

【黄河三角洲研究】

黄河三角洲滨海湿地退化和恢复 对芦苇光合特征的影响

邵鹏帅, 王美琦, 赵丽莹

(滨州学院 山东省黄河三角洲生态环境重点实验室, 山东 滨州 256603)

摘要:湿地在全球生态系统碳循环过程中发挥着重要作用。探究了黄河三角洲滨海湿地在退化-恢复过程中芦苇净光合速率等参数的变化,及影响芦苇净光合速率的土壤和植物因素。恢复的滨海湿地表层土壤含水量和氮含量显著增加,土壤电导率显著降低,表明滨海湿地恢复有利于土壤水盐条件和氮营养的改善。与退化湿地相比,恢复湿地显著提高了芦苇叶片的生理性状,包括净光合速率、气孔导度、胞间 CO_2 浓度、蒸腾速率以及水分利用效率。在滨海湿地退化和恢复过程中,芦苇的净光合速率正相关于土壤含水量、总氮以及叶片其他指标,而负相关于土壤电导率,表明滨海湿地恢复导致的水盐条件和营养改善促进了芦苇的光合作用,进而导致地上生物量碳固持的增加。本研究通过探究滨海湿地动态变化对植物光合作用的影响,为提高滨海湿地生态系统碳固持提供了理论参考。

关键词:滨海湿地退化和恢复;芦苇;光合作用;叶片生理特性;水分利用效率

中图分类号: Q 945; X 173 **文献标识码:** A **DOI:**10.13486/j.cnki.1673-2618.2023.02.011

0 引言

通过一系列的生态系统过程,如植物光合作用、呼吸作用以及植物对环境胁迫和生态恢复的响应等,陆生和水生生态系统对维持全球碳平衡起着关键的作用^[1-2]。不同于陆生生态系统(包括森林、草地、农田等)和水生生态系统(如海洋、湖泊、河流等),滨海湿地是陆生和水生生态系统的交互区域,具有其独特水、盐等环境条件,具有生态脆弱性的特征,易受环境或者人为活动的干扰^[3-4]。滨海湿地开垦、鱼虾养殖、堤坝建设等人类活动和干旱、温度上升等气候变化导致大量湿地消失或退化,破坏了滨海湿地生态系统的结构和功能^[5-6]。例如,滨海湿地消失或者退化引起生物量锐减、植物多样性降低、表层土壤板结和水文连通降低,进而引起植物光合作用减弱、资源利用效率降低、土壤有机质损失以及环境胁迫加重等一系列问题^[7-8]。面对恶化的环境和增高的气温,越来越多的国家、政府和科学家关注生态和气候问题,恢复生态系统结构和功能的可持续性^[9]。滨海湿地修复或恢复能极大地改善植物和土壤功能,如增加植物光合能力、提高资源利用效率以及促进碳固持等^[10-11]。因此,探究滨海湿地退化-恢复动态变化下植物光合作用、水分利用效率等的变化,对评估滨海湿地的生态服务功能具有重要的意义。

植物通过光合作用构建了大气-植物-土壤生态系统之间的联系^[12]。一方面植物利用土壤资源(如水、养分)固定 CO_2 ,合成植物生物量,通过凋落物分解和根系分泌物将有机质再输入到土壤中^[13];另一方

收稿日期:2022-05-03

第一作者简介:邵鹏帅(1988—),男,河南夏邑人,讲师,博士,主要从事湿地微生物生态学研究。

E-mail:pshshao@163.com

面滨海湿地变化导致的植物生理(如气孔导度、水分利用效率等)和土壤条件(如pH、水分、盐分、营养等)的改变也会影响植物的光合作用^[14-15]。以往的研究指出,滨海湿地退化降低了植物的气孔导度和胞间CO₂浓度,影响了植物的光合作用^[15]。另外,湿地恢复导致的土壤水盐和营养状况的改善增加了植物的光合速率^[16-17]。通过对湿地芦苇叶片耐旱性的研究发现,随着土壤水分的逐渐减少,芦苇叶片的光合速率、蒸腾速率和气孔导度均会随之逐渐减小,而水分利用效率则会升高^[18]。滨海湿地退化和恢复导致的水盐条件、植物生理和土壤性状的剧烈变化,有利于我们探讨导致植物光合作用变化的植物和土壤因素。

在滨海湿地生态系统中,芦苇分布范围较广,具有较强的环境适应性^[7]。然而,基于土壤理化特征、芦苇生理特性及其生态功能,探究滨海湿地动态变化下土壤、植物光合作用及植物碳固持间联系的研究相对较少。因此,本研究以黄河三角洲退化和恢复滨海湿地的芦苇为对象,探究滨海湿地动态变化下芦苇光合特征的差异,揭示驱动净光合速率的影响因素以及植物光合作用对植物碳固持的影响。本研究的主要目标是:(1)分析滨海湿地退化-恢复下土壤理化性质和芦苇叶片生理特征的差异;(2)探究芦苇净光合速率对退化-恢复滨海湿地的响应;(3)阐明滨海湿地退化-恢复下决定芦苇净光合速率的植物和土壤因素。

1 材料与方法

1.1 研究样地和试验处理

研究区域位于山东省东营市黄河三角洲国家级自然保护区(118°33'E—119°20'E,37°35'N—38°12'N)。该区域年平均气温约12.6℃,年平均降雨量约550mm。在黄河三角洲湿地自然保护区,因石油开采运输而修建的道路隔开了黄河和湿地,减少了进入湿地的黄河水,加剧了该区域土壤盐渍化,导致湿地退化。近年来,由于科学的管理策略和湿地工程建设,通过修建河道引黄河水进入退化的湿地,使以芦苇群落为主的河口湿地恢复。因此,本研究包括两个湿地类型:退化湿地和恢复湿地。退化湿地的植物群落以芦苇(*Phragmites australis*)为优势种,还有盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)等;恢复湿地的植物类群相对丰富,以芦苇为主,还有盐地碱蓬、鹅绒藤(*Cynanchum chinense*)、柽柳(*Tamarix chinensis*)等。

1.2 植物和土壤样品采集

2020年8月,在退化和恢复的湿地分别选择6个5m×5m的样方,在每个样方内选择4株芦苇,进行净光合速率的测定。在4个测定净光合速率的区域,选择0.5m×0.5m的样方,用于芦苇地上生物量的测定。在0.5m×0.5m的样方内用直径3cm的土钻采集0~10cm的表层土壤,并将4份土壤均匀混成1个样品。新鲜土壤样品去除大的石块、动植物残体等,一部分土壤样品保存在4℃环境中,用于测定土壤含水量,另一部分土壤样品自然风干用于测定pH、电导率和总氮。

1.3 植物和土壤指标测定

收集0.5m×0.5m样方内地上芦苇(包括茎和叶),烘干后(65℃,48h)称重,计算单位面积的芦苇生物量。利用Li-6400光合仪(Li-COR Inc., Lincoln, NE, USA)测定芦苇叶片净光合速率、气孔导度、胞间CO₂浓度和蒸腾速率。基于叶片净光合速率和蒸腾速率,芦苇叶片水平的水分利用效率=叶片净光合速率/蒸腾速率。

称取5g新鲜土壤样品置于铝盒中,105℃烘至恒重,计算土壤含水量。称取5g研磨过2mm筛的风干土壤样品于50mL离心管中,以5:1水土比(*v/m*)进行混合,振荡后的土壤悬浊液于pH计(PHS-3C,上海仪电科学仪器股份有限公司)和电导率仪(DDS-307,上海仪电科学仪器股份有限公司)上分别测定pH和电导率。研磨过0.15mm筛的土壤样品在元素分析仪(Vario EL III, Elementar, Germany)上测定总氮含量。

1.4 统计分析

利用SAS V. 8.1软件(SAS Institute Inc., Cary, NC, USA)进行成组 t -检验和线性回归分析。成组 t -检验分析滨海湿地退化-恢复下芦苇地上生物量、叶片净光合速率、气孔导度、胞间CO₂浓度、蒸腾速

率、水分利用效率以及土壤理化特性(土壤含水量、pH、电导率和总氮)的显著性差异。

2 结果与讨论

2.1 滨海湿地退化和恢复对土壤理化性质的影响

在滨海湿地退化-恢复过程中,0~10 cm 土壤的含水量、电导率、pH 和总氮含量存在显著差异。相较于退化的滨海湿地,恢复的滨海湿地土壤含水量和总氮含量显著增加,而土壤电导率显著降低,土壤 pH 没有变化(表 1)。虽然恢复滨海湿地植物的生长增加了其蒸腾速率,但地下水的补充和增加的植物覆盖度有利于土壤水分的提高^[19]。另外,恢复滨海湿地地上芦苇生物量的增加导致更多凋落物输入到土壤中,提高了土壤氮含量^[20]。

表 1 退化和恢复滨海湿地表层土壤(0~10 cm)理化特性的差异

指标	退化湿地	恢复湿地	<i>t</i> 统计值
土壤含水量/%	11.13±1.26	17.92±0.88	-4.41**
土壤电导率/(dS·m ⁻¹)	3.01±0.34	1.56±0.16	3.86**
土壤 pH	8.47±0.08	8.73±0.12	-1.88
土壤总氮/(g·kg ⁻¹)	0.09±0.01	0.75±0.03	-23.65***

显著性:*** ($p < 0.001$), ** ($p < 0.01$)

2.2 芦苇叶片生理性状对退化-恢复湿地的响应

芦苇叶片的生理特性,即气孔导度、胞间 CO₂ 浓度和蒸腾速率,在滨海湿地退化-恢复下都发生了显著改变,但改变的幅度不同(图 1)。滨海湿地从退化到恢复,叶片气孔导度从 0.19 mmol·m⁻²·s⁻¹ 增加到 0.24 mmol·m⁻²·s⁻¹,增加了 23.33%(图 1a);胞间 CO₂ 浓度从 281.8 μmol·mmol⁻¹ 升高到 299.5 μmol·mmol⁻¹,升高了 6.28%(图 1b);蒸腾速率从 3.50 mmol·m⁻²·s⁻¹ 增加到 4.26 mmol·m⁻²·s⁻¹,升高了 21.70%(图 1c)。恢复湿地的芦苇生理特性的增加,间接地表明滨海湿地恢复有利于植物 CO₂ 的同化以及地上生物量的积累。以往的研究也指出滨海湿地退化导致的环境胁迫抑制了植物的生理性状,如气孔导度;而湿地恢复增加了植物的气孔导度^[11]。

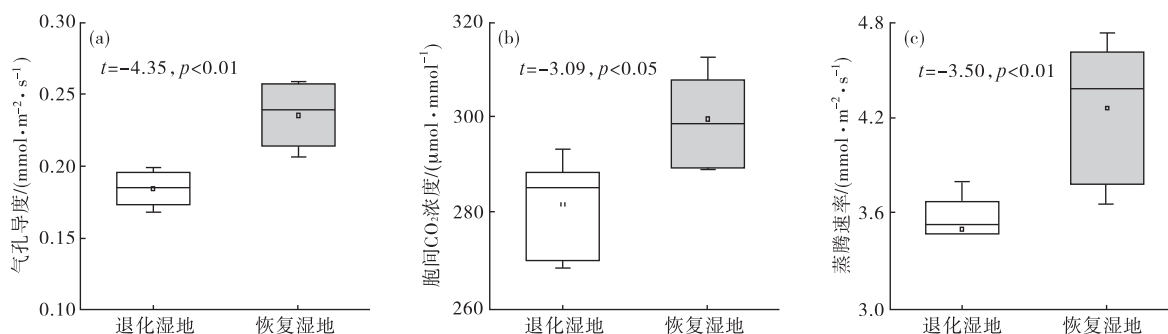


图 1 芦苇叶片气孔导度(a)、胞间 CO₂ 浓度(b)和蒸腾速率(c)在退化-恢复湿地下的差异

2.3 滨海湿地退化-恢复下芦苇叶片净光合速率、水分利用效率和地上生物量的变化

成组 *t*-检验的结果指出滨海湿地退化和恢复动态变化过程中,芦苇叶片净光合速率、水分利用效率和地上生物量发生了显著变化(图 2)。恢复湿地芦苇的叶片净光合速率(16.97 μmol·m⁻²·s⁻¹)显著高于退化湿地芦苇的叶片净光合速率(10.66 μmol·m⁻²·s⁻¹),增加了 59.19%(图 2a)。芦苇叶片的水分利用效率在退化湿地(3.05 μmol·mmol⁻¹)显著低于恢复湿地(4.03 μmol·mmol⁻¹),降低了 32.11%(图 2b)。相对于退化湿地的芦苇地上生物量(0.13 kg·m⁻²),恢复湿地具有更高的芦苇地上生物量(0.39 kg·m⁻²)(图 2c)。以上结果表明恢复的滨海湿地通过提高芦苇叶片的水分利用效率,提高了芦苇

的光合能力,促进更多碳的固持^[15,21]。

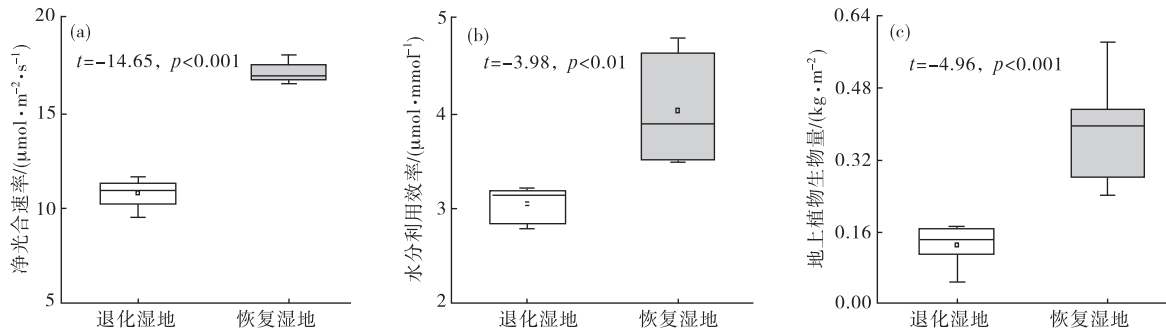


图 2 芦苇叶片净光合速率(a)、水分利用效率(b)以及地上生物量(c)对退化-恢复湿地的响应

2.4 芦苇叶片净光合速率与土壤理化性质、叶片生理性状和地上生物量间的关系

线性回归分析结果显示退化-恢复湿地土壤的理化性质和芦苇叶片的生理性状与净光合速率间存在相关性(图 3)。芦苇叶片的净光合速率与土壤含水量(图 3(a))和总氮含量(图 3(d))呈显著正相关,与土壤电导率显著负相关(图 3(b)),而与土壤 pH 的相关性较弱(图 3(c))。这些结果表明恢复湿地高的土壤水分和氮以及低的土壤盐分促进了芦苇的光合作用,而退化湿地低的可利用资源(如低的土壤水分、氮)和高的盐胁迫抑制了芦苇的光合作用^[22]。另外,芦苇叶片的生理性状对其净光合速率也具有较大的影响。芦苇叶片的气孔导度(图 3(e))、胞间 CO₂ 浓度(图 3(f))、蒸腾速率(图 3(g))以及水分利用效率(图 3(h))均正相关于其叶片净光合速率,表明恢复的滨海湿地通过提高芦苇叶片的生理特性和水分利用效率增加了芦苇叶片的光合能力^[15]。

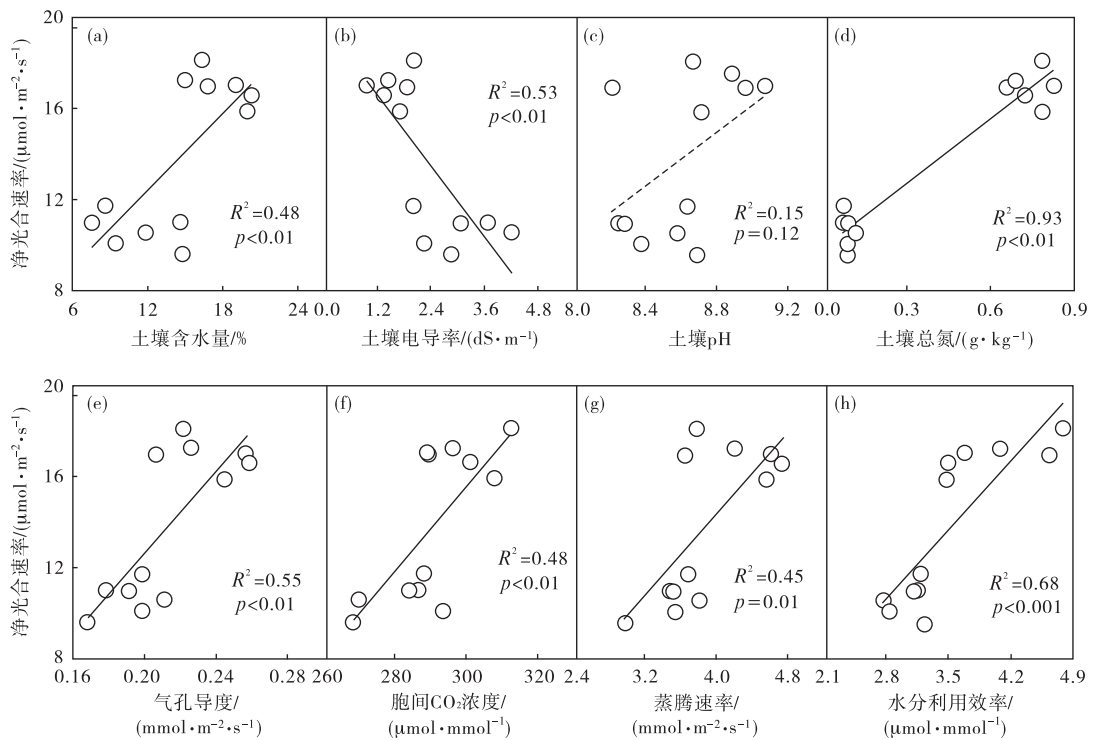


图 3 芦苇叶片净光合速率与土壤理化性质(a~d)和叶片生理性状(e~h)间的相关性

另外,本研究分析了叶片净光合速率与芦苇地上生物量的关系,探究净光合速率对生物量的影响。芦苇叶片净光合速率与地上生物量显著正相关(图 4),表明高的净光合速率导致更多的碳固持在芦苇茎和叶片中,促进了地上生物量的积累。

3 结论

本研究阐明了黄河三角洲滨海湿地退化-恢复下的芦苇叶片净光合速率、地上生物量、生理特性以及这些指标间的关系。与退化湿地相比,恢复湿地的表层土壤的含水量和氮含量显著增加,土壤电导率显著降低,表明滨海湿地恢复有助于改善土壤水盐条件和营养状况。滨海湿地恢复显著增强了芦苇的生理特性(气孔导度、胞间 CO₂ 浓度、蒸腾速率以及水分利用效率)及其光合能力。土壤含水量、总氮以及叶片各生理指标显著正相关于芦苇叶片净光合速率,而土壤电导率显著负相关于净光合速率,意味着恢复湿地改善的水盐条件、营养以及提高的水分利用效率导致芦苇光合能力的提高,并促进了芦苇生物量的积累。黄河三角洲滨海湿地退化-恢复过程中植物碳固持的变化情况表明,滨海湿地恢复对增加生态系统碳汇功能具有重要作用。

参 考 文 献:

- [1] SERRANO O,LOVELOCK C E B,ATWOOD T,et al. Australian vegetated coastal ecosystems as global hotspots for climate change mitigation[J]. Nature communications,2019,10:4313.
- [2] 杨元合,石岳,孙文娟,等. 中国及全球陆地生态系统碳源汇特征及其对碳中和的贡献[J]. 中国科学: 生命科学,2022,52(4):534-574.
- [3] XU W H,FAN X Y,MA J G,et al. Hidden loss of wetlands in China[J]. Current biology,2019,29: 3065-3071.
- [4] 韩广轩,宋维民,李培广,等. 长期生态学研究为滨海湿地保护提供科技支撑[J]. 中国科学院院刊, 2020(2):218-228.
- [5] 崔保山,谢焱,王青,等. 大规模围填海对滨海湿地的影响与对策[J]. 中国科学院院刊,2017(4):418-425.
- [6] TAN L,GE Z,ZHOU X,et al. Conversion of coastal wetlands, riparian wetlands, and peatlands increases greenhouse gas emissions:a global meta-analysis[J]. Global change biology,2020,26:1638-1653.
- [7] 于君宝,栗云召,管博,等. 黄河三角洲滨海湿地退化过程与生态修复[M]. 北京:科学出版社,2019.
- [8] FU C,LI Y,ZENG L,et al. Stocks and losses of soil organic carbon from Chinese vegetated coastal habitats[J]. Global change biology,2021,27:202-214.
- [9] CROOKS S,SUTTON-GRIER A E,TROXLER T G,et al. Coastal wetland management as a contribution to the US National greenhouse gas inventory[J]. Nature climate change,2018,8:1109-1112.
- [10] 闫明,潘根兴,李恋卿,等. 中国芦苇湿地生态系统固碳潜力探讨[J]. 中国农学通报,2010(18):320-323.
- [11] SHAO P S,HAN H Y,YANG H J,et al. Responses of above-and belowground carbon stocks to degraded and recovering wetlands in the Yellow River Delta[J]. Frontiers in ecology and evolution,2022,10:856479.
- [12] OSLAND M J,GABLER C A,GRACE J B,et al. Climate and plant controls on soil organic matter in coastal wetlands[J]. Global change biology,2018,24(11):5361-5379.
- [13] 邵鹏帅,解宏图,鲍雪莲,等. 森林次生演替过程中有机质层和矿质层土壤微生物残体的变化[J]. 土壤学报,2021,58(4):1050-1059.
- [14] 张颖,郑西来,伍成成,等. 辽河口湿地芦苇叶片蒸腾及其与影响因子关系研究[J]. 湿地科学,2011, 9(3):227-232.

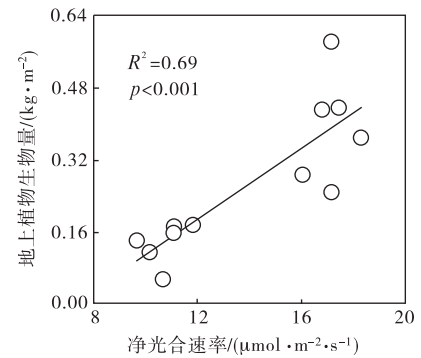


图 4 芦苇地上生物量与其叶片净光合速率的相关性

- [15] XIA J B, REN J Y, ZHAO X M, et al. Threshold effect of the groundwater depth on the photosynthetic efficiency of tamarix chinensis in the Yellow River Delta[J]. *Plant and soil*, 2018, 433: 157 - 171.
- [16] CHU X, HAN G, XING Q, et al. Changes in plant biomass induced by soil moisture variability drive interannual variation in the net ecosystem CO₂ exchange over a reclaimed coastal wetland [J]. *Agricultural and forest meteorology*, 2019, 264: 138 - 148.
- [17] 赵永全, 何彤慧, 夏贵菊, 等. 不同控水条件下芦苇生长与光合特征研究[J]. *西北林学院学报*, 2015, 30(1): 69 - 74.
- [18] 夏大娟, 刘秋蓉, ZOU L, 等. 滨海盐生植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与主要养分元素化学计量的关系[J]. *生态学报*, 2020, 40(7): 2215 - 2224.
- [19] 郑明喜, 解伏菊, 侯传美. 黄河三角洲退化湿地植被与土壤的恢复研究[J]. *气象与环境学报*, 2012, 28(1): 11 - 16.
- [20] ZHAO Q Q, BAI J H, ZHANG G L, et al. Effects of water and salinity regulation measures on soil carbon sequestration in coastal wetlands of the Yellow River Delta[J]. *Geoderma*, 2018, 319: 219 - 229.
- [21] 谢涛, 杨志峰. 水分胁迫对黄河三角洲河口湿地芦苇光合参数的影响[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(3): 562 - 568.
- [22] 李群, 赵成章, 赵连春, 等. 秦王川盐沼湿地芦苇叶片比叶面积与光合效率的关联分析[J]. *生态学报*, 2019, 39(19): 7124 - 7133.

Changes in Photosynthetic Characteristics of *Phragmites australis* during Wetland Degradation and Restoration in the Yellow River Delta

SHAO Peng-shuai, WANG Mei-qi, ZHAO Li-ying

(Shandong Key Laboratory of Eco-environmental Science for the Yellow River Delta, Binzhou University, Binzhou 256603, China)

Abstract: Wetlands play an important role in global ecosystem carbon cycle. The changes in photosynthetic rate and physiological characteristics of *Phragmites australis* and the factors affecting photosynthetic rate to detect soil and plant factors during wetland degradation and restoration in the Yellow River Delta are studied. The results show that wetland restoration significantly increases surface soil water content and nitrogen content, but decreases soil electrical conductivity. That indicates that wetland restoration is beneficial to the improvement of soil water and salt conditions, and nitrogen. Compared with degraded wetlands, the restored wetland improves greatly the physiological characteristics of *Phragmites australis*, including stomatal conductance, intercellular CO₂ concentration, transpiration rate and water use efficiency. In addition, the photosynthetic rate in restored wetlands is significantly higher than that in degraded wetlands. In restored-degraded wetlands, photosynthetic rate is positively related to soil water content, nitrogen, and leaf physiological characteristics, and negatively related to soil electrical conductivity. These suggest that wetland restoration results in the increase in water, nutrition, and improving plant physiological characteristics promoted photosynthesis, further enhancing plant carbon fixation. This research provides a theoretical basis for improving the carbon sequestration of wetland ecosystems by exploring the effects of dynamic wetlands on plant photosynthesis.

Keywords: coastal wetland degradation and restoration; *Phragmites australis*; photosynthesis; leaf physiological characteristics; water-use efficiency (责任编辑:王新亮)