

DOI: 10.5846/stxb201911142422

赵睿, 卜红梅, 宋献方. 再生水补水河道芦苇碳氮化学计量特征及其对环境的响应. 生态学报, 2021, 41(6): 2439-2450.

Zhao R, Bu H M, Song X F. Carbon and nitrogen stoichiometry of *Phragmites australis* and its response to environment in river reaches restored by reclaimed water. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(6): 2439-2450.

再生水补水河道芦苇碳氮化学计量特征及其对环境的响应

赵睿^{1,2}, 卜红梅^{1,*}, 宋献方^{1,2}

1 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程院重点实验室, 北京 100101

2 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049

摘要:在再生水补水河道内, 芦苇(*Phragmites australis*)受高氮再生水的长期影响, 具有独特的碳(C)、氮(N)化学计量特征。为查明芦苇 C、N 化学计量特征及其对高氮环境的响应, 在芦苇生长季节(5、7、9 月份), 分析了再生水补水的潮白河顺义段内河水、土壤及芦苇各器官(根、茎和叶)中 C、N 含量及碳氮比(C/N)。结果表明: 河水中 C、N 含量和 C/N 比分别在 22.20—37.25 mg/L、2.24—11.20 mg/L 和 3.33—9.92 之间。土壤中 C、N 含量和 C/N 比的范围为 5.69—35.17、0.28—2.63、8.77—25.39。在整个生长季节的所有采样点内, 芦苇根、茎和叶中 C 含量的平均值分别为(170.84±63.56)、(369.02±39.12)、(431.80±96.70) mg/g; N 含量的平均值分别为(8.20±3.96)、(14.11±6.22)和(30.73±8.66) mg/g; C/N 比的平均值分别为 23.89±12.84、32.65±18.48、15.21±5.60。方差分析表明, 芦苇各器官中 C、N 计量特征具有显著的季节性差异($P<0.05$), 这主要与芦苇在生长过程中的生理作用有关。环境中 C、N 计量特征具有显著的空间差异($P<0.05$), 受环境变量的影响, 芦苇叶中 N 含量和 C/N 比从上游到下游显著降低($P<0.05$)。逐步回归分析的结果显示, 土壤和河水中的 C、N 含量能够解释芦苇叶中 71.0% 的变量($P<0.05$); 土壤中 C、N 含量和河水中 N 含量能够解释芦苇叶 C/N 比 82.6% 的变量($P<0.05$)。相关分析指出, 河水中 N 含量与土壤中 N 含量显著正相关($P<0.05$), 说明土壤受到高氮再生水的影响而具有较强的供 N 能力。高氮环境下, 芦苇叶中 N 含量较高; 相较于芦苇茎和叶, 根中 C 含量较小。研究证明在再生水补水河道中, 芦苇对环境中的 N 有良好的吸收能力, 其 C、N 计量特征对高氮环境表现出明显的响应。

关键词:再生水; 芦苇; 碳; 氮; 碳氮比; 化学计量学

Carbon and nitrogen stoichiometry of *Phragmites australis* and its response to environment in river reaches restored by reclaimed water

ZHAO Rui^{1,2}, BU Hongmei^{1,*}, SONG Xianfang^{1,2}

1 Key Laboratory of Water Cycle and Related Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: In river reaches restored by reclaimed water, *Phragmites australis* showed distinct carbon (C) and nitrogen (N) stoichiometry due to the long-term influence of reclaimed water with high nitrogen. To identify the C and N stoichiometric characteristics of *P. australis* and its response to high N environment, contents of C and N and carbon: nitrogen ratio (C/N) in river water, soil and organs of *P. australis* (root, stem, and leaf) were analyzed in the growing seasons (May, July, and September) of *P. australis*. The results showed that the C, N contents and C/N ratio in river water ranged between 22.20—37.25 mg/L, 2.24—11.20 mg/L, and 3.33—9.92, respectively. The contents in soil were 5.69—35.17 mg/g for C, 0.28—2.63 mg/g for N, and 8.77—25.39 for C/N ratio, respectively. At all sampling sites during the growing seasons, mean values of C contents in roots, stems, and leaves of *P. australis* were (170.84±63.56), (369.02±39.12),

基金项目:国家自然科学基金重点项目(41730749);北京市自然科学基金项目(8172044)

收稿日期:2019-11-14; **网络出版日期:**2021-01-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: buhm@igsrr.ac.cn

and (431.80 ± 96.70) mg/g, respectively; for N contents, they were (8.20 ± 3.96) , (14.11 ± 6.22) , and (30.73 ± 8.66) mg/g, respectively; for C/N ratios, they were respective 23.89 ± 12.84 , 32.65 ± 18.48 , and 15.21 ± 5.60 . The C and N stoichiometry in different organs of *P. australis* had significantly seasonal differences ($P < 0.05$) in variance analysis, which was mainly caused by the physiological processes of *P. australis* in the growing seasons. The C and N stoichiometry in the environment had significantly spatial differences ($P < 0.05$), leading to significant decrease of N content and C/N ratio in leaf of *P. australis* from upstream to downstream ($P < 0.05$). Regression analysis indicated that the C and N contents in soil and river water could explain 71.0% of the variances of N content in *P. australis* leaf ($P < 0.05$), while C and N contents in soil and the N content in river water could explain 82.6% of the variances of C/N ratio in *P. australis* leaf ($P < 0.05$). Significantly positive correlation between N in river water and N in soil ($P < 0.05$) were implied by correlation analysis, indicating close N exchange between river water and soil. Under the influence of the reclaimed water with high nitrogen, it showed strong N supplying capacity by soil, which caused high N content in *P. australis* leaf, and lower C content in root compared with stem and leaf of *P. australis*. Consequently, *P. australis* had strong storage capacity of N in the river reaches restored by the reclaimed water since its C and N stoichiometry showed strong responsiveness to high N environment.

Key Words: reclaimed water; *Phragmites australis*; carbon; nitrogen; carbon: nitrogen ratio; stoichiometry

生态化学计量学是研究生态系统中多种化学元素平衡关系的科学^[1-2]。在植物体内的各种元素中,C是构成植物体干物质的主要元素^[2],N是与光合作用相关的各种酶中最重要的营养元素^[1],C/N比可以反映出植物对N的利用效率^[1-2]。因此,C、N含量及其相对比例对植物的生理机制调节具有重要作用^[1-3]。芦苇(*Phragmites australis*)是一种对环境适应性强且具有良好抗逆性的禾本科植物,广泛分布于热带和温带的湿地或浅水区^[4]。芦苇C、N化学计量学的研究揭示出了芦苇在不同生境下的生长策略以及养分循环方式^[4-10]。刘东等^[5]分析了不同水分梯度下芦苇叶片的C、N计量特征,发现随着土壤含水率的升高,芦苇叶片中C、N含量减小而C/N比增大。赵志江等^[6]的研究指出,在人类干扰小、水源充足的地区,芦苇对C和N具有更高的固持能力。王利平等^[7]讨论了土壤对芦苇叶片化学计量特征的影响,指出叶片中C含量和C/N比更能体现出土壤理化因子的作用。白军红等^[8]发现,芦苇根、茎、叶和穗中N含量随季节变化表现出显著的变化特征,且不同器官的变化趋势一致。此外,C、N含量在芦苇各器官间的分配会受到环境的影响,不同生长阶段、不同研究区的结果之间存在差异^[9-11]。

再生水作为一种持续而稳定的水源,对缓解我国水资源短缺有重要意义^[12]。在北方缺水城市,将再生水作为景观用水水源已有大量应用实例^[12-14]。在再生水补给的景观河湖中,芦苇可有效吸收水体中的营养盐,常被用于缓解水体富营养化问题^[15-18]。芦苇在吸收了再生水中的营养盐后,自身的生理特征会随之改变。刘克等^[19]研究了再生水补给湿地中的芦苇,发现芦苇叶片对再生水中的N含量有明显的响应,其光谱信息可用于遥感反演。宫兆宁等^[20]发现,随着再生水中N含量的上升,芦苇叶片的荧光参数表现出上升趋势。芦苇的叶片光谱和叶绿素荧光参数都与叶片中N含量有关,间接反映了高氮环境对芦苇体内N含量的影响。然而,现有研究中缺少对再生水补给条件下芦苇体内C、N化学计量特征及对环境响应的直接探究。

潮白河顺义段是再生水补水的景观河道,再生水是主要水源,也是主要N源。相较于其他水生植物,芦苇作为河道中生长的优势种挺水植物与再生水河道环境之间的相互作用最为显著。河水和土壤为芦苇提供了N源用于生长,芦苇通过直接吸收去除了环境中的N,两者之间联系紧密。通过对芦苇各器官以及河水、土壤的综合调查,旨在分析潮白河顺义段河道内芦苇各器官和环境C、N含量及C/N比的时空变化特征,查明芦苇根、茎和叶之间C、N含量的分配模式,厘清芦苇各器官C、N含量分别与河水和土壤变量之间的关系,从而揭示芦苇对再生水高氮环境的响应。研究结果对于进一步分析再生水补给河道条件下芦苇的水质净化效果及河道的生态修复能力具有重要的理论和应用价值。

1 材料与方

1.1 研究区概况

研究区位于潮白河北京顺义段(40°03′—40°11′N, 116°38′—116°45′E)。该地区为典型的北温带半湿润大陆性季风气候。1981—2010年间,累年年平均气温为12.3℃。冬季寒冷干燥,累年年最低气温为-18.1℃;夏季高温多雨,累年年最高气温为42℃,最大日降水量为207 mm。潮白河顺义段向阳闸至河南橡胶坝之间的河段因干旱曾一度断流^[21-22]。2007年,“引温济潮”工程将温榆河的河水经过膜生物反应器(MBR)工艺处理后调至北京市顺义区的城北减河,由城北减河向潮白河补水用于景观用水,再生水出水水质要求总氮(TN)低于15 mg/L。再生水是研究区内最主要的水源,出水口附近氮的本底值较高,但沿河有降低趋势,表现出了河水一定程度的自净能力^[22-23]。

研究区水流流速缓慢,基本成静止状态,河水中营养物质本底值相对较高,极易爆发水华,影响水体景观生态修复效果^[22]。河道底部未衬砌,研究区内生长的水生植物主要包括沉水植物菹草(*Potamogeton crispus*)、浮水植物水鳖(*Hydrocharis dubia*)、挺水植物芦苇(*P. australis*)。芦苇是河道内优势种挺水植物,在河道上游的再生水出水口附近、中游的减河公园内和下游的河南橡胶坝附近都有分布(图1)。芦苇沿河分布较为均匀、生物量大,与周围环境之间的相互作用更为显著,因此选择芦苇作为研究对象。芦苇生长在河水与河岸交界处,根部及根部土壤被水淹没。越靠近河岸,土层越厚,则芦苇的根系更发达,其形态更高大,根、茎生长更粗壮;而靠近河水一侧,土层较薄,则芦苇的植株普遍矮小。

1.2 采样设计和实验方法

采样于2019年5、7、9月份芦苇的生长季节进行。选择芦苇生长区域,沿河在减河段的再生水出水口附近(S1)、两河交汇处的减河公园(S2)及潮白河段的河南村橡胶坝(S3)分别布设采样点(图1)。在各采样点,采取地上部分长势、高度接近的芦苇5株,并挖取芦苇地下部分15 cm,形成混合样本,用于后续测样。同时,在每个采样点各采集2 L水样和500 g左右土样,用于水和土壤C、N含量的测定。

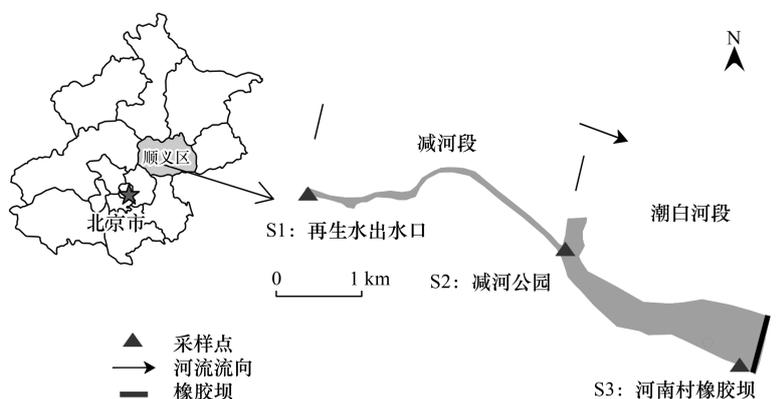


图1 潮白河顺义段采样点分布图

Fig.1 Distribution of sampling sites in Shunyi reaches of the Chaobai River

所有样品放在保温箱内冷藏带回。芦苇洗净后放入烘箱,105℃下杀青30 min,65℃烘干至恒重,分根、茎、叶磨碎,过200目筛后进行元素测定。土壤风干后亦磨碎、过200目筛。芦苇各器官及土样的C和N含量用元素分析仪(Elementar vario MACRO cube, German)测定。芦苇和土壤的样品粉末在装有催化剂的管中燃烧分解,排除杂质气体,将需要测试的各元素组分气体分离,采用热导检测器检测C和N含量。芦苇和土壤的C和N含量采用质量含量(mg/g),C/N比采用质量比。河水中N含量用总氮来表示,C含量用总碳来表示。水样中的总氮用碱性过硫酸钾消解后,在化学分析仪(Alliance Smart Chem200, France)上测试;水样中

的总碳在总有机碳分析仪(Elementar liqui TOC II, German)上进行测试。

1.3 数据处理

用单因素方差分析分别比较各变量的季节性和空间性差异,显著性水平 $P < 0.05$ 或 $P < 0.01$ 。在进行分析前,用 Shapiro-Wilk 法来检验原始数据的正态性,用 Bartlett 法来检验方差齐性。对于不满足正态分布的指标,进行自然对数变换。土壤中 C 含量、河水中 N 含量和河水中 C/N 比经自然对数变换后基本符合正态性分布。对于仍然不满足正态分布要求的河水中 C 含量,选用非参数法 Kruskal-Wallis 秩和检验进行方差分析。相关分析中,采用 Pearson 相关系数表示各变量之间的相关关系,显著性水平 $P < 0.05$ 或 $P < 0.01$ 。将数据标准化后,用线性回归分析探究河水和土壤中 C、N 含量之间的线性关系;用逐步多元回归方法选择合适的参数来构建环境变量与芦苇各器官中变量之间的回归模型。以上数据分析及制图过程在 Microsoft Excel 和 R 语言^[24]中进行。

2 结果与分析

2.1 环境中 C、N 含量和 C/N 比的时空变化特征

2.1.1 河水中 C、N 含量和 C/N 比的时空变化特征

在潮白河顺义段再生水补给的河道内,不同采样时期河水中 C 含量的范围在 22.20—37.25 mg/L 之间(图 2)。其中,在 5、7、9 月份,河水中 C 的平均含量分别为 (35.54 ± 2.12) 、 (34.61 ± 0.67) 、 (26.77 ± 3.26) mg/L,方差分析表明无显著季节性变化($P > 0.05$);从上游到下游,各采样点(S1—S3)河水中 C 的平均含量分别为 (33.18 ± 3.57) 、 (33.90 ± 3.13) 、 (29.84 ± 5.47) mg/L,无显著空间变化趋势($P > 0.05$)。

河水中 N 含量的变化范围为 2.24—11.20 mg/L(图 2),其含量值在不同采样季节和不同采样点均高于《地表水环境质量标准》(GB3838—2002)中 V 类水的标准(2 mg/L)。河水中 N 含量在 5、7、9 月份的平均含量分别为 (7.94 ± 2.32) 、 (6.00 ± 1.76) 、 (5.23 ± 2.42) mg/L,其含量值无显著季节性差异($P > 0.05$);从上游到下游,河水中 N 含量沿着河流方向逐渐降低,在样点 S1、S2 和 S3 的平均值分别为 (9.27 ± 1.37) 、 (5.67 ± 0.72) 、 (4.23 ± 1.53) mg/L,呈现显著的空间变化趋势($P < 0.05$)。

河水中 C/N 比在 3.33—9.92 之间,其平均值为 5.78 ± 2.15 (图 2)。河水中 C/N 比在 5 月份最低,其平均值为 4.77 ± 1.02 ,在 7 月和 9 月份有不同程度的升高,其平均值分别为 6.24 ± 1.62 和 6.33 ± 2.67 ,季节变化不显著($P > 0.05$);从上游到下游,河水中 C/N 比呈现出与 N 含量相反的趋势,样点 S1、S2 和 S3 逐渐升高,其平均值分别为 3.60 ± 0.28 、 6.03 ± 0.69 和 7.71 ± 1.81 ,具有显著的空间变化趋势($P < 0.05$)。

2.1.2 土壤中 C、N 含量和 C/N 比的时空变化特征

在潮白河顺义段再生水补给河道沿岸,土壤中 C 含量的变化范围为 5.69—35.17 mg/g(图 3)。在 5、7、9 月份,土壤中 C 含量的平均值分别为 (25.42 ± 9.56) 、 (11.82 ± 5.11) 、 (18.01 ± 8.13) mg/g,5 月和 9 月时土壤中 C 含量高于 7 月,具有显著的季节性差异($P < 0.05$);从上游到下游,在样点 S1—S3 土壤中 C 含量逐渐减小,其平均值分别为 (24.99 ± 9.89) 、 (21.42 ± 5.17) 、 (8.84 ± 2.77) mg/g,具有显著的空间变化特征($P < 0.05$)。

土壤中 N 含量在 0.28—2.63 mg/g 之间,其平均值为 (1.28 ± 0.81) mg/g(图 3)。土壤中 N 含量在 5、7、9 月份的平均值分别为 (1.46 ± 1.05) 、 (0.89 ± 0.29) 、 (1.21 ± 0.62) mg/g,无显著季节性变化($P > 0.05$);但土壤中 N 含量从上游到下游逐渐降低,土壤 N 在样点 S1—S3 的含量分别为 (1.95 ± 0.61) 、 (1.36 ± 0.73) 、 (0.54 ± 0.24) mg/g,具有显著的空间变化趋势($P < 0.05$)。

土壤中 C/N 比在 8.77—25.39 之间,其平均值为 13.61 ± 4.86 (图 3)。从采样时期 5 月到 9 月份,土壤中 C/N 比的平均值略有升高,分别为 12.41 ± 1.93 、 13.16 ± 3.29 和 15.26 ± 6.65 ,无显著季节差异($P > 0.05$);土壤中 C/N 在样点 S2 具有最大平均值 18.41 ± 5.44 ,在样点 S1 和 S3 的平均值分别为 12.35 ± 1.63 和 10.07 ± 1.22 ,具有显著的空间差异($P < 0.05$)。

2.1.3 河水和土壤中 C、N 含量及 C/N 比之间的相关性

相关分析表明(表 1),河水中 N 含量与河水的 C/N 比之间极显著负相关,相关系数为 -0.929 ($P < 0.001$),与

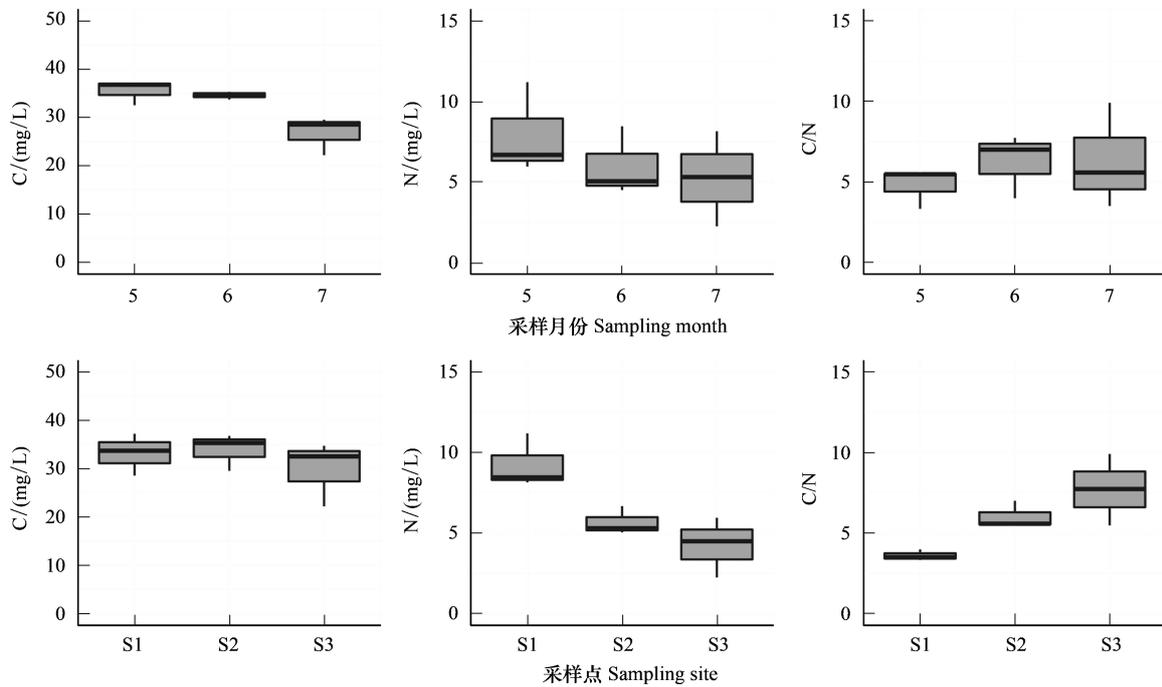


图2 潮白河顺义段河水中 C、N 含量和 C/N 比的时空变化

Fig.2 Temporal and spatial variations of riverine C and N contents and C/N ratio in Shunyi reaches of the Chaobai River

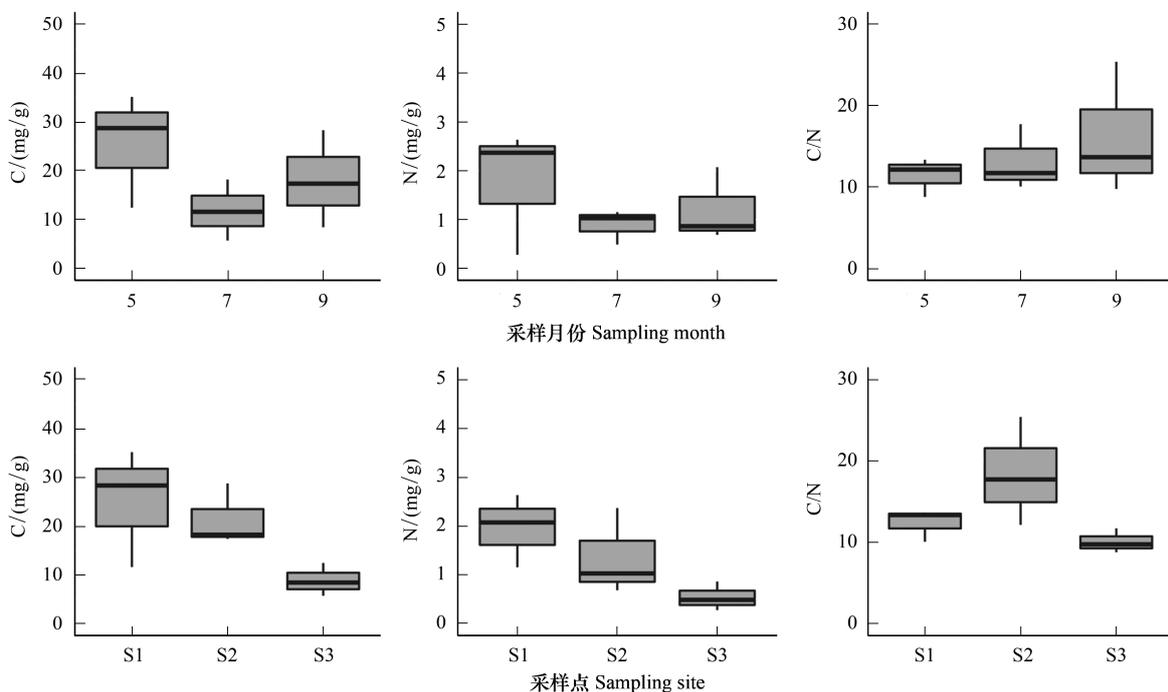


图3 潮白河顺义段土壤中 C、N 含量和 C/N 比的时空变化

Fig.3 Temporal and spatial variations of soil C and N contents and C/N ratio in Shunyi reaches of the Chaobai River

土壤中 C 含量之间显著正相关,相关系数为 0.675 ($P < 0.05$),与土壤中 N 含量之间显著正相关,相关系数为 0.704 ($P < 0.05$)。土壤中 C 含量与土壤中 N 含量之间也存在显著正相关,相关系数为 0.941 ($P < 0.001$)。

表 1 潮白河顺义段环境及芦苇中 C、N 含量及 C/N 比的相关性
Table 1 Correlations among C and N contents and C/N ratio of environment and *P. australis* in Shunyi reaches of the Chaobai River

	河水 C 含量 C in river water	河水 N 含量 N in river water	河水 C/N 比 C/N in river water	土壤 C 含量 C in soil	土壤 N 含量 N in soil	土壤 C/N 比 C/N in soil	根 C 含量 C in root	根 N 含量 N in root	根 C/N 比 C/N in root	茎 C 含量 C in stem	茎 N 含量 N in stem	茎 C/N 比 C/N in stem	叶 C 含量 C in leaf	叶 N 含量 N in leaf	叶 C/N 比 C/N in leaf	
河水 C 含量 C in river water	1															
河水 N 含量 N in river water	0.571	1														
河水 C/N 比 C/N in river water	-0.484	-0.929***	1													
土壤 C 含量 C in soil	0.343	0.675**	-0.589	1												
土壤 N 含量 N in soil	0.343	0.704**	-0.565	0.941***	1											
土壤 C/N 比 C/N in soil	0.000	-0.052	-0.092	0.281	-0.044	1										
根 C 含量 C in root	-0.780**	-0.195	0.135	-0.194	-0.239	0.017	1									
根 N 含量 N in root	-0.359	0.006	0.107	0.155	0.166	-0.218	0.697**	1								
根 C/N 比 C/N in root	-0.278	-0.108	-0.098	-0.266	-0.420	0.567	0.169	-0.550	1							
茎 C 含量 C in stem	-0.476	-0.588#	0.612	-0.436	-0.575	0.430	0.363	-0.025	0.513	1						
茎 N 含量 N in stem	0.135	0.185	-0.132	0.037	0.096	-0.407	0.069	0.519	-0.642*#	-0.575	1					
茎 C/N 比 C/N in stem	-0.160	-0.115	0.008	-0.242	-0.320	0.414	0.047	-0.586	0.875***	0.593	-0.894***	1				
叶 C 含量 C in leaf	-0.371	0.596#	-0.306	0.352	0.317	0.065	0.489	0.468	-0.111	-0.202	0.071	-0.208	1			
叶 N 含量 N in leaf	-0.368	0.406	0.185	0.179	0.647#	-0.110	0.348	0.671**	-0.541	-0.319	0.702**	-0.784**	0.406	1		
叶 C/N 比 C/N in leaf	0.098	0.604	-0.367	-0.102	0.712#	-0.034	0.019	-0.388	0.505	0.162	-0.667**	0.732**	0.110	-0.824***	1	

#表示通过显著性检验的相关系数; *表示显著性水平<0.05, **表示显著性水平<0.01

土壤和河水中 C、N 含量及 C/N 比的回归分析表明(图 4),土壤中 C 含量与 N 含量之间具有极显著的线性回归关系($P < 0.001$),其决定系数 R^2 为 0.886。河水中 N 含量与 C/N 比之间具有十分显著的线性回归关系($P < 0.01$),其决定系数 R^2 为 0.862。河水 N 含量与土壤 N 含量之间存在显著线性回归关系($P < 0.05$),其决定系数 R^2 为 0.496。

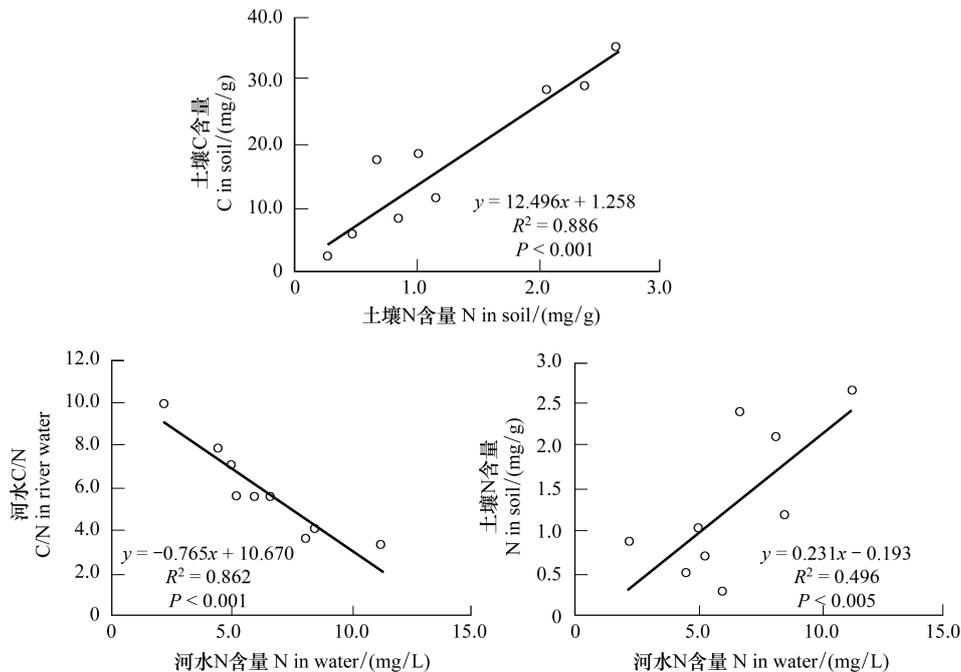


图 4 潮白河顺义段河水和土壤中 C、N 含量及 C/N 比的相关性

Fig.4 Correlations among C and N contents and C/N ratios of river water and soil in Shunyi reaches of the Chaobai River

2.2 芦苇根、茎和叶中 C、N 含量和 C/N 比的时空变化特征

在潮白河顺义段再生水补给的河道内,芦苇根中 C、N 含量及 C/N 比的平均值分别为 (170.84 ± 63.56) mg/g、 (8.20 ± 3.96) mg/g 和 (23.89 ± 12.84) (图 5)。芦苇根中 C 平均含量在 5、7、9 月份分别为 (127.06 ± 55.60) 、 (157.90 ± 33.69) 、 (390.52 ± 35.27) mg/g,其平均值随着不同生长时期逐渐增加,呈现显著的季节性差异($P < 0.05$);芦苇根中 C 含量在各采样点 S1、S2 和 S3 的平均值分别为 (191.87 ± 40.94) 、 (148.05 ± 62.12) 、 (182.61 ± 59.84) mg/g,无显著空间差异($P > 0.05$)。芦苇根中 N 含量在 9 月份有最大平均值 9.55 ± 4.35 mg/g,而 5 和 7 月份的平均 N 含量接近,分别为 (7.67 ± 3.06) 、 (7.36 ± 3.25) mg/g,但季节变化不显著($P > 0.05$);从上游到下游,各采样点 S1、S2 和 S3 芦苇根中 N 含量分别 (9.48 ± 3.52) 、 (6.29 ± 3.99) 、 (8.81 ± 2.78) mg/g,在空间变化上没有显著差异($P > 0.05$)。芦苇根的 C/N 比随季节变化显著增大($P < 0.05$),其平均值分别为 16.33 ± 3.14 (5 月)、 24.57 ± 9.66 (7 月)和 30.77 ± 15.22 (9 月)。芦苇根的 C/N 比空间变化不显著($P > 0.05$),其平均值从上游到下游分别为 23.66 ± 9.33 (S1)、 27.38 ± 17.61 (S2)和 20.62 ± 0.33 (S3)。

芦苇茎中 C、N 含量及 C/N 比的平均值分别为 (369.02 ± 39.12) 、 (14.11 ± 6.22) mg/g 和 32.65 ± 18.48 (图 5)。芦苇茎中 C 含量在 5、7、9 月份分别为 (329.90 ± 14.97) 、 (375.42 ± 12.28) 、 (390.61 ± 37.44) mg/g,其平均值随着不同生长时期逐渐增加,呈现显著的季节性差异($P < 0.05$);芦苇茎中 C 含量空间变化不显著($P > 0.05$),其平均值在各采样点分别为 (352.45 ± 13.96) (S1)、 (372.65 ± 44.91) (S2)和 (381.99 ± 37.59) mg/g(S3)。芦苇茎中 N 含量在 5 月份有最大平均值 (19.70 ± 5.21) mg/g,在 7 月份明显下降,其平均值为 (10.60 ± 3.64) mg/g,9 月份其平均含量有所增加,其值为 (12.02 ± 3.89) mg/g,具有显著的季节变化特征($P < 0.05$);从上游到下游,芦苇茎中 N 平均含量分别为 (13.84 ± 5.88) (S1)、 (11.57 ± 3.40) (S2)和 (16.90 ± 6.56) mg/g(S3),无显著

的空间变化趋势($P>0.05$)。芦苇茎的 C/N 比在 5 月份有最小平均值 17.90 ± 4.37 , 7 月和 9 月份芦苇茎的 C/N 比接近, 分别为 33.45 ± 16.21 和 38.06 ± 17.17 , 呈现显著的季节变化趋势($P<0.05$); 芦苇茎中 C/N 比在各个采样点 (S1—S3) 分别为 34.37 ± 21.29 、 37.16 ± 17.28 和 28.43 ± 9.86 , 无显著空间变化($P>0.05$)。

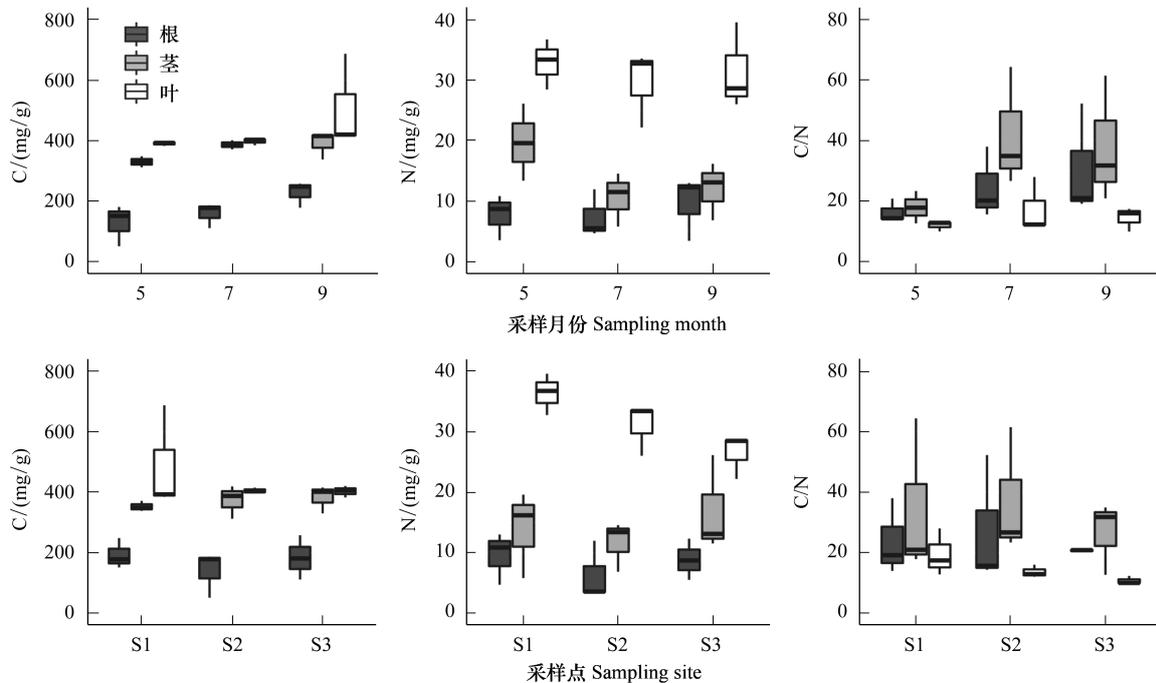


图5 潮白河顺义段芦苇中 C、N 含量和 C/N 比的时空变化

Fig.5 Temporal and spatial variations of C and N contents and C/N ratio of *P. australis* in Shunyi reaches of the Chaobai River

芦苇叶中 C、N 含量及 C/N 比的平均值分别为 (431.80 ± 96.70) 、 (30.73 ± 8.66) 、 (15.21 ± 5.60) (图 5)。芦苇叶中 C 含量在 9 月份有最大平均值 (507.50 ± 5.83) mg/g, 5 月和 7 月平均含量接近, 分别为 (390.52 ± 8.94) mg/g 和 (397.38 ± 120.30) mg/g, 具有显著的季节变化特征($P<0.05$); 从上游到下游, 芦苇叶中 C 含量平均值分别为 (468.30 ± 140.89) (S1)、 (404.63 ± 7.64) (S2)、 (402.47 ± 15.43) mg/g (S3), 无显著空间差异($P>0.05$)。芦苇叶中 N 含量在 5 月、7 月和 9 月份分别为 (32.89 ± 3.20) 、 (29.52 ± 8.12) 、 (31.43 ± 6.18) mg/g, 无显著季节差异($P>0.05$); 但在空间上, 芦苇叶中 N 含量逐渐降低, 在样点 S1、S2 和 S3 的平均值分别为 (36.37 ± 10.71) 、 (31.02 ± 3.52) 、 (26.44 ± 7.72) mg/g, 有显著的空间差异($P<0.05$)。芦苇叶的 C/N 比的平均值在 5 月、7 月和 9 月份分别为 12.85 ± 1.18 、 17.39 ± 6.57 、 14.39 ± 2.79 , 无显著季节性差异($P>0.05$); 从上游到下游, 芦苇叶的 C/N 比平均值逐渐降低, 分别为 (19.36 ± 6.35) (S1)、 (13.59 ± 1.89) (S2)、 (10.68 ± 3.71) (S3), 具有显著的空间变化特征($P<0.05$)。

2.3 芦苇根、茎和叶中 C、N 含量及 C/N 比的分配特征和相关性

在生长季节, 芦苇根、茎和叶中的 C、N 含量分配及 C/N 比大小存在差异(图 5)。芦苇叶中 C 含量最高, 茎中 C 含量其次, 而根中 C 含量极显著低于茎和叶($P<0.001$)。芦苇各器官中 N 含量也表现为叶>茎>根, 具有极显著差异($P<0.001$)。芦苇各器官按 C/N 比高低排序为茎>根>叶, 存在显著差异($P<0.05$)。

芦苇各器官之间的 C、N 计量特征表现出一定的相关性(表 1)。茎和叶、根和叶在 N 含量上都显著正相关, Pearson 相关系数分别为 0.702 和 0.671($P<0.05$)。芦苇各器官本身之间的 C 含量相关性不显著, 但通过 C 含量的调节, 根和茎、茎和叶之间的 C/N 比都显著正相关, Pearson 相关系数分别为 0.875($P<0.01$)和 0.732($P<0.05$)。

2.4 芦苇各器官变量与环境变量之间的关系

根据芦苇各器官变量与环境变量之间的相关分析可知(表1),芦苇根中C含量与河水中C含量之间显著负相关($P<0.05$)。芦苇茎中C含量与河水中N含量呈负相关关系($P<0.05$)。芦苇叶中C含量和C/N比均与河水中N含量显著正相关($P<0.05$);芦苇叶中N含量和C/N比均与土壤中N含量显著正相关($P<0.05$)。

表2 潮白河顺义段芦苇叶中C、N含量及C/N比与环境C、N含量之间的多元逐步回归

Table 2 Multiple stepwise regression between C and N contents and C/N ratio in *P. australis* leaf and C and N contents in the environment in Shunyi reaches of the Chaobai River

因变量 dependent variable	自变量 independent variable	P	逐步回归方程 Stepwise regression equation	调整 R^2 Adj. R^2	P
芦苇叶 C 含量 C content in leaf	x_1	0.119	$y_1 = -0.820x_1 + 0.425x_3 + 4.023e^{-12}$	0.541	0.165
芦苇叶 N 含量 N content in leaf	x_1	0.047	$y_2 = -5.623x_1 + 4.601x_2 - 7.132x_3 + 0.252x_4 + 0.934e^{-10}$	0.710	0.039
	x_2	0.028			
	x_3	0.258			
	x_4	0.026			
芦苇叶 C/N 比 C/N in leaf	x_1	0.027	$y_3 = 0.309x_1 + 1.365x_2 + 3.010x_4 + 7.003e^{-10}$	0.826	0.014
	x_2	0.008			
	x_4	0.038			

x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 分别表示土壤C含量、土壤N含量、河水C含量、河水N含量; y_1 、 y_2 、 y_3 分别表示芦苇叶的C含量、N含量和C/N比

以河水和土壤中的C、N含量为自变量,分别以芦苇各器官中C、N含量和C/N比为因变量,用多元逐步回归法筛选出相对重要的环境变量建立回归方程。其中,以芦苇叶N含量和芦苇叶C/N比为因变量的回归方程通过了显著性检验(表2)。由回归方程可知,土壤和河水中的C、N含量能够解释芦苇叶中71.0%的变量($P<0.05$);土壤中C、N含量和河水中N含量能够解释芦苇叶C/N比82.6%的变量($P<0.05$)。

3 讨论

3.1 环境对芦苇C、N计量特征时空变化的影响

研究区内河水和土壤的C、N计量特征在季节变化上较为稳定,除土壤中C含量外,其他环境变量均无显著季节差异(图2和图3)。因此,芦苇中C、N含量的季节性差异受环境C、N水平的影响较小。5—9月份是芦苇的生长季节,芦苇各器官内C、N含量的季节变化主要与芦苇在生长过程中的生理作用有关。芦苇根、茎和叶中C含量随季节推移均持续上升(图5),体现出芦苇各器官在生长季节内干物质的积累^[2]。所有器官中N含量的最小值都出现在7月,且叶片中N含量降低最为显著(图5)。这与芦苇在生长周期对N的利用率变化有关^[1-2]。7月是芦苇生长最旺盛的阶段,对N的利用率相对较高,因而器官内留存的N相应减少,而叶片作为主要的光合器官,对N的消耗量也就最多。

河水中N含量、河水的C/N、土壤中C含量、土壤中N含量和土壤的C/N比都具有显著的空间变化(图2和图3)。本研究区河水中N含量沿程降低主要与微生物除氮过程有关^[21-23]。河水的C/N比在一定范围内的提高可以促进反硝化反应,从而降低水体中N含量^[25],使得河水的C/N比与河水中N含量具有极显著的线性关系。河水中N含量和土壤中N含量之间具有显著的线性关系,说明河水与土壤之间存在着紧密的N元素交换。因此,从上游到下游,土壤中N含量随着河水中N含量的降低而相应降低(图4)。土壤中C含量与N含量之间具有十分显著的线性关系,这在全球尺度上存在着相同的规律^[26]。土壤中N含量受到河水中N含量的影响沿程降低时,土壤中C含量与C/N也随之变化。在芦苇各器官中,根和茎的C、N计量特征均无显著的空间差异,只有芦苇叶中N含量和C/N比表现出显著的空间变化特征(图5)。这表明,相较于根和

茎,环境中营养元素的变化对芦苇叶片的影响更明显。研究发现,植物叶中 N 含量能反映出环境中 N 含量的高低,环境中 N 含量越高,植物叶片中 N 含量也越高^[27-28]。因此,从上游到下游,当河水和土壤中 N 含量逐渐降低时,芦苇叶片中 N 含量相应减小。可见,芦苇叶中 N 含量是再生水环境中 N 含量变化的良好的响应指标^[27-28]。C/N 比对植物生长速率有指示作用,C/N 比越小,生长速率越高^[1]。芦苇叶的 C/N 比沿程降低(图 5),表明上游到下游,芦苇的生长速率逐渐增大。从芦苇叶 C/N 比的回归方程来看(表 2),土壤中 N 含量和河水中 N 含量的增加会引起芦苇叶中 C/N 比的增大,即芦苇生长速率的减小。这反映出芦苇对高 N 环境的适应情况。一般情况下,植物的光合能力强弱与叶的 N 含量之间有正相关关系^[29]。但当 N 含量超过某个临界值时,叶片中过高的 N 含量会引起 N 在 RuBP 酶和类囊体膜之间的配比失衡和不同营养元素之间的失衡^[1,30],从而抑制植物的生长。本研究中,在环境 N 含量最高的样点 S1,芦苇叶中 N 含量可能超过了最适 N 含量,因此生长速率最小;而在环境 N 含量最低的样点 S3,芦苇叶中 N 含量更适宜芦苇生长,反而有最大的生长速率^[20]。

3.2 环境对芦苇各器官中 C、N 含量分配的影响

在河水-土壤-芦苇组成的河流生态系统中,土壤中 N 含量为芦苇提供了最直接的 N 源。在高 N 再生水的长期水淹下,本研究区内,土壤中 N 含量的平均值明显高于闽江河口^[31]、胶州湾^[32]、黄河三角洲^[33]等芦苇生长湿地土壤中 N 含量的平均值。除了土壤中 N 含量的高低,土壤的 C/N 比也是影响土壤供 N 能力的重要因素。土壤中的有机氮要矿化为无机氮才能被植物吸收利用,而土壤的 C/N 比是影响土壤氮素矿化能力的重要非生物因素^[34]。本研究中,土壤的 C/N 比平均值为 13.61。在 C/N 比低于 15 时,矿化后的有效氮从一开始就超过微生物同化量,使植物可以获得氮素的供应^[34]。可见,河道沿岸土壤受到再生水的长期影响,N 含量高且氮素矿化能力强,表现出较强的供 N 能力。

河道内较强的供 N 能力使得芦苇叶片中 N 含量较高。植物对 N 的吸收一般是奢侈吸收^[1],在超过本身生长所需的量后,还能继续吸收环境中的 N。本研究中,芦苇叶中 N 含量平均值为 30.73 mg/g,远高于全国 C₃ 草本植物(21.2 mg/g)^[35]、全国湿地植物(16.07 mg/g)^[9]和北京及周边地区植物(26.1 mg/g)^[36]叶的 N 含量平均值。这从挺水植物本身的角度出发,证明了其对富营养化水体中的 N 具有良好的净化能力^[16]。植物光合器官内会积累相对更多的 N 是自然界中普遍的现象^[10,29]。本研究中,芦苇各器官 N 含量的排序为叶>茎>根,叶作为主要的光和器官需要最多的 N。禾本科植物幼嫩的茎在生长期内也可以进行光合作用^[10],因此根吸收的 N 主要用于供给茎和叶而存留的含量最低。芦苇根、茎和叶的 N 含量之间具有显著相关性,正体现出了芦苇各器官在吸收环境中 N 时的协作性。

环境较强的供 N 能力还影响了芦苇中 C 含量在各器官之间的分配。植物 C 含量在各器官之间的分配模式并不像 N 含量一样存在广泛的规律,而更多受到环境的影响^[37]。本研究中,芦苇各器官中 C 含量的排序为叶>茎>根(图 5),这与黄河三角洲的淡水芦苇情况相似^[37]。当土壤中可被利用的 N 含量较高时,根不需要扩大生长范围以寻求 N 源,C 在根中的分配就会较少。尤其是在根系附近 N 有效性高的情况下,芦苇地下根用于生长的 C 会低于地上茎、叶部分^[38]。因此,在高 N 再生水补水的河道里,芦苇地上部分(茎和叶)的 C 含量会高于地下的根。

4 结论

本研究分析了再生水补水河道内芦苇根、茎和叶各器官及土壤和河水中 C、N 含量及 C/N 比的时空变化特征,并探讨了芦苇各器官变量与土壤和河水中各变量的关系,在一定程度上揭示了芦苇对再生水高 N 环境的响应。主要结论如下:

(1) 研究区内,河水中 C、N 含量和 C/N 比分别在 22.20—37.25、2.24—11.20、3.33—9.92 之间。土壤中 C、N 含量和 C/N 的范围为 5.69—35.17、0.28—2.63、8.77—25.39。河水和土壤的 C、N 计量特征在季节变化上较为稳定,但河水中 N 含量、C/N 及土壤中 C、N 含量和 C/N 比都表现出显著的空间变化特征($P < 0.05$)。

(2)在整个生长时期,芦苇根、茎和叶中 C 含量的平均值分别为 (170.84 ± 63.56) 、 (369.02 ± 39.12) 、 (431.80 ± 96.70) mg/g; N 含量的平均值分别为 (8.20 ± 3.96) 、 (14.11 ± 6.22) 、 (30.73 ± 8.66) mg/g; C/N 比的平均值分别为 23.89 ± 12.84 、 32.65 ± 18.48 和 15.21 ± 5.60 。芦苇各器官中 C、N 计量特征都具有显著的季节性差异($P < 0.05$),但只有芦苇叶中 N 含量和 C/N 比具有显著空间变化($P < 0.05$)。

(3)芦苇 C、N 计量特征的季节变化与其在生长季节的生理作用有关,芦苇对环境的响应主要体现在空间变化上。相较于根和茎,芦苇叶对环境的响应最为显著。从上游到下游,随着河水和土壤中 N 含量的降低,芦苇叶中 N 含量和 C/N 比沿程减小。

(4)芦苇对环境的响应还体现在各器官间 C、N 含量的分配模式上。在供 N 能力强的环境下,芦苇叶中积累了大量的 N,而 C 在茎和叶中的分配显著高于根($P < 0.05$)。这种 C、N 含量的分配模式体现出了芦苇在再生水河道内的生长策略以及对高氮环境的适应。

参考文献 (References):

- [1] Ågren G I. The C: N: P stoichiometry of autotrophs-Theory and observations. *Ecology Letters*, 2004, 7(3): 185-191.
- [2] Ågren G I. Stoichiometry and nutrition of plant growth in natural communities. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2008, 39(1): 153-170.
- [3] 王晶苑, 王绍强, 李纫兰, 闫俊华, 沙丽清, 韩士杰. 中国四种森林类型主要优势植物的 C: N: P 化学计量学特征. *植物生态学报*, 2011, 35(6): 587-595.
- [4] 屈凡柱, 孟灵, 付战勇, 孙景宽, 刘京涛, 宋爱云. 不同生境条件下滨海芦苇湿地 C、N、P 化学计量特征. *生态学报*, 2018, 38(5): 1731-1738.
- [5] 刘冬, 张剑, 包雅兰, 赵海燕, 陈涛. 水分对敦煌阳关湿地芦苇叶片与土壤 C、N、P 生态化学计量特征的影响. *生态学报*, 2020, 40(11): 3804-3812.
- [6] 赵志江, 朱利, 李伟, 张勇, 闫飞, 董雪, 崔丽娟. 汉石桥湿地芦苇生长季末地上部分各器官中碳、氮和磷的生态化学计量特征及其对固持能力. *湿地科学*, 2019, 17(3): 311-317.
- [7] 王利平, 张剑, 耿亚军, 葛少青, 孙文, 范双萍. 渥洼池湿地芦苇叶片碳、氮、磷生态化学计量学特征及其影响因素. *湿地科学*, 2018, 16(3): 417-423.
- [8] 白军红, 王庆改, 高海峰, 肖蓉, 黄来斌. 向海沼泽湿地芦苇中氮含量动态变化和循环特征. *湿地科学*, 2010, 8(2): 164-168.
- [9] 胡伟芳, 章文龙, 张林海, 陈晓艳, 林伟, 曾从盛, 全川. 中国主要湿地植被氮和磷生态化学计量学特征. *植物生态学报*, 2014, 38(10): 1041-1052.
- [10] 赵美霞, 李德志, 潘宇, 吕媛媛, 高锦瑾, 程立丽. 崇明东滩湿地芦苇和互花米草 N、P 利用策略的生态化学计量学分析. *广西植物*, 2012, 32(6): 715-722.
- [11] 蒋利玲, 何诗, 吴丽凤, 颜远烽, 翁少峰, 刘静, 王维奇, 曾从盛. 闽江河口湿地 3 种植物化学计量内稳性特征. *湿地科学*, 2014, 12(3): 293-298.
- [12] 《城市污水再生利用系列标准实施指南》编写组. 城市污水再生利用系列标准实施指南. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [13] Chen R, Ao D, Ji J Y, Wang X C, Li Y Y, Huang Y, Xue T, Guo H B, Wang N, Zhang L. Insight into the risk of replenishing urban landscape ponds with reclaimed wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, 324(Part B): 573-582.
- [14] Yi L L, Jiao W T, Chen X N, Chen W P. An overview of reclaimed water reuse in China. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, 23(10): 1585-1593.
- [15] Fuchs V J, Gierke J S, Mihelcic J R. Laboratory investigation of ammonium and nitrate removal in vertical-flow regimes in planted and unplanted wetland columns. *Journal of Environmental Engineering*, 2012, 138(12): 1227-1230.
- [16] Idris S M, Jones P L, Salzman S A, Croatto G, Allinson G. Evaluation of the giant reed (*Arundo donax*) in horizontal subsurface flow wetlands for the treatment of recirculating aquaculture system effluent. *Environmental Science and Pollution Research*, 2012, 19(4): 1159-1170.
- [17] Di Nasso N N, Roncucci N, Bonari E. Seasonal dynamics of aboveground and belowground biomass and nutrient accumulation and remobilization in Giant Reed (*Arundo donax* L.): a three-year study on marginal land. *BioEnergy Research*, 2013, 6(2): 725-736.
- [18] 仝欣楠, 王欣泽, 何小娟, 孔海南. 人工芦苇湿地氨氮污染物去除及氨氧化菌群多样性分析. *环境科学研究*, 2014, 27(2): 218-224.
- [19] 刘克, 赵文吉, 郭道宇, 王翊虹, 孙永华, 苗茜, 王京萌. 基于湿地植物光谱的水体总氮估测. *生态学报*, 2012, 32(8): 2410-2419.
- [20] 宫兆宁, 范云豹, 刘辉, 赵文吉. 不同水氮梯度下典型挺水植物叶绿素荧光的响应特性. *植物学报*, 2016, 51(5): 631-638.
- [21] Yu Y L, Song X F, Zhang Y H, Zheng F D, Liu L C. Water quality of reclaimed water from treated urban wastewater in chaobai river basin, north

- China. *Chinese Journal of Population Resources and Environment*, 2014, 12(2): 103-109.
- [22] Yang L, He J T, Liu Y M, Wang J, Jiang L, Wang G C. Characteristics of change in water quality along reclaimed water intake area of the Chaobai River in Beijing, China. *Journal of Environmental Sciences*, 2016, 50(12): 93-102.
- [23] 顾永钢, 吴晓辉, 李兆欣, 赵立新, 刘操. 潮白河再生水受水区水体水质沿程变化规律研究. *北京水务*, 2017, (1): 29-35.
- [24] 汤银才. *R 语言与统计分析*. 北京: 高等教育出版社, 2018: 200-247.
- [25] Mohan T V K, Nanchaiah Y V, Venugopalan V P, Sai P M S. Effect of C/N ratio on denitrification of high-strength nitrate wastewater in anoxic granular sludge sequencing batch reactors. *Ecological Engineering*, 2016, 91: 441-448.
- [26] Cleveland C C, Liptzin D. C: N: P stoichiometry in soil: is there a "Redfield ratio" for the microbial biomass? *Biogeochemistry*, 2007, 85(3): 235-252.
- [27] 刘克, 唐新明, 赵文吉, 雷兵, 郭道宇, 宫兆宁. 水体总氮浓度与湿地芦苇叶片高光谱特征关系研究. *地理与地理信息科学*, 2015, 31(2): 24-28.
- [28] Siciliano D, Wasson K, Potts D C, Olsen R C. Evaluating hyperspectral imaging of wetland vegetation as a tool for detecting estuarine nutrient enrichment. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(11): 4020-4033.
- [29] Evans J R. Photosynthesis and nitrogen relationships in leaves of C_3 plants. *Oecologia*, 1989, 78(1): 9-19.
- [30] Elser J J, Bracken M E S, Cleland E E, Gruner D S, Harpole W S, Hillebrand H, Ngai J T, Seabloom E W, Shurin J B, Smith J E. Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems. *Ecology Letters*, 2007, 10(12): 1135-1142.
- [31] 王维奇, 王纯, 曾从盛, 仝川. 闽江河口不同河段芦苇湿地土壤碳氮磷生态化学计量学特征. *生态学报*, 2012, 32(13): 4087-4093.
- [32] 刘文龙, 谢文霞, 赵全升, 朱鲲鹏, 于蓉蓉. 胶州湾芦苇滩涂土壤碳、氮和磷分布及生态化学计量学特征. *湿地科学*, 2014, 12(3): 362-368.
- [33] 夏志坚, 白军红, 贾佳, 温晓君, 高照琴, 张光亮. 黄河三角洲芦苇盐沼土壤碳、氮含量和储量的垂直分布特征. *湿地科学*, 2015, 13(6): 702-707.
- [34] 王常慧, 邢雪荣, 韩兴国. 草地生态系统中土壤氮素矿化影响因素的研究进展. *应用生态学报*, 2004, 15(11): 2184-2188.
- [35] Han W X, Fang J Y, Guo D L, Zhang Y. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China. *New Phytologist*, 2005, 168(2): 377-385.
- [36] 韩文轩, 吴漪, 汤璐瑛, 陈雅涵, 李利平, 贺金生, 方精云. 北京及周边地区植物叶的碳氮磷元素计量特征. *北京大学学报: 自然科学版*, 2009, 45(5): 855-860.
- [37] 刘兴华. 黄河三角洲湿地植物与土壤 C、N、P 生态化学计量特征研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2013.
- [38] 赵平, 孙谷畴, 彭少麟. 植物氮素营养的生理生态学研究. *生态科学*, 1998, 17(2): 37-42.