

网络出版时间:2017-12-08 16:25

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2018.02.014

网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20171208.1623.028.html

气象因素影响下小麦蚜虫种群动态突变模型分析

张平平^a,冯露之^a,李媛^b,李祯^a,赵惠燕^b

(西北农林科技大学 a 理学院, b 植物保护学院, 陕西 杨凌 712100)

【摘要】【目的】根据小麦蚜虫种群动态变化和气候因素的关系,建立小麦蚜虫种群动态的突变模型,以期为蚜虫的防治提供参考。【方法】假设研究区域不变,小麦的品种、天敌状况、农民施肥、喷洒农药年际变化变化很小时,将气候因素加以细化,以温度、相对湿度和作物生长状况为控制变量,在广义 logistic 模型的基础上建立蚜虫种群动态变化的燕尾突变模型,并对该模型进行了检验。【结果】构建了受温度、相对湿度、作物生长状况 3 种因素作用的小麦蚜虫种群动态模型,并在此基础上构建了燕尾突变模型。利用燕尾突变模型预测了蚜虫种群动态在气候因素影响下突然爆发的可能情况:当蚜虫种群动态处于分歧点集中的 V 区,且控制变量有向 I、II、III、IV 4 个区域发生变化趋势时,蚜虫种群系统将会产生突变;蚜虫种群动态处于分歧点集的 II 区,且控制变量从 II 区变到 I、III、V 区时,系统的稳定性不会引起改变;当蚜虫种群动态处于分歧点集的 I、III、IV 区,且控制变量变化到 V 区时,系统的稳定性也不会产生改变。验证结果表明,燕尾突变模型可以预测蚜虫种群生长过程中的突变行为。【结论】构建的燕尾突变模型可以较好地预测小麦蚜虫种群动态的突然变化。

【关键词】小麦蚜虫;种群动态;燕尾突变模型;广义 logistic 模型;分歧点集

【中图分类号】Q968.1;S435.122⁺.2

【文献标志码】A

【文章编号】1671-9387(2018)02-0113-08

Catastrophe model for pest population dynamics under meteorological influence

ZHANG Pingping^a, FENG Luzhi^a, LI Yuan^b, LI Zhen^a, ZHAO Huiyan^b

(a College of Science, b College of Plant Protection, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objective】According to the relationship of aphid population dynamics and meteorological factors, a catastrophe model of population dynamics was established to provide reference for aphid control. 【Method】This article assumed that the study area was constant, while wheat varieties, natural conditions, and fertilization, and pesticides use basically remained unchanged. Then meteorological factors were detailed and temperature, humidity and growing conditions were used as control variables to establish the swallowtail catastrophe model of aphid population dynamics based on generalized logistic model. 【Result】This paper constructed a population dynamic model considering temperature, relative humidity and crop growth, and established a swallowtail catastrophe model. The model was then used to predicted sudden outbreak of aphid. When aphids population dynamics were in bifurcation V area and had the potential to change to I, II, III, and IV, aphids population system would produce mutation. When the control variables changed from II area to I, III, and V, the stability of the system would not change. When the control variables changed from I, III and IV to V, the stability of the system would not change either. The mutant model can predict the mutation behavior of aphid population during growth. 【Conclusion】The established swallowtail catas-

【收稿日期】2016-12-09

【基金项目】高校博士点基金项目“紫外线胁迫下麦长管蚜抗氧化酶分子生态及微进化研究”(20130204110004)

【作者简介】张平平(1991—),女,山东德州人,在读硕士,主要从事生物数学研究。E-mail:zhpingp@126.com

【通信作者】赵惠燕(1955—),女,河南西平人,教授,博士生导师,主要从事昆虫生态及害虫综合治理研究。

trophe model can predict the abrupt change of aphid population dynamics.

Key words: wheat aphids; population dynamic; swallowtail catastrophe model; generalized logistic equation; bifurcation set

小麦是世界上三大主要粮食作物之一, 对全国粮食生产安全与居民消费意义重大。在小麦的各个生长阶段, 常常面临各种虫害的发生, 影响小麦的品质及其产量, 造成严重损失。在各种因素的联合影响下, 有些害虫会突然间大爆发, 形成严重损害; 而有些害虫则受到控制变量的影响, 在将要爆发时没有爆发。用传统的数学方法无法解释这种不连续的变化, 而人们研究发现突变理论则可以解决这类问题。

1972 年, Thom 以拓扑学为基础创建突变理论, 用于直接处理事物的不连续变化。人们发现当控制变量少于或等于 4 个时, 有 7 种突变模型; 控制变量仅为 5 个时, 存在着 4 种突变模型; 当控制变量在 5 个以上时, 对应有无多种模型^[1]。突变理论产生后, 大量的研究人员利用其研究各自范畴的问题。在生态学中, 人们主要应用突变理论进行生态系统中各因素间互相作用及相应作用机理的探究。赵惠燕等^[2-5]以气候因素、天敌状况为控制变量, 构建了尖角突变模型, 研究出了蚜虫预防治理的关键期、虫害发展蔓延的趋向、防治强度以及对策; 魏雪莲等^[6]将气象因素、环境容纳量、天敌作为控制变量, 构建燕尾突变模型, 阐明了害虫种群突变出现的条件及其机理; 李祯等^[7]以气象因素、农药因素、天敌及作物生长状况作为控制变量, 建立了蝴蝶突变模型, 阐明了其蝴蝶突变指征。Piyaratne 等^[8]用突变理论, 对燕尾突变模型进行研究, 并结合实际数据进行了拟合。Wu 等^[9]在前人的基础上, 用突变理论改变了控制变量的作用位置, 并用最小平方样条逼近法对参数进行估计, 阐明了小麦蚜虫动态发生突然变化的原因。李媛^[10]对燕尾突变模型与蝴蝶突变模型进行对比发现, 前者描述的蚜虫种群动态突变规律比后者准确。以上模型大都利用温度代表气候因素来建模, 考虑的因子相对单一, 实际上气候因素含多种因子。本研究在前人的基础上, 主要考虑对蚜虫种群动态影响较大的两个重要气候因子——温度和相对湿度, 并以温度、相对湿度、作物生长状况为控制变量, 建立小麦蚜虫种群的燕尾突变模型, 然后对其进行分析, 以期对小麦蚜虫的防治提供参考。

1 材料与方法

本研究中涉及 2 个模型: 种群动态模型和燕尾

突变模型, 其中种群动态模型是在广义 logistic 模型基础上进行改进而成的, 考虑了温度和相对湿度对种群的影响, 并将该模型转化为燕尾突变模型。最后再借助燕尾突变模型的特性研究蚜虫种群动态的发展规律。

1.1 种群动态模型的建立

影响小麦蚜虫种群数量改变的因素有农药、环境容纳量、天敌、气象因子和蚜虫自身的特性等, 若利用折迭模型或者尖角模型进行分析, 那么能利用的控制因素仅有 1 个或 2 个, 而实际上蚜虫种群数目一般是由多重因子联合影响而不断变化的。若考虑多个控制因素来研究, 则很难保证选取的控制因素之间是相互独立的。IPCC 的第五次报告声称, 近 30 年来全球气候变化的标志是平均气温上升 0.85℃, 中国在近百年来上升 0.91℃^[11]。赵惠燕等^[12]研究表明, 陕西近 50 年平均气温上升 0.89℃。当研究的区域不变时, 地理环境、小麦品种、农民施肥措施的年际变化相对较小, 影响小麦蚜虫种群数量年际变化的主要因素是当地的气候和作物生长状况^[13]。小麦蚜虫的发生除自身生物学特性干扰外, 受气象因素的干扰较大^[14]。气候变化对害虫发生数量、发生世代有显著的影响^[15]。本研究区域位于陕西省中部地区, 是世界上气候影响最显著的地域之一^[16]。

研究种群动态变化规律时常借助 logistic 模型, 优势是其各个参数对应的生物学意义精确, 并且可以清楚地表示出种群增长率与密度之间的制约关系; 其缺点是当生物种群周围的环境或者种群自身的部分条件产生变化时, 内禀增长率及最大环境容纳量是不能改变的常数。然而很多学者研究发现, 表示蚜虫种群大小的两个极为重要的指标——环境最大容纳量与内禀增长率在环境因素干扰下并不是一成不变。因而产生了广义的 logistic 种群动态模型。

本研究考虑广义的 logistic 种群动态模型:

$$\frac{dN}{dt} = rN \frac{K - N}{K + c} \quad (1)$$

式中: N 表示害虫的种群密度; t 表示时间; K 表示害虫所取食的作物生长状况; r 为害虫的内禀增长率; c 代表常数, $c > -1$ 时表示广义的 logistic 种群

动态模型呈“S”型增长, $c=0$ 时表示广义的 logistic 种群动态模型即为传统的 logistic 模型。

本研究在此基础上考虑了温度和相对湿度的影响,建立的蚜虫种群动态模型为:

$$\frac{dN}{dt} = r(e)N(1 - \frac{N^2}{K + cN^2}) - hN^2. \quad (2)$$

式中: $r(e)$ 表示蚜虫在温度影响下的内禀增长率,其是一个与温度相关的函数; h 表示相对湿度。当 $c=0$ 时,模型可转化为尖点突变模型。

本研究考虑蚜虫种群密度伴随 t 的变化率等于0时的状态:

$$\frac{dN}{dt} = r(e)N(1 - \frac{N^2}{K + cN^2}) - hN^2 = 0,$$

化简整理得:

$$hcN^4 - r(e)(c-1)N^3 + hKN^2 - r(e)KN = 0. \quad (3)$$

1.2 燕尾突变模型的建立

将温度、相对湿度、作物生长状况(环境容纳量)作为控制变量,构建燕尾突变模型,并将该模型的平

$$\begin{cases} x = N + \frac{r(e)(1-c)}{4hc}, \\ u = \frac{5}{3} \left[\frac{K}{c} - 6 \left(\frac{r(e)(1-c)}{4hc} \right)^2 \right], \\ v = \frac{5}{2} \left[-\frac{r(e)K(1-c)}{2c} + 8 \left(\frac{r(e)(1-c)}{4hc} \right)^3 + \frac{-r(e)K}{hc} \right], \\ w = 5 \left[-\frac{r(e)K(1-c)}{4hc^2} - 3 \left(\frac{r(e)(1-c)}{4hc} \right)^4 + \frac{K}{c} \left(\frac{r(e)(1-c)}{4hc} \right)^2 \right]. \end{cases} \quad (7)$$

从式(7)中可以看出,燕尾突变模型中的控制变量 u, v, w 均受温度 e 、相对湿度 h 、作物生长状况(环境容纳量) K 的综合影响。因为种群数量 $N > 0$,所以 x 必须大于 $\frac{r(e)(c-1)}{4hc}$ 。

根据突变理论,上述表达式可如下表示,即燕尾模型^[17-18]标准形式的势函数为:

$$V(x; u, v, w) = x^5 + ux^3 + vx^2 + wx. \quad (8)$$

式中: x 为状态变量, u, v, w 为控制变量。

由 $V(x; u, v, w)$ 的一阶导数给出平衡曲面的方程 $M; V'(x; u, v, w) = 0$,即:

$$5x^4 + 3ux^2 + 2vx + w = 0. \quad (9)$$

M 为 V 的所有临界点组成,即燕尾突变模型的全体平衡点组成, M 为一个流形。燕尾突变模型的奇点集 S 是 M 的一个子集,包含 V 的全体退化临界点,由 $V(x; u, v, w)$ 二阶导数给出,即 $V''(x; u, v, w) = 0$,得:

$$20x^3 + 6ux + 2v = 0. \quad (10)$$

衡曲面方程拟合到已经建立的种群动态模型。

将种群动态方程经过变换拟合到燕尾突变模型中去,为简化形式,令:

$$a_1 = hc, a_2 = r(e)(1-c), a_3 = hK, a_4 = -r(e)K. \quad (4)$$

则将式(3)简化如下:

$$a_1 N^4 + a_2 N^3 + a_3 N^2 + a_4 N = 0. \quad (5)$$

建立拓扑变换如下:

$$\begin{cases} x = N + \frac{a_2}{4a_1}, \\ u = \frac{5}{3} \left[\frac{a_3}{a_1} - 6 \left(\frac{a_2}{4a_1} \right)^2 \right], \\ v = \frac{5}{2} \left[-\frac{a_2 a_3}{2a_1} + 8 \left(\frac{a_2}{4a_1} \right)^3 + \frac{a_4}{a_1} \right], \\ w = \left[-\frac{a_2 a_3}{4a_1^2} - 3 \left(\frac{a_2}{4a_1} \right)^4 + \frac{a_3}{a_1} \left(\frac{a_2}{4a_1} \right)^2 \right]. \end{cases} \quad (6)$$

其中: u, v, w 为燕尾突变中的控制变量, x 为燕尾突变模型中的状态变量。将式(4)带入式(6)中可以得到 x, u, v, w 的估计方程:

将 S 定义的方程和由 M 定义的方程联立,消掉全部状态变量 x ,即为分歧点集 B :

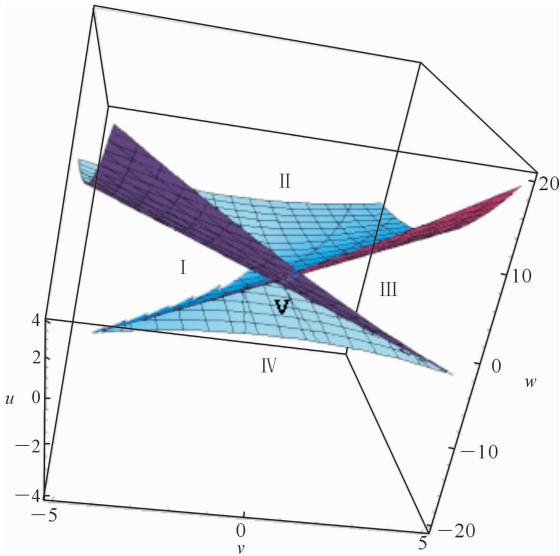
$$u(81u^3 + 540v^2)w - 360u^2w^2 + 400w^3 = v^2(27u^3 + 135v^2). \quad (11)$$

B 为控制空间中使 $V(x; u, v, w)$ 发生变化的全体点构成的集合,系统的突变特征借助临界点间的彼此转化进行分析。

2 结果与分析

2.1 种群动态模型的燕尾突变分析

在突变理论中,当控制变量 u, v, w 连续发生改变时,有可能引发状态变量骤然上升或下跌。燕尾突变分歧点集的分布区域如图1所示。图1中,分歧点集被划成I、II、III、IV、V 5个区域。分歧点集是控制空间里使得势函数产生突变的点,即临界点的集合。当控制变量穿过分歧区域时,则存在引起状态变量发生突变的可能性。



I—V 为分歧点集划分的 5 个区域。下同

I—V are the regions of the bifurcation set. The same below

图 1 燕尾突变的分歧点集

Fig. 1 Bifurcation set of the swallowtail catastrophe model

为更好地研讨燕尾突变模型的原理,可通过改变控制变量的值来研究状态变量的突变情况^[6,18]。本研究分析了当控制变量 u 为常数时,控制变量 v 、 w 为不同值时分歧点集的变化情况。

当 $u < 0$ 时, B 的截线可由方程组 $\begin{cases} v = -10x^3 - 3ux \\ w = 15x^4 + 3ux^2 \end{cases}$ 确定,具体结果如图 2-a 所示。由

图 2-a 可知, B 的截线在 $u < 0$ 时是关于控制变量 w 对称的,因此本研究只分析 $v = 0$ 时的情况即可。此时 B 的截线与 w 轴交于两点 $w = 0$ 和 $w = \frac{9u^2}{20}$,平衡曲面方程式 (9) 可化简为 $x^2 = 1/10 \times [-3u + \sqrt{(9u^2 - 20w)}]$ 。(1) 当 $w < 0$ 时, M 有 2 个互为不等的实根,1 个极大值点,相应地有 1 个不稳定的平衡点,1 个极小值点,有 1 个稳定的平衡点与其对应。(2) 当 $0 < w < \frac{9u^2}{20}$ 时,对应的 M 有 4 个互为不等的实根,其中有 2 个极大值点,有 2 个不稳定的平衡点与其对应;其余 2 个为极小值点,对应着 2 个稳定的平衡点。(3) 而当 $w > \frac{9u^2}{20}$ 时,对应的 M 没有实数根,即没有稳定的平衡点。

当 $u \geq 0$ 时, B 的截线如图 2-b 所示。由图 2-b 可知, B 的截线在 $u \geq 0$ 时也是相对于控制变量 w 对称的,因此本研究只分析 $v = 0$ 时的情况。此时 B 的截线与 w 轴交于点 $w = 0$ 。(1) 当 $w < 0$ 时, M 存在着 2 个互为不等实根,即势函数存在 2 个互为不等的奇点,1 个极大值点对应 1 个不稳定的平衡点,1 个为极小值点对应着 1 个稳定的平衡点。(2) 当 $w > 0$ 时, M 没有实数解,即势函数不存在稳定的平衡点。

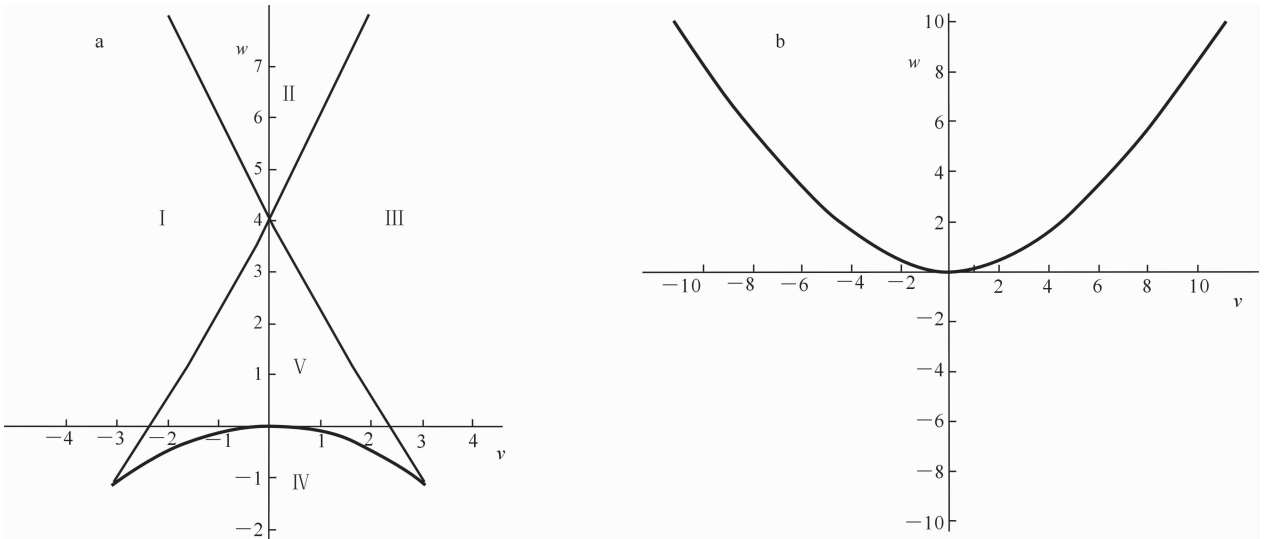


图 2 $u < 0$ (a) 和 $u \geq 0$ (b) 时 $v-w$ 平面上的分歧点集

Fig. 2 Bifurcation section in (v, w) -plane when $u < 0$ (a) and $u \geq 0$ (b)

2.2 小麦蚜虫种群动态模型的燕尾突变分析应用

在小麦蚜虫种群动态的应用过程中,可以由大田调查或通过试验得到的温度、相对湿度、作物生长

状况的数据模拟燕尾突变模型中 u 、 v 、 w 的值,来确定控制点在燕尾突变分歧区域里的位置,然后推断出蚜虫的变化趋向,从而采取一定的措施,来控制蚜

虫的种群密度,减少因蚜虫数量的暴增而带来惨痛的经济损失。在图 2-a 中,若蚜虫种群动态处于分歧点集中的 V 区,且控制变量有向 I、II、III、IV 4 个区域发生变化趋势时,由于平衡点的性质产生了改变,蚜虫种群系统将会产生突变。若此时蚜虫种群密度较低时,则应控制条件,使其继续处于区域 V;若此时蚜虫种群密度已经影响到小麦产量,则应控制变量向其他 4 个区域变化,从而达到控制害虫危害的目的。若蚜虫种群动态处于分歧点集的 II 区,且控制变量从 II 区变到 I、III、V 区时,系统的稳定性不会引起改变。若此时种群密度比较低时,则可以使控制变量仍然处在 II 区或者使控制变量向 I、III、V 区改变;如果此时的蚜虫种群密度已经影响到小麦产量,则应该将控制变量先向 V 区变化然后向 IV 区变化,致使其发生突变,达到降低小麦蚜虫种群密度的目的。若蚜虫种群动态处于分歧点集的 I、III、IV 区,且控制变量变化到 V 区时,系统的稳定性不会产生改变。若此时小麦种群密度比较低时,则可以使控制变量仍然处在 V 区;如果此时蚜虫种群密度已经影响到了小麦产量,则应该将控制变量先

向 V 区变化而后向 II 区变化,使种群动态发生突变,达到降低种群密度的目的。因为 u 、 v 、 w 都为复合变量,可以综合控制这些变量,达到降低蚜虫种群密度的目的。如可以通过人工降雨等措施,使相对湿度增大,从而引发蚜霉菌,这对蚜虫种群而言则是毁灭性的打击。

2.3 燕尾突变模型的验证

在控制变量穿过分歧区域时,临界点的性质可能会发生改变进而导致突变的产生,因而通过分析控制变量 u 、 v 、 w 值的不同情况,可以预测出蚜虫种群生长过程中的突变行为。采用 1987 年 3 月中旬到 5 月底西北农林科技大学昆虫生态实验室在陕西省中部收集的大田数据,每 5 d 调查 1 次,使用随机取样方法,调查的蚜虫种类包括禾谷缢管蚜、麦长管蚜和麦二叉蚜,这 3 种蚜虫总数量用种群动态模型中 N 表示,温度采用 5 d 的平均气温,相对湿度采用 5 d 的平均相对湿度,用软件模拟 u 、 v 、 w 。

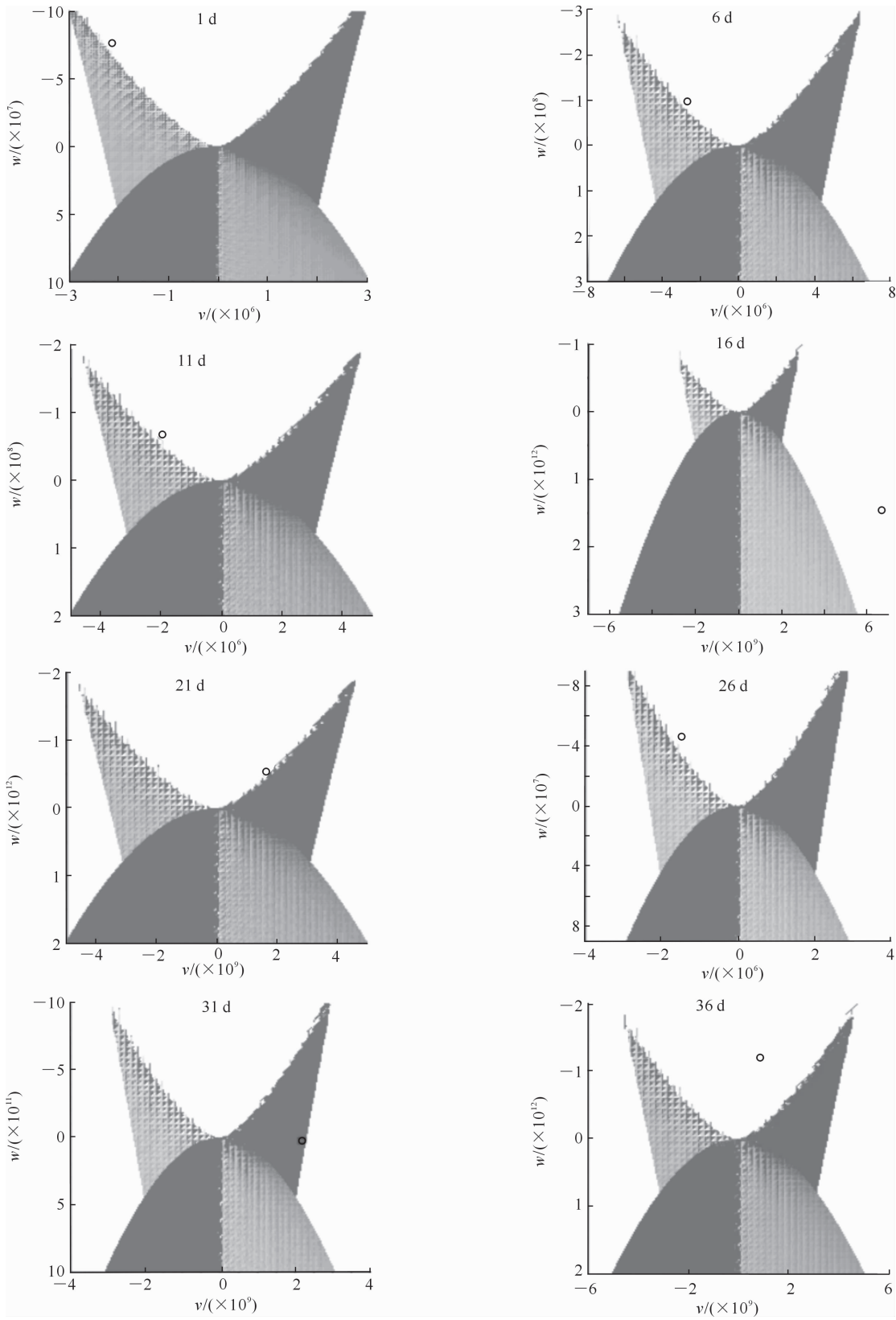
式(2)中的参数 $r(e)$ 可以通过文献[9]得到,参数 K 、 c 和 h 可利用软件 OpenLu 中的 Opt 函数进行参数拟合,结果见表 1。

表 1 小麦蚜虫种群燕尾突变模型的 u 、 v 、 w 值和突变区域

Table 1 u , v and w values for the butterfly catastrophe model and the catastrophe regions on aphid population dynamics							
调查时间/d Investigation time	相对湿度/% Mean relative humidity	平均气温/℃ Climate mean temperature	百株蚜虫量/头 Aphid population per 100 stems	u	v	w	突变区域 Region in the control space
1	80.0	4.70	7	-2.26×10^4	-2.14×10^6	-7.63×10^7	IV
6	77.6	8.30	4	-2.58×10^4	-2.62×10^6	-9.99×10^7	IV
11	77.4	3.50	13	-2.12×10^4	-1.95×10^6	-6.72×10^7	IV
16	72.5	8.07	3	-2.11×10^6	6.69×10^9	1.48×10^{12}	III
21	76.6	11.92	10	-2.68×10^6	1.85×10^9	-5.30×10^{11}	IV
26	72.6	15.14	39	-1.74×10^4	-1.46×10^6	-4.56×10^7	IV
31	76.2	96.80	353	-2.16×10^6	2.19×10^9	2.53×10^{10}	III
36	72.6	16.40	1 026	-3.12×10^6	9.10×10^8	-1.20×10^{12}	IV
41	73.2	16.66	3 962	-2.10×10^6	-1.21×10^9	-6.00×10^{11}	IV
46	76.8	15.76	3 424	-1.87×10^4	-1.62×10^6	-5.27×10^7	IV
51	67.0	14.16	28	-3.04×10^4	-3.35×10^6	-1.39×10^8	IV
56	71.6	17.54	400	-4.10×10^6	5.75×10^9	-1.47×10^{12}	III
61	81.8	18.44	248	-2.74×10^6	4.44×10^8	-1.00×10^{12}	IV
66	67.6	21.24	4 572	-3.10×10^4	-3.45×10^6	-1.44×10^8	IV
71	78.4	21.88	7 736	-3.70×10^6	3.40×10^9	-1.37×10^{12}	IV

将表 1 的结果绘制在图 1 中,可得到每个点所处的突变区域。表 1 中,由于所得的数据 u 都小于 0,因此本研究画出了 $u < 0$ 时每个点的控制变量在 $v-w$ 面上投影的状态,结果如图 3 和图 4 所示。图 3 和图 4 中,各圆点的位置并不代表每个时段的蚜量,而只是每个数据点相对于分歧点集的位置状态。在第 16~21 天和第 31~36 天,控制变量由 III 区穿越 V 区后变到 IV 区,由于平衡点性质的改变,导致蚜虫种

群密度发生突变;在第 51~56 天,控制变量由 IV 区穿越 V 区最后变到 III 区,蚜虫种群密度也发生突变。这可能是由于在作物生长的不同阶段蚜虫能得到的营养状况不同所致。表明在研究区域不变时,当地理环境、小麦品种、农民施肥措施年际变化相对较小,小麦蚜虫种群密度在当地气候变化和农作物生长状况的连续变化下有可能发生剧烈的改变。



图中所示的圆点表示控制变量的投影。下图同

Dot represents the projection of the control variable. The same below

图 3 1~36 d $u \leq 0$ 时每个点的控制变量在 $v-w$ 面上投影的状态

Fig. 3 Control variables projection of points in (v, w) plane when $u \leq 0$ during 1-36 d

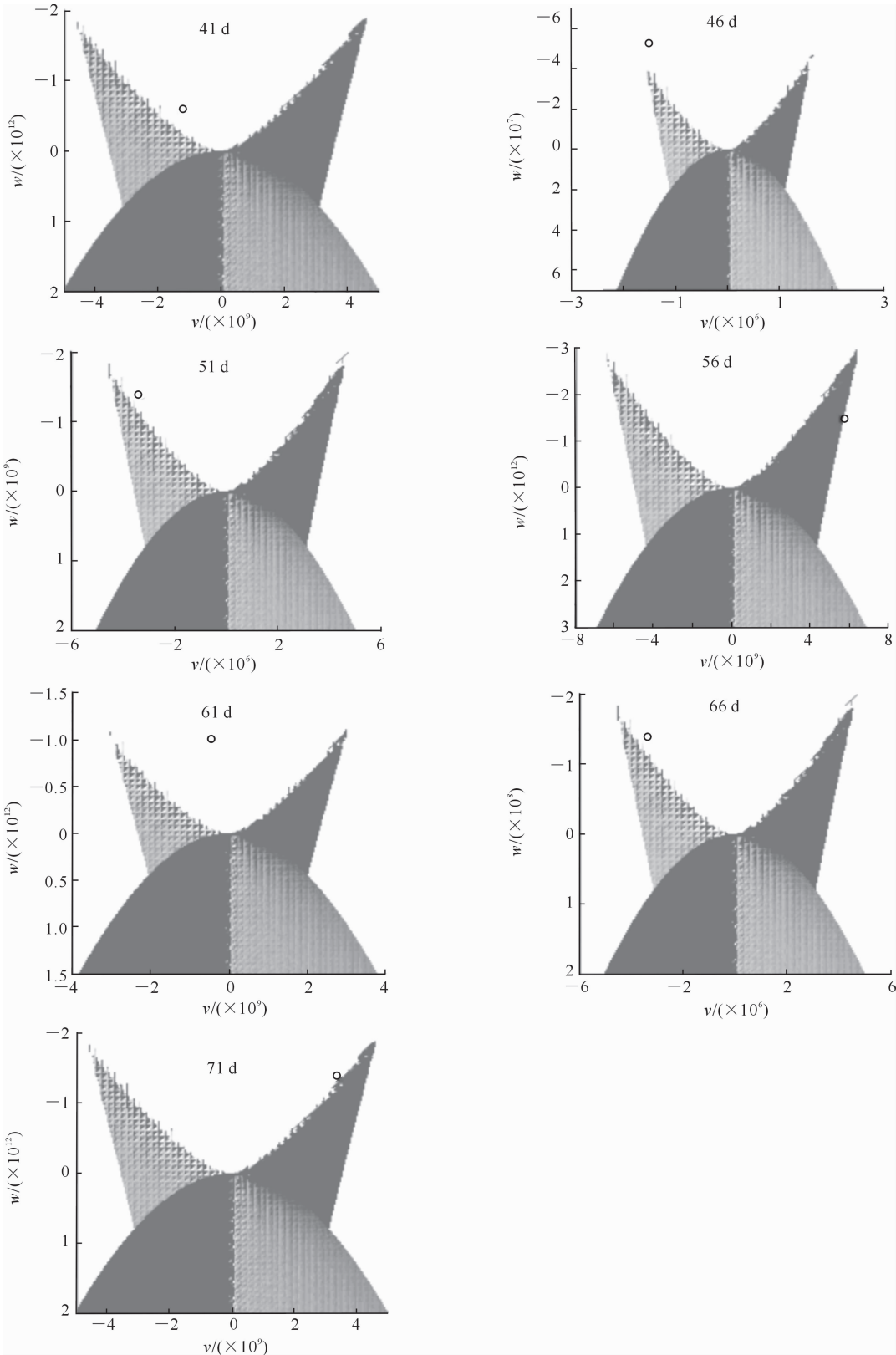


图 4 41~71 d $u < 0$ 时每个点的控制变量在 $v-w$ 面上投影的状态

Fig. 4 Control variables projection of points in (v, w) plane when $u < 0$ during 41–71 d

3 结论与讨论

在以往的采用突变理论探讨蚜虫种群动态变化

的研究中,选取控制变量时,大多仅考虑温度代表气象因素,然而气象因素包含的因子实际上是非常繁杂的。本研究根据前人的经验,假设当研究区域不

变,且小麦品种、天敌状况、农民施肥、喷洒农药年际变化相对较小,考虑气象因素的影响时,不再单一地考虑温度的影响,而尝试引入另一个影响较大的因素,即相对湿度对蚜虫种群动态的影响,以温度、相对湿度、作物生长状况为控制变量,建立蚜虫种群动态的燕尾突变模型,并通过研究平衡点的稳定性变化,对该模型进行了检验。结果发现,当研究区域不变时,在自然条件下,蚜虫种群动态会发生突然改变。本研究结果为进一步建立递级突变模型提供了依据与方法,究竟还有哪些气象因素会对蚜虫种群产生较大影响,这还需进一步进行探究。

此外,本研究建立的燕尾突变模型参数较多,确定控制变量时也有较多的参数会对其产生影响,本研究侧重分析了气候因素对蚜虫种群动态的影响,而喷药作为一个影响蚜虫种群动态人为因素,当其作为一个控制变量突然加入时也会引起蚜虫数量的突然变化,究竟何时喷药能达到最好的效果,以及燕尾突变模型具体的应用与参数估计需要进一步的研究。

[参考文献]

[1] Zeeman E C. Catastrophe theory [J]. Scientific American, 1976, 234(4): 65-83.

[2] 赵惠燕,汪世泽,董应才. 应用突变论研究麦蚜生态系统的防治策略[J]. 科学通报, 1989, 34(22): 1745-1748.

Zhao H Y, Wang S Z, Dong Y C. Catastrophe analysis of strategy of wheat aphids control [J]. Chinese Science Bulletin, 1989, 34(22): 1745-1748.

[3] 赵惠燕. 麦蚜防治决策过程中的尖角突变模型突变区域及防治指标的研究初报[J]. 系统工程, 1991, 9(6): 30-35.

Zhao H Y. Study on the cusp catastrophe model, sudden change region and controlling target during strategy of wheat aphids control [J]. Systems Engineering, 1991, 9(6): 30-35.

[4] 赵惠燕. 利用尖角突变模型确定病虫害发生的趋势及防治对策的研究[J]. 陕西气象, 1992(3): 28-30.

Zhao H Y. The occurrence of pest and disease on sharp point mutation model is used to determine the trend and counter-measures research [J]. Journal of Shaanxi Meteorology, 1992(3): 28-30.

[5] 赵惠燕,汪世泽,岳妙云. 棉花苗蚜尖角突变模型及其分析[J]. 生态学杂志, 1993, 12(1): 62-66.

Zhao H Y, Wang S Z, Yue M Y. Cusp mutation model of cotton seedling aphids and its analysis [J]. Journal of Ecology, 1993, 12(1): 62-66.

[6] 魏雪莲,赵惠燕,刘光祖,等. 害虫种群动态模型的燕尾突变分析[J]. 生态学报, 2009, 29(10): 5478-5484.

Wei X L, Zhao H Y, Liu G Z, et al. Analysis of pest population dynamic model using swallowtail catastrophe theory [J]. Acta Ecological Sinica, 2009, 29(10): 5478-5484.

[7] 李 楨,赵惠燕,刘光祖,等. 害虫种群动态的蝴蝶突变模型与

分析 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2012, 40(9): 103-108.

Li Z, Zhao H Y, Liu G Z, et al. Population dynamics of insect pests of butterfly catastrophe model and analysis [J]. Journal of Northwest A&F University (Nat Sci Ed), 2012, 40(9): 103-108.

[8] Piyaratne M K D K, Zhao H Y. APHIDSim: a population dynamics model for wheat aphids based on swallowtail catastrophe theory [J]. Ecological Modeling, 2013, 253: 9-16.

[9] Wu W Q, Piyaratne M K D K, Zhao H Y, et al. Butterfly catastrophe model for wheat aphid population dynamics: construction, analysis and application [J]. Ecological Modeling, 2014(288): 55-61.

[10] 李 媛. 基于突变理论的麦蚜生态系统模型的定性分析 [D]. 辽宁鞍山: 辽宁科技大学, 2015.

Li Y. A thesis submitted to university of science and technology Liaoning. [D]. Anshan, Liaoning: University of Science and Technology Liaoning, 2015.

[11] IPCC. Climate change 2013: the physical science basis [M/OL]// IPCC. Climate change 2013: the physical science basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2013-09-30[2013-11-20]. http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_SPM_FINAL.pdf.

[12] 赵惠燕,胡祖庆,胡想顺,等. 陕西农村适应气候变化状况及脆弱性评估与分析 [J]. 气候变化快报, 2015(4): 160-170.

Zhao H Y, Hu Z Q, Hu X S, et al. Investigation and analysis about the adaptation on climate changes in rural area [J]. Climate Change Research Letters, 2015(4): 160-170.

[13] 张俊香,延军平. 陕西省农作物病虫害与气候变化的关系分析 [J]. 灾害学, 2001, 16(2): 27-30.

Zhang J X, Yan J P. The analysis on the relation of crop diseases and insect pests with climate change in Shaanxi Province [J]. Journal of Catastrophology, 2001, 16(2): 27-30.

[14] Mattson W J, Haack R A. The role of drought in outbreaks of plant-eating insects [J]. Bio Science, 1987, 37(2): 110-118.

[15] 戈 峰. 应对全球气候变化的昆虫学研究 [J]. 应用昆虫学报, 2011, 48(5): 1117-1122.

Ge F. Challenges facing entomologists in a changing global climate [J]. Chinese Journal of Applied Entomology, 2011, 48(5): 1117-1122.

[16] Luo K, Hu Z Q, Hu X S, et al. The studies and practice of mitigation and adaptation on the climate change to the development in poverty rural areas in Shaanxi [J]. Climate Change Research Letters, 2016, 5(2): 116-125.

[17] 凌复华. 突变理论及其应用 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1987: 83-95.

Ling F H. The theory and application of catastrophe theory [M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 1987: 83-95.

[18] 姜 璐,于连宇. 初等突变理论在社会科学中的应用 [J]. 系统工程理论与实践, 2002, 22(10): 113-117.

Jiang L, Yu L Y. The application of primary catastrophe theory to social science [J]. Systems Engineering-Theory&Practice, 2002, 22(10): 113-117.