

## 雁荡山湖泊沉积物记录的中国东部季风区小冰期以来气候干湿变化<sup>\*</sup>

崔树昆<sup>1</sup>, 蒋诗威<sup>1</sup>, 刘孝艳<sup>1</sup>, 涂路遥<sup>2</sup>, 周鑫<sup>1\*\*</sup>

(1: 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥 230026)

(2: 伯尔尼大学奥斯切尔中心气候变化研究所和地理学院, 伯尔尼 3012)

**摘 要:** 中国东部季风区过去千年降水变化特征已有大量研究并取得重要进展, 但多数研究集中在中国北方和中部地区, 南方地区重建记录相对较少. 本文对浙江雁荡山雁湖沉积物的总有机碳、色度和粒度等多指标进行分析, 重点探讨小冰期以来研究区域的降水变化, 结果显示: 1) 1400—1600 AD, 湖区集水发育, 研究区气候偏湿润; 2) 1600—1650 AD, 降水量减少, 气候偏干旱; 3) 1650—1750 AD, 气候偏湿润; 4) 1750—2000 AD, 研究区气候处于干旱状态, 其中 1500—1650 AD 期间的干湿变化与历史文献记录的雁湖水位有良好的对应关系. 在年代误差范围内, 雁湖沉积物与浙江天目山泥炭、福建仙山泥炭以及湖光岩玛珥湖沉积物等记录的干湿变化同步, 指示了小冰期期间中国东南地区气候波动的一致性. 另外, 中国东部南、北地区古气候记录反映的降水变化趋势相反, 表明在百年时间尺度上, 中国东部南北地区降水存在着“南涝北旱”和“北涝南旱”的空间特征. 通过与太平洋年代际振荡 (PDO) 的对比, 显示 PDO 对中国东部地区小冰期期间出现的南—北“偶极型”空间降水特征可能具有重要影响.

**关键词:** 湖泊沉积物; 雁荡山; 小冰期; 干湿变化; 太平洋年代际振荡

## Climate change in the monsoon region of eastern China since the Little Ice Age (LIA) recorded from Lacustrine sediments in Yandang Mountain<sup>\*</sup>

Cui Shukun<sup>1</sup>, Jiang Shiwei<sup>1</sup>, Liu Xiaoyan<sup>1</sup>, Tu Luyao<sup>2</sup> & Zhou Xin<sup>1\*\*</sup>

(1: School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, P.R. China)

(2: Oeschger Centre for Climate Change Research & Institute of Geography, University of Bern, Bern 3012, Switzerland)

**Abstract:** Numerous studies have been conducted to investigate precipitation variation in the monsoon region of eastern China during the past millennium, however, most of them have mainly focused on the records from northern and central China, thus lacking of precipitation records from southern China. In the present study, we carried out multi-proxy analyses of lacustrine sediments from Yandang Mountain in Zhejiang Province of southern China, including total organic carbon (TOC), chromaticity, and grain size, to reconstruct past hydroclimatic changes since the Little Ice Age (LIA). The results show that: 1) during 1400–1600 AD, the lake expanded and the climate was relatively humid; 2) during 1600–1650 AD, precipitation decreased and the climate was drier; 3) during 1650–1750 AD, the climate became wetter; 4) during 1750–2000 AD, the climate remained relatively dry. It is noteworthy that during the period from 1500 to 1650 AD, humidity reconstruction from this study corresponds well with historical documents. Within uncertainties of the age calibrations, changes in our record are similar to those in the peat records from the Tianmu Mountain in Zhejiang Province, the Xianshan Mountain in Fujian Province, and the lacustrine records from Huguangyan Maar Lake, indicating the consistency of climate fluctuations in southeast China. In addition, the paleoclimate records of northern and southern regions in eastern China have the opposite trend of precipitation. It is suggested that, on the centennial scale, the precipitation variations in eastern China were characterized by the asynchronous pattern of moisture variations between northern and southern regions, i.e. “dry in northern China and wet in southern China” or “wet in northern China and dry in southern China”. The

<sup>\*</sup> 2020-05-24 收稿; 2020-08-09 收修改稿.

国家自然科学基金项目 (41822707, 41672159) 资助.

<sup>\*\*</sup> 通信作者; E-mail: xinzhou@ustc.edu.cn.

comparison with the Pacific Decadal Oscillation (PDO) shows that PDO plays an important role in the spatial precipitation characteristics of the “south-north” dipolar mode during the LIA in eastern China.

**Keywords:** Lacustrine sediments; Yandang Mountain; Little Ice Age; humidity changes; Pacific Decadal Oscillation

小冰期(Little Ice Age, 简称LIA)是全新世北大西洋冰筏事件最后一次发生的时期,也是距现代最近的全球性典型寒冷期,时间约为1400—1850 AD<sup>[1-3]</sup>. 小冰期期间北半球整体气温比器测记录的平均气温低约0.5℃,对人类社会的发展产生了重要的影响,是当前古气候研究的热点时段<sup>[4-5]</sup>.

基于不同区域的地质记录,大量研究发现中国东部季风区小冰期内部存在明显的次一级干湿波动,但重建的降水记录和干湿变化有很大的区域差异. 在我国东北地区,呼伦湖孢粉数据<sup>[6]</sup>和镜泊湖沉积物记录<sup>[7]</sup>显示小冰期气候偏湿润;而小龙湾湖泊沉积物多指标分析<sup>[8]</sup>显示在1360—1450 AD、1590—1670 AD以及过去的150 a中存在显著的干旱期;内蒙古达里湖<sup>[9]</sup>在小冰期期间也出现低水位,说明季风降水较少,气候偏干旱;阿尔山天池<sup>[10]</sup>植被演化记录反映的近500 a气候变化显示1524—1680 AD、1743—1780 AD和1895—1945 AD 3个时期偏干旱,1680—1743 AD和1780—1895 AD则偏湿润. 在华北地区,北京石花洞石笋 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 记录<sup>[11]</sup>显示小冰期整体较中世纪暖期偏干旱,但其内部可分为两个时期,即1450—1750 AD气候相对干旱,1750—1900 AD气候偏湿润;白洋淀湖泊沉积物研究<sup>[12]</sup>显示1340—1580 AD气候偏干旱,1580—1800 AD气候干旱加剧,1800—1920 AD气候逐渐转向湿润. 在江淮地区,Cui等<sup>[13]</sup>基于长江中游地区孢粉记录提出小冰期可分为早期(气候轻度湿润)、中期(气候干旱)和晚期(气候湿润)3个阶段;江苏高邮湖沉积物记录<sup>[14]</sup>显示1600—1900 AD气候显著干旱;神农架大九湖泥炭记录<sup>[15]</sup>则显示整个小冰期气候相对湿度.

上述研究结果显示重建的中国东部季风区小冰期干湿状况区域差异较大,并且小冰期内部干湿波动的空间特征仍不清楚. 以往研究主要集中在北方,小冰期内部中国南方的地质记录较少,影响了对该区域小冰期期间季风降水演变的研究. 雁荡山地处中国南方的浙江省东南部,前人对该地区古气候的研究较少. 因此本文对雁荡山雁湖沉积物进行多指标分析,建立该区域水文变化历史,并与东亚季风区其他区域的指标序列进行对比,探讨小冰期期间季风降水的时空变化特征及其可能的驱动机制.

## 1 研究位置与方法

雁荡山位于浙江省乐清市东北境内,是全球典型性的中生代晚期复活破火山,处于环太平洋亚洲大陆边缘构造岩浆带中的中国东南沿海中生代火山岩带<sup>[16]</sup>,属于中低山丘陵区,地势西高东低,西部为低山丘陵,东部与乐清湾相接,为海积平原. 山脉多呈东北—西南向展布,平均海拔为500~600 m. 该地区属亚热带季风气候,雨量充沛,气候温暖湿润,水热资源丰富,年平均气温13.5℃,年平均降雨量为1935.6 mm,平均相对湿度77%. 植被类型主要为亚热带常绿阔叶林、常绿落叶阔叶混交林和针阔叶混交林<sup>[17]</sup>. 本研究具体采样地点雁湖是一处山顶湖盆区域,海拔为896 m,湖盆面积较小,长度约为70.7 m,宽度约为40 m. 研究组采样时期为枯水期,湖泊已干涸,据野外分析,当湖盆重新汇聚降水形成湖泊时,水位也较浅. 湖区流域面积较小,无河流汇入,其水体主要来源于径流作用和降水汇聚,周围植被较丰富,但湖区无水生植被生长.

YH沉积柱于2016年在浙江省雁荡山国家地质公园雁湖岗(28°21′25.93″N, 121°0′58.58″E)钻取(图1),长77 cm,在实验室对岩芯进行了对剖、照相与描述,按0.5 cm间距连续分割岩芯,共获得样品147个,样品经冷冻干燥处理后保存.

选取6个样品送往美国Beta实验室进行AMS<sup>14</sup>C测年,测年材料包括全岩有机碳和炭屑. 测年结果使用Calib7.0程序的IntCal13数据库<sup>[18]</sup>进行校正,并使用2 $\sigma$ 校正年龄(表1). 总有机碳(TOC)测试在中国科学技术大学理化科学实验中心进行,具体步骤为:(1)使用球形磨样机对样品进行研磨;(2)取1.5 g左右的样品,加入稀盐酸多次搅拌,去除样品中的无机碳酸盐;(3)用中性去离子水水洗并且多次离心至中性(pH=7),置于恒温箱烘干后保存;(4)称取一定量的被测样品,用锡舟紧密包裹后送入氧化炉中,由自动进样器送入Elementary vario EL cube型元素分析仪,在960℃的氧化条件下测定TOC的百分含量. 色度测试在中国科学技术大学进行,将样品装入石英杯使用CR-700R测色仪测试. 粒度分析在泰山学院土壤与环境变化实

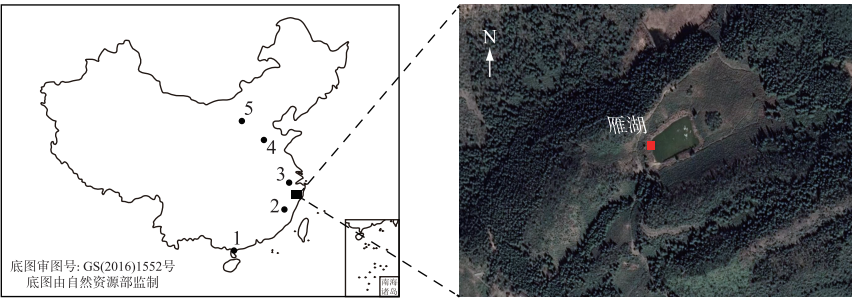


图1 采样点位置(左图黑色圆点为本研究对比位置点,分别为:  
1 湖光岩玛珥湖;2 仙山;3 天目山;4 华北平原;5 公海)

Fig.1 Site location (The black dots in the left map are sites used for comparison in this study:

1 Huguangyan Maar Lake;2 Xianshan Mountain ; 3 Tianmu Mountain; 4 North China Plain; 5 Lake Gonghai)

验室进行,具体方法如下:取少量样品加 10~20 mL 30%的  $H_2O_2$ ,摇匀后在 150℃ 条件下加热以除去有机质,之后加入 10 mL 10% 的盐酸除去碳酸盐,静置 48 h 后加入 10 mL 10% 的分散剂(六偏磷酸钠),超声 10 min 后,用 Mastersizer 2000 型激光粒度仪进行粒度测试. 仪器测量范围为 0.02~2000  $\mu m$ , 粒级分辨率为 0.01 $\Phi$ , 重复测试的相对误差<2%.

2 结果

2.1 年代

YH 钻孔 6 个样品的 AMS<sup>14</sup>C 测年数据如表 1 所示. 由于测年误差,个别数据存在倒转现象,但整体上符合沉积规律. 为了更好地处理年代-深度关系,我们基于贝叶斯公式的“WinBacon2.2”年代模型<sup>[19]</sup>,使用 R 软件<sup>[20]</sup> 为不同的年代控制点选择合适的函数,从而建立了 YH 钻孔的年代框架(图 2).

年代-深度模型(图 2)显示,YH 钻孔在 41 cm 以下沉积速率较低,41~57 cm 之间沉积速率为 0.011 cm/a,57~77 cm 为 0.012 cm/a. 41 cm 以上沉积速率较高,0~13.0 cm 之间沉积速率为 0.058 cm/a,13.0~23.5 cm 为 0.058 cm/a,23.5~35.0 cm 为 0.15 cm/a,35.0~37.5 cm 为 0.093 cm/a,37.5~41.0 cm 为 0.026 cm/a.

表 1 YH 钻孔 AMS<sup>14</sup>C 测年结果  
Tab.1 Results of AMS<sup>14</sup>C dating of the YH Core

样品编号	深度/cm	测年材料	$\delta^{13}C/‰$	<sup>14</sup> C 年龄/a BP	校正年代(2 $\sigma$ )
BETA-502340	13.0	全岩有机碳	-19.1	200±30	1770 (1730-1809) AD
BETA-496015	23.5	炭屑	-25.6	200±30	1770 (1730-1809) AD
BETA-503611	35.0	全岩有机碳	-16.9	240±30	1657 (1632-1681) AD
BETA-502342	37.5	全岩有机碳	-18.0	300±30	1546 (1490-1602) AD
BETA-502612	41.0	全岩有机碳	-19.4	630±30	1368 (1337-1398) AD
BETA-502343	57.0	全岩有机碳	-20.7	2130±30	131 (209-53) BC

2.2 岩性和代用指标

由 YH 钻孔沉积剖面(图 3a)可以看出,整个沉积剖面有明显的分层现象,上部(41 cm 以上)颜色较深,有机质含量高;底部(41 cm 以下)为浅黄色,颗粒偏粗,有机质含量低. YH 钻孔的各项环境指标数据分布如图 3b 所示, $L^*$  为亮度,在明亮(此时  $L^* = 100$ )与黑暗(此时  $L^* = 0$ )之间变化, $a^*$  值表示颜色从绿色( $-a^*$ )到红色( $+a^*$ )之间变化, $a^*/L^*$  为通过亮度校正后的红度值. 钻孔粒度数据按照黏土(<4  $\mu m$ )、粉砂(4~64  $\mu m$ )和砂(>64  $\mu m$ )分类. 结合 YH 钻孔岩性和各项环境指标数据,整个沉积序列可分为 3 段:

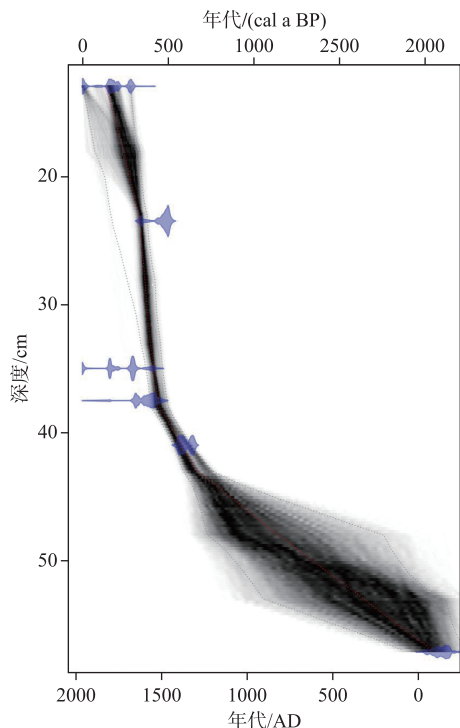


图 2 YH 钻孔年代-深度模型

Fig.2 The age-depth model of the YH Core

(1) 0~23 cm 岩芯为浅褐色, TOC 含量平均值为 1.83%, 有机质含量较高, 粒度显示该段岩芯黏土含量较低, 粉砂含量较高, 中值粒径在 8.79~12.3  $\mu\text{m}$  之间, 平均值为 9.47  $\mu\text{m}$ , 沉积物颗粒中等偏细; (2) 23~41 cm 岩芯为深褐色, TOC 含量平均值为 2.55%, 有机质含量为最高, 该段沉积黏土含量较高, 粉砂含量较低, 中值粒径在 7.02~8.93  $\mu\text{m}$  之间, 平均值为 7.72  $\mu\text{m}$ , 说明沉积物颗粒偏细; (3) 41~77 cm 岩芯为黄褐色, TOC 含量平均值为 0.67%, 有机质含量为最低, 黏土和粉砂含量均较低, 而砂含量较高, 中值粒径在 8.16~19.3  $\mu\text{m}$  之间, 平均值为 10.22  $\mu\text{m}$ , 沉积物颗粒偏粗。

由于: 1) 本研究所采取的 6 个 AMS<sup>14</sup>C 测年样品多数集中在顶部至 41.0 cm 处, 底部测年的数据较少; 2) 底部沉积物 TOC 含量较低, 可能导致全岩有机碳测试年龄存在误差, 另外据钻孔剖面岩性初步判断 (1)、(2) 段岩芯为湖相沉积, 而 (3) 段岩芯可能为早期岩石的风化产物而非湖泊沉积相, 因此本文将着重探讨 41.0 cm (大约 1400 AD) 以上沉积序列所反映的气候变化信息。

### 3 讨论

#### 3.1 1400 AD 以来研究区环境指标的变化特征与湖区古气候重建

湖泊沉积物的 TOC 含量常被用于反映沉积时期生物

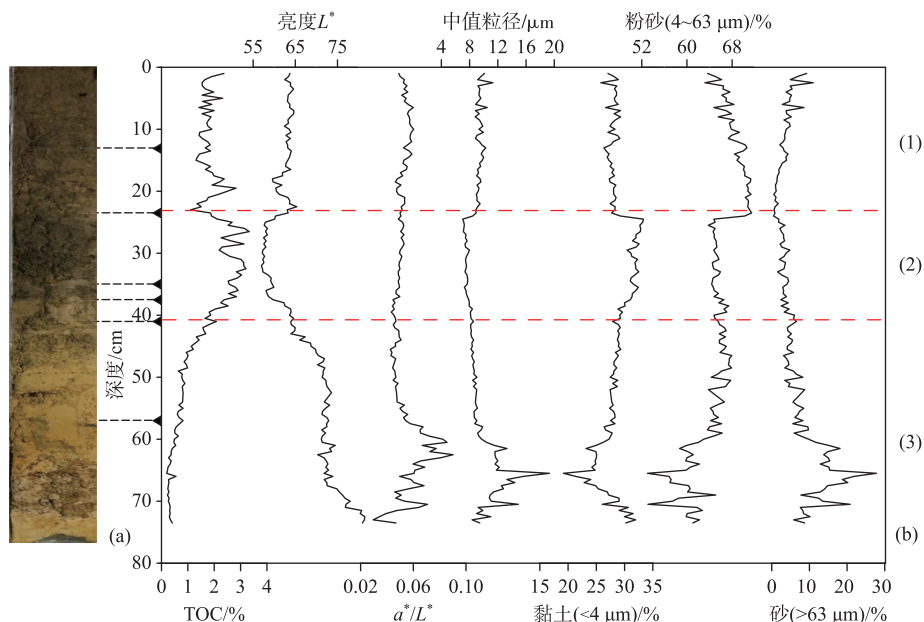


图 3 YH 钻孔岩性图 (a) 和指标序列 (b) (▲为 AMS<sup>14</sup>C 测年点, 红色虚线为岩性分界)

Fig.3 The lithology (a) and proxies (b) of YH Core (Triangles show AMS<sup>14</sup>C ages and the red dotted lines show distinctive lithological changes)

量的多少以及氧化还原环境条件<sup>[21]</sup>. 通常在温暖湿润气候时期,湖泊内水生生物及藻类发育,且流域内植被茂盛,沉积物中 TOC 含量较高<sup>[22-23]</sup>. 研究区雁湖为山顶面积较小、水深较浅的湖泊,同时雁湖属于亚热带季风区且地处较高海拔位置,相比于温度的变化,该地区的降水量在季节一年代际范围都具有较大波动,影响湖区及周围流域的生物量,因此认为降水量可能是控制雁湖沉积物中 TOC 变化的主要因素<sup>[24]</sup>. 当然,对于浅湖来说,其他因素也会影响沉积物中 TOC 含量,因此本文结合了 TOC、粒度和色度进行多指标对比分析.

湖泊沉积物颗粒的粗细变化能够反映水体的扩张和收缩,从而指示沉积环境的干湿变化<sup>[25-26]</sup>. 雁湖属于封闭湖泊且水位波动较大,其沉积物来源单一,沉积物颗粒大小与水位高低密切相关. 在气候干旱期,湖水退却,采样点距离湖岸较近,粗颗粒物易于到达;反之,在气候湿润期,湖泊扩张,采样点距离湖岸较远,粗颗粒物难以到达,该位置的沉积颗粒较细<sup>[27-28]</sup>. 因此,雁湖沉积物颗粒的粗细变化能够反映湖区的干湿变迁,即:细颗粒沉积物标志着湿润气候,粗颗粒沉积物反映干旱气候.

湖泊沉积物的色度也经常用于气候变化研究,其常用指标包括亮度  $L^*$  和红度  $a^*$ . 亮度  $L^*$  主要受控于沉积物中碳酸盐和有机质含量变化,碳酸盐含量越高,则沉积物的亮度值就越大,而有机质含量的增高则使沉积物变暗<sup>[29-30]</sup>. 红度  $a^*$  与沉积物中氧化铁含量有关<sup>[31-32]</sup>,沉积物有机质含量和湖泊水位高低会影响氧化铁等致色矿物的形成,即高水位、有机质含量丰富的偏还原环境抑制了致色矿物形成,而低水位、有机质含量低的偏氧化环境促进了矿物形成.

雁湖地区 1400 AD 以来气候变化可分为 4 个阶段(图 4). 阶段 I: 1400—1600 AD 期间,沉积物 TOC 含量逐渐增加,说明湖区及周围流域生物量较高,进而反映了较多的季风降水. 这段时期  $L^*$  逐渐降低反映了有机质含量高使得沉积物偏暗, $a^*/L^*$  整体偏低表明沉积环境偏还原条件,抑制了赤铁矿等致色矿物的形成. 另外中值粒径在该时期也逐渐减小,沉积物颗粒偏细. 各项指标均说明,1400—1600 AD 期间,研究区降水量较丰富,气候偏湿润,湖区集水发育,水位较高;阶段 II: 1600—1650 AD 期间,TOC 含量大幅降低, $L^*$  和  $a^*/L^*$  相应升高,中值粒径显示沉积物颗粒变粗,说明这段时期研究区降水量减少,气候转向干旱,湖区水位下降;阶段 III: 1650—1750 AD 期间,TOC 含量出现回升, $L^*$  和  $a^*/L^*$  降低,但该时期中值粒径并无显著变化,仍显示沉积物颗粒偏粗,说明该时期研究区降水有小幅增加,但湖区水位仍然较低;阶段 IV: 1750—2000 AD 期间,TOC 含量逐渐降低且之后一直较低, $L^*$  和  $a^*/L^*$  升高且保持在较高水平,中值粒径偏大,各项指标均说明研究区气候一直处于干旱状态,降水偏少.

### 3.2 与历史文献记录的对比

文献资料中记录了大量的古气候信息,雁湖地区的水文状况在多篇历史文献中也有反映. 1590s,明代陈仁锡在其所著《潜确类书》中记载到:“雁荡山在东清县山顶有一湖,方可十里,水常不涸,春雁归时都宿此,故名”,说明此时期雁湖湖泊面积较大,水位较高,对应于本研究得出的 1550—1600 AD 研究区降水量较多,气候偏湿润的阶段. 明代地理学家徐霞客分别在 1613 AD 和 1632 AD(图 4 中黑色虚线标注)两次游历雁荡山并且留下两篇游记,第 1 篇(1613 AD)记载到:“湖中草满,已成荒田”,第 2 篇(1632 AD)记载到:“洼中积水成荒草之地,青青弥望满眼,视野所及处,所称雁湖也”,说明该时期雁湖水位较低,在年代误差范围内,对应于本研究中 1600—1650 AD 湖区降水量减少,气候偏干旱的阶段. 另外,岩性显示钻孔约 23 cm(约 1613 AD)以上沉积物颜色逐渐变浅,对照 YH 钻孔 TOC 含量降低和粒度变粗说明了湖泊沉积物中有机质含

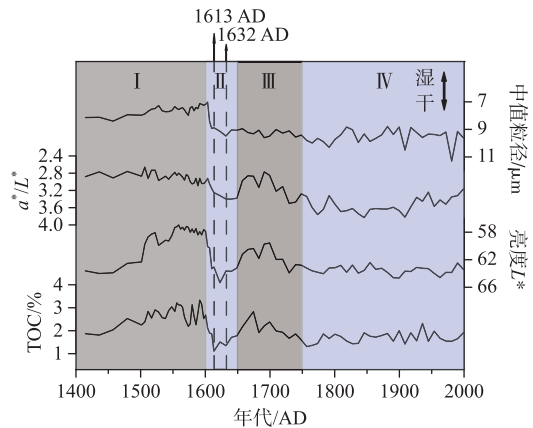


图 4 1400 AD 以来雁湖沉积记录的气候变化序列(虚线为文献记录时间)

Fig.4 Time-series of proxies in sediments of Lake Yanhu since 1400 AD (The dotted lines correspond to the ages in historical documents)



量减少,气候较为干旱的状态. 综上,本研究各项环境指标分析结果与历史文献记录的气候变化特征较吻合,说明雁湖沉积物小冰期以来的沉积序列年代框架和环境指标所反映的气候变化信息较准确.

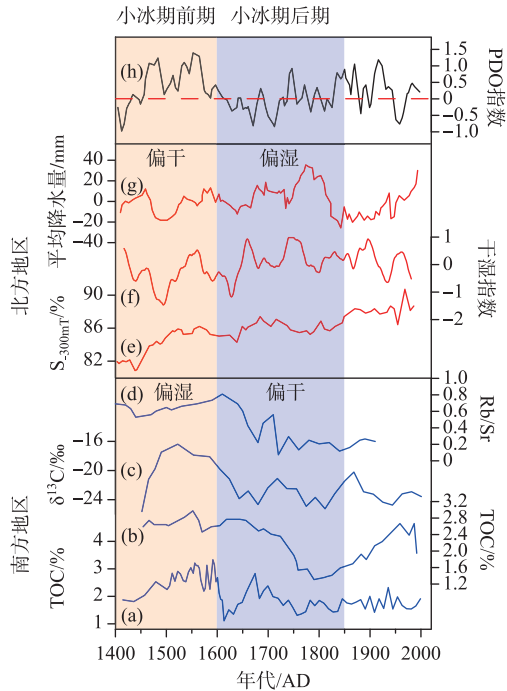


图5 南北地区干湿记录以及与太平洋年代际振荡的对比(橙色阴影代表小冰期前期,蓝色阴影代表小冰期后期):(a) YH 钻孔 TOC 含量;(b) 湖光岩玛珥湖 TOC 含量;(c) 福建仙山泥炭  $\alpha$ -纤维素  $\delta^{13}\text{C}$ ;(d) 浙江天目山泥炭 Rb/Sr;(e) 公海磁化参数  $S_{300\text{mT}}$ ;(f) 华北平原干湿指数;(g) 孢粉记录重建的北方年平均降水量;(h) 太平洋年代际振荡指数(PDO 指数)

Fig.5 Comparison of records in eastern China with the Pacific Decadal Oscillation (orange shadows represent the early LIA, blue shadows represent the late LIA): (a) TOC content from YH Core; (b) TOC content from Huguangyan Maar Lake; (c) the percentage of cellulose  $\delta^{13}\text{C}$  from the Xianshan Peat in Fujian Province; (d) the Rb/Sr ratio of the Tianmu Mountain in Zhejiang Province; (e) the variations of  $S_{300\text{mT}}$  in Lake Gonghai; (f) dry-wet index in North China Plain; (g) the pollen-based PANN anomaly in northern China; (h) Pacific Decadal Oscillation index (PDO index)

旱”)<sup>[50]</sup>.

本文将中国东部南北地区重建的 1400 AD 以来的干湿记录与 PDO 指数<sup>[51]</sup>(图 5h)进行对比,分析发现:小冰期前期(1400—1600 AD),PDO 处于暖相位,中国南方地区降水量相对较高,气候湿润,北方地区降

### 3.3 季风降水的区域对比

为了进一步确定小冰期期间东亚季风区南部的降水变化特征,本文将雁湖沉积物的指标与被用于反映降水变化的湖光岩玛珥湖沉积物 TOC 含量<sup>[33]</sup>、福建仙山泥炭  $\alpha$ -纤维素  $\delta^{13}\text{C}$  记录<sup>[34]</sup>和浙江天目山千亩田泥炭 Rb/Sr 值<sup>[35]</sup>进行对比. 分析发现(图 5a~d):在年代误差范围内,上述地区的降水变化趋势较为一致,总体上在小冰期前期(1400—1600 AD)气候偏湿润,而小冰期后期(1600—1850 AD)气候偏干旱. 天目山、仙山、湖光岩玛珥湖和雁荡山同处于中国东南季风区,因此 4 个地区的气候变化序列可能反映了中国东南地区的干湿变化趋势.

为深入研究小冰期内部中国东部季风区南北降水时空变化特征,我们将上述南方古气候记录与北方地区(图 5e~g)降水重建记录(包括公海沉积物磁性特征记录<sup>[36]</sup>、基于历史文献重建的华北干湿指数<sup>[37]</sup>和孢粉记录重建的北方年平均降水量<sup>[38]</sup>)进行对比. 结果显示:与南方地区记录反映的干湿状态所不同,北方古气候记录显示在小冰期前期气候偏干旱,而在小冰期后期气候偏湿润. 上述对比说明在百年时间尺度上,南北地区降水气候变化趋势相反,小冰期期间中国东部季风区降水存在“南涝北旱”和“北涝南旱”的空间变化特征.

### 3.4 驱动机制分析

太平洋年代际振荡 (Pacific Decadal Oscillation, PDO) 是北太平洋海温多年代际变化的主要模式<sup>[39-40]</sup>. 在 PDO 暖相位时期,北太平洋中西部海温偏冷,而东部海温则高于往年平均温度,PDO 冷相位时期情况则相反<sup>[41-43]</sup>. 现代气象观测数据显示我国东部夏季降水的空间格局和时间变异性与太平洋海温异常具有较好的相关性<sup>[44-45]</sup>. 例如,一些研究认为 PDO 相位的移动与华北降水的年代际变化密切相关,在 PDO 暖期,降水低于正常水平,华北地区干旱加剧,反之则情况相反<sup>[46-48]</sup>. Zhu 等发现:与 1979—1999 年相比,2000—2008 年黄淮流域夏季降水增加,长江流域降水减少是由 1999 年前后 PDO 由暖向冷的相变引起的<sup>[49]</sup>. Yang 等利用 1951—2015 年 160 个台站月降水数据研究发现:在太平洋海温模式暖期(冷期),中国东部地区表现为“南涝北旱”(“北涝南旱”)<sup>[50]</sup>.

水量则相对较低,气候干旱;小冰期后期(1600—1850 AD),PDO处于冷相位,中国南方地区降水量减少,气候偏干旱,而北方地区则呈现相反趋势,其降水量增加,气候偏湿润。

关于中国东部旱涝分布变化与PDO的内在联系,有研究<sup>[52,53]</sup>认为太平洋海温异常可以通过影响西太平洋副热带高压(西太副高)的强度和位置进而改变中国东部降水空间格局。一般而言,西太副高会在每年的6月中旬和7月中下旬出现向北迁移的过程,伴随着西太副高的迁移,中国东部地区雨带地理位置也会发生相应变化<sup>[54,55]</sup>。在PDO暖相位时期,西太副高增强并向西南扩展,使得雨带在中国南方地区停留较长时间并且导致更多降水,而北方地区降水则减少;相反在PDO冷相位时期,西太副高减弱且向东北退缩,导致中国南方地区提前结束了梅雨期,而北方地区则迎来更多降水<sup>[56]</sup>。本研究地质记录对比也显示小冰期前期受PDO暖事件影响,中国东部地区降水表现为“南涝北旱”;小冰期后期受PDO冷事件影响,东部地区降水表现为“北涝南旱”。综上分析,小冰期以来,PDO对中国东部季风区南—北“偶极型”空间降水特征具有重要影响作用。

#### 4 结论

本研究对YH钻孔进行了多指标对比分析,并与中国东部南北地区季风降水指标序列以及PDO指数进行对比分析,初步得到以下结论:

1) 1400 AD以来研究区的气候变化大致可分为4个阶段:a) 1400—1600 AD,气候偏湿润,湖区集水发育;b) 1600—1650 AD,降水量减少,湖区水位下降;c) 1650—1750 AD,研究区气候出现回转,降水量有小幅增加,但湖区水位仍较低;d) 1750—2000 AD,研究区气候一直处于偏干旱状态。其中1500—1650 AD期间研究区的干湿变化与历史文献记录能够很好地对应。

2) 在百年时间尺度上,雁湖沉积记录与天目山泥炭、福建仙山泥炭以及湖光岩玛珉湖沉积记录的干湿变化同步,指示了中国东南地区气候波动的一致性。

3) 小冰期以来中国东部季风区南北降水记录反映的气候变化状况大体上呈反相位关系,说明在百年时间尺度上,东部地区降水存在着“南涝北旱”和“北涝南旱”的“偶极型”特征。这种空间降水特征与PDO具有密切相关性:小冰期前期(1400—1600 AD)受PDO暖相位事件影响,中国东部地区表现为“南涝北旱”,而小冰期后期(1600—1850 AD)受PDO冷相位事件影响,表现为“北涝南旱”的特征。

致谢:感谢黄开建在采样过程中的帮助。

#### 5 参考文献

- [1] Bond G, Kromer B, Beer J *et al.* Persistent solar influence on North Atlantic climate during the Holocene. *Science*, 2001, **294**(5549): 2130-2136. DOI: 10.1126/science.1065680.
- [2] Mann ME, Zhang ZH, Rutherford S *et al.* Global signatures and dynamical origins of the little ice age and medieval climate anomaly. *Science*, 2009, **326**(5957): 1256-1260. DOI: 10.1126/science.1177303.
- [3] Yan H, Wei W, Soon W *et al.* Dynamics of the intertropical convergence zone over the western Pacific during the Little Ice Age. *Nature Geoscience*, 2015, **8**(4): 315-320. DOI: 10.1038/ngeo2375.
- [4] Kulkarni C, Peteet DM, Boger R. The Little Ice Age and human-environmental interactions in the Central Balkans: Insights from a new Serbian paleorecord. *Quaternary International*, 2018, **482**: 13-26. DOI: 10.1016/j.quaint.2018.04.035.
- [5] Munn T, Wookey PA eds. Encyclopedia of global environmental change. Chichester: Wiley & Sons, 2002: 504-509.
- [6] Wen RL, Xiao JL, Chang ZG *et al.* Holocene precipitation and temperature variations in the East Asian monsoonal margin from pollen data from Hulun Lake in northeastern Inner Mongolia, China. *Boreas*, 2010, **39**(2): 262-272. DOI: 10.1111/j.1502-3885.2009.00125.x.
- [7] Chen R, Shen J, Li CH *et al.* Mid- to late-Holocene East Asian summer monsoon variability recorded in lacustrine sediments from Jingpo Lake, Northeastern China. *The Holocene*, 2015, **25**(3): 454-468. DOI: 10.1177/0959683614561888.
- [8] Chu GQ, Sun Q, Wang XH *et al.* A 1600 year multiproxy record of paleoclimatic change from varved sediments in Lake Xiaolongwan, northeastern China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2009, **114**(D22): D22108. DOI: 10.1029/2009JD012077.

- [ 9 ] Xiao JL, Si B, Zhai DY *et al.* Hydrology of Dali Lake in central-eastern Inner Mongolia and Holocene East Asian monsoon variability. *Journal of Paleolimnology*, 2008, **40**(1): 519-528. DOI: 10.1007/s10933-007-9179-x.
- [ 10 ] Li XL. Inner Mongolia the Aer Tianchi since the Little Ice Age lake drilling pollen characteristics and vegetation succession [Dissertation]. Beijing: China University of Geosciences, 2012. [李雪林. 内蒙古阿尔山天池小冰期以来湖泊钻孔孢粉特征及植被演替[学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2012.]
- [ 11 ] Hou JZ, Tan M, Cheng H *et al.* Stable isotope records of plant cover change and monsoon variation in the past 2200 years: Evidence from laminated *Stalagmites* in Beijing, China. *Boreas*, 2003, **32**(2): 304-313. DOI: 10.1111/j.1502-3885.2003.tb01085.x.
- [ 12 ] Fan BS, Zhang WS, Zhang RC *et al.* Characteristics of dry-wet changes and human activities in the North China Plain since the Little Ice Age. *Quaternary Sciences*, 2019, **39**(2): 483-496. [范保硕, 张文胜, 张茹春等. 华北平原小冰期以来干湿变化与人类活动特征. 第四纪研究, 2019, **39**(2): 483-496.]
- [ 13 ] Cui AN, Ma CM, Zhao L *et al.* Pollen records of the Little Ice Age humidity flip in the middle Yangtze River catchment. *Quaternary Science Reviews*, 2018, **193**: 43-53. DOI: 10.1016/j.quascirev.2018.06.015.
- [ 14 ] Li SH, Guo W, Yin Y *et al.* Environmental changes inferred from lacustrine sediments and historical literature: A record from Gaoyou Lake, eastern China. *Quaternary International*, 2015, **380/381**: 350-357. DOI: 10.1016/j.quaint.2015.01.010.
- [ 15 ] He BY, Zhang S, Cai SM. Climatic changes recorded in peat from the dajiu lake basin in Shennongjia since the last 2600 years. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2003, **23**(2): 109-115. [何报寅, 张穗, 蔡述明. 近 2600 年神农架大九湖泥炭的气候变化记录. 海洋地质与第四纪地质, 2003, **23**(2): 109-115.]
- [ 16 ] Yu MG, Xing GF, Shen JL *et al.* Chronologic study on volcanic rocks in the Mt. Yandangshan world geopark. *Acta Geologica Sinica*, 2006, **80**(11): 1683-1690. [余明刚, 邢光福, 沈加林等. 雁荡山世界地质公园火山岩年代学研究. 地质学报, 2006, **80**(11): 1683-1690.]
- [ 17 ] Shan Q, Feng GB, Liang XN. Temporal and spatial variation of Mare Nubium over Yandang Mountain and its relationship with meteorological factors. *Journal of Zhejiang Meteorology*, 2014, **35**(2): 34-37. [单权, 冯国标, 梁晓妮. 雁荡山云海的时空变化特征及其与气象因子的关系. 浙江气象, 2014, **35**(2): 34-37.]
- [ 18 ] Reimer PJ, Bard E, Bayliss A *et al.* IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves 0–50,000 years cal BP. *Radiocarbon*, 2013, **55**(4): 1869-1887. DOI: 10.2458/azu\_js\_rc.55.16947.
- [ 19 ] Blaauw M, Christen JA. Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process. *Bayesian Analysis*, 2011, **6**(3): 457-474. DOI: 10.1214/11-ba618.
- [ 20 ] Knezevic SZ, Streibig JC, Ritz C. Utilizing R software package for dose-response studies: The concept and data analysis. *Weed Technology*, 2007, **21**(3): 840-848. DOI: 10.1614/wt-06-161.1.
- [ 21 ] Meyers PA. Organic geochemical proxies of paleoceanographic, paleolimnologic, and paleoclimatic processes. *Organic Geochemistry*, 1997, **27**(5/6): 213-250. DOI: 10.1016/S0146-6380(97)00049-1.
- [ 22 ] Brenner M, Dorsey K, Song XL *et al.* Paleolimnology of Qilu Hu, Yunnan Province, China. *Hydrobiologia*, 1991, **214**(1): 333-340. DOI: 10.1007/BF00050968.
- [ 23 ] Selvaraj K, Wei KY, Liu KK *et al.* Late Holocene monsoon climate of northeastern Taiwan inferred from elemental (C, N) and isotopic ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{15}\text{N}$ ) data in lake sediments. *Quaternary Science Reviews*, 2012, **37**: 48-60. DOI: 10.1016/j.quascirev.2012.01.009.
- [ 24 ] Zeng Y, Chen JG, Zhu ZJ *et al.* The wet Little Ice Age recorded by sediments in Huguangyan Lake, tropical South China. *Quaternary International*, 2012, **263**: 55-62. DOI: 10.1016/j.quaint.2011.12.022.
- [ 25 ] Guo C, Ma YZ, Liu JR *et al.* Climatic change recorded by grain-size in the past about 2000 years from Yamzhog Yumco Lake, Tibet. *Quaternary Sciences*, 2016, **36**(2): 405-419. [郭超, 马玉贞, 刘杰瑞等. 过去 2000 年来西藏羊卓雍错沉积物粒度记录的气候变化. 第四纪研究, 2016, **36**(2): 405-419.]
- [ 26 ] He HC, Ding HY, Zhang ZK *et al.* Grain-size characteristics and their environmental significance of Hongze Lake sediments. *Scientia Geographica Sinica*, 2005, **25**(5): 590-596. [何华春, 丁海燕, 张振克等. 淮河中下游洪泽湖湖泊沉积物粒度特征及其沉积环境意义. 地理科学, 2005, **25**(5): 590-596.]
- [ 27 ] Chen JA, Wan GJ, Xu JY. Sediment particle sizes and the dry-humid transformation of the regional climate in Erhai Lake. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2000, **18**(3): 341-345. [陈敬安, 万国江, 徐经意. 洱海沉积物粒度记录与气候干湿变



- 迁. 沉积学报, 2000, **18**(3): 341-345.]
- [28] Wang HY, Liu HY, Cui HT *et al.* Terminal Pleistocene/Holocene palaeoenvironmental changes revealed by mineral-magnetism measurements of lake sediments for Dali Nor area, southeastern Inner Mongolia Plateau, China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2001, **170**(1/2): 115-132. DOI: 10.1016/S0031-0182(01)00231-0.
- [29] Balsam WL, Deaton BC, Damuth JE. Evaluating optical lightness as a proxy for carbonate content in marine sediment cores. *Marine Geology*, 1999, **161**(2/3/4): 141-153. DOI: 10.1016/S0025-3227(99)00037-7.
- [30] Helmke JP, Schulz M, Bauch HA. Sediment-color record from the northeast Atlantic reveals patterns of millennial-scale climate variability during the past 500, 000 years. *Quaternary Research*, 2002, **57**(1): 49-57. DOI: 10.1006/qres.2001.2289.
- [31] Wu YH, Li SJ. Significance of lake sediment color for short time scale climate variation. *Advances in Earth Science*, 2004, **19**(5): 789-792. [吴艳宏, 李世杰. 湖泊沉积物色度在短尺度古气候研究中的应用. 地球科学进展, 2004, **19**(5): 789-792.]
- [32] Ji JF, Shen J, Balsam W *et al.* Asian monsoon oscillations in the northeastern Qinghai-Tibet Plateau since the late glacial as interpreted from visible reflectance of Qinghai Lake sediments. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, **233**(1/2): 61-70. DOI: 10.1016/j.epsl.2005.02.025.
- [33] Chu GQ, Liu JQ, Sun Q *et al.* The 'Mediaeval Warm Period' drought recorded in Lake Huguangyan, tropical South China. *The Holocene*, 2002, **12**(5): 511-516. DOI: 10.1191/0959683602hl566ft.
- [34] Lei GL, Zhu Y, Jiang XY *et al.* Climate variations over the past 1400 years inferred from an  $\alpha$ -cellulose  $\delta^{13}\text{C}$  record from Xianshan peat in southeast China. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, **34**(8): 1018-1024. [雷国良, 朱芸, 姜修洋等. 福建仙山泥炭距今 1400a 以来的  $\alpha$ -纤维素  $\delta^{13}\text{C}$  记录及其气候意义. 地理科学, 2014, **34**(8): 1018-1024.]
- [35] Zhang Y, Ma CM, Zhao N *et al.* Late Holocene Rb/Sr ratios as a paleoclimate proxy in the qianmutian peat of Tianmu Mountains, Zhejiang Province. *Journal of Stratigraphy*, 2015, **39**(1): 97-107. [张愈, 马春梅, 赵宁等. 浙江天目山千亩田泥炭晚全新世以来 Rb/Sr 记录的干湿变化. 地层学杂志, 2015, **39**(1): 97-107.]
- [36] Liu JB, Chen FH, Chen JH *et al.* Humid medieval warm period recorded by magnetic characteristics of sediments from Gonghai Lake, Shanxi, North China. *Chinese Science Bulletin*, 2011, **56**(23): 2464-2474. DOI: 10.1007/s11434-011-4592-y.
- [37] Zheng JY, Wang WC, Ge QS *et al.* Precipitation variability and extreme events in eastern China during the past 1500 years. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2006, **17**(3): 579. DOI: 10.3319/tao.2006.17.3.579(a).
- [38] Li JY, Dodson J, Yan H *et al.* Quantifying climatic variability in monsoonal northern China over the last 2200 years and its role in driving Chinese dynastic changes. *Quaternary Science Reviews*, 2017, **159**: 35-46. DOI: 10.1016/j.quascirev.2017.01.009.
- [39] Mantua NJ, Hare SR, Zhang Y *et al.* A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1997, **78**(6): 1069-1079. DOI: 10.1175/1520-0477(1997)0781069:apicow>2.0.co;2.
- [40] Nigam S, Barlow M, Berbery EH. Analysis links Pacific decadal variability to drought and streamflow in United States. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 1999, **80**(51): 621-625. DOI: 10.1029/99eo00412.
- [41] Minobe S. Spatio-temporal structure of the pentadecadal variability over the North Pacific. *Progress in Oceanography*, 2000, **47**(2/3/4): 381-408. DOI: 10.1016/S0079-6611(00)00042-2.
- [42] Mantua NJ, Hare SR. The Pacific decadal oscillation. *Journal of Oceanography*, 2002, **58**(1): 35-44. DOI: 10.1023/a:1015820616384.
- [43] Zhang XB, Sheng J, Shabbar A. Modes of interannual and interdecadal variability of Pacific SST. *Journal of Climate*, 1998, **11**(10): 2556-2569. DOI: 10.1175/1520-0442(1998)0112556:moiaiv>2.0.co;2.
- [44] Shen CM, Wang WC, Gong W *et al.* A Pacific Decadal Oscillation record since 1470 AD reconstructed from proxy data of summer rainfall over eastern China. *Geophysical Research Letters*, 2006, **33**(3): L03702. DOI: 10.1029/2005gl024804.
- [45] Yang Q, Ma ZG, Fan XG *et al.* Decadal Modulation of Precipitation Patterns over Eastern China by Sea Surface Temperature Anomalies. *Journal of Climate*, 2017, **30**(17): 7017-7033. DOI: 10.1175/jcli-d-16-0793.1
- [46] Ma ZG. The interdecadal trend and shift of dry/wet over the central part of North China and their relationship to the Pacific Decadal Oscillation (PDO). *Chinese Science Bulletin*, 2007, **52**(15): 2130-2139. DOI: 10.1007/s11434-007-0284-z.

- [47] Ma ZG, Fu CB. Some evidence of drying trend over northern China from 1951 to 2004. *Chinese Science Bulletin*, 2006, **51** (23): 2913-2925. DOI: 10.1007/s11434-006-2159-0.
- [48] Ma ZG, Shao LJ. Relationship between dry/wet variation and the Pacific decade oscillation (PDO) in Northern China during the last 100 years. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2006, **30**(3): 464-474. [马柱国, 邵丽娟. 中国北方近百年干湿变化与太平洋年代际振荡的关系. 大气科学, 2006, **30**(3): 464-474.]
- [49] Zhu YL, Wang HJ, Zhou W *et al.* Recent changes in the summer precipitation pattern in East China and the background circulation. *Climate Dynamics*, 2011, **36**(7/8): 1463-1473. DOI: 10.1007/s00382-010-0852-9.
- [50] Yang Q, Ma ZG, Xu BL. Modulation of monthly precipitation patterns over East China by the Pacific Decadal Oscillation. *Climatic Change*, 2017, **144**(3): 405-417. DOI: 10.1007/s10584-016-1662-9.
- [51] MacDonald GM. Variations in the Pacific Decadal Oscillation over the past millennium. *Geophysical Research Letters*, 2005, **32**(8): L08703. DOI: 10.1029/2005gl022478.
- [52] Hu ZZ. Interdecadal variability of summer climate over East Asia and its association with 500 hPa height and global sea surface temperature. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1997, **102** (D16): 19403-19412. DOI: 10.1029/97JD01052.
- [53] Zhou TJ, Yu RC, Zhang J *et al.* Why the western Pacific subtropical high has extended westward since the late 1970s. *Journal of Climate*, 2009, **22**(8): 2199-2215. DOI: 10.1175/2008jcli2527.1.
- [54] Ren XJ, Yang XQ, Sun XG. Zonal oscillation of western Pacific subtropical high and subseasonal SST variations during Yangtze persistent heavy rainfall events. *Journal of Climate*, 2013, **26** (22): 8929-8946. DOI: 10.1175/jcli-d-12-00861.1.
- [55] Su TH, Xue F. The intraseasonal variation of summer monsoon circulation and rainfall in East Asia. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2010, **34**(3): 611-628. [苏同华, 薛峰. 东亚夏季风环流和雨带的季节内变化. 大气科学, 2010, **34**(3): 611-628.]
- [56] Yu L, Furevik T, Otterå OH *et al.* Modulation of the Pacific Decadal Oscillation on the summer precipitation over East China: A comparison of observations to 600-years control run of Bergen Climate Model. *Climate Dynamics*, 2015, **44**(1/2): 475-494. DOI: 10.1007/s00382-014-2141-5.