

江苏阜宁西园全新世风暴沉积与海岸沙丘的发现及其意义*

赵希涛 李 波 鲁刚毅

(中国科学院地质研究所, 北京 100029)

王绍鸿

张景文

(福建师范大学地理研究所, 福州 350007)

(国家地震局地质研究所, 北京 100029)

摘 要

江苏阜宁西园地区的“西冈”堤状砂质堆积体, 往往被认为是典型的“贝壳砂堤”。实际上, 它是由成因不同的两大部分所组成: 下部为障壁沙坝主体, 其主要部分为风暴沉积, 形成于 6700—5500 aBP 间; 上部为海岸沙丘, 由风成沙、古土壤序列及丘间泥炭堆积组成, 发育于 5500 aBP 以来。以阜宁西园剖面为代表的障壁沙坝和以建湖庆丰剖面为代表的坝后潟湖, 构成了苏北中部平原的沙坝-潟湖体系。沙坝与潟湖的发育具有明显的关联性与一致性, 与中全新世以来的海面变化有密切的关系。

关键词 全新世、风暴沉积、海岸沙丘、沙坝-潟湖体系、海面变化

自 1959 年陈吉余等报道苏北中部平原有三列岸外沙堤发育以来, 这一地区的几条 NNW 向延伸的堤状砂质堆积体, 一直被视为典型的“贝壳砂堤”(图 1)^[1-6]。然而, 作者在 1989 年 11 月调查苏北贝壳砂堤最典型地段阜宁县西园段时, 发现原先所称的“西冈”, 实际上由成因不同的两大部分组成: 下部为障壁沙坝主体, 其主要部分为风暴沉积; 上部为海岸沙丘, 由风成砂-古土壤序列及丘间泥炭堆积组成。

本文记述了阜宁西园地区人工开挖的横穿该砂体厚近 10 m 的全新世地层剖面, 鉴别了各层沉积的沉积构造与沉积相, 并在 ^{14}C 年代测定及与代表坝后潟湖沉积的建湖县庆丰剖面^[7]对比的基础上, 讨论了苏北平原中部全新世沙坝-潟湖体系的发育历史及其与海面变化的关系。

一、西园剖面全新世地层

西园地区的西冈, 西北起自射阳河东岸的喻口, 东南止于东桃园村, 长 7.5 km, 最宽处达 1.3 km。我们观察与测量了西园-两合间由采砂场、渔塘(图版 I-1)和探井所组成的横穿该砂

1991-01-29 收稿, 1991-11-18 收修改稿

* 国家自然科学基金与中国科学院联合资助项目

质堆积体的厚近 10 m 的地层剖面(图 2), 自下而上为:

1. 青灰色淤泥, 厚层块状, 层理不明显. 该层中至下部 1.8 m 地层中, 共发现 14 属 28 种有孔虫化石 1265 枚, 计有嗜温转轮虫(*Ammonia tepida*), 厚壁转轮虫(*A. confertitasta*), 丸桥转轮虫(*A. maruhassi* var), 凸镶边转轮虫(*A. limbato-beccarii*), 多室转轮虫(*A. multicella*), 锐角方室转轮虫(*A. keitienziensis*)及科柏转轮虫(*A. cf. koeboeensis*)等. 剖面上部 70 cm 左右发现 6 属 13 种有孔虫 69 枚, 为丸桥转轮虫、嗜温转轮虫及南通转轮虫(*A. nantongensis*). 该层属滨海泥滩沉积. 该层底部一淤泥样品的 ^{14}C 年代为 9900 ± 135 aBP(见后面表 1). > 2.8 m

2. 灰色细砂夹贝壳, 含大量球粒. 贝壳属种计有: 四角蛤蜊(*Macra quadrangularis*), 光滑篮蛤(*Aloides lavis*), 篮蛤(*Aloides* sp.), 樱蛤(*Tellina* sp.), 橄榄蚶(*Estellarca olivacea*), 褐蚶(*Didimacar tenebrica*), 日本棱蛤(*Libitina japonica*), 棱蛤(*Libitina* sp), 大竹蛏(*Solen grandis*), 僧帽牡蛎(*Ostrea cucullata*), 黑扁顶蛤(*Volsella atrata*), 双纹须蚶(*Barbatia bistirgata*)等, 多数为栖息于浅海及潮间带泥沙质海底的种类. 在该层中至下部, 仅发现 4 属 9 种有孔虫 224 枚, 主要有嗜温转轮虫、粗糙企虫(*Elphidium hispidulum*)和高锅转轮虫(*A. takanabensis*)等.

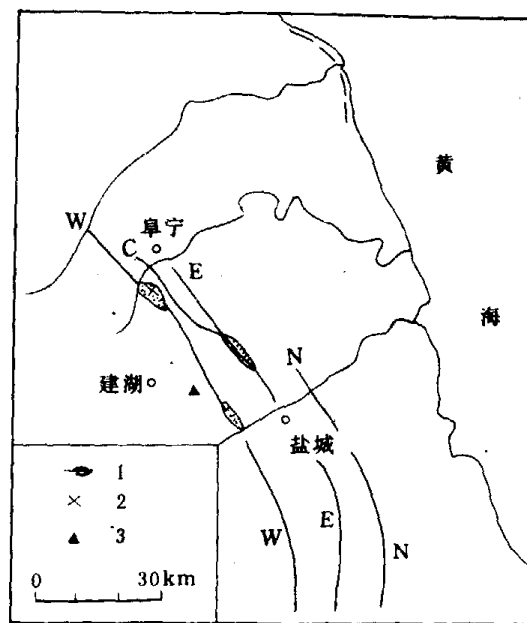


图 1 苏北中部平原“贝壳砂堤”分布与西园、庆丰剖面位置

1——“贝壳砂堤”, 2——西园剖面; 3——庆丰剖面, W——西冈, C——中冈, E——东冈, N——新冈

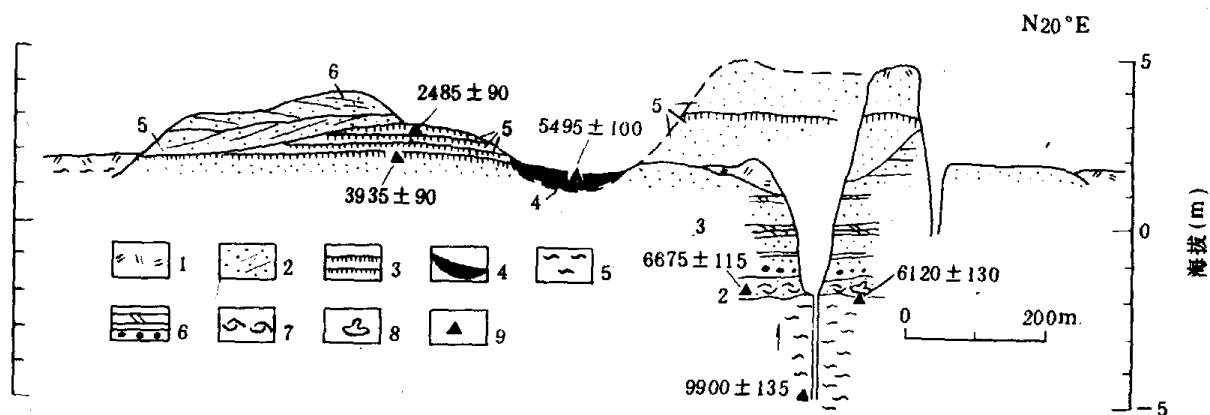


图 2 阜宁西园全新世地层剖面

1——堆土或耕土, 2——沙, 3——古土壤, 4——泥炭夹腐木, 5——淤泥, 6——淤泥夹层与“泥砾”, 7——贝壳层, 8——原位近江牡蛎壳, 9—— ^{14}C 样品地点与年代

均为广盐浅水种属. 该砂层属水下浅滩堆积. 贝壳样品的 ^{14}C 年代为 6675 ± 115 aBP. 该层与下伏及上覆地层均为不整合接触. 其下界面有原位原态的近江牡蛎(*Ostrea vivularis*)丛生, 其样品的 ^{14}C 测年结果为 6120 ± 130 aBP. 测年结果的颠倒现象, 将在后面讨论.

3. 黄色沙与灰色淤泥互层. 其下部 0.65 m 为黄色沙与“泥砾”(粘土沉积改造而成的砾石, 下同). 泥砾外表已氧化成黄色, 内部仍为灰色, 粒径多为 1—2 cm, 集中于底部 20 cm (图版 I-2); 中下部 0.8 m 为灰黄色砂, 夹两层厚仅 1—2 cm 的灰色泥层; 中部 0.7 m 为灰色淤泥与黄色砂互层, 层理清晰(图版 I-3); 上部 3 m 左右为黄色砂, 层理清晰, 偶夹薄层淤泥, 其中发现 5 属 13 种有孔虫化石 48 枚, 主要为嗜温转轮虫与科柏转轮虫.

沉积特征(见后述)表明,该层大部(可达4m)属水下沙坝沉积,其主要部分为风暴沉积,仅顶部0.5m左右沉积于水面之上,为风-潮坪沉积。 2.2—4.5 m

4.泥炭,往往含腐木,属丘间沉积,一腐木样品的 ^{14}C 年代为 $5495 \pm 100 \text{ aBP}$ 。据郭瑞祥报道,在西园沙堤西侧+0.5m左右高程上有大片泥炭层被掩埋,其中未发现孢粉,却含绿藻、硅藻、裸藻和隐藻等淡水藻类及苔藓。其中泥炭与树根样品的 ^{14}C 年代为 $4480 \pm 80 \text{ aBP}$ (见后面表1)。该泥炭层与下伏沙坝沉积之间为侵蚀面,与超覆的沙丘沉积或为不整合接触,或与其古土壤层呈相变关系。 0.5—1 m

5.黄色砂与黑色古土壤互层砂为中、细砂,层理清晰。在不同人工剖面中,可发现一至数层古土壤,有时呈密集的古土壤复合层出现(图版I-4,5)。古土壤呈黑色,富含有机质,在其下部及其下的砂层中,往往保存着大量的植物根、茎(似为芦苇)。在沙与部分古土壤层中未发现孢粉,而在多数古土壤层中发现较丰富的孢粉与藻类。其中,在一年龄为 $5025 \pm 90 \text{ aBP}$ 的古土壤样品中,含有木本花粉17.8%,主要为栎(*Quercus*),其次为松(*Pinus*)、栗(*Castanea*)及常绿青冈(*Cyclobalanopsis*)等;草本花粉占31.7%,主要为禾本科(*Gramineae*)和莎草科(*Cyperaceae*);水生植物占19.4%,主要为眼子菜(*Potamogeton*)及藻类30.5%,为环纹藻(*Concentrisysit*)等,表明当时气候温暖,本区水体发育。另一古土壤复合体底部 ^{14}C 年代为 $3935 \pm 90 \text{ aBP}$ 样品的孢粉更为丰富,其中木本花粉占7.0%,仍以栎为主,次为松、柏科(*Cypressaceae*),栗、榛(*Corylus*)及青冈栎等;草本花粉占50.6%,以蒿属(*Artemisia*)及禾本科为主;水湿生草本花粉占8.4%,主要为香蒲(*Typha*)与眼子菜;蕨类孢子明显增多,占19.2%,以水龙骨科(*Polypodiaceae*)及紫萁(*Osmanda*)为主,以及环纹藻,占14.8%,表明此时气候仍然温暖,也有较多水生生物,但已较前干旱。我们还获得另外两个古土壤样品的 ^{14}C 年龄,分别为 4155 ± 115 及 $2485 \pm 90 \text{ aBP}$ 。沉积学研究(见后)表明,这套砂-古土壤序列属于古海岸沙丘。它与上覆风成砂层以冲刷面接触。 1.5—2 m

6.黄色砂,以中、细砂为主,属风成沉积。其内部及顶面均有一明显的冲刷面。 0.3—0.8 m

7.现代风砂沉积。 0.1—0.5 m

二、风 暴 沉 积

西园剖面(图2),风暴沉积自1层淤泥顶部或2层砂与贝壳顶部的冲刷面开始,至3层黄色砂与灰色淤泥互层的上部为止,厚近5m,构成西园障壁沙坝的主体。该风暴沉积的特征是:沉积物为绿色或灰绿色,风化色为黄色或褐黄色。无分选性或分选性很差,粒级范围变化大(粘土级至中砾级)。砾级颗粒组分主要包括石英碎屑、泥砾(滚圆和棱角状两种)、球粒、贝壳与贝壳碎屑等,一般作为缩聚(Condensation)或韵律层的底部出现。每层或相邻层间的峰值粒度或平值粒度,可以或经常相隔几个粒级。这种现象称为风暴沉积记录的“粒级跃迁”。这与保存在地层中正常滩面粒度或潮坪垂向粒度的变化截然不同。除了底部以缩聚方式保存的贝壳碎屑与泥砾外,该风暴沉积主要由石英颗粒、长石颗粒、海绿石、重矿物和球粒等组成,而以石英碎屑和球粒为主要组分。大量的海绿石组分说明这套沉积是水下的,而云母类矿物及有孔虫类等微体生物很少,则说明沉积物经过了充分的筛选。不同期沉积的淤泥层都已强烈地变形,或呈肠节状,或呈火焰状(图版I-3)。沉积物缩聚、生物逃逸构造、波控构造、大型板状平行层理等,是该风暴沉积的特征沉积构造。缺乏正常海滩层理(如潮汐层理、小型交错层理等)的滩面,一般认为是风暴天气与正常天气交替作用的结果^[8-10]。

西园剖面的风暴沉积自下而上可依次划分为:(1)沉积物缩聚相,包括球粒缩聚、砂缩聚与泥砾缩聚、贝壳缩聚和异粒缩聚。自冲刷面穿越缩聚的生物逃逸迹是该构造相的显著特征;(2)具泥砾镶嵌的大型平行层理构造相。平行层理具有正韵律性,每一单层都以其底部的球粒层和前一单层区别开来。该构造相的顶部层面上有大量近水平或水平的形态简单的生物爬迹分布;(3)波控(wave controlled)构造相,包括在垂向上几个相邻的泥盖层复合在一起形成状如

干涉波纹的相干层理、枝状泥波痕交错纹理、大型丘状泥波痕层理和火焰构造等大型变形层理构造。大量分布的生物潜穴和逃逸迹是该构造相的显著特征;(4)大型板状平行层理构造相,中部分布有垂直的生物遗迹或潜穴;(5)波控构造相,主要由浪成的沙波纹构成,沙波内可见弯曲或倾斜的生物潜穴;(6)大型板状平行层理构造相,该构造相缺乏交错纹层或双向层理;(7)波控构造相,仅在局部地段保存,多为后期植被或生物活动所破坏。

上述特征表明,该风暴沉积缺乏正常天气条件下的海滩层理,代之以沉积物缩聚、大型板状平行层理、波控构造和具有适应特征的生物遗迹,在剖面上零散分布的泥砾和死亡于泥盖层之下的贝壳。这说明,风暴是塑造滩面的主要营力,而正常天气下所形成的海滩受到严重改造。

三、海 岸 沙 丘

西园剖面上部 3—4 m,即自 3 层顶部的冲刷面开始至现代耕作层面为止,风是形成其各沉积层的主要营力,故属风成相(eolian facies)或风控制相(wind-controlled facies)。自下而上,它可进一步划分为泥炭坪相、沙丘相、沙原相(I, II)及现代风砂相。各相之间均以冲刷面或剥蚀面为界。这些风成沉积,是在西园障壁沙坝发育至水面之上而形成的。下面我们着重讨论沙丘相,它与泥炭坪相共同构成了西园沙坝上部的海岸沙丘主体。

沙丘相直接超覆于潮坪沉积或泥炭层顶部的冲刷面上,局部地区发育了一至多层古土壤。从底部冲刷面起至顶部的大型波状冲刷面止,沙丘相厚约 1.5—2 m。它一般由两部分组成,即沙丘与丘间,后者一般因积水而发育泥炭,其中往往有树木生长。

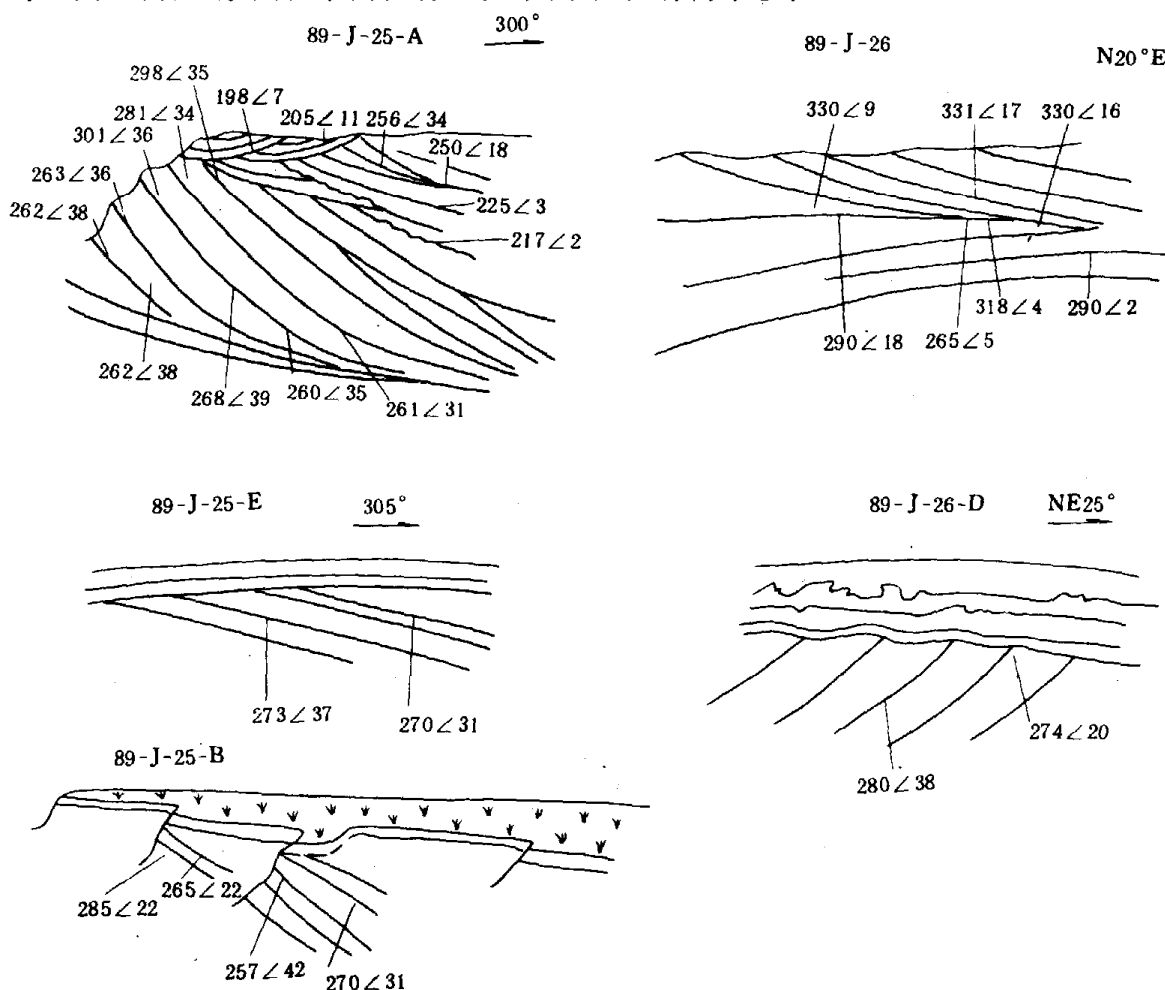


图 3 西园地区若干沙丘剖面层理构造图

沙丘内部层理及其产状分布如图 3 所示。由图 3 可以看出:(1)沙丘内部构造比较简单,主要包括高角度的单斜层理(图版 I-4)、低角度的单斜层理、凸镜层理、大型楔状层理和大型微斜层理;(2)倾角较陡,且陡的倾角多集中在沙丘的中上部;(3)在沙丘的中上部多发育变形层理;(4)沙丘背风坡的坡脚缺乏变形层理和风影沙波,这说明常风的风力不足以形成这种构造。

丘间的层理类型主要是不规则的沙波纹理和“粘附纹理”,大型楔状层理和大型微斜层理等。生物遗迹主要位于沙丘内部(呈垂直或微弯曲的卵形)、沙丘的顶部冲刷面(呈水平的卵形)或丘间泥炭之中。沙丘与丘间的投影面积比约为 1:9。

综合上述特征可以看出:(1)西园地区障壁沙坝上部的砂质堆积主要是海岸沙丘,而不是贝壳砂堤,这从高角度的前积层、风成砂与古土壤层相间出现,及沙丘与丘间泥炭的沉积组合等特征可以作出肯定的判断;(2)本区的沙丘可能为孤立的新月沙丘或小型横向沙丘,因为简单的单斜层理构造(缺乏各种复杂的交错层理)一般可认为是新月形或横向沙丘的典型特征^[11];(3)塑造沙丘的主导风力为近东风,与现代风力状况有明显的一致性^[12];(4)沙丘发育时期气候总体上温暖而潮湿,表现为风成砂-古土壤系列的形成(也显示出一定程度的干、湿变化)和丘间泥炭层及木本、水生植被的发育。丘间砂层面上多见雨痕和流水波痕,大量发育的变形沙波纹理和“粘附纹理”,则是潮湿气候条件下风沙环境的主要沉积构造类型^[13]。

表 1 阜宁西园地区¹⁴C 年代数据

样品编号		地点与层位	试料	¹⁴ C 年代(aBP) ^{a)}	文 献
野外	室内				
J-26-2	CG2468	西园-两合间海岸沙丘(中上部)	古土壤	2485±90	本文
J-26-8	CG2469	西园-两合间海岸沙丘(中下部)	"	3935±90	"
8604A	CG1914	西园海岸沙丘中(近底部)	"	4155±115	"
J-25-A	CG2467	西园海岸沙丘中(近底部)	"	5025±90	"
	CG524	西园-两合间沙丘间泥炭层	泥炭	4385±85	[4]
	PV352	西园沙堤西侧下 2 m	泥炭与树根	4480±80	b)
J-26-B	CG2470	西园海岸沙丘丘间泥炭中	木头	5495±100	本文
		沙缺口西北 1km 沙堤外侧	"	4540±120	[14]
	CG526	陈良施庄	"	7670±100	[4]
	PV351	西园沙堤下 2.5 m	"	5600±80	b)
		西园沙堤下 1 m	"	5533±70	c)
J-21-2	CG2466	西园剖面 2 层	贝壳	6675±115	本文
J-21-1	CG2465	西园剖面 1,2 层剥蚀面	近江牡蛎	6120±130	"
C-N-35	SH-34	两合地下 3.5m	牡蛎	6540±79	[2,3]
	CG527	施庄 4m	"	6265±135	[4]
J-27-11	CG2558	西园剖面最底部	淤泥	9900±135	本文

a)¹⁴C 半衰期为 5570 a, 计年起点 1950 aAD

b)郭瑞祥, 苏北滨海平原古砂堤的分布及海岸演变, 1983

c)曹琼英, 江苏海岸演变史, 1984

四、沙坝-潟湖发育与海面变化

根据上述西园剖面及该区若干辅助剖面的地层、古生物与沉积特征以及¹⁴C 年代测定结

果(表1),可将西园地区障壁沙坝及海岸沙丘的发育历史,划分为如下阶段:

1. 滨海泥滩,相当于西园剖面1层青灰色淤泥堆积时期。数量较少和较为单调的广盐性浅水种有孔虫(如嗜温转轮虫、厚壁转轮虫、丸桥转轮虫等)的出现,表明该地为滨海或水深不大的泥滩环境。从该层底部一样品的 ^{14}C 年代为 $9900 \pm 135\text{a BP}$ 及上覆地层与剥蚀面的年代判断,该阶段相当于早全新世。

2. 水下浅滩,相当于西园剖面2层堆积时期。在淤泥质岸滩背景下砂与贝壳物质的出现,意味着水动力的加强与水下浅滩的形成。贝壳属种较为多样,均为泥、砂质海底的浅水或潮间带属种,其中较多种属要求水质清洁的环境,如日本棱蛤和大竹蛏等,亦表明水深加大、海水沟通性较好。该层混合贝壳样品的 ^{14}C 年代测定结果为 $6675 \pm 115\text{aBP}$,与丛生于该层和下伏泥层之间剥蚀面上的近江牡蛎样品的 ^{14}C 年代 $6120 \pm 130\text{aBP}$ 略有颠倒现象。这可能有如下解释:(1)水下砂质浅滩是冲刷泥质海底而形成的,因而夹于砂层中的贝壳可部分或全部取自下伏泥层而使其年龄稍稍偏老;(2)丛生牡蛎是在不厚的沙层堆积之后部分地段遭受剥蚀时生长于泥层之上的,因而其测年结果符合于其真实堆积年龄。总之,无论属于何种情况,该阶段均大致相当于 $6700 - 6100\text{aBP}$ 间的中全新世大西洋期早-中期。同一地区类似部位的牡蛎样品的 ^{14}C 年代(表1)也印证了这一点。

3. 水下沙坝,相当于西园剖面3层中的大部。在此沙坝主要发育时期,滩面经历了多次旋回,这主要是风暴天气与正常天气交替出现造成的结果,因而地层中往往缺少有孔虫记录。根据前述,下伏贝壳与牡蛎壳及上覆泥炭层样品的 ^{14}C 年代测定结果(表1),可推测该水下沙坝形成于 $6100 - 5500\text{aBP}$ 之间,相当于中全新世大西洋期中晚期。

4. 沙坝,相当于西园剖面3层顶部。由这一阶段的沉积中缺乏有关波浪与交错层理的记录,表明风暴作用减弱,沙坝出露水面,滩面开始接受风的改造,在地形高处发育风沙,低处积水而形成泥炭。根据最低层位泥炭层的 ^{14}C 年代为 $5495 \pm 100\text{aBP}$,及上覆海岸沙丘最老古土壤层年龄,可推知该阶段相当于 $5500 - 5000\text{aBP}$ 间的中全新世大西洋期末期。

5. 海岸沙丘,相当于西园剖面5—6层及整个西园沙坝上部。西园地区的海岸沙丘至少经历了几个不同的发育阶段:最初,在沙坝出露水面之后,即接受风的改造,堆积了最早的沙坪。接着,在沙坝上开始发育沙丘。由于气候温暖潮湿,因而在风况与气候波动的情况下发育了数层古土壤,形成了风成砂-古土壤序列,而在丘间地,则继续发育泥炭。根据古土壤层的 ^{14}C 测年结果(表1),可知该阶段相当于 $5000 - 2500\text{aBP}$ 间的中全新世亚北方期。随后,沙丘发育进一步加强,形成了新月形沙丘,横向沙丘等活动性类型。在经过一次恶劣天气时期潮水的冲刷之后,风沙堆积作用继续进行,并以大型微斜层理为特征,称为沙原阶段I。以后,又经过一次风暴天气潮水的侵袭,接着发育沙原阶段II,以其内部发育大型微斜层理,沙波纹理与“粘附纹理”为特征。虽然沙丘发育的后几个阶段缺乏年龄标定,但从下伏沙丘古土壤层及沙丘中有构成沉积构造一部分的砖块出现,表明它们已属于晚全新世。即使现今,该区仍有现代风沙堆积。

从上述西园障壁沙坝及海岸沙丘的发育历史可以看出:在 $9900 - 5500\text{aBP}$ 间,海平面主要处于上升阶段,该地区相应地从滨海泥滩、水下浅滩、水下沙坝发展为沙坝,但在此期间经历了1层中上部、1和2层间冲刷面、2和3层间冲刷面等海面相对下降时段。这三次海面下降可能发生于 $9000 - 8000\text{aBP}$ 左右、 6700aBP 之前和 $6700 - 6100\text{aBP}$ 间。而在 5500aBP 以后,该地区因海面达到最大高度而使沙坝向上加积,进而随海面在微微波动中下降而开始了海岸沙丘发育阶段。然而一直到晚全新世,该地区仍数度受到风暴潮波及。只是到12世纪黄河夺

淮南迁, 苏北滨海平原发育, 该区才最终脱离海水影响。

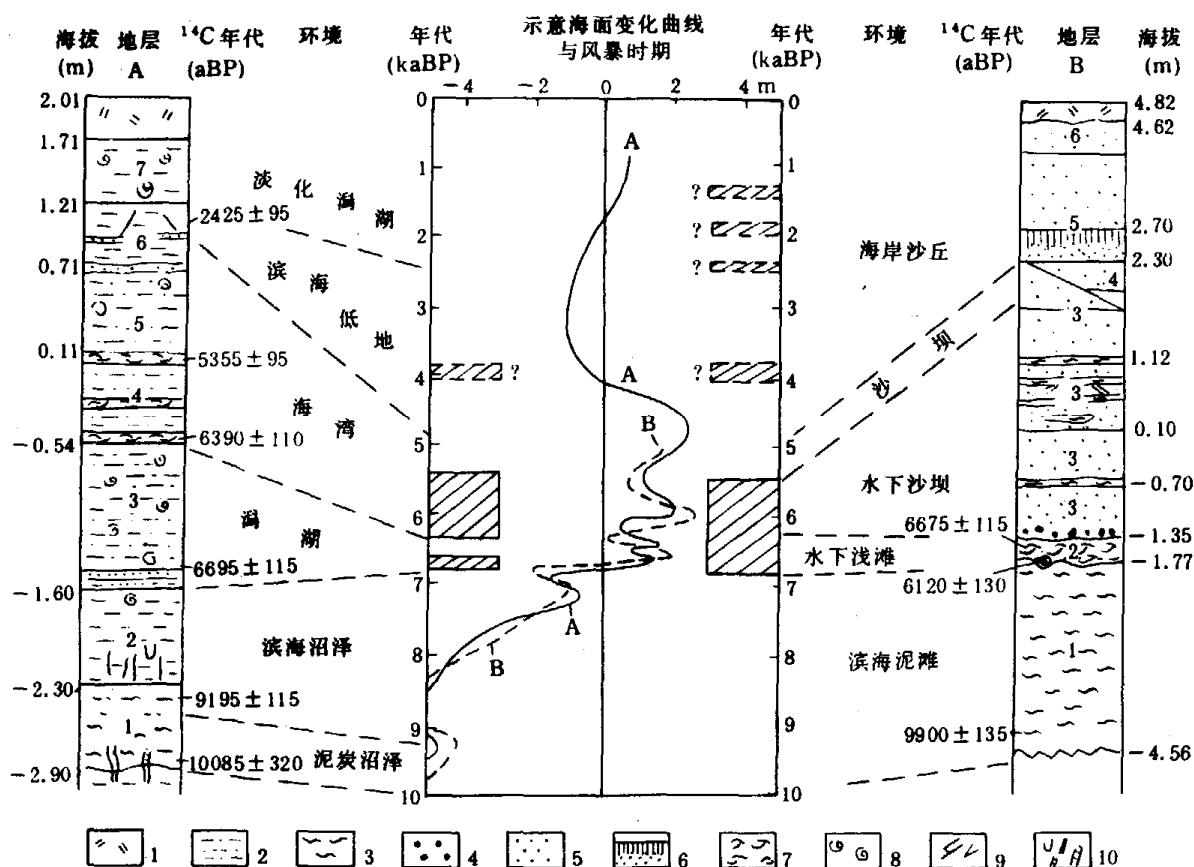


图4 庆丰剖面(A)与西园剖面(B)全新世环境变迁, 海面变化及风暴时期对比图

1——耕土或堆土, 2——粘土或亚粘土, 3——淤泥, 4——泥砾, 5——砂, 6——古土壤,
7——贝壳与贝壳碎屑, 8——原位贝壳或牡蛎壳, 9——腐木, 10——潜穴

对比代表障壁沙坝的西园剖面和代表坝后潟湖的建湖庆丰剖面(图4)可以看出:(1)苏北平原中部沙坝-潟湖体系的发育具有明显的成因上的关联性和时间上的一致性。例如,在早全新世,两地均为滨海泥质堆积,只是由于西园地区更靠外海,从而要比庆丰剖面稍具海相性,其间都有一度海水退出时期。在6700—5500aBP间,西园地区随海面上升,逐步由水下浅滩、水下沙坝发展为沙坝,而庆丰地区则随海面上升,但由滨海沼泽发展为湖和半开阔的海湾。在5500—2500aBP间,西园沙坝上发育了海岸沙丘,基本上脱离了海水的直接影响,相应地庆丰地区发生海退,成为滨海低地;(2)西园地区与庆丰地区的风暴时期与风暴事件也有明显的一致性。例如,西园地区的风暴沉积主要发育于6700—5500aBP间,而庆丰剖面以泥砂交替纹层(3层底部)和贝壳缩聚层(4层底、中、顶部)为代表的风暴沉积,也主要发育于6700aBP左右及6400—5400aBP间(图版I-6)。在5000—2500aBP间及以后,西园地区在海岸沙丘发育时期,曾受到风暴潮的冲刷改造,而在庆丰剖面6层下部,也有数层薄砂层夹于泥层之中。当然,由于西园地区处于靠海的障壁沙坝部位,故所受到的风暴作用自然要比庆丰地区频繁些。

致谢 唐领余协助孢粉分析,吴胜光共同参加野外工作,作者表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 陈吉余等, 地理学报, 25(1959), 3:201—220.
- [2] 虞志英等, 海洋科学, 1982, 4:11—14.
- [3] 顾家裕等, 沉积学报, 1(1983), 2:47—59.
- [4] 张景文等, 海洋科学, 1983, 6:8—11.
- [5] 高善明, 李元芳, 黄淮海平原农业自然条件和区域环境研究, 第二集, 科学出版社, 1987, 181—189.
- [6] Zhao Xitao, *Marine Geology*, 90(1989), 311—320.
- [7] 赵希涛等, 中国科学B 辑, 1991, 9:992—999.
- [8] Kulm, L. D. et al., *J. Geol.*, 83(1975), 145—176.
- [9] Golding, R. & Bridges, P., *J. Sed. Petrol.*, 43(1973), 736—747.
- [10] Bridges, D. H., *J. Sed. Petrol.*, 45(1975), 79—94.
- [11] Wilson, I. G., *Sedimentology*, 19(1972), 173—210.
- [12] 赵希涛等, 科学通报, 36(1991), 22:1727—1729.
- [13] Glennie, K. W., *Development in Sedimentology*, 14, Elsevier, Amsterdam, 1970.
- [14] 陈希祥, 海洋科学, 9(1985), 2:55—56.