

气候变暖背景下中原腹地冬小麦 气候适宜度变化

朱新玉¹, 刘 杰², 史本林¹, 张 怡³

(1. 商丘师范学院环境与规划学院, 河南商丘 476000; 2. 菏泽学院资源与环境系, 山东菏泽 274000;

3. 河南商丘市气象局, 河南商丘 476000)

摘要:通过构建冬小麦光照、温度、降水及综合气候适宜度计算模型,探讨气候变化对冬小麦气候适宜性的影响。结果表明:冬小麦全生育期温度、光照、降水及综合气候适宜度均值分别为0.54、0.64、0.37及0.50;冬小麦对光照适宜性较好,降水是限制冬小麦生长发育的主要因子;温度和降水适宜度以 $0.001 \cdot a^{-1}$ 线性趋势下降,光照适宜度以 $0.002 \cdot a^{-1}$ 线性趋势下降,气候因子匹配效果变差对冬小麦的生长不利。冬前生长阶段温度、光照和降水适宜性较弱,各气候因子匹配效果较差。出苗—拔节期降水适宜性较强,各气候因子组合效果较差;拔节—抽穗期和抽穗—乳熟期温度与光照适宜性较强,水分胁迫较大,气候因子组合效果趋好。乳熟—成熟期光照和降水适宜性较强,综合气候适宜性变差。光照、温度和降水适宜度在全生育期的中后期与冬小麦产量的相关性比较显著。

关 键 词:气候变暖;冬小麦;气候适宜度;商丘

文章编号:1000-0585(2012)08-1479-11

1 引言

气候变暖已成为一个全球性的问题,对农业生产的影响正在逐渐显现^[1~3]。农业生态系统作为受气候条件限制较大的生产部门,逐渐成为全球变化研究中的重要内容^[4,5]。粮食作物对当前及未来气候适宜性研究已成为热点问题之一,探索粮食作物适应气候变化的机理及过程,主动适应气候变化是维持粮食作物稳产、高产的重要措施。众多学者根据IPCC历次评估报告,对粮食作物产量增减、生长发育节奏、熟制、种植界限以及可种植海拔高度上限抬升等受气候变化的影响做了详细的研究^[6~12]。部分研究结论在近年大田实际生产中得到验证,部分还需要进一步探索。

气候变化对区域性农业生产的影响研究也取得了显著成果。张明捷等^[9]研究表明降雨量及日照时数的变化,不利于小麦发育成熟及高产。温度升高导致冬小麦生长期缩短,干物质积累和粉粒产量下降。国际权威杂志Nature 2012年2~3月刊登了2篇文章,特别强调了气候变化对小麦的影响;报道了气候变暖会导致小麦早熟、减产,干物质质量积累下降;如全球气候升高 2°C ,小麦减产幅度将比现有模型预计的大50%^[13,14]。在研究作物

收稿日期:2012-02-14;修订日期:2012-05-18

基金项目:国家自然科学基金项目(41140019);河南省教育厅科技攻关项目(12A170005)

作者简介:朱新玉(1981-),女,河北邱县人,博士,讲师,主要从事环境土壤学和农业生态学研究。

E-mail: tia20021201@163.com

通讯作者:史本林(1967-),男,河南柘城人,教授,主要从事区域环境变化及旅游资源管理方面研究。

E-mail: shibenlin@163.com

气候适宜性时, 由于作物生长影响因子的多样性及其间的关系的复杂性, 使各因子选取及其与作物关系的表达较为困难。以往研究中, 以温度、降水、光照等单因子气候适宜性评价报道较多^[15~17], 忽视了影响作物生长发育的气候因子协同作用, 不能客观反映气候变化对粮食作物生长的影响特征^[18]。由于降水、温度、光照等气候因子变化的不一致性, 研究结论不可避免存在较大差异; 综合气候各因子对冬小麦生长的影响程度, 客观评价气候变化对冬小麦生长发育的影响, 极有必要。

2011 年以河南为主体的中原经济区获国务院批准, 其战略地位提升为国家重要的粮食生产和现代农业基地。商丘地处黄淮平原腹地, 是中原经济区的战略支撑城市, 由于其独特的地理位置和温带气候的最佳组合, 成为河南农业的主体区域, 是我国重要的商品粮基地和农副产品生产基地。近 40 年中原腹地受气候变暖的影响, 冬小麦生长发育特征发生了较大变化^[19]。本文根据 1971~2010 年商丘冬小麦种植区生长发育资料及同期气象资料, 构建冬小麦气候适宜度计算模型, 探究其生育阶段的气候适宜性, 为提高农作物产量、中原经济区综合实力提升及未来应对气候变化提供科学依据。

2 资料来源与研究方法

2.1 研究区概况及资料来源

商丘位于河南东部, 地处黄淮平原腹地, 介于东经 $114^{\circ}49'$ ~ $116^{\circ}39'$ 、北纬 $33^{\circ}43'$ ~ $34^{\circ}52'$, 总面积 1.07 万 km^2 。58.2% 的土壤为两合土和沙壤土, 27.9% 为淤土和砂浆土, 另有 13.9% 的潮土和碱土, 研究区的土壤属于潮土。商丘属暖温带半湿润大陆性季风气候, 春季温暖大风多, 夏季炎热雨集中, 秋季凉爽日照长, 冬季寒冷少雨雪, 年均温 13.9°C ~ 14.3°C 之间, 年均降水量 623 mm, 年平均日照时数为 2204.4~2427.6 h, 无霜期平均为 207~214 d。

选取商丘市、民权、睢县等 8 个农业气象观测站 1971~2010 年的冬小麦生长期间光照、温度及降水的逐日测量值和冬小麦各个发育期的观测资料及单产资料。取 8 个观测站的逐年气候适宜度平均值, 作为研究区域气候适宜度时间序列值。所有资料都是依照中国气象局《农业气象观测规范》要求和注意事项进行观测而得到的, 并保持了观测方法的一致性。以上资料分别由商丘市气象局和商丘市农业局提供。研究区概况见图 1。

2.2 气候适宜度计算方法

各气候因子对作物生长的影响应在“适宜”和“不适宜”间, 界限应允许一定程度的模糊; 综合相关研究^[20~23], 冬小麦各气候因子适宜度



图 1 研究区概况图

Fig. 1 The region of study areas

计算模型为：

2.2.1 温度适宜度

计算模型为：

$$S(T_i) = \frac{[(T_i - T_1)(T_2 - T_i)^b]}{[(T_0 - T_1)(T_2 - T_0)^b]} \quad b = \frac{T_2 - T_0}{T_0 - T_1} \tag{1}$$

$S(T_i)$ 为温度适宜度， T_i 为生育阶段逐日平均温度（℃）， T_1 为某一发育期的下限温度（℃）， T_2 为上限温度（℃）， b 为三基点温度计算的常数， T_0 为最适温度的平均值（℃）。冬小麦不同生长发育期的三基点温度要求见表 1。

2.2.2 光照适宜度

计算模型为：

$$S(S_i) = \begin{cases} e^{-[(S-S_0)/b]^2} \\ 1 \end{cases} \tag{2}$$

$S(S_i)$ 为光照适宜度， S_0 为当日日照百分率 70% 的时数（h）； S 为实时日照数（h）；以日照百分率达到 70% 为临界点，日照时数 > 日照百分率 70% 时适宜度为 1，小于 70% 时其对冬小麦的适宜度应小于 1； b 为常数，经多次拟合得到^[20,21]（表 1）。

表 1 冬小麦不同生育期各参数取值

Tab 1 The variables value of winter wheat in different growth periods

变量	冬小麦生育期						
	播种—出苗	出苗—停止	停止—返青	返青—拔节	拔节—抽穗	抽穗—乳熟	乳熟—成熟
T_1	5	3	—15	1	10	13	13
T_2	20	18	5	16	32	27	25
T_0	17	13	—5	7	19	20	20
b	4.15	4.14	4.38	4.50	4.61	4.93	4.99

2.2.3 降水适宜度

计算模型为：

$$S(R_i) = \begin{cases} 1 & R_i \geq R_0 \\ R_i/R_0 & R_i < R_0 \end{cases} \tag{3}$$

$S(R_i)$ 为冬小麦降水适宜度（水分适宜度），鉴于降水量时间分布的不均匀性及农作物生长特性，降水适宜度以旬为单位。 R_i 为旬降水量（mm）； R_0 为旬生理需水量（mm），根据 FAO 给出的作物系数，运用实时气象资料根据 Penman（98 版）公式计算而得^[22,23]。当 $R_i > R_0$ 时，且完全可被土壤储存接纳时，可认为冬小麦全部吸收利用，适宜度为 1，当 $R_i < R_0$ 时，适宜度小于 1。

冬小麦某一生育期阶段或全生育期的温度及光照适宜度可用下式计算：

$$S_{(c)} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_{(a)} \tag{4}$$

式中 m 为生育阶段或生育期的总天数， $S_{(c)}$ 为光照（ $S_{(s)}$ ）、温度（ $S_{(T)}$ ）或降水（ $S_{(R)}$ ）适宜度； $S_{(a)}$ 为生育阶段或生育期内每天的光照、温度或降水适宜度。

2.2.4 综合气候适宜度 冬小麦生长发育及产量受光、温、水综合气候因子影响，参考以往研究^[21]，用下式表示光、温、水对冬小麦的综合作用：

$$C_r = \sum_{j=1}^n (0.20S_{(s)j} + 0.32S_{(T)j} + 0.48S_{(R)j}) \tag{5}$$

C_r 为综合气候适宜度, j 为生育期, n 为计算生育阶段所包括生育期数。

3 结果分析

3.1 冬小麦种植区气候变化基本特征

冬小麦种植区气候变化基本特征为温度明显升高, 降雨量增加, 日照时数则逐渐减少 (图 2)。1971~2010 年年均气温以 $0.028^{\circ}\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$ ($R^2=0.404$, $P>99\%$) 的线性趋势升高; 其中春季线性升高趋势为 $0.057^{\circ}\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$ ($R^2=0.144$, $P>99\%$), 夏季为 $0.016^{\circ}\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$ ($R^2=0.097$, $P>90\%$), 秋季为 $0.017^{\circ}\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$ ($R^2=0.108$, $P>95\%$), 冬季为 $0.026^{\circ}\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$ ($R^2=0.118$, $P>95\%$); 春、冬两季气温升高比较明显, 气候变暖较为显著。年降雨量以 $2.38 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ ($R^2=0.024$, $P>90\%$) 的线性趋势增加, 其中除春季外, 夏、秋、冬三季降雨量均呈线性增加趋势; 夏、秋两季降雨量增加幅度较冬季大。20 世纪 70~80 年代末与 20 世纪末至 21 世纪初, 是降雨量变化比较明显的阶段。1991~2010 年与 1971~1990 年相比, 年降雨量均值增加了 38.17 mm。年均日照时数以 $0.048 \text{ h} \cdot \text{a}^{-1}$ ($R^2=0.529$, $P>99\%$) 的线性趋势降低, 其中夏、秋两季日照时数降幅较大, 春季日照时数降低较小。可知, 商丘地区气候趋向于暖湿化。

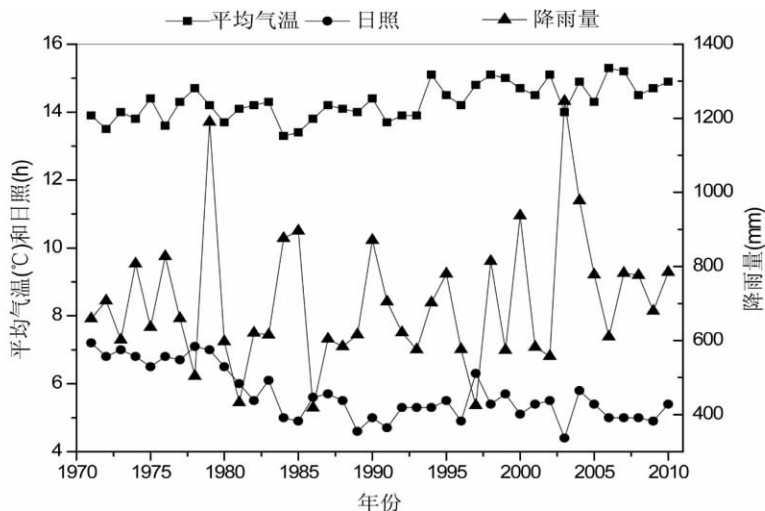


图 2 冬小麦种植区气温、降雨量和日照变化 (1971~2010)

Fig. 2 Variations of annual mean temperature, precipitation and sunshine from 1971 to 2010

3.2 冬小麦气候适宜度年变化

近 40 年冬小麦全生育期平均单因子气候适宜度以光照最高为 0.64, 其次为温度 0.54, 降水最低为 0.37; 综合气候适宜度平均值为 0.50 (图 3)。

温度及光照基本能够满足冬小麦的正常生长需求, 降水只及冬小麦生长发育的 40% 左右, 与冬小麦生产的影响实际情况相符^[24]。1971~2010 年, 温度、降水适宜度以 $0.001 \cdot \text{a}^{-1}$ ($R^2=0.071$, $P>99\%$; $R^2=0.020$, $P>99\%$) 的线性趋势下降, 光照适宜度以 $0.002 \cdot \text{a}^{-1}$ ($R^2=0.223$, $P>99\%$) 的线性趋势下降, 综合气候适宜度线性变化不明显。21 世纪初与 20 世纪 70 年代相比, 温度、光照和水分适宜度分别下降了 0.03、0.09 和 0.05, 综合适宜度基本无变化; 由于气温、光照和降水适宜性下降, 加大了中原

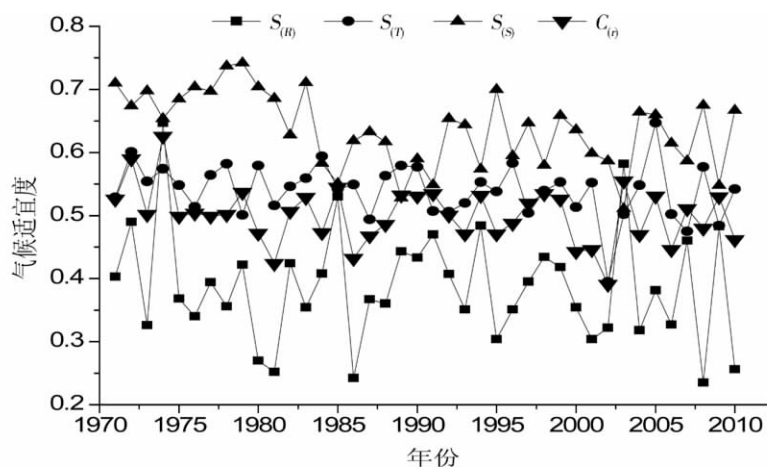


图 3 冬小麦全生育期气候适宜度年变化 (1971~2010)

Fig 3 Annual variations of climate suitability in the whole growth period of winter wheat from 1971 to 2010

腹地冬小麦生产风险。

3.3 冬小麦不同生育阶段各气候因子适宜度的变化

3.3.1 播种—出苗期各气候因子适宜度 冬小麦在播种—出苗期的光照适宜度较好，平均为 0.65，其次为温度适宜度平均为 0.58，降水适宜度较差平均为 0.42（图 4）。研究区冬小麦播种—出苗期的 10~11 月份降水总量较少且时间分布不均匀的时段，加上旱情发生频率较高，是影响冬小麦播种及出苗的主要原因^[19]。光照在整个生育期适宜度均较好且起伏不大；温度适宜度的转折点出现在 20 世纪 80 年代末，1988~2010 年以 $0.001 \cdot a^{-1}$ ($R^2=0.004$, $P>99\%$) 的线性趋势下降，20 世纪 80 年代后期以来气候变暖，暖冬现象频发，易造成旺长且影响其安全越冬能力，温度适宜性减弱^[25,26]。综合气候适宜度呈逐年降低趋势，但变化幅度不大，未达到差异显著性水平 ($R^2=0.133$, $P>95\%$)

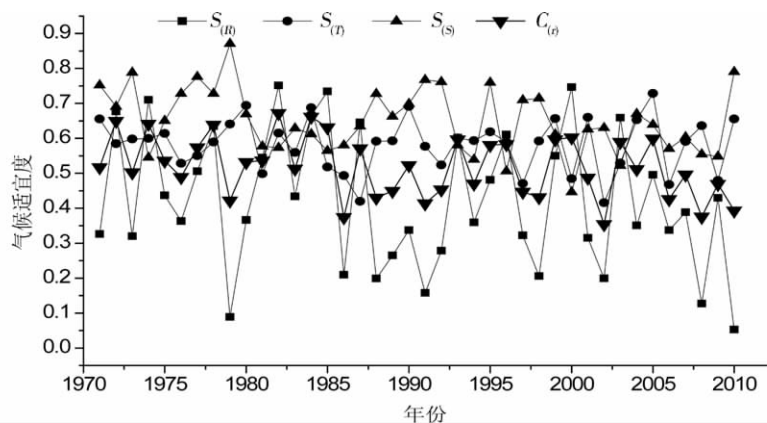


图 4 冬小麦播种—出苗期气候适宜度年变化 (1971~2010)

Fig 4 Interannual variations of climate suitability of winter wheat in sowing to emergence period from 1971 to 2010

3.3.2 出苗—拔节期各气候因子适宜度 出苗—拔节期光照适宜度最高, 平均为 0.59; 其次是降水适宜度, 平均为 0.40; 温度适宜度最低, 平均为 0.38; 综合适宜度平均为 0.43 (图 5)。

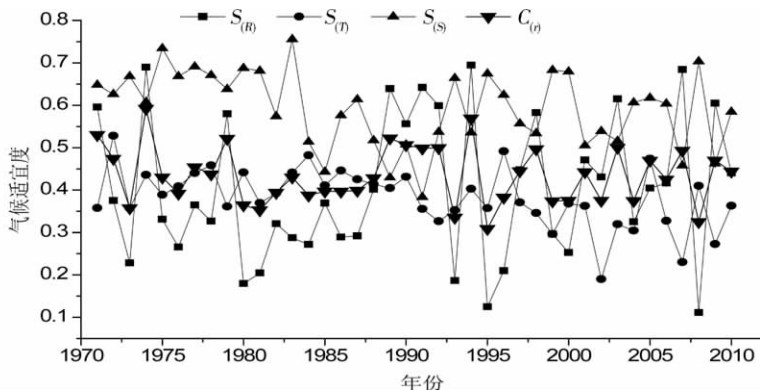


图 5 冬小麦出苗—拔节期气候适宜度年变化 (1971~2010)

Fig. 5 Interannual variations of climate suitability of winter wheat in emergence to jointing period from 1971 to 2010

20 世纪 90 年代后期与前期相比, 光照适宜度平均下降了 0.04, 变化较小, 对该生育阶段冬小麦正常生长影响不大。温度适宜度变化分两个阶段, 1971~1990 年以 $0.001 \cdot a^{-1}$ ($R^2=0.008$, $P>95\%$) 的线性趋势上升, 而 1991~2010 年以 $0.003 \cdot a^{-1}$ ($R^2=0.050$, $P>95\%$) 的线性趋势下降; 近 40 年的平均气温明显升高, 尤以春、冬两季温度增加明显, 对冬小麦春化作用的正常进行产生较大影响, 进而影响来年花芽和花器的正常发育; 河南省农业科学院小麦研究中心经过长时间野外实验发现, 不同品种的冬小麦对极端温度的耐受程度不同, 如豫农 4023 品种冬季抗寒性较好, 但抗倒春寒能力较弱^[26~28]; 这些导致其温度适宜性降低。降水适宜度以 $0.002 \cdot a^{-1}$ ($R^2=0.016$, $P>95\%$) 的线性趋势上升, 21 世纪 90 年代以来与 20 世纪 70 年代至 80 年代相比, 降水适宜度总体上升了 0.97; 可见近 40 年来, 冬小麦在出苗—拔节期的降水适宜性较好。综合气候适宜度在该生育阶段的平均值是冬小麦全生育期的最低值 (0.43), 可知冬小麦在出苗—拔节期的各气候因子的有效匹配, 影响了冬小麦的生长发育。

3.3.3 拔节—抽穗期各气候因子适宜度 拔节—抽穗期是冬小麦主要生长期, 平均适宜度以温度和光照最高, 均为 0.69; 降水适宜度仅为 0.29, 是冬小麦全生育期最低的时段; 综合适宜度的平均值为 0.50 (图 6)。

自 20 世纪 70 年代以来, 温度适宜度呈增加趋势, 以 $0.003 \cdot a^{-1}$ ($R^2=0.100$, $P>95\%$) 的线性趋势上升; 20 世纪 90 年代至 21 世纪初与 20 世纪 70~80 年代相比, 温度适宜度上升了 0.91。光照适宜度变化分两个阶段, 1971~1990 年以 $0.0025 \cdot a^{-1}$ ($R^2=0.026$, $P>95\%$) 的线性趋势降低, 而 1991~2010 年以 $0.0029 \cdot a^{-1}$ ($R^2=0.038$, $P>95\%$) 的线性趋势上升。表明温度和光照对冬小麦的拔节和抽穗适宜性较高, 有利于冬小麦正常生长发育。降水适宜性在该生育阶段最差, 以 $0.0058 \cdot a^{-1}$ ($R^2=0.113$, $P>95\%$) 的线性趋势下降; 尤其以 20 世纪 80 年代初至 90 年代初以及 21 世纪初的下降较为明显, 对冬小麦拔节期正常生长产生较大影响, 对冬小麦后期生长发育极为不利^[24]。综

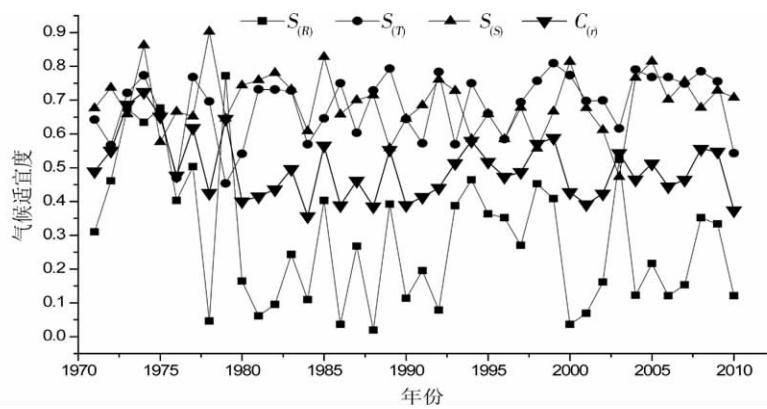


图 6 冬小麦拔节—抽穗期气候适宜度年变化 (1971~2010)

Fig. 6 Interannual variations of climate suitability of winter wheat in jointing to tasseling period from 1971 to 2010

合气候适宜度总体变化较小，以 20 世纪 70 年代、90 年代中期较高，20 世纪 80 年代、90 年代初期与 21 世纪初较低。

3.3.4 抽穗—乳熟期各气候因子适宜度 冬小麦抽穗—乳熟期温度、光照和降水适宜度平均值分别为 0.79、0.69 和 0.37，温度适宜度为全生育期最高的时段；综合气候适宜度平均值为 0.57（图 7）。抽穗—乳熟期冬小麦对温度和光照的适宜性较好，对降水的适宜性较差。温度适宜度线性变化不明显，20 世纪 70 年代初、80 年代末期及 21 世纪初的温度适宜度较高。光照适宜度随年份呈减少趋势（ $R^2=0.088$ ， $P>95\%$ ），适宜度较高的值出现在 20 世纪 70 年代末、90 年代末及 21 世纪初。降水适宜度呈增加趋势（ $R^2=0.006$ ， $P>95\%$ ），随年份的波动较大，20 世纪 80 年代末期的适宜度值较高，其余年份均较低；降水对冬小麦该生育期的影响较大。综合气候适宜度呈增加趋势，但变化不明显（ $R^2=0.002$ ， $P>95\%$ ），是冬小麦全生育期的最高值，该生育期各气候因子匹配效果较好，有利于冬小麦的生长。

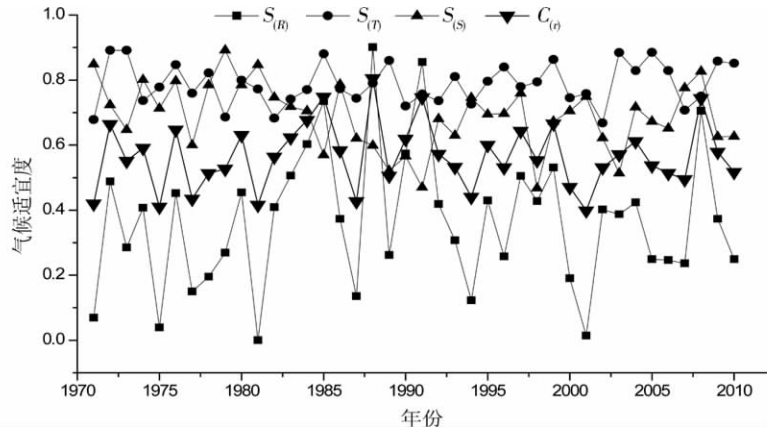


图 7 冬小麦抽穗—乳熟期气候适宜度年变化 (1971~2010)

Fig. 7 Interannual variations of climate suitability of winter wheat in tasseling to milk period from 1971 to 2010

3.3.5 乳熟—成熟期各气候因子适宜度 温度、光照和降水适宜度的平均值分别为 0.28、0.66 和 0.62，综合气候适宜度 0.52（图 8）。冬小麦对光照和降水的适宜性较好，对温度的适宜性较差；该生育阶段的降水适宜度为全生育期最高，温度适宜度为全生育期最低；乳熟—成熟期阶段常常因为连阴雨天气光照不足而影响其正常成熟，20 世纪 90 年代以来光照适宜度呈增加趋势（ $R^2=0.166$ ， $P>95\%$ ），适宜度最高值出现在 20 世纪 70 年代至 80 年代初期，最低值在 20 世纪 90 年代初期。温度适宜度以 $0.0016 \cdot a^{-1}$ （ $R^2=0.039$ ， $P>95\%$ ）的线性趋势降低，且波动较为明显；20 世纪 80 年代温度适宜度较高，20 世纪 70 年代末及 21 世纪初适宜度较低。近 40 年来虽然年平均气温明显升高，但夏季平均气温变化较小，且极端气温出现较为频繁^[14,29]，最高、最低气温超出了该生育阶段的温度适宜上下限，适宜度有所下降。降水适宜度随年份呈逐年下降趋势（ $R^2=0.038$ ， $P>95\%$ ），20 世纪 70~80 年代适宜度较高，进入 21 世纪后降水适宜度下降幅度较大；近 20 年来冬小麦生长后期降水适宜性变差。综合气候适宜度呈下降趋势，尤其是 20 世纪 90 年代以后，综合气候适宜度较 20 世纪 70 年代及 80 年代的下降幅度大。

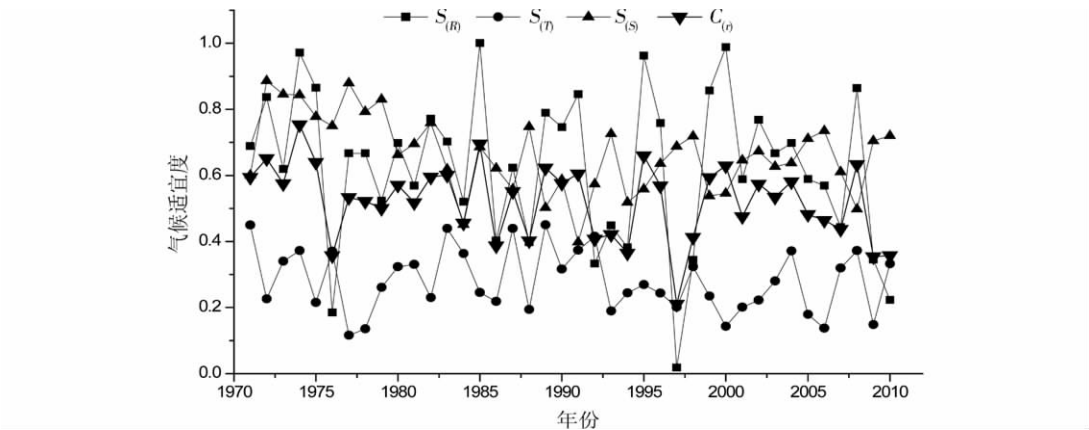


图 8 冬小麦乳熟—成熟期气候适宜度年变化（1971~2010）
Fig. 8 Interannual variations of climate suitability of winter wheat
in milk to maturity period from 1971 to 2010

3.4 冬小麦各生育阶段气候适宜度与产量的关系

冬小麦各气候因子适宜度与单产相关分析见表 2。结果表明，全生育期平均光照及综合气候适宜度与产量的相关性比较显著。播种—出苗期温度是关键因子，温度的高低对冬

表 2 冬小麦不同生育阶段各气候因子适宜度与单产的相关系数（1991~2010）
Tah 2 Correlative coefficient between degree of climate suitability and yield of winter wheat (1991~2010)

气候适宜度	播种—出苗期	出苗—拔节期	拔节—抽穗期	抽穗—乳熟期	乳熟—成熟期	全生育期
降水适宜度	−0.140	−0.047	−0.326*	−0.351*	−0.112	−0.235
温度适宜度	0.302*	−0.203	0.285*	0.286*	−0.157	−0.108
光照适宜度	−0.227	0.321*	0.342*	0.300*	0.439**	0.266*
综合气候适宜度	−0.193	−0.115	−0.162	0.386*	−0.067	−0.298*

注：* 相关性达到显著水平（ $P<0.05$ ）；** 相关性达到显著水平（ $P<0.01$ ）

小麦出苗质量及后期生长影响较大; 出苗—拔节期光照适宜度与产量相关关系比较显著; 拔节—抽穗期降水和光照是影响产量的主要因子, 干旱是冬小麦在该生育阶段的主要胁迫因子^[16]; 抽穗—乳熟期是冬小麦产量形成的主要发育期, 产量在该阶段与各个气候因子适宜度相关性均较显著; 乳熟—成熟期生育阶段时间较短, 光照是影响冬小麦产量的关键因子, 且达到极显著差异水平 ($P>99\%$); 综合适宜度仅在抽穗—乳熟期与冬小麦单产相关性显著, 其它生育阶段的显著性均不明显。但也不排除气候变化的同时人为投入 (化肥、农药等) 对冬小麦产量的影响, 这有待于进一步分析。

4 结论与讨论

冬小麦各气候因子适宜度及综合气候适宜度计算模型是建立在不同生长发育阶段对不同环境条件适应及要求的基础上, 适用性较强, 同时考虑了冬小麦生长特性及对当地气候因子的适宜性, 优于单一气候因子评价模型, 能够反映中原腹地冬小麦气候适宜性水平及其动态变化。与历年实际产量的检验分析表明, 模型可以客观评述气候因子对冬小麦生长发育及产量形成的影响。

(1) 全生育期冬小麦对光照适宜度较好, 其次是温度适宜度, 降水适宜度最低; 可知, 降水是限制冬小麦正常生长发育的主要气候因子。近 40 年来, 温度、光照和降水适宜度均呈下降趋势, 结合种植区气候变化特征可知, 气温上升和日照时数下降对冬小麦的生长不利; 综合气候适宜度呈逐年降低趋势, 说明环境因子匹配效果变差。

(2) 冬前生长阶段温度、光照和降水适宜度基本上呈逐年下降趋势, 各气候因子在该生育阶段匹配效果较差; 同时气候变暖暖冬增多及极端气候频现使适宜度下降比较明显^[13, 14], 对冬小麦的正常发育产生影响。20 世纪 90 年代以来, 冬小麦在出苗—拔节期光照和温度适宜度下降比较明显, 对降水适宜性较好; 综合气候适宜度是全生育期的最低值, 可知冬小麦在出苗—拔节期的各气候因子的有效匹配, 影响了冬小麦的生长发育。

(3) 拔节—抽穗期、抽穗—乳熟期温度和光照适宜度基本上呈逐年上升趋势, 降水适宜度呈下降趋势, 说明冬小麦在这两个生育阶段对温度和光照的适宜性较好, 对降水的适宜性较差; 20 世纪 80 年以来, 综合气候适宜度在拔节—抽穗期逐年下降, 但总体波动不大; 综合气候适宜度在抽穗—乳熟期呈逐年增加趋势, 是冬小麦全生育期的最高值, 各气候因子匹配效果较好, 有利于冬小麦的生长。

(4) 乳熟—成熟期冬小麦对光照和降水的适宜性较好, 对温度的适宜性较差; 降水适宜度为全生育期最高值, 温度适宜度为全生育期最低值。随着全球气候变暖, 气温明显升高极端温度频现, 最高、最低气温超出了该生育阶段的温度适宜上下限, 导致适宜度有所下降。综合气候适宜度呈逐年下降趋势, 尤其是 20 世纪 90 年代以来, 下降幅度较大, 各气候因子的匹配效果较差。

(5) 冬小麦产量与各生育阶段不同气候因子适宜度的相关性差异较大。温度适宜度在播种—出苗期、拔节—抽穗期和抽穗—乳熟期与产量的相关性比较显著, 温度的高低对冬小麦出苗质量及后期生长影响较大; 光照适宜度除播种—出苗期外, 与其它生育阶段的产量相关性比较显著; 降水适宜度仅与拔节—抽穗期、抽穗—乳熟期的相关性较为显著。综合气候适宜度与抽穗—乳熟期及冬小麦的全生育期相关性较为显著。

本文针对气候变化对商丘地区冬小麦气候适宜度的影响做了初步分析, 探讨了冬小麦气候适宜度与产量的关系。然而, 影响冬小麦产量的因素很多, 如人为投入 (化肥、农药

等)等,文章仅针对气候因子对冬小麦产量进行了分析研究;今后应该考虑增加人为因素、作物病虫害和农业管理措施等其它因素对冬小麦产量的影响;同时也应加强极端气候变化对冬小麦生长发育的影响。

参考文献:

- [1] 杨晓光,刘志娟,陈阜.全球气候变暖对中国种植制度可能影响Ⅰ.气候变暖对中国种植制度北界和粮食产量可能影响的分析.中国农业科学,2010,43(2):329~336.
- [2] 巢清尘,胡国权.气候变化的风险、挑战与决策.气候变化研究进展,2009,5(4):249.
- [3] 何凡能,李珂,刘浩龙.历史时期气候变化对中国古代农业影响研究的若干进展.地理研究,2010,29(12):2289~2296
- [4] Piao S L, Ciais P, Huang Y, *et al.* The impacts of climate change on water resources and agriculture in China. *Nature*, 2010, 476:43~51.
- [5] 张强,邓振镛,赵映东.全球气候变化对我国西北地区农业的影响.生态学报,2008,28(3):1210~1218.
- [6] Thomas A. Agricultural irrigation demand under present and future climate scenarios in China. *Global and Planetary Change*, 2008, 60(3-4):306~326.
- [7] 邓振镛,王强,张强,等.中国北方气候暖干化对粮食作物的影响及应对措施.生态学报,2010,30(22):6278~6288.
- [8] 茆长宝,陈勇.南京市近60年气候变化及其对冬小麦产量影响.资源科学,2010,32(10):1955~1962.
- [9] 张明捷,王运行,赵桂芳,等.濮阳冬小麦生育期气候变化及其对小麦产量的影响.中国农业气象,2009,30(2):223~229.
- [10] Bannayan M, Lotfabadi S S, Sanjani S, *et al.* Effects of precipitation and temperature on crop production variability in northeast Iran. *International Journal of Biometeorology*, 2011,55(3):387~401.
- [11] 姚玉璧,李耀辉,王毅荣,等.黄土高原气候与气候生产力对全球气候变化的响应.干旱地区农业研究,2005,23(2):202~208.
- [12] Liu Yujie, Yuan Guofu. Impacts of climate change on winter wheat growth in Panzhuang Irrigation District, Shandong Province. *Journal of Geographical Sciences*, 2010, 20(6):861~875.
- [13] Pongratz J, Lobell D B, Cao L, *et al.* Crop yields in a geoengineered climate. *Nature*, 2012, 2(2):101~105.
- [14] Lobell D B, Sibley A, Ortiz-Monasterio J I. Extreme heat effects on wheat senescence in India. *Nature*, 2012, 2(3):186~189.
- [15] 刘青春,千怀遂,任玉兰,等.河南省棉花的温度适宜性及其变化趋势分析.资源科学,2004,26(4):52~56.
- [16] 浦金涌,张存杰.甘肃省冬小麦水分适应性动态变化分析.资源科学,2008,30(9):1397~1420.
- [17] 赵峰,千怀遂.全球变暖影响下农作物气候适宜性研究进展.中国生态农业学报,2004,12(2):134~137.
- [18] 姚小英,浦金涌,姚茹莘,等.气候暖干化背景下甘肃旱作区玉米气候适宜性变化.地理学报,2011,66(1):59~67.
- [19] 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.地理研究,2012,31(1):14~22.
- [20] 赵峰,千怀遂,焦士兴.农作物气候适宜度研究.资源科学,2003,25(6):78~82.
- [21] 浦金涌,姚小英,王位泰.气候变化对甘肃省冬小麦气候适宜性的影响.地理研究,2011,30(1):153~160.
- [22] 刘钰, Pereira L S. 对FAO推荐的作物系数计算方法的验证.农业工程学报,2000,16(5):26~30.
- [23] 刘尧东,刘作新,张运福.参考作物蒸散计算方法及其评价.河南农业大学学报,2001,35(1):57~61.
- [24] 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.中国生态农业学报,2011,19(5):1048~1053.
- [25] 蒲金涌,姚玉璧,马鹏里,等.甘肃省冬小麦生长发育对暖冬现象的响应.应用生态学报,2007,18(6):1237~1241.
- [26] 王鹏,张春庆,陈化榜,等.小麦冬性强弱评价体系的建立.生态学报,2012,32(4):1230~1240.
- [27] 河南省农科院小麦研究中心.河南省小麦品种试验汇总.河南省农业科学院,2010:92~94.
- [28] 周阳,何中虎,陈新民,等.30余年来北部冬麦区小麦品种产量改良遗传进展.作物学报,2007,33(9):1530~1535.
- [29] Lobell D B, Schlenker W, Roberts J C. Climate trends and global crop production since 1980. *Science*, 2011,333(6042):616~620.

Variation of climate suitability of winter wheat in Central Plains under the condition of climate warming

ZHU Xin-yu¹, LIU Jie², SHI Ben-lin¹, ZHANG Yi³

(1. College of Environment and Planning, Shangqiu Normal University, Shangqiu 476000, Henan, China;

2. Department of Resources and Environment, Heze University, Heze 274000, Shandong, China;

3. Shangqiu Weather Bureau, Shangqiu 476000, Henan, China)

Abstract: Global climate change has significant impacts on agricultural production. Climate variability adversely impacts crop production and imposes a key constraint on agricultural production, mostly on how to enhance the yields of winter wheat, across the world. Owing to the fundamental importance of food to human welfare, crop and livestock production, we used the data of winter wheat experimental field and meteorological data of eight agrometeorological experiment stations and agrometeorological observation stations from 1991 to 2010 to establish the models of climate suitability. The variation of climate suitability in the whole growth period from 1971 to 2010 was analyzed. The results showed that the suitability degrees of temperature, sunshine, precipitation and integrated index were 0.54, 0.64, 0.37 and 0.50 respectively during the whole growth period of winter wheat. The sunshine suitability degree was the best, temperature suitability degree took the second place and the precipitation suitability degree was the worst. It is indicated that precipitation is the major limiting factor affecting winter wheat growth and development. It was shown that the temperature and precipitation suitability degrees decreased by 0.001 every year and sunshine suitability degree decreased by 0.002 every year from 1971 to 2010. The weaken combination effects of temperature, sunshine and precipitation were unfavorable for the growth of winter wheat. The temperature, sunshine and precipitation suitability degrees were weaker and these factors had poor combination effects in sowing to emergence period from 1971 to 2010. The precipitation suitability degree was good, sunshine and temperature suitability degrees were weaker in emergence to jointing period of winter wheat. In jointing to milk period of winter wheat, temperature and sunshine suitability degrees were good, and precipitation suitability degree was weak; and the combination of climate factors tended to be better. The sunshine and precipitation suitability degrees were good, temperature suitability degree was weaker in milk to maturity period of winter wheat; and the integrated climate suitability degree began to deteriorate. Per unit yield of winter wheat had a significant correlation with sunshine, temperature and precipitation suitability degrees in the middle-late growth period of winter wheat.

Key words: climate warming; winter wheat; climate suitability; Shangqiu