

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2023.02.014

黄庄, 黑杰, 刘旭阳, 等. 互花米草入侵对滨海湿地不同质地土壤碳氮磷及其生态化学计量比的影响. 土壤, 2023, 55(2): 340–347.

互花米草入侵对滨海湿地不同质地土壤碳氮磷及其生态化学计量比的影响^①

黄庄^{1,2}, 黑杰^{1,2}, 刘旭阳^{1,2}, 金强^{1,2}, 黄佳芳^{1,2}, 林少颖^{1,2}, 候宁^{1,2}, 谢杨阳^{1,2}, 王维奇^{1,2}, 王纯^{1,2*}

(1 福建师范大学地理研究所, 福州 350117; 2 福建师范大学湿润亚热带生态-地理过程教育部重点实验室, 福州 350117)

摘要: 为了阐明外来物种入侵对滨海湿地不同质地土壤碳(C)、氮(N)、磷(P)及其生态化学计量比的影响, 对福建省滨海地区东湖湿地两种质地土壤的土著种与入侵种植被下土壤 C、N、P 含量及其生态化学计量特征与影响因素进行了测定与分析。研究结果表明: 相同植被下, 壤质土的 C、N、P 及其计量比均高于砂质土。互花米草入侵增加了两种质地土壤的 C、N 含量及碳磷比(C/P)、氮磷比(N/P), 降低了土壤有效磷(AP)、P 含量与碳氮比(C/N), 其中砂质土的土壤 N 含量显著增加了近 1 倍($P<0.05$), AP 含量下降近 70%, 壤质土的 C/P 增加了近 2 倍($P<0.05$)。不同质地土壤中铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)和硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)含量对互花米草入侵的响应不同, 在壤质土中, 互花米草入侵后降低了 50% 的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量, 增加了近 3 倍的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量($P<0.05$); 而在砂质土中, 互花米草入侵后土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量增加了约 3 倍($P<0.05$), $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量呈现降低的趋势。两种质地土壤的 C/P 和 N/P 均与 P 呈显著负相关($P<0.05$), 而与 C、N 无显著相关性。在砂质土中, 土壤 N 含量与容重呈显著负相关, 与含水量呈显著正相关($P<0.05$)。总体来说, 互花米草入侵对不同质地土壤 C、N、P 及其生态化学计量比的影响程度虽然存在差异, 但趋势大致相同, 互花米草入侵后将会提高土壤 C、N 含量, 但会降低土壤 P 含量, 从而加剧滨海湿地土壤的 P 限制。

关键词: 碳、氮、磷; 生态化学计量比; 植物入侵; 土壤质地

中图分类号: S153.6 **文献标志码:** A

Effects of *Spartina alterniflora* Invasion on Soil Carbon, Nitrogen and Phosphorus and Their Ecological Stoichiometric Ratios in Coastal Wetlands of Different Textures

HUANG Zhuang^{1,2}, HEI Jie^{1,2}, LIU Xuyang^{1,2}, JIN Qiang^{1,2}, HUANG Jiafang^{1,2}, LIN Shaoying^{1,2}, HOU Ning^{1,2}, XIE Yangyang^{1,2}, WANG Weiqi^{1,2}, WANG Chun^{1,2*}

(1 Institute of Geography, Fujian Normal University, Fuzhou 350117, China; 2 Key Laboratory of Humid Sub-tropical Eco-geographical Process of Ministry of Education, Fujian Normal University, Fuzhou 350117, China)

Abstract: In order to clarify the effects of alien species invasion on soil carbon (C), nitrogen (N), phosphorus (P) and their ecological stoichiometric ratios in coastal wetlands with different textures, the contents of soil C, N, P and their ecological stoichiometric characteristics, as well as influencing factors of Donghu Wetland with sandy and loamy textures in coastal areas of Fujian Province were measured and analyzed. The results showed that the contents of soil C, N and P and their stoichiometric ratios were higher in the loamy soil than that in the sandy soil under the same vegetation. The invasion of *Spartina alterniflora* increased the C and N contents, the ratios of carbon to phosphorus (C/P) and nitrogen to phosphorus (N/P) of the two textured soils, and decreased the soil P content and the carbon to nitrogen (C/N) ratio, with a significant increase of almost 1 times ($P<0.05$) in the soil N content and a decrease in the AP content of nearly 70% in sandy soils, as well as a significant increase of almost 2 times ($P<0.05$) in the C/P in loamy soils. The invasion of *Spartina alterniflora* had different effects on the content of ammonium nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) and nitrate nitrogen ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) in soils of different textures. In loamy soils, *Spartina alterniflora* invasion decreased the $\text{NH}_4^+\text{-N}$ content by 50% and increased the $\text{NO}_3^-\text{-N}$ content by almost 3 times ($P<0.05$). However, in sandy soils, the

①基金项目: 国家自然科学基金项目(41901111)和福建省自然科学基金项目(2020J01188)资助。

* 通讯作者(wangchun821314@163.com)

作者简介: 黄庄(1998—), 男, 湖南衡阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为湿地生物地球化学循环。E-mail: amyf1999@163.com

NH_4^+ -N content increased almost 3 times after *Spartina alterniflora* invasion ($P < 0.05$) and the NO_3^- -N content showed a decreasing trend. The C/P and N/P of both textured soils were significantly negatively correlated with P ($P < 0.05$), but not significantly correlated with C and N. In sandy soils, soil N content was significantly negatively correlated with bulk density, while positively correlated with water content ($P < 0.05$). In general, although the effects of *Spartina alterniflora* invasion on C, N, P and their ecological stoichiometric ratios for different textures soils are different, the trends are roughly the same. The invasion of *Spartina alterniflora* will increase the contents of soil C and N, but reduce the P content of the soil, thus exacerbate P limitation in coastal wetland soils.

Key words: Carbon; Nitrogen; Phosphorus; Ecological stoichiometric ratio; Plant invasion; Soil texture

碳(C)、氮(N)、磷(P)作为土壤中最重要营养与结构元素,影响着湿地植被的营养供应,进而对整个生态系统物质循环和能量流动过程产生影响,并对该过程具有良好的指示作用^[1]。生态化学计量学主要研究生态系统过程中主要化学元素的共变规律,及其与生物和非生物因素之间的耦合关系^[2],它为揭示生态过程中元素协同变化及其影响因素提供了一种综合方法。因此,研究土壤C、N、P及其生态化学计量学特征,对于了解区域土壤C、N、P元素的循环与平衡机制,揭示土壤养分有效性的调控机制及预测未来的变化等具有重要意义^[3]。生态化学计量学作为一种研究方法,已被应用于陆地和海洋生态系统的评估研究中,但对滨海湖泊湿地生态系统研究较少,特别是生物入侵对不同质地土壤C、N、P的含量变化耦合平衡关系的对比研究更是鲜有报道。

生物入侵作为全球三大环境问题之一,已对全球生态环境和经济发展造成了严重的危害,引起了国内外学者的广泛关注^[4]。互花米草是禾本科米草属多年生耐盐耐淹高大草本植物,原产于北美洲中纬度海岸潮间带,自从1979年引入我国,已广泛分布于北至渤海、南到南海的大部分潮汐湿地,成为我国沿海地区的主要入侵植物^[5]。外来入侵植物可改变原生生态系统的结构和功能,过去几十年互花米草的迅速扩张对滨海湿地生物多样性以及生物地球化学循环等产生了重要影响,已成为国内外学者的研究热点^[6],但目前对湿地互花米草入侵的研究大多集中在壤质土壤。高建华等^[7]通过研究苏北潮滩湿地不同潮间带壤质土壤中C、N、P分布特征时发现,互花米草入侵后,土壤C、N、P含量随互花米草入侵年限的增加而增加;金宝石等^[8]的研究也发现,在闽江河口壤质土壤中,互花米草湿地土壤C、N、P含量随入侵年限增加而增加。那么,互花米草入侵砂质土壤会产生怎样的生态影响呢?目前对于互花米草入侵滨海湿地砂质土和壤质土的差异影响仍不清楚,进一步开展对比研究,有利于科学认知外来植物入侵不同生境产

生的生态影响。

福建省福州市滨海地区的东湖湿地是一个典型的湖泊湿地,近年来,外来植物互花米草入侵现象比较严重,但互花米草入侵对该区域土壤C、N、P及其生态化学计量学特征的影响如何?不同质地土壤对互花米草入侵的响应有何差异?目前尚不清楚。基于此,本研究综合探讨不同质地(壤质土、砂质土)土著种与入侵种植被下土壤C、N、P及其生态化学计量学特征,并进一步分析其演变的驱动因素,旨在揭示互花米草入侵对不同质地湿地土壤的差异影响,并辨析其原因,为入侵生境的恢复和治理提供重要的科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区与采样点

研究区位于福建省福州市长乐区滨海新城的东湖湿地公园($25^{\circ}49'36''\text{N} \sim 25^{\circ}54'0''\text{N}$, $119^{\circ}35'12''\text{E} \sim 119^{\circ}38'11''\text{E}$),该区域属于中亚热带和南亚热带海洋性季风气候的过渡区,暖热湿润,年平均气温 19.3°C 。流域内降雨量充沛,多年平均降水量为 1390mm ,但年内分配不均,春夏季多雨^[9]。天然植被主要有土著种芦苇(*Phragmites australis*)和飘拂草(*Fimbristylis dichotoma*)混生,入侵种为互花米草(*Spartina alterniflora*)。于不同质地(壤质土、砂质土)中分别选取土著种(芦苇与飘拂草混生)和入侵种植被(互花米草)下土壤作为采样点,开展互花米草入侵对滨海湿地不同质地土壤C、N、P及其生态化学计量比影响的对比研究。

1.2 土壤样品采集

野外采样于2018年10月进行,为了使土样更具代表性和典型性,在采样前根据该区域实际情况提前规划采样点,根据等量、随机和多点混合的原则采样,每个采样点分别取5个重复,共20个土样。所采土样均为去除凋落物与植物根系后的表层土壤($0 \sim 15\text{cm}$),采样完成后,分为两份迅速装入自封袋密封

保存,一份放入 4 °C 冰箱冷藏待用,一份自然风干后保存待用。

1.3 样品分析方法

土壤理化性质测定:土壤含水量(WC)采用土壤水分测定仪(TDR300r)测定;电导率(EC)采用电导计(2265FS,美国)测定;土壤 pH 采用 pH 计(Starter 300,美国)测定,水土比 2.5:1($V:m$)振荡 30 min;土壤容重(BD)采用环刀法测定^[10]。

土壤养分指标测定:土壤 C、N 采用 C、N 元素分析仪(Elementar Vario Max CN,德国)测定,土壤 P 与有效磷(AP)分别采用 $\text{HClO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4$ 法消煮和 M3 浸提法处理后,使用连续流动分析仪(Skalar SAN++,荷兰)测定。土壤有效氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$)采用 2 mol/L 的氯化钾浸提处理后,使用连续流动分析仪(Skalar SAN++,荷兰)测定。

1.4 数据处理与分析

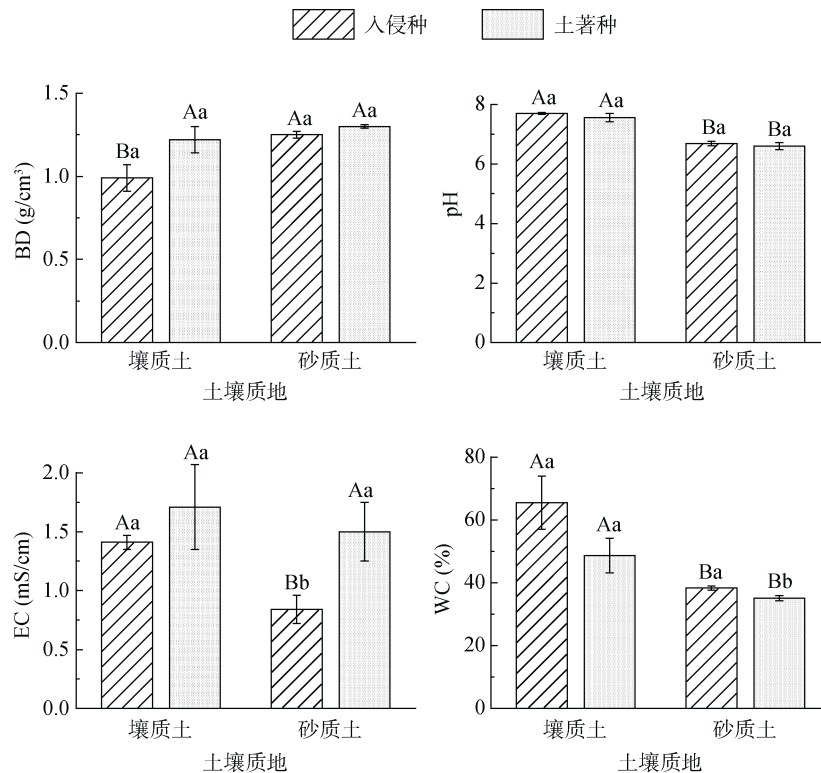
对测定数据分别运用 Excel 2016、Origin 2021b、SPSS 22.0 统计分析软件进行整理和绘图。其中,原始数据的平均值、标准差与变异系数采用 Excel 2016 计算,利用 Origin 2021b 绘制含量及比值图。入侵种与土著种土壤的理化性质,C、N、P 含量及 C/N、C/P、N/P 的差异性检验采用 SPSS 22.0 的独立 T 检

验分析。土壤质地和植被类型对土壤的 C、N、P 含量及其计量比影响的差异性采用 SPSS 22.0 中双因素方差进行分析。土壤理化性质、土壤养分与生态化学计量比之间的相关关系通过 Origin 2021b 的 Correlation Plot 插件中的 Pearson 相关系数进行。

2 结果与分析

2.1 互花米草入侵对不同质地土壤理化特征的影响

东湖湿地不同质地土壤土著种与入侵种土壤理化特征如图 1 所示。从土壤质地来看,壤质土中的入侵种土壤 BD 显著低于砂质土($P<0.05$),EC 显著高于砂质土($P<0.05$);而土著种土壤 BD 略低于砂质土,EC 略高于砂质土;壤质土中入侵种和土著种土壤 pH、WC 均显著高于砂质土($P<0.05$),壤质土 BD、WC、pH 等理化性质的变异系数均大于砂质土,表明砂质土壤理化性质的空间异质性相对更低。从互花米草入侵的影响来看,互花米草入侵后两种质地土壤 BD 与 EC 均降低,其中砂质土的 EC 降低约 50% (从 1.50 mS/cm 下降至 0.84 mS/cm; $P<0.05$);土壤 pH 与 WC 均有增加。可见,对于土壤理化性质而言,互花米草入侵在砂质土中的影响大于壤质土。



(图中大写字母不同表示同种植被不同质地土壤之间差异显著($P<0.05$),小写字母不同表示相同质地不同植被土壤之间差异显著($P<0.05$),下同)

图 1 不同质地土壤土著种与入侵种土壤理化特征

Fig. 1 Soil physicochemical characteristics in different texture soils of indigenous and invasive species

2.2 互花米草入侵对不同质地土壤速效养分特征的影响

东湖湿地不同质地土壤土著种与入侵种土壤速效养分特征如图 2 所示。在两种质地土壤中均表现为互花米草入侵后土壤 AP 含量显著降低($P < 0.05$), 且互花米草入侵对土壤 AP 含量的影响在砂质土中更为显著, 其含量下降近 70%(从 22.92 mg/kg 下降至 7.38 mg/kg, $P < 0.01$)。土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量在不同质地土壤中对互花米草入侵的响应呈现相反的变化特征, 在壤质土中, 互花米草入侵后土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量降低了 50%(从 4.11 mg/kg 下降至 1.94 mg/kg, $P < 0.01$), 土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量增加了近 3 倍(从 3.18 mg/kg 增加至 12.66 mg/kg, $P < 0.01$); 而在砂质土中, 互花米草入侵后土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量增加了约 3 倍(从 3.17 mg/kg 增加至 12.89 mg/kg, $P < 0.01$), 但 $\text{NO}_3^-\text{-N}$

含量略有降低。

2.3 互花米草入侵对不同质地土壤 C、N、P 含量及其生态化学计量比的影响

东湖湿地不同质地土壤土著种与入侵种土壤 C、N、P 含量特征如图 3 所示。壤质土的 C、N、P 含量均高于同一植被下的砂质土, 其中土壤 C、N 达到显著差异水平($P < 0.05$)。从互花米草入侵影响来看, 在两种质地土壤中互花米草入侵对两种质地土壤 C、N、P 含量的影响趋势大致相同, C、N 均呈现增加趋势, P 呈现降低趋势, 但影响程度存在差异, 其中砂质土的土壤 N 含量显著增加了近 1 倍(从 0.28 g/kg 增加至 0.50 g/kg; $P < 0.05$), 而壤质土中的 N 含量增加不显著。不同质地土著种与入侵种土壤生态化学计量比特征如图 4 所示。从土壤质地来看, 壤质土的 C/N、C/P、N/P 均高于砂质土, 其中土壤 C/N 达到极显著差异水

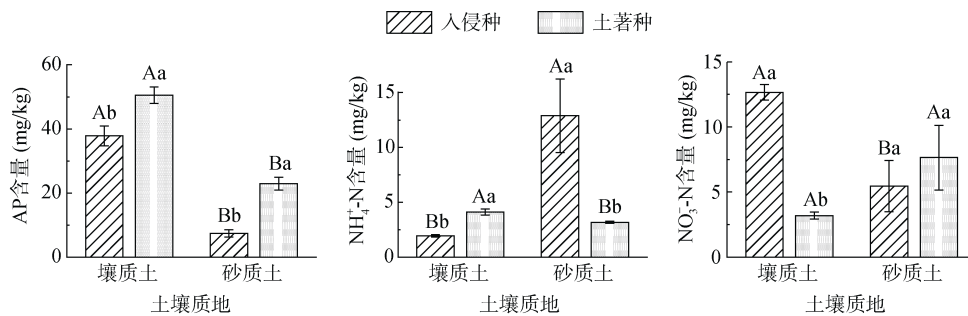


图 2 不同质地土壤土著种与入侵种土壤速效养分特征

Fig. 2 Soil available nutrients in different texture soils of indigenous and invasive species

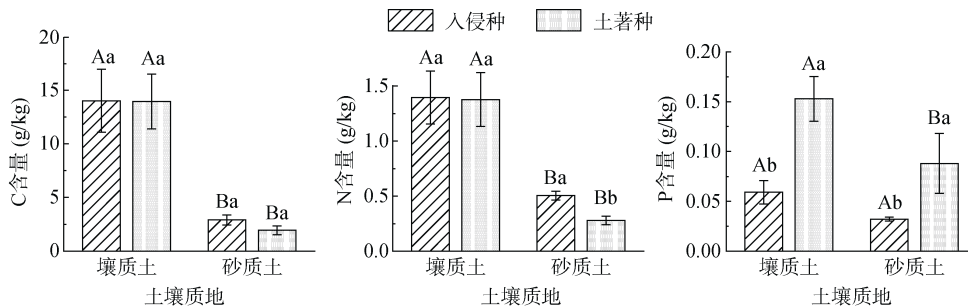


图 3 不同质地土壤土著种与入侵种土壤 C、N、P 特征

Fig. 3 Soil C, N and P characteristics in different texture soils of indigenous and invasive species

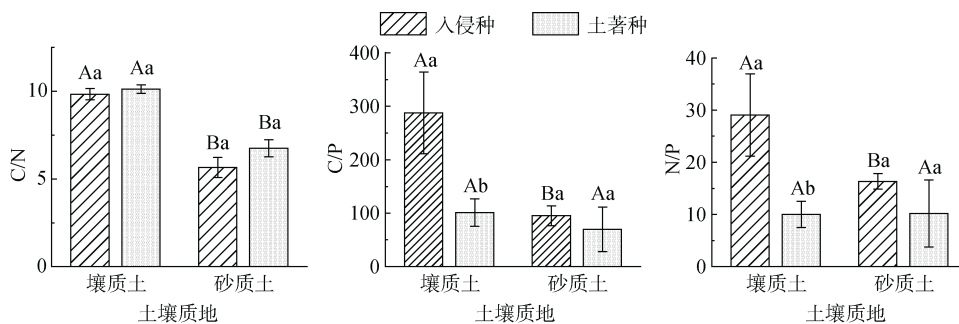


图 4 不同质地土壤土著种与入侵种土壤 C、N、P 生态化学计量比特征

Fig. 4 Ecological stoichiometry of C, N and P in different texture soils of indigenous and invasive species

平($P<0.01$)。从互花米草入侵的影响来看,互花米草入侵后,土壤 C/N 略有降低,但未达到显著差异水平;土壤 C/P 与 N/P 均增加,其中壤质土的 C/P 显著增加了近 2 倍(从 101.03 增加至 287.31, $P<0.05$)。

2.4 土壤与植被因素对土壤 C、N、P 及其生态化学计量比的综合影响

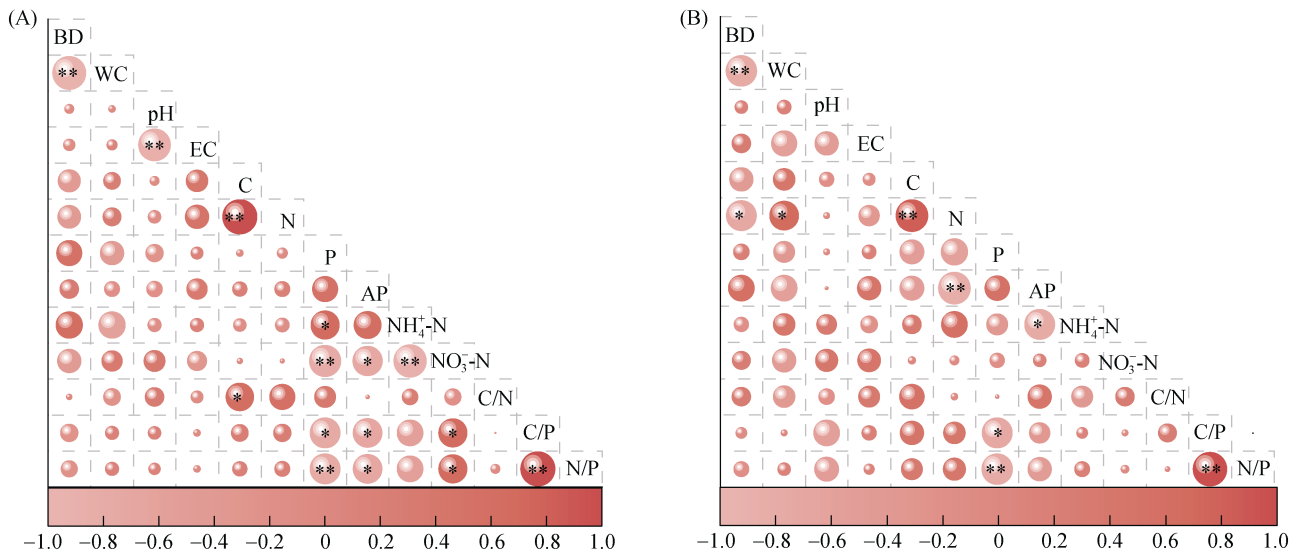
通过对不同质地土壤 C、N、P 含量及其生态化学计量比与土壤理化性质综合分析发现(图 5),在土壤理化性质与土壤养分特征的相关关系中,两者在壤质土中无显著相关关系;而在砂质土中,土壤 N 与 BD 呈现显著负相关($P<0.05$),与 WC 呈现显著正相关($P<0.05$)。两种质地土壤的 C 与 N 含量均呈现极显著正相关($P<0.01$),P 与 N/P 均呈现极显著负相关($P<0.01$),P 与 C/P 均呈现显著负相关($P<0.05$),C/P 与 N/P 均呈现极显著正相关($P<0.01$)。C 与 C/N 在壤质土中呈现显著正相关($P<0.05$),但砂质土中并不显著;N 与 AP 在砂质土中呈现极显著负相关($P<0.01$),但壤质土中无显著相关关系。

同时,不同质地土壤和植被类型因素对土壤 C、N、P 含量及其生态化学计量比的影响各不相同(表 1)。根据影响因素分析,土壤质地对 C、N 含量的影响均达到极显著水平($P<0.01$),对 P 含量达到显著水平($P<0.05$)。植被类型对 P 含量的影响达到了极显著水平($P<0.01$),但是植被类型对 C、N 含量的影响不显著。土壤质地对 C/N 的影响达到极显著水平($P<0.01$),

对 C/P 达到显著水平($P<0.05$),但对 N/P 的影响不显著。植被类型对 C/N 的影响不显著,但对 C/P、N/P 的影响显著($P<0.05$)。此外,土壤质地和植被类型的交互作用对土壤 C、N、P 含量及其生态化学计量比的影响均不显著。

表 1 土壤 C、N、P 含量及其计量比的影响因素分析
Table 1 Analysis of variation sources in soil C, N and P contents and their stoichiometric ratios

指标	影响因素	df	MS	F	P
C	土壤质地	1	668.40	34.27	<0.01**
	植被类型	1	1.35	0.07	0.80
	土壤质地×植被类型	1	1.02	0.05	0.82
N	土壤质地	1	4.94	32.50	<0.01**
	植被类型	1	0.07	0.49	0.49
	土壤质地×植被类型	1	0.05	0.36	0.56
P	土壤质地	1	0.01	5.36	<0.05*
	植被类型	1	0.03	14.64	<0.01**
	土壤质地×植被类型	1	0.01	1.01	0.33
C/N	土壤质地	1	71.44	78.36	<0.01**
	植被类型	1	2.38	2.61	0.13
	土壤质地×植被类型	1	0.83	0.91	0.36
C/P	土壤质地	1	62 458.19	5.84	<0.05*
	植被类型	1	56 131.25	5.25	<0.05*
	土壤质地×植被类型	1	32 258.19	3.02	0.102
N/P	土壤质地	1	195.94	1.40	0.25
	植被类型	1	793.30	5.67	<0.05*
	土壤质地×植被类型	1	207.11	1.48	0.242



(A. 壤质土, B. 砂质土; 图中深红表示正相关关系, 浅红表示负相关关系; *, ** 分别表示因子间相关性达 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 显著水平)

图 5 不同质地土壤 C、N、P 含量及其化学计量比与土壤理化性质之间的关系

Fig. 5 Correlation between C, N and P contents of different texture soils and their stoichiometric ratios with environmental factors

3 讨论

3.1 互花米草入侵对不同质地土壤 C、N、P 含量影响

本研究中, 壤质土的 C、N、P 含量显著高于同一植被下的砂质土, 两种质地土壤的 C、N、P 含量差异与葛楠楠等^[11]对黄土高原不同土壤质地农田土壤 C、N、P 的研究结果一致。产生差异的主要原因是壤质土的土壤通透性会相对较低, 进而抑制土壤有机质矿化、硝化等反应, 降低了土壤养分的分解速度。同时, 两种质地土壤不同的黏粒含量会影响到微生物活性, 间接影响土壤的 C、N、P 含量^[12]。但从植物入侵影响来看, 互花米草入侵后两种质地土壤 C、N、P 含量变化趋势是一致的, C、N 均呈现增加趋势, P 呈现降低趋势。Valéry 等^[13]的研究发现, 法国西部海湾披碱草入侵后, 盐沼湿地土壤全碳含量未发生显著差异; 而 Cheng 等^[14]对比长江河口九段沙湿地自然保护区互花米草群落和本地种海三棱藨草群落土壤碳库, 发现互花米草群落比海三棱藨草群落土壤中的全碳、有机碳含量更高, 表明外来植物入侵会影响碳循环关键过程, 进而改变土壤碳含量, 但不同研究样地由于环境条件和植被类型等不同, 研究结果存在不确定性。

互花米草入侵后, 砂质土的 N 含量显著增加, 但壤质土中的 N 含量增加不显著。原因在于, 具有较大孔隙的砂质土, 土壤 N 含量受水分淋失影响较大, 而互花米草具有促淤的作用, 密集根系会减弱对土壤 N 的淋失, 所以砂质土中的互花米草对土壤 N 的截获和固存更多^[15]。此外, 本研究也发现, 在砂质土壤中, 土壤 N 与 BD、WC 分别呈现显著负相关、正相关, 这是因为土壤 BD 越大, 土壤越容易板结, 不利于植物生长, 且土壤微生物及菌类活动也受到限制, 加大了土壤表层的枯枝落叶腐烂分解的难度, 植物返还的养分随之减少, 进而影响土壤 N 含量^[16]。而土壤 WC 增加时, 土壤透气性降低, 致使微生物的数量和活性下降, 有利于土壤 N 的累积^[17]。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 作为易被作物吸收利用的两种有效 N, 分析互花米草入侵对其含量的影响, 可以推演植物入侵对原生生态系统的生产力、营养元素的吸收和 N 的迁移转化能力的影响^[18]。本研究发现, 在壤质土中, 互花米草入侵后 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量显著降低, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量显著增加, 原因可能是互花米草入侵后, 根系周转能力和根系分泌物增加, 根际微生物活性可能高于土著群落^[19], 导致互花米草下土壤的硝化作用更强烈,

大量 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 转化为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$, 使得互花米草入侵后 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量显著降低, 而 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量显著增加。而在砂质土中, 两种植被下土壤的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量与壤质土截然相反, 可能是因为砂质土的持水能力弱, 土壤含水量低, 利于反硝化细菌的生长, 使得 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的固持大于硝化, 所以砂质土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量相对积累, 而 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量降低^[20]。

在两种质地土壤中, 互花米草入侵后都显著降低了土壤 P 含量, 主要原因可能是与芦苇相比较, 米草属植物生长过程对 P 的需求量较大^[21], 对 P 较强的吸收能力使其具有反沃岛效应^[22]。通常而言, 植物会将土壤中的水分、养分、微生物等聚集于其周围, 在植株下形成一个相对肥沃的区域, 即沃岛现象^[23]。但阚慢慢^[22]通过研究滨海湿地不同植物类型下土壤 C、P 的积聚特征发现, 在滨海湿地中, 植物群落下的土壤 P 含量、C/N 以及含水量等特征均小于裸滩, 这与在干旱和半干旱地区所广泛应用的沃岛效应刚好相反, 呈现出反沃岛现象。此外, 根据土壤 C、N、P 影响因素分析发现, 植被类型对 P 含量的影响达到了极显著水平, 超过了土壤质地的影响, 其原因可能与入侵植物比土著植物具有更强的吸收 P 的能力有关, 这也是外来植物入侵成功的重要机制之一^[24]。

3.2 互花米草入侵对不同质地土壤 C、N、P 生态化学计量比影响及其指示作用

土壤 C、N、P 生态化学计量比是生态系统过程及其功能的重要表征^[2], 能够反映土壤元素含量平衡与有效性, 在预测有机质分解速率以及养分的限制与平衡等方面起着重要作用。本研究发现, 两种质地土壤的计量比与土壤 C、N、P 变化特征相似, 壤质土显著高于同一植被下的砂质土, 两种质地土壤 C/P、N/P 的差异与高冉^[25]和葛楠楠等^[11]的研究结论一致。但是 C/N 的差异与其他人的研究相反, 这与两种质地土壤之间的 C、N 相对含量差异有关, 虽然砂质土的 C、N 含量均低于壤质土, 但是 C 含量的变幅更大, 最终导致了砂质土较低的 C/N。在互花米草入侵影响方面, 两种质地土壤都呈现出互花米草入侵后土壤 C/P、N/P 显著增加, C/N 略有降低, 这可能是因为互花米草入侵后, 根际微生物活动增加, 使得土壤矿化速率加快^[26], 从而使 C/N 降低, 同时由于互花米草对 P 的需求量较大, 入侵后显著降低了土壤 P 含量, 从而使土壤 C/P、N/P 均显著提高。本研究中 C/P 和 N/P 均与 P 呈显著负相关, 而与 C、N 无显著相关性, 说明 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, 该区域土壤主要受 P 的限制。

此外, 土壤 N/P 通常被当作 N 饱和的诊断指标, 两种质地土壤的 N/P 均大于 10, 远远超过了全国平均水平^[27], 进一步验证了该区域土壤主要是受到 P 的限制。

3.3 互花米草入侵对不同质地土壤理化性质影响

本研究中互花米草入侵对不同质地土壤理化性质的影响是相似的。互花米草发达的根系和较大的生物量使得土壤孔隙度增加^[28], 因此入侵后土壤 BD 略有降低。两种质地土壤在互花米草入侵后土壤 EC 都显著降低, 原因可能是芦苇是拒盐植物, 而互花米草是泌盐植物, 植株会通过吸收土壤盐分, 分泌体外后被潮水带走的方式降低土壤盐度^[29]。两种质地土壤在互花米草入侵之后均增加了土壤 WC, 是因为互花米草强大的滞流作用使潮水滞留在互花米草滩面, 改变土壤水分状况^[30]。而且互花米草有较高的叶面积指数、地上生物量、植株密度和凋落物量, 起到良好的遮阴作用, 减少了土壤水分的丧失。由此可见, 土壤与植物之间存在着反馈调节机制, 一方面, 土壤理化特征深刻地影响着植物的生长与物质代谢等生态过程; 另一方面, 植被状况又会反过来控制土壤性质以及相关生物地球化学过程。因此, 无论是壤质土还是砂质土, 植物入侵都会改变原有土壤的性质, 从而影响原生生态系统的结构与功能。

4 结论

壤质土的 C、N、P 及其计量比均高于同一植被下的砂质土。互花米草入侵对两种质地土壤 C、N、P 及其计量比的影响趋势大致相同, C、N、C/P 和 N/P 均呈现增加趋势, P 和 C/N 呈现降低趋势, 但影响程度存在差异, 其中砂质土的 N 含量显著增加, 但壤质土中的 N 含量增加不显著。相关性分析的结果表明两种质地土壤的 C/P 和 N/P 均与 P 呈显著负相关, 而与 C、N 无显著相关性, 这说明 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, 互花米草入侵后对 P 的需求不断增加, 会加剧滨海湿地土壤的 P 限制。

参考文献:

[1] 李红林, 贡璐, 朱美玲, 等. 塔里木盆地北缘绿洲土壤化学计量特征[J]. 土壤学报, 2015, 52(6): 1345–1355.
 [2] 于贵瑞, 李轩然, 赵宁, 等. 生态化学计量学在陆地生态系统碳-氮-水耦合循环理论体系中作用初探[J]. 第四纪研究, 2014, 34(4): 881–890.
 [3] 王维奇, 王纯, 曾从盛, 等. 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[J]. 生态学报, 2012,

32(13): 4087–4093.
 [4] Sala O E, Chapin F S 3rd, Armesto J J, et al. Global biodiversity scenarios for the year 2100[J]. Science, 2000, 287(5459): 1770–1774.
 [5] 陈秋宇, 杨仁敏, 朱长明. 基于 VIS-NIR 光谱的互花米草入侵湿地土壤有机碳预测研究[J]. 土壤学报, 2021, 58(3): 694–703.
 [6] Gao S, Du Y F, Xie W J, et al. Environment-ecosystem dynamic processes of *Spartina alterniflora* salt-marshes along the Eastern China coastlines[J]. Science China Earth Sciences, 2014, 57(11): 2567–2586.
 [7] 高建华, 白凤龙, 杨桂山, 等. 苏北潮滩湿地不同生态带碳、氮、磷分布特征[J]. 第四纪研究, 2007, 27(5): 756–765.
 [8] 金宝石, 闫鸿远, 王维奇, 等. 互花米草入侵下湿地土壤碳氮磷变化及化学计量学特征[J]. 应用生态学报, 2017, 28(5): 1541–1549.
 [9] 杨平, 唐晨, 陆苗慧, 等. 亚热带河口区水库 DOC 和 DIC 浓度时空变化特征[J]. 湖泊科学, 2021, 33(4): 1123–1137.
 [10] 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.
 [11] 葛楠楠, 石芸, 杨宪龙, 等. 黄土高原不同土壤质地农田土壤碳、氮、磷及团聚体分布特征[J]. 应用生态学报, 2017, 28(5): 1626–1632.
 [12] 第 19 届国际土壤学大会重点论文摘要选译[J]. 土壤, 2010, 42(5): 696–799.
 [13] Valéry L, Bouchard V, Lefeuvre J C. Impact of the invasive native species *Elymus athericus* on carbon pools in a salt marsh[J]. Wetlands, 2004, 24(2): 268–276.
 [14] Cheng X L, Luo Y Q, Chen J Q, et al. Short-term C_4 plant *Spartina alterniflora* invasions change the soil carbon in C_3 plant-dominated tidal wetlands on a growing estuarine Island[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38(12): 3380–3386.
 [15] 潘婷, 曾六福, 曾从盛, 等. 互花米草入侵对闽江河口裸滩湿地土壤有机碳的影响[J]. 中国水土保持科学, 2015, 13(1): 84–90.
 [16] 张珊, 李玉, 车克钧, 等. 祁连山东段青海云杉林区土壤氮矿化与土壤因子的相关性[J]. 水土保持学报, 2016, 30(5): 218–223.
 [17] 宋良翠, 马维伟, 李广, 等. 水分对杂海湿地退化演替土壤氮矿化的影响[J]. 干旱区研究, 2022, 39(1): 165–175.
 [18] 李家兵, 陈庆燎, 张丽烟, 等. 闽江河口互花米草入侵过程对短叶荇菜湿地土壤氮矿化的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(4): 242–248.
 [19] Liao C Z, Luo Y Q, Fang C M, et al. Litter pool sizes, decomposition, and nitrogen dynamics in *Spartina alterniflora*-invaded and native coastal marshlands of the Yangtze Estuary[J]. Oecologia, 2008, 156(3): 589–600.
 [20] 廖圣祥, 任运涛, 袁晓波, 等. 围封对黄土高原草地土壤铵态氮和硝态氮的影响[J]. 草业科学, 2016, 33(6): 1044–1053.
 [21] Hemminga M A, van Soelen J, Maas Y E M. Biomass

- production in Pioneer *Spartina anglica* Patches: Evidence for the importance of seston particle deposition[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1998, 47(6): 797–805.
- [22] 阚慢慢. 滨海湿地不同植被类型下土壤中氮与磷的积聚特征[D]. 济南: 山东大学, 2016.
- [23] 金钊, 齐玉春, 董云社. 干旱半干旱地区草原灌丛荒漠化及其生物地球化学循环[J]. *地理科学进展*, 2007, 26(4): 23–32.
- [24] Zhang Y L, Leng Z R, Wu Y M, et al. Interaction between nitrogen, phosphorus, and invasive alien plants[J]. *Sustainability*, 2022, 14(2): 746.
- [25] 高冉. 互花米草入侵对黄家塘湾滨海湿地土壤理化性质的影响[D]. 曲阜: 曲阜师范大学, 2021.
- [26] 张春华, 王宗明, 居为民, 等. 松嫩平原玉米带土壤碳氮比的时空变异特征[J]. *环境科学*, 2011, 32(5): 1407–1414.
- [27] 赵维俊, 敬文茂, 赵永宏, 等. 祁连山大野口流域典型灌丛植物与土壤中氮磷的化学计量特征[J]. *土壤*, 2017, 49(3): 572–579.
- [28] 冯强, 段宝玲, 姜硕. 小流域尺度土壤容重及其影响因素的空间变异[J]. *山西农业大学学报(自然科学版)*, 2016, 36(1): 39–45.
- [29] 布乃顺, 胡悦, 杨骁, 等. 互花米草入侵对长江河口湿地土壤理化性质的影响[J]. *长江流域资源与环境*, 2017, 26(1): 100–109.
- [30] 王娟, 刘红玉, 李玉凤, 等. 入侵种互花米草空间扩张模式识别与景观变化模拟[J]. *生态学报*, 2018, 38(15): 5413–5422.