

播期和播深对冬小麦越冬前生长性状的影响

闫锦涛¹ 冯利平¹ 李 扬¹ 陈先冠¹ 余卫东²

(1. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193;

2. 中国气象局河南省农业气象保障与应用技术重点开放实验室, 郑州 450003)

摘要: 为评价播期和播深对冬小麦越冬前生长性状的影响,以农大 211 冬小麦为试验材料,于 2015—2017 年在中国农业大学北京上庄实验站进行了 4 个播期水平(9 月 23 日、10 月 3 日、10 月 13 日和 10 月 23 日)、3 个播深水平(2、4、6 cm)的随机区组大田试验,探究不同栽培措施对越冬前冬小麦各生长指标(单株叶面积、主茎叶龄、分蘖数、地上部干物质量、分蘖节入土深度、地中茎长度和株高)的影响。并于 2016 年和 2018 年开展梯度播种试验,设置不同播期(2016 年 9 月 23 日、10 月 3 日、10 月 13 日和 2018 年 10 月 23 日、11 月 3 日),对分蘖节入土深度进行定量化模拟。结果表明:随着播期推迟,单株叶面积、主茎叶龄、分蘖数和地上部干物质量均显著减少($P < 0.05$),地中茎长度和株高随着播种深度的增加逐渐增加。播期、播深、播期与播深的交互效应均对冬小麦分蘖节入土深度有显著影响,冬小麦分蘖节入土深度与越冬前积温为负相关的线性关系,随着播期推迟分蘖节入土深度逐渐增加,冬小麦分蘖节入土深度和播深呈对数曲线规律。依据梯度播种试验数据进行分蘖节入土深度的模拟,建立了分蘖节入土深度与越冬前有效积温和播种深度的定量关系。研究结果对于评价冬小麦地上地下部性状、制定防冻保苗措施具有重要意义。

关键词: 冬小麦; 播期; 播深; 生长性状; 分蘖节入土深度; 抗寒性

中图分类号: S352 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2022)02-0327-09

OSID:



Effects of Sowing Date and Sowing Depth on Winter Wheat Growth before Overwintering

YAN Jintao¹ FENG Liping¹ LI Yang¹ CHEN Xianguan¹ YU Weidong²

(1. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China

2. Henan Key Laboratory of Agro-meteorological Support and Applied Technique, China Meteorological Administration, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: The climate change will lead to tremendous environmental risk. As a common agrometeorological disaster of winter wheat, the frequency and loss of low temperature and freezing injury are also significantly increased. In order to study the effect of different cultivation measurements on morphological indexes of winter wheat before overwintering, including leaf area per plant, main stem leaf age, tillering number, aboveground biomass, tillering node depth, stem length in the ground and plant height, the randomized block field trials with seven sowing dates (Oct 3, Oct 13, Oct 23 in 2015, and Sep 23, Oct 3, Oct 13, Oct 23 in 2016) and three horizontal seeding depths (2 cm, 4 cm and 6 cm) were carried out during 2015—2017, using ‘Nongda211’ as object at the Shangzhuang Experimental Station of China Agricultural University in Beijing. The gradient deep-sowing experiment with different sowing dates (Sep 23, 2016, Oct 3, 2016, Oct 13, 2016, and Oct 23, 2018, Nov 3, 2018) was further carried out to quantitatively simulate the depth of tillering node. The results of field experiment on sowing date and sowing depth showed that with the delaying sowing date, the leaf area, leaf age of main stem, tiller number of single plant and aboveground biomass of winter wheat were decreased significantly. With the deepening of sowing depth, the depth of tillering node, stem length in the ground and the height of

收稿日期: 2021-10-02 修回日期: 2021-11-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(31371528)、国家重点研发计划项目(2016YFD0300201)和中国气象局河南省农业气象保障与应用技术重点开放实验室开放研究基金项目(AMF201805)

作者简介: 闫锦涛(1994—),女,博士生,主要从事农业模型及气候资源利用研究,E-mail: b20183030266@cau.edu.cn

通信作者: 冯利平(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事农业模型、农业气象及气候变化与资源利用研究,E-mail: fenglp@cau.edu.cn

plant were increased gradually. The sowing date, sowing depth and the interactive effects of sowing date and sowing depth all had significant impact on the tillering node depth of winter wheat. There was a linear relationship between the tillering node depth of winter wheat and the accumulated temperature before overwintering. As the sowing date was delayed, the tillering node depth was gradually increased. And the winter wheat tillering node depth and sowing depth showed a logarithmic curve. The tillering node depth was increased with the increase of depth of sowing. The quantitative relationship between the soil depth of tiller node and the effective accumulated temperature before winter was established with the experiment data of gradient seeding depth at different sowing dates. The results could provide a reference model for further study of freezing damage.

Key words: winter wheat; sowing date; sowing depth; growth characteristics; depth of tillering node; cold resistance

0 引言

冬小麦是我国小麦生产的重要组成部分,冬小麦产量在我国粮食安全和国计民生中占有极其重要的地位。华北平原作为我国粮食生产的重要基地之一,其冬小麦产量占我国的 50% 以上。因此,保障华北平原冬小麦稳产、高产、粮食安全具有重要的生产和民生价值。极端天气事件增加致使华北地区冬小麦冻害的发生规律更加复杂。随着全球气候变暖,尤其是越冬前气温显著升高,导致冬小麦种植界限北移^[1-3];品种特性由冬性向春性过渡^[4-5];部分生育期提前^[6-7],使得冬小麦越冬前旺长,抗寒锻炼不足,在一定程度上增加了冬小麦冻害的风险。极端天气事件增加,农业气象灾害频率和强度明显上升^[8-11],冬小麦常有不同程度的受冻、死苗现象。

冬小麦能否安全越冬不仅与环境有关,还与不同的种植制度和管理方式有关。播期是影响冬小麦生长发育、籽粒产量和品质的主要农艺措施,对冬小麦抗寒性的影响主要体现在生育期和越冬前苗龄上。而播深是影响麦苗长势的关键因素之一,对抗寒性的影响主要体现在地中茎的生长和分蘖节的位置^[12]。冬小麦的越冬存活率主要取决于分蘖节的抗寒性。分蘖节是小麦重要的生物学特性,是植株地下部未伸长的节间、节和腋芽等紧缩在一起的节群,其贮存的养分可以维持小麦越冬期间的正常生命活动,并且小麦分蘖节内的分生组织具有再生性,只要冬小麦分蘖节不受损害,翌年仍可恢复生长^[13]。前人研究认为,分蘖节处的土壤最低温度、温度日振幅是影响冬小麦越冬死亡的主要因素^[14],并以冬小麦分蘖节临界致死温度 LT₅₀(冬作物越冬期间有 50% 的植株受冻死亡时的最低温度)作为冬小麦冻害的指标^[15]。

作物模型的研究和应用在农业生产中起到重要作用,模型对农业气象灾害影响的模拟功能也在逐步提升,在冬小麦抗冻能力研究中往往使用的是固

定的分蘖节入土深度,而随着生产条件的变化分蘖节入土深度是不同的。FOWLER 等^[16]将温度和作物品种的最大 50% 分蘖节致死温度作为影响因素,基于温度和抗霜曲线系数,建立了可以逐日定量计算冬小麦抗冻能力的模型。BERGHORD 等^[17]对该模型进行改进,增加了积雪和越冬前抗寒锻炼时间对每日 LT₅₀变化的影响,建立 FROSTOL 模型,且该模型需要输入分蘖节处温度,但实际中,对分蘖节所处位置的观测有较大难度,需要对冬小麦破坏性取样,通常认为分蘖节位于距地表 2 ~ 3 cm 处。在冬小麦抗冻能力的研究中,慕臣英等^[18]和 ZHENG 等^[19]分别将 3 cm 和 2.5 cm 处土壤温度作为分蘖节处温度。郑大玮^[20]提出分蘖节入土深度随播种深度而加深呈双曲线关系,但该模型只考虑播种深度对分蘖节入土深度的影响,且由于气候变化和品种的更替,该模型在应用方面具有一定的局限性。分蘖节入土深度在不同环境、不同栽培方式下都有所差异,但在目前研究中,分蘖节入土深度常采用固定值,在作物模型中也缺乏对分蘖节入土深度的模拟。

本文开展不同播期和播深冬小麦田间试验,明确不同栽培措施下越冬前冬小麦生长的变化规律,重点对分蘖节入土深度进行量化模拟,以确保分蘖节在适宜的位置,保证其处于良好的生长状态。为全面评价冬小麦地上地下部性状、制定防冻保苗措施提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验区域与材料

试验在中国农业大学北京上庄实验站进行,位于北京市海淀区上庄镇辛力屯村东(40.1°N, 116.2°E,海拔 50.2 m)。全年大于等于 0℃ 积温 3 050℃·d,平均日照时数 2 600 h,多年平均降水量 650 mm,无霜期 185 d 左右。地貌类型属于华北山前冲积平原,土壤质地为粉砂质潮土。供试材料为农大 211(ND)冬小麦。

1.2 试验方法

1.2.1 试验设计

试验Ⅰ：不同播期、播深二因素完全随机区组试验,于2015—2016年、2016—2017年进行,试验材料选取农大211,播期处理设4个水平,分别为9月23日、10月3日、10月13日和10月23日(其中2015年试验无9月23日播期设置)。每个播期设3个播深水平,分别为2、4、6 cm。2015年试验共计9个处理,2016年试验共计12个处理,每个处理设置3个重复。行间距20 cm,小区间隔0.5 m,四周有保护行0.5 m。小区面积2 m²(2 m×1 m),南北向种植。

试验Ⅱ：不同播期、播深梯度二因素试验,于2016—2017年进行,试验材料选取农大211,播种期设3个水平,分别为9月23日、10月3日和10月13日,播深采用深度梯度方法^[19],开一条长度为1.5 m的沟,播种深度最浅为0 cm(地表),最深为15 cm,播种时沿斜坡放置种子,播量每个处理约80粒,最后将土覆盖至与地面持平。另外,于2018—2019年进行了2个播种期(10月23日、11月3日)补充试验。每个处理设置3个重复。

试验管理同当地常规高产大田水平。0~20 cm土壤水分保持为土壤田间持水率的65%以上(土壤水势在-40 kPa以上)。试验设计及播种期至越冬期的气象条件如表1所示。

表1 冬小麦播种至越冬前气象条件

Tab.1 Weather conditions during period of sowing date to day before overwintering

年份	播期日期	越冬前平均 气温/℃	越冬前积温/ (℃·d)	越冬期 起始日
2015	10月3日	10.8	550.4	11月22日
	10月13日	9.2	376.6	
	10月23日	7.3	226.8	
2016	9月23日	11.3	688.9	11月22日
	10月3日	9.7	495.6	
	10月13日	8.5	346.5	
	10月23日	6.4	199.3	
2018	10月23日	6.5	279.0	12月5日
	11月3日	5.1	162.7	

1.2.2 试验指标测定

在越冬期(12月1日)取样,在试验Ⅰ每个处理选取3株长势一致的冬小麦,对试验Ⅱ所有小麦植株全部破坏性取样。测定冬小麦主茎的叶数即主茎叶龄;主茎和各一二级分蘖数的总和即分蘖数;测量分蘖节到植株叶片伸展最高处的长度,记为株高;测量种子到分蘖节之间的长度,记为地中茎长度;测量分蘖节中心位置到植株中部绿白交接中心位置的长

度,记为分蘖节入土深度;采用长宽法测定单株叶面积,校正系数取0.83;将小麦地上部植株于105℃杀青30 min,80℃干燥至质量恒定后,称单株地上部干物质量^[21]。

1.3 数据计算与分析

1.3.1 越冬前积温、播种深度与冬小麦生长指标

GDD(Growing degree-days)是指在实际环境条件下,完成某一生育阶段所经历的累积有效积温,代表着作物生长期累积的热量。不同播期采用冬小麦播种期至越冬期的积温表示,计算公式为

$$T_{GDD} = \sum_{i=1}^j (T_{AVEi} - T_0)$$

(1)

式中 T_{GDD} ——越冬前积温,℃·d
 T_{AVEi} ——播种后第*i*天的日平均气温,℃
 T_0 ——小麦生物学下限温度,取0℃^[22]
 j ——播种到越冬期开始的时间,d

采用2015—2017年的播期、播深试验数据(试验Ⅰ),分别建立冬小麦单株叶面积(Y_{LA})、主茎叶龄(Y_{MSL})、分蘖数(Y_{TN})、地上部干物质量(Y_{AB})和分蘖节入土深度(Y_{TD})与越冬前积温(T_{GDD})的定量关系。采用2016—2017年和2018—2019年不同播期下冬小麦梯度播种试验数据(试验Ⅱ),建立分蘖节入土深度(Y_{TD})与播种深度(X_{sd})的定量关系。

分蘖节入土深度综合模拟方程的建立采用2016—2017年不同播期下冬小麦梯度播种试验数据(试验Ⅱ),验证采用2018—2019年不同播期下冬小麦梯度播种试验数据(试验Ⅱ)。

1.3.2 统计指标

通过1:1线图直观地表达模拟值与实测值的吻合程度,并使用统计指标作为检验指标检验模拟模型的准确度,主要包括模拟值与实测值的均方根误差(Root mean square error, RMSE)、归一化均方根误差(Normalized root mean squared error, NRMSE)和决定系数(Coefficient of determination, R^2)。

采用Excel 2016制图,R语言进行方差分析,Tukey法进行显著性检验。

2 结果与分析

2.1 播期和播深对冬小麦越冬前生长性状的影响

播期和播深耦合试验结果表明不同播期和播深处理下冬小麦单株叶面积、主茎叶龄、分蘖数和地上部干物质量存在较大差异(表2)。随着播期推迟,冬小麦越冬前单株叶面积、主茎叶龄、分蘖数和地上部干物质量均显著减少($P<0.05$),与9月23日播种相比,10月23日播种的主茎叶龄、分蘖数、单株叶面积和地上部干物质量分别减少80.6%、100%、

表 2 不同播期、播深对冬小麦越冬前生长性状的影响

Tab.2 Comparison of growth of winter wheat before overwintering period under different sowing dates and sowing depth treatments					
	处理	主茎叶龄/片	分蘖数/个	单株叶面积/cm ²	地上部干物质量/(g·株 ⁻¹)
播期	9 月 23 日	(6.7 ± 0.1) ^a	(7.7 ± 0.3) ^a	(52.3 ± 1.0) ^a	(0.40 ± 0.07) ^a
	10 月 3 日	(4.5 ± 0.1) ^b	(3.1 ± 0.2) ^b	(23.7 ± 1.9) ^b	(0.15 ± 0.04) ^b
	10 月 13 日	(3.0 ± 0.0) ^c	(0.7 ± 0.1) ^c	(10.6 ± 0.5) ^c	(0.05 ± 0.02) ^c
	10 月 23 日	(1.3 ± 0.1) ^d	(0.0 ± 0.0) ^d	(3.4 ± 0.1) ^d	(0.01 ± 0.01) ^d
播深	2 cm	(3.6 ± 0.4) ^a	(2.7 ± 0.6) ^a	(20.5 ± 3.9) ^a	(0.14 ± 0.34) ^a
	4 cm	(3.4 ± 0.4) ^a	(1.9 ± 0.6) ^a	(19.1 ± 3.6) ^a	(0.11 ± 0.26) ^a
	6 cm	(3.3 ± 0.4) ^a	(1.9 ± 0.5) ^a	(15.2 ± 3.4) ^a	(0.10 ± 0.27) ^a

注:同列数字后不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$),下同。

93.5% 和 97.5%。随着播深的加深,主茎叶龄、越冬前分蘖数、单株叶面积和地上部干物质量均有减少的趋势,与播深为 2 cm 相比,播深为 6 cm 分别减少 8.3%、30.0%、25.8% 和 28.6%,但未达到显著水平($P > 0.05$)。

播深对冬小麦越冬前生长试验结果表明,播深的加深导致地中茎长度和株高显著增加($P < 0.05$)

(图 1,图中不同小写字母表示处理在 0.05 水平差异显著)。播种深度加深,地中茎长度增加,播深为 6 cm 时,各播期的平均地中茎长度为 2.7 cm;播种深度为 2、4、6 cm 时,株高分别为 11.7、13.5、15.8 cm。地中茎的增加会抬升分蘖节,播种深度与地中茎长度的差即为分蘖节入土深度,因此使分蘖节入土深度增加,有利于冬小麦纵向生长。

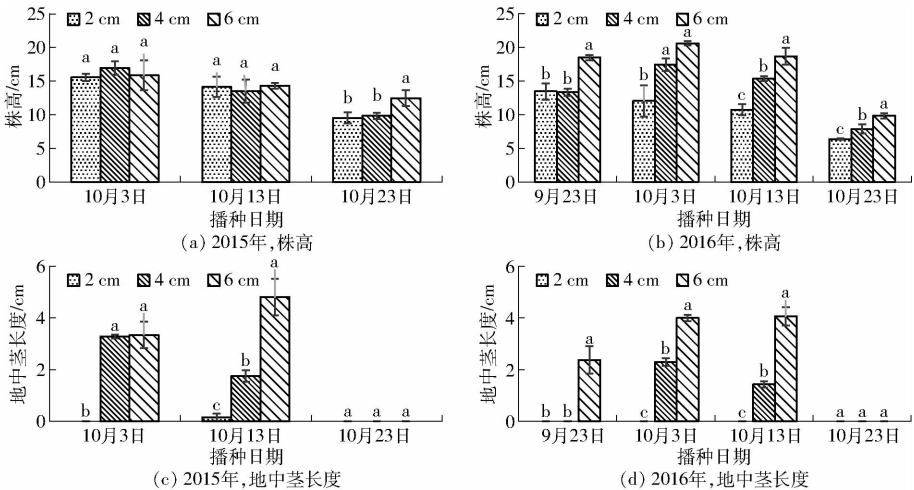


图 1 不同播期、播深对冬小麦越冬前株高和地中茎长度的影响

Fig.1 Influence of plant height and ground stem length before overwintering period for different sowing dates and sowing depths of winter wheat

播期耦合播深方差分析结果表明,播期、播深、播期与播深的交互效应均对冬小麦分蘖节入土深度有显著影响($P < 0.05$,表 3)。播期对分蘖节入土深度的影响表现为随着播期推迟分蘖节入土深度逐渐增加,9 月 23 日的分蘖节入土深度最浅,仅为 0.9 cm,10 月 3 日和 10 月 13 日的分蘖节入土深度居中,分别为 1.3 ~ 1.6 cm 和 1.7 ~ 2.1 cm,10 月 23 日的分蘖节入土深度明显加深,为 2.2 ~ 3.2 cm。播深对分蘖节入土深度的影响表现为随着播深的加深分蘖节入土深度逐渐增加,浅播时分蘖节入土深度最浅,仅为 1.0 ~ 1.6 cm,正常播深时分蘖节入土深度居中,为 1.7 ~ 2.1 cm,深播时分蘖节入土深度明显加深,为 2.4 ~ 3.0 cm。

表 3 播期、播深对冬小麦分蘖节入土深度的影响
Tab.3 Influence of tillering depth before overwintering period for different sowing dates and sowing depths of winter wheat

		cm	
处理		2015—2016 年	2016—2017 年
播期	9 月 23 日		(0.9 ± 0.2) ^a
	10 月 3 日	(1.6 ± 0.3) ^a	(1.3 ± 0.1) ^b
	10 月 13 日	(2.1 ± 0.4) ^b	(1.7 ± 0.1) ^c
	10 月 23 日	(3.2 ± 0.3) ^c	(2.2 ± 0.2) ^d
播深	2 cm	(1.6 ± 0.2) ^a	(1.0 ± 0.2) ^a
	4 cm	(2.1 ± 0.3) ^b	(1.7 ± 0.1) ^b
	6 cm	(3.0 ± 0.3) ^c	(2.4 ± 0.1) ^c
F	播期	41.1 *	39.8 *
	播深	28.3 *	34.9 *
	播期 × 播深	11.8 *	7.5 *

注: * 表示在 0.05 水平差异显著。

2.2 越冬前积温、播深与冬小麦生长的关系

基于 2015—2017 年的播期、播深试验数据，分别建立冬小麦单株叶面积 (Y_{LA})、主茎叶龄 (Y_{MSL})、分蘖数 (Y_{TN})、地上部干物质量 (Y_{AB}) 和分蘖节入土深度 (Y_{TD}) 与越冬前积温 (T_{CDD}) 的定量关系。单株叶面积和地上部干物质量随 T_{CDD} 的增加而增加，且增速逐渐加快，符合指数模型，故对其用指数曲线进行模拟，决定系数 R^2 在 0.94 ~

0.95 之间，达到显著水平，表明冬小麦越冬前的单株叶面积和地上部干物质量能很好地满足所给出的方程，拟合效果极显著。主茎叶龄和分蘖数与 T_{CDD} 呈显著的线性变化规律，主茎叶龄和分蘖数随着 T_{CDD} 的增加而增加，即播种期越早，主茎叶龄和分蘖数越大， R^2 分别为 0.97 和 0.85，表明冬小麦越冬前的主茎叶龄和分蘖数能很好地满足所给出的方程，拟合效果极显著 (图 2)。

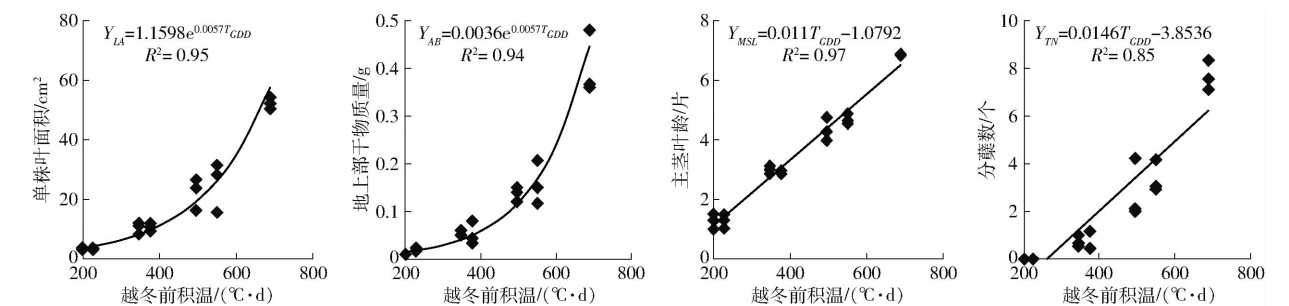


图 2 冬小麦越冬前生长性状与越冬前积温的关系

Fig. 2 Relationships between depth of growth of winter wheat and T_{CDD}

播种期对冬小麦分蘖节入土深度有显著的影响，基于 2015—2017 年的播期、播深试验数据，建立了冬小麦分蘖节入土深度 (Y_{TD}) 与越冬前积温 (T_{CDD}) 的定量关系，播深为 2、4、6 cm 时冬小麦分蘖

节入土深度与 T_{CDD} 的关系如图 3 所示。结果表明，分蘖节入土深度与越冬前积温为显著的线性变化规律，冬小麦分蘖节入土深度随着越冬前积温的增加而减少，即播种期越迟，分蘖节入土深度越大。

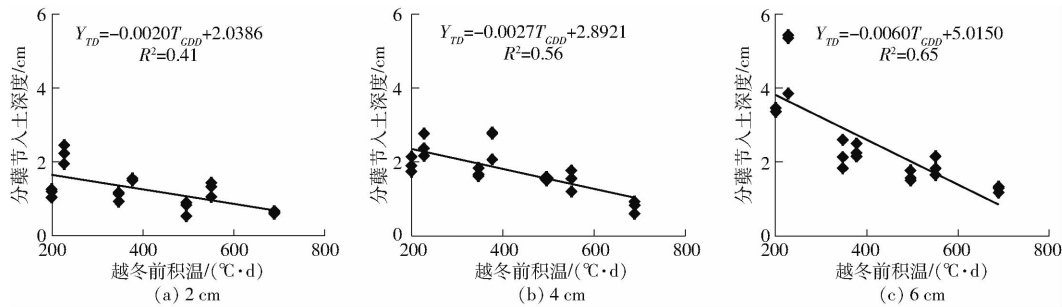


图 3 冬小麦分蘖节入土深度与越冬前积温的关系

Fig. 3 Relationships between depth of tillering node of winter wheat and T_{CDD}

对不同播期下冬小麦梯度播种试验的分蘖节入土深度的实测值进行分析 (试验 II)，表明不同播期下冬小麦分蘖节入土深度随播深的变化均满足对数曲线规律，播种期为 2016 年 9 月 23 日、10 月 3 日、10 月 13 日和 2018 年 10 月 23 日拟合方程 R^2 分别为 0.97、0.97、0.98 和 0.98，拟合效果显著 (图 4)。由此可得分蘖节入土深度方程为

$$Y_{TD} = a \ln(X_{SD} + 1) \quad (0 \text{ cm} \leq X_{SD} \leq 10 \text{ cm}) \quad (2)$$

式中 a ——系数

2.3 越冬前积温与播种深度对分蘖节入土深度影响的综合方程建立与验证

越冬前积温和播深对冬小麦分蘖节入土深度的影响显著，越冬前积温与冬小麦分蘖节入土深度为负相关的线性关系，播深与冬小麦分蘖节入土深度为对数曲线关系。结合上述已构建的冬小麦分蘖节

入土深度方程 (图 3，式 (2))，采用 2016 年不同播期下，冬小麦的分蘖节入土深度实测数据 (试验 II)，建立分蘖节入土深度综合方程为

$$Y_{TD} = (-0.0009T_{CDD} + 1.7332) \ln(X_{SD} + 1) \quad (0 \text{ cm} \leq X_{SD} \leq 10 \text{ cm}) \quad (3)$$

采用播种期为 2018 年 10 月 23 日的分蘖节入土深度 (试验 II，2018 年 11 月 3 日播种的冬小麦越冬前未出苗) 对建立的方程进行验证，验证结果如图 5 所示，大部分数据分布在 1:1 线附近，且偏离度较小，表明模拟分蘖节入土深度较好。分蘖节入土深度在 0 ~ 2 cm 时，数据点集中在 1:1 线附近；在 2 ~ 4 cm 时，数据点与 1:1 线的偏离程度变大，且在可接受范围之内。不同播深处理下的 NRMSE 小于 20%，表明该公式模拟结果较好。以上分析表明分蘖节入土深度模拟公式在不同冬小麦播深下的模

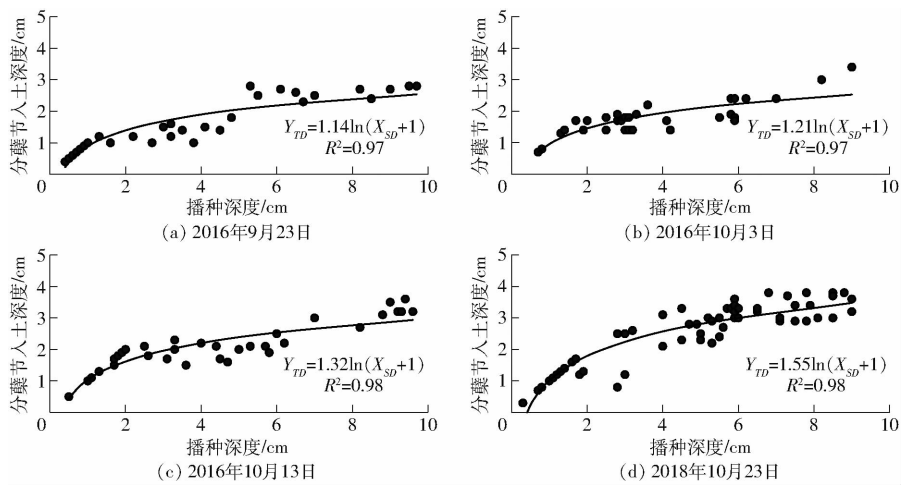


图4 冬小麦分蘖节入土深度与播种深度的关系

Fig.4 Relationships between depth of tillering node of winter wheat and sowing depth under different sowing dates and varieties

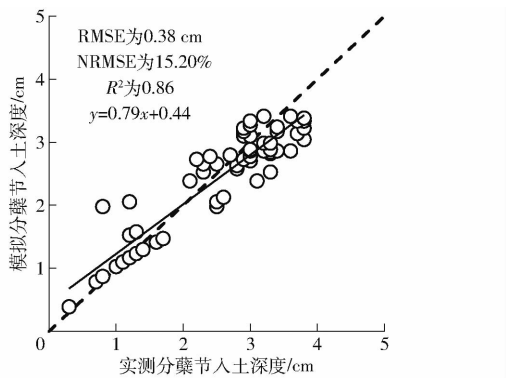


图5 冬小麦分蘖节入土深度方程验证

Fig.5 Validation of depth of tillering node under different sowing depths

拟效果较好(图5)。

公式可以满足在地表撒播即播种深度 $X_{sd}=0\text{ cm}$ 时,分蘖节入土深度 $Y_{td}=0\text{ cm}$,即分蘖节也处于地表位置;在播种深度较小时($0\text{ cm}\leq X_{sd}\leq 2\text{ cm}$),分蘖节入土深度随播种深度的变化可以近似为线性变化,即分蘖节入土深度与播深相等,在此条件下冬小麦没有地中茎;在播种深度逐渐增加的过程中,分蘖节入土深度也逐渐增加,但增速逐渐放缓,这与实际生长发育过程中随播种深度增加的地中茎补偿效应相吻合。并且随着 T_{cdd} 的增加,分蘖节入土深度也逐渐减少。因此该公式具有生物学意义,可以用于分蘖节入土深度随播深、播期变化的模拟。

3 讨论

本文基于不同播期、播深冬小麦生长发育大田试验,分析播期、播深对冬小麦越冬前生长指标的影响及其变化规律,进而对越冬前冬小麦的单株叶面积、主茎叶龄、分蘖数、地上部干物质质量、分蘖节入土

深度进行量化研究。

播期是影响冬小麦发育进程的关键因素。小麦早播时,提前结束春化阶段,进入拔节期后抗寒性迅速降低,若此时遇到恶劣低温寒潮,会导致大分蘖和主茎冻死,冬小麦晚播时,由于越冬前积温不足,出苗推迟且缓慢,苗小且弱,越冬前叶面积偏小,地面覆盖不充分,地温变化剧烈时易受冻害,且光合产物和贮存的可溶性糖少,抗寒性也较差,同样易受冻害。而适期播种的冬小麦可以充分利用越冬前有效积温积累营养物质,抗冻能力最强,利于培育壮苗、麦苗安全越冬以及返青后稳健生长^[23]。SHAH等^[24]的研究表明,单株分蘖数随着播期的延迟而下降。徐晖等^[25]的研究结果表明,随播期推迟,越冬前积温降低,显著影响小麦越冬前生育进程,植株叶龄减小,分蘖发生数下降,叶面积指数和累积干物质质量降低。本研究与前人研究结果一致,随着播期推迟,小麦单株叶面积、主茎叶龄、分蘖数和地上部干物质质量均显著减少。播期推迟,在播种至越冬阶段面临平均气温低和越冬前积温减少等不利天气因素(表1),越冬前积温由 $688.9^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 减少到 $199.3^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 。这些不利因素通过抑制种子出苗、幼苗生长和分蘖发育对冬小麦早期生长产生负面影响^[26-27]。

播种深度是影响幼苗形态建成及后期生长发育的关键因素^[28-29]。播种过深会使得冬小麦地中茎伸长过长,延长小麦的出苗期,降低小麦的出苗率,并在出苗过程中大量消耗种子内的能量,不利于冬小麦出苗后的生长和抗寒性的形成;而播种过浅会造成分蘖节入土深度较浅,使得分蘖节处的土壤温度过低且变化幅度加大,极易受到冬季寒潮降温和春季冻融交替的影响,对冬小麦安全越冬产生不利影响^[30]。前人的试验和研究表明冬小麦的适宜播

深在 3 ~ 5 cm^[31],播深主要通过改变分蘖节的位置,从而影响冬小麦的抗寒性,这也是影响麦苗素质的关键因素之一。郑亭等^[32]研究得出,浅播(播深 2 cm)下小麦植株根系活力、干物质量、叶面积及叶绿素含量大大降低。易峰等^[33]的研究表明,随着播种深度的增加,小麦株高逐渐增高,叶龄和单株分蘖数大体上呈先增后减的趋势。本研究表明,随着播深的加深,单株叶面积、主茎叶龄和越冬前分蘖数均有减少的趋势,分蘖节入土深度、地中茎长度、株高均显著增加。

在冬小麦越冬前生长发育的诸多因素中,温度是主导因素。本研究表明,越冬前冬小麦的单株叶面积、地上部干物质量与 T_{cdd} 为显著的指数变化规律,主茎叶龄和分蘖数与 T_{cdd} 呈线性关系,随着 T_{cdd} 的增加而增加。前人研究指出,冬小麦越冬前叶龄在 4 ~ 6 片时属于壮苗,抗寒能力最强^[34-35],选取主茎叶龄代表冬小麦越冬前的生长状态,由叶龄与 T_{cdd} 的回归方程计算可得,越冬前积温在 461.69 ~ 643.51℃·d 之间,冬小麦在越冬前可达到壮苗标准。利用逐日平均气温数据,计算越冬前积温,确定适宜播种日期的范围,有利于冬小麦的安全越冬。

冬小麦分蘖节入土深度是分蘖节抗寒性的重要指标之一,分蘖节入土深度与冬小麦越冬死亡率有很强的负相关关系,因此分蘖节处于合适位置对于冬小麦安全越冬具有重要意义。而分蘖节入土深度主要与播深、播期和品种特性有关^[20],本研究表明,播期、播深和播期与播深的交互作用对冬小麦分蘖节入土深度有显著影响,随着播期推迟和播深的加深,分蘖节入土深度逐渐增大,分蘖节入土深度与播

深呈对数曲线规律。冬小麦分蘖节入土深度与越冬前积温为负相关的线性关系,这是由于在不同播期下,冬小麦出苗的温度有所差异,播期越早,地中茎由于温度升高迅速伸长易将分蘖节抬升,分蘖节入土较浅。为了确定分蘖节所处位置,量化冬小麦分蘖节入土深度,本研究基于冬小麦在不同播期、播深条件下的分蘖节入土深度试验测量值,建立分蘖节入土深度模拟公式。前人对不同基因型小麦的形态指标分析发现,随着品种抗寒力增强,分蘖节入土深度增加^[36],而本研究所选取的品种为我国华北北部和西北冬麦区的适宜品种,没有综合考虑各生态区品种的分蘖节入土深度变化。

4 结论

(1)播期对冬小麦抗寒力的影响主要体现在越冬前苗情上,随着播期的推迟,小麦单株叶面积、主茎叶龄、分蘖数和地上部干物质量均显著减少。播深对冬小麦抗寒力的影响主要因为地中茎增加对分蘖节的抬升作用导致分蘖节入土深度的变化。

(2)越冬前冬小麦的单株叶面积和地上部干物质量与 T_{cdd} 为显著的指数函数关系,主茎叶龄和分蘖数与 T_{cdd} 呈线性关系,均随着 T_{cdd} 的增加而增加。根据主茎叶龄模拟方程,得出越冬前积温在 461.69 ~ 643.51℃·d 之间,冬小麦的抗寒性较好。

(3)冬小麦的安全越冬主要取决于分蘖节处的环境状况,播期、播深和播期与播深的交互作用对冬小麦分蘖节入土深度有显著影响,对冬小麦抗寒性的关键指标进行定量化研究,建立了分蘖节入土深度与播期和播深的定量关系,可以估算到一定播期、播深下分蘖节的实际入土深度。

参 考 文 献

- [1] 唐晓培,宋妮,陈智芳,等. 黄淮海地区冬小麦种植北界时空演变及未来趋势分析[J]. 农业工程学报,2019,35(9):129-137. TANG Xiaopei, SONG Ni, CHEN Zhifang, et al. Spatial-temporal distribution and change trend of northern limit of winter wheat planting in Huang-Huai-Hai Plain[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(9): 129-137. (in Chinese)
- [2] 张悦,胡琦,和骅芸,等. 气候变化背景下华北平原冬小麦冬前生育期与节气对应及偏移分析[J]. 中国农业气象,2019,40(7):411-421. ZHANG Yue, HU Qi, HE Huayun, et al. Correspondence and shifting analysis for the winter wheat growing period before winter and solar terms in the North China Plain under climate change background[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2019, 40(7): 411-421. (in Chinese)
- [3] 杨晓光,刘志娟,陈阜. 全球气候变暖对中国种植制度可能影响:VI. 未来气候变化对中国种植制度北界的可能影响[J]. 中国农业科学,2011,44(8):1562-1570. YANG Xiaoguang, LIU Zhijuan, CHEN Fu. The possible effects of global warming on cropping systems in China VI. Possible effects of future climate change on northern limits of cropping system in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(8): 1562-1570. (in Chinese)
- [4] 邓振镛,张强,宁惠芳,等. 西北地区气候暖干化对作物气候生态适应性的影响[J]. 中国沙漠,2010,30(3):633-639. DENG Zhenyong, ZHANG Qiang, NING Hui Fang, et al. Influence of climate warming and drying on crop eco-climate adaptability in Northwestern China[J]. Journal of Desert Research, 2010, 30(3): 633-639. (in Chinese)
- [5] MARTIN M M, OLESEN J E, PORTER J R. A genotype, environment and management (GxExM) analysis of adaptation in winter wheat to climate change in Denmark[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2014, 187(2): 1-13.

- [6] 李克南,杨晓光,慕臣英,等. 全球气候变暖对中国种植制度可能影响Ⅷ——气候变化对中国冬小麦冬春性品种种植界限的影响[J]. 中国农业科学,2013,46(8):1583-1594.
LI Ke'nan, YANG Xiaoguang, MU Chenying, et al. The possible effects of global warming on cropping systems in China Ⅷ—The effects of climate change on planting boundaries of different winter spring varieties of winter wheat in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(8): 1583-1594. (in Chinese)
- [7] 余卫东,赵国强,陈怀亮,等. 气候变化对河南省主要农作物生育期的影响[J]. 中国农业气象,2007,28(1):9-12.
YU Weidong, ZHAO Guoqiang, CHEN Huailiang, et al. Impacts of climate change on growing stages of main crops in Henan Province[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2007, 28(1): 9-12. (in Chinese)
- [8] 王玉宝,柴成亮,张鹏,等. 气候变化条件下旱作玉米用水效率与单产变化趋势分析[J]. 农业机械学报,2018,49(8):210-218.
WANG Yubao, CHAI Chengliang, ZHANG Peng, et al. Trend analysis of water use efficiency and yield of dryland maize under climate change[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 210-218. (in Chinese)
- [9] 孟繁圆,冯利平,张丰瑶,等. 北部冬麦区冬小麦越冬冻害时空变化特征[J]. 作物学报,2019,45(10):1576-1585.
MENG Fanyuan, FENG Liping, ZHANG Fengyao, et al. Temporal and spatial variations of winter wheat freezing injury in northern winter wheat region[J]. Acta Agronomica Sinica, 2019, 45(10): 1576-1585. (in Chinese)
- [10] LOBELL D B, SCHLENKER W, COSTA R J. Climate trends and global crop production since 1980[J]. Science, 2011, 333(6042): 616-620.
- [11] ZHENG B, CHENU K, DRECCER M F, et al. Breeding for the future: what are the potential impacts of future frost and heat events on sowing and flowering time requirements for Australian bread wheat (*Triticum aestivum*) varieties? [J]. Global Change Biology, 2012, 18(9):2899-2914.
- [12] 于晶,张林,苍晶,等. 冬小麦抗寒性的研究进展[J]. 东北农业大学学报,2008,39(11):123-127.
YU Jing, ZHANG Lin, CANG Jing, et al. Research progress of cold resistance in winter wheat[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2008, 39(11): 123-127. (in Chinese)
- [13] FOWLER D B, ROCHE I A D L. Wheat quality evaluation. 3. Influence of genotype and environment[J]. Canadian Journal of Plant Science, 1975, 55(1): 263-269.
- [14] 简令成,张宝田. 小麦越冬期间死苗原因分析[J]. 植物学杂志,1974(4):28-29.
- [15] MAHFOOZI S, LIMIN A E, AHAKPAZ F, et al. Phenological development and expression of freezing resistance in spring and winter wheat under field conditions in north-west Iran[J]. Field Crops Research, 2006, 97(2-3): 182-187.
- [16] FOWLER D B, LIMIN A E, RITCHIE J T. Low-temperature tolerance in cereals: model and genetic interpretation[J]. Crop Science, 1999, 39(3): 627-633.
- [17] BERGJORD A K, BONESMO H, SKJELVAG A O. Modelling the course of frost tolerance in winter wheat: I. Model development[J]. European Journal of Agronomy, 2008, 28(3): 321-330.
- [18] 慕臣英,杨晓光,杨婕,等. 黄淮海地区不同冬春性小麦抗冻能力及冻害指标 I. 隆冬期不同冬春性小麦抗冻能力比较[J]. 应用生态学报,2015,26(10):3119-3125.
MU Chenying, YANG Xiaoguang, YANG Jie, et al. Freezing resistance and injury indices for different cultivars of winter-spring wheat in Huang-Huai-Hai Plain I. Comparison of freezing resistance for different cultivars of winter-spring wheat during mid-winter period[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(10): 3119-3125. (in Chinese)
- [19] ZHENG D X, YANG X G, MINGUEZ M I, et al. Effect of freezing temperature and duration on winter survival and grain yield of winter wheat[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 260-261(5): 1-8.
- [20] 郑大玮. 冬小麦冻害及其防御[M]. 北京:气象出版社,1985:116-118.
- [21] 赵玉田,梁博文. 冬小麦抗冻性鉴定的方法指标及筛选[J]. 中国农业科学,1987,20(6):74-80.
- [22] 姜会飞. 农业气象学[M]. 北京:科学出版社,2013:79.
- [23] 陈先冠,冯利平,马雪晴,等. 不同播期和灌水条件下冬小麦生物量变化与产量模拟[J]. 农业机械学报,2021,52(10):349-357.
CHEN Xianguan, FENG Liping, MA Xueqing, et al. Biomass change and yield simulation of winter wheat under different sowing dates and irrigation conditions[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10): 349-357. (in Chinese)
- [24] SHAH F, COULTER J A, YE C, et al. Yield penalty due to delayed sowing of winter wheat and the mitigatory role of increased seeding rate[J]. European Journal of Agronomy, 2020, 119(5):126120.
- [25] 徐晖,崔怀洋,张伟,等. 播期对小麦冬前幼苗生长和积温的调控效应[J]. 中国农学通报,2015,31(3):99-105.
XU Hui, CUI Huaiyang, ZHANG Wei, et al. Effects of sowing date on seedling growth characteristics and accumulated temperature before wintering stage of wheat[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(3): 99-105. (in Chinese)
- [26] SUN H Y, ZHANG X Y, CHEN S Y, et al. Effects of harvest and sowing time on the performance of the rotation of winter wheat-summer maize in the North China Plain[J]. Industrial Crops & Products, 2007, 25(3):239-247.
- [27] SHAH T, LATIF S, KHAN H, et al. Ascorbic acid priming enhances seed germination and seedling growth of winter wheat under low temperature due to late sowing in Pakistan[J]. Agronomy, 2019, 9(11):757.
- [28] 曹慧英,王丁波,史建国,等. 播种深度对夏玉米幼苗性状和根系特性的影响[J]. 应用生态学报,2015,26(8):2397-2404.

CAO Huiying, WANG Dingbo, SHI Jianguo, et al. Effects of sowing depth on seedling traits and root characteristics of summer maize[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(8): 2397–2404. (in Chinese)

[29] 甄晓宇,杨坚群,栗鑫鑫,等. 播种深度对花生生育进程和叶片衰老的影响及其生理机制[J]. 作物学报, 2019,45(9): 1386–1397.

ZHEN Xiaoyu, YANG Jianqun, LI Xinxin, et al. Effects and physiological mechanisms of sowing depth on the growth progress and leaf senescence of peanut[J]. Acta Agronomica Sinica, 2019, 45(9): 1386–1397. (in Chinese)

[30] 张洪程,霍中洋,戴其根,等. 稻田套播小麦分蘖节入土状况对生长发育与产量的若干影响[J]. 江苏农业研究,1999, 20(3):8–11.

ZHANG Hongcheng, HUO Zhongyang, DAI Qigen, et al. Effect of tiller nodes location on the growth and yield of interplant wheat in paddy[J]. Jiangsu Agricultural Research, 1999, 20(3): 8–11. (in Chinese)

[31] KIRBY E J M. Effect of sowing depth on seedling emergence, growth and development in barley and wheat[J]. Field Crops Research, 1993, 35(2):101–111.

[32] 郑亭,樊高琼,王秀芳,等. 耕作方式、播深及覆土对机播套作小麦麦苗素质的影响[J]. 农业工程学报,2011,27(5): 164–168.

ZHENG Ting, FAN Gaoqiong, WANG Xiufang, et al. Effect of tillage management, sowing depth and soil-covering on the seedlings quality of mechanical sowing wheat under intercropping condition[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(5): 164–168. (in Chinese)

[33] 易峰,钱双,许泽华,等. 不同播种深度对小麦生长及其产量的影响研究[J]. 上海农业科技,2019(3):55–57.

[34] 郝照,赵雪晨,曾淑军,等. 冬小麦麦苗不同叶龄的耐寒力[J]. 植物学报, 1985, 3(5):38–40.

[35] 李巧云,年力,刘万代,等. 冬前积温对河南省小麦冬前生长发育的影响[J]. 中国农业气象, 2010, 31(4):563–569.

LI Qiaoyun, NIAN Li, LIU Wandai, et al. Effects of accumulated temperature before winter on growth and development of wheat in Henan Province[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2010, 31(4):563–569. (in Chinese)

[36] KIR Y M V, YAKUBTSIINER M M. Depth of the tillering node and plant survival during overwintering in different wheat species[J]. Selskokhozyaistvennaya Biologiya, 1980, 15(3): 463–464.

(上接第 255 页)

[25] 孟庆宽,张漫,杨晓霞,等. 基于轻量卷积结合特征信息融合的玉米幼苗与杂草识别[J]. 农业机械学报, 2020, 51(12): 238–245, 303.

MENG Qingkuan, ZHANG Man, YANG Xiaoxia, et al. Recognition of maize seedling and weed based on light weight convolution and feature fusion[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 238–245, 303. (in Chinese)

[26] SHARPE S M, SCHUMANN A W, BOYD N S. Goosegrass detection in strawberry and tomato using a convolutional neural network[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 1–8.

[27] GAO J, FRENCH A P, POUND M P, et al. Deep convolutional neural networks for image-based convolvulus sepium detection in sugar beet fields[J]. Plant Methods, 2020, 16(1): 1–12.

[28] 郭敬东,陈彬,王仁书,等. 基于 YOLO 的无人机电力线路杆塔巡检图像实时检测[J]. 中国电力, 2019, 52(7): 17–23.

GUO Jingdong, CHEN Bin, WANG Renshu, et al. YOLO-based real-time detection of power line poles from unmanned aerial vehicle inspection vision[J]. Electric Power, 2019, 52(7): 17–23. (in Chinese)

[29] 郝琨,王阔,赵璐,等. 基于图像增强与改进 YOLOv3 的水下生物检测算法[J/OL]. 吉林大学学报(工学版), 2021–04–27.

HAO Kun, WANG Kuo, ZHAO Lu, et al. Underwater biological detection algorithm based on image enhancement and improved YOLOv3[J/OL]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2021–04–27. <https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb20200970>. (in Chinese)

[30] ZUIDERVELD K. Contrast limited adaptive histogram equalization[M]//Graphics Gems. Academic Press, 1994: 474–485.

[31] JOBSON D, RAHMAN Z. A multiscale retinex for bridging the gap between color images and the human observation of scenes [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(7): 965–976.

[32] WANG C Y, BOCHKOVSKIY A, LIAO H. Scaled–YOLOv4: scaling cross stage partial network[C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2021: 13029–13038.

[33] 杨英彬. 基于改进 YOLOv4 的车辆检测及统计研究[D]. 武汉:江汉大学, 2021.

YANG Yingbin. Research on vehicle detection and statistics based on improved YOLOv4[D]. Wuhan: Jiangnan University, 2021. (in Chinese)

[34] LIU Z, LI J G, SHEN Z Q, et al. Learning efficient convolutional networks through network slimming[J]. arXiv: 1708. 06519,2017.