

冬小麦及其叶片发育积温需求研究

毛振强* 宇振荣** 刘洪

(中国农业大学 资源与环境学院, 北京 100094)

摘要 研究了田间冬小麦不同生育阶段和不同叶位叶片生长发育的积温需求。结果表明: 在不同年份和不同水分、播期条件下, 品种邯 4564 和邯 5316 完成整个的生活周期所需的积温差异很大, 但在 1 800~ 2 300 °C·d 均可正常成熟, 适时播种水肥适宜条件下为 2 200 °C·d 左右; 开花到成熟期的积温占小麦全生育期积温的 1/3~ 1/4; 叶片的出叶积温为 70~ 100 °C·d, 比较稳定, 多为 90 °C·d; 返青后出现的叶片的出叶积温略大于冬前叶的出叶积温。叶片功能期的积温随该叶片在主茎上叶位的升高而逐渐增大; 适时播种则第一片叶的功能期积温为 300~ 450 °C·d, 旗叶的功能期积温 900~ 1 100 °C·d, 而倒 2、倒 3 叶功能期积温略高于旗叶。水、肥缺乏和灌溉咸水均使小麦提前成熟, 且小麦全生育期和不同叶位叶片功能期的积温相应减少。

关键词 冬小麦; 积温; 发育阶段; 叶片

中图分类号 S512.11; S162.5

Experimental Research on Thermal Requirement for Winter Wheat and Its Leaves

Mao Zhenqiang Yu Zhenrong Liu Hong

(College of Natural Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100094, China)

Abstract The thermal requirement for wheat development in different stages and for its leaf growth in different location was studied based on field experiments. It was found that the thermal requirement from anthesis to maturity stage generally covers one third to one fourth of the total (T_{sum}), which varies from 1 800 to 2 300 °C·d, and was generally 2 200 °C·d under suitable soil water and fertility conditions if sowed in time. The phyllochron for different leaves is generally stable, which varies from 70~ 100 °C·d and is about 90 °C·d for most leaves. Thermal requirement for assimilation active stage of a leaf increases along with the ascending of position on the main stem, the scope is 300~ 450 °C·d and 900~ 1 100 °C·d for the first and last leaf respectively if sowed in time. Wheat would mature earlier if water, salt and/or nitrogen stress existed, as a result, the thermal requirement for wheat and leaves decreased correspondingly.

Key words winter wheat; thermal requirement; development stage; leaf

除作物的遗传特性外, 温度和日长是影响田间作物生长发育最重要的因子。作物的积温需求具有较好的稳定性、便于量化, 且能从更深层次揭示生长发育机理。且大多数机理性作物模型都以积温作为描述或控制模拟作物生长发育过程的主要变量^[1]。作物最重要的光合器官叶

收稿日期: 2002-03-28

国家重点基础研究发展规划资助项目(G1999011709)和荷兰 SA L 基金会中荷合作资助项目(SA L-SPP 299.399)

* 毛振强, 在读博士研究生, 研究方向为土地产力和土地可持续利用。

** 宇振荣, 教授, 博士生导师; 研究方向为景观生态学、土地可持续利用和作物模拟等。联系作者。北京圆明园西路 2 号

片的生长速率、功能期长度和叶面积的变化更是作物模型研究的重点。由于冬小麦主茎叶片数目和生长发育之间具有显著的相关性, 所以成功地预测作物叶片的生长发育是实现适时管理的重要基础。前人研究表明: 小麦的出叶积温 (phyllchron, 即从叶片露出叶鞘到定长的积温需求) 基本是一个常数^[2]。为综合考虑日长和温度对作物生长的影响, 最常用的方法是将每日有效温度乘以不同形式的日长系数^[3,4]。目前, 已发展了许多预测小麦主茎叶片数目、叶片出现时间和叶面积变化趋势的模型^[2,3,5~11]。研究发现: 在恒定的温度条件下(0~ 30 ℃), 小麦和大麦的出叶积温随日长的延长而减小; 日长恒定条件下(4~ 20 h), 出叶积温随温度的升高而增大^[8,9]。此外, 土壤的紧实度、水分含量、土壤有机质和硝酸盐含量等被视为影响作物及其叶片生长发育的次要因子^[11,13], 它们不会改变作物及叶片生长发育的规律, 但可影响它们对光、热的反应。本试验的目的是研究冬小麦及其叶片发育的积温需求, 同时研究大田条件下水分、养分和盐分等因子对小麦及其叶片生长积温需求的影响。

1 材料与方 法

1.1 试验设计

试验 1998—2001 年在中国农业大学曲周试验站进行。供试品种为当地大面积播种的邯 5316 和邯 4564。试验田土壤为中壤质潮土, 0~ 200 cm 平均容重 $1.4 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。试验站观测的多年平均降雨量为 500 mm, 年变异系数 24%; 温度变化见图 1。0~ 20 cm 耕层土壤基础养分含量: 有机质 $8.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效氮和全氮含量分别为 0.035 和 $0.61 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。试验温度、水盐等处理见表 1。随机区组设计, 小区面积 66.67 m^2 ; 充足施肥处理施肥量 (N) $400 \sim 450 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 一半以碳铵做基肥耕前撒施, 一半用尿素做追肥在拔节前撒施。灌溉用咸水电导率 $5.40 \sim 5.47 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$, 开采深度 $8 \sim 12 \text{ m}$; 淡水电导率 $1.2 \sim 1.6 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$, 开采深度 $100 \sim 120 \text{ m}$; 每次灌溉量 $75 \sim 90 \text{ mm}$; 处理 00-5 和 01-5 春后只灌拔节和灌浆水; 充足灌溉处理春后灌返青、拔节、孕穗和灌浆水。处理 01-6 采用点播, 每穴 1 株, 行、株距分别为 50 和 30 cm; 其他处理均为机播, 行距 16.4 cm , 播种密度 $3 \sim 3.5 \times 10^6 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

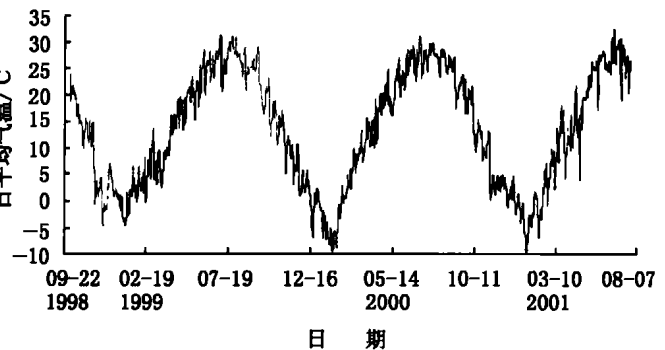


图 1 试验期间日平均气温

1.2 小麦及叶片发育的观测

每处理选有代表性的 10~ 20 株小麦定株观测, 因年份而不同, 出叶盛期每 2~ 3 d 调查 1 次; 越冬期和挑旗后每 5 d 调查 1 次; 同时记载小麦达到各生育时期的日期。1998—2000 年, 记录各叶定长和衰亡(叶片 1/2 以上面积枯黄)日期; 2000—2001 年叶片生长用叶龄法记载, 叶片衰亡仍用日期法记载。

1.3 积温计算

本文计算积温采用的方法如下^[14]

$$DDT_i = \begin{cases} T_d - T_0 & T_d > T_0 \text{ 且 } T_d < T_h \\ 0 & T_d \leq T_0 \\ T_h - T_0 & T_d \geq T_h \end{cases} \quad (1)$$

表1 试验处理基本情况说明

处理编号	品种	处理因子	播种期	成熟期	全生育期长/d	处理因子说明
99-1	邯 4564	温度	1998-10-07	1999-06-05	241	适时播种, 淡水充足, 施肥充足
99-2	邯 4564	温度	1998-10-17	1999-06-03	229	迟播 10 d, 淡水充足, 施肥充足
99-3	邯 4564	温度	1998-10-27	1999-06-07	223	迟播 20 d, 淡水充足, 施肥充足
00-1	邯 5316	对照	1999-10-09	2000-06-05	240	适时播种, 淡水充足, 施肥充足
00-2	邯 5316	盐分	1999-10-09	2000-06-05	240	适时播种, 咸水灌溉, 施肥充足
00-3	邯 5316	严重水分胁迫	1999-10-09	2000-05-28	232	适时播种, 只灌越冬水(淡), 施肥充足
00-4	邯 5316	氮胁迫	1999-10-09	2000-05-28	232	适时播种, 淡水充足, 连续 5 茬不施肥
00-5	邯 5316	中等水分胁迫	1999-10-09	2000-06-02	237	春后只灌溉拔节水和灌浆水
00-6	邯 5316	温度	1999-10-30	2000-06-05	219	迟播 21 d, 淡水充足, 施肥充足
01-1	邯 5316	对照	2000-10-18	2001-06-04	229	适时播种, 淡水充足, 施肥充足
01-2	邯 5316	盐分	2000-10-18	2001-06-04	229	适时播种, 咸水充足, 施肥充足
01-3	邯 5316	严重水分胁迫	2000-10-18	2001-06-04	229	适时播种, 只灌越冬水(淡), 施肥充足
01-4	邯 5316	氮胁迫	2000-10-18	2001-06-04	229	春后只灌溉拔节水和灌浆水
01-5	邯 5316	中等水分胁迫	2000-10-18	2001-06-04	229	适时播种, 淡水充足, 连续 7 d 不施肥
01-6	邯 5316	温度	2000-10-27	2001-06-05	221	迟播 9 d, 淡水充足, 施肥充足

$$DDT = \sum_{i=N_1}^{N_2} DDT_i \quad (2)$$

其中 T_d 是根据每天 2:00, 8:00, 14:00 和 20:00 时 4 次观测的气温计算的日平均气温; T_h 和 T_0 分别为作物发育的上、下限温度。本试验采用的品种 T_0 和 T_h 分别取 0 和 30; DDT_i 和 DDT 分别为每日有效温度和从第 N_1 天到第 N_2 天的有效积温。若 N_1 和 N_2 为播种和成熟日期, DDT 即总有效积温 (T_{sum})。

2 试验结果

2.1 冬小麦不同生长发育阶段的积温需求

由于不同年份的温度变化和各处理土壤水分、养分、盐分及播种时间等条件的差异, 小麦完成整个生活周期所需积温差异很大, 从 1 800 到 2 300 °C·d 均可实现正常生理成熟(表 2)。在适时播种(本试验为 10 月上旬)和水、肥、盐等因子胁迫较小的条件下为 2 200 °C·d 左右, 拔节前后各占约 1/2。

表 2 几个主要处理冬小麦不同发育阶段的积温需求

处理编号	总积温	播种— 出苗	出苗— 分蘖	分蘖— 越冬	越冬— 返青	返青— 拔节	拔节— 挑旗	挑旗— 开花	开花— 灌浆	灌浆— 成熟	抽穗— 成熟
99-1	2 309.5	122.1	305.2	208.7	263.4	234.7	149.1	310.2	124.8	591.3	849.5
99-2	2 074.5	144.4	266.5	30.6	267.5	263.5	192.8	258.7	143.8	506.7	776.7
99-3	2 018.8	180.5	116.6	0.0	267.5	278.6	229.1	207.3	167.2	572.0	829.7
00-1 与 2	2 207.2	129.1	263.9	174.8	153.1	327.2	144.8	181.9	148	684.4	906.9
00-3	2 023.0	129.1	263.9	174.8	153.1	327.2	111.3	107.5	146.2	609.9	848.2
00-4	2 023.0	129.1	263.9	174.8	153.1	327.2	144.8	181.9	148.0	500.2	776.4
00-5	2 139.4	129.1	263.9	174.8	153.1	327.2	144.8	181.9	148.0	616.6	839.1
00-6	1 890.6	98.2	126.2	26.8	161.9	318.4	144.8	181.9	148.0	684.4	906.9
01-1	1 973.0	129.6	201.7	18.2	158.6	245.0	152.5	287.8	99.6	680.0	913.9
01-6	1 918.1	122.5	122.7*		180.1	218.5	208.6	310.8	126.8	628.1	902.0

注释: * 该处理由于播种过晚, 冬前没达到分蘖期, 所以该数据为出苗到越冬的积温。

由于各年份的气温变化很不稳定, 小麦进入越冬和开始返青的时间不同年份差异很大。因此, 从分蘖到拔节期间各生育阶段积温的年际变异很大。总的来看, 在播期相同的条件下, 由作物的遗传特性决定的各发育阶段积温比较稳定; 而主要由环境条件(主要是指气温)的变化所决定的各发育阶段的积温需求在不同的年份差异较大。即使同一品种, 如果播种时间不同, 各阶段所需的积温也可能差异较大, 但一般较年际间的变异小, 尤其是在小麦拔节后各阶段。

2.2 环境因子对小麦总叶数和出叶积温的影响

一个叶片的整个生活周期可分为生长期、功能期和衰亡期 3 个时期。叶片生长期是指从叶尖露出叶鞘到叶片定长的时期; 功能期指从叶片定长到衰亡的时期; 叶片衰亡期指从叶片 1/2 以上面积衰亡到完全枯死的时期。叶片生长期的积温反映了叶片生长速率的大小; 功能期的积温反映了叶片在光合能力较强时期可能接收能量的多少, 在一定程度上反映了该叶片可能合成光合产物的多少。

从表 3 可以看出: 邯 4564 和邯 5316 的总叶片数一般为 10~14 片。返青后叶片数目变化很小, 一般 5 片; 栽培和环境条件对冬前和越冬期叶片数目影响较大, 适时播种和水肥胁迫较小的条件下, 冬前叶一般 6~7 片, 越冬到返青期间一般出现 1~2 片叶; 严重的水肥短缺和盐分胁迫及迟播均不同程度地减少冬前出现的叶片数目, 尤以迟播的影响为大。2000 年 10 月下旬和 11 月连阴多雨, 气温较低, 又遇播种较晚, 冬前积温明显少于平常年份, 大多数植株越冬前主茎只有 2~4 片展开叶; 处理 01-6 越冬前仅 1~2 片展开叶。但迟播的处理越冬期出现的叶片一般较多, 在一定程度上弥补了由于播种较晚而带来的总叶片数量和叶面积的损失。这可能是由于该年份越冬期大多数日期的白天平均气温都略高于 0℃, 尤其是在接近返青期的时候, 白天平均气温甚至可以达到 5~6℃。

表 3 不同环境因子对小麦主茎叶片数目的影响及不同时期叶片的出叶积温

处理编号	样本株数	总叶片数 (叶/株)	冬前叶片数	越冬期出现的叶片数 (叶/株)	返青后出现的叶片数 (叶/株)	冬前叶的出叶积温 (°C·d)	越冬期叶片的出叶积温 (°C·d)	返青后叶片的出叶积温 (°C·d)	挑旗日期
99-1	10	13.0	7.0	1.0	5.0	73.41	263.40	76.76	1999-04-16
00-1	15	12.47	6.14	1.33	5.0	71.45	117.77	94.40	2000-04-11
00-2	15	12.0	6.0	1.0	5.0	73.12	153.10	94.40	2000-04-12
00-3	15	11.7	5.6	1.1	5.0	76.96	139.18	87.70	2000-04-11
00-4	15	12.1	6.0	1.0	5.0	73.12	153.10	94.40	2000-04-13
00-5	15	12.1	5.9	1.33	4.9	74.36	117.77	96.33	2000-04-09
00-6	15	10.8	3.8	2.0	5.0	40.26	80.95	92.64	2000-04-13
01-1	15	10.5	2.8	3.0	4.7	78.54	52.87	84.57	2000-04-16
01-6	9	9.9	1.7	3.5	4.7	72.18	51.46	88.98	2001-04-17

冬前叶的出叶积温(即叶片生长期的积温)一般略小于返青后叶片的出叶积温, 即冬前叶的出叶速率略大于春后叶的出叶速率。适时播种条件下的出叶积温, 冬前叶约 70~75 °C·d; 返青后叶片约 90 °C·d 左右; 越冬期一般为 110~160 °C·d, 但处理间的差异较大。迟播小麦相应叶位叶片的出叶积温较小, 即出叶速率大于适期播种小麦的出叶速率。但是, 这一般不能完全弥补由于总积温减少而造成的叶片总数减少。严重的水分胁迫(处理 00-3)使主茎叶片总数减少了 0.77 片; 微咸水灌溉、中等水分胁迫和严重的养分胁迫分别使主茎叶片数减少了 0.37,

0.37 和 0.47 片。从不同时期出现的叶片的出叶积温看, 处理 00-3 冬前和越冬期出现的叶片的出叶积温较对照处理多 $5.5 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{d}$; 而返青后出现叶片的出叶积温较对照处理少 $6.7 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{d}$ 。这可能是由于越接近生长后期水分胁迫愈严重, 小麦的蒸腾量较小, 冠层的温度较对照处理高, 促进了叶片生长的缘故。微咸水灌溉和严重的养分胁迫对返青后出现叶片的出叶积温影响较小, 但都不同程度地抑制了冬前和越冬期叶片的生长, 这可能是因为冬前幼苗对养分缺乏和盐分敏感性较高的缘故。中等水分胁迫条件下(处理 00-5), 水分缺乏对叶片生长的抑制作用始终比较明显, 叶片的出叶积温均明显大于对照处理叶片的出叶积温。

2.3 环境因子对小麦不同叶位叶片功能期积温的影响

小麦叶片的功能期积温随叶位的升高而增大, 最大的是倒 2 叶或倒 3 叶, 旗叶的功能期积温比倒 2 叶和倒 3 叶的功能期积温略有下降。适时播种和水肥适宜条件下, 冬前叶的功能期积温约 $350\sim 600 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{d}$; 最后 3 片叶功能期的积温变化较小, 一般为 $1000\sim 1100 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{d}$ (图 2)。

叶片功能期的长度不仅受各种外界因子的影响, 同时还受小麦群体大小、不同个体及同一个体的不同叶片对资源竞争的影响。在水肥比较适宜的大田条件下, 小麦的群体和单个叶片的叶面积较大, 叶面积系数(LA I)较高, 光照和通风透气条件较差; 同时, 不同个体间的竞争也比较剧烈。这些不利条件都可能造成下部叶片生活周期缩短和功能期积温减少。但在作物生长前期和后期, 尤其是抽穗以后, 群体大小比较稳定, 竞争的结果已形成了相对优化的群体结构。因此, 不同处理小麦的低位和高位叶片功能期积温的可比性较大。

从图 2 可以看出, 尽管养分、水分等限制因子不会改变不同叶位叶片功能期积温的变化趋势, 但都不同程度地减少了各叶片功能期的积温, 对高位叶的影响尤其明显。在各种限制因素中, 水分胁迫对叶片的功能期影响最大, 处理 00-3 最后 3 片叶分别比处理 00-1 相应叶位叶片功能期的积温减少了 30%, 25% 和 22%。微咸水灌溉条件下(处理 00-2), 由于试验中盐分胁迫不特别严重, 尽管盐分胁迫对叶片数目的影响较小, 但各叶片功能期的积温则明显大于处理 00-1 相应叶位叶片功能期的积温。究其原因, 可能是因为在微咸水灌溉条件下, 盐分抑制了叶细胞的伸长, 因此叶片的面积较小; 同时, 幼小的分蘖对盐分比较敏感, 小麦群体也比较小。因此, 处理 00-2 小麦的中下部郁蔽现象不像处理 00-1 那么严重, 所以各叶片的生活周期较长。在播种较晚的条件下(处理 00-6), 尽管小麦主茎的总叶片数较少, 但各叶片功能期的积温相对较高。尤其是主茎中部的叶片, 功能期积温明显高于其他各处理, 这为播种较晚的小麦的快速发育提供了较好物质基础。

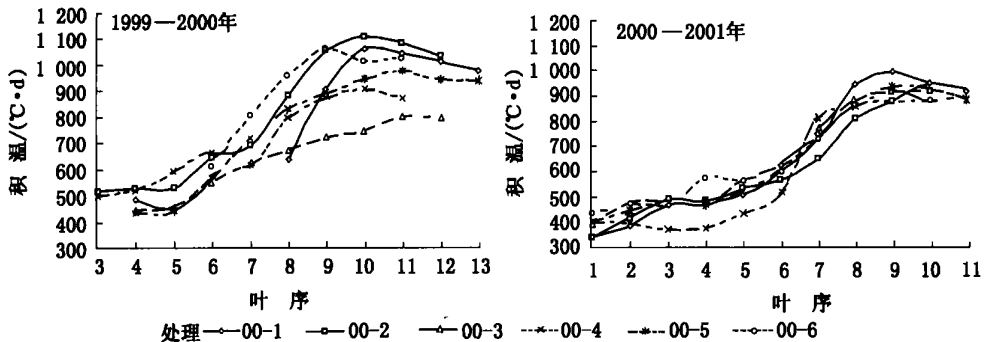


图 2 不同环境条件下不同叶位叶片功能期的积温

3 讨 论

本文中的积温是以气温为标准计算的,严格地说这种算法并不精确。在小麦播种到出苗阶段,生长点感受的是播种深度处土壤环境的温度;拔节前,小麦生长点位于地表附近,温度环境与地表 1~3 cm 的地温近似;如果土壤水分等条件差异很大,处理间地表温度必然存在一定差异,小麦的生长速度不可避免地存在相应差异。表 3 中,越冬期出现的叶片的出叶积温明显偏高的现象,就可能是由于地温和气温差异所引起的,因为冬天气温可能略高于地温。拔节后,不同条件下(尤其是不同水分处理条件下)小麦的蒸腾状况不同,冠层温度也有一定差异。资料表明,水分严重缺乏时,蒸腾量较小,冠层温度略高于水分适宜条件下的冠层温度^[15],这时,以冠温代替气温应是较合理的算法。使用上述数据是否会提高计算精度并揭示一些深层次的问题,及如何通过简单易行的方法获得上述数据,尚需进一步研究。

小麦是适播地域广阔、品种众多的粮食作物,种间的生物学特性和种植的环境条件差异很大。本研究的适地为黄河中下游地区。

参 考 文 献

- 1 Driessen P M, Konijn N T. Land-use System Analysis Wageningen Agricultural University. Wageningen, The Netherlands, 1992
- 2 Jame Y W, Cutforth H W, Ritchie J T. Interaction of temperature and daylength on leaf appearance rate in wheat and barley. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1998, 92: 241~ 249
- 3 Kirby E J M. Factors affecting rate of leaf emergence in barley and wheat *Crop Science*, 1995, 35: 11~ 19
- 4 Kirby E J M, Appleyard M, Fellowes G. Rate of change of daylength and leaf emergence. In: *Annual Report of the Plant Breeding Inst*, Cambridge, 1982. Cambridge, England, 1983, 115
- 5 Kirby E J M. Identification and prediction of stages of wheat development for management decisions. Project Rep. Home Grown Cereals Authority, Hamlyn House, Highgate Hill, London, 1993, 90
- 6 Kirby E J M, Appleyard M, Simpson N A. Coordination of stem elongation and Zadoks growth stages with leaf emergence in wheat and barley. *J Agric Sci(Cambridge)*, 1993, 122: 21~ 29
- 7 Cao W X, Moss D N. Phyllochron change in winter wheat with planting date and environmental changes. *Agron J*, 1991, 83: 396~ 401
- 8 Cao W X, Moss D N. Temperature effect on leaf emergence and phyllochron in wheat and barley. *Crop Sci*, 1989, 29, 1018~ 1021
- 9 Cao W X, Moss D N. Temperature and daylength interaction on phyllochron in wheat and barley. *Crop Sci*, 1989, 29: 1046~ 1048
- 10 Masle J, Doussinault G, Farquhar G D, Sun B. Foliar stage in wheat correlates better to photothermal time than to thermal time. *Plant Cell and Environment*, 1989, 12: 235~ 247
- 11 Miglietta F. Simulation of wheat ontogenesis: I The appearance of main stem leaves in the field. *Climate Research*, 1991, (1): 145~ 150
- 12 Masle J, Passioura J B. The effect of soil strength on the growth of young wheat plants. *Aust J Plant Physiol*, 1987, 14: 643~ 656
- 13 Biscoe P V, Willington V B A. Crop physiological studies in relation to mathematical models. In: Day W, Atkin R K, eds. *Wheat Growth and Modeling*. Plenum Press, New York, 1985, 257~ 270
- 14 张银锁, 宇振荣. 夏玉米及其叶片积温需求的试验和模拟研究. *应用生态学报*, 2001, 12(4): 561~ 565
- 15 张银锁. 基于作物生长模拟模型的夏玉米可持续生产管理系统的分析 [学位论文]. 北京: 中国农业大学, 2001