

李炳军,张一帆. 不同生育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):238-246.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.12.036

不同生育期气候变化对河南省冬小麦产量影响的量化分析

李炳军,张一帆

(河南农业大学信息与管理科学学院,河南郑州 450046)

摘要:为探究冬小麦不同生育期气象因素变化趋势及其对小麦产量的影响,选取河南省 17 个农业气象观测站 2009—2019 年气象资料与产量资料,采用 HP 滤波法分离得到气象产量,并通过建立一元回归与多元回归模型,分别在时间和空间上对河南省冬小麦不同生长阶段的气候变化趋势及其对产量的贡献进行量化分析。结果表明,冬小麦各生育期表现为一致增温,光照与降水量均在分蘖期、返青期、灌浆期 3 个时期显著减少;温度、光照、降水量分别在分蘖期、返青期、抽穗期对冬小麦产量贡献率最大;豫北和豫东地区温度显著升高,而该区域在冬小麦播种—分蘖期间的光照和降水量分别呈现显著增加和显著减少的趋势,降水量在豫西和豫西南地区全生育期间表现为先减少后增加;温度、光照、降水量在抽穗—成熟阶段的河南省大部分地区、东南地区、越冬—拔节阶段的东北地区对冬小麦产量贡献最高。

关键词:冬小麦;生育期;气象因素;HP 滤波法;回归分析法

中图分类号:S162.5⁺3;S314 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2022)12-0238-08

气候条件与粮食作物生长密切相关,气候变化和极端气候对粮食供应的直接影响最甚。由于农业对气候变化的高敏感性,导致农业生产系统对自然条件尤其是气候气象条件依赖性极强^[1]。冬小麦是我国主要的农作物之一,在农业生产及国民经济中都占有重要地位,冬小麦的整个生产阶段都不同程度地受到气候因素的影响,其产量依气候条件的变化而波动^[2]。在我国农业气候条件发生显著变化的背景下,了解冬小麦产量和气候变量之间的关系,对于满足因人口增加而增加的粮食需求以及减轻全球变暖下极端气候情况增加的负面影响具有重要意义。产量是气候变化对作物影响的直接衡量标准,也是影响作物种植战略最重要的因素之一,气候变化通过影响小麦不同生育阶段的演变特征进而影响其产量的形成^[3]。国内外学者对气候变化和不同地区不同时间尺度冬小麦产量关系进行了丰富的研究,较一致的结论是气象因素与小麦生长发育密切相关,气候变化对冬小麦产量的影响逐渐显著^[4]。受地形、土壤、耕作方式的影响,区域

间小麦产量对不同气象因子的敏感度差异明显^[5-6]。大部分利用通径分析和相关分析方法的研究结果均表明温度和降水量与小麦产量显著相关,是决定小麦产量的主要限制因子^[7-9]。杨文彪等采用农业生态区域法和生产潜力递减机制法估算得到限制小麦气候生产潜力的主要气象因子是降水量和温度^[10]。Liu 等基于中国 48 个农业气象站点的数据比较气候变化对冬小麦产量的相对贡献,同样发现平均温度对冬小麦产量的贡献率最大^[11]。Singh 等则将日最高温和最低温作为小麦产量评估的重要参数^[12]。此外,武建华等认为,时空不均的降水、连阴雨、干旱对小麦高产有一定的制约作用^[13]。吴熠婷等发现气候变化会对不同气候区冬小麦生长造成不同程度的影响,影响程度总体上呈现自北向南逐渐降低的趋势^[14]。Bönecke 认为,气候系统最终将导致冬小麦在未来 10~20 年内明显减产^[15]。穆青云等同样发现不同气象因子与小麦产量呈现不同的函数关系,且研究区西部小麦产量变化对温度升高相较于其他区域更加敏感^[16]。席凯鹏等揭示了不同气候年型下小麦产量对晚霜冻的响应,发现春季增温会导致小麦抗晚霜冻能力下降,从而导致产量下降^[17]。学者们针对气候变量和作物产量之间的关系研究成果十分显著,具有很好的借鉴意义。然而小麦产量是在全生育期各时段环境条件综合影响下形成的最终结果,它对不同时

收稿日期:2021-08-28

基金项目:河南省软科学研究重点项目(编号:202400410051)。

作者简介:李炳军(1968—),男,河南泌阳人,博士,教授,博士生导师,从事灰色系统理论和农业系统工程研究。E-mail:zzljun@163.com。

通信作者:张一帆(1998—),女,河南许昌人,硕士研究生,从事灰色系统理论和农业系统工程研究。E-mail:zyf185423@163.com。

段的环境条件有不同的敏感度。不同气象条件在各生育期的变化趋势、对小麦产量的贡献以及气象因子作用机制的空间差异等仍旧模糊。此外,冬小麦不同生长阶段对不同气象气候条件的需求是不同的,这些要素的实时状态影响着小麦农艺生育性能。可见,基于不同生育期研究气象因素与小麦产量的关系十分必要,而现有研究对该方面的报道相对较少,其影响机制尚不清楚。河南省是我国小麦五大主产区之一,冬小麦种植面积占夏收粮食种植面积的 99% 以上,属于半冬性小麦区,该区域小麦产量变异系数较大,对气候变化敏感^[18]。为明确不同物候期下气象因素状态趋势变化规律及对冬小麦产量的影响,本研究以河南省为例,综合采用 HP 滤波法和线性回归分析对冬小麦不同生长阶段气象因素进行量化分析,以期科学应对气候变化、指导小麦生产提供重要依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域与数据来源

河南省位于中国中东部、黄河中下游,属于温带-亚热带、湿润-半湿润季风气候,地形基本以平原为主,其特有的气候、自然条件为冬小麦生长提供了有利的环境,除信阳市以外其余地区均处于黄淮冬麦区。根据河南省冬小麦农业气象站点的资料,从中选取气象观测数据连续、具有典型代表性、空间位置分布均匀的 17 个农业气象观测站点(表 1),农业气象观测站空间地理位置分布见图 1。各站点 2009—2019 年冬小麦生长季光、温、水等资料数据来源于河南省气象局(<http://ha.cma.gov.cn/>)以及中国气象数据网《中国地面气候资料日值数据集》(<http://data.cma.cn>)。其中选取日照时数(S_{un})作为光照条件;选取日平均温度(T_{ave})、日最高温度(T_{max})、日最低温度(T_{min})作为温度条件;选取 20:00—08:00 时降水量(P_{20-8})、08:00—20:00 时降水量(P_{8-20})作为降水条件。研究站点冬小麦产量以及历年河南省冬小麦总产量资料来源于 2009—2019 年《河南省统计年鉴》(<http://www.ha.stats.gov.cn>)。依据文献[19]中的冬小麦生育期物候图,将冬小麦生育期划为播种期、出苗期、分蘖期、越冬期、返青期、拔节期、抽穗期、灌浆期、成熟期 9 个生育阶段。

1.2 数据处理与分析

利用《中国地面气候资料日值数据集》中提供

表 1 研究站点基本信息

区站名	区站号	纬度(°N)	经度(°E)	观测场海拔(m)
安阳	53898	36.03	114.08	194.8
新乡	53986	35.19	113.55	73.2
三门峡	57051	34.43	111.15	575.6
孟津	57071	34.48	112.28	329.1
郑州	57083	34.42	113.40	110.4
许昌	57089	34.04	113.56	67.2
开封	57091	34.48	114.18	73.7
西峡	57156	33.19	111.29	250.3
南阳	57178	33.06	112.29	180.6
宝丰	57181	33.53	113.03	136.4
西华	57193	33.47	114.31	52.6
桐柏	57285	32.23	113.25	153.0
驻马店	57290	32.56	113.55	106.2
信阳	57297	32.08	114.03	114.5
商丘	58005	34.26	115.32	50.8
永城	58111	33.51	116.25	32.1
固始	58208	32.10	115.37	42.9

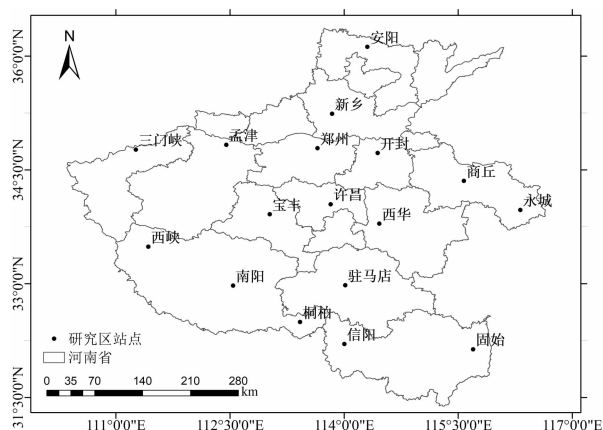
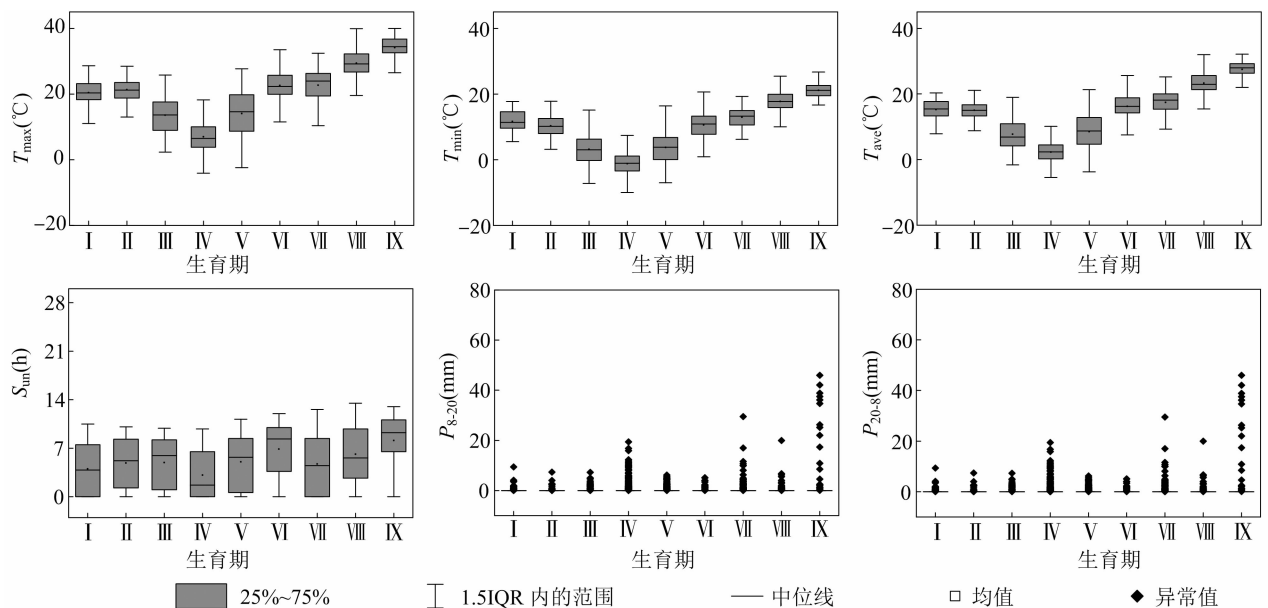


图 1 研究区域及站点分布

的要素观测数据质量控制码,借助 SPSS 软件,采用五日滑动平均法对气象数据缺失值、异常值、可疑值进行替换与插补。根据各生育期逐日气象资料数据,将计算逐日气象要素平均值作为各站点逐年不同生育期的气象要素值(表 2)。由于日值气象资料数据量庞大,本研究借助 Origin 软件并根据 2009—2019 年河南省冬小麦生育期气象资料日值数据对冬小麦不同生育期下的气象变量数据进行描述统计,通过箱图展示各气象要素在不同时段的分布规律和离散程度(图 2)。其中 T_{ave} 、 T_{max} 、 T_{min} 、 S_{un} 在冬小麦不同生长时段均有明显的分布特征,由于降水在一年中大多集中在特定的时节,且同一时期下没有特定的规律,因此 P_{20-8} 、 P_{8-20} 数据的分布

表 2 2009—2019 年河南省冬小麦产量分离结果

年份	y_t (万 t)	g_t (万 t)	c_t (万 t)
2009	3 092.20	3 046.44	45.76
2010	3 121.00	3 085.73	35.27
2011	3 144.90	3 115.02	29.88
2012	3 223.07	3 166.02	57.05
2013	3 266.33	3 209.82	56.51
2014	3 385.20	3 282.97	102.23
2015	3 526.90	3 324.81	202.09
2016	3 618.62	3 451.44	167.18
2017	3 705.21	3 350.25	354.96
2018	3 602.85	3 416.77	186.08
2019	3 741.77	3 611.93	129.84



I、II、III、IV、V、VI、VII、VIII、IX 分别代表播种期、出苗期、分蘖期、越冬期、返青期、拔节期、抽穗期、灌浆期、成熟期

图2 冬小麦生长季气候变量分布

$$y_t = g_t + c_t + \Delta_y. \quad (1)$$

式中: y_t ($t=1, 2, 3, \dots, n$) 是包含长期趋势和短期波动成分的长时间序列趋势产量; n 代表样本容量; g_t 反映历史生产力发展水平; c_t 反映由短期气象因子变化引起的短期波动成分;由于 Δ_y 对产量影响较小,此处忽略不计。

HP 滤波法使得小麦产量序列在长时间尺度上的趋势成分和实际单产序列间偏差的平方和最小,即

$$\min \left\{ \sum_{t=1}^n (y_t - g_t)^2 + \lambda \sum_{t=1}^n [(g_{t+1} - g_t) - (g_t - g_{t-1})]^2 \right\}. \quad (2)$$

式中: g_t 表示公式(2)最小化的解,即长期趋势成

为离散状态的点。

1.3 研究方法

1.3.1 HP 滤波法 HP 滤波法是 Hodrick & Prescott 于 1980 年提出用来消除时间序列中包含趋势成分的方法,最初应用于宏观经济趋势的分析,也可用于气象产量分离。通过查阅相关文献,目前较成熟的农作物产量分离方法主要有 Logistic 拟合法、滑动平均法、HP 滤波法、综合平均趋势法、滑动平均法等。其中,HP 滤波法操作简单且分离精度较高,其拟合结果能够较准确地体现气候变化对粮食产量的影响^[20]。本研究采用 HP 滤波法将小麦产量 y_t 分解为趋势产量 g_t 、气象产量 c_t 、随机误差 Δ_y 等 3 个部分,即

分; λ 在年度、季度、月度下都有相应的取值,这里取 $\lambda=100$ 。采用公式 $c_t = y_t - g_t$ 计算冬小麦历年气象产量,计算结果如表 2 所示。

1.3.2 回归分析法 回归分析是数据分析中最基础也是最重要的工具,识别重要变量、判断相关性程度及方向、利用回归系数估计权重是回归分析的 3 个重要使命^[21]。其中判断相关性程度及方向这一特性在本研究中用以测算冬小麦在各生育期以及不同气象站点下的气候倾向率,利用回归系数估计权重这一特性在本研究中用以测算不同生育期下主导气象要素对冬小麦产量贡献率以及针对不同气象站点各关键气象要素对冬小麦产量的贡献

率。采用一元线性回归模型 $y_i = b_i + a_i t + \mu_i$ 分别统计不同气象因子在各生育期和气象站点的气候倾向率,其中 t 为年份, μ_i 为无法观测且满足一定条件的扰动项。若 y_i 为冬小麦不同生育期下各气象因子逐年气象数据,则 $10a_i$ 代表冬小麦不同生育期下各气象要素气候倾向率,同理也可得到不同气象站点各气象要素气候倾向率。本研究借助气候倾向率来表征要素在时间上的变异特征,采用 t 检验法来判断回归系数的显著性,对各要素变化趋势进行显著性检验。概率水平 $P < 0.05$ 、 $P < 0.01$ 分别表示达到显著水平和极显著水平。

采用多元线性回归模型 $X_0 = \beta + \alpha_1 X_1 + \alpha_2 X_2 + \dots + \alpha_i X_i + \gamma_i$ 来拟合气象产量与冬小麦不同生育时期气象要素的关系,并对其进行统计分析。式中, X_0 表示河南省冬小麦历年总产量, X_1 、 X_2 、 X_3 、 \dots 、 X_i 分别为不同生育时段各气象要素逐年气象数据,利用公式(3)计算可得到不同生育期各气象要素对冬小麦产量的贡献率,同理也可得到不同气象站点各气象因子对冬小麦产量贡献率。

$$\omega_i = \frac{\alpha_i}{\sum_{i=1}^n |\alpha_i|} \quad (3)$$

式中: α_i 表示多元线性回归方程第 i 个回归系数; $\omega_i > 0$ 表示气象要素 y_i 对小麦产量为正影响, $\omega_i < 0$

表示不利影响。

2 结果与分析

2.1 冬小麦不同生育期气候变化特征

气候倾向率表征某一气候变量的趋势变化,其数值大小反映气候变量变化的强弱。利用一元回归方程分别计算得到冬小麦不同生育时期下气象因素 T_{\min} 、 T_{ave} 、 T_{\max} 、 S_{un} 、 P_{20-8} 、 P_{8-20} 随年份 t 变化而变化的特征,各生育期气象因素气候倾向率见表 3。

由表 3 可知,冬小麦不同生育时期气候变化趋势基本一致,主要表现在各时期 T_{\min} 、 T_{ave} 、 T_{\max} 均为正值,表明各时期一致增温,其中 T_{ave} 在冬小麦大部分生育时期显著升高,其增温速率也明显高于 T_{\min} 与 T_{\max} 。纵观整个生育期,发现返青期的 T_{\min} 、 T_{ave} 、 T_{\max} 的气候倾向率明显偏大且变化显著,尤其是 T_{ave} 按 $1.05\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ 年的速率升高。 S_{un} 在冬小麦的播种期、分蘖期、越冬抽穗期、灌浆期一致减少,在抽穗期和灌浆期极显著减少, S_{un} 在其余时期一致增加,在成熟期显著增加,其余时期则变化不显著; P_{20-8} 在大部分生育期下呈现增长趋势,其中在分蘖期与返青期显著减少,在拔节期成熟期显著增加; P_{8-20} 与 P_{20-8} 变化趋势基本一致,不同的是 P_{8-20} 降水量减少更显著。

表 3 冬小麦生育期各气象要素气候倾向率

生育期	T_{\min} [$^{\circ}\text{C}/(10\text{ 年})$]	T_{ave} [$^{\circ}\text{C}/(10\text{ 年})$]	T_{\max} [$^{\circ}\text{C}/(10\text{ 年})$]	S_{un} [$\text{h}/(10\text{ 年})$]	P_{20-8} [$\text{cm}/(100\text{ 年})$]	P_{8-20} [$\text{cm}/(100\text{ 年})$]
播种期	0.07 *	0.61 **	0.58 **	-1.31	0.64	0.57 *
出苗期	0.49 *	0.79 *	0.67 *	0.4	0.14	0.48 *
分蘖期	0.28	0.86	0.17	-0.47	-0.42 *	-0.27 **
越冬期	0.89 **	0.53 **	0.14 *	-0.01	0.18	1.00
返青期	0.93 *	1.05 *	0.91 *	1.49 **	-0.15 *	-0.51
拔节期	0.52 **	0.13 **	0.05 **	0.78	0.69 *	0.61 **
抽穗期	0.42	0.57	0.21	-4.73 **	0.25	0.2 *
灌浆期	0.53 **	0.33 **	0.09 **	-5.91 *	-0.61	-0.62
成熟期	0.04 *	0.95 *	0.02	1.53 *	1.71 *	0.61 **

注: *、** 分别表示不同生育期气象要素在 0.05、0.01 水平上差异显著。

2.2 不同生育期气候变化对冬小麦产量的影响

采用多元线性回归,将气象因素 T_{\min} 、 T_{ave} 、 T_{\max} 、 S_{un} 、 P_{20-8} 、 P_{8-20} 的回归系数绝对值之和作为基数,利用公式(3)得到各气象要素 2009—2019 年在不同生育期下对于冬小麦产量的贡献率。为了更清晰地反映不同气象因素贡献率的差异,借助 Origin 软件绘制各生育期下气象因素的贡献率分布图(图 3)。

冬小麦在某一特定生育期下,气象因素贡献率各不相同(图 3)。冬小麦播种期间仅 T_{ave} 为负贡献,其余气象因素均为正贡献;出苗期 P_{20-8} 对冬小麦产量贡献率最高,而 P_{8-20} 对冬小麦的生长抑制作用最强。分蘖期与越冬期 T_{ave} 在相应时期对冬小麦产量正贡献最高,然而 T_{\min} 在这 2 个时期都有最高的负贡献。返青期间 P_{20-8} 与 T_{ave} 均为负贡献,拔节

期间的 P_{20-8} 与 T_{ave} 对冬小麦产量为正贡献,且拔节期间 P_{20-8} 与 T_{ave} 相对于其他气象因素贡献率最高。抽穗期、灌浆期、成熟期下日照时数对冬小麦产量贡献率最低,3 个时期下对冬小麦产量贡献率最高的分别是 T_{ave} 、 T_{max} 、 T_{min} 。

同一气象因素在不同生育期下的作用也存在差异(图 3)。 P_{8-20} 在播种期、返青期、拔节期、抽穗期、灌浆期为正贡献,在其余生育期为负贡献, P_{8-20} 在灌浆期(31.8%)和出苗期(-25.64%)对小麦生产抑制和促进作用最强; P_{20-8} 在出苗期、分蘖期、越冬期、拔节期、抽穗期、成熟期均为正贡献且在出苗期(30.87%)贡献率最高; T_{ave} 在分蘖期、越冬期、拔

节期、抽穗期均为正贡献且在拔节期(40.87%)贡献率最高; T_{max} 在各个生育时期相对于其他气象因素贡献率较大。 T_{max} 在播种期、出苗期、返青期、灌浆期、成熟期均为正贡献,且在灌浆期(28.44%)贡献率达到最高值; T_{min} 在播种期、出苗期、返青期、灌浆期、成熟期均为正贡献,在播种期(26.72%)和分蘖期(-25.52%)分别达到最高正贡献和负贡献; S_{un} 在播种期、出苗期、返青期、拔节期均为正贡献,日照时数在冬小麦各生育期间整体贡献率均处于较低水平,且大部分时期为负贡献,正负贡献的绝对值均在 10% 左右。可见同一气象因子在冬小麦生长的整个生育期发挥着不同的作用。

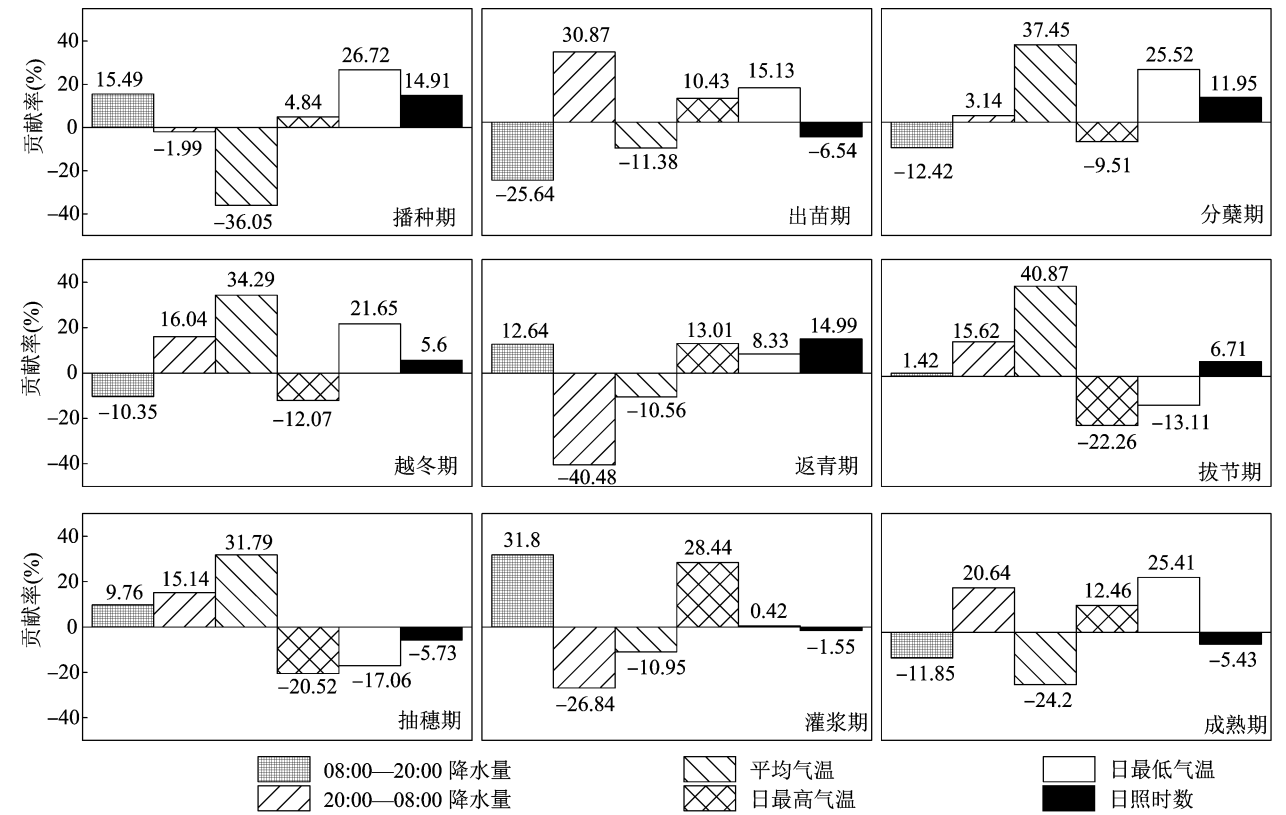


图3 不同生育期气象因素贡献率

根据图 3 计算得到在冬小麦整个生育期间各气象因素的平均贡献率(表 4),发现除 T_{min} 以外,大部分气象因素在冬小麦整个生育期是正贡献,可见 T_{min} 对冬小麦产量形成存在不利的影响。全生育期下平均贡献率位居前三的分别是 T_{ave} 、 P_{20-8} 、 S_{un} ,该结论与周吉红等的研究结果^[22]一致。

2.3 气候变化特征及对冬小麦产量影响的空间分布

将冬小麦全生育期划分为播种—分蘖阶段、越冬—拔节阶段、抽穗—成熟阶段 3 个生长阶段,气象

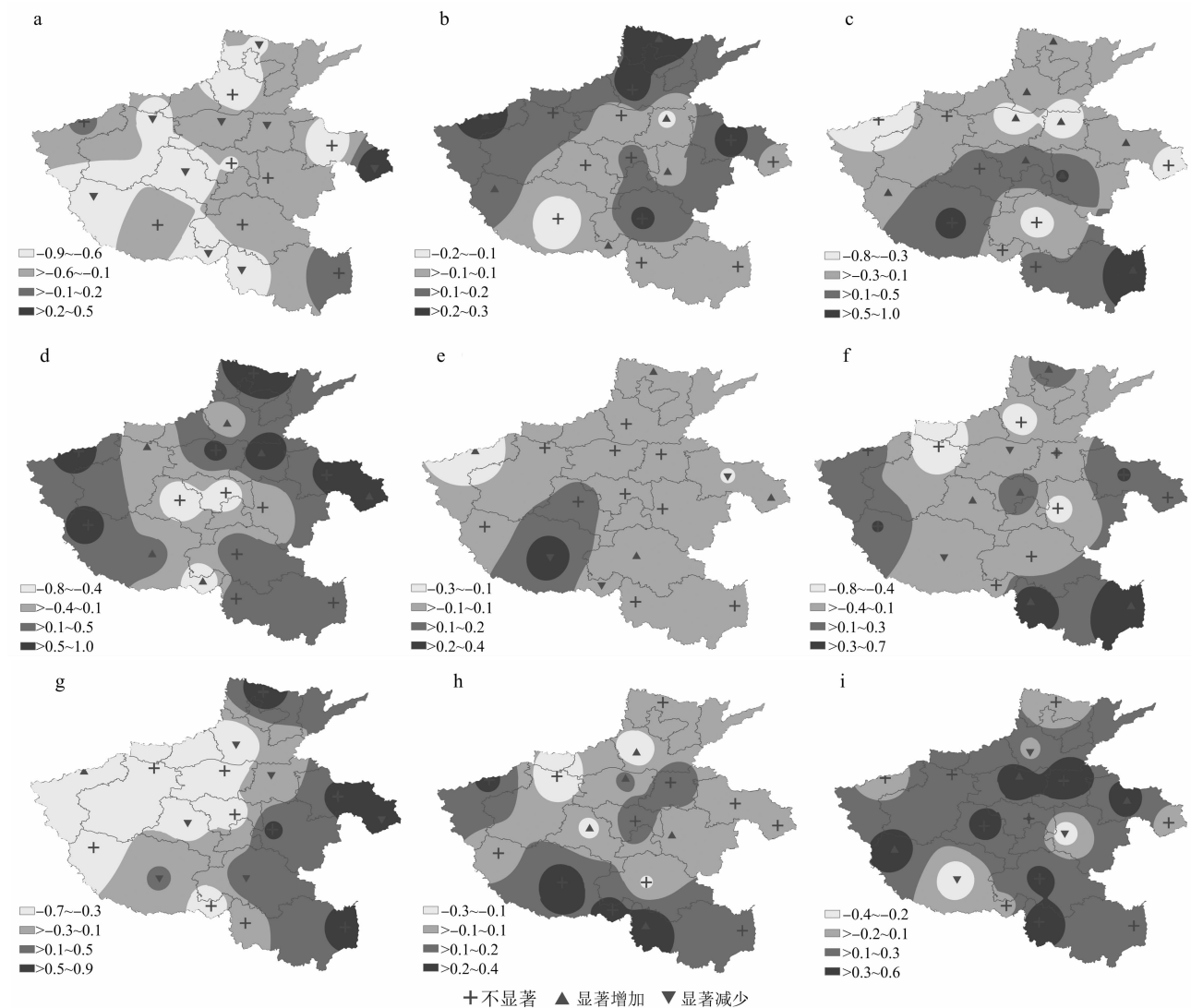
因素 T_{min} 、 T_{ave} 、 T_{max} 、 S_{un} 、 P_{20-8} 、 P_{8-20} 划分为温度、光照、降水量 3 个气象条件。选取 T_{ave} 来反映冬小麦

表 4 全生育期下气象因素平均贡献率

全生育期	贡献率(%)
P_{8-20}	1.20
P_{20-8}	3.57
T_{ave}	5.70
T_{max}	0.54
T_{min}	-0.15
S_{un}	1.43

整个生育期内的温度条件,选取同日期下 P_{20-8} 与 P_{8-20} 逐日气象要素数据的加和来反映冬小麦整个生育期内的降水条件^[23]。研究站点冬小麦产量利用该站点所在区域小麦产量代替,再次运用回归分析法进行拟合,同理可得到不同研究站点下 3 个气象条件的气候倾向率以及冬小麦的产量贡献率。

为更清晰反映各气象要素气候倾向率及其贡献率在空间上的分布状态,基于已有的实际测量值,采用反距离权重法并借助 ArcGIS 软件对研究站点以外的预测点进行空间插值^[24],得到不同生长阶段水、温、光气候倾向率及对产量的贡献率分布图(图 4)。



a、b、c—表示降水、温度、光照在冬小麦播种—分蘖阶段的气候倾向率及对产量的贡献分布; d、e、f—表示降水、温度、光照在冬小麦越冬—拔节阶段的气候倾向率及对产量的贡献分布; g、h、i—表示降水、温度、光照在冬小麦抽穗—成熟阶段的气候倾向率及对产量的贡献分布

图4 不同生长阶段降水、温度、光照气候倾向率及对产量贡献分布

从冬小麦不同生长阶段降水、温度、光照气候倾向率显著性的空间分布来看,播种—分蘖阶段大部分站点降水量显著减少,部分站点温度显著降低、光照时数显著增加,其余地区气候变化特征不显著;越冬—拔节阶段豫北、豫南地区降水量显著增加,河南省周边地带温度显著升高,中部地区则变化不显著,豫中、豫北、豫东南地区日照时数显著增

加,豫西南地区日照时数显著减少;抽穗—成熟阶段豫中、豫东、豫南大部分地区降水量显著减少,豫中和豫南地区温度显著升高,豫中和豫西南地区日照时数显著减少,光照时数在豫西和豫东地区显著增加,可见各生长阶段气象气候变化特征区域差异显著。

从各气象条件在冬小麦不同生长阶段的贡献率水平来看,降水量在河南省东部、东南部、东北部

地区贡献率最高,而在部分豫中地区以及豫西、豫西南地区对小麦产量有明显的抑制作用。温度分别在 3 个生长阶段的豫西北、豫西南、豫西南地区具有较高的正贡献,在越冬—拔节阶段和抽穗—成熟阶段的豫西北地区温度对小麦生长具有明显的抑制作用。光照在播种—分蘖和越冬—拔节的豫东南地区贡献率较高,在抽穗—成熟阶段的大部分地区对小麦生长均为促进作用。

3 结论与讨论

本研究借助 HP 滤波法分离得到冬小麦气象产量,基于气象因素 S_{un} 、 T_{ave} 、 T_{max} 、 T_{min} 、 P_{20-8} 、 P_{8-20} ,利用一元线性回归与多元线性回归对河南省冬小麦生育期气候变化趋势以及不同气象因素贡献进行分析比较,量化整个生育期和不同生长阶段下气象因素对冬小麦产量的影响。回归结果表明,冬小麦在不同生育期以及不同区域的气候变化特征各有差异,气象因素在各个生育阶段以及不同区域对冬小麦产量的贡献也各不相同。基于冬小麦不同生育期来探究气象因素对其产量的影响,使分析结果更加全面具体,能够很好地揭示气象气候因素对小麦生长发育的影响机理。

从冬小麦不同生育期气候的历史变化趋势(表 3)来看,冬小麦整个生长阶段总体上都呈现升温的趋势, T_{min} 的增速在大部分生育期明显高于 T_{max} ,说明温度差在逐年减小,Xiao 等基于作物模型和田间变暖试验的研究也有类似发现^[25-26]。此外,返青至抽穗阶段 T_{min} 的大幅增加意味着春季回暖较快,此时光周期反应的加速会影响后期的抽穗率,对于小麦适应气候的变化措施,应重点考虑返青后的麦田管理方法。小麦生长期间温度变暖显著,温度的升高会导致冬小麦生育期提前,进而缩短小麦生长的持续时间^[27]。累积降水量变化趋势在不同生育期间有显著差异,其中 P_{20-8} 和 P_{8-20} 在大部分生育期显著增加,一定范围内降水量的增加与温度的回升等条件有利于冬小麦的返青起身和拔节生长,这与成林等的研究结果^[28]相似。气候变化趋势不仅在时间上有所不同,同时也存在空间区域性差异(图 4)。对比分析研究区内冬小麦播种—分蘖、越冬—拔节、抽穗—成熟等 3 个生长阶段,发现播种—分蘖阶段与抽穗—成熟阶段分别有 47%、35% 的站点降水量显著下降,其中抽穗—成熟阶段包含需水关键期(4—5 月)^[29],降水量分布的不确定和不稳定也

是作物生长主要限制因素之一^[30],对于小麦需水阶段应进行合理灌溉以预防小麦干旱灾害的发生。研究区内分别有 35%、24%、29% 的站点温度显著升高,不同生长阶段温度的变化存在东西部区域差异,表明冬小麦积温需求结构发生改变,随不同生育阶段和区域的变化而变化,这与栾青等的研究结果^[31]相互印证。3 个生长阶段依次有 53%、29%、18% 的站点光照时数显著增加,光照时数增加区域多集中在河南省中部地区。

由于物候对气候因素的不同敏感性以及不同生育期各研究站点气候变化趋势的差异性,导致气象因素在冬小麦不同生长阶段的贡献也有所不同(图 3)。 T_{ave} 在冬小麦大部分生育期都具有较高的正贡献,景毅刚等也同样认为温度是影响作物变化的主要驱动力,与小麦生长发育密切相关,可见该要素是决定农作物能否正常生长、发育和成熟的先决条件^[32]。在一定范围内,温度的适度提高有利于促进小麦叶片的光合作用以及小麦植株干物质的积累,从而提高小麦产量^[33]。 T_{max} 与 T_{min} 在冬小麦各发育阶段的贡献率方向保持一致,其中 T_{min} 在小麦生育期前几个阶段为正贡献,表明该气象因素在小麦生长前期是有利条件。吕丽华等也发现小麦在幼苗阶段必须通过一定的低温时期才能进入幼穗分化,否则麦苗只能停留在分蘖状态而不能抽穗结实^[34]。 S_{un} 在冬小麦分蘖期至拔节期为正贡献,表明该因素在这一时期下对小麦生长起着关键作用,该阶段恰好对应小麦光照阶段。小麦是长日照作物,日照越长越有利于小麦抽穗,反之则抽穗延迟或不能抽穗进而影响小麦产量^[35]。 P_{20-8} 与 P_{8-20} 在冬小麦生长阶段的大部分时期为正贡献,降水因素对冬小麦产量的影响不容忽视,水是生命之源,对小麦更是如此,充足的水分是农作物生长发育和产量形成的重要保证。冬小麦从播种到成熟整个生育期需要大量的水分。据统计,小麦一生中需要消耗水量为 400 ~ 600 mm (相当于 3 000 ~ 6 000 m³/hm²)^[36]。此外,气象因素对小麦产量的贡献也存在空间差异(图 4),降水量在河南省东南部、东北部的贡献率较高,由于西部地区多山地丘陵不利于小麦的种植,且降水是小麦汲取水分的重要途径,因此降水的贡献大都集中在适宜小麦种植的中部平原区域。温度在播种—分蘖、抽穗—成熟阶段有较大的贡献,纵观 3 个生长阶段,温度对河南省东北部以及东南部地区的贡献率较大。光照在 3

个生长阶段的贡献自东南部、东部逐渐移至西南、南部进而影响到河南省整个种植区域。

综上,小麦从种子萌发到成熟的每一个发育阶段都要求一定光照、温度、水分的综合气象条件。《作物栽培学》中也提到,如果有适宜的水分、温度、光照、气体、肥料,作物就能茁壮成长,将降水、温度、光照三要素置于最前面,可见冬小麦生育期内降水、温度、光照的合理搭配对小麦稳产高产至关重要^[37]。但小麦不同发育阶段以及不同的种植区域都有属于其特定的重要气象因素,在研究冬小麦适应气候变化措施时应结合不同生育期气候变化规律,根据苗情进行分类管理,做好促弱控旺,力争形成合理群体,同时根据墒情和天气变化,适时施肥、灌溉,以促进冬小麦返青和拔节生长。然而小麦生产不仅仅具有区域性和阶段性等特征,也是一个处在环境条件不确定的多因素交互作用的生理生态发展过程,该过程不仅受气候条件等因素的影响,同时也受土壤条件、技术和管理水平、物质投入等多源数据的影响。受资料限制,本研究只选取气象条件这一单方面因素,可通过选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过程及规律,并对小麦生产进行反演,这也是下一步研究工作的方向。

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):97-102.
- [2] 徐雨晴,於珺,周波涛,等. 气候变化背景下未来中国气候生产潜力时空动态格局[J]. 干旱区资源与环境,2019,33(9):72-80.
- [3] 马倩倩. 未来气候变暖情景下北部冬麦区冬小麦生育期演变趋势预测分析[J]. 麦类作物学报,2021,41(6):762-770.
- [4] 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):729-737.
- [5] 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.
- [6] Ferrara R M, Trevisiol P, Acutis M, et al. Topographic impacts on wheat yields under climate change: two contrasted case studies in Europe[J]. Theoretical and Applied Climatology,2010,99(1/2):53-65.
- [7] 李月英,刘全喜,张文英,等. 黑龙港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):329-333.
- [8] 逯玉兰,李广,韩俊英,等. 降水量和气温变化对定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):268-273.
- [9] Wang J, Wang E L, de Li Liu. Modelling the impacts of climate change on wheat yield and field water balance over the Murray - Darling Basin in Australia[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2011,104(3/4):285-300.
- [10] 杨文彪,张慧芋,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):161-167.
- [11] 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, 2018,248:518-526.
- [12] Singh M, Sharma B, Vikas V. Weather based yield prediction model at various growth stages of wheat crop in different agro Climatic Zones of Jammu region[J]. Journal of Agrometeorology,2020,22:80-84.
- [13] 武建华,陈松,陈英慧,等. 驻马店市冬小麦主要气候特征及高产气象因素[J]. 中国农学通报,2011,27(6):387-393.
- [14] 吴熠婷,江琪,孟远,等. 气候变化条件下陕西省不同气候区灌溉对冬小麦减产风险影响评估[J]. 江苏农业科学,2021,49(10):213-222.
- [15] Bönecke E, Breitsameter L, Brüggemann N, et al. Decoupling of impact factors reveals the response of German winter wheat yields to climatic changes[J]. Global Change Biology,2020,26(6):3601-3626.
- [16] 穆青云,李俊,何亮,等. 青藏高原原冬小麦生产潜力及其对气候变化的响应[J]. 干旱区资源与环境,2021,35(7):92-99.
- [17] 席凯鹏,席吉龙,杨娜,等. 春季阶段性增温对小麦抗晚霜冻性和产量的影响[J]. 麦类作物学报,2021,41(5):632-639.
- [18] 马新明,张浩,熊淑萍,等. 基于 GIS 技术的河南粮食核心区小麦玉米区域潜力研究[J]. 农业工程学报,2010,26(增刊1):162-168.
- [19] 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(4):487-492.
- [20] 李心怡,张祎,赵艳霞,等. 主要作物产量分离方法比较[J]. 应用气象学报,2020,31(1):74-82.
- [21] 刘彦文,周霞,何宗宜,等. 基于 Logistic 回归的耕地数量演变及其空间要素边际效应分析[J]. 农业工程学报,2020,36(11):267-276.
- [22] 周吉红,毛思帅,王俊英,等. 北京地区小麦生育期温度演变及不同生育时期温度指标[J]. 作物杂志,2016(3):116-122.
- [23] 张媛铃,郭晓磊,王娜,等. 基于决策系统模拟不同降水年型旱作冬小麦的最佳播期[J]. 中国农业气象,2021,42(6):475-485.
- [24] 何鹏,张媛,高文波,等. 四川省多年平均气温数据空间插值方法与影响因素研究[J]. 中国农业资源与区划,2019,40(9):114-124.
- [25] Xiao D P, Tao F L, Shen Y J, et al. Combined impact of climate change, cultivar shift, and sowing date on spring wheat phenology in Northern China[J]. Journal of Meteorological Research,2016,30(5):820-831.
- [26] Zhang L X, Zhu L L, Yu M Y, et al. Warming decreases photosynthates and yield of soybean [*Glycine max* (L.) Merrill] in the North China Plain[J]. The Crop Journal,2016,4(2):139-146.
- [27] Zhang T Y, Huang Y, Yang X G. Climate warming over the past three decades has shortened rice growth duration in China and cultivar shifts have further accelerated the process for late rice[J]. Global Change Biology,2013,19(2):563-570.

王翠丽,王军强,陈亮,等. 不同耕作方式对绿洲区农田土壤团聚体中微生物生物量碳、氮含量的影响[J]. 江苏农业科学,2022,50(12):246-251.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.12.037

不同耕作方式对绿洲区农田土壤团聚体中微生物生物量碳、氮含量的影响

王翠丽^{1,2}, 王军强³, 陈亮^{1,2}, 栾倩倩^{1,2}, 李彦荣^{1,2}, 赵旭^{1,2}

(1. 兰州大学西部生态安全省部共建协同创新中心,甘肃兰州 730000; 2. 甘肃省农业工程技术研究院,甘肃武威 733006;

3. 西华师范大学,四川南充 637000)

摘要:为了更好地研究不同耕作方式下绿洲区农田土壤团聚体中有机碳、微生物量碳、微生物量氮含量之间的关系,选择4种耕作方式(免耕、少耕、深松、秋翻),对不同土层(0~20、20~40 cm)的土壤进行样品采集和分析,研究各粒级(粒径>2.00 mm、>1.00~2.00 mm、0.25~1.00 mm、<0.25 mm)土壤团聚体中有机碳、微生物量碳、微生物量氮含量的变化特征。结果表明,在4种耕作方式下,在0~20 cm土层4种粒级的土壤团聚体中,粒径>2.00 mm的土壤团聚体的微生物量碳、微生物量氮含量最高,免耕、少耕、秋翻处理的土壤团聚体有机碳含量最高。对同一粒级的土壤团聚体而言,0~20 cm土层有机碳、微生物量碳、微生物量氮含量高于20~40 cm土层。随团聚体粒级变小,土壤微生物量碳、微生物量氮含量逐渐降低;在秋翻方式下,土壤有机碳、微生物量碳、微生物量氮含量均最高,说明对该地区土壤翻动处理,可改善土壤微环境、增强土壤肥力,可作为改善绿洲区农田土壤的合理措施。

关键词:绿洲农田;耕作方式;团聚体;有机碳;微生物量碳;微生物量氮

中图分类号: S151.9⁺3;S153 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2022)12-0246-06

土壤团聚体是在土壤形成过程中,由土壤矿质颗粒吸收钙的腐殖质凝结而成的,是土壤结构的基本单元^[1]。土壤团聚体中各种微生物的活性受到耕作方

式、土壤类型及气候条件的影响,使不同粒级团聚体中碳、氮含量发生变化^[2]。有研究发现,微生物的快速生长对微团聚体(粒径<0.25 mm)中微生物群落结构的贡献高于大团聚体(粒径>2.00 mm)^[3]。单位体积土壤中的微生物量随着团聚体粒级的减小而增加,导致大团粒来自植物的外源有机质占据优势,而微小粒级团聚体中来自微生物代谢的有机物占优势^[4]。团聚体粒级大小不同,其微生物数量和种群也不相同,有研究发现,在0~30 cm土层,有机质含量在粒径为0.5~2 mm的团聚体中低于粒径≤0.005 mm的团聚体中^[5];还有研究发现,土壤微生物量碳、氮含量在粒径>2 mm团聚体中的含量

收稿日期:2021-08-19

基金项目:兰州大学中央高校基本科研业务费专项(编号:ljzjbky-2021-kb12);甘肃省级引导科技创新发展专项(编号:2019ZX-06);国家自然科学基金(编号:41867013,31560170)。

作者简介:王翠丽(1989—),女,甘肃会宁人,硕士,助理研究员,从事设施蔬菜栽培生理与生长调控研究。E-mail: wangcl116@163.com。

通信作者:赵旭,副研究员,博士,从事农田生态和微生物生理生化研究。E-mail: zhaoxu512@163.com。

[28] 成林,李彤霄,刘荣花. 主要生育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): 931-940.

[29] 徐建文,梅旭荣,居辉,等. 黄淮海地区冬小麦关键生育期不同灌溉水平对产量影响的模拟[J]. 作物学报,2014,40(8): 1485-1492.

[30] Nie H J, Qin T L, Li C Z, et al. Trend analysis of effective precipitation in different growth stages of winter wheat in Huaihe River Plain[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2019, 138(3/4): 2043-2056.

[31] 栾青,郭建平,马雅丽,等. 基于线性生长假设的作物积温模型稳定性比较[J]. 中国农业气象,2020,41(11): 695-706.

[32] 景毅刚,范建忠,高茂盛. 气候变暖对陕西冬小麦生育期的影响[J]. 麦类作物学报,2013,33(2): 389-396.

[33] 李娜,张峰举,许兴,等. 增温对宁夏北部春小麦叶片光合作用的影响[J]. 生态学报,2019,39(24): 9101-9110.

[34] 吕丽华,梁双波,张丽华,等. 不同小麦品种产量对冬前积温变化的响应[J]. 作物学报,2016,42(1): 149-156.

[35] 周宝元,葛均筑,孙雪芳,等. 黄淮海麦玉两熟区周年光温资源优化配置研究进展[J]. 作物学报,2021,47(10): 1843-1853.

[36] 李文旭,吴政卿,雷振生,等. 河南省主要气象因子变化及其对主要粮食作物单产的影响特征[J]. 作物杂志,2021(1): 124-134.

[37] 南学军,胡宏远,马国飞,等. 宁夏引黄灌区头水灌溉对春小麦生长和产量的影响[J]. 江苏农业科学,2021,49(13): 64-70.