

DOI: 10.5846/stxb201304010583

王启栋, 宋金明, 李学刚. 黄河口湿地有机碳来源及其对碳埋藏提升策略的启示. 生态学报, 2015, 35(2): 568-576.

Wang Q D, Song J M, Li X G. Sources of organic carbon in the wetlands of the Yellow River estuary and instructions on carbon burial promotion strategies. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(2): 568-576.

## 黄河口湿地有机碳来源及其对碳埋藏提升策略的启示

王启栋<sup>1,2</sup>, 宋金明<sup>1,\*</sup>, 李学刚<sup>1</sup>

1 中国科学院海洋研究所 生态与环境科学重点实验室, 青岛 266071

2 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要:**滨海湿地是地球上具有多种独特功能的生态系统,是地球上重要的碳库之一,其在全球碳循环中的作用在近年来越来越受到人们的重视。总结了用 C/N、稳定碳同位素和生物标志物等方法追踪黄河口湿地有机碳来源的研究成果,并据此探讨了黄河口湿地的固碳提升策略。黄河口湿地是我国典型的滨海湿地,碳来源复杂,但各种示踪方法均表明有机碳的来源中陆源输入较海源输入优势明显,而且陆源输入以地表径流和植被为主,但海源输入从内陆向近海逐渐增强,碳的来源有明显的时空变化并且受到人类活动的强烈干扰。从有机质来源看,提升黄河口湿地的碳埋藏能力应该从合理调配河流淡水资源、保护植被、加快植物群落演替等方面入手。目前有机碳来源的研究还存在覆盖区域有限、碳源区分粗略、影响因子研究较少等问题,缺乏系统性,多限于观测,对机制的理解十分薄弱,因此难以对碳埋藏能力的提升提供定量化的指导。今后的研究要从以下几个方面加强:1)不同区域和不同环境条件之间的比较研究;2)探寻更具特异性的生物指标、优化数据模型,使来源区分更细致;3)不同来源有机质在沉积物中埋藏效率的对比研究;4)构建湿地碳埋藏能力评估体系,综合考虑各方面因素研发和集成能够最大限度提高滨海湿地碳埋藏能力的技术。

**关键词:** 有机碳来源; 碳埋藏能力; 碳稳定同位素; 生物标志物; 黄河口湿地

## Sources of organic carbon in the wetlands of the Yellow River estuary and instructions on carbon burial promotion strategies

WANG Qidong<sup>1,2</sup>, SONG Jinming<sup>1,\*</sup>, LI Xuegang<sup>1</sup>

1 Key Laboratory of Ecology and Environment, Institute of Oceanography, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** Coastal wetland ecosystem, which has many kinds of special ecological functions, is one of the most important carbon pools on the earth. In recent years, the global climate change caused by the emission of greenhouse gases has increasingly been attended. As a significant carbon sink, the coastal wetland regions play an important role in the global carbon cycle. However, the carbon cycling processes in the coastal wetland are very complicated due to the interactions between land and ocean. Recent research demonstrates that the carbon input is the most important among all the complicated processes as the base of the carbon cycle. The Yellow River estuary wetland is a typical coastal wetland in the Northern China. The organic carbon sources were discussed and the strategies about increasing carbon burial capacity of the wetlands ecosystem were raised in this paper. The sources of organic carbon in the Yellow River estuary wetland were deduced by C/N, stable carbon isotopic compositions and biomarkers. The study showed that the organic carbon sources in the Yellow River estuary wetlands were complex with both terrestrial and marine materials. The C/N, stable carbon isotopic compositions of organic matters and biomarkers distributions showed that the terrestrial input of organic matters to the sediments was more

**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(DOMEPI(MEA)-01-01)

**收稿日期:** 2013-04-01; **网络出版日期:** 2014-03-25

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jmsong@qdio.ac.cn

than the marine input. The proportion of marine organic matters increased gradually from inland to coastal areas and from shallow beaches to deeper areas with the enhancing impact of tidal. The organic carbon sources had a significantly seasonal change with primary productivities, runoff of the Yellow River and were disturbed intensively by human activities. On the results of organic carbon sources research, many ways can be used to increase the carbon burial capacity of the Yellow River estuary wetlands such as allocating riverine fresh water input reasonably, protecting vegetation around the estuary and accelerating the succession of plant communities covering the wetlands. The conclusions we drew from the Yellow River Estuary wetland can be extended to other coastal wetlands, especially large estuarine wetlands, because the fundamental principles that drive the biogeochemical processes of the coastal wetlands are basically the same despite the different environmental conditions. The current researches on organic carbon sources of coastal wetland should be improved by extending the study areas, exploring stricter distinguish of carbon sources and systematically analyzing the influencing factors. Since most researches are non-systematic and merely based on the direct observation rather than the exploration of principles and mechanisms, it is hard to get more quantitative results and effective instructions to the increase of the carbon burial capacity of coastal wetland. Future researches should be enhanced in the following parts: 1) Carrying out more comparative studies of wetlands with different environmental conditions; 2) Searching more specific biological indicators and optimizing data analysis models to make finer distinction of carbon sources; 3) Studying the burial efficiencies of organic matters from different sources; 4) Building the assessment system of carbon burial capacity of wetland, developing and integrating the techniques which can increase the carbon burial capacity of coastal wetlands the most.

**Key Words:** organic carbon sources; carbon burial capacity; stable carbon isotope; biomarker; Yellow River estuary wetlands

滨海湿地是地球上具有多种独特功能的生态系统,它不仅为人类提供食物、原料和水资源,而且在稳定环境、维持生态平衡、保护生物多样性方面均起到重要作用。同时滨海湿地也是地球上重要的碳库之一,它具有固碳能力强、沉积速率高、碳埋藏速率高、甲烷排放量低的特点,对于抑制大气 CO<sub>2</sub> 升高、缓解全球变暖具有重要作用。我国滨海湿地面积广阔<sup>[1]</sup>,是补偿碳排放的重要空间资源。本文以黄河口湿地为例,综述了滨海湿地有机碳的输入与埋藏等过程,评估了其在增加碳汇方面的作用。

黄河口湿地位于山东省东营市,北临渤海,东靠莱州湾,是我国典型的滨海湿地,也是世界上暖温带最年轻、最广阔、最完整的湿地生态系统<sup>[2]</sup>。黄河口滨海湿地总面积 33.82 万 hm<sup>2</sup>,其中自然滨海湿地面积 30.81 万 hm<sup>2</sup>,占 80.6%。自然湿地主要包括浅海水域、滩涂以及覆盖有芦苇、碱蓬等植被的草甸沼泽等<sup>[3]</sup>。自 20 世纪 90 年代以来,黄河口湿地的研究热点集中在湿地演化、生物多样性、生态环境及湿地保护与修复等方面,而随着人们对河口区应对气候变化作用的认识加强,有关元素生物地球化学过程,尤其是碳循环的研究在近年来也逐渐展开<sup>[4]</sup>。

黄河口湿地环境复杂多变,碳循环受多种因素的共同影响和控制。有机碳参与的生物地球化学过程既包含光合作用、呼吸作用、微生物降解等生化过程,也包括土壤颗粒吸附、水动力、生物扰动以及土地利用变化等物理过程,而且各个过程之间又相互耦合,更加深了碳循环的复杂程度。此外,黄河口湿地的前沿还在不断向海洋推进,每年产生大面积的新生湿地,碳过程发生的区域在不断扩大,不确定性也在增加。众多学者在黄河口湿地进行过对有机碳的研究,涉及植被固碳能力<sup>[5]</sup>、土壤有机碳含量及空间分布<sup>[6-7]</sup>、有机碳分布与来源<sup>[8-9]</sup>、有机碳的空间输运<sup>[10]</sup>等,而对有机碳的复杂转化过程、永久埋藏效力以及湿地碳源汇特征的研究还不多。众所周知,碳循环研究的核心科学问题之一是弄清区域的碳源汇格局<sup>[11]</sup>,一般而言,滨海湿地碳汇能力的大小在表观上直接取决于整个生态系统碳输入量和输出量的相对大小。因此,追踪滨海湿地沉积物中有机碳的来源,对深入解析有机质的迁移转化机制,阐明滨海湿地碳源汇特征有重要意义。针对这些情况,本文总结归纳了近年来黄河口滨海湿地沉积物有机质来源的研究进展,估算了碳埋藏能力及提升空间,并从有机碳

来源的角度探讨了滨海湿地生态系统碳埋藏能力的提升策略,以期对进一步开展滨海湿地碳循环研究提供帮助。

## 1 黄河口湿地的有机碳来源

### 1.1 碳的输入途径

黄河口湿地分布有大面积的芦苇和碱蓬以及其它湿生和盐生植被,浮游动植物有上百种,底栖的潮间带生物也有 80 多种,这些构成了有机碳内部输入的主要来源。除了黄河主流外,黄河口滨海湿地河流众多,南部有小清河、支脉河、杏花河、孝妇河、淄河,北部有徒骇河、德惠新河、潮河、秦口河等<sup>[3]</sup>,这些河流会携带大量颗粒物,在河口区堆积;潮汐作用也给大面积的沿岸滩涂带来悬浮物,这些水源给黄河口湿地带来强烈的外源有机质输入。黄河口滨岸潮滩湿地植被覆盖区表层土壤的有机碳含量并不完全高于无植被区和光滩<sup>[7]</sup>,说明该区域土壤有机碳受外源输入影响强烈。此外,黄河口地区经济发展迅速,人口密集,人类活动频繁,还有中国第二大的胜利油田,人为产生的有机污染物也是黄河口湿地有机质一个不可忽视的来源,例如在黄河口区检测到的多环芳烃,就主要来自于化石燃料的燃烧以及石油源<sup>[12]</sup>。所以,黄河口湿地的有机碳来源构成复杂,影响因素众多,需要多种检测手段和追踪方法来弄清楚不同的来源及其对湿地碳库的贡献大小。

### 1.2 有机碳来源的示踪研究

很多学者对黄河口湿地有机碳的来源进行了研究和报道,在示踪方法和指标上使用 C/N 比值法、稳定碳同位素法以及生物标志物追踪黄河口湿地有机碳来源的研究较多。

#### 1.2.1 C/N 比值法

C/N 比值作为区分有机质来源的最常用参数,其依据是不同生物体所产生的主要有机物的种类有差别。如藻类等水生生物富含蛋白质等物质,其产生的有机物 C/N 较低,一般为 4—10。陆生高等植物生产的有机物则以纤维素、木质素等碳水化合物为主,蛋白质含量相对较低,因此 C/N 通常较高,一般在 20 以上<sup>[13]</sup>。

黄河三角洲湿地表层土壤 C/N 分布的空间差异较大。三角洲北部多林地,表层土壤 C/N 大于 30 且与土壤有机碳含量显著相关<sup>[2]</sup>,说明土壤有机质主要来自陆地高等植物;黄河河道两侧土壤 C/N 则低于 8 或 12,一方面可能由于人类活动产生的污水导致氮含量升高<sup>[2]</sup>,另一方面也可能意味着海源物质输入的增强。研究显示,黄河口滨海湿地的入海河流污染严重,主要污染因子为总氮(TN)、总磷(TP)等,这势必会给湿地土壤带来额外的氮磷,给物源判断带来困难<sup>[14]</sup>。表层沉积物 C/N 的季节变化也十分明显。以河道附近为例,6 月份表层沉积物的碳氮比平均值为 19.18,与 4 月份平均值 8.04 相比显著增加,而且在潮上带,主要受黄河水影响的样点碳氮比的增加远远高于低潮带受河流及潮汐共同影响的样点<sup>[15]</sup>。这充分说明了河流携带的陆源有机质是周围湿地土壤有机碳的重要来源,其影响远大于植被覆盖的不同并且随径流量的变化而变化。总的来看,黄河口滨海湿地碳来源多样化,且不同位置差别很大,主要控制因素也各不相同,C/N 比值可以反映有机质来源的变化,但无法深入辨别。

#### 1.2.2 碳稳定同位素法

植物在利用无机碳的过程中会产生不同程度的碳同位素分馏现象,从而使得不同来源有机质具有不同的碳同位素含量。因此碳的稳定同位素比值  $\delta^{13}\text{C}$  可以反映有机质来源,常被用作近海和河口环境中有机碳的物源示踪指标。

早在 20 世纪 90 年代,黄河口区的有机碳同位素地球化学的相关研究就已展开。碳稳定同位素方法的研究对象包括河水中的 POC(particulate organic carbon)以及河口湿地沉积物。河水 POC 的  $\delta^{13}\text{C}$  存在明显的季节变化,洪水期比枯水期更重,与长江口区类似<sup>[16]</sup>。洪水期 POC 碳同位素平均值为  $-25.8\text{‰}$ ,与马兰黄土接近,而枯水期平均值则为  $-28.8\text{‰}$ <sup>[17]</sup>,接近 C3 植物平均值  $-28\text{‰}$ <sup>[18]</sup>,这揭示了径流量大时 POC 主要来自于上游冲刷的泥土,而径流量小时陆地植被的贡献更大。相较于陆地植被,水生植物分馏过程受控因素较多,同位素含量变化范围较大,但一般认为海洋有机质  $\delta^{13}\text{C}$  值  $-22\text{‰}$ — $-20\text{‰}$ <sup>[13]</sup>,研究中一般用  $-25\text{‰}$ 和  $-20\text{‰}$ 作为陆

地和海洋来源有机质同位素组成的端元值来大概区分有机质的海陆来源。在河口浅海,水体 POC 的  $\delta^{13}\text{C}$  整体分布规律是离岸越远越重,表明海洋来源有机质的比例在逐渐增大,但是同位素含量一般不大于  $-23\text{‰}$  说明仍以陆源为主<sup>[17]</sup>。与河水 POC 相比,湿地沉积物的  $\delta^{13}\text{C}$  明显偏重 ( $-25.18\text{‰}$ — $-21.49\text{‰}$ )<sup>[15]</sup>,而湿地植被以桤柳、芦苇等同位素含量低的 C3 植物为主,这说明湿地沉积物中有许多潜在的碳来源,如碳同位素含量较高(平均  $-14\text{‰}$ )的 C4 植物,并且占有重要比例。结合 C/N 和  $\delta^{13}\text{C}$  计算海陆来源有机质的相对贡献,结果在空间变化上符合离海越近海源有机质贡献越大的一般规律,入海口处表层沉积物的海源输入已经超过了陆源<sup>[15]</sup>。柱状沉积物的碳同位素分布规律不明显,表明该区域沉积过程受到了干扰,如黄河的调水调沙,有机质输入不稳定。碳同位素含量的季节变化上,湿地表层沉积物与河水 POC 保持一致,夏季含量更高。表 1 列举了我国主要河口及滨海湿地碳同位素含量的研究结果。可以看出,在长江黄河体系中陆源输入占绝对优势,相对而言黄河口湿地受陆源有机质输入的影响更强烈。从北到南,海源有机质的输入逐渐加强,这与中国边缘海的物质输入特点是一致的,这种规律形成的原因主要是中国近海开放程度的不同:黄河注入的渤海属于内海,而黄海区域的海流主要是闭合的环流,因此中国北部近海与外海的物质交换匮乏,陆源有机质输入后不断累积,所占比例较高;相比较而言,南部近海更开放,物质交换迅速,陆源输入的物质被快速搬运到外海,从而也使海源输入的影响加强。

表 1 河口颗粒/沉积碳同位素  $\delta^{13}\text{C}$  与其他区域研究结果对比Table 1 Comparison of the  $\delta^{13}\text{C}$  in particles or sediments between Yellow River Estuary and other areas

研究区域 Study area	样品 Sample	碳同位素组成 $\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	有机质来源 Organic matter source	参考文献 References
黄河口 Yellow River Estuary	POC (particulate organic carbon)	洪水期 $-27.7$ — $-24.7$ 枯水期 $-29.7$ — $-28.2$	陆源黄土带入 陆源为主	[17]
黄河口湿地 Yellow River Estuary wetland	SS (surface sediment)	$-25.18$ — $-21.49$	海陆混合	[15]
苏北潮滩湿地 Tidal wetland of Subei	SS	$-23.34$ — $-19$	光滩及过渡带海源为主,米草滩 陆源为主	[19]
长江口 Yangtze River Estuary	POC	洪水期 $-25.4$ — $-19.7$ 枯水期 $-26.6$ — $-23.7$	海陆混合 陆源占优势	[16]
崇明东滩 East beach of Chongming Island	SS	$-24.3$ — $-22.8$	河水悬浮有机质, C3 植物	[20]
漳江口红树林湿地 Mangrove wetland in Zhangjiang Estuary	SS	$-25.53$ — $-21.61$	植被贡献小,可能主要来自其他来源	[21]
珠江口及近海 Pearl River Estuary and offshore	SS	$-24.73$ — $-21.69$	陆源江口占 $45\%$ — $66\%$ ,近海占 $8\%$ — $11\%$	[22]

与 C/N 相比,稳定碳同位素含量在体现有机质的来源方面优势明显,但仍有许多不确定因素。首先是不同生物有机体的碳同位素含量范围重叠造成端元模糊,降低了辨别的准确性。其次,有机质在沉积过程中会发生不同程度的降解,难降解有机碳得到选择性保存,会造成碳同位素含量的变化。另外,植物体的碳同位素组成还会随着环境的变化而变化,从输入之初就造成了沉积物稳定碳同位素含量的不确定。整个黄河三角洲湿地植被和表层土壤的碳同位素组成<sup>[2]</sup>:植物样品的  $\delta^{13}\text{C}$  值为  $-30.5\text{‰}$ — $-13.2\text{‰}$ ,平均  $-26.3\text{‰}$ ,以 C3 植物为主;表层土壤  $\delta^{13}\text{C}$  值为  $-26.44\text{‰}$ — $-3.12\text{‰}$ ,平均  $-17.37\text{‰}$ 。土壤  $\delta^{13}\text{C}$  值比植被、河水悬浮颗粒物,甚至海源有机质都要高,说明可能有重要的未知来源有机碳的输入,仅通过碳同位素组成难以辨别。

### 1.2.3 生物标志物法

生物标志物是指有特定的生物来源并且在沉积物中历经长时间埋藏后还能保持来源信息的化合物<sup>[23]</sup>,它们在沉积成岩作用过程中具有良好的稳定性和对原始生物母质特征的继承性,因此可被用以识别有机质的物源。一些学者在黄河口区展开过生物标志物的研究,其湿地检测到的生物标志物有正构烷烃、脂肪酸、甾醇等<sup>[8-9,15,24-26]</sup>。为了方便对比不同的研究结果,将这 3 种生物标志物用于指示有机碳来源的主要指标列于表 2。

表 2 3 种不同生物标志物对有机质来源的指示

Table 2 Use of three different biomarkers as organic matter sources indicators

生物标志物 Biomarker	陆生高等植物 Terrestrial high plant	藻类等浮游生物 Algae and other planktons	细菌等微生物 Bacteria and other microorganisms	参考文献 References
正构烷烃 N-alkanes	$nC23-nC35$ , CPI (carbon preference index) >3 奇偶优势明显	$nC15-nC21$ CPI <3	短链, CPI 接近 1	[27]
脂肪酸 fatty acid	>C22, 饱和脂肪酸	<C20	不饱和脂肪酸、异构酸	[15, 27, 28]
甾醇 sterols	C29	C27, C28	—	[21]

河口区表层沉积物研究结果较多。河口混合区检测到较高含量 C24 脂肪酸、大量不饱和脂肪酸以及 C15 和 C17 的异和反异脂肪酸<sup>[24]</sup>, 说明沉积物中同时存在陆源有机质和浮游动植物和微生物来源的有机质, 而正烷烃 CPI (carbon preference index) (3.1—7.9) 指示碳原子数奇偶优势明显, 表明陆地植被是主要来源。毛登<sup>[25]</sup> 对比研究了黄河口和长江口表层沉积物烃类化合物分布, 发现黄河口正构烷烃主峰为 C18, 奇偶优势不明显, 并且甾醇的分布也以富集于浮游生物的 C27 为主, 因此认为黄河口沉积物受陆源高等植物影响较弱。而张娇<sup>[8]</sup> 的研究结果则显示黄河口表层沉积物中正构烷烃主峰以高碳数 (C29, C31) 为主, 且奇偶优势明显, 轻重烃比值较低, 有机质主要受陆源输入影响。他们之间研究结果的不同可能是多个原因造成的。其一, 采样位置不同。毛登的采样位置在黄河河道, 而张娇则是在黄河口外南北两个断面多个样点的采集表层沉积物, 通常河水中有有机质含量较低的粗颗粒泥沙会首先沉降, 这可能是造成毛登的研究结果中陆源有机质输入较弱的原因; 其二, 从 2002 年开始, 黄河进行调水调沙, 大量泥沙被冲出河道输入海洋, 势必会带来大量陆源有机质, 而毛登与张娇的采样时间正好在黄河调水调沙前后, 因此他们关于陆源有机质影响大小的研究结果有差异。吴斌发现黄河口表层沉积物有机碳含量较低, 并认为是受黄河粗颗粒物沉降的影响, 而有机质含量高的细颗粒物则迁移至更远距离, 这也体现了黄河泥沙输入给有机质分布带来的影响<sup>[29]</sup>。

湿地沉积物中有机质来源的分布地区差异明显。黄河三角洲自然保护区内, 沉积物中正构烷烃以高碳数烃为主, 奇偶优势明显, 平均碳链长度大于 27, CPI 指数高于 5.5, 正构烷烃主碳峰以 31 为主<sup>[9]</sup>, 说明有机质主要来自于陆生高等植物中的草本植物, 与当地覆盖的芦苇、碱蓬等植被相一致。而黄河三角洲潮间带脂类物质中, 有大量的支链及不饱和脂肪酸, 从结合态及游离态的脂类物质组成看, 均以藻源和细菌源为主<sup>[26]</sup>, 证明有机碳主要来源于原位的初级生产力和海洋自生源物质。对比这两个区域的研究结果, 可以看出海源有机质的输入从内陆到近海逐渐增强。与其他地区滨海湿地相比, 黄河口湿地沉积物中有机碳含量较低, 并且受陆源输入的影响更强烈。以正构烷烃为例, 从表 3 中可以看出黄河口湿地正构烷烃含量与其他地区相当或者略低, 而 CPI 指数则明显高于其他区域, 说明有机质大部分来源于陆地高等植物。长江口和漳江口都位于中国南部沿海, 这也与上文中所得出的从南至北陆源输入增强的结论相一致。

### 1.3 有机碳来源分析

从方法各异的各种研究结果来看, 黄河口湿地有机碳来源有以下特点:

#### (1) 陆源输入优势明显

黄河口湿地的陆源输入, 一是以黄河为主的众多河流从中上游携带而来的大量泥沙及悬浮颗粒物, 它们在河口处堆积, 是湿地形成及延伸的主要物质来源, 构成了湿地土壤的主体和原始有机碳库; 二是湿地植被产生的有机物质, 它们在湿地发育过程中为土壤有机碳库提供重要的补充。从有机碳的生物指标来看, 湿地土壤有机质中陆地来源占绝对优势, 甚至连边缘海的表层沉积物中, 也有半数有机碳来源于陆地。

#### (2) 有明显的空间和季节变化

海源输入从近海沿岸向内陆逐渐减弱, 这与大多数滨海湿地的分布规律相一致。有机质的海源输入主要

表 3 黄河口有机碳及正构烷烃研究结果与其他区域对比

Table 3 Comparison of the TOC (total organic carbon) and T-ALK (total n-alkanes) between Yellow River Estuary and other areas

研究区域 Study area	总有机碳 TOC/%	总正构烷烃 T-ALK/( $\mu\text{g/g}$ )	碳优势指数 CPI (carbon preference index)	参考文献 References
黄河口及近海 Yellow River Estuary and offshore	0.06—0.39	0.32—1.16	3.1—7.9	[24]
黄河口及近海 Yellow River Estuary and offshore	0.34—2.4	0.38—2.55	2.32—5.91	[8]
黄河口湿地 Yellow River Estuary wetland	0.02—0.9	0.57—3.9	4.63—8.70	[9]
长江口及近海 Yangtse River Estuary and offshore	0.16—1.31	0.35—6.44	1.216—2.672	[30]
长江口湿地 Yangtse River Estuary wetland	0.1—0.7	1.1—2.8	1.7—4.1	[31]
漳江口红树林湿地 Mangrove wetland in Zhangjiang Estuary	0.76—1.49	—	0.74—12.55	[21]

受潮汐的影响。近海区域有较高的初级生产力,产生大量颗粒有机质<sup>[32]</sup>。在潮间带区域,海水冲刷滩涂,回落时流速减缓,水中颗粒物沉降,颗粒物附着的海洋自生的有机质成为潮间带沉积物中有机碳的重要来源。黄河口滨岸新生湿地,植被覆盖率低,潮水不受阻挡,因此,颗粒物沉积速率较低,沉积物有机碳含量也较低,而且潮汐作用范围有限,海水到达不了的地方海源有机质的输入则明显减弱。季节变化则主要是由水动力的改变引起的。丰水期,黄河中上游冲刷严重,河水携带的大颗粒泥沙在河口区沉降,而富含有机质的细颗粒物则迁移的更远;而枯水期河流携带物质堆积减少,河口湿地的植被则成为有机质的主要贡献者<sup>[8,17]</sup>。

### (3) 人类活动影响剧烈

人类对黄河口湿地有机碳库的干扰主要有三个方面:第一是胜利油田的开采。在河口湿地及近海表层沉积物中都检测到了 UCM (unresolved complex mixture) 的存在<sup>[8-9]</sup>,这种不能分辨的复杂物质来自石油烃,这说明油田的开采过程的抛洒、泄露等导致了湿地沉积物的石油污染。第二是大量的生活污水及农业活动产生的污水排放到河中。湿地沉积物中 C/N 的偏低,同位素含量的异常以及检测到多环芳烃的存在,都证明了人类活动带来了有机质的输入,这会增加沉积碳库潜在的碳来源,给湿地有机碳来源的追溯造成更大的不确定性。第三是为治理黄河而进行的调水调沙。调水调沙是治理黄河的积极举措,促进了黄河口湿地的恢复,明显改善河口三角洲地区的生态环境,并且每年大幅增加湿地面积。黄河口湿地有机碳库因此也在不断发生改变,碳来源追踪更加复杂。

## 2 黄河口湿地碳埋藏能力与提升策略

碳埋藏是湿地生态系统参与陆地生态系统碳循环的一项重要服务功能,滨海湿地具有很高的碳埋藏能力,其碳累积速率可达  $(210 \pm 20) \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ,远高于泥炭湿地<sup>[33]</sup>。黄河口湿地是我国典型的滨海湿地,研究表明,黄河口滨岸新生湿地土壤有机碳含量远低于内陆沼泽湿地,这是因为新生湿地成土年龄短,土壤潜育化程度低,缺乏植被覆盖和有机质输入,但是黄河口湿地却有较高的沉积速率,所以总体来看,黄河口滨海湿地碳埋藏能力有很大的提升空间。采取措施提高黄河口湿地的碳埋藏水平,使黄河口地区变成一个巨大的碳汇,对于缓解我国二氧化碳排放压力具有重要意义。

### 2.1 碳埋藏潜力估算

根据《中国滨海湿地》,黄河口滨海天然湿地陆地面积以滩涂为主 ( $104505 \text{ hm}^2$ ),而植被覆盖区域主要是芦苇滩和碱蓬滩,面积分别为  $15792 \text{ hm}^2$  和  $14231 \text{ hm}^2$ <sup>[3]</sup>。根据黄河口湿地芦苇和碱蓬湿地近 30 年的有机碳平均埋藏速率分别为  $216.68 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$  和  $101.26 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ <sup>[6]</sup>,可计算获得有机碳埋藏量分别可达  $34218.1 \text{ t/a}$  和  $14410.3 \text{ t/a}$ ,湿地沉积物有机碳含量小于 1%,远低于内陆沼泽湿地<sup>[6]</sup>。滩涂的有机碳含量及埋藏速率都

低于碱蓬湿地,按照植被对沉积物有机质贡献为 50%来估计,滩涂总的有机碳埋藏量不超过 52911 t/a。因此,可估算黄河口湿地陆上部分总有机碳埋藏能力在  $1 \times 10^5$  t/a 左右,仍有较大的提升空间。

首先从植被覆盖面积看,黄河口滨海天然湿地的陆地面积中只有 20%左右被芦苇和碱蓬覆盖,无植被覆盖的光滩面积高达 70%以上,随着湿地保护措施的实施和植物群落的演替和发展,芦苇和碱蓬湿地的面积可能会不断扩大。随着先锋物种碱蓬入侵,如果现有光滩面积的一半被植被覆盖,而原来的碱蓬群落全部演替为芦苇群落,在各湿地类型的有机碳埋藏速率不变的情况下,黄河口湿地总的有机碳埋藏能力将会接近  $1.5 \times 10^5$  t/a,提高了 1.5 倍。

其次,目前湿地沉积物中有机碳的含量较低,主要是由于已有植物群落较稀疏,生物量密度小,沉积物中植物有机质输入不足所致,而随着植物群落初级生产力的增加,湿地有机碳含量也会不断增高。据统计,黄河口湿地芦苇和碱蓬的初级生产力分别为  $7.9 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$  和  $6.2 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ <sup>[34]</sup>,固碳能力分别为  $3.48 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$  和  $2.74 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ (根据每形成 1g 干物质需要同化  $1.62 \text{ gCO}_2$ ,固定  $0.44 \text{ gC}$ ,由初级生产力计算得到),低于中国滨海湿地的平均值  $3.7 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ,更低于气候条件相同的暖温带阔叶林的固碳能力  $10.6 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ <sup>[35]</sup>。从光能利用率的角度来看,黄河口湿地芦苇和碱蓬分别为 0.25% 和 0.20%<sup>[35]</sup>,远低于辽河三角洲湿地的 0.84%<sup>[36]</sup>、长江口湿地的 0.3%—0.9%以及理论最高值 5%—6%<sup>[35]</sup>。因此,如果光能利用率提升到 1%,黄河口湿地植被的初级生产力仍有 4—5 倍的提升空间。考虑到呼吸作用及矿化作用对有机质的消耗,湿地沉积物中有机碳的含量仍然可能成倍增加,况且还可以通过淡水输入等方式提高地下水位,降低有机碳消耗速率。相应的,湿地有机碳埋藏能力也会成倍提升。

## 2.2 碳埋藏能力提升策略

从黄河口湿地有机碳来源的研究结果分析,有机质输入最主要的方式是河流携带的悬浮物堆积和覆盖在湿地上的植被生物量的输入,因此主要可从这两方面着手,采取措施以增加土壤有机碳库,提升湿地碳埋藏能力。

### (1) 合理调配河流淡水输入

水对湿地的作用是不言而喻的,正是由于常年积水才使得湿地有机质降解缓慢,碳埋藏不断增加。研究表明,湿地水位下降, $\text{CO}_2$ 排放显著增加,会导致大量的碳输出,而大多数湿地退化的原因正是水分的流失。对于河口湿地而言,最主要的水来源是河流淡水输入。河流淡水输入不仅产生物质的堆积,还会促进湿地土壤脱盐以利于植被的生长,是关系河口湿地存亡的关键因素。20 世纪黄河频繁断流就造成了河口湿地生态系统的退化。湿地保持健康是固碳能力提升的前提,为恢复维护湿地生态系统的正常生态功能,需要对河流进行治理,要建立健全管理机制,统一调度和分配水资源,合理节约用水,利用自然规律,协调人类与生态系统的关系。本世纪初开始的黄河调水调沙对黄河口湿地的恢复起到了积极作用,对于其他相关河流也要加紧治理。对于已退化的湿地,可以通过淡水添加的方式进行恢复。研究显示,对黄河三角洲退化某块湿地进行长期淡水添加之后,土壤有机碳含量、C/N、以及植物生物量都显著增加<sup>[37]</sup>,效果显著。

### (2) 保护河口邻近区域植被,加快植物群落演替

植被是湿地土壤碳库的另一重要来源。总的来说,黄河三角洲地区植被种类单调,以草本为主,湿生和盐生植被是优势种,植被形成时间短,群落稳定性较差,属于群落演替的早期。但是植被的顺行演替过程会使黄河口湿地碳储量不断增大,固碳能力不断提高。碱蓬可忍受高盐分的胁迫,在滨海湿地盐渍土壤中正常生长<sup>[38]</sup>,是滨岸新生湿地的先锋植物。碱蓬生长后,有机碳开始累积,土壤抬高并开始脱盐,之后芦苇、柽柳等植物群落开始出现并发展成优势群落,土壤盐度进一步降低,其他较耐盐的非盐生植物开始入侵并且逐渐替代盐生植物。自然状态下,演替会从滩涂湿地生态系统最终演变成暖温带阔叶林系统。然而强烈的人类活动,干扰了这一自然演替过程。首先,频繁的开发活动导致碱蓬斑块面积减小,减缓了滩涂湿地土壤脱盐改良的速度;其次,在芦苇、柽柳等群落成为优势种,土壤进一步改良后开垦为农田,不合理的农耕方式导致土壤反盐严重。因此,黄河口湿地植被演替缓慢,目前仍以草本植物为主,林地很少出现。为提升河口湿地的固碳能

力,植物群落的形成和发展至关重要。为此,必须要采取措施,保护现有植被,暂时的经济利益让步于生态系统的维护,减少开发活动等人类干扰。此外,还可以采取手段加速植物群落的演替过程,如工程措施加快土壤脱盐,培养更耐盐的碱蓬、芦苇和怪柳品种使其能迅速占领新生湿地并形成稳固的群落。

### 3 黄河口湿地有机碳来源与碳埋藏能力提升研究展望

#### 3.1 存在问题

总体来看,关于黄河口湿地有机碳来源的研究尽管取得了一些进展,研究结果对湿地有机碳库的维护和湿地碳埋藏能力的提升策略制定都有一定的价值,但对揭示有机碳输入所有途径及其在有机碳库中的作用还有许多深入系统的工作要做。

有机碳的来源是碳的生物地球化学过程研究的热点之一,尤其是在环境条件复杂多变的河口地区。近年来,不少学者在黄河口湿地展开了有机碳的溯源研究,但受限于实地取样和研究方法,目前的研究缺乏系统性,多限于观测,对机制的理解十分薄弱。第一,当前的研究覆盖区域有限,调查取样一般只在局部区域,对比研究缺乏,难以体现黄河口湿地碳来源的全部特征。第二,对有机碳来源的辨别大多只是粗略分成海源和陆源,准确的定量研究很少。第三,有机碳来源影响因素及季节变化等系统的机制的研究匮乏。

有机碳来源的研究结果对提升滨海湿地的碳埋藏能力具有重要指导意义。碳埋藏能力取决于碳输入和碳输出的相对大小,而有机碳来源的研究正是解决碳的输入问题。根据碳来源的不同途径和比例,采取相应的方法、有侧重的增加生态系统的碳输入是提升滨海湿地碳埋藏能力的重要举措之一。然而目前的研究还无法将二者紧密结合,一方面有机碳来源研究结果不够细致;另一方面不同来源的有机质在沉积物中的埋藏效率缺乏研究;此外,对于湿地碳埋藏能力的提升,目前还缺乏统一的标准评估方法。

#### 3.2 研究展望

针对目前存在的问题,今后黄河口湿地有机碳来源的研究应侧重,1)加强不同植被覆盖、不同水文环境之间的比较研究;2)探寻更具特异性的生物指标或者更优化的数据解译方法和模型,以期更细致的辨别海洋和陆地中不同种生物的有机碳来源;3)按时间序列跟踪区域有机碳来源的变化,结合地下水位、温度等环境因子的变化探讨影响有机碳来源的因素。

不同来源有机碳在滨海湿地沉积物中埋藏效率的研究亟需开展。建议从沉积物岩芯入手,结合当地生态环境变化的历史资料,解译出不同来源有机质在不同时期的输入量以及现存量,再综合不同历史时期温度、水文、潮汐等环境因子,从而对比在不同环境条件下不同类型有机质在沉积物中得到长期保存的能力,以期为滨海湿地碳埋藏能力的提升提供科学的指导。

湿地碳埋藏能力评估体系的建立也迫在眉睫。对滨海湿地生态系统还要综合考虑湿地植被固碳潜力、沉积物碳排放量、碳沉降量、碳埋藏量以及沉积物微生物固碳能力等方面,并结合地质地貌、水文和气候条件,结合湿地的开发利用现状,研发和集成能够最大限度提高滨海湿地碳埋藏能力的技术。

尽管环境条件不同,但是推动和调节潮间带生物地球化学过程的基本原理是相同的<sup>[39]</sup>。所以黄河口湿地有关碳过程的研究成果,在其他区域滨海湿地,尤其是大河口湿地,可以得到参考和借鉴。因此,未来的研究可以黄河口湿地为例,形成一套系统的研究方法,并在全国各地滨海湿地的研究中得到推广,以尽快利用滨海湿地碳封存能力强的优势,缓解我国由温室气体排放带来的经济压力。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 张晓龙,李培英,李萍,徐兴永.中国滨海湿地的研究现状与展望.海洋科学进展,2005,23(1):87-95.
- [ 2 ] 丁喜桂,叶思源,王吉松.黄河三角洲湿地土壤、植物碳氮稳定同位素的组成特征.海洋地质前沿,2011,27(2):66-71.
- [ 3 ] 关道明.中国滨海湿地.北京:海洋出版社,2012:69-76.
- [ 4 ] Song J M. Biogeochemical Processes of Biogenic Elements in China Marginal Seas. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2010: 1-662.
- [ 5 ] 张绪良,张朝晖,徐宗军,侯雪景,蔡庆芳.黄河三角洲滨海湿地植被的碳储量 and 固碳能力.安全与环境学报,2012,12(6):145-149.

- [6] 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. 地质论评, 2012, 58(1): 183-189.
- [7] 董洪芳, 于家宝, 孙志高, 牟晓杰, 陈小兵, 毛培利, 吴春发, 管博. 黄河口滨岸潮滩湿地植物-土壤系统有机碳空间分布特征. 环境科学, 2010, 31(6): 1594-1599.
- [8] 张娇. 黄河及河口烃类有机物的分布特征及源解析 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008.
- [9] 姚鹏, 尹红珍, 姚庆祯, 陈洪涛, 刘月良. 黄河口湿地土壤中正构烷烃分子指标及物源指示意义. 环境科学, 2012, 33(10): 3457-3465.
- [10] 张龙军, 张向上, 王晓亮, 刘立芳. 黄河口有机碳的时空输运特征及其影响因素分析. 水科学进展, 2007, 18(1): 674-682.
- [11] 宋金明, 徐永福, 胡维平, 倪乐意. 中国近海与湖泊碳的生物地球化学. 北京: 科学出版社, 2008: 1-533.
- [12] Hui Y M, Zheng M H, Liu Z T, Gao L R. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments from Yellow River Estuary and Yangtze River Estuary, China. Journal of Environmental Sciences, 2009, 21(12): 1625-1631.
- [13] Meyers P A. Preservation of elemental and isotopic source identification of sedimentary organic-matter. Chemical Geology, 1994, 114(3/4): 289-302.
- [14] 刘峰, 董贯仓, 秦玉广, 刘超, 朱士文. 黄河口滨海湿地 4 条入海河流污染物现状调查. 安徽农业科学, 2012, 40(1): 441-444.
- [15] 尹红珍. 应用多参数示踪方法研究黄河口湿地沉积有机质来源和分布 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
- [16] 蔡德陵, Tan F C, Edmond J M. 长江口区有机碳同位素地球化学. 地球化学, 1992, 21(3): 305-312.
- [17] 蔡德陵, 蔡爱智. 黄河口区有机碳同位素地球化学研究. 中国科学(B辑 化学 生命科学 地学), 1993, 23(10): 1105-1113.
- [18] O'leary M H. Carbon isotopes in photosynthesis. Bioscience, 1988, 38(5): 328-336.
- [19] 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. 环境科学, 2005, 26(6): 53-56.
- [20] Zhou J L, Wu Y, Zhang J, Kang Q S, Liu Z T. Carbon and nitrogen composition and stable isotope as potential indicators of source and fate of organic matter in the salt marsh of the Changjiang Estuary, China. Chemosphere, 2006, 65(2): 310-317.
- [21] 薛博. 漳江口红树林湿地沉积物有机质来源追溯 [D]. 厦门: 厦门大学, 2007.
- [22] 张凌, 陈繁荣, 殷克东, 吕莹, 杨永强, 张德荣. 珠江口及近海表层沉积有机质的特征和来源. 热带海洋学报, 2010, 29(1): 98-103.
- [23] Meyers P A. Applications of organic geochemistry to paleolimnological reconstructions: a summary of examples from the Laurentian Great Lakes. Organic Geochemistry, 2003, 34(2): 261-289.
- [24] Bigot M, Saliot A, Cui X, Li J. Organic geochemistry of surface sediments from the Huanghe estuary and adjacent Bohai Sea (China). Chemical Geology, 1989, 75(4): 339-350.
- [25] 毛登, 范德江, 郭志刚, 杨作升. 长江、黄河河口沉积物中生物标志化合物组成的初步研究. 青岛海洋大学学报, 2001, 31(5): 747-754.
- [26] 杜天君. 黄河三角洲潮间带区域脂类有机碳的来源和埋藏特征 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
- [27] Bianchi T S, Canuel E A. Chemical Biomarkers in Aquatic Ecosystems. Princeton: Princeton University Press, 2011: 144-206.
- [28] Russell M, Rosell-Mele A. Preliminary study of fluxes of major lipid biomarker classes in the water column and sediments of Lake Baikal, Russia. Global Planet Change, 2005, 46(1/4): 45-56.
- [29] 吴斌, 宋金明, 李学刚. 黄河口表层沉积物中重金属的环境地球化学特征. 环境科学, 2013, 34(4): 1324-1332.
- [30] 朱纯, 潘建明, 卢冰, 扈传昱, 刘小涯, 叶新荣, 薛斌. 长江口及邻近海域现代沉积物中正构烷烃分子组合特征及其对有机碳运移分布的指示. 海洋学报, 2005, 27(4): 59-67.
- [31] 周俊丽. 长江口湿地生态系统中有机质的生物地球化学过程研究 [D]. 上海: 华东师范大学, 2005.
- [32] 宋金明, 李学刚, 袁华茂, 郑国侠, 杨宇峰. 中国近海生物固碳强度与潜力. 生态学报, 2008, 28(2): 551-558.
- [33] 段晓男, 王效科, 逯非, 欧阳志云. 中国湿地生态系统固碳现状和潜力. 生态学报, 2008, 28(2): 463-469.
- [34] 王海梅, 李政海, 宋国宝, 高吉喜, 闫军. 黄河三角洲植被分布、土地利用类型与土壤理化性状关系的初步研究. 内蒙古大学学报, 2006, 37(1): 69-75.
- [35] 梅雪英, 张修峰. 长江口湿地海三棱藨草 (*Scirpus mariqueter*) 的储碳、固碳功能研究——以崇明东滩为例. 农业环境科学学报, 2007, 26(1): 360-363.
- [36] 索安宁, 赵冬至, 张丰收. 我国北方河口湿地植被储碳、固碳功能研究——以辽河三角洲盘锦地区为例. 海洋学研究, 2010, 28(3): 67-71.
- [37] Wang H, Wang R Q, Yu Y, Mithell M J, Zhang L J. Soil organic carbon of degraded wetlands treated with freshwater in the Yellow River Delta, China. Journal of Environmental Management, 2011, 92(10): 2682-2633.
- [38] 宋金明, 张默, 李学刚, 袁华茂, 李宁, 段丽琴, 许思思. 胶州湾滨海湿地中的 Li、Rb、Cs、Sr、Ba 及碱蓬 (*Suaeda salsola*) 对其的“重力分馏”. 海洋与湖沼, 2011, 42(5): 670-675.
- [39] Jickells T D, Rae J E. Biogeochemistry of Intertidal Sediments. Cambridge: Cambridge University Press, 1997: 1-12.