

Mechanism of Eutrophication Affecting Salt Marsh Soil Organic Carbon Sequestration Potential

Jin'e Liu*, Hairong Su, Jie Xu, Huang Huang, Guoxiang Wang*

Jiangsu Center of Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, The Environmental School of Nanjing Normal University, Nanjing Jiangsu
Email: ^{*}liujine@njnu.edu.cn, ^{*}442371719@qq.com

Received: Oct. 13th, 2017; accepted: Oct. 23rd, 2017; published: Oct. 30th, 2017

Abstract

With the development of human activities, more nitrogen and phosphorus are released into marine ecosystem, leading to heavier eutrophication, which threatens the function of the coastal wetland ecosystem. This paper reviewed the research progresses on the eutrophication affecting the salt marsh ecosystems including the effects of eutrophication on the alien plant competition ability, salt marsh plant community succession, salt marsh plant growth strategy and sedimentary environment, the responses of salt marsh plants to the atmospheric carbon dioxide concentration increase and the influence on plant carbon allocation strategy, discussed the effects of eutrophication on salt marsh soil organic carbon and its possible mechanism, and suggested the valuable research directions in this field.

Keywords

Eutrophication, Salt Marsh Ecosystem, Carbon Sequestration Potential, Soil Organic Carbon Pool

富营养化对盐沼生态系统土壤有机碳库固定潜力影响机理研究进展

刘金娥*, 苏海蓉, 徐杰, 黄黄, 王国祥*

南京师范大学环境学院, 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 江苏 南京
Email: ^{*}liujine@njnu.edu.cn, ^{*}442371719@qq.com

收稿日期: 2017年10月13日; 录用日期: 2017年10月23日; 发布日期: 2017年10月30日

^{*}通讯作者。

文章引用: 刘金娥, 苏海蓉, 徐杰, 黄黄, 王国祥. 富营养化对盐沼生态系统土壤有机碳库固定潜力影响机理研究进展[J]. 土壤科学, 2017, 5(4): 53-60. DOI: [10.12677/hjss.2017.54007](https://doi.org/10.12677/hjss.2017.54007)

摘要

随着工农业的发展,沿海地区水体富营养化的程度加剧,严重威胁了海滨湿地生态系统的功能。本文综述了富营养化对盐沼外来植物竞争能力、盐沼植物群落演替、盐沼植物生长策略及沉积环境、盐沼植物对大气二氧化碳浓度增加的响应以及植物碳分配策略的影响等方面研究进展,总结了富营养化对盐沼的生态系统固碳潜力的效应及可能的作用机理,指出未来的研究方向。

关键词

富营养化, 盐沼生态系统, 固碳潜力, 土壤碳库

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

富营养化指在一定水体范围内,营养物质富集到一定程度导致水体营养状况发生改变,并可能导致水体生态系统功能改变的过程,目前引起富营养化的主要营养元素是氮(N)和磷(P)。随着工农业的发展,可利用态氮(N)、磷(P)使用量快速增长,并通过不同途径输入海洋导致全球沿海地区富营养化,引发沿海地区大范围生境退化、生物多样性丧失[1]、海滨湿地群落结构和物种组成发生改变等生态问题,严重损害了海滨生态系统功能[2],甚至导致盐沼消失[3]。在未来几十年,全球范围内进入海滨生态系统的N和P含量将进一步增加[4]。海滨盐沼湿地处于海陆交错区,具有极高的初级生产力,湿地植物净同化的碳仅有15%再释放到大气中。盐沼湿地碳库在全球碳循环中占有重要地位,同时也是受到富营养化、海平面上升、生物入侵、全球变暖等全球变化作用最为复杂的脆弱生态系统[3]。富营养化作为一个长期起作用的生态因子,与上述因素叠加作用,将深刻影响盐沼湿地土壤有机碳库积累和转化过程[5]。

2. 富营养化对盐沼外来植物竞争能力的影响

现有研究表明富营养化能够提高外来植物竞争力。首先,外来植物具有营养消耗高、生长快速、产生更多繁殖体等特性,因此外来植物入侵是否成功依赖于生境的营养水平[6],在富营养生境中比贫瘠生境更容易成功[7]。N营养不足是海滨生态系统的主要限制因素之一,能直接影响不同植物的竞争能力和空间分布[8]。贫营养的海滨生态系统中N营养缺乏能够降低外来植物的竞争能力,从而限制其种群生长和扩张速度[9]。有研究表明,氮富集促进了原生植物的扩张及外来物种的入侵[10]。在三种不同营养条件下,外来种火炬树在与本地种麻栎竞争中处于优势地位,并且这种优势随氮磷比的升高而增大[11]。这说明在贫营养条件下火炬树的竞争能力受到一定程度的限制,营养水平的提高增强了火炬树的竞争能力。海滨生态系统的富营养化,则解除了N营养限制,提高了生态系统的可入侵性,有利于外来植物在竞争中取胜,替代本地植物,造成植被类型的更加单一化[12]。另外,外来植物具有更高的表型可塑性[6],能更快适应富营养化环境。例如,空心莲子草比水芹、黄菖蒲具有更高的表型可塑性,具有较强的氮磷吸收能力。对高养分生境适应性更强[13]。在中国沿海,外来种互花米草和本地种芦苇在不同N营养条件下叶形态表现出显著性差异:高N营养对互花米草叶片功能性状促进作用显著高于对芦苇叶片功能性

状的促进[12],说明富营养环境下外来植物互花米草比本地植物芦苇适应性更强,竞争力提升更显著。有研究表明,氮、磷水平能够显著影响入侵植物飞机草的植株生长,飞机草亦能够通过植株形态、结构以及生物量积累与分配的调整来适应多变的养分环境,并表现出较高的可塑性[14]。藨草在富营养状态下也表现出有利于入侵的表型特征[15],表现出良好的适应能力。此外,外来植物对 N 的利用效率也显著高于相同生境中的本地种[16]。在北美大西洋沿岸海滨生态系统中,外来植物芦苇凭借其溶解态有机 N 具有很高的利用效率而在竞争中取胜。外来杂草反枝苋在入侵初期能够保持高的光合能力,对氮素资源进行高效利用,这很可能是其迅速抢占生态位,从而成功入侵的原因之一[17]。对西双版纳的外来入侵植物飞机草、紫茎泽兰的研究也发现,飞机草与紫茎泽兰的叶片 N、P 平均含量显著高于无入侵条件下的本地植物以及与其共存的本地植物,推测入侵可能提高了植物的 N 可利用性[18]。因此,在富营养化的背景下植物对 N 利用方式的差异有可能是外来植物成功入侵的机制之一[19]。富营养化有助于外来植物在竞争中取胜,替代本地植物,可能改变盐沼植被生产力,影响土壤有机物质的积累,进而影响土壤有机碳库固定潜力。

3. 富营养化对盐沼植物群落演替的影响

富营养化改变盐沼植物群落物种组成、群落结构和物种竞争关系,加快演替速率。在低 N (贫营养)的潮间带,高潮区的互花米草竞争能力低于狐米草(*Spartina patens*)和灯芯草(*Juncus roemerianus*),只能分布在较低的位置,而 N 营养状况的改善,则极大地提高了互花米草的竞争能力,使其逐渐扩张到高潮带[20],改变了该盐沼群落结构。在贫营养的盐沼中人为添加 N 素后,外来植物生物量、茎密度以及扩张速度显著增加,且与沉积物中 N 含量呈显著正相关[12],表明富营养化加速盐沼演替速率。有研究发现,增加 N 的可用性,可以改变美国湿地盐沼植物群落的竞争等级,导致高沼泽植物盐草的扩张,营养供应,提高和竞争之间的相互作用改变了不同种类的沼泽植物之间的竞争成功的方向,并强制改变了盐沼植物群落的空间分布和组成[21]。一项长达五年的研究发现,添加 N 养分后,外来种禾叶慈姑总生物量、叶生物量比率、相对生长速率随氮养分水平的增加而增加,植物产生更多的中、小球茎,以及更多、更长的根茎,提高了禾叶慈姑入侵速率[22],导致物种竞争关系、群落结构组成产生变化。也有研究发现,富营养化减少生物多样性。由于植物是生态系统的基础物种,他们对富营养化的响应可能会推动生态系统结构和功能的变化[23]。有研究显示, N 添加对北美盐沼外来芦苇生长的促进作用大于本地种,直接提高了外来芦苇的竞争力[24];另一研究则显示,随着 N 水平的提高,外来植物互花米草迅速替代了高潮带的土著植物北美海蓬子(*Salicornia bigelovii*)和盐角草(*S. virginica*) [25],表明在 N 营养水平提高的情况下,互花米草种群比本地植物具有更强的增长能力和竞争优势[26]。因此, N 营养水平的提高增强了海滨生态系统外来植物的相对竞争力,导致本地群落被外来植物替代,加速了植物群落的演替。另有研究表明,植物对营养富集的反应是不确定的,主要取决于营养物富集的程度,土壤条件,特定营养物的性质,植物性状,生命历史和种间相互作用[27]。油蒿群落中不同植物种对氮添加的响应存在差异,持续增加的氮沉降很可能会引起油蒿群落物种组成的变化,从而影响油蒿群落的演替[28]。未来在地表径流和大气沉降富营养元素驱动下,海滨生态系统的富营养化仍将持续甚至更为严重。可以预计,海滨生态系统长期富营养化,将进一步缓解贫营养对外来植物的限制作用,尤其有利于生长速度快、养分需求量大的外来禾草扩张,从而改变盐沼植物间的竞争关系,导致在贫营养盐沼中处于竞争劣势的外来植物,逐步替代耐贫营养但对富营养适应性较差的本地植物。

4. 富营养化对盐沼植物生长策略及沉积环境的影响

富营养化通过影响盐沼植物的生长策略和盐沼土壤微生物的分解活动改变盐沼沉积环境物理稳定性

[29]。早期研究认为沿海富营养化通过促进植物生长可以增加盐沼高程，保护盐沼；但是营养添加试验结果却并不一致、甚至是相反的[30]。有研究发现，添加 N 限制了盐沼保留 C、N 的能力[31]，且营养物富集不利于有机质积累和泥炭地形成[32]。在 Caribbean mangrove swamp，盐沼边缘和内部的样地在添加 N 后高程降低；在二者之间的过渡区，添加 N 对高程无影响；在盐沼边缘添加 P 也能够降低高程，在过渡区和盐沼内部添加 P 则增加高程[33]，在这个淤积量较低的盐沼中营养盐添加对高程的效应主要由植物细小根系的生长状况决定，因此，营养盐添加后盐沼高程是下降、增加还是保持不变，取决于盐沼初始状态是 N 缺乏还是 P 缺乏。如果营养限制类型不同，营养盐添加后植物生长策略调整不一样，对盐沼高程的作用也不一致。有研究表明富营养化导致盐沼高程下降，是由于盐沼植物的生长策略发生了改变，从营养获取的根型生长策略转变为光捕获的茎型生长策略，例如，有研究表明，营养物增加导致低沼泽区互花米草茎的质量和高度增加[34]，或者高生物量植物被低生物量植物替代，导致植物根系生长量降低，对盐沼沉积物的保持能力下降，从而降低了盐沼稳定性[35]。也有研究显示，可能是营养盐添加提高了盐沼沉积物中有机物分解速率[3]，分解活动增强导致盐沼稳定性下降。有研究认为，过多施用氮肥不仅会导致生产成本增加，而且会造成土壤理化性质恶化[36]。对假臭草的研究表明，假臭草的入侵会造成土壤养分的大量损耗，降低土壤酶活性与土壤微生物群落功能多样性，导致土壤质量下降[37]，富营养化会加速假臭草的入侵，造成土壤质量进一步恶化。但同时也有研究认为，富营养化对盐沼沉积物有机质分解过程的影响效果还难以确定，主要原因是目前的研究手段在野外试验中很难区分植物根系呼吸分解与有机物呼吸分解作用，只能在实验室内采用人工手段切断微生物呼吸过程和植物根系呼吸过程分别测定，或者只能研究短期的凋落物分解过程，但是短期分解过程对盐沼有机物的长期保存关联不大。因此，判断富营养化对盐沼高程的影响需要更长时间尺度(数十年以上)和更大空间尺度(数平方公里以上)的定位观测。另外，富营养化可能降低湿地土壤强度[38]，但是这种效应需要经过数十年时间或者经历大型风暴潮后才能得到检验[39]。一项持续 9 年的 N 添加试验结果表明，富营养化提高盐沼植物(互花米草和狐米草)地上叶生物量，降低地下根系密度和生物量，促进微生物对有机质的分解作用，这些效应最终降低了盐沼的物理稳定性，导致潮沟崩塌毁坏，由植被覆盖的盐沼转变为无植被的光滩[3]。而另一项持续 36 年的野外营养盐添加试验显示，营养添加降低了盐沼植物地下有机质的积累，并导致盐沼丧失，盐沼损失速率相当于海平面上升所致损失速率的一半，认为维持和修复濒临消失的盐沼需要削减营养负荷[40]。但也有研究发现，营养物浓度升高，土壤基质的结构完整性没有被破坏，分解速率也与对照组相似，根系明显增强，土壤强度也增加[41]。

5. 富营养化条件下盐沼植物对大气二氧化碳浓度增加响应能力的变化

营养添加对盐沼植物固定二氧化碳能力的影响随植物种类、添加时间、植物光合途径等因素变化。N 是植物生长的限制因子，因而以往都假设在大气 CO₂ 浓度提高的背景下添加 N 能够促进植物对 CO₂ 的固定从而提高植物生产力[35]。但是，只有少数的试验能够支持这一假设[42]，例如，在一片松林的试验表明，添加 N 能促进树木对二氧化碳的固定，促进木质化组织形成[43]。对油松的试验表明，在同一光照水平下，氮素营养不仅明显增加了油松幼苗的净光合速率，而且还增强了油松幼苗在全光照下对光抑制的抵抗性[44]，促进对大气中二氧化碳的固定。在草地的 CO₂ 和 N 协同添加试验表明三年后二者表现为正协同作用，N 添加能促进草地利用 CO₂ 能力并提高产量[45]。更多的实验结果则显示 N 添加最终降低植物乃至整个生态系统利用 CO₂ 的能力。对黑麦草的控制试验显示，短时间内 N 添加促进草地利用 CO₂ 能力，但是长期的添加则会抑制草地利用 CO₂ 能力[46]。对苔藓结皮的控制模拟试验表明，氮添加量较少时，苔藓结皮净光合速率受到促进作用，超过一定量的氮添加量会使净光合速率受到抑制，导致光合固碳能力下降[47]。对长白山落叶阔叶红松林和紫椴林的试验发现，在一定范围内，两个树种最大净光

合速率随施氮量的增加而增大,超过该范围后,最大净光合速率下降[48]。而对草原生态系统的控制试验也表明不同剂量 N 添加对生态系统生产力存在差异,高等剂量 N 添加下生态系统固碳能力低于中等剂量添加下的固碳能力[49]。通常 C3 植物 C4 植物组成的盐沼对环境变化响应敏感,也更容易受到富营养化的影响,在添加 N 后,第一年增加盐沼植物生产力,提高了固定大气 CO₂ 能力。但是 N 添加对 C4 植物生产力的提升远远高于 C3 植物,而 C4 植物响应大气 CO₂ 浓度增加的能力远低于 C3 植物。到第三、第四年以后, N 添加试验引起的植物演替最终降低了盐沼植物生产力[50]。大量研究显示大气 CO₂ 浓度增加和 N 污染叠加对不同植物的作用不相同[51],并且能够引起植物群落演替[52],进而改变整个生态系统固定大气 CO₂ 浓度的能力,而且植物类群对于各种扰动正向响应能力的相互抵消很可能降低整个自然生态系统响应大气 CO₂ 浓度增加的能力。盐沼植物对碳的固定及养分循环的作用非常重要,未来可将目光集中在盐沼植物对碳浓度增加的响应。

6. 富营养化对植物碳分配策略影响

富营养化改变植物生物量碳分配策略,并影响到微生物对土壤有机质的分解作用。从 Louisiana 到 Nova Scotia 盐沼(互花米草和狐米草)的富营养化添加试验结果表明:营养盐添加能提高植物地上生物量[53],部分样地植物地下生物量降低,也有部分样地中地下生物量未发生变化[54],有机质分解作用增强[55]。有研究表明,富营养化导致盐沼植物地上生物量增加[56]。对青藏高原高寒草甸的研究表明,氮添加显著促进了青藏高原高寒草甸的地上生物量增加,对高寒草甸地下生物量无显著影响,而磷添加后地下生物量有增加的趋势[57]。根系减少和有机质分解作用加强能导致土壤结实度下降[38]。一些短期试验结果显示,营养添加会导致盐沼根系和根茎生物量下降并降低碳积累[40]。研究发现,营养物的添加导致互花米草的地下生物量减少了 20% [58]。对杉木幼苗的试验表明,施氮降低了杉木根茎生物量[59],对南亚热带常绿阔叶次生林的研究也表明,细根生物量与土壤 N 含量负相关[60],而对湿地松林的研究表明,施氮处理显著减少了林分凋落物量、土壤微生物碳、氮量,并轻微抑制了细根生物量[61]。羊草的养分添加试验表明, N 添加显著提高了羊草的地上生物量, P 添加显著降低了羊草的地下生物量, N、P 添加促进了羊草生物量向地上部分的分配和 N、P 向叶片的分配[62],富营养化将影响羊草的生物量碳分配策略。在加利福尼亚草地进行了 9 年的控制试验结果表明, N 添加能够降低微生物残体对土壤碳的贡献比例,从而可能降低土壤碳库[63]。通常植物根系生物量碳在土壤中的存留效率远比地上生物量存留效率高[64],同位素分析以及根、茎生物标记物的对比研究证明,来自根系的有机碳分子结构在土壤和土壤微生物中占优势[65]。在温带森林的土壤中根系生物碳会被优先保留[66],地下生物量输入(包括真菌菌丝体)在土壤新增有机质中所占比例大于叶片凋落物输入[67]。除了大部分地上生物量输入在枯枝落叶层被矿化分解外,根和菌根生物量有更多机会和土壤颗粒进行物理化学作用[68]。同时,新鲜根进入土壤可以刺激微生物活动,引起对旧的有机质加速分解并改变微生物群落组成[69]。因此植物的碳分配在土壤碳变化动态中具有重要作用[70]。

7. 展望

综上所述,现有工作主要涉及富营养化对盐沼外来植物竞争能力的影响,对盐沼植物群落演替的影响,对盐沼沉积环境稳定性影响和盐沼对全球变化响应等方面,尚未深入到富营养化对盐沼土壤碳库的影响及其机理研究。关于富营养化对盐沼湿地的影响研究结论不确定,对盐沼土壤碳库方面影响的基础研究还非常缺乏。需要充分的研究结果支持和研究技术方法的突破,尤其需要系统的长期定位研究和原位控制实验,如在盐沼植物样地设置营养盐添加样地和无添加的对照样地,进行对比试验,来研究富营养化对盐沼土壤碳库的影响等,积累系统的科学数据,探讨其生态过程和作用机理。

参考文献 (References)

- [1] Bannon, R.O. and Roman, C.T. (2008) Using Stable Isotopes to Monitor Anthropogenic Nitrogen Inputs to Estuaries. *Ecological Applications*, **18**, 22-30. <https://doi.org/10.1890/06-2006.1>
- [2] Lovelock, C.E., Ball, M.C., Martin, K.C., et al. (2009) Nutrient Enrichment Increases Mortality of Mangroves. *Plos One*, **4**, e5600. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0005600>
- [3] Deegan, L.A., Johnson, D.S., Warren, R.S., et al. (2012) Coastal Eutrophication as a Driver of Salt Marsh Loss. *Nature*, **490**, 388-392. <https://doi.org/10.1038/nature11533>
- [4] Yasin, J.A., Kroeze, C. and Mayorga, E. (2010) Nutrients Export by Rivers to the Coastal Waters of Africa: Past and Future Trends. *Global Biogeochemical Cycles*, **24**, 90-98. <https://doi.org/10.1029/2009GB003568>
- [5] Liao, C.Z., Luo, Y., Jiang, L.F., et al. (2007) Invasion of *Spartina alterniflora* Enhanced Ecosystem Carbon and Nitrogen Stocks in the Yangtze Estuary, China. *Ecosystems*, **10**, 1351-1361. <https://doi.org/10.1007/s10021-007-9103-2>
- [6] Funk, J.L. and Vitousek, P.M. (2007) Resource-Use Efficiency and Plant Invasion in Low-Resource Systems. *Nature*, **446**, 1079-1081. <https://doi.org/10.1038/nature05719>
- [7] Gross, K.L., Mittelbach, G.G. and Reynolds, H.L. (2008) Grassland Invisibility and Diversity: Responses to Nutrients, Seed Input, and Disturbance. *Ecology*, **86**, 476-486. <https://doi.org/10.1890/04-0122>
- [8] Pennings, S.C., Stanton, L.E. and Brewer, J.S. (2002) Nutrient Effects on the Composition of Salt Marsh Plant Communities along the Southern Atlantic and Gulf Coasts of the United States. *Estuaries and Coasts*, **25**, 1164-1173. <https://doi.org/10.1007/BF02692213>
- [9] Levine, J.M., Brewer, J.S. and Bertness, M.D. (1998) Nutrients, Competition and Plant Zonation in a New England Salt Marsh. *Journal of Ecology*, **86**, 285-292. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2745.1998.00253.x>
- [10] Valéry, L., Radureau, A. and Lefeuvre, J.C. (2017) Spread of the Native Grass *Elymus athericus* in Salt Marshes of Mont-Saint-Michel Bay as an Unusual Case of Coastal Eutrophication. *Journal of Coastal Conservation*, **21**, 421-433. <https://doi.org/10.1007/s11852-016-0450-z>
- [11] 袁义福, 郭卫华, 王仁卿. 低营养条件下外来种火炬树与本地种麻栎幼苗在生物量分配策略上的差异[EB/OL]. 北京: 中国科技论文在线. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201302-41>, 2013-01-28.
- [12] Tyler, A.C., Lambrinos, J.G. and Grosholz, E.D. (2007) Nitrogen Inputs Promote the Spread of an Invasive Marsh Grass. *Ecological Applications*, **17**, 1886-1898. <https://doi.org/10.1890/06-0822.1>
- [13] 常瑞英. 养分水平和氮磷比对入侵植物空心莲子草与非入侵种竞争关系的影响[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2013.
- [14] 全国明, 谢俊芳, 章家恩, 等. 氮、磷养分对飞机草营养器官表型可塑性的影响[J]. 生态学杂志, 2014, 33(10): 2625-2632.
- [15] Herr-Turoff, A. and Zedler, J.B. (2007) Does Morphological Plasticity of the *Phalaris arundinacea* Canopy Increase Invasiveness? *Plant Ecology*, **193**, 265-277. <https://doi.org/10.1007/s11258-007-9264-2>
- [16] Jiang, L.F., Luo, Y.Q., Chen, J.K., et al. (2009) Ecophysiological Characteristics of Invasive *Spartina alterniflora* and Native Species in Salt Marshes of Yangtze River Estuary, China. *Estuarine Coastal & Shelf Science*, **81**, 74-82. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2008.09.018>
- [17] 丛雪, 吴岩, 鲁萍, 等. 氮素波动对反枝苋和大豆最大净光合速率和光合氮利用效率的影响[J]. 作物杂志, 2013(1): 73-77.
- [18] 胡朝臣, 刘学炎, 类延宝, 等. 西双版纳外来入侵植物及其共存种叶片氮、磷化学计量特征[J]. 植物生态学报, 2016, 40(11): 1145-1153.
- [19] Mozdzer, T.J., Zieman, J.C. and Mcglathery, K.J. (2010) Nitrogen Uptake by Native and Invasive Temperate Coastal Macrophytes: Importance of Dissolved Organic Nitrogen. *Estuaries and Coasts*, **33**, 784-797. <https://doi.org/10.1007/s12237-009-9254-9>
- [20] Bertness, M.D., Ewanchuk, P.J. and Silliman, B.R. (2002) Anthropogenic Modification of New England Salt Marsh Landscapes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **99**, 1395-1398. <https://doi.org/10.1073/pnas.022447299>
- [21] Fox, L., Valiela, I. and Kinney, E.L. (2012) Vegetation Cover and Elevation in Long-Term Experimental Nutrient-Enrichment Plots in Great Sippewissett Salt Marsh, Cape Cod, Massachusetts: Implications for Eutrophication and Sea Level rise. *Estuaries and Coasts*, **35**, 445-458. <https://doi.org/10.1007/s12237-012-9479-x>
- [22] 张丽辉. 鸭绿江湿地外来种禾叶慈姑的生态适应机制[D]: [博士学位论文]. 长春: 东北师范大学, 2014.
- [23] Isbell, F., Reich, P.B., Tilman, D., et al. (2013) Nutrient Enrichment, Biodiversity Loss, and Consequent Declines in

- Ecosystem Productivity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **110**, 11911-11916. <https://doi.org/10.1073/pnas.1310880110>
- [24] Saltonstall, K. and Stevenson, J.C. (2007) The Effect of Nutrients on Seedling Growth of Native and Introduced *Phragmites australis*. *Aquatic Botany*, **86**, 331-336. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2006.12.003>
- [25] Boyer, K.E. and Zedler, J.B. (1999) Nitrogen Addition Could Shift Plant Community Composition in a Restored California Salt Marsh. *Restoration Ecology*, **7**, 74-85. <https://doi.org/10.1046/j.1526-100X.1999.07109.x>
- [26] Zhao, Y.J., Hua, Q., Zhao, C.J., *et al.* (2010) Phenotypic Plasticity of *Spartina alterniflora*, and *Phragmites australis*, in Response to Nitrogen Addition and Intraspecific Competition. *Hydrobiologia*, **637**, 143-155. <https://doi.org/10.1007/s10750-009-9992-5>
- [27] He, Q. and Silliman, B.R. (2015) Biogeographic Consequences of Nutrient Enrichment for Plant-Herbivore Interactions in Coastal Wetlands. *Ecology Letters*, **18**, 462-471. <https://doi.org/10.1111/ele.12429>
- [28] 张文瑾, 张宇清, 余维维, 等. 氮添加对油蒿群落植物叶片生态化学计量特征的影响[J]. 环境科学研究, 2016, 29(1): 52-58.
- [29] Kirwan, M.L. and Megonigal, J.P. (2013) Tidal Wetland Stability in the Face of Human Impacts and Sea-Level Rise. *Nature*, **504**, 53-60. <https://doi.org/10.1038/nature12856>
- [30] Anisfeld, S.C. and Hill, T.D. (2012) Fertilization Effects on Elevation Change and Belowground Carbon Balance in a Long Island Sound Tidal Marsh. *Estuaries and Coasts*, **35**, 201-211. <https://doi.org/10.1007/s12237-011-9440-4>
- [31] Vivanco, L., Irvine, I.C. and Martiny, J.B. (2015) Nonlinear Responses in Salt Marsh Functioning to Increased Nitrogen Addition. *Ecology*, **96**, 936-947. <https://doi.org/10.1890/13-1983.1>
- [32] Watson, E.B., Oczkowski, A.J., Wigand, C., *et al.* (2014) Nutrient Enrichment and Precipitation Changes Do Not Enhance Resiliency of Salt Marshes to Sea Level Rise in the Northeastern U.S.. *Climatic Change*, **125**, 501-509. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1189-x>
- [33] Mckee, K.L., Cahoon, D.R. and Feller, I.C. (2007) Caribbean Mangroves Adjust to Rising Sea Level through Biotic Controls on Soil Elevation Change. *Global Ecology & Biogeography*, **16**, 545-556. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2007.00317.x>
- [34] Johnson, D.S., Warren, R.S., Deegan, L.A., *et al.* (2016) Saltmarsh Plant Responses to Eutrophication. *Ecological Applications*, **26**, 2649-2661. <https://doi.org/10.1002/eap.1402>
- [35] Langley, J.A. and Megonigal, J.P. (2010) Ecosystem Response to Elevated CO₂ Levels Limited by Nitrogen-Induced Plant Species Shift. *Nature*, **466**, 96-99. <https://doi.org/10.1038/nature09176>
- [36] 梁国鹏, Houssou, A.A., 吴会军, 等. 施氮量对夏玉米根际和非根际土壤酶活性及氮含量的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(6): 1917-1924.
- [37] 全国明, 代亭亭, 章家恩, 等. 假臭草入侵对土壤养分与微生物群落功能多样性的影响[J]. 生态学杂志, 2016, 35(11): 2883-2889.
- [38] Turner, R.E. (2011) Beneath the Salt Marsh Canopy: Loss of Soil Strength with Increasing Nutrient Loads. *Estuaries and Coasts*, **34**, 1084-1093. <https://doi.org/10.1007/s12237-010-9341-y>
- [39] Howes, N.C. (2010) Hurricane-Induced Failure of Low Salinity Wetlands. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **107**, 14014-14019. <https://doi.org/10.1073/pnas.0914582107>
- [40] Turner, R.E., Howes, B.L., Teal, J.M., *et al.* (2009) Salt Marshes and Eutrophication: An Unsustainable Outcome. *Limnology & Oceanography*, **54**, 1634-1642. <https://doi.org/10.4319/lo.2009.54.5.1634>
- [41] Graham, S.A. and Mendelsohn, I.A. (2016) Coastal Wetland Stability Maintained through Counterbalancing Accretionary Responses to Chronic Nutrient Enrichment. *Ecology*, **95**, 3271-3283. <https://doi.org/10.1890/14-0196.1>
- [42] Reich, P.B., Hungate, B.A. and Luo, Y. (2006) Carbon-Nitrogen Interactions in Terrestrial Ecosystems in Response to Rising Atmospheric Carbon Dioxide. *Annual Review of Ecology Evolution & Systematics*, **37**, 611-636. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.37.091305.110039>
- [43] Oren, R., Ellsworth, D.S., Johnsen, K.H., *et al.* (2001) Soil Fertility Limits Carbon Sequestration by Forest Ecosystems in a CO₂-Enriched Atmosphere. *Nature*, **411**, 469-472. <https://doi.org/10.1038/35078064>
- [44] 郑娇. 光照、氮素、水分对油松光合固碳能力的影响[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京林业大学, 2013.
- [45] Reich, P.B., Hobbie, S.E., Lee, T., *et al.* (2006) Nitrogen Limitation Constrains Sustainability of Ecosystem Response to CO₂. *Nature*, **440**, 922-925. <https://doi.org/10.1038/nature04486>
- [46] Schneider, M.K., Lüscher, A., Richter, M., *et al.* (2004) Ten Years of Free-Air CO₂ Enrichment Altered the Mobilization of N from Soil in *Lolium perenne* L. Swards. *Global Change Biology*, **10**, 1377-1388. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2004.00803.x>

- [47] 闫佳毅, 张宇清, 秦树高, 等. 不同水分条件下苔藓结皮光合能力对氮素添加量的响应[J]. 水土保持通报, 2015, 35(6): 75-80.
- [48] 孙金伟, 吴家兵, 任亮, 等. 氮添加对长白山阔叶红松林 2 种树木幼苗光合生理生态特征的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(21): 6777-6785.
- [49] 游成铭, 胡中民, 郭群, 等. 氮添加对内蒙古温带典型草原生态系统碳交换的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(8): 2142-2150.
- [50] Langley, J.A., Mckee, K.L., Cahoon, D.R., *et al.* (2009) Elevated CO₂ Stimulates Marsh Elevation Gain, Counterbalancing Sea-Level Rise. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **106**, 6182-6186. <https://doi.org/10.1073/pnas.0807695106>
- [51] Xia, J. and Wan, S. (2008) Global Response Patterns of Terrestrial Plant Species to Nitrogen Addition. *New Phytologist*, **179**, 428-439. <https://doi.org/10.1073/pnas.0807695106>
- [52] Reich, P.B. (2009) Elevated CO₂ Reduces Losses of Plant Diversity Caused by Nitrogen Deposition. *Science*, **326**, 1399-1402. <https://doi.org/10.1126/science.1178820>
- [53] Bertness, M.D. and Pennings, S.C. (2002) Spatial Variation in Process and Pattern in Salt Marsh Plant Communities in Eastern North America. In: Weinstein, M.P. and Kreeger, D.A., Eds., *Concepts and Controversies in Tidal Marsh Ecology*, Springer Netherlands, 39-57. https://doi.org/10.1007/0-306-47534-0_4
- [54] Cathleen, W., Patricia, B., Mark, S., *et al.* (2009) Soil Respiration Rates in Coastal Marshes Subject to Increasing Watershed Nitrogen Loads in Southern New England, USA. *Wetlands*, **29**, 952-963. <https://doi.org/10.1672/08-147.1>
- [55] Morris, J.T. and Bradley, P.M. (1999) Effects of Nutrient Loading on the Carbon Balance of Coastal Wetland Sediments. *Limnology & Oceanography*, **44**, 699-702. <https://doi.org/10.4319/lo.1999.44.3.0699>
- [56] Reef, R., Spencer, T., Möller, I., *et al.* (2016) The Effects of Elevated CO₂ and Eutrophication on Surface Elevation Gain in a European Saltmarsh. *Global Change Biology*, **23**, 881-890. <https://doi.org/10.1111/gcb.13396>
- [57] 杨晓霞, 任飞, 周华坤, 等. 青藏高原高寒草甸植物群落生物量对氮、磷添加的响应[J]. 植物生态学报, 2014, 38(2): 159-166.
- [58] Valiela, I. (2015) The Great Sippewissett Salt Marsh Plots—Some History, Highlights, and Contrails from a Long-Term Study. *Estuaries and Coasts*, **38**, 1099-1120. <https://doi.org/10.1007/s12237-015-9976-9>
- [59] 于钦民, 徐福利, 王渭玲. 氮、磷肥对杉木幼苗生物量及养分分配的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(1): 118-128.
- [60] 徐伟强, 周璋, 李意德, 等. 植被因子和土壤氮对南亚热带常绿阔叶次生林细根生物量的影响[J]. 生态环境学报, 2016, 25(2): 183-188.
- [61] 刘益君, 闫文德, 郑威, 等. 施氮对湿地松(*Pinuselliottii*)林土壤呼吸和相关因子的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(2): 342-349.
- [62] 詹书侠, 郑淑霞, 王扬, 等. 羊草的地上-地下功能性状对氮磷施肥梯度的响应及关联[J]. 植物生态学报, 2016, 40(1): 36-47.
- [63] Liang, C. and Balse, T.C. (2012) Warming and Nitrogen Deposition Lessen Microbial Residue Contribution to Soil Carbon Pool. *Nature Communications*, **3**, 1222. <https://doi.org/10.1038/ncomms2224>
- [64] Schmidt, M.W., Torn, M.S., Abiven, S., *et al.* (2011) Persistence of Soil Organic Matter as an Ecosystem Property. *Nature*, **478**, 49-56. <https://doi.org/10.1038/nature10386>
- [65] Kramer, C., Trumbore, S., Fröberg, M., Dozal, L.M.C., Zhang, D.C., Xu, X.M., Santos, G.M. and Hanson, P.J. (2010) Recent (4 Year Old) Leaf Litter Is Not a Major Source of Microbial Carbon in a Temperate Forest Mineral Soil. *Soil Biology and Biochemistry*, **42**, 1028-1037. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.02.021>
- [66] Bird, J.A., Kleber, M. and Torn, M.S. (2008) C and N Stabilization Dynamics in Soil Organic Matter Fractions during Needle and Fine Root Decomposition. *Organic Geochemistry*, **39**, 465-477. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2007.12.003>
- [67] Godbold, D.L., Hoosbeek, M.R., Lukac, M., *et al.* (2006) Mycorrhizal Hyphal Turnover as a Dominant Process for Carbon Input into Soil Organic Matter. *Plant and Soil*, **281**, 15-24. <https://doi.org/10.1007/s1104-005-3701-6>
- [68] Fontaine, S., Barot, S., Barré, P., *et al.* (2007) Stability of Organic Carbon in Deep Soil Layers Controlled by Fresh Carbon Supply. *Nature*, **450**, 277-280. <https://doi.org/10.1038/nature06275>
- [69] Lehmann, E.A. and Johansson, A.M. (2010) Reduction of Forest Soil Respiration in Response to Nitrogen Deposition. *Nature Geoscience*, **3**, 315-322. <https://doi.org/10.1038/ngeo844>
- [70] 郭卫东, 章小明, 杨逸萍, 等. 中国近岸海域潜在性富营养化程度的评价[J]. 应用海洋学学报, 1998(1): 64-70.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2329-7255，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：hjss@hanspub.org