

白洋淀地区晚冰期以来的气候和环境演变

王 娜¹, 许清海^{1,2}, 张生瑞^{1,2}, 阳小兰³, 王丹丹¹, 孙沅浩⁴, 王 涛⁴

(1. 河北师范大学地理科学学院, 石家庄 050024; 2. 河北省环境演变与生态建设重点实验室, 石家庄 050024; 3. 河北省科学院地理科学研究所, 石家庄 050011; 4. 兰州大学资源环境学院, 兰州 730000)

摘要: 华北平原晚冰期以来气候环境演变研究对该地区社会发展、灾害风险评估和科学应对未来全球增温背景下极端降水和洪涝事件具有重要意义。本文以华北平原中部白洋淀地区高阳剖面(BG-2019)为研究对象,通过高精度 AMS¹⁴C、OSL 定年技术和高分辨率孢粉组合、粒度组分分析,恢复和重建了白洋淀地区晚冰期以来(距今 13710 a—今)区域植被演替和气候环境变化历史。结果显示:BG-2019剖面在距今 10270~13710 a 和距今 4630~5400 a 发育湖相沉积,距今 3470~3700 a 发育沼泽相沉积;距今 7130~8000 a 发育河流—入湖三角洲相沉积,距今 3700~4630 a 和距今 3230~3470 a 发育河流相沉积;距今 8000~10270 a 和距今 5400~7130 a 存在明显的沉积间断/地层缺失;表明采样剖面所在位置缺乏连续的湖相地层。晚冰期白洋淀为局地小湖沼;中全新世湖沼较发育、范围广,但也不是连续广袤的湖相沉积;晚全新世湖泊范围收缩。晚冰期和全新世白洋淀流域植被景观存在显著差异;晚冰期气候寒冷干燥,平原发育以蒿属、藜亚科、禾本科和菊科等为主的草地,周围山地森林覆盖度低;中全新世气候温暖湿润,平原大部仍发育以蒿属、藜亚科和禾本科为主的草地,湖区水蕨和水生植物繁盛,周围山地生长松属、栎属为主的针阔混交林,森林覆盖度增高;晚全新世气候温和偏干,平原仍是以蒿属、藜亚科和禾本科等为主的草地,西部山地生长以松属为主的针阔混交林,森林覆盖度较高。

关键词: 白洋淀;晚冰期;全新世;古植被;古气候

DOI: 10.11821/dlxb202205011

1 引言

华北平原是中国政治、经济、人口和文化的核心区之一。地貌上地处燕山和太行山的山前,属典型的冲积洪积平原^[1],易受极端降水和洪涝灾害的影响。因此,开展华北平原地质历史时期气候环境演变研究,揭示不同时期季风降水变化幅度和洪涝事件的发生概率,有望为科学应对未来全球增温背景下极端降水和洪涝事件提供科学参考,并为华北地区社会生产建设和灾害风险评估提供重要启示。

白洋淀是华北平原腹地最大的淡水湖泊^[2],具有开展地质时期气候环境变化研究的潜力^[3-5]。20 世纪 80 年代起,国内学者围绕白洋淀气候环境演变开展了大量研究,大致可划

收稿日期: 2021-06-27; 修订日期: 2022-04-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(41630753, 41702184, 41501048); 中国国家基金委和瑞典皇家教育基金会国际合作项目(41611130050); 河北省环境演变与生态建设重点实验室和河北省重点学科基金项目 [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41630753, No.41702184, No.41501048; International Cooperation Program between the National Natural Foundation of China and the Royal Swedish Educational Foundation, No.41611130050; The Hebei Key Laboratory of Environmental Change and Ecological Construction and Key Discipline Fund Project in Hebei Province]

作者简介: 王娜(1996-), 女, 山西大同人, 硕士生, 自然地理学专业。E-mail: wnangnaw@163.com

通讯作者: 许清海(1951-), 男, 河北石家庄人, 教授, 主要从事全球变化与第四纪孢粉学研究。

E-mail: xuqinghai@hebtu.edu.cn

分为两个主要阶段：20世纪80—90年代，基于地貌学、沉积学和古生物学证据，揭示了白洋淀的成因^[2, 6-9]、全新世湖淀范围变化^[10]和全新世气候环境变化^[11]；认为白洋淀属扇间和扇缘低湿洼地^[9-10]，全新世以来白洋淀经历了兴起（早全新世）—扩张（中全新世）—收缩（晚全新世）3个阶段^[10]（扩张期白洋淀范围东起文安洼、西至保定、南至饶阳、北至雄县，面积约为现代白洋淀的30倍），气候也经历了偏凉偏干—温暖湿润—温凉偏干的变化过程^[11]。2000年以来，随着测年技术的提高和代用指标的丰富，开展了一系列高分辨率沉积记录研究（如老河口剖面^[12]、同口镇剖面^[3]和东垒头剖面^[5]等）；基于大量测年数据和多指标综合分析，将全新世白洋淀气候划分为寒冷干燥—温暖偏湿—温暖湿润—温暖偏湿—变凉变干等阶段^[5, 12]，并辨识了全新世期间出现的一系列千年—百年尺度气候突变事件。然而已有研究存在两方面问题：① 受研究材料和技术手段限制，早期研究缺乏精确年代控制，且样品分辨率低^[11]，仅能提供区域气候环境演变的基本框架，对短时间尺度气候环境波动认识不足。② 部分研究在建立沉积剖面年代序列时，测年数据少，或仅采用单一测年方法^[3, 5, 12]，未考虑沉积相变或沉积间断的影响^[5, 12]；同时，关于环境代用指标的解译未能充分考虑沉积物搬运动力和物质来源的影响；导致区域气候环境重建结果存在不确定性。

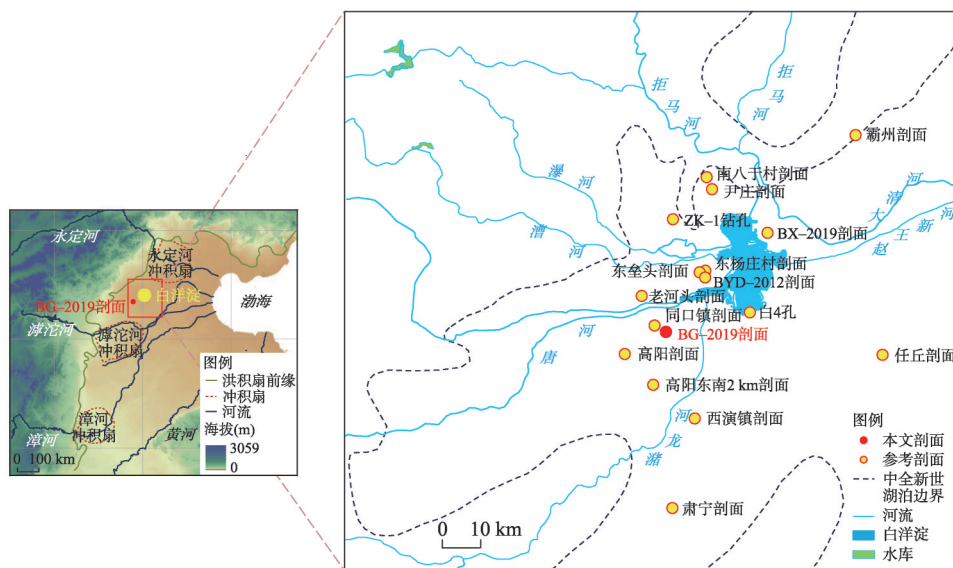
白洋淀受山前冲洪积扇发育、河流洪水期泛滥影响^[9]，其地层沉积特征较为复杂。目前有关白洋淀地区湖相沉积存在争议，王会昌^[10]认为距今2500~7500 a为湖淀极度扩张期，湖相沉积稳定而广泛；而朱宣清等^[9]根据地质、历史资料研究了白洋淀的生成、发展、缩小和干涸的演变过程，认为全新世至北宋以前白洋淀区域无广阔、稳定、常年积水的湖淀环境。因此，中全新世是否存在连续广袤的白洋淀尚有争议。此外，关于不同时期华北平原腹地植被景观也存有争议：孙湘君等^[13]、Ni等^[14]和Tian等^[15]认为末次冰盛期和中全新世华北平原腹地分别发育典型草原和落叶阔叶林；李曼玥等^[16]认为受地貌景观影响，末次冰盛期和中全新世华北平原腹地始终发育以蒿属、藜科和禾本科为主的草地植被，森林面积相对较小；而Leroy等^[17]基于地层孢粉数据和数值模型结果认为，末次冰盛期华北平原可能生长森林植被。因此，有必要深入开展华北平原不同时期植被景观格局研究。

解决上述问题的关键是选择有精确年代控制且样品分辨率高的地层沉积记录开展气候环境演化研究。在大量野外考察工作的基础上，本文选取高阳县北15 km处出露良好、沉积较厚的自然剖面（剖面位于现代白洋淀西南10 km内，历史时期曾与现代白洋淀连为一体）为研究对象，拟通过高精度AMS¹⁴C和OSL定年，结合高分辨率孢粉组合和粒度组分分析，恢复和重建白洋淀地区晚冰期以来区域植被演替和气候环境变化历史。在此基础上，明确白洋淀地区沉积环境特征和沉积序列发育过程，探讨白洋淀发育演化过程，比较不同时期白洋淀流域植被景观组成差异。

2 区域概况

白洋淀（38°43'N~39°02'N，115°38'E~116°07'E）地处华北平原中部（图1），位于太行山东麓永定河冲积扇和滹沱河冲积扇之间的低洼地区^[9]，由白洋淀、烧车淀、马棚淀、藻荇淀^[10]等143个大小不一的淀泊组成，接受白沟引河、潞龙河、唐河、漕河和拒马河等河流补给。湖区面积366 km²^[6]，流域面积32200 km²^[18]。

白洋淀地区属暖温带大陆性季风气候区，年均气温12.1℃，1月平均气温-4.6℃，7月平均气温26.8℃；降水量525 mm，最大年降水量865 mm（1977年），最小年降水量263 mm（1962年），7—9月降水量约占年降水量的80%^[19]。



注: 根据文献[10, 22]改绘; 影像底图来源: <http://www.gscloud.cn/sources/accessdata/305?pid=302>。

图1 白洋淀地理位置图

Fig. 1 Location of Baiyangdian Lake

白洋淀流域现代陆地植被主要包括3类: ① 流域上游山区次生或人类干扰后的森林植被油松 (*Pinus tabulaeformis*)、华北落叶松 (*Larix principis-rupprechtii*)、山杨 (*Populus davidiana*)、白桦 (*Betula platyphylla*) 和栎属 (*Quercus*) 等^[20]; ② 平原区人工种植的杨属 (*Populus*)、柳属 (*Salix*)、槐属 (*Styphnolobium*)、榆属 (*Ulmus*) 和臭椿属 (*Ailanthus*) 等乔木^[21]和人工栽培的小麦 (*Triticum aestivum*)、玉米 (*Zea mays*)、大豆 (*Glycine max*)、苹果 (*Malus domestica*) 和核桃 (*Juglans regia*) 等经济作物; ③ 白洋淀内广泛生长的芦苇 (*Phragmites australis*)、香蒲 (*Typha orientalis*) 和莲 (*Nelumbo nucifera*) 等水生植物^[2]。

3 材料与方法

3.1 野外工作

2019年4月, 在高阳县北15 km处 (38°46'2.55"N, 115°49'0.41"E、海拔7 m) 选择一出露良好的自然剖面为研究对象开展相关工作, 命名为BG-2019。BG-2019剖面厚6 m, 深0.4~6.0 m为自然沉积层, 按2 cm间距采集指标样品, 深0.0~0.4 m为耕作层, 按10 cm间距采集指标样品, 共获得指标样品283个; 年代样品采集时考虑了沉积相的变化, 获得光释光 (OSL) 年代样品6个、AMS ¹⁴C样品6个。

3.2 年代测定

选取BG-2019剖面AMS ¹⁴C年代有机质样品, 由美国Beta Analytic Inc.完成实验处理和测试工作, 获得的¹⁴C年龄采用IntCal 20校正数据集^[23]在Calib 8.2程序^[24]中转换为日历年。选取BG-2019剖面OSL年代样品沉积物石英颗粒, 由中国地质科学院水文地质环境地质研究所光释光年代实验室完成相关实验处理和测试工作, 获得的年龄采用Fleming法^[25]进行校正; 并将所有OSL年龄调整为距1950年, 与校正的¹⁴C年龄相统一。考虑到沉积相变化可能存在沉积间断, 故对不同沉积相的顶底板进行年代测试。

3.3 粒度分析

粒度分析采用激光衍射法^[26], 每个样品取干重 0.5 g。利用盐酸和过氧化氢去除样品中的碳酸盐和有机质后, 加入适量六偏磷酸钠溶液使样品充分分散, 而后在 Malvern Mastersizer 3000 型激光粒度仪上进行测试。

3.4 孢粉分析

孢粉实验处理采用常规盐酸—氢氧化钠—氢氟酸处理法^[27], 每个样品取干重 150 g。实验处理前每个样品加入一粒现代石松孢子片 (含石松孢子 27637±563 粒), 以计算孢粉浓度。孢粉鉴定和统计在 Olympus BX51 光学生物显微镜下进行, 主要参考《中国植物花粉形态》^[28]和《中国第四纪孢粉图鉴》^[29]。孢粉数据处理在 Excel 软件中进行, 陆生植物花粉百分比以所统计的陆生植物花粉总数为基数计算, 水生和蕨类植物科属百分比以统计的陆生植物花粉总数与水生、蕨类植物孢粉数之和为基数计算; 孢粉图谱采用 Tilia 2.6.1 软件绘制^[30]。

4 研究结果

4.1 地层年代

按地层沉积相变化, BG-2019 剖面自下而上可划分为 7 个深度层序: 4.46~6.0 m, 深灰色/黑色粉砂—粉砂质黏土层, 见水平层理 (图 2); 3.46~4.46 m, 粉砂质砂—砂质粉砂层; 2.48~3.46 m, 黑色粉砂—粉砂质黏土层, 水平层理发育; 1.26~2.48 m, 砂质粉砂—粉砂层; 0.94~1.26 m, 灰色粉砂—粉砂质黏土层; 0.6~0.94 m, 粉砂—砂质粉砂层; 0.0~0.6 m, 耕作层+土壤层。结合白洋淀地区已有地层沉积剖面的物质组成^[10-11]和古生物组合^[31-32]等特征, 本文认为 BG-2019 剖面中出现的黑色/灰色粉砂—黏土层为湖沼相沉积、粉砂—粗砂层为河流相沉积。

针对 BG-2019 剖面湖沼相和河流相沉积层序, 本文分别采用 AMS ¹⁴C 和 OSL 法进行定年, 结果显示 (图 2、表 1、表 2), 剖面 4.46~6.0 m、2.48~3.46 m 和 0.94~1.26 m 湖沼相层的发育年龄分别为距今 10270~13710 a、距今 4630~5400 a 和距今 3470~3700 a; 3.46~4.46 m、1.26~2.48 m 和 0.6~0.94 m 河流相沉积层的发育年龄分别为距今 7130~8000 a、距今 3700~4630 a 和距今 3230~3470 a。剖面 1.3 m (湖沼相层底部) 和 0.6 m (河流相层顶部) 处的 OSL 测年结果分别为距今 3730 a 和距今 3230 a, 本文认为上部形成的湖沼相和河流相沉积层形成年龄应在距今 3230~3730 a 之间; 同时通过 0.6 m、1.3 m 的年龄并结合湖沼相的平均沉积速率 (87.6 cm/ka), 求得 0.94 m 处的年龄为距今 3470 a。

综合 BG-2019 剖面不同沉积层年代结果和沉积环境变化特征, 可以看出不同沉积相沉积速率变化差异显著; 同时, 各湖沼相沉积层和河流相沉积层之间存在明显的沉积间断, 缺失地层的年代为距今 8000~10270 a 和距今 5400~7130 a。为方便指标样品对比分析, 本文采用线性内插的方法分别对各个沉积层进行插值运算, 获得各沉积层内指标样品的年代。

4.2 粒度组分

为明确 BG-2019 剖面不同沉积层物质来源、搬运过程和沉积特征, 本文按照 2 cm 间距对 0.6~6.0 m 沉积层进行粒度组分分析, 共计完成 269 个样品。按照沉积物颗粒粗细变化, 将获得的粒度数据按美国地理协会粒级划分标准区分为砂粒 (> 63 μm)、粉砂 (2~63 μm) 和黏土 (< 2 μm) 3 个级别, 同时计算了各样品的中值粒径、平均粒径和分选系数等参数^[33]。按照沉积环境差异, 湖沼相和河流相粒度组分变化特征表述如下:

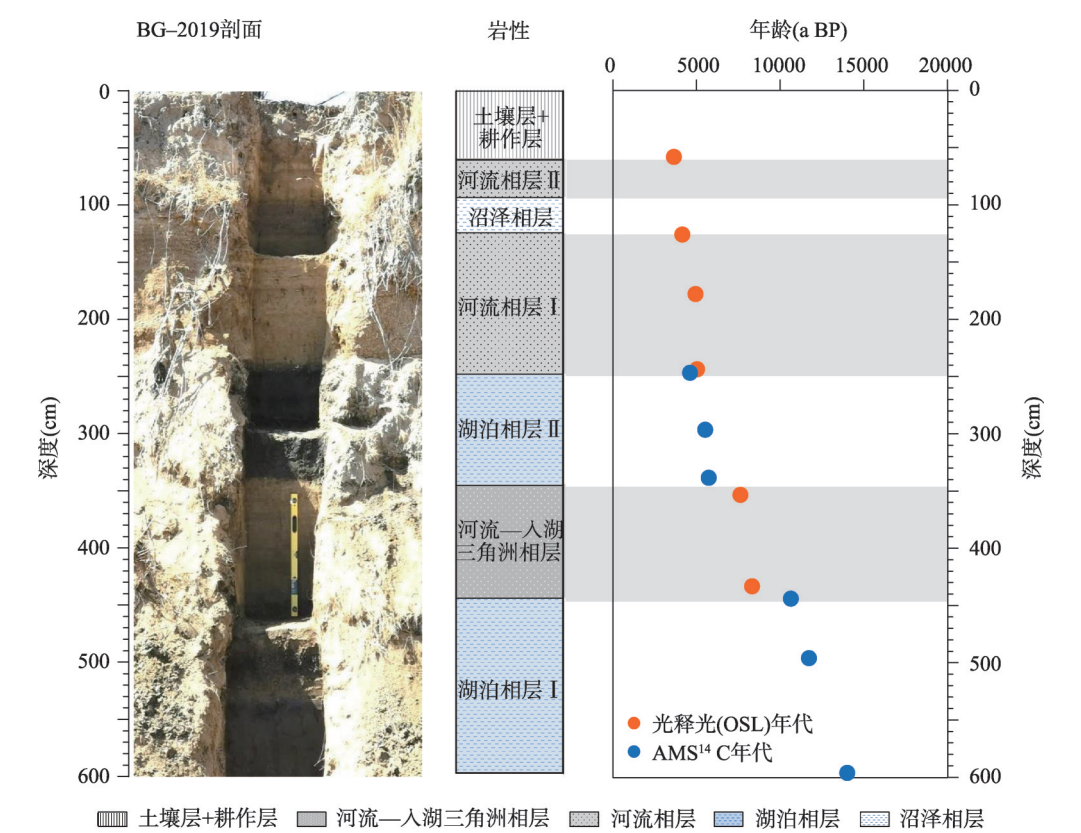


图2 BG-2019剖面深度、岩性及年代
Fig. 2 Lithology and age-depth model for profile BG-2019

表1 BG-2019剖面 AMS¹⁴C 年龄
Tab.1 Results of AMS¹⁴C dating of profile BG-2019

沉积相	取样部位	深度(m)	测试材料	¹⁴ C 年龄(a BP)	校正年龄 (2σ, cal a BP)	校正年龄中值 (cal a BP)
湖相层 II	顶部	2.48~2.50	全样	3850±30	4153~4406	4268
	中部	3.00~3.02	全样	4560±30	5052~5436	5185
	底部	3.42~3.44	全样	4690±30	5319~5553	5392
湖相层 I	顶部	4.48~4.50	全样	9180±30	10244~10486	10329
	中部	5.00~5.02	全样	9980±30	11269~11682	11419
	底部	6.00~6.02	全样	11880±40	13602~13800	13712

表2 BG-2019剖面 OSL 年代数据
Tab.2 Results of OSL dating of profile BG-2019

沉积相	取样部位	深度 (m)	U (ppm)	Th (ppm)	K (%)	等效剂量 E.D (Gy)	年剂量 Dy (Gy/ka)	含水量 (%)	年龄(a)
河流相层 II	顶部	0.6~0.64	1.94	9.61	1.65	11.26±0.48	3.44±0.14	11.5	3300±200
河流相层 I	顶部	1.28~1.32	1.81	9.36	1.74	13.16±0.89	3.43±0.14	14.1	3800±300
	中部	1.80~1.84	1.77	8.91	1.74	15.04±1.10	3.30±0.13	22.2	4600±400
	底部	2.46~2.50	1.70	8.61	1.67	15.00±0.79	3.19±0.13	19.5	4700±300
河流—入湖 三角洲相层	顶部	3.56~3.60	1.73	9.87	1.68	23.88±0.67	3.29±0.13	21.7	7300±400
	底部	4.36~4.40	1.65	9.04	1.69	25.50±1.99	3.17±0.13	24.0	8000±700

4.2.1 湖沼相沉积层

湖相 I (4.46~6.0 m、距今 10270~13710 a): 中值粒径变化范围为 10.8~35.1 μm ; 黏土含量 2.5%~10.4%, 平均 6.4%; 粉砂含量 64.1%~85.9%, 平均 79.9%; 砂粒含量 4.8%~33.4%, 平均 13.7%。

湖相 II (2.48~3.46 m、距今 4630~5400 a): 中值粒径变化范围为 9.9~44.1 μm ; 黏土含量 3.3%~12.5%, 平均 6.3%; 粉砂含量 57.1%~86.7%, 平均 75.8%; 砂粒含量 5.1%~38.8%, 平均 18.0%。

沼泽相 (0.94~1.26 m、距今 3470~3700 a): 中值粒径变化范围为 9.9~36.4 μm ; 黏土含量 2.6%~11.1%, 平均 4.9%; 粉砂含量 61.8%~90.3%, 平均 81.3%; 砂粒含量 5.5%~32.7%, 平均 13.8%。

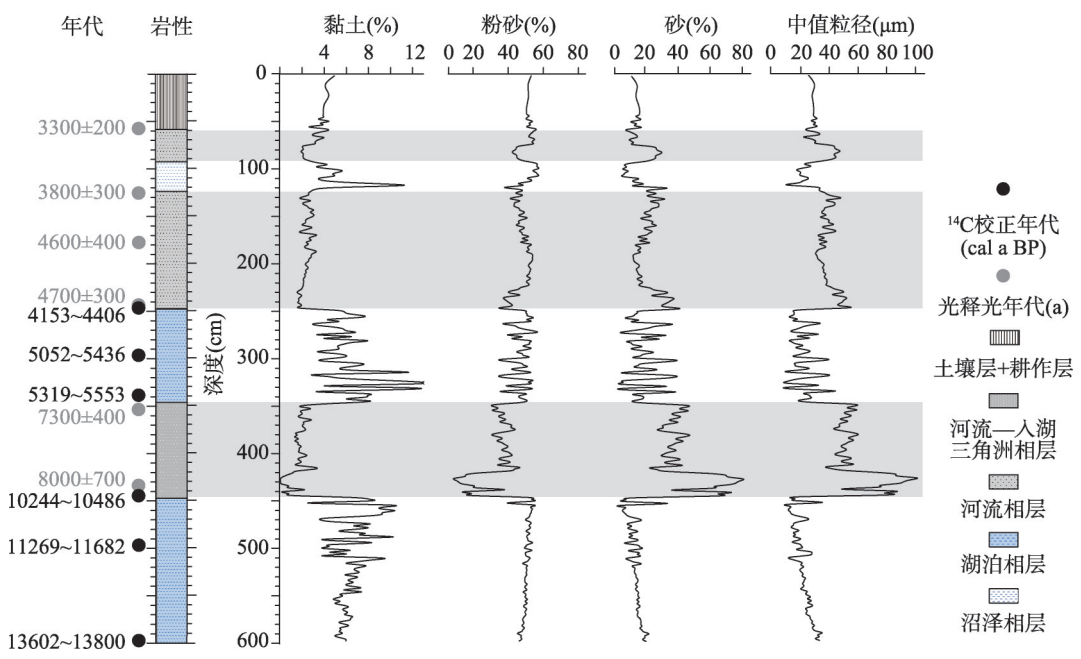
4.2.2 河流相沉积层

河流—入湖三角洲相 (3.46~4.46 m、距今 7130~8000 a): 中值粒径变化范围为 27.5~101 μm ; 黏土含量 0.03%~5.9%, 平均仅有 1.7%; 粉砂含量 19.5%~73.8%, 平均 54.1%; 砂粒含量 22%~80.5%, 平均高达 44.2%。

河流相 I (1.26~2.48 m、距今 3700~4630 a): 中值粒径变化范围为 30.3~53.7 μm ; 黏土含量 1.6%~3.3%, 平均 2.3%; 粉砂含量 57.4%~85.3%, 平均 76.3%; 砂粒含量 11.9%~40.7%, 平均 21.4%。

河流相 II (0.6~0.94 m、距今 3230~3470 a): 中值粒径变化范围为 22.2~47.3 μm ; 黏土含量 1.9%~3.9%, 平均 2.7%; 粉砂含量 68.4%~86.9%, 平均 77.9%; 砂粒含量 9.6%~29.7%, 平均 19.5%。

整体来看 (图 3), BG-2019 剖面湖相以粉砂 (77.9%) 占主导, 中值粒径为 9.9~44.1 μm , 平均粒径为 31.0 μm ; 沼泽相以粉砂 (81.3%) 占主导, 中值粒径为 9.9~36.4 μm ,



注: 图中年代由分层插值计算得出。

图3 BG-2019剖面粒度组分与中值粒径

Fig. 3 Grain-size fractions and median grain size of profile BG-2019

平均粒径为 $30.1\ \mu\text{m}$; 河流—入湖三角洲相沉积层以粉砂 (54.1%) 和砂粒 (44.2%) 为主, 中值粒径为 $27.5\sim 101\ \mu\text{m}$, 平均粒径为 $64.7\ \mu\text{m}$; 河流相沉积层物质组成以粉砂 (77.1%) 和砂粒 (20.4%) 为主, 中值粒径为 $22.2\sim 53.7\ \mu\text{m}$, 平均粒径为 $41.5\ \mu\text{m}$; 相比较而言, 河流相沉积层和河流—入湖三角洲相沉积层粒径明显较湖相和沼泽相沉积层粗, 河流—入湖三角洲相沉积层粒径较河流相沉积层粗。同时, 湖相和沼泽相沉积层粒度分布主要为主次峰或双峰型, 而河流相沉积层和河流—入湖三角洲相沉积层粒度分布主要为单峰型 (图4); 表明湖相和沼泽相沉积既有河流搬运组分又有风力搬运组分或不同河流搬运的组分, 而河流相沉积和河流—入湖三角洲相沉积层主要为单一河流搬运组分。

4.3 孢粉组合

为揭示BG-2019剖面记录的白洋淀地区植被演替过程和气候环境背景, 本文按照2~4 cm间距对0.6~6.0 m沉积层进行孢粉分析, 共计完成209个样品。然而, 受沉积环境和花粉保存等因素影响^[34-35], 其中58个样品陆生植物花粉总数未达到100粒; 为确保数据结果的准确性和可靠性, 本文在孢粉数据分析和制图时予以排除。

BG-2019剖面151个样品共统计鉴定出81个科(属)的植物孢粉类型, 木本植物花粉类型23个, 以松属(*Pinus*)、栎属、榆属和椴属(*Tilia*)为主; 草本植物花粉40个, 以蒿属(*Artemisia*)、藜亚科(*Chenopodiaceae*)、禾本科(*Poaceae*)和菊科(*Asteraceae*)为主; 水生和蕨类植物孢粉类型18个, 以香蒲属(*Typha*)、莎草科(*Cyperaceae*)、水蕨属(*Ceratopteris*)、中华卷柏(*Selaginella sinensis*)和环纹藻属(*Concentricystes*)等为主。华北平原不同地貌单元现代孢粉组合特征研究显示, 不同沉积环境孢粉组合的来源、组成和环境意义差别很大^[36-37]。考虑到BG-2019剖面沉积环境变化特征, 本文分别对湖沼相和河流相的孢粉组合变化特征表述如下(图5):

4.3.1 湖沼相沉积层

带Ⅰ(4.46~6.0 m、距今10270~13710 a): 草本类型占绝对优势(95.7%), 以禾本科(32.0%)、蒲公英型(33.1%)、蒿属(15.2%)和藜亚科(12.4%)为主; 其它孢粉类型含量较低。

带Ⅱ(2.48~3.46 m、距今4630~5400 a): 木本类型含量占21.6%, 以松属为主(20.5%); 草本类型含量高(78.4%), 主要包括蒿属(22.8%)、藜亚科(26.3%)和禾本科(23.7%)等; 水生和蕨类孢粉含量为整个剖面最高(达47.1%), 以水蕨属(43.6%)和香蒲属(1.4%)为主。

带Ⅲ(0.94~1.26 m、距今3470~3700 a): 木本花粉含量达整个剖面最高(77.1%), 其中松属(74.8%)占绝对优势, 其它类型含量极低; 草本类型主要有蒿属(4.9%)、藜

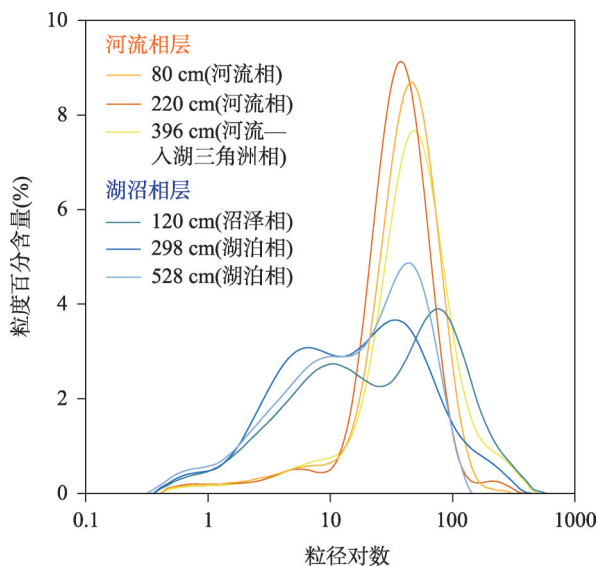


图4 BG-2019剖面不同沉积环境粒度频率曲线图
Fig. 4 Grain-size frequency distribution curves of different facies in profile BG-2019

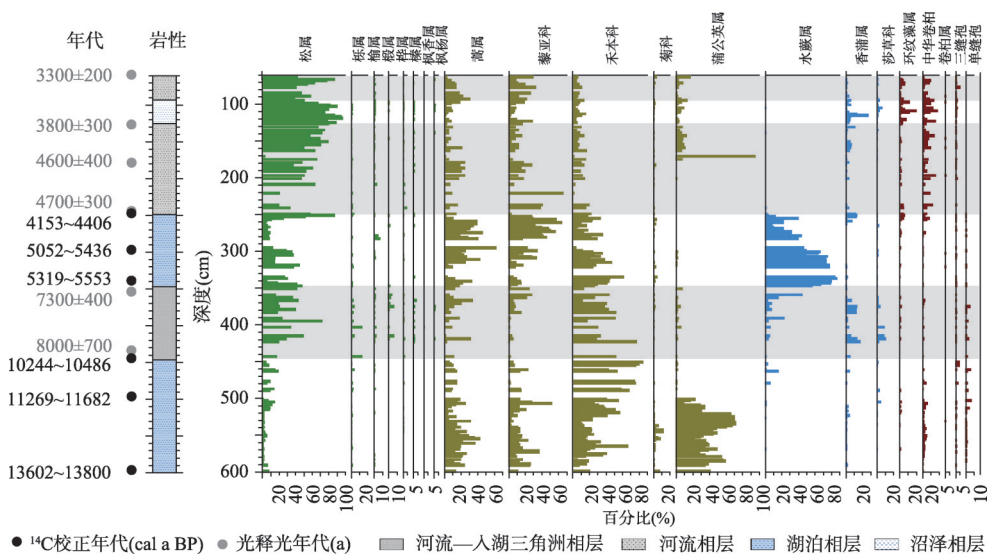


图5 BG-2019剖面距今3230~13710 a主要孢粉类型组合图

Fig. 5 Pollen assemblage diagram for profile BG-2019 for the interval of 3230-13710 cal a BP

亚科 (6.7%) 和禾本科 (6.1%); 水生和蕨类孢粉中香蒲属 (4.6%) 和中华卷柏 (6.8%) 含量较高, 其他类型含量均较低。

4.3.2 河流相沉积层

带 I (3.46~4.46 m、距今 7130~8000 a): 木本花粉类型含量较高 (38.9%), 以松属为主 (32.6%), 其次是栎属 (2.2%)、榆属 (0.6%)、桦木属 (0.5%) 和槲蕈属 (1.2%), 个别层位出现有枫香属和枫杨属等; 草本类型以蒿属 (12.1%)、藜亚科 (8.0%) 和禾本科 (36.1%) 为主; 水生类型含量较高 (18.8%), 主要包括水蕨属 (11.0%)、香蒲属 (5.7%) 和莎草科 (2.2%)。

带 II (1.26~2.48 m、距今 3700~4630 a): 木本类型含量较高 (55.2%), 其中松属占 53.5%, 其它类型含量较低; 草本类型含量降至 44.8%, 以藜亚科 (16.2%) 和蒿属 (10.3%) 为主; 水生和蕨类孢粉中的香蒲属 (2.0%) 和中华卷柏 (6.1%) 含量较高, 其他类型含量均较低。

带 III (0.6~0.94 m、距今 3230~3470 a): 木本类型含量占 57.0%, 以松属 (56.1%) 为主; 草本类型含量占 43.1%, 主要包括蒿属 (13.4%)、藜亚科 (17.7%) 和禾本科 (5.8%); 水生和蕨类孢粉中环纹藻属 (2.6%) 和中华卷柏 (4.5%) 含量较高。

5 讨论

5.1 白洋淀地区地层沉积特征

通过颜色、岩性、结构、粒度、孢粉等分析, 结合年代结果, 并对各指标进行对比分析, 结果显示: BG-2019剖面 4.46~6.0 m (距今 10270~13710 a) 以深灰色/黑色粉砂和粉砂质黏土为主, 沉积物颗粒较细, 频率曲线以双峰为主, 表明该段地层为湖相沉积。3.46~4.46 m (距今 7130~8000 a) 由粉砂质砂和砂质粉砂组成, 砂含量很高, 沉积物颗粒偏粗, 分选较好, 应为河流相沉积, 但水蕨属和香蒲属水生孢粉含量较高 (16.8%), 因此推测为河流—入湖三角洲相沉积。2.48~3.46 m (距今 4630~5400 a) 为黑色粉砂和粉砂

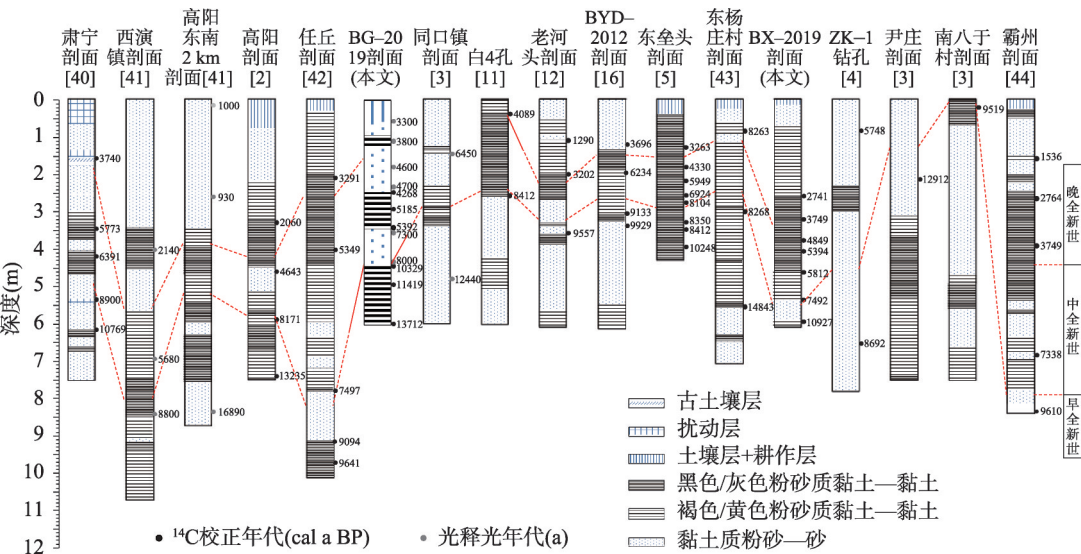
质黏土,黏土含量很高,水蕨孢子含量为43.6%,表明为湖相沉积。1.26~2.48 m(距今3700~4630 a)该层沉积物为砂质粉砂和粉砂,砂粒含量较高,沉积物颗粒较粗,频率曲线以单峰为主,应为河流相沉积。0.94~1.26 m(距今3470~3700 a)为灰色粉砂和粉砂质黏土,挺水植物香蒲属和沼生植物莎草科含量较高,反映该层为沼泽相沉积。0.6~0.94 m(距今3230~3470 a)为粉砂和砂质粉砂,频率曲线单峰,为河流相沉积。

通过分析白洋淀BG-2019剖面地层发育序列发现,白洋淀BG-2019剖面距今8000~10270 a和距今5400~7130 a存在两次明显的沉积间断;表明晚冰期以来白洋淀地区地层沉积环境不稳定,主要表现为湖沼相沉积和河流相沉积交替演变的模式^[10-11, 22]。同时,不同沉积环境沉积速率变化特征显示:河流相沉积层持续时间相对较短、沉积速率快(平均279.8 cm/ka),具有突发性特征;而湖沼相沉积发育时间相对较长、沉积速率慢(平均87.6 cm/ka),沉积环境相对稳定。结合前人研究结果,本文认为源自西部太行山区的河流是影响白洋淀地区地层沉积变化的主要原因^[38],其河道变迁的侵蚀作用和差异性堆积会引起沉积间断/地层缺失^[8, 39]。

BG-2019剖面沉积物粒度组成特征和沉积相变化显示,距今10270~13710 a沉积物以粉砂和粉砂质黏土为主,粗粒含量很低,表明当时剖面所处区域水动力条件弱;中值粒径波动小,指示此阶段为低能稳定的湖相沉积。距今8000~10270 a,入湖河流改道它处,湖沼消失,研究区处于剥蚀状态。直至距今7130~8000 a,河流再次流经剖面所在地,但未形成湖泊,而是沉积了以粉砂质砂和砂质粉砂为主的河流—入湖三角洲相沉积,且中值粒径变化范围大,分选好,说明当时河流活跃,河流水动力强。河流在此处流淌了约870年后,又改道它处,故距今5400~7130 a研究区暴露地表,处于剥蚀状态。距今4630~5400 a在中全新世大暖期背景下,白洋淀湖泊扩张^[10],研究区可能与白洋淀连为一体,形成以粉砂和粉砂质黏土为主的典型湖相沉积,沉积物砂粒较多且中值粒径范围和波动幅度较大,表明此阶段剖面所处区域距入湖河口较近,水动力条件较强,湖相沉积环境不稳定。距今3700~4630 a古湖收缩消退,河流再次侵入剖面所在地,沉积了以砂质粉砂和粉砂为主的河流相沉积;沉积物粗粒组分含量较高,但中值粒径波动幅度较小,说明河流水动力较强,为高能较稳定的河流相沉积。至距今3470~3700 a,河流又改道它处,剖面处形成积水洼地,发育以粉砂和粉砂质黏土为主的沼泽相沉积,沉积环境稳定。距今3230~3470 a研究区又被河流侵入,维持两百多年的积水洼地消失,发育以粉砂和砂质粉砂为主的河流相沉积。

综上所述,河流对研究区沉积环境的变化产生重要影响,也是古白洋淀消亡解体的直接原因。河流流量和动能条件受气候变化影响,是剖面粒度组分发生变化的重要原因。我们认为BG-2019剖面沉积物颗粒粗细应与季风降水及强弱变化有关:中—早全新世和中—晚全新世降水变幅明显高于晚冰期和晚全新世。

对白洋淀地区多个沉积剖面和钻孔进行筛选,发现连续湖相沉积厚度少,且多个剖面测年数据少,难以确定其湖相沉积的具体年代,因此我们选择全新世年代数据较多的17个剖面进行对比(图6)。结合前人对白洋淀地区地层沉积特征研究^[10-11],我们认为褐色—黄色黏土或粉砂质黏土层为洪水泛滥沉积,只有黑色—灰黑色黏土或粉砂质黏土为湖相沉积。图6显示,距今10000~13000 a的晚冰期,湖沼相沉积主要集中在现在白洋淀的西南地区,距今8000~10000 a的早全新世,白洋淀向东向北扩张,距今4000~8000 a的中全新世白洋淀向四周扩张,是白洋淀湖沼最发育期。晚全新世受气候变化影响,湖泊范围收缩。中全新世时期(最新全新世划分,中全新世为8000—4000 a BP)白4孔和东垒头剖面可能存在连续的湖相沉积,其他剖面或存在沉积间断,或发生沉积相改变。



注：沉积剖面改自文献[2-5, 11, 12, 16, 40-44]。

图6 白洋淀区域各剖面对比

Fig. 6 Comparison of various stratigraphic profiles from the Baiyangdian area

因此，我们认为全新世时期白洋淀地区可能存在一个持续不间断的白洋淀。特别是中全新世时期气候温暖湿润，降水量丰富，河流来水量大，且河北平原东部发生海侵，海面上升，使得河流坡度变缓^[1]，堆积作用强烈，形成更多的低洼地和更多的积水湖泊。但由于白洋淀地势平坦，汇集了众多发源于西部太行山区和黄土高原的河流（可能还受到黄河的影响），湖泊主要为河流差异性堆积形成的积水洼地，极易被河流沉积物填充改造，形成游荡性湖泊，使得白洋淀湖泊位置不固定、面积和形状变化较大。陈亭亭等^[4]也曾指出白洋淀 ZK-1 钻孔、安新县尹庄剖面和安新县同口镇剖面存在地层缺失。因此中全新世时白洋淀地区不存在广袤连续的黑色—灰黑色黏土组成的湖相沉积，湖面非连成一片的广袤大湖。

因此，在建立沉积剖面地层年代序列时，应考虑沉积间断/地层缺失的影响。一方面尽可能地确定不同沉积相变的年代^[5, 12]，另一方面应根据沉积相变化特征，采用分层插值的方法建立沉积剖面年代—深度模型。此外，依据白洋淀不同沉积层沉积物化学元素、矿物和粒度组分等^[5, 12]参数探讨区域气候环境变化时需十分谨慎，避免由于不同沉积过程引起的物质来源差异而导致的不确定性。

5.2 白洋淀流域植被演替过程

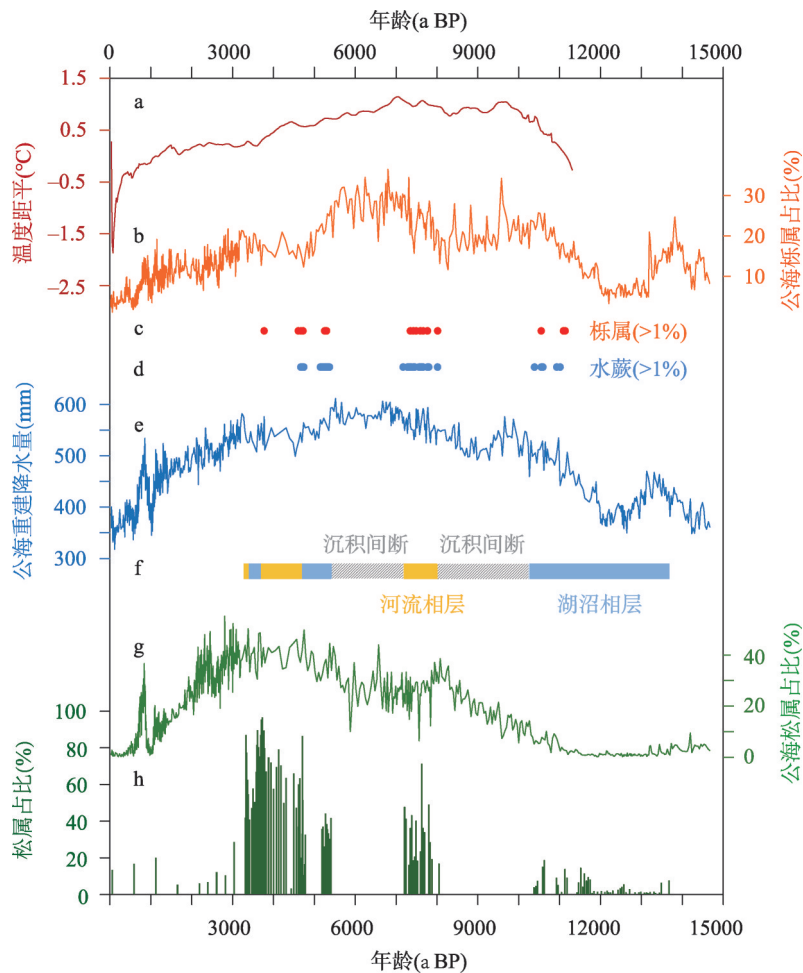
白洋淀属于多条河流注入的大型湖泊^[10]。基于白洋淀流域现代植被分布和表层沉积物孢粉组合特征，许清海等^[45]认为白洋淀孢粉主要来源包括三部分：经河流注入湖泊的孢粉、由空气搬运的孢粉、以及湖泊内生长的水生植物孢粉类型；其中河流作用搬运的孢粉贡献率达90%以上。前文已述，BG-2019剖面晚冰期以来沉积环境多变，主要包括两次湖相、一次沼泽相发育期和两次河流相、一次河流—入湖三角洲相发育期。结合前人关于华北平原不同地貌单元现代孢粉组合特征的研究结论^[36-37]，本文认为，BG-2019剖面湖相和沼泽相发育期，沉积物孢粉由入湖河流携带、空气搬运以及湖泊内水生植物孢粉组成，代表白洋淀流域植被状况；而河流相、河流—入湖三角洲相发育期，其沉积物花粉主要来源于河流，主要反映河流上游的植被状况。

BG-2019 剖面湖泊、沼泽沉积层孢粉组合特征显示, 晚冰期 (距今 10270~13710 a), 旱生植物孢粉含量显著高于水生、湿生植物孢粉, 白洋淀流域山区森林植被覆盖度低, 平原区以以蒿属、藜亚科、禾本科和菊科等为主的草地植被, 表明此阶段区域气候寒冷干燥, 降雨量小, 白洋淀湖泊面积较小水位低; 据记载晚更新世后期气温较现在下降 10 ℃左右^[46]。中一晚全新世 (距今 4630~5400 a), 白洋淀流域山区生长着松属、栎属等为主的针阔混交林, 森林覆盖度相对较高, 平原区以蒿属、藜亚科和禾本科为主的草地植被仍较发育, 湖泊内生长喜暖湿的亚热带蕨类植物—水蕨; 此阶段白洋淀中的水蕨孢子含量高达 43.6%, 可知本时段水蕨植物在白洋淀湖区大量生长, 也表明该时段白洋淀水域较现今范围广, 气候温暖湿润, 降雨量多, 湖泊面积大水位较高; 据现今水蕨分布范围最北界 (34.5°N) 及温度随纬度递减关系研究^[47], 当时白洋淀地区温度较现在高 2~4 ℃, 年降水量较现今多 200 mm 左右^[11]。晚全新世早期 (距今 3470~3700 a), 旱生孢粉低于水生、湿生植物孢粉, 白洋淀流域山区生长以松属为主的针阔混交林, 耐旱松林的大面积扩张, 森林覆盖度高, 平原区仍为以蒿属、藜亚科、禾本科等为主的草地植被, 湖区生长着香蒲、芦苇、狐尾藻等水生植物, 香蒲属、莎草科等花粉含量上升, 表明此阶段白洋淀流域气候温和偏干, 降雨量减少, 沉积物自下而上由细变粗, 为湖泊收缩填充时期。

BG-2019 剖面河流相沉积层孢粉组合虽不反映流域整体植被特征, 但其代表河流上游山地植被组成。中全新世早期 (距今 7130~8000 a) 太行山山地生长以松属为主的针阔混交林植被, 常见阔叶树种有栎属、榆属、椴属、桦木属等, 草本植物主要有蒿属、藜亚科、禾本科等; 喜温的栎属、榆属、椴属等阔叶林的增加以及喜暖湿水蕨植物的出现表明此阶段温度和降水显著增加, 指示气候温和较湿。中全新世晚期—晚全新世早期 (距今 3700~4630 a) 上游山地森林发育以松属为主的针阔混交林、落叶阔叶属种比例较少, 蒿属、藜亚科、禾本科和菊科等草本植物以及中华卷柏等蕨类植物相对发育, 表明气候温和偏干。晚全新世早期 (距今 3230~3470 a), 上游山地生长以松属为主的针阔混交林, 蒿属、藜亚科、禾本科等草本植物仍较发育; 蒿属、藜亚科等草本花粉含量的增加, 表明气候在变干过程中又趋于变凉。

河北省地带性植被类型为落叶阔叶林, 气候湿润时栎林成分为主, 气候变干后松林成分增加^[46], 图 7 公海栎属和松属花粉含量^[48]变化趋势也有所体现。BG-2019 剖面中全新世后期喜暖湿水蕨和栎属植物消失 (图 7d) 以及松属花粉含量 (图 7h) 的增加表明白洋淀地区气候向凉干方向发展, 与北半球温度距平曲线^[49] (图 7a) 和公海重建降水曲线^[50] (图 7e) 有较好的一致性。在 BG-2019 剖面孢粉组合中, 中全新世后期以来松属花粉占很大优势, 考虑到河流对不同沉积环境孢粉来源的影响, 认为较高含量的松属花粉一方面应与中全新世后期以来气候变干背景下西部太行山松林植被扩张有关^[46] (图 7g), 另一方面与人类活动增强自然植被大规模破坏导致原始落叶阔叶林减少, 以及次生油松林植被生长^[46]有关。

上述结果表明, 中全新世白洋淀流域植被发育状况明显好于晚冰期阶段, 主要表现在山地森林植被盖度增加、落叶阔叶树种类型增多和亚热带植物出现; 晚全新世研究区植被发育状况相对变差, 主要表现在山地植被中耐旱的植物松属和中华卷柏比例增加、落叶阔叶属种含量降低和热带蕨类植物水蕨的消失。整体来看, 中一早全新世和中一晚全新世气候条件较晚冰期、晚全新世早期好, 表现为中一早全新世、中一晚全新世气候暖湿而晚冰期和晚全新世早期为凉干的气候特征。



注：数据来源：图 a 文献[49]；图 b、图 g 文献[48]；图 e 文献[50]；其他数据来自 BG-2019 剖面。

图 7 白洋淀地区高阳剖面主要记录与区域和全球记录对比

Fig.7 Key proxy records for profile BG-2019 from the Baiyangdian area and comparisons with regional and global paleoenvironmental records

6 结论

BG-2019 剖面的粒度组分和孢粉分析，揭示了白洋淀地区晚冰期以来的植被演替和气候环境变化。剖面所在地距今 10270~13710 a 和距今 4630~5400 a 发育湖相沉积，距今 3470~3700 a 发育沼泽相沉积；距今 7130~8000 a 发育河流—入湖三角洲相沉积，距今 3700~4630 a 和距今 3230~3470 a 发育河流相沉积，距今 8000~10270 a 和距今 5400~7130 a 存在明显的沉积间断/地层缺失；表明晚冰期以来白洋淀地区不存在稳定连续的湖沼相沉积，河流作用是影响白洋淀地区沉积相变化、地层缺失的主要原因。晚冰期时在现在白洋淀西南部的扇间和扇缘洼地出现一些小型湖沼；早全新世湖泊向东向北扩张，中全新世湖泊向四周扩张，是白洋淀湖泊范围最广时期，并非广袤连续的湖相沉积；晚全新世湖泊范围收缩，在人为影响下逐步形成现代的白洋淀。晚冰期和全新世流域植被景观发生显著变化，其中晚冰期（距今 10270~13710 a）气候寒冷干旱，平原发育以蒿属、藜亚

科、禾本科和菊科等为主的草地景观, 山地森林覆盖度低; 中全新世晚期(距今4630~5400 a) 气候温暖湿润, 平原仍生长以蒿属、藜亚科和禾本科为主的草地植被, 湖淀内生长着许多亚热带蕨类植物—水蕨, 山地植被为以松属—栎属等为主的针阔混交林, 森林覆盖度增高。晚全新世早期(距今3470~3700 a) 气候温和偏干, 平原生长蒿属、藜亚科、禾本科等草地植被, 山地生长以松属为主的针阔混交林, 森林覆盖度较高。

参考文献(References)

- [1] Wu Chen. Landform Environment and Its Formation in North China. Beijing: Science Press, 2008: 297-300. [吴忱. 华北地貌环境及其形成演化. 北京: 科学出版社, 2008: 297-300.]
- [2] Zhu Xuanqing, Gong Ran, Mu Zhongyi, et al. Environmental Evolution and Forecast of Baiyangdian Lake. Xi'an: Xi'an Map Publishing House, 1994: 1-62. [朱宣清, 弓冉, 穆仲义, 等. 白洋淀环境演变及预测. 西安: 西安地图出版, 1994: 1-95.]
- [3] Yi Xianjin. The study on the characteristics of paleoenvironmental evolution since late Pleistocene in Baiyangdian area, Hebei province [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2015. [易先进. 河北白洋淀地区晚更新世以来环境演变研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2015.]
- [4] Chen Tingting, Yang Zhenjing, Liu Rongfang, et al. Grain size characteristics and sedimentary environment analysis of Baiyangdian ZK-1 borehole since late Pleistocene. Journal of Hebei GEO University, 2017, 40(6): 1-7. [陈亭亭, 杨振京, 刘荣访, 等. 白洋淀ZK-1钻孔晚更新世以来的粒度特征及其沉积环境分析. 河北地质大学学报, 2017, 40(6): 1-7.]
- [5] Shen Gaihui, Ding Guoqiang, Yang Xiaolan, et al. Holocene climate and environmental change in the Baiyangdian area. Quaternary Sciences, 2018, 38(3): 756-768. [申改慧, 丁国强, 阳小兰, 等. 白洋淀地区全新世以来的气候环境变化. 第四纪研究, 2018, 38(3): 756-768.]
- [6] Xu Qinghai, Wu Chen. Preliminary understanding of Holocene environmental change in Baiyangdian area. Geography and Territorial Research, 1986, 2(3): 51-56. [许清海, 吴忱. 全新世时期白洋淀地区环境演变的初步认识. 地理学与国土研究, 1986, 2(3): 51-56.]
- [7] He Naihua, Zhu Xuanqing. The study on the reasons of Baiyangdian Lake's formation. Geography and Territorial Research, 1994, 10(1): 50-54, 30. [何乃华, 朱宣清. 白洋淀形成原因的探讨. 地理学与国土研究, 1994, 10(1): 50-54, 30.]
- [8] Wu Chen, Xu Qinghai. Formation or development stage: A discussion on the cause of the formation of Baiyangdian Lake, China. Journal of Lake Sciences, 1998, 10(3): 91-96. [吴忱, 许清海. “演变阶段”与“成因”不能混为一谈: 也谈白洋淀的成因. 湖泊科学, 1998, 10(3): 91-96.]
- [9] Zhu Xuanqing, Shi Derong, He Naihua, et al. Relations between human activities and the vicissitudes of Baiyang Lake in the northern part of North China plain. Journal of the Hebei Academy of Sciences, 1986(2): 24-34. [朱宣清, 施德荣, 何乃华, 等. 白洋淀的兴衰与人类活动的关系. 河北省科学院学报, 1986(2): 24-34.]
- [10] Wang Huichang. Expansion and contraction of the Baiyangdian Lake since 10000 years ago. Geographical Research, 1983, 2(3): 8-18. [王会昌. 一万年来白洋淀的扩张与收缩. 地理研究, 1983, 2(3): 8-18.]
- [11] Xu Qinghai, Chen Shuying, Kong Zhaochen, et al. Preliminary discussion of vegetation succession and climate change since the Holocene in the Baiyangdian Lake district. Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica, 1988, 12(2): 65-73. [许清海, 陈淑英, 孔昭宸, 等. 白洋淀地区全新世以来植被演替和气候变化初探. 植物生态学与地植物学学报, 1988, 12(2): 65-73.]
- [12] Yang Huijun, Wang Yong, Chi Zhenqing, et al. Sedimentary record of climate change during the past 25.5 ka of Laohetou profile from Baiyangdian, Hebei province. Geoscience, 2015, 29(2): 291-298. [杨慧君, 王永, 迟振卿, 等. 河北白洋淀老河口剖面25.5 ka BP以来气候环境变化的沉积记录. 现代地质, 2015, 29(2): 291-298.]
- [13] Sun Xiangjun, Song Changqing, Chen Xudong. "China Quaternary Pollen Database" (CPD) and "BIOME 6000" project. Advance in Earth Sciences, 1999, 14(4): 407-411. [孙湘君, 宋长青, 陈旭东. 中国第四纪孢粉数据库(CPD)和生物群区(Biome 6000). 地球科学进展, 1999, 14(4): 407-411.]
- [14] Ni J, Yu G, Harrison S P, et al. Palaeovegetation in China during the late Quaternary: Biome reconstructions based on a global scheme of plant functional types. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2010, 289(1-4): 44-61.
- [15] Tian F, Cao X Y, Dallmeyer A, et al. Biome changes and their inferred climatic drivers in northern and eastern continental Asia at selected times since 40 cal ka BP. Vegetation History and Archaeobotany, 2018, 27(2): 365-379.

- [16] Li Manyue, Zhang Shengrui, Xu Qinghai, et al. Spatial patterns of vegetation and climate in the North China Plain during the Last Glacial Maximum and Holocene climatic optimum. *Scientia Sinica: Terrae*, 2019, 49(8): 1269-1277. [李曼玥, 张生瑞, 许清海, 等. 华北平原末次冰盛期以来典型时段古环境格局. *中国科学: 地球科学*, 2019, 49(8): 1269-1277.]
- [17] Leroy S A G, Arpe K, Mikolajewicz U, et al. Climate simulations and pollen data reveal the distribution and connectivity of temperate tree populations in eastern Asia during the Last Glacial Maximum. *Climate of the Past*, 2020, 16(6): 2039-2054.
- [18] Xiao Sirong. Climatic characteristics of precipitation in Baiyangdian basin. *Geography and Territorial Research*, 1985, 1(4): 37-43. [肖嗣荣. 白洋淀流域降水的气候特征. *地理学与国土研究*, 1985, 1(4): 37-43.]
- [19] Wang Sumin, Dou Hongshen. *Records of Lakes in China*. Beijing: Science Press, 1998: 308-311. [王苏民, 窦鸿身. *中国湖泊志*. 北京: 科学出版社, 1998: 308-311.]
- [20] The Editorial Committee of Vegetation and Agricultural Division Committee of Hebei. *Vegetation of Hebei*. Beijing: Science Press, 1996: 1-364. [河北植被编辑委员和河北省农业区划委员会办公室. *河北植被*. 北京: 科学出版社, 1996: 1-364.]
- [21] Xu Qinghai, Wu Chen, Wang Zihui. Natural vegetation in Hebei Province from spore pollen analysis. *Geography and Territorial Research*, 1991, 7(2): 50-53. [许清海, 吴忱, 王子惠. 从孢粉分析看河北省自然植被. *地理学与国土研究*, 1991, 7(2): 50-53.]
- [22] Wu Chen, Xu Qinghai, Liu Jinsong. *A New Examination on North China Landform*. Beijing: Science Press, 2017: 92-146. [吴忱, 许清海, 刘劲松. *华北地貌新论*. 北京: 科学出版社, 2017: 92-146.]
- [23] Reimer P J, Austin W E N, Bard E, et al. The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0-55 cal kBP). *Radiocarbon*, 2020, 62(4): 725-757.
- [24] Stuiver M, Reimer P J, Reimer R W. 2021, CALIB 8.2. <http://calib.org>, accessed 2021-6-16.
- [25] Fleming S J, Stoneham D. The subtraction technique of thermoluminescent dating. *Archaeometry*, 1973, 15(2): 229-238.
- [26] Swithenbank J, Beer J M, Taylor D S, et al. A laser diagnostic technique for the measurement of droplet and particle size distribution. *Experimental Diagnostics in Gas Phase Combustion Systems: Progress in Astronautics and Aeronautics*, 1977, 53: 421-447.
- [27] Faegri K, Iversen J. A textbook of pollen analysis. *Journal of Biogeography*, 1989, 4(4): 328. DOI: 10.1002/jqs.3390050310.
- [28] Wang Fuxiong, Qian Nanfen, Zhang Yulong, et al. *Pollen Flora of China*. 2nd ed. Beijing: Science Press, 1995. [王伏雄, 钱南芬, 张玉龙, 等. *中国植物花粉形态(第二版)*. 北京: 科学出版社, 1995.]
- [29] Tang Lingyu, Mao Limi, Shu Junwu, et al. *An Illustrated Handbook of Quaternary Pollen and Spores in China*. Beijing: Science Press, 2016. [唐领余, 毛礼米, 舒军武, 等. *中国第四纪孢粉图鉴*. 北京: 科学出版社, 2016.]
- [30] Grimm E C. Tilia version 2.6.1. Illinois: Illinois State Museum, 2019.
- [31] Wang Yong, Min Longrui, Dong Jin, et al. Sedimentary characteristics and stratigraphic division of Holocene series in Baiyang Dian, Hebei province. *Acta Geoscientica Sinica*, 2015, 36(5): 575-582. [王永, 闵隆瑞, 董进, 等. 河北白洋淀全新统沉积特征与地层划分. *地球学报*, 2015, 36(5): 575-582.]
- [32] Guo Shuyuan, Zhan Wei, Wang Qiang. Middle Holocene Lamprotula fauna from Baiyangdian area, Hebei Province and its environmental significance. *Journal of Palaeogeography*, 2014, 16(3): 335-346. [郭书元, 詹伟, 王强. 河北省白洋淀地区中全新世丽蚌动物群及其生态环境意义. *古地理学报*, 2014, 16(3): 335-346.]
- [33] Folk R L, Ward W C. Brazos river bar: A study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Research*, 1957, 27(1): 3-26.
- [34] Bunting M J, Tipping R. Sorting dross from data: Possible indicators of post-depositional assemblage biasing in archaeological palynology. *Human Ecodynamics. Symposia of the Association for Environmental Archaeology*, 2000, 19: 63-68.
- [35] Tomescu A M F. Evaluation of Holocene pollen records from the Romanian Plain. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 2000, 109(3-4): 219-233.
- [36] 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.]
- [37] Xu Qinghai, Wu Chen, Meng Lingyao, et al. *Research on Different Pollen Assemblages of Sedimentary Facies of Modern in Northern North China*. Xi'an: Xi'an Map Publishing House. 1994: 1-132. [许清海, 吴忱, 孟令尧, 等. *华北平*

- 原北部现代不同沉积相抱粉组合特征研究. 西安: 西安地图出版社, 1994: 1-132.]
- [38] He Naihua, Zhu Xuanqing. Palaeoenvironment changes since 30000 a BP and effects of human activities in the Baiyangdian area. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1992, 12(2): 79-88. [何乃华, 朱宣清. 白洋淀地区近3万年来的古环境与历史上人类活动的影响. *海洋地质与第四纪地质*, 1992, 12(2): 79-88.]
- [39] Wu Chen. Surface ancient channels in Hebei plain. *Acta Geographica Sinica*, 1984, 39(3): 268-276. [吴忱. 河北平原的地面古河道. *地理学报*, 1984, 39(3): 268-276.]
- [40] Yin Chunmin, Qiu Weili, Li Rongquan. Holocene paleofloods in the North China plain. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2001, 37(2): 280-284. [殷春敏, 邱维理, 李容全. 全新世华北平原古洪水. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2001, 37(2): 280-284.]
- [41] Sun Qingqing. The study on stratigraphic sequences and change of palaeoenvironment since late Pleistocene in Baiyangdian area[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2014. [孙青青. 河北白洋淀地区晚更新世以来地层层序建立及古环境变迁[D]. 北京: 中国地质大学, 2014.]
- [42] Cui Jianxin, Zhou Shangzhe, Han Haitao, et al. Fluvial-lacustrine sediments and Holocene climatic and hydrologic events in the Renqiu section, China. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2005, 25(4): 107-113. [崔建新, 周尚哲, 韩海涛, 等. 河北任丘剖面河湖相沉积及全新世水文气候事件. *海洋地质与第四纪地质*, 2005, 25(4): 107-113.]
- [43] Zhang Chao. Preliminary study on the paleolake evolution of middle and south Hebei plain since late Pleistocene [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2020. [张超. 河北平原中南部晚更新世以来古湖泊演化初探[D]. 北京: 中国地质大学, 2020.]
- [44] Ni Hantao. Holocene climate evolution: Information from the lacustrine-fluvial sediment in Baiyangdian area, North China plain [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2020. [倪瀚韬. 华北平原白洋淀地区全新世河湖相地层的气候记录[D]. 北京: 中国地质大学, 2020.]
- [45] Xu Q H, Tian F, Bunting M J, et al. Pollen source areas of lakes with inflowing rivers: Modern pollen influx data from Lake Baiyangdian, China. *Quaternary Science Reviews*, 2012, 37: 81-91.
- [46] Liu Lian, Zhang Yumin, Wang Shouyi, et al. Vegetation in Hebei. Beijing: Science Press, 1996: 40-210. [刘濂, 张裕民, 王守一, 等. 河北植被. 北京: 科学出版社, 1996: 40-210.]
- [47] Tang Lingyu, Mao Limi, Lv Xinmiao, et al. Palaeoecological and palaeoenvironmental significance of some important spores and micro-algae in Quaternary deposits. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(20): 1969-1983. [唐领余, 毛礼米, 吕新苗, 等. 第四纪沉积物中重要蕨类孢子和微体藻类的古生态环境指示意义. *科学通报*, 2013, 58(20): 1969-1983.]
- [48] Xu Q H, Chen F H, Zhang S R, et al. Vegetation succession and East Asian Summer Monsoon changes since the last deglaciation inferred from high-resolution pollen record in Gonghai Lake, Shanxi Province, China. *The Holocene*, 2017, 27(6): 835-846.
- [49] Marcott S A, Shakun J D, Clark P U, et al. A reconstruction of regional and global temperature for the past 11300 years. *Science*, 2013, 339(6124): 1198-1201.
- [50] Chen F H, Xu Q H, Chen J H, et al. East Asian summer monsoon precipitation variability since the last deglaciation. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 11186. DOI: 10.1038/srep11186.

Climatic and environmental evolution of the Baiyangdian area since the Lateglacial

WANG Na¹, XU Qinghai^{1,2}, ZHANG Shengrui^{1,2}, YANG Xiaolan³,
WANG Dandan¹, SUN Yuanhao⁴, WANG Tao⁴

(1. School of Geographical Sciences, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, China;

2. Hebei Key Laboratory of Environmental Change and Ecological Construction, Shijiazhuang 050024, China;

3. Institute of Geographical Science, Hebei Academy of Sciences, Shijiazhuang 050011, China;

4. College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The North China Plain is a typical diluvial- alluvial plain with an unstable depositional environment and poor sedimentary continuity. However, the effects of changes in sedimentary phases or hiatuses were not considered in previous studies of the sedimentary record of the North China Plain, which limits our understanding of the environmental and climatic evolution of the region during the historical period. Baiyangdian, the largest freshwater lake in the plain, is a potentially valuable archive of regional paleoenvironmental information since the late Pleistocene. We investigated a sedimentary profile (BG-2019; 38°46' 2.55"N, 115°49'0.41"E; 7 m a.s.l) in Gaoyang County, in the southwestern part of Baiyangdian Lake region; the profile is ~6 m long. The results of AMS ¹⁴C and OSL dating indicate that profile BG- 2019 has two intervals of lacustrine facies, two intervals of fluvial facies, one interval of swamp facies, one interval of fluvial-lacustrine delta facies, and two intervals of non-deposition or stratigraphic lacunae. The ages of the various facies are as follows. Lacustrine facies: 10270-13710 cal a BP and 4630-5400 cal a BP; swamp facies: 3470-3700 cal a BP; fluvial-lacustrine delta facies: 7130-8000 cal a BP; fluvial facies: 3700-4630 cal a BP and 3230-3470 cal a BP;; intervals of interrupted deposition: 8000-10270 cal a BP and 5400-7130 cal a BP. Therefore, no continuous lacustrine facies exists in the Baiyangdian region since the Lateglacial. Baiyangdian was a small lake during the Lateglacial, but was more extensive during the middle Holocene, although with discontinuous lacustrine facies. During the late Holocene the lake began to shrink under the influence of climate change and human activity. No other than human activity around the modern Baiyangdian Lake was reserved. Pollen analysis shows that the vegetation landscape of the Baiyangdian Basin differed substantially between the Lateglacial and the middle Holocene. During the Lateglacial, the climate was cold and dry, and vegetation dominated by *Artemisia*, *Chenopodioidae*, *Poaceae* and *Asteraceae* developed in the plain, while the western mountains had a limited forest cover. During the middle Holocene, when the climate was warm and humid, grassland vegetation dominated by *Artemisia*, *Chenopodioidae* and *Poaceae* developed in the plain; *Ceratopteris* and aquatic plants flourished in and around the lake; and coniferous-broadleaved mixed forest dominated by *Pinus* and *Quercus* developed in the western mountains, with an increased forest cover. During the middle-late Holocene, when the climate was relatively mild and dry, grassland vegetation dominated by *Artemisia*, *Chenopodioidae* and *Poaceae* persisted in the plain; and coniferous-broadleaved mixed forest dominated by *Pinus* developed in the western mountains, with a high forest cover age.

Keywords: Baiyangdian Lake; Lateglacial; Holocene; paleovegetation; paleoclimate