

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0088

NIU Diyuan, LI Jianyong, WANG Ninglian, et al. Relationship between pollen assemblages in surface soil and modern vegetation and climate in the western Tianshan Mountains, Xinjiang [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(3): 1070-1082. [牛地园, 李建勇, 王宁练, 等. 新疆天山西部表土花粉组合与现代植被和气候的关系[J]. 冰川冻土, 2022, 44(3): 1070-1082.]

新疆天山西部表土花粉组合与现代植被和气候的关系

牛地园, 李建勇, 王宁练, 杜建峰, 陈小俊

(西北大学 城市与环境学院 陕西省地表系统与可持续发展重点实验室, 陕西 西安 710127)

摘要: 基于新疆天山西部46个表土样品花粉谱特征,结合植物群落样方调查结果,分析了该区域表土花粉与现代气候和植被分布的对应关系。结果表明:天山西部表土花粉组合与现代植被分布相一致,聚类分析结果将研究区分为3个植被带,按海拔由高到低分别对应山地草原带、荒漠植被带和典型荒漠带,总体上该地区表土花粉组合大致能反映当地植被的主要特征,但某些花粉类型百分比与相关植物盖度存在明显差异;乔木植物中云杉属和松属花粉,灌木植物中麻黄属花粉,以及草本植物中藜科和蒿属花粉因受到自然风力、水流、自身花粉产量的影响,表现出明显的超代表性;灌木植物中的蔷薇科花粉和草本植物中的禾本科花粉在以其自身为优势种的现代植物群落中呈现低代表性。蒿属与藜科花粉百分含量的比值(A/C)可以将荒漠带、山地草原带区分开,很好地反映干湿程度。但在利用这个指标进行气候环境重建时,需要结合花粉组合特征以及植被组成和其他因素的影响进行判别。海拔、年平均降水量以及年平均气温共同影响该地区表土花粉组合分布。

关键词: 花粉组合; 植被带; 聚类分析; 冗余分析; A/C比值

中图分类号: Q944.571 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2022)03-1070-13

0 引言

花粉分析是第四纪以来孢粉学研究的重要课题之一,人们依据第四纪沉积物中的孢粉分布特征去解译沉积时期的植被概况,从而恢复古气候和古环境^[1-3]。本着“将今论古”的原则,现代表土花粉的研究是其中最为基础的任务^[4]。花粉与植被的非线性关系近年来受到植物生态学者和孢粉学者的广泛关注^[5],精准的利用化石孢粉反演区域古植被、重建古气候的必要条件之一就是掌握表土花粉组合特征及其与现代植被和气候的关系。对于这三者之间的关系研究涉及多种统计学方法^[6-7],如主成分分析、冗余分析等,不仅可以重建古气候,还有助于评估对未来气候的模拟与预测^[8]。近年来,部分学者对表土花粉研究的深度和广度有了进一步提

升^[9-11],不仅采样点覆盖面广,而且包含多种地理单元涉及森林、草原、山地等。

位于亚洲内陆干旱区的新疆,生态环境脆弱,对全球和区域气候变化响应敏感,是不同时空尺度环境演变研究的热点区域之一,吸引了诸多学者开展表土花粉的相关研究^[12-13]。研究该地区现代花粉分布特征有助于理解该区植被与气候、水文的关系,从而为该区过去气候/水文变化的相关研究奠定理论基础^[14-15]。前人在新疆地区开展了许多表土花粉研究,并取得丰硕成果^[16-23]。目前,已对新疆地区表土花粉空间分布规律、不同植被带花粉组合特征、表土花粉-植被-气候关系等进行了定性和定量分析^[20-27]。概括来讲,新疆地区表土花粉研究以大尺度为主,受纬度、海拔、地形等因素影响,不同植被带对应不同的花粉组合,大部分表土花粉含量及

收稿日期: 2021-08-21; 修订日期: 2022-05-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(41801090)资助

作者简介: 牛地园, 硕士研究生, 主要从事第四纪地质与环境研究. E-mail: Ndy13636882411@163.com

通信作者: 李建勇, 教授, 主要从事气候变化与植被生态恢复、人类活动与环境相互作用研究. E-mail: lijy@nwu.edu.cn

空间分布与现代植被相一致,但个别属种有待进一步探讨研究^[16,28-29]。山地森林带、高山草甸带及盐生草甸带均有其特有的花粉组合形式,荒漠带、草原带的某些花粉类型百分比与对应的植被类型盖度并非线性关系^[29-30]。这些成果为今后新疆地区开展表土与地层孢粉研究奠定了稳固的基础,但这些研究空间分布不平衡,样点分布不连续,多数集中在天山、阿尔泰山等区域,诸如赛里木湖流域、石河子南山地区、乌鲁木齐河源区、吐鲁番地区、南天山地区等^[6-7,31-32],然而现代花粉数据库中新疆西部地区仍存在部分空白区域,导致该区域部分地层花粉数据的解译受到了限制。

蒿属(*Artemisia*)与藜科(*Chenopodiaceae*)花粉含量的比值(A/C)被认为是反映有效湿度的替代指标,该参数成为近年来干旱、半干旱区表土花粉研究的热点之一,其应用的前提是两者百分比之和(蒿属+藜科) $>50\%$ ^[27,33]。我国学者运用干旱、半干旱区的孢粉数据对A/C及其环境意义进行了深入探讨,但研究结论还存在争议^[34-35]。例如,魏海成等^[36]在研究青海东北部表土花粉分布规律时,认为当蒿属与藜科之和 $>20\%$ 时,A/C比值的中位数值就能较好地地区分草原与荒漠地带;Weng等^[37]、钟巍等^[38]在

研究干旱区塔里木盆地南缘以及西南缘昆仑山山地表土花粉时,认为A/C比值可以作为判断湿度高低的可靠指标之一,并且蒿属与藜科花粉的含量密切影响着湿度,但是A/C比值能否作为该区域的干湿指数需要更深入的探究。综上所述,地处不同气候系统过渡区的新疆,花粉传播影响因素复杂,对A/C指示的生态意义还需在更多典型区域开展更多高分辨率的系统性的专题研究。本研究选取新疆天山西部地区,探讨和揭示该区域表土花粉组合特征与现代植被类型关系,为该区域今后的研究提供系统性的参考资料,并进一步丰富中国现代花粉数据库。

1 研究区概况

研究区位于新疆西部,大致处于 $44^{\circ}02' \sim 45^{\circ}23' \text{ N}$ 、 $79^{\circ}53' \sim 83^{\circ}53' \text{ E}$,西起博乐市,东到石河子市,北达塔城市,南至伊宁市(图1)。该研究区域年平均气温 $4 \sim 9^{\circ} \text{ C}$,月均温 $20 \sim 25^{\circ} \text{ C}$,属于大陆性温带干旱气候。全年降雨量 $150 \sim 200 \text{ mm}$,雨季主要集中在6—8月^[30]。研究区降雨量空间分布不均匀,降水量随海拔的降低而减少^[39]。根据天山西部地区现代植被分布情况(图2),可将该区域划分为3个植被带:山地草原带以蒿属(*Artemisia*)、蔷薇科

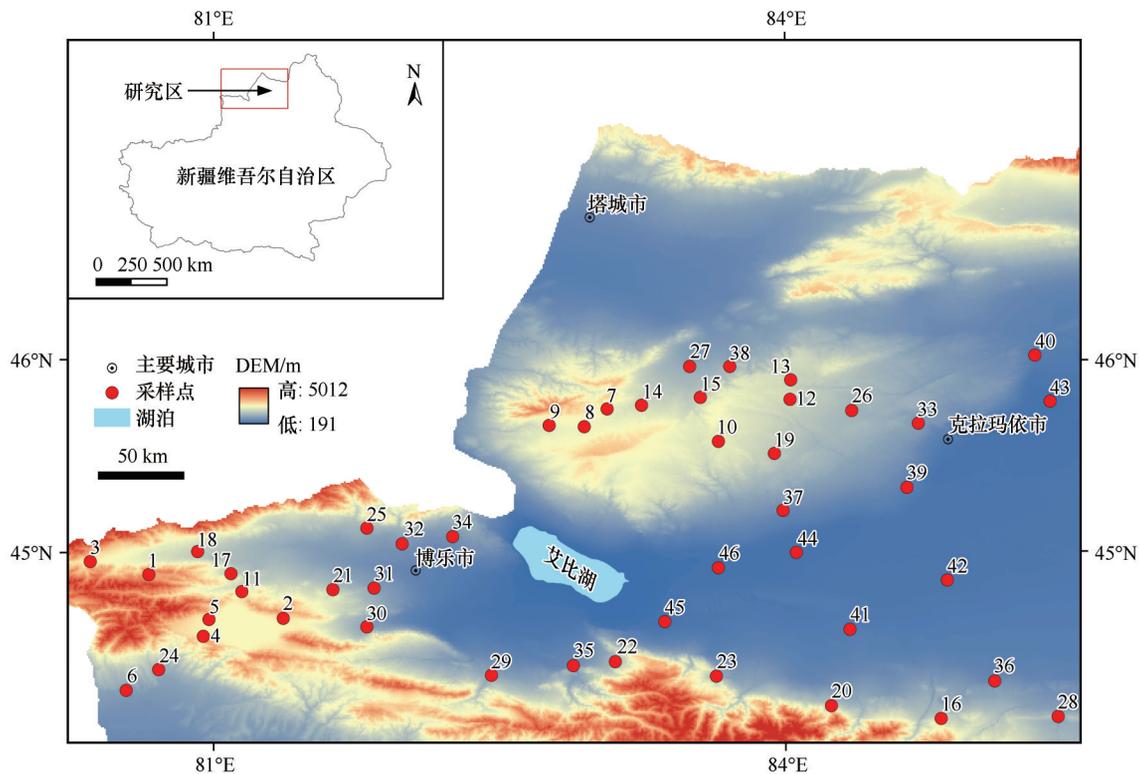
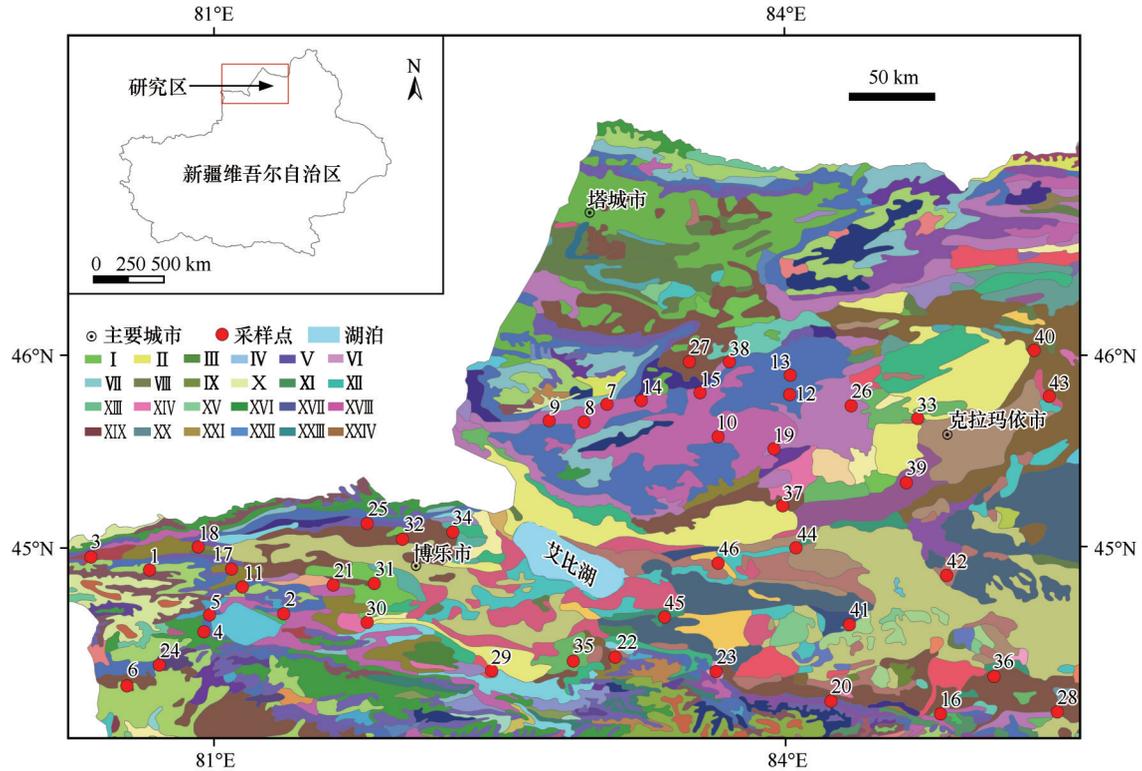


图1 研究区地形图

Fig. 1 Topographic map of the study area



注: I-白羊草、杂类草甸草原; II-冰草草原; III-博乐绢蒿、沟叶羊茅荒漠草原; IV-东方针茅荒漠草原; V-芨芨草、长芒草原; VI-沙生针茅荒漠草原; VII-羊茅草原; VIII-针茅、丛生禾草原; IX-针茅、冷蒿草原; X-含胡杨的芦苇盐生草甸; XI-芦苇盐生草甸; XII-早熟禾草甸; XIII-东方猪毛菜荒漠; XIV-短叶假木贼荒漠; XV-多枝怪柳荒漠; XVI-红砂荒漠; XVII-驼绒藜荒漠; XVIII-小蓬荒漠; XIX-风毛菊、红景天、垂头菊稀疏植被; XX-紫菀木、灌木亚菊、沙生针茅荒漠; XXI-驼绒藜沙漠; XXII-博乐绢蒿砾漠; XXIII-新疆绢蒿荒漠; XXIV-驼绒藜砾漠

图2 研究区采样点及植被分布图(根据文献[40]改绘)

Fig. 2 Sampling points and vegetation distribution in the study area (drawn from Reference [40]) (Note: I-*Bothriochloa ischaemum*, forbs meadow steppe; II-*Agropyron cristatum* steppe; III-*Seriphidium borotalense*, *Festuca rupicula* desert steppe; IV-*Stipa orientalis* desert steppe; V-*Achnatherum splendens*, *Stipa bungeana* steppe; VI-*Stipa glareosa* desert steppe; VII-*Festuca ovina* steppe; VIII-*Stipa capillata*, tussock grass steppe; IX-*Stipa capillata*, *Artemisia frigida* steppe; X-*Phragmites australis* shalophyte meadow with *Populus euphratica*; XI-*Phragmites australis* shalophyte meadow; XII-*Poa annua* meadow; XIII-*Salsola orientalis* desert; XIV-*Anabasis brevifolia* desert; XV-*Tamarix ramosissima* desert; XVI-*Reaumuria songarica* desert; XVII-*Ceratoides latens* desert; XVIII-*Nanophyton erinaceum* desert; XIX-*Saussurea japonica*, *Rhodiola rosea* and *Cremanthodium reniforme* sparse vegetation; XX-*Asterothamnus alyssoides*, *Ajania fruticulose* and *Stipa glareosa* desert; XXI-*Ceratoides latens* desert; XXII-*Seriphidium borotalense* gravel desert; XXIII-*Seriphidium kaschgaricum* desert; XXIV-*Ceratoides latens* gravel desert)

(Rosaceae)、禾本科(Poaceae)、藜科(Chenopodiaceae)等为主;荒漠植被带以蒿属(*Artemisia*)、禾本科(Poaceae)、藜科(Chenopodiaceae)、豆科(Leguminosae)、麻黄属(*Ephedra*)等为主;典型荒漠带则以藜科(Chenopodiaceae)、禾本科(Poaceae)以及菊科(Asteraceae)等为主。

2 实验方法

2.1 样品采集与分析

2018年新疆西部地区采用常规的梅花布点法采样,选取天然植被区或人为干扰较少的地点,在

样方4个角及中心位置的表层取土,充分混合后为1个样品,主要采集0.5 cm以上的表土。在采样的同时进行植被样方调查,记录样方内的主要物种、植物盖度、丰富度、种类等特征。采用全球定位系统(GPS)进行精确定位,以便较准确地记录地理坐标,样品按照海拔的顺序进行编号(表1)。共采集46个表土花粉样品,分布于3种不同的植被带内,分别采集样品13、24、9个,并完成植被调查。

2.2 花粉分析

在对表土样品进行分析时,称取20~120 g不等的质量。在实验过程中采用常规的酸、碱处理,

表1 表土样品采样点信息

Table 1 Sampling point information of surface soil samples

样点编号	纬度/N	经度/E	海拔/m	群落类型	主要植物类型
1	44.8846°	80.6740°	2674	小针茅	小针茅、莎草科、唐松草、菊科
2	44.6568°	81.3786°	2236	禾本科+地衣+莎草	禾本科、地衣、藜科、景天科
3	44.9519°	80.3669°	2121	戈壁针茅+冷蒿	锦鸡儿、戈壁针茅、莎草、委陵菜
4	44.5631°	80.9593°	2098	禾本科+虎耳草	禾本科、虎耳草、廖科、豆科、茜草科、唐松草、麻黄
5	44.6505°	80.9894°	2063	针茅	针茅、龙胆科、老鹳草、蓝花棘豆、蒿
6	44.2807°	80.5546°	1892	骆驼刺+针茅	戈壁针茅、猪毛菜、骆驼刺、冷蒿、藜科、瓦松、菊科
7	45.7483°	83.0766°	1862	蒿属+委陵菜	委陵菜、蒿属、针茅、锦鸡儿、莎草科、菊科
8	45.6560°	82.9567°	1855	禾本科+委陵菜	禾本科、委陵菜、地衣
9	45.6625°	82.7733°	1830	针茅+蒿属+委陵菜	针茅、委陵菜、蒿属、藜科、豆科
10	45.5800°	83.6600°	1762	禾本科+菊科	禾本科、菊科、玄参科、委陵菜、蒿、锦鸡儿、麻黄
11	44.7955°	81.1618°	1659	禾本科+蒿属	大籽蒿、禾本科、锦鸡儿、蒿、白刺
12	45.7992°	84.0358°	1580	蒿+委陵菜+麻黄+针茅	针茅、莎草、委陵菜、蒿、麻黄、报春花
13	45.9001°	84.0420°	1580	针茅+蒿+委陵菜+麻黄	锦鸡儿、戈壁针茅、莎草、委陵菜、蒿属
14	45.7682°	83.2573°	1577	委陵菜+禾本科	委陵菜、禾本科、狗娃花、莎草
15	45.8086°	83.5661°	1440	禾本科+委陵菜+蒿属+锦鸡儿	禾本科、委陵菜、地衣、蒿属
16	44.1346°	84.8291°	1438	锦鸡儿+灌木旋花+禾本科	锦鸡儿、蔷薇科、灌木旋花、禾本科、蒿属、豆科、荨麻
17	44.8901°	81.1046°	1437	蒿+禾本科+锦鸡儿	禾本科、蒿、锦鸡儿、麻黄、苜蓿科
18	45.0045°	80.9305°	1425	禾本科+狗娃花+灌木旋花	禾本科、狗娃花、刺柏、锦鸡儿、旋花
19	45.5167°	83.9537°	1338	锦鸡儿+禾本科+蒿属	禾本科、蒿属、狗娃花、委陵菜、藜科、瓦松
20	44.2011°	84.2535°	1333	莎草	莎草、荨麻、蒿属、禾本科、骆驼蓬
21	44.8057°	81.6385°	1300	锦鸡儿+小针茅	锦鸡儿、针茅、藜科、菊科、十字花科、唇形科
22	44.4300°	83.1200°	1208	藜科+蒿属	藜科、禾本科、地衣、蒿属
23	44.3547°	83.6506°	1150	蒿属+骆驼刺+猪毛菜	骆驼刺、针茅、蒿、藜科、禾本科
24	44.3888°	80.7251°	1096	苦豆子+狐尾草+菊科	禾本科、苦豆子、菊科、莎草科
25	45.1275°	81.8167°	1066	小针茅	藜科、旋花科、莎草科、小针茅、蒿、委陵菜
26	45.7404°	84.3627°	1020	沙葱+麻黄+禾本科+锦鸡儿	禾本科、沙葱、麻黄、狗娃花、小飞蓬、蒿
27	45.9732°	83.5106°	944	藜科	禾本科、狗娃花、刺柏、锦鸡儿、卷柏、景天科
28	44.1450°	85.4423°	915	小针茅+蒿属+藜科	灌木藜、蒿、小针茅、藜科、十字花科
29	44.3609°	82.4715°	875	锦鸡儿+梭梭	锦鸡儿、梭梭、西伯利亚刺柏、猪毛菜、麻黄、藜科、菊科
30	44.6117°	81.8171°	874	锦鸡儿+麻黄	锦鸡儿、禾本科、麻黄、葱属、刺柏
31	44.8145°	81.8546°	870	禾本科+藜科+骆驼刺	锦鸡儿、骆驼刺、藜科、禾本科、骆驼蓬、麻黄刺柏
32	45.0447°	82.0018°	763	刺藜+白刺+盐爪爪	刺藜、盐爪爪、猪毛菜、禾本科、十字花科、菊科
33	45.6744°	84.7089°	698	麻黄+灌木藜+苦苣菜	麻黄、灌木藜、苦苣菜、沙葱、锦鸡儿
34	45.0830°	82.2669°	693	白刺+刺藜	猪毛菜、小飞蓬、白刺、刺藜
35	44.4100°	82.9000°	590	藜科+小飞蓬	藜科、禾本科、灌木旋花
36	44.3300°	85.1100°	581	梭梭+藜科	梭梭、藜科、麻黄、骆驼刺、针茅、蒿、藜科、禾本科
37	45.2192°	83.9995°	549	蒿+禾本科	梭梭、禾本科、蒿、小飞蓬、藜科、茜草科
38	45.9700°	83.7200°	491	梭梭	梭梭、禾本科、狗娃花、莎草
39	45.3400°	84.6503°	400	藜科	禾本科、藜科、禾本科、蒿
40	46.0306°	85.3209°	356	梭梭	禾本科、梭梭、豆科、茜草科、唐松草、麻黄
41	44.6021°	84.3522°	306	红砂+珍珠+白刺	红砂、珍珠、白刺、补血草、藜科
42	44.8567°	84.8606°	247	梭梭+蒿+藜科	禾本科、菊科、蒿、牦牛儿苗科、藜科、骆驼蓬
43	45.7900°	85.4003°	214	怪柳+藜科	怪柳、藜科、禾本科、苦豆子、菊科、莎草科、麻黄
44	45.0020°	84.0701°	206	梭梭+怪柳	禾本科、梭梭、怪柳、藜科、骆驼刺
45	44.6404°	83.3800°	190	胡杨+梭梭+怪柳	梭梭、白刺、胡杨、猪毛菜、藜科
46	44.9210°	83.6602°	188	藜科+骆驼刺	骆驼刺、蒿属、狗娃花、委陵菜、藜科、怪柳

过筛之后采用重液浮选法提取花粉^[41]。使用奥林巴斯光学显微镜对花粉进行鉴定和统计。为了保证花粉统计的可靠性,单个样品的统计数目必须大于400粒。计算出各属种花粉的百分含量,运用Tilia软件进行绘制花粉图谱并进行Coniss聚类分析。

2.3 排序分析

选取花粉组合中常见的花粉类型,包括松属(*Pinus*)、麻黄属(*Ephedra*)、蔷薇科(Rosaceae)、禾本科(Poaceae)、藜科(Chenopodiaceae)、菊科(Asteraceae)、蒿属(*Artemisia*)、毛茛科(Ranunculaceae)、莎草科(Cyperaceae)等9个类型的百分含量作为花粉数据矩阵,利用Canoco 5.0软件进行DCA分析。根据对DCA中梯度长度的分析来判别选择典型对应分析(CCA)或者冗余分析(RDA),进而探讨

影响花粉空间分布特征的环境要素^[42]。

采样点的气象信息来源于全球气候数据库(<http://www.worldclim.com/>),然后运用ArcGIS 10.2软件(自然领域插值法,area-stealing)获得每个样点的1970—2018年平均气温和降水量数据。

3 结果与分析

3.1 表土花粉组合特征与聚类分析

本研究区46个样品中共鉴定花粉23 552粒,平均每个样品至少统计400粒,共鉴定出35个类型。主要的乔木花粉类型有松属、云杉属等;灌木花粉主要有麻黄属、白刺属、蔷薇科等;草本花粉主要有蒿属、藜科、菊科、莎草科、毛茛科等;根据聚类分析结果,研究区表土花粉谱按照海拔从上至下可分为3个花粉组合带(图3)。

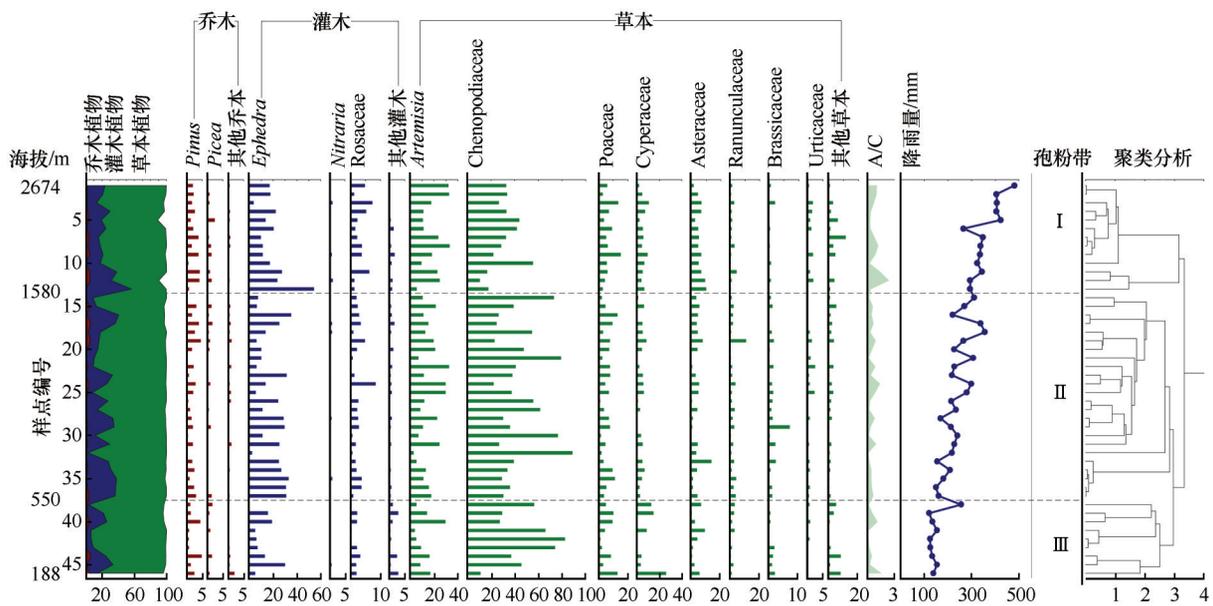


图3 新疆天山西部表土花粉组合及聚类分析结果

Fig. 3 Pollen assemblage of surface soil and cluster analysis results in the western Tianshan Mountains, Xinjiang

带 I : 山地草原带,本带包括13个样品,海拔为1 580~2 674 m。花粉组合以草本花粉类型为主,其平均含量为77.27%。草本植物花粉以藜科(34.95%)为主,其次是蒿属(19.71%)和禾本科(7.39%)为主;灌木植物花粉以麻黄属(14.12%)和蔷薇科(3.13%)为主;木本植物的花粉含量较少,为2.63%;蒿属/藜科(A/C)比值在本带的平均值为0.79。

带 II : 荒漠植被带,本带包括24个样品,海拔为549~1 577 m。花粉组合依然以草本植物花粉为主,其平均含量为73.42%;灌木植物花粉含量较上带有所增加,平均为23.01%,以麻黄属为主

(20.27%);草本植物花粉中以藜科为主(40.44%),其次是蒿属(15.45%)和禾本科(5.59%);乔木的花粉含量与上带相比变化不大,平均值为2.30%。该带中蒿属/藜科(A/C)比值的平均值为0.55。

带 III : 典型荒漠带,本带包括9个样品,海拔为188~491 m。花粉组合中,草本花粉占82.79%,以藜科(47.65%)为主,其次是蒿属(11.71%)和禾本科(6.30%);灌木花粉百分比有所降低,平均为(13.58%),主要以麻黄属(10.84%)为主;乔木花粉含量与上带相比变化较小,平均为2.50%;该带中蒿属/藜科(A/C)比值在本带的平均值为0.44。

3.2 排序分析

DCA 分析结果显示,第一轴的梯度长度值为 0.80,故选择基于线性模型的冗余分析(RDA)方法

进一步探讨表土花粉数据与主要环境因子海拔 (ALT)、年均降水量(MAP)和年平均气温(MAT)之间的关系(图4)。

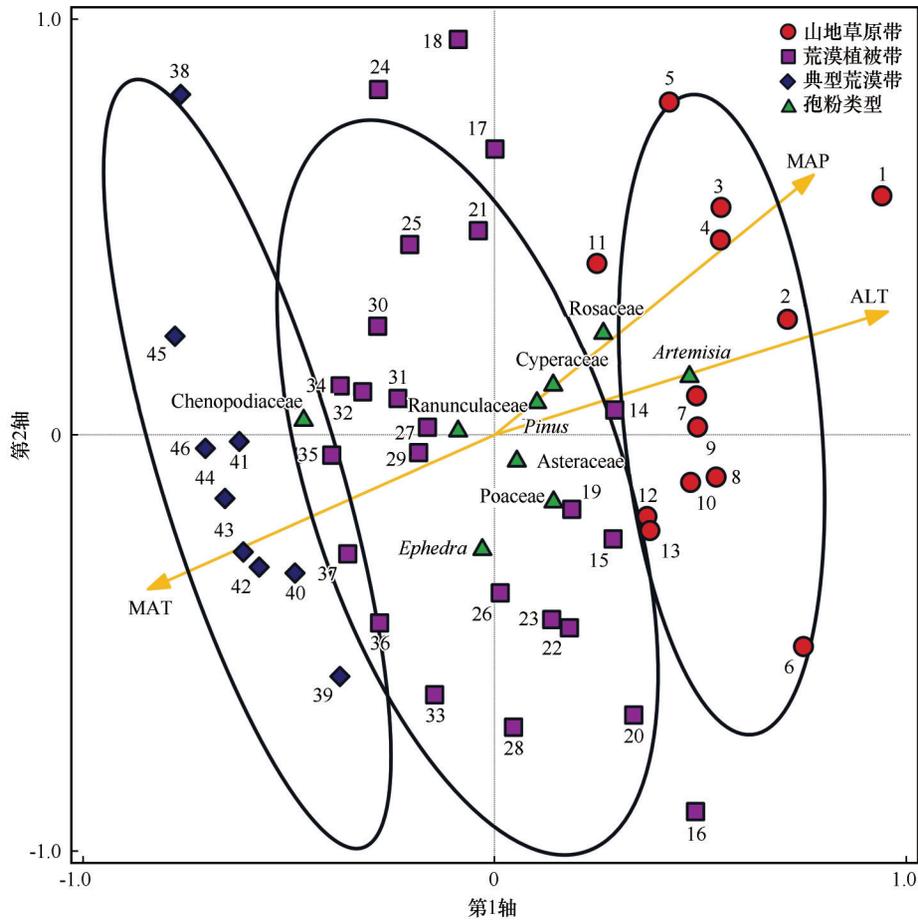


图4 新疆天山西部主要花粉与样点的RDA分析

Fig. 4 RDA analysis of main pollen and sampling sites in the western Tianshan Mountains, Xinjiang

RDA 分析结果(表 2)显示:排序轴 1 的特征值为 0.1686,共解释了 90.42% 的物种-环境累计方差,物种与环境相关性为 0.4885;排序轴 2 的特征值为 0.0158,共解释了 98.90% 的物种-环境累计方差,物种与环境相关性为 0.3261。从表 3 可知,RDA 排序轴 1 与海拔、年均降水量呈正相关,与年均气温呈负相关,相关系数绝对值大小依次为海拔>年平均

表 2 新疆天山西部表土样品与环境因子 RDA 分析结果

Table 2 RDA analysis results of surface soil samples and environmental factors in the western Tianshan Mountains, Xinjiang

项目	排序轴 1	排序轴 2	排序轴 3	排序轴 4
特征值	0.1686	0.0158	0.0021	0.5482
物种与环境的相关性	0.4885	0.3261	0.2087	0
物种累计方差/%	16.86	18.44	18.65	73.65
物种-环境累计方差/%	90.42	98.90	100.00	0

表 3 新疆西部表土样品 RDA 排序轴与环境因子的相关分析

Table 3 Correlation analysis between RDA ordination axis of surface soil samples and environmental factors in the western Tianshan Mountains, Xinjiang

环境因子	排序轴 1	排序轴 2	排序轴 3	排序轴 4
海拔(ALT)	0.4665*	0.0967	-0.0040	0
年平均降水量(MAP)	0.3788*	0.2038	-0.0190	0
年平均气温(MAT)	-0.4111*	-0.1210	0.0820	0

注: *表示在 0.05 水平显著。

气温>年平均降水量。此外,RDA 排序轴得分与环境因子的显著性分析来看,海拔、年平均气温和年平均降水量共同影响着新疆天山北部地区的表土花粉分布。

从 RDA 分析排序图可以看出,年平均降水量 (MAP)、年平均气温(MAT)、海拔(ALT)均与排序

轴 1 相关性很高, 39~46 号表土孢粉样品主要受海拔的影响较大, 该部分样品主要来自于典型荒漠带, 随海拔降低温度上升。其中, 2~4、7~9、11 号样品同时受海拔和降水量两者的影响, 这些孢粉样品点主要采自山地草原带。从图 4 中还可看出, 莎草科花粉、蒿属花粉和蔷薇科花粉受降水量及海拔影响较大, 而这些植物孢粉种类与温度成负相关; 麻黄属花粉和藜科花粉受温度影响最为明显。

4 讨论

4.1 表土花粉组成及其变化

带 I 为山地草原带, 根据 13 个采样点的植被样方资料表明, 现代植被总盖度在 60% 以上。禾本科花粉含量为 7.39%, 但其对应的植物平均盖度达 30%; 蔷薇科花粉含量仅为 3.13%, 但蔷薇科植物如委陵菜 (*Potentilla chinensis*)、绣线菊 (*Spiraea salicifolia*) 等的盖度却处于 5%~10% 之间; 可见, 禾本科、蔷薇科花粉的代表性低, 较好地响应了前人的研究成果^[26,36]。莎草科花粉含量为 5.34%, 莎草科植被盖度为 1.0%~5.0%, 其代表性适中; 蒿属盖度为 5%~15% 左右, 对应的蒿属花粉含量平均 19.71%, 植被调查样方中绝大多数蒿属花粉百分比 >30%, 极个别样点含量较小, 降低了平均值, 反映出蒿属花粉具有超代表性^[34]。虽然在样方调查中样点均有藜科植物出现, 诸如梭梭 (*Haloxylon ammodendron*)、猪毛菜 (*Salsola collina*)、盐爪爪 (*Kalidium foliatum*)、驼绒藜 (*Ceratoides latens*) 等类型, 但是其盖度均值 <20%, 而花粉组合中藜科花粉的含量均值为 34.95%, 表明藜科花粉具有超代表性^[20]。

带 II 为荒漠植被带, 现代植被总盖度在 50% 以上。禾本科花粉含量 (平均 5.59%) 明显低于样方中禾本科植物 [如针茅 (*S. capillata*)、芨芨草 (*Achnatherum splendens*) 等] 的盖度 (20%), 表明禾本科花粉具有低代表性^[26]。带 II 中所含的松属花粉虽然较其他带含量多, 但在样品中的平均含量仅为 1.76%, 可能是外源花粉^[24]。此外, 在植被样方调查中, 出现较少的麻黄属植物 [膜果麻黄 (*Ephedra przewalskii*) 等], 其盖度均值 <10%, 但却出现较高的麻黄属花粉百分比 (20.27%), 最高的达 54.20%, 表明该花粉类型具有超代表性^[15]。本带中出现较高频率的榛属 (*Corylus*), 其含量较低 (<3%), 但是野外调查中未见到对应的植物类型, 推测此类型花粉为外源花粉。

带 III 为典型荒漠带, 现代植被总盖度为 20%~50%。该带空气湿度低, 植物种类少, 覆盖度低, 主要类型包括蒿属、藜科和菊科植物。表土花粉谱中藜科、蒿属花粉含量高, 优势显著; 在乔、灌木花粉类型中, 仅麻黄属含量较高, 其余科、属以荒漠植被花粉类型为主, 且含量低, 变幅小。典型荒漠带花粉谱以藜科+蒿属为主的组合方式, 其含量变化与现代植被分布状况基本一致。该带中主要花粉类型的代表性特征与带 II 较为相似, 在这里不做进一步的讨论。

4.2 表土孢粉组合与现代植被的关系

4.2.1 乔木花粉与植被

带 I、带 II 和带 III 中云杉与松属花粉含量均值分别为 1.96% 和 0.51%、1.78% 和 0.31% 以及 1.76% 和 0.45%。野外植被调查结果表明, 带 I 主要以禾本群落以及蒿草群落等为主, 带 II 主要以委陵菜、锦鸡儿 (*Caragana sinica*)、藜科以及麻黄群落为主, 带 III 以针茅、骆驼刺 (*Alhagi sparsifolia*) 群落为主。带 I 仅有极少数榆树 (*Ulmus*) 和胡杨生长, 其余均未发现有乔木植物生长。尽管采样点距林地较远, 有的甚至上千米, 但绝大多数样品中都有云杉以及松属花粉的分布。

前人对新疆天山、赛里木湖、伊犁盆地等地区的表土花粉分析结果显示, 虽然该地区云杉属和松属种类较少、分布范围局限, 但二者的花粉产量较高且具备远距离传播的能力, 常呈现出明显的超代表性^[7,23,43-44]。本研究也证实了这一点。此外, 也有研究发现该属种植物花粉含量与林地的距离、海拔等有关, 而且当云杉属花粉含量小于 1%~5% 时, 不能说明当地和附近区域有云杉林的存在, 而是来自远距离传播的花粉^[45]; 只有云杉属花粉的含量大于 15%, 才能表明数 10 m 范围内有云杉生长^[46]。赵克良等^[23]关于新疆伊犁盆地的表土花粉研究同样表明, 在距离云杉林 10 km 以上的荒漠草原、蒿属荒漠和藜科荒漠中, 云杉属花粉含量通常在 1% 以下。该研究结果与本文中带 II 荒漠植被带以及带 III 典型荒漠带中的云杉属花粉含量较为接近, 表明样点周围无云杉林存在, 并且与植被样方调查结果相一致, 推断云杉属花粉可能是由远距离传播而来。这可能与研究区域多西北风有关, 且风力强劲, 大风易于携带花粉往山坡低处沉积^[39]; 此外, 研究区域内最大河流是博尔塔拉河, 该河流由夏尔希里河和阿门琴天兰河以及主要河流向南汇入保尔德河, 继

而向南汇入,形成明显的河流洪水特点,且以暴雨型洪水为主^[47],这些河流都有可能把沿途河谷区的云杉花粉携带到此处沉积^[48]。相关研究表明,松属花粉产量很高,其花粉形态具有气囊,可以随风搬运到较远的地方,因此当花粉组合中松属含量低于25%~30%时,该区域可能处于无松林带^[49]。本研究区的样品中,松属花粉含量都很低,最高不超过5%,与研究区无松林发育的植被调查结果相一致,也证实了松属花粉具有超代表性的普遍观点,推断表土花粉组合中的松属花粉类型均为外源性^[44]。王志英^[1]、伍婧^[50]在研究柴达木盆地以及兴隆山表土花粉时,也得出类似结论。

4.2.2 灌木花粉与植被

本研究发现50%的样方中出现了麻黄属植物类群,大部分出现在植被带Ⅱ和带Ⅲ中。然而,麻黄属花粉在46个表土花粉样品中全部出现,在带Ⅱ荒漠植被带中含量最高,其平均值为20.27%,最高达到了54.20%。干旱地区的麻黄属花粉散布能力很强,通常呈超代表性,本研究响应了新疆其他地区的研究成果^[15,35]。此外,在有无麻黄生长的样地中含量虽有差异,但仍然很高(例如,在无麻黄生长样地和有麻黄生长样地中麻黄属花粉平均含量分别为17.04%和39.43%)。部分研究发现麻黄属花粉丰度与湿度密切相关^[23],即认为湿度与丰度成反比,甚至在土壤含水量较高地区麻黄属消失。与以往研究不同的是,本研究发现在新疆很多地区(天山南部和西部地区),麻黄属花粉在各植被带中都有一定分布,推测造成这种分布的原因可能是出现了花粉爬坡现象,从而影响了麻黄属花粉的分布。这与之前天山山区的研究是一致的^[6,11],都认为气流严重影响了花粉的传播。研究区域东北侧准噶尔盆地西缘有阿拉山口、老风口、布尔津等风口,来自于西面方向气流有利于进入,风力强劲,并遇山地抬升致雨^[51]。据调查,四个物种[中麻黄(*E. intermedia*),膜果麻黄(*E. przewlaskii*),双穗麻黄(*E. distachys*),草麻黄(*E. sinica*)]大多生长在湖岸或温和气候下阳光直射的沙质土壤中,在中国的(半)干旱地区(如新疆、青海、甘肃、内蒙古)尤其普遍^[52];在阿拉山口一侧局部地段,膜果麻黄群系呈单优势分布,群落盖度一般在10%左右,常在山麓洪积扇上比较发育^[51],这些就为风力传播提供了基质。因此,虽然带Ⅰ未发现麻黄属植物生长,但是位于高海拔的研究样点均有麻黄花粉出现,应该是

风力作用(山谷风)将花粉携带造成,属外来花粉。

蔷薇科花粉在表土样品中出现频率较高,但含量均较低,其在植被带Ⅰ、带Ⅱ、带Ⅲ的平均百分比含量分别为3.13%、2.22%以及1.50%。野外植被调查发现,在蒿属+委陵菜群落中,委陵菜占43.26%,盖度较大,但其花粉百分比比较低。虽然在23个植被样方中都发现了蔷薇科植物,且具有较大盖度,但其花粉百分比均较低,因此蔷薇科花粉类型可能具有低代表性。同样,前人等在研究柴达木盆地、伊犁盆地以及博尔塔拉河等地区表土花粉与植被的关系时,也发现蔷薇科花粉百分比比较低,但其植被盖度较高,明显具有低代表性^[1,23,52]。鉴于此,有必要考虑其他因素对花粉传播的影响。

4.2.3 草本花粉与植被

在3个植被带中主要草本植物花粉类型中,藜科花粉最高达到88.57%,最低含量为10.50%,在3个植被带的平均含量分别为34.95%(带Ⅰ)、40.44%(带Ⅱ)、47.65%(带Ⅲ)。蒿属花粉含量仅次于藜科,其峰值(32.38%)出现于带Ⅰ的山地草原带,在3个带中的平均含量分别为19.71%(带Ⅰ)、15.45%(带Ⅱ)、11.71%(带Ⅲ)。在本次采样的植被带中,荒漠植被带的蒿属与藜科花粉百分比最高,其均值为61.39%,但是在野外植被调查中发现,该带主要以针茅+骆驼刺群落为主的情况不相符,而多数蒿属与藜科植被盖度小于30%,说明蒿属和藜科花粉,在表土花粉中呈现超代表性。原因之一可能是由于研究区域内气流和水流对花粉的传播造成了一定的影响^[15]。据观测,蒿属的花粉粒直径多集中在19~25 μm,沉降速度大约为0.015 m·s⁻¹,极易被风吹起并被长途运输^[52];再者,研究区域内博尔塔拉河自西向东流经温泉县、博乐市、精河县,最后注入艾比湖,艾比湖流域三面环山,近年来由于气候的影响使这里的降水量不断增加,遇到暴雨或者冰雪融化这里也会形成洪水^[53],花粉粒沉降易被河流带走。因此,对该区花粉的解释宜考虑水流搬运和风力传播对花粉组合的影响。此外,研究者还发现这种现象的产生与两者的花粉产量大小及传播方式密切相关^[9-10]。所以在对这种类型花粉进行研究时,不仅要考虑常规的影响因素(气流和水流等),还应考虑植物种属的自身因素,例如相对花粉产量等。禾本科植物在新疆天山西部地区分布广泛,在山地草原带和荒漠植被带中为建群种,在典型荒漠带中为伴生种,表土样品中的禾本科花粉含量分别

为6.54%(带Ⅰ)、6.31%(带Ⅱ)、5.81%(带Ⅲ)。但是,野外植被调查结果显示,三个植被带的禾本科植被盖度均值大于10%。禾本科是北方草原的主要成分之一,即使是禾本科植物为主的草原植被,其花粉组合中禾本科花粉百分比通常比较低,而蒿属花粉可能表现为花粉组合的优势类型,这种现象可能与植物的繁殖方式以及花粉产量有关^[54]。新疆其他地区亦是如此,中天山山间盆地、依连哈比尔尕山、赛里木湖等地区的表土花粉分析结果显示,禾本科花粉含量较低,呈低代表性是一种普遍现象^[7,16,35]。

4.3 蒿藜比变化及其意义

前人关于蒿属/藜科花粉含量比值(A/C)的研究表明,荒漠区A/C比值在0.5以下,荒漠草原区A/C比值在0.5~1.2之间,草原区A/C比值一般大于1^[14]。并且,在某一花粉谱中的A/C比值越低,指示环境越干旱^[15]。当蒿属和藜科在花粉组合中占优势时(百分比之和>50%),二者花粉含量的比值,对于确定植被的性质有指示性意义^[14]。魏海成等^[36]对青海表土的花粉分析显示,A/C比值能很好地反映环境干湿程度;赵克良等^[23]、姚付龙等^[34]分别在新疆伊犁盆地和新疆博格达山进行了表土花粉研究,认为A/C比值可以作为山地垂直方向上气候干湿程度变化的重要指标。郎青等^[16]关于新疆中天山盆地的现代花粉研究表明,A/C比值对于干旱区湿度变化具有区域性指示意义。

本研究区域的植被带Ⅰ和Ⅱ中A/C比值的波动范围为0.5~1.2,带Ⅲ中A/C比值<0.5,其变化趋势与区域植被和气候的整体变化相一致,可作为衡量干湿变化的一个代用指标。相比于其他学者对天山西部的表土花粉研究,本研究区域中山地草原带的A/C比值有所降低。伊犁盆地中^[23]山地草原带A/C平均值大于1.2,高于本研究区域中山地草原带的A/C平均值(0.63);本研究区域中荒漠植被带的A/C平均值(0.55)低于新疆赛里木湖地区^[7]荒漠植被带的A/C比值平均(0.62),但却高于石河子南山地区^[25]荒漠植被带该比值(<0.5)、东部巴里坤湖流域^[55]荒漠植被区A/C比值(0.23);典型荒漠带A/C比值则与前人研究结果较为一致^[15,32],赵克良等^[23]在研究干旱半干旱区域的A/C比值时,认为该比值是荒漠地区的可靠指标之一。山地草原带A/C比值偏低与采样点所在区域蒿属种类有关,博乐绢蒿、伊犁绢蒿(*Seriphidium transiliense*)等是优质牧草,

而采样点所在区域农牧业发达,农牧活动一定程度上减少了植被带中蒿属的数量^[16]。此外,在个别样点中,例如位于植被带Ⅱ的第12和第13号样点,其A/C比值分别为1.36和2.34,这明显不符合荒漠植被带中A/C比值<1.2的情况。A/C比值虽然能够指示干湿变化,但该指标容易在小尺度上受到人类活动的干扰。因此,在评估花粉比率的有效性时,应考虑当地植被组成和其他因素的变化(如花粉生产力、代表性、运输模式、埋藏条件、地形、样品来源以及人类活动等),从而减少误差和误判^[6]。

4.4 天山西部表土花粉与环境因子的关系

由于植物种类的分布规律与区域海拔、年均温度和降水量有着紧密的联系^[18],在研究花粉与植被的相互关系时,通常把以上3个基本指标作为主要的环境变量来进行排序分析^[18,56-57]。从山地草原带到荒漠植被带和典型荒漠带,随着海拔降低,降雨量逐渐减少,反映了海拔和降雨量的梯度变化;从图4来看,气候因子均与第一轴相关性较高,并且海拔的相关系数达到最大,沿着第一轴从左往右,海拔升高、降水量增加;此外,通过显著性分析可知,海拔、降雨以及温度共同影响该地区花粉分布。孢粉种类百分比的变化从另一方面反映出来的是植被覆盖变化,对于干旱半干旱区的植被,温度升高则会降低植被覆盖度,而降水的增加才会使植被的覆盖度升高^[58]。国内外很多关于植被变化对气候响应的研究,很多研究结果表明影响植被变化的驱动因素可以概括为两个方面——自然环境因素和人为因素,其中海拔、温度以及降水又是影响植被覆盖变化的主要因素^[59-60]。

本文研究结果证实了以往的研究结论^[6,18],即降水量与海拔呈正相关性,与温度呈反相关性(图4)。表土花粉数据的RDA分析显示,蔷薇科、蒿属花粉以及莎草科花粉分布与海拔和降水量具有很高的相关性。这些种类植物喜湿生长,一般生长在高海拔较湿润地区,受海拔和降水量影响,这与前人研究结果较为一致^[23],符合该类植物的生理特性。从降水量和年平均气温同海拔的反方向关系可以看出,第39~46号样品主要受海拔的影响较大,随海拔降低而温度上升,与这些样品采自于典型荒漠带有较好的对应关系。第2~4、7~9、11号样品主要受降水量和海拔的影响,这与所采样品的植被带相对应。从图1中还可得知,受降水量及海拔影响较大的植物为禾本科和松属,这些植物的花粉分布

与温度变化呈现反相关性;而麻黄属和藜科可能受温度影响较大,与降水量呈明显的负相关性,说明藜科植物以及麻黄属植物比较适应在温度高和降水量低的环境中生长。前人在北疆地区、阿尔泰山嘴地区同样得出藜科以及麻黄属与降水量呈正相关关系,与温度呈负相关关系^[17,26]。据查阅,本次植被调查中出现的藜科植物如驼绒藜、短叶假木贼是超旱生耐寒垫形小半灌木,适应于高寒的亚洲中部生物气候类型;梭梭为超旱生矮半乔木,要求温暖或高温的气候。此外,典型荒漠带的第39、40号样品与荒漠植被带中的第34~37号样品,在第一轴向排列上呈现出重叠过渡的关系,这一特点与其所处的自然环境和植被特征相吻合,由于该地区特殊的地貌、地形和气候特点,植被较为稀疏,且大多数为耐寒耐旱植物,一定程度上使得带与带之间的过渡界限模糊^[18]。所以,今后在开展表土孢粉数据进行植被与气候定量重建时,需要结合地形因素、植被样方资料以及沉积环境等因素对表土孢粉数据进行校正和筛选。

5 结论

(1)通过对新疆天山西部地区海拔188~2 674 m采集的46个表土花粉样品进行花粉分析,结合植被调查结果,将表土花粉谱划分为3个花粉组合带,分别对应山地荒漠带、荒漠植被带和典型荒漠带。

(2)乔木植物中云杉属和松属花粉,灌木植物中麻黄属花粉及草本植物中藜科和蒿属因受到自然风力、水流、自身花粉产量的影响,表现出明显的超代表性;灌木植物中的蔷薇科花粉和草本植物中的禾本科花粉在以其自身为优势种的现代植物群落中呈现低代表性;

(3)蒿/藜比值(A/C)可以反映一个地区的干湿程度,但在利用这个指标进行气候环境重建时,需要结合花粉组合特征以及地植被组成和其他因素的变化影响进行判别。

(4)表土花粉组合和环境因子的排序分析结果表明,海拔、年平均降水量以及年平均气温共同影响研究区表土花粉分布的主要环境因子,海拔与年平均降水量具正相关性,二者与年平均气温呈负相关性。蒿属、蔷薇科等花粉类型受年平均降水量和海拔影响较大,与二者呈正相关关系,与年平均气温呈负相关关系。此外,藜科受温度影响较大,与年平均气温呈明显的正相关性,与降水量呈明显的

负相关性,说明藜科适宜生长于高温、降水量低的环境中。

参考文献(References):

- [1] Wang Zhiying. Study on the relationship between surface pollen assemblage and vegetation in Qaidam Basin [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2008. [王志英. 柴达木盆地表土花粉与植被关系的研究[D]. 广州: 广州大学, 2008.]
- [2] Ni Jian, Cao Xianyong, Jeltsch F, et al. Biome distribution over the last 22,000 yr in China [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2014, 409: 33-47.
- [3] Zhang Yun, Kong Zhaochen, Zhang Qibin, et al. Holocene climate events inferred from modern and fossil pollen records in Butuo Lake, eastern Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Climatic Change*, 2015, 133(2): 223-235.
- [4] Xu Qinghai, Zhang Shengrui, Gaillard M J, et al. 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 [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2016, 149: 151-166.
- [5] Xu Qinghai, Li Yuecong, Li Yu, et al. The discussion of modern pollen and Quaternary environmental study [J]. *Progress in Natural Science*, 2006, 16(6): 647-656. [许青海, 李月丛, 李育, 等. 现代花粉过程与第四纪环境研究若干问题讨论 [J]. *自然科学进展*, 2006, 16(6): 647-656.]
- [6] Yang Zhenjing, Zhang Yun, Bi Zhiwei, et al. Surface pollen distribution in the southern slope of Tianshan Mountains, Xinjiang [J]. *Arid Land Geography*, 2011, 34(6): 880-889. [杨振京, 张芸, 毕志伟, 等. 新疆天山南坡表土花粉的初步研究 [J]. *干旱区地理*, 2011, 34(6): 880-889.]
- [7] Yao Fulong, Ma Chunmei, Jing Yidan, et al. Relationship between surface pollen assemblage and the vegetation in the Sayram Lake region, northern Xinjiang, China [J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 2018, 35(4): 423-435. [姚付龙, 马春梅, 敬一丹, 等. 新疆赛里木湖流域表土花粉组合与现代植被关系研究 [J]. *微体古生物学报*, 2018, 35(4): 423-435.]
- [8] Cao Xianyong, Herzschuh U, Telford R J, et al. A modern pollen-climate dataset from China and Mongolia: assessing its potential for climate reconstruction [J]. *Review of Palaeobotany & Palynology*, 2014, 211: 87-96.
- [9] Xu Qinghai, Li Yuecong, Yang Xiaolan, et al. Study on surface pollen of major steppe communities in Northern China [J]. *Geographical Research*, 2005, 24(3): 394-402. [许青海, 李月丛, 阳小兰, 等. 北方草原区主要群落类型表土花粉分析 [J]. *地理研究*, 2005, 24(3): 394-402.]
- [10] Li Yuecong, Xu Qinghai, Wang Xueli, et al. Modern pollen assemblages of the forest communities and their relationships with vegetation and climate in Northern China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(9): 945-957. [李月丛, 许青海, 王学丽, 等. 中国北方森林群落现代花粉与植被和气候的关系 [J]. *地理学报*, 2008, 63(9): 945-957.]
- [11] Yao Fulong, Xia Qianqian, Zhang Jing, et al. Pollen in surface soil at the southern slope of western Tianshan, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(7): 2301-2308. [姚付龙, 夏倩倩, 张静, 等. 西天山南坡表土花粉分析 [J]. *应用生态学报*, 2019, 30(7): 2301-2308.]
- [12] Zhao Yan, Xu Qinghai, Huang Xiaozhong, 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 reconstruction[J]. *Review of Palaeobotany & Palynology*, 2009, 156(3): 519-524.
- [13] Liu Xingqi, Herzsuh U, Shen Ji, et al. Holocene environmental and climatic changes inferred from Wulungu Lake in northern Xinjiang, China. *Quaternary Research*, 2008, 70: 412-425.
- [14] Sun Xiangjun, Du Naiqiu, Weng 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. [孙湘君, 杜乃秋, 翁成郁, 等. 新疆玛纳斯湖盆周围近 14000 年以来的古植被古环境[J]. 第四纪研究, 1994, 14(3): 239-248.]
- [15] Luo Chuanxiu, Zheng Zhuo, Pan Anding, et al. Spatial distribution of modern pollen in Xinjiang region [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2008, 28(2): 272-275. [罗传秀, 郑卓, 潘安定, 等. 新疆地区表土孢粉空间分布规律研究[J]. 地理科学, 2008, 28(2): 272-275.]
- [16] Lang Qing, Yao Fulong, Yang Haijun. Surface pollen spectrum in intermountain basin of middle Tianshan, Xinjiang, China [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(8): 2518-2527. [郎青, 姚付龙, 杨海军. 新疆中天山间盆地表土花粉谱特征[J]. 生态学杂志, 2020, 39(8): 2518-2527.]
- [17] Wu Huixian, Xu Hai, Lan Jianghu, et al. Pollen assemblages in surface soil and their relationships with vegetation and climate in northern Xinjiang [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(12): 3499-3507. [吴慧贤, 徐海, 蓝江湖, 等. 北疆表土花粉组合及其与植被和气候的关系[J]. 生态学杂志, 2018, 37(12): 3499-3507.]
- [18] Yang Qinghua, Yang Zhenjing, Zhang Yun, et al. Relationship between surface spore-pollen and modern vegetation in Xarxili Nature Reserve of Xinjiang [J]. *Arid Land Geography*, 2019, 42(5): 986-997. [杨庆华, 杨振京, 张芸, 等. 新疆夏尔希里自然保护区表土孢粉与植被的关系[J]. 干旱区地理, 2019, 42(5): 986-997.]
- [19] Yan Shun. The discussion on the pollen of pine family in surface soil in Xinjiang [J]. *Arid Land Geography*, 1993, 16(3): 1-9. [阎顺. 新疆表土松科花粉分布的探讨[J]. 干旱区地理, 1993, 16(3): 1-9.]
- [20] Xu Yingqin, Yan Shun, Jia Baoquan, et al. Numerical relationship between the surface spore-pollen and surrounding vegetation on the southern slope of Tianshan Mountains [J]. *Arid Land Geography*, 1996, 19(3): 24-30. [许英勤, 阎顺, 贾宝全, 等. 天山南坡表土孢粉分析及其与植被的数量关系[J]. 干旱区地理, 1996, 19(3): 24-30.]
- [21] Luo Chuanxiu, Zheng Zhuo, Tarasov P, et al. Characteristics of the modern pollen distribution and their relationship to vegetation in the Xinjiang region, northwestern China [J]. *Review of Palaeobotany & Palynology*, 2009, 153(3): 282-295.
- [22] Chen Chunzhu, Huang Xiaozhong, Peng Wei, et al. Study of the surface spore-pollen in the Small Yourdusi Basin on the southern slopes of the Tianshan Mountains [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(6): 1526-1534. [陈春珠, 黄小忠, 彭卫, 等. 天山南坡小尤尔都斯盆地表土孢粉初步研究[J]. 冰川冻土, 2012, 34(6): 1526-1534.]
- [23] Zhao Keliang, Li Xiaoqiang. Modern pollen and vegetation relationships in the Yili Basin, Xinjiang, NW China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(30): 3070-3078. [赵克良, 李小明. 新疆伊犁盆地表土花粉与植被关系[J]. 科学通报, 2013, 58(30): 3070-3078.]
- [24] Li Yumei, Yang Zhenjing, Zhang Yun, et al. Surface pollen assemblages and vegetation relationships in the Bortala River Basin of Xinjiang, China [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, 34(12): 1518-1525. [李玉梅, 杨振京, 张芸, 等. 新疆博尔塔拉河表土孢粉组合与植被关系研究[J]. 地理科学, 2014, 34(12): 1518-1525.]
- [25] Zhang Hui, Zhang Yun, Yang Zhenjing, et al. Surface pollen research of Nanshan region, Shihezi City in Xinjiang [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(20): 6478-6487. [张卉, 张芸, 杨振京, 等. 新疆石河子南山地区表土花粉研究[J]. 生态学报, 2013, 33(20): 6478-6487.]
- [26] Li Yuanyuan, Zhang Yun, Kong Zhaochen, et al. Surface spore-pollen and modern vegetation in Hongshanzui area, Altai, Xinjiang, China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2021, 45(2): 174-186. [李媛媛, 张芸, 孔昭宸, 等. 新疆阿尔泰山嘴地区的表土孢粉与现代植被[J]. 植物生态学报, 2021, 45(2): 174-186.]
- [27] Zhao Yan, Liu Hongyan, Li Furong, et al. Application and limitations of the *Artemisia/Chenopodiaceae* pollen ratio in arid and semi-arid China [J]. *The Holocene*, 2012, 22(12): 1385-1392.
- [28] Luo Chuanxiu, Zheng Zhuo, Tarasov P, et al. A potential of pollen-based climate reconstruction using a modern pollen-climate dataset from arid northern and western China [J]. *Review of Palaeobotany & Palynology*, 2010, 160(3/4): 111-125.
- [29] Wei Haicheng, Zhao Yan. Surface pollen and its relationships with modern vegetation and climate in the Tianshan Mountains, northwestern China [J]. *Vegetation History and Archaeobotany*, 2016, 25(1): 19-27.
- [30] Luo Chuanxiu, Zheng Zhuo, Pan Anding, et al. Distribution of surface soil spore-pollen and its relationship with vegetation in Xinjiang, China [J]. *Arid Land Geography*, 2007, 30(4): 536-543. [罗传秀, 郑卓, 潘安定, 等. 新疆地区表土孢粉分布规律及其与植被关系研究[J]. 干旱区地理, 2007, 30(4): 536-543.]
- [31] Yang Zhenjing, Kong Zhaochen, Yan Shun, et al. Pollen distribution in topsoil along the Daxigou Valley in the headwaters of the Urumqi River, the central Tianshan Mountains [J]. *Arid Land Geography*, 2004, 27(4): 543-547. [杨振京, 孔昭宸, 阎顺, 等. 天山乌鲁木齐河源区大西沟表土花粉散布特征[J]. 干旱区地理, 2004, 27(4): 543-547.]
- [32] Wang Li, Zhang Yun, Kong Zhaochen, et al. Preliminary study on pollen distribution in the surface soil of the Turpan region in the southern slope of Tianshan Mountains, Xinjiang, China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2017, 41(7): 779-786. [王力, 张芸, 孔昭宸, 等. 新疆天山南坡吐鲁番地区表土花粉的初步研究[J]. 植物生态学报, 2017, 41(7): 779-786.]
- [33] El-Moslimany A P. Ecological significance of common non-arboreal pollen: examples from drylands of the Middle East [J]. *Review of Palaeobotany & Palynology*, 1990, 64(1): 343-350.
- [34] Yao Fulong, Zhang Jing, Yang Haijun, et al. Surface pollen distribution on the north slope of Bogda Mountain, Xinjiang, China [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, 30(3): 466-474. [姚付龙, 张静, 杨海军, 等. 新疆博格达山北坡表土花粉散布特征[J]. 生态环境学报, 2021, 30(3): 466-474.]
- [35] Zhao Nannan, Yang Zhenjing, Ning Kai, et al. A comparative study on the relationship between surface pollen and vegetation on the north and south slopes of the northern Tianshan Mountains [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*,

- 2019, 33(12): 117-126. [赵楠楠, 杨振京, 宁凯, 等. 依连哈比尔尕山南北坡表土孢粉与植被关系研究[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(12): 117-126.]
- [36] Wei Haicheng, Zheng Zhuo, Ma Haizhou, et al. Pollen distribution patterns of surface soil sample in Qinghai of China and their relationship with vegetation [J]. *Arid Land Geography*, 2009, 32(6): 932-940. [魏海成, 郑卓, 马海州, 等. 青海表土花粉分布规律及其与植被的关系[J]. 干旱区地理, 2009, 32(6): 932-940.]
- [37] Weng Chengyu, Sun Xiangjun, Chen Yinshuo. Numerical characteristics of pollen assemblages of surface samples from the west Kunlun Mountains [J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 1993, 35(1): 69-79.
- [38] Zhong Wei, Shu Qiang, Xiong Heigang. Pollen assemblages of Niya section in southern Xinjiang and paleoenvironmental evolution [J]. *Geographical Research*, 2001, 20(1): 91-96. [钟巍, 舒强, 熊黑钢. 塔里木盆地南缘尼雅剖面的孢粉组合与环境[J]. 地理研究, 2001, 20(1): 91-96.]
- [39] Huo Yuxia. Tree-ring width records of past climate variability in north Xinjiang [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2017. [霍玉侠. 树轮宽度记录的新疆北疆地区气候变化研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2017.]
- [40] Hou Xueyu. Vegetation atlas of China 1: 1000000 [M]. Beijing: Science Press, 2001. [侯学煜. 中国植被图集 1: 1000000[M]. 北京: 科学出版社, 2001.]
- [41] Faegri K, Kaland P E, Krzywinski K. Text book of pollen analysis [M]. 4th ed. London: Wiley, 1989.
- [42] Hancock P A, Hutchinson M F. Spatial interpolation of large climate data sets using bivariate thin plate smoothing splines [J]. *Environmental Modelling and Software*, 2005, 21(12): 1684-1694.
- [43] Editorial Committee of Xinjiang Forest. Xinjiang forest [M]. Beijing: China Forestry Press, 1989. [《新疆森林》编辑委员会. 新疆森林[M]. 北京: 中国林业出版社, 1989.]
- [44] Li Wenyi, Yao Zuju. A study on the quantitative relationship between Pinus pollen in surface sample and Pinus vegetation [J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 1990, 32(12): 943-950.
- [45] Yan Shun, Kong Zhaochen, Yang Zhenjing, et al. Seeking relationship between vegetation and *Picea* pollen in surface soils of Xinjiang, northwestern China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(9): 2017-2023. [阎顺, 孔昭宸, 杨振京, 等. 新疆表土中云杉花粉与植被的关系[J]. 生态学报, 2004, 24(9): 2017-2023.]
- [46] Li Wenyi. On dispersal efficiency of *Picea* pollen [J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 1991, 33(10): 792-800.
- [47] Luo Xiaoqin, Chen Shujiang, Abduweli Kiyum, et al. Survey of surface water resources of Xarxili Natural Reserve in Xinjiang [J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 2012, 9(2): 130-131. [罗晓琴, 陈蜀江, 阿布都艾力·喀尤木, 等. 新疆夏尔希里地表水资源调查[J]. 科技创新导报, 2012, 9(2): 130-131.]
- [48] Xu Qinghai, Yang Xiaolan, Yang Zhenjing, et al. Reconstruction of climatic changes of Yanshan Mountain area since 5000 a B. P. inferred from pollen data [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2004, 24(3): 339-345. [许清海, 阳小兰, 杨振京, 等. 孢粉分析定量重建燕山地区 5000 年来的气候变化[J]. 地理科学, 2004, 24(3): 339-345.]
- [49] Yu Ge, Han Huiyou. A preliminary palynological study of the surface soils of modern vegetation in the Zijin Mountain, Nanjing [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 1995, 19(1): 79-84. [于革, 韩辉友. 南京紫金山现代植被表土孢粉的初步研究[J]. 植物生态学报, 1995, 19(1): 79-84.]
- [50] Wu Jing. A preliminary study on the relationship between surface pollen assemblage and modern vegetation on Xinglong Mountain [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2006. [伍婧. 兴隆山地区表土花粉与植被关系的研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2006.]
- [51] Chen Shujiang. Comprehensive scientific investigation of Xarxili Natural Reserve in Xinjiang [M]. Urumqi: Xinjiang Science and Technology Press, 2006: 15-76. [陈蜀江. 新疆夏尔希里自然保护区综合科学考察[M]. 乌鲁木齐: 新疆科学技术出版社, 2006: 15-76.]
- [52] Zhao Yongtao, Miao Yunfa, Fang Yiman, et al. Investigation of factors affecting surface pollen assemblages in the Balikun Basin, Central Asia: implications for palaeoenvironmental reconstructions [J]. *Ecological Indicators*, 2021, 123(3): 107332.
- [53] Dai Jianmin. Analysis of the impact of climate change on the hydrological characteristics of the Aibi Lake basin [J]. *Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy*, 2014, 42(10): 18-19. [戴建民. 气候变化对艾比湖流域水文特征变化的影响分析[J]. 黑龙江水利科技, 2014, 42(10): 18-19.]
- [54] Xu Qinghai, Cao Xianyong, Tian Fang, et al. Relative pollen productivities of typical steppe species in northern China and their potential in past vegetation reconstruction [J]. *Scientia Sinica Terrae*, 2013, 43(12): 2016-2028. [许清海, 曹现勇, 田芳, 等. 中国北方典型草原区花粉产量及其定量重建古植被的作用[J]. 中国科学: 地球科学, 2013, 43(12): 2016-2028.]
- [55] Tao Shichen, An Chenbang, Chen Fahu, et al. Pollen-inferred vegetation and environmental changes since 16.7 ka BP at Balikun Lake, Xinjiang [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(22): 2449-2457.
- [56] Zhao Zhenming, Liu Aimin, Peng Wei, et al. Holocene environmental changes of northern Qinghai-Tibetan Plateau based on spore-pollen analysis [J]. *Arid Land Geography*, 2007, 30(3): 381-391. [赵振明, 刘爱民, 彭伟, 等. 青藏高原北部孢粉记录的全新世以来环境变化[J]. 干旱区地理, 2007, 30(3): 381-391.]
- [57] Li Furong, Zhao Yan, Gaillard M J, et al. Modern pollen-climate relationships in north Xinjiang, northwestern China: implications for pollen-based reconstruction of Holocene climate [J]. *The Holocene*, 2017, 27(7): 951-966.
- [58] Yu Fawen, Price K P, Ellis J, et al. Interannual variations of the grassland boundaries bordering the eastern edges of the Gobi Desert in Central Asia [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(2): 327-346.
- [59] Dai Shengpei, Zhang Bo, Wang Haijun, et al. Spatio-temporal variation characteristics of vegetation cover in Northwest China and its response to climate change [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2010, 25(1): 69-76. [戴声佩, 张勃, 王海军, 等. 中国西北地区植被时空演变特征及其对气候变化的响应[J]. 遥感技术与应用, 2010, 25(1): 69-76.]
- [60] Kaufmann R K, Zhou Lingya, Myneni R B, et al. The effect of vegetation on surface temperature: a statistical analysis of NDVI and climate data [J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(22): 2147.

Relationship between pollen assemblages in surface soil and modern vegetation and climate in the western Tianshan Mountains, Xinjiang

NIU Diyan, LI Jianyong, WANG Ninglian, DU Jianfeng, CHEN Xiaojun
(Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China)

Abstract: Based on the pollen spectrum characteristics of 46 surface samples collected in the western Tianshan Mountains of Xinjiang and a plant community quadrat survey, we analyzed the relationship between pollen assemblages and modern climate and vegetation distribution in the region. The results showed the surface pollen assemblages were consistent with the distribution of modern vegetation. Based on the results of cluster analysis, the study area could be divided into three pollen assemblage zones (mountain steppe zone, desert vegetation zone and typical desert zone). In general, pollen assemblage can roughly reflect the main characteristics of local vegetation, but there are significant differences in the percentage of some pollen types and the coverage of related plants. The pollen of *Picea* and *Pinus* in arbor plants, *Ephedra* in shrub plants, Chenopodiaceae and *Artemisia* in herb plants were high represented due to the influence of natural wind, water flow and their own pollen yield. While Rosaceae pollen in shrubs and Poaceae in herbs were less representative in a modern plant community with its own dominant species; The *Artemisia* and Chenopodiaceae (A/C) ratio can distinguish the desert zone from the mountain steppe zone, and could clearly reflect the aridity level. However, when using this indicator to reconstruct the climate environment, it is necessary to combine the characteristics of pollen assemblage and the influence of changes in vegetation composition and other factors to distinguish; Altitude, average annual precipitation, and average annual temperature all affect the distribution of surface pollen in the area.

Key words: pollen assemblage; vegetation zone; cluster analysis; redundancy analysis; A/C ratio

(责任编辑: 左小安)