

文章编号: 1000-0550(2013)02-0331-09

# 长江口泥质区沉积物颜色反射率指示的 近百年来东亚季风变迁<sup>①</sup>

刘升发<sup>1,2</sup> 王昆山<sup>1,2</sup> 刘焱光<sup>1,2</sup> 杨刚<sup>1,2</sup> 吴永华<sup>1,2</sup> 石学法<sup>1,2</sup>

(1. 国家海洋局第一海洋研究所 山东青岛 266061; 2. 海洋沉积与环境地质国家海洋局重点实验室 山东青岛 266061)

**摘要** 利用 Minolta CM2002 光谱光度计按照 1 cm 间隔测量了长江口泥质区 ZM11 孔沉积物的光谱特征,通过数理统计的方法对获取的 400~700 nm 可见光范围内的颜色反射率数据进行分析,揭示其对环境气候的指示意义。因子分析提取了  $F_1$  和  $F_2$  两个主因子,通过与测试所得到的亮度( $L$ )、红度( $a^*$ 分量)、黄度( $b^*$ 分量)等颜色反射率特征值对比,发现  $F_1$  与亮度曲线的变化趋势基本一致,而  $F_2$  与黄量变化趋势则完全相反,其中前者可以作为东亚夏季风的有效替代性指标,东亚夏季风强度指数增大,沉积物亮度值变大,反之亦然。结合  $^{210}\text{Pb}$  沉积速率数据, ZM11 孔沉积物颜色反射率指标记录的近百年来发生的数次东亚夏季风增强期大致出现在 1887、1897、1904、1915、1936、1945、1953、1965、1977、1987、1992 年,该结果得到了近年来温度和降雨量实测记录的验证。东亚季风的这种强度变化具有显著的周期性,功率谱分析表明研究区存在明显的 28 a 和 2 a 周期,结合历史资料,推断太阳辐射强度的变化是其主要控制因素,另外还可能受到大尺度气候波动的影响。

**关键词** 长江口 泥质区 沉积物 颜色反射率 东亚季风

**第一作者简介** 刘升发 男 1979 年出生 博士 副研究员 海洋沉积学 E-mail: liushengfa@fio.org.cn

**通讯作者** 石学法 E-mail: xfshi@fio.org.cn

**中图分类号** P534.63+2 **文献标志码** A

颜色是沉积物最明显的形态特征之一,不同矿物组成的沉积物具有不同的反射光谱特征,通过测量沉积物的反射光谱曲线可以获取沉积物的物质组成变化,其空间分布对沉积物氧化还原的相对强度和物质来源的变化反映非常敏感<sup>[1]</sup>,利用颜色反射率与沉积物成分之间的对应关系可以迅速推知沉积物的组成,进而推断海底风化程度、气候波动以及海洋生产力变化等方面的信息<sup>[1~5]</sup>,因此,沉积物光谱学特征以其较高的分辨率在古海洋学研究上具有良好的应用前景<sup>[5,6]</sup>。

长江口泥质区位于长江水下三角洲前缘斜坡的下端,面积约为  $1.0 \times 10^4 \text{ km}^2$ <sup>[7]</sup>,主要来源于长江入海泥沙,在长江冲淡水的推动下,堆积在长江口门外,其沉积物组成以黏土质粉砂为主。近百年来平均沉积速率为 3.5 cm/a,最高可达 5.4 cm/a,是长江入海沉积物最大的堆积中心<sup>[8,9]</sup>。本文以长江口泥质区 ZM11 孔为研究对象,根据  $^{210}\text{Pb}$  测年、沉积物粒度、高分辨率沉积物颜色反射率等方面的分析,阐述近百年来长江口泥质区沉积物组成的变化特征及其对沉积环境及气候波动的响应。

## 1 材料与方法

研究所用 ZM11 孔“柱状沉积物”,系国家海洋局第一海洋研究所 2007 年执行“我国近海海洋综合调查与评价”专项过程中在长江水下三角洲用重力取样器获得,样长 3.08 m。该孔位于长江口泥质区南部( $122^\circ37'.24''\text{E}$ ,  $30^\circ41'.69''\text{N}$ ) (图 1),水深 25.0 m。对该柱状样进行磁化率测试后从中间剖开,按 1 cm 间隔进行颜色反射率测定,并按 2 cm 等间隔取样,进行  $^{210}\text{Pb}$  活度和粒度测试。

利用 Minolta CM2002 光谱光度计按照 1 cm 间隔测量 ZM11 孔沉积物的光谱特征。测量过程主要参照了 ODP 的测量程序,采用 SCE 设置,测量数据输出格式与 ODP 沉积物颜色反射率输出格式一致<sup>[10]</sup>,色空间选择  $L^* a^* b^*$  色空间(CIELAB 色空间),该色空间可以通过立体的球来表示,球的轴为亮度参数  $L^*$ ,从 0~100;  $a^*$ 、 $b^*$  为色度坐标,表示色方向:  $+a^*$  为红色方向,  $-a^*$  为绿色方向,  $+b^*$  为黄色方向,  $-b^*$  为蓝色方向。测量所得的可见光范围内的反射率从 400~700 nm,以 10 nm 为一间隔,共有 31 个数据。

<sup>①</sup>我国近海海洋综合调查与评价专项(908-01-CJ12, 908-ZC-I-05); 国家自然科学基金(批准号:41106063); 中国博士后科学基金(20100481304)资助。  
收稿日期:2012-02-13; 收修改稿日期:2012-06-05

颜色反射率测试工作在海洋沉积与环境地质国家海洋局重点实验室测试中心进行。

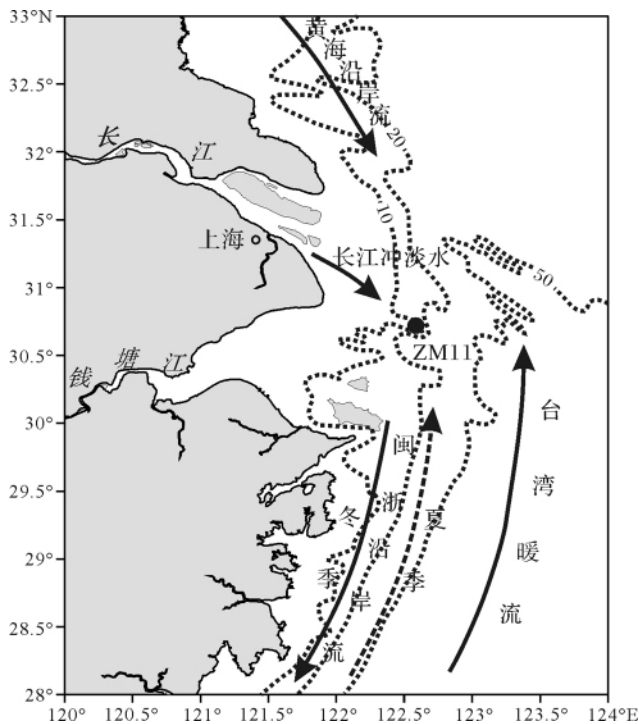


图1 研究区流系及站位图

Fig. 1 Location of the studied piston core and the current system in the study area

粒度分析取适量样品置于烧杯中,加入 15 mL 30% 的双氧水浸泡 24 h,去除有机质,然后加入 5 mL  $3 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  的稀盐酸浸泡 24 h 去除沉积物中的钙质胶结物及生物贝壳,其后将样品进行反复离心、洗盐直至溶液呈中性,经超声波振荡分散后上机测试。所用仪器为英国 Malvern 公司生产的 Master sizer 2000 型激光粒度仪,测量范围为  $0.02 \sim 2000 \mu\text{m}$ ,粒径分辨率为  $0.01\phi$ ,重复测量的相对误差  $< 3\%$ 。粒度测试工作在海洋沉积与环境地质国家海洋局重点实验室测试中心进行。

根据粒度变化曲线,选取了 ZM11 孔 26 个样品进行  $^{210}\text{Pb}$  测年。将样品烘干,研磨,采用浸取法进行化学处理<sup>[11]</sup>,以  $^{208}\text{Po}$  作为示踪剂,用  $\alpha$  多道能谱仪测定  $^{210}\text{Pb}$  放射性活度,采用最小二乘法回归计算沉积速率。 $^{210}\text{Pb}$  测年在中国科学院南京地理与湖泊研究所完成。

## 2 结果与讨论

### 2.1 地层沉积特征

ZM11 孔整个岩芯的岩性较为均一,以黄褐色黏

土质粉砂为主,其垂向分布大致可以分为三层:底层 308 ~ 187 cm,质软,强粘性,含水量介于 28.1% ~ 32.0% 之间,含大量粉砂夹层,偶见贝壳碎片和虫孔; 187 ~ 46 cm,质软,含水量在 31.0% ~ 34.1% 左右,强粘性,见少量贝壳和零星虫孔构造,偶见粉砂夹层; 46 ~ 0 cm,半流动—质软,强粘性,含水量较高 (36.2% ~ 42.6%),自下而上逐渐增加,底部有 0.3 cm 厚细粉砂夹层。

粒度分析结果见图 2。总体上沉积物组成变化不大,以粉砂为主,含量在 61.3% ~ 78.1% 之间,平均含量为 71.28%;黏土含量也较为稳定,在 14.3% ~ 33.8% 之间波动;砂含量相对变化幅度较大,在 0.14% ~ 24.38% 之间,黏土与砂含量呈此消彼长态势。

由粒度参数垂向分布可见 308 ~ 140 cm,平均粒径总体上自下而上呈增高趋势,由接近底部的  $\sim 7.5\phi$  增加到 150 cm 处  $\sim 6\phi$ ,而后略有减小;黏土含量呈现降低趋势,平均含量由 30% 以上降到 20% 左右;粉砂含量变化趋势不明显,在 75% ~ 67% 之间波动,砂含量略微增加平均由  $\sim 1\%$  增加到  $\sim 4\%$ ,分选逐渐变差。140 ~ 46 cm,砂的平均含量达到整根岩芯的最大值,基本在 5% 以上,最大可达 24.38%,大致由 90 cm 向上砂平均含量呈现一个波动减少的趋势,顶部降到 5% 以下,粉砂含量变化趋势与之相反,呈现波动增加趋势,大致由 93 cm 处的  $\sim 61\%$  增加为 50 cm 处的  $\sim 78\%$ ,沉积物平均粒径波动幅度较大,分选较差(图 2)。46 cm 以上,总体上砂含量较之前明显减少,总体低于 5%,最低达 1% 左右,黏土和粉砂含量相对之前增加,分选系数较 50 cm 以下明显降低。46 cm 处粉砂含量由 77.4% 降至 43 cm 处的 70.3%,而黏土含量在 45 cm 处突然大幅增加,由 18.5% 骤增到 43 cm 处的 28.6%,分选系数也由 1.8 以上降为 40 cm 处的 1.6,之后保持在 1.6 ~ 1.8 范围内。

### 2.2 $^{210}\text{Pb}$ 测年结果

$^{210}\text{Pb}$  活度随深度的垂向分布如图 3 所示,表层 0 ~ 9 cm 可能由于扰动作用致使  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  活度异常;9 ~ 139 cm 层位  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  随深度有明显的指数衰减趋势;而 139 cm 以下层位,  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  活度值分布规律性差。因此,选用 9 ~ 139 cm 层位的样品  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  活度进行沉积速率计算,线性拟合结果表明 9 ~ 139 cm 层位的平均沉积速率为 2.5 cm/a。据此确定 ZM11 柱状样沉积时间为 1885—2007 年,提供了近 123a 以来长江口泥质区高分辨率的沉积记录。

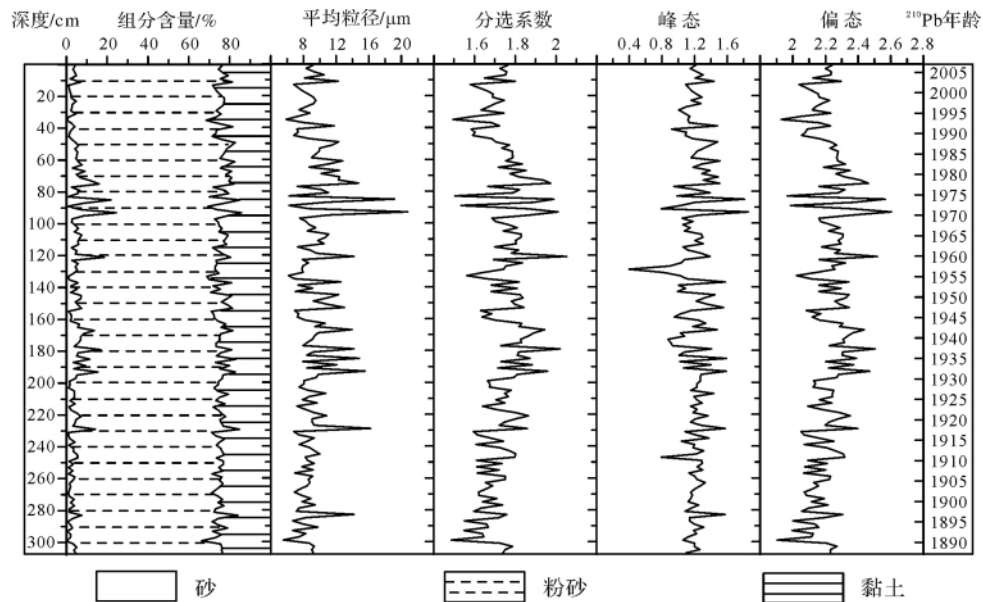


图 2 ZM11 孔沉积物粒度参数垂向分布图

Fig. 2 Vertical distributions of grain size parameters of Core ZM11

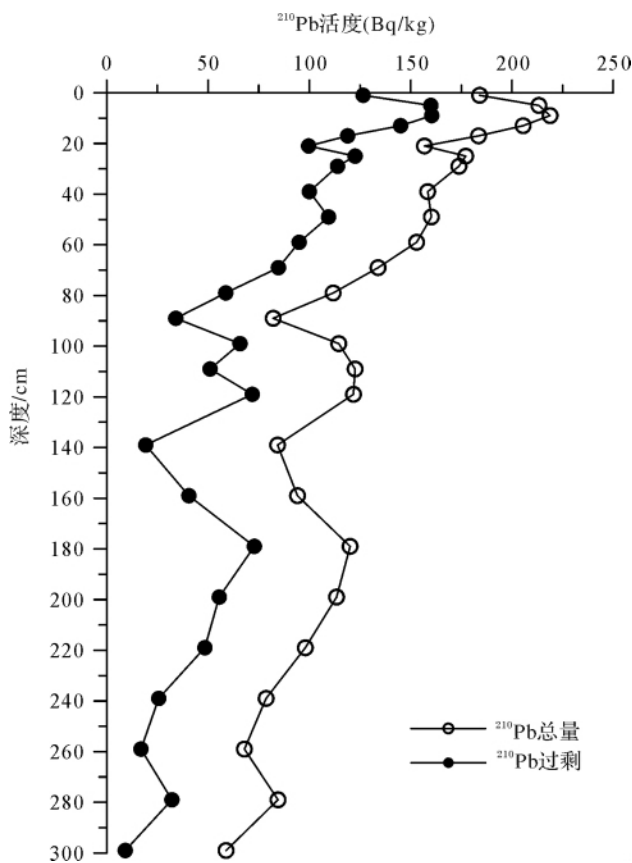


图 3 ZM11 孔 <sup>210</sup>Pb 垂向分布图

Fig. 3 Profile of <sup>210</sup>Pb activity in the piston Core ZM11

### 2.3 颜色反射率分析结果

根据获得的颜色反射率光谱强度, 本文采取两种

方法提取颜色反射光谱参数: (1) 根据  $L a^* b^*$  色空间 (CIELAB 色空间) 模型获得颜色反射率参数, 该色空间模型可以通过立体的球来表示, 球的轴为亮度参数  $L$ , 从  $0 \sim 100$ ,  $a^*$  为色度坐标, 表示色方向:  $+a^*$  为红色方向,  $-a^*$  为绿色方向,  $+b^*$  为黄色方向,  $-b^*$  为蓝色方向; (2) 借鉴 Deaton 和 Balsam (1991) 的方法, 采用主成分分析方法, 根据各个样品在可见光 ( $400 \sim 700 \text{ nm}$ ) 范围的反射光谱值, 采用 SPSS 软件进行因子分析, 可以获得 2 个高于置信度的因子 (因子  $F_1$  和因子  $F_2$ ), 两者的变化贡献了所有光谱变化的 99% 以上, 其中  $F_1$  的变化贡献了 92.59%,  $F_2$  贡献了 7.31%。这样, 每个样品都可以获得 2 个因子的得分, 其垂向分布反映了沉积物中最主要的 2 类物质的变化。

图 4 显示了 MZ11 孔近 123a 以来沉积物亮度 ( $L$ )、 $a^*$  分量、 $b^*$  分量、 $F_1$ 、 $F_2$  的变化情况, 主因子  $F_1$  变化与亮度变化几乎完全一致,  $F_1$  值高的样品对应的亮度值大; 而反射光谱  $F_2$  的变化与  $b^*$  分量的变化几乎完全一致 (反相关),  $F_2$  值高的沉积物对应的  $b^*$  分量值低。因子分析已表明 MZ11 孔沉积物的反射率光谱变化可以用  $F_1$  和  $F_2$  两个主因子的变化来指示, 而亮度曲线与  $F_1$  和  $b^*$  分量与  $F_2$  的高度一致性说明  $F_1$  和  $F_2$  两个主因子所指示的物理意义是分别与亮度和  $b^*$  分量相似的。因此, 理解亮度和  $b^*$  分量的变化就可以说明颜色反射率曲线所反映的环境变化。

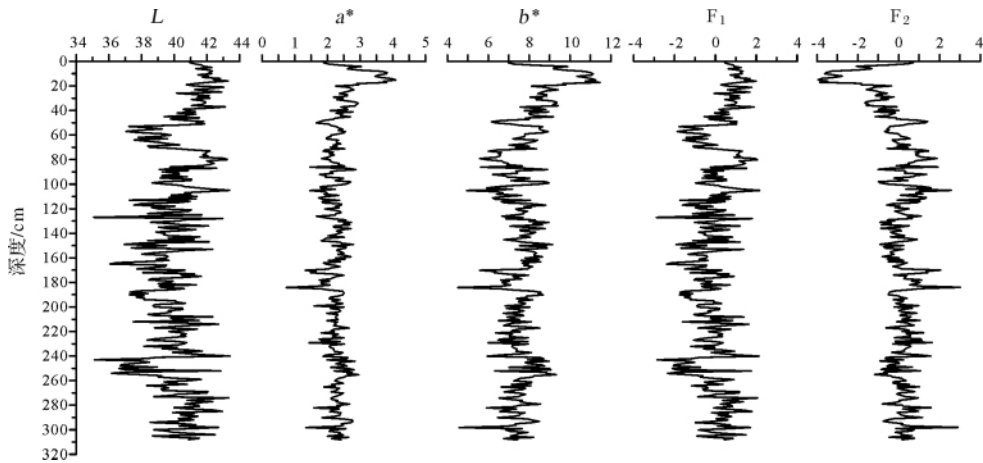


图 4 MZ11 孔近百年来沉积物颜色反射率特征值垂向分布图

Fig. 4 Vertical distributions of sediment color reflectance in the Core MZ11 in the past on hundred years

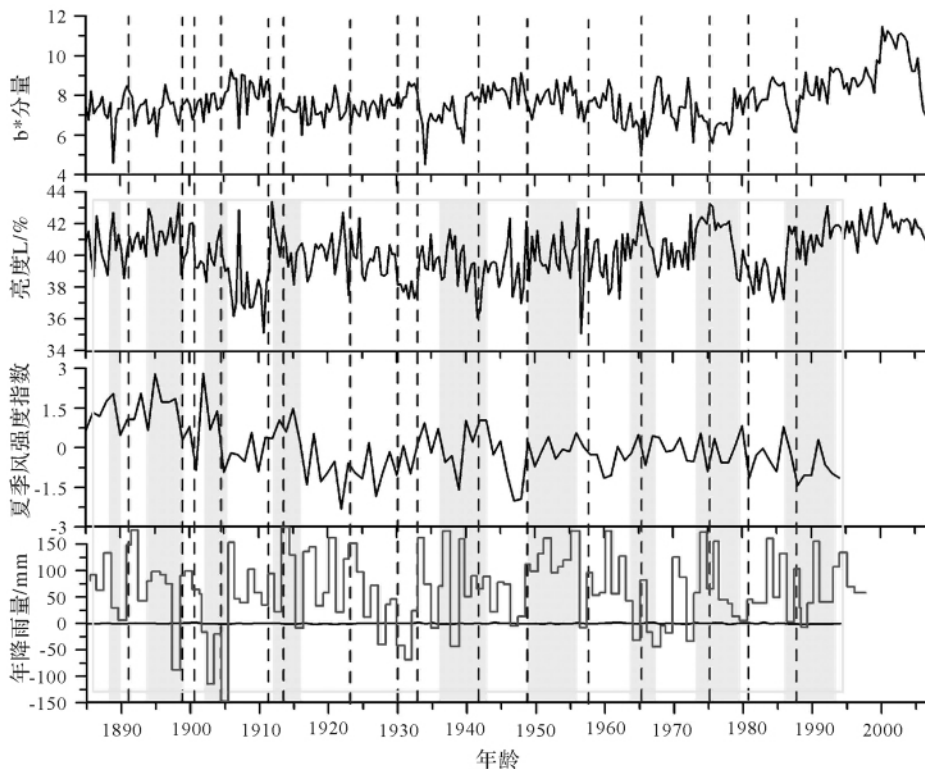


图 5 MZ11 孔沉积物颜色反射率指标与东亚季风强度对比

Fig. 5 Comparison of East Asian monsoon index with color reflectance in Core MZ11

2.4 颜色反射率指示的近百年来东亚季风变迁

通常情况下,在运用各种替代性指标进行沉积序列中的古环境分析时,通常需把沉积序列中复杂的变量或参数按照物质来源、水动力条件等因素进行分离,再详细研究不同组分所代表的地质环境意义,进而根据其在沉积序列中的变化推断气候环境的演化历史<sup>[12]</sup>。本文主要依据因子分析手段对 MZ11 孔颜

色反射率数据进行了分离,根据主因子  $F_1$ 、 $F_2$  与亮度和黄度( $b^*$ 分量)的对应关系探讨颜色反射率参数的环境指示意义。

对长江口泥质区的研究表明,该区是长江入海细颗粒物质的堆积中心<sup>[13,14]</sup>,其沉积物主要来源于长江扩散系统物质,经过长江径流运输而来<sup>[15,16]</sup>。东海悬浮体运输受沉积动力过程季节性变化的控制作

用而表现出“夏储冬输”的输运格局<sup>[17,18]</sup>,亦即夏季东海沿岸流系统弱化,能量降低,使得大量细颗粒沉积物得以在河流入海口周边海域沉积,保存;而冬季沿岸流系统强化,能量增强,促进了细颗粒沉积物向外海或远处搬运,是东海内陆架泥质区沉积作用的关键季节(对东南区域的沉积来说尤为重要)。因此,MZ11孔所处的长江口泥质区沉积物形成、演化过程与东亚季风,尤其是夏季风的驱动有着必然的联系。为探讨该泥质区沉积物对东亚季风的响应,将MZ11孔沉积物颜色反射率指标与东亚季风强度指数进行对比,可以发现,MZ11孔沉积物亮度(L)与东亚夏季风有着较好的对应关系,夏季风增强期,沉积物亮度值增大,反之亦然(图5)。而夏季风的强度变化必然引起降雨量的变化,从图5中还可以发现,每一次夏季风的增强,直接导致降雨量的增大<sup>[19]</sup>。关于沉积物亮度(L)的指示意义,在深海沉积物中可以反映碳酸盐的含量,其变化与底栖氧同位素曲线吻合<sup>[3-4]</sup>,而由于陆架河口区域沉积物中碳酸盐相对匮乏,沉积物中陆源物质占主导地位,因此初步认为MZ11孔沉积物亮度(L)主要受陆源物质风化及其沉积过程和成岩作用的控制,陆源入海物质通量及其沉积速率的增大,形成相对氧化的沉积环境,沉积物中有机质含量相对较低,导致沉积物亮度增大<sup>[20]</sup>。

夏季风的增强以及降雨量的增大直接导致长江入海径流量的增大,甚至出现短期的洪水事件<sup>[21]</sup>。

结合<sup>210</sup>Pb沉积速率数据,颜色反射率指标指示的近百年来东亚夏季风出现的11次相对增强期大致出现在1887年、1897年、1904年、1915年、1936年、1945年、1953年、1965年、1977年、1987年、1992年。由表1可以看出,东亚夏季风增强期与历史记录的洪水事件出现时间较为接近<sup>[22]</sup>,个别洪水事件的剖面年龄与历史数据相差约2~4年,可能与<sup>210</sup>Pb年龄测试的误差有关,也与河流沉积环境的不稳定性有关。显然,这也反映了自然地理状况下沉积动力环境的复杂性。

在深海沉积物中,颜色反射率是反映季风变化的一个非常有用的指标<sup>[4]</sup>。然而深海沉积物由于沉积速率相对较低,很难获取包括百年、十年际尺度的高分辨率季风变化记录。本文根据长江口泥质区沉积物的颜色反射率建立的东亚夏季风替代性指标,是否能够较好的反映短尺度东亚夏季风的变化呢?下面将本文利用MZ11孔恢复的东亚夏季风记录与近几十年以来的实测温度资料进行比较,以此来检验替代性指标的可靠性。已有研究表明近60年以来发生不同程度的波动,其中的高温期大致出现在1952年、1962年、1973年、1983年、1990年、1998年和2006年,其出现的时间点与利用MZ11孔恢复的相应时间段出现在1953年、1965年、1977年、1987年、1992年左右的5次东亚夏季风增强期较为吻合,总体变化趋势基本一致,绝对年龄最多相差不超过4年<sup>[23]</sup>。由

表1 近百年来长江流域大洪水简表<sup>[22]</sup>

Table 1 Flood events in the Yangtze River catchment in the past one hundred years<sup>[22]</sup>

本文推算年份	历史记录年份	区域	灾情
1887年	1889年	中下游大洪水	鄂、皖、苏、浙4省受灾严重,太湖流域大洪水。
1897年	1896年	上游大洪水	川东、三峡区域受灾严重,鄂、皖局部受灾,宜昌洪峰流量71 100 m <sup>3</sup> /s。
1904年	1905年	上游大洪水	金沙江中下游、长江上游大水,寸滩洪峰流量85 100 m <sup>3</sup> /s,20多县受灾较重。
1915年	-	-	-
1936年	1936年	上游大洪水	岷、沱、嘉陵、渠江及长江干流上游大水,四川50余县特别是沱江中下游受灾严重。
1945年	1945年	上游大洪水	岷、沱、嘉陵江和乌江,长江干流上游大水,寸滩洪峰流量73 800 m <sup>3</sup> /s,40余县市严重水灾,死亡数千人。
1953年	1954年	全流域大洪水	宜昌洪峰流量66 800 m <sup>3</sup> /s,汉口洪峰流量76 100 m <sup>3</sup> /s,大通92 600 m <sup>3</sup> /s(第一位),灾情特重,死亡33 169人。
1965年	1969年	中下游大洪水	大暴雨发生于鄂西清江流域,洪峰流量18 900 m <sup>3</sup> /s,鄂东北山区6条小河洪峰流量26 840 m <sup>3</sup> /s,汉口洪峰流量62 400 m <sup>3</sup> /s,鄂、皖二省重灾,死亡3 239人。
1977年	1980年	中下游大洪水	长江三峡、嘉陵江、清江与汉江大水,汉江洪峰流量60 100 m <sup>3</sup> /s,鄂、赣、皖、湘4省死亡1 339人。
1987年	1983年	汉江及长江中游大洪水	汉口洪峰流量65 000 m <sup>3</sup> /s,湘、鄂、赣、皖部分地区重灾,汉江安康洪峰流量31 000 m <sup>3</sup> /s,老城淹没,死亡870人。
1992年	1991年	下游大洪水	洪峰流量汉口66 700 m <sup>3</sup> /s,巢湖、滁河、太湖与淮河地区重灾,皖、苏二省死亡1 163人。

“—”表示没有相关记录

此可见,经 $^{210}\text{Pb}$ 年代数据控制的MZ11孔沉积物亮度值( $L$ )所反映的东亚夏季风强盛期与实测相对高温期较为一致,说明陆架泥质体沉积物颜色反射率指标可以很好地恢复东亚夏季风的演化历史。

## 2.5 气候波动周期性分析

历史时期气候的波动具有显著的周期性<sup>[24-25]</sup>。研究全球不同区域(尤其是对气候变化反映敏感的区域)历史时期气温波动的周期性变化,不仅有助于人们理解气候系统的驱动要素及内部各要素之间的相互作用过程,而且也可以使人们能够从历史角度正确认识目前的环境、气候状况,为预测未来气候发展趋势提供重要的理论依据<sup>[26]</sup>。

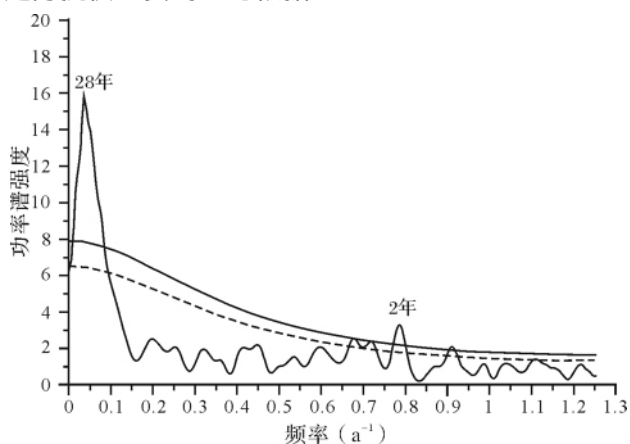


图6 MZ11孔亮度( $L$ )序列功率谱分析结果

Fig. 6 Frequency analysis of sediment brightness of Core MZ11

本文使用功率谱分析软件 REDFIT35,对MZ11孔沉积物亮度( $L$ )级进行分析,该软件专门为非等间距时间序列(unevenly spaced time series)功率谱分析设计。分析过程使用了如下参数: $n_{\text{sim}} = 1500$ ;  $n_{50} = 4$ (WOSA segment: Welch-Overlap-Segment-Averaging procedure);  $i_{\text{win}} = 2$ (取样窗函数: Welch spectrum window)其余参数均使用软件默认参数(各参数及其具体意义见<sup>[27]</sup>)。

MZ11孔沉积物亮度( $L$ )序列功率谱分析结果见图6,可以识别出置信水平在90%以上的周期包括28年和2年:

(1) 28 a周期: 28年周期是MZ11孔沉积物亮度( $L$ )序列功率谱所揭示的最显著的周期,该周期在近百年来的气温实测记录中也有相应记录。对我国42个测站长期的气温测试分析结果表明,近百年以来我国年、季平均气温序列主成分方差谱分析结果表明显著

的周期集中出现在28.9~18.4 a 2~3 a等波段,这些显著周期出现频数或方差谱的平均值达到了 $\alpha = 0.01$ 的显著标准,其中28.9~18.4 a波段的周期分量与太阳黑子数11年周期双周的位相配合非常密切<sup>[28]</sup>。青藏高原古里雅冰芯记录的28.6 a周期,同样显示主要受太阳黑子活动的影响<sup>[29]</sup>。近百年来,日本北海道地区实测气温波动存在明显的28 a变化周期<sup>[30]</sup>。与之相应的是,近百年以来降雨量的变化大致表现为以20~30 a为周期的干湿交替出现<sup>[19]</sup>。因此,本文研究初步认为28 a周期广泛存在于东亚季风控制区,其驱动因素可能主要是太阳辐射量的周期性变化。

(2) 2 a周期: 2 a周期是目前高分辨率气候周期研究所揭示的最小周期,该周期广泛存在于不同区域的气候载体中<sup>[31]</sup>。对银川气象站48年(1951-1998)实测气温的功率谱分析表明,年平均气温存在3.75 a的准周期,6~8月平均气温存在2.4 a的准周期<sup>[32]</sup>;近百年以来青藏高原东部树木年轮同样表现出明显的2年周期<sup>[25]</sup>;近200多年来,我国秦岭地区的初春气温也存在2.7 a左右的准周期<sup>[33,34]</sup>。对利用陕西中一北部树轮建立的温度重建序列进行功率谱分析,检测到3.51, 2.63和2.5 a的准周期;无独有偶,马利民等研究发现中国秦岭地区树木年轮中也记载了ENSO事件<sup>[35]</sup>。

上述这些周期可归于2~3 a的周期特征,这一结果从另一个角度说明本文重建资料潜在的可能性。这种周期特征广泛存在于中国北方地区的树轮研究中<sup>[33,36]</sup>,已有研究证实2 a左右的准周期同样在热带太平洋海温序列中存在<sup>[37]</sup>。这种与气候变化的短期波动有关的特征与“准两年脉动(QBO)”十分接近,已有研究表明QBO的影响存在于较大的范围<sup>[32]</sup>,初步推断2 a周期可能与“厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)”的变化有关<sup>[38,39]</sup>,而导致其形成的深层次因素,还需要进一步的研究。

## 3 结论

本文通过对长江口泥质区MZ11孔沉积物样品进行400~700 nm可见光范围内的颜色反射率测试,从中提取 $F_1$ 和 $F_2$ 两个主因子和亮度( $L$ )、红度( $a^*$ 分量)、黄度( $b^*$ 分量)等颜色反射率特征值,结果表明亮度曲线与 $F_1$ 的变化趋势基本一致,而黄量与 $F_2$ 变化趋势则完全相反,其中前者与近百年以来东亚季风指数变化趋势基本一致,东亚季风强度指数增

大, 沉积物亮度值变大, 反之亦然。MZ11 孔沉积物颜色反射率指标指示的近百年来发生的数次东亚夏季季风增强期大致出现在 1887、1897、1904、1915a、1936、1945、1953、1965、1977、1987 和 1992 年, 且这种强度变化具有显著的 28 a 和 2 a 周期性, 该结果得到了近年来温度和降雨实测记录的验证。表明沉积物亮度 ( $L$ ) 可以作为东亚夏季风的有效替代性指标, 这在一定程度上丰富了古气候和古环境研究的指标体系。由于影响沉积物颜色的因素众多, 如沉积物的物源、风化程度、沉积环境、水动力条件等均可造成沉积物颜色组成的变化, 在今后的研究中尚需进一步去除干扰因素, 更加有效的利用沉积物颜色反射率指标进行古气候和古环境研究。

致谢 上海石油局第一海洋调查大队“勘 407”钻探船全体船员协助海上取样工作, 中国科学院南京地理与湖泊研究所夏威岚研究员协助进行了  $^{210}\text{Pb}$  年龄测试, 国家海洋局第一海洋研究所朱爱美工程师协助进行了粒度测试, 作者在此一并表示感谢。

### 参考文献 (References)

- 王昆山, 石学法, 王国庆. 南海海陆架沉积物颜色反射率的初步研究[J]. 海洋科学进展, 2006, 24(1): 30-38 [Wang Kunshan, Shi Xuefa, Wang Guoqing. Analysis of affecting factors for reflectance spectra of sediments from the central shelf area of the Southern Yellow Sea[J]. Advances in Marine Science, 2006, 24(1): 30-38]
- Barranco F T, Balsam W L, Deaton B C. Quantitative reassessment of brick red lutites: Evidence from reflectance spectrophotometry [J]. Marine Geology, 1989, (89): 299-314
- 黄维, 翦知湔, ühring B C. 南海北部 ODP1144 站颜色反射率揭示的千年尺度气候波动[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2007, 23(3): 5-10 [Huang Wei, Jian Zhimin, ühring B C. The millennial-scale climate fluctuations revealed by the records of color reflectance from ODP site 1144 in the Northern South China Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2007, 23(3): 5-10]
- 刘连文, 郑洪波, 翦知湔. 南海沉积物漫反射光谱反映的 220ka 以来东亚夏季风变迁[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 2005, 30(5): 543-549 [Liu Lianwen, Zheng Hongbo, Jian Zhimin. Visible reflectance record of South China Sea sediments during the past 220 ka and its implications for East Asian Monsoon Variation[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2005, 30(5): 543-549]
- 王昆山, 石学法, 程振波, 等. 南海海陆架中部沉积物反射率光谱的影响因素分析[J]. 海洋科学进展, 2007, 25(1): 46-53 [Wang Kunshan, Shi Xuefa, Cheng Zhenbo et al. A preliminary study on the sediment color reflectance in the Southern Yellow Sea shelf area[J]. Advances in Marine Science, 2007, 25(1): 46-53]
- Giosan L, Flood R D, Grijtzen J, et al. Paleoclimatographic significance of sediment color on western North Atlantic drifts: II. Late Pliocene-Pleistocene sedimentation [J]. Marine Geology, 2002, 189: 43-61
- Milliman J D, Shen H T, Yang Z S, et al. Transport and deposition of river sediment in the Changjiang estuary and adjacent continental shelf [J]. Continental Shelf Research, 1985, 4(1-2): 37-45
- 杨作升, 陈晓辉. 百年来长江口泥质区高分辨率沉积粒度变化及影响因素探讨[J]. 第四纪研究, 2007, 27(5): 690-699 [Yang Zuosheng, Chen Xiaohui. Centennial high resolution records of sediment grain-size variation in the mud area off the Changjiang (Yangtze River) estuary and its influential factors [J]. Quaternary Sciences, 2007, 27(5): 690-699]
- 张瑞, 潘少明, 汪亚平, 等. 长江河口水下三角洲  $^{210}\text{Pb}$  分布特征及其沉积速率[J]. 沉积学报, 2009, 27(4): 704-713 [Zhang Rui, Pan Shaoming, Wang Yaping, et al. Sedimentation rates and characteristics of radionuclide  $^{210}\text{Pb}$  at the subaqueous delta in Changjiang estuary [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(4): 704-713]
- Peter B. Physical properties handbook: A guide to the shipboard measurement of physical properties of deep-sea cores [J/OL]. Ocean Drilling Program, 1997, 7: 1-40 [1999-10-04]. <http://www-odp.tamu.edu/publications/tnotes/t2b/CHAP7.PDF>.
- Li Fengye. Modern sedimentation rates and sedimentation feature in the Huanghe River Estuary based on  $^{210}\text{Pb}$  technique [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 1993, 11(4): 333-342
- 向荣, 杨作升, 郭志刚, 等. 济州岛西南泥质区粒度组分变化的古环境应用[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 2005, 30(5): 582-588 [Xiang Rong, Yang Zuosheng, Satio Y, et al. East Asia Winter Monsoon changes inferred from environmentally sensitive grain-size component records during the last 2300 years in mud area southwest off Cheju Island, ECS [J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2006, 49: 604-614]
- 秦蕴珊, 赵一阳, 陈丽蓉, 等. 东海地质 [M]. 北京: 科学出版社, 1987 [Qin Yunshan, Zhao Yiyang, Chen Lirong, et al. Geology of the East China Sea [M]. Beijing: Science Press, 1987]
- 金翔龙. 东海海洋地质 [M]. 北京: 海洋出版社, 1992 [Jin Xianglong. Marine Geology of the East China Sea [M]. Beijing: Ocean Press, 1992]
- Milliman J D, Meade R C. World-wide delivery of river sediment to the oceans [J]. Journal of Geology, 1983, 91(1): 1-21
- 胡敦欣, 杨作升. 东海海洋通量关键过程 [M]. 北京: 海洋出版社, 2001 [Hu Dunxin, Yang Zuosheng. Margin Flux in the East China Sea [M]. Beijing: Ocean Press, 2001]
- 杨作升, 郭志刚, 王兆祥, 等. 黄东海陆架悬浮体及其向东部深海区输送的宏观格局 [J]. 海洋学报, 1992, 14: 81-90 [Yang Zuosheng, Guo Zhigang, Wang Zhaoxiang, et al. Suspended sediments on the Yellow and East China Sea shelf and macro-pattern of their being transported to the eastern deeper sea [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1992, 14: 81-90]
- 孙效功, 方明, 黄伟. 黄东海陆架区悬浮体输运的时空变化规律 [J]. 海洋与湖沼, 2000, 31: 581-587 [Sun Xiaogong, Fang Ming, Huang Wei. Spatial and temporal variations in suspended particulate

- matter transport on the Yellow and East China Sea shelf[J]. *Oceanol Et Limnol, Sinica*, 2000, 31: 581-587]
- 19 王绍武. 近百年中国气候变化的研究[J]. 中国科学基金, 1998, 3: 167-170 [Wang Shaowu. Studies on climatic change in China during the last one hundred years [J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 1998, 3: 167-170]
- 20 李双建, 张然, 王清晨. 沉积物颜色和黏土矿物对库车坳陷第三纪气候变化的指示[J]. 沉积学报, 2006, 24(4): 521-530 [Li Shuangjian, Zhang Ran, Wang Qingchen. Implications of the color of sediments and clay minerals for Tertiary climatic changes of Kupa Depression [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2006, 24(4): 521-530]
- 21 展望, 杨守业, 刘晓理, 等. 长江下游近代洪水事件重建的新证据[J]. 科学通报, 2010, 55(19): 1908-1913 [Zhan Wang, Yang Shouye, Liu Xiaoli, et al. Reconstruction of flood events over the last 150 years in the lower reaches of the Changjiang River [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(21): 2268-2274]
- 22 施雅风, 姜彤, 苏布达, 等. 1840 年以来长江大洪水演变与气候变化关系初探[J]. 湖泊科学, 2004, 16(4): 289-297 [Shi Yafeng, Jiang Tong, Su Buda, et al. Preliminary analysis on the relation between the evolution of heavy floods in the Yangtze River catchment and the climate changes since 1840 [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2004 16(4): 289-297]
- 23 宗海峰, 杨莉. 近 50 年来全球增暖的阶段性特征及其与中国东部夏季降雨分布的关系[J]. 河北工业科技, 2010, 2: 69-75 [Zeng Haifeng, Yang Li. Stage characteristics of global warming in recent fifty years and its relation with summer rainfall in China's eastern area [J]. *Hebei Journal of Industrial Science and Technology*, 2010, 2: 69-75]
- 24 肖尚斌, 李安春, 陈木宏, 等. 全新世东亚季风变化的百年尺度周期[J]. 科技导报, 2006, 24(4): 40-43 [Xiao Shangbin, Li Anchun, Chen Muhong, et al. Centennial cycles of variation of the Holocene East Asian Monsoon [J]. *Science & Technology Review*, 2006, 24(4): 40-43]
- 25 刘禹, 蔡秋芳, 宋慧明, 等. 青藏高原中东部 2485 年来温度变化幅度、速率、周期、原因及未来趋势[J]. 科学通报, 2011, 56(25): 2042-2051 [Liu Yu, Cai Qiufang, Song Huiming, et al. Amplitudes, rates, periodicities and causes of temperature variations in the past 2485 years and future over the central-eastern Tibetan Plateau [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(28-29): 2986-2994]
- 26 王宁练. 青藏高原北部马兰冰芯记录所揭示的近 200 年来沙尘天气发生频率变化趋势[J]. 科学通报, 2006, 51(6): 724-729 [Wang Ninglian. Decrease trend of dust event frequency over the past 200 years recorded in the Malan ice core from the northern Tibetan Plateau [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(24): 2866-2871]
- 27 Schulz M, Mudelsee M. REDFIT: Estimating red-noise spectra directly from unevenly spaced paleoclimatic time series [J]. *Computers and Geoscience*, 2002, 28(3): 421-426
- 28 屠其璞. 近百年来我国气温变化的趋势和周期[J]. 南京气象学院学报, 1984, 2: 151-162 [Tu Qipu. Trend and periodicity of temperature change in China during the past hundred years [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 1984, 2: 151-162]
- 29 王宁练, Thompson L G, Cole-Dai J. 青藏高原古里雅冰芯记录所揭示的 Maunder 极小值太阳活动特征[J]. 科学通报, 2000, 45(16): 1697-1704 [Wang Ninglian, Thompson L G, Cole-Dai J. The nature of the solar activity during the Maunder Minimum revealed by the Guliya ice core record [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(23): 2118-2125]
- 30 董满宇, 吴正方, 江源. 近百年来中国东北与日本北海道地区气温变化对比[J]. 地理科学, 2009, 29(5): 684-689 [Dong Manyu, Wu Zhengfang, Jiang Yuan. Comparative analysis of temperature change in the regions of Northeast China and Hokkaido, Japan over the last hundred years [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2009, 29(5): 684-689]
- 31 蔡秋芳, 刘禹, 宋慧明, 等. 树轮记录的陕西中—北部地区 1826 年以来 4—9 月温度变化[J]. 中国科学: D 辑, 2008, 38(8): 971-977 [Cai Qiufang, Liu Yu, Song Huiming, et al. Tree-ring-based reconstruction of the April to September mean temperature since 1826 AD for north-central Shanxi Province, China [J]. *Science in China: Series D*, 2008, 51(8): 1099-1106]
- 32 钱维宏, 朱亚芬, 叶谦. 赤道东太平洋海温异常的年际和年代际变率[J]. 科学通报, 1998, 43(10): 1098-1102 [Qian Weihong, Zhu Yafen, Ye Qian. Interannual and interdecadal variabilities of sea surface temperature over the equatorial eastern Pacific [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1998, 43(10): 1098-1102]
- 33 刘禹, 马利民, 蔡秋芳, 等. 依据陕西秦岭镇安树木年轮重建 3~4 月气温序列[J]. 自然科学进展, 2001, 11(2): 157-162 [Liu Yu, Ma Limin, Cai Qiufang, et al. Reconstruction of March to April temperature using tree ring data of Qinling Mountains, Shanxi Province [J]. *Progress in Nature Science*, 2001, 11(2): 157-162]
- 34 刘洪滨, 邵雪梅. 采用秦岭冷杉年轮宽度重建陕西镇安 1755 年以来的初春温度[J]. 气象学报, 2000, 58(2): 223-233 [Liu Hongbin, Shao Xuemei. Reconstruction of early-spring temperature at Zhennan from 1755 using tree ring chronology [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2000, 58(2): 223-233]
- 35 马利民, 刘禹, 安芷生. 秦岭树轮记录中的 ENSO 事件[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2001, 21(3): 93-98 [Ma Limin, Liu Yu, An Zhisheng. ENSO events from tree-ring width in Qinling Mountain [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2001, 21(3): 93-98]
- 36 Liu Y, Cai Q F, Shi J F, et al. Seasonal precipitation in the south-central Helan Mountain region, China, reconstructed from tree-ring width for the past 224 years [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2005, 35(10): 2403-2412
- 37 史历, 倪允琪. 近百年热带太平洋海温年际及年代际时间变率特征的诊断研究[J]. 气象科学, 2001, 59(2): 220-225 [Shi Li, Ni Yunqi. A diagnostic analysis of the characters of inter-decadal variability and inter-annual variability of the sea surface temperature in tropical Pacific in the past century [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2001, 59(2): 220-225]
- 38 Bradley R S, Diaz H F, Kiladis G N, et al. ENSO signal in continental temperature and precipitation records [J]. *Nature*, 1987, 327: 497-501
- 39 Allan R J, Lindesay J, Parker D E. El Niño-Southern Oscillation and



Climatic Variability [M]. Melbourne: CSIRO Publishing, 1996

## Color Reflectance Record of the Yangtze River Mud Area Sediments during the Past 100 yr and Its Implications for East Asian Monsoon Variation

LIU Sheng-fa<sup>1 2</sup> WANG Kun-shan<sup>1 2</sup> LIU Yan-guang<sup>1 2</sup> ,  
YANG Gang<sup>1 2</sup> WU Yong-hua<sup>1 2</sup> SHI Xue-fa<sup>1 2</sup>

(1. First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao, Shandong 266061;

2. Key Lab of Marine Sedimentology and Environmental Geology, State Oceanic Administration, Qingdao, Shandong 266061)

**Abstract:** The continental shelf mud areas over the East China Sea were formed from the mid-Holocene, and are regarded as important places to study regional responses to global climate change due to their high sedimentation rate, which provide continual and rich record of environmental information. In this paper, the Minolta CM-2002 spectrophotometer was used to measure the color reflectance data of sediments in Core MZ11, which was taken from the Yangtze River mud area. Based on the factor analysis using 400 ~ 700 nm color reflectance data, the parameters such as  $F_1$ ,  $F_2$ , brightness, redness and yellowness were summarized. By contrast with these curves, the results show that factor 1 and brightness show similar fluctuation patterns, while factor 2 and yellowness show complete contrary trend, so we can draw a conclusion that brightness and yellowness are the main factor to control the color composition of the sediment in core MZ11. The mud area near the Yangtze River estuary was believed to have been formed by fine-grained sediments from the Yangtze River, which was influenced by the Eastern Asian Monsoon obviously, so by comparing with the historic record of the climate and the sediment brightness, we found the brightness could be a good proxy to monitor paleoclimatic changes in the study area and a time series analysis of the factor  $F_1$  and brightness indicate that relative high values in the past 100 yr occurred in 1887a, 1897a, 1904a, 1915a, 1936a, 1945a, 1953a, 1965a, 1977a, 1987a and 1992a, which may correlate with the abnormally strong summer monsoon events, suggesting that the tropical ocean had a major effect on the East Asian summer monsoon. Periodicities of 28 yr and 2 yr are observed in the color reflectance records coinciding with those known for solar cycles in the past 100 yr might be resulted from changes in solar activity.

**Key words:** Yangtze River estuary; mud area; sediment; color reflectance; East Asian Monsoon.