

网络出版时间:2024-11-11

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1359.S.20241108.1507.006

河北旱碱麦不同生育时期气候变化及对产量影响的双重量化分析

秦俊灵^{1,2,3}, 索春男³, 任妙春³, 李琛³, 孙萌萌⁴, 魏秀梅^{1,2,3}

(1. 河北省气象与生态环境重点实验室, 河北石家庄 050021; 2. 中国气象局雄安大气边界层重点开放实验室, 河北雄安新区 071800; 3. 河北省沧州市气象局, 河北沧州 061000; 4. 河北省黄骅市气象局, 河北黄骅 061100)

摘要: 为了探究河北旱碱麦不同生育时期气候变化特征及其对旱碱麦产量的影响, 选取 2009—2022 年旱碱麦主产区气象观测资料和产量资料, 利用四分位和气候倾向率等方法对旱碱麦不同生育时期气候特征及变化趋势进行分析, 再采用二次曲线法分离气象产量, 利用灰色关联度法进行不同生育时期气象因子对旱碱麦产量影响的双重量化分析。结果表明: (1) 旱碱麦各生育时期平均气温、最高气温、最低气温和日照时数均有明显的分布规律, 而降水量变化较大; (2) 旱碱麦不同生育时期各气象因子的变化趋势存在明显差异; (3) 经单重量化分析, 对旱碱麦气象产量影响最大的气象因子在播种期、分蘖期、越冬期和抽穗期均为降水量, 出苗期和灌浆期均为日照时数影响最大, 返青期为平均气温, 拔节期为最低气温; (4) 经双重量化分析, 对旱碱麦气象产量影响排名前五的气象因子依次为分蘖期降水量、越冬期降水量、分蘖期最低气温、拔节期最低气温、抽穗期降水量。因此, 河北旱碱麦种植应根据生育期降水情况采用保墒、灌水等水分管理措施, 同时预防小麦分蘖期和拔节期的低温危害, 以促进小麦生长发育和高产。

关键词: 旱碱麦; 气象因子; 气象产量; 灰色关联度; 量化分析

中图分类号: S512.1; S314

文献标识码: A

文章编号: 1009-1041(2025)01-0130-08

Double Quantitative Analysis of Climate Change and Its Effect on Yield of Drought-Alkali-Resistant Wheat in Hebei Province

QIN Junling^{1,2,3}, SUO Chunnan³, REN Miaochun³, LI Chen³, SUN Mengmeng⁴, WEI Xiumei^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Meteorology and Ecological Environment of Hebei Province, Shijiazhuang, Hebei 050021, China; 2. China Meteorological Administration Xiong'an Atmospheric Boundary Layer Key Laboratory, Xiong'an New Area, Hebei 071800, China; 3. Cangzhou Meteorological Bureau of Hebei Province, Cangzhou, Hebei 061000, China; 4. Huanghua Meteorological Bureau of Hebei Province, Huanghua, Hebei 061100, China)

Abstract: In order to explore the climate change characteristics at different growth stages of drought-alkali-resistant wheat in Hebei and their impact on wheat yield, the meteorological observation data and yield data from the main production areas of drought-alkali-resistant wheat from 2009 to 2022 were collected, and various methods, including quartiles and climate slopes, were employed to analyze the climate characteristics and trends at different growth stages of drought-alkali-resistant wheat. Subsequently, the second-order curve method was used to separate meteorological yield, and the grey correlation degree method was applied for a dual quantitative analysis of the impact of meteorological factors on wheat yield during different growth stages. The results were as follows: (1) At each growth stage of drought-alkali-resistant wheat, there were clear distribution patterns for average temperature, maximum temperature, minimum temperature, and sunshine hours. Precipitation was the

收稿日期: 2023-08-21

修回日期: 2023-11-14

基金项目: 沧州市科技局科研项目(222108006); 沧州市气象局科研开发项目(23CZ03)

第一作者 E-mail: 1005647511@qq.com(秦俊灵)

通讯作者 E-mail: 1981796659@qq.com(魏秀梅)

most variable meteorological factor in the growth and development process of drought-alkali-resistant wheat. (2) There were significant differences in the trends of various meteorological factors at different growth stages of drought-alkali-resistant wheat. (3) Monofactor quantification revealed that precipitation at sowing stage, tillering stage, overwintering stage and heading stage, sunshine hours at seeding stage and grain filling stage, average temperature at reviving, minimum temperature at jointing stage had the greatest impact on the meteorological yield of drought-alkali-resistant wheat. (4) Dual quantification indicated that the top five meteorological factors affecting the meteorological yield of drought-alkali-resistant wheat, ranked as precipitation at tillering stage, precipitation at overwintering stage, minimum temperature at tillering stage, minimum temperature at jointing stage, and precipitation at heading stage. Therefore, in order to promote wheat growth and high yield in drought-alkali-resistant wheat planting areas in Hebei, some field water management measures such as water conservation and irrigation should be used according to the precipitation change during wheat growth period, and the low temperature impact on wheat should attract more attention at tillering and jointing stages.

Keywords: Drought-alkali-resistant wheat; Meteorological factors; Meteorological yield; Gray correlation; Quantitative analysis

气候条件与小麦的生长发育密切相关,气候变化和极端天气直接影响小麦产量^[1]。早碱麦是指适宜在河北中东部盐碱化土壤上种植的一种新型小麦,其生产基本靠雨养,对气候条件的依赖性高于常规冬小麦。早碱麦的整个生长阶段都会不同程度地受到气候条件的影响,从而影响产量。明确不同生长阶段气候因素与早碱麦产量之间的关系,对进一步加强早碱麦田管理,促进其高产稳产及提高盐碱地利用效率具有重要意义。

目前针对小麦生育期气候变化特征及其对产量的影响分析已有大量的研究报道。从历史数据的分析结果看,不同气候要素与冬小麦产量关联度总体呈上升趋势,气候变化对冬小麦产量的影响逐渐显著^[2]。通过农业生态区域法和生产潜力递减机制法分析,限制小麦气候生产潜力的主要气象因素是降水量和温度^[3]。相关分析和通径分析均发现降水量和温度与小麦产量显著相关,是决定小麦产量的主要限制因素^[4-6]。在不同气象因素中,平均温度对冬小麦产量的贡献率最大^[7,8]。通过灰色关联度等方法,量化了不同生长阶段气象因素对河南省冬小麦产量的影响程度,结果发现,出苗期平均气温和日最高气温、分蘖期和越冬期平均相对湿度、拔节期平均风速均对冬小麦气象产量的影响较大^[9]。以往的研究均是针对种植在普通土壤上的冬小麦,而对种植在盐碱化程度较高土壤上的早碱麦不同生育时期气

象因子对其产量影响的分析鲜有报道。

因此,本研究选取 2009—2022 年河北早碱麦主产区气象观测资料和产量资料,利用四分位和气候倾斜率等方法对早碱麦不同生育时期气候特征及变化趋势进行分析,再采用二次曲线法分离得到早碱麦气象产量,利用灰色关联度法进行不同生育时期气象因子对早碱麦产量影响的双重量化分析,进而量化河北早碱麦各生育时期气象因子的特征和变化趋势以及其对产量的影响程度,以期早碱麦开展精细化、针对性的田间管理和气象服务指导提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究材料

河北早碱麦主产区位于冀中平原东部,包括黄骅、海兴、青县、沧县、孟村和盐山等 6 个县市。本研究的气象数据来源于 2009—2022 年河北省气象局在早碱麦主产区 6 个气象观测站,包括日平均气温、日最高气温、日最低气温、日降水量、日照时数以及生育时期,由此计算各生育时期平均气温($S_1, ^\circ\text{C}$)、最高气温($S_2, ^\circ\text{C}$)、最低气温($S_3, ^\circ\text{C}$)、降水量(S_4, mm)、日照时数(S_5, h)。产量数据来源于 2009—2022 年河北省统计局 6 个县市早碱麦的调查结果。取 6 个县市气象因子及单产的平均值作为主产区早碱麦气象因子和单产特征值。

根据早碱麦生育过程中生理及形态特征的变

化,参照旱碱麦生育状况实际观测结果,采用各生育时期观测普遍期的上四分位^[10]日期作为各生育时期的起止时间,将旱碱麦全生育时期划分为

播种期(I)、出苗期(II)、分蘖期(III)、越冬期(IV)、返青期(V)、拔节期(VI)、抽穗期(VII)、灌浆期(VIII)共 8 个生育时期(表 1)。

表 1 旱碱麦各生育时期起止日期及天数

Table 1 Date and number of days from the beginning to the end of each growth period of drought-alkali-resistant wheat

序号 Number	生育时期 Stage	起止日期(月/日) Range of date (month/day)	天数 Days/d
I	播种期 Sowing	10/4—10/9	6
II	出苗期 Seedling	10/10—11/3	25
III	分蘖期 Tillering	11/4—11/28	25
IV	越冬期 Overwintering	11/29—3/1	94
V	返青期 Reviving	3/2—4/13	43
VI	拔节期 Jointing	4/14—5/1	18
VII	抽穗期 Heading	5/2—5/17	16
VIII	灌浆期 Grain filling	5/18—6/4	18

1.2 研究方法

1.2.1 气象因子特征值的计算及变化趋势

采用四分位^[10]统计方法构建旱碱麦各生育时期不同气象因子的特征值及阈值。采用变异系数 CV 分析气象因子特征值的离散程度:当 CV ≤ 10%,表示数据的离散程度较小,为弱变异;当 10% < CV ≤ 30%,表示数据的离散程度中度,为中等变异;当 CV > 30%,表示数据的离散程度较大,为强变异。采用气候倾斜率^[11]分析气象因子的变化趋势。

1.2.2 产量分离方法

目前较成熟的产量分离方法主要有滑动平均法、Logistic 拟合法、二次曲线法、HP 滤波法等。其中,二次曲线法操作简单且分离精度较高,其拟合结果能够较准确地反映气候变化对粮食产量的影响^[12]。因此,采用二次曲线方法模拟趋势产量,进而对旱碱麦单产进行产量分离。 $Y = Y_t + Y_w$, $Y_t = at^2 + bt + c$, Y , Y_t 和 Y_w 分别为实际单产、趋势产量和气象产量, t 为年份序列变换得到的时间序列, a 和 b 为模拟系数, c 为模拟常数。

1.2.3 灰色关联分析

以往研究气象因子对作物产量影响的量化分析时,多是采用数理统计中的主成分分析。该方法要求有大量数据,样本需要服从某个典型的概率分布,计算量大,并且可能出现量化结果与定性分析结果不符等数理统计的缺憾。因此,为了更准确的分析气象因子与气象产量间的相关关系,本研究选取邓氏灰色关联分析模型^[13],该模型对样本量的多少和样本数据有无规律都同样适用,而且计算量小,十分方便,更不会出现量化结果与

定性分析结果不符的情况。

设模型特征行为序列为 $X_0 = [x_0(1), x_0(2), \dots, x_0(n)]$; 系统的相关因素序列为 $X_i = [x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(n)]$, i 表示不同的气象因子,对于灰色关联度 $\in (0, 1)$, 令

$$\varepsilon_i(k) = \frac{\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| + \rho \cdot \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \rho \cdot \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}$$

$$k = 1, 2, \dots, n$$

$$\gamma(X_0, X_i) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \varepsilon_i(k)$$

式中, ρ 是分辨系数,一般取 0.5, $\varepsilon_i(k)$ 为关联系数, $\gamma(X_0, X_i)$ 为 X_0 与 X_i 的邓氏关联度,取值范围为(0, 1),灰色关联度越大,表示气象因素与产量的关联程度越高,其影响越大。

2 结果与分析

2.1 旱碱麦不同生育时期的气象因子特征

按照生育时期天数(样本个数),对 2009—2022 年河北旱碱麦各生育时期平均气温、最高气温、最低气温、降水量、日照时数 5 种气象因子,进行四分位和变异系数分析,结果(表 2)表明,旱碱麦不同生育时期平均气温特征值为 -1.0 ~ 23.5 °C,最高气温特征值为 15.5 ~ 34.4 °C,最低气温特征值为 -12.4 ~ 13.3 °C,三种温度特征值均随着生育时期进程呈先降后增趋势,越冬期最低,灌浆期最高;日照时数特征值为 45.5 ~ 601.7 h,且随着生育时期进程表现为先波动增长后波动降低,越冬期达到最高,播种期最低;降水量特征值为 0.3 ~ 17.4 mm,其中播种期降水最少,出苗期最多,其他时期在 10.3 ~ 13.6 mm 之间波动,变

化较小。从变异系数来看,平均气温、最高气温、最低气温和日照时数离散程度较小,变异系数分别为 5.4%~24.6%、4.8%~19.1%、11.6%~28.7%和 8.7%~28.3%,为弱到中等变异;降水量离散程度较大,变异系数为 50.2%~199.8%,为强变异。

2.2 旱碱麦不同生育时期气象因子的年际变化特征

2009—2022 年旱碱麦不同生育时期各气候因子变化趋势存在明显差异(表 3)。播种期、出苗期、抽穗期的平均气温呈降低趋势,其他生育时期呈增高趋势,其中播种期、越冬期和返青期变化均达到极显著水平,气候倾斜率分别为 -2.98、1.83 和 2.78 $^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。最高气温表现为播

种期、出苗期均呈降低趋势,其他生育时期呈增高趋势,其中播种期和越冬期变化均达到显著水平,气候倾斜率分别为 -3.40 和 4.68 $^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。最低气温表现为播种期、越冬期、抽穗期、灌浆期呈降低趋势,其他生育时期呈增高趋势,其中播种期、返青期均达到极显著水平,气候倾斜率分别为 -3.62 和 2.35 $^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。降水量表现为播种期、分蘖期、返青期呈增多趋势,其他生育时期呈减少趋势,其中播种期、出苗期变化均达到显著水平,气候倾斜率分别为 33.70、-15.89 $\text{mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。日照时数表现为播种期、抽穗期呈减少趋势,其他生育时期呈增多趋势,其中灌浆期变化显著,气候倾斜率为 24.51 $\text{h} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。

表 2 旱碱麦不同生育时期气象因子的特征

Table 2 Characteristic of different meteorological factors at different developmental stages of drought-alkali-resistant wheat

生育时期 Stage	播种期 Sowing	出苗期 Seedling	分蘖期 Tillering	越冬期 Overwintering	返青期 Reviving	拔节期 Jointing	抽穗期 Heading	灌浆期 Grain filling
S1 特征值 Eigenvalues/ $^{\circ}\text{C}$	16.6	13.4	6.6	-1.0	10.2	17.1	19.1	23.5
阈值 Threshold/ $^{\circ}\text{C}$	15.8~18.5	12.6~13.6	5.5~7.0	-1.8~-0.1	8.8~10.3	15.5~17.9	18.4~20.8	22.4~24.4
变异系数 CV/%	10.1	5.4	24.6	22.2	16.0	11.7	6.5	5.5
S2 特征值 Eigenvalues/ $^{\circ}\text{C}$	26.1	24.6	19.6	15.5	26.2	29.7	31.8	34.4
阈值 Threshold/ $^{\circ}\text{C}$	23.8~27.7	23.3~25.9	16.7~20.7	14.1~16.8	24.8~29.0	28.8~31.4	30.6~32.5	33.9~37.2
变异系数 CV/%	8.5	7.7	10.9	19.1	10.7	7.1	4.8	5.4
S3 特征值 Eigenvalues/ $^{\circ}\text{C}$	8.5	2.2	-4.7	-12.4	-3.8	5.6	9.6	13.3
阈值 Threshold/ $^{\circ}\text{C}$	7.9~10.6	1.3~2.9	-5.7~-3.4	-16.1~-11.7	-4.9~-3.0	4.2~6.7	8.9~11	11.7~13.7
变异系数 CV/%	20.9	28.7	20.2	24.8	15.4	13.5	17.3	11.6
S4 特征值 Eigenvalues/mm	0.3	17.4	13.3	13.6	11.9	10.3	13.1	13.2
阈值 Threshold/mm	0~3.9	6.5~24.1	7.4~26.1	10.5~21.1	7.5~18.9	5.4~20.9	3.7~46.2	5.9~25.1
变异系数 CV/%	199.8	69.0	95.5	50.2	84.2	91.2	95.4	76.5
S5 特征值 Eigenvalues/h	45.5	158.9	143.6	601.7	357.4	173.5	141.9	180.6
阈值 Threshold/h	35.2~54.8	143.2~168.0	121.8~175.5	534.2~635.8	331.9~378.8	155.2~179.6	132.9~157.6	175.3~194.9
变异系数 CV/%	20.3	13.7	28.3	13.8	8.8	9.0	14.5	8.7

表 3 旱碱麦各生育时期不同气象因子的气候倾斜率

Table 3 Climatic slope of different meteorological factors at different growth stages of drought-alkali-resistant wheat

生育时期 Growth stage	气候倾斜率 Climatic slope				
	S1/ $^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$	S2/ $^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$	S3/ $^{\circ}\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$	S4/ $\text{mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$	S5/ $\text{h} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$
播种期 Sowing	-2.98**	-3.40**	-3.62**	33.70*	-15.22
出苗期 Seedling	-0.22	-1.78	1.90	-15.89*	2.55
分蘖期 Tillering	1.85	0.36	0.18	16.46	1.45
越冬期 Overwintering	1.83**	4.68*	-0.74	-1.45	69.73
返青期 Reviving	2.78**	1.61	2.35**	8.50	11.25
拔节期 Jointing	1.88	0.45	0.58	-2.90	4.71
抽穗期 Heading	-0.43	0.11	-2.03	-24.41	-6.36
灌浆期 Grain filling	1.37	1.75	-0.01	-6.10	24.51*

* : $P < 0.05$; ** : $P < 0.01$.

2.3 旱碱麦不同生育时期气象因子影响的量化分析

以 2009—2022 年旱碱麦气象产量作为特征序列,以 2009—2022 年不同生育时期的气象因子数据分别作为行为序列,进行灰色关联分析,得到旱碱麦不同生育时期气象因子与旱碱麦气象产量的灰色关联度(表 4)。在播种期,对旱碱麦气象产量影响最大的气象因子为降水量,其次为最低气温,影响最小的为最高气温;在出苗期,影响最大的气象因子为日照时数,其次为最高气温,影响最小的为最低气温;在分蘖期,影响最大的气象因子为降水量,其次为最低气温,影响最小的为平均气温;在越冬期,影响最大的气象因子为降水量,其次为日照时数,影响最小的为最高气温;在返青期,对旱碱麦气象产量影响最大的气象因子为平均气温,其次均为最高气温,影响最小的为最低气温;在拔节期,影响最大的气象因子为最低气温,其次为平均气温,影响最小的气象因子为降水量;

在抽穗期,对旱碱麦气象产量影响最大的气象因子为降水量,其次为最低气温,影响最小的为日照时数;在灌浆期,对旱碱麦气象产量影响最大的气象因子为日照时数,其次为平均气温,影响最小的为降水量。

2.4 旱碱麦不同生育时期气象因子影响的双重量化分析

为了探究不同生育时期的气象因子在旱碱麦整个生育期对气象产量的影响程度,以旱碱麦每个生育时期的气象因子构建全生育期的气象影响因子集,再次进行灰色关联分析,得到旱碱麦整个生育时期气象因子与其气象产量的关联系数矩阵和关联度。表 5 列出关联度排序前 10 的气象因子,在旱碱麦整个生育时期对其气象产量影响最大的是分蘖期的降水量,其次是越冬期的降水量,分蘖期的最低气温影响排名第三,其后依次为拔节期的最低气温、抽穗期的降水量、分蘖期的最高气温、返青期平均气温等。

表 4 旱碱麦气象产量与不同生育时期气象因子的灰色关联度及排序

Table 4 Grey correlation degree and sequence of meteorological yield and meteorological factors at different growth stages of drought-alkali-resistant wheat

生育时期 Growth stage	灰色关联度 Grey correlation degree					灰色关联排序 Grey correlation sequence
	S1	S2	S3	S4	S5	
播种期 Sowing	0.701 3	0.700 1	0.704 9	0.708 5	0.700 2	S4>S3>S1>S5>S2
出苗期 Seedling	0.594 6	0.600 1	0.557 4	0.596 7	0.602 5	S5>S2>S4>S1>S3
分蘖期 Tillering	0.548 9	0.561 7	0.583 4	0.586 7	0.566 0	S4>S3>S5>S2>S1
越冬期 Overwintering	0.621 4	0.620 3	0.622 8	0.656 6	0.630 2	S4>S5>S3>S1>S2
返青期 Reviving	0.639 1	0.635 4	0.610 9	0.622 1	0.632 1	S1>S2>S5>S4>S3
拔节期 Jointing	0.596 8	0.593 4	0.624 1	0.562 0	0.593 2	S3>S1>S2>S5>S4
抽穗期 Heading	0.552 3	0.554 7	0.559 4	0.583 7	0.544 5	S4>S3>S2>S1>S5
灌浆期 Grain filling	0.659 7	0.657 5	0.658 6	0.602 6	0.662 7	S5>S1>S3>S2>S4

表 5 旱碱麦气象产量与全生育时期主要气象因子的灰色关联度及排序

Table 5 Grey correlation degree and sequence of meteorological yield and main meteorological factors in the whole growth period of drought-alkali-resistant wheat

生育时期 Stage	气象因子 Meteorological factor	灰色关联度 Grey correlation degree	排序 Sequence
分蘖期 Tillering	降水量 Precipitation	0.706 4	1
越冬期 Overwintering	降水量 Precipitation	0.702 2	2
分蘖期 Tillering	最低气温 Minimum temperature	0.701 5	3
拔节期 Jointing	最低气温 Minimum temperature	0.695 9	4
抽穗期 Reviving	降水量 Precipitation	0.688 7	5
分蘖期 Tillering	最高气温 Maximum temperature	0.682 5	6
返青期 Reviving	平均气温 Mean temperature	0.682 0	7
越冬期 Overwintering	日照时数 Sunshine hours	0.681 6	8
播种期 Sowing	降水量 Precipitation	0.681 6	9
分蘖期 Tillering	日照时数 Sunshine hours	0.681 5	10

根据早碱麦整个生育期气象因子与其气象产量的灰色关联度,分别计算各气象因子和各生育时期的总灰色关联度(图 1)。早碱麦整个生育时期气象因子对气象产量影响排序是日照时数>

最高气温>平均气温>最低气温>降水量,各生育时期对早碱麦气象产量影响排序是分蘖期>越冬期>播种期>拔节期>抽穗期>返青期>灌浆期>出苗期。

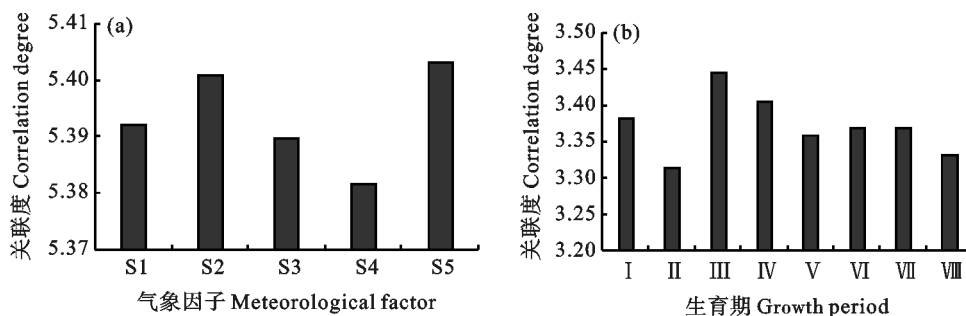


图 1 早碱麦整个生育时期不同气象因子和不同生育时期的总灰色关联度

Fig. 1 Total grey correlation degree of different meteorological factors and different growth stages during the whole growth period of drought-alkali-resistant wheat

3 讨论

从特征值统计来看,早碱麦各生育时期平均气温、最高气温、最低气温和日照时数均有明显的分布规律,而降水量离散程度较大,说明降水量在早碱麦同一生育时期下没有特定的分布规律,是早碱麦生长发育进程中变数最大的气象因子,这与李炳文^[8]研究结果基本一致。从变化趋势来看,气温变化趋势在不同生育时期有明显差异,大部分生育时期呈增温趋势,但播种期三种温度、出苗期平均及最低、越冬期最低、抽穗期平均及最低和灌浆期最低气温均呈降低趋势,这与李炳军等^[8]研究冬小麦整个生长阶段总体上都呈升温的趋势结论略有差异,这主要由于气温变化趋势存在较为明显的地域性差异所致。早碱麦播种期间温度下降显著,不利于早碱麦出苗,强冷空气的出现可能会造成早碱麦出苗期推迟。此外,越冬期和返青期温度变暖显著,温度的升高会导致早碱麦越冬期缩短和返青期提前。因此,对于早碱麦应对气候变化的措施,要着重考虑播种期、越冬期和返青期的麦田管理需求。降水量变化趋势在不同生育时期也存在显著差异,在播种期、分蘖期和返青期呈增多趋势,有利于早碱麦的播种萌发、分蘖和返青起身生长,这与成林等^[14]的研究结果相似。日照时数在大部分生长阶段都呈增多趋势,特别是灌浆期增多显著,有利于早碱麦生长发育和产量的形成。

单重量化分析表明,早碱麦不同生育时期对气象产量影响最大的关键气象因子有明显差异,

播种期、分蘖期、越冬期和抽穗期关键气象因子是降水量,出苗期和灌浆期是日照时数,返青期是平均气温,拔节期是最低气温,这与李炳文等^[9]、张明捷等^[15]和史本林等^[16]的分析结果略有差异,但都发现影响气象产量的关键是小麦生育时期内光、温、水的合理搭配。在播种期降水量和最低气温对早碱麦气象产量的影响较大,早碱麦在播种后,需要一定的水分和适宜的温度才能使种子发芽,破土出苗,这与郑娜等^[17]的研究结果相似。在出苗期日照时数与最高气温对早碱麦气象产量的影响较大,这主要是由于早碱麦对降水量的需求显著低于普通农田冬小麦。在分蘖期和越冬期降水量和最低气温、日照时数对早碱麦的气象产量影响较大,分蘖期需要足够的水分、光照才能使早碱麦茁壮生长,最低气温会抑制早碱麦的分蘖,越冬期最低气温会造成低温冻害,不利于早碱麦越冬。在返青期和拔节期对气象产量影响较大的气象因子是温度和日照时数,这期间早碱麦需要适宜的温度和足够的光照进行光合作用和生长发育,并且低温会造成霜冻害,不利于早碱麦生长发育。在抽穗期对早碱麦的气象产量影响较大的气象因子是降水量和最低气温,而灌浆期是日照时数和平均气温,这与李炳文等^[9]研究结果略有差异性,相同的是温度为影响抽穗期和灌浆期的关键气象因子,温度过高或者温度过低都会影响小麦抽穗开花和产量形成;不同的是早碱麦关键需水阶段为抽穗期,而普通田间的冬小麦为灌浆期,这主要是由于早碱麦和田间普通冬小麦需水特征的不同造成的。由此可见,在早碱麦生长发育过

程中,对气象因子的需求与田间普通冬小麦有一定差异。

双重量化分析表明,在旱碱麦的整个生育时期,对其气象产量影响较大的气象因子为分蘖期、越冬期、抽穗期的降水量和分蘖期、拔节期的最低气温,这与余卫东等^[18]在田间普通冬小麦上得到的研究结果不完全一致,这进一步说明影响旱碱麦生长发育的关键气象因子与田间普通冬小麦具有一定的差异。因此,在旱碱麦气象服务和麦田管理中不能完全将冬小麦的常规管理经验作为参考。另外,分蘖期、越冬期、抽穗期三个阶段的降水量排名均在前五名之列,说明水分在旱碱麦整个生育时期对其产量有较大的影响;然而从各气象因子在整个生育时期的总灰色关联度来看,气象因子影响排序依次是日照时数>最高气温>平均气温>最低气温>降水量,降水量排在末位,这也说明了基于旱碱麦不同生育时期来探究气象因子对其产量的影响,使分析结果更加全面具体,能够更详细精确地揭示气象条件对旱碱麦生长发育的影响机理,也有利于今后对旱碱麦开展更精细化、针对性的田间管理和气象服务指导。

总体来看,旱碱麦每个生长阶段都需要一定水分、温度、光照的综合气象条件,利用双重量化从两个层面对影响旱碱麦产量的气象因子进行分析,能够更加全面具体地将旱碱麦整个生长阶段不同气象因子对气象产量的影响程度进行量化,方法简洁,结果更为详细精确。此外,旱碱麦生产不仅受气候条件等因素的影响,同时也会受物质投入、土壤条件等多源数据的影响。受资料限制,本研究只选取气象条件这一单方面因素,后续可通过获取多方面的实时监测数据和历史统计数据,进一步探索基于多源数据不同影响因子的作用规律及影响程度,对旱碱麦生产过程进行反演。

4 结论

旱碱麦各生育时期平均气温、最高气温、最低气温和日照时数均有明显的分布规律,而降水量没有特定的分布规律,是旱碱麦生长发育进程中变数最大的气象因子。旱碱麦不同生育时期各气象因子的变化趋势存在明显差异。单重量化结果表明,旱碱麦各生育时期影响气象产量的关键气象因子有明显差异,播种期、分蘖期、越冬期和抽穗期是降水量,出苗期和灌浆期是日照时数,返青期是平均气温,拔节期是最低气温。双重量化结

果表明,对旱碱麦气象产量影响排名前五的气象因子依次为分蘖期降水量、越冬期降水量、分蘖期最低气温、拔节期最低气温、抽穗期降水量。

参考文献:

- [1] 韩兰英,张强,程英,等. 农业干旱灾害风险研究进展及前景分析[J]. 干旱区资源与环境,2020,34(6):97.
HAN L Y,ZHANG Q,CHENG Y, *et al.* Research progress of agriculture drought disaster risk and prospect [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2020,34(6):97.
- [2] 赵凯娜,宁晓菊,秦耀辰,等. 县域冬小麦生育期气候要素与产量的灰色关联度分析—以河南省为例[J]. 中国农业气象,2017,38(11):736.
ZHAO K N,NING X J,QIN Y C, *et al.* Grey correlation analysis between climatic elements during winter wheat growing period and yield in counties: A case study of Henan Province [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2017, 38 (11): 736.
- [3] 杨文彪,张慧芊,李莹,等. 山西省冬小麦生产潜力时空分布与气象因子分析[J]. 作物杂志,2020(1):166.
YANG W B,ZHANG H Y,LI Y, *et al.* Spatiotemporal distribution of potential productivity of winter wheat and meteorological factor analysis in Shanxi Province [J]. *Crops*, 2020 (1):166.
- [4] 李月英,刘全喜,张文英,等. 黑龙江流域冬小麦产量与气象因子相关与通径分析[J]. 华北农学报,2008,23(S2):332.
LI Y Y,LIU Q X,ZHANG W Y, *et al.* Correlation and path analysis between winter wheat yield and meteorological factors in Heilonggang region [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2008,23(S2):332.
- [5] 逮玉兰,李广,韩俊英,等. 降水量和气温变化对东西地区旱地春小麦产量的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版) 2021,47(3):272.
LU Y L,LI G,HAN J Y, *et al.* Effect of precipitation and temperature changes on dryland spring wheat yield in Dingxi area [J]. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)*, 2021,47(3):272.
- [6] 史印山,王玉珍,池俊成,等. 河北平原气候变化对冬小麦产量的影响[J]. 中国生态农业学报,2008,16(6):1447.
SHI Y S,WANG Y Z,CHI J C, *et al.* Impact of climate change on winter wheat production in the Hebei Plain [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008,16(6):1447.
- [7] LIU Y J,CHEN Q M,GE Q S, *et al.* Modelling the impacts of climate change and crop management on phenological trends of spring and winter wheat in China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018,248:525.
- [8] 李炳军,张一帆. 不同生育时期气候变化对河南省冬小麦产量影响的量化分析[J]. 江苏农业科学,2022,50(12):244.
LI B J,ZHANG Y F. Quantitative analysis of impact of climate change at different growth stages on winter wheat yield in Henan Province [J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2022,50(12):244.

- [9]李炳军,王天慧.冬小麦不同生长阶段气象因素对产量影响的双重量化分析[J].麦类作物学报,2018,38(04):488.
LI B J, WANG T H. Double quantification analysis of the effect of meteorological factors on yield in winter wheat at different growth stages [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2018, 38(4):488.
- [10]祁贵明,雒维萍,霍治国,等.柴达木盆地藜麦适宜农业气象指标构建[J].中国农业资源与区划,2022,43(04):192.
QI G M, LUO W P, HUO Z G, *et al.* Construction of suitable agrometeorological indexes for quinoa in Qaidam Basin [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2022, 43(4):192.
- [11]LIVEZEY R E, CHEN W Y. Statistical field significance and its determination by Monte Carlo techniques [J]. *Monthly Weather Review*, 1983, 111(1):47.
- [12]徐敏,徐经纬,高苹,等.不同统计模型在冬小麦产量预报中的预报能力评估——以江苏麦区为例[J].中国生态农业学报,2020,28(3):446.
XU M, XU J W, GAO P, *et al.* Evaluation of winter wheat yield prediction ability of different statistical models: A case study of Jiangsu wheat-growing region [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(3):446.
- [13]刘思峰.灰色系统理论及其应用(第九版)[M].北京:科学出版社,2021:75-78.
LIU S F. Grey system theory and its application (9th Edition) [M]. Beijing: Science Press, 2021:75-78.
- [14]成林,李彤霄,刘荣花.主要生育时期气候变化对河南省冬小麦生长及产量的影响[J].中国生态农业学报,2017,25(6):938.
CHENG L, LI T X, LIU R H. Effect of climate change on growth and yield of winter wheat in Henan Province [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(6):938.
- [15]张明捷,王运行,赵桂芳,等.濮阳冬小麦生育时期气候变化及其对小麦产量的影响[J].中国农业气象,2009,30(2):228.
ZHANG M J, WANG R X, ZHAO G F, *et al.* Climate change during winter wheat growing period and its impacts on winter wheat yield in Puyang of Henan Province [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2009, 30(2):228.
- [16]史本林,朱新玉,李红忠,等.中原腹地气候变化对冬小麦产量的影响——以商丘地区为例[J].地理研究,2012,31(1):20.
SHI B L, ZHU X Y, LI H Z, *et al.* Impacts of climate change on winter wheat yield in Central Planins of China: Case study of Shangqiu [J]. *Geographical Research*, 2012, 31(1):20.
- [17]郑娜,刘秀位,王锡平.利用产量差距方法进行华北冬小麦产量受气候影响规律的分析——以河北省栾城县为例[J].中国生态农业学报,2014,22(2):239.
ZHENG N, LIU X W, WANG X P. Determining the effects of climate on winter wheat yield in Northern China via yield gap analysis: A case study of Luancheng County, Hebei Province [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22(2):239.
- [18]余卫东,赵国强,陈怀亮.气候变化对河南省主要农作物生育时期的影响[J].中国农业气象,2007(1):11.
YU W D, ZHAO G Q, CHEN H L. Impacts of climate change on growing stages of main crops in Henan Province [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2007(1):11.