

马尾松毛虫幼虫发生量的方差分析 周期外推预报——一代幼虫发生量 和高峰期发生量预报*

程 娴^{1**} 张书平^{1,2} 余 燕^{1,2} 毕守东^{1***} 周夏芝²
邹运鼎² 张国庆³ 张 桢³ 方国飞⁴ 宋玉双⁴

(1. 安徽农业大学理学院, 合肥 230036; 2. 安徽农业大学林学与园林学院, 合肥 230036;
3. 安徽省潜山县林业局, 潜山 246300; 4. 国家林业局森林病虫害防治总站, 沈阳 110034)

摘 要 【目的】 为了提高马尾松毛虫 *Dendrolimus punctatus* Walker 发生量预报结果的准确性, 以期为提高防治效果提供科学依据。【方法】 采用方差分析周期外推预报法研究安徽省潜山县 1991-2016 年 25 年的马尾松毛虫一代幼虫发生量和一代幼虫高峰期发生量, 并对预报结果进行验证。【结果】 一代幼虫发生量的预报值与实况值相比, 历史符合率达 96%, 只有 2008 年预报值与实况值差 1 级。一代幼虫高峰期发生量的预报值与实况值相比, 25 年中完全相同的有 22 年, 历史符合率达 88%。预报结果不同的是 1996 年、2005 年和 2016 年, 预测值与实况值均相差 1 级。【结论】 方差分析周期外推预报法对马尾松毛虫发生量的预报是一种较理想的预报方法。

关键词 马尾松毛虫; 一代幼虫发生量; 一代幼虫高峰期发生量; 方差分析周期外推预报

Analysis of variance superimposed on periodic extrapolation of the occurrence of *Dendrolimus punctatus* larvae

CHENG Xian^{1**} ZHANG Shu-Ping^{1,2} YU Yan^{1,2} BI Shou-Dong^{1***}
ZHOU Xia-Zhi² ZOU Yun-Ding² ZHANG Guo-Qin³
ZHANG Zhen³ FANG Guo-Fei⁴ SONG Yu-Shuang⁴

(1. School of Science, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; 2. School of Forestry and Landscape Architecture, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; 3. Forestry Bureau of Qianshan County, Anhui Province, Qianshan 246300, China;
4. General Station of Forest Disease and Insect Pest Control of State Forestry Administration, Shenyang 110034, China)

Abstract [Objectives] To improve the accuracy of forecasting the occurrence of *Dendrolimus punctatus* Walker and provide a scientific basis for the prevention and control of this pest. [Methods] The occurrence, and peak occurrence, of first generation larvae in Qianshan County Anhui Province during the 25 years from 1991 to 2016 were studied using analysis of variance, superimposed on periodic extrapolation to verify the predictions. [Results] Comparison of the predicted occurrence of first generation larvae with the actual values indicates that the historical coincidence rate was 96% and the difference between forecasted and actual values in 2008 was only 1 unit. Compared to the actual values, the predicted peak of first generation occurrence was exactly the same in 22 years of the 25 years; a historical coincidence rate of 88%. In 1996, 2005 and 2016, the difference between predicted and actual values were just 1 unit. [Conclusion] Variance analysis superimposed on periodic extrapolation methods is an ideal way to predict the occurrence of *D. punctatus*.

*资助项目 Supported projects: 国家自然科学基金项目 (30871444); 国家林业公益性创业科研专项 (201404410); 安徽省高校自然科学研究项目 (KJ2019A0215)

**第一作者 First author, E-mail: chengxian@ahau.edu.cn

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: bishoudong@163.com

收稿日期 Received: 2018-07-31; 接受日期 Accepted: 2019-05-07

Key words *Dendrolimus punctatus*; first generation larvae occurrence; first generation larval peak occurrence; variance analysis superimposed by periodic extrapolation method

马尾松毛虫 *Dendrolimus punctatus* Walker 分布于安徽、河南、四川、贵州、陕西、云南、江西、江苏、湖南、浙江、福建、广东、海南、广西和台湾等省, 主要危害马尾松 *Pinus massoniana* Lamb, 还危害黑松 *Pinus thunbergii* Parl、火炬松 *Pinus taeda* Linn、湿地松 *Pinus elliotii* Engelm、晚松 *Pinus rigida* var. *serotina* (Michx.) Loud ex Hoopes、海南松 *Pinus fenzeliana* Hand-Mazz 等松属植物。20 世纪中叶是我国发生最广、危害面积最大, 经常猖獗成灾的森林害虫。该虫不但影响林业生产, 还危害人身健康 (候陶谦, 1987; 邹运鼎等 1990; 萧刚柔, 1992; 张真和李典谟, 2008)。进入 21 世纪森林管理上采用了封山育林、混交、间作等措施优化了森林生态系统, 增加了物种多样性以及科学地运用综合治理措施, 使马尾松毛虫的危害得到有效控制, 但该虫具有巨大的繁殖潜能, 遇到有利条件极易爆发成灾, 对其的监测丝毫不能放松。

马尾松毛虫一年发生 2-4 代, 发生世代的多少随不同地方而异。马尾松毛虫发生的预测预报是对其进行综合防治的基本工作, 森林保护工作者 (张爱兵等, 2001; Park *et al.*, 2003; 贾春生, 2006; Zhang *et al.*, 2008; 陈绘画等, 2011; 田万银和徐华潮, 2012; 费海泽等, 2014; 许章华等, 2014; 王庆等, 2016; 余燕等, 2017; 周夏芝等, 2017) 分别采用不同的预测方法预测马尾松毛虫的发生量、虫害等级以及发生类别、发生空间格局, 为马尾松毛虫的综合防治工作提供了有力支持。由于各地气象条件、植被条件和地形地貌的差异, 马尾松毛虫的发生特点也不完全相同。对安徽省潜山县马尾松毛虫各世代幼虫高峰期发生量和世代幼虫发生量的预报, 余燕等 (2017) 和周夏芝等 (2017) 用平稳时间序列预测法, 回归预测法、BP 神经网络法、马尔科夫链法和列联表多因子多级综合相关预报法取得

了较好的结果, 本研究采用方差分析周期外推预报法研究马尾松毛虫一代幼虫发生量和一代幼虫高峰期发生量, 以期马尾松毛虫的综合治理提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 材料来源

马尾松毛虫资料来自国家林业局的森林病虫害中心测报点——安徽省潜山县森林病虫害防治站, 资料的时间跨度为 1991-2016 年, 其中 1998 年缺如。根据国家林业局森林病虫害防治总站制定的调查方法进行调查, 即采用踏查和详查相结合的方法 (国家林业局森林病虫害防治总站, 2013), 对不同虫态采取不同的观测方法。沿林斑线、林道、公路、铁路等线路调查, 目测发生范围、危害状况, 发现虫情或灾情立即设临时标准地, 采取平行线抽样法抽取 20 株标准株详查。卵期调查是在雌蛾羽化高峰后 1-2 d 调查平均卵块数, 卵块平均粒数; 幼虫期调查, 1-2 龄幼虫调查枯黄卷曲的枝数, 推算幼虫数, 3 龄以上的幼虫 3 m 以下的小树直接调查合计树冠上的幼虫数, 大树用“虫粪粒推算法”调查, 幼虫越冬期间调查树干基部树皮缝中的幼虫数推算全部虫口。蛹期调查, 在结茧盛期后 2-5 d 剖茧, 调查雌雄性比、平均雌蛹重、死亡率、寄生率; 成虫期调查在成虫羽化前 2-3 d 及羽化期用黑光灯诱集, 统计其诱集量和雌雄性比。

1.2 方差分析周期外推预测法

如果对某种害虫的发生量进行等时距观测, 就得到一系列观测值 $y_1, y_2, y_3, \dots, y_n$, 即时间序列。如果该序列存在着周期长度为 T 的周期振荡, 那么当把时间序列按照 T 个数据一行依次排列时, 得到 $m = \left\lfloor \frac{n}{T} \right\rfloor + 1$ 行数据, 其中最后一行可以不足 T 个数据。

$y_{1\setminus}$	$y_{2\setminus}$	$y_{3\setminus}$	\dots	y_T
$y_{T+1\setminus}$	$y_{T+2\setminus}$	$y_{T+3\setminus}$	\dots	y_{2T}
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
$y_{KT+1\setminus}$	$y_{KT+2\setminus}$	$y_{KT+3\setminus}$	\dots	$y_{(K+1)T}$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
$y_{(m-1)T+1\setminus}$	$y_{(m-1)T+2\setminus}$	\dots	y_n	

因为每一列的数值都是在周期振荡的同一位相观测到的，每列数值内即组内（如 $y_{1\setminus}$ 、 $y_{T+1\setminus}$ 、 \dots 、 $y_{KT+1\setminus}$ ）差异不大，而各列平均值之间即组间的差异则较大，即各列间的差异较各列内的大。即组间均方差大于组内均方差。反之，如果序列的周期长度为 T ，在排列观测值时不是按 T 个数值一行，而是按 t ($t < T$) 个数值一行，得到 t 列数值，由于这 t 列数值中每一列都是由不同位相观测值组成的，所以，各列平均值间就不会有显著差异，利用以上原理，如果当我们不知道序列中是否存在周期振荡时，就可以取不同的 t 值（试测周期， t 的最大值应取小于或等于 $n/2$ ， n 为样本数），将序列排列起来，用方差分析检验各列平均值之间是否存在显著差异，如果检测结果表明 t 取某些数值时，各列平均值间差异显著，则该序列为周期振荡序列，其周期长度为 t 。

在实际时序中常包括若干个周期，通常取平均值差异最显著的（即 F 值最大的）试测周期作为第一周期，各列平均值作为第一周期分量。然后从原序列中减去第一周期分量，则得到第一周期余序列，对第一周期余序列继续进行方差分析，确定其中各列平均值差异最显著的周期为第 2 周期，相应各列平均值为第 2 周期分量。第一周期余序列减去第 2 周期分量，得到第 2 周期余序列，如此反复，重复试测周期，进行分析直到余序列没有显著周期时为止。预报时将各周期分量叠加，然后外延即可求出未来时段的预报值。

2 结果与分析

2.1 一代幼虫高峰期发生量预报

为了便于计算，将潜山县 1991-2016 年一代马尾松毛虫高峰期的发生量进行分级，按照分级标准将其列于表 1，进行试测周期，选择 $t=3$ 时，

$F=0.3367$ ； $t=4$ 时， $F=1.3317$ ； $t=5$ 时， $F=0.3364$ ； $t=6$ 时， $F=1.2082$ ； $t=7$ 时， $F=2.8397$ ； $t=8$ 时， $F=2.3730$ ； $t=9$ 时， $F=0.2464$ ； $t=10$ 时， $F=1.4869$ ； $t=11$ 时， $F=0.8022$ ； $t=12$ 时， $F=1.0488$ 。

可看出只有 $t=7$ ， $F > F_{0.05}(6,18) = 2.66$ ，由此可知一代幼虫高峰期发生量在 t 为 7 时，该序列为周期振荡序列， $t=7$ 的周期分量是将表 1 中原序列 1、2、2、6、5、6、 \dots 、2 按照 7 个数据一行依次排成 4 行 7 列，其中第 4 行只有 4 个数，并求每列的平均数。该平均数即是 $t=7$ 的第一周期分量。 $t=7$ 的第一周期分量为 2.00、2.50、2.50、3.75、5.33、4.33 和 3.00。从表 1 中原序列减去第一周期分量，得到第一周期余序列，列于表 1，对余序列继续进行方差分析。 $t=3$ 时， $F=0.6559$ ； $t=4$ 时， $F=3.0940$ ； $t=5$ 时， $F=0.6921$ ； $t=6$ 时， $F=2.4970$ ； $t=8$ 时， $F=2.2564$ ； $t=9$ 时， $F=0.3089$ ； $t=10$ 时， $F=1.8590$ ； $t=11$ 时， $F=1.5185$ ； $t=12$ 时， $F=2.8493$ 。可看出 $t=4$ 时 $F > F_{0.05}(3,21) = 3.07$ 和 $t=12$ 时 $F > F_{0.05}(11,13) = 2.59$ ，具有周期振荡，但 $t=4$ 的 F 值较大，将 $t=4$ 的第 2 周期分量及第一周期余序列及两者相减得到的第 2 周期余序列列于表 1，进行不同周期的试测分析，结果是 $t=3$ 时， $F=0.6723$ 。

$t=5$ 时， $F=0.6907$ ； $t=6$ 时， $F=0.8466$ ； $t=8$ 时， $F=2.0402$ ； $t=9$ 时， $F=0.5777$ ； $t=10$ 时， $F=0.9601$ ； $t=11$ 时， $F=5.1228$ ； $t=12$ 时， $F=1.6243$ 。 $t=11$ 时， $F > F_{0.01}(10,14) = 3.94$ 选择 $t=11$ 继续分析，将第 2 周期余序列和 $t=11$ 时的第 3 周期分量及第 3 周期余序列也列于表 1。

$t=3$ 时， $F=1.4353$ ； $t=5$ 时， $F=2.9118$ ； $t=6$ 时， $F=0.7862$ ； $t=8$ 时， $F=0.4221$ ； $t=9$ 时， $F=0.6649$ ； $t=10$ 时， $F=2.4396$ ； $t=12$ 时， $F=1.4713$ 。只有 $t=5$ 时， $F > F_{0.05}(4,20) = 2.87$ ，继续对周期为 5 的余序列进行周期试测，将第 3 周期余序列和 $t=5$ 的第 4 周期分量及余序列列于表 2，继续进行周期试测。

$t=3$ 时， $F=4.0026$ ； $t=6$ 时， $F=1.7467$ ； $t=8$ 时， $F=0.3801$ ； $t=9$ 时， $F=1.7069$ ； $t=10$ 时， $F=0.2208$ ； $t=12$ 时， $F=0.7893$ 。只有 $t=3$ 时，

表 1 原序列、 $t=7$ 时的第一周期分量及第一周期余序列、 $t=4$ 时的第 2 周期分量及第 2 周期余序列、 $t=11$ 时的第 3 周期分量及第 3 周期余序列

Table 1 The original sequence, the first periodic component and the first periodic residual sequence of $t=7$, the second periodic component and the second periodic residual sequence of $t=4$, the third periodic component and the third periodic residual sequence of $t=11$

年份 Year	发生量 Occurrence quantity	原序列 (级数) Original sequence (series)	第一周期 分量 First periodic component	第一周期 余序列 First periodic component sequence	第 2 周期 分量 Second periodic component	第 2 周期 余序列 Second periodic remainder sequence	第 3 周期 分量 Third periodic component	第 3 周期 余序列 Third periodic remainder sequence
1991	1.92	1	2.00	- 1.00	- 0.772 9	- 0.227 1	- 0.158 5	- 0.068 6
1992	2.35	2	2.50	- 0.50	0.486 7	- 0.986 7	- 1.269 6	0.282 9
1993	2.10	2	2.50	- 0.50	- 0.346 7	- 0.153 3	0.191 5	- 0.344 8
1994	11.77	6	3.75	2.25	0.765 0	1.485 0	1.415 9	0.069 1
1995	5.66	5	5.33	- 0.33	- 0.772 9	0.442 9	0.589 0	- 0.146 1
1996	13.07	6	4.33	1.67	0.486 7	1.183 3	1.728 1	- 0.544 8
1997	2.17	2	3.00	- 1.00	- 0.346 7	- 0.653 3	- 0.445 0	- 0.208 3
1999	2.02	2	2.00	0.00	0.765 0	- 0.765 0	- 0.374 2	- 0.390 8
2000	2.43	2	2.50	- 0.50	- 0.772 9	0.272 9	0.089 0	0.183 9
2001	2.11	2	2.50	- 0.50	0.486 7	- 0.986 7	- 0.606 9	- 0.379 8
2002	3.11	3	3.75	- 0.75	- 0.346 7	- 0.403 3	- 0.445 0	0.041 7
2003	6.53	6	5.33	0.67	0.765 0	- 0.095 0	- 0.158 5	0.063 5
2004	2.63	2	4.33	- 2.33	- 0.772 9	- 1.557 1	- 1.269 6	- 0.287 5
2005	5.25	5	3.00	2.00	0.486 7	1.513 3	0.191 5	1.321 8
2006	3.47	3	2.00	1.00	- 0.346 7	1.346 7	1.415 9	- 0.069 2
2007	4.13	4	2.50	1.50	0.765 0	0.735 0	0.589 0	0.146 0
2008	4.19	4	2.50	1.50	- 0.772 9	2.272 9	1.728 1	0.544 8
2009	4.56	4	3.75	0.25	0.486 7	- 0.236 7	- 0.445 0	0.208 3
2010	5.52	5	5.33	- 0.33	- 0.346 7	0.016 7	- 0.374 2	0.390 9
2011	5.15	5	4.33	0.67	0.765 0	- 0.095 0	0.089 0	- 0.184 0
2012	2.35	2	3.00	- 1.00	- 0.772 9	- 0.227 1	- 0.606 9	0.379 8
2013	2.30	2	2.00	0.00	0.486 7	- 0.486 7	- 0.445 0	- 0.041 7
2014	2.16	2	2.50	- 0.50	- 0.346 7	- 0.153 3	- 0.158 5	0.003 0
2015	2.12	2	2.50	- 0.50	0.765 0	- 1.265 0	- 1.269 6	0.004 6
2016	2.25	2	3.75	- 1.75	- 0.772 9	- 0.977 1	0.191 5	- 1.168 6

分级标准：1 级：1-2 头/株；2 级：2.1-3 头/株；3 级：3.1-4 头/株；4 级：4.1-5 头/株；5 级：5.1-6 头/株；6 级：>6.1 头/株。

Classification standards: Level 1: 1-2 head/plant; Level 2: 2.1-3 head/plant; Level 3: 3.1-4 head/plant; Level 4: 4.1-5 head/plant; Level 5: 5.1-6 head/plant; Level 6: >6.1 head/plant.

表 2 第 3 周期余序列、 $t=5$ 时的第 4 周期分量及第 4 周期余序列、 $t=3$ 时的第 5 周期分量及第 5 周期余序列
 Table 2 The third periodic residual sequence, the fourth periodic component and the fourth periodic residual sequence of $t=5$, the fifth periodic component and the fifth periodic residual sequence of $t=3$

年份 Year	第 3 周期余序列 Third periodic residual sequence	第 4 周期分量 Fourth periodic component	第 4 周期余序列 Fourth periodic residual sequence	第 5 周期分量 Fifth periodic component	第 5 周期余序列 Fifth periodic residual sequence
1991	- 0.068 6	- 0.009 2	- 0.059 4	- 0.181 5	0.122 1
1992	0.282 9	0.128 2	0.154 7	0.242 0	- 0.087 3
1993	- 0.344 8	- 0.162 4	- 0.182 4	- 0.037 8	- 0.144 6
1994	0.069 1	0.394 1	- 0.325 0	- 0.181 5	- 0.143 5
1995	- 0.146 1	- 0.389 5	0.243 4	0.242 0	0.001 4
1996	- 0.544 8	- 0.009 2	- 0.535 6	- 0.037 8	- 0.497 8
1997	- 0.208 3	0.128 2	- 0.336 5	- 0.181 5	- 0.155 0
1999	- 0.390 8	- 0.162 4	- 0.228 4	0.242 0	- 0.470 4
2000	0.183 9	0.394 1	- 0.210 2	- 0.037 8	- 0.172 4
2001	- 0.379 8	- 0.389 5	0.009 7	- 0.181 5	0.191 2
2002	0.041 7	- 0.009 2	0.050 9	0.242 0	- 0.191 1
2003	0.063 5	0.128 2	- 0.064 7	- 0.037 8	- 0.026 9
2004	- 0.287 5	- 0.162 4	- 0.125 1	- 0.181 5	0.056 4
2005	1.321 8	0.394 1	0.927 7	0.242 0	0.685 7
2006	- 0.069 2	- 0.389 5	0.320 3	- 0.037 8	0.358 1
2007	0.146 0	- 0.009 2	0.155 2	- 0.181 5	0.336 7
2008	0.544 8	0.128 2	0.416 6	0.242 0	0.174 6
2009	0.208 3	- 0.162 4	0.370 7	- 0.037 8	0.408 5
2010	0.390 9	0.394 1	- 0.003 2	- 0.181 5	0.178 3
2011	- 0.184 0	- 0.389 5	0.205 5	0.242 0	- 0.036 5
2012	0.379 8	- 0.009 2	0.389 0	- 0.037 8	0.426 8
2013	- 0.041 7	0.128 2	- 0.169 9	- 0.181 5	0.011 6
2014	0.003 0	- 0.162 4	0.165 4	0.242 0	- 0.076 6
2015	0.004 6	0.394 1	- 0.389 5	- 0.037 8	- 0.351 7
2016	- 1.168 6	- 0.389 5	- 0.779 1	- 0.181 5	- 0.597 6

$F > F_{0.05}(2,22) = 3.44$ ，将 $t=3$ 的第 5 周期分量、余序列和第 4 周期余序列也列于表 2，对 $t=3$ 的第 5 周期余序列继续进行周期试测。

$t=6$ 时， $F=0.336 1$ ， $F < F_{0.05}(5,19) = 2.74$ ； $t=8$ 时， $F=0.429 4$ ， $F < F_{0.05}(7,17) = 2.61$ ； $t=9$ 时， $F=0.112 7$ ， $F < F_{0.05}(8,16) = 2.59$ ； $t=10$ 时，

$F=0.013 1$ ， $F < F_{0.05}(9,15) = 2.59$ ； $t=12$ 时， $F=1.108 7$ ， $F < F_{0.05}(11,13) = 2.635$ 。 F 值均小于 $F_{0.05}$ 的值，表明上述无周期振荡。

为了评判预报结果的准确性，将一代幼虫高峰期发生量周期分量叠加预报值和实况值绘于图 1，可看出与实况值比较，25 年预报值与实况

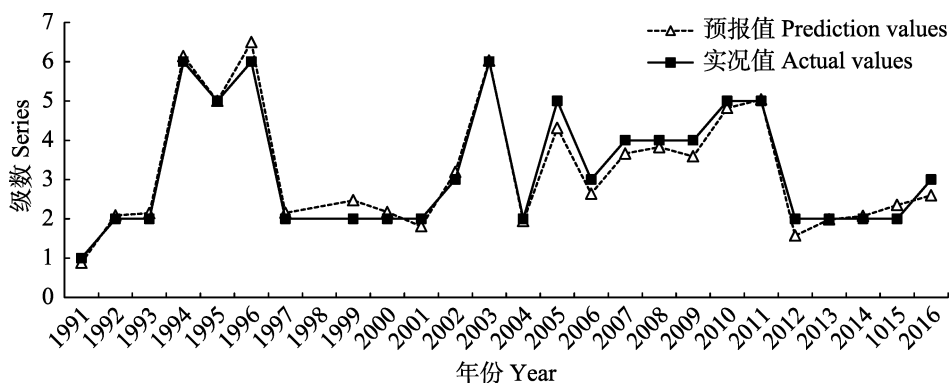


图1 一代幼虫高峰期发生量叠加预报值与实况值的比较图

Fig. 1 Comparison diagram of superposition prediction values and actual values of the first generation larva peak occurrence

值有 22 年完全相符, 历史符合率达 88%, 1996 年、2005 年和 2016 年预报值和实况值均只是误差 1 级。

2.2 一代幼虫累计发生量预报

将 1991-2016 年一代幼虫累计发生量等列于表 3。对表 3 中级数振荡周期进行试测, 结果是, $t=3$ 时, $F=0.2462$; $t=4$ 时, $F=1.3158$; $t=5$ 时, $F=1.3725$; $t=6$ 时, $F=6.9808$, $F > F_{0.05}(5,19) = 4.17$; $t=7$ 时, $F=3.7098$, $F > F_{0.05}(6,18) = 2.66$; $t=8$ 时, $F=2.7971$, $F > F_{0.05}(7,17) = 2.61$; $t=9$ 时, $F=0.2452$; $t=10$ 时, $F=0.6970$; $t=11$ 时, $F=0.9739$; $t=12$ 时, $F=1.0130$ 。试测的周期中只有周期 $t=6, 7, 8$ 时的 F 值大于 $F_{0.05}$ 的值, 其中 $t=6$ 的 F 值最大, 选 F 最大的周期, 本研究选周期为 6 继续进行分析并把周期为 6 的第一分量列于表 3, 把原序列与第一周期分量的差值——第一周期余序列也列于表 3, 对第一周期余序列进行周期试测, $t=3$ 时, $F=1.6372$; $t=4$ 时, $F=0.3598$; $t=5$ 时, $F=1.7687$; $t=7$ 时, $F=0.6299$; $t=8$ 时, $F=0.4444$; $t=9$ 时, $F=0.5499$; $t=10$ 时, $F=0.5095$; $t=11$ 时, $F=1.6799$; $t=12$ 时, $F=3.1546$, $F > F_{0.05}(11,13) = 2.635$ 。可看出只有周期为 12 时 $F > F_{0.05}$, 一代幼虫累计虫口为周期振荡序列, 将 $t=12$ 时的第 2 周期分量、第一周期余序列及第 2 周期余序列也列于表 3, 进行周期试测。

结果是 $t=3$ 时, $F=0.0332$; $t=4$ 时, $F=0.0647$; $t=5$ 时, $F=1.4077$; $t=7$ 时,

$F=3.2100$, $F > F_{0.05}(6,18) = 2.66$; $t=8$ 时, $F=4.8674$, $F > F_{0.05}(7,17) = 2.61$, $F > F_{0.01}(7,17) = 3.93$; $t=9$ 时, $F=1.2807$; $t=10$ 时, $F=1.0149$; $t=11$ 时, $F=0.8222$ 。 $t=7$ 和 $t=8$ 的 F 值都大于 $F_{0.05}$, 根据取 F 最大值原则, 取周期 $t=8$, 继续进行分析, 将 $t=8$ 时的第 3 周期分量, 第 2 周期余序列及其两者之差——第 3 周期余序列也列于表 3, 继续进行分析。

$t=3$ 时, $F=0.0927$; $t=4$ 时, $F=0.0534$; $t=5$ 时, $F=3.7435$, $F > F_{0.05}(4,20) = 2.87$; $t=7$ 时, $F=1.8115$; $t=9$ 时, $F=1.0403$; $t=10$ 时, $F=2.5983$, $F > F_{0.05}(9,15) = 2.59$, 差异显著; $t=11$ 时, $F=1.1528$ 。周期 $t=5$ 时和 $t=10$ 时的余序列具有振荡周期, 因 $t=5$ 的 F 值大于 $t=10$ 的 F 值, 继续进行 $t=5$ 的分析, 将第 3 周期余序列、第 4 周期分量及余序列列于表 4, 对第 3 周期余序列进行周期试测。

$t=3$ 时, $F=0.4101$; $t=4$ 时, $F=0.4682$; $t=7$ 时, $F=2.8785$, $F > F_{0.05}(6,18) = 2.66$; $t=9$ 时, $F=0.8758$; $t=10$ 时, $F=0.7688$; $t=11$ 时, $F=2.0970$ 。由于 $t=7$ 时, $F > F_{0.05}(6,18) = 2.66$, 还需继续分析, 将 $t=7$ 时的第 4 周期余序列, 第 5 周期分量和余序列也列于表 4, 继续进行 $t=7$ 周期余序列的周期试测。

$t=3$ 时, $F=1.3052$, $F < F_{0.05}(2,22) = 3.44$; $t=4$ 时, $F=0.5166$, $F < F_{0.05}(3,21) = 3.07$; $t=9$ 时, $F=1.3947$, $F < F_{0.05}(8,16) = 2.59$; $t=10$ 时, $F=0.8478$, $F < F_{0.05}(9,15) = 2.59$; $t=11$ 时, $F=0.9151$,

$F < F_{0.05}(10,14) = 2.60$ 。F 值均小于 $F_{0.05}$ 值，表明 $t=7$ 时的第 5 周期余序列没有周期振荡现象。将一代幼虫累计发生量周期分量叠加预报

值和实况值绘于图 2，可看出 25 年中有 24 年的预报值与实况值完全一致，历史符合率达 96%，只有 2008 年误差 1 级。

表 3 一代幼虫累计虫口的原序列、 $t=6$ 时的第一周期分量及第一周期余序列、 $t=12$ 时的第 2 周期分量及第 2 周期余序列、 $t=8$ 时的第 3 周期分量及第 3 周期余序列

Table 3 The original sequence, the first periodic component and the first periodic residual sequence of $t=6$, the second periodic component and the second periodic residual sequence of $t=12$, the third periodic component and the third periodic residual sequence of $t=8$ of the first generation larva accumulative population

年份 Year	累计虫口 Accumulative population	原序列 (级数) Original sequence (series)	第一周期 分量 First periodic component	第一周期 余序列 First periodic residual sequence	第 2 周期 分量 Second periodic component	第 2 周期 余序列 Second periodic residual sequence	第 3 周期 分量 Third periodic component	第 3 周期 余序列 Third periodic residual sequence
1991	7.6	1	1.40	- 0.40	- 0.40	0.00	- 0.275 0	0.275 0
1992	7.8	1	2.00	- 1.00	0.00	- 1.00	0.333 3	- 1.333 3
1993	7.4	1	1.25	- 0.25	0.25	- 0.50	0.200 0	- 0.700 0
1994	38.6	5	2.25	2.75	1.25	1.50	1.166 7	0.333 3
1995	19.6	3	4.00	- 1.00	- 1.50	0.50	0.000 0	0.500 0
1996	10.1	2	4.00	- 2.00	- 2.00	0.00	0.333 3	- 0.333 3
1997	7.1	1	1.40	- 0.40	1.00	- 1.40	- 0.466 7	- 0.933 3
1999	6.6	1	2.00	- 1.00	0.00	- 1.00	- 1.166 7	0.166 7
2000	7.2	1	1.25	- 0.25	0.25	- 0.50	- 0.275 0	- 0.225 0
2001	6.1	1	2.25	- 1.25	- 1.25	0.00	0.333 3	- 0.333 3
2002	8.6	2	4.00	- 2.00	- 2.50	0.50	0.200 0	0.300 0
2003	18.6	3	4.00	- 1.00	- 2.00	1.00	1.166 7	- 0.166 7
2004	7.7	1	1.40	- 0.40	- 0.40	0.00	0.000 0	0.000 0
2005	16.4	3	2.00	1.00	0.00	1.00	0.333 3	0.666 7
2006	12	2	1.25	0.75	0.25	0.50	- 0.466 7	0.966 7
2007	12.6	2	2.25	- 0.25	1.25	- 1.50	- 1.166 7	- 0.333 3
2008	12.1	2	4.00	- 2.00	- 1.50	- 0.60	- 0.275 0	- 0.325 0
2009	12.8	2	4.00	- 2.00	- 2.00	0.00	0.333 3	- 0.333 3
2010	16.2	3	1.40	1.60	1.00	0.60	0.200 0	0.400 0
2011	16.1	3	2.00	1.00	0.00	1.00	1.166 7	- 0.166 7
2012	7.4	1	1.25	- 0.25	0.25	- 0.50	0.000 0	- 0.500 0
2013	6.7	1	2.25	- 1.25	- 1.25	0.00	0.333 3	- 0.333 3
2014	6.7	1	4.00	- 3.00	- 2.50	- 0.50	- 0.466 7	- 0.033 3
2015	6.3	1	4.00	- 3.00	- 2.00	- 1.00	- 1.166 7	0.166 7
2016	6.6	1	1.40	- 0.40	- 0.40	0.00	- 0.275 0	0.275 0

表 4 第 3 周期余序列、 $t=5$ 时的第 4 周期分量及第 4 周期余序列、 $t=7$ 时的第 5 周期分量及第 5 周期余序列
 Table 4 The third periodic residual sequence, the fourth periodic component and the fourth periodic residual sequence of $t=5$, the fifth periodic component and the fifth periodic residual sequence of $t=7$

年份 Year	第 3 周期余序列 Third periodic residual sequence	第 4 周期分量 Fourth periodic component	第 4 周期余序列 Fourth periodic residual sequence	第 5 周期分量 Fifth periodic component	第 5 周期余序列 Fifth periodic residual sequence
1991	0.275 0	- 0.118 3	0.393 3	0.435 9	- 0.042 6
1992	- 1.333 3	- 0.618 3	- 0.715 0	- 0.319 2	- 0.395 8
1993	- 0.700 0	- 0.180 0	- 0.520 0	- 0.227 5	- 0.292 5
1994	0.333 3	0.268 3	0.065 0	0.089 2	- 0.024 2
1995	0.500 0	0.248 3	0.251 7	0.278 3	- 0.026 6
1996	- 0.333 3	- 0.118 3	- 0.215 0	- 0.150 0	- 0.065 0
1997	- 0.933 3	- 0.618 3	- 0.315 0	- 0.099 4	- 0.215 6
1999	0.166 7	- 0.180 0	0.346 7	0.435 9	- 0.089 2
2000	- 0.225 0	0.268 3	- 0.493 3	- 0.319 2	- 0.174 1
2001	- 0.333 3	0.248 3	- 0.581 6	- 0.227 5	- 0.354 1
2002	0.300 0	- 0.118 3	0.418 3	0.089 2	0.329 1
2003	- 0.166 7	- 0.618 3	0.451 6	0.278 3	0.173 3
2004	0.000 0	- 0.180 0	0.180 0	- 0.150 0	0.330 0
2005	0.666 7	0.268 3	0.398 4	- 0.099 4	0.497 8
2006	0.966 7	0.248 3	0.718 4	0.435 9	0.282 5
2007	- 0.333 3	- 0.118 3	- 0.215 0	- 0.319 2	0.104 2
2008	- 0.325 0	- 0.618 3	0.293 3	- 0.227 5	0.520 8
2009	- 0.333 3	- 0.180 0	- 0.153 3	0.089 2	- 0.242 5
2010	0.400 0	0.268 3	0.131 7	0.278 3	- 0.146 6
2011	- 0.166 7	0.248 3	- 0.415 0	- 0.150 0	- 0.265 0
2012	- 0.500 0	- 0.118 3	- 0.381 7	- 0.099 4	- 0.282 3
2013	- 0.333 3	- 0.618 3	0.285 0	0.435 9	- 0.150 9
2014	- 0.033 3	- 0.180 0	0.146 7	- 0.319 2	0.465 9
2015	0.166 7	0.268 3	- 0.101 6	- 0.227 5	0.125 9
2016	0.275 0	0.248 3	0.026 7	0.089 2	- 0.062 5

3 小结与讨论

本文采用方差分析周期外推预报法研究 1991-2016 年潜山县马尾松毛虫一代幼虫发生量和高峰期发生量,一代幼虫发生量的预报结果与实况值相比,历史符合率为 96%,只有 2008 年

的预报值误差 0.63 级,对一代幼虫高峰期发生量的预报,历史符合率达 88%,只有 1996 年、2005 年和 2016 年的预报值与实况值误差 1 级。结果表明该方法预报马尾松毛虫幼虫发生量是个较理想的方法,周夏芝等(2017)预测马尾松毛虫幼虫高峰期发生量用列联表多因子综合相

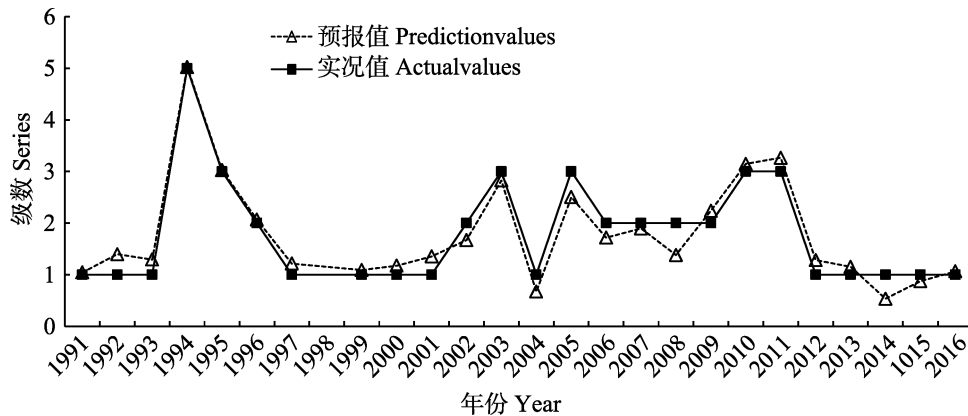


图2 一代幼虫累计发生量叠加预报值与实况值的比较图

Fig. 2 Comparison diagram of superposition prediction values and actual values of the first generation larva occurrence

关分析法,预测一代高峰期发生量的历史符合率为 90.32%, 2 代为 83.47%;用 BP 神经网络预测法预测,其结果的历史符合率一代为 90.32%, 2 代为 100%;平稳时间序列法和马尔科夫链法预报 2015 年和 2016 年的结果与实况值完全相符。余燕等(2017)预测马尾松毛虫一代发生量,用平稳时间序列法、BP 神经网络法预测结果的历史符合率均为 100%,马尔科夫链法预测 2015 年和 2016 年的发生情况与实况值完全一致,列联表多因子多级相关分析法预测一代和 2 代结果的历史符合率为 80.65%和 87.10%,几种方法预测结果的历史符合率综合比较,方差分析周期外推预报法好于列联表多因子多级相关分析法,但对研究对象不具有周期性特点的序列,方差分析周期外推法就不适用。

在较稳定的良好的生态系统中,马尾松毛虫对生态环境和生物群落的作用形成了一定的适应能力。特别是在较稳定的物理环境中,影响马尾松毛虫种群数量的就是生物因子,特别是各种捕食性和寄生性天敌的作用,天敌与马尾松毛虫数量之间形成互相依存互相制约的此起彼伏的关系,使得马尾松毛虫数量形成周期振荡。比如安徽省潜山县马尾松毛虫一代幼虫累计发生量(如文中表 3)出现周期 $t=6$ 、 $t=12$ 、 $t=8$ 、 $t=5$ 和 $t=7$ 的多周期振荡序列。这些周期分量叠加值即是预报值。因为在稳定的物理环境中这种状态继续存在,因此可用此法预报未来马尾松毛虫幼

虫发生量。

害虫测报工作中测报人员都要和一系列害虫发生情况的观察数据打交道,这些按时间顺序产生和排列的观察数据序列称为时间序列。时间序列具有 4 个特征,即时间序列的随机性、交变性、非平稳性和周期性。方差分析周期外推法就是利用时间序列周期性的特征。时间序列有非平稳序列,即它的自相关系数 r_1 最大, r_2 、 r_3 ... 逐渐递减,即时间序列的非平稳性特征。也有一些时间序列具有平稳性特征,即自相关系数 r_1 、 r_2 、 r_3 ... 差异较小,这种情况适宜用时间平稳序列法进行预测,两种方法都适用于时间序列,但前提条件不同。

参考文献 (References)

- Chen HH, Wang JY, Xu ZH, 2011. Application of response-surface methodology to chaos detection and forecast of occurrence quantity of *Dendrolimus punctatus*. *Journal of Northeast Forestry University*, 39(9): 94-96. [陈绘画, 王坚娜, 徐志宏, 2011. 基于响应面方法的马尾松毛虫发生量混沌特性检测及其预测. 东北林业大学学报, 39(9): 94-96.]
- Fei HZ, Wang HB, Kong XB, Zhang Z, Zhang SF, Song XG, 2014. Selection and prediction of meteorological factors correlated with *Dendrolimus punctatus* outbreak. *Journal of Northeast Forestry University*, 41(1): 136-140. [费海泽, 王鸿斌, 孔祥波, 张真, 张苏芳, 宋雄刚, 2014. 马尾松毛虫发生相关气象因子筛选及预测. 东北林业大学学报, 41(1): 136-140.]
- Hou TQ, 1987. *The Pine Caterpillars in China*. Beijing: Science Press: 188-191. [侯陶谦, 1987. 中国松毛虫. 北京: 科学出版

- 社: 188–191.]
- Jia CS, 2006. Forecast of occurrence level of *Dendrolimus punctatus* by Markov chains. *Journal of Northeast Forestry University*, 34(5): 21–22. [贾春生, 2006. 利用马尔可夫链方法测报马尾松毛虫发生级别. 东北林业大学学报, 34(5): 21–22.]
- Park YS, Cereghino R, Compin A, 2003. Applications of artificial neural networks for patterning and predicting aquatic insect species richness in running waters. *Ecological Modelling*, 160(3): 265–280.
- The Forest Disease and Pests Prevention and Control Station, 2013. *Forest Pest Monitoring and Forecasting Technology*. Beijing: Chinese Forest Press. 117–118. [国家林业局森林病虫害防治总站, 2013. 林业有害生物监测预报技术. 北京: 中国林业出版社: 117–118.]
- Tian WY, Xu HC, 2012. The prediction model of *Dendrolimus punctatus* walker in coastal shelterbelt of Zhejiang. *Journal of Environmental Entomology*, 34(4): 401–406. [田万银, 徐华潮, 2012. 浙江沿海防护林马尾松毛虫的预测预报模型. 环境昆虫学报, 34(4): 401–406.]
- Wang Q, Bi M, Du T, 2016. Spatial pattern of *Dendrolimus punctatus* incidence rate based on meteorological factors. *Forest Research*, 29(2): 256–260. [王庆, 毕猛, 杜婷, 2016. 基于气象因子的马尾松毛虫发生率空间格局研究. 林业科学研究, 29(2): 256–260.]
- Xiao GR, 1992. *Forest Insects of China* (the second edition). Beijing: Chinese Academy of Forestry: 948–953. [萧刚柔, 1992. 中国森林害虫 (第二版). 北京: 林业出版社: 948–953.]
- Xu ZH, Li CH, Liu J, 2014. Fisher discriminant analysis of *Dendrolimus punctatus* Walker pest levels. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 45(6): 401–406. [许章华, 李聪慧, 刘健, 2014. 马尾松毛虫害等级的 Fisher 判别分析. 农业机械学报, 45(6): 401–406.]
- Yu Y, Li S, Wang ZX, Bi SD, Zhang GQ, Zhou XZ, Fang GF, Zou YD, Zhang Z, Song YS, 2017. A study on the forecasting occurrence severity degree of the *Dendrolimus punctatus* larvae. *Journal of Anhui Agricultural University*, 44(5): 882–893. [余燕, 李尚, 王振兴, 毕守东, 张国庆, 周夏芝, 方国飞, 邹运鼎, 张桢, 宋玉双, 2017. 马尾松毛虫幼虫发生严重程度的预测研究. 安徽农业大学学报, 44(5): 882–893.]
- Zhang AB, Chen J, Wang ZJ, Li DM, Tian J, 2001. The application of BP model and logit model to prediction of forest insect pests. *Acta Ecologica Sinica*, 21(12): 2159–2156. [张爱兵, 陈建, 王正军, 李典谟, 田洁, 2001. BP网络模型和LOGIT模型在森林害虫测报上的应用初报. 生态学报, 21(12): 2159–2156.]
- Zhang WJ, Zhong XQ, Liu GH, 2008. Recognizing spatial distribution patterns of grassland insects: Neural network approaches. *Stoch. Environ. Res. Risk Assess*, 22(2): 207–216.
- Zhang Z, Li DM, 2008. Approach to outbreak mechanism of *Dendrolimus punctatus* (Lepidoptera: Lasiocampidae). *Scientia Silvae Sinicae*, 44(1): 140–150. [张真, 李典谟, 2008. 马尾松毛虫暴发机制分析. 林业科学, 44(1): 140–150.]
- Zhou XZ, Wang ZX, Yu Y, Li S, Bi SD, Zhang GQ, Fang GF, Zou YD, Zhang Z, Song YS, 2017. A study on the forecasting model of the peak occurrence quantity of *Dendrolimus punctatus* larvae. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 54(6): 1031–1043. [周夏芝, 王振兴, 余燕, 李尚, 毕守东, 张国庆, 方国飞, 邹运鼎, 张桢, 宋玉双, 2017. 马尾松毛虫幼虫高峰期发生量的预测模型研究. 应用昆虫学报, 54(6): 1031–1043.]
- Zou YD, Cheng FJ, Zha GJ, 1990. Effect of the chemical components of pine needle on the existence and growth of pine caterpillars *Dendrolimus punctatus*. *Scientia Silvae Sinicae*, 26(2): 142–148. [邹运鼎, 程扶玖, 查光济, 1990. 松针内含物与马尾松毛虫生存发育关系的研究. 林业科学, 26(2): 142–148.]