

# 北山周边地区地质历史时期气候环境变化的综合分析

万国江\* 万思源 王仕禄 王敬富 陈敬安

(中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002)

**摘要:** 过去数万年以来, 北山地区一直处于干旱化的区域环境背景。尽管曾经有过暖湿时期, 仍然呈现波动式的变干趋势。虽然因现代人为活动影响而存在向暖湿转变的可能性, 但其区域干旱化的环境特征对于阻止污染物的水迁移扩散和永久型地质处置库选址具有不可替代的优越性。

**关键词:** 地质历史; 气候变化; 西北干旱区; 北山地区

废物深层地质处置是环境安全的最终技术保障, 是万年大计的系统工程。在万年或更长时间尺度上, 对处置库区域地质环境气候变化的了解, 将为处置场地环境安全的评估提供科学基础。基于上述考虑, 在废物深层地质处置场址的选择上, 需要回答的首要问题是: 过去地质环境与气候变化的历史?

北山地区位于甘肃省西北部, 行政上属肃北蒙古族自治县境, 介于新疆东部与内蒙西部沙漠之间, 也是我国西北干旱区的核心部位。我国西北干旱区为季风降水所不及, 西风带来的水汽也很少, 荒漠广布。但是, 在地质历史的气候环境演化过程中, 曾经出现过较为暖湿的状况。鉴于我国西北干旱区地质历史气候研究的良好基础, 本文旨在对该地区实地考察的基础上, 以众多学者的优秀成果文献为基础, 从较大区域和地质历史的空间和时间尺度上, 综合剖析北山周边地区地质历史的气候变化, 以为废物深层地质处置工程的选址决策提供科学基础。

## 1 40~30 ka BP, 中国出现了比现代更为暖湿的特殊环境

施雅风先生等的研究指出<sup>[1-2]</sup>: 40~30 ka BP, 即末次冰盛期 (Last Glacial Maximum, LGM) 之前的间冰期, 中国出现了比现代更为暖湿的特殊环境。他们的主要依据是: ① 20世纪90年代西昆仑山古里雅冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 记录研究首次指出, 在35 ka BP左右, 气温可能高出现代4℃, 即为以前所不知的间冰期; ② 同期湖泊沉积、孢粉与古生物、黄土与沙漠地区古土壤、石灰岩洞穴中石笋、古河道、滨海地区海相沉积等多种记录的集成研究表明, 当时青藏高原与西北干旱区有许多淡水大湖, 降水量远比现代丰沛, 导致外流水系扩大, 形成了青海境内的黄河上游水系; ③ 暖湿的气候条下, 森林分布区向北、向西大范围扩展; 华南热带喜湿热的陆均松 (*Dacrydium sp.*) 北界移至22°~24°N, 表明当时热带气温较现代高2℃左右, 降水量也有较大增加; ④ 长江下游石笋资料和北方半干旱半湿润区的植物、古土壤、河道沉积资料均表示降水量有较大增加, 森林覆盖度大; ⑤ 由于冰川和极地冰盖萎缩, 海平面上升; 结合若干地区地面沉降, 海河下游、长江三角洲和珠江三角洲均出现相当规模的海侵。据此, 施雅风等认为: “上述涉及全中国的特殊暖湿环境的形成与地球轨道运行岁差周期变化导致中低纬度日射增强, 致使温度升高, 季风区与西风带降水量都有显著增加关系密切, 而植被改善又对温度和湿度有正反馈作用”。

**作者简介:** 万国江 (1940—), 男, 研究员, 核子地球化学专业, 主要从事区域环境演变、环境过程和核素示踪研究, E-mail: wangguojiang@vip.skleg.cn  
科工二司[2004]124 项目资助

## 2 40~30 ka BP, 西北干旱区曾经呈现湿润化

与中国全境的特殊暖湿环境的形成同步,中国西北部干旱地区也呈现湿润化,升温幅度与降水的增加可能比东部地区更强烈。新疆和内蒙古西部高山区河流下注形成绿洲和湖泊,并消失在沙漠中。湖泊水量变化指示着区域气候的干湿演替。玛纳斯湖、艾比湖、巴里坤湖、艾丁湖、古居延海和白碱湖等是西北地区几个重要的湖泊。北山地区位于上述古湖泊分布区的中心部位,并且地势较高(图1)。上述几个古湖泊的研究资料显示:40~30 ka BP,西北干旱区曾经呈现湿润化。

据Rhodes等对天山北麓玛纳斯河末端的玛纳斯湖的钻孔资料研究显示<sup>[3]</sup>,玛纳斯湖在37.8~32.1 ka BP(AMS <sup>14</sup>C 测年)为淡水深湖。周兴佳编汇的古玛纳斯湖与艾比湖区沙漠分布图显示<sup>[4]</sup>,玛纳斯湖湖面积可能扩展至8 000 km<sup>2</sup>。玛纳斯湖西南相距180~200 km的艾比湖在大约25 ka BP前为大型淡水湖,面积约3 000 km<sup>2</sup>,并形成海拔280 m的高阶地,其时可能与玛纳斯湖连通。

位于天山东段的巴里坤湖,海拔1 575 m,面积112.5 km<sup>2</sup>,为中度咸水湖。于革等根据长13.6 m的ZK00A钻孔资料分析,37~33.6 ka BP(13.6~13.0 m)为最初的相对深水期<sup>[5]</sup>。

天山南麓的吐鲁番盆地是现代极干旱区,艾丁盐湖位于吐鲁番盆地中心<sup>[6]</sup>。李秉孝等根据艾丁湖老盐壳钻孔研究<sup>[7]</sup>,孔深11.6 m(<sup>14</sup>C年代24.9 ka BP)以上水体收缩为盐湖阶段;以下为粘土、粉砂、细砂、砾石等淡水湖相沉积。这个湿润时期一直延伸至孔深16.6 m(39.7 ka BP)。闫顺调查得知<sup>[8]</sup>:晚更新世湿润时,艾丁湖沉积范围可能扩大到2 500~3 000 km<sup>2</sup>。当时,位于艾丁湖西北150 km的柴窝堡湖水外溢,亦流注艾丁湖。

内蒙古西部额济纳旗源于祁连山黑河末端的古居延海,含软体动物的粗砂湖堤高出现代湖滩22~30 m,<sup>14</sup>C年代34.0~29.4 ka BP时为32 000 km<sup>2</sup>的淡水大湖<sup>[6]</sup>。

Pachur等的研究还发现<sup>[6]</sup>,祁连山东段石羊河流注甘肃民勤县境的白碱湖古湖岸阶地高出现代盐滩22~27 m,<sup>14</sup>C测年为33.5~32.4 ka BP。Zhang Hucui等推算相对高度30 m的更高湖阶地的年龄为35 ka BP,湖面积达20 000 km<sup>2</sup>以上<sup>[9]</sup>。

综合已有研究(表1)说明,上述几个重要湖区在30 ka BP前普遍扩大,指示当时上游山区降水增加,河流来水量大增。杨小平发现<sup>[10]</sup>巴丹吉林沙漠中有厚度超过50 cm的钙质胶结层,测年在32 ka BP左右,推测降水量在100~300 mm a<sup>-1</sup>。马玉贞等对位于巴丹吉林沙漠东侧海拔1 600~2 200 m的雅布赖山断头梁剖面孢粉研究指出<sup>[11]</sup>:相当于42~31 ka BP,已有桦和栎林存在,为针叶和阔叶混交林,比现代更东的贺兰山森林下降400~600 m。由此推算当时的年温度比现今高2~3℃,年降水量比现今多250~350 mm。从上述分析可见,当时季风区和西风区的降水量可能都有显著增加。

北山地区位于我国西北上述几个古湖分布区的中心部位,地势较高,不存在大型湖盆。在40~30 ka BP,该地区可能同样处于湿润化气候阶段。年均气温可能高出现代2~4℃,年降水量可能多出现代200~300 mm。

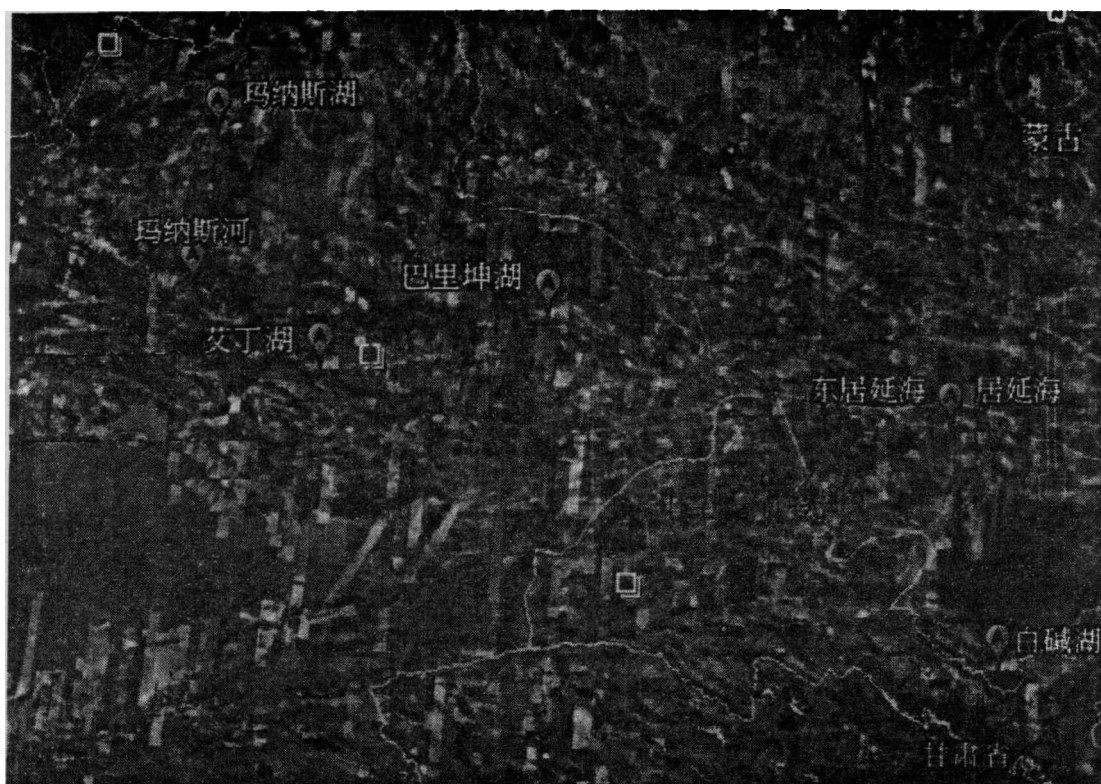


图1 北山地区与西北地区几个重要湖泊的位置关系 (原图采集自Google Earth)

表1 西北地区湖泊沉积记录及演化

湖泊名称	钻孔深/湖堤岸高 /m	年代 /ka BP	古湖面积 /km <sup>2</sup>	近代湖面积 /km <sup>2</sup>	文献
玛纳斯湖		37.8 ~ 32.1	8 000	750 (1957年) 干涸 (1962年)	Rhodes等 (1996) <sup>[3]</sup> 周兴佳 (1994) <sup>[4]</sup>
艾比湖		~ 25	3 000		周兴佳 (1994) <sup>[4]</sup>
艾丁湖	11.6 ~ 16.6/	24.9 ~ 39.7	2 500 ~ 3 000	230 (1909年) 50 (2000年)	李秉孝等 (1989) <sup>[7]</sup> 闫顺 (1996) <sup>[8]</sup> 王亚俊等 (2003) <sup>[17]</sup>
巴里坤湖	13.6 ~ 13.0/	37 ~ 33.6			于革等 (2001) <sup>[9]</sup>
古居延海	/22 ~ 30	34.0 ~ 29.4	32 000	西湖: 267 (1958年) 干涸 (1961年) 东湖: 35 (1958年) 干涸 (1964年)	Pachur等 (1995) <sup>[6]</sup>
白碱湖	/22 ~ 27 /30	33.5 ~ 32.4 35	≥ 20 000	42 (目前)	Pachur等 (1995) <sup>[6]</sup> Zhang Hucui等 (2002) <sup>[9]</sup>

### 3 近万年以来, 西北干旱区呈现波动式的变干趋势

根据张德二通过气象资料分析认为<sup>[12]</sup>, 我国西北大部分地区包含亚干旱、干旱、极干旱等气候大区, 近万年以来湿度状况总体呈现波动式的变干趋势。西北地区气候的主要特征是: ① 降水量少, 年均降水量基本上在 400 mm 以下; 年均降水量少于 100 mm 的地区约占一半以上; ② 降水量的变率大, 基本上都在 20% 以上; ③ 蒸发量也很大, 年蒸发量可达 2 000 mm 以上。

干燥度系数是一个地区最大可能蒸发量与降水量的比值，通常被用以表示水分的有效获得程度。干燥度系数 1.6 ~ 3.5 的相应自然景观为草原；3.5 ~ 16.0 为半荒漠；16.0 以上为荒漠。根据干燥度系数的上述指示，结合北山地区的年降水量和年蒸发量估算，北山地区干燥度系数基本上都在 16 以上，属荒漠景观。

竺可桢对历史气候记录的研究指出<sup>[13]</sup>，中国近五千年来气候相对温暖适宜的时段分别出现在殷商、春秋战国—西汉、隋—唐中期、元初和 20 世纪；在各相对寒冷时期内，还存在次一级尺度的相对温暖时段。现今正处于小冰期寒冷气候结束后的迅速增暖阶段。张德二对竺可桢推断得出的中国近 5000 a 温度曲线注释（图 2），以 a、b、c、d 分别表示典型的温暖时段（汉代、唐代前期）和寒冷时段（东晋、明代后期）。

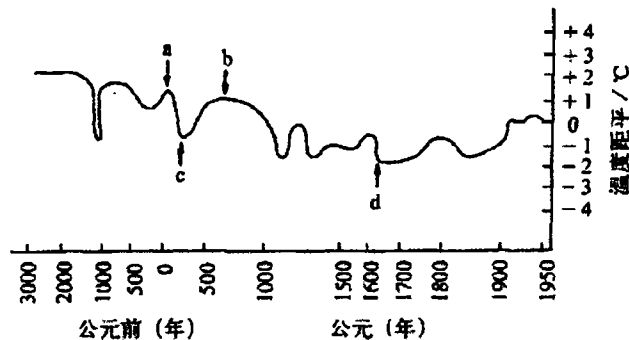


图2 由中国历史文献记录推断得出的历史温度曲线（引自张德二（2005）<sup>[12]</sup>据竺可桢（1973）<sup>[13]</sup>给出的温度曲线改绘。图中：a为汉代温暖期，b为唐代温暖期，c为东晋寒冷期，d为晚明寒冷期）

施雅风等根据各种代用资料（孢粉、冰芯、古湖泊、古土壤、考古材料等）的综合分析认为<sup>[14-15]</sup>：（1）西北地区最近 10 ka 来温度变化的轮廓是：进入全新世以后气候迅速转暖，气温波动式上升，在 8.5 ~ 3.0 ka BP 出现全新世大暖期，其鼎盛阶段在 7.2 ~ 6.0 ka BP；大暖期结束后，气温又呈现波动式的下降。其中 10 ~ 14 世纪一度回暖，出现中世纪暖期；15 ~ 19 世纪进入小冰期；20 世纪气候又再度转暖，气温迅速上升。（2）对于湿度变化：西北地区湿度状况总体上呈现波动式的变干演变趋势，其间出现过多次干湿阶段的交替。内陆封闭湖泊是气候湿润状态变化的良好指示器，大气降水是这些湖泊的主要水量收入，蒸发是其主要消耗。

施雅风等的研究还指出<sup>[4]</sup>，最近 10 ka 以来，以 6000 ~ 7000 a BP 的气候最为潮湿。其后普遍存在着湖面的萎缩乃至逐渐消失，大范围变干的趋势明显。图 3 展示了全新世以来青海湖水位的历史变化：7.0 ka BP 时，湖面高出现代湖面 65 m；5.5 ka BP 时高出 45 m；3.5 ka BP 高出 25 m。总体上看，湖面的相对高度呈波动式的下降，显示出西北地区气候变干的总体趋势。

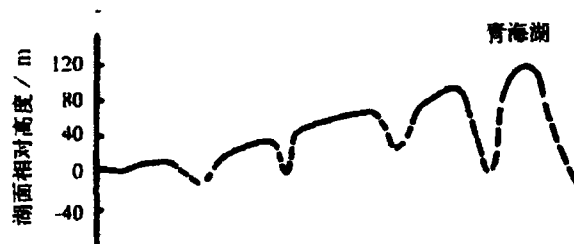


图3 青海湖水位指示的干湿变化（摘引自施雅风等（1992）<sup>[14]</sup>）

西北古气候研究资料表明，历史上延续数百年至千年以上的暖期均是气候比较湿润时期。相反，冷期对应于干旱时期。以 2.2 ~ 1.8 ka BP 的暖湿时期为例，据西昆仑山古里雅冰芯记录，0 ~ 270 AD 是 2000 年以来温度最高的时期，平均温度高出 20 世纪 0.47 °C，而在 3 世纪比现今高 1.3 °C<sup>[16]</sup>。降水和径流显然也比现代丰富。

再如, 全新世大暖期鼎盛阶段, 即7.2~6 ka BP 前后, 西北和华北温度比现代高3℃左右, 降水量也有大幅度增加。如青海湖区降水高于现代70%~80%, 内陆湖区均呈现高湖面、湖水淡化、沙漠面积缩小<sup>[14]</sup>。

根据西北地区进入全新世以来近万年区域性的气候趋势推测, 北山地区气温同样可能出现波动式上升: 在经历了全新世大暖期后, 气温又可能呈现波动式的下降; 一度回暖再经中世纪暖期后, 进入小冰期; 20世纪再度转暖, 气温迅速上升。湿度状况总体上呈现波动式的变干趋势, 其间出现过多次干湿阶段的交替。

#### 4 近 100 年以来人类活动的加剧, 西北地区的干旱更加明显

随着近代人类活动影响的加剧, 西北地区一些湖面急剧萎缩, 显现出区域性的干旱更加明显(表1)。例如: 艾丁盐湖在1909年时扩大至230 km<sup>2</sup>, 2000年湖面面积也仅为50 km<sup>2</sup><sup>[17]</sup>。玛纳斯湖在1957年尚为水深6 m, 面积750 km<sup>2</sup>的大湖; 因灌溉用水增大, 1962年后干涸为盐湖。古居延海, 分嘎顺诺尔(西湖)和索古诺尔(东湖), 1958年两湖面积还分别有267 km<sup>2</sup>与35 km<sup>2</sup>。因上游来水被大量引用, 两湖分别于1961年和1964年干涸。白碱湖, 现在为一片盐滩, 面积仅42 km<sup>2</sup>。巴丹吉林沙漠现代降水量只有50 mm a<sup>-1</sup>。

蒸散(Evapotranspiration, ET)是植被及地面向大气输送的水汽总通量, 包括植被蒸腾和土壤蒸发两部分。作为水循环的重要指示, ET表征着陆地生物圈的水分需求, 是水资源管理的重要依据。根据IPCC第四次评估报告指出, 大气CO<sub>2</sub>浓度的增加使得全球不同地区平均气温都有不同程度的上升, 而20世纪90年代是140年以来最暖的时期, 温度升高将会导致了陆地生态系统蒸散的显著增加。同时, 土地利用、土地覆被的变化也会引起ET的明显变化。生态系统蒸散(ET)的时空动态是研究气候变化和陆地生态系统碳水循环的重要因子, 与生态系统的净初级生产力(NPP)密切关联。周蕾等基于1991~2000年NOAA-AVHRR遥感数据、气象数据以及土壤数据和其他辅助数据, 利用改进的生态系统过程模型(Boreal Ecosystem Productivity Simulator, BEPS), 模拟了中国陆地生态系统不同时间尺度ET的空间分布格局, 分析了10年来中国陆地生态系统ET的时空变化特征及其对气候变化的响应<sup>[18]</sup>。结果表明: 降水可能是中国陆地生态系统年ET变化的主要决定因子, 表现出明显的空间分布格局: 从西北地区到东南地区呈三级阶梯逐渐增加, 与相应的降水分布格局类似。

由周蕾等模拟的图示可见<sup>[18]</sup>: 北山地区ET的年均值处于小于100 mm/a的最低水平, 而年降水量均值与ET年均值的差值处于0左右(图4); ET的四季均值均小于50 mm/季; ET年均值的年际变化很小(仅0~3 mm/a)(图5)。

王劲松等对西北近50a来气温变化特征的进一步研究表明<sup>[19]</sup>: 北山地区全年气温变化倾向率为~0.5℃/10a, 主要发生在夏季。

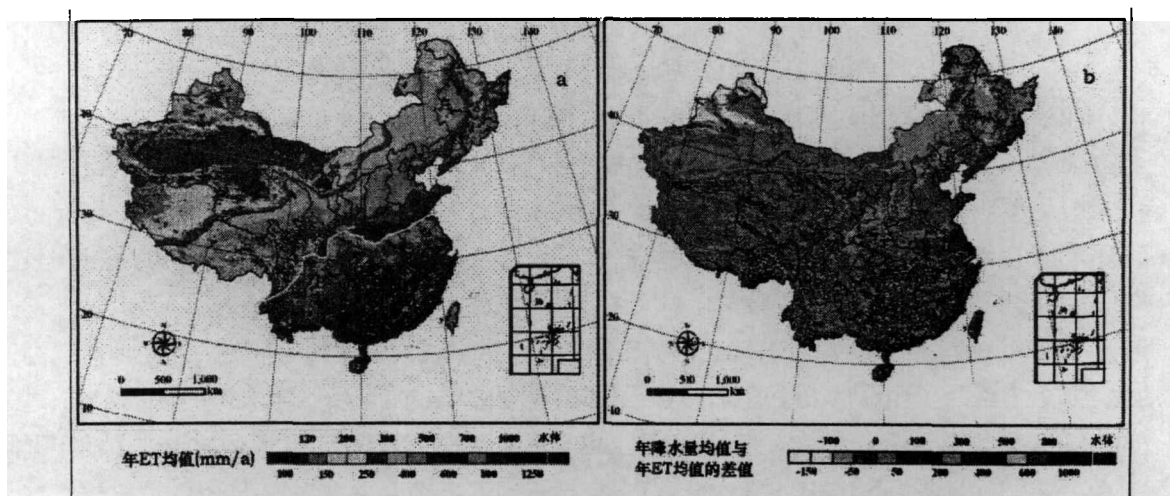


图4 中国陆地生态系统年ET均值、年降水量和年ET差值的多年均值空间分布(引自周蕾等(2009)[18]), 注: 红线和黄线为分界线; 不包括水体。

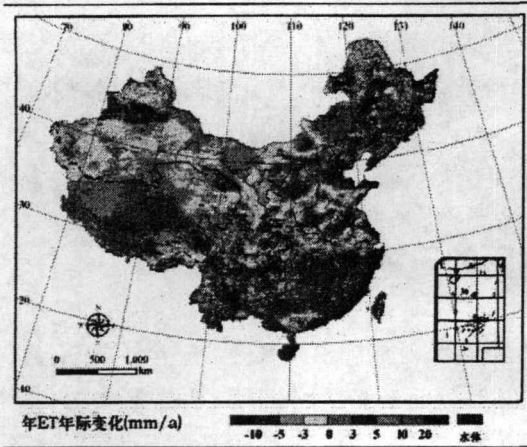


图5 中国陆地生态系统年ET年际变化趋势的空间分布 (引自周蕾等 (2009) [18])

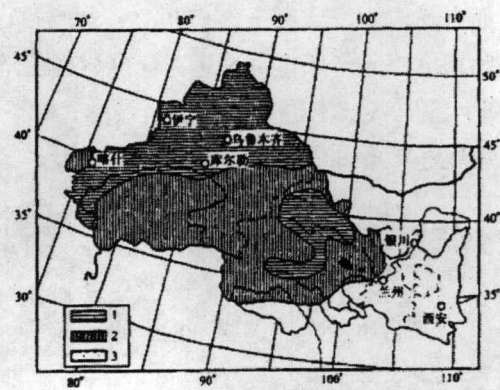


图6 西北气候从暖干向暖湿转型范围和程度示意 (引自施雅风等 (2003) [20])  
1. 显著转型区 2. 轻度转型区 3. 未转型区

施雅风等根据前100年前后,即小冰期结束以后气候波动变暖干的特征而提出:西北气候自暖干向暖湿转型<sup>[20]</sup>。他们认为:由于全球显著变暖和循环加快,使得中国西北主要是新疆地区于1987年以来气候发生突然变化。近50年实测记录的气温持续攀升、降水量显著增加、冰川萎缩及消融水量持续增加、河川径流量连续多年增加、内陆湖泊水位显著上升及湖面积扩大、洪水灾害频繁、植被覆盖有增加迹象、沙尘暴日数趋于减少。从而改变了19世纪末期至20世纪70年代的变暖变干趋势。以降水量增加超过蒸发量增加所导致的径流量增长及湖泊水位上升作为气候向暖湿转型的主要标准,西北地区目前的气候变化可分为3个区域:显著转型区、轻度转型区和未转型区(图6)。他们初步认为,西北气候向暖湿转型可能是世纪性的,预期西北东部在21世纪上半期也会向暖湿转变。但预测有较大的不确定性。

气候转型的原因可能与空中水汽含量的增加、有利的天气形势及全球变暖驱动水循环过程加快有关。1987年以来西北地区中、西部气候的变暖变湿是与全球变暖、水循环加剧所导致的降水量增加相联系。

由图6可见,北山地区属于轻度转型区。降水量有少量增加,但不足以形成地面径流;植被有局部改善或未得改善和沙尘暴日数有相当减少。由于原有的极端干旱性质,地表实际蒸发水汽很少,从而限制了降水在将来不大可能大幅度增加。

## 5 结语

通过实地考察和文献剖析,我们对北山及其周边地区地质历史气候变化具有如下的轮廓认识:

(1) 40~30 ka BP间,中国出现了比现代更为暖湿的特殊环境。与全国形势同步,位于西北地区几个重要湖泊(如:玛纳斯湖、艾比湖、巴里坤湖、艾丁湖、古居延海和白碱湖等)的研究资料显示:西北干旱区也曾经呈现湿润化。北山地区位于上述古湖泊分布区的中心部位,并且地势较高,不存在大型湖盆。在40~30 ka BP,该地区可能同样处于湿润化气候阶段,年均气温可能高出现代2~4℃,年降水量多200~300 mm。虽然如此,过去数万年以来,北山地区仍然一直置于干旱化的区域环境背景。

(2) 近万年以来,西北干旱区呈现波动式的变干趋势。从区域性的气候趋势推测,北山地区气温同样可能出现波动式上升;在经历了全新世大暖期后,气温又可能呈现波动式的下降;再经中世纪暖期后,进入小冰期;20世纪再度转暖,气温迅速上升。湿度状况总体上也呈现波动式的变干趋势,其间出现过多次干湿阶段的交替。

(3) 近 100 年以来, 由于人类活动的加剧, 西北地区的干旱更加明显。北山地区属于轻度转型区。降水量有少量增加, 但不足以形成地面径流; 植被有局部改善或未得改善和沙尘暴日数有相当减少。由于原有的极端干旱性质, 地表实际蒸发水汽很少, 从而限制了降水在将来不大可能大幅度增加。

(4) 鉴于北山地区所处区域干旱化的环境背景特征, 对于阻止污染物的水迁移扩散和永久型地质处置库选址具有不可替代的优越性。

### 参考文献(References):

- [1] 施雅风 于革. 30~40 ka BP 中国暖湿气候和海侵的特征与成因探讨[J]. 第四纪研究, 2003, 23 (1): 1~11.[Shi Yafeng, Yu Ge. Warm humid climate and transgressions during 40~30 ka BP and their potential mechanisms [J]. *Quaternary Sciences*, 2003, 23 (1): 1~11] (in Chinese with English abstract).
- [2] 施雅风 赵井东. 40~30 ka BP 中国特殊暖湿气候与环境的发现与研究过程的回顾[J]. 冰川冻土, 2009, 31 (1): 1~10.[Shi Yafeng, Zhao Jingdong. The special warm-humid climate and environment in China during 40~30 ka BP: Discovery and Review[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31 (1): 1~10]. (in Chinese with English abstract).
- [3] Rhodes T E, Gasse F, Lin Ruifen *et al.* A late Pleistocene-Holocene lacustrine record from Lake Manas, Zunggar (northern Xinjiang, western China)[J]. *Palaeogeography, Paleoclimatology, Palaeoecology*, 1996, 120: 105 - 120.
- [4] 周兴佳. 古玛纳斯湖与艾比湖区沙漠分布图[C]. 文启忠主编, 新疆第四纪地质与环境[M]. 北京: 中国农业出版社, 1994, 208.[Zhou Xingjia. The distribution map of desert around the ancient Lake Manas and Aibi [C]. Ed by Wen Qizhong, *Quaternary Geology and Environment in Xinjiang*[M]. Beijing: China Agricultural Publishing House, 1994, 208].
- [5] 于革 薛滨 刘健 等. 中国湖泊演变与古气候动力学研究[M]. 北京: 气象出版社, 2001, 43~49.[Yu Ge, Xue Bin, Liu Jian, *et al.* Lake records from China and the palaeoclimate dynamics [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2001: 43~49].
- [6] Pachur H J, Wünnemann B, Zhang Hucai. Lake evolution in the Tengger desert, northwestern China, during last 40000 years [J]. *Quaternary Research*, 1995, 44 (2): 171~180.
- [7] 李秉孝 蔡碧琴 梁青生. 吐鲁番盆地艾丁湖沉积特征[J]. 科学通报, 1989, 34 (8): 608~610.[Li Bingxiao, Cai Biqin, Liang Qingsheng. Depositional characteristics of Aydingkol Lake in Turpan depression[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1989, 34 (18): 1551~1555].
- [8] 闫顺. 中国新疆北部湖泊的近期变化及其水生态问题[C]. 加帕尔·买合皮尔, A A 图尔苏诺夫. 亚洲中部湖泊水生态学概论[M]. 乌鲁木齐: 新疆科技卫生出版社, 1996, 101 - 111. [Yan Shun. Recent variation of lakes and its water ecology in the north of Xinjiang, China [C]. Jiapaer Maihepier, Tuersunuofu A A. A introduction of lakes and water ecology in central Asia[M]. Ürtmqi: Xinjiang Science and Technology and Hygiene Publishing House, 1996, 101 - 111].
- [9] Zhang Hucai, Wünnemann B, Ma Y Z, *et al.* Lake level and climate changes between 42 000 and 18 000 <sup>14</sup>C yr BP in the Tengger desert, northwestern China [J]. *Quaternary Research*, 2002, 58 (1): 62~72.
- [10] 杨小平. 巴丹吉林沙漠地区钙质胶结层的发现及其古气候意义[J]. 第四纪研究, 2000, 20 (3): 295. [Yang Xiaoping. The discovery of the lime nodule stratum and its significance to the paleoclimate in the Badain Jaran Desert [J]. *Quaternary Sciences*, 2000, 20 (3): 295] (in Chinese).
- [11] 马玉贞 张虎才 李吉均 等. 腾格里沙漠晚更新世孢粉植物群与气候环境演变[J]. 植物学报, 1998, 40 (9): 871~879. [Ma Yuzhen, Zhang Hucai, Li Jijun, *et al.* ON the evolution of the palynoflora and climatic environment during late pleistocene in tengger desert, China[J]. *Acta Botanica Sinica*. 1998, 40 (9): 871~879] (in Chinese with English abstract).
- [12] 张德二. 历史记录的西北环境变化与农业开发[J]. 气候变化研究进展, 2005, 1 (2): 58~64.[Zhang De'er. Historical records of environmental changes and agricultural development in Northwest China [J]. *Advances in climate change research*, 2005, 1 (2): 58~64] (in Chinese with English abstract).
- [13] 竺可桢. 中国近五千年来气候变迁的初步研究[J], 中国科学 A 辑, 1973, 16 (2): 168~189.[Chu Kochen. A preliminary study on the climatic fluctuations during the last 5,000 years in China[J], *Science in China, Ser.A*, 1973, 16 (2)] (in Chinese).
- [14] 施雅风 孔昭震 王苏民 等. 中国全新世大暖期气候与环境的基本特征(A) 施雅风主编, 中国全新世大暖期气候与环境(C), 北京: 海洋出版社, 1992, 5, 1~18.
- [15] 施雅风 姚檀栋 杨保. 近2000a古里雅冰芯10a尺度的气候变化及其与中国东部文献记录的比较[J]. 中国科学(D)辑, 1999, 29 (增刊1): 79~86.[Shi Yafeng, Yao Tandong, Yang Bao. Decadal climatic variations recorded in Guliya ice core and comparison with the historical documentary data from East

- China during the last 2000 years[J]. *Science in China, Ser.D*, 1999, 29 (supp.): 91~100] (in Chinese)..
- [16] 杨保 施雅风. 近2000年古里雅冰芯气候变化的子波分析[J]. 地理科学, 2001, 21 (6): 488~492. [Yang Bao, Shi Yafeng. Wavelet analysis of climatic change recorded in Guliya ice core in the last two millennia[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2001, 21 (6): 488~492] (in Chinese with English abstract).
- [17] 王亚俊 吴素芬. 新疆吐鲁番盆地艾丁湖的环境变化[J]. 冰川冻土, 2003, 25 (2): 229~231. [Wang Yajun, Wu Sufen. Environment Change over the Aydingkol Lake Region in Turpan Basin, Xinjiang[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25 (2): 229~231] (in Chinese with English abstract).
- [18] 周蕾 王绍强 陈镜明 等. 1991年至2000年中国陆地生态系统蒸散时空分布特征[J]. 资源科学, 2009, 31 (6): 962 ~ 972.[ Zhou Lei, Wang Shaoqiang, Chen Jingming, et al. The spatial-temporal characteristics of evapotranspiration of China's terrestrial ecosystems during 1991~2000[J]. *Resources Science*, 2009, 31 (6): 962 ~ 972] (in Chinese with English abstract).
- [19] 王劲松 费晓玲 魏锋. 中国西北近50a来气温变化特征的进一步研究[J]. 中国沙漠, 2008, 28 (4): 724 ~ 732.[Wang Jinsong , Fei Xiaoling , Wei Feng. Further study of temperature change in Northwest China in recent 50 Years[J]. *Journal of Desert Research*, 2008, 28(4): 724 ~ 732] (in Chinese with English abstract).
- [20] 施雅风 沈永平 李栋梁 等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J]. 第四纪研究, 2003, 23(2): 152~164.[Shi Yafeng, Shen Yongping, Li Dongliang, et al. Discussion on the present climate change from warm-dry to warm-wet in Northwest China[J]. *Quaternary Sciences*, 2003, 23 (2): 152~164] (in Chinese with English abstract)