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

唐领余^①, 毛礼米^{①*}, 吕新苗^②, 马庆峰^{②③}, 周忠泽^④, 杨春蕾^④, 孔昭宸^⑤, BATTEN David J.^⑥

① 中国科学院南京地质古生物研究所, 现代古生物学和地层学国家重点实验室, 南京 210008;

② 中国科学院青藏高原研究所, 青藏高原环境变化与地表过程重点实验室, 北京 100101;

③ 中国科学院大学, 北京 100049;

④ 安徽大学资源与环境工程学院, 合肥 230601;

⑤ 中国科学院植物研究所, 北京 100093;

⑥ School of Earth, Atmospheric and Environmental Sciences, The University of Manchester, Manchester, M13 9PL, UK

* 联系人, E-mail: lmmao@nigpas.ac.cn

2012-08-03 收稿, 2013-01-24 接受, 2013-05-09 网络版发表

国家自然科学基金(40971029, 41072251, 41171162)、中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-155)和现代古生物学和地层学国家重点实验室开放基金(113106)资助

摘要 类型丰富的蕨类孢子与微体藻类在第四纪沉积物中频繁出现, 然而对其中的大部分蕨类孢子和重要微体藻类所蕴含的古生态与古环境信息仍缺乏深入分析与研究. 论文详细地总结和分析了其中的 7 种(属)重要的化石孢子和微体藻类的形态学特征、产地、时代、分布区域及其古生态环境指示意义, 即中华卷柏(*Selaginella sinensis* (Desv.) Spring, 1843)、水蕨(*Ceratopteris* cf. *thalictroides* (L.) Brongn, 1821)、短棘盘星藻(*Pediastrum boryanum* (Turp.) Meneghini, 1840)、单角盘星藻(*P. simplex* Meyen, 1829)、整齐盘星藻(*P. integrum* Nägeli, 1849)、刺甲藻属(*Spiniferites* Mantell, 1850, emend Strjeant, 1970)以及环纹藻属(*Concentricystes* Rssignal 1962, emend Jiabo, 1978). 除环纹藻属的系统位置仍存疑之外, 其他化石类型中所对应的植物视其亲缘关系可归属到相应的自然科属. 它们分别属于蕨类植物卷柏科(*Selaginellaceae*)的卷柏属(*Selaginella* Spring)、水蕨科(*Parkeriaceae*)的水蕨属(*Ceratopteris* Brongn)、绿藻门水网藻科(*Hydrodictyceae*)的盘星藻属(*Pediastrum*)、沟鞭藻类刺甲藻科(*Spiniferitaceae*)以及疑源类系统位置未定亚类的环纹藻属. 这些蕨类孢子和微体藻类的植物体往往适应特定的生境, 除中华卷柏适应温干气候条件或温暖偏湿的山坡或林下阴处石灰质土壤环境条件外, 其他均为与水体环境紧密相联的水生植物. 水蕨、盘星藻和环纹藻属于淡水种, 适宜在各种大小型自然湖沼湿地和水田、水沟等人工湿地生长和繁殖; 刺甲藻则生活在近海海域中, 属于咸水种. 它们在我国第四纪地层的沉积物中含量丰富, 而且在有些层位中个体浓度非常高, 因此, 这些适应特定生境的蕨类植物和微体藻类成为阐述第四纪古生态与古环境的强有力证据.

关键词

蕨类孢子
微体藻类
水生植物
湖沼湿地
第四纪沉积物

蕨类和藻类植物几乎遍布全球, 因此在地层的沉积物中, 蕨类孢子和微体藻类成了含量颇丰的微观生物遗存. 尽管蕨类植物的分布随着地球上水平

地带和垂直地带的气候条件(尤其是气温和降水)和土壤条件的差异也会发生相应的变化, 但它们的大多数喜生于温暖阴湿的林下环境, 成为森林植被中

引用格式: 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: 1969–1983

英文版见: Tang L Y, Mao L M, Lü X M, et al. Palaeoecological and palaeoenvironmental significance of some important spores and micro-algae in Quaternary deposits. Chin Sci Bull, 2013, 58, doi: 10.1007/s11434-013-5747-9

草本层的重要组成,因而可作为环境条件的指示植物.藻类植物绝大部分生活于水体中,但在淡水或咸水的生境中的种类各异.如短棘盘星藻(*Pediastrum boryanum* (Turp.) Menegh.)大多数生长于淡水湖沼,而刺甲藻属(*Spiniferites* Mantell, 1850, emend. Strjeant, 1970)则分布于近海海域.近年来我们在青藏高原许多高山湖泊表层和钻孔沉积物中所发现的盘星藻均产于淡水或微咸水的湖泊中,但在不同地理位置、不同水质的高山湖泊中却有盘星藻的不同种类;即使在同一湖泊中的不同深度,盘星藻出现的个体数、甚至种类也有变化,其种类和数量的变化也能指示着不同生态环境的变化.

尽管蕨类孢子和微体藻类经常出现在第四纪沉积物中,然而因其隐域性植被的植物组成,故在恢复植被和气候中得不到足够重视,甚至它们的种类鉴定与数量统计经常被忽视,从而直接影响到重建古生态环境的科学性与客观性.已有研究表明,一旦准确鉴定出地层中的某一种蕨类植物孢子化石,有可能在恢复环境,甚至在确定地层的沉积时代时有重要的指示意义.例如,从周口店北京猿人遗址中准确鉴定出具有指示气候较温暖的中华卷柏(*Selaginella sinensis*),从而修正了将这类孢子定为指示湿冷环境的阴地蕨或其他孢子^[1];最近我们在河北安新全新统的地层中发现不少现今广布于淮河、长江以南的亚热带地区水体中的水蕨孢子化石(*Ceratopteris thalictroides*),从而反映在全新世中期白洋淀地区的气候要比现在暖湿得多.20世纪70、80年代朱浩然等人^[2]和王开发等人^[3-5]先后初步研究过我国东部一些地区的藻类化石;最近毛礼米等人^[6]初步分析了长江三角洲地区全新世蕨类孢子和微体藻类化石指示古生态与古环境的应用潜力.但由于缺乏对蕨类和藻类植物现代生态环境及其沉积过程的研究,对此类植物古生态环境意义的讨论仅局限在特定区域或特定种类.根据本研究的化石材料,并结合文献记载,本研究总结并分析了几种重要的蕨类孢子和微体藻类化石的类型、产地和产出的年代信息;对第四纪地层中常见的化石孢子和微体藻类的形态进行了鉴别特征的描述与对比;并对它们指示的古生态环境进行了较深入的分析,期望在第四纪孢粉研究中予以重视,从而增加恢复第四纪古地理的信息,提高基于孢粉组合重建第四纪古生态与古环境的科学性与可信度.

1970

1 化石孢子和微体藻类及其形态特征描述

本文详细描述了2种蕨类和其他5种类型的藻类,数据来源为已经出版的文献和我们最近的研究材料和数据.研究的材料覆盖了中国很多地区.表1详细地列出了第四纪地层中常见的几种重要蕨类孢子和微体藻类化石的类型、分布地区和产出的年代信息.

1.1 中华卷柏 *Selaginella sinensis* (Desv.) Spring, 1843

中华卷柏化石在我国最早出现有可能是在黑龙江富拉尔基中更新世早期^[7]及吉林乾安上新世砂岩沉积中^[8].北京地区早白垩世晚期的沉积物中曾有卷柏孢子的报道,其中中华卷柏孢子化石出现时代为晚第三纪-全新世^[15].近几年我们在河北安新更新统-全新统、山东临沂全新统、江苏兴化更新统、江苏连云港全新统以及四川绵阳全新统中均发现较多此类化石(表1,图1).

本研究的更新统-全新统的中华卷柏孢子形态比较一致,极面观为圆角(等边)三角形,或为近圆形到圆形,赤道面观为椭圆形.孢子轮廓为规则的波浪状,孢子大小为33.3~41.1 μm,具三裂缝,扭曲裂缝长达孢子赤道线,孢子外壁较薄,具有很明显的疣块状纹饰.这种化石与具有疣块状纹饰的三缝孢凤尾蕨(*Pteris*)或阴地蕨(*Botrychium*)的一些种类孢子较相似.中华卷柏化石孢子以裂缝扭曲、不具边缘、不具环而具较大疣块状纹饰可与凤尾蕨或阴地蕨孢子区分开^[58].

中华卷柏化石孢子的植物亲缘关系属蕨类植物门卷柏科卷柏属.中华卷柏是我国蕨类植物的特有种,为多年生草本植物,喜生于较为湿润的山坡及山顶石缝中、阴草坡、沟底阴处、山坡灌丛下或林下草丛中的石灰质土壤中^[59].本属植物现全球均有分布,在我国主要分布于长江以北温带森林、森林草原和草原区.

1.2 水蕨(比较种) *Ceratopteris* cf. *thalictroides* (L.) Brongn., 1821

本研究的水蕨化石孢子发现于浙江余姚河姆渡、灵山全新统,上海广富林、奉贤和崇明全新统,江苏泰州、兴化更新统,山东临沂全新统以及河北安新更新统-全新统(表1).该化石孢子个体大,形态特征明

表 1 化石中华卷柏、水蕨、盘星藻、刺甲藻及环纹藻在我国部分地区分布信息与产出年代数据

化石类型	产出地区	时代或年代 (cal ka BP)	来源	化石类型	产出地区	时代或年代 (cal ka BP)	来源	
中华卷柏	黑龙江富拉尔基	中更新世早期	[7]	盘星藻	西藏南部普莫雍错	19.0~0.5	[32]	
	吉林乾安	晚第三纪	[8]		西藏那曲阿洪错	10.8~1.5	[33]	
	内蒙古呼和浩特、古敖汉旗	全新世	[9]		西藏普兰拉昂错	全新世	本文	
	内蒙古大青山	7.5~6.2	[10]		西藏八宿仁错	8.5~6.0	[34]	
	内蒙古兴隆洼	8.3~8.1	[11]		西藏工布江达县海登湖	14.0~0.5	[33]	
	内蒙古赤峰巴林古旗	8.9~6.8	[11]		西藏中部慈格塘错	全新世	[35]	
	青海柴达木盆地察尔汗盐湖	33.0~28.7	[12]		西藏安多唐古拉山口湖	6.5~0.5	[33]	
	青海湖	全新世	[13]		四川义敦冰川湖	11.0~0.5	[34]	
	北京周口店	更新世、全新世	[1]		新疆乌仑古湖	9.55~3.62	[36,37]	
	北京坟庄	全新世	[14]		新疆博斯腾湖	8.0~0.1	[38]	
	北京地区	晚第三纪-全新世	[15]		北京昆明湖	(1750~1960 AD)	[14]	
	渤海湾西岸	全新世	[16]		河北迁安	8.3~6.8	[20]	
	大连大莲花泡	1.8	[17]		河北安新	更新世-全新世	本文	
	河北白洋淀	全新世	[18]		黄海、东海陆架泥炭层	晚更新世	[39]	
	水蕨	河北安新	更新世		本文	江苏泰州、吕四	更新世、全新世	本文
青岛沿海		全新世	[19]	上海奉贤	全新世	[6]		
山东临沂		全新世	本文	江苏阳澄湖	晚更新世	[39]		
四川绵阳		全新世		长江三角洲地区	近代沉积	[40]		
江苏兴化		更新世		浙江西湖、宁波平原	晚更新世、全新世	[40]		
江苏连云港		全新世		浙江余姚河姆渡、灵山	全新世	本文		
内蒙古赤峰兴隆洼		7.47~6.895		[11]	云南滇池	全新世	[41]	
北京延庆, 顺义		8.1~5.7		[10]	海南岛双池玛珥湖	1.7~0.7	[42]	
天津市、塘沽、静海、北塘		8.1~5.7		[10]	雷州半岛湛江湖光岩玛珥湖	4.5	[43]	
河北安新		更新世-全新世		本文	南海陆架 7#	晚更新世	[39]	
河北黄骅		全新世		[10]	刺甲藻	南黄海盆地	更新世、晚第三纪	[44,26]
河北白洋淀		8.1~6.8		[18,20]		渤海沿岸、东海大陆架	晚第三纪	[45,46]
河北孟村		8.9~5.7		[10]		东海陆架	新生代	[47,48]
河北深县、景县、任县		8.9~3.3		[10]		山东东营凹陷	晚更新世晚期	[49]
河北黑龙洪、沧州		8.9		[10]		南海北部大陆架	晚第三纪	[28]
关中平原冀北丘陵	8.3~5.7	[11]		江苏连云港、吕四		全新世	本文	
渤海海湾	8.9~5.7	[21]		江苏泰州、兴化		晚更新世		
渤海沿岸东海大陆架	晚第三纪	[22]	上海奉贤	全新世		[6]		
河南郑州市区	全新世	本文	上海广富林、崇明	全新世		本文		
河南新郑贾湖遗址、大郑庄	8.9~5.7	[10]	浙江余姚河姆渡、灵山	全新世				
河南裴李岗	8.9~8.1	[10]	环纹藻	黑龙江牡丹江地区		全新世	本文	
山东青岛沿岸	8.9~5.7	[10]		黄土高原		晚更新世	[50]	
山东南四湖、莘县、惠民	8.9~5.7	[10]		河北安新		更新世	本文	
山东黄河三角洲	8.3~5.7	[10]		山东临沂		全新世		
山东胶州湾	全新世	[23]		安徽合肥		全新世	[25]	
山东日照	8.7~5.7	[10]		江苏连云港、吕四	全新世	本文		
山东兖州	5.7	[10]		江苏泰州、兴化	晚更新世			
山东临沂	全新世	本文		江苏南通	更新世	[51]		
山东郯城	5.9	[10]		江苏太湖沿岸	全新世	[40]		
安徽枞阳	8.9	[24]		江苏渡村	全新世	[52]		
江苏吕四	全新世	本文		长江三角洲地区	近代沉积	[40]		
江苏兴化	更新世			上海金山、奉贤	全新世	[3,6]		
上海广富林	全新世			浙江余姚河姆渡、灵山	全新世	本文		
上海奉贤	全新世	[6]		浙江杭州湾	更新世、全新世	[5]		
浙江余姚河姆渡、灵山	全新世	本文		黄海、东海沿岸	晚更新世	[53,39]		
南京宝华山	5.8	[25]		宁波平原	全新世	[53]		
南黄海盆地	更新世, 晚第三纪	[26]		江西西山西药湖、庐山	全新世	[54]		
雷州半岛	更新世, 晚第三纪	[27]		河南南阳	全新世	本文		
南海北部大陆架	晚第三纪	[28]		四川绵阳	全新世			
盘星藻	黑龙江富拉尔基	早更新世		[7]	福建晋江	全新世	[5]	
	吉林乾安	晚第三纪		[8]	云南滇池	近代沉积	[41]	
	内蒙古呼伦贝尔盟伊敏河域	5.2		[9]	广东佛山	全新世	本文	
	腾格里沙漠断头梁	晚更新世		[29]	北部湾沿岸	更新世	[28]	
	巴丹吉林沙漠浅湖	晚更新世		[29]	香港	晚更新世	[55]	
	青海柴达木盆地察尔汗盐湖	33.0~28.7		[12]	深圳前海	晚更新世	[56]	
	青海柴达木盆地东部	37.8~21.5		[30]	南海南部巽他陆架	16.5	[57]	
	青海呼尔勒湖	10.8~0.1		[31]	吉林	全新世	[58]	
	西藏纳木错	17.8~10.96	本文

图1 中华卷柏(*Selaginella sinensis* (Desv.) Spring)化石

(a)~(c) 河北安新更新世-全新世; (d)~(f) 山东临沂全新世

显。孢子四面体形, 辐射对称。极面观为钝三角形或三角圆形, 赤道面观为超半圆形。孢子大小为 $95\sim 162.5\ \mu\text{m}$ 。具三裂缝, 裂缝长达孢子半径的 $2/3$ 。不具周壁。外壁很厚, 约为 $4.8\ \mu\text{m}$, 层次明显, 外层厚于内层, 外层具肋条状纹饰, 肋的排列有一定的方向, 在远极面肋条与孢子轮廓线三边平行, 每边有 $6\sim 7$ 条, 在近极面每边肋条仅 $3\sim 4$ 条或更少, 形状弯曲(图2)。

晚第三纪的水蕨化石孢子常定名为粗肋孢属(*Magnastriatites* Germeraad, Hopping et Muller, 1968), 也常定名为肋纹孢(*Cicatricosisporites* Pot. et Gell., 1933), 最早发现于苏联克里米亚、莫斯科州等地的下白垩统, 高加索、西西伯利亚、外贝加尔等地的第三系以及其他地区的上白垩统和第三系地层^[15,60~62], 最早发现于中国、尼日利亚、哥伦比亚、印度尼西亚和印度渐新世至上新世。其中, 肋纹孢(*Cicatricosisporites*)由 Germeraad 和 Hopping^[63]建立, 并发现

图2 水蕨(比较种)*Ceratopteris* cf. *thalictroides* (L.) Brongn. 化石

(a)~(c) 河北安新更新世-全新世; (d)~(f) 山东临沂全新世

于哥伦比亚第三系地层。在我国许多地区晚第三纪地层中发现的多种粗肋孢属, 应该是水蕨化石孢子在我国的最早发现^[22,26,28,44,45,64]。如东海陆架盆地海龙井组中段的哈氏粗肋孢(*M. howardi* Germeraad, Hopping et Muller); 海龙井组-玉泉组发现的粗肋孢(*M. granulastratus* Li)、小粗肋孢(*M. minutus* Li)^[47]; 南海北部大陆架涠洲组的雷州粗肋孢(*M. leizhouensis* Zhang)^[27]等, 其时代为晚中新世。

水蕨(比较种)(*Ceratopteris* cf. *thalictroides* (L.) Brongn)和粗肋孢属(*Magnastriatites* Germeraad, Hopping et Muller)的植物亲缘关系均属现代植物蕨类植物门水蕨科的水蕨属。现代水蕨(*Ceratopteris thalictroides* (L.) Brongn.)为一年生多汁水生植物, 生活于池沼、水田和水沟。在我国分布于广东、台湾、福建、江苏、浙江、安徽、湖北、四川、广西、云南等地^[65]; 亚、非、欧洲其他热带和暖温带地区也有分布。

1.3 短棘盘星藻 *Pediastrum boryanum* (Turp.) Meneghini 1840

短棘盘星藻化石在欧洲白垩纪就有发现^[66,67]。我国学者在渤海沿岸下渐新统-上始新统沙河街组四段地层中发现多种相似化石, 其中有一种定名为短棘盘星藻波边变种(*Pediastrum boryanum* var. *undulatum* Wille 1879)的化石可能是我国最早发现短棘盘星藻化石^[46]。黑龙江富拉尔基早更新世沉积中也发现短棘盘星藻^[7]。本研究的短棘盘星藻化石发现于浙江余姚河姆渡、灵山全新统, 上海广富林、奉贤和崇明全新统, 江苏泰州、兴化更新统, 山东临沂全新统, 安徽巢湖全新统, 河北安新更新统以及西藏阿洪错、错那、唐古拉山垭口湖、拉昂错、公珠错、纳木错和义敦湖等高山湖泊全新统(表1)。它们的植物体形状呈圆盘形或椭圆形, 轮廓近圆形。定形群体由 $16\sim 64$ (最多256)个细胞所组成的单层体, 分成 $2\sim 4$ 个同心环, 排列紧密均匀, 相邻细胞壁构成网格状, 细胞五至六边形, 细胞壁表面具细颗粒状。细胞直径约 $10\sim 30\ \mu\text{m}$, 定形群体总直径 $50\sim 160\ \mu\text{m}$ 。外层细胞具2个钝的角状突起, 长 $2\sim 10\ \mu\text{m}$, 两突起间明显凹陷, 其末端钝或平截(图3)。

1.4 单角盘星藻 *Pediastrum simplex* Meyen, 1829

本研究的化石标本产自江苏吕四全新统, 浙江

图3 短棘盘星藻(*Pediastrum boryanum* (Turp.) Meneghini)化石

(a) 河北安新更新世-全新世; (b), (d), (e) 西藏纳木错更新世-全新世; (c) 西藏那曲阿洪错全新世; (f) 西藏普兰公珠错全新世

余姚河姆渡和灵山全新统, 上海广富林、奉贤和崇明全新统, 江苏泰州、兴化更新统, 河北安新更新统-全新统, 西藏那曲阿洪错、错那、唐古拉山湖、拉昂错全新统以及西藏纳木错更新统-全新统(表 1)。化石单角盘星藻定形群体完整无穿孔, 由 18~56 个细胞组成。内层细胞五至六边形。边缘细胞外侧具一角状凸起, 凸起周边凹入(图 4)。单角盘星藻与短棘盘星藻的特征比较接近。

1.5 整齐盘星藻 *Pediastrum integrum* Nägeli, 1849

本研究的整齐盘星藻化石标本采自西藏纳木错

图4 单角盘星藻(*Pediastrum simplex* Meyen)化石

(a) 河北安新全新世; (b) 江苏吕四全新世; (c) 西藏纳木错更新世-全新世; (d) 上海奉贤全新世

更新统-全新统和西藏拉昂错全新统(表 1)。植物体定形群体完整无穿孔, 由 36~64 个细胞组成。内层细胞常为五边形。外层细胞外侧具有 2 个短凸起, 两短凸起间的细胞壁略凹入, 细胞壁常具颗粒纹饰。细胞宽 12~18 μm, 个体的最大直径可达 120 μm(图 5)。

以上 3 种盘星藻化石的植物体均属于现代植物绿藻门绿藻纲(*Chlorophyceae*)绿球藻目(*Chlorococaceae*)水网藻科的盘星藻属。它们广泛分布, 常生长在湖湾、池塘、沟渠、小水洼等各种静止水体中。我国第四纪地层中盘星藻化石不止这 3 种。海南岛双池玛珥湖晚全新世沉积中鉴定出盘星藻属有 3 个种, 即单角盘星藻(*Pediastrum simplex*)、二角盘星藻(*P. duplex* Meyen)和短棘盘星藻(*P. boryanum*), 其中单角盘星藻还发现了多个变种^[68]。张玉兰等人^[39]在南海陆架#7 井除记录有单棘、双棘和短棘盘星藻外, 还发现有叠指盘星藻(*P. kawraiskyi* Schmidle)、歧射盘星藻(*P. biradiatum* Meyen)、全缘盘星藻(*P. integrum*)、钝角盘星藻(*P. mulicum* Kuetz)、多孔盘星藻(*P. clathratum* (Schröder) Lemmermann)、蛛网盘星藻(*P. araneosum* (Racib.) Smith)等。Zamaloa 和 Tell^[69]研究南美南部盘星藻化石时发现不同种产于不同时代, 最老的是 *P. boryanum* var. *boryanum*, 出现于晚白垩系; *P. tetras* (Ehrenberg) Ralfs 产于早始新统地层; *P. boryanum* var. *brevicorne* Braun, *P. boryanum* var. *longicorne* Reinsch, *P. duplex*, *P. integrum*, *P. kawraiskyi*, *P. leonensis* Tell and Zamaloa, *P. mustersii* Tell and Mataloni 和 *P. simplex* 出现在中新世的藻类组合中。

1.6 刺甲藻属 *Spiniferites* Mantell, 1850, emend. Strjeant, 1970

本研究的刺甲藻化石没有定到种, 只是该属的

图5 整齐盘星藻(*Pediastrum integrum* Nägeli, 1849)化石

(a), (b) 西藏纳木错更新世-全新世

未定种(*Spiniferites* sp.)化石标本产自江苏吕四全新统,浙江余姚河姆渡和灵山全新统,上海广富林、奉贤和崇明全新统,江苏泰州、兴化更新统-全新统(表 1)。该化石壳体为不规则卵球形,被纤细缝线分为板片,板式不明显。壳体分上下壳,具管状突起多处于缝线汇合处,突起多中空,和壳体不通,从近极向远极微变窄,末端常截平。顶突起和后腰板片突起较其他突起宽大。壳体大小约 30~40 μm (图 6)。刺甲藻化石在很多地区的白垩纪以来的地层中均有发现^[70],指示海洋沉积环境。20 世纪 60 年代中期之前,类似于刺甲藻属化石类型被定名为 *Hystri-chospaera*, 而 Evitt^[66]和 Rossignol^[71]研究发现,它出现时代较晚,实为 *Spiniferites* 的同物异名^[47,66]。现在晚第三纪以来上述类型的化石均定为 *Spiniferites*, 取代 *Hystri-chospaera*。

我国东海陆架盆地龙井构造带东海群底部曾发现近 10 种刺甲藻化石。根据壳体形状和大小、突起长短和宽窄、管状末端形状和是否分叉等特征,分别定名为:本托刺甲藻 *Spiniferites bentorii*(Rossignol) Wall and Dale、多泡刺甲藻(比较种) (*S. cf. bulloides* (Deflandre and Cookson) Sarjeant)、膜带刺甲藻具刺变种(新变种)(*S. cingulatus* var. *spinatus* Song)、超棘

刺甲藻(比较种) (*S. cf. hyperacanthus* (Deflandre and Cookson) Cookson and Eisenack)、膜管刺甲藻(*S. membranaceus* (Rossignol) Sarjeant)、节管刺甲藻(*S. nodosus* (Wall) Sarjeant)、多枝刺甲藻(*S. ramosus* (Ehrenberg) Mantell)等,都是下更新统常见种类^[47]。余静贤^[48]、祝幼华^[49]在东海陆架盆地台北拗陷,下始新统瓯江组上部-温州组下部发现的本托刺甲藻截管亚种(*S. bentorii* subsp. *truncatus* (Rossignol) Lentin and Williams, 1973), 以及石油化学工业部石油勘探开发规划院等^[46]在渤海沿岸沙河街组四段(相当于下渐新统-上始新统)发现的 *S. bentorii* 可能是我国发现时代最老的刺甲藻化石。

1.7 环纹藻属 *Concentricystes* Rossignol 1962, emend. Jiabo, 1978

环纹藻属化石壳体透镜形或近卵形,轮廓圆形或卵形。壳体沿赤道或可分为两部分。壳面具同心排列或指纹形的凸条纹,密或疏。圆口存在或缺乏。具薄膜或无(图 7)。

环纹藻属的植物亲缘关系不明,暂归疑源类位置未定亚类。它最早为 Wolff 发现于德国上新世褐煤层,称为 *Sporites cirulus*^[72,73], 后来 Rossignol^[74]将之

图 6 刺甲藻属(*Spiniferites* Mantell, 1850, emend. Strjeant, 1970)化石

(a) 上海奉贤全新世; (b)和(i) 连云港更新世; (c)和(g) 上海广富林全新世; (d)~(f), (j) 江苏吕四全新世; (h)和(k) 浙江河姆渡全新世

图7 环纹藻属(*Concentricystes* Rssignal 1962, emand. Jiabo, 1978)化石

(a)~(c) 河北安新更新世-全新世; (d), (k), (l) 连云港更新世-全新世; (e) 江苏泰州更新世-全新世; (f) 广东佛山全新世; (g), (m), (q) 河南南阳全新世; (h), (i) 浙江河姆渡全新世; (j) 山东临沂全新世; (n) 江苏吕四全新世; (o), (p) 上海奉贤全新世; (r) 重庆全新世((r-1), (r-2) 分别自不同角度拍摄)

命名为 *Concentricystes srubinus*, 一直沿用至今. 裸藻门的 *Trachelomones onulifera* (Fritsch & Rich) *Huberpestalozyi* 和 *Tr. stokesiana* 孢子都具环状纹饰, 其外形和环纹藻属相似^[46], 它们是否存在亲缘关系需要深入研究证实. 吴作基等人^[56]研究深圳市后海晚更新世中期泥炭层孢粉组合中发现的具环状纹饰和本研究的环纹藻属一些类型化石相似, 被定为裸藻门的 *Trachelomones* sp. Medeanic^[75]在巴西 Rio Grande 海边平原全新世泥炭地及泻湖沉积中发现的 *Pseudoschizaea* sp. 与我们发现的 *Concentricystes* type

形态相似.

环纹藻属化石以壳壁外具薄膜或无、环纹细密或粗强等可分为若干种. 如辽宁盘山沙河街组二段, 山东垦利沙河街组三段上部以及渤海南部明化镇组的薄膜环纹藻(*Concentricystes membranaceus*); 天津南郊和山东滨县的沙河街组一段—东营组, 渤海中部平原组的盘山环纹藻(*Concentricystes panshanensis*)^[45,47]. 该属化石广泛出现在我国第四纪湖相地层中, 如香港元朗山下村、东涌、大埔和清水湾道等地更新统湖泥沉积^[55], 深圳后海上更新统泥炭层^[56],

沪杭地区晚更新世-全新世湖相沉积^[52], 北方在黑龙江牡丹江地区全新统以及吉林乾安早更新统均有出现^[58], 但我国西北及青藏高原地区很少出现。

本研究的化石标本产于长江三角洲地区更新统-全新统, 江苏吕四全新统; 苏北泰州、兴化更新统, 上海崇明全新统, 河北安新更新统-全新统(表 1)。本研究所采集到的标本均未鉴定到种, 用 *Concentricystes* type 的形式表示。孔昭宸等人^[76]在北京海淀泥炭层发现的 *Concentricystes*, 当时定中文的学名是指纹孢, 其实这种化石类型应该就是现在普遍称为的环纹藻属。

2 结论与讨论

2.1 中华卷柏指示温暖偏热湿的林下草被层环境

中华卷柏的孢子形态与具疣状纹饰、三裂缝的凤尾蕨一些种较相似, 而被误定为凤尾蕨(*Pteris* sp.)或扇羽阴地蕨属(*Botrychium lunaria* (Linn) SW), 直到1981年, 孔昭宸等人^[1]在进行周口店北京猿人遗址环境研究时, 首次采用中华卷柏(*Selaginella sinensis*)一名, 后相继发现于内蒙古呼和浩特旧石器遗址昭乌达盟敖汉旗^[9]、北京周口店中更新统^[1]、青海柴达木盆地察尔汗盐湖更新统^[12]、青岛沿海全新统^[38]以及黑龙江富拉尔基^[7]、吉林乾安晚第三系^[8]等。然而, 大量的第四纪孢粉研究者往往忽视了中华卷柏孢子的鉴定, 更很少讨论它们在地层划分、对比以及反映古环境等方面的重要作用。

根据中国有关地方植物志记载^[65], 现今中华卷柏分布最北至黑龙江大兴安岭林区(50.24°N, 124°E), 最南达湖北武当山(31.6°N, 113.8°E)。年均温范围在-2~15.6℃, 7月气温在20.1~28℃, 年降水量在473~988 mm。可见中华卷柏主要生长在长江以北气候较湿润、温度适中的环境中^[59]。而现有资料显示化石中华卷柏孢子发现最西部到青海柴达木盆地, 北部到辽宁, 东部抵大连, 东南达江苏赣榆。如青海湖和柴达木盆地察尔汗盐湖(36°40'~37°10'N, 94°10'~95°10'E)更新世-全新世发现的中华卷柏孢子, 化石产地分布较现今中华卷柏产地北移约2°(纬度)和西移(经度)10°, 这就反映了当时气候比现在要温暖湿润得多^[59]。

在周口店(中更新世)底砾石层的孢粉组合中, 中华卷柏占80.2%, 说明该沉积层处于温暖的间冰期环

境^[58]; 在1.7 cal ka BP前后大连金州大连花泡剖面中出现大量蕨类孢子, 其中中华卷柏占90%, 表明当地1.7 cal ka BP前后由温干趋向凉湿^[17]。我们在河北安新、山东临沂、江苏兴化和连云港等地更新统-全新统许多剖面发现较多中华卷柏孢子, 其地层均为湖沼相或湿地滩涂。因此, 一旦地层剖面的孢粉谱中出现一定数量的中华卷柏孢子, 可以推论这类孢粉组合反映的可能是森林或森林草地植被, 指示温暖偏热湿的气候条件以及林下山坡及山坡石缝石灰岩成土母质土壤生境。

2.2 水蕨孢子化石指示湿热湖沼及河流相沉积环境

水蕨孢子化石常被定为粗肋孢属(*Magnastratites*), 20世纪70~80年代发现于第三系的渤海沿岸地层^[46]、东海陆架盆地^[47]和南黄海盆地^[28], 以及雷州半岛^[27]的更新统地层等。

水蕨属可能起源于始新世晚期的亚洲热带地区, 渐新世时它们向热带地区扩展, 而后再向北推进。在美洲加勒比海地区、非洲尼日利亚及孟加拉湾沿岸地区就是从渐新世一直延续到第四纪。在我国渤海沿岸地区和长江流域一带, 水蕨孢子一般出现于上第三系至第四系, 而下第三系少见; 在热带地区水蕨孢子从渐新世经过中新世一直延续到第四纪^[47]。

水蕨属是水蕨科的单型属^[65], 广布于热带及亚热带地区。我国有2种, 即水蕨(*Ceratopteris thalictroides*(L.) Brongn.)和粗梗水蕨(*Ceratopteris pteridoides*(Hook) Hieron), 它们主要分布于长江以南, 并经常生于池沼、水田和水沟的淤泥中, 有时漂浮于水面上。很显然水蕨适宜于暖热的静水环境。从孢子形态看, 我们所发现的水蕨孢子化石与水蕨(*C. thalictroides*)相似, 定为水蕨(比较种)(*Ceratopteris* cf. *thalictroides*(L.) Brongn.)。据调查现今水蕨分布最北在山东南四湖(34.5°N)附近, 南至云南和海南岛。而现有孢粉记录显示水蕨孢子化石发现地点全新世中期(约8.9~5.9 cal ka BP)较现在分布地区偏北1~6个纬度, 最北到北京延庆(40.5°N)和顺义(40.1°N)^[10]。按照纬度每变化1°, 气温将变化0.6℃的粗略计算, 可以推测水蕨孢子化石地点在全新世中期当地年均温较现在高0.6~3.6℃。换言之, 在全新世中期我国河北、山东等地的气候要比现在湿热得多。例如, 最近我们在河北安新(距现在在水蕨分布北界有4.4个纬度)更新世-全新世地层中发现不少水蕨孢子和莎草、香蒲以及水藻等

组成反映湖沼湿地植被类型的孢粉谱,说明更新世或全新世一些时段,安新地区气候比现在湿热,白洋淀的面积较现在大得多;山东兖州王因遗址(5.9 cal ka BP)发现大量水蕨和双星藻(*Zygnema*),说明黄淮流域年均气温较现今高 2℃以上,发育大面积湖沼^[11];同样,水蕨孢子大量出现在 6.8 cal ka BP 白洋淀^[18]和 5.9 cal ka BP 山东郯城,显示 6.8 cal ka BP 前后海河流域 1 月温度达 $5\pm 2^{\circ}\text{C}$,比现在保定 1 月高出 $9\pm 2^{\circ}\text{C}$;5.9 cal ka BP 前后郯城 1 月气温比郯城现在高出 $3.5\pm 1^{\circ}\text{C}$ ^[24,25]。

根据孢粉记录在全新世中期(约 8.9~5.9 cal ka BP)水蕨孢子化石在我国分布范围^[10],除长江以南外,值得讨论的主要是海河流域及黄河三角洲地区以及渤海湾及青岛沿岸的水蕨孢子发现的环境意义。在 8.3~5.7 cal ka BP 期间,海河、黄河三角洲、北京、天津、河北东部、关中平原及冀北丘陵等地,在以栎、榆、桦为主的孢粉组合中出现热带亚热带植物成分,如水青冈、枫香、山核桃和水蕨等呈现半湿润森林气候环境^[16];渤海湾及青岛沿海 8.9~5.9 cal ka BP 孢粉组合中出现亚热带乔灌木、栎类、枫香、山核桃、山矾、杨梅、冬青、水青冈以及水蕨和凤尾蕨,属暖温带阔叶林与亚热带常绿落叶阔叶林过渡类型植被,气候明显较现今温暖潮湿^[21,23]。

水蕨作为隐域植物的一种,一旦遇到合适的水温和水质条件,它的数量可能会突然增高,从而对湖沼生态以及水域环境产生重要影响。因此,当孢粉组合中出现较多水蕨孢子化石时,有理由把水蕨作为代用指标指示湿热湖沼、湿地以及流速较慢的河流沉积环境。

2.3 化石盘星藻丰度可作为指示相对湖面变化的代用指标

盘星藻是一类广域性分布的水生藻类植物,生活在淡水或微咸水湖泊、池塘、洼地或流速不大的小河等各种静止水体中,硬水中更为常见^[77]。现生盘星藻几乎都生于淡水,迄今为止海产种类没有发现。在海相地层中如有盘星藻化石出现,可能是随水流进入湖泊或距海不远的古淡水湖泊,后因地壳下陷,海水侵入而搬运盘星藻再沉积于地层中。因此,盘星藻可作为一种良好的淡水湖泊沉积相的指示体。

盘星藻化石在世界范围内均有发现。在加拿大安大略州东北 Temagami 地区全新世湖泊沉积物的

6.25~4.115 ka BP (uncalibrated ^{14}C age) 时段出现丰富的盘星藻等淡水藻类,反映了温暖气候,相当于全新世大暖期(Hypsithermal)阶段^[78];波兰 Baltic 海南晚冰期沉积的 *Pediastrum-Carpinus-Corylus-Alnus* 组合,表明淡水侵入的温暖环境^[79];玻利维亚 Altipano 湖相沉积钻孔孢粉研究反映 90~21.5 cal ka BP 呈现湖泥与盐地交替变化,指示了湿润与干旱环境变迁过程,低浓度的及明显波动的盘星藻和水生植物组合反映以盐地为主的干旱环境,而 54~30.5 cal ka BP 和末次盛冰期(LGM)及其后的时段则相反,呈现湿润环境^[80];巴西 Rio Grande 海边平原全新世泥炭地发现的 *Pediastrum*, *Zygnema*, *Spirogyra* 等淡水藻类,反映了因海侵海退的泻湖沉积环境^[75];印度西海岸全新世沉积中出现一系列淡水盘星藻和葡萄藻(*Botryococcus*)聚集群,指示 Kerala 盆地被淡水侵入以及泻湖的发育^[81]。盘星藻化石在我国广泛分布在淡水或微咸水湖泊中,从最南端海南岛双池玛珥湖^[42]、南海陆架^[39]到吉林乾安^[8]、黑龙江富拉尔基^[7];从东海海底^[39]、长江三角洲地区^[6]到青藏高原高山湖泊^[33,34]、新疆乌伦古湖^[36,37]和内蒙古巴丹吉林沙漠浅水湖^[29]都有分布。

盘星藻在我国西部及西南部水深较浅的淡水或微咸水湖泊中广泛分布,其个体数随着湖泊水深增加而升高。据现生盘星藻的个体数丰度与水深关系调查发现,在青藏高原及西部水深较浅的淡水或微咸水湖泊中,随着湖泊水深增加,盘星藻个体数则随之相应地增加。如青海柴达木盆地呼勒湖(水深 8.6 m)从水深 0.6~8 m 盘星藻个体数逐渐增多,8 m 以下不复出现^[31]。云南滇池(水深 6.5 m)表层沉积从水深 4.5~6.4 m 盘星藻个体数急增,由每克 2000 余增到 10000 个体^[41]。陈发虎等人^[38]认为盘星藻是池沼环境中的浮游植物,适宜于生长在淡水并略富营养化的静水水体中;盘星藻化石常常作为淡水湖泊的指示性植物。新疆博斯腾湖在较浅的湖泊沉积物中基本没有发现盘星藻,部分样品中即使有发现,浓度也非常低。在水深大于约 10 m 以后,盘星藻的浓度快速上升。因此,对于水深在 15 m 左右的湖泊^[2]表层沉积物中盘星藻浓度与水深有较好的对应关系,可以作为水深变化的指标。然而,对于深水湖泊是否具有同样的规律,有待深入研究。据初步调查西藏高山湖泊水深在 20~90 m(如公珠错、玛崩错、崩错、玛旁雍错、班公错等)的湖泊表层沉积中均有盘星藻出

现. 水深在 90 m 以上的纳木错和水深在 60 m 以上的普莫雍错表层沉积中也出现了丰富的盘星藻, 最少有 3 个种(图 5~7).

根据青藏高原晚更新世-全新世湖泊沉积孢粉记录, 许多湖相沉积中均发现一定数量的盘星藻化石, 尤其是全新世中后期的沉积地层中出现盘星藻沉积通量($\text{colonies cm}^{-2} \text{a}^{-1}$, 即每年每平方米个体数)较高^[82]. 如西藏八宿的仁错和那曲的阿洪错在 8.5~6.0 cal ka BP, 达 300~2000 $\text{colonies cm}^{-2} \text{a}^{-1}$; 工布江达的海登湖在 10.8~9.0 cal ka BP 和 2.0~1.5 cal ka BP 达高值(500~700 $\text{colonies cm}^{-2} \text{a}^{-1}$); 唐古拉山垭口湖在 4.2 cal ka BP 以后达 300~400 $\text{colonies cm}^{-2} \text{a}^{-1}$ ^[33,82]; 纳木错湖泊钻孔在 10.96~12.71 cal ka BP 和 17.8 cal ka BP 前后盘星藻出现峰值(2000~2500 $\text{colonies cm}^{-2} \text{a}^{-1}$); 青海呼尔勒湖^[31]在 5.5 cal ka BP 以后盘星藻逐渐上升达 76%(图 8); 新疆乌伦古湖在 5.21~3.62 cal ka BP 达到 43.3%, 在 9.55~7.74 cal ka BP 出现(15.6~43.3%)最高值^[36,37]; 海南岛双池玛珥湖在 1.7~2.4 cal ka BP 以及雷州半岛湛江湖光岩玛珥湖在 4.5 cal ka BP 盘星藻个体数出现峰值, 大约达 2000~6000 个体/ $\text{g}^{[42,43]}$.

依据青藏高原一些湖泊孢粉组合中生物定量指标研究, 化石盘星藻可以作为指示相对湖面变化的

代用指标. 高原中部唐古拉山垭口湖和阿洪错的孢粉记录中化石盘星藻的通量($\text{colonies cm}^{-2} \text{a}^{-1}$)分别在 4.5~3.0 cal ka BP 和 7.8~6.5 cal ka BP 出现峰值. 比这两个湖的其他时段高出 40 和 350($\text{colonies cm}^{-2} \text{a}^{-1}$) (图 8). 这些高值时段与孢粉总通量、禾本科/蒿属比值或莎草科花粉百分含量高值期是同步的^[33,34]. 孢粉通量增高反映当时湖盆地区季风性降水增多, 尽管还看不出植被的变化, 但同层位的碳酸盐 $\delta^{18}\text{O}$ 值很低, 可能反映此时湖水已经外溢^[33]. 在其他湖泊沉积中化石盘星藻个体数量增加同样反映为季风性降水增多. 如海南岛双池玛珥湖在 2.4~1.8 cal ka BP 时段盘星藻个体数急增, 是 1.7~1.3 cal ka BP 的 5~8 倍, 反映季节降水增加, 湖面扩大, 推测为丰水期^[42]. 在我国西北荒漠或干旱地区第四纪沉积中出现盘星藻更能说明这一点. 青海柴达木盆地察尔汗盐湖大别勒滩钻孔 31.8~25.6 ka BP 出现 14.8%短棘盘星藻, 反映湖水一度淡化^[12]; 内蒙古呼伦贝尔盟伊敏河流域 4.5 ka BP 也发现短棘盘星藻, 说明当时湿度高, 森林面积扩大^[9]; 腾格里沙漠断头梁剖面 28~30 cal ka BP 层位中较多(31.5%)化石盘星藻出现, 说明沉积当时有足够降水才能在沙漠中形成湖泊^[29].

在国外也有相似的研究例子, 如澳大利亚维多

图 8 青藏高原几个高山湖泊全新世沉积中化石盘星藻沉积通量($\text{colonies cm}^{-2} \text{a}^{-1}$)

利亚州西南凯拉比特火山口湖 6.5~5.0 cal ka BP 沉积时段的盘星藻化石数量占孢粉总数的 81.7%，指示当时气候潮湿，湖水淡化，含盐量降低^[72]。丹麦 Bollinger So 晚冰期和全新世沉积中 8 种盘星藻显示，进入全新世后，盘星藻浓度上升 (20×10^3 colonies $\text{cm}^{-2} \text{a}^{-1}$)，反映碱性湖水上升^[83]。由此可以推测，与现在湖泊相比，丰富的化石盘星藻个体数所在层位是相对高的湖面时段。但根据盘星藻丰度变化，目前尚不能提出定量的盘星藻丰度与湖水深度的数量关系模型，只能定性反映相对的湖面变化。

另外，在青藏高原中部草原-草甸区内，湖泊孢粉记录中盘星藻丰度也可以起到与莎草科花粉百分含量相似的指示相对湖面变化的作用。以小湖许果错为例，莎草科花粉大部分来自湖泊周围沼泽草甸。如果湖面缩小，莎草沼泽草甸就可能扩大，花粉记录中莎草科花粉必然增多。但许果错自 8.5 cal ka BP 以来没有出现盘星藻，莎草科花粉含量逐渐增加，不仅说明该湖自 8.5 cal ka BP 以来一直没有变成淡水湖，而且可以推测该湖湖面下降^[33,34]。

2.4 刺甲藻化石指示近海、海滩或海侵沉积环境

据以前的文献记载^[84]，刺甲藻化石是典型的指示海相地层的成分，广泛出现于下白垩至第四系。我国渤海沿岸地区下渐新统出现的 *Spiniferites puyangensis*；日本新泻地区和我南海北部大陆架琼东南盆地的中新世地层分别出现 *S. hexatypicus* 和 *S. pseudofurcatus*, *S. ramosus* 为半咸水-咸水种^[44-46]；大西洋的比斯开湾、意大利以及日本新泻上新统-下更新统刺甲藻是延续的，如 *S. membranaceus* 和 *S. ramosus* 都是上新世和第四纪海相沉积中常见类型，到更新世海相刺甲藻数量增多，分异度高，在北太平洋、白令海和大西洋比斯开湾更新统以 *S. mirabilis* 和 *S. frigidus* 为主。在近海区全新世沉积中常见 *S. elongatus*, *S. membranaceus*, *S. mirabilis*, *S. ramosus* 等都是从更新世延续过来的^[70,85]。de Verna 和 Mudie^[86]认为以 *Spinifrites* 化石占优势的层段代表间冰期沉积，但 Edwards 等人^[87]认为含 *Spinifrites* 藻类组合很难显示海水温度和海水深度。

本文发现于江苏吕四全新统，浙江河姆渡、余姚和灵山全新统，上海广富林、奉贤和崇明全新统的 *Spinifrites* 化石反映为近海或海滩沉积环境。而发现于江苏泰州、兴化更新统的 *Spinifrites* 化石可能反映

为海侵沉积环境。Downie 等人^[85]认为以 *Spinifrites* 占优势藻类组合代表典型开阔海域的沉积环境，并在海侵阶段它们的数量最为丰富，所产 *Spinifrites* 化石大多为棒刺状突起，非宽管状，很可能处于近岸的海洋环境。

2.5 环纹藻化石多出现于湖沼沉积物中，通常反映温暖湿润的气候环境

Rossingnol^[71]认为环纹藻是淡水藻类，大量标本是在以色列的 Wadi Kutin 河底沉积以及美国和澳大利亚第四纪冲积物中发现，反映为淡水河流相或湖泊沉积环境。但 Wall^[88]认为这种类型的环纹藻在深海沉积以及大陆架沉积中是十分普遍的。在我国尚缺少深海沉积中环纹藻化石的报道。

环纹藻化石在我国第四纪地层中有广泛的分布，是一种具指相意义、对气候有较强适应性的藻类。据以往研究报道及本研究所发现的环纹藻化石，绝大多数发现于湖沼相或泥炭沉积环境的地层。在我国东部江浙沪及江西、福建等地全新世泥炭沉积或河湖相灰黑色泥质沉积中都发现有丰富的环纹藻化石，它往往与莎草科、香蒲、眼子菜、泽泻、浮萍等水生植物共同出现，且经常与淡水生盘星藻、双星藻、鼓藻共生，其孢粉组合所反映的是以常绿栎类为主的植物群，反映温热湿润的淡水湖沼或河漫滩积水沼泽的沉积环境^[5]。我国东海陆架盆地龙井组、台湾石底组(早中新世)以及日本早中新世相浦型(*Ainoura* type)植物群，也有环纹藻出现。它们常常与菱粉属(*Sporotrapoidites*)、芸香粉属(*Rutaceipollis*)以及粗肋孢属(*Magnastriatites*)等，同时出现于湖相沉积地层中，反映暖温带-亚热带温暖湿润的气候环境^[47,89]。在我国最南端南沙群岛更新世沉积中，也发现有众多环纹藻化石。如南海南部巽他陆架柱状剖面在 16.5~13.9 cal ka BP 时段热带低山雨林成分花粉含量较高，同时环纹藻浓度也很高，说明当时水位较低，或仅是地面有积水，海平面刚刚开始上升^[57]。在北部湾沿岸更新世沉积中以热带亚热带植物花粉(樟科、桑科、山龙眼、无患子科等)为主的沉积层中，同时出现较多环纹藻，反映炎热潮湿的气候环境^[5]。

环纹藻对气候具有很强的适应性，它不仅出现在我国南方和东南、黄海沿岸的热带亚热带湿热的气候环境中，在我国北方黑龙江以及黄土高原从晚更

图 9 计算盘星藻个体浓度一例：西藏那曲阿洪错主要孢粉种类百分含量和盘星藻个体浓度^[33]

新世早期到晚全新世都有发现，不论是含喜暖湿的阔叶树花粉的层位，还是喜冷湿暗针叶树花粉层位都出现较多环纹藻化石个体，依此可以追溯当地的地史时期淡水湖沼的环境变迁^[50]。

2.6 有关藻类个体的浓度计算

第四纪孢粉分析中，经常有多种藻类化石出现，如盘星藻、双星藻、环纹藻等。它们分别适应特定的生境，是指示第四纪古生态与古环境的明确指示物和强有力证据，应该将它们单独计算个体浓度，而不要将它们与花粉、孢子加到一起计算相对百分比含量或浓度。藻类虽然是植物的一部分，但它们是广域分布的隐性水生低等植物，不是区域或地带性植被的

构成者，如果把它们和同层位发现的乔木或草本植物花粉一起计算百分比，将会削弱其他花粉类型的相对百分比含量的统计权重，导致孢粉植物群重建的可信度下降。应该指出，本论文引用的有些文献资料与数据缺少更新，仍然有采用盘星藻或环纹藻占孢粉总数百分比的计算方法，在此引用仅作参考。我们建议今后在孢粉组合的成分统计中，将同时发现的各种藻类单独计算出它们的个体数，然后根据化石层位年代和外加花粉数计算每平方厘米(沉积层)，每年沉积的某藻类的个体数(图 9)，即藻类的沉积通量为个体数/(平方厘米年)(colonies cm⁻² a⁻¹ 或 grains cm⁻² a⁻¹)，沉积通量为客观地解释古生态与古环境的演变过程丰富了重要的信息。

致谢 感谢中国科学院南京地理与湖泊研究所的李春海博士、中国科学院植物研究所张芸博士和中国科学院南京地质古生物研究所何翠玲女士分别在 ¹⁴C 年代校正及换算、文稿修订和样品分析方面给予的帮助。

参考文献

- 1 孔昭宸 杜乃秋, 吴玉书, 等. 依据孢粉分析讨论北京猿人生活时期及其前后自然环境的演变. 科学通报, 1981, 26: 1065–1067
- 2 朱浩然, 曾昭琪, 张忠英. 江苏北部下第三系戴南组的盘星藻化石及其沉积环境的初步分析. 古生物学报, 1979, 17: 233–243
- 3 王开发, 张玉兰. 根据孢粉分析推论沪杭地区一万多年来的气候变迁. 历史地理, 1981, 1: 126–131
- 4 王开发, 张玉兰, 蒋辉, 等. 东海海底泥炭层盘星藻组合的发现与晚更新世晚期的海平面变化. 科学通报, 1981, 26: 109–112
- 5 王开发, 韩信斌. 我国东部新生界环纹藻化石研究. 古生物学报, 1983, 22: 468–473
- 6 毛礼米, 王伟铭, 舒军武, 等. 长江三角洲地区全新世蕨类孢子与藻类——以奉贤 DY03 钻孔的产出类型为例. 古生物学报, 2011, 50: 154–165
- 7 刘敏, 杜乃秋, 孔昭宸. 黑龙江省富拉尔基晚新生代孢粉分析及其意义. 植物学报, 1990, 32: 307–316

- 8 贾翠华, 于莉, 杜乃秋, 等. 吉林乾安晚第三纪以来的植被发展和气候变化. 地理科学, 1988, 9: 274-282
- 9 孔昭宸, 杜乃秋. 内蒙古自治区几个考古地点的孢粉分析在古植被和古气候上地意义. 植物生态学与地植物学丛刊, 1981, 5: 193-204
- 10 孔昭宸, 杜乃秋, 许清海, 等. 中国北方全新世大暖期植物群的古气候波动. 见: 施雅风, 编. 中国全新世大暖期气候与环境. 北京: 海洋出版社, 1992. 48-65
- 11 孔昭宸, 杜乃秋. 中国某些地区全新世高温期植被和气候的初步研究. 海洋地质与第四纪地质, 1990, 10: 99-102
- 12 杜乃秋, 孔昭宸. 青海柴达木盆地察尔汗盐湖的孢粉组合及其在地理和植物学的意义. 植物学报, 1983, 25: 275-282
- 13 杜乃秋, 孔昭宸, 山发寿. 青海湖 QH85-14C 钻孔孢粉分析及其古气候古环境的初步探讨. 植物学报, 1989, 31: 803-814
- 14 Zhang J, Kong Z, Du N. Reconstruct history vegetation and environmental changes Late Pleistocene in Beijing. Open IGBP/BHAC-LUCC joint Inter-core Projects Symposium. Kyoyo Japan November, 1996. 38-41
- 15 中国科学院北京植物研究所古植物研究室孢粉组. 中国蕨类植物孢子形态. 北京: 科学出版社, 1976. 1-41
- 16 许清海, 吴忱, 王子惠, 等. 25000 年以来渤海湾西岸古环境探讨. 植物生态学与地植物学学报, 1993, 17: 20-32
- 17 曲晓云, 庄云, 何红, 等. 大连地区大莲花剖面全新世环境变迁信息研究. 见: 张兰生, 编. 中国生存环境历史演变规律研究. 北京: 海洋出版社, 1993. 214-217
- 18 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: 143-151
- 19 韩有松, 孟广兰. 青岛沿海地区 20000 年以来的古地理环境演变. 海洋与湖沼, 1986, 17: 196-206
- 20 李文漪, 梁玉莲. 河北东部全新世温暖期植被与环境. 植物学报, 1985, 27: 650-651
- 21 吕厚远. 渤海南部晚更新世以来孢粉组合及环境分析. 黄渤海海洋, 1989, 7: 11-26
- 22 关学婷, 田秀梅, 孙新华. 渤海海域晚第三纪孢粉组合及其意义. 见: 中国孢粉学会, 编. 中国孢粉学会第一届学术会议论文选集 (1979). 北京: 科学出版社, 1982. 64-70
- 23 王永吉, 李善为. 青岛胶州湾地区 20000 以来的古植被与古气候. 植物学报, 1983, 25: 385-392
- 24 梁幼林, 王晓春, 孔昭宸, 等. 逐步判别分析在恢复气候上的应用. 科学通报, 1991, 22: 173-174
- 25 孔昭宸, 杜乃秋. 中国东部晚更新世以来植被和气候的戏剧性变化. 见: 梁名胜, 张吉林, 编. 中国海陆第四纪对比研究. 北京: 科学出版社, 1991. 165-172
- 26 李增瑞, 徐金荣, 孟其林, 等. 南黄海盆地中新世孢粉组合特征及其地层意义. 海洋地质专刊, 1984, 1: 1-32
- 27 张一勇. 雷州半岛第三纪孢粉. 古生物学报, 1981, 20: 449-458
- 28 侯佑堂, 李应培, 金庆焕. 南海北部大陆架第三纪古生物图册. 广州: 广州科技出版社, 1981. 1-58
- 29 马玉贞, 张虎才, 李吉均, 等. 腾格里沙漠晚更新世孢粉植物群与气候环境演变. 植物学报, 1998, 40: 871-879
- 30 万和文, 唐领余, 张虎才, 等. 柴达木盆地东部 36~18 ka BP 期间的孢粉记录及其气候环境. 第四纪研究, 2008, 28: 112-121
- 31 Zhao Y, Yu Z C, Chen F H, et al. Holocene vegetation and climate history at Hurlig Lake in the Qaidam Basin, Northwest China. Rev Palaeobot Palynol, 2007, 145: 275-288
- 32 吕新苗, 朱立平, Nishimura M, 等. 西藏南部普莫雍错 19 cal ka BP 以来高分辨率环境记录. 科学通报, 2011, 56: 2006-2016
- 33 Tang L Y, Shen C M, Li C H, et al. Pollen-inferred vegetation and environmental changes in the central Tibetan Plateau since 8200 yr BP. Sci China Ser D-Earth Sci, 2009, 52: 1104-1114
- 34 Shen C M, Liu K B, Morill C, et al. Meadow-steppe ecotone shift and major central-scale droughts during the mid-Holocene in the central Tibetan Plateau. Ecology, 2008, 89: 1079-1088
- 35 Herzschuh U, Katia W, Bernd W, et al. A general trend on the central Tibetan Plateau throughout the Holocene recorded by the Lake Zigetang pollen spectra. Quat Int, 2006, 154-155: 113-121
- 36 Liu X Q, Herzschuh U, Shen J, et al. Holocene environmental and climatic changes inferred from Wulungu Lake in northern Xinjiang, China. Quat Res, 2008, 70: 412-425
- 37 肖霞云, 蒋庆丰, 刘兴起, 等. 新疆乌伦古湖全新世以来高分辨率的孢粉记录与环境变迁. 微体古生物学报, 2006, 23: 77-86
- 38 陈发虎, 黄小忠, 杨美临, 等. 亚洲中部干旱区全新世气候变化的西风模式——以新疆博斯腾湖记录为例. 第四纪研究, 2006, 26: 882-887
- 39 张玉兰, 张敏斌. 海洋沉积物中淡水藻类的发现及其古环境意义. 海洋通报, 2002, 21: 36-40
- 40 王开发, 张玉兰, 孙煜华. 长江三角洲表层沉积孢粉/藻类组合. 地理学报, 1982, 37: 261-271
- 41 孙湘君, 吴玉书. 云南滇池表层沉积物中恢复和藻类的分布规律以及数量特征. 海洋地质与第四纪地质, 1987, 7: 81-92
- 42 郑卓, 王建华, 王斌, 等. 海南岛双池玛珥湖全新世高分辨率环境记录. 科学通报, 2003, 48: 282-286
- 43 吕厚远, 刘嘉麒, 储国强, 等. 末次冰期以来湛江湖光岩玛珥湖孢粉记录及古环境变化. 古生物学报, 2003, 42: 284-291
- 44 郑亚惠, 周山富, 刘祥琪, 等. 苏北和南黄海盆地晚第三纪孢粉. 中国科学院南京地质古生物研究所丛刊, 1981, 3: 29-90
- 45 中国海洋石油总公司渤海石油公司, 中国科学院南京地质古生物研究所. 渤海海域晚新生代孢粉学研究. 南京: 南京大学出版社, 1989. 25-48

- 46 石油化学工业部石油勘探开发规划研究院, 中国科学院南京地质古生物研究所. 渤海沿岸地区早第三纪沟鞭藻类和疑源类. 北京: 科学出版社, 1978. 1-90
- 47 地质矿产部海洋地质综合研究大队, 中国海洋石油总公司渤海石油公司, 中国科学院南京地质古生物研究所. 东海陆架盆地龙井构造带新生代孢粉学的研究. 合肥: 安徽科学技术出版社, 1985. 1-209
- 48 余静贤. 沟鞭藻类. 见: 地质矿产部海洋地质综合研究大队, 中国地质科学院地质研究所, 编. 东海陆架新生代古生物群(微体古植物分册). 北京: 地质出版社, 1989. 112-159
- 49 祝幼华. 山东东营凹陷晚更新世海相沟鞭藻类. 微体古生物学报, 2004, 21: 174-182
- 50 柯曼红. 黄土高原区环纹藻化石的发现及其意义. 西安工程学院学报(自然科学版), 1995, 17: 90-93
- 51 宋之琛, 王开发. 江苏南通滨海相第四系的孢粉组合. 古生物学报, 1961, 9: 234-252
- 52 汪世兰, 徐齐治, 郑铁. 江苏渡村第四纪孢粉组合与古气候. 兰州大学学报(自然科学版), 1988, 24: 92-99
- 53 王开发, 张玉兰. 宁波平原晚第四纪沉积的孢粉、藻类组合及其古地理. 地理科学, 1985, 5: 145-152
- 54 王开发. 南昌西山洗药湖泥炭的孢粉分析. 植物学报, 1974, 16: 83-93
- 55 唐领余, 黎权伟. 香港更新世晚期孢子花粉. 见: 李作明, 陈金华, 何国雄, 编. 香港古生物与地层(下册), 北京: 科学出版社, 1998. 184-191
- 56 吴作基, 余金凤. 深圳市前海晚更新世中期泥炭层孢粉组合的初步研究. 南海海洋科学集刊, 1987, 8: 95-102
- 57 王晓梅, 孙湘君, 汪品先, 等. 末次冰消期以来巽他陆架孢粉、藻类及其古环境意义. 古生物学报, 2008, 47: 313-318
- 58 吴玉书. 中华卷柏孢子形态的研究及其生态学意义. 植物学报, 1989, 31: 77-80
- 59 张佳华, 孔昭宸. 中华卷柏在恢复过去环境研究中的生态指示意义. 西北植物学报, 1999, 19: 530-537
- 60 Krutzsch W. Sporen-und Pollengruppen aus der Oberkreide und dem Tertiär Mitteleuropas und ihre stratigraphische Verteilung. Z Angew Geol (Zeitschrift für Angewandte Geologie), 1957, 3: 509-548
- 61 Müller H. Palynological investigations of Cretaceous sediments in northeastern Brazil. In: J E Van Hinte, ed. Proceedings of the Second West African Micropaleontological Colloquium, Ibadan, 1965. Brill: Leiden, 1966. 123-136
- 62 Drugg W S. Palynology of the Upper Moreno Formation (Late Cretaceous-Paleocene), Escarpado Canyon, California. Palaeontographica B, 1967, 120: 1-71
- 63 Germeraad J H, Hopping C A. Palynology of Tertiary sediments from tropical areas. Rev Palaeobot Palynol, 1968, 6: 189-348
- 64 刘金陵, 叶萍宜. 上海、浙江某些地区第四纪孢粉组合及其在地层和古气候上的意义. 古生物学报, 1977, 16: 1-10
- 65 秦仁昌. 中国植物志(第 2 卷). 北京: 科学出版社, 1959. 1-406
- 66 Evitt W R. Occurrence of fresh-water algae *Pediastrum* in Cretaceous of marine sediments. Am J Sci, 1963, 261: 890-893
- 67 Batten D J, Lister J K. Evidence of freshwater dinoflagellates and other algae in the English Wealden (Early Cretaceous). Cretaceous Res, 1988, 9: 171-179
- 68 张华, 郑卓, 王建华, 等. 海南岛近 2500 a 来盘星藻记录的周期性气候变化. 热带地理, 2004, 24: 109-112
- 69 Zamalao M C, Tell G. The fossil record of freshwater micro-algae *Pediastrum* Meyen (Chlorophyceae) in southern America. J Paleolimn, 2005, 34: 433-444
- 70 Bujak J P. Cenozoic dinoflagellate cysts and acritarchs from the Bering Sea and northern North Pacific, DSDP Leg 19. Micropaleontology, 1984, 30: 180-212
- 71 Rossignol M. Hystichospheres du Quaternaire Méditerranée orientale, dans les sédiments Pleistocène et les Bousmarines Actuelles. Rev Micropalaeontol, 1964, 7: 83-99
- 72 Wolff V H. Mikrofossilien des pliocänen Humodils der Grube Freigericht bei Dettingen a Mund Vergleich mit älteren Schichten der Tertiärs sowie posttertiären Ablagerungen. Inst Palaobot Petrogr Brennsteine, Arbeit, 1934, 5: 55-101
- 73 Downie C, Williams G L, Sarjeant W A S. Classification of fossil microplankton. Nature, 1961, 192: 471
- 74 Rossignol M. Analyse pollinique de sédiments marins quaternaires en Israël. 11. Sédiments Pleistocènes pollen et spores, 1962, 4: 121-148
- 75 Medeanic S. Freshwater algal palynomorph records from Holocene deposits in the coastal plain of Rio Grande do Sul, Brazil. Rev Palaeobot Palynol, 2006, 141: 83-101
- 76 孔昭宸, 杜乃秋, 张子斌. 北京地区 10000 年以来的植物群发展和气候变化. 植物学报, 1982, 24: 172-181
- 77 胡鸿均, 李尧英, 魏印心, 等. 中国淡水藻类. 上海: 上海科学技术出版社, 1980. 246-327
- 78 Boudreau R, Galloway J, Patterson R, et al. A paleolimnological record of Holocene climate and environmental change in the Temagami region, northeastern Ontario. J Paleolimn, 2005, 33: 445-461
- 79 Head J M, Marit-Solveig S, Janczyk-Kopikowa Z, et al. Last Interglacial (Eemian) hydrographic conditions in the southeastern Baltic Sea, NE Europe, based on dinoflagellate cysts. Quat Int, 2005, 130: 3-30
- 80 Chepstow-Lusty A, Bush M B, Frogley M R, et al. Vegetation and climate change on the Bolivian Altiplano between 108000 and 18000 years ago. Quat Res, 2005, 63: 90-98

- 81 Limaye R B, Kumaran K P N, Nair K M, et al. Non-pollen palynomorphs as potential palaeoenvironmental indicators in the Late Quaternary sediments of the west coast of India. *Curr Sci*, 2007, 92: 1370–1382
- 82 Tang L Y, Shen C M, Liu K B, et al. Climatic changes in the Southeastern Qinghai-Tibetan Plateau during the Last Glacial Maximum—Pollen records from Southeastern Tibet. *Sci China Ser D-Earth Sci*, 2004, 34: 436–442
- 83 Sarmaja-Korjonen K, Seppanen A, Bennike O. *Pediastrum* algae from the classic late glacial Bolling So site, Denmark: Response of aquatic biota to climate change. *Rev Palaeobot Palynol*, 2006, 138: 95–107
- 84 Costa L I, Downie C. Cenozoic dinocyst stratigraphy of Sites 403 to 406 (Rockall Plateau), IPOD, Leg 48. In: Montadat L, Roberts D G, eds. *Init Repts Deep Sea Drilling Project*, 1979, 48: 513–529
- 85 Downie C, Hussain M A, Williams G L. Dinoflagellate cyst and acritarch associations in the Paleogene of southeast England. *Geosci Man*, 1971, 3: 29–35
- 86 De Vernal A, Mudie P J. Pliocene and Quaternary dinoflagellate cyst Stratigraphy in the Labrador Sea: Paleoenvironmental implications. In: Head M J, Wrenn J H, eds. *Neogene and Quaternary dinoflagellate cysts and acritarchs*. Amer Ass Stratigr Palynol Found, Dallas, 1992. 329–346
- 87 Edwards L E, Andrieu V A S. Distribution of selected dinoflagellate cysts in modern sediments. In: Head M J, Wrenn J H, eds. *Neogene and Quaternary dinoflagellate cysts and acritarchs*. Amer Ass Stratigr Palynol Found, Dallas, 1992. 259–288
- 88 Wall D. Fossil microplankton in Deep-sea core from the Caribbean Sea. *Palaeontology*, 1967, 10: 95–123
- 89 Huang T C. Miocene palynomorphs of Taiwan(VI). *Miscellaneous spores and pollen grains*. Taiwan, 1981, 26: 45–57