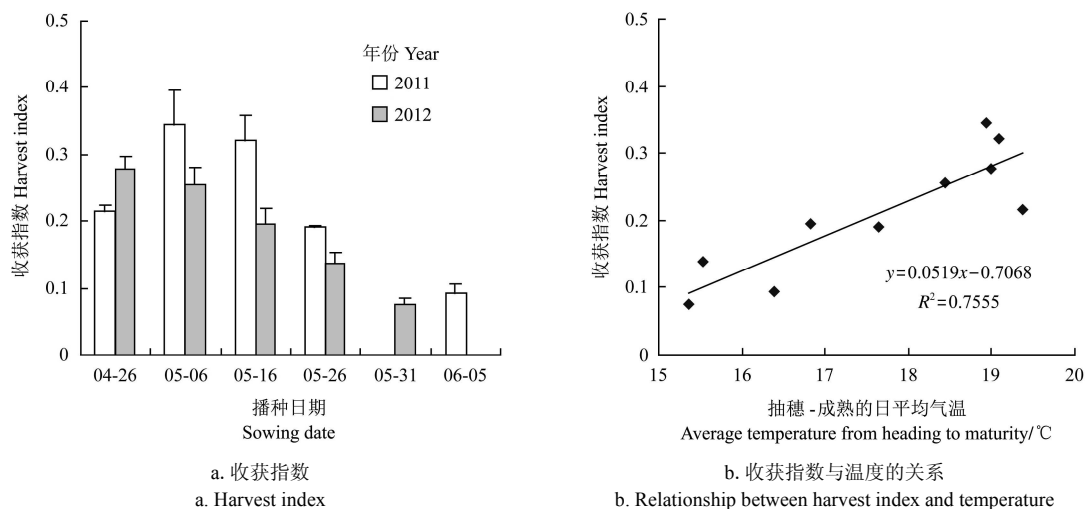


图2 不同年份小麦的收获指数及其与抽穗-成熟期间日平均温度的关系

Fig.2 Harvest index response to daily temperature from wheat heading to maturity in 2011 and 2012

2.2 不同播期春小麦的生长动态

图3显示小麦地上部干物质质量的动态变化,2011年4月26日播种的小麦地上部干物质质量达到1085 g/m²,为各播期处理间的最大值,2012年各处理中5月6日播种的小麦干物质质量最高,为1197 g/m²,最早播期的生物量较次之,晚播各处理的地上部干物质质量介于848~1071 g/m²之间。综合

分析2年的结果可见,较早播种(5月6日之前播种)的小麦地上部干物质质量较高,但是晚播处理(5月26日以后播种)的地上部干物质质量超过了5月16日播种的对应数值。

2.3 不同播期春小麦的生育期

将不同播期下春小麦各个生育期的实际日数(*d*)、大于0的积温(TT)和用基础温度0及最适

温度 20℃ 计算得到的生理发育时间 PDT 进行了对比。如表 3 所示, 从播种到出苗阶段, 播期间实际发育日数的差异显著, 但是 TT 和生理发育时间差异不显著, 说明前期温度较低、较早播种的作物需要更长日数积累温度完成发育过程, 温度并非该区域作物发育初期的限制因子。出苗至分蘖阶段, 播期和年际间 3 种表示方法均无显著差异, 但是变异系数较高。作物分蘖后到抽穗阶段播期和年际间 d 、TT 和 PDT 这 3 种表示方法均无显著差异, 且变异

系数较小, 用发育日数、积温和生理发育时间均可以较好地定量该发育阶段。抽穗后到成熟期变异系数又有增高, 其中积温和生理发育时间的变异系数值分别为 8.67% 和 9.12%, 实际日数的变异系数为 13.5%。小麦从播种到成熟全生育期中, 实际日数的变异系数为 4.49%, 高于用积温和生理发育时间表示的变异系数 (3.21%), 用大于 0 的积温和以 0 和 20℃ 计算的生理发育时间可以较为准确地量化武川地区春小麦的发育进程。

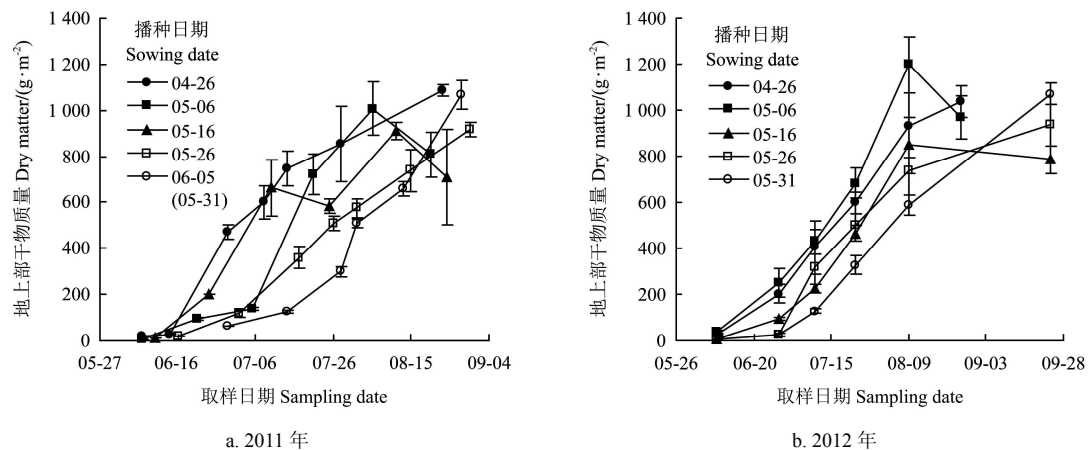


图 3 2011 年和 2012 年小麦地上部干物质质量
Fig.3 Above-ground dry matter of wheat in 2011 and 2012

表 3 2011 年和 2012 年不同播种日期小麦各生育期的日数 (d)、积温 (TT) 和生理发育时间 (PDT)
Table 3 Development time (d), thermal time (TT) and physiological development time (PDT) of sprint wheat at different sowing date in 2011-2012

年份 Year	播种日期 Sowing date	播种-出苗 Sowing-emergency			出苗-分蘖 Emergencym-tillering			分蘖-抽穗 Tillering-heading			抽穗-成熟 Heading-maturity			播种-成熟 Sowing-maturity		
		d/d	TT/(°C·d)	PDT/d	d/d	TT/(°C·d)	PDT/d	d/d	TT/(°C·d)	PDT/d	d/d	TT/(°C·d)	PDT/d	d/d	TT/(°C·d)	PDT/d
2011	04-26	19	151	7.6	13	174	8.7	35	635	31.3	51	988	47.6	118	1948	95.1
	05-06	16	164	8.2	10	153	7.7	35	657	32.3	53	1004	48.5	114	1978	96.6
	05-16	10	126	6.3	14	237	12.5	35	651	31.3	52	992	47.8	111	2005	97.9
	05-26	7	112	4.6	15	267	14.2	37	705	34.5	51	899	43.5	110	1984	96.8
	06-05	9	155	7.7	10	200	9.6	37	699	34.4	49	803	38.7	105	1856	90.4
2012	04-26	25	345	17.1	9	115	5.9	36	612	29.4	44	835	41.3	114	1907	93.7
	05-06	15	207	10.7	9	115	5.9	37	635	30.4	47	866	43.2	108	1824	90.2
	05-16	17	236	11.6	5	79	4.0	38	691	33.4	59	993	49.8	119	1999	98.8
	05-26	8	111	5.6	11	155	8.1	35	682	32.6	67	1041	52.1	121	1989	98.3
	05-31	7	105	5.2	13	210	9.8	33	638	31.1	63	968	48.5	116	1921	94.7
平均值		13.3	171	8.45	10.9	170	8.65	35.8	660	32.1	53.6	939	46.1	113.6	1941	95.3
标准差		6.1	74.4	3.79	2.96	58.7	3.09	1.48	32.0	1.67	7.23	81.4	4.21	5.10	63.0	3.05
变异系数 CV/%		45.5	43.5	44.8	27.2	34.5	35.7	4.12	4.84	5.22	13.5	8.67	9.12	4.49	3.24	3.21
P 值	播期间	0.031	0.416	0.344	0.773	0.446	0.486	0.952	0.239	0.352	0.605	0.843	0.840	0.803	0.335	0.323
	年际间	0.295	0.237	0.194	0.203	0.071	0.074	1.000	0.338	0.196	0.379	0.961	0.624	0.344	0.509	0.902

注: TT 是高于 0 的积温, PDT 为生理发育时间, 用基础温度 0 和最适温度 20℃ 计算得到。

Note: TT is thermal time which is the sum of above 0 air temperature. PDT is physiological time which is for base temperature of 0 and optimal temperature of 20℃.

2.4 春小麦的耗水强度和水分利用效率分析

依据 2011—2012 年实测的土壤水分含量数据, 按照播种-拔节, 拔节-开花和开花-成熟将春小麦全

生育期划分为 3 个阶段, 分别计算出各阶段作物的日耗水量 (表 4) 从播种-拔节期, 不同播期间作物的日耗水量差异显著, 其中 5 月 16 日之前播种的

各处理小麦的日耗水量在 0.58~1.84 mm/d 之间, 这之后播种的小麦日耗水量显著增加至 1.51~3.27 mm/d, 主要是由于前期温度低早播作物在发育始期生长较为缓慢实际需要日数较长, 5 月 26 日之后播种的小麦在播种-拔节期间日平均温度提高, 作

物生育进程加快, 实际生长时间缩短; 拔节-开花的阶段, 不同播期和年际间作物日耗水量稳定在 3.90~5.19 mm/d 之间为全生育期中日耗水量最大的时期; 开花至成熟阶段, 各处理的日耗水量维持在 1.40~3.79 mm/d 之间。

表 4 2011 和 2012 年不同播期处理春小麦日耗水量

Table 4 Daily water use amount of spring wheat at different sowing date in 2011 and 2012

mm·d⁻¹

播种日期 Sowing date	生育早期 (播种-拔节) Sow-jointing		生育中期 (拔节-开花) Jointing-flowering		生育末期 (开花-成熟) Flowering-maturity	
	2011	2012	2011	2012	2011	2012
04-26	0.68±0.22	0.69±0.21	4.04±0.56	4.67±0.07	2.45±0.21	3.79±0.40
05-06	0.58±0.30	0.73±0.16	4.23±0.36	3.90±0.41	2.75±0.09	3.79±0.09
05-16	0.69±0.49	1.84±0.23	3.97±0.43	3.96±0.09	2.59±0.37	2.78±0.42
05-26	3.27±0.58	2.83±1.46	4.42±0.36	4.23±0.20	2.33±0.38	2.26±0.33
06-05 (05-31)	1.51±0.43	2.45±0.60	4.80±0.29	5.19±0.70	1.40±0.12	2.67±0.28

注: 括号内的数值表示为 2012 年的播种日期。

Note: The last sowing date for 2012 was on 31 May.

表 5 2011—2012 年不同播期处理小麦蒸散量和水分利用效率

Table 5 Evapotranspiration and water use efficiency of spring wheat at different sowing dates in 2011-2012

g·m⁻²·mm⁻¹

播种期 Sowing date	2011 年		2012 年	
	蒸散量 Evapotranspiration	水分利用效率 Water use efficiency	蒸散量 Evapotranspiration	水分利用效率 Water use efficiency
04-26	272.92bc	0.858ab	373.27b	0.777a
05-06	270.79c	0.981a	364.23b	0.824a
05-16	345.76a	0.820b	364.04b	0.412b
05-26	329.09a	0.530c	444.43a	0.285bc
06-05 (05-31)	316.54ab	0.306d	374.51b	0.212c
Standard error	20.72	0.049	17.32	0.048

注: 括号内的数值为 2012 年的最后一个播种日期。将同年不同播期处理进行差异显著性分析, 相同小写字母表示差异不显著。

Note: The last sowing date for 2012 was on 31 May. The same small letter indicates no significantly difference at $\alpha=0.05$.

2 a 试验中前两期播种的春小麦 WUE 较高且无显著差异, 随着播期推迟 5 月 6 日之后播种各处理的 WUE 显著降低, 与 5 月 6 日播种的 WUE 相比, 最后 2 期播种 WUE 分别降低了 46%、69% (2011 年) 和 55%、62% (2012 年)。不同播期处理下, 蒸散量也存在差异, 2011 年前 2 个播期处理蒸散量为 270.79~272.92 g/(m²·mm), 显著低于 5 月 16 日之后播种的各处理的蒸散值。2012 年试验中 5 月 16 日之前播种的处理蒸散量均低于 5 月 26 日播种处理的数值。

2.5 地上部氮素的吸收和利用效率

通过对作物全生育期地上部植株氮素累积量 (图 4) 分析可知, 2 a 试验中 5 月 6 日播种的小麦氮素累积量均达到最高值, 4 月 26 日播种处理的氮素累积量次之, 所有播期处理的植株氮素累积量集中在 14.0~17.0 g/m² 之间。晚播处理 (5 月 26 日以后) 地上部氮素累积量略高于 5 月 16 日播种处理,

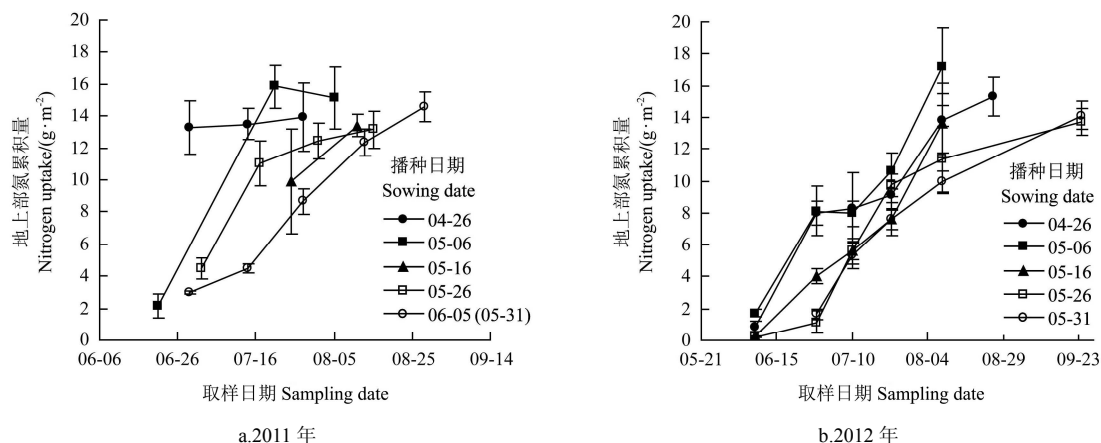


图 4 2011 年和 2012 年作物地上部氮素累积量

Fig.4 Nitrogen accumulation of above-ground biomass in 2011 and 2012

结合收获指数(图2)分析可知,5月26日之后播种各处理的收获指数偏低,即穗占地上部干物质量的比例减少,说明营养体所占的比例较高,因此,晚播处理中N素积累的大部分来源于叶片、茎秆等营养器官。

氮素利用效率可以更清晰的反应氮素积累对于产量的贡献(图5),不同播期处理的小麦氮素利用率差异显著,不同年份间5月6日之前播种的小麦氮素利用率稳定在17~19 g/g之间,随着播期的推迟,5月16日之后播种的各处理氮素利用效率显著降低。其中2011年各处理中晚播处理(5月26日之后播种)的氮素利用效率较5月16日处理分别降低了39.96%和70%。2012年各处理中,5月16日以后播种的各处理氮素利用效率较5月6日处理分别降低了42.15%、52.56%和70.94%。

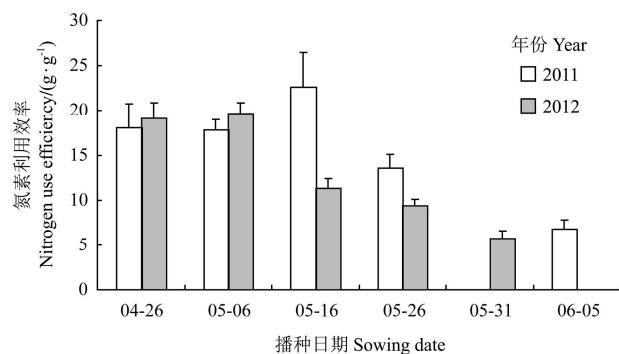


图5 2011年和2012年作物氮素利用效率

Fig5 Nitrogen use efficiency of above-ground biomass in 2011 and 2012

3 讨论

作物生长过程中,热量、水分等限制因子综合作用,影响其生长发育过程及产量^[15]。对于小麦而言,营养生长阶段的相对高温,会延迟作物的花期^[16]。开花期温度偏高导致籽粒产量明显降低,籽粒产量占地上部干物重的比例即收获指数明显降低^[15]。播期是影响禾本科作物产量和品质的最重要的管理因素之一^[17]。适宜早播可以提高作物产量,晚播产量会降低^[18-20]。

由于播期不同,导致的作物抽穗至成熟阶段的日平均温度产生差异,当温度稳定在18.5℃以上时,小麦的产量达到2342 kg/hm²以上,且千粒质量的数值超过42.80 g,收获指数也较高。秋季温度较高的年型(2011年),可能会有利于晚播小麦增产,但是年际间温度、降水状况呈现波动,对于生长季受限制的农牧交错带地区,适时早播可提高作物对热量资源的利用效率,同时获得稳产和高产。

本研究采用了实际观测日数、积温、和生理发

育时间3种表达方式分析了小麦的生育过程,作物在最适温光条件下生长时,一个生理发育日等于1个自然日。当作物在非最适温光条件下生长时,1个生理发育日就小于1个自然日^[21]。本研究中小麦完成全生育期的积温需要1941(℃·d),实际日数需要114 d左右,生理发育时间95.3 d。利用生理发育时间能够很好地表征春小麦的生育期,且在不同年份、播期和各生育阶段其数值均没有显著差异,说明该方法很稳定可靠。生理发育时间的确定为今后使用模型模拟预测小麦的生育期产量等提供了基础依据。通过系统分析和模拟来诊断与指定可选择的方法,通过配置作物播期、管理措施来适应当地气候土壤等环境条件和农民行为习惯以适应气候变化,减轻农作风险^[22]。

由于播期的不同,作物不同生育阶段的水热条件存在差异,导致土壤裸间蒸发和作物的蒸腾作用均不同,从而造成了作物水分利用效率的差异。杜尧东等研究表明春小麦在拔节-抽穗和抽穗-乳熟阶段水分敏感度最高^[23],赵鸿等研究表明春小麦各阶段生长和产量对气候变化的响应不完全一致,出苗-拔节期、抽穗-乳熟期降水量减少对春小麦产量下降有显著的正效应,拔节-抽穗期的增温对产量有极显著的负影响^[24]。本研究中,5月6日之前播种的小麦WUE高达0.777~0.981 g/(m²·mm),之后各播期处理的WUE数值显著降低,早播处理的小麦的水分敏感期与雨季吻合,促进了作物生长,利于作物叶面积指数提高,增加光的截获量,降低水分的蒸发,提高产量进而提高水分利用效率。产量的高低是水分利用效率高低的關鍵^[25],但是不同小麦品种的耗水量、产量和水分利用效率之间存在一定差异^[26]。今后考虑在选择适宜的播种期的同时,结合垄沟集雨、垄膜沟植等集雨措施^[27],提高干旱半干旱区水分利用效率。除此之外,董宛麟等在该区域的研究证明向日葵和马铃薯间作系统,具有显著的水分利用优势^[28]。苟芳等研究表明农牧交错带的几种典型带状间作种植模式都具有一定的间作产量优势和经济效益,而且还能降低农业生产的气候风险^[29]。可见通过不同作物的间作技术,也可提高资源利用效率。免耕覆盖和深松覆盖等措施也可以提高小麦产量和水分利用效率^[30]。

研究表明不同播期处理间地上部氮素累积量差异不显著,但早播处理的收获指数较高,产量高从而提高了氮素利用效率。Braunack等研究播期对棉花氮素利用率的影响时也得到了类似的结论^[31]。Ferrise等^[32]的试验中设置了不同的氮肥梯度,研究播期和氮肥用量对小麦产量等影响,指出氮肥的施用量差异没有引起小麦的发育期变化,但使作物在

营养生长阶段积累了更多的生物量和氮素,同时高氮处理的作物其冠层更饱满,在灌浆期间可以积累更多的生物量和氮素,使得收获后作物的产量和蛋白质含量均提高。本研究中,未考虑不同氮肥施用量的影响,后续试验可以设置不同的氮肥梯度,分析该区域水、氮耦合的最佳效率配比。

4 结 论

1) 试验结果表明,农牧交错带地区,春小麦的最适播期在 5 月 6 日之前,播期推迟后小麦产量降低,晚播处理(5 月 26 日以后播种)的产量相对当年最高产量,减产了 40.12%~73.26%,适时早播利于小麦高产稳产。晚播处理的小麦如果抽穗-成熟阶段日平均气温降低,不能达到小麦该生育期的最适温度要求,将严重影响小麦的产量、千粒质量和收获指数等指标。

2) 不同播期处理下,小麦全生育期水分利用效率呈现差异,5 月 6 日之前播种的处理中,水分利用效率高达 0.777~0.981 g/(m²·mm),随着播期推迟,水分利用效率较当季最高值降低了 46%~69%。

3) 早播处理(5 月 6 日之前播种),播种小麦氮素利用效率稳定在 17~19 g/g 之间,随着播期推迟,5 月 26 日以后播种的处理中,氮素利用效率较当年最高值降低了 39.96%~70.94%。

4) 研究区域内不同年型和播期处理下,春小麦(蒙麦 33 号)的生理发育时间稳定在 95.3 个生理日数。综上,农牧交错带雨养条件下在 5 月 6 日之前播种春小麦,利于获得较为稳定的产量和较高的资源利用效率。

【参 考 文 献】

- [1] 闫冠华,李巧萍,吕冬红. 中国北方农牧交错带气候变化特征及未来趋势[J]. 南京气象学院学报, 2008, 31(5): 671—678.
Yan Guanhua, Li Qiaoping, Lü Donghong. Climate change and future trends of the farming grazing zone in Northern China[J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2008, 31(5): 671—678. (in Chinese with English abstract)
- [2] 何磊. 气候变化对北方农牧交错带农业生产脆弱性的影响研究[D]. 南京:南京信息工程大学, 2007.
He Lei. The Study of Climate Change Impact on the Vulnerability of the Agricultural Production of Northern Farming-Pastoral Region[D]. Nanjing: Nanjing University of information and science technology, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [3] 程序,毛留喜. 农牧交错带系统生产力概念及其对生态重建的意义[J]. 应用生态学报, 2003, 14(12): 2311—2315.
Cheng Xu, Mao Liuxi. Concept of system productivity and its significance in ecological reconstruction of pasture and agriculture transitional zone in China[J]. Chinese Journal of Applied ecology, 2003, 14(12): 2311—2315. (in Chinese with English abstract)
- [4] 李秋月,潘学标. 气候变化对我国北方农牧交错带空间位移的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(10): 1—6.
Li Qiuyue, Pan Xuebiao. The impact of climate change on boundary shift of farming pasture ecotone in northern China[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26(10): 1—6. (in Chinese with English abstract)
- [5] Ju Hui, Velde M, Lin Erda, et al. The impacts of climate change on agricultural production systems in China[J]. Climatic Change, 2013, 120: 313—324. (in Chinese with English abstract)
- [6] 邓振镛,王强,张强,等. 中国北方气候暖干化对粮食作物的影响及应对措施[J]. 生态学报, 2010, 30(22): 6278—6288.
Deng Zhenyong, Wang Qiang, Zhang Qiang, et al. Impact of climate change warming and drying on food crops in north China and the countermeasures[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(22): 6278—6288. (in Chinese with English abstract)
- [7] 侯琼,郭瑞清,杨丽桃. 内蒙古气候变化及其对主要农作物的影响[J]. 中国农业气象, 2009, 30(4): 560—564.
Hou Qiong, Guo Ruiqing, Yang Litao. Climate change and its impact on main crops in Inner Mongolia[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2009, 30(4): 560—564. (in Chinese with English abstract)
- [8] Waha K L, Bussel L G J, Müller C, et al. Climate—driven simulation of global crop sowing dates[J]. Global Ecol Biogeography, 2012, 21, 247—259.
- [9] 孙本普,孙士宗,李秀云. 不同年份对小麦生育期的影响[J]. 小麦研究, 2005, 26(1): 31—36.
- [10] 张立祯,曹卫星,张思平,等. 基于生理发育时间的棉花生育期模拟模型[J]. 棉花学报, 2003, 15(2): 97—103.
Zhang Lizhen, Cao Weixing, Zhang Siping, et al. Simulation model for cotton development stages based on physiological development time[J]. Cotton Science, 2003, 15(2): 97—103. (in Chinese with English abstract)
- [11] 刘铁梅,曹卫星,罗卫红. 小麦抽穗后生理发育时间的计算与生育期的预测[J]. 麦类作物学报, 2000, 20(3): 29—34.
Liu Tiemei, Cao Weixing, Luo Weihong. Calculation of physiological development time and prediction of development stages after heading[J]. Journal of Triticeae Crops, 2000, 20(3): 29—34. (in Chinese with English abstract)
- [12] 王冀川,马富裕,冯胜利. 基于生理发育时间的加工番茄生育期模拟模型[J]. 应用生态学报, 2008, 19(7): 1544—1550.
Wang Jichuan, Ma Fuyu, Feng Shengli, et al. Simulation model for the development stages of processing tomato based on physiological development time[J]. Chinese Journal of Applied ecology, 2008, 19(7): 1544—1550. (in Chinese with English abstract)

- [13] 谢光辉, 王晓玉, 韩东倩, 等. 中国非禾谷类大田作物收获指数和秸秆系数[J]. 中国农业大学学报, 2011, 16(1): 9—17.
Xie Guanghui, Wang Xiaoyu, Han Dongqian, et al. Harvest index and residue factor of non-cereal crops in China[J]. Journal of China Agricultural University, 2011, 16(1): 9—17. (in Chinese with English abstract)
- [14] 殷新佑. 对预测作物发育的积温法的评价[J]. 作物学报, 1999, 25(4): 474—482.
Yin Xinyou. A critical appraisal of thermal time approach for predicting crop development[J]. Acta Agronomica Sinica, 1999, 25(4): 474—482. (in Chinese with English abstract)
- [15] Porter J R. & Semenov M A. Crop responses to climatic variation[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 2005, 360(10): 2021—2035.
- [16] Bassu S, Asseng S, Motzo R, Giunta F. Optimizing sowing date of durum wheat in a variable Mediterranean environment[J]. Field Crops Res. 2009, 111, 109—118..
- [17] Miralles D J, Ferro B C, Slafer G A. Developmental responses to sowing date in wheat, barley and rapeseed[J]. Field Crop Research, 2001, 72, 211—223.
- [18] McLeod J G, Campbell C A, Dyck F B, et al. Optimum seeding dates of winter wheat in southwestern Saskatchewan[J]. Agronomy Journal, 1992, 84, 86—90.
- [19] 张凯, 李巧珍, 王润元, 等. 播期对春小麦生长发育及产量的影响[J]. 生态学杂志, 2012, 31(2): 324—331.
Zhang Kai, Li Qiaozhen, Wang Runyuan, et al. Effects of sowing date on the growth and yield of spring wheat[J]. Chinese Journal of Ecology 2012, 31(2): 324—331. (in Chinese with English abstract)
- [20] 袁俊秀, 尚勋武, 马小乐, 等. 播期对春小麦籽粒产量及品质性状的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2007, 42(5): 73—78.
Yuan Junxiu, Shang Xunwu, Ma Xiaole, et al. Effects of seeding date on seed yield and flour quality of spring wheat[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2007, 42(5): 73—78. (in Chinese with English abstract)
- [21] 倪纪恒, 罗卫红, 李永秀, 等. 温室番茄发育模拟模型研究[J]. 中国农业科学, 2005, 38(6): 1219—1225.
Ni Jiheng, Luo Weihong, Li Yongxiu, et al. Simulation of the Development of Tomato in Greenhouse[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2005, 38(6): 1219—1225. (in Chinese with English abstract)
- [22] 潘学标. 西部旱区气候资源评估与区域农业可持续发展[J]. 干旱区资源与环境, 2002, 16(3): 38—46.
Pan Xuebiao. Climate resources assessment and regional sustainable agriculture development in West Arid Region[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2002, 16(3): 38—46. (in Chinese with English abstract)
- [23] 杜尧东, 宋丽莉, 邵洋春. 小麦水分敏感指数与有限水量生育期的最优分配[J]. 华南农业大学学报 (自然科学版), 2003, 24(4): 1—4.
Du Yaodong, Song Lili, Shao Yang. Water sensitivity indexes for spring wheat and optimum distribution of limited water during its development stage[J]. Journal of South China Agricultural University (Natural Science Edition, 2003, 24(4): 1—4. (in Chinese with English abstract)
- [24] 赵鸿, 肖国举, 王润元, 等. 气候变化对半干旱雨养农业区春小麦生长的影响[J]. 地球科学进展, 2007, 22(3): 322—327.
Zhao Hong, Xiao Guojun, Wang Runyuan, et al. Impact of climate change on spring wheat growth in semi-arid rain feed region[J]. Advance in Earth Science, 2007, 22(3): 322—327. (in Chinese with English abstract)
- [25] 张旭东, 杨兴国, 杨启国. 半干旱区旱作春小麦耗水规律研究[J]. 干旱地区农业研究, 2004, 22(2): 63—66
Zhang Xudong, Yang Xingguo, Yang Qiguo. Study on laws of evapotranspiration of spring wheat in semi-arid region[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2004, 22(2): 63—66. (in Chinese with English abstract)
- [26] 董宝娣, 张正斌, 刘孟雨, 等. 小麦不同品种的水分利用特性及对灌溉制度的响应[J]. 农业工程学报, 2007, 23(9): 27—33.
Dong Baodi, Zhang Zhengbin, Liu Mengyu, et al. Water use characteristics of different wheat varieties and their responses to different irrigation schedulings[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007, 23(9): 27—33. (in Chinese with English abstract)
- [27] 何峰, 王堃, 李向林, 等. 垄沟集雨对干旱半干旱区土壤水热条件及老芒麦产草量的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(12): 122—126.
HeFeng, WangKun, Li Xianglin, et al. Effects of ridge and furrow rainfall harvesting system of on soil hydrothermal condition and yields of *Elymus sibiricus* L. in arid and semiarid regions[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(12): 122—126. (in Chinese with English abstract)
- [28] 董宛麟, 张立祯, 于洋, 等. 向日葵和马铃薯间作模式的生产力及水分利用[J]. 农业工程学报, 2012, 28(18): 127—133.
Dong Wanlin, Zhang Lizhen, Yu Yang, et al. Productivity and water use in sunflower intercropped with potato[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(18): 127—133. (in Chinese with English abstract)
- [29] 苟芳, 张立祯, 董宛麟, 等. 农牧交错带不同间套作模式的土地生产力[J]. 农业工程学报, 2013, 29(6): 129—141.
Gou Fang, Zhang Lizhen, Dong Wanlin, et al. Productivity of strip intercropping systems in agro-pastoral ecotone[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(6): 129—141. (in Chinese with English abstract)
- [30] 李友军, 吴金芝, 黄明, 等. 不同耕作方式对小麦旗叶光合特性和水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2006, 22(12): 44—48.
Li Youjun, Wu Jinzhi, Huang Ming, et al. Effects of different tillage systems on photosynthesis characteristics of flag leaf and water use efficiency in winter wheat[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural

- Engineering (Transactions of the CSAE), 2006, 22 (12): 44—48. (in Chinese with English abstract)
- [31] Braunack M V, Bange M P, Johnston D B. Can planting date and cultivar selection improve resource use efficiency of cotton systems?[J]. Field Crops Research, 2012, 137: 1—11.
- [32] Ferrise R, Triossi A, Stratonovitch P, et al. Sowing date and nitrogen fertilization effects on dry matter and nitrogen dynamics for durum wheat: An experimental and simulation study[J]. Field Crops Research, 2010, 117: 245—257.

Optimal sowing dates improving yield, water and nitrogen use efficiencies of spring wheat in agriculture and pasture ecotone

Yang Ning^{1,2}, Pan Xuebiao^{1,2*}, Zhang Lizhen^{1,2}, Wang Jing^{1,2}, Dong Wanlin^{1,2,5}, Hu Qi^{1,2},
Li Qiuyue^{1,2}, Wang Xiaoxiao^{1,2}, Tang Jianzhao^{1,2}, Liu Zhe^{1,2}, Zhao Peiyi^{3,4}

(1. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China;
2. Wuchuan Scientific Observing and Experimental Station of Agro-Environment, Ministry of Agriculture, Huhhot 011705, China;
3. Institute of Plant Nutrition and Analysis, Inner-Mongolia Academy of Agricultural Sciences, Hohhot 010031, China;
4. Scientific Observing and Experimental Station of Arable Land Conservation (Inner Mongolia), Ministry of Agriculture, Huhhot 011705, China; 5. Changchun Shuangyang Meteorological Administration, Changchun 130600, China)

Abstract: Agriculture and pasture ecotone are typical ecologically vulnerable areas. Crop productivities and the agricultural sustainability are greatly affected by climate change in these areas. Field experiments were conducted from 2011 to 2013 in Inner Mongolia (41°06'N, 111°28'E) to investigate the influence of planting dates on yield and phenology of spring wheat and potential of improving resource (water and nitrogen) use efficiencies. The experimental field was located in arid and semiarid climate zone, where mean annual temperature was 2.7°C, annual growing degree days (>0) was about 2553 (°C·d), the average annual rainfall was only 354 mm mainly in July and August accounting for 80% precipitation in the whole growing season. Five sowing dates was designed from 26 April to 5 June with a 10-day interval. The results showed that the yields after 6 May were significantly ($p<0.05$) decreased due to delayed sowing dates. Compared to early sowing date (26 April), the yield of the late sowing date was reduced by 63.3% to 72.3% due to the obvious reduction in daily temperature from the growth stages of heading to maturity. Harvest index (HI) and grain weight per 1000 seeds were also affected by sowing dates. The early sowing (26 April and 5 May) treatments had higher HI. But after 16 May, the HI decreased significantly ($p<0.05$). The grain weight per 1000 seeds decreased from 44.65 to 20.73 g with the delaying of the seeding dates, which had a trend similar with HI. It indicated that low values of HI and grain weight contributed to yield decrease when sowing after 26 May. Phenology of wheat as expressed in calendar days were different between years and sowing dates, especially from sowing to emergency, but the phenology based on physiological development time (PDT) was similar with a constant value of 95.3 days (the days required to complete whole development stage at optimal temperature condition) between years and sowing dates. Water use efficiency (WUE) was significantly ($p<0.05$) decreased by delaying sowing dates. Compared with early sowing treatments, the WUE of late sowing dates were reduced by 68.8% to 74.3% probably due to the reduction of ratio of spike over above-ground dry matter in late sowing treatments (*i.e.* more vegetative growth and bigger canopy than early sowing treatments). Total nitrogen uptake by above-ground biomass ranged from 14.0 to 17.0 g/m² for different sowing dates, however, the difference was not statistically significant ($p>0.05$). As the early sowing treatments showed higher ($p<0.05$) yield and HI, nitrogen use efficiency (NUE), the transformation of nitrogen uptake to the economic yield was significantly ($p<0.05$) higher in early sowing treatments than in late sowing treatments. Therefore, the best sowing date should be earlier than 6 May, and early sowing before 6 May could improve yield, water and nitrogen use efficiencies of wheat in the agriculture and pasture ecotone.

Key words: water; nitrogen; crop; sowing date; spring wheat; phenology; yields

(责任编辑: 刘丽英)