

互花米草入侵下湿地土壤碳氮磷变化及化学计量学特征

金宝石^{1,2} 闫鸿远² 王维奇¹ 曾从盛^{1*}

(¹福建师范大学地理科学学院/湿润亚热带生态地理过程教育部重点实验室/亚热带湿地研究中心, 福州 350007; ²安庆师范大学资源环境学院, 安徽安庆 246133)

摘要 为阐明外来物种入侵对生态系统的改变,对闽江河口区本土植物短叶茳芏和不同入侵年限的互花米草湿地土壤总碳(TC)、总氮(TN)、总磷(TP)含量进行了测定与分析.结果表明:互花米草入侵后0~50 cm深度各层土壤TC、TN和TP含量均有不同程度的增加,其中TC、TN的变化比较一致,而TP的变化滞后;TC的增加引起土壤C/N持续增加,而TP是调节互花米草入侵过程中湿地土壤C/P和N/P的关键因子,C/P和N/P的变化基本一致.土壤TC、TN、TP的变化受到土壤盐度、容重、含水量和黏粒组成的影响,而它们之间计量比主要受土壤盐度、粒径组成的影响;C/N和C/P对互花米草湿地的土壤固碳效应具有良好的指示作用.互花米草入侵引起生物量和湿地生境改变,导致土壤碳氮磷含量及其生态化学计量比发生显著变化,且随入侵时间延长表现出不同的变化特征.

关键词 短叶茳芏; 营养元素; 生态化学计量学; 入侵年限

Changes of soil carbon, nitrogen and phosphorus and stoichiometry characteristics in marsh invaded by *Spartina alterniflora*. JIN Bao-shi^{1,2}, YAN Hong-yuan², WANG Wei-qi¹, ZENG Cong-sheng^{1*} (¹*School of Geographical Sciences/Ministry of Education Key Laboratory of Humid Sub-tropical Eco-geographical Process/Research Centre of Wetlands in Subtropical Region, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China*; ²*School of Resources and Environment Science, Anqing Normal University, Anqing 246133, Anhui, China*).

Abstract: To clarify the effect of invasive alien plants on ecosystem functions, soil total carbon (TC), total carbon (TN), and total phosphorus (TP) contents were studied in the exotic invasive plant *Spartina alterniflora* marsh with different durations and the native species *Cyperus malaccensis* marsh in the Minjiang River estuary. The results showed that there were different variations of TC, TN and TP at 0–50 cm soil layer in the *C. malaccensis* marsh invaded by *S. alterniflora*, but the changes of TC and TN were similar and the change of the TP lagged behind them. Soil C/N increased continually with the increase of TC. Soil TP was a key factor affecting soil C/P and N/P during the *S. alterniflora* invasion, and the change of C/P and N/P followed a similar trend. The changes of TC, TN and TP were influenced by abiotic factors such as soil salinity, bulk density, soil water content and clay composition. C, N and P stoichiometric ratios were influenced mainly by soil salinity and grain composition. C/N and C/P were the good indicators for soil carbon enrichment ability in *S. alterniflora* marsh. *S. alterniflora* invasion induced the change of biomass and marsh habitats. Soil carbon, nitrogen, phosphorus contents, and their ecological stoichiometric ratios changed significantly in the *C. malaccensis* marsh invaded by *S. alterniflora* and showed different change characteristics with different invasion duration.

Key words: *Cyperus malaccensis*; nutrient element; ecological stoichiometry; invasion duration.

本文由国家自然科学基金项目(31000262)、国家基础科学人才培养基金项目(J1210067)和福建师范大学校创新团队项目(IRTL1205)资助
This work was supported by the National Science Foundation of China (31000262), the National Basic Science Fund for Fostering Talents (J1210067), and the Program for Innovative Research Team at Fujian Normal University (IRTL1205).

2016-08-23 Received, 2017-02-17 Accepted.

*通讯作者 Corresponding author. E-mail: czeng@fjnu.edu.cn

互花米草 (*Spartina alterniflora*) 是我国沿海地区的主要入侵植物,广泛分布于北到天津、南到北海的大部分潮汐湿地,面积达到 34137 hm²[1].外来入侵植物可改变被侵入生态系统的结构、功能和过程,过去 30 多年互花米草的快速扩张对河口和滨海湿地生态系统功能、生物多样性以及生物地球化学循环产生重要影响,引起了国内外学者的广泛关注[2-4].碳(C)、氮(N)、磷(P)是重要的生源要素,无论是作为结构性元素还是养分元素,在探究生物系统物质和能量循环以及多元素平衡过程中都发挥着重要作用,并对该过程具有良好的指示作用[5].土壤是湿地生态系统的重要组成部分,是营养元素的主要截留者和储存库,对营养元素的吸收、储存和转化等过程均有重要影响,进而影响到生态系统的结构、过程与功能[6].目前,关于互花米草入侵对湿地土壤影响关注较多的是碳氮循环[7-8],而对磷元素研究比较薄弱[9].同时,土壤碳氮磷生态化学计量比是生态系统过程及其功能的重要特征[10-11],能够反映土壤元素含量平衡与有效性,对于预测有机质分解速率以及养分的限制与平衡等具有重要作用.开展互花米草入侵下湿地土壤碳氮磷变化及其计量学特征研究,对完善外来入侵物种下湿地生物地球化学循环和生态化学计量学理论具有重要意义.

闽江河口湿地地处中亚热带和南亚热带过渡区,是我国重要的河口湿地之一.短叶茳茳 (*Cyperus malaccensis*) 是闽江河口鳊鱼滩湿地的主要土著种,2002 年开始遭受互花米草的迅速入侵[12],并占据从低潮滩到高潮滩的各种生境,影响着闽江河口湿地的生物多样性和生态系统功能.目前,作者已就其入侵对生态过程的影响进行了研究[13-14],并结合生态化学计量学原理,探讨了互花米草对短叶茳茳的入侵机制[12]和两者在枯落物分解过程中的分解速率、养分、能量动态[15],然而,关于闽江口互花米草入侵时间序列的研究比较薄弱.为此,本文选取了本土植物短叶茳茳和不同入侵年限的互花米草湿地土壤,研究其 C、N、P 含量及其生态化学计量学特征的时空变化规律、生态化学计量学特征的趋同性及其与碳固定的关系,为有效评估湿地植物入侵对生态系统结构和功能的影响提供科学依据.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于闽江河口区面积最大的鳊鱼滩湿地 (26°0'36"—26°3'42" N, 119°34'12"—119°40'40" E,

图 1).该湿地处于南亚热带与中亚热带的过渡带,属典型的季风气候区,年均温 19.3 °C,年降水量 1380 mm[16].区内为暖热湿润的气候,加上临江濒海,水域宽阔,使得湿地水草茂盛,具有较高的生物多样性.2002 年开始发现入侵物种互花米草群落[12],此后迅速蔓延,并与短叶茳茳、蔗草 (*Scirpus triquetter*) 和芦苇 (*Phragmites australis*) 等本土植物产生竞争,2010 年鳊鱼滩湿地互花米草面积已达 306.9 hm²[13],分布在平行于海岸线的潮滩边缘,成为主要的植物群落之一,构成鳊鱼滩湿地新的植被演替序列,影响闽江河口湿地的生物多样性和生态系统功能.

1.2 试验设计

分别对 2006 年航空影像、2010 年 SPOT5 和 2014 年 Landsat 8 卫星影像进行图像解译提取 3 个年份的互花米草分布图,然后利用 GIS 空间分析判别其生长年限.鉴于鳊鱼滩湿地的互花米草入侵始于 2002 年,因此将其分为 0~4 年 (SA₁)、4~8 年 (SA₂) 和 8~12 年 (SA₃) 3 个不同的入侵时间序列.在此基础上,于 2014 年 11 月携带 GPS 在鳊鱼滩湿地西北侧选取互花米草长势一致的区域,对 3 个不同入侵年限的互花米草湿地和本土植物短叶茳茳湿地 (CM) 分别布设样地 (图 1).4 个样地基本与海岸线平行,从而保证水文条件一致,并根据研究区已有的植被类型分布图确定互花米草样地在入侵前的优势物种为短叶茳茳.每个样地随机设置 3 个取样点 (样点间距约 20 m),采用长 80 cm、直径 10 cm 的不锈钢取土器钻取 0~50 cm 的土壤柱状样品,并将其等间距分割为 5 个土层,土样装入自封袋并带回实

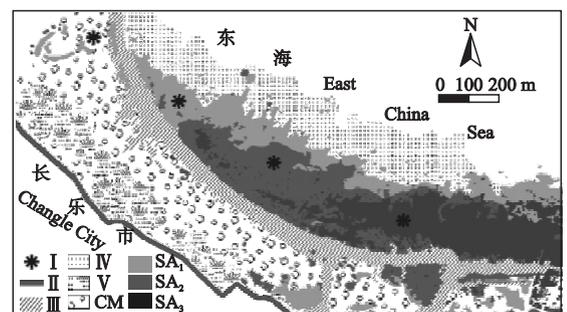


图 1 采样区与采样点位置

Fig.1 Study area and sampling sites.

CM: 短叶茳茳湿地 *Cyperus malaccensis* marsh; SA₁: 入侵 0~4 年互花米草湿地 *Spartina alterniflora* marsh for 0~4 years; SA₂: 入侵 4~8 年互花米草湿地 *S. alterniflora* marsh for 4~8 years; SA₃: 入侵 8~12 年互花米草湿地 *S. alterniflora* marsh for 8~12 years. 下同 The same below. I: 采样点 Sampling site; II: 大坝 Dam; III: 潮沟 Tidal creek; IV: 蔗草 *Scirpus triquetter*; V: 芦苇 *Phragmites australis*.

实验室. 土壤样品放置于阴凉通风处自然晾干, 除去植物根系, 分别过 2 和 0.149 mm 网筛待测.

1.3 测定项目与方法

pH 值采用奥立龙 868 型酸度计测定, 水土比 2.5 : 1; 用 2265FS 便携式电导计 (Spectrum Technologies Inc, 美国) 原位测定土壤电导率, 以此表征土壤盐度; 土壤容重用环刀法测定, 含水量采用烘干法测定; 土壤粒度采用 Master Sizer-2000 激光衍射粒度分析仪 (Malvern, 英国) 测定, 粒度分级采用国际制分类, 分别为黏粒 (< 2 μm)、粉粒 (2~20 μm) 和砂粒 (>20 μm). 土壤总碳 (TC) 和总氮 (TN) 使用碳氮元素分析仪 (Vario EL CN, 德国) 测定, 总磷 (TP) 经硫酸-高氯酸消解后采用流动连续分析仪 (Skalar San⁺⁺, 荷兰) 测定.

1.4 数据处理

基于 ArcGIS 软件进行遥感数据解译与样地的制图, 采用 Excel 2003 和 Origin 8.0 软件对数据进行统计分析和作图. 利用 SPSS 17.0 软件的单因素方差分析法 (one-way ANOVA) 和最小显著差异法 (LSD) 进行不同样地土壤各理化因子间的差异显著性检验 ($\alpha=0.05$), 采用双因素方差分析 (two-way ANOVA) 对互花米草入侵年限和土壤深度的影响进行显著性检验 ($\alpha=0.05$), 用 Pearson 法对碳氮磷含量及计量学特征与土壤理化因子进行相关分析. 图表中数据为平均值 \pm 标准误.

2 结果与分析

2.1 土壤理化性质变化

如表 1 所示, 互花米草入侵 8~12 年土壤 pH 值显著下降, 土壤盐度和容重则在入侵 4~8 年分别显著升高 33.2% 和降低 9.3%. 含水量在入侵后就显著增加, 入侵 0~4、4~8 和 8~12 年分别提高 6.4%、10.3% 和 11.5%. 各样地土壤组成主要以粉粒为主 (>70.1%), 互花米草入侵后引起砂粒显著降低, 粉粒微幅上升, 黏粒显著增加.

表 1 各样地 0~50 cm 土层土壤理化性质

Table 1 Soil physicochemical properties at the 0~50 cm layer at plots

样地 Plot	pH	含水量 Water content (%)	盐度 Salinity ($\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$)	容重 Bulk density ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	砂粒 Sand (%)	粉粒 Silt (%)	黏粒 Clay (%)
CM	6.44 \pm 1.19b	97.9 \pm 4.7a	4.22 \pm 2.21a	0.74 \pm 0.23b	18.5 \pm 1.6b	70.3 \pm 4.9a	11.2 \pm 1.7a
SA ₁	6.28 \pm 0.11b	104.2 \pm 6.6b	4.15 \pm 0.33a	0.79 \pm 0.08b	17.8 \pm 1.4b	70.1 \pm 3.3a	12.2 \pm 1.6a
SA ₂	6.32 \pm 0.13b	107.8 \pm 6.8b	5.62 \pm 0.42b	0.69 \pm 0.02a	11.1 \pm 0.8a	75.1 \pm 2.3a	13.8 \pm 2.5a
SA ₃	6.09 \pm 0.06a	109.2 \pm 5.1b	5.77 \pm 0.14b	0.70 \pm 0.05a	10.2 \pm 0.9a	72.7 \pm 2.9a	17.1 \pm 2.9b

同列不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$) Different small letters in the same column indicated significant difference at 0.05 level.

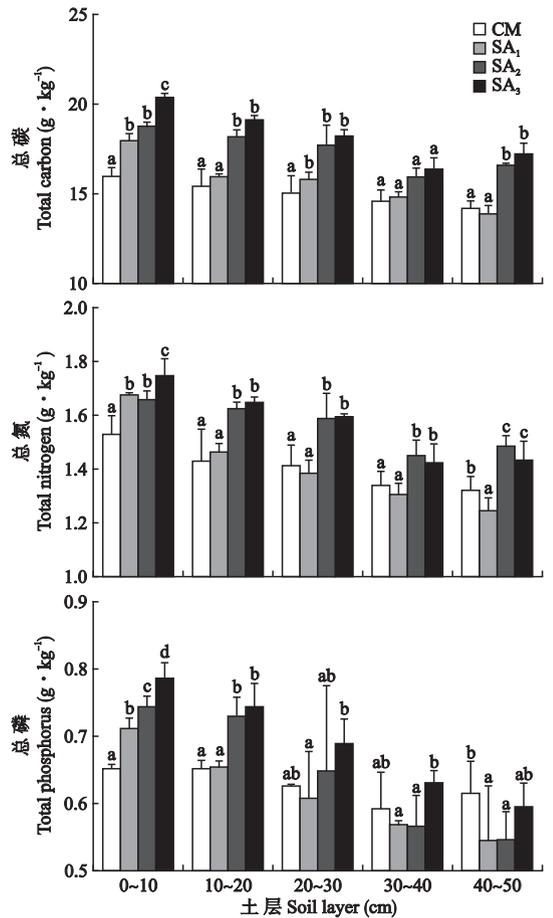


图 2 互花米草入侵下短叶荳蔻湿地土壤碳、氮、磷含量

Fig.2 Soil C, N and P contents in the *Cyperus malaccensis* marsh invaded by *Spartina alterniflora*.

同一土层不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$) Different small letters in the same soil layer indicated significant difference among treatments at 0.05 level. 下同 The same below.

2.2 土壤碳、氮、磷含量变化

如图 2 所示, 互花米草入侵后即引起 0~10 cm 表层土壤 TC 发生显著改变, 且随入侵时间延长持续增加, 入侵 0~4、4~8 和 8~12 年互花米草湿地相对于短叶荳蔻湿地分别增加 12.3%、17.3% 和 27.2%. 10 cm 以下土层中除了 40~50 cm 土层土壤 TC 在入侵初期 (0~4 年) 有小幅下降外, 其余各层在互花米

草入侵后持续增加.其中,30~40 cm 土层 TC 没有显著改变,其他 3 层在入侵 4 年后均显著增加,10~20、20~30 和 40~50 cm 土层分别增加 17.3%、17.8%和 16.6%,但在入侵 8 年后的变化不显著,这与表层土壤变化不同.

TN 变化与 TC 基本一致,表层土壤 TN 在互花米草入侵后就开始显著增加,入侵 0~4、4~8 和 8~12 年互花米草湿地相对于短叶茳芩湿地分别增加 9.6%、8.5%和 14.2%;10~20 cm 土壤 TN 在入侵初期也有小幅增加,在入侵 4 年后出现显著改变(13.9%).与 TC 变化不同,20~50 cm 内 3 层土壤 TN 在入侵初期均出现下降,且在 40~50 cm 土层发生显著降低(5.7%),但入侵 4 年后各层均显著超过短叶茳芩湿地,20~50 cm 各层分别增加 12.2%、6.1%和 8.5%,且随入侵时间延长持续增加.

表层土壤 TP 在不同入侵年限均显著增加,入侵 0~4、4~8 和 8~12 年互花米草湿地相对于短叶茳芩湿地分别增加 8.9%、14.0%和 20.3%;10~20 cm 土层土壤 TP 在入侵初期小幅增加,在入侵 4 年后显著改变(12.1%);20~50 cm 内各层 TP 在入侵初期均出现下降,其中 20~30 cm 土层在入侵 4 年后有所增加,30~40 m 土层在入侵 8 年后才发生增加,但均未显著改变,40~50 cm 土层 TP 一直低于短叶茳芩土层,入侵初期和 4 年后分别显著降低

11.4%和 11.1%,入侵 8 年后才有所增加.

表 2 表明,入侵年限、土壤深度以及两者的交互作用对 TC 和 TN 均产生显著影响,而 TP 随土壤深度和入侵年限分别显著变化,但两者的交互作用对其没有显著影响.分析所有样地 3 种元素的相互关联性发现(图 3),TC 与 TN 的相关系数高达 0.925,两者呈现显著的线性拟合关系,从斜率看几乎是同步变化.TP 与 TC、TN 之间的相关系数较低,但也存在显著正相关.从元素在空间尺度上的变化趋势看,TP 的变化滞后于 TC 和 TN,这可能与 C 和 N 是有机质的结构性成分有关.

2.3 生态化学计量学特征

如图 4 所示,互花米草入侵后土壤 C/N 在 0~50 cm 各层均持续增加,且随入侵年限表现为显著变化(表 2).短叶茳芩湿地和入侵 0~4、4~8 和 8~12 年互花米草湿地土壤 C/N 分别为 9.88~11.19、10.50~11.67、10.90~11.98 和 10.90~11.98,均值分别为 10.69、11.07、11.25 和 11.49,变异系数分别为 3.3%、3.6%、2.4%和 1.8%.C/P 在 0~20 cm 土层持续增加,而 20 cm 以下各层在入侵 8 年前持续显著增加,随后降低.短叶茳芩湿地和入侵 0~4、4~8 和 8~12 年互花米草湿地土壤 C/P 分别为 21.29~29.73、13.57~36.20、18.41~42.33 和 15.94~28.03,均值分别为 23.94、25.37、27.11和 26.54,变异系数

表 2 碳氮磷含量及生态化学计量指标的双因素方差分析

Table 2 Two-way ANOVA of C, N and P contents and stoichiometric ratios (*F* value)

	<i>df</i>	TC	TN	TP	C/N	C/P	N/P
入侵年限 Invasion duration (Y)	3	27.78 **	10.16 **	3.01 *	19.29 **	4.81 **	5.73 **
土壤深度 Soil depth (D)	4	12.53 **	11.41 **	7.62 **	1.04	1.08	3.61 *
Y×D	12	4.75 **	3.97 **	1.85	1.48	1.59	1.70

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$. 下同 The same below.

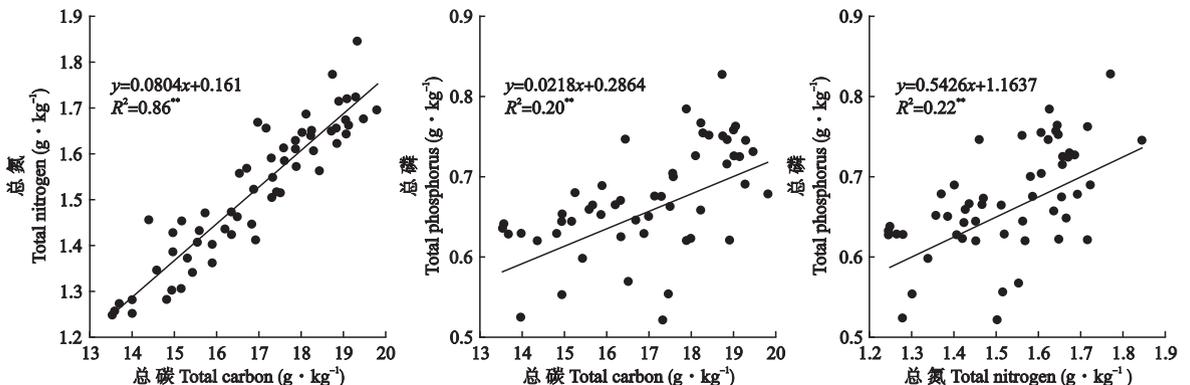


图 3 互花米草入侵下短叶茳芩湿地土壤碳、氮、磷含量的回归分析

Fig.3 Regression analysis of soil TC, TN and TP contents in the *Cyperus malaccensis* invaded by *Spartina alterniflora*.

** $P < 0.01$.

表 3 土壤碳氮磷及其生态化学计量特征与土壤理化性质的相关系数

Table 3 Correlation coefficients of TC, TN, TP contents and stoichiometric ratios with soil physicochemical properties

	TC	TN	TP	C/N	C/P	N/P
pH	-0.267 *	-0.224	-0.047	-0.345 **	-0.124	-0.064
盐度 Salinity	0.314 *	0.431 **	0.217	0.279 *	-0.292 *	-0.047
容重 Bulk density	-0.386 **	-0.421 **	-0.296 *	0.062	-0.039	-0.054
含水量 Moisture	0.362 **	0.358 **	0.330 **	0.016	-0.086	-0.091
砂粒 Sand	-0.260 *	-0.192	-0.256 *	-0.207	0.430 **	0.386 **
粉粒 Silt	-0.184	-0.141	0.313 *	-0.136	-0.432 **	-0.402 **
黏粒 Clay	0.380 **	0.267 *	0.004	0.332 **	-0.269 *	-0.202
C/N	0.288 *	-0.095	0.054		0.138	-0.052
C/P	0.183	0.135	-0.793 **	0.138		0.982 **
N/P	0.131	0.156	-0.807 **	-0.052	0.982 **	

表 4 主成分载荷矩阵

Table 4 Load matrix of principal component analysis

主成分 Component	贡献率 Contribution (%)	pH	盐度 Salinity	容重 Bulk density	含水量 Moisture	砂粒 Sand	粉粒 Silt	黏粒 Clay
1	42.0	-0.373	0.790	-0.746	0.826	-0.231	-0.255	0.275
2	37.2	0.047	0.163	-0.389	0.369	0.768	0.893	-0.950
3	9.7	0.788	0.437	0.050	0.008	0.141	-0.153	0.084

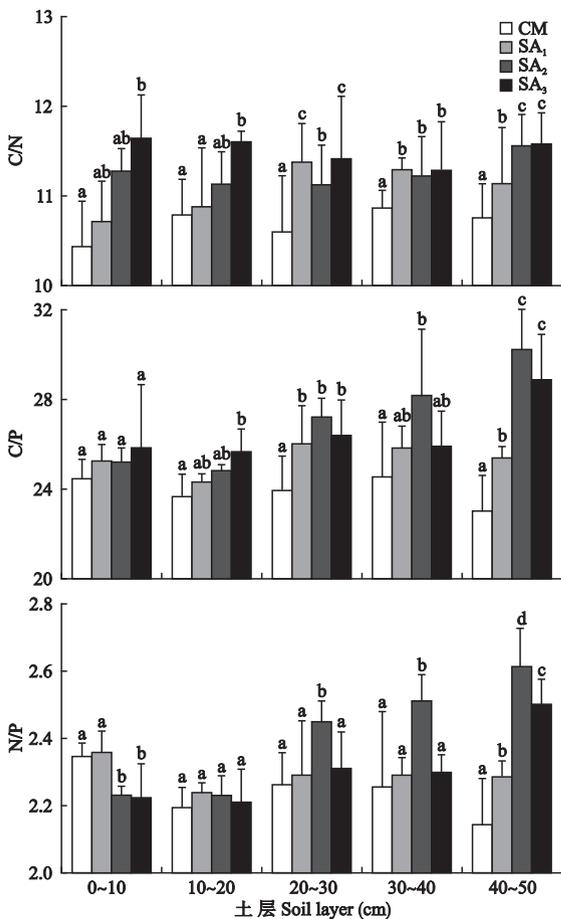


图 4 互花米草入侵下短叶茳芩湿地土壤 C/N、C/P、N/P 变化

Fig. 4 Changes of soil C/N, C/P and N/P in the *Cyperus malaccensis* marsh invaded by *Spartina alterniflora*.

分别为 9.9%、22.5%、26.5% 和 14.3%。N/P 在 0~20 cm 土层先小幅增加, 入侵 4 年后降低, 其余各层变化与 C/P 基本一致, 先显著增加, 入侵 8 年后开始显著降低。短叶茳芩湿地和入侵 0~4、4~8 和 8~12 年互花米草湿地土壤 N/P 分别为 1.96~2.74、1.41~3.76、2.13~4.68 和 2.08~2.74, 均值分别为 2.24、2.29、2.40 和 2.31, 变异系数分别为 10.4%、21.7%、25.1% 和 8.7%。比较发现, 在互花米草入侵初期各生态化学计量指标 (C/N、C/P、N/P) 的变化范围不断扩大, 变异系数不断增加, 但随着入侵时间延长, 两者又开始减小, 且在入侵 8 年后基本与短叶茳芩相近。

2.4 相关性分析

如表 3 所示, TC、TN 均与土壤盐度、容重、含水量、黏粒呈显著相关, TC 与 pH 值、砂粒组成呈显著相关, 而 TP 与容重、含水量、砂粒、粉粒呈显著相关。C/N 与土壤 pH 值、盐度、黏粒呈显著相关, C/P 与盐度、各粒径组成呈显著相关, N/P 与砂粒、粉粒呈显著相关。总体上, 土壤 C、N、P 含量主要受到土壤盐度、容重、含水量和黏粒组成的影响, 而它们之间计量比的主要影响因子是土壤盐度和粒径组成。此外, C、N、P 及其计量指标之间也存在一定的相关性, C/N 与 TC 含量呈显著正相关, 而 C/P 和 N/P 均与 TP 呈显著负相关, 且 C/P 和 N/P 存在显著正相关。

主成分分析结果 (表 4) 显示, 前 3 个主成分累

积贡献率达到 89%,其中,第 1 主成分与土壤盐度、容重和含水量的相关性较高,第 2 主成分与各土壤粒径组成的相关性较好,第 3 主成分仅与 pH 密切相关.这表明各土壤理化性质在闽江河口互花米草入侵过程中驱动湿地土壤碳、氮、磷含量及其生态化学计量学特征的变化.

3 讨 论

3.1 湿地土壤碳、氮、磷含量时空变异

土壤 C、N、P 含量主要取决于输入与输出间的平衡,滨海河口湿地土壤营养元素主要通过潮汐作用、微生物作用、动植物残体的归还与分解以及人类活动等输入和输出过程的平衡来调节^[17].有研究表明,互花米草入侵引起潮滩湿地土壤总碳的变化主要是由于生物量变化增加了土壤有机碳含量^[18].相对于本土植物短叶荇苳,互花米草具有较高的地上地下生物量^[14],在其入侵后通过地表枯落物分解、地下根系分泌物和植物残体进行有机质的固定与累积,进而显著增加湿地土壤的碳含量,且随着入侵时间的延长,互花米草种群密度不断增加,地下根须也明显增加,导致生物量大幅增加^[19],因此,土壤 C 含量也持续升高;另一方面,不同植被所处环境的沉积动力存在差异,互花米草高大的茎叶和发达的根系可以减弱潮水动力,使得河川径流携带的陆源碳和潮汐带来的生源物质不断沉积下来,从而增加其固碳能力.此外,由于动植物残体归还和外源碳输入为表层提供了丰富的碳源,因此其增加速度和幅度相对明显.

有研究证实,土壤 C 的固持在很大程度上控制着 N 含量,从而它们表现出相同的变化规律^[20],本研究结论也证实了这一点(图 2).但是,在入侵初期,底层 N 含量出现了降低现象,这可能是由于互花米草生长需要吸收营养物质,且 N 和 P 是潮滩植物生长过程中最常见的限制性元素^[21].野外调查发现,短叶荇苳根系主要分布在 0~20 cm 土层中,而互花米草根分布分布在 0~50 cm 土层,在此条件下,入侵初期底层土壤 N 含量相对较低,且通过垂直淋溶的无机氮含量所占比重较大,导致入侵过程中由于植物吸收使得沉积物底层的 N 含量出现下降.

这一现象在 P 含量的变化上表现得更为明显(图 2),由于米草属植物的生长对 P 的需求量很大^[22],导致其下部沉积物中的 P 逐渐减少,尤其是 40~50 cm 底层 P 含量一直低于短叶荇苳.高建华等^[23]研究也发现,互花米草湿地土壤 P 含量低于光

滩.同时,N、P 等营养元素在植物体内不断累积,每年都要通过凋落物和根系残体重新回归到沉积物中,由此构成生源要素在植物和沉积物之间周而复始的循环,由于互花米草湿地土壤比短叶荇苳具有更多的根系归还,入侵后期增加了土壤中 N 和 P 含量.此外,由于较多枯落物分解释放和外源携带的营养物质在表层土壤的吸附、沉淀等作用下出现固定与累积,且 P 受垂直方向的淋溶作用影响较小^[24],所以表层 P 含量表现为入侵后即持续显著增加的特征.

土壤 C、N、P 的变化还受到湿地生境改变的影响,本研究中虽然通过相关分析探讨了主导这种规律模式的土壤理化性质(表 3),但这种规律的形成是诸多因子作用的结果,且与其他研究结论存在一定的相同和不同之处^[24-26],因此今后应加强相关机理研究.

3.2 土壤碳、氮、磷生态化学计量学特征

闽江河口湿地土壤 C/P>C/N>N/P,平均值分别为 22.52、11.11 和 2.38,均低于全国湿地平均值 245.22、18.22 和 13.60^[27],这表明土壤有机质腐殖化程度更高,有机氮与磷更易矿化^[28];同时,较低的 C/N/P 也意味着河口湿地与外部环境间土壤营养元素的交换可能更为活跃^[29].C/N 可用来指示有机质的来源,通常认为>12 为陆源有机物,而<8 为海源有机物^[30].本研究中 C/N 分布与变化表明,陆源输入对土壤有机质的来源有重要影响,这与其他研究结果一致^[31].相对于底部沉积物,植物体内有着更高的 C/N,且互花米草比值(45.11)要比短叶荇苳(26.80)大得多^[14].一般认为,较高 C/N 的枯落物具有较低的分解速率,因此,互花米草入侵后通过有机物输入不断改变湿地土壤有机质来源,降低了有机物分解速率;与此同时,在土壤 C/N 不断增加的过程中,微生物活性将受到 N 限制^[32],枯落物分解过程也将放缓,最终导致土壤中碳含量持续增加,引起土壤 C/N 持续显著增加,相关分析也显示,C/N 与 TC 含量呈显著正相关(表 3).

C/P 和 N/P 均与 TP 呈显著负相关,而与 TC、TN 无显著相关性,说明其变化主要受到 P 含量的影响,受 C、N 含量变化的影响不大,因此 P 是调节互花米草入侵过程中土壤 C/P 和 N/P 变化的关键因子.互花米草种群在扩张过程中对营养元素 N 和 P 的需求不断增加,而 C 不断累积,导致 C/P 持续增加,而 C/P 升高进一步表明,土壤中易出现微生物与植被共同竞争有效磷的情况^[33].相对于 N,湿

地生态系统更多受到 P 的限制^[21],且米草属植物的生长对 P 的需求量很大,从而使得互花米草入侵后湿地土壤 N/P 显著增加.但是,土壤表层 N/P 出现了下降,这主要是由于河川径流和潮汐的冲刷作用使得河口湿地表层可溶性的氮随水流失,还有一部分受水流淋溶向下层垂直迁移扩散,尤其是 NO_3^- -N 不易被土壤胶体吸附而易于被水垂直淋溶,而磷元素由于具有较强的吸附、沉淀作用而出现表层富集现象.

此外,生态化学计量指标(C/P、C/N、N/P)的变化范围和变异系数在互花米草初期均增加明显,这主要是因为互花入侵后引起植物地上地下生物量变化和潮滩沉积环境差异^[23],加上河口区河川径流和潮汐作用引起水盐特征变化,相应的元素比也将发生变化.这种情形下土壤 C、N、P 循环过程相对于原生环境发生显著改变,从而引起各生态计量指标波动较大.但是,随着互花米草入侵成功和生长时间延长,新的湿地生境逐渐形成,比值特征也趋于稳定.因此,随着入侵时间的推移,各计量指标的变化范围和变异系数开始减小并与短叶茳芏湿地相近.

综上所述,互花米草湿地土壤 C/P、C/N 和 N/P 的变化明显受到 C、N、P 含量的控制,各指标可以很好地指示土壤营养元素的限制及其有效性.相关分析显示,土壤盐度和粒径组成是影响生态化学计量指标的主要因子(表 3);对其进行主成分分析,结果进一步证明了土壤 pH、盐度和粒径组成是主要影响因子.研究表明,土壤 pH 和盐度可以通过控制参与分解的微生物种类、丰度和活性来影响土壤 C、N、P 的分解和释放速率^[17],并可影响 N、P 的矿化周转,进而影响土壤 C、N、P 计量学特征^[24-25],这与本研究结论一致.在粒径组成方面,土壤粒度越细、比表面积越大,对营养盐的吸附与固持能力相对较强,易于 C 的累积^[34];而粉粒和砂粒组成越高,土壤孔隙度越大,越有利于土壤中有有机氮和有机磷的矿化分解,从而引起 N、P 含量的降低.

3.3 碳与养分比对土壤碳固定的指示作用

闽江河口短叶茳芏湿地 0~50 cm 土层土壤碳与养分比(C/N 和 C/P)在互花米草入侵后均呈现增加趋势,且随着时间推移持续上升,其土壤碳储量也表现为相同的规律,短叶茳芏湿地和入侵 0~4、4~8 和 8~12 年互花米草湿地土壤有机碳储量分别为 50.28、54.28、61.13 和 80.96 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[35].与此同时,较高的碳与养分比和较高的土壤碳密度数据相吻合,C/N 和 C/P 与土壤碳密度均呈显著正相关.

因此,可以得出碳与养分比对土壤碳固定具有良好的指示作用.然而,关于这一结论也存在不确定性,王维奇等^[25]认为,土壤碳储量是关于土壤碳含量与土壤容重的函数,土壤容重在调节二者之间关系上相当重要,只有土壤容重相近的情况下,碳与养分比才会对土壤碳储量具有良好的指示作用,如果土壤容重差异较大,则不能很好地反映碳储量变化的原因.本研究中,各样地土壤容重比较接近,从而得到两者变化相对一致的结果.同时,鉴于土壤容重与研究区域尺度存在一定的关系,王维奇等^[26]进一步提出,在小尺度区域的碳与养分比对土壤碳储量具有良好的指示作用,而相对较大尺度情形下,这种相关性不显著.因此,需要对这种指示作用进行深入研究.

参考文献

- [1] Lu JB, Zhang Y. Spatial distribution of an invasive plant *Spartina alterniflora* and its potential as biofuels in China. *Ecological Engineering*, 2013, **52**: 175-181
- [2] Liao CZ, Luo Y, Jiang L, et al. Invasion of *Spartina alterniflora* enhanced ecosystem carbon and nitrogen stocks in the Yangtze Estuary, China. *Ecosystems*, 2007, **10**: 1351-1361
- [3] Wan S, Qin P, Liu J, et al. The positive and negative effects of exotic *Spartina alterniflora* in China. *Ecological Engineering*, 2009, **35**: 444-452
- [4] Gao S, Du YF, Xie WJ, et al. Environment-ecosystem dynamic processes of *Spartina alterniflora*, salt-marshes along the eastern China coastlines. *Science China Earth Science*, 2014, **57**: 2567-2586
- [5] Agren GI. Stoichiometry and nutrition of plant growth in natural communities. *Annual Review of Ecology, Evolution & Systematics*, 2008, **39**: 153-170
- [6] Kostka JE, Gribsholt B, Petrie E, et al. The rates and pathways of carbon oxidation in bioturbated salt marsh sediments. *Limnology and Oceanography*, 2002, **47**: 230-240
- [7] Yang W, An SQ, Zhao H, et al. Impacts of *Spartina alterniflora* invasion on soil organic carbon and nitrogen pools sizes, stability, and turnover in a coastal salt marsh of eastern China. *Ecological Engineering*, 2016, **86**: 174-182
- [8] Cheng XL, Chen JK, Luo Y, et al. Assessing the effects of short-term *Spartina alterniflora* invasion on labile and recalcitrant C and N pools by means of soil fractionation and stable C and N isotopes. *Geoderma*, 2008, **145**: 177-184
- [9] Gao J-H (高建华), Yang G-S (杨桂山), Ou W-X (欧维新). The influence after introduction of *Spartina alterniflora* on the distribution of TOC, TN and TP in the

- national Yancheng Rare Birds Nature Reserve, Jiangsu Province, China. *Geographical Research* (地理研究), 2007, **26**(4): 799–808 (in Chinese)
- [10] Zeng D-P (曾冬萍), Jiang L-L (蒋利玲), Zeng C-S (曾从盛), *et al.* Reviews on the ecological stoichiometry characteristics and its applications. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2013, **33**(18): 5484–5492 (in Chinese)
- [11] Wang W-Q (王维奇), Xu L-L (徐玲琳), Zeng C-S (曾从盛), *et al.* Carbon, nitrogen and phosphorus ecological stoichiometric ratios among live plant-litter-soil systems in estuarine wetland. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2011, **31**(23): 7119–7124 (in Chinese)
- [12] Wang W-Q (王维奇), Xu L-L (徐玲琳), Zeng C-S (曾从盛), *et al.* Invasion mechanism of *Spartina alterniflora* in Minjiang River estuarine wetland. *Journal of Natural Resources* (自然资源学报), 2011, **26**(11): 1900–1907 (in Chinese)
- [13] Zhang WL, Zeng CS, Tong C, *et al.* Analysis of the expanding process of the *Spartina alterniflora* salt marsh in Shanyutan Wetland, Minjiang River estuary by remote sensing. *Procedia Environmental Sciences*, 2011, **10**: 2472–2477
- [14] Tong C, Wang WQ, Huang JF, *et al.* Invasive alien plants increase CH₄ emissions from a subtropical tidal estuarine wetland. *Biogeochemistry*, 2012, **111**: 677–693
- [15] Ouyang L-M (欧阳林梅), Wang C (王纯), Wang W-Q (王维奇), *et al.* Carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometric characteristics during the decomposition of *Spartina alterniflora* and *Cyperus malaccensis* litters. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2013, **33**(2): 389–394 (in Chinese)
- [16] Liu J-Q (刘剑秋), Zeng C-S (曾从盛). Research of the Minjiang River Estuary Wetland. Beijing: Science Press, 2006 (in Chinese)
- [17] Liu W-L (刘文龙), Xie W-X (谢文霞), Zhao Q-S (赵全升), *et al.* Spatial distribution and ecological stoichiometry characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus in soil *Phragmites australis* tidal flat of Jiaozhou Bay. *Wetland Science* (湿地科学), 2014, **12**(3): 362–368 (in Chinese)
- [18] Cheng XL, Luo Y, Chen JK, *et al.* Short-term C₄ plant *Spartina alterniflora* invasions change the soil carbon in C3 plant-dominated tidal wetlands on a growing estuarine island. *Soil Biology & Biochemistry*, 2006, **38**: 3380–3386
- [19] Li J-B (李家兵), Zhang Q-T (张秋婷), Tong C (全川), *et al.* Effect of *Spartina alterniflora* invasion sequence on soil carbon and nitrogen distribution in a *Cyperus malaccensis* marsh of the Min River estuary in spring. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2016, **36**(12): 3628–3638 (in Chinese)
- [20] Xiao Y (肖焯), Shang L-N (商丽娜), Huang Z-G (黄志刚), *et al.* Ecological stoichiometry characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus in mountain swamps of eastern Jilin Province. *Scientia Geographica Sinica* (地理科学), 2014, **34**(8): 994–1001 (in Chinese)
- [21] Elser JJ, Bracken ME, Cleland EE, *et al.* Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems. *Ecology Letters*, 2008, **10**: 1135–1142
- [22] Hemminga MA, Soelen J, Maas YEM. Biomass production in pioneer *Spartina anglica* patches: Evidence for the importance seston particle deposition. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1998, **47**: 797–805
- [23] Gao J-H (高建华), Bai F-L (白凤龙), Yang G-S (杨桂山), *et al.* Distribution characteristics of organic carbon, nitrogen, and phosphorus in sediments from different ecologic zones of tidal flats in north Jiangsu Province. *Quaternary Sciences* (第四纪研究), 2007, **27**(5): 756–765 (in Chinese)
- [24] Hu M-J (胡敏杰), Ren H-C (任洪昌), Zou F-F (邹芳芳), *et al.* Spatiotemporal distribution and stoichiometry characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus in surface soils of freshwater and brackish marshes in the Min River estuary. *China Environmental Science* (中国环境科学), 2016, **36**(3): 917–926 (in Chinese)
- [25] Wang W-Q (王维奇), Tong C (全川), Jia R-X (贾瑞霞), *et al.* Ecological stoichiometry characteristics of wetland soil carbon, nitrogen and phosphorus in different water-flooded frequency. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2010, **24**(3): 238–242 (in Chinese)
- [26] Wang W-Q (王维奇), Wang C (王纯), Zeng C-S (曾从盛), *et al.* Soil carbon, nitrogen and phosphorus ecological stoichiometry of *Phragmites australis* wetlands in different reaches in Minjiang River estuary. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2012, **32**(13): 4087–4093 (in Chinese)
- [27] Zhang Z-S (张仲胜), Lyu X-G (吕宪国), Xue Z-S (薛振山), *et al.* Is there a Redfield-type C:N:P ratio in Chinese wetland soils? *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2016, **53**(5): 1160–1169 (in Chinese)
- [28] Bai JH, Ouyang H, Deng W, *et al.* Spatial distribution characteristics of organic matter and total nitrogen of marsh soils in river marginal wetlands. *Geoderma*, 2005, **124**: 181–192
- [29] Zhang ZS, Song XL, Lu XG, *et al.* Ecological stoichiometry of carbon, nitrogen, and phosphorus in estuarine wetland soils: Influences of vegetation coverage, plant communities, geomorphology, and seawalls. *Journal of Soils Sediments*, 2013, **13**: 1043–1051
- [30] Wu Y, Zhang J, Liu SM, *et al.* Sources and distribution of carbon within the Yangtze River system. *Estuarine*

- Coastal and Shelf Science*, 2007, **71**: 13–25
- [31] Zhang WL, Zeng CS, Tong C, *et al.* Spatial distribution of phosphorus speciation in marsh sediments along a hydrologic gradient in a subtropical estuarine wetland, China. *Estuarine Coastal & Shelf Science*, 2015, **154**: 30–38
- [32] Yang W, Zhao H, Chen XL, *et al.* Consequences of short-term C₄ plant *Spartina alterniflora* invasions for soil organic carbon dynamics in a coastal wetland of eastern China. *Ecological Engineering*, 2013, **61**: 50–57
- [33] Peng P-Q (彭佩钦), Zhang W-J (张文菊), Tong C-L (童成立), *et al.* Soil C, N and P contents and their relationships with soil physical properties in wetlands of Dongting Lake floodplain. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2005, **16**(10): 1872–1878 (in Chinese)
- [34] Zhang Y-H (张耀鸿), Zhang F-C (张富存), Zhou X-D (周晓冬), *et al.* Effects of plant invasion along a *Spartina alterniflora* chronosequence on organic carbon dynamics in coastal wetland in north Jiangsu. *China Environmental Science* (中国环境科学), 2011, **31**(2): 271–276 (in Chinese)
- [35] Jin B-S (金宝石), Gao D-Z (高灯州), Yang P (杨平), *et al.* Change of soil organic carbon with different years of *Spartina alterniflora* invasion in wetlands of Minjiang river estuary. *Journal of Natural Resources* (自然资源学报), 2016, **31**(4): 608–619 (in Chinese)

作者简介 金宝石, 男, 1979 年生, 副教授, 博士研究生. 主要从事湿地生态环境研究. E-mail: jinbsh@aqnu.edu.cn

责任编辑 孙 菊
