

九龙江口浮游生物群落呼吸速率及其影响因素

谢建明, 高春柏, 欧光南, 何碧烟

(集美大学食品与生物工程学院, 福建 厦门 361021)

[摘要] 采用甲板培养的方法, 于2015年秋季和2016年夏季分别对九龙江口表层水体的浮游生物群落呼吸速率进行了研究, 同时测定与浮游生物群落呼吸作用相关的环境参数, 分析环境因素对呼吸速率的影响。结果表明, 秋季浮游生物群落呼吸速率变化范围为 $4.3 \sim 43.1 \mu\text{mol} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$, 沙口上游群落呼吸速率显著高于河口下游, 而夏季群落呼吸速率的变化范围为 $14.5 \sim 23.4 \mu\text{mol} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$, 最大值却出现在河口下游的藻华区。统计分析表明, 在生物量较低的秋季, 浮游生物群落呼吸速率与溶解有机碳(dissolved organic carbon, DOC)、叶绿素a(chlorophyll a, Chl-a)均呈显著的正相关, 与溶解氧(dissolved oxygen, DO)呈显著负相关; 而在生物量较高的夏季群落, 呼吸速率与Chl-a、DOC呈弱正相关性, 与DO几乎没有相关性。说明, 在生产力低季节, 群落呼吸作用不但对DOC的依赖更高, 而且自养-异养耦合程度也更大; 秋季DO浓度主要受控于浮游生物群落的呼吸作用, 夏季则主要受控于浮游植物的光合作用。

[关键词] 浮游生物群落; 呼吸速率; 有机物; 氧亏损; 九龙江口

[中图分类号] Q 938.1; P 76

Factors Regulating Pelagic Community Respiration in Jiulong River Estuary

XIE Jianming, GAO Chunbo, OU Guangnan, HE Biyan

(College of Food and Biological Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China)

Abstract: The pelagic community respiration rates of surface waters were measured as *in vitro* changes of dissolved oxygen concentration during deck incubations in November 2015 (autumn) and July 2016 (summer). The environmental parameters related to the community respiration were also determined, and the response of pelagic community respiration rate to environmental factors was analyzed. The results showed that the community respiration rates exhibited significant spatial and seasonal variations in Jiulong River Estuary. In autumn, the respiration rates in the surface water ranged from 4.3 to $43.1 \mu\text{mol} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$, in the upper reaches of the estuary were significantly higher than rates in downstream. On the contrary, in summer, community respiration rates ranged from 14.5 to $23.4 \mu\text{mol} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$, and the maximum respiration rate was observed in the algal bloom area in the lower estuary. Statistical analysis showed that the pelagic community respiration rates were significantly and positively correlated with both DOC and Chl-a concentration in autumn with low phytoplankton biomass, while in summer with high biomass, the community respiration rates were positively but not significantly correlated with Chl-a and weak positively correlated with DOC concentration. These results suggested that the pelagic community respiration was dependent more on allochthonous DOC supplied, and that the autotrophic-heterotrophic coupling degree was greater in low productive season than in high productive season.

[收稿日期] 2019-03-03

[基金项目] 国家自然科学基金项目(41576085); 福建省自然科学基金项目(2017J01635, 2019J01699)

[作者简介] 谢建明(1992—), 男, 硕士生, 从事海洋生态研究。通信作者: 何碧烟(1966—), 女, 教授, 博士, 从事河口有机碳生物地球化学研究。E-mail: byhe@jmu.edu.cn

In autumn, DO concentrations in Jiulong River Estuary were mainly controlled by the pelagic community respiration, while in summer, photosynthetic oxygen production had more influence on DO concentrations than community respiration.

Keywords: pelagic community; respiration rate; organic matter; oxygen deficit; Jiulong River Estuary

0 引言

呼吸作用和光合作用是生态系统新陈代谢的两个关键过程。在水生生态系统中，浮游生物通过光合作用将无机碳转变为有机碳，同时产生氧气，它是支持水生生态系统的主要物质和能量来源。群落呼吸作用是光合作用的逆过程，微生物消耗氧气，将有机碳转化为无机碳。因此，测量初级生产力和呼吸作用对于评估河口的自养或异养状态，以及量化河口生态系统碳收支至关重要^[1-2]。尽管呼吸作用对于水生生态系统的功能至关重要，然而，当今生态学的大多数研究关注的是生产过程，而不是分解代谢过程^[3-4]，全球只有 22 条河口有直接测量水体浮游生物群落呼吸（pelagic community respiration）速率的数据^[5]，而且这些河口绝大部分位于温带气候区。由于缺乏群落呼吸作用的研究资料与数据，世界许多河口、近岸海域究竟是呈现自养还是异养状态的争议不断^[6-8]。

九龙江口位于中国东南部、台湾海峡西侧，是一个典型的亚热带河口系统。九龙江是福建省第二大河流，流域总面积 $1.47 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，多年平均径流量为 $1.44 \times 10^{10} \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ 。受季风气候影响，九龙江的径流量具有显著的季节变化，丰水期（4—9 月）的径流量约占年径流量的 74%^[9]。目前，关于九龙江口生态学的研究大多集中在九龙江口土壤湿地群落呼吸速率、底栖生物群落呼吸速率、群落结构分布特征与演替等^[10-14]，而对于九龙江口水体浮游生物群落呼吸速率及其影响因子的生态学研究还非常少。

本文以九龙江口为研究区域，通过测量 2015 年秋季和 2016 年夏季水体的群落呼吸速率及其相关的水环境参数，旨在阐明九龙江口水体群落呼吸作用的空间分布和季节变化规律，探讨有机物供给、浮游植物生物量、溶解氧等环境因素对群落呼吸作用的影响，为进一步研究河口碳的收支以及区域环境管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品的采集

于 2015 年 11 月（秋季）和 2016 年 7 月（夏季）搭载厦门大学科考船“海洋 2 号”，在九龙江口水域进行了两个航次的现场观测，2 个航次均设置了 14 个采水站，采集表层（距水面 0.5 m）水样，用于测定水环境参数。同时根据盐度梯度设置了 6~7 个代表性站位（见图 1）测定水体的浮游生物群落呼吸速率。

九龙江的径流量季节性差异显著，根据九龙江浦南（北溪）和郑店（西溪）水文站公布的水文信息（<http://218.1.102.99:8100/indexwater.html>），2015 年秋季调查期间北溪的周平均径流量为 $92.0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ，西溪的为 $50.7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ，2016 年夏季调查期间北溪的周平均径流量为 $330.5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ，西溪为 $120.6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。2015 年秋季具有典型的枯水期特征，2016 年夏季具有丰水期特征。

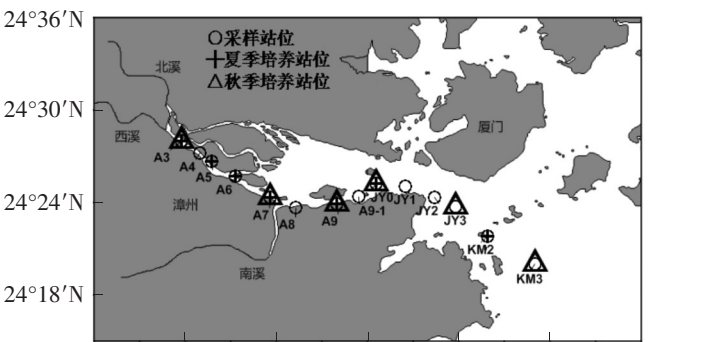


图 1 九龙江口采样站位图

Fig.1 Location of sampling stations in Jiulong River Estuary

1.2 环境参数的测定

水样用 5 L Niskin 采水器采集,然后分别采集 DO、DOC、Chl-a、盐度等环境参数的样品,样品的采集与测定方法参见文献^[15]:DOC 样品用孔径 0.7 μm 的 GF/F 滤膜(在 450 $^{\circ}\text{C}$ 预灼烧 5 h 后使用)过滤,滤液用 40 mL 的棕色硼玻璃瓶收集,于 -20 $^{\circ}\text{C}$ 冷冻保存。测定时将样品解冻到室温后加入 40 μL 磷酸酸化,然后用岛津 TOC-VCPH 总有机碳分析仪采用高温催化氧化的方法测定 DOC 浓度。DO 样品用 60 mL BOD 瓶采集水样,立即加入氯化锰和碱性 NaI 试剂固定,充分摇匀后,放置阴凉处静置至少 2 h,采用 Winkler 滴定法测定瓶中的溶解氧的浓度。Chl-a 样品用 GF/F 滤膜过滤,将滤膜置于事先准备的铝箔纸内,置于 -20 $^{\circ}\text{C}$ 冷冻保存,带回实验室之后取出滤膜,用体积分数 90% 的丙酮溶液在 -20 $^{\circ}\text{C}$ 条件下避光萃取 20 h,萃取液利用 CARY 50 Eclipse 荧光分光光度计(美国 VARIAN)测定叶绿素的浓度^[15]。水体的温度采用 SBE-9 自容式 CTD 探头原位测定,盐度样品采集后用便携式多参数水质分析仪(WTW Multi 340i/SET)测定。

1.3 群落呼吸速率的测定

群落呼吸速率采用甲板培养的方法测定^[15],用大约 60 mL 的 BOD 瓶采集表水样,每个站位采集 4 瓶,其中 2 瓶用 winkler 试剂固定,作为 DO 的初始值,剩下 2 瓶用铝箔纸包裹避光,然后放在甲板的培养箱中,利用现场的流动水控制温度,培养 24 h,然后用同样的方法固定,测定培养前后的溶解氧,依据培养前后溶解氧的差值以及培养时间得出群落呼吸速率。

1.4 数据处理

数据使用 Spss 19.0 进行统计分析,采用 Origin 8 作图。

2 结果与讨论

2.1 水文参数的季节变化

九龙江口 2015 年秋季表层水体的盐度变化范围为 0.4 ~ 29.9,平均值为 18.6 ± 10.3 ;2017 年夏季盐度变化范围为 0 ~ 32.5,平均值为 18.8 ± 12.8 。受径流量季节性变化的影响,秋季河口的淡水端位于 A3 站上游,夏季河口淡水端下移到 A7 站(见图 2a)。

2.2 DOC、Chl-a、DO 的空间分布和季节变化

秋季 DOC 的空间分布整体上表现为淡水端高、海水端低的分布特征。表层水体 DOC 的浓度变化范围为 82 ~ 178 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$,平均值 $(116 \pm 29) \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$,最高值出现在河口上游的 A3 站,最低值在海水端的 KM3 站(见图 2b)。夏季 DOC 浓度的空间分布也呈现上游比较高、下游比较低的分布特征,表层 DOC 的浓度范围为 86 ~ 130 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$,平均 $(107 \pm 12) \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。河口上游 DOC 浓度季节差异明显,秋季河口上游 DOC 浓度显著高于夏季,而在河口下游 DOC 浓度季节差异则不明显,这与珠江口^[16]和长江口^[17]DOC 的分布类似。

秋季 Chl-a 浓度的空间分布与 DOC 浓度的空间分布相似,也表现为上游高下游低的特征,从河口上游到下游,Chl-a 浓度逐渐降低。秋季表层 Chl-a 质量浓度范围为 1.1 ~ 4.8 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,平均值为 $(2.4 \pm 1.2) \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。夏季表层 Chl-a 浓度明显高于秋季,其质量浓度范围在 3.9 ~ 15.0 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,平均值为 $(7.8 \pm 3.4) \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,约为秋季的 3.2 倍。此外,夏季 Chl-a 浓度的分布特征也与秋季明显不同,其最大值位于河口下游的 JY1 站(见图 2c),与 Chl-a 浓度最大值对应的是 DO 浓度的峰值(见图 2d),预示夏季在河口下游出现藻华现象。

与 DOC 的空间分布相反,秋季表层水体 DO 浓度的空间分布表现为上游低、往下游方向逐渐升高的分布特征。DO 的浓度范围为 81.3 ~ 202.7 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$,平均值为 $(167.0 \pm 37.6) \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$,整个九龙江口水体的 DO 均低于水-气平衡时的 DO 饱和浓度 220 ~ 260 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$,全面处于氧亏损状态,其中河口上游氧亏损尤为明显,如在河口上游的 A3 站表层,DO 的饱和度仅有 31%。夏季 DO 浓度明显高于秋季,表层 DO 浓度变化范围为 164.6 ~ 269.1 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$,平均值为 $(211.5 \pm 35.3) \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。夏季水

体 DO 的空间分布特征也明显不同于秋季，表现为：河口上游 DO 浓度的变化幅度较小，其浓度略低于水 - 气平衡时的 DO 饱和浓度 $200 \sim 240 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ，而在河口下游表层 DO 浓度明显升高（见图 2d），出现 DO 过饱和状态，JY1 站表层 DO 的饱和度高达 129%。与此同时，在河口下游也出现叶绿素浓度的升高，进一步说明夏季在河口下游出现明显的藻华现象。

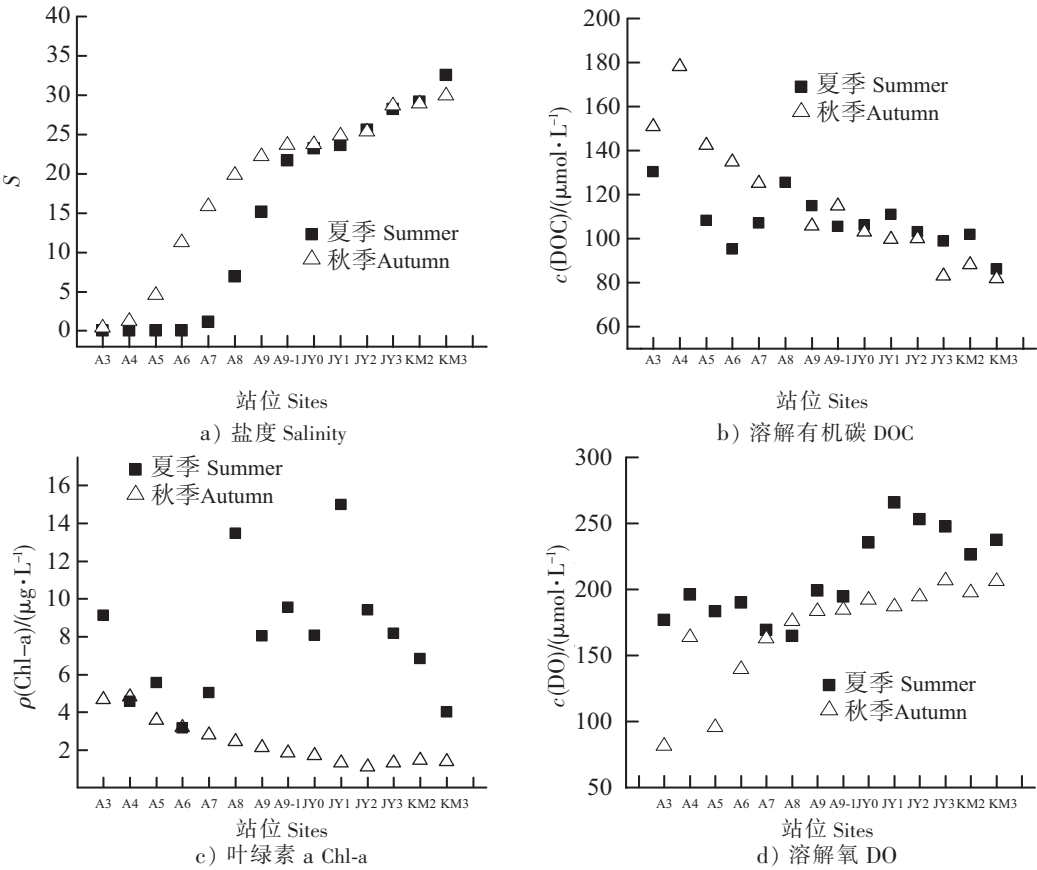


图 2 九龙江口表层水体的盐度、DOC、Chl-a、DO 的分布

Fig.2 The distribution of salinity,DOC,Chl-a and DO of the surface water in Jiulong River Estuary

2.3 群落呼吸速率的空间分布和季节变化

秋季九龙江口群落呼吸速率空间差异很显著，表层水体群落呼吸速率 $4.3 \sim 43.1 \mu\text{mol} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ ，平均值为 $(12.8 \pm 13.8) \mu\text{mol} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ ，河口上游群落呼吸速率显著高于下游，在 A3 站，群落呼吸速率高达 $43.1 \mu\text{mol} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ ，而到了河口下游 JY0 站位，则快速降低为 $4.3 \mu\text{mol} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ （见图 3）。夏季九龙江口表层水体群落呼吸速率的变化范围为 $14.5 \sim 23.4 \mu\text{mol} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ ，平均值为 $(19.7 \pm 3.5) \mu\text{mol} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ ，河口上游和下游水体的群落呼吸速率差别不大，而且群落呼吸速率的最大值出现在河口下游的藻华区（见图 3）。

2.4 九龙江口群落呼吸速率与其他河口的比较

不同的河口，其水体的群落呼吸速率差异很大，Hopkinson 等^[5]统计了全球河口水体群落

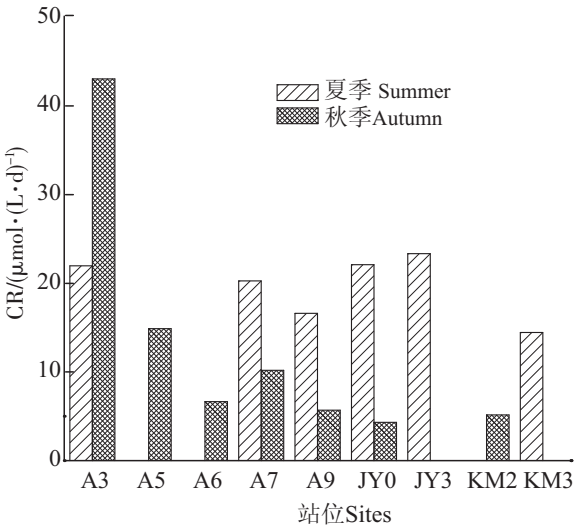


图 3 九龙江口浮游生物群落呼吸速率的时空变化

Fig.3 The temporal and spatial variation of pelagic community respiration rates in Jiulong River Estuary

呼吸速率的观测数据,得出各河口群落呼吸速率的平均值的变化范围为 $1.7 \sim 84 \mu\text{mol} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$,几乎没有特定的变化规律。九龙江口表层水体夏季群落呼吸速率变化范围为 $14.5 \sim 23.4 \mu\text{mol} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$,秋季为 $4.3 \sim 43.1 \mu\text{mol} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$,位于世界河口水体群落呼吸速率的中值区^[5],与切萨皮克湾和密西西比河羽流区水体的群落呼吸速率相当^[18-19],但明显小于受污水输入影响比较严重的珠江口上游^[20]和 Urdaiabai 河口上游^[21]。与世界上许多河口相似,九龙江口水体的群落呼吸速率空间差异非常显著,秋季河口上游 A3 站表层的群落呼吸速率约为河口下游 KM2 站表层的 16 倍。此外,九龙江口水体的群落呼吸速率的季节差异也非常显著,在河口上游的 A3 站,秋季水体的群落呼吸速率约为夏季的 2 倍。相反,到了河口下游的 JY0 站表层,秋季群落呼吸速率反而只有夏季的 1/5。有机物的供给和浮游生物的生物量可能是调控九龙江口水体群落呼吸速率时空变化的关键因素。

2.5 九龙江口浮游生物群落呼吸作用的影响因素

2.5.1 有机物的供给对浮游生物群落呼吸速率的影响

有机物(底物)的供给和温度被认为是影响河口群落呼吸作用最重要的两个因素^[5]。河口有机物的供给包括外源输入(allochthonous)和浮游植物的原位生产(autochthonous),由于浮游植物生产的有机物生物活性较高,异养细菌对其的利用率较高,因此在许多河口都观察到群落呼吸速率与水体 Chl-a 浓度之间成正相关^[5,22-23]。在秋季,九龙江口水体群落呼吸速率与 DOC、Chl-a 浓度均成显著的正相关,相关系数 r^2 分别达到 0.64 和 0.75 (见图 4a,图 4b),说明有机物的供给是决定水体群落呼吸速率的主要因素,这与多数河口的研究结果一致^[5,22,24]。进一步分析九龙江口 DOC 和 Chl-a 浓度随盐度的变化可以发现,秋季 DOC 和 Chl-a 都与盐度呈非常显著的负相关,相关系数 r^2 高达 0.92 和 0.95 (见图 5a,图 5b),说明秋季九龙江口 DOC 和 Chl-a 主要来自河流的输入,河-海水的混合是调控河口 DOC 和 Chl-a 分布的主要因素。秋季由于水体的强烈混合作用,导致沉积物的再悬浮,水体的悬浮颗粒物的浓度非常高(平均质量浓度 $(184 \pm 190) \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$),动荡的水文环境和悬浮颗粒物对光的阻挡作用限制了浮游植物的生长,使得秋季水体 Chl-a 浓度显著低于夏季。由此可以推测,秋季九龙江口的有机物可能主要来自河流输入的贡献,现场生产的贡献是次要的。

然而,在夏季,水体的群落呼吸速率与 DOC、Chl-a 浓度虽然也成正相关,但相关性不显著,相关系数 r^2 只有 0.22 和 0.45 (见图 4d,图 4e),说明 DOC 和 Chl-a 不能完全解释夏季九龙江口水体群落呼吸速率的变异。如上所述,温度是影响河口群落呼吸速率的另一个重要因素,然而,本研究测定群落呼吸速率的甲板培养实验是在同一个培养箱中进行,并利用走航泵水系统来控制培养温度使之与环境温度一致。因此,同一个航次所有站位甲板培养的温度近似相同。由此可见,夏季群落呼吸速率的变异并非因为温度变化引起的。如上所述,夏季由于在河口下游出现藻华现象,使得夏季表层水体的 Chl-a 的浓度显著高于秋季(见图 2c),例如在藻华中心区的 JY1 站,表层 Chl-a 浓度是秋季的 11.4 倍。受藻华的影响,夏季九龙江口 Chl-a 浓度与盐度几乎没有相关性,而且 DOC 与盐度也只有微弱的负相关,相关系数 r^2 只有 0.26 (见图 5d),显著低于秋季。这说明夏季九龙江口有机物的供给除了河流输入的外源有机物外,浮游植物原位生产的内源有机物(包括溶解有机物和颗粒有机物)对群落呼吸作用可能具有重要的贡献,这可能是导致夏季群落呼吸速率与 DOC 相关性显著低于秋季的主要原因。此外,浮游生物群落呼吸作用还可能受浮游植物和浮游细菌丰度或生物量的影响^[23-24]。

2.5.2 浮游植物生物量对浮游生物群落呼吸速率的影响

Chl-a 浓度是衡量浮游植物生物量和水体初级生产力水平的一个基本指标^[25],九龙江口夏季水体的 Chl-a 浓度显著高于秋季,说明夏季水体的浮游植物生物量显著高于秋季。从群落呼吸速率和 Chl-a 的关系可以看出,在生物量较低的秋季,群落呼吸速率与 Chl-a 浓度呈显著正相关(相关系数 $r^2 = 0.75$),而在生物量较高的夏季,群落呼吸速率与 Chl-a 浓度呈不显著的正相关(相关系数 $r^2 = 0.45$),说明在生产水平低季节,浮游生物群落呼吸速率和浮游植物生物量之间相关性强,在生产水平高的季节,浮游生物群落呼吸速率和浮游植物生物量之间相关性弱。类似的结果在切萨皮克

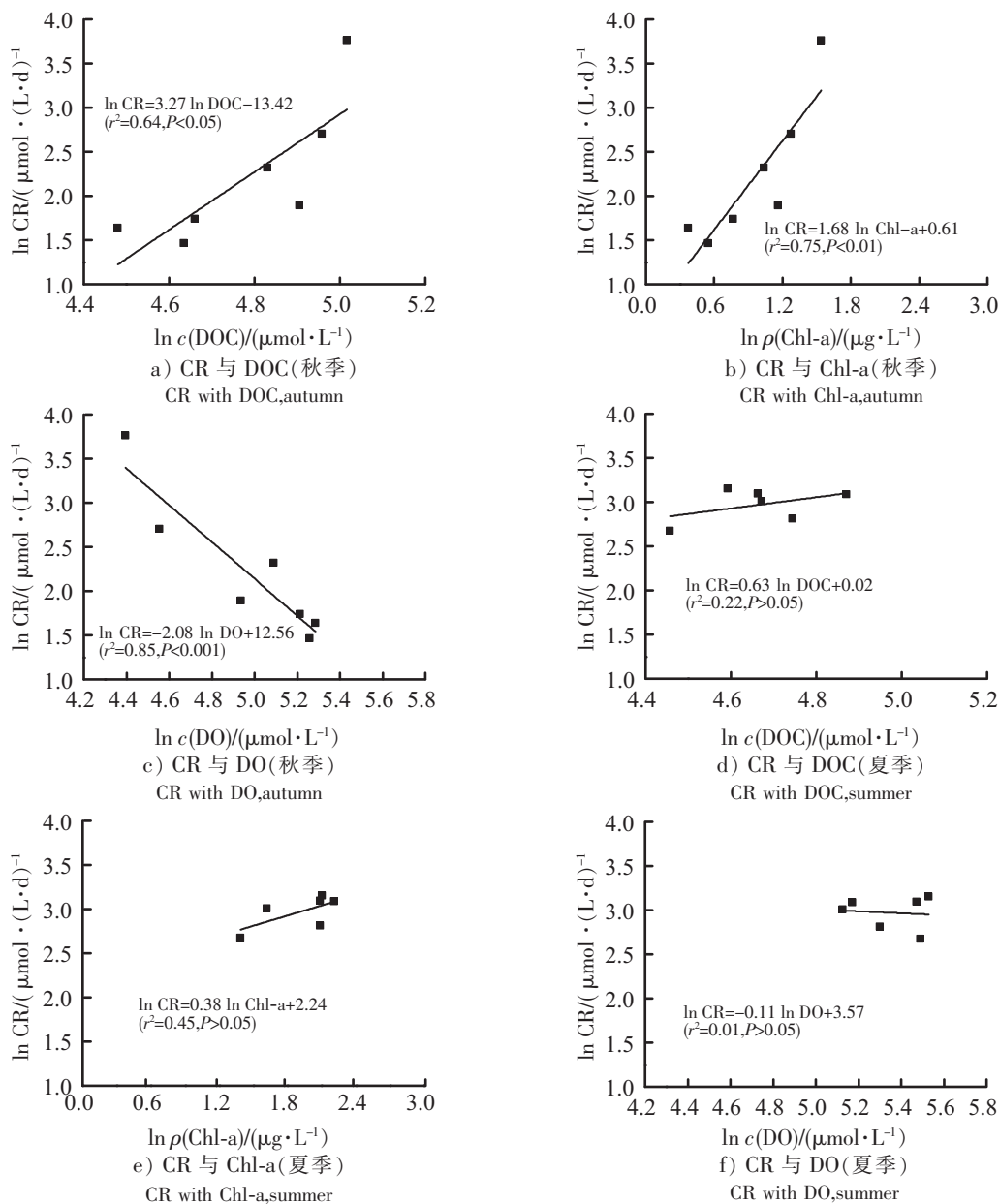


图 4 九龙江口秋季与夏季群落呼吸速率(CR)与 DOC、Chl-a、DO 的相关性

Fig.4 The correlation between community respiration rate (CR)with DOC,Chl-a and DO in autumn and summer in Jiulong River Estuary

湾和 Urdaibai 河口也有发现，例如：Smith 等^[18] 在切萨皮克湾上游的低生产力区、Iriarte 等^[21] 在 Urdaibai 河口靠海端的低生产力区，都观察到浮游生物群落呼吸速率和 Chl-a 的相关性比其他高生产力区的相关性强。这些结果说明，在生产力较低时，群落呼吸对自养生产的依赖程度更大，自养 - 异养耦合程度也更高。

2.5.3 溶解氧对浮游生物群落呼吸速率的影响

通常意义上的群落呼吸作用指的是微生物的有氧呼吸过程，因此，水体的 DO 浓度可能是影响群落呼吸速率的另一个重要因素。在秋季，九龙江口群落呼吸速率与 DO 呈显著的负相关 ($r^2 = 0.85$ ，见图 4c)，而且表层水体 DO 浓度都明显低于 DO 的饱和浓度，处于严重的氧亏损状态（见图 2d），尤其是在河口上游氧亏损现象更加明显，说明水体的群落呼吸作用是造成秋季九龙江口氧亏损的主要原因。与此相反，在夏季，群落呼吸速率与 DO 之间几乎没有相关性（见图 4f）。说明群落呼吸作用

不是控制夏季水体 DO 分布的关键因素。表层水体 DO 的主要来源是水体表面与大气的交换以及表层浮游植物光合作用的生产, 主要去除途径是群落的呼吸作用消耗。夏季由于九龙江径流量大, 水交换速率快, 水的停留时间短, 平均只有 $1 \sim 2 \text{ d}^{[26]}$, 因此群落呼吸作用对水体 DO 浓度的降低比较有限。此外, 夏季浮游植物生物量明显比秋季高, 白天藻类的光合作用释放的氧气补偿了群落呼吸作用对氧气的消耗, 使得夏季水体 DO 浓度明显高于秋季, 特别是在河口下游, 由于出现明显的藻华现象, 藻类的光合作用释放的氧气甚至超过群落呼吸作用的消耗, 使得河口下游表层水体 DO 处于过饱和状态 (见图 4f)。由此可见, 夏季九龙江口 DO 分布受浮游植物光合作用的影响超过受群落呼吸作用的影响。

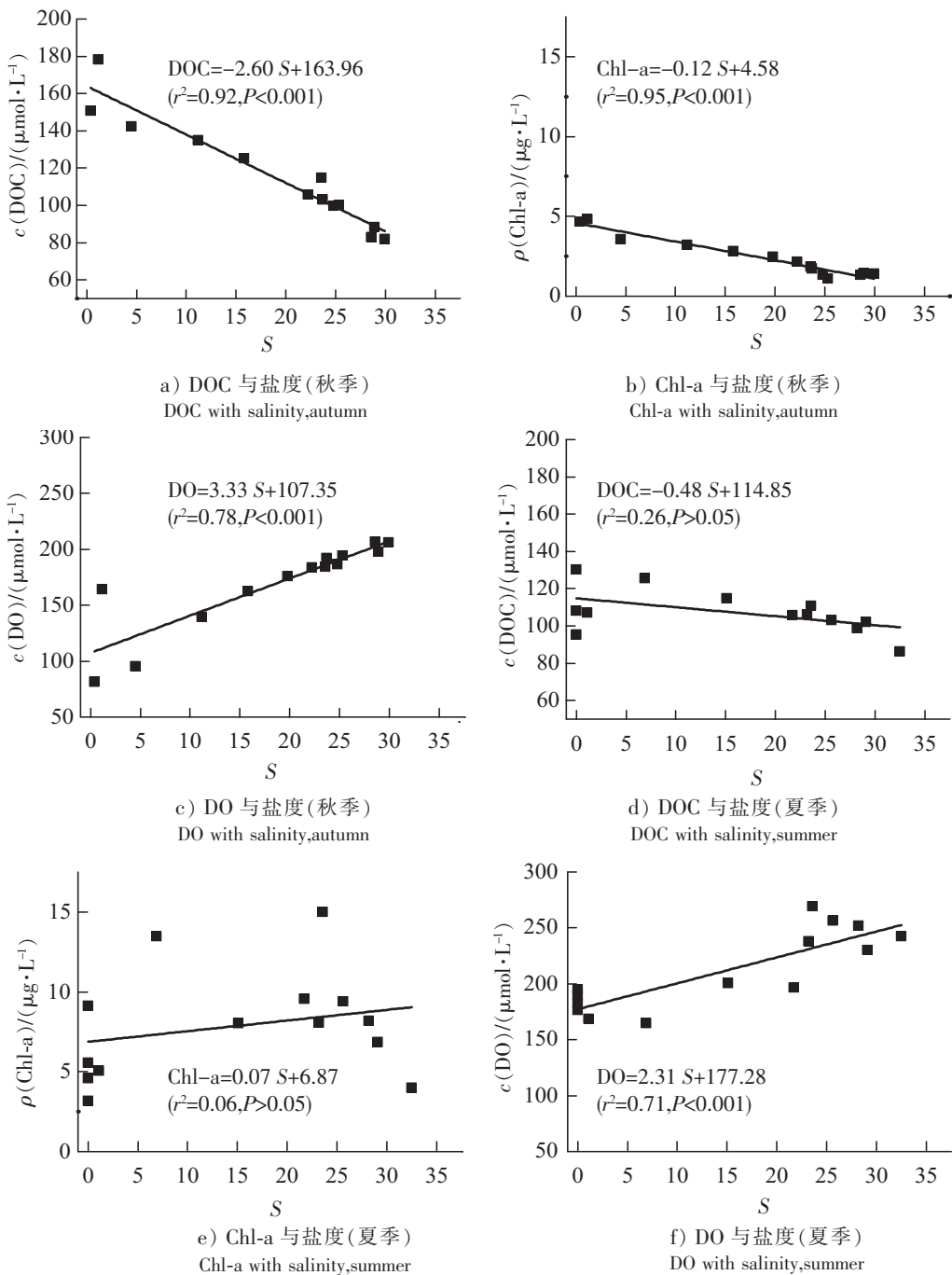


图 5 九龙江口秋季与夏季 DOC、Chl-a、DO 与盐度的相关性

Fig.5 The correlation between DOC, Chl-a, DO and salinity in autumn and summer in Jiulong River Estuary

3 结论

1) 九龙江口群落呼吸速率的空间差异和季节变化显著, 秋季表层水体的群落呼吸速率变化范围为 $4.3 \sim 43.1 \mu\text{mol} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$, 群落呼吸速率最大值位于河口上游。夏季表层水体的群落呼吸速率变化范围为 $14.5 \sim 23.4 \mu\text{mol} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$, 群落呼吸速率最大值位于河口下游。

2) 在浮游植物生物量较低的秋季, 水体群落呼吸速率与 DOC、Chl-a 均呈显著的正相关, 与 DO 呈显著的负相关; 而在浮游植物生物量较高的夏季, 水体群落呼吸速率与 DOC、Chl-a 呈弱的正相关, 与 DO 几乎没有相关性。说明, 在生产力低的季节, 浮游生物群落呼吸作用不但对河口外源 DOC 的依赖更高, 而且自养-异养耦合程度也更大。

3) 在生产力较低的秋季, 水体 DO 浓度主要受控于浮游生物群落的呼吸作用, 群落呼吸作用是导致秋季水体氧亏损的主要原因; 而在生产力较高的夏季, 浮游植物的光合作用对水体 DO 的影响超过群落呼吸作用的影响。

[参 考 文 献]

- [1] CARIGNAN R, PLANAS D, VIS C. Planktonic production and respiration in oligotrophic Shield lakes [J]. *Limnology & Oceanography*, 2000, 45(1): 189-199. DOI:10.4319/lo.2000.45.1.0189.
- [2] JENSEN L M, SAND-JENSEN K, MARCHER S, et al. Plankton community respiration along a nutrient gradient in a shallow Danish estuary [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1990, 61: 75-85. DOI:10.3354/meps061075.
- [3] WILLIAMS P J L B. Respiration in aquatic ecosystems: history and background [M]. New York: Oxford University Press, 2005: 1-2.
- [4] ROBINSON C. Plankton gross production and respiration in the shallow water hydrothermal systems of Milos, Aegean Sea [J]. *Journal of Plankton Research*, 2015, 22(5): 887-906. DOI:10.1093/plankt/22.5.887.
- [5] HOPKINSON C S, SMITH E M. Estuarine respiration: an overview of benthic, pelagic, and whole system respiration [M]. New York: Oxford University Press, 2005: 122-146.
- [6] JIANG L Q, CAI W J, WANG Y C, et al. Pelagic community respiration on the continental shelf off Georgia, USA [J]. *Biogeochemistry*, 2010, 98(1/3): 101-113. DOI:10.1007/s10533-009-9379-8.
- [7] BIDDANDA B, OPSAHL S, BENNER R. Plankton respiration and carbon flux through bacterioplankton on the Louisiana shelf [J]. *Limnology and Oceanography*, 1994, 39(6): 1259-1275. DOI:10.4319/lo.1994.39.6.1259.
- [8] POMEROY L R, SHELDON J E, JR W M S, et al. Seasonal changes in microbial processes in estuarine and continental shelf waters of the south-eastern USA [J]. *Estuarine Coastal & Shelf Science*, 2000, 51(4): 415-428. DOI:10.1006/ecss.2000.0690.
- [9] 黄秀琴. 九龙江流域水文特性 [J]. *水利科技*, 2008(1): 16-17.
- [10] CAI L L, ZHANG R, HE Y, et al. Metagenomic analysis of viroplankton of the subtropical Jiulong River Estuary, China [J]. *Viruses*, 2016, 8(2): 35. DOI:10.3390/v8020035.
- [11] CHEN C C, RAO L, HUANG J L, et al. Seasonal variation on nutrient limitation for phytoplankton growth in a coastal river-reservoir system, southeast China [J]. 2015, 36(9): 3238. DOI:10.13227/j.hjlx.2015.09.015.
- [12] JIN L, LU C Y, YE Y, et al. Soil respiration in a subtropical mangrove wetland in the Jiulong River Estuary, China [J]. *Pedosphere*, 2013, 23(5): 678-685. DOI:10.1016/S1002-0160(13)60060-0.
- [13] LIN G, XIANG P, YANG Q, et al. Phytoplankton community succession and its relation to abiotic parameters during blooming period in Xiamen sea, China [J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2013, 19(1): 126-133. DOI:10.3724/sp.j.1145.2013.00126.
- [14] CHEN J X, HUANG B Q, JIA X W, et al. Community structure of marine ultraphytoplankton in Xiamen waters using photosynthetic pigments [J]. *Marine Environmental Science*, 2003, 22(3): 16-21. DOI:10.1007/s11769-003-0089-1.
- [15] HE B Y, DAI M H, ZHAI W D, et al. Distribution, degradation and dynamics of dissolved organic carbon and its major compound classes in the Pearl River estuary, China [J]. *Marine Chemistry*, 2010, 119(1/4): 52-64. DOI:10.1016/j.marchem.2009.12.006.

- [16] 郭威, 叶丰, 连忠廉, 等. 珠江口水体有机碳的季节性变化 [J]. 热带海洋学报, 2016, 35(4): 40-50. DOI: 10.11978/2015109.
- [17] 张珊珊, 线薇薇, 梁翠. 2015 年秋季长江口有机碳的分布特征及其影响因素 [J]. 海洋环境科学, 2018, 37(1): 55-61.
- [18] SMITH E M, KEMP W M. Seasonal and regional variations in plankton community production and respiration for Chesapeake Bay [J]. Marine Ecology Progress Series, 1995, 116(1/3): 217-231. DOI:10.3354/meps116217.
- [19] PAKULSKI J D, BENNER P, AMON R, et al. Community metabolism and nutrient cycling in the Mississippi River plume: evidence for intense nitrification at intermediate salinities [J]. Marine Ecology Progress Series, 1995, 117(1/3): 207-218. DOI:10.3354/meps117207.
- [20] HE B Y, DAI M H, ZHAI W D, et al. Hypoxia in the upper reaches of the Pearl River Estuary and its maintenance mechanisms: a synthesis based on multiple year observations during 2000—2008 [J]. Marine Chemistry, 2014, 167: 13-24. DOI:10.1016/j.marchem.2014.07.003.
- [21] IRIARTE A, DE MADARIAGA I, DIEZ-GARAGARZA F, et al. Primary plankton production, respiration and nitrification in a shallow temperate estuary during summer [J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 1997, 208(1/2): 127-151. DOI:10.1016/S0022-0981(96)02672-X.
- [22] MARTÍNEZ-GARCÍA S, ARBONES B, GARCÍA-MARTÍN E E, et al. Impact of atmospheric deposition on the metabolism of coastal microbial communities [J]. Estuarine Coastal & Shelf Science, 2015, 153: 18-28. DOI:10.1016/j.ecss.2014.11.025.
- [23] CHEN C C, SHIAH F K, GONG G C, et al. Planktonic community respiration in the East China Sea: importance of microbial consumption of organic carbon [J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2003, 50(6/7): 1311-1325. DOI:10.1016/S0967-0645(03)00025-0.
- [24] CHEN C C, CHIANG K P, GONG G C, et al. Importance of planktonic community respiration on the carbon balance of the East China Sea in summer [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2006, 20(4): 24-29. DOI: 10.1029/2005GB002647.
- [25] 沈春燕, 施平, 赵辉. 烟台四十里湾叶绿素 a 浓度的时空分布特征及其影响机制 [J]. 海洋科学, 2014, 38(9): 33-38. DOI:10.11759/hyxx20130925002.
- [26] WANG G Z, WANG Z Y, ZHAI W D, et al. Net subterranean estuarine export fluxes of dissolved inorganic C, N, P, Si, and total alkalinity into the Jiulong River estuary, China [J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 2015, 149: 103-114. DOI:10.1016/j.gca.2014.11.001.

(责任编辑 马建华 英文审校 刘静雯)