

黄海水体生物发光所致离水辐亮度变化及其与固有光学性质和深度的联系

张雨潇¹, 王希³, 陈树果^{1, 2, 3*}, 刘召伟³, 胡连波^{1, 2}

1. 中国海洋大学海洋技术学院/三亚海洋研究院, 山东 青岛 266100/海南 三亚 572024
2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室, 山东 青岛 266237
3. 国家卫星海洋应用中心, 北京 100081

摘要 利用黄海不同季节实测生物发光数据, 结合同步测量的固有光学性质数据, 基于辐射传输模拟, 分析了生物发光所致离水辐亮度(L_{w-bio})的数值变化和光谱变化, 并讨论其与固有光学性质及生物发光所处深度的联系。主要结论如下: (1) 黄海水体 L_{w-bio} 幅值不仅具有显著的季节变化特征, 同时具有显著的空间变化特征, 影响其变化的主要因素除水体本身发光生物的丰度和发光能力外, 与水体自身固有光学性质和发光生物所处深度有关。(2) 在光谱变化方面, L_{w-bio} 最大峰值波长漂移不仅随着生物发光所处深度加深而增大, 同时与固有光学性质有关, 在固有光学性质其值较大的水体, 当生物发光的光源深度位于表层以下, L_{w-bio} 峰值波长可由蓝光波段(474 nm)变为绿光波段(最大可移动至 578 nm); 在固有光学性质其值较小的清澈水体中, 辐亮度光谱变化较弱, 其 L_{w-bio} 峰值波长仍在蓝光波段范围内(最大可移动至 500 nm)。(3) 黄海海域宽泛的固有光学性质对生物发光光源的几何深度反演影响较大, 但可通过 L_{w-bio} 的光谱信息, 反演光源的几何深度。

关键词 黄海水体; 辐射传输; 固有光学性质; 生物发光所致离水辐亮度

中图分类号: P733.3 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)06-1899-08

引言

机械刺激下的生物发光作为全球海洋水体普遍存在的自然现象, 其定量化研究(光谱特征和发光动力学特征)无论对于海洋生态还是水下目标探测均具有重要的意义^[1-4]。Gordon^[5]于1984年通过一些假设对生物发光的星载传感器探测的可行性以及依赖性进行了理论上的分析。Yi等^[6]对生物发光的可探测性进行深入的研究, 然而这些研究都是理论上的探讨。2005年, Miller等^[7]利用美国防卫气象卫星DMSP-OLS(夜间卫星)成功探测到位于印度洋的著名“牛奶海”的细菌发光现象, 该项研究意义重大, 虽然造成该发光的生物有机体是细菌而不是浮游生物, 但其研究结果证明了海洋生物发光的实际星载传感器的可探测性, 并进一步分析了星载可探测的生物发光强度的阈值范围。Moline^[8]等与Oliver^[9]等围绕机械刺激所致的生物发光的强度分布及其辐射传输特性展开研究, 其研究结果表明, 生物发光的辐射传输特性的决定因素分别是发光浮游生物分布及水体的固有光学性质。

黄海海域具有发光能力的生物有机体分布广泛, 数量丰富, 其中部分发光生物有较高的浓度, 为所在地区的优势物种, 并且生物发光现象在黄海水体普遍存在。我国黄海受长江及黄河输入的影响, 其水体性质在时间和空间上都有着剧烈的变化, 即黄海水体的固有光学性质在时间与空间分布上差异较大^[10], 从而影响了生物发光的辐射传输特性。

基于机械刺激下浮游生物发光的重要意义, Moline等围绕美国新泽西州近岸水体展开了生物发光辐射传输特性的研究^[8], 本研究主要围绕固有光学性质差异较大的黄海, 针对机械刺激下浮游生物发光的辐射传输特性展开研究。通过在黄海广泛测量的浮游生物发光强度及固有光学性质数据, 模拟水下生物发光辐射传输过程, 分析黄海水体浮游生物发光的辐射分布特征与季节变化趋势, 并讨论黄海水体固有光学性质及光源深度对浮游生物发光光谱变化的影响。

1 实验部分

1.1 数据

收稿日期: 2021-04-29, 修订日期: 2022-05-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(61705211), 海南省重点研发计划项目(ZDYF2020010)资助

作者简介: 张雨潇, 1994年生, 中国海洋大学硕士研究生 e-mail: zux9412@stu.ouc.edu.cn

* 通讯作者 e-mail: chenshuguo@ouc.edu.cn

1.1.1 数据来源

本研究所使用的数据包括生物发光强度(the mechanical-stimulated bioluminescence potential, MBP)以及水体固有光学性质(inherent optical properties)数据。水体固有光学性质包括吸收系数、后向散射系数和衰减系数。为了获取上述所需的研究数据,从而研究黄海水体生物发光辐射传输特性,分别于 2017 年 12 月 20 日至次年 1 月 10 日(冬季航次),2018 年 3 月 28 日至 4 月 16 日(春季航次)、2018 年 7 月 24 日至 8 月 8 日(夏季航次),搭乘“东方红 2 号”科学考察船在黄海海域测量了 3 个季节整个水体剖面的黄海海域生物发光强度数据以及固有光学性质数据,测量站位分布如图 1 所示。

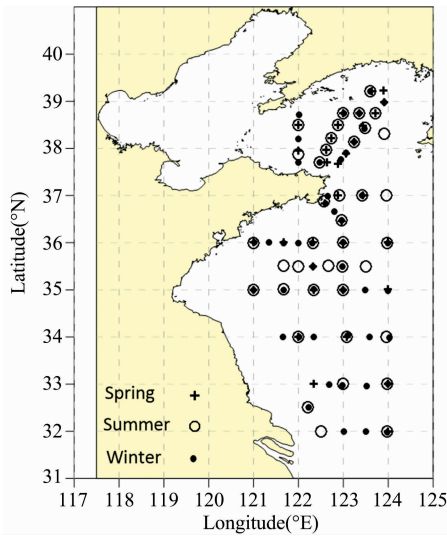


图 1 测量站位分布图

Fig. 1 The distribution of survey station in the Yellow sea

1.1.2 测量仪器

本研究所使用的测量仪器在使用前后均进行了严格的实验室定标处理。其中,生物发光分析仪(underwater bioluminescence assessment tool, UBAT)用于生物发光强度的测量。吸收系数与衰减系数采用美国 WET Labs 公司研发的反射管式水体吸收衰减测量仪(spectral absorption and attenuation meter, AC-S)测量。后向散射系数采用美国 WET Labs 公司研发的后向散射仪(Scattering Meter, BB9)测量。使用温盐深剖面仪 Seabird SBE19 PLUS 进行同步测量水体温度、盐度以及深度信息。对于 AC-S,利用同步测量的温度和盐度数据进行温度和盐度校正,然后根据散射误差与相应波段散射系数之间的比例关系进行散射校正。对于 BB9,使用校正后的 AC-S 数据进行路径补偿校正。仪器手册给出了上述仪器的具体校正方法及数据的具体处理方法,本文不再赘述^[11-13]。将以上仪器安装固定在光学剖面笼中,使用绞车以 $0.15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的下降速度将光学剖面笼从水面下放至海底 3 m 以上深度(避免仪器触底遭受损坏),从而获取水体生物发光强度和固有光学性质等从表层至底层的连续剖面测量数据。

1.1.3 水下光学深度

光学深度 τ 定义如式(1)所示,与几何深度 z 、衰减系数 c 以及波长有关,其中, z_1 为 ACS 测量剖面初始水深, z_2 为光源的几何深度,本研究所计算的为不同几何深度,不同峰值波长下的光学深度。

$$\tau = \int_{z_1}^{z_2} c(\lambda, z) dz \quad (1)$$

1.2 生物发光辐射传输模拟方法

水下生物发光所产生的离水辐射强度和光谱形状与水体衰减系数有关^[14]。因此,为了揭示固有光学性质对生物发光所致离水辐亮度(L_{w-bio})的幅值以及光谱变化的影响,本研究使用 Hydrolight(v5.0)辐射传输软件^[15-16],通过以下步骤进行辐射传输模拟,得到 L_{w-bio} ,从而构建生物发光模型。

(1)将实测浮游生物发光测量剖面划分为以 1 m 深度为间隔的多个水下光源,将相应的输入数据按 1 m 间隔进行插值,实测数据从水下 3 m 起至海底 3 m 以上。

(2)输入参数:将实测黄海海域固有光学性质作为输入,使用 Pope 等所提供的纯水吸收系数^[17],体积散射函数由测量的 $b_b(\lambda)/b(\lambda)$ 根据 Petzold 计算^[18], $b_b(\lambda)$ 为水体后向散射系数, $b(\lambda)$ 为水体总散射系数。本研究仅针对生物发光现象,因此需排除外部光源的影响,为此采用夜间模式,将太阳辐射设置为 0,确保模拟所得辐亮度仅来自于生物发光。表 1 给出了 Hydrolight 辐射传输模型输入参数的配置情况。

(3)生成 L_{w-bio} :不同生物体所产生的生物发光光谱是不同的,而对于黄海海域,引起生物发光的生物主要是甲藻, Moline 等使用已知的光谱从甲藻等生物发光光谱中对生物发光光谱进行了光谱重建^[8]。因此,本研究使用 Moline 构建的光谱将 MBP 通过式(2)转化为不同波长下的能量形式 E ($\text{W} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{nm}^{-1}$)。其中 h 为普朗克常量,值为 $6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$, c 为光速,值为 $3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, P (percent of total photons) 为 Moline 构建的光谱中光子数在不同波长下所占百分比, λ 为波长,波长范围 350~680 nm。 E 作为生物发光辐射传输模型的光源输入,通过辐射传输方程^[19],最终得到光谱 L_{w-bio} 。其中,2.1 节中所使用的 L_{w-bio} 为 L_{w-bio} 光谱积分所得。

$$E = hc \times \text{MBP} \times P/\lambda \quad (2)$$

表 1 Hydrolight 主要输入设置

Table 1 Main input settings of Hydrolight

| 输入项 | 设置方式 |
|--------|----------------------------|
| 固有光学性质 | 采用实际测量的水体吸收系数、衰减系数以及后向散射系数 |
| 生物发光 | 采用实际测量 MBP |
| 太阳辐射 | 采用夜间模式,太阳辐射设置为 0 |

2 结果与讨论

2.1 黄海水体生物发光所致离水辐亮度幅值季节变化及空间变化特征

通过 L_{w-bio} ,结合实测 MBP 分析黄海水体 L_{w-bio} 幅值的分布特征。图 2—图 4 展示了黄海海域不同季节不同光源深度

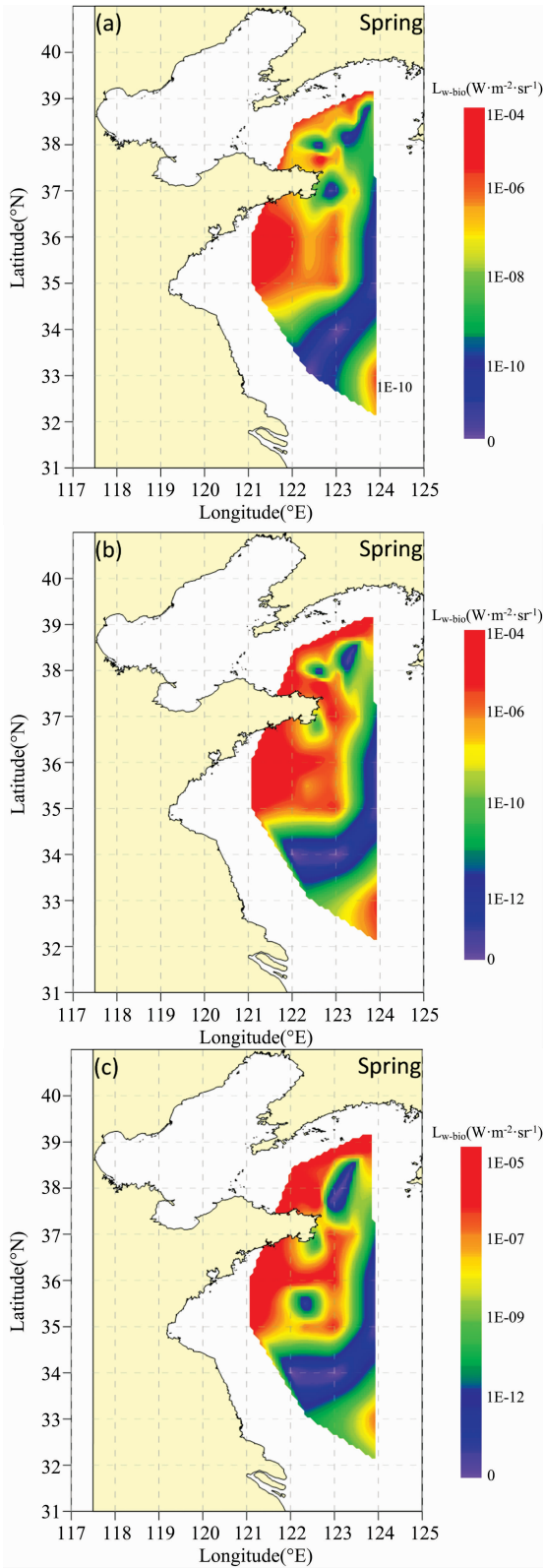


图 2 春季黄海海域光源深度为 4 m (a), 8 m (b), 15 m (c) 时 L_{w-bio} 空间分布

Fig. 2 The spatial distribution of L_{w-bio} at bioluminescence source depths of 4 m (a), 8 m (b) and 15 m (c) in the Yellow Sea during spring

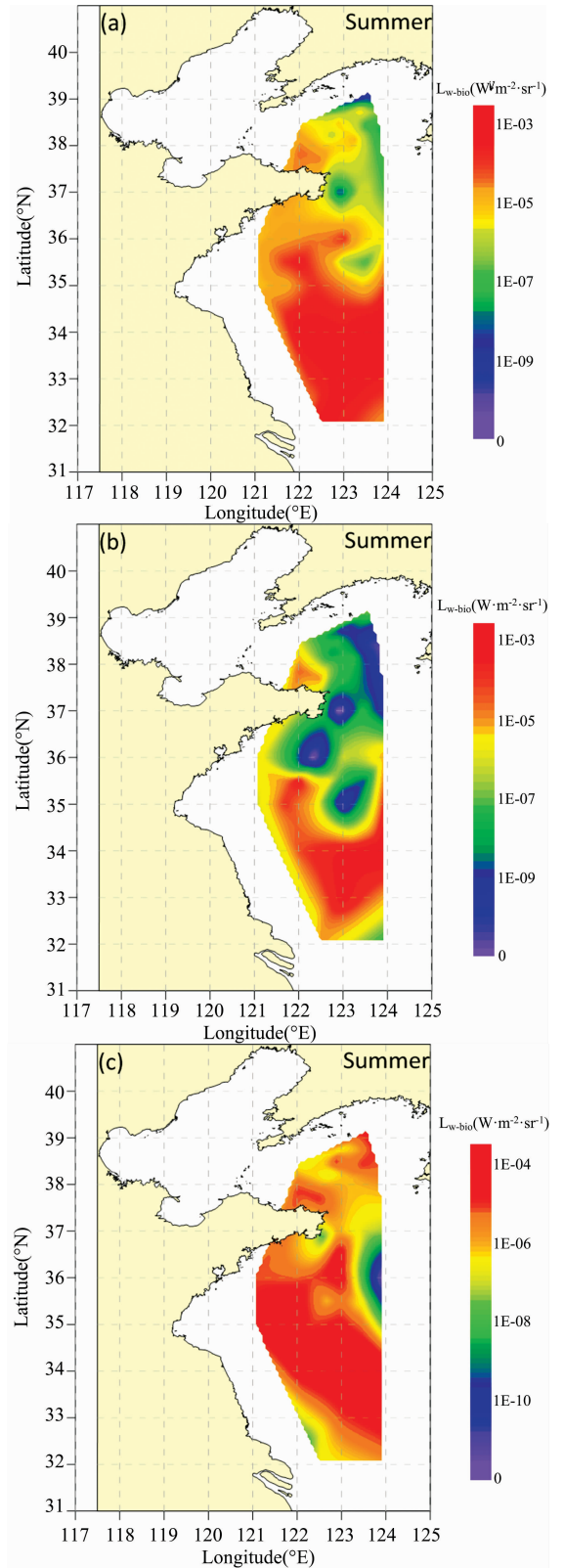


图 3 夏季黄海海域光源深度为 4 m (a), 8 m (b), 15 m (c) 时 L_{w-bio} 空间分布

Fig. 3 The spatial distribution of L_{w-bio} at bioluminescence source depths of 4 m (a), 8 m (b) and 15 m (c) in the Yellow Sea during summer

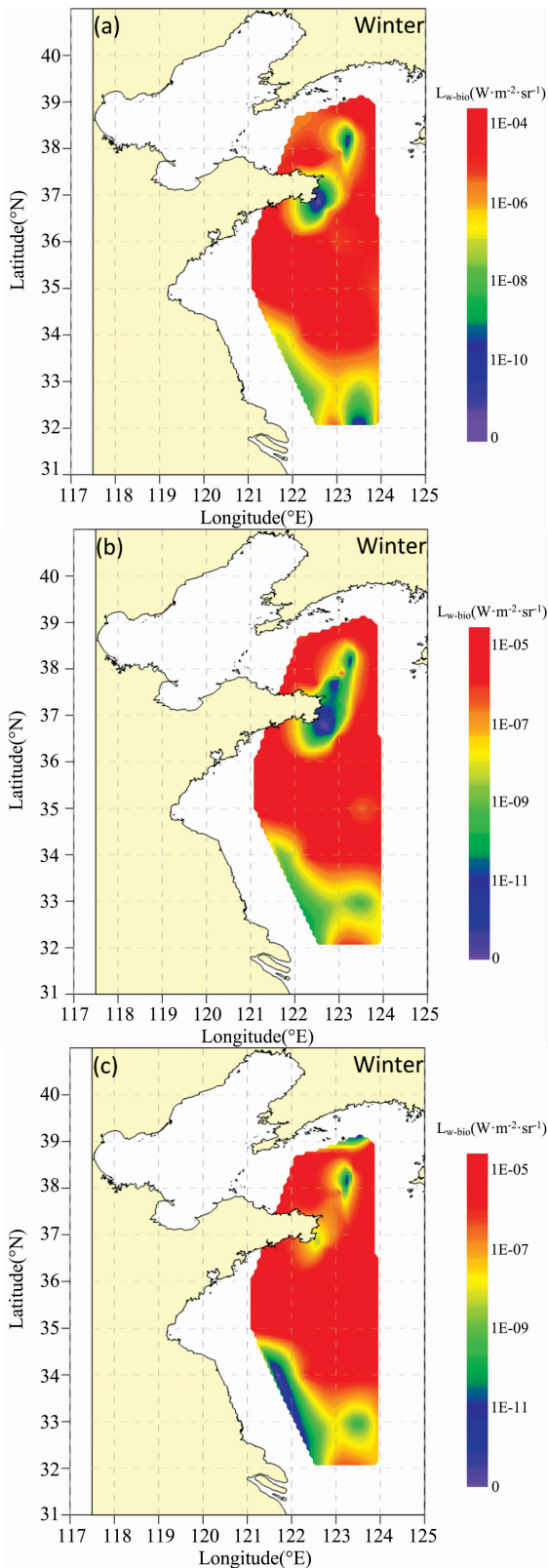


图 4 冬季黄海海域光源深度为 4 m(a), 8 m(b), 15 m(c)时 L_{w-bio} 空间分布

Fig. 4 The spatial distribution of L_{w-bio} at bioluminescence source depths of 4 m (a), 8 m (b) and 15 m (c) in the Yellow Sea during winter

下 L_{w-bio} 空间分布(不同海域水深不同, 为确保不同深度下均有数据, 选取 4, 8 和 15 m 深度为发光光源)。

由图 2, 春季黄海海域 L_{w-bio} 高值区位于山东半岛威海附近海域、山东半岛以南海域以及北黄海东北部海域, 上述海域衰减系数较低, 发光浮游生物丰度较高, MBP 在整个黄海海域处于较高水平^[18]。北黄海中部海域、山东半岛东南部近岸海域以及南黄海东部海域的 L_{w-bio} 处于较低的水平。随着光源深度的增加, 春季黄海海域的 L_{w-bio} 幅值仅在数值上呈现减小趋势, 分布特征并未出现明显的变化。整体上, 春季 L_{w-bio} 幅值呈近岸高远岸低的特征。

由图 3, 夏季黄海海域 L_{w-bio} 低值区集中在北黄海海域与山东半岛东部海域, 高值区位于南黄海海域, 当光源深度为 4 m 时, L_{w-bio} 的分布特征呈北低南高。随着海水深度增加, MBP 含量发生改变, 当光源深度加深时, L_{w-bio} 分布特征也发生了改变: 光源深度为 8 m 时, 低值区由山东半岛东部海域延伸至山东半岛南部海域及南黄海中部海域, 高值区缩小至南黄海东部海域; 光源深度为 15 m 时, 低值区缩减至南黄海东北海域。不同光源深度下, 夏季 L_{w-bio} 分布呈现差异, 整体上, 呈现南部高北部低的特征。

由图 4, 在冬季黄海海域, 当光源深度位于为水下 4 m 时, 低值区分别出现在北黄海中部、南黄海南部海域以及山东半岛东南部近岸海域。高值区位于北黄海东北部海域和山东半岛以南海域。随着生物发光光源深度的加深, 冬季黄海海域的 L_{w-bio} 仅在数值上呈现减小趋势, 分布特征并未出现明显的变化。整体上, 冬季黄海海域 L_{w-bio} 呈现中部高南部低的特征。

三个季节的 L_{w-bio} 空间分布特征呈现较大差异, L_{w-bio} 季节变化趋势十分显著。自冬季至春季, 山东半岛威海附近海域 L_{w-bio} 由低值区转为高值区, 南黄海东部海域的 L_{w-bio} 转变为低值区, 总体特征由中部高南部低转变为近岸高远岸低(西部高东部低)。自春季至夏季, 山东半岛东南部近岸海域 L_{w-bio} 始终保持较低水平, 北黄海东北部海域、山东半岛以南海域和山东半岛威海附近海域 L_{w-bio} 由高值区变为低值区, 南黄海东部海域 L_{w-bio} 由低值区变为高值区, 分布特征由近岸高远岸低(西部高东部低)转变为南部高北部低。

光源深度为 4 m 时(表 2), 春季 L_{w-bio} 范围在 $4.59 \times 10^{-10} \sim 2.60 \times 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ 之间, 平均值为 $2.84 \times 10^{-5} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$, 夏季 L_{w-bio} 范围在 $7.86 \times 10^{-9} \sim 4.71 \times 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ 之间, 平均值为 $2.69 \times 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$, 冬季 L_{w-bio} 范围在 $1.81 \times 10^{-9} \sim 1.39 \times 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ 之间, 平均值为 $1.50 \times 10^{-5} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ 。随着光源深度加深, L_{w-bio} 整体呈减小趋势。当光源深度一定时, 自冬季至春季, 春季至夏季, L_{w-bio} 依次增大, 具有显著季节变化特征。引起 L_{w-bio} 幅值变化的主要原因有以下两点: (1) 由表 3 可知, 发光浮游生物 MBP 由冬季至夏季逐渐增大; (2) 固有光学性质影响着 L_{w-bio} 幅值, 由实测数据及前人研究^[10] 可知, 黄海海域吸收系数、衰减系数、及后向散射系数由冬季至夏季逐渐减小。

表 2 不同季节不同光源深度下 L_{w-bio} 分布

Table 2 The value of L_{w-bio} at different depths of bioluminescence source in different seasons

| | | 春季 | 夏季 | 冬季 | |
|--|-----------|-----|------------------------|------------------------|------------------------|
| $L_{w-bio}/(W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1})$ | 光源深度 4 m | 平均值 | 2.39×10^{-5} | 2.99×10^{-4} | 2.18×10^{-5} |
| | | 最大值 | 3.57×10^{-4} | 2.83×10^{-3} | 1.93×10^{-4} |
| | | 最小值 | 1.19×10^{-8} | 3.89×10^{-7} | 4.16×10^{-9} |
| | | 标准差 | 7.00×10^{-5} | 6.32×10^{-4} | 3.94×10^{-5} |
| | 光源深度 8 m | 平均值 | 1.32×10^{-5} | 1.01×10^{-4} | 1.11×10^{-5} |
| | | 最大值 | 2.28×10^{-4} | 8.54×10^{-4} | 1.05×10^{-4} |
| | | 最小值 | 8.53×10^{-11} | 5.76×10^{-7} | 1.18×10^{-11} |
| | | 标准差 | 4.01×10^{-5} | 1.89×10^{-4} | 2.15×10^{-5} |
| | 光源深度 15 m | 平均值 | 1.47×10^{-5} | 4.40×10^{-5} | 9.17×10^{-6} |
| | | 最大值 | 2.33×10^{-4} | 3.05×10^{-4} | 1.02×10^{-4} |
| | | 最小值 | 1.06×10^{-11} | 2.18×10^{-10} | 1.11×10^{-12} |
| | | 标准差 | 4.35×10^{-5} | 7.74×10^{-5} | 2.26×10^{-5} |

表 3 不同季节不同光源深度下 MBP 分布

Table 3 The value of MBP at different depths of bioluminescence source in different seasons

| 季节 | MBP/(photons · s ⁻¹ · L ⁻¹) | | | | | |
|----|--|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | 光源深度 4 m | | 光源深度 8 m | | 光源深度 15 m | |
| | 平均值 | 最大值 | 平均值 | 最大值 | 平均值 | 最大值 |
| 春季 | 2.51×10^{10} | 3.38×10^{11} | 3.16×10^{10} | 4.72×10^{11} | 3.56×10^{10} | 5.09×10^{11} |
| 夏季 | 7.47×10^{10} | 1.48×10^{12} | 8.67×10^{10} | 1.34×10^{12} | 6.10×10^{10} | 5.99×10^{11} |
| 冬季 | 1.61×10^{10} | 2.85×10^{11} | 2.25×10^{10} | 3.65×10^{11} | 1.55×10^{10} | 2.00×10^{11} |

2.2 黄海水体生物发光所致离水辐亮度的光谱变化

生物发光光谱呈近高斯分布特征，生物发光光源处所产生的上行生物发光辐亮度 (L_{w-bio}) 峰值波长在 474 nm 附近，随着光传输至海面， L_{w-bio} 峰值波长发生改变，图 5 汇总了三个季节黄海海域不同发光源深度下 L_{w-bio} 的光谱分布。在不同海域、不同深度下， L_{w-bio} 峰值波长漂移 ($\Delta\lambda$) 的范围在 2~104 nm。一方面， $\Delta\lambda$ 随着光源深度加深而增大；另一方面， $\Delta\lambda$ 与固有光学性质也有紧密的联系：结合实测固有光学性质数据，在水体剖面不包含纯水的 488 nm 波段衰减系数 (c_{488}) 低于 $1 m^{-1}$ ，吸收系数 (a_{488}) 低于 $0.15 m^{-1}$ ，后向散射系数 (b_{488}) 低于 $0.02 m^{-1}$ 的海域， $\Delta\lambda$ 小于 30 nm；在 c_{488} 介于 $1 \sim 5 m^{-1}$ 之间， a_{488} 介于 $0.15 \sim 0.3 m^{-1}$ 之间， b_{488} 介于 $0.02 \sim 0.1 m^{-1}$ 之间的海域， $\Delta\lambda$ 介于 30~70 nm；在 c_{488} 大于 $5 m^{-1}$ ， a_{488} 大于 $0.3 m^{-1}$ ， b_{488} 大于 $0.1 m^{-1}$ 的海域， $\Delta\lambda$ 大于 70 nm。较大的衰减系数可使得峰值波长由蓝光波段变为绿光波段 (474 nm 附近移动至 578 nm 附近)。而在衰减系数较小的水体中，辐亮度光谱变化较弱，若光源位于水深 10 m 以内，其 $\Delta\lambda$ 仅在 5 nm 以内，即使光源位于水深 30 m 以下，其峰值波长最大仅漂移 26 nm，仍在蓝光波段范围内。

Moline 等基于新泽西州近岸水体的实测生物发光数据进行辐射传输模拟，并指出随着生物发光光源深度的增加， L_{w-bio} 峰值波长由蓝光波段移动至绿光波段，波长漂移大于 90 nm。本研究模拟了固有光学性质差异较大的黄海海域生物发光辐射传输过程，结果表明， $\Delta\lambda$ 不仅与光源几何深度有关，与固有光学性质也存在紧密的联系：在固有光学性质其值较大的水体，随着光源深度的增加，其 $\Delta\lambda$ 大于 90 nm，而

清洁水体中发光生物所产生的 $\Delta\lambda$ 小于 30 nm。

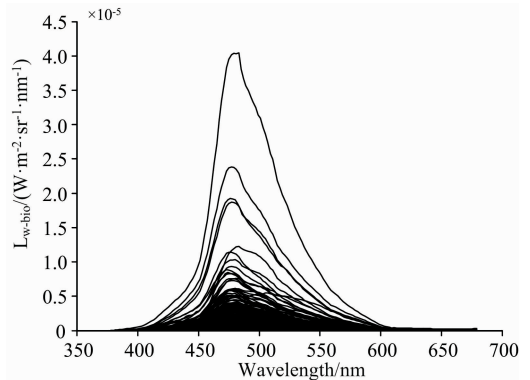


图 5 黄海海域不同发光源深度下 L_{w-bio} 光谱 (不同曲线代表不同深度)

Fig. 5 The spectrum of L_{w-bio} at different depths in the Yellow Sea (Different curves represent different depths)

2.3 黄海水体生物发光光源的几何深度及光学深度与 L_{w-bio} 的联系

为了更好地将本研究应用于其他领域，如生物发光的光源反演，本研究分析了光源的光学深度 τ 和几何深度 d 分别与 $\Delta\lambda$ 及峰值 L_{w-bio} 的关系。图 6 与图 7 分别展示了 τ , d ，与 $\Delta\lambda$ 及峰值 L_{w-bio} 之间的联系：(1) 从平均值上看， $\Delta\lambda$ 随着 τ 的增大而增大，与 d 无显著的递增或递减关系；从整体上看，在不同海域，由于固有光学性质的差异，即使光源的几何深度或光学深度相同， $\Delta\lambda$ 也呈现较大波动。(2) 峰值 L_{w-bio} 与 τ

以及 d 存在一定的关系：峰值 L_{w-bio} 随着 τ 与 d 的加深而减小。基于此，使用 τ 与 d 分别与 $\Delta\lambda$ 及峰值 L_{w-bio} 进行二元线性拟合，结果如图 8 和图 9 所示。 d 与 $\Delta\lambda$ 及 $\text{Log}_{10}(L_{w-bio})$ 二元拟合的决定系数 $R^2=0.64$ ，均方根误差 $\text{RMSE}=9.39$ ，拟合关系为 $d=17.42-16.91\text{Log}_{10}(L_{w-bio})-7.458\Delta\lambda$ 。 τ 与 $\Delta\lambda$ 及 $\text{Log}_{10}(L_{w-bio})$ 二元拟合的决定系数 $R^2=0.90$ ，均方根误差 $\text{RMSE}=4.99$ ，拟合关系为 $\tau=14-14.47\text{Log}_{10}(L_{w-bio})+1.18\Delta\lambda$ ， τ 包含了水体的固有光学性质信息及峰值波长信息，因此 τ 的拟合结果优于 d 。

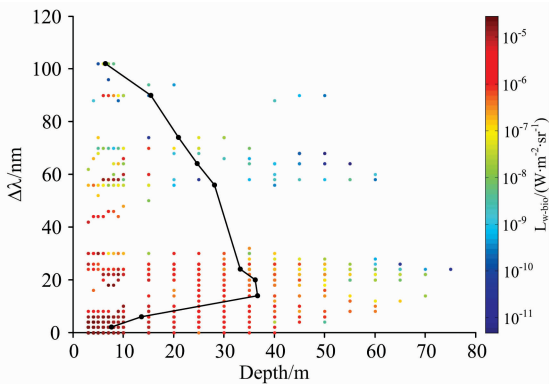


图 6 几何深度 d 、 $\Delta\lambda$ 以及峰值 L_{w-bio} 的变化
黑色线条为 τ 平均值

Fig. 6 The variation of geometric depth d , $\Delta\lambda$ and maximum L_{w-bio}
the black line represents the average of τ

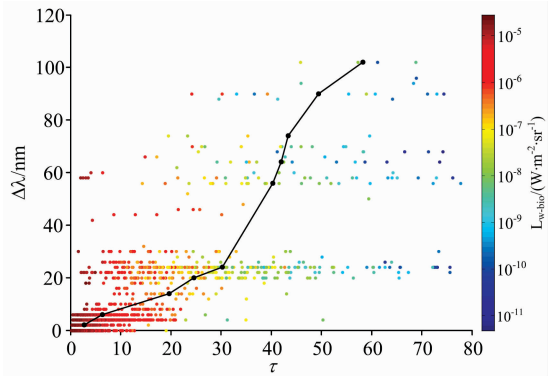


图 7 光学深度 τ 、 $\Delta\lambda$ 以及峰值 L_{w-bio} 的变化
黑色线条为 d 平均值

Fig. 7 The variation of optical depth τ , $\Delta\lambda$ and maximum L_{w-bio}
the black line represents the average of d

以上结果表明：(1)光源的几何深度与峰值 L_{w-bio} 及 $\Delta\lambda$ 的线性关系较弱；(2)在黄海水域，固有光学性质对生物发光光源的几何深度反演影响较大。

基于上述结论，本研究考虑将光谱 L_{w-bio} 作为输入，用于增加水体光学信息及光谱信息，以此讨论生物发光光源的几何深度反演可行性。本节构建了简单的神经网络模型，将模拟所得光谱 L_{w-bio} (波长数 44) 作为输入，输出为光源的几何深度。结果如图 10 与图 11 所示，回归系数 $R=1.00$ ，均方

误差 $\text{MSE}=0.14$ ，最大误差为 1.84 m(由图 11 可知)，且超过 97%的数据，其误差小于 1 m，反演精度显著提升。

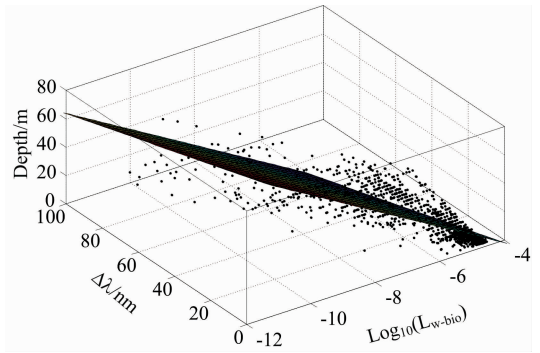


图 8 几何深度 d 与 $\Delta\lambda$ 及峰值 L_{w-bio} 拟合结果
Fig. 8 The fitting result of geometric depth d with $\Delta\lambda$ and maximum L_{w-bio}

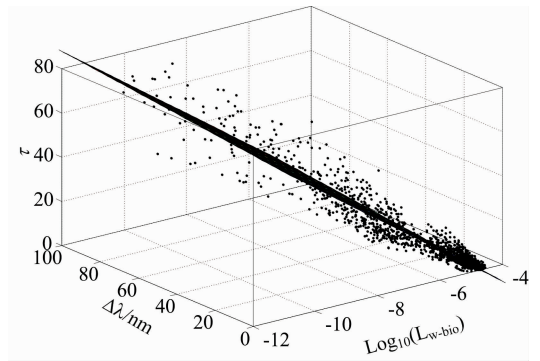


图 9 光学深度 τ 与 $\Delta\lambda$ 及峰值 L_{w-bio} 拟合结果
Fig. 9 The fitting result of optical depth τ with $\Delta\lambda$ and maximum L_{w-bio}

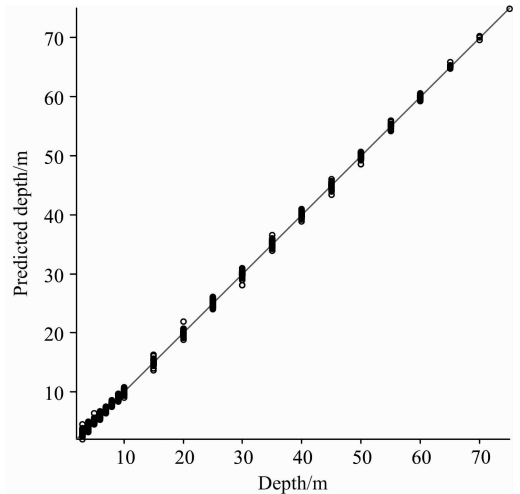


图 10 生物发光光源的几何深度反演结果(直线为 1 : 1 线)
Fig. 10 The retrieval result of geometric depth (the straight line represents 1 : 1 line)

本节仅对光谱 L_{w-bio} 与几何深度的关系进行了初步的神经网络拟合，结果表明，生物发光光源的几何深度可以通过

神经网络模型, 由光谱 L_{w-bio} 反演所得。在未来, 我们将围绕反演深度所需的最少波长数, 展开进一步的研究。

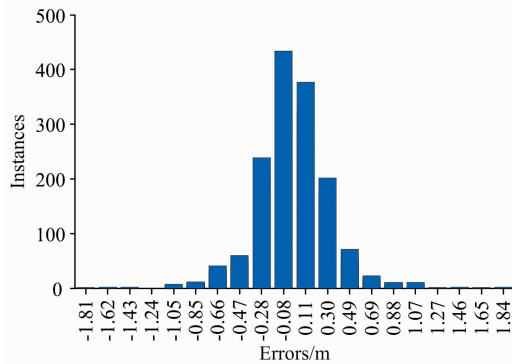


图 11 几何深度反演结果误差统计 (误差 = 实际值 - 预测值)
Fig. 11 The error statistics of retrieval result of geometric depth (Errors = actual value - predicted value)

3 结 论

利用在不同季节获取的黄海水体生物发光强度数据, 结合同步测量的固有光学性质数据, 基于辐射传输模拟, 分析了生物发光所致离水辐亮度 (L_{w-bio}) 的数值变化和光谱变化特征, 并讨论其与固有光学性质及生物发光所处深度的联系。

References

- [1] Ryan J P, Fischer A M, Kudela R M, et al. *Continental Shelf Research*, 2009, 29(5-6): 785.
- [2] Jester R, Lefebvre K, Langlois G, et al. *Harmful Algae*, 2009, 8(2): 291.
- [3] Lapota D. *Proceedings of SPIE—Photonics for Port and Harbor Security*, 2005, 5780: 128.
- [4] Xue C, Chen S, Zhang T. *Optics Express*, 2020, 28(17): 25618.
- [5] Gordon H R. *Applied Optics*, 1984, 23(11): 1694.
- [6] Yi H C, Sanchez R, McCormick N J. *Appl. Opt.*, 1992, 31(6): 822.
- [7] Miller S, Haddock S H D, Elvidge C, et al. *Proceedings of the National Academy of Sciences of USA*, 2005, 102(40): 14181.
- [8] Moline M A, Oliver M J, Mobley C D, et al. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2007, 112(C11): C11016.
- [9] Oliver M J, Moline M A, Mobley C D, et al. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2007, 112(C11): C11017.
- [10] Chen S, Zhang T, Hu L, et al. *Optics Express*, 2018, 26(4): 4112.
- [11] WET Labs, Inc. UBAT document, Revision C, 2015.
- [12] WET Labs, Inc. ac-s document, Revision J, 2009.
- [13] WET Labs, Inc. BB9 document, Revision H, 2007.
- [14] Leathers R, Roesler C S, McCormick N J. *Applied Optics*, 1999, 38(24): 5096.
- [15] Mobley C D, Sundman L K. *HydroLight 4.2 Users' Guide*, Sequoia Sci., 2001a. Inc., Mercer Island, Wash.
- [16] Mobley C D, Sundman L K. *HydroLight 4.2 Technical Documentation*, Sequoia Sci., 2001b. Inc., Mercer Island, Wash.
- [17] Pope R M, Fry E S. *Applied Optics*, 1997, 36(33): 8710.
- [18] Petzold T J. *Volume Scattering Functions for Selected Ocean Waters*, Tech. Rep., 1972. SIO, pp. 72-78, Scripps Inst. of Oceanogr., San Diego, Calif
- [19] Mobley C D. *Academic*, New York, 1994. 592.

主要结论如下:

(1)随着光源深度加深, L_{w-bio} 整体呈减小趋势。当光源深度一定时, 自冬季至春季, 春季至夏季, L_{w-bio} 依次增大, 具有显著季节变化特征。在空间变化方面, 春季黄海海域 L_{w-bio} 幅值分布呈近岸高远岸低的特征, 夏季分布呈现南部高北部低的特征, 冬季分布呈现中部高南部低的特征。

(2)在光谱变化方面, $\Delta\lambda$ 随着光源深度加深而增大, 并与固有光学性质有紧密的联系: 在 c_{488} 低于 1 m^{-1} , a_{488} 低于 0.15 m^{-1} , b_{6488} 低于 0.02 m^{-1} 的海域, $\Delta\lambda$ 小于 30 nm ; 在 c_{488} 介于 $1\sim 5\text{ m}^{-1}$ 之间, a_{488} 介于 $0.15\sim 0.3\text{ m}^{-1}$ 之间, b_{6488} 介于 $0.02\sim 0.1\text{ m}^{-1}$ 之间的海域, $\Delta\lambda$ 介于 $30\sim 70\text{ nm}$; 在 c_{488} 大于 5 m^{-1} , a_{488} 大于 0.3 m^{-1} , b_{6488} 大于 0.1 m^{-1} 的海域, $\Delta\lambda$ 大于 70 nm 。较大的衰减系数可使得峰值波长由蓝光波段变为绿光波段 (474 nm 附近移动至 578 nm 附近)。而在衰减系数较小的水体中, 辐亮度光谱变化较弱, 若光源位于水深 10 m 以内, 其 $\Delta\lambda$ 仅在 5 nm 以内, 即使光源位于水深 30 m 以下, 其峰值波长最大仅漂移 26 nm , 仍在蓝光波段范围内。

(3)黄海海域宽泛的固有光学性质对生物发光光源的几何深度反演影响较大, 但可通过 L_{w-bio} 的光谱信息, 反演光源的几何深度。

致谢: 感谢“东方红 2 号”科考船上工作人员的支持, 感谢出海期间所有采集数据的人, 感谢课题组薛程、史鑫皓、李艺师、甘思铭四位同学的帮助。

Variation of Water Leaving Radiance Originated From Bioluminescence in the Yellow Sea and Its Relationship With Inherent Optical Properties and Depth

ZHANG Yu-xiao¹, WANG Xi³, CHEN Shu-guo^{1,2,3*}, LIU Zhao-wei³, HU Lian-bo^{1,2}

1. College of Marine Technology/Sanya Oceanographic Institution, Ocean University of China, Qingdao 266100/Sanya 572024, China

2. Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China

3. National Satellite Ocean Application Service, Beijing 100081, China

Abstract Based on the radiative transfer simulation model, using the measured bioluminescence intensity data from different seasons in the Yellow Sea, combined with the simultaneous measured inherent optical properties data, this study analyzes the numerical and spectral variation of the water leaving radiance originating from bioluminescence (L_{w-bio}) and discusses its relationship with the inherent optical properties and the depth of bioluminescence. The main research results of this paper are as follows: (1) L_{w-bio} in the Yellow Sea has significant seasonal and spatial variation characteristics. Besides the bioluminescence abundance and ability of the water column, the L_{w-bio} is also related to the inherent optical properties of the water column and the depth of the bioluminescence source. (2) In terms of spectral variation, the maximum wavelength shift of L_{w-bio} increases with the deepening of the depth of bioluminescence source and related to the inherent optical properties. In the water column with a large value of inherent optical properties, when the depth of the bioluminescence source is below the surface water column, the maximum wavelength of L_{w-bio} can change from blue band (474 nm) to green band (up to 578 nm); In the water column with a low value of inherent optical properties, the variation of radiance spectrum is weak. Even if the depth of the bioluminescence source increases, the maximum wavelength of L_{w-bio} is still in the blue band (up to 500 nm). (3) Although the broad inherent optical properties of the Yellow Sea have a great impact on the geometric depth retrieval of the bioluminescence source, the geometric depth of the bioluminescence source can be retrieved from the spectral information of L_{w-bio} .

Keywords The Yellow Sea; Radiative transfer; Inherent optical properties; Water leaving radiance originated from bioluminescence

(Received Apr. 29, 2021; accepted May 6, 2022)

* Corresponding author