

北方冬小麦主产区的高产与稳产关联性 及其影响因素

陈晓琳¹, 谭晓悦², 李露凝¹, 陈晋¹, 李强¹

(1. 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875; 2. 香港理工大学土地测量及地理资讯学系, 香港 999077)

摘要: 冬小麦产量高低及稳定性对于保障我国粮食安全同等重要。鉴于北方冬小麦主产区受气候变化的负面影响显著, 有必要从高产—稳产关联特征入手, 探究全面提升冬小麦产量及稳定性的途径。基于 598 个县 1985—2014 年的单产数据, 分析了冬小麦高产与稳产关联性时空分异特征, 并结合气象、物候观测、农业生产要素等数据, 应用无序多分类 Logistic 模型揭示了冬小麦高产—稳产关联特征的影响因素。主要结论为: (1) 冬小麦产量随时间不断提高的同时稳定性也增强, 高产性和稳产性均呈东北向西南降低的特征。(2) 冬小麦高产与稳产、低产与不稳产密切相关, 在研究区占据主导地位, 且这两种关联类型的分布区域相对稳定, 空间聚集性强。(3) 灌溉条件是促进冬小麦高产—稳产的关键因素, 影响随时间逐渐增强; 具备灌溉条件的情况下, 研究区的光温水等气象条件均比较适合冬小麦生产, 但不同物候期气象要素的波动对高产和稳产均有负向影响。研究结果可为划定冬小麦优质产区和制定气候变化应对策略提供依据。

关键词: 北方冬小麦主产区; 高产—稳产关联性; 时空分异; 无序多分类 Logistic 模型

北方冬小麦主产区对于确保我国粮食安全具有主导作用。然而, 在全球气候变化背景下, 该区域近百年来呈现气温上升和降水减少的特点^[1], 这将加大冬小麦生产的不确定性, 给我国粮食安全带来严重挑战。比如: 冬春季的温度上升可能导致冬小麦关键物候期(返青期、拔节期等)提前和生育期缩短, 不仅遭遇倒春寒等气象灾害的风险增大, 也不利于冬小麦干物质的积累^[2-4]; 温度上升和降水减少的叠加作用使得该区域水分短缺问题更加严峻^[5,6]; 水热条件的年际波动和极端气候事件增加会导致产量年际波动增大, 降低小麦生产的稳定性^[7]。冬小麦的生产能力高低(高产性)和波动幅度大小(稳产性)是衡量区域粮食生产可持续能力的重要指标, 二者同等重要且同时受气候变化影响。因此, 为了揭示冬小麦生产系统对气候变化的响应机制, 有必要从根本上掌握冬小麦高产和稳产的关联性及其时空分异特征, 并在揭示关键影响因素的基础上, 探究全面提升冬小麦产量及稳定性的途径。

近年来, 关注小麦生产系统对气候变化响应的研究成果丰富。在小麦高产性方面, 肖登攀等^[8]利用统计方法分析冬小麦产量与气象因子的关系; Wang 等^[9]通过人工模拟实验, 研究气候变化对小麦产量影响的生理机制; Bai 等^[10]利用产量预测模型分析气候变化

收稿日期: 2020-09-10; 修订日期: 2020-11-16

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFD0300201)

作者简介: 陈晓琳(1996-), 女, 福建龙岩人, 硕士, 研究方向为土地资源与区域发展。

E-mail: 201921051120@mail.bnu.edu.cn

通讯作者: 李强(1967-), 女, 内蒙古呼和浩特人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为区域规划与资源管理。

E-mail: liqiang@bnu.edu.cn

对华北平原冬小麦产量的可能影响。多数研究结果表明：未来气候变化确实将导致我国北方小麦产量降低。在小麦产量稳定性方面，变异系数、波动系数和变异率等指标常被用于评价长时间序列下区域粮食生产的稳定程度^[11-13]；此外，在评价区域粮食安全风险中，稳产性被认为是粮食生产系统抵御自然灾害能力的重要评价指标^[14,15]。在影响因素方面，科技进步、农业生产经营等人为因素的正向影响可以在一定程度上减缓气候变化带来的不利影响^[16]，更有研究揭示：相较于自然条件因素，农业生产因素对粮食产量及其稳定性的影响更大^[13,17]。但现有研究往往仅侧重高产性或稳定性某一方面，少有关注两者的相互联系，尤其缺乏对高产和稳产关联特征及其影响因素的研究，因而难以支撑对于气候变化影响小麦生产的深入研究。

综上所述，本文依据我国北方冬小麦主产区598个县1985—2014年的单产数据，在划分高产—稳产、高产—不稳产、低产—稳产和低产—不稳产等关联类型的基础上，分析不同类型的时空分异特征；并进一步考虑关键物候期的气象条件和农业生产条件，应用无序多分类Logistic模型，揭示影响冬小麦高产—稳产关联类型的主要因素，期望研究结果为划定冬小麦优质产区和制定气候变化应对策略提供科学依据。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

北方冬小麦主产区的冬小麦播种面积和产量分别占全国的82%和88%^[18]，范围包括江苏、安徽、山东、河南的全部县市以及河北、山西和陕西的部分县市（共598个县，图1）。该区域土地资源丰富且耕种条件优越，属于暖温带和亚热带季风气候，年平均气温11.0~15.4℃，最低月平均气温在-4.6~-0.7℃，冬小麦生长季积温可达1200~3000℃/年，降水量为520~980mm，具备冬小麦生长的良好热量和水分条件^[19]。根据我国小麦种植区划^[20]，可进一步划分黄淮北麦区、黄淮南麦区和江淮麦区三个亚区。

1.2 数据来源

研究区的冬小麦单产数据由中国农业科学研究院提供，考虑数据的完整性，确定能够覆盖全部598个县的数据时段为1985—2014年。气象数据来源于中国国家级地面气象站基本气象要素日值数据集（<http://www.nmic.cn/>），该数据集经过严格的质量控制和归一化处理，基于研究区内143个国家级气象站的数据，本文通过空间插值获得了各县市的数据。冬小麦物候数据来源于研究区内98个农业气象站1993—2013年的实际观测值，农业生产条件数据来源于研究区所涉及的省或市1985—2014年的统计年鉴。

1.3 研究方法

1.3.1 高产—稳产关联类型的判别

高产和稳产表征的是特定区域在特定时段的农业生产相对状况。因此，针对不同时期（1985—1994年、1995—2004年和2005—2014年）的冬小麦生产实际，以各县某一

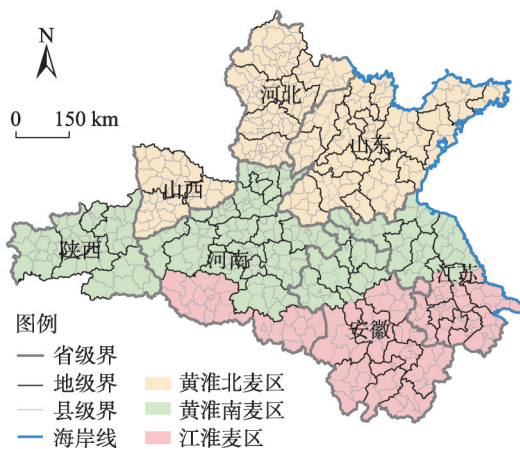


图1 研究区范围及冬小麦种植区划

Fig. 1 The scope of the study area and its sub-regions of winter wheat planting

期冬小麦单产的均值反映单产高低水平, 以相应的年际变异系数反映稳产性水平, 计算公式如下:

$$\mu_{ip} = \frac{\sum_{t=1}^{t+n-1} \mu_{it}}{n} \quad (1)$$

$$CV_{ip} = \frac{\sigma_{ip}}{\mu_{ip}} \quad (2)$$

式中: μ_{it} 表示 i 县 t 年的冬小麦单产 (kg/hm^2); n 代表年数; μ_{ip} 和 σ_{ip} 分别表示 i 县特定时期 p 的冬小麦单产均值和标准差; CV_{ip} 表示 i 县特定时期 p 的冬小麦单产年际变异系数。

根据全区域在特定时期 p 的单产中值 μ_{mp} 和年际变异系数中值 CV_{mp} , 按照图 2 所示的方法判别高产—稳产、高产—不稳产、低产—稳产和低产—不稳产四种关联类型, 并确定各县的所属类型。

1.3.2 LISA 分析

LISA (Local Indications of Spatial Association) 分析方法主要用于度量每个区域与其邻近区域的空间关联和空间差异程度, 通过将高值集聚和低值集聚现象的空间结构可视化, 揭示区域的空间分布规律, 公式如下:

$$I_i = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma^2} \sum_{j=1}^N w_{ij} (x_j - \bar{x}) \quad (3)$$

式中: I_i 为位置 i 的 LISA 系数, I_i 取值为 $-1 \sim 1$, 大于 0 时为正向自相关, 小于 0 时为负向自相关, 等于 0 时为空间分布呈随机性; x_i 和 x_j 分别为位置 i 和 j 的同一地理属性的观测值; \bar{x} 和 σ^2 分别为 x 的平均值和方差; w_{ij} 为空间权重矩阵。

将高产—稳产、高产—不稳产、低产—稳产和低产—不稳产四种关联类型分别赋值为 4、3、2 和 1, LISA 分析的空间集聚意义为: (1) H-H 类型表示高产—稳产关联类型的各县呈现空间同质性且显著正相关, 可视为冬小麦的优质产地; L-L 类型表示低产—不稳产关联类型的各县呈现空间同质性且显著正相关, 可视为冬小麦的低质产地。(2) H-L 类型和 L-H 类型则表示高产—稳产关联类型或者低产—不稳产关联类型的各县, 与其周边相邻县属于不同的关联类型, 空间差异程度较大且呈现显著负相关。

1.3.3 无序多分类 Logistic 模型

无序多分类 Logistic 模型是面向因变量为分类变量的回归分析方法, 其原理为:

定义事件的发生比 $Odds$ 为事件 i 的发生概率 (P_i) 与不发生概率 ($1-P_i$) 之比, 见式 (4); 对 $Odds$ 取 Logit 变换使其取值范围扩展到实数集, 以符合传统线性回归模型的要求, 见式 (5)。

$$Odds = \frac{P_i}{1-P_i} \quad (4)$$

$$\log it(P_i) = \log(Odds) = \ln\left(\frac{P_i}{1-P_i}\right) \quad (5)$$

若多分类因变量 Y 有 J 个事件 (Y_1, Y_2, \dots, Y_J) 且事件间不存在等级关系, 则式 (4) 为

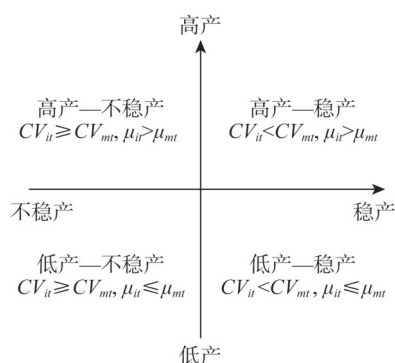


图2 冬小麦高产—稳产关联类型的判别

Fig. 2 Classification of high-yield and stable-yield association of winter wheat

无序多分类 Logistic 模型。设因变量 Y 有 n 个影响因素、事件 j 发生的概率为 P_j ，当取事件 Y_J 为参考类型时，其余事件类型与其进行比较，可拟合 $J-1$ 个 Logistic 回归方程如下：

$$\ln\left(\frac{P_j}{P_J}\right)=\beta_0+\beta_1x_1+\beta_2x_2+\cdots+\beta_nx_n$$

(6)

式中： $j=1, 2, \cdots, J-1$ 。从 *Odds* 的角度解读系数 β_n 的意义为：当其他变量保持不变时，每增加一单位 x_n ，事件 Y_j 的 *Odds* 就是参考事件 Y_J 的 e^{β_n} 倍。当 $\beta_n \geq 0$ 时， x_n 正向影响事件 j ，且 β_n 越大， x_n 对于事件 j 发生概率的正向影响越大；当 $\beta_n < 0$ 时， x_n 负向影响事件 j ，且 β_n 越小， x_n 对于事件 j 发生概率的负向影响越大。

本文以高产—稳产、高产—不稳产、低产—稳产和低产—不稳产四种关联类型作为因变量进行回归分析。对于模型中的自变量，考虑到粮食生产受自然条件和社会经济状况等诸多因素影响，从基本气象条件和农业生产条件两方面，选择冬小麦高产—稳产关联特征的影响因素（表 1）。

表 1 冬小麦高产—稳产关联的影响因素

气象要素主要包括反映基本光温水条件的冬小麦生长季的大于 0℃ 积温 x_1 、累积降水量 x_2 和总日照时数 x_3 。为揭示播种—越冬期、返青—抽穗期和抽穗—成熟期的气象要素对冬小麦生产系统的差异化影响，根据收集到的实际观测物候期数据，进一步选择不同发育阶段的日均温度、累积降水和累积日照时数的年际变化（用变异系数 CV 表示）等因素 $x_4 \sim x_{12}$ 。农业生产要素主要选取灌溉条件（有效灌溉面积/耕地面积） x_{13} 、单位面积农业机械条件 x_{14} 、单位面积化肥施用量 x_{15} 和单位面积劳动力 x_{16} 。

Table 1 Influencing factors of high-yield and stable-yield association of winter wheat

影响因素	变量 x	内容	单位
气象因素	x_1	生长季 >0℃ 积温	℃
	x_2	生长季累积降水	mm
	x_3	生长季总日照时数	hour
	x_4	播种—越冬期日均温度 CV	—
	x_5	返青—抽穗期日均温度 CV	—
	x_6	抽穗—成熟期日均温度 CV	—
	x_7	播种—越冬期累积降水 CV	—
	x_8	返青—抽穗期累积降水 CV	—
	x_9	抽穗—成熟期累积降水 CV	—
	x_{10}	播种—越冬期累积日照时数 CV	—
	x_{11}	返青—抽穗期累积日照时数 CV	—
	x_{12}	抽穗—成熟期累积日照时数 CV	—
农业生产因素	x_{13}	灌溉条件	%
	x_{14}	农业机械条件	kW/hm ²
	x_{15}	化肥施用量	t/hm ²
	x_{16}	劳动力	人/hm ²

2 结果分析

2.1 冬小麦高产性和稳产性的时空分异特征

2.1.1 时间变化

1985—2014 年，冬小麦单产从 3170 kg/hm² 增长到 5531 kg/hm²，年均增长率为 1.93%，呈波动增加趋势（图 3a）， CV 值达 17.78%，表明单产年际波动较大。在 1985—1994 年、1995—2004 年和 2005—2014 年三个时期，冬小麦单产前期增速快但波动大，后期增速趋缓趋稳。对比三个麦区 1985—2014 年间的产量变化可知（图 3b），随着时间变化均呈现在三个时期平均单产逐渐增加、年均增长率先增后减的特点，并且由南向北呈现平均单产逐渐增高、 CV 值逐渐减小的趋势（图 3c）。

2.1.2 空间分布变化

冬小麦 1985—2014 年间的单产总体呈东北向西南降低的空间分布规律（图 4a），具

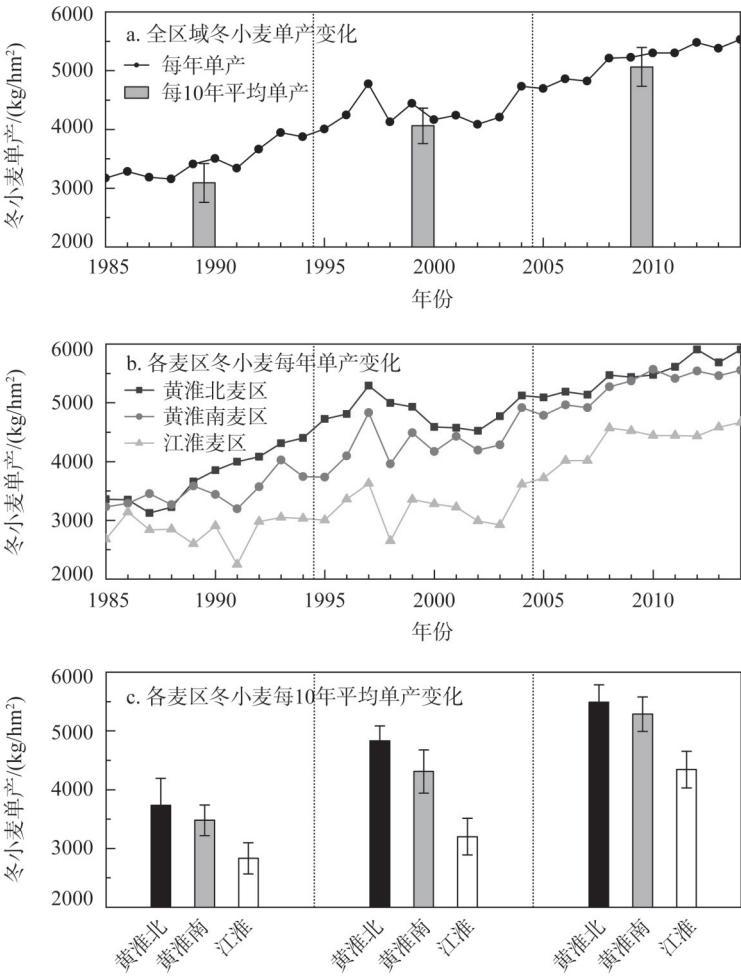


图3 1985—2014年研究区冬小麦产量变化

Fig. 3 The change of winter wheat yield in the study area from 1985 to 2014

体而言：(1) 1985—1994年间黄淮北麦区的东部单产较高，黄淮北的西部、黄淮南的西部和江淮南部的单产较低；(2) 1995—2004年间三个麦区的单产均值大幅增加，黄淮北的东部和黄淮南的中部增产明显；(3) 2005—2014年间各县冬小麦继续增产，高产区域向南、向西扩展，低产区域仍主要分布在西部和东南部。

冬小麦稳产性的空间分布规律和高产性相似，但东西分异更为显著（图4b）。(1) 1985—1994年间黄淮北麦区的稳定性低于江淮和黄淮南麦区，空间分布的整体规律性较弱；(2) 1995—2004年间三个麦区的单产稳定性均有增强，黄淮北麦区北部和中部、黄淮南麦区北部的冬小麦生产逐渐稳定，呈现东北向西南降低的趋势；(3) 2005—2014年间大部分县市稳产性增加，不稳产地区仍是黄淮北西部、黄淮南西部和江淮西部，出现东西分异更为显著的空间特征。

2.2 冬小麦高产—稳产关联性的时空分异特征

2.2.1 高产—稳产关联类型的时间变化

表2是冬小麦高产—稳产四种关联类型在三个时期的结构比例及其变化。相比

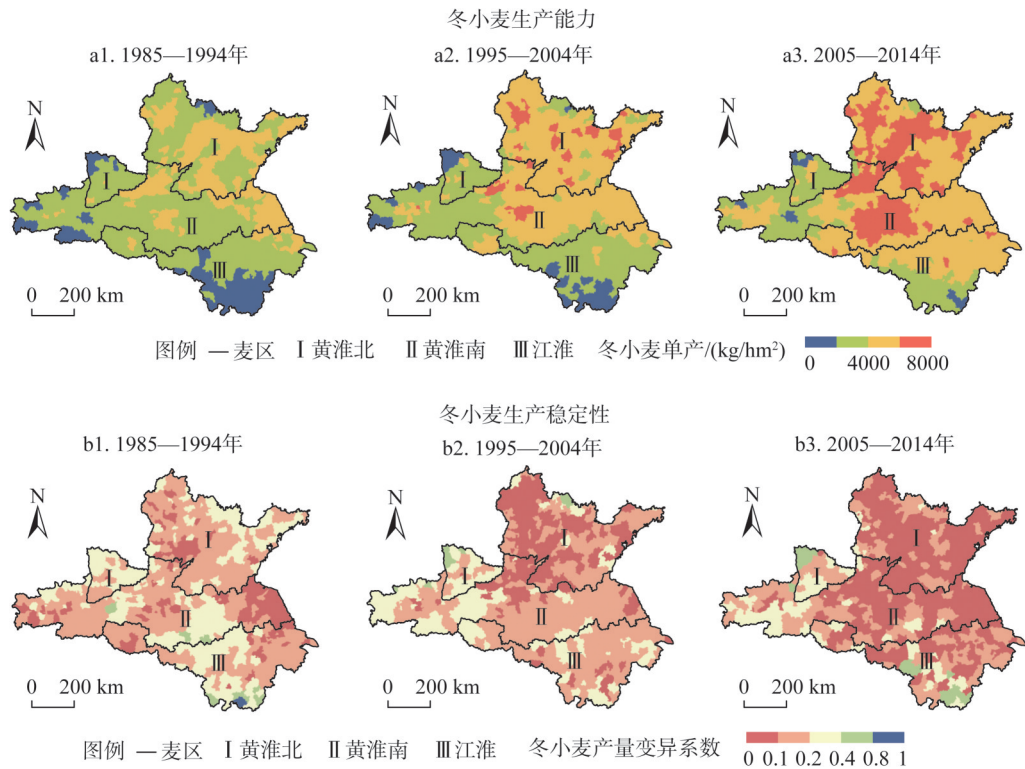


图4 1985—2014年研究区冬小麦高产性和稳产性的空间分布变化

Fig. 4 Changes of spatial distribution of winter wheat yield and its stability in the study area from 1985 to 2014

1985—1994年, 1995—2004年间的高产—稳产和低产—不稳产主导类型占比进一步加大, 呈现高产—不稳产向高产—稳产、低产—稳产向低产—不稳产变化; 从1995—2004年至2005—2014年间, 四种高产—稳产关联类型之间的变化更为复杂, 不仅有高产—不稳产向高产—稳产、低产—稳产向低产—不稳产的变化, 还有高产—稳产向高产—不稳产、低产—不稳产向低产—稳产的变化。这些变化表明, 在各种影响因素作用下, 冬小麦生产既具有增强高产—稳产类型的潜力, 也具有加大低产—不稳产类型的风险; 同时, 低产—不稳产类型可能向低产—稳产类型变化, 高产—稳产类型也可能向高产—不

表2 冬小麦高产—稳产关联类型在不同时期的占比变化矩阵

Table 2 Proportion change matrix of high-yield and stable-yield association of winter wheat over time (%)						
研究时期	关联类型	高产—稳产	高产—不稳产	低产—稳产	低产—不稳产	变化
1985—1994年至1995—2004年	高产—稳产	20.07	6.02	4.18	3.34	+3.90
	高产—不稳产	11.20	2.84	0.17	2.17	-3.90
	低产—稳产	2.84	0.33	4.35	9.03	-3.90
	低产—不稳产	3.34	3.34	3.85	22.91	+3.90
1995—2004年至2005—2014年	高产—稳产	25.75	6.69	2.84	2.17	-2.00
	高产—不稳产	6.86	4.01	1.17	0.50	+2.00
	低产—稳产	0.67	0.67	3.51	7.69	-2.00
	低产—不稳产	2.17	3.18	7.02	25.08	+2.00

稳产类型变化,但整体上由低产类型向高产—稳产类型转换具有难度。

另一方面,高产—稳产类型和低产—不稳产类型在三个时期均占比相当,二者占比之和在70%左右,表明这两类是研究区的主导类型,冬小麦高产与稳产、低产与不稳产密切关联的特征鲜明。

比较三个时期不同单产水平下的冬小麦 CV 值(图5a)可知,高产区的 CV 值始终小于低产区,变化幅度较小,而且无论高低产区, CV 值随时间变化均逐渐减小,表明高产区的冬小麦更具有稳产性,且稳产性随时间逐渐增强。同时,三个时期冬小麦单产与 CV 的散点图及拟合结果(图5b)显示,冬小麦产量与 CV 值呈显著负相关,即:高产条件下冬小麦的稳产性更强,而低产条件下的波动性更大。

2.2.2 高产—稳产关联类型的空间分布变化

根据冬小麦高产—稳产四种关联类型的空间分布图(图6a)及其LISA空间聚集图(图6b)发现:(1)1985—1994年间高产—稳产区主要位于东部和中部,H-H类型呈现四个聚集中心;低产—不稳产区主要位于西部和南部(黄淮南麦区西部和江淮麦区中西部),L-L类型有多个零星聚集区,其中江淮麦区中西部的聚集区规模较大。(2)1995—2004年间高产—稳产区向北部和东部扩展,形成南北延伸的聚集区,且规模较大;低产—不稳产区仍然在西部和南部,L-L类型仍有多个零星聚集区,但江淮麦区中西部的聚集区趋于消失。(3)2005—2014年间高产—稳产区进一步扩大,聚集区向南延伸;低产—不稳产区基本维持不变,西部的L-L类型区聚集性明显增强。整体而言,作为主导类型的高产—稳产区和低产—不稳产区的空间聚集性较强,高产—稳产区逐步扩大,低产—不稳产区趋向稳定;而非主导类型的高产—不稳产区和低产—稳产区的空间聚集性较弱,未形成显著聚集中心。

遵循《全国新增1000亿斤粮食生产能力规划》“粮食产能向主产区和产粮大县集中”和“着力打造粮食生产核心区”的根本要求,根据高产—稳产关联类型的空间分布,可以认为黄淮麦区具有扩大冬小麦优质产地范围的基本条件,在进一步加强灌溉条件和农业机械条件、选育抗劣品种的前提下,通过促进低质产地及高产—不稳产区向高产—稳产类型转化,能够形成大规模连片的高产—稳产优质产地;而在江淮麦区,需要进行农田灌溉、排水条件的同步改善,并适当进行作物结构优化。

2.3 冬小麦高产—稳产关联特征的影响因素

2.3.1 模型结果分析

利用无序多分类Logistic回归模型探究冬小麦高产—稳产关联性的影响因素,结果如表3~表5所示。三个时期回归模型的拟合 P 值均小于0.001,综合预测准确率分别为59.5%、70.7%和66.2%,拟合效果较好。

1985—1994年间,(1)以低产—不稳产类型为参照,低产—稳产类型的稳定性主要受灌溉条件和化肥施用量的正向作用,累积日照时数增加也有利于稳产。(2)以低产—不稳产类型和低产—稳产类型分别为参照,对比高产—不稳产类型和高产—稳产类型,发现灌溉条件仍然是促进冬小麦高产的最重要因素;稳产区返青—抽穗期的日均温度波动和抽穗—成熟期的日照时数波动、以及不稳产区的累积降水过多和降水波动过大均是导致冬小麦减产的重要因素。(3)以高产—不稳产类型为参照,对比高产—稳产类型,可知高产区的稳产主要与累积降水和返青—抽穗期的日均温度和降水稳定性相关。

1995—2004年间,(1)以低产—不稳产类型为参照,高产—稳产类型除了受灌溉条

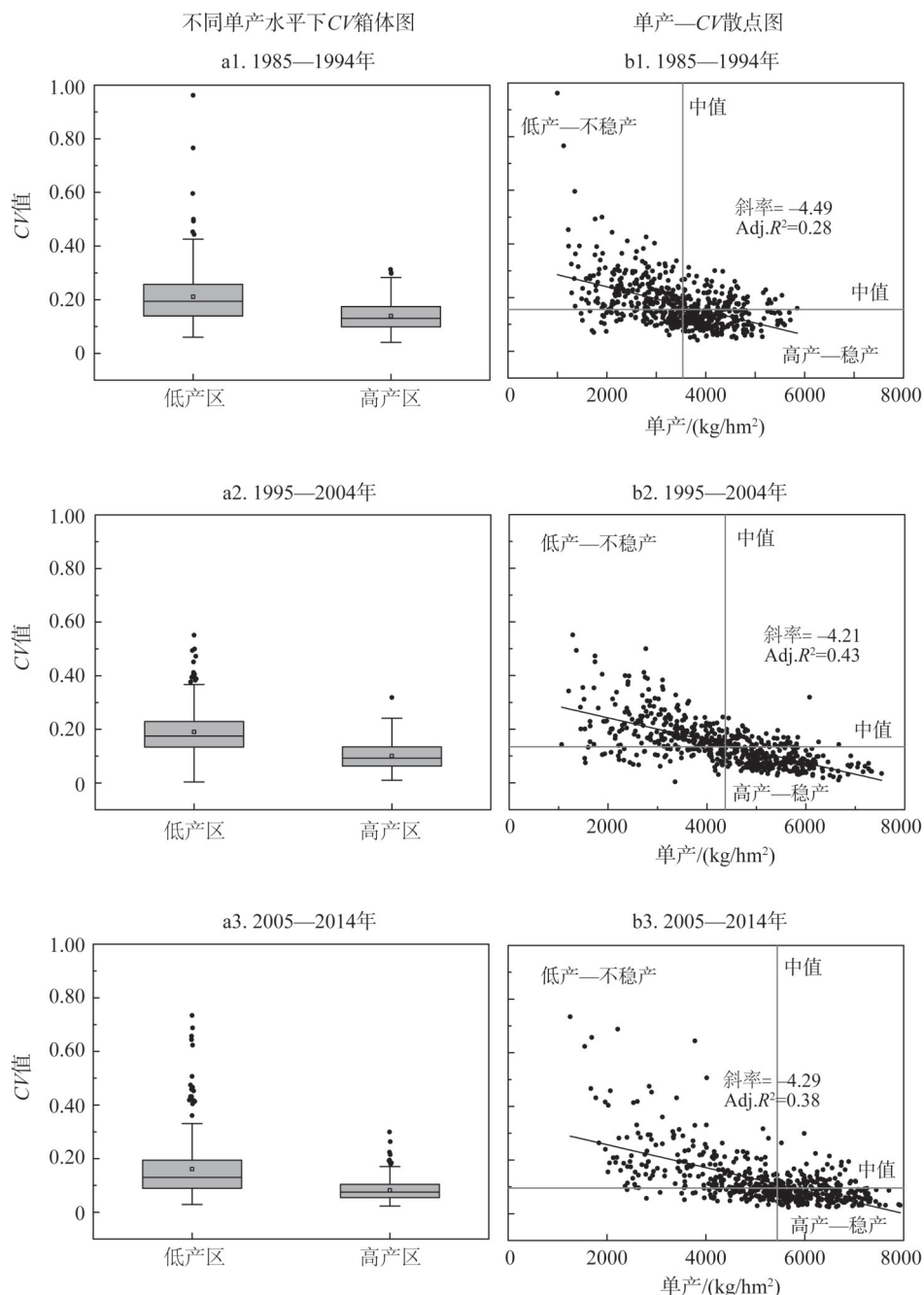


图5 冬小麦高产与稳产的关系

Fig. 5 The relationship of high yield and stable yield of winter wheat

件、累积降水和日均温度波动的影响外，还与播种—越冬期的降水和日照时数波动负相关，与农业机械条件和化肥施用量正相关，农业生产条件的影响最大。(2) 以低产—不稳产类型和低产—稳产类型分别为参照，对比高产—不稳产类型和高产—稳产类型，发现稳产区生长季累积降水过多将导致冬小麦产量下降，灌溉条件、农业机械条件对高产的影响增强。(3) 以低产—不稳产类型和高产—不稳产类型分别为参照，对比低产—稳

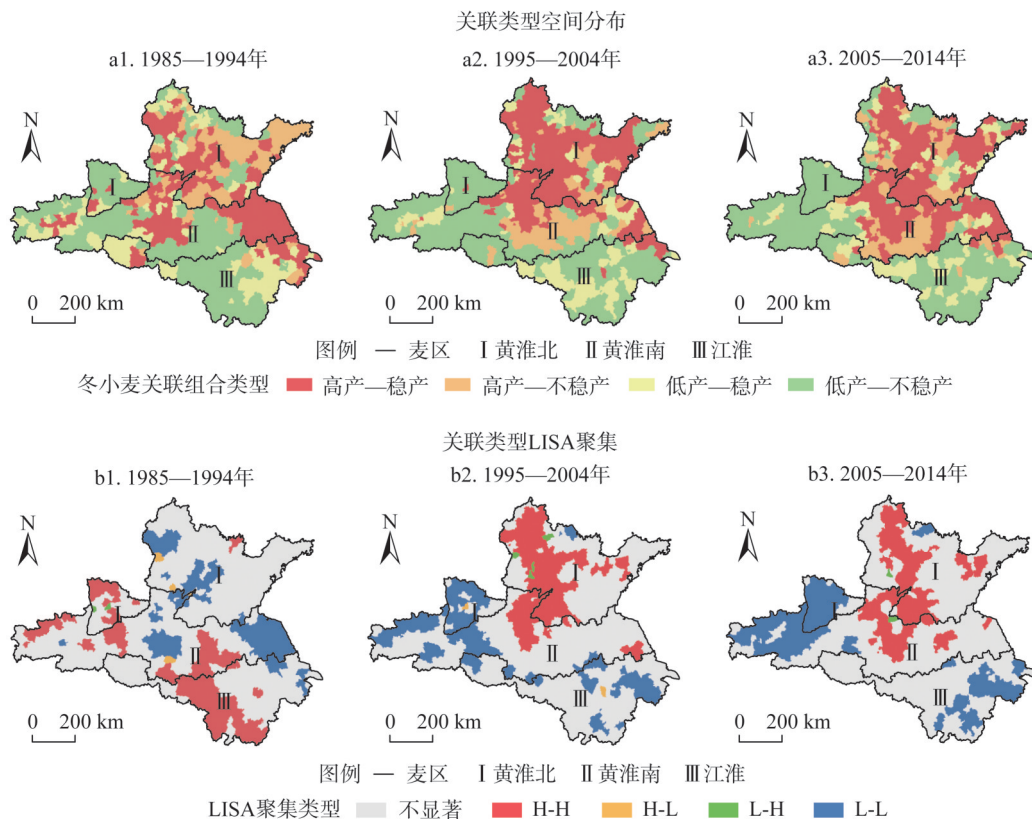


图6 冬小麦高产—稳产关联类型空间分布及其LISA聚集图

Fig. 6 Spatial distribution and LISA cluster of high-yield and stable-yield association of winter wheat

产类型和高产—稳产类型,结果与前一时期相似,进一步印证灌溉条件对于低产区稳产性的重要作用,以及积温、降水及其波动对高产区稳产性的重要影响。

2005—2014年间,(1)以低产—不稳产类型为参照,高产—稳产类型依旧主要受降水及其波动影响,灌溉条件和农业机械条件的正向影响作用增强。(2)以低产—不稳产类型和低产—稳产类型为参照,对比高产—不稳产类型和高产—稳产类型,发现生长季累积降水过多依旧是影响高产的不利因素,而灌溉条件、农业机械条件依旧是促进产量增加的有利因素,与前一时期的结果一致。(3)以低产—不稳产类型和高产—不稳产类型分别为参照,对比低产—稳产类型和高产—稳产类型,可知低产区除了受农业生产条件影响外,生长季积温增加和返青—抽穗期累积降水稳定也会促进稳产;而高产区除了受积温、降水等气象因素影响外,农业生产条件对保障稳产具有正向作用。

根据以上结果,首先,灌溉条件和农业机械条件是保障冬小麦高产和稳产的最重要因素,其正向影响随时间逐渐增强;化肥施用量的作用逐渐从增加到饱和;劳动力的影响程度逐渐减小,结果与前人的研究较为一致^[13,21]。其次,具备灌溉条件时,光温水条件对冬小麦高产和稳产的影响相对较小且较稳定,表明研究区具备冬小麦生产的优良条件。再次,不同物候期的气象要素波动同时影响高产和稳产,但作用随时间逐渐减小,影响因素的重要程度依次为:日均温度波动>累积降水波动>累积日照时数波动,温度和降水波动的影响主要在返青—抽穗期,而日照时数波动的作用主要在抽穗—成熟期。

表3 1985—1994年的Logistic回归模型结果

Table 3 The results of Logistic regression model from 1985 to 1994

类型	低产—稳产	高产—不稳产	高产—稳产	高产—稳产	高产—稳产
参考类型	低产—不稳产	低产—不稳产	低产—不稳产	低产—稳产	高产—不稳产
影响因素	标准化系数 β				
生长季>0℃积温	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
生长季累积降水	0.00	-0.86***	-0.43**	0.00	0.43***
生长季日照时数	0.00**	0.00	0.00**	0.00	0.00
播种—越冬期日均温度 CV	-0.19	-0.08	-0.20**	-0.01	-0.12
返青—抽穗期日均温度 CV	0.60	1.01	0.26	-0.33**	-0.74**
抽穗—成熟期日均温度 CV	-0.55	-0.61*	-0.05	0.49	0.56
播种—越冬期累积降水 CV	0.10	0.22*	0.06	-0.04	-0.16
返青—抽穗期累积降水 CV	-0.03	-0.28*	0.08	0.11	0.36**
抽穗—成熟期累积降水 CV	0.00	0.23**	0.15*	0.15	-0.08
播种—越冬期累积日照时数 CV	0.11	-0.03	0.11	-0.01	0.14
返青—抽穗期累积日照时数 CV	0.07	-0.08*	-0.01	-0.09	0.06
抽穗—成熟期累积日照时数 CV	0.05	-0.17	-0.11	-0.16*	0.06
灌溉条件	0.22**	0.57***	0.61***	0.39***	0.04
农业机械条件	0.00	0.30*	-0.21	-0.21	0.09
化肥施用量	0.16**	0.07	-0.02	0.13	-0.09
劳动力	0.03	-0.06	-0.07	-0.10	-0.01

注：***表示在0.01水平上显著，**表示在0.05水平上显著，*表示在0.1水平上显著，下同。

表4 1995—2004年的Logistic回归模型结果

Table 4 The results of Logistic regression model from 1995 to 2004

类型	低产—稳产	高产—不稳产	高产—稳产	高产—稳产	高产—稳产
参考类型	低产—不稳产	低产—不稳产	低产—不稳产	低产—稳产	高产—不稳产
影响因素	标准化系数 β				
生长季>0℃积温	0.00	0.00***	0.00	0.00	0.00***
生长季累积降水	0.00	-0.42**	-1.26***	-1.26***	-0.84***
生长季日照时数	0.00	0.00	0.00	0.00*	0.00
播种—越冬期日均温度 CV	0.46	0.85	1.87***	0.93**	0.47***
返青—抽穗期日均温度 CV	-0.31	0.01	-0.95***	-0.64	-0.95***
抽穗—成熟期日均温度 CV	-0.43	-0.27	-0.09	0.34	0.18
播种—越冬期累积降水 CV	0.03	0.10	-0.30**	-0.33***	-0.40***
返青—抽穗期累积降水 CV	0.02	0.28**	0.09	0.07	-0.19**
抽穗—成熟期累积降水 CV	-0.03	0.00	-0.01	0.03	-0.01
播种—越冬期累积日照时数 CV	-0.03	-0.17	-0.27***	-0.24**	-0.10
返青—抽穗期累积日照时数 CV	-0.01	-0.12	-0.04	-0.03	0.08
抽穗—成熟期累积日照时数 CV	0.10	-0.55	-0.06	-0.16	0.50
灌溉条件	0.53***	0.94***	0.98***	0.45***	0.03
农业机械条件	0.09	0.04**	0.15**	0.05**	0.11
化肥施用量	0.04	-0.01	0.06**	0.10**	0.07
劳动力	0.08	0.21**	-0.08	-0.16	-0.29

表5 2005—2014年的Logistic回归模型结果

Table 5 The results of Logistic regression model from 2005 to 2014

类型	低产—稳产	高产—不稳产	高产—稳产	高产—稳产	高产—稳产
参考类型	低产—不稳产	低产—不稳产	低产—不稳产	低产—稳产	高产—不稳产
影响因素	标准化系数 β				
生长季>0℃积温	0.00*	0.00	0.00	0.00*	0.00*
生长季累积降水	0.00	-0.43***	-0.86***	-0.43***	-0.43*
生长季日总照时数	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
播种—越冬期日均温度 CV	0.01	-0.08	-0.03	-0.05	0.05
返青—抽穗期日均温度 CV	0.08	0.08	0.12	0.04	0.04
抽穗—成熟期日均温度 CV	0.04	-0.18	0.00	-0.04	0.17
播种—越冬期累积降水 CV	-0.02	0.31**	0.11	0.13	-0.20
返青—抽穗期累积降水 CV	-0.01***	-0.12	0.03	0.04	0.15
抽穗—成熟期累积降水 CV	-0.26	0.17	0.23***	-0.03	0.06
播种—越冬期累积日照时数 CV	0.08	-0.01	-0.03	-0.10	-0.02
返青—抽穗期累积日照时数 CV	-0.01	-0.01	-0.02	-0.01	0.00
抽穗—成熟期累积日照时数 CV	-0.13	-0.17	-0.11	-0.24**	0.06
灌溉条件	0.60***	0.55***	1.39***	0.80***	0.84***
农业机械条件	0.21*	0.34***	0.20*	-0.01	0.14*
化肥施用量	-0.03	-0.15	0.03	0.06*	0.19**
劳动力	-0.06	-0.11	-0.30***	-0.24**	-0.18

2.3.2 模型结果讨论

《第三次气候变化国家评估报告》^[22]和《华北区域气候变化评估报告》^[1]指出，华北是我国未来增温最显著、增温幅度最大的地区之一，冬季增温幅度最大；降水量年际波动较大但总体呈增加趋势，冬季降水量增速最快。

根据Logistic模型结果，未来北方冬小麦主产区的温度升高会有利于冬小麦高产和稳产，但播种—越冬期温度升高导致的旺长会有负面影响。另一方面，由于生长季累积降水对高产—稳产关联类型的负向影响，降水增多可能会导致冬小麦减产且不稳产，尤其是江淮麦区，过多的降水可能导致低温寡照，同时加重镰刀菌赤霉病等病害^[23]；并且播种—越冬期累积降水波动较大将加大春旱威胁。因此，研究区未来气温升高的正效应可能被降水增多、冬季升温和极端事件增加的负效应所抵消，从而导致高产—不稳产类型或低产—不稳产类型增多的趋势，总体上不利于冬小麦生产。

模型结果还揭示出灌溉条件和农业机械条件的影响呈增加趋势，非气象因素对冬小麦生产的影响总体上强于气象因素，冬小麦高产特性和稳产特性显著关联。因此，改善农业生产条件可以同步提高冬小麦高产性和稳产性，有助于增强抵御气候变化负效应的能力。

3 结论

粮食生产能力和稳定性在保障我国粮食安全方面同等重要，全面认识冬小麦高产—稳产关联特征更具价值。基于1985—2014年的冬小麦单产数据、物候和气象数据、农业

生产要素数据,分析了北方冬小麦主产区高产—稳产关联性的时空分异特征,并应用无序多分类Logistic模型揭示了影响冬小麦高产—稳产关联性的主要因素,研究结论为:

(1) 时间变化上,冬小麦单产及稳定性均在1985—2014年间不断增加;空间分布上,冬小麦单产及稳产性均呈现由东北向西南降低的特征,稳产性的东西方向分异更为显著。

(2) 冬小麦高产与稳产、低产与不稳产密切关联的特征鲜明,且这两种类型在研究区占据主导地位,高产—不稳产类型有较大潜力转换为高产—稳产类型。高产—稳产区主要分布在东北部和中部,形成南北延伸的优质产地聚集区;低产—不稳产区主要分布在西部和东南部,西部的聚集性明显。

(3) 无序多分类Logistic回归结果表明:农业生产条件改善是促进冬小麦高产—稳产的最重要因素,灌溉条件的正向作用最为显著。具备灌溉条件的情况下,研究区的光温水条件均比较适合冬小麦生产,但不同物候期气象要素的波动同时对冬小麦的高产和稳产有负向影响,影响程度依次为:日均温度波动>累积降水波动>累积日照时数波动,温度和降水波动影响主要体现在返青—抽穗期,而日照时数波动的作用主要体现在抽穗—成熟期。

本文依据研究区598个县1985—2014年间的冬小麦单产中值和变异系数中值来判别高产/低产和稳产/不稳产,并划分高产—稳产、高产—不稳产、低产—稳产和低产—不稳产四种关联类型。这种基于阈值的相对分级标准可以抵消技术进步因素对冬小麦产量的阶段性影响,简单易行,但针对不同区域的适用性需要进一步验证。同时,应用无序多分类Logistic模型有利于揭示影响冬小麦高产—稳产关联类型的重要因素,但粮食生产系统复杂,选择自变量时还可以考虑农业政策、农村居民收入等。此外,收集近年的数据可使研究结果更加完善。

参考文献(References):

- [1] 中国气象局. 华北区域气候变化评估报告. http://www.cma.gov.cn/2011xzt/2013zhuant/20130620_3/index.html#, 2013-8-16. [China Meteorological Administration. Climate change assessment report in North China. http://www.cma.gov.cn/2011xzt/2013zhuant/20130620_3/index.html#, 2013-8-16.]
- [2] 李向东, 张德奇, 王汉芳, 等. 越冬前增温对小麦生长发育和产量的影响. 应用生态学报, 2015, 26(3): 839-846. [LI X D, ZHANG D Q, WANG H F, et al. Impact of temperature increment before the over-wintering period on growth and development and grain yield of winter wheat. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(3): 839-846.]
- [3] 赵彦茜, 肖登攀, 柏会子, 等. 中国作物物候对气候变化的响应与适应研究进展. 地理科学进展, 2019, 38(2): 224-235. [ZHAO Y X, XIAO D P, BAI H Z, et al. Research progress on the response and adaptation of crop phenology to climate change in China. Progress in Geography, 2019, 38(2): 224-235.]
- [4] YAND X, TIAN Z, SUN L X, et al. The impacts of increased heat stress events on wheat yield under climate change in China. Climatic Change, 2017, 140(3-4): 605-620.
- [5] WANG J X, HUANG J K, YAN T T. Impacts of climate change on water and agricultural production in ten large river basins in China. Journal of Integrative Agriculture, 2013, 12(7): 1267-1278.
- [6] 吴芬, 徐萍, 郭海谦, 等. 冬小麦产量差和资源利用效率差及调控途径研究进展. 中国生态农业学报, 2020, 28(10): 1551-1567. [WU F, XU P, GUO H Q, et al. Advances in research regarding the yield gap and resource use efficiency of winter wheat cultivation and the related regulatory approaches. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(10): 1551-1567.]
- [7] 柏会子, 肖登攀, 刘剑锋, 等. 1965—2014年华北地区极端气候事件与农业气象灾害时空格局研究. 地理与地理信息科学, 2018, 34(5): 99-105. [BAI H Z, XIAO D P, LIU J F, et al. Temporal and spatial patterns of extreme climate events

- and agrometeorological disasters in North China from 1965 to 2014. *Geography and Geo-Information Science*, 2018, 34(5): 99-105.]
- [8] 肖登攀, 陶福祿, 沈彦俊, 等. 华北平原冬小麦对过去 30 年气候变化响应的敏感性研究. *中国生态农业学报*, 2014, 22(4): 430-438. [XIAO D P, TAO F L, SHEN Y J, et al. Sensitivity of response of winter wheat to climate change in the North China Plain in the last three decades. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22(4): 430-438.]
- [9] WANG X, ZHAO C, CHRISTOPH M, et al. Emergent constraint on crop yield response to warmer temperature from field experiments. *Nature Sustainability*, 2020, 3: 908-916.
- [10] BAI H, WANG J, FANG Q, et al. Modeling the sensitivity of wheat yield and yield gap to temperature change with two contrasting methods in the North China Plain. *Climatic Change*, 2019, 156(4): 589-607.
- [11] ZHAO J, YANG X G. Distribution of high-yield and high-yield-stability zones for maize yield potential in the main growing regions in China. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2018, 248: 511-517.
- [12] 曹永强, 李维佳, 袁立婷. 河北省主要农作物生产时空格局变化特征及安全评价. *地理科学*, 2018, 38(8): 1319-1327. [CAO Y Q, LI W J, YUAN L T. Spatio-temporal pattern variation and safety evaluation of crops in Hebei province. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(8): 1319-1327.]
- [13] 李昊儒, 毛丽丽, 梅旭荣, 等. 近 30 年来我国粮食产量波动影响因素分析. *中国农业资源与区划*, 2018, 39(10): 1-10, 16. [LI H R, MAO L L, MEI X R, et al. Analysis on influencing factors of grain production fluctuation during the last 30 years in China. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2018, 39(10): 1-10, 16.]
- [14] 潘佩佩, 杨桂山, 苏伟忠, 等. 太湖流域粮食生产时空格局演变与粮食安全评价. *自然资源学报*, 2013, 28(6): 931-943. [PAN P P, YANG G S, SU W Z, et al. Spatio-temporal structure variation of grain production and the evaluation of grain security in Taihu Lake Basin. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(6): 931-943.]
- [15] 姚成胜, 殷伟, 李政通. 中国粮食安全系统脆弱性评价及其驱动机制分析. *自然资源学报*, 2019, 34(8): 1720-1734. [YAO C S, YIN W, LI Z T. The vulnerability assessment and driving mechanism analysis of China's food security system. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(8): 1720-1734.]
- [16] 尹朝静, 李谷成, 高雪. 气候因素对水稻单产影响的实证分析: 基于湖北农户层面的分层模型. *自然资源学报*, 2017, 32(8): 1433-1444. [YIN C J, LI G C, GAO X. An empirical analysis of climatic factors impact on rice yield: Based on the Hierarchical Model at household level. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(8): 1433-1444.]
- [17] 马恩朴, 蔡建明, 林静, 等. 2000—2014 年全球粮食安全格局的时空演化及影响因素. *地理学报*, 2020, 75(2): 332-347. [MA E P, CAI J M, LIN J, et al. Spatio-temporal evolution of global food security pattern and its influencing factors in 2000-2014. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(2): 332-347.]
- [18] 国家统计局. 中国统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2019: 385-391. [National Bureau of China. *China Statistical Yearbook*. Beijing: China Statistics Press, 2019: 385-391.]
- [19] 金善宝. 中国小麦学. 北京: 中国农业出版社, 1996: 29-55. [JIN S B. *Chinese Wheat*. Beijing: China Agriculture Press, 1996: 29-55.]
- [20] 赵广才. 中国小麦种植区划研究(一). 麦类作物学报, 2010, 30(5): 886-895. [ZHAO G C. Study on Chinese wheat planting regionalization (I). *Journal of Triticeae Crops*, 2010, 30(5): 886-895.]
- [21] 王凤, 刘艳芳, 孔雪松, 等. 中国县域粮食产量时空演变及影响因素变化. *经济地理*, 2018, 38(5): 142-151. [WANG F, LIU Y F, KONG X S, et al. Spatial and temporal variation of grain production and its influencing factors at the county level in China. *Economic Geography*, 2018, 38(5): 142-151.]
- [22] 《第三次气候变化国家评估报告》编写委员会. 第三次气候变化国家评估报告. 北京: 科学出版社, 2015: 285-346. [Editorial Committee for the Third China's National Assessment Report on Climate Change. *The Third China's National Assessment Report on Climate Change*. Beijing: Science Press, 2015: 285-346.]
- [23] SONG Y, LINDERHOLM H W, WANG C, et al. The influence of excess precipitation on winter wheat under climate change in China from 1961 to 2017. *Science of the Total Environment*, 2019, 690(10): 189-196.

The association between high-yield and stable-yield characteristics of winter wheat and its influencing factors in the main producing areas in Northern China

CHEN Xiao-lin¹, TAN Xiao-yue², LI Lu-ning¹, CHEN Jin¹, LI Qiang¹

(1. Beijing Normal University, Faculty of Geographical Science, Beijing 100875, China; 2. The Department of Land Surveying and Geo-Informatics, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077, China)

Abstract: The high yield and stable yield of winter wheat are of equal importance to ensure food security in China. In view of the significant negative impacts of climate change on winter wheat production in the main producing areas in Northern China, it is necessary to start from the association between high-yield and stable-yield characteristics to explore effective ways to improve and stabilize the yield. Based on the yield data of 598 counties from 1985 to 2014, we analyze the association between high-yield and stable-yield characteristics of winter wheat and its spatiotemporal differentiation. Combined with the meteorological data, the phenological data and the agricultural production factors data, we apply the Unordered Multinomial Logistic Model to reveal the main influencing factors that affect the high- yield and stable- yield characteristics of winter wheat. The main results show that: (1) The yield of winter wheat has increased over time while stability has also enhanced, and both high productivity and stable productivity show a decrease from northeast to southwest. (2) The high yield and stable yield, low yield and unstable yield of winter wheat are closely correlated. These two association types dominate in the study area, and their spatial distribution presents a relatively stable and aggregated pattern. (3) Among the influencing factors, the irrigation conditions are the key factors promoting the high yield and stable yield of winter wheat, with the influence gradually increasing during the study period. With irrigation conditions available, meteorological conditions such as light, temperature and water in the study area are suitable for the production of winter wheat. However, fluctuations of meteorological factors during different phenological periods have negative impacts on both high yield and stable yield of winter wheat. These findings of our study can provide references for the delineation of high-quality winter wheat producing areas and the formulation of adaptation strategies in response to climate change in China.

Keywords: main producing areas of winter wheat in Northern China; high-yield and stable-yield association; spatio-temporal differentiation; Unordered Multinomial Logistic Model