

施加磷酸盐对浮萍抗氧化特性及铀富集能力的影响

范益, 朱靖, 张艳, 谭仁豪, 陈珂 (西南科技大学生命科学与工程学院, 四川绵阳 621000)

摘要 [目的]探讨铀污染水体的生态效应及浮萍应对铀污染的植物修复潜力。[方法]以浮萍为研究对象,通过施加磷酸盐研究其在不同浓度铀胁迫条件下抗氧化酶系统的响应机制以及铀富集能力的变化。[结果]浮萍对水体中的铀有较高的富集能力,最大能达到44.37 mg/g,而且主要是以吸附作用为主,植株受到的膜脂过氧化胁迫程度较小。但在施加磷酸盐后,浮萍对水体中铀的富集能力和富集系数显著下降,富集机制可能由吸附转变为吸收为主,铀酰离子的生物有效性有所提高,从而导致植株受到更为明显的膜脂过氧化胁迫。[结论]磷酸盐的施加可以显著降低浮萍对水体中铀的去除作用,但在一定程度上加剧了浮萍所受到的铀胁迫。

关键词 浮萍; 铀胁迫; 铀富集; 抗氧化特性; 磷酸盐

中图分类号 S181 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2018)12-0084-03

Effect of Phosphate on Antioxidant Traits and Uranium Enrichment of Duckweed

FAN Yi, ZHU Jing, ZHANG Yan et al (School of Life Science and Bioengineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621000)

Abstract [Objective] The research aimed to explore the ecological effects of uranium-polluted water bodies and the phytoremediation potential of duckweed in response to uranium pollution. [Method] Taking duckweed as the research object, the response mechanism of antioxidant enzyme system and the change of uranium enrichment ability under different uranium stress conditions were studied by applying phosphate. [Result] Duckweed had a relative high uranium enrichment ability, the maximum could reach 44.37 mg/g, and the main effect was adsorption, and the membrane lipid peroxidation stress on plants had less influence. However, after application of phosphate, the uranium enrichment and accumulation coefficient of duckweed in water decreased significantly. The enrichment mechanism may shift from adsorption to absorption, and the bioavailability of uranyl ion had increased, leading to more pronounced membrane lipid peroxidative stress. [Conclusion] Phosphate can significantly reduce the removal of uranium in water by duckweed, but to a certain extent exacerbate the uranium stress on duckweed.

Key words Duckweed; Uranium stress; Uranium enrichment; Antioxidant traits; Phosphate

随着核工业的发展,带来了巨大的经济效益,为人类的发展做出巨大贡献;但与此同时,大量的铀矿被开发,产生大量的尾矿以及矿渣,在大雨冲刷后,有大量含铀元素的水体聚集在低洼地带,要么汇入附近河流,要么形成污染水体蓄积或进入地下水,甚至污染附近农田灌溉水体^[1-3]。铀作为一种重金属元素在水体中无法降解,具有相当高的稳定性,会对水体、水生植物、水生动物系统产生严重危害,并可能通过食物链直接或间接地影响到人类的自身健康。而且尾矿铀元素具有放射性,衰变时产生大量射线,也会对人体造成内源辐照伤害。因此,亟待开展对铀污染水体的生态效应研究^[4]。

浮萍(*Lemna*)植物是一类以漂浮为主的水生被子植物,主要是无性繁殖,能够起到净化水体的作用^[5-8]。由于利用浮萍科植物治理受污染水体有很多其他治理方法无法比拟的优点,所以无论是在废水的处理上还是在水体的生态恢复与监测上,浮萍都具有重要的应用价值^[9]。因此,该研究以浮萍为研究对象,通过施加磷酸盐研究其在不同浓度铀胁迫条件下抗氧化酶系统的响应机制,以及铀富集能力的变化,探讨铀污染水体的生态效应和浮萍应对铀污染的植物修复潜力。

1 材料与方

1.1 试验材料 浮萍采自西南科技大学校园池塘,先水培容器中预培养,用1/2 Hogland 营养液预水培15 d,然后挑选

长势、大小一致的植物作为供试材料。

1.2 试验方法 试验在西南科技大学温室中进行,采用浮水植物浮萍,利用温室水盆进行驯化及试验,驯化15 d,水体采用Hogland 营养液。Hogland 营养液配方如下:大量元素, KNO_3 510 mg/L、 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 820 mg/L、 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 490 mg/L、 KH_2PO_4 136 mg/L、 FeSO_4 0.6 mg/L;微量元素, H_3BO_3 2.86 mg/L、 $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 1.81 mg/L、 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.22 mg/L、 $(\text{NH}_4)_2\text{Mo}_7\text{O}_{24}$ 0.45 mg/L、EDTA 0.744 mg/L、 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 0.08 mg/L。温度控制在20~25℃。

试验采用单因素完全随机设计,供试核素为醋酸双氧铀 [$\text{UO}_2(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$],铀(UO_2^{2+})处理浓度为国家标准0.05 mg/L的整倍数:低浓度(0.5 mg/L, U0.5)、中浓度(5.0 mg/L, U5)、高浓度(50.0 mg/L, U50),试验采用的磷酸盐为 KH_2PO_4 , PO_4^{3-} 施加浓度分别为0(-P)、5 mg/L(低浓度, +P5)、50 mg/L(高浓度, +P50)。具体设计如表1。水培容器每盆20 L纯水,pH调节至6,浮萍处理组每盆150 g,每个处理3次重复,共计27盆。容器随机排列,保持足够的空间,消除边际效应的干扰。

1.3 指标测定 试验处理第9天收获植物样品测定超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)活性及丙二醛(MAD)和脯氨酸(Pro)的含量,结束后收集植物样品干燥后测定生物量及植物体内的铀含量。

SOD酶活性采用氮蓝四唑(NBT)法;CAT活性采用紫外比色法测定;MAD采用硫代巴比妥法;脯氨酸含量测定采用酸性茚三酮法;铀含量是由在植物样品微波消解法后,采用美国安捷伦公司电感耦合等离子体发射光谱-质谱仪(ICP-MS)进行测定。

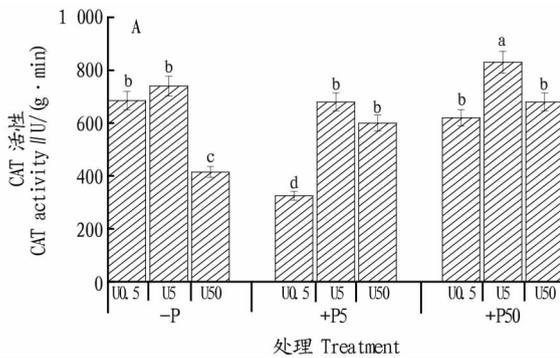
基金项目 西南科技大学创新基金精准扶贫项目(17JZ-102);西南科技大学大学生创新创业训练计划项目(16xcxy24)。

作者简介 范益(1992—),男,四川江油人,硕士研究生,研究方向:污染环境植物生态修复。

收稿日期 2018-02-24

表 1 试验设计
Table 1 Experimental design

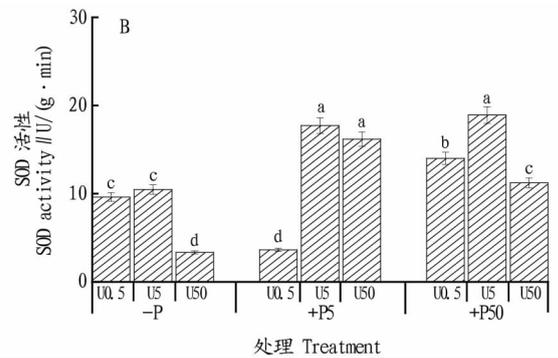
处理 Treatment	磷酸盐浓度 (PO_4^{2-}) Phosphate concentration mg/L	铀离子浓度 UO_2^{2+} concentration mg/L
-P	0	0.5
	0	5.0
	0	50.0
+P5	5	0.5
	5	5.0
	5	50.0
+P50	50	0.5
	50	5.0
	50	50.0



1.4 数据分析 采用 SPSS 17.0 进行数据差异性分析,利用 Origin 8.5 进行作图。富集系数 = 植物 U 的含量 (g/kg)/培养液中 U 的含量 (g/kg)。

2 结果与分析

2.1 铀胁迫下施加磷酸盐对浮萍抗氧化酶系统的影响 由图 1 可见,水体高浓度铀 (50.0 mg/L) 显著抑制了浮萍的 SOD 和 CAT 活性,而在低、中浓度 (0.5、5.0 mg/L) 的铀胁迫中浮萍均保持较高的抗氧化酶活性。施加了磷酸盐后,总体上来看,在中低浓度铀胁迫下浮萍的 CAT 活性没有受到显著的变化,但在高浓度铀胁迫下浮萍的 CAT 活性显著提高。磷酸盐诱导了浮萍在中高浓度铀胁迫下 SOD 活性的显著提高,而且施加低浓度的磷酸盐的促进作用更加明显,因为高浓度的磷酸盐导致高浓度铀胁迫下 SOD 活性的下降。



注:不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)

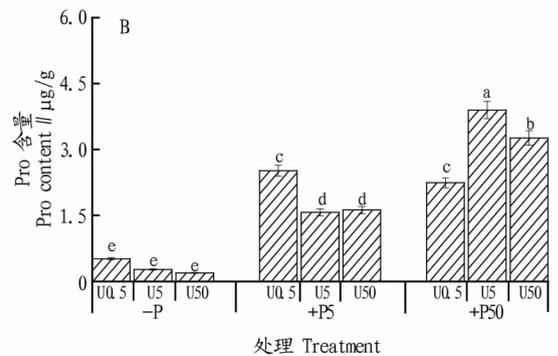
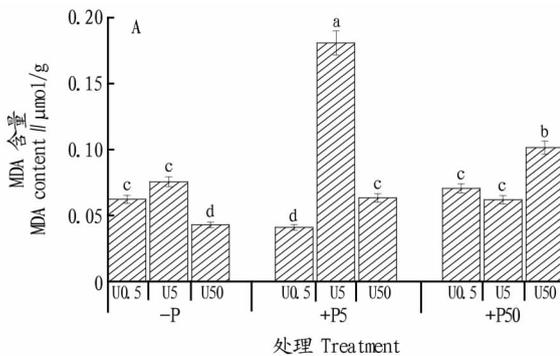
Note: Different lowercase letters indicate significant difference ($P < 0.05$)

图 1 磷酸盐作用下不同浓度铀离子处理对浮萍 CAT(A) 和 SOD(B) 活性的影响

Fig. 1 Effects of phosphate ($\pm P$) on CAT activities of *Lemna minor* L. under different treatments with UO_2^{2+}

2.2 铀胁迫下施加磷酸盐对浮萍 MAD 和 Pro 含量的影响 由图 3 可见,在未施加磷酸盐的情况下,铀的胁迫并未导致浮萍 MAD 含量的显著变化,只有在高浓度铀胁迫下 MAD 有所下降。而施加了磷酸盐后,在低浓度铀胁迫下,浮萍的 MAD 含量随磷酸盐的增加呈先降低后升高的趋势;在中浓度铀胁迫时, MAD 含量随磷酸盐的增加呈先升高后降

低的趋势,且在低浓度磷酸盐的情况下有最大值;在高浓度的铀胁迫下, MAD 含量随磷酸盐增加而增加。未施加磷酸盐时,浮萍 Pro 含量随铀胁迫浓度的增加而下降,但是差异不显著;施加磷酸盐后,浮萍 Pro 含量都在显著增高,并且磷酸盐的浓度越高,在中高浓度组的浮萍 Pro 含量增加越多,且达到显著水平。



注:不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)

Note: Different lowercase letters indicate significant difference ($P < 0.05$)

图 2 磷酸盐作用下不同浓度铀离子处理对浮萍 MDA(A) 和 Pro(B) 含量的影响

Fig. 2 Effects of phosphate ($\pm P$) on Pro contents of *Lemna minor* L. under different treatments with UO_2^{2+}

2.3 铀胁迫下施加磷酸盐对浮萍生物量和富集量的影响 在整个试验过程,浮萍在处理前后的生物量变化不显

著。由表 2 可见,浮萍对铀的富集量是随着铀胁迫浓度的增加而显著提高的,但富集系数则是在中浓度铀胁迫条件下达

到最大。而磷酸盐的施加会导致浮萍对铀的富集量和富集系数显著下降,且磷酸盐浓度越高,铀富集量下降得越多,但是低浓度磷酸盐能够显著提高低浓度铀条件下浮萍对铀的富集系数。总体上看,磷酸盐会抑制浮萍对铀的富集和吸收。

表2 施加磷酸盐后不同浓度铀离子处理对浮萍富集量的影响

Table 2 Effects of phosphate on accumulation amount of duckweed under different treatments with UO_2^{2+}

磷酸盐浓度 Phosphate concentration mg/L	铀处理浓度 UO_2^{2+} concentration mg/L	铀富集浓度 Uranium enrichment concentration mg/g	富集系数 Enrichment coefficient
0	0.5	0.35 ± 0.02 f	0.70
	5.0	5.61 ± 0.24 c	1.12
	50.0	42.45 ± 1.93 a	0.83
5	0.5	0.66 ± 0.33 e	1.32
	5.0	0.31 ± 0.18 g	0.61
	50.0	20.13 ± 1.09 b	0.40
50	0.5	0.18 ± 0.01 h	0.36
	5.0	0.16 ± 0.01 i	0.03
	50.0	1.30 ± 0.08 d	0.03

注:不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)

Note: Different lowercase letters indicate significant difference ($P < 0.05$)

3 讨论

铀作为非生物功能性元素,通常情况下,进入植物体内主要是通过被动运输,首先铀吸附在植物表面,可能通过能量流动和信息传递等功能进入细胞内部,并富集在植物体内,有研究表明铀进入细胞内是由于铀的毒性改变了细胞渗透性从而进入体内^[10-11]。从该研究的试验结果来看,未施加磷酸盐时,浮萍 MAD、Pro、CAT 和 SOD 这 4 个理化指标对铀胁迫浓度的响应并不明显,仅在高浓度铀胁迫条件下 CAT 和 SOD 有所下降,而浮萍对铀的富集量却是随着铀浓度的增加而显著升高的。这表明浮萍对铀的富集可能是由于铀离子主要被吸附在浮萍的根和叶片背面上,并没有被吸收到植物体内造成实质性的伤害;只有在高铀胁迫下,植物表面富集的铀含量过高而可能导致离子通道受阻或造成部分物理伤害,从而直接导致浮萍抗氧化系统受到了一定损伤且直接有所下降。该研究指出浮萍对铀的富集量最大也能达到 44.37 mg/g,表明对铀富集能力是比较强的。这与聂小琴等^[12]的研究结果一致,说明浮萍科植物对铀确实有较高的富集能力。

一般认为,由于磷元素与铀元素具有较强的络合作用,因此磷酸盐的加入对铀在水环境中的吸附(分配)产生较大的影响,同时水体中铀的赋存形态关系着生物对铀的可利用性^[13]。磷酸盐主要从 2 个方面对植物产生影响:一是为植物生长提供营养物质,磷作为植物生长的必需元素,在植物体内物质的组成和代谢过程方面都有重要的作用,对植物生长具有重要作用;二是磷酸盐的加入与环境中的重金属产生络合等作用,对重金属生物利用有效性产生影响^[14-16]。谷兆萍^[17]研究也发现低浓度的磷处理下浮萍体内 As 含量明显增加,高浓度的磷处理下浮萍体内 As 含量明显降低,这与植物对重金属的富集既通过物理化学吸附又经过磷酸盐的吸收通道有关系。该研究中磷酸盐的施加对浮萍最大的影响

是对铀富集量的显著抑制,而且施加的磷酸盐浓度越大,浮萍对铀的富集量越小。结合聂小琴等^[12]、谷兆萍^[17]的研究推测的铀元素主要被吸附在浮萍植物表面,属于物理吸附,那么磷酸盐可能起到的作用是通过络合的作用解析了植物表面吸附的铀酰离子,从而显著降低了植株对铀的富集量。此外,从 MAD、Pro、CAT 和 SOD 的变化来看,磷酸盐的施加虽然降低了浮萍对铀的富集,但是可能增强了铀酰离子对植株的膜脂过氧化损伤,这也在一定程度上解释了为什么磷酸盐促进浮萍在低浓度铀胁迫下的富集系数反而升高的原因。有研究发现,由于细胞膜具有运输磷元素的特殊通道,磷酸型铀酰离子更容易被细胞吸收,因此,对于生物而言,磷酸型铀酰离子比其他形式的铀酰离子具有更大的毒性,具有更强的生物可利用性^[18]。由此也可以初步推断,施加磷酸盐后,浮萍对铀的富集主要是通过吸收作用而不是吸附作用。

4 结论

该试验主要研究了浮萍在不同浓度铀胁迫条件下,高低 2 个浓度磷酸盐施加前后,其 MAD、Pro 以及 CAT 和 SOD 2 个抗氧化酶系统的生理生化指标的变化。结果表明,浮萍对水体中的铀有较高的富集能力,最大能达到 44.37 mg/g,而且主要是以吸附作用为主,植株受到的膜脂过氧化胁迫程度小。但施加磷酸盐后,浮萍对水体中铀的富集量和富集系数显著下降,富集机制可能由吸附转变为吸收为主,提高了铀酰离子的生物有效性,从而导致植株受到更明显的膜脂过氧化胁迫。

参考文献

- [1] 朱业安. 铀矿区土壤重金属污染与铀富集植物累积特征研究[D]. 南昌: 东华理工大学, 2013.
- [2] 张学礼, 徐乐昌, 张辉. 某铀尾矿库周围农田土壤重金属污染与评价[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(6): 221-226.
- [3] 朱旭彬, 蔡滨莲, 林伟杰, 等. 我国市郊农田重金属污染研究进展[J]. 环境科学与技术, 2016(S1): 137-142.
- [4] 高米力, 杨俊诚, 顾八明. 饮用水中铀、钍和镭的分析[J]. 核农学报, 1985(3): 57-61.
- [5] 印万芬. 我国主要浮萍科植物的综合开发利用[J]. 资源节约和综合利用, 1998(2): 46-48.
- [6] 孙凯文, 时佩佩, 盛海君, 等. 富营养化水体中磷浓度对不同种类浮萍生长的影响[J]. 江苏农业科学, 2016, 45(5): 529-531.
- [7] BONOMO L, PASTORELLI G, ZAMBON N. Advantages and limitations of duckweed-based wastewater treatment systems[J]. Water science & technology, 1997, 35(5): 239-246.
- [8] 韩玉洁, 杨琳, 赵玲, 等. 浮萍植物在水体净化中的研究及展望[J]. 生物学通报, 2016, 51(6): 4-7.
- [9] 胡南, 丁德馨, 李广悦, 等. 五种水生植物对水中铀的去除作用[J]. 环境科学学报, 2012, 32(7): 1637-1645.
- [10] 王建龙, 刘海洋. 放射性废水的膜处理技术研究进展[J]. 环境科学学报, 2013, 33(10): 2639-2656.
- [11] SUZUKI Y, BANFIELD J F. Geomicrobiology of uranium[J]. Reviews in mineralogy and geochemistry, 1999, 38(1): 393-432.
- [12] 聂小琴, 董发勤, 刘宁, 等. 少根紫萍对水中 U(VI) 的吸附和矿化行为研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(9): 2613-2619.
- [13] BERNHARD G, GEIPEL G, BRENDLER V, et al. Uranium speciation in waters of different uranium mining areas[J]. Journal of alloys and compounds, 1998, 271-273: 201-205.
- [14] 陈苗苗, 徐明岗, 周世伟, 等. 不同磷酸盐对污染土壤中镉生物有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(2): 255-262.
- [15] 安志装, 王校常, 施卫明, 等. 重金属与营养元素交互作用的植物生理效应[J]. 土壤与环境, 2002, 11(4): 392-396.

(下转第 97 页)

生物学鉴定以及 Biolog 系统鉴定。16S rDNA 基因作为分子指标,运用于分子生物学鉴定中,可以对各类细菌和真菌等进行快速、微量分类与鉴定。但是,单一应用 16S rDNA 的方法对菌株进行鉴定可能无法得出准确结论,因此该研究结合 Biolog 系统鉴定法对候选益生菌进行了生理生化水平鉴定,结果发现 2 种方法鉴定结果一致,2 株候选益生菌经鉴定分别为霍氏肠杆菌和乳酸菌,说明鉴定结果准确、可靠。该研究为今后凡纳滨对虾益生菌制剂的开发和应用建立了一种有效的筛选及鉴定方法。

参考文献

- [1] KESARCODI-WATSON A, KASPAR H, LATEGAN M J, et al. Probiotics in aquaculture: The need, principles and mechanisms of action and screening processes[J]. *Aquaculture*, 2008, 274(1): 1-14.
- [2] ESIÖBU N, ARMENTA L, IKE J. Antibiotic resistance in soil and water environments[J]. *International journal of environmental health research*, 2002, 12(2): 133-144.
- [3] WANG Y B, XU Z R, ZHOU X X, et al. Bacteria attached to suspended particles in Northern White Shrimp (*Penaeus vannamei* L.) ponds[J]. *Aquaculture*, 2005, 249(12/3/4): 285-290.
- [4] FULLER R. Probiotics in man and animals[J]. *Journal of applied bacteriology*, 1989, 66(5): 365-378.
- [5] BALCÁZAR J L, DE BLAS I, RUIZ-ZARZUELA I, et al. The role of probiotics in aquaculture[J]. *Veterinary microbiology*, 2006, 114(3/4): 173-186.
- [6] HARIKRISHNAN R, BALASUNDARAM C, HEO M S. Effect of probiotics enriched diet on *Paralichthys olivaceus* infected with lymphocystis disease virus (LCDV)[J]. *Fish & shellfish immunology*, 2010, 29(5): 868-874.
- [7] SOUNDARAPANDIAN P, RAMANAN V, DINAKARAN G K. Effect of probiotics on the growth and survival of *Penaeus monodon* (Fabricius)[J]. *Current research journal of social sciences*, 2010, 2(2): 51-57.
- [8] PETERSON B C, BOOTH N J, MANNING B B. Replacement of fish meal in juvenile channel catfish, *Ictalurus punctatus*, diets using a yeast-derived protein source: The effects on weight gain, food conversion ratio, body composition and survival of catfish challenged with *Edwardsiella ictaluri*[J]. *Aquaculture nutrition*, 2012, 18(2): 132-137.
- [9] WANG Y B, GU Q. Effect of probiotics on white shrimp (*Penaeus vannamei*) growth performance and immune response[J]. *Marine biology research*, 2010, 6(3): 327-332.
- [10] MACEY B M, COYNE V E. Improved growth rate and disease resistance in farmed *Haliotis midae* through probiotic treatment[J]. *Aquaculture*, 2005, 245(1/2/3/4): 249-261.
- [11] BAIRAGI A, GHOSH K S, SEN S K, et al. Evaluation of the nutritive value of *Leucaena leucocephala* leaf meal, inoculated with fish intestinal bacteria *Bacillus subtilis* and *Bacillus circulans* in formulated diets for rohu, *Labeo rohita* (Hamilton) fingerlings[J]. *Aquaculture research*, 2004, 35(5): 436-446.
- [12] FURNESS A L, LEE J V, DONOVAN T J. The *Vibrios*[M]//HOWELLS C H L, PATH F R C, MEERS P D, et al. Public health laboratory service: Monograph series No. 11. London: Her Majesty's Stationery Office, 1978: 4-5.
- [13] National Committee for Clinical Laboratory Standards. Analysis and presentation of cumulative antimicrobial susceptibility test data; proposed guideline, M39-P[M]. Wayne: National Committee for Clinical Laboratory Standards, 2002.
- [14] CASTRO G R, FERRERO M A, MÉNDEZ B S, et al. Screening and selection of bacteria with high amylolytic activity[J]. *Acta biotechnologica*, 1993, 13(2): 197-201.
- [15] OLSSON J C, WESTERDAHL A, CONWAY P L, et al. Intestinal colonization potential of turbot (*Scophthalmus maximus*)-and dab (*Limanda limanda*)-associated bacteria with inhibitory effects against *Vibrio anguillarum*[J]. *Applied and environmental microbiology*, 1992, 58(2): 551-556.
- [16] KONGNUM K, HONGPATTARAKERE T. Effect of *Lactobacillus plantarum* isolated from digestive tract of wild shrimp on growth and survival of white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) challenged with *Vibrio harveyi*[J]. *Fish & shellfish immunology*, 2012, 32(1): 170-177.
- [17] 黎春萌, 左志略, 刘逸尘, 等. 凡纳滨对虾肠道内产消化酶益生菌的分离与筛选[J]. *水产学报*, 2016, 40(4): 537-546.
- [18] ORSOD M, JOSEPH M, HUYOP F. Characterization of exopolysaccharides produced by *Bacillus cereus* and *Brachybacterium* sp. isolated from Asian Sea Bass (*Lates calcarifer*)[J]. *Malaysian journal of microbiology*, 2012, 8(3): 170-174.
- [19] SANTOS Y, TORANZO A E, BARJA J L, et al. Virulence properties and enterotoxin production of *Aeromonas* strains isolated from fish[J]. *Infection and immunity*, 1988, 56(12): 3285-3293.
- [20] BAUER A W, KIRBY W M, SHERRIS J C, et al. Antibiotic susceptibility testing by a standardized single disk method[J]. *American journal of clinical pathology*, 1966, 45(4): 493-496.
- [21] 雷质文, 黄捷, 杨冰, 等. 感染白斑综合征病毒 (WSSV) 对虾相关免疫因子的研究[J]. *中国水产科学*, 2001, 8(4): 46-51.
- [22] ZOKAEIFAR H, BABAEI N, SAAD C R, et al. Administration of *Bacillus subtilis* strains in the rearing water enhances the water quality, growth performance, immune response and resistance against *Vibrio harveyi* infection in juvenile white shrimp, *Litopenaeus vannamei*[J]. *Fish & shellfish immunology*, 2014, 36(1): 68-74.
- [23] 张玲, 谭北平, 麦康森, 等. 中国对虾体内 1 株益生菌的筛选与初步鉴定[J]. *中国海洋大学学报*, 2008, 38(2): 225-231.
- [24] O'BRIEN J, CRITTENDEN R, OUWEHAND A C, et al. Safety evaluation of probiotics[J]. *Trends in food science & technology*, 1999, 10(12): 418-424.
- [25] 高盼盼, 罗义, 周启星, 等. 水产养殖环境中抗生素抗性基因 (ARGs) 的研究及进展[J]. *生态毒理学报*, 2009, 4(6): 770-779.
- [26] 王丹, 隋倩, 赵文涛, 等. 中国地表水环境中药物和个人护理品的研究进展[J]. *科学通报*, 2014, 59(9): 743-751.
- [27] KÜMMERER K. Significance of antibiotics in the environment[J]. *Journal of antimicrobial chemotherapy*, 2003, 52(1): 5-7.
- [28] TERNES T A, JOSS A, SIEGRIST H. Peer reviewed: Scrutinizing pharmaceuticals and personal care products in wastewater treatment[J]. *Environmental science & technology*, 2004, 38(20): 392-399.
- [29] 王瑞旋, 冯娟, 耿玉静, 等. 水产细菌耐药性的最新研究概况[J]. *海洋环境科学*, 2010, 29(5): 770-776.
- [18] MULLER D, HOUPERT P, CAMBAR J, et al. Role of the sodium-dependent phosphate co-transporters and of the phosphate complexes of uranyl in the cytotoxicity of uranium in LLC-PK1 cells[J]. *Toxicology and applied pharmacology*, 2006, 214(2): 166-177.

(上接第 86 页)

- [16] 陈苗苗, 张桂银, 徐明岗, 等. 不同磷酸盐下红壤对镉离子的吸附-解吸特征[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(8): 1578-1584.
- [17] 谷兆萍. 复合污染下浮萍 (*Lemna minor* L.) 对重金属吸收、富集特征和机理[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2011.

科技论文写作规范——作者

论文署名一般不超过 5 个。中国人姓名的英文名采用汉语拼音拼写, 姓氏字母与名字的首字母分别大写; 外国人姓名、名字缩写可不加缩写点。