

DOI: 10.5846/stxb202006291682

李谦维, 高俊琴, 梁金凤, 冯久格, 张晓雅, 盖凌云. 生物炭添加对不同水氮条件下芦苇生长和氮素吸收的影响. 生态学报, 2021, 41(10): 3765-3774.

Li Q W, Gao J Q, Liang J F, Feng J G, Zhang X Y, Gai L Y. Effects of biochar addition on growth and nitrogen absorption of *Phragmites australis* under different water and nitrogen conditions. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(10): 3765-3774.

生物炭添加对不同水氮条件下芦苇生长和氮素吸收的影响

李谦维¹, 高俊琴^{1,*}, 梁金凤^{1,2}, 冯久格¹, 张晓雅¹, 盖凌云³

1 北京林业大学生态与自然保护学院, 北京 100083

2 北京师范大学环境学院水环境模拟国家重点实验室, 北京 100875

3 山东黄河三角洲国家级自然保护区黄河口管理站, 东营 257500

摘要:生物炭能改良土壤从而促进植物生长和氮素吸收,但其作用效果是否受水氮条件的影响尚不清楚。以湿地植物芦苇为研究对象,在3种氮添加水平(无添加, 30 kg hm⁻² a⁻¹和60 kg hm⁻² a⁻¹)和两种水分(淹水和非淹水)条件下分别进行生物炭添加和不添加处理,结果表明:(1)生物炭添加能促进芦苇根系生长,在非淹水条件下根系生物量增加了40.5%,在淹水条件下根系生物量增加了20.1%。(2)生物炭添加能促进非淹水条件下芦苇的氮素吸收,能提高淹水条件下芦苇的氮素生产力。(3)生物炭添加加剧了土壤氮素损失,且在非淹水高氮条件下作用最强,可能是由于生物炭促进了芦苇的氮素吸收。芦苇氮素吸收速率与土壤氮损失之间存在显著的正相关关系。因此,在添加生物炭时,需要考虑土壤水分状况和氮素富集程度以及植物的氮素吸收偏好。该研究结果可为生物炭在湿地生态系统中的应用提供参考。

关键词:氮添加;氮吸收;芦苇;生物炭;水分条件

Effects of biochar addition on growth and nitrogen absorption of *Phragmites australis* under different water and nitrogen conditions

LI Qianwei¹, GAO Junqin^{1,*}, LIANG Jinfeng^{1,2}, FENG Jiuge¹, ZHANG Xiaoya¹, GAI Lingyun³

1 School of Ecology and Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

3 Huanghekou Management Station, Shandong Yellow River Delta National Nature Reserve Administration, Dongying 257500, China

Abstract: Nitrogen is an essential element for plant growth and is closely related to plant life activities. In most terrestrial ecosystems, plant growth is limited by nitrogen availability. Therefore, it is important to improve plant productivity in terrestrial systems by increasing the nitrogen uptake capacity of plants. Biochar is regarded as a kind of "soil conditioner" produced by pyrolysis of biomass under high temperature and hypoxia conditions. It has attracted more and more attention because of its important role in promoting crop yield, reducing greenhouse gas emissions and environmental pollution control in recent years. Most previous studies have applied biochar in dryland ecosystems, but few in wetland ecosystem. Though biochar has been proved to be beneficial of plant growth and nitrogen uptake, but whether it is influenced by different nitrogen availability and water conditions is still unclear. Therefore, we conducted a greenhouse experiment to investigate the effects of biochar addition on the growth and nitrogen absorption of *Phragmites australis* with three nitrogen additions (no

基金项目:国家重点研究开发项目(2017YFC0505903);国家科技基础资源调查专项(2019FY100605)

收稿日期:2020-06-29; 修订日期:2021-03-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gaojq@bjfu.edu.cn

addition, $30 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$, $60 \text{ kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$) and two water treatments (inundation and no inundation). The results showed that: (1) biochar addition promoted the root growth of *P. australis*, increased the root biomass by 40.5% in the non-flooded treatment and by 20.1% in the flooded treatment, but have no significant effects on biomass of other parts and total biomass. (2) Biochar addition could improve the nitrogen absorption rate in the non-flooded condition, increased the nitrogen absorption rate by 23% in average. Biochar addition also enhanced the nitrogen productivity of *P. australis* in the flooded condition by 22% in average. (3) Biochar significantly decreased the soil ammonium-N, nitrate-N and mineral nitrogen concentrations, increased the soil nitrogen loss, and the effects were the strongest in the non-flooded and high nitrogen treatments because biochar promoted nitrogen absorption rate of *P. australis*. There was a significantly positive correlation between nitrogen absorption rate of *P. australis* and soil nitrogen loss. Our study shows that biochar has different effects on growth, nitrogen absorption and utilization of *P. australis* in different soil nitrogen availability and water treatments, and the difference may be related to the absorption preference of plants on different nitrogen chemical forms. Therefore, it is necessary to comprehensive balance soil water status, nitrogen enrichment and nitrogen absorption preference of plants when applying biochar in field. This result can practically provide scientific support for the application of biochar in the wetland ecosystem.

Key Words: nitrogen addition; nitrogen absorption; *Phragmites australis*; biochar; water condition

氮素是植物生长所必需的元素,与植物生命活动有密切关系^[1-2]。在绝大多数陆地生态系统中,植物生长会受到氮素的限制^[3-4]。因此,通过提高植物的氮素吸收能力来提高陆地系统植物生产力至关重要。近年来,生物炭在农业生产和环境治理等方面的应用逐渐受到关注。生物炭是生物质在高温缺氧条件下裂解而成的一种“土壤改良剂”^[5-6]。已有的研究表明,生物炭具有促进作物增产,减少土壤温室气体排放,缓解重金属污染等作用^[7-8]。生物炭本身具有疏松多孔的物理结构,能够改善土壤机械组成,从而改善土壤的通气性和保水保肥能力,为土壤微生物提供附着位点等^[9-10]。生物炭本身含有的微量元素能直接为植物生长所利用,生物炭自身含有的负电官能团能有效的吸附土壤中的阳离子,从而影响土壤的阳离子交换能力^[9]。因此,生物炭通过影响土壤的机械组成,改变土壤理化性质,从而达到改良土壤的目的。

生物炭对土壤理化性质的改变会进一步影响植物的生长和氮素吸收能力^[7, 11]。已有的研究表明,生物炭添加能改变土壤氮素转化和迁移过程来提高土壤氮素可利用性,主要表现在以下几个方面:1)生物炭自身含有的少量氮素能作为土壤营养元素的补充^[9, 12];2)生物炭能提高土壤通气性,降低土壤反硝化作用,减少 N_2O 排放^[7];3)生物炭添加能为土壤微生物提供更多的附着位点,从而提高土壤矿化作用^[7, 9];4)生物炭能有效吸附土壤中可利用性氮,减小淋溶损失^[7]。除此之外,生物炭还能直接影响植物生长和氮素吸收能力。一方面生物炭添加改变了土壤机械组成,使土壤变得松软,降低了植物根系生长的机械阻力^[13-14];另一方面,生物炭添加能提高丛枝菌根真菌对植物的侵染,从而提高植物的养分吸收能力^[15-16]。

生物炭对植物氮素吸收的作用会受到土壤水分和土壤氮素可利用性的调控^[17-18]。以往的研究认为生物炭对富养土壤和贫瘠土壤的改良作用不同^[19]。在不同的氮素水平下,生物炭的添加对作物生长和氮素吸收的影响尚不清楚^[17],随着氮沉降量的增加,土壤可利用性氮的含量会逐渐增加^[20],因此有必要进一步探讨不同氮沉降量条件下生物炭对植物生长和氮素吸收的影响。研究表明,与干旱条件相比,在水分充足条件下生物炭更能促进小麦的生长^[18]。但也有研究表明生物炭添加可以缓解水稻受到的干旱胁迫^[21],促进干旱条件下玉米的生长和氮素吸收^[22]。湿地生态系统长期处于淹水或季节性淹水的状态,水分已不是限制湿地植物生长的关键性因素,生物炭在淹水条件下能否发挥作用尚不清楚。

本研究采用温室控制实验,探究生物炭在不同水分和不同氮添加条件下对湿地植物芦苇(*Phragmites australis*)生长和氮素吸收的影响,验证以下两个假设:1)生物炭添加能促进芦苇生长和氮素吸收。2)生物炭添加对芦苇生长和氮素吸收的影响受到土壤氮水平和土壤水分条件的调控。

1 材料与方法

1.1 实验材料

于 2018 年 6 月从黄河三角洲采集芦苇幼苗并带回温室进行预培养,在芦苇幼苗长势稳定后,选择 120 株高 10 cm,大小一致的芦苇幼苗分装到准备好的花盆中(高 19 cm,直径 17 cm,底部密封),每个花盆两株。实验基质按照黄河三角洲土壤基质(主要为沙土和黏土)进行配制,配制比例为沙子:黏土 = 7:3,配制好的基质按照 5 kg 干重分装到花盆中。生物炭是以黄河三角洲芦苇为原材料,在缺氧环境 500 ℃ 条件下裂解 2 h 而成的。生物炭和风干土壤基质的碳氮含量见表 1。

表 1 实验所用生物炭和土壤基质的碳氮含量

Table 1 Carbon and nitrogen concentrations of biochar and soil matrix used in the experiment

实验材料 Experimental material	总碳 Total carbon/ (mg/g)	有机碳 Organic carbon/ (mg/g)	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N/ (μg/g)	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N/ (μg/g)	总氮 Total N/ (mg/g)
生物炭 Biochar	909.58±39.43	246.30±0.89	7.68±0.67	2.48±0.92	153.05±16.94
土壤基质 Soil substrate	12.93±0.55	4.77±0.35	6.75±0.06	14.20±0.78	0.17±0.03

1.2 实验设计

实验采用三因素设计,包括两种生物炭添加(1.5%添加和无添加),两种水分处理(淹水和非淹水),3 种氮素添加(无添加,30 kg hm⁻² a⁻¹和 60 kg hm⁻² a⁻¹),共 12 种处理,每种处理设置 5 个重复,共 60 盆。生物炭添加方式为混合添加,即将生物炭与土壤基质充分混合,不添加生物炭的处理作同样扰动。非淹水处理调控土壤含水率到 60%并保持,淹水前,在需淹水处理的花盆中土壤上方 5 cm 处用记号笔做好标记,淹水时将水位控制在标记处来实现 5 cm 深度的水淹处理。从实验开始后的第 15 天开始施氮,分 4 次进行,每隔 15 天施氮一次,施氮所用药品为 NH₄NO₃。施氮时,将 NH₄NO₃溶解在 10 mL 去离子水中,均匀喷洒在土壤表面,然后用 10 mL 去离子水淋洗。

实验从 2018 年 7 月 10 日开始,到 2018 年 9 月 23 日结束,持续 75 d,实验在北京林业大学科技股份有限公司温室中进行。

1.3 样品采集与测定

1.3.1 样品采集

收获时,将植物根、茎、叶三部分分别收获,洗净后用烘箱 70 ℃ 烘干 72 h 至恒重,称重获取各部分生物量。采用多点混合收集 50 g 土壤,用于土壤铵态氮和硝态氮的测量。

1.3.2 指标测定

将植物地上部分(茎和叶混匀)和地下部分分别磨成粉末,然后用元素分析仪(Flash 2000 EA-HT, Thermo Fisher Scientific, Inc., USA)测定植物地上和地下部分全氮。称取 5 g 鲜土,用 0.05 M K₂SO₄浸提,然后用流动分析仪(AA3; Bran-Luebbe, Hamburg, Germany)测定土壤中铵态氮和硝态氮含量。

1.4 计算与统计分析

用芦苇各部分氮含量和生物量的乘积计算芦苇的植物氮库,并依此计算芦苇的氮素吸收速率(NUR, mg g⁻¹ d⁻¹)^[23]:

$$NUR = (\Delta \text{Total N pool}/t) \times ((\ln(\text{Root}_{\text{final}}) - \ln(\text{Root}_{\text{initial}})) / \Delta \text{Root})$$

式中,Total N pool(mg)为植物的氮含量与生物量的乘积; t (d)为生长时间; $\text{Root}_{\text{final}}$ (g)为收获时植物的根系生物量; $\text{Root}_{\text{initial}}$ (g)为初始根系生物量。

用芦苇初始生物量和最终生物量计算芦苇的相对生长速率(RGR, g g⁻¹ d⁻¹),计算公式为^[23]:

$$RGR = ((\ln(\text{Biomass}_{\text{final}}) - \ln(\text{Biomass}_{\text{initial}})) / t)$$

式中, $Biomass_{final}$ (g) 为最终生物量, $Biomass_{initial}$ (g) 为初始生物量, t (d) 为生长时间。

用芦苇的氮素含量结合芦苇相对生长速率计算芦苇的氮素生产力 ($NP, g\ mol^{-1}\ d^{-1}$) [23]:

$$NP = \frac{RGR}{N\ concentration}$$

式中, $N\ concentration$ 为整个花盆中芦苇的氮含量 (mol/g)。

用培养前后土壤基质中总无机氮量的变化来表示土壤无机氮损失:

土壤无机氮损失 = 培养前土壤无机氮含量 $\times$ 土壤干重 + 施氮量 + 生物炭无机氮总量 - 培养后土壤无机氮含量 $\times$ 土壤干重

1.5 数据分析

用三因素方差分析 (Three-way ANOVA) 检验水分, 生物炭添加和氮添加对芦苇生长指标和芦苇氮素吸收速率, 氮素生产力以及土壤氮含量的影响。当 $P < 0.05$ 时, 认为处理间存在显著差异。采用线性相关分析检验芦苇氮素吸收速率与土壤氮素损失之间的相关关系。所有数据分析均采用 SPSS 25.0 进行, 采用 Sigmaplot 12.5 进行绘图。

2 结果

2.1 水分, 生物炭和氮添加对芦苇生物量的影响

水分对芦苇各部分生物量有显著影响 (表 2, $P < 0.05$)。淹水显著提高了芦苇各部分生物量和总生物量 (图 1)。生物炭添加显著促进了芦苇根系的生长 (表 2, $P < 0.05$)。氮添加显著促进了芦苇茎的生长 (表 2, $P < 0.05$)。水分和氮添加对芦苇叶生物量有显著交互作用 (表 2, $P < 0.05$), 在非淹水条件下, 芦苇叶生物量随着施氮量的增加而逐渐增加; 在淹水条件下, 芦苇叶生物量随着施氮量的增加而逐渐减少 (图 1)。

表 2 水分、生物炭和氮添加对芦苇生长指标, 氮素吸收和土壤氮含量的影响

Table 2 Effects of water, biochar and nitrogen addition on growth index of <i>P. australis</i> , nitrogen uptake and soil nitrogen concentration							
指标 Traits	水分 Water (W) $F_{1,48}$	生物炭 Biochar (BC) $F_{1,48}$	氮添加 N addition (N) $F_{2,48}$	W $\times$ BC $F_{1,48}$	W $\times$ N $F_{2,48}$	BC $\times$ N $F_{2,48}$	W $\times$ BC $\times$ N $F_{2,48}$
根生物量 Root mass	5.38 *	4.25 *	1.52	0.08	1.14	0.54	0.25
茎生物量 Stem mass	27.29 ***	0.10	4.13 *	0.13	1.36	0.09	2.57
叶生物量 Leaf mass	6.54 *	1.44	1.30	0.02	4.66 *	1.63	2.36
总生物量 Total mass	17.89 ***	0.10	1.94	0.01	0.60	0.18	0.57
氮吸收速率 N uptake rate	8.41 **	4.26 *	11.12 ***	4.15 *	0.17	1.65	2.46
氮素生产力 N productivity	24.35 ***	0.41	3.81 *	5.02 *	1.81	0.20	1.46
土壤铵态氮 Soil NH_4^+	39.10 ***	16.93 ***	3.55 *	8.35 **	4.39 *	3.43 *	2.72
土壤硝态氮 Soil NO_3^-	56.91 ***	18.68 ***	7.60 ***	5.50 *	5.50 **	4.17 *	5.28 **
土壤无机氮 Soil mineral N	28.13 ***	24.39 ***	4.73 *	2.20	6.37 **	3.12	5.10 **
土壤氮损失 Soil N loss	49.85 ***	97.03 ***	4664.89 ***	8.63 **	14.73 ***	12.82 ***	9.31 ***

* 表示 $0.01 < P \leq 0.05$; ** 表示 $0.001 < P \leq 0.01$; *** 表示 $P \leq 0.001$

2.2 水分, 生物炭和氮添加对芦苇氮素吸收速率和氮素生产力的影响

水分, 生物炭和氮添加对芦苇的氮素吸收速率有显著影响 (表 2, $P < 0.05$)。淹水显著降低了芦苇的氮素

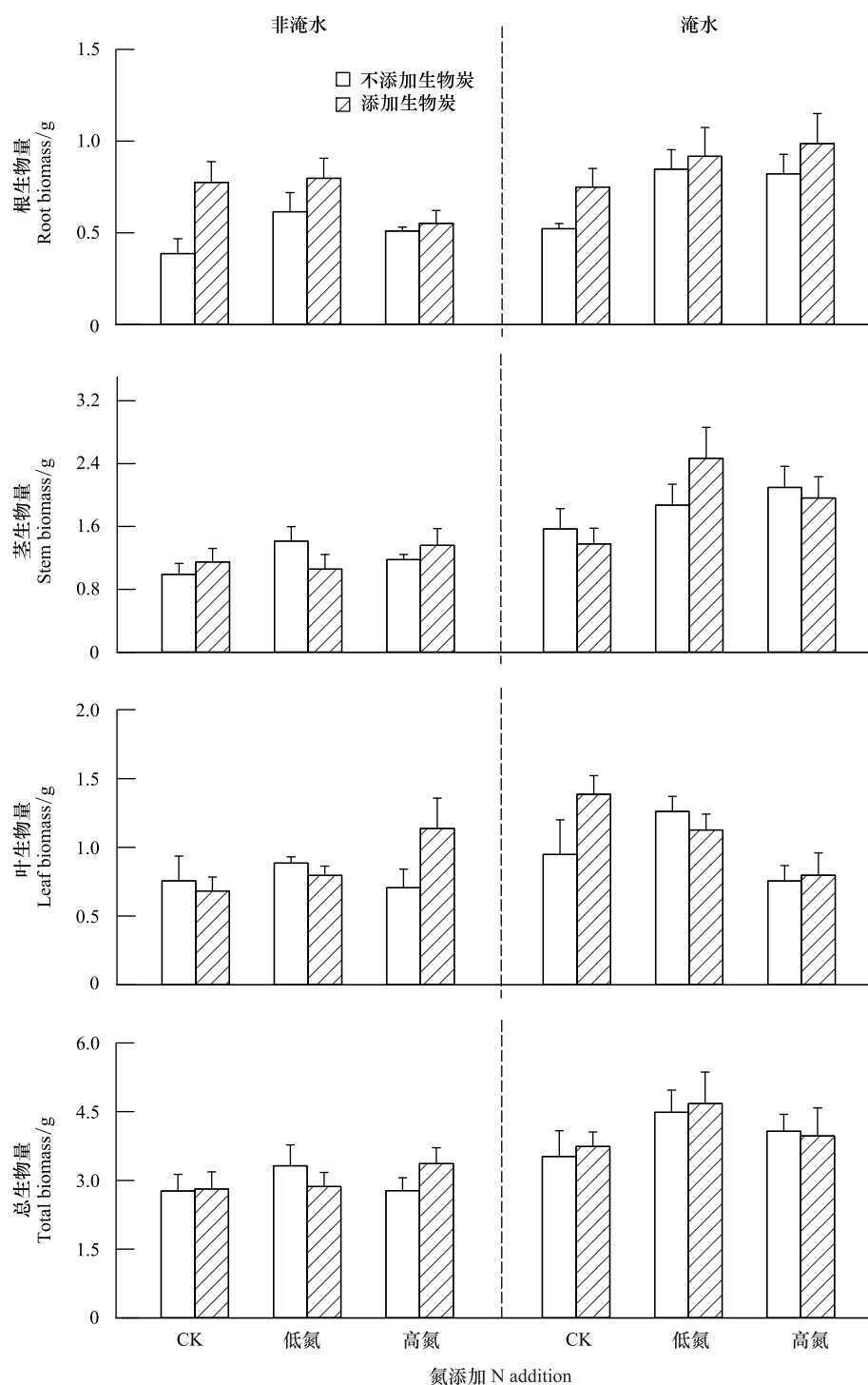


图1 水分、生物炭和氮添加对芦苇生物量的影响

Fig.1 Effects of water, biochar and nitrogen addition on the biomass of *P. australis*

吸收速率;生物炭添加显著提高了芦苇的氮素吸收速率;随着施氮量的增加,芦苇的氮素吸收速率逐渐增大(图2)。水分和生物炭对芦苇的氮素吸收速率有显著交互作用(表2, $P < 0.05$)。在非淹水条件下,生物炭添加显著促进了芦苇的氮素吸收,在淹水条件下,生物炭对芦苇氮素吸收无显著作用(图2)。

水分和氮添加对芦苇氮素生产力有显著影响(表2, $P < 0.05$)。淹水条件下芦苇的氮素生产力显著提高;芦苇的氮素生产力随着施氮量的增加逐渐降低(图2)。水分和生物炭对芦苇的氮素生产力有显著交互作用

(表 2, $P < 0.05$)。在非淹水条件下,生物炭添加对芦苇的氮素生产力无显著影响;在淹水条件下,生物炭添加显著提高了芦苇的氮素生产力(图 2)。

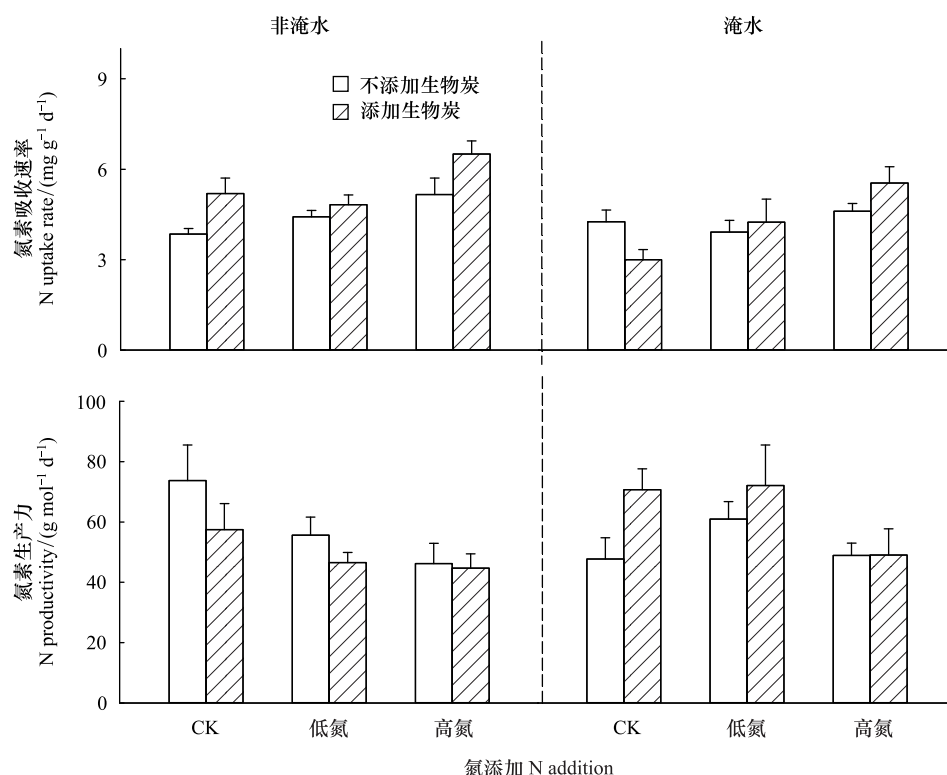


图 2 水分、生物炭和氮添加对芦苇氮素吸收速率和氮素生产力的影响

Fig.2 Effects of water, biochar and nitrogen addition on nitrogen uptake rate and nitrogen productivity of *P. australis*

2.3 水分、生物炭和氮添加对土壤无机氮含量及土壤氮损失的影响。

水分、生物炭和氮添加对土壤铵态氮、硝态氮和土壤总无机氮均有显著影响(表 2, $P < 0.05$)。淹水显著提高了土壤铵态氮含量,但降低了土壤硝态氮和总无机氮含量;生物炭显著降低了土壤铵态氮、硝态氮和总无机氮含量;高氮添加显著提高了土壤铵态氮、硝态氮和总无机氮含量(图 3)。

水分和生物炭对土壤铵态氮和硝态氮含量有显著的交互作用(表 2, $P < 0.05$)。在非淹水条件下,生物炭添加对土壤铵态氮无显著影响,但降低了土壤硝态氮含量;在淹水条件下,生物炭显著降低了土壤铵态氮含量,但对土壤硝态氮无显著影响(图 3)。

水分和氮添加对土壤铵态氮、硝态氮和土壤总无机氮有显著交互作用(表 2, $P < 0.05$)。在非淹水条件下,施氮显著增加了土壤硝态氮和总无机氮含量,但对土壤铵态氮无显著影响,在淹水条件下,施氮显著增加了土壤铵态氮含量,但对土壤硝态氮和总无机氮含量无显著影响(图 3)。生物炭和氮添加对土壤铵态氮、硝态氮和总无机氮有显著的交互作用(表 2, $P < 0.05$)。生物炭添加显著降低了低氮和高氮条件下土壤铵态氮和硝态氮含量,但对对照条件下土壤铵态氮和硝态氮含量无显著影响(图 3)。

水分、生物炭和氮添加对土壤硝态氮和总无机氮含量有显著地三向交互作用(表 2, $P < 0.05$)。在非淹水条件下,生物炭添加显著降低了高氮条件下的土壤硝态氮和总无机氮含量,对对照和低氮条件下土壤硝态氮和土壤总无机氮含量无显著影响;而在淹水条件下,生物炭添加降低了对照和低氮条件下土壤硝态氮和总无机氮含量,对高氮条件下土壤硝态氮和总无机氮含量无显著影响(图 3)。

水分、氮添加和生物炭添加对土壤氮损失有显著地三向交互作用(表 2, $P < 0.05$)。淹水显著降低了土壤氮损失,随着施氮量增加,土壤氮损失逐渐增加,生物炭添加显著增加了土壤的氮损失。在非淹水高氮条件

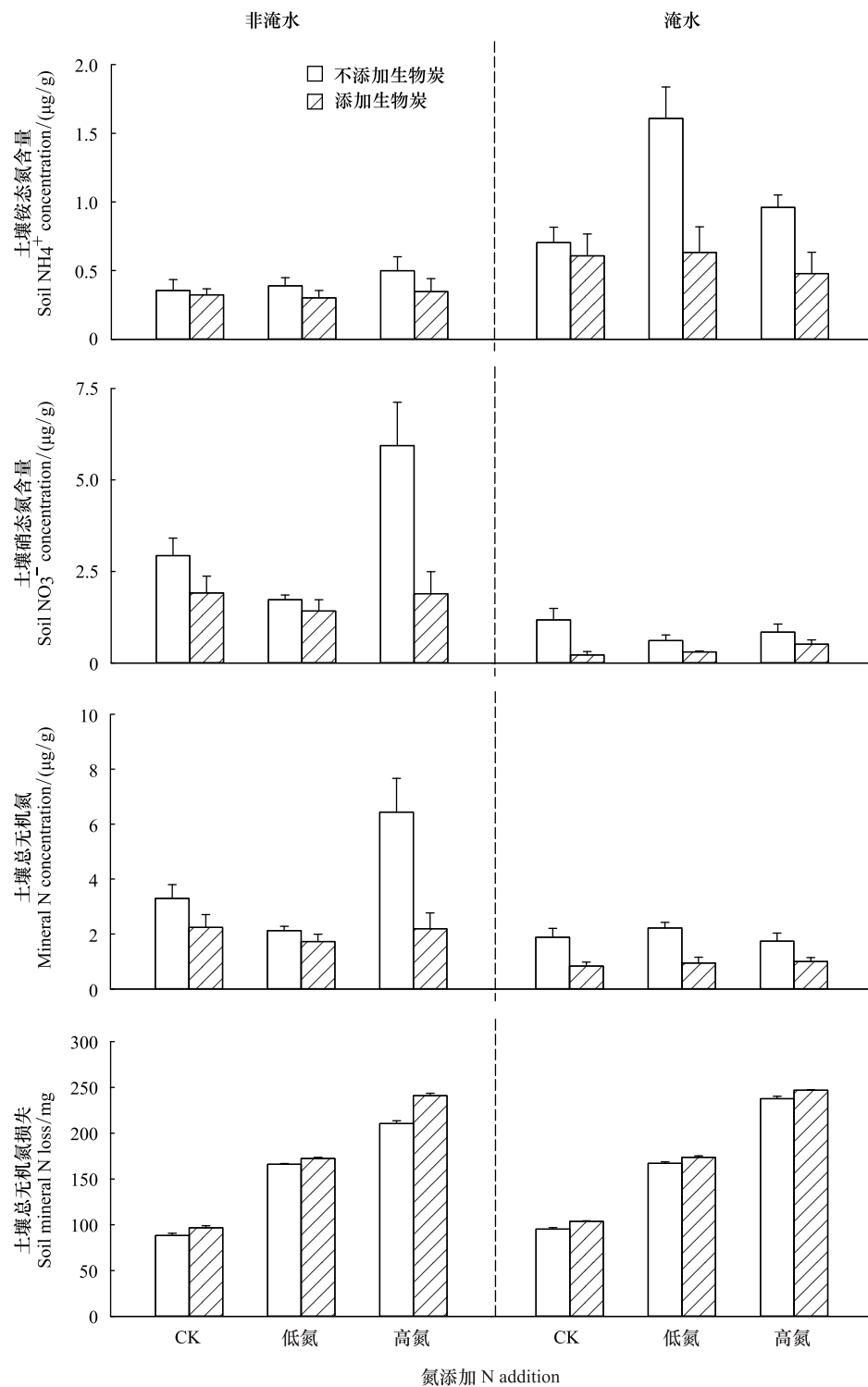


图3 水分、生物炭和氮添加对土壤无机氮含量和土壤氮素损失的影响

Fig.3 Effects of water, biochar and nitrogen addition on soil inorganic nitrogen concentration and soil nitrogen loss

下,生物炭添加对土壤氮损失的促进作用高于其他条件下(图3)。

相关分析表明,芦苇氮素吸收总量与土壤氮损失之间存在显著地正相关关系(图4)。

3 讨论

研究表明,生物炭添加能促进植物的生长^[11, 15, 22]。我们研究发现,生物炭添加显著地提高了芦苇的根系生物量,这与前人的研究结果一致^[15, 24]。这可能是两方面的原因造成的,一方面生物炭添加改善了土壤机械组成,使土壤变得松软,减小了芦苇根系生长的机械阻力^[13-14];另一方面生物炭中包含很多的有机质如有机酸等能直接刺激植物根系的伸长^[14, 25]。此外,还发现水分和氮素对芦苇生长也有影响。氮素是植物生长所必须的元素,施氮会直接影响植物的生长,本研究中,随着氮添加量的增加,芦苇的茎生物量逐渐增大,这与以往的研究结果相一致^[1]。芦苇对水分比对养分更加敏感^[26],这与我们的研究结果是一致的,即淹水对芦苇的

各部分生长均表现出促进作用,类似的研究结果表明,芦苇的最适生长水位为 0 cm,此时的土壤水分和通气性以及土壤营养在一定程度上达到均衡,从而有利于芦苇的生长^[27]。在非淹水条件下,芦苇叶生物量随着施氮量的增加而逐渐增加;在淹水条件下,芦苇叶生物量随着施氮量的增加而逐渐减少,这可能是植物面临环境变化时作出的适应性反应,当水分或氮素不足时通过加强叶的生长来弥补光合效率的降低。

生物炭添加显著促进了芦苇的氮素吸收,这与以往的研究结果相一致^[13, 17]。很多研究表明生物炭能促进植物根系的伸长,进而促进植物的养分吸收^[13, 17]。我们的研究结果中生物炭添加提高了芦苇根生物量,在一定程度上也验证了这一结论。还有研究表明,生物炭能为土壤微生物提供不稳定的碳源,进而提高土壤微生物的活性,促进土壤氮素矿化,提高土壤氮素可利用性,促进植物氮素吸收^[7, 9]。此外,生物炭能够改变植物的根系形态,促进植物产生更多的细根,进而有利于植物的养分吸收^[13, 17]。然而,我们的研究结果发现,在淹水条件下,生物炭虽然也能促进植物的氮素吸收,但效果不如在非淹水条件下显著。可能的原因有:(1)淹水降低了土壤微生物的活性与数量^[28],在一定程度上淹水条件遮掩了生物炭多孔的特性,从而削弱了生物炭对土壤微生物的积极作用,这也是淹水条件下土壤无机氮含量较低的原因。(2)淹水条件下,芦苇具有更发达的通气组织和较少的吸收组织^[29-30],这可能是植物在营养吸收和根系呼吸之间的权衡。随着施氮量的增加,芦苇的氮素吸收速率越高,这与前人的研究结果一致,高的土壤氮素可利用性使植物捕捉氮素变得更容易^[31]。

生物炭添加提高了淹水条件下芦苇的氮素生产力。这主要与土壤中氮素形态和生物炭强大的阳离子交换能力有关。淹水条件下,土壤由于强烈的反硝化作用,土壤中无机氮主要以铵态氮形式存在。很多研究表明,芦苇更倾向于吸收铵态氮^[15, 32],且铵态氮的供给能提高植物的光合作用^[33]。生物炭能将土壤中大量游离的铵根离子转变成吸附态的铵根离子,有利于植物吸收^[13, 34],因此,生物炭添加提高了淹水条件下芦苇的氮素生产力。

生物炭对芦苇氮素吸收的促进作用直接反映为土壤中氮素含量的变化。我们发现,生物炭添加改变了土壤中硝态氮和铵态氮的含量,添加生物炭显著降低了非淹水条件下土壤硝态氮含量和淹水条件下土壤铵态氮含量。这是由于植物会根据土壤氮素可利用性改变氮素吸收策略,优先吸收土壤中占主要形态的氮素^[35-36]。而在两种水分条件下,由于曝气条件的差异,非淹水条件下土壤中主要发生硝化作用,土壤中氮素主要以硝态氮形式存在,淹水条件下硝化作用降低而反硝化作用增强,土壤中无机氮主要以铵态氮形式存在^[37-39],这在我们的研究结果中同样得到证实。因此,在淹水和非淹水条件下,芦苇分别主要吸收铵态氮和硝态氮,生物炭对氮素吸收速率的促进作用导致淹水和非淹水条件下土壤铵态氮和硝态氮分别降低。

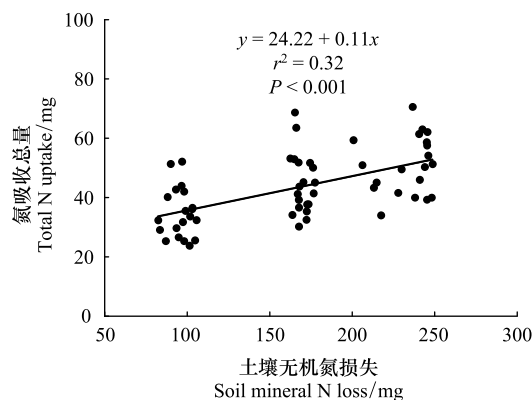


图4 芦苇氮素吸收总量与土壤无机氮损失之间的关系

Fig. 4 The relationship between total nitrogen absorption of *P. australis* and soil inorganic nitrogen loss

无论哪种水分条件,生物炭添加都降低了土壤中无机氮的含量,增加了土壤中无机氮的损失量。这主要是由于生物炭添加促进了芦苇对土壤无机氮的吸收。由于植物氮素吸收总量与土壤无机氮损失之间的相关系数较小($r^2=0.32$),可能还存在除植物氮素吸收以外的氮损失,例如由于生物炭的弱碱性,可能造成土壤氮挥发的增强^[7, 34];淹水条件下反硝化作用的增强可能造成了更多的氮释放到大气中。此外,淹水条件下,部分土壤氮素会流失进入水体,这也是方差分析中水分条件对土壤无机氮含量影响显著的原因之一。生物炭添加在非淹水条件下造成的氮损失高于淹水条件下,主要原因是非淹水条件下芦苇的氮素吸收能力更强。土壤无机氮损失量随着施氮量的增大而增大,主要原因是施氮提高了植物的氮素吸收,增加了氮挥发的底物。

4 结论

生物炭在淹水和非淹水两种条件下发挥的作用不同。在非淹水条件下生物炭能提升芦苇的氮素吸收能力,但在淹水条件下,生物炭能提高芦苇的氮素生产力。此外,生物炭添加加剧了土壤的氮素损失,且在非淹水高氮条件下作用最强。因此,在不同水分条件下进行生物炭的应用需要进一步权衡土壤中氮素的富含程度和植物的氮素吸收偏好。

参考文献 (References):

- [1] Li Q W, Zhang X Y, Gao J Q, Song M H, Liang J F, Yue Y. Effects of N addition frequency and quantity on *Hydrocotyle vulgaris* growth and greenhouse gas emissions from wetland microcosms. *Sustainability*, 2019, 11(6):1520.
- [2] Reddy K R, Matcha S K. Quantifying nitrogen effects on castor bean (*Ricinus communis* L.) development, growth, and photosynthesis. *Industrial Crops and Products*, 2010, 31(1):185-191.
- [3] Vitousek P M, Howarth R W. Nitrogen limitation on land and in the sea:how can it occur? *Biogeochemistry*, 1991, 13(2):87-115.
- [4] Liu X Y, Koba K, Koyama L A, Hobbie S E, Weiss M S, Inagaki Y, Shaver G R, Giblin A E, Hobara S, Nadelhoffer K J, Sommerkorn M, Rastetter E B, Kling G W, Laundre J A, Yano Y, Makabe A, Yano M, Liu C Q. Nitrate is an important nitrogen source for Arctic tundra plants. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(13):3398-3403.
- [5] Rizwan M, Ali S, Qayyum M F, Ibrahim M, Zia-ur-Rehman M, Abbas T, Ok Y S. Mechanisms of biochar-mediated alleviation of toxicity of trace elements in plants;a critical review. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(3):2230-2248.
- [6] Sohi S P. Carbon storage with benefits. *Science*, 2012, 338(6110):1034-1035.
- [7] Liu Q, Zhang Y H, Liu B J, Amonette J E, Lin Z B, Liu G, Ambus P, Xie Z B. How does biochar influence soil N cycle? A meta-analysis. *Plant and Soil*, 2018, 426(1/2):211-225.
- [8] Muhammad N, Hussain M, Ullah W, Khan T A, Ali S, Akbar A, Aziz R, Rafiq M K, Bachmann R T, Al-Wabel M I, Rizwan M. Biochar for sustainable soil and environment;a comprehensive review. *Arabian Journal of Geosciences*, 2018, 11(23):731.
- [9] Saifullah, Dahlawi S, Naeem A, Rengel Z, Naidu R. Biochar application for the remediation of salt-affected soils:challenges and opportunities. *Science of the Total Environment*, 2018, 625:320-335.
- [10] Spokas K A, Novak J M, Venterea R T. Biochar's role as an alternative N-fertilizer;ammonia capture. *Plant and Soil*, 2012, 350(1/2):35-42.
- [11] Biederman L A, Harpole W S. Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling;a meta-analysis. *GCB Bioenergy*, 2013, 5(2):202-214.
- [12] Prendergast-Miller M T, Duvall M, Sohi S P. Biochar-root interactions are mediated by biochar nutrient content and impacts on soil nutrient availability. *European Journal of Soil Science*, 2014, 65(1):173-185.
- [13] Backer R G M, Saeed W, Seguin P, Smith D L. Root traits and nitrogen fertilizer recovery efficiency of corn grown in biochar-amended soil under greenhouse conditions. *Plant and Soil*, 2017, 415(1/2):465-477.
- [14] Spokas K A, Novak J M, Stewart C E, Cantrell K B, Uchimiya M, DuSaire M G, Ro K S. Qualitative analysis of volatile organic compounds on biochar. *Chemosphere*, 2011, 85(5):869-882.
- [15] Liang J F, An J, Gao J Q, Zhang X Y, Song M H, Yu F H. Interactive effects of biochar and AMF on plant growth and greenhouse gas emissions from wetland microcosms. *Geoderma*, 2019, 346:11-17.
- [16] Hammer E C, Forstreuter M, Rillig M C, Kohler J. Biochar increases arbuscular mycorrhizal plant growth enhancement and ameliorates salinity stress. *Applied Soil Ecology*, 2015, 96:114-121.
- [17] Wang Z, Wang Z, Luo Y, Zhan Y N, Meng Y L, Zhou Z G. Biochar increases ¹⁵N fertilizer retention and indigenous soil N uptake in a cotton-

- barley rotation system. *Geoderma*, 2020, 357:113944.
- [18] Li S L, Shangguan Z P. Positive effects of apple branch biochar on wheat yield only appear at a low application rate, regardless of nitrogen and water conditions. *Journal of Soils and Sediments*, 2018, 18(11):3235-3243.
- [19] Noguera D, Rondon M, Laossi K R, Hoyos V, Lavelle P, de Carvalho M H C, Barot S. Contrasted effect of biochar and earthworms on rice growth and resource allocation in different soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(7):1017-1027.
- [20] Liu X J, Zhang Y, Han W X, Tang A H, Shen J L, Cui Z L, Vitousek P, Erisman J W, Goulding K, Christie P, Fangmeier A, Zhang F S. Enhanced nitrogen deposition over China. *Nature*, 2013, 494(7438):459-462.
- [21] Rizwan M, Ali S, Abbas T, Adrees M, Zia-Ur-Rehman M, Ibrahim M, Abbas F, Qayyum M F, Nawaz R. Residual effects of biochar on growth, photosynthesis and cadmium uptake in rice (*Oryza sativa* L.) under Cd stress with different water conditions. *Journal of Environmental Management*, 2018, 206:676-683.
- [22] Xiao Q, Zhu L X, Zhang H P, Li X Y, Shen Y F, Li S Q. Soil amendment with biochar increases maize yields in a semi-arid region by improving soil quality and root growth. *Crop and Pasture Science*, 2016, 67(5):495-507.
- [23] Walker J T, James J J, Drenovsky R E. Competition from *Bromus tectorum* removes differences between perennial grasses in N capture and conservation strategies. *Plant and Soil*, 2017, 412(1/2):177-188.
- [24] Cheng N, Peng Y J, Kong Y L, Li J J, Sun C X. Combined effects of biochar addition and nitrogen fertilizer reduction on the rhizosphere metabolomics of maize (*Zea mays* L.) seedlings. *Plant and Soil*, 2018, 433(1/2):19-35.
- [25] Graber E R, Harel Y M, Kolton M, Cytryn E, Silber A, David D R, Tsechansky L, Borenshtein M, Elad Y. Biochar impact on development and productivity of pepper and tomato grown in fertilized soilless media. *Plant and Soil*, 2010, 337(1/2):481-496.
- [26] Engloner A I. Structure, growth dynamics and biomass of reed (*Phragmites australis*)-a review. *Flora- Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 2009, 204(5):331-346.
- [27] Guan B, Yu J B, Hou A X, Han G X, Wang G M, Qu F Z, Xia J B, Wang X H. The ecological adaptability of *Phragmites australis* to interactive effects of water level and salt stress in the Yellow River Delta. *Aquatic Ecology*, 2017, 51(1):107-116.
- [28] Liao H K, Chapman S J, Li Y Y, Yao H Y. Dynamics of microbial biomass and community composition after short-term water status change in Chinese paddy soils. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(3):2932-2941.
- [29] Sauter M. Root responses to flooding. *Current Opinion in Plant Biology*, 2013, 16(3):282-286.
- [30] 李林鑫, 吴文景, 杨振, 钟悦, 连晓倩, 吴鹏飞. 水陆交错带芦苇根系表型与解剖结构的差异. *防护林科技*, 2019, (12):8-10, 21-21.
- [31] Zhou M X, Yan G Y, Xing Y J, Chen F, Zhang X, Wang J Y, Zhang J H, Dai G H, Zheng X B, Sun W J, Wang Q G, Liu T. Nitrogen deposition and decreased precipitation does not change total nitrogen uptake in a temperate forest. *Science of the Total Environment*, 2019, 651:32-41.
- [32] Chlot S, Widerlund A, Ohlander B. Nitrogen uptake and cycling in *Phragmites australis* in a lake-receiving nutrient-rich mine water: a ^{15}N tracer study. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 74(7):6027-6038.
- [33] 陶爽, 华晓雨, 王英男, 郭娜, 阎秀峰, 蔺吉祥. 不同氮素形态对植物生长与生理影响的研究进展. *贵州农业科学*, 2017, 45(12):64-68.
- [34] 王洪媛, 盖霞普, 翟丽梅, 刘宏斌. 生物炭对土壤氮循环的影响研究进展. *生态学报*, 2016, 36(19):5998-6011.
- [35] Xi N X, Zhu B R, Zhang D Y. Contrasting grass nitrogen strategies reflect interspecific trade-offs between nitrogen acquisition and use in a semi-arid temperate grassland. *Plant and Soil*, 2017, 418(1/2):267-276.
- [36] McKane R B, Johnson L C, Shaver G R, Nadelhoffer K J, Rastetter E B, Fry B, Giblin A E, Kielland K, Kwiatkowski B L, Laundre J A, Murray G. Resource-based niches provide a basis for plant species diversity and dominance in arctic tundra. *Nature*, 2002, 415(6867):68-71.
- [37] Macrae M L, Devito K J, Strack M, Waddington J M. Effect of water table drawdown on peatland nutrient dynamics: implications for climate change. *Biogeochemistry*, 2013, 112(1-3):661-676.
- [38] Hefting M, Clément J C, Dowrick D, Cosandey A C, Bernal S, Cimpian C, Tatur A, Burt T P, Pinay G. Water table elevation controls on soil nitrogen cycling in riparian wetlands along a European climatic gradient. *Biogeochemistry*, 2004, 67(1):113-134.
- [39] Chen Y T, Borken W, Stange C F, Matzner E. Dynamics of nitrogen and carbon mineralization in a fen soil following water table fluctuations. *Wetlands*, 2012, 32(3):579-587.