

压实作用下广西典型红树林区沉积速率及海平面上升对红树林迁移效应的制衡^①

夏鹏¹ 孟宪伟¹ 丰爱平¹ 李珍² 杨刚¹

(1.国家海洋局第一海洋研究所 山东青岛 266061;2.华东师范大学河口海岸学国家重点实验室 上海 200062)

摘要 气候变化造成的海平面上升是迫使红树林向陆迁移的主要驱动力,而其自身通过捕沙促淤不同程度的减缓了海平面上升速率的影响。基于广西典型红树林区8根短柱的²¹⁰Pb测年和含水率分析,以考虑/未考虑沉积物压实作用为研究情景,通过对比研究红树林区潮滩地表高程抬升速率和相对海平面上升速率的大小关系,揭示当前海平面上升对广西红树林向陆/向海迁移的驱动机制。研究发现:未考虑压实作用下的沉积速率约是考虑压实作用下沉积速率的1.00~1.34倍(平均1.12倍),压实作用明显;压实沉积速率介于0.16~0.78 cm/a,其底层压实沉积速率与潮滩地表高程抬升速率相等。压实作用下,英罗湾和丹兜海红树林区的地表高程抬升速率小于相对海平面上升速率;与未考虑压实作用得到的结论相悖。由于广西红树林海岸大都建有防波堤,限制了红树林向陆的迁移;表明英罗湾和丹兜海的红树林正面临海平面上升的威胁。压实作用校正与否对地表高程抬升速率与相对海平面上升速率相当的区域尤为重要。

关键词 红树林 沉积速率 压实作用 海平面上升 迁移

第一作者简介 夏鹏 男 1982年出生 博士 副研究员 海洋地质学和环境地球化学研究 E-mail: pengxia@fio.org.cn

通讯作者 孟宪伟 男 研究员 E-mail: mxw@fio.org.cn

中图分类号 TE121.3 **文献标识码** A

0 引言

红树林湿地是全球四大高生产力海洋生态系统之一,平均生产力(以碳计)为2 500 mg/(m²·d),其凋落物约占进入海洋陆源有机质的11%^[1-2]。因此说,红树林湿地中的红树林自身在维护“陆—海—气”系统中的碳循环及近岸生态系统平衡和生物多样性方面发挥着重要作用^[3-4]。但是,在全球气候变暖情景下,海平面上升势必对长于潮间带的红树林生存空间造成威胁,为与海平面变化保持同步,会迫使红树林发生向陆迁移和群落兴衰等问题^[5]。红树林迁移效应的驱动力源于相对海平面上升速率和红树林潮滩地表高程抬升速率的大小关系^[6]。当前,国外潮滩地表高程变化测量的一种可信、准确的方法是利用地表高程测量仪^[7],但在国内尚未普遍推广;鉴于我国目前广泛使用²¹⁰Pb沉积速率计算的背景下,

进一步深化沉积物的压实作用对沉积速率和地表高程抬升速率的影响不失为一种行而有效的方法。以往鲜有研究把红树林潮滩地表高程抬升速率与沉积速率区别开来,更有甚者可能将其混为一谈。因此,红树林潮滩地表高程抬升速率与沉积速率之间的关系研究已成为解决问题的关键。

²¹⁰Pb已被国内外广泛用于湖泊、河流和海洋现代沉积速率的研究中^[6, 8-14]。由于上覆沉积物的压实作用致使各层深的孔隙度和密度存在差异,不同程度的改变了²¹⁰Pb的垂向分布特征^[15];尤其是对淤泥/淤泥质粉砂等压缩率较大的沉积物,更要注意沉积物的压实作用^[16]。累加质量深度是消除孔隙度和密度差异的常用压实校正方法^[6, 8, 17-18],采用相同的压实校正标准,便于横向比较不同海区的沉积速率。有鉴于此,本文基于广西典型港湾红树林区8根短柱状沉积物,在考虑压实作用的基础上计算红树林潮滩

^①国家自然科学基金“广西英罗湾中全新世以来红树林演变的沉积物有机碳同位素和孢粉记录及其对气候变化的响应”(批准号:41206057)与中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金“近百年来人类活动影响下广西红树林生长发育的孢粉和稳定碳同位素记录”(编号:2012G18)联合资助

收稿日期:2014-01-09;收修改稿日期:2014-08-12

沉积速率,通过与地表高程抬升速率进行对比研究,进而计算当前潮滩地表高程抬升速率;并结合有关北部湾相对海平面变化资料,揭示当前海平面上升对广西红树林向陆/向海迁移的驱动机制。

1 样品采集与分析

1.1 样品采集

2011年5月,趁低潮时将直径10 cm的有机玻璃管缓缓打入广西典型红树林区潮滩沉积物中,共采集了8根短柱状样(图1)。其中,SJC、HXL和JXW分别位于茅尾海的老鼠簕、秋茄和桐花树群落内(图1a);DDH位于丹兜海的白骨壤群落内;YLW01、YLW02、YLW03和YLW04分别位于英罗湾的红海榄、秋茄、木榄和桐花树群落内(图1b、表1)。在样品获取过程中尽量保持沉积物的原始状态,并利用美国Trimble公司的DSM 212H双信标DGPS定位设备进行现场定位,平面定位精度优于1 m。将柱状样进行现场密封后带回实验室,按2 cm间隔进行分样,将子样品密封冷冻直至实验室分析。样品在采集、运输、保存和测定的过程中,均严格按照《海洋调查规

范》等相关要求和规定进行。

1.2 分析方法

取约20 g湿样品于称量盒内,称重后一并放入烘箱,在105℃~110℃恒温下烘10 h以上。将烘干后的称量盒和样品取出,放入干燥器内冷却后再称重,将两次平行试验的误差控制在0.5%内,以此计算沉积物的含水率。

对入管蜡封并放置3星期的约5 g干样品进行 ^{210}Pb 和 ^{226}Ra 放射性比活度测试,采用EG&G Ortec公司生产的高纯锗低本底 γ 能谱仪完成。以46.5 keV(^{210}Pb)处的能量峰来计算总 ^{210}Pb 比活度($^{210}\text{Pb}_{\text{tot}}$),以351.92 keV(^{214}Pb , ^{226}Ra 的子体)处的能量峰来计算本底 ^{210}Pb 比活度($^{210}\text{Pb}_{\text{sup}}$),其差值即为过剩 ^{210}Pb ($^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$)的比活度^[19]。

1.3 数据处理方法

^{210}Pb 定年:选用常量初始浓度(CIC)模式^[14]。

沉积物干密度:前人研究表明,高度压实的页岩干密度介于2.55~2.65 g/cm³;因此,沉积物干密度可通过成熟的经验公式进行估算^[10]:

$$BD = (PD \cdot D) / (D + PD \cdot (1 - D))$$

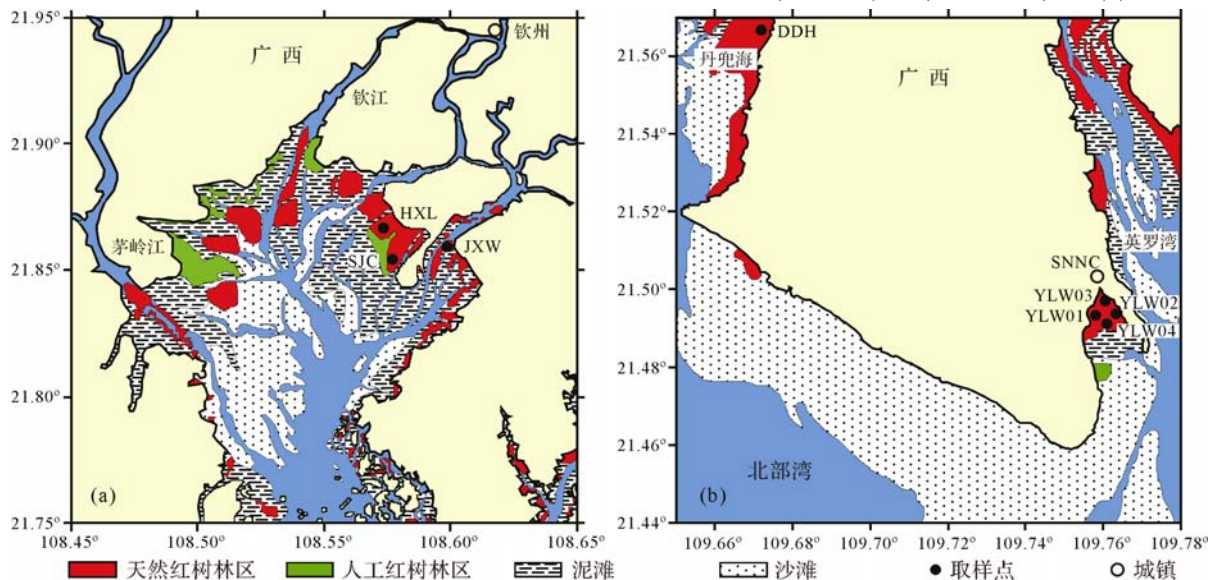


图1 研究区域和采样站位分布图

Fig.1 Maps showing the study area and coring location

表1 采样站位信息表

Table 1 Details of sampling data for 8 sediment cores

柱号	群落	柱长/cm	区域	柱号	群落	柱长/cm	区域
SJC	老鼠簕	100	茅尾海	YLW01	红海榄	66	英罗湾
HXL	秋茄	90	茅尾海	YLW02	秋茄	88	英罗湾
JXW	桐花树	86	茅尾海	YLW03	木榄	50	英罗湾
DDH	白骨壤	50	丹兜海	YLW04	桐花树	52	英罗湾

式中: BD 是沉积物干密度 (g/cm^3); PD 是页岩干密度(孔隙度近似为 0), 本文取 $2.60 \text{ g}/\text{cm}^3$; D 是沉积物含水率(%)。

压实作用: 是指沉积物沉积后, 由于上覆沉积物不断加厚, 在重荷压力下所发生的脱水、孔隙度降低、体积缩小、密度增大的地质过程。由于含水率变化引起沉积物密度差异, 压实校正被广泛应用于 ^{210}Pb 剖面^[6]。本文, 各层位子样品利用柱样的平均干密度进行校正, 即公式(1):

$$CI_x = (BD_x / BD_{\text{avg}}) \cdot I \quad (1)$$

式中: CI_x 是层位 x 的压缩间隔长度 (cm); BD_x 是层位 x 的干密度 (g/cm^3); BD_{avg} 是柱样的平均干密度 (g/cm^3); I 是原始层位间隔, 2 cm。

把各层位进行压实校正后的 CI_x 累加在一起, 得到层位 x 的校正深度: $CI_1 + CI_2 + CI_3 + \dots + CI_x$ 。

2 ^{210}Pb 年代和沉积速率

广西典型红树林区 8 根短柱状样中 $^{210}\text{Pb}_{\text{tot}}$ 的比活度并非呈现出理想状态下随深度呈指数衰减的趋势, 局部层位偶现异常的增减波动, 但总体向下减少的趋势还是比较明显(图 2)。而 SJC、DDH 和 YLW03 柱中表层 10 cm 内的 $^{210}\text{Pb}_{\text{tot}}$ 却呈现相对稳定/衰减的异常现象, 这应与沉积物表层混合作用有关^[20]。鉴于广西海岸带非封闭体系, 受浪、潮、流以及人类活动的影响显著, 因此选用 CIC 模式定年更合理一些。它适用于沉积物主要来源于表层侵蚀产物, ^{210}Pb 含量明显受物源影响, 即沉积物增加同时导致相应 ^{210}Pb 增加的沉积系统^[21]。

2.1 未压实校正沉积速率

未考虑压实作用下, 选用深层沉积物中的 $^{210}\text{Pb}_{\text{tot}}$

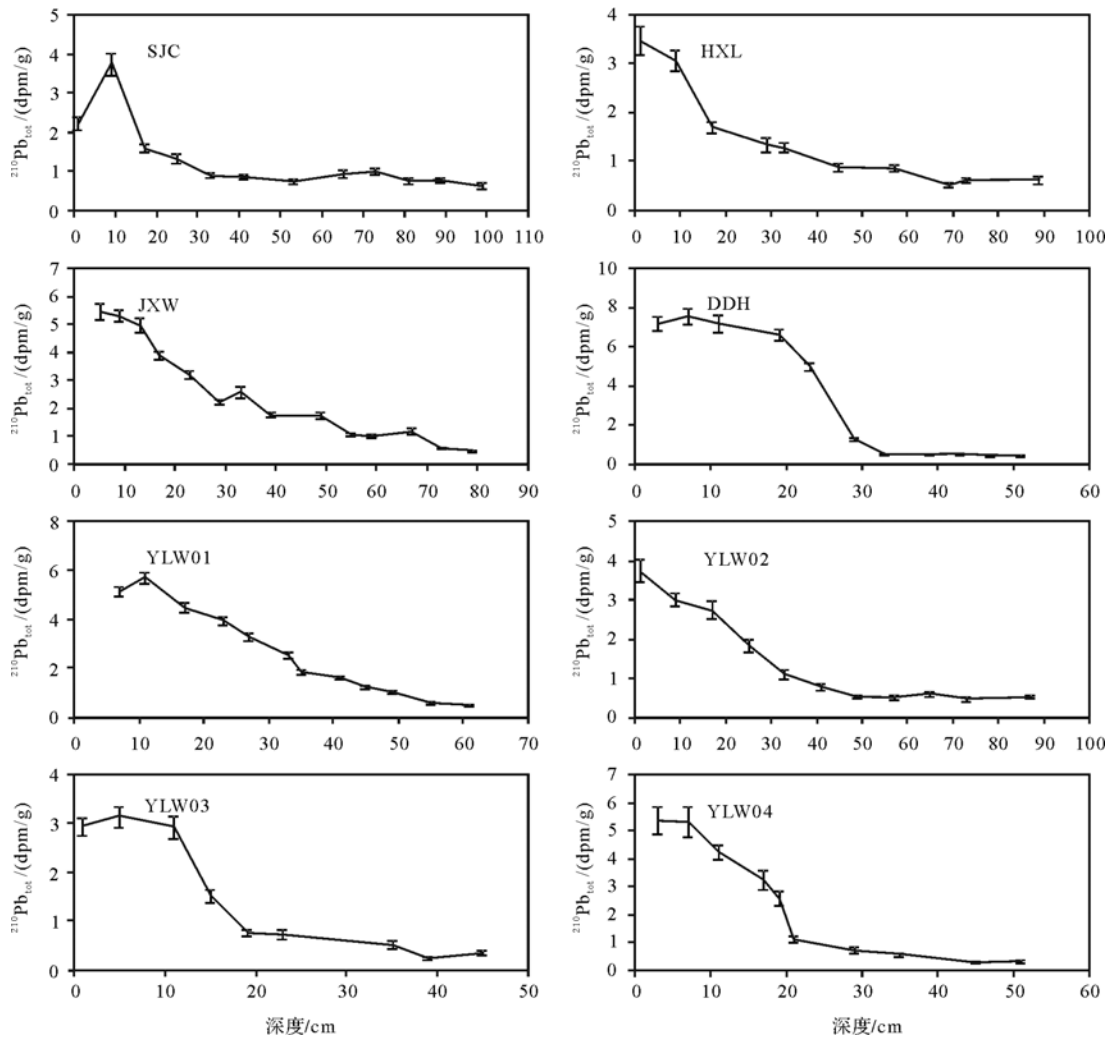


图 2 $^{210}\text{Pb}_{\text{tot}}$ 比活度的垂向分布特征

Fig.2 Vertical distributions of $^{210}\text{Pb}_{\text{tot}}$ activities in the sediment cores

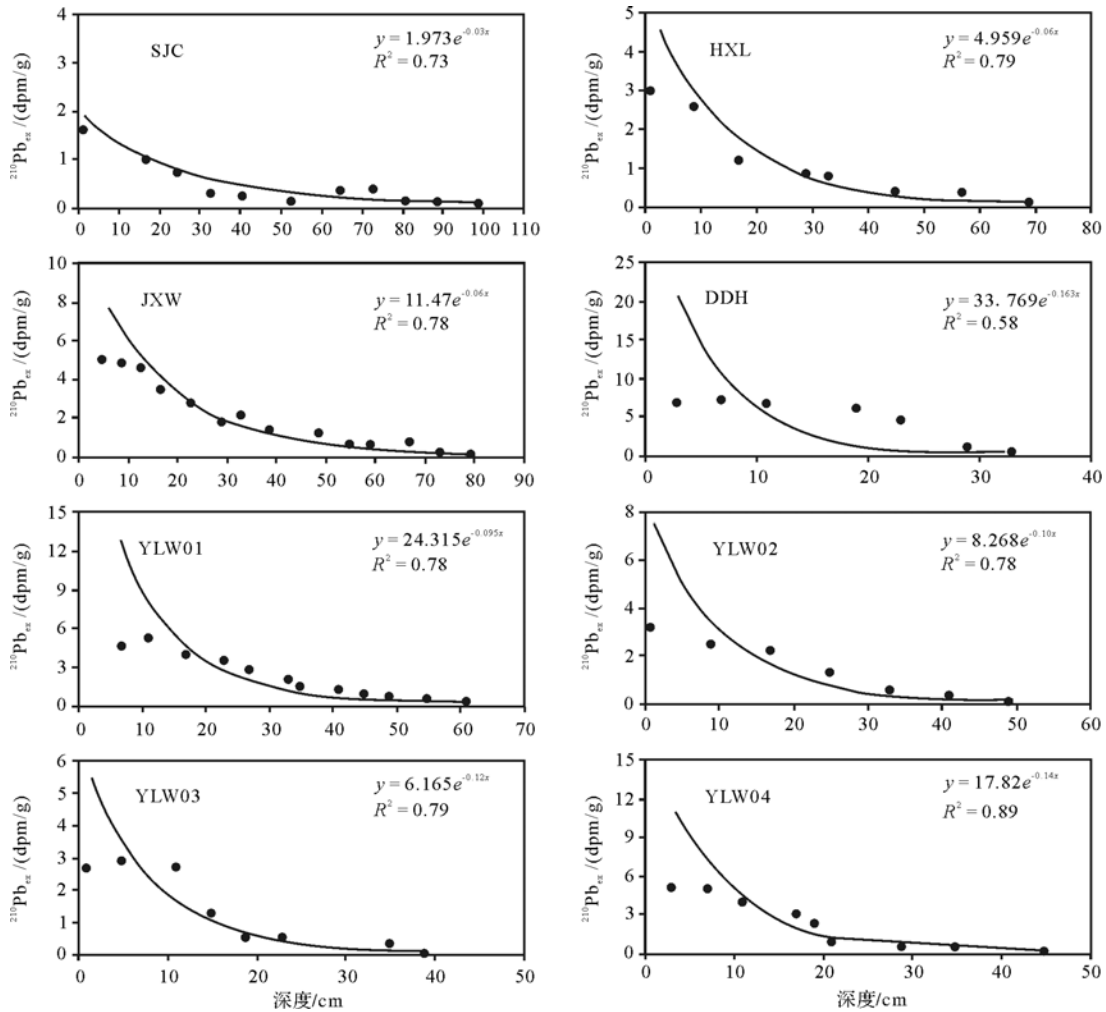


图3 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 随深度的垂向分布及其指数拟合曲线

Fig.3 Vertical distributions of $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ activities and its exponential curves fitting with depth

作为 $^{210}\text{Pb}_{\text{sup}}$ ^[19],其 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 比活度的垂向分布特征如图3所示。将 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 与深度进行指数拟合,拟合系数 R^2 介于0.58~0.89之间,拟合程度良好。计算可得,SJC、HXL、JXW、DDH、YLW01、YLW02、YLW03和YLW04柱的平均沉积速率分别为1.04、0.52、0.52、0.19、0.33、0.31、0.26和0.22 cm/a。其中,位于茅尾海钦江口附近SJC、HXL、JXW柱的沉积速率明显高于周边无大型河流入海的丹兜海DDH和英罗湾YLW01、YLW02、YLW03和YLW04柱,可见河流输入海是影响潮滩沉积速率的主要原因。

2.2 压实校正沉积速率

沉积物中含水率自上而下递减趋势明显(图4),表层沉积物中的含水率高达40%~50%,而深层沉积物中的含水率低至20%~30%,沉积物压实作用显著;且深层沉积物中的含水率趋于相对稳定。这源于

上覆沉积物不断加厚,在重荷压力下所发生的脱水、孔隙度降低等一系列的地质过程。基于线性回归模型对含水率随深度的变化进行拟合,拟合系数 R^2 介于0.38~0.83,表明含水率随深度多呈线性衰减趋势。

由于含水率变化引起的沉积物密度差异,压实作用被用于校正 ^{210}Pb 剖面^[6]。本文,将各层位沉积物利用柱样的平均干密度进行校正,再把各层位进行压实校正后的 CI_x 累加在一起,得到层位 x 的校正深度。将 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的比活度与校正深度进行指数拟合(图5),拟合系数 R^2 介于0.63~0.94之间,拟合程度较未考虑压实作用有大幅提高。计算得,SJC、HXL、JXW、DDH、YLW01、YLW02、YLW03和YLW04柱的压实沉积速率分别为0.78、0.44、0.52、0.16、0.31、0.26、0.24和0.22 cm/a。

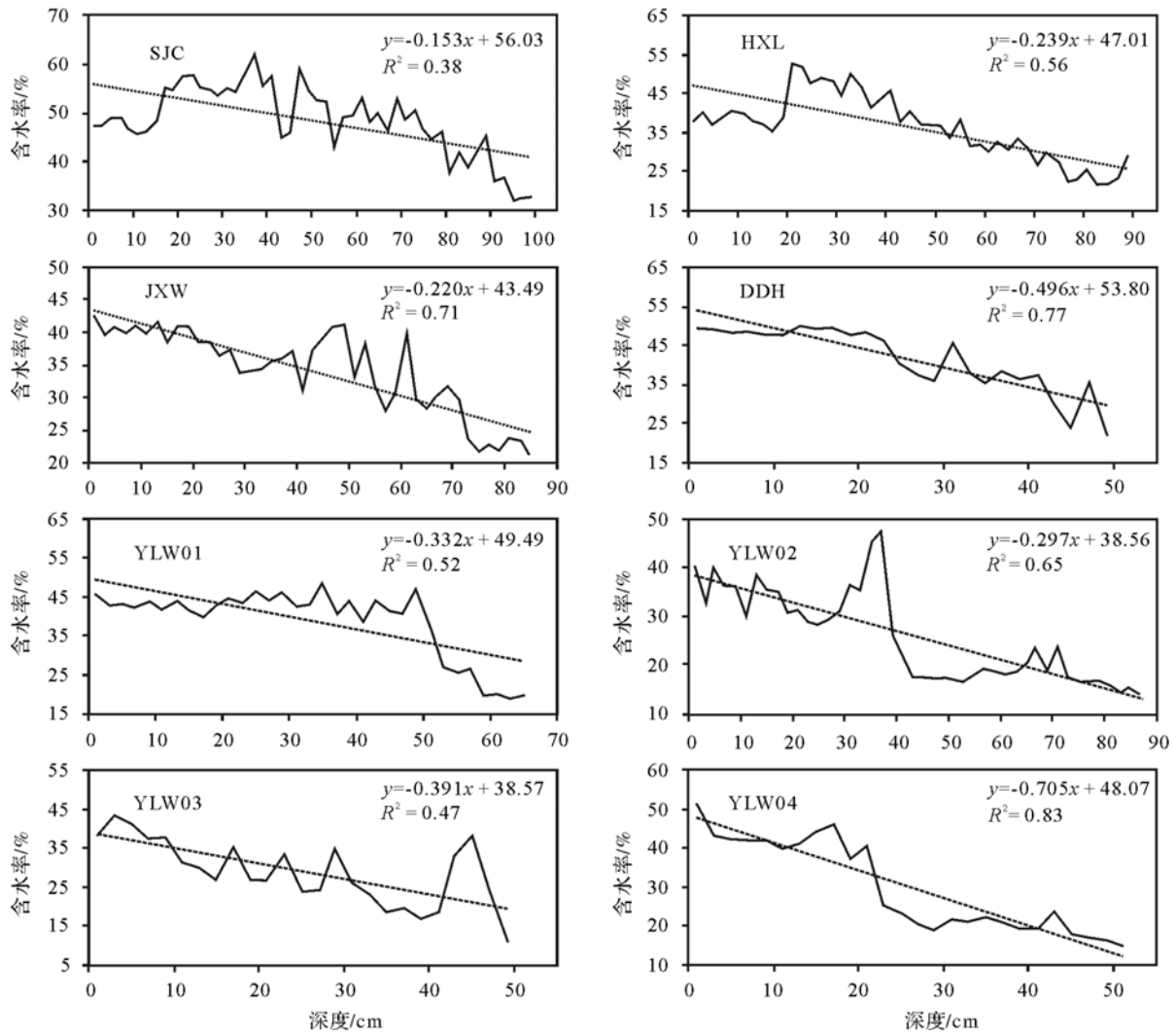


图4 柱状沉积物中含水率的垂向分布及其线性回归

Fig.4 Vertical distributions of moisture contents and its simple linear regressions with depth

2.3 压实校正前/后沉积速率对比

为了比较压实校正前/后沉积速率的差异,将8根短柱中的沉积速率绘于图6(a)中。显而易见,未压实校正沉积速率均大于压实校正沉积速率,约是压实校正沉积速率的1.00~1.34倍(平均1.12倍)。将由压实校正前/后沉积速率换算出的沉积物底部年龄绘于图6(b)中,由于压实校正年龄应更接近于实际沉积年龄,故SJC、HXL、JXW、DDH、YLW01、YLW02和YLW03柱压实校正的沉积物年龄相比未压实校正的年龄分别增加了31、27、0、39、10、52和14年,而YLW04柱的年龄却减少了4年。

考虑压实作用下,由压实沉积速率和 C_l 压缩间隔反推各年份不同含水率下的理论沉积速率(非真实沉积速率),以及无压实作用下的表层沉积速率

(图7)。由于源自含水率的推算,除表层沉积速率为当年实际沉积速率外,其余各年份的沉积速率仅反映当年实际沉积速率被不同程度压实后的现状,属于理论沉积速率,它与含水率的时间演变完全一致,用于研究压实作用下的浅层沉积物下沉速率。

2.4 地表高程抬升速率与沉积速率的关系

为了查清潮滩地表高程抬升速率与沉积速率的关系,将未考虑/考虑压实作用两种情况下的红树林潮滩沉积速率和地表高程抬升速率的示意图绘于图8中(每层代表一个年度内的沉积物累积厚度)。

(1) 未考虑压实作用下:地表高程抬升速率=未压实沉积速率(图8a阴影部分);

(2) 考虑压实作用下:由于新一年的沉积物对其下方的沉积物起到再压实作用,地表高程抬升速率

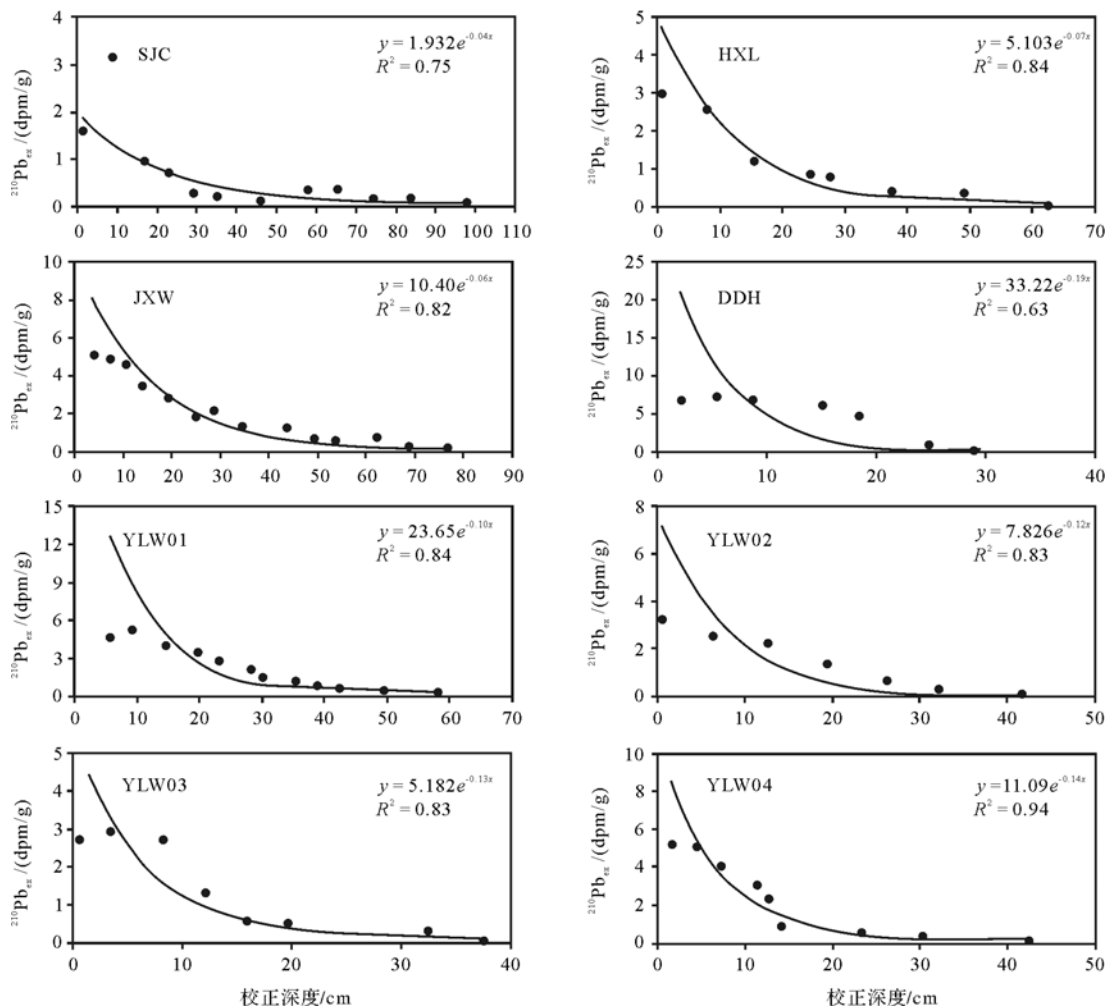


图5 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 随校正深度的垂向分布及其指数拟合曲线

Fig.5 Vertical distributions of $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ activities and its exponential curves fitting with depth correction

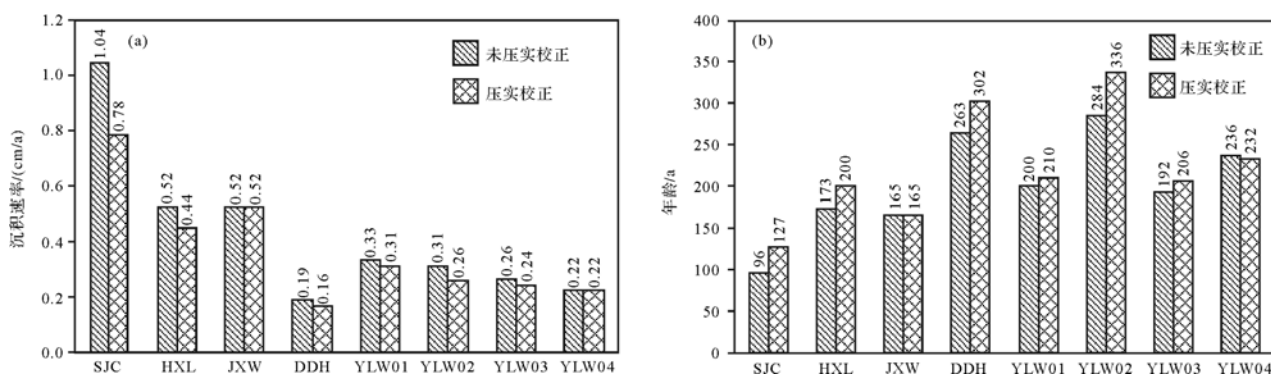


图6 压实校正前/后沉积速率和沉积物年龄的关系

Fig.6 Calculated sedimentation rates and sediment ages before/after compaction correction

(图8c 阴影部分)要小于红树林潮滩表层沉积速率(图8b 阴影部分);地表高程抬升速率等于“表层沉积速率—表层沉降速率”。通过对比相邻两个年度

的沉积物压实模型(图8右)发现,地表高程抬升速率(图8c 阴影部分)等于底层压实沉积速率(图8d 阴影部分)。

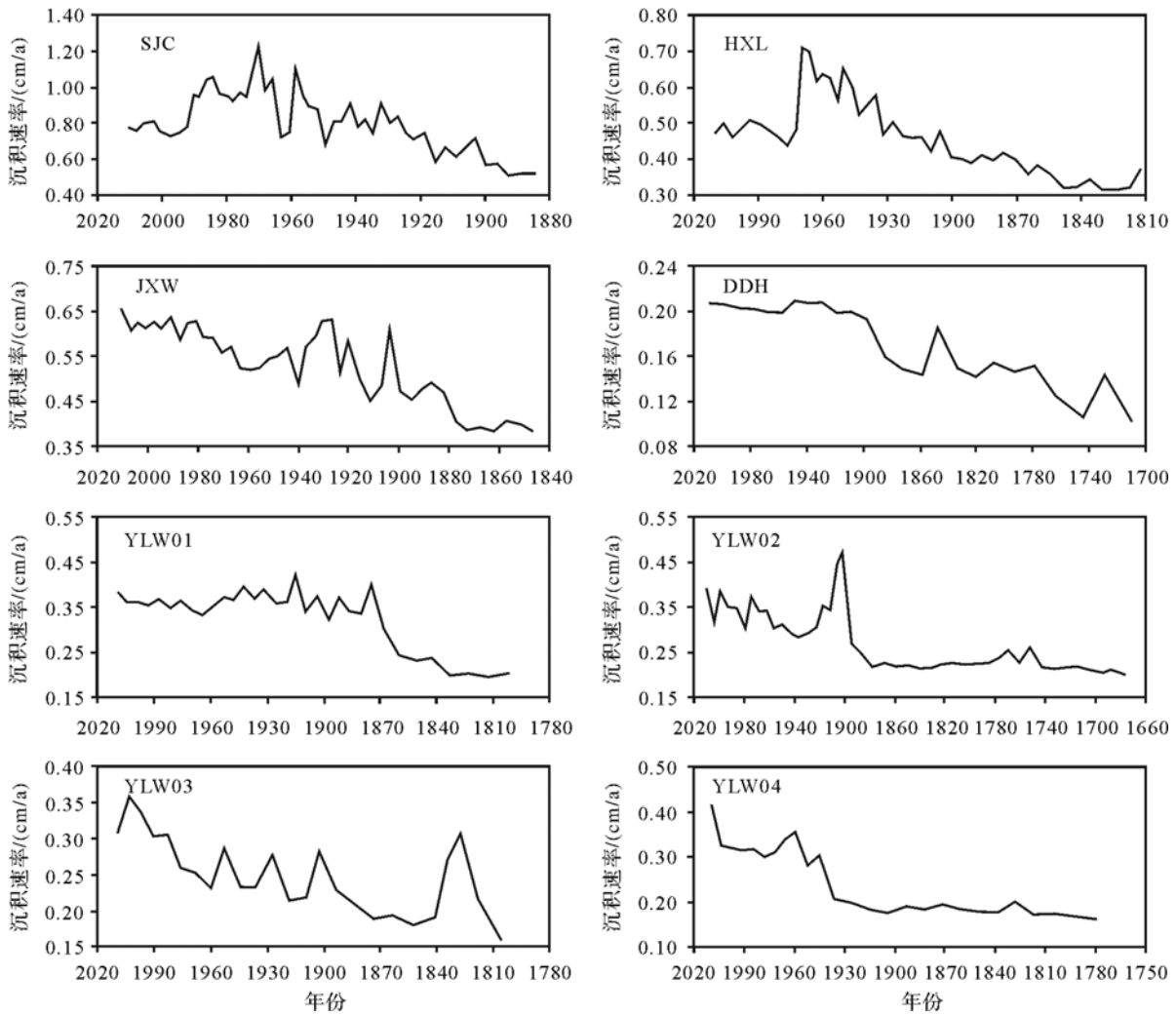


图7 压实作用下各年份的理论沉积速率

Fig.7 Temporal changes of theoretical sedimentation rates under compaction

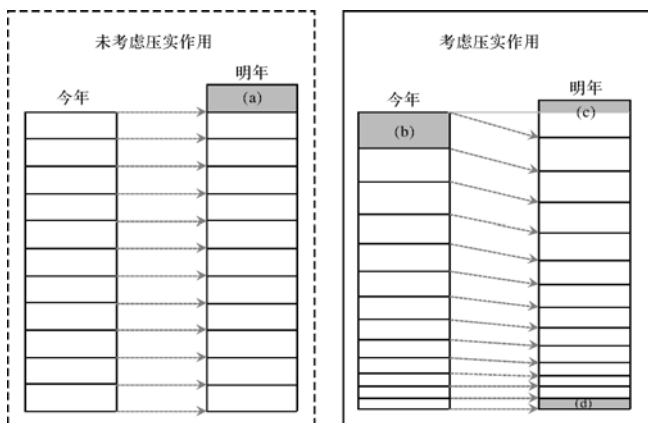


图8 压实校正前/后红树林滩涂沉积速率和地表高程抬升速率示意图

Fig.8 Diagrammatic sketches of sedimentation rates and rising rates of seawater-sediment interface before/after compaction correction

3 相对海平面上升对红树林迁移效应的影响

3.1 相对海平面上升速率

全球海平面上升速率:据 IPCC (2007)^[22], 1961~2003 年间全球平均海平面以每年~1.8 mm (1.3~2.3) 的平均速率上升;其中,1993~2003 年间,全球平均海平面以每年约 3.1 mm (2.4~3.8) 的平均速率上升。在未考虑气候—碳循环反馈的不确定性(也未包括冰盖流量变化的整体效应)前提下,预测 2090~2099 年较 1980~1999 年的海平面上升 18~59 cm。

相对海平面上升速率:据中国海洋公报 (2010)^[23],2001 年以来广西沿海的海平面总体处于历史高位,2001~2010 年的平均海平面比 1991~2000 年的平均海平面高约 22 mm,比 1981~1990 年的平

均海平面高约 48 mm。即广西沿海相对海平面平均上升速率为 2.2~2.4 mm/a, 可作为广西沿海相对海平面上升速率; 它略低于全球平均海平面上升速率, 源于区域板块构造的抬升^[24]。

3.2 红树林适应相对海平面上升的临界速率

在临界速率下, 红树林随相对海平面上升发生同步迁移; 反之, 红树林迁移跟不上相对海平面上升步伐, 发生衰退。

(1) 红树林后缘地貌和地层条件适合红树林生长和迁移的区域

不同学者研究获得的临界速率大小不一: ① Ellison & Stoddart^[25] 认为临界速率为 0.8~0.9 mm/a, 超过 1.2 mm/a 将会灭亡; ② Snedaker *et al.*^[26] 认为临界速率为 1.6~1.8 mm/a; ③ Ellison *et al.*^[27] 认为临界速率为 2~10 mm/a。本文选用 1.2 mm/a 作为红树林适宜迁移的临界速率。

(2) 红树林后缘为海堤的情况

后缘海堤限制了红树林的向陆迁移, 临界速率为零。

3.3 相对海平面上升对红树林迁移的制约

据广西 908 专项实测数据: 广西海岸线总长 1 628.59 km, 其中人工岸线长 1 280.21 km (占 78.6%)。受近年围塘养殖、盐场建设、港口围填以及人工岸堤修建等的影响, 人工岸线长度仍呈逐年增加的趋势; 即相对海平面上升速率大于地表高程抬升速率将会对红树林造成毁灭性的影响。基于未考虑/考虑压实作用两种模式, 计算广西典型红树林区的相对海平面上升速率 ($V_{\text{海平面上升}}$) 与地表高程抬升速率 ($V_{\text{地表高程}}$) 的差值, 详见图 9。

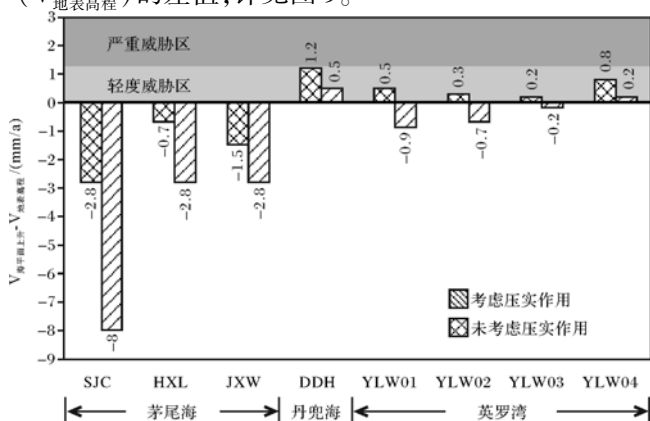


图 9 压实校正前/后红树林区 $V_{\text{海平面上升}}$ 与 $V_{\text{地表高程}}$ 的差值
Fig.9 The difference between relative sea-level rise rate and ground elevation uplift rate before/after compaction correction

(1) 未考虑压实作用: 除丹兜海的 DDH 和英罗湾的 YLW04 柱外, 其余 6 柱的相对海平面上升速率均小于地表高程抬升速率, 表明滩面多处于淤积状态。这与张乔民研究获得的结论相一致^[27-28]: “我国大部分红树林潮滩淤积速率接近或大于 2030 年前的海平面上升速率, 红树林潮滩可以通过滩面淤积跟上甚至超越海平面上升, 红树林面积基本上能保持稳定”^[28-29]。

(2) 考虑压实作用: 丹兜海的 DDH 和英罗湾的 YLW01、YLW02、YLW03、YLW04 五根短柱的相对海平面上升速率均大于潮滩地表高程抬升速率, 表明该区红树林已经受到海平面上升的轻度威胁。

茅尾海的 SJC、HXL 和 JXW, 无论是否考虑压实作用, 相对海平面上升速率均小于地表高程抬升速率, 表明该区红树林暂未受到海平面上升的影响。可见, 压实作用校正与否对地表高程抬升速率与相对海平面上升速率相当的区域尤为重要。

4 结论

用 ^{210}Pb 法测定红树林潮滩沉积速率/地表高程抬升速率时均应考虑压实作用的影响, 尤其在含水率变化显著的潮滩。本文基于考虑/未考虑压实作用两种模式, 分别计算了沉积速率与地表高程抬升速率的关系。研究发现: ① 无论是否考虑压实作用, 计算出的茅尾海红树林区的地表高程抬升速率均大于相对海平面上升速率, 这与近期茅尾海的淤积现象相符; ② 考虑压实作用下, 英罗湾和丹兜海红树林区的地表高程抬升速率小于相对海平面上升速率; 发现地表高程抬升速率等于压实沉积速率, 明显低于未经压实的表层沉积速率。由于广西红树林海岸大都建有防波堤, 限制了红树林向陆方向的迁移; 因此, 英罗湾和丹兜海的红树林正面临海平面上升的威胁。这与前人部分研究结果有所出入, 主要源于未考虑沉积物压实作用, 过高的估计了红树林区的沉积速率/地表高程抬升速率。可见, 压实作用校正与否对地表高程抬升速率与相对海平面上升速率相当的区域尤为重要。

参考文献 (References)

- Alongi D M. The dynamics of benthic nutrient pools and fluxes in tropical mangrove forests [J]. *Journal of Marine Research*, 1996, 54(1): 123-148.
- Jennerjahn T C, Ittekkot V. Relevance of mangroves for the production and deposition of organic matter along tropical continental margins [J]. *Naturwissenschaften*, 2002, 89(1): 23-30.

- 3 Woodroffe C. Mangrove sediments and geomorphology [M]//Robertson A I, Alongi D M. Tropical Mangrove Ecosystems. Washington, DC: American Geophysical Union, 1992: 7-41.
- 4 Valiela I, Cole M L. Comparative evidence that salt marshes and mangroves may protect seagrass meadows from land-derived nitrogen loads [J]. *Ecosystems*, 2002, 5(1): 92-102.
- 5 Valiela I, Bowen J L, York J K. Mangrove forests: one of the world's threatened major tropical environments [J]. *BioScience*, 2001, 51(10): 807-815.
- 6 Lynch J C, Meriwether J R, McKee B A, et al. Recent accretion in mangrove ecosystems based on ^{137}Cs and ^{210}Pb [J]. *Estuaries*, 1989, 12(4): 284-299.
- 7 仇晴川,张乔民. 湿地地表高程变化的测量与研究[J]. 海洋地质动态, 2009, 25(11): 15-20. [Qiu Qingchuan, Zhang Qiaomin. Measure and research of wetland elevation change [J]. *Marine Geology Letters*, 2009, 25(11): 15-20.]
- 8 Kim G, Hussain N, Church T M, et al. The fallout isotope ^{207}Bi in a Delaware salt marsh: a comparison with ^{210}Pb and ^{137}Cs as a geochronological tool [J]. *Science of the Total Environment*, 1997, 196(1): 31-41.
- 9 Madsen A T, Murray A S, Andersen T J, et al. Optically stimulated luminescence dating of young estuarine sediments: a comparison with ^{210}Pb and ^{137}Cs dating [J]. *Marine Geology*, 2005, 214(1/2/3): 251-268.
- 10 Xia Peng, Meng Xianwei, Yin Ping, et al. Eighty-year sedimentary record of heavy metal inputs in the intertidal sediments from the Nanliu River estuary, Beibu Gulf of South China Sea [J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159(1): 92-99.
- 11 叶崇开. ^{137}Cs 法和 ^{210}Pb 法对比研究鄱阳湖近代沉积速率[J]. 沉积学报, 1991, 9(1): 106-114. [Ye Chongkai. Contrasting investigation by ^{137}Cs method and ^{210}Pb method for the present sedimentation rate of Poyang Lake, Jiangxi [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1991, 9(1): 106-114.]
- 12 夏小明,杨辉,李炎,等. 长江口—杭州湾毗连海区的现代沉积速率[J]. 沉积学报, 2004, 22(1): 130-135. [Xia Xiaoming, Yang Hui, Li Yan, et al. Modern sedimentation rates in the contiguous sea area of Changjiang estuary and Hangzhou bay [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2004, 22(1): 130-135.]
- 13 段凌云,王张华,李茂田,等. 长江口沉积物 ^{210}Pb 分布及沉积环境解释[J]. 沉积学报, 2005, 23(3): 514-522. [Duan Lingyun, Wang Zhanghua, Li Maotian, et al. ^{210}Pb distribution of the Changjiang estuarine sediment and the implications to sedimentary environment [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2005, 23(3): 514-522.]
- 14 夏鹏,孟宪伟,李珍,等. 广西海岸带近百年来人类活动影响下环境演变的沉积记录[J]. 沉积学报, 2012, 30(2): 325-332. [Xia Peng, Meng Xianwei, Li Zhen, et al. Sedimentary records of environmental evolution during the recent 100 years in the coastal zone of Guangxi province [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2012, 30(2): 325-332.]
- 15 肖玉仲,刘国贤,杜瑞芝,等. 江苏灌河口现代沉积速率的研究[J]. 海洋学报, 1997, 19(5): 91-96. [Xiao Yuzhong, Liu Guoxian, Du Ruizhi, et al. Modern sedimentary rate in the Guanhe estuary of Jiangsu [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1997, 19(5): 91-96.]
- 16 全亚荣,梁致荣,刘彝筠,等. 海口,新海湾 ^{210}Pb 法沉积速率的测定[J]. 中山大学学报:自然科学版, 1995, 34(1): 90-95. [Quan Yarong, Liang Zhirong, Liu Yijun, et al. The determination of depositional rate on the Haikou and Xinhai bays by ^{210}Pb method [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 1995, 34(1): 90-95.]
- 17 李凤业,宋金明,李学刚,等. 胶州湾现代沉积速率和沉积通量研究[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2003, 23(4): 29-33. [Li Fengye, Song Jinming, Li Xuegang, et al. Modern sedimentation rate and flux in the Jiaozhou Bay [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2003, 23(4): 29-33.]
- 18 张燕,潘少明,彭补拙. 用 ^{137}Cs 计年法确定湖泊沉积物沉积速率研究进展[J]. 地球科学进展, 2005, 20(6): 671-678. [Zhang Yan, Pan Shaoming, Peng Buzhuo. An overview on the evaluation of sediment accumulation rate of lake by ^{137}Cs dating [J]. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(6): 671-678.]
- 19 San Miguel E G, Bolívar J P, García-Tenorio R. Vertical distribution of Th-isotope ratios, ^{210}Pb , ^{226}Ra and ^{137}Cs in sediment cores from an estuary affected by anthropogenic releases [J]. *Science of the Total Environment*, 2004, 318(1/2/3): 143-157.
- 20 Bloesch J, Evans R D. Lead-210 dating of sediments compared with accumulation rates estimated by natural markers and measured with sediment traps [J]. *Sediment/Freshwater Interaction Developments in Hydrobiology*, 1982, 9: 579-586.
- 21 Appleby P G, Oldfield F. The calculation of lead-210 dates assuming a constant rate of supply of unsupported ^{210}Pb to the sediment [J]. *Catena*, 1978, 5(1): 1-8.
- 22 IPCC. Climate change 2007: Synthesis report [R]//Core Writing Team, Pachauri R K, Reisinger A. Contribution of working groups I, II and III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Geneva, Switzerland; IPCC, 2007: 104.
- 23 国家海洋局. 2010年中国海平面公报[R]. 北京:海洋出版社, 2011: 32. [State Oceanic Administration. 2010 China sea-level reports [R]. Beijing: China Ocean Press, 2011: 32.]
- 24 王雪,罗新正. 海平面上升对广西珍珠港红树林分布的影响[J]. 烟台大学学报:自然科学与工程版, 2013, 26(3): 225-230. [Wang Xue, Luo Xinzhen. Impact of sea level rise on mangrove distribution in Guangxi Pearl Harbor [J]. *Journal of Yantai University: Natural Science and Engineering Edition*, 2013, 26(3): 225-230.]
- 25 Ellison J C, Stoddart D R. Mangrove ecosystem collapse during predicted sea-level rise: Holocene analogues and implications [J]. *Journal of Coastal Research*, 1991, 7(1): 151-165.
- 26 Snedaker S C, Meeder J F, Ross M S, et al. Discussion of Ellison, Joanna C. and Stoddart, David R., 1991. Mangrove ecosystem collapse during predicted sea-level rise: Holocene analogues and implications. *Journal of Coastal Research*, 7(1): 151-165 [J]. *Journal of Coastal Research*, 1994, 10(2): 497-498.
- 27 Ellison J C. Long-term retrospection on mangrove development using sediment cores and pollen analysis: a review [J]. *Aquatic Botany*,

- 2008, 89(2): 93-104.
- 28 张乔民, 温孝胜, 宋朝景, 等. 红树林潮滩沉积速率测量与研究 [J]. 热带海洋, 1996, 15(4): 57-62. [Zhang Qiaomin, Wen Xiaosheng, Song Chaojing, et al. The measurement and study on sedimentation rates in mangrove tidal flats [J]. Tropic Oceanology, 1996, 15(4): 57-62.]
- 29 谭晓林, 张乔民. 红树林潮滩沉积速率及海平面上升对我国红树林的影响 [J]. 海洋通报, 1997, 16(4): 29-35. [Tan Xiaolin, Zhang Qiaomin. Mangrove beaches' accretion rate and effects of relative sea-level rise on mangroves in China [J]. Marine Science Bulletin, 1997, 16(4): 29-35.]

Sediment Compaction Rates in Mangrove Swamps of Guangxi and Its Mangrove Migration Response to Sea-level Rise

XIA Peng¹ MENG XianWei¹ FENG AiPing¹ LI Zhen² YANG Gang¹

(1. First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao, Shandong 266061;

2. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062)

Abstract: Rising sea levels caused by climate change is the major driving force in landward migration of mangrove communities, and its overlying plants can slow down the rate of sea-level rise deriving from sediment trapping. In the paper, six sediment cores were collected from the typical mangrove swamps in Guangxi, China. Based on moisture contents and ²¹⁰Pb analysis, the average sedimentary rates were calculated using the CIC model in different cases of considering/no-considering sediment compaction. Compared between the rate of regional sea-level rise and the sedimentary rates, it reveals the relationship of landward mangrove migration in response to relative sea-level rise. The sediment compaction rates are between 0.16~0.78 cm/a, but no-considering sediment compaction rates are approximately 1.00~1.34 times (mean 1.12 times) more than the rates of sediment compaction. The sediment compaction rates are lower than the rate of regional sea-level rise in mangrove swamps of Yingluo Bay and Dandou Sea, however, the sediment compaction rates are obviously higher in the Maowei Sea. Owing to the seawall preventing the landward mangrove migration, the mangrove plants are currently under threat from sea-level rise in the Yingluo Bay and Dandou Sea. It is obviously different with previous reports. Taking no account of sediment compaction, the sediment rates were be overestimated in the recent studies.

Key words: mangrove; sedimentary rate; sediment compaction; sea-level rise; migration