

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2018.02.16

清澜港红树林浮游植物群落结构及水质对应分析

于一雷¹, 郭菊兰¹, 武高洁¹, 吕诗昆²

(1. 中国林业科学研究院湿地研究所湿地生态功能与恢复北京市重点实验室, 北京 100091;
2. 海南清澜港红树林自然保护区管理站, 海南 文昌 571000)

摘要:为了认清热带地区红树林中浮游植物群落结构及其关键水质影响因子, 分别于2015年11月和2016年3月和8月在海南清澜港红树林进行样品采集, 进行藻类鉴定和水质分析。结果表明: 调查期间浮游植物7门, 74属(种)。蓝藻门13属(种), 硅藻门35属(种), 绿藻门13属(种), 隐藻门4属(种), 裸藻门3属(种), 甲藻门3属(种), 金藻门3属(种)。八门湾优势种为硅藻门角毛藻(*Chaetoceros*)和硅藻门小环藻(*Cyclotella* sp.); 红树林潮间带优势种为蓝藻门假鱼腥藻(*Pseudoanabaena* sp.)和甲藻门多甲藻(*Peridinium*); 养殖水优势种为蓝藻门微囊藻(*Microcystis*)和隐藻门蓝隐藻(*Chroomonas placiodea*)。养殖水浮游植物密度最高, 其次是八门湾和潮间带。除2016年3月份外, 生物多样性指数均值由大到小顺序为: 潮间带, 八门湾, 养殖水。2015年11月时氮为藻类生长限制因素, 而2016年3月和8月时磷为大部水体限制因素。藻类与氮磷营养盐及金属离子密切相关, 季节变化影响不明显。

关键词:浮游植物; 水质; 清澜港; 红树林

中图分类号: X173 文献标志码: A 文章编号: 1004-6933(2018)02-0102-09

Phytoplankton community structure and water quality correspondence analysis of mangrove forests in Qinglan Harbor

YU Yilei¹, GUO Julian¹, WU Gaojie¹, LYU Shikun²

(1. Institute of Wetland Research, Chinese Academy of Forestry, Beijing Key Laboratory of Wetland Services and Restoration, Beijing 100091, China; 2. Hainan Qinglan Port Mangrove Nature Reserve Management Station, Wenchang 571000, China)

Abstract: In order to study the phytoplankton community structure in mangrove forests in tropical areas and to explore the key water quality influencing factors. The samples were collected and analyzed from Qinglan Harbor of Hainan Province in November 2015, March 2016, and August 2016, respectively. The main conclusions are as follows: 7 species of phytoplankton and 74 genera (species) were identified during the investigation. 13 genera (Species) of phytoplankton, 3 (genera) species of Phyllosticta, Chlorella 13 genera (species), Cryptophyta 4 genera (species), Ophiopogon 3 (species), Chlorella 3 genera (species), Golden algae 3 genera (species). The dominant species of the Bamen Bay are *Chaetoceros* and *Cyclotella* sp.; the dominant species of the mangrove intertidal zone are *Pseudoanabaena* sp. *Alpystis*, *Microcystis* and *Chroomonas placiodea*; and the dominant species of aquaculture water are *Microcystis*, and *Chroomonas placiodea*. The density of phytoplankton is the highest, followed by the Bamen Bay and the intertidal zone. Except in March, the order of the biodiversity index from high to low is: Intertidal zone, Octopus, and aquaculture water. Nitrogen was a limiting factor for algae growth in November 2015,

基金项目: 国家林业公益性行业科研专项(201504419)
作者简介: 于一雷(1981—), 男, 副研究员, 博士, 主要从事水循环水环境及同位素水文学方面研究。E-mail: yuyilei1222@126.com
通信作者: 郭菊兰, 高级工程师。E-mail: guojulan@163.com

and the one for most water bodies were phosphorus in March and August. Algae are mainly related to nitrogen and phosphorus nutrients and metal ions, and seasonal changes have no obvious effect on their relationship.

Key words: phytoplankton; water quality; Qinglan Harbor; mangrove forest

红树林生长于热带和亚热带海岸潮间带,是由受到周期性潮水作用下的常绿灌木、小乔木组成的潮滩湿地群落。红树林植物大致分为真红树植物和半红树植物。红树林湿地生态系统与珊瑚礁、盐沼、上升流区生态系统并称为地球上生物多样性最丰富、生产力最高的四大海洋自然生态系统^[1]。红树林面积虽小,但作为热带、亚热带特有的海岸湿地类型,对维护生态平衡、保护海岸生态系统起着重要的作用^[2-3];保育滨海湿地生物多样性,发达的潮沟为大量生物提供栖息地环境^[4],还具有物质生产、防风固沙、净化水质,以及有旅游、美学等^[5-6]功能。具有丰富生物多样性的清澜港自然保护区红树林生态系统,具有多种功能和社会价值,在沿海防护林体屏障方面起到重要作用。

大量工业、农业及生活污水排入河口、海湾地区,导致红树林面积减少、生物多样性降低^[7-8]。目前,红树林水质的研究主要集中在水体富营养化和有机物污染方面。污水中较低的氮磷元素在一定程度上促进了红树林的生长^[9],然而高氮磷含量的大量污水会造成红树林成片死亡甚至消失。水产养殖是红树林氮磷营养盐的一个重要来源^[10],但是高浓度的氮磷改变了浮游植物群落结构、种群数量及其多样性^[11],最终导致水体向富营养化方向发展。近几年,东寨港红树林水体氮磷浓度超标、有机污染指数较高,基本处于中富营养化状态,且降低的趋势不

明显^[12]。清澜港红树林保护区一直面临着农业、生活污水以及虾塘养殖的影响,因此,开展其浮游植物群落结构及与水质关系的研究,对红树林水体污染防治、红树林资源保护具有重要意义。

本研究通过野外现场设置水体监测点,多次进行样品采集和分析,研究红树林不同水体中浮游植物群落结构、密度及生物量特征、水体氮磷等水质特征,阐明浮游植物群落结构及与水质特征之间的关系。

1 研究区概况

清澜港红树林湿地自然保护区(以下简称保护区)于1981年建立,是我国第二个红树林自然保护区,位于海南省东北部文昌市界内,总面积2906.57 hm²,其中红树林面积1223.3 hm²,滩涂和水域面积1724.7 hm²。保护区有3块区域,主要区域位于文昌市东南方的八门湾沿岸,总面积2019.9 hm²,其中红树林面积835.4 hm²,滩涂和水域面积1184.5 hm²^[13]。保护区属热带季风季候,年平均气温24.1℃,最冷月平均最低气温18℃,历史极端最高气温39.1℃,极端最低气温4.7℃^[12]。清澜港八门湾深入内陆,有文昌江和文教河汇入湾内,沿岸土壤淤泥质且较深厚,生境很适宜红树林的生长。潮汐属于不规则全日潮,八门湾最高潮位2.38 m,最低潮位0.01 m,平均潮差0.75 m,最大

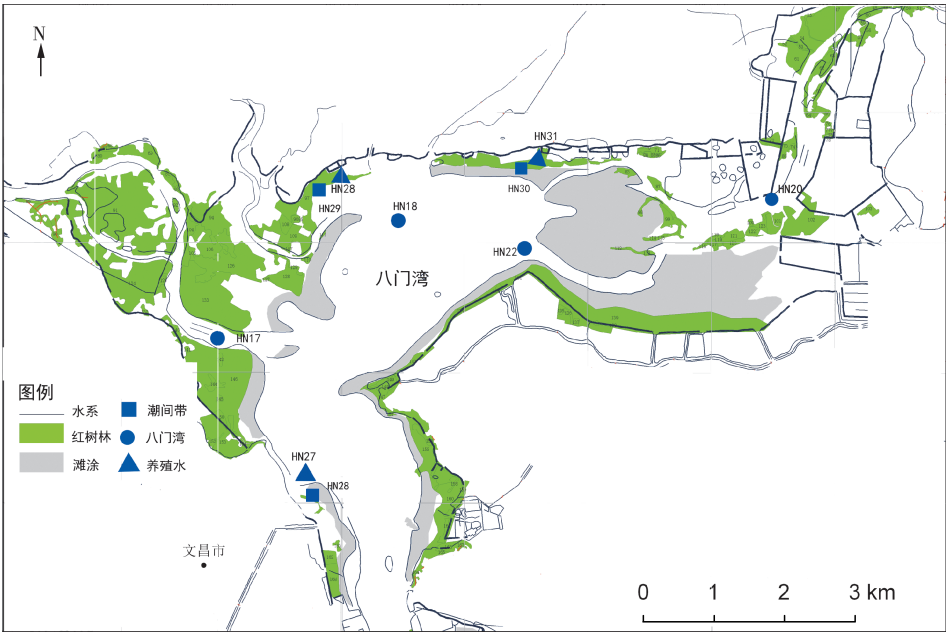


图1 海南清澜港红树林位置及样品采集点

潮差 2.07 m,潮差大,潮间带相应较宽^[13]。

$$D = (S - 1) / \log_2 N \tag{3}$$

保护区是我国红树林资源数量和种类最多、树龄长、面积最大的地区。红树林植物群落保持完整,主要有 14 种类型。根据各种资源调查资料统计,清澜港保护区的红树植物有 24 种,种类占全省的 92.3%,占全国的 85.7%,占全世界的 27.9%;半红树植物有 20 种,隶属 15 科 19 属。红树植物中有水椰、海南海桑、杯萼海桑、卵叶海桑、拟海桑、木果楝、正红树、尖叶卤蕨等珍贵、稀有和濒危的物种^[14]。

2 研究方法

2.1 样品采集、处理和分析

在清澜港红树林湿地水域中设置 10 个监测点(图 1),分别于 2015 年 11 月、2016 年 3 月和 8 月进行 3 次样品采集。采用哈希便携式水质检测仪,现场测试水体 pH、温度(T,℃)、溶解氧(DO,mg/L)、电导率(EC,μS/cm)和 ORP(mV)。利用 25#浮游植物网采集浮游植物定性鉴定样品,同时,采集 1 000 ml 浮游植物的定量水样,水样中加入鲁哥试剂(用量为水样量的 1.5%)固定样品。定量水样静置沉淀 48h 后,移去上层水,浓缩到 30 mL,取 0.1 mL 于浮游植物计数框中,盖上盖玻片,于 Olympus BX51 显微镜 40 倍物镜下观察,取 100 个视野进行计数。另外,每个监测点采集用于分析主要水质指标的样品 1 000 mL,用于分析营养元素和金属元素。

表 1 藻类和水质监测点相关信息

水体类型	监测点	监测点描述
红树林潮间带水体	HN26	下阳村红树林潮间
	HN29	丹场红树林潮间带
	HN30	排港红树林潮间带
八门湾水体	HN17	西侧文昌河入八门湾交汇处,河水-海水混合
	HN18	丹场对面八门湾水体
	HN20	文教河入八门湾交汇处,河水-海水混合
	HN22	南岸东村八门湾水体
红树林中养殖池水体	HN27	下田村,养殖池水体
	HN28	丹场养殖池
	HN31	排港养殖池

2.2 数据分析

藻类群落优势度和多样性指数计算公式如下:
优势种的判定采用 McNaughton 优势指数^[15]Y,当数值大于 0.02 时确定为优势种,计算公式为

$$Y = \frac{N_i}{N} f_i \tag{1}$$

Shannon-Wiener 多样性指数^[16-19]:

$$H' = - \sum_{i=1}^s P_i \log_2 P_i \tag{2}$$

Margalef 物种丰富度指数^[20]:

Pielou 物种均匀度指数^[21]:

$$J = H' / \log_2 S \tag{4}$$

式中: N_i 为第 i 种的个体数; N 为同一样品中的个体总数; f_i 为第 i 种在各监测点出现的频率; S 为所有监测点的藻种总个体数; P_i 为第 i 种的个体数与样品中总个体数的比值(N_i/N)。

对应分析是非线性多元直接梯度分析方法,能有效研究生物分布与环境之间的关系,结合众多环境因子进行分析,信息量大,结果直观明显,能更好地反映群落与环境的关系,是分析生物群落与环境因子间复杂关系的有效方法^[22-23]。

3 结果与讨论

3.1 浮游植物种类组成与数量分布

3.1.1 种类组成及优势种变化

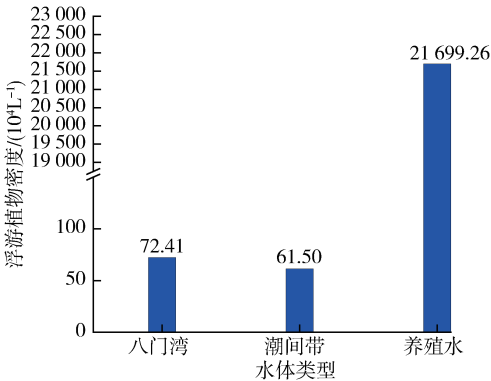
优势度是作为表明水体中浮游植物优势种群的指数。清澜港红树林湿地调查期间共检出浮游植物 7 门,74 种(属)。其中,蓝藻门 13 种,占 17.6%;硅藻门 35 种,占 47.3%;绿藻门 13 种,占 17.6%;隐藻门 4 种,占 5.4%;裸藻门 3 种,占 4.1%;甲藻门 3 种,占 4.1%;金藻门 3 种,占 4.1%。根据优势度指数计算结果,八门湾水体在 2015 年 11 月时优势种为硅藻门角毛藻(*Chaetoceros*),在 2016 年 3 月和 8 月的优势种为硅藻门小环藻(*Cyclotella* sp.)。红树林潮间带水体在 2015 年 11 月无优势种,在 2016 年 3 月时优势种为蓝藻门假鱼腥藻(*Pseudoanabaena* sp.),在 2016 年 8 月时优势种为甲藻门多甲藻(*Peridinium*),亚优势种为硅藻门舟形藻(*Navicula*)。红树林养殖水体在 2015 年 11 月时优势种为蓝藻门微囊藻(*Microcystis*),亚优势种为绿藻门小球藻(*Chlorella*),在 2016 年 3 月时优势种为蓝藻门微囊藻(*Microcystis*),亚优势种为金藻门锥囊藻(*Dinobryon*),在 2016 年 8 月时优势种为隐藻门蓝隐藻(*Chroomonas placiodea*)。

八门湾水体以硅藻为主,同时小环藻(*Cyclotella* sp.)是代表性的耐污藻类,这与深圳福田红树林藻类的检出结果^[11]类似,一定程度上说明水体处于中富营养状态。红树林以甲藻和蓝藻为主,说明水体处于中营养向富营养转化状态。红树林养殖水体以蓝藻为主,同时,养殖水在 2016 年 8 月时的优势种隐藻,其适宜在营养盐浓度较高水体中生长^[11, 24]。这主要由于养殖导致水体中氮磷浓度过高所引起。

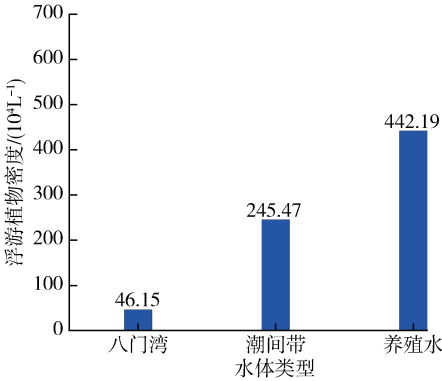
3.1.2 浮游植物密度

在调查研究期间,清澜港红树林不同水体类型

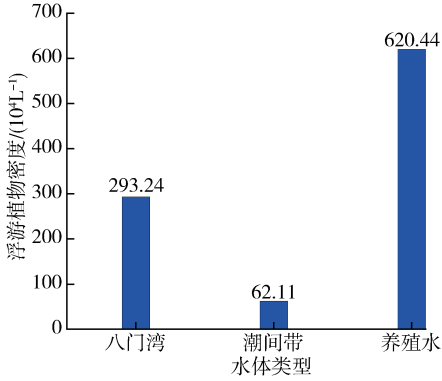
之间浮游植物密度差异明显(图2),其变化范围为 $46.15 \times 10^4 \sim 21\,699.26 \times 10^4 \text{L}^{-1}$,均值为 $7847.59 \times 10^4 \text{L}^{-1}$ 。浮游植物密度水体与富营养化水平之间存在一定的关系^[25],数值均大于 10^4L^{-1} ,水体均已表现为富营养化趋势。



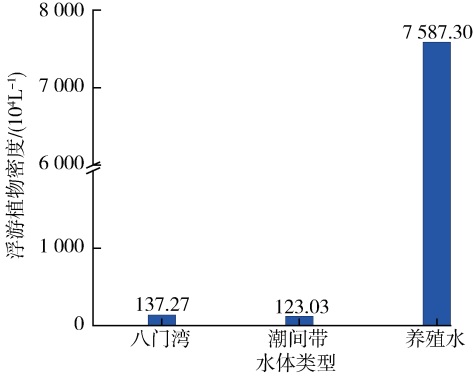
(a) 2015 年 11 月



(b) 2016 年 3 月



(c) 2016 年 8 月



(d) 平均值

图2 不同水体类型浮游植物密度

不同水体中浮游植物密度的时间变化也明显不同。其中,八门湾水体在2016年3月时浮游植物密度最低,在2015年11月略有升高,到2016年8月时为最高值;潮间带水体在2016年3月时浮游植物密度最高,在2016年8月和11月时密度接近;养殖水体在2015年11月时最高,其次为2016年8月,最低为2016年3月。3次样品采集期间,养殖水体中浮游植物的密度均为最高值,另外,八门湾水体在2015年11月和2016年8月时浮游植物密度高于潮间带,2016年3月时则相反。从3次采集的样品浮游植物密度均值可以看出,养殖水体中密度最高,其次是八门湾和潮间带,后两者密度数值接近,其中八门湾略高于潮间带。浮游植物生长需要适宜的温度和充足的营养元素,从表2看出,不同水体温度的变化及均值接近,说明温度条件类似。热带和亚热带地区温度和光照条件对浮游植物的影响作用不如温带地区作用明显^[26],养殖水体的氮磷含量显著高于其他水体,这可能是导致其水体中浮游植物密度最高的原因。

表2 不同水体类型水温变化及均值

水体	水温/℃			
	2015 年 11 月	2016 年 3 月	2016 年 8 月	均值
八门湾	23.2	24.0	34.1	27.1
潮间带	24.8	25.7	32.0	27.5
养殖水	24.8	26.8	32.4	28.0

3.1.3 浮游植物群落物种多样性

本研究中浮游植物群落结构主要采用 Shannon-Wiener 多样性指数 (H')、Margalef 物种丰富度指数 (D) 和 Pielou 物种均匀度指数 (J) 来描述(图3)。

Shannon-Wiener 指数说明群落中生物种类增多,代表了群落的复杂程度增高。2015 年 11 月,八门湾、潮间带和养殖水体指数均值分别为 1.16、1.41 和 0.19;2016 年 3 月时,均值分别为 1.00、0.84 和 0.75;8 月时均值分别为 0.81、1.37 和 0.98。除 3 月份八门湾高于潮间带外,其余时间均值由大到小顺序为:潮间带,八门湾,养殖水。八门湾水体在 8 月时 HN17 和 HN18 指数较低,分别为 0.26 和 0.80。潮间带指数的时间和空间变化较大,其中 HN30 在 11 月时出现最高值(1.90)。养殖水体不同监测点之间差异较大,其中 HN28 在 8 月时出现最高值(1.77),其次为 11 月时的 HN27(1.56)。Margalef 丰富度与 Shannon-Wiener 指数关系最密切。不同水体类型丰富度指数大小顺序与 Shannon-Wiener 指数一致。2015 年 11 月时,八门湾、潮间带和养殖水体均值为 6.0、3.0 和 5.0;2016 年 3 月时,均值分别为 4.5、6.33 和 4.67;8 月时均值分别为 6.25、6.0 和 7.0。丰富度指数显著的特点是潮间带

水体在 11 月时 HN30 出现最高值(18.0),除此之外其余监测点在不同时间的数值变化不明显。

Pielou 均匀度指数反映的是群落中各物种个体数目分配的均匀程度。2015 年 11 月,八门湾、潮间带和养殖水体均值为 0.70、0.76 和 0.14,2016 年 3 月时,均值分别为 0.68、0.49 和 0.47,2016 年 8 月时均值分别为 0.46、0.78 和 0.50。不同水体均匀度均值顺序与 Shannon-Wiener 指数和丰富度指数顺序一致。八门湾水体除在 2016 年 8 月 HN17、HN18 和 HN20 均匀度指数较低外,其他监测点数值均较高,均大于 0.5。潮间带除在 2016 年 3 月时 HN29 (0.36) 和 HN30(0.26) 较低外,其他监测点数值均大于 0.6,且相互之间数值接近。养殖水体在 2016 年 3 月时 HN27 出现最高值(0.97),其次为 2016 年 8 月时的 HN28(0.91)。

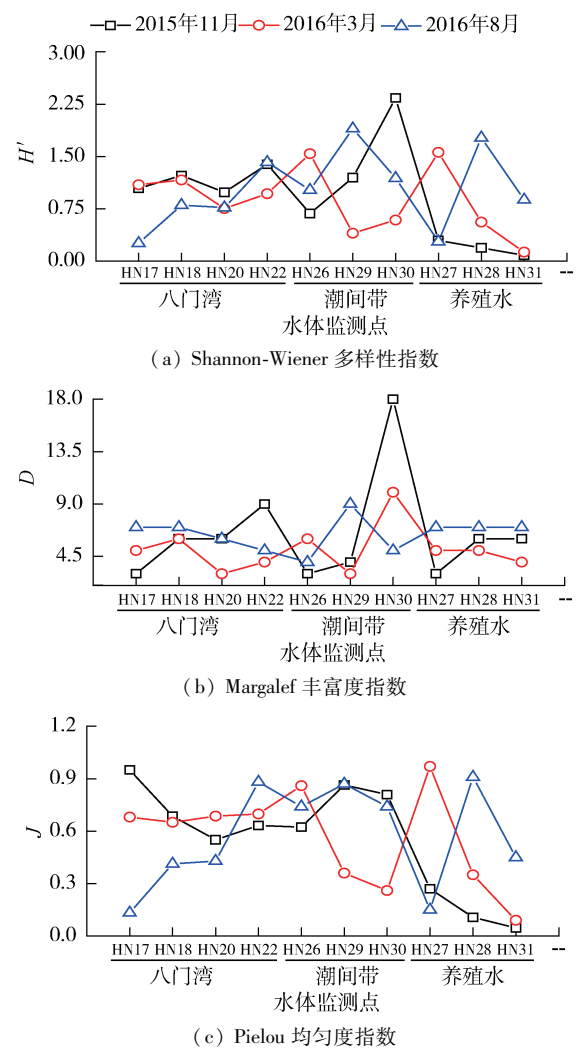


图3 不同水体监测点的浮游植物多样性指数、丰富度指数和均匀度指数

水质较好水体中的浮游植物种类较多且种间均匀,表现为多样性和均匀度指数较高。与此相反,重污染水体的多样性和均匀度指数较低。Shannon-Wiener 多样性指数为 0~1 时,水体为重污染;1~3

时,水体为中污染,其中,1~2 时,水体为 α -中污染,2~3 时,水体为 β -中污染;大于 3 时,水体为轻污染或无污染^[20]。重污染的水体包括八门湾的 HN20(2015 年 11 月、2016 年 3 月和 8 月)、HN17(2016 年 8 月)、HN18(2016 年 8 月)和 HN22(2016 年 3 月),潮间带 HN26(2016 年 11 月)、HN29(2016 年 3 月)、HN30(3 月),养殖水体的 HN27(2015 年 11 月和 2016 年 8 月)、HN28(2015 年 11 月和 2016 年 3 月)和 HN31(2015 年 11 月、2016 年 3 月和 8 月)。除潮间带水体的 HN30(2015 年 11 月)监测点为 β -中污染外,剩余不同时间的监测点样品皆为 α -中污染,但无轻污染或无污染水体。深圳福田红树林水体处于中富营养化状态且向富营养化过渡的阶段^[11],一直面临水体富营养化的威胁。

3.2 氮磷营养元素特征

清澜港红树林不同水体中氮磷浓度见图 4。氨态氮:八门湾水体除 HN17 外,其余监测点不同时间的变化不明显。HN17 在 2016 年 3 月时浓度最高,其次为 2015 年 11 月,最低为 2016 年 8 月。潮间带水体时间变化和空间变化明显,2016 年 8 月时在 HN26 和 HN30 分别出现最高值和次高值。养殖水体在 2016 年 8 月时浓度明显高于 2015 年 11 月和 2016 年 3 月,且 8 月时在 HN31 出现最高值(2.29 mg/L)。亚硝态氮为硝化和反硝化反应中间产物。八门湾 HN17 亚硝态氮浓度变化情况为:2016 年 3 月(0.20 mg/L) > 2015 年 11 月(0.13 mg/L) > 2016 年 8 月(0.09 mg/L)。潮间带水体不同监测点空间差异明显,其中 HN30 在 11 月时浓度最高(0.12 mg/L)。养殖水体除 2016 年 8 月时 HN31 为最高值(1.15 mg/L)外,其他各点浓度数值极低。硝态氮在 3 种水体中的时间变化趋势类似,表现为在 2016 年 8 月时浓度最高,其次为 2016 年 3 月,2015 年 11 月时最低。除养殖水体 HN31 点在 2016 年 8 月时为最高值(7.67 mg/L)外,其他监测点空间变异不明显。总磷在 2015 年 11 月时浓度高,空间变异性大,尤其是八门湾水体的 HN20(2.09 mg/L)和 HN22(3.10 mg/L)。潮间带 HN30 在 2015 年 11 月时与其他时间相比浓度较低(0.59 mg/L)。对比分析不同水体的时空变化特征,发现养殖水体不同监测点之间时空变化明显,在 2016 年 8 月份时多出现极高值。不同水体总磷在 2015 年 11 月时浓度较高并且变化明显。

根据 Redfield 假设^[28],典型藻类分子式为 $C_{106}H_{263}O_{110}N_{16}P$,得出氮磷含量比值为 7.2:1。表明理论上若氮磷比小于该值,则氮为限制藻类生长元素;氮磷比值大于该值,则磷为限制元素。清澜港红树林不同水体的 TN/TP 比值,2015 年 11 月时除八门

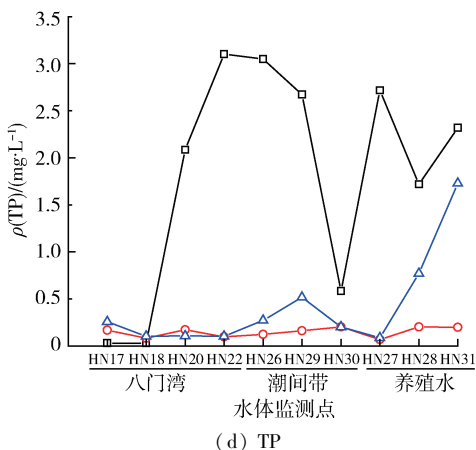
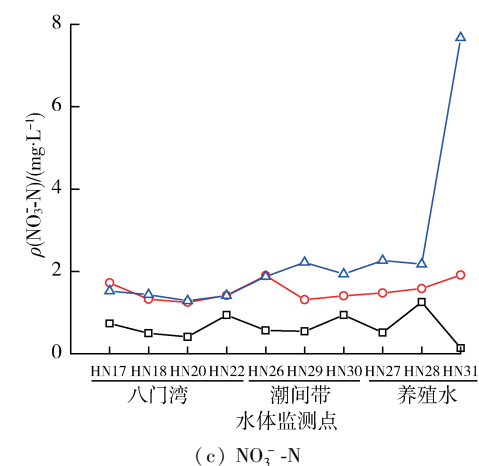
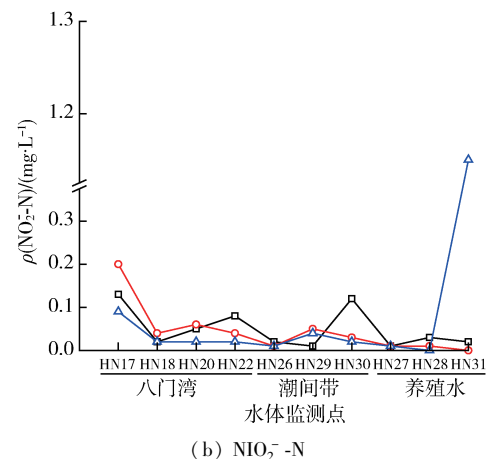
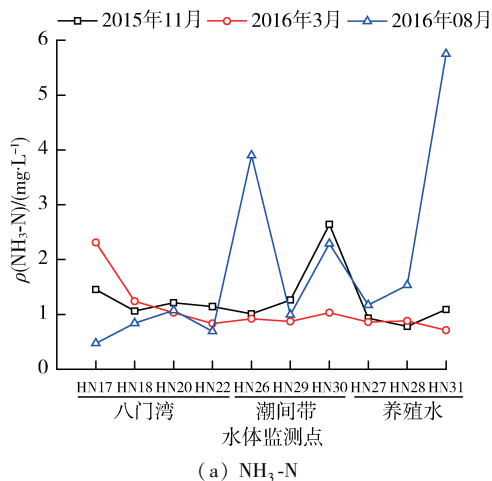


图4 不同水体监测点氮磷质量浓度

湾 HN17 和 HN18 比值大于 7.2 外,其他皆远小于 7.2 (范围为 0.6 ~ 6.5, 均值为 1.5), 表明 2015 年 11 月时氮为藻类生长限制因素;2016 年 3 月时 TN/TP 比值范围 12.3 ~ 118.5, 均值为 36.4;2016 年 8 月时除潮间带 HN28 比值为 5.0 外,其余范围为 7.4 ~ 39.8, 均值为 20.8, 2016 年 3 月和 8 月时八门湾、潮间带和养殖水体大部分监测点的藻类生长限制因素为磷。藻类生长限制元素也因地而异,如海南东寨港红树林初期不存在限制因素,而后期磷成为限制元素^[12]。东寨港红树林中的养殖明显改变了水质成分,增加了丰富的磷,导致氮磷比变化,结果氮为限制因素^[10]。

3.3 浮游植物群落与水质对应分析

采用 Canoco4.5 软件对浮游植物群落与水质关系进行对应分析。分析之前对物种和除 pH 外的环境数据都进行 $\lg(X+1)$ 转换。首先对物种数据矩阵进行降趋势对应分析(DCA),根据分析结果中排序轴数值大小特征,判断下一步分析方法。数据分析表明,2015 年 11 月和 2016 年 3 月的数据采用线性模型合适,而 2016 年 8 月数据适合采用单峰模型。2015 年 11 月、2016 年 3 月和 8 月时浮游植物和水质对应分析结果分别见图 5、图 6 和图 7。

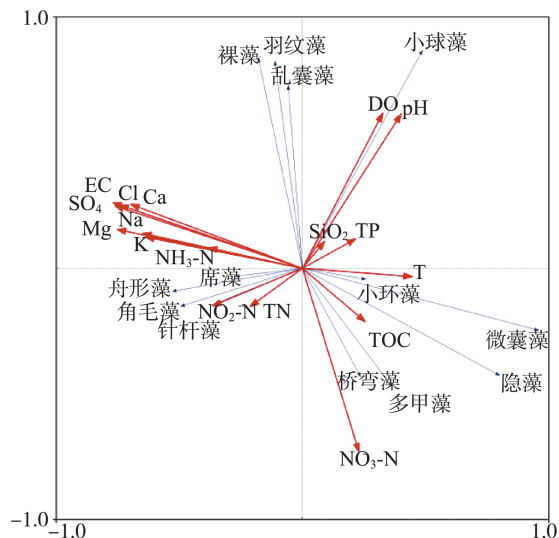


图5 2015 年 11 月浮游植物与水质 RDA 对应分析

图 5 中特征值 1 (横轴) 和 2 (竖轴) 分别解释了物种变量的 45.8% 和 30.3%, 总共解释了 76.2%, 表明排序结果良好。与特征值 1 呈显著负相关的参数包括 K、Na、Ca、Mg、Cl 和 SO_4^{2-} ; 与特征值 2 呈显著正相关的参数包括 pH 和 DO。浮游植物与水质关系为: 裸藻、羽纹藻、卵囊藻与 EC、Cl、Na、K、Ca、Mg、 SO_4^{2-} 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 呈正相关; 小球藻、舟形藻、角毛藻和杆藻与 $\text{NO}_2\text{-N}$ 和 TN 呈正相关; 小球藻、微囊藻、隐藻、桥弯藻和多甲藻与 T、TOC 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 呈正相关。

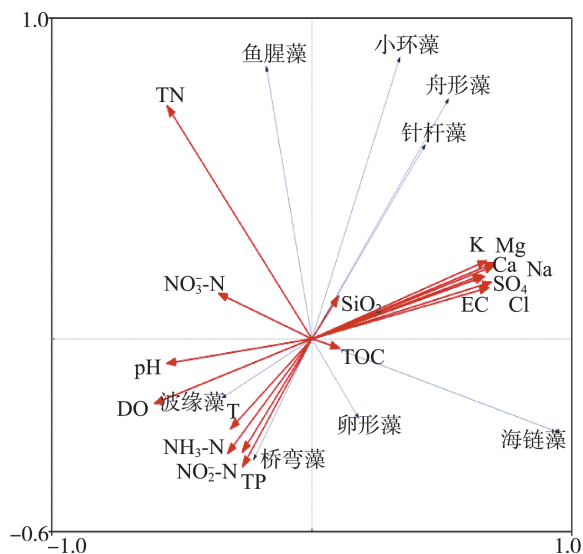


图6 2016年3月浮游植物与水质 RDA 对应分析

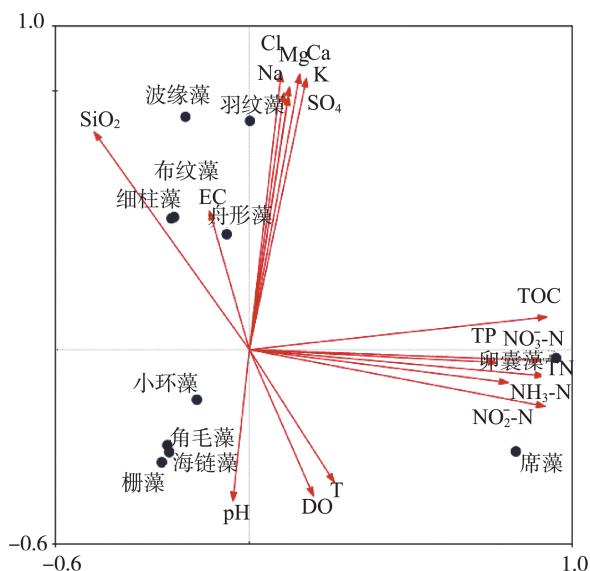


图7 2016年8月浮游植物与水质 CCA 对应分析

图6中特征值1和2分别解释了总变量的48.1%和35.0%,共解释了83.1%。与特征值1呈正相关的参数包括:EC、K、Na、Ca、Mg、Cl和 SO_4^{2-} ,呈显著负相关的参数为DO;与特征值2呈显著正相关的参数为TN。鱼腥藻与TN和 NO_3^- -N,小环藻、舟形藻和铁杆藻与 SiO_2 、K、Na、Ca、Mg、 SO_4^{2-} 、Cl和EC,以及卵形藻和海链藻与TOC,波缘藻、桥弯藻与pH、DO、温度T、 NH_3 -N、 NO_2^- -N和TP呈正相关。图7中特征值1和2分别解释了变量的38.4%和26.4%,共解释了64.8%。与轴1呈显著正相关的参数为 NH_3 -N、 NO_2^- -N、 NO_3^- -N、TN、TP和TOC。与轴2呈显著正相关参数为 SiO_2 、K、Na、Ca、Mg、Cl和 SO_4^{2-} 。波缘藻、羽纹藻、布纹藻、细柱藻和舟形藻与EC、K、Na、Ca、Mg、Cl、 SO_4^{2-} 、 SiO_2 呈正相关;小环藻、角毛藻、海链藻、栅藻与pH、T和DO呈正

相关;卵囊藻、席藻与TOC、TP、 NO_3^- -N、TN、 NH_3 -N和 NO_2^- -N呈正相关。可以看出,大部分藻类主要与氮磷营养盐及金属离子密切相关,季节变化对其影响不大。

4 结 论

a. 群落结构方面,调查期间共鉴定出浮游植物7门(蓝藻门、硅藻门、绿藻门、隐藻门、裸藻门、甲藻门、金藻门),74属(种)。

b. 密度及多样性方面,养殖水体中浮游植物密度最高,其次是八门湾和潮间带,范围为 $46.15 \times 10^4 \sim 21699.26 \times 10^4 \text{ L}^{-1}$,均值为 $7847.59 \times 10^4 \text{ L}^{-1}$ 。除2016年3月份外,Shannon-Wiener指数、Margalef丰富度与均匀度指数均值从大到小顺序一致为:潮间带,八门湾,养殖水。

c. 与水质关系方面,2015年11月时氮为藻类生长限制因素,而2016年3月和8月时大部水体限制因素为磷。藻类主要与氮磷营养盐及金属离子密切相关,季节变化对其影响不明显。

参考文献:

- [1] 林鹏. 中国红树林湿地与生态工程的几个问题 [J]. 中国工程科学, 2003, 5(6): 33-38. (LIN Peng. Chinese mangrove wetland and ecological engineering [J]. Chinese Journal of Engineering Science, 2003, 5(6): 33-38. (in Chinese))
- [2] 郑德璋,李玫,郑松发,等. 中国红树林恢复和发展研究进展 [J]. 广东林业科技, 2003, 19(1): 10-14. (ZHENG Dezhang, LI Mei, ZHENG Songfa, et al. Study on the restoration and development of mangrove forests in China [J]. Guangdong Forestry Science and Technology, 2003, 19(1): 10-14. (in Chinese))
- [3] 张梦琴,邱可天. 广东省沿海红树林的保护及生态效益 [J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 1992, 16(3): 107-107. (ZHANG Mengqin, QIU Ketian. The protection and ecological effect of coast mangrove in Guangdong Province [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 1992, 16(3): 107-107. (in Chinese))
- [4] 黄勃,张本,陆健健,等. 东寨港红树林区大型底栖动物生态与滩涂养殖容量的研究 I. 潮间带表层底栖动物数量的初步研究 [J]. 海洋科学, 2002, 26(3): 65-68. (HUANG Bo, ZHANG Ben, LU Jianjian, et al. Study on the biomass and trough culture capacity of macrobenthic fauna in hongshu forest area of Dongzhai Harbor I. preliminary study on the amount of surface benthic animals in intertidal zone [J]. Marine Science, 2002, 26(3): 65-

68. (in Chinese))
- [5] 曾群英,李际平,黄剑坚,等. 红树林林分空间结构健康指数的测度与应用[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2014, 38(4): 177-180. (ZENG Qunying, LI Jiping, HUANG Jianjian, et al. Health index of spatial structure of mangrove forest stand [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2014, 38(4): 177-180. (in Chinese))
- [6] 吴初平,叶激华,黄玉洁,等. 浙江舟山岛不同林分类型的水质效应[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2015, 39(4): 75-80. (WU Chuping, YE Jihua, HUANG Yujie, et al. Effects of different forest types on water quality in Zhoushan Island, Zhejiang Province [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2015, 39(4): 75-80. (in Chinese))
- [7] 黄立南,蓝崇钰,束文圣. 污水排放对红树林湿地生态系统的影响 [J]. 生态学杂志, 2000, 19(2): 13-19. (HUANG Linan, LAN Chongyu, SHU Wensheng. Effects of sewage discharge on mangrove wetland ecosystem [J]. Acta Ecologica Sinica, 2000, 19(2): 13-19. (in Chinese))
- [8] 章金鸿,李玫,陈桂珠. 港湾污水排放对红树林湿地的影响 [J]. 上海环境科学, 2004(4): 147-151. (ZHANG Jinhong, LI Mei, CHEN Guizhu. Effects of harbor sewage discharge on mangrove wetland [J]. Shanghai Environmental Science, 2004, (4): 147-151. (in Chinese))
- [9] 刘亚云,孙红斌,陈桂珠. 特呈岛红树林自然保护区水环境质量评价 [J]. 海洋湖沼通报, 2012(3): 115-122. (LIU Yayun, SUN Hongbin, CHEN Guizhu. Evaluation of water environmental quality in Megao Mangrove Nature Reserve [J]. Acta Climatology, 2012(3): 115-122. (in Chinese))
- [10] 邱明红. 红树林水产养殖与生态恢复对其环境的影响研究 [D]. 海口:海南师范大学, 2014.
- [11] 王雨,卢昌义,谭凤仪,等. 深圳红树林水体浮游植物多样性与营养状态评价 [J]. 海洋环境科学, 2010, 29(1): 17-21. (WANG Yu, LU Changyi, TAN Fengyi, et al. Evaluation of phytoplankton diversity and nutritional status of mangrove in Shenzhen [J]. Marine Environment Science, 2010, 29(1): 17-21 (in Chinese))
- [12] 李鹏山,谢跟踪,李巧香,等. 东寨港红树林国家级自然保护区海水水质状况分析与评价 [J]. 海洋湖沼通报, 2010(4): 53-60. (LI Pengshan, XIE Genzong, LI Qiaoxiang, et al. Analysis and evaluation of seawater quality of Hongshulin Forest National Nature Reserve in Dongzhai Harbor [J]. Acta Horizon, 2010(4): 53-60. (in Chinese))
- [13] 韩新,曾传智. 清澜港(八门湾)自然保护区红树林调查 [J]. 热带林业, 2009, 37(2): 50-51. (HAN Xin, ZENG Chuazhi. Investigation on mangrove forest in Qinglan Harbor (Baimeng Bay) Nature Reserve [J]. Tropical Forestry, 2009, 37(2): 50-51. (in Chinese))
- [14] 郭菊兰,秦英英,朱耀军,等. 清澜港红树植物分布与土壤环境因子的相关关系 [J]. 林业科学研究, 2014, 27(2): 149-157. (GUO Julan, Qin Yingying, ZHU Yaojun, et al. Relationship between mangrove plant distribution and soil environmental factors in Qinglan Port [J]. Forestry Science Research, 2014, 27(2): 149-157. (in Chinese))
- [15] 陈亚瞿,徐兆礼,王云龙,等. 长江口河口锋区浮游动物生态研究 I: 生物量及优势种的平面分布 [J]. 中国水产科学, 1995(1): 49-58. (CHEN Yaqu, XU Zhaoli, WANG Yunlong, et al. Zooplankton ecology in the estuary of the Yangtze River estuary I: plane distribution of biomass and dominant species [J]. Chinese Journal of Aquaculture, 1995(1): 49-58. (in Chinese))
- [16] 盛萧,毛建忠,曹然,等. 基于 5 种大型底栖动物评价指标的河流生态健康评价 [J]. 水资源保护, 2017, 33(1): 75-82. (SHENG Xiao, MAO Jianzhong, CAO Ran, et al. River health assessment based on five biological indices for macroinvertebrates [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(1): 75-82. (in Chinese))
- [17] 曹然,黎征武,毛建忠,等. 北江大型底栖无脊椎动物群落结构及水质的生物评价 [J]. 水资源保护, 2017, 33(4): 80-87. (CAO Ran, LI Zhengwu, MAO Jianzhong, et al. Benthic macroinvertebrate community structure and bioassessment of water quality of Beijiang River [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(4): 80-87. (in Chinese))
- [18] 舒卫先,张云舒,韦翠珍. 洪泽湖浮游藻类变化动态及影响因素 [J]. 水资源保护, 2016, 32(5): 115-122. (SHU Weixian, ZHANG Yunshu, WEI Cuizhen. Seasonal dynamics of and factors in phytoplankton in Hongze Lake [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(5): 115-122. (in Chinese))
- [19] 张妮,陈晓江,杜桂森,等. 北京怀柔水库的浮游藻类与水体营养状态 [J]. 水资源保护, 2012, 28(3): 55-58. (ZHANG Ni, CHEN Xiaojiang, DU Guisen, et al. Planktonic algae and trohic state in Huairou Reservoir in Beijing City [J]. Water Resources Protection, 2012, 28(3): 55-58. (in Chinese))
- [20] 吴小伟,刘平. 扬州境内湖泊浮游植物群落结构与环境因子的关系 [J]. 水资源保护, 2015, 31(5): 47-52. (WU Xiaowei, LIU Ping. Phytoplankton community structure and its relationship with environmental factors in lakes in Yangzhou [J]. Water Resources Protection, 2015, 31(5):

47-52. (in Chinese))

[21] 沈会涛,刘存歧. 白洋淀浮游植物群落及其与环境因子的典范对应分析 [J]. 湖泊科学,2008,20(6):773-779. (SHEN Huitao,LIU Cunqi. Potential correspondence analysis of phytoplankton communities and environmental factors in Baiyangdian Lake [J]. Lake Science,2008,20(6):773-779. (in Chinese))

[22] 谢永红,李春永,杨中兰. 阳宗海浮游生物群落结构研究 [J]. 水资源保护,2015,31(4):47-51. (XIE Yonghong,LI Chunyong,YANG Zhonglan. Research on plankton community structure of Yangzonghai Lake [J]. Water Resources Protection,2015,31(4):47-51. (in Chinese))

[23] 陈晓江,杨劼,杜桂森,等. 海子水库浮游植物功能群季节演替及其驱动因子 [J]. 水资源保护,2015,31(6):122-127. (CHEN Xiaojiang,YANG jie,DU Guishen, et al. Seasonal succession of phytoplankton functional groups and its driving factors in Haizi Reservoir [J]. Water Resources Protection,2015,31(6):122-127. (in Chinese))

[24] 陈长平,高亚辉,林鹏. 深圳福田红树林保护区浮游植物群落的变化及其生态学研究 [J]. 厦门大学学报(自然科学版),2005,44(增刊1):11-15. (CHEN Changping,GAO Yahui,LIN Peng. Seasonal variation of phytoplankton community and its ecology in Futian mangrove forest, Shenzhen [J]. Journal of Xiamen University (Natural Science Edition),2005,44(S1):11-15. (in Chinese))

[25] 陈长平. 闽粤沿海几个红树林区硅藻的生态分布和6种重金属对底栖硅藻胞外产物的影响 [D]. 厦门:厦门大学,2004.

[26] 盛海燕,虞左明,韩轶才,等. 亚热带大型河流型水库:富春江水库浮游植物群落及其与环境因子的关系 [J]. 湖泊科学,2010,22(2):235-243. (SHENG Haiyan,YU Zuoming,HAN Yicai, et al. Phytoplankton community in Fuchunjiang reservoir and its relationship with environmental factors in subtropical large-scale river reservoir Lake Science [J]. Lake Science,2010,22(2):235-243. (in Chinese))

[27] 蒋玉玲,李青,陈晓宏,等. 广州市大金钟水库浮游植物与环境因子的关系 [J]. 水资源保护,2011,27(1):46-50. (JIANG Yuling,LI Qing,CHEN Xiaohong, et al. Relationship between phytoplankton and environmental factors in Dajinzhong reservoir of Guangzhou [J]. Water Resources Protection,2011,27(1):46-50. (in Chinese))

[28] VOLLENWEIDER R A. Elemental and biochemical composition of plankton biomass; some comments and explorations [J]. Archiv Fur Hydrobiologie,1985,105(1):11-29.

(收稿日期:2017-04-30 编辑:彭桃英)

+++++

(上接第101页)

[25] 路剑飞,甘华阳,张顺枝,等. 琼东北滨海浅层地下水水质变化特征分析 [J]. 中山大学学报自然科学版,2016,55(1):137-148. (LU Janfei,GAN Huayang,ZHANG Shunzhi, et al. Analysis of water quality fluctuations in coastal shallow groundwater at NE Hainan [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni,2016,55(1):137-148. (in Chinese))

[26] 余海忠,冯书才,曾奇. 采用物探方法研究深圳西部海水入侵现状 [J]. 山西建筑,2015(14):56-58. (YU Haizhong,FENG Shucai,ZENG Qi. Analysis in coastal soft soil foundation treatment method [J]. Shanxi Architecture,2015(14):56-58. (in Chinese))

[27] 王凤和,孙洪梅. 电导仪法在海水入侵监测分析中的应用 [J]. 吉林水利,2007(12):30-31. (WANG Fenghe,SUN Hongmei. Application of conductance instrument in the sea water inbreak monitoring analysis [J]. Jilin Water Resources,2007(12):30-31. (in Chinese))

[28] 苏乔,彭昌盛,徐兴永,等. 基于高密度电法的潮汐作用对潍坊滨海地下水影响分析 [J]. 海洋环境科学,2015,34(2):286-289. (SU Qiao,PENG Changsheng,XU Xingyong, et al. The application of high density resistivity method to analysis the impact of tide on water table fluctuation in coastal aquifer [J]. Marine Environmental Science,2015,34(2):286-289. (in Chinese))

[29] 张长宽,陈欣迪. 海岸滩涂资源的开发利用与保护研究进展 [J]. 河海大学学报(自然科学版),2016,44(1):25-33. (ZHANG Changkuan,CHEN xindi. Advances in development, utilization, and protection of coastal tidal flats [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2016,44(1):25-33. (in Chinese))

[30] 冯锐,李智明,李志武,等. 电阻率层析成像技术 [J]. 中国地震,2004,20(1):13-30. (FENG Rui,LI Zhiming,LI Zhiwu, et al. Resistivity Tomography [J]. Earthquake Research in China,2004,20(1):13-30. (in Chinese))

[31] BARKER R. Signal contribution sections and their use in resistivity studies [J]. Geophysical Journal International,1979,59(1):123-129.

(收稿日期:2017-11-09 编辑:徐娟)