

中南林业科技大学学报

Journal of Central South University of Forestry & Technology

ISSN 1673-923X，CN 43-1470/S

《中南林业科技大学学报》2026年第9期

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923X.2026.09.014

论文标题： 广西钦州湾3种典型红树林土壤阳离子交换量特征及保肥能力分析

作　　者： 甘国娟，刘盼盼，周彩红，等

收稿日期： 2025-09-16

引文格式： 甘国娟,刘盼盼,周彩红,等.广西钦州湾3种典型红树林土壤阳离子交换量特征及保肥能力分析[J].中南林业科技大学学报,2026,46(9):153-163.

Gan G J, Liu P P, Zhou C H, et al. Analysis of cation exchange capacity and fertilizer retention in three typical mangrove soils from Qinzhou bay, Guangxi[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(9):153-163.

相关论文推荐

Recommended articles

钦州湾不同林龄无瓣海桑人工林表层沉积物生态化学计量特征

Ecological stoichiometry characteristics in surface sediments of *Sonneratia apetala* plantation of different ages in Qinzhou bay

泰森多边形与传统四株树法的天然红树林空间结构比较研究

Comparative study on natural mangrove forest stand spatial structure by Tyson polygon and traditional four trees method

淇澳岛不同恢复类型红树林碳密度及固碳速率研究

Carbon density and carbon fixation rate of mangroves of different restoration types in Qi'ao island

5种红树幼苗对光强变化的生长生理响应与耐阴性差异

Growth and physiological response to light intensity changes and shade tolerance differences of five mangrove seedlings

基于MaxEnt模型的珠海市红树林潜在适生区分析

Research on the potential suitable habitat of mangroves analysis in Zhuhai City based on MaxEnt modeling

八门湾不同退化梯度红树林土壤重金属污染及风险评价

Heavy metal pollution and risk assessment of mangrove soils with different degradation gradients in Bamen bay

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2026.09.014
http: //qks.csuft.edu.cn

广西钦州湾 3 种典型红树林土壤阳离子交换量特征及保肥能力分析

甘国娟[1]，刘盼盼[1]，周彩红[1]，李京隆[1]，赵文杰[1]，周　伟[1]，田红灯[2]

（1. 南宁师范大学 a. 北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室；
b. 广西地表过程与智能模拟重点实验室；c. 环境与生命科学学院，广西 南宁 530001；
2. 广西壮族自治区林业科学研究院 广西林业实验室，广西 南宁 530002）

摘　要：【目的】旨在揭示滨海湿地环境下典型红树林土壤阳离子交换量（Cation exchange capacity，CEC）的树种特异性规律，阐明土壤物理性质 - 化学性质 - 生态化学计量比的多尺度耦合驱动机制，并验证 CEC 作为红树林土壤保肥能力核心指标的生态适配性，为精准提升红树林生态修复过程中土壤肥力调控提供科学依据。【方法】以茅尾海的桐花树 *Aegiceras corniculatum*、无瓣海桑 *Sonneratia apetala* 和秋茄 *Kandelia obovata* 3 种典型红树群落为研究对象，在不同林分中分别设置 4 个 20 m×20 m 样地，采用蛇形布点法采集 0 ～ 60 cm 土壤样品，测定土壤 CEC、pH 值、有机质含量、全氮含量、全磷含量等 12 项土壤理化指标，采用相关性分析、主成分分析、方差分析并构建偏最小二乘结构方程模型，探究 CEC 的关键影响因素及其与土壤保肥能力的耦合机制。【结果】1）除硝态氮外，其余 11 项土壤理化指标在树种间差异显著（$P < 0.05$）；0 ～ 20 cm 表层土壤 CEC 及多数养分指标显著高于深层土壤（$P < 0.05$），呈现明显的表聚效应。2）CEC 受土壤物理性质、化学性质及生态化学计量比的共同影响，其中土壤物理性质总效应最大（通过间接作用调控化学性质），化学性质直接效应最强，二者协同驱动 CEC 变化，生态化学计量比影响最弱。3）土壤肥力综合指数（Integrated fertility index，IFI）与 CEC 排序一致（桐花树＞无瓣海桑＞秋茄），树种差异显著影响土壤 CEC 与肥力水平，同时验证了 CEC 作为土壤保肥能力核心评价指标的可靠性。【结论】研究区红树林土壤保肥能力中等偏低，土壤富含有机质而氮磷匮乏，保持适宜 CEC 的关键在于保护有机质的稳定自然积累。建议加快研究区植被恢复，促进植被演替进程，以此提升土壤氮磷水平，改善生态系统供肥保肥性能。

关键词：红树林；土壤养分；阳离子交换量；保肥能力；广西钦州湾

中图分类号：S718.51　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1673-923X(2026)09-0153-11

Analysis of cation exchange capacity and fertilizer retention in three typical mangrove soils from Qinzhou bay, Guangxi

Gan Guojuan[1], Liu Panpan[1], Zhou Caihong[1], Li Jinglong[1], Zhao Wenjie[1], Zhou Wei[1], Tian Hongdeng[2]

(1. a. Key Laboratory of Environment Change and Resources Use in Beibu Gulf of Ministry of Education; b. Guangxi Key Laboratory of Earth Surface Processes and Intelligent Simulation; c. School of Environment and Life Science, Nanning Normal University, Nanning 530001, Guangxi, China; 2. Guangxi Forestry Research Institute, Guangxi Forestry Laboratory, Nanning 530002, Guangxi, China)

Abstract:【Objective】This study aimed to reveal the species-specific patterns of soil cation exchange capacity (CEC) in typical mangrove forests within the specific environment of coastal wetlands, elucidate the multi-scale coupled driving mechanisms involving soil physical properties, chemical properties, and ecological stoichiometric ratios, and verify the ecological suitability of CEC as a core indicator of soil nutrient retention capacity in mangrove ecosystems, thereby providing a scientific basis for precisely enhancing the

收稿日期（Received）：2025-09-16　　**修订日期**（Revised）：2025-11-17

基金项目：北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室（南宁师范大学）和广西地表过程与智能模拟重点实验室（南宁师范大学）开放或系统基金项目（NNNU-KLOP-K1902）；广西重点研发计划项目（桂科 AB24010288）；广西林业科技推广示范项目（2023GXLK07）；广西壮族自治区级大学生创新创业训练计划项目（S202410603089）。

第一作者：甘国娟（ganguojuan2010@163.com），助理研究员，博士。**通信作者：**田红灯（664215129@qq.com），高级工程师，硕士。

引文格式：甘国娟 , 刘盼盼 , 周彩红 , 等 . 广西钦州湾 3 种典型红树林土壤阳离子交换量特征及保肥能力分析 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2026,46(9):153-163.

Gan G J, Liu P P, Zhou C H, et al. Analysis of cation exchange capacity and fertilizer retention in three typical mangrove soils from Qinzhou bay, Guangxi[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(9):153-163.

efficiency of soil fertility regulation in mangrove ecological restoration.【Method】Taking the three typical communities of *Aegiceras corniculatum*, *Sonneratia apetala,* and *Kandelia obovata* as study objects in Maowei Sea, four plots of 20 m × 20 m were set up in each forest, soil samples were collected within each plot using a zigzag pattern to a depth of 0-60 cm, 12 physical and chemical indicators including soil CEC, pH value, organic matter, total nitrogen, and total phosphorus were determined. Correlation analysis, principal component analysis (PCA), variance partitioning analysis (VPA), and partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM) were used to explore the key influencing factors of CEC and its coupling mechanism with nutrient retention capacity.【Result】1) Except for nitrate nitrogen, the other 11 soil physical and chemical indicators showed significant differences among tree species ($P < 0.05$); CEC and most nutrient indicators in the 0-20 cm topsoil were significantly higher than those in the subsoil ($P < 0.05$), exhibited an obvious surface accumulation effect; 2) CEC was jointly influenced by soil physical properties, chemical characteristics and ecological stoichiometric ratios. Among them, soil physical properties had the largest total effect (regulating chemical properties through indirect effects), chemical properties had the strongest direct effect, and the two synergistically drove CEC changes, while ecological stoichiometric ratios had the weakest impact; 3) The integrated fertility index (IFI) showed the same order as CEC (*Aegiceras corniculatum* > *Sonneratia apetala* > *Kandelia obovata*), soil CEC and fertility levels were significantly affected by tree species differences, meanwhile, the reliability of CEC as a core indicator of nutrient retention capacity was verified.【Conclusion】The comprehensive soil fertility level of mangroves in the study area was generally medium to low. The soil was rich in organic matter but deficient in nitrogen and phosphorus. The key to maintaining appropriate CEC lies in protecting the natural accumulation of organic matter. It is suggested to adopt artificial regulation measures to accelerate vegetation restoration, promote vegetation succession, improve nitrogen and phosphorus levels, and enhance soil nutrient supply and retention capacity.

Keywords: mangroves; soil nutrients; cation exchange capacity; nutrient retention capacity; Qinzhou bay in Guangxi

土壤肥力是衡量土壤质量与生产潜力的重要指标，与土壤生态功能及土地资源可持续利用密切相关[1]。阳离子交换量（Cation exchange capacity，CEC）作为表征土壤保肥、供肥及缓冲能力的关键参数，可直接反映土壤养分对植物及土壤微生物的有效性[2]，在土壤质量维持与保护、物质循环与能量流动以及土地资源可持续利用方面发挥关键作用[3]。因此，CEC 常作为评价土壤保肥能力的重要指标[4]。红树林作为热带亚热带海岸带的独特湿地生态系统，兼具高生产力与生物多样性，但其面积锐减与功能退化问题已成为全球关注的焦点。近年来，红树林生态修复工程广泛开展，红树林生态系统恢复能力和土壤养分循环效率随之提高[5]，然而不同红树树种对土壤 CEC 的调控机制及其与肥力特征的关联规律仍不明确，制约了修复策略的精准性。因此，探究红树林土壤 CEC 特征及保肥能力，对推进红树林保护与修复进程具有重要意义。

Martel 等[6]对美国 11 种潜育土进行分析，显示土壤 CEC 与黏粒及有机质含量存在极显著相关性，基于美国土壤普查数据构建的预测模型可对多数土壤的 CEC 进行有效预测[7]。国内学者多围绕 CEC 与土壤质量关系、CEC 时空特征及其影响因子展开研究。苏有健等[8]研究表明，土壤缓冲性能随 CEC 增加而提升，二者呈正相关关系，土壤酸化速率则同时降低；李源环等[9]、关雪[10]研究表明，土壤 CEC 越高，酸碱缓冲容量越大，对重金属的缓冲性越强；郭锁娜等[11]针对云南大春河小流域进行研究，表明土壤阳离子附着于土壤而流失，并随土壤深度的增加，土壤 CEC 呈递减趋势；纪佳辰等[12]研究表明，土壤质地和有机碳含量是长江下游冲积平原土壤 CEC 的主要影响因素；白志强等[13]针对四川盆地西缘的研究指出，由温度与降水构成的气候因素决定了该地区土壤 CEC 水平；童根平等[14]研究表明，黏粒是土壤 CEC 的主要贡献者，不同类型土壤之间保肥能力存在差异；温军等[15]对长江源区高寒草地土壤进行研究，发现 CEC 均为阴坡大于滩地和阳坡。现有研究表明，土壤 CEC 受土壤类型、地形条件、气候等多种因素的影响而表现出差异性。目前，CEC 研究多聚焦于陆地森林[16-17]、耕地[18-19]、小流域[20]等生态系统。尽管红树林生态修复中树种选择对土壤质量的影响已得到关注，但本土树种（如桐花树 *Aegiceras corniculatum*、秋茄 *Kandelia obovata* 等）与外来种（如无瓣海桑 *Sonneratia apetala*）在长期潮汐 - 盐度胁迫下，不同植被类型调控土壤 CEC 的特异性过程仍缺乏系统解析。现有研究多聚焦生态系统 CEC 的单一影响因子，而红树林湿地中土壤物理结构、化学性质及生态化学计量比如何通过“直接 - 间接”路径协同驱动 CEC 变化的多维度机制尚未揭示。此外，红树林土壤肥力与 CEC 的耦合关系及其对植被类型的反馈作用，尚未成为红树林生态修复的理论依据。广西是我国红树林分布最多的省（区）之一，红树林面积约占全国红树林总面积的 1/3，其中钦州湾是最典型的红树林分布区之一。基于此，本研究选取钦州湾的桐花树、无瓣海桑、秋茄 3 种典型红树林成熟林群落，基于多维度数据解析 CEC 的分布规律、关键驱动因子及

保肥机制，以期为红树林生态修复中的树种选择与土壤肥力管理提供理论支撑。

1　研究区概况与研究方法

1.1　研究区概况

研究区位于广西钦州湾茅尾海红树林保护区（108°28′35″ ～ 108°54′26″ E，21°44′13″ ～ 21°53′49″ N），为典型全日潮海域，属南亚热带季风气候，年均温 22.1 ℃，年均降水量 2 170.99 mm，年均相对湿度 81%，桐花树、无瓣海桑、秋茄等为研究区内典型红树群落 [21]。

1.2　样地设置和样品采集

2023 年 8 月，在广西钦州湾茅尾海红树林保护区红树林生长区域，遵循样点设置的典型性原则，选取桐花树（AC）、无瓣海桑（SA）、秋茄（KO）3 种具有代表性的样地（成熟林，且均处于同一低潮位带），样地基本概况见表 1。在不同林分中分别设置 4 个 20 m×20 m 样地，共计 12 个样地。用滩涂取样器采集 0 ～ 60 cm 土壤样品（每隔 20 cm 分层，共 3 层），每个样地内按蛇形布点法取 3 根土柱，将 4 个平行样地采集的同一土层土壤混匀成一个样品（约 1 kg），运回实验室；去除动植物残体、石块等杂质后，将样品粉碎过筛，待土样自然风干后进行研磨，研磨完毕后分成两份，一份过 2 mm 尼龙筛，另一份过 0.149 mm 尼龙筛，分别存于自封袋，用于土壤理化指标的测定。

1.3　测定方法

参照《土壤调查实验室分析方法》[22] 及《土壤农化分析（第三版）》[23] 开展土壤样品理化指标测定。采用三氯化六氨合钴浸提 - 分光光度法测定 CEC；采用电极法测定土壤 pH 值及电导率（Electrical conductivity，EC）；采用激光粒度仪法测定黏粒（Clay）、粉粒（Silt）和砂粒（Sand）质量分数；有机质（Soil organic matter，SOM）含量用重铬酸钾容量法测定；分别采用凯氏定氮法、纳氏试剂比色法、紫外分光光度法测定全氮（Total nitrogen，TN）、铵态氮（NH_4^+-N）、硝态氮（NO_3^--N）含量；分别采用酸溶 - 钼锑抗分光光度法、氟化铵 + 盐酸浸提 - 钼锑抗比色法测定土壤全磷（Total phosphorus，TP）、有效磷（Available phosphorus，AP）含量。

1.4　湿地土壤肥力评价方法

参照已有方法 [24]，利用土壤肥力综合指标值（Integrated fertility index，IFI，I_F）评价湿地土壤肥力，该值由隶属度值和权重计算得出，具体函数表达式为：

$$I_F = \sum_{i=1}^{n} W_i F_i \text{ 。}$$

式中：n 为评价土壤指标数；W_i、F_i 分别是第 i 个指标的权重、隶属度。IFI 介于 0 ～ 1 之间，其值越接近 1，表示土壤肥力越高。IFI 分为 5 个等级，分别为：Ⅰ级（0.8 ～ 1.0]、Ⅱ级（0.6 ～ 0.8]、Ⅲ级（0.4 ～ 0.6]、Ⅳ级（0.2 ～ 0.4] 和Ⅴ级（0 ～ 0.2]。

1.5　数据处理与分析

采用 Excel 2019 软件计算土壤理化指标及生态化学计量比（C∶N、C∶P、N∶P）的平均值和标准偏差。采用 https://cnsknowall.com/#/HomePage 在线数据分析平台进行差异性分析及雷达图绘制；采用 R 语言辅助绘制土壤理化性质相关性 Heatmap 图、主成分分析（Principal component analysis，PCA）图和方差分析（Variation partitioning analysis，VPA）图，用以分析相关因子对 CEC 影响的贡献值。在 R4.2.2 软件中构建偏最小二乘结构方程模型（PLS-SEM），用来量化土壤理化性质对土壤 CEC 的影响。采用 Adobe Illustrator 软件制图。

2　结果与分析

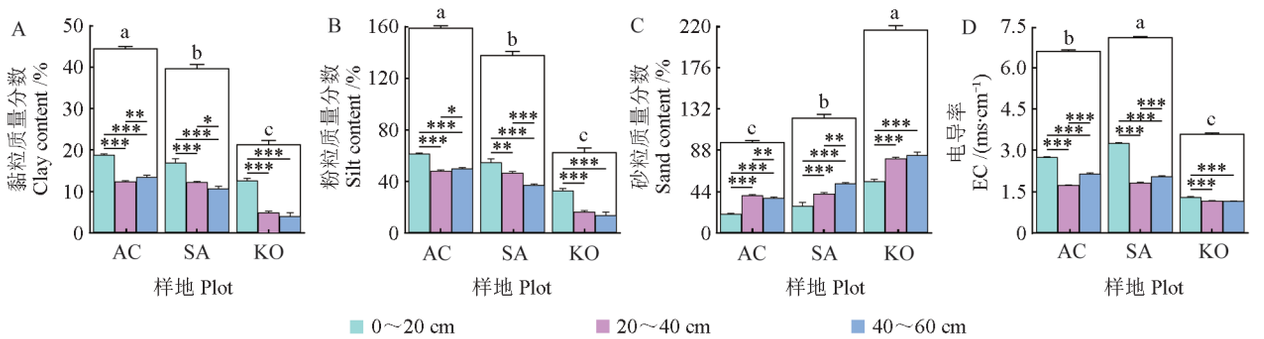
2.1　土壤物理性质指标的分布特征

由图 1 可知，土壤黏粒和粉粒的质量分数在树种间存在显著差异，表现为桐花树＞无瓣海桑＞秋茄；在不同土层间存在显著或极显著

表 1　样地基本概况
Table 1　Basic overview of the sample plot

样地 Sample plot	主要树种 Main tree species	土壤类型 Soil type	平均树高 Average tree height /m	平均胸径 Average DBH /cm	经纬度 Latitude and longitude
AC	桐花树	盐渍沼泽土（泥炭）	2.81±0.79	8.31±2.12	108°29′25″ E，21°52′08″ N
SA	无瓣海桑	盐渍沼泽土（沙土）	16.33±0.88	29.71±0.91	108°29′22″ E，21°52′08″ N
KO	秋茄	盐渍沼泽土（沙土）	2.92±0.72	12.22±3.53	108°32′57″ E，21°54′04″ N

差异，但在土层间变化趋势不一样，无瓣海桑和秋茄表现为 0 ～ 20 cm ＞ 20 ～ 40 cm ＞ 40 ～ 60 cm，桐花树为 0 ～ 20 cm ＞ 40 ～ 60 cm ＞ 20 ～ 40 cm。土壤砂粒的质量分数在树种间存在显著差异，表现为秋茄＞无瓣海桑＞桐花树；在不同土层间存在显著或极显著差异，但在土层间变化趋势不一样，无瓣海桑和秋茄表现为 40 ～ 60 cm ＞ 20 ～ 40 cm ＞ 0 ～ 20 cm，桐花树最大值出现在 20 ～ 40 cm 土层。土壤电导率在树种间存在显著差异，表现为无瓣海桑＞桐花树＞秋茄；在不同土层间存在显著或极显著差异，但在土层间变化趋势不一样，无瓣海桑和桐花树的电导率为 0 ～ 20 cm ＞ 40 ～ 60 cm ＞ 20 ～ 40 cm，秋茄为 0 ～ 20 cm ＞ 20 ～ 40 cm ＞ 40 ～ 60 cm。综上所述，4 个土壤物理指标在树种间均存在显著差异，黏粒和粉粒的质量分数为桐花树＞无瓣海桑＞秋茄，砂粒为秋茄＞无瓣海桑＞桐花树，电导率为无瓣海桑＞桐花树＞秋茄；土层间的变化规律在不同指标中存在差异，黏粒质量分数、粉粒质量分数和电导率均为表层土显著高于其他土层。



不同小写字母表示不同土层深度平均值在不同树种间存在显著差异（$P < 0.05$）。不同土壤深度间差异分析：*，$P < 0.05$；**，$P < 0.01$；***，$P < 0.001$。下同。
Different small letters indicate that the average values at different depths are significantly different among different tree species ($P < 0.05$). Analysis of differences among different soil depths: *, $P < 0.05$; **, $P < 0.01$; ***, $P < 0.001$, the same below.

图 1　土壤物理性质指标的分布特征

Fig. 1　Distribution characteristics of content of indices of soil physical properties

2.2　土壤化学性质指标的分布特征

由图 2 可知，土壤 CEC 和有机质含量在树种间存在显著差异，且表现为桐花树＞无瓣海桑＞秋茄；同一树种不同土层间存在极显著或显著差异，除无瓣海桑的有机质外，其他树种在土层间的变化趋势为 0 ～ 20 cm ＞ 20 ～ 40 cm ＞ 40 ～ 60 cm。无瓣海桑土壤全磷含量分别与桐花树、秋茄存在显著差异，桐花树与秋茄不存在显著差异，含量表现为无瓣海桑＞桐花树＞秋茄；在不同土层间存在极显著或不显著差异，且在土层间的变化趋势为 0 ～ 20 cm ＞ 20 ～ 40 cm ＞ 40 ～ 60 cm（图 2）。土壤全氮含量在树种间存在显著差异，含量为无瓣海桑＞桐花树＞秋茄；在不同土层间存在极显著或显著差异，而且在土层间的变化趋势为 0 ～ 20 cm ＞ 40 ～ 60 cm ＞ 20 ～ 40 cm（图 2）。土壤有效磷含量在树种间存在显著差异，含量为桐花树＞秋茄＞无瓣海桑；在不同土层间存在极显著或显著差异，在土层间的变化趋势为 0 ～ 20 cm ＞ 20 ～ 40 cm ＞ 40 ～ 60 cm（图 2）。土壤铵态氮含量在树种间存在显著差异，含量为无瓣海桑＞桐花树＞秋茄；在不同土层间存在显著差异，无明显规律，且在土层间的变化趋势不一样，其中最大值在 0 ～ 20 cm（图 2）。土壤硝态氮含量在树种间无显著差异；在不同土层间存在显著或极显著差异，但在土层间的变化趋势不一样，秋茄和桐花树的最大值出现在 20 ～ 40 cm 土层，无瓣海桑的最大值出现在 0 ～ 20 cm 土层（图 2）。土壤 pH 值在树种间存在显著差异，表现为秋茄＞桐花树＞无瓣海桑；在不同土层间存在显著或极显著差异，但在土层间的变化趋势不一样，桐花树和无瓣海桑的土壤 pH 值为 0 ～ 20 cm ＞ 20 ～ 40 cm ＞ 40 ～ 60 cm，秋茄为 0 ～ 20 cm ＜ 20 ～ 40 cm ＜ 40 ～ 60 cm（图 2）。综上所述，除了硝态氮含量在树种间差异不显著外，其他 7 个土壤化学指标在树种间均存在显著差异，其中全磷含量、全氮含量和铵态氮含量表现为无瓣海桑＞桐花树＞秋茄，CEC、有机质含量表现为桐花树＞无瓣海桑＞秋茄；土层间的变化规律在不同指标中存在差异，除硝态氮和 pH 值外，最大值均出现在 0 ～ 20 cm。

2.3　生态化学计量比的分布特征

由图 3 可知，土壤碳氮比（C∶N）在树种间存在显著差异，表现为桐花树＞秋茄＞无瓣海桑；在不同土层间存在显著或极显著差异，但在土层间

的变化趋势不一样，桐花树和秋茄的土壤 C∶N 为 20 ～ 40 cm ＞ 40 ～ 60 cm ＞ 0 ～ 20 cm，无瓣海桑为 0 ～ 20 cm ＜ 20 ～ 40 cm ＜ 40 ～ 60 cm。土壤碳磷比（C∶P）在树种间存在显著差异，表现为桐花树＞秋茄＞无瓣海桑；在不同土层间存在显著或极显著差异，但在土层间的变化趋势不一样，无瓣海桑和秋茄的 C∶P 最大值出现在 40 ～ 60 cm 土层，而桐花树最大值出现在 20 ～ 40 cm 土层。土壤氮磷比（N∶P）在树种间存在显著差异，表现为桐花树＞秋茄＞无瓣海桑；在不同土层间存在极显著差异（其中无瓣海桑 0 ～ 20 cm 土层与 40 ～ 60 cm 土层间无差异），桐花树和秋茄土壤 N∶P 为 0 ～ 20 cm ＜ 20 ～ 40 cm ＜ 40 ～ 60 cm，无瓣海桑为 0 ～ 20 cm ＞ 40 ～ 60 cm ＞ 20 ～ 40 cm。综上所述，3 个生态化学计量比在树种间均存在显著差异，而且比值均为桐花树＞秋茄＞无瓣海桑，不同指标在土层间的变化规律存在差异。

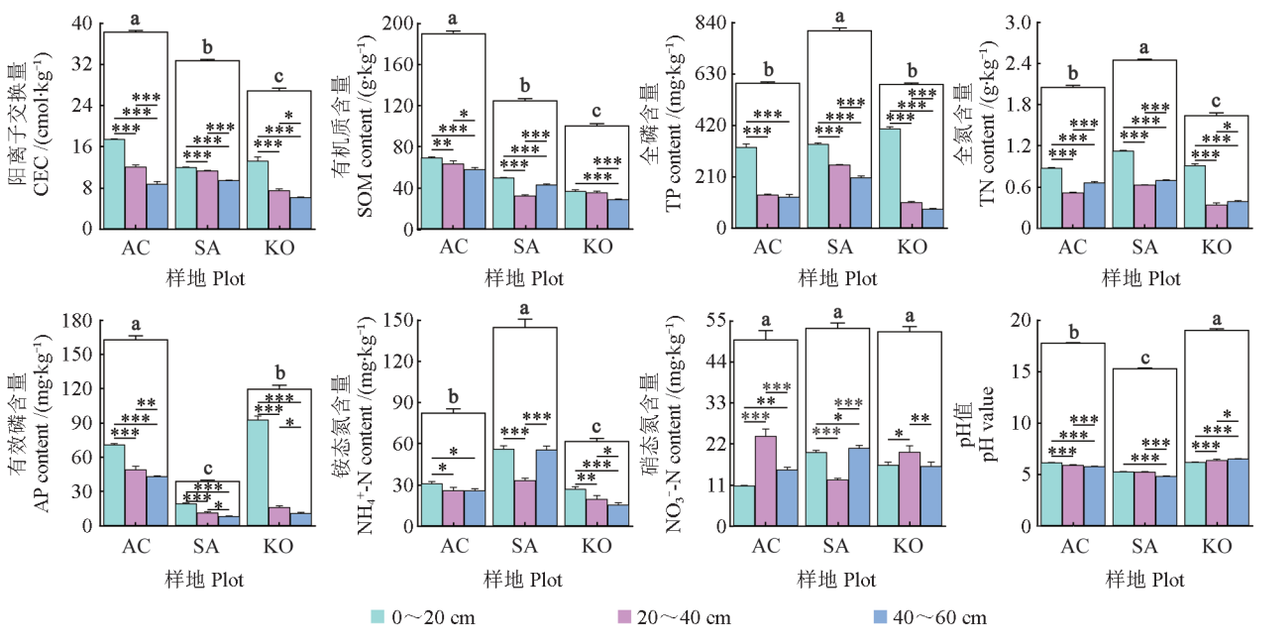


图 2　土壤化学性质指标的分布特征

Fig. 2　Distribution characteristics of content of indices of soil chemical properties

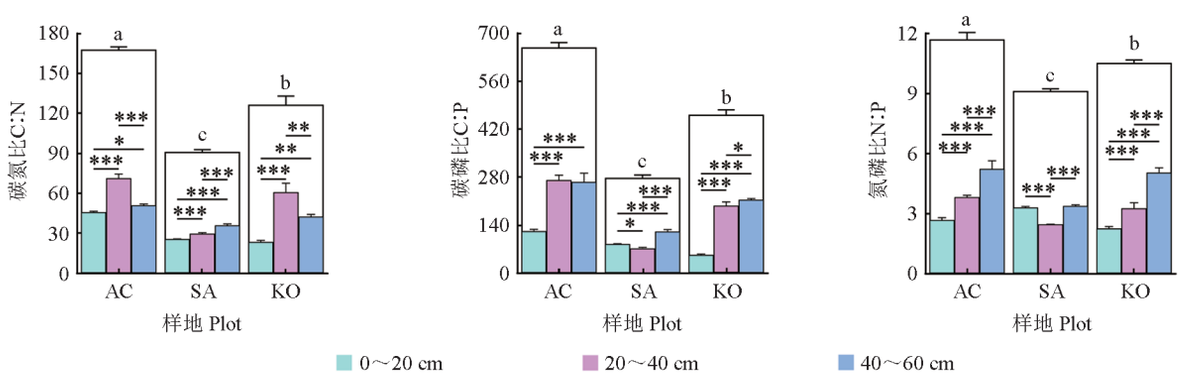


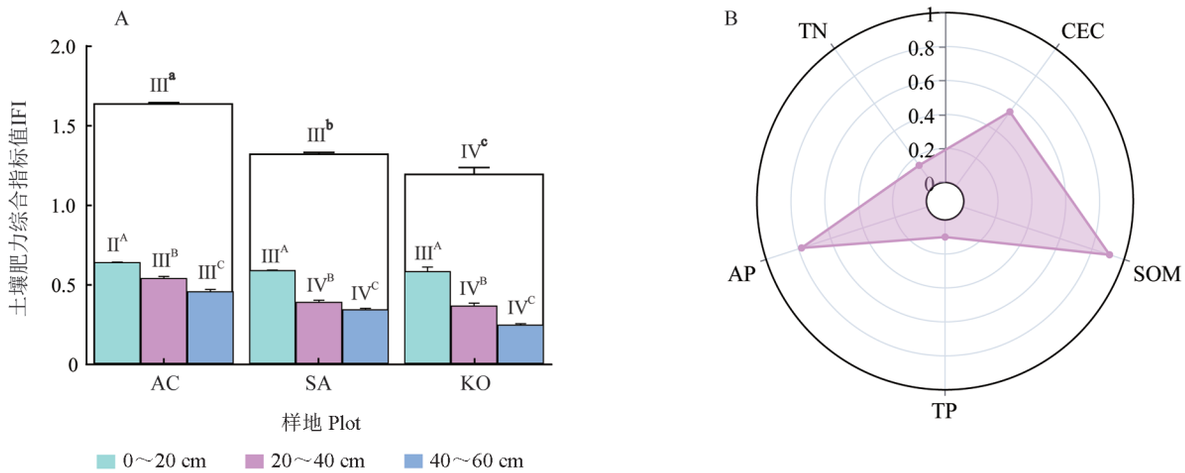
图 3　生态化学计量比的分布特征

Fig. 3　Distribution characteristics of ecological stoichiometric ratios

2.4　土壤肥力分析

由图 4A 可知，土壤肥力综合指标值在树种间存在显著差异，表现为桐花树＞无瓣海桑＞秋茄；在不同土层间存在显著差异，表现为 0 ～ 20 cm ＞ 20 ～ 40 cm ＞ 40 ～ 60 cm。其中桐花树和无瓣海桑属于Ⅲ级，秋茄属于Ⅳ级；土壤肥力等级属于Ⅱ级的有桐花树的 0 ～ 20 cm 土层；等级属于Ⅲ级的有桐花树的 20 ～ 40 cm 土层、桐花树的 40 ～ 60 cm 土层、无瓣海桑的 0 ～ 20 cm 土层、秋茄的 0 ～ 20 cm 土层；等级属于Ⅳ级的有无瓣海桑的 20 ～ 40 cm 土层、无瓣海桑的 40 ～ 60 cm 土层、秋茄的 20 ～ 40 cm 土层、秋茄的 40 ～ 60 cm

土层。图 4B 为利用各项土壤肥力指标的平均隶属度值绘制的雷达图。从各指标在坐标轴上的位置可以看出，土壤全磷的平均隶属度值为 0.10，在所有指标值中最小，次小值为全氮，说明全磷和全氮是制约红树林土壤肥力提升的主要因子。总体而言，各肥力指标组成的多边形面积不大，说明研究区域内红树林土壤肥力整体不高。



不同小写字母表示不同土壤深度平均值在不同树种间存在显著差异（$P < 0.05$）。不同大写字母表示不同土壤深度间存在显著差异（$P < 0.05$）。
Different small letters indicate that the average values at different depths are significantly different among different tree species ($P < 0.05$). Different capital letters indicate significant differences between different soil depths ($P < 0.05$).

图 4 土壤肥力综合指标值和肥力指标平均隶属度雷达图

Fig. 4 Radar chart of integrated fertility index and average membership degree of soil fertility indicators

2.5 土壤阳离子交换量影响因素分析

图 5A 展示了土壤肥力指标 CEC、TN、SOM、TP、AP 与其他指标的相关性。土壤 CEC 与 Clay、Silt、TN、SOM、TP 和 AP 呈极显著正相关（$P < 0.001$），与 EC 呈极显著正相关（$P < 0.01$），与 Sand 和 N∶P 呈极显著负相关（$P < 0.001$），与 C∶P 呈显著负相关（$P < 0.05$）。TN 与 pH 值和 N∶P 呈显著负相关（$P < 0.05$），与 EC、Clay、Silt、NH_4^+ 和 TP 呈极显著正相关（$P < 0.001$），与 Sand、C∶N、C∶P 呈极显著负相关（$P < 0.001$），与 AP 呈显著正相关（$P < 0.05$）。SOM 与 EC、Clay、Silt 呈极显著正相关（$P < 0.001$），与 Sand 呈极显著负相关（$P < 0.01$），与 AP 和 C∶N 呈显著正相关（$P < 0.05$）。TP 与 EC 和 NH_4^+ 呈显著正相关（$P < 0.05$），与 Clay 呈极显著正相关（$P < 0.001$），与 Silt 和 AP 呈极显著正相关（$P < 0.01$），与 Sand 呈极显著负相关（$P < 0.01$），与 C∶N、C∶P 和 N∶P 呈极显著负相关（$P < 0.001$）。AP 与 pH 值和 Clay 呈显著正相关（$P < 0.05$）。基于上述结果，推测 CEC 与土壤质地、EC、土壤养分和生态化学计量比关系密切，可借助主成分分析完成数据降维再开展后续分析。

由图 5B 可知，通过对土壤性质进行主成分分析，PC1 轴可解释总方差的 49.94%，PC2 轴可解释总方差的 20.06%，两主成分累计方差贡献率达到 70%。PC1 主导样本中大部分的变异，主要来自 Clay、TN、Sand、Silt、TP 等指标的贡献，而 PC2 则反映次要的变异，主要与 SOM、C∶N 和 C∶P 相关。桐花树样品处于 PC2 的正轴，其中 SOM 对桐花树的得分贡献最大。无瓣海桑在 PC1 正轴、PC2 负轴，其中 TP 对无瓣海桑的得分贡献最大。秋茄在 PC2 负轴，其中 Sand 对秋茄的得分贡献最大。CEC 与 SOM、Clay、Silt、TP、TN 和 EC 呈显著正相关（$P < 0.05$）。

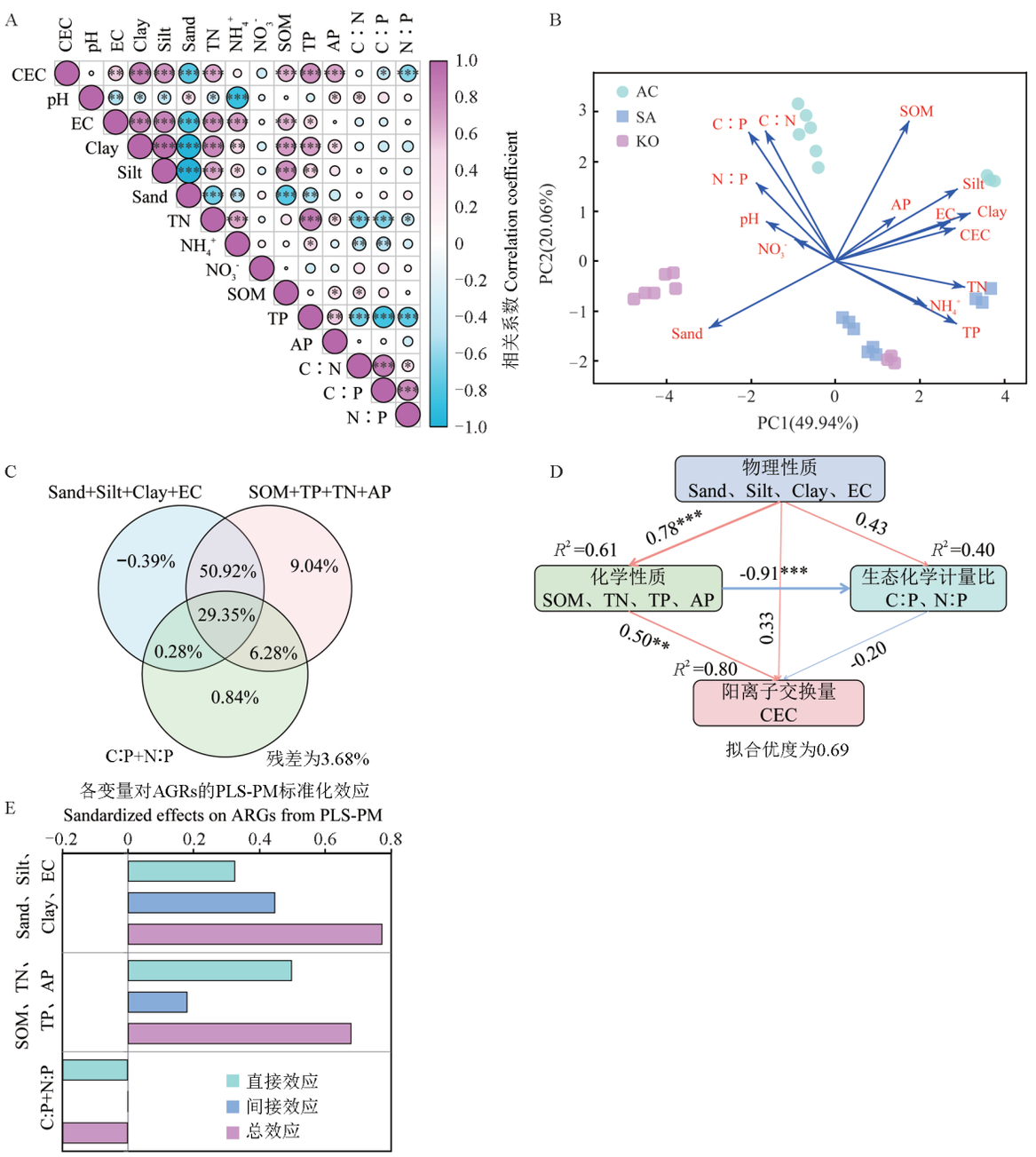
根据相关性分析和 PCA 分析结果，将 Sand+Silt+Clay+EC（物理性质）、SOM+TP+TN+AP（化学性质）、C∶N+C∶P（生态化学计量比）作为关键变量与 CEC 进行方差分解分析（VPA），发现三者对 CEC 的单独解释率为化学性质（9.04%）＞生态化学计量比（0.84%）＞物理性质（−0.39%），二者共同解释分别为物理性质与化学性质（50.92%）＞化学性质与生态化学计量比（6.28%）＞物理性质与生态化学计量比（0.28%），三者共同解释率为 29.35%（图 5C），可见物理性质与化学性质的共同作用最大。

基于 VPA 分析的结果，应用偏最小二乘结构方程模型（PLS-SEM）构建理化因子与土壤 CEC 之间的驱动与耦合模型，进一步研究理化因子对土壤 CEC 的影响机制。结果（图 5D）表明，模型的全局拟合优度为 0.69，说明模型预测效果较好。在内生变量解释度上，本研究中 CEC 的 R^2=0.80，

说明环境因子对土壤 CEC 的变化具有较强的解释力。整体上，物理性质对土壤化学性质具有极显著正影响（$P < 0.001$），对 CEC 和生态化学计量比具有正影响；化学性质对 CEC 具有极显著正影响（$P < 0.01$），对生态化学计量比具有极显著负影响（$P < 0.001$）；生态化学计量比对 CEC 具有负影响但不显著。结合图 5E 可知，直接效应为化学性质＞物理性质＞生态化学计量比，总效应为物理性质＞化学性质＞生态化学计量比，说明土壤物理性质可通过调控化学性质进而间接作用于 CEC，该影响不容忽视。

3　讨　论

土壤养分是影响植物生长、繁殖和代谢活动的主要因素之一，土壤碳、氮、磷作为土壤关键养分要素，其含量变化决定了森林生态系统生产力水平并影响生态过程 [25]。全国热带亚热带地区土壤有机质、全氮和全磷平均含量分别为 12.961、



A 为相关性热图，B 为 PCA 图，C 为 VPA 图，D 为偏最小二乘结构方程模型，E 为偏最小二乘结构方程模型的效应分析图。*，$P < 0.05$；**，$P < 0.01$；***，$P < 0.001$。D 图中，红色箭头是正向影响，蓝色箭头为负向影响。

(A) represents the correlation heatmap, (B) displays the principal component analysis (PCA) plot, (C) shows the variance partitioning analysis (VPA) plot, (D) illustrates the partial least squares structural equation model (PLS-SEM), and (E) presents the effect analysis diagram of the PLS-SEM. An asterisk (*) indicates a significant correlation ($P < 0.05$), ** indicates a highly significant correlation ($P < 0.01$), and *** indicates an extremely significant correlation ($P < 0.001$). In panel (D), red arrows represent the positive influence pattern, and blue arrows represent the negative influence pattern.

图 5　土壤阳离子交换量影响因素分析

Fig. 5　Analysis of influencing factors of soil cation exchange capacity

1.106、0.589 g·kg^{-1}，全国土壤有机质、全氮和全磷平均含量分别为 19.33、1.61、0.74 g·kg^{-1}[26]，研究区土壤有机质、全氮和全磷平均含量分别为 46.23、0.68 和 0.22 g·kg^{-1}，与全国热带亚热带地区土壤及全国土壤相比，除有机质含量高于全国均值外，全氮、全磷含量均明显低于全国水平。研究表明，C∶N ＞ 25 时，有助于促进有机质的积累，且微生物需要吸收氮素以满足自身生长需求 [27]。本研究区中，土壤 C∶N 均值（42.79）远高于中国湿地土壤 C∶N 均值（18.22），且 C∶N ＞ 25，说明红树林生态系统有助于碳积累。相关研究表明，C∶N 会随碳积累呈升高趋势，该特征能够为红树林湿地具备较强碳汇能力提供合理阐释 [28]。红树林生境具有多元有机质输入途径：其一，红树林下底栖动物活动会提供丰富有机质；其二，红树植物发达的根系也能有效网罗陆海来源的有机碎屑。研究区土壤全氮、全磷含量匮乏，这可能受制于区域元素背景值较低。本研究中，除硝态氮外，其余 11 项土壤理化指标在树种间差异显著（P ＜ 0.05）。黏粒、粉粒、有机质的变化规律为桐花树＞无瓣海桑＞秋茄；电导率、全氮、铵态氮的变化规律为无瓣海桑＞桐花树＞秋茄；有效磷、C∶N、C∶P、N∶P 的变化规律为桐花树＞秋茄＞无瓣海桑。这可能是由于红树林湿地土壤中的有机质 [29] 和全氮 [30] 主要来源于原位植物贡献，其中以红树林生长过程中产生的凋落物为主，说明植被类型会影响生态系统养分循环格局。凋落物归还是红树林土壤养分的重要来源，而红树植物凋落物受气候、纬度、潮汐等因素的综合影响 [25]。土壤阳离子交换量在不同树种间存在显著差异，表现为桐花树＞无瓣海桑＞秋茄；同一树种不同土层间存在极显著或显著差异，在不同深度土层间的变化趋势为 0 ～ 20 cm ＞ 20 ～ 40 cm ＞ 40 ～ 60 cm，呈现明显的表层聚集效应。这可能是由于研究区气候高温多湿，凋落物的分解过程 [31] 和土壤微生物的活动集中在表层土壤 [3]，其有机碳及养分含量较高，可形成更多胶体，提升土壤表层阳离子交换量 [32]。

根据全国第二次土壤普查结果，土壤阳离子交换量大于 20 cmol·kg^{-1} 时土壤保肥能力强，介于 10 ～ 20 cmol·kg^{-1} 之间保肥能力中等，小于 10 cmol·kg^{-1} 时保肥能力弱 [33]。本研究发现，桐花树、无瓣海桑、秋茄土壤阳离子交换量均值分别为 12.78、10.93、8.97 cmol·kg^{-1}，说明桐花树和无瓣海桑的土壤保肥能力处于中等水平，而秋茄土壤的保肥能力较弱，这与土壤肥力综合指标值分析结果一致（桐花树和无瓣海桑属于Ⅲ级，秋茄属于Ⅳ级）。综上所述，研究区红树林土壤综合保肥能力总体中等偏低。综合土壤阳离子交换量均值及土壤肥力指标分析，土壤保肥能力为桐花树＞无瓣海桑＞秋茄，这可能与土壤质地有关。研究区内桐花树为泥炭土，无瓣海桑和秋茄是沙土，黏粒质量分数和粉粒质量分数为桐花树＞无瓣海桑＞秋茄，砂粒质量分数为秋茄＞无瓣海桑＞桐花树，阳离子交换量与黏粒、粉粒质量分数呈极显著正相关，随着黏粒与粉粒质量分数的增加，阳离子交换量呈显著上升趋势 [34]。砂粒质量分数随土层深度的增加而升高，砂粒质量分数与阳离子交换量呈极显著负相关，这与孙哲等 [35] 的研究结果一致。土壤粒径越小，比表面积越大，阳离子吸附交换位点越多，吸附能力就越强 [36]，所以桐花树的阳离子交换量最高。

土壤阳离子交换量与 pH 值之间相关性低，这可能是因为研究区土壤 pH 值差异小，阳离子交换量对 pH 值变化的响应不明显 [37]。有研究表明，有机质作为土壤重要组成部分，是影响阳离子交换量的关键因子之一 [38]。本研究结果表明，土壤阳离子交换量与有机质含量呈极显著正相关，这与已有研究结论一致 [11,37,39-40]。相关研究表明，红树林通过向土壤归还大量凋落物，为有机质与营养元素的积累奠定物质基础 [28]。红树林是全球最脆弱的生态系统之一，对环境变化及外界干扰敏感，钦州湾红树林土壤阳离子交换量主要受有机质含量影响。因此，保持研究区适宜阳离子交换量的关键在于保护有机质的稳定自然积累。本研究中，阳离子交换量与全氮、全磷、有效磷含量均呈极显著正相关。究其原因，植物根系可通过养分吸收、物理捕获、与微生物协同作用及根系残体分解，调控土壤离子组成；死亡根系不断释放养分，根系分解过程使土壤养分表现出富集—释放的动态格局 [41]。养分含量较高的土壤富含胶体颗粒，胶体之间相互缔合形成复合胶体，其比表面积更大，可增加土壤表面负电荷数量，进而提升阳离子交换量。而较高的阳离子交换量通常代表土壤具备更强的保肥能力 [33]。

肥力指标分析表明，全磷和全氮是制约研究区红树林土壤肥力提升的主要因子。在该区域红树林保护修复进程中，建议采取人工调控措施，加快研究区植被恢复，促进植被演替进程，提升土壤氮磷水平，改善土壤供肥保肥性能。

环境因子可较好地解释土壤阳离子交换量的变异，其中土壤物理性质和化学性质共同解释率为 50.92%，说明土壤理化性质是土壤阳离子交换量的主要驱动因素。偏最小二乘结构方程模型

构建及分析结果表明，影响总效应为物理性质＞化学性质＞生态化学计量比，直接效应为化学性质＞物理性质＞生态化学计量比，化学性质的直接效应最强，物理性质间接影响大于直接影响，即物理性质通过间接调控化学性质影响阳离子交换量，阳离子交换量受物理 - 化学性质协同驱动。

生态恢复措施作为人类直接且关键的干预手段，对土壤质量具有决定性影响。此类生态修复活动通过改变土壤的物质循环与结构组成，影响其理化特性及生态功能。合理的恢复策略能够有效优化土壤团粒结构，提升养分保持能力与生物活性，进而提高整体质量；反之，若修复措施缺乏科学性，则可能加剧表土流失，破坏土壤孔隙度与有机质平衡，导致肥力衰退，同时削弱土壤系统对外界环境扰动的缓冲能力，使其稳定性显著下降。研究表明，物种多样性较高的混交群落可通过物种间的生态位分化实现有限资源的高效分配与利用，进而提升系统生产力 [42]。相较于单一群落，混交群落空间利用效率更高。同时，丰富的凋落物与根系分泌物能优化土壤微生物及动物群落结构并提升其活性，加速有机质分解与养分周转；此外，还能促进土壤团聚体形成，改良土壤理化性状，为土壤养分留存创造有利条件 [43]。朱晓武等 [25] 对粤东地区红树林进行研究，发现土壤养分总体表现为混交群落土壤优于单一群落。本研究选择 3 种典型红树林纯林为研究对象，桐花树土壤保肥能力优于无瓣海桑和秋茄。因此，在未来红树林保护与修复过程中，建议优先考虑采用以桐花树为优势树种的乡土红树多树种混交模式（如桐花树和秋茄 2∶1 带状混交，10 000 ～ 40 000 株 /hm^2），更好地促进钦州湾地区红树林生态系统健康稳定发展。

4　结　论

本研究对钦州湾典型红树林群落进行调查发现，树种差异显著影响土壤阳离子交换量与肥力水平，土壤肥力综合指标值与土壤阳离子交换量均为桐花树＞无瓣海桑＞秋茄，即土壤保肥能力以桐花树最强，无瓣海桑次之，秋茄最弱。土壤阳离子交换量受物理 - 化学性质协同驱动，物理性质通过间接调控化学性质影响阳离子交换量，化学性质的直接效应最强，生态化学计量比的作用较弱。研究区红树林土壤综合保肥能力中等偏低，土壤富含有机质而氮磷元素匮乏，保持适宜阳离子交换量的关键在于保护有机质的稳定自然积累。建议采取人工调控措施，加快研究区植被恢复，促进植被演替进程，提升土壤氮、磷养分含量，进而改善土壤供肥与保肥能力。

本次调查初步阐明了钦州湾典型红树林湿地的土壤肥力特征与现状，但该区域受滨海工程建设、水产养殖等高强度人类活动的持续干扰，多因素耦合作用对红树林湿地生态系统的综合影响机制仍需进一步深入探究。与此同时，在红树林保护与修复实践中，亟须建立长期监测机制，系统追踪不同修复年限下土壤环境要素的动态变化规律，为红树林生态系统的可持续管理提供更为系统的理论支撑与科学依据。

参考文献：

[1] 裴小龙 , 韩小龙 , 钱建利 , 等 . 自然资源综合观测视角下的土壤肥力评价指标 [J]. 资源科学 ,2020,42(10):1953-1964.
Pei X L, Han X L, Qian J L, et al. Soil fertility assessment indicators from the perspective of natural resources comprehensive observation[J]. Resources Science,2020,42(10):1953-1964.

[2] 于耀泓 , 刘悦 , 顾晓娟 , 等 .2 种人工林对土壤碳氮磷化学计量特征及阳离子交换量的影响 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2023,43(6):168-177.
Yu Y H, Liu Y, Gu X J, et al. Effects of two plantations on soil carbon, nitrogen, phosphorus stoichiometry and cation exchange capacity[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2023,43(6):168-177.

[3] 孔令阳 , 殷书柏 , 刘吉平 , 等 . 三江平原碟形洼地 - 岛状林土壤阳离子交换量分布特征 [J]. 科学技术与工程 ,2021,21(21):8828-8833.
Kong L Y, Yin S B, Liu J P, et al. Distribution characteristics of soil cation exchange capacity of saucer-shaped depressions to island forests in the Sanjiang plain[J]. Science Technology and Engineering,2021,21(21):8828-8833.

[4] 潘启凤 , 曾荣 . 安徽省土壤阳离子交换量传递函数构建与精度评价 [J]. 土壤通报 ,2024,55(2):374-382.
Pan Q F, Zeng R. Construction and precision evaluation of the pedotransfer model of soil cation exchange capacity in Anhui Province[J]. Chinese Journal of Soil Science,2024,55(2):374-382.

[5] 廖浩宇 , 胡敏杰 , 王景涛 , 等 . 红树林恢复对湿地土壤有机碳库的影响及其调控因素 [J]. 环境科学学报 ,2025,45(9):438-446.
Liao H Y, Hu M J, Wang J T, et al. Effects of mangrove restoration on wetland soil organic carbon pools and its regulatory factors[J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2025,45(9):438-446.

[6] Martel Y A, De Kimpe C R, Laverdière M R. Cation-exchange capacity of clay-rich soils in relation to organic matter, mineral composition, and surface area[J]. Soil Science Society of America Journal,1978,42(5):764-767.

[7] 陈忠柳 . 喀斯特山区土壤阳离子交换性能对土地不同利用方式的响应 [D]. 贵阳 : 贵州大学 ,2020:5-15.
Chen Z L. Response of soil cation exchange performance to different land use patterns in karst mountainous area[D].

Guiyang: Guizhou University,2020:5-15.

[8] 苏有健 , 王烨军 , 张永利 , 等 . 不同植茶年限茶园土壤 pH 缓冲容量 [J]. 应用生态学报 ,2014,25(10):2914-2918.
Su Y J, Wang Y J, Zhang Y L, et al. Soil pH buffer capacity of tea garden with different planting years[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2014,25(10):2914-2918.

[9] 李源环 , 邓小华 , 张仲文 , 等 . 湘西典型植烟土壤酸碱缓冲特性及影响因素 [J]. 中国生态农业学报 (中英文),2019,27(1):109-118.
Li Y H, Deng X H, Zhang Z W, et al. Characteristics and driving factors of acid-base buffer of typical tobacco-planting soils in western Hunan Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019,27(1):109-118.

[10] 关雪 . 土壤缓冲容量对土壤重金属植物有效性的影响 [D]. 沈阳 : 沈阳大学 ,2014:20-35.
Guan X. Effects of soil buffer capacity on heavy metal bioavailability in soil[D]. Shenyang: Shenyang University,2014: 20-35.

[11] 郭锁娜 , 脱云飞 , 张丽娟 , 等 . 大春河小流域土壤有效硼和阳离子交换量变化特征研究 [J]. 西南林业大学学报 (自然科学), 2024,44(1):48-55.
Guo S N, Tuo Y F, Zhang L J, et al. Study on variation characteristics of soil effective boron and cation exchange capacity in Dachunhe watershed[J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Science),2024,44(1):48-55.

[12] 纪佳辰 , 许明旭 , 宿宝巍 , 等 . 长江下游冲积平原土壤阳离子交换性能演变特征及影响因素 [J]. 长江流域资源与环境 , 2025,34(7):1470-1478.
Ji J C, Xu M X, Su B W, et al. Evolution of soil cation exchange property and influencing factors in the lower Yangtze River alluvial plain[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2025,34(7):1470-1478.

[13] 白志强 , 张世熔 , 钟钦梅 , 等 . 四川盆地西缘土壤阳离子交换量的特征及影响因素 [J]. 土壤 ,2020,52(3):581-587.
Bai Z Q, Zhang S R, Zhong Q M, et al. Characteristics and impact factors of soil cation exchange capacity (CEC) in western margin of Sichuan basin[J]. Soils,2020,52(3):581-587.

[14] 童根平 , 姜霓雯 , 傅伟军 , 等 . 清凉峰自然保护区土壤阳离子交换量的剖面分布特征及其影响因素 [J]. 东北林业大学学报 , 2023,51(2):111-115,122.
Tong G P, Jiang N W, Fu W J, et al. Profile distribution characteristics and influencing factors of soil cation exchange capacity in low mountain natural forest land in south China[J]. Journal of Northeast Forestry University,2023,51(2):111-115,122.

[15] 温军 , 王晓丽 , 王彦龙 . 长江源区 3 种地形高寒草地土壤阳离子交换量和交换性盐基离子的分布特征及其机理探讨 [J]. 生态环境学报 ,2019,28(3):488-497.
Wen J, Wang X L, Wang Y L. Distribution characteristics and mechanism discussion of soil cation exchange capacity and exchangeable based cations of alpine grassland in the source region of Yangtze River[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019,28(3):488-497.

[16] 顾晓娟 , 何至杭 , 林子湛 , 等 . 不同海拔森林土壤的阳离子交换性能 [J]. 森林与环境学报 ,2025,45(2):147-156.
Gu X J, He Z H, Lin Z Z, et al. Cation exchange properties of forest soil at different altitudes[J]. Journal of Forest and Environment, 2025,45(2):147-156.

[17] 包维斌 , 白一茹 , 杨帆 , 等 . 宁夏中宁枸杞林地粉壤土阳离子交换量空间分布预测方法对比 [J]. 生态学杂志 ,2020,39(4): 1377-1386.
Bao W B, Bai Y R, Yang F, et al. Predicting spatial distribution of cation exchange capacity in silt loam soil under *Lycium barbarum* of Zhongning, Ningxia[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020,39(4):1377-1386.

[18] 田祥珅 , 郑重谊 , 刘勇军 , 等 . 稻作烟区土壤电导率和阳离子交换量的垂直分布特征与养分有效性的关系 [J]. 西南农业学报 ,2021,34(12):2700-2706.
Tian X S, Zheng Z Y, Liu Y J, et al. Vertical distribution of electrical conductivity and cation exchange capacity in soil and their relationship with nutrient availability in rice-growing tobacco areas[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2021,34(12):2700-2706.

[19] 马纪龙 , 马琨 , 谢铁娜 , 等 . 基于机器学习的农田土壤阳离子交换量空间分布预测 [J]. 环境科学 ,2025,46(3):1737-1750.
Ma J L, Ma K, Xie T N, et al. Prediction of spatial distribution of cation exchange in agricultural soils based on machine learning[J]. Environmental Science,2025,46(3):1737-1750.

[20] 张亚杰 , 余力 , 曹艳萍 , 等 . 典型工矿区小流域土壤阳离子交换量空间分布及其影响因素 [J]. 水土保持研究 ,2025,32(4): 100-109.
Zhang Y J, Yu L, Cao Y P, et al. Spatial distribution of soil cation exchange capacity and its influencing factors in small watersheds of typical industrial and mining area[J]. Research of Soil and Water Conservation,2025,32(4):100-109.

[21] 田红灯 , 张继辉 , 韦海航 , 等 . 修枝对无瓣海桑人工林土壤特性的短期影响 [J]. 广西林业科学 ,2025,54(3):294-301.
Tian H D, Zhang J H, Wei H H, et al. Short-term effects of pruning on soil characteristics of *Sonneratia apetala* plantation[J]. Guangxi Forestry Science,2025,54(3):294-301.

[22] 张甘霖 , 龚子同 . 土壤调查实验室分析方法 [M]. 北京 : 科学出版社 ,2012:65-78.
Zhang G L, Gong Z T. Soil survey laboratory methods[M]. Beijing: Science Press,2012:65-78.

[23] 鲍士旦 . 土壤农化分析 [M].3 版 . 北京 : 中国农业出版社 ,2000: 35-49.
Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press,2000:35-49.

[24] 李伟 , 杨崛园 , 熊健 , 等 . 西藏雅尼湿地土壤养分空间变异特征及肥力评价 [J]. 冰川冻土 ,2025,47(2):549-561.
Li W, Yang J Y, Xiong J, et al. Spatial variation of soil nutrients and fertility evaluation in Yani wetland, Xizang[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2025,47(2):549-561.

[25] 朱晓武 , 吴悦宏 , 肖泽鑫 , 等 . 粤东地区红树林土壤养分及生态化学计量特征 [J]. 土壤通报 ,2024,55(5):1345-1354.

Zhu X W, Wu Y H, Xiao Z X, et al. Characterization of soil nutrients and ecological stoichiometry of mangrove forests in eastern Guangdong[J]. Chinese Journal of Soil Science,2024,55(5): 1345-1354.

[26] 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,2010,98:139-151.

[27] 甘国娟 , 陈永意 , 田红灯 , 等 . 钦州湾不同林龄无瓣海桑人工林表层沉积物生态化学计量特征 [J]. 中南林业科技大学学报 , 2024,44(6):135-144.
Gan G J, Chen Y Y, Tian H D, et al. Ecological stoichiometry characteristics in surface sediments of *Sonneratia apetala* plantation of different ages in Qinzhou bay[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2024,44(6):135-144.

[28] 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.

[29] Zhang J F, Gan S C, Yang P J, et al. A global assessment of mangrove soil organic carbon sources and implications for blue carbon credit[J]. Nature Communications,2024,15:8994.

[30] Huang X F, Yang Q S, Feng J X, et al. Introduction of exotic species *Sonneratia apetala* alters diazotrophic community and stimulates nitrogen fixation in mangrove sediments[J]. Ecological Indicators,2022,142:109179.

[31] Girona-García A, Badía-Villas D, Martí C. Changes in topsoil properties after centennial Scots pine afforestation in a European beech forest (NE Spain)[J]. Forests,2018,9:343.

[32] 陈忠柳 , 舒英格 , 周鹏鹏 . 喀斯特山区不同生态恢复模式土壤盐基离子的交换及分布特征 [J]. 水土保持学报 ,2020,34(4): 304-311,319.
Chen Z L, Shu Y G, Zhou P P. Exchange and distribution characteristics of soil base ions under different ecological restoration patterns in the karst mountainous area[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2020,34(4):304-311,319.

[33] 刘林云慧 , 吴妙兰 , 刘悦 , 等 . 广东鹤山两种人工林土壤阳离子交换量的特征及影响因素 [J]. 土壤通报 ,2024,55(3):661-668.
Liu-lin Y H, Wu M L, Liu Y, et al. Characteristics of soil cation exchange capacity of two plantations in Heshan, Guangdong Province[J]. Chinese Journal of Soil Science,2024,55(3):661-668.

[34] 王圣 , 陈科希 , 袁源远 , 等 . 江西省旱地土壤质地与土壤化学性状的相关性研究 [J]. 中国土壤与肥料 ,2021(6):65-71.
Wang S, Chen K X, Yuan Y Y, et al. Correlation between soil texture and soil chemical properties in dry land of Jiangxi Province[J]. Soils and Fertilizers Sciences in China,2021(6):65-71.

[35] 孙哲 , 马雄忠 , 陈宇航 . 广西典型喀斯特地区不同林地土壤粒度分布的单重与多重分形特征 [J]. 水土保持通报 ,2025,45(1): 10-19.
Sun Z, Ma X Z, Chen Y H. Fractal and multifractal characteristics of soil particle-size distribution in different forest types in typical karst regions of Guangxi[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2025,45(1):10-19.

[36] 邢雨欣 , 袁红 , 吉香潼 , 等 . 湖南典型岩溶土壤 CEC、机械组成与矿物类型的响应 [J]. 中国岩溶 ,2024,43(5):1076-1087.
Xing Y X, Yuan H, Ji X T, et al. Response relationships among CEC, mechanical compositions and mineral types in typical karst soil[J]. Carsologica Sinica,2024,43(5):1076-1087.

[37] 于耀泓 , 刘悦 , 王艺颖 , 等 . 鹅凰嶂山地雨林土壤阳离子交换量和交换性盐基离子分布特征 [J]. 土壤通报 ,2022,53(6):1341-1349.
Yu Y H, Liu Y, Wang Y Y, et al. Distribution of soil cation exchange capacity and exchangeable based cations in the E'huangzhang montane rain forest[J]. Chinese Journal of Soil Science,2022,53(6):1341-1349.

[38] 蔡祖聪 , 马毅杰 . 土壤有机质与土壤阳离子交换量的关系 [J]. 土壤学进展 ,1988(3):10-15.
Cai Z C, Ma Y J. The relationship between soil organic matter and soil cation exchange capacity[J]. Advances in Soil Science, 1988(3):10-15.

[39] 李艳 , 郝占魁 , 石强 , 等 . 黑龙江西部地区土壤 pH 值、阳离子交换量和有机质的分布特征 [J]. 防护林科技 ,2020(4): 20-22.
Li Y, Hao Z K, Shi Q, et al. Distribution characteristics of soil pH, cation exchange capacity and organic matter in the area of western Heilongjiang Province[J]. Protection Forest Science and Technology,2020(4):20-22.

[40] 范庆锋 , 虞娜 , 张玉玲 , 等 . 设施蔬菜栽培对土壤阳离子交换性能的影响 [J]. 土壤学报 ,2014,51(5):1132-1137.
Fan Q F, Yu N, Zhang Y L, et al. Effects of vegetable cultivation on soil cation exchange capacity in greenhouse[J]. Acta Pedologica Sinica,2014,51(5): 1132-1137.

[41] 庞宗清 , 陈伟彬 , 苏芳龙 , 等 . 凋落物和根系输入对南亚热带季风常绿阔叶林土壤养分的影响 [J]. 生态学报 ,2022,42(22): 9143-9152.
Pang Z Q, Chen W B, Su F L, et al. Short-term effects of altered litter and root inputs on soil water-extractable ions in a subtropical monsoon evergreen broadleaf forest, southern China[J]. Acta Ecologica Sinica,2022,42(22):9143-9152.

[42] 江小雷 , 岳静 , 张卫国 , 等 . 生物多样性 , 生态系统功能与时空尺度 [J]. 草业学报 ,2010,19(1):219-225.
Jiang X L, Yue J, Zhang W G, et al. Biodiversity, ecosystem functioning and spatio-temporal scales[J]. Acta Prataculturae Sinica,2010,19(1):219-225.

[43] 王传盈 , 王凯月 , 王浩然 , 等 . 黄河下游典型湿地土壤养分及其生态化学计量特征 [J]. 环境科学 ,2024,45(3):1674-1683.
Wang C Y, Wang K Y, Wang H R, et al. Nutrients and ecological stoichiometry characteristics of typical wetland soils in the lower Yellow River[J]. Environmental Science,2024,45(3):1674-1683.

[本文编校：谢荣秀]