应用昆虫学报 *Chinese Journal of Applied Entomology* 2016, 53(4): 793−801. DOI: 10.7679/j.issn.2095−1353.2016.098

Cd^{2+}和 Ni^{2+}对亚洲玉米螟求偶行为的影响*

曹红妹[1, 2**] 魏洪义[1***]

（1. 江西农业大学农学院 南昌 330045；2. 江西省蚕桑茶叶研究所 南昌 330202）

摘 要 **【目的】** 探索农田重金属 Cd^{2+}和 Ni^{2+}污染对植食性昆虫求偶行为潜在的影响。**【方法】** 在人工饲料中添加不同类型的重金属，设置成 Cd^{2+}、Ni^{2+}、Cd^{2+}-Ni^{2+}和空白对照(CK) 4 个处理，重金属浓度均为 5 mg/kg。实验室条件下饲养亚洲玉米螟 *Ostrinia furnacalis* (Guenée) 初孵幼虫，系统观察其各代存活雌蛾求偶行为。**【结果】** 重金属 Cd^{2+}和 Ni^{2+}对亚洲玉米螟 3 代存活雌蛾求偶百分率、求偶高峰期出现的时间及求偶持续时间都产生了影响。其中第 2 代求偶百分率与对照组差距最大，第 3 代受到的影响最小，甚至表现出促进作用；各重金属处理的求偶高峰期出现的时间仅在第 2 代与对照组保持一致外，第 1 代、第 3 代均发生改变；存活雌蛾求偶平均持续时间随着重金属饲养亚洲玉米螟代数的增加而逐代减少。与对照组各代各暗期最长求偶持续时间为 4.89 h 相比，重金属处理的雌蛾平均求偶持续时间最大值出现在 Ni^{2+}处理第 1 代的第 3 个暗期，值为 5.56 h；最小值为 Cd^{2+}处理的第 2 代的第 2、第 3 个暗期，值均为 3.08 h。**【结论】** 重金属 Cd^{2+}和 Ni^{2+}对亚洲玉米螟存活雌蛾的求偶行为产生了影响。

关键词 亚洲玉米螟，Cd^{2+}，Ni^{2+}，求偶行为，求偶百分率，求偶平均持续时间

Effect of the heavy metals $Cd^{2+}$and Ni^{2+}on the calling behavior of *Ostrinia furnacalis* (Lepidoptera: Crambidae)

CAO Hong-Mei[1, 2**] WEI Hong-Yi[1***]

(1. College of Agronomy, Jiangxi Agricultural University Nanchang 330045, China;
2. Jiangxi Research Institute of Sericulture and Tea, Nanchang 330202, China)

Abstract **[Objevtives]** To explore the potential impacts of the heavy metals Cd^{2+} and Ni^{2+} in polluted farmlands on the calling behavior of herbivorous insects. **[Methods]** Neonate larvae of the Asian corn borer (ACB), *Ostrinia furnacalis* (Guenée), were fed artificial diets containing the heavy metals Cd^{2+}、Ni^{2+} and Cd^{2+}-Ni^{2+} at a concentration of 5 mg/kg, and a control diet without any heavy metals, under laboratory conditions. Female calling behavior of three successive generations was then monitored and compared. **[Results]** Ingestion of Cd^{2+} and Ni^{2+} affected calling percentage, peak mating time, and calling duration, in all three generations of *O. furnacalis*. The largest decrease in calling percentage relative to the control was observed in the second generation, and the least decrease, and even the opposite effect, was observed in the third generation. The peak calling time of second generation females in treatment groups was similar to that of those in the control group, but that of first and third generation females differed from the control group. The average calling duration of surviving females decreased from the first to the third generation. Compared to the longest calling duration (4.89 h) recorded in control females, the maximum calling duration (5.56 h) was recorded in the first generation of the Ni^{2+}-treatment group during the third scotophase. The shortest calling duration (3.08 h) was observed in the second generation of the Cd^{2+}-treatment group during the second and third scotophase. **[Conclusion]** The calling behavior of *O. furnacalis* is affected by the ingestion of the heavy metals Cd^{2+} and Ni^{2+}.

Key words *Ostrinia furnacali*, Cd^{2+}, Ni^{2+}, calling behavior, calling rate, average calling duration

---

*资助项目 Supported projects：“十二五”国家科技支撑计划课题（2012BAD14B14）

**第一作者 First author，E-mail：1056562610@qq.com

***通讯作者 Corresponding author，E-mail：hywei@jxau.edu.cn

收稿日期 Received：2015-09-14，接受日期 Accepted：2016-04-06

生殖行为是生物界较为普遍的行为，对生物种群繁衍起着重要的作用。蛾类昆虫的生殖过程从成虫羽化开始，随着成虫性成熟度的逐渐增加，雌蛾在体内进行性信息素的生物合成并释放出信息素，从而表现出求偶行为（万先萌等，2010）。求偶行为是雌蛾的本能行为，正常雌蛾在没有任何外界刺激的情况下也会发生求偶行为。大多数蛾类昆虫的求偶行为都有着明显的先后次序，且可依次分为 4 个等级，即非求偶状态、求偶前驱状态、求偶基本状态和求偶典型状态，其中处于求偶典型状态的雌蛾会释放性信息素（游灵，2013）。昆虫的求偶行为是雌雄虫交配前进行联系的基础，通过一定的程序反应向异性传递信息从而激发异性兴奋，为交配过程做好前期准备。昆虫生殖过程的两个必要环节为求偶与交配，而求偶行为是否正常发生将直接影响交配行为的顺利进行，因此求偶行为在昆虫的生殖繁衍过程中起着非常重要的作用（周祖琳，1994）。

昆虫的求偶行为具有明显的时辰节律（Circadian rhythms），且具有自发求偶的行为多发生在暗期中，黑暗条件可增强雌蛾的求偶行为，而在光亮的条件下雌蛾的求偶行为显著减弱或消失。例如稻纵卷叶螟 *Cnaphalocrocis medinalis* 的求偶行为表现出明显的昼夜周期性，雌蛾求偶在进入暗期后的 5~7 h 达高峰（Kei and Sadahiro，2002）。在光周期 D∶L=10∶14 的条件下，杨小舟蛾 *Micromelalopha troglodyta* 和杨扇舟蛾 *Clostera anastomosis* 雌蛾求偶分别在在暗期 6~7 h 和 9 h 达高峰期，求偶率分别达 70%和 90%（王淑芬等，1999；陈琳等，2014）。昆虫求偶行为的这种时辰节律性会受温度、光周期等外界环境因子的影响。如常温下求偶行为的发生要晚于低温条件，而在高温条件下求偶行为则推迟（Kamimura *et al.*，1995）。另外蛾日龄和交配也会影响雌蛾的求偶行为（Raina，1986；Kamimura and Tatsuki，1993）。

蛾类昆虫的求偶行为除了受到温度和光周期的影响之外，外界环境中的有毒物质如杀虫剂和重金属也会影响蛾类昆虫的求偶行为。从已有的研究报道来看，粉纹夜蛾 *Trichoplusia ni* 经氯氰菊酯处理后降低了雌蛾的求偶百分率，推迟了雌蛾求偶行为的发生时间（Clark and Haynes，1992）。用亚致死剂量溴氰菊酯、马拉硫磷和毒扁豆碱处理亚洲玉米螟 *Ostrinia furnacalis*（Guenée）后，分别可抑制 33%、50%和 50%存活雌蛾的求偶率（杨智化和杜家纬，2003；Yang and Du，2003）。而近年来，国内外关于重金属对昆虫的求偶行为的影响未见报道。因此，本实验以亚洲玉米螟为材料，设置 Cd^{2+}、Ni^{2+}、Cd^{2+}-Ni^{2+}和空白对照（CK）4 个处理，配制含有重金属的人工饲料，在实验条件下，连续系统观察 3 代亚洲玉米螟雌蛾求偶行为受到重金属的影响后发生的变化，并作分析。以期揭示农田重金属对植食性昆虫可能产生的影响，为重金属污染地区虫害测报提供理论依据；也为进一步分析重金属对亚洲玉米螟生理生化和遗传变异的影响提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试虫源

实验所用亚洲玉米螟 *Ostrinia furnacalis*（Guenée）来自中国农业科学院植物保护研究所玉米害虫组提供的卵块，孵化后在室内用人工饲料饲养建立种群。饲养条件：温度保持在（25±1）℃，相对湿度 60%~70%，光周期 L∶D=14∶10。选其中一代成虫产卵，将孵化出的幼虫作为实验初始用虫。

1.2 重金属试剂

氯化镉（$CdCl_2$）和氯化镍（$NiCl_2$），纯度均为 99.99%，溶于蒸馏水中制成母液，配成系列梯度浓度（梯度比值为 1∶10），置于冰箱中备用。

1.3 试验浓度的确定

根据参考文献（许桂芬和白羽军，2007；丁园等，2009；金波等，2013；张继蓉等，2013；沈洪艳等，2014）确定镉（Cd^{2+}）和镍（Ni^{2+}）的浓度范围制定浓度梯度，配制含有 Cd^{2+}和 Ni^{2+}的相应浓度梯度的人工饲料。将亚洲玉米螟初孵

幼虫接入含不同浓度 Cd^{2+}和 Ni^{2+}的人工饲料和对照正常饲料中取食，每个浓度设 4 组，每组 30 头初孵幼虫。接虫 24、48、72 h 各观察 1 次存活情况，以触动虫体无反应者为死亡个体。最终确定 Cd^{2+}和 Ni^{2+}幼虫死亡率均在 10%~30%之间的浓度 5 mg/kg 为实验浓度，连续饲养 3 代。

1.4　雌蛾求偶行为的观察

求偶行为的观察在暗室内进行[光周期为 L∶D=14∶10，温度（25±1）℃，相对湿度 60%～70%)。判断雌蛾正在求偶的标准是产卵器外伸，持续暴露其性信息素腺体。暗期开始前 1 h 左右将新羽化的雌蛾单头置于 200 mL 的塑料杯内，每个塑料杯置于单个培养皿上，杯内放入浸有 10%蔗糖水的脱脂棉球，为雌蛾补充营养。暗期开始后，每隔 30 min，通过红光手电筒照明，观察记录塑料杯内雌蛾的求偶情况，直至暗期结束。每组处理 10 头雌蛾，重复 3 次，连续观察 6 个暗期。依照同样方法，连续实验 3 代。

1.5　数据处理

采用 SPSS17.0 软件进行统计分析。对照与处理组间及各处理组间差异的显著性采用 Duncan's 多重比较法进行检验，显著水平设为 P= 0.05。求偶百分率经平方根反正弦转换后再进行统计分析。

2　结果与分析

2.1　各个世代暗期后 5~10 h 的求偶百分率

由图 1~图 6 可以看出亚洲玉米螟在取食含重金属 Cd^{2+}/Ni^{2+}人工饲料后，连续 3 代存活雌蛾的求偶百分率都受到一定程度的影响。通过观察发现亚洲玉米螟雌蛾求偶高峰期集中在暗期后的 5~10 h 内，所以将暗期后 5~10 h 的雌蛾求偶百分率作图进行分析。

第一代亚洲玉米螟取食重金属 Cd^{2+}/Ni^{2+}处理后，存活雌蛾求偶行为受到了影响（图 1）。这种影响在 Cd^{2+}处理下雌蛾的第 1 和第 6 个暗期各个时间段的求偶百分率表现最为明显。如在第 1 个暗期，取食 Cd^{2+}的雌蛾最高求偶百分率为

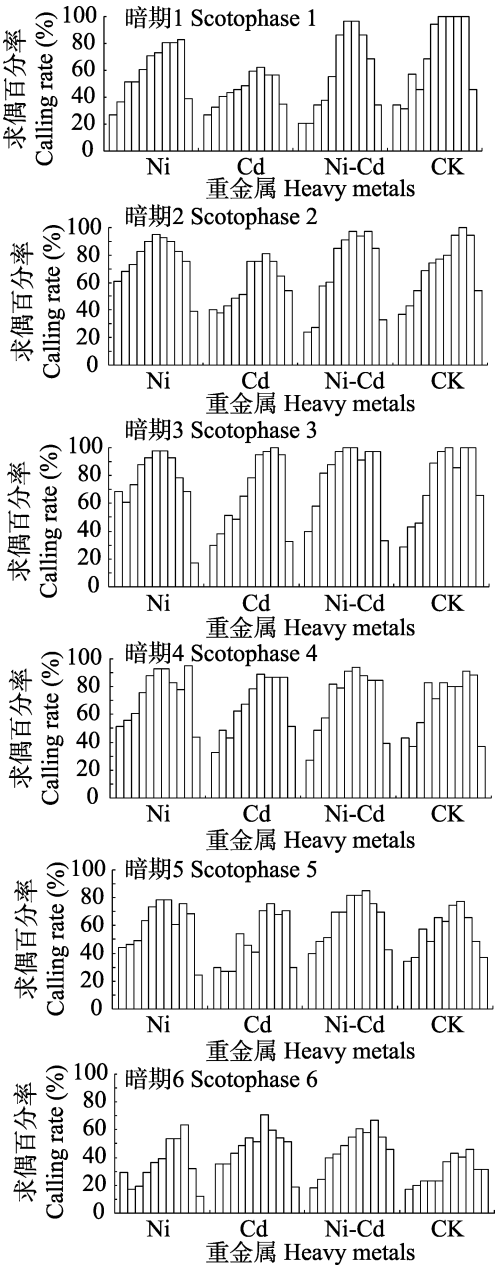


图 1　不同重金属处理下第一代亚洲玉米螟雌蛾求偶百分率

Fig. 1　Calling rate of the first generation female *Ostrinia furnacalis* under different heavy mental treatment

柱形图表示进入暗期后第 5~10 小时的求偶率，即：第 1 根柱子表示暗期第 5 小时的求偶率、第 2 根柱子表示暗期第 5.5 h 的求偶率….以此类推，每 30 min 记录 1 次。图 5 和图 7 同。

Bars represent the female calling rate from the 5th hour to 10th hour after the initiation of scotophase, the first bar indicates the calling rate at the 5th hour of the dark period, the second indicates the calling rate at the 5.5th hour of the dark period…, and so on, recording in a 30 min interval throughout the 10 h scotophase. The same as Fig. 5 and Fig.7.

62.2%，远低于同个暗期对照组雌蛾最高求偶百分率 100%，而在第 6 个暗期，取食 Cd^{2+}的最高求偶百分率则为最大值 70.3%，最小值为对照组 45.7%。

与对照组求偶高峰期出现在暗期开始后的第 8~9 小时，最高求偶百分率为 100%相比，Cd^{2+}处理的亚洲玉米螟存活雌蛾求偶高峰期出现时间与最高求偶百分率没有改变，Ni^{2+}处理和 Cd^{2+}-Ni^{2+}处理的雌蛾求偶高分期都提前到暗期开始后的第 7~8 小时出现，并且最高求偶百分率分别为 97.6%和 100%。

与对照组相比，重金属 Cd^{2+}/Ni^{2+}使得第一代存活雌蛾在各个暗期的最高求偶百分率都发生了变化（图 2），但是变化差异不大。在第 3 个暗期，Cd^{2} 和 Cd^{2+}-Ni^{2+}处理最高求偶百分率与对照组一样，都为 100%，而 Ni^{2+}处理的为 97.6%。在第 3 个暗期之前，各个重金属处理组最高求偶百分率都小于对照组，第 3 个暗期之后各处理组最高求偶百分率减少速度都比对照组小，至第 6 个暗期时都比对照组大。

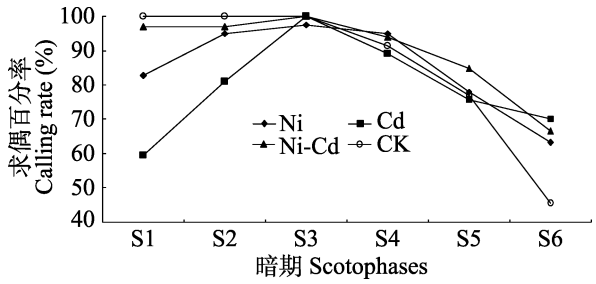


图 2　不同重金属处理下第一代亚洲玉米螟雌蛾 6 个暗期最高求偶百分率

Fig. 2　The highest calling rate of the first generation female *Ostrinia furnacalis* under different heavy mental treatment in the scotophase 1 to scotophase 6

第 2 代亚洲玉米螟存活雌蛾求偶行为受到重金属 Cd^{2+}/Ni^{2+}的影响比第一代大。差异在第 1 和第 6 个暗期中表现的也最明显（图 3）：在第 1 个暗期，Ni^{2+}、Cd^{2+}和 Cd^{2+}-Ni^{2+}3 种处理的暗期后 5~10 h 内的求偶百分率都小于对照组，第 6 个暗期则相反，3 种重金属处理的存活雌蛾的求偶百分率都大于对照组。对照组雌蛾求偶高峰期出现在暗期开始后的第 8~9 小时，最高求偶百分率为 100%；Ni^{2+}、Cd^{2+}和 Cd^{2+}-Ni^{2+} 3 种处理雌蛾的求偶高峰期出现时间与对照组一致，最高求偶百分率分别为 97%、100%和 93.9%。

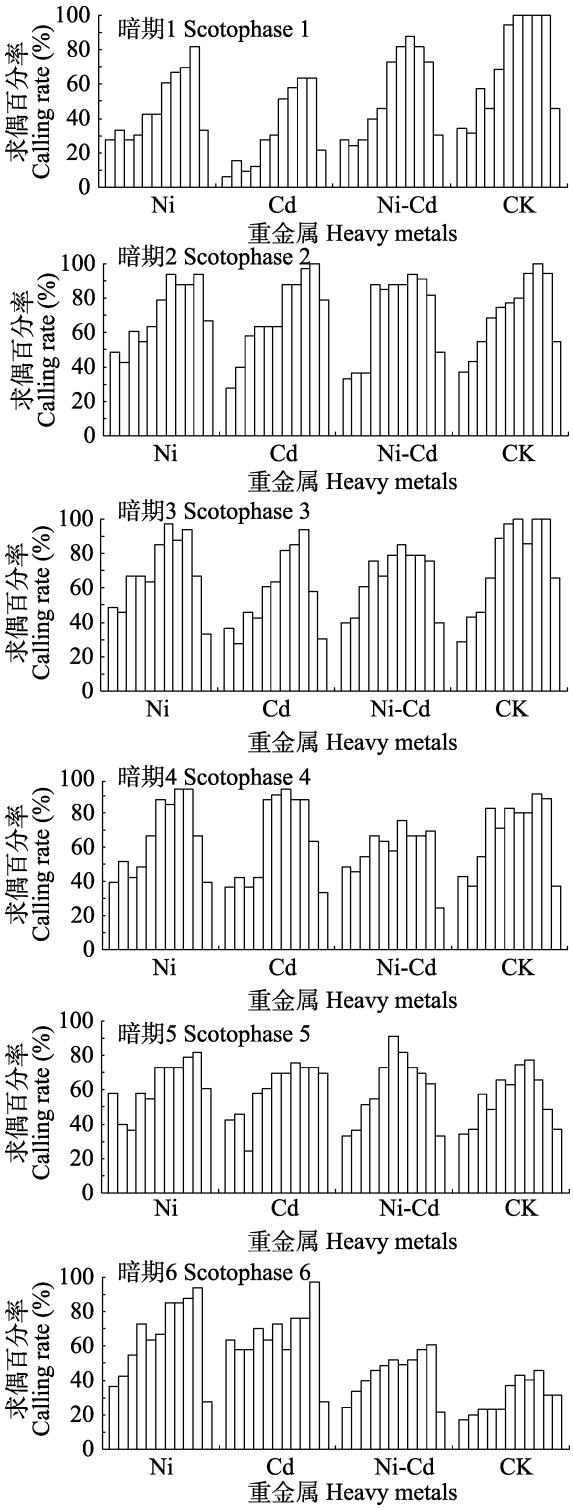


图 3　不同重金属处理下第 2 代亚洲玉米螟雌蛾求偶百分率

Fig. 3　Calling rate of the second generation female *Ostrinia furnacalis* under different heavy mental treatment

与对照组相比（图 4）3 种重金属处理对第 2 代亚洲玉米螟存活雌蛾在 6 个暗期中的最高求偶百分率影响较大。Cd^{2+}在第 1 个暗期求偶百分率最低，最高为 63.6%；在第 6 个暗期求偶百分率最高，为 96.9%，都与对照组求偶百分率差异最大；第 2、4、5 个暗期中 Cd^{2+}的求偶百分率与对照组基本一致，其中在第 2 个暗期都达到 100%的最高求偶百分率。Ni^{2+}的求偶百分率与 Cd^{2+}的变化趋势基本相似，但在第 1、3、6 个暗期的求偶百分率与对照组更接近，第 2、5 个暗期的求偶百分率比镉更偏离对照组，第 4 个暗期相同，Ni^{2+}处理的最高求偶百分率未达到 100%而为 97%。Cd^{2+}-Ni^{2+}混合处理的存活雌蛾在第 1、6 个暗期的求偶百分率及最高求偶百分率都与对照组最接近，但在第 2、3、4、5 个暗期中都是比其他单独重金属处理的雌蛾的求偶百分率及最高求偶百分率更偏离对照组，且最高求偶百分率为最小值 93.7%。

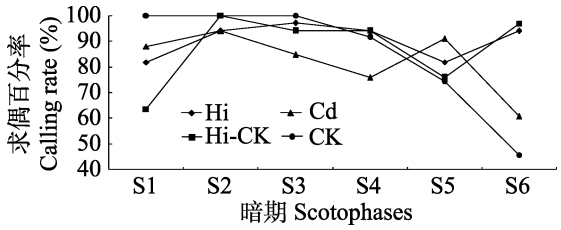


图 4　不同重金属处理下第 2 代亚洲玉米螟雌蛾 6 个暗期最高求偶百分率

Fig. 4　The highest calling rate of the second generation female *Ostrinia furnacalis* under different heavy mental treatment in thescotophase 1 to scotophase 6

第 3 代亚洲玉米螟存活雌蛾的求偶行为受重金属影响的程度最小(图 5,图 6),且 Cd^{2+}-Ni^{2+}混合处理对亚洲玉米螟存活雌蛾的求偶百分率的影响较单独一种重金属处理的影响要大。首先从第 3 代雌蛾求偶百分率来看（图 5）:4 个处理组在 6 个暗期中的求偶高峰期都出现在暗期的第 8~9 小时，高峰期的持续时间为 1 h 左右，随后求偶百分率逐渐减少。较其他 2 个处理而言，第 2 个暗期 Ni^{2+}处理的雌蛾与对照组的求偶百分率差异最大，尤其是在 5~7 h Ni^{2+}处理的求偶百分率明显高于对照组；第 5 个暗期 Cd^{2+}处理的雌蛾求偶百分率与对照组差异最大；第 1、3、4 个暗期 Cd^{2+}-Ni^{2+}混合处理的求偶百分率都与对照

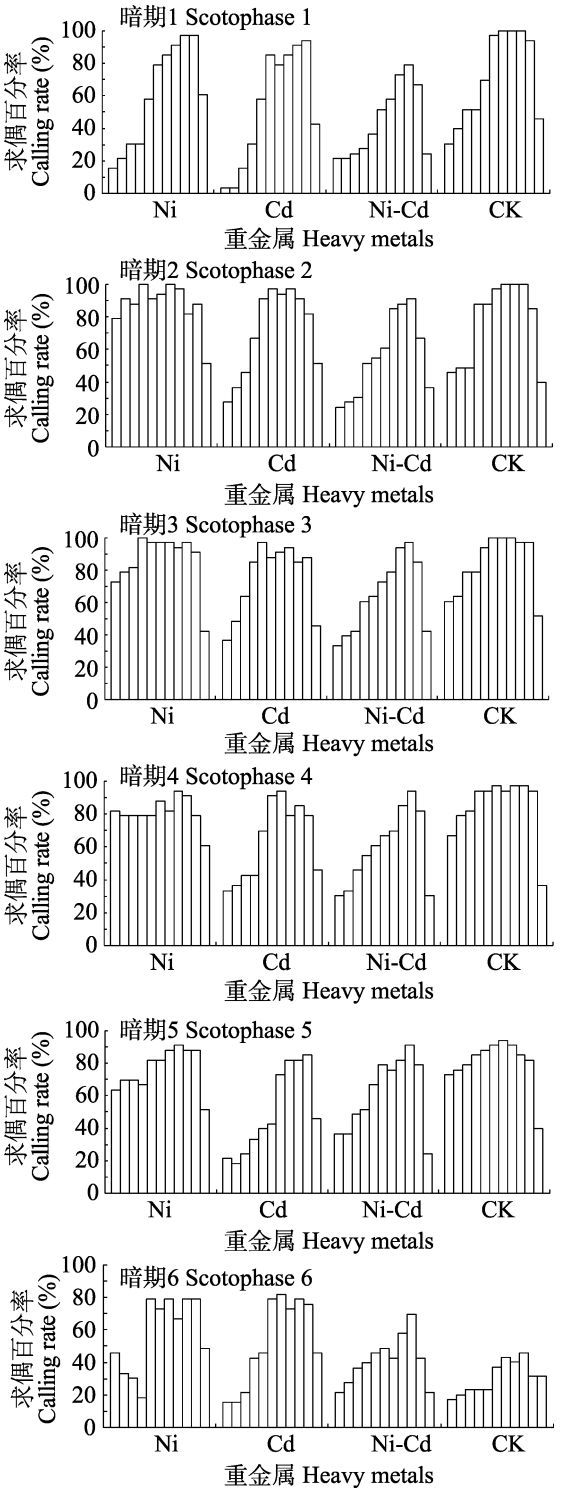


图 5　不同重金属处理下第 3 代亚洲玉米螟雌蛾求偶百分率

Fig. 5　Calling rate of the third generation female *Ostrinia furnacalis* under different heavy mental treatment

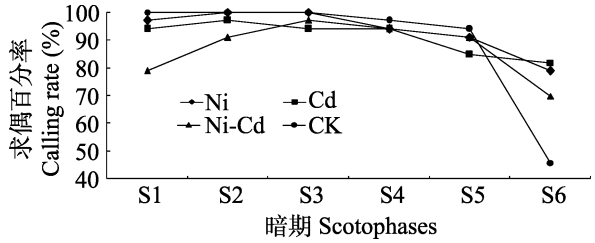


图 6　不同重金属处理下第 3 代亚洲玉米螟雌蛾 6 个暗期最高求偶百分率

Fig. 6　The highest calling rate of the third generation female Ostrinia furnacalis under different heavy mental treatment in the scotophase 1 to scotophase 6

组差异最大，都小于对照组；在第 6 个暗期对照组的求偶百分率最小。

从 6 个暗期最高求偶百分率（图 6）的变化来看：第 1、2 个暗期，Ni^{2+}处理的亚洲玉米螟存活雌蛾最高求偶百分率与对照组最接近，Cd^{2+}次之，Cd^{2+}-Ni^{2+}混合处理与对照组差距最大；第 3 个暗期，Ni^{2+}的最高求偶百分率与对照组相等都是 100%，Cd^{2+}-Ni^{2+}次之，Cd^{2+}最小；随后各暗期的最高求偶百分率逐渐减少，第 4 个暗期，3 种重金属处理的雌蛾最高求偶百分率大小一致都小于对照组；第 5 个暗期为 CK>Ni^{2+}>Cd^{2+}-Ni^{2+}>Cd^{2+}；第 6 个暗期则表现为 Cd^{2+}>Ni^{2+}>Cd^{2+}-Ni^{2+}>CK。在 6 个暗期中 Cd^{2+}、Ni^{2+}、Cd^{2+}-Ni^{2+}和 CK 的最高求偶百分率分别为：97%、100%、97%和 100%。

2.2　不同重金属处理后不同世代间最高求偶百分率

亚洲玉米螟在在含有重金属的人工饲料上连续饲养 3 代后，各代雌蛾最高求偶百分率发生变化（图 7）。与对照组 3 代最高求偶百分率都为 100%相比，Ni^{2+}最高求偶百分率变化发生在

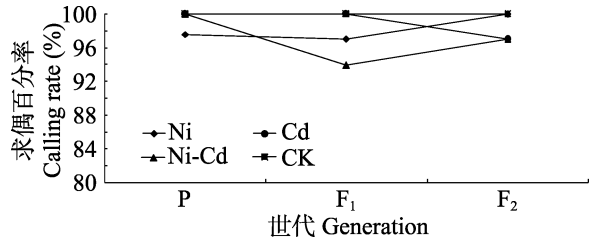


图 7　不同重金属处理下各代亚洲玉米螟雌蛾最高求偶百分率

Fig. 7　The highest calling rate of different generation females *Ostrinia furnacalis* under different heavy mental treatment

第 1、2 代，分别为 97.6%、97%；Cd^{2+}-Ni^{2+}混合处理的第 2、3 代最高求偶百分率则分别为 93.9%和 97%；Cd^{2+}最高求偶百分率只在第 3 代与对照组不同，为 97%。

2.3　镉和镍对亚洲玉米螟求偶持续时间的影响

2.3.1　同一重金属处理的亚洲玉米螟不同世代求偶持续时间的变化　Cd^{2+}、Ni^{2+}及 Cd^{2+}-Ni^{2+}处理对连续 3 代亚洲玉米螟存活雌蛾的求偶持续时间产生了抑制作用（表 1），并且抑制作用的大小依次为：Cd^{2+}>Cd^{2+}-Ni^{2+}>Ni^{2+}。

Ni^{2+}处理对亚洲玉米螟的第 1 代求偶持续时间主要起促进作用，至第 2、3 代时则起抑制作用。Ni^{2+}处理的连续 3 代亚洲玉米螟的各个暗期的持续求偶时间与对照组相比，除了第 1 代的第 2~5 个暗期和各代的第 6 个暗期的值大于对照组之外，其他各代各暗期的持续求偶时间都比对照组小。并且 Ni^{2+}处理的亚洲玉米螟雌蛾从第 1 代至第 3 代的最长求偶持续时间依次为 5.56、4.53、4.28 h，与对照组相应各代最长求偶持续时间依次增加了 0.67 h、减少了 0.29 h、减少了 0.34 h。

Cd^{2+}对各代亚洲玉米螟存活雌蛾的求偶持续时间具有明显的抑制作用。由表 2 可以看出，除各代的第 6 个暗期之外，1~5 个暗期的各代求偶持续时间都比相应各代的对照组求偶持续时间短。Cd^{2+}处理的亚洲玉米螟从第 1 代至第 3 代最长求偶持续时间依次减少并且比对照组依次减少了 0.54、0.91、1.54 h。

Cd^{2+}-Ni^{2+}混合重金属对各代亚洲玉米螟存活雌蛾的求偶持续时间具有抑制作用。除各代第 6 个暗期和第 1 代的第 3 个暗期的求偶持续时间大于对照组之外，其他各代各暗期的求偶持续时间都小于对照组。与对照组各代最长求偶持续时间 4.89、4.82、4.62 h 相比，Cd^{2+}-Ni^{2+}混合处理使得各代存活雌蛾最长求偶持续时间依次变化为第 1 代增加了 0.13 h、第 2 代减少了 0.49 h、第 3 代减少了 1.29 h。

2.3.2　各个世代不同重金属处理的亚洲玉米螟求偶持续时间的变化　由表 2 结果可以看出，随着亚洲玉米螟在含有重金属人工饲料上饲养

表 1　同一重金属处理的亚洲玉米螟不同世代平均求偶持续时间

Table 1　Average duration of different generation female *Ostrinia furnacalis* under the same heavy metal treatment

处理 Treatment	世代 Generation	暗期 1 Scotophase 1 (h)	暗期 2 Scotophase 2 (h)	暗期 3 Scotophase 3 (h)	暗期 4 Scotophase 4 (h)	暗期 5 Scotophase 5 (h)	暗期 6 Scotophase 6 (h)
Ni	P	3.70±0.42 a	5.51±0.39 a	5.56±0.40 a	5.40±0.35 a	4.44±0.34 a	1.88±0.26 b
	F_1	2.83±0.44 b	4.53±0.39 b	4.23±0.34 ac	3.98±0.29 b	3.34±0.35 c	3.44±0.14 a
	F_2	3.76±0.32 a	4.28±0.27 a	4.02±0.26 b	4.12±0.35 b	4.02±0.41 b	3.15±0.15 a
Cd	P	2.96±0.47 a	3.76±0.46 a	4.04±0.30 a	4.35±0.39 a	3.21±0.38 b	2.64±0.38 b
	F_1	1.80±0.36 b	3.89±0.29 a	3.59±0.38 b	3.91±0.37 a	3.43±0.35 a	3.30±0.27 a
	F_2	2.92±0.24 a	3.08±0.26 b	3.08±0.31 b	3.15±0.30 b	2.77±0.34 c	2.79±0.31 b
Ni-Cd	P	3.12±0.3 a	3.92±0.22 b	5.02±0.28 a	4.23±0.33 a	3.11±0.38 a	2.73±0.38 a
	F_1	2.89±0.29 a	4.33±0.36 a	3.83±0.36 b	3.56±0.43 b	3.44±0.32 a	2.80±0.28 a
	F_2	2.12±0.26 b	3.33±0.38 c	2.71±0.30 c	2.02±0.22 c	1.99±0.20 b	1.65±0.22 b
CK	P	4.63±0.33 a	4.60±0.37 a	4.89±0.36 a	4.44±0.44 a	3.21±0.36 a	1.81±0.34 a
	F_1	4.42±0.29 a	4.61±0.35 a	4.82±0.38 a	4.27±0.44 a	3.52±0.39 a	1.89±0.33 a
	F_2	4.08±0.27 b	4.38±0.26 ab	4.62±0.32 a	4.33±0.31 a	3.12±0.28 a	2.07±0.13 a

表中数据为平均值±标准误，同一种金属处理的亚洲玉米螟 3 代间同列数据后字母不相同表示经 Duncan's 多重比较检验差异显著（P<0.05）。

Data in the table are mean the average ± SE, and the same kind of mental processing between 3 generations of *Ostrinia furnacalis* followed by different letters are significantly different (P<0.05, Duncan's new multiple range test).

表 2　各个世代不同重金属处理的亚洲玉米螟求偶持续时间

Table 2　Average duration of each generation female *Ostrinia furnacalis* under different heavy metal treatments

处理 Treatment	世代 Generation	暗期 1 Scotophase 1 (h)	暗期 2 Scotophase 2 (h)	暗期 3 Scotophase 3 (h)	暗期 4 Scotophase 4 (h)	暗期 5 Scotophase 5 (h)	暗期 6 Scotophase 6 (h)
P	Ni	3.70±0.42 b	5.51±0.39 a	5.56±0.40 a	5.40±0.35 a	4.44±0.34 a	1.88±0.26 b
	Cd	2.96±0.47 d	3.76±0.46 c	4.04±0.30 c	4.35±0.39 b	3.21±0.38 c	2.64±0.38 a
	Ni-Cd	3.12±0.3 c	3.92±0.22 c	5.02±0.28 b	4.23±0.33 b	3.11±0.38 b	2.73±0.38 a
	CK	4.63±0.33 a	4.60±0.37 b	4.89±0.36 b	4.44±0.44 ab	3.21±0.36 c	1.81±0.34 b
F_1	Ni	2.83±0.44 b	4.53±0.39 a	4.23±0.34 b	3.98±0.29 ab	3.34±0.35 a	3.44±0.14 a
	Cd	1.80±0.36 c	3.89±0.29 b	3.59±0.38 c	3.91±0.37 ab	3.43±0.35 a	3.30±0.27 a
	Ni-Cd	2.89±0.29 b	4.33±0.36 a	3.83±0.36 bc	3.56±0.43 b	3.44±0.32 a	2.80±0.28 b
	CK	4.42±0.29 a	4.61±0.35 a	4.82±0.38 a	4.27±0.44 a	3.52±0.39 a	1.89±0.33 c
F_2	Ni	3.76±0.32 b	4.28±0.27 a	4.02±0.26 a	4.12±0.35 a	4.02±0.41 a	3.15±0.15 a
	Cd	2.92±0.24 c	3.08±0.26 c	3.08±0.31 c	3.15±0.30 b	2.77±0.34 c	2.79±0.31 a
	Ni-Cd	2.12±0.26 d	3.33±0.38 c	2.71±0.30 d	2.02±0.22 c	1.99±0.20 d	1.65±0.22 c
	CK	4.08±0.27 a	4.38±0.26 b	4.62±0.32 b	4.33±0.31 a	3.12±0.28 b	2.07±0.13 b

表中数据为平均值±标准误，各个世代的亚洲玉米螟 4 种处理间同列数据后字母不相同表示经 Duncan 多重比较检验差异显著（P<0.05）。

Data in the table are means± SE, and each generations 4 kinds of treatment of *Ostrinia furnacalis* followed by different letters are significantly different (P<0.05, Duncan's new multiple range test).

代数的增加，存活雌蛾求偶平均持续时间值逐代减少，从而可以判断亚洲玉米螟求偶持续时间受重金属影响的大小依次是：第 3 代>第 2 代>第 1 代。第 1 代至第 3 代 3 种重金属处理与对照组相比，各代都是以 Ni^{2+}处理的存活雌蛾最长求偶持续时间值最大，Cd^{2+}-Ni^{2+}混合重金属处理的次之，Cd^{2+}处理的存活雌蛾最长求偶持续时间最短，各种重金属处理的最长求偶持续时间也是逐代减少，最短的求偶持续时间出现在镍-镉混合处理的第 3 代第 6 个暗期，值为 1.65 h。

3 结论与讨论

作为重金属的重要种类，关于 Cd^{2+} 或 Ni^{2+} 对昆虫的影响已见报道。例如，孙虹霞等（2010）研究发现，Ni^{2+}不仅会影响蛾类昆虫的生长发育而且对蛾类昆虫的免疫力也会产生影响。在 Ni^{2+} 的胁迫作用下，蛾类昆虫体内的组织化学、生化和生理反应会发生特定的变化来防御 Ni^{2+}的危害，在变化的过程中又常会间接影响能量代谢从而降低其免疫力，影响个体活性。具体表现指标为：昆虫血淋巴中能量物质总糖、血淋巴中热量值、蛋白质和脂肪的含量。另外有研究表明生物体具有吸收、积累重金属的功能。当生物吸收、积累的重金属量超过生物体正常所需量时就会抑制昆虫的免疫系统，提高昆虫病原的易感性，最终影响生物体的生长发育和生殖行为（Grześ，2010；van Ooik and Rantala，2010）。本实验充分验证了上述结论，即亚洲玉米螟在含有重金属的人工饲料上连续饲养 3 代后其存活雌蛾求偶百分率、求偶高峰期出现的时间及求偶持续时间都产生了影响。从各代的变化来看，求偶百分率在第 2 代变化最大，第 3 年代受到的影响最小，甚至表现出促进作用；各重金属处理的求偶高峰期出现的时间仅在第 2 代与对照组保持一致外，第 1、3 代都有改变；存活雌蛾求偶平均持续时间随着重金属饲养亚洲玉米螟代数的增加而逐代减少。从各种重金属处理来看，Cd^{2+}、Ni^{2+}、Cd^{2+}-Ni^{2+}都是对第 3 代雌蛾求偶行为影响最大。值得注意的是，不论是 Cd^{2+}、Ni^{2+}单独处理还是 Cd^{2+}-Ni^{2+}混合处理，在各代的第 6 个暗期重金属处理的亚洲玉米螟雌蛾的求偶百分率或求偶持续时间都比对照组大，这一结果与曹红妹等（2015）的研究结果一致。

从蛾类昆虫的性信息素通讯系统分析实验结果来看，性信息素通讯系统对雌蛾的求偶行为起着非常重要的作用，并且蛾类昆虫的性信息素通讯系统非常的复杂，具有物种特异性（游灵等，2012）。那么我们猜测取食重金属后亚洲玉米螟雌蛾求偶行为发生改变一方面可能是受到重金属的影响，亚洲玉米螟的性信息素通讯系统受到了损坏，从而破坏雌蛾正常的求偶行为，并且受损坏的程度与重金属种类相关；另一方面也可能是在重金属的作用下使得亚洲玉米螟的免疫力受到影响，成虫的活性发生改变，雌蛾求偶行为也随之发生改变。然而关于重金属改变蛾类昆虫的求偶行为的本质原因未见报道，因此重金属对蛾类昆虫求偶行为的作用机制以及蛾类昆虫对重金属胁迫的抵御/调控机制也有待于进一步研究。

参考文献 (References)

Chen L, Wang GL, Wei HY, 2014. The circadian rhythm of emergence and reproduction for *Micromelalopha troglodyta* (Lepidoptera: Notodontidae). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 25(8): 2425–2430. [陈琳, 王广利, 魏洪义. 2014. 杨小舟蛾的羽化与生殖行为节律. 应用生态学报, 25(8): 2425–2430.]

Clark DC, Haynes KF, 1992. Sublethal effects of cypermethrin on chemical communication, courtship, and oviposition in the cabbage looper (Lepidoptera: Noctuidae). *Journal of Economic Entomology*, 85(5): 1771–1778.

Cao HM, Zheng LX, Wei HY, 2015. Effects of heavy metal Ni^{2+} on the development and reproductive behavior of *Ostrinia furnacalis* (Lepidoptera: Pyralidae). *Acta Entomologica Sinica*, 58(6): 560–567. [曹红妹, 郑丽霞, 魏洪义, 2015. 重金属 Ni^{2+} 对亚洲玉米螟生长发育和生殖行为的影响. 昆虫学报, 58(6): 560–567.]

Ding Y, Zhong GF, Liu YH, Zong LG, 2009. Impact of enterprises in adjacent area of Nanchang on the distribution of heavy metals. *Ecology and Environmental Sciences*, 18(5): 1783–1787. [丁园, 钟桂芳, 刘燕红, 宗良纲, 2009. 南昌地区不同企业周边重金属分布及影响规律. 生态环境学报, 18(5): 1783–1787.]

Grześ IM, 2010. Ants and heavy metal pollution -a review. *European Journal of Soil Biology*, 46(6): 350–355.

Jin B, Ma C, 2013. Determination and contamination assessment of heavy metal nickel in medicinal and edible Chinese medicinal materials. *Traditional Chinese Drug Research & Clinical Pharmacology*, 24(2): 180–183. [金波, 马辰, 2013. 茯苓等 10 种药食同源药材中重金属镍含量测定及评价. 中药新药与临床药理, 24(2): 180–183.]

Kamimura M, Tatsuki S, 1993. Diel rhythms of calling behavior and pheromone production of oriental tobacco budworm moth. *Helicoverpa assulta* (Lepidoptea: Noctuidae). *Journal of Chemical Ecology*, 19(12): 2953–2963.

Kamimura M, Tatsuki S, 1995. Pheromonotroic activity in the head of the oriental budworm moth, *helicovera assulta*. *Journal of Applied Entomology*, 75(2): 189–191.

Kei K, Sadahiro T, 2002. Diel rhythms of calling behavior and temporal change in pheromone production of the rice leaffolder moth, *Cnaphalocrocis medinalis* (Lepidoptera: Crambidae). *Applied Entomology and Zoology*, 37 (1): 219–224.

Raina AK, 1986. Diel periodicity and effect of age on female sex pheromone titre in *Heliothis zea* (Lepidoptera: Noctuidae). *Annals of the Entomological Society of America*, 79(1): 128–131.

Shen HY, Zhang HY, Liu L, Zhang YF, Zhou Y, Zheng J, Zhu LY, 2014. Bio-toxicity and bioavailability of metal-spiked freshwater sediments to benthic invertebrates. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 34(1): 272–280. [沈洪艳, 张红燕, 刘丽, 张彦峰, 周煜, 郑军, 祝凌燕, 2014. 淡水沉积物中重金属对底栖生物毒性及其生物有效性研究. 环境科学学报, 34(1): 272–280.]

Sun HX, Xia Q, Tang WC, Zhang GR, Dang Z, 2010. Regulation of energy reserves in the hemolymph of *Spodoptera litura* Fabricius larvae under nickel stress. *Acta Entomologica Sinica,* 53(4): 361–368. [孙虹霞, 夏嫱, 唐文成, 张古忍, 党志, 2010. Ni^{2+}胁迫对斜纹夜蛾幼虫血淋巴中能量物质水平的适应性调节. 昆虫学报, 53(4): 361–368.]

Van Ooik T, Rantala MJ, 2010. Local adaptation of an insect herbivore to a heavy metal contaminated environment. *Annales Zoologici Fennici*, 47(3): 215–222.

Wang SF, Sun HZ, Huang YP, Jiang LH, Tang DW, 1999. Study of Sex Pheromone of *Clostera anastomosis* (Lepidoptera: Notodontidace). *Journal of Central South Forestry University*, 19(2): 11–14. [王淑芬, 孙汉洲, 黄勇平, 江丽辉, 唐大武, 1999. 杨树分月扇舟蛾性信息素研究. 中南林学院学报, 19(2): 11–14.]

Wan XM, Liu W, Wei HY, Tian SR, Yao ZW, 2010. A review on reproductive behaviors in moths. *Jiangxi Plant Protection*, 33(1): 3–7. [万先萌, 刘伟, 魏洪义, 田生荣, 姚振威, 2010. 蛾类昆虫的生殖行为. 江西植保, 33(1): 3–7.]

Xu GF, Bai YJ, 2007. Heavy metal pollution in soil of vegetable production base in Harbin city. *Heilongjiang Environment Journal*, 31(1): 31–33. [许桂芬, 白羽军, 2007. 哈尔滨市蔬菜生产基地土壤重金属污染状况评价. 黑龙江环境通报, 31(1): 31–33.]

Yang ZH, Du JW, 2003. Effects of sublethal deltamethrin on the chemical communication system and PBAN activity of Asiam corn borer,*Ostrinia furnacalis* (Guene). *Journal of Chemical Ecology,* 29: 1611–1619.

Yang ZH, Du JW, 2003. Sublethal effects of two insecticides on the chemical communication system of *Ostrinia furnacalis* (Guenée) (Lepidoptera:Pyralidae). *Acta Phytophylacica Sinica,* 30(2): 181–186. [杨智化, 杜家纬, 2003. 两种亚致死剂量的农药对亚洲玉米螟化学通讯系统的干扰作用. 植物保护学报, 30(2): 181–186.]

You L, 2013. Sublethal effects of four low-toxicity insecticides on development and reproductive behavior of the diamondback moth, *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae). Master dissertation. Nanchang: Jiangxi Agricultural University. [游灵, 2013. 四种低毒杀虫剂对小菜蛾生长发育及生殖行为的亚致死效应. 硕士学位论文. 南昌: 江西农业大学.]

You L, Wang GL, Wei HY, 2012. Advances in neuron transferring pathways in insect' olfactory signals. *Biological Disaster Science*, 35(1): 7–11. [游灵, 王广利, 魏洪义, 2012. 昆虫嗅觉信号神经传递途径的研究进展. 生物灾害科学, 35(1): 7–11.]

Zhou ZL, 1994. Methods on distinquish gradation and courtship behavior of *Sitotroga cerealella* (Olivier). *Entomological Knowledge*, 31(5): 270–273. [周祖琳, 1994. 麦蛾的求偶行为与区分等级的方法. 昆虫知识, 31(5): 270–273.]

Zhang JR, Yin C, Li XF, 2013. Determination of Cu, Zn, Pb, Cd and Ni in activated sludge by atomic absorption spectrometry. *China Water & Wastewater*, 29(4): 91–93. [张继蓉, 印成, 李显芳, 2013. 原子吸收光谱法测定活性污泥中 Cu、Zn、Pb、Cd、Ni. 中国给水排水, 29(4): 91–93.]