

紧张的情况下,商业化运作的模式也不能不考虑,否则这个网站就维持不下去。这是在未来的实践中不得不面对和解决的问题。

参 考 文 献

- 1 高伟. 中原文物, 2002, (2): 82~84.
- 2 甄朔南. 中国博物馆, 1999, (2): 14~17.
- 3 伟波, 曹文君. 复旦学报(自然科学版), 2001, 40(6): 649~652.
- 4 赵昆. 北方文物, 2002 (1): 94~97.
- 5 祝敬国, 李俊杰. 中国博物馆, 2001, (4): 45~53
- 6 李斌. 中国博物馆, 2004, (1): 5~12
- 7 陶洁, 李春晓, 梁赓, 柳军飞. 计算机系统应用, 2003, (8): 8~10.
- 8 陈宏京, 陈霜. 东南文化, 2000 (1): 95~99.
- 9 Kevin C., Gaea L., Chien F. C. *Comput. Educ.*, 2001, 36, 1~14.
- 10 Patel M., White M., Mourkousis N., Walczak K., Wojciechowski R., *et al. Intern. J. Digit. Lib.*, 2005, 5 (3): 179~192.
- 11 Hong J. S., Chen B. H., Hung S. H., Hsiang J. *Intern. J. Digit. Lib.*, 2005, 5(3): 231~251.
- 12 David G., Ketan M. P. *Int. J. Digit. Lib.*, 2005, 5(5): 205~218.

土壤重金属向节肢动物的传递及影响^{*}

朱春香 季相华 蒋明星^{**} 程家安

(浙江大学昆虫科学研究所 杭州 310029)

Transfer of heavy metals from soils to arthropods and their impacts on the arthropod populations. ZHU Chun-Xiang JI Xiang-Hua, JIANG Ming-Xing^{**}, CHENG Jia-An (*Institute of Insect Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China*)

Abstract Heavy metals in soils can be transferred to arthropods through trophic chains and accumulated in these animals. The paper reviews the major factors affecting their transfer to and accumulation in arthropods and their impacts on arthropod herbivores, predators, parasitoids and detritivores at population and community levels. Despite the great advancement in this research area, further mechanisms responsible for metal transfer and accumulations are to be explored with emphasis on community ecology, behavior and physiology aspects of involved arthropods.

Key words arthropod, heavy-metal contamination, biotransfer

摘 要 土壤中重金属可通过食物链传递至节肢动物,并在其体内累积。文章介绍影响重金属传递和积累的主要因子,及重金属对植食性、捕食性、寄生性、腐食性节肢动物种群及群落的影响情况。建议对影响传递与累积的机制开展深入研究,并重点从节肢动物群落生态学、行为学、生理学等角度开展更多工作。

关键词 节肢动物, 重金属, 生物传递

土壤中重金属离子可被植物根部吸附和吸收,并传输至其地上部分,通过食物链传递至植食性节肢动物及其捕食性、寄生性天敌。自1976年《Science》报道镍超富集(hyperaccumulating)植物(*Sebertia acuminata*)^[1]以来,已相继发现多种对土壤重金属具超富集能力的植物,显示出此类植物在重金属污染土壤的生物修复(bioremediation)领域广阔的应用前景^[2]。由于超富集植物的叶片或植株地上部

分镉(Cd)含量可高达100 mg/kg以上,钴(Co)、铜(Cu)、镍(Ni)、铅(Pb)含量可达1 000 mg/kg以上,锰(Mn)、锌(Zn)含量可达10 000 mg/kg以上^[3],它们已成为评价土壤重金属向节肢动物

^{*} 863中国高技术研究发展计划项目(2004AA649050);国家自然科学基金重点项目(30230070)。

^{**} 通讯作者, E-mail: mxjiang@zju.edu.cn

重登日期: 2006-12-08, 接受日期: 2007-01-10

传递及其影响的重要研究材料。此方面研究不仅可丰富重金属与节肢动物两者关系的认识,还可为评价土壤重金属的生态毒理、推广种植超富集植物的潜在生态效应提供实验依据。本文综述此领域的主要研究进展。

1 土壤重金属向节肢动物传递及主要影响因子

相关研究集中在 Ni, Cd, Cu, Zn 等少数几种重金属^[4],传递影响因子主要有:重金属本身的生态行为(如进入根部后在植物体内的传输特性),寄主植物对重金属的累积能力,节肢动物的食性(在寄主植物上的取食部位、食性专化程度等),及其对重金属的累积与排泄能力等。重金属在节肢动物体内的累积水平与其个体大小、所处营养层次并无密切关系^[5, 6]。

有关植物体中重金属传输特性的研究颇多。重金属离子进入植物根部后与有机组分生成稳定性不同的化合物,稳定性大者难以向叶片、茎运输,因而大部分被富集、浓缩于根部,稳定性小的则反之。植物中二价重金属的稳定性从高到低依次为: Cu > Ni > Co > Zn > Mn^[7],表明与 Cu 和 Ni 相比, Mn、Zn 等较易运输到植株地上部分,从而对地上节肢动物的潜在影响相对较大。

若寄主植物对某种土壤重金属具累积能力,则植食者、天敌中该重金属含量可随土壤中含量的升高而升高;反之,若寄主植物无累积能力,或植食者、天敌排泄重金属的能力较强,则其体内浓度较少受土壤中含量的影响。如小麦(*Triticum aestivum* cv. *Alexander*)嫩梢及麦长管蚜 *Sitobion avenae* 中 Zn 含量可随土壤 Zn 含量的升高而升高,其中蚜虫中含量可达到土壤中的 4 倍;但 Cd 向麦株和蚜虫的传递与土壤中含量的关系^[8]。庭荠(*Alyssum pintodasilvae*)可超富集土壤 Ni,致使该植物上蜘蛛体内的 Ni 含量较高,而不被该植物富集的 Cr 与 Co 其蜘蛛中含量也较低^[9]。

植食者对重金属的摄取情况与其在寄主上的取食部位、取食方式有关。如 Ni 超富集植

物(*Streptanthus polygaloides*)中的 Ni 可显著降低嚼食叶片的 2 种昆虫赤胫黑蝗 *Melanoplus femurrubrum* 和卷心菜薄翅野螟 *Evergestis rimosalis* 幼虫的存活率,但刺吸寄主木质部或韧皮汁液的 3 种昆虫长沫蝉 *Philaenus spumarius*、萝卜蚜 *Lipaphis erysimi* 和温室白粉虱 *Trialeurodes vaporariorum* 则不受 Ni 影响^[10]。捕食性节肢动物体内重金属累积水平与其食性的专化程度有关,若专化性强,当猎物某重金属含量较高时,其体内累积该重金属的可能性增大^[1, 12]。如在莫斯科地区发现,专性捕食性天敌对 Cu 和 Zn 的生物富集因子(bioaccumulation factor)分别为 0.67 和 0.99,而非专性捕食性天敌分别为 0.54 和 0.21^[11]。对腐食性种类也如此,如专性取食真菌的一些螨类比其它非专性螨类更易累积 Zn^[13]。

受上述因素影响,加上节肢动物本身累积或排泄重金属的能力存在差异(对此本文不加叙述),使得不同重金属在不同节肢动物体内的残留量往往存在较大差异。如,9 种甲螨新小臭甲螨 *Oppiella nova*、*Adoristes ovatus*、森林懒甲螨 *Nothrus silvestris*、若甲螨 *Oribatula tibialis*、真前翼甲螨 *Eupelops tardus*、裸珠甲螨 *Gymnodamaeus bicostatus*、*Atropacarus striculus*、全大翼甲螨 *Pergalumna nevosa*、覆盖头甲螨 *Tectocephus velatus* 均可累积 Cu,但以前三者的累积水平相对较高;与 Cu 相比,所有这几种甲螨对 Zn 和 Cd 的累积水平较低^[9]。又如,据 Straalen 等在俄罗斯图拉附近金属冶炼厂周边地区调查,重金属含量以甲螨、步甲类中较高,而弹尾虫、蜈蚣与蜘蛛类中较低^[14]。需指出的是,总体而言,节肢动物重金属残留量与土壤含量并无明显的对应关系,两者的数量关系极为复杂^[14]。

2 土壤重金属通过食物链对节肢动物的影响

2.1 对植食性节肢动物的影响

植物中重金属是其防御植食者的重要因素,对超富集植物尤为如此。节肢动物取食含

高水平重金属的寄主植物后, 往往表现出死亡率增高、体重减轻等不良反应。在 Ni 超富集植物 (*S. polygaloides*) 上, 甜菜夜蛾 *Spodoptera exigua* 1~2 龄幼虫取食高 Ni 叶片 (1 500 mg Ni/kg) 后 10 d 内死亡率即达 96%, 而取食低 Ni 叶片 (20 mg Ni/kg) 死亡率仅 48%, 且取食高 Ni 叶片后幼虫体重显著减轻, 化蛹时间推迟^[13]。在 Zn 超富集十字花科植物 (*Thlaspi caerulescens*) 上, 非洲沙漠蝗 *Schistocerca gregaria* 和大菜粉蝶 *Pieris brassicae* 对低 Zn 叶片的取食喜好性胜过高 Zn 叶片^[14]。

自然条件下, 某些植食者对寄主中的高水平重金属具较强的适应性。如在南非 Mpumalanga 地区的一种 Ni 超富集植物 (*Bekheya coddii*) 上可发生数种甲虫, 其中金叶甲 *Chrysolina pardalina* 对该植物具嗜好性, 室内可在高 Ni 叶子上连续取食繁殖 4 个世代^[17]。在加利福尼亚部分地区有一种盲蝽 *Melanotrichus boydi*, 它以 Ni 富集植物 (*S. polygaloides*) 为其惟一寄主^[5], 其体内 Ni 含量可高达 770 $\mu\text{g/g}$ ^[18]。

2.2 对捕食性和寄生性节肢动物的影响

已有研究表明, 重金属可通过植食者或腐食者传递至捕食性节肢动物, 并对后者存活、发育等产生影响^[12, 19~21]。但也有研究发现, 由于一些种类对重金属具较强的排泄或耐受能力, 受猎物重金属的影响较小 (除非猎物中重金属含量非常高)^[17]。

不同捕食者对猎物体内重金属的敏感性存在差异。如对家幽灵蛛 *Pholcus phalangioides*、弓足密蛛 *Misumena vatia*、加利福尼亚螳螂 *Stagmomantis californica* 和普通草蛉 *Chrysoperla carnea* 研究发现, 弓足密蛛取食高 Ni 猎物盲蝽 *M. boydi* 后的存活率显著低于取食低 Ni *M. boydi*, 但其余 3 种天敌在取食高 Ni 与低 Ni 猎物后存活率无显著差异^[12]。

有关土壤重金属向寄生性节肢动物的传递及影响情况, 报道很少。对蚕豆 (*Vicia faba*)、豌豆蚜 *Acyrtosiphon pisum*、无网长管蚜茧蜂 *Aphidius ervi* 系统与 Cd 的关系研究发现, 盆栽

条件下土壤加入 Cd 可显著降低 *A. ervi* 的种群增长率^[22]。Butovsky 和 Straalen^[11] 报道野外采集的专性寄生性节肢动物中对 Cu 和 Zn 的生物富集因子分别高达 10.7 和 2.08。

2.3 对腐食性节肢动物的影响

弹尾虫、甲螨等腐食性节肢动物可通过取食含重金属的植物腐殖质或活体植物而接触重金属。一般地, 土壤含重金属不利于此类动物的繁衍。如, 野外投放含 Cd 的污水污泥不利于弹尾虫数量的增加^[23]。但情况并非如此, 土壤含一定浓度的重金属反而有利于某些腐食性种类繁衍。如对 Cu 与弹尾虫关系的研究发现, 与无 Cu 污染土壤相比, Cu 富集的土壤有利于 *Mesaphorura krausbaueri* (Tullbergiidae 科)、*Mesaphorura macrochaeta*、武装棘跳虫 *Onychiurus armatus*、球角跳虫 *Hypogastrura succinea* 等的增殖^[24], 另曾发现弹尾虫等小型节肢动物的发生数量在土壤 Cu 浓度处于中等时为最大^[25]。

不同弹尾虫对重金属的行为反应存在差异。如, 武装棘跳虫 *O. armatus* 遇到含 Cu 食物后选择离开, 而符跳虫 *Folsomia quadrioculata* 与 *F. manoladiei* 对 Cu 具嗜好性, 等节跳虫 *Isotomurus palustris* 则对 Cu 无明显的反应^[24]。Pedersen 等也报道了类似结果, 发现符跳虫 *F. quadrioculata* 和 *F. fimetaria* 对土壤 Cu 的敏感性要强于其它种类^[25]。这种种间差异的研究, 是剖析不同重金属浓度影响下节肢动物群落结构、多样性差异的基础, 因此十分重要。

2.4 对节肢动物群落多样性的影响

此方面的报道较少, 已有研究多以腐食的小型节肢动物为研究对象。一般地, 土壤重金属含量升高后, 节肢动物多样性会下降^[25], 但也有些例外。如, 曾报道弹尾虫等小型节肢动物的多样性指数可随土壤中 Cu 浓度的升高而直线增大^[25], 另有研究还发现土栖叶螨的群落结构及种多样性受土壤重金属 (含 Zn, Cu, Cd, Pb, Fe 等) 的影响并不显著^[3]。此外, 对森林中甲螨群落的调查发现, 重金属含量为中等的土壤中此类动物发生数量较大, 多样性较高^[6]。

2.5 土壤重金属影响节肢动物的生态学机制

显然,食物链是土壤重金属影响节肢动物的直接途径。此外,土壤重金属还有可能通过一些间接途径对节肢动物产生影响,如通过改变生态系统对此类动物的适宜程度^[23],改变寄主植物的一些与节肢动物取食、发育、繁殖等有关的理化特性等。除了自身因子外,重金属还有可能与植物体内的一些化学防御因子(如次生化合物)协作,一同对植食者产生影响^[15, 23, 28]。

3 结语

土壤重金属可通过食物链途径传递至节肢动物,并在个体、种群和群落水平对其产生影响。近10多年来,国外已在此领域开展许多研究,积累了丰富文献,而国内则研究极少。总体上看,已有研究大多局限于土壤重金属向节肢动物体内传递及在其体内累积水平的测定与描述,在影响方面多集中种群水平上开展。今后,有待对影响传递与累积的机制开展深入研究,并应从节肢动物群落生态学、行为学、生理学等角度开展更多工作。

参 考 文 献

1 Jaffre T., Brooks R. R., Lee V., Reeves R. D. *Science*, 1976, **193**: 579~580.

2 Boyd R. S. *New Phytol.*, 2004 **162**(3): 563~567.

3 Baker A. J. M., Brooks R. R., Pease A. J., Makiisse F. *Plant Soil*, 1983, **73**(3): 377~385.

4 Li L. J., Liu X. M., Duan Y. H., Guo Y. P., Cheng B., et al. *J. Environ. Sci. China*, 2006, **18**(2): 341~346.

5 Schwartz M. D., Wall M. A. *Pan-Pac. Entomol.*, 2001, **77** (1): 39~44.

6 Skubaa P., Kafel A. *Environ. Pollut.*, 2004 **132**(1): 51~60.

7 陈英旭主编. 环境学. 北京: 中国环境科学出版社, 2001. 162~169.

8 Green I. D., Merrington G., Tibbett M. *Agr. Ecosys. Environ.*, 2003 **99**(1/3): 171~178.

9 Peterson L. R., Trivett V., Baker A. J. M., Aguiar C., Pollard A. J. *Chemoecology*, 2003, **13**(2): 103~108.

10 Jhee E. M., Boyd R. S., Eubanks M. D. *New Phytol.*, 2005, **168**(2): 331~343.

11 Butovsky R. O., van Straalen N. M. *Pedobiologia*, 1995, **39** (6): 481~487.

12 Boyd R. S., Wall M. A. *Am. Midl. Nat.*, 2001, **146**(1):

186~198.

13 Zaitsev A. S., van Straalen N. M. *Pedobiologia*, 2001, **45** (5): 467~479.

14 Straalen N. M. van, Butovsky R. O., Pokarzhevskii A. D., Zaitsev A. S., Verhoef S. C. *Pedobiologia*, 2001, **45**(5): 451~466.

15 Boyd R. S., Moar W. J. *Oecologia*, 1999 **118**(2): 218~224.

16 Polkard A. J., Baker A. J. M. *New Phytol.*, 1997, **135**(4): 655~658.

17 Mesjasz-Przybylowicz J., Przybylowicz W. J. *South Afr. J. Sci.*, 2001, **97**(11-12): 596~598.

18 Wall M. A., Boyd R. S. *Pan-Pacific Entomol.*, 2002, **78** (3): 168~176.

19 Miglioni M., Pigno G., Bianchi N., Bemini F., Leonzio C. *Environ. Pollut.*, 2004 **129**(2): 331~340.

20 Scheifler R., Gomot-de Vaufleury A., Toussaint M. L., Badot P. M. *Chemosphere*, 2002 **48**(6): 571~579.

21 Vickeman D. B., Trumble J. T. *Ecotoxicology*, 2003, **12** (6): 497~504.

22 Kramarz P., Stark J. D. *Biol. Control*, 2003, **27** (3): 310~314.

23 Cole L. J., McCracken D. I., Foster G. N., Aitken M. N. *Agr. Ecosyst. Environ.*, 2001, **83**(1/2): 177~189.

24 Filser J., Wittmann R., Lang A. *Environ. Pollut.*, 2000, **107**(1): 71~78.

25 Pedersen M. B., Axelsen J. A., Strandberg B., Jensen J., Attrill M. J. *Ecotoxicology*, 1999, **8**(6): 467~483.

26 Caruso A. T., Miglionib M., Pignob G., Bargaglia R. <http://www.xiii.congresso.societaitalianaecologia.org/articles/Caruso-50.pdf>

27 Davis M. A., Boyd R. S. *New Phytol.*, 2000, **146**(2): 211~217.

28 Tolà R. P., Poscherrieder C., Alonso R., Barceó D., Barceó J. *New Phytol.*, 2001, **151**(3): 621~626.

供应包装昆虫标本用的
格拉辛纸制的三角纸

规格	大	中	小
元/包(100个)	30	24	16

邮费另计, 要求最低订购金额每次 150 元以上(含邮费)。
联系地址: 辽宁省丹东市 019 号信箱 118000
联系人: 唐玮, 李启明
E-mail: tangdorcus@yahoo.com.cn
业成贸易有限公司