

doi:10.13428/j.cnki.fjlk.2025.04.004

李志豪,张马啸,刘奇,等.闽江口典型湿地植物光合生理与土壤环境季节动态变化[J].福建林业科技,2025,52(4):26-33,41.

## 闽江口典型湿地植物光合生理与土壤环境季节动态变化

李志豪<sup>1,2</sup>,张马啸<sup>1,2</sup>,刘奇<sup>3</sup>,张瑜<sup>3</sup>,潘辉<sup>2</sup>,周丽丽<sup>2</sup>

(1. 福建农林大学资源与环境学院,福建福州 350002;2. 闽江学院地理与海洋学院,福建福州 350002;3. 福建农林大学林学院,福建福州 350002)

**摘要:**为探究闽江河口植被光合与土壤含水量和 pH 之间的关系,在闽江河口湿地设置秋茄、芦苇、短叶茳芩样方,测定其春夏秋冬四季的净光合速率( $P_n$ )、蒸腾速率( $T_r$ )、胞间  $CO_2$  浓度( $C_i$ )、气孔导度( $G_s$ )以及 0—80 cm 的土壤含水量和 pH。结果表明:秋茄  $P_n$ 、 $T_r$  和  $G_s$  在夏季达到最高, $C_i$  在冬季最高;芦苇  $P_n$  和  $G_s$  在夏季达到最高, $T_r$  和  $C_i$  在春季达到最高;短叶茳芩  $P_n$  和  $T_r$  在春季最高, $G_s$  夏季最高, $C_i$  在冬季最高。土壤含水量总体呈随土层加深而升高的趋势。各湿地植被土壤 pH 值呈弱酸性。相关分析表明, $P_n$  与 0—20 cm 土层 pH 存在显著相关性( $P<0.05$ ), $T_r$  与各土层 pH 之间存在显著相关性( $P<0.05$ )。综上,不同湿地植被的光合生理特性具有明显的季节差异,且与土壤含水量和 pH 值密切相关,其中蒸腾速率对各土层土壤 pH 的变化响应尤为敏感,二者呈显著的关联性。

**关键词:** 闽江口湿地;光合生理;土壤含水量;土壤 pH 值;季节动态

中图分类号: S718.43;S714.2 文献标识码: A 文章编号: 1002-7351(2025)04-0026-08

### Seasonal Dynamics of Photosynthetic Physiology and Soil Environment of Typical Wetland Plants in the Minjiang Estuary

LI Zhihao<sup>1,2</sup>, ZHANG Maxiao<sup>1,2</sup>, LIU Qi<sup>3</sup>, ZHANG Yu<sup>3</sup>, PAN Hui<sup>2</sup>, ZHOU Lili<sup>2</sup>

(1. College of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China ;  
2. School of Geography and Oceanography, Minjiang University, Fuzhou 350002, Fujian, China ;  
3. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China )

**Abstract:** To explore the relationship between photosynthesis of vegetation in the Minjiang River Estuary and soil moisture content and pH, plots of *Kandelia obovata* Sheue, *Phragmites australis* and *Cyperus malaccensis* were set up in the Minjiang River Estuary Wetland. The net photosynthetic rate ( $P_n$ ), transpiration rate ( $T_r$ ), intercellular  $CO_2$  concentration ( $C_i$ ) and stomatal conductance ( $G_s$ ) of the three plants were measured in spring, summer, autumn and winter, as well as the soil moisture content and pH at 0—80 cm depth. The results showed that the  $P_n$ ,  $T_r$  and  $G_s$  of *Kandelia obovata* Sheue reached the highest in summer, and  $C_i$  was the highest in winter; the  $P_n$  and  $G_s$  of *Phragmites australis* were the highest in summer, and  $T_r$  and  $C_i$  were the highest in spring; the  $P_n$  and  $T_r$  of *Cyperus malaccensis* were the highest in spring,  $G_s$  was the highest in summer, and  $C_i$  was the highest in winter. The soil moisture content generally increased with the increase of soil depth. The soil pH values of the wetland vegetation were weakly acidic. Correlation analysis showed that  $P_n$  was significantly correlated with pH of the 0—20 cm soil layer, and  $T_r$  was significantly correlated with the pH of each soil layer. In conclusion, the photosynthetic physiological characteristics of different wetland vegetation show obvious seasonal differences and are closely related to soil moisture content and pH value. Among them, the transpiration rate is particularly sensitive to the changes in soil pH at each soil layer, and the two show a significant correlation.

**Keywords:** Minjiang River Estuary Wetland; photosynthesis; soil moisture content; pH value; seasonal dynamics

收稿日期: 2025-09-15

基金项目: 福建省林业科技项目(2022FKJ30;2025FKJ22);自然资源部海洋生态保护与修复重点实验室/福建省海洋生态保护与修复重点实验室开放基金课题(EPR2024010)

第一作者: 李志豪(2000—),男,硕士研究生,主要从事湿地生态与资源利用方面的研究。Email:lzh880881@126.com。

通信作者: 周丽丽(1982—),女,副研究员,主要从事森林生态与资源利用方面的研究。Email:fjzhoulili@126.com。

湿地被誉为“地球之肾”,在维持生态平衡、调节水文过程与保护生物多样性等方面发挥着不可替代的作用<sup>[1]</sup>。湿地生态系统是由水文、植被和土壤3个核心组分构成的有机整体,各组分间相互关联、彼此制约,共同维系湿地的结构与功能稳定<sup>[2]</sup>。闽江河口湿地位于福州市长乐区,是福建省面积最大、生态价值最突出的滨海湿地之一。作为习近平生态文明思想的重要实践地与国家生态治理的示范窗口,该湿地于2023年被列入《湿地公约》国际重要湿地名录,体现了我国在全球生态保护领域的积极贡献。该区域植被类型丰富,主要分布有秋茄(*Kandelia obovata* Sheue)等红树植物,以及芦苇(*Phragmites australis*)和短叶茳茳(*Cyperus malaccensis*)等盐沼植被。

光合作用是植物生长过程中物质积累与生理代谢的基本途径,其受生理与环境的共同影响<sup>[3]</sup>。季节变化会引起温度、光照及湿度等环境因子的改变,进一步调控植物的光合生理过程,而植物对此的适应性反应,是其生长能力与遗传特性的体现<sup>[4]</sup>。马晓雨等<sup>[5]</sup>对不同种源红松的光合特性季节动态研究发现,光合特性受季节变化影响较大,与各环境因子密切相关。刘济明等<sup>[6]</sup>对不同季节小蓬竹(*Ampelocalamus luodianensis*)光合特性日变化及其与环境因子的关系研究表明,影响其净光合速率( $P_n$ )日变化的主要生理因子是气孔导度( $G_s$ )和胞间二氧化碳浓度( $C_i$ )。杨通文等<sup>[7]</sup>对竹节树(*Carallia brachiata*)不同季节光合特性日变化与其环境因子的相关性分析结果表明,秋、冬两季蒸腾速率( $T_r$ )是影响 $P_n$ 的主要因子。

近年来,受全球气候变暖影响,气候变化异常、极端天气频发,加上人类活动干扰,湿地土壤水分、pH等关键理化性质发生显著变化,进而对植物的生长发育及光合生理过程产生深远影响。土壤水分作为气候与植被相互作用的重要产物,直接调控着植物的生理功能与生态适应性<sup>[8]</sup>。赵泽欢等<sup>[9]</sup>研究玉米(*Zea mays* L.)土壤水分效应时发现,土壤水分显著影响其蒸腾速率、光合速率与气孔导度等关键光合参数。同时,土壤pH也是影响植物光合作用的重要环境因子,吴成龙等<sup>[10]</sup>指出,高pH胁迫会显著抑制菊芋(*Helianthus tuberosus* L.)的净光合速率、气孔导度、蒸腾速率及水分利用效率,且净光合速率下降主要受非气孔限制因素驱动。然而,目前关于湿地植物光合生理特性与土壤水分、pH因子在不同季节中的动态耦合机制,仍缺乏系统性的研究。

因此,本研究以闽江河口典型湿地植被为对象,分析土壤水分和pH对其光合性能的调控作用,量化光合生理参数对土壤含水量和pH的响应规律,揭示湿地植物光合生理与土壤含水量和pH之间的内在联系,以为该区域湿地生态修复与植被构建提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料及设计

闽江河口湿地位于闽江与东海交汇处,地理坐标为119°36′27.8″—119°41′15.1″E、26°01′7.8″—26°03′39.3″N,是由河流-海洋相互作用形成的典型河口湿地生态系统。作为一个拥有盐沼、红树林与芦苇群落等典型植被的重要生态系统,由闽江河口湿地国家级自然保护区和闽江河口国家湿地公园两部分组成,总面积约2380 hm<sup>2</sup>。属亚热带海洋性季风气候,年均气温19~25℃,年降水量900~2100 mm;土壤呈弱酸性,以秋茄、芦苇和短叶茳茳等为代表物种。

2023年3月,在闽江河口湿地卧龙滩涂栈道A段东南区域典型地段,设置秋茄、芦苇和短叶茳茳3块样地,样地间隔大于3 m,每个样地内随机选择3个10 m×10 m的样方,共9个,在每个样方内分别选择3个0.5 m×0.5 m的采样点<sup>[11]</sup>。

### 1.2 指标测定

试验分别开展于4月(春季)、7月(夏季)、10月(秋季)和12月(冬季)。

1.2.1 植物光合特性测定 于2023年4月、7月、10月和12月选择晴朗天气的8:30—11:00,在样方内选取靠近样地边缘生长、叶位和朝向一致、生长状态良好的叶片,清理叶片表面的污垢<sup>[12]</sup>,因为样地位于自然保护区域内,秋茄等植物资源同样被作为保护对象,故采取这种方式,以最大程度降低对植被的破坏。使用便携式光合测定系统(CIRAS-3, PP-Systems Company, 美国)对秋茄、芦苇和短叶茳茳进行测定。测试前仪器需预热30 min至稳定,光合系统CO<sub>2</sub>浓度为390 μmol·mol<sup>-1</sup>,光源设置为仪器自带的固定光

源(红光 90、绿光 0、蓝光 10、白光 0),测定叶片的净光合速率  $P_n$  ( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )、蒸腾速率  $T_r$  ( $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )、胞间  $\text{CO}_2$  浓度  $C_i$  ( $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ )、气孔导度  $G_s$  ( $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ),每个处理重复测定 5 次。

1.2.2 土壤理化性质测定 分别在每个样方内按“梅花形布点取样法”,用 80 cm 深的定制土钻以 20 cm 为 1 层采集 0—20、20—40、40—60、60—80 cm 深的原位土样,用环刀法<sup>[13]</sup>分层采集 0—20、20—40、40—60、60—80 cm 的土样,测定土壤含水量 MC(%).将自然晾干的土壤样品研磨过 20 目筛(1 mm),称取过筛后的土壤样品 3.00 g,置于 10 mL 离心管中,按水土比 2.5:1 加入 7.5 mL 去离子水,摇匀静置后,用 pH 计(ST2100, OHAUS, 美国)测定土壤 pH<sup>[14]</sup>,每个处理重复测定 3 次。

### 1.3 数据处理

进行多因素方差分析(Multi-way ANOVA)和 Duncan 法检验不同植被类型指标之间的差异,采用 Pearson 相关分析法分析土壤含水量、土壤 pH 值与光合生理参数的相关性。使用 IBM SPSS Statistics 27 进行数据统计分析,使用 Origin 2024 软件绘制相关图形。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同湿地植被类型光合特性及其季节动态

双因素方差分析表明,植被对净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和胞间  $\text{CO}_2$  浓度影响均达极显著水平( $P < 0.001$ );季节对净光合速率、蒸腾速率和胞间  $\text{CO}_2$  浓度( $P < 0.001$ )存在极显著影响;季节与植被的交互对净光合速率和胞间  $\text{CO}_2$  浓度存在极显著影响( $P < 0.001$ )。

表 1 季节及植被类型对净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和胞间  $\text{CO}_2$  浓度的双因素方差分析( $F$  值)

Table 1 Two-factor analysis of variance( $F$  values) of net photosynthetic rate, transpiration rate, stomatal conductance and intercellular  $\text{CO}_2$  concentration by season and vegetation type

因子 Factor	净光合速率 $P_n$	蒸腾速率 $T_r$	气孔导度 $G_s$	胞间 $\text{CO}_2$ 浓度 $C_i$
植被 Vegetation	220.916***	16.286***	217.614***	40.864***
季节 Season	27.638***	40.465***	6.715	22.472***
季节×植被 Season×Vegetation	10.885***	0.269	5.134	48.878***

\*:\*\*\* 为  $P < 0.001$ ;下同。

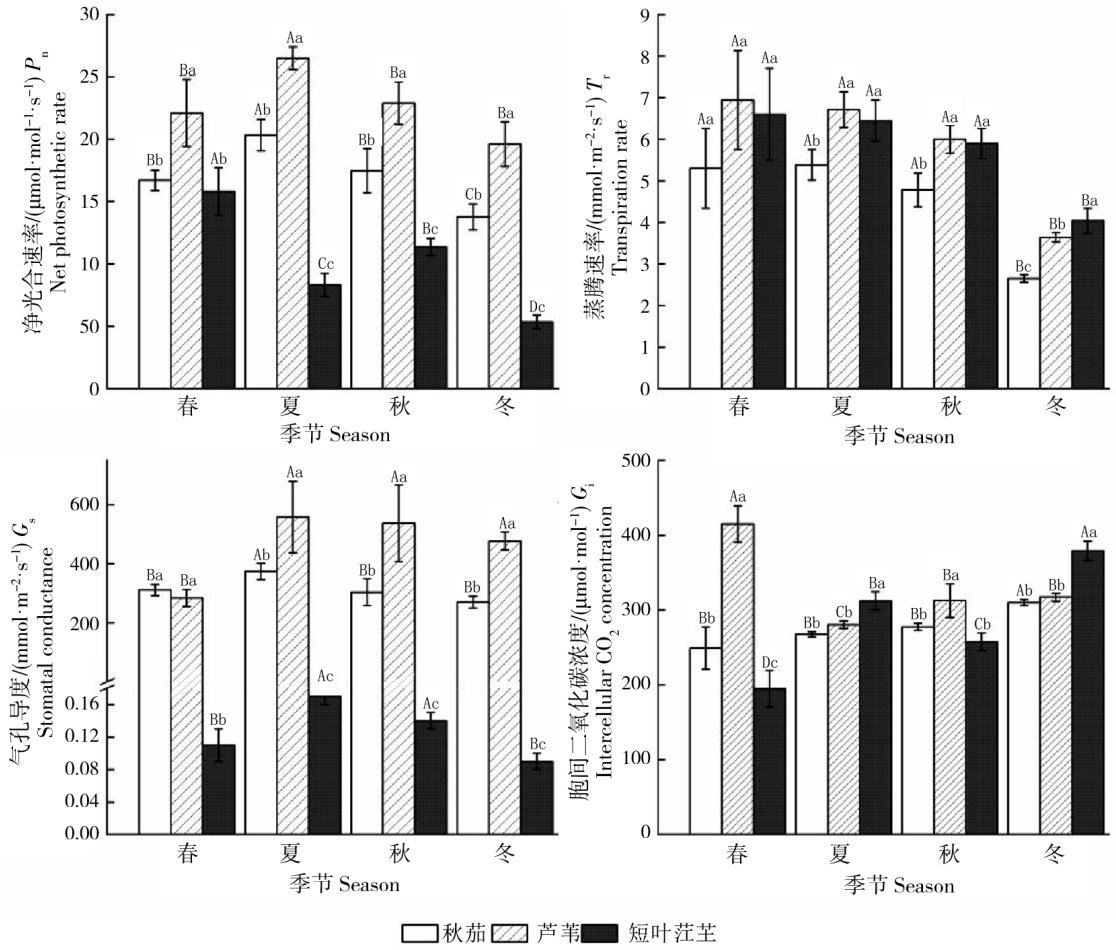
\*:\*\*\* means  $P < 0.001$ ; the same below.

由图 1 可知,3 种植物光合生理指标均呈现明显的季节变化,但植被类型不同季节动态也存在差异。秋茄、芦苇净光合速率均于夏季达峰值,分别为( $20.33 \pm 1.25$ )、( $26.50 \pm 0.90$ )  $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ,随后逐渐下降,冬季达到最低;短叶茳芩净光合速率则在春季达到最高值,随后下降回升后在冬季降至最低。芦苇、短叶茳芩蒸腾速率于春季达到最大值,分别为( $6.94 \pm 1.19$ )、( $6.60 \pm 1.10$ )  $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,此后逐渐降低,均在冬季达到最低;秋茄在夏季达到峰值后呈下降趋势并在冬季达到最低。秋茄、芦苇、短叶茳芩的气孔导度均在夏季达到最大值,依次为( $374.33 \pm 28.04$ )、( $558.33 \pm 121.76$ )、( $0.17 \pm 0.01$ )  $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,后续依次随季节下降,而短叶茳芩气孔导度四季波动相对平缓,芦苇冬季的气孔导度值显著高于春季( $P < 0.05$ )。秋茄胞间  $\text{CO}_2$  浓度随季节递增,冬季达到最高;芦苇春季达峰值,夏秋季下降,冬季略微升高;短叶茳芩春季最低,夏季升高后又在秋季下降,冬季升高并达最大值。

### 2.2 不同湿地植被类型土壤理化性质的季节动态

2.2.1 土壤含水率 三因素方差分析结果(表 2)表明,植被类型及季节对土壤含水量和 pH 影响均达极显著水平( $P < 0.001$ );土层对土壤含水量( $P < 0.001$ )存在极显著主效应;季节与植被类型的交互效应对土壤含水量和 pH 存在极显著主效应( $P < 0.001$ )。

3 种湿地土壤含水量整体随深度增加而升高,但不同季节间存在一定差异(图 2)。秋茄样地表现为春季、秋季和冬季时土壤含水量均随土层的加深而增加,春季各土层含水量最低,夏季除 40—60 cm 层呈现下降趋势外,其余土层随深度加深呈上升趋势。芦苇样地,春季、夏季和冬季均表现为含水量随土层深



不同大写字母为相同植被不同季节光合特性差异显著 ( $P < 0.05$ ); 不同小写字母为相同季节不同植被光合特性差异显著 ( $P < 0.05$ ); 下同。

Different capital letters indicate significant differences in photosynthetic characteristics among the same vegetation in different seasons ( $P < 0.05$ ); and different lowercase letters indicate significant differences in photosynthetic characteristics among different vegetation in the same season ( $P < 0.05$ ); the same below.

图 1 不同植被类型湿地植被光合特性及其季节动态

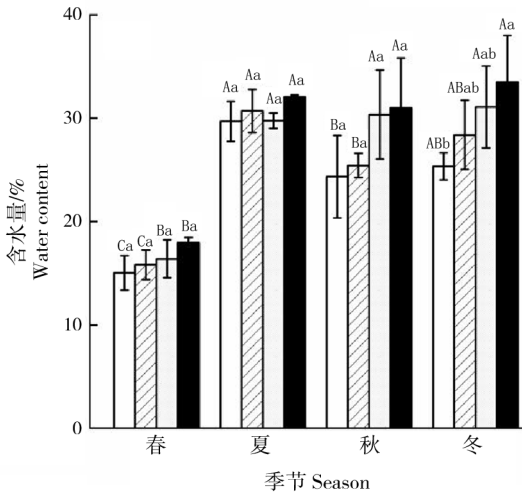
Fig. 1 Photosynthetic characteristics and seasonal dynamics of wetland vegetation in different vegetation types

度增加而升高,各土层土壤含水量均在夏季达到最高,显著高于春季 ( $P < 0.05$ ),秋季各土层含水量表现为  $60-80\text{ cm} > 0-20\text{ cm} > 40-60\text{ cm} > 20-40\text{ cm}$ 。短叶茳茳含水量四季均表现为随土层的加深而增加,夏季除  $60-80\text{ cm}$  土层外,其余土层含水量均达到峰值,春季和秋季的  $0-20\text{ cm}$  与  $20-40\text{ cm}$  土层土壤之间存在显著差异性 ( $P < 0.05$ )。

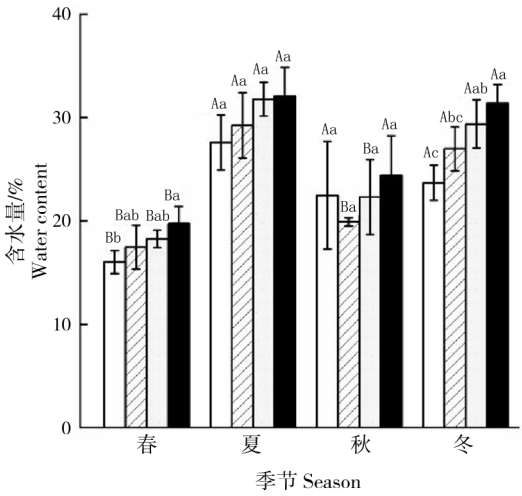
表 2 季节、植被类型和土层对土壤含水量及 pH 的三因素方差分析 ( $F$  值)

Table 2 Three-factor variance analysis ( $F$  value) of soil moisture content and pH in relation to seasons, vegetation types and soil layers

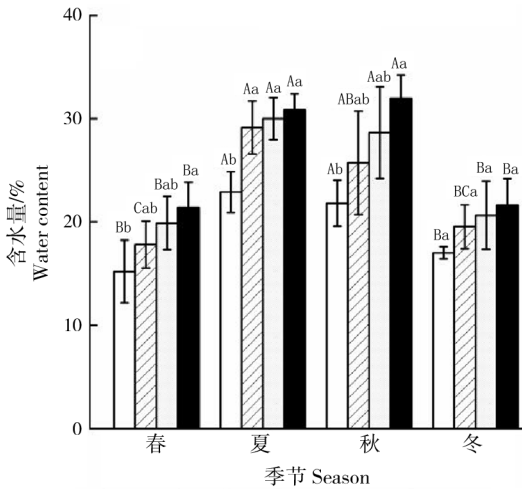
因子 Factor	含水量/% Water content	pH
植被 Vegetation	124.757***	28.435***
季节 Season	11.724***	37.026***
土层 Soil layer	27.924***	5.792
季节×植被 Season×Vegetation	17.623***	6.286***
季节×土层 Season×Soil layer	0.719	2.805
植被×土层 Vegetation×Soil layer	0.864	3.178
季节×植被×土层 Season×Vegetation×Soil layer	0.790	0.612



a. 秋茄 *Kandelia obovata* Sheue

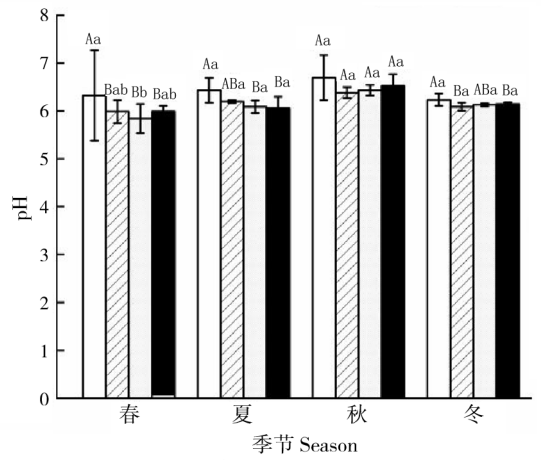


b. 芦苇 *Phragmites australis*

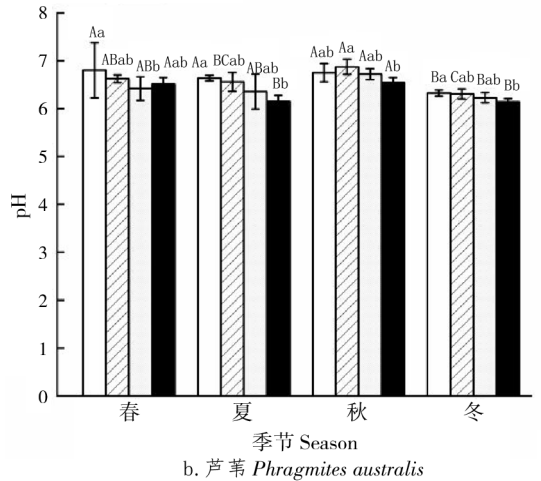


c. 短叶茳芩 *Cyperus malaccensis*

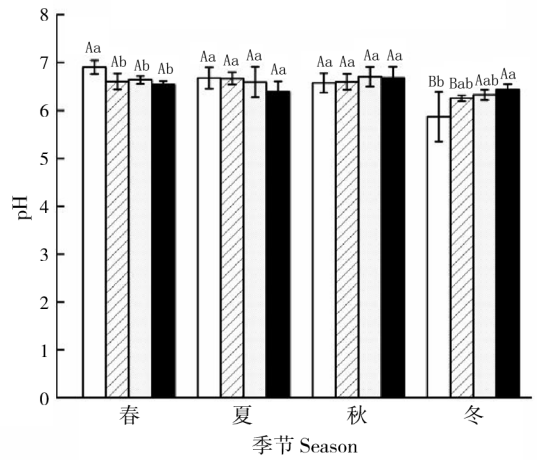
0-20 cm 20-40 cm 40-60 cm 60-80 cm



a. 秋茄 *Kandelia obovata* Sheue



b. 芦苇 *Phragmites australis*



c. 短叶茳芩 *Cyperus malaccensis*

0-20 cm 20-40 cm 40-60 cm 60-80 cm

图 2 闽江口湿地 0—80 cm 土层土壤含水量季节动态  
Fig. 2 Seasonal dynamics of soil moisture content in 0—80 cm soil layer of Minjiang estuary wetland

图 3 闽江口湿地 0—80 cm 土层土壤 pH 季节动态  
Figure 3 Seasonal dynamics of soil pH in 0—80 cm soil layer of Minjiang estuary wetland

2.2.2 土壤 pH 3 种湿地 0—80 cm 土层 pH 变化规律见图 3。各湿地土壤 pH 在不同土层与不同季节均呈弱酸性,其变动范围为 $(5.840 \pm 0.303) \sim (6.903 \pm 0.142)$ 。秋茄春季在 0—20 cm 土层达到峰值,此后呈先降后升趋势,秋季和冬季均在 0—20 cm 土层达到峰值,20—40 cm 土层下降,此后随土层加深呈上升趋势。芦苇湿地春季在 0—20 cm 土层达到峰值,此后呈先降后升趋势,夏季和冬季在 0—20 cm 土层达到峰值后下降,秋季 20—40 cm 土层达到峰值后呈下降趋势。短叶茳茳春季和夏季土壤 pH 值均为 0—20 cm 土层达到最高,此后呈下降趋势,60—80 cm 土层最低,秋季时 40—60 cm 土层达到最大值,冬季则 60—80 cm 土层达到最大值。

### 2.3 湿地植被光合及不同土层土壤含水量、pH 相关性分析

相关分析(图 4)表明, $P_n$  与 0—20 cm 土层 pH 呈显著正相关( $P < 0.05$ ); $T_r$  与 0—20 cm、20—40 cm 土层 pH 呈极显著正相关( $P < 0.001$ ),与 40—60、60—80 cm 土层 pH 呈显著正相关( $P < 0.05$ ); $G_s$  与 0—20 cm 土层含水量呈显著正相关( $P < 0.05$ ),与 60—80 cm 土层 pH 呈显著负相关( $P < 0.05$ )。

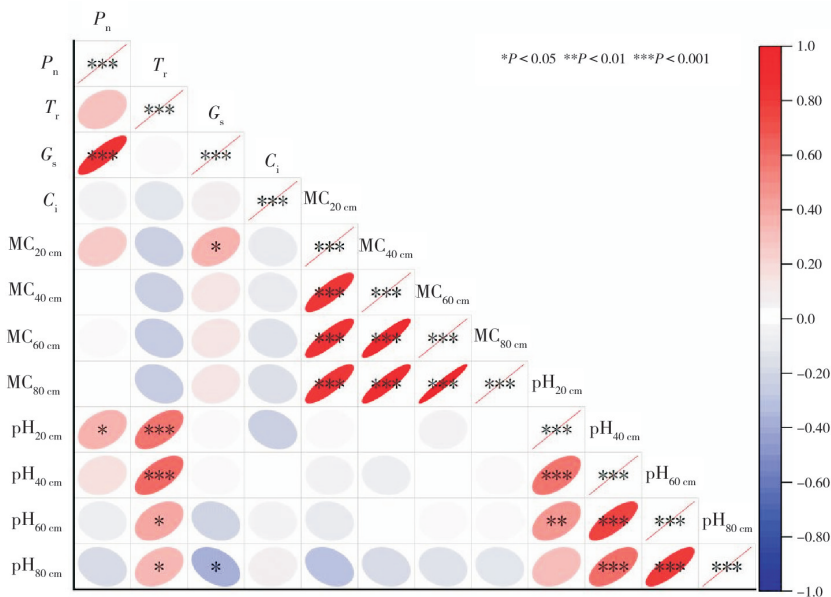


图 4 闽江口湿地植被光合及不同土层土壤含水量、pH 相关性分析

Fig. 4 Correlation analysis of photosynthetic activity of wetland vegetation in Minjiang estuary and soil moisture content and pH in different soil layers

## 3 结论与讨论

### 3.1 不同湿地植物光合特性的季节变化

在本研究中,芦苇和秋茄的  $P_n$  均在夏季达到最高,这与曾群英等<sup>[15]</sup>在对真红树植物的研究结果类似。 $P_n$  高说明秋茄与外界交换的  $CO_2$  和  $O_2$  较多,因此光合能力越强。此后随季节依次下降并在冬季达到最低,这与康雅茸等<sup>[16]</sup>的研究兰州银滩黄河湿地不同植物夏季光合日变化结果类似,夏季随着光照强度的增强,净光合速率  $P_n$  不断增大,秋冬季节光照强度逐渐减弱,植物  $P_n$  不断减小。芦苇和短叶茳茳的  $T_r$  均在春季达到最高,这与张春娜等<sup>[17]</sup>对西宁湿地挺水植物的研究结果类似,芦苇和短叶茳茳的蒸腾作用与生理形态特征有一定的关系,春季新叶展开伴随气温回升,蒸腾量快速上升。秋茄的  $T_r$  在夏季达到最高,这与周成等<sup>[18]</sup>对秋茄光合生理研究结果一致,秋茄在夏季为生长最旺盛的季节,其光合能力较强,因此有着较高的气孔张开程度,使得蒸腾速率较高。

芦苇  $G_s$  在夏季达到最大值后逐渐下降,这与荆天<sup>[19]</sup>的研究四种彩色植物光合生理生态特性结果类似,夏季温度升高, $P_n$  不断增大,植物通过调节气孔吸收外界  $CO_2$ ,同时控制蒸腾作用失水,达到最大  $CO_2$  同化量与最小水分散失量,此后随温度降低, $G_s$  呈现下降趋势。短叶茳茳的  $G_s$  相较于其它植物,在各季

节始终维持着显著偏低的水平,这与张林海等<sup>[20]</sup>研究短叶茳苳逆境胁迫结果类似,短叶茳苳较低的气孔导度是其为适应高盐、周期性水淹的河口湿地环境而形成的一种生存策略,有助于在胁迫环境下平衡生长与水分流失。芦苇  $C_i$  在春季达峰值后快速下降并趋稳,这与光强变化直接相关。根据陈亮等<sup>[21]</sup>研究结果,芦苇  $C_i$  在生长季弱光下迅速降低,中强光下降幅趋缓,体现光强对胞间  $CO_2$  浓度反馈的调控作用。

### 3.2 不同湿地类型土壤理化性质的变化规律

本研究表明不同湿地土层含水量大多数随深度增加而升高,这说明根系发达、固土能力强的植被群落,能够有效截留地表径流,促使降雨径流转化为片状流,提高湿地入渗量,更好地将地表水转化为地下水<sup>[22]</sup>。秋茄地春季含水量较低,这与金亮等<sup>[23]</sup>研究春季天文潮汐活动结果类似,春季闽江河口湿地潮汐活动减弱,导致海水淹没湿地的频率、时长和范围大幅减少,从而造成含水量降低。而造成短叶茳苳土壤含水量在夏季所有土层均达到峰值的原因很多,如潮汐活跃、暴雨极端集中、地形蓄水性强、蒸散受抑制等多重机制<sup>[24]</sup>,形成全年最饱和的水文环境,支持其旺盛生长。这与秋茄湿地春季形成鲜明对比,体现了滨海湿地生态系统对水文周期的高度适应。芦苇湿地 0—20 cm 土层含水量相较于其它土层低,这与刘莎等<sup>[25]</sup>对白洋淀芦苇的研究结果类似,表层土壤是与大气发生水分、气体等物质与能量交换的场所,土壤孔隙度大,蒸发、渗透作用强烈且水分得不到有效补充,所以含水量最低。

秋茄湿地春秋冬季 pH 在 0—20 cm 土层达到峰值,这与刘艳等<sup>[26]</sup>对鼎湖山针阔叶混交林土壤酸度与土壤养分的季节动态的研究结果类似,春季高频度的降水带走土壤中大量的酸性离子,同时腐烂的凋落物有可能对土壤酸度起到缓冲作用,这使得土壤 pH 值呈上升趋势。

秋季 pH 变化则与秦娟等<sup>[27]</sup>对白榆/刺槐互作条件下土壤与植物养分季节变化研究结果相似,当土壤中盐类物质含量较高时,秋季水分的蒸发促使盐分在地表积聚,由于这些盐分多呈碱性,最终导致土壤 pH 值升高。秋茄夏季 pH 值随土壤深度增加呈现下降趋势,这与何琴飞等<sup>[28]</sup>研究钦州湾不同类型红树林土壤因子调查与分析结果类似,在夏季高温、缺氧的条件下,中下层微生物活动剧烈,当归还土壤的红树林枯枝落叶和红树林残体被埋藏分解后,在还原环境下,有机质一部分分解释放出低价态的硫,生成硫化氢,造成土壤 pH 下降。芦苇湿地在春季、夏季、冬季 0—20 cm 土层 pH 值最大,这与钱华等<sup>[29]</sup>对下荆江漫滩系统土壤理化性质分布特征及其影响因素研究结果类似,水文地貌单元对 0—20 cm 土层土壤 pH 值的差异具有影响,且土壤 pH 值都随着土层深度而变化,表明土层深度对土壤 pH 的变化具有较大影响。在夏季芦苇和短叶茳苳的表层土壤 pH 值降低,与 Georgiadis 等<sup>[30]</sup>对农田转化为短轮伐期柳树和杨树后土壤有机碳的积累结果类似,由于造林后表层土壤有机碳的积累程度远高于深层土壤,从而对表层 pH 产生更显著的酸化效应,土壤 pH 值降低。

### 3.3 湿地植被光合特性与不同土层土壤含水量、pH 的相关性分析

相关性分析结果表明, $P_n$  与 0—20 cm 土层 pH 值显著正相关( $P < 0.05$ ),这与李紫琳<sup>[31]</sup>的研究土壤酸碱度对草坪草生长的影响结果类似,土壤 pH 值在弱酸性条件下能显著提高湿地植被的净光合速率,有利于植被生长。短叶茳苳夏季土壤含水量最高但  $P_n$  下降,这与葛耀相等<sup>[32]</sup>对不同水肥配比对球莖甘蓝光合特性、产量和经济效益影响的研究结果类似,高温和空气相对湿度的降低均会降低叶肉细胞中的光合酶活性,从而造成此时的净光合速率下降。 $T_r$  与各土层 pH 值呈显著正相关( $P < 0.05$ ),这与郝岩松<sup>[33]</sup>模拟酸雨对墨西哥柏幼苗光合生理特性的影响研究结果类似,蒸腾速率的日动态变化可能与土壤因子的变化密切相关,酸性条件下会影响植物光合色素含量与组成以及破坏同化组织,进而影响植物的光合作用。 $G_s$  与 0—20 cm 土层含水量呈显著正相关( $P < 0.05$ ),这与张万恒等<sup>[34]</sup>的研究水分亏缺和盐胁迫对棉苗生长及光合特性的影响结果类似,水分调亏会显著影响气孔的开闭,相同土壤含盐量条件下,表现出土壤含水量越高,叶片气孔导度越高的趋势。

### 3.4 结论

本研究发现闽江口湿地秋茄、芦苇和短叶茳苳的光合生理特性存在显著种间差异与季节动态,秋茄和芦苇的  $P_n$  峰值见于夏季,而短叶茳苳为春季;三者的  $T_r$  和  $C_i$  亦呈现不同的季节格局, $G_s$  均以夏季为峰值;土壤含水量基本随土层加深而升高,湿地土壤整体呈弱酸性。相关分析结果表明,表层土壤 pH 与  $P_n$ 、

各土层 pH 与  $T_r$  均存在显著正相关,证实了土壤 pH 是影响  $P_n$  和  $T_r$  的关键生态驱动因子。这些发现揭示了主要湿地植物的生理生态适应机制,可为区域湿地的科学管理、生态修复及植被重建提供参考。

### 参考文献:

- [1] ZHANG MD, WANG HR, WANG CY, et al. Water use strategy of *Carex cinerascens* and its response to water condition changes in Poyang Lake Wetland, China[J]. *Ecological Indicators*, 2023(146):109863.
- [2] 李雅,于秀波,刘宇,等. 湿地植物功能性状对水文过程的响应研究进展[J]. *生态学杂志*, 2018, 37(3):952-959.
- [3] 顾婧婧,金则新,罗光宇,等. 4 种秤锤树属植物光合特性比较[J]. *福建林业科技*, 2025, 52(1):1-8.
- [4] 王倩,周措,李强峰. 小叶杨不同优树无性系光合特性分析[J]. *福建林业科技*, 2022, 49(3):6-11.
- [5] 马晓雨,张利民,徐阳,等. 不同种源红松的光合特性季节动态分析[J]. *林业科技通讯*, 2022(11):55-59.
- [6] 刘济明,黄路婷,廖晓峰,等. 不同季节小蓬竹光合特性日变化及其与环境因子的关系[J]. *安徽农业大学学报*, 2020, 47(1):62-69.
- [7] 杨通文,杨浩,高秀梅. 竹节树光合特性不同季节日变化与其环境因子的相关性分析[J]. *生态科学*, 2023, 42(4):106-113.
- [8] 马云飞,陈洁,许翔驰,等. 2001—2020 年东北三省土壤水分时空动态及其气候响应[J]. *沙漠与绿洲气象*, 2025, 19(2):126-134.
- [9] 赵泽欢,范兴科. 土壤含水量对夏玉米蒸发蒸腾量和光合性能的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2022, 40(5):126-133.
- [10] 吴成龙,尹金来,徐阳春,等. 碱胁迫对菊芋幼苗生长及其光合作用和抗氧化作用的影响[J]. *西北植物学报*, 2006(3):447-454.
- [11] 邵鹏帅,王美琦,赵丽莹. 黄河三角洲滨海湿地退化和恢复对芦苇光合特征的影响[J]. *滨州学院学报*, 2023, 39(2):68-73.
- [12] 郝英惠,韩玮,罗招磊,等. 不同天气条件叶片边界层湿度对土壤水分的响应及其影响因素[J]. *生态学报*, 2025, 45(10):4828-4841.
- [13] 高学芳,孙超,包淑萍. 测定土壤田间持水量的环刀法改进研究[J]. *宁夏工程技术*, 2019, 18(4):347-349.
- [14] 李珊珊. 土壤 pH 测定的影响因素分析[J]. *全面腐蚀控制*, 2025, 39(7):314-316.
- [15] 曾群英,刘素青,李林峰,等. 真红树植物的净光合速率与其相关生理生态因子的关系[J]. *西北林学院学报*, 2015, 30(3):28-34.
- [16] 康雅茸,张华. 兰州银滩黄河湿地不同植物夏季光合日变化[J]. *生态学杂志*, 2014, 33(9):2336-2342.
- [17] 张春娜,刘志锋,左晔,等. 西宁市主要湿地挺水植物光合与蒸腾作用的时空变化和影响因素研究[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2025, 61(2):207-216.
- [18] 周成,黄颖,杨华蕾,等. 浙南人工红树林秋茄叶片光合作用与荧光特性动态研究[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2022(3):90-100.
- [19] 荆天. 四种彩色植物光合生理生态特性的研究[D]. 合肥:安徽农业大学, 2015.
- [20] 张林海,曾从盛,全川. 氮输入和水淹对闽江河口短叶茳芩光合特性的影响[J]. *环境科学学报*, 2017, 37(6):2368-2378.
- [21] 陈亮,孙宝玉,韩广轩,等. 降雨量增减对黄河三角洲滨海湿地土壤呼吸和芦苇光合特性的影响[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(9):2794-2804.
- [22] 褚少杰. 锡林河河谷湿地土壤与植被特征对水文周期和放牧干扰的响应[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2023.
- [23] 金亮,卢昌义,叶勇,等. 九龙江口秋茄红树林湿地土壤呼吸速率的季节变化及其与环境因子的相关性[J]. *应用海洋学报*, 2013, 32(4):557-562.
- [24] 师自香,孙志高,胡星云,等. 闽江河口芦苇和短叶茳芩空间扩展对湿地植物-土壤系统氮分布及转运特征的影响[J]. *环境科学学报*, 2022, 42(9):301-311.
- [25] 刘莎,刘存歧,李博,等. 白洋淀芦苇台地土壤理化因子及其酶活性特征[J]. *湿地科学*, 2012, 10(1):74-80.
- [26] 刘艳,周国逸,褚国伟,等. 鼎湖山针阔叶混交林土壤酸度与土壤养分的季节动态[J]. *生态环境*, 2005(1):81-85.
- [27] 秦娟,上官周平. 白榆/刺槐互作条件下土壤与植物养分季节变化[J]. *生态环境学报*, 2011, 20(3):429-434.
- [28] 何琴飞,蒋焱,刘秀,等. 钦州湾不同类型红树林土壤因子调查与分析[J]. *湿地科学与管理*, 2011, 7(3):45-48.

种生长及养分吸收对硅肥施用剂量梯度的响应,筛选针对树种特性的最佳硅肥施用技术。

### 参考文献:

- [1]刘鸣达,张玉龙. 水稻土硅素肥力的研究现状与展望[J]. 土壤通报,2001(4):187-192.
- [2]王永刚,康怀启,王会海,等. 硅肥的研究及其在农业生产上的应用[J]. 中国果菜,2018,38(8):48-50,64.
- [3]孙建业,董文渊,钟欢,等. 硅肥施用量对笋竹笋品质和养分吸收的影响[J]. 世界竹藤通讯,2024,22(6):34-38.
- [4]刘春成,李中阳,胡超,等. 逆境条件下硅肥调控效应研究进展[J]. 中国土壤与肥料,2021(4):337-346.
- [5]王东阳,刘辉,卞云婷,等. 酸性土壤中硅肥施氮钾对玉米苗期生长和养分吸收的影响[J/OL]. 分子植物育种. (2024-03-30). <https://link.cnki.net/urlid/46.1068.S.20240329.1734.017>.
- [6]VICCA S, GOLLE D S. Is the climate change mitigation effect of enhanced silicate weathering governed by biological processes? [J]. *Global Change Biology*,2021,28(3):711-726.
- [7]秦曼丽,胡绪峰,刘德麒,等. 硅对盐胁迫下黄瓜生长和多胺代谢的影响[J]. 植物生理学报,2022,58(6):1077-1091.
- [8]FAN N. K. ZHAO C. Nanosilicon alters oxidative stress and defence reactions in plants: a meta-analysis, mechanism and perspective[J]. *Environmental Science Nano*,2022(9):3742-3755.
- [9]BUSS W, HASEMER H, FERGUSON S, et al. Stabilisation of soil organic matter with rock dust partially counteracted by plants [J]. *Global Change Biology*,2023,30(1):e17052.
- [10]范福金,叶义全,张文晶,等. 硅对杉木幼苗生长和光合特性的影响[J]. 福建林业科技,2024,51(1):54-61.
- [11]段继霞,董文渊,浦婵,等. 硅肥对盆栽笋竹生长及叶绿素荧光特性的影响[J]. 东北林业大学学报,2025,53(3):31-37.
- [12]李沛瑶,李钰如,黄海峰,等. 不同光照强度下硅肥添加对木荷幼苗叶片性状及光合生理特性的影响[J]. 林业科学研究,2024,37(6):136-145.
- [13]廖晓丽,薛可馨,蔡思莹,等. 外源硅添加对楠木幼苗生长及光合特性的影响[J]. 热带亚热带植物学报,2024,32(6):772-780.
- [14]王梦翔,卢晶晶,张妞,等. 遮荫与施硅对圆柏幼苗光合特性和生长的影响[J]. 天津农业科学,2024,30(3):21-29.
- [15]CHEN Y. F. JIN S. Silicon fertilization increases the particulate and mineral-associated organic carbon in Chinese fir forest ecosystem[J]. *Forest Ecology and Management*,2025,595(22):1-15.
- [16]杨丹,张玉龙,刘鸣达,等. 几种工矿废渣改善土壤供硅能力的效果[J]. 生态环境,2007(2):449-452.
- [17]朱蕴灵. 不同硅肥硅生物有效性评价方法研究[D]. 杭州:浙江大学,2023.
- [18]杨淑清,张丽霞,崔林海,等. 喷施硅肥对茶树生长及硅素分布的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2023,29(4):712-721.
- [19]陈澎军,张蛟,韩继军,等. 不同外源硅肥喷施对滩涂水稻产量、各器官干物质和养分积累及转运的影响[J]. 中国农学通报,2025,41(9):8-17.
- [20]LIANG Y. LIAO M. FANG. How silicon fertilizer improves nitrogen and phosphorus nutrient availability in paddy soil? [J]. *Journal of Zhejiang University-Science B (Biomedicine & Biotechnology)*, 2021,22(7):521-533.
- [21]王利民,黄东风,钟守健,等. 喷施新型叶面硅肥对闽北红壤区玉米生长发育和养分吸收的影响[J]. 福建农业科技,2022,53(11):58-61.

(上接第33页)

- [29]钱华. 下荆江漫滩系统土壤理化性质分布特征及其影响因素[D]. 恩施:湖北民族大学,2021.
- [30]GEORGIADIS P, VESTERDAL L, STUPAK I, et al. Accumulation of soil organic carbon after cropland conversion to short-rotation willow and poplar[J]. *GCB Bioenergy*,2017,9(8):1390-1401.
- [31]李紫琳. 土壤酸碱度对3种草坪草生长及草坪质量的影响[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2022.
- [32]葛耀相,黄弟,余浩铭,等. 不同水肥配合对球茎甘蓝光合特性、产量和经济效益的影响[J]. 北方园艺,2025(18):45-53.
- [33]郝岩松. 模拟酸雨对墨西哥柏幼苗光合生理特性的影响[D]. 南京:南京林业大学,2013.
- [34]张万恒,何帅,忠智博. 水分亏缺和盐胁迫对棉苗生长及光合特性的影响[J]. 农业工程,2024,14(12):115-120.