

华北平原冬小麦对过去30年气候变化响应的 敏感性研究*

肖登攀^{1,2,3} 陶福禄² 沈彦俊³ 刘剑锋¹ 王仁德¹

(1. 河北省科学院地理科学研究所 石家庄 050011; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所 北京 100101;
3. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心 石家庄 050022)

摘要 以气候变暖为主要特征的全球变化已经对人类的生产和生活产生重要影响。作物物候及产量对气候变化的响应和适应是研究气候变化对农业生产影响的重要内容。本文选择位于华北平原的4个典型农业气象试验站(唐山、惠民、商丘和驻马店),利用详细的物候和产量观测资料,在站点尺度上研究了冬小麦物候及产量对过去30年(1980—2009)气候变化的响应及其敏感性。结果表明:过去30年冬小麦出苗期推迟,而抽穗期和成熟期呈提前趋势。物候期的提前或推迟导致冬小麦不同生长发育阶段历时发生变化,出苗—抽穗阶段(营养生长阶段)呈缩短趋势,而抽穗—成熟生长阶段(生殖生长阶段)呈延长趋势。相关性研究表明:在4个研究站点,温度和辐射是制约冬小麦产量的主要气候因子;但不同生长阶段,冬小麦产量对气象因子的响应不同。利用多元回归统计方法研究冬小麦产量对不同生长阶段气候因子(温度、辐射和降雨)的敏感性发现:在出苗—抽穗生长阶段,除驻马店站点外,温度升高对冬小麦产量有正效应;而在抽穗—成熟阶段,温度升高会给产量带来负面影响。冬小麦产量与辐射呈正相关,辐射降低给冬小麦产量产生负效应。

关键词 华北平原 冬小麦 气候变化 产量 物候期 敏感性

中图分类号: S162.5 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2014)04-0430-09

Sensitivity of response of winter wheat to climate change in the North China Plain in the last three decades

XIAO Dengpan^{1,2,3}, TAO Fulu², SHEN Yanjun³, LIU Jianfeng¹, WANG Rende¹

(1. Institute of Geographical Sciences, Hebei Academy of Sciences, Shijiazhuang 050011, China; 2. Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050022, China)

Abstract As the main indicator for global change, ongoing climate warming has had significant impact on human life, including agricultural production for human consumption. Crop phenology and yield response to climate change has been critical in the study of the impacts of climate change on agricultural production. This study used data from four typical agro-meteorological experiment stations in the North China Plain (NCP) to study the sensitivity of the response of winter wheat phenology and yield to climate change in the last three decades. The data included detailed observation dates of winter wheat phenology and yield in the NCP study area for the period of 1980–2009. The experiment stations are located in Tangshan of Hebei Province, Huimin of Shandong Province, Shangqiu and Zhumadian of Henan Province. The results showed that while sowing date of winter wheat delayed, heading and maturity dates advanced in the last three decades. The advance or delay of winter wheat phenology induced corresponding changes in the durations of the different growth stages of the crop. The duration from emergence to heading, which was a sensitive vegetative growth stage (VGP), shortened in all the four investigated stations. By contrast, the duration from heading to maturity, which was a critical reproductive growth stage (RGP), prolonged in all the stations. Correlation analysis showed that temperature and radiation were the main climatic factors controlling winter wheat cultivation in the study area. However, winter wheat yield response to meteorological factors differed with different growth stages. With the exception of Zhumadian Station, the temperature increase

* 河北省科学院博士基金项目和中国科学院战略性先导科技专项(XDA05090308)资助
肖登攀,主要从事气候变化、农业气象研究。E-mail: xiaodengpan168@163.com
收稿日期: 2013-10-15 接受日期: 2014-01-20

positively influenced winter wheat yield for the growth stage period from emergence to heading. However, temperature rise negatively influenced winter wheat yield for the growth stage period from heading to maturity. Winter wheat yield was positively correlated with radiation, implying that the decline in radiation in the study area in the last three decades had a negative effect on winter wheat production. Our findings suggested that the sensitivity of the response of winter wheat growth and yield to climate change in the NCP was increasing. The response mechanisms of crop growth and productivity to climate change needed appropriate consideration in order to improve the prediction of the impacts of climate change and to develop requisite adaptation measures to enhance future crop productivity.

Keywords North China Plain; Winter wheat; Climate change; Yield; Phenological period; Sensitivity

(Received Oct. 15, 2013; accepted Jan. 20, 2014)

在制约农业生产的自然资源中, 气候条件是最为重要的组成部分之一^[1]。大量观测事实表明全球变暖已成为不争的事实。政府间气候变化专门委员会(IPCC)第4次研究报告指出: 过去100年全球平均地表气温升高的线性趋势达到 $0.74\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[2]。以气候变暖为主要标志的全球变化已经对人类活动的各个方面产生了深远影响, 其中包括人类赖以生存的农业生产^[3]。准确量化作物物候及产量对过去气候变化的响应及其敏感性是理解和预测未来气候变化对农业生产影响的前提和基础^[4-5]。农业和气象等领域的科学家们已经在气候变化对农作物的生长发育及产量形成的影响机理等相关领域进行了大量研究工作^[6-8]。然而由于问题的复杂性, 不同的研究区域、尺度以及研究方法, 其研究结果往往存在较大的不一致性。Nicholls^[9]研究发现, 1952—1992年气候变暖使得澳大利亚小麦产量增加30%~50%; You等^[10]在我国过去20年小麦产量对气候变化的响应研究中发现, 1979—2000年温度升高使小麦减产约4.5%。Lobell等^[11]在全球尺度上的研究指出, 1980年以来的气候变化使全球小麦减产2.5%。因此, 气候变化对作物生长发育以及产量形成的作用和影响程度还存在较大争议, 需要进行多尺度、多方法的对比研究^[12]。

小麦是我国主要的粮食作物之一, 年播种面积和总产量仅次于水稻和玉米。华北平原地区是我国主要的小麦生产基地, 其中以种植冬小麦为主。在小麦整个生长发育过程中, 温度、辐射和降雨等气候因子都是影响其正常生长的重要环境因素^[1]。小麦各生长阶段都需要达到一定的积温条件才能完成, 因此, 生长环境温度升高或降低会引起冬小麦物候产生相应的提前或推迟。冬小麦在整个生长过程中需要经历一个停止生长阶段(休眠期), 而冬小麦休眠开始和结束的日期主要受外界温度的影响和控制, 因此, 气候变暖对冬小麦物候的影响往往更加直接和突出^[13]。此外, 冬小麦生长发育过程中还会受春化作用、光周期等因素影响^[14]。辐射和降雨为小麦生产提供能量来源和水分条件, 是其生长过程中不

可或缺的环境要素^[15]。不同的生长阶段, 小麦对气候因子的响应存在显著差异^[13]。目前, 在气候变化对冬小麦物候影响的相关研究较多^[13,16], 但结合物候变化来研究气候变化对产量的影响还鲜见报道。由于冬小麦对不同生长阶段气候变化的响应和敏感性存在差异, 以前的大量研究工作只关注小麦整个生育期气候变化对其生长和产量的影响, 得到的结果不能很好地解释其影响机制^[9-11]。因此, 在进行冬小麦对气候变化响应和敏感性的研究中, 需要根据其不同的生长阶段对气候变化的响应进行单独考虑。

本研究在华北平原冬小麦主产区选取4个典型农业气象试验站点, 站点分布在不同的地理位置和气候背景下, 在一定程度上可以代表华北平原冬小麦的生长环境条件。利用详细的物候和产量观测资料, 在站点尺度上研究冬小麦物候及产量对气候变化的响应及其敏感性, 为更加客观和深入地揭示过去几十年气候变化对冬小麦生产的影响提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验站点概况及气候条件

良好的气候和土壤条件使得华北平原地区(包括河北省、山东省和河南省)成为我国主要的冬小麦、夏玉米生产基地。在我国华北平原冬小麦主产区选择具有详细物候资料和产量数据的4个典型农业气象试验站, 分别为唐山(位于河北省, 东经 $118^{\circ}10'$, 北纬 $39^{\circ}38'$, 海拔25.9 m)、惠民(位于山东省, 东经 $117^{\circ}31'$, 北纬 $37^{\circ}30'$, 海拔11.7 m)、商丘(位于河南省, 东经 $115^{\circ}40'$, 北纬 $34^{\circ}27'$, 海拔50.1 m)和驻马店(位于河南省, 东经 $114^{\circ}1'$, 北纬 $33^{\circ}00'$, 海拔82.7 m), 4个研究站点处于不同的地理环境, 气象条件存在显著差异。整体而言, 从北向南(唐山→惠民→商丘→驻马店)气温和降雨增加, 而辐射降低(表1)。4个代表性试验站一定程度上代表了华北平原冬小麦主产区的主要气候类型, 同时所选试验站点具有良好的灌溉设施和条件, 每个生长季根据具体的降雨情况平均灌溉3~6次, 在一定程度上可以

满足冬小麦不同生长阶段的需水量, 保证产量稳定。其他管理措施(包括施肥、灭虫等)按照当地管理条件进行最优处理。

在气候变化背景下, 4 个研究站点在过去 30 年里(1980—2009 年)平均温度均呈增加趋势, 且达到

极显著水平($P < 0.01$); 辐射条件呈减小趋势, 惠民站点达到显著水平($P < 0.05$); 另外, 唐山和驻马店两个试验站的降雨呈减少趋势, 而惠民和商丘站点的降雨量呈增加趋势, 但 4 个站点均未达到显著水平($P > 0.05$)(表 1)。

表 1 1980—2009 年研究站点气候条件及其变化趋势

Table 1 Conditions and variation trends in mean temperature, radiation and precipitation at four stations during the period of 1980—2009

站点 Station	平均温度 Mean temperature		辐射 Radiation		降雨量 Precipitation	
	数值 Value(°C)	变化趋势 Variation trend (°C·10a ⁻¹)	数值 Value (MJ·m ⁻²)	变化趋势 Variation trend (MJ·m ⁻² ·10a ⁻¹)	数值 Value (mm)	变化趋势 Variation trend (mm·10a ⁻¹)
唐山 Tangshan	12.3	0.58**	13.9	-0.20	586.8	-40.8
惠民 Huimin	13.0	0.55**	13.6	-0.26*	534.9	11.2
商丘 Shangqiu	14.1	0.48**	12.8	-0.26	694.5	64.9
驻马店 Zhumadian	15.2	0.56**	12.1	-0.17	994.5	-19.3

、*分别表示在 1%和 5%水平上显著, 下同。, * indicate significance at 1% and 5% levels, respectively. The same below.

1.2 数据资料

1980—2009 年各农业气象试验站冬小麦物候和产量观测资料来自于国家气象信息中心气象资料档案服务室的农作物生育状况观测记录年报表。数据包括逐年冬小麦播种、出苗、抽穗及成熟等关键生育期的详细记录和冬小麦产量数据。气象数据来自于国家气象信息中心气象资料室的中国地面气候资料数据集。数据包括逐日最高温度、最低温度、平均温度、降水及日照时数等, 其中辐射通过日照时数计算获得, 计算方法依据 Angstrom-Prescott 方程^[17]。

不同的生长阶段, 冬小麦产量对气候因子的响应和敏感性存在巨大差异。本研究把整个冬小麦生长过程划分为 2 个主要生长阶段, 分别是出苗—抽穗阶段(VGP, 营养生长阶段)和抽穗—成熟阶段(RGP, 生殖生长阶段)。由于冬小麦播种到出苗期主要受到土壤温度和湿度等因素的影响, 因此选择冬小麦出苗期作为营养生长阶段的开始来进行分析。结合详细的物候资料计算过去 30 年冬小麦 2 个生长阶段(VGP 和 RGP)的气候条件(包括平均温度、辐射和降雨量), 可以准确研究不同生长阶段气候因子对冬小麦物候和产量的影响。

1.3 研究方法

1.3.1 相关性分析

冬小麦产量与各个气候因子(平均温度、辐射和降雨)进行相关性分析。为避免过去几十年产量、气候因子本身的变化趋势对相关性的干扰, 选择产量和气候因子的年较差(后一年与前一年的差值, first difference)进行相关性分析, 即分析 ΔYd 与 ΔT_{ave} 、 ΔR_{ad} 和 ΔP_{rec} 的相关性, 其中 ΔYd 、 ΔT_{ave} 、 ΔR_{ad} 和 ΔP_{rec} 分别是冬小麦产量和不同生长阶段平均温

度、辐射和降雨的年较差, 即后一年与前一年的差值。该方法已经得到科学家的认可和广泛应用^[9,18-19]。

1.3.2 敏感性分析

相关研究在基于统计模型识别气候变化对作物产量的贡献上已有较为深刻的理解和应用^[20-21]。本研究为深入分析和比较过去 30 年(1980—2009 年)冬小麦产量对不同生长阶段气候因子(平均温度、辐射和降雨)的响应, 采用 2 种基于不同机理的多元回归模型进行敏感性分析。

多元回归模型 1(MODLE1):

$$Yd_t = \beta_0 + \beta_1 year + \beta_2 T_{ave,t} + \beta_3 R_{ad,t} + \beta_4 P_{rec,t} + \beta_5 T'_{ave,t} + \beta_6 R'_{ad,t} + \beta_7 P'_{rec,t} + \varepsilon_t \quad (1)$$

式中: Yd_t 为 t 年(1981—2009 年)冬小麦产量; $T_{ave,t}$ 、 $R_{ad,t}$ 和 $P_{rec,t}$ ($T'_{ave,t}$ 、 $R'_{ad,t}$ 和 $P'_{rec,t}$) 分别为相应年份出苗—抽穗生长阶段(抽穗—成熟生长阶段)的平均温度、辐射和降雨; β_0 、 β_1 、 β_2 、 \dots 、 β_7 分别代表模型的拟合参数, 其中 β_1 表示冬小麦产量年增长趋势, 反映了站点过去几十年品种变化、技术提高以及管理和政策等非气候因素对冬小麦产量的影响, β_{2-7} 表示各气候因子对产量的影响, 即冬小麦产量对各气候因子的敏感性; ε_t 为误差项。

多元回归模型 2(MODLE2):

$$\Delta Yd = \lambda_0 + \lambda_1 \Delta T_{ave} + \lambda_2 \Delta R_{ad} + \lambda_3 \Delta P_{rec} + \lambda_4 \Delta T'_{ave} + \lambda_5 \Delta R'_{ad} + \lambda_6 \Delta P'_{rec} + \varepsilon \quad (2)$$

式中: ΔYd 为冬小麦产量年较差; ΔT_{ave} 、 ΔR_{ad} 和 ΔP_{rec} ($\Delta T'_{ave}$ 、 $\Delta R'_{ad}$ 和 $\Delta P'_{rec}$) 分别为出苗—抽穗生长阶段(抽穗—成熟生长阶段)平均温度、辐射和降雨的年较差; λ_0 、 λ_1 、 λ_2 、 \dots 、 λ_6 分别代表模型的拟合参数, 其中 λ_{1-6} 表示冬小麦产量对不同生长阶段气

候因子的敏感性; ε 为误差项。

统计分析中, 通过 F 检验对多元回归方程的显著性进行检验, 通过 t 检验对各个变量的回归显著性进行检验。由于样本资料有限, 为了减少样本的不确定性, 采用 bootstrap 方法重置样本^[22], 将重置次数设为 1 000 次, 得到回归系数的中值。在结果分析中, 利用各气候因子的回归系数与站点多年平均产量之比来获得冬小麦对气候因子的敏感性(百分比)。

2 结果与分析

2.1 冬小麦物候及不同生长阶段气候因子变化趋势

过去 30 年, 在气候变化的背景下, 4 个研究站点的冬小麦物候发生了显著变化。其中冬小麦出苗期呈推迟趋势, 而抽穗和成熟期呈提前趋势(图 1)。出苗期的推迟主要受播种期的推迟所影响, 而冬小麦播种时间一般取决于气候条件和农民的决策。相关研究已经表明, 抽穗期和成熟期的提前主要是过去几十年气候变化的结果, 品种变换在一定程度上减缓这一变化^[23]。物候期的变化使得冬小麦不同生长发育阶段历时发生变化, 在过去 30 年(1980—2009 年), 由于出苗期推迟和抽穗期提前, 4 个研究站点的冬小麦营养生长阶段(出苗—抽穗阶段)缩短 $4.0\sim 11.9 \text{ d}\cdot 10\text{a}^{-1}$ 。然而由于成熟期提前幅度小于抽穗期, 使得冬小麦生殖生长阶段(抽穗—成熟阶段)延长 $0.1\sim 2.8 \text{ d}\cdot 10\text{a}^{-1}$ 。冬小麦整个生长阶段(出苗—成

熟阶段)呈缩短趋势, 其中唐山、惠民和驻马店达到显著水平($P<0.05$)(表 2)。冬小麦不同生育阶段时间长度的变化, 使得不同生育阶段的气候条件也发生相应变化。由表 3 可知, 在气候变暖背景下, 冬小麦出苗—抽穗、出苗—成熟生长阶段的平均温度升高, 但由于抽穗和成熟期的提前, 冬小麦抽穗—成熟阶段的平均气温在 4 个研究站点都呈减小趋势。虽然减少趋势没有达到显著水平($P>0.05$)(表 3), 但已经表明冬小麦在生长过程中可以通过物候改变来缓解和适应气候变暖。4 个研究站点在不同生长阶段的辐射均呈降低趋势, 但只有出苗—抽穗阶段商丘站点的辐射呈显著降低趋势($P<0.05$)(表 3)。不同的研究站点, 降雨变化不一致。在整个生长阶段, 唐山市和驻马店市降雨呈降低趋势, 而惠民县和商丘市呈增加趋势, 但均未达到显著水平($P>0.05$)(表 3)。

综上所述, 过去 30 年的气候变暖对冬小麦物候产生了重要影响, 使得冬小麦抽穗和成熟显著提前, 最终导致冬小麦整个生育过程缩短。然而冬小麦不同的生长阶段对气候变化的响应不一致, 虽然冬小麦营养生长阶段(出苗—抽穗阶段)呈显著缩短趋势, 但是对最终产量形成更为重要的生殖生长阶段(抽穗—成熟阶段)却呈延长趋势。同时由于抽穗和成熟期的提前, 使得该阶段的平均温度呈降低趋势, 在一定程度上可以避免初夏高温对小麦生产的影响。

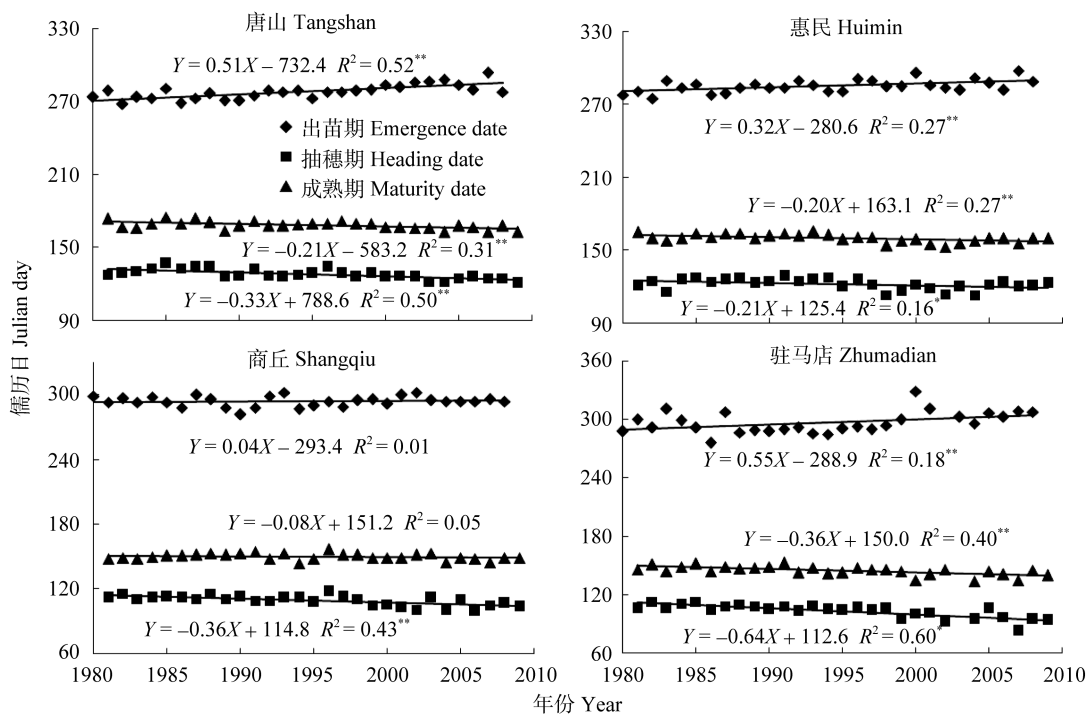


图 1 1980—2009 年各研究站点冬小麦出苗、抽穗和成熟期变化趋势

Fig. 1 Variation trends in emergence, heading and maturity dates of winter wheat during 1980–2009 at different stations

表 2 1980—2009 年各研究站点冬小麦不同生长阶段历时变化趋势

Table 2 Variation trends in durations of different growth stages of winter wheat during 1980–2009 at different stations

站点 Station	出苗—抽穗期 From emergence to heading			抽穗—成熟期 From heading to maturity			出苗—成熟期 From emergence to maturity		
	变化趋势	Trend (d·10a ⁻¹)	R ²	变化趋势	Trend (d·10a ⁻¹)	R ²	变化趋势	Trend (d·10a ⁻¹)	R ²
	唐山 Tangshan	-8.4**		0.62	1.2*		0.16	-7.1**	
惠民 Huimin	-5.3**		0.40	0.1		0.01	-5.2**		0.43
商丘 Shangqiu	-4.0**		0.26	2.8**		0.34	-1.2		0.03
驻马店 Zhumadian	-11.9**		0.46	2.8**		0.28	-9.1**		0.34

表 3 1980—2009 年各研究站点冬小麦不同生长阶段气候因子变化趋势

Table 3 Variation trends in mean temperature, radiation and precipitation at different growth stages of winter wheat during 1980–2009 at different stations

站点 Station	出苗—抽穗期 From emergence to heading			抽穗—成熟期 From heading to maturity			出苗—成熟期 From emergence to maturity		
	平均温度 Mean temperature (°C·10a ⁻¹)	辐射 Radiation (MJ·m ⁻² ·10a ⁻¹)	降雨 Precipitation (mm·10a ⁻¹)	平均温度 Mean temperature (°C·10a ⁻¹)	辐射 Radiation (MJ·m ⁻² ·10a ⁻¹)	降雨 Precipitation (mm·10a ⁻¹)	平均温度 Mean temperature (°C·10a ⁻¹)	辐射 Radiation (MJ·m ⁻² ·10a ⁻¹)	降雨 Precipitation (mm·10a ⁻¹)
	唐山 Tangshan	0.20	-0.17	-4.54	-0.04	-0.13	-7.15	0.33**	-0.08
惠民 Huimin	0.45**	-0.16	3.66	-0.13	-0.10	5.05	0.42**	-0.09	8.71
商丘 Shangqiu	0.44**	-0.21*	9.81	-0.07	-0.12	-2.17	0.54**	-0.09	7.64
驻马店 Zhumadian	0.26*	-0.13	-1.49	-0.10	-0.11	1.28	0.38**	-0.03	-0.21

2.2 冬小麦产量变化及与气候因子的相关性

气候变化和非气候因子(品种变换、管理改善等)共同作用下, 4 个研究站点冬小麦产量在过去 30 年(1980—2009 年)均呈显著增长趋势, 增幅达到 54~

101 kg·hm⁻²·a⁻¹(图 2)。本研究主要探讨气候变化对冬小麦产量的影响, 通过对冬小麦产量与 3 个生长阶段气候因子(平均温度、辐射和降雨)年较差的相关性研究表明: 在出苗—抽穗的营养生长阶段以及

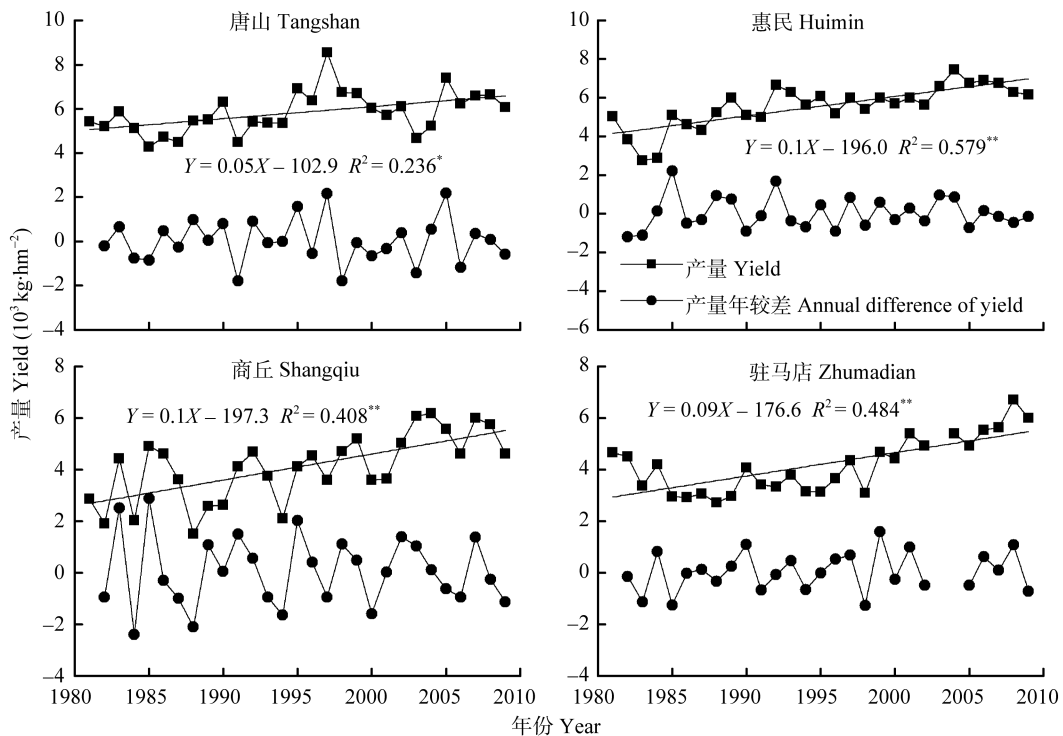


图 2 1980—2009 年各研究站点冬小麦产量变化趋势

Fig. 2 Variation trend in yields of winter wheat during 1980–2009 at different stations
图中方程为冬小麦产量变化趋势。Equations in the figure denote the variation trend in yield of winter wheat.

出苗—成熟整个生育期, 除驻马店站点外, 产量与平均温度均呈正相关关系, 唐山和商丘站点达到显著水平($P<0.05$)(表 4)。然而在抽穗—成熟生长阶段, 冬小麦产量与平均温度均呈负相关关系, 在唐山和商丘站点达到显著水平($P<0.05$)(表 4)。在冬小麦 3 个不同生长阶段, 产量与辐射均呈正相关关系; 其中在生殖生长阶段(抽穗—成熟), 商丘和驻马店站点产量与辐射

的相关性达到显著水平($P<0.05$)(表 4)。冬小麦产量与降雨的相关性较小且不一致(表 4), 分析原因可能是华北地区冬小麦种植区具备良好的灌溉条件, 如果降水不足, 可以通过灌溉来补充冬小麦需水。相关研究指出, 从 20 世纪 80 年代开始华北平原冬小麦种植区的灌溉条件已经能够满足冬小麦生长期的正常需水量^[24-25], 降水一般不是冬小麦生产的主要限制条件。

表 4 各研究站点冬小麦产量与不同生长阶段气候因子的相关性

Table 4 Correlations of wheat yield with mean temperature, radiation and precipitation at different growth stages of winter wheat at different stations

站点 Station	出苗—抽穗期 From emergence to heading			抽穗—成熟期 From heading to maturity			出苗—成熟期 From emergence to maturity		
	平均温度 Mean temperature	辐射 Radiation	降雨 Precipitation	平均温度 Mean temperature	辐射 Radiation	降雨 Precipitation	平均温度 Mean temperature	辐射 Radiation	降雨 Precipitation
	唐山 Tangshan	0.30*	0.05	0.11	-0.29*	0.25	0.07	0.19	0.10
惠民 Huimin	0.18	0.06	-0.01	-0.17	0.15	-0.01	0.18	0.15	-0.02
商丘 Shangqiu	0.32*	0.09	0.09	-0.28*	0.29*	0.05	0.32*	0.18	0.06
驻马店 Zhumadian	-0.13	0.05	-0.12	-0.18	0.42*	-0.01	-0.13	0.36*	-0.09

2.3 冬小麦产量对气候因子的敏感性分析

为了从不同研究方法上验证冬小麦产量对过去 30 年气候变化的响应, 本研究利用 2 种基于不同机理的统计回归方程来研究冬小麦产量对气候因子的敏感性。经过统计 F 检验分析, 各个研究站点拟合的回归方程均达到显著性水平($P<0.05$), 各回归变量的显著性水平见图 3。在整体趋势上, 2 种方法得到的冬小麦产量对气候因子的响应较一致。

2.3.1 冬小麦产量对温度的敏感性

冬小麦在不同生长阶段对温度的敏感性存在较大差异。在出苗—抽穗阶段, 除驻马店站点外, 冬小麦产量都随温度升高而增长, 其中位于研究区最北部的唐山站点, 平均温度升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 产量增加 7% 以上。由北向南(唐山→惠民→商丘→驻马店), 冬小麦产量随温度升高而增长的幅度变小; 然而在驻马店站点, 出苗—抽穗期平均温度升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 产量减少约 4% 左右。在抽穗—成熟阶段, 4 个研究站点冬小麦产量随平均温度的升高均减小, 其中由北向南, 冬小麦产量随平均温度升高减小的程度增加(图 3)。

温度变化对冬小麦生长是正效应还是负效应, 主要取决于环境温度是否超过了冬小麦生长的最适温度。如果气温低于冬小麦生长的最适温度, 那么温度升高将有利于冬小麦生长, 反之, 如果当前气温已经超过作物生长的最适温度, 则温度升高会给冬小麦生产带来负面影响^[26-27]。以上研究表明, 在出苗—抽穗生长阶段, 过去 30 年气候变暖, 在唐山、惠民和商丘站点带来正面效应, 而在驻马店却

产生负面效应。这与不同站点本身的气候条件有关, 驻马店位于研究区最南部, 本身温度条件高于其他站点。因此, 在出苗—抽穗阶段, 驻马店的温度条件已经超过了该阶段冬小麦生长最适温度, 而在唐山、惠民和商丘站点, 温度条件还未达到冬小麦营养生长阶段的最适温度。在冬小麦生殖生长阶段(抽穗—成熟时期), 气候变暖对 4 个研究站点均产生负面影响, 表明该生长阶段的温度条件已经超过了冬小麦生长的最适条件。另外在过去 30 年, 由于冬小麦物候变化, 使得抽穗—成熟时期(生殖生长阶段)提前, 最终导致如前文所述的生殖生长阶段的气温呈降低趋势, 从而对冬小麦生长有利。另外, 在华北平原冬小麦主产区, 由于冬小麦产量形成的主要阶段——冬小麦灌浆期一般发生在 5—6 月, 而在该阶段往往会受到干热风和高温逼熟等灾害天气的影响而导致减产, 物候的提前可以减少这些灾害发生。因此, 冬小麦在一定程度上通过物候的改变来缓和和适应气候变暖对其产生的影响^[28]。

2.3.2 冬小麦产量对辐射的敏感性

冬小麦是喜光作物, 光照强度对冬小麦产量形成具有重要影响^[29]。在出苗—抽穗和抽穗—成熟 2 个生长阶段, 冬小麦产量均随辐射增加而增加, 然而产量对出苗—抽穗阶段辐射的敏感性小于抽穗—成熟阶段。由于从北向南(唐山→惠民→商丘→驻马店)辐射降低, 使冬小麦产量对辐射的敏感性增加。驻马店站点在抽穗—成熟阶段, 辐射每增加 $1\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$, 产量增加约 6%(图 3)。

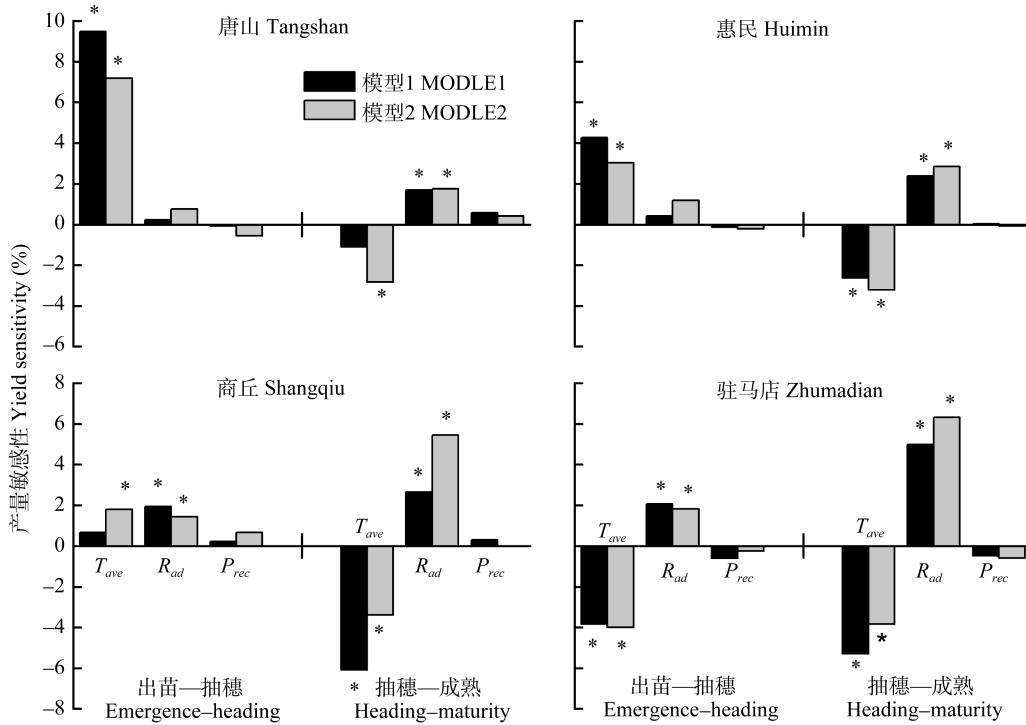


图 3 冬小麦产量对营养生长阶段(出苗—抽穗)和生殖生长阶段(抽穗—成熟)气候因子(温度、辐射和降雨量)的敏感性
Fig. 3 Winter wheat yield change per mean temperature ($1\text{ }^{\circ}\text{C}$), radiation ($1\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$) and precipitation (10 mm) at vegetative growth period (seedling to heading) and reproductive growth period (heading to maturity)

T_{ave} 、 R_{ad} 和 P_{rec} 分别为平均温度、辐射和降雨量; 产量敏感性表示平均温度、辐射和降雨分别变化 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $1\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 10 mm 导致的产量变化(%). *表示在 5%水平显著. T_{ave} 、 R_{ad} 和 P_{rec} denote the mean temperature, radiation and precipitation, respectively. Yield sensitivity is the yield change (%) due to mean temperature change of $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, radiation change of $1\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$, and precipitation change of 10 mm , respectively. * indicates significant change at 5% level.

所有研究站点在过去 30 年辐射均呈降低趋势, 对冬小麦生产带来负面影响。冬小麦产量形成的重要阶段(灌浆期)发生在抽穗—成熟阶段, 然而华北平原冬小麦主产区在抽穗—成熟生长期往往会发生长时间阴雨天气, 使得辐射条件较差, 从而降低干物质积累, 最终导致籽粒下降。

2.3.3 冬小麦产量对降雨的敏感性

由于研究区是灌溉农业, 冬小麦产量对降雨的敏感性较小, 甚至在驻马店站点, 由于降雨增多往往会导致辐射降低, 从而使得产量随着降雨的增加而减小(图 3)。水分条件是冬小麦生长发育和产量形成的基础, 是获得高产的基本保证。降水量对小麦生产的影响是一个较为复杂的过程, 不同生育期降水的影响存在较大差异。生育前期降水增加有利于小麦产量提高, 而后期尤其是开花期和成熟期会导致一定减产^[30]。由于华北平原冬小麦可以得到充分灌溉, 使得降水对其生产的影响较小, 甚至有些地区, 由于雨水一般集中与小麦开花或成熟期前后, 使得该时期过多降水往往导致小麦减产。

3 讨论与结论

过去 30 年(1980—2009 年), 气候变化对冬小麦的生长发育和产量形成产生了重要影响。温度升高,

冬小麦可以提前满足积温需求, 从而导致冬小麦物候提前和生育期缩短。本研究发现华北地区气候变暖使得冬小麦抽穗期提前、营养生长阶段缩短。抽穗期提前使得成熟期相应提前, 从而改变了冬小麦生殖生长阶段(抽穗—成熟阶段)的气候条件。在气候变暖的背景下, 4 个研究站点冬小麦生殖生长阶段的平均温度在过去 30 年呈降低趋势, 使得产量形成的重要阶段(冬小麦灌浆期)延长, 同时一定程度上避免了初夏高温对冬小麦生产的负面影响, 对冬小麦的稳产和高产具有重要意义。

冬小麦不同生长阶段, 对温度的敏感性存在较大差异。研究表明: 除驻马店站点外, 出苗—抽穗生长阶段, 过去 30 年气候变暖对冬小麦产量具有正面效应, 在冬小麦抽穗—成熟阶段, 气候变暖对 4 个研究站点均为负面效应。然而, 由于物候提前使冬小麦生殖生长阶段(抽穗—成熟)提前, 从而对冬小麦生产有利。因此, 冬小麦物候的改变在一定程度上可以缓和和适应气候变暖带来的不利影响。

太阳辐射对冬小麦产量形成具有重要作用, 4 个研究站点在过去 30 年辐射均呈降低趋势, 从而对冬小麦生长带来负面效应。另外, 华北平原冬小麦主产区在抽穗—成熟生长期(8—9 月)容易出现长时间

阴雨天气,使得辐射条件较差,影响干物质积累,导致籽粒下降。水分条件是冬小麦生长发育和产量形成的基础,是稳产和高产的保证。华北平原冬小麦播种区具有良好的灌溉条件,降水对产量的影响较小,但有些年份,由于雨水集中于冬小麦开花期前后,会使得降水导致冬小麦减产。

参考文献

- [1] Porter J R, Semenov M A. Crop responses to climatic variation[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 2005, 360(1463): 2021–2035
- [2] IPCC. Climate Change 2007. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007: 30–31
- [3] Lin E D, Xu Y L, Wu S H, et al. China's national assessment report on climate change (): Climate change impacts and adaptation[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2007, 3: 6–11
- [4] Olesen J E, Bindi M. Consequences of climate change for European agricultural productivity, land use and policy[J]. *European Journal Agronomy*, 2002, 16(4): 239–262
- [5] Tao F L, Yokozawa M, Xu Y L, et al. Climate changes and trends in phenology and yields of field crops in China 1981–2000[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 138(1/4): 82–92
- [6] 齐永青, 孙宏勇, 沈彦俊. 太行山山前平原近 50 年气候变暖特征及其对冬小麦-夏玉米作物系统的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2011, 19(5): 1048–1053
Qi Y Q, Sun H Y, Shen Y J. Characteristics and effects of climate warming on winter wheat/summer maize cropping system in recent 50 years in the piedmont of Mount Taihang[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(5): 1048–1053
- [7] 杨晓琳, 宋振伟, 王宏, 等. 黄淮海农作区冬小麦需水量时空变化特征及气候影响因素分析[J]. *中国生态农业学报*, 2012, 20(3): 356–362
Yang X L, Song Z W, Wang H, et al. Spatio-temporal variations of winter wheat water requirement and climatic causes in Huang-Huai-Hai farming region[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(3): 356–362
- [8] 殷培红, 方修琦, 张学珍, 等. 中国粮食单产对气候变化的敏感性评价[J]. *地理学报*, 2010, 65(5): 515–524
Yin P H, Fang X Q, Zhang X Z, et al. Identification of the susceptible regions to climate change impact on grain yield per unit area in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(5): 515–524
- [9] Nicholls N. Increased Australian wheat yield due to recent climate trends[J]. *Nature*, 1997, 387(6632): 484–485
- [10] You L Z, Rosegrant M W, Wood S, et al. Impact of growing season temperature on wheat productivity in China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(6/7): 1009–1014
- [11] Lobell D B, Schlenker W, Costa-Roberts J. Climate trends and global crop production since 1980[J]. *Science*, 2011, 333(6042): 616–620
- [12] Lobell D B, Burke M B. Climate Change and Food Security: Adapting Agriculture to a Warmer World[M]. Netherlands: Springer
- [13] 肖登攀, 陶福祿. 过去 30 年气候变化对华北平原冬小麦物候的影响研究[J]. *中国生态农业学报*, 2012, 20(11): 1539–1545
Xiao D P, Tao F L. Impact of climate change in 1981–2009 on winter wheat phenology in the North China Plain[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(11): 1539–1545
- [14] Tao F L, Zhang S, Zhang Z. Spatiotemporal changes of wheat phenology in China under the effects of temperature, day length and cultivar thermal characteristics[J]. *European Journal Agronomy*, 2012, 43: 201–212
- [15] Kristensen K, Schelde K, Olesen J E. Winter wheat yield response to climate variability in Denmark[J]. *Journal of Agriculture Science*, 2011, 149(1): 33–47
- [16] Wang J, Wang E L, Feng L P, et al. Phenological trends of winter wheat in response to varietal and temperature changes in the North China Plain[J]. *Field Crops Research*, 2013, 144: 135–144
- [17] Prescott J A. Evaporation from a water surface in relation to solar radiation[J]. *Transactions of the Royal Society of South Australia*, 1940, 64(1): 114–118
- [18] Tao F L, Yokozawa M, Liu J Y, et al. Climate-crop yield relationships at provincial scales in China and the impacts of recent climate trends[J]. *Climate Research*, 2008, 38(1): 83–94
- [19] Lobell D B, Field C B. Global scale climate-crop yield relationships and the impacts of recent warming[J]. *Environmental Research Letters*, 2007, 2(1): 1–7
- [20] 史文娇, 陶福祿, 张朝. 基于统计模型识别气候变化对农业产量贡献的研究进展[J]. *地理学报*, 2012, 67(9): 1213–1222
Shi W J, Tao F L, Zhang Z. Identifying contributions of climate change to crop yields based on statistical models: A review[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(9): 1213–1222
- [21] Lobell D B, Burke M B. On the use of statistical models to predict crop yield responses to climate change[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, 150(11): 1443–1452
- [22] Tao F L, Zhang Z, Shi W J, et al. Single rice growth period was prolonged by cultivars shifts, but yield was damaged by climate change during 1981–2009 in China, and late rice was just opposite[J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(10): 3200–3209
- [23] Xiao D P, Tao F L, Liu Y J, et al. Observed changes in winter wheat phenology in the North China Plain for 1981–2009[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2013, 57(2): 275–285
- [24] Chen C, Wang E L, Yu Q, et al. Quantifying the effects of climate trends in the past 43 years (1961–2003) on crop growth and water demand in the North China Plain[J]. *Climatic Change*, 2010, 100(3/4): 559–578
- [25] Tao F L, Zhang Z. Climate change, wheat productivity and water use in the North China Plain: A new super-ensemble-based probabilistic projection[J]. *Agricultural and*

- Forest Meteorology, 2011, 170: 146–165
- [26] Baker J T, Allen J L H. Contrasting crop species responses to CO₂ and temperature: Rice, soybean and citrus[J]. Vegetatio, 1993, 104–105(1): 239–260
- [27] Conroy J P, Seneweera S, Basra A S, et al. Influence of rising atmospheric CO₂ concentrations and temperature on growth, yield and grain quality of cereal crops[J]. Australian Journal of Plant Physiology, 1994, 21(6): 741–758
- [28] 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, 2013, doi: 10.1007/s11027-013-9531-6
- [29] Gent M P N, Kiyomoto R K. Canopy photosynthesis and respiration in winter wheat adapted and unadapted to connecticut[J]. Crop Science, 1992, 32(2): 425–431
- [30] Asseng S, Jamieson P D, Kimball B, et al. Simulated wheat growth affected by rising temperature, increased water deficit and elevated atmospheric CO₂[J]. Field Crops Research, 2004, 85(2/3): 85–102

欢迎报考

中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心

中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心(以下简称中心)的前身为中国科学院石家庄农业现代化研究所, 2002 年与中国科学院遗传与发育生物学研究所整合后更名为“中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心”, 保留独立事业单位法人资格。

本中心面向国家水安全、粮食安全、生态环境安全的重大战略需求和农业资源与生态学前沿领域, 以农业水资源高效利用为重点, 在节水理论与技术、农业生物技术、生态系统及信息管理等领域, 开展应用基础研究, 集成创新资源节约型现代农业模式, 为区域农业持续发展做出了基础性、战略性、前瞻性贡献。

1 研究生招生

作为中国科学院博士及硕士学位培养单位之一, 中心招收生态学学术型硕士、博士研究生, 生物工程全日制专业学位硕士研究生, 鼓励优秀学生硕博连读。针对推免生, 凡参加并通过我中心面试, 如未能获得所在院校推免名额, 第一志愿报考我中心参加统考时, 可免再次复试。

2 研究生培养

中心具有一支结构合理、经验丰富、学术造诣深的导师队伍。博士生导师 20 名, 硕士生导师 25 名。研究生作为中心科研工作的生力军在相关研究领域做出了突出成绩。曾荣获中国科学院院长奖、朱李月华奖学金以及各种冠名奖学金和中国科学院遗传与发育生物学研究所振声奖学金、益海嘉里奖学金等。导师关注每一位学生的成长, 注重研究生创新能力的培养。积极引导研究生开展跨学科和跨地区的社会实践, 邀请海内外知名学者参加研究生的培养工作, 举办形式多样的学术研讨会与报告会, 为人才的成长营造良好的环境和氛围。另外中心有研究生学生会、研究生党支部和各种社团, 同学们的业余生活丰富多彩。

3 研究生待遇

研究生在学期间享有相应的研究助理薪金, 硕士生每年 25 000 元左右, 博士生每年 35 000 元左右, 定向和委培生也有机会获得三助岗位津贴。此外, 部分优秀学生每年可获得中国科学院研究生院奖学金、冠名奖学金等奖励。2010 年新建的学生公寓, 宽敞明亮(两人/间), 具有独立卫生间和淋浴条件, 中心食堂伙食可口且价位低, 深受同学好评。

4 研究生就业

研究生毕业后多数赴国内外大学、科研院所等企事业单位就职或从事博士后研究工作, 平均就业率为 97.6%(2006—2012 年数据统计)。

5 联系方式

招生代码: 学校代码: 80001 院系代码: 80156

单位网址: <http://www.sjziam.cas.cn>

联系部门: 人事教育部门

联系人: 王老师 毛老师

联系电话: 0311-85801050; 0311-85814366