

# 全新世中后期开封西郊黄泛沉积序列的孢粉记录

刘德新<sup>1</sup>, 马建华<sup>1,2</sup>, 谷 蕾<sup>1</sup>, 陈彦芳<sup>1</sup>

(1. 河南大学资源与环境研究所, 开封 475004;

2. 黄河文明传承与现代化建设河南省协同创新中心, 开封 475001)

**摘要:** 历史时期以来, 黄河在开封市附近多次泛滥形成了相对完整的沉积序列。选取开封市西郊25 m岩芯(ZK<sub>1m</sub>)为研究对象, 通过孢粉分析, 结合地层沉积旋回和历史文献资料, 探讨了全新世中后期以来大洪水事件的孢粉记录。结果表明: 黄泛地层中的孢粉含量及其组成很好地记录了大洪水事件, 洪水沉积期的木本植物花粉含量高于其间断期, 而人工禾本科花粉含量低于间断期。每个粒度旋回基本上都有与之对应的孢粉亚带, 且其上下界限的吻合度较高, 表明孢粉可作为划分沉积旋回的代用指标。岩芯孢粉亚带的数目(12个)多于粒度旋回数(9个), 孢粉组合特征可以识别出规模较小的洪水或者一次洪水事件出现的多个短期洪水间歇期所形成的沉积, 孢粉指标划分沉积旋回的精度高于粒度指标。

**关键词:** 黄河泛滥; 沉积旋回; 孢粉; 全新世中后期; 大洪水; 开封市

DOI: 10.11821/dlxb201605013

## 1 引言

开封市作为中国八朝古都, 其兴衰与黄河密切相关。早在公元前225年, 秦将王贲引鸿沟(连接黄河与淮河的运河)之水淹没魏都大梁城<sup>[1]</sup>。自南宋建炎二年(1128年)黄河“夺淮入海”至清末咸丰五年(1855年)的700余年间, 黄河下游河道在开封附近决溢达300多次, 其中15次波及开封城<sup>[2]</sup>。战国大梁城、唐代汴州城、北宋东京城、金元汴京城、明代和清代开封城被埋在地下不同深度, 形成“城摞城”奇观<sup>[3]</sup>。但是, 上述研究的主要依据是零星的历史文献记载和局部的考古试掘结果, 开封城究竟经历了多少次黄河决溢和泥沙堆积, 尚缺乏详细的地层学证据。由于黄河下游沉积物属冲积相沉积, 具有沉积不稳定、地层不连续等特点<sup>[4]</sup>, 研究难度大, 积累的资料较少, 尤其是孢粉学研究更为薄弱。传统的孢粉学研究多用于揭示区域古环境变化<sup>[5-12]</sup>, 而对洪水泛滥期与沉积间断期孢粉组合的差异性研究较少。

黄河在开封市附近多次泛滥形成了相对完整的沉积序列, 为探索大洪水事件的孢粉

收稿日期: 2016-01-02; 修订日期: 2016-02-22

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(41171409); 教育部人文社会科学重点研究基地重大项目(12JJD790023); 教育部和河南省共建河南大学项目(SBGJ090101); 河南大学研究生优秀学位论文培育计划项目(Y1424004)  
[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41171409; Humanities and Social Science Projects by Ministry of Education of China, No.12JJD790023; Joint Fund from the State Ministry of Education and Henan Province to construct Henan University, No.SBGJ090101; Research Fund for the Incubation Programme of Outstanding Graduate Student Dissertation of Henan University, No.Y1424004]

**作者简介:** 刘德新(1989-), 男, 河南柘城人, 博士, 主要从事土壤与沉积物环境变化研究。

E-mail: liudexin269@163.com

**通讯作者:** 马建华(1958-), 男, 河南清丰人, 教授, 博士生导师, 中国地理学会会员(S110000227M), 主要从事土壤环境污染防治、自然地理综合研究。E-mail: mjh@henu.edu.cn

记录提供了难得的研究载体。马建华等<sup>[13]</sup>根据开封市城区和郊区岩芯样品粒度和黑碳含量数据,借助小波分析技术开展了沉积旋回划分,但并没有认真讨论全新世以来的大洪水事件。本文在马建华等<sup>[13]</sup>研究的基础上,选取开封市西郊地层岩芯样品,通过孢粉分析,探讨该地区全新世中后期以来的大洪水事件及其冲积物孢粉特征。旨在揭示黄河下游冲积地层孢粉总量和组成变化及其与黄河泛滥沉积间断的关系,为识别深受人类活动影响的沉积旋回提供新的代用指标。

## 2 研究区概况

开封市地处黄淮平原,北距黄河12 km,海拔在69~78 m之间。气候属于暖温带大陆性季风气候,年均降水量636 mm,年均气温14℃。自然植被属于暖温带落叶阔叶林,目前绝大部分原生植被已被农田、果园和人工林所取代。主要粮食作物包括小麦(*Triticum aestivum*)、玉米(*Zea mays*)和大豆(*Glycine max*)等,经济作物以花生(*Arachis hypogaea*)、西瓜(*Citrullus lanatus*)和棉花(*Gossypium hirsutum*)等为主;木本植物主要有梨(*Pyrus bretschneideri*)、苹果(*Malus pumila*)和桃(*Amygdalus persica*)等果树,以及泡桐(*Paulownia elongata*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、臭椿(*Ailanthus altissima*)、榆(*Ulmus pumila*)、柳(*Salix matsudana*)、杨(*Populus tomentosa*)等;草本植物主要有画眉草(*Eragrostis pilosa*)、碱蒿(*Artemisia abrotanum*)、猪毛菜(*Salsola collina*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、马唐(*Digitaria sanguinalis*)、苍耳(*Xanthium sibiricum*)、紫菀(*Aster tataricus*)、狗牙根(*Cynodon dactylon*)和白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)等。

## 3 研究方法

开封市规划局<sup>①</sup>通过对开封市区众多钻孔资料的对比分析,发现其全新统下界在地下40 m左右,其中深度14~24 m地层的年代在2500~5000 a BP之间,即全新世中后期。这为确定钻取岩芯的深度及其年代提供了重要参考。

### 3.1 岩芯样品采集

本研究的钻孔(ZK<sub>jm</sub>)位于开封市西郊河南大学金明校区内,地理坐标是34°49′2.17″N、114°18′29.31″E,东距明清时期的西城墙约3 km,西距明代的护城堤约2 km。该地点至少在唐代以后的1000多年间一直是非城镇用地,地层受人为扰动轻微。

2012年4月,利用DPP-100型钻机采集连续岩芯(直径9 cm)25 m。考虑到河流冲积沉积的速率变化较大,岩芯孢粉样品的取样间隔在10~30 cm之间<sup>[14-19]</sup>,岩性变化明显的层段取样较为密集,岩性较为均一的层段取样相对稀疏,共获得孢粉样品165个(表1)。

### 3.2 孢粉分析方法

样品中的孢粉提取采用酸碱处理和重液浮选法<sup>[20]</sup>。称取沉积物样品80~300 g,加入1粒石松孢子片(平均20848粒/片,部分27637粒/片)作为示踪剂,采用盐酸—氢氧化钠—氢氟酸和浓硫酸:乙酸酐(1:9)程序进行前处理,用重液(比重2.0)浮选。孢粉鉴定统计在400倍Leica DM5500B生物显微镜下完成,每个样品观察玻片4个以上,花粉数量均在400粒以上(不包括蕨类孢子和藻类)。花粉百分比计算以陆生植物花粉总量为基数,蕨类孢子百分比以孢粉总量为基数。孢粉百分比图式用Tilia软件完成。

① 开封市规划局. 开封市全新世地质研究. 1998年.

表1 岩芯孢粉样品分布及数量  
Tab. 1 Distribution and abundance of pollen samples of ZK<sub>jm</sub> core

深度(m)	岩性	取样间隔(cm)	样品数(个)
0~2.2	棕黄色粉壤土	10	22
2.2~4.2	棕色砂壤土	20	10
4.2~7.8	棕色壤土	15	24
7.8~8.2	暗棕色粉黏土	10	14
8.2~12.8	灰黄或棕黄色粉沙土	20	23
12.8~14.5	暗棕色或灰色黏壤土	10	17
14.5~20.1	灰黄色粉沙土	20	28
20.1~20.6	棕色黏壤土	10	5
20.6~22.2	黄色粉沙土	20	8
22.2~25.0	棕色砂壤土	20	14

3.3 年代断定

马建华等<sup>[13]</sup>对 ZK<sub>jm</sub> 岩芯深度 7.8 m 和 13.2 m 处的植物残体和黏土进行 AMS<sup>14</sup>C 测年, 校正后的年龄分别为 1460±30AD (明天顺年间) 和 920±60AD (唐末或北宋初)。岩芯深度 14.5 m 左右出现第一个混杂有砖瓦块的黑棕色文化层, 推断是开封最早建都的战国大梁城地面。

4 结果分析

4.1 主要孢粉类型

岩芯样品共鉴定统计出 73 个孢粉类型 (表 2), 其中包括 24 种乔木植物花粉 (科/属)、12 种灌木植物花粉 (科/属)、32 种草本植物花粉 (科/属)、5 种蕨类孢子和藻类 (科/属)。常见的乔木植物花粉类型有松属 (*Pinus*)、云杉属 (*Picea*)、栎属 (*Quercus*)、桑科 (*Moraceae*)、桦属 (*Betula*)、榆属 (*Ulmus*) 等。灌木植物花粉类型主

表2 岩芯主要孢粉类型  
Tab. 2 Major pollen species of the core

孢粉类别	主要类型
乔木 (Arbor)	松属 ( <i>Pinus</i> ), 罗汉松科 ( <i>Podocarpaceae</i> ), 云杉属 ( <i>Picea</i> ), 铁杉属 ( <i>Tsuga</i> ), 冷杉属 ( <i>Abies</i> ), 栎属 ( <i>Quercus</i> ), 常绿栎 ( <i>Evergreen Oak</i> ), 桑科 ( <i>Moraceae</i> ), 桦属 ( <i>Betula</i> ), 鹅耳枥属 ( <i>Carpinus</i> ), 桤木属 ( <i>Alnus</i> ), 榆属 ( <i>Ulmus</i> ), 臭椿属 ( <i>Ailanthus</i> ), 胡桃属 ( <i>Juglans</i> ), 枫杨属 ( <i>Pterocarya</i> ), 山核桃属 ( <i>Carya</i> ), 柳属 ( <i>Salix</i> ), 漆树科 ( <i>Anacardiaceae</i> ), 白蜡树 ( <i>Fraxinus chinensis Roxb</i> ), 椴树科 ( <i>Tiliaceae</i> ), 无患子科 ( <i>Sapindaceae</i> ), 楝科 ( <i>Meliaceae</i> ), 枫香树属 ( <i>Liquidambar</i> ), 杨梅科 ( <i>Myricaceae</i> )
灌木 (Shrub)	蔷薇科 ( <i>Rosaceae</i> ), 绣线菊 ( <i>Spiraea Salicifolia L.</i> ), 柽柳科 ( <i>Tamaricaceae</i> ), 胡颓子科 ( <i>Elaeagnaceae</i> ), 虎榛子属 ( <i>Ostryopsis</i> ), 榛属 ( <i>Corylus</i> ), 木犀科 ( <i>Oleaceae</i> ), 鼠李科 ( <i>Rhamnaceae</i> ), 麻黄属 ( <i>Ephedra</i> ), 蒺藜科 ( <i>Zygophyllaceae</i> ), 白刺属 ( <i>Nitraria</i> ), 远志科 ( <i>Polygalaceae</i> )
草本 (Herb)	藜科 ( <i>Chenopodiaceae</i> ), 人工禾本科 ( <i>Planted Poaceae</i> ), 禾本科 ( <i>Gramineae</i> ), 莎草科 ( <i>Cyperaceae</i> ), 菊科 ( <i>Asteraceae</i> ), 蒿属 ( <i>Artemisia</i> ), 蒲公英属 ( <i>Taraxacum</i> ), 苍耳 ( <i>Xanthium sibiricum</i> ), 大蓟 ( <i>Cirsium japonicum</i> ), 紫菀属 ( <i>Aster</i> ), 毛茛科 ( <i>Ranunculaceae</i> ), 唐松草属 ( <i>Thalictrum</i> ), 十字花科 ( <i>Cruciferae</i> ), 唇形科 ( <i>Labiatae</i> ), 豆科 ( <i>Leguminosae</i> ), 葡萄科 ( <i>Vitaceae</i> ), 玄参科 ( <i>Scrophulariaceae</i> ), 蓼科 ( <i>Polygonaceae</i> ), 酸模属 ( <i>Rumex</i> ), 荞麦属 ( <i>Fagopyrum</i> ), 石竹科 ( <i>Caryophyllaceae</i> ), 大戟科 ( <i>Euphorbiaceae</i> ), 柳叶菜科 ( <i>Onagraceae</i> ), 旋花科 ( <i>Convolvulaceae</i> ), 龙胆科 ( <i>Gentianaceae</i> ), 伞形科 ( <i>Umbelliferae</i> ), 狼毒属 ( <i>Stellera</i> ), 车前科 ( <i>Plantaginaceae</i> ), 败酱科 ( <i>Valerianaceae</i> ), 茜草科 ( <i>Rubiaceae</i> ), 香蒲属 ( <i>Typha</i> ), 狐尾藻属 ( <i>Myriophyllum</i> )
蕨类(Fern)	三缝孢 ( <i>Triletes spores</i> ), 中华卷柏 ( <i>Selaginella sinensis</i> ), 单缝孢 ( <i>Monoletes Spores</i> )
藻类(Algae)	环纹藻 ( <i>Concentricystes</i> ), 盘星藻 ( <i>Pediastraceae</i> )

要有胡颓子科 (*Elaeagnaceae*)、蔷薇科 (*Rosaceae*)、绣线菊 (*Spiraea Salicifolia* L.) 等。由于灌木植物花粉含量少, 变化幅度小, 在孢粉图谱中不易辨识, 因此本研究将乔木花粉和灌木花粉合并为一类, 统称为木本植物花粉。常见的草本植物花粉类型有蒿属 (*Artemisia*)、藜科 (*Chenopodiaceae*)、莎草科 (*Cyperaceae*)、禾本科 (*Gramineae*) 等, 其中一些禾本科花粉粒径较大, 一般在  $35\ \mu\text{m}$  以上, 且表面纹饰清晰, 孔环较为明显, 可能与人类活动有关, 将这类花粉归为人工禾本科 (*Planted Poaceae*) 花粉<sup>[21-22]</sup>。另外, 草本植物花粉中还有香蒲属 (*Typha*) 和狐尾藻属 (*Myriophyllum*) 等水生草本植物花粉。蕨类孢子以三缝孢 (*Triletes* spores) 和中华卷柏 (*Selaginella sinensis*) 为主。样品中还出现一些环纹藻 (*Concentricystes*) 和盘星藻 (*Pediastraceae*) 等淡水藻类。

## 4.2 孢粉组合特征

根据孢粉组合类型及其数量在岩芯上的垂直变化, 结合 CONISS 聚类分析, 自下而上划分为带 I、带 II、带 III 和带 IV 四个孢粉带, 其中孢粉带 I 又可以划分出两个亚带, 带 III 可以划分出四个亚带, 带 II 和带 IV 分别可以划分出三个亚带 (图 1, 图 2)。

### (1) 孢粉带 I

孢粉带 I 出现在岩芯深度 25~20 m 之间, 孢粉浓度较低 (50 粒/g, 平均值, 下同)。本带草本植物花粉含量较为丰富, 均达 60% 以上, 以 (人工) 禾本科 (10%~32%) 和藜科 (9%~30%) 为主; 木本植物花粉含量多在 30% 以下, 以松属花粉为主, 平均含量为 10%; 蕨类孢子含量较低, 主要为三缝孢和中华卷柏; 上部还出现大量环纹藻。根据孢粉组合特点, 本带可以划分为 Ia 和 Ib 两个亚带。

亚带 Ia (深度 25~23.6 m) 孢粉浓度为 44 粒/g, 以草本植物花粉为主, 主要有藜科、(人工) 禾本科、莎草科、香蒲属和蒿属; 木本植物花粉以松属、栎属和桦属为主。亚带 Ib (深度 23.6~20 m) 孢粉浓度为 52 粒/g, 木本植物花粉含量较亚带 Ia 有所增加, 其中松属花粉增加较为迅速, 桦属、栎属、榆属、桑科和胡颓子科花粉含量也稍有增加; 藜科、蒿属和香蒲属等草本植物花粉含量均不同程度的减少, 而 (人工) 禾本科花粉迅速增多, 莎草科和毛茛科花粉含量也有所增加; 环纹藻含量增加迅速, 最高含量达 64%。

### (2) 孢粉带 II

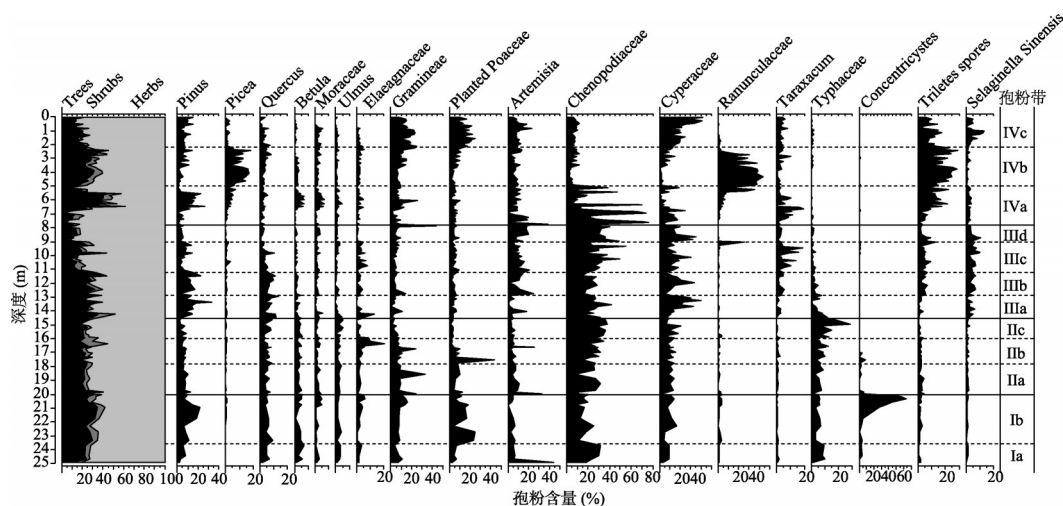


图 1 岩芯孢粉百分含量

Fig. 1 Pollen percentage diagram of the core



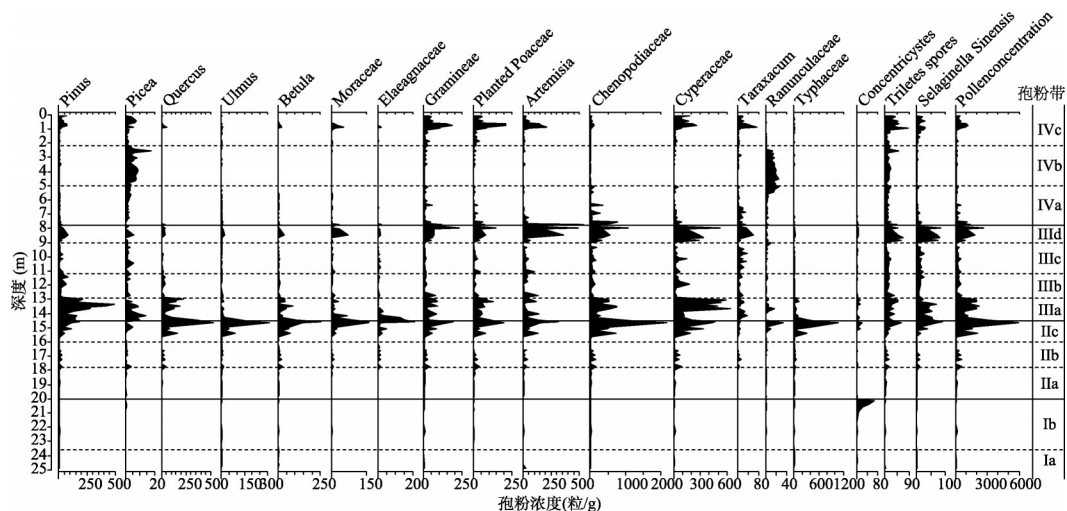


图2 岩芯孢粉浓度

Fig. 2 Pollen concentration diagram of the core

孢粉带Ⅱ出现在岩芯深度20~14.5 m之间,孢粉浓度比孢粉带Ⅰ迅速升高(675粒/g)。本带木本植物花粉较带Ⅰ有所减少,尤其松属花粉含量减少最为明显,而胡颓子科花粉含量增加。草本植物花粉含量有所增加,以藜科、(人工)禾本科、莎草科、香蒲属和蒿属为主,其中(人工)禾本科花粉含量略有减少,其余均不同程度的增加。蕨类孢子和藻类含量较低,其中环纹藻含量较带Ⅰ急剧下降。本带可以划分为Ⅱa、Ⅱb和Ⅱc三个亚带。

亚带Ⅱa(深度20~17.8 m)孢粉浓度较低(67粒/g)。草本植物花粉增加至73%,以藜科(8%~31%)、(人工)禾本科(12%~43%)和蒿属(4%~33%)为主。木本植物花粉仍以松属为主,含量为3%~13%。环纹藻含量急剧下降,平均为2%。

亚带Ⅱb(深度17.8~16 m)孢粉浓度升高至212粒/g。草本植物花粉含量较亚带Ⅱa略有减少,平均含量为71%,其中禾本科和蒿属花粉有所减少,但藜科和香蒲属花粉稍有增加。木本植物花粉含量略有增加,其中胡颓子科花粉增加较多,平均含量为6%;栎属和桦属也有所增加,而松属和桑科花粉含量有所减少。

亚带Ⅱc(深度16~14.5 m)孢粉浓度急剧升高至1715粒/g。木本植物花粉含量继续减少,仍以松属、栎属、桦属、榆属、胡颓子科和桑科等为主。草本植物花粉以藜科、香蒲属和莎草科为主,其中香蒲属(7%~29%)和藜科(30%~38%)花粉增加明显,(人工)禾本科(3%~11%)花粉迅速减少。三缝孢含量减少,中华卷柏增加。

### (3) 孢粉带Ⅲ

孢粉带Ⅲ出现在深度14.5~7.8 m之间,孢粉浓度较带Ⅱ继续升高(829粒/g)。本带木本植物花粉含量(4%~44%)总体上先增多后减少,仍以松属(2%~33%)为主,其次为栎属(1%~14%)和胡颓子科(0~13%)。草本植物花粉依然占绝对优势,以藜科(13%~55%)、莎草科(6%~40%)和(人工)禾本科(2%~50%)为主。三缝孢(1%~13%)和中华卷柏(1%~11%)含量增多。本带可以划分为Ⅲa、Ⅲb、Ⅲc和Ⅲd四个亚带。

亚带Ⅲa(深度14.5~13 m)孢粉浓度较高(1698粒/g)。木本植物花粉含量增加至31%,其中松属花粉增加最为明显,达到14%。草本植物花粉含量有所减少,但依然占

绝对优势。与亚带Ⅱc相比,香蒲属和藜科花粉减少,莎草科、蒿属和(人工)禾本科有不同程度的增加。

亚带Ⅲb(深度13~11.2 m)孢粉浓度迅速降低至468粒/g。木本植物花粉含量变化不大,以松属(3%~23%)和栎属(5%~14%)为主。草本植物中的蒿属和蒲公英属花粉含量有所增加,香蒲属、藜科和莎草科均不同程度的减少。三缝孢和中华卷柏含量继续增加。

亚带Ⅲc(深度11.2~9 m)孢粉浓度继续减少至266粒/g。木本植物花粉含量减少至22%,除胡颓子科含量有所增加外,松属、桦属、桑科和榆属花粉均不同程度的减少。草本植物花粉含量增加,以藜科最为明显,平均含量达30%,毛茛科花粉在本亚带上部9 m处突然增加至25%。

亚带Ⅲd(深度9~7.8 m)孢粉浓度又迅速升高至1103粒/g。木本植物花粉含量减少至整个孢粉带的最低值,平均为11%。草本植物花粉含量继续增加,以藜科(15%~49%)、莎草科(10%~35%)、蒿属(5%~20%)和(人工)禾本科为主,其中(人工)禾本科花粉在本亚带上部7.8 m处突然增加至51%。

#### (4) 孢粉带Ⅳ

孢粉带Ⅳ出现在深度7.8~0 m之间,孢粉浓度变化幅度较大(40~1444粒/g,平均228粒/g)。本带木本植物花粉含量有所增加,达26%,主要有松属(1%~27%)、云杉属(0~18%)、栎属和桑科。草本植物花粉以藜科、(人工)禾本科、蒿属、莎草科和毛茛科为主,其中藜科花粉含量在本带下部明显升高,上部减少;毛茛科花粉在本带中部急剧增多;(人工)禾本科和莎草科在本带上部突然升高。三缝孢含量增加至整个岩芯的最高值,达13%。本带可以划分为Ⅳa、Ⅳb和Ⅳc三个亚带。

亚带Ⅳa(深度7.8~5 m)孢粉浓度为270粒/g。草本植物花粉占据优势,平均含量为75%,以藜科(6%~77%)、(人工)禾本科、蒿属和莎草科为主,毛茛科花粉在本亚带上部逐渐增多。木本植物花粉在本亚带上部开始急剧升高,以松属为主。

亚带Ⅳb(深度5~2.2 m)孢粉浓度下降至81粒/g。木本植物花粉含量较亚带Ⅳa有所减少,其中松属花粉减少最为明显,而云杉属花粉平均含量快速增加至11%。草本植物花粉开始增加,其中毛茛科(1%~44%)花粉增加最为迅速并占据主导地位,(人工)禾本科和莎草科花粉也有所增加,藜科花粉含量迅速减少(多在10%以下)。三缝孢增加也较为迅速。

亚带Ⅳc(深度2.2~0 m)孢粉浓度快速升高至337粒/g。木本植物花粉含量多在20%以下,除松属花粉含量稍有增加之外,其余木本植物花粉均不同程度的减少。草本植物花粉除毛茛科迅速降至2%以下之外,其余均有不同程度的增加,以(人工)禾本科(16%~45%)和莎草科(10%~42%)增加最为明显。中华卷柏含量明显升高,而三缝孢含量有所下降。

## 5 讨论

### 5.1 开封西郊全新世中后期大洪水事件及其与孢粉亚带的关系分析

**5.1.1 大洪水事件反演** 由于冲积地层的沉积旋回是洪水事件造成的,所以根据ZK<sub>jm</sub>岩芯的沉积旋回数日和年代,即可反演全新世以来开封地区的大洪水事件。马建华等<sup>[13]</sup>依据ZK<sub>jm</sub>岩芯粒度特征和黑碳含量垂直变化,自下而上划分出9个完整的沉积旋回,分别是20.5~24 m(旋回1)、17.5~20.5 m(旋回2)、14.5~17.5 m(旋回3)、11.8~14.5 m(旋回

4)、9.8~11.8 m (旋回5)、7.8~9.8 m (旋回6)、4.2~7.8 m (旋回7)、2.5~4.2 m (旋回8) 和0.5~2.5 m (旋回9)。

有关研究<sup>[23-25]</sup>表明, 在4000 a BP前后黄河下游发生了大规模的改道, 改道后的黄河由东流转向北流, 于天津附近入渤海。该次黄泛形成的沉积层可能对应旋回1。据记载<sup>[26]</sup>, 3500-3300 a BP年间, 殷人屡次迁都, 其原因是“水患说”, 期间的黄泛沉积可能对应旋回2。商末西周初期(3100 a BP前后), 全新世大暖期结束, 干旱和洪水频繁发生<sup>[27-30]</sup>, 其沉积层可能对应旋回3。马建华等<sup>[13]</sup>研究表明, 旋回4、旋回5、旋回6、旋回7和旋回8分别是前225年、1387年、1461年、1642年和1841年黄河泛滥形成的沉积层, 旋回9是20世纪60年代“引黄压砂”形成的沉积层。

**5.1.2 大洪水事件与孢粉亚带的关系** 对比ZK<sub>jm</sub>岩芯所反映的洪水事件(沉积旋回)和孢粉亚带(图3)可以发现, 深度23.6 m以上的地层, 除旋回6和孢粉亚带Ⅲc、旋回8和孢粉亚带Ⅳb的下界差别稍大(相差约80 cm)外, 其他旋回基本上都有与之对应的孢粉亚带, 且其上下界限的吻合度很高。例如, 孢粉亚带Ⅰb的范围大致与旋回1的界限一致, 亚带Ⅱa的范围大致与旋回2的界限一致, 亚带Ⅱb和Ⅱc的范围大致与旋回3的界限一致, 亚带Ⅲa和Ⅲb的范围大致与旋回4的界限一致, 亚带Ⅲc的范围大致与旋回5的界限一致, 亚带Ⅳa的范围大致与旋回7的界限一致, 亚带Ⅳb的范围大致与旋回8的界限一致, 亚带Ⅳc的范围大致与旋回9的界限一致。这种情况表明, ZK<sub>jm</sub>岩芯的孢粉含量及其组合特征与全新世中后期大洪水事件存在某种对应关系, 孢粉含量及其组合特征在某种程度上可以指示大洪水事件。

从图3还可以看出, ZK<sub>jm</sub>岩芯孢粉亚带的数目多于沉积旋回数, 如旋回3包括孢粉亚带Ⅱb和Ⅱc, 旋回4包括孢粉亚带Ⅲa和Ⅲb。这些孢粉亚带的形成可能是由于地层粒度指标未能识别出的规模较小的洪水造成的。较小的洪水水动力条件弱, 沉积物粒径较小且分选不明显, 再加上后期人为扰动, 很难划分出粒度旋回。然而每次洪水事件发生时气候条件、季节等的不同, 可导致冲积物花粉种类和数量出现差异, 从而划分出了孢粉亚带。另外, 有些黄河泛滥历时较长, 期间因季节变化、洪水流路和波及范围多变等原因, 导致一次洪水事件可能出现多个短期洪水间歇期。在洪水间歇期间, 沉积下来的孢粉更多的反映了开封当地的植物种类组成, 与洪水泛滥期间从中上游带来的孢粉类型必然存在一定差别。因此, 有些孢粉亚带可能并不指示某次特定的大洪水事件。

## 5.2 泛滥沉积期和间断期孢粉特征差异分析

### 5.2.1 泛滥沉积期和间断期木本植物花粉含量

ZK<sub>jm</sub>岩芯沉积期和间断期孢粉组合中的木本植物花粉含量变化最为明显(图1)。将岩芯沉积期和间断期的木本植物花粉平均含量进行对比(图

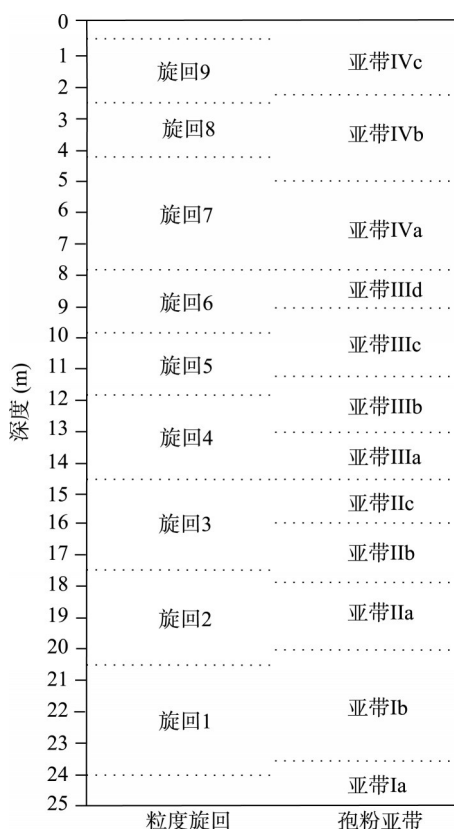


图3 岩芯沉积旋回和孢粉带的比较

Fig. 3 Comparison of sedimentary cycles and pollen zones of the core

4) 可以发现,除旋回3和旋回7以外,黄泛沉积期木本植物(主要为松属)花粉含量都高于其间断期,虽然彼此差别并不显著( $P > 0.05$ ),但也反映了沉积期和间断期木本植物花粉存在一定差异。研究发现<sup>[31-32]</sup>,花粉比重小于泥沙沉积物,在流水中主要以悬移质的形式被搬运。洪水发生时,流域内大量花粉随水流汇集至主河道,并在搬运过程中发生分选作用,体积较小的草本植物花粉(藜科、蒿属和菊科等)大多随泥沙颗粒在中上游河床沉积下来<sup>[32-34]</sup>;松属等体积较大的木本植物花粉由于悬浮能力较强被洪水携带至下游,在洪水流速较低时沉积到河漫滩上或泛滥相地层中<sup>[33-35]</sup>。洪水过后,在黄泛沉积物之上发育成古地面或文化层,其下部的花粉主要来自开封上游流域,上部的花粉主要是当地植物花粉或由风力搬运而来的周围地区的花粉。与河流搬运相比,花粉在风力搬运过程中的分选作用并不明显<sup>[34, 36]</sup>。沉积间断期间虽然也有洪水搬运来的花粉成分(木本植物花粉),但后来又加入了更多当地植被的花粉,尤其是草本植物花粉,它们冲淡了从远处搬运来的木本植物花粉浓度,使得沉积期的木本植物花粉含量高于沉积间断期。另一方面,全新世中后期以来,该区域人类活动逐渐增强,人为的毁林开荒等活动使得沉积间断期的木本植物花粉含量减少,使沉积期和间断期木本植物花粉含量差别进一步加大。

值得注意的是,旋回3和旋回7沉积间断期木本植物花粉含量高于沉积期(图4),这可能与当时的气候条件、人类活动、沉积间断时间长短等因素有关。旋回3沉积期正值全新世大暖期结束,较为冷干的气候导致开封及其中上游地区木本植物减少;此时正处于商周时期,居住在黄河流域先民的农业生产等活动使得木本植物进一步减少<sup>[26-27]</sup>。沉积间断期大致经历了西周早期暖期(3000-2850 a BP)、西周中晚期冷期(2850-2700 a BP)、春秋暖期(2700-2400 a BP)和战国温凉期(2400-2200 a BP),气候总体上较为适宜<sup>[26]</sup>,沉积间断时间较长,开封及其周边地区木本植物花粉通过风力搬运等作用沉积下来。

研究表明,1440s-1450s是明朝气候转干的起点<sup>[26, 37-38]</sup>,其中1637-1643年间的连旱事件是中国过去2000年间最为严重的持续性旱灾,史称“崇祯大旱”<sup>[26, 39]</sup>。干旱期间,木本植物花粉急剧减少,尤其是藜科等草本植物花粉的迅速增加,在很大程度上冲淡了木本植物花粉含量;明朝以来中国人口急剧增长,对土地需求增多,黄河中上游地区大规模的毁林开荒等活动也使得木本植物花粉含量减少。因此,旋回7沉积期木本植物花粉含量显著减少。

**5.2.2 泛滥沉积期和间断期人工禾本科花粉含量** 人工禾本科花粉是识别人类活动尤其是农业活动的重要指标。研究表明<sup>[22, 34, 40]</sup>,人工禾本科花粉产量低、传播能力弱、传播范围小,常具有低代表性,因此地层中只要出现少量的人工禾本科花粉就可以认为周围有农田存在。从图5可见,除旋回4和旋回7之外,其余旋回间断期的人工禾本科花粉含量均不同程度地高于沉积期。

沉积间断期间,除少量外源性人工禾本科花粉沉积外,更多的是开封当地的农业生

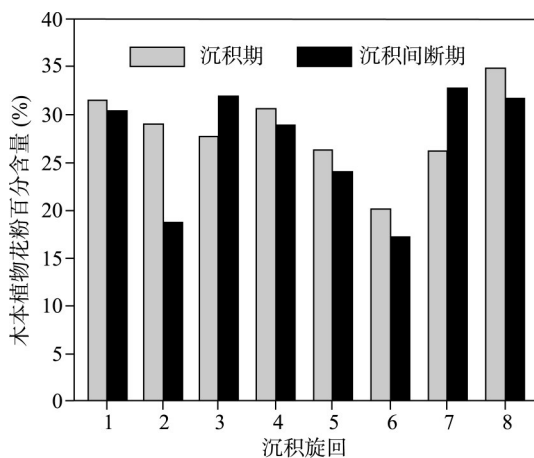


图4 沉积期和间断期木本植物花粉平均百分含量

Fig. 4 Comparison of average woody pollen percentage between flood deposition and hiatus period



产遗存的人工禾本科花粉<sup>[41-42]</sup>, 导致其含量高于沉积期, 因此, 人工禾本科花粉含量在一定程度上可以识别沉积间断。旋回4沉积间断期是战国地面, 岩芯位于战国大梁城内<sup>[43]</sup>, 周围应该没有农田存在, 故其人工禾本科花粉含量少于沉积期。旋回7沉积间断期发生了“崇祯大旱”事件, 河南省作为重灾区连旱达7年之多<sup>[26]</sup>, 农作物生长受到极大的影响, 故其人工禾本科花粉也减少。

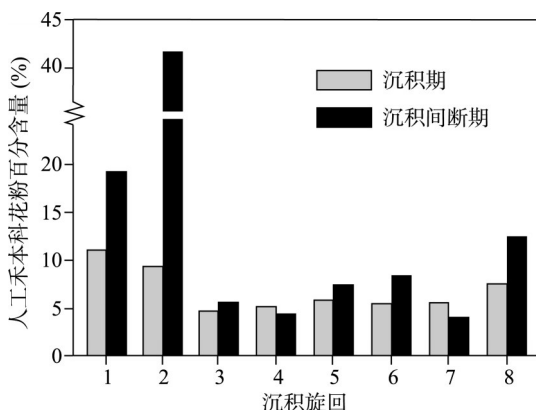


图5 沉积期和沉积间断期人工禾本科花粉平均百分含量的比较

Fig. 5 Comparison of average Planted Poaceae percentage between flood deposition and hiatus period

## 6 结论

通过对开封市西郊ZK<sub>m</sub> 25 m岩芯样品的孢粉分析, 结合沉积旋回和历史文献资料, 对全新世中后期大洪水事件的孢粉记录进行了研究, 得出如下主要结论:

(1) 岩芯的每个沉积旋回基本上都有与之对应的孢粉亚带, 且其上下界的吻合度较高, 表明孢粉可以作为划分沉积旋回的代用指标。

(2) 岩芯孢粉亚带的数目(12个)多于粒度旋回数(9个), 孢粉组合特征可以识别出规模较小的洪水或者一次洪水事件出现的多个短期洪水间歇期所形成的沉积, 表明在黄泛地层沉积旋回的划分上, 孢粉指标的精度稍高于粒度指标。

(3) 由于受花粉分选作用、花粉源范围和人类活动的综合影响, 泛滥沉积期木本植物花粉含量高于沉积间断期, 而人工禾本科花粉含量低于沉积间断期。

(4) 孢粉作为一个沉积旋回的代用指标, 具有一定的间接性, 与洪水泛滥期和间断期的关系很难完全对应, 但指示大洪水事件是没有问题的。另外, 本研究的有效测年数据较少, 一些旋回的形成时间是根据文献资料和地层沉积顺序推定的。今后应在研究区开展更多点位的岩芯孢粉研究, 获得更多的测年数据, 运用多种环境指标相互印证, 为黄泛冲积物大洪水事件的孢粉学研究提供更为精确的资料。

## 参考文献(References)

- [1] Li Runtian, Ding Shengyan, Li Zhiheng. The historical evolution of Kaifeng City under the influence of the Yellow River. *Areal Research and Development*, 2006, 25(6): 1-7. [李润田, 丁圣彦, 李志恒. 黄河影响下开封城市的历史演变. *地域研究与开发*, 2006, 25(6): 1-7.]
- [2] Cheng Suiying. The Yellow River's passes and flooding in Kaifeng district in the 12th century. *Journal of Henan University (Social Science)*, 2003, 43(6): 32-36. [程遂营. 12世纪前后黄河在开封地区的安流与泛滥. *河南大学学报(社会科学版)*, 2003, 43(6): 32-36.]
- [3] Liu Chunying. *Uncovering Ancient Cities Built in Different Dynasties under Kaifeng City*. Beijing: Science Press, 2009. [刘春迎. *揭秘开封城下城*. 北京: 科学出版社, 2009.]
- [4] Xu Qinghai, Li Runlan, Zhu Feng, et al. Pollen sedimentary facies of fluvial sediments on North China Plain. *Journal of Palaeogeography*, 2001, 3(2): 55-63. [许清海, 李润兰, 朱峰, 等. 华北平原冲积物孢粉沉积相研究. *古地理学报*, 2001, 3(2): 55-63.]
- [5] Chen Fahu, Cheng Bo, Zhao Yan, et al. Holocene environmental change inferred from a high-resolution pollen record, Lake Zhuyeze, arid China. *The Holocene*, 2006, 16(5): 675-684.
- [6] Hayashi R, Takahara H, Hayashida A, et al. Millennial-scale vegetation changes during the last 40000 yr based on a pollen record from Lake Biwa, Japan. *Quaternary Research*, 2010, 74(1): 91-99.

- [7] Zhao Yan, Chen Fahu, Zhou Aifeng, et al. Vegetation history, climate change and human activities over the last 6200 years on the Liupan Mountains in the southwestern Loess Plateau in central China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2010, 293(1): 197-205.
- [8] Zhu Cheng, Ma Chunmei, Yu Shiyong, et al. A detailed pollen record of vegetation and climate changes in Central China during the past 16 000 years. *Boreas*, 2010, 39(1): 69-76.
- [9] Li Jie, Zheng Zhuo, Huang Kangyou, et al. Vegetation changes during the past 40,000 years in Central China from a long fossil record. *Quaternary International*, 2013, 310(11): 221-226.
- [10] Sun Aizhi, Feng Zhaodong, Ran Min, et al. Pollen-recorded bioclimatic variations of the last ~22,600 years retrieved from Achit Nuur core in the western Mongolian Plateau. *Quaternary International*, 2013, 311: 36-43.
- [11] Njokuocha R C, Akaegbobi I M. A contribution to the Holocene vegetation history of Nigeria: Pollen from Ohe Pond Nsukka, southeastern Nigeria. *Quaternary International*, 2014, 338: 28-34.
- [12] Mazzini I, Gliozzi E, Koci R, et al. Historical evolution and Middle to Late Holocene environmental changes in Lake Shkodra (Albania): New evidences from micropaleontological analysis. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2015, 419: 47-59.
- [13] Ma Jianhua, Lu Jing, Gu Lei, et al. Black carbon as an indicator for dividing sedimentary cycle from the Yellow River flood sediments in Kaifeng. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(5): 730-738. [马建华, 陆静, 谷蕾, 等. 黑碳在开封古城黄泛地层沉积旋回划分中的指示意义. *地理学报*, 2015, 70(5): 730-738.]
- [14] Xu Qinghai, Yang Xiaolan. Ancient vegetation interpreted by alluvial pollen at northern mountain area of Hebei province. *Scientia Geographica Sinica*, 1998, 18(5): 486-491. [许青海, 阳小兰. 根据冲积物花粉恢复冀北山地古植被的意义. *地理科学*, 1998, 18(5): 486-491.]
- [15] Kong Zhaochen, Xu Qinghai, Yang Xiaolan, et al. Spatial and temporal Holocene vegetation change from alluvium pollen analysis in the Yinma River basin of Hebei province. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(6): 724-730. [孔昭宸, 许青海, 阳小兰, 等. 河北卢龙饮马河流域全新世冲积物孢粉分析及对全新世植被时空变化的初步探讨. *植物生态学报*, 2000, 24(6): 724-730.]
- [16] Wang Hongya, Shi Yuanchun, Yu Pengtao, et al. Alluviums of the early and middle Holocene in the Quzhou area, the southern Hebei plain and palaeoenvironment inferences. *Quaternary Science*, 2002, 22(4): 381-393. [王红亚, 石元春, 于澎涛, 等. 河北平原南部曲周地区早、中全新世冲积物的分析及古环境状况的推测. *第四纪研究*, 2002, 22(4): 381-393.]
- [17] Work P T, Semken H A, Baker R G. Pollen, plant macrofossils and microvertebrates from mid-Holocene alluvium in east-central Iowa, USA: Comparative taphonomy and paleoecology. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2005, 223(3): 204-221.
- [18] Li Yu, Wang Nai'ang, Li Zhuolun, et al. Holocene palynological records and their responses to the controversies of climate system in the Shiyang River drainage basin. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(2): 161-173. [李育, 王乃昂, 李卓仑, 等. 石羊河流域全新世孢粉记录及其对气候系统响应争论的启示. *科学通报*, 2011, 56(2): 161-173.]
- [19] Li Yu, Wang Yue, Zhang Chengqi, et al. Changes of sedimentary facies and Holocene environments in the middle reaches of inland rivers, arid China: A case study of the Shiyang River. *Geographical Research*, 2014, 33(10): 1866-1880. [李育, 王岳, 张成琦, 等. 干旱区内陆河流域中游地区全新世沉积相变与环境变化: 以石羊河流域为例. *地理研究*, 2014, 33(10): 1866-1880.]
- [20] Faegri K, Iversen J. *Textbook of Pollen Analysis*. 4th ed. London: John Wiley and Sons, 1989.
- [21] Zhou Kunshu. Environmental archeology in Beijing. *Quaternary Sciences*, 1989(1): 184-194. [周昆叔. 北京环境考古. *第四纪研究*, 1989(1): 184-194.]
- [22] Xu Qinghai, Cao Xianrong, Wang Xueli, et al. Generation of YinXu culture: Environmental background and impacts of human activities. *Quaternary Sciences*, 2010, 30(2): 273-286. [许青海, 曹现勇, 王学丽, 等. 殷墟文化发生的环境背景及人类活动的影响. *第四纪研究*, 2010, 30(2): 273-286.]
- [23] Wang Qing. The historic context of water-control project of Dayu: No.1 of a series investigation on the legend ear of ancient Chinese history. *Cultural Relics of Central China*, 1999(1): 32-42. [王清. 大禹治水的地理背景. *中原文物*, 1999(1): 32-42.]
- [24] Wu Wenxiang, Ge Quansheng. The possibility of occurring of the extraordinary floods on the eve of establishment of the Xia Dynasty and the historical truth of Dayu's successful regulating of floodwaters. *Quaternary Sciences*, 2005, 25(6): 741-749. [吴文祥, 葛全胜. 夏朝前夕洪水发生的可能性及大禹治水真相. *第四纪研究*, 2005, 25(6): 741-749.]
- [25] Zhang Junna, Xia Zhengkai. Deposition evidences of the 4 ka BP flood events in Central China Plains. *Acta*

- Geographica Sinica, 2011, 66(5): 685-697. [张俊娜, 夏正楷. 中原地区 4 ka BP 前后异常洪水事件的沉积证据. 地理学报, 2011, 66(5): 685-697.]
- [26] Ge Quansheng. Climate Change in Chinese Dynasties. Beijing: Science Press, 2011. [葛全胜. 中国历朝气候变化. 北京: 科学出版社, 2011.]
- [27] Huang Chunchang, Pang Jiangli, Su Hongxia, et al. Holocene environmental change inferred from the loess-palaeosol sequences adjacent to the floodplain of the Yellow River, China. Quaternary Science Reviews, 2009, 28(25): 2633-2646.
- [28] Huang Chunchang, Pang Jiangli, Zha Xiaochun, et al. Holocene palaeoflood events recorded by slackwater deposits along the lower Jinghe River valley, middle Yellow River Basin, China. Journal of Quaternary Science, 2012, 27(5): 485-493.
- [29] Huang Chunchang, Li Xiaogang, Pang Jiangli, et al. Palaeoflood sedimentological and hydrological studies in the Yongheguan reach in the middle reaches of the Yellow River. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(11): 1494-1504. [黄春长, 李晓刚, 庞奖励, 等. 黄河永和关段全新世古洪水研究. 地理学报, 2012, 67(11): 1494-1504.]
- [30] Ma Yugai, Huang Chunchang, Zhou Yali, et al. OSL dating of the Holocene paleoflood events in the Jixian reach along the middle Yellow River. Quaternary Sciences, 2014, 34(2): 372-380. [马玉改, 黄春长, 周亚利, 等. 黄河中游吉县段全新世古洪水滞流沉积物光释光测年研究. 第四纪研究, 2014, 34(2): 372-380.]
- [31] Brush G S, Brush L M. Transport of pollen in a sediment-laden channel: A laboratory study. American Journal of Science, 1972, 272(4): 359-381.
- [32] Hall S A. Pollen analysis and paleoecology of alluvium. Quaternary Research, 1989, 31(3): 435-438.
- [33] Zhu Yan, Chen Fahu, Zhang Jiawu, et al. Effects of depositional environment on pollen assemblages: A case study in the Shiyang River Basin. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 19(2): 186-191. [朱艳, 陈发虎, 张家武, 等. 沉积环境对孢粉组合影响的探讨: 以石羊河流域为例. 沉积学报, 2001, 19(2): 186-191.]
- [34] Liu Yaoliang, Xu Qinghai, Li Manyue, et al. Holocene pollen record of the Sanyangzhuang site in Neihuang County, Henan province. Quaternary Sciences, 2013, 33(3): 536-544. [刘耀亮, 许清海, 李曼玥, 等. 河南省内黄县三杨庄全新世以来的孢粉学记录. 第四纪研究, 2013, 33(3): 536-544.]
- [35] Xu Qinghai, Yang Zhenjing, Yang Xiaolan, et al. Vegetation in the Luanhe River Basin and surrounding areas. Acta Phytocologica Sinica, 2005, 29(3): 444-456. [许清海, 杨振京, 阳小兰, 等. 滦河流域及周边地区花粉与植被关系的研究. 植物生态学报, 2005, 29(3): 444-456.]
- [36] Xu Qinghai, Li Manyue, Zhang Shengrui, et al. Modern pollen processes of China: Progress and problems. Science China Earth Sciences, 2015, 45(11): 1661-1682. [许清海, 李曼玥, 张生瑞, 等. 中国第四纪花粉现代过程: 进展与问题. 中国科学: 地球科学, 2015, 45(11): 1661-1682.]
- [37] Zhang Meiliang, Yuan Daoxian, Lin Yushi, et al. A 6000-year high-resolution climatic record from a stalagmite in Xiangshui Cave, Guilin, China. The Holocene, 2004, 14(5): 697-702.
- [38] Peng Youbing, Xu Ying. A modeling study on drought and flood events of the last 530 years in East China. Quaternary Sciences, 2009, 29(6): 1095-1103. [彭友兵, 徐影. 过去 530 年中国东部旱涝事件模拟研究初探. 第四纪研究, 2009, 29(6): 1095-1103.]
- [39] Zhang De'er. Severe drought events as revealed in the climate records of China and their temperature situations over the last 1000 years. Acta Meteorologica Sinica, 2005, 19(4): 485-491.
- [40] Zhang Zhenqing, Xu Qinghai, Li Yuecong, et al. Environmental changes of Yin Ruins area based on pollen analysis. Quaternary Sciences, 2007, 27(3): 461-468. [张振卿, 许清海, 李月丛, 等. 殷墟地区土壤剖面孢粉组合特征及环境意义. 第四纪研究, 2007, 27(3): 461-468.]
- [41] Wei Jiyin. The discussion between climatic change and the formation of central position of the centre China civilization. Cultural Relics of Central China, 2011(5): 15-24. [魏继印. 论气候变迁与中原文明中心地位的形成. 中原文物, 2011(5): 15-24.]
- [42] Liu Chunying. Archaeological research on "Laoqiu", the capital of Xia Dynasty: Confirmation from Erlitou Culture have been found in Kaifeng area. Cultural Relics of Central China, 2014, (3): 18-23. [刘春迎. 夏都“老丘”考: 从开封地区已经发现的二里头文化遗存中求证. 中原文物, 2014(3): 18-23.]
- [43] Ge Qifeng. A new probe on the plane layout of Daliang city of Wei State of the Warring State Period. Cultural Relics of Central China, 2012(4): 27-33. [葛奇峰. 战国魏大梁城平面布局新探. 中原文物, 2012(4): 27-33.]

## The middle and late Holocene pollen record from the Yellow River flooding sedimentary sequence in the western suburbs of Kaifeng City, China

LIU Dexin<sup>1</sup>, MA Jianhua<sup>1,2</sup>, GU Lei<sup>1</sup>, CHEN Yanfang<sup>1</sup>

(1. Institute of Natural Resources and Environment, Henan University, Kaifeng 475004, Henan, China;

2. Collaborative Innovation Center on Yellow River Civilization of Henan Province, Kaifeng 475001, Henan, China)

**Abstract:** The flooding of the Yellow River has occurred many times near Kaifeng City and formed a relatively complete sedimentary sequence, which provide a rare research carrier for the exploration of the stratigraphic evidence on flood events and its pollen records in the vicinity of Kaifeng. In this research, a 25-m long core was obtained from Jinming campus of Henan University (ZK<sub>jm</sub>), which is located in the western suburbs of Kaifeng, Henan Province, China. On the basis of detailed pollen analysis, along with color identification, AMS<sup>14</sup>C dates, grain size and historical documents, sedimentary cycles in the study area were identified, and flood events and their pollen records were revealed since the middle and late Holocene. The results are as follows: According to the sand-clay ratio of grain size in the study area, ZK<sub>jm</sub> core can be divided into nine sedimentary cycles from bottom to top, and can roughly record eight large flood events. The difference between pollen assemblages is that the percentage of arboreal pollen in flood deposition period is higher than that in neighboring hiatus period, while the percentage of planted Poaceae is lower in ZK<sub>jm</sub> core. Except individual strata, the boundaries of sedimentary cycle are mainly consistent with the pollen subzones, suggesting pollen can be used as a reference indicator for dividing sedimentary cycles of strata. Notably, sedimentary cycles formed by smaller flood or plurality of intermittent short-term floods within one flood can be identified by pollen index. Therefore, the number of pollen subzones (12) is more than that of sedimentary cycles (9), indicating the accuracy of the cycle division of some intermittent pollen indexes is slightly higher than that of granularity. Due to seasonal changes, the variability of the flowing path of floods and the geographic scope, some floods of the Yellow River that lasted longer may have multiple intermittent short-term floods. However, the local pollen of Kaifeng City mainly deposited during the intermittent floods, which is different from the upper reaches of the Yellow River. Consequently, a pollen subzone may not indicate a specific flood event.

**Keywords:** flooding of the Yellow River; sedimentary cycle; middle and late Holocene; pollen; flood; Kaifeng