

# 辽河三角洲翅碱蓬湿地不同植被覆盖度下的土壤对碳的扣留

余雪洋<sup>1,2</sup> 叶思源<sup>2,3</sup> Nicholas Lawrence Yuknis<sup>2,3,4</sup>

Edward A. Laws<sup>2,3,4</sup> 赵广明<sup>2,3</sup> 袁红明<sup>2,3</sup> 丁喜桂<sup>2,3</sup> 王锦<sup>2,3</sup>

(1.青岛大学,山东青岛266071;2.国土资源部海洋油气资源与环境地质重点实验室,山东青岛266071;

3.青岛海洋地质研究所,山东青岛266071;4.路易斯安那州立大学,美国Barton Rouge, LA 70803)

**摘要:**为研究辽河三角洲湿地的固碳能力,2010年5月在辽河三角洲双台子河口东侧的两个翅碱蓬湿地区域采取7个柱状样,通过对样品的化学分析测试,并利用<sup>210</sup>Pb测年法确定的沉积速率研究了土壤对碳的扣留速率,其结果表明:有机碳浓度分别与各营养元素浓度间有显著的正相关关系( $p < 0.01$ ),指示沉积物中的有机物质对营养元素有很强的富集能力,同时营养元素促进植物的生长,从而影响土壤碳的加积速率。研究区总碳浓度范围为10.5~14.6 g/kg,其中约83%为有机碳,其相应的土壤对总碳和有机碳扣留速率分别为98.02~260.37 g/m<sup>2</sup>/a(均值171.84 g/m<sup>2</sup>/a)和81.17~229.98 g/m<sup>2</sup>/a(均值141.29 g/m<sup>2</sup>/a)。本研究区,土壤对碳的扣留速率主要受土壤的沉积速率控制,并与高程有显著的相关关系( $p < 0.01$ )。土壤对碳扣留机制的研究有助于加深对全球碳循环的理解。

**关键词:**辽河三角洲;湿地;碳扣留;营养成分;<sup>210</sup>Pb测年

**中图分类号:**P632<sup>+.1</sup>;P934 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2014)02-0648-10

沉积物对碳的扣留和埋藏<sup>[1]</sup>是全球碳收支平衡以及湿地生态系统在地质历史时期内碳循环研究的重要内容,引起了全球科学家的广泛兴趣<sup>[2-5]</sup>,在中国的部分地区也有相关的土壤有机碳浓度以及储量的研究<sup>[6-8]</sup>。在小的时间尺度内,沉积物对碳的扣留(Carbon sequestration)影响着湿地生态系统的营养状态和河口的生产力<sup>[9,10]</sup>。

沉积物中被埋藏的碳形态与碳的总量受控于早期成岩作用<sup>[11]</sup>。在湿地沉积物表面,大部分新沉积的有机物质被分解,而其他的营养成分会快速地重新矿化,并向沉积物中的孔隙水中释放,最终释放到上覆地表水中<sup>[12,13]</sup>。因此,只有部分与沉积物颗粒结合的有机碳及营养成分到达水-沉积物界面

时会与聚集的沉积物一起被埋藏。埋藏于深层沉积物中的有机碳和营养成分多以较稳定的矿物形态存在,不易迁移和转化。河口作为早期成岩作用最为显著的地区,聚集了大量来自陆地的有机物质与营养成分,因此研究河口湿地有机碳和其他营养成分的扣留与埋藏作用是非常重要的。在一些沼泽湿地只有30%~50%或甚至更少的有机碳和营养成分被埋藏下来<sup>[14]</sup>。

本研究利用<sup>210</sup>Pb放射性测年法<sup>[15,16]</sup>,利用恒定沉积通量(Constant Initial Concentration, CIC)模型,确定各柱状样的沉积速率,结合分析测试结果中的有机碳( $C_{org}$ )、总碳(TC)含量以及柱状样的体积密度等参数,计算柱状样所在区域的有机碳加积

收稿日期:2013-08-16;改回日期:2013-11-20

基金项目:国土资源部公益性行业基金(201111023)、国家自然科学基金(41240022)、海洋地质保障工程项目(GZH201200503)及中国地质调查局地质大调查项目(1212010611402)联合资助。

作者简介:余雪洋,男,1989年生,硕士生,从事环境地球化学与碳循环研究;E-mail:yuxueyang89@hotmail.com。

通讯作者:叶思源,女,1963年生,研究员,从事环境地球化学与碳循环研究;E-mail:ye\_siyuan@sina.com。

速率,并通过各站位和横向对比,确定总碳(TC)和有机碳(C<sub>org</sub>)的加积速率及其影响因素。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区基本情况

辽河三角洲滨海湿地位于辽河平原的南部,靠近渤海沿岸,是7000年前海进时期由多条河流形成的复合三角洲。位于121°30'~122°00'E,40°45'~41°10'N,湿地面积近8×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>,是辽宁省湿地的重要组成部分。所选区域蕴藏着丰富的资源,是全省的水资源库、动植物库、储油(气)库。区内维持湿地生境的河流主要包括:大凌河、小凌河、双台子河、大辽河和大清河等。

本区地貌类型为辽河下游冲积平原,地势低洼平坦,海拔高度为1.3~4.0 m,坡降为1/20 000到1/25 000,河道稳定,多有苇塘沼泽和潮间带滩涂。

### 1.2 样品采集和分析

本研究在辽河三角洲辽河西岸的2个潮间带翅碱蓬湿地地区(即在滩海站及纪念碑一带、水库南)选取不同翅碱蓬覆盖度的7个采样点(图1)。目标是比较3种不同翅碱蓬覆盖度区域的沉积速率,即光滩、

翅碱蓬半覆盖和翅碱蓬全覆盖区域。在滩海站(THZZH)区域(图1-I)内总共取得4个柱状样:2个全覆盖、1个半覆盖、1个光滩样品。从水库南(SKZH)区域(图1-II)内取得3个柱状样品:1个半覆盖和2个光滩样品。滩海站区域的高程较低而且距离双台子河口比之水库南(SKZH)要近,采样点位置能够代表周围盐沼相似的高程和植被情况,土壤样品取于距离公路和堤岸至少50 m、距离潮沟至少10 m的无干扰条件下。

样品采集使用直径15cm、长1 m的薄铁皮管,在取样位置缓缓转动下压,到达取样深度后,使用铁铲将周围沉积物移除,托住取样管底部,缓缓取出。样品运输时竖直摆放,于实验室间隔2.5 cm分样。

土壤样品经风干,研磨,分析pH、TC、总氮(TN)及营养元素总量。pH用电位法测定。TC量用非水容量法测定。将少量样品在1000℃灼烧1 h,加入少量线性氧化铜为助溶剂,经高温管式炉1100~1150℃分解,产生的二氧化碳为样品中的全碳量,经碳硫分析仪非水滴定液吸收,并根据试液颜色变化进行滴定测定全碳量。测定土壤样品中的有机

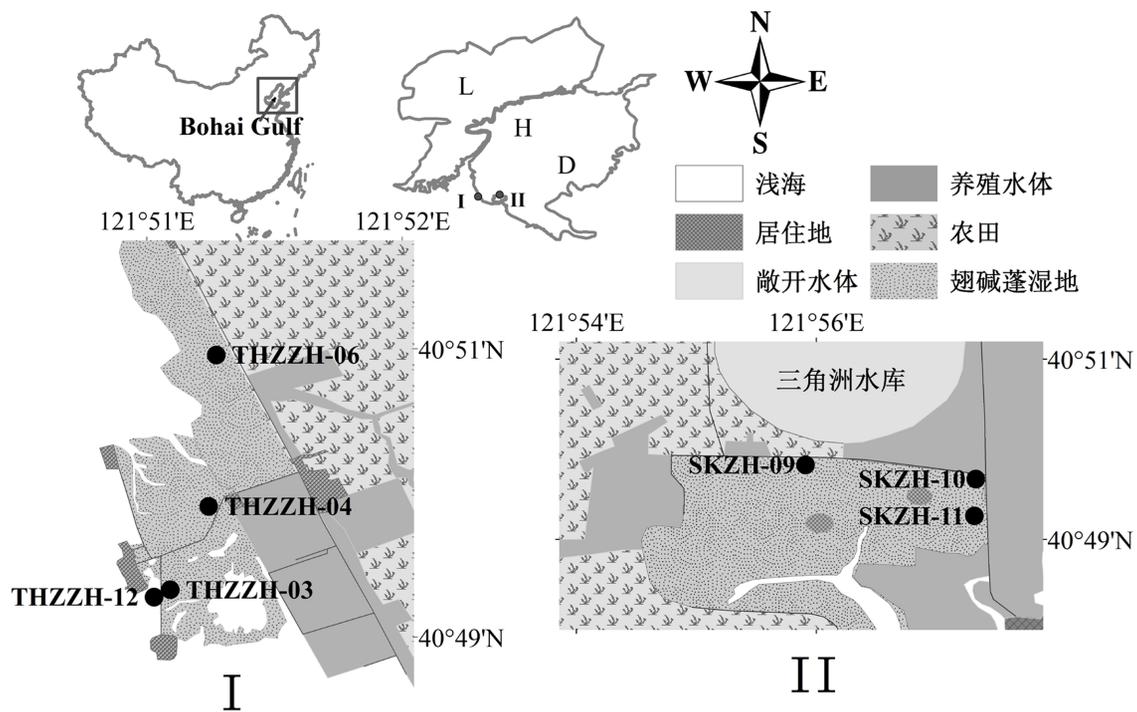


图1 采样点分布图

Fig.1 Sampling location

碳( $C_{org}$ )含量,称取0.1500~0.3000 g样品,置于经1000 °C灼烧1 h的瓷舟中,先用2%稀磷酸处理,烘箱80 °C烘干,再用5%稀磷酸处理,烘箱80 °C烘干,反复处理至气泡冒尽,除去样品中的无机碳,然后用非水容量法测定。营养成分N量用凯氏定氮法测定;P和S量及金属元素Cu、Mn和Zn均用粉末压片X射线荧光光谱法测定;Mg、Ca和K量的测定,先用粉末压片X射线荧光光谱法测定 $Al_2O_3$ 、 $Fe_2O_3$ 、MgO、CaO、 $K_2O$ 的量,再通过分子量计算金属元素的量;Mo元素用电感耦合等离子体质谱法测定;有效态营养盐Mehlich III通用浸提法提取并用ICP-AES测试;各测量方法相对误差小于5%。

沉积速率利用 $^{210}Pb$ 定年法,结合恒定沉积通量模式。沉积物中过剩 $^{210}Pb$ 呈指数模式衰减的关系,利用带有高纯锗检测器的 $\gamma$ 谱仪,通过 $^{210}Pb$ 标准样品的校正,分别测量沉积物中总 $^{210}Pb$ 放射活度与由测量 $^{226}Ra$ 放射活度得到的补给 $^{210}Pb$ ,计算过剩 $^{210}Pb$ ,继而根据 $^{210}Pb$ 的指数衰减模式确定沉积速率。

## 2 样品分析测试结果

### 2.1 辽河三角洲新生湿地土壤元素分布特征

研究区土壤的各营养元素成分总量及平均含量见表1。其中硫(S)元素含量为30~960 mg/kg,总碳(TC)含量为5.88~19.97 g/kg,总氮(N)、总磷(P)含量分别为0.33~1.47 g/kg、0.56~0.80 g/kg。土壤营养元素中的常量元素钾(K)、钙(Ca)、钠(Na)、镁(Mg)元素的含量分别为23.42~25.67 g/kg、12.02~

18.92 g/kg、16.33~22.77 g/kg、9.43~17.36 g/kg,微量元素铜(Cu)、铁(Fe)、锰(Mn)、锌(Zn)含量分别为15.2~109.6 mg/kg、24.29~56.94 g/kg、0.48~1.93 mg/kg、61.0~306.1 g/kg。

利用Mehlich III通用浸提法获取辽河三角洲沉积物表层0~30 cm有效态营养盐含量(表2),有效K、Ca、Mg含量分别为399.4~1193.1 mg/kg、2301.1~7139.6 mg/kg、674.1~1789.3 mg/kg。有效P、Cu、Fe、Zn含量分别为16.7~41.0 mg/kg、1.0~9.8 mg/kg、83.2~344.5 mg/kg、4.8~154.1 mg/kg。

### 2.2 体积密度及C、N、P和S的浓度分布

体积密度及C、N、P和S的浓度在垂向上分布如图2所示。体积密度(BD)平均为1.20 g/cm<sup>3</sup>,体积密度随着深度增加,变化不明显。仅有THZZH-06、THZZH-04和THZZH-03、SKZH-11底部出现体积密度随深度增加而增加的趋势。其余柱样体积密度在均值附近波动。

有机碳( $C_{org}$ )含量垂向上总体随深度的增加而降低,在THZZH-03、04、12和SKZH-10、11中表现明显;THZZH-06有机碳含量在表层0~50 cm随着深度增加有机碳含量降低,在50 cm以下随深度增加 $C_{org}$ 有所升高;SKZH-09在表层0~25 cm随着深度增加 $C_{org}$ 升高,25 cm以下随深度增加 $C_{org}$ 含量降低。总碳(TC)随深度增加的变化趋势与 $C_{org}$ 相似。

总氮(TN)在THZZH-03、04、06和SKZH-9、10、11中垂向上随深度增加而降低,THZZH-12于表层0~20 cm随深度增加而增加,20 cm以下随深度

表1 辽河三角洲土壤元素特征

Table 1 Soil elemental characteristics at wetlands of the Liaohe Delta

	Cu	Mn	Zn	N	P	S	Fe	Mg	Ca	K	Al	TC	pH
	mg/kg						g/kg						
Mean	27.2	1007	115	830	668	465	40.8	13.9	14.7	18.3	78.9	8.6	7.675
±RSD	0.331	0.268	0.301	0.344	0.061	0.324	0.165	0.122	0.093	0.018	0.055	0.240	0.263

标注:RSD:相对标准偏差(=标准偏差与平均值的比值)。

表2 辽河三角洲土壤有效态营养盐含量特征(mg/kg)(Mehlich III浸提法)

Table 2 Mehlich III extractable nutrients of the Liaohe Delta(mg/kg)

	Ca	Cu	Fe	K	Mg	Mn	P	Zn
Mean	4127.2	3.9	168.2	727.5	1184.2	291.8	27.8	17.6
±RSD	0.245	0.310	0.350	0.198	0.188	0.217	0.192	0.977

注:RSD:相对标准偏差(=标准偏差与平均值的比值)。

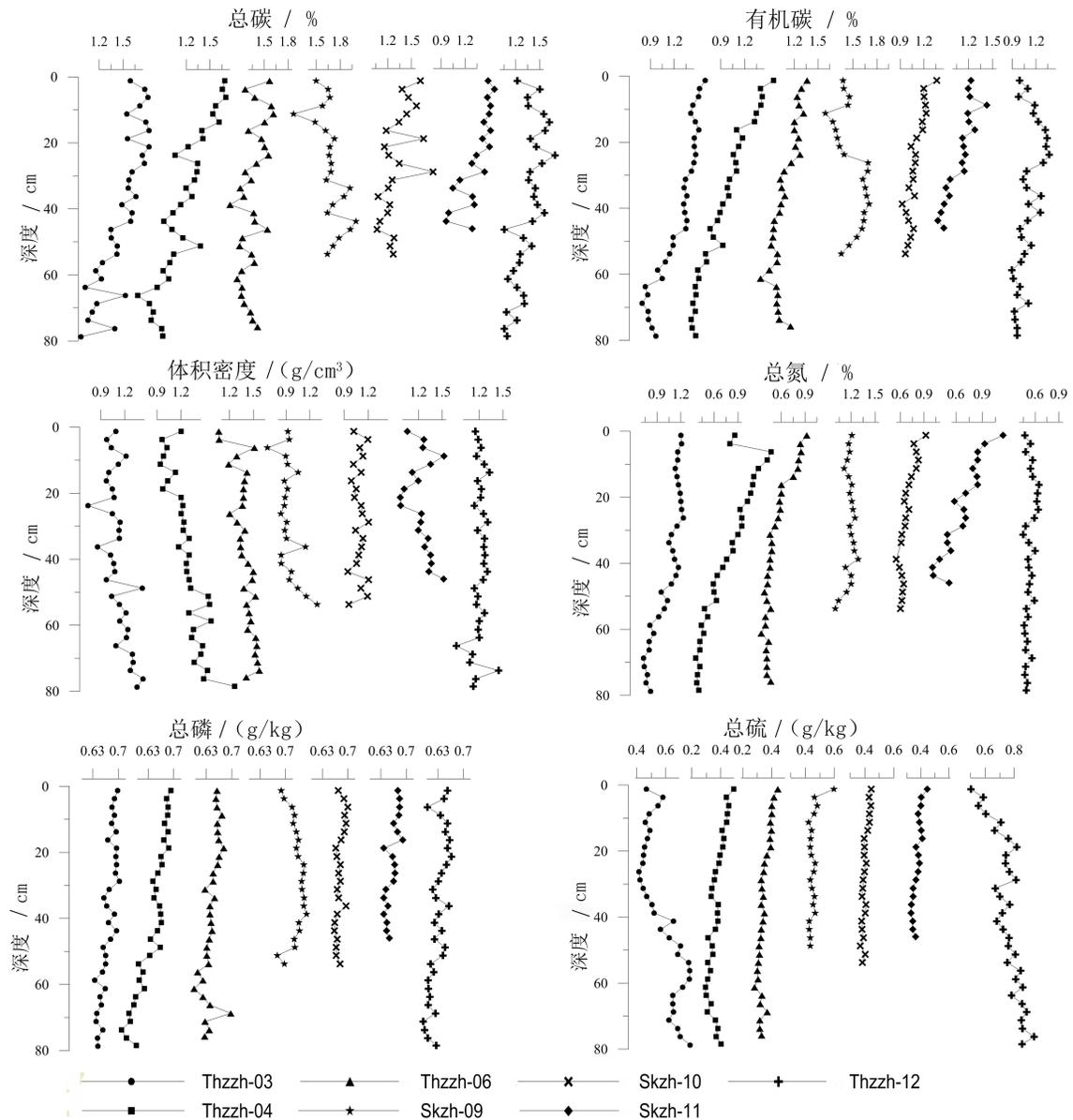


图2 体积密度、有机碳、P和S等浓度随深度的变化  
Fig.2 Concentrations of BD, C<sub>org</sub>, P and S versus depth (cm)

增加而降低。

总磷(TP)在柱状样 THZZH-03、04 和 SKZH-10、11、12 中有明显的随深度增加而降低的趋势, THZZH-06 随深度增加的变化趋势不明显;SKZH-09 在表层 0~30 cm 随深度增加而增加, 30 cm 以下随深度增加而降低。

总硫(TS)含量在 THZZH-03、04、06 和 SKZH-11 中表现为表层 0~40 cm 随深度增加而降低, 40 cm 以下随深度的增加而升高;SKZH-09、10 表层 0~20 cm 随深度增加 TS 含量降低, 20 cm 以下趋于稳定;

THZZH-12 随深度的增加 TS 含量逐渐增高。

### 2.3 沉积速率

样品经分样, 风干, 研磨, 于 105 °C 烘箱中烘干至恒重, 置于同样大小的硬质塑料样品盒中密封保存, 平衡 2 周后, 利用带有高纯锗检测器的  $\gamma$ -谱仪。测量 24 h, 读取结果中  $^{210}\text{Pb}$  和  $^{226}\text{Ra}$  对应的峰值, 通过利用标准样品所做标准曲线换算得到  $^{210}\text{Pb}$  和  $^{226}\text{Ra}$  在对应深度的放射性活度, 通过对沉积物深度-过剩  $^{210}\text{Pb}$  活度对数值, 所做最小二乘回归曲线(图 3), 利用 CIC 模型, 求算平均沉积速率<sup>[17]</sup>(表 3)。

辽河三角洲的平均沉积速率为1.26 cm/a,体积密度总平均值为1.22 g/cm<sup>3</sup>,沉积物中总碳的含量平均为14.1 g/kg,TC和C<sub>org</sub>的加积速率分别为98.02~260.37 g/m<sup>2</sup>/a、81.17~229.98 g/m<sup>2</sup>/a(表3)。

### 3 讨 论

#### 3.1 有机碳及营养元素

翅碱蓬是一年生草本植物,植株矮小,根系不发达,根据野外观测,根系能够到达表层0~20 cm,并且翅碱蓬主根较为细小,对沉积物的扰动不明显,随着土壤中有机质的分解,柱状沉积物中的有机碳和总碳在垂向上呈显著的随深度增加而减小的趋势( $p <$

0.05),并且线性关系明显,变化较为平缓。

沉积物中总碳的含量为11.68~16.79 g/kg(平均13.84 g/kg),略高于黄河三角洲新生湿地的9.202~21.216 g/kg(平均为12.59 g/kg),辽河三角洲沉积物中有机碳含量9.34~14.83 g/kg,高于黄河三角洲的0.75~8.35 g/kg,有机碳平均值占总碳的83.2%,远高于黄河三角洲的13.65%。因此在平均沉积速率低于黄河三角洲5.85 cm/a的前提下,仍然能够与黄河三角洲的固碳能力相比较。

辽河三角洲湿地土壤有机碳浓度虽然高于黄河三角洲和盐城滨海湿地的有机碳浓度,但均小于2%,远小于三江平原的6.057%~8.706%<sup>[18]</sup>和美国东

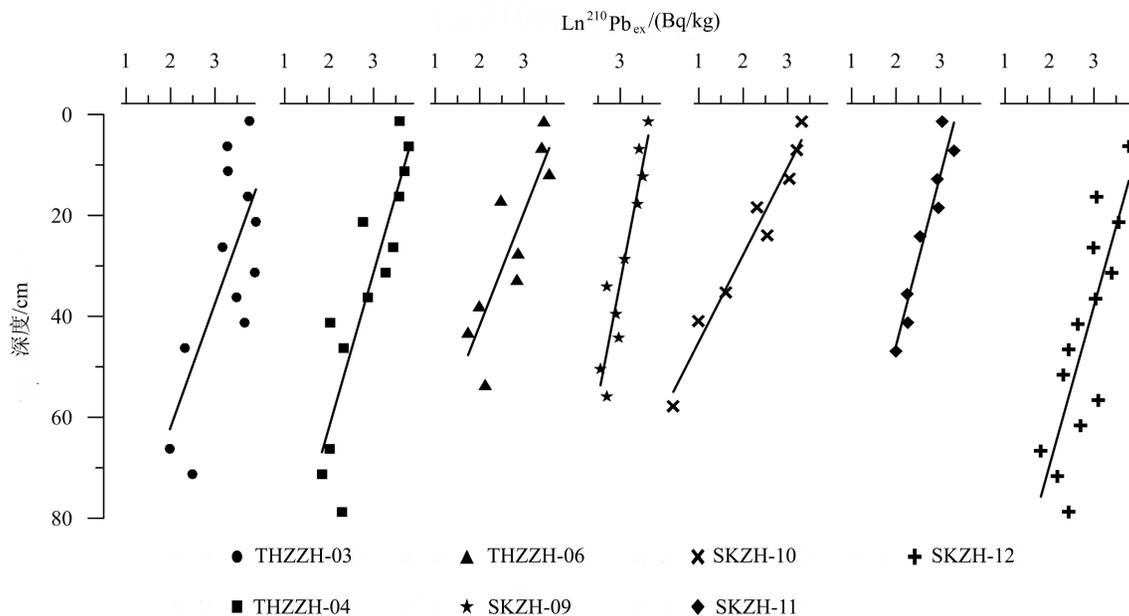


图3 不同深度<sup>210</sup>Pb<sub>ex</sub>活度的自然对数  
Fig. 3 Profiles of Ln(<sup>210</sup>Pb<sub>ex</sub>) in different cores

表3 新生湿地沉积物垂向加积速率与C的净累积速率计算

Table 3 Carbon accumulation rate and sediment accretion rate for newly created wetlands

站点	沉积速率 /(cm/a)	体积密度 /(g/cm <sup>3</sup> )	TC		C <sub>org</sub>	
			含量/(g/kg)	加积速率/(g/m <sup>2</sup> /a)	含量/(g/kg)	加积速率/(g/m <sup>2</sup> /a)
THZZH-03	1.485	1.121	14.84	247.04	12.45	207.25
THZZH-04	1.238	1.286	11.68	185.95	9.34	148.70
THZZH-06	1.227	1.394	13.48	230.57	10.82	185.07
THZZH-12	1.510	1.207	13.46	245.32	10.97	199.94
SKZH-09	1.648	0.941	16.79	260.37	14.83	229.98
SKZH-10	0.560	1.325	13.21	98.02	10.94	81.17
SKZH-11	1.162	1.241	13.45	193.95	10.91	157.33

南部沼泽的18.01%<sup>[19]</sup>,这很有可能是由于滨海湿地受潮流作用明显,有机碎屑不易原位积累,加之翅碱蓬本身生物量低,其长势受气候条件与当地水文条件等影响较大。因此,辽河三角洲滨海翅碱蓬湿地的碳浓度明显小于滨海红树林湿地<sup>[20]</sup>和内陆湿地<sup>[21]</sup>。然而由于辽河三角洲年均气温低于黄河三角洲,气候较黄河三角洲略湿润,有利于有机碳和有机氮的保存,因此辽河三角洲滨海湿地仍然会表现出较高的固碳能力。

辽河三角洲翅碱蓬湿地 TC 和 C<sub>org</sub> 的加积速率分别为 98.02~260.37 g/m<sup>2</sup>/a、81.17~229.98 g/m<sup>2</sup>/a, 平均值为 208.75 g/m<sup>2</sup>/a、172.78 g/m<sup>2</sup>/a, 这个值域范围虽低于美国的佛罗里达的 320 g/m<sup>2</sup>/a<sup>[10]</sup>和路易斯安那湿地的 300 g/m<sup>2</sup>/a<sup>[22]</sup>,但能够与其他文献中报道的 C 的累积速率 100~200 g/m<sup>2</sup>/a<sup>[23-25]</sup>以及沼泽水资源保护区的有机碳加积速率 86~387 g/m<sup>2</sup>/a<sup>[26]</sup>相比较。

辽河三角洲沉积物的主要来源是变质岩的风

化和剥蚀作用,通过河流的搬运作用,沉积在辽河三角洲,由于物源的不同,导致辽河三角洲 Fe、Mn、Al 和 Ca 等元素的含量(表4)不同于黄河三角洲<sup>[27]</sup>。

由于海水中含有较多的 S 元素,因此 TS 指示了各站位受海水影响的大小。在垂向上 S 元素变化最为平缓,由于 THZZH-12 站位最接近海水,其硫元素(S)的平均含量最高,达到 753.77 mg/kg,海水中 TS 远高于淡水,并且该站位高程较低,受海潮影响强烈,从高程与 TS 含量有显著的负相关( $r=-0.867$ ,  $p<0.01$ )也证实了上述的观点。

各营养元素总量之间的相关性如表5所示。营养元素 K、Mg、N、P 以及 TC、TN 和 Al 之间都有很显著的正相关性,但 Ca 与其他营养元素 Fe、Mg、K、P、S 以及 Al 呈显著的负相关,与 TN、TC 和 C<sub>org</sub> 不相关。Ca 的来源应与(除 C、N 和 P)其他的营养元素的来源一致,然而在滨海湿地中,由于植物根系的呼吸作用产生的 CO<sub>2</sub> 在水中溶解进入沉积物孔隙水中,

表4 不同站位土壤特征

Table 4 Soil characteristics at wetlands of each site

站位	柱样长度/cm	植被覆盖度	TC /%	TN /%	C:N	C <sub>org</sub> /%	P /(g/kg)	S /(mg/kg)	高程 /m
THZZH-03	80	100%	1.48	0.10	14.49	1.25	0.67	579.89	-0.59
THZZH-04	79.75	100%	1.17	0.07	16.80	0.93	0.64	371.34	1.05
THZZH-06	76.5	50%	1.35	0.05	26.54	1.08	0.64	347.30	1.47
THZZH-12	79.5	0%	1.35	0.05	25.44	1.10	0.63	753.77	-1.37
SKZH-09	55	50%	1.68	0.12	14.28	1.48	0.73	454.78	2.15
SKZH-10	55	0%	1.32	0.07	19.15	1.09	0.68	403.07	2.36
SKZH-11	47	0%	1.35	0.07	21.42	1.09	0.66	375.65	2.27

表5 各营养元素总量相关性分析(n=247)

Table 5 Correlations between carbons, Al and nutrients(n=247)

	Al	Fe	Mg	Ca	K	P	TN	TC	C <sub>org</sub>	S
Al	1	0.948**	0.979**	-0.428**	0.754**	0.878**	0.691**	0.738**	0.807**	-0.146*
Fe		1	0.975**	-0.336**	0.695**	0.910**	0.766**	0.820**	0.879**	-0.100
Mg			1	-0.379**	0.703**	0.899**	0.726**	0.791**	0.842**	-0.134*
Ca				1	-0.410**	-0.401**	-0.119	-0.033	-0.113	0.273**
K					1	0.630**	0.517**	0.448**	0.616**	0.370**
P						1	0.666**	0.761**	0.768**	-0.129*
TN							1	0.676**	0.875**	0.044
TC								1	0.792**	-0.045
C <sub>org</sub>									1	0.075
S										1

注:\*\*表示在0.01水平(双侧)上显著相关;\*表示在0.05水平(双侧)上显著相关。

使之富含碳酸根离子,会与沉积物中的Ca发生部分沉淀作用,使得该组分浓度与其他营养元素之间的关系变得复杂。此外,S元素与除Ca和K外的其他元素相关性较弱或不相关。这主要是因为滨海湿地由于受海水的影响含有较高的 $SO_4^{2-}$ ,有机碳由于参与S循环,会减少碳的分解,有机碳会转化为矿物碳。因此从生物地球化学的角度来分析,有机碳浓度与硫化物的形成量会成反比。然而这种关系在河口的不同沉积环境中常常会出现相反的变化关系<sup>[12,13]</sup>,其原因是该反应还存在微生物过程,与硫酸盐还原菌存在与否有关,从而使得有机碳与S的关系变得复杂,即该二组分通常不是简单的线性关系。

Mehlich III 营养元素有效态是利用Mehlich III 浸提剂提取沉积物中的营养盐,进而通过ICP-AES测试有效态营养盐浓度,该结果表示能够被植物利用的有效的营养盐含量,对其相关性分析可知,与元素总量不同的是,总生物有效态P与其他有效态营养元素的相关性不明显,通过生物有效P与TP对比可知,Mehlich III 提取的有效态磷占总磷的4.15%。Mehlich III 提取的Fe、K分别占总Fe、总K的0.4%、2.95%。沉积物中大部分P、Fe、K元素在沉积物中以组成的矿物质存在,不能够被植物吸收利用。相比之下有效Ca、有效Mn分别占相应元素总量的28.06%和28.19%。

### 3.2 沉积速率的影响因素

在滩海站(THZZH)和水库南(SKZH)两个区

域,沉积速率均显示出了与高程显著的负相关关系(图4),从图中可以看出在河口区域,沉积物有向低地汇集的趋势,但是不同的是,在滩海站区域内沉积速率受高程变化的影响小于水库南区域,滩海站区域内各点位高程差距较大,最低THZZH-12(高程-1.37 m)与最高THZZH-06(高程1.47 m)相差2.1 m,沉积速率极差仅为0.283 cm/a,而在水库南区域,极差达到了1.088 cm/a,该区域中湿地沼泽的促淤作用明显。在滨海湿地中的植物能使底层水流速度降低40%~60%<sup>[28]</sup>,潮流携裹的沉积物会有更多的淤积,SKZH-09的高沉积速率,是较低的高程和较高的翅碱蓬覆盖度共同作用的结果。

从有机碳和总碳加积速率的计算结果(表3)可知,其最大值分布于站位SKZH-09,该站位的沉积速率、TC、 $C_{org}$ 均为最高,与南海红树林的沉积情况类似<sup>[20]</sup>的是,辽河三角洲湿地沉积受海潮和河流的共同作用,其沉积物沉积速率在海岸带湿地范围内随高程的增加而减小,呈明显的负相关关系( $p < 0.01$ ),虽然THZZH-12有较快的沉积速率,但是该站位无翅碱蓬分布,缺乏原位有机碳的输入,加之该地为光滩,受潮流影响,难以原位积累,致使该站位有机碳浓度低,影响有机碳和总碳的加积速率。

### 3.3 有机碳加积速率的影响因素

不同因素对有机碳加积速率的相关性分析见表6。影响沼泽有机碳加积速率的最主要两个因素为沉积物的沉积速率和有机碳浓度,前者受控于局

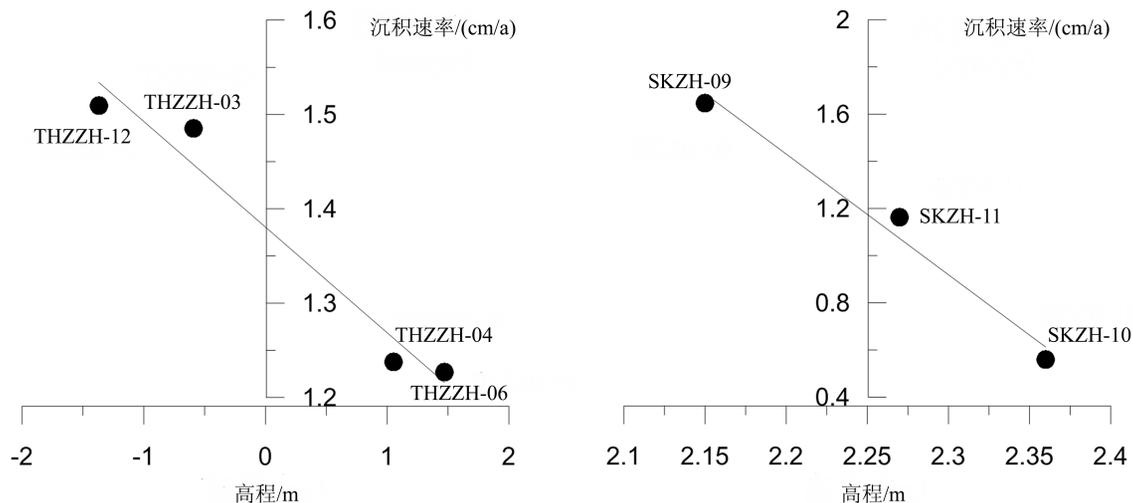


图4 沉积速率与高程关系  
Fig.4 The relationship between accumulation rate and evaluation

部高程,以及所处位置的水文条件,低地有汇聚沉积物的倾向,因而会有较高的沉积速率;在三角洲地区河流与潮汐的共同作用下,植被覆盖度高的区域不仅能够获得大量的原位输入有机碳,而且能够固定水流中携带的大量有机碳,处于这种条件下的有机碳浓度较高。

不同翅碱蓬覆盖度对TC、 $C_{org}$ 加积速率的影响主要体现在表层的TC、 $C_{org}$ 的浓度上(图5),不同的植被覆盖度区域的表层土壤 $C_{org}$ 含量存在显著的差异( $p<0.01$ ),但由于辽河三角洲翅碱蓬湿地 $C_{org}$ 浓度差别竞争不过沉积物沉积速率的差别,所以不同翅碱蓬覆盖度并不能显著地影响TC和 $C_{org}$ 的加积速率( $p<0.05$ )。

BD指示湿地土壤物理特征,有机碳浓度较高的沉积物含有较低的BD值。本研究BD与有机碳浓度关系也遵循这个规律,存在显著的负相关关系( $p=-0.868, p<0.05$ ),然而,在本研究中,由于有机碳浓度差异不大( $E_{std}=0.236$ ),所以BD对有机碳加积速率( $AC_{org}$ )和总碳加积速率( $A_{TC}$ )的影响不显著( $p>0.05$ )。

C:N是土壤有机物质分解和稳定的一个指示。随着土壤中有有机物质的分解,C元素以 $CO_2$ 形式排放的同时N被保留。随着C:N减小,土壤的稳定性增加。土壤OM稳定的C:N范围通常是15~25。在有翅碱蓬完全覆盖的站位范围内,碳氮比较小,在光滩和半覆盖地区C:N较高。

在大尺度上滨海湿地有机碳的加积速率取决于气候条件和水文条件,而在局部范围内,地势较低、存在周期性的淹水条件、植被覆盖度较高的湿地,不仅能够原位输入更多的有机碳,同时也能

获得相对较高的沉积速率,捕获更多的非原位有机碳;相对的,在小尺度上,局部高程较高、植被覆盖度低的地方沉积物更容易受到水流侵蚀而发生再迁移,这可能是站位SKZH-10和SKZH-11沉积速率较为缓慢的原因,同理该处也会有较低的有机碳加积速率。

## 4 结论

(1)辽河三角洲翅碱蓬湿地的TC和 $C_{org}$ 加积速率分别为98.02~260.37  $g/m^2/a$ 、81.17~229.98  $g/m^2/a$ ,平均值为208.75  $g/m^2/a$ 、172.78  $g/m^2/a$ ;其最主要的影响因素为沉积速率,且沉积速率与高程有显著的负相关关系。TC和 $C_{org}$ 的加积速率与世界其他高有机碳浓度湿地的同名组分相当。

(2)原位植物的输入作为辽河三角洲滨海湿地沉积物中的有机碳主要来源之一,其输入量与植被覆盖度呈显著的正相关关系,植被覆盖度决定了沉积物表层10 cm以上土壤沉积物 $C_{org}$ 浓度,而 $C_{org}$ 浓度同各营养元素间有显著的正相关关系,表明沉积物中的有机物质对K、Mg等金属营养元素有很强的富集能力,同时营养元素促进植物的生长,增加土壤中的有机碳含量并影响植被的覆盖度,从而影响土壤碳的加积速率。

(3)滨海湿地是重要的碳汇,但并非所有的湿

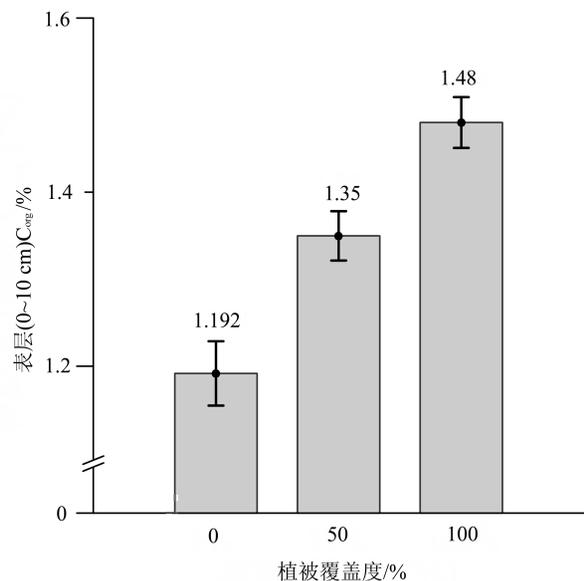


图5 不同植被覆盖度表层土壤 $C_{org}$ 浓度分布  
Fig.5 Distribution of organic carbon concentrations under various plant coverage conditions

表6 沉积物性质相关性分析  
Table 6 Carbon accretion rate and its correlation analyses

	C:N	BD	$C_{org}$	AR	$AC_{org}$
C:N	1	0.659	-0.486	-0.168	-0.106
BD		1	-0.868 <sup>§</sup>	-0.677	-0.66
$C_{org}$			1	0.51	0.61
AR				1	0.971 <sup>**</sup>
$AC_{org}$					1

注:\*\*表示在0.01水平(双侧)上显著相关;\*表示在0.05水平(双侧)上显著相关;AR为沉积速率; $AC_{org}$ 为有机碳加积速率。

地均有同样的固碳能力。其固碳能力从大尺度上看取决于气候条件,从局部范围看则取决于湿地所处的地形地貌、地质条件、植被分布特征等。对这些机制的理解有利于我们正确地对全球碳循环进行正确的评估。

**致谢:**两位匿名评审员对本文提出了建设性的修改意见,对他们表示十分感谢。

### 参考文献(References):

- [1] 李克让,王绍强,曹明奎. 中国植被和土壤碳储量[J]. 中国科学(D辑), 2003, 33(1): 72–80.  
Li Kerang, Wang Shaoqiang, Cao Mingquan. Vegetation and carbon storage in China[J]. Science in China(series D), 2003, 33(1): 72–80 (in Chinese).
- [2] Brevik E C, Homburg J A. A 5000 year record of carbon sequestration from a coastal lagoon and wetland complex, Southern California, USA[J]. Catena, 2004, 57(3): 221–232.
- [3] Smith P. Carbon sequestration in croplands: The potential in Europe and the global context[J]. European Journal of Agronomy, 2004, 20(3): 229–236.
- [4] Zhang S, Wang L, Hu J, et al. Organic carbon accumulation capability of two typical tidal wetland soils in Chongming Dongtan, China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2011, 23(1): 87–94.
- [5] Xiaonan D, Xiaoke W, Lu F, et al. Primary evaluation of carbon sequestration potential of wetlands in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(2): 463–469.
- [6] 魏为兴. 福州市表层土壤农业生态环境质量评价[J]. 中国地质, 2007, 34(2): 354–358.  
Wei Weixing. Assessments of agricultural eco-environmental quality of topsoils in Fuzhou City[J]. Geology in China, 2007, 34(2): 354–358(in Chinese with English abstract).
- [7] 师焕芝,李福春,孙旭辉,等. 洛川黄土/古土壤中有有机碳的分布特征及其与粘土矿物的相关性[J]. 中国地质, 2011, 38(5): 1355–1362.  
Shi Huanzhi, Li Fuchun, Sun Xuhui, et al. Distribution of organic carbon in the Luochuan loess/paleosol and its relationship with clay minerals[J]. Geology in China, 2011, 38(5): 1355–1362(in Chinese with English abstract).
- [8] 李随民,栾文楼,宋泽峰,等. 河北省南部平原区土壤有机碳储量估算[J]. 中国地质, 2010, 37(002): 525–529.  
Li Suimin, Luan Wenlou, Song Zefeng, et al. An estimation of oil organic carbon reserves in the southern plain of Hebei Province[J]. Geology in China, 2010, 37(2): 525–529(in Chinese with English abstract).
- [9] Erwin K L, Best G R. Evaluation of Constructed Wetlands on Phosphate Mined Lands in Florida: Final Report [M]. Florida Institute of Phosphate Research, 1997.
- [10] Nair V D, Graetz D A, Reddy K R, et al. Soil development in phosphate-mined created wetlands of Florida, USA[J]. Wetlands, 2001, 21(2): 232–239.
- [11] Berner R A. Sedimentary pyrite formation[J]. American Journal of Science, 1970, 268(1): 1–23.
- [12] Ye S, Laws E A, Wu Q, et al. Pyritization of trace metals in estuarine sediments and the controlling factors: A case in Jiaojiang Estuary of Zhejiang Province, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2010, 61(5): 973–982.
- [13] Ye S, Laws E A, Zhong S, et al. Sequestration of metals through association with pyrite in subtidal sediments of the Nanpaishui Estuary on the Western Bank of the Bohai Sea, China[J]. Marine Pollution Bulletin, 2011, 62(5): 934–941.
- [14] 丁玉蓉,叶思源,赵全升. 黄河三角洲新生湿地土壤对营养成分和碳的扣留[J]. 地质论评, 2012, 58(1): 183–189.  
Ding Yurong, Ye Siyuan, Zhao Quansheng. Nutrients and carbon sequestration in the newly created wetlands of the Yellow River Delta[J]. Geological Review, 2012, 58(1): 183–189(in Chinese with English abstract).
- [15] 范德江,杨作升,郭志刚. 中国陆架<sup>210</sup>Pb测年应用现状与思考[J]. 地球科学进展, 2000, 15(3): 297–302.  
Fan Dejiang, Yang Zuosheng, Guo Zhigang. Review of <sup>210</sup>Pb dating in the coastal shelf of China[J]. Advance in Earth Science, 2000, 15(3): 297–302(in Chinese with English abstract).
- [16] 康兴伦,袁毅,李培泉,等. <sup>210</sup>Pb法在测定沉积速率中的应用[J]. 海洋科学, 1985, 9(1): 38–42.  
Kang Xinglun, Yuan Yi, Li Peiquan, et al. The determination of sedimentation rate by <sup>210</sup>Pb method[J]. Marine Science, 1985, 9(1): 38–42(in Chinese with English abstract).
- [17] Appleby P, Nolan P, Gifford D, et al. <sup>210</sup>Pb Dating by Low Background Gamma Counting[M]. Paleolimnology IV, Springer, 1987: 21–27.
- [18] Yu J, Sun W, Liu J, et al. Enhanced net formations of nitrous oxide and methane underneath the frozen soil in Sanjiang wetland, northeastern China[J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 112(D7): D07111.
- [19] Sigua G C, Kang W J, Coleman S W. Soil profile distribution of phosphorus and other nutrients following wetland conversion to beef cattle pasture[J]. Journal of Environmental Quality, 2006, 35(6): 2374–2382.
- [20] 朱耀军,郭菊兰,武高洁. 红树林湿地有机碳研究进展[J]. 生态学杂志, 2012, 31(010): 2681–2687.  
Zhu Yaojun, Guo Julan, Wu Gaojie. Organic carbon in mangrove wetland: A review [J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(010): 2681–2687(in Chinese with English abstract).
- [21] Yu J B, Sun W D, Liu J D, et al. Enhanced net formations of nitrous oxide and methane underneath the frozen soil in Sanjiang wetland, northeastern China[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984—2012), 2007, 112, D07111.
- [22] Hatton R S, Patrick W H Jr, DeLaune R D. Sedimentation, nutrient accumulation, and early diagenesis in Louisiana Barataria Basin coastal marshes[C]. International Estuarine Research

- Conference, 1982: 255–267.
- [23] Turner R, Swenson E, Milan C. Organic and inorganic contributions to vertical accretion in salt marsh sediments[J]. *Concepts and Controversies in Tidal Marsh Ecology*, 2002: 583–595.
- [24] Chmura G L, Anisfeld S C, Cahoon D R, et al. Global carbon sequestration in tidal, saline wetland soils[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, 17(4): 1111–1132.
- [25] Craft C. Freshwater input structures soil properties, vertical accretion, and nutrient accumulation of Georgia and US tidal marshes[J]. *Limnology and Oceanography*, 2007, 1220–1230.
- [26] Reddy K, DeBusk W, DeLaune R, et al. Long-term nutrient accumulation rates in the Everglades[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, 57(4): 1147–1155.
- [27] 于君宝, 陈小兵, 孙志高, 等. 黄河三角洲新生滨海湿地土壤养分元素空间分布特征[J]. *环境科学学报*, 2009, 30(4): 855–861.
- Yu Junbao, Chen Xiaobing, Sun Zhigao, et al. The spatial distribution characteristics of soil nutrients in new-born coastal wetland in the Yellow River delta[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 30(4): 855–861(in Chinese with English abstract).
- [28] 杨世伦, 陈吉余. 试论植物在潮滩发育演变中的作用[J]. *海洋与湖沼*, 1994, 25(6): 631–635.
- Yang Shilun, Chen Jiyu. The role of vegetation in mud coast processes[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1994, 25(6): 631–635.

## Carbon sequestration along vegetation coverage gradient in the Suaeda salsa marsh from the Liaohe Delta

YU Xue-yang<sup>1,2</sup>, YE Si-yuan<sup>2,3,4</sup>, Nicholas Lawrence Yuknis<sup>2,3,4</sup>,  
Edward A. Laws<sup>2,3,4</sup>, ZHAO Guang-ming<sup>2,3</sup>, YUAN Hong-ming<sup>2,3</sup>,  
DING Xi-gui<sup>2,3</sup>, WANG Jin<sup>2,3</sup>

(1. Qingdao University, Qingdao 266071, Shandong, China; 2. Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resources and Environmental Geology, Ministry of Land and Resources, Qingdao 266071, Shandong, China; 3. Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, Shandong, China; 4. Louisiana State University, Barton Rouge, LA 70803, USA)

**Abstract:** Carbon storage or sequestration is important in studying the global carbon cycle and budget. To evaluate carbon accumulation rate of *S. salsa* marsh along the vegetation coverage gradient, the authors collected 7 core samples from Liaohe Delta in May, 2010. The sediment accretion rate was calculated by <sup>210</sup>Pb dating method. The laboratory analyses focused on water content, bulk density, nutrient contents, Mehlich III extractable nutrients and carbon concentration. Remarkably, carbon concentration is significantly related to nutrient contents ( $p < 0.01$ ), implying that organic matters can effectively accumulate nutrient elements and support the growth of wetland vegetation, which favors carbon sequestration in the wetland soils. The results showed that total carbon concentration, about 83% of which is organic carbon, varies within 10.5–14.6 g/kg and carbon accumulation rates are in the ranges of 98.02–260.37 g/m<sup>2</sup>/a (for total carbon) and 81.17–229.98 g/m<sup>2</sup>/a (for organic carbon) respectively with the average accumulation rate of 171.84 g/m<sup>2</sup>/a for TC and 141.29 g/m<sup>2</sup>/a for C<sub>org</sub>. Carbon accumulation rates are likely affected by sediment accretion rate which is significantly related to the elevation of each wetland ( $p < 0.01$ ). The implication is that not every wetland in different geological conditions and vegetation coverages is equally effective in sequestering carbon; it is important to address differences in wetland elevation, geological conditions and vegetation coverages when assessing the role of wetlands as carbon sinks in global carbon budgets.

**Key words:** Liaohe Delta; wetland; carbon sequestration; nutrients; <sup>210</sup>Pb dating

**About the first author:** YU Xue-yang, male, born in 1989, master candidate, mainly engages in the study of environmental chemistry and carbon cycle; E-mail: yuxueyang89@hotmail.com.

**About the corresponding author:** YE Si-yuan, female, born in 1963, senior researcher, mainly engages in the study of environmental chemistry and carbon cycle; E-mail: ye\_siyan@sina.com.