

文章编号:1001-4810(2011)02-0119-09

# 晚更新世晚期以来滇西北高原的孢粉记录 与我国南方石笋记录的气候变化对比研究

石胜强,袁道先,罗伦德,郝秀东,赵增友

(西南大学地理科学学院,重庆 400715)

**摘要:**运用古气候参数方法对滇西北高原 YXL 剖面进行孢粉分析,结合定年数据,重建了该地区晚更新世晚期以来的植被变化和气候变化并与我国南方石笋记录等进行对比分析。研究表明:从大约 31 570 cal. yr BP 以来,滇西北高原总体经历了温凉偏干—冷干—略转暖湿—冷干—转暖增湿—冷干—转为暖湿—温和偏干—温凉偏干的气候变化历程,其间多有反复;YXL 剖面孢粉记录与董哥洞、葫芦洞石笋记录在古气候变化大趋势上基本一致,对 H2、H1、YD、MWP、LIA 等气候事件反映明显;YXL 剖面孢粉记录中全新世大暖期升温增湿的速度慢于石笋记录和冰芯记录,其干冷气候期持续时间较长,这些特点均与高原环境有关,并受到青藏高原的影响,具有一定的区域性意义。

**关键词:**滇西北高原;香格里拉;孢粉记录;石笋记录;孢粉带;植被;气候变化

**中图分类号:**P532;Q913.85 **文献标识码:**A

石笋具有定年分辨率高、时间跨度较长的特点,在重建短时间尺度的气候和环境变化方面具有其它地质记录无法替代的优势,目前已经成为全球变化研究中的重要信息库<sup>[1-4]</sup>。孢粉能直接反映古植被的状况,也是古环境研究的重要手段<sup>[5]</sup>,但长期以来,孢粉鉴定的精度一直处于科、属水平,而同科同属的植物其生态意义完全可能大相径庭,这就可能导致研究结论出现偏差<sup>[6]</sup>。本文采用 Luopacias 孢粉鉴定系统<sup>[7-10]</sup>进行孢粉鉴定,可以将大部分孢粉鉴定到种的水平。如此,每一种孢粉对应的生态意义(古气候参数)得以确定,每一孢粉组合的生态意义(古气候参数)就可以通过加权集合而确定。这不仅提高了孢粉记录的精度,还促使孢粉记录与其他地质记录进行定量对比成为可能。

滇西北高原地处西南季风窗口地带,现代气候兼具高原气候和季风气候特征。晚更新世后期以来该地区地壳多次发生差异性升降变化,相应的气候和环境发生了怎样的变迁值得深入研究。本文选定高原北部香格里拉县 YXL 剖面进行孢粉分析,运用古气

候参数方法<sup>[11]</sup>,结合定年数据来重建该地区晚更新世晚期以来的植被和气候,并与石笋记录进行对比。

## 1 研究区概况

香格里拉县地处青藏高原东南缘横断山脉三江纵谷区东部;新生界第四系更新统地层主要为沿着河、湖、山间盆地及山坡、山麓堆积的冲积、洪积、冰积、湖积、坡积、残积物;全新统地层主要是山间盆地及河流堆积,主要分布在大中甸、小中甸等山间盆地;属温带和寒温带季风气候(河谷地区属北亚热带季风气候);为云南亚热带常绿阔叶林植被区向青藏高原高寒植被区过渡地带,植被类型丰富,按照《云南植被》划分标准,包括如下十种类型:温性针叶林、灌丛、亚热带常绿阔叶林、落叶阔叶林、暖性针叶林、竹林、稀疏灌木草丛、草甸、高原湖泊水生植被。

YXL 剖面自然地理特征:剖面海拔 3 310 m,位于香格里拉县中部大中甸坝子上的县城西郊(图 1),

基金项目:国土资源部、广西壮族自治区岩溶动力学重点实验室开放课题基金项目(KDL2008-15),西南大学青年基金项目(swu208001),现代古生物学与地层学国家重点实验室开放基金(073112)

第一作者简介:石胜强(1974—),男,讲师,西南大学在职博士生,主要从事孢粉学与第四纪环境研究。E-mail:ssq@swu.edu.cn.

收稿日期:2011-02-03

大中甸坝海拔在 3 260~3 360 范围内,面积 158.53 km<sup>2</sup>,由洪积、冲积、湖积物组成。YXL 剖面所在地建塘镇年平均气温 5.9℃,一月(最冷月)月均温为-3.2℃,七月(最热月)月均温为 13.5℃;年降水量为 648.6 mm,其中 6-10 月降水量为 472.2 mm,占全年降水量的 72.8%。剖面所在小地貌特征为山间凹地,土壤为棕壤,原生植被为寒温性针叶林和亚高山寒温灌丛,现代植被状况为:山坡上为人工栽培的冷杉林,山麓地带带有少量次生的落叶阔叶树种,样点所在凹地处为禾草草甸。

## 2 研究方法

### 2.1 剖面分析

YXL 剖面(29°49'N, 99°42'E);海拔 3 310 m,深 4.4 m,以淤泥、粘土和砂、砾石为主,系典型的第四纪松散堆积。其中,底部至 3.85 处为黑色淤泥;3.85~3.2 处为黑色含细砂砾泥,砾石粒径约 3 mm;3.2~2.9 处为黑色淤泥;2.9~2.7 处为黄色含细砂淤泥;2.7~1.95 处为青灰色淤泥;1.95~1.91 处为黄色淤泥,乃一明显过渡地层,其下方以淤泥为主,其上方以粘土为主;1.91~1.3 处为黄色含砂砾粘土,砾石粒径约 8 mm;1.3~1.13 处为黄色粘土;1.13~0.85 处为黄色含砾石粘土,砾石粒径约 7 mm;0.85~0.65 处为浅黄色含少量砾石粘土;0.65~0.35 处为黄色粘土,夹杂大量炭屑;0.35~0.10 为黄色粘土;0.10 至地表为腐

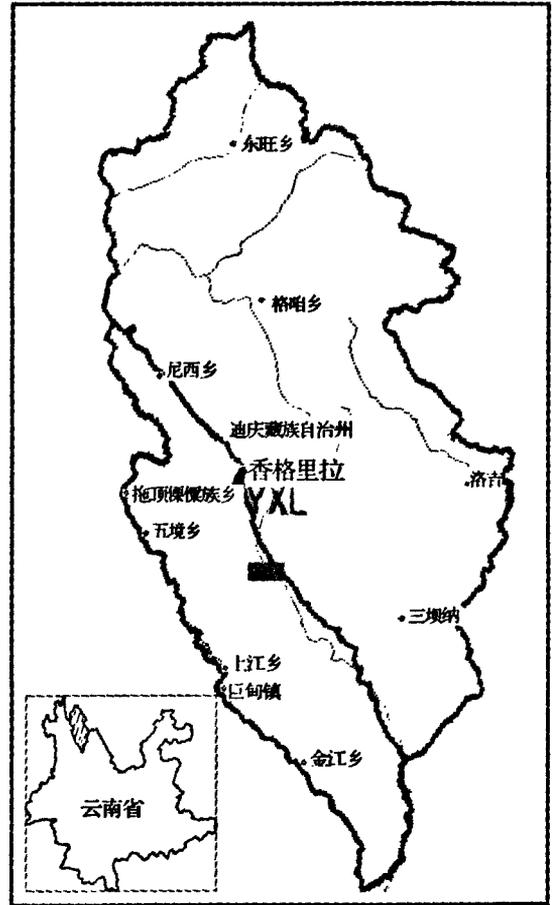


图 1 研究区及剖面(YXL)位置

Fig. 1 Overview of the study area and the location of YXL section

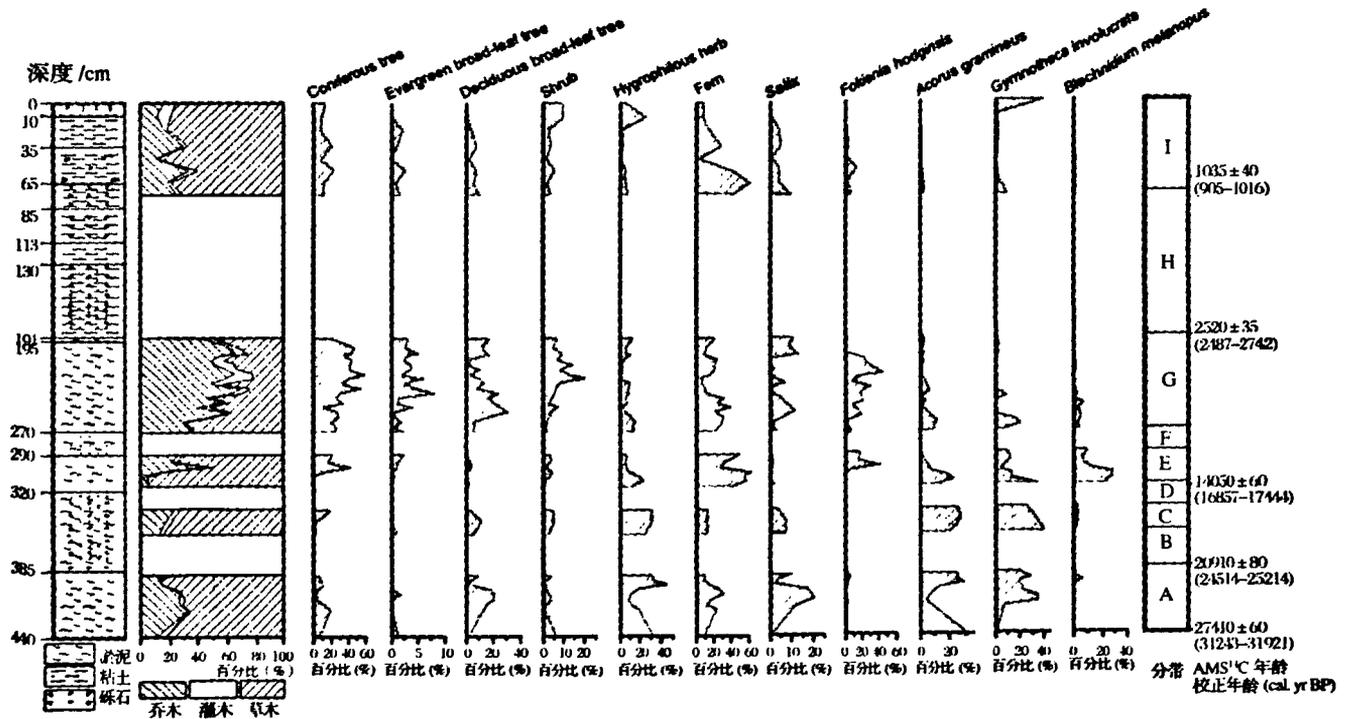


图 2 YXL 剖面孢粉谱及地质年代图

Fig. 2 Diagram showing sporopollen spectrum of the YXL section and the geologic time

殖土层(图2)。

## 2.2 孢粉分析

根据岩性相近的原则,我们在淤泥部分基本按照4 cm间距采取了45个样品,在粘土部分按照10 cm或20 cm间距采取了16个孢粉样品以及1个表土样品。样品采用常规酸碱法处理,用重液浮选结合过筛收集。样品鉴定采用Luo-pacias系统<sup>[7-10]</sup>进行,经统计,44个样品统计粒数在200粒以上,其中200~400粒3个,400~1 000粒37个,1 000粒以上4个;另有3个样品因孢粉较少仅统计出100~200粒;其余15个样品孢粉稀缺,达不到统计标准。

## 2.3 测年数据

样品AMS-<sup>14</sup>C数据由中国科学院广州地球化学研究所AMS-<sup>14</sup>C制样实验室和北京大学核物理与核技术国家重点实验室联合完成。

剖面底部(深度:4.40 m)AMS-<sup>14</sup>C年龄为27 410±160 a BP(校正年代为31 243~31 921 cal. yr BP(2 $\sigma$ )),3.85 m处年龄为20 910±80 a BP(校正年代为24 514~25 214 cal. yr BP(2 $\sigma$ )),3.20 m处年龄为14 050±60 a BP(校正年代为16 857~17 444 cal. yr BP(1 $\sigma$ )),1.95 m处为2 520±35 BP(校正年代为2 487~2 742 cal. yr BP(2 $\sigma$ )),0.65 m处为1035±40 a BP(校正年代为905~1 016 cal. yr BP(2 $\sigma$ ))。视淤泥部分和粘土部分的沉积速率相近,分别进行二次曲线估计(淤泥部分: $T = -18950.7 + 107.2527d + 0.0172d^2$ ;粘土部分: $T = -60 + 16.6923d + 0.0153d^2$ 。式中, $T$ 为样品年龄,单位:a; $d$ 为深度,单位:cm。)得到各个样品的年龄(图2)。

## 3 孢粉带划分及古植被、古气候推演

YXL剖面所在地——大中甸坝子在晚更新世及其以后一段时期曾湖泊广布,后期随着地壳多次升降,湖河环境互易,形成湖、河交替相沉积物<sup>[12]</sup>。这一特征在YXL剖面沉积物特征上明显表现:淤泥、粘土、沙砾等交替分布。从孢粉组合特征来看,整个YXL剖面中蕨类占比高达23.2%,这也是该地地势较低,潜水位较高的反映;整个剖面中草本的比例(32.5%)超过乔木比例(30.7%)和灌木比例(4.9%),乔木中针叶树种的比例(19.5%)高于阔叶树种(11.2%),反映了该地气候总体温凉偏干的特征。

根据每个样品的孢粉组合特征将YXL剖面62个样品划分为9个孢粉带(图2)。

A带:(4.40~3.85 m),本带包括YXL01~L09这9个样品。孢粉含量从底部到3.85 m处表现出

显的中等—丰富—差的变化特征。本带孢粉类型偏少,最高的YXL03样品有40种,最低的YXL09样品仅19种。本带草本植物花粉占比(52.1%)远高于乔木(22.6%),蕨类占比(18.2%)低于整个剖面的平均水平(23.2%),这是气候总体偏干的表现;乔木中阔叶树种占比(13.8%)高于针叶树种(8.8%)说明当时气候温和。

本带可以进一步划分为三个亚带。

A1亚带,以YXL01样品为代表。该亚带的典型特征是草本植物花粉(以羊茅*Festuca ovina*为主)具有绝对优势,占到了总量的74.1%;蕨类孢子占比仅为9.1%,远低于整个剖面的平均水平;乔木中针叶树种占比(6.4%)高于阔叶树种(2.3%);灌木占比(6.2%)超过整个剖面的平均水平(4.9%)。这样的孢粉组合特征是典型的高原草甸的表现,指示当时气候温凉偏干。

A2亚带,包括YXL02~06这5个样品。该亚带的主要特征为:虽然草本仍然占有优势(44.3%),但阔叶树种(以柳属*salix*为主)(8.3%)和针叶树种(以滇柏*Fokienia hodginsis*为主)(9.3%)也达到了一定的比例,蕨类孢子(以宽叶水韭*Isoetes japonica*为主)所占比例也上升到21.3%。说明当时气温有所升高,降水也有所增加,气候温润,形成针阔混交林的雏形。

A3亚带,包括YXL07~09这3个样品。该亚带的孢粉种类不断减少(30—26—19种),孢粉浓度也明显下降。孢粉组合特征又演变为A1亚带的情形:草本植物花粉(以白苞裸蒴*Gymnotheca involu-crata*为主)(72.3%)具有绝对优势;乔木中针叶树种占比(8.4%)高于阔叶树种(4.2%);蕨类孢子占比仅为10.7%,远低于整个剖面的平均水平。这表明气候又回归温凉偏干,发育高原草甸。

B带:(3.85~3.55 m),孢粉稀缺带,包括YXL10~12这3个样品。该带孢粉稀缺,收集制片后经镜检每片不超过20粒。从A2亚带至A3亚带的趋势来看,该带对应冷干气候。

C带:(3.55~3.35 m),本带包括YXL13~15这3个样品。本带孢粉含量较之B带有所增加,YXL13~15样品分别统计出184、402和241粒孢粉(5片)。从孢粉组合特征来看,仍然是草本(以白苞裸蒴为主)占据了绝对优势(65.2%);乔木中针叶树种占比(8.4%)和阔叶树种(8.4%)相当;蕨类占比(13.1%)低于整个剖面的平均水平;灌木占比(4.1%)也低于整个剖面的平均水平。上述特征仍然是高原草甸的表现,指示当时气候温凉偏干。

D带:(3.35~3.16 m),孢粉稀缺带,包括YXL16和YXL17这两个样品。该带孢粉稀缺,收集制片后镜检中每片不超过20粒。该孢粉稀缺带的再次出现反映出从B带开始的冷干气候经过C带的短暂回暖增湿后又趋于冷干。

E带:(3.16~2.90 m),本带包括YXL18-24这7个样品。本带孢粉种类仍然偏少,介于22~43种之间,但孢粉含量比较丰富。本带蕨类孢子非常丰富,占到孢粉总量的47.6%,草本占比则从前期的50%以上降到31.3%,反映了前期偏干的气候逐步转湿;针叶树种占比上升到14.0%,但以滇柏等偏暖湿种类为主,反映出气候转暖的特征。

本带可以进一步划分为2个亚带。

E1亚带,包括YXL18-20这3个样品。本亚带的孢粉组合特征为:蕨类孢子(以乌木蕨*Blechnidium melanopus*为主)占比迅速升高至52.1%,草本(以白苞裸蒴和菖蒲*Acorus calamus*为主)也有42.0%的占比,其他生态类型的孢粉含量均不及总量的2.0%。这是气候转暖增湿过程中形成高原沼泽草甸的孢粉表现。

E2亚带,包括YXL21-24这4个样品。本亚带中蕨类孢子(以尖片角蕨*Cornopteris acutiloba*为主)含量仍然高达44.3%;草本占比下降至23.4%;针叶树种(以滇柏为主)却迅速上升至23.3%;灌木和阔叶树种仍然很少,仅占3.4%和3.3%。这是植被类型由沼泽草甸逐步向针叶林过渡的表现,反映出气候继续转暖增湿的特征。

F带:(2.90~2.71 m),只有YXL25这一个样品。本带孢粉稀缺,收集制片后镜检中每片不超过20粒。本带仅一个样品,历时较为短暂,从前期气候变化的趋势来看,应该对应一个气候突变过程。

G带:(2.71~1.93 m),本带包括YXL26-45这20个样品。本带除了YXL35、YXL37外,其余样品的孢粉含量均较丰富,孢粉种类也较多,介于36~66种之间。与前期E2亚带对比,本带针叶树种占比进一步攀升至33.4%;阔叶树种迅速上升至20.6%;灌木占比(6.3%)也超过全剖面平均水平;蕨类和草本则分别下降至21.6%和21.2%。上述特征反映出F带对应的气候突变以后,气候重新趋于暖湿,针阔混交林逐步形成。

本带可以进一步划分为3个亚带。

G1亚带,包括YXL26-33这8个样品。相对于E2亚带,蕨类占比下降至29.2%,阔叶树种(以柳属、桦属*Betula*为主)则迅速上升至18.5%,针叶树种(以滇柏为主)也上升至24.8%,草本占比

(23.8%)和E2亚带大致相当。反映出气候经历突变后的反弹过程,针阔混交林逐步形成。

G2亚带,包括YXL34-37这4个样品,本亚带孢粉浓度明显下降,孢粉类型也偏少(平均38种)。本带蕨类占比急剧减少,仅占到孢粉总量的9.8%;阔叶树种占比继续上升至21.5%,但其中占比最高的是白桦(*Betula platyphylla*)(5.6%)(冷干型);针叶树种(37.1%)也有增多,以滇柏(*Fokienia hodginsis*)(暖型)为主,但其中冷干型的落叶松(*Larix potaninii*)也从G1亚带的2.7%迅速上升到9.8%;草本占比(23.7%)变化不大,但以冷型的列当(*Orobanchae caerulescens*)为主(11.1%);灌木占比(7.8%)远高于全剖面平均水平但以荆条(*Vitex negundo var. incisa*)(5.6%)(耐旱型)为主。上述特征反映出该亚带对应着气候趋于暖湿过程中出现的一个减湿降温过程。

G3亚带,包括YXL38-45这8个样品,本亚带孢粉含量丰富,孢粉类型也最为丰富(36~63种)。以滇柏(14.6%)和刺柏(*Juniperus formosana*)(14.2%)(暖湿型)为主的针叶树种花粉占比最高,占到了孢粉总量的41.7%;蕨类孢子的比例又有所提高,达到了16.7%;草本和阔叶树种大致相当,分别占到了孢粉总量的17.4%和14.3%;灌木占比也是整个剖面最高的,达到9.1%。以上特征可以推断当时的植被类型为以暖针叶林为主的针阔混交林,说明当时的气候比较温暖湿润。

H带:(1.93~0.75 m),孢粉稀缺带,包括YXL46-54这9个样品。该带孢粉稀缺,但是鉴于其地层厚度较大,我们仍然对其进行了孢粉鉴定与统计。统计发现,样品中除了落叶松和香青桧(*Juniperus squamata*)之外冷型种类并不多,相反倒出现了之前没有出现过的萼苞蛇菰(*Blanophora involucreta*)、矮茴香(*Drimys aromatica*)和红泽兰(*Championella japonica*)等暖型种类,可见本带孢粉稀缺的主要原因在于干而非冷。结合G3亚带及其上方的I带可以大致推断该带对应着温和偏干的气候。

I带:(0.75~0 m),本带包括YXL55-62这8个样品。本带孢粉含量比较丰富,孢粉类型也比较丰富,介于38~66种之间。本带针叶树种(11.8%)、阔叶树种(4.6%)和灌木(5.9%)所占比重较之G3亚带大幅下降;代之以草本和苔藓,分别占到30.4%和29.1%;蕨类占比(18.2%)低于整个剖面平均水平。反映出气候又趋于冷干气候特征。

本带可以进一步划分为2个亚带。

I1亚带,本亚带包括YXL55-57这3个样品。

本亚带蕨类(以乌毛蕨 *Blechnum orientale* 和里白 *Hicriopteris glauca* 为主)最为丰富(47.0%);草本(以大蝎子草 *Girardinia palmata* 为主)(22.8%)次之;针叶树种(以滇柏为主)占到15.6%;阔叶树种(以柳属为主)占到10.2%;灌木最少,仅占4.0%。对照G3亚带-H带以来的走势可以推断为气候又再度趋于润湿、气温有所下降,植被类型为针阔混交林。

I2亚带:包括YXL58-62这5个样品,本亚带苔藓孢子(以小反纽藓 *Timmia diminula* 为主)最为丰富,占到孢粉总量的37.2%;草本(以白苞裸蒴为主)占比上升到32.5%;蕨类占比迅速下降到10.0%;阔叶树种占比迅速下降到3.1%;针叶树种占比也下降到10.7%。上述特征反映出再次形成高原草甸的趋势,是气候趋于冷干的结果。

#### 4 定量重建古气候及对比

上述分析定性推断出了滇西北高原晚更新世晚期以来的植被变化和气候演化。利用孢粉学定量重建古气候已成为第四纪古环境研究的一个发展趋势,目前广泛应用的方法各具特色但又各有局限性<sup>[13]</sup>。本文采用古气候参数方法<sup>[11]</sup>建立了YXL剖面古温度、古降水变化折线图(图3,图中四处中断对应孢粉

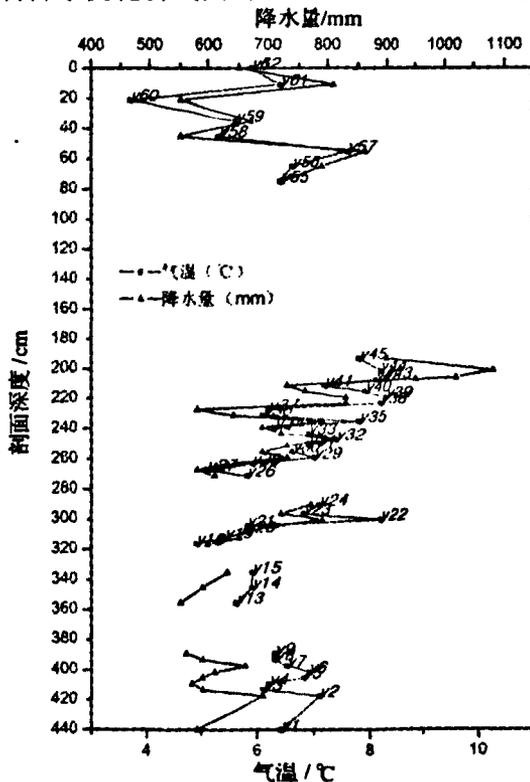


图3 YXL剖面古温度和古降水量变化折线图

Fig. 3 Line graph showing the paleo-temperature and paleo-precipitation change analyzed from YXL section

稀缺带)。该方法的基本原理是:特定植物有其相应的分布区域,该区域的气候特征可以捕捉;第四纪植物的生态特征与现代植物基本相同,可以以现代植物的生态特征作为桥梁来对第四纪植物孢粉谱进行定量分析。具体方法是:根据孢粉对应的各类植物的现代分布区域(经度、纬度和海拔高度)来确定该类孢粉的气温参数和降水参数;利用各个样品的孢粉百分比组成来加权计算出该样品的气温参数和降水参数;用表土孢粉气候参数与现代气候数据的差值来对各个样品的气候参数进行修正。为方便与石笋记录及冰芯记录进行对比,我们建立了YXL剖面孢粉记录与冰芯、石笋记录<sup>[14-15]</sup>对比图(图4,图中虚线对应孢粉稀缺带,图中年龄为校正年龄)。

结合定年数据详细分析如下:

A带:27.4~20.9 kaBP,古温度参数平均为6.5 °C,古降水量参数平均为600 mm。其中,A1亚带(27.4~24.6 kaBP),古温度参数为6.4 °C,古降水量参数为580 mm;A2亚带(24.6~22.3 kaBP),古温度参数为6.6 °C,古降水量参数为610 mm;A3亚带(22.3~20.9 kaBP),古温度参数为6.4 °C,古降水量参数为600 mm。与香格里拉现代气候(5.9 °C,648.6 mm)相比,本带香格里拉气候气温略高,降水略少,属于温凉偏干的气候。中国大部分地区显示了35 000±3 000 aBP具有间冰阶暖湿气候特征,35 kaBP前后的海洋氧同位素3阶段晚期均出现过比现代更为温暖的气候<sup>[16]</sup>。那么,香格里拉本时段气候应当是上述暖湿气候向干冷气候转变的一个过渡期的表现,可以与西北欧孢粉分期魏塞尔冰期中Poud-of-stillfyiad期进行对比。国内来看,位于香格里拉以南约150 km的鹤庆古湖孢粉记录<sup>[17]</sup>显示出由27.2 kaBP之前的温凉转为冷湿的特征;与南京葫芦洞石笋记录对比,二者所反映的古气候变化大趋势是一致的,特别是A2亚带,反映了总体温凉偏干气候背景中趋于湿润的一个过程,并且在这一过程中还有反复(图4)。

B带:20.9~17.7 kaBP。该带为孢粉稀缺带,指示该时段内香格里拉气候恶劣,几乎没有植被生长。这一时段可以与Heinrich2快速变冷事件<sup>[18]</sup>对比;鹤庆古湖孢粉记录显示本时段内气候冷湿为主;而四川若尔盖盆地RM孔孢粉记录<sup>[19]</sup>“非常低的孢粉浓度和松和云杉的高比值……显示末次冰盛期气候寒冷干燥”;若尔盖DC剖面孢粉记录<sup>[20]</sup>中也有类似表现,作者进行了大量对比判断当时为干冷的恶劣气候,且这一冷干时期具有全球性,但其年代稍晚,在18~16 kaBP之间。南京葫芦洞石笋记录对Hein-

rich2 也有明显反映,相对而言,孢粉记录显示的冷干时间要长得多(图 4)(容后讨论)。

C 带:17.7~15.6 kaBP。古温度参数平均为 5.8 °C,古降水量参数平均为 590 mm,比现代气候略干冷。三个样品对应气候参数依次递增,反应了气候转暖增湿的趋势。这和南京葫芦洞石笋记录显示的变化趋势一致;若尔盖 DC 剖面孢粉记录也显示 16~15 kaBP 气候转暖的特征;若尔盖 RM 孔记录显示 18~15 kaBP 气温和降水急剧增长。

D 带:15.6~13.6 kaBP。该带为孢粉稀缺带,指示该时段内气候恶劣,植被难以生长。这一时段可以与 Heinrich1 快速变冷事件<sup>[18]</sup>对比(图 4)。H1 事件的葫芦洞 PD 石笋记录显示 δ<sup>18</sup>O 快速下降,至约 15 800 yrBP 降到最低(图 4);葫芦洞 YT 石笋记录<sup>[21]</sup>显示 H1 快速降温事件开始于 16 140 ± 100 aBP,持续约 800 年;而 YXL 孢粉记录显示从大约 16 300 cal. yr BP,气温已经开始回升(图 4)(容后讨论)。滇川两地孢粉记录中,若尔盖地区 DC 剖面显

示 15~13 kaBP 再次出现冷干气候;红原泥炭剖面<sup>[22]</sup>则显示 16.0~13.4 kaBP 期间以干冷气候为主。

E 带:13.6~11.0 kaBP。古温度参数平均为 6.3 °C,古降水量参数平均为 700 mm。其中,E1 亚带(13.6~12.4 kaBP),古温度参数为 5.4 °C,古降水量参数为 640 mm;E2 亚带(12.4~11.0 kaBP),古温度参数为 7.0 °C,古降水量参数为 750 mm。本带气温和降水明显回升,在大约 12.0 kaBP 前后(对应 YXL22 样品)达到高点之后略有下降,这一特征与格陵兰冰芯记录非常接近(图 4),E1 亚带和 E2 亚带也分别可以与西北欧孢粉记录中老仙女木期和博林暖期对比;滇川两地孢粉记录中,红原泥炭剖面呈现同样趋势,若尔盖 DC 剖面以转暖为主,鹤庆古湖记录显示气温回升、湿度下降;与葫芦洞和董哥洞石笋记录相比,大的趋势是一致的,但高值的出现偏早了大约 1 400 a(图 4)。

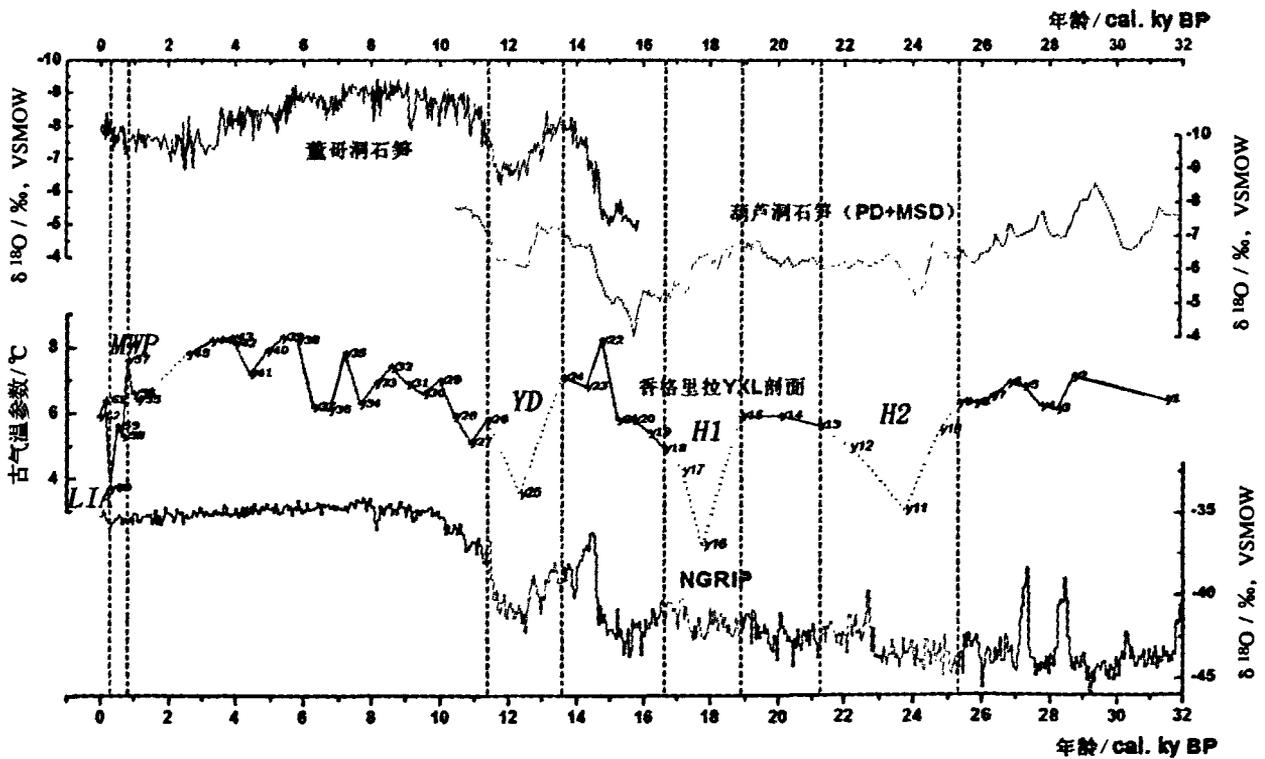


图 4 YXL 剖面孢粉记录与石笋记录<sup>[13-14]</sup>、冰芯对比

Fig. 4 Contrast of sporopollen among the YXL record, the stalagmite record and the ice core record

F 带:11.0~9.2 kaBP,该带为孢粉稀缺带,指示该时段内气候干冷,植被难以生长。本时段可以与新仙女木期(Youngest Dryas)对比(图 4)。滇川两地孢粉记录中,鹤庆古湖孢粉记录显示在 11 100 aBP 出现快速降温,红原泥炭剖面孢粉记录显示 10.5~

10 aBP 对应新仙女木期。YD 在葫芦洞和董哥洞石笋记录以及格陵兰冰芯记录中也有明显反映(图 4)。

G 带:9 200~2 500 aBP。古温度参数平均为 7.1 °C,古降水量参数平均为 760 mm,对应全新世大暖期。其中,G1 亚带(9 200~6 600 aBP),古温度参数

为 6.5 °C,古降水量参数为 690 mm,表现为新仙女木事件后气候快速转暖增湿,这一过程中略有反复(YXL27、YXL30 样品),至大约 7 000 aBP 前后(YXL32 样品)达到高值转为下降,这与红原泥炭剖面、冕宁彝海洼地钻孔<sup>[23]</sup>和若尔盖地区 DC 剖面孢粉记录的变化趋势均较一致。G2 亚带(6 600~4 900 aBP),古温度参数为 6.6 °C,古降水量参数为 670 mm,本亚带气温放缓增长,降水量甚至略有下降,但在 5 900 aBP 前后(YXL35 样品)有反复,相似特征也出现在上述三个剖面之中;G3 亚带(4 900~2 500 aBP),古温度参数为 8.0 °C,古降水量参数为 890 mm,本亚带是香格里拉最温暖湿润的时期,仅在 3 900 aBP 前后(YXL41 样品)气候参数有所下降。鹤庆盆地 HQ 孔孢粉记录<sup>[24]</sup>显示“6.98 kaBP 以来总体温暖湿润”。王开发<sup>[25]</sup>通过对孢粉植物群等的研究,认为我国南方约在 4 500 aBP 发生一次短暂变冷降温事件。邵晓华、汪永进等<sup>[26]</sup>在湖北神农架石笋记录中发现 4.3 kaBP 前后季风降水突然减少,并指出红原泥炭、青海湖沉积物、内蒙古岱湖沉积物以及新疆民勤盆地野麻湖平面变化等各种地质记录中均有类似表现。

与董哥洞石笋记录对比,全新世以来不断反复但总体升温增湿的大趋势是一致的,但升温增湿的速率以及相应的峰值出现时间上有一定差异(图 4),容后讨论。

H 带:2 500~1 200 aBP。该带为孢粉稀缺带,如前所述,本带虽然孢粉稀缺,但鉴定中却发现了较多暖型植物孢粉,可见本带孢粉稀缺的原因主要为干而非冷,可以大致推断该带对应温和偏干气候。这一结论与四川冕宁地区“2.6~2.2 aBP,气候温暖偏干;2.2~1.2 kaBP 温凉偏湿,其中有一次温干过程”和湖北神农架大九湖孢粉记录<sup>[26]</sup>“4.051~0.911 kaBP 的孢粉带 V 体现晚全新世温干的气候”比较一致;与成都平原<sup>[27]</sup>从“3 600~3 400 aBP,气候温暖湿润;3 400~2 600 aBP 气温下降,环境更加湿润”到“2 600~900 aBP,气温开始逐渐回升,气候温和偏湿”的变化趋势也是一致的。本时段内董哥洞石笋记录显示气候总体温凉偏干,前期有较大的波动(图 4)。

I 带:1 200 aBP 至今。古温度参数平均为 5.9 °C,古降水量参数平均为 700 mm。其中,I1 亚带(1 200~880 aBP),古温度参数平均为 6.9 °C,古降水量参数平均为 790 mm。本亚带 3 个样品的气候参数逐级递增,至 880 aBP 前后(对应 YXL57 样品)气候参数达到最高(7.6 °C、860 mm),这应该是

中世纪暖期(MWP)的反映。I2 亚带(约 880 aBP 至今),古温度参数为 5.4 °C,古降水量参数为 650 mm。其中从大约 560 aBP(对应 YXL59 样品)至 320 aBP(对应 YXL60 样品)为一明显降温过程,可以与小冰期(LIA)对比,与西部树轮指数<sup>[28]</sup>反映的约在 1700 年前后气温降到最低点一致。董哥洞石笋记录中 LIA 的特征比较明显,但 MWP 没有突出表现(图 4)。

## 5 讨论

### 5.1 全新世以来孢粉记录和石笋记录的差异

YXL 剖面孢粉记录所显示的全新世以来气候变化的走势与董哥洞石笋记录和格陵兰冰芯记录有较大差异,表现在:香格里拉地区进入全新世以来总体升温增湿的速度比董哥洞石笋记录和格陵兰冰芯记录慢一些,峰值出现的时间相应滞后,直到全新世中期(4.5 aBP,约 5 500 cal. yr BP)才出现,而后者却出现在早全新世约 9 000~7 000 cal. yr BP 这一时段(图 4)。笔者查阅了邻近地区的孢粉记录:鹤庆盆地<sup>[24]</sup>(肖霞云等),128~6.98 kaBP 的最后一个阶段气温升高,6.98 kaBP 以来总体温暖较湿润;四川冕宁(童国榜等),5.0~2.6 kaBP,气温升高,气候温暖,半湿-偏干;四川红原(王燕等),6.1~5.8 kaBP 显著降温,5.8~5.0 kaBP 气候改善向温凉发展,5.0~2.0 kaBP 气候变得温暖湿润。上述地区的研究结果和香格里拉比较一致,而这几个地区均与青藏高原毗邻,海拔较高,现代气候往往有高原气候的特点。而青藏高原全新世中期的气候比早期温暖湿润<sup>[29]</sup>。由此可以推论:全新世伊始,世界各地气温升高,湿度增大,青藏高原冰川退化,积雪融化,这一过程需要消耗大量热能,因此高原升温较慢,其冷源效应影响到毗邻地区;随着气候进一步变得温湿,高原冰雪覆盖面积大幅下降,高原的热源效应得以发挥,毗邻地区受其影响气温升高。青藏高原这一冷热源性质的转化在影响到周边地区的气温变化的同时,也通过大气环流如高原季风等带动西南季风逐渐增强,降水增加,但与此同时,西南季风的路径也发生变化,进而导致降水的空间分布格局的改变,表现在香格里拉地区是气温和降水基本同步增长(图 4),直至 2 600 aBP 以后西南季风衰退,降水带南迁<sup>[23]</sup>。

### 5.2 Heinrich 2 和 Heinrich 1 快速变冷事件的孢粉记录

B 带(20.9~17.7 kaBP,约 24 900~21 300 cal. yr BP),孢粉稀缺带,对应 H2 事件。本带所显示的冷干气候持续时间比石笋记录要长得多(图 4),在同

期的若尔盖 DC 剖面、鹤庆古湖和若尔盖盆地 RM 孔孢粉记录中也有类似表现。这说明高原地区植物对冷干气候的反应更为敏感。究其原因,高原地区气候本就偏冷偏干,一旦遭遇冷干气候事件,植物将更早接受生态阈值的考验从而率先反映在样品状况中;而气候一旦转暖,高原的冷源效应又导致其升温增湿相对滞后,从而形成较长的孢粉干冷气候期。然而 YXL 孢粉记录中,D 带(15.6~13.6 kaBP,约 18 900~16 660 cal. yr BP,孢粉稀缺带,对应 H1 快速变冷事件)所指示的冷干气候期却比石笋记录 H1 事件提早结束(图 4)。查阅同期滇川两地其他孢粉记录,若尔盖地区 DC 剖面显示 15~13 kaBP 气候干冷;红原泥炭剖面则显示 16.0~13.4 kaBP 期间以干冷气候为主;鹤庆古湖 HQ 孔记录表现为升温增湿过程中的一次快速降温事件;若尔盖 RM 孔孢粉记录总体表现为升温增湿。上述记录中若尔盖 DC 剖面与红原泥炭剖面与 YXL 记录比较接近,而其他记录却差异较大,可见对 H1 事件的响应各地有较大差异,有待进一步提高取样密度获取更高分辨率的孢粉记录并找到相应的区域气候特征后方能够进行对比分析。

### 5.3 H 带孢粉稀缺的成因推导

H 带(2 500~1 200 aBP),从 YXL 剖面岩性变化来看,1.95~1.91 m(约 2 500 aBP 前后)处为一薄层黄色淤泥,其下以淤泥为主,其上以粘土为主,乃一明显过渡地层,我们推断该时段可能是一个重要的气候变化拐点。通过对比我们发现在四川冕宁<sup>[16]</sup>和成都平原<sup>[18]</sup> 2.6 kaBP 也是孢粉带的时间界线,但二者在这一时点前后的孢粉组合特征有所差异(前已述及),共同之处在于变化趋势上均趋于偏干气候,结合鉴定统计中出现较多暖型孢粉的情形,参考施雅风先生<sup>[30]</sup>的观点“青藏高原全新世总的气候特征是早中期气候比较温暖湿润,而晚期开始气候明显干旱,且变化明显”,我们大致推断该时段对应温和偏干的气候。至于三地孢粉组合特征上的差异,我们认为可能是由于地势高低、地貌类型导致,也可能是相对位置(相对古天气系统)的差异,甚至可能是由于不同地区地壳差异性升降等因素导致。

## 6 结 论

通过对 YXL 剖面孢粉记录的分析并与南方岩溶石笋记录等进行对比,我们得到如下认识:

(1)从大约 31 570 cal. yr BP 以来,滇西北高原总体经历了温凉偏干—冷干—略转暖湿—冷干—转

暖增湿—冷干—转为暖湿—温和偏干—温凉偏干的气候变化历程,其间多有反复;植被类型相应经历了草甸—荒芜—草甸—荒芜—针叶林—荒芜—针阔混交林—荒芜—针阔混交林的演变序列。

(2)YXL 剖面孢粉记录与董哥洞、葫芦洞石笋记录在古气候变化的大趋势上基本一致,对 H2、H1、YD、MWP、LIA 等全球性或半球性气候事件反映明显。

(3)YXL 剖面孢粉记录中全新世大暖期升温增湿的速度慢于中国南方石笋记录和格陵兰冰芯记录,其干冷气候期持续时间较长,这些特点与高原环境有关,并受到青藏高原的影响,具有一定的区域性意义。

### 参考文献

- [1] Yuan D X, Cheng H, Zhang M L, et al. Timing duration and translations of the last interglacial Asian Monsoon [J]. *Science*, 2004, 304: 575—578.
- [2] Winograd I J, Coplen T B, Landwehr J M, et al. Continuous 500 000 year climate record from vein calcite in Devils Hole, Nevada [J]. *Science*, 1992, 258: 255—260.
- [3] 邵晓华,汪永进,孔兴功,等. 南京葫芦洞石笋生长速率及其气候意义讨论 [J]. *地理科学*, 2003, 23 (3): 304—310.
- [4] Dorale J A, Edwards R L, Ito E, et al. Climate and Vegetation History of the Midcontinent from 75 to 25ka: A Speleothem Record from Crevice Cave, Missouri, USA [J]. *Science*, 1998, 282: 1871—1874.
- [5] 王开发,王宪曾. 孢粉学概论 [M]. 北京:北京出版社,1983:2.
- [6] 王瑞江,陈忠毅. 海桑科的系统演化及地理分布 [J]. *广西植物*, 2002, 22(3): 22—27.
- [7] 罗伦德. 孢粉编码鉴定与资料查询微机数据库——POCIAS 系统(中文版) [J]. *古生物学报*, 1998, 37(1): 133—136.
- [8] 罗伦德. 孢粉双十编码分类鉴定系统的研制与应用 [J]. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 1998, (3): 100—107.
- [9] Luolunde. Palaeoecology-Environmental evolution during the late Quaternary in the Chengdu plain, China [C]. //Liu Tungsheng, Luo Lunde. *Environmental change & Quaternary research*. Chongqing: Southwest China Normal University Press, 1996: 1—14.
- [10] 罗伦德. 重庆嘉陵江一级阶地孢粉分析及其晚全新世古气候的演变 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1998, 9(4): 68—85.
- [11] 罗伦德. 第四纪孢粉分析中古气温、古降水指数的计算方法——以成都锦江一级阶地研究为例 [J]. *贵州师范大学学报*, 1996, 14(3): 41—51.
- [12] 云南省中甸县志编纂委员会. 中甸县志 [M]. 昆明:云南民族出版社,1997: 81.
- [13] 潘安定,陈碧娟,刘会平,等. 孢粉学定量重建古气候方法探讨 [J]. *热带地理*, 2008, 28(6): 489—497.
- [14] Carolyn A, Dykoski R, Lawrence Edwards, Hai Cheng, et al. A high-resolution, absolute-dated Holocene and deglacial Asian monsoon record from Dongge Cave, China [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 233: 71—86.

- [15] Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, et al. A High-Resolution Absolute-Dated Late Pleistocene Monsoon Record from Hulu Cave, China[J]. *Science*, 2001, 294, 2345-2348.
- [16] Wang Feia, Li Hongchun, Zhu Rixiang, et al. Late Quaternary downcutting rates of the Qianyou River from U/Th speleothem dates, Qinling mountains, China[J]. *Quaternary Research*, 2004, 62, 194-200.
- [17] 羊向东,王苏民,董国榜,等. 云南鹤庆古湖晚更新世的孢粉记录及其古气候学意义[J]. *第四纪研究*, 1998, (4), 335-344.
- [18] Bond G, Broecker W S, Johnson S, et al. Correlations between climate record from North Atlantic sediments and Greenland ice[J]. *Nature*, 1993, 365, 143-147.
- [19] 沈才明,唐领余,王苏民,等. 若尔盖盆地 RM 孔孢粉记录及其年代序列[J]. *科学通报*, 2005, 50(3), 246-254.
- [20] 刘光锈,沈永平,王睿,等. 孢粉记录揭示的 2 万年以来若尔盖地区的气候变化[J]. *冰川冻土*, 1995, 17(02), 132-137.
- [21] 汪永进,刘殿兵,吴金全,等. 石笋记录的东亚季风气候 H1 事件突变性特征[J]. *中国科学(D辑)*, 2002, 32(3), 227-232.
- [22] 王燕,赵志中,乔彦松,等. 川北若尔盖高原红原泥炭剖面孢粉记录的晚冰期以来古气候古环境的演变[J]. *地质通报*, 2006, 25(7), 827-832.
- [23] 董国榜,吴瑞金,吴艳宏,等. 四川冕宁地区一万年来的植被与环境演变[J]. *微体古生物学报*, 2000, 17(4), 470-477.
- [24] 肖霞云,沈吉,肖海丰,等. 云南鹤庆盆地中更新世以来的孢粉记录及其植被与气候变化[J]. *湖泊科学*, 2006, 18 (4), 369-376.
- [25] 王开发. 全新世温暖期中低温事件的初步研究[J]. *第四纪研究*, 1996(2), 168-174.
- [26] 邵晓华,汪永进,程海,等. 全新世季风气候演化与干旱事件的湖北神农架石笋记录[J]. *科学通报*, 2006, 51(1), 80-86.
- [27] 罗丽萍,朱利东,向芳,等. 成都平原 4000aBP 以来的孢粉记录与环境变化[J]. *古生物学报*, 2008, 47(2), 195-202.
- [28] 郑景云,王绍武. 中国过去 2000 年气候变化的评估[J]. *地理学报*, 2005, 60 (1), 21-31.
- [29] 施雅风,郑本兴,李世杰,等. 青藏高原中东部最大冰期时代高度与气候环境探讨[J]. *冰川冻土*, 1995, 17 (2), 97-112.
- [30] 唐领余,李春海. 青藏高原全新世植被的时空分布[J]. *冰川冻土*, 2001, 23 (4), 367-374.

## Comparative study on climatic change during later period of the late Pleistocene epoch with the sporopollen record from northwest Yunnan plateau and the stalagmite record from South China

SHI Sheng-qiang, YUAN Dao-xian, LUO Lun-de, HAO Xiu-dong, ZHAO Zeng-you  
(*Geographical Science School of Southwest University, Chongqing 400715, China*)

**Abstract:** Sporopollen analysis on the YXL profile in northwest Yunnan plateau is done by means of paleoclimate parameter methods, and changes in paleo-vegetation and paleoclimate during later period of the late Pleistocene epoch is reconstructed in combining with dating figures in the paper. Furthermore, comparative analysis with the stalagmite record from South China is done. The results show that, the process of paleoclimate change in plateau of Yunnan Province is moderate cool and a little dry - cold and dry - slightly warmer and wetter - cold and dry - warmer and wetter - cold and dry - warm and wet - moderate and a little dry-cool and a little dry from about 31 570 cal. yr BP and there are some reversals in the process; YXL pollen record shows nearly same trend of Paleoclimate change contrast with the stalagmites record in the Dongge Cave and Hulu Cave, the climate events including H2, H1, YD, MWP, LIA appeared in the pollen record obviously; the process of warmer and wetter in YXL pollen record in Holocene seemed slower than that in the stalagmite records and ice core records, and in YXL pollen record the dry and cold climate last much longer, it is related with the high altitude environment and impacted by the Qinghai-Tibetan Plateau, showing some regional significance.

**Key words:** northwest Yunnan plateau; Shangri-la; sporopollen record; stalagmite records; sporopollen zone; vegetation; climate change