

中国北方季风尾闾区不同类型湖泊表层沉积物花粉组合特征

田芳^{*}, 许清海^{*}, 李月丛^{*}, 曹现勇^{*}, 王学丽^{*}, 张丽艳^{*}

河北师范大学资源与环境科学学院, 石家庄 050016;

河北省环境演变与生态建设实验室, 石家庄 050016;

兰州大学教育部西部环境重点实验室, 兰州 730000

^{*} 联系人, E-mail: xuqinghai@mail.hebtu.edu.cn

2008-03-14 收稿, 2008-07-22 接受

科技部基础研究重大项目前期研究专项项目(批准号: 2003CCA01800)、国家自然科学基金重点项目(批准号: 40730103)、国家自然科学基金项目(批准号: 40571166, 40672107)、教育部博士点专项科研基金项目(批准号: 20050094004)、河北省自然科学基金项目(批准号: D2008000186)、河北省博士基金项目(批准号: 06547006-3)和河北省高校重点学科建设项目资助

Tian F, Xu Q H, Li Y C, et al. Pollen assemblage characteristics of lakes in the monsoon fringe area of China.

Chinese Science Bulletin, 2008, 53(21): 3354—3363, doi: 10.1007/s11434-008-0408-0

摘要 岱海、红碱淖、囫囵淖和对口淖 108 个湖泊表层沉积物样品花粉组合和花粉浓度特征研究表明, 4 个湖泊花粉组合均以蒿属、藜科、禾本科和菊科等草本植物花粉为主, 松、桦、栎、榆、杨、虎榛子、胡颓子等花粉类型经常出现, 较好地反映了地带性植被和湖泊周围植被特征. 同一湖泊各采样点花粉组合有较好的一致性(平均相似系数分别为 0.66 ± 0.17 , 0.71 ± 0.11 , 0.73 ± 0.12 和 0.67 ± 0.12), 表明湖泊花粉沉积前受到湖水的搅匀作用, 但也存在一定差异, 其中岱海湖泊表层沉积物花粉组合差异明显, 其次为对口淖、囫囵淖、红碱淖(平均欧氏距离分别为 20.09 ± 11.11 , 11.22 ± 4.51 , 10.67 ± 4.03 和 8.44 ± 3.64). 4 个湖泊湖水搅匀作用、花粉来源途径、流域面积及流域内植被等的差异可能是湖泊内各样点花粉组合差异性不同的原因. 湖水深度大于 5 m 的岱海和红碱淖, 近岸和浅水区湖水对花粉的再悬浮作用较强, 花粉浓度较低, 深水区再悬浮作用较弱, 汇集作用较强, 花粉浓度较高. 湖水深度小于 5 m 的囫囵淖和对口淖, 湖水对整个湖泊花粉再悬浮和搅匀作用均较强, 各样点花粉组合和花粉浓度一致性较好. 湖泊样品和入湖河流样品花粉组合对比表明, 红碱淖湖泊花粉以风力传播为主. 花粉以风力搬运为主的湖泊花粉组合差异较小, 河流搬运为主的湖泊花粉组合差异较大.

关键词
湖泊花粉
相似系数
欧氏距离
搅匀作用

湖泊花粉是研究区域气候和环境变化理想的代用指标之一. 湖泊花粉来源范围、传播途径及沉积过程是现今孢粉学界研究的热点. Jacobson 等人^[1]认为小型湖泊花粉来源面积较小, 大型湖泊花粉来源面积较大; 小型池塘、沼泽、湖泊沉积的主要是当地植被的花粉, 大型湖泊会出现更多的区域性花粉^[2~4]. Sugita 通过改进 Prentice 模型^[5]定量研究了湖泊相对花粉源面积^[6]. 然而 Sugita 模型的前提是空气传播为湖泊花粉的主要来源途径, 忽略河流携带作用对

湖泊花粉的影响^[6~10]. 澳大利亚 Tyrrell 湖的花粉源区比较适合 Sugita 模型, 因为 Tyrrell 湖的花粉主要是风来的, 河流和地表径流带入湖中的花粉微不足道^[11]. 然而, 许多湖泊花粉都会受到河流携带作用的影响, 甚至河流携带是湖泊花粉的重要来源^[12~17]. 无河流注入的封闭型湖泊花粉通量总是低于有河流注入的湖泊^[18]也证明了河流携带作用对湖泊花粉的贡献. 我国滇池、岱海和博斯腾湖表层沉积物花粉研究也表明河流携带是湖泊花粉的重要来源^[19~21]. 显然, 河流

携带作用对湖泊花粉的影响不能被忽视。

关于花粉沉积过程,有学者认为花粉沉积到湖底前,湖水对花粉有搅匀作用,湖泊内花粉组合比较均一^[6,11,13,22~25]。然而湖水对花粉的搅匀作用是否存在,与湖泊哪些特征有关有待验证和研究。

本文以岱海、红碱淖、囿囿淖和对口淖为研究对象,通过分析湖泊表层沉积物花粉组合及花粉浓度空间分布特征,试图探究不同类型湖泊的花粉传播途径、验证湖水搅匀作用是否存在及其在不同类型湖泊中的差异。

1 研究区域

岱海、红碱淖、囿囿淖和对口淖均位于我国季风气候尾部区。岱海位于内蒙古鄂尔多斯高原东缘(112°35'45.49"E ~ 112°46'13.51"E, 40°31'22.49"N ~ 40°36'45.96"N),湖泊面积 133.5 km²,最大水深 12.5 m,有多条河流注入(较大河流 4 条),均为发源于盆地周围的季节性河流,流域面积 2084.4 km²;年均降水量 423.7 mm;周围植被属温带干草原(图 1),周围山地主要生长着山杨(*Populus davidiana*)、白桦(*Betula platyphylla*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、榆

(*Ulmus*)、柳(*Salix*)等乔木,林下生长着绣线菊(*Spiraea*)、沙棘(*Hippophae* sp.)、虎榛子(*Ostryopsis davidiana*)、胡颓子(*Elaeagnus*)、无脉苔草(*Carex enervis*)、艾蒿(*Artemisia argyi*)、铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)等灌木和草本,有较大面积以种植玉米(*Zea mays*)和马铃薯(*Solanum tuberosum*)等为主的农田^[20,26]。

红碱淖位于内蒙古和陕西交界处(109°49'11.05"E ~ 109°56'13.58"E, 39°3'39.32"N ~ 39°8'9.91"N),湖泊面积 39.3 km²,最大水深 6.8 m;入湖河流短小,地下水是湖泊主要补给来源(占补给量的 80%)^[27],流域面积 1500 km²;年均降水量 400 mm;周围植被属暖温带干草原带(图 1),主要有沙柳(*Salix cheilophila*)、黑沙蒿(*Artemisia ordosica*)、白沙蒿(*Artemisia sphaerocephala*),以及人工栽种的柳、小叶杨(*Populus simonii*)、榆等,也有较大面积以种植小麦(*Trisetum*)和玉米为主的农田^[28~30]。

囿囿淖(115°41'16.22"E ~ 115°43'55.51"E, 41°41'57.74"N ~ 41°43'43.56"N)和对口淖(114°47'43.28"E ~ 114°49'7.88"E, 41°13'20.03"N ~ 41°14'18.36"N)均位于

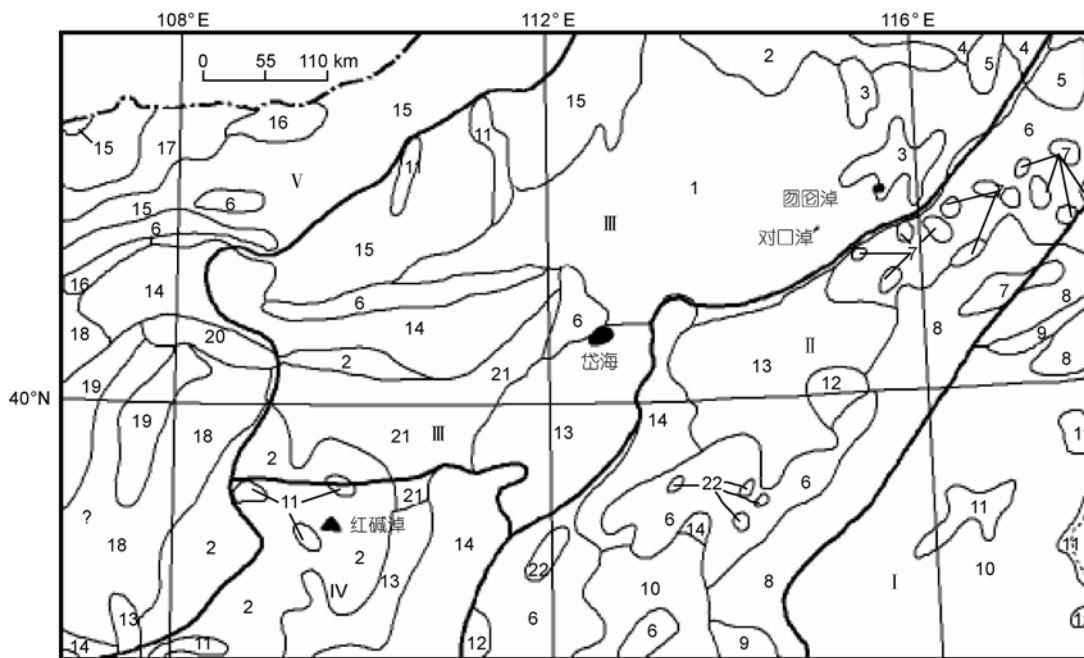


图 1 4 个湖泊位置及植被状况

, 暖温带落叶阔叶林带; , 暖温带森林草原带; , 温带干草原带; , 暖温带干草原带; , 温带荒漠草原带。1, 大针茅、克氏针茅草原; 2, 草原沙地锦鸡儿、柳、蒿灌丛; 3, 杂草、苔草、禾草草甸; 4, 草原沙地榆树疏林; 5, 线叶菊草原; 6, 山地虎榛子、绣线菊灌丛; 7, 桦、杨林; 8, 荆条、酸枣、白羊草群落; 9, 榆树、黄连木、侧柏林; 10, 冬小麦、玉米、谷子农田; 11, 禾草、杂类草盐生草甸; 12, 油松林; 13, 白羊草、黄背草草原; 14, 春小麦、糜子、马铃薯农田; 15, 戈壁针茅草原; 16, 川青锦鸡儿、驼绒藜沙砾漠; 17, 琵琶柴砾漠; 18, 白沙蒿、油蒿沙漠; 19, 三瓣蔷薇、沙冬青、四合木砾漠; 20, 沙拐枣沙漠; 21, 本氏针茅、短花针茅草原; 22, 云杉林^[31]

河北省坝上高原, 湖泊面积分别为 9.5 和 1 km², 最大水深分别为 3.4 和 1 m, 均有 1 条发源于燕山山脉冀北山地的季节性河流注入, 南距山地约 30~40 km, 流域面积分别为 847 和 160 km²; 年均降水量 400 mm; 植被类型为温带草原和暖温带森林草原的过渡地带(图 1), 以菊科(Compositae)、禾本科(Poaceae)、蔷薇科(Rosaceae)、豆科(Leguminosae)和藜科(Chenopodiaceae)为主^[26], 但适宜地段多开垦为农田, 种植小麦、裸燕麦(莜麦)(*Avena nuda*)、玉米、亚麻科(Linaceae)、马铃薯、甜菜(*Beta vulgaris*)等喜凉作物, 河北省坝上高原为冀北防护林地带, 以杨树为主, 冀北山地生长着以白桦和山杨为主的落叶阔叶林^[32].

2 研究方法

湖泊表层沉积物样品采集于 2006 年 7 月. 采用自制取样器(取样器顶端有 4 个排水孔, 底部有一个活动阀)取样, 样品进入取样器后, 水由顶端排水孔排出, 拉动活动阀, 封住取样器底孔, 以防样品从取样器中脱出. 取样厚度约 2 cm. 共采集湖泊表层沉积物样品 108 个, 其中岱海 37 个、红碱淖 30 个、囿囿

淖 26 个、对口淖 15 个. 为研究河流携带作用对湖泊花粉的影响, 在红碱淖和对口淖河流入湖口处分别取表层沉积物样品 11 和 2 个. 取样点位置见图 2.

花粉提取采用常规的酸碱处理、重液浮选方法^[33]. 实验室取样重量 10 g (湿重). 样品处理前加入石松孢子 11670 粒, 以计算花粉浓度. 花粉鉴定统计在日产 Olympus BX-51 光学生物显微镜下进行, 每个样品统计陆源花粉 400 粒以上.

相似系数和距离系数均能反映两个实体的一致性和差异性. 本研究采用相似系数衡量同一湖泊内各样点间花粉组合的一致性, 相似系数介于 0~1 之间, 越趋向于 1, 表明样品间花粉组合一致性越好, 但由于其值较小, 用于反映样点间差异效果不理想, 为了进一步验证相似系数的可靠性并且突出体现湖泊内各样点间的差异性, 计算了各个湖泊内样点间的欧氏距离. 欧氏距离越大, 表明样品间差异越大; 反之亦然^[34]. 以岱海为例, 计算过程如下: 首先采用 SPSS(11.5)软件计算出湖泊内样点 1 与其他 36 个样点间花粉组合相似系数, 得到 36 个相似系数值; 同

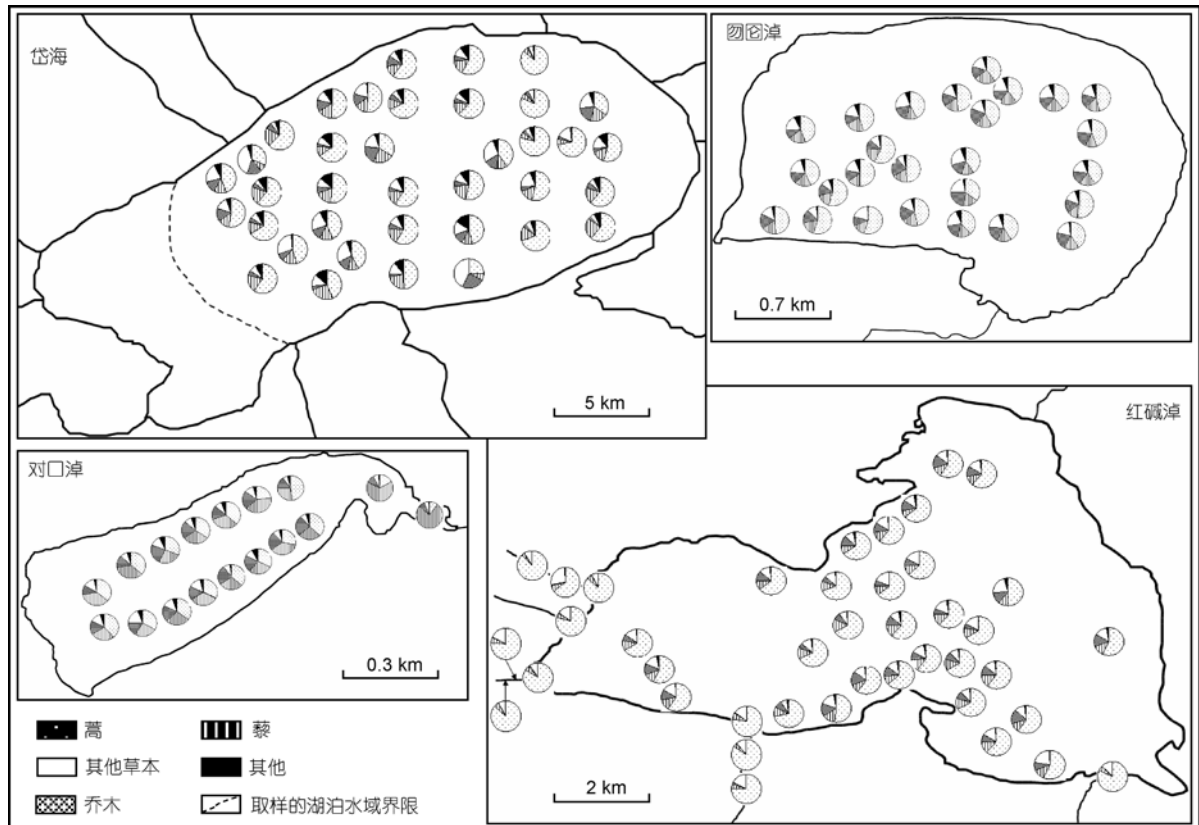


图 2 湖泊样品取样点位置及主要花粉类型百分比(圆心为取样点位置)

样方法计算样点2与除样点1外的其他35个样点间相似系数,得到35个相似系数值;依次类推,共得到666个相似系数值,求其平均值,即为岱海湖泊平均相似系数.同理计算平均欧氏距离.

3 结果

3.1 湖泊表层沉积物样品花粉组合和浓度特征

岱海、红碱淖、囫圇淖和对口淖位于半湿润-半干旱草原地带,湖泊表层沉积物花粉组合均以蒿属(*Artemisia*)、藜科、禾本科和菊科等草本植物花粉(84.3%, 87.7%, 79.2%和75.9%)为主,松、桦、栎、榆、杨、虎榛子、胡颓子等乔木和灌木植物花粉类型虽经常出现,但总百分比多低于20%.4个湖泊花粉组合均能较好地反映地带性植被和湖泊周围植被特征.

岱海(图2, 3(a))各样点花粉组合均以蒿属和藜科花粉为主,禾本科、菊科、莎草、松、桦、虎榛子、胡颓子等花粉类型经常出现,表现出较好的一致性.但花粉百分比表现出一定差异,如蒿属花粉变化于25%~85.5%,平均55.1%;藜科花粉变化于5.8%~26.7%,平均14.9%;禾本科0.4%~15.5%,平均5.1%;菊科0.4%~7.5%,平均2.3%;莎草0~17.3%,平均1.9%;松0~10.7%,平均3.7%;桦0~6.1%,平均1.6%;虎榛子0~4.8%,平均1.8%;胡颓子0~6.1%,平均1.6%.各样点花粉浓度差异明显,近岸浅水区样点花粉浓度较低,最低仅为18粒/g,深水区浓度较高,最高达14838粒/g(图4).

红碱淖(图2, 3(b))各样点花粉组合一致性也较好,也以蒿属和藜科花粉为主;常见花粉类型有禾本科、菊科、荨麻、莎草、松、桦、栎等.花粉百分比虽有一定差异,但变化范围较岱海小,蒿属花粉变化于50.2%~71.7%,平均62.1%;藜科花粉变化于8.2%~15.5%,平均12.0%;禾本科1.4%~9.9%,平均4.1%;菊科0~4.6%,平均2.0%;荨麻0~6.9%,平均2.4%;莎草0.4%~7.5%,平均2.5%;松0.5%~7.3%,平均3.4%;桦0~4.1%,平均1.5%;栎1.3%~6.9%,平均3.2%.各样点花粉浓度差异也较明显,浅水区至深水区花粉浓度由360粒/g增至18318粒/g.河口样品花粉类型与湖泊样品一致,但花粉百分比差别较大,蒿属(64.7%~87.6%,平均80.2%)和莎草科(1.9%~18.1%,平均6.7%)含量高于湖泊样品,而藜科(2.9%~7.1%,平均5.1%)、松(0~1.6%,平均0.6%)和桦(0~0.5%,平均0.1%)低于湖泊样品.花粉浓度(1610~6031粒/g,

平均3538粒/g)明显低于湖泊样品(360~18318粒/g,平均8996粒/g)(图4).

囫圇淖(图2, 3(c))各样点花粉组合一致性亦较好,以蒿属(35.3%~57.6%,平均45.5%)、藜科(12.5%~24.6%,平均16.9%)、禾本科(3.6%~11.0%,平均6.7%)和松(4.0%~14.0%,平均7.8%)花粉为主,菊科(1.0%~5.4%,平均3.0%)、莎草科(0~9.1%,平均3.8%)、桦(1.5%~7.8%,平均3.9%)、栎(0.2%~4.4%,平均2.2%)、杨(0~3.5%,平均0.9%)和虎榛子(0~4.3%,平均2.4%)等花粉常见.各样点花粉浓度(9745~53332粒/g)差异较小,亦没有明显趋势(图4).与其相近的对口淖(图2, 3(d))湖泊表层沉积物花粉组合以蒿属(22.9%~48.1%,平均34.7%)、藜科(25.6%~40.4%,平均30.8%)、禾本科(3.6~13.2,平均5.8%)、松(2.0%~7.7%,平均4.7%)和桦(3.3%~10.7%,平均6.6%)花粉为主,栎(0.4%~2.9%,平均1.8%)、杨(1.0%~8.4%,平均4.3%)、虎榛子(0.2%~4.0%,平均1.8%)和胡颓子(0.5%~3.6%,平均2.0%)等经常出现.各样点花粉浓度为5213~24090粒/g(图4).河口样品藜科花粉含量(65.1%和75.5%)明显高于湖泊样品,蒿属花粉(17.1%和10.9%)明显低于湖泊样品.

3.2 湖泊表层沉积物样品一致性和差异性分析

以12种主要和常见花粉类型(蒿、藜、禾本科、菊科、莎草、松、桦、栎、榆、杨、虎榛子和胡颓子)百分比为对比因子分别计算了4个湖泊表层沉积物各样点间花粉组合的平均相似系数和欧氏距离,结果见表1和图5.岱海、红碱淖、囫圇淖和对口淖平均相似系数分别为 0.66 ± 0.17 , 0.71 ± 0.11 , 0.73 ± 0.12 和 0.67 ± 0.12 .湖泊内各样点间花粉组合一致性均较好,但也有一定差异.岱海差异最大,欧氏距离为3.11~62.75,平均 20.09 ± 11.11 ,其中与其他样点平均欧氏距离大于20.09的样点(共11个)均位于近河口或湖岸处;红碱淖差异最小,欧氏距离为2.98~24.44,平均 8.44 ± 3.64 ,其中水深小于5m的样点(11个)间欧氏距离为3.31~21.1,平均9.26,水深大于5m的样点(19个)间为2.68~21.43,平均7.96,深水湖区花粉组合差异小于浅水湖区;对口淖和囫圇淖介于岱海和红碱淖之间,欧氏距离分别为3.5~25.5和3.95~29.02,平均 11.22 ± 4.51 和 10.67 ± 4.03 .

4 讨论

岱海、红碱淖、囫圇淖和对口淖湖泊表层沉积物

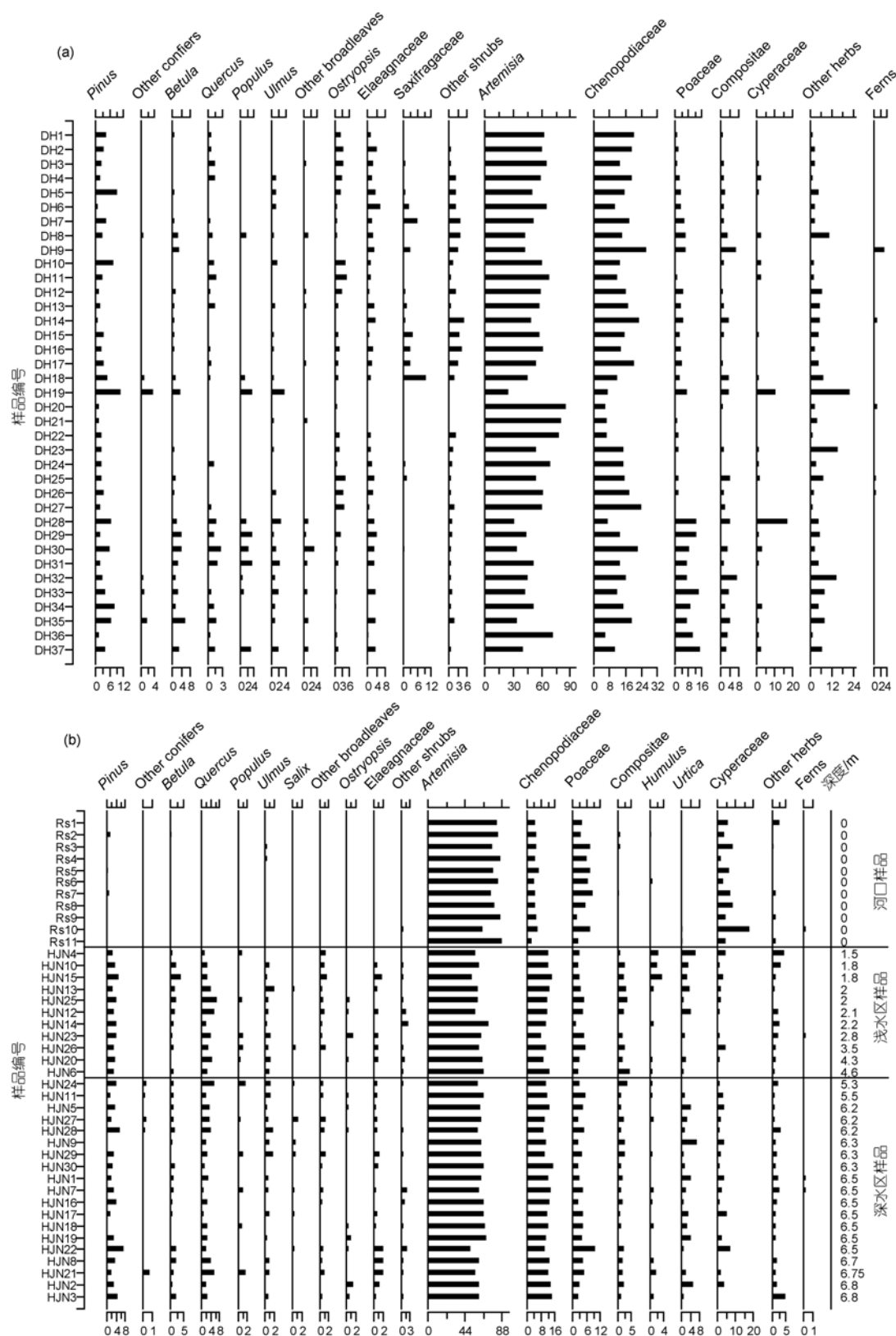


图3 4个湖泊表层沉积物花粉百分比(单位: %)

(a) 岱海; (b) 红碱淖; (c) 圈图淖; (d) 对口淖

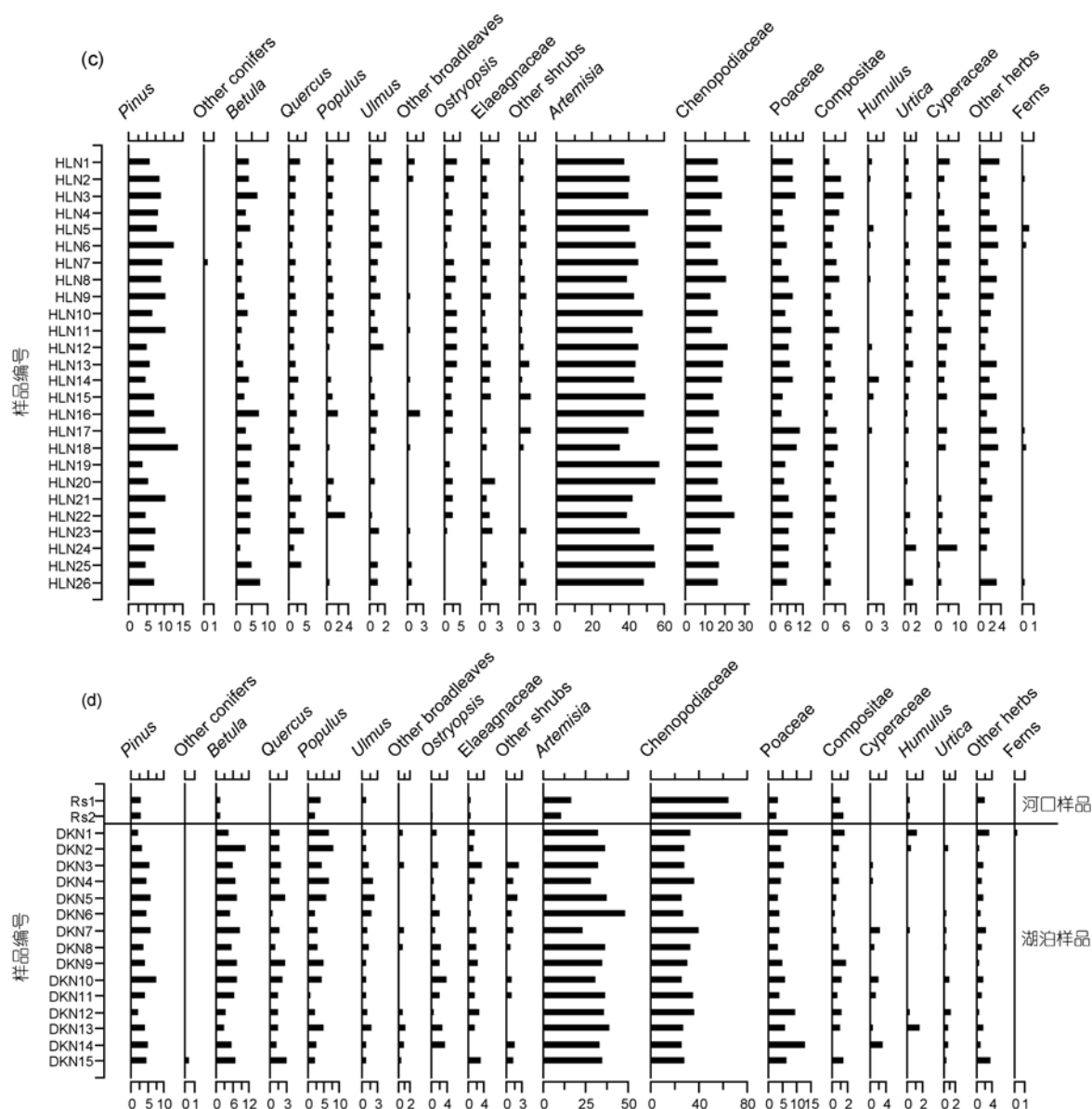


图 3 4 个湖泊表层沉积物花粉百分比(单位: %)

(a) 岱海; (b) 红碱淖; (c) 囫囵淖; (d) 对口淖

花粉组合均以蒿属、藜科、禾本科和菊科等草本植物花粉(84.3%, 87.7%, 79.2%和 75.9%)为主, 松、桦、栎、榆、杨、虎榛子、胡颓子等乔木和灌木植物花粉虽经常出现, 但含量多低于 20%, 均较好地反映了地带性植被和湖泊周围植被特征。

4 个湖泊的表层沉积物各样点间花粉组合均表现出较好的一致性, 均以蒿属、藜科等草本植物花粉为主, 且各湖泊内花粉组合相似系数均较高(分别为 0.66 ± 0.17 , 0.71 ± 0.11 , 0.73 ± 0.12 和 0.67 ± 0.12), 表明花粉进入湖泊后经历了搅匀作用。Fall 已证实花粉

在搬运过程中存在着混合搅匀作用^[35], 花粉由于比重小, 进入湖泊后, 并不会迅速沉积下来, 而是在湖水波浪作用下发生搅匀作用, 即使花粉沉积到湖底表层后, 湖水波浪波及到的湖区花粉也会发生再悬浮和搅匀作用^[6,11,13,22~25]。

湖水搅匀作用下, 不同样点间花粉组合趋于一致。但 4 个湖泊表层沉积物花粉组合均存在一定差异。欧氏距离分析表明, 岱海湖泊表层沉积物各样点间花粉组合差异最明显(平均欧氏距离 20.09 ± 11.11); 红碱淖差异最小(平均欧氏距离 8.44 ± 3.64), 囫囵淖

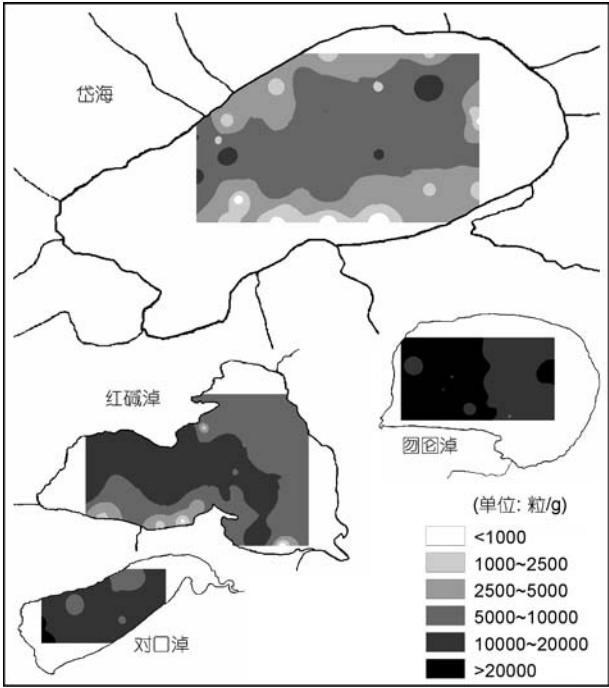


图 4 湖泊表层沉积物花粉浓度空间分布特征

和对口淖介于两者之间(平均欧氏距离分别为 10.67 ± 4.03 和 11.22 ± 4.51)。表明湖泊面积和水深的不同是湖泊花粉组合一致性差异的原因之一,但不是唯一的制约因素。

湖泊花粉的再悬浮和搅匀作用与湖泊面积和湖水深度有关,湖泊面积大,风引起的波浪也大,波浪可以波及到较深水域;相反,湖泊面积小,风引起的波浪就小,波浪只影响较浅水域。因此,大而浅的湖泊,再悬浮作用明显,小而深的湖泊,再悬浮作用不明显。据中国科学院南京湖泊与地理研究所沈吉研究员介绍,我国北方湖泊风浪波及的最大水深一般不超过 5 m(个人通讯)。岱海和红碱淖湖泊面积较大,但湖水较深(最大水深分别为 12.5 和 6.8 m)。近岸和浅水湖区水动力较强,并且存在湖岸流,湖水搅动和再悬浮作用较强,同时沉积物粒度偏粗,不利于花粉沉积,花粉浓度较低;较深的中心区湖底水动力较弱,沉积物粒度较细,花粉沉积后较少发生搅动和再悬浮作用,而汇聚作用较强,花粉浓度较高,与前人研

表 1 各个湖泊内样点间相似系数和欧氏距离结果

湖泊	样品数	系数个数	相似系数			欧氏距离		
			平均值	方差	标准差	平均值	方差	标准差
岱海	37	666	0.66	0.03	0.17	20.09	123.36	11.11
红碱淖	30	435	0.71	0.01	0.11	8.44	13.21	3.64
囫囵淖	26	325	0.73	0.01	0.12	10.67	16.24	4.03
对口淖	15	105	0.67	0.01	0.12	11.22	20.32	4.51

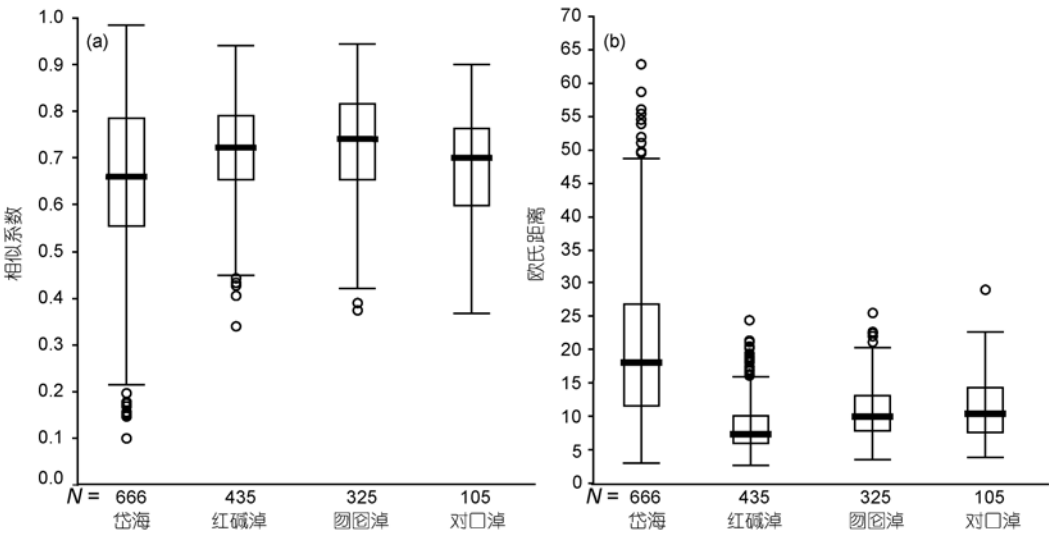


图 5 4 个湖泊相似系数和欧氏距离箱式图

N, 数据个数; ○, 异常值。(a) 相似系数; (b) 欧氏距离

究结果一致^[19,21,36,37]. 浅水区和深水区湖水搅动和再悬浮作用的差异, 可能是岱海花粉组合一致性较差的原因之一. 囡囡淖和对口淖湖泊面积虽小, 但湖水小于 5 m (最大水深分别为 3.4 和 1.0 m), 风浪可以波及到整个湖底, 湖水对花粉的再悬浮和搅匀作用在整个湖区均较强, 各样点花粉组合和浓度一致性均较好.

岱海有多条河流, 特别是有弓坝河、目花河等常年流水的河流注入, 河流搬运作用对岱海湖泊花粉影响明显^[20]. 对口淖和囡囡淖虽然均只有一条季节性河流入湖, 湖泊面积较小, 入湖河流是湖泊的主要水源, 尽管河流不是湖泊花粉的唯一来源, 但湖泊中出现较多的由河流搬运而来的山地乔木花粉, 可以认为季节性河流对湖泊花粉影响也较明显; 红碱淖虽也有多条季节性河流注入, 但地处半固定沙丘地带, 下渗作用强烈, 湖泊主要依靠地下水补给^[27]. 河口沉积物花粉浓度低于湖泊; 花粉组合特征与湖泊样品有明显差异; 说明河流搬运对红碱淖湖泊花粉影响较小, 故我们认为红碱淖湖泊花粉主要是风力搬运而来. 风力搬运的花粉均匀地沉积在湖泊表层, 而河流搬运的花粉首先在河流入湖口附近沉积下来. 这可能是湖泊面积和水深均大于对口淖和囡囡淖的红碱淖花粉组合差异反而小的原因. 所以, 风力搬运为主的湖泊花粉组合差异较小, 河流搬运为主的湖泊花粉组合差异较大.

湖泊流域面积和流域内植被一致性的差异也是影响湖泊表层沉积物花粉组合差异性的重要原因. 4 个湖泊中, 岱海流域面积最大, 流域内植被差异也大, 湖泊表层沉积物花粉组合差异明显; 囡囡淖和对口

淖湖泊流域面积远小于岱海, 流域内植被较一致, 表层沉积物花粉组合差异较小; 红碱淖入湖河流较短, 流域内植被与湖泊周围植被较一致, 所以红碱淖湖泊表层沉积物花粉组合差异也较小.

大型湖泊花粉一般反映区域性植被状况, 而较小湖泊花粉则代表地方性植被特征^[1~4]. 有河流注入湖泊花粉也可较好反映流域植被状况. 受湖水搅匀和汇聚作用影响, 湖泊中心区花粉富集, 花粉浓度较高, 对周围植被代表性较好, 而近岸区花粉受湖边植被和河流携带花粉影响, 对周围植被代表性存在一定偏差. 因此, 利用湖泊花粉恢复古植被、古气候, 取样位置应尽可能选在湖泊中心.

5 结论

() 岱海、红碱淖、囡囡淖和对口淖湖泊各样点间花粉组合均表现出较好的一致性, 均以蒿属、藜科、禾本科和菊科等草本植物花粉为主, 松、桦、栎、榆、杨、虎榛子、胡颓子等花粉类型经常出现, 较好地反映了地带性植被和湖泊周围植被特征.

() 湖泊内各样点间花粉组合较好的一致性表明花粉进入湖泊后受到湖水的搅匀作用. 湖水深度大于 5 m 的岱海和红碱淖, 近岸和浅水区湖水对花粉的再悬浮作用较强, 花粉浓度较低, 深水区湖水对花粉的再悬浮作用较弱, 而汇聚作用较强, 花粉浓度较高. 湖水深度小于 5 m 的囡囡淖和对口淖, 湖水对整个湖泊花粉的再悬浮和搅匀作用均较强, 各样点花粉组合一致性较好.

() 风力搬运为主的湖泊花粉组合差异较小, 河流搬运为主的湖泊花粉组合差异较大.

参考文献

- 1 Jacobson G L, Bradshaw R H W. The selection of sites for paleovegetational studies. *Quat Res*, 1981, 16(1): 80—96[doi]
- 2 Davis M B, Brubaker M B. Differential sedimentation of pollen grains in lakes. *Limnol Oceanogr*, 1973, 18(4): 635—646
- 3 Davis M B, Ford M S. Sediment focusing in mirror Lake, New Hampshire. *Limnol Oceanogr*, 1982, 27: 147—150
- 4 Jackson S T. Pollen source area and representation in small lakes of the northeast United States. *Rev Palaeobot Palyno*, 1990, 63: 53—76[doi]
- 5 Prentice I C. Pollen representation, source area, and basin size: Toward a unified theory of pollen analysis. *Quat Res*, 1985, 23: 76—86[doi]
- 6 Sugita S. A model of pollen source area for an entire lake surface. *Quat Res*, 1993, 39: 239—244[doi]
- 7 Sugita S. Pollen representation of vegetation in Quaternary sediments: Theory and method in patchy vegetation. *J Eco*, 1994, 82: 881—897
- 8 Sugita S, Gaillardet M J, Brostrom A. Landscape openness and pollen records: A simulation approach. *The Holocene*, 1999, 9(4): 409—421[doi]
- 9 Sugita S. Theory of quantitative reconstruction of vegetation I: Pollen from large sites REVEALS regional vegetation composition. *The Holocene*, 2007, 17(2): 229—241[doi]
- 10 Sugita S. Theory of quantitative reconstruction of vegetation II: All you need is LOVE. *The Holocene*, 2007, 17(2): 243—257[doi]
- 11 Luly J G. Modern pollen dynamics and surficial sedimentary processes at Lake Tyrrell, semi-arid northwestern Victoria, Australia. *Rev Palaeobot Palyno*, 1997, 97: 301—318[doi]

- 12 Cross T A, Thompson G G, Zaitzeff J B. Source and distribution of palynomorphs in bottom sediments, southern part of the Gulf of California. *Mar Geol*, 1966, 4(6): 467—524[[doi](#)]
- 13 Peck R M. Pollen budget studies in a small yorkshire catchment. In: Birks H J B, West R G, eds. *Quaternary Plant Ecology*. Oxford: Blackwell, 1973. 43—60
- 14 Bonny A P. Recruitment of pollen to the section and sediment of some lake district lakes. *J Ecol*, 1976, 64: 859—887[[doi](#)]
- 15 Bonny A P. The effect of pollen recruitment processes on pollen distribution over the sediment surface of a small lake in Cumbria. *J Ecol*, 1978, 66: 385—416[[doi](#)]
- 16 Vincens A, Bonnefille R. Modern pollen sedimentation in Africa lakes (abstract). 7th International Palynology Congress, Brisbane, 1988. 173
- 17 DeBusk G H. The distribution of pollen in the surface sediments of Lake Malawi, Africa, and the transport of pollen in large lakes. *Rev Palaeobot Palyno*, 1997, 97(1): 123—153[[doi](#)]
- 18 Pennington W. The origin of pollen in lake sediments: an enclosed lake compared with one receiving inflow streams. *New Phytol*, 1979, 83: 189—213[[doi](#)]
- 19 孙湘君, 吴玉书. 云南滇池表层沉积物中花粉和藻类的分布规律及数量特征. *海洋地质与第四纪地质*, 1987, 7(4): 81—92
- 20 Xu Q H, Li Y C, Yang X L, et al. Source and distribution of pollen in the surface sediment of the Daihai Lake, Inner Mongolia. *Quat Int*, 2005, 136(1): 33—45[[doi](#)]
- 21 黄小忠, 赵艳, 程波, 等. 新疆博斯腾湖表层沉积物的孢粉分析. *冰川冻土*, 2004, 26(5): 602—609
- 22 Davis M B. Pollen grains in lake sediments: Redeposition caused by seasonal water circulation. *Science*, 1968, 162, 796—799[[doi](#)]
- 23 Davis M B, Brubaker L B, Beiswenger J M. Pollen grains in lake sediments: Pollen percentages in surface sediments from southern Michigan. *Quat Res*, 1971, 1: 450—467[[doi](#)]
- 24 Davis M B, Moeller R E, Ford J. Sediment focusing and pollen influx. In: Haworth Y, Lund J W G, eds. *Lake Sediments and Environmental History*. Leicester: University of Leicester Press, 1984. 261—293
- 25 Bonny A P. Seasonal and annual variation over 5 years in contemporary airborne pollen trapped at a Cumbrian lake. *J Ecol*, 1980, 68(2): 421—441[[doi](#)]
- 26 吴征镒. 中国植被. 北京: 科学出版社, 1980. 917—955
- 27 黄金廷, 王文科, 何渊, 等. 鄂尔多斯沙漠高原湖淖群的形成演化及生态功能探讨. *资源科学*, 2006, 28(2): 140—146
- 28 肖霞云, 羊向东, 沈吉, 等. 陕西红碱淖近年来的孢粉记录及环境变化. *湖泊科学*, 2005, 17(1): 28—34
- 29 沈吉, 汪勇, 羊向东, 等. 湖泊沉积记录的区域风沙特征及湖泊演化历史: 以陕西红碱淖湖泊为例. *科学通报*, 2006, 51(1): 87—92
- 30 雷明德, 等. 陕西植被. 北京: 科学出版社, 1999. 446—454
- 31 焦北辰, 刘明光, 等. 中国自然地理图集. 北京: 地图出版社, 1984. 171
- 32 刘濂, 张裕民, 王守一, 等. 河北植被. 北京: 科学出版社, 1996. 261—262
- 33 Faegri K, Iversen J. *Textbook of Pollen Analysis*. 3rd ed. Oxford: Blackwell, 1989. 295
- 34 李春喜, 王志和, 王文林. 生物统计学. 北京: 科学出版社, 2000: 229—246
- 35 Fall P L. Pollen taphonomy in a Canyon stream. *Quat Res*, 1987, 28: 393—406[[doi](#)]
- 36 Terasmaa J, Punning J M. Sedimentation dynamics in a small dimictic lake in northern Estonia. *Proc Estonian Acad Sci Biol Ecol*, 2006, 55(3): 228—242
- 37 Horowitz A. Recent pollen sedimentation in Lake Kinneret, Israel. *Pollen Spore*, 1969, 6(2): 353—383