

# 青藏高原全新世降水序列的集成重建

侯光良, 鄂崇毅, 肖景义

(青海师范大学青藏高原资源与环境教育部重点实验室, 西宁 810008)

**摘 要:** 青藏高原全新世降水变化对于过去全球变化研究有重要意义。在过去全球变化研究中, 大尺度区域降水序列重建缺乏可行、有效的方法, 本文以青藏高原作为研究区, 构建了分区古降水空间模拟—多区面积加权的集成方法, 重建全新世青藏高原降水序列。本研究以孢粉为环境证据, 选取有空间代表性的10条由孢粉重建的高原样点降水序列, 获得716条具有年代的定量降水记录, 建立全新世古降水记录数据集。借助GIS分析, 基于现代高原降水空间分布的地理因子模拟, 并与古降水记录相集成, 定量重建了高原全新世200年分辨率的降水序列。结果显示: 早全新世高原降水迅速增多, 并在9.0 kaBP达到极大值500 mm, 较现代高170 mm; 9.0~5.6 kaBP是旺盛的湿润期, 降水总体比现代高出80 mm, 但呈现明显的下降趋势; 5.6 kaBP以来降水减少, 降水与现代相当, 但波动幅度较小; 集成序列与其他高低分辨率环境记录有很好的可比性, 说明集成序列有很好的代表性和一定的准确性。

**关 键 词:** 青藏高原; 全新世; 降水; 集成重建

青藏高原由于其独特的地理环境, 在全球变化中占有重要地位<sup>[1]</sup>。高原受东亚季风、南亚季风及高原季风环流等系统影响, 降水来源多样, 具有显著的独特性、复杂性和敏感性<sup>[2-3]</sup>; 因此重建高原全新世降水变化, 对于认识全球变化有重要意义。过去的全球变化研究计划(Past Global Changes)是目前全球变化研究的核心内容之一, 全新世是一个重要时段<sup>[4]</sup>, 全新世古气候研究, 是评估未来气候变化所必需的古气候背景<sup>[5]</sup>, 是认识全球变化机制、评估区域尺度全球环流模式的一个重要窗口<sup>[6]</sup>。

古气候研究中大尺度降水重建是个难点, 一直以来缺乏行之有效的方法, 大大阻碍了区域降水序列的重建工作。这是由于影响降水变化的因素错综复杂, 尤其是地形等地理环境因子影响显著, 降水分布格局表现出较明显的非地带性<sup>[7]</sup>, 使得单个样点降水空间代表性难以确定, 增加了重建大尺度区域降水变化的难度。因此目前虽有一些高原地点全新世降水序列<sup>[8-14]</sup>, 但却不能反映整个高原降水变化。本文尝试利用集成思想, 构建分区古降水空间模拟—多区面积加权降水集成重建方法, 有机集成单点重建结果, 重建具有一定分辨率、并能反映高原整体变化的定量降水序列。需要指出的是,

本文中的青藏高原范围仅包括青海和西藏。

## 1 资料与方法

### 1.1 基本思路

集成方法的基本思想是以自然环境的协同性为出发点, 把不同类型的代用指标信息、不同地区的研究结果集成在一起, 综合考虑, 相互印证, 得到一个既符合自然环境协同性, 又与其他证据相互吻合的综合结果<sup>[15]</sup>。中国地理环境具有明显空间协同性特点<sup>[16]</sup>, 青藏高原也不例外, 即同一时期的自然地理现象, 其空间分布是有序、相互联系的, 遵从一定的分布规律。

青藏高原地势高耸、地域广阔, 降水的水汽来源有显著的区域分异。青藏高原东部, 主要受来自太平洋东南季风影响, 兼受西南季风影响, 由于地处季风边缘, 水汽含量较少。高原南部, 受来自印度洋的西南季风控制, 水汽丰富, 水汽在喜马拉雅山南麓迎风坡形成较多的降水, 并以雅鲁藏布江为通道深入青藏高原南部腹地。高原的西部和北部广大区域, 深居大陆内部, 远离海洋, 又加之高耸地势, 形成特有的高原季风, 夏季形成热低压, 生成高

收稿日期: 2012-04; 修订日期: 2012-06.

基金项目: 国家自然科学基金项目(41161018); 教育部人文社会科学研究青年基金项目(10YJCZH041); 青海科技厅青年基金项目(2011-Z-926Q); 青海师范大学昆仑学者经费项目。

作者简介: 侯光良(1972-), 男, 青海省人, 教授, 主要从事环境演变研究。E-mail: hgl20@163.com

原低涡、切变形等系统带来不大的阵性降水<sup>[16]</sup>。由于降水来源的差异,又加之地形原因等,导致高原降水空间分布产生巨大的差异。水汽来源的不同是进行高原降水分区的基础和依据。在同一分区内,水汽来源大体一致,根据环境协同原理,降水变化也表现出一致性。因此在分区内全新世古降水样点可以看作是代表分区古降水变化的样本,不同分区全新世降水样本的集成,可以重建高原的全新世降水变化。

青藏高原平均海拔在 4000 m 以上,高原上有东西纵横的高大山脉、深切的河谷和坦荡的高原面等地貌类型,地形和地理位置对降水及其空间分布影响显著<sup>[17-20]</sup>,尤其是海拔高度、坡向、坡度、地理位置(经纬度坐标)。例如青藏高原东北缘无冰川或大面积积雪的区域,降水量随海拔升高而增大,约达到最大降水高度(3600 m)后,又随海拔的升高而减少<sup>[19]</sup>,降水量及其降水分布与海拔呈现出明显的相关性。坡向对于降水影响也非常大,巴颜喀拉山南麓夏季受来自印度洋的西南季风的影响,为迎风坡,降水较多,清水河和玉树等地年均降水量在 400 mm 以上;而山北麓,夏季是西南季风的背风坡,冬季又受西北季风控制,因此降水量较少,北麓的玛多年均降水只有 300 mm 左右。地理位置对应降水分布影响也很大,有研究表明,在高原东北缘,其他条件不变的情况下,经度增加一度,降水增加 29.5 mm<sup>[17]</sup>。故准确分析地形和地理位置因素对高原降水分布之间数理关系,可以建立地理因子与高原降水空间分布的模拟模型。

考虑到全新世期间,上述地理因子变化有限,这种变化对于降水量的影响可以忽略不计,将地理因子与降水空间分布之间模拟关系应用到全新世,从一个样点降水就可以模拟出整个分区的降水分布状况,进而可以恢复分区古降水的平均状况,达到重建全新世古降水的目的。

1.2 分区现代降水空间分布模型的建立

按照青藏高原水汽来源不同,可以将高原降水划分为 4 个分区(图 1,表 1),I 区为青

高原东部东亚季风影响和向内陆过渡区,II 区为青藏高原西部、北部内陆局地的环流区,III 区为青藏高原南部西南季风影响和过渡区,IV 区为青藏高原东南山地区<sup>[17]</sup>。

各分区降水空间分布与地理因子相关程度均大于 95%,可以利用地理因子来模拟降水的空间分布<sup>[17]</sup>。本文降水数据取自中国 1 km 栅格年均降水量数据(1971-2000 年),地形数据利用美国航天飞机雷达地形测绘任务(Shuttle Radar Topography Mission, SRTM)制作提供的青藏高原 DEM 数据,并利用 ArcGIS 软件,分别从 DEM 获取经纬度、海拔、坡度和坡向等地理因子参数栅格数据,分辨率为 0.05°×0.05°。

在青藏高原均匀选取 213 个建模点,其中 76 个为高原气象台站点;从 1 km 栅格降水量数据上利用 spatial analyst tools-extraction-extract by points 工具提取 213 个建模点的降水数据。以分区为单位,建立分区内建模点降水与对应位置的经度(  $E$  )、纬度(  $N$  )、海拔(  $H$  )、坡度(  $S$  )和坡向(  $A$  )降水分布模拟方程,公式为:

$$P_i = a_i + b_{1i}E + b_{2i}N + b_{3i}H + b_{4i}S + b_{5i}A \quad (1)$$

式中:  $P_i$  为  $i$  分区降水量;  $a_i$  是不同分区大气环流不同造成的常数项,称为环流项;  $b_{mi}$  为各地理因子的偏回归系数。从表 1 可见:地理因子与降水的相关性较高,根据地理因子模拟的降水分布  $F$  值远远大于临界值,也通过了 0.05 的信度检验,表明所建方程较为可靠,利用所建方程可以模拟各分区的降

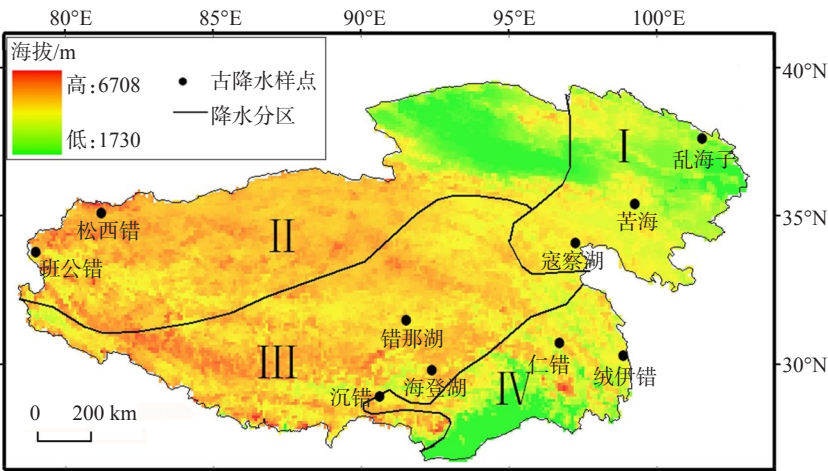


图 1 青藏高原降水分区及其古降水样点

Fig.1 Divisional precipitation and its paleo-precipitation records on Qinghai-Tibet Plateau  
注: I 区为青藏高原东部东亚季风影响和向内陆过渡区, II 区为青藏高原西部、北部内陆局地的环流区, III 区为青藏高原南部西南季风影响和过渡区, IV 区为青藏高原东南山地区。

表1 青藏高原分区降水模拟与地理因子偏回归关系及其相关性检验

Tab.1 Partial regression relation & its correlation test between divisional simulated precipitation of Qinghai–Tibet Plateau and geographic factors

分区	面积		地理因子偏回归系数						相关性检验				相对 误差/%
	面积/ 平方度	面积 权重	常数	经度	纬度	海拔	坡度	朝向	建模 点	相关系 数(R)	F 值	检验 (sig.)	
I区	31.12	0.17	247.79	26.57	-69.22	-0.01	3.72	-0.15	55	0.88	32.07(4.45)	0.00	5.7
II区	66.91	0.36	157.08	8.21	-24.51	0.02	0.88	0.09	52	0.95	81.98(4.45)	0.00	22.3
III区	63.91	0.35	-486.99	23.44	-42.43	0.01	4.76	0.04	72	0.95	127.25(8.57)	0.00	10.28
IV区	22.57	0.12	-1527.55	43.67	-72.50	0.05	-0.27	-0.03	35	1.00	568.16(4.5)	0.00	2.05

注: F值项括号内为 F 检验信度 0.05 的临界值。

水空间分布。

相对误差可以衡量所建空间模型的模拟误差。从表1可见, I、Ⅲ、Ⅳ区相对误差在10%及以下; II区相对误差较大, 达到22%, 这是由于这里属于高原西部、北部内陆极为干旱区, 年降水很少, 例如柴达木盆地年降水多在40 mm以下, 降水年际变化大, 故较小的降水变化可能产生较大的相对误差, 实际上II区的绝对误差只有不到20 mm。需要指出的是, 相对误差大致可以指示降水集成重建结果的误差。

1.3 全新世古降水记录的整理与提取

1.3.1 全新世古降水记录的来源

从国内外发表的文献中选取青藏高原样点高质量的全新世降水序列8条, 化石孢粉记录2条, 这些记录有如下特征:

(1) 序列时段主要涵盖全新世, 个别序列甚至是晚更新世末期以来, 有较好年代控制(表2), 序列以日历年或<sup>14</sup>C年时间体系定量表达。从文献中筛

选了8条高原全新世降水序列, 2条高分辨率的化石孢粉序列, 地域分布基本覆盖整个高原及其各个分区, 有较好的区域代表性。

(2) 定量的古降水数据: 重建降水量以年均降水量等形式表达。有8条序列原文献有古降水的重建结果, 重建方法为转换函数法(Transfer functions)或加权回归-最小二乘法校正法(weighted-averaging regression and calibration partial least squares, 简称WA-PLS); 但在分区羌塘高原没有全新世降水序列, 为保证各分区均有古降水样点, 从而使得集成结果有较好的代表性, 使用班公错和松西错的全新世化石孢粉记录<sup>[21-22]</sup>, 青藏高原现代降水数据取自中国1 km 栅格年均降水量数据(1971-2000年), 青藏高原表土孢粉468份来自东亚孢粉数据库(<http://eapd.sysu.edu.cn/database/>), 利用软件Polygon1.5, 采用现代类比法(The Modern Analogues Technique), 重建了班公错和松西错两地的全新世降水序列(另有专文论述)。需要指出的是中

表2 青藏高原全新世降水序列记录样点

Tab.2 Reconstructed precipitation records from proxy data during the Holocene in Qinghai–Tibet Plateau

地点	纬度 /°N	经度 /°E	海拔 /m	现代年降 水量/mm	年代 类型	重建 方法	时间跨度/ cal.kaBP	年代 控制	获取 点数	分区
寇察湖 <sup>[8]</sup>	34.0	97.2	4540	469.00	日历年	W	0~16.0	5	44	I
乱海子 <sup>[9]</sup>	37.9	101.6	3200	279.36	<sup>14</sup> C	W	0~19.0	6	22	
苦海 <sup>[10]</sup>	35.3	99.2	4150	393.58	日历年	W	0~11.5	5	34	
班公错 <sup>[21]</sup>	33.7	79.0	4241	141.86	<sup>14</sup> C	M	0~11.2	7	67	II
松西错 <sup>[22]</sup>	35.5	81.0	5058	144.89	<sup>14</sup> C	M	3.4~15.3	5	70	
错那湖 <sup>[11]</sup>	31.5	91.5	4515	385.23	日历年	W	0~6.0	12	50	III
海登湖 <sup>[12]</sup>	29.8	92.4	4980	450.00	<sup>14</sup> C	F	0~12.0	7	66	
绒伊错 <sup>[13]</sup>	30.3	99.5	4470	620.00	日历年	W	0~17.0	3	35	IV
沉错 <sup>[14]</sup>	28.9	90.6	4420	514.18	日历年	W	0~10.0	5	280	
仁错 <sup>[12]</sup>	30.7	96.7	4450	672.46	<sup>14</sup> C	F	0~11.5	7	48	

重建方法: F为转换函数, W为加权回归-最小二乘法校正法, M为现代类比法。



国北方的研究表明,采用现代类比法重建的古降水与国际通行的 WA-PLS 重建的降水类似,但是前者能更好的重建气候快速变化事件<sup>[23]</sup>。

(3) 所有的古降水数据其环境感应体为孢粉。应用孢粉重建高原古降水量,有着不可替代的巨大优势,主要表现在:①孢粉所记录的环境古降水分辨率在百年左右<sup>[24]</sup>,可以满足重建高原百年分辨率降水序列的需要;②在青藏高原孢粉是估算主要环境变量可靠感应体,年均降水是影响孢粉分布的最重要的环境主导变量<sup>[14,25]</sup>。

### 1.3.2 序列中古降水数据的提取

(1) 年代校正:这 10 条序列中,5 条为日历年,5 条为  $^{14}\text{C}$  年代。 $^{14}\text{C}$  年代序列测年数据有 5~7 个,有较好的年代控制,利用 Calib4.4 程序将  $^{14}\text{C}$  年代校正为日历年,再根据其深度与年代关系,将序列时间校正为日历年,因此所有时间体系均采用日历年。

(2) 数据获取:对序列进行数字化,读取序列的降水数值与对应的年代,为保证数据的有效性,优先选取拐点数据,对序列中分辨率达不到 200 年的时段,读取时段中点的降水数据。从 10 条序列中共读取 716 条古降水记录,原始降水序列中获取 579 条记录,由化石孢粉采用现代类比法获得 137 条。从分区来看,其中 I 区有 3 条序列,获取记录 100 条;II 区、III 区各 2 条序列,分别获得记录 137 条、116 条;IV 区 3 条序列,获得记录 363 条。

(3) 全新世古降水记录数据集的建立:根据各区全新世古气温记录的时间分布状况,将上述古降水记录以样点为单位,以日历年为时间坐标系,以 1900-1999AD 年记为 0 aBP,按 200 年间隔对各区的记录进行归并,1700-1899AD 标记为 200 aBP,依次类推。根据整理的古降水记录数量和时间分布,200 年时间尺度既保证重建序列的连续性,又具有一定的分辨率。否则如选择更高分辨率,则不能保证序列的连续性;如过分降低了分辨率,则难以捕捉快速变动的气候事件,缺乏应有的科学意义。经整理古降水记录数据集每个时段记录数在 2~15,多数都在 4 个以上。根据统计学原理,记录数愈多,重建的结果误差应该愈小,因此记录数是误差大小的衡量指标之一。

## 1.4 分区古降水空间模拟—多区面积加权降水集成重建方法

分区古降水空间模拟—多区面积加权降水集成重建方法步骤如下:

(1) 分区古降水的获得。假设在全新世青藏高原的上述地理因子的变化可以忽略不计,则式(1)所述的关系,可以推广到全新世期间。将分区样点古降水代入到式(1),则在其他地理因子不变的情况下,可以求得当时的环流项数值;分区内同一时段有多个古降水样点的,可以对各样点环流项平均,做为古降水模拟方程的环流项;得到分区全新世各个时间段的古降水分布模拟方程,利用 ArcGIS 中 spatial analyst-Raster calculator 工具,将经纬度、海拔、坡度、坡向等地理因子栅格数据按照古降水分布模拟方程进行栅格计算,得到全新世某时段分区古降水分布栅格数据,并利用古降水栅格数据属性表中的 Statistics 工具计算分区平均古降水。

(2) 多区面积加权。将各分区全新世降水序列,依表 1 中面积权重,按照下式求取青藏高原降水集成重建结果。

$$P = \sum_{i=1}^n q_i p_i \quad (2)$$

式中:  $P$  为高原集成降水;  $q_i$  为第  $i$  分区面积权重;  $p_i$  为  $i$  分区古降水。

## 2 降水序列集成重建结果

### 2.1 集成重建结果

青藏高原全新世降水序列集成重建结果表明(图 2):全新世期间青藏高原年均降水量波动幅度在 288~500 mm 之间,而现代降水量(1971-2000 年)为 329 mm,全新世期间高原平均降水量为 367 mm。从时间变化来看,降水序列分为 3 个阶段,第一阶段(11.5~9.0 kaBP)为迅速增湿期,在全新世伊始降水量已与现代相当,其后迅速增加,并在 9.0 kaBP 达到最大值 499 mm,高出现代约 170 mm。第二阶段(9.0~5.6 kaBP)为湿润期,该期降水平均高出现代 80 mm,其中 9.0~8.2 kaBP 为盛期,当时降水平均较现代高出 100 mm;但是本阶段高原降水在 9.0 kaBP 达到极大值后就表现为下降趋势,虽有波动,但波动的峰值都较前者依次下降。第三阶段(5.6~0 kaBP)为平稳减少期,本期降水变化较为平稳,波动较小,但较湿润期有较大幅度减少,总体上已与现代相当;又可以分为前期(5.6~1.8 kaBP)和后期(1.8~0 kaBP)平稳期,前期降水在 350 mm 上下,比现代略高,但低于湿润期;后期降水又较前期为低,低约 30 mm 左右,其中 0.4 kaBP 降水达到全新世的

极低值 288 mm, 该时段与小冰期相对应。在集成序列中能辨识一系列的百年尺度干湿事件, 主要的湿润事件发生在早中全新世, 主要包括 9.8 kaBP、9.0~8.6 kaBP、7.0 kaBP、6.0 kaBP; 主要的干旱事件有 8.2 kaBP、6.6 kaBP、4.8 kaBP 和 0.4 kaBP。

从分区来看, II~IV 区降水序列变化特征基本类似, 大致表现为早全新世降水迅速增多, 中全新世湿润, 晚全新世变干; I 区较为特别, 在全新世降水呈现出早到晚逐渐增加的趋势。此外, 从分区的降水量来看, 表现出从东南向西北减少的空间分布格局。

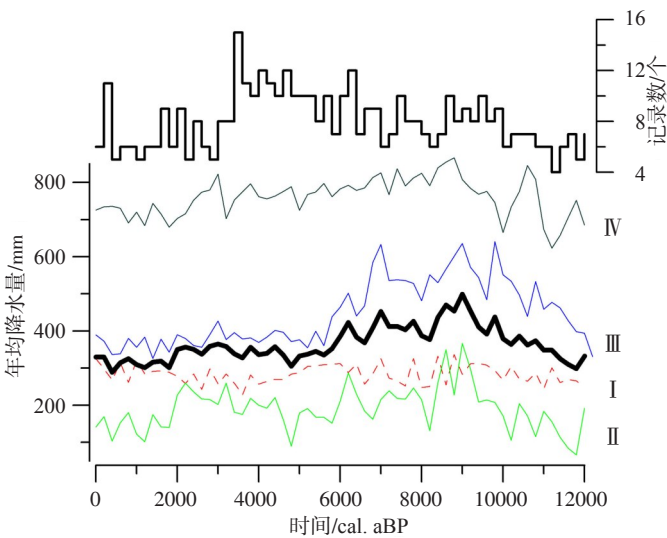
2.2 与其他重建结果的对比

在高分辨率环境记录中, 若尔盖红原泥炭腐殖化度指示了东亚夏季风强度<sup>[26]</sup>, 青海湖孢粉浓度也包含较多降水信息<sup>[27]</sup>, Sumxi 湖的氧同位素记录被用来讨论干湿变化<sup>[28]</sup>, 董歌洞石笋记录被认为是东亚季风降水的良好指标<sup>[29]</sup>; 而低分辨率的环境记录, 诸如班公湖湖面变化<sup>[30]</sup>、共和盆地古土壤序列<sup>[31]</sup>也都和降水变化关系密切。

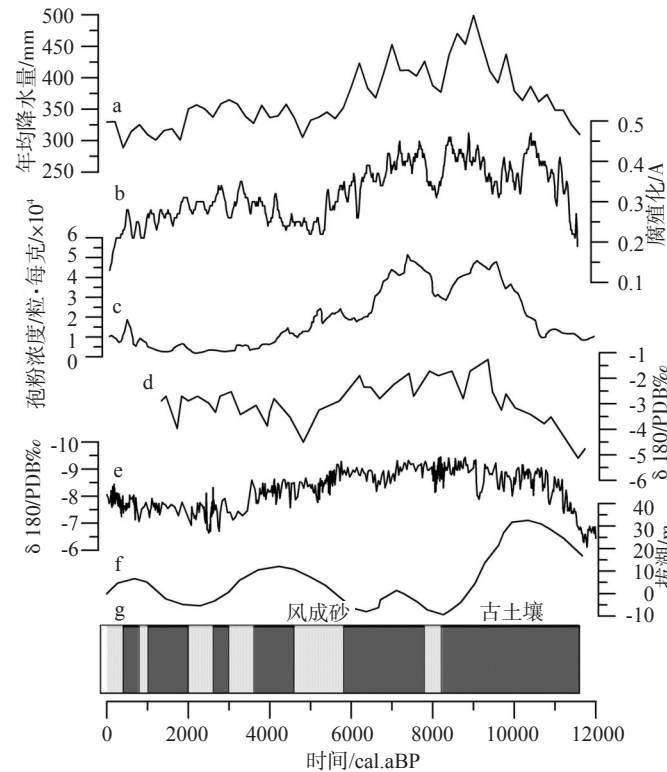
集成序列与高分辨率环境记录对比显示 (图 3): 首先它们变化趋势大体一致, 早全新世降水迅速增加, 并在 9.0 kaBP 前后达到极大值; 中全新世持续湿润, 但呈现出下降趋势; 晚全新世降水量减少, 但波动幅度小。其次, 百年尺度干湿事件也有较多一致性, 集成序列和环境记录中也都显示降水极大值发生在 9.0 kaBP 前后, 7.0 kaBP、6.0 kaBP 属湿润期, 在高分辨率序列中也都有记录; 集成序列中的 8.2 kaBP 和 4.8 kaBP 干旱事件在环境记录中也多有对应。

集成序列与低分辨率的环境记录对比显示: 早全新世降水迅速增加并达到极值, 班公湖面在早全新世即为高湖面, 共和盆地也连续发育古土壤。8.0 kaBP 前后班公湖面降低, 共和盆地风砂活动活化, 与集成序列中 8.2 kaBP 干旱事件对应, 5.0 kaBP 前后的盆地沙地活动则和 4.8 kaBP 干旱事件有关。

通过集成序列与高低分辨率环境记录的对比, 可以发现集成序列与环境记录不仅在变化趋势上基本一致, 许多干湿事件也相互对应, 有较好的可比性与较高的一致性, 说明集成序列具有较好重建效果。



注: 粗黑线为青藏高原降水集成序列, I~IV 为分区降水序列。  
图 2 青藏高原全新世降水集成序列与重建使用记录数  
Fig.2 Synthetically reconstructed precipitation change of Holocene on Qinghai-Tibet Plateau and records used for its reconstruction



注: a. 集成序列, b. 若尔盖红原泥炭<sup>[26]</sup>, c. 青海湖孢粉浓度<sup>[27]</sup>, d. Sumxi 湖氧同位素<sup>[28]</sup>, e. 董歌石笋<sup>[29]</sup>, f. 班公湖湖面<sup>[30]</sup>, g. 共和盆地古土壤<sup>[31]</sup>  
图 3 青藏高原降水集成序列与其他高低分辨率环境记录对比  
Fig.3 Comparison between the synthetically reconstructed precipitation series and other high or low resolution environmental records of Qinghai-Tibet Plateau

### 3 结论

(1) 从国内外公开发表的文献中整理收集 10 条青藏高原降水序列,数字化得到 716 条定量降水记录,以日历年为时间坐标系,以 1900-1999AD 年记为 0 aBP,按 200 年间隔对各区的记录进行归并,建立全新世古降水记录数据集。该数据集的古降水数据在每个 200 年时间段都有分布,多数时间段古气温记录在 4 个以上,能满足建立连续的青藏高原全新世 200 年尺度降水序列的需要。

(2) 采用分区古降水空间模拟—多区面积加权集成重建降水序列,即将高原按照水汽来源的不同分为 4 个分区,建立分区内各点的降水量与对应地理位置(经纬度)、海拔、坡度和坡向的函数,由样点的古降水根据函数可以借助 GIS 工具得到整个分区的降水,并将 4 个分区的古降水按照面积加权的办法计算青藏高原古降水。

(3) 集成序列表明,全新世青藏高原降水序列分为 3 个阶段,11.5~9.0 kaBP 为迅速增湿期,9.0~5.6 kaBP 为典型湿润期,5.6~0 kaBP 平稳递减期,降水与现代相当。在全新世早期 9.0 kaBP 高原降水即达峰值,降水较现代高 170 mm,其后呈现下降趋势;湿润期高原降水平均高出现代 80 mm,因此全新世早中期湿润,晚期变干。此外,集成序列与高、低分辨率环境记录指示的气候变化趋势基本一致,许多干湿事件也相互对应,具有较高的可比性。

### 参考文献

- [1] 莫中国, 张百平, 程维明, 等. 青藏高原的主要环境效应. 地理科学进展, 2004, 23(2): 88-96.
- [2] Kutzbach J E, Guetter P J, Ruddiman W F, et al. The sensitivity of climate to late Cenozoic uplift in southern Asia and the American west: Numerical experiments. Journal of Geophysical Research, 1989, 94(3): 18393-18407.
- [3] An Z S, Kutzbach J E, Prell W L, et al. Evolution of Asian monsoons and phased uplift of the Himalayan-Tibetan plateau since late Miocene times. Nature, 2001, 411(18): 62-66.
- [4] Prell W L, Kutzbach J E. Sensitivity of the Indian monsoon to forcing parameters and implications for its evolution. Nature, 1992, 360(10): 647-652.
- [5] Bradley R S, Alverson T R, Pedersen F. Challenges of a changing earth: Past perspectives, future concerns//Aler-son K R. Bradley T S, Pedersen F. Paleoclimate, Global Change and the Future. Berlin: Springer Verlag, 2003: 163-167.

- [6] COHMAP Members. Climatic changes of the last 18,000 years: Observation and model simulations. Science, 1988, 241(6): 1043-1052.
- [7] 张家诚, 林之光. 中国气候. 上海: 上海科学技术出版社, 1985: 467-483.
- [8] Herzschuh U, Kramer A, Mischke S, et al. Quantitative climate and vegetation trends since the late glacial on the northeastern Tibetan Plateau deduced from Koucha Lake pollen spectra. Quaternary Research, 2009, 71(4): 162-171.
- [9] Herzschuh U, Birks H B, Mischke S, et al. 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. Journal of Biogeography, 2010, 37(1): 752-766.
- [10] Wischniewski J, Mischke S, Wang Yongbo, et al. Reconstructing climate variability on the northeastern Tibetan plateau since the last Lateglacial: A multi-proxy, dual-site approach comparing terrestrial and aquatic signals. Quaternary Science Reviews, 2011, 30(4): 82-97.
- [11] Tang L Y, Shen C M, Li C H, et al. Pollen-inferred vegetation and environmental changes in the central Tibetan Plateau since 8200 yr BP. Sci China Ser D: Earth Sci, 2009, doi: 10.1007/s11430-009-0080-5.
- [12] 唐领余, 沈才明, Liu K M, 等. 南亚古季风的演变: 西藏新的高分辨率古气候记录. 科学通报, 1999, 44(18): 2004-2007.
- [13] Shen C M, Liu K M, Tang L Y, et al. Quantitative relationships between modern pollen rain and climate in the Tibetan Plateau. Review of Palaeobotany and Palynology, 2006, 140(5): 61-77.
- [14] Lu H Y, Wu N Q, Liu K M, et al. Modern pollen distributions in Qinghai-Tibetan Plateau and the development of transfer functions for reconstructing Holocene environmental changes. Quaternary Science Reviews, 2011, 30(3): 947-966.
- [15] 葛全胜, 陈泮勤, 张雪芹. 全球变化的集成研究. 地球科学进展, 2000, 15(4): 461-466.
- [16] 张兰生, 方修琦, 任国玉. 全球变化. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [17] 鲁春霞, 王菱, 谢高地, 等. 青藏高原降水的梯度效应及其空间分布模拟. 山地学报, 2007, 25(6): 655-663.
- [18] 林之光. 地形降水气候学. 北京: 科学出版社, 1995: 6-45.
- [19] 戴加洗. 青藏高原气候. 北京: 气象出版社, 1990: 51-184.
- [20] 杜军, 马玉才. 西藏高原降水变化趋势的气候分析. 地理学报, 2004, 29(3): 375-382.
- [21] Campo E V, Cour P, Hang S X. Holocene environmental changes in Bangong Co basin (Western Tibet). Part 2: The pollen record. Palaeogeography, Palaeoclimatology,



- Palaeoecology, 1996, 120(5): 49-63.
- [22] Campo E V, Gasse F. Pollen and diatom-inferred climatic and hydrological changes in Sumxi Co basin(wesetern Tibet) since 13000yrB.P. *Quaternary Research*, 1993, 39(1): 300-313.
- [23] Xu Q H, Li Y C, Bunting M J, et al. The effects of training set selection on the relationship between pollen assemblages and climate parameters: Implications. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2010, doi: 10.1016/j.palaeo.2010.02.024.
- [24] 龚高法, 张丕远, 吴祥定, 等. 历史时期气候变化研究方法. 北京: 科学出版社, 1983: 6-7.
- [25] 赵东升, 李双成, 吴绍洪. 青藏高原的气候植被模型研究进展. *地理科学进展*, 2006, 25(4): 68-78.
- [26] 于学峰, 周卫健, Franzen G L, 等. 青藏高原东部全新世冬夏季风变化的高分辨率泥炭记录. *中国科学: D辑*, 2006, 36(2): 182-187.
- [27] 刘兴起, 沈吉, 王苏民, 等. 青海湖 16 ka 以来的花粉记录及其古气候古环境演化. *科学通报*, 2002, 47(17): 1351-1355.
- [28] Gasse F, Arnold M, Fontes J C, et al. A 13000 year climate record from western Tibet. *Nature*, 1991, 353(4): 742-745.
- [29] Dykoski C A, Edwards R L, Cheng H, et al. A high-resolution, absolute-dated Holocene and deglacial Asian monsoon record from Dongge Cave, China. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 233(6): 71- 86.
- [30] 王富葆. 青藏高原全新世气候及环境基本特征//施雅风. 中国全新世大暖期气候与环境. 北京: 海洋出版社, 1992: 197-205.
- [31] 靳鹤龄, 董光荣, 苏志珠, 等. 全新世沙漠—黄土边界带空间格局的重建. *科学通报*, 2001, 46(7): 538-543.

## Synthetical Reconstruction of the Precipitation Series of the Qinghai-Tibet Plateau during the Holocene

HOU Guangliang, E Chongyi, XIAO Jingyi

(Key Laboratory of Qinghai-Tibetan Plateau Environment and Resource (MOE), School of Life and Geographic Science, Qinghai Normal University, Xining 810008, China)

**Abstract:** The precipitation change over the Qinghai-Tibet Plateau in Holocene is of great importance to the study of global change in the past. There is a lack of practical and effective methods to reconstruct precipitation in a large-scale region in the previous studies on global change, and in order to solve this problem, this study takes the Qinghai-Tibet Plateau as the research area and combines the method of partitioned space simulation of ancient precipitation and multi-area weighted method for the purpose of reconstructing the precipitation series of Qinghai-Tibet Plateau in Holocene. As the vegetation variation of Qinghai-Tibet Plateau can well reflect the precipitation change, this study mainly takes pollen as the circumstantial evidence, selects ten pollen reconstructed precipitation series of sampling points on the plateau, acquires 716 signaled quantitative precipitation records and reconstructs the precipitation series of the plateau in Holocene. With the help of GIS analysis, based on the geographical simulation of spatial distribution of modern plateau precipitation, and integrated with the ancient precipitation records, this paper quantitatively reconstructed the 200-resolution precipitation series of the plateau during the Holocene. The results indicated that during the Holocene the precipitation went up rapidly, reaching a peak of 500 mm at 9 ka BP, 170 mm more than that in modern times. The period 9-5.6 ka BP was a moist period with the total precipitation 80 mm more than that at present. However it showed a downward trend. Since 5.6 ka BP the precipitation went down compared with the present time with small fluctuation. Synthetic series are comparable to the other records in a high or low resolution, which means synthetic series are representative and accurate.

**Key words:** Qinghai-Tibet Plateau; Holocene; precipitation; synthesis reconstruction

本文引用格式:

侯光良, 鄂崇毅, 肖景义. 青藏高原全新世降水序列的集成重建. *地理科学进展*, 2012, 31(9): 1117-1123.