

河南南阳不同生境土壤重金属含量及其对拟水狼蛛生物学特性的影响

张征田^{1,*}, 夏敏¹, 彭宇², 杜瑞卿¹

(1. 南阳师范学院生命科学与技术学院, 河南南阳 473061; 2. 湖北大学生命科学学院, 武汉 430062)

摘要: 为了探明重金属含量对拟水狼蛛 *Pirata subpiraticus* 生物学特性的影响, 本研究于 2008 年 7 月在河南南阳地区 5 种不同生境下, 共采集 50 份土壤样本和 150 头拟水狼蛛样本, 采用原子吸收光谱法测定了 5 种不同生境下雌拟水狼蛛体内重金属含量, 并测定了雌蛛头胸甲宽、体重、卵袋重量、卵数目和卵体积等生物学指标。结果表明: 不同样点拟水狼蛛重金属含量与土壤重金属含量显著正相关, 4 个重金属污染区与宝天曼自然保护区 (Baotianman, BTM) 拟水狼蛛体内 Cd、Cu 和 Zn 的含量差异极显著 ($P < 0.001$), 桐柏铜矿 (Tongbai Tongkuang, TBTK) 和南阳油田 (Nanyang Youtian, NYYT) 的 Pb 含量与 BTM 的差异极显著 ($P < 0.001$), 主成分分析表明 Cd、Cu 和 Zn 是反应重金属污染的主要指标。在重金属胁迫下, 4 个重金属污染区与保护区的拟水狼蛛头胸甲宽、雌体重量、卵袋重量、卵数目和卵体积差异均达到极显著 ($P < 0.001$) 或显著水平 ($P < 0.05$), 主成分分析表明背胸甲宽、卵袋重量和卵体积是重要生物学指标。拟水狼蛛的背胸甲宽、卵袋重量和卵的体积与重金属含量显著相关, 重金属含量高的地方拟水狼蛛背胸甲宽较小, 雌性体重、卵袋重量和卵数目较小, 卵的体积大, 因此说明拟水狼蛛处在逆环境中时, 动物为保持总的繁殖力不变的前提下, 后代个体的大小与数目间满足某种平衡, 即达到协同进化的目的, 拟水狼蛛可以作为重金属污染的监测指示生物。

关键词: 拟水狼蛛; 土壤; 重金属污染; 背胸甲宽; 卵袋重量; 卵体积

中图分类号: Q959 文献标识码: A 文章编号: 0454-6296(2009)09-0994-06

Heavy metal levels in soil and their effects on biological characteristics of *Pirata subpiraticus* (Araneae: Lycosidae) in different habitats in Nanyang, Henan

ZHANG Zheng-Tian^{1,*}, XIA Min¹, PENG Yu², DU Rui-Qing¹ (1. Department of Life Sciences, Nanyang Normal University, Nanyang, Henan 473061, China; 2. Faculty of Life Sciences, Hubei University, Wuhan 430062, China)

Abstract: In order to study the impact of heavy metals on *Pirata subpiraticus*, 50 soil samples and 150 individuals of *P. subpiraticus* were collected from 5 different habitats in Nanyang City, Henan Province in July 2008. The contents of heavy metals (Cd, Pb, Cu and Zn) of soil and *P. subpiraticus* were measured using atomic absorptions pectrometry. The carapace width, female weight, egg sac weight, the volume and number of eggs were measured and counted. The results showed that the contents of Cd, Cu and Zn in *P. subpiraticus* in varios habitats were positively correlated with those in soil, and significantly higher in 4 heavy metal polluted habitats (TBJK, TBTK, NYYT, and NYJG) than the control habitat (BTM nature reserve); the result for Pb content was same, but it was significantly higher in TBTK and NYYT than the control habitat (BTM). Principal component analysis (PCA) results suggested that Cd, Cu and Zn could be principal indicators of heavy metal pollution. Females from populations with high concentrations of heavy metals showed a strongly reduced fecundity, indicating a high reduction in resource availability due to detoxification processes. Egg size in contrast was negatively correlated with fecundity and as a consequence positively related with internal metal burden. The conclusion is that changes of *P. subpiraticus* in the relationship between offspring size and offspring fitness will result in an altered balance between offspring size and *P. subpiraticus* could be used as a very important bio-indicator for heavy metal pollution.

基金项目: 南阳师范学院高层次人才科研启动费资助项目; 河南省重点实验室资助项目

作者简介: 张征田, 1978 年生, 男, 硕士, 主要从事动物学研究

* 通讯作者 Author for correspondence, E-mail: ztz0105@yahoo.com.cn

收稿日期 Received: 2008-12-25; 接受日期 Accepted: 2009-07-08

Key words: *Pirata subpiraticus*; soil; heavy metal pollution; carapace width; cocoon weight; egg volume

随着工业的发展和农业现代化,土壤的污染日益严重,世界各国均受到不同程度的重金属污染。土壤污染直接威胁土壤动物的生存繁衍,使土壤物质循环和能量转化受到严重影响,土壤重金属积累可导致土壤、大气和水体环境质量的进一步恶化,并引起农作物产量和品质的下降,通过食物链途径危害人体的健康。有关重金属污染土壤的风险评估和修复也得到越来越多的关注。传统化学方法只能提供土壤中目标污染物浓度,不能提供因污染而对土壤生态系统产生影响的全部信息(Kurakov *et al.*, 1998)。尤其是重金属复合污染,很难单纯地用化学分析的数据来解释和评估可能存在的生态风险,因此,重金属污染土壤生态的生物评价是对化学评价的有效补充和相互验证(Solomon and Sibley, 2002; Crouan and Moia, 2006)。目前,国内外除最常使用蚯蚓外,还有很多土壤动物作为指示生物被用于土壤重金属污染生态风险评估(Kula and Kokta, 1992; 王振中等, 2002),例如,土壤线虫(Bongers and Ferris, 1999; 张薇等, 2004)、原生动物(宋雪英等, 2004)和甲螨(陈国定等, 1992)等。蜘蛛作为广泛遍布潮湿的表层土壤的生物,处在食物链的顶端,很容易受到重金属的污染,但蜘蛛作为土壤重金属污染指示生物的研究很少报道。蜘蛛从食物链中累积了大量的重金属,贮存在中肠之中,为了保护自身,机体往往产生氧化抗毒的机理以抵抗重金属的毒害,而付出的代价是生长停滞和繁殖率的下降(Hopkin and Martin, 1985)。

南阳作为豫西南重要的能源和有色金属产地,在石油、煤炭和有色金属的开采和利用过程中,发生大量的重金属污染,对土壤表层动物也产生重要影

响(孙贤斌等, 2005)。拟水狼蛛 *Pirata subpiraticus* 是广布于河流、稻田和潮湿环境的一种游猎性优势蜘蛛(李剑泉等, 2002),本文在对南阳市煤矿、石油和铜矿等污染地研究的基础上,以拟水狼蛛为实验材料,探讨重金属污染对蜘蛛生物学特性和生长发育的影响,从而反映土壤重金属污染程度和生物学效应,为治理污染和恢复矿区生态系统以及对潜在的生态风险进行定量评价提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集与处理

1.1.1 土壤样品的采集与处理:2008 年 7 月利用 GPS 定位,记录采样点植被、环境因子(表 1),在 5 个样点采用蛇形布点法在每个采样区采集 0~20 cm 左右的表层土壤,混合均匀后按四分法获取足量的样品装入布袋中,于实验室内自然风干。剔除植物残体和石块,磨碎、过 120 目筛,保存于玻璃瓶中,以备重金属元素测定用。

1.1.2 拟水狼蛛的采集:为了减少实验误差,采集性成熟的雌蛛作为实验材料。于 2008 年 7 月利用 GPS 定位,记录采样点植被、环境因子(表 1),在 5 个样点利用平行线跳跃法手工采集 30 头携带卵袋的雌性拟水狼蛛带回实验室,以南阳宝天曼国家自然保护区葛条爬采集的标本为对照组。分别做好标记后饲养在玻璃指管(12 cm×4 cm)中,为了减少实验误差,观察 1~2 d,通过严格镜检观察卵的发育情况,剔除提前孵化的卵袋,确保无空卵袋和产生第 2 个卵袋。然后各随机选取 10 头携带卵袋的雌性拟水狼蛛放入-30℃冰箱冰冻冷藏以备用。

表 1 采样方位及生境
Table 1 The sampling site and habitat

样点 Sampling site	经纬度 Latitude/longitude	生境特征 Habitat characteristics
桐柏金矿 Tongbai Jinkuang (TBJK)	32°27'25"N, 113°19'50"E	黄色粉砂土, 植被少, 以蒿草为主
桐柏铜矿 Tongbai Tongkuang (TBTk)	32°32'49"N, 113°19'7"E	黄色粉砂土, 植被少, 以蒿草为主
南阳油田 Nanyang Youtian (NYYT)	33°0'58"N, 112°27'10"E	耕作土, 砂质粘土, 以农作物小麦居多
南阳军工厂 Nanyang Jungong (NYJG)	33°1'24"N, 112°29'52"E	砂粒粘土, 植被少, 以苔草为主
宝天曼 Baotianman (BTM)	33°2'17"N, 111°56'22"E	砂质粘土, 植被丰富, 以荔枝草为主

1.2 生物学特性的测量

利用电子天平(德国赛多利斯:BL310 型)称出雌蛛鲜重,精确到 0.01 mg。称出卵袋鲜重,精确到 0.1 mg。在解剖镜(UTHSCSA Image Tool version 2.0)下用测微尺测出雌蛛背胸甲宽度,精确到 0.01 mm。头胸甲宽是衡量各种蜘蛛体型大小的重要指标。剥开卵袋计算卵粒数,由于卵近似椭球体,测量卵的长(l_1)和宽(l_2),精确到 0.01 mm,利用 $V = \pi/6 l_1 l_2^2$ 算出体积,作为卵的尺寸大小。卵袋重量、卵粒数和卵体积作为雌蛛繁殖力的指标,每地点重复测量 10 头。

1.3 重金属含量的测定

参照 Tack (2000) 方法略加改进。采用原子吸收法测定拟水狼蛛体内重金属(Cd, Pb, Cu 和 Zn)的含量。测量前,用 1% HNO₃ 溶解去掉表皮毛上的重金属。然后 70℃ 烘箱中干燥 48 h,电子天平称重,精确到 0.1 mg。然后用 5 mL 65% 纯 HNO₃ 在 130℃ 溶解 1 h,添加 2 mL 20% H₂O₂ 溶液,30 min 后再添加 2 mL 20% H₂O₂ 溶液至完全溶解。样品添加 1% HNO₃ 至 10 mL 备用。然后用原子吸收分光光度计(日本日立 Z-5000)测定 Cu 和 Zn 的含量,

Cd 和 Pb 的测定选用背景校正为塞曼效应。所有重金属含量以单位蜘蛛干重所含的重量,精确到 0.1 μg,每地点重复测量 10 头。土壤样品重金属含量测定方法同上,土壤样品重金属含量以单位样品干重所含的重量,精确到 0.1 mg,每样品重复测量 3 次,取平均值。

1.4 数据处理

所有数据处理采用 SPSS15.0 进行 t 检验、主成分和线性回归分析。

2 结果与分析

2.1 不同样点土壤重金属的含量

从表 2 可看出 4 个采集样点(TBJK, TBTK, NYYT, NYJG)土壤重金属(Cd, Pb, Cu 和 Zn)的含量与参照组 BTM 重金属含量相比,差异极显著($P < 0.01$)。所有样本经简单相关分析表明拟水狼蛛体内重金属(Cd, Pb, Cu 和 Zn)含量分别与土壤中相应的重金属(Cd, Pb, Cu 和 Zn)含量显著正相关($r = 0.983, P < 0.01; r = 0.967, P < 0.01; r = 0.946, P < 0.01; r = 0.924, P < 0.01$)。

表 2 不同样点土壤重金属含量(mg/kg)比较
Table 2 The comparison of heavy metal content (mg/kg) in soil of different habitats

样点 Sampling site	Cd	Pb	Cu	Zn
TBJK	141.07 ± 4.41 **	183.02 ± 12.08 **	755.80 ± 24.50 **	1 514.02 ± 58.38 **
TBTK	74.06 ± 3.31 **	208.71 ± 9.28 **	644.93 ± 19.86 **	1 818.00 ± 39.98 **
NYYT	49.28 ± 3.09 **	555.45 ± 30.12 **	448.44 ± 19.66 **	1 353.30 ± 40.15 **
NYJG	37.70 ± 1.01 **	357.02 ± 32.52 **	592.40 ± 31.58 **	1 355.30 ± 36.68 **
BTM	5.94 ± 0.43	98.51 ± 4.31	155.68 ± 7.27	717.00 ± 11.73

表中数据为平均值 ± 标准差(n = 10), * 和 ** 分别表示与对照组 BTM 差异显著和极显著,下同。Data (mean ± SD, n = 10) followed by * and ** in the same column show that there are significant difference ($P < 0.05$) and very significant difference ($P < 0.01$) as compared with control (BTM) by t -test. The same below.

2.2 不同地点拟水狼蛛体内重金属的含量

如表 3, 4 个不同地点拟水狼蛛体内重金属(Cd, Pb, Cu 和 Zn)的含量中,与 BTM 国家自然保护区葛条爬采集样本相比,Cd, Cu 和 Zn 的含量差异极显著($P < 0.001$)。对于 Pb 只有 TBTK, NYYT 与 BTM 差异极显著($P < 0.001$)。TBJK, TBTK 与 BTM 相比,差异不显著($P > 0.05$)。5 个地点所有样本进行主成分分析结果表明:第一主成分的贡献率为 55.688%,第二主成分的累积贡献率

26.133%,两者累积率为 81.822%。第一主成分方程 $F_1 = -0.179y_1 - 0.029y_2 - 0.360y_3 + 1.259y_4$ (y_1, y_2, y_3 和 y_4 分别代表 Cd, Pb, Cu 和 Zn),第二主成分方程 $F_2 = 1.300 y_1 + 0.154y_2 - 0.401y_3 - 0.183y_4$ (y_1, y_2, y_3 和 y_4 同上)。从第一主成分方程的系数来看,Cu 和 Zn 的含量是主要影响因素,从第二主成分的系数来看 Cd 和 Cu 也是主要影响因素。从相关性来看,Cd 和 Cu、Zn 相互影响较大($P < 0.001$),其他相互影响较小($P > 0.05$)。

表 3 不同生境下拟水狼蛛重金属含量 (μg/g) 比较
Table 3 The comparison of heavy metal content (μg/g) of *Pirata subpiraticus* in different habitats

样点 Sampling site	Cd	Pb	Cu	Zn
TBJK	64.67 ± 3.84 **	79.43 ± 8.89	329.47 ± 23.31 **	916.18 ± 31.20 **
TBTK	31.92 ± 1.62 **	80.56 ± 8.64	254.13 ± 18.77 **	1144.40 ± 54.59 **
NYYT	24.10 ± 2.38 **	275.28 ± 20.68 **	204.18 ± 16.63 **	720.87 ± 28.81 **
NYJG	21.50 ± 0.71 **	189.21 ± 18.05 **	278.78 ± 10.94 **	995.00 ± 44.34 **
BTM	3.23 ± 0.27	65.14 ± 8.11	75.52 ± 2.47	424.61 ± 16.51

2.3 不同地点拟水狼蛛的背胸甲宽、雌体重量、卵袋重量、卵数目和卵体积

结果见表 4，与参照组 BTM 相比，其他 4 个地点拟水狼蛛背胸甲宽、雌体重量、卵袋重量、卵数目和卵体积差异均达到极显著 ($P < 0.001$) 或显著水平 ($P < 0.05$)。主成分分析结果表明：第一主成分的贡献率为 72.99%，第二主成分的累积贡献率 17.507%，两者累积率为 90.497%。第一主成分方程 $F_1 = -0.321x_1 - 0.218x_2 - 0.231x_3 + 1.482x_4 - 0.139x_5$ (x_1, x_2, x_3, x_4 和 x_5 分别代表背胸甲宽、雌体重量、卵袋重量、卵数目和卵体积)，第二主成分

方程 $F_2 = 1.631x_1 - 0.049x_2 - 0.350x_3 - 0.386x_4 + 0.394x_5$ 。从第一主成分的系数来看，卵数目和背胸甲宽是主要生物学指标从第二主成分的系数来看背胸甲宽和卵的体积也是主要生物学指标，从相关性来看，前 4 个指标相关性显著，相互影响大 ($P < 0.001$)。综合表 1 和表 2 可以看出，重金属含量高的地方拟水狼蛛背胸甲宽较小，雌性体重、卵袋重量和卵数目较小，说明重金属严重影响了蜘蛛的繁殖力，但是卵的体积刚好相反，重金属含量高的地方卵体积较大。

表 4 不同生境下拟水狼蛛生物学特性与繁殖力的比较
Table 4 The comparison of biological traits and fecundity of *Pirata subpiraticus* in different habitats

样点 Sampling site	背胸甲宽 (mm) Carapace width	雌性体重 (mg) Female weight	卵袋重量 (mg) Cocoon weight	卵数目 Egg number	卵体积 (mm ³) Egg volume
TBJK	2.07 ± 0.04 **	23.61 ± 0.22 **	17.35 ± 0.13 **	55.4 ± 1.4 **	0.32 ± 0.01 *
TBTK	2.17 ± 0.04 **	24.11 ± 0.26 **	19.38 ± 0.20 **	64.0 ± 1.5 **	0.33 ± 0.01 **
NYYT	2.14 ± 0.03 **	25.20 ± 0.26 **	21.44 ± 0.25 **	67.9 ± 1.9 **	0.35 ± 0.01 **
NYJG	2.28 ± 0.03 **	26.60 ± 0.31 **	22.70 ± 0.31 **	72.5 ± 1.4 **	0.35 ± 0.01 **
BTM	2.68 ± 0.05	31.64 ± 0.42 **	26.63 ± 0.35	80.5 ± 1.1	0.28 ± 0.01

2.4 拟水狼蛛背胸甲宽、雌性体重和繁殖力指标与其体内重金属含量多元线性回归分析

5 个地点所有样本进行多元线性回归分析表明：背胸甲宽与 Cd, Pb 含量显著负相关，与 Zn 含

量显著正相关，雌性体重与 Cd, Pb, Zn 含量显著负相关，卵袋重量与 Cd, Cu, Zn 含量显著负相关，卵数目与 Cd 显著负相关，卵体积与 Cd 显著负相关 (表 5)。

表 5 拟水狼蛛背胸甲宽、雌性体重和繁殖力指标与其体内重金属含量多元线性回归分析
Table 5 Multivariate linear regression analysis of carapace width, female weight and fecundity of *Pirata subpiraticus* to heavy metals

	多元线性回归方程 Line regression equation	F	P
背胸甲宽 Carapace width	$y = 2.832 - 0.007y_1 - 0.001y_2 + 0.0004y_4$	43.425	<0.0001
雌性体重 Female weight	$y = 33.541 - 0.082y_1 - 0.007y_2 - 0.005y_4$	51.635	<0.0001
卵袋重量 Cocoon weight	$y = 27.804 - 0.094y_1 - 0.007y_3 - 0.002y_4$	66.607	<0.0001
卵数目 Egg number	$y = 78.363 - 0.354y_1$	80.388	<0.0001
卵体积 Egg volume	$y = 0.248 + 0.0004y_2 + 6.09E - 5y_4 + 0.354y_1$	25.666	<0.0001

y_1, y_2, y_3 和 y_4 分别代表 Cd, Pb, Cu 和 Zn 含量。 y_1, y_2, y_3 和 y_4 indicate the contents of Cd, Pb, Cu and Zn, respectively.

2.5 拟水狼蛛背胸甲宽与繁殖力指标线性回归分析

线性回归分析结果表明:拟水狼蛛背胸甲宽与卵袋重量显著正相关,回归方程为 $y = 11.225 + 2.962x_3$ ($r = 0.843$, $P < 0.0001$);背胸甲宽与卵数目显著正相关,回归方程为 $y = 3.893 + 28.300x_4$ ($r = 0.738$, $P < 0.0001$);背胸甲宽与卵体积显著负相关,回归方程为 $y = 0.493 - 0.073x_5$ ($r = -0.509$, $P < 0.0001$)。

3 讨论

生物监测是环境预警的有效途径,可以直观地了解环境变化对生物造成影响的程度。利用食物链上不同营养级的许多生物作为指示生物,可以对土壤及其他生态系统进行监测和评估 (Odsjo *et al.*, 2004)。由于顶级捕食动物体内的重金属水平可以揭示这些污染物在生态系统中转移的过程,因此对处于较高营养级的捕食者体内重金属富集特征研究日益受到重视 (Turle and Collins, 1993; Pain *et al.*, 2003; 阮禄章等, 2003; Von Storch and Hangner, 2004)。蜘蛛作为生态系统中的重要捕食者,研究蜘蛛在重金属胁迫下的生物学行为有着重要的意义。

本研究结果表明,不同地点土壤重金属含量不同,拟水狼蛛体内重金属含量也不同,与作为参照组的保护区种群相比,工业区、金属矿区和石油矿区的显著高于保护区,说明重工业活动和采矿业能造成很严重的重金属污染,并通过一定的食物链传递到蜘蛛且富集在体内,这与 Heikens 等 (2001) 和 Maelfait (1996) 的研究结论较为一致,即重金属污染能造成一定的生物学效应。通过主成分分析表明,在 4 种重金属元素中, Cd、Zn 和 Cu 是污染的主要成分, Pb 是次要成分。

不同程度的重金属污染下,拟水狼蛛有着不同的生物学特性和繁殖策略。在高浓度的重金属胁迫下,拟水狼蛛个体发育受阻,个体较小,产卵量下降,但是卵的尺寸较大,这与 Sibly 等 (1988) 及 Tamate 和 Maekawa (2000) 早期报道的生活史预测模型一致,即在高浓度的重金属胁迫下,动物的繁殖策略将会是产生数目较少但个体较大的后代。这进一步说明动物处在逆环境中时,动物为保持总的繁殖力不变的前提下,后代个体的大小与数目间满足某种平衡,即达到协同进化的目的。这种协同进

化的证据在其他昆虫也有报道 (Caley *et al.*, 2001)。

本研究结果表明拟水狼蛛在重金属胁迫下,拟水狼蛛的背胸甲宽、卵袋重量和卵的体积与重金属含量显著相关,因此这些指标可以作为重要的生物学指标,反映蜘蛛是否受到重金属的污染,因此拟水狼蛛可以作为一个重要的重金属污染指示生物。拟水狼蛛作为狼蛛科的一种,狼蛛科和跳蛛科很多其他种类也是游猎的地表活动型的蜘蛛,在重金属的污染下,是否也表现出相同的繁殖策略是今后研究的方向之一。另外,蜘蛛对重金属的富集作用的遗传机理以及如何抗重金属的毒性的免疫机理也是今后研究的重点。

参考文献 (References)

- Bongers T, Ferris H, 1999. Nematode community structure as a bioindicator in environmental monitoring. *Trends Ecol. Evol.*, 14: 224 – 227.
- Caley MJ, Schwarzkopf L, Shine R, 2001. Does total reproductive effort evolve independently of offspring size? *Evolution*, 55: 1 245 – 1 248.
- Chen GD, Zhu W, Li MD, Yu XC, Wang YF, 1992. The acarid as indicator of environment pollution. *Environmental Monitoring in China*, 8(1): 6 – 10. [陈国定, 朱文, 黎明达, 俞小淙, 王以方, 1992. 应用甲螨检测土壤污染. 中国环境监测, 8(1): 6 – 10]
- Crouan Y, Moia C, 2006. The relative sensitivity of growth and reproduction in the springtail *Folsomia candida* exposed to xenobiotics in the laboratory: An indicator of soil toxicity. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 64(2): 115 – 121.
- Heikens A, Peijnenburg WJGM, Hendriks AJ, 2001. Bioaccumulation of heavy metals in terrestrial invertebrates. *Environ. Pollut.*, 113: 385 – 393.
- Hopkin SP, Martin MH, 1985. Assimilation of zinc, cadmium, lead, copper and iron by the spider *Dysdera crocata*, a predator of woodlice. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 34: 183 – 187.
- Kula H, Kokta C, 1992. Side effects of selected pesticide on earthworms under laboratory and field conditions. *Soil Biol. Biochem.*, 24(12): 1 711 – 1 714.
- Kurakov A, Iyaginsev DG, Umarov M, 1998. Assessment of soil quality by biological methods: Experience from arable soils in Gech Republic. In: Proceedings of the 16th World Congress of Soil Science, Montpellier, France. 148 – 150.
- Li JQ, Shen ZR, Zhao ZM, Luo YJ, 2002. Biology and ecology of the wolf spider *Pirata subpiraticus*. *Acta Ecologica Sinica*, 22(9): 1 478 – 1 484. [李剑泉, 沈佐锐, 赵志模, 罗雁婕, 2002. 拟水狼蛛的生物学生态学特性. 生态学报, 22(9): 1 478 – 1 484]
- Maelfait JP, 1996. Soil spiders and bioindication. In: Van Straalen NM, Krivolutsky DA eds. *Bioindicator Systems for Soil Pollution*. Kluwer, Dordrecht. 165 – 178.
- Odsjo T, Roos A, Johnels AG, 2004. The tail feathers of osprey

- nestlings (*Pandion haliaetus* L.) as indicators of change in mercury load in the environment of southern Sweden (1969–1998): a case study with a note on the simultaneous intake of selenium. *AMBIO*, 33(3): 117–121.
- Pain DJ, Meharg A, Sinclair G, Powell N, Finnie J, Williams R, Hilton G, 2003. Levels of cadmium and zinc in soil and plants following the toxic spill from a pyrite mine, Aznalcollar, Spain. *Ambio*, 32(1): 52–57.
- Ruan LZ, Zhang YM, Zhao DQ, Dong YH, Mauro F, 2003. *Egretta garzetta* as a bioindicator of environmental pollution in Tai Lake region. *Chin. J. Appl. Ecol.*, 14(2): 263–268. [阮禄章, 张迎梅, 赵东芹, 董元华, Fasola Mauro, 2003. 白鹭作为无锡太湖地区环境污染指示生物的研究. 应用生态学报, 14(2): 263–268]
- Sibly RM, Calow P, Smith RH, 1988. Optimal size of seasonal breeders. *J. Theor. Biol.*, 133: 13–21.
- Solomon KR, Sibley P, 2002. New concepts in ecological risk assessment: Where do we go from here? *Marine Pollution Bulletin*, 44: 279–285.
- Song XY, Song YF, Zhou QX, 2004. Bioindicating function of soil protozoa to environmental pollution. *Chin. J. Appl. Ecol.*, 15(10): 1 979–1 982. [宋雪英, 宋玉芳, 周启星, 2004. 土壤原生动物对环境污染的生物指示作用. 应用生态学报, 15(10): 1 979–1 982]
- Sun XB, Li YC, Zhang XP, Wang ZY, 2005. Influence of heavy metal pollution on soil animal community and its diversity in Huainan City. *Chinese Journal of Ecology*, 24(10): 1 163–1 166. [孙贤斌, 李玉成, 张小平, 王宗英, 2005. 淮南市重金属污染对土壤动物群落和多样性影响研究. 生态学杂志, 24(10): 1 163–1 166]
- Tack FMG, Bogaert N, Verloo MG, Hendrickx F, Maelfait JP, Mertens J, 2000. Determination of Cd, Cu, Pb and Zn in woodlouse (*Oniscus asellus*). *Int. J. Environ. Anal. Chem.*, 78: 149–158.
- Tamate T, Maekawa K, 2000. Interpopulation variation in reproductive traits of female masusalmon, *Oncorhynchus masou*. *Oikos*, 90: 209–218.
- Turle R, Collins B, 1993. Validation of the use of pooled samples for monitoring of contaminants in wildlife. *Chemosphere*, 25: 463–469.
- Von Storch H, Hangner C, 2004. Controlling lead concentrations in human blood by regulating the use of lead in gasoline. *Ambio*, 33(3): 110–116.
- Wang ZZ, Zhang YM, Xing XJ, 2002. Effect of change in soil environment on community structure of soil animal. *Acta Pedologica Sinica*, 39(6): 892–897. [王振中, 张友梅, 邢协加, 2002. 土壤环境变化对土壤动物群落影响的研究. 土壤学报, 39(6): 892–897]
- Zhang W, Song YF, Zhou QX, 2004. Soil nematode as a bioindicator of environment pollution. *Chin. J. Appl. Ecol.*, 15(10): 1 973–1 978. [张薇, 宋玉芳, 周启星, 2004. 土壤线虫对环境污染的指示作用. 应用生态学报, 15(10): 1 973–1 978]

(责任编辑: 袁德成)