

白背飞虱体内金属元素的含量动态及模拟分析

时 嵩¹, 唐启义^{1,*}, 傅 强², 彭 奇¹, 程家安¹

(1. 浙江大学昆虫科学研究所/水稻生物学国家重点实验室, 杭州 310029; 2. 中国水稻研究所水稻生物学国家重点实验室, 杭州 310006)

摘要: 为明确金属元素在白背飞虱 *Sogatella furcifera* (Horváth) 体内的分布及其含量动态, 将白背飞虱长翅成虫在实验室中用超纯水分别饲养 0, 24, 48, 96 h 后测量其体重变化; 并用电感耦合等离子体质谱 (inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS) 检测各个处理虫体内 12 种金属元素 (Cu, Zn, Cd, Mn, Ca, Fe, Na, As, U, Mg, K 和 Pb) 的含量。以白背飞虱整个体重 (W)、有机体组织重量 (O)、体内可排泄内容物重量 (E) 及可排泄内容物排出体外的速率 (r) 为参数, 构建其体重变化的修正指数模型 $W_t = O + E(1-r)^t$ 。基于白背飞虱体内金属元素总含量 (WC_t) 为有机体组织内含量 (OC) 和可排泄内容物中含量 (EC) 按两者百分率 (OP_t 和 EP_t) 加权之和, 即 $WC_t = OC \cdot OP_t + EC \cdot EP_t$, 分别估计白背飞虱体内组织和可排泄内容物中金属元素含量。模拟分析结果表明: Cu, Zn, Cd, Mn 和 Ca 这 5 种元素在白背飞虱组织内的含量显著高于其可排泄内容物中的含量 ($P < 0.05$), 表明这些金属元素可被昆虫有机体组织吸收、积累, 并稳定地存在于昆虫的有机体组织之中。Fe, Na, As, U, Mg, K 和 Pb 这 7 种元素在白背飞虱有机体组织内的含量与其可排泄内容物中的含量接近, 其在有机体组织和可排泄内容物中的分布差异不显著 ($P > 0.05$), 以相对平衡状态存在于白背飞虱有机体组织和可排泄内容物中。该分析方法可能为其他小型和微型昆虫体内金属元素的分布、积累、排泄的研究提供借鉴。

关键词: 白背飞虱; 金属元素含量; 生物富集; 模型分析

中图分类号: Q959 文献标识码: A 文章编号: 0454-6296(2011)07-0778-08

Dynamics and simulation modeling of the content of metal elements in *Sogatella furcifera* Horváth (Homoptera, Delphacidae)

SHI Song¹, TANG Qi-Yi^{1,*}, FU Qiang², PENG Qi¹, CHENG Jia-An¹ (1. State Key Laboratory of Rice Biology, Institute of Insect Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China; 2. State Key Laboratory of Rice Biology, China National Rice Research Institute, Hangzhou 310006, China)

Abstract: To determine the distribution and dynamic excretion of metal elements, the test insects, adults of the *Sogatella furcifera* (Horváth) were subjected to feeding on deionized water for 0 h, 24 h, 48 h, and 96 h, respectively. The body weight changes were measured and the contents of twelve metal elements (Cu, Zn, Cd, Mn, Ca, Fe, Na, As, U, Mg, K and Pb) in *S. furcifera* were detected using ICP-MS technique. At the same time, we denote the entire body weight, the organic tissue weight, the weight of the intestinal contents and their excretion rate of *S. furcifera* by W , O , E and r , respectively. The body weight of *S. furcifera* at different time can be expressed by the modified exponent equation $W_t = O + E(1-r)^t$. Considering the content of a certain element in *S. furcifera* (WC_t) should be the sum of the content of that element in the organic tissues (OC) and in the intestinal contents (EC), the statistical model is $WC_t = OC \cdot OP_t + EC \cdot EP_t$, where OP_t is the percentage of O to body weight at time t and EP_t is the percentage of E . The results of simulation modeling showed that the contents of Cu, Zn, Cd, Mn and Ca are significantly higher in the organic tissues than those in the intestinal contents ($P < 0.05$), suggesting that these elements can be absorbed or accumulated by organic tissues. The contents of seven elements (Fe, Na, As, U, Mg, K and Pb) have no significant difference between in the organic tissues and in the intestinal contents ($P > 0.05$), suggesting that the contents of these elements in the organic tissues are balanced with those in the intestinal contents and their contents in insect body are not significantly changed. The simulation modeling method can provide reference to other studies

基金项目: 国家重点基础研究发展规划 (“973”计划)项目(2010CB126200); 国家高技术研究发展 (“863”计划)项目(2006AA10Z217); 农业部公益性行业科研专项(200803003)

作者简介: 时嵩, 男, 1986年生, 湖南岳阳人, 硕士研究生, 研究方向为昆虫生物技术, E-mail: shisong1986@gmail.com

* 通讯作者 Corresponding author, E-mail: qytang@zju.edu.cn

收稿日期 Received: 2010-12-29; 接受日期 Accepted: 2011-04-14

involving metal distribution, accumulation and excretion in other small or micro-insects.

Key words: *Sogatella furcifera*; metal element content; bio-accumulation effect; simulation modelling

在急剧发展的工业化时代, 土壤或水体中很多金属元素的含量可能增加。这时生物摄取金属元素的数量增加会导致部分金属元素富集, 以致对生态系统产生不利影响。金属元素富集或多或少地影响到昆虫行为, 如改变取食方式、迁徙和生殖行为等 (Mogren and Trumble, 2010)。在陆生昆虫中, 昆虫摄取金属元素的主要途径是通过消化道 (Hopkin, 1989)。不同金属元素进入昆虫体内后的分布位置与该元素是否在体内富集有潜在关系。自然状态下, 金属元素通过食物进入昆虫体后, 一部分透过上皮细胞进入血淋巴, 血淋巴将金属元素通过血液循环运至其他器官, 如消化道、马氏管、脂肪体、生殖器和表皮等, 与金属硫蛋白结合, 以稳定形式储藏在这些器官的细胞中 (Clubb *et al.*, 1975; Ballen-Dufrançais, 2002), 导致生物体内金属元素含量增加, 但这不会对生物体本身产生有害影响 (Hopkin, 1989)。另外有些分布在消化道内的过量金属元素可通过粪便直接排泄出体外 (Heliövaara and Väisänen, 1990)。排泄功能是由马氏管来执行的, 马氏管负责过滤昆虫血淋巴中过量的金属元素 (Przybyłowicz *et al.*, 2003); 同时马氏管还可以储存或排泄新陈代谢的废物和过量的金属离子 (Green, 1979; Sohal and Lamb, 1979; Ballen-Dufrançais, 2002)。

昆虫在生态系统中常有着较高的种群密度。因此, 昆虫体内金属元素含量常可以反映整个生态系统金属元素富集情况。国外关于昆虫体内金属元素分布、富集等方面的研究以水生昆虫较为常见, 如蜉蝣、石蚕蛾和石蝇等, 这些昆虫常被作为指示生物 (Nehring, 1976; Walton, 1989)。此外, 鳞翅目、膜翅目、双翅目、鞘翅目、同翅目、直翅目等陆生昆虫亦被用来监测被污染的生态系统中的金属元素浓度 (孙虹霞等, 2007)。国内对昆虫体内金属元素的研究并不多见, 仅有棕尾别麻蝇 *Boettcherisca peregrine* (Robineau-Desvoidy) (吴国星等, 2007) 和斜纹夜蛾 *Spodoptera litura* Fabricius (孙虹霞等, 2008) 等报道。现有研究表明, 不同金属元素在不同昆虫体内的分布、积累表现不同, 即使很相近的种之间也有差异 (Hopkin, 1989, 1990; Rainbow, 2002)。这表明对于不同昆虫体内金属表现特性的研究, 仍有很多工作要做。现有研究的对象基本上

是几种常见的金属元素, 如 Cd, Zn, Cu, Ni 和 Pb 等, 其他金属元素在昆虫体内的分布、排泄及富集尚未见报道。

对于个体微小的昆虫, 研究金属元素在生物体内的富集作用, 如能排除可排泄内容物中金属元素的影响, 则结果更精确。但对于小型昆虫, 用解剖分离的方法除去排泄物以精确检测体内组织中金属元素含量似乎难度很大, 不仅费时费工且操作过程可能存在污染或误差。本研究首先通过构建模型将昆虫整个个体分为有机体组织和可排泄内容物两部分 (本文中可排泄内容物指昆虫消化道内食物和体内代谢废物如排泄系统马氏管或肠道中的粪便等可以消耗或排出体外的物质); 然后对供试白背飞虱长翅成虫用去离子水分别饲养 24, 48 和 96 h, 将处理后的试虫称重, 并用 ICP-MS 技术检测不同处理时间的试虫体内各种金属元素含量; 最后通过模型方法, 建立可排泄内容物变化和金属元素含量变化的关系, 并估计各金属元素在白背飞虱有机体组织和可排泄内容物中的分布及含量动态。

1 材料与方 法

1.1 虫源

供试白背飞虱于 2010 年 7 月 28 - 30 日取自浙江省富阳市中国水稻研究所试验田 (北纬 30°04', 东经 119°55'), 共采集成虫 5 000 头以上。白背飞虱从田间采集后立即放入干净的塑料管中, 带回实验室立刻处理。供试白背飞虱均为长翅型成虫。

1.2 分析仪器与试剂

每个样品均检测了 Cu, Zn, Cd, Mn, Ca, Fe, Na, As, U, Mg, K 和 Pb 共 12 种金属元素。检测金属元素使用的是电感耦合等离子体质谱仪 (inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS), 型号 Agilent 7500A, 八极反应体系 (octopole reaction system, ORS), 日本横河公司 Yokogawa Analytical Systems Inc.。内标溶液 (Li^6 , Sc^{45} , Ge^{72} , In^{115} , Bi^{209} , HNO_3 10%) 均为 Agilent 公司提供。分析样品时 ICP-MS 的工作条件为: Rf 功率为 1 250 W, 等离子气体流量为 15.0 L/min, 辅助气流量为 1.06 L/min, 样品提升率为 0.1 rps。实验前处理中使用到的仪器有: 万分之一分析天平 (德国赛多利

斯 Sartorius, 型号 BS124S), 高温高压消解罐 (50 mL, 滨海县正红塑料厂), 聚四氟乙烯瓶 (50 mL, 滨海县正红塑料厂), 电子数字控温鼓风干燥箱 (上海福马实验设备有限公司, 型号 DGX-9143B)。所用试剂浓 HNO_3 和 H_2O_2 均为优级纯或以上级别 (北京化工总厂生产), 实验中所用到的水都是经 Millipore 超纯水装置 (MILLI-Q ELEMENT A10 系统, 美国密理博公司生产) 处理后的去离子水。

1.3 白背飞虱的饲养

田中采集来的白背飞虱成虫被分为 4 个处理: 一部分直接放入冷冻箱中 -20°C 冷冻, 储存; 其余供试虫被分别放入 3 组双通管中用去离子水分别饲养 24, 48 和 96 h。饲养供试虫的双通玻璃管长 14 cm, 直径 2.5 cm。玻璃管一端用双层 Parafilm 夹持去离子水供白背飞虱取食, 并对着光源; 另一端用 80 目的尼龙纱扎紧, 防止逃脱, 并用去离子水湿润的黑布覆盖 (Fu *et al.*, 2001)。Parafilm 每 24 h 更换一次。每个双通管中饲养 20 头白背飞虱, 保证每虫均能吸食水滴为宜。实验温度 $27.0 \pm 1^\circ\text{C}$, 相对湿度大于 90%, 光周期为 10L: 14D。每隔 24 h 将双通管中的死虫挑出。将达到实验规定处理时间, 即 24, 48 和 96 h 的活虫放入冷冻箱 -20°C 保存待用。

1.4 样品实验室称量及金属元素含量检测的前处理

1.4.1 体重称重: 各处理供试虫在检测、称重前放入烘箱 50°C 干燥 12 h, 然后用万分之一分析天平称重。用于构建白背飞虱体重变化的修正指数方程的样品, 采用无重复随机取样方法, 每个处理取样 100 头, 重复 3 次, 然后称重, 并计算出每个样品每头白背飞虱重量的平均值, 进行修正指数方程 (1) 的建模分析。

1.4.2 元素含量检测前处理: 用于检测白背飞虱体内金属元素含量的样品, 各个处理称量 200 mg, 重复 3 次。然后将样品分别置入 100 mL 的聚四氟乙烯瓶中。缓慢加入 4 mL 浓硝酸, 0.5 mL H_2O_2 后插入消化罐, 盖紧罐盖, 放入烘箱先 120°C 2 h 加热, 后 160°C 8 h 加热, 使虫体充分消解。稍冷取出, 用去离子水冲洗聚四氟乙烯瓶内壁和瓶盖, 洗涤残留 2~3 次, 将消解液用中速定量滤纸过滤至 50 mL 离心管中, 最后每一个样品用去离子水定容到 50 mL。每种处理设 3 个重复。前处理中设立空白样品 5 个, 用来消除前处理和金属元素含量仪器检测的误差。空白样品只加入 4 mL 浓硝酸和

0.5 mL H_2O_2 , 其他处理过程和方法和白背飞虱样品一样, 并且同时进行。虫样和空白前处理完成后立即送样进行 ICP-MS 测定。

1.5 实验模型和数据分析

为了有效地估计白背飞虱有机体组织内和可排泄内容物中各金属元素含量, 我们设计了一套模型分析的程序。假设白背飞虱整个体重 (W) 由白背飞虱有机体组织重量 (O) 和体内可排泄内容物重量 (E) 两部分组成。体内可排泄内容物在白背飞虱取食去离子水过程中被逐渐稀释、排出体外, 其体重趋近于有机体组织重量 (O) (图 1)。

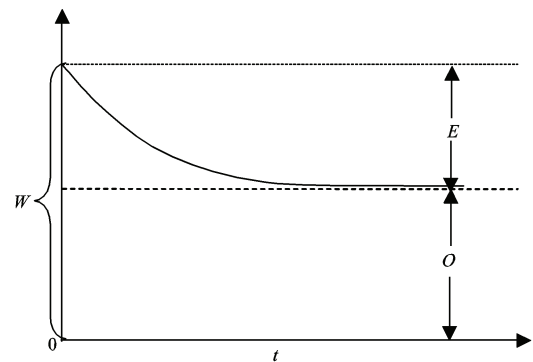


图 1 白背飞虱体重变化趋势图

Fig. 1 The diagram of the trend of weight change of *Sogatella furcifera*

图 1 的动态过程可用修正指数模型来描述, 修正指数方程为:

$$W_t = O + E(1 - r)^t \quad (1)$$

式 (1) 中, W_t 为某时刻白背飞虱体重, O 为有机组织重量, E 为可排泄内容物重量, r 为排出体外的速度。式 (1) 中各个参数, O , E 和 r 可根据实验数据, 采用非线性最小二乘法进行估计。根据参数估计值, 计算其各个时间点体重理论值 \hat{W}_t 。设时刻 t 时有机体组织重量 (O) 占白背飞虱体重 (\hat{W}_t) 的百分率为 OP_t , 可得

$$OP_t = \frac{O}{\hat{W}_t} \quad (2)$$

同理, 时刻 t 时白背飞虱体内可排泄内容物为 $\hat{W}_t - O$, 设时刻 t 时白背飞虱体内可排泄内容物占白背飞虱体重的百分率为 EP_t , 即

$$EP_t = \frac{\hat{W}_t - O}{\hat{W}_t} = 1 - OP_t \quad (3)$$

这样根据各个时间点白背飞虱体内金属元素含量的检测值, 可建立体重变化和体内金属元素含量

变化的关系。

由于金属元素分别存在于白背飞虱有机组织内和可排泄内容物之中, 记某一时刻金属元素含量为 WC_t , 它是白背飞虱体内有机体组织内金属元素含量 OC 和可排泄内容物中金属元素含量 EC , 按相应重量的百分率加权之和, 即

$$WC_t = OC \cdot OP_t + EC \cdot EP_t \quad (4)$$

式(4)实际上是一个不含截距项的二元线性回归方程。这里 WC_t 是白背飞虱体内在时刻 t 时元素含量, OP_t 和 EP_t 亦可根据式(1)、式(2)和式(3)进行估计。当得到各时刻 t 的 WC_t, OP_t 和 EP_t 值之后, 可以对式(4)中的未知参数 OC 和 EC 进行估计, 得到各元素在白背飞虱体内有机体组织内的含量(OC)和可排泄内容物中的含量(EC)的估计值。

式(1)和式(4)的参数估计采用 DPS 数据处理系统完成(唐启义, 2010)。

在得到白背飞虱体内有机体组织的金属元素含量 OC 和可排泄内容物中金属元素含量 EC 的估计

值及其标准误 SE_{OC} 和 SE_{EC} 之后, 可采用 Z 检验法对两者差异的显著性进行统计检验, 统计检验公式为

$$Z = \frac{|OC - EC|}{\sqrt{SE_{OC} + SE_{EC}}} \quad (5)$$

计算某种金属元素在有机体组织内含量和可排泄内容物中含量的差异显著性检验的 Z 得分统计量, 根据 Z 值可计算相应的概率 P 值, 进而推断金属元素在白背飞虱体内的含量动态。

2 结果与分析

2.1 白背飞虱体内检出金属元素数量及含量

本实验检测了白背飞虱长翅成虫样本中 12 种常见或以往研究表明在其他昆虫中具有富集作用的金属元素, Cu, Zn, Cd, Mn, Ca, Fe, Na, As, U, Mg, K 和 Pb。这 12 种元素在经过超纯水饲养处理 0, 24, 48 和 96 h 后的白背飞虱体内的含量见表 1。

表 1 处理后不同时间白背飞虱成虫体内 12 种金属元素含量 ($\mu\text{g/g}$ 干重)

Table 1 Content of 12 elements ($\mu\text{g/g}$ DW) in *Sogatella furcifera* adults at different time after treatment

金属元素 Metal element	处理后时间 Time after treatment (h)			
	0	24	48	96
Cu	10.24 ± 0.67	11.67 ± 0.95	12.15 ± 0.33	13.39 ± 0.27
Zn	45.67 ± 5.42	49.89 ± 4.84	53.40 ± 1.37	61.42 ± 1.06
Cd	0.0425 ± 0.0029	0.0444 ± 0.0030	0.0454 ± 0.0002	0.0518 ± 0.0024
Mn	8.19 ± 0.68	8.03 ± 1.14	8.87 ± 0.32	10.33 ± 0.59
Ca	224.10 ± 25.29	239.80 ± 32.82	271.30 ± 32.79	270.60 ± 23.02
Fe	457.90 ± 20.29	471.70 ± 84.91	588.40 ± 68.12	528.03 ± 8.13
Na	834.40 ± 17.82	1 027.00 ± 31.91	1 140.70 ± 64.58	1 017.70 ± 89.47
As	0.189 ± 0.090	0.208 ± 0.107	0.225 ± 0.056	0.241 ± 0.111
U	0.0377 ± 0.0099	0.0410 ± 0.0098	0.0519 ± 0.0058	0.0449 ± 0.0035
Mg	660.20 ± 9.24	698.90 ± 22.78	705.80 ± 59.44	657.70 ± 51.55
K	4 099.30 ± 89.86	4 579.50 ± 15.76	4 814.50 ± 344.87	3 957.50 ± 287.70
Pb	0.438 ± 0.074	0.218 ± 0.067	0.232 ± 0.060	0.306 ± 0.092

2.2 白背飞虱体重-排泄过程建模

将不同处理时间的白背飞虱无重复随机取样 100 头, 重复 3 次的数用于方程式(1), 采用麦夸特非线性最小二乘方法进行拟合, 建立经验回归方程如式(6):

$$W_t = 0.3371 + 0.3113(1 - 0.0125)^t \quad (6)$$

根据式(6)中各个参数估计值, 可得到白背飞虱有机体组织重量的估计值, $O = 0.3371$ (mg), 和可排泄内容物重量的估计值, $E = 0.3113$ (mg)。在

去离子水饲养条件下, 可排泄内容物的稀释速率 $r = 0.0125$ 。根据 r 值可计算得到可排泄内容物稀释速度半衰期为 54.95 h。模型的决定系数为 0.9926。实验数据观察值及模拟曲线如图 2。

然后, 据式(2)和式(3)计算得到各个处理时间的白背飞虱体内有机体组织部分占体重的百分率 (OP_t), 以及可排泄内容物占体重的百分率 (EP_t) 的估计值如表 2。

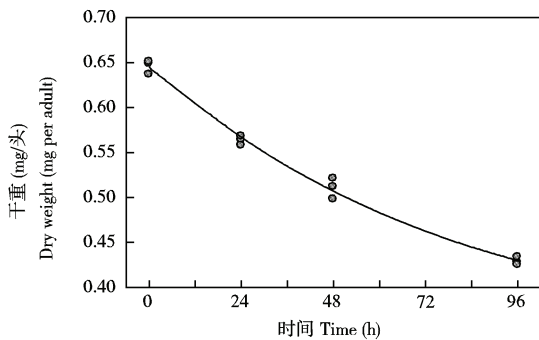


图2 白背飞虱成虫体重-排泄过程模型

Fig. 2 'Body weight-excretion' regression equation of *Sogatella furcifera* adults

图中圆点表示每个时间点称重的重量；曲线表示模型拟合值 The dot is experimental data of laboratory weighing; the line is simulated curve.

表2 背飞虱成虫体内组织重量和可排泄内容物重量占体重百分率的理论值

Table 2 The simulation of OP_t and EP_t in *Sogatella furcifera* adults

时间(h) Time	组织重占体重百分比 OP_t Percentage of organic tissue weight accounting for total body weight	可排泄内容物重量占体重百分比 EP_t Percentage of weight of intestinal contents accounting for total body weight
0	52.29	47.71
24	59.43	40.57
48	66.47	33.53
96	78.41	21.59

由图3中可以发现金属元素在白背飞虱体内含量的变化呈现出上升和下降的趋势,即图中实线上升意味着白背飞虱体内金属元素含量具上升趋势,该元素在白背飞虱有机体组织内可能具有富集作用;实线下降则反之。

统计检验表明,Cu, Zn, Cd, Mn 和 Ca 这5种元素在有机体组织内的含量显著高于可排泄内容物中的含量($P < 0.05$),可认为这些金属元素是以一种稳定的状态存在于昆虫有机体组织内。这可能是因为它们在白背飞虱体内具有富集作用效应,金属元素被昆虫的有机组织吸收,导致可排泄内容物中的金属元素含量下降。

Fe, Na, As, U, Mg, K 和 Pb 这7种元素在白背飞虱有机体组织内的含量与其可排泄内容物中的含量接近。在不同的处理时间,元素含量无明显上升或下降趋势。统计检验亦表明这些元素在有机体组织中和可排泄内容物中的含量差异不显著($P > 0.05$),故可认为这些元素以一种动态平衡方式存在于有机体组织中和内容物中,其含量相对稳定。

2.3 白背飞虱体内组织和内容物中金属元素含量估计

将12种金属元素分别在0, 24, 48和96h时含量的检测值,结合表2理论值,拟合公式(4),可得到各金属元素含量随时间变化的估计值,以及各金属元素在白背飞虱有机体组织内含量(OC)和可排泄内容物中含量(EC)的估计值及其标准误,拟合结果如图3所示。对OC和EC的差异显著性,可根据OC和EC估计值及其标准误,按式(5)进行Z检验,计算正态得分的Z值及其相应的概率P值,当P值小于0.05时表明估计值OC和EC差异显著(图3)。

3 讨论

数学模型常用于模拟生物体内的生理活动,有助于寻找规律,更好地理解各生物量之间内在的关联。如Gillespie等(1975)用指数模型研究了农药DDT在石蝇 *Pteronarcys californica* 体内的代谢过程。Welling等(1983)用指数模型描述了马拉氧磷在家蝇 *Musca domestica* 体内的毒物代谢过程。对金属元素在生物体内摄取、富集和排泄过程的建模,在水生无脊椎动物中有过研究。如金属元素的富集率与生物的摄取率、吸收率、排泄速率和体重增长率相关(Reinfelder *et al.*, 1998)。Cammen(1980)用模型描述了水生生物体内金属元素的吸收率与体重的动态关系。用动态模型模拟金属元素在生物体内的积累、解毒和排泄机制是很重要的途径,但目前已有模型都还处于初级阶段(Adams *et al.*, 2010)。陆生无脊椎动物,尤其是陆生昆虫,运用模型来研究其体内金属元素分布、富集和排泄还有待深入。

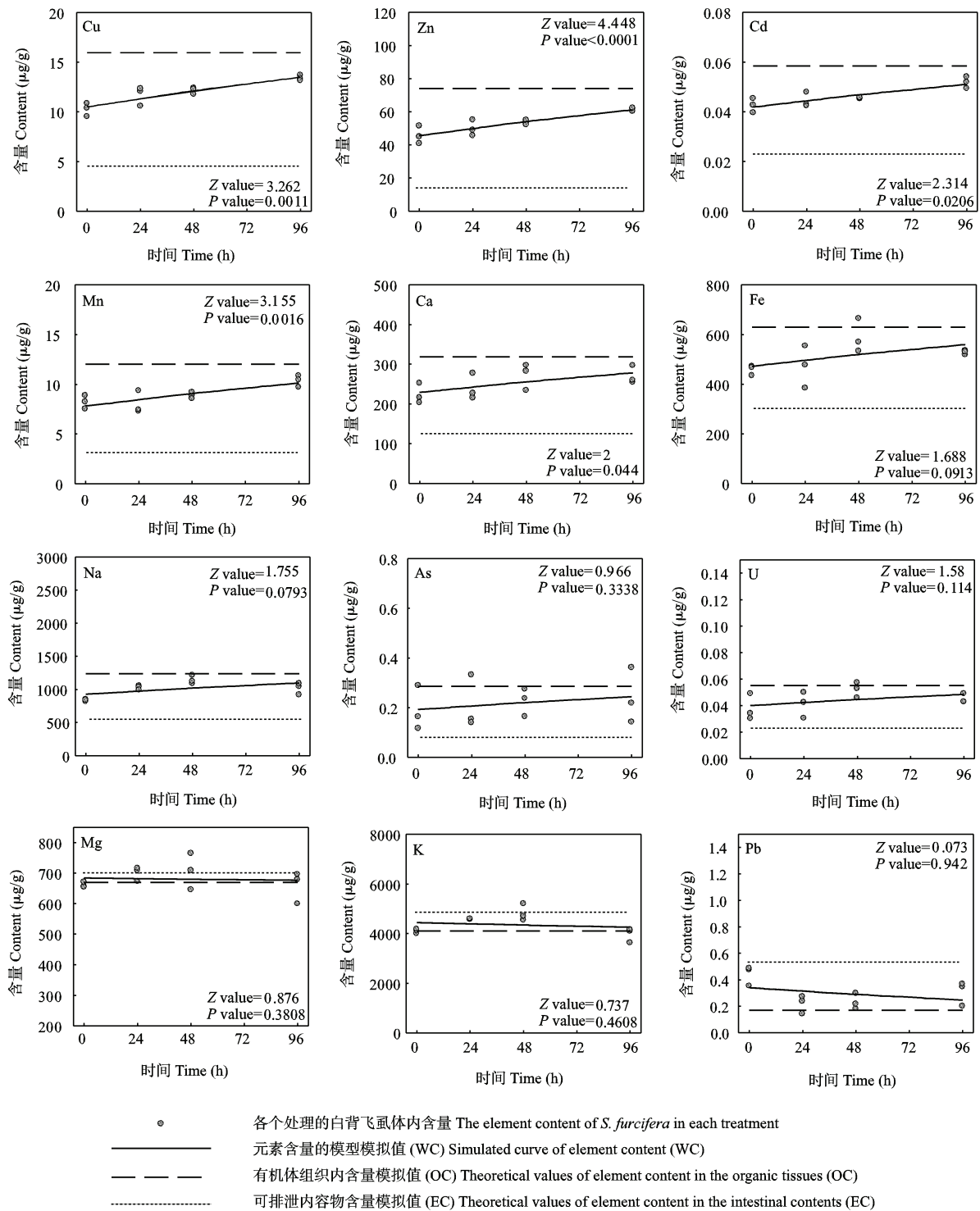


图 3 白背飞虱成虫体内金属含量随时间变化趋势

Fig. 3 The temporal change in content of metal elements in *Sogatella furcifera* adults

图中 Z 值和 P 值由 OC 和 EC 估计值及其标准误计算得到; 虚线高于点线表示有机体组织内含量高于可排泄内容物含量; 点线高于虚线表示可排泄内容物含量高于有机体组织内含量; P 值 < 0.05 表示有机体组织内含量和可排泄内容物含量差异显著。Z value and P value were calculated by formula (5); the long dash line above the dotted line mean that the content of metal elements in the organic tissues was higher than in the intestinal contents; the dotted line above the long dash line mean that the content of metal elements in the intestinal contents was higher than in the organic tissues; P value < 0.05 means significant difference between the content of metal elements in the organic tissues and in the intestinal contents.

本研究应用数学模型方法分析白背飞虱体内金属元素的分布和含量动态。该方法基于白背飞虱体重由有机体组织重量和可排泄内容物重量构成,而可排泄内容物中金属元素,随着昆虫取食超纯水,和可排泄内容物一起被稀释、排出体外的这一假设。因此,本研究中,供试虫分别用超纯水饲养 0, 24, 48 和 96 h, 其体内可排泄内容物及其中的金属元素被超纯水稀释而排出体外。其排泄速度可根据不同时刻白背飞虱体内的组织重量和可排泄内容物重量,通过建立修正指数模型(式 6)进行估计。

由修正指数模型(式 6),本实验估计出白背飞虱体内有机组织重量占体重百分率为 52.29%、内容物重量占体重百分率为 47.71%。据沈君辉等(2003, 2005)报道,刚羽化的白背飞虱雌成虫取食不同水稻品种其蜜露排泄量在 1.65 ~ 3.02 mg/(雌·d),在某些品种上取食时蜜露排泄量甚至可达到 11.26 mg/(雌·d)。而这时白背飞虱体重平均每头仅 0.65 mg。这说明刚羽化的成虫其取食多,排泄物量大,体内内容物含量也较大。这可能是刚羽化成虫为完成其生殖系统发育、繁育后代、迁飞而大量取食的结果。

基于修正指数模型(式 6),应用作者提出的式(2)、式(3)和式(4),估计出了各种金属元素在白背飞虱体内有机组织和可排泄内容物中的含量,给出了体内各种金属元素含量变化理论曲线(图 3)。图 3 曲线反映了各金属元素在白背飞虱体内经稀释随可排泄内容物排出体外时的含量动态。并通过 *Z* 检验发现:一些金属元素在组织内的含量较高($P < 0.05$);另一些金属元素,在组织中和内容物中的含量差异不显著($P > 0.05$)。

本研究通过模型模拟,应用较简便的实验得到金属元素在昆虫体内的分布状况和排泄动态,为研究小型和微型昆虫体内金属元素的分布、含量的定量估计以及排泄动态,提供了一种新的途径。

参 考 文 献 (References)

- Adams WJ, Blust R, Borgmann U, Brix KV, DeForest DK, Green AS, Meyer JS, McGeer JC, Paquin PR, Rainbow PS, Wood CM, 2010. Utility of tissue residues for predicting effects of metals on aquatic organisms. *Int. Environ. Assess. Manag.*, 7: 75–98.
- Ballen-Dufrancais C, 2002. Localization of metals in cells of pterygote insects. *Microsc. Res. Tech.*, 56: 403–420.
- Cammen LM, 1980. Ingestion rate: an empirical model for aquatic deposit feeders and detritivores. *Oecologia*, 44: 303–310.
- Clubb RW, Lords JL, Gaufin AR, 1975. Isolation and characterization of a glycoprotein from the stonefly *Pteronarcys californica*, which binds cadmium. *J. Insect Physiol.*, 21: 53–60.
- Fu Q, Zhang ZT, Hu C, Lai FX, 2001. The differentiation of amino acid requirements in three host-related populations of the brown planthopper, *Nilaparvata lugens* (Stål). *Entomologia Sinica*, 8: 361–369.
- Gillespie DM, Eldredge JD, Thompson CK, 1975. A kinetic model for static bioassay of insecticides. *Water Research*, 9: 817–819.
- Green LFB, 1979. Regional specialization in the Malpighian tubules of the New Zealand glow-worm *Arachnocampa luminosa* (Diptera: Mycetophilidae): the structure and function of type I and II cells. *Tissue Cell*, 11: 673–702.
- Helivaara K, Vaisanen R, 1990. Concentrations of heavy metals in the food, faeces, adults, and empty cocoons of *Neodiprion sertifer* (Hymenoptera, Diprionidae). *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 45: 13–18.
- Hopkin SP, 1989. *Ecophysiology of Metals in Terrestrial Invertebrates*. Elsevier, London, UK.
- Hopkin SP, 1990. Species-specific differences in the net assimilation of zinc, cadmium, lead, copper and iron by the terrestrial isopods *Oniscus asellus* and *Porcellio scaber*. *J. Appl. Ecol.*, 27: 460–474.
- Mogren CL, Trumble JT, 2010. The impacts of metals and metalloids on insect behavior. *Entomol. Exp. Appl.*, 135: 1–17.
- Nehring RB, 1976. Aquatic insects as biological monitors of heavy metal pollution. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 15: 147–154.
- Rainbow PS, 2002. Trace metal concentrations in aquatic invertebrates: why and so what? *Environ. Pollut.*, 120: 497–507.
- Reinfelder JR, Fisher NS, Luoma SN, Nichols JW, Wang WX, 1998. Trace element trophic transfer in aquatic organisms: a critique of the kinetic model approach. *Sci. Total Environ.*, 219: 117–135.
- Shen JH, Li P, Liu GJ, 2005. Virulence of *Sogatella furcifera* field populations to rice varieties: a determination with electronic monitoring system. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 16(6): 1090–1094. [沈君辉, 李平, 刘光杰, 2005. 运用电子记录技术检测白背飞虱田间种群致害性. *应用生态学报*, 16(6): 1090–1094]
- Shen JH, Liu GJ, Chen AH, Kazushige S, 2003. Electronic monitoring feeding and oviposition behavior of the whitebacked planthopper, *Sogatella furcifera*. *Chinese Journal of Rice Science*, 17(1): 73–76. [沈君辉, 刘光杰, 陈爱辉, 寒川一成, 2003. 电子记录白背飞虱的取食和产卵行为. *中国水稻科学*, 17(1): 73–76]
- Sohal RS, Lamb RE, 1979. Storage-excretion of metallic cations in the adult housefly, *Musca domestica*. *J. Insect Physiol.*, 25: 119–124.
- Sun HX, Liu Y, Zhang GR, 2007. Effects of heavy metal pollution on insects. *Acta Entomologica Sinica*, 50(2): 178–185. [孙虹霞, 刘颖, 张古忍, 2007. 重金属污染对昆虫生长发育的影响. *昆虫学报*, 50(2): 178–185]
- Sun HX, Xia Q, Zhou Q, Zhang GR, 2008. Accumulation and excretion of nickel in *Spodoptera litura* Fabricius larvae fed on diets with Ni²⁺. *Acta Entomologica Sinica*, 51(6): 569–574. [孙虹霞, 夏婧, 周强, 张古忍, 2008. 斜纹夜蛾幼虫对食物中重金属 Ni²⁺ 的积累与排泄. *昆虫学报*, 51(6): 569–574]

- Tang QY, 2010. Data Processing System - Experimental Design, Statistical Analysis and Data Mining. 2nd ed. Science Press, Beijing. [唐启义, 2010. DPS 数据处理系统——实验设计、统计分析及数据挖掘(第 2 版). 北京: 科学出版社]
- Walton BT, 1989. Insects as indicators of toxicity, bioaccumulation and bioavailability of environmental contaminants. *Environ. Toxicol. Chem.*, 8: 649 - 658.
- Welling W, de Vries JW, Paterson GD, Duffy MR, 1983. Toxicodynamics of malaoxon in house flies. *Pest. Biochem. Physiol.*, 20: 360 - 372.
- Wu GX, Gao X, Ye GY, Hu C, Cheng JA, 2007. Effects of dietary copper on the growth, development and reproduction of *Boettcherisca peregrine* (Diptera: Sarcophagidae) in the parental generation and first filial generation. *Acta Entomologica Sinica*, 50(10): 1042 - 1048. [吴国星, 高熹, 叶恭银, 胡萃, 程家安, 2007. 取食重金属铜对棕尾别麻蝇亲代及子代生长发育与繁殖的影响. 昆虫学报, 50(10): 1042 - 1048]

(责任编辑: 赵利辉)