

Biological Adaptation Cost and Its Survival Strategies under Environmental Pollution

Peng Wang^{1,2}, Changqun Duan^{1,2,3}, Minhui Yue^{1,2}, Minghui Yu^{1,2}, Xianghuai Meng^{1,2}, Ying Pan^{1,2,3}, Chang'e Liu^{1,2,3*}

¹School of Ecology and Environmental Sciences & Yunnan Key Laboratory for Plateau Mountain Ecology and Restoration of Degraded Environments, Yunnan University, Kunming Yunnan

²International Cooperative Center of Plateau Lake Ecological Restoration and Watershed Management of Yunnan, Kunming Yunnan

³Yunnan Ecological Civilization Construction Think Tank, Kunming Yunnan

Email: *change@ynu.edu.cn

Received: Jul. 29th, 2019; accepted: Aug. 14th, 2019; published: Aug. 22nd, 2019

Abstract

In the polluted environment, the organisms face the pressure of "new environment". In the short term, this "new environment" is harmful and is not conducive to the survival and reproduction of the organism; in the long run, the tolerant organism will become new. A wide variety of species can survive in a variety of complex environments, and the new environment is conducive to its reproductive distribution, which forms the adaptation cost of organisms under environmental pollution stress and the survival strategies made by organisms. This paper starts with the ecological environment, physiological cost and evolution cost of biological treatment, and analyzes the biological life to adjust the life history, morphology, anatomy and physiology and biochemistry, and reshape the new survival strategy. Both biological adaptation and survival strategies are the maximum survival and reproduction of organisms.

Keywords

Pollutants, New Environment, Environmental Choice, Adaptation Cost, Survival Strategies

环境污染胁迫下生物的适应代价及其生存策略分析

王朋^{1,2}, 段昌群^{1,2,3}, 岳敏慧^{1,2}, 禹明慧^{1,2}, 孟祥怀^{1,2}, 潘瑛^{1,2,3}, 刘嫦娥^{1,2,3*}

¹云南大学生态学与环境学院暨云南省高原山地生态与退化环境修复重点实验室, 云南 昆明

*通讯作者。

文章引用: 王朋, 段昌群, 岳敏慧, 禹明慧, 孟祥怀, 潘瑛, 刘嫦娥. 环境污染胁迫下生物的适应代价及其生存策略分析[J]. 世界生态学, 2019, 8(3): 214-222. DOI: 10.12677/ije.2019.83029

²云南省高原湖泊生态修复及流域管理国际联合研究中心, 云南 昆明

³云南生态文明建设智库, 云南 昆明

Email: change@ynu.edu.cn

收稿日期: 2019年7月29日; 录用日期: 2019年8月14日; 发布日期: 2019年8月22日

摘要

在污染环境中的生物面对“新环境”的压力, 从短期来看, 这种“新环境”是有害的, 不利于生物生存繁衍; 从长期来看, 耐受性的生物将会成为新的广泛种, 面对各种复杂环境都能生存, 进而新环境是有益于其繁衍分布的, 这就形成了环境污染胁迫下生物的适应代价以及生物作出的生存策略。本文从生物付出的生态代价、生理代价及进化代价三方面适应“新环境”着手, 分析生物为了存活而调整生活史、形态学、解剖学及生理生化等, 重塑新的生存策略。生物适应与生存策略均是生物最大限度地生存和繁殖的方式。

关键词

污染物, 新环境, 环境选择, 适应代价, 生存策略

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来, 随着人类社会发展产生的大量环境污染物凸显出了近几个世纪发展引发的许多环境问题。地球上的所有生物面对环境的污染影响到自身的生存时不得不做出相应的改变, 只有适应这种改变的环境, 否则将会面临被自然界淘汰的危险。环境污染物按照组成一般分为金属类污染物(如汞、铬、砷、铅、铜、镉、钼、镍等)、非金属无机污染物(如硫化物、氟化物、氰化物和砷化合物等)以及有机污染物(如石油烃类污染物、卤代烃类污染物, 农药类污染物、多环芳烃、多氯联苯、二恶英、邻苯二甲酸酯等有机污染物), 然而危害最为严重的是金属类污染物和有机污染物, 研究表明低浓度的重金属可以促进某些植物的生长, 如一定浓度的铅锌矿渣可以促进蓖麻种子的成活率、萌发率、发芽势及营养生长; 低浓度 Pb、Zn 对植物叶片叶绿素的提高同样具有促进作用, 并且能够保持叶绿体结构的正常[1]; 也有一部分必须金属元素是生物体内酶的活性中心; 但是在超过一定浓度时会对生物的生长产生胁迫, 产生不利的影响。如 Cu、Zn、Cd、Pb、Ni 等多个重金属单独作用或者联合作用会形成更加复杂、毒性极强的聚集污染物[2][3]。随着社会的发展, 有大量的有机污染物如农药进入到环境中对植物的生长造成了一定的影响。有研究表明有机污染物如除草剂会随着浓度的增加进而显著降低植物对氮磷的吸收[4]。当植物接触某些农药后, 将影响其生理、生化以及正常的生长发育过程, 如叶片出现黄化、失绿、卷叶、落叶、落果及枯萎等现象[5]。

近年来随着农药化肥的大量使用以及现代工业产品塑料的大量使用, 由重金属及微塑料等所引发的大气污染、土壤污染、水体污染等现象极其严峻。随着工业革命产生, 引发了各类与环境污染相关的问题, 随着污染物的不断扩展和延伸, 地球上对污染敏感的物种趋于灭绝; 环境污染的发生至今已有几百

年的历史,但由于人们对环境保护意识的缺乏,一直没有被重视起来。生物对环境污染的适应人们已做了大量的研究,主要研究生物对环境污染后的短期效应,生物对污染环境的长期适应和进化的研究较少[6]。生物对环境污染的适应,可从两个方面进行研究:第一个是生物对污染物所引起的“自然”环境的适应;第二个是生物对环境污染物的适应。任何一种生物要想在污染环境生存或多或少都会面对这两个方面的挑战[7],生物可从自身的形态、生理、生化等多个方面做出适宜于生存的调整,即就是适应污染引起的自然环境的适应。生物也将会付出生态代价、进化代价和生理代价以及对生存策略进行调整,来增强环境污染的适应性,但有可能使得生物在其他方面的适应性有所下降或受到限制,这就是适应代价问题。面对污染的环境生物要想很好的生存均需付出相应的代价,环境不同适应代价也不同。在污染特别严重的地区,也有生物生存并且能够完成生长发育的全过程,在污染不太严重接近没有污染的地区也会有生物的灭绝,生物对自己生存的环境都会去适应,但是否能够一直存活下去就跟生存策略有关。生存策略在环境污染后生物能否继续生存下去起着决定性的作用。

2. 污染胁迫下生物适应代价

一般认为适应代价主要包括生态代价、进化代价和生理代价[8]。适应是生物不断发展、壮大、延续的一个最基本的手段。如果生物不能对所处的环境做出积极的响应,将会被自然界所淘汰。随着城镇化进程的不断加剧以及科学技术的发展所产生的大量污染物严重影响了生物的栖息地[9]。适应一般是指生物是否在所栖息的环境中能够繁衍出下一代,使得种群得以延续。在正常环境中是指其竞争力和生活力以及生长状态等;在非正常环境中,一般强调对所处环境的忍耐极限[10]。因此,生物随着环境的不同其适应代价也将随之改变。

2.1. 生态代价

一般认为生态代价是对污染适应的生物,再次进入到正常环境中,表现出对正常环境适应能力有下降的趋势;以及抵抗温度、水分、病虫害等能力的下降[8]。在重金属胁迫时,有些植物会产生相应的耐受对策。生物体在适宜的环境中生存会形成相应的适应对策,但当该生物经历污染的胁迫后,再回到原来的环境中时,将会表现出对之前环境的不适应。

植物在污染胁迫生境中会将大部分的资源用于保障能够产生正常种子,而在营养生殖上分配的较少,也会根据重金属对自身迫害的严重程度进而将富集的重金属分配到不同的器官。研究表明,镉在苕麻根茎叶中的累积量呈现为根 > 茎 > 叶[11]。大量研究表明随着镉浓度的增加,植物体各个器官中镉的分配规律为根 > 叶 > 花[12]。近年来随着微塑料引起的污染广受学者的关注,研究表明,微塑料被一些小型动物和稍大型动物取食后,可能堵塞肠道并造成伪饱食现象[13];微塑料能够长时间存留在摄入者的消化道中[14],甚至可以通过消化道管壁进入各个器官组织[15];此外,微塑料能够降低河鲈幼鱼的生长速率、改变其饮食习惯,并且影响河鲈幼鱼对危险的感知能力,从而增加了其被捕食率[16];虽然也有研究发现只有极少数微塑料会停留在生物体内[17],但是一旦微塑料被水生生物吸收,存在从消化道向其他组织器官转移的可能,从而对生物体的生命活动造成影响[18],这将导致生物的竞争力、对污染的抵抗能力及其对不良环境的耐性都会下降。此外,农药化肥的过量使用,不仅影响了土壤环境而且一部分通过地表径流进入到河流湖泊中进而会引发一系列的生态环境效应[19]。比如水体富营养化所引发藻类的疯长使得大量水生动植物缺乏氧气等生长要素导致其难以继续生存下去,进而导致水生群落结构的单一、物种多样性的减少。不同的氮磷比影响植物生长,且植物对营养生长所支配的资源远远高于正常环境下生长的植物,导致生殖生长的资源不足,不能正常繁衍。在一定程度上不同的氮磷比也决定着群落的结构特征[20],低的氮对卡盾藻生长受到抑制,氮含量升高非常容易引发卡盾藻爆发进而引起赤潮[21],藻类

爆发将导致水体的变质，严重时可能还会导致大量水生动植物的死亡。

2.2. 进化代价

生物对污染的适应将会对资源重新分配进而适应新的胁迫环境，这将会降低对其它环境的适应性，这在一定程度上降低了它的进化潜力[22]，因此，进化代价表现为对污染环境适应很好的生物再进入之前的适宜环境后其适应性降低，主要是遗传多样性的丧失导致失去适应其他环境的可能性[23]，主要是因为部分与抵抗污染无关的基因流失导致的。这也使得生物物种的扩散受到了自身限制，大大的降低了繁衍能力。研究发现，农药化肥等农业化学用品会造成无尾两栖类动物性别比例严重失调[24]，甚至对其生命产生直接影响[25] [26]，由于性别比例的失调，会在短时间造成数量和遗传多样性的急剧减少。此外，农药化肥的大量使用不但降低了生物多样性，而且对无尾两栖类的体质也有影响[27]。

随着抗菌药物的广泛使用导致许多病原菌具有了耐药性，耐药性的产生不仅在疾病的治疗上增加了难度，而且造成经济上的损失。耐药性的产生主要是机体的基因突变，这种突变是不可逆的，停止使用这种药物后其耐药性仍然存在[28]。目前全球结核病防控面临的重大挑战是结核病耐药率的攀升。在积累耐药突变之后，结核分枝杆菌可通过进一步积累其他特定的突变来回补耐药突变导致的适应性代价，这一过程称为“补偿性进化代价”。目前发现通过耐药相关基因的二次突变、耐药突变之间的异位显性效应及同工酶的过表达的3种形式进化[29]。在2006年之前已发现，实验室筛选的耐利福平结核分枝杆菌通常具有较高的适应性代价，而临床分离的一些耐利福平结核分枝杆菌表现出与野生株相当的适应性，提示可能发生了补偿性进化代价[30]。

2.3. 生理代价

繁殖期是生物重要的生活史阶段，在繁殖期生物会出现一系列特殊的行为学与生理学模式以保障发育，这种亲代依靠牺牲自我而保障繁殖的现象为生殖生理代价。研究发现，随着性腺发育，繁殖会抑制刺参对有机质的消化能力；淀粉酶和胰蛋白酶在肠道组织中的活性有所下降；而5-羟色胺与溶血卵磷脂等8种物质含量在性腺生长期与成熟期都出现上升；而尿苷磷酸等4种物质含量在性腺生长期与成熟期都出现下降，表明刺参繁殖期消化酶活力的下降主要由肠道退化与氧化损伤所导致的，而摄食选择性可能是适应繁殖期肠道退化的生活史策略[31]。

此外，生物面对污染的胁迫同样也会在生理上付出相应的代价来适应新的环境。污染物对植物体会产生巨大的影响，如重金属离子被植物体吸收、积累后会胁迫植物在外在表型、酶活性、内部结构等方面做出调整[32]。研究表明对贻贝进行低温和高温驯化，然后在将其暴露于重度污染环境中，发现适应较低温度的生物体出现大量死亡；同时也发现能在较高温度存活的生物是显著减少了细胞防御蛋白[33]。不同鱼类经过长期适应和进化适应环境温度能力的不同，从而会激发体内抗冻蛋白、代谢酶类、膜通道蛋白和分子伴侣等都参与其对低温胁迫的适应过程，以达到对低温环境的适应，当再次进入温度较高的环境中后又表现为难以适应的特征[34]。部分植物通过诱导或者抑制蛋白质的表达来适应污染的环境，如在Cd胁迫环境中水稻的耐性品种通过调节其生理生化过程，从生理或分子水平上诱导或抑制蛋白质的表达，为了降低Cd对水稻的毒害作用[35]。

3. 环境污染下生物的生存策略

在植物演替及动物繁殖过程中，适应于获取和利用资源的生物生命史形式或行为方式称为生存策略。然而在污染环境中生物是如何选择生存方式进而适应胁迫环境的呢？现从生活史策略、形态学特征、解剖学特征及生理生化特征等4个方面深入分析生物生存策略的研究进展。

3.1. 生活史策略

生物应对不利的环境会改变其生活史对策来平衡不利的环境。生活史对策是生物适应的最直接体现[10]。对已有环境的适应中主要是对能量的分配而言,如有些植物面对比较适宜生存的环境时能量会在营养生长上的投入较多;面对生存受到环境胁迫时即不太适宜与生存时,能量会在生殖生长上的投入较多。

重金属的富集植物其耐受对策主要分为分隔策略和去除策略两类。分隔策略通常指大量的重金属离子在植物的根系富集通过主动和被动吸收作用[36],去除策略则指重金属离子倾向于富集于植物的临时器官比如叶片[37]。随着生物的不同种类其应对环境污染后生活史也将不同,如植物体通过部分器官对污染物的富集后通过对部分器官的脱落与凋谢进而将污染物排除体内,这将会导致植物部分器官的新陈代谢加快,这属于“耐受策略”。

研究表明,能量在不同器官的分配存在代价问题[38]。通过分析发现在重金属污染区域中不同蚕豆品种的生存策略来看,在繁殖生长上,蚕豆 A、B 品种减少了种子数量却提高了种子质量,保证了每粒种子的竞争力,而 C 品种种子重量虽然下降但却增加了种子的数量[39]。此外,也有研究表明,柠条的根有扩大生长的潜力,为了吸收满足生长所需的磷,它通过增加根际的吸收表面积,来增加对磷的吸收[40],进而能量在根部的分配较多用于吸收生命活动所需的磷等。

此外,对同一区域两种蝌蚪(*Pelophylax nigromaculatus*) PN 和(*Rhacophorus schlegelii*) RS 在笼中受控捕食者龙虾(*Procambarus clarkia*)的研究中表明,在室内实验中 PN 表现出较高的活动水平和躲避行为。而在自然条件下 PN 表现为生物量和死亡率均增加,这种现象在室内实验中没有体现,说明这种捕食风险使得蝌蚪调整了其生活史对策[41]。牛蛙(*Rana catesbeiana* Shaw)胚胎发育的速度、变态时间长短与水体温度、DO、pH 等环境因素相关[42],这恰恰是牛蛙为适应环境而作出的生活史调整策略。当然如果污染物毒性超过生物的应激修复能力的话,可能会导致生物无法通过生活史调整来生存,甚至死亡,研究表明,以高氯酸盐处理南方豹蛙蝌蚪,用硝酸钾化肥浸染美洲林蛙蝌蚪均发现其变态发育时间延长,甚至有很大比例不能完成变态发育过程而死亡[43]。

3.2. 形态学策略

在污染环境的胁迫下生物会表现出不同的形态学特征。早在 20 世纪的工业革命后昆虫由于工业污染导致的黑化现象称为工业黑化,这是很典型的生物适应环境的形态学表现;此外,在干旱胁迫下玉米(*Zea mays*)的抗旱品种的根干重和根体积均减小,根系总吸收面积和活跃吸收面积均降低,最大根长增加、根数增长,根冠比加大[44]。

当然短期的污染环境也会使生物表现出形态学上的生存策略。研究表明,部分植物在受到重金属等的污染时会表现出植株矮小、发育缓慢、叶片小并且卷缩等特征。在重金属 Cd 的胁迫对绿豆幼苗的影响中,Cd 显著抑制了绿豆幼苗的鲜重、干重;极显著抑制了株高、主根长、侧根数及净光合速率;显著抑制了茎中 Zn、Mn、Fe 金属的含量,极显著促进了根中 Zn、Fe、Cu 的含量,这将影响其正常的生长发育和光合作用[45];在重金属污染区域生长的植物形态、颜色、叶面大小均会发生显著性变化,如铜尾矿上的鹅观草叶片颜色较浅、形态矮小、茎秆柔弱,然而正常土壤上的鹅观草叶片颜色较深、茎秆粗壮[46];Cr⁶⁺在玉米种子内富集浓度越大,叶片中叶绿素含量和叶绿素 a/b 比值越小,玉米的叶片呈现出衰老的特征,表现为生长状态不健康等[47];重金属 Cd 和 Cd 单一/复合污染均会造成蚕豆和玉米植株的矮化现象,同时蚕豆的第一结荚节高度和玉米的茎粗都有所减小[39]。

对环境极其敏感的水生动物蝌蚪而言,当水生环境受到不同程度的污染时会表现为尾巴弯曲、尾巴不对称、身体水肿、游泳时侧泳等[48];随着二噁磷农药的升高卞氏皱蛙蝌蚪表现出逐渐强烈的回避反应,

即呈现出不正常的游泳姿态, 躯体剧烈的扭动[49]; 此外, 污染物也会影响蝌蚪的生长, 黑眶蟾蜍蝌蚪在较高浓度的除草剂百草隆溶液里, 反应敏感, 摄食活动相对频繁, 在蝌蚪的体重、体长上远远超过对照组[50]; 而水温增加会显著改变蝌蚪尾部皮肤亮度的表征其感应环境水温增高的指示色差的 L 值(26℃)[51]。以上研究表明蝌蚪在污染胁迫环境中, 通过自身的应激修复表现出一定适应性。

3.3. 解剖学策略

生活在高寒干旱地区的部分植物, 由于长期对高寒干旱环境的适应, 部分在叶片下会形成皮下层。研究表明, 在高寒地区的锦鸡儿其解剖结构上表现为海绵组织和栅栏组织分化程度较高, 这种对高寒环境的长期适应使其分化出了旱生结构; 在高寒地区的柠条它的叶片中海绵组织较少, 然而叶肉组织是以栅栏组织为主并且分布与叶片的两面[40]。

重金属污染物随着生物体各部分组织器官的差异其积累量也不同, 由于肾脏和肝脏中能够快速的合成金属硫蛋白进而使得大量重金属所积累, 因而肝脏和肾脏成了金属类污染物聚集的主要器官, 铅和铜等金属主要分布于内脏中, 砷和汞一般积累于骨骼中[52]。此外也有报道, 氮肥磷酸二铵使得花背蟾蜍(*Bufo raddei*)的肝脏组织严重损伤, 其显微及超微结构变化表现在: 肝细胞呈明显的脂肪变性, 出现由于淋巴细胞浸润形成的斑块状坏死区域, 核内异染色质浓缩, 粗面内质网扩张, 部分细胞内出现髓样结构, 且血窦内的淋巴细胞、巨噬细胞和枯否细胞逐渐增多[50]。

3.4. 生理生化策略

生物在污染环境中也会作出积极的生理响应。研究表明部分重金属会影响细胞膜的通透性, 使得细胞内的大量有机物和离子渗出, 有些有毒的物质会进入到细胞体内, 导致细胞膜失去了选择透过性, 进而影响其生理生化特征[53]。研究发现近年来的病虫害问题主要原因是农民为防治虫害而过于依于喷洒大量的农药, 经过长期的适应, 这些药物将有抗药性的虫子筛选出来, 这些虫子再经过繁衍, 进一步产生出更多带有抗药性基因的虫子, 从而增强了害虫对农药的抗性[54]。此外, 有些不仅表现在产生抗性基因, 有些表现在相关酶的表达特征上, 同一金属以及不同金属的不同剂量处理下, 酶的表达呈现出差异。研究表明不同的同工酶对相同的金属或不同的金属剂量不同时具有差异性表达, 这是一种对生理功能的补偿, 表现为“适应代价”[55]。

大多数重金属进入植物体一般是通过植物的根系细胞壁, 为了减少重金属对植物的毒害程度, 植物细胞壁上的纤维素、木质素、糖类等物质可与重金属结合使其失去毒性[56]。同时, 部分重金属会被细胞壁上的果酸提供的离子交换点所固定, 阻止其进入植物体, 从而使重金属失去毒害[57]。在植物体中重金属主要分布于质外体、或与细胞壁结合或形成磷酸盐以及碳酸盐沉淀[58]。一般认为, 抗氧化酶类在植物抵抗污染胁迫时起着关键作用, 逆境胁迫引起抗氧化酶活性增加[59]; 金属硫蛋白在重金属的解毒、离子交换以及维持离子动态平衡方面发挥重要的作用[60]。此外, 当生物受到污染后会在表型以及代谢物呈现出一定的性状, 对污染环境能够做出敏感的外在表型特征的生物可以作为环境监测生物。

4. 结语

生物应对污染环境付出了生态代价、生理代价和进化代价, 以及对生活史、形态、生理生化、遗传等方面做出了相应的调整, 也就是生存策略选择。

纵观研究发现, 污染物对生物的生存与繁殖而言具有巨大的挑战。生物对污染环境的长期适应, 使自己能够在污染的环境下继续生存繁衍下去, 将在不同层次不同程度地改变着生物原来的生理生化、遗传代谢等特征。这种适应污染环境的策略将使得生物对自身的发展付出相应的代价。由于当前环境的污

染是生物在地球上演化以来从未经历的阶段,也可以说这种污染的环境是一种全新的环境。生物面对全新的环境更加考验对污染环境的感知、灵敏与适应能力,以尽快地对自身的生活史做出相应的调整。感知能力越强、灵敏度越高、耐受性越强的生物才能适应这种“新环境”。在污染环境中的生物面对“新环境”的压力,从短期来看,这种“新环境”是有害的,不利于生物生存繁衍;从长期来看,耐受性的生物将会成为新的广泛种,面对各种复杂环境都能生存,所以新的环境是有利于其繁衍分布。耐受性差,感知能力弱的生物将会被淘汰,只有在特定的栖息地才能够生存,离开这个环境将会灭绝。因此,一个大胆的猜想是:如果地球上环境污染物继续增多、环境质量继续恶化,地球上存在的生物都将是进化出对环境污染物有敏感感知能力、耐受性强的物种,未来的命运必将是泛化种。从另一个角度也可以说生物对污染的适应也将是自身选择的结果;也是“环境选择,适者生存”的结果。

基金项目

国家自然科学基金项目(31660169)、云南省科技计划重点研发项目(2018BC001)、云南大学服务云南行动计划项目(2016MS18)资助。

参考文献

- [1] 易心钰. 蓖麻对铅锌污染土壤的适应性及其机理研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南林业科技大学, 2014.
- [2] 舒杰明, 高云玲, 姚克俭, 等. 香豆素类荧光传感器检测金属离子的研究进展[J]. 化工进展, 2014, 33(12): 3144-3156.
- [3] 康凯璇, 兰秀茹, 付娜, 等. 生物技术在石油污染修复领域的最新进展[J]. 石油化工安全环保技术, 2015, 31(5): 71-75.
- [4] 林先贵, 郝文英, 施亚琴. 三种除草剂对 VA 菌根真菌的侵染和植物生长的影响[J]. 环境科学学报, 1991, 11(4): 439-444.
- [5] 罗东华, 王敏, 徐有权. 土壤污染对植物生长的影响研究[J]. 绿色科技, 2017(12): 120-122.
- [6] 王焕校. 污染生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012.
- [7] 段昌群. 植物对环境污染的适应与植物的微进化[J]. 生态学杂志, 1995, 14(5): 43-50.
- [8] 郭涛, 段昌群, 王海娟. 植物对环境污染的适应代价[J]. 云南环境科学, 2001, 20(S1): 17-20.
- [9] 王晓雯. 氟化物对中华大蟾蜍幼体发育的影响[D]: [硕士学位论文]. 西安: 陕西师范大学, 2011.
- [10] 曹晶潇. 生物对环境污染的适应代价[J]. 大众科技, 2017, 19(8): 40-42.
- [11] 许英, 揭雨成, 孙志民, 冷鹏. 苎麻品种对镉污染土壤适应性的研究[J]. 中国麻业, 2005, 27(5): 249-253.
- [12] 孙游云. 铬对植物体生长生理的影响及其在植物体中的积累规律[J]. 环境污染与防治, 2001, 23(1): 45-46.
- [13] Cole, M., Lindeque, P., Halsband, C., *et al.* (2011) Microplastics as Contaminants in the Marine Environment: A Review. *Marine Pollution Bulletin*, **62**, 2588-2597. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.09.025>
- [14] Browne, M.A., Dissanayake, A., Galloway, T.S., *et al.* (2008) Ingested Microscopic Plastic Translocates to the Circulatory System of the Mussel, *Mytilus edulis* (L). *Environmental Science and Technology*, **42**, 5026-5031. <https://doi.org/10.1021/es800249a>
- [15] Farrell, P. and Nelson, K. (2013) Trophic Level Transfer of Microplastic: *Mytilus edulis* (L) to *Carcinus maenas* (L). *Environment Pollution*, **177**, 1-3. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.01.046>
- [16] Lonnstedt, O.M. and Eklöv, P. (2016) Environmentally Relevant Concentrations of Microplastic Particles Influence Larval Fish Ecology. *Science*, **352**, 1213-1216. <https://doi.org/10.1126/science.aad8828>
- [17] Grigorakis, S., Mason, S.A. and Drouillard, K.G. (2017) Determination of the Gut Retention of Plastic Microbeads and Microfibers in Goldfish (*Carassius auratus*). *Chemosphere*, **169**, 233-238. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.11.055>
- [18] 刘治君, 杨凌肖, 王琼, 李乃稳. 微塑料在陆地水环境中的迁移转化与环境效应[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(4): 59-65.
- [19] Painting, S.J., Devlin, M.J., Malcolm, S.J., *et al.* (2007) Assessing the Impact of Nutrient Enrichment in Estuaries:

- Susceptibility to Eutrophication. *Marine Pollution Bulletin*, **55**, 74-90. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2006.08.020>
- [20] Zhou, Y.P., Tan, L.J., Pang, Q.T., *et al.* (2015) Influence of Nutrients Pollution on the Growth and Organic Matter Output of *Ulva prolifera* in the Southern Yellow Sea, China. *Marine Pollution Bulletin*, **95**, 107-114. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.04.034>
- [21] 袁美玲, 王朝晖, 李友富. N、P 营养盐对海洋卡盾藻(*Chattonella marina*)生长的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(1): 430-435.
- [22] 赵明莲. 生态适应与生存策略分析[J]. 吉首大学学报(自然科学版), 2002, 23(3): 40-43.
- [23] 张汉波. 铅锌矿渣中重金属耐受细菌的进化生态特征研究[D]: [博士学位论文]. 昆明: 云南大学, 2003.
- [24] Hayes, T., Haston, K., Tsui, M., *et al.* (2002) Herbicides: Feminization of Male Frogs in the Wild. *Nature*, **419**, 895-896. <https://doi.org/10.1038/419895a>
- [25] Hamer, A.J., Makings, J.A., Lane, S.J., *et al.* (2004) Amphibian Decline and Fertilizers Used on Agricultural Land in South-Eastern Australia. *Agriculture Ecosystems & Environment*, **102**, 299-305. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2003.09.027>
- [26] Davidson, C. (2004) Declining Downwind: Amphibian Population Declines in California and Historical Pesticide Use. *Ecological Applications*, **14**, 1892-1902. <https://doi.org/10.1890/03-5224>
- [27] 石玉帛. 崇明地区无尾两栖类现状分析[D]: [博士学位论文]. 上海: 华东师范大学, 2018.
- [28] 张汉波, 段昌群. 微生物对药物的适应进化问题[J]. 国外医药(抗生素分册), 2002, 23(2): 53-56.
- [29] 皮锐, 柳清云, 高谦. 耐药结核分枝杆菌的适应性代价与补偿性进化[J]. 微生物与感染, 2017, 12(6): 362-368.
- [30] Gagneux, S., Long, C.D., Small, P.M., Van, T., Schoolnik, G.K. and Bohannan, B.J. (2006) The Competitive Cost of Antibiotic Resistance in *Mycobacterium tuberculosis*. *Science*, **312**, 1944-1946. <https://doi.org/10.1126/science.1124410>
- [31] 茹小尚. 刺参生殖代价与适应机制研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国科学院大学, 2018.
- [32] Pandey, N., Chandra, P., *et al.* (2002) Effect of Heavy Metals Co^{2+} , Ni^{2+} and Cr^{6+} on Growth and Metabolism of Cabbage. *Plant Science*, **163**, 753-758. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(02\)00210-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(02)00210-8)
- [33] Pédena, R., Rochera, B., Chan, P., *et al.* (2018) Highly Polluted Life History and Acute Heat Stress, a Hazardous Mix for Blue Mussels. *Marine Pollution Bulletin*, **135**, 594-606. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.07.066>
- [34] 刘丽丽, 朱华, 闫艳春, 王晓雯, 张蓉, 朱建亚. 鱼类低温耐受机制与功能基因研究进展[J/OL]. 生物技术通报, 2018(8): 1-7.
- [35] 柯庆明. 水稻对镉累积的遗传生态学特性研究[D]: [博士学位论文]. 福州: 福建农林大学, 2006.
- [36] Vodyanitskii, Y.N. and Shoba, S.A. (2015) Biogeochemistry of Carbon, Iron, and Heavy Metals in Wetlands (Analytical Review). *Moscow University Soil Science Bulletin*, **70**, 89-97. <https://doi.org/10.3103/S0147687415030072>
- [37] Bonanno, G., Borg, J.A. and Di Martino, V. (2017) Levels of Heavy Metals in Wetland and Marine Vascular Plants and Their Biomonitoring Potential: A Comparative Assessment. *Science of the Total Environment*, **576**, 796 -806. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.171>
- [38] Wilson, I.B. (1988) The Cost of Heavy-Metal Tolerance: An Example. *Evolution*, **42**, 408-413. <https://doi.org/10.1111/j.1558-5646.1988.tb04146.x>
- [39] 王琪. Pb、Cd 持续污染条件下蚕豆(*Vicia faba L*)和玉米(*Zea mays L*)种群生态分化研究[D]: [博士学位论文]. 昆明: 云南大学, 2013.
- [40] 马红梅, 陈明昌, 张强. 柠条生物形态对逆境的适应性机理[J]. 山西农业科学, 2005, 33(3): 47-49.
- [41] Ramamonjisoa, N., Rakotonjoely, H. and Natuhara, Y. (2018) Differential Vulnerability of Two Sympatric Tadpoles to an Invasive Crayfish Predator. *Hydrobiologia*, **818**, 119-127. <https://doi.org/10.1007/s10750-018-3599-7>
- [42] 刘楚吾, 陈信初. 环境因素对牛蛙胚胎发育的影响[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 1987, 10(2): 60-64.
- [43] Ortiz-Santaliestra, M.E. and Sparling, D.W. (2007) Alteration of Larval Development and Metamorphosis by Nitrate and Perchlorate in Southern Leopard Frogs (*Rana sphenoccephala*). *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, **53**, 639-646. <https://doi.org/10.1007/s00244-006-0277-y>
- [44] 李德顺, 刘芳, 马永光. 玉米根系与抗旱性关系研究[J]. 杂粮物, 2010, 30(3): 195-197.
- [45] 张媛华. Cd 胁迫对绿豆幼苗生长、光合作用及微量元素代谢的影响[J]. 东北农业科学, 2016, 41(1): 35-37.
- [46] 刘登义, 杨世勇, 谢建春, 赵娟. 铜对鹅观草两个种群生理、发育指标的影响研究[J]. 应用生态学报, 2001, 12(3): 455-457.

- [47] 马溪平, 李鲜珠, 沈玉冰, 李万龙, 张宏亮, 王迪, 徐成斌. Cr^{6+} 对3种玉米品种的生理特性影响[J]. 生态环境学报, 2014, 23(9): 1482-1486.
- [48] 周景明, 秦占芬, 徐晓白. 两栖类动物在环境毒理学研究中的应用[J]. 环境与健康杂志, 2006, 23(4): 369-371.
- [49] 李贞, 李丕鹏, 徐齐艳, 陆宇燕. 农药和化肥对无尾两栖类蝌蚪的毒性效应研究进展[J]. 生态毒理学报, 2010, 5(2): 287-294.
- [50] 刘木养, 陈伟庭, 李东风. 除草剂草隆对蝌蚪生长发育的影响[J]. 四川动物, 2006, 25(2): 382-385.
- [51] 朱卫东, 任凤艺, 申屠琰, 等. 水温对棘胸蛙(*Paa spinosa*)蝌蚪行为及尾部皮肤和肝脏相关功能酶活力的影响[J]. 海洋与湖沼, 2016, 47(1): 245-252.
- [52] 秦春艳. 广东沿海海洋生物体内有毒物质的生物积累与污染评价[D]: [硕士学位论文]. 上海: 华南师范大学, 2007.
- [53] 周希琴, 莫灿坤. 植物重金属胁迫及其抗氧化系统[J]. 新疆教育学院学报, 2003, 19(2): 103-108.
- [54] 朱振江. 农药减量控害增效技术在农业有害生物防治上的应用[J]. 农业与技术, 2018, 38(19): 27-28.
- [55] 段昌群, 王焕校. Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Hg^{2+} 对蚕豆(*Vicia faba* L.)乳酸脱氢酶的影响[J]. 生态学报, 1998, 18(4): 79-83.
- [56] 徐照丽, 吴启堂, 依艳丽. 不同品种菜心对镉抗性的研究[J]. 生态学报, 2002, 22(4): 571-576.
- [57] 徐红宁, 杨居荣, 许嘉琳. 作物对Cd的吸收与根系阳离子交换容量[J]. 农业环境保护, 1995(4): 150-153.
- [58] 罗春玲, 沈振国. 植物对重金属的吸收和分布[J]. 植物学通报, 2003, 20(1): 59-66.
- [59] 秦小琼, 贾士荣. 植物抗氧化逆境的基因工程(综述)[J]. 农业生物技术学报, 1997(1): 16-26.
- [60] 全先庆, 张洪涛, 单雷, 毕玉平. 植物金属硫蛋白及其重金属解毒机制研究进展[J]. 遗传, 2006, 28(3): 375-382.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网首页: <http://cnki.net/>, 点击页面中“外文资源总库 CNKI SCHOLAR”, 跳转至: <http://scholar.cnki.net/new>, 搜索框内直接输入文章标题, 即可查询;
或点击“高级检索”, 下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2324-7967, 即可查询。
2. 通过知网首页 <http://cnki.net/>顶部“旧版入口”进入知网旧版: <http://www.cnki.net/old/>, 左侧选择“国际文献总库”进入, 搜索框直接输入文章标题, 即可查询。

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ije@hanspub.org