



新疆阿尔泰红山嘴地区的表土孢粉与现代植被

李媛媛^{1,2} 张 芸^{1*} 孔昭宸¹ 杨振京³

¹中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093; ²中国科学院大学生命科学学院, 北京 100049; ³中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 石家庄 050061

摘 要 在新疆阿尔泰山中段的红山嘴地区选取一条沿海拔745–2 413 m的不同植被带群落样方进行调查, 对应采集37个表土样品进行孢粉统计和排序分析, 初步探究了红山嘴地区的植被与表土孢粉之间的对应关系, 并将之与新疆阿尔泰西部的喀纳斯西坡孢粉垂直带进行对比。结果表明, 红山嘴地区表土孢粉谱依照海拔高度自上而下划分为4个孢粉组合类型, 分别对应亚高山草甸、山地森林、灌丛草原和荒漠草原。乔木植物中云杉属(*Picea*)和松属(*Pinus*)花粉, 灌木植物中麻黄属(*Ephedra*)及草本植物中的苋科和蒿属(*Artemisia*)因受到自然风力、水流及人为活动的影响, 表现出明显的超代表性; 乔木植物中的落叶松属(*Larix*)花粉, 草本植物中的禾本科及莎草科花粉, 却在其自身为优势种的群落中呈现低代表性; 蒿属与苋科花粉百分含量的比值(Ar/Am)能较好地反映该区气候垂直带的干湿状况, 灌丛草原带的 Ar/Am 低, 在一定程度上反映了人类活动对草原灌丛化的影响。与新疆阿尔泰西部的喀纳斯西坡孢粉垂直带相比, 红山嘴垂直带的孢粉类型偏少, 同时相似的孢粉带在该区的分布高度比喀纳斯西坡高。此外, 排序分析(RDA)结果表明, 年降水量是影响该区表土孢粉组合的主要环境因子。

关键词 阿尔泰山地; 表土孢粉; 植被盖度; 环境因子; 排序分析

李媛媛, 张芸, 孔昭宸, 杨振京 (2021). 新疆阿尔泰红山嘴地区的表土孢粉与现代植被. 植物生态学报, 45, 174-186. DOI: 10.17521/cjpe.2020.0195

Surface sporopollen and modern vegetation in Hongshanzui area, Altai, Xinjiang, China

LI Yuan-Yuan^{1,2}, ZHANG Yun^{1*}, KONG Zhao-Chen¹, and YANG Zhen-Jing³

¹State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China; ²College of Life Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; and ³Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, China

Abstract

Aims Our aims are 1) to explore the relationship between vegetation and sporopollen in the surface soil in the Hongshanzui area, which is located in the middle slope of the Altai Mountains, 2) to compare different sporopollen assemblages zones between the Hongshanzui area and the Kanas region, which is located in the western slope of the Altai Mountains of Xinjiang, and 3) to explore the relationships between surface sporopollen and environmental factors.

Methods We collected 37 surface soil samples and carried out modern vegetation survey in the Hongshanzui area along an altitudinal gradient from 745 to 2 413 m. Mathematical statistics and redundancy analysis (RDA) were applied to analyze the distribution pattern of sporopollen in surface soil and its relationships with modern vegetation.

Important findings The results showed that the sporopollen spectrum of surface soil in Hongshanzui area was divided into four zones from top to bottom along the altitudinal gradient, corresponding to the major vegetation types in this region, including subalpine meadow, mountain coniferous forest, shrub steppe and desert steppe. The typical tree species, *Picea* and *Pinus* pollen, and shrub species *Ephedra*, herbs *Amaranthaceae* and *Artemisia*, were extra representation in the region, mainly because of the impact of wind and rivers in sporopollen dispersal. *Larix*, *Poaceae*, and *Cyperaceae* had low representations in communities where they were dominant species. Many previous sporopollen studies have shown that the ratio of the percentage of pollen content of *Artemisia* to *Amaranthaceae* (Ar/Am) was a good indicator of the degree of humidity in the semi-arid and arid areas. Our study confirms that Ar/Am roughly corresponded to the wet and dry conditions of the climate vertical zone in this area. To some extent, the low Ar/Am ratio for shrub steppe also reflected the influence of human activities on shrub steppe. Compared with the western slope of Kanas, the characteristics of sporopollen assemblage zones in the

收稿日期Received: 2020-06-17 接受日期Accepted: 2020-09-23

基金项目: 国家自然科学基金(41971121和41572331)和中国科学院战略性先导科技专项(XDA19050103)。Supported by the National Natural Science Foundation of China (41971121 and 41572331), and the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (XDA19050103).

* 通信作者Corresponding author (zhangygl@ibcas.ac.cn)

Hongshanzui region were incomplete, and the distribution height of similar sporopollen zones in this area was higher than that on the western slope of Kanas. In addition, the results of RDA on sporopollen assemblages and environmental factors (mean annual temperature (*MAT*), mean annual precipitation (*MAP*) and altitude (*ALT*)) revealed that the *MAP* was the main environmental factor affecting sporopollen assemblages in the surface soil in the Hongshanzui region.

Key words Altai Mountains; surface sporopollen; vegetation coverage; environmental factor; Ordination analyses

Li YY, Zhang Y, Kong ZC, Yang ZJ (2021). Surface sporopollen and modern vegetation in Hongshanzui area, Altai, Xinjiang, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 45, 174-186. DOI: 10.17521/cjpe.2020.0195

利用孢粉(即孢子和花粉)记录作为环境的替代指标进行全球变化定量研究已成为过去全球变化(PAGES)研究的重要手段, 在全新世、第四纪乃至更大的时间尺度上的古植被恢复、古气候重建工作中发挥着重要作用(Ni *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2015; Lézine *et al.*, 2019)。本着“将今论古”的原则, 现代表土孢粉的研究是其中最为基础的任务(Xu *et al.*, 2016)。目前对于孢粉与植被及气候间的关系的研究颇为丰富(Zhang *et al.*, 2018), 涉及多种统计学方法, 不仅有助于古气候的重建, 还可用于对未来气候的预测(Cao *et al.*, 2014), 同时部分研究还将人为活动的影响考虑在内(Ma *et al.*, 2017; Huang *et al.*, 2018a)。对孢粉现代过程的研究, 现今更多是集中于探究大尺度范围的影响(Zheng *et al.*, 2014; Cao *et al.*, 2017), 从而为全球气候变化的研究提供基础。

新疆表土的研究, 最早始于1989年阎顺对新疆北部阿尔泰山的表土孢粉研究(阎顺和许英勤, 1989), 21世纪后, 研究步步深入(Li *et al.*, 2017; Huang *et al.*, 2018b), 有针对小局域如天山南坡吐鲁番地区(王力等, 2017)、中天山北坡(Yang *et al.*, 2016)、天山西部博尔塔拉河(李玉梅等, 2014)等地探究孢粉组合与植被及气候的关系、山体垂直带特征等, 也有对全疆表土孢粉空间分布规律及其与植被之间的关系进行探讨(罗传秀等, 2007; Luo *et al.*, 2009)。目前建立孢粉数据库进行更大空间尺度的研究虽是研究热点, 但小区域地区的表土孢粉研究仍需进一步加强。

对于新疆阿尔泰山的表土孢粉研究, 阎顺采集的样点集中在哈巴河县和乌伦古湖(阎顺和许英勤, 1989), 李玉梅(2015)对喀纳斯东西坡65个表土样品进行分析, 并重建了3 150年以来的气温和年降水量变化, 李芙蓉等也集中讨论了准噶尔盆地外沿、喀纳斯和青河县等地66个表土孢粉样品, 认为降水量是主要的影响因子(Li *et al.*, 2017)。而处于新疆阿尔

泰山中部, 紧邻两河源自然保护区的红山嘴地区, 有比较完整的植被带谱(袁国映, 1986), 同时垂直带出现了灌丛草原, 该区的孢粉垂直带组合特征如何? 其与新疆阿尔泰山西部的孢粉谱特征是否存在差异, 而这种差异是受什么因素控制? 加上红山嘴口岸的建设, 人为活动影响日渐加剧, 灌丛草原化明显, 对孢粉的搬运沉积、传播和保存都存在一定影响, 其孢粉与植被及气候关系又具有如何特点? 因此本文通过多种统计学方法更加全面地探讨这三者间的关系, 研究结果将有助于阐释温带干旱半干旱地区植被的垂直地带性变化规律; 对比不同地段的垂直带孢粉组合特征, 将有助于更好地弄清海拔、温度和降水等环境因子对孢粉传播的影响, 从而为新疆地区的经济和生态文明建设提供科学依据, 还可为重建全新世以来的新疆北部地区古植被、古气候提供参考。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

新疆阿尔泰山(45°–49° N, 86°–94° E)地处阿尔泰山中段南坡, 西起中国与哈萨克斯坦边境, 东部延伸至新疆木垒县与蒙古接壤, 北部连接俄罗斯, 南部抵达北塔山(图1)。全长约750 km, 平均宽度60–140 km, 东部余脉宽约20 km(曹秋梅, 2015)。研究区属于新疆阿尔泰山中段南坡的福海林场境内, 位于47.55°–48.08° N和88.32°–89.02° E之间, 处于西北高东南低的中山地带, 主要为山地地貌, 地形坡度一般在20°–40°之间。该区属中温带大陆性干旱气候, 7月平均气温19 °C左右, 1月平均温度为–21.7 °C, 年降水量500 mm左右, ≥10 °C积温在1 800–2 600 °C之间(国家林业局西北林业调查规划设计院, 2010)。研究区的土壤和气候水文、地貌、植被等条件互相制约, 互相依赖, 形成了界限明显的不同垂直自然带(袁国映, 1986)。海拔高度从745

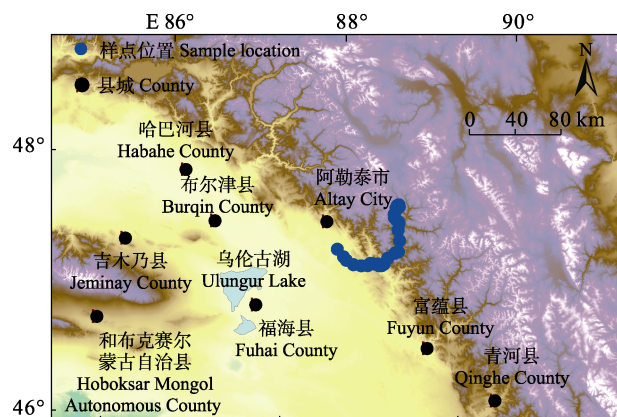


图1 新疆红山嘴地区孢粉取样点位置图。

Fig. 1 Study area and locations of the sporopollen sampling sites in the Hongshanzui region of Xinjiang.

到2 413 m, 形成低山带、中山带、亚高山带和高山带。植被带也相应分为4个带: (1)荒漠草原带, 该带现代植被景观主要为退化的禾草草原和由藜科(最新植物分类学系统(APG)归并到苋科)、蒿属(*Artemisia*)组成的荒漠类型, 优势种为角果藜(*Ceratocarpus arenarius*)、豆科红车轴草(*Trifolium pratense*)、菊科刺头菊(*Cousinia affinis*)和蒿属、蓼科和禾本科等草本植物。(2)灌丛草原带, 该带主要是灌丛草原或灌丛草甸植物。灌木层植物主要有蔷薇科绣线菊(*Spiraea salicifolia*)、苋科梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、麻黄科麻黄属(*Ephedra*)等, 草本植物多为禾本科、莎草科藁草属(*Carex*)、豆科苜蓿属(*Medicago*)和唇形科等。(3)山地森林带, 该带植被类型多由落叶乔木树种西伯利亚落叶松(*Larix sibirica*)与常绿针叶西伯利亚云杉(*Picea obovata*)构成混交林, 或伴生杨属(*Populus*)和桦木属(*Betula*)等落叶阔叶树种形成针阔叶混交林。灌木植物有麻黄属、蔷薇科绣线菊和珍珠梅(*Sorbaria sorbifolia*)以及小檗科等植物; 草本植物有禾本科、菊科高山蓍(*Achillea alpina*)、蒿属、狗娃花(*Aster hispidus*)、豆科甘草(*Glycyrrhiza uralensis*)、蔷薇科天山羽衣草(*Alchemilla tianschanica*)以及莎草科藁草属等。在部分隐域地区尚存在少量落叶松属(*Larix*)及杨属和桦木属的河谷森林, 呈现出显著的乔灌木结构, 总体看森林植被状况保存良好。(4)亚高山草甸带, 该带主要为亚高山草甸植被、禾草退化草原植被, 优势种有莎草科藁草属、禾本科、蔷薇科中的天山羽衣草和委陵菜(*Potentilla chinensis*), 以及石竹科等草本植物。在该带的阴坡和半阴坡, 以西

伯利亚落叶松为主的森林植物以块状和带状与山地草甸相间分布, 乔木植物分布上限可达2 500 m (国家林业局西北林业调查规划设计院, 2010; 黄力平等, 2015; 姜泽群等, 2016)。

1.2 样品的采集与鉴定

2011年, 从海拔745 m的阿勒泰市开始, 沿着216国道海拔每上升大约100 m采集一个表土样品, 并进行植被群落样方调查, 经过新疆阿尔泰温泉沟森林公园及红山嘴口岸, 海拔最高至2 413 m。表土样品按采集顺序依次编号, 总计37个(图1)。

在实验室里按照取样土岩性不同, 称取10–120 g不等的质量, 采用常规的酸碱处理及氢氟酸消煮法对孢粉进行提取, 并在Olympus孢粉光学显微镜40 × 10倍镜下进行鉴定, 除孢粉含量较少的个别样品外, 绝大多数样品均统计陆生植物花粉400粒以上。

1.3 数据统计

(1)样品中孢粉各科属数量占孢粉总含量的百分含量的公式为: $W = n/N \times 100\%$, W 为该科属在该样品中的百分含量; n 为该科属孢粉在鉴定中统计的数(粒); N 为该样品鉴定中统计的孢粉总数(粒)。

(2)样品孢粉浓度的计算公式: $X = (N' \times n') / (N'' \times G)$, X 为该样品孢粉浓度(粒·g⁻¹); N' 为该样品加入的石松孢子数(粒); n' 为该样品在显微镜下鉴定的石松孢子数(粒); N'' 为该样品鉴定的孢粉总数; G 为该样品质量(g)。

1.4 排序分析

红山嘴垂直带中使用的环境数据取自新疆地区1971–2000年30年的气候插值数据(区域气候数据集由4个变量(月平均气温、月降水量、日极端高温、日极端低温)组成), 这些变量是1971–2000年在新疆全部气象站共计30年的长期记录的平均值。使用薄板平滑样条曲面拟合技术将这些数据插值到1 km的网格单元中, 该技术在STRM数字高程模型的基础上考虑到高程的影响, 对应查找样点附近1 km网格气候插值数据值。用于排序分析的数据有海拔(ALT)、年降水量(MAP)和年平均气温(MAT)3个环境因子。选择孢粉组合和植被组成中的典型代表性孢粉种类: 云杉属(*Picea*)、松属(*Pinus*)、桦木属、麻黄属、蔷薇科(除委陵菜属之外)、苋科、蒿属、菊科(除蒿属、蒲公英属和紫菀属之外)、紫菀属(*Aster*)、毛茛科、石竹科、阴地蕨属(*Botrychium*)等17个科属

进行排序作图。

2 结果

2.1 孢粉组合特征

37份表土样品统计出孢粉共19 388粒, 分属于79个植物科属, 其中水生的双星藻孢子(*Zygnema*)仅计1粒, 故未计入孢粉总数进行计算分析。筛选科属孢粉百分比值大于5%的共计28个植物科属, 它们均为新疆地区现生植被中陆生植物区系的重要组成部分。根据研究区地貌特征及现代植被调查的相关资料, 将该区表土孢粉谱划分为4个孢粉组合带: 亚高山草甸、山地森林、灌丛草原和荒漠草原(图2)。

2.1.1 亚高山草甸(带I: 2 413–2 031 m)

此带孢粉总浓度平均为17 174粒·g⁻¹ (以下均为平均值)。在孢粉组合中, 草本植物花粉占59.34%, 其中以石竹科(15.24%)、蒿属(15.13%)、苋科(8.42%)、蓼科(5.50%)、禾本科(5.32%)和莎草科(2.39%)等含量较高。乔木植物花粉占36.07%, 其中云杉属占17.77%, 落叶松属占8.05%, 松属占6.86%。蕨类植物在此垂直带中含量最多(3.33%), 其中阴地蕨属占2.20%。该带蒿属与苋科花粉比值(Ar/Am)最高(1.88, 以下均为平均值), 乔木植物花粉与非乔木植物花粉之比(AP/NAP)的平均值却较低, 仅为0.62。

2.1.2 山地森林(带II: 1 970–978 m)

该带孢粉总浓度为18 102粒·g⁻¹, 达垂直带最高值。乔木植物花粉在孢粉组合中占孢粉总数的71.03%, 其中云杉属、松属、落叶松属和桦木属含量较多。灌木树种包括麻黄属(0.38%)和蔷薇科(0.44%)等花粉, 占2.88%。草本植物占本孢粉带的24.45%, 以蒿属(8.07%)、苋科(5.94%)、禾本科(2.15%)、蓼科(0.46%)、石竹科(0.75%)及湿生草本植物莎草科(1.71%)等为主。蕨类植物占2.65%。该带Ar/Am (1.7)较带I低, AP/NAP达最高值(3.62)。

2.1.3 灌丛草原(带III: 1 161–772 m)

该带孢粉总浓度仅为8 115粒·g⁻¹, 为该垂直带的最低值。在孢粉组合中, 灌木植物花粉的百分比值达此垂直带最高值(8.49%), 其中麻黄属占6.15%, 其次为柏科(1.45%)。乔木植物花粉则急剧下降至35.47%。草本植物占53.64%。蕨类植物孢子占1.29%。该带Ar/Am仅为0.60, AP/NAP降至0.78。

2.1.4 荒漠草原(带IV: 1 066–745 m)

该带孢粉总浓度为9 682粒·g⁻¹。在孢粉组合中, 草本植物花粉所占比例达最高值, 为93.81%, 其中苋科占56.43%, 蒿属占30.61%。乔木植物花粉降至最低值, 达4.92%。灌木植物花粉占总数的1.38%, 多为麻黄属(0.58%)。蕨类植物仅为0.12%。该带Ar/Am为0.99, AP/NAP达垂直带最低值(0.05)。

2.2 排序分析结果

通过对红山嘴地区植被垂直带的孢粉数据与气象因子数据对应进行排序分析, 大致能反映出表土孢粉分布规律及与生态环境因子之间的相关关系。首先用Canoco软件进行去趋势对应分析(DCA), 得出其中第1轴和第2轴共解释了21.39%的累计方差, 而第3和第4轴的累计方差为6.32%, 明显低于第1轴和第2轴, 由此可认为孢粉种属及表土样品点的排列顺序主要受第1轴和第2轴所代表的环境因子所控制, 且第1轴要比第2轴更为重要。由于DCA结果显示出的梯度长度为1.46, 小于3.0, 所以选择冗余分析(RDA)。

RDA结果显示: 其中第1轴的物种与环境相关系数为0.937 7, 共解释了63.51%的物种与环境累计方差, 而第2轴的物种与环境相关系数为0.789 0, 共解释92.93%的物种与环境累计方差, 可见, 轴1和2所代表的环境因子是影响该区表土孢粉组合的主要因子。

从RDA排序图(图3)可以看出, MAP、ALT与第1轴的负半轴相关性很高(相关系数分别为0.937 7, 0.789 0)。海拔依次由2 413 m降低到745 m, 降水量由319.42 mm降低到167.59 mm, 孢粉带依次为亚高山草原、山地森林、灌丛草原和荒漠草原带, 环境中水热因子发生变化。

从孢粉种类看, 落叶松属花粉与MAP和ALT呈现明显的正相关关系, 而苋科花粉与MAP和ALT呈现负相关关系; 麻黄属和柏科的花粉和MAT有很好的正相关关系, 而石竹科与阴地蕨属与MAT呈现明显的负相关关系。

从孢粉带看, 亚高山草甸(带I)与MAP和ALT呈现正相关关系, 灌丛草原(带III)与之表现相反, 而与MAT有较好的正相关关系。山地森林带(带II)部分样品与MAP和ALT表现正相关关系, 部分样品与MAT表现很好的正相关关系。荒漠草原带(带IV)表现为与MAP和ALT是负相关关系。整体看来, 孢粉带

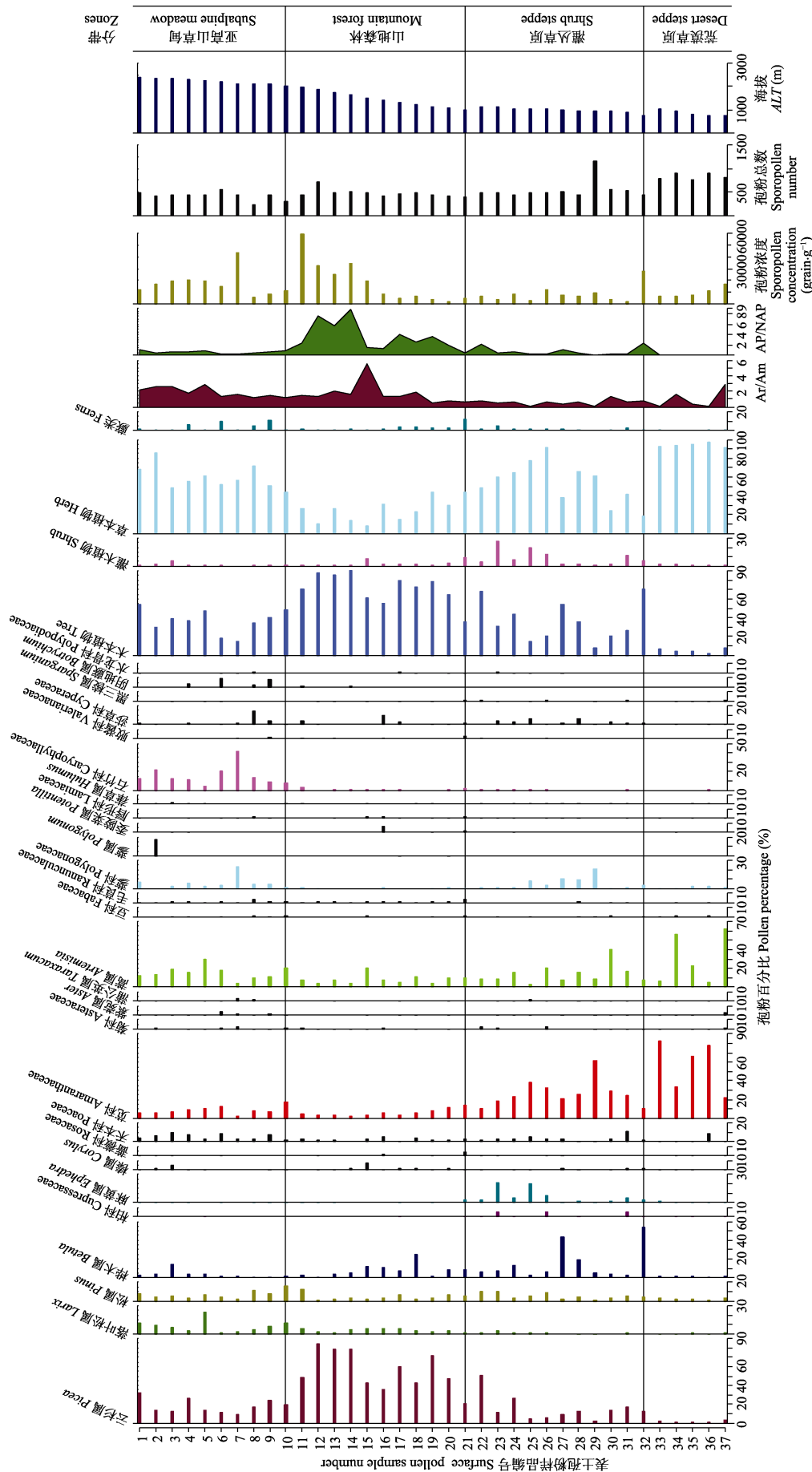


图2 新疆红山嘴地区表土孢粉组合图谱。图中菊科的孢粉百分比为排除蒿属、蒲公英属和紫菀属的数值；蔷薇科和蓼科的孢粉百分比为分别排除委陵菜属和蓼属的数值。AP/NAP, 乔木与非乔木花粉比值; Ar/Am, 蒿属与菊科花粉比值。
Fig. 2 Surface sporopollen percentages and sporopollen zones of the Hongshanzui region in Xinjiang. The pollen percentages of Asteraceae in the figure are the values excluding *Artemisia*, *Taraxacum* and *Aster*; the pollen percentages of Rosaceae and Polygonaceae are the values excluding *Potentilla* and *Polygonaceae*, respectively. *ALT*, altitude; *AP/NAP*, arboreal pollen/non-arboreal pollen; *Ar/Am*, *Artemisia*/*Amaranthaceae* pollen.

与气候因子间的关系与实际植被带分布基本吻合。

2.3 相关分析结果

Pearson相关分析选用的数据与排序分析选用的一致, 表1仅展示有显著相关关系的6个孢粉类群。结果表明, 云杉属与MAP显著正相关, 与MAT显著负相关, 相关系数分别为0.330、-0.357 ($p < 0.05$)。落叶松属与MAP和ALT呈现显著的正相关关系, 相关系数分别为0.596、0.663 ($p < 0.01$), 苋科花粉与MAP和ALT呈现显著的负相关关系, 相关系数分别为-0.611和-0.553 ($p < 0.01$)。石竹科与阴地蕨

属与MAT呈现显著的负相关关系, 相关系数分别为-0.617、-0.469 ($p < 0.01$), 研究结果和排序结果大体相近。毛茛科也与MAT呈现显著的负相关关系, 相关系数为-0.329 ($p < 0.05$)。

3 讨论

3.1 红山嘴孢粉垂直带与植被之间的关系

3.1.1 表土孢粉垂直带与植被带之间的关系

根据两河源自然保护区高精度遥感影像资料, 认为亚高山草甸植被一般分布在海拔2 200–2 800 m

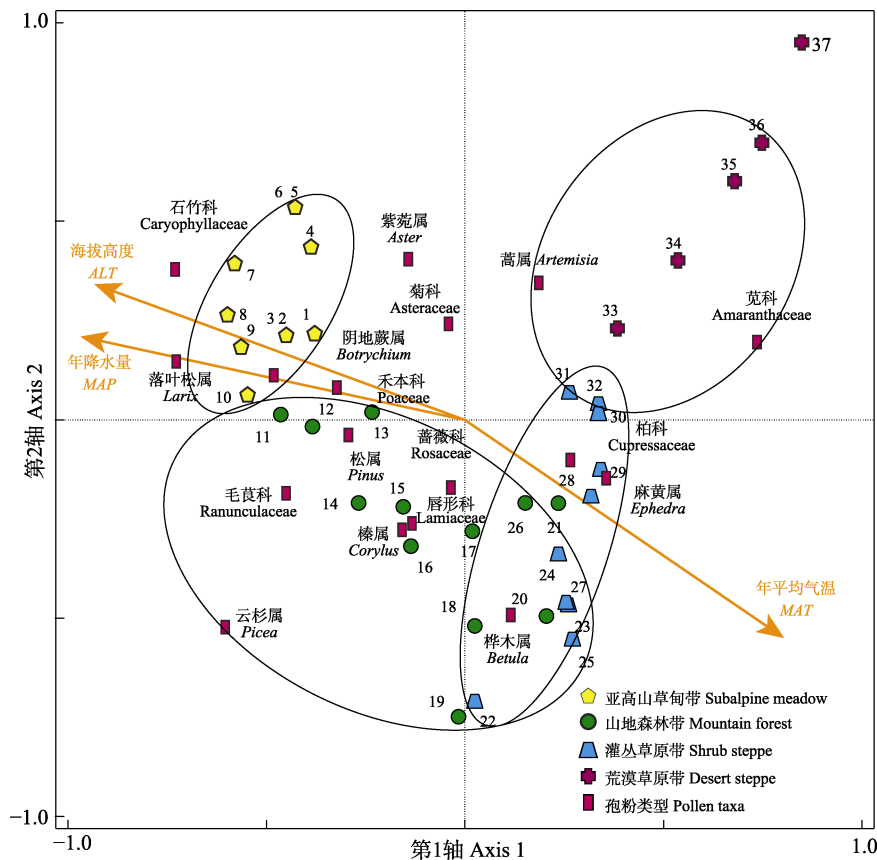


图3 新疆红山嘴地区主要孢粉类型与样点的RDA排序图。数字代表表土样点。
Fig. 3 Ordination of pollen sampling sites and sporopollen taxa of the Hongshanzui region in Xinjiang in the space of the first two axes of the redundancy analysis (RDA). ALT, altitude; MAP, mean annual precipitation; MAT, mean annual air temperature. Number means surface soil samples.

表1 新疆红山嘴地区6个孢粉类群与3个环境因子的相关分析
Table 1 Pearson correlations between the proportions of six sporopollen taxa and three environmental factors of the Hongshanzui region in Xinjiang

	云杉属 <i>Picea</i>	落叶松属 <i>Larix</i>	苋科 <i>Amaranthaceae</i>	毛茛科 <i>Ranunculaceae</i>	石竹科 <i>Caryophyllaceae</i>	阴地蕨属 <i>Botrychium</i>
海拔 Altitude	0.218	0.663**	-0.553**	0.274	0.674**	0.408*
年平均气温 Mean annual air temperature	-0.357*	-0.608**	0.635**	-0.329*	-0.617**	-0.469**
年降水量 Mean annual precipitation	0.330*	0.596**	-0.611**	0.313	0.624**	0.494**

*, 在0.05水平(双侧)上显著相关; **, 在0.01水平(双侧)上显著相关。
*, a significant correlation at the 0.05 level (two-sided); **, a significant correlation at the 0.01 level (two-sided).

的阳坡,呈楔形向下部森林区延伸(陈艳锋等, 2016)。而本研究的植被调查数据显示,亚高山草甸孢粉带分布海拔下限稍低于该植被带。随着红山嘴口岸的开发,公路和基础设施的建设以及观光旅游业的开展,此带分布海拔的波动应受到一定的人为活动干扰(徐黎丽和朱璧莹, 2017)。其中部分样方为森林景观,呈片状分布。有研究证实,在水热条件好的情况下,乔木树种即使在海拔2 500 m以上,仍有小片分布(姜泽群等, 2016)。新疆阿尔泰两河源自然保护区的山地针阔叶混交林的分布海拔为1 300–2 200 m,在温泉沟森林公园处,其海拔上限能到2 500 m,下限到1 100 m。孢粉带II中的山地针阔混交林(1 970–1 150 m)的海拔区间与实际植被分布基本吻合。

灌丛在新疆阿尔泰山不具有地带性意义,但其分布遍及山地、河谷和平原,在山地草原带中的石质化坡地或较阴湿的地段,主要以次生植被成斑块状零星分布,形成灌丛草原(陈艳锋等, 2016)。在海拔1 100 m以下福海林场南端的低山灌木草原带的河谷中,分布有小面积的杨树林或桦木林(姜泽群等, 2016)。带IV (1 066–745 m)则位于地带性的荒漠植被带中。带III、IV的海拔高度有一定的重合,但表现为不同的植被类型。

3.1.2 表土孢粉含量与植被盖度之间的关系

在带I亚高山草甸中,10个样点的植被样方调查资料显示,现代植被总盖度都在80%以上,这与孢粉总浓度值高有一定对应关系。尽管以莎草科藁草属为主的建群种盖度在40%–80%之间,但孢粉组合中却仅占2.39%;禾本科花粉含量为5.32%,但其对应植物的平均盖度达10%;蔷薇科花粉含量仅为0.09%,但蔷薇科羽衣草、委陵菜等的盖度却处于5%–35%之间,可见莎草科、禾本科及蔷薇科花粉的代表性低(魏海成等, 2009)。石竹科、苋科及蒿属花粉的平均百分比值在8%以上,最高的达15.24%,但样方调查中,其对应植物的盖度皆小于5%,表明其花粉具有超代表性(许英勤等, 1996; 阎顺等, 2004)。样方中有苔藓类植物孢子,其含量在5%左右,但苔藓类的孢子所占比例却不高。蕨类植物较少,但其孢子比值为3.33%,相对较高,表现出超代表性。

带II为山地森林类型,11个样点的植被样方调查资料显示,植被总盖度在80%左右,与孢粉总浓度在此垂直带上为最高值呈较好的对应关系。此带

多为山地针叶林和针阔混交林,有少量河谷林。森林环境状况保持得较好,物种的丰富度亦高。仅云杉属花粉就占53.96%,达到整个垂直带的最高值,但却与其植被样方中盖度(平均约为19.5%)对比相差较大,表明云杉属花粉具有超代表性。落叶松属花粉(3.30%)与其植被平均盖度(约38%)之间的对应性较差,属于低代表性花粉。桦木属花粉(10.42%)与其植被平均盖度(约24%)之间基本对应(阎顺和许英勤, 1989)。值得一提的是,调查的样方位于河流、河谷及较湿润地带,甚至有杨树纯林分布,但在其表土花粉中,杨属花粉含量却极低,几乎没有,这与该花粉的特性及环境保存等有关,在地层古环境重建中需综合考虑(阎顺和许英勤, 1989)。高含量的蒿属及苋科植物的花粉与植被样方中的盖度难以对应,应属外源花粉(杨庆华等, 2019)。AP/NAP最高值达3.55,与其为森林植被带相关,具有一定的植被指示意义。这些研究结果有助于研究区古植被的恢复与古环境的重建(Zhang *et al.*, 2006)。

带III为灌丛草原类型,11个样点的植被样方调查资料显示,植被总盖度平均在70%左右,灌木层的盖度约为25%,与孢粉浓度低有一定对应关系。蔷薇科绣线菊的植被盖度在5%–30%之间,平均在20%左右,但其花粉却仅为0.37%,表明其具低代表性(伍婧, 2006)。柏科花粉(1.56%)与其植被盖度(平均约12%)对应不是很好,表现较低的植被代表性(赵克良和李小强, 2013)。在植被样方调查中未见到麻黄属植物,但却出现较高比值的麻黄属花粉(6.63%)。在中国荒漠区东部,也曾记录到即使无麻黄属植物分布,其花粉百分含量值也高达60%的情况(李月丛等, 2005)。因此,该花粉来源有待商榷(杨庆华等, 2019)。

带IV为荒漠草原带,5个样点的植被样方调查资料均显示,草本植被盖度在50%–75%间,平均值为60%,可与孢粉总浓度对应。此带苋科植物在样方中盖度为5%–55%,平均值为21%,但其花粉百分比平均占56.43%,表明其属于超代表性花粉。蒿属百分比值(30.61%)对应植被盖度平均值(23%)来讲,也表现出一定的不对应性。样地中禾本科、菊科物种种类较多(曹秋梅, 2015),但盖度低,花粉百分比值也极低,花粉的代表性偏低(罗传秀等, 2007)。综上,红山嘴地区垂直带的表土孢粉组合特征基本能反映出当地植被的主要特征。

3.1.3 典型乔木和草本植物花粉与植被的关系

带I亚高山草甸部分样品中鉴定出大量的云杉属和松属的花粉(图4), 其可能原因是, 亚高山草甸下方多分布针叶林或针阔混交林森林植被带, 云杉属和松属的花粉具有双气囊, 易于远距离传播(Zhang *et al.*, 2006), 可认为是由山体向上的地形风携带传播(Yang *et al.*, 2016)。带III灌丛草原部分样品中, 乔木树种花粉(云杉属和松属)占比例亦高, 根据植被样方调查, 可能认为是处于森林带下方及其边缘带, 森林带的花粉会对就近范围的灌丛草原带有一定影响(阎顺和许英勤, 1989)。带II(16、17、18号)、带III(20、21号)的取样点, 处于额尔齐斯河上游支流的河谷内, 河流顺着河谷自上而下流动, 易携带花粉搬运和沉积(李玉梅等, 2014)。

带I中西伯利亚落叶松花粉的含量达8.05%, 处于该垂直带最高值。植被调查结果表明, 该带是以西伯利亚落叶松为主的乔木植物呈块状和带状与山地草甸相间分布在山体的阴坡和半阴坡(国家林业局西北林业调查规划设计院, 2010; 黄力平等, 2015; 姜泽群等, 2016)。该带有10个植被样方, 其中4个为森林景观, 以落叶松属植物为主, 花粉就近沉积, 导致其花粉含量较高。带II中的植被类型是由西伯利亚落叶松与西伯利亚云杉形成的混交林, 乔木植物中的云杉成分增加, 云杉属花粉具双气囊且属超代表性(李文漪和姚祖驹, 1990), 导致其花粉含量较高, 而落叶松属花粉含量不高与该花粉不具气囊且

是低代表性花粉(阎顺和许英勤, 1989)类型有关。

3.1.4 Ar/Am变化及其意义

El-Moslimany (1990)最早采用蒿属和藜科比值(A/C)来指示气候的干湿程度, 也就是本文计算的Ar/Am; 孙湘君等(1994)则通过研究干旱和半干旱区蒿属和藜科花粉的分布规律, 提出Ar/Am可以作为区分草原和荒漠植被的指标。钟巍等(2001)在塔里木盆地南缘的孢粉研究中, 认为该比值的高低能反映环境的干湿变化。通常在典型荒漠地区, 其值要小于0.5, 而草原地区通常大于1, 该比值对降水量反应十分敏感(赵克良和李小强, 2013; 吴慧贤, 2018)。该垂直带的(图5)带I是位于海拔2 000 m以上的亚高山草甸, 其植被状况较好, 湿度较大, 带II为森林植被, 水热条件较好, 这两带的Ar/Am > 1.5。带III和带IV, Ar/Am低, 均<1, 呈现出较为干旱的环境状况, 与其处于荒漠带有关, 大体变化趋势与前人研究(El-Moslimany, 1990; 钟巍等, 2001; 赵克良和李小强, 2013; Li *et al.*, 2017; 吴慧贤, 2018)一致, 可以反映出该区垂直带湿度变化情况。带I中, Ar/Am处于垂直带最高值, 通常在湿润的环境下, 蒿属植物花粉所占比例较高, 与该带植被类型相吻合(Yang *et al.*, 2016)。带II的Ar/Am仅次于带I, 与其处于环境条件较好的森林带有关。带III的Ar/Am处于此垂直带最低值(0.60), 该带是灌丛草原带, 相比森林带来讲, 其MAT高, MAP少, 属干旱气候分区(郑景云等, 2013)。带IV的Ar/Am达0.99, 与该带多

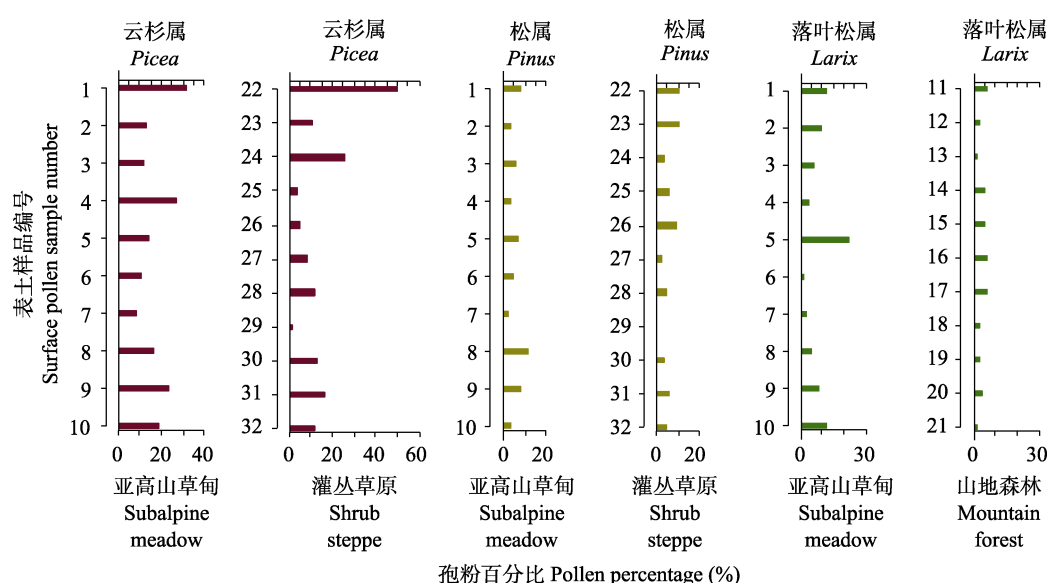


图4 新疆红山嘴地区乔木植物花粉与植被带的关系。

Fig. 4 Relationship between tree pollen and vegetation zones of the Hongshanzui region in Xinjiang.

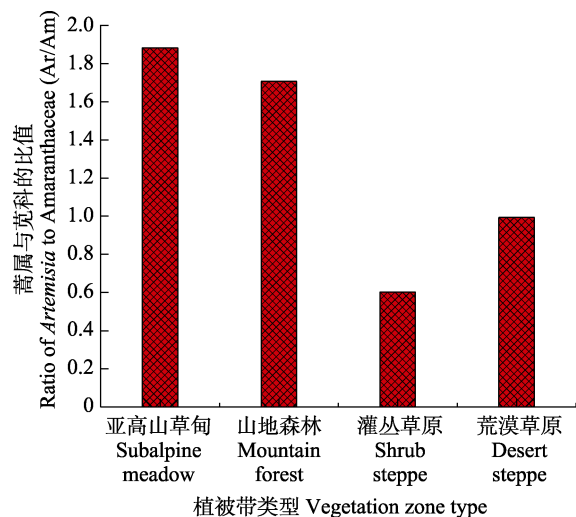


图5 新疆红山嘴地区4个孢粉组合带蒿属与苋科的比值。
Fig. 5 Ratio of *Artemisia* and *Amaranthaceae* in four spore-pollen zones of the Hongshanzui region in Xinjiang.

个样点的优势种均为蒿属植物有关(赵克良和李小强, 2013)。

另外, 25号采样点的植物样方中有较多的田旋花(*Convolvulus arvensis*)、车前(*Plantago asiatica*)等植物, 29号采样点的植物样方中蓼科扁蓄(*Polygonum aviculare*)盖度高, 33号采样点的植物样方中角果藜盖度可达55%, 这些样品的Ar/Am显著偏低, 不超过0.1。田旋花、车前和扁蓄都是常见的伴人植物(李宜垠等, 2008), 角果藜作为牛羊及骆驼喜食的植物, 常生长在过度放牧的草场。灌丛植被大多成斑块状零星分布, 草原灌丛化是气候变化和人类活动多种因素综合作用的结果, 带III的Ar/Am低于带IV, 也在一定程度上反映了过度放牧和火烧等人为干扰对草原灌丛化的影响(赵克良, 2013; 高琼和刘婷, 2015)。伊犁盆地表土孢粉记录显示处于哈萨克人的主要牧区之内的两个样点的Ar/Am低于其他样点(赵克良和李小强, 2013)。

3.2 红山嘴垂直带与环境因子的关系

从荒漠草原、灌丛草原到山地森林和亚高山草甸, 随着ALT升高, MAP逐渐增加, 反映了MAP和ALT的梯度变化; 并且MAP与第1轴的负半轴存在较好的相关关系, 但第2轴反映的环境梯度却表现得并不明显, 本文收集并整理的1971–2000年间气象数据, 反映该垂直带上, MAP由上而下呈现降低的趋势, 所以MAP应是影响该区表土孢粉组合的主要环境因子(Li *et al.*, 2017)。

从孢粉种类看, 麻黄属和苋科花粉与MAP呈负

相关关系, 从草甸-森林-灌丛草原-荒漠草原湿度逐渐下降, 这些花粉百分比含量逐渐增高。麻黄属集中分布在MAT 6.0–7.0 °C, MAP 300–340 mm的区域内, 其分布随MAP的增加而减少(吴建国等, 2010)。苋科(如驼绒藜、角果藜、梭梭等)植物作为荒漠植被带的优势种和建群种, 地质历史时期以来该植物表征干旱的气候环境(孙非非等, 2010)。柏科花粉含量受MAT的影响较大, 这与其多以稀疏矮小的灌木状形态分布于灌丛草原中有密切联系, 这些柏科小灌木如刺柏属新疆方枝柏(*Juniperus pseudosabina*)都比较喜光喜暖, 常分布于阳坡作为替代种。全球变暖也是促进灌木向草原入侵的重要原因(高琼和刘婷, 2015)。落叶松属的花粉含量和MAP的相关性更高, 和MAT呈现显著负相关关系, 西伯利亚落叶松耐寒冷, 在此地区常以片状纯林分布在阴坡和半阴坡。

带I中的样品受ALT和MAP的影响较大, 与所处的亚高山草甸植被带有良好的对应关系。带II中的物种丰富, 皆为样地调查中的物种组成。带III中的样品则与ALT和MAP呈负相关关系, 但与MAT却呈显著正相关关系, 表明其与温度之间的联系更为密切, 尤其新疆方枝柏和麻黄属等植物, 也证明了灌丛草原化与全球变暖有一定的关系(高琼和刘婷, 2015)。同时带II (21–26号样品)与带III中部分样品(17–18号样品)处于森林与灌丛草原的过渡带, 在前人的研究中, 垂直带中出现针阔混交林这一过渡带, 与桦木属植物常生长于海拔较低的湿地环境中(如河流旁及山地阴坡)有关(姜景民, 1990; Zhang *et al.*, 2009; 李玉梅等, 2014), 属于隐域植被, 这也与植被样方调查数据一致。带IV的孢粉类型主要为蒿属和苋科, 与荒漠植被带有较好对应(吴慧贤, 2018)。这将为应用该地区垂直带的化石孢粉组合重建古植被、古气候提供了一定的参考。

3.3 红山嘴孢粉垂直带与喀纳斯西坡孢粉垂直带之间的关系

采自新疆阿尔泰山西部的喀纳斯西坡的38个表土孢粉数据被划分为3个带, 分别对应现代的山地温带半荒漠草原带、山地寒温带草原带和山地针叶林带, 山地针叶林带之上为亚高山草甸带(李玉梅, 2015)。根据本文所选用的新疆地区气候插值数据, 对应查找了喀纳斯西坡样点的气候插值数据值进行计算(表2), 结果表明位于新疆阿尔泰山中部地区的

表2 新疆红山嘴和喀纳斯西部相同海拔区间的年平均气温(MAT)和年降水量(MAP)(平均值)。
Table 2 Mean annual temperature (MAT) and mean annual precipitation (MAP)(mean) of the same altitude range in Hongshanzui and Western Kanas, Xinjiang

海拔高度 Altitude (m)	MAT (°C)		MAP (mm)	
	红山嘴 Hongshanzui	喀纳斯西坡 Western slope of Kanas	红山嘴 Hongshanzui	喀纳斯西坡 Western slope of Kanas
600–800	3.38	3.82	180	181
800–1 000	2.66	2.24	190	195
1 000–1 200	1.64	1.10	206	213
1 200–1 400	0.33	0.09	222	229
1 400–1 600	–1.75	–2.00	257	264

红山嘴地区各海拔区间(600–800、800–1 000、1 000–1 200、1 200–1 400、1 400–1 600 m)的年降水量(平均值)都明显低于喀纳斯西坡, 而年平均气温(平均值)大多显著高于这些地区。新疆阿尔泰山西部垂直带较中东部丰富, 部分垂直带到中东部渐渐消失, 同时相似孢粉带对应的海拔高度比中东部低(杜璇, 2019)。对比喀纳斯西坡孢粉垂直带(图6), 红山嘴地区的亚高山草甸带(2 400–2 000 m)分布的海拔下限略高200 m左右; 针叶林带(2 031–1 223 m)上限的海

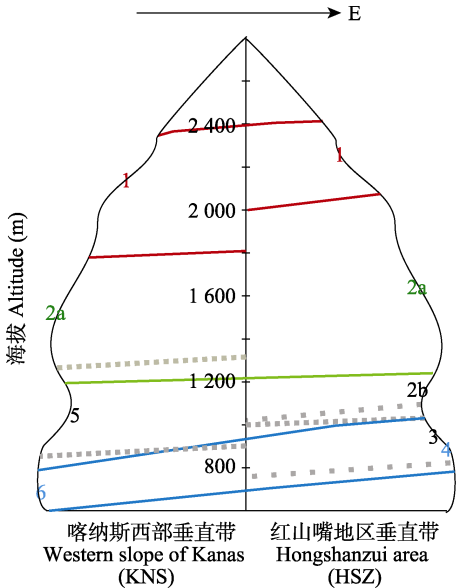
拔高200 m左右, 并且缺少山地寒温带草原带(李玉梅, 2015); 荒漠草原(1 066–745 m)带对应于喀纳斯西坡的山地温带半荒漠草原带(807–637 m), 该带的海拔高度也比喀纳斯西坡高约100–200 m。比红山嘴地区更偏东的青海山区其对应植被带海拔也均上升300 m (袁国映, 1986)。大量研究证实, 由于温度降水及湿润气流的差异变化, 孢粉垂直带分布的海拔也出现上下波动的情况(王力等, 2017)。新疆阿尔泰山呈现西北-东南走向, 喀纳斯西坡受北冰洋、大西洋冷湿气流的影响, 泰加林比重较大, 红山嘴位置比喀纳斯偏东, 气温较高, 而降水量却低(袁国映, 1986; 庄晓翠等, 2009), 植被垂直带谱是在较早生的荒漠草原上发育起来的, 各带分布的海拔高度有所上升(曹秋梅, 2015; 陈艳锋等, 2016)。由此, 红山嘴地区相似孢粉带分布的海拔高度比喀纳斯西坡的高, 是与两地温度和降水存在差异有一定关系。

4 结论

(1)通过对新疆阿尔泰山中段福海县境内的红山嘴地区海拔745–2 413 m采集的37个表土样品进行孢粉分析, 结合植被调查结果, 将其划分为4个孢粉组合带, 从上而下分别对应亚高山草甸、山地森林、灌丛草原、荒漠草原。

(2)通过与新疆阿尔泰西部的喀纳斯西坡垂直带的孢粉组合特征进行对比, 沿着山脉从西北到东南, 由于受到降水少、温度高的影响, 红山嘴的孢粉垂直带类型较少, 同时相似的孢粉带在该区分布的海拔高度要比喀纳斯西坡高100–200 m。

(3)研究区内表土孢粉组合与环境因子之间的排序分析结果表明, 降水量是制约该区表土孢粉组合的主要环境因子。带I和III存在一定量的乔木植物花粉, 应与地形风的影响和水流的搬运有关; 本研究区Ar/Am大致能反映出该区垂直带的干湿变化,



- 1, 亚高山草甸 Subalpine meadow (KNS: 1 800–2 400 m; HSZ: 2 000–2 400 m)(红线内 With the red line)
- 2a, 山地针叶林 Mountain coniferous forest (KNS: 1 200–1 800 m; HSZ: 1 223–2 031 m)(红线和绿线之间 Between the red line and the green line)
- 2b, 山地针阔混交林 Mountain coniferous and broad leaved mixed forest (HSZ: 978–1 223 m)(虚线内 With the dotted line)
- 3, 灌丛草原 Shrub steppe (HSZ: 772–1 156 m)(虚线内 With the dotted line)
- 4, 荒漠草原 Desert steppe (HSZ: 745–1 066 m)(蓝线内 With the blue line)
- 5, 山地寒温带草原 Mountain cold temperate steppe (KNS: 898–1 310 m)(虚线内 With the dotted line)
- 6, 山地温带半荒漠草原 Mountain temperate semi-desert steppe (KNS: 637–807 m)(蓝线内 With the blue line)

图6 新疆喀纳斯西坡与红山嘴地区孢粉垂直带对应的海拔。
Fig. 6 Comparison between the altitudes of different sporopollen vertical zones on western slopes of Kanas and Hongshanzui area, Xinjiang.

灌丛草原带的低Ar/Am在一定程度上反映了人类活动对草原灌丛化的干扰和影响。

致谢 该论文受到中国地质科学院水文地质环境地质研究所基本科研业务费项目(SK202012)的资助,感谢浙江师范大学倪健教授提供新疆气候插值数据。

参考文献

- Cao QM (2015). *The Global Outstanding Universal Value of Plant Diversity in Altai Mountains, Xinjiang*. Master degree dissertation, Xinjiang Agricultural University, Ürümqi. [曹秋梅 (2015). 新疆阿尔泰山植物多样性全球突出普遍价值. 硕士学位论文, 新疆农业大学, 乌鲁木齐.]
- Cao XY, Herzschuh U, Telford RJ, Ni J (2014). A modern pollen-climate dataset from China and Mongolia: assessing its potential for climate reconstruction. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 211, 87-96.
- Cao X, Tian F, Telford RJ, Ni J, Xu Q, Chen F, Liu X, Stebich M, Zhao Y, Herzschuh U (2017). Impacts of the spatial extent of pollen-climate calibration-set on the absolute values, range and trends of reconstructed Holocene precipitation. *Quaternary Science Reviews*, 178, 37-53.
- Chen YF, Yin LK, Cao QM, Wang Q (2016). Vegetation information extraction and analysis of Xinjiang Altay Two-River Source Nature Reserve. *Arid Land Geography*, 39, 843-850. [陈艳锋, 尹林克, 曹秋梅, 王琴 (2016). 新疆阿勒泰两河源自然保护区植被信息提取与分析. 干旱区地理, 39, 843-850.]
- Du X (2019). *Quantitative and Semi-Quantitative Relationship Between Surface Pollen and Climate on the Southern Slope of Altai Mountains and Its Preliminary Application*. Master degree dissertation, Lanzhou University, Lanzhou. [杜璇 (2019). 阿尔泰山南坡表土花粉与气候定量、半定量关系及初步应用. 硕士学位论文, 兰州大学, 兰州.]
- El-Moslimany AP (1990). Ecological significance of common nonaraboreal pollen: examples from drylands of the Middle East. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 64, 343-350.
- Gao Q, Liu T (2015). Causes and consequences of shrub encroachment in arid and semiarid region: a disputable issue. *Arid Land Geography*, 38, 1202-1212. [高琼, 刘婷 (2015). 干旱半干旱区草原灌丛化的原因及影响——争议与进展. 干旱区地理, 38, 1202-1212.]
- Huang LP, Gao YQ, Li Y, Zhang TW, Hu DY, Wang L (2015). Growth of *Siberia larch* in the middle east of Altay Mountains and its response to climate change. *Arid Land Geography*, 38, 1169-1178. [黄力平, 高亚琪, 李云, 张同文, 胡东宇, 王蕾 (2015). 阿尔泰山中东部西伯利亚落叶松生长量及其对气候变化的响应研究. 干旱区地理, 38, 1169-1178.]
- Huang XZ, Chen XM, Du X (2018a). Modern pollen assemblages from human-influenced vegetation in northwestern China and their relationship with vegetation and climate. *Vegetation History and Archaeobotany*, 27, 767-780.
- Huang X, Peng W, Rudaya N, Grimm EC, Chen X, Cao X, Zhang J, Pan X, Liu S, Chen C, Chen F (2018b). Holocene vegetation and climate dynamics in the Altai Mountains and surrounding areas. *Geophysical Research Letters*, 45, 6628-6636.
- Jiang JM (1990). The study of the geographical distribution of the *Betula* in China. *Forest Research*, 3, 55-62. [姜景民 (1990). 中国桦木属植物地理分布的研究. 林业科学研究, 3, 55-62.]
- Jiang ZQ, Abbas A, Tumur A (2016). Study on the lichens species diversity in Hot spring valley forest park of Altay Mountain. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 30, 121-126. [姜泽群, 阿不都拉·阿巴斯, 艾尼瓦尔·吐米尔 (2016). 阿尔泰山温泉沟森林公园地衣物种多样性的研究. 干旱区资源与环境, 30, 121-126.]
- Lézine AM, Izumi K, Kageyama M, Achoundong G (2019). A 90000-year record of Afromontane forest responses to climate change. *Science*, 363, 177-181.
- Li FR, Zhao Y, Gaillard MJ, Li H, Sun JH, Xu QH (2017). Modern pollen-climate relationships in north Xinjiang, northwestern China: implications for pollen-based reconstruction of Holocene climate. *The Holocene*, 27, 951-966.
- Li WY, Yao ZJ (1990). A study on the quantitative relationship between *Pinus* pollen in surface sample and *Pinus* vegetation. *Acta Botanica Sinica*, 32, 943-950. [李文漪, 姚祖驹 (1990). 表土中松属花粉与植物间数量关系的研究. 植物学报, 32, 943-950.]
- Li YC, Xu QH, Xiao JL, Chen H, Lü XM (2005). Indicative study of pollen on transformation in the eastern desert region of China. *Chinese Science Bulletin*, 50, 1356-1364. [李月丛, 许清海, 肖举乐, 陈辉, 吕新苗 (2005). 中国荒漠区东部花粉对植被的指示性研究. 科学通报, 50, 1356-1364.]
- Li YM (2015). *Pollen Assemblages and Palaeoenvironment Change in the Typical Wetland of North Xinjiang, China*. Master degree dissertation, Shijiazhuang University of Economics, Shijiazhuang. [李玉梅 (2015). 新疆北部地区典型湿地孢粉组合与古环境研究. 硕士学位论文, 石家庄经济学院, 石家庄.]
- Li YM, Yang ZJ, Zhang Y, Yang QH, Liu LJ, Bi ZW, Wang CM, Kong ZC, Zhao L (2014). Surface pollen assemblages and vegetation relationships in the Bortala River Basin of Xinjiang, China. *Scientia Geographica Sinica*, 34, 1518-1525. [李玉梅, 杨振京, 张芸, 杨庆华, 刘林敬, 毕志伟, 王成敏, 孔昭宸, 赵龙 (2014). 新疆博尔塔拉河表土孢粉组合与植被关系研究. 地理科学, 34,

- 1518-1525.]
- Li YY, Zhou LP, Cui HT (2008). Human active pollen indicator. *Chinese Science Bulletin*, 53, 991-1002. [李宜垠, 周力平, 崔海亭 (2008). 人类活动的孢粉指示体. 科学通报, 53, 991-1002.]
- Luo CX, Zheng Z, Pan AD, An FZ, Beaudouin C, Huang KY (2007). Distribution of surface soil spore-pollen and its relationship with vegetation in Xinjiang, China. *Arid Land Geography*, 30, 536-543. [罗传秀, 郑卓, 潘安定, 安放舟, Beaudouin C, 黄康有 (2007). 新疆地区表土孢粉分布规律及其与植被关系研究. 干旱区地理, 30, 536-543.]
- Luo C, Zheng Z, Tarasov P, Pan A, Huang KY, Beaudouin C, An F (2009). Characteristics of the modern pollen distribution and their relationship to vegetation in the Xinjiang region, northwestern China. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 153, 282-295.
- Ma QF, Zhu LP, Lu XM, Wang Y, Guo Y, Wang JB, Ju JT, Peng P, Tang LY (2017). Modern pollen assemblages from surface lake sediments and their environmental implications on the southwestern Tibetan Plateau. *Boreas*, 46, 242-253.
- Ni J, Cao XY, Jeltsch F, Herzsuh U (2014). Biome distribution over the last 22000 yr in China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 409, 33-47.
- Northwest Forestry Survey Planning and Design Institute of State Forestry Administration (2010). *Investigation Report on Forest Resources Planning and Design of Fuhai Forest Farm of Xinjiang Altai Mountain State Owned Forest Administration Bureau*. Xian. [国家林业局西北林业调查规划设计院 (2010). 新疆阿尔泰山国有林管理局福海林场森林资源规划设计调查报告. 西安.]
- Sun FF, Zhang WY, Gong JC, Zhang CJ (2010). The palaeoenvironmental reconstruction on pollen proxy in the Qaidam Basin since Late Pliocene. *Geological Review*, 56, 621-628. [孙非非, 张菀漪, 巩俊成, 张成君 (2010). 柴达木盆地上新世晚期以来古气候演变的孢粉环境指标重建. 地质论评, 56, 621-628.]
- Sun XJ, Du NQ, Weng CY, Lin RF, Wei KQ (1994). Paleovegetation and paleoenvironment of Manasi Lake, Xinjiang, N.W. China during the last 14000 Years. *Quaternary Sciences*, 3, 239-248. [孙湘君, 杜乃秋, 翁成郁, 林瑞芬, 卫克勤 (1994). 新疆玛纳斯湖盆周围近14000年以来的古植被古环境. 第四纪研究, 3, 239-248.]
- Wang L, Zhang Y, Kong ZC, Yang ZJ, Yan S, Li YC (2017). Preliminary study on pollen distribution in the surface soil of the Turpan region in the southern slope of Tianshan Mountains, Xinjiang. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 41, 779-786. [王力, 张芸, 孔昭宸, 杨振京, 阎顺, 李月丛 (2017). 新疆天山南坡吐鲁番地区表土花粉的初步研究. 植物生态学报, 41, 779-786.]
- Wei HC, Zheng Z, Ma HZ, Pan AD, Huang KY, Luo CX, Zheng YW, Wang ZY (2009). Pollen distribution patterns of surface soil sample in Qinghai of China and their relationship with vegetation. *Arid Land Geography*, 32, 932-940. [魏海成, 郑卓, 马海州, 潘安定, 黄康有, 罗传秀, 郑艳伟, 王志英 (2009). 青海表土花粉分布规律及其与植被的关系. 干旱区地理, 32, 932-940.]
- Wu HX (2018). *Pollen Assemblages of the Surface Soil and their Relationships with the Modern Vegetation and Climate in Northern Xinjiang*. Master degree dissertation, University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences), Beijing. [吴慧贤 (2018). 北疆表土花粉组合及其与植被和气候的关系. 硕士学位论文, 中国科学院大学(中国科学院地球环境研究所), 北京.]
- Wu J (2006). *A Preliminary Study on the Relationship Between Surface Pollen Assemblage and Modern Vegetation on Xinglong Mountain*. Master degree dissertation, Lanzhou University, Lanzhou. [伍婧 (2006). 兴隆山地区表土花粉与植被关系的研究. 硕士学位论文, 兰州大学, 兰州.]
- Wu JG, Lü JJ, Zhou QF (2010). Potential effects of climate change on the distribution of six desert plants in China. *Chinese Bulletin of Botany*, 45, 723-738. [吴建国, 吕佳佳, 周巧富 (2010). 气候变化对6种荒漠植物分布的潜在影响. 植物学报, 45, 723-738.]
- Xu LL, Zhu BY (2017). Hongshanzui border post. *Journal of the Western Mongolian Studies*, 1, 44-51. [徐黎丽, 朱璧莹 (2017). 红山嘴边境口岸志. 西部蒙古论坛, 1, 44-51.]
- Xu Q, Zhang S, Gaillard MJ, Li M, Cao X, Tian F, Li F (2016). Studies of modern pollen assemblages for pollen dispersal-deposition-preservation process understanding and for pollen-based reconstructions of past vegetation, climate, and human impact: a review based on case studies in China. *Quaternary Science Reviews*, 149, 151-166.
- Xu YQ, Yan S, Jia BQ, Yang YL (1996). Numerical relationship between the surface spore-pollen and surrounding vegetation on the southern slope of Tianshan Mountains. *Arid Land Geography*, 19, 24-30. [许英勤, 阎顺, 贾宝全, 杨云良 (1996). 天山南坡表土孢粉分析及其与植被的数量关系. 干旱区地理, 19, 24-30.]
- Yan S, Kong ZC, Yang ZJ, Zhang Y, Ni J (2004). Seeking relationship between vegetation and *Picea* pollen in surface soils of Xinjiang, northwestern China. *Acta Ecologica Sinica*, 24, 2017-2023. [阎顺, 孔昭宸, 杨振京, 张芸, 倪健 (2004). 新疆表土中云杉花粉与植被的关系. 生态学报, 24, 2017-2023.]
- Yan S, Xu YQ (1989). Spore-pollen association in surface-soil in Altay, Xinjiang. *Arid Zone Research*, (1), 26-33. [阎顺, 许英勤 (1989). 新疆阿勒泰地区表土孢粉组合. 干旱区研究, (1), 26-33.]
- Yang QH, Yang ZJ, Zhang Y, Bi ZW, Liu LJ, Song SY, Hou XH (2019). Relationship between surface sporepollen and

- modern vegetation in Xarxili Nature Reserve of Xinjiang. *Arid Land Geography*, 42, 986-997. [杨庆华, 杨振京, 张芸, 毕志伟, 刘林敬, 宋淑瑶, 侯献华 (2019). 新疆夏尔希里自然保护区表土孢粉与植被的关系. 干旱区地理, 42, 986-997.]
- Yang ZJ, Zhang Y, Ren HB, Yan S, Kong ZC, Ma KP, Ni J (2016). Altitudinal changes of surface pollen and vegetation on the north slope of the Middle Tianshan Mountains, China. *Journal of Arid Land*, 8, 799-810.
- Yuan GY (1986). The vertical zonation of the western Altay MTS. *Acta Geographica Sinica*, 41, 32-40. [袁国映 (1986). 阿尔泰山西部地区的垂直自然带. 地理学报, 41, 32-40.]
- Zhang Y, Kong ZC, Yan S, Yang ZJ, Ni J (2009). "Medieval Warm Period" on the northern slope of central Tianshan Mountains, Xinjiang, NW China. *Geophysical Research Letters*, 36, L11702. DOI: 10.1029/2009GL037375.
- Zhang Y, Kong ZC, Yan S, Yang ZJ, Ni J (2006). Fluctuation of *Picea* timber-line and paleo-environment on the northern slope of Tianshan Mountains during the late Holocene. *Chinese Science Bulletin*, 51, 1747-1756.
- Zhang Y, Kong ZC, Zhang QB, Yang ZJ (2015). Holocene climate events inferred from modern and fossil pollen records in Butuo Lake, Eastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Climatic Change*, 133, 223-235.
- Zhang YJ, Duo L, Pang YZ, Felde VA, Birks HH, Birks HJB (2018). Modern pollen assemblages and their relationships to vegetation and climate in the Lhasa Valley, Tibetan Plateau, China. *Quaternary International*, 467, 210-221.
- Zhao KL (2013). *Climatic Changes and Early Agricultural Activities since the Last Deglaciation in Xinjiang, NW China*. Postdoctoral Dissertation, Chinese Academy of Sciences University, Beijing. [赵克良 (2013). 新疆地区末次冰消期以来气候变化及早期农业活动. 博士后出站报告, 中国科学院大学, 北京.]
- Zhao KL, Li XQ (2013). Modern pollen and vegetation relationships in the Yili Basin, Xinjiang, NW China. *Chinese Science Bulletin*, 58, 4133-4142. [赵克良, 李小强 (2013). 新疆伊犁盆地表土花粉与植被关系. 科学通报, 58, 4133-4142.]
- Zheng JY, Bian JJ, Ge QS, Hao ZX, Yin YH, Liao YM (2013). The climate regionalization in China for 1981-2010. *Chinese Science Bulletin*, 58, 3088-3099. [郑景云, 卞娟娟, 葛全胜, 郝志新, 尹云鹤, 廖要明 (2013). 1981-2010年中国气候区划. 科学通报, 58, 3088-3099.]
- Zheng Z, Wei JH, Huang KY, Xu QH, Lu HY, Tarasov P, Luo CX, Beaudouin C, Deng Y, Pan AD, Zheng YW, Luo YL, Nakagawa T, Li CH, Yang SX, Peng HH, Cheddadi R (2014). East Asian pollen database: modern pollen distribution and its quantitative relationship with vegetation and climate. *Journal of Biogeography*, 41, 1819-1832.
- Zhong W, Shu Q, Xiong HG (2001). Pollen assemblages of Niya section in southern Xinjiang and paleoenvironmental evolution. *Geographical Research*, 20, 91-96. [钟巍, 舒强, 熊黑钢 (2001). 塔里木盆地南缘尼雅剖面的孢粉组合与环境. 地理研究, 20, 91-96.]
- Zhuang XC, Zhang LH, Liu DF (2009). Analysis on characteristic of difference between ground and air temperature at Altai Region in Xinjiang. *Meteorological and Environmental Sciences*, 32(4), 13-19. [庄晓翠, 张林梅, 刘大锋 (2009). 新疆阿勒泰地区地气温差变化特征分析. 气象与环境科学, 32(4), 13-19.]

责任编辑: 倪健 编辑: 赵航