

# 概率膜系统在大熊猫种群数据建模中的应用<sup>①</sup>

黄志伟<sup>1</sup>, 张葛祥<sup>1</sup>, 齐敦武<sup>2</sup>, 荣海娜<sup>1</sup>, MARIO J. Pérez-Jiménez<sup>3</sup>, LUIS Valencia-Cabrera<sup>3</sup>

<sup>1</sup>(西南交通大学 电气工程学院, 成都 610031)

<sup>2</sup>(成都大熊猫繁育研究基地, 成都 610081)

<sup>3</sup>(University of Seville Department of Computer Science and Artificial Intelligence, Seville 41012)

**摘要:** 大熊猫种群数据是掌握大熊猫种群动态变化的重要依据, 因此大熊猫种群数据建模对保护大熊猫具有重要意义. 本文针对现有种群动态性建模方法无法捕获复杂生态系统的随机效应和可扩展性差的问题, 提出一种使用概率膜系统对成都大熊猫繁育研究基地大熊猫种群数据建模的方法. 基于成都大熊猫繁育研究基地大熊猫谱系数据, 设计了一个具有两层膜结构, 形式化表示大熊猫生态系统的一系列对象和规则的概率膜系统模型. 仿真实验结果表明, 该模型能反映大熊猫种群动态变化趋势, 给管理者提供参考.

**关键词:** 概率膜系统; 大熊猫; 种群数据; 数据建模

引用格式: 黄志伟, 张葛祥, 齐敦武, 荣海娜, MARIO J. Pérez-Jiménez, LUIS Valencia-Cabrera. 概率膜系统在大熊猫种群数据建模中的应用. 计算机系统应用, 2017, 26(8): 252-256. <http://www.c-s-a.org.cn/1003-3254/5878.html>

## Application of Probabilistic Membrane Systems to Model Giant Panda Population Data

HUANG Zhi-Wei<sup>1</sup>, ZHANG Ge-Xiang<sup>1</sup>, QI Dun-Wu<sup>2</sup>, RONG Hai-Na<sup>1</sup>, MARIO J. Pérez-Jiménez<sup>3</sup>, LUIS Valencia-Cabrera<sup>3</sup>

<sup>1</sup>(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

<sup>2</sup>(Chengdu Research Base of Giant Panda Breeding, Chengdu 610081, China)

<sup>3</sup>(Department of Computer Science and Artificial Intelligence, University of Seville, Seville 41012, Spain)

**Abstract:** Giant panda population data are important bases for knowing the population dynamics of giant pandas. Thus, it is significant to model giant panda population data for conservation. To solve the problems that the existing methods for modeling population dynamics were not able to capture the randomness in a complex ecological system and have bad extensibility, a probability membrane system for modeling the giant panda ecosystem is proposed based on the data from Chengdu Research Base of Giant Panda Breeding. On the basis of giant panda pedigree, a probability membrane system is designed with a membrane structure consisting of two nested membranes, a series of objects and evolution rules for representing the giant panda ecosystem. The simulation results show that the model can reflect the dynamic changes of giant panda population and therefore can provide reference for managers.

**Key words:** probabilistic membrane system; giant panda; population data; data modeling

大熊猫已在地球上生存了至少 800 万年, 被誉为“活化石”和“中国国宝”, 属国际一级保护动物, 是世界自然基金会的形象大使, 世界生物多样性保护的旗舰物种<sup>[1-4]</sup>. 在保护过程中, 定量的了解大熊猫短期、长期种群数量和年龄结构的变化以及这些变化主要受到何

种因素影响(即种群动态性)具有重要意义<sup>[5,6]</sup>.

早期, 研究者主要使用常微分方程或偏微分方程对种群动态性进行建模分析<sup>[7,8]</sup>. 这些方法虽可以形式化表示生态系统, 但暴露了许多无法克服的缺点. 例如, 不能捕获生态系统的随机效应, 建模过程过于复杂, 建

① 基金项目: 国家自然科学基金(61672437, 31372223, 61373047); 成都大熊猫繁育研究基金会(CPF2015-19, CPF2013-17)

收稿时间: 2016-11-21; 采用时间: 2016-12-12

立的模型非模块化等. 为了克服早期建模方法的缺点, 研究者提出了新的建模方法. 例如, 多代理模型<sup>[9,10]</sup>与结构化方程模型<sup>[11]</sup>等. 这些模型更加符合生态系统的特点, 模块化具有较好的扩展性, 但不能较好的捕获生态系统的随机效应. 概率膜系统<sup>[12]</sup>是在膜系统的基础上引入概率机制而发展起来. 概率膜系统中, 规则不仅符合膜系统极大并行的执行方式, 而且依据随机算法, 每条规则被赋予一个概率变量, 规则执行由概率变量决定. 因此, 概率膜系统可以很好的解决随机性较高的问题.

目前, 研究者主要研究分析了大熊猫成长过程中单个因素对大熊猫种群动态性的影响. 例如, 文献<sup>[13-15]</sup>分别研究分析了大熊猫种群生存能力, 竹子对大熊猫种群动态性的影响及栖息地对大熊猫种群动态性的影响, 但并没有考虑大熊猫短期、长期种群数量和年龄结构的变化. 文献<sup>[16-18]</sup>将概率膜系统应用于西班牙比利牛斯山脉中胡兀鹫生态系统的数据库建模, 定量的分析了胡兀鹫生态系统中胡兀鹫短期、长期种群数量的变化. 文献<sup>[19]</sup>将概率膜系统应用于庇里牛斯蝾螈生态系统的数据库建模, 定量的分析了庇里牛斯蝾螈生态系统中蝾螈种群短期、长期数量的变化. 这些研究工作清楚地表明, 概率膜系统是生态系统种群动态性建模与分析的有效工具.

由此, 本文提出使用概率膜系统对成都大熊猫繁育研究基地大熊猫种群数据建模的方法. 基于成都大熊猫繁育研究基地大熊猫谱系数据, 设计了一个具有两层膜结构, 形式化表示大熊猫生态系统的一系列对象和规则的概率膜系统模型. 该模型不仅克服了其它模型局限性较大且可扩展性差等缺点, 又充分展示了其固有的分布式结构与高度并行的计算方式等优点.

## 1 数据搜集与分析

本文以成都大熊猫繁育研究基地大熊猫生态系统作为研究对象. 该生态系统中物种数量较为单一, 不存在物种之间的生存竞争, 因此只需考虑大熊猫个体进化行为过程中的相关因素. 成都大熊猫繁育研究基地大熊猫生态系统中, 由于人为干预的因素, 考虑大熊猫个体救护对种群的影响, 忽略疾病及天气变化等外界条件对种群的影响. 因此, 数据搜集主要考虑大熊猫繁殖, 死亡, 进食成长, 个体救护等主要影响大熊猫种群动态性的因素.

从出生到死亡, 依照大熊猫不同时期的行为特点, 一般将其分为幼年, 亚成年, 青年, 中年, 中老年, 老年六个年龄阶段. 因此, 分别搜集雌性大熊猫和雄性大熊猫达到不同年龄阶段的年龄及处在各个年龄段的雌性大熊猫和雄性大熊猫死亡率和所需要的食物量. 除此之外, 还需搜集雌性大熊猫和雄性大熊猫个体的年龄分布和各个年龄的个体数量, 以及各自繁殖开始与结束的年龄.

分析整理搜集的影响大熊猫种群动态性的数据, 并将其参数化. 符号  $i$  表示大熊猫的性别( $i=1$  表示雄性大熊猫,  $i=2$  表示雌性大熊猫).  $k_{i,1}, k_{i,2}, k_{i,3}, k_{i,4}, k_{i,5}$  分别表示性别为  $i$  的大熊猫处于亚成年, 青年, 中年, 中老年, 老年阶段;  $k_{i,6}$  表示性别为  $i$  的大熊猫达到的最大年龄;  $p_{i,1}, p_{i,2}, p_{i,3}, p_{i,4}, p_{i,5}, p_{i,6}$  分别表示处于各年龄段性别为  $i$  的大熊猫的死亡率;  $p_{Cn}$  表示有  $n$  个个体被营救的概率;  $p_{Gi}$  表示营救个体性别为  $i$  的概率;  $p_{Aj}$  表示营救个体年龄为  $j$  的概率.

## 2 概率膜系统

本节首先介绍概率膜系统的定义, 随后介绍描述该生态系统的概率膜系统模型, 最后给出模型运行格局图.

### 2.1 概率膜系统定义

膜计算是自然计算的新分支, 由欧洲科学院院士、罗马尼亚科学院院士 Gheorghe Păun 提出<sup>[20]</sup>. 膜系统由膜结构、对象和进化规则三要素构成. 膜系统中, 膜结构界定了对象和规则所处的区域, 对象按照所在区域的规则不断演化, 进化规则以极大并行的方式执行. 膜系统运行开始前的状态称为初始格局. 当膜系统自初始格局开始, 由进化规则控制, 从一个格局演化到下一个格局, 直到没有任何规则执行时, 系统终止, 此时的系统状态称为终止格局. 终止格局时, 指定膜里对象的数目是膜系统的输出<sup>[21,22]</sup>. 概率膜系统是在膜系统的基础上引入概率机制而发展起来. 因此, 一个度为  $n$  的概率膜系统  $\Pi$  可定义<sup>[12]</sup>为:

$$\Pi = (\Gamma, \mu, w_1, \dots, w_n, R, \{p_r\}_{r \in R}) \quad (1)$$

其中:

(1)  $\Gamma$  是字母表, 包含有限且非空个表示对象的字符集, 其中对象的个数被定义为字母表的长度;

(2)  $\mu$  是包含了  $m$  个膜的膜结构, 每个膜都采用相

应的标签号来表示,  $H = \{1, \dots, m\}$ 是膜结构标签号集合, 通常用一对括号[]表示一层膜, 括号的下标即为膜的标签号, 如[]<sub>1</sub>表示膜1;

(3)  $W$  是各个区域初始多重对象集的集合, 即  $W = (w_0, \dots, w_m)$ , 其中  $w_i (0 \leq i \leq m)$  是第  $i$  个膜区域内的初始对象集, 并且  $w_i$  是由字母表中的元素构成的多重对象集,  $w_i$  中包含对象的个数称为  $w_i$  的长度, 每一个  $w_i$  可以为空集, 即不包含任何对象;

(4)  $R_i$  是各区域进化规则集的集合, 即  $R = (R_0, \dots, R_m)$ ,  $R_i (0 \leq i \leq m)$  是第  $i$  个膜区域内的规则集, 如  $u[v]_i \xrightarrow{p_r} u'[v']_i$ , 其中  $u, v, u', v'$  是字母表里的对象集,  $p_r$  是 0-1 之间的数, 表示规则  $r$  被选中执行的概率值.

一个概率膜系统的计算过程如下: 在开始计算后, 各个区域依照概率值被选中的进化规则集  $R_i (0 \leq i \leq m)$  在对应膜区域中初始对象集  $w_i (0 \leq i \leq m)$  触发下, 按照极大并行方式不断执行, 膜系统从初始格局不断转移到下一个格局, 直到对象集不再触发进化规则执行, 处于最终格局.

### 2.2 概率膜系统模型

基于对成都大熊猫繁育研究基地大熊猫数据的搜集与分析, 本文使用概率膜系统对成都大熊猫繁育研究基地的大熊猫进行数据建模, 设计了一个具有两层膜结构的概率膜系统:

$$\prod = (\Gamma, \mu, w_1, w_2, R, \{p_r\}_{r \in R}) \quad (2)$$

其中:

(1) 字母表  $\Gamma$  中, 采用  $X, Y, Z, W$  表示处于不同成长阶段的大熊猫,  $i, j$  分别表示大熊猫性别及年龄,  $F$  表示每个周期供给大熊猫的食物量;

$$\Gamma = \{X_{i,j}, Y_{i,j}, Z_{i,j}, W_{i,j}\} \cup \{F, N, A\} \quad (3)$$

(2) 膜结构中, 采用两层膜结构实现,  $\mu = [[]_2]_1$ ;

(3) 各区域对象集  $w_1 = \{X_{i,j}^{q_{i,j}} | 1 \leq i \leq 2, 0 \leq j \leq k_{i,6}\}$ , 其中  $q_{i,j}$  表示初始化时年龄为  $j$  性别为  $i$  的大熊猫的数量,  $w_2 = \{F, N, A\}$ , 其中  $A$  是救护发生时所需的对象;

(4) 规则集由初始规则, 繁殖规则, 死亡规则, 进食规则, 救护规则, 更新规则五部分组成. 下面给出部分规则集:

#### 1) 繁殖规则

$$r_1 \equiv [N]_2 \rightarrow N[Y_{1,0}^{g_1} Y_{2,0}^{g_2}]_2 \quad (4)$$

$$r_2 \equiv X_{i,j}[]_2 \rightarrow [Y_{i,j}]_2, 1 \leq i \leq 2, 1 \leq j \leq k_{i,6}; \quad (5)$$

#### 2) 死亡规则

##### ①幼年:

$$r_3 \equiv [Y_{i,j} \xrightarrow{1-P_{i,1}} Z_{i,j}]_2, 1 \leq i \leq 2, 0 \leq j < k_{i,1} \quad (6)$$

$$r_4 \equiv [Y_{i,j} \xrightarrow{P_{i,1}} \lambda]_2, 1 \leq i \leq 2, 0 \leq j < k_{i,1} \quad (7)$$

##### ②亚成年:

$$r_5 \equiv [Y_{i,j} \xrightarrow{1-P_{i,2}} Z_{i,j}]_2, 1 \leq i \leq 2, k_{i,1} \leq j < k_{i,2} \quad (8)$$

$$r_6 \equiv [Y_{i,j} \xrightarrow{P_{i,2}} \lambda]_2, 1 \leq i \leq 2, k_{i,1} \leq j < k_{i,2} \quad (9)$$

##### ③青年:

$$r_7 \equiv [Y_{i,j} \xrightarrow{1-P_{i,3}} Z_{i,j}]_2, 1 \leq i \leq 2, k_{i,2} \leq j < k_{i,3} \quad (10)$$

$$r_8 \equiv [Y_{i,j} \xrightarrow{P_{i,3}} \lambda]_2, 1 \leq i \leq 2, k_{i,2} \leq j < k_{i,3} \quad (11)$$

##### ④中年:

$$r_9 \equiv [Y_{i,j} \xrightarrow{1-P_{i,4}} Z_{i,j}]_2, 1 \leq i \leq 2, k_{i,3} \leq j < k_{i,4} \quad (12)$$

$$r_{10} \equiv [Y_{i,j} \xrightarrow{P_{i,4}} \lambda]_2, 1 \leq i \leq 2, k_{i,3} \leq j < k_{i,4} \quad (13)$$

##### ⑤中老年:

$$r_{11} \equiv [Y_{i,j} \xrightarrow{1-P_{i,5}} Z_{i,j}]_2, 1 \leq i \leq 2, k_{i,4} \leq j < k_{i,5} \quad (14)$$

$$r_{12} \equiv [Y_{i,j} \xrightarrow{P_{i,5}} \lambda]_2, 1 \leq i \leq 2, k_{i,4} \leq j < k_{i,5} \quad (15)$$

##### ⑥老年:

$$r_{13} \equiv [Y_{i,j} \xrightarrow{1-P_{i,6}} Z_{i,j}]_2, 1 \leq i \leq 2, k_{i,5} \leq j < k_{i,6} \quad (16)$$

$$r_{14} \equiv [Y_{i,j} \xrightarrow{P_{i,6}} \lambda]_2, 1 \leq i \leq 2, k_{i,5} \leq j < k_{i,6} \quad (17)$$

##### ⑦达到最大年龄:

$$r_{15} \equiv [Y_{i,j} \rightarrow \lambda]_2, 1 \leq i \leq 2, j = k_{i,6} \quad (18)$$

#### 3) 救护规则

$$r_{16} \equiv [A]_2 \xrightarrow{P_{Cn}} AC^n[]_2, c_{\min} \leq n \leq c_{\max} \quad (19)$$

$$r_{17} \equiv [C \xrightarrow{P_{Gi}} C_i]_1, 1 \leq i \leq 2 \quad (20)$$

$$r_{18} \equiv [C_i \xrightarrow{P_{Aj}} C_{i,j}]_1, 1 \leq i \leq 2, c_{\min a} \leq j \leq c_{\max a} \quad (21)$$

综上所述, 模型考虑了大熊猫繁殖, 死亡, 进食成长, 个体救护等影响大熊猫种群动态性的主要因素. 该模型的运行格局图如图 1 所示.

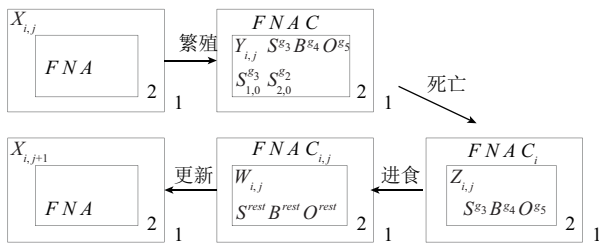


图1 模型运行格局图

### 3 实验仿真与讨论

为了验证本文设计的概率膜系统模型的有效性和可行性,基于2005-2014年大熊猫谱系,分别统计了各年份成都大熊猫繁育研究基地雌性和雄性大熊猫的数量,将实验结果与实际数据进行比较分析.实验中,概率膜系统模型规则的实现基于P-Lingua,实验仿真所用计算机为华硕K50ID 2.20 GHz, 2 GMB,仿真平台为MeCoSim. 2005年雌性和雄性大熊猫数量作为输入,2006-2014年雌性和雄性大熊猫数量作为输出.

概率膜系统模型中,一个周期表示一个自然年.在自然界中,大熊猫在一个自然年内个体进化行为过程是随机的.因此,可以通过调整模型中繁殖,死亡及进食模块的顺序进行仿真实验.死亡模块的参数如表1所示.救护模块参数设置情况如表2所示.

表1 大熊猫各年龄阶段死亡参数

|    | $P_{i,1}$ | $P_{i,2}$ | $P_{i,3}$ | $P_{i,4}$ | $P_{i,5}$ | $P_{i,6}$ |
|----|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 雄性 | 0.09      | 0.001     | 0.007     | 0.008     | 0.1       | 0.15      |
| 雌性 | 0.05      | 0.001     | 0.005     | 0.005     | 0.034     | 0.09      |

表2 大熊猫营救个体数量参数

| 数量n | $P_{Cn}$ 参数值 |
|-----|--------------|
| n=0 | 0.6          |
| n=1 | 0.4          |

雄性大熊猫种群数量变化实验结果与真实数据进行对比,结果如图2所示.

雌性大熊猫种群数量变化实验结果与真实数据进行对比,结果如图3所示.

从以上结果可以看出,本文设计的概率膜系统模型仿真结果与真实数据比较,误差较小,较好的模拟了大熊猫种群动态变化趋势.

### 4 结束语

本文使用一种新颖的方法对具有完整家谱信息的

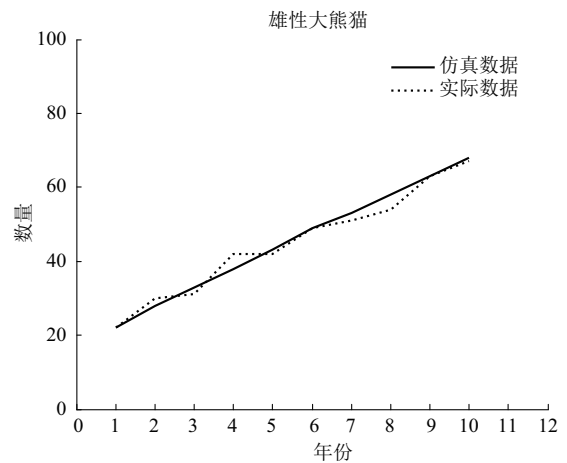


图2 雄性大熊猫种群数量变化

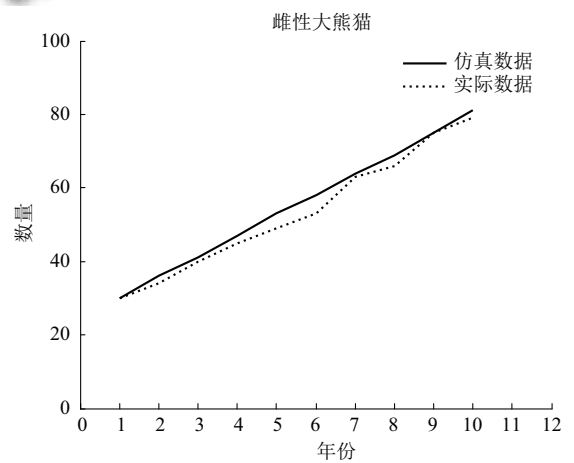


图3 雌性大熊猫种群数量变化

成都大熊猫繁育研究基地大熊猫建模分析.实验结果表明,该概率膜系统模型可以较好的模拟大熊猫种群动态变化趋势.该研究不仅能够给决策者提供参考,而且模块化的模型特点可以让模型设计者将来考虑更多复杂的情形.

### 参考文献

- 1 Qi DW, Hu YB, Gu XD, *et al.* Ecological niche modeling of the sympatric giant and red pandas on a mountain-range scale. *Biodiversity and Conservation*, 2009, 18(8): 2127–2141. [doi: 10.1007/s10531-009-9577-7]
- 2 Qi DW, Zhang SN, Zhang ZJ, *et al.* Different habitat preferences of male and female giant pandas. *Journal of Zoology*, 2011, 285(3): 205–214. [doi: 10.1111/jzo.2011.285.issue-3]
- 3 Qi DW, Hu YB, Gu XD, *et al.* Quantifying landscape linkages among giant panda subpopulations in regional scale



- conservation. *Integrative Zoology*, 2012, 7(2): 165–174. [doi: [10.1111/inz.2012.7.issue-2](https://doi.org/10.1111/inz.2012.7.issue-2)]
- 4 Qi DW, Zhang SN, Zhang ZJ, *et al.* Measures of giant panda habitat selection across multiple spatial scales for species conservation. *The Journal of Wildlife Management*, 2012, 76(5): 1092–1100. [doi: [10.1002/jwmg.v76.5](https://doi.org/10.1002/jwmg.v76.5)]
- 5 Tanentzap AJ, Walker S, Theo Stephens RT, *et al.* A framework for predicting species extinction by linking population dynamics with habitat loss. *Conservation Letters*, 2012, 5(2): 149–156. [doi: [10.1111/j.1755-263X.2011.00221.x](https://doi.org/10.1111/j.1755-263X.2011.00221.x)]
- 6 Unglaub B, Steinfartz S, Drechsler A, *et al.* Linking habitat suitability to demography in a pond-breeding amphibian. *Frontiers in Zoology*, 2015, 12(1): 9. [doi: [10.1186/s12983-015-0103-3](https://doi.org/10.1186/s12983-015-0103-3)]
- 7 唐启义, 胡国文, 冯明光, 等. 生物种群动态微分方程模型参数估计方法. *生物数学学报*, 1996, 11(5): 69–75.
- 8 赵中华, 沈佐锐. 昆虫种群发育数量动态的模拟模型及其应用. *植物保护学报*, 1999, 26(1): 13–19.
- 9 杜军平, Mayoh B. 智能体在自然界建模中的应用研究. *计算机工程*, 2000, 26(12): 75–76. [doi: [10.3969/j.issn.1000-3428.2000.12.031](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-3428.2000.12.031)]
- 10 关广丰, 景方, 杜德生. 聚集演化过程仿真与特征分析. *哈尔滨理工大学学报*, 2002, 7(5): 12–15.
- 11 陈琦, 梁万年, 孟群. 结构方程模型及其应用. *中国卫生统计*, 2004, 21(2): 70–74.
- 12 Colomer MÀ, Margalida A, Sanuy D, *et al.* A bio-inspired computing model as a new tool for modeling ecosystems: The avian scavengers as a case study. *Ecological Modelling*, 2011, 222(1): 33–47. [doi: [10.1016/j.ecolmodel.2010.09.012](https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2010.09.012)]
- 13 Guo J, Chen YH, Hu JC. Population viability analysis of giant pandas in the Yele Nature Reserve. *Journal for Nature Conservation*, 2002, 10(1): 35–40. [doi: [10.1078/1617-1381-00004](https://doi.org/10.1078/1617-1381-00004)]
- 14 Guo J, Chen YH, Zhang HD, *et al.* A mathematical model for the population of giant pandas and bamboo in Yele Nature Reserve of Xiangling Mountains. *Journal for Nature Conservation*, 2002, 10(2): 69–74. [doi: [10.1078/1617-1381-00008](https://doi.org/10.1078/1617-1381-00008)]
- 15 Gui ZJ, Song GH, Chen YX. Simulation study on giant panda population dynamics model with due consideration for deforestation. *Procedia Environmental Sciences*, 2012, 13: 2091–2097. [doi: [10.1016/j.proenv.2012.01.199](https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.01.199)]
- 16 Cardona M, Colomer MA, Pérez-Jiménez MJ, *et al.* Modeling ecosystems using P systems: The bearded vulture, a case study. Corne DW, Frisco P, Păun G, *et al.* *Membrane Computing*. Berlin Heidelberg: Springer, 2008. 137–156.
- 17 Cardona M, Colomer MA, Margalida A, *et al.* A P system based model of an ecosystem of some scavenger birds. Păun G, Pérez-Jiménez MJ, Riscos-Núñez A, *et al.* *Membrane Computing*. Berlin Heidelberg: Springer, 2009. 182–195.
- 18 Margalida A, Colomer MÀ, Sanuy D. Can wild ungulate carcasses provide enough biomass to maintain Avian scavenger populations? An empirical assessment using a bio-inspired computational model. *PLoS One*, 2011, 6(5): e20248. [doi: [10.1371/journal.pone.0020248](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0020248)]
- 19 Colomer MÀ, Montori A, García E, *et al.* Using a bioinspired model to determine the extinction risk of *Calotriton asper* populations as a result of an increase in extreme rainfall in a scenario of climatic change. *Ecological Modelling*, 2014, 281: 1–14. [doi: [10.1016/j.ecolmodel.2014.02.018](https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2014.02.018)]
- 20 Păun G. Computing with membranes. *Journal of Computer and System Sciences*, 2000, 61(1): 108–143. [doi: [10.1006/jcss.1999.1693](https://doi.org/10.1006/jcss.1999.1693)]
- 21 张葛祥, 潘林强. 自然计算的新分支——膜计算. *计算机学报*, 2010, 33(2): 208–214.
- 22 张葛祥, 程吉祥, 王涛, 等. *膜计算: 理论与应用*. 北京: 科学出版社, 2015.