

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

郑 娜¹ 刘秀位² 王锡平^{1**}

(1. 河北师范大学资源与环境科学学院 河北省环境演变与生态建设实验室 石家庄 050024;

2. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心 石家庄 050022)

摘 要 为了进一步分析华北气候要素对小麦产量的影响, 基于地处华北腹地的中国科学院栾城农业生态系统试验站, 采用逐日作物生长动态模型模拟冬小麦生产潜力(Y_{mp}), 并计算其与充分灌溉条件下实际产量(Y_h)的产量差距(YG), 利用相关分析和逐步回归分析, 进行 Y_h 、 YG 与不同时段气候因子的关系分析。结果表明, 抽穗前日照时数和各温度因子与 YG 表现为正相关趋势, 而抽穗后日照时数、日较差与 YG 为负相关趋势。说明生育前期较好的光温条件更多地增加生产潜力, 而后期光照、日较差增加可以更好地满足冬小麦旺盛生长的需要, 更多地提升冬小麦的实际产量。从实际产量来看, 整个小麦发育期多个时段的日照时数和气温日较差对 Y_h 呈正相关的影响趋势, 表明生长季较高的光照和日较差条件对冬小麦实际产量有利。几乎整个发育期降水量与 YG 表现出负相关趋势, 但与充分灌溉条件的 Y_h 相关不显著, 说明降水对 YG 的影响主要在于对生产潜力的减少作用。只有 6 月上旬降水量与 YG 呈显著正相关, 与 Y_h 有较弱负相关, 说明接近成熟时降水对充分灌溉条件的小麦产量可能有不利影响。

关键词 华北平原 冬小麦 产量差距 生产潜力 气候变化

中图分类号: P467; S512.1+1 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2014)02-0234-07

Determining the effects of climate on winter wheat yield in Northern China via yield gap analysis —A case study of Luancheng County, Hebei Province

ZHENG Na¹, LIU Xiuwei², WANG Xiping¹

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Hebei Normal University; Hebei Key Laboratory of Environmental Change and Ecological Construction, Shijiazhuang 050024, China; 2. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050022, China)

Abstract In order to determine the effect of climate on winter wheat yield in the North China Plain, potential wheat productivity (Y_{mp}) was simulated using daily dynamic crop growth model and agro-climate data from the Luancheng Agro-Ecosystem Experimental Station of Chinese Academy of Sciences. Yield gap (YG) was calculated as the difference between Y_{mp} and the actual yield under sufficient irrigation (Y_h). A correlative stepwise regression analysis was used to determine the relationship between climate factors at different growth stages and YG . The same analysis was used to determine the relationship between climate factors and Y_h . Before heading, sunshine hours and temperature factors (mean air temperature, maximum air temperature, minimum air temperature and daily temperature-range) were positively related with YG . After heading, however, both sunshine hours and daily temperature-range tended to be negatively correlated with YG . The results suggested that higher light and temperature increased production potential in the early growth stage. At the late stage, however, sufficient sunshine and large daily temperature-range

* 公益性行业(农业)科研专项(201303133, 201203077)、“十二五”农村领域国家科技计划课题(2012BAD20B04 - 06)和河北省高校重点学科建设项目资助

** 通讯作者: 王锡平, 研究方向为气候变化与农业生产系统模拟和分析研究。E-mail: wangxp@mail.hebtu.edu.cn

郑娜, 主要研究方向为农业生产力模拟与分析。E-mail: zhengnaziran@163.com

收稿日期: 2013-09-13 接受日期: 2013-12-04

benefited actual yield by enhancing vigorous growth. For actual yield, sunshine hours and daily temperature-range were positively correlated with Y_h at most growth stages. This suggested that high sunshine and daily temperature-range were favored actual yield. While precipitation was negatively correlated to YG for almost the whole growth period, it was not significantly correlated with Y_h . This suggested that precipitation influenced yield gap by reducing production potential. Only at the late ripening stage (about ten days before harvest) was precipitation positively correlated with YG and slightly negatively related with Y_h . It implied that at late ripening stage, winter wheat yield did not benefit from precipitation.

Keywords North China Plain; Winter wheat; Yield gap; Potential productivity; Climate change

(Received Sep. 13, 2013; accepted Dec. 4, 2013)

华北平原光热充足、土层深厚, 非常适合冬小麦生长, 是我国冬小麦的主产区之一^[1]。但华北地区属大陆性季风气候, 气候诸要素时、空变化大, 降水严重不足。而冬小麦为喜凉、喜光、高耗水作物, 且冬小麦生产周期长, 其主要生长季在冬春季节, 温度和降水变化剧烈, 往往造成冬小麦产量的不稳定。Zhang 等^[2]利用 DSSAT 模型进行不同品种和水肥条件的冬小麦模拟分析, 结果表明, 与 1980s 相比, 1990s 和最近 12 年内, 华北地区由气象条件影响引起的冬小麦产量的变化分别占总产量的 -39% 和 20%, 而同期品种改良带来的增产为 24.7% 和 52.0%, 由土壤肥力的增加带来的增产只有 7.4% 和 6.8%, 可见气候变化对冬小麦影响的重要程度。随着全球气候变化日趋明显, 华北平原气候变异加剧, 水资源紧缺状况更加严重, 气候条件对冬小麦生长发育的影响可能会更加突出^[1-2]。一般认为, 发育期内降水量、日照时数、日较差增加有利于冬小麦产量增加^[2-3]。目前华北地区变暖的趋势, 会使冬小麦生长期缩短, 干物质积累和穗重减少, 最终使气象产量下降^[2, 4-5]。但在华北地区, 冬小麦历经冬前、越冬、返青及穗分化和灌浆成熟期, 不同发育期对气象条件的适应特性不同, 冬小麦产量形成对不同季节气候要素变化的敏感度和响应规律也不一致^[6]。而目前已有的研究结果大都基于生长季节间的气候要素与产量的相互关系分析, 对不同发育期或时段的气候影响规律的分析还不够明晰。

为了分析作物产量的变化规律, 早在 1981 年 de Datta 就提出产量差距(yield gap)的概念, 将其定义为农民实际收获的作物产量与试验站获得产量之间的差距^[7-8]。此后产量差距的概念不断被丰富和完善, 目前一般认为产量差距是作物生产潜力与田间实际产量之间的差异^[8], 并且积累了大量对产量差距的模拟计算及时空变异规律分析方面的研究和应用成果^[9-12]。研究表明, 在华北平原麦区, 冬小麦产量差距大致在光温生产潜力的 16%~54%^[8], 一些管理水平较高的地区(如河北省石家庄地区), 实际产量已达到光温生产潜力的 80% 以上^[11]。产量差距的影响因素包括气候因素、土壤肥力、管理措施、社会经

济因素, 以及政府政策方面的因素等^[13]。一般认为华北冬小麦属高产, 生产管理水平较高且比较稳定, 而气候条件成为产量和产量差距变异的重要影响因素^[2, 12]。产量差距能够反映作物产量距离最高限产量的差异情况, 分析产量差距的变化规律和影响因素, 可以一定程度上探寻或诊断一个地区产量受限制的原因以及气象因子对产量的气候胁迫情况。但目前相关研究多集中在产量的变化规律分析, 对产量差距变化规律的深入研究还很缺乏, 对产量差距的气候影响含义还没有足够的定量分析和表达。为此, 本研究基于逐日气象资料进行生产潜力模拟, 并计算光温生产潜力及其与充分灌溉条件下实际产量的产量差距, 将产量差距与冬小麦生长期分阶段的气候要素进行相关及逐步回归分析, 探究产量差距和作物产量变化受气候影响的规律, 以求更好地理解华北地区冬小麦产量受气候影响的机制。

1 材料与方法

1.1 资料来源

冬小麦实际产量数据来自中国科学院栾城农业生态系统试验站(简称栾城试验站)的长期定位试验, 充分灌溉条件下冬小麦产量选自 4 水灌溉和 5 水灌溉处理中的最高产量^[14], 时间为 2000—2010 年。其间品种、耕作管理措施不变, 所以认为其间的产量变化来自于气候变异的影响。

本文进行冬小麦生产潜力模拟与变化分析所用的逐日气象资料来自石家庄标准气象站(与栾城试验站的直线距离约 25 km), 资料年限为 1955—2010 年, 包括最高气温、最低气温、日平均温度、日降水量、日照时数、平均风速及平均湿度。为更好地反映气候变化及其决定的冬小麦生产潜力的变化规律, 这里使用了比产量资料更长的时间序列, 但产量差距和实际产量的分析仍然利用实际产量可得的时间序列, 即 2000—2010 年。

1.2 数据分析方法

将冬小麦整个生长季分为播种、越冬、返青、拔节、抽穗、灌浆、成熟 7 个发育阶段(表 1), 利用 Pearson 相关系数筛查对产量差距相关显著的各阶段气候因

子; 利用逐步回归分析排除多因子之间连带相关的干扰, 找出各阶段对产量差距影响显著的关键因子。

文中的数据整理和图表绘制用 Microsoft Excel 完成, 数据统计分析用 SPSS 19.0 完成。

表 1 适用于华北平原的冬小麦生育时段划分
Table 1 Growth stages of winter wheat suitable for the North China Plain

| 生育期 Growth stage | 播种 Seeding | 越冬 Wintering | 返青 Reviving | 拔节 Jointing | 抽穗 Heading | 灌浆 Filling | 成熟 Ripening |
|----------------------------|---------------|-----------------|----------------|----------------|---------------|---------------|----------------|
| 起始时间(月-日) Date (month-day) | 10-06 | 12-01 | 03-01 | 04-01 | 04-21 | 05-11 | 06-11 |

1.3 冬小麦生产潜力模型和产量差距计算方法

本文利用作物逐日生长动态模型^[15-18]计算冬小麦生产潜力, 采用 C++ 语言编程实现模型, 计算历年光合、光温及气候(光温水)各级生产潜力。

光合生产潜力由公式(1)计算得到^[15-16]:

$$Y_m = K \cdot \Omega \cdot \varepsilon \cdot \Phi \cdot (1-\alpha) \cdot (1-\beta) \cdot (1-\rho) \cdot (1-r) \cdot (1-\omega) \cdot (1-\eta)^{-1} \cdot (1-\xi)^{-1} \cdot s \cdot q^{-1} \cdot I_{LAI} \cdot \sum Q_j \quad (1)$$

式中, Y_m 为作物的光合生产潜力, K 为物能转换系数, Ω 为作物光合固定 CO_2 的能力, ε 为光合辐射占总辐射的比例, Φ 为光合作用量子效率, α 为植物群体反射率, β 为植物繁茂群体发射率, ρ 为非光合器官截留辐射率, r 为超过光饱和点的光的比例, ω 为呼吸消耗占光合物的比例, η 为成熟产品的含水率, ξ 为植物无机灰分含量的比例, s 为作物经济系数, q 为单位干物质含热值, I_{LAI} 为叶面积订正系数, Q_j 为太阳辐射量。

光温生产潜力由公式(2)计算得到:

$$Y_{mp} = Y_m \cdot f(T) \quad (2)$$

式中: Y_{mp} 为光温生产潜力; $f(T)$ 是光合作用的温度订正函数, 由公式(3)求得:

$$f(T) = \left[\frac{(T - T_1)(T_2 - T)^B}{(T_0 - T_1)(T_2 - T_0)^B} \right] \quad (3)$$

式中, $B = (T_2 - T_1)/(T_0 - T_1)$, T 是日均温, T_1 、 T_2 和 T_0 分别是作物生育的下限温度、上限温度和产量形成的最适温度。不同发育期取值参见文献^[17]。

气候(光温水)生产潜力由公式(4)~(6)计算得到^[18]:

$$Y_{mps} = Y_{mp} \cdot f(w) \quad (4)$$

式中: Y_{mps} 为气候生产潜力; $f(w)$ 为水分订正系数, 由公式(5)求得:

$$f(w) = \begin{cases} Y_{mp} \cdot [1 - K_y \cdot (1 - ET_a/ET_m)] & ET_a < ET_m \\ 1 & ET_a > ET_m \end{cases} \quad (5)$$

式中: K_y 为产量反应系数; ET_a 为作物实际蒸散量; ET_m 为作物需水量, 由参考作物蒸散量和作物系数计算得到^[19]。

本文定义冬小麦产量差距(YG)为光温生产潜力(Y_{mp})与充分灌溉产量(Y_h)的差值。由于栾城试验站田间条件较好, 充分灌溉产量的水分、肥力条件和管理措施等能满足冬小麦生长的需要, 因此认为 YG

主要是由气象条件的限制引起了冬小麦产量对 Y_{mp} 的偏离。

2 结果与分析

2.1 冬小麦生育期气候要素变化趋势

根据石家庄气象站 1955—2010 年的气象资料统计结果(图 1), 冬小麦生长季平均日照时数为 1 625.8 h, 并呈现出显著随时间下滑趋势, 平均每年减少约 8.25 h($P < 0.05$); 最低温度呈显著增高趋势, 平均每 10 年增加约 0.6°C ($P < 0.05$); 平均气温也表现出显著增高趋势, 平均每 10 年增加约 0.4°C ($P < 0.05$); 最高气温和降水量的变化趋势不显著。

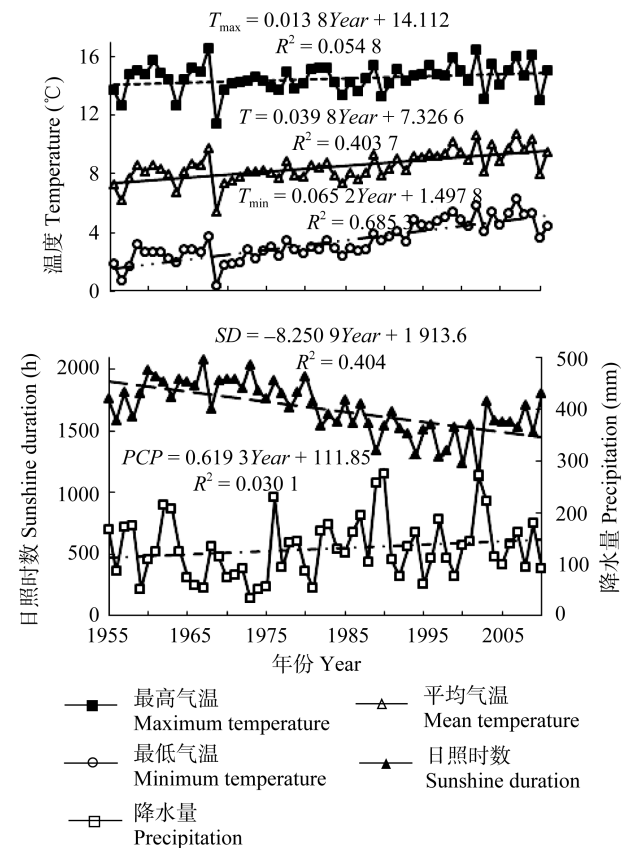


图 1 1955—2010 年间石家庄气象站冬小麦生长季主要气候要素变化趋势($n=56$)

Fig. 1 Changes of climate elements at Shijiazhuang Weather Station for winter wheat growth period over 1955–2010 ($n=56$)

T_{\max} : 最高气温; T_{\min} : 最低气温; T : 平均气温; SD : 日照时数; PCP : 降水量。下同。 T_{\max} : maximum air temperature; T_{\min} : minimum air temperature; T : average air temperature; SD : sunshine duration; PCP : precipitation. The same blow.

2.2 冬小麦生产潜力及产量差距变化趋势

冬小麦光合生产潜力(Y_m)、光温生产潜力(Y_{mp})和光温水气候生产潜力(Y_{mps})之间存在明显且稳定的差异(图2), 多年平均值分别为 $15\ 083\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $8\ 176\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $6\ 115\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。 Y_m 呈现出显著的随时间降低的趋势, 每年平均减少约 $45.3\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ($P<0.05$)。 Y_{mp} 和 Y_{mps} 随时间变化趋势不显著。充分灌溉条件下冬小麦实际产量(Y_h)及产量差距(YG)均值分别为 $6\ 644\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $1\ 373\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 均无显著的随时间变化趋势(图3)。

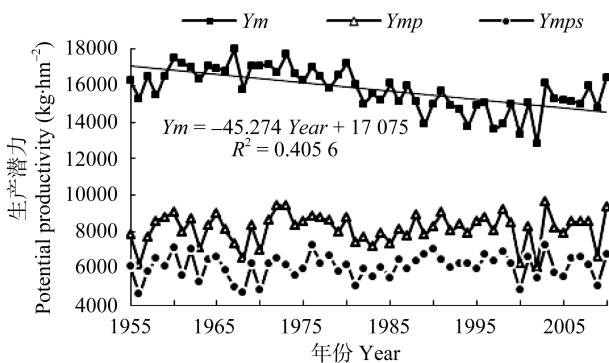


图2 基于石家庄气象站资料的冬小麦光合生产潜力(Y_m)、光温生产潜力(Y_{mp})、光温水气候生产潜力(Y_{mps})变化趋势($n=56$)

Fig. 2 Potential photosynthetic productivity (Y_m), light-temperature productivity (Y_{mp}) and climate productivity (Y_{mps}) of winter wheat based on data from Shijiazhuang Weather Station ($n=56$)

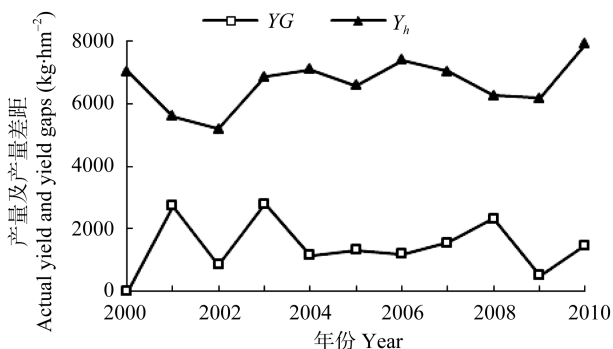


图3 2000—2010年冬小麦充分灌溉产量(Y_h)及其与光温潜力的差距(YG)

Fig. 3 Sufficient irrigated yield (Y_h) and its yield gap (YG) to potential light-temperature productivity of winter wheat over 2000–2010

2.3 气候要素对冬小麦产量差距的影响

产量差距(YG)与冬小麦生育期内各旬(共24旬)气象要素的相关分析(表2)显示, 降水量几乎在灌浆之前的大部分阶段都与 YG 有负相关关系, 并在1月上旬、2月上旬和4月下旬达到显著相关水平, 只有在成熟末期的6月上旬, 降水量与 YG 有正相关关系, 说明生育期内大部分时间降水会缩小产量差距, 而成熟末期降水可能会降低实际产量从而增加产量差距。

抽穗期之前的日照时数和各温度因子一致地与 YG 呈正相关趋势, 如12月下旬、2月上旬和4月上

旬的日照时数, 1月上旬、2月上旬的最高气温, 1月上旬和2月上旬、中旬的最低气温以及1月上旬的日较差, 都与 YG 表现出显著正相关关系; 而进入抽穗期后, 日照时数和日较差一致地与 YG 表现出负相关关系, 并在5月中旬达到显著性水平。说明在冬小麦中早发育期, 高日照、较高温度和日较差会拉大实际产量与生产潜力之间的差距; 而抽穗之后冬小麦开始旺盛生长, 充足的光照和较大的温度日较差条件会更显著增加小麦的实际产量, 从而减少实际产量与生产潜力之间的差距。

对具有多个显著相关因子的1月上旬和2月上旬, 经逐步回归分析方法筛选关键因子^[20], 1月上旬为降水量的负效应和最高气温的正效应, 2月上旬为降水量的负效应和最低气温的正效应(表2), 此结果与以上相关规律一致。

2.4 气候要素对冬小麦实际产量的影响

农艺措施不变条件下, 冬小麦实际产量的变化反映的仅仅是气象条件的影响结果, 产量与各阶段气候要素的相关系数也只反映了各因子对产量的影响程度。从分析结果看出(表3), 除了灌浆后降水与产量的负相关外, 返青—拔节期降水量对产量的负相关可能与试验中灌溉时间有关^[14], 其他时间降水量与产量的相关性均不显著。

发育期内日照时数、最高温度、最低温度以及气温日较差与充分灌溉的实际产量表现出正相关趋势, 尤其是日照时数和日较差在更多时段与实际产量呈正相关关系, 如12月上旬、3月上下旬、4月中旬、5月中旬的日照时数以及12月上旬、中旬及5月中旬的日较差均达到显著相关水平。对有多个气象因子显著相关的12月上旬和5月中旬进行逐步回归分析, 结果显示, 日照时数都是影响实际产量的关键气象因子, 说明日照时数具有更加重要的作用。值得注意的是, 冬前11月上旬的最低气温与实际产量呈显著正相关, 而越冬期1月中旬最低气温与实际产量呈显著负相关趋势(表3), 说明较高的冬前温度有利于产量增加, 而越冬期间最低温较高可能不利于产量的形成。

2.5 降水量对冬小麦产量差距的影响

降水量在冬小麦灌浆期之前的多数阶段都与 YG 有显著负相关关系(表2), 降水可减少产量差距, 而降水量与充分灌溉条件下的冬小麦实际产量(Y_h)相关不显著(表3), 说明降水量对产量差距的影响主要在于对生产潜力的减少作用, 这与 Y_{mp} 和降水进行相关分析的结果一致(表4)。而在冬小麦接近成熟的6月上旬, 降水量与 YG 有正相关关系(表2), 与实际产量具有较弱的负相关关系(表3), 从而进一步说明冬小麦生长末期降水可能会对当地冬小麦产量形成不利, 拉大 Y_{mp} 与 Y_h 之间的差距。

表 2 光温生产潜力与充分灌溉冬小麦的产量差距(*YG*)与逐旬气象要素的相关和逐步回归关系
Table 2 Pearson correlation and stepwise regression relationships between the yield gap (*YG*, between light-temperature potential productivity and actual yield with sufficient irrigation) of winter wheat and the climate factors calculated by every ten days

| 发育期 Growthstage | 时间 Time | 气候因子 Climate factor | 相关系数 Correlation coefficient | 逐步回归关系 Stepwise regression relationship |
|---------------------------------|--|------------------------|---------------------------------|---|
| 越冬—返青 Overwintering–reviving | 12 月下旬 21 st –31 st Dec. | <i>SD</i> | 0.634 [*] | $YG = -80PCP + 161.7T_{\max} + 1\ 133$, [$R^2 = 0.817$, $P < 0.05$, $P(T_{\max}) = 0.002$, $P(R) = 0.027$] |
| | 1 月上旬 1 st –10 th Jan. | T_{\max} | 0.807 ^{**} | |
| | | <i>DT</i> | 0.689 [*] | |
| | | T_{\min} | 0.690 [*] | |
| | | <i>PCP</i> | -0.478 [*] | |
| | 2 月上旬 1 st –10 st Feb. | T_{\max} | 0.731 [*] | $YG = -250.7PCP + 222.9T_{\min} + 2\ 586$ [$R^2 = 0.813$, $P < 0.01$, $P(R) = 0.006$, $P(T_{\min}) = 0.008$] |
| | | <i>SD</i> | 0.677 [*] | |
| | | T_{\min} | 0.702 [*] | |
| | | <i>PCP</i> | -0.514 [*] | |
| | | | | |
| 拔节—抽穗 Jointing–heading | 2 月中旬 11 th –20 th Feb. | T_{\min} | 0.661 [*] | |
| 抽穗—灌浆 Heading–filling | 4 月上旬 1 st –10 th Apr. | <i>SD</i> | 0.614 [*] | |
| 灌浆—成熟 Filling–ripening | 4 月下旬 21 st –30 th Apr. | <i>PCP</i> | -0.460 [*] | |
| | 5 月中旬 11 th –20 th May | <i>SD</i> | -0.677 [*] | |
| | 5 月中旬 11 th –20 th May | <i>DT</i> | -0.639 [*] | |
| | 6 月上旬 1 st –10 th Jun. | <i>PCP</i> | 0.596 [*] | |

DT: 日较差; * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$, 下同。 *DT*: Daily temperature-range; * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$. The same below.

表 3 逐旬气象因子与充分灌溉条件下冬小麦产量(Y_h)的 Pearson 相关系数和逐步回归关系
Table 3 Correlation and stepwise regression analysis between sufficient irrigation yield (Y_h) of winter wheat and the climate factors calculated by every ten days

| 发育期 Growth stage | 旬数 Time | 气候因子 Climate factor | 相关系数 Correlation coefficient | 关键因子 Key factor |
|---------------------------------|--|------------------------|---------------------------------|---|
| 播种—越冬 Seeding–overwintering | 11 月上旬 1 st –10 th Nov. | T_{\min} | 0.632 [*] | $Y_h = 327.4SD + 5\ 085$ ($R^2 = 0.529$, $P = 0.011$) |
| 越冬—返青 Overwintering–reviving | 12 月上旬 1 st –10 th Dec. | <i>SD</i> | 0.727 [*] | |
| | | <i>DT</i> | 0.702 [*] | |
| | 12 月中旬 11 th –20 th Dec. | T_{\max} | 0.749 ^{**} | $Y_h = 224.2T_{\max} + 5\ 573$ ($R^2 = 0.561$, $P = 0.008$) |
| | | <i>DT</i> | 0.654 [*] | |
| 返青—拔节 Reviving–jointing | 1 月中旬 11 th –20 th Jan. | T_{\min} | -0.629 [*] | |
| | 3 月上旬 1 st –10 th Mar. | <i>SD</i> | 0.676 [*] | |
| | 3 月中旬 11 th –20 th Mar. | <i>PCP</i> | -0.692 [*] | |
| | | <i>SD</i> | 0.634 [*] | |
| | 3 月下旬 21 st –31 st Mar. | <i>SD</i> | 0.606 [*] | |
| 拔节—抽穗 Jointing–heading | 4 月中旬 11 th –20 th Apr. | <i>SD</i> | 0.606 [*] | |
| 灌浆—成熟 Filling–ripening | 5 月中旬 11 th –20 th May | <i>SD</i> | 0.758 ^{**} | $Y_h = 221.9SD + 4\ 854$ ($R^2 = 0.574$, $P = 0.007$) |
| | | <i>DT</i> | 0.619 [*] | |
| | | <i>PCP</i> | -0.669 [*] | |
| | 6 月上旬 1 st –10 th Jun. | <i>PCP</i> | -0.393 ($P_{0.05} = 0.443$) | |

表 4 冬小麦生育期各阶段降水量与光温生产潜力(Y_{mp})的相关系数
Table 4 Correlation coefficients between precipitation in different growth periods and light-temperature potential productivity of winter wheat

| 项目 Item | 播种—越冬 Seeding–overwintering | 越冬—返青 Overwintering–reviving | 返青—拔节 Reviving–jointing | 拔节—抽穗 Jointing–heading | 抽穗—灌浆 Heading–filling | 灌浆—成熟 Filling–ripening |
|---------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|----------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|
| 相关系数 Correlation coefficient | -0.370 ^{**} | -0.043 | -0.163 | -0.526 ^{**} | -0.402 ^{**} | 0.110 |
| 显著性 Significance | 0.005 | 0.753 | 0.230 | 0.000 | 0.002 | 0.419 |

3 讨论与结论

本文以华北腹地中国科学院栾城农业生态系统试验站为代表站点, 对生产潜力的分析表明, 1955—2010年冬小麦生长季由于日照时数显著减少, 光合生产潜力(Y_m)呈明显下降趋势; 而温度升高对光照下降的抵消作用, 使得光温生产潜力(Y_{mp})无显著变化趋势; 同时, 光温水气候生产潜力(Y_{mps})也没有显著变化趋势。这与王涛等^[11]利用 WOFOST 模型模拟的 1968—2007 年华北地区冬小麦生产潜力的变化趋势结果一致。

利用光温生产潜力(Y_{mp})与充分灌溉条件下作物产量(Y_h)之间的差距(YG)反映由气候波动、胁迫现象引起的冬小麦产量对 Y_{mp} 的偏离, 认为其可在一定程度上表达太阳辐射和有效热量之外的任何其他因素引起的对实际产量的限制, 如冬小麦的冻害、高温胁迫、降水亏缺等气象灾害(这里假设病虫害等其他灾害容易控制且完全被控制住)都会减少产量从而增加 YG 。分析结果表明, 拔节、抽穗前的温度和日照时数均与 YG 呈正相关, 说明光、温要素增加实际产量的效应较弱, 至少不及其增加 Y_{mp} 的效应[从公式(1)~(3)显而易见光照和温度与光温潜力 Y_{mp} 具有正相关关系], 从而造成 Y_{mp} 与实际产量之间的差距(YG)加大, 同时也表明冬小麦生长的前期光温条件基本满足冬小麦实际生长需要, 光温增加虽然会增加生产潜力, 但对实际产量的改善意义不大; 进入抽穗灌浆期之后, 日照和气温日较差则与 YG 呈负相关趋势, 此时小麦开始旺盛生长, 充足的光照和较大的日较差更有利于提高冬小麦的实际产量, 从而使产量差距减少, 后期光照和日较差对当地冬小麦产量形成有利。

值得注意的是, 11 月上旬的最低气温与实际产量呈正相关, 说明冬前较高的温度有利于小麦冬前干物质积累及实际产量的提高。而 1 月中旬最低气温与实际产量呈现出显著负相关趋势, 可能是因为越冬期冬小麦停止光合作用, 温度升高会增加呼吸消耗, 从而可能使产量下降。

降水量因其降低 Y_{mp} 而与 YG 具有显著负相关关系, 但在灌浆期之前的大部分时间降水量与 Y_h 相关性不显著。说明充分灌溉后降水量不再是当地小麦产量的限制条件。而在接近成熟的 6 月上旬的降水量与 YG 呈显著正相关关系, 但与实际产量具有不显著负相关关系, 与光温潜力相关不显著, 说明末期降水因降低实际产量, 从而拉大 Y_{mp} 与 Y_h 之间的差距。

在实际生产条件下收获的作物实际产量, 不仅

受气候光热水累积资源量的限制, 而且还受气候适宜程度、气候灾害(如冷热害、干旱逼熟等现象)或耕作条件的胁迫或限制。将一个地区气象条件对作物产量的影响理解为两个层次: 一为作物最大生产潜力, 即由比较稳定的气候资源累积量决定的那部分产量, 可用如光合生产潜力、光温生产潜力、光温水生产潜力等表达; 另外一个层次是由产量差距表达的受气候胁迫或限制的作物产量变异, 是由气候要素对某种作物适宜性的偏离(如气候胁迫)造成的, 如冬小麦高温逼熟使得热量潜力得不到发挥, 使实际产量与生产潜力之间产生差距。产量差距反映作物产量对当地最大生产潜力利用的受限制程度, 产量差距越大, 说明作物生长过程中受到的胁迫越严重、产量受限越大。本文以代表华北地区较高生产水平的中国科学院栾城农业生态系统试验站的长期定位试验为基础, 对充分灌溉条件下产量差距的气候影响规律作了初步分析, 但不同生产管理和地力水平条件下其规律可能会有较大差异, 今后将继续进行更全面的分析, 希望研究结果可为应对气候变化条件下冬小麦的生产规划和高效管理提供理论依据, 并为气候胁迫地区的农作物生产分析提供方法借鉴。

参考文献

- [1] 梅旭荣, 康绍忠, 于强, 等. 协同提升黄淮海平原作物生产力与农田水分利用效率途径[J]. 中国农业科学, 2013, 46(6): 1149—1157
Mei X R, Kang S Z, Yu Q, et al. Pathways to synchronously improving crop productivity and field water use efficiency in the North China Plain[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(6): 1149—1157
- [2] Zhang X Y, Wang S F, Sun H Y, et al. Contribution of cultivar, fertilizer and weather to yield variation of winter wheat over three decades: A case study in the North China Plain[J]. European Journal of Agronomy, 2013, 50: 52—59
- [3] 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): 1444—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): 1444—1447
- [4] Liu Y, Wang E, Yang X, et al. Contributions of climatic and crop varietal changes to crop production in the North China Plain, since 1980[J]. Global Change Biology, 2010, 16(8): 2287—2299
- [5] 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): 14—22
Shi B L, Zhu X Y, Li H Z, et al. Impacts of climate change on winter wheat yield in central plains of China: A case study of Shangqiu[J]. Geographical Research, 2012, 31(1): 14—22
- [6] 汪永钦, 王信理, 刘荣花. 冬小麦生长和产量形成与气象

- 条件关系及其动态模拟的研究——以河南省黄淮平原冬小麦中、低产地区为例[J]. 气象学报, 1991, 49(2): 205–214
- Wang Y Q, Wang X L, Liu R H. The relations of the growth of winter wheat and the formation of its yield productivity to meteorological conditions and their dynamic simulation[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1991, 49(2): 205–214
- [7] de Datta S K. Principles and Practices of Rice Production[M]. New York, USA: Wiley-Inter Science Publication, 1981
- [8] 范兰, 吕昌河, 陈朝. 作物产量差及其形成原因综述[J]. 自然资源学报, 2011, 26(12): 2155–2166
- Fan L, Lü C H, Chen C. A review on crop yield gaps and the causes[J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(12): 2155–2166
- [9] Wang T, Lu C H, Yu B H. Production potential and yield gaps of summer maize in the Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Journal of Geographical Sciences, 2011, 21(4): 677–688
- [10] Lu C H, Fan L. Winter wheat yield potentials and yield gaps in the North China Plain[J]. Field Crops Research, 2013, 143: 98–105
- [11] 王涛, 吕昌河, 于伯华. 基于 WOFOST 模型的京津冀地区冬小麦生产潜力评价[J]. 自然资源学报, 2010, 25(3): 475–487
- Wang T, Lü C H, Yu B H. Assessing the potential productivity of winter wheat using WOFOST in the Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(3): 475–487
- [12] 石全红, 刘建刚, 王兆华, 等. 南方稻区水稻产量差的变化及其气候影响因素[J]. 作物学报, 2012, 38(5): 896–903
- Shi Q H, Liu J G, Wang Z H, et al. Change of rice yield gaps and influential climatic factors in Southern China[J]. Acta Agronomica Sinica, 2012, 38(5): 896–903
- [13] Mohammad H M. Causes of yield gaps and strategies for minimizing the gaps in different crops of Bangladesh[J]. Bangladesh Journal of Agricultural Research, 2011, 36(3): 469–476
- [14] Zhang X Y, Chen S Y, Sun H Y, et al. Dry matter, harvest index, grain yield and water use efficiency as affected by water supply in winter wheat[J]. Irrigation Science, 2008, 27(1): 1–10
- [15] 高素华. 中国三北地区农业气候生产潜力及开发利用对策研究[M]. 北京: 气象出版社, 1995
- Gao S H. Agricultural Climate Production Potential and its Utilization Research in the North of China[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1995
- [16] 王素艳, 霍治国, 李世奎, 等. 中国北方冬小麦的水分亏缺与气候生产潜力——近 40 年来的动态变化研究[J]. 自然灾害学报, 2003, 12(1): 121–130
- Wang S Y, Huo Z G, Li S K, et al. Water deficiency and climatic productive potentialities of winter wheat in north of China: Study on its dynamic change in recent 40 years[J]. Journal of Natural Disasters, 2003, 12(1): 121–130
- [17] 马鹏里, 蒲金勇, 赵春雨, 等. 光温因子对大田冬小麦累积生物量的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(5): 1270–1276
- Ma P L, Pu J Y, Zhao C Y, et al. Influence of light and temperature factors on biomass accumulation of winter wheat in field[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(5): 1270–1276
- [18] 王宏, 陈阜, 石全红, 等. 近 30 a 黄淮海农作区冬小麦单产潜力的影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2010, 26(Sup.1): 90–95
- Wang H, Chen F, Shi Q H, et al. Analysis of factors on impacting potential productivity of winter wheat in Huanghuaihai agricultural area over 30 years[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(Sup.1): 90–95
- [19] 毛飞, 张光智, 徐祥德. 参考作物蒸散量的多种计算方法及其结果的比较[J]. 应用气象学报, 2000, 11(S1): 128–136
- Mao F, Zhang G Z, Xu X D. Several methods of calculating the reference evapotranspiration and comparison of their results[J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 2000, 11(S1): 128–136
- [20] 王培娟, 张佳华, 谢东辉, 等. A2 和 B2 情景下冀鲁豫冬小麦气象产量估算[J]. 应用气象学报, 2011, 2(5): 549–557
- Wang P J, Zhang J H, Xie D H, et al. Estimation for weather yield of winter wheat under A2 and B2 scenarios in Hebei, Shandong and He'nan Provinces[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2011, 2(5): 549–557