

基质改良对河岸带芦苇区冬季脱氮效果及土壤-植物化学计量特征的影响

付子轼, 刘福兴, 王俊力, 乔红霞, 毕玉翠

引用本文:

付子轼, 刘福兴, 王俊力, 乔红霞, 毕玉翠. 基质改良对河岸带芦苇区冬季脱氮效果及土壤-植物化学计量特征的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(1): 166-176.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0509>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

改性核桃壳生物炭对枯草芽孢杆菌SL-44的吸附

邓子禾, 田飞, 武占省, 陶冶东, 孙琳琳, 杨帆, 李海杰

农业环境科学学报. 2022, 41(2): 387-399 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0583>

不同处理梯度污水对细菌群落和酶活性的影响

吴晓斐, 何源, 黄治平, 张丹丹, 郑宏艳, 丁健

农业环境科学学报. 2020, 39(9): 2026-2035 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0155>

添加生物炭对海南燥红壤 N_2O 和 CO_2 排放的影响

刘丽君, 朱启林, 李凯凯, 李淼, 孟磊, 伍延正, 汤水荣, 何秋香

农业环境科学学报. 2021, 40(9): 2049-2056 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0187>

虾壳生物炭对Cd-As复合污染土壤修复效应及土壤可溶性有机碳含量的影响

孙涛, 孙约兵, 贾宏涛, 吴泽赢

农业环境科学学报. 2021, 40(8): 1675-1685 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0056>

红树林人工湿地的脱氮除磷效果研究

刘永, 张诗涵, 肖雅元, 吴鹏, 王腾, 李纯厚

农业环境科学学报. 2022, 41(8): 1788-1799 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1478>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

付子轼, 刘福兴, 王俊力, 等. 基质改良对河岸带芦苇区冬季脱氮效果及土壤-植物化学计量特征的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(1): 166–176.

FU Z S, LIU F X, WANG J L, et al. Effects of substrate improvement on nitrogen removal in winter and soil-plant stoichiometric characteristics in reed (*Phragmites australis*) area of a riparian zone[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2023, 42(1): 166–176.



开放科学 OSID

基质改良对河岸带芦苇区冬季脱氮效果及土壤-植物化学计量特征的影响

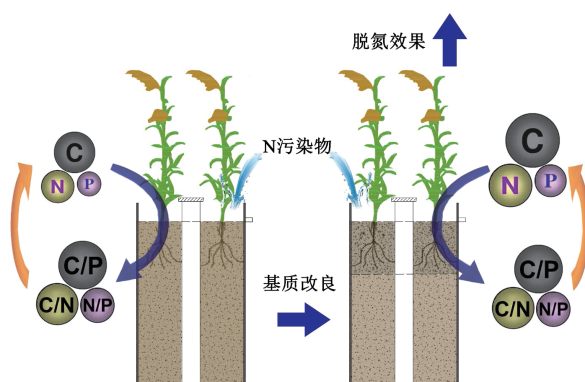
付子轼^{1,2}, 刘福兴^{1,2}, 王俊力^{1,2*}, 乔红霞^{1,2}, 毕玉翠^{1,2}

(1. 上海市农业科学院, 上海 201403; 2. 上海低碳农业工程技术研究中心, 上海 201415)

摘要:为探究基质改良对亚热带地区河岸带芦苇区冬季脱氮效果和土壤-植物化学计量特征的影响,以河岸带土壤基质为对照,通过芦苇湿地模拟实验,系统探讨不同基质(砾石、砾石+生物炭、陶粒+生物炭、改性陶粒+生物炭)添加条件下,芦苇湿地的冬季脱氮效果,以及土壤和植物各器官中C、N、P含量及其化学计量比。结果表明:基质改良能够提高芦苇湿地冬季脱氮效果,添加砾石处理使 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率提高8.3个百分点($P<0.05$),添加砾石+生物炭处理使TN和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率均提高8.9个百分点($P<0.05$)。基质改良能够增加土壤TC、TN和TP含量,其中,添加砾石+生物炭处理使三者含量均显著增加($P<0.05$)。添加生物炭的3个处理均有利于根C固定和植物N吸收,添加陶粒+生物炭和改性陶粒+生物炭处理对植物生长具有促进作用。土壤-植物化学计量特征存在一定的相关性,且土壤与植物茎和根之间的关系更大;与植物相比,基质改良使芦苇湿地冬季脱氮效果更易受到土壤化学计量特征的影响。研究表明,适当的基质改良能够提高亚热带地区河岸带芦苇区冬季脱氮效果,增加土壤养分,促进植物生长。

关键词:基质;河岸带;芦苇湿地;氮;化学计量特征

中图分类号:X173;S154.4 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2023)01-0166-11 doi:10.11654/jaes.2022-0509



Effects of substrate improvement on nitrogen removal in winter and soil-plant stoichiometric characteristics in reed (*Phragmites australis*) area of a riparian zone

FU Zishi^{1,2}, LIU Fuxing^{1,2}, WANG Junli^{1,2*}, QIAO Hongxia^{1,2}, BI Yucui^{1,2}

(1. Shanghai Academy of Agricultural Science, Shanghai 201403, China; 2. Shanghai Engineering Research Centre of Low-Carbon Agriculture, Shanghai 201415, China)

Abstract: We explored the effects of substrate improvement on nitrogen removal in winter and soil-plant stoichiometric characteristics in the reed (*Phragmites australis*) area of a subtropical riparian zone in a reed wetland simulation experiment using the riparian soil substrate as the control. Wetland N removal in winter, C, N and P contents, and their stoichiometric ratio in soil and plant organs were determined

收稿日期:2022-05-20 录用日期:2022-07-29

作者简介:付子轼(1974—),男,山东临沂人,副研究员,从事水环境治理及水生态修复研究。E-mail:fzs@foxmail.com

*通信作者:王俊力 E-mail:wangjunli@saas.sh.cn

基金项目:上海市科委长三角科技创新共同体领域项目(21002410300);国家自然科学基金项目(41807397);上海市青年科技启明星计划项目(19QC1400700)

Project supported: Yangtze River Delta Science and Technology Innovation Project of Shanghai Municipal Science and Technology Commission (21002410300); The National Natural Science Foundation of China(41807397); Shanghai Rising-Star Program(19QC1400700)

following addition of different substrates (gravel, gravel + biochar, ceramsite + biochar and modified ceramsite + biochar). Substrate improvement enhanced N removal from the reed wetland in winter. Gravel addition increased $\text{NH}_4^+\text{-N}$ removal efficiency by 8.3 percentage points ($P<0.05$). Gravel+biochar addition increased both TN and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ removal efficiencies by 8.9 percentage points ($P<0.05$). Substrate improvement increased soil TC, TN and TP. These increase were significant with gravel+biochar addition ($P<0.05$). The three treatments involving biochar addition were conducive to root C fixation and plant N absorption. Ceramsite+biochar and modified ceramsite+biochar addition promoted plant growth. There was a certain correlation between soil and plant stoichiometric characteristics, and the relationship between soil with stems and roots was greater. Compared with the effect of plant characteristics, N removal by reed wetlands in winter was more easily affected by soil stoichiometric characteristics under different substrate additions. These results conclude that proper substrate improvement can enhance N removal in winter, increase soil nutrients and promote plant growth in the riparian reed area of a subtropical zone.

Keywords: substrate; riparian zone; reed wetland; nitrogen; stoichiometric characteristic

河岸带湿地是陆地生态系统和水生生态系统之间的过渡区域,能够有效截留陆域污染物进入水体,是陆水界面的重要屏障^[1]。近年来由于氮肥的过度使用,导致过量活性氮经径流和渗漏过程进入汇水水体,造成水体富营养化^[2]。河岸带可以通过“土壤-植物-微生物”的综合作用控制氮素向水体的迁移,研究表明,不同植被河岸带对TN的截留率均约为50%或以上^[3],对氮素面源污染阻控起到了关键作用。

作为湿地生态系统的主要植物之一,芦苇(*Phragmites australis*)适应性强、生态域广,在全球岸带湿地广泛分布^[4]。芦苇湿地的脱氮效率很高,夏季的TN和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率在90%以上,冬季则会显著降低为20%~40%^[5-6];而冬季产生的氮素面源污染不可忽视,研究表明,冬小麦季比水稻季有更多的径流TN损失^[7-8],因此,采取有效措施提升河岸带芦苇湿地冬季脱氮效果对面源污染的拦截净化具有重要意义。

土壤基质是河岸带湿地的重要组成部分,能够通过吸附、沉淀、离子交换等作用截留氮素^[9],并且协同植物、微生物等共同对河岸带氮素迁移转化产生重要影响^[1],但仅靠单一基质,常不能满足现阶段对污染物的去除要求。研究表明,通过添加适量高效、易得且安全的基质对土壤基质进行改良,可以有效发挥基质组合间互补效应以及与植物和微生物间协同作用的优势,提升湿地的污染物去除效果^[10]。

C、N、P是生物有机体的必需元素,不仅参与土壤养分的循环和转化,还影响植物的生长发育乃至整个生态系统的健康^[11],并且它们之间存在着一定的耦合关系。生态化学计量学是研究主要化学元素(尤其是C、N、P)在生态系统过程中的共变规律和耦合关系,揭示生态系统的元素协同变化及其平衡机制的一种综合方法^[12]。土壤-植物作为河岸带湿地的主要组成部分,其生态化学计量特征(C、N、P含量以及C/N、N/P、C/P)可能会受到氮素面源污染的影响,导致各元素在

组分之间的关系及比例发生变化,从而影响湿地的脱氮效果和养分循环^[13-14]。以往对于湿地基质改良的研究多是从污染物去除效果角度考虑,而没有充分考虑整个系统的养分分布以及土壤-植物化学计量特征的差异和相互作用。因此,本文基于生态化学计量学理论,以亚热带地区河岸带芦苇区为研究对象,通过构建模拟湿地,探讨不同基质添加的土壤基质改良对湿地冬季脱氮效果的影响,以及土壤-植物C、N、P生物地球化学循环,也为河岸带湿地的修复和保护及面源污染防控提供科学借鉴。

1 材料与方法

1.1 实验材料

供试基质分别为土壤、砾石、生物炭、陶粒和改性陶粒。供试土壤为试验区河岸带土壤,基本理化性质:有机碳 $7.3\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮 $0.4\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全磷 $0.6\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,pH 7.0。供试砾石、生物炭和陶粒均为市售,砾石和陶粒的粒径为1~2 cm,生物炭为椰壳炭,粒径为2~4 mm;供试改性陶粒购于江西某科技公司,由硅钛超材、硅钛超材复合组合材料组成,主要成分为 TiO_2 、 SiO_2 、 CaO 、 Al_2O_3 等,粒径为1~2 cm。供试植物为当地常见的水生植物芦苇(*Phragmites australis*)。实验用水利用试验区河道水配制,参考当地农田地表径流中的TN排放情况,用尿素调节进水TN浓度。

1.2 模拟湿地构建

实验采取模拟芦苇湿地的方式,构建20个相同结构的盆栽装置(图1),装置为直径30 cm,高50 cm的圆柱体形状,离盆底自下而上45 cm处设置一个出水口,用于保持固定水位。为了便于测定系统内部的原位水质指标和抽水,在装置中心位置竖向设置一个包裹300目尼龙网的内径5 cm穿孔管。

根据湿地基质不同,实验设置5个处理:土壤

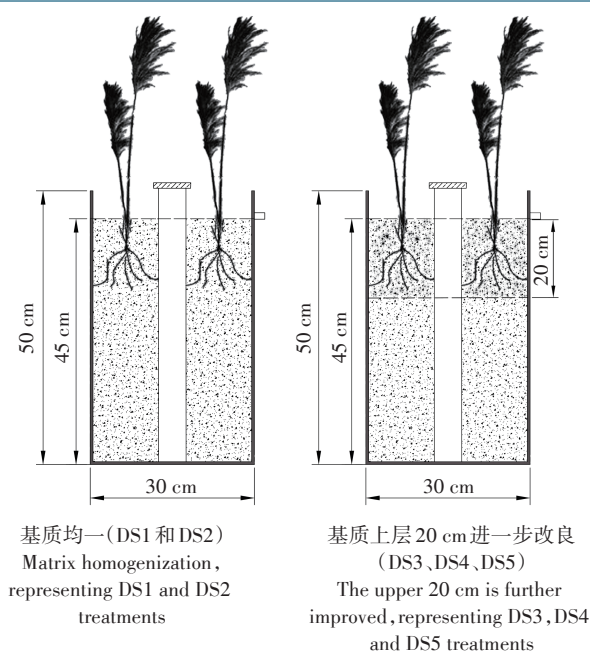


图1 芦苇湿地实验装置示意图

Figure 1 Schematic diagram of reed wetland experimental device

(DS1), 基质均一, 为对照处理; 土壤+砾石(DS2), 基质均一, 为土壤与砾石按体积 1:1 混匀; 土壤+砾石+生物炭(DS3), 上层 20 cm 为土壤、砾石与生物炭按体积 1:1:1 混匀, 下层为土壤与砾石按体积 1:1 混匀; 土壤+陶粒+生物炭(DS4), 上层 20 cm 为土壤、陶粒与生物炭按体积 1:1:1 混匀, 下层为土壤与陶粒按体积 1:1 混匀; 土壤+改性陶粒+生物炭(DS5), 上层 20 cm 为土壤、改性陶粒与生物炭按体积 1:1:1 混匀, 下层为土壤与改性陶粒按体积 1:1 混匀。每个处理 4 个重复, 共计 20 个盆栽装置系统单元。在填装基质的同时种植植物, 即于 2019 年 6 月选取长势相近的芦苇幼苗移栽至装置中, 初始种植密度为 2 株·盆⁻¹ (约 28 株·m⁻²), 芦苇在装置中培养, 开始实验时每盆植物均长势平稳, 平均密度为 85 株·盆⁻¹, 平均株高为 1.1 m。

1.3 实验地点与采样

模拟湿地在上海市农业科学院庄行综合试验基地(30°53'N, 121°23'E)中建立并运行, 该地属亚热带季风气候, 多年平均降水量 1 191.5 mm, 蒸发量 1 236.8 mm, 年均温度 16.1 °C, 全年日照时数 1 900.2 h, 无霜期 224.4 d。系统稳定至少 4 个月, 开始正式实验, 时间从 2019 年 10 月底至 2020 年 3 月底, 涵盖整个冬季。系统每周进水一次, 均在上午 10:00 左右完成, 每次进水前均先在穿孔管中原位测量系统内部水质指标, 并取水样, 将装置中的水抽干后再进行下一

次进水。结束运行后, 对系统进行破坏性采样, 同时采集植物(叶、茎、根)样品和基质中的土壤(0~20 cm)样品, 测定其养分含量。

1.4 测定指标与方法

使用便携式多参数水质测定仪(HI9829, HANNA, 意大利)现场测定系统内部基本水质指标, 包括温度(*T*)、pH、溶解氧(DO)、氧化还原电位(ORP)、总溶解固体(TDS)、电导率(EC)等。水体 TN 浓度采用过硫酸钾氧化法测定^[15]; NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 浓度使用流动分析仪(AA3, Seal, 德国)测定。

土壤 TC 和 TN 含量采用元素分析仪(Vario EL cube, Elementar, 德国)测定; TP 含量采用高氯酸-硫酸法测定^[16]。

将植物叶、茎、根在烘箱中杀青、烘干至质量恒定, 称取植物生物量; C、N 含量采用元素分析仪(Vario EL cube, Elementar, 德国)测定; P 含量采用钼锑抗比色法测定^[16]。

1.5 数据统计与分析

采用 SPSS 22.0 软件对数据进行处理, 进行单因素方差分析(One way ANOVA)和差异显著性检验(Duncan, *P*<0.05); 采用 SigmaPlot 12.5 软件制图, 图表中数据为平均值±标准差; 采用 R4.1.1 绘制 Pearson 相关性热图; 采用 Canoco 5.0 软件进行冗余分析(RDA)。

2 结果与分析

2.1 芦苇湿地冬季脱氮效果

从进出水浓度可以看出(图2), 实验期间系统的进水 TN 浓度为 5.8~20.7 mg·L⁻¹, NH₄⁺-N 浓度为 0.3~14.4 mg·L⁻¹, NO₃⁻-N 浓度为 0.1~1.2 mg·L⁻¹, 进水浓度波动相对较大。5 个处理的出水浓度均显著降低, 并保持在较低水平相对稳定。

从不同处理的 TN、NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 去除率可以看出(图2), 实验期间 TN 和 NH₄⁺-N 的去除率存在处理间差异(*P*<0.05), 而 NO₃⁻-N 去除率各处理间差异不显著(*P*>0.05)。从 TN 平均去除率看, DS3 最高(97.2%)且相对最为稳定, 其次为 DS4(94.2%)和 DS2(93.9%); DS5(89.2%)和 DS1(88.3%)相对较低且不稳定, 二者与 DS3 之间差异显著(*P*<0.05)。从 NH₄⁺-N 平均去除率看, DS2(97.2%)和 DS3(97.9%)相对较高且稳定, 其次为 DS4(95.3%)和 DS5(95.1%), DS1(89.0%)最低且不稳定, 其与 DS2 和 DS3 之间差异显著(*P*<0.05)。从 NO₃⁻-N 平均去除率看, 虽然处理间差

异不显著($P>0.05$),但DS2~DS5均比DS1(71.0%)去除率高且相对稳定。

与DS1相比,DS2、DS3、DS4和DS5的TN平均去除率分别增加5.5、8.9、5.9、0.8个百分点, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均去除率分别增加8.3、8.9、6.4、6.1个百分点, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 平均去除率分别增加13.0、12.5、11.4、10.5个百分点。

实验期间,不同处理系统内部水体 T 和 DO 差异不显著,而 pH 、 ORP 、 EC 和 TDS 均存在处理间差异(表1)。DS2~DS5的 pH 均显著高于DS1($P<0.05$),其中DS3和DS5与DS2和DS4之间亦差异显著($P<$

0.05)。与DS1相比,DS2~DS5的 ORP 均显著降低($P<0.05$),而 EC 和 TDS 均显著增加($P<0.05$)。

2.2 土壤化学计量特征

从处理间土壤养分(TC 、 TN 、 TP)含量可以看出(图3),与DS1相比,DS2~DS5的土壤 TC 含量均有增加趋势,其中DS5增加最多($P<0.05$),DS3和DS2也有显著增加($P<0.05$);DS2~DS4的土壤 TN 含量有增加趋势,其中DS3与DS1差异显著($P<0.05$),DS5与DS1差异不显著;DS2~DS5的土壤 TP 含量均有增加趋势,其中DS2和DS5增加相对较多($P<0.05$),DS3也有显

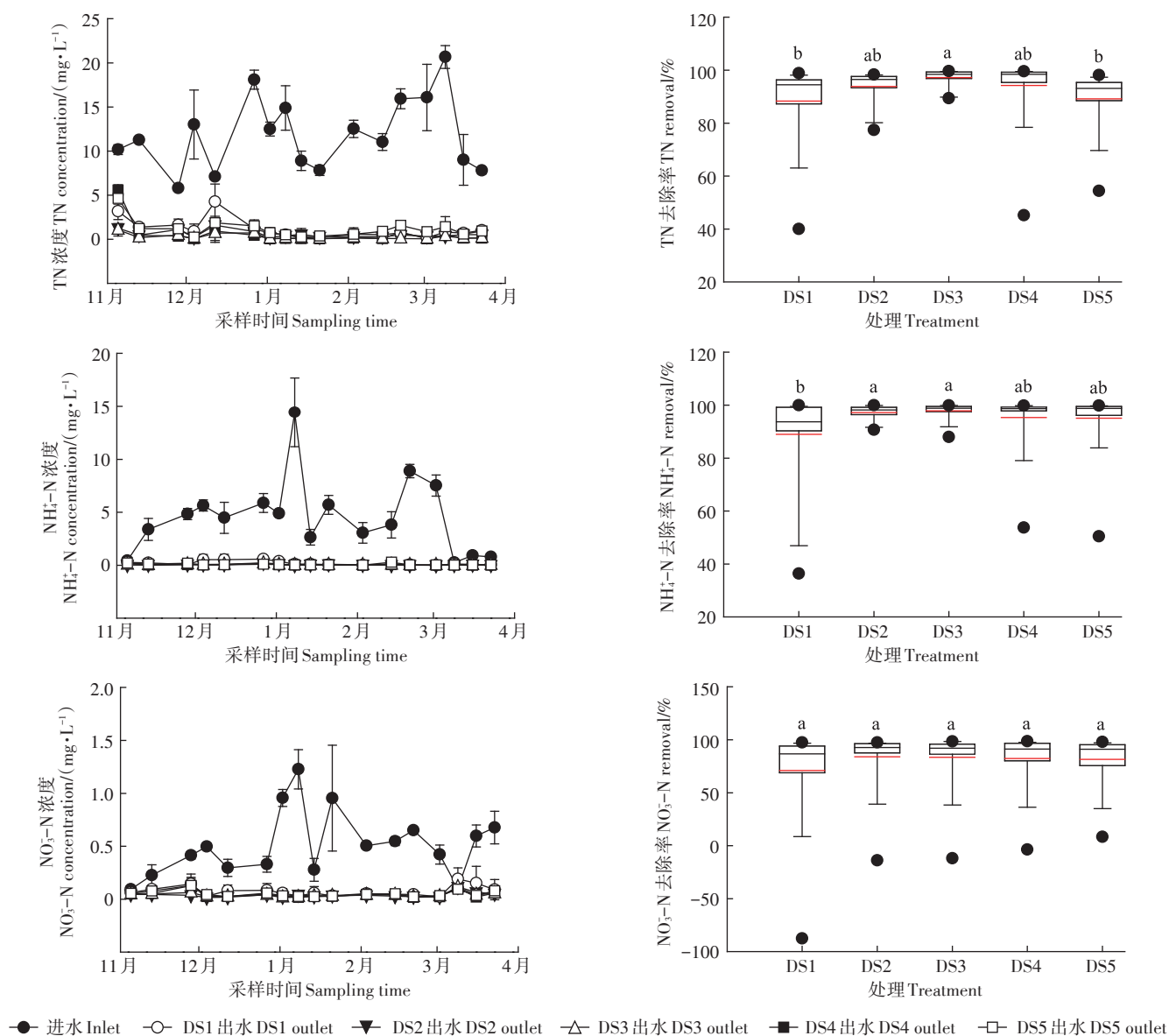


图2 TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 进出水浓度变化及其去除率

Figure 2 Inlet and outlet concentration fluctuation and removal of TN, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$

表1 系统内部原位水质指标

Table 1 *In situ* water quality index inside the system units

处理 Treatment	温度 $T/^\circ\text{C}$	pH	溶解氧 $\text{DO}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	氧化还原电位 ORP/mV	电导率 $\text{EC}/(\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1})$	总溶解固体 $\text{TDS}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$
DS1	9.7±3.5a	6.8±0.3c	2.0±1.8a	85.8±57.6a	994.7±244.7c	524.8±108.9c
DS2	9.8±3.6a	7.0±0.1b	1.7±1.6a	-14.3±42.4b	1 691.7±391.7b	911.5±243.6b
DS3	9.3±3.6a	7.2±0.1a	1.7±1.6a	-22.9±30.3b	1 628.4±389.7b	878.4±252.8b
DS4	9.8±3.6a	7.0±0.1b	1.6±1.5a	2.8±37.3b	1 591.2±436.7b	855.9±264.3b
DS5	9.7±3.6a	7.2±0.1a	1.5±1.5a	-26.4±41.3b	2 090.3±604.8a	1 120.7±309.2a

注:不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). The same below.

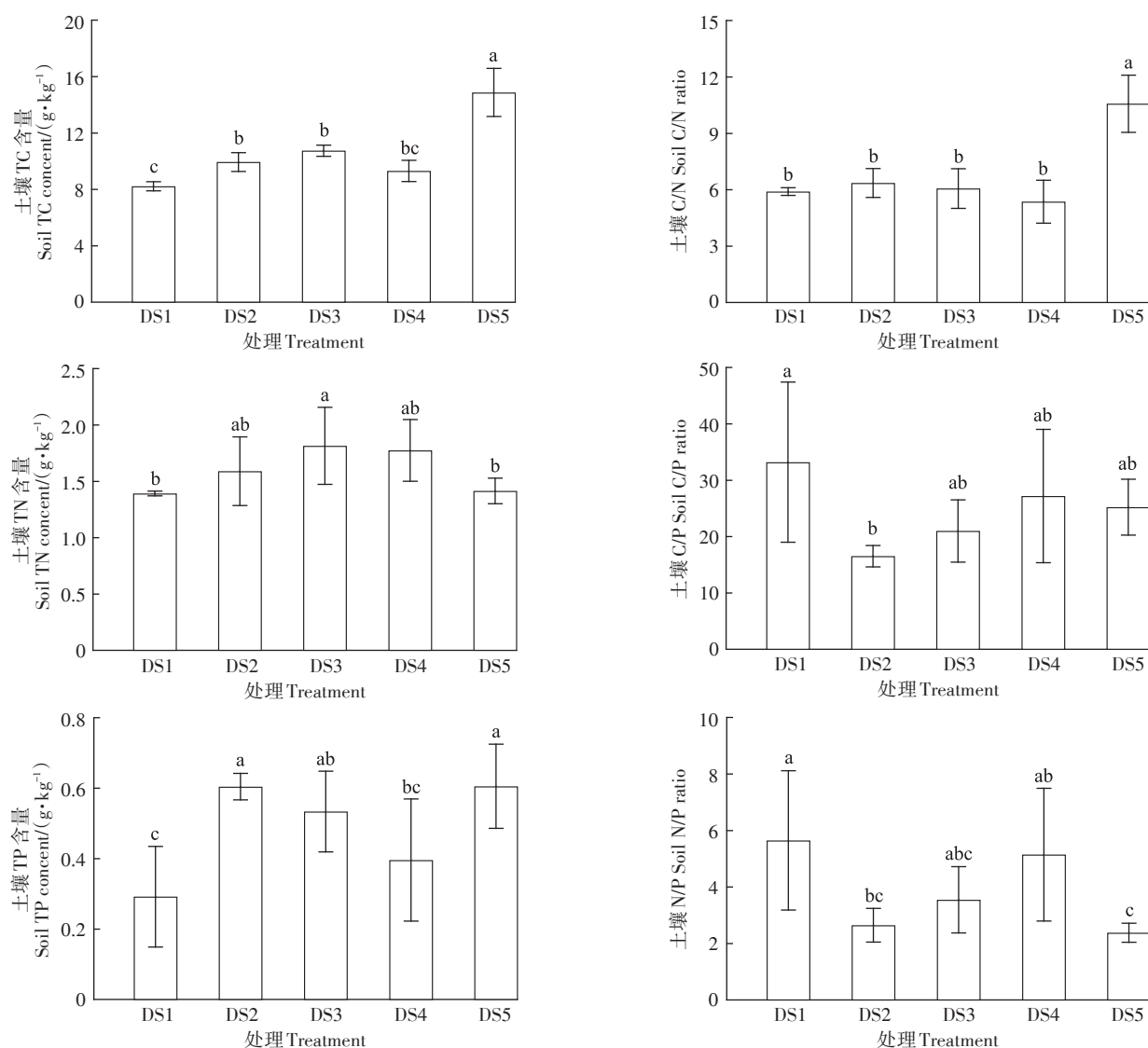


图3 土壤C、N、P化学计量特征

Figure 3 Soil C, N and P stoichiometry

著增加($P<0.05$)。

从处理间土壤C、N、P化学计量比可以看出(图3),与DS1相比,DS5的土壤C/N显著增加($P<0.05$),

DS2~DS4变化不显著;DS2~DS5的土壤C/P和N/P均有降低趋势,其中DS2的土壤C/P与DS1差异显著($P<0.05$),DS2和DS5的土壤N/P与DS1差异显著($P<0.05$)。

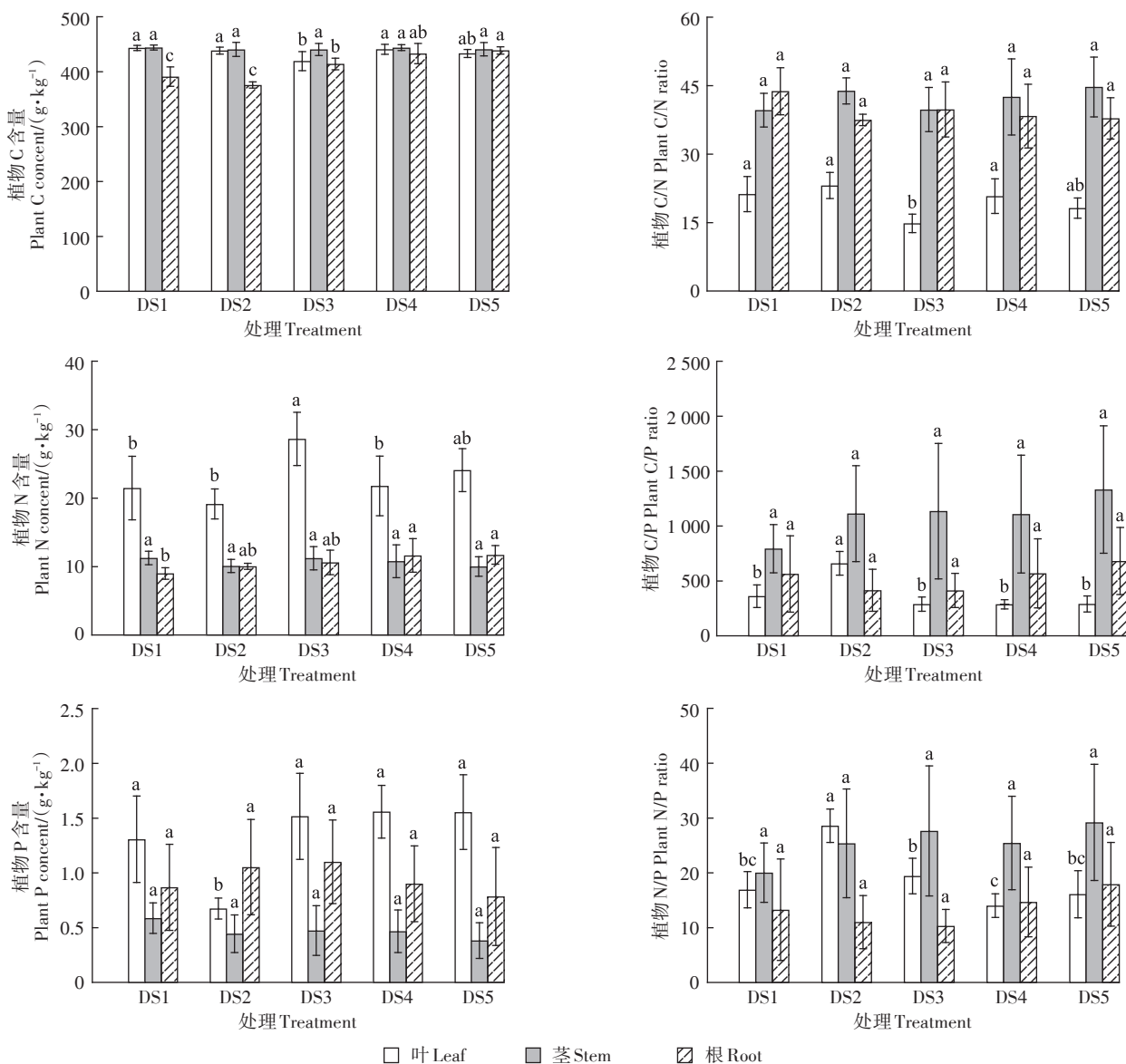
2.3 植物化学计量特征

从处理间芦苇各器官养分(C、N、P)含量可以看出(图4),茎C、N、P含量在处理间无显著差异($P>0.05$)。与叶和茎相比,根C含量在处理间变化相对较大,与DS1和DS2相比,DS3~DS5均显著增加了根C含量($P<0.05$),而DS3的叶C含量显著降低($P<0.05$);叶N含量比茎和根的要高,与DS1相比,DS3的叶N含量显著增加($P<0.05$),DS4和DS5的根N含量显著增加($P<0.05$);除DS2的叶P含量显著降低外($P<0.05$),其他处理间的叶、根P含量无显著差异。P含量在各

器官中的趋势为叶>根>茎。

从处理间芦苇各器官C、N、P化学计量比可以看出(图4),茎和根的C/N、C/P和N/P在处理间均无显著差异($P>0.05$)。与DS1的叶(C/N为21.3,C/P为361.7,N/P为16.9)相比,DS3的叶C/N(14.8)显著降低($P<0.05$),而DS2的叶C/P(660.8)和N/P(28.6)显著增加($P<0.05$)。

由生物量和植物各器官C、N、P含量可以计算出系统中植物的养分分配情况,由表2可见,各指标均表现出地下部分高于地上部分或基本相当。从生物



不同小写字母表示同一器官不同处理间差异显著($P<0.05$)

Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P<0.05$) of the same organ

图4 植物各器官C、N、P化学计量特征

Figure 4 Plant C, N and P stoichiometry of leaf, stem and root

量总量的平均值看,与DS1相比,DS2和DS3为降低趋势,DS4和DS5为增加趋势,且DS3差异显著($P<0.05$),主要是受茎生物量显著降低的影响。与DS1相比,植物C总量的处理间趋势与生物量趋势一致,但差异不显著($P>0.05$);植物N总量的处理间趋势亦与生物量趋势一致,且DS4和DS5呈显著差异水平($P<0.05$)。与DS1相比,DS4的叶、茎、根C量均有增加趋势,而DS5的叶和根C量显著增加,但茎C量降低。与DS1相比,DS2~DS5的植物P总量有降低趋势,但差异均不显著($P>0.05$)。

2.4 土壤-植物化学计量特征相关性

土壤和植物各器官化学计量特征之间的Pearson相关性见图5,总体来说,土壤、叶、茎、根各组分内部养分含量和化学计量比的相关性较其相互间更大。土壤与植物之间,各处理土壤-叶之间的化学计量特征均无显著相关性,而土壤-茎和土壤-根之间均存在一定的相关性,说明基质改良下,植物茎和根与土壤化学计量特征之间的关系更大。土壤TC含量与根C含量显著正相关($R=0.54, P<0.05$),说明土壤TC含量对根C固定具有较大影响;土壤TN含量与茎和根的N含量显著正相关($P<0.05$),说明土壤TN含量对茎和根的N吸收具有较大影响。土壤C/N和N/P均与茎化学计量特征有相关性,其中,土壤C/N与茎N和P的含量负相关、与茎C/N和C/P比正相关($P<0.05$),土

壤N/P与茎N含量正相关、与茎C/N比负相关($P<0.05$),说明土壤化学计量比可能仅对茎的养分利用效率有影响。

植物各器官之间,仅根与叶存在化学计量特征间的相关性,根C含量与叶P含量正相关($P<0.05$),与叶C/P和N/P负相关($P<0.01$);根C/P与叶N/P负相关($P<0.05$)。

2.5 水质因子和土壤-植物化学计量特征对湿地脱氮效果的影响

RDA分析显示(图6),水质因子仅解释了湿地脱氮效果总变异的20.9%,其中, T (负相关)和pH(正相关)对实验期间湿地脱氮效率变化的影响显著($P<0.05$),分别解释了总变异的10.1%和4.6%。土壤-植物化学计量特征解释了湿地脱氮效果总变异的100%,其中,仅土壤TP含量(正相关)、C/P(负相关)和TN含量(正相关)对实验期间湿地平均脱氮效率的影响显著($P<0.05$),分别解释了总变异的27.7%、22.9%和22.5%,说明基质改良使湿地冬季脱氮效果更易受到土壤化学计量特征的影响。

3 讨论

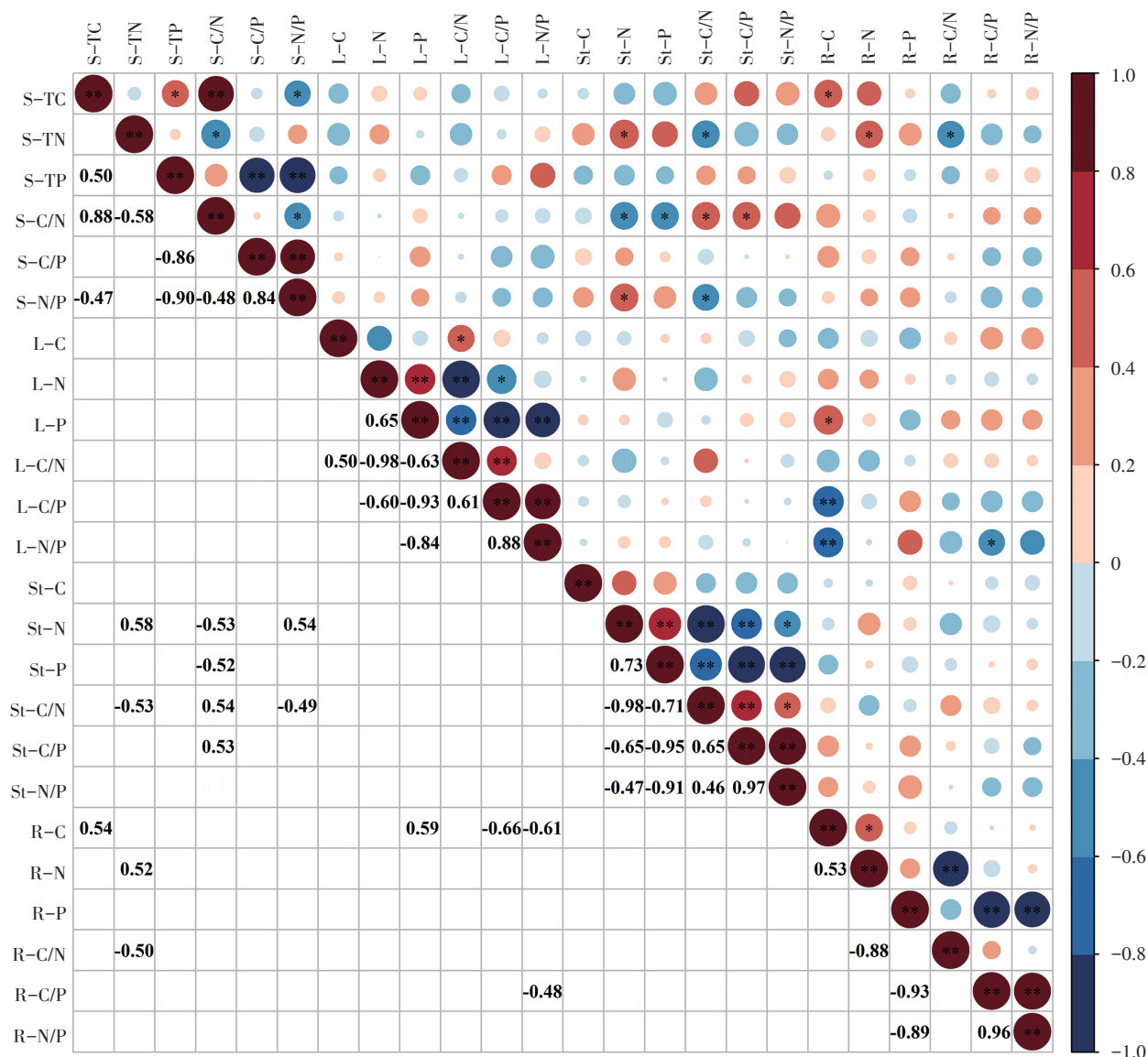
3.1 基质改良对芦苇区冬季脱氮效果的影响

本实验中,土壤基质处理本身就具有较好的湿地脱氮效果(TN 88.3%、 NH_4^+-N 89.0%、 NO_3^--N 71.0%),

表2 系统中植物的养分分配($\text{g}\cdot\text{盆}^{-1}$)

Table 2 Nutrient distribution of plant in the system units($\text{g}\cdot\text{pot}^{-1}$)

指标 Index	器官 Organ	处理 Treatment				
		DS1	DS2	DS3	DS4	DS5
生物量 Dry weight	叶 Leaf	13.9±3.2b	18.6±7.0ab	12.8±4.2b	16.7±5.2b	24.2±3.2a
	茎 Stem	97.9±22.2ab	94.6±5.2abc	63.0±13.3c	114.8±34.4a	73.3±15.7bc
	根 Root	138.5±38.7ab	117.3±20.9b	124.5±8.8b	129.6±18.6b	172.6±19.0a
	总 Total	250.3±29.4a	230.4±22.0ab	200.3±11.2b	261.1±49.7a	270.1±31.9a
C	叶 Leaf	6.2±1.4b	8.2±3.1ab	5.4±2.0b	7.3±2.1ab	10.5±1.3a
	茎 Stem	43.4±9.5ab	41.6±1.7abc	27.7±5.6c	50.9±15.0a	32.4±7.6bc
	根 Root	54.6±17.1b	44.1±7.8b	51.6±4.1b	56.3±10.2b	75.8±9.3a
	总 Total	104.2±13.4abc	93.9±8.8bc	84.7±4.0c	114.5±22.7ab	118.7±14.9a
N	叶 Leaf	0.29±0.02b	0.35±0.13b	0.37±0.14b	0.35±0.08b	0.58±0.04a
	茎 Stem	1.10±0.26a	0.95±0.07ab	0.70±0.11b	1.19±0.28a	0.72±0.11b
	根 Root	1.25±0.38b	1.17±0.18b	1.33±0.27b	1.50±0.31b	2.00±0.11a
	总 Total	2.64±0.31b	2.48±0.30b	2.39±0.12b	3.04±0.19a	3.30±0.11a
P	叶 Leaf	0.02±0.01bc	0.01±0.01c	0.02±0.01bc	0.03±0.01b	0.04±0.01a
	茎 Stem	0.06±0.02a	0.04±0.01ab	0.03±0.01b	0.05±0.02ab	0.03±0.01b
	根 Root	0.13±0.08a	0.12±0.05a	0.14±0.05a	0.12±0.06a	0.13±0.07a
	总 Total	0.21±0.07a	0.18±0.06a	0.19±0.04a	0.19±0.05a	0.20±0.06a



S-TC:土壤全碳含量,S-TN:土壤全氮含量,S-TP:土壤全磷含量,S-C/N:土壤碳氮比,S-C/P:土壤碳磷比,S-N/P:土壤氮磷比,L-C:叶片碳含量,L-N:叶片氮含量,L-P:叶片磷含量,L-C/N:叶片碳氮比,L-C/P:叶片碳磷比,L-N/P:叶片氮磷比,St-C:茎碳含量,St-N:茎氮含量,St-P:茎磷含量,St-C/N:茎碳氮比,St-C/P:茎碳磷比,St-N/P:茎氮磷比,R-C:根碳含量,R-N:根氮含量,R-P:根磷含量,R-C/N:根碳氮比,R-C/P:根碳磷比,R-N/P:根氮磷比,下同。* $P<0.05$, ** $P<0.01$

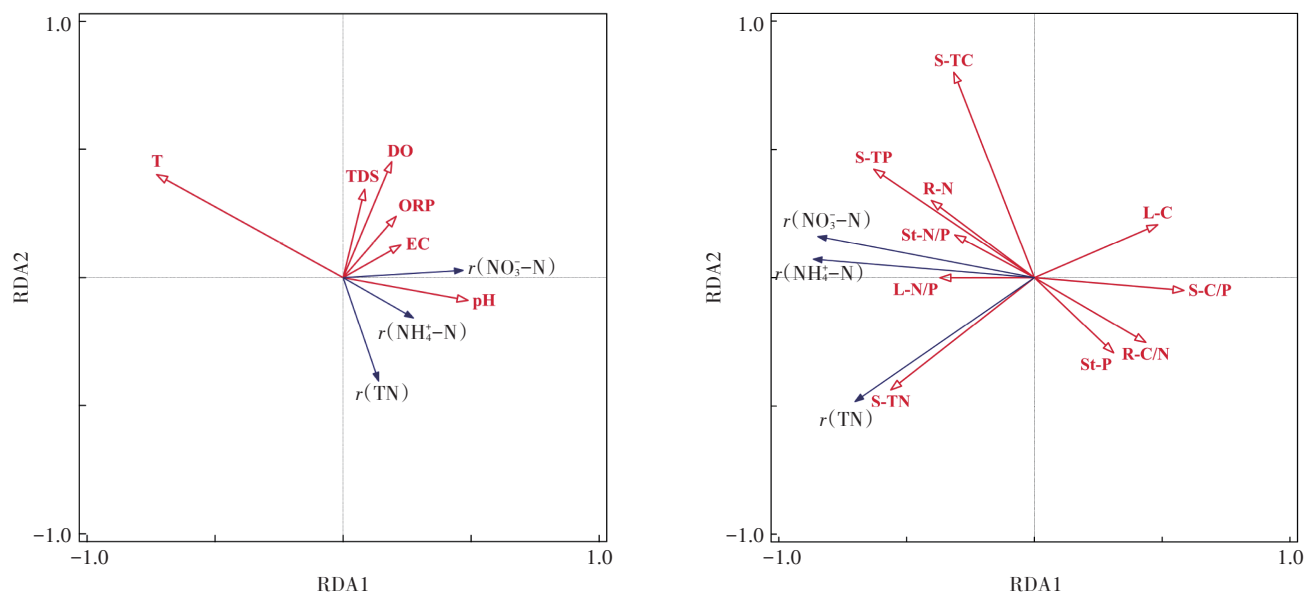
S-TC: Soil total carbon content; S-TN: Soil total nitrogen content; S-TP: Soil total phosphorus content; S-C/N: Soil C/N ratio; S-C/P: Soil C/P ratio; S-N/P: Soil N/P ratio; L-C: Leaf C content; L-N: Leaf N content; L-P: Leaf P content; L-C/N: Leaf C/N ratio; L-C/P: Leaf C/P ratio; L-N/P: Leaf N/P ratio; St-C: Stem C content; St-N: Stem N content; St-P: Stem P content; St-C/N: Stem C/N ratio; St-C/P: Stem C/P ratio; St-N/P: Stem N/P ratio; R-C: Root C content; R-N: Root N content; R-P: Root P content; R-C/N: Root C/N ratio; R-C/P: Root C/P ratio; R-N/P: Root N/P ratio. The same below. * $P<0.05$, ** $P<0.01$

图5 土壤-植物C、N、P化学计量特征相关性

Figure 5 Correlation between soil and plant C, N and P stoichiometry

通过在土壤中添加砾石、砾石+生物炭、陶粒+生物炭以及改性陶粒+生物炭对土壤基质进行改良均进一步提高了湿地冬季脱氮效果,其中,砾石+生物炭处理显著提高了湿地 TN 去除率(8.9 个百分点, $P<0.05$),砾石(8.3 个百分点)和砾石+生物炭(8.9 个百分点)处理显著提高了湿地 NH_4^+-N 的去除率($P<0.05$)。研究表明,砾石对氮的吸附能力相对较弱^[17],

但在本研究中,添加砾石基质处理的湿地脱氮效果较好。可能的原因有:第一,基质吸附不是湿地脱氮的主要途径,湿地脱氮主要通过微生物的硝化-反硝化作用^[18];第二,砾石的添加增加了基质的通透性,影响了基质中的水分运移过程以及植物根系-微生物生长的微环境^[19],从而间接对湿地脱氮效果产生影响;第三,与陶粒相比,砾石不规则的几何形状可能增加



$r(\text{TN})$: 湿地 TN 去除率, $r(\text{NH}_4^+-\text{N})$: 湿地 NH_4^+-N 去除率, $r(\text{NO}_3^--\text{N})$: 湿地 NO_3^--N 去除率。
土壤-植物化学计量特征选择简单效应解释率排序前 10 的指标
 $r(\text{TN})$: Wetland TN removal; $r(\text{NH}_4^+-\text{N})$: Wetland NH_4^+-N removal; $r(\text{NO}_3^--\text{N})$: Wetland NO_3^--N removal.
Soil-plant stoichiometry selection the top 10 explain indicators of simple term effects for mapping

图6 水质因子和土壤-植物化学计量特征与湿地脱氮效果的 RDA 分析

Figure 6 Redundancy analysis between wetland N removal with water index and soil-plant stoichiometry

了微环境的复杂结构,从而更加有效地发挥了植物根系-微生物的作用。在添加砾石处理的上层添加生物炭会进一步提高湿地脱氮效率,可能是因为生物炭对 NH_4^+-N 的吸附效果较好,同时其也为微生物反硝化提供了碳源^[20]。RDA 分析显示,水质因子中的温度和 pH 对实验期间湿地脱氮效率的变化有影响,且与温度呈负相关,与 pH 呈正相关。一般来说,温度越高,湿地冬季脱氮效果越好^[21],而本实验中,各处理间温度差异较小,说明基质改良不是通过影响温度来提高湿地冬季脱氮效果;基质改良处理的系统 pH 均显著增加,研究表明,低温下在一定范围内的 pH 越高,脱氮效果越好^[22],说明 pH 增加可能是基质改良提高湿地脱氮效果的重要因素。

3.2 基质改良对土壤化学计量特征的影响

土壤 TC、TN、TP 含量及其化学计量比是表征土壤质量及养分平衡的重要指标,本实验中,基质改良处理均增加了土壤 TC 和 TP 含量,且均为添加砾石、砾石+生物炭和改良陶粒+生物炭处理的增加显著($P<0.05$),说明基质改良可以增加土壤 TC 和 TP 的积累。基质改良处理亦增加了土壤 TN 含量,且添加砾石+生物炭的处理增加显著($P<0.05$),说明基质改良能够增加土壤的氮有效吸附,提高土壤的缓冲能力^[23]。本实验中,添加改良陶粒+生物炭处理的土壤 C/N 显著增

加($P<0.05$),说明该处理的土壤有机物矿化分解较慢,养分循环速率较慢,有利于碳的积累^[24]。研究表明,土壤 C/N 小于 25 时,微生物分解有机质能力强^[25],本研究中土壤 C/N 均较低,说明河岸带土壤微生物的有机质分解速率相对较高。土壤 C/P 是体现 P 有效性的重要指标, C/P 越低,则 P 有效性越高;土壤 N/P 是养分限制的预测因子,也是判断 N 饱和度的重要指标^[24]。本研究中,基质改良处理的土壤 C/P 和 N/P 均为降低趋势,且添加砾石的处理均与对照差异显著($P<0.05$),说明基质改良处理的土壤中 P 有效性相对较高,仍表现为 N 限制,因此可以容纳水体中更高的氮浓度。

3.3 基质改良对植物化学计量特征的影响

植物 C 是干物质组成的基本元素, N 和 P 是反映植物生长状况的重要指标^[25];植物化学计量比反映其对环境的适应机制及特征,不同器官的化学计量比也可以反映器官内稳性与元素在不同器官中的分配和相互关系^[26]。本实验中,基质改良使植物叶和根中的 C、N、P 含量发生变化,而茎中变化较小($P>0.05$)。研究表明,叶是植物对环境变化反应最快速的器官^[27],而根直接与土壤接触,更易对土壤环境做出响应^[14]。本实验中,3 个添加生物炭的处理均显著增加了根 C 含量($P<0.05$),说明基质中添加生物炭更有利于根 C

固定;另外,砾石+生物炭处理显著增加了叶N含量,陶粒+生物炭和改良陶粒+生物炭处理显著增加了根N含量,说明基质中添加生物炭也有利于植物N吸收,由于不同基质条件下植物对N的利用策略不同,导致不同器官对N的积累存在差异。基质改良仅使叶C/N、C/P和N/P发生变化。研究表明,叶C/N和C/P越低,植物生长速率越快,对N、P吸收效率越高^[28]。砾石+生物炭处理的叶C/N显著降低($P<0.05$),而砾石处理的叶C/P显著增加($P<0.05$),说明基质中添加砾石+生物炭,植物对N的吸收效率较高,而仅添加砾石,植物对P的吸收效率则较低。研究表明,叶N/P为14~16时,植物生长受N和P的共同限制,叶N/P高于16时受P的限制,叶N/P低于14时则受N的限制^[29]。本实验中,土壤基质处理中的叶N/P高于16(16.9),植物生长受P的限制,而添加砾石处理,叶N/P显著增加(28.6, $P<0.05$),进水中较高的TN浓度,可能是造成这一现象的重要原因。

植物为了适应环境,能够对不同器官中的养分分配进行调整^[29],本实验中,各处理的植物养分分配均表现为地下部分高于地上部分或基本相当。基质中添加陶粒+生物炭和改性陶粒+生物炭对植物生长具有促进作用,C和N的吸收量相对较大;而添加砾石和砾石+生物炭处理的植物生物量降低,其中,添加砾石+生物炭处理显著降低($P<0.05$),而其水体脱氮效果却相对较好,一方面说明植物吸收不是湿地脱氮的主要途径^[5],另一方面说明基质改良促进湿地脱氮的主要作用是为微生物硝化-反硝化过程提供良好的微环境。

4 结论

(1)与土壤基质相比,4种基质改良处理均提高了芦苇湿地冬季脱氮效果,其中,添加砾石处理显著提高了湿地 NH_4^+-N 的去除率,添加砾石+生物炭处理显著提高了湿地TN和 NH_4^+-N 的去除率。

(2)基质改良处理均增加了土壤TC、TN和TP的含量,其中,添加砾石+生物炭处理使三者含量均显著增加,促进了土壤C、N、P的有效吸附;基质改良处理均降低了土壤C/P和N/P,其中,添加砾石处理使二者比值均显著降低,土壤中P有效性相对较高。

(3)添加生物炭的3个处理均有利于根C固定和植物N吸收;添加砾石+生物炭处理的植物对N吸收效率较高,而添加砾石处理的植物对P吸收效率较低;添加砾石的2个处理使植物生物量降低,而添加陶粒或

改性陶粒的2个处理对植物生长具有促进作用。

(4)土壤-植物化学计量特征之间存在一定的相关性,且土壤与植物茎和根的化学计量特征之间的关系更大,其中,土壤TC含量影响根C固定,土壤TN含量影响茎和根的N吸收,而土壤化学计量比仅对茎的养分利用效率有影响。

参考文献:

- [1] 王超,尹炜,贾海燕,等. 滨岸带对河流生态系统的影响机制研究进展[J]. 生态科学, 2018, 37(3):222-232. WANG C, YIN W, JIA H Y, et al. Review on the influence mechanism of riparian zone to the river ecosystem[J]. *Ecological Science*, 2018, 37(3):222-232.
- [2] SWANEY D P, HONG B, TI C, et al. Net anthropogenic nitrogen inputs to watersheds and riverine N export to coastal waters: A brief overview[J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2012, 4(2):203-211.
- [3] 李晓娜,张国芳,武美军,等. 不同植被过滤带对农田径流泥沙和氮磷拦截效果与途径[J]. 水土保持学报, 2017, 31(3):39-44. LI X N, ZHANG G F, WU M J, et al. Interception ways and effects of grass filter strips on sediment, nitrogen and phosphorus in agricultural runoff[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(3):39-44.
- [4] DEAK B, VALKO O, TOROK P, et al. Reed cut, habitat diversity and productivity in wetland[J]. *Ecological Complexity*, 2015, 22:121-125.
- [5] WANG J L, CHEN G F, FU Z S, et al. Assessing wetland nitrogen removal and reed (*Phragmites australis*) nutrient responses for the selection of optimal harvest time[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 280:111783.
- [6] 王俊力,付子轼,乔红霞,等. 枯萎期芦苇收割时间对湿地脱氮效果及根系呼吸代谢的影响[J]. 环境科学研究, 2021, 34(8):1909-1917. WANG J L, FU Z S, QIAO H X, et al. Effects of reed (*Phragmites australis*) harvest time on nitrogen removal and root respiratory metabolism in wetland[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, 34(8):1909-1917.
- [7] 潘复燕,薛利红,卢萍,等. 不同土壤添加剂对太湖流域小麦产量及氮磷养分流失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(5):928-936. PAN F Y, XUE L H, LU P, et al. Effects of different soil additives on wheat yield and nitrogen and phosphorus loss in Tai Lake region[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(5):928-936.
- [8] CAO Y S, SUN H F, LIU Y Q, et al. Reducing N losses through surface runoff from rice-wheat rotation by improving fertilizer management[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(5):4841-4850.
- [9] 葛秋易,梁冬梅,肖尊东. 基质优化人工湿地处理效率方法研究进展[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(22):5-9. GE Q Y, LIANG D M, XIAO Z D. Research progress on treatment efficiency of substrate optimized constructed wetland[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2017, 45(22):5-9.
- [10] 赵林丽,邵学新,吴明,等. 人工湿地不同基质和粒径对污水净化效果的比较[J]. 环境科学, 2018, 39(9):4236-4241. ZHAO L L,

- SHAO X X, WU M, et al. Effects of different substrates and particle sizes on wastewater purification[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(9):4236–4241.
- [11] SISTLA S A, SCHIMEL J P. Stoichiometric flexibility as a regulator of carbon and nutrient cycling in terrestrial ecosystems under change[J]. *New Phytologist*, 2012, 196(1):68–78.
- [12] ELSER J J, ANDERSEN T, BARON J S, et al. Shifts in lake N:P stoichiometry and nutrient limitation driven by atmospheric nitrogen deposition[J]. *Science*, 2009, 326:835–837.
- [13] WANG J L, CHEN G F, ZOU G Y, et al. Comparative on plant stoichiometry response to agricultural non-point source pollution in different types of ecological ditches[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26:647–658.
- [14] WANG J L, CHEN G F, FU Z S, et al. Application performance and nutrient stoichiometric variation of ecological ditch systems in treating non-point source pollutants from paddy fields[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2020, 299:106989.
- [15] 国家环境保护总局. 水和废监测分析方法[M]. 四版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002:701–705. State Environmental Protection Administration. Methods for monitoring and analysis of water and wastewater[M]. 4th Edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002:701–705.
- [16] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. LU R K. The analysis method of soil agricultural chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [17] 王功, 魏东洋, 方晓航, 等. 3种湿地填料对水体中氮磷的吸附特性研究[J]. 环境污染与防治, 2012, 34(11):9–13. WANG G, WEI D Y, FANG X H, et al. Study on the adsorption characteristics of nitrogen and phosphorus on three substrates of constructed wetland[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2012, 34(11):9–13.
- [18] WANG M, ZHANG D Q, DONG J W, et al. Constructed wetlands for wastewater treatment in cold climate: A review[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2017, 57(7):293–311.
- [19] 张志华, 张锦豪, 桑玉强, 等. 太行山南麓坡面土壤碳氮空间变异性及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2021, 32(8):2829–2838. ZHANG Z H, ZHANG J H, SANG Y Q, et al. Spatial variations and its influencing factors of soil carbon and nitrogen on the southern foot of Taihang Mountains, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(8):2829–2838.
- [20] 卢少勇, 万正芬, 李锋民, 等. 29种湿地填料对氨氮的吸附解吸性能比较[J]. 环境科学研究, 2016, 29(8):1187–1194. LU S Y, WAN Z F, LI F M, et al. Ammonia nitrogen adsorption and desorption characteristics of twenty-nine kinds of constructed wetland substrates[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, 29(8):1187–1194.
- [21] 钱昊, 王勇超, 孙峰, 等. 季节性温度变化对CANON型潮汐流人工湿地脱氮的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(5):1715–1724. QIAN H, WANG Y C, SUN F, et al. Effects of seasonal temperature variation on nitrogen removal from a tidal flow constructed wetland system with CANON process[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(5):1715–1724.
- [22] 唐政坤, 李行, 张硕, 等. 响应曲面法分析pH和温度对厌氧氨氧化脱氮效能的影响[J]. 净水技术, 2019, 38(3):82–87. TANG Z K, LI H, ZHANG S, et al. Influence of pH value and temperature on anammox denitrification efficiency analyzed by response surface methodology[J]. *Water Purification Technology*, 2019, 38(3):82–87.
- [23] SAYANTAN D, SHARDEN D. Phosphate amendments moderate the arsenate accumulation and its subsequent oxidative and physiological toxicities in *Amaranthus viridis* L. [J]. *PNAS*, 2017, 87(4):1343–1353.
- [24] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. 生态学报, 2008, 28(8):3937–3947. WANG S Q, YU G R. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(8):3937–3947.
- [25] GUSEWELL S. N:P ratios in terrestrial plants: Variation and functional significance[J]. *New Phytologist*, 2004, 164(2):243–266.
- [26] SARDANS J, RIVAS-UBACH A, PENUÉLAS J. The elemental stoichiometry of aquatic and terrestrial ecosystems and its relationships with organismic lifestyle and ecosystem structure and function: A review and perspectives[J]. *Biogeochemistry*, 2012, 111(1/2/3):1–39.
- [27] STERNER R W, ELSER J J. Ecological stoichiometry: The biology of elements from molecules to the biosphere[M]. Princeton: Princeton University Press, 2002.
- [28] HAN W, FANG J, GUO D, et al. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China[J]. *New Phytologist*, 2005, 168(2):377–385.
- [29] RONG Q, LIU J, CAI Y, et al. Leaf carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry of *Tamarix chinensis* Lour. in the Laizhou Bay coastal wetland, China[J]. *Ecological Engineering*, 2015, 76:57–65.

(责任编辑:李丹)