

## 湛江红树林湿地不同淹水梯度下土壤养分及其化学计量特征

陈玉军<sup>1</sup>, 李 婷<sup>2</sup>, 朱立安<sup>2\*</sup>, 林 梓<sup>2</sup>, 陈粤超<sup>3</sup>, 李 玫<sup>1</sup>, 贾 桐<sup>4</sup>, 张会化<sup>2</sup>

(1. 中国林业科学研究院 热带林业研究所, 广东 广州 510520; 2. 广东省科学院 生态环境与土壤研究所, 华南土壤污染控制与修复国家地方联合工程研究中心, 广东省农业环境综合治理重点实验室, 广东 广州 510650; 3. 广东湛江红树林国家级自然保护区管理局, 广东 湛江 524088; 4. 佛山科学技术学院 食品科学与工程学院, 广东 佛山 528000)

**摘 要:**明确不同淹水时间下红树林土壤养分和生态化学计量特征的空间异质性,可揭示环境变化对土壤元素组成的调控和反馈作用,为科学利用海岸潮间带土壤提供依据。通过野外调查与室内试验分析,研究湛江红树林湿地不同淹水时间下土壤 C、N、P、K 含量与生态化学计量特征。结果表明,低潮位土壤盐度与有机碳、N、P、K 含量均显著( $P<0.05$ )低于高潮位,降幅分别为 78.5%、89.4%、79.4%、54.2%和 31.5%。随着淹水时间的增加,土壤可溶性 N、碱解 N、速效 P 和速效 K 分别减少 83.1%、79.6%、82.7%和 53.8%。土壤 C:N、C:P、C:K、N:P 均表现为高潮位>中高潮位>中潮位>低潮位>中低潮位,其比值分别为 48.00~117.20、1.00~6.47、0.08~0.65、0.02~0.06,属弱变异,N 是研究区土壤限制性养分因子。冗余分析表明,溶解性有机碳是影响生态化学计量比变化的关键环境因子,可解释其 81.1%的变化率。淹水时间的变化对湛江红树林湿地表层土壤养分及其化学计量特征变化产生了显著影响,随淹水时间的增加土壤质量总体呈衰退态势,建议可适当增加研究区湿地土壤 N 元素供给以改善土壤质量,促进红树植树造林及生长。

**关键词:**生态化学计量学;淹水时间;红树林;土壤养分;变异系数

**中图分类号:**S714.8

**文献标志码:**A

**文章编号:**1001-7461(2023)05-0019-09

### Soil Nutrients and Stoichiometry Along Different Flooding Gradients in the Zhanjiang Mangrove Wetland

CHEN Yu-jun<sup>1</sup>, LI Ting<sup>2</sup>, ZHU Li-an<sup>2\*</sup>, LIN Zi<sup>2</sup>, CHEN Yue-chao<sup>3</sup>, LI Mei<sup>1</sup>, JIA Tong<sup>4</sup>, ZHANG Hui-hua<sup>2</sup>

(1. Research Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Guangzhou 510520, Guangdong, China;  
2. Institute of Eco-Environmental and Soil Sciences, Guangdong Academy of Sciences, National-Regional Joint Engineering Research Center for Soil Pollution Control and Remediation in South China, Guangdong Key Laboratory of Integrated Agro-Environmental Pollution Control and Management, Guangzhou 510650, Guangdong, China;  
3. Zhanjiang Mangrove Reserve Administration, Zhanjiang 524088, Guangdong, China;  
4. School of Food Science and Engineering, Foshan University, Foshan 528000, Guangdong, China)

**Abstract:** Clarification of the spatial heterogeneity of soil nutrients and stoichiometry under different flooding conditions in mangroves is helpful to revealing the responses of soil process to environmental changes and provides a basis for soil management in coastal intertidal zones. We conducted field investigation of the contents of soil organic C, N, P, K and stoichiometry under different intertidal zones in Zhanjiang mangrove wetland. Soil salinity and the contents of soil organic C, N, P, K in low-intertidal zones were significantly ( $P<0.05$ ) lower than those of high-intertidal zones, with values in low-intertidal zones 78.5%, 89.4%, 79.4%, 54.2% and 31.5% lower than those in high-intertidal zone, respectively. With the increase of

收稿日期:2022-06-30 修回日期:2022-08-01

基金项目:广东省重点领域研发计划项目(2020B020214001);国家自然科学基金(41771232);海南省自然科学基金项目(421RC658);广东省科学院项目(2019GDASYL-0104014)。

第一作者:陈玉军,副研究员。研究方向:红树林湿地生态学。E-mail:yjchen@163.net

\* 通信作者:朱立安,副研究员。研究方向:土壤环境与区域生态。E-mail:715546440@qq.com

flooding time, soil dissolved organic C, alkaline hydrolyzed N, available P and available potassium decreased by 83.1%, 79.6%, 82.7% and 53.8%, respectively. Soil C : N, C : P, C : K and N : P showed the same trends along intertidal zones: high-intertidal > mid-climax-intertidal > mid-intertidal > low-intertidal > mid-low-intertidal, and the ratios ranged between 48.00—117.20, 1.00—6.47, 0.08—0.65 and 0.02—0.06, respectively. Soil C : N, C : P, C : K and N : P showed moderate variations and N was the limiting nutrient in the study site. Redundancy analysis showed that dissolved organic C was the key influencing factor of stoichiometric ratios, accounted for 81.1% of total variation. The flooding time had a significant effect on soil nutrients and stoichiometric ratios, and soil fertility decreased with the increase of flooding time. The results suggest to increase the supply of nitrogen for the improvement of soil quality and the promotion of mangrove afforestation and growth.

**Key words:** ecological stoichiometry; flooding time; mangrove; soil nutrient; coefficient of variation

生态化学计量学是综合物理、化学、生物等多学科基本原理,研究生态过程中能量、化学元素平衡和相互作用的科学<sup>[1-2]</sup>,为预测不同生境的元素循环提供了一种新方法<sup>[3]</sup>,在分子、细胞个体、群落、生态系统与全球区域尺度等各个层次已被广泛应用<sup>[4]</sup>。碳(C)、氮(N)、磷(P)是生物体中以相对稳定的比例存在的3种主要元素,其比值的动态变化决定生物和生态系统的关键特征<sup>[5]</sup>。土壤C:N:P可指示土壤内部C、N、P循环及其耦合关系,反映土壤生态系统结构和功能的异变性<sup>[6]</sup>。研究表明,全球0~10 cm表层土壤C:N:P(摩尔比)具有相对较低的空间异质性,分别为186:13:1<sup>[7]</sup>,我国0~10 cm表层土壤C:N:P比为134:9:1<sup>[8]</sup>,湿地土壤C:N:P均值为245:13.6:1<sup>[9]</sup>。但土壤C:N:P受植被覆盖、植物群落、地貌和土地利用类型等多种因素的影响,表现出较高的复杂性<sup>[10]</sup>。研究不同环境条件下不同生态系统间C:N:P,可揭示不同环境条件对土壤元素组成的调控和反馈作用,并预测其对环境变化的响应<sup>[11]</sup>。

红树林是生长在热带和亚热带潮间带特有木本植物群落,具有较高初级生产力水平,被认为是全球碳储量最高的生态系统之一<sup>[12]</sup>,在全球C、N、P、S循环中发挥重要作用<sup>[13]</sup>。每个沿海红树林都有其独特环境特征,并影响海岸线沉积物类型、元素化学计量比、有机质组成,最终影响红树植被和土壤C储量<sup>[14]</sup>。研究表明,红树林通常缺乏N、P等养分,限制其生长,较低的C/N和较高的凋落物产量将加速红树林生物源物质的输出和周转,从而可能导致红树林碳的流失<sup>[15-16]</sup>。研究红树林生态化学计量学特征,有助于更好地认识红树林生长和养分利用情况,为红树林的保护和管理提供科学依据<sup>[17]</sup>。

目前,对红树林生态化学计量学的研究多集中于红树植物不同器官<sup>[18]</sup>、树种<sup>[19]</sup>、群落<sup>[20]</sup>及土壤不同剖面<sup>[19,21]</sup>、质地<sup>[22]</sup>等方面,结果发现,不同类型的

红树林对土壤养分的分配利用不同,表现出不同养分限制类型,红树植物的生理生态特征以及河口海岸环境影响红树植物和土壤的计量特征。淹水梯度是海岸湿地一个主要的环境变量,控制着湿地与邻近海洋系统之间的水文和能量、物质和营养物质的交换,其变化可使环境因素和土壤微生物组成存在差异,这势必造成土壤性质和生态化学计量特征的改变<sup>[23-24]</sup>。陈瑶瑶等<sup>[25]</sup>研究了广东英罗湾红树林土壤碳密度随潮滩高程变化的差异,但关于淹水时间下红树林的生态化学计量学特征研究尚缺乏报道。本研究选取湛江红树林不同潮位沉积物土壤为对象,通过明确不同淹水时间下红树林土壤养分和生态化学计量特征的空间异质性,为厘清淹水时间对红树林土壤生态化学计量特征的影响机制提供科学依据,为该区域红树林造林及管理提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究地位于广东省湛江市附城镇迈奏村(图1),属广东湛江红树林国家级自然保护区范围,系红树人工林。研究区内地势较平坦,属亚热带海洋性季风气候,光照充足,热量丰富,年温差明显,干湿分明,区域内降雨不均匀,无霜期较长。海拔-1.5~1.5 m,年平均气温15.9℃,年平均降水量1711.6 mm,年平均日照时数2003.6 h,年均气温22℃。区域内潮汐为不规则半日潮,平均潮差约3 m,海水盐度最高可达30‰。

### 1.2 试验设计

2021年4月22日在研究地依据潮间带分布情况及红树林群落类型,设置15个20 m×20 m样地,平行样地距离约40 m,分别采集低潮位光滩(KT)、中低潮位光滩(KD)、中潮位(DD)、中高潮位(ZZ)、高潮位(ZG)表层沉积物样品(表1)。采集样品时,每个样方内按照对角线取样方式,多点采集表

层 0~20 cm 土壤,均匀混合分别装入密封封口袋, 1 份挑拣出杂物存于冰箱待测,1 份自然风干后过筛低温保存并迅速运回实验室,将样品均分为 2 份,装袋待测。

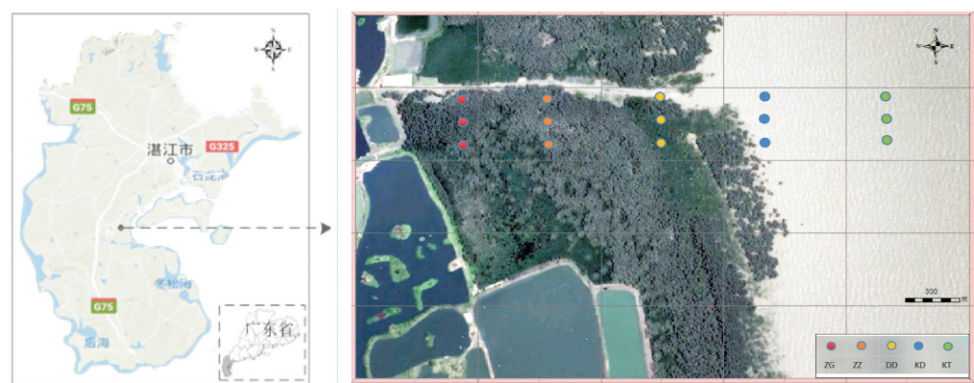


图 1 采样点地理位置  
Fig. 1 Map of sampling sites

表 1 研究区基本信息

Table 1 Basic information of sampling sites

潮位	经纬度	土壤质地	植被组成	每天淹水时间/h
KT	20°55′7.61″N,110°10′26.8″E	壤质砂土	光滩	15
KD	20°55′7.60″N,110°10′09.7″E	壤质砂土	光滩	13~15
DD	20°55′7.27″N,110°09′9.63″E	壤土	无瓣海桑 ( <i>Sonneratia apetala</i> ) + 白骨壤 ( <i>Avicennia marina</i> )(4 : 6)	11~13
ZZ	20°55′7.23″N,110°09′9.20″E	粉砂质黏壤土	无瓣海桑 + 白骨壤(8 : 2)	8~11
ZG	20°55′7.14″N,110°09′8.45″E	粉砂质黏壤土	无瓣海桑	<8

1.3 测定项目与方法

pH 采用电位法( $m : V = 1 : 10$ ),Sartorius PB-10 型酸度计和 Sartorius pH/ATC 复合电极测定。土壤总含盐量采用质量法( $m : V = 1 : 5$ ,振荡 5 min);有机碳(SOC)采用高温外加热重铬酸钾氧化法测定;全 N 采用  $H_2SO_4$  消煮,扩散法测定;全 P、全 K 均采用碱熔,分别用钼锑抗比色法、火焰光度计测定。水溶性有机碳采用去离子水( $m : V = 1 : 10$ )浸提,总有机碳分析仪(TOC 2500,岛津)测定;碱解 N 采用碱解扩散法;有效 P 采用  $0.5\text{ mol} \cdot L^{-1}$  碳酸氢钠(pH 8.5, $m : V = 1 : 20$ )浸提,钼锑抗比色法测定;速效 K 采用  $1.0\text{ mol} \cdot L^{-1}$  乙酸铵浸提,用火焰光度计测定<sup>[26]</sup>。

1.4 数据处理

采用 Excel 2010 对试验数据进行统计处理,运用 SPSS 21.0 进行数据分析,对所有数据进行正态性和方差齐性检验。符合方差齐次,则对不同潮位的差异进行单因素方差(One-way ANOVA)分析,使用 Tukey 检验,反之则使用韦尔奇方差(Welch’s ANOVA)分析,使用 Games-Howell 检验, $P < 0.05$  表示差异显著。使用 Pearson 相关分析,研究土壤理化特征及生态化学计量比间的关系。使用 CANOCO 5.0 对土壤理化特征和生态化学计量比进行冗余分

析(RDA),研究土壤生态化学计量特征的综合影响因素。文中生态化学计量比均为摩尔比。

2 结果与分析

2.1 淹水时间对红树林土壤理化特征的影响

从表 2 可以看出,土壤 pH 为 5.93~6.13,呈酸性,不同潮位间土壤 pH 无显著差异。土壤含水率为 33.05%~47.32%,不同潮位间土壤含水率差异显著( $P < 0.01$ ),低潮位、中低潮位土壤含水率显著低于其他潮位。土壤含盐量为  $7.36 \sim 34.30\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,不同潮位间土壤含盐量显著差异( $P < 0.001$ ),高潮位土壤含盐量显著( $P < 0.001$ )高于其他潮位,其中低潮位土壤含盐量较高潮位显著( $P < 0.001$ )降低 78.5%。土壤有机碳、溶解性有机碳含量为  $1.94 \sim 21.15, 28.81 \sim 171.23\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,不同潮位间土壤有机 C、溶解性有机 C 储量差异显著( $P < 0.001$ ),均表现为高潮位>中高潮位>中潮位>低潮位>中低潮位。土壤全 N 含量  $0.032 \sim 0.155\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,不同潮位间土壤全 N 含量有显著差异( $P < 0.001$ ),高潮位土壤全 N 含量显著( $P < 0.001$ )高于其他潮位,其中低潮位土壤全 N 较高潮位显著( $P < 0.001$ )降低 79.4%。土壤全 P 含量为  $0.58 \sim 1.27\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,不同潮位间土壤全 P 含量差



异显著 ( $P < 0.01$ ), 高潮位土壤全 P 显著 ( $P < 0.05$ ) 高于其他潮位, 其中低潮位较高潮位土壤全 P 含量显著 ( $P < 0.01$ ) 降低 54.2%。土壤全 K 含量为  $6.86 \sim 10.01 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 不同潮位间土壤全 K 差异显著 ( $P < 0.01$ ), 高潮位土壤全 K 显著 ( $P < 0.05$ ) 高于中潮位、中低潮位和低潮位, 其中低潮位土壤全 K 含量较高潮位显著 ( $P < 0.05$ ) 降低 31.5%。

土壤碱解 N 和速效 P 含量分别为  $19.30 \sim$

$94.75, 7.97 \sim 45.96 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 不同潮位间土壤碱解 N 和速效 P 有显著差异 ( $P < 0.001$ ), 均随淹水频率的增加而减少, 其中低潮位较高潮位土壤碱解 N 和速效 P 含量分别显著 ( $P < 0.001$ ) 降低 79.6%、82.7%。土壤速效 K 含量  $884.64 \sim 1971.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 不同潮位间土壤速效钾差异显著 ( $P < 0.001$ ), 表现为高潮位 > 中高潮位 > 中潮位 > 低潮位 > 中低潮位, 其中低潮位较高潮位土壤速效钾显著 ( $P < 0.001$ ) 降低 53.8%。

表 2 不同潮位土壤理化特征

Table 2 Physicochemical properties of soil in different tidal gradient

指标	潮位					方差分析 $P$
	KT	KD	DD	ZZ	ZG	
pH	$6.01 \pm 0.05a$	$6.13 \pm 0.01a$	$5.97 \pm 0.08a$	$5.93 \pm 0.05a$	$6.08 \pm 0.10a$	$>0.05$
含水率 (%)	$35.73 \pm 1.96b$	$33.05 \pm 0.94b$	$47.32 \pm 0.32a$	$45.32 \pm 0.90a$	$43.85 \pm 0.09a$	$<0.01$
盐度 / ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	$7.36 \pm 1.49c$	$8.80 \pm 1.04c$	$8.49 \pm 0.06c$	$20.41 \pm 0.79b$	$34.30 \pm 1.09a$	$<0.001$
有机碳 / ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	$2.25 \pm 0.11d$	$1.94 \pm 0.11d$	$4.84 \pm 0.33c$	$10.65 \pm 0.08b$	$21.15 \pm 0.52a$	$<0.001$
全氮 / ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	$0.032 \pm 0.006c$	$0.035 \pm 0.002c$	$0.051 \pm 0.007c$	$0.086 \pm 0.006b$	$0.155 \pm 0.005a$	$<0.001$
全磷 / ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	$0.58 \pm 0.03b$	$0.80 \pm 0.16b$	$0.75 \pm 0.04b$	$0.71 \pm 0.03b$	$1.27 \pm 0.08a$	$<0.01$
全钾 / ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	$6.86 \pm 0.49b$	$7.13 \pm 0.40b$	$7.18 \pm 0.06b$	$9.11 \pm 0.93ab$	$10.01 \pm 0.25a$	$<0.01$
溶解性有机碳 / ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	$28.86 \pm 1.84d$	$28.81 \pm 1.30d$	$49.11 \pm 0.85c$	$107.08 \pm 0.91b$	$171.23 \pm 6.58a$	$<0.001$
碱解氮 / ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	$19.30 \pm 1.33d$	$35.20 \pm 2.09c$	$35.53 \pm 0.76c$	$69.75 \pm 1.14b$	$94.75 \pm 1.14a$	$<0.001$
速效磷 / ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	$7.97 \pm 0.39e$	$10.28 \pm 0.07d$	$28.11 \pm 0.14c$	$30.87 \pm 0.21b$	$45.96 \pm 0.48a$	$<0.001$
速效钾 / ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	$910.74 \pm 14.95c$	$884.64 \pm 14.22c$	$922.16 \pm 1.63c$	$1261.39 \pm 6.52b$	$1971.05 \pm 21.19a$	$<0.001$

注: 同行不同字母表示潮位间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

## 2.2 淹水时间对红树林土壤生态化学计量的影响

由图 2 可以看出, 不同潮位间土壤 C : N、C : P、C : K、N : P 比均有显著差异 ( $P < 0.001$ ), 均表现为高潮位 > 中高潮位 > 中潮位 > 低潮位 > 中低潮位。其中, 土壤 C : N 为  $48.00 \sim 117.20$ , 平均 C : N 为 83.74, C : N 变异系数为 1.0%~13.8%, 平均变异系数 7.0%。土壤 C : P 为  $1.00 \sim 6.47$ , 平均 C : P 为 3.46, 其变异系数为 1.4%~17.1%, 平均变异系数 5.6% (图 3)。土壤 C : K 为  $0.08 \sim 0.65$ , 平均 C : K 为 0.28, C : K 变异系数为 0.3%~10.4%, 平均变异系数 4.8%。土壤 N : P 为  $0.02 \sim 0.06$ , 平均 N : P 为 0.04, 其变异系数为 2.8%~16.0%, 平均变异系数 9.4%。

## 2.3 土壤理化特征与生态化学计量比间的关系

土壤理化特征及生态化学计量比间的相关性分析见表 3, 土壤含水率与可溶性碳、C : K、N : P 比呈显著正相关 ( $r \geq 0.533, n=15, P < 0.05$ ), 与速效磷、C : N、C : P 呈极显著正相关 ( $r \geq 0.642, n=15, P < 0.01$ )。土壤盐度、有机碳、全 N、全 K、溶解性有机碳、碱解 N、速效 P、速效 K、C : N、C : P、C : K、N : P 之间均呈极显著正相关 ( $r \geq 0.718, n=15, P < 0.01$ )。

以土壤生态化学计量比作为响应变量, 土壤理

化特征为解释变量进行冗余分析 (图 4), 不同潮位样品表现出一定类聚, 表明淹水时间影响红树林表层土壤生态化学计量比。排序第 1 轴、第 2 轴分别解释了生态化学计量比变异的 95.4% 和 2.4%。各土壤理化因子对生态化学计量比影响程度重要性表现为: 溶解性有机 C > 速效 P > 有机 C > 碱解 N > 全 N > 盐度 > 速效 K > 全 K > 含水率 > 全 P > pH (表 6), 其中溶解性有机 C、速效 P、有机 C、碱解 N、全 N、盐度和速效 K 显著正向影响土壤生态化学计量比特征 ( $P < 0.05$ ), 各自解释量 65.0%~81.1%。土壤溶解性有机碳和含水率显著影响生态化学计量比特征 ( $P < 0.05$ ), 累积解释率 89.2%, 其中溶解性有机碳是其变化的主要环境因子, 可解释生态化学计量比 81.1% 的变化率。

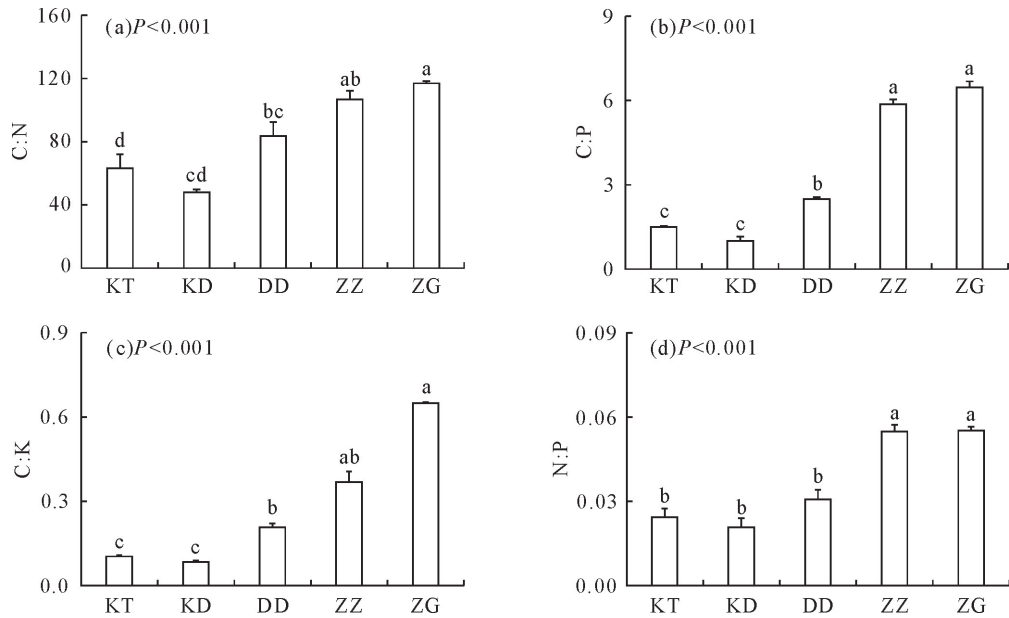
## 3 结论与讨论

### 3.1 结论

淹水时间对研究区红树林湿地土壤养分和生态化学计量比均有显著影响, 土壤有机 C、N、P、K 含量均表现为高潮位显著高于低潮位, 可主要归因于低潮位淹水时间的增加致使植被生物量的减少和土壤缺氧状态的增多, 影响土壤 C、N、P、K 含量。不同淹水时间下土壤 C : N、C : P、C : K、N : P 均表

现为高潮位>中高潮位>中潮位>低潮位>中低潮位,空间异质性小,均较为稳定。研究区为 C 积累生态系统,P 有效性较高,而 N 是研究区土壤限制性养分指标。湛江红树林湿地土壤溶解性有机 C

和含水率显著影响其生态化学计量比特征,溶解性有机碳是其变化的关键环境因素。建议增加研究区湿地土壤 N 养分供给,可缓解 N 缺乏状态,促进红树植物造林及生长,保护其生态环境。



不同小写字母表示潮位间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图 2 不同潮位土壤生态化学计量比特征

Fig. 2 Ecological stoichiometric ratios of soil in different tidal gradients

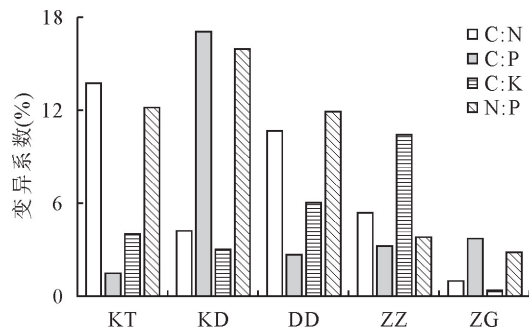


图 3 不同潮位土壤生态化学计量比变异系数

Fig. 3 Coefficients of variation of soil ecological stoichiometric ratios in different tidal gradients

3.2 讨论

3.2.1 淹水时间对红树林土壤理化特征的影响  
土壤 pH 是评价土壤质量的关键指标,受成土母质、土壤固有性质和土地利用类型等多种因素影响,空间异质性较高<sup>[27]</sup>。研究区土壤 pH 呈酸性,与陈瑶瑶等<sup>[25]</sup>在英罗湾红树林的研究结果一致,可归因于红树林对土壤的酸化作用<sup>[28]</sup>。湿地水分条件的变化影响其生态系统之间 C、N 的生物地球化学过程各环节的方向与强度<sup>[29]</sup>。研究表明,湛江高桥红树林自然保护区高潮位光滩含水率最低为 0.87%<sup>[30]</sup>,低于其他潮位。本研究中,高、中高潮位光滩土壤含水率显著低于其他潮位,与上述研究具有相似性。

其原因可能是光滩无植被覆盖,土壤为砂土,保水能力差<sup>[30]</sup>。盐度是调节红树林生长的关键因素,红树林对土壤具有积盐作用,盐分含量一般为 0.5%~2.0%<sup>[28,31]</sup>。本研究中土壤平均含盐量为 14.69 g·kg<sup>-1</sup>,淹水时间的增加显著降低土壤盐度,与 Feng 等<sup>[21]</sup>、陈瑶瑶等<sup>[25]</sup>的研究具有一致性。

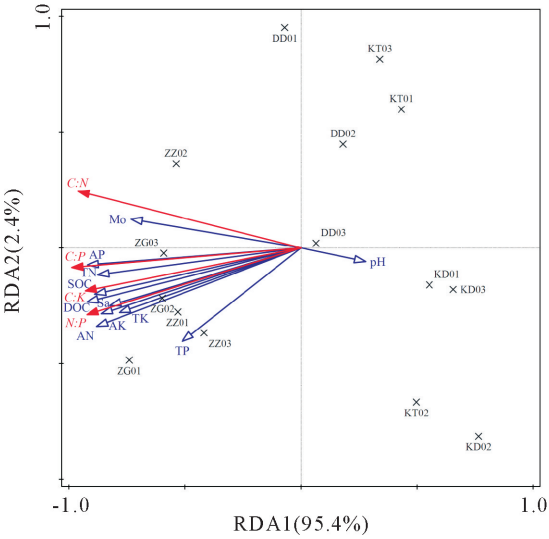


图 4 土壤理化特征与生态化学计量比的 RDA 排序

Fig. 4 RDA ordination of soil physicochemical properties and ecological stoichiometric ratio

红树林是富含 C 的生态系统之一,其 C 储量是陆地森林的 4~8 倍<sup>[32]</sup>。河口潮滩湿地固 C 潜力受

淹水频率影响<sup>[33]</sup>。研究表明,九江口湿地 0~20 cm 土层有机 C、溶解性有机 C 含量随淹水频率的增加而分别减少 59.0%、24.0%<sup>[33]</sup>;闽江口湿地 0~20 cm 土层有机 C、溶解性有机 C 含量随淹水频率增加而分别减少 61.9%、63.4%<sup>[34]</sup>。本研究中低潮位土壤有机 C、溶解性有机 C 含量较高潮位分别显著减少 89.4%、83.2%,土壤有机碳、溶解性有机碳含量总体上随淹水时间增加而减少,与上述研究表现出相同的分布特征。究其原因,土壤有机碳主要来源于植物凋落物、根系和根系分泌物<sup>[35]</sup>,且红树林活

根生物量和植被生物量已被证明与土壤 C 含量呈显著正相关<sup>[36-37]</sup>。研究区高潮位至低潮位分别为无瓣海桑林、无瓣海桑与白骨壤混交林、无植被光滩。研究表明,无瓣海桑在生物量积累方面较白骨壤具有更大优势<sup>[38-39]</sup>,使得研究区植被生物量随淹水频率的增加而有所减少。从而使低潮位土壤有机碳、溶解性有机碳含量均显著低于中、高潮位。此外,溶解性有机碳为有机碳的活性组分,相关分析表明,溶解性有机碳与有机碳呈极显著正相关(表 3),使其随淹水时间的分布特征与有机碳一致<sup>[33-34]</sup>。

表 3 土壤理化特征与生态化学计量比间的相关性分析

Table 3 Correlation coefficients between physical and chemical properties and ecological stoichiometric ratio of soil

	pH	Mo	Sa	SOC	DOC	TN	TP	TK	AN	AP	AK	C : N	C : P	C : K	N : P
pH	1														
Mo	-0.431	1													
Sa	0.006	0.423	1												
SOC	0.037	0.511	0.980**	1											
DOC	-0.066	0.533*	0.977**	0.987**	1										
TN	0.077	0.488	0.971**	0.989**	0.973**	1									
TP	0.127	0.251	0.758**	0.763**	0.744**	0.764**	1								
TK	-0.103	0.403	0.828**	0.828**	0.862**	0.826**	0.649**	1							
AN	0.001	0.510	0.963**	0.959**	0.974**	0.946**	0.751**	0.849**	1						
AP	-0.110	0.765**	0.871**	0.924**	0.922**	0.916**	0.697**	0.763**	0.905**	1					
AK	0.087	0.397	0.983**	0.988**	0.969**	0.978**	0.787**	0.804**	0.935**	0.865**	1				
C : N	-0.230	0.706**	0.816**	—	0.875**	—	0.473	0.718**	0.821**	0.890**	0.789**	1			
C : P	-0.235	0.642**	0.907**	—	0.952**	0.890**	—	0.824**	0.936**	0.896**	0.863**	0.919**	1		
C : K	-0.057	0.571*	0.970**	—	0.984**	0.968**	0.748**	—	0.955**	0.940**	0.969**	0.876**	0.933**	1	
N : P	-0.278	0.636*	0.848**	0.846**	0.896**	—	—	0.813**	0.890**	0.842**	0.794**	0.817**	0.969**	0.869**	1

注:Mo. 含水率;Sa. 盐度;SOC. 有机碳;DOC. 溶解性有机碳;TN. 全氮;TP. 全磷;TK. 全钾;AN. 碱解氮;AP. 速效磷;AK. 速效钾。\* 表示显著相关性( $P < 0.05$ )(双尾);\*\* 表示极显著相关性( $P < 0.01$ )(双尾);—表示存在自相关关系,不进行相关性分析。下同。

表 4 环境因子解释量与显著性检验

Table 4 Explanation rate of the environmental factors and Duncan test

类型	环境因子	解释率(%)	Pseudo-F	P	类型	环境因子	解释率(%)	Pseudo-F	P
单独效应	DOC	81.1	55.7	0.022	条件效应	DOC	81.1	55.7	0.022
	AP	80.9	54.9	0.022		Mo	8.1	8.9	0.022
	SOC	75.6	40.2	0.022		TP	3.9	6.1	0.264
	AN	74.2	37.5	0.022		AK	1.3	2.5	1.000
	TN	73.2	35.5	0.022		AN	1.1	2.4	1.000
	Sa	70.9	31.7	0.022		TN	1.0	1.7	1.000
	AK	65.0	24.1	0.022		SOC	0.7	1.6	1.000
	TK	58.7	18.5	0.066		Sa	0.4	0.9	1.000
	Mo	51.2	13.6	0.066		TK	0.4	1.0	1.000
	TP	25.5	4.5	0.594		AP	0.3	0.7	1.000
	pH	7.5	1.1	1.000		pH	0.2	0.3	1.000

与其他植物群落一样,养分有效性是影响红树林结构和生产力的主要因素之一<sup>[40]</sup>。本研究中土壤全 N、全 P、全 K 含量分别为 0.032~0.155、0.58~1.27、6.86~10.01 g · kg<sup>-1</sup>。依据全国第二

次土壤普查分级标准,全 N 含量低于 0.5 g · kg<sup>-1</sup> 时,土壤高度缺 N,表明 N 是限制该地红树林生长的养分因子。研究表明,英罗湾红树林土壤全 N、全 P 均呈随潮滩高程增加而增加<sup>[25]</sup>;九龙江口表层沉

积物全 N、全 P 均随潮位高程降低而降低<sup>[41]</sup>。本研究中高潮位土壤全 N、全 P、全 K 及速效养分含量均显著高于低潮位,与上述研究具有一致性。这是由于低潮位为光滩,红树林植被生物量低于中、高潮位,植物凋落物输入较中、高潮位少。其次,低潮位土壤受潮水浸淹时间长,高水位环境使土壤植物凋落物、根系分泌物等不易直接返回土壤,土壤养分输入少而输出多,且长时间潮水浸淹使低潮位土壤多处于低氧水平,土壤微生物活性低,抑制腐殖质分解,进一步减少土壤养分输入量<sup>[42]</sup>,从而使低潮位土壤养分含量低于高潮位。

**3.2.2 淹水时间对红树林土壤生态化学计量特征的影响** 土壤生态化学计量比可判断土壤有机质和质量,指示和预测养分在土壤中的循环和变化趋势<sup>[43]</sup>。土壤 C:N 可反映有机质来源、分解状态及其对土壤肥力的潜在贡献,是土壤质量的敏感指标<sup>[44]</sup>。研究表明,C:N 与有机 C 分解速率成反比,C:N 越低土壤矿化越快<sup>[2,44]</sup>。研究区土壤 C:N 均值为 83.74,高于世界土壤(14.3)和中国土壤(11.9)C:N 均值<sup>[7-8]</sup>,表明该生态系统土壤有机质矿化速率缓慢,微生物对有机质的分解速率受限于 N 含量<sup>[2]</sup>,为 C 积累生态系统。不同淹水时间土壤 C:N 随淹水时间增加而减少,高潮位 C:N 显著高于中、中低和低潮位,与刘冬等<sup>[43]</sup>的研究具有一致性,表明不同淹水时间下土壤有机质分解速率存在差异。研究表明,微生物的分解作用对土壤 C:N 产生重要影响,中、低潮位土壤受潮水浸淹时间长,微生物活性受不同程度抑制,从而减缓了有机物的矿化分解<sup>[29]</sup>。本研究中 C:N 属于弱变异<sup>[45]</sup>。土壤 C:N 相对稳定,可归因于土壤 C 和 N 之间的极显著相关性,它们对环境变化的响应几乎同步,且较为稳定的 C:N 符合有机质形成需要一定量 N、相应比例 C 和其他营养素的生态化学计量学原理<sup>[2,4,46]</sup>。

C:P 可反映土壤 P 矿化能力<sup>[46]</sup>。本研究土壤 C:P 均值为 3.46,远低于世界土壤(186)和我国土壤(61)C:P 均值<sup>[7-8]</sup>。较低 C:P 指示土壤 P 的高有效性,有利于促进微生物分解有机质和释放养分,并能促进土壤有效 P 含量增加<sup>[47]</sup>,表明研究区红树林土壤 P 有效性较高。不同淹水时间土壤 C:P 随淹水时间增加而减少,与 C:N 呈相同变化趋势。与王维奇等<sup>[48]</sup>研究结果不同,可能是由于湿地类型的不同使土壤理化性质和生态化学计量比存在差异。此外,C:P 变异程度小<sup>[45]</sup>,P 主要源于岩石风化,受土壤母质影响,使其较为稳定<sup>[8,46]</sup>。土壤 N:P 指示土壤 N 饱和状态,可确定土壤养分限制

阈值<sup>[47]</sup>,研究表明,N:P 小于 14 指示土壤受 N 限制,N:P 大于 16 指示土壤受磷限制<sup>[49]</sup>。本研究土壤 N:P 均值为 0.04,表明研究区红树林土壤处于 N 限制状态,红树植物生长 N 素供应不足,这也证明了红树林土壤 N 的缺乏。高潮位土壤 N:P、C:K 显著高于低潮位,相关分析表明,N:P、C:K 与土壤有机碳、全 N、全 P 和全 K 存在自相关性,使其随淹水梯度的分布特征与养分变化较为一致。

**3.2.3 土壤理化特征与生态化学计量特征的关系** pH、有机碳、全 N 和全 P 等土壤性质可以调节土壤 C:N、C:P 的动态变化<sup>[50]</sup>。本研究中土壤 C:N、C:P、C:K、N:P 分别与土壤盐度、有机碳、溶解性有机 C、全 N、全 K、碱解 N、速效 P、速效 K 均显著正相关,但与 pH 均无显著相关性。李培玺等<sup>[51]</sup>研究表明,湖泊湿地土壤 C:P 与 N 显著正相关,与本研究具有一定相似性。土壤 pH>8.5 或 pH<5.5 可抑制土壤微生物活性,从而降低有机 C 分解速率,影响土壤 C、N 循环<sup>[52]</sup>。本研究中土壤 pH 为 5.93~6.13,在不同潮位间无显著差异,pH 波动对土壤微生物活性影响较为一致,这与赵海燕等<sup>[53]</sup>研究具有相似性。冗余分析表明,土壤溶解性有机 C 和含水率可解释研究区土壤生态化学计量比变化的 89.2%,其中土壤溶解性有机 C 是其变化的关键环境因素。研究表明<sup>[51,53-55]</sup>,土壤 N、P 会因土壤 C 变化而变化,土壤 C、P 含量是 C/N、C/P 差异的重要决定性因子;而土壤含水率是影响湿地土壤 C、N、P 化学计量比的关键因素,这与本研究具有相似性。

## 参考文献:

- [1] SU B Q, SHANGGUAN Z P. Response of water use efficiency and plant-soil C:N:P stoichiometry to stand quality in *Robinia pseudoacacia* on the Loess Plateau of China[J]. *Catena*, 2021, 206: 105571.
- [2] 王绍强,于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. *生态学报*, 2008, 28(8): 3937-3947.  
WANG S Q, YU G R. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(8): 3937-3947. (in Chinese)
- [3] ZECHMEISTER-BOLTENSTREIN S, KEIBLINGER K M, MOOSHAMMER M, et al. The application of ecological stoichiometry to plant-microbial-soil organic matter transformations[J]. *Ecological Monographs*, 2015, 85(2): 133-155.
- [4] 张珊,顾振东,陶继新,等. 白龙江上游不同林龄粗枝云杉人工林土壤化学计量特征[J]. *西北林学院学报*, 2022, 37(1): 17-24.  
ZHANG S, GU Z D, TAO J X, et al. Soil ecological stoichiometry of spruce plantation of age sequence in upstream of Bailongjiang River[J]. *Journal of Northwest Forestry University*,



- 2022,37(1):17-24. (in Chinese)
- [5] MICHAELS A F. The ratios of life[J]. Science, 2003, 300 (5621):906-907.
- [6] 李佳佳,樊妙春,上官周平. 黄土高原南北样带刺槐林土壤碳、氮、磷生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2019, 39(21):7996-8002.
- LI J J, FAN M C, SHANGGUAN Z P. Ecological stoichiometry characteristics of soil carbon, nitrogen, and phosphorus of the *Robinia pseudoacacia* forest on the north-south strip of the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(21):7996-8002. (in Chinese)
- [7] CLEVELAND C C, LIPTZIN D. C : N : P stoichiometry in soil; is there a "redfield ratio" for the microbial biomass? [J]. Biogeochemistry, 2007, 85(3):235-252.
- [8] TIAN H Q, CHEN G S, ZHANG C, *et al.* Pattern and variation of C : N : P ratios in China's soils; a synthesis of observational data[J]. Biogeochemistry, 2010, 98(1/3):139-151.
- [9] 张仲胜, 吕宪国, 薛振山, 等. 中国湿地土壤碳氮磷生态化学计量学特征研究[J]. 土壤学报, 2016, 53(5):1160-1169.
- ZHANG Z S, LÜ X G, XUE Z S, *et al.* Is there a redfield-type C : N : P ratio in Chinese wetland soils[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53(5):1160-1169. (in Chinese)
- [10] ZHAO F Z, KANG D, HAN X H, *et al.* Soil stoichiometry and carbon storage in long-term afforestation soil affected by understory vegetation diversity[J]. Ecological Engineering, 2015, 74:415-422.
- [11] 宋佳龄, 盛浩, 周萍, 等. 亚热带稻田土壤碳氮磷生态化学计量学特征[J]. 环境科学, 2020, 41(1):403-411.
- SONG J L, SHENG H, ZHOU P, *et al.* Ecological stoichiometry of carbon, nitrogen, and phosphorus in subtropical paddy soils [J]. Environmental Science, 2020, 41(1):403-411. (in Chinese)
- [12] DONATO D C, KAUFFMAN J B, MURDIYARSO D, *et al.* Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics [J]. Nature Geoscience, 2011, 4(5):293-297.
- [13] FENG J X, ZHOU J, WANG L M, *et al.* Effects of short-term invasion of *Spartina alterniflora* and the subsequent restoration of native mangroves on the soil organic carbon, nitrogen and phosphorus stock [J]. Chemosphere, 2017, 184:774-783.
- [14] ROVAI A S, TWILLEY R R, CASTANEDA-MOYA E, *et al.* Global controls on carbon storage in mangrove soils[J]. Nature Climate Change, 2018, 8(6):534-538.
- [15] ALONGI D M. Early growth responses of mangroves to different rates of nitrogen and phosphorus supply[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2011, 397(2):85-93.
- [16] LU W Z, YANG S C, CHEN L Z, *et al.* Changes in carbon pool and stand structure of a native subtropical mangrove forest after inter-planting with exotic species *Sonneratia Apetala* [J]. PLoS One, 2014, 9(3):91238.
- [17] ZHU D H, HUI D F, WANG M Q, *et al.* Light and competition alter leaf stoichiometry of introduced species and native mangrove species [J]. Science of the Total Environment, 2020, 738:140301.
- [18] 刘滨尔, 廖宝文, 方展强. 不同潮汐和盐度下红树植物幼苗秋茄的化学计量特征[J]. 生态学报, 2012, 32(24):7818-7827.
- [19] 周元慧, 张忠华, 黎洁, 等. 广西北仑河口红树植物叶片和土壤的碳氮磷生态化学计量特征[J]. 地球与环境, 2020, 48(1):58-65.
- ZHOU Y H, ZHANG Z H, LI J, *et al.* Ecological stoichiometry of carbon, nitrogen and phosphorus in plant leaves and soils of mangrove forests in the Beilun estuary, Guangxi, China [J]. Earth and Environment, 2020, 48(1):58-65. (in Chinese)
- [20] 何琴飞, 申文辉, 彭玉华, 等. 钦州湾红树林土壤肥力及其 C、N、P、K 化学计量特征[J]. 西北林学院学报, 2017, 32(6):119-124, 149.
- HE Q F, SHEN W H, PENG Y H, *et al.* Soil fertility and C, N, P, K ecological stoichiometry of mangroves in Qinzhou Bay, Guangxi[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017, 32(6):119-124, 149. (in Chinese)
- [21] FENG J X, CUI X W, ZHOU J, *et al.* Effects of exotic and native mangrove forests plantation on soil organic carbon, nitrogen, and phosphorus contents and pools in Leizhou, China [J]. Catena, 2019, 180:1-7.
- [22] WANG Q, WEN Y X, ZHAO B, *et al.* Coastal soil texture controls soil organic carbon distribution and storage of mangroves in China[J]. Catena, 2021, 207:105709.
- [23] MULLER P, GRANSE D, NOLTE S, *et al.* Unrecognized controls on microbial functioning in blue carbon ecosystems: the role of mineral enzyme stabilization and allochthonous substrate supply [J]. Ecology and Evolution, 2020, 10(2):998-1011.
- [24] WANG L X, YAN B X, PRASHER S O, *et al.* The response of microbial composition and enzyme activities to hydrological gradients in a riparian wetland[J]. Journal of Soils and Sediments, 2019, 19(12):4031-4041.
- [25] 陈瑶瑶, 张雅松, 姜铎, 等. 广东英罗湾不同潮位红树林-滩涂系统碳密度差异[J]. 生态环境学报, 2019, 28(6):1134-1140.
- CHEN Y Y, ZHANG Y S, LOU D, *et al.* Carbon density difference of mangrove-shoal system at different tidal levels in Yingluo Bay, Guangdong[J]. Ecology and Environmental Sciences, 28(6):1134-1140. (in Chinese)
- [26] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- [27] LI Q Q, LI S, XIAO Y, *et al.* Soil acidification and its influencing factors in the purple hilly area of southwest China from 1981 to 2012[J]. Catena, 2019, 175(4):278-285.
- [28] 蓝福生, 李瑞棠, 陈平, 等. 广西海涂红树林与土壤的关系[J]. 广西植物, 1994(1):54-59.
- [29] 赵慧, 刘伟龙, 王小丹, 等. 不同水分条件下藏北盐化沼泽湿地土壤碳氮的分布[J]. 山地学报, 2014, 32(4):431-437.
- [30] 马晓霞. 潮汐水淹和根际氧化对红树林氮素动态变化的影响 [D]. 广州: 暨南大学, 2019.
- [31] KOMIYAMA A, POUNGPAM S, UMNOUYISIN S, *et al.* Occurrence of seasonal water replacement in mangrove soil and the trunk growth response of *Avicennia alba* related to salinity changes in a tropical monsoon climate[J]. Ecological Research, 2019, 34(3):428-439.
- [32] COORAY P L I G M, JAYAWARDANA D T, GU-



- NATHILAKE B M, *et al.* Characteristics of tropical mangrove soils and relationships with forest structural attributes in the northern coast of Sri Lanka[J]. *Regional Studies in Marine Science*, 2021, 44: 101741.
- [33] 黄小清, 全川, 罗敏, 等. 九龙江河口潮滩湿地土壤有机碳储量、活性组分及稳定性沿淹水梯度的分布特征[J]. *环境科学*, 2022, 43(4): 2226-2236.
- [34] 高灯州, 曾从盛, 章文龙, 等. 闽江口湿地土壤有机碳及其活性组分沿水文梯度分布特征[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(6): 216-221, 227.
- [35] LI N, SHAO T Y, ZHU T S, *et al.* Vegetation succession influences soil carbon sequestration in coastal alkali-saline soils in southeast China[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 1-12.
- [36] REN H, CHEN H, LI Z A, *et al.* Biomass accumulation and carbon storage of four different aged *Sonneratia apetala* plantations in southern China[J]. *Plant and Soil*, 2010, 327(1/2): 279-291.
- [37] 缪绅裕, 陈桂珠, 陈正桃, 等. 广东湛江保护区红树林种群的生物量及其分布格局[J]. *广西植物*, 1998(1): 20-24.
- [38] GLEASON S M, EWEL K C. Organic matter dynamics on the forest floor of a Micronesian mangrove forest: an investigation of species composition shifts[J]. *Biotropica*, 2002, 34(2): 190-198.
- [39] WANG G, GUAN D S, PEART M R, *et al.* Ecosystem carbon stocks of mangrove forest in Yingluo Bay, Guangdong Province of south China[J]. *Forest Ecology and Management*, 2013, 310: 539-546.
- [40] REEF R, FELLER I C, LOVELOCK C E. Nutrition of mangroves[J]. *Tree Physiology*, 2010, 30(9): 1148-1160.
- [41] 余小青, 杨军, 刘乐冕, 等. 九龙江口滨海湿地生源要素空间分布特征[J]. *环境科学*, 2012, 33(11): 3739-3747.
- [42] LIU Y, JIANG M, LU X G, *et al.* Carbon, nitrogen and phosphorus contents of wetland soils in relation to environment factors in northeast China[J]. *Wetlands*, 2017, 37(1): 153-161.
- [43] 刘冬, 张剑, 包雅兰, 等. 水分对敦煌阳关湿地芦苇叶片与土壤C、N、P生态化学计量特征的影响[J]. *生态学报*, 2020, 40(11): 3804-3812.
- LIU D, ZHANG J, BAO Y L, *et al.* Effects of soil moisture on *Phragmites australis* leaves and soil C, N and P ecological stoichiometric characteristics in Yangguan wetland, Dunhuang[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(11): 3804-3812. (in Chinese)
- [44] BUI E N, HENDERSON B L. C : N : P stoichiometry in Australian soils with respect to vegetation and environmental factors[J]. *Plant and Soil*, 2013, 373(1/2): 553-568.
- [45] 杜映妮, 李天阳, 何丙辉, 等. 长期施肥和耕作下紫色土坡耕地土壤C、N、P和K化学计量特征[J]. *环境科学*, 2020, 41(1): 394-402.
- [46] WANG L J, WANG P, SHENG M Y, *et al.* Ecological stoichiometry and environmental influencing factors of soil nutrients in the karst rocky desertification ecosystem, southwest China[J]. *Global Ecology and Conservation*, 2018, 16: 449.
- [47] CUI H, OU Y, WANG L X, *et al.* Dynamic changes in microbial communities and nutrient stoichiometry associated with soil aggregate structure in restored wetlands[J]. *Catena*, 2021, 197: 104984.
- [48] 王维奇, 王纯, 曾从盛, 等. 闽江河口不同河段芦苇湿地土壤碳氮磷生态化学计量学特征[J]. *生态学报*, 2012, 32(13): 4087-4093.
- [49] KOERSELMAN W, MEULEMAN A F M. The vegetation N : P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation[J]. *Journal of Applied Ecology*, 1996, 33(6): 1441-1450.
- [50] LU Q Q, BAI J H, ZHANG G L, *et al.* Spatial and seasonal distribution of carbon, nitrogen, phosphorus, and sulfur and their ecological stoichiometry in wetland soils along a water and salt gradient in the Yellow River Delta, China[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2018, 104: 9-17.
- [51] 李培玺, 储炳银, 滕臻, 等. 巢湖湖滨带不同植被类型土壤碳氮磷生态化学计量学特征[J]. *草业科学*, 2020, 37(8): 1448-1457.
- LI P X, CHU B Y, TENG Z, *et al.* Effect of vegetation type on the eco-stoichiometric characteristics of soils from around Chaohu lake[J]. *Pratacultural Science*, 2020, 37(8): 1448-1457. (in Chinese)
- [52] 张剑, 宿力, 王利平, 等. 植被盖度对土壤碳、氮、磷生态化学计量比的影响—以敦煌阳关湿地为例[J]. *生态学报*, 2019, 39(2): 580-589.
- ZHANG J, SU L, WANG L P, *et al.* The effect of vegetation cover on ecological stoichiometric ratios of soil carbon, nitrogen and phosphorus: a case study of the Dunhuang Yangguan wetland[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(2): 580-589. (in Chinese)
- [53] 赵海燕, 张剑, 刘冬, 等. 不同沼泽湿地土壤碳氮磷生态化学计量学特征及其影响因素[J]. *干旱区研究*, 2020, 37(3): 618-626.
- ZHAO H Y, ZHANG J, LIU D, *et al.* Characteristics and determining factors for ecological stoichiometry of soil carbon, nitrogen, and phosphorus in different marsh wetlands[J]. *Arid Zone Research*, 2020, 37(3): 618-626. (in Chinese)
- [54] 卜晓燕, 米文宝, 许浩, 等. 宁夏平原不同类型湿地土壤碳氮磷含量及其生态化学计量学特征[J]. *浙江大学学报: 农业与生命科学版*, 2016, 42(1): 107-118.
- [55] HU C, LI F, XIE Y H, *et al.* Soil carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry of three dominant plant communities distributed along a small-scale elevation gradient in the east Dongting Lake[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2018, 103(1): 28-34.