

# 播期对江苏省冬小麦产量及其构成的影响

严惠敏<sup>1</sup>,周铭瑞<sup>1</sup>,徐志鹏<sup>1</sup>,王清颀<sup>1</sup>,  
刘健峰<sup>1</sup>,周杨阳<sup>1</sup>,王乃江<sup>2</sup>,丁奠元<sup>1,2</sup>

(1.扬州大学水利科学与工程学院,江苏 扬州 225009;2.西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院,陕西 杨凌 712100)

**摘要:**以江苏省冬小麦播期为主要研究对象,利用近20年冬小麦大田播期试验数据相关文献,按照晚播天数、品性、区域、年代进行分组,利用Meta分析方法定量研究了播期变化对江苏省冬小麦产量及其产量构成的影响。结果表明:近20年江苏省冬小麦的播期随时间的推移总体呈现出延迟的趋势,约 $5.5 \text{ d} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ,苏北和苏南地区冬小麦均在晚播18~22 d开始出现减产趋势,苏中地区冬小麦在晚播23~27 d开始出现减产趋势;整体上江苏省晚播13~17 d左右的冬小麦有显著增产效应,增产达3.1%(95%置信区间0.4%~5.8%),晚播18~22 d及以上时,冬小麦产量开始呈现减产趋势。随着年代不断向后推移,晚播的减产效应出现的越来越早。2000—2010年,晚播23~27 d开始出现减产趋势;2011—2017年,晚播18~22 d开始出现减产趋势;(弱)春性冬小麦从晚播18~22 d开始出现减产效应,(半)冬性冬小麦从晚播8~12 d开始出现减产趋势,冬小麦的选择偏于春性化。Meta分析的数据中,冬小麦穗数对产量的影响更大( $P < 0.05, R^2 = 0.3166$ )。适当晚播是江苏省稳定冬小麦产量,适应气候变化的有效手段,其主要是通过影响晚播小麦穗数进而影响冬小麦产量。

**关键词:**播期;冬小麦;产量;产量性状;气候变化;晚播;Meta分析

**中图分类号:**S512.1<sup>+</sup>1 **文献标志码:**A

## Effect of sowing date on winter wheat yield and yield composition in Jiangsu Province

YAN Huimin<sup>1</sup>, ZHOU Mingrui<sup>1</sup>, XU Zhipeng<sup>1</sup>, Wang Qingyi<sup>1</sup>, LIU Jianfeng<sup>1</sup>,  
ZHOU Yangyang<sup>1</sup>, WANG Naijiang<sup>2</sup>, DING Dianyuan<sup>1,2</sup>

(1. College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225009

2. Institute of Water-Saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100)

**Abstract:** Winter wheat sowing date in Jiangsu Province was taken as the main research object. Field experimental data for sowing dates of winter wheat came from references within recent 20 years. The data was grouped according to delayed time in sowing, wheat cultivar, planting regions, and growing years. Then, the meta-analysis method was used to quantify effects of sowing date changes on winter wheat yield and yield composition. The results showed that the sowing date in Jiangsu Province in the past 20 years showed a delaying trend with  $5.5 \text{ d} \cdot 10\text{a}^{-1}$ . Winter wheat in northern Jiangsu and southern Jiangsu began to decrease in yield after 18~22 d of late sowing, and winter wheat in central Jiangsu began to decrease in yield after 23~27 d of late sowing. Compared with yields of the normal sowing date, wheat yields with sowing date delayed 13~17 d had a significantly increasing trend with a 3.1% yield increase (95% confidence interval, 0.4%~5.8%), and wheat yields showed a significant decreasing trend when the sowing date was delayed more than 18~22 d. With the development of the year, the effect of late so-

收稿日期:2020-04-29

修回日期:2020-05-11

**基金项目:**国家自然科学基金项目(51709233);中国博士后科学基金(2018M632391);江苏省高等学校自然科学研究面上项目(17KJD416002)

**作者简介:**严惠敏(1994-),女,江苏淮安人,硕士研究生,主要从事农艺措施改进与气候变化关系方面研究。E-mail:1479323831@qq.com  
**通信作者:**丁奠元(1989-),男,山东潍坊人,博士,硕士生导师,主要从事农业水土资源利用与保护方面研究。E-mail:dyding@yzu.edu.cn

wing on yield reduction appears earlier and earlier. From 2000 to 2010, the trend of production reduction began to appear after 23~27 d of late broadcasting; From 2011 to 2017, the trend of production reduction began to appear after 18~22 d of late broadcasting. The yield of (weak) spring winter wheat began to decrease after 18~22 d of late sowing, while that of (semi) winter wheat decreased after 8~12 d of late sowing, and the selection of winter wheat tended to be vernalization. In the data of meta-analysis, yields of winter wheat was highly dependent on spike number ( $P < 0.05$ ,  $R^2 = 0.3116$ ). The spike number of winter wheat played a dominance role in yield composition when the sowing date was delayed. Late-sowing of winter wheat could be used to adapt with climate change in Jiangsu Province.

**Keywords:** sowing date; spike number; climate change; late-sowing; meta-analysis

粮食安全问题一直是中国乃至全世界持续关注的重大民生问题<sup>[1]</sup>。农业生产受外界气候环境的影响显著,已有研究表明气候变化是除了快速增加的人口数量、水分短缺和土地退化之外,又一个对粮食生产和安全的重要威胁<sup>[2]</sup>。因此,有效应对气候变化,利用其对农业生产有利一面,缓解其对粮食安全不利一面,已成为众多学者必须面对的重大挑战。

小麦是世界主要粮食作物之一,在我国种植范围较广,江苏省是中国冬小麦的主要种植区域之一<sup>[3]</sup>。随着全球气候变暖,特别是暖冬的出现,改变了小麦冬季的生长发育状况。有研究表明,在气候变化背景下,传统的播期易造成冬小麦植株生长迅速、苗情过旺,遇到寒冬或倒春寒,极大增加了冻害的发生几率,严重影响冬小麦的产量<sup>[4-5]</sup>。为了适应气温升高,适当晚播可以延缓小麦越冬前的发育进程,减少冻害对小麦生产的影响<sup>[6]</sup>;同时适度推迟播种日期可以使小麦植株充分利用冬前光热资源,培育壮苗,有利于形成高产群体,稳定冬小麦产量<sup>[7-9]</sup>。因此,如何“适期”,如何确定“晚播时间”,成为优化小麦生育进程,适应当地气候环境的关键问题。目前,关于晚播对冬小麦产量及其构成影响的研究多是单一的研究区域,而且已有研究试验分布较为独立分散,且对整个江苏省开展系统性研究较少;不同区域冬小麦的最适播期是否相同,播期如何影响冬小麦产量及其产量构成因子(穗数、穗粒数和千粒重),这些问题均需要进一步探讨。

以上问题均无法从独立的田间试验中得以解决,而 Meta 分析(Meta-analysis)为以上问题提供了可能的解决途径。Meta 分析是一种对同一主题下的多个独立试验或研究进行综合统计的分析方法<sup>[10]</sup>,从统计学角度达到增大样本含量,提高检验效能的目的<sup>[11]</sup>。Meta 分析在医学、矿产和土地利

用等多方面均有着广泛的应用<sup>[12-15]</sup>。在农业方面,Meta 分析已经应用到棉花地膜覆盖产量效应<sup>[16]</sup>、农田秸秆还田土壤  $N_2O$  排放及其影响因素<sup>[17]</sup>、生物质炭施用对我国农作物和土壤固碳减排潜力的影响<sup>[18]</sup>、玉米产量相关性状<sup>[19]</sup>、稻麦两熟系统产量对秸秆还田的响应<sup>[20]</sup>。目前已有研究中,基于 Meta 分析江苏省播期对冬小麦产量及其构成影响的相关研究较少,江苏省冬小麦播期需要从较大区域尺度进一步研究。

鉴于以上研究现状和存在的问题,本研究基于收集的近 20 年江苏省冬小麦播期的大田试验数据,利用 Meta 分析方法,定量研究播期对冬小麦产量及其构成要素的影响,为江苏省确定冬小麦最适播期提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据来源

本研究通过对中国知网、维普、万方和 Web of Science 等中外文文献数据库进行检索,收集截止 2019 年 12 月 31 日国内外公开发表的有关播期对小麦产量影响的田间试验研究论文。检索中文关键词包括小麦、播期、晚播等及其组合,英文关键词包括 Winter wheat, sowing date, planting date, late sowing 及其组合。基于以下标准确定该研究的分析样本:(1) 试验区域位于中国江苏省范围内,试验地点明确;(2) 试验处理必须包括晚播和正常播期的对照试验;(3) 文中列有相关处理的产量和产量构成的均值及标准差(或标准误),或提供相关处理各重复产量,或试验年份  $\geq 2$  a<sup>[21]</sup>。经以上标准严格筛选,共获得 19 篇可用文献(表 1),65 组有效数据。

### 1.2 数据处理及分组

本研究根据获取的数据情况,将数据按照晚播天数、冬小麦品性、试验区域、试验年代进行分组,

其中因晚播>32 d的数据量较少,没有单独进行分析,具体见表2。

### 1.3 数据分析及研究方法

**1.3.1 标准差计算** Meta分析是一种基于文献资料的定量统计方法,它通过合并同质统计量,对某研究领域中的主题问题进行综合定量分析<sup>[41]</sup>。标准差是Meta分析的一个重要参数,用于计算各研究的权重。在数据整理中,当文中列有产量标准差时,直接使用;当文中没有提供产量标准差但有标准误,或多个重复试验的产量,或既未提供产量标准差也无重复试验的产量,但包含多年试验时,将多年试验结果看作平均重复,计算标准差<sup>[42]</sup>。

**1.3.2 Meta分析** 通过对以往的Meta分析研究的

了解,研究中每个试验点的权重用原始数据均值的标准差进行计算<sup>[43]</sup>,也可以采用试验处理的重复次数进行计算<sup>[44]</sup>。本研究利用试验处理的重复次数的方法计算权重( $W$ )。

$$W = (N_e \times N_c) / (N_e + N_c)$$

式中, $N_e$ 和 $N_c$ 分别表示晚播和正常播期对照组的试验重复次数。

在MetaWin软件中输入各研究中晚播组和正常播期对照组平均产量值、对应的标准差、样本个数,计算效应值( $\ln R$ ):

$$\ln R = \ln(Y_e/Y_c)$$

式中, $R$ 是反应比; $Y_e$ 和 $Y_c$ 分别为晚播和正常播期对照组的产量( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )。

表1 数据库原始文献信息概要

Table 1 Description of source references used in the database

序号 No.	晚播天数 Delayed time in sowing/d	试验年代 Experimental time	小麦品种 Wheat variety	播种密度/ $(10^4 \text{株} \cdot \text{hm}^{-2})$ Planting density / $(10^4 \text{plants} \cdot \text{hm}^{-2})$	参考文献 Reference
1	15	2015	扬麦22 Yangmai 22	150,225,300	[22]
2	21	2016	连麦6号、烟农19 Lianmai No.6, Yannong 19	225	[23]
3	15	2015	扬麦20 Yangmai 20	150,225,300	[24]
4	15	2014	扬麦158、扬麦16、扬麦14、扬麦15、 扬麦20、扬麦22、扬麦23、宁麦13 Yangmai 158, Yangmai 16, Yangmai 14, Yangmai 15, Yangmai 20, Yangmai 22, Yangmai 23, Ningmai 13		[25]
5	15	2012	镇麦10号 Zhenmai No.10	225,300,375	[26]
6	7	2012	淮麦30 Huaimai 30	225,300,375	[27]
7	7	2012	扬麦16 Yangmai 16	150,225,300,375	[28]
8	10	2011	镇麦168 Zhenmai 168	180,225,270,330	[29]
9	5	2000	扬麦158、9356、宁麦9号 Yangmai 158, 9356, Ningmai No.9	180	[30]
10	7	2007	淮麦22 Huaimai 22	150,195,240	[31]
11	7	2005	淮麦21号 Huaimai No.21	195,240,285	[32]
12	5	2000	扬麦158、苏麦6号、宁麦9号 Yangmai 158, Sumai 6, Ningmai 9		[33]
13	8	2005	扬麦16 Yangmai 16	120,180,240,300	[34]
14	10	2004	华麦1号 Huamai No.1	150,225,300,375,450	[35]
15	10	2012	扬麦13 Yangmai 13	150,225,300,375	[36]
16	10	2012	生选6号 Shengxuan No.6	120,180,240,300	[37]
17	5	2015	淮麦28 Huaimai 28	495,525,555,600	[38]
18	21	2017	扬麦20、扬麦23、扬麦24、扬麦25 Yangmai 20, Yangmai 23, Yangmai 24, Yangmai 25		[39]
19	6	2017	扬麦15、宁麦13 Yangmai 15, Ningmai 13	120,240,360	[40]

表2 Meta分析有效数据分类信息

Table 2 Valid data classification in formation used in the Meta-analysis

晚播天数/d Delayed time in sowing	3~7	8~12	13~17	18~22	23~27
试验区域 Experimental area	苏北 Northern Jiangsu Province 苏中 Central Jiangsu Province 苏南 Southern Jiangsu Province				
试验年代 Experimental time	2000—2012		2011—2017		
冬小麦品性 The character of winter wheat	(弱)春性 (Weak) spring wheat (半)冬性 (Semi-winter) winter variety				

为便于使用晚播增产率解释晚播的效应(增产或减产效应),将效应量( $\ln R$ )转化为增产率( $Z$ ):

$$Z = [\exp(\ln R) - 1] \times 100\%$$

晚播的增产率( $Z$ )和其95%的置信区间用MetaWin2.1软件产生。 $Z$ 的95%置信区间若全部大于0,说明晚播对产量具有显著正效应,即促进增产;若全部小于0,说明晚播对产量具有显著负效应,即不利于产量的提高;若包含0,则说明晚播对产量无显著影响。同理,产量构成因子穗数、穗粒数和千粒重增加率可解释晚播的效应。当异质性

结果显著时( $P<0.05$ ),采用随机效应模型,相反,则采用固定效应模型。

敏感性分析的目的是检验用于 Meta 分析的数据是否存在离群值,即通过逐一移除单个效应量对其余效应量进行整合,观察综合效应量、95%置信区间及异质性检验结果等是否发生较大变化,从而检测是否存在离群值<sup>[21]</sup>。

1.3.3 数据处理 所有数据分析均使用 Excel 2016 进行数据收集整理,采用 Metawin2.1 软件进行 Meta 分析,利用 SigmaPlot 12.5 软件作图,进行相关关系分析,并采用 LSD 法进行显著性分析( $P<0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 异质性检验和敏感性分析

通过卡方检验(Chi-square)明确不同播期及产量之间是否存在异质性(表 3),结果表明异质性检验结果达到极显著水平,故采用随机效应模型。发表性偏倚结果表明,纳入的研究结果不存在发表性

偏倚( $P>0.05$ )。

对不同播期冬小麦产量效应进行敏感性分析(表 4),结果表明,在不同播期中,任意独立样本的移除对整体样本的增产率和 95%置信区间均未产生明显变化,且仍存在显著的异质性。在晚播 3~7 d 和晚播 23~27 d 中,分别第 9 个和第 2 个样本的移除对整体影响比较大,但仍未显著改变原来 Meta 分析的结果,不能将它们视为离群值。

表 3 冬小麦产量的异质性和发表性偏倚

Table 3 Heterogeneity and publication bias of winter wheat yield

样本量 Sample size	模型 Model	$Q$	$P_Q$	$Z_B$	$P_B$
58	随机 Random	151.13	0.000	-0.249	0.803

注: $Q$ 为异质性检验的统计量; $P_Q$ 为 $Q$ 统计量显著性; $Z_B$ 为发表性偏倚的统计量; $P_B$ 为 $Z_B$ 统计量显著性。

Note:  $Q$  is the statistic of heterogeneity;  $P_Q$  is the significant value of  $Q$ ;  $Z_B$  is the statistic of publication bias;  $P_B$  is the significant value of  $Z_B$ .

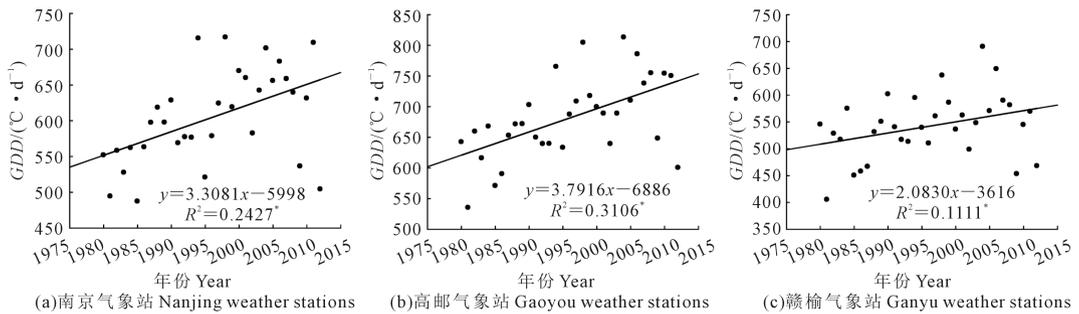
表 4 冬小麦对不同播期的敏感性分析

Table 4 Sensitivity analysis of winter wheat to different sowing dates

晚播天数 Delayed time in sowing/d	增产率 Yield increasing rate/%	95%置信区间 95% confidence interval/%				增产率 Yield increasing rate/%	95%置信区间 95% confidence interval/%			
		下限 Lower limit		上限 Upper limit			下限 Lower limit		上限 Upper limit	
3~7	4.08	-0.07	8.22	3.74	0.27	7.2				
	3.86	0.38	7.35	3.3	0.04	6.56				
	4.85	1.2	8.5	4.45	-0.02	8.91				
	3.71	0.24	7.19	4.52	0.92	8.12				
	2.55	-0.02	5.11	3.56	0.08	7.04				
8~12	4.25	-5.2	13.71	2.95	-5.01	10.91				
	3.89	-4.61	12.38	5.46	-3.7	14.62				
	5.31	-3.43	14.06	5.87	-2.64	14.38				
	6.73	-0.95	14.41	5.84	-2.84	14.53				
	3.18	-5.02	11.38	3.4	-4.93	11.73				
13~17	2.63	-0.2	5.46	3.42	0.47	6.36				
	3.09	0.18	5.99	3.24	0.2	6.28				
	2.8	-0.02	5.62	3.17	0.2	6.14				
	2.52	-0.22	5.25	2.91	0.16	5.66				
	2.46	-0.08	4.99	3.46	0.21	6.71				
18~22	3.39	0.11	6.66	2.91	0.13	5.69				
	3.59	0.89	6.29	3.47	0.84	6.11				
	-2.8	-8.39	2.78	-2.88	-8.54	2.79				
	-3.9	-9.37	1.58	-3.1	-8.31	2.12				
	-4.46	-9.56	0.64	-3.37	-9.86	3.11				
23~27	-3.24	-9.15	2.67	-3.44	-8.72	1.84				
	-2.22	-7.45	3.02	-1.93	-7.07	3.21				
	-1	-5.59	3.59	-2.16	-7.39	3.08				
	-4.45	-9.55	0.65	-3.96	-9.16	1.23				
	-4.21	-41.74	33.32	-9.81	-29.11	9.5				
28~32	-5.28	-33.25	22.69	-0.73	-21.73	20.27				
	-9.67	-14.52	-4.82	-8.73	-14.41	-3.06				
	-8.89	-14.16	-3.62	-9.02	-14.49	-3.54				
	-9.49	-14.53	-4.45	-8.81	-14.39	-3.23				
	-8.8	-13.76	-3.85	-8.88	-13.71	-4.04				
23~27	-9.35	-14.31	-4.38	-8.1	-13.23	-2.97				
	-7.24	-11.41	-3.08	-8.47	-13.44	-3.5				
	-7.4	-11.96	-2.84							

## 2.2 冬前积温变化

积温学说通常以界限温度来定义,本研究以5 d滑动平均的日平均气温 $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 作为稳定通过 $0^{\circ}\text{C}$ 终日,以此作为冬小麦越冬停止生长的日期<sup>[45]</sup>。选取南京气象站、高邮气象站和赣榆气象站作为江苏省苏南、苏中、苏北3个地区的代表气象站。分析1980—2012年的冬前积温,表明江苏省 $0^{\circ}\text{C}$ 以上的活动积温呈现增长的趋势(图1)。苏南地区以 $3.3081^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}\cdot\text{a}^{-1}$ 的速度递增( $R^2=0.2427$ );苏中地区以 $3.7916^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}\cdot\text{a}^{-1}$ 的速度递增( $R^2=0.3106$ );苏北地区以 $2.0830^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}\cdot\text{a}^{-1}$ 的速度递增( $R^2=0.1111$ )。在积温与年际的相关性检验中,苏南、苏中、苏北均通过0.05显著性检验,说明江苏省受气候变化影响, $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 有效积温显著增加。

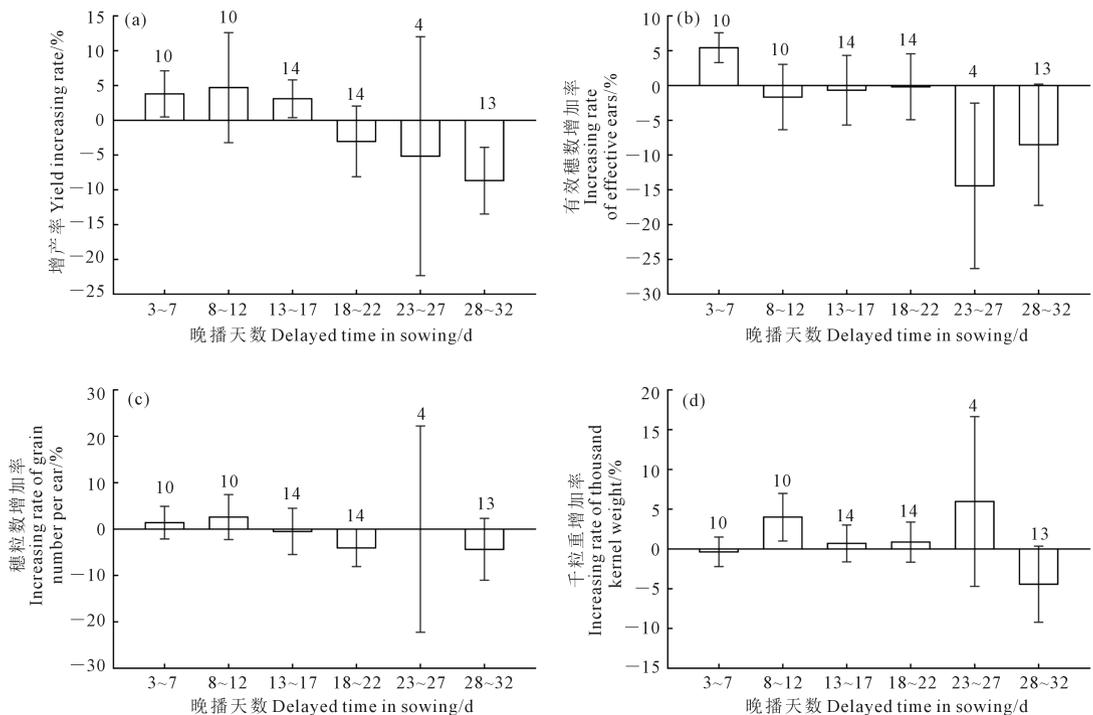


注: \* 显著相关( $P<0.05$ ),下同。

Note: \* Significant correlation ( $P<0.05$ ), the same below.

图1 典型气象站冬前有效积温(GDD)趋势

Fig.1 Trend of growing degree days (GDD) before over-wintering at typical weather stations



注:误差棒表示95%置信区间的上下限值,下同。

Note: The lines on each column represent the upper and lower limits of the 95% confidence interval. The same below.

图2 不同播期对冬小麦产量及产量构成的影响

Fig.2 Effects of delayed time in sowing on winter wheat yield and its composition

## 2.3 江苏省冬小麦播期对产量及其构成的影响

产量与穗粒数的变化趋势基本同步,但穗数对产量的影响更大,均在晚播天数大于20 d时,有减少的趋势,且随着时间的推移,减少趋势越来越显著。

与正常播期相比(图2a),晚播17 d以内冬小麦有增产的趋势。其中,晚播3~7 d和13~17 d冬小麦增产效应显著,分别增加3.8%(95%置信区间0.5%~7.1%)和3.1%(95%置信区间0.4%~5.8%);晚播8~12 d,冬小麦产量较正常播期产量增产效应不显著;从晚播18~22 d开始,冬小麦出现减产趋势。与正常播期产量相比,晚播18~22 d和23~27 d的冬小麦减产效应不显著;当晚播28~32 d,减产效应显著,冬小麦减产达8.7%(95%置信区间-13.5%~-3.9%)。

晚播 3~7 d (图 2b), 冬小麦穗数较正常播期穗数增加显著, 增加达 5.4% (95% 置信区间 3.3%~7.6%); 从晚播 8~12 d 开始, 冬小麦穗数呈现减少趋势, 随着播期的推迟, 冬小麦穗数减少趋势越来越显著。与正常播期相比, 晚播 8~12、13~17、18~22 d 和 28~32 d 冬小麦穗数减少效应不显著; 晚播 23~27 d 的穗数减少效应显著, 减少达 14.4% (95% 置信区间 -26.3%~-2.5%)。

晚播 12 d 以内 (图 2c), 冬小麦穗粒数有增加趋势, 但增加效应不显著; 从晚播 13~17 d 开始, 冬小麦穗粒数出现减少的趋势。与正常播期穗粒数相比, 晚播 13~17、23~27 d 和 28~32 d 的冬小麦穗粒数减少效应不显著; 与正常播期的穗粒数相比, 当晚播 18~22 d 冬小麦穗粒数减少效应显著, 减少达 4.1% (95% 置信区间 -8.1%~-0.03%)。

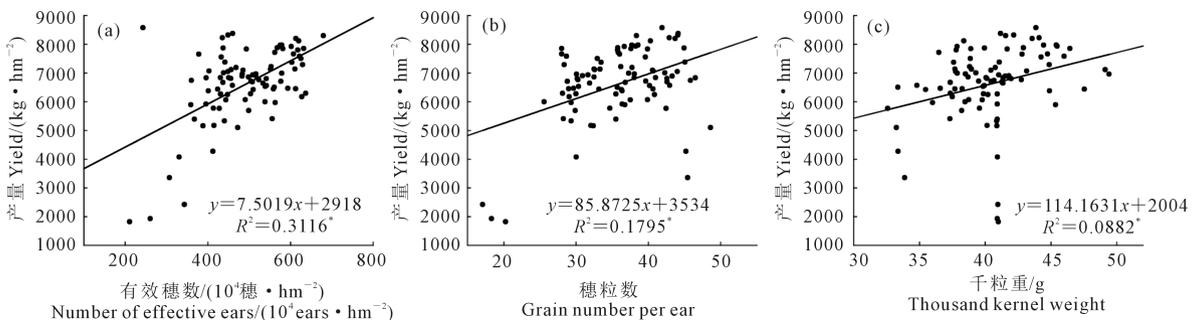
晚播 3~7 d 和 28~32 d 时, 冬小麦千粒重与正常播期千粒重相比, 减少效应不显著; 晚播 8~27 d, 冬小麦千粒重出现增加的趋势。其中, 当晚播 8~12 d 时, 冬小麦千粒重增加效应显著, 增加达 4.0% (95% 置信区间 1%~7.0%); 晚播 13~17、18~22 d 和 23~27 d, 冬小麦千粒重与正常播期千粒重相比, 增加效应不显著 (图 2d)。

冬小麦产量构成的主要因子包括有效穗数、穗

粒数和千粒重。相关分析结果表明, 冬小麦产量与穗数、穗粒数和千粒重呈显著正相关 ( $P < 0.05$ ; 图 3), 产量与穗数拟合关系的  $R^2$  值 (0.3116) 明显大于穗粒数和千粒重的  $R^2$  值 (分别为 0.1795 和 0.0882), 这说明穗数对产量的影响更大。

## 2.4 不同地区冬小麦产量对播期的响应

苏北和苏南地区 (图 4a 和图 4c), 晚播 3~7 d 和 13~17 d, 冬小麦均有增产的趋势, 但与正常播期产量差异不显著。其中, 苏北晚播 3~7 d 和 13~17 d 冬小麦产量分别增加 1.9% (95% 置信区间 -1.1%~5.0%) 和 2.1% (95% 置信区间 -3.2%~7.4%), 苏南晚播 3~7 d 和 13~17 d 冬小麦产量分别增加 8.8% (95% 置信区间 -114.0%~131.5%) 和 4.9% (95% 置信区间 -61.2%~71.0%); 两个地区均从晚播 18~22 d 开始, 播期推迟对冬小麦产量的影响出现负效应。其中, 晚播 18~22 d, 苏北冬小麦产量减少 2.1% (95% 置信区间 -6.1%~2.0%); 晚播 18~22 d 和 28~32 d, 苏南冬小麦产量分别减少 23.1% (95% 置信区间 -281.7%~235.5%) 和 7.6% (95% 置信区间 -16.5%~1.4%), 晚播冬小麦产量与正常播期产量差异均不显著。当晚播 28~32 d 左右时, 苏北冬小麦产量显著低于正常播期产量, 减产达 19.0% (95% 置信区间 -28.0%~-10.0%)。



注: \* 显著相关 ( $P < 0.05$ ), 下同。

Note: \* Significant correlation ( $P < 0.05$ ), the same below.

图 3 冬小麦产量与穗数、穗粒数和千粒重的相关性分析

Fig.3 Correlation analysis between yield and its composition factors

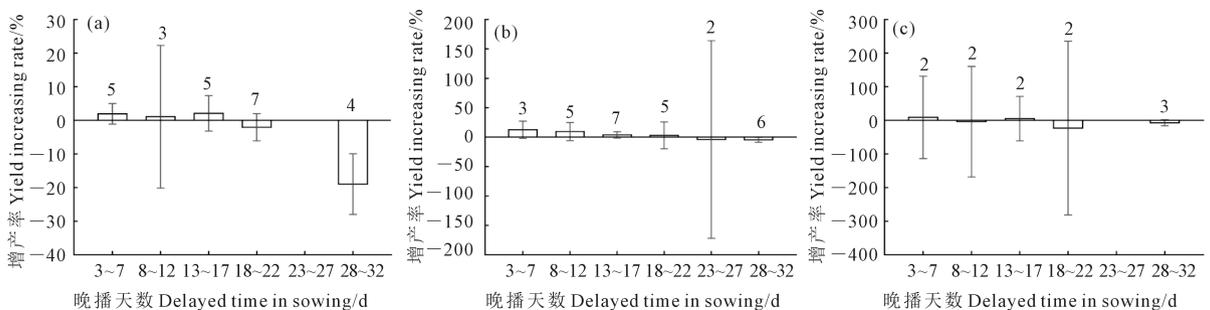


图 4 不同区域 (a. 苏北; b. 苏中; c. 苏南) 晚播时间对冬小麦产量影响

Fig.4 Effects of delayed time in sowing on winter wheat yield in different regions (a. northern district of Jiangsu Province; b. middle district of Jiangsu Province; c. southern district of Jiangsu Province)

苏中地区(图4b)晚播22 d之内,冬小麦有增产的趋势,但与正常播期产量差异不显著。晚播3~7、8~12、13~17 d和18~22 d分别增产12.6%(95%置信区间-2%~27.3%)、9.4%(95%置信区间-6.1%~24.9%)、3.8%(95%置信区间-1.6%~9.2%)和3.0%(95%置信区间-19.7%~25.8%);从晚播23~27 d开始,冬小麦呈现减产趋势,随着播期的推迟,冬小麦减产趋势越来越显著。当晚播28~32 d时,减产效应显著,冬小麦产量较正常播期产量平均减少4.4%(95%置信区间-8.8%~-0.1%)。

### 2.5 不同时期播期对冬小麦产量的影响

2000—2010年(图5a),晚播22 d以内,冬小麦产量有增加趋势,但增产效应均不显著。晚播3~7、8~12、13~17 d和18~22 d的冬小麦产量比正常播期分别增加2.6%(95%置信区间-2.8%~8.0%)、7.5%(95%置信区间-10.9%~25.8%)、2.1%(95%置信区间-3.7%~7.8%)和0.2%(95%置信区间-7.4%~7.8%);从晚播23~27 d开始,冬小麦产量有减少的趋势,当晚播28~32 d时,冬小麦产量显著低于正常播期产量,减产15.8%(95%置信区间-27.3%~-4.3%)。

2011—2017年(图5b),晚播17 d以内,冬小麦产量较正常播期产量呈增加趋势,且增产效应越来越显著。晚播3~7、8~12 d和13~17 d分别增加

5.4%(-1.7%~12.6%)、2.9%(-9.9%~15.6%)和3.6%(95%置信区间0.1%~7.1%);晚播18~22 d的冬小麦产量比正常播期产量减产效应不显著;晚播28~32 d,冬小麦产量呈现显著的减产效应,减产5.4%(95%置信区间-8.7%~-2.1%)。

### 2.6 不同品性冬小麦产量对播期的响应

随着气候变暖,冬小麦的生育期缩短,种植结构也发生改变。温度升高和大气中CO<sub>2</sub>浓度升高使农业气候带北移和西扩,出现品种春性化<sup>[46]</sup>。不同冬春性的冬小麦的生育期也不同,研究不同品性冬小麦产量对播期的响应是必要的。

(弱)春性冬小麦(图6a),晚播17 d以内,冬小麦产量有增加趋势。其中,晚播3~7 d和13~17 d,冬小麦产量呈现显著增产效应,分别增产5.6%(95%置信区间1.8%~9.4%)和5.0%(1.1%~9.0%);从晚播18~22 d开始,播期推迟对冬小麦产量的影响出现负效应,且减产效应均不显著。

(半)冬性小麦(图6b),当晚播3~7 d,增产效应不显著,冬小麦产量较正常播期产量平均提高0.4%(95%置信区间-9.5%~10.3%);从晚播8~12 d开始,冬小麦出现减产趋势。与正常播期产量相比,晚播8~12、13~17、18~22 d和28~32 d冬小麦产量分别减产3.4%(95%置信区间-44.7%~37.8%)、6.9%(95%置信区间-120.6%~106.7%)、4.7%(95%置

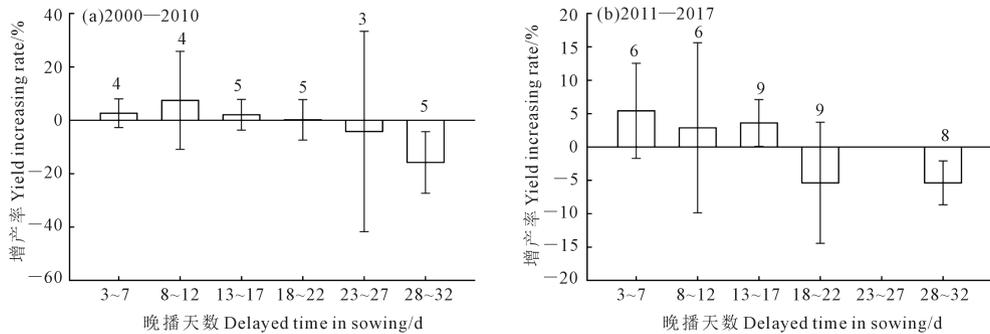


图5 晚播对冬小麦产量的影响

Fig.5 Effects of delayed time in sowing during different periods on winter wheat yield

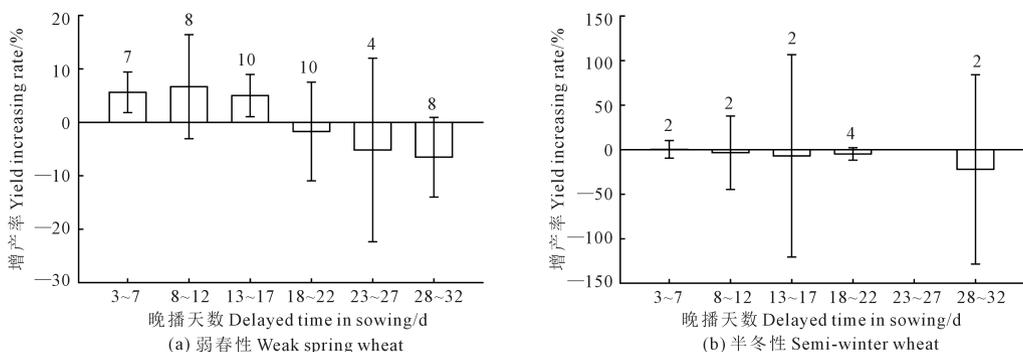


图6 不同品性冬小麦晚播对产量的影响

Fig.6 Effect of delayed time in sowing of winter wheat with different characters on yield

信区间  $-11.7\% \sim 2.3\%$ ) 和  $22.1\%$  (95% 置信区间  $-128.3\% \sim 84.2\%$ ), 晚播冬小麦产量与正常播期产量差异均不显著。

## 3 讨论

### 3.1 适期晚播

气候变化背景下, 我国温度、降水量等农业气候资源发生显著变化, 受其影响, 作物生长也会发生相应改变。康俊等<sup>[47]</sup>分析了近 45 年江苏省年、季实测温度、降水的变化特征, 江苏省表现出明显增温趋势, 气温增速达  $0.026^{\circ}\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$ , 降水量变化总体为上升趋势。小麦产量因暖冬、阴湿寡照和后期高温等因素不同程度影响呈下降趋势<sup>[48]</sup>。

随着气候变化的不断发展, 调整播期成为适应气候变化的主要手段之一。关于播期对冬小麦产量的影响, 前人开展过大量研究, 但研究结果并不一致。有研究表明不同播期条件下, 宽幅播种提高单位面积穗数大幅提高小麦产量<sup>[49]</sup>。赵玉花等<sup>[50]</sup>研究发现适期晚播减少小麦的有效穗数, 但其穗粒数增加。不同试验结论不同, 可能与其设置的播期、小麦品种、播种密度、施肥条件、冬前有效积温不同有关。本研究结果表明, 在江苏省, 适当晚播有助于提高冬小麦产量; 与正常播期相比, 晚播 13~17 d, 冬小麦产量有显著增产趋势; 晚播天数达 18~22 d 以上时, 冬小麦产量开始呈现减产趋势。因此, 江苏省总体适期播种的范围是比正常播期晚播 13~17 d。这与单维民等<sup>[51]</sup>研究小麦适期晚播提高小麦产量, 过度晚播则会不利于冬小麦高产的研究结果相一致。然而单维民研究中也说明, 在实际生产过程中, 冬小麦播期还会与其它措施相结合, 如增加播种密度, 选择合适品种等, 以达到不仅适应当地气候环境的变化, 又能稳定冬小麦产量的目的。

本研究统计数据表明, 江苏省的正常播期随时间的推进, 呈现出延迟的趋势, 达  $5.5 \text{ d} \cdot 10\text{a}^{-1}$  (图 7)。随着年代的推移, 年代间相对播期不断推迟, 使得晚播的减产效应出现越来越早。宋方超等<sup>[52]</sup>发现山西省沁水县平均气温随年代的推移呈逐渐升高趋势, 播种日期较传统播种期推迟了约 5 d; 成兆金等<sup>[45]</sup>研究日照地区得出小麦播期比传统播期推迟 5~10 d; 通过实测统计数据发现在过去的 30 年中, 我国农民已经自然地将播种日期推迟  $1.5 \text{ d} \cdot 10\text{a}^{-1}$ <sup>[53]</sup>, 以上研究结果与本文结果一致。

### 3.2 播期对产量构成的影响

在播期对产量构成因子的影响中, 前人得到的结论不一。李华英等<sup>[54]</sup>研究表明, 适当晚播使得冬

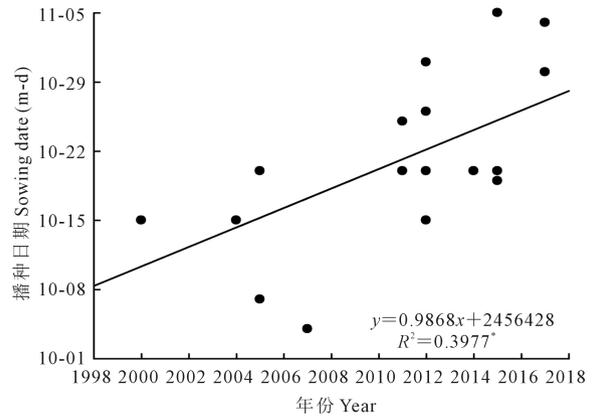


图 7 江苏省冬小麦正常播期随时间的变化

Fig. 7 Response of sowing date to time in Jiangsu Province

小麦单位面积有效穗数减少, 穗粒数增加, 可获得与早播和传统播期处理相当水平的籽粒产量。也有研究表明, 延迟播期后, 冬小麦有效叶面积减少, 籽粒灌浆速率减慢, 导致单位面积穗数和穗粒数降低<sup>[55]</sup>; 随冬小麦播期推迟, 穗数、穗粒数和千粒重均有所下降, 进而产量显著下降<sup>[56]</sup>。本研究 Meta 分析表明, 穗数对产量的影响更大。

### 3.3 Meta 分析的优缺点

理论上, 进行播期增产率的空间和时间效应的研究需要在不同地区选定固定的代表区进行多年的试验研究, 但是进行这样的研究需要花费大量的人力物力, 研究的可行性低, Meta 分析可以有效解决这个问题。Meta 分析基于前人研究结果, 提供了一种便捷的数据综合处理方法<sup>[57]</sup>, 对晚播条件下冬小麦产量及其产量构成进行分析, 有助于确定江苏省适期晚播时间, 给当地农民和政府决策者提供一定参考。

Meta 分析也存在一定的局限性: (1) 发表的文献或由于数据量不足, 不能用于 Meta 分析, 可能会使结果的可靠性降低; (2) 因数据量的原因, 只能针对数据较多的区域进行分析; (3) 冬小麦的产量受多种因素影响, 如气候因子、土壤肥力、小麦品种、耕作方式等, 这些因素之间可能存在一定的交互作用, 这些因子如何与播期互动, 进而影响冬小麦产量的机制需要进一步研究。因此, 应尽可能增大 Meta 分析的数据量, 更好地揭示冬小麦产量的影响机制。

本研究选取农民易于操作和实现的田间管理措施——改变冬小麦播期作为主要研究对象。利用 Meta 分析对已收集实测数据进行量化分析, 研究不同播期对江苏省冬小麦产量及其构成因子的影响。但是在研究中, 能够获取的大田试验数据较

少,且未能尽可能详细和准确描述试验条件,不利于研究间的整合。此外,在探讨播期对冬小麦产量的影响时,未能综合考虑气象因子对冬小麦的影响。因此,在未来的研究中要进一步考虑土壤、管理、播种密度等耕作措施与不同气候系统模式的耦合效应,考虑各个因子的交互作用。

## 4 结 论

1)江苏省冬小麦正常播期随时间的推进,总体呈现出延迟的趋势,速率达 $5.5 \text{ d} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 。苏北和苏南地区播期对冬小麦产量的响应基本一致,均从晚播18~22 d开始出现减产趋势;苏中地区冬小麦从晚播23~27 d开始出现减产趋势。

2)在江苏省,适当晚播能够稳定冬小麦产量。其中,晚播13~17 d冬小麦增产效应显著;晚播 $\geq 18$ ~22 d时,冬小麦呈现减产趋势;随着年代不断向后推移,晚播的减产效应出现的越来越早。2000—2010年,从晚播23~27 d开始出现减产趋势;2011—2017年,从晚播18~22 d开始出现减产趋势。

3)(弱)春性冬小麦从晚播18~22 d开始出现减产效应,(半)冬性冬小麦从晚播8~12 d开始出现减产趋势,冬小麦品种的选择偏于春性化。

4)晚播措施主要通过影响冬小麦穗数,进而影响冬小麦产量。

综上所述,适当晚播可有效稳定、提高江苏省冬小麦的产量,适应气候变化。

## 参 考 文 献:

- [1] Ding D Y, Feng H, Zhao Y, et al. Impact assessment of climate change and later-maturing cultivars on winter wheat growth and soil water deficit on the Loess Plateau of China [J]. *Climatic Change*, 2016, 138(1-2): 157-171.
- [2] Thomas R. J. Opportunities to reduce the vulnerability of dryland farmers in Central and West Asia and North Africa to climate change [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2008, 126(1): 36-45.
- [3] 王连喜,顾嘉熠,李琪,等.江苏省冬小麦适宜度时空变化研究[J]. *生态环境学报*, 2016, 25(1): 67-75.
- [4] 程玉民,董昀,范永胜.暖冬气候对小麦生长发育的影响及对策[J]. *中国种业*, 2006, (8): 35.
- [5] 王夏,胡新,孙忠富,等.不同播期和播量对小麦群体性状和产量的影响[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(21): 170-176.
- [6] 张敏,王岩岩,蔡瑞国,等.播期推迟对冬小麦产量形成和籽粒品质的调控效应[J]. *麦类作物学报*, 2013, 33(2): 325-330.
- [7] 王福玉,尹逊利,陈贵菊,等.播期播量对强筋小麦济宁16产量及其构成因素的影响[J]. *山东农业科学*, 2011, (1): 33-35.
- [8] 杨春玲,李晓亮,冯小涛,等.不同类型小麦品种播期及播量对叶龄及产量构成因素的影响[J]. *山东农业科学*, 2009, (6): 32-34.
- [9] 杨清岭,朱统泉,贺建锋,等.晚播不同播期对郑麦9023的群体质量产量及品质的影响[J]. *河南科技学院学报(自然科学版)*, 2007, 35(1): 18-20.
- [10] Kessel C, Venterea R, Six J, et al. Climate, duration, and N placement determine  $\text{N}_2\text{O}$  emissions in reduced tillage systems: a meta-analysis [J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(1): 33-44.
- [11] 刘鸣.系统评价、Meta-分析设计与实施方法[M].北京:人民卫生出版社, 2011: 96-97.
- [12] 黄娟,孙明霞,杨若彤,等.针灸治疗面部斑痘取穴配伍规律的Meta分析[J]. *内蒙古医学杂志*, 2018, 50(12): 1435-1437.
- [13] 段晨松,韩燕,张远彬.不同恢复方式地震受损区的土壤理化性质的Meta分析[J]. *山地学报*, 2018, 36(6): 857-866.
- [14] 王颖.基于Meta分析与多属性模糊优选决策模型的多元信息成矿预测研究[D].长沙:中南大学, 2010.
- [15] 朱晓磊.基于Meta分析的资源型城市生态系统服务价值转移模型研究[D].北京:中国地质大学, 2018.
- [16] 李昊,李世平,南灵,等.中国棉花地膜覆盖产量效应的Meta分析[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(7): 228-235.
- [17] 张冉,赵鑫,濮超,等.中国农田秸秆还田土壤 $\text{N}_2\text{O}$ 排放及其影响因素的Meta分析[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(22): 1-6.
- [18] 刘成,刘晓雨,张旭辉,等.基于整合分析方法评价我国生物质炭施用的增产与固碳减排效果[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(3): 696-706.
- [19] 马娟,王浩,王利锋,等.玉米产量相关性状定位和Meta-QTL整合[J]. *植物遗传资源学报*, 2019, 20(1): 37-47.
- [20] 朱冰莹,马娜娜,余德贵.稻麦两熟系统产量对秸秆还田的响应:基于Meta分析[J]. *南京农业大学学报*, 2017, 40(3): 376-385.
- [21] 银敏华,李援农,申胜龙,等.中国可降解膜覆盖对玉米产量效应的Meta分析[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(19): 1-9.
- [22] 胡文静,程顺和,陈甜甜,等.栽培因子对扬麦22产量、品质及氮肥农学利用率的影响[J]. *扬州大学学报(农业与生命科学版)*, 2018, 39(1): 86-90.
- [23] 陈凤,樊继伟,郭明明,等.连麦6号产量对播期和施肥比例互作的响应[J]. *江苏农业学报*, 2017, 33(6): 1266-1271.
- [24] 胡文静,程顺和,程晓明,等.栽培措施对弱筋小麦品种扬麦20产量、品质和氮肥农学利用率的影响[J]. *江苏农业学报*, 2018, 34(3): 487-492.
- [25] 王慧,朱冬梅,王君婵,等.扬麦16耐迟播早熟特性研究[J]. *麦类作物学报*, 2016, 36(12): 1657-1666.
- [26] 李东升,温明星,蔡金华,等.播期和密氮组合对镇麦10号干物质积累及产量的调控效应[J]. *麦类作物学报*, 2015, 35(10): 1426-1432.
- [27] 周羊梅,顾正中,王安邦,等.优质强筋小麦淮麦30的配套栽培技术[J]. *江苏农业科学*, 2015, 43(2): 89-91.
- [28] 葛自强,董明辉,顾俊荣,等.苏南太湖稻区稻茬小麦光温综合生产力[J]. *江苏农业科学*, 2014, 42(10): 68-72.
- [29] 陈爱大,蔡金华,温明星,等.播期和种植密度对镇麦168籽粒产量与品质的调控效应[J]. *江苏农业学报*, 2014, 30(1): 9-13.
- [30] 刘艳阳.不同播期对小麦产量和品质的影响[J]. *安徽农业科学*, 2009, 37(35): 17425-17428.
- [31] 周羊梅,顾正中,王安邦.小麦新品种淮麦22高产栽培技术探讨[J]. *江苏农业科学*, 2009, (4): 104-105.
- [32] 顾正中,周羊梅,王安邦,等.淮麦21号小麦高产栽培技术研究

- [J]. 江苏农业科学, 2008, (4): 47-48.
- [33] 茆文军, 商兆堂, 吴建中, 等. 小麦播期对穗粒结构的影响分析[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(12): 4913-4914, 4979.
- [34] 陈俊才, 汤顺英, 孙敬东, 等. 播期与密度对扬麦 16 号子粒产量和生育期及抗逆性的影响[J]. 作物杂志, 2007, (5): 34-36.
- [35] 陈春, 周凤明, 解小林, 等. 小麦新品种华麦 1 号的高产栽培技术研究[J]. 江苏农业科学, 2006, (6): 54-57+276.
- [36] 薛亚光, 魏亚凤, 李波, 等. 播期和密度对宽幅带播小麦产量及其构成因素的影响[J]. 农学学报, 2016, 6(1): 1-6.
- [37] 姜朋, 杨学明, 张鹏, 等. 播期和密度对小麦生选 6 号产量和品质的影响[J]. 江西农业学报, 2014, 26(7): 5-9.
- [38] 王静静, 王素霞, 李东升, 等. 减氮处理对苏北稻茬麦产量、氮肥利用率及经济效益的影响[J]. 浙江农业科学, 2017, 58(2): 235-238.
- [39] 王慧, 朱冬梅, 陆成彬, 等. 不同小麦品种群体结构和产量形成对迟播的响应[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2019, 40(6): 35-40.
- [40] 周美文, 殷慧, 马亚培, 等. 泰兴市小麦的最佳播期及播量[J]. 农技服务, 2019, 36(10): 16-18.
- [41] 周天津, 周雪晴, 万素馨, 等. Meta 分析方法及其在医疗卫生领域中的应用[J]. 重庆医学, 2016, 45(7): 985-988.
- [42] 赵爱琴, 魏秀菊, 朱明. 基于 Meta-analysis 的中国马铃薯地膜覆盖产量效应分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(24): 1-7.
- [43] Yang M, Fang Y T, Sun D, et al. Efficiency of two nitrification inhibitors (dicyandiamide and 3, 4-dimethylpyrazole phosphate) on soil nitrogen transformations and plant productivity: a meta-analysis[J]. Scientific reports, 2016, 6(1): 1249-1257.
- [44] Lam S K, Chen D L, Norton R, et al. Nitrogen dynamics in grain crop and legume pasture systems under elevated atmospheric carbon dioxide concentration: A meta-analysis[J]. Global change biology, 2012, 18(9): 2853-2859.
- [45] 成兆金, 陈蕾, 徐淑米. 日照地区气候背景下冬小麦适播期分析[J]. 气象与环境学报, 2018, 34(3): 93-98.
- [46] 王贺然. 北京地区冬小麦适应气候变化的播期和品种试验研究[D]. 北京: 首都师范大学, 2013.
- [47] 康俊, 邱新法, 曾燕, 等. 江苏地表湿润状况的变化趋势与区域特征分析[J]. 气象, 2008, 34(9): 89-96.
- [48] Weiss A, Hays C J, Won J. Assessing Winter Wheat Responses to Climate Change Scenarios: A Simulation Study in the U.S. Great Plains[J]. Climatic Change, 2003, 58(1-2): 119-147.
- [49] 石玉华, 初金鹏, 尹立俊, 等. 宽幅播种提高不同播期小麦产量与氮素利用率[J]. 农业工程学报, 2018, 4(17): 127-133.
- [50] 赵玉花. 播期对山东冬小麦产量和抗倒性能的影响[J]. 农业工程技术, 2018, 38(5): 19-20.
- [51] 单维民. 论小麦玉米双晚种植对周年产量和资源利用的影响[J]. 农业与技术, 2016, 36(24): 104.
- [52] 宋方超, 张燕, 赵莉, 等. 气候变暖对沁水县冬小麦适播期的影响[J]. 河北农业科学, 2015, 19(6): 101-105.
- [53] Xiao D P, Moiwu J P, Tao F L, et al. Spatiotemporal variability of winter wheat phenology in response to weather and climate variability in China[J]. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2015, 20(7): 1191-1202.
- [54] 李华英, 代兴龙, 张宇, 等. 播期对冬小麦产量和抗倒性能的影响[J]. 麦类作物学报, 2015, 35(3): 357-363.
- [55] 安霞, 张海军, 蒋方山, 等. 播期播量对不同穗型冬小麦群体及子粒产量的影响[J]. 作物杂志, 2018, (5): 132-136.
- [56] 邵庆勤, 闫素辉, 张从宇, 等. 密度对沿淮晚播小麦产量形成及品质性状的影响[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(9): 1366-1377.
- [57] 谢远玉, 黄淑娥, 田俊, 等. 长江中下游热量资源时空演变特征及其对双季稻种植的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(9): 2950-2958.

(上接第 292 页)

- [21] 张凯莉, 郝庆菊, 冯迪, 等. 地膜覆盖对蔬菜地甲烷排放的影响[J]. 环境科学, 2017, 38(8): 3451-3462.
- [22] 李志国, 张润花, 赖冬梅, 等. 西北干旱区两种不同栽培管理措施下棉田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放通量研究[J]. 土壤学报, 2012, 49(5): 924-934.
- [23] 倪雪, 郝庆菊, 陈世杰, 等. 地膜覆盖和施氮对菜地 N<sub>2</sub>O 排放的影响[J]. 环境科学, 2019, 40(2): 893-903.
- [24] 郭金金, 张富仓, 闫世程, 等. 缓释氮肥与尿素掺混对玉米生理特性和氮素吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(5): 1194-1204.
- [25] 王凯瑜. 垄沟集雨补灌对田间土壤水分及冬小麦生长发育的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- [26] 王杰, 冯浩, 王乃江, 等. 垄作覆膜种植对夏玉米生长和土壤水分动态的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(2): 110-119.
- [27] 张守都, 栗岩峰, 李久生. 滴灌条件下揭膜时间对土壤酶活性及玉米吸氮量的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2019, 37(5): 454-460.
- [28] 周昌明, 李援农, 银敏华, 等. 连垄全覆盖降解膜集雨种植促进玉米根系生长提高产量[J]. 农业工程学报, 2015, 31(7): 109-117.
- [29] 路海东, 薛吉全, 郝引川, 等. 黑色地膜覆盖对旱地玉米土壤环境和植株生长的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(7): 1997-2004.
- [30] 张琴. 不同颜色地膜覆盖对玉米土壤水热状况及产量的影响[J]. 节水灌溉, 2017, (4): 57-61.
- [31] 张冬梅, 池宝亮, 黄学芳, 等. 地膜覆盖导致旱地玉米减产的负面影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(4): 99-102.
- [32] 申丽霞, 兰印超, 李若帆. 不同降解膜覆盖对土壤水热与玉米生长的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(1): 200-206.
- [33] 李长春, 宋莲英. 旱地玉米双垄面集雨全膜覆盖沟播栽培技术模式及效益[J]. 青海农技推广, 2018, (1): 27-28.
- [34] Nishimura S, Komada M, Takebe M, et al. Contribution of nitrous oxide emission from soil covered with plastic mulch film in vegetable field[J]. Journal of Agricultural Meteorology, 2014, 70(2): 117-125.
- [35] 谢军红, 王进斌, 李玲玲, 等. 培肥模式对旱作全膜双垄沟播玉米生长及土壤呼吸的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(1): 79-85.
- [36] Cuello J P, Hwang H Y, Gutierrez J, et al. Impact of plastic film mulching on increasing greenhouse gas emissions in temperate upland soil during maize cultivation[J]. Applied Soil Ecology, 2015, 91: 48-57.
- [37] 罗晓琦, 张阿凤, 陈海心, 等. 覆膜方式和灌溉对夏玉米产量及农田碳排放强度的影响[J]. 环境科学, 2018, 39(11): 5246-5256.