

黄渤海不同生长阶段的日本鳗草对5种重金属 (锌、铬、铜、铅、镉)的生物蓄积

杨晓龙^{1,2,3}, 郭美玉², 叶金清², 袁秀堂⁴, 张安国²,
李淑英³, 徐永平³, 杨超杰¹

(1.海南热带海洋学院 热带海洋生物资源利用与保护教育部重点实验室,海南 三亚 572022; 2.国家海洋环境监测中心,辽宁 大连 116023; 3.大连赛姆生物工程技术有限公司博士后工作站,辽宁 大连 116620; 4.中国科学院烟台海岸带研究所,山东 烟台 264003)

摘要:为研究日本鳗草 (*Zostera japonica*) 在不同生长阶段对环境重金属的生物蓄积作用,本文在辽河口(渤海)、桑沟湾(黄海)和大长山岛(黄海)的日本鳗草分布区开展调查研究,分析了日本鳗草生长初期(5月)、生长旺盛期(8月)和衰退期(10月)地上组织和地下组织中5种重金属(Zn、Cr、Cu、Pb和Cd)的含量及其同沉积物重金属含量的相关性。研究表明,除Zn以外,辽河口日本鳗草分布区沉积物的重金属含量显著高于大长山岛和桑沟湾;日本鳗草体内的Pb和Zn含量显著高于其他重金属含量;日本鳗草地上组织对Cd、Pb和Cu具有蓄积作用,对Cd的生物富集系数最高达37.18,但对Zn和Cr不具有蓄积作用;生长初期的日本鳗草地上组织Cu和Zn含量与其基质中Cu和Zn含量呈良好的线性关系,而衰退期的日本鳗草地上组织Pb含量同沉积物中Pb含量具有显著相关性。日本鳗草在不同生长阶段对重金属的蓄积作用可用于开展黄渤海重金属污染水平的生物监测,本研究结果可为黄渤海的污染防治工作提供重要参考。

关键词:海草; 重金属; 生长阶段; 生物蓄积

中图分类号:X55 文献标识码:A 文章编号:1007-6336(2021)06-0895-08

The bioaccumulation of *Zostera japonica* for five heavy metals (Zn, Cr, Cu, Pb, Cd) at different growth stages in the Yellow Sea and Bohai Sea

YANG Xiao-long^{1,2,3}, GUO Mei-yu², YE Jin-qing², YUAN Xiu-tang⁴,
ZHANG An-guo², LI Shu-ying³, XU Yong-ping³, YANG Chao-jie¹

(1.Key Laboratory of Utilization and Conservation for Tropical Marine Bioresources (Hainan Tropical Ocean University), Ministry of Education, Sanya 572022, China; 2.National Marine Environment Monitoring Center, Dalian 116023, China; 3.Postdoctoral Workstation of Dalian SEM Bio-Engineering Technology Co. Ltd., Dalian 116620, China; 4.Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China)

Abstract: Three distribution areas of *Zostera japonica* located in Liaohe Estuary (Bohai Sea), Sanggou Bay (Yellow Sea), and Dachangshan Island (Yellow Sea) were investigated to study the bioaccumulation of Z.

收稿日期:2021-06-27, 修订日期:2021-09-09

基金项目:国家环境保护近岸海域生态环境重点实验室开放基金项目(202101); 国家自然科学基金青年科学基金项目(41906115); 热带海洋生物资源利用与保护教育部重点实验室开放课题

作者简介:杨晓龙(1988-),男,辽宁大连人,博士,从事海洋生态学研究, E-mail: xlyang@nmemc.org.cn

通讯作者:杨超杰(1986-),男,海南三亚人,讲师,从事渔业资源生态学研究, E-mail: yangchaojie1986@163.com

japonica for environmental heavy metals at different growth stages. The contents of five heavy metals (Zn, Cr, Cu, Pb and Cd) in the aboveground and belowground tissues of *Z. japonica* during the early growth stage (May), the full growth stage (August) and the decline stage (October), as well as the relations between heavy metal contents in seagrass tissues and that in sediments were analyzed. The heavy metal levels, except Zn, in the sediments of seagrass beds in Liaohe estuary were significantly higher than that in Dachangshan island and Sanggou bay. The contents of Pb and Zn in *Z. japonica* were significantly higher than those of other heavy metals. The Cd, Pb and Cu were enriched in the above-ground tissues of *Z. japonica* with the highest bioconcentration factor for Cd was 37.18, but *Z. japonica* had no enrichment effects on Zn and Cr. The contents of Cu and Zn in the aboveground tissues of *Z. japonica* at the early growth stage showed a good linear relationship with the contents of Cu and Zn in the substrate, while the contents of Pb in the belowground tissues of *Z. japonica* at the decline stage had a significant correlation with the contents of Pb in the sediments. The bioaccumulation of *Z. japonica* for heavy metals at different growth stages can be applied for biological monitoring of heavy metal levels in the Bohai Sea and the Yellow Sea. The present results could provide important guideline for pollution regulation in the Yellow Sea and Bohai Sea.

Key words: seagrass; heavy metal; growth stages; bioaccumulation

重金属因其难分解、易传递、易富集和生物毒性等特点,被认为是具有潜在环境危害的主要污染物。随着全球海洋污染程度加剧,重金属污染逐渐成为制约和危害近海生态系统健康发展的主要因素之一^[1]。因此,在海洋污染监管和治理过程中,准确高效的监测数据是开展海洋生态系统健康评价的重要基础。相对于常规的环境介质监测,运用指示生物能够更加有效、及时地对海洋生态系统健康状况做出准确评价。为此,科学家开发出多种指示生物作为重金属的监测评价工具^[2]。通常认为,生物体的元素含量与环境介质中该元素的含量具有线性或接近线性的相关性,则该生物体对环境的变化敏感,可以作为环境变化的指示生物^[3]。生物对特定环境压力的响应受其自身生长周期、群落结构、生长状态等多种因素影响。因此,目前全球并未对重金属污染的指示生物形成统一的评价标准,筛选统一的广布性指示生物能够在海洋管理工作中发挥事半功倍的效果。

海草(seagrass)是生长在海洋或河口,可以进行光合作用的一类显花被子植物。以海草为支撑生物组成的海草床生态系统是海洋生物圈中最具初级生产力的生态系统之一^[4]。悬浮颗粒物吸附表面积大,易于重金属吸附富集,是海洋重金属的重要“汇”。海草床通过减缓水流

速度促进海水中悬浮颗粒物的加速沉降,并由海草错综复杂的地下根茎系统稳定沉积物,防止沉积物再悬浮,导致海草床中的沉积物重金属含量显著高于周围环境^[5]。此外,海草通过根部和叶片将沉积物和海水中的重金属吸收并富集到体内。由于海草的生理差异性,不同海草对重金属元素的富集效果差异很大,即使是同一种海草,重金属在不同组织和器官的富集程度也存在差异;此外,海草不同生长阶段对重金属的吸收效率不同,导致同一种海草在不同生长阶段的环境指示效果亦有差异^[6]。

日本鳗草(*Zostera japonica*)是亚洲特有的海草种类,在我国黄海、渤海和南海海域广有分布。日本鳗草能够适应剧烈的温度和光照波动,是滨海滩涂的主要被子植物类型之一。近年来,有学者在黄河口分析了沉积物和海草组织中重金属含量的相关性,并提出将日本鳗草作为环境指示生物评估海洋环境污染状况^[5]。作为多年生被子植物,日本鳗草在不同生长阶段对环境不同重金属的吸收和富集效率不同。为探究日本鳗草在不同生长阶段对环境重金属的指示效果,本研究对黄、渤海三个典型日本鳗草分布区开展了周年调查,分析了不同区域沉积物和海草组织中重金属铜(Cu)、铅(Pb)、锌(Zn)、铬(Cr)和镉(Cd)的时空变化及其相关性,旨在探明不同生长阶段的日本鳗草对环境重金属的指示效果

及其应用价值, 为近海环境污染的生物监测评价研究提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 研究区域

本研究在桑沟湾 (SG, 37°05' N—37°08' N, 122°26' E—122°36' E)、辽河口 (LH, 40°50' N—41°20' N, 121°30' E—122°00' E) 和大长山岛 (CH, 37°08' N—37°20' N, 122°32' E—122°37' E) 三个海区开展样品采集工作。三个海区的地貌特征和环境状况差异较大 (图 1)。桑沟湾是典型的半封闭型海湾, 开口向东, 湾口宽度约 11.5 km, 位于黄海之滨山东半岛东端, 是我国重要的海水养殖基地。桑沟湾最大水深达 18 m, 平均水深为 7.5 m, 八河和沽河是主要入海河流。该海域同外海水体交换能力不足, 加之高密度的养殖活动和陆源污染随地表径流输入, 导致局部区域, 特别是河口区污染较严重。湾内海草呈斑块化分布, 主要海草种类有鳗草、日本鳗草和丛生鳗草, 其中, 日本鳗草主要分布在低潮期暴露于空气的潮间带区域^[7]。辽河口位于渤海辽东湾北端, 是辽河入海的主要通道, 辽河途经河北、内蒙古、吉林和辽宁, 沿河流域大量的工业污水、城市及农业废水排放至辽河, 重金属、化学及有机污染物由辽河携带入海, 因此, 辽河是我国污染最严重的入海河流之一^[8]。河口处咸淡水交融, 大量泥沙被河水携带入海, 大面积滩涂在入海口形成; 另外, 大量有机质及营养盐被携带至此, 导致此区域营养丰富, 河口滩涂生境埋栖性贝类资源丰富。河口海草种类只有日本鳗草 1 种, 在离岸约 600 m 的潮间带区域呈带状分布, 受环境污染、贝类采捕等人为活动影响, 海草床生境破碎化严重。大长山岛位于黄海北部的长山群岛, 由于较少受到人类活动干扰, 岛上没有重工业, 该海域水质清洁, 饵料充足, 海洋渔业资源丰富, 海岛周围分布着成片鳗草和日本鳗草, 其中, 日本鳗草分布区位于距离高潮线 200 ~ 300 m 以下的潮间带^[9]。

1.2 样品采集

于 2020 年 5 月、8 月和 10 月在桑沟湾、辽河口和大长山岛开展日本鳗草及其环境介质的

样品采集工作。分别在桑沟湾、辽河口和大长山岛设置了 6 个、8 个和 5 个站点。每个站点随机选取 4 个 25 cm×25 cm 的平行样方, 平行样方间距约 15 m。将样方框内的全部日本鳗草完整取出, 用海水清洗海草表面的附着物和泥土后, 将海草样品置于自封袋中, 记录站点编号及海草种类; 同时, 在每个站点使用 PVC 管 ($d = 5\text{ cm}$) 收集表层 10 cm 的沉积物样品, 每个站点采集 3 组平行样品。所有样品均在 -20 °C 和遮光条件下保存并运至实验室进行后续分析。

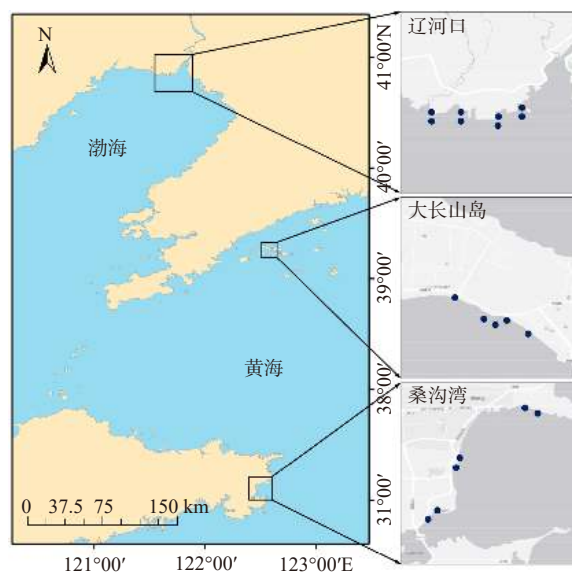


图 1 黄渤海日本鳗草分布区样品采集站位

Fig. 1 The sampling sites of *Zostera japonica* beds in the Yellow Sea and Bohai Sea

1.3 样品分析

在实验室中, 用载玻片小心地将附着在海草叶片的藻类等海洋生物和杂质刮掉, 用蒸馏水将海草样品洗涤干净并用纸巾擦干, 将海草样品分成地上组织和地下组织。将沉积物样品和海草样品真空冷冻干燥 (真空冷冻干燥机, FD-1C-50, 北京博医康实验仪器有限公司) 至恒重。样品经研钵研磨后, 沉积物样品过 200 目分样筛, 去除直径大于 0.5 mm 的颗粒物, 充分混匀后遮光密闭保存。

准确称取 0.2 g 的沉积物置于消解罐, 加入 3 mL HNO₃ 和 2 mL HF 的混合溶液, 在 150 °C 下加热 12 h, 冷却后再加入 1 mL HClO₄, 加热赶

酸至近干;再加入 2 mL HNO₃ 和 1 mL HF 混合液, 220 °C 下加热 4 h, 再加入 1 mL HClO₄, 加热至近干, 残渣用 2 mL HNO₃ 和 1 mL 超纯水溶解, 在密闭消解罐中加热至 120 °C, 直到溶液呈清亮色。准确称取 1.0 g 的海草样品置于消解罐, 加入 10 mL HNO₃ 和 1 mL HClO₄ 的混合溶液, 在 140 °C 下加热 3 h, 冷却后再加入 3 mL H₂O₂, 加热至近干, 用超纯水定容至 50 mL, 用 0.45 μm 醋酸纤维素滤膜过滤。采用石墨炉原子吸收分光光度计(岛津 AA-6300C)测定日本鳗草地上、地下组织和沉积物样品中 Cu、Cd、Cr、Pb 和 Zn 的含量。酸解和测定时均做空白对照和平行处理以减少测定结果误差。

采用烧失量法测定研究区域中沉积物的有机质含量;采用 Mastersizer2000 激光粒度分析仪测定并运用福克—沃德粒度参数公式计算研究区域中沉积物的粒度。

1.4 统计分析

采用单因素方差分析(ANOVA)检验沉积物中重金属含量时空分布的显著性差异。在进行单因素方差分析前,对数据进行方差齐性检验,

如数据不满足方差齐性,将数据进行对数转化至满足方差齐性后,再开展后续分析。采用 Pearson 相关分析检验海草不同组织中重金属含量同沉积物中重金属含量的相关性。用生物富集系数(BCF, the bioconcentration factor)表征日本鳗草吸收和富集重金属的能力^[10],计算公式如下:

$$BCF = C_i / C_{sed}$$

式中: C_i 是日本鳗草地下或地下组织的重金属含量; C_{sed} 是沉积物中重金属含量。

使用 ArcGIS 10.2 绘制调查区域及站位图,运用 SPSS 21.0 和 OriginPro 8 软件对数据进行统计分析和制图,结果采用平均值±标准误差($\bar{x} \pm SE$)的形式表示,显著性水平为 0.05。

2 结果与讨论

2.1 沉积物理化性质及重金属分布特征

不同海区日本鳗草分布区沉积物的理化性质见表 1。辽河口和桑沟湾海草分布区的沉积物有机质含量差异不显著,沉积物类型均为砂质粉砂,大长山岛海草分布区的沉积物有机质含量高于其他区域,沉积物类型为砂质粉砂和粘土质粉砂。

表 1 研究区域沉积物的理化特征

Tab.1 The physicochemical characteristics of sediments in the studying areas

研究区域	理化特征	5月	8月	10月
辽河口	有机质/(%)	2.16±0.39	2.21±0.44	2.18±0.36
	平均粒度(ϕ)	5.34±1.22	5.69±0.98	5.46±1.23
	沉积物类型	砂质粉砂	砂质粉砂	砂质粉砂
大长山岛	有机质/(%)	3.14±0.12	3.05±0.24	3.33±0.15
	平均粒度(ϕ)	6.12±1.02	6.06±0.96	6.17±1.34
	沉积物类型	砂质粉砂-粘土质粉砂	砂质粉砂-粘土质粉砂	砂质粉砂-粘土质粉砂
桑沟湾	有机质/(%)	2.05±0.23	1.98±0.31	2.11±0.19
	平均粒度(ϕ)	5.21±1.11	5.06±0.64	5.13±0.23
	沉积物类型	砂质粉砂	砂质粉砂	砂质粉砂

受污染来源、水动力、沉积特征等诸多因素影响,桑沟湾、辽河口和大长山岛海草床沉积物中的重金属含量存在显著差异(图 2)。辽河口和大长山岛重金属平均含量为 Zn>Cr>Cu>Pb>Cd,而桑沟湾重金属平均含量为 Cr>Zn>Pb>Cu>Cd。总体来说,辽河口日本鳗草分布区沉积

物的 Cu、Cd、Cr 和 Pb 含量显著高于大长山岛和桑沟湾日本鳗草分布区($p < 0.01$),辽河口和大长山岛的 Zn 含量差异不显著,但显著高于桑沟湾的 Zn 含量(图 2)。辽河是全国污染最严重的河流之一,特别是沿河分布的造纸厂和石油加工厂排放大量富含重金属的废水入河,地表径流携带

重金属污染物排放入海,大量重金属通过沉积作用保存在河口和湿地沉积物中^[11]。刘泽正等^[12]和 Yang 等^[11] 分别对辽河口滩涂沉积物的重金属开展了调查分析,结果表明,该海域沉积物中的 Cd、Cu 和 Pb 存在生态风险,这与本研究的结果相一致。桑沟湾是半封闭海湾,水动力交换较弱,且有多条淡水河流注入,但桑沟湾海带养殖业发达,高密度的海带养殖不仅能大量摄取无机营养盐,还能吸收环境介质中的重金属 Zn,因此,桑沟湾的 Zn 浓度水平整体较低^[13]。大长山岛海域水质清洁,环境介质中重金属含量均低于《海洋沉积物质量》(GB 18668—2002)中的 I 类标准;此外,由于人为干扰程度较低,除 Zn 以外,大长山岛海域沉积物重金属的季节变化不显著。

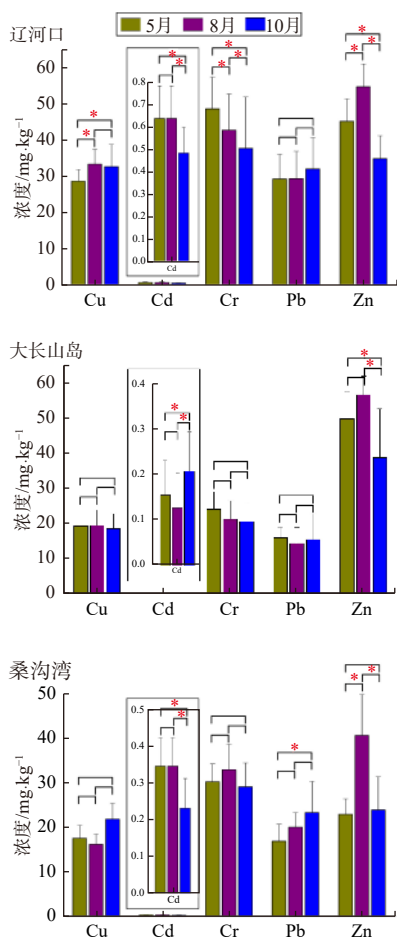


图 2 研究区域沉积物中重金属含量时空分布

Fig. 2 Temporal and spatial distribution of heavy metal in the sediment of *Zostera japonica* beds in the studying areas

2.2 日本鳗草不同组织中重金属含量

不同重金属在海草体内的蓄积和迁移效率不同,导致海草不同组织中重金属含量的分配比例差异较大^[14]。在本研究中,Cu、Cd、Cr 和 Pb 在日本鳗草地上组织中的含量高于地下组织,而 Zn 在日本鳗草地下组织中的含量显著高于地上组织(表 2)。总体来看,Cr 在日本鳗草体内的含量最低,其次是 Cd;Pb 和 Zn 含量显著高于其他重金属,这与黄河口和威海沿海日本鳗草的研究结论一致^[3,5]。但 Amado-Filho 等^[15]分析了里约热内卢沿海的莱氏二药草(*Halodule wrightii*)体内重金属含量,发现根部 Pb、Cu、Cd 的含量显著高于叶片,而 Zn 在叶片的富集程度更高,这可能是由海草种类不同以及生活环境差异造成的。日本鳗草主要分布在温带潮间带,在低潮时长时间遭受干旱胁迫,二药草属海草通常分布在热带浅海区,不同海草种类以及生境特点的差异导致重金属的传递和分配机制存在差异,这可能是造成两种海草对重金属的积累效应不同的主要原因。

日本鳗草不同组织对重金属的生物富集系数具有较大差异(图 3)。日本鳗草对 Cd 的生物富集系数最大,特别在 8 月,地上组织对 Cd 的生物富集系数高达 37.18,10 月地下组织对 Cd 的生物富集系数最小(10.95)。日本鳗草地上组织对 Pb 和 Cu 具有较强的富集作用,生物富集系数分别为 1.24~2.00 和 1.23~1.26,但地下组织对 Pb 和 Cu 不具有富集作用,生物富集系数分别为 0.27~0.48 和 0.71~1.09。日本鳗草对 Zn 和 Cr 的生物富集系数均低于 1.00,不具有富集作用。

海草体内重金属浓度的富集模式同海草的生长周期密切相关^[16]。通常来说,快速生长的海草体内重金属含量较低,即“生长稀释”效应。例如,喜盐草(*Halophila stipulacea*)和波喜荡草(*Posidonia australis*)在春、冬季节(生物量较低)的叶片重金属含量显著高于春、夏季节(生物量较高)^[17-18]。但是这一趋势并不适用于所有海草种类。Malea 等^[19]发现小丝粉草(*Cymodocea nodosa*)体内的 Cd 在夏季含量显著高于春、冬季节,这可能是由于 Cd 更易于转移,随着秋季海草

表 2 日本鳗草地上和地下组织中重金属含量($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{DW}$)Tab.2 The heavy metal levels in the above-ground and below-ground tissues of *Zostera japonica*

重金属	组织	5月	8月	10月
Cu	地上组织	27.82±8.37 ^a	28.80±10.00 ^a	30.74±13.74 ^a
	地下组织	15.36±4.82 ^a	13.82±4.08 ^a	24.22±11.99 ^b
Cd	地上组织	5.09±2.51 ^a	7.29±2.95 ^b	8.63±5.02 ^b
	地下组织	3.66±1.67 ^a	4.37±1.70 ^a	3.65±1.44 ^a
Cr	地上组织	3.20±1.29 ^a	3.90±1.95 ^b	2.64±0.87 ^a
	地下组织	3.17±1.51 ^a	4.61±2.06 ^b	2.02±0.76 ^c
Pb	地上组织	33.56±10.93 ^a	43.04±12.81 ^b	29.68±11.67 ^a
	地下组织	7.89±2.88 ^a	5.40±2.95 ^b	10.61±4.55 ^c
Zn	地上组织	31.14±8.23 ^a	29.76±7.99 ^a	28.51±9.57 ^a
	地下组织	22.09±5.98 ^a	47.25±14.17 ^b	36.55±11.58 ^c

注: 同一行中上标字母相同表示差异不显著, 不同字母表示差异显著

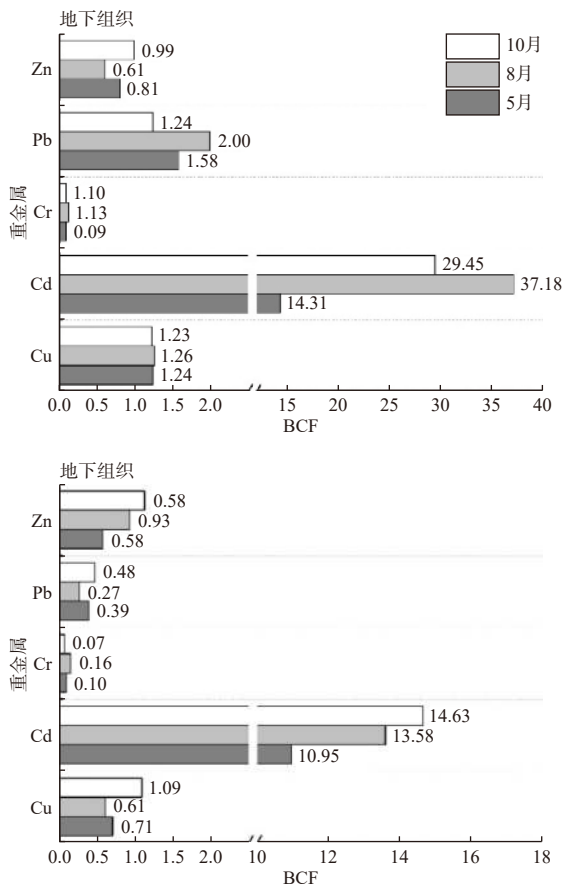


图 3 日本鳗草地上和地下组织对重金属的生物富集系数

Fig. 3 Bioaccumulation factors of heavy metals in above-ground and below-ground tissues of *Zostera japonica*

叶片衰老, 老叶中的 Cd 会渗透到海水或转移到新叶片中, 导致衰退期的 Cd 含量降低。在本研究中, 日本鳗草叶片中 Cd 和 Pb 在夏季的富集系数显著高于秋季, 同 Malea 等^[19]的研究结果一致。上述结果也表明, 在分析重金属在海草体内富集的研究中, 同样要考虑重金属的可转移性等特征。

2.3 日本鳗草和沉积物中重金属的相关性

海草体内重金属含量与其生长环境密切相关, 主要通过根茎和叶片分别从沉积物间隙水和水体中吸收重金属, 并在海草体内不断蓄积^[20]。曾有研究对海草的环境指示作用进行了分析和评估, 认为海草可以作为高效的重金属指示生物^[3]。但也有学者指出, 不同种类的海草由于生理代谢、形态结构和生长时期的差异, 会低估或者高估其生活环境中重金属的污染水平^[20]。在本研究中, 日本鳗草不同组织中重金属含量同沉积物中重金属含量的相关性差异较大(图 4)。春季和夏季的日本鳗草地上和地下组织中 Cd 含量均与沉积物中 Cd 含量存在显著相关性, 表明生长初期和生长旺盛期的日本鳗草对 Cd 具有良好的生物指示效果, 通过测定该时期日本鳗草体内的 Cd 含量可以估计该海域的污染状况。春季, 日本鳗草地上组织的 Cu 和 Zn 含量与其基质中 Cu 和 Zn 含量呈良好的线性关系, 表明生长初

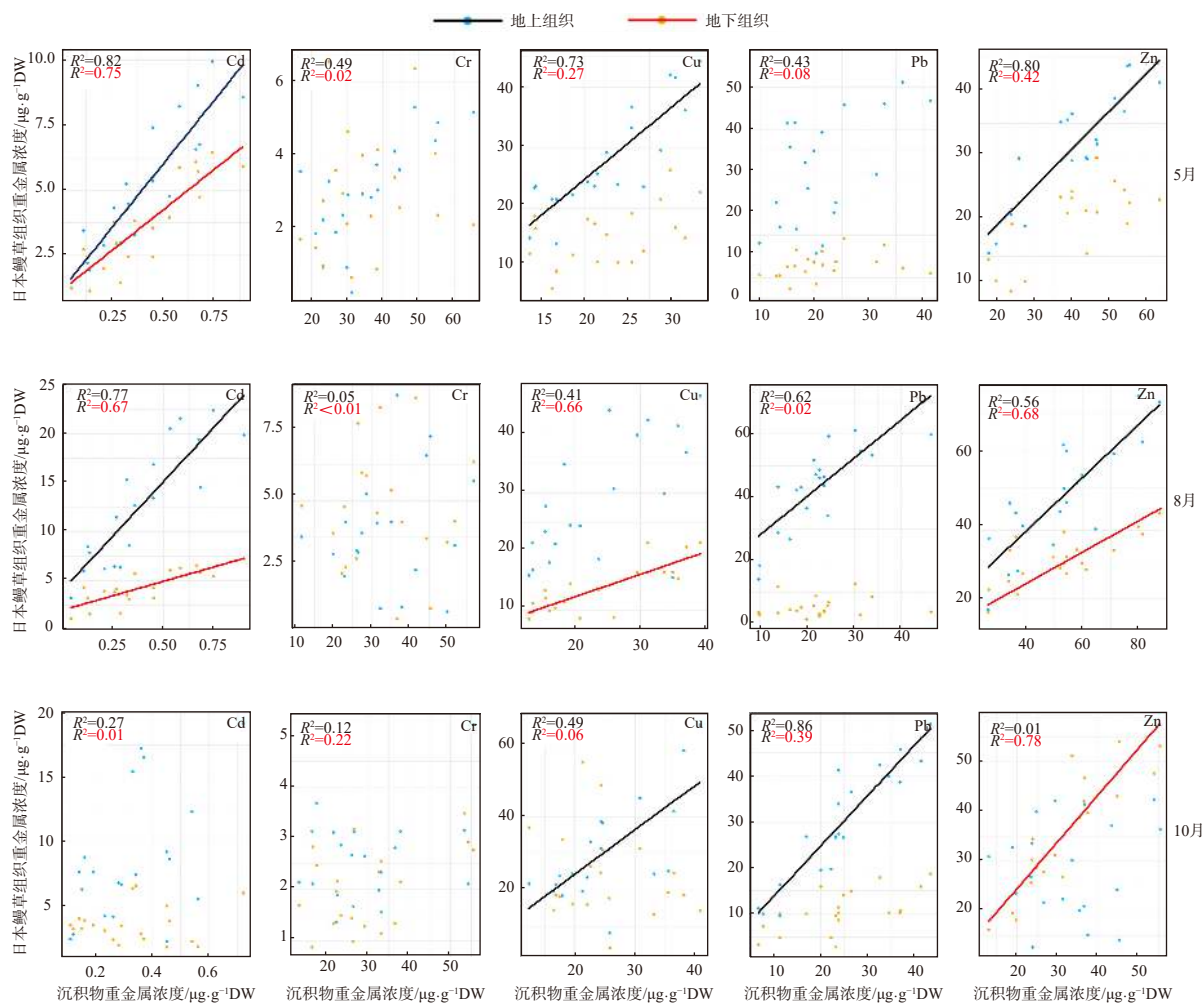


图 4 日本鳗草不同组织中重金属含量同沉积物重金属含量的相关性

Fig. 4 Correlation between heavy metal contents in different tissues of *Zostera japonica* and sediments

期的日本鳗草地上组织对 Cu 和 Zn 具有生物指示效应。对 Pb 来说, 秋季, 日本鳗草的地上组织中 Pb 含量同沉积物中 Pb 含量具有显著相关性, 表明衰退期的日本鳗草能够准确反映环境中 Pb 的污染水平。

3 结论

日本鳗草不同组织在不同生长阶段对重金属的指示效果存在显著差异。日本鳗草, 特别是地上组织对重金属 Cd 的富集程度最高, 这一特点不仅能作为指示生物监测当地的 Cd 污染水平, 还可以通过引进和扩大日本鳗草床的规模在 Cd 污染严重的海区开展生态修复工程。日本鳗草地上组织对重金属的生物指示效果优于地

下组织, 生长初期和生长旺盛期的指示效果更加突出。本研究结果表明, 日本鳗草具有监测环境重金属水平的潜力, 由于该海草在黄、渤海潮间带广泛分布, 可以作为监测黄、渤海重金属污染的有效指示生物, 为黄、渤海的污染防治工作提供有价值的参考。

但本研究中仍有如下不足及后续的研究方向: (1) 本文仅对不同海区环境和日本鳗草体内重金属数据进行了统计分析, 未考虑生境中其他因素 (如海流、温度等) 对日本鳗草重金属富集作用的影响, 有待进一步验证结论; (2) 本文研究海区仅限于黄、渤海海域, 后续应关注更大尺度的研究, 探究全国甚至全球沿海日本鳗草的生物指示效果; (3) 本文对重金属在日本鳗草体内的

吸收、传递和分配机制尚不明确,后续研究需聚焦重金属对日本鳗草生理生态特征的影响,从机理上探明重金属在日本鳗草体内的赋存机制。

参考文献:

- [1] VAREDA J P, VALENTE A J M, DURÃES L. Assessment of heavy metal pollution from anthropogenic activities and remediation strategies: a review[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 246: 101-118.
- [2] AZIZI G, AKODAD M, BAGHOUR M, et al. The use of *Mytilus* spp. mussels as bioindicators of heavy metal pollution in the coastal environment. A review[J]. *Journal of Materials and Environmental Science*, 2018, 9(4): 1170-1181.
- [3] HU C Y, YANG X L, GAO L J, et al. Comparative analysis of heavy metal accumulation and bioindication in three seagrasses: which species is more suitable as a bioindicator?[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 669: 41-48.
- [4] 李 森, 范航清, 邱广龙, 等. 海草床恢复研究进展[J]. *生态学报*, 2010, 30(9): 2443-2453.
- [5] LIN H Y, SUN T, XUE S F, et al. Heavy metal spatial variation, bioaccumulation, and risk assessment of *Zostera japonica* habitat in the Yellow River Estuary, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 541: 435-443.
- [6] 李 磊, 黄小平. 重金属在海草中累积及其对海草生长的影响[J]. *生态学杂志*, 2009, 28(9): 1897-1904.
- [7] 郑凤英, 邱广龙, 范航清, 等. 中国海草的多样性、分布及保护[J]. *生物多样性*, 2013, 21(5): 517-526.
- [8] 张 婧, 王淑秋, 谢 琰, 等. 辽河水系表层沉积物中重金属分布及污染特征研究[J]. *环境科学*, 2008, 29(9): 2413-2418.
- [9] XU S C, QIAO Y L, XU S, et al. Diversity, distribution and conservation of seagrass in coastal waters of the Liaodong Peninsula, North Yellow Sea, northern China: implications for seagrass conservation[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2021, 167: 112261.
- [10] LI Y, PANG H D, HE L Y, et al. Cd immobilization and reduced tissue Cd accumulation of rice (*Oryza sativa* wuyun-23) in the presence of heavy metal-resistant bacteria[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, 138: 56-63.
- [11] YANG X L, YUAN X T, ZHANG A G, et al. Spatial distribution and sources of heavy metals and petroleum hydrocarbon in the sand flats of Shuangtaizi Estuary, Bohai Sea of China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, 95(1): 503-512.
- [12] 刘泽正, 汪方芳, 解成杰, 等. 辽河口盐沼湿地表层沉积物重金属污染评价[J]. *北京师范大学学报:自然科学版*, 2018, 54(1): 144-149.
- [13] 蒋增杰, 方建光, 张继红, 等. 桑沟湾沉积物重金属含量分布及潜在生态危害评价[J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(1): 301-305.
- [14] JEONG H, CHOI J Y, CHOI D H, et al. Heavy metal pollution assessment in coastal sediments and bioaccumulation on seagrass (*Enhalus acoroides*) of Palau[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2021, 163: 111912.
- [15] FILHO G M A, CREED J C, ANDRADE L R, et al. Metal accumulation by *Halodule wrightii* populations[J]. *Aquatic Botany*, 2004, 80(4): 241-251.
- [16] SCHLACHER-HOENLINGER M A, SCHLACHER T A. Accumulation, contamination, and seasonal variability of trace metals in the coastal zone – patterns in a seagrass meadow from the Mediterranean[J]. *Marine Biology*, 1998, 131(3): 401-410.
- [17] MALEA P. Seasonal variation and local distribution of metals in the seagrass *Halophila stipulacea* (Forsk.) Aschers. In the Antikyra Gulf, Greece[J]. *Environmental Pollution*, 1994, 85(1): 77-85.
- [18] WARD T J. Temporal variation of metals in the seagrass *Posidonia australis* and its potential as a sentinel accumulator near a lead smelter[J]. *Marine Biology*, 1987, 95(2): 315-321.
- [19] MALEA P, HARITONIDIS S. Local distribution and seasonal variation of Fe, Pb, Zn, Cu, Cd, Na, K, Ca, and Mg concentrations in the seagrass *Cymodocea nodosa* (ucris) Aschers. in the Antikyra Gulf, Greece[J]. *Marine Ecology*, 1995, 16(1): 41-56.
- [20] MARTÍNEZ-CREGO B, VERGÉS A, ALCOVERRO T, et al. Selection of multiple seagrass indicators for environmental biomonitoring[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2008, 361: 93-109.