

青藏高原表土孢粉定量重建的气候参数探讨

王芳芳¹⁾, 侯光良^{2)*}, 侯小青¹⁾, 王青波¹⁾

1) 青海师范大学, 生命与地理科学学院, 青海西宁 810008;

2) 青海师范大学, 青海省自然地理与环境过程重点实验室, 青海西宁 810008

摘 要: 孢粉在古环境研究中具有重要价值, 尤其是在重建古气候方面, 既可以定性地恢复过去的植被类型变化, 也能定量地重建气候变化规律, 是古气候研究中最常用、较可靠和较成熟的环境代用指标。现代类比法是探讨表土孢粉与气候定量关系的方法之一, 适用性较为广泛。本文利用青藏高原及其毗邻地区 495 个现代表土样点的孢粉谱, 及现代气象站点器测资料, 采用现代类比法得到气候参数的模拟值, 并分析模拟值与气候参数观测值之间的关系。结果表明: 相关性最高的气候因子是年均降水($r=0.894$), 其次为年均相对湿度($r=0.863$)和年均蒸发量($r=0.801$), 最低的是干燥度($r=0.18$)。因此在重建古气候时降水的可信度较高, 相对湿度和蒸发量也具有一定的可信度。并选用相关性较好的年均降水指标, 分析其与 11 个孢粉类型之间的相关性, 然后将相关性较高的孢粉组合与降水之间建立孢粉-气候函数模型, 用以重建该地区过去气候变化。

关键词: 青藏高原; 表土孢粉; 气候参数; 定量重建

中图分类号: Q913.84; P532 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2017.04.10

Researches on Climate Parameters for Quantitative Reconstruction Based on Surface Pollen in the Tibetan Plateau

WANG Fang-fang¹⁾, HOU Guang-liang^{2)*}, HOU Xiao-qing¹⁾, WANG Qing-bo¹⁾

1) School of Live and Geography Science, Qinghai Normal University, Xining, Qinghai 810008;

2) Physical Geography and Environmental Process Key Laboratory of Qinghai Province, Qinghai Normal University, Xining, Qinghai 810008

Abstract: The pollen has important value in palaeoenvironmental research, especially in the field of paleoclimate reconstruction, because it can qualitatively restore paleovegetation type and reconstruct the climate rhythms. In addition, it is the most common, reliable and mature environmental substitute index in the paleoclimate research. Modern Analogue Technique has extensive applicability and is one of the methods for studying the relationship between surface pollen and climate. In this paper, the authors selected 495 surface pollen spectra in the Tibetan Plateau and its adjacent areas as well as the measurement data obtained by meteorological stations. Then, the authors calculated the Pearson's correlation coefficients between the observed values from the meteorological stations and the reconstructed values by using the Polygon software. The results indicate that the annual average precipitation had the highest correlation ($r=0.894$), followed by relative humidity ($r=0.863$) and annual average evaporation ($r=0.801$), with the lowest being aridity index ($r=0.18$). Therefore, the annual average precipitation has the higher credibility; and the relative humidity and the annual average evaporation have certain credibility in paleoclimate reconstruction. The authors calculated the relationship between the 11 pollen taxa and the annual average precipitation, and then chose the pollen taxa with better correlation coefficient to establish the

本文由青海省科技厅自然科学基金项目(编号: 2017-ZJ-903)和国家自然科学基金项目(编号: 41550001)联合资助。

收稿日期: 2017-02-10; 改回日期: 2017-04-20。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 王芳芳, 女, 1989 年生。硕士研究生。主要从事环境演变与人类活动研究。通讯地址: 青海省西宁市城西区五四西路 38 号。E-mail: wff0207@163.com。

*通讯作者: 侯光良, 男, 1972 年生。博士生导师, 教授。主要从事环境演变与人类活动研究。通讯地址: 青海省西宁市城西区五四西路 38 号。E-mail: hgl20@163.com。

pollen-climate model between the pollen assemblages and the annual average precipitation so as to reconstruct the paleoclimate change in this region.

Key words: Tibetan Plateau; surface pollen; climate parameters; quantitative reconstruction

青藏高原独特的自然环境下其生态系统和气候系统对全球的生态循环和环境变化具有重要作用(孙鸿烈等, 2012)。该地区自然环境受人类干扰较小, 植被对全球变化响应非常敏感(潘保田等, 1996; 朱文琴等 2001)。对该地区过去气候和自然环境的研究, 能够对探索该地区未来气候变化甚至全球变化提供一定的依据, 现在已有很多学者通过地层孢粉来重建该地区的古植被和古气候(赵振明, 2007; Wang and Herzschuh, 2011)。而现代表土孢粉与气候参数之间定量关系的研究是利用地层孢粉研究古气候的基础(郑卓等, 2013)。也关系着对化石孢粉谱研究的准确性以及对古环境解释的精确度(李月丛等, 2005)。国内外很多学者将表土孢粉与植被类型和植被群落之间的关系做了详细的阐述, 研究结果也较为一致, 均认为现代表土孢粉与现代植被之间具有较好的一致性, 能基本反映植被的各种特征, 以及植被分布所对应的气候区(陈瑜和倪健, 2008; 郑卓等, 2008; 冯晓华等, 2011; 李国荣等, 2014; 庞有智等, 2016)。

植被是在一定的水热条件下生长的, 高原地形和高寒气候条件下生长的植被亦能反映该地的自然环境状况, 尤其是在干旱-半干旱及高寒气候区, 表土孢粉和地层孢粉都被广泛应用于半量化研究其与植被和气候之间的关系(董明星等, 2006; 陈英玉等, 2014; 王大宁等, 2016)。表土孢粉与气候参数之间具有一定的数量关系, 对其关系的研究也具有重要意义。中国现在已有很多表土孢粉数据, 前人对其的研究主要集中在表土孢粉与年均降水、年均温以及 1 月和 7 月均温之间的关系, 对于与水分相关的其他指标如年均相对湿度、年均蒸发量和干燥度研究的较少(Shen et al., 2006; Luo et al., 2010; Xu et al., 2010; Lu et al., 2011)。本文使用青藏高原及其周边地区不同地形、海拔和植被类型的表土数据, 利用现代类比法分析青藏高原地区的现代表土孢粉与年均降水、年均蒸发量、年均相对湿度和干燥度之间的数量关系, 然后再运用数理统计分析方法, 建立二者之间的关系。

青藏高原位于我国地形的第一阶梯, 总体面积约 250 万 km^2 , 各地海拔相差较大, 平均在 4 000 m, 是全球最高的高原, 大体可分为东北部山地和盆地、西部高原和东南部谷地三个分区。东北部山地从北向南依次横列着祁连山、拉脊山、阿尼玛卿山和巴颜喀拉山, 盆地主要有柴达木盆地和共和盆地, 亚高山地带分布各种针叶林植被, 高山草甸区以草

本植物为主, 东亚季风和西风带共同影响该地的气候; 西部地区海拔最高, 山脉主要有昆仑山、唐古拉山和冈底斯山, 广泛分布着冰川与雪山, 植被以高寒草甸为主, 属干旱高原气候; 东南部山地与谷地相间分布, 气候主要受西南季风影响。本研究区的地理范围大致位于 27°N — 40°N , 72°E — 104°E , 主体是青藏高原地区, 行政区范围涵盖了青海省、西藏自治区、新疆维吾尔自治区的南部、甘肃省中部和南部、四川西部以及云南西北部。受西南季风、东亚季风和高原高寒三大气候类型共同影响, 地形复杂多样, 涵盖了高原、山地、盆地、河谷、戈壁、沙漠等地貌类型。内部相对封闭, 地形和气候特点较为复杂, 因而自然环境受人类干扰较小, 取样点有较好的代表性。青藏高原的植被分布受水分主导作用较强, 自东南向西北主要植被类型有高山森林、高山灌丛、高寒草甸、高寒草原和高寒荒漠等类型(吴征镒, 1980)。因而探讨表土孢粉与水分之间的关系具有重要意义。

1 数据与方法

1.1 数据来源

本文使用的孢粉数据是青藏高原及毗邻地区 495 个点的现代表土样品, 共 77 个孢粉类型, 数据来源于青藏高原湖泊表泥孢粉研究(Herzschuh et al., 2010)、青藏高原东北缘表土花粉(Wei et al., 2011)以及东亚表土孢粉数据库(<http://eapd.sysu.edu.cn/database/>)(图 1)。根据 Luo 等(2010)的研究结果使用现代类比法对多种孢粉类型进行类比和与一些相关系数较高的孢粉类型类比的效果类似。故我们选取了 495 个表土点孢粉数据以及与降水相关性较高的 11 种孢粉类型: 蒿属(*Artemisia*)、桦属(*Betula*)、藜科(*Chenopodiaceae*)、菊科(*Compositae*)、莎草科(*Cyperaceae*)、麻黄属(*Ephedra*)、禾本科(*Poaceae*)、松属(*Pinus*)、云杉属(*Picea*)、柳属(*Salix*)、唐松草属(*Thalictrum*)。

本文探讨表土孢粉与水分相关的气候参数定量重建的效果, 因而气象数据选取了建站至 1980 年以来的降水以及与水分相关的相对湿度、蒸发量和干燥度四个指标。该时段内, 气候变化较近年相对稳定, 全球温度的增幅也较现在小, 气象数据更具代表性。其中降水数据从全国 672 个气象站点获得, 相对湿度和蒸发量主要从中国西部的气象站获取, 前者有 273 个站点, 后者 270 个站点(图 2)。

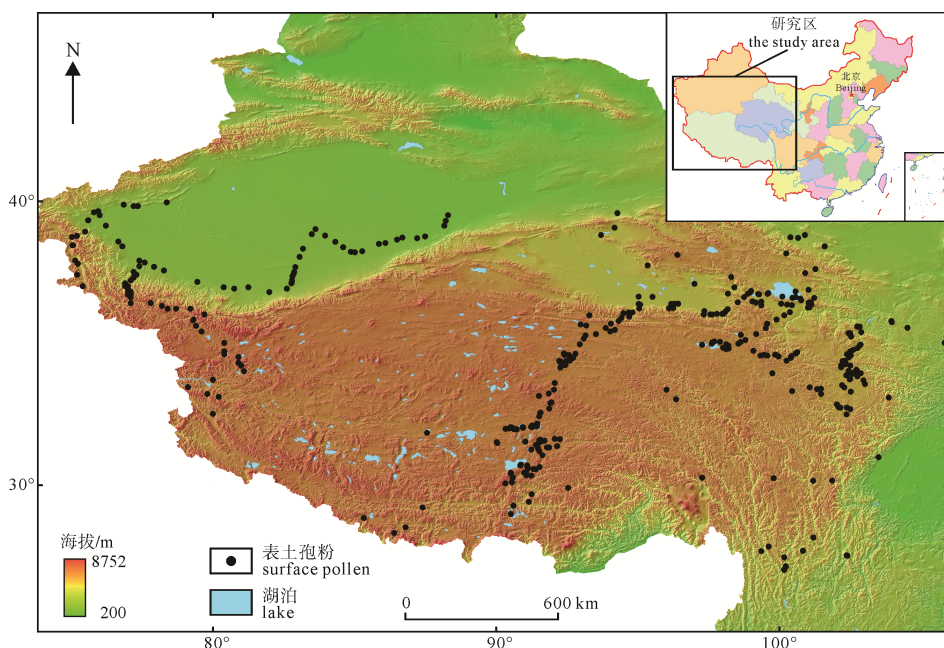


图 1 青藏高原及其毗邻地区 495 个现代表土孢粉

Fig. 1 495 modern surface soil pollens from the Tibetan Plateau and its adjacent areas

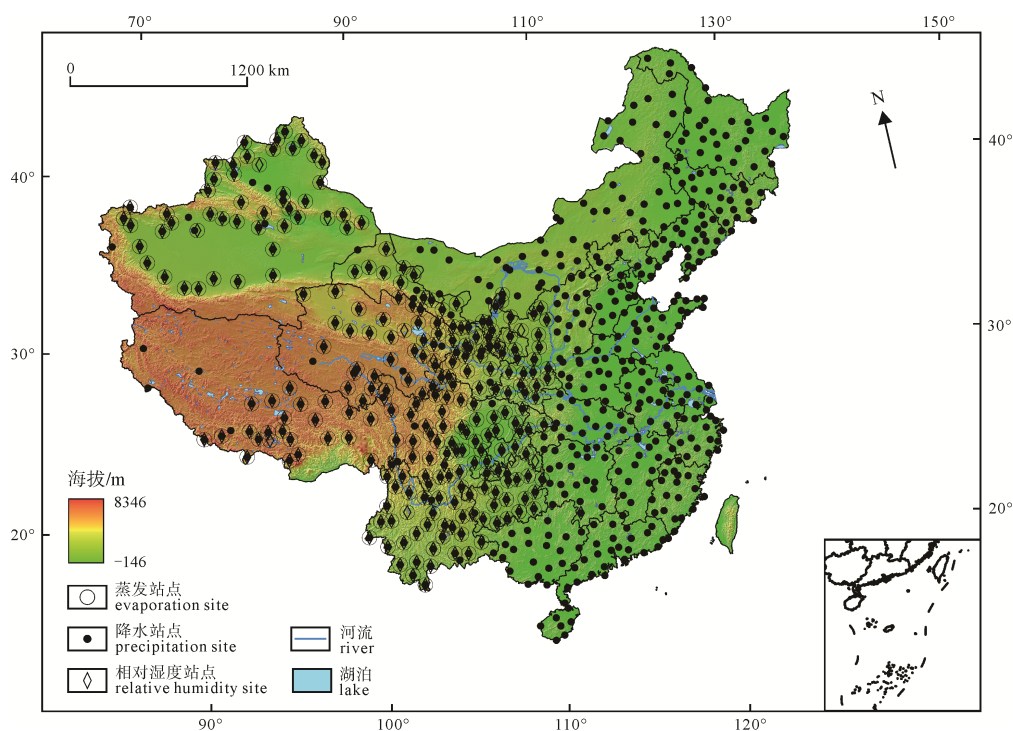


图 2 气象站点的空间分布图

Fig. 2 The spatial distribution of meteorological stations

本文的干燥度指标是根据年均降水与年均蒸发量的比值得到,属于传统的计算方法能定性地反映区域的干燥程度。根据气象站点的经纬度坐标将四种气象数据分别使用 ArcGIS 软件中 Kriging 插值法绘制地图,再利用表土孢粉点的经纬度提取出该点分别所对应的气象数据即为观测值。

1.2 方法

1.2.1 现代类比法

现代类比法 Modern Analogue Technique, 简称

MAT)又称最佳类比法(Best Analogue),其原理是假设过去植被类型与气候之间的关系是相对应的,将指示植被类型的地层孢粉谱与代表表土孢粉谱对比,只要二者之间有某几种类型相同,再将其与对应点的现代气候参数相对比,就能类比得到地层孢粉所对应的气候(许清海等, 2015)。其运算方法是对地层孢粉谱与每个现代孢粉谱之间的非相似性距离进行计算,求取两者之间距离最小的样品(黄康有等, 2013)。计算方法多种多样,综合起来分为三类

(Sawada, 2006): 第一种为无权重类型、第二种为等权重类型, 本文使用的为第三种去除杂音信息类型, 该方法采用弦距平方公式, 能够为含量少、不常见的种属提供适当的权重, 其计算公式如下:

$$D_{ij} = \sum (k\sqrt{p_{ik}} - \sqrt{p_{jk}})^2 \quad (1)$$

其中, D_{ij} 是孢粉样品 i 与 j 之间的非相似距离, k 是孢粉型, p_{ik} 是孢粉类型 k 在样品 i 中的百分比含量, p_{jk} 是孢粉类型 k 在样品 j 的百分比含量。使用 Polygon 2.2.4 软件将现代表土孢粉做为地层孢粉数据, 再与其他表土花粉数据类比得出与其最相似的若干样点, 并计算出对应的气候因子模拟值。

1.2.2 转换函数法

相关分析: 本文使用的为皮尔逊积矩相关系数 (Pearson Correlation Coefficient, PCC), 它描述了两个定距变量间联系的紧密程度(张宇镭等, 2005)。其计算公式为:

$$r = \frac{\sum XY - \frac{\sum X \sum Y}{N}}{\sqrt{(\sum X^2 - \frac{(\sum X)^2}{N})(\sum Y^2 - \frac{(\sum Y)^2}{N})}} \quad (2)$$

其中, X 变量是 x -所有点的坐标集合, 变量 Y 是所有点 y -的坐标集合, N 表示点的总个数。 r 描述的是两个变量间线性相关强弱的程度。 r 的值在-1与+1之间, $r > 0$, 表明两个变量是正相关, $r < 0$, 表明两个变量是负相关。使用 SPSS 软件将表土孢粉点气象参数(年均降水、年均相对湿度、年蒸发量和干燥度)的观测数据与现代类比法得到的模拟数据

进行 Pearson 相关系数分析。

回归分析: 本文首先分析了 11 种孢粉类型与降水参数相关性, 孢粉类型相关性最高的是蒿属 (*Artemisia*)、桦属 (*Betula*)、藜科 (*Chenopodiaceae*)、麻黄属 (*Ephedra*) 和松属 (*Pinus*), 根据相关性将此作为一个孢粉组合使用多元线性回归分析方法, 重建其与年均降水之间的关系。其基本思想和方法与一元线性回归分析相似, 即回归平方和越大, 则剩余平方和 Q 就越小, 回归模型的效果就越好。多元线性回归模型的结构为(徐建华, 2006):

$$y_a = \beta_0 + \beta_1 x_{1a} + \beta_2 x_{2a} + \dots + \beta_k x_{ka} + \varepsilon_a \quad (3)$$

其中, $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ 为待定参数; ε_a 为随机变量。

如果 $b_0, b_1, \dots, b_k$ 分别为 $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ 的拟合值, 则回归方程为:

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_k x_k \quad (4)$$

其中, y 是因变量, x 是自变量, b_0 为常数, $b_1, b_2, \dots, b_k$ 称为偏回归系数。

2 结果

(1) 青藏高原及毗邻地区 495 个表土孢粉点的气候参数观测数值与现代类比法得到的模拟值进行 Pearson 相关系数分析得出的 r 相关性如图所示(图 3), 年均降水、年均相对湿度、年蒸发量和干燥度四个气候因子在显著性(双侧)0.01 水平下的相关系数 r 和 R^2 分别为: 0.894、0.799; 0.863、0.745; 0.801、0.641; 0.18、0.032。结果表明: 气候因子中年均降

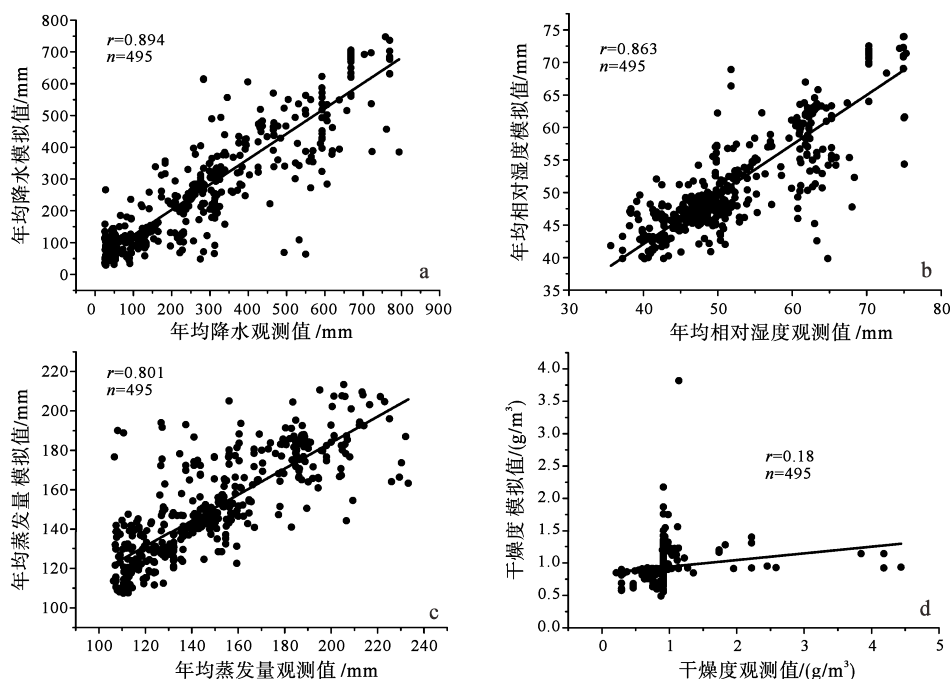


图 3 气候参数 GIS 模拟值与现代类比法重建值之间的相关性

Fig. 3 The relationship between climate parameter interpolated using the GIS software and reconstructed value using the Polygon software

a-年均降水; b-年均相对湿度; c-年均蒸发量; d-干燥度

a-the annual average precipitation; b-relative humidity; c-the annual average evaporation; d-aridity index

水(0.894), 年均相对湿度(0.863)、年均蒸发量(0.801) 相关程度高, 干燥度(0.18)不呈相关性。因此可推测 在干旱半干旱的温带大陆性气候和高原高山气候区 使用孢粉重建古气候时降水的可信度较高, 相对湿 度和蒸发量也具有一定的可信度。

(2)本文将相关性较高的年均降水指标与 11 个 孢粉类型进行双变量相关分析(表 1), 一般 $|r| \geq 0.7$, 称两个变量高度相关, $0.7 > |r| \geq 0.5$, 称两个变量 中度相关, $0.5 > |r| \geq 0.3$, 称两个变量低度相关(朱 红兵和卢纹岱, 2011)。所有孢粉类型中除菊科和唐 松草属外其它孢粉谱均在 0.01 水平(双侧)上与年均 降水显著相关即通过了显著性检验, 并与实际理论 相符, 菊科和唐松草属的显著性水平(双侧) P 值 > 0.05 故判定二者与降水的相关性不显著。其中, 松 属和藜科与降水之间的相关性较好 $|r| > 0.5$, 莎草 科、禾本科、云杉属和柳属的相关性 $|r| \leq 0.2$, 蒿 属、桦属和麻黄属的相关性 $0.2 < |r| < 0.5$ 。本文将 相关性大于 0.2 的五种孢粉类型作为组合分析其与 降水之间的关系。

最后使用最小二乘法将孢粉组合与年均降水 进行回归建模分析(表 2), 得到桦属、松属、藜科、 蒿属和麻黄属与降水的关系模型为:

$$p=342.003+4.888P+14.620B-3.237E-2.02A-3.151C \quad (5)$$

其中, p 为年均降水, P 为松属, B 为桦属, E 为麻 黄属, A 为蒿属, C 为藜科。该模型的相关系数 $R=0.741$, 说明该回归方程具有较好的相关性, 解释 变量能反映因变量的特征。另外, 在置信水平

$\alpha=0.01$ 上查 F 分布表知: $F_{0.01}(5, \infty)=3.02$, 由于 F 远大于 $F_{0.01}(5, \infty)=3.02$, 所以年均降水与孢粉组 合之间的回归方程是显著的。

3 讨论

孢粉对古植被, 古气候的重建具有较高的准确 性, 在环境重建中具有十分重大的意义。本文利用 孢粉能直接反映植被类型, 进而间接指示自然环境的这一特点。本文研究结果表明年均降水、年均相 对湿度、年蒸发量和干燥度四个气象因子中年均降 水的观测值和模拟值相关性最高, 印证了干旱半干 旱及高寒地区降水在植被生长中起主导作用的重要 因素之一。

在建模之前先分析了 11 种孢粉类型与降水之 间的相关性, 研究显示藜科、蒿属和麻黄属虽都属 于高海拔荒漠地带的植被, 结果得到藜科与降水之 间的关系达到了-0.518 这也符合现代藜科植被的生 长特征, 其多生长在以荒漠、草原为主的干旱、半 干旱和高寒地区(罗传秀等, 2007); 本文中蒿属与降 水的负相关性小于藜科, 根据已有的研究青藏高原 A/C 值(蒿/藜)的数值大小与环境的干旱状况成反比, 也说明了其生长过程需要相对较多的水分(Wei et al., 2011); 麻黄属植被也指示干旱的气候环境, 对 植被的指示呈超代表性, 同时具有传播能力强的特 点(魏海成等, 2009), 在本研究与降水之间的相关 性为-0.264 低于藜科和蒿属, 符合现代植被生长状 况。松属、桦属、云杉属和柳属同作为木本植物,

表 1 表土孢粉谱与气候参数之间的相关性
Table 1 The relationship between surface pollen spectra and climate parameters

	<i>Artemisia</i>	<i>Betula</i>	<i>Chenopodiaceae</i>	<i>Compositae</i>	<i>Cyperaceae</i>	<i>Ephedra</i>	<i>Poaceae</i>	<i>Pinus</i>	<i>Picea</i>	<i>Salix</i>	<i>Thalictrum</i>
年均 相关性	-0.30	0.35	-0.52	-0.08	0.13	-0.26	-0.20	0.55	0.17	0.15	0.07
降水 显著性	0.000	0.000	0.000	0.070	0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.140
/mm <i>N</i>	495	495	495	495	495	495	495	495	495	495	495
年均 相关性	-0.24	0.33	-0.46	-0.06	-0.02	-0.26	-0.20	0.65	0.21	0.13	0.05
相对 显著性	0.000	0.000	0.000	0.184	0.618	0.000	0.000	0.000	0.000	0.003	0.293
湿度 <i>N</i>	495	495	495	495	495	495	495	495	495	495	495
%											

表 2 孢粉组合与年均降水之间的多元回归模型
Table 2 Multiple linear regressive model between the pollen assemblages and the annual average precipitation

模型	非标准化系数		标准系数	<i>t</i>	<i>sig</i>	<i>R</i>	<i>R</i> ²	调整 <i>R</i> ²
	<i>B</i>	标准误差	试用版					
常量	342.003	12.122		39.260	0.000			
<i>Pinus</i>	4.888	0.484	0.335	10.096	0.000			
<i>Betual</i>	14.620	2.312	0.197	6.324	0.000	0.741 ^a	0.549	0.544
<i>Ephedra</i>	-3.237	0.625	-0.160	-5.179	0.000			
<i>Artemisia</i>	-2.020	0.294	-0.216	-6.868	0.000			
<i>Chenopodiaceae</i>	-3.151	0.277	-0.369	-11.383	0.000			

注: *B*-样本回归系数; *t*-用 *T* 检验法对方程进行假设检验以说明其有无统计学意义的 *t* 值; *sig* 表示差异的显著性水平; ^a-预测变量。

但与降水之间的相关性却存在着显著的差异,这可能与各植被之间耐寒、耐旱的特性有关,如桦属具有较强的生长性能,生长地带跨越了灌木和草原地带(Zhu et al., 2009)。另外,李玉梅等(2014)对新疆博尔塔拉河流域表土花粉的研究认为藜科和云杉与降水量和温度等气候因素关系较为密切,同样刘鸿雁的研究结果得到云杉属是喜冷湿的植物种类,其花粉的含量可以指示温度条件。这可能是云杉属与降水的相关性低于松属和桦属的原因之一。同时本文还发现莎草科和禾本科这两类草本植物与降水之间的关系同木本植物(云杉属和柳属)与降水之间的相关性很相近,这也符合莎草科作为非地带性植被,与湿地环境相联系的生长环境,禾本科花粉含量的增减作为人类对土地开垦强弱的指示,其生长环境需要较多水分,具有广适性(刘鸿雁和李宜垠, 2009)。青藏高原的菊科植被与降水之间的关系显著性不明显可能与其指示人类的放牧活动有关(Zhao et al., 2011)。另一种与降水之间相关性不显著的唐松草属是属于毛茛科,根据前人在青藏高原东部研究海拔对毛茛科繁殖特征的影响,其中结果表明不同海拔生长环境对比较常见的毛茛科钝裂银莲花繁殖特征和大小依赖性产生了直接的影响(樊宝丽等, 2008)。这可能是唐松草属与降水相关性不显著的潜在原因,需要做进一步的研究和探索。

在进行多元回归建模时本文选取了相关性较好的五个孢粉组合利用线性回归进行建模。其中桦属和松属与降水呈正相关,藜科、蒿属和麻黄属与降水呈负相关,符合现代植被的生长特点,木本植物比草本植被需要更多水分,生长在半干旱、干旱及高寒区的草本植物具有很强的耐旱性。因而建立的降水模型对气候研究具有一定的参考意义。本研究在横向上对前人的结果做出拓展,得到的结论具有一致性,而在今后进一步的研究中需要加大表土孢粉点的样本量,同时进行严格筛选,而气候参数也需多样化,并尽量选取全国范围的气象站点。在选择方法上也需要更加多元化。

4 结论

利用青藏高原及毗邻地区 495 个表土孢粉点以及气象站点的数据,选取年均降水、相对湿度、蒸发量和干燥度四个气候因子为探讨对象。用 GIS 软件 Kriging 插值法得出的观测值和使用 Polygon 软件现代类比法得到的模拟值进行 Pearson 相关系数分析,结果显示使用孢粉定量重建气候参数时前三者都具有较高的相关性,而最理想的指标是年均降水相关系数 $r=0.894$ 。在建模之前首先分析了孢粉谱与

降水的相关性,得到松属和藜科与降水之间的相关性最高 $|r| > 0.5$,并选取相关性大于 0.2 的五种孢粉类型作为一个组合(桦属、松属、藜科、蒿属和麻黄属)将其与降水之间建立了多元回归分析模型。

Acknowledgements:

This study was supported by Science and Technology Department of Qinghai Province (No. 2017-ZJ-903), and National Natural Science Foundation of China (No. 41550001).

参考文献:

- 陈英玉, QING Hai-ruo, VELEZ M, LIU Meng, 魏豆豆, 蔡遥. 2014. 青海共和盆地达连海湖泊流域表土花粉-气候响应面分析[J]. 地球学报, 35(1): 85-92.
- 陈瑜, 倪健. 2008. 利用孢粉记录定量重建大尺度古植被格局[J]. 植物生态学报, 32(5): 1201-121.
- 董明星, 李凤麟, 高德臻, 耿明山, 李龙吟. 2006. 内蒙古苏尼特左旗中新世晚期孢粉记录干旱事件[J]. 地球学报, 27(3): 207-212.
- 樊宝丽, 孟金柳, 赵志刚, 杜国祯. 2008. 海拔对青藏高原东部毛茛科植物繁殖特征和资源分配的影响[J]. 西北植物学报, 28(4): 805-811.
- 冯晓华, 阎顺, 倪健. 2011. 新疆表土孢粉的植被定量重建[J]. 地理科学, 31(6): 702-707.
- 黄康有, 魏金辉, 陈碧珊, 张华, 郑卓, 曹玲珑, 郑艳伟. 2013. 最佳类比法的孢粉-古气候定量重建研究进展[J]. 第四纪研究, 33(6): 1069-1079.
- 李国荣, 陈英玉, VELEZ M, 韩丽蓉, 蔡遥, 王涛. 2014. 青海共和盆地达连海湖泊流域的表土孢粉研究[J]. 冰川冻土, 36(3): 599-607.
- 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[J]. 地理科学, 34(12): 1518-1525.
- 李月丛, 许清海, 阳小兰, 郑振华. 2005. 中国草原区主要群落类型花粉组合特征[J]. 生态学报, 25(3): 555-564.
- 刘鸿雁, 李宜垠. 2009. 半干旱区气候变化和人类活动的孢粉指示[J]. 古生物学报, 48(2): 211-221.
- 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[J]. 干旱区地理, 30(4): 536-543.
- 潘保田, 李吉均. 1996. 青藏高原: 全球气候变化的驱动力与放大器[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 32(1): 108-115.
- 庞有智, 拉多, 张燕杰, 李春海, 唐领余. 2016. 青藏高原南部米拉山东、西坡表土花粉与现代植被关系研究[J]. 微体古生物学报, 33(1): 33-44.
- 孙鸿烈, 郑度, 姚檀栋, 张懿铨. 2012. 青藏高原国家生态安全屏障保护与建设[J]. 地理学报, 67(1): 3-12.
- 王大宁, 王旭日, 季强. 2016. 冀北—辽西地区侏罗—白垩纪之交的孢粉植物群演替与古气候变化[J]. 地球学报, 37(4): 449-459.

- 魏海成, 郑卓, 马海州, 潘安定, 黄康有, 罗传秀, 郑艳伟, 王志. 2009. 青海表土孢粉分布规律及其与植被的关系[J]. 干旱区地理, 32(6): 932-940.
- 吴征镒. 1980. 中国植被[M]. 北京: 科学出版社: 1023-1035.
- 徐建华. 2006. 计量地理学[M]. 北京: 高等教育出版社: 62-67.
- 许清海, 李曼玥, 张生瑞, 张娅红, 张攀攀, 卢静瑶. 2015. 中国第四纪花粉现代过程: 进展与问题[J]. 中国科学: 地球科学, 45: 1661-1682.
- 张宇镭, 党琰, 贺平安. 2005. 利用 pearson 相关系数定量分析生物亲缘关系[J]. 计算机工程与应用, 33: 79-99.
- 赵振明, 刘爱民, 彭伟, 计文化, 李荣社, 王毅智, 朱迎堂. 2007. 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, 30(3): 381-391.
- 郑卓, 黄康有, 魏金辉, 乐远福, 万秋池, 许清海, 吕厚远, 罗运利, 罗传秀. 2013. 中国及其邻区现代孢粉数据: 空间分布特征和定量古环境重建中的应用[J]. 第四纪研究, 33: 1037-1053.
- 郑卓, 黄康有, 许清海, 吕厚远, RACHID C, 罗运利, CELIA B, 罗传秀, 郑艳伟, 李春海, 魏金辉, 杜春彬. 2008. 中国表土花粉与建群植物地理分布的气候指示性对比[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 38(6): 701-714.
- 朱红兵, 卢纹岱. 2011. 应用统计与 SPSS 应用[M]. 北京: 电子工业出版社: 517-520.
- 朱文琴, 陈隆勋, 周自江. 2001. 现代青藏高原气候变化的几个特征[J]. 中国科学(D 辑), 31: 327-334.

References:

- CHEN Ying-yu, QING Hai-ruo, VELEZ MI, LIU Meng, WEI Dou-dou, CAI Yao. 2014. Climatic Response of Vegetation Inferred from Surface Pollen from Dalianhai Lake, Gonghe Basin, Northeastern Tibetan Plateau[J]. Acta Geoscientica Sinica, 35(1): 85-92(in Chinese with English abstract).
- CHEN Yu, NI Jian. 2008. Quantitative Palaeo Vegetation Reconstruction At Large Scale Based on Pollen Records[J]. Journal of Plant Ecology (Chinese Version), 32(5): 1201-1211(in Chinese with English abstract).
- DONG Ming-xing, LI Feng-lin, GAO De-zhen, GENG Ming-shan, LI Long-yin. 2006. A Study of the Late Miocene Dry Event Based on Spore-Pollen Variations in Sunitezuoqi, Inner Mongolia[J]. Acta Geoscientica Sinica, 27(3): 207-212(in Chinese with English abstract).
- FAN Bao-li, MENG Jin-liu, ZHAO Zhi-gang, DU Guo-zhen. 2008. Influence of Altitude on Reproductive Traits and Resource Allocation of Species of Ranunculaceae at East Qinghai Tibetan Plateau[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 28(4): 805-811(in Chinese with English abstract).
- FENG Xiao-hua, YAN Shun, NI Jian. 2011. Pollen-based and Quantitative Reconstruction of Holocene Palaeovegetation of Surface Soil of Xinjiang[J]. Scientia Geographica Sinica, 31(6): 702-707(in Chinese with English abstract).
- HERZSCHUH U, BIRKS H J B, MISCHKE S, ZHANG Cheng-jun, BÖHNER J. 2010. A Modern Pollen-Climate Calibration Set Based on lake Sediments from the Tibetan Plateau and Its Application to a Late Quaternary Pollen Record from the Qilian Mountains[J]. Journal of Biogeography, 37: 752-766.
- HUANG Kang-you, WEI Jin-hui, CHEN Bi-shan, ZHANG Hua, ZHENG Zhuo, CAO Ling-long, ZHENG Yan-wei. Research Progress of Pollen-Based Quantitative Paleoclimate Reconstruction Using Modern Analogue Technique[J]. Quaternary Sciences, 33(6): 1069-1079(in Chinese with English abstract).
- LI Guo-rong, CHEN Ying-yu, VELEZ M, HAN Li-rong, CAI Yao, WANG Tao. 2014. A Study of Surface Pollen in Dalianhai Lake Catchment, Qinghai[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 36(3): 599-607(in Chinese with English abstract).
- LI Yue-Cong, XU Qing-Hai, YANG Xiao-Lan, ZHENG Zhen-Hua. 2005. Pollen Assemblages of Major Steppe Communities in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 25(3): 555-564(in Chinese with English abstract).
- LI Yu-mei, YANG Zhen-jing, ZHANG Yun, YANG Qing-hua, LIU Lin-jing, BI Zhi-wei, WANG Cheng-min, KONG Zhao-chen, ZHAO Long. 2014. Surface Pollen Assemblages and Vegetation Relationships in the Bortala River Basin of Xinjiang, China[J]. Scientia Geographica Sinica, 34(12): 1518-1525(in Chinese with English abstract).
- LIU Hong-yan, LI Yi-yin. 2009. Pollen Indicators of Climate Change and Human Activities in the Semi-Arid Region[J]. Acta Palaeontologica Sinica, 48(2): 211-221(in Chinese with English abstract).
- LU Hou-yuan, WU Nai-qin, LIU Kam-biu, ZHU Li-ping, YANG Xiang-dong, YAO Tan-dong, WANG Luo, LI Quan, LIU Xing-qi, SHEN Cai-ming, LI Xiao-qiang, TONG Guo-bang, JIANG Hui. 2011. Modern Pollen Distributions in Qinghai-Tibetan Plateau and the Development of Transfer Functions for Reconstructing Holocene Environmental Changes[J]. Quaternary Science Reviews, 30: 947-966.
- LUO Chuan-xiu, ZHENG Zhuo, PAVEL Tarasov, TAKESHI Nakagawa, PAN An-ding, XU Qing-hai, LU Houyuan, HUANG Kang-you. 2010. A Potential of Pollen-Based Climate Reconstruction Using a Modern Pollen-climate dataset from arid northern and western China[J]. Review of Palaeobotany and Palynology, 160: 111-125.
- LUO Chuan-xiu, ZHENG Zhuo, PAN An-ding, AN Fang-zhou, BEAUDOUIN C, HUANG Kang-you. 2007. Distribution of Surface Soil Spore-pollen and its Relationship with Vegetation in Xinjiang, China[J]. Arid Land Geography, 30(4): 536-543(in Chinese with English abstract).
- PAN Bao-tian, LI Ji-jun. 1996. Qinghai-Tibetan Plateau: A Driver and Amplifier of the Global Climatic Change[J]. Journal of Lanzhou University(Natural Sciences), 32(1): 108-115(in Chinese with English abstract).
- PANG You-zhi, LA Duo, ZHANG Yan-jie, LI Chun-hai, TANG Lin-yu. 2016. Relationship Between the Surface Pollen and Modern Vegetation In the Mila Mountain, Southern Qing-

- hai-Tibetan Plateau, China[J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 33(1): 33-44(in Chinese with English abstract).
- SAWADA M. 2006. An open source implementation of the Modern Analogue Technique(MAT) within the R computing environment[J]. *Computers & Geosciences*, 32: 818-833.
- SHEN Cai-ming, LIU Kam-biu, TANG Ling-yu, JONATHAN T O. 2006. Quantitative Relationships between Modern Pollen Rain and Climate in the Tibetan Plateau[J]. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 140: 61-77.
- SUN Hong-lie, ZHENG Du, YAO Tan-dong, ZHANG Yi-li. 2012. Protection and Construction of the National Ecological Security Shelter Zone on Tibetan Plateau[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 67(1): 3-12(in Chinese with English abstract).
- WANG Da-ning, WANG Xu-ri, JI Qiang. 2016. The Palynoflora Alternation and the Paleoclimate Change at the Turning Time between Late Jurassic and Early Cretaceous in Northern Hebei and Western Liaoning[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 37(4): 449-459(in Chinese with English abstract).
- WANG Yong-bo, HERZSCHUH U. 2011. Reassessment of Holocene Vegetation Change on the Upper Tibetan Plateau Using the Pollen-Based Reveals Model[J]. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 168: 31-40.
- WEI Hai-cheng, MA Hai-zhou, ZHENG Zhuo, PAN An-ding, HUANG Kang-you. 2011. Modern Pollen Assemblages of Surface Samples and Their Relationships to Vegetation and Climate in the Northeastern Qinghai-Tibetan Plateau, China[J]. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 16(3): 237-246.
- WEI Hai-cheng, ZHENG Zhuo, MA Hai-zhou, PAN An-ding, HUANG Kang-you, LUO Chuan-xiu, ZHENG Yan-wei, WANG Zhi-ying. 2009. Pollen Distribution Patterns of Surface Soil Sample in Qinghai of China and the Irrelationship with Vegetation[J]. *Arid Land Geography*, 32(6): 932-940(in Chinese with English abstract).
- WU Zheng-yi. 1980. *Vegetation of China*[M]. Beijing: Science Press: 1023-1035(in Chinese).
- XU Jian-hua. 2006. *Quantity Geography*[M]. Beijing: Higher Education Press: 62-67(in Chinese).
- XU Qing-hai, LI Yue-cong, M Jane Bunting, TIAN Fang, LIU Jin-song. 2010. The Effects of Training Set Selection on the Relationship between Pollen Assemblages and Climate Parameters: Implications for Reconstructing Past Climate[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, doi: 10.1016/j.palaeo.2010.02.024.
- XU Qing-hai, LI Man-yue, ZHANG Sheng-rui, ZHANG Ya-hong, ZHANG Pan-pan, LU Jing-yao. 2015. Modern Pollen Processes of China: Progress and Problems (in Chinese)[J]. *Scientia Sinica Terrae*, 58: 1661-1682(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Yu-lei, DANG Yan, HE Ping-an. 2005. Quantitative Analysis of the Relationship of Biology Species Using Pearson Correlation Coefficient[J]. *Computer Engineering and Applications*, 33: 79-99(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Yan, YU Zi-cheng, ZHAO Wen-wei. 2011. Holocene Vegetation and Climate Histories in the Eastern Tibetan Plateau: Controls by Insolation-Driven Temperature or Monsoon-Derived Precipitation Changes?[J]. *Quaternary Science Reviews*, 30: 1173-1184.
- ZHAO Zhen-ming, LIU Ai-min, PENG Wei, JI Wen-hua, LI Rong-she, WANG Yi-zhi, ZHU Ying-tang. 2007. Holocene Environmental Changes of Northern Qinghai-Tibetan Plateau Based on Spore-Pollen Analysis[J]. *Arid Land Geography*, 30(3): 381-391(in Chinese with English abstract).
- ZHENG Zhuo, HUAN Kang-you, XU Qing-hai, LU Hou-yuan, RACHID Cheddadi, LUO Yun-li, CELIA Beaudouin, LUO Chuan-xiu, ZHENG Yan-wei, LI Chun-hai, WEI Jin-hui, DU Chun-bin. 2008. Climate Indicative contrast of Surface Pollen and Geographic Distribution of Constructive Plants in China[J]. *Science in China(Series D)*, 38(6): 701-714(in Chinese).
- ZHENG Zhuo, HUANG Kang-you, WEI Jin-hui, WAN Qing-chi, XU Qing-hai, LU Hou-yuan, LUO Yun-li, LUO Chuan-xiu. 2013. Modern Pollen Data In China And Adjacent Areas: Sptatial Distribution Features And Applications On Quantitative Paleoenvironment Reconstruction[J]. *Quaternary Sciences*, 33: 1037-1053(in Chinese with English abstract).
- ZHU Hong-bin, LU Wen-dai. 2011. *Applied Statistics and Application of the SPSS*. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1: 517-520(in Chinese).
- ZHU Li-ping, ZHEN Xiao-lin, WANG Jun-bo, LU Hou-yuan, XIE Man-ping, HIROYKI Kitagawa, GURAN Possnert. 2009. A ~30,000-year Record of Environmental Changes Inferred from Lake Chen Co, Southern Tibet[J]. *J. Paleolimnol*, 42: 343-358.
- ZHU Wen-qin, CHEN Long-sun, ZHOU Zi-jiang. 2001. Several Characteristics of modern Climate Change in the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Science in China(Series D)*, 31: 327-334(in Chinese).