

# 天山北坡晚全新世云杉林线变化和古环境特征

张芸<sup>①</sup> 孔昭宸<sup>①</sup> 阎顺<sup>②</sup> 杨振京<sup>①③</sup> 倪健<sup>①</sup>

(<sup>①</sup> 中国科学院植物研究所植被数量生态学重点实验室, 北京 100093; <sup>②</sup> 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011;

<sup>③</sup> 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 正定 050803. E-mail: zhangygl@ibcas.ac.cn)

**摘要** 林线位置的变化, 是地质历史时期和现代诸多环境因素综合作用的结果, 可用来指示全新世气候的波动. 雪岭云杉(*Picea schrenkiana*)作为新疆天山北坡山地针叶林的建群种, 其分布范围和种群大小对气候变化反应敏感. 本文选取新疆吉木萨尔县泉子街乡桦树窝子村典型自然剖面 and 邻近的小西沟考古遗址剖面进行较高时间分辨率的孢粉分析和对比, 结合地层  $^{14}\text{C}$  年代分析和文化层炭屑扫描电镜显微结构鉴定, 表明两个剖面在 2000~1300 aBP 同一时段的地层中均出现云杉花粉百分含量的峰值, 云杉花粉分别达到 20% 和 35% 以上, 并与小西沟文化层中雪岭云杉炭屑的年代相吻合, 揭示出在 2000~1300 aBP 时段, 天山北坡雪岭云杉林的林线相对现今下移约 330 m 左右.

**关键词** 天山北坡 云杉 林线 全新世

植被变化和林线波动既可对全球气候变化进行监测, 亦可指示全新世气候的波动. 近年来国外学者对美洲和欧洲的高山带的林线和树线研究颇多<sup>[1~4]</sup>, 国内关于林线的研究主要集中在青藏高原、河北小五台山、山西五台山、秦岭太白山和东北等地区<sup>[5~10]</sup>. 在这些研究中, 关于山地森林的上界使用了不同的名称, 如高山林线(timberline), 森林界限(forestline), 树线(treeline), 林线以上森林(forest above treeline)<sup>[6,11,12]</sup>, 本文所指的林线(timberline)即高山林线过渡带. 综观诸多文献, 可以看出高山林线是历史和现代诸多环境因素综合作用的结果. 除了自然气候方面的因素之外, 人类活动对林线的影响也不容忽视<sup>[13]</sup>. 从古生态学角度探讨高山林线动态变迁的重要证据有孢粉、古木材以及植物残体等方面<sup>[8]</sup>, 因此需要借助于孢粉分析、树木年轮和古植物遗存的鉴定和定年等多种分析方法来进行林线波动和气候变化响应的研究<sup>[14]</sup>.

云杉属(*Picea*), 作为北方针叶林的主要代表, 全球约 40 种, 广泛分布在北半球的寒温带、温带和亚热带的亚高山带. Ravazzi 曾根据南欧 163 个晚更新世剖面的孢粉、炭屑和植物大化石记录重建了挪威云杉(*Picea abies* Karst)和塞尔维亚云杉(*Picea omorika* (Pancic) Purkyne)的晚第四纪演变历史<sup>[3]</sup>. McLeod 和 MacDonald 则利用加拿大西部地区 13 个湖的沉积物的孢粉数据恢复了晚冰期以来黑云杉(*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.)和白云杉(*Picea glauca* (Moench) Voss)种群演化和扩张历史<sup>[15]</sup>. 在中国, 云杉属有 16 种和 9 个变种, 上新世和早更新世时, 曾广泛分布于

青藏高原亚高山地区<sup>[16]</sup>. 第四纪, 尤其是末次冰期时, 在中国的东部、中部、西部和南部的低山丘陵和平原也曾有过云杉林分布<sup>[10, 17]</sup>. 徐仁等依据陕西渭南北庄村(海拔 490m)晚更新世地层中发现的大量青扦(*Picea wilsonii*)的木材、球果、种子和针叶等大化石和以云杉、冷杉(*Abies*)为优势的孢粉组合, 认为在大约 23000 aBP 时秦岭山地的云杉林曾下降到海拔 490 m 的丘陵带, 当时年平均气温较今低 7℃<sup>[10]</sup>. 李文漪和吕厚远等则分别探讨了新疆天山地区云杉林以及青藏高原北纬 25°~45°, 东经 75°~106°范围内海拔 1000~5700 m 地区的现代表土中云杉花粉的分布规律, 进而研究了云杉花粉的分布与植被、气候、海拔、风速和风向及地形因素之间的关系<sup>[18,19]</sup>.

在新疆广阔的水平与垂直分布范围内, 虽然气候、土壤、植被与群落的性质以及地质历史条件差异显著, 但云杉几乎总是占优势的或单一的新疆山地针叶林的建群种<sup>[20]</sup>. 主要分布于天山南北坡的雪岭云杉(*Picea schrenkiana*)和主要分布于阿尔泰山西南坡的西伯利亚云杉(*Picea obovata*)则是新疆云杉的两种类型<sup>[21]</sup>. 雪岭云杉作为生长在天山北坡山地荒漠和草原带之上的山地针叶林的建群种, 在史前和历史时期, 林线波动较大, 并且分布范围和种群大小对气候变化的反应敏感<sup>[22]</sup>. 尽管阎顺等曾根据桦树窝子剖面孢粉分析的结果初步探讨了森林线的变化<sup>[22]</sup>, 而本文则选取距该剖面仅 200 m 的小西沟考古遗址剖面作为典型研究剖面, 先对小西沟剖面文化层的炭屑进行测年和扫描电镜显微结构鉴定, 再与邻近

时段可以对比的桦树窝子自然剖面的孢粉组合及测年数据等进行比较,从而通过运用多种代用环境指标进一步研究天山北坡晚全新世以来林线变化的过程,这不仅可以揭示相应时段内气候环境的变化,也有助于预测气候变化对云杉林的影响,从而探讨林线波动对气候变化的响应机制。

## 1 研究地点和研究方法

在天山北坡海拔高 1500~1600 m 至 2700~2800 m 之间的亚高山带由雪岭云杉构成了幅宽达 1200 m 的森林带<sup>[20, 21]</sup>。研究地点位于距天山北坡现代云杉林分布下限以北水平距离约 10 km 的低山丘陵区(海拔 1200~1600 m),该区气候比较干旱,区内年均气温 5℃左右,年均降水量约 300 mm。农作物除部分小麦(*Triticum aestivum*)和玉米(*Zea mays*)外,比较适合种植土豆(*Solanum tuberosum*)和大蒜(*Allium sativum*)。自然植被为荒漠草原,主要有蒿(*Artemisia* sp.)、沙生针茅(*Stipa glareosa*)、驼绒藜(*Ceratoides latens*)、角果藜(*Ceratocarpus arenarium*)、骆驼蓬(*Peganum harmala*)、大蓟(*Cirsium japonicum*)和白皮锦鸡儿(*Caragana leucophloea*)等,在梁间的沟中,由于有溪流,地下水位高,还常见苔草(*Carex* sp.)、鸢尾(*Iris* sp.)、车轴草(*Trifolium* sp.)等,在沟边也有零星人工栽种的杨(*Populus davidiana*)和榆树(*Ulmus* sp.)<sup>[22]</sup>。据当地居民介绍,这里曾有桦树(*Betula* sp.)生长,故桦树窝子村得名。

吉木萨尔县泉子乡桦树窝子村(海拔 1410 m)的西岗地,分布着厚约 180 cm 的小西沟文化遗址(北纬 43°48.1', 东经 89°7.3', 海拔 1360 m)<sup>[23]</sup>。小西沟剖面自下而上分为 7 层,分别是土黄色黏土层、灰黑色下文化层、土黄色黄土层、灰黑色上文化层、土黄色黄土层、灰色、灰黄色黄土层和土黄色黄土层<sup>[22]</sup>。遗址曾出土了彩陶、石器、五铢钱、铁刀、灯及汉代瓦片等具有新石器时代至汉代文化特点的遗物<sup>[24]</sup>。遗址剖面可分为上、下文化层,下文化层:深 180~140 cm,含零星炭屑;上文化层:深 120~104 cm,灰坑中有较多炭屑。对炭屑进行测年,并通过扫描电镜显微结构鉴定其种属,可提供林线变化研究的有力证据<sup>[13, 14]</sup>。

由于考古遗址文化层中的孢粉记录不可避免地受到人类活动的干扰,不利于区域性古植被的恢复

和林线变化的研究。为了获得未受人类活动影响的孢粉资料,在距考古遗址 200 m 处选取自然剖面(即桦树窝子剖面,北纬 43°48.3', 东经 89°8', 海拔 1320 m),作为考古遗址剖面的对照和时间标尺。两个剖面均处于天山北坡的前山丘陵区,地势南高北低,地形较和缓。桦树窝子剖面总厚 110 cm,自下而上分为 6 层,分别是含小砾石灰黑色黏土层、棕黑色黏土层、浅灰色黏土夹浅黄色黏土层、深灰色黏土层、浅棕色黏土层和棕色黏土层。

小西沟文化遗址剖面自上而下采集 38 块孢粉样品,采样间距为 5 cm。桦树窝子自然剖面自上而下共采集 52 块孢粉样品,除底部含小砾石灰黑色黏土层采样间距为 2~3 cm 外,其他层采样间距均为 2 cm。所有样品均采用重液浮选的孢粉分析方法进行处理,应用 10×40 倍 Olympus 光学显微镜鉴定。小西沟剖面共鉴定出 39 个科属的花粉,桦树窝子剖面则鉴定出 42 个科属的花粉,统计孢粉总数达 10000 多粒,除个别样品外,每个样品均统计 150 多粒花粉颗粒。花粉百分比的计算是以陆生种子花粉和水生植物花粉以及蕨类孢子总和为基数,并运用 Tilia 软件进行孢粉图式制图。

在桦树窝子剖面深 110~88, 50~48 和 17~14 cm 处和小西沟剖面的下文化层中部深 155~145 cm 处分别采集沉积物样品和在小西沟剖面上文化层的下部和中部灰坑中浮选出较小的混合炭屑样品进行 <sup>14</sup>C 年代分析,其中,中部灰坑的炭屑样品由北京大学科技考古与文物保护实验室测定,其余样品均由国家地震局地质研究所 <sup>14</sup>C 实验室测定。测年结果为:桦树窝子剖面深 110~88, 50~48 和 17~14 cm 处沉积物样品的年代分别为 (2170 ± 185)aBP(cal.(2150 ± 225)aBP), (1050 ± 50)aBP(cal.(950 ± 60)aBP)和(450 ± 55) aBP (cal.(510 ± 30)aBP),小西沟剖面下文化层中部深 155~145 cm 处测年数据为 (3240 ± 60)aBP(cal.(3470 ± 85)aBP),上文化层的下部和中部灰坑中的混合炭屑样品测年数据分别为(1930 ± 65)aBP(cal.(1875 ± 65) aBP)和(1755 ± 75)aBP(cal. 195 AD)。同时,从小西沟剖面上文化层的下部和中部灰坑中浮选出许多炭屑,其中,在下部灰坑中挑出较大的 7 块炭屑,中部灰坑中挑出 5 块炭屑,进行预处理后,然后用扫描电子显微镜(SEM)观察其显微结构,根据显微结构特征进行树种鉴定<sup>1)</sup>。

1) 中国林业科学院腰希申先生协助树种鉴定

另外,兰州大学西部环境教育部重点实验室对桦树窝子剖面的52块样品进行粒度和烧失量的测定。

## 2 结果与分析

### 2.1 炭屑年代测定和显微结构的研究

考古遗址中炭屑鉴定开始于上个世纪, Santa 首先把该手段用于北非地区的古生态学研究<sup>[25]</sup>, 之后, 炭屑分析作为重要的研究手段已被广泛用于第四纪和古生态学研究。在中国, 崔海亭等曾利用扫描电镜对浑善达克沙地东南部的古木材和赤峰地区两处青铜时代遗址中的炭屑进行鉴定, 鉴定结果表明浑善达克沙地的古木材为鱼鳞云杉(*Picea jezoensis*), 而赤峰地区的两处炭屑均为蒙古栎(*Quercus mongolica*), 并依次复原研究区域的植被和气候<sup>[26, 27]</sup>。

小西沟文化遗址的上文化层的下部灰坑采集的炭屑(<sup>14</sup>C 年代为(1930 ± 65) aBP), 扫描电镜鉴定结果表明与现代雪岭云杉的解剖特征一致(图 1), 在中部灰坑中采集的炭屑样品(<sup>14</sup>C 年代为(1755 ± 75) aBP)则分别属于雪岭云杉(图 1)、崖柳(*Salix xerophila*)和稠李(*Prunus padus*)。这些植物现今在该地已不能生长,

可能是历史上先民从当地砍伐的, 也可能是从天山远距离采伐的薪柴。

### 2.2 孢粉数据的对比

Tinne<sup>[13]</sup>和 Wick 等<sup>[28]</sup>在利用孢粉和植物大化石数据研究全新世植被演变中认为人类活动是影响林线变化的重要因素。至于本区林线的变化是否与人类活动有关, 尚需要进一步寻找孢粉方面的证据。

根据小西沟剖面岩性特征、主要孢粉种类的百分含量、孢粉总浓度和 AP/NAP(乔木/非乔木)比值<sup>[29]</sup>等多种代用数据把剖面分为 5 个孢粉带(图 2)。

带 I (190~180 cm), 黏土层, 鉴定的孢粉类群较少, 为 5 科 11 属。孢粉组合中乔木植物花粉相对含量较低(仅为 2.2%~7.0%), 中旱生草本和灌木花粉占优势(平均含量达 95.4%), 其中以藜科(*Chenopodiaceae*)(平均含量约 23.3%)和柽柳属(*Tamarix*)(平均含量约 21.0%)为主, 其次为蒿属(*Artemisia*)(平均含量为 14.2%)和麻黄属(*Ephedra*)(平均含量为 10.3%), 云杉属花粉平均含量仅为 2.4%, 花粉浓度较低, 为 441~572 粒/g, AP/NAP 比值也处于剖面低值(约

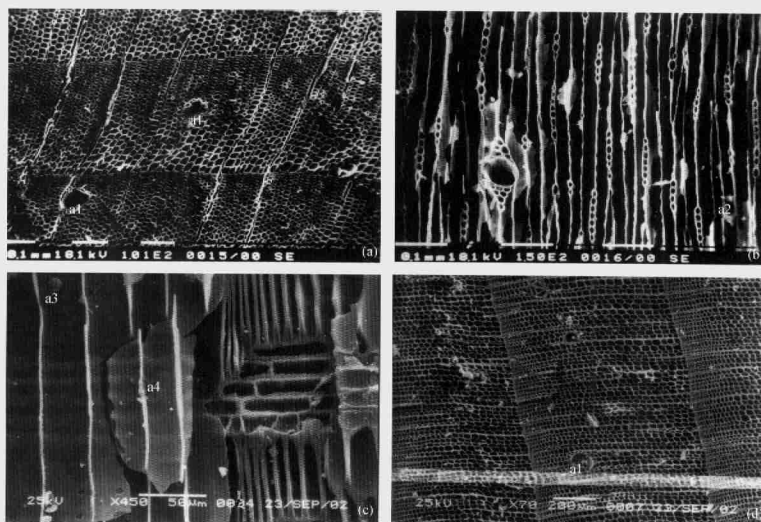


图 1 雪岭云杉炭屑解剖特征

(a) 横切面(<sup>14</sup>C 测年(1755 ± 75) aBP); (b) 弦切面(<sup>14</sup>C 测年(1755 ± 75) aBP); (c) 径切面(<sup>14</sup>C 测年(1755 ± 75) aBP); (d) 横切面(<sup>14</sup>C 测年(1930 ± 65) aBP)。a1: 树脂道, a2: 单列射线, a3: 管胞, a4: 交叉场

0.05), 但孢粉复合分异度稍高(平均值为 8.61). 整个组合特征反映荒漠草原植被景观, 植被以旱生植物为主, 也有少量的超旱生种类.

带 II (180~140 cm), 文化层, 共鉴定出 7 科和 17 属的孢粉类群, 较带 I 多. 孢粉组合中仍以草本和灌木花粉占优势(平均含量达 93.4%), 但其中蒿属含量(平均约 21.0%)迅速增高, 藜科含量变化不大(平均约 23.9%), A/C(*Artemisia*/*Chenopodiaceae*)比值较带 I 增高, 为 0.58~2.1, 但柽柳属含量(平均约 7%)和麻黄属含量(平均约 5.7%)较带 I 大幅度减少. 孢粉浓度开始增高并处于剖面最高值, 为 604~5152 粒/g, AP/NAP 比值和孢粉复合分异度也均较带 I 高, 反映当时气候较带 I 湿润. 剖面深 155~145 cm 处测年数据为  $3240 \pm 60$  aBP(cal.  $3470 \pm 85$  aBP).

带 III (140~120 cm), 黄土层, 共鉴定出 7 科和 11 属的孢粉类群, 较带 II 少. 孢粉组合中中旱生草本和灌木花粉含量更高(最高含量可达 100%), 其中藜科含量(平均约 34.6%)迅速增高, 蒿属(平均约 22.7%)和麻黄属含量(平均为 6.9%)较带 II 稍高, 则 A/C 比值较带 II 稍降低, 为 0.26~0.91, 但柽柳属含量(平均约 4.4%)较带 II 减少. 木本花粉含量为剖面最低值; 孢粉浓度也降为剖面最低值(仅为 13 粒/g), 孢粉复合分异度和 AP/NAP 比值也均较带 II 低, 反映当时气候较带 II 干燥.

带 IV (120~104 cm), 文化层, 共鉴定出 26 个孢粉科属, 明显较带 III 多. 孢粉组合中木本花粉含量迅速增高(平均约 15.7%), 草本和灌木花粉平均含量降为 84.3%, 无论是藜科含量(平均约 24.3%)、还是蒿属(平均约 10.8%)、柽柳属(平均约 2.9%)和麻黄属的含量(平均约 3.4%)均较带 III 大幅度减少, 但云杉属含量却迅速增高, 可达 35.5%. 孢粉浓度升为剖面较高值, 为 230~1078 粒/g, AP/NAP 比值和孢粉复合分异度也均为剖面峰值, 反映当时气候较带 III 湿润. 该层的下部和中部灰坑中的混合炭屑样品测年数据分别为  $1930 \pm 65$  aBP(cal.  $1875 \pm 65$  aBP) 和  $1755 \pm 75$  aBP(cal. 195 AD).

带 V (104~0 cm), 黄土层, 孢粉组合中木本花粉含量又开始下降, 平均含量为 3.6%, 而中旱生草本和灌木花粉含量再次升高, 仍占优势(平均约 96.4%), 其中藜科含量(平均为 38.8%)、蒿属(平均约 12.0%)、麻黄属(平均为 12.6%)和柽柳属的含量(平均约 5.5%)较带 IV 均增加. A/C 比值较带 IV 低, 为 0.11~0.51. 该

带孢粉浓度先开始增加(1881 粒/g), 后又降低为 81 粒/g, 孢粉复合分异度和 AP/NAP 比值较带 IV 低, 反映当时气候较带 IV 干燥.

根据主要孢粉种类的百分含量的垂向变化<sup>[22]</sup>和孢粉 Simpson 指数<sup>[29]</sup>可将桦树窝子剖面分为 4 个孢粉带(图 3).

带 I (88 cm 以下)(约 2000 aBP 以前), 下部为小砾石灰黑色黏土层, 上部为棕黑色黏土层. 孢粉组合中乔木植物花粉相对含量较低(平均达 4.9%), 其中云杉属花粉平均含量仅为 2.0%, 旱生和超旱生植物花粉较多(平均含量达 95.0%). 该带下部藜科含量较高(平均达 44.7%), 其次为蒿属; 而上部藜科含量减少(平均约 21.0%). 花粉总浓度较低(为 140 粒/g), 孢粉复合分异度较少(平均值为 8.1), LOI 和 AP/NAP 比值也均为剖面低值, 岩性组成较粗. 该组合特征反映荒漠草原景观, 推测建群植物主要是藜科、麻黄、柽柳属、琵琶柴(*Reaumuria*)、骆驼蓬、霸王属(*Zygophyllum*)等旱生植物.

带 II (88~58 cm)(约 2000~1300 aBP), 棕黑色黏土层. 该带中草本和灌木花粉仍占优势, 平均含量达 90.8%, 但乔木植物花粉相对含量开始增高(约 9.2%), 其中云杉属花粉含量达到剖面最高值(平均 8%), 尤其是在剖面深度为 72~66 cm 的孢粉组合中, 其含量最高可达到 21.5%; 旱生和超旱生的植物花粉开始减少, 其中藜科花粉含量下降成为剖面最低值(平均约 23.3%), 而蒿属、禾本科(*Gramineae*)、菊科(*Compositae*)、毛茛科(*Ranunculaceae*)、豆科(*Leguminosae*)、石竹科(*Caryophyllaceae*)、唇形科(*Labiatae*)、伞形科(*Umbeliferae*)、十字花科(*Cruciferae*)、百合科(*Liliaceae*)、葱属(*Allium*)和莎草科(*Cyperaceae*)等植物含量增加. 花粉浓度较高, 平均为 309 粒/g, 孢粉复合分异度和 LOI 也均为剖面高值, AP/NAP 比值处于剖面最高值, 岩性组成较带 I 细. 该组合特征反映为草原和有少量森林的草原植被景观.

带 III (58~16 cm)(约 1300~450 aBP), 下部棕黑色黏土层, 中间为浅灰色黏土夹浅黄色黏土层, 上部为深灰色黏土层. 草本和灌木花粉含量继续占绝对优势, 达 96.6%, 旱生和超旱生的植物花粉增加, 其中藜科花粉含量较高(平均达 30.5%); 云杉属花粉含量降低(平均 2.6%). 花粉总浓度处于整个剖面最低值, 仅为 76.8 粒/g, 孢粉复合分异度、AP/NAP 比值和 LOI

也均降为剖面最低值,岩性组成仍较细.整个组合特征反映为荒漠草原植被,推测建群植物以旱生植物为主,除蒿、菊和少量禾本科植物外,主要是藜科植物.

带Ⅳ(16~0 cm)(约450 aBP以来)下部为深灰色黏土层,中部为浅棕色黏土层,下部为棕色黏土层.与带Ⅲ比较,旱生和超旱生的植物花粉含量减少,其中藜科花粉含量平均仅为17.2%;云杉属花粉含量平均为4.2%,桦木属花粉含量达到最高(即13.2%),此时可能有大量桦树分布在附近,桦树窝子村也可能因此而得名.孢粉复合分异度和AP/NAP再次增高,并处于剖面高值,花粉浓度也处于剖面最高值(平均为949粒/g),岩性较带Ⅲ粗.反映为荒漠草原—草原植被景观,仍以草本和灌木植物占优势,但禾本科和莎草科植物逐渐增加,豆科、伞形科、十字花科、百合科和葱属等花粉含量较高.

从图2可以看出,小西沟文化遗址剖面云杉百分含量平均值为3.75%,但在上文化层115 cm深处,云杉花粉百分含量却出现了35.1%的峰值,孢粉复合分异度和AP/NAP比值均为最峰值.如果说该文化层中的云杉炭屑是先民从远距离采伐用作薪柴的燃烧物,在遗址剖面上并不应该出现云杉花粉的峰值.另外,根据阎顺等对新疆天山、阿尔泰山、昆仑山、塔里木盆地、准噶尔盆地不同植被带131个表土花粉样品中的云杉花粉含量的百分比统计结果,提出影响表土中云杉含量的最大因素是水平距离,在云杉林内,云杉花粉的含量平均达50%~60%,但通常30%以上的云杉花粉就可以代表云杉林地的存在,距林地10 km以上时,云杉花粉平均含量为4.7%<sup>[30]</sup>.杨振京选择天山中段从海拔3510 m的高山座垫植被带到海拔460 m的古尔班通古特沙漠边缘的一条长约80 km的样带,共采集了80个表土花粉样品,分析结果显示:山地云杉林带的孢粉百分含量为10.4%~93.5%,平均含量为62.4%<sup>1)</sup>.所以,已距现代雪岭云杉林下限10 km的小西沟文化遗址剖面中出现云杉花粉百分含量的峰值,表明当时云杉林应在附近生长.更值得提出的是,距小西沟剖面200 m的桦树窝子剖面云杉平均百分含量仅为4.33%,但在72, 70和66 cm深处,云杉也出现百分含量的峰值(16.7%~21.5%),同时,LOI、孢粉复合分异度、AP/NAP比值和总花粉浓度也均为峰值(图3).该剖面110~88, 50~48和17~14 cm

处采集的沉积物样品的年代分别为2170 ± 185 aBP(cal. 2150 ± 225 aBP), 1050 ± 50 aBP(cal. 950 ± 60 aBP)和450 ± 55 aBP(cal. 510 ± 30 aBP),根据这些年代学数据和沉积速率推算,深度为72~66 cm的沉积年代应在1700~1400 aBP之间,这与取自小西沟剖面云杉花粉峰值的地层中的云杉炭屑的年代(1755 ± 75 aBP)基本吻合.可见,两个剖面在2000~1300 aBP大致相同时段的地层中均出现较高比例的云杉花粉,故可认为这些炭化木材并非远距离搬运而来,而是就近采集的.

### 3 讨论

尽管上文已从炭屑和孢粉数据对比的角度定性地探讨了云杉林的移动,作者也曾就天山北坡的大西沟剖面对云杉林移动的气候因素做了初步分析<sup>[31]</sup>,但对制约雪岭云杉林生长的水热因子还需作进一步分析,因此,选择了天山北坡的8个气象台站从1951年到2000年间的多年气象资料(来自北京气象中心资料室),再参考相关文献<sup>[32,33]</sup>,可大致计算出新疆天山北坡地区现代云杉林的生态气候指数与研究地点的现在气候特征(多年平均湿润指数和温暖指数)(表1).

温暖指数  $WI$ :  $WI = \sum(t_i - 5)$ ,  $t_i > 5^\circ\text{C}$ , 式中  $t_i$  为月均温  $> 5^\circ\text{C}$  的月平均气温<sup>[33]</sup>; 湿润指数  $MI = \sum(P_i/2 - t_i)$ <sup>[32]</sup>, 式中  $P_i$  为月均温  $> 5^\circ\text{C}$  的各月降水量;  $t_i$  为相应月份的月均温.

通过对这8个气象台站的“海拔高度”、“湿润指数”和“温暖指数”进行拟合,拟合结果发现温暖指数与海拔高度存在明显的线性关系,计算出的线性回归方程:  $WI = -0.03x + 103.45$  (其中,  $WI$  为温暖指数,  $x$  为海拔高度,复相关系数  $R = 0.9434$ ),但是湿润指数与海拔高度之间为显著的二次函数关系,方程为  $MI = -6.51E-05x^2 + 0.30x - 208.75$  ( $MI$  为湿润指数,  $x$  为海拔高度,复相关系数  $R = 0.9294$ ).研究结果表明随着海拔高度的升高,气温呈现线性递减,降水量开始是逐渐增高的,但到一定的海拔高度时,降水量达最大,然后随着海拔高度的再增高而逐渐减少.根据这两个方程,计算出雪岭云杉的温暖指数为22.7~52.6  $^\circ\text{C} \cdot \text{月}$ ,湿润指数为117.5~142.9  $\text{mm} \cdot (^\circ\text{C} \cdot \text{月})^{-1}$ .而Fang等计算出紫果云杉(*Picea purpurea*)的温暖指数为11.0~76.0  $^\circ\text{C} \cdot \text{月}$ ,丽江云杉(*Picea likiangensis*)的温暖指数为11.0~66.0  $^\circ\text{C} \cdot \text{月}$ <sup>[34]</sup>,与本文计算的雪

1) 杨振京. 新疆天山中段北坡地区现代孢粉学研究. 中国科学院植物研究所博士后研究工作报告. 2004

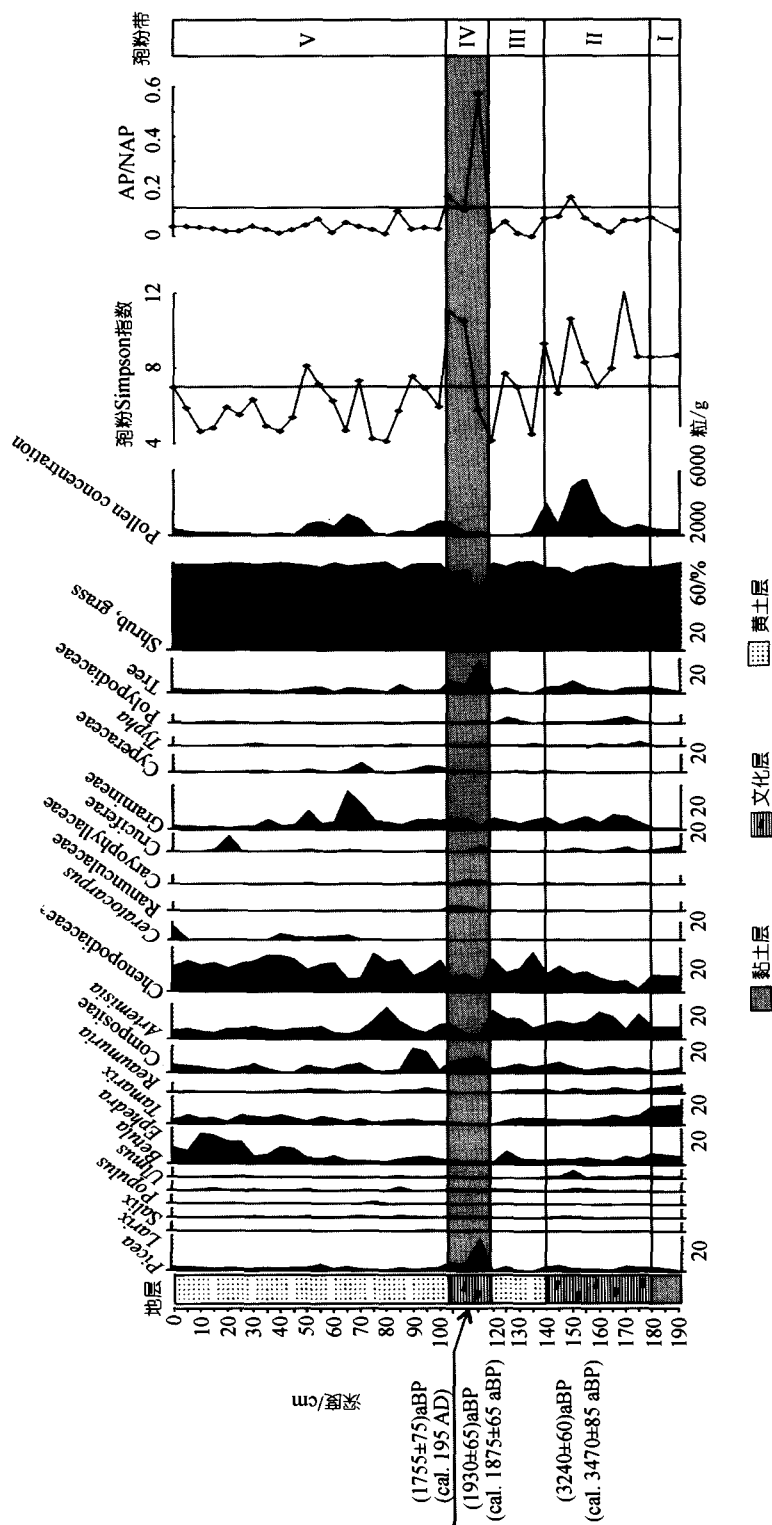


图 2 小西沟剖面花粉组合特征

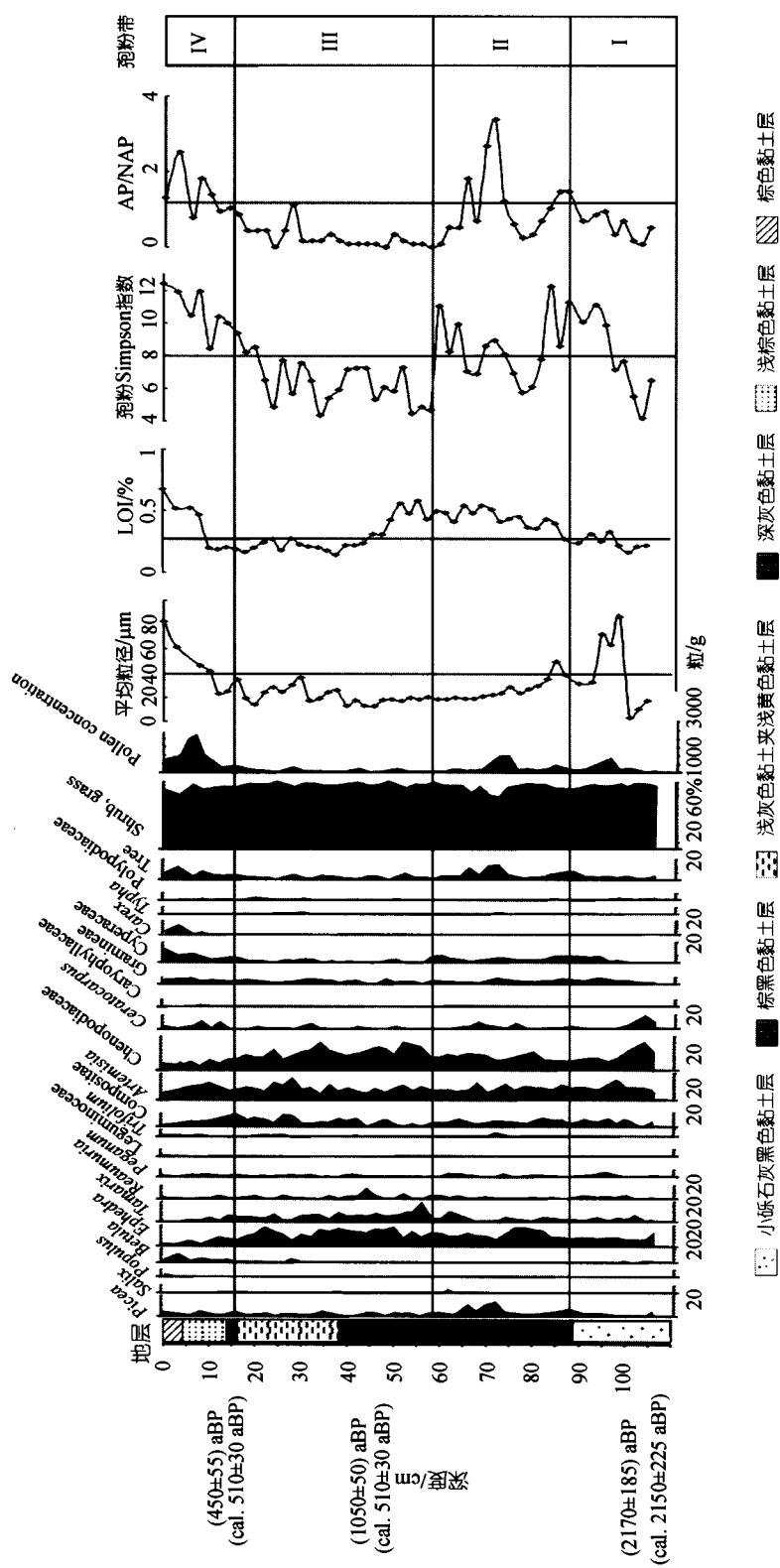


图3 桦树窝子剖面花粉组合及粒度和LOI特征

表 1 天山北坡 8 个气象台站资料及水热指数

| 气象台站 | 纬度/(°) | 经度/(°) | 海拔高度/m | 年均温/℃ | 年降水量/mm | 温暖指数/℃·月 | 湿润指数/mm·(℃·月) <sup>-1</sup> | 气象记录        |
|------|--------|--------|--------|-------|---------|----------|-----------------------------|-------------|
| 蔡家湖  | 44.12  | 87.32  | 441.0  | 5.9   | 136.4   | 90.8     | -75.3                       | 1961~1998 年 |
| 阜康   | 44.10  | 87.55  | 547.0  | 6.9   | 238.9   | 92.0     | -29.5                       | 1971~2000 年 |
| 奇台   | 44.01  | 89.34  | 793.5  | 4.9   | 185.3   | 78.3     | -40.2                       | 1952~1998 年 |
| 乌鲁木齐 | 43.47  | 87.37  | 917.9  | 6.6   | 256.8   | 85.4     | -24.8                       | 1951~1990 年 |
| 昭苏   | 43.09  | 81.08  | 1848.6 | 3.1   | 494.3   | 39.7     | 139.8                       | 1961~1998 年 |
| 天池   | 43.53  | 88.07  | 1942.5 | 1.9   | 581.5   | 34.8     | 154.0                       | 1958~1980 年 |
| 小渠子  | 43.34  | 87.06  | 2160.0 | 2.1   | 525.3   | 34.1     | 137.3                       | 1956~1990 年 |
| 大西沟  | 43.06  | 86.5   | 3539.0 | -5.3  | 431.4   | 7.50     | 42.2                        | 1958~1990 年 |

岭云杉温暖指数的分布范围大体一致。

对照桦树窝子和小西沟剖面所在地点的现代生态气候指标(温暖指数为 62.7 ℃·月,湿润指数为 82.3 mm·(℃·月)<sup>-1</sup>),可以看出,2000~1300 aBP 时的温暖指数比现在温暖指数低 10.1 ℃·月,而该时段有云杉林分布在附近,因此,估计云杉林的林线下限较今约下降 337 m,这与实际情况较为吻合。如果西北地区未来气候趋向暖湿<sup>[35]</sup>,那么天山北坡林线的上限或下限也将会发生显著的移动。

Tranquillini<sup>[36]</sup>和 Fall<sup>[4]</sup>都认为森林的上限受低温控制,分布下限受降水量控制。对云杉而言,温度和降水量的分布都是限制云杉生长的重要因子,但研究区的坡度、坡向、坡型等地形因素的影响也不容忽视。总之,影响天山北坡林线移动的气候机制比较复杂,又因研究区内的气象台站尤其是高海拔(3539 m 以上)的气象台站偏少,气象资料的涵盖面较窄,因此需要借助更多的气象资料以及从植被、地形和气候整合以及全球变化的角度探讨天山云杉林线波动和气候响应。

#### 4 结语

根据桦树窝子剖面的孢粉分析资料,得知在 2000 aBP 以前,该区域植被为荒漠草原,而 2000~1300 aBP,当地植被为草原,并有少量云杉林分布在附近,另外,该时段沉积物组成较细,而 LOI、孢粉总浓度值和孢粉复合分异度均较高,AP/NAP 比值也处于峰值,表明当时气候状况明显好于现代,降水量增多,适合雪岭云杉林生长。小西沟剖面相应时段的孢粉组合特征也反映当时气候较湿润,AP/NAP 比值和孢粉复合分异度均为剖面峰值。

通过桦树窝子剖面和小西沟剖面孢粉数据对比分析,发现在大致相同时段(2000~1300 aBP)的地层中出现云杉花粉百分含量的丰值,云杉花粉分别达到 20%和 35%以上,并与小西沟文化层中的雪岭云

杉炭屑的测年数据相吻合,再结合雪岭云杉林生长的水热因子分析结果,因此,可以认为:天山北坡雪岭云杉林的林线相对现今下移约 330 m 左右。

**致谢** 在论文写作过程中,就一些科学问题请教北京大学刘鸿雁教授,审稿专家对本文进行了深入细致地修改,特致谢意。本研究受国家自然科学基金重点项目(批准号: NSFC90102009)、教育部留学回国人员科研启动基金资助项目、中国科学院知识创新工程重大项目(批准号: KZCX1-10-05)和国家“973”项目(批准号: G1999043502)资助。

#### 参 考 文 献

- Pellatt M G, Smith M J, Mathewes R W, et al. Palaeoecology of postglacial treeline shifts in the northern Cascade Mountains, Canada. *Palaeogeogr Palaeoclimatol*, 1998, 141(1-2): 123—138
- Gervais B R, MacDonald G M, Snyder J A, et al. *Pinus sylvestris* treeline development and movement on the Kola Peninsula of Russia: pollen and stomate evidence. *J Ecol*, 2002, 90(4): 627—638
- Ravazzi C. Late Quaternary history of Spruce in southern Europe. *Rev Palaeobot Palynology*, 2002, 120(1-2): 131—177
- Fall P L. Timber fluctuation and late Quaternary paleoclimates in the Southern Rocky Mountains, Colorado. *Geol Soc Am Bull*, 1997, 109(10): 1306—1320
- 吴锡浩. 青藏高原东南部现代雪线和林线及其关系的初步研究. *冰川冻土*, 1989, 11(2): 113—124
- 于澎涛, 刘鸿雁, 崔海亭. 小五台山北台林线附近的植被及其与气候条件的关系分析. *应用生态学报*, 2002, 13(5): 523—528
- 刘鸿雁, 曹艳丽, 田军, 等. 山西五台山高山林线的植被景观. *植物生态学报*, 2003, 27(2): 263—269
- 刘鸿雁, 王红亚, 崔海亭. 太白山高山带 2000 多年以来气候变化与林线的响应. *第四纪研究*, 2003, 23(3): 299—308
- Liu H Y, Tang Z Y, Dai J H, et al. Larch timberline and its development in North China. *Mount Res Devel*, 2002, 22(4): 359—367
- 徐仁, 孔昭宸, 杜乃秋. 中国更新世的云杉、冷杉植物群及其在第四纪研究上的意义. *中国第四纪研究*. 1980, 5(1): 48—56
- Holtmeier F K. Ecological aspects of climatically-caused timberline fluctuations: review and outlook. In: Beniston M, ed. *Mountain Environment in Changing Climates*. London: Rautledge Pub-



- lishing Company, 1994. 220—233
- 12 戴君虎, 崔海亭. 国内外高山林线研究综述. 地理科学, 1996, 19(3): 243—249
- 13 Tinner W, Ammann B, Germann P. Treeline fluctuations recorded for 12500 years by soil profiles, pollen, and plant macrofossils in the Central Swiss Alps. *Arct Antarct Alp Res*, 1996, 28(2): 131—147
- 14 MacDonald G M, Velichko A A, Kremenetski C V, et al. Holocene treeline history and climate change across northern Eurasia. *Quat Res*, 2000, 53: 302—311
- 15 McLeod T K, MacDonald G M. Postglacial range expansion and population growth of *Picea mariana*, *Picea glauca* and *Pinus banksiana* in the western interior of Canada. *J Biogeogr*, 1997, 24 (6): 865—881
- 16 孔昭宸, 杜乃秋, 山发寿. 青藏高原晚新生代以来植被时空变化的初步探讨. 微体古生物学报, 1996, 13(4): 339—351
- 17 李文漪. 论中国东部第四纪冷期植被与环境. 地理学报, 1987, 46(2): 186—193
- 18 李文漪. 云杉花粉散布效率问题. 植物学报, 1991, 33(10): 792—800
- 19 吕厚远, 王淑云, 沈才明, 等. 青藏高原现代表土中冷杉和云杉花粉的空间分布. 第四纪研究, 2004, 24(1): 39—49
- 20 中国科学院新疆综合考察队, 中国科学院植物研究所. 新疆植被及其利用. 北京: 科学出版社, 1978. 5—91
- 21 《新疆森林》编辑委员会. 新疆森林. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1989. 121—149
- 22 阎顺, 孔昭宸, 杨振京, 等. 东天山北麓 2000 多年以来的森林线与环境变化. 地理科学, 2003, 23(6): 699—704
- 23 阎顺, 阎耀平. 吉木萨尔地区历史时期环境演变与人类活动. 干旱区地理学集刊, 1993, 3: 162—175
- 24 戴良佐. 务涂谷今地考. 西北史地, 1997, 4: 47—50
- 25 Santa S. Essai de reconstitution de paysages végétaux Quaternaires d'Afrique de Nord. *Lybica*, 1961, 6(7): 37—77
- 26 崔海亭, 李宜垠, 胡金明, 等. 利用炭屑显微结构复原青铜时代的植被. 科学通报, 2002, 47(19): 1504—1507
- 27 崔海亭, 刘鸿雁, 腰希申. 浑善达克沙地古云杉木材的发现及其古生态学意义. 中国科学, D 辑, 1997, 27(5): 457—461
- 28 Wick L, Van Leeuwen J F N, Van der Knaap W O, et al. Holocene vegetation development in the catchment of Sagistalsee(1935m asl), a small lake in the Swiss Alps. *J Paleolimn*, 2003, 30(3): 261—272
- 29 张芸, 孔昭宸, 阎顺, 等. 新疆天山北坡地区中晚全新世古生物多样性特征. 植物生态学报, 2005, 29(5): 836—844
- 30 阎顺, 孔昭宸, 杨振京, 等. 新疆表土中云杉花粉与植被的关系. 生态学报, 2004, 24(9): 2017—2023
- 31 Zhang Y, Kong Z C, Yang Z J, et al. Vegetation changes and environmental evolution in the Urumqi River Head, central Tianshan Mountains since 3.6 ka B.P.: a case study of Daxigou profile. *Acta Bot Sin*, 2004, 46: 668—674
- 32 李文华, 冷允法, 胡涌. 云南横断山区森林植被分布与水热因子相关的量化研究. 见: 中国科学院青藏高原综合科学考察队. 青藏高原研究: 横断山考察专集(一). 昆明: 云南人民出版社, 1983. 185—204
- 33 徐文铎. 中国东北主要植被类型的分布与气候的关系. 植物生态学与地植物学学报, 1985, 10(4): 254—263
- 34 Fang J Y, Yoda K. Distribution of tree species along the thermal gradient (climate and vegetation in China IV). *Ecol Res*, 1990, 5: 291—302
- 35 施雅风, 沈永平. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初探. 科学导报, 2003, 2: 54—57
- 36 Tranquillini W. *Physiological Ecology of Alpine Timberline*. New York: Springer Verlag, 1979

(2006-01-10 收稿, 2006-02-20 接受)