

黄河三角洲典型潮汐湿地碳、氮、磷生物地球化学特征

曹磊^{1,2,3}, 宋金明^{1,2}, 李学刚^{1,2}, 袁华茂^{1,2}, 李宁^{1,2}, 段丽琴^{1,2}, 王启栋^{1,2,3}

(1. 中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院生态与环境科学重点实验室 山东 青岛 266071; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 选择位于黄河三角洲的广饶潮汐湿地为研究对象, 对比了在不同的植被覆盖和水文条件下潮汐湿地土壤碳、氮、磷元素的垂直分布及生态化学计量学特征。结果表明, 在芦苇(*Phragmites australis*)覆盖下的 GRA2 区域沉积物总有机碳(TOC)和总氮(TN)含量明显高于碱蓬(*Suaeda salsa*)覆盖下的 GRA1 区域。GRA1 柱样 TOC 含量均值为 1.798 mg/g, 而 GRA2 柱样则为 3.109 mg/g。GRA1 柱样的 TN 含量范围在 0.108~0.213 mg/g, 均值为 0.165 mg/g, 而 GRA2 柱样 TN 含量范围则为 0.307~0.473 mg/g, 均值为 0.353 mg/g。总体上, 总磷(TP)含量的变化水平相对于 TOC 和 TN 来说较大, 其垂直变异系数较高。而与 TOC 和 TN 相反的是, GRA2 柱样中 TP 含量均值为 0.298 mg/g, 低于 GRA1 的 0.388 mg/g, 这可能跟 GRA2 区域芦苇的生长比碱蓬需要吸收更多的 P 元素有一定关系。研究区域沉积物 C、N、P 元素生态化学计量学比值普遍较低。相对较高的 C/N 值, 较低的 C/P 值和 N/P 则显示黄河三角洲潮汐湿地的生物地球化学过程可能更多地受营养元素 N 和 P 等的限制, 而前者可能是主要限制因素。本研究可为滨海湿地对全球碳和氮的储存提供基础数据, 为滨海湿地可持续发展的管理和保护提供科学依据。

关键词: 潮汐湿地; 碳; 氮; 磷; 生态化学计量学

中图分类号: Q145 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2015)01-0084-09

doi: 10.11759/hyxx20140408005

滨海湿地是一种特殊的生态系统类型, 它包括在海陆交互作用下被水体浸淹的沿海低地, 潮间带滩涂以及低潮时水深不超过 6 m 的浅海水域, 盐沼、滩涂等, 滨海湿地的特殊地理位置决定了它在物质的来源、迁移和转化等生物地球化学过程中起到非常关键的作用^[1-2]。较高的碳封存速率和相对较低的甲烷释放速率使单位面积的滨海湿地在全球变暖的情况下可能成为更有价值的碳汇, 研究滨海湿地碳收支有着非常重要的意义^[3-4]。有机碳(TOC)、总氮(TN)和总磷(TP)是滨海湿地土壤主要的生源要素, 它们是影响湿地生产力的最重要的生态因子^[5-6]。储存于滨海湿地沉积物中的有机碳是全球碳循环中重要组成部分, 而有机质的动力学过程则通过分解矿化和植物吸收等过程与氮循环密切联系在一起的。同时, 磷素的可利用性则对湿地的初级生产力和物种组成起着不可忽视的调节作用, 这与碳、氮的生物地球化学过程是不可分割的^[7]。同时, 对于生源要素的剖面分布特征的研究能够提供给我们有机碳的沉积与转化信息。生态化学计量学是研究生物系统能量平衡和多重化学元素平衡的科学^[8-9], 碳、氮、磷等元素作为营养元素及结构性元素, 在探究生态系统物

质和能量循环及平衡过程中发挥着十分重要的作用, 但目前对滨海湿地生态系统元素生态化学计量学的研究还十分有限^[10-12]。滨海湿地土壤提供了对于研究碳、氮、磷的生态化学计量学非常好的区域, 其元素生态化学计量学的研究有助于我们对湿地营养元素的生物地球化学循环及其平衡机制有更好的了解。

潮汐湿地是我国最普遍的滨海湿地类型之一, 黄河三角洲典型潮汐湿地分布广泛, 其生源要素的生物地球化学过程对于滨海湿地固碳能力的提升有着重要启示。对潮汐湿地不同植被和水文条件下碳、氮、磷的垂直变化特征进行研究有助于探寻滨海湿地生态系统生产力的影响因子及其碳循环对于全球碳循环的贡献。本文对黄河三角洲典型潮汐湿地土

收稿日期: 2014-04-08; 修回日期: 2014-07-10

基金项目: 国家海洋公益性项目(201205008); 国家海洋局环境评价项目(DOMEP(MEA)-01-01)

作者简介: 曹磊, (1985-), 女, 河南驻马店人, 博士研究生, 主要从事滨海湿地生物地球化学过程的研究。电话: 0532-82898583, E-mail: chaolei4732@sina.com; 宋金明, 通信作者, 研究员, E-mail: jmsong@qdio.ac.cn

壤中有机碳、总氮、总磷的生物地球化学特征及其生态化学计量学的变化特征进行了研究,并对其影响因素进行了分析,以期对黄河三角洲滨海湿地碳的埋藏和营养物质的循环与平衡机制有进一步的理解,并且为促进滨海湿地的可持续发展及利用滨海湿地增汇减排提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

广饶潮汐湿地位于山东省东营境内,地理坐标为 37°20′~37°42′N, 118°53′~118°58′E。该区属温带季风型大陆性气候,四季分明,夏季炎热多雨,冬季寒冷少雪多干燥。年平均气温 12.6℃,无霜期 196 d,年平均蒸发量是 1 796.5 mm,平均降雨量为 562.2 mm,70%的降水量集中于 6 月和 8 月。研究区域内土壤主要为隐域性潮土和盐土土类,不规则半日潮可以淹没整片湿地。主要植被类型有草本植物芦苇(*Phragmites australis*)和碱蓬(*Suaeda salsa*)。在广饶湿地选择了碱蓬覆盖度约为 95%的站位 GRA1 和芦苇覆盖度约为 95%的站位 GRA2 为研究区域,且 GRA2 站位靠近潮沟。

1.2 样品的采集与测定

用 PVC 管在研究区域采集了长度约为 74 cm 沉积物柱样 GRA1 和 GRA2。柱状沉积物以 2 cm 为间隔分样,置于洁净密封袋中冷冻保存。采集所得土样一部分经自然风干后过 60 目筛,用来测定土壤基本理化参数。另一部分在 60℃烘干至恒质量,然后将可见的植物残体、细根及砂砾剔除,将土样用研钵研磨,过 100 目筛,用于生源要素的测定。在激光粒度仪(Cilas 940L)上测定沉积物粒度,根据沉积物粒度累计百分含量得到砂、粉砂和黏土的含量。pH 值和电导率(EC)采用电位法测定(DDS-307 型电导仪和奥立龙 868 型酸度计,水土比为 1:5)。沉积物 TOC 含量的测定采用改进的 Walkley-Black 方法,相对标准偏差在 5%以内;TN 含量的测定用过硫酸钾氧化-锌镉还原法测定,相对标准偏差低于 8%;TP 含量的测定则用混酸消解-磷钼蓝法,相对偏差低于 7%。

1.3 数据分析

应用 SPSS 16.0 软件对数据进行统计分析,运用 Origin 8.0 软件对数据进行作图和计算。采用 Pearson 相关性系数对所获得参数进行相关性分析。C/N, C/P, N/P 值采用的是物质的量之比。

2 结果与讨论

2.1 沉积物的理化性质

湿地沉积物的理化性质不仅可以反映土壤结构状况和蓄水能力,还会影响湿地植被的生长,关系到湿地生态系统内不同生境的形成与植被演替,从而直接或间接地影响土壤中营养元素的含量和分布^[13]。图 1 显示了广饶湿地沉积物中 pH 和电导率的垂直变化特征。沉积物 pH 值在 GRA1 和 GRA2 柱样中的前 20 cm 都表现出了下降的趋势, GRA1 的 pH 值在 9.34~8.73, 尽管其表层 pH 值低于 GRA2 表层的 pH 值 9.47, 而在垂直剖面上, GRA1 的 pH 值要高于 GRA2(9.47~8.36)。如图 1 所示, GRA1 站位垂直方向上沉积物 pH 值变化要比 GRA2 站位显著。电导率可用来指示水溶性盐的含量,广饶湿地土壤电导率较高, GRA1 和 GRA2 柱样中电导率均值分别为 1 295.95 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 和 1 815.65 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。可见, GRA1 位点的可溶性盐分含量较高,这可能是由于 GRA2 位点靠近潮沟,潮水淹没更加频繁从而增加了沉积物中的盐分的缘故。

湿地植被能够消浪促淤,有效抵御滩面侵蚀,影响海岸带沉积动力过程和潮滩演变。滨海湿地植被的生长增加了滩面的粗糙度,潮流进入有植被生长的潮滩后,流速减小,水体的紊动减弱,进而削弱了其容纳悬浮泥沙的能力,促使悬沙颗粒沉降,同时亦遏制了滩面沉积物的再悬浮^[14]。水体中的悬浮泥沙直接黏附于植被,使之可以进一步捕捉潮水悬沙,最终导致细颗粒的大量沉降。因此,植被对细颗粒悬沙的促淤作用将导致植被生长带潮滩的滩面沉积物的细化。因此,沉积物粒径在滨海湿地沉积物有机碳积累方面扮演着十分重要的作用^[15-16]。表 1 给出了广饶湿地沉积物不同柱样粒度的组成与含量的垂直分布。可以看出,研究区域沉积物颗粒较细,以粒度小于 0.063 μm 的黏土和粉砂为主。其中,粉砂含量极高,达到粒度组成的 78.52%~79.53%,黏土含量较低,砂含量最低。GRA1 柱样中,黏土含量平均值为 15.79%,而 GRA2 柱中黏土含量高于 GRA1,均值为 20.37%,这可能是由于靠近潮沟的 GRA2 站位的覆盖植被是芦苇,且潮水入侵频率相对 GRA1 较高,更有利于细颗粒沉积物的沉积,随着滩面的淤积增长,沉积物的颗粒组分不断变细,其沉积物粒度组成中砂含量均值仅为 1.11%。细颗粒沉积物通常是有机质的载体,因此,有机碳的含量也会因此而

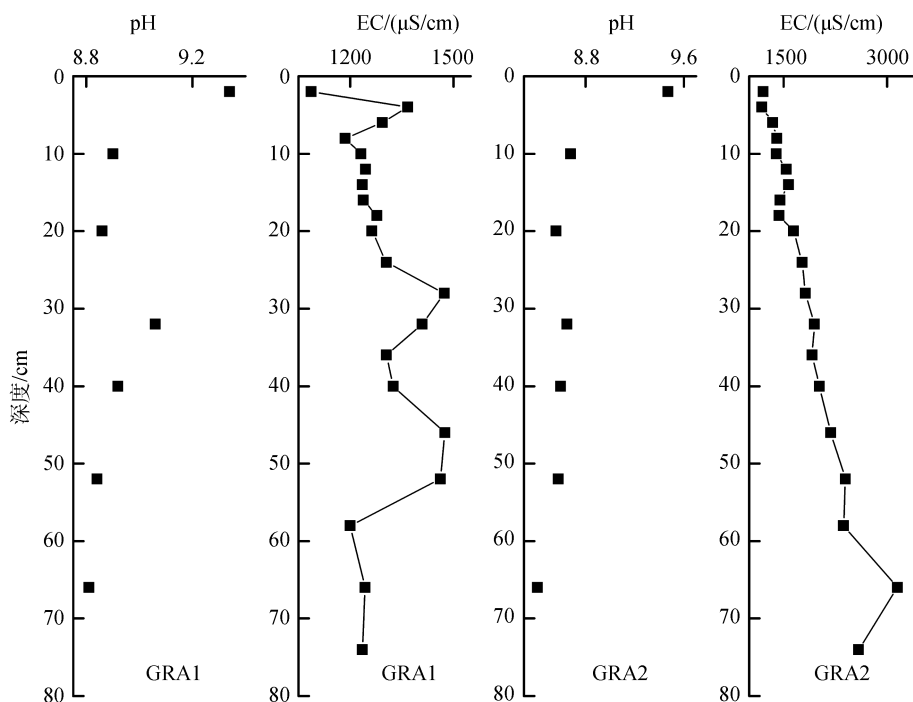


图 1 广饶湿地沉积物中 pH、EC 的垂直变化

Fig.1 Vertical distribution of selected physical-chemical properties in Guangrao wetland sediments

表 1 广饶湿地沉积物粒度组成的垂直分布

Tab.1 Vertical distribution of grain size in Guangrao wetland sediments

深度 (cm)	沉积物粒度组成(%)					
	黏土		粉砂		砂	
	GRA1	GRA2	GRA1	GRA2	GRA1	GRA2
0~2	9.85	87.78	2.37	14.12	84.48	1.40
2~4	12.45	15.07	86.83	80.65	0.72	4.28
4~6	14.25	14.68	85.75	84.14	0.00	1.18
6~8	12.44	18.94	87.56	81.06	0.00	0.00
8~10	11.18	18.76	87.46	81.24	1.36	0.00
10~12	20.29	19.05	79.71	80.18	0.00	0.77
12~14	18.27	19.05	80.37	80.20	1.36	0.75
14~16	21.18	20.04	78.82	79.23	0.00	0.73
16~18	14.72	21.07	81.68	78.07	3.60	0.86
18~20	18.34	15.73	79.27	82.49	2.39	1.78
22~24	17.18	23.17	79.68	75.77	3.14	1.06
26~28	21.41	23.43	75.96	76.57	2.63	0.00
30~32	17.95	16.33	78.27	81.54	3.78	2.13
34~36	15.14	18.28	70.30	80.20	14.56	1.52
38~40	18.37	22.66	78.09	77.34	3.54	0.00
44~46	17.46	21.21	76.81	76.72	5.73	2.07
50~52	20.04	29.59	72.73	70.41	7.23	0.00
56~58	7.630	28.95	61.22	70.30	31.15	0.75
64~66	13.85	25.84	82.04	74.16	4.11	0.00
72~74	13.72	21.41	80.23	75.72	6.05	2.87
平均值(%)	15.79	20.37	79.53	78.52	4.69	1.11

有所提升。GRA1 站位被碱蓬覆盖, 碱蓬的植株没有芦苇密集, 由于其根系不发达, 且茎叶短小, 株高较矮, 因此对细颗粒的捕捉促淤作用没有芦苇强烈, 细颗粒沉积相对较少, 因此, 对沉积物颗粒的改造不如芦苇明显。

2.2 沉积物中有机碳、总氮、总磷的地球化学特征

滨海潮滩湿地沉积物有机质的来源大致可以分为陆源和海源, 陆源主要是指潮滩上植物的生长所带来的有机质来源, 海源主要是海水中的浮游和底栖生物所带来的有机质来源^[14]。植被的生长在潮汐湿地的生源要素循环中发挥着重要作用, 一方面体现在植被对沉积物-海水界面间的氮素和磷素的吸附、转化以及累积; 另一方面 C, N, P 等生源要素在植物体内不断累积的同时, 每年通过植物凋落的生

物量重新归还于沉积物, 由此构成生源要素在沉积物-植物之间每年周而复始的循环。此外, 潮沟是潮汐湿地特别是低位河口潮滩的一个显著地形特征, 它同时受到入海径流和潮流的影响^[17]。潮沟的存在虽可为邻近区域站位带来一定量的外源有机物质, 通过植被的缓冲而停留在沉积物表层, 但潮水对地表的直接冲刷也会带走沉积物表层的有机物质。

如图 2 所示, 总体来看, GRA1 柱样中 TOC 含量较低, 在剖面 32 cm 以上 TOC 含量随深度增加而呈现缓慢上升趋势, 最高值为 2.218 mg/g, 在 32 cm 以下深度 TOC 含量又在不断下降, 直到在 74 cm 降到最低值 1.139 mg/g, 而在 36~52 cm 变化极小。GRA1 柱样 TOC 含量均值为 1.798 mg/g, 变异系数为 16.15%(表 1)。GRA1 柱样中 TN 含量范围在 0.108~0.213 mg/g, 均值为 0.165 mg/g, 且

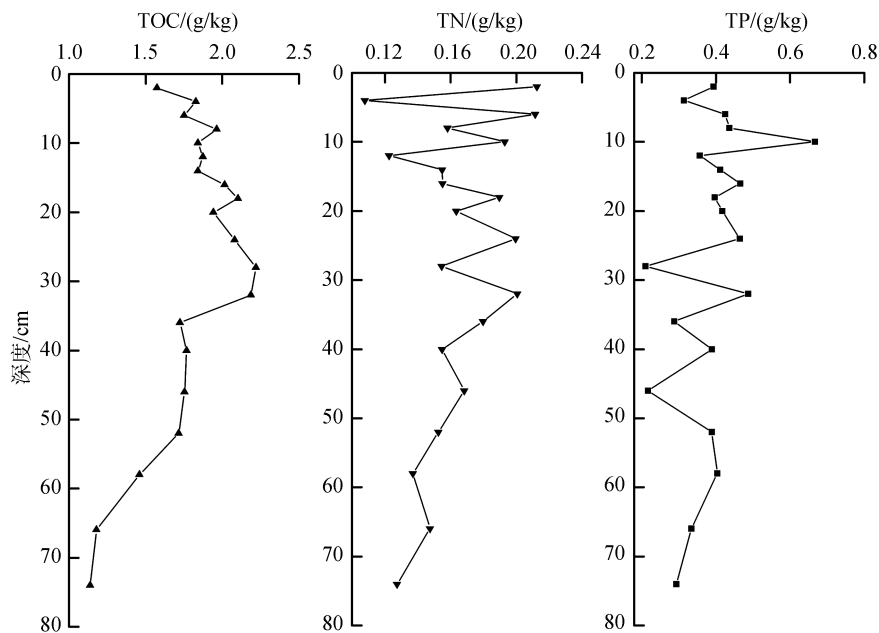


图 2 柱状沉积物 GRA1 中 TOC、TN 和 TP 含量的垂直分布
Fig.2 Vertical distribution of TOC, TN and TP contents in GRA1 profile

表 2 广饶湿地沉积物柱样中 TOC、TN 和 TP 含量的垂直变异

Tab.2 The variations of TOC、TN and TP distribution in Guangrao wetland

统计指标	TOC(mg/g)		TN(mg/g)		TP(mg/g)	
	GRA1	GRA2	GRA1	GRA2	GRA1	GRA2
最小值	1.139	2.307	0.108	0.307	0.210	0.175
最大值	2.218	4.325	0.213	0.473	0.667	0.525
均值	1.798	3.109	0.165	0.353	0.388	0.298
标准差	0.290	0.59	0.030	0.040	0.100	0.080
变异系数	16.15 %	19.10%	18.00%	11.26 %	26.07%	27.78%

40 cm 以下 TN 含量变化很小。TP 的变化水平相对于 TOC 和 TN 来说比较大, 最高值和最低值分别出现在 10 cm 和 28 cm, 变化范围在 0.210~0.667 mg/g, 均值为 0.388 mg/g, 变异系数高达 26.07 %。

与 GRA1 位点不同, GRA2 位点的生长植被为芦苇, 覆盖率大于 95%。明显地, GRA2 柱样中 TOC 含量高于 GRA1 柱样。如图 3 所示, TOC 含量在垂直剖面上的上升趋势并不是很规则。在前 10 cm 深度内, TOC 含量随着深度的增加而逐渐降低, 在 10 cm 深度以下, 除了在 12~14 cm 和 38~40 cm 出现明显的积累峰以外, TOC 含量均表现为上升趋势, 最大值

4.325 mg/g 出现在 64~66 cm。GRA2 柱样 TOC 的平均含量为 3.109 mg/g, 远高于 GRA1 柱样的 1.798 mg/g, 变异系数为 19.10%, 稍高于 GRA1。相对于 GRA1 剖面, GRA2 柱样中同样有着较高的 TN 含量(范围为 0.307~0.473 mg/g), 这可能跟 GRA2 较高的有机碳含量有关。但是 TN 的含量变化规律在剖面上并不明显, 其最高值出现在 58~60 cm 深度, 平均 TN 含量为 0.353 mg/g。与 TOC 和 TN 相反, GRA2 柱样中 TP 含量低于 GRA1, 均值为 0.298 mg/g。TP 含量的最高值和最低值分别出现在 12 cm 和 52 cm 的深度, 剖面的变异系数较 TOC 和 TN 高, 为 27.78%。

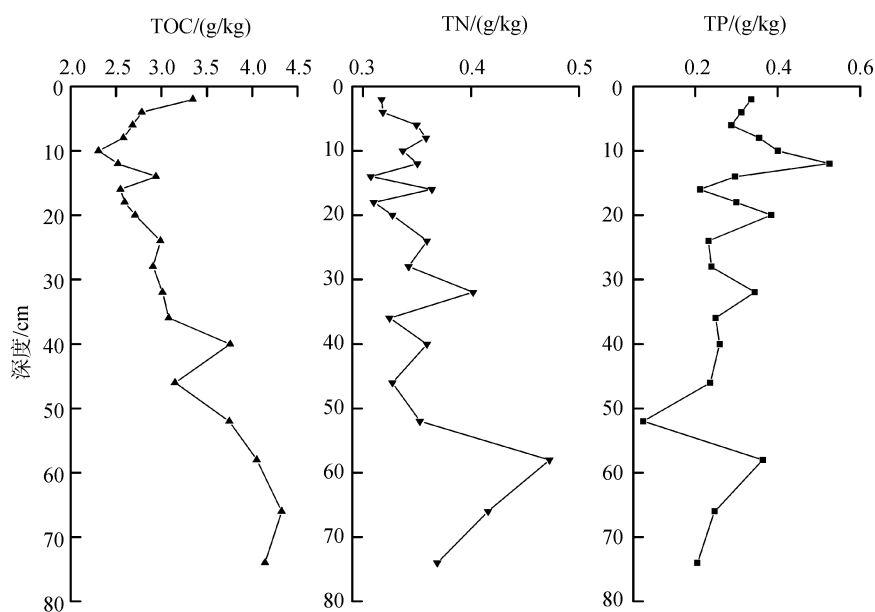


图 3 柱状沉积物 GRA2 中 TOC、TN 和 TP 含量的垂直分布

Fig.3 Vertical distribution of TOC, TN and TP contents in GRA2 profile

在同样的潮水冲刷频率下, 广饶潮汐湿地 GRA1 和 GRA2 有机碳含量却有着较大的差异, 这反映了不同湿地位点对有机碳的持留程度不同, 植被和潮沟对有机碳的持留影响较大。GRA2 站位被芦苇所覆盖, 生物量高于 GRA1 的碱蓬, 而且 GRA2 靠近潮沟, 这也为 GRA2 剖面有机碳的来源提供了更多的可能性。GRA1 和 GRA2 所位于的潮汐湿地是一个长期受潮水影响的开放区域, 厌氧环境减少了 N 素的流失^[18]。GRA2 剖面 TN 含量高于 GRA1, 同时前者的 TN 变异也高于后者。这可能与 N 素的植被输入量不同有关。有研究报道, 碱蓬及其枯落物在一年内可以分解完全, 且枯落物 N 素归还量约为 0.368 g/m², 但是由于潮汐影响, 实际的 N 素归还量源低于这个数量^[19]。然而, 在芦苇覆盖的 GRA2 区域, 则有着

较高的 N 持留能力, 这是因为芦苇本身生物量远高于碱蓬, 其分解归还量也高于碱蓬。同时, 较发达的芦苇根系还能够缓冲潮水冲刷的速度, 减少 N 素的流失。与 TOC 和 TN 的分布模式有着明显不同, TP 在沉积物中的分布模式随深度和采样位点的不同有着很大差异, 也没有明显的规律可循。在广饶湿地沉积物中, GRA1 柱样中 TP 含量高于 GRA2, 可能是由于 GRA2 处芦苇的生长比碱蓬需要吸收更多的 P 元素^[20]。

对广饶湿地沉积物中 TOC、TN、TP 和理化参数进行相关性分析得到结果如表 3 所示, 在 GRA1 柱样中, 沉积物 TOC 含量与黏粒含量及 C/N 是显著相关的, 与 TN 含量并无显著相关性, 这说明在 GRA1 站位有机碳被吸附在细颗粒的可能性较大,

表 3 广饶湿地沉积物 TOC、TN、TP 和理化参数相关性分析矩阵

Tab. 3 Matrix of correlation coefficients between TOC, TN, TP and soil properties in Guangrao wetland sediments

GRA1

	TOC	TN	TP	C/N	EC	Clay
TOC	1.000					
TN	0.315	1.000				
TP	0.229	0.424	1.000			
C/N	0.515*	-0.621**	-0.192	1.000		
EC	0.358	-0.095	-0.405	0.329	1.000	
Clay	0.499*	-0.112	-0.216	0.423	0.569**	1.000

GRA2

	TOC	TN	TP	C/N	EC	Clay
TOC	1.000					
TN	0.569**	1.000				
TP	-0.439	0.026	1.000			
C/N	0.800**	-0.035	-0.551*	1.000		
EC	0.851**	0.606**	-0.421	0.574**	1.000	
Clay	0.610**	0.549*	-0.392	0.329	0.716**	1.000

注: *表示相关性显著($P<0.05$);**表示相关性显著($P<0.01$)

而且多来自于外源物质即潮水涨落带来的有机质。而在 GRA2 柱样中, 沉积物 TOC 含量与 TN、C/N、EC 及黏粒含量均表现为显著相关($P<0.01$)。可见 GRA2 站位的芦苇的生长对有机碳的提升有着不可忽视的贡献, 芦苇相较于碱蓬具有更高的地上和地下生物量, 同时芦苇的根系发达。芦苇的地上凋落物可能是表层有机碳的一个重要来源, 而且, 通过强壮的根系来影响着更深层土壤有机碳的积累, 而碱蓬的根系并不发达且较浅, 不能够通过深入土壤来达到有机碳的显著积累。这也可以解释为何 GRA2 的沉积物有机碳含量随着深度的增加而呈升高趋势至 74 cm 深度, 而在 GRA1 站位, 从 30 cm 深度开始沉积物有机碳含量呈降低趋势。

2.3 沉积物中碳、氮、磷的生态化学计量学的变化特征

广饶湿地沉积物中碳、氮、磷元素化学计量学的垂直变化如表 4 所示, GRA1 柱样中 C/N 值在 19.74~8.65, 均值为 13.40, 高于 GRA2 柱样中的 C/N 值。GRA2 柱样中 C/N 值在 13.10~7.99, 均值为 10.02, GRA1 柱样中 C/N 值垂直变化较大, 变异系数为 20.41%, 而 GRA2 中 C/N 值的垂直变异则较小, 为 14.41%。C/P 值的大小却相反, GRA2 中 C/P 值在

12.39~55.47, 远高于 GRA2, 这可能由于芦苇在生长的过程中吸收了更多的磷元素使 GRA2 站位 TP 含量较低所致。广饶湿地沉积物中 N/P 值普遍较低, GRA1 柱样中 N/P 比值均小于 2, GRA2 柱样中 N/P 比值则均小于 5, 这跟广饶新生滨海湿地沉积物中碳、氮、磷元素含量本来就较低有关, 同时也说明 GRA1 位点氮素的供给十分有限。

潮汐作用引起的湿地内不同地理位置水温状况的差异是河口湿地的主要特征, 潮汐通过各种物理、生物和化学作用影响着湿地土壤的碳、氮、磷元素的循环过程及其相应的生态化学计量学特征^[21]。GRA2 位点靠近潮沟, 淹水过程持续较长, 有机质在这种情况下被稳定保存下来, 因此, 相对于 GRA1 来说, GRA2 站位有着较高的 C/P 和 N/P 值。滨海湿地沉积物 C、N、P 的生态计量学具有高度的异质性, 并且受多种因素综合影响^[22]。本研究区域内生境类型的自身特点如植被类型、微生物活动等也影响着土壤 C/N、C/P 与 N/P 值的垂直分布特征。对比中国其他湿地, 广饶潮汐湿地土壤的 C、N、P 元素比值是非常低的, 尽管其生物地球化学过程受营养元素的限制, 但是从一定程度上也说明广饶潮汐湿地的碳素和营养元素与相邻生态系统的交换是比较活跃的^[23-24]。

表 4 广饶湿地沉积物中碳、氮、磷元素生态化学计量学的垂直变化

Tab.4 Vertical distribution of C, N, P ratios in Guangrao wetland sediments

深度 (cm)	C/N		C/P		N/P	
	GRA1	GRA2	GRA1	GRA2	GRA1	GRA2
0~2	8.65	12.31	10.34	25.76	1.20	2.09
2~4	19.74	10.20	15.03	23.05	0.76	2.26
4~6	9.66	8.95	10.64	24.11	1.10	2.69
6~8	14.48	8.40	11.62	18.76	0.80	2.23
8~10	11.13	7.99	7.12	14.87	0.64	1.86
10~12	17.84	8.39	13.57	12.39	0.76	1.48
12~14	13.87	11.16	11.54	25.54	0.83	2.29
14~16	15.16	8.18	11.18	31.00	0.74	3.79
16~18	12.93	9.78	13.66	22.40	1.06	2.29
18~20	13.86	9.66	12.02	18.21	0.87	1.89
22~24	12.15	9.70	11.57	33.20	0.95	3.42
26~28	16.74	9.91	27.30	31.38	1.63	3.17
30~32	12.71	8.75	11.58	22.65	0.91	2.59
34~36	11.20	11.07	15.49	31.95	1.38	2.89
38~40	13.31	12.21	11.72	37.42	0.88	3.07
44~46	12.16	11.23	20.85	34.37	1.71	3.06
50~52	13.12	12.40	11.40	55.47	0.87	4.47
56~58	12.43	10.00	9.33	28.76	0.75	2.88
64~66	9.33	12.13	9.13	45.18	0.98	3.72
72~74	10.42	13.10	10.01	52.04	0.96	3.97

3 结论

在不同的植被覆盖和水文条件下, 潮汐湿地土壤碳、氮、磷元素的分布随着深度的变化具有不同的分布模式。由于芦苇相较于碱蓬具有更高的地上和地下生物量, 在芦苇覆盖下的 GRA2 区域 TOC 和 TN 含量高于碱蓬覆盖下的 GRA1 区域。与 TOC 和 TN 的分布有着明显不同, TP 在沉积物中的分布模式随深度变化没有明显的规律可循。而 GRA1 柱样中 TP 含量却高于 GRA2, 这可能由于 GRA2 处芦苇的生长比碱蓬需要吸收更多的 P 元素。滨海湿地沉积物 C、N、P 的生态化学计量学具有高度的异质性, 并且受多种因素综合影响。较高的 C/N 值, 较低的 C/P 值和 N/P 值显示研究区域的生物地球化学过程可能更多地受营养元素 N 和 P 等的限制, 而前者可能是主要的因素。本文的研究结果可以为滨海湿地对全球碳和氮的储存提供基础数据, 为滨海湿地可持续发展的管理和保护提供科学依据, 然而, 湿地生物地球化学过程和水文动力学对 SOC, TN 和 TP 分布的影响还有待于进一步的研究。

参考文献:

- [1] Alongi D M, Tirendi F, Dixon P, et al. Mineralization of organic matter in intertidal sediments of a tropical semi-enclosed delta [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1999, 48(4): 451-467.
- [2] Noe G B, Hupp C R. Carbon, nitrogen, and phosphorus accumulation in floodplains of Atlantic Coastal Plain rivers, USA [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2005, 15 (4), 1178-1190.
- [3] Bartlett K H, Harris R C. Review and assessment of methane emissions from wetlands [J]. *Chemosphere*, 1993, 26(1-4): 261-320.
- [4] Chmura G L, Anisfeld S C, Cahoon D R, et al. Global carbon sequestration in tidal saline wetland soils [J]. *Global Biogeochemistry Cycles*, 2003, 17(4): 1-12.
- [5] Loomis M J, Craft C B. Carbon sequestration and nutrient (nitrogen, phosphorus) accumulation in river-dominated tidal marshes, Georgia, USA [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, 74(3):

- 1028-1036.
- [6] Choi Y, Wang Y, Hsieh Y P, et al. Vegetation succession and carbon sequestration in a coastal wetland in northwest Florida: Evidence from carbon isotopes [J]. *Global Biogeochemistry Cycles*, 2001, 15 (2): 311-319.
- [7] Sundareshwar P V, Morris J T, Koepfler E K, et al. Phosphorus limitation of coastal ecosystem processes [J]. *Science*, 2003, 299 (5606): 563-565.
- [8] Hessen D O, Bjerkeng B. A model approach to planktonic stoichiometry and consumer resource stability [J]. *Freshwater Biology*, 1997, 38 (3): 447-471.
- [9] Bradshaw C, Kautsky U, Kumblad L. Ecological stoichiometry and multi-element transfer in a coastal ecosystem [J]. *Ecosystems*, 2012, 15 (4): 591-603.
- [10] 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.
- [11] 王维奇, 仝川, 贾瑞霞, 等. 不同淹水频率下湿地土壤碳氮磷生态化学计量学特征[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(3): 238-242.
- [12] Elser J J, Sterner R W, Gorokhova E, et al. Biological stoichiometry from genes to ecosystems [J]. *Ecology Letters*, 2000, 3 (6): 540-550.
- [13] 李庆梅, 侯龙鱼, 刘艳, 等. 黄河三角洲盐碱地不同利用方式土壤理化性质[J]. *中国生态农业学报*, 2009, 17(6): 1132-1136.
- [14] 高建华, 杨桂山, 欧维新. 苏北潮滩湿地不同生态带有机质来源辨析与定量估算[J]. *环境科学*, 2005, 26(6): 51-56.
- [15] 陈庆强, 周菊珍, 孟翎, 等. 长江口盐沼滩面演化的有机碳累积效应[J]. *自然科学通报*, 2007, 18(5): 614-623.
- [16] 毛志刚, 王国祥, 刘金娥, 等. 苏北滨海湿地不同植被粒度特征分析[J]. *海洋科学进展*, 2008, 26(4): 454-463.
- [17] 仝川, 贾瑞霞, 王维奇, 等. 闽江口潮汐盐沼湿地土壤碳氮磷的空间变化[J]. *地理研究*, 2010, 29(7): 1203-1213.
- [18] Gao H F, Bai J H, Xiao R, et al. Soil net nitrogen mineralization in salt marshes with different flooding periods in the Yellow River Delta, China [J]. *Clean-Soil Air Water* 2012, 40 (10): 1111-1117.
- [19] Mou X J, Sun Z G, Wang L L, et al. Nitrogen cycle of a typical *Suaeda salsa* marsh ecosystem in the Yellow River estuary [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, 23 (6): 958-967.
- [20] Hinsinger P. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review [J]. *Plant Soil*, 2001, 237 (2): 173-195.
- [21] Taylor P G, Townsend A R. Stoichiometric control of organic carbon-nitrate relationships from soils to the sea [J]. *Nature*, 2010, 464 (7292): 1178-1181.
- [22] 王维奇, 仝川, 曾从盛. 不同质地湿地土壤碳、氮、磷计量学及厌氧碳分解特征[J]. *中国环境科学*, 2010, 30(10): 1130-1134.
- [23] 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.
- [24] Zhang Z S, Song X L, Lu X G, et al. Ecological stoichiometry of carbon, nitrogen, and phosphorus in estuarine wetland soils: influences of vegetation coverage, plant communities, geomorphology, and seawalls [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2013, 13 (6): 1043-1051.

Biogeochemical characteristics of soil C, N, P in the tidal wetlands of the Yellow River Delta

CAO Lei^{1, 2, 3}, SONG Jin-ming^{1, 2}, LI Xue-gang^{1, 2}, YUAN Hua-mao^{1, 2}, LI Ning^{1, 2}, DUAN Li-qin^{1, 2}, WANG Qi-dong^{1, 2, 3}

(1. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Key Laboratory of Marine Ecology and Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Received: Apr., 8, 2014

Key words: tidal wetland; C; N; P; ecological stoichiometry

Abstract: This study analyzed the variations of soil organic carbon (TOC), total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) in tidal wetland of the Yellow River Delta. While GRA2 surface was covered with *Phragmites australis* had much higher biomass and sufficiently stronger roots than GRA1 with *Suaeda salsa*. TOC and TN contents in GRA2 profile were higher than those in GRA1. The average TOC contents of GRA1 and GRA2 were 1.798 and 3.109 mg/g, respectively. It was obvious that GRA2 profile contained quite high TN content (a range of 0.307~0.473 mg/g) as compared to GRA1 profile (a range of 0.108~0.213 mg/g), possibly due to the higher organic matter retention in GRA2. The average TP content in GRA1 profile was slightly higher than that in GRA2, with values of 0.388 mg/g and 0.298 mg/g, in GRA1 and GRA2 respectively. The growth of *P.australis* in GRA2 area that needed more phosphorus than *S. salsa* in GRA1 area may be the potential explanation. However, no clear trend was found on the vertical variations of TP. Additionally, C, N, and P ecological stoichiometry had high complexities within this tidal wetland. The C/N ratios were generally higher, while the C/P ratios and the N/P ratios were comparatively low, indicating the coastal wetland biogeochemical processes were more limited by N and P, with the former may being the primary factor. This study would be helpful for future research on the carbon burial, nutrients balance, and promoting sustainable management of the coastal plain.

(本文编辑: 刘珊珊)