

呼伦湖表层沉积物花粉空间分布特征及影响因素探讨^①

刘立娜^{1,2} 王 维^{1,2} 马玉贞³ 李岩岩^{1,2} 姜雅娟^{1,2} 何 江^{1,2}

(1.内蒙古大学环境与资源学院 呼和浩特 010021;2.内蒙古大学环境地质研究所 呼和浩特 010021;

3.北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点实验室、地表过程与资源生态国家重点实验室 北京 100875)

摘 要 对呼伦湖 29 个表层沉积物花粉组合和环境影响因子进行主成分分析(PCA)和冗余分析(RDA),探讨呼伦湖表层沉积物花粉组合的空间分布特征及造成空间分异的现代过程机制。研究表明,呼伦湖表层沉积物花粉组合空间分布差异显著,藜科和松属等花粉在湖泊东侧近岸地带百分含量较高,蒿属与桦属花粉在湖泊中部和西部百分含量较高。呼伦湖东岸盐生非地带性植被、主导风向形成的漂流、与水深相关的二次悬移再沉积过程以及河流搬运作用是影响呼伦湖表层沉积物花粉空间分异的主要因素,其中湖泊东岸盐生非地带性植被造成了藜科花粉百分含量在近东岸地带偏高,主导风向形成的由西向东的漂流作用可能导致了松属花粉百分含量在近东岸地带偏高。

关键词 呼伦湖 表层沉积物 花粉空间分布 环境影响因子 排序分析

第一作者简介 刘立娜 女 1990 年出生 硕士研究生 环境变化研究 E-mail: linaLiu2013@163.com

通讯作者 王 维 男 副教授 E-mail: ndweiwang@imu.edu.cn

中图分类号 Q913.84 **文献标识码** A

0 引言

环境变化代用指标的现代过程研究可为沉积记录中代用指标的环境解译提供依据,具有重要研究意义^[1-2]。湖泊沉积物孢粉是重建古环境和古植被的重要指标,但因其扩散、产量以及保存等方面的不确定性,导致该指标的应用存在一定的局限性^[3-4]。从湖泊沉积的现代过程入手,提高孢粉代表性的准确度、确定孢粉来源、厘定孢粉源区以及建立孢粉—植被—气候关系,是提高孢粉代用指标潜力的有效途径^[5],对于研究植被和气候变化具有重要意义。过去几十年,学者对孢粉源区、孢粉代表性、湖泊再沉积过程及河流搬运花粉能力进行了广泛的研究^[6-18]。一些学者认为孢粉进入沉积物之前已经充分混合均匀,湖泊不同位置的沉积物孢粉组合基本相同^[9,19-23],但也有研究者认为湖泊表层沉积物花粉的二次悬移再沉积过程、主导风向形成的漂流作用、湖滨非地带性植被以及河流搬运过程可导致湖泊表层沉积物花粉组合的空间分布差异^[16,24-27]。然而,前人对湖泊表层沉积物花粉空间分布的研究多集中在空间分布规律的揭示、河流搬运或再积积分选等定性分析方面,较少对花粉组合空间分布和影响分布的环境因子进行定量分析(排序分析)。为此,本文选择我

国北方最大的淡水湖—呼伦湖表层沉积物花粉组合为研究对象,构建影响花粉组合空间分布的环境因子,利用排序分析方法,揭示呼伦湖表层沉积物花粉组合的空间分布特征,探讨花粉组合空间分布的影响因素,进而揭示造成花粉组合空间分异可能的现代过程机制,为湖泊古环境研究岩芯位置的选择提供参考,为岩芯孢粉序列的植被和环境解译提供依据。

1 研究区概况

呼伦湖(48°33'~49°20' N,117°E~117°45' E)位于我国东北内蒙古自治区呼伦贝尔市境内,现代湖泊水域面积约 2 100 km²,平均水深约 3 m,最大水深 3.4 m(面积据 Google 地图测算,水深为 2011 年实地测量)。呼伦湖主要补给河流为流经蒙古国东部地区从西南部注入的克鲁伦河、源于大兴安岭(上游为哈拉哈河)连接贝尔湖与呼伦湖的乌尔逊河及连接海拉尔河与呼伦湖的人工补给河(东北部新开河),排泄河流主要为连接海拉尔河与呼伦湖的旧新开河,受近年来湖泊水位降低影响,旧新开河如今已演化为补给河流^[28]。

研究区现代气候为温带大陆性气候,冬季寒冷干燥,夏季炎热多雨,年均温 0.3°C,年均降水 247~319 mm,主要集中在 6~8 月,冬半年盛行西风和西北风,

^①国家自然科学基金(批准号:41162004,41271207,41330748)与内蒙古教育厅高等学校青年科技英才计划(编号:NJYT-14-A01)联合资助
收稿日期:2014-09-15;收修改稿日期:2014-12-01

及周边地带^[26-27],为此本文构建的第二类环境因子是采样点距各入河口的距离参数(D1~D4)。具体构建方法是,在 Google earth 上测算各点至各河口的距离,以所有样点至某一河口的最大距离除以各样点至该河口的距离得到该样点至某一河口的距离参数 D,该参数无量纲,与该样点距河口距离呈反比,D 值越大样点距离河口越近,由此得到了呼伦湖 29 个样点距四个入湖河流的距离因子 D1、D2、D3、D4,分别表示样点距旧新开河、新开河、乌尔逊河以及克鲁伦河的距离因子。本文构建的第三类因子为距呼伦湖东岸的距离因子 D5,该因子主要考虑了主导风向形成的漂流和呼伦湖东岸非地带性植被的影响。一方面,在主导风向形成的漂流作用下,沉降速率大的花粉就地沉降或短距离迁移后沉降,沉降速率小的花粉迁移距离较大,可能造成花粉沉积分异^[24]。呼伦湖 5~11 月开湖期(非结冰期)主导风向为西南风(图 1),在地转偏向力作用下,形成近乎自西向东的漂流,漂流作用造成的花粉组成空间分异与漂流运移距离有关,在本文中以距东岸距离 D5 表示,D5 越小,漂流运移距离越大。D5 因子的构建方法与 D1~D4 相似,以同一行样点中纬向距离湖泊东岸最大距离除以各样点纬向距离东岸距离得到,该因子无量纲,距东岸距离越近,值越大。另一方面,湖岸非地带性植被可能是造成表层沉积物花粉组合空间分异的因素之一,根据 Prentice^[10]和 Sugita^[9]对花粉源区的研究结果,湖滨地带的花粉源区相对较小,接纳了更多的湖岸非地带性植被花粉^[25]。呼伦湖东岸湖滨地带着生大面积芨芨草、马蔺、碱蓬、碱茅、碱蒿、白刺、盐爪爪等盐生草甸,西岸受南西—北东向断裂带作用,形成坡度较大的湖滨环境,植被直接过渡到地带性禾草草原,缺失湖岸非地带性植被。因此,反映湖岸非地带性植被影响的因子也可能是距湖东岸距离因子 D5。需要说明的是,对呼伦湖而言,反映主导风向漂流作用的影响因子和反映湖东岸非地带性植被影响的因子都是距东岸距离 D5,这给后期排序分析结果的解释造成了一定的困难,本文将在讨论部分综合沉积学理论和前人研究结果,就具体种属的空间分异及可能的影响因素进行讨论。

最后,根据表层沉积物花粉组合百分含量数据的 DCA 梯度长度,选择排序分析方法,对表层沉积物花粉组合数据(百分含量大于 0.5%的花粉种属)和环境因子数据进行排序分析,探讨表层沉积物花粉空间分布特征与环境因子之间的关系。

3 结果

3.1 呼伦湖表层沉积物花粉分析

3.1.1 呼伦湖表层沉积物花粉组合特征

呼伦湖 29 个表层沉积物,共鉴定出 42 个科属的花粉类型。所有样品花粉组合均以草本植物花粉为主(平均含量为 74.08%),针叶树花粉次之(平均含量为 16.85%),阔叶树花粉含量最少(平均含量为 9.05%)。

草本植物花粉中,藜科(Chenopodiaceae)所占比例最高,平均含量在 26%以上;其次为蒿属(*Artemisia*),平均含量高于 23%;莎草科(Cyperaceae)为 1.50%~9.34%;禾本科(Poaceae)为 0.14%~7.80%;黑三棱(Sparganiaceae)含量不足 6%;紫菀型(*Aster-type*)含量不足 4%;麻黄属(*Ephedra*)含量低于 1%;其他草本植物花粉有蒲公英型(*Taraxacum-type*)、春黄菊型(*Anthemis-type*)、风毛菊型(*Saussurea-type*)、蔷薇科(Rosaceae)、石竹科(Caryophyllaceae)、十字花科(Cruciferae)、毛茛科(Ranunculaceae)、唇形科(Labiatae)、唐松草属(*Thalictrum*)、眼子菜(*Potamogeton*)、狐尾藻(*Myriophyllum*)等,白刺属(*Nitraria*)、蓼属(*Polygonum*)、车前草属(*Plantago*)、荨麻属(*Urtica*)、沙棘属(*Hippophae*)零星出现。针叶树花粉主要以松属(*Pinus*)为主,含量介于 8.27%~31.24%,云杉属(*Picea*)含量低于 1%。阔叶树花粉中桦属(*Betula*)占绝对优势,含量为 2.12%~14.16%,桤木(*Alnus*)含量低于 1%,榛属(*Corylus*)、鹅耳枥属(*Capinus*)、榆属(*Ulmus*)、胡桃属(*Juglans*)、柳属(*Salix*)、栎属(*Quercus*)等阔叶树花粉仅零星出现。

3.1.2 呼伦湖表层沉积物花粉分布特征

根据呼伦湖 29 个表层沉积物花粉组合特征,将 29 个样点分为 A、B 两组(图 2)。

A 组包括 4~5、11~14、22~26 号 11 个样点,多分布于湖泊东侧近岸地带。花粉组合以松属、桦属、蒿属、藜科以及莎草科为主,其中松属百分含量变化于 9.20%~31.24%之间,平均约 20.47%;桦属含量在 2.12%~10.96%间,平均不足 5%;藜科百分含量较高,变化于 21.42%~44.07%之间,平均在 30%左右;蒿属含量略低,在 10.95%~21.23%间,平均约 15%左右;禾本科(1.79%~6.35%)和莎草科(4.17%~9.34%)含量适中。花粉总浓度介于 7 128~86 296 粒/g,平均 45 004 粒/g。

B 组包括 1~3、6~10、15~21、27~29 号样点,多

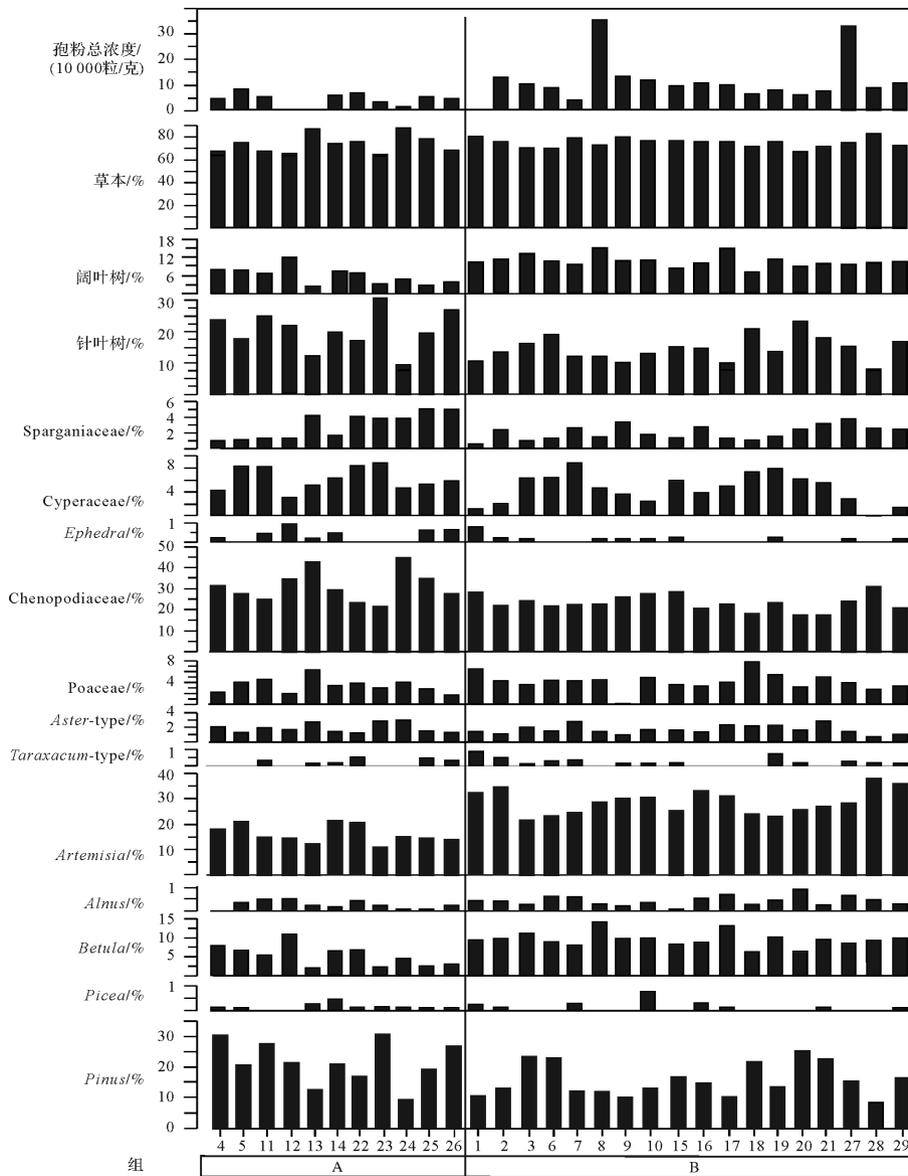


图 2 呼伦湖表层沉积物花粉百分比柱状图

Fig.2 Pollen percentage plot of Hulun lake surface samples

位于湖泊中部和西岸。与 A 组样点花粉组合最大的区别在于,藜科含量显著降低,而桦属和蒿属含量显著增加,花粉浓度亦显著增加。其中藜科花粉百分含量变化于 17.39%~30.64%,平均 23.07%,较 A 组大幅减少;蒿属百分含量在 21.63%~38.16%间,平均 28.71%,较 A 组增加 10%左右;桦属含量(6.54%~14.16%)也显著增加;松属百分含量(8.27%~23.50%)减少,禾本科(0.14%~7.80%)、莎草科(1.50%~9.24%)等变化不明显。花粉总浓度较 A 组显著增加,平均达 117 739 粒/g。

3.2 排序分析

首先对花粉种属百分含量数据进行除趋势对应

分析(DCA),结果表明(表 1),排序轴(第一排序轴梯度长度为 0.804)的梯度长度小于 3,因此采用基于线性模型的主成分分析(PCA)和冗余分析(RDA)^[35]。

3.2.1 主成分分析(PCA)

主成分分析(PCA)结果表明(表 2),4 个排序轴的特征值分别为 0.409、0.192、0.104 和 0.081,分别解释了 40.9%、19.2%、10.4%和 8.1%的花粉百分含量变化,选择特征值大的前两个轴做 PCA 排序图。PCA 排序图中箭头表示物种,物种箭头的起始点表示物种多度平均值位置,若样点的投影点落在箭头的正方向,则表示该物种在此样点中的多度大于平均

值;反之,则小于平均值^[35]。PCA 排序图结果表明(图3):藜科(*Chenopodiaceae*)、麻黄属(*Ephedra*)、黑三棱(*Sparganiaceae*)、莎草科(*Cyperaceae*)等草本植物位于第一轴正方向,蒲公英型(*Taraxacum*-type)、禾本科(*Poaceae*)、毛茛科(*Ranunculaceae*)、唐松草属(*Thalictrum*)等草本植物位于第一轴负方向。如前所述,湖泊东岸着生大面积旱生、盐生沼泽植被,而湖泊西岸缺失该类型植被,因此,第一轴可能代表了样点距湖泊东岸的距离梯度。这也得到了样点分布规律的支持,以原点为限可将29个样点分为两组,第一组包括4、5、11~14、18、20、22~26号样点,除18、20

号样点以外其他样点均分布于湖泊东侧近岸地带,藜科是第一组的优势种属,藜科花粉在除18、20号以外的样点中均具有较高的百分比含量,且具有越靠近东岸藜科花粉百分比含量越高的趋势,松属花粉也是第一组的优势种属,在除13、22、24号3个样点之外均具有较高的百分比含量;第二组由1~3、6~10、15~17、19、21及27~29号样点组成,均位于湖泊中部和西部,蒿属和桦属在第二组中具有绝对优势。此外,PCA排序结果与之前的花粉组合分组结果具有很好的 consistency,第一组中除18、20号两个样点外,其余均落入本文3.1中的A组之中。

表1 呼伦湖表层沉积物花粉除趋势对应分析(DCA)结果

Table 1 The result of detrended correspondence analysis (DCA) of pollen data of lake surface sediment, Lake Hulun

轴(Axis)	1	2	3	4	总惯量(Total inertia)
特征值(Eigenvalues)	0.052	0.016	0.006	0.004	0.126
梯度长度(Lengths of gradient)	0.804	0.602	0.367	0.323	
物种累积百分比变化率(Cumulative percentage variance of species data)	41.1	53.6	53.6	61.5	
典型特征值的总和(Sum of all canonical eigenvalues)					0.126

表2 呼伦湖表层沉积物花粉主成分分析(PCA)结果

Table 2 The result of principal correspondence analysis (PCA) of pollen in Hulun lake surface sediment

轴(Axis)	1	2	3	4	总惯量(Total inertia)
特征值(Eigenvalues)	0.409	0.192	0.104	0.081	1.000
物种累积百分比变化率(Cumulative percentage variance of species data)	40.9	60.1	70.5	78.6	
典型特征值的总和(Sum of all canonical eigenvalues)					1.000

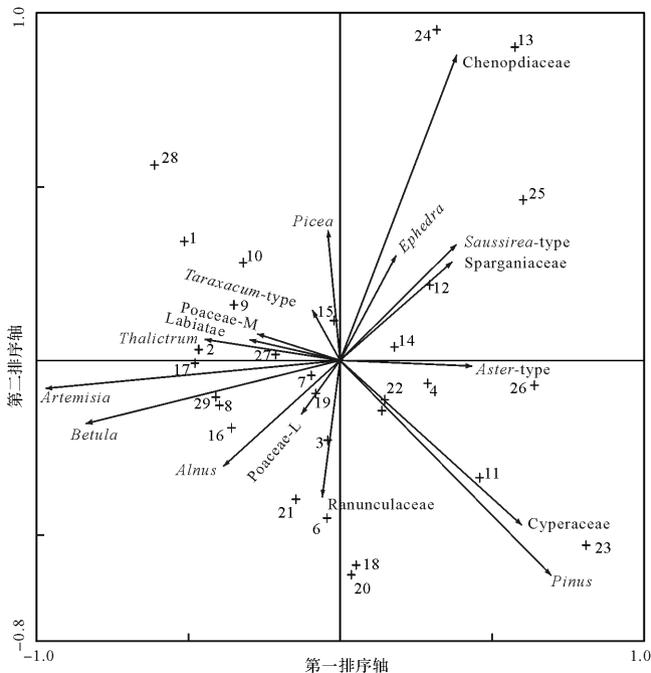


图3 呼伦湖表层沉积物花粉主成分分析(PCA)图

Fig.3 Plot showing the principle component analysis (PCA) of pollen in Hulun lake surface sediment

3.2.2 冗余分析(RDA)

RDA排序图中,箭头所示的矢量分别代表环境因子和物种因子,矢量间的夹角表示两者间(环境因子之间、物种之间、环境因子与物种之间)的相关程度^[35]。RDA结果表明(表3),四个轴的特征值分别是0.294、0.078、0.064、0.051,前两轴累计解释了37.2%的物种信息和73.7%的物种—环境关系信息。利用向前引入法对环境因子逐步筛选, Monte Carlo置换检验结果显示,6个环境因子中D5($F=10.022$, $P=0.0020$)、D2($F=2.63$, $P=0.0206$)及WD($F=2.62$, $P=0.0300$)对花粉组合空间分布的影响达到了显著水平($P<0.05$),而其他3个环境因子达不到显著水平($P>0.05$),表明距湖泊东岸距离、新开河河流搬运作用及与水深相关的二次悬移再沉积过程是影响呼伦湖表层沉积物花粉空间分布的主要因子,显著性最高的D5(距东岸距离因子, $F=10.022$, $P=0.0020$)可能导致了表层沉积物花粉的空间分异。

选择特征值最大的前两轴做排序图,进一步揭示呼伦湖表层沉积物花粉空间分布与环境因子之

表3 呼伦湖表层沉积物花粉与环境因子的冗余分析(RDA)结果

Table 3 Redundancy analysis (RDA) results for pollen in Hulun lake surface sediment and environmental factors

轴(Axis)	1	2	3	4	总惯量 (Total inertia)
特征值(Eigenvalues)	0.294	0.078	0.064	0.051	1.000
物种—环境相关性(Species-environment correlations)	0.886	0.833	0.651	0.716	
物种累积百分比变化率(Cumulative percentage variance of species data)	29.4	37.2	43.6	48.7	
物种—环境相关性累积百分比变化率(Cumulative percentage variance of species-environment relation)	58.3	73.7	86.4	96.5	
特征值总和(Sum of all eigenvalues)					1.000
典型特征值总和(Sum of all canonical eigenvalues)					0.505

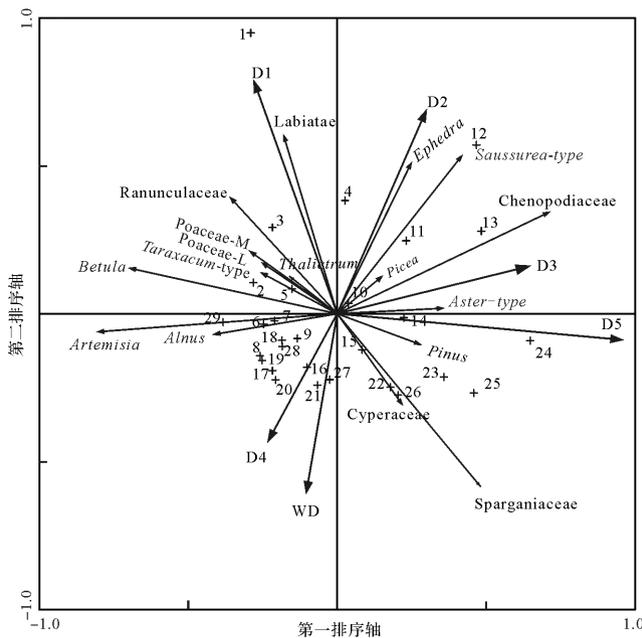


图4 呼伦湖表层沉积物花粉冗余分析(RDA)图
Fig.4 Map showing the redundancy analysis (RDA) of pollen in Hulun lake surface sediment

间的关系(图4)。如图4所示,D5指向第一轴正向,与藜科矢量间的夹角较小,与蒿属、桦属间夹角近180度,近东岸样点11、12、13、14、23、24、25均分布在D5的正方向,表明距离东岸越近,样点中藜科含量越高,相应蒿属、桦属含量越低。如前所述,东岸着生大面积盐生、沼生非地带性植被,可能控制或影响了呼伦湖表层沉积物花粉空间分布。此外,D5与松属矢量间的夹角也较小,可能与湖岸盐生非地带性植被无关,而与漂流作用因花粉沉降速率差异造成的分异有关;D2(距新开河距离因子)与表层沉积物花粉组合亦相关,表明河流搬运花粉可能是造成呼伦湖表层沉积物花粉空间分异的又一影响因子;水深WD也可能是影响表层沉积物花粉分异潜在的影响因子,水深较大的样点均分布于WD的正方向,而水深较浅的

样点均位于WD的负方向,WD正方向与蒿属等种属夹角较小,表明上述花粉可能受到了二次悬移再沉积向湖泊中心富集作用的影响。相比于D5(距东岸距离因子),D2(距新开河距离因子)和WD(水深)对表层沉积物花粉组合空间分布的影响较小。

4 讨论

湖泊表层沉积物及其中的花粉沉积过程可能会受以下沉积过程的影响:①湖泊风浪和定震波造成的沉积物的二次悬移和再沉积;②主导风向形成的漂流作用;③入湖河流因河水密度差异形成的羽状表面流或水下潜流^[24]。首先,湖泊风浪和定震波作用造成的二次悬移与湖泊水深有关,二次悬移过程主要发生在浅水湖泊和深水湖泊滨岸地带(水深小于一个波高),导致细粒沉积物向深水区(湖心)运移,造成湖泊沉积物的空间分异,该过程是否也造成表层沉积物花粉的空间分异,前人对此有不同的主张^[9,16,19-23]。其次,大型湖泊通常具有主导风向作用形成的漂流,由位于呼伦湖西北侧约30 km的满洲里风向玫瑰图(图1)得知,呼伦湖地区夏季开湖期主导风向为西南风,在地转偏向力作用下形成近乎由西向东的表层漂流,湖水在东岸堆聚,在湖水漂流过程作用下,沉降速率小的花粉类型可能被携带至湖泊近东岸地带沉降,沉降速率大的花粉可能就地或短距离迁移后沉降,进而造成表层沉积物花粉空间分异。再者,入湖河流因河水密度差异形成表层羽状流或底层潜流,随着流速度降低动能减小,河流携带的粗粒沉积物就近沉积,细粒沉积物随湖水搬运至较远地带,造成沉积物粒度的空间分异,该过程是否造成了河流携带花粉的空间分异。最后,同一湖泊内,表层沉积物花粉源区大小与沉积点位在湖泊的位置有关,一般湖心位置具有较大的孢粉源区,而近湖岸位置孢粉源区相对较小,较多反映了湖岸非地带性植被。本文将在后续讨论中,

参考前人研究成果,结合湖泊固体碎屑物质的沉积过程,依据本文表层沉积物花粉组合与影响因子排序分析结果,从上述四个方面讨论造成呼伦湖表层沉积物花粉空间分异的主要因素。

4.1 二次悬移再沉积分异的影响

前人研究结果显示,表层沉积物以及其中的花粉在湖水流及波浪作用下可发生二次悬移和再沉积^[19,23-24]。表层沉积物二次悬移和再沉积过程可能会造成其中花粉的分选,体型较小沉降速率较低的花粉较易被二次悬移,在水中滞留较长时间,而被携带至水深较大处再沉积,而体型相对较大沉降速率较大的花粉则可能具有较小的再迁移距离,可能就地再沉降^[19,36]。Mueller^[37]研究印第安纳北部3个湖泊表层沉积物花粉组合时发现了显著的空间分异,Davis等^[19]研究密歇根州南部5个湖泊表层沉积物空间分布结果显示,豚草属/乔木花粉比值呈现出显著的空间分异,其主要原因归因于与花粉个体差异相关的沉降速率的差异导致了二次悬移再沉积过程。然而,也有研究认为,二次悬移再沉积过程中,沉积物连同花粉整体迁移,不存在因花粉个体差异造成的分选过程,搅匀作用可能造成湖泊表层沉积物中花粉组合呈现出较高的均一性^[11]。此外,Tian等^[27]也认为水深小于5 m的湖泊二次悬移和搅匀作用比较显著,花粉组合分布呈现较好的一致性。

本文呼伦湖表层沉积物花粉组合与主要环境影响因子的RDA排序分析结果显示,与水深相关的沉积物二次悬移再沉积对呼伦湖表层沉积物花粉空间分异的影响有限,远小于其它两个因子,可能表明与水深相关的湖泊二次悬移再沉积过程不是造成表层沉积物花粉组合空间分异的主要原因。这可能归因于呼伦湖平底型湖盆形状和平均约3 m(2011年测量)的水深条件,一方面,平底型湖盆沉积物的二次悬移再沉积显著弱于锅型湖盆^[24],另一方面,浅水湖泊搅匀作用可能弱化了沉积分异^[11,27]。

4.2 河流搬运过程的影响

前人关于河流搬运对湖泊表层沉积物花粉组合空间分布作用的研究较多。有研究认为,河流搬运花粉组分是湖泊沉积物花粉重要来源之一,可能会优先沉积在入湖口附近及周边地带,造成河流流域植被花粉类型含量升高^[26-27]。然而,也有研究者认为,相比于河流搬运组分,空气传播组分是湖泊沉积物花粉的主体,如Bonny^[21]对Cubbrian湖研究结果认为湖泊沉积物花粉主要源自于空气传播,而非河流搬运,Lu-

ly^[23]在澳大利亚Tyrrell盐湖研究进一步支持了Bonny的结果。

本文利用排序分析的方法分析了呼伦湖河流搬运过程对湖泊表层沉积物花粉组合的影响,结果显示,相对于距湖泊东岸距离因子(D5),河流搬运造成花粉空间分异的影响不大,支持了湖泊沉积物花粉主要源自于空气传播的说法。

4.3 漂流作用和湖岸非地带性植被的影响

呼伦湖表层沉积物花粉组合PCA分析结果表明,呼伦湖表层沉积物花粉组合呈现出显著的空间差异,藜科、松属等草本植物花粉种属位于第一轴正方向,在湖泊近东岸含量较高;RDA分析结果表明,湖泊自西向东的漂流作用(距离东岸距离D5)或东岸非地带性植被(也是距离东岸距离D5)是影响和控制呼伦湖表层沉积物花粉组合空间分异的主要因子。

首先,讨论漂流作用可能导致的空间分异。呼伦湖在西南向主导风向作用下形成自西向东的漂流,气传花粉沉降于湖水表面后,沉降速率大的花粉就地沉降或近距离迁移后沉降,而沉降速率小的花粉则随水流迁移较大距离后沉降,造成沉降速率小的花粉可能在东岸富集。呼伦湖表层沉积物花粉组合表现出松属、藜科花粉含量在湖泊东侧近岸地带偏高,而蒿属、桦属在湖泊中部和西部偏高,可能部分与漂流作用有关。由于具气囊的松属花粉具有较小的沉降速率^[38],可随漂流远距离迁移后在在湖泊东侧近岸地带沉降富集(距离河口较近的13和24号样点松属含量偏低,可能和入湖河流形成的羽状表面流或潜流对漂流的抑制作用有关)。然而,漂流作用似乎不能解释藜科花粉在东岸的富集,因为这种花粉的沉降速率相对较大^[10,38],不大可能随水长距离迁移至湖泊东侧,可能东岸非地带性盐生植被造成了藜科花粉的空间分异。

根据Prentice^[6]和Sugita^[9]对花粉源区的研究结果,湖泊大小决定湖泊花粉源区的大小,较小的湖泊花粉源区较小。藜科花粉沉降速率值大致在0.01~0.02 vg/u^[6],同一湖泊中心位置处的花粉组成中,湖岸周边2 km内的当地花粉贡献了二者的约50%,2~200 km范围内的区域花粉贡献了约40%,区域外(超过200 km)贡献了约10%。而近东岸位置处样点距岸距离减小,造成花粉源区的减小,湖泊周边2 km以内贡献的花粉比率会显著增加,可能导致湖岸非地带性植被花粉含量升高。上述分析得到了Sugita^[5]研究的支持,其研究认为湖泊边缘样点处花粉源区比湖

泊中心位置处花粉源区小 30%~50%,近湖岸样点花粉组合中湖岸非地带性植被贡献了更多的花粉。

前文已经述及,受湖泊西岸南西—北东向断裂构造活动的影响,呼伦湖湖盆形貌呈东岸缓、西岸陡的特点,呼伦湖东岸着生大面积旱生、盐生沼泽植被,而湖泊西岸缺失该类型植被,直接过渡为典型草原。湖泊东西两岸植被的差异可能表明,东侧非地带性植被是造成呼伦湖表层沉积物花粉组合中藜科花粉在近东岸地带偏高的主要原因。这一点得到了其他研究的支持,如许清海等^[26]对岱海研究表明,岱海湖区不同部位花粉组合差异很好的反映了湖泊周围植被的变化;Heggen 等^[16]研究认为湖泊边缘地带花粉组合可能受当地非地带性植被影响显著;我们对内蒙古地区其他几个浅水湖泊(如乌兰察布乌兰呼稍海子等)研究的结果也支持上述假设,在湖泊近岸处往往得到较高的藜科花粉含量。上述结果提醒我们,在干旱区开展湖泊沉积物花粉古植被重建研究时,必须注意非地带性花粉的影响,须选择较大直径湖泊的中心位置进行钻孔取样。

5 结论

(1) 呼伦湖表层沉积物花粉组合中草本植物花粉含量较高,其中藜科、蒿属花粉占绝对优势,其次为针叶树花粉,主要为松属,阔叶树花粉含量较少,以桦属为主。花粉空间分布呈现显著差异,藜科和松属花粉百分含量在湖泊东侧近岸地带较高,蒿属与桦属花粉百分含量在湖泊中部和西部较高。

(2) 综合沉积学、孢粉传播以及本文 RDA 分析结果表明,主导风向形成的漂流作用、湖泊东岸盐生非地带性植被、与水深相关的二次悬移再沉积过程及新开河河流搬运作用是控制或影响呼伦湖表层沉积物花粉空间分异的主要因素,其中漂流作用导致了松属花粉在湖泊近东岸地带的富集,湖泊东岸盐生非地带性植被导致了藜科花粉百分含量在湖泊近东岸地带偏高。

致谢 感谢两位审稿人给予的建设性意见,感谢呼伦湖渔场领导和工作人员在采样过程中给予的帮助。

参考文献(References)

1 吴霞,哈斯,杜会石,等. 库布齐沙漠南缘抛物线形沙丘表面粒度特征[J]. 沉积学报, 2012, 30(5): 937-944. [Wu Xia, Ha Si, Du Huishi, et al. Grain size distribution of parabolic dunes on the southern

fringe of Hobq Desert[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2012, 30(5): 937-944.]

2 王小雷,杨浩,赵其国,等. 云南抚仙湖近现代环境变化的沉积物粒度记录[J]. 沉积学报, 2010, 28(4): 776-782. [Wang Xiaolei, Yang Hao, Zhao Qiguo, et al. Recent environmental change inferred from grain-size records in Fuxian Lake, Yunnan province[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(4): 776-782.]

3 Seppä H, Bennett K D. Quaternary pollen analysis: recent progress in palaeoecology and palaeoclimatology[J]. *Progress in Physical Geography*, 2003, 27(4): 548-579.

4 Xu Q H, Li Y C, Bunting M J, et al. The effects of training set selection on the relationship between pollen assemblages and climate parameters: Implications for reconstructing past climate[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2010, 289(1/4): 123-133.

5 Sugita S. Pollen representation of vegetation in Quaternary sediments: theory and method in patchy vegetation[J]. *Journal of Ecology*, 1994, 82(4): 881-897.

6 Prentice L C. Modern pollen spectra from lake sediments in Finland and Finnmark, north Norway[J]. *Boreas*, 1978, 7(3): 131-153.

7 Jacobson G L, Jr, Bradshaw R H W. The selection of sites for paleovegetational studies[J]. *Quaternary Research*, 1981, 16(1): 80-96.

8 Jackson S T. Pollen source area and representation in small lakes of the northeast United States[J]. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 1990, 63(1/2): 53-76.

9 Sugita S. A model of pollen source area for an entire lake surface[J]. *Quaternary Research*, 1993, 39(2): 239-244.

10 Prentice I C. Pollen representation, source area, and basin size: Toward a unified theory of pollen analysis[J]. *Quaternary Research*, 1985, 23(1): 76-86.

11 Davis M B. Redeposition of pollen grains in lake sediment[J]. *Limnology and Oceanography*, 1973, 18(1): 44-52.

12 Bonny A P. The effect of pollen recruitment processes on pollen distribution over the sediment surface of a small lake in Cumbria[J]. *Journal of Ecology*, 1978, 66(2): 385-416.

13 Pennington W. The origin of pollen in lake sediments; An enclosed lake compared with one receiving inflow streams[J]. *New Phytologist*, 1979, 83(1): 189-213.

14 Gajewski K. Modern pollen assemblages in lake sediments from the Canadian Arctic[J]. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2002, 34(1): 26-32.

15 Bunting M J, Middleton D. Modelling pollen dispersal and deposition using HUMPOL software, including simulating windroses and irregular lakes[J]. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 2005, 134(3/4): 185-196.

16 Heggen M P, Birks H H, Heiri O, et al. Are fossil assemblages in a single sediment core from a small lake representative of total deposition of mite, chironomid, and plant macrofossil remains? [J]. *Journal of Paleolimnology*, 2012, 48(4): 669-691.

17 Zhao Y, Xu Q H, Huang X Z, et al. Differences of modern pollen assemblages from lake sediments and surface soils in arid and semi-arid China and their significance for pollen-based quantitative climate re-

- construction[J]. Review of Palaeobotany and Palynology, 2009, 156 (3/4): 519-524.
- 18 Zhao Y, Liu H Y, Li F R. Application and limitations of the *Artemisia*/Chenopodiaceae pollen ratio in arid and semi-arid China[J]. The Holocene, 2012, 22(12): 1385-1392.
- 19 Davis M B, Brubaker L B, Beiswenger J M. Pollen grains in lake sediments: pollen percentages in surface sediments from southern Michigan[J]. Quaternary Research, 1971, 1(4): 450-467.
- 20 Peck R M. Pollen budget studies in a small Yorkshire catchment [M]//Birks H J B, West, R G. Quaternary Plant Ecology. London: Blackwell Press, 1973: 43-60.
- 21 Bonny A P. Seasonal and annual variation over 5 years in contemporary airborne pollen trapped at a Cumbrian lake[J]. Journal of Ecology, 1980, 68(2): 421-441.
- 22 Davis M B, Moeller R E, Ford J. Sediment focusing and pollen influx [M]//Haworth Y, Lund J W G. Lake sediments and environmental history. Leicester: University of Leicester Press, 1984: 261-293.
- 23 Luly J G. Modern pollen dynamics and surficial sedimentary processes at Lake Tyrrell, semi-arid northwestern Victoria, Australia[J]. Review of Palaeobotany and Palynology, 1997, 97(3/4): 301-318.
- 24 沈吉, 薛滨, 吴敬禄, 等. 湖泊沉积与环境演化[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 20-24. [Shen Ji, Xue Bin, Wu Jinglu, et al. Lacustrine Deposit and Environmental Change [M]. Beijing: Science Press, 2010: 20-24.]
- 25 蒋庆丰, 沈吉, 刘兴起, 等. 乌伦古湖介形组合及其壳体同位素记录的全新世气候环境变化[J]. 第四纪研究, 2007, 27(3): 382-391. [Jiang Qingfeng, Shen Ji, Liu Xingqi, et al. Holocene climate reconstruction of Ulungur Lake (Xingjiang, China) inferred from ostracod species assemblages and stable isotopes [J]. Quaternary Science, 2007, 27(3): 382-391.]
- 26 Xu Q H, Li Y C, Yang X L, et al. Source and distribution of pollen in the surface sediment of Daihai Lake, inner Mongolia[J]. Quaternary International, 2005, 136(1): 33-45.
- 27 Tian F, Xu Q H, Li Y C, et al. Pollen assemblage characteristics of lakes in the monsoon fringe area of China[J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(21): 3354-3363.
- 28 赵慧颖, 乌力吉, 郝文俊. 气候变化对呼伦湖湿地及其周边地区生态环境演变的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(3): 1064-1071. [Zhao Huiying, Wu Liji, Hao Wenjun. Influences of climate change to ecological and environmental evolution in the Hulun Lake wetland and its surrounding areas [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(3): 1064-1071.]
- 29 《中华人民共和国气候图集》编委会. 中华人民共和国气候图集 [M]. 北京: 气象出版社, 2002: 1-250. [The Committee of the Climate Atlas of China. Climate Atlas of China [M]. Beijing: Meteorological Press, 2002: 1-250.]
- 30 《中国植被图集》编委会. 中国植被图集图集. 北京: 气象出版社, 2002: 137-139. [The Committee of the vegetation Atlas of China. Vegetation Atlas of China. Beijing: Meteorological Press, 2002: 137-139.]
- 31 Faegri K, Iversen J. Textbook of pollen analysis [M]. Chichester New York: Wiley, 1975: 1-295.
- 32 Erdtman G, Wodehouse R. An introduction to pollen analysis [M]. Mass, USA: Read Books, 1954: 175-195.
- 33 王伏雄, 钱南芬, 张玉龙, 等. 中国植物花粉形态 [M]. 北京: 科学出版社, 1995: 1-461. [Wang Fuxiong, Qian Nanfen, Zhang Yulong, et al. Pollen Flora of China [M]. Beijing: Science Press, 1995: 1-461.]
- 34 Juggins S. C2 Version 1.5: Software for ecological and palaeoecological data analysis and visualisation [CD]. Newcastle upon Tyne: University of Newcastle, 2007: 73.
- 35 Lepš J, Šmilauer P. Multivariate Analysis of Ecological Data Using CANOCO [M]. New York: Cambridge University Press, 2003.
- 36 Tutin W. Preliminary observation on a year's cycle of sedimentation in windermere, England [J]. Mem Ist Ital Idrobiol, 1955, 8: 467-484.
- 37 Mueller W P. The distribution of cladoceran remains in surficial sediments from three northern Indiana lakes [J]. Investing Indiana Lakes & Streams, 1964(6): 1-63.
- 38 邓韞, 郑卓, Suc J P, 等. 冲绳海槽末次盛冰期孢粉组合的古环境指示意义 [J]. 地球科学, 2005, 30(5): 597-603. [Deng Yun, Zheng Zhuo, Suc J P, et al. Pollen assemblages of the last glacial maximum in Okinawa Trough and their implication on paleoenvironment [J]. Earth Science, 2005, 30(5): 597-603.]

Spatial Distribution Characteristics and Environmental Influencing Factors of Pollen Assemblage of Lake Surface Sediments from Lake Hulun

LIU LiNa^{1,2} WANG Wei^{1,2} MA YuZhen³ LI YanYan^{1,2} JIANG YaJuan^{1,2} HE Jiang^{1,2}

(1. College of Environment and Resource, Inner Mongolia University, Hohhot 010021;

2. Institute of Environmental Geology, Inner Mongolia University, Hohhot 010021;

3. Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, Ministry of Education of China & State Key Laboratory of Earth Surface Process and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875)

Abstract: The spatial characteristics of pollen assemblages of the lake surface sediments and associated dynamics on deposition, perseveration and transport process is important to the paleoclimate and paleoenvironment reconstruction. Lake Hulun, which is situated in the northeast of China, with a lake surface area of ~2 100 km² and an average water depth of 3 m, and four inflow rivers in the north, east and the south, provide an ideal site for such researches. In addition, the widely varied lake basin (the differences of the water depth between each sample site) and the changed vegetation pattern around the lake, provide chances to explore the impact of the resuspension and redeposition process, the influencing of drift and the influence of non-zonal vegetation to the pollen assemblage in the lake. Investigations on pollen assemblages of 29 surface sediment samples throughout Lake Hulun were carried and ordination analysis on the pollen percentage data and environmental data were conducted to disclose the spatial characteristics of pollen assemblages and the potential dynamics between the pollen data and the environmental factors. Specifically, 29 lake surface sediment samples (top 2 cm sediment) were collected at a spatial interval of 5×5 minutes along a snake line in the lake and three types of environmental impact factors including water depth (in relation to resuspension and redeposition), the distance to the rivers mouth (in relation to river transportation process) and the distance to the east coast of the lake (in relation to the drift caused by dominant wind in warm season and the influence of the non-zonal vegetation in the east of the lake) were constructed. Ordination analysis including principal component analysis (PCA) and redundancy analysis (RDA) were selected according to the data type of the pollen data (i.e., liner model as indicated by the gradient length of the detrended correspondence analysis, DCA) and were conducted on the pollen data and environmental data. As suggested by the result of the PCA, remarkable spatial differentiations of the pollen assemblage could be distinguished. That is, the pollen percentages of Chenopodiaceae and *Pinus* are high in the sample sites in the eastern littoral area, while the pollen percentages of *Betula* and *Artemisia* are high in the sample sites in the central and western profundal area. As revealed by the results of RDA, the distance to the east coast (D5), the distance to the Xinkai River mouth (D2) and the water depth (WD) are statistically correlated to the spatial patterns of pollen assemblages and are responsible for the spatial differentiations of pollen assemblages. The distance to the east coast (D5), on behalf of the influence of the drift caused by the dominant wind and the influence of the non-zonal halophytic vegetation developed in the east shore of Lake Hulun, is the most important environmental factor correlated to the spatial difference of pollen assemblage. The non-zonal halophytic vegetation developed in the east shore of Lake Hulun make a contribution to the high content of Chenopodiaceae in the eastern littoral area, while the drift caused by the dominant west-southward wind lead to the high *Pinus* percentages in the eastern littoral area.

Key words: Lake Hulun; surface sediment; pollen spatial distribution; environmental impact factors; ordination analysis