

DOI:10.19431/j.cnki.1673-0062.20180619.001

## 多种水生植物对铀的富集特性对比研究

孙 静<sup>1</sup>,何家东<sup>2</sup>,李 乾<sup>1\*</sup>

(1.南华大学 铀矿冶生物技术国防重点学科实验室,湖南 衡阳 421001;

2.贵州健康职业学院 药理学系,贵州 铜仁 554300)

**摘 要:**本研究采集水生或者喜水植物 12 种,进行铀富集特性对比研究.对含铀废水的净化结果表明:满江红鱼腥藻对铀的富集能力最强,在修复 25 d 时,体系中铀的去除率达到 97.7%,达到国家允许排放的标准;香蒲草在修复进行 20 d 以后,铀的去除率也超过 92%.对铀富集特性的 principal co-ordinates analysis (PCoA) 分析表明,满江红鱼腥藻和香蒲草、碎米沙草和白鹤芋、合果芋和水莎草、大藻和水葫芦对铀的富集特性是相似的.植物对铀毒害的耐受性监测表明,满江红鱼腥藻、合果芋和香蒲草等对铀的耐受性比较强.

**关键词:**水生植物;铀;富集特性;对比分析

**中图分类号:**X524 **文献标志码:**B **文章编号:**1673-0062(2018)03-0027-05

## Comparative Analysis about Uranium Accumulation Characteristics of Various Aquatic Plants

SUN Jing<sup>1</sup>, HE Jiadong<sup>2</sup>, LI Qian<sup>1\*</sup>

(1.Key Discipline Laboratory for National Defense of Biotechnology in Uranium Mining and Hydrometallurgy, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China;

2.Department of Pharmacy, Guizhou College of Health Professions, Tongren, Guizhou 554300, China)

**Abstract:** In this study, twelve kinds of aquatic plants were collected and their uranium-accumulative performance were compared. The results of remediation for uranium waste water showed, the Azolla imbricate from the uranium tailings pond exerted the strongest accumulative capacity and the uranium removal had reached 97.7%, and the cleaned water had reached below the national permission standard of uranium emission in 25 days. Also, the Typha orientalis showed a good accumulative capacity and tolerance, the uranium removal

收稿日期:2018-03-28

基金项目:湖南省教育厅科学研究资助一般项目(15C1179)

作者简介:孙 静(1987-),女,实验师,硕士,主要从事放射性环境污染的生物修复方面的研究.E-mail:370001052236@usc.edu.cn.\* 通信作者:李 乾(1984-),男,副教授,博士,主要从事浸矿微生物学与溶浸采铀方面的研究.E-mail:liqianusc@126.com

achieved 92.0% in 25 days. The PCoA analysis of the uranium adsorption characteristics showed that, *Cyperus iria* and *Spathiphyllum kochii*, *Azolla imbricate* and *Typha orientalis*, *Syngonium podophyllum* and *Cyperus serotinus*, *Pistia stratiotes* and *Water hyacinth*, showed the similar performance on the uranium enrichment respectively. The plant tolerance results showed, the *Azolla imbricate*, *Syngonium podophyllum* and *Typha orientalis* had a better uranium tolerance.

**key words:** aquatic plants; uranium; accumulative characteristics; comparative analysis

## 0 引言

铀是天然的放射性元素,具有较高的化学毒性和辐射危害,公众摄入铀后会引引起内污染,对机体造成危害<sup>[1]</sup>.在铀矿开采和冶炼加工过程中会产生大量的铀废渣和铀尾矿,残留的铀会通过地表径流和地下渗流进入周边水体,并存在长久的潜在危害<sup>[2-3]</sup>.传统的铀污染水体处理方法,存在工艺流程冗长、易造成二次污染等特点,难以胜任低浓度铀污染水体的大面积处理<sup>[1,4]</sup>.生物修复方法是一种高效节能、安全环保的修复放射性污染环境的新方法,在大面积、低浓度的铀污染水域处理研究领域,受到了国内外学者的广泛关注<sup>[5-10]</sup>.

刘韬<sup>[7]</sup>对香蒲的铀胁迫伤害以及对铀的富集能力进行研究,结果表明铀浓度越高,对香蒲中叶绿素和抗氧化系统的影响越明显,香蒲对铀的富集多集中在根部.聂小琴等<sup>[8]</sup>通过室内水培实验的研究,发现大藻和凤眼莲对铀污染水体的修复能力跟植物生长期、生物量和覆盖水体面积等因素呈正相关,且对不同 pH 的铀废水的修复机理不同.胡南等<sup>[9]</sup>对五种水生植物对水中铀的去除作用进行研究,发现满江红对铀的抗性比较大,富集能力比较强.胡南等<sup>[10]</sup>对满江红和满江红鱼腥藻修复铀污染水体时,铀在植物—微生物共生体系内的分布进行研究,证明了其对铀具有富集特性.可见,国内外对铀污染水体的植物修复开展的研究众多,但植物物种繁多,修复效果参差不齐,很难将其作用进行直观的对比.基于 R 语言的 PCoA (principal co-ordinates analysis) 多样性分析的数据处理方法,常被用于多样性研究<sup>[11-13]</sup>.闫彩霞等<sup>[12]</sup>对黄曲霉侵染后花生胚的所有种质进行 PCoA 分析,结果表明分组结果均与种质的抗性特点有明显的相关性.张翠琴<sup>[13]</sup>采用 PCoA 对五角枫种群遗传多样性进行研究,结果表明其种群分类结果与 UPGMA 聚类分析相一致.

为了筛选更具潜力的铀富集植物,本研究实地调查并采集了 12 种水生或喜水植物,进行铀污

染水体修复的对比研究.采用模拟铀污染水体开展室内水培实验,对比分析了各植物对铀的富集能力,及其植物在铀污染水体中的机体变化,揭示其对铀的富集能力和耐受性.并通过 PCoA 多样性分析的数据处理方法,将各植物对铀的富集特性进行比对,以研究各植物对铀的富集特性的相似性.通过上述对比研究,筛选在铀污染水体中具有最佳富集能力与耐受能力的水生植物,为植物修复铀污染水体提供更有价值的参考.

## 1 材料与方法

### 1.1 铀富集植物的采集

香蒲草采集自衡阳某铀尾矿库周边铀污染水域,大藻采集自韶关某铀矿山周边铀污染水域,水葫芦、满江红鱼腥藻、碎米莎草、空心莲子草、水莎草 5 种水生或喜水植物,取自衡阳某铀尾矿库周边池塘和土壤,合果芋、彩叶草、白鹤芋、绿萝、滴水观音 5 种喜水植物购自衡阳市花卉市场.

### 1.2 培养液的配制

植物水培采用改性的 Hoagland's 营养液,将其除去磷酸盐,防止其和水体中  $\text{UO}_2^{2+}$  生成磷酸铀酰沉淀,再与铀标准溶液按比例混合,所有试剂均为分析纯.

### 1.3 铀富集植物水培实验

将所有植物用清水培养 3 d 后,再选择个体差异不大的植株,冲洗干净后,浸入质量的浓度为 1% 的高锰酸钾溶液中消毒 10~15 min,再用去离子水清洗 5 次后备用.选用大小均匀的 12 种水生或喜水植物(因水葫芦和滴水观音个体较大,选择单株重量 50~60 g 的植株;满江红鱼腥藻重量 25 g;其他植株选择大小均匀、总重量 35~40 g 的 2-4 株相应植株),进行铀污染水体植物修复的室内水培模拟实验研究,初始铀质量浓度为 2.015 mg/L,采用缓冲溶液调节 pH 为  $6\pm 0.1$ .

实验设置:3 000 mL 的烧杯,上架花托,加入 2 000 mL 模拟铀污染水体,栽入植物,植物根部没入水体,隔天加入 5 mL 改进的 Hoagland's 营养

液,并补足蒸发水分.修复时间为 25 d,定时测定水体中铀的含量,并观察铀污染水体对植物的抑制作用.

#### 1.4 铀污染水体的浓度测定

参照 GB6768-68 的规定,采用 2-(5-溴-2-吡啶偶氮)-5-乙氨基苯酚分光光度法测定水溶液中的铀浓度.低于分光光度法测量下限的样品,可消解后加入 Rh 内标液,采用电感耦合等离子体质谱技术测定铀的浓度.所用试剂均为分析纯.

#### 1.5 植物修复的相关性分析

PCoA (principal co-ordinates analysis) 是基于 R 语言的一种研究数据相似性或差异性的可视化方法,它通过距离矩阵中最主要的坐标,对数据矩阵进行旋转,观察其差异性<sup>[11]</sup>.利用 PCoA 来进行植物修复的相关性分析,以直观显示不同植物修复中的相似性及差异性.

#### 1.6 植物对铀的耐受性和富集能力的监测

在铀的胁迫下,水生植物的生长抑制率( $G$ )和对水中铀的去除率( $\eta$ )通过式(1)(2)来计算.

$$G = (m_0 - m_1) / m_0 \times 100\% \quad (1)$$

$$\eta = (C_0 - C_1) / C_0 \times 100\% \quad (2)$$

式中, $m_0$  为空白对照组植株的质量(g), $m_1$  为实验组植株的质量(g), $C_0$  为铀污染水体的初始铀质量浓度(mg/L), $C_1$  为测试时水中残留的铀质量浓度(mg/L).

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同植物对铀污染水体的净化效果

不同修复时间的条件下,不同植物对铀污染水体进行修复后的水体中残留铀浓度的检测结果,如图 1~6 所示,其结果表明:经过相同的作用时间,不同植物对铀的富集效果的差异很大,满江红鱼腥藻、香蒲草等富集能力强的植物,净化后水体中残留的铀质量浓度低于 0.125 mg/L,即植物可以净化水体中 90% 以上的铀,而绿萝净化后水体中残留的铀浓度高于 1.300 mg/L,即绿萝仅能富集水体中的 35% 左右的铀;同一植物在不同时间对铀的富集效果也是不一样的,大部分植物在前五天的富集量,基本可以超过植物总富集量的一半,并在 15~20 d 左右达到平衡,继续培养残留的铀质量浓度下降不明显,植物的富集效果没有明显提高,大藻和水葫芦的培养液中铀的残留浓度甚至呈现上升趋势.

植物修复铀污染水体的进程,大致分为三个阶段:快速富集期(前 5 d)、平稳增长期(5~20

d)、稳定期(20~25 d).短时间来看,满江红鱼腥藻和香蒲草对铀的富集能力最强,修复五天后,水体中铀的残留浓度低于 0.8 mg/L,对铀的去除率达到 60% 以上,其次是水葫芦、合果芋、水莎草和大藻,铀的残留浓度低于 0.9 mg/L,五天对铀的去除率达到 50% 以上,如图 2 所示.长时间来看,在 20~25 d 的修复稳定期,如图 5~6 所示:满江红鱼腥藻对铀的富集能力最强,在修复 25 d 后,体系中残留的铀浓度低于 0.05 mg/L,已达到国家规定的安全排放标准,铀的去除率高达 97.7%;香蒲草在修复进行 20 d 以后,对水体中残留的铀浓度约为 0.15 mg/L,对水体中铀的去除率达到 90% 以上,但尚未达到安全排放标准,虽是一种本土生长的铀富集植物,但净化作用仍需加强;合果芋和空心莲子草也可以富集污染水体中的铀,对铀的去除率超过 80%,但平衡体系中的铀浓度仍高于 0.3 mg/L,远高于国家允许的排放标准,可以通过其他方式提高其对铀的富集能力,具体方法待研究;绿萝和滴水观音对铀的富集能力比较差,修复效率比较低,平衡体系中的铀浓度仍维持在 1 mg/L 左右,仅能净化铀污染水体中 50% 的铀,很难用于铀污染水体的修复;大藻和水葫芦也可以富集水体中的铀,但受培养条件限制,在培养 15 d 以后,对铀的去除率反而降低,可能跟其不适应室内培养条件,植物腐烂有关,原本富集的铀重新释放到水体中.由此可见,满江红鱼腥藻与香蒲草对铀的富集能力最强,对铀污染水体的净化最彻底,可以用于铀污染水体的修复.

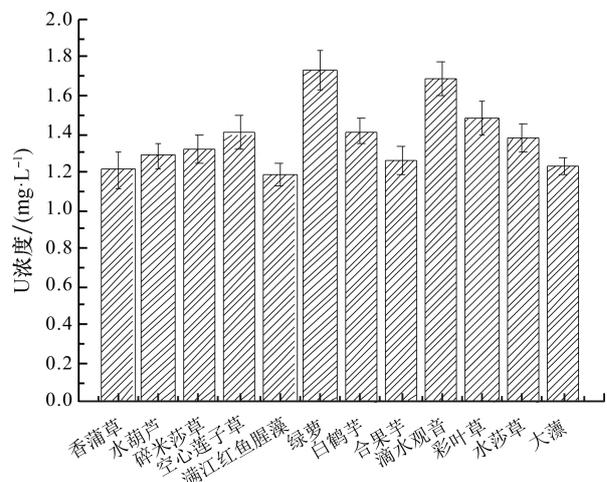


图 1 不同植物修复 2 d 后残留的铀浓度

Fig.1 The residual concentration uranium repaired by different plants repaired after 2 days

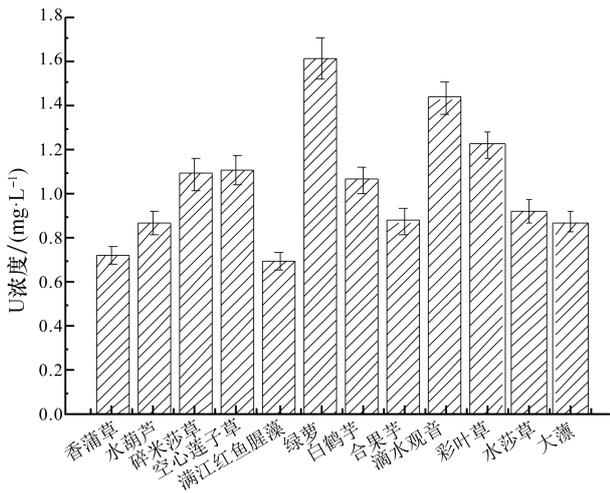


图2 不同植物修复5 d后残留的铀浓度

Fig.2 The residual concentration of uranium repaired by different plants repaired after 5 days

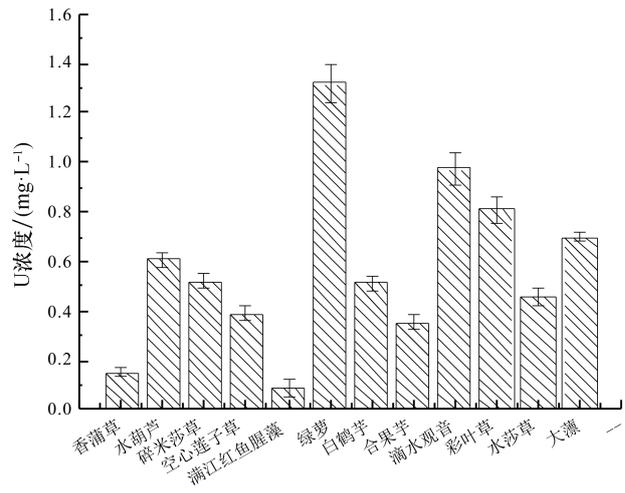


图5 不同植物修复20 d后残留的铀浓度

Fig.5 The residual concentration of uranium repaired by different plants repaired after 20 days

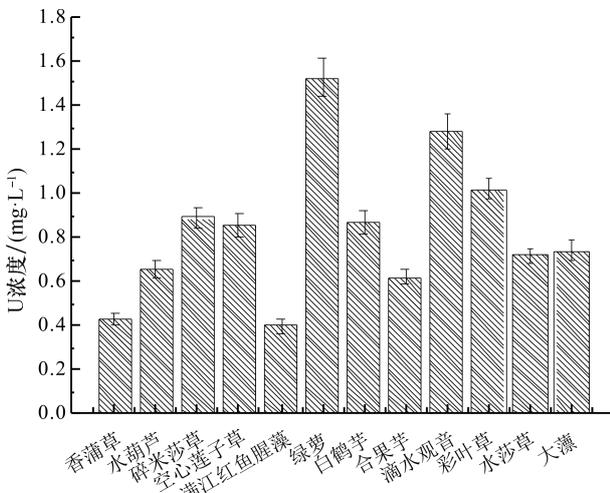


图3 不同植物修复10 d后残留的铀浓度

Fig.3 The residual concentration of uranium repaired by different plants repaired after 10 days

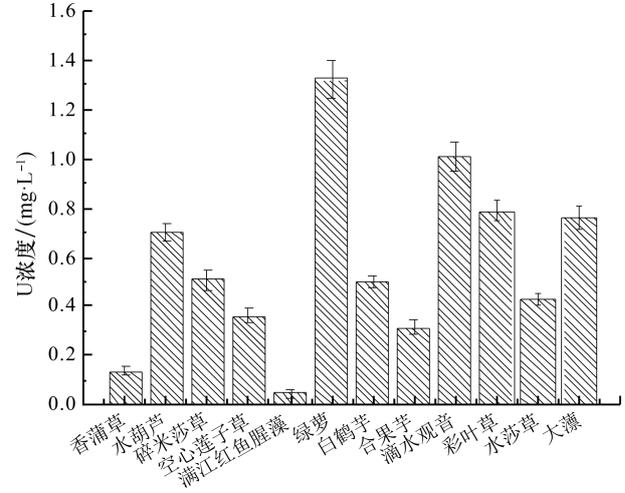


图6 不同植物修复25 d后残留的铀浓度

Fig.6 The residual concentration of uranium repaired by different plants repaired after 25 days

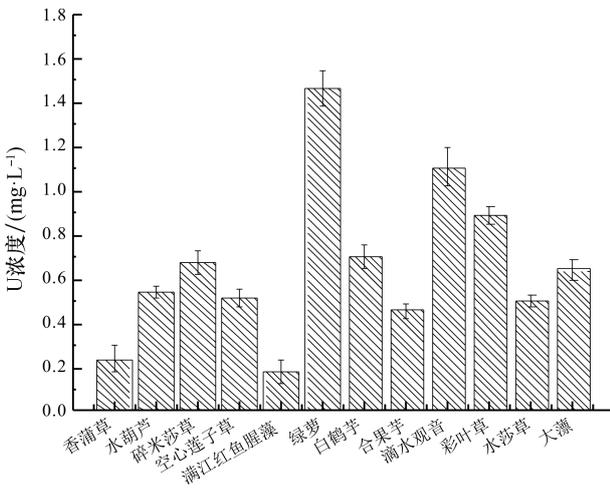


图4 不同植物修复15 d后残留的铀浓度

Fig.4 The residual concentration of uranium repaired by different plants repaired after 15 days

### 2.2 植物吸附特性的比对分析

不同植物对铀污染水体的富集特性的PCoA分析中,前几个主成分所含信息百分比反映的是顺序效果优劣的重要指标之一.对12种植物的铀富集性能的PCoA分析表明:第一坐标轴可以表示总富集特性的95.11%,即95.11%的植物的富集特性集中在第一坐标轴附近,符合第二坐标轴的植物富集特性仅占植物总数的4.35%(图7).

PCoA分析将不同植物对铀的富集性能进行大体分类:碎米莎草和白鹤芋对铀的富集性能是相似的;水葫芦和大藻对铀的富集性能是相似的;香蒲草和满江红鱼腥藻在对污染水体中铀的富集性能上,也有一定的相似性;合果芋和水莎草对铀的富集性能也是相似的,其他植物对铀的富集性

能的相似度则比较低。

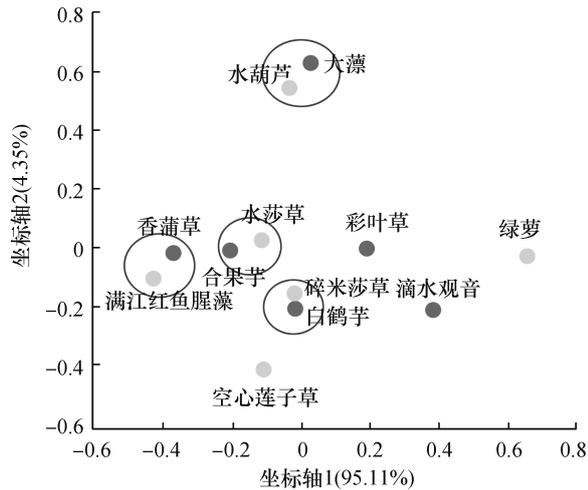


图 7 12 种植物对铀的富集性能对比的 PCoA 分析

Fig.7 The PCoA analysis of the enrichment performance for uranium ions by plants

### 2.3 不同植物对铀毒害的耐受性监测结果

对香蒲草等 12 种水生或喜水植物在铀胁迫下的生长情况进行观察,不同植物的生长状态差别很大.修复 25 d 后,满江红鱼腥藻、合果芋、绿萝、滴水观音、彩叶草等植物在铀污染水体基本能保持良好的生长状态,相对于对照组无毒害的植物,其生长抑制率低于 5%,反映其对铀具有较强的耐受性;但是购自市场的绿萝、滴水观音、彩叶草,虽然对铀的耐受性比较强,但对铀的去除率也比较低,不适用于铀污染水体的修复.香蒲草、碎米莎草、空心莲子草、白鹤芋和水莎草,在修复 25 d 后发现少量黄叶,铀对植物的生长抑制率低于 10%,基本能适应铀污染环境.而采集自野外的水葫芦和大藻,在铀污染水体中生 15~20 d 左右开始出现了茎叶的腐烂,其空白组同样存在植株焉黄的症状,可能室内菌群和水质成分同野外水体差距较大,植物不适用于室内水培的生长环境,虽然其对铀具有较强的吸附能力,暂时无法用于铀污染水体修复的室内模拟研究。

综上所述,从铀尾矿库旁池塘中取得的满江红鱼腥藻、香蒲草对铀的耐受性和富集能力都较强,可以用于铀污染水体的修复,其中满江红鱼腥藻最佳。

## 3 结 论

将铀污染水体取得的香蒲草和大藻,铀尾矿库旁池塘中取得的 5 种水生或喜水植物,与市场购买的 5 种水生或喜水植物进行其对铀污染水体的净化效果及耐受性的对比研究,得到以下结论:

1) 从铀尾矿库旁池塘中取得的满江红鱼腥藻对铀的富集能力最强,在修复 25 d 时,体系中铀的去除率达到 97.7%,体系中残留的铀质量浓度低于 0.05 mg/L,达到国家允许排放的标准.香蒲草在修复进行 20 d 以后,铀的去除率超过 92%,也是一种较强的铀富集植物。

2) 不同植物对铀的富集性能的 PCoA 分析表明:碎米莎草和白鹤芋、满江红鱼腥藻和香蒲草、水葫芦和大藻、合果芋和水莎草在对污染水体中铀的富集特性上有一定的相似性,其他植物对铀的富集特性的相似度则比较低。

3) 植物对铀毒害的耐受性监测,结合其富集性能的结果表明:满江红鱼腥藻、合果芋和香蒲草等对铀的耐受性比较强,同时对铀的富集效率非常高,可用于铀污染水体的植物修复研究,但对合果芋和香蒲草体系残留铀浓度仍高于国家排放标准的情况,可以采取其他措施提高植物的富集能力,具体措施待研究。

### 参考文献:

- [1] 丁志斌,罗凌江.贫铀武器对人体健康和环境的影响[J].解放军预防医学杂志,2003,21(3):225-228.
- [2] DANG D H, WANG W, PELLETIER P, et al. Uranium dispersion from U tailings and mechanisms leading to U accumulation in sediments: Insights from biogeochemical and isotopic approaches [J]. Science of the total environment, 2018, 610-611: 880-891.
- [3] 黄常,杨瑞丽,郭腾,等.苏丹草对铀的积累特征试验研究[J].南华大学学报(自然科学版),2015,29(3):21-24.
- [4] 汪萍,吕彩霞,盛青,等.含铀废水处理技术的研究进展[J].现代化工,2016,36(12):23-27.
- [5] JUWARKAR A A, MISRA R R, SHARMA J K. Recent trends in bioremediation [J]. Geomicrobiology and biogeochemistry, 2014, 39: 81-100.
- [6] 张晨.环境生物技术 in 环境污染控制中的应用[J].污染防治技术,2017,30(6):60-61.
- [7] 刘韬.香蒲对低浓度含铀废水处理效果的实验研究[D].衡阳:南华大学,2014.
- [8] 聂小琴,董发勤,丁德馨,等.两种土著水生植物对铀矿坑水的修复能力研究[J].原子能科学技术,2015,49(11):1946-1953.
- [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] 胡南,丁德馨,潘长春,等.铀在植物-微生物共生体系满江红体内的分布[J].南华大学学报(自然科学版),2014,28(4):18-22.
- [11] JIANG X T, PENG X, DENG G H, et al. Illumina sequencing of 16S rRNA tag revealed spatial variations of bacterial communities in a mangrove wetland [J]. Microbial ecology, 2013, 66(1): 96-104.
- [12] 闫彩霞,张浩,李春娟,等.黄曲霉侵染后花生胚发育动态及抗病相关种质群体结构[J].山东农业科学,2017,49(3):1-9.
- [13] 张翠琴.五角枫种群遗传多样性研究[D].临汾:山西师范大学,2015.

(责任编辑:龙威)