

DOI: 10.5846/stxb202101050034

陶宝先,王晶东,陈庆海,马澍,袁海燕,陈永金,王浩.氮添加对黄河三角洲滨海湿地芦苇养分再吸收效率的影响.生态学报, 2022, 42(3): 914-921.

Tao B X, Wang J D, Chen Q H, Ma S, Yuan H Y, Chen Y J, Wang H. Effect of nitrogen additions on the nutrient resorption efficiency of *Phragmites australis* in coastal wetlands of the Yellow River Delta. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(3): 914-921.

氮添加对黄河三角洲滨海湿地芦苇养分再吸收效率的影响

陶宝先*, 王晶东, 陈庆海, 马澍, 袁海燕, 陈永金, 王浩

聊城大学地理与环境学院, 聊城 252059

摘要: 大气氮沉降增加能改变土壤养分可利用性, 影响滨海湿地植物的养分再吸收。目前研究多关注氮沉降量对养分再吸收过程的影响, 且研究集中于叶片, 鲜有研究区分不同形态氮素对植物不同器官养分再吸收过程的影响。通过两年的野外控制实验, 研究硝态氮、铵态氮添加对黄河三角洲滨海湿地芦苇 (*Phragmites australis*) 叶、茎养分再吸收效率的影响。结果表明: 两类氮添加均显著增加叶、茎的氮、磷含量 ($P < 0.001$), 增幅达 32.74%—43.22% (氮)、30.91%—36.51% (磷)。叶片氮的再吸收效率为 54.14%—67.66%, 茎氮的再吸收效率为 50.60%—62.85%。叶片磷的再吸收效率为 56.80%—70.38%, 茎磷的再吸收效率为 77.43%—84.95%。两类氮添加均显著降低氮、磷的再吸收效率 ($P < 0.001$), 但两类氮添加处理下的养分再吸收效率无差异。叶、茎氮的再吸收效率无差异, 但茎磷的再吸收效率明显高于叶 ($P < 0.01$)。总之, 氮添加降低芦苇对氮、磷的再吸收效率, 且茎对养分的再吸收也具有不可忽略的贡献。

关键词: 硝态氮; 铵态氮; 养分再吸收; 芦苇; 黄河三角洲

Effect of nitrogen additions on the nutrient resorption efficiency of *Phragmites australis* in coastal wetlands of the Yellow River Delta

TAO Baoxian*, WANG Jingdong, CHEN Qinghai, MA Shu, YUAN Haiyan, CHEN Yongjin, WANG Hao

College of Geography and Environment, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China

Abstract: Increased atmospheric nitrogen (N) deposition may adjust the nutrient resorption efficiency of the plant species in the coastal wetlands due to the changing of soil nutrients availability. Most studies concentrated on the nutrient resorption of the leaf, whereas the nutrient resorption of the non-leaf organs, such as culm, is still less known. Moreover, little attention is concentrated on differentiating the effects of nitrate and ammonium additions on nutrient resorption. In this study, an in situ experiment was conducted to investigate the effects of nitrate and ammonium additions on the nutrient resorption efficiency of leaf and culm for reed (*Phragmites australis*) in the coastal wetlands of the Yellow River Delta, China. Results showed that N additions increased the concentrations of N and phosphorus (P) in senesced organs, ranging from 32.71% to 43.22% for N, and ranging from 30.91% to 36.51% for P. The N resorption efficiency (NRE) ranged from 54.14% to 67.66% for the leaf and ranged from 50.60% to 62.85% for the culm. The P resorption efficiency (PRE) ranged from 56.80% to 70.38% for the leaf and ranged from 77.43% to 84.95% for the culm. Both two types of N addition had similar and negative effects on nutrient resorption efficiency ($P < 0.001$). The NRE of leaf was similar to that of culm, whereas the culm had larger PRE than leaf ($P < 0.01$). Overall, both N additions decreased the NRE and PRE of reed.

基金项目: 山东省自然科学基金项目 (ZR2020MD004); 山东省本科高校教学改革研究项目 (M2018X052); 聊城大学实验技术研究项目 (26322170123); 聊城大学基金项目 (318051430)

收稿日期: 2021-01-05; **网络出版日期:** 2021-10-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: taobaoxian@sina.com

Furthermore, the culm of reed had a non-negligible contribution to nutrient resorption.

Key Words: nitrate; ammonium; nutrient resorption; *Phragmites australis*; Yellow River Delta

植物可以采取各种不同的策略适应外界环境变化^[1]。其中,再吸收作为一种养分保护机制,是指植物将养分从脱落的叶片转移至根部的过程^[2-4]。植物可以直接利用再吸收的养分,减少对外界氮、磷养分供应的需求^[4-5]。通常,土壤养分可利用性增强会降低植物的养分再吸收效率^[6-8],如外源氮添加降低植物对氮素的再吸收效率^[9]。在温带湿地中植物生长常受氮素限制^[10],外源氮添加可能缓解氮素对植物生长的限制,降低其对氮素的再吸收效率。此外,磷的再吸收效率对外源氮添加的响应目前仍不确定。前期研究发现,氮添加能显著改变磷的再吸收效率^[8],但其他研究也发现氮添加不会改变磷的再吸收效率^[11]。因此,氮添加导致的土壤养分可利用性变化,可能改变温带湿地植物对养分的再吸收过程。

现有研究多关注植物叶片的养分再吸收过程,然而茎^[12-13]、鞘^[14]等器官中的养分也能被植物再吸收。由于茎对地上生物量中具有显著贡献^[15],其在植物养分再吸收过程中占有不可忽略的地位^[5, 13],且其养分再吸收过程也受外源养分添加的影响。早期研究发现,长期氮添加增加湿地凋落物氮含量,降低叶、茎等的养分再吸收效率^[14]。然而,茎、鞘等器官的养分再吸收过程常被忽略^[5, 14, 16]。此外,植物生长对不同形态氮素可能具有偏好性吸收。前期研究发现,水生植物吸收铵态氮较硝态氮消耗较少的能量^[17-18],故水生植物偏好于吸收铵态氮^[19]。甚至有研究发现,滨海湿地芦苇能直接利用溶解性有机氮^[20]。这暗示:植物对不同形态氮素的偏好性利用极可能影响其对养分的再吸收过程。各种形态氮素是否对植物的养分再吸收效率有不同的影响?目前的研究仍不充分。因此,研究植物叶、茎的养分再吸收效率及其对不同形态氮添加的响应,可深入理解土壤养分可利用性与植物内部养分保护之间的关系。

黄河三角洲是世界上较年轻的、典型的河口湿地之一^[21]。芦苇是黄河三角洲重要的植物物种,但由于气候变化及人类活动的影响,过去几十年芦苇在该区的分布面积持续下降,影响了该区的植被恢复进程^[22]。大气氮沉降作为黄河三角洲滨海湿地的主要氮素来源之一,能够调节滨海湿地诸多生态过程,然而氮沉降对黄河三角洲滨海湿地生态过程的影响研究仍不充分^[23],尤其是氮沉降对黄河三角洲芦苇的养分再吸收过程的影响研究仍不清楚。因此,本研究通过两年的原位模拟氮添加实验,研究氮添加(硝态氮、铵态氮)对黄河三角洲滨海湿地芦苇养分再吸收效率(氮、磷)的影响,以期明确以下科学问题:(1)氮沉降是否影响黄河三角洲滨海湿地芦苇叶、茎的养分再吸收效率?(2)芦苇的养分再吸收效率是否对硝态氮、铵态氮添加具有不同的响应?(3)芦苇叶与茎是否具有相同的养分再吸收效率?

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于山东省东营市中国科学院黄河三角洲滨海湿地生态试验站(37°45'50"N, 118°59'24"E)。该区属于暖温带大陆性季节气候,年均温 11.7—12.8℃,无霜期 196 d,年蒸发量 190—2400 mm,年降水量 552—630 mm,且近 70%的降水集中在 7、8、9 月份,雨热同期,四季分明。在 7、8 月份大雨后研究区地表常有暂时性积水。该区土壤类型以盐土和潮土为主^[24],平均土壤盐度约为 0.69‰^[21]。植被以耐盐物种为主,主要有怪柳(*Tamarix chinensis*)、芦苇及盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)^[25]。在本研究的试验点,主要植被类型为芦苇。

1.2 样地布置

2016 年 2 月,在研究区设置对照、硝态氮(NaNO_3)、铵态氮(NH_4Cl)3 个处理,每个处理设置 3 个样方,共 9 个样方。每个样方(长 2 m × 宽 2 m)用 4 块不锈钢板焊接成的不锈钢筒(长 2 m × 宽 2 m × 高 0.8 m)与外界隔离,为防止样方内添加氮素的流失,将不锈钢筒插入地下约 0.4 m 深,地表以上约 0.4 m 高。相邻样方间留 2 m 的缓冲区。早期研究发现,研究区年平均氮沉降量为 2.8 g/m²^[26],且未来有增加趋势^[27]。因此,本研究

设置的年氮沉降量为 8 g/m^2 , 每年分 4 次输入 (3、6、9、12 月各一次), 每次的输入量为 2 g/m^2 。氮素用 2 L 样地附近沟塘的地表水溶解, 用喷壶均匀地喷洒于样地地表, 对照处理仅喷洒等量的地表水。

1.3 样品采集与分析

2017 年 5 月, 在每个样方内选择长势均匀的 10 株芦苇并做标记。2017 年 6—9 月, 每月中旬于每个样方内齐地剪除标记的芦苇 2 株, 剪下完全展开的叶片及其对应部位的茎, 用于分析全氮、全磷含量。10 月中旬起每周观察各样方内植物的生长状况, 至各样方内标记芦苇完全变黄时采集地上部分。每月采样后, 将每个样方 2 株芦苇的叶或茎样品分别混合成一个混合样, 再用去离子清洗干净, 于 70°C 烘干至恒重, 粉碎、过 0.1 mm 筛。样品采用浓硫酸- H_2O_2 消煮, 全氮采用靛酚蓝比色法测定, 全磷采用钼锑抗比色法测定, 有机碳采用高温外加热重铬酸钾氧化法测定^[28]。

1.4 数据处理与统计分析

养分再吸收效率 $= (C_m - C_s) / C_m$ 。其中, C_m 代表成熟器官的养分含量, C_s 代表脱落器官的养分含量。6—9 月样品中全氮或全磷含量最高值代表成熟器官的养分含量, 叶、茎成熟器官氮含量及叶成熟器官磷含量均采用 6 月份数据, 茎成熟器官磷含量采用 8 月份数据。10 月份芦苇完全变黄时各器官的全氮或全磷含量代表脱落器官的养分含量。

采用单因素方差分析 (Tukey 法) 检验各指标在不同处理间的差异, 显著性水平为 $P < 0.05$ 。采用 SPSS 25.0 与 Excel 2016 进行数据统计和计算, 采用 Origin 2016 作图, 图中误差线为标准差。

2 结果

硝态氮、铵态氮添加均显著增加脱落器官 (叶与茎) 的氮、磷含量 ($P < 0.001$), 其中, 脱落叶片氮含量增加 43.22% (硝态氮)、37.60% (铵态氮), 脱落茎氮含量增加 38.28% (硝态氮)、32.74% (铵态氮), 脱落叶片磷含量增

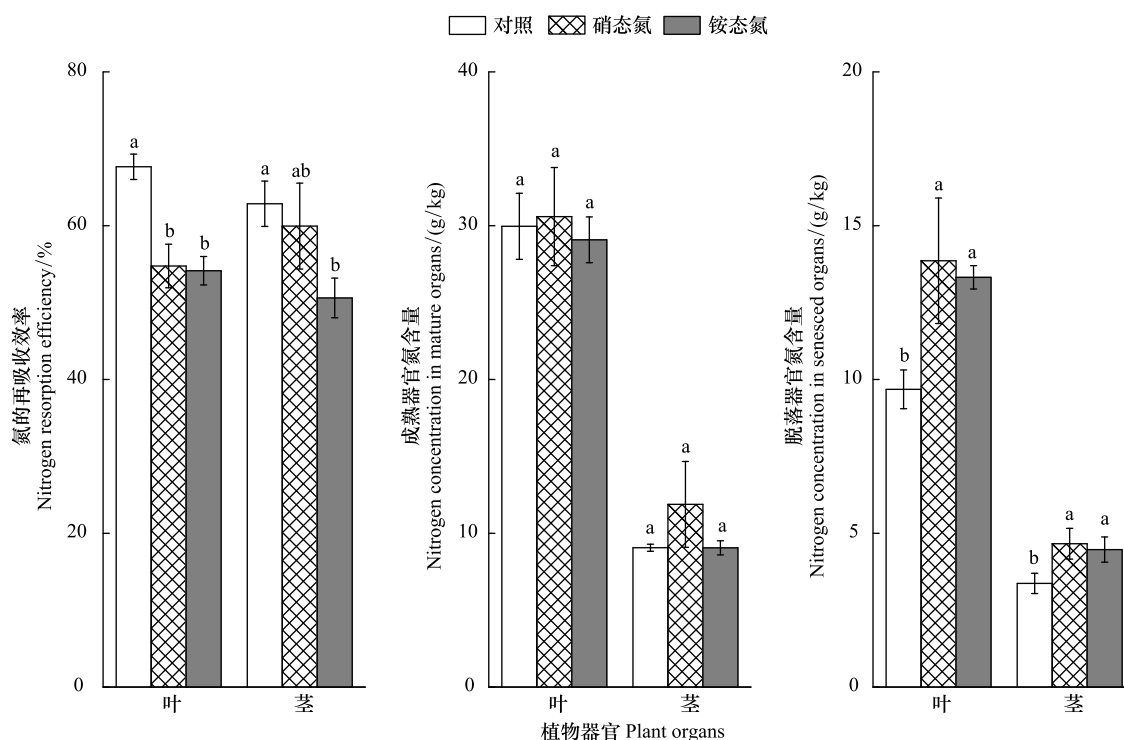


图 1 氮输入对氮的养分再吸收效率及其成熟、脱落器官氮含量的影响

Fig.1 Effects of nitrogen additions on nitrogen resorption efficiency and concentrations of nitrogen in mature and senesced organs

小写字母代表不同处理间有显著差异 ($P < 0.05$)

加 30.91% (硝态氮)、36.36% (铵态氮), 脱落茎磷含量增加 33.33% (硝态氮)、36.51% (铵态氮); 但同一脱落器官的氮或磷含量在两类氮输入处理间无显著差异。两类氮添加对成熟器官氮、磷含量无显著影响 (图 1、2)。成熟叶片 N/P 比值为 16.33 (对照)、18.25 (硝态氮)、16.46 (铵态氮), 茎 N/P 比值为 6.39 (对照)、9.53 (硝态氮)、6.92 (铵态氮; 图 3)。两类氮添加显著降低芦苇凋落物 (即脱落器官) 的 C/N、C/P ($P < 0.01$), 叶凋落物的 C/N 均值为 48.02 (对照)、33.91 (硝态氮)、34.28 (铵态氮), 茎凋落物的 C/N 均值为 138.74 (对照)、101.55 (硝态氮)、104.75 (铵态氮), 叶凋落物的 C/P 均值为 2175.13 (对照)、1681.52 (硝态氮)、1611.43 (铵态氮), 茎凋落物的 C/N 均值为 859.39 (对照)、655.68 (硝态氮)、624.12 (铵态氮; 图 4)。

叶片氮的再吸收效率为 51.83%—69.51%, 均值为 67.66% (对照)、54.76% (硝态氮)、54.14% (铵态氮); 茎氮的再吸收效率为 47.64%—64.76%, 均值为 62.85% (对照)、59.95% (硝态氮)、50.60% (铵态氮)。叶片磷的再吸收效率为 51.30%—75.68%, 均值为 70.38% (对照)、56.80% (硝态氮)、57.63% (铵态氮); 茎磷的再吸收效率为 75.56%—85.91%, 均值为 84.95% (对照)、77.43% (硝态氮)、78.33% (铵态氮)。两类氮添加显著降低叶、茎的养分再吸收效率 ($P < 0.001$), 其中, 叶片氮的再吸收效率降幅为 19.06% (硝态氮)、19.98% (铵态氮), 茎氮的再吸收效率降幅为 4.61% (硝态氮)、19.48% (铵态氮), 叶片磷的再吸收效率降幅为 19.30% (硝态氮)、18.12% (铵态氮), 茎氮的再吸收效率降幅为 8.85% (硝态氮)、7.79% (铵态氮)。针对同一器官, 氮或磷的再吸收效率在两类氮输入处理间均无差异。相同氮输入处理或对照处理下, 叶、茎的氮素再吸收效率无显著差异, 但茎磷的再吸收效率显著高于叶片 ($P < 0.01$; 图 1、2)。

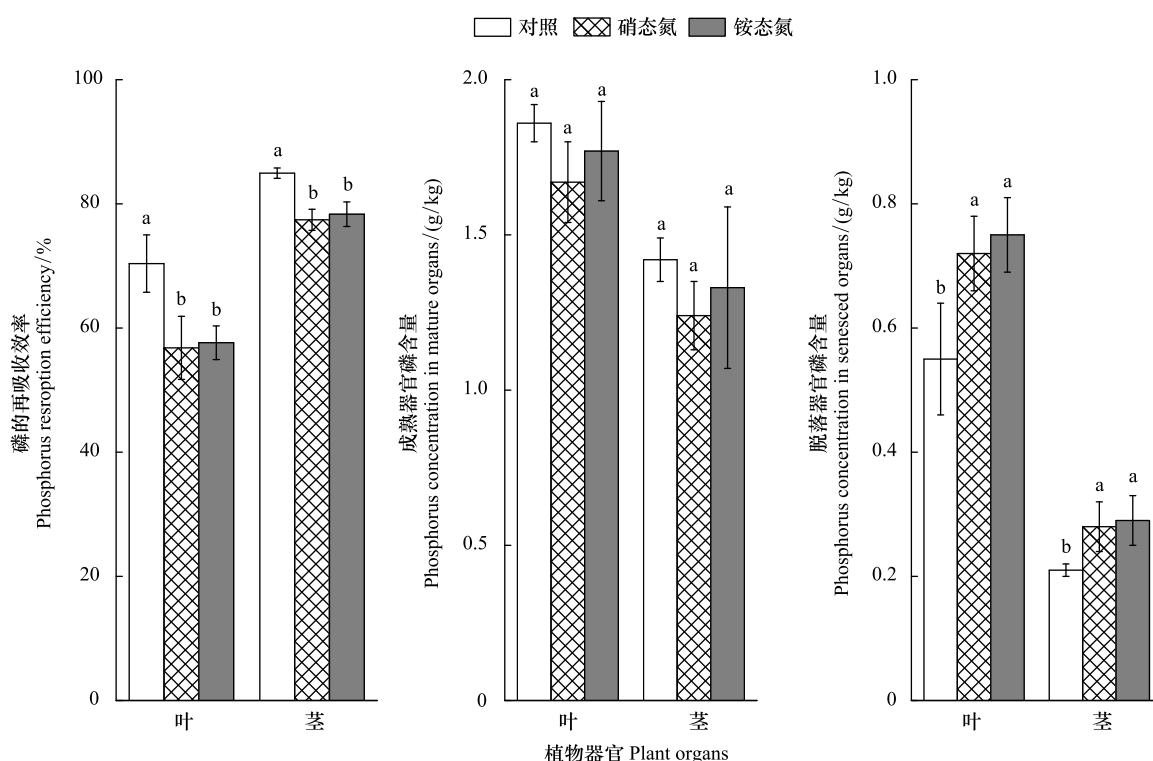


图 2 氮输入对磷的养分再吸收效率及其成熟、脱落器官磷含量的影响

Fig.2 Effects of nitrogen additions on phosphorus resorption efficiency and concentrations of phosphorus in mature and senesced organs

小写字母代表不同处理间有显著差异 ($P < 0.05$)

3 讨论

植物叶片养分含量增加通常会降低养分的再吸收效率^[7]。然而, 早期研究也发现, 氮添加仅能降低温带

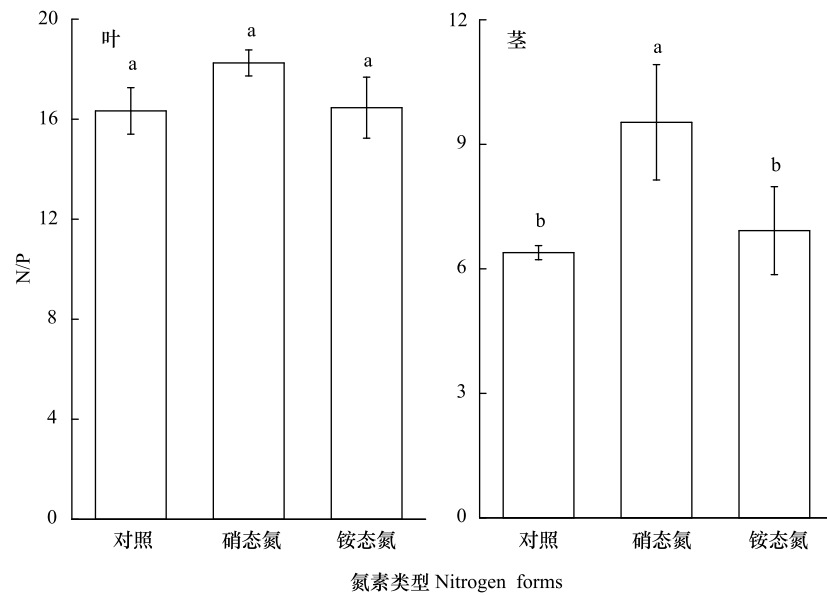


图3 氮输入对成熟叶、茎 N/P 比的影响

Fig.3 Effects of nitrogen additions on the ratio of N/P in mature leaf and culm

小写字母代表不同处理间有显著差异 ($P < 0.05$)

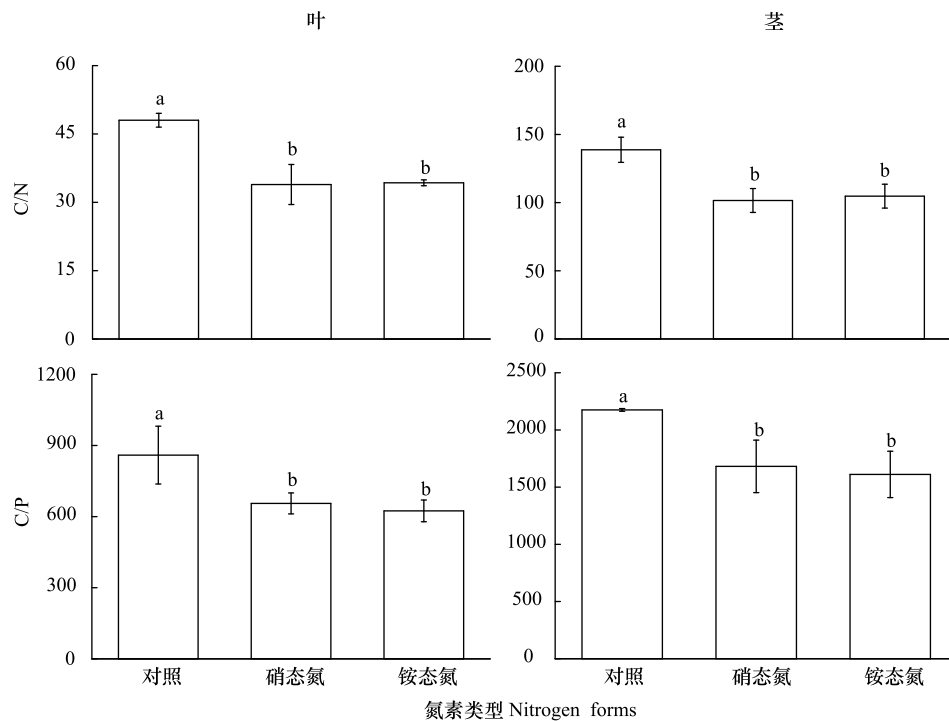


图4 氮输入对叶、茎凋落物 C/N、C/P 比的影响

Fig.4 Effects of nitrogen additions on the ratios of C/N and C/P in senesced leaf and culm

小写字母代表不同处理间有显著差异 ($P < 0.05$)

草原部分物种叶片氮的再吸收效率^[29]。本研究发现,硝态氮、铵态氮添加均增加了脱落器官的氮含量,但降低了氮的再吸收效率(图1),这与其他草原^[6, 8]及湿地^[14]生态系统的研究结论相似,即外源氮添加增加土壤氮的可利用性,促进植物对氮的吸收,降低氮的再吸收效率^[6, 8]。温带湿地植物生长通常受氮素限制^[10],这意味着外源氮添加可能促进植物吸收氮素,增加脱落器官氮含量,进而降低氮的再吸收效率。近期研究也发

现,外源氮添加能增加土壤硝态氮、铵态氮含量,促进黄河三角洲芦苇的生长^[21]。生态化学计量比是反映植物生长状况的重要指标,早期研究曾将 $N/P < 14$ 、 $N/P > 16$ 、 $14 < N/P < 16$ 作为植物生长受氮限制、磷限制和氮磷共同限制的阈值^[30]。本研究发现,芦苇茎 $N/P < 14$ 、叶片 $N/P > 16$ (图 3)。这意味着:黄河三角洲滨海湿地芦苇的生长受氮、磷限制,外源氮添加可能减缓氮素对植物生长的限制,这极有可能降低氮素的再吸收效率。

早期研究发现,水生植物对不同形态氮素有选择性吸收^[17-18, 20]。这暗示:硝态氮、铵态氮可能对植物的养分再吸收有不同的影响。然而,本研究发现,两类无机氮添加对养分再吸收效率产生相似的作用(图 1、2),这与 Kou 等^[11]的研究结论相似。其原因可能是:(1)黄河三角洲滨海湿地土壤氮素含量明显低于其他滨海湿地,如长江口^[31]。这可能加剧氮素对植物生长的限制,增加芦苇生长对氮素的需求,芦苇有可能吸收各种形态的氮素来满足自身生长对氮素的需求。(2)早期研究发现,滨海湿地芦苇能够吸收无机及有机形态的氮素^[20],这表明芦苇对不同形态氮素可能无差别吸收。这可能导致两种形态氮素虽能降低养分的再吸收效率,但两者的效果无差别。

目前,磷的再吸收效率与土壤氮素可利用性之间的关系仍不确定。前期研究发现,外源氮添加能显著增加^[8, 32]、降低^[6]植物叶片磷的再吸收效率,或对磷的再吸收效率无显著影响^[33]。外源氮添加促进植物生长,这极有可能产生植物生长的稀释作用,使植物生长转为磷限制^[34]。本研究的 N/P 比也表明(图 3),芦苇叶片生长受磷限制。这意味着:氮添加可能增加植物生长对磷的需求,促进植物对磷的再吸收。然而,本研究却发现,外源氮添加显著降低磷的再吸收效率,这与 Lü 等^[6]的研究结论相似:外源氮添加可能促进土壤磷的周转,增加土壤磷的可利用性,进而降低植物生长对磷的需求及其再吸收效率。近期研究发现,硝态氮、铵态氮添加刺激了黄河三角洲滨海芦苇湿地土壤磷酸酶活性^[21],其他淡水湿地的研究也发现相似结论^[35],这表明外源氮添加可能通过刺激磷酸酶活性增加土壤磷的可利用性,这极有可能缓解植物生长对磷的需求,进而降低植物对磷的再吸收效率。

前期研究多关注叶片的养分再吸收效率,而茎、鞘等器官的养分再吸收过程常被忽略。早期研究已发现,叶片的养分再吸收效率与茎相似^[12],表明除了叶片之外的其他器官也对植物的养分再吸收有着不可忽略的贡献。本研究发现,芦苇的叶(58.86%)、茎(57.80%)具有相似的氮的再吸收效率,且与全球平均水平相近(62.1%)^[7]。芦苇叶片磷的再吸收效率均值为 61.60%,与全球陆地生态系统植物对磷的再吸收效率均值相近(64.9%),但芦苇茎磷的再吸收效率(均值 80.24%)却显著高于全球平均水平^[7],这与 Aerts 等^[36]的结果(91%)相近。虽然芦苇茎的氮、磷含量低于叶(图 2),但茎的生物量是叶的 2.9 倍^[37],且茎磷的再吸收效率也要高于叶,这意味着芦苇茎养分的再吸收量要明显高于叶,即黄河三角洲滨海湿地芦苇的茎较叶片对养分的再吸收具有更大的贡献,尤其是磷。同时,本研究也建议,后续研究应该注重对非叶器官(如茎、鞘等)养分再吸收过程的研究。

本研究发现,外源氮添加增加了脱落器官氮、磷含量,降低了凋落物 C/N 、 C/P (图 4),改变凋落物质量。也有研究发现,长期氮添加减少湿地挺水植物叶片易分解碳含量,促进茎中难分解碳组分的累积^[38],降低了叶、茎凋落物质量。而凋落物生态化学计量比(如 C/N 、 C/P 、 N/P 等)及有机碳质量^[39-40]的变化能进一步影响凋落物分解过程^[41-42],甚至改变湿地碳循环过程。因此,后续应进一步加强植物养分再吸收效率变化对凋落物分解的研究。

4 结论

(1)氮添加增加了芦苇脱落叶、茎的氮、磷含量,降低了芦苇叶、茎的氮素与磷的再吸效率。同一脱落器官的养分(氮或磷)含量及同一器官的养分(氮或磷)再吸收效率在两类氮添加处理间均无显著差异。

(2)芦苇叶、茎具有相似的氮素再吸收效率,但茎磷的再吸收效率显著高于叶,表明:芦苇茎对养分再吸收过程具有不可忽略的贡献。

参考文献 (References):

- [1] Reich P B, Wright I J, Cavender-Bares J, Craine J M, Oleksyn J, Westoby M, Walters M B. The evolution of plant functional variation: traits, spectra, and strategies. *International Journal of Plant Sciences*, 2003, 164(S3): S143-S164.
- [2] Aerts R. Nutrient resorption from senescing leaves of perennials: are there general patterns? *Journal of Ecology*, 1996, 84(4): 597-608.
- [3] Aerts R, Chapin III F S. The mineral nutrition of wild plants revisited: a re-evaluation of processes and patterns. *Advances in Ecological Research*, 1999, 30: 1-67.
- [4] Alam M R, Mahmood H, Biswas T, Rahman M M. Physiologically adaptive plasticity in nutrient resorption efficiency of *Avicennia officinalis* L. under fluctuating saline environments in the Sundarbans of Bangladesh. *Hydrobiologia*, 2019, 828(1): 41-56.
- [5] Lü X T, Freschet G T, Flynn D F B, Han X G. Plasticity in leaf and stem nutrient resorption proficiency potentially reinforces plant-soil feedbacks and microscale heterogeneity in a semi-arid grassland. *Journal of Ecology*, 2012, 100(1): 144-150.
- [6] Lü X T, Reed S, Yu Q, He N P, Wang Z W, Han X G. Convergent responses of nitrogen and phosphorus resorption to nitrogen inputs in a semiarid grassland. *Global Change Biology*, 2013, 19(9): 2775-2784.
- [7] Vergutz L, Manzoni S, Porporato A, Novais R F, Jackson P B. Global resorption efficiencies and concentrations of carbon and nutrients in leaves of terrestrial plants. *Ecological Monographs*, 2012, 82(2): 205-220.
- [8] Ren H Y, Kang J, Yuan Z Y, Xu Z W, Han G D. Responses of nutrient resorption to warming and nitrogen fertilization in contrasting wet and dry years in a desert grassland. *Plant and Soil*, 2018, 432(1): 65-73.
- [9] Yuan Z Y, Chen H Y H. Negative effects of fertilization on plant nutrient resorption. *Ecology*, 2015, 96(2): 373-380.
- [10] Aert R, Verhoeven J T A, Whigham D F. Plant-mediated controls on nutrient cycling in temperate fens and bogs. *Ecology*, 1999, 80(7): 2170-2181.
- [11] Kou L, Wang H M, Gao W L, Chen W W, Yang H, Li S G. Nitrogen addition regulates tradeoff between root capture and foliar resorption of nitrogen and phosphorus in a subtropical pine plantation. *Trees*, 2017, 31(1): 77-91.
- [12] Freschet G T, Cornelissen J H C, Van Logtestijn R S P, Aerts R. Substantial nutrient resorption from leaves, stems and roots in a subarctic flora: what is the link with other resource economics traits? *New Phytologist*, 2010, 186(4): 879-889.
- [13] Zhang H, Guo W H, Yu M K, Wang G G, Wu T G. Latitudinal patterns of leaf N, P stoichiometry and nutrient resorption of *Metasequoia glyptostroboides* along the eastern coastline of China. *Science of the Total Environment*, 2018, 618: 1-6.
- [14] Mao R, Song C C, Zhang X H, Wang X W, Zhang Z H. Response of leaf, sheath and stem nutrient resorption to 7 years of N addition in freshwater wetland of Northeast China. *Plant and Soil*, 2013, 364(1): 385-394.
- [15] 任海彦, 郑淑霞, 白永飞. 放牧对内蒙古锡林河流域草地群落植物茎叶生物量资源分配的影响. *植物生态学报*, 2009, 33(6): 1065-1074.
- [16] Shen Y, Yang X, Sun X, Chen W Q, Yang G W, Liu N, Chen J S, Zhang Y J. Increased precipitation modulates the influence of nitrogen and litter inputs on the nutrient resorption proficiency rather than efficiency of *Leymus chinensis*. *Plant Ecology*, 2018, 219(2): 217-230.
- [17] Jampeetong A, Brix H, Kantawanichkul S. Effects of inorganic nitrogen forms on growth, morphology, nitrogen uptake capacity and nutrient allocation of four tropical aquatic macrophytes (*Salvinia cucullata*, *Ipomoea aquatica*, *Cyperus involucratus* and *Vetiveria zizanioides*). *Aquatic Botany*, 2012, 97(1): 10-16.
- [18] Nayar S, Collings G J, Miller D J, Bryars S, Cheshire A C. Uptake and resource allocation of ammonium and nitrate in temperate seagrasses *Posidonia* and *Amphibolis*. *Marine Pollution Bulletin*, 2010, 60(9): 1502-1511.
- [19] Nordin A, Högberg P, Näsholm T. Soil nitrogen form and plant nitrogen uptake along a boreal forest productivity gradient. *Oecologia*, 2001, 129(1): 125-132.
- [20] Mozdzer T J, Zieman J C, McGlathery K J. Nitrogen uptake by native and invasive temperate coastal macrophytes: importance of dissolved organic nitrogen. *Estuaries and Coasts*, 2010, 33(3): 784-797.
- [21] Guan B, Xie B H, Yang S S, Hou A X, Chen M, Han G X. Effects of five years' nitrogen deposition on soil properties and plant growth in a salinized reed wetland of the Yellow River Delta. *Ecological Engineering*, 2019, 136: 160-166.
- [22] Wang H J, Yang Z S, Saito Y, Liu J P, Sun X X. Interannual and seasonal variation of the Huanghe (Yellow River) water discharge over the past 50 years: connections to impacts from ENSO events and dams. *Global and Planetary Change*, 2006, 50(3/4): 212-225.
- [23] Wolters M L, Sun Z C, Huang C, Kuenzer C. Environmental awareness and vulnerability in the Yellow River Delta: results based on a comprehensive household survey. *Ocean & Coastal Management*, 2016, 120: 1-10.
- [24] Xiao L L, Xie B H, Liu J C, Zhang H X, Han G X, Wang O M, Liu F H. Stimulation of long-term ammonium nitrogen deposition on methanogenesis by Methanocellaceae in a coastal wetland. *Science of the Total Environment*, 2017, 595: 337-343.

- [25] Xu G, Shao H B, Sun J N, Chang S X. Phosphorus fractions and profile distribution in newly formed wetland soils along a salinity gradient in the Yellow River Delta in China. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2012, 175(5): 721-728.
- [26] Zhang Y, Song L, Liu X J, Li W Q, Lü S H, Zheng L X, Bai Z C, Cai G Y, Zhang F S. Atmospheric organic nitrogen deposition in China. *Atmospheric Environment*, 2012, 46: 195-204.
- [27] Galloway J N, Townsend A R, Erisman J W, Bekunda M, Cai Z C, Freney J R, Martinelli L A, Seitzinger S P, Sutton M A. Transformation of the nitrogen cycle: recent trends, questions, and potential solutions. *Science*, 2008, 320(5878): 889-892.
- [28] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [29] Huang J Y, Zhu X G, Yuan Z Y, Song S H, Li X, Li L H. Changes in nitrogen resorption traits of six temperate grassland species along a multi-level N addition gradient. *Plant and Soil*, 2008, 306(1): 149-158.
- [30] Güsewell S. N: P ratios in terrestrial plants: variation and functional significance. *New Phytologist*, 2004, 164(2): 243-266.
- [31] Yu J B, Zhan C, Li Y Z, Zhou D, Fu Y Q, Chu X J, Xing Q H, Han G X, Wang G M, Guan B, Wang Q. Distribution of carbon, nitrogen and phosphorus in coastal wetland soil related land use in the Modern Yellow River Delta. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 37940.
- [32] Li L, Gao X P, Li X Y, Lin L S, Zeng F J, Gui D W, Lu Y. Nitrogen (N) and phosphorus (P) resorption of two dominant alpine perennial grass species in response to contrasting N and P availability. *Environmental and Experimental Botany*, 2016, 127: 37-44.
- [33] Kozovits A R, Bustamante M M C, Garofalo C R, Bucci S, Franco A C, Goldstein G, Meinzer F C. Nutrient resorption and patterns of litter production and decomposition in a Neotropical Savanna. *Functional Ecology*, 2007, 21(6): 1034-1043.
- [34] Van Heerwaarden L M, Toet S, Aerts R. Nitrogen and phosphorus resorption efficiency and proficiency in six sub-arctic bog species after 4 years of nitrogen fertilization. *Journal of Ecology*, 2003, 91(6): 1060-1070.
- [35] Tao B X, Song C C, Guo Y D. Short-term effects of nitrogen additions and increased temperature on wetland soil respiration, Sanjiang Plain, China. *Wetlands*, 2013, 33(4): 727-736.
- [36] Aerts R, De Caluwe H. Aboveground productivity and nutrient turnover of *Molinia Caerulea* along an experimental gradient of nutrient availability. *Oikos*, 1989, 54(3): 320-324.
- [37] 咎肖肖, 徐宾铎, 任一平, 王小林, 蔡星媛. 青岛大沽河河口湿地芦苇的生长及生物量动态研究. *中国海洋大学学报*, 2011, 41(11): 27-33.
- [38] Shan L P, Song C C, Zhang X H, Ren J S. Effects of long-term nitrogen and phosphorus addition on plant defence compounds in a freshwater wetland. *Ecological Indicators*, 2018, 94: 1-6.
- [39] Bonanomi G, Incerti G, Giannino F, Mingo A, Lanzotti V, Mazzoleni S. Litter quality assessed by solid state ^{13}C NMR spectroscopy predicts decay rate better than C/N and Lignin/N ratios. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 56: 40-48.
- [40] Hättenschwiler S, Jørgensen H B. Carbon quality rather than stoichiometry controls litter decomposition in a tropical rain forest. *Journal of Ecology*, 2010, 98(4): 754-763.
- [41] Liu P, Huang J H, Sun O J, Han X G. Litter decomposition and nutrient release as affected by soil nitrogen availability and litter quality in a semiarid grassland ecosystem. *Oecologia*, 2010, 162(3): 771-780.
- [42] Tao B X, Zhang B H, Dong J, Liu C Y, Cui Q. Antagonistic effect of nitrogen additions and warming on litter decomposition in the coastal wetland of the Yellow River Delta, China. *Ecological Engineering*, 2019, 131: 1-8.