

灾变模型在马尾松毛虫幼虫发生量预报中的应用

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, 安徽 合肥 230036; 2. 安徽农业大学 林学与园林学院, 安徽 合肥 230036;
3. 安徽省潜山县林业局, 安徽 潜山 246300; 4. 国家林业和草原局 森林病虫害防治总站, 辽宁 沈阳 110034)

摘要:【目的】提高马尾松毛虫 *Dendrolimus punctatus* 幼虫发生量预测预报结果的准确性。【方法】利用灰色灾变预测 GM(1,1)模型预测了安徽省潜山县 1989–2016 年马尾松毛虫越冬代、1 代和 2 代严重发生的年份。【结果】马尾松毛虫越冬代虫口数的 GM(1,1)灾变预测模型为: $\hat{z}^{(1)}(k+1)=9.580\ 75e^{0.269\ 33k}-8.580\ 75$, 其中 k 为年序号, $\hat{z}^{(1)}(k+1)$ 为灾变年序号。1 代幼虫虫口数的 GM(1,1)灾变预测模型为: $\hat{z}^{(1)}(k+1)=18.181\ 8e^{0.241\ 87k}-17.181\ 8$ 。2 代幼虫虫口数的 GM(1,1)灾变预测模型为: $\hat{z}^{(1)}(k+1)=20.123\ 7e^{0.197\ 58k}-19.123\ 7$ 。根据此模型求得已知年份的拟合值与观察值, 对两者差异进行 t 检验, 差异均不显著, 即拟合值与观察值间吻合度高, 各灾变年精度值平均为 84.40%, 84.85%和 84.08%, 总体平均精度依次为 96.25%, 92.34%和 94.09%, 模型精度高。由此推算未来时刻的预测值得到, 从 2011 年马尾松毛虫越冬代幼虫灾变年算起, 再过 10 a 即 2021 年为马尾松毛虫越冬代大发生年。从 2011 年马尾松毛虫 1 代幼虫灾变年算起, 再过 11 a 即 2022 年为马尾松毛虫 1 代幼虫大发生年。从 2011 年马尾松毛虫 2 代幼虫灾变年算起, 再过 9 a 即 2020 年为马尾松毛虫 2 代幼虫大发生年。【结论】灾变预测对马尾松毛虫幼虫发生量灾变的预报是一种较理想的预报方法。表 4 参 15

关键词: 森林保护学; 马尾松毛虫幼虫; 灾变预测; GM(1,1)模型

中图分类号: S763.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2020)01-0093-07

A catastrophe model to forecast larvae occurrence of *Dendrolimus punctatus*

ZHANG Shuping^{1,2}, YU Yan^{1,2}, BI Shoudong¹, ZHOU Xiazh², ZOU Yunding², ZHANG Guoqing³,
ZHANG Zhen³, FANG Guofer⁴, SONG Yushuang⁴

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

Abstract: [Objective] The aim is to improve control of *Dendrolimus punctatus* larval occurrence, and to select a suitable prediction model by increasing prediction accuracy through a catastrophe prediction method. [Method] The prediction model GM(1,1) for *D. punctatus* was used over 28 years from 1989 to 2016 in Qianshan County, Anhui Province. [Result] The GM(1,1) cataclysmic prediction model for the overwintering generation of *D. punctatus* was as follows: $\hat{z}^{(1)}(k+1)=9.580\ 75e^{0.269\ 33k}-8.580\ 75$, where k was the annual serial number and $\hat{z}^{(1)}(k+1)$ was the disaster year serial number. The GM(1,1) cataclysmic prediction model for the number of larvae of the first generation was: $\hat{z}^{(1)}(k+1)=18.181\ 8e^{0.241\ 87k}-17.181\ 8$, and the second generation larval

收稿日期: 2018-12-28; 修回日期: 2019-04-02

基金项目: 国家林业公益性创业科研专项(201404410)

作者简介: 张书平, 从事生物数学研究。E-mail: 2711143928@qq.com。通信作者: 毕守东, 教授, 博士, 从事种群生态、数量生态研究。E-mail: bishoudong@163.com

population was: $\hat{z}^{(1)}(k+1)=20.123\ 7e^{0.197\ 58k}-19.123\ 7$. According to this model, fitted and observed values of known years were obtained. Results of a t test for $t_{0.05}$ were not significant. The average annual accuracy of three disasters was 84.40%, 84.85%, and 84.08% with the total average accuracy of the first being 96.25%, of the second being 92.34%, and of the third being 94.09%. The predicted future times were as follows: for the wintering *D. punctatus* disaster of 2011, it would be another 10 years (2021) before the next overwintering. For the first generation *D. punctatus* larvae in the catastrophic year 2011, it would be another 11 years (2022), until the great occurrence of the first generation larvae. For the second generation *D. punctatus* larvae, the next disaster after 2011 would occur 9 years later (2020). [Conclusion] Thus, the catastrophe prediction method could be an ideal method for predicting the occurrence of larval cataclysm with *D. punctatus*. [Ch, 4 tab. 15 ref.]

Key words: forest protection; *Dendrolimus punctatus* larvae; catastrophic prediction; GM(1,1) model

马尾松毛虫 *Dendrolimus punctatus* 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、海南和广西等，主要危害马尾松 *Pinus massoniana*，还危害黑松 *Pinus thunbergii*，火炬松 *Pinus taeda*，湿地松 *Pinus elliottii*，晚松 *Pinus rigida* var. *serotina* 和海南松 *Pinus fenzeliana* 等松属 *Pinus* 植物。20 世纪中叶在中国森林害虫中马尾松毛虫是发生最广、危害面积最大、经常猖獗成灾的害虫。在广大丘陵地区虫害此起彼伏，为害时如同火烧，造成了巨大的经济效益和生态效益损失。该虫不但影响林业生产，还危害人身健康^[1-4]，人们的林事活动中接触马尾松毛虫毒毛，容易引发皮炎和关节肿痛。进入 21 世纪，封山育林、混交、间作等措施优化了森林生态环境，使马尾松毛虫的危害得到有效控制，但该虫具有强大的繁殖潜力，遇到有利的生态环境极易爆发成灾，不能放松对它的监测。马尾松毛虫 1 a 发生 2~4 代，发生世代的多少随不同地方而异。在河南省信阳地区 1 a 发生 2 代为主，在长江流域诸省 1 a 发生 2~3 代，而在广东、广西、福建南部 1 a 发生 3~4 代，海南 1 a 发生 4~5 代^[1]。安徽潜山县 1 a 发生 3 代，即 4~6 月上旬为越冬代，6 月上旬至 8 月中下旬为 1 代，8 月中下旬至 12 月为 2 代。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。研究者^[5-9]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、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等不同，马尾松毛虫的发生特点也不完全相同。为了有效地防治马尾松毛虫，本研究采用灰色理论中的灾变预测法研究了安徽省潜山县马尾松毛虫幼虫越冬代、1 代和 2 代严重发生的年份，以期对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和草原局森林病虫中心测报点——安徽省潜山县森林病虫防治站，时间跨度为 1989–2016 年，其中 1998 年缺失。采用踏查和详查相结合的方法，沿林班线、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。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 龄以上的幼虫且 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。

1.2 灾变预测的建模方法

灰色系统理论认为，一切随机量都是在一定范围内、一定时段上变化的灰色量及其灰色过程，主张从事物内部研究其发展变化规律。对于灰色量的处理，不是去寻求它的统计规律和概率分布，而是从无规律的原始数据中找出规律，即对数据通过一定方式处理后再建立模型。因为客观系统无论怎样复杂，它总是有关联、有序、有整体功能的，作为系统行为特征的数据，总是蕴含着某种规律。

原始数据 $x^{(0)}=[x_{(1)}^{(0)}, x_{(2)}^{(0)}, \dots, x_{(n)}^{(0)}]$, $x_{(i)}^{(0)}$ 指数列 $x^{(0)}$ 中第 i 年的发生数量。令 ξ 为异常值，如果 $x_{(i)}^{(0)} \geq \xi$ 为灾变，则称这种情况为上灾变。如果 $x_{(i)}^{(0)} \leq \xi$ 为灾变，则称为下灾变。一般上下灾变统称灾变， ξ 为灾变阈值，或灾变值^[10]。在害虫发生量和为害损失的预测预报中，最关心的是上灾变，也即预测数量或损失超过某个阈值出现的时间。 $x^{(0)}$ 中每一个数据 $x_{(k)}^{(0)}$ 应该说是数值 $x_{(k)}^{(0)}$ 与年序号 k 的二元组合，记为

$[k, x_{(k)}^{(0)}]$ 。

如果在 $x^{(0)}$ 中有新的数列 $x_{\xi}^{(0)}=[x_{(1')}^{(0)}, x_{(2')}^{(0)}, \cdots, x_{(n')}^{(0)}]$, $n'<n$ 是符合灾变定义的数列, 则对于上灾变 $x_{(i')}^{(0)}\geqslant \xi$, $V'\in [1', 2', \cdots, n']$, 其中: i' 为灾变年序号, V' 为灾变年序号取值范围。

从 $x^{(0)}$ 到 $x_{\xi}^{(0)}$ 是一种映射, 记为 $\xi: [x^{(0)}]\rightarrow[x_{\xi}^{(0)}]$ 。为了建立灾变预测数据集, 将二元组合 $x_{(i')}^{(0)}$ 记为 $[i', x_{(i')}^{(0)}]$ 。

为了便于辨认, 特记灾变年序号 i' 为 $z(i')$ 或 $z(i)$ 。并作灾变号映射 $p, p[x_{\xi}^{(0)}]=(\omega)$; $p[x_{\xi}^{(0)}]=[z(1'), z(2'), \cdots, z(n')]= (z)$, 记 z 的 1 次累加生成数(accumulated generating operation, O_{AG})为 $O_{AG}: (z)\rightarrow(z^{(1)})$, 则灾变预测的 GM(1,1) 模型有如下算式: $d(z)^{(1)}/dt+az^{(1)}=u$, $\hat{a}=\begin{bmatrix} a \\ u \end{bmatrix}$, $\hat{a}=(B^TB)^{-1}B^Ty_N$, 其中: t 为年份, a 为发展灰数, u 为内生控制灰数, $\hat{a}$ 为待估灰数, B 为累加矩阵, B^T 为转置矩阵, y_N 为常数项向量。

$$B=\begin{bmatrix} -(1/2)[z^{(1)}(1)+z^{(1)}(2)] & 1 \\ -(1/2)[z^{(1)}(2)+z^{(1)}(3)] & 1 \\ \cdots & \cdots \\ -(1/2)[z^{(1)}(N-1)+z^{(1)}(N)] & 1 \end{bmatrix}, y_N=\begin{bmatrix} z(2) \\ z(3) \\ \cdots \\ z(N) \end{bmatrix}。$$

灾变模型为 $\hat{z}^{(1)}(k+1)=[z^{(0)}(1)-u/a]e^{-ak}+u/a$, 其中: $z^{(0)}$ 为原始灾变年序号, 如 $z^{(0)}(1)$ 为第 1 次发生灾变的年份, 即 1989 年, $\hat{z}^{(1)}(k+1)$ 为灾变年序号。

2 结果与分析

2.1 马尾松毛虫累计虫口数

马尾松毛虫每年越冬代、1 代幼虫和 2 代幼虫的累计虫口数见表 1, 将其作为原始数据。

表 1 马尾松毛虫越冬代、1 代幼虫和 2 代幼虫累计虫口数

Table 1 Accumulative population of *D. punctatus* during wintering, first and second generation larvae

序号	年份	累计虫口数/(头·株 ⁻¹)			序号	年份	累计虫口数/(头·株 ⁻¹)		
		越冬代	1 代幼虫	2 代幼虫			越冬代	1 代幼虫	2 代幼虫
1	1989	42.5	18.3	34.1	15	2003	15.7	18.6	18.8
2	1990	37.3	42.5	18.4	16	2004	7.6	7.7	22.6
3	1991	18.5	7.6	13.2	17	2005	6.4	16.4	12.6
4	1992	12.2	7.8	11.8	18	2006	6.6	12.0	11.8
5	1993	7.8	7.4	26.5	19	2007	6.4	12.6	12.1
6	1994	18.6	38.6	40.4	20	2008	6.6	12.1	13.2
7	1995	18.2	19.6	19.6	21	2009	8.4	12.8	13.8
8	1996	38.6	40.1	52.6	22	2010	16.2	16.2	26.8
9	1997	42.1	7.1	12.4	23	2011	16.6	16.1	16.7
10	1998	—	—	—	24	2012	7.2	7.4	8.9
11	1999	6.2	6.6	11.6	25	2013	7.2	6.7	7.2
12	2000	7.6	7.2	12.3	26	2014	6.4	6.7	7.4
13	2001	6.2	6.1	12.6	27	2015	6.2	6.3	7.4
14	2002	7.1	8.6	16.4	28	2016	7.1	6.6	8.1

说明: “—” 表示数据缺失

2.2 马尾松毛虫越冬代灾变预测

2.2.1 确定灾变阈值 根据安徽省潜山县森林病虫害防治总站提供的 1983–2016 年马尾松毛虫发生情况的资料, 马尾松毛虫越冬代虫口数大于 15 头·株⁻¹ 的年份为大发生年, 故以每株虫口数 15 头为灾变阈值。

2.2.2 对原始数列作有关映射 原始数列为 $x^{(0)}=\{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \cdots, x^{(0)}(28)\}=\{42.5, 37.3, 18.5, 12.2, 7.8, 18.6, 18.2, 38.6, 42.1, 6.2, 7.6, 6.2, 7.1, 15.7, 7.6, 6.4, 6.6, 6.4, 6.6, 8.4, 16.2, 16.6, 7.2, 7.2, 6.4, 6.2, 7.1\}$ 。对原始数列作灾变映射, 按 $\xi\geqslant 15$ 得灾变数列:

$$\xi\{x^{(0)}\}=\{42.5, 37.3, 18.5, 18.6, 18.2, 38.6, 42.1, 15.7, 16.2, 16.6\}=\{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), x^{(0)}(3),$$

$x^{(0)}(6), x^{(0)}(7), x^{(0)}(8), x^{(0)}(9), x^{(0)}(15), x^{(0)}(22), x^{(0)}(23)\} = \{x^{(0)}(1'), x^{(0)}(2'), x^{(0)}(3'), x^{(0)}(4'), x^{(0)}(5'), x^{(0)}(6'), x^{(0)}(7'), x^{(0)}(8'), x^{(0)}(9'), x^{(0)}(10')\}=x_{\xi}^{(0)}$ 。

然后再作灾变序号映射 $p, p\{x_{\xi}^{(0)}\}=\{z\}, px_{\xi}^{(0)}=\{z(1'), z(2'), z(3'), z(4'), z(5'), z(6'), z(7'), z(8'), z(9'), z(10')\}=\{1', 2', 3', 4', 5', 6', 7', 8', 9', 10'\}=z$ 。

由于 $1'=1, 2'=2, 3'=3, 4'=6, 5'=7, 6'=8, 7'=9, 8'=15, 9'=22, 10'=23$, 故得到灾变日期集 $z=\{1, 2, 3, 6, 7, 8, 9, 15, 22, 23\}$ 即为建模时所需的原始数列。

2.2.3 建立灰色预测 GM(1,1)模型 对灾变年序集 z 建立 GM(1,1)模型, 按原始数列 $z=\{1, 2, 3, 6, 7, 8, 9, 15, 22, 23\}$ 作 O_{AG} (一次累加生成算子)得:

$O_{AG}\{z^{(0)}\}=z^{(1)}=\{z^{(1)}(1), z^{(1)}(2), z^{(1)}(3), z^{(1)}(4), z^{(1)}(5), z^{(1)}(6), z^{(1)}(7), z^{(1)}(8), z^{(1)}(9), z^{(1)}(10)\}=\{1, 3, 6, 12, 19, 27, 36, 51, 73, 96\}$ 。

按 $z^{(1)}$ 建模: $\hat{a}=(B^TB)^{-1}B^Ty_N=\begin{bmatrix} -0.269\ 33 \\ 2.311\ 06 \end{bmatrix}$, 即 $\hat{a}=-0.269\ 33, u=2.311\ 06, u/a=-8.580\ 75, z^{(0)}(1)=1$,

由此得出马尾松毛虫越冬代虫口数的 GM(1,1)灾变预测模型: $\hat{z}^{(1)}(k+1)=9.580\ 75e^{0.269\ 33k}-8.580\ 75$ 。

将根据马尾松毛虫越冬代虫口数的 GM(1,1)灾变预测模型得到的拟合值、误差等列于表 2。

表 2 马尾松毛虫越冬代虫口数预测的拟合值与误差

Table 2 Fitting value and error of population prediction of *D. punctatus* in overwintering generation

序号	大于阈值的年份	虫口数/(头·株 ⁻¹)			精度/%
		观察值	拟合值	误差	
$x(1)$	1989	1	1.00	0	100.00
$x(2)$	1990	2	2.96	-0.96	51.94
$x(3)$	1991	3	3.88	-0.88	70.78
$x(4)$	1994	6	5.07	0.93	84.58
$x(5)$	1995	7	6.64	0.36	94.91
$x(6)$	1996	8	8.70	-0.70	91.29
$x(7)$	1997	9	11.38	-2.38	73.50
$x(8)$	2003	15	14.90	0.10	99.36
$x(9)$	2010	22	19.51	2.49	88.68
$x(10)$	2011	23	25.54	-2.54	88.95

对观察值和拟合值间的差异进行 t 检验, $t=0.101\ 7, d_f=18$ 时, $t_{0.05}=2.10, t<t_{0.05}$, 差异不显著, 平均误差(2 个均数之差)只有观察值均数的 3.40%。实际观察值与通过 GM(1,1)灾变预测模型得到的拟合值之间误差较小, 各灾变年的平均精度为 84.40%, 总体精度(观察值的平均值减去误差的平均值与观察值的平均值之比)为 96.25%。由此可以通过这个模型求得未来 5 个时刻的预测值, 用所建灾变预测模型 $\hat{z}^{(1)}(k+1)=9.580\ 75e^{0.269\ 33k}-8.580\ 75$ 对未来马尾松毛虫越冬代灾变年份进行预测 $\hat{z}^{(0)}(11)=\hat{z}^{(1)}(11)-z^{(1)}(10)=33.434\ 8$, 由原始序号得知, 原始序列最后一次灾变是 2011 年, $z^{(0)}(10)=23$, 现预测下一次灾变年的序号 $\hat{z}^{(0)}(11)=33.434\ 8$, 即从 2011 年马尾松毛虫越冬代灾变年算起, 再过 10 a 即 2021 年为马尾松毛虫越冬代大发生年, 同理可预测之后年份 $z(t+1)=33.434\ 8, z(t+2)=43.769\ 1, z(t+3)=57.297\ 6, z(t+4)=75.007\ 5, z(t+5)=98.191\ 4$ 。

2.3 马尾松毛虫 1 代幼虫灾变预测

与上述马尾松毛虫越冬代虫口数 GM(1,1)灾变预测模型相似, 由表 1 根据阈值大于 15 头·株⁻¹可以得到马尾松毛虫 1 代幼虫虫口数 GM(1,1)灾变预测模型。

原始数列为 $x^{(0)}=\{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(28)\}=\{18.3, 42.5, 7.6, 7.8, 7.4, 38.6, 19.6, 40.1, 7.1, 6.6, 7.2, 6.1, 8.6, 18.6, 7.7, 16.4, 12.0, 12.6, 12.1, 12.8, 16.2, 16.1, 7.4, 6.7, 6.7, 6.3, 6.6\}$ 。

对原始数列作灾变映射, 按 $\xi \geq 15$ 得灾变数列, 最终得到灾变日期集 $\{1, 2, 6, 7, 8, 15, 17, 22, 23\}$ 即为建模时所需的原始数列。

作 O_{AG} 得: $O_{AG}\{z^{(0)}\}=z^{(1)}=\{1, 3, 9, 16, 24, 39, 56, 78, 101\}$ 。

按 $z^{(1)}$ 建模： $\hat{a}=(B^TB)^{-1}B^Ty_N=\begin{bmatrix} -0.241\ 87 \\ 4.155\ 67 \end{bmatrix}$ ，即 $\hat{a}=-0.241\ 87$ ， $u=4.155\ 67$ ， $u/a=-17.181\ 8$ ， $z^{(0)}(1)=1$ ，由此得出马尾松毛虫 1 代幼虫虫口数的 GM(1,1)灾变预测模型： $\hat{z}^{(1)}(k+1)=18.181\ 8e^{0.241\ 87k}-17.181\ 8$ 。

将根据马尾松毛虫 1 代幼虫虫口数的 GM(1,1)灾变预测模型得到的拟合值、误差等列于表 3。

表 3 马尾松毛虫 1 代幼虫虫口数预测的拟合值与误差

Table 3 Fitting value and error of prediction of population number of first generation larvae of <i>D. punctatus</i>					
序号	大于阈值的年份	虫口数/(头·株 ⁻¹)			精度/%
		观察值	拟合值	误差	
$x(1)$	1989	1	1.00	0	100.00
$x(2)$	1990	2	4.97	-2.97	48.75
$x(3)$	1994	6	6.34	-0.34	94.40
$x(4)$	1995	7	8.07	-1.07	84.72
$x(5)$	1996	8	10.28	-2.28	71.53
$x(6)$	2003	15	13.09	1.91	87.27
$x(7)$	2005	17	16.67	0.33	98.07
$x(8)$	2010	22	21.23	0.77	96.52
$x(9)$	2011	23	27.04	-4.04	82.42

对观察值和拟合值的差异进行 t 检验， $t=0.218\ 6$ ， $d_j=16$ 时， $t_{0.05}=2.12$ ， $t<t_{0.05}$ ，两者差异不显著，平均误差(2 个均数之差)只有观察值均数的 6.49%。实际观察值与通过 GM(1,1)灾变预测模型得到的拟合值之间误差较小，各灾变年的精度平均为 84.85%，总体精度为 92.34%。由此可以通过这个模型求得未来 5 个时刻的预测值，用所建灾变预测模型 $\hat{z}^{(1)}(k+1)=18.181\ 8e^{0.241\ 87k}-17.181\ 8$ 对未来马尾松毛虫一代幼虫灾变年份进行预测 $\hat{z}^{(0)}(10)=\hat{z}^{(1)}(10)-z^{(1)}(9)=34.443\ 8$ ，由原始序号得知，原始序列最后一次灾变是 2011 年， $z^{(0)}(9)=23$ ，现预测下一次灾变年的序号 $\hat{z}^{(0)}(10)=34.443\ 8$ ，即从 2011 年马尾松毛虫 1 代幼虫灾变年算起，再过 11 a 即 2022 年为马尾松毛虫一代幼虫大发生年，同理可以预测之后年份 $z(t+1)=34.443\ 8$ ， $z(t+2)=43.868\ 4$ ， $z(t+3)=55.871\ 7$ ， $z(t+4)=71.159\ 5$ ， $z(t+5)=90.630\ 2$ 。

2.4 马尾松毛虫 2 代幼虫灾变预测

与马尾松毛虫越冬代和 1 代幼虫虫口数 GM(1,1)灾变预测模型相似，由表 1 根据阈值大于 15 头·株⁻¹可以得到马尾松毛虫 2 代幼虫虫口数 GM(1,1)灾变预测模型。

原始数列为 $x^{(0)}=\{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(28)\}=\{34.1, 18.4, 13.2, 11.8, 26.5, 40.4, 19.6, 52.6, 12.4, 11.6, 12.3, 12.6, 16.4, 18.8, 22.6, 12.6, 11.8, 12.1, 13.2, 13.8, 26.8, 16.7, 8.9, 7.2, 7.4, 7.4, 8.1\}$ 。

对原始数列作灾变映射，按 $\xi \geq 15$ 得灾变数列，最终得到灾变日期集 $z=\{1, 2, 5, 6, 7, 8, 14, 15, 16, 22, 23\}$ 即为建模时所需的原始数列。

作 O_{AG} 得： $O_{AG}\{z^{(0)}\}=z^{(1)}=\{1, 3, 8, 14, 21, 29, 43, 58, 74, 96, 119\}$ 。

按 $z^{(1)}$ 建模： $\hat{a}=(B^TB)^{-1}B^Ty_N=\begin{bmatrix} -0.197\ 58 \\ 3.778\ 40 \end{bmatrix}$ ，即 $\hat{a}=-0.197\ 58$ ， $u=3.778\ 40$ ， $u/a=-19.123\ 7$ ， $z^{(0)}(1)=1$ ，由此得出马尾松毛虫 2 代幼虫虫口数的 GM(1,1)灾变预测模型： $\hat{z}^{(1)}(k+1)=20.123\ 7e^{0.197\ 58k}-19.123\ 7$ 。

将根据马尾松毛虫 2 代幼虫虫口数的 GM(1,1)灾变预测模型得到的拟合值、误差等列于表 4。

对观察值和拟合值的差异进行 t 检验， $t=0.195\ 2$ ， $d_j=20$ 时， $t_{0.05}=2.09$ ， $t<t_{0.05}$ ，两者差异不显著，平均误差只占观察值均数的 5.4%。实际观察值与通过 GM(1,1)灾变预测模型得到的拟合值之间误差较小，各灾变年的精度平均为 84.08%，总体平均精度为 94.09%。由此可以通过这个模型求得未来 5 个时刻的预测值，用所建灾变预测模型 $\hat{z}^{(1)}(k+1)=20.123\ 7e^{0.197\ 58k}-19.123\ 7$ 对未来马尾松毛虫 2 代幼虫灾变年份进行预测 $\hat{z}^{(0)}(12)=\hat{z}^{(1)}(12)-z^{(1)}(11)=31.704\ 2$ ，由原始序号得知，最后一次灾变是 2011 年， $z^{(0)}(11)=23$ ，现预测下一次灾变年的序号 $\hat{z}^{(0)}(12)=31.704\ 2$ ，即从 2011 年马尾松毛虫 2 代幼虫灾变年算起，再过 9 a 即

表 4 马尾松毛虫 2 代幼虫虫口数预测的拟合值与误差

Table 4 Fitting value and error of prediction of population number of second generation larvae of <i>D. punctatus</i>					
序号	大于阈值的年份	虫口数/(头·株 ⁻¹)			精度/%
		观察值	拟合值	误差	
<i>x</i> (1)	1989	1	1.00	0	100.00
<i>x</i> (2)	1990	2	4.40	-2.40	19.80
<i>x</i> (3)	1993	5	5.36	-0.36	92.88
<i>x</i> (4)	1994	6	6.53	-0.53	91.23
<i>x</i> (5)	1995	7	7.95	-0.95	86.40
<i>x</i> (6)	1996	8	9.69	-1.69	78.89
<i>x</i> (7)	2002	14	11.81	2.19	84.33
<i>x</i> (8)	2003	15	14.38	0.62	95.90
<i>x</i> (9)	2004	16	17.53	-1.53	90.46
<i>x</i> (10)	2010	22	21.36	0.64	97.07
<i>x</i> (11)	2011	23	26.02	-3.02	86.87

2020 年为马尾松毛虫 2 代幼虫大发生年，同理可预测之后年份 $z(t+1)=31.704\ 2$ ， $z(t+2)=38.629\ 8$ ， $z(t+3)=47.068\ 4$ ， $z(t+4)=57.350\ 3$ ， $z(t+5)=69.878\ 2$ 。

3 小结与讨论

利用灰色灾变模型预测法对安徽省潜山县 1989–2016 年马尾松毛虫幼虫越冬代、1 代和 2 代累计虫口的灾变进行预测，GM(1,1)灾变预测模型分别是 $\hat{z}^{(1)}(k+1)=9.580\ 75e^{0.269\ 33k}-8.580\ 75$ ， $\hat{z}^{(1)}(k+1)=18.181\ 8e^{0.241\ 87k}-17.181\ 8$ 和 $\hat{z}^{(1)}(k+1)=20.123\ 7e^{0.197\ 58k}-19.123\ 7$ 。根据预测模型求得的已知年份的拟合值与观察值进行 *t* 检验，*t*=0.101 7，0.218 6 和 0.195 2，均小于 *t*_{0.05}，差异均不显著，总体平均精度达 96.25%、92.34%和 94.09%，各灾变年精度平均值为 84.40%、84.85%和 84.08%，误差极小。说明灾变预测法对马尾松毛虫幼虫发生量灾变的预测预报是一种较理想的预报方法。从 2011 年算起，预测越冬代灾变年为 2021 年，1 代灾变年为 2022 年，2 代灾变年为 2020 年。

害虫种群的消长，其本质是害虫种群与环境之间进行物质交换和能量传递的结果，它既含有已知的信息，又含有未知的或非确知的信息，实际上是一个灰色系统。灰色系统灾变预测一般是指某种大于阈值的灾害在哪一年份出现，灰色系统灾变预测已经运用到国民经济各个方面的预测，在植物保护方面也被大量利用。在农业害虫的预测上，预测结果与实际情况吻合度很高^[11-13]。灰色系统灾变预测结果在林业害虫的预测上也有报道，吴秋芳等^[14]对河南省安阳县杨树 *Populus* 苗圃地下害虫进行灰色灾变预测，平均精度达 90.40%。宋丁权等^[15]用灰色理论中的灾变模型以及灰色区间模型对马尾松毛虫灾级出现的年份进行了模拟、预测和分析，也取得了较好的效果。与中国马尾松毛虫发生的其他省区相比，安徽省马尾松毛虫发生的偶灾区，由于安徽省马尾松林面积较大，加之还有一定面积的湿地松和火炬松的纯林和混交林，为马尾松毛虫的猖獗提供了发生的基础条件，安徽省地处亚热带和温带的过渡带，温、湿、降雨等气候条件均适宜于马尾松毛虫的发生，马尾松毛虫发生的森林环境，常灾区绝大部分为海拔 100~300 m 的丘陵地区，偶灾区为海拔 300~500 m 的山区，海拔 500 m 以上的山区很少有马尾松毛虫发生，安徽省为海拔 400~800 m 的偶灾区^[1]。马尾松毛虫在遇到适宜的发生条件，极易爆发成灾，所以对马尾松毛虫猖獗成灾的预报有着重要的意义。本研究预测了安徽省潜山县马尾松毛虫越冬代、1 代和 2 代幼虫发生的严重年份，平均精度分别为 96.25%、92.34%和 94.09%。灰色灾变模型预测法预测周期长，预测结果精度高，是较理想的预测方法。对灰色灾变模型的应用在原始序列数据中应有一定的时间长度，这样精度才能提高，再者灾变模型随着时间的推移，也需要不断更新和修正。

4 参考文献

[1] 萧刚柔. 中国森林害虫[M]. 2 版. 北京：林业出版社，1992：948 – 953.
[2] 侯陶谦. 中国松毛虫[M]. 北京：科学出版社，1987：188 – 191.

- [3] 邹运鼎, 程扶玖, 查光济. 松针内含物与马尾松毛虫生存发育关系的研究[J]. 林业科学, 1990, **26**(2): 142 – 148.
ZOU Yunding, CHENG Fujiu, CHA Guangji. Effect of the chemical components of pine needle on the existence and growth of pine caterpillars *Dendrolimus punctatus* [J]. *Sci Silv Sin*, 1990, **26**(2): 142 – 148.
- [4] 张真, 李典谟. 马尾松毛虫暴发机制分析[J]. 林业科学, 2008, **44**(1): 140 – 150.
ZHANG Zhen, LI Dianmo. Approach to outbreak mechanism of *Dendrolimus punctatus* [J]. *Sci Silv Sin*, 2008, **44**(1): 140 – 150.
- [5] 陈绘画, 王坚娅, 徐志宏. 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[J]. 东北林业大学学报, 2011, **39**(9): 94 – 96.
CHEN Huihua, WANG Jianya, XU Zhihong. Application of response-surface methodology to chaos detection and forecast of occurrence quantity of *Dendrolimus punctatus* [J]. *J Northeast For Univ*, 2011, **39**(9): 94 – 96.
- [6] 张爱兵, 陈建, 王正军, 等. BP 网络模型和 LOGIT 模型在森林害虫测报上的应用初报[J]. 生态学报, 2001, **21**(12): 2159 – 2156.
ZHANG Aibing, CHEN Jian, WANG Zhengjun, *et al.* The application of BP model and LOGIT model to prediction of forest insect pests [J]. *Acta Ecol Sin*, 2001, **21**(12): 2159 – 2156.
- [7] 田万银, 徐华潮. 浙江沿海防护林马尾松毛虫的预测预报模型[J]. 环境昆虫学报, 2012, **34**(4): 401 – 406.
TIAN Wanyin, XU Huachao. The prediction model of *Dendrolimus punctatus* Walker in coastal shelterbelt of Zhejiang [J]. *J Environ Entomol*, 2012, **34**(4): 401 – 406.
- [8] 许章华, 李聪慧, 刘健. 马尾松毛虫害等级的 Fisher 判别分析[J]. 农业机械学报, 2014, **45**(6): 401 – 406.
XU Zhanghua, LI Conghui, LIU Jian. Fisher discriminant analysis of *Dendrolimus punctatus* Walker pest level [J]. *Trans Chin Soc Agric Mach*, 2014, **45**(6): 401 – 406.
- [9] PARK Y S, CERECHINO R, COMPIN A. Applications of artificial neural networks for patterning and predicting aquatic insect species richness in running waters [J]. *Ecol Modelling*, 2003, **160**(3): 265 – 280.
- [10] 唐启义. DPS 数据处理系统[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2010: 1084 – 1092.
- [11] 张传珂. 应用灰色系统模型对麦蜘蛛灾变预测的研究[J]. 安徽农业科学, 2005, **33**(2): 221 – 222.
ZHANG Chuanke. Research on the forecast of the sudden change of the wheat spider with grey system theory [J]. *J Anhui Agric Sci*, 2005, **33**(2): 221 – 222.
- [12] 王守会, 戴建国, 赖军臣, 等. 基于 GM(1,1)模型的新疆棉叶螨预测研究[J]. 绿洲农业科学与工程, 2016 (4): 25 – 30.
WANG Shouhui, DAI Jianguo, LAI Junchen, *et al.* Predictive study on Xinjiang cotton spider mites based on GM (1, 1) models [J]. *Oasis Agric Sci Eng*, 2016(4): 25 – 30.
- [13] 熊彩珍, 白锡川. 灰色理论在桑螟灾变预测中的应用[J]. 蚕业科学, 2009, **35**(4): 869 – 871.
XIONG Caizheng, BAI Xichuan. Application of grey theory in forecasting the *Diaphania pyralis* catclysm [J]. *Sci Seric*, 2009, **35**(4): 869 – 871.
- [14] 吴秋芳, 贺春玲, 路志芳. 杨树苗圃地下害虫灰色灾变预测研究[J]. 湖北农业科学, 2014, **53**(15): 3553 – 3559.
WU Qiufang, HE Chunling, LU Zhifang. Grey disaster forecast of soil-inhabiting pests of poplar nursery [J]. *Hubei Agric Sci*, 2014, **53**(15): 3553 – 3559.
- [15] 宋丁权, 周晓路. 灾变模型在马尾松毛虫灾级预报上的应用[J]. 南京林业大学学报, 1993, **17**(2): 75 – 78.
SONG Dingquan, ZHOU Xiaolu. Application of disaster model to *Dendrolimus punctatus* disaster degree prediction [J]. *J Nanjing For Univ*, 1993, **17**(2): 75 – 78.