

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2019070301

2.5 Ma 以来中国陆地孢粉记录反映的古气候变化

赵辰辰¹, 王永波¹, 胥勤勉²

1. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048

2. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170

摘要: 第四纪作为地质历史中距今最近的一个时期, 其气候演化过程备受关注。然而, 受研究材料的限制, 该时段内气候演化历史研究有限且存在一定的不一致性。为此, 本文选取中国陆地第四纪时期 (2.5 Ma 以来) 的 48 篇孢粉记录资料作为研究对象, 对孢粉组成结果进行再分析, 探讨孢粉中记录的第四纪气候演化信息。结果表明, 研究区域 2.5~1.5 Ma 期间气候波动变冷且明显偏干, 1.5~1.0 Ma 期间东部地区气候偏湿而西北地区 and 青藏高原地区则偏干, 1.0 Ma 以来整体气候波动频繁。同时, 孢粉记录中保存的气候演化历史与第四纪亚洲季风演化具有较好的一致性, 约 2.5 Ma 亚洲冬季风逐渐增强, 该阶段气候较为干旱; 在 1.5 Ma 东亚夏季风呈现增强的趋势, 带来较多降水, 气候湿润; 而 1.0 Ma 以来冬季风增强夏季风减弱, 气候又逐渐变干。

关键词: 孢粉; 气候演化; 亚洲季风; 第四纪

中图分类号: P532

文献标识码: A

Climate changes on Chinese continent since 2.5 Ma: Evidence from fossil pollen records

ZHAO Chenchen¹, WANG Yongbo¹, XU Qinmian²

1. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China

2. Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin 300170, China

Abstract: Climate change during Quaternary has been a hot spot in geosciences for decades. However, discrepancies remain among scholars up to date. In this paper, 48 fossil pollen records from Chinese continent, which cover the whole period of Quaternary, were selected and synthesized for regional climate variations in order to better understand the historical evolution of Quaternary climate. Pollen data were interpolated and mapped using the method of Inverse Distance Weighting (IDW) for spatial distribution patterns. According to the fossil pollen records, Quaternary climate variation on Chinese continent could be summarized as follows. During the period of 2.5~1.5 Ma, the region was dominated by fluctuated cold and dry climate. During the period from 1.5 to 1.0 Ma, it was warm and wet in the eastern part but dry in the northwestern part and the Tibetan Plateau. More fluctuations appeared since 1.0 Ma. The climate variation revealed by pollen records shows a good consistence with the Quaternary monsoon evolution: Asian winter monsoon gradually strengthened after 2.5 Ma while the climate was relatively dry. The East Asian summer monsoon, however, intensified around 1.5 Ma, which probably brought in more precipitation and led to the overall wet climate. The region returned to a drying trend again since 1.0 Ma with the retreat of summer monsoon.

Key words: pollen; climate change; Asian monsoon; Quaternary

第四纪作为地质历史上最接近现代的一个时期^[1], 其植被、气候演化历史对于深入理解不同时间尺度全球气候变化机制以及预测未来变化趋势具有重要科学意义^[2], 备受国内外研究学者关注。

孢粉化石由于耐腐蚀、易散布、产量大等特点, 广泛分布于不同类型的沉积物中, 作为重要的陆源生物指标, 其种属组成可以忠实地记录过去植物群

落的组合特征, 被广泛应用于过去植被演化历史重建当中^[3]。同时, 根据区域植被组成的演化, 可以有效地获取过去气候变化信息, 因此, 在古气候重建中发挥着重要作用。早在 20 世纪 20 年代, 北欧泥炭记录中的孢粉记录就被应用于全新世气候重建当中^[4]。随后在 20 世纪 50 年代, 国内孢粉学研究逐步发展起来, 并取得了一系列的卓越成果, 建立

资助项目: 国家自然科学基金“青藏高原东南部巴松措湖泊沉积物记录的晚全新世地震事件”(41877282); 中国地质调查局项目“河北怀安-内蒙凉城地区区域地质调查”(DD20190035)

作者简介: 赵辰辰(1993—), 女, 硕士研究生, 自然地理学专业, E-mail: 15081056522@163.com

通讯作者: 王永波(1983—), 男, 副研究员, 主要从事自然地理学全球气候环境变化研究, E-mail: yongbowang@cnu.edu.cn

收稿日期: 2019-07-03; **改回日期:** 2019-11-13. 文凤英编辑

了不同时间尺度的植被、气候演变序列^[5-7]。近年来,随着现代花粉过程研究的深入以及统计学方法在古环境演化中的应用,基于孢粉化石组成的过去植被、气候演化历史研究也逐步由定性分析向定量重建的方向发展^[8]。孢粉化石组成作为陆生植被系统演替的直接证据,在恢复过去植被、气候环境演化研究中发挥着不可替代的作用。

近几十年来,基于一系列的沉积物钻孔和剖面样品孢粉分析,对我国第四纪时期的植被、气候演化进行了探讨(表 1)。然而,受样品材料限制,在百万

年时间尺度上利用孢粉为代用指标开展古气候重建的研究仍较少,且多数文献仅局限于对自身沉积序列数据的分析,缺乏系统的气候描述及区域间的综合对比分析。研究表明,对不同时间节点的孢粉分析结果进行空间上的作图分析可以更有效地获取宏观区域尺度上的植被及气候演化规律^[9-10]。因此,本文拟对 2.5 Ma 以来我国陆地孢粉研究记录进行搜集和系统整理,通过空间插值分析获取孢粉组成在空间上的分布特征以及时间上的演化历史,进一步揭示孢粉记录中所保存的第四纪古气候演化信息。

表 1 中国 2.5 Ma 以来陆地孢粉记录
Table 1 List of pollen records since 2.5 Ma from Chinese continent

编号	钻孔	东经	北纬	载体	孔深/m	年代/Ma	样品数	文献
NW1	QK7	107.00°	41.00°	岩芯	200	0.51	275	李玉刚等 ^[11]
NW2	DWJ	99.50°	39.50°	岩芯	140	1.70	19	常婧等 ^[12]
NW3	CK1	106.25°	38.47°	岩芯	300	0.80	110	杨振京等 ^[13]
N1	虎头梁剖面	114.35°	40.16°	剖面	—	早更新世	—	刘金陵等 ^[14]
N2	昌平东关村	115.84°	40.04°	岩芯	103~149	0.60~1.07	60	李腾飞等 ^[15]
N3	HR88-01	116.58°	40.19°	岩芯	506	第四纪	—	李长安等 ^[16]
N4	TZ01	116.54°	40.10°	岩芯	763	3.58	239	姚亦峰等 ^[17]
N5	北京凹陷新5孔	116.52°	39.95°	岩芯	862	2.30	51	郭高轩等 ^[18]
N6	CQJ1孔	117.22°	39.34°	岩芯	501	4.00	275	范淑贤等 ^[19]
N7	TD1	118.16°	39.54°	岩芯	238	3.45	87	胡云壮等 ^[20]
N8	G1、G25、SK304	—	—	岩芯	103、68、55	第四纪	25、31、31	任振纪等 ^[21]
N9	河北平原内25口井	115.00°~117.45°	37.45°~33.51°	剖面	—	第四纪	314	童国榜等 ^[22]
N10	HS1	115.68°	37.91°	岩芯	600	3.50	529	范淑贤等 ^[23]
N11	河南开封XK63、武涉XK72 河北肃宁sukai10、沧州沧12 沧13、玉田yu11	113.00°~118.00°	35.0°~40.0°	岩芯	330~770	第四纪	362	童国榜等 ^[24]
N12	HB1	117.51°	38.29°	岩芯	550	3.20	462	范淑贤等 ^[25]
N13	甘肃省灵台县朝那镇	107.20°	35.12°	剖面	105	1.50	130	吴福莉等 ^[26]
N14	黑木沟	109.43°	35.76°	剖面	—	2.50	—	李玉梅等 ^[27]
N15	BK2	113.25°	35.18°	岩芯	162	0.57	158	乔晓旭等 ^[28]
N16	HZ~S	114.51°	36.61°	岩芯	1~101	第四纪	140	肖景义等 ^[29]
N17	N3	110.10°	34.55°	岩芯	250	第四纪	35	刘明建等 ^[30]
N18	NYbz1、NYbz2	112.54°~112.40°	32.89°~32.94°	岩芯	150、130	1.98	50、20	李博等 ^[31]
N19	淮北平原	116.00°	34.00°	—	—	2.50	—	于振江等 ^[32]
T1	ZK402	91.60°	37.58°	岩芯	—	2.50	—	王建等 ^[33]
T2	ZK701+801孔、水6孔、涩中6井、涩深1井	—	—	岩芯	0~1100 0~900 380~1146、 1140~1620	1.87	—	康安等 ^[34]

续表 1

编号	钻孔	东经	北纬	载体	孔深/m	年代/Ma	样品数	文献
T3	BDQ	93.93°	35.22°	岩芯	106	0.73~0.02	90	刘晓丽等 ^[35]
T4	羌塘组	94.93°	36.41°	剖面	355	2.00	50	许清海等 ^[36]
T5	东山顶	94.78°	35.00°	剖面	120	2.40	180	潘安定等 ^[37]
T6	野牛沟、大野马岭牛头碑、哈拉滩、黑河乡	97.00°~99.00°	34.00°~35.00°	剖面		2.23	219	韩建恩等 ^[38]
T7	东山组	103.07°	35.58°	剖面	80~200	2.50~1.76	88	董铭等 ^[39]
T8	香孜组剖面	79.67°	31.82°	剖面	250	2.68~1.36	34	朱大岗等 ^[40]
T9	香孜组剖面	79.62°	31.84°	剖面	110	2.75~1.86	54	江尚松等 ^[41]
T10	CN	91.40°~91.50°	31.40°~31.50°	岩芯	197	2.80	400	陈诗越等 ^[42]
T11	错鄂孔	91.40°~91.50°	31.40°~31.50°	岩芯	201	2.80	400	陈诗越等 ^[43]
T12	沃马剖面	85.29°	28.50°	剖面	600	10.00~1.67	159	徐亚东等 ^[44]
S1	DZS2	112.70°	31.22°	岩芯	240	第四纪	461	张志忠等 ^[45]
S2	ZKA4	119.52°	32.48°	岩芯	234	2.58	129	张宗言等 ^[46]
S3	ZK10	119.84°	32.97°	岩芯	243	2.58	180	劳金秀等 ^[47]
S4	兴化钻孔	119.52°	32.48°	岩芯	350	3.00	—	舒强等 ^[48]
S5	NTK01	120.91°	31.97°	岩芯	202	上新世	125	向烨等 ^[49]
S6	SZ03	120.70°	31.24°	岩芯	272	第四纪	109	宗雯等 ^[50]
S7	渡村1125井	120.08°	31.03°	岩芯	139	第四纪	51	汪世兰等 ^[51]
S8	长江三角洲	121.14°	31.00°	—	—	第四纪	1000多	王开发等 ^[52]
S9	斜土路2号钻孔	120.86°	30.67°	岩芯	248	更新世	—	姜立征等 ^[53]
S10	ZK1	122.33°	30.00°	岩芯	90	中更新世	33	叶兴永等 ^[54]
S11	HQ	100.18°	26.56°	岩芯	737	/ 2.78	1989	肖霞云等 ^[55]
S12	云贵高原	92.00°~108.00°	22.00°~28.00°	—	—	4.00	700	童国榜等 ^[56]
S13	ZK1	110.18°	20.33°	岩芯	39~210	0.73~2.48	26	廖先斌等 ^[57]
S14	ZQ1、ZQ2、ZQ3、ZQ4	113.00°~116.00°	20.00°~23.00°	岩芯	120	第四纪	177	陈芳等 ^[58]

1 区域概况

中国幅员辽阔,复杂多样的地形和气候条件形成了丰富多样的植被类型。受纬度及相应的热力分布差异影响,从南到北地带性植被有北热带季雨林、南亚热带季风常绿阔叶林、中亚热带常绿阔叶林、北亚热带常绿落叶混交林、暖温带落叶阔叶林、温带针阔叶混交林和寒温带针叶林等^[59]。同时,我国地处典型的季风气候区,在亚洲夏季风的影响下年降水量呈现出明显的由东南沿海向西北内陆逐渐减少的趋势,从东南到西北呈现出由森林、草原逐渐过渡到荒漠的植被分布特征。此外,不同海拔高度上,气候要素对植被生长的影响呈现

较大的差异,山地地形气候的地带性差异使得山地植被存在明显的垂直地带性分异。尤其是青藏高原地区,因其海拔效应而形成独特的气候环境,发育了典型的高寒草甸、高寒草原等植被类型。

在中国植被区划的基础上,为方便对比分析,我们将研究区分为4个主要区域:北方地区、南方地区、西北地区及青藏高原地区(图1)。(1)北方地区主要包括华北平原、东北平原、黄土高原、长白山及太行山等地区。其中东北平原和长白山地区现代植被以温带针阔混交林、森林草甸草原为主;华北平原和太行山以栎林、油松林和灌木草原等为主;黄土高原南部以松栎林为代表的森林草原为主,北部以长芒草、蒿为代表的干草原为主。(2)南方地区为中国东部季风区南部,主要是秦岭-淮河

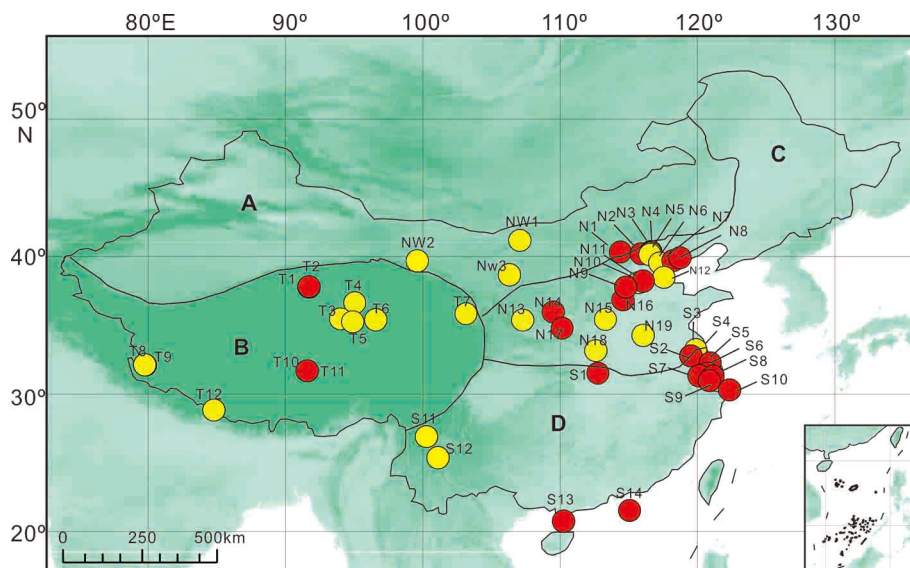


图1 第四纪古孢粉记录的空间分布及4个研究区域

A. 西北地区, B. 青藏地区, C. 北方地区, D. 南方地区。

黄色点为有年代标尺的记录, 红色点为无具体年代标尺的记录, 记录详情见表1。

Fig.1 The distribution of Quaternary pollen records collected in this study for four sub-regions

A-Northwest China, B-Qinghai-Tibetan Plateau, C-North China, D-South China

The yellow dots are records with age control, while red dots represent records without age control, detailed information refer to Table 1.

一线以南, 包括长江中下游平原、珠江三角洲平原、四川盆地、云贵高原等地形区。本地带以亚热带常绿阔叶林为鲜明特征, 按照不同的水分条件、海拔高度以及不同纬度形成的植被组合可进一步分为半湿润常绿阔叶林、季风常绿阔叶林和中山湿性常绿阔叶林。(3)西北地区主要包括准噶尔盆地、塔里木盆地、阿尔泰山、天山及内蒙古高原等, 区域性植被包括东疆山间盆地戈壁荒漠植被、河西走廊荒漠草原植被以及内蒙古高原荒漠草原植被。(4)青藏高原地区包括青藏高原及柴达木盆地, 植被主要为干旱荒漠灌丛植被、高寒灌丛草甸及山地寒温性云冷杉针叶林等^[60]。

2 研究方法

2.1 孢粉记录的获取

为获取中国第四纪植被演替信息, 对已发表的3.0 Ma以来我国陆地孢粉文献资料进行收集整理, 共获取到时间跨度在0.5 Ma以上且有明确孢粉数据资料的记录有48个, 其中时间跨度在1.5 Ma以上的有24个(图1, 表1)。大部分记录中的样品取自沉积物岩芯(34个)、剖面(11个)。在空间分布上, 所获取的记录主要集中在北方地区(19个)和南方地区(14个), 青藏高原地区(12个)尤其是西北

地区(3个)记录相对较少。此外, 所收集的记录中的32个记录有明确的测年结果及年代学框架, 占记录总数约67%, 测年方法以古地磁、释光和ESR测年为主; 剩余16个无具体年代学标尺的记录中, 部分记录对样品进行了详细的沉积地层学的描述(4个), 依据地层年代对样品所处的年代进行了推算。

2.2 特征种属的空间分布及时间演化规律

为获取第四纪植被演化的时间、空间规律, 本文对有具体年代标尺且孢粉百分比含量数据较为完整的记录进行空间插值分析。选取在记录中广泛分布且含量较高的6种孢粉种属进行统计分析, 包括木本花粉3种: 松属(*Pinus*)、云/冷杉属(*Picea/Abies*)和桦木属(*Betula*), 草本花粉3种: 蒿属(*Artemisia*)、藜科(*Chenopodiaceae*)和禾本科(*Poaceae*)。根据文献资料中各钻孔孢粉数据记录的气候演化趋势, 同时考虑亚洲夏季风在第四纪所呈现出阶段性的变化趋势, 我们对2.5、2.0、1.5、1.0、0.5、0 Ma这6个时间节点的6种特殊种属的孢粉百分含量进行了分析探讨。

为了更清晰地展示特征种属在时间尺度和空间尺度上的变化规律, 运用ArcMap 10.4.1程序对6个特征种属的数据进行了数量分级(表2), 随后采用反距离加权方法(Inverse Distance Weighting)对分布不均匀的孢粉记录进行空间插值, 从而获取不

表 2 特征孢粉种属 ArcMap 插值分级
Table 2 Classification of selected pollen species for interpolation in ArcMap

种属	分级
松属	<10%、10%~20%、20%~40%、40%~60%、60%~80%、>80%
云/冷杉属	<5%、5%~15%、15%~25%、>25%
桦木属	<1%、1%~2%、2%~4%、4%~5%、>5%
蒿属	<6%、6%~15%、15%~25%、25%~50%、>50%
藜科	<2%、2%~5%、5%~15%、15%~30%、30%~40%、40%~55%、>55%
禾本科	<3%、3%~5%、5%~10%、10%~15%、>20%

同时的孢粉种属百分含量的空间分布特征(图 2—8)。由于 3.0~2.5 Ma 时段孢粉记录较少,未进行空间插值分析;同时,为了保证空间上的分辨率,对 2.5 Ma 以来少数部分数据缺失的钻孔,利用较近距离的两个以上样品点的数据进行插值,进而得出各钻孔在不同时间段的特征种属百分含量。

2.3 孢粉记录的过去气候变化信息

为了更清晰地展示孢粉记录中的气候变化信息,从 48 篇古气候记录中筛选了 25 篇有具体气候变化描述的文献,其中包括 21 篇有具体年代标尺的记录和 4 篇有地层年代描述的记录。通过建立气候指数的方法^[61-64],将所搜集文献中的气候变化信息(湿度、温度)转化为半定量的气候干湿(冷暖)指数: +2, +1, -1, -2; 其中, +2 表示记录中最为湿润(温暖)的气候阶段, +1 表示气候相对偏湿(偏暖)的状态; 相应的, -1 则表示气候相对偏干(偏冷)的阶段, 而 -2 表示记录中最为干旱(寒冷)的时期。依据以上规则,结合参考文献记录中的气候演化阶段划分及气候环境描述,将 25 篇文献中的气候变化信息转化为 4 个等级的气候指数,并结合相应年代得到气候指数变化序列(图 8),开展气候记录间以及不同区域间的对比分析。

3 结果

3.1 特征孢粉种属时空分布特征

在所选取的 6 种特征种属中,木本花粉中松属(*Pinus*)在各记录中广泛分布,且普遍呈现出较高含量(最高可达 80%)。同时,在所搜集到的第四纪时期孢粉记录中,松属花粉主要分布在北方地区,在青藏高原东北部也有所分布,含量较低(约 10%)(图 2)。另一方面,在时间分布上,2.5 Ma 以来松属

百分含量呈现波动变化,在 1.0 和 0 Ma 时间段内整体含量较高,其余时段含量较低(图 2)。

云/冷杉属(*Picea/Abies*)花粉的百分含量变化范围为 0~40%,但由于获取的资料中云/冷杉属的记录较少,仅利用 ArcMap 程序进行数据分级,未能进行插值分析。从图 3 可以发现,2.5~2.0 Ma 该种属主要出现在北方地区,同时在青藏地区有所分布;2.0 Ma 时段内北方地区云/冷杉属孢粉百分含量略有减少,主要分布于青藏地区。2.0~1.5 Ma 其百分含量较上一阶段整体下降,而 1.5~0.5 Ma 又有显著升高。自 0.5 Ma 以来,云/冷杉孢粉含量在青藏地区有所上升,北方、西北地区呈减少趋势。

桦木属(*Betula*)花粉百分含量整体较低,为 0~15%,主要分布在我国北方地区。对桦木属进行数据分级和空间插值分析表明,1.0 Ma 以前孢粉含量在青藏高原东缘略有增高,但北方地区变化不明显;除北方地区外,该孢粉含量在 0.5 Ma 前后明显增多且在多数记录中出现峰值后,孢粉含量明显下降(图 4)。

草本花粉中蒿属(*Artemisia*)百分含量为 0~75%,从图 5 中我们可以发现蒿属主要分布在北方和青藏地区。对蒿属进行数据分级和插值分析表明:2.5~2.0 Ma 孢粉百分含量在青藏地区逐渐增多,而北方地区略有减少,在该时间段内蒿属主要分布于青藏地区。2.0~1.5 Ma 蒿属百分含量整体呈现小幅度升高,而随后 1.5~1.0 Ma 整体减少。自 1.0 Ma 以来,蒿属花粉孢粉百分含量又呈现整体上升的趋势,尤其是在最后 0.5 Ma 时段内明显增加。

藜科(*Chenopodiaceae*)花粉在记录中的百分含量为 0~75%,由于记录空间分布的限制,该科花粉主要分布在北方地区和青藏地区。此外,空间插值分析结果(图 6)表明,2.5~2.0 Ma 藜科花粉含量整体较低,随后在 1.5~1.0 Ma 期间含量略有增加。1.0 Ma 以来孢粉含量显著增加,且在空间分布范围

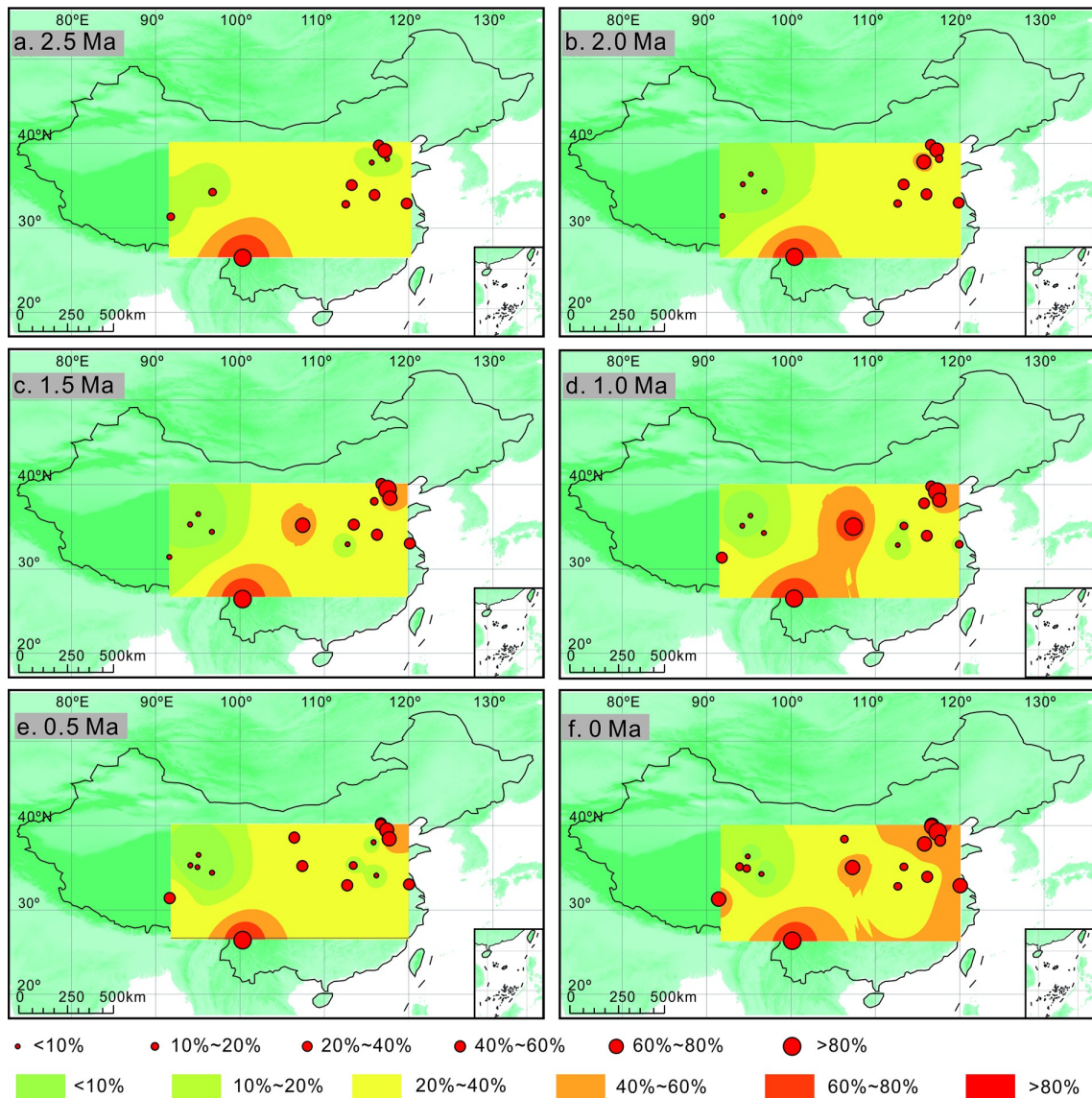


图2 2.5 Ma以来松属花粉含量的时空变化

Fig.2 Temporal and spatial distribution pattern of *Pinus* pollen since 2.5 Ma

上明显扩大。

禾本科(Poaceae)的百分含量为0~60%,在各区域内分布较为均匀。在2.5 Ma除南阳盆地NYbz1、NYbz2钻孔^[31]的禾本科含量异常偏高外,整体含量呈波动变化。1.5~1.0 Ma禾本科孢粉含量在青藏地区略有升高,而自1.0 Ma以来,禾本科含量整体呈现上升趋势,尤其是我国东部的平原地区(图7)。

3.2 气候记录温湿指数分析

在北方地区搜集到的古气候记录中,8个记录有具体年代标尺和详细气候演化描述,这些记录中所反映的3.0 Ma以来中国北方地区的气候演化过程大体表现为:3.0~2.5 Ma气候较为温暖湿润,2.5~2.0 Ma逐渐变冷,气候偏干,2.0~1.0 Ma气候

逐渐变湿,1.0~0.5 Ma气候温和偏湿,0.5 Ma以来气候波动频繁,整体偏暖(图8)。

南方地区搜集到的记录中仅有4个记录有具体的年代标尺和气候变化信息。综合这4个记录可以发现,中国南方地区在3.0~2.5 Ma时段内气候温暖湿润,2.5~1.5 Ma气候偏凉且较为干燥,1.5~0 Ma气候较为湿润(图8)。

西北地区获取记录较少,仅3个记录,均有具体的年代标尺和气候演化历史的描述,但所涵盖的时间较短。从这3个记录中可以发现,中国西北地区在1.5~0.5 Ma时期气候较为干旱,随后0.5~0 Ma气候波动频繁(图8)。

青藏地区所搜集的12个记录中,10篇记录有较为具体的年代学研究结果和气候演化阶段的描述。该地区整体呈现如下模式:3.0~2.5 Ma气候温

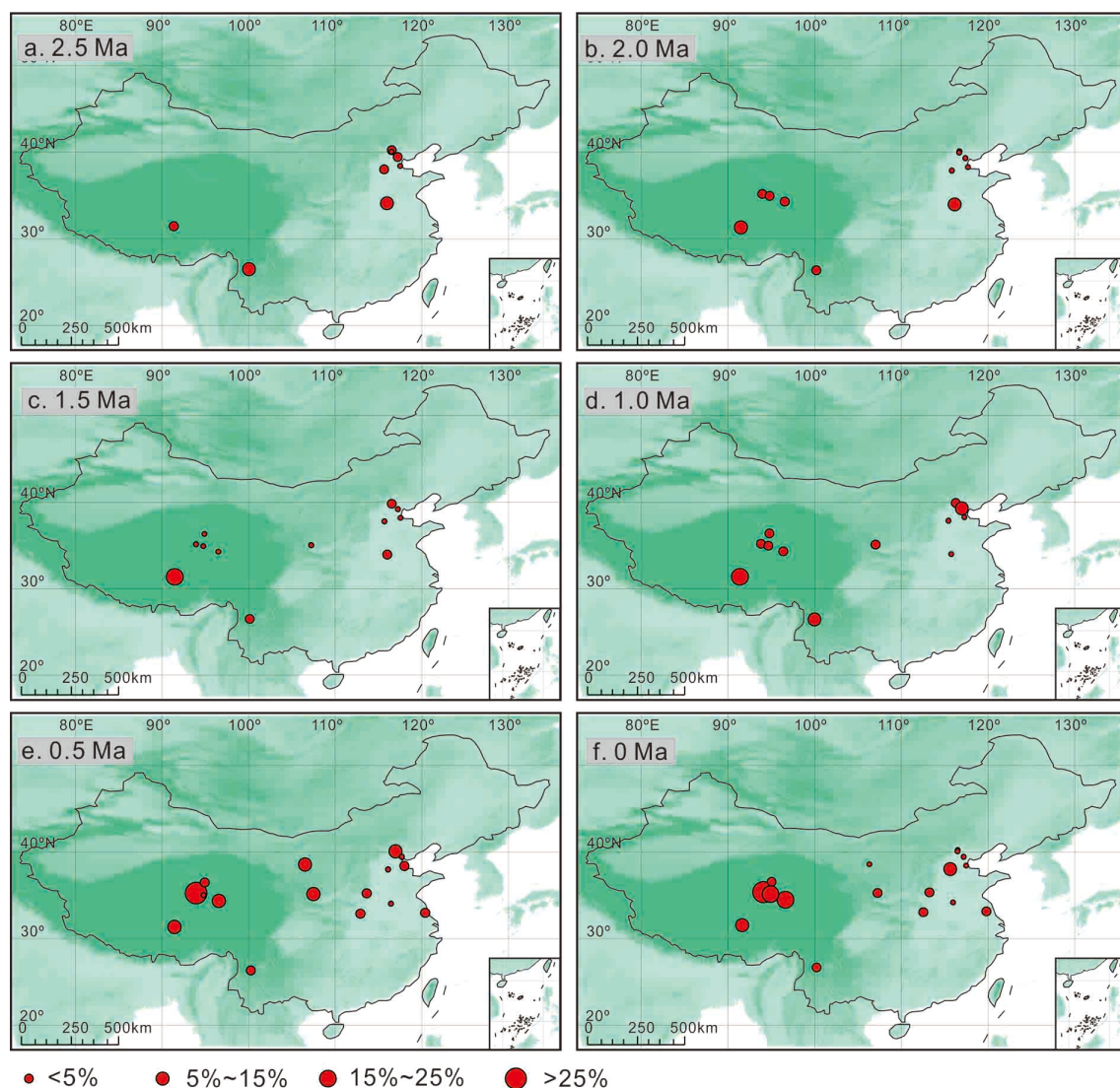


图 3 2.5 Ma 以来云/冷杉花粉含量的时空变化

Fig.3 Temporal and spatial distribution pattern of *Picea/Abies* pollen since 2.5 Ma

暖, 2.5~2.0 Ma 气候偏凉偏干, 2.0~1.5 Ma 气候整体偏凉, 1.5~1.0 Ma 气候波动较为频繁, 1.0~0 Ma 气候寒冷偏干(图 8)。对中国 4 个区域古气候记录进行综合对比分析可以发现, 在 3.0~2.5 Ma 期间气候整体较为温暖湿润, 2.5~1.5 Ma 期间气候波动频繁, 整体偏冷且明显偏干, 1.5~1.0 Ma 期间东部地区气候偏湿而西北地区和青藏高原地区则偏干, 1.0 Ma 以来整体气候波动频繁。

4 讨论

4.1 特征种属孢粉所记录的第四纪环境演化

由于研究资料的限制, 本文共搜集到 48 个记录, 而其中仅有一半记录(24 个)中提供了明确的年代学研究结果及气候演化描述(表 1)。同时, 所搜

集到的记录主要集中在北方地区, 西北地区仅搜集到 3 个钻孔记录, 而我国东北地区、西藏的西北部以及华南大部分地区未搜集到相关记录。因此, 样品点空间分布上的不均一性, 一定程度上限制了孢粉组成的空间插值分析结果。此外, 由于孢粉保存、提取工作的难度, 所搜集到的第四纪时段孢粉记录中样品分析数量通常仅有几十个, 样品分辨率达数万年, 从钻孔所获取的气候记录的分辨率较低, 因而只能获取阶段性的气候演化信息, 很难提取到周期性的气候波动变化信号。

在所选取的文献中出现广泛且含量较高的 6 个特征种属中, 松属(*Pinus*)含量较高。现代松属植物在地球上广泛分布, 在北极圈以南赤道以北的北半球区域均有分布, 在垂向上可分布于 0~4 000 m 不同海拔高度。我国是松属植物重要分布中心区域之一, 种类繁多, 几乎遍及全国各省区^[65], 松属花粉

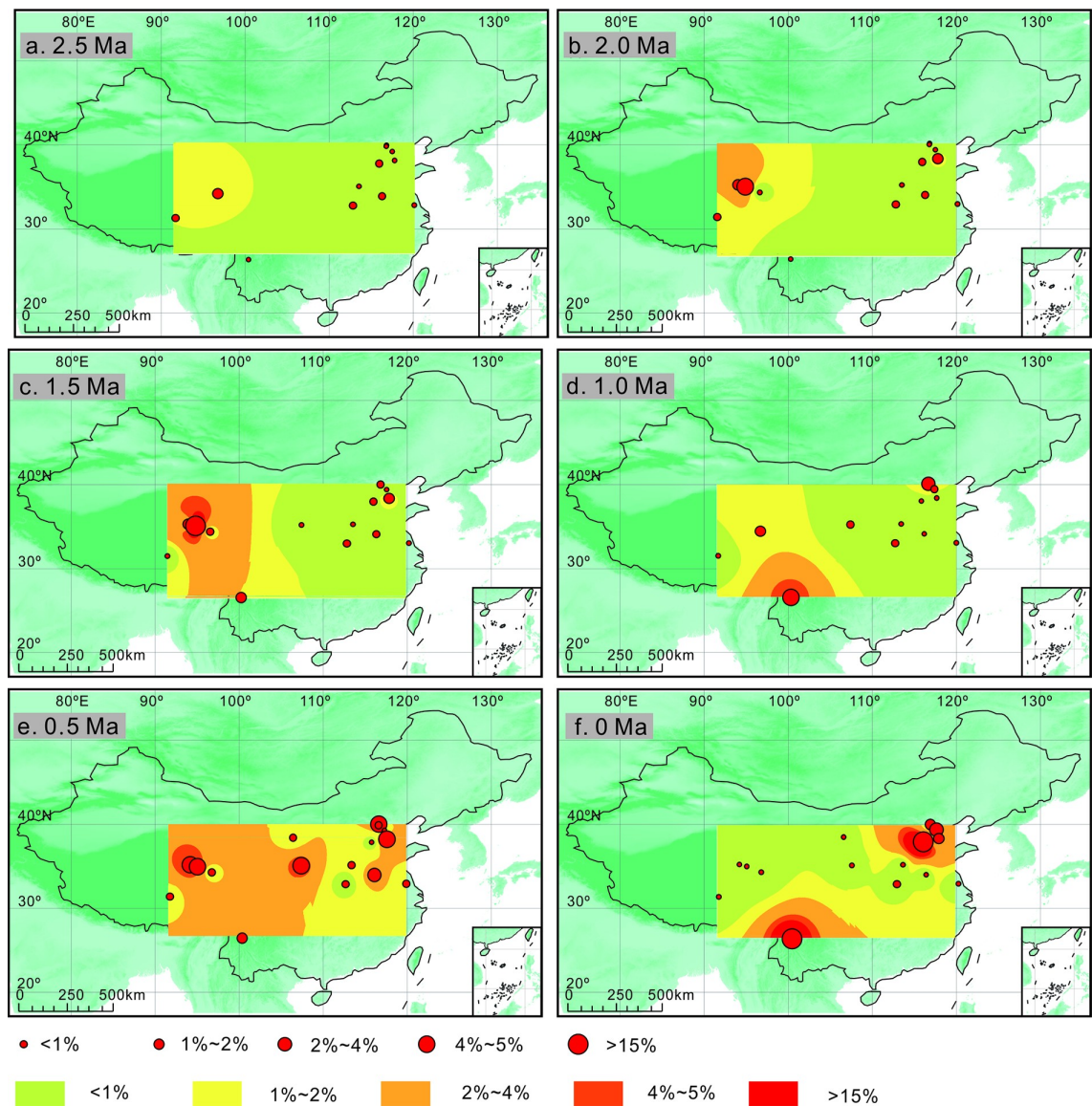


图 4 2.5 Ma 以来桦木属花粉含量的时空变化
Fig.4 Temporal and spatial distribution pattern of *Betula* pollen since 2.5 Ma

含量在 50~60% 及以上的样品多出现在海拔 2 500~3 200 m^[66]。研究表明,松属植物的花粉产量大^[67],且具有两个发达的气囊,可以随气流搬运到较远的距离,导致在无林区也会出现较高含量松属花粉的现象^[68]。同时,松属花粉数量主要受春季温度影响,温度越高花粉数量越多,其他季节花粉数量主要受相对湿度影响,湿度越低,花粉数量越大^[69]。因而,在第四纪阶段内松属花粉在北方地区含量较高,但在时间和空间上变化较小,变化趋势不明显,可能与松属花粉具有两个发达气囊易于传播有很大的关系。一定程度上也表明,在开展松属花粉研究工作中应进行更为精确的种属鉴定,结合不同花粉的传播机制,获取更为确切的气候指示意义。

云杉属和冷杉属(*Picea/Abies*)是暗针叶林的主

要建群种,绝大多数现生种都分布在寒冷地区。因而在第四纪沉积物中发现的云/冷杉属花粉,通常被视为寒冷气候的指示物,尤其它们在孢粉组合中含量增加,一般被解释为冰期的到来^[70]。所搜集到的孢粉记录中云/冷杉属花粉主要分布于中国北方、青藏地区。在 2.5~2.0 Ma 时段内整体含量偏高,指示气候相对偏冷(图 3a)。然而,在 2.0~1.5 Ma 期间云/冷杉花粉含量整体略有下降,表明气温有所回升,气候偏暖(图 3b)。在 1.5~0.5 Ma,其花粉含量在青藏高原地区再次升高,指示该区域温度呈现明显下降的趋势(图 3c—e),气候变冷。自 0.5 Ma 以来,其百分含量略有增加,指示气温有所降低,气候逐渐变冷(图 3f)。

桦木属(*Betula*)为落叶乔木或灌木,喜温湿,耐

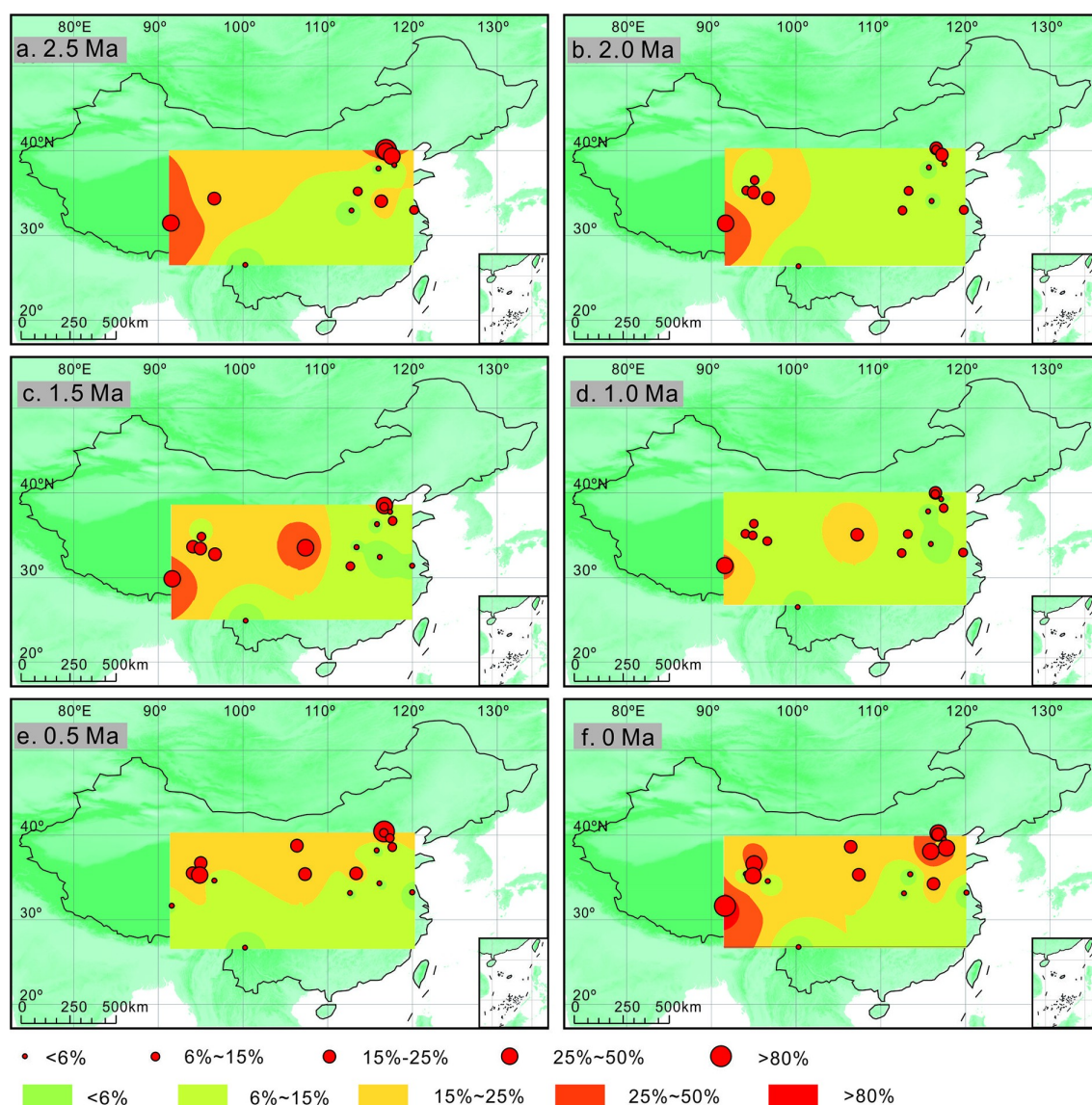


图 5 2.5 Ma 以来蒿属花粉含量的时空变化

Fig.5 Temporal and spatial distribution pattern of *Artemisia* pollen since 2.5 Ma

水湿, 绝大多数种类分布在北半球温带, 但对南方山地也有很强的适应性, 不少种类散布至亚热带、热带地区^[71]。对中国北方不同植被类型下表土花粉丰度及气候参数进行对比研究发现, 桦木属花粉丰度在一定程度上受年均降水量的影响, 花粉丰度与降水量呈正相关, 随着降水量的增高其丰度值增高^[72]。此外, 结合表土花粉和现代植被地理的研究也发现, 桦木属对区域降水量和湿度的变化有很强的指示意义^[73]。在 1.5 Ma 前后, 青藏高原东北部地区桦木属花粉有所增加, 指示该区域气候略为湿润(图 4c)。桦木属花粉 0.5 Ma 时在北方和青藏高原地区出现较为明显的高值, 一定程度上表明该阶段区域气候较为湿润(图 4e), 随后该种属花粉含量降低, 气候逐渐变干(图 4f)。

蒿属 (*Artemisia*) 和藜科 (Chenopodiaceae) 植物

都是典型的草原和荒漠草原类植物^[74], 同时由于二者较高的相对花粉产量, 是我国西部干旱半干旱地区以及青藏高原地区样品中花粉组合的主要成分。蒿属为草本, 在北半球温带地区分布广泛, 以草原为主尤其在草原沙地上特别发育。藜科同样多分布于荒漠、干草原尤其以荒漠区属种多, 其中许多属种为荒漠植被的主要建群种^[75]。样品中蒿属和藜科花粉的百分含量变化可以敏感地反映区域气候干旱程度, 环境的干旱程度越高, 蒿藜所占百分比越高^[76]。此外, 由于两个科属植物的生态习性差异, 在干旱地区, 当蒿属、藜科之和占孢粉总数的一半以上时, 蒿/藜比值 (A/C) 具有良好的气候指示意义, 被广泛用来指示区域气候干旱程度的变化^[77-78]。所搜集的记录中蒿属、藜科的花粉含量在 2.5~2.0 Ma 期间青藏地区有所增加, 指示该地区该时间

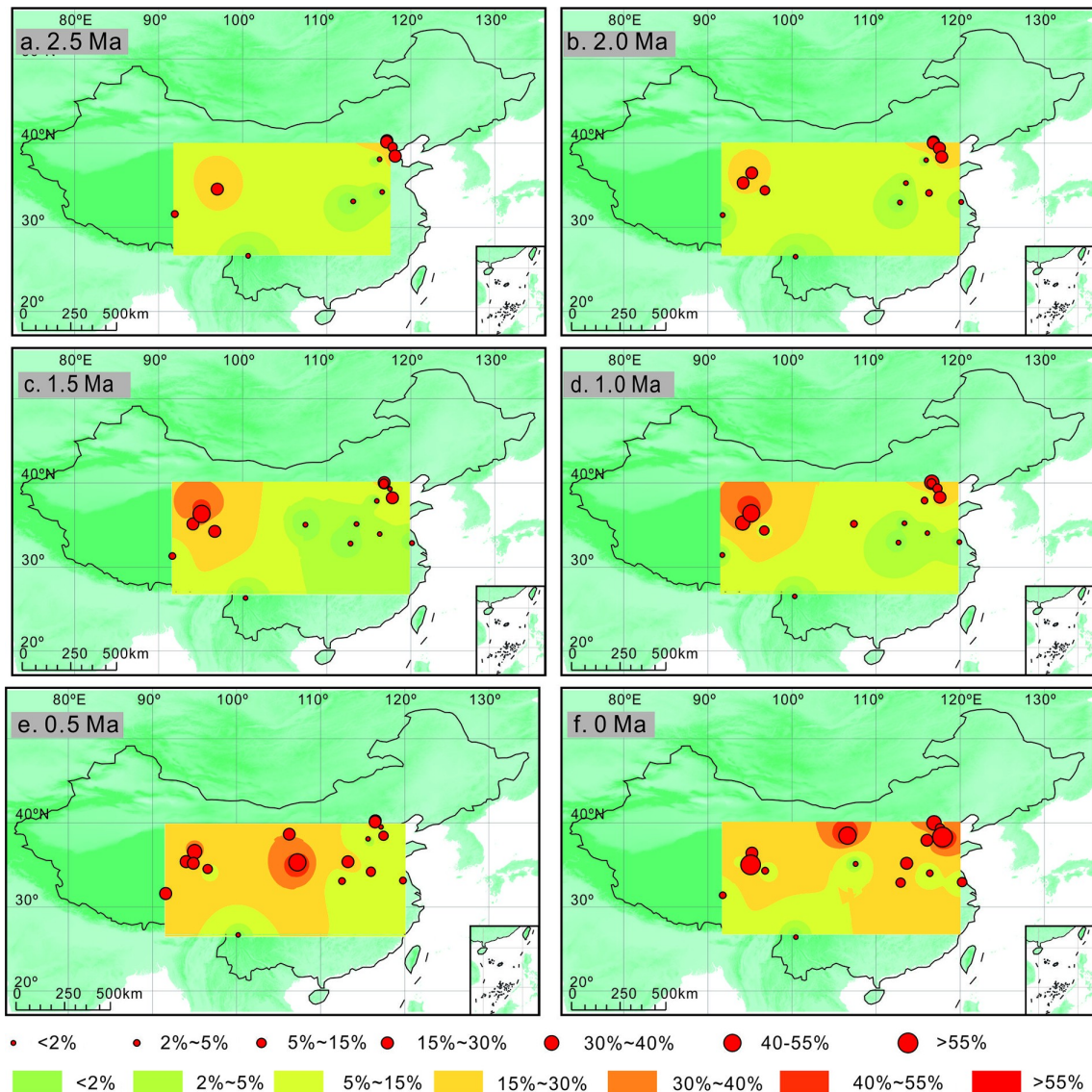


图6 2.5 Ma以来藜科花粉含量的时空变化

Fig.6 Temporal and spatial distribution pattern of Chenopodiaceae pollen since 2.5 Ma

段较为干旱(图 5a—b, 图 6a—b)。随后, 2.0~1.5 Ma 阶段蒿属、藜科绝对百分含量整体呈现小幅度升高, 指示气候进一步干旱(图 5b、c, 图 6b、c); 而 1.5~1.0 Ma 蒿属百分比含量小幅度减少, 表明气候较为湿润(图 5c、d, 图 6c、d)。自 1.0 Ma 以来, 蒿属、藜科孢粉百分比含量在青藏、西北地区又呈现出明显升高的趋势, 指示区域气候再次干旱化(图 5e、f, 图 6e、f)。

禾本科(Poaceae)植物的适应性强, 分布范围广泛, 属于非地带性植物。一方面, 禾本科植物为伴人植物, 是借助于人类活动传播和扩大分布区的植物^[79], 诸多研究表明禾本科植物花粉通常可以指示人类活动的影响^[80]。另一方面, 作为常见的草本植物类型, 其花粉含量在一定环境下与湿度呈现负相关^[72]。在所搜集到的钻孔记录中, 禾本科花粉在

1.0 Ma 之前变化并不明显, 只是南阳盆地 NYbz1、NYbz2 钻孔的禾本科含量在 2.5 Ma 时间段内出现明显高值(图 7a)^[31]。自 1.0 Ma 以来, 禾本科百分含量整体呈现逐步升高的趋势, 结合蒿属和藜科两种草本植物在该时间段花粉含量增加所指示的气候变干趋势, 禾本科花粉含量的增加一定程度上也受到了整体气候变干的影响。同时相较于 1.0 Ma, 0.5~0 Ma 期间禾本科大幅度增加可能受到人类活动的影响。因而, 禾本科花粉增加可能是自然气候变干和人类活动增加两者的共同结果(图 7e、f)。

4.2 孢粉记录的第四纪气候变迁与亚洲夏季风演化

由于我国处于典型的季风气候区, 在全球大气环流共同影响下, 受太平洋夏季风(东南季风)、印度洋夏季风(西南季风)和来自西伯利亚的冬季风

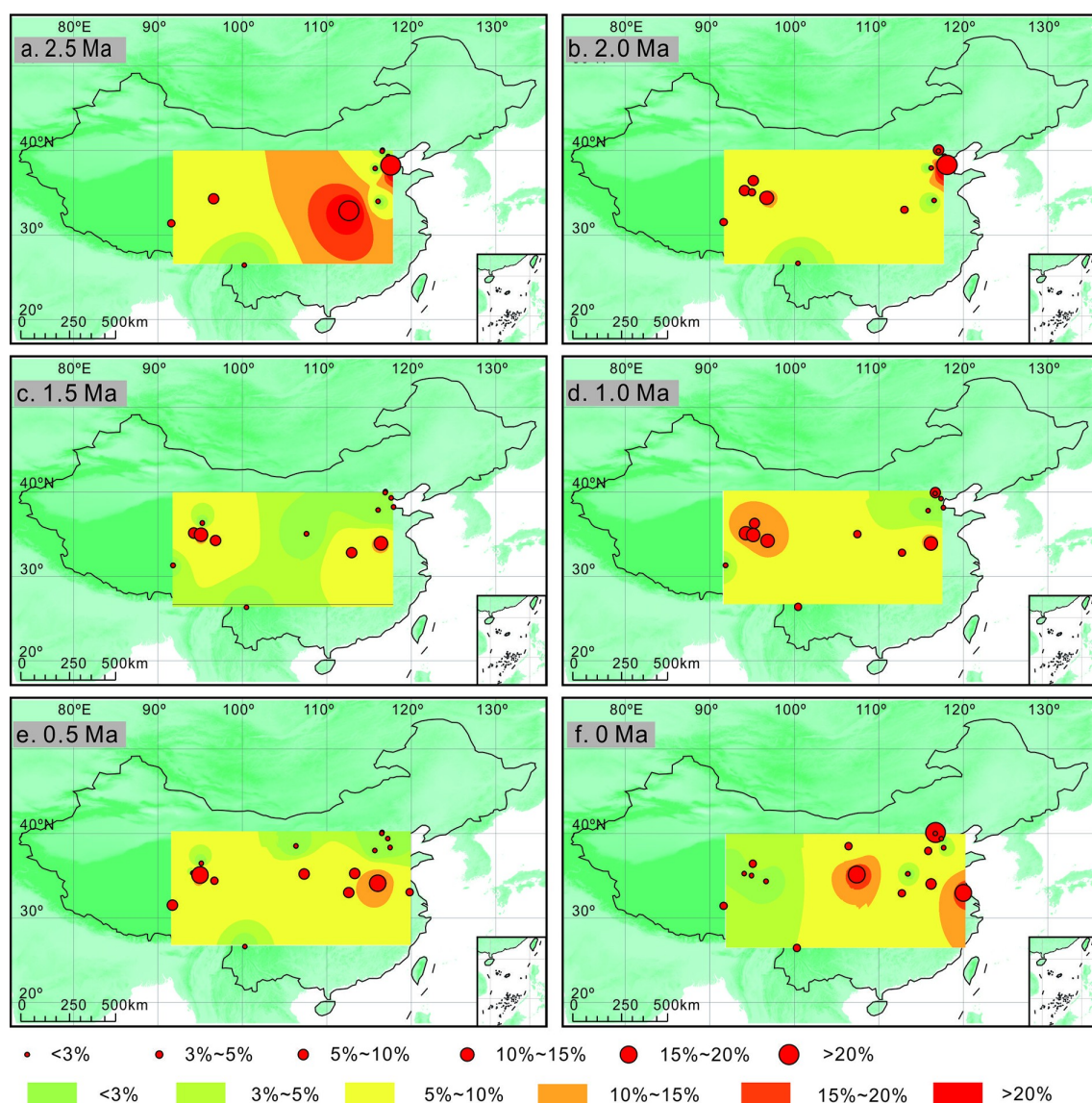


图 7 2.5 Ma 以来禾本科花粉含量的时空变化

Fig. 7 Temporal and spatial distribution pattern of Poaceae pollen since 2.5 Ma

的共同控制^[81], 区域内植被、气候演化受季风影响显著, 形成了独特的环境格局。在夏季风影响区, 降水主要集中在夏季, 温度较同纬度其他地区高, 而冬季温度较同纬度其他地区低^[82]。

在第四纪阶段亚洲冬季风的演化历史研究中, 已经得出较为一致观点, 认为自 3.0 Ma 以来冬季风逐渐增强。例如, 刘东生等在探索亚洲季风系统的起源和发展与两极冰盖和区域构造运动的时代耦合性时提出, 冬季风加强的时期可能在 3.0 Ma 以前就开始了, 到 2.5 Ma 时达到顶峰^[82]。此外, Rea 等人在海洋记录中同样发现距今 3.6 Ma 北太平洋粉尘通量急剧增加, 间接地指示了冬季风的加强^[83]。在中国黄土古土壤序列与日本晚新生代沉积记录进行对比时也发现 2.5 Ma 冬季风加强。另一方面, 陕西靖边黄土剖面砂含量记录的北方沙漠的阶段

性扩张, 表明自 3.5 Ma 以来我国夏季风逐渐减弱^[84]。综合孢粉种属分布和温湿指数变化发现, 在 3.0~2.5 Ma 阶段气候记录较少, 搜集到的资料综合显示该阶段气候波动较为频繁, 因而气候变化趋势不明显(图 8)。在 2.5~2.0 Ma 时段内, 蒿属、藜科孢粉百分含量在青藏地区呈现上升趋势, 同时气候指数结果也指示气候较为干旱。随后, 在 2.0~1.5 Ma 阶段, 蒿属、藜科孢粉含量整体继续升高, 指示气候更为干旱。通过对洛川剖面氨基酸分析结果与氧同位素记录对比, 向明菊等^[85]发现 2.4 Ma 气候由暖湿转向冷干, 0.87~0.77 Ma, 1.2~1.09 Ma 和 2.0~1.87 Ma 时期西北地区气候较为干冷。1.5~1.0 Ma 期间蒿、藜百分含量略有减少, 指示较为湿润的环境, 而自 1.0 Ma 以来, 蒿、藜百分比含量均明显增多, 木本植物花粉尤其是桦木属花粉含量在该阶段明显降低,

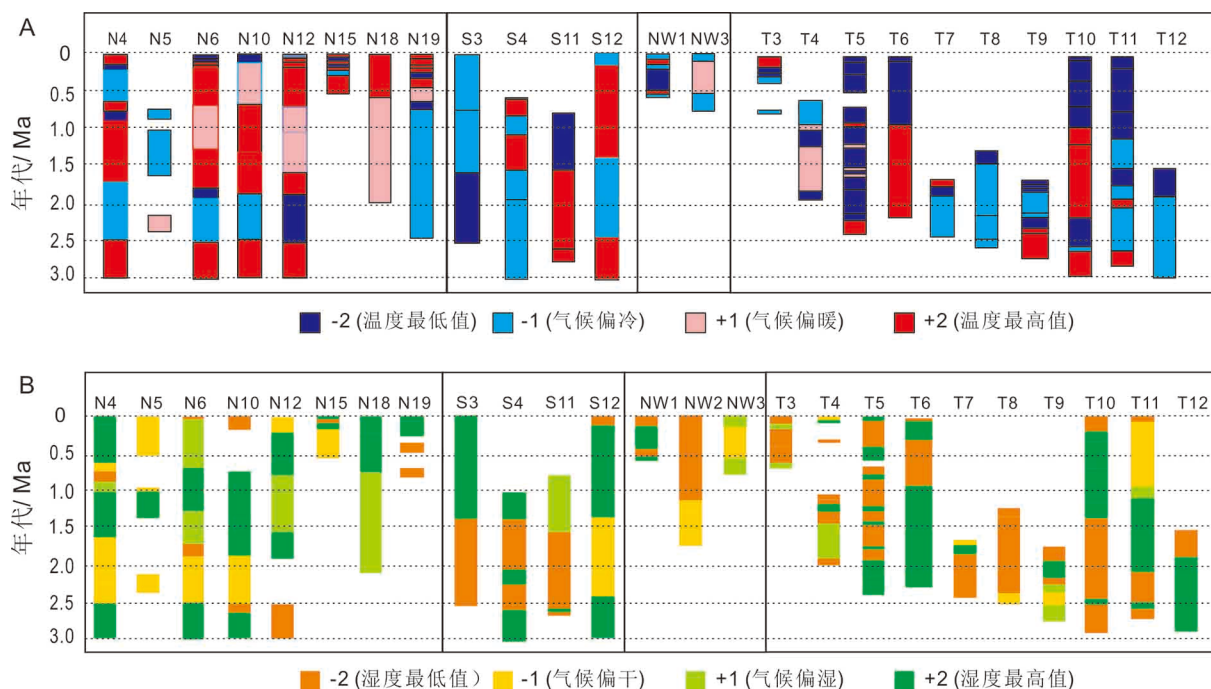


图8 孢粉记录中获取的气候(A温度, B湿度)变化序列

Fig.8 Paleoclimate inference (A temperature, B moisture) based on Quaternary pollen records

气候整体寒冷干旱。郑绵平等^[86]通过研究第四纪盐湖沉积发现,以柴达木西部——塔里木东部为中心,于2.36~2.0 Ma、1.62~1.0 Ma和0.9~0.6 Ma发生了盐湖扩张,指示西北地区该时间段较为干旱。

亚洲季风系统中的夏季风主要包括两个子系统,即源于印度洋的西南季风(也称印度夏季风)和源于太平洋的东亚夏季风。由于青藏高原的隆升和阻挡,西南季风对青藏地区的气候有重要影响^[87],而东亚夏季风主要影响我国东部的南方和北方地区。相对于冬季风研究,亚洲夏季风在第四纪阶段的演化问题仍有一定不确定性。有关西南季风的研究中,Jin等通过对青藏高原中部湖泊介形虫的 $\delta^{15}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{N}$ 的研究发现,在0.93~0.84 Ma期间西南季风减弱^[88]。在1.0 Ma期间,青藏地区云/冷杉含量降低,蒿属、藜科百分含量增高,指示区域性干旱,与0.93~0.84 Ma印度夏季风的衰退有较好的一致性(图5—6)。在对东亚夏季风的研究中,通过对比中国黄土-古土壤序列与日本晚新生代沉积,Xiao和An发现晚新生代东亚夏季风环流在1.2 Ma以及0.5 Ma出现明显的增强过程^[76]。此外,An等根据黄土磁性地层和稳定同位素记录也发现1.2 Ma和0.5 Ma是东亚夏季风加强的转型点^[89];同时,临夏北塬、洛川黑木沟和蓝田马白坡黄土磁性地层和稳定同位素记录表明东亚夏季风存在阶段性的变迁,尤其是在1.2和0.5 Ma时期东亚夏季风显著加强^[89-90]。受时间及空间分辨率的影响,孢粉记录中

仅在1.5~1.0 Ma时段内东部地区呈现出蒿属孢粉百分含量明显降低,指示气候较为湿润,与该时间段东亚夏季风增强相一致。

结合第四纪季风研究结果,发现孢粉记录的气候干湿变化与黄土、海洋记录中夏季风的进退具有较好的一致性^[89,91]。受2.5 Ma亚洲冬季风增强的影响,该阶段气候较为干旱;在1.5 Ma东亚夏季风呈现增强的趋势,带来较多降水,气候湿润,而1.0 Ma以来冬季风增强夏季风减弱,青藏与西北地区气候又逐渐变干。

5 结论

不同类型沉积物中所保存的孢粉记录,在获取地质历史时期植被、气候演化研究中具有重要意义。在百万年时间尺度上,以孢粉为代用指标进行古气候重建的研究目前仍较少,且样品的时间分辨率低,在空间分布上还存在显著的不均一性,一定程度上限制了大空间尺度上的植被演替、气候变化分析。通过对6种特征种属孢粉含量的时间、空间分布规律进行分析,发现研究区域在2.5~1.5 Ma期间气候环境偏冷干且波动变化明显,随后在1.5~1.0 Ma期间东部地区气候偏湿而西北地区和青藏高原地区仍偏干,而1.0 Ma以来整体气候波动频繁。由于我国特定的地理条件,受东亚季风影响显著,2.5 Ma以来气候的冷暖干湿与东亚季风的进退有

着密切的联系。此外,应进一步开展中国第四纪长时间序列孢粉分析,进行古植被、古气候重建,以填补各个区域不同时间尺度上的研究空白,同时完善多种环境代用指标的综合分析以及加强区域之间的联系与对比研究,更好地理解第四纪以来区域气候变化尤其是亚洲季风的演化历程。

参考文献 (References)

- [1] 安芷生, 艾莉. 尚未完成的地质年代表——第四纪悬而未决的前程[J]. *地层学杂志*, 2005, 29(2): 99-103. [AN Zhisheng, AI Li. Imperfect geologic time scale——pending future of the Quaternary [J]. *Journal of Stratigraphy*, 2005, 29(2): 99-103.]
- [2] 刘秀铭, 刘东生, Heller F, et al. 中国黄土磁化率与第四纪古气候研究[J]. *地质科学*, 1992(S1): 279-285. [LIU Xiuming, LIU Dongsheng, Heller F, et al. Study on magnetic susceptibility of loess and Quaternary climate in China [J]. *Chinese Journal of Geology*, 1992(S1): 279-285.]
- [3] 秦锋, 赵艳. 基于孢粉组合定量重建古气候的方法在中国的运用及思考[J]. *第四纪研究*, 2013, 33(6): 1054-1068. [QIN Feng, ZHAO Yan. Methods of quantitative climate reconstruction based on palynological data and their applications in China [J]. *Quaternary Sciences*, 2013, 33(6): 1054-1068.]
- [4] Davis M B, Faegri K. Forest tree pollen in South swedish peat bog deposits, by L. von Post (translation) [J]. *Pollen et Spores*, 1967, 27(9): 375-401.
- [5] 孙湘君, 罗运利, 陈怀成. 中国第四纪深海孢粉研究进展[J]. *科学通报*, 2003, 48(20): 2155-2165. [SUN Xiangjun, LUO Yunli, CHEN Huaicheng. Deep-sea pollen research in China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(20): 2155-2165.]
- [6] 徐仁. 孢粉学的现状及孢子花粉分析在我国发展的展望[J]. *科学通报*, 1956, 7(7): 49-52. [XU Ren. The current situation of palynology and the prospect of spore pollen analysis in China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1956, 7(7): 49-52.]
- [7] 孔昭宸, 张芸, 王力, 等. 中国孢粉学的过去、现在及未来——侧重第四纪孢粉学[J]. *科学通报*, 2018, 63(2): 164-171. [KONG Zhaochen, ZHANG Yun, WANG Li, et al. The past, present and future of palynology in China—Concentrate on Quaternary palynology [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2018, 63(2): 164-171.]
- [8] 李洁, 许清海, 张生瑞, 等. 相对花粉产量及其在古植被定量重建中的应用[J]. *第四纪研究*, 2013, 33(6): 1101-1110. [LI Jie, XU Qinghai, ZHANG Shengrui, et al. Relative pollen productivity and its use in quantitative reconstruction of paleovegetation [J]. *Quaternary Sciences*, 2013, 33(6): 1101-1110.]
- [9] Ren G Y, Beug H J. Mapping holocene pollen data and vegetation of China [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2002, 21(12-13): 1395-1422.
- [10] Brewer S, Cheddadi R, De Beaulieu J L, et al. The spread of deciduous *Quercus* throughout Europe since the last glacial period [J]. *Forest Ecology and Management*, 2002, 156(1-3): 27-48.
- [11] 李玉刚, 卞德隆, 王雅璐, 等. 三湖河中更新世以来孢粉组合与古气候研究[J]. *世界有色金属*, 2017(1): 228-229. [LI Yugang, BIAN Delong, WANG Yalu, et al. The study on palynological assemblages and paleoclimate of sanhuhe since middle pleistocene [J]. *World Nonferrous Metals*, 2017(1): 228-229.]
- [12] 常婧. 黑河中游孢粉记录及第四纪环境变化研究[D]. 兰州大学硕士学位论文, 2016. [CHANG Jing. Pollen records and the Quaternary environment changes in the middle reach of Heihe River [D]. Master Dissertation of Lanzhou University, 2016.]
- [13] 杨振京, 郑宏瑞, 童国榜, 等. 银川盆地中更新世以来的孢粉植物群古气候轮回探讨[J]. *长春科技大学学报*, 2001, 31(3): 213-216. [YANG Zhenjing, ZHENG Hongrui, TONG Guobang, et al. Study on palynoflora and paleoclimatic cycles since Mid-Pleistocene in Yinchuan Basin [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 2001, 31(3): 213-216.]
- [14] 刘金陵. 泥河湾组的孢粉组合及其地质时代[J]. *科学通报*, 1980, 25(7): 584-587. [LIU Jinling. Pollen analysis and geological age of the Nihewan formation [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1980, 25(7): 584-587.]
- [15] 李腾飞. 北京昌平东滩村钻孔中更新世气候转型期的孢粉组合特征及其古气候意义[D]. 首都师范大学硕士学位论文, 2014. [LI Tengfei. Characteristics of sporopollen assemblages and their paleoclimatic significance during the during the Middle Pleistocene climate transition period in Dongzhaocun borehole, Changping, Beijing [D]. Master Dissertation of Capital Normal University, 2014.]
- [16] 李长安. 北京平原区第四纪古气候变化[J]. *地质通报*, 1993(4): 336-343. [LI Chang'an. Changes of quaternary paleoclimates in the plain area of Beijing [J]. *Regional Geology of China*, 1993(4): 336-343.]
- [17] 姚铁锋, 叶超, 寇香玉, 等. 北京天竺晚上新世以来植被演替与气候变迁[J]. *古地理学报*, 2007, 9(1): 45-58. [YAO Yifeng, YE Chao, KOU Xiangyu, et al. Vegetation succession and climate changing since the Late Pliocene in Tianzhu Region in Beijing [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2007, 9(1): 45-58.]
- [18] 郭高轩, 蒋汉朝, 蔡向民, 等. 北京新5孔第四纪孢粉记录及其对更新世气候变化的响应[J]. *第四纪研究*, 2013, 33(6): 1160-1170. [GUO Gaoxuan, JIANG Hanchao, CAI Xiangmin, et al. A Quaternary pollen record from the X5 core in Beijing and its response to the Pleistocene climate change [J]. *Quaternary Sciences*, 2013, 33(6): 1160-1170.]
- [19] 范淑贤, 翟子梅, 张学斌, 等. 天津北部4.00 MaBP以来古植被与古气候[J]. *古地理学报*, 2010, 12(6): 655-664. [FAN Shuxian, ZHAI Zimei, ZHANG Xuebin, et al. Palaeovegetation and palaeoclimate since 4.0 MaBP in northern Tianjin [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2010, 12(6): 655-664.]
- [20] 胡云壮, 张金起, 白耀楠, 等. 3.45 Ma以来滦河冲积扇中部唐山TD1孔记录的区域构造和气候演化[J]. *古地理学报*, 2014, 16(2): 249-262. [HU Yunzhuang, ZHANG Jinqi, BAI Yaonan, et al. Records of regional tectonic and climatic evolution since 3.45 MaBP at Borehole TD1 of Tangshan in the middle part of Luanhe River fluvial fan [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2014, 16(2): 249-262.]
- [21] 任振纪. 冀东滦县——滦南县钻孔第四纪孢粉组合及古气候[J]. *河北地质大学学报*, 1979(2): 55-58. [REN Zhenji. Quaternary

- Sporopollen assemblages and paleoclimate of boreholes in Luanxian-Luannan country, eastern Hebei Province [J]. *Journal of Shijiazhuang University of Economics*, 1979 (2): 55-58.]
- [22] 童国榜, 柯曼红, 于淑凤. 河北平原第四纪孢粉组合及其地质意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1983, 3 (4): 91-103. [TONG Guobang, KE Manhong, YU Shufeng. Quaternary sporo-pollen assemblages in Hebei plain, China and their Geological significance [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1983, 3 (4): 91-103.]
- [23] 范淑贤, 刘海坤, 徐建明, 等. 3.50 Ma BP以来河北衡水地区古植被与环境演化[J]. *现代地质*, 2009, 23 (1): 75-81. [FAN Shuxian, LIU Haikun, XU Jianming, et al. Palaeovegetation and environmental evolution in Hengshui district of Hebei Province since 3.50 MaBP [J]. *Geoscience*, 2009, 23 (1): 75-81.]
- [24] 童国榜, 于淑凤, 张俊牌, 等. 华北平原第四纪孢粉的数学地质分析[J]. *植物学报*, 1988, 30 (3): 325-332. [TONG Gongbang, YU Shufeng, ZHANG Junpai, et al. On analysis of quantitative geology for Quaternary sporopollen in the northern China plain [J]. *Acta Botanica Sinica*, 1988, 30 (3): 325-332.]
- [25] 范淑贤, 刘海坤, 赵华, 等. 3.2 MaBP以来河北黄骅地区孢粉地层学与古气候变迁[J]. *微体古生物学报*, 2009, 26 (2): 173-180. [FAN Shuxian, LIU Haikun, ZHAO Hua, et al. Palynology Stratigraphy and palaeoclimate evolution in Huanghua district of Hebei province since 3.2 MaBP [J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 2009, 26 (2): 173-180.]
- [26] 吴福莉, 方小敏, 马玉贞, 等. 黄土高原中部1.5 Ma以来古生态环境演化的孢粉记录[J]. *科学通报*, 2004, 49 (3): 295-302. [WU Fuli, FANG Xiaomin, MA Yuzhen, et al. A 1.5 Ma sporopollen record of paleoecologic environment evolution in the central Chinese Loess Plateau [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49 (3): 295-302.]
- [27] 李玉梅. 最近2.5 Ma黄土高原环境变化研究进展——来自洛川黄土地层的证据[J]. *地球科学进展*, 2002, 17 (1): 118-125. [LI Yumei. Lochuan Loess-paleosol sequence and paleo-environmental implications: a brief review [J]. *Advance in Earth Sciences*, 2002, 17 (1): 118-125.]
- [28] 乔晓旭. 焦作市中更新世以来的孢粉组合与气候演化规律[D]. 中国地质大学(北京)硕士学位论文, 2015. [QIAO Xiaoxu. The spore-pollen assemblage characteristics and the climate evolution in Jiaozuo since the middle pleistocene[D]. Master Dissertation of China University of Geosciences, 2015.]
- [29] 肖景义, 陈建强, 李辉, 等. 河北邯郸HZ-S孔第四纪孢粉组合的定量分析[J]. *地质通报*, 2008, 27 (5): 599-604. [XIAO Jingyi, CHEN Jianqiang, LI Hui, et al. Quantitative analysis of the Quaternary sporopollen assemblages: A case study of hole HZ-S core in Handan, Hebei, China [J]. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27 (5): 599-604.]
- [30] 刘明健, 王静敏, 杜乃秋, 等. 陕西华阴N-3钻孔孢粉分析及对自然环境变化的初步探讨[J]. *植物学报*, 1984, 2 (1): 51-54. [LIU Mingjian, WANG Jingmin, DU Naiqiu, et al. A preliminary study on the environmental changes in Huayin county, Shanxi province since pleistocene based on pollen analysis [J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 1984, 2 (1): 51-54.]
- [31] 李博, 文雪峰, 赵斌, 等. 南阳盆地更新世以来的孢粉分析及其古气候记录[J]. *地质科技情报*, 2015, 34 (1): 49-56. [LI Bo, WEN Xuefeng, ZHAO Bin, et al. Spore-pollen assemblages and paleoclimate analysis since the late pleistocene sediments of Nanyang basin [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2015, 34 (1): 49-56.]
- [32] 于振江, 黄多成. 安徽省淮北平原第四纪孢粉序列[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1993, 13 (1): 21-32. [YU Zhenjiang, HUANG Duocheng. Quaternary palynological sequence in Huaibei plain, Anhui province [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1993, 13 (1): 21-32.]
- [33] 王建, 黄巧华, 柏春广, 等. 2.5 Ma以来柴达木盆地的气候干湿变化特征及其原因[J]. *地理科学*, 2002, 22 (1): 34-38. [WANG Jian, HUANG Qiaohua, BAI Chunguang, et al. Tendency of the quaternary climatic change in Qaidam basin and its causal mechanism [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2002, 22 (1): 34-38.]
- [34] 康安, 朱筱敏, 韩德馨, 等. 柴达木盆地第四纪孢粉组合及古气候波动[J]. *地质通报*, 2003, 22 (1): 12-15. [KANG An, ZHU Xiaomin, KANG Dexin, et al. Quaternary Sporopollen assemblages and paleoclimatic fluctuation in the Qaidam basin [J]. *Regional Geology of China*, 2003, 22 (1): 12-15.]
- [35] 刘晓丽. 可可西里地区钻孔记录的中更新世孢粉与环境演化[D]. 兰州大学硕士学位论文, 2010. [LIU Xiaoli. Vegetation and Climate changes of middle Pleistocene in Hoh Xil area[D]. Master Dissertation of Lanzhou University, 2010.]
- [36] 许清海, 阳小兰, 梁文栋, 等. 东昆仑山区更新世植被与环境变化的孢粉学证据[J]. *冰川冻土*, 2001, 23 (4): 407-413. [XU Qinghai, YANG Xiaolan, LIANG Wendong, et al. Palynological evidences of the pleistocene vegetation and environmental changes in the East Kunlun mountains [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2001, 23 (4): 407-413.]
- [37] 潘安定. 青藏高原东北边缘第四纪孢粉记录的环境意义[J]. *微体古生物学报*, 2000, 17 (2): 178-185. [PAN Anding. The environmental significance of Quaternary Spore-pollen records from northeastern margin of Qinghai-Tibetan plateau [J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 2000, 17 (2): 178-185.]
- [38] 韩建恩, 余佳, 朱大岗, 等. 青海黄河源盆地早更新世以来环境演变[J]. *地质通报*, 2011, 30 (12): 1941-1949. [HAN Jianen, YU Jia, ZHU Dagang, et al. The palaeoenvironmental evolution of the Yellow River headwater basin in Qinghai province since early Pleistocene [J]. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30 (12): 1941-1949.]
- [39] 董铭, 方小敏, 史正涛, 等. 甘肃省临夏盆地更新世早期湖泊沉积孢粉记录的古气候演化[J]. *第四纪研究*, 2011, 31 (1): 104-111. [DONG Ming, FANG Xiaomin, SHI Zhengtao, et al. Early Pleistocene lacustrine spore-pollen records and evolution of paleoclimate in Linxia Basin, Gansu province, China [J]. *Quaternary Sciences*, 2011, 31 (1): 104-111.]
- [40] 朱大岗, 孟宪刚, 邵兆刚, 等. 西藏阿里札达盆地早更新世早期沉积及其古气候与古环境变化[J]. *中国地质*, 2006, 33 (6): 1276-1284. [ZHU Dagang, MENG Xiangang, SHAO Zhaogang, et al. Early Pleistocene deposits and paleoclimate and palaeoenvironmental changes in the Zanda basin, Ngari area, Tibet [J]. *Geology in China*, 2006, 33 (6): 1276-1284.]
- [41] 江尚松, 向树元, 徐亚东. 西藏札达盆地晚上新世—早更新世孢粉组

- 合及其地质意义[J]. *地质科技情报*, 2010, 29(4): 21-31. [JIANG Shangsong, XIANG Shuyuan, XU Yadong. Geological significances of late pliocene-early pleistocene palynological assemblage in Zanda Basin, Tibet [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2010, 29(4): 21-31.]
- [42] 陈诗越, 王苏民, 吴艳宏. 西藏错鄂湖沉积旋回与古环境变迁[J]. *地球学报*, 2006, 27(4): 315-322. [CHEN Shiyue, WANG Sumin, WU Yanhong. Sedimentary cycles and paleoenvironmental evolution of the Co Ngoin Lake in Tibetan Plateau since Late Cenozoic [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2006, 27(4): 315-322.]
- [43] 陈诗越, 王苏民, 金章东, 等. 湖泊沉积物记录的藏中地区2.8 Ma以来的环境演变历史[J]. *地球化学*, 2004, 33(2): 159-164. [CHEN Shiyue, WANG Sumin, JIN Zhangdong, et al. Lake sedimentary records of environmental evolution in the last 2.8 Ma from the Co Ngoin Basin, central Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Geochimica*, 2004, 33(2): 159-164.]
- [44] 徐亚东, 张克信, 王国灿, 等. 西藏南部吉隆盆地中新世一早更新世孢粉组合带及其地质意义[J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 2010, 35(5): 759-773. [XU Yadong, ZHANG Kexin, WANG Guocan, et al. Geological Significance of Miocene-Early Pleistocene Palynological Zones in the Gyirong Basin, Southern Tibet [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2010, 35(5): 759-773.]
- [45] 张志忠, 邹亮, 杨振京, 等. 舟山北部海域DZS2钻孔孢粉记录与古环境[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2015, 35(4): 125-132. [ZHANG Zhizhong, ZOU Liang, YANG Zhenjing, et al. Sporo-pollen records of borehole DZS2 offshore north Zhoushan islands and palaeo-environmental implications [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2015, 35(4): 125-132.]
- [46] 张宗言, 于俊杰, 蒋仁, 等. 江苏省江都市大桥镇ZKA4 钻孔第四纪孢粉组合及其环境变化研究[J]. *微体古生物学报*, 2013, 87(1): 64-74. [ZHANG Zongyan, YU Junjie, JIANG Ren, et al. Palynological assemblages from the borehole ZKA4 at Daqiao town, Jiangdu city, Jiangsu province and their environmental meanings [J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 2013, 87(1): 64-74.]
- [47] 劳金秀, 杨祝良, 于俊杰, 等. 江苏兴化ZK10孔第四纪多重地层研究[J]. *地质通报*, 2016, 35(10): 1705-1714. [LAO Jinxiu, YANG Zhuliang, YU Junjie, et al. Quaternary multistratigraphic study of Borehole ZK10, Xinghua, Jiangsu Province [J]. *Geological Bulletin of China*, 2016, 35(10): 1705-1714.]
- [48] 舒强. 苏北盆地兴化钻孔近3 Ma环境变化记录研究[D]. 南京师范大学博士学位论文, 2004. [SHU Qiang. Study on the changes of palaeoenvironment and palaeoclimate during the Past 3 Ma recorded in Xinghua core at Northern Jiangsu Basin [D]. Doctor Dissertation of Nanjing Normal University, 2004.]
- [49] 向烨. 南通市第四系孢粉组合与气候演化特征[D]. 中国地质大学(北京)硕士学位论文, 2012. [XIANG Ye. Sporopollen assemblage and evolution of palaeoclimate in Natong city area since Quaternary [D]. Master Dissertation of China University of Geosciences, 2012.]
- [50] 宗雯, 肖渊甫, 杨祝良, 等. 太湖地区第四纪孢粉组合特征及其古环境意义[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2014, 33(1): 38-48. [ZONG Wen, XIAO Yuanfu, YANG Zhuliang, et al. Characteristics and paleo-environment implication of quaternary sporo-pollen assemblages in the Taihu Lake region [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2014, 33(1): 38-48.]
- [51] 汪世兰, 徐齐治, 郑秩. 江苏渡村第四纪孢粉组合与古气候[J]. *兰州大学学报: 自然科学版*, 1988, 24(S1): 94-101. [WANG Shilan, XU Qizhi, ZHENG Zhi. Quaternary Sporo-pollen assemblages and paleoclimate of Ducum Jiangsu [J]. *Journal of Lanzhou University: Natural Sciences*, 1988, 24(S1): 94-101.]
- [52] 王开发, 张玉兰, 蒋辉, 等. 长江三角洲第四纪孢粉组合及其地层、古地理意义[J]. *海洋学报*, 1984, 6(4): 65-76. [WANG Kaifa, ZHANG Yulan, JIANG Hui, et al. Quaternary sporopollen assemblages in the Yangtze River Delta and their stratigraphic and paleogeographical significance [J]. *Acta Oceanologica sinica*, 1984, 6(4): 65-76.]
- [53] 姜立征, 张玉兰, 王开发, 等. 上海地区更新世孢粉组合及其古植被、古气候[J]. *上海地质*, 2000, 21(4): 34-41. [JIANG Lizheng, ZHANG Yulan, WANG Kaifa, et al. Palynological assemblages of pleistocene from Shanghai region and its palaeovegetation and palaeoclimate [J]. *Shanghai Geology*, 2000, 21(4): 34-41.]
- [54] 叶兴永. 舟山岛中更新世以来孢粉组合特征及古气候变迁[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2000, 20(3): 9-13. [YE Xingyong. The anthophyta assemblages and paleoclimate variation of Zhoushan island since Middle Pleistocene [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2000, 20(3): 9-13.]
- [55] 肖霞云, 沈吉, 王苏民, 等. 鹤庆深钻孢粉记录揭示的2.78 Ma以来的植被演替与气候变迁[J]. *中国科学: 地球科学*, 2007, 37(6): 778-788. [XIAO Xiayun, SHEN Ji, WANG Sumin, et al. Vegetation succession and climate change in 2.78 Ma revealed by Heqing deep-drilling sporopollen record [J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2007, 37(6): 778-788.]
- [56] 童国榜, 张俊牌, 羊向东, 等. 云贵高原晚新生代孢粉植物群与环境变迁[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1994, 14(3): 91-104. [TONG Guobang, ZHANG Junpai, YANG Xiangdong, et al. Late cenozoic palynoflora and environment changes in Yunnan-Guizhou plateau [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1994, 14(3): 91-104.]
- [57] 廖先斌. 广东徐闻早更新世古气候变化浅析[J]. *广东地质*, 1998(3): 32-38. [LIAO Xianbin. Preliminary analysis on early Pleistocene paleoclimate variation in Xuwen, Guangdong [J]. *Guangdong Geology*, 1998(3): 32-38.]
- [58] 陈芳, 童林芬, 茅绍智. 珠江口盆地第四纪孢粉组合及沉积环境探讨[J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 1993, 18(2): 227-234. [CHEN Fang, TONG Linfen, MAO Shaozhi. Quaternary sporopollen assemblages and the environmental research in the Pearl River Mouth Basin [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 1993, 18(2): 227-234.]
- [59] 彭少麟, 赵平, 任海, 等. 全球变化压力下中国东部样带植被与农业生态系统格局的可能性变化[J]. *地学前缘*, 2002, 9(1): 217-226. [PENG Shaolin, ZHAO Ping, REN Hai, et al. The possible heat-driven pattern variation of zonal vegetation and agricultural ecosystems along the north-south transect of China under the global change [J]. *Earth Science Frontiers*, 2002, 9(1): 217-226.]

- [60] 唐领余, 毛礼米, 舒军武, 等. 中国第四纪孢粉图鉴[M]. 北京: 科学出版社, 2016. [TANG Lingyu, MAO Limi, SHU Junwu, et al. An Illustrated Handbook of Quaternary Pollen and Spores in China[M]. Beijing: Science Press, 2016.]
- [61] Herzschuh U. Palaeo-moisture evolution in monsoonal Central Asia during the last 50,000 years [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2006, 25(1-2): 163-178.
- [62] Chen F H, Yu Z C, Yang M L, et al. Holocene moisture evolution in arid central Asia and its out-of-phase relationship with Asian monsoon history [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2008, 27(3-4): 351-364.
- [63] Wang Y B, Liu X Q, Herzschuh U. Asynchronous evolution of the Indian and East Asian Summer Monsoon indicated by Holocene moisture patterns in monsoonal central Asia [J]. *Earth-Science Reviews*, 2010, 103(3-4): 135-153.
- [64] Wang Y B, Bekeschus B, Handorf D, et al. Coherent tropical-subtropical Holocene see-saw moisture patterns in the Eastern Hemisphere monsoon systems [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2017, 169: 231-242.
- [65] 蒋辉, 王开发, 张玉兰. 松属花粉的形态特征及其研究意义[J]. 植物科学学报, 1986, 4(1): 17-26. [JIANG Hui, WANG Kaifa, ZHANG Yulan. Morphological character of pinus pollen and its implication [J]. Journal of Wuhan Botanical Research, 1986, 4(1): 17-26.]
- [66] 张德怀, 孙爱芝, 韩晓丽, 等. 雅鲁藏布江中游松属、冷杉属表土花粉对海拔的指示意义[J]. 山地学报, 2012, 30(4): 478-483. [ZHANG Dehuai, SUN Aizhi, HAN Xiaoli, et al. The instruction significance to altitudes of surface pinus and abies pollen from the middle reaches of Yarlung Zangbo river [J]. *Journal of Mountain Science*, 2012, 30(4): 478-483.]
- [67] 肖霞云, 童松梅, 沈吉, 等. 云南省玉龙雪山表土花粉垂直散布与植被关系研究[J]. 第四纪研究, 2009, 29(1): 80-88. [XIAO Xiayun, TONG Songmei, SHEN Ji, et al. Altitudinal distribution of surface pollen and their relations to modern vegetation in the Yulong Mountains, Yunnan province [J]. *Quaternary Sciences*, 2009, 29(1): 80-88.]
- [68] 李文漪, 姚祖驹. 表土中松属花粉与植物间数量关系的研究[J]. 植物学报, 1990, 32(12): 943-950. [LI Wenqi, YAO Zuju. A study on the Quantitative relationship between pinus pollen in surface sample and pinus vegetation [J]. *Acta Botanica Sinica*, 1990, 32(12): 943-950.]
- [69] 吕素青, 李月从, 许清海, 等. 陕西中部黄土高原地区空气花粉组成及其与气候因子的关系——以洛川县下黑木沟村为例[J]. 生态学报, 2012, 32(24): 7654-7666. [LV Suqing, LI Yuecong, XU Qinghai, et al. Airborne pollen assemblages and their relationships with climate factors in the central Shaanxi Province of the Loess Plateau: a case in Xiaheimugou, Luochuan County [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(24): 7654-7666.]
- [70] 石宁. 上新世-早更新世云杉属和冷杉属在华北地区的发展及其气候指示意义[J]. 第四纪研究, 1996, 16(4): 319-328. [SHI Ning. Development of spruce and fir in north China during the Pliocene and the early Pleistocene: palaeoclimatic implications [J]. *Quaternary Sciences*, 1996, 16(4): 319-328.]
- [71] 陈之端. 桦木科植物的系统发育和地理分布(续)[J]. 中国科学院大学学学报, 1994, 32(2): 101-153. [CHEN Zhiduan. Phylogeny and phytogeography of the betulaceae (cont.) [J]. *Acta Phytotaxonomica Sinica*, 1994, 32(2): 101-153.]
- [72] SUN Xiangjun, WANG Bengyu, SONG Changqing. Pollen-climate response surface analysis of some genus in northern China [J]. *Science in China*, 1996, 26(5): 431-436.
- [73] 刘鸿雁, 李宜垠. 半干旱区气候变化和人类活动的孢粉指示[J]. 古生物学报, 2009, 48(2): 211-221. [LIU Hongyan, LI Yiyin. Pollen indicators of climate change and human activities in the semi-arid region [J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 2009, 48(2): 211-221.]
- [74] 罗传秀, 潘安定, 郑卓. 西北干旱地区表土孢粉与植被关系研究进展[J]. 干旱区研究, 2006, 23(2): 314-319. [LUO Chuanxiu, PAN Anding, ZHENG Zhuo. Progresses about the studies on the relationship between topsoil spore-pollen and vegetation in Arid areas of Northwest China [J]. *Arid Zone Research*, 2006, 23(2): 314-319.]
- [75] 孙湘君, 杜乃秋, 翁成郁, 等. 新疆玛纳斯湖盆周围近14 000年以来的古植被古环境[J]. 第四纪研究, 1994, 14(3): 239-248. [SUN Xiangjun, DU Naiqiu, WEN Chengyu, et al. Paleovegetation and paleoenvironment of manasi lake, XinJiang, N. W. China during the last 14000 years [J]. *Quaternary Sciences*, 1994, 14(3): 239-248.]
- [76] Xiao J L, An Z S. Three large shifts in East Asian monsoon circulation indicated by loess-paleosol sequences in China and late Cenozoic deposits in Japan [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1999, 154(3): 179-189.
- [77] Herzschuh U, Tarasov P, Wünnemann B, et al. Holocene vegetation and climate of the Alashan Plateau, NW China, reconstructed from pollen data [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2004, 211(1-2): 1-17.
- [78] Herzschuh U. Reliability of pollen ratios for environmental reconstructions on the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Biogeography*, 2007, 34(7): 1265-1273.
- [79] 李宜垠, 周力平, 崔海亭. 人类活动的孢粉指示体[J]. 科学通报, 2008, 53(9): 1281-1293. [LI Yigen, ZHOU Liping, CUI Haiting. Pollen indicators of human activity [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(9): 1281-1293.]
- [80] Hjelte K L. Modern pollen assemblages from mown and grazed vegetation types in western Norway [J]. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 1999, 107(1-2): 55-81.
- [81] 陈隆勋, 朱乾根, 罗会邦. 东亚季风[M]. 北京: 气象出版社, 1991. [CHEN Longxun, ZHU Qiangen, LUO Huibang. East Asian monsoon[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1991.]
- [82] 刘东生, 郑绵平, 郭正堂. 亚洲季风系统的起源和发展及其与两极冰盖和区域构造运动的时代耦合性[J]. 第四纪研究, 1998, 18(3): 194-204. [LIU Dongsheng, ZHENG Mianping, GUO Zhengtang. Initiation and evolution of the Asian monsoon system timely coupled with the ice-sheet growth and the tectonic movements in Asia [J]. *Quaternary Sciences*, 1998, 18(3): 194-204.]
- [83] Rea D K, Snoeckx H, Joseph L H. Late Cenozoic eolian deposition in the North Pacific: Asian drying, Tibetan uplift, and cooling of the Northern Hemisphere [J]. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 1998, 13(3): 215-224.
- [84] Ding Z L, Derbyshire E, Yang S L, et al. Stepwise expansion of desert

- environment across northern China in the past 3.5 Ma and implications for monsoon evolution [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 237(1-2): 45-55.
- [85] 向明菊, 史继扬. 氨基酸分析结果与第四纪气候旋回[J]. *第四纪研究*, 1991, 11(3): 213-220. [XIANG Mingju, SHI Jiyang. Quaternary climate cycles and amino acids data [J]. *Quaternary Sciences*, 1991, 11(3): 213-220.]
- [86] 郑绵平, 赵元艺, 刘俊英. 第四纪盐湖沉积与古气候[J]. *第四纪研究*, 1998, 18(4): 297-307. [ZHENG Mianping, ZHAO Yuanyi, LIU Junying. Quaternary saline lake deposition and paleoclimate [J]. *Quaternary Sciences*, 1998, 18(4): 297-307.]
- [87] 李吉均. 青藏高原的地貌演化与亚洲季风[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1999, 19(1): 1-12. [LI Jijun. Studies on the geomorphological evolution of the Qinghai-Xizang(Tibetan) plateau and Asian monsoon [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1999, 19(1): 1-12.]
- [88] Jin Z D, Bickle M J, Chapman H J, et al. Early to mid-Pleistocene ostracod $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ in the central Tibetan Plateau: Implication for Indian monsoon change [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2009, 280(3-4): 406-414.
- [89] An Z S, Liu T, Lu Y C, et al. The long-term paleomonsoon variation recorded by the loess-paleosol sequence in Central China [J]. *Quaternary International*, 1990, 7-8: 91-95.
- [90] 安芷生, 吴锡浩, 汪品先, 等. 最近130 ka中国的古季风——II. 古季风变迁[J]. *中国科学 B辑*, 1991, 21(11): 1209. [AN Zhisheng, WU Xihao, WANG Pinxian, et al. The ancient monsoon of China in the last 130 ka- II. the change of the ancient monsoon [J]. *Scientia Sinica(Chimica)*, 1991, 21(11): 1209.]
- [91] 汪品先. 新生代亚洲形变与海陆相互作用[J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 2005, 30(1): 1-18. [WANG Pinxian. Cenozoic deformation and history of Sea-Land interactions in Asia [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2005, 30(1): 1-18.]