文章编号:1000-7601(2025)05-0263-09 doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2025.05.26

中国北部冬小麦稳定种植分布及其影响因素分析

黄银兰[1,2],刘 丹[1],陈 实[1,2]

(1. 池州学院地理与规划学院,安徽 池州 247000; 2. 池州学院农业生态资源与环境研究中心,安徽 池州 247000)

摘 要:基于中国北部 2018—2024 年冬小麦数据,利用冷热点分析、地理探测器等方法分析中国北部冬小麦稳定种植空间格局特征,揭示地形梯度因子、农业气候因子和土壤质量指标对冬小麦稳定种植的影响,探究土地利用变化对冬小麦稳定种植分布的制约。结果表明:(1)中国北部约有 40%冬小麦分布的种植概率超过 71%,冬小麦稳定种植的热区主要位于河北省保定市、沧州市、石家庄市与廊坊市四市交界处,冷区主要聚集在山西省太原市、吕梁市、晋中市和长治市等地区。(2)地形梯度因子对冬小麦稳定种植影响最大(q 均值为 0.19),其次为农业气候因子(q 均值为 0.17),土壤质量对冬小麦稳定种植的影响最小,因子间的两两交互作用对冬小麦稳定种植影响较大。高程小于 589 m 的区域有利于冬小麦稳定种植,生育期积温大于 2 020℃·d 有利于冬小麦稳定种植。(3)土地利用变化类型中,耕地向不透水面转移、城镇扩张占用耕地对冬小麦稳定种植具有明显影响;适宜稳定种植冬小麦的耕地面积由 1999 年的 64 344 km^2 减少至 2023 年的 56 777 km^2,减少了 11.76%(7 567 km^2)。

关键词:冬小麦;稳定种植区域;地形梯度;农业气候因子;土壤质量;中国北部

中图分类号:S42; S512.1+1 **文献标志码**:A

Analysis of the spatial distribution and influencing factors of stable winter wheat planting in northern China

HUANG Yinlan[1,2], LIU Dan[1], CHEN Shi[1,2]

(1. *School of Geography and Planning, Chizhou University, Chizhou, Anhui* 247000, *China*;
2. *Research Center for Agricultural Ecological Resources and Environment, Chizhou University, Chizhou, Anhui* 247000, *China*)

Abstract: Based on winter wheat data from northern China spanning 2018 to 2024, this study employed methods such as hotspot analysis and the Geodetector to analyze the spatial distribution patterns of stable winter wheat planting. Additionally, the study explored the influence of topographic gradient factors, agro-climatic conditions, and soil quality indicators on stable winter wheat planting and examined the constraints of land-use changes on its spatial distribution. The results showed that: (1) Approximately 40% of winter wheat planting in northern China exhibited over 71% of occurrence probability. The hotspots for stable winter wheat planting were primarily located at the junction of Baoding, Cangzhou, Shijiazhuang, and Langfang in Hebei Province, while coldspots were concentrated in Taiyuan, Lüliang, Jinzhong, and Changzhi in Shanxi Province. (2) Topographic gradient factors had the most significant impact on stable winter wheat planting (average q value was 0.19), followed by agro-climatic conditions (average q value was 0.17), with soil quality exerting the least influence. Notably, the interaction between pairs of factors significantly influenced winter wheat stability. The areas with an elevation of less than 589 meters and growing degree days exceeding 2020℃·d favored stable planting. (3) Among the types of land-use changes, the conversion of cropland to impervious surfaces, driven by urban expansion, had a notable impact on stable winter wheat planting. The cropland area suitable for stable winter wheat planting declined from 64 344 km^2 in 1999 to 56 777 km^2 in 2023, representing a reduction of 11.76% (7 567 km^2).

Keywords: winter wheat; stable planting area; topographic gradient; agricultural climate factor; soil quality; northern China

收稿日期:2024-10-13 **修回日期**:2025-03-03

基金项目:安徽省教育厅自然科学重大项目(2024AH040199);安徽省哲学社会科学规划项目(AHSKQ2021D172)

作者简介:黄银兰(1988-),女,安徽安庆人,硕士,讲师,研究方向为资源与生态环境评价。E-mail:hyl_03@163.com

通信作者:陈实(1987-),男,安徽安庆人,博士,副教授,主要从事农业资源与环境遥感研究。E-mail:shic11@126.com

冬小麦作为我国北方地区重要的口粮作物,其稳定生产对保障国家粮食安全具有战略意义[1]。中国北部冬小麦区是中国冬小麦的主要种植区,然而该地区复杂多样的地形格局与时空变异性强的气候条件深刻影响着冬小麦的种植空间布局[2]。地形梯度和土壤质量差异导致耕作条件呈现显著的空间异质性,成为制约区域冬小麦种植规模与生产效率的关键因素[3]。因此,深入解析中国北部冬小麦稳定种植区时空分布格局的演变特征并系统揭示其驱动机制,对于优化区域作物种植结构、提升冬小麦单产与总产潜力、增强粮食供给韧性,从而保障国家粮食安全具有重要的理论与实践价值[4]。

近年来,随着气候变化、农业技术进步和政策调整,中国北部冬小麦种植区发生了明显变化[5]。学者们从不同角度开展了大量研究,在冬小麦种植空间格局变化的研究方法方面,基于逐日气象数据和 RCPs(representative concentration pathways)情景下的未来温度数据分析冬小麦种植北界的变化规律和未来趋势[6]。通过全国小麦主产区的面板数据构建双向固定效应模型,综合考虑时间和空间因素,揭示各省(市、区)小麦种植的空间分布特征及其优势变化[7]。基于 PRECIS(providing regional climates for impacts studies)区域气候模式系统分析未来气候情景下冬小麦潜在北移区的农业气候资源变化,预测冬小麦种植区的可能变化[8]。利用 VIP(vegetation interface processes)生态水文模型评估气候变化对冬小麦种植的影响[9]。在冬小麦种植空间格局变化的驱动因素研究方面,气候变暖是冬小麦种植空间格局变化的主要驱动因素之一,由于冬季温度升高,冬小麦不同冬春性品种种植界限明显北移[10],气温升高和降水变化对冬小麦产量的影响存在区域差异[11]。至 21 世纪末,冬小麦种植北界将平均向北移动 147.8 km,北移面积约 1.86×10^5 km^2[8]。农业技术的进步特别是新品种的推广和栽培技术的改进对冬小麦种植区的扩展起到了重要作用。孙敬松等[12]利用最大熵法模拟中国冬小麦分布区的年代际动态变化,发现新品种的推广显著提高了高寒地区的冬小麦种植适宜性。政策调整也对冬小麦种植区的变化产生了重要影响。在华北地下水超采区的冬小麦种植区,政策引导下的土地休耕措施能够有效减少地下水消耗、保护生态环境[13]。在冬小麦种植对地形梯度的响应研究方面,研究发现冬小麦种植北界北移的热量资源受地形影响显著,即冬小麦种植适宜性随着地形高度的变化而变化[14]。但从地形梯度因子、农业气候因子、土壤质量指标、土地利用变化等方面分析其对冬小麦稳定种植的影响还值得深入探究。

鉴于此,本研究基于 2018—2024 年冬小麦空间分布栅格数据,揭示中国北部冬麦区冬小麦种植概率,采用冷热点分析方法解析县域尺度下冬小麦稳定种植空间分布格局,运用地理探测器,从因子探测、交互探测及风险探测三个角度,在格网尺度探究自变量地形梯度因子、农业气候因子、土壤质量指标对因变量冬小麦空间分布的影响程度,明晰土地利用变化对中国北部冬小麦稳定种植适宜区的制约。研究结果为规模化和集约化科学种植冬小麦提供有力支持。

1 数据和方法

1.1 研究区概况

以中国小麦区划的北部冬麦区为基础,选取覆盖甘肃省西南部、陕西省北部、山西省中部、河北省北部及东北部、北京市与天津市全部地区的县级行政区为研究区域(图 1)[15],研究区面积约为 3.8×10^5 km^2。研究区位于中纬度地区,处于暖温带与中温带的交界地带,气候复杂多样;西部是温带大陆性气候,东部是温带季风气候。该研究区海拔高度在 0~3 059 m 范围内,垂直高差大,地势起伏明显,跨越我国地势第二与第三阶梯。地跨多个地形单元,西部以高原、山地、丘陵为主,东部以平原为主,包括黄土高原、华北平原北部与太行山脉等。

1.2 数据来源与处理

2018—2024 年冬小麦空间分布栅格数据来源于 2018—2024 年中国 10 m 空间分辨率冬小麦识别数据集(http://www.nesdc.org.cn),该数据采用自动

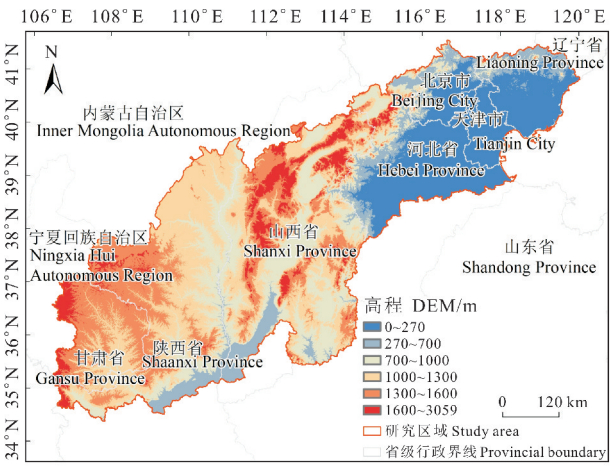


图 1 研究区示意图

Fig.1 Location of study area

化提取方法(automated training data generation, ATDG)和模型年际迁移方法(model transfer, MT)制作大尺度范围下高精度冬小麦栅格数据,空间分辨率为 10 m×10 m[16]。数字地形高程模型数据(digital elevation model, DEM)来自 STRM 90 m 高程数据(http://srtm.csi.cgiar.org/srtmdata/),该数据由美国太空总署(NASA)和美国国家测绘局(NIMA)共同测量制作;由 DEM 数据在 ArcGIS 中处理,分别获得高程、坡度、起伏度与地形位指数共 4 个地形梯度因子,用于分析地形梯度因子对冬小麦稳定种植的影响。从中国国家气象科学数据中心(http://data.cma.cn/)下载 1961—2019 年的降水和气温数据,计算获得影响冬小麦种植的关键农业气候因子[17]。土壤质量数据来源于地理遥感生态网科学数据注册与出版系统的土壤理化性质分布数据(www.gisrs.cn),用于分析土壤质量指标对冬小麦稳定种植的影响。1999 年和 2023 年土地利用类型数据来自武汉大学的中国年度土地覆盖数据集(https://doi.org/10.5281/zenodo.12779975),处理后的土地利用类型包括耕地(CL)、林地(FL)、草地(GL)、水域(WR)、裸地(BN)和不透水面(IS)六大类。将地形因子、农业气候因子、土壤质量指标和土地利用类型数据的投影坐标统一设为 Albers Equal Area Conic/WGS84,空间分辨率重采样为 1 km×1 km。

1.3　研究方法

1.3.1　冷热点分析　冷热点分析(Getis-Ord G_i^* 统计)能够分析研究对象在不同区域尺度下的聚集或者分散程度,可以有效反映研究对象在空间上的分布[18]。本文在县域尺度运用冷热点分析法探究冬小麦种植的空间分布特征。

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^{n} w_{ij}x_j - \bar{X}\sum_{j=1}^{n} w_{ij}}{S\sqrt{\frac{n\sum_{j=1}^{n} w_{ij}^2 - (\sum_{j=1}^{n} w_{ij})^2}{n-1}}} \quad (1)$$

式中,x_j 为 j 研究区研究对象面积;ω_{ij} 为空间权重矩阵;$\bar{X}$ 为研究区范围研究对象面积均值;n 为研究区单个范围个数,S 是标准差。如果 G_i^* 为负值且显著,为冷点区域,G_i^* 为正值且显著,则为热点区域。

1.3.2　地理探测器　本文将研究区划分为 5 km×5 km 的格网(15 164 个),将自变量和因变量统一到格网尺度,采用地理探测器的因子探测、交互探测和风险探测[19],揭示地形、气候和土壤质量对冬小麦种植的影响。

因子探测采用 q 值解释因子 X 对于因变量 Y 的空间分异[20]。因变量是格网内冬小麦稳定种植(概率大于 5/7)的次数总和,选取高程(elevation, *ELE*)、坡度(slope, *SL*)、起伏度(relief amplitude, *RA*)和地形位指数(topographic index, *TI*),年极端最低气温(annual extreme minimum temperature, *AEMT*)、最冷月平均气温(coldest monthly mean temperature, *CMMT*)、生育期积温(accumulated temperature in growth period, *ATGP*)、越冬期负积温(negative accumulated temperature in overwintering period, *NATOP*)、越冬前积温(accumulated temperature before overwintering, *ATBO*)、生育期降水量(precipitation in growth period, *PGP*)、关键期降水量(precipitation in critical period, *PCP*),土壤容重(soil bulk density, *SBD*)、土壤阳离子交换量(cation exchange capacity, *CEC*)、土壤粘粒含量(soil clay particle content, *SCPC*)、土壤 pH(soil pH, *SPH*)、土壤粉粒含量(soil particle content, *SPC*)、土壤有机碳含量(soil organic carbon content, *SOCC*)、土壤全钾含量(soil total K content, *STKC*)、土壤全氮含量(soil total N content, *STNC*)、土壤全磷含量(soil total P content, *STPC*)、土层厚度(soil thickness, *ST*)等地形梯度因子、农业气候因子和土壤质量指标,将 21 个因子按照自然断点法划分为 9 个等级,利用格点提取等级值到格网中作为自变量。

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^{k} N_h\sigma_h^2}{N\sigma^2} \quad (2)$$

式中,L 指影响因子层数量;h 代表单个因子类型;N_h 与 N 分别指单个因子与整个研究区的样本数量;σ_h^2 与 σ^2 分别代表 h 层样本与整个研究区范围的方差。q 值在 0~1 之间,q 值越大,研究区域的空间分异性就越强,反之则较弱。

交互探测可以分析两个影响因子 X_1 与 X_2 共同作用下,是否会增强或者降低对于因变量 Y 的驱动作用[21]。在相互关系中,包括非线性减弱、单因子非线性减弱、双因子独立、独立与非线性增强[22]。

风险探测主要用于判断影响因子 X 在不同子区域间对于因变量 Y 是否存在显著性差异,判断不同因子间等级阈值范围指标差异是否足够大,且因子等级阈值范围内指标差异是否足够小,如在子区域间不存在显著性差异,则超过或低于此子区域就不利于因变量的发展[23],以此来确定冬小麦稳定种植的因子阈值。

表 1 交互作用探测

Table 1 Interaction detection

判断依据 Judgment basis	交互作用 Interaction_detector
$q(X_1 \cap X_2) < \mathrm{Min}[q(X_1), q(X_2)]$	非线性减弱 Nonlinear weakening
$\mathrm{Min}[q(X_1), q(X_2)] < q(X_1 \cap X_2) < \mathrm{Max}[q(X_1), q(X_2)]$	单因子非线性减弱 Single factor nonlinear weakening
$q(X_1 \cap X_2) > \mathrm{Max}[q(X_1), q(X_2)]$	双因子独立 Two-factor independence
$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$	独立 Independence
$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$	非线性增强 Nonlinear enhancement

2 结果与分析

2.1 中国北部冬小麦种植空间格局分析

基于 2018—2024 年冬小麦空间分布栅格数据，本研究首先计算了每个栅格单元在 7 年内种植冬小麦的累计频率（即种植概率）。具体方法为：利用 ArcGIS 的栅格计算功能，对每年栅格数据（种植赋值为 1，未种植赋值为 0）进行逐年累加求和，再除以总年数（7 年），最终得到表征多年稳定性的种植概率（图 2a）。计算结果显示，种植概率依次为 14%（仅 1 年种植）、28%（2 年）、43%（3 年）、57%（4 年）、71%（5 年）、86%（6 年）与 100%（7 年连续种植）。从空间格局分析（图 2a）可见，种植概率≥57%（即至少 4 年种植）的区域占研究区冬小麦总面积的 50%。其中，种植概率≥71%（即至少 5 年种植）的高稳定性区域占比约 40%，空间上主要集中分布于地形条件优越的河北海河平原、山西临汾盆地和陕西渭河平原等冲积平原及断陷盆地。这一分布特征初步表明地形条件是影响冬小麦种植稳定性的关键因素。

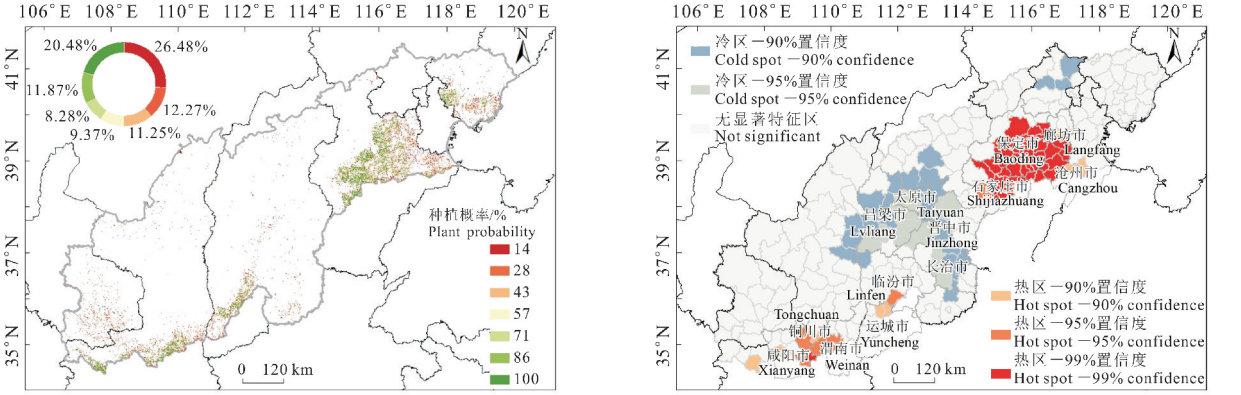
为进一步揭示冬小麦稳定种植的空间集聚特征，本研究聚焦于高稳定性区域（种植概率≥71%的栅格）。将这部分栅格的种植面积聚合至区（县）级行政单元，并应用冷热点分析方法识别出区（县）尺度上冬小麦稳定种植的热点区（高值集聚）与冷点区（低值集聚）（图 2b）。空间分布表明稳定种植的热点区（Hot spots）主要位于：（1）河北省保定市、沧州市、石家庄市与廊坊市四市交界的平原腹地；（2）山西省西南部临汾市与运城市交界的汾河谷地；（3）陕西省中部铜川市、渭南市与咸阳市三市交界的渭河平原核心区。而稳定种植的冷点区（Cold spots）则聚集于山西省中部太原市、吕梁市、晋中市和长治市等地的黄土丘陵及山地过渡区域。可见，热点区在地形上均对应于地势相对低平、开阔的平原/盆地核心地带，进一步印证了地形对冬小麦稳定种植格局的潜在制约作用。

2.2 中国北部冬小麦稳定种植的影响因素分析

从自然环境条件影响冬小麦稳定种植的 q 值上看，生育期积温（*ATGP*）、高程（*ELE*）、地形位指数（*TI*）、生育期降水量（*PGP*）、越冬前积温（*ATBO*）的 q 值大于 0.2；起伏度（*RA*）、坡度（*SL*）、年极端最低气温（*AEMT*）、关键期降水量（*PCP*）、越冬期负积温（*NATOP*）、最冷月平均气温（*CMMT*）、土壤全磷含量（*STPC*）、土壤容重（*SBD*）、土层厚度（*ST*）、土壤全钾含量（*STKC*）、土壤粘粒含量（*SCPC*）的 q 值在 0.1 ~ 0.2 之间；而土壤全氮含量（*STNC*）、土壤阳离子交换量（*CEC*）、土壤有机碳含量（*SOCC*）、土壤粉粒含量（*SPC*）、土壤 pH（*SPH*）等土壤质量指标对冬小麦稳定种植的影响不大，q 值均小于 0.1（图 3a）。在地形梯度因子、农业气候因子和土壤质量指标 3 类自然环境因素中（图 3b），地形梯度因子对冬小麦稳定种植影响最大，q 均值为 0.19，其次为农业气候因子（q 均值为 0.17），土壤质量对冬小麦稳定种植的影响最小（q 均值为 0.08）。

从 21 个因子之间的交互作用来看，地形梯度因子中高程（*ELE*）和地形位指数（*TI*）相较于其他因子的交互作用最强，交互 q 均值都达到了 0.30，农业气候因子中生育期降水量（*PGP*）和生育期积温（*ATGP*）相较于其他因子的交互作用最强，交互 q 均值分别为 0.34 和 0.30，土壤质量指标中土壤全钾含量（*STKC*）和土壤全磷含量（*STPC*）相较于其他因子的交互作用最强，交互 q 均值分别为 0.29 和 0.28（图 4a）。从每个因子与因子两两交互作用的影响程度来看，地形梯度因子中地形位指数（*TI*）与其他因子的交互作用最好，交互 q 均值为 0.30，农业气候因子中生育期降水量（*PGP*）与其他因子的交互作用最好，交互 q 均值为 0.34，土壤质量指标中土壤全钾含量（*STKC*）与其他因子的交互作用最好，交互 q 均值为 0.29（图 4b）。结合单因子探测结果可知，地形梯度因子、农业气候因子和土壤质量指标两两间交互作用，对冬小麦稳定种植表现出明显的影响。

在地形梯度因子、农业气候因子中分别选取单因子影响程度相对高、且交互作用强的因子，即高程（*ELE*）和生育期积温（*ATGP*），利用风险探测器获得高程（*ELE*）和生育期积温（*ATGP*）两个因子的阈值。从图 5 中可发现，高程在 237 ~ 589 m 等级，影响冬小麦稳定种植不存在显著性差异（红色表示不存在显著性差异，绿色表示存在显著性差异），高程小于 589 m 的区域有利于冬小麦稳定种植（图 5a）；生育期积温在 1 144 ~ 2 020℃ · d 范围不存在显著性差异，生育期积温大于 2 020℃ · d 有利于冬小麦稳定种植（图 5b）。



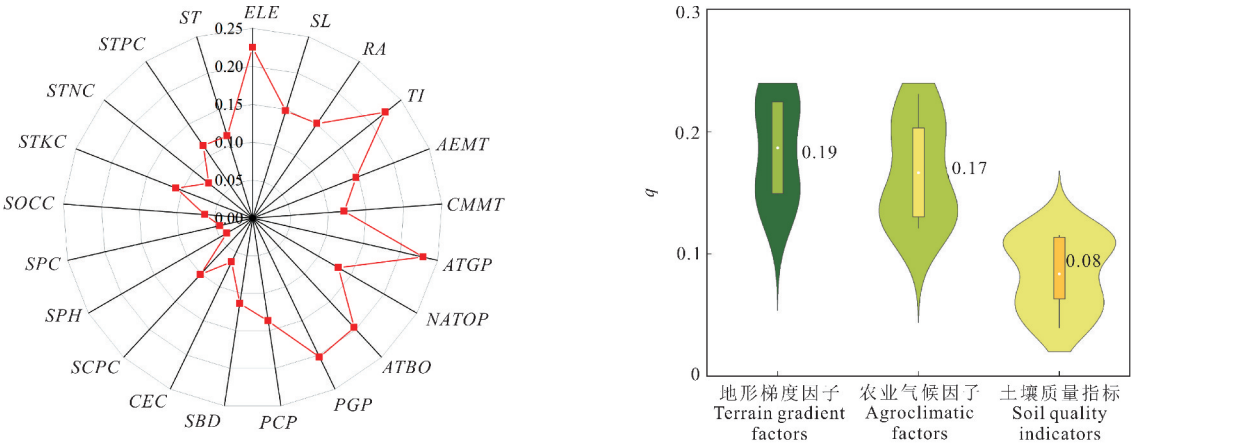
(a) 种植概率 Plant probability　　(b) 稳定种植区空间分布 Spatial distribution of stable planting areas

注:图左上角圆环表示种植概率面积占比。

Note: The circular ring in the upper left corner of the figure represents planting probability area proportion.

图 2　中国北部冬小麦种植概率及稳定种植区空间分布

Fig.2　Spatial distribution of winter wheat planting probability and stable planting areas in northern China



(a) 各影响因素的q值 q value of influencing factors　　(b) 三类自然环境因素q值 q value of three types of natural environmental factors

图 3　冬小麦稳定种植的影响因素分析

Fig.3　Analysis of influencing factors on stable winter wheat planting

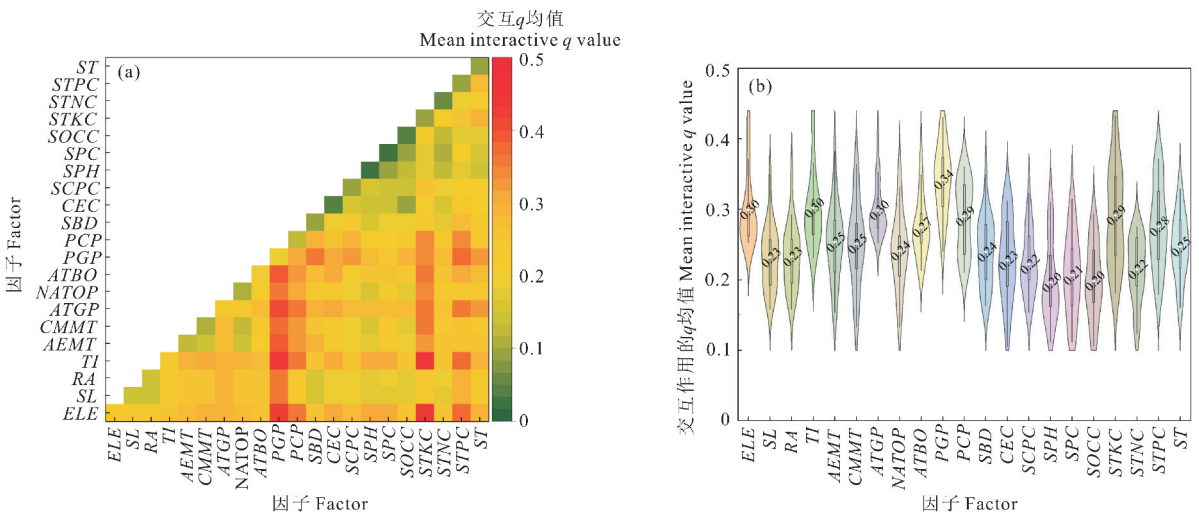


图 4　影响冬小麦稳定种植的因子交互作用

Fig.4　Interactive effects of factors influencing stable winter wheat planting

2.3 土地利用变化对冬小麦稳定种植潜在区域的影响

根据退耕还林还草实施的时间节点,选取1999年和2023年两个时期的土地利用数据,结合冬小麦稳定种植的地形、气候关键因子和阈值,从退耕还林还草政策实施角度分析25年来土地利用变化对中国北部冬小麦稳定种植的影响。中国北部冬麦区土地利用类型主要是以耕地、草地和林地为主,在1999—2023年间81.16%的土地利用类型没有发生变化,18.84%的土地利用类型变化体现在耕地向草地(4.52%,17 164.70 km^2)和不透水面(2.96%,11 231.10 km^2)转移、草地向耕地(4.51%,17 121.17 km^2)和林地(3.60%,13 682.94 km^2)转移(图6a)。土地利用转移类型在空间上具有一定的地形梯度性,在地形平坦、灌溉水源充足的平原与河谷地区,即冬小麦稳定种植核心区,主要是耕地向不透水面转移;在地势平坦向地形相对复杂的过渡区域体现为草地向林地转移;在地形陡坡影响耕地作业的区域表现为耕地向草地转移;草地向林地转移主要分布在黄土高原的防风固沙区(图6b)。

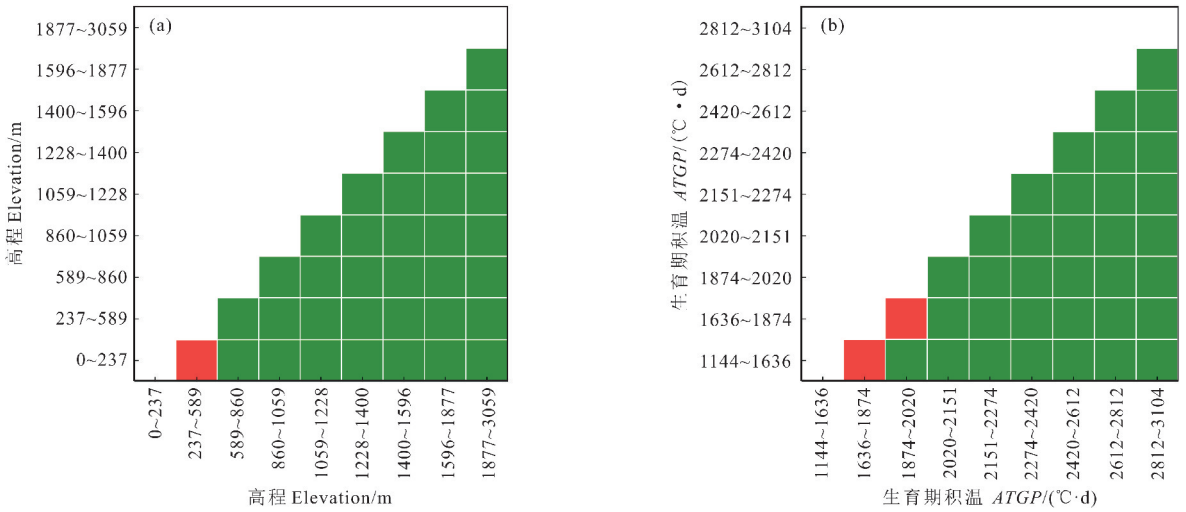
在满足*ELE*和*ATGP*要求的适宜冬小麦稳定种植的区域,土地利用类型以耕地、林地和不透水面为主,在1999—2023年间85.35%的土地利用类型没有发生变化,14.65%的土地利用类型变化体现在耕地向不透水面(8.30%,8 362.86 km^2)转移,草地向耕地(1.22%,1 230.12 km^2)和林地(1.01%,1 014.30 km^2)转移。耕地向不透水面转移区主要发生在城镇周边;草地向耕地和林地转移主要分布在平原与丘陵过渡区域(图7a)。耕地的损失主要是城镇扩张所致(图7b),1999—2023年适宜冬小麦稳定种植的耕地由64 344 km^2减少至56 777 km^2,25年间减少了11.76%(7 567 km^2)。

3 讨 论

从中国北部冬小麦种植概率的空间分布格局来看,研究区内甘肃省大部、陕西省北部及山西省北部地区呈现出明显的低概率零星分布特征。这些区域的冬小麦种植概率普遍偏低,空间分布破碎化程度高。这种分布格局的形成很大程度上可归因于当地复杂地形与不利农业气候条件的共同制约。该地区地形以山地、丘陵和沟壑为主,显著加剧了水土流失、地表径流与土壤侵蚀过程[24-25],进而导致土壤水分有效性与保墒能力下降、土层瘠薄,对冬小麦的稳定种植构成严重障碍。同时,该区域常面临的热量(如冬季低温冻害、春季有效积温不足)和水分(如降水总量不足、季节分配不均)等关键农业气候因子的限制,进一步削弱了冬小麦种植的适宜性与稳定性。在陕西省咸阳市与渭南市、山西省临汾市与运城市、河北省保定市、沧州市、石家庄市与廊坊市四市交界地区,冬小麦种植集中,种植概率高,具有渭河、汾河与海河等为代表的灌溉水源,且处于河谷平坦地区陕西不在范围内[26-27],水资源相对丰富,规模化集约化种植便利[28]。

在未来气候变化情景下,中国热量资源将得到提升,冬小麦适宜种植范围明显向北扩张,可种植区面积增大[5,29],冬小麦种植区的地形因子则成为合理布局冬小麦稳定种植的关键,高程、坡度与冬小麦种植频率之间表现出明显的负相关关系,相关系数R分别达到了-0.58和-0.57,如地形高程高、坡度大,会导致冬小麦种植频率低[30],本研究探测出在中国北部冬麦区当高程超过589 m,冬小麦则不适宜稳定种植,同时地形位指数和坡度也制约着冬小麦的稳定种植。学者们研究发现在海拔相对较高、坡度较陡的地区种植冬小麦更容易发生干旱[31]。冬小麦的产量也受坡度影响,研究表明坡度小于10°的地区冬小麦产量较高,明显高于陡峭地区[32]。尤其是在凹形地形、0~5°坡度以及地势平坦地区,冬小麦产量更高[33]。

由此可见,关键农业气候因子(如温度、降水、积温等)与地形梯度的空间异质性分析,为精准农业的多个核心环节提供了关键科学依据。本研究基于2018—2024年共7年的冬小麦空间分布数据,揭示了中国北部冬小麦种植格局在此期间的动态变化特征。鉴于研究时限相对较短,未来研究可拓展更长的时间序列数据,以期更全面地解析其历史演变规律与长期趋势。在研究区域界定方面,本研究基于冬小麦种植空间分布栅格数据,选取种植概率较高的区域作为“冬小麦稳定种植区”。该区域因其内部空间异质性较低,在分析气候与地形等因子对种植分布的影响时,其干扰效应相对较弱。为进一步深化驱动机制研究,未来工作应整合自然环境本底(如土壤、地形)、多情景气候变化数据、人类活动(如土地利用变化、灌溉)及社会经济因素(如政策、市场),并综合运用MaxEnt、DNDC和APSIM等多模型耦合或比较分析方法。这将有助于优化冬小麦种植动态预测模型的精度与可靠性,更科学地探究我国冬小麦种植分布的驱动机制、潜在限制因子及适宜耕作范围,从而丰富冬小麦可持续种植管理的理论基础,为我国农业的可持续发展提供更具针对性的科学参考。



注:红色和绿色分别表示差异不显著(P>0.05)和显著(P<0.05)。

Note: Red and green indicate insignificant (P>0.05) and significant (P<0.05) differences, respectively.

图 5　高程和生育期积温因子风险探测结果

Fig.5　Risk detection results for elevation and accumulated temperature in growth period

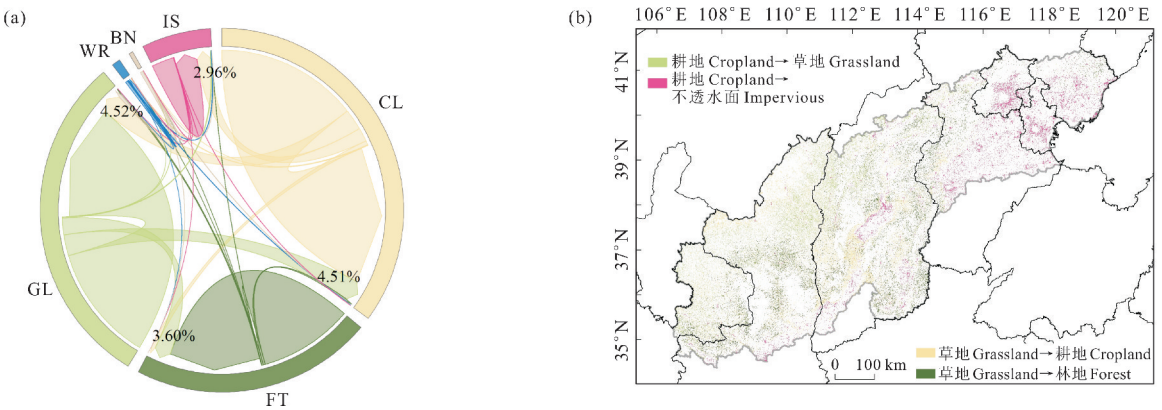


图 6　1999—2023 年中国北部冬麦区土地利用类型时空转移变化

Fig.6　Spatiotemporal changes in land-use types in the northern winter wheat region from1999 to 2023

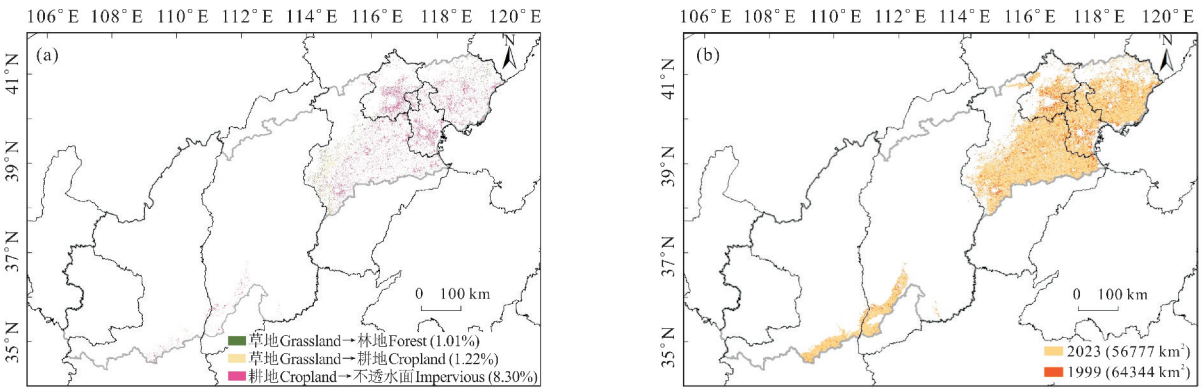


图 7　冬小麦稳定种植潜在区土地利用类型及适宜分布变化

Fig.7　Land use types and suitable distribution changes in potential areas for stable winter wheat planting

4　结　论

本研究分析了中国北部冬小麦稳定种植的空间分布特征、影响因素及土地利用变化的影响,为冬小麦种植区域资源优化配置和农业可持续发展提供了重要参考。主要结论如下:

(1)中国北部约 40%的区域冬小麦种植概率超过 71%,主要分布在河北海河平原、山西临汾盆地

和陕西渭河平原等地势平坦的区域。冬小麦稳定种植的热区集中于河北省保定市、沧州市、石家庄市与廊坊市交界处,而冷区则主要分布在地形复杂的地区,如山西省的太原市、吕梁市、晋中市和长治市等。研究表明,地势对冬小麦稳定种植具有重要制约作用。

(2)地形梯度因子(特别是高程和地形位指数)对冬小麦稳定种植的影响最大(平均 q 值为 0.19),其次是农业气候因子(如生育期积温和生育期降水量,平均 q 值为 0.17),土壤质量因子的影响最小(平均 q 值为 0.08)。因子间的交互作用显著,尤其是地形梯度因子和农业气候因子的交互作用最强。研究发现,高程低于 589 m 且生育期积温大于 2 020℃·d 的区域最有利于冬小麦的稳定种植。

(3)过去 25 年的土地利用变化对冬小麦稳定种植产生了显著影响。核心种植区(灌溉水源充足的平原与河谷地区)的土地利用类型发生了显著变化,其中因城市扩张导致的耕地向不透水面转移尤为突出,使得适宜冬小麦种植的耕地面积减少了 7 567 km^2(11.76%)。

参 考 文 献:

[1] ZHAO J C, SUN X F, WANG M, et al. Long-term annual mapping and spatial-temporal dynamic analysis of winter wheat in Shandong province based on spatial-temporal data fusion (2000-2022)[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2024, 196(9): 826.

[2] WANG D L, LI R, ZHU B, et al. Estimation of wheat plant height and biomass by combining UAV imagery and elevation data[J]. Agriculture (Nitra, Slovakia), 2022, 13(1): 9.

[3] 刘小鹏, 张宙, 谭龙, 等. 基于多源数据的永宁县葡萄种植区地形特征因子分析[J]. 测绘技术装备, 2021, 23(4): 26-29, 39.
LIU X P, ZHANG Z, TANG L, et al. Topographic feature factor analysis of grape growing area in Yongning county based on multi-source data[J]. Geomatics Technology and Equipment, 2021, 23(4): 26-29, 39.

[4] 张全军, 吴东丽, 宏观, 等. 1981-2020 年陕西安康冬小麦生育期对农业气象条件的响应[J]. 麦类作物学报, 2024, 44(12): 1560-1572.
ZHANG Q J, WU D L, HONG G, et al. Response of winter wheat growth period inAnkang, Shaanxi to agrometeorological condition from 1981 to 2020[J]. Journal of Triticeae Crops, 2024, 44(12): 1560-1572.

[5] 孙昊蔚, 马靖涵, 王力. 未来气候变化情景下基于 APSIM 模型的黄土高原冬小麦适宜种植区域模拟[J]. 麦类作物学报, 2021, 41(6): 771-782.
SUN H W, MA J H, WANG L. Simulation of suitable planting area of winter wheat under climate change in theloess plateau based on APSIM model[J]. Journal of Triticeae Crops, 2021, 41(6): 771-782.

[6] 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 X P, SONG N, CHEN Z F, et al. Spatial-temporal distribution and change trend of northern limit of winter wheat planting in Huang-Huai-Haiplain[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(9): 129-137.

[7] 檀竹平, 高雪萍. 1997-2016 年中国小麦种植区域比较优势及空间分布[J]. 河南农业大学学报, 2018, 52(5): 825-838.
TAN Z P, GAO X P. Comparative advantage and spatial distribution of wheat in China from 1997 to 2016[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2018, 52(5): 825-838.

[8] 张梦婷, 张玉静, 佟金鹤, 等. 未来气候情景下冬小麦潜在北移区农业气候资源变化特征[J]. 气候变化研究进展, 2017, 13(3): 243-252.
ZHANG M T, ZHANG Y J, TONG J H, et al. Variations ofagro-climatic resources under a future climate scenarioin the potential northward region of winter wheat[J]. Climate Change Research, 2017, 13(3): 243-252.

[9] 胡实, 莫兴国, 林忠辉, 等. 黄淮海平原冬小麦种植的气候变化适应评估[J]. 自然资源学报, 2016, 31(11): 1892-1905.
HU S, MO X G, LIN Z H, et al. Adaptation of winter wheat to climate change in Huang-Huai-Hai plain[J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31(11): 1892-1905.

[10] 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 K N, YANG X G, MU C Y, et al. The possible effects of global warming on cropping systems in China Ⅷ—the effects of climate change on planting boundaries of different Winte-Spring varieties of winter wheat in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(8): 1583-1594.

[11] 孙新素, 龙致炜, 宋广鹏, 等. 气候变化对黄淮海地区夏玉米-冬小麦种植模式和产量的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(13): 2476-2487.
SUN X S, LONG Z W, SONG G P, et al. Effects of climate change on cropping pattern and yield of summer maize-winter wheat in Huang-Huai-Haiplain[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(13): 2476-2487.

[12] 孙敬松, 周广胜. 利用最大熵法(MaxEnt)模拟中国冬小麦分布区的年代际动态变化[J]. 中国农业气象, 2012, 33(4): 481-487.
SUN J S, ZHOU G S. Inter-decadal variability of winter wheat planting zone in China during 1961 to 2010 simulated by maximum entropy (MaxEnt)[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2012, 33(4): 481-487.

[13] 杨文稼, 肖庆红, 王仕稳, 等. 黄土高原旱作麦田深层土壤水利用与小麦产量及产量稳定性的关系[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(3): 41-48.
YANG W J, XIAO Q H, WANG S W, et al. Relationship between water use of subsoil and wheat yield and yield stability in dryland wheat on theloess plateau[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2023, 41(3): 41-48.

[14] 林文, 同延安, 韩仲宇, 等. 1961-2001 年间陕西冬小麦种植北界北移的热量资源分析与评价[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(6): 772-778.
LIN W, TONG Y A, HAN Z Y, et al. Analysis and assessment of heat resource for winter wheat northward moving during 1961-2001 in

Shaanxiprovince[J]. Chinese Journal of Eco-agriculture, 2013, 21(6): 772-778.

[15] 马倩倩, 贺勇, 张梦婷, 等. 中国北部冬麦区小麦生育期对生育阶段积温变化的响应[J]. 中国农业气象, 2018, 39(4): 233-244.
MA Q Q, HE Y, ZHANG M T, et al. Responses of winter wheat phenology to accumulated temperature during growing periods in northern China wheat belt[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2018, 39(4): 233-244.

[16] YANG G X, LI X R, LIU P Z, et al. Automated in-season mapping of winter wheat in China with training data generation and model transfer[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2023, 202: 422-438.

[17] 陈实, 黄银兰, 金云翔, 等. 中国北部冬小麦安全种植的农业气候因子及其阈值[J]. 中国农业科学, 2024, 57(16): 3142-3153.
CHEN S, HUANG Y L, JIN Y X, et al. Agricultural climatic factors and their thresholds for winter wheat cultivation in northern China [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2024, 57(16): 3142-3153.

[18] 郭兰博, 赵冬, 陈国龙, 等. 2000-2020 年郑州市土地利用状态时空变化特征[J]. 地域研究与开发, 2023, 42(4): 149-154.
GUO L B, ZHAO D, CHEN G L, et al. Spatio-temporalcharacteristics of land use in Zhengzhou city from 2000 to 2020[J]. Areal Research and Development, 2023, 42(4): 149-154.

[19] 陈以恒. 玉素甫江·如素力, 阿卜杜热合曼·吾斯曼. 2001-2020 年天山新疆段草地植被覆盖度时空变化及驱动因素分析[J]. 植物生态学报, 2024, 48(5): 561-576.
CHEN Y H. Analysis of spatial and temporal variation in grassland vegetation cover in the Tianshanmountains and the driving factors from 2001 to 2020[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2024, 48(5): 561-576.

[20] WANG J F, LI X H, CHRISTAKOS G, et al. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun region, China[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010, 24(1): 107-127.

[21] 吴大放, 马佩芳, 李龙, 等. 基于地理探测器的区域土地利用转型时空演变及因子探测——以珠海市为例[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2023, 55(4): 50-61.
WU D F, MA P F, LI L, et al. Spatiotemporal variation and factor detection of land use transition based on geodetector: a case study of Zhuhai[J]. Journal of South China Normal University (Natural Science Edition), 2023, 55(4): 50-61.

[22] 季建万, 姜琳琳, 刘文亮, 等. 基于多参数优选地理探测器的京津冀城市群地质灾害影响因子分析[J]. 地理与地理信息科学, 2023, 39(2): 39-45.
JI J W, JIANG L L, LIU W L, et al. Analysis on influence factors of geological hazards in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration based on multi-parameters optimized by geodetector[J]. Geography and Geo-Information Science, 2023, 39(2): 39-45.

[23] 李文秀, 燕振刚. 基于地理探测器的甘肃农牧交错带土地利用时空演化及其驱动机制[J]. 干旱区研究, 2024, 41(4): 590-602.
LI W X, YAN Z G. Analysis of spatiotemporal evolution of land use and its driving mechanism in the agro-pastoral ecotone of Gansuprovince using geodetector[J]. Arid Zone Research, 2024, 41(4): 590-602.

[24] 孙雯杰, 杨昕. 水土流失分析的地形因子尺度效应——以安徽大别山区为例[J]. 中国水土保持, 2023(7): 50-55.
SUN W J, YANG X. Scale effect of topographic factors in soil erosion analysis: a case study of Dabie mountain area in Anhui province[J]. Soil and Water Conservation in China, 2023(7): 50-55.

[25] 高毅丰, 韩磊, 火红, 等. 基于地形梯度的典型退耕区土壤侵蚀时空分异特征研究[J]. 水土保持研究, 2024, 31(3): 30-41, 48.
GAO Y F, HAN L, HUO H, et al. Study on spatial and temporal variations of soil erosionin typical farmland conversion area based on topographic gradient[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(3): 30-41, 48.

[26] 高晨凯, 刘水苗, 李煜铭, 等. 冬小麦水分利用效率相关驱动因子及其预测模型构建[J]. 中国农业科学, 2024, 57(7): 1281-1294.
GAO C K, LIU S M, LI Y M, et al. The related driving factors of water use efficiency and its prediction model construction in winter wheat[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2024, 57(7): 1281-1294.

[27] YANG N, ZHANG Z T, DING B B, et al. Evaluation of winter-wheat water stress with UAV-based multispectral data and ensemble learning method[J]. Plant andSoil, 2024, 497(1): 647-668.

[28] 赵俊芳, 谢鸿飞, 杨嘉琪, 等. 1981-2020 年黄淮海冬小麦干旱时空分异规律及演变趋势[J]. 生态学杂志, 2024, 43(10): 3104-3112.
ZHAO J F, XIE H F, YANG J Q, et al. Spatiotemporal differentiation and variation trend of drought in winter wheat in the Huang-Huai-Hai region from 1981 to 2020[J]. Chinese Journal of Ecology, 2024, 43(10): 3104-3112.

[29] 李柯欣, 郑飞, 高学杰. 中、高温室气体排放情景下 2069~2098 年中国冬小麦气候适宜种植分区对比[J]. 气候与环境研究, 2022, 27(1): 105-122.
LI K X, ZHENG F, GAO X J. Comparison of winter wheat climatically suitable regions in China during 2069-2098 under medium and high greenhouse gas emission scenarios[J]. Climatic and Environmental Research, 2022, 27(1): 105-122.

[30] 李方杰, 任建强, 吴尚蓉, 等. 河南省冬小麦种植频率时空变化及影响因素分析[J]. 中国农业科学, 2020, 53(9): 1773-1794.
LI F J, REN J Q, WU S R, et al. Spatio-temporal variations of winter wheat planting frequency and their analysis of influencing factors in Henan province[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(9): 1773-1794.

[31] 高超, 陈财, 罗纲. 冬小麦干旱的下垫面孕灾环境研究——以淮河流域为例[J]. 水土保持学报, 2021, 35(3): 359-368.
GAO C, CHEN C, LUO G. Study on the hazard-formative environment on underlying surface of winter wheatdrought-a case study of Huaihe river basin, China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(3): 359-368.

[32] AJAMI M, HEIDARI A, KHORMLI F, et al. Spatial variability of rainfed wheat production under the influence of topography and soil properties in loess-derived soils, northern Iran[J]. International Journal of Plant Production, 2020, 14: 597-608.

[33] WANG K, HUGGINS D R, TAO H Y. Rapid mapping of winter wheat yield, protein, and nitrogen uptake using remote and proximal sensing[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2019, 82: 101921.