

中原腹地气候变化对冬小麦产量的影响 ——以商丘地区为例

史本林¹, 朱新玉¹, 李红忠¹, 张 怡²

(1. 商丘师范学院环境与规划学院, 河南商丘 476000; 2. 商丘气象局, 河南商丘 476000)

摘要:为探明气候变化对商丘地区冬小麦产量的影响, 根据1991~2010商丘市气候资料和小麦产量资料, 利用数学统计与Thornthwaite Memoriae模型, 结合未来气候预测结果定量分析了气候变化对冬小麦产量的影响。结果表明, 冬小麦产量整体上呈波动上升趋势; 主成分分析表明, 气温、降水量、蒸发量与极端温度为影响冬小麦产量的主要气候因子, 蒸发量过大及极端低温对冬小麦生产不利。商丘地区“暖湿型”气候有利于冬小麦生产力的提高, “冷干型”气候对冬小麦生产最为不利; 未来几十年内气候可能将向“暖湿型”变化, 对商丘地区粮食作物产量的提升较为有利。

关 键 词: 气候变化; 商丘; 冬小麦; 产量

文章编号: 1000-0585(2012)01-0014-09

1 引言

气候变化对人类、自然、农业、水资源等的潜在影响已成为各国政府、学术界、决策界与社会公众广泛关注的重大问题^[1~4], 其中, 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主要内容之一^[5]。研究表明, 气候变化对农业生产的影响较为明显, 主要体现在气候变化对农作物产量波动大, 生产的不稳定性增加, 农业种植结构、布局的改变, 农作物发育及熟制变化大等方面^[6~14]。Wang^[15]和林而达等^[16]的研究发现, 气候变化使中国农作物的平均生产力下降5%~10%左右, 其中小麦、水稻和玉米三大作物均以减产为主。

近年来, 国内外在气候变化对区域农业生产影响的研究方面成果显著。研究发现, 温度、降水的变化使小麦越冬期天数缩短, 物候期明显提前^[17~19]; 降雨量及日照时数的变化, 不利于小麦发育成熟及高产^[20]; 温度升高导致冬春小麦生长期缩短, 干物质积累和产量下降^[13, 21~23], 但Wang等^[24]发现温度持续升高使河西绿洲作物玉米、春小麦的生长期缩短, 导致棉花生长期延长等。上述研究表明, 不同地区的农作物对气候变化的响应有差异, 且大部分局限于温度、降水、光照等气候因素对农作物产量、生长、生物学特性等方面研究, 而对全球变化下不同气候因子对农作物产量影响程度的定量性研究不多。

我国学者对气候变化背景下农业受到的影响进行了广泛研究^[25~30], 但研究多以大中

收稿日期: 2011-07-23; 修订日期: 2011-10-27

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: 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研究。

E-mail: shibenlin@163.com

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

区域尺度为研究对象，对小区域尺度的定量研究尚不多见。河南省在中原经济区占有重要的地理位置，是以粮食生产为主的传统农业地区。因此，加强中原腹地的粮食产量受气候变化影响研究，对该地区农业的可持续发展及提高中原地区经济实力有重要意义。本文旨在以中原腹地的商丘地区为例，针对过去 20 年来的气候变化规律及其与冬小麦产量之间的响应关系，气候变化对冬小麦产量影响开展定量研究，进而预测未来气候因素的变化对粮食作物气象产量的影响。该研究可为中原地区农业应对全球气候变化提供一定的参考，对该区的社会经济发展及提高农作物产量具有理论指导意义。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

选用河南省商丘市农业气象观测站 1991~2010 年间的气象资料（气温、降水量、日照时数）和冬小麦各个发育期的观测资料及观测地段的单产资料。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得到，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。

2.2 研究方法

(1) 气象产量

$$Y = Y_1 + Y_w + e \quad (1)$$

式中 Y_w 是受气象因素为主的短周期变化因子影响的产量分量，即气象产量； Y 为粮食单产； Y_t 为通过对原始产量资料进行模拟出的关于时间趋势的函数，即趋势产量； e 为受病虫害、社会动荡等随机因素影响的产量分量，所占比例较小，实际计算中不做考虑；故简化为：

$$Y = Y_t + Y_w \quad (2)$$

(2) 气候生产力的计算

以气候条件来计算农业生产潜力，即是气候生产力，表示在各种气候及环境条件最适情况下，单位面积可能达到的最高产量，也称气象产量。Lieth 根据世界各地作物产量与年平均气温、年降雨量之间的关系，提出了用实际蒸散量来估算作物产量的公式方法，也就是 Thornthwaite Memoriae 模型^[30]：

$$P_v = 30000 \times [1 - e^{-0.0009695(v-20)}] \quad (3)$$

其中：

$$v = 1.05r / \sqrt{1 + (1.05r/L)^2} \quad (4)$$

$$L = 300 + 25t + 0.05t^3 \quad (5)$$

P_v 为作物气象产量 $[\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})]$ ； v 为年均蒸散量 (mm)； r 为年降雨量 (mm)； L 为年均最大蒸散量 (mm)，是气温 t ($^{\circ}\text{C}$) 的函数，式 (3) 中 30000 是经验系数 (g)。

采用 SPSS 16.0 和 Excel 2003 软件对数据进行处理。

3 结果分析

3.1 气候变化与冬小麦产量关系

图 1 为商丘市近 20 年 (1991~2010) 冬小麦单产 (kg/hm^2) 变化趋势图，从中可以看出，随着时间变化，冬小麦单产在波动中急剧上升。一元线性回归方程表明：商丘市冬小麦单产以平均 198.32 $\text{kg}/\text{年}$ 的速度增加，并通过了显著性检验 ($P < 0.01$)。20 世纪 90

年代冬小麦的平均单产为 3615.27 kg/hm²；而到 21 世纪，冬小麦平均单产高达 6645.02 kg/hm²，短短 10 余年的时间增加了将近 2 倍。以 2000 年为分界线，冬小麦单产在 90 年代波动较大，1994 年到 1997 年，冬小麦单产变化高达 173.6%，是这 20 年来波动最大的一个时期；进入 21 世纪后，波动相对较为缓和，但仍呈现逐步增长趋势。20 年间，冬小麦产量的最大值出现在 2008 年，为 6851.85 kg/hm²，最小值出现在 1994 年，为 3034.95 kg/hm²，相差较大。

表 1 为商丘地区 20 年（1991～2010 年）来冬小麦生育期内气温、降水量、日辐射量及极端温度对冬小麦产量的影响。可见，在冬小麦生长期中，10 月、11 月、3 月、4 月月均气温，3 月降水量，12 月、2 月的日辐射量，3 月、4 月极端温度对冬小麦产量影响较大，相关系数分别为 -0.392、-0.363、-0.501、0.329、0.332、-0.459、-0.372、-0.465 和 -0.311，均达显著性差异（ $P < 0.05$ ），3 月份月均温与极高温与冬小麦产量达极显著差异（ $P < 0.01$ ）；其他时期各气象因子与冬小麦产量的相关不大，未达显著差异水平（ $P > 0.05$ ）。

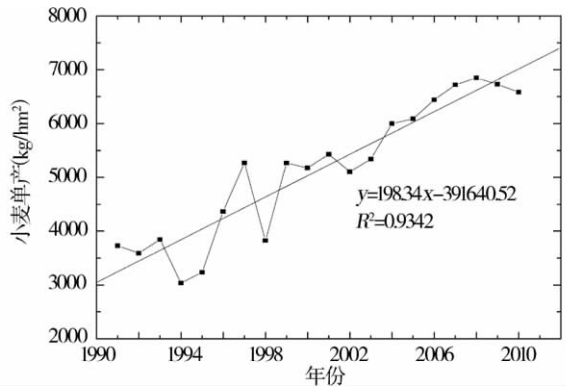


图 1 冬小麦单产变化图

Fig. 1 The fluctuations of wheat yields

表 1 小麦气象产量与生长期中各月气温、降水量和极端温度的相关关系

Tab 1 The relationships of wheat climate yield and temperature, precipitation and extreme temperature

气象因子	10 月	11 月	12 月	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月
均温/℃	-0.392**	-0.363*	0.222	-0.206	0.157	-0.501**	0.329*	0.287
降水量/mm	-0.283	-0.039	0.011	0.160	-0.280	0.332*	0.298	0.187
日辐射量/h	-0.109	-0.023	-0.459**	-0.179	-0.372*	-0.267	-0.134	0.241
极高温/℃	0.053	0.235	-0.142	-0.119	0.244	-0.465**	-0.050	-0.012
极低温/℃	0.222	0.172	-0.177	-0.064	0.028	0.062	-0.311*	-0.246

注：# 表示气候因子与小麦产量的相关系数；* 表示相关性达到显著水平（ $P < 0.05$ ）；** 表示相关性达到显著水平（ $P < 0.01$ ）。

温度是影响冬小麦生长发育的主要因素，在其生长的整个过程中，适宜的温度是冬小麦进行正常生长发育，进行光合作用获得高能量的重要保证。10 月、11 月和 3 月的气温与冬小麦产量存在着显著的负相关性（表 1），说明冬小麦在此时期处于幼苗阶段，温度对幼苗的影响最大，如温度过高，不利于春化，幼苗容易徒长，造成苗质较为细弱，整体质量较差，进而影响到正常分蘖和灌浆，不利于冬小麦高产；同时，3 月和 4 月的极端温度对冬小麦产量的影响也较大，说明在生育期内，极端温度不利于冬小麦生产。3～4 月正是中原地区冬小麦的孕穗期，是冬小麦生长发育最快的时期，同时也是冬小麦整个生育期内耗水量最多的时期，这点可以在表 1 中得到证实，3～4 月降水量与冬小麦产量相关

系数较大，且 3 月份降水量与冬小麦产量相关性达显著性水平 ($P<0.05$)。日辐射量与冬小麦产量也密切关系，在生育期内，12 月和 2 月影响冬小麦产量的主要因素是温度，日照多温度高是不利于冬小麦生长的 (表 1)。

3.2 影响冬小麦产量的主要气象因子筛选

主成分分析有利于在多种影响因素中筛选出主要影响因素^[31]。利用主成分分析法对年均气温 (X1)、年均降水量 (X2)、年蒸发量 (X3)、年日照均值 (X4)、年地温均值 (X5)、年极低气温 (X6) 与年极高气温 (X7) 等 7 个因子进行统计分析，计算主成分因子的特征值、贡献率及因子载荷，计算结果见表 1。前三个特征值 (Eigenvalues of the Correlation Matrix) 的特征根值大于 1 (表 2)，根据主成分对应的累积贡献率大于 85% 及特征值大于 1 原则综合考虑，选取了三个主成分因子。

从表 2 中可以看出，第一主成分与年均气温 (X1) 及年地温均值 (X5) 有较大的正相关，反映了气温因素对冬小麦产量的影响；第二主成分的年均降水量 (X2) 与年蒸发量 (X3) 因子载荷较大，可以作为水分因子；第三主成分与年极低气温 (X6) 和年极高气温 (X7) 的相关性较强，反映了极端温度对冬小麦产量的影响。从各主成分因子贡献率来看，前三个因子贡献率分别为 42.375%、25.369%、20.407%，累积贡献率达到 87.15% 的原始信息。因此，影响冬小麦产量的因子可以归结为温度、降水量、蒸发量与极端温度。蒸发量和极低温度的因子载荷及其与小麦产量的相关系数为负值，表明在冬小麦关键生育期，蒸发量大和极端低温对冬小麦生产不利，如 4~5 月的极端低温对小麦生产不利 (表 1)，这与粮食产量常因关键生育期的极端低温与高温导致的蒸发量大而减产相一致 (表 2、表 3)。

表 2 气候变化主成分因子特征值、贡献率及因子载荷

Tab 2 The Eigenvalues, cumulative rate and component matrix of principal component factor

变量	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%	第一主成分	第二主成分	第三主成分
X1	2.616	42.375	42.375	0.934	-0.034	-0.04
X2	1.496	25.369	67.744	-0.220	-0.740	0.237
X3	1.218	20.407	87.151	-0.145	0.845	0.011
X4	0.715	5.208	93.359	0.504	0.674	0.230
X5	0.536	3.659	97.018	0.924	0.255	-0.012
X6	0.365	2.219	99.237	0.345	-0.056	-0.766
X7	0.053	0.763	100	0.347	-0.143	0.734

表 3 气象因子与小麦产量的相关性

Tab 3 Correlation between meteorological factors and wheat yields

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7
小麦产量	0.612 ^{##}	0.510 [*]	-0.650 ^{**}	-0.073	0.323	-0.024	0.119
	0.004 [§]	0.015	0.002	0.761	0.165	0.920	0.617

注：# 表示气候因子与小麦产量的相关系数；§ 表示相关系数的显著水平；* 表示相关性达到显著水平 ($P<0.05$)；** 表示相关性达到显著水平 ($P<0.01$)。

选用 7 个气象因子作为自变量 (x) 与冬小麦产量作为因变量 (y) 进行多元线性回归分析，结果见表 4。经多元线性回归得到冬小麦产量与气象因子的多元回归方程为：

$$y = -28.151 - 24.848 \times X_1 + 18.606 \times X_2 - 4.644 \times X_3 + 0.321 \times X_4 + 31.080 \times X_5 - 0.985 \times X_6 - 1.044 \times X_7 \quad (6)$$

拟合方程的确定系数为 $R^2 = 0.723$ ($P = 0.011 < 0.05$), 达到了显著水平。气温 (X_1)、降雨量 (X_2) 和地温 (X_5) 的回归系数较大, 对冬小麦产量的影响程度较高 (表 4), 同时, 蒸发量 (X_3) 对冬小麦的影响也不可忽视, 且回归系数的显著性较高 ($P = 0.001 < 0.01$) (表 4), 说明气温、降雨量和地温在影响冬小麦的同时, 蒸发量对冬小麦的影响同样重要。

表 4 气象因子与冬小麦产量之间的多元回归分析

Tab 4 Multiple regression analysis of meteorological factors and wheat yields

变量	回归系数	标准化回归系数	显著性	偏相关系数
	-28.151		0.046	
X1	-24.848	-0.953	0.052	0.712
X2	18.606	0.234	0.081	0.613
X3	-4.644	-0.892	0.001	-0.689
X4	0.321	0.011	0.960	-0.142
X5	31.080	1.447	0.011	0.425
X6	-0.985	-0.137	0.420	-0.132
X7	-1.044	-0.210	0.250	0.216

3.3 冬小麦气象产量与气候生产力的变化

根据商丘市近 20 年 (1991~2010) 来冬小麦单产及生长期平均气温和降水量, 利用前述模型 (1)~(5) 式, 计算出近 20 年该地区冬小麦气象产量 Y_w 和气候生产力值 P_v , 结果见图 2。从中可以看出, 20 世纪 90 年代初期, 冬小麦气象产量 Y_w 值和气候生产力值 P_v 变化一致, 均呈下降趋势; 1993~1999 年间, Y_w 与 P_v 的波动幅度较大, 且变化趋势相反; 自 2000 年始, 这两条曲线的波动较为缓和, 变化趋势较更相似。

冬小麦气象产量 Y_w 的年际变化较

大, 90 年代初期, Y_w 为正值, 冬小麦气象产量波动下降, 气候变化对冬小麦产量增加是有利的。1993~1999 年间, Y_w 值呈现下降、上升再下降的趋势, 波动尤为剧烈, 1993 年达到最低值 -817.32 kg/hm^2 , 1998 年达到了最高值 825.07 kg/hm^2 。从图 3 也可看出, 在此期间气温和降雨量的波动也较剧烈, 说明此时期气候变化对冬小麦产量是不利的。进入 21 世纪至今, Y_w 值呈现下降的趋势, 且在 0 附近摆动, 说明气候对冬小麦产量存在不利影响; 但近几年 Y_w 值趋向于负值, 因此近几年气候变化不利于冬小麦产量的增加。同时, 冬小麦气象产量的变化曲线总体趋势与气温和降雨量变化曲线较为一致, 说明气候变化对冬小麦产量存在明显影响。

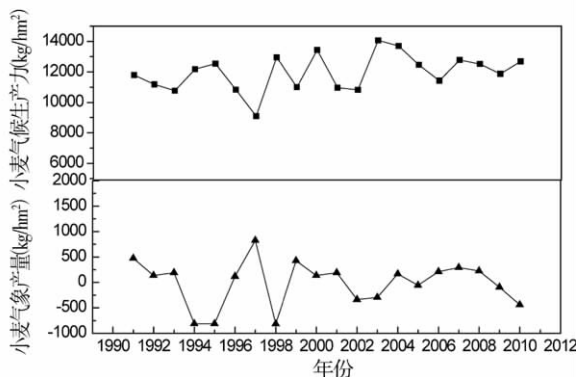


图 2 冬小麦气象产量及气候生产力年际变化对比

Fig. 2 Comparison of the climate yields trend of wheat with the climate productivity trend of wheat

经分析可知，步入 21 世纪，气候变化不利于冬小麦的生产，但冬小麦总体产量在波动中上升的原因可能是近年来人为投入（化肥、农药、电力等）的增加造成的。此外，冬小麦种植品种的变化对产量的变化也有较大影响^[32,33]。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气候变化，尤其是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^[32]。周阳等^[33]研究发现，不同品种的冬小麦与产量之间存在极显著差异。

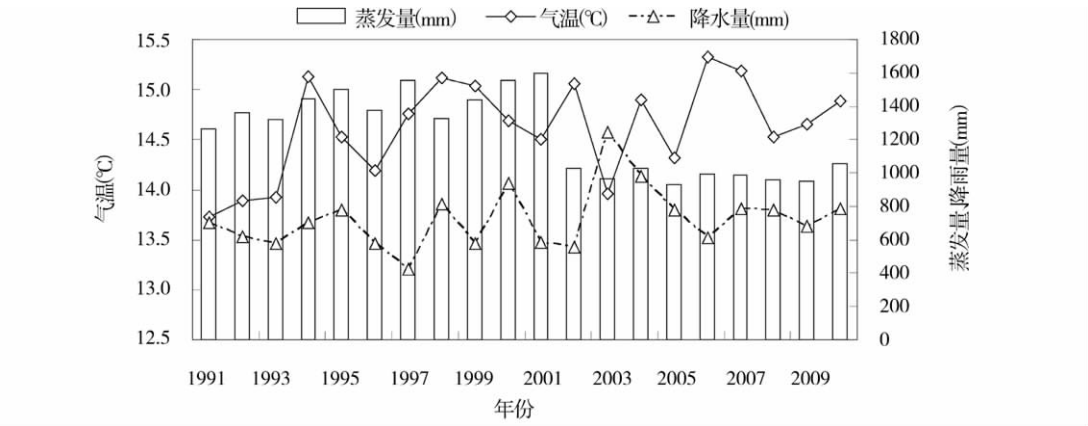


图 3 1991~2010 年商丘市气象因子变化图

Fig. 3 The changes of meteorological factors in Shangqiu during 1991~2010

3. 4 未来气候变化对商丘地区冬小麦气候生产力的影响

气候生产力是随着气温和降水量的变化而增减的，由于气温和降水量的变化在时间和空间上是同时发生的，结合相关研究^[25,26,34]，假设未来气候变化的 49 种情景，即年均气温升高或降低 3℃、2℃、1℃，年降水量增加或减少 30%、20%、10%，计算冬小麦的气候生产力 P_v 变化百分比，结果见表 5。

表 5 年平均气温和年降水量变化下冬小麦气候生产力 P_v 变化百分率

Tah 5 Percentage changes of the P_v under the changing conditions of the annual mean temperature and precipitation

气温变幅 (°C)	降水量变幅 (%)						
	−30	−20	−10	0	10	20	30
−3	−21.6	−16.2	−11.7	−8.0	−4.9	−2.3	−0.1
−2	−19.8	−14.1	−9.3	−5.3	−1.9	1.0	3.4
−1	−18.2	−12.1	−6.9	−2.6	1.1	4.3	7.0
0	−16.7	−10.2	−4.7	0	4.0	7.4	10.4
1	−15.3	−8.4	−2.6	2.4	6.8	10.5	13.7
2	−13.9	−6.8	−6.0	4.8	9.4	13.4	16.8
3	−12.7	−5.2	1.3	6.9	11.8	16.1	19.9

由表 5 可知，当气温不变时，冬小麦 P_v 值随着降水量的增加而增加；当降水量不变时， P_v 值随着气温的升高而增加，相比较而言，降水量的变化对冬小麦 P_v 值的变化影响更大。当气温和降水量同时变化，若气温上升 1℃，年降水量增加 10%、20%、30% 的

“暖湿型”气候时,冬小麦 P_v 值增加 6.8%、10.5%、13.7%,说明“暖湿型”气候有利于冬小麦产量的提高;气温升高 1℃,年降水量减少的情况下, P_v 值减小,反映出“暖干型”气候加剧了水分的不足,造成生产力下降。当气温降低 1℃,年降水量增加 10%、20%、30%的“冷湿型”气候时,冬小麦 P_v 值增加 1.1%、4.3%、7.0%,说明出现“冷湿型”气候,冬小麦产量增幅不明显;当气温降低 1℃,年降水量减少的情况下, P_v 值减少的幅度较大,可见“冷干型”气候对冬小麦生产最为不利。

根据相关研究对中国未来气候变化的预测^[30],计算未来商丘市冬小麦气候生产力 P_v 的可能变化,结果见表 6。根据预测,到 2020 年气温和降水量将有小幅升高和增加,使得冬小麦气候生产力增幅为 4.08%~6.44%;到 2050 年,气温仍将继续升高,而降水量增加不大,但冬小麦气候生产力增幅明显

表 6 未来气候的预测结果及气候生产力 P_v 的可能增幅

Tab. 6 The climate prediction results in the future and the possible increase extent of the climate productivity

年份	气温波动 (℃)	降水波动 (%)	气候生产力增幅 (%)
2020	1.3~2.1	2~3	4.08~6.44
2030	1.5~2.8	5~7	5.92~9.96
2050	2.3~3.3	7~9	8.78~12.07
2100	3.9~6.0	11~17	18.93~21.91

(表 6);到 2100 年,气温和降水量都有较大幅度升高和增加,冬小麦气候生产力的增加幅度也较大,为 18.93%~21.91%。可见,未来几十年内气候可能将向“暖湿型”变化,冬小麦气候生产力也有较大幅度提高,对冬小麦产量的提升较为有利。

4 结论与讨论

基于 1991~2010 年气象与冬小麦产量数据,利用数学统计分析、模型模拟方法,研究了气候变化对商丘地区冬小麦产量的影响,得出以下结论:

(1) 近 20 年来商丘地区冬小麦产量整体上呈波动上升趋势,以平均 198.32 kg/年的速度增加。

(2) 主成分分析表明,前三个因子贡献率分别为 42.375%、25.369%、20.407%,累积贡献率达到 87.15%的原始信息;因此,气温、降水量与极端温度为影响冬小麦产量的主要气候因子,降水过多及低温对小麦生产不利,这与粮食产量常因低温与洪涝灾害减产相一致。商丘地区近 20 年气候变化对冬小麦生产总体上呈有利影响。

(3) 气温升高和降水量的“暖湿型”气候,有利于冬小麦产量的提高;气温升高与降水量减少的“暖干型”气候加剧了水分的不足,造成生产力下降。气温降低与降水量增加的“冷湿型”气候,导致冬小麦产量增幅不明显;气温降低和降水量减少的“冷干型”气候对冬小麦生产最为不利。根据预测推算,商丘地区未来 80~90 年内气候可能将向“暖湿型”变化,冬小麦气候生产力也有较大幅度提高,对冬小麦产量的提升较为有利。

本文对商丘市近 20 年来气候变化对冬小麦产量的影响做了初步分析和探讨。然而,影响冬小麦产量的因素很多,如人为投入(化肥、农药、电力等)等,本文只从自然因素中的气候变化角度对商丘市的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他因素对冬小麦产量的影响,全面的为该区适应气候变化,提高农业生产力水平提供更加准确的依据。同时,近年极端气候变化增多,其对农业生产的影响也在逐步加重,今后也加强局域极端气候对冬小麦产量的影响研究。

参考文献:

- [1] 叶笃正, 符淙斌, 董文杰. 全球变化科学进展与未来趋势. 地球科学进展, 2002, 17(4): 467~469.
- [2] 何凡能, 李珂, 刘浩龙. 历时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.
- [3] 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.
- [4] 缪启龙, 丁园圆, 王勇. 气候变暖对中国亚热带北界位置的影响. 地理研究, 2009, 28(3): 634~642.
- [5] 秦大河, 王苏民, 林而达, 等. 中国西部环境演变评估(第三卷). 北京: 科学出版社, 2002. 1~22.
- [6] 秦大河. 气候变化的事实与影响对策. 中国科学基金, 2003, 17(1): 1~3.
- [7] Wang F T. Impacts of climate change on cropping system and its implication for China. *Acta Meteorologica Sinica*, 1997, 11(4): 407~415.
- [8] Thomas A. Agricultural irrigation demand under present and future climate scenarios in China. *Global and Planetary Change*, 2008, 60(3-4): 306~326.
- [9] Matthews R B, Wassmann R. Modelling the impacts of climate change and methane emission reductions on rice production: A review. *European Journal of Agronomy*, 2003, 19(4): 573~598.
- [10] Tao F, Yokozawa M, Xu Y, *et al.* Climate change and trends in phenology and yields of field crops in China, 1981~2000. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 138(1-4): 82~92.
- [11] Wu D, Yu Q, Lu C, *et al.* Quantifying production potentials of winter wheat in the North China Plain. *European Journal of Agronomy*, 2006, 24(3): 226~235.
- [12] Xiong W, Matthews R, Holman I, *et al.* Modelling China's potential maize production at regional scale under climate change. *Climatic Change*, 2007, 85(3-4): 433~445.
- [13] 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.
- [14] 蒲金涌, 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.
- [15] Wang F T. Some advances in climate warming impact research in China. *Acta Meteorologica Sinica*, 2001, 15(4): 498~508.
- [16] 林而达, 张厚宣, 王京华. 全球气候变化对中国农业影响的模拟. 北京: 中国农业科技出版社, 1997. 61~68.
- [17] 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.
- [18] 刘文平, 郭慕萍, 安炜. 气候变化对山西省冬小麦种植的影响. 干旱区资源与环境, 2009, 23(11): 88~93.
- [19] 李彤霄, 赵国强, 李有. 河南省气候变化及其对冬小麦越冬期的影响. 中国农业气象, 2009, 30(2): 143~146.
- [20] 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.
- [21] Polley H W. Implications of atmospheric and climate change for crop yield and water use efficiency. *Crop Science*, 2002, 42(1): 131~140.
- [22] Baker J T. Yield responses of southern US rice cultivars to CO₂ and temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 122(3-4): 129~137.
- [23] 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.
- [24] Wang RY, Zhang Q, Wang YL, *et al.* Response of corn to climate warming in arid areas in Northwest China. *Acta Botanica Sinica*, 2004, 46(12): 1387~1392.
- [25] 赵鸿, 肖国举, 王润元, 等. 气候变化对半干旱雨养农业区春小麦生长的影响. 地球科学进展, 2007, 22(3): 93~98.
- [26] 闫军辉, 延军平, 曹小星, 等. 气候变化对粮食产量影响定量分析——以西安市为例. 干旱区资源与环境, 2010, 24(12): 117~120.
- [27] 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.
- [28] 张海萍, 陈利顶, 王晓燕, 等. 气候波动对海伦市粮食产量影响的风险分析. 中国生态农业学报, 2010, 18(6): 1345~1350.
- [29] Yao F, Xu Y, Lin E, *et al.* Assessing the impacts of climate change on rice yields in the main rice areas of China. *Climatic Change*, 2007, 80(3-4): 395~409.

- [30] 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.
- [31] Viketoft M, Sohlenius B. Soil nematode populations in a grassland plant diversity experiment run for seven years. *Applied Soil Ecology*, 2011, 48(2): 174~184.
- [32] 河南省农业科学院小麦研究中心. 河南省小麦品种试验汇总. 郑州: 河南省种子管理站, 2010. 92~94.
- [33] 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.
- [34] 秦大河, 丁一汇, 苏纪兰, 等. 中国气候与环境演变评估(1): 中国气候与环境变化及未来趋势. 气候变化研究进展, 2005, 1(1): 4~9.

Impacts of climate change on winter wheat yield in Central Planins of China: Case study of Shangqiu

SHI Ben-lin¹, ZHU Xin-yu¹, LI Hong-zhong¹, ZHANG Yi²

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

2. 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 major constraint on farming planning, mostly on how to enhance the yileds of winter wheat, across the world. Owing to the fundamental importance of food to human welfare and of climate to crop and live-stock production, various investigations showed that agriculture has been a focus of re-search on the impacts of climate change on wheat yield. However, considering the recent investigations in the field of the impacts of climate change on wheat yield, many studies were focused on the climate change in large scale regions. Few studies have been done with respect to the impacts of climate change on wheat yields in small scale regions. Therefore, in order to determine the effects of the climate changes on winter wheat yields in the Central Plains, taking Shangqiu, Henan as a study area, the climate data and wheat yields of observation stations from 1991 to 2010 were used in analyses with principal component analysis, correlation analysis, multiple linear regression analysis and Thornthwaite Memoriae model. The prediction results in the future and possible increase extent of the climate productivity of winter wheat were discovered. The results showed that winter wheat yields increased with fluctuations in recent 20 years. The results of principal component analysis illustrated that the main factors affecting winter wheat yields were temperature, precipitation, evaporation and extreme temperature. Excessive evaporation and extreme low temperature had adverse effects on the winter wheat production. The warm-wet climate was beneficial to wheat production, while the cold-dry climate was detrimental to wheat production. In the future decades, the climate variation will present a warm-wet tendency, which could be favorable to the grain yields in the Central Plains, especially in Shangqiu.

Key words: climate change; Shangqiu; winter wheat; yield