

刘 波, 谢清萍, 李大军, 等. 基于高斯坐标平滑的界限温度日期求算的新方法[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(1): 347–350.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2015.01.114

# 基于高斯坐标平滑的界限温度日期求算的新方法

刘 波<sup>1</sup>, 谢清萍<sup>2</sup>, 李大军<sup>1</sup>, 喻 宇<sup>3</sup>, 余 露<sup>1</sup>

(1. 东华理工大学测绘工程学院, 江西南昌 330013; 2. 江西省基础信息中心, 江西南昌 330046;  
3. 湖南省湘阴县气象局, 湖南湘阴 414600)

**摘要:**界限温度日期的确定, 对指导农业生产具有很重要的意义。五日滑动平均法是目前求算界限温度日期最为广泛的方法之一, 它能够消除 5 d 以内的随机波动, 但这种等权求算界限温度日期方法存在一定缺陷。针对五日滑动平均法计算界限温度中所存在的不足, 提出利用高斯坐标平滑来计算确定能稳定通过某界限温度日期的一种新方法。利用某气象站每日不同深度的温度数据, 对高斯坐标平滑方法和五日滑动平均算法以及其他常用的方法进行试验验证, 比较分析得出, 所提出的方法正确, 得出的界限温度日期更合理, 适用性效果更好。

**关键词:**高斯坐标平滑; 界限温度; 五日滑动平均; 新方法

**中图分类号:** S161.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2015)01-0347-03

界限温度是指日平均气温稳定升到(或降到)某值, 此值以上(下)反映了植物生长发育(起止)的新阶段或农事活动新的转折<sup>[1-2]</sup>。在农业气候资源分析中常采用 0、5、10、15、20 ℃ 各等级, 也就是在已有气温资料的基础上, 确定某界限温度作为指标, 以便于掌握自然物候特征和植物的生育规律, 及时采取栽培措施, 使农业生产获得稳产、高产<sup>[3-4]</sup>。因此界限温度日期的确定, 对指导农业生产具有很重要的意义。

目前, 求算界限温度日期常用而有效的方法有直方图法、偏差法、候平均法、三日连续偏低法、五日滑动平均法等。根据每种方法的自身特点, 其适用性也不一致, 为了提高各种方法的适用性, 许多学者提出了求算具有不同地势地区界限温度日期的方法<sup>[5-10]</sup>, 但总体来说五日滑动平均法是目前应用最为广泛的方法之一<sup>[7]</sup>。

五日滑动平均方法取 5 d 的时间序列来求算界限温度日期, 虽然可以滤掉滑动间隔以内的周期振动, 但该方法采用等权的方式求算界限温度日期, 没有考虑 5 d 内温度的随机性, 因而对温度周期振动也有一定的削弱, 存在一定的缺陷, 本研究针对该缺陷, 提出采用不等权的高斯坐标平滑来计算界限温度日期的新方法, 并利用某气象站每日不同深度(0、5、10、15、20、40 cm)的平均地温数据, 对高斯坐标平滑和其他求算界限温度日期的方法进行验证。通过比较、分析, 得出用高斯坐标平滑来确定界限温度日期的新方法正确, 求出的界限温度日期更合理, 更能够代表界限温度日期的真正含义, 能更好地指导农业生产, 具有一定的实用价值。

## 1 五日滑动平均方法的基本思路

在动态数据分析处理中, 常常会分析一系列复杂的时序

数据, 这些时序数据不能或者很难用一个多项式来表示或拟合其变动规律。同时分析这些时序数据的目的, 不是为了求出相应的函数, 而只是为了消除动态时序数据中的随机波动, 利用某一点的数值来反映动态时序数据的周期和趋势。因此在这种情况下, 通常采用动态时序数据周期分析中的平滑与滤波的数据处理方法, 即滑动平均方法<sup>[11]</sup>。而所谓五日滑动平均法(也称五点滑动平均法), 是滑动平均方法的一个特例。其基本思路是, 在一个长序列的逐日资料中, 按照时间的顺序, 从第 1 天开始, 计算第 1 天到第 5 天的数值之和再求平均, 求出的平均值作为第 1 天的五日滑动平均值; 再求第 2 天到第 6 天、第 3 天到第 7 天、第 4 天到第 8 天……以此类推。选取五日滑动平均值大于界限温度并且之后均大于该界限温度的连续 5 d, 把这连续 5 d 中的第 1 天作为界限温度的初日。滑动平均的基本原理如下:

(1) 在动态时序数据中, 先求算出序列前几项的平均值, 然后向后移动 1 项, 再以同样的项数求得平均数, 以此类推。

设  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  为 1 年的日平均温度的记录值, 则  $n$  项滑动平均计算公式为:

$$\bar{x}_{ni} = (x_i + x_{i+1} + \dots + x_{i+n-1}) / n. \quad (1)$$

式中:  $i$  为某一天。

一般经过滑动平均滤波之后, 平滑的时间序列的随机波动较原时间序列的随机波动程度有所减弱, 当滑动间隔增大时, 即  $n$  增大, 随机波动的幅度减少得就更多。如果  $n$  值过大, 虽然有很好的平滑作用, 能够很好地抑制时间序列的随机波动, 但同时也会对所分析的周期规律进行平滑, 削弱了周期振动, 因此合理地选择平滑项  $n$  十分关键。确定界限温度日期的常用五日滑动平均法, 就是当  $n=5$  时的滑动平均法, 即:

$$\bar{x}_{5i} = (x_i + x_{i+1} + x_{i+2} + x_{i+3} + x_{i+4}) / 5. \quad (2)$$

五日滑动平均也可写成:  $\bar{x}_{5i} = (x_i \times w_i + x_{i+1} \times w_{i+1} + x_{i+2} \times w_{i+2} + x_{i+3} \times w_{i+3} + x_{i+4} \times w_{i+4}) / 5$ , 式中,  $w$  为权重;  $w_i = w_{i+1} = w_{i+2} = w_{i+3} = w_{i+4} = 1$ , 即五日滑动平均是等权重的滑动平均, 每 1 项的权重均等于“1”。在等权重五日滑动平均中, 虽然可以过滤掉滑动间隔以内的随机波动, 但该方法采用等权

收稿日期: 2014-03-11

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 41201395); 江西省数字国土重点实验室开放基金(编号: DLLJ201308)。

作者简介: 刘波(1983—), 男, 湖北钟祥人, 硕士, 副教授, 主要从事 GIS 应用研究。E-mail: liubo\_716@163.com。

的方式求算界限温度日期,没有考虑 5 d 内温度的随机性,因而对温度周期振动也有一定的削弱。

2 基于高斯坐标平滑的界限温度日期求算的新方法

为了克服五日滑动平均算法等权这一缺点,本研究考虑采用高斯坐标平滑——不等权滑动方法来求算界限温度日期。

高斯坐标平滑方法是把权重函数在滑动间隔内看成是正态分布(高斯分布),即在滑动时间点  $t$  上权重最大,远离  $t$  的正负间隔时间的权重以正态分布形式递减。高斯平滑是一种低频通过的滤波器,亦称为低通滤波,即频率越大、周期越短的波动削弱越多<sup>[11]</sup>。

本研究基于五日滑动平均方法的基本思路,也以 5 d 的时间间隔求算界限温度日期,即:

$$\bar{x}_{5t} = (x_{i-2}w_{i-2} + x_{i-1}w_{i-1} + x_iw_i + x_{i+1}w_{i+1} + x_{i+2}w_{i+2})/5。$$

由于高斯坐标平滑在滑动时间点  $t$  上的权重最大,远离  $t$  的正负间隔时间的权重以正态分布形式递减。通常,对于满足高斯分布的连续型变量  $t$  的概率密度函数如(3)式所示:

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}}。 \tag{3}$$

式中: $\sigma$  为标准差, $\mu$  为数为数字期望。

由于高斯坐标平滑  $t$  的正负间隔时间的权重服从标准正态分布,即  $\mu = 0, \sigma = 1$ 。所以间隔为 5 d 的正态变量  $t$  所对应的概率密度函数可以化简为(4)式:

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}}。 \tag{4}$$

当  $t = -2$  时,  $w_{i-2} = f(t) = 0.054$ ; 当  $t = -1$  时,  $w_{i-1} = f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}} = 0.242$ ; 当  $t = 0$  时,  $w_i = f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} = 0.399$ ; 当  $t = 1$  时,  $w_{i+1} = f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}} = 0.242$ ; 当  $t = 2$  时,  $w_{i+2} = f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-2} = 0.054$ 。

根据权重函数的性质,在滑动间隔内的权重函数值之和必须为“1”,则需将以上计算得到的概率密度函数做简单归一化处理,方法如下。

正态概率密度函数和  $S$  为:

$$S = \sum f(t) = 0.991; \tag{5}$$

$$w(t) = f(t)/S。 \tag{6}$$

故权重  $w(t)$  的值为:

$$w(-2) = w(2) = 0.054/0.991; w(-1) = w(1) = 0.242/0.991 = 0.2; w(0) = 0.399/0.991 = 0.4。$$

结果如表 1 所示。

表 1 5 d 间隔高斯坐标平滑权重

$i$	正态变量	正态概率密度值	权重
-2	-2	0.054	0.1
-1	-1	0.242	0.2
0	0	0.399	0.4
1	1	0.242	0.2
2	2	0.054	0.1

设  $T(t)$  为日平均温度函数,则在日期  $i$  时的高斯坐标平滑结果按(7)式计算得到:

$$\overline{T(i)} = T(i-2) \times w(-2) + T(i-1) \times w(-1) + T(i) \times w(0) + T(i+1) \times w(1) + T(i+2) \times w(2)。 \tag{7}$$

3 实例验证

3.1 原始数据分析及试验结果

为了验证本研究算法的正确性,本研究利用某气象站气象地面测报业务软件 OSSMO3.20 获取的某年 A0 格式的数据进行试验验证。表 2 是通过 A0 数据转化得到的深度为 0 cm 的地温原始数据。

利用从 A0 格式数据转化得到的如表 2 格式深度为 0、5、10、15、20、40 cm 的地温数据,利用 VC++ 实现了直方图法、偏差法、候平均法、三日连续偏低法、五日滑动平均方法和高斯坐标平滑方法求算界限温度 20℃ 的界限日期,结果如表 3 所示。

3.2 各种方法结果分析

通过对表 3 比较,可以得到以下分析结果:(1)在地表 0 cm 处,高斯平滑与偏差法、候平均法得到相同的结果(4 月 12 日),三日连续偏低法与五日滑动法得到相同的结果(4 月 9 日)。这是由于三日连续偏低法与五日滑动法在理论上都属于滑动平均方法,只是前者取 3 d 平均,后者取 5 d 平均。由表 2 可以看出,4 月 9 日,温度 22.0℃ 刚达到界限温度 20℃,但随后日平均温度在 4 月 11 日还出现了波动 18.2℃,因此 4 月 9 日稳定通过 20℃ 的界限意义就没有 4 月 12 日强。直方图得到的结果(4 月 20 日)偏差较大,明显不合理,主要是由于直方图法是将 1 年的时间序列温度数据所对应的月平均温度的数值用直方图的形式表现出来,根据每月的月平均地温绘制出直方图,然后再根据月平均温度绘制日平均气温的年变化曲线。在绘制日平均温度的年变化曲线时,需要保证直方图中长方形的面积(每月的直方图块的面积)与日平均温度的年变化曲线的面积相等,因此这种考虑较长时间序列的方法,容易产生界限温度日期偏后的现象。(2)在地表下 5 cm 处,高斯平滑法与偏差法、候平均法、五日滑动法得到相同的结果,而直方图法和三日连续偏低法得到的结果偏差较大,明显不合理。三日连续偏低法出现大的波动是因为恰好这 3 d 温度有个大的波动,因此说明取 3 d 平均计算界限温度的抗波动性较弱。(3)在地表以下 10、15 cm 处,除了直方图法结果偏差较大外,其他 5 种方法得到相同的结果。(4)在地表以下 20 cm 处,高斯平滑法、三日连续偏低法、五日滑动法得到相同的结果,比偏差法、候平均法得到的结果早了 2 d。(5)在地表以下 40 cm 处,高斯平滑法得到日期 4 月 17 日,与偏差法、候平均法、三日连续偏低法、五日滑动法得到的结果 4 月 16 日相比晚了 1 d。

通过以上分析,高斯坐标法得出的初始日期与其他 4 种方法均接近,且高斯坐标平滑法得出的结果能够较好地反映界限温度“稳定通过”的统计意义。

4 结论

界限温度的出现日期、持续日数对确定地区的作物布局、耕作制度、品种搭配等都具有十分重要的意义,合理地计算得

表 2 0 cm 地温日平均值

日期	0 cm 地温(℃)											
	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
1	5.6	12.5	5.8	11.9	28.7	25.1	22.0	32.8	25.1	29.2	17.9	11.3
2	5.3	12.7	6.4	11.1	21.5	21.3	21.6	32.5	29.2	29.7	17.2	11.0
3	8.6	10.9	4.9	14.3	24.4	24.0	27.0	32.7	35.1	29.7	15.1	9.7
4	9.5	10.4	5.9	14.9	28.2	28.9	26.3	33.9	36.7	28.5	15.9	8.4
5	6.2	12.4	7.0	13.1	26.5	31.0	30.8	32.3	38.8	28.7	20.3	8.3
6	5.6	15.8	7.9	16.9	28.7	32.0	32.7	32.3	39.5	28.3	21.9	10.0
7	3.9	15.6	8.1	15.7	31.2	33.9	32.6	29.0	38.2	27.0	26.8	11.3
8	4.9	15.7	8.5	19.6	31.6	31.3	35.5	29.3	36.2	28.2	26.7	9.6
9	5.7	12.3	14.1	22.0	32.4	26.7	35.4	28.1	32.9	27.0	28.1	10.6
10	4.1	15.8	15.8	20.0	34.0	23.8	34.8	25.2	33.8	28.8	17.7	11.1
11	5.0	18.8	14.7	18.2	36.4	27.1	37.1	29.7	36.9	28.4	12.8	15.0
12	4.1	21.2	15.6	20.4	33.6	26.2	38.2	31.5	36.3	25.2	11.1	11.7
13	4.1	22.0	8.3	23.0	22.9	31.1	32.9	29.5	34.0	22.5	7.7	9.9
14	4.4	17.4	11.4	24.0	29.8	32.2	33.6	31.5	35.4	20.8	9.6	9.4
15	5.4	12.4	14.1	25.7	36.0	34.8	29.1	33.8	32.3	24.1	8.2	6.7
16	7.3	9.9	18.4	22.5	35.8	34.9	36.3	27.8	30.3	26.1	4.6	6.3
17	10.1	8.7	20.4	22.0	23.8	36.8	37.9	29.7	35.7	27.0	3.3	6.1
18	9.5	9.5	22.1	24.7	23.1	40.3	38.8	32.2	28.5	26.6	3.6	5.5
19	8.9	9.0	22.9	20.3	22.8	36.8	36.3	33.2	30.6	19.8	4.4	5.3
20	8.2	11.6	20.7	23.2	21.3	38.0	40.4	35.5	34.2	18.0	7.7	5.9
21	7.4	9.1	23.1	24.4	26.4	37.1	38.4	36.5	23.4	21.2	8.2	5.1
22	9.4	12.8	20.1	26.0	26.9	31.2	39.2	36.7	23.3	24.3	9.6	7.2
23	2.9	10.1	13.2	24.4	23.0	32.4	38.1	36.1	26.7	24.1	9.2	9.4
24	4.0	15.3	12.9	20.6	23.4	33.4	34.8	35.1	33.2	24.8	11.8	10.6
25	1.2	10.3	15.3	20.0	26.1	27.0	27.2	38.0	34.4	24.9	13.1	10.4
26	1.0	7.0	17.5	21.0	20.4	30.4	27.2	39.0	28.6	24.0	14.4	6.8
27	4.1	5.4	16.1	22.3	20.8	34.6	28.9	39.2	29.8	22.0	13.8	3.1
28	7.5	5.8	11.5	25.4	19.8	27.2	25.8	38.5	27.6	23.7	11.5	4.1
29	7.6	—	10.7	19.0	22.4	31.2	28.3	38.9	23.2	27.1	10.9	2.8
30	9.4	—	12.6	25.1	25.4	31.9	31.8	24.2	24.2	27.4	9.8	5.5
31	11.1	—	16.5	—	27.7	—	32.9	23.7	—	28.5	—	6.6

注:“—”表示缺失该记录温度。

表 3 各种方法求得的界限温度 20 ℃ 的界限日期

深度 (cm)	界限日期					
	直方图法	偏差法	候平均法	三日连续偏低法	五日滑动法	高斯平滑法
0	4 月 20 日	4 月 12 日	4 月 12 日	4 月 9 日	4 月 9 日	4 月 12 日
5	4 月 23 日	4 月 13 日	4 月 13 日	4 月 28 日	4 月 13 日	4 月 13 日
10	4 月 22 日	4 月 13 日	4 月 13 日	4 月 13 日	4 月 13 日	4 月 13 日
15	4 月 23 日	4 月 13 日	4 月 13 日	4 月 13 日	4 月 13 日	4 月 13 日
20	4 月 28 日	4 月 16 日	4 月 16 日	4 月 14 日	4 月 14 日	4 月 14 日
40	4 月 28 日	4 月 16 日	4 月 16 日	4 月 16 日	4 月 16 日	4 月 17 日

到界限温度日期,对指导农业生产具有很重要的意义。本研究提出基于高斯坐标平滑的界限温度日期求算的新方法,通过试验验证,可以得出以下结论:(1)不管是从理论上还是试验验证,基于高斯坐标平滑的界限温度日期求算的新方法与目前常用的五日平均方法相比,偏差较小,同时分析发现,本研究提出的方法更合理,能更好地指导农业生产,具有一定的实用价值。(2)从表 3 中可以看出,直方图方法首先采用 1 年的时间序列温度数据计算界限温度日期,明显偏后。说明这种考虑较长时间序列的方法,对于求算界限温度日期不是很合理,同时对相关的时序分析,时间序列取值太长的话,对

计算结果也会产生影响。(3)通过在地表下 5cm 处的比较结果可以发现,在时间序列分析中,三日连续偏低方法由于所取时间序列(3 d)较短,抗波动干扰较弱,易出现大的波动。(4)从分析结果可以看出,在地表 0 cm 到地表以下 40 cm 这个区间,通过界限温度日期越来越晚,说明地下温度越来越低,这符合地温的正常变化。

参考文献:

[1] 欧阳海,郑步忠,王雪娥,等. 农业气候学[M]. 北京:气象出版社,1990.

郭中领,常春平,王仁德. 使用有限风速数据计算 RWEQ 模型的风因子[J]. 江苏农业科学,2015,43(1):350-353.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2015.01.115

# 使用有限风速数据计算 RWEQ 模型的风因子

郭中领<sup>1</sup>, 常春平<sup>1</sup>, 王仁德<sup>2</sup>

(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省级重点实验室, 河北石家庄 050024;

2. 河北省科学院地理科学研究所, 河北石家庄 050011)

**摘要:**修正的土壤风蚀方程(revised wind erosion equation, RWEQ)被广泛应用于土壤风蚀预报, 风因子是该模型的重要参数。RWEQ 将风蚀力定义为风因子(wind factor, Wf), RWEQ 最初要求使用逐小时风速数据计算 Wf。基于中国河北省康保县、拉伯克市两地长时间逐小时风速数据计算了月均、年均 Wf(Wf<sub>24</sub>), 并对比了由当地标准时间(local standard time, 简称 LT)1 日 4 风速(02:00、08:00、14:00、20:00)计算的 Wf(Wf<sub>4</sub>)。结果表明, 对于康保县, Wf<sub>24</sub> 与 Wf<sub>4</sub> 符合得很好(年均 Wf<sub>24</sub> 与 Wf<sub>4</sub> 误差为 -2.60%), 1 日 4 风速能够用于计算土壤风蚀量; 对于拉伯克市, Wf<sub>24</sub> 与 Wf<sub>4</sub> 之间的误差相对较大(年均 Wf<sub>24</sub> 与 Wf<sub>4</sub> 误差为 11.16%), 1 日 4 风速可用于评估不同农田管理措施的防风蚀效果; 1 日 4 风速的其他组合、1 日 3 风速以及 1 日 2 风速等风速组合类型亦可以用于 RWEQ 模型。可以看出, 站点风速的日变化特点是选取风速数据组合的重要影响因素。

**关键词:**土壤风蚀; 风蚀力; 风因子; 风速

**中图分类号:** S157.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2015)01-0350-04

我国是世界上遭受风蚀最为严重的国家之一, 对土壤风蚀进行定量预测预报是土壤风蚀研究的核心任务之一<sup>[1]</sup>。为了准确计算土壤风蚀量, 评价各种防风蚀措施, 学者们先后提出了不同形式的土壤风蚀预报模型, 比如区域尺度的 WEAM<sup>[2]</sup>、IWEMS<sup>[3]</sup>、AUSLEM<sup>[4]</sup>等, 以及田块尺度的 WEQ<sup>[5]</sup>、WEPS<sup>[6]</sup>等。其中, 修正的土壤风蚀方程(revised wind erosion equation, RWEQ)被广泛应用于土壤风蚀预报<sup>[7-10]</sup>, 该模型由美国农业部(USDA)农业研究服务(Agricultural Research Service)组织开发, 它是一个基于过程模拟的经验性模型。RWEQ 模型能够成功模拟田间管理措施、不

同作物轮作对风蚀量的影响<sup>[7]</sup>。风是 RWEQ 模拟风蚀的基本驱动力, 风蚀力一般被用来描述风吹扬地表细粒物质的潜力。自从 Bagnold 开创性提出“风沙流的强度与风速的立方成正比”以来, 许多学者先后提出大量不同形式的风蚀力表达式<sup>[11-12]</sup>。RWEQ 表达风蚀力的具体形式为:

$$W = (U_i - U_c)^2 U_i. \quad (1)$$

式中: W 为风力值, m<sup>3</sup>/s<sup>3</sup>; U<sub>i</sub> 为距离地面 2 m 处风速, m/s; U<sub>c</sub> 为距离地面 2 m 处的临界起沙风速, m/s。RWEQ 模型将 U<sub>c</sub> 设为定值 5.0 m/s, 当风速低于 5.0 m/s 时, 风力值为 0, 无风蚀发生。RWEQ 模型定义平均风力值为风因子(wind factor, Wf), 表达式为<sup>[6]</sup>:

$$Wf = \sum_{i=1}^N \rho \frac{(U_i - U_c)^2 U_i}{gN}. \quad (2)$$

式中: Wf 为风因子值, kg/(m·s); ρ 为空气密度, kg/m<sup>3</sup>; g 为重力加速度, m/s<sup>2</sup>; N 为观测时段内记录风速的次数。

高质量的风速数据是准确计算 Wf 的必要条件。RWEQ 模型要求逐小时风速数据为输入参数。然而, 自然界的风往往呈湍流状态, 变化十分迅速。因此, 风速观测中往往是记录并保存一些代表性时段的风速数据。保存风速数据的代表性

收稿日期: 2014-02-20

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 41330746); 国家自然科学基金青年基金(编号: 41301291、41101251); 河北省自然科学基金青年基金(编号: D2014205063、D2013302034); 河北省软科学重点项目(编号: 13454213D); 河北省科技计划(编号: 13109); 河北师范大学科研基金(编号: 130531)。

作者简介: 郭中领(1983—), 男, 河北巨鹿人, 博士, 讲师, 主要从事土壤风蚀、可持续农业研究。E-mail: gzldhr@163.com。

[2] 何永坤, 郭建平. 1961—2006 年东北地区农业气候资源变化特征[J]. 自然资源学报, 2011, 26(7): 1199-1208.

[3] Chavas D R, Izaurrealde R C, Thomson A M, et al. Long-term climate change impacts on agricultural productivity in eastern China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2009, 149(6/7): 1118-1128.

[4] Xiong W, Holman I, Lin E, et al. Climate change, water availability and future cereal production in China[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2010, 135(1/2): 58-69.

[5] 刘实, 王勇, 缪启龙, 等. 近 50 年东北地区热量资源变化特征[J]. 应用气象学报, 2010, 21(3): 266-278.

[6] 宋辞, 裴韬, 周成虎. 1960 年以来青藏高原气温变化研究进

展[J]. 地理科学进展, 2012, 31(11): 1503-1509.

[7] 王发科, 祁贵明, 郭晓宁, 等. 柴达木盆地南缘农业界限温度的气候变化特征[J]. 干旱气象, 2009, 27(3): 227-231.

[8] 张连强, 赵新平, 欧阳宗继, 等. 求算界限温度日期的一种新方法——样条函数插值法[J]. 地理学报, 1993, 48(1): 70-74.

[9] 杜军, 胡军. 索朗欧珠. 西藏高原农业界限温度的变化特征[J]. 地理学报, 2005, 60(2): 289-298.

[10] 郭瑞鸽, 刘寿东, 杜筱玲. 江西气温稳定通过 10℃初日变化及其对双季早稻物候期的影响[J]. 中国农业气象, 2011, 32(1): 12-16.

[11] 韦玉春, 陈锁忠. 地理建模原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2005.