

潘国浩,刘洋,张莹莹,等. 滨海滩涂原生草滩及围垦农田土壤碳、氮、磷化学计量学特征及其随盐度的变化[J]. 江苏农业科学,2019,47(8):273-278. doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.08.063

滨海滩涂原生草滩及围垦农田土壤碳、氮、磷化学计量学特征及其随盐度的变化

潘国浩^{1,2}, 刘洋², 张莹莹², 高军³, 付强², 赵永强⁴, 严金龙²

(1. 常州大学环境与安全工程学院, 江苏常州 213164; 2. 盐城工学院环境科学与工程学院/江苏省环境保护海涂生态与污染控制重点实验室, 江苏盐城 224051; 3. 环境保护部南京环境科学研究所, 江苏南京 210042; 4. 盐城湿地珍禽国家级自然保护区, 江苏盐城 224057)

摘要:为研究滨海滩涂土地利用变化对土壤碳、氮、磷含量及其化学计量比的影响,并探讨土壤盐度与C、N、P化学计量比的关系,以滨海滩涂原生草滩(碱蓬滩、芦苇滩)及围垦后的农田为研究对象,分析滩涂土地利用变化过程中土壤盐度和C、N、P含量及其化学计量比的变化。研究表明:(1)滨海滩涂由碱蓬滩-芦苇滩-农田的转化过程中,土壤有机碳(TOC)含量、全氮(TN)含量、全磷(TP)含量均整体显著升高,TOC含量、TN含量增长幅度远高于TP含量;C/P、N/P显著升高,而C/N没有显著变化。(2)在较高的P水平及较低的N水平影响下,滨海滩涂土壤表现为较高的C/N、较低的C/P和N/P,总体表现为N限制。(3)随着土壤盐度的降低,TOC含量、TN含量、C/P和N/P均显著升高,且呈一阶递减幂函数(Allometric1)关系($y = a \cdot x^b, r^2 \geq 0.75, P < 0.01$);土壤TP含量及C/N则随盐度没有表现出明显的规律性变化。总体而言,滨海滩涂土地利用及盐度变化主要影响土壤TOC含量、TN含量、C/P和N/P,对TP含量和C/N的影响相对较小。

关键词:滩涂;土地利用变化;土壤;化学计量学;盐度

中图分类号: S181 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)08-0273-06

生源要素碳(C)、氮(N)、磷(P)的化学计量学关系对于维持生态系统结构、功能及其稳定性具有重要作用^[1-2]。土壤中的C、N、P化学计量比直接影响微生物种群动态、有机质分解、植物养分吸收等一系列生态过程,并进一步影响生态系统对全球变化的响应与反馈^[3]。土壤C、N、P化学计量比既反映了土壤养分的供应、限制关系,又反映了土壤生态系统碳的消耗与固定过程,同时反映了自然因素和人为因素对土壤生源要素的影响程度^[1]。因此,土壤C、N、P化学计量关系已成为目前土壤生态学及生物地球化学的研究热点和不可缺少的重要指标。

土壤C、N、P化学计量比主要受区域水热条件和成土作用特征的控制,同时受到人类活动的影响^[1,4]。近年来,随着社会经济快速发展,人类活动对自然生态系统的干扰不断增强,并进一步对土壤C、N、P生物地球化学过程产生深刻影响,C、N、P化学计量关系是反映这种变化的表现性指标^[4]。人类活动(如施肥、污染、土地利用变化等)可以改变环境条件,导致土壤养分循环和C、N、P化学计量关系等发生变化,进而强烈地影响生态系统、碳循环和地球气候之间的相互作用^[1]。

土地利用变化对土壤C、N、P化学计量比具有显著影响^[5-7],这种影响在湿地生态系统中表现得尤为突出和明

显^[4,8-9]。研究显示,在河口湿地土地利用变化过程中,土壤C/N、C/P、N/P均表现为随着干扰程度的增大而逐渐降低的趋势^[4];滨海芦苇湿地在农业开垦下,土壤有机碳含量、全氮含量均显著增加,而全磷含量变化不大,退耕湿地土壤C/N、C/P、N/P均显著高于新生湿地^[8];在湖泊湿地中,天然湿地土壤C/N显著高于围垦农田,而C/P和N/P则显著低于围垦农田^[9]。不同湿地系统土地利用变化对土壤C、N、P化学计量比可能具有不同的影响。

滨海滩涂是一种特殊的湿地类型,是陆-海界面重要的缓冲带和过渡带,也是我国重要的后备耕地资源^[10]。几十年来,围垦等人类活动改变了自然海岸格局,对滨海滩涂造成了巨大冲击,使滨海滩涂土地利用由自然湿地向农田转化^[11],这种转化势必驱动土壤C、N、P含量及其化学计量关系发生变化,进而影响整个滨海生态系统的稳定^[12]。研究滨海滩涂由原生草滩到围垦农田的土地利用变化对土壤生源要素的影响具有重要的理论和现实意义。目前,相关研究主要集中在河口湿地^[4,13]、湖泊湿地^[3,9]、沼泽湿地^[14]以及三江平原湿地^[15]等上,而对于面积广阔的滨海滩涂湿地尚没有相关研究。盐度变化是滨海滩涂土地利用变化的最直观指示,也是其他许多重要土壤指标和植物生长的关键影响因素^[16-17],然而有关滩涂土壤盐度变化和C、N、P含量及其化学计量比的关系尚未有研究报道。

基于此,本研究选择江苏省典型滨海滩涂原生草滩及其围垦农田为研究对象,设置采样断面,分析滨海滩涂由自然湿地转变为围垦农田过程中土壤C、N、P含量及其化学计量关系的变化,并探讨土壤盐度与C、N、P含量及其化学计量比的关系,以期对江苏省滨海滩涂的生态保护、湿地利用与合理开

收稿日期:2017-12-02

基金项目:国家自然科学基金(编号:41301551);江苏省自然科学基金(编号:BK20130426、BK20131219)。

作者简介:潘国浩(1992—),男,江苏连云港人,硕士研究生,主要从事滨海湿地污染生态学研究。E-mail:1256133359@qq.com。

通信作者:付强,博士,副教授,主要从事滩涂生物地球化学研究。E-mail:fuqiangaal@126.com。

发提供一定的科学依据。

1 材料与与方法

1.1 研究区概况

采样点选择在江苏盐城新洋港和斗龙港之间的典型原生滩涂及其外围围垦农田。该原生滩涂地区面积约 218.9 km²,保存着较为完整的滨海滩涂生态系统,植被资源丰富。除芦苇(*Phragmites australis*)、碱蓬(*Suaeda salsa*)2种原生植被大量分布外,外来入侵物种互花米草(*Spartina alterniflora*)面积逐渐扩大。在水盐影响下,滩涂草滩从陆地向海洋呈现明显条带状分布,土质主要为滨海盐土。原生滩涂周边土地主要为经过筑堤围垦、淋盐洗盐形成的农田,主要种植小麦(*Triticum aestivum*)、大麦(*Hordeum vulgare*)、玉米(*Zea mays*)、大豆(*Glycine max*)、油菜(*Bassika kapestris*)等作物,土质主要为脱盐发育而成的潮土。

1.2 样品采集与预处理

2013年5月,在研究区由海至陆沿垂直海岸线方向设置2条采样断面(A、B),每个断面设置13个采样点,合计26个采样点(图1)。采样点包括滩涂原生草滩:碱蓬滩(A1~A3, B1~B3)、芦苇滩(A4~A6, B4~B6);围垦农田:小麦田(A7~A9, B7~B9)、玉米田(A10, B13)、大麦田(A11~A12, B10~B11)、油菜田(A13, B12)。各块农田中每年农作物种植种类并不固定,因此将农田作为整体进行讨论。

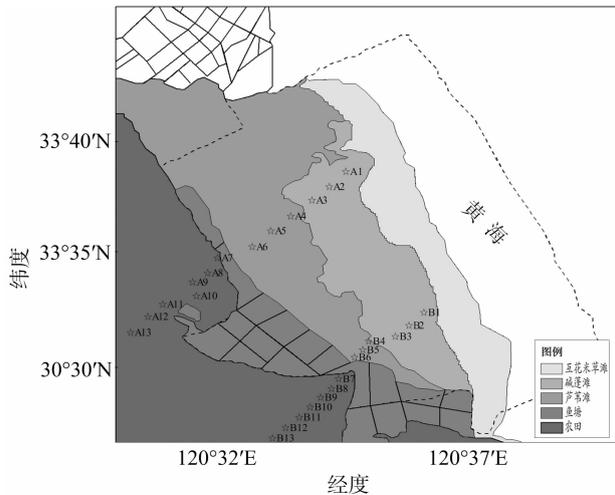


图1 滩涂采样点示意

在每个采样点用荷兰 Eijkelkamp 土壤采样器随机采集 5 个 0~20 cm 深土壤样品,并等量混合,作为该采样点表层土壤样品。样品采集后带回实验室风干、研磨、过筛,用于测定土壤理化性质。

1.3 分析方法

土壤全磷(TP)含量采用酸溶-钼锑抗法测定;全氮(TN)含量采用重铬酸钾-硫酸消解,开氏法测定;有机碳(TOC)含量采用重铬酸钾外加热法测定;土壤盐度(Salt)采用质量法测定,同时利用电导率仪测定电导率(EC)(水土比 5 mL:1 g);pH 值采用酸度计测定。

土壤 C、N、P 化学计量比(C/P、N/P、C/N)均采用元素物质的量之比进行计算。

1.4 统计方法

采用 SPSS 10.0 和 Origin 7.5 软件对数据进行分析 and 作图。采用 Mann-Whitney U 非参数检验进行差异性分析;秩次转换后,进行多重比较,方差齐性时,采用 LSD 检验,方差不齐时,采用 Tamhane's 检验;采用 Spearman 秩相关分析进行相关性分析,置信水平为 $\alpha = 0.05, 0.01, 0.001$ 。

2 结果与分析

2.1 滩涂原生草滩及围垦农田土壤碳、氮、磷含量及其化学计量学特征

由图 2 可知,滩涂原生草滩及围垦农田土壤 pH 值在 8.10~8.95 之间,随着碱蓬滩、芦苇滩、农田的土地利用变化,pH 值整体略呈降低趋势,但差异未达到显著水平($P > 0.05$)。研究区土壤盐度、电导率分别在 0.012%~2.409%、0.10~4.48 mS/cm 之间,其中碱蓬滩土壤盐度显著高于芦苇滩和农田土壤($P < 0.05$),芦苇滩盐度显著高于农田土壤($P < 0.05$),随着碱蓬滩、芦苇滩、农田的土地利用变化,土壤盐度逐渐降低。研究区 TOC、TN、TP 含量分别在 0.588%~2.832%、0.025%~0.140% 和 0.048%~0.104% 之间,在由碱蓬滩、芦苇滩到农田的土地利用变化过程中,TOC、TN 含量均显著升高($P < 0.05$);TP 含量与 TOC、TN 含量不同,碱蓬滩和芦苇滩 TP 含量没有显著差异($P > 0.05$),而农田 TP 含量有一定程度的升高。从碱蓬滩到农田,TOC、TN 含量升高近 2 倍,而 TP 含量仅升高 0.3 倍,相比而言,TOC、TN 含量变化幅度远高于 TP 含量。

滩涂原生草滩及围垦农田土壤 C/P 在 22.2~112.4 之间,随着碱蓬滩、芦苇滩、农田的土地利用变化,土壤 C/P 逐渐升高,相比于碱蓬滩,农田土壤 C/P 提高约 1.2 倍。研究区土壤 N/P 在 0.81~4.65 之间,其变化趋势与 C/P 一致,随着土地利用变化,N/P 逐渐升高,农田土壤相比于碱蓬滩提高约 1.3 倍。相比于 C/P 和 N/P,土壤 C/N 变异性相对较小(18.5~30.4),其变化趋势与 C/P 和 N/P 明显不同。随着碱蓬滩、芦苇滩、农田的土地利用变化,土壤 C/N 没有显著变化。

2.2 与其他研究的对比

通过与部分典型湿地表层土壤以及全球、中国湿地土壤 C、N、P 化学计量比的对比(表 1),可以看出,总体而言,研究区土壤 C/P 低于中国和全球湿地土壤平均 C/P,而与其他湿地系统土壤相比处于相对居中的水平。研究区总体 N/P 远低于中国和全球土壤平均 N/P,也低于大部分文献中其他湿地系统。研究区总体 C/N 则高于中国和全球土壤平均 C/N,与其他湿地土壤相比,研究区 C/N 也处于相对较高水平。相对于较高的 C/N,较低的 C/P 和 N/P 可能与研究区较高的 P 水平及较低的 N 水平有关。滨海滩涂原生草滩及围垦农田土壤总体表现为 N 限制。

2.3 研究区土壤碳、氮、磷含量及其化学计量比的相关关系

滩涂原生草滩及围垦农田土壤 C、N、P 含量及其化学计量比的 Spearman 秩相关分析结果如表 2 所示。TOC 含量与 TN 含量具有极显著相关性($r = 0.95, P < 0.001$),表示两者具有共同的来源和归趋过程;TOC 含量与 TP 含量也具有极显著相关性($r = 0.54, P < 0.01$),但相关性明显低于 TN 含量,说明与 N 相比,P 对有机碳的影响更多为间接过程^[22]。

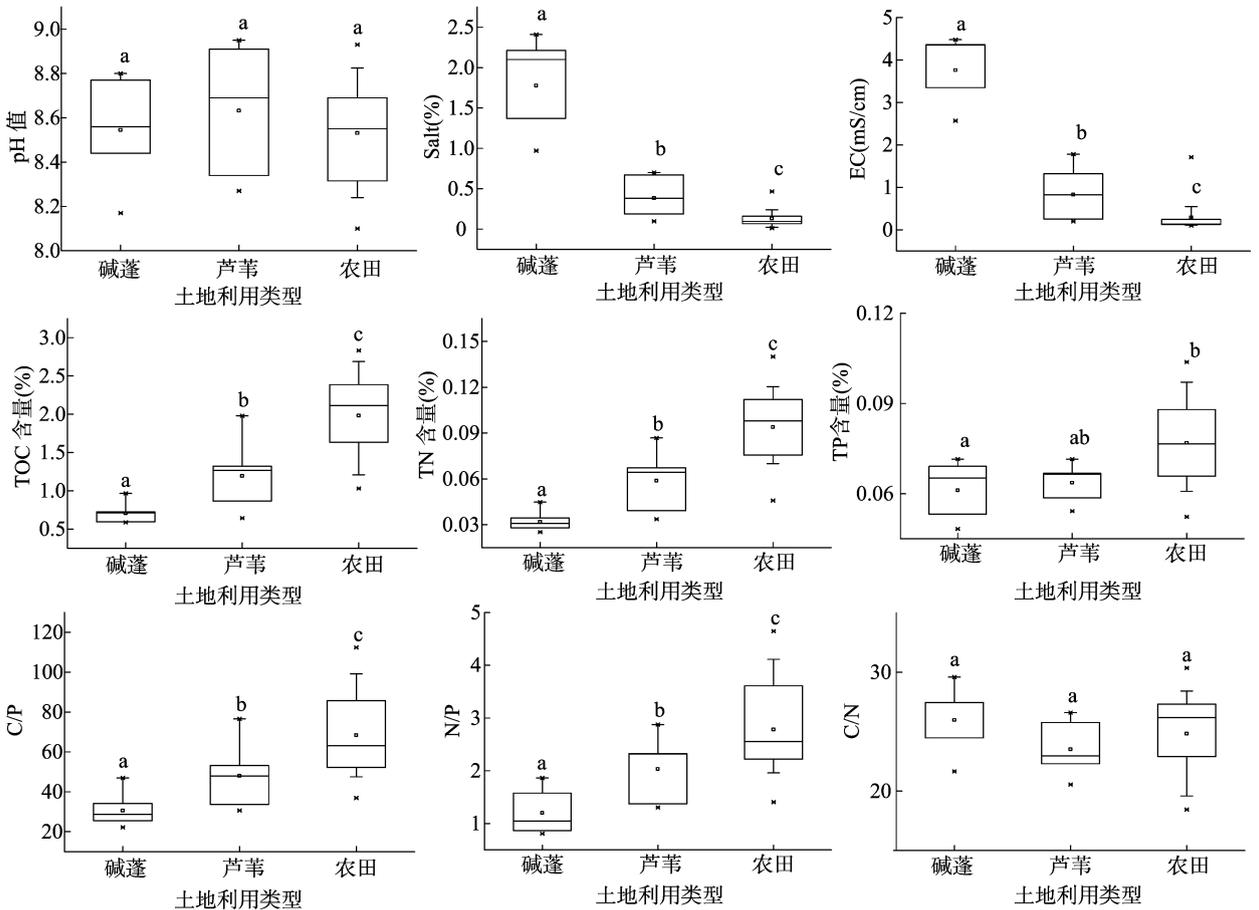


图2 滩涂原生草滩及围垦农田土壤基本理化性质及碳、氮、磷化学计量学特征

表1 滩涂原生草滩及围垦农田土壤碳、氮、磷化学计量比与相关研究的对比

区域	土地利用类型	土层 (cm)	C/P	N/P	C/N
本研究	碱蓬滩	0~20	30.5 ± 9.0	1.2 ± 0.4	26.0 ± 2.8
	芦苇滩	0~20	47.9 ± 16.5	2.0 ± 0.6	23.5 ± 2.3
	农田	0~20	68.4 ± 22.2	2.8 ± 0.9	24.8 ± 3.5
	研究区总体	0~20	54.9 ± 24.1	2.2 ± 1.0	24.8 ± 3.1
闽江河段芦苇湿地 ^[18]	芦苇	0~60	67.7	3.2	26.0
闽江河口湿地 ^[4]	芦苇沼泽	0~50	156.1	6.1	25.3
	农田	0~50	46.2	2.7	17.6
胶州湾芦苇潮滩 ^[16]	芦苇	0~60	182.6	11.6	17.1
鄱阳湖南毗湿地 ^[9]	芦苇	0~30	51.0	3.5	14.7
崇明东滩芦苇湿地 ^[19]	芦苇	0~20	56.5	2.1	25.8
黄河三角洲潮汐湿地 ^[20]	碱蓬	0~20	11.7	0.9	13.7
	芦苇	0~20	21.6	2.3	9.5
天津滨海芦苇湿地 ^[21]	芦苇	0~25	76.4	6.9	11.0
中国 ^[13]			61.0 ± 0.9	5.2 ± 0.1	11.9 ± 0.4
全球 ^[13]			186.0 ± 12.9	13.1 ± 0.8	14.3 ± 0.5

注: C、N、P 化学计量比均换算为物质的量之比。

TN 含量和 TP 含量之间具有显著相关性 ($r = 0.48, P < 0.05$), 表示两者来源和归趋具有差异。总体而言, C、N、P 之间具有一定的相互依存关系, 在氮和有机碳之间这种关系更加显著。

C/P 与 TOC 含量具有极显著相关性 ($r = 0.91, P < 0.001$), 而与 TP 含量不相关, 表明研究区土壤 C/P 主要由有

机碳控制, TP 含量作用较小。同样 N/P 与 TN 含量极显著相关 ($r = 0.89, P < 0.001$), 而与 TP 含量没有显著相关性, 表明研究区土壤 N/P 主要由 TN 含量控制, 而与 TP 含量关系不大。受 TOC 和 TN 同源性的影响, 土壤 C/N 与 TOC 含量、TN 含量均没有显著相关性, 而与 TP 含量也没有显著相关性, 表明 TP 含量对研究区土壤 C/N 影响不大。

表2 研究区土壤碳、氮、磷含量及其化学计量比的

Spearman 秩相关分析

指标	TOC 含量	TN 含量	TP 含量	C/N	C/P	N/P
TOC 含量	1					
TN 含量	0.95***	1				
TP 含量	0.54**	0.48*	1			
C/N	ns	ns	ns	1		
C/P	0.91***	0.90***	ns	ns	1	
N/P	0.82***	0.89***	ns	ns	0.94***	1

注: ns 表示相关不显著 ($P > 0.05$); **、*、* 分别表示在 0.001、0.01、0.05 水平上显著相关。

2.4 滩涂土地利用变化过程中土壤碳、氮、磷含量随盐度的变化

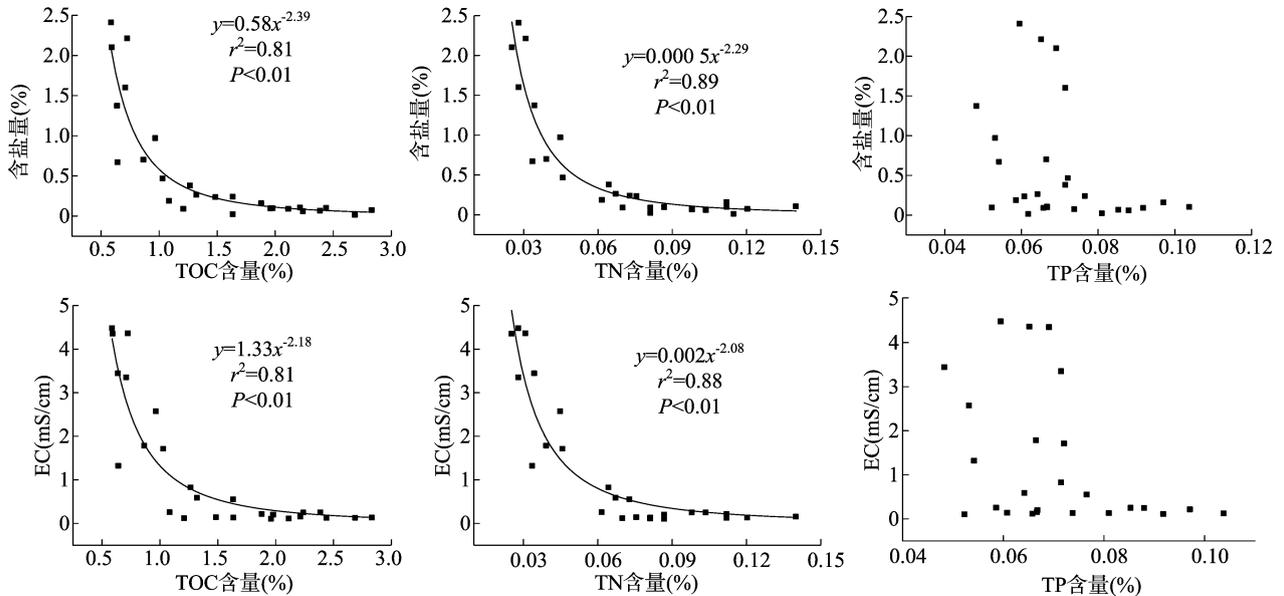


图3 滨海滩涂土地利用变化过程中土壤盐度与碳、氮、磷的关系

2.5 滩涂土地利用变化过程中土壤碳、氮、磷化学计量比随盐度的变化

受土壤 C、N、P 含量与盐度关系的影响,滩涂土地利用变化过程中,土壤 C、N、P 化学计量比同样与盐度表现出一定的相关关系。由图 4 可知,在滩涂土地利用变化过程中,土壤 C/P、N/P 均随着盐度降低表现出先缓慢升高再急剧升高趋势,其相关性同样表现为以一阶递减幂函数(Allometric1)关系($r^2 \geq 0.75$, $P < 0.01$);而土壤 C/N 随盐度则没有表现出明显的变化规律。说明滨海滩涂土地利用变化及其盐度变异性主要影响土壤 C/P 和 N/P,而对 C/N 的影响规律不显著。

3 结论与讨论

湿地土地利用变化对土壤质量的影响是目前环境科学、湿地科学和土壤学研究的热点之一^[23]。作为一种特殊的湿地类型,滨海滩涂土地利用变化及其导致的环境效应也已引起广泛关注^[24]。研究指出,滨海滩涂土地利用转变所导致的 C、N、P 变化是滨海富营养化的重要诱因^[12],而富营养化又会促进滨海滩涂的丧失^[25],因此研究土壤 C、N、P 在从滨海滩涂原生植被演替到围垦农田演化过程中的含量、比例变化及其影响因素具有重要意义。

滨海滩涂土地利用变化过程中,土壤盐度变化是其最显著的变化特征之一。盐度变化是滩涂土地利用变化的直观反映,能在土壤内部影响 C、N、P 的生物地球化学过程^[16-17]。由图 3 可知,滨海滩涂由碱蓬滩、芦苇滩到农田的土地利用变化过程中,土壤 TOC、TN 含量随盐度呈相似的变化趋势,均随着盐度降低缓慢升高,当盐度降低至约 0.5% (EC 约为 1.5 mS/cm) 时,TOC、TN 含量随盐度的降低急剧升高,可以用一阶递减幂函数(Allometric1) $y = a \cdot x^b$ 对盐度、TOC、TN 含量的关系进行拟合($r^2 > 0.80$, $P < 0.01$),即在滨海滩涂土地利用变化过程中,土壤有机质、TN 含量随盐度降低呈异速生长幂律关系。TP 含量与 TOC、TN 含量的变化趋势明显不同,它随盐度没有明显规律性变化趋势,TP 含量在滩涂土地利用变化过程中总体上保持一定程度的稳定。

本研究中,滨海滩涂原生草滩及围垦农田 TOC、TN、TP 含量平均分别为 1.51%、0.07%、0.07%,与其他湿地、农田土壤^[2]相比,TN 含量明显偏低,而 TP 含量相对较高,TOC 含量则处于适中水平。高磷低氮可能是苏北滨海滩涂土壤的一个重要特征,毛志刚等也有类似发现^[26]。研究显示,滨海滩涂土壤中,P 主要以钙结合态的无机磷为主^[27],而研究区土壤 CaCO_3 是江苏近海含量最高的区域之一,可达 10% ~ 15%^[28]。在近海碱性环境下,土壤吸附外源磷后,易形成大量 Ca-P 并累积在土壤中^[29]。此外,滩涂中通常有大量鸟类聚集,通过鸟粪也容易引进相当数量的磷^[30],而除植物吸收外,滩涂中土壤 P 缺少其他去除途径,从而导致 P 在滩涂土壤中的累积。而 N 主要来源于与植物有关的生物过程,碱蓬滩等植物量通常较低,同时土壤中存在较强的硝化、反硝化去除途径^[31],因此 N 含量在滩涂土壤中相对偏低。

由于 C、N 通常作为有机质的结构性成分,且两者归趋过程基本一致,因此土壤中有机质和 N 的含量变化通常具有同步性^[4,32],而 P 除植物残体的少量有机磷外,主要为成土母质和岩石风化的无机磷形态,因此 P 的变化通常具有滞后性^[4]。本研究中,滨海滩涂土壤中 TOC 含量和 TN 含量呈极显著正相关关系($P < 0.001$),而 TP 含量与 TOC、TN 含量的

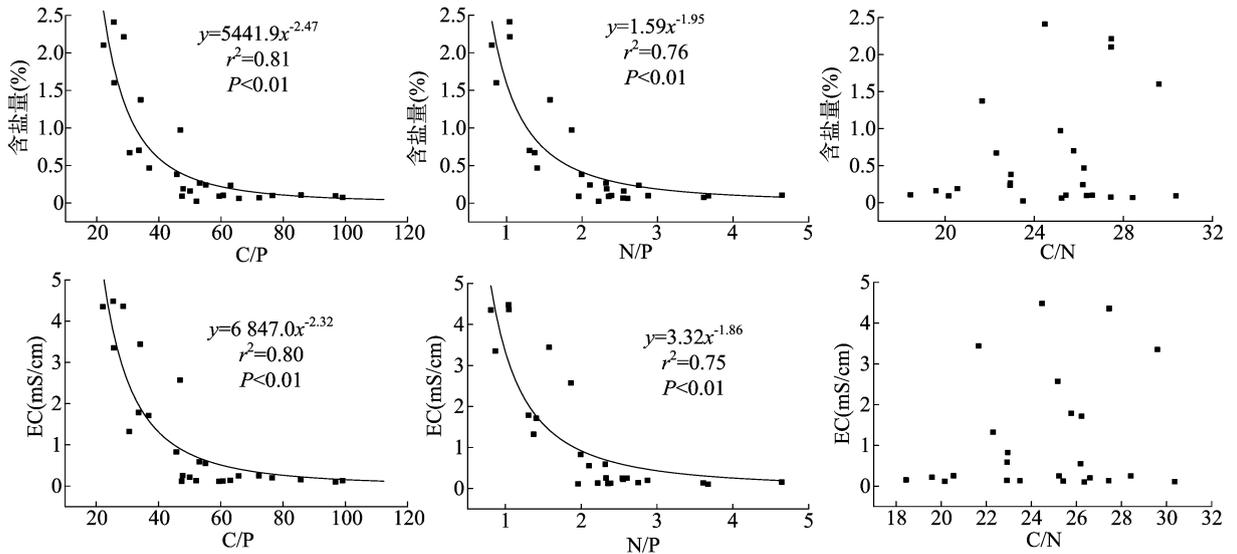


图4 滨海滩涂土地利用变化过程中土壤盐度与碳、氮、磷化学计量比的关系

相关性稍弱,同样支持了这一结论。

土地利用变化对土壤 C、N、P 含量具有显著影响^[33]。本研究发现,滨海滩涂由原生草滩转变为农田后,土壤 TOC、TN 含量均提高近 2 倍,而 TP 含量仅提高 0.3 倍,在滩涂土地利用变化过程中,P 能够保持相对的稳定。王维奇等研究发现,随着干扰程度的增大,湿地土壤 C、N 含量变化较快,且对环境的响应几乎同步,而 P 含量变化滞后于 C、N 含量,具有相对的稳定性^[4,32]。屈凡柱等同样发现,湿地土地利用变化过程中,C、N 含量变化幅度远高于 P 含量^[8],这与本研究结果基本一致。围垦为农田后,在人为干扰下土壤有机质含量会显著升高^[8,34],从而促进 N 含量的升高,施肥等外源氮的引入以及犁耕层淋溶的降低也进一步提高了土壤 N 含量^[9]。而 P 主要以稳定的 Ca-P 形态存在,在土地利用变化过程中变异性较小,外源磷肥等能够一定程度上提高土壤 P 含量,但由于植物吸收、排水等过程导致其含量变异性远小于有机质和 N。C、N、P 的这种变化特性将直接影响滩涂土地利用变化过程中它们的化学计量比变化。

影响土壤 C、N、P 化学计量比的因素很多,其主要受区域水热条件和成土作用的控制。由于气候、地貌、成土母质、年代、植被和土壤生物等土壤形成因子和人类活动的影响,土壤 C、N、P 含量变异性很大,使得它们的化学计量比发生较大变化^[8]。Tian 等研究发现,我国土壤 C、N、P 比值约为 60:5:1^[2],与之相比,滩涂原生草滩和围垦农田土壤具有相对较低的 C/P、N/P,相对较高的 C/N,呈现 N 限制,这可能主要与滨海滩涂高磷低氮的土壤特性有关。在对黄河三角洲芦苇湿地^[20]及崇明东滩^[19]的研究中同样发现了较高的 C/N 和较低的 C/P、N/P,而闽江口等^[4]湿地则没有类似发现。因此,N 限制可能是我国北部滨海滩涂湿地的基本特征。

土壤 C、N、P 化学计量比随滩涂由原生草滩到农田的土地利用转变发生明显变化,C/P 和 N/P 显著升高,而 C/N 没有显著变化。研究显示,在土地利用变化过程中,土壤 C/P 和 N/P 随气候、土壤类型、土壤深度和风化阶段呈现显著的空间变异性,而 C/N 则在不同层次间基本保持恒定^[2]。周正

虎等研究发现,土地利用变化并没有显著改变土壤碳-氮关系,而显著改变碳-磷、氮-磷关系^[5]。土壤 P 含量对土地利用变化的响应与 C 和 N 并不相同,磷元素和碳、氮元素不仅在来源上不同,且对外界干扰的响应机制可能也不同,从而导致碳-磷、氮-磷关系具有一定的局域性^[2,35]。本研究发现,C 含量和 N 含量分别是决定滩涂不同土地利用 C/P 和 N/P 的关键因素,这可能是由磷素的相对稳定以及碳、氮对于环境的敏感性所致^[4]。

土壤 C、N、P 化学计量比反映了土壤内部生源要素循环,综合了生态系统功能的变异性,反映了土壤 C、N、P 的矿化作用和固持作用,可以作为养分限制以及碳、氮、磷饱和的诊断和有效预测指标^[1]。由 C、N、P 化学计量比的变化趋势可以看出,滩涂由原生草滩转变为农田后,促进了土壤碳、氮库的增加而有机质的矿化和分解则没有显著变化,因此从 C、N、P 化学计量比来看,滩涂土地利用变化有助于碳的储存和氮限制的缓解。

滩涂围垦过程中要经历压盐、洗盐和排盐过程,土壤盐度变化是滨海滩涂土地利用变化的重要特征性指标^[36]。研究显示,盐度变化也是土壤养分环境行为的重要影响因子^[37]。刘文龙等研究发现,土壤盐度是滨海芦苇滩涂土壤 C、N、P 化学计量比的最主要影响因子^[16]。分析盐度和土壤 C、N、P 含量及其化学计量比的关系能够更加深入地了解滩涂土地利用变化对土壤养分的影响过程。本研究显示,在滩涂由原生草滩到农田的土地利用变化过程中,盐度和 TOC 含量、TN 含量、C/P、N/P 均呈幂函数关系,欧维新等在滨海滩涂研究中也类似发现^[17,38]。研究发现,滩涂土壤盐度高,有机质含量会受到抑制,而脱盐有利于植物生长,增加土壤有机质含量,有机质增加的同时可促进土壤 N 的累积并进一步促进土壤脱盐,三者相辅相成,在滩涂的农业开发中,能降低土壤盐分的土地利用变化能起到改良土壤的作用^[17,38]。大量关于土壤碳氮比的研究表明,植物是陆地生态系统土壤碳、氮的主要来源,而磷主要取决于土壤母质和岩石风化^[8],盐度通过植物对碳、氮产生的影响基本同步,而对土壤母质的影响通常较小,因而盐度变化对土壤 TP 含量和 C/N 并没有呈现显著

的规律性影响。

本研究表明,滨海滩涂土壤表现为较高的 C/N、较低的 C/P 和 N/P,总体表现为 N 限制;滨海滩涂由原生草滩向农田的转化能够显著提高土壤 TOC 含量、TN 含量及 C/P、N/P,而对 TP 含量和 C/N 的影响相对较小;随着土壤盐度的降低,TOC 含量、TN 含量及 C/P、N/P 均显著升高,且呈一阶递减幂函数关系,土壤 TP 含量及 C/N 随盐度变化没有表现出明显的规律性变化。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, et al. Pattern and variation of C : N : P ratios in China's soils; a synthesis of observational data [J]. Biogeochemistry, 2010, 98 : 139 - 151.
- [3] 付 珊, 吴 琴, 尧 波, 等. 南矶湿地土壤碳、氮、磷化学计量比沿水位梯度的分布[J]. 湿地科学, 2015, 13(3) : 374 - 380.
- [4] 王维奇, 曾从盛, 钟春棋, 等. 人类干扰对闽江河口湿地土壤碳、氮、磷生态化学计量学特征的影响[J]. 环境科学, 2010, 31(10) : 2411 - 2416.
- [5] 周正虎, 王传宽, 张全智. 土地利用变化对东北温带幼龄林土壤碳、氮、磷含量及其化学计量特征的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(20) : 6694 - 6702.
- [6] Guo L B, Gifford R M. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis[J]. Global Change Biology, 2002, 8(4) : 345 - 360.
- [7] Xu Z H, Ward S, Chen C R, et al. Soil carbon and nutrient pools, microbial properties and gross nitrogen transformations in adjacent natural forest and hoop pine plantations of subtropical Australia[J]. Journal of Soils and Sediments, 2008, 8(2) : 99 - 105.
- [8] 屈凡柱, 孟 灵, 付战勇, 等. 不同生境条件下滨海芦苇湿地 C、N、P 化学计量特征[J]. 生态学报, 2018, 38(5) : 1731 - 1738.
- [9] 付 珊. 鄱阳湖天然湿地开垦前后土壤 C、N、P 化学计量特征研究[D]. 南昌:江西师范大学, 2015.
- [10] 沈永明, 冯年华, 周 勤, 等. 江苏沿海滩涂围垦现状及其对环境的影响[J]. 海洋科学, 2006, 30(10) : 39 - 43.
- [11] 欧维新, 杨桂山, 李恒鹏, 等. 苏北盐城海岸带景观格局时空变化及驱动力分析[J]. 地理科学, 2004, 24(5) : 610 - 615.
- [12] Gedan K B, Silliman B R, Bertness M D. Centuries of human - driven change in salt marsh ecosystems [J]. Annual Review of Marine Science, 2009, 1 : 117 - 141.
- [13] 张 友, 徐 刚, 高 丽, 等. 黄河三角洲新生湿地土壤碳、氮、磷分布及其生态化学计量学意义[J]. 地球与环境, 2016, 44(6) : 647 - 653.
- [14] 肖 烨, 商丽娜, 黄志刚, 等. 吉林东部山地沼泽湿地土壤碳、氮、磷含量及其生态化学计量学特征[J]. 地理科学, 2014, 34(8) : 994 - 1001.
- [15] Zhang Z S, Lu X G, Song X L, et al. Soil C, N and P stoichiometry of *Deyeuxia angustifolia* and *Carex lasiocarpa* wetlands in Sanjiang Plain, Northeast China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2012, 12(9) : 1309 - 1315.
- [16] 刘文龙, 谢文霞, 赵全升, 等. 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[J]. 湿地科学, 2014, 12(3) : 362 - 368.
- [17] 欧维新, 杨桂山, 于兴修, 等. 盐城海岸带土地利用变化的生态环境效应研究[J]. 资源科学, 2004, 26(3) : 76 - 83.
- [18] 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.
- [19] 韩 华, 王昊彬, 余华光, 等. 崇明滩涂湿地不同盐度梯度下芦苇种群及土壤的生态化学计量学特征[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(5) : 816 - 823.
- [20] 曹 磊, 宋金明, 李学刚, 等. 黄河三角洲典型潮汐湿地碳、氮、磷生物地球化学特征[J]. 海洋科学, 2015, 39(1) : 84 - 92.
- [21] 刘 丹, 陈 清, 王义东, 等. 天津市芦苇沼泽底泥中的碳、氮和磷分布及其生态化学计量学特征[J]. 湿地科学, 2016, 14(6) : 908 - 915.
- [22] 郭胜利, 党廷辉, 刘守赞, 等. 磷素吸附特性演变及其与土壤磷素形态、土壤有机碳含量的关系[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(1) : 33 - 39.
- [23] 刘红玉, 吕宪国, 张世奎. 湿地景观变化过程与累积环境效应研究进展[J]. 地理科学进展, 2003, 22(1) : 60 - 70.
- [24] Li J G, Pu L J, Zhu M, et al. Evolution of soil properties following reclamation in coastal areas: a review [J]. Geoderma, 2014, 226 - 227 : 130 - 139.
- [25] Deegan L A, John D S, Warren R S, et al. Coastal eutrophication as a driver of salt marsh loss [J]. Nature, 2012, 490(7420) : 388 - 392.
- [26] 毛志刚, 谷孝鸿, 刘金娥, 等. 盐城海滨盐沼湿地及围垦农田的土壤质量演变[J]. 应用生态学报, 2010, 21(8) : 1986 - 1992.
- [27] 尹爱经. 典型滩涂围垦区土壤理化性质和磷形态演变[D]. 南京:南京大学, 2015 : 50 - 72.
- [28] 任美鄂. 江苏省海岸带和海涂资源综合调查报告[R]. 北京:海洋出版社, 1986 : 12 - 30.
- [29] 高建华, 白凤龙, 杨桂山, 等. 苏北潮湿湿地不同生态带碳、氮、磷分布特征[J]. 第四纪研究, 2007, 27(5) : 756 - 765.
- [30] Portnoy J W. Gull contributions of phosphorus and nitrogen to a Cape Cod kettle pond [J]. Hydrobiologia, 1990, 202 : 61 - 69.
- [31] 徐 莎, 陈 圆, 印 杰, 等. 典型滨海湿地沉积物反硝化与硝态氮氮化相对重要性研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2016, 40(2) : 9 - 15.
- [32] Cleveland C C, Liptzin D. C : N : P stoichiometry in soil: is there a "Redfield ratio" for the microbial biomass? [J]. Biogeochemistry, 2007, 85 : 235 - 252.
- [33] 曾从盛, 钟春棋, 全 川, 等. 闽江口湿地不同土地利用方式下表层土壤 N, P, K 含量研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(3) : 87 - 91.
- [34] Fernández S, Santín C, Marquín J, et al. Saltmarsh soil evolution after land reclamation in Atlantic estuaries (Bay of Biscay, North coast of Spain) [J]. Geomorphology, 2010, 114(4) : 497 - 507.
- [35] Chen X W, Li B L. Change in soil carbon and nutrient storage after human disturbance of a primary Korean pine forest in Northeast China [J]. Forest Ecology and Management, 2003, 186(1/2/3) : 197 - 206.
- [36] 张华兵, 刘红玉, 李玉凤, 等. 自然条件下盐城海滨湿地土壤水分盐度空间分异及其与植被关系研究[J]. 环境科学, 2013, 34(2) : 540 - 546.
- [37] Wieski K, Guo H Y, Craft C B, et al. Ecosystem functions of tidal fresh, brackish, and salt marshes on the Georgia coast [J]. Estuaries and Coasts, 2010, 33(1) : 161 - 169.
- [38] 潘 宏, 陈邦本, 方 明. 江苏轻壤质滨海盐土向潮土演化过程中土壤有效养分的变化[J]. 江苏农业科学, 1993(2) : 41 - 43.