

文章编号: 1001-8166(2006)05-0532-07

# 中国西北极端干旱区水文与湖泊演化及其 巴丹吉林沙漠大型沙丘的形成

张虎才<sup>1,2</sup>, 明庆忠<sup>2,3</sup>

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏 南京 210008; 2. 兰州大学资源与环境学院, 中国西部环境系统教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 3. 云南师范大学旅游与地理学院, 云南 昆明 650092)

**摘要** 地表径流和地下水循环是维持中国西部现今极端干旱区绿洲、湖泊和地下水位变化的绝对主导因素。极少的年降水量和年际—季节降水分布的不均性、强烈的蒸发、蒸腾作用、稀少而水量有限的地表径流和人类活动的影响及其过度的水资源利用是导致目前自然景观和生态环境恶化的根本原因。不仅如此, 在这样一个大的气候背景条件下, 人类不合理、不科学的活动可以夸张的放大和加速生态系统的恶化程度和速度, 而要坚持、改善和修复已破坏的生态环境则需长期不懈的努力和巨大的人力、资金投入。地质断裂带不但具有蓄水、导水的作用, 还具有隔水作用, 断裂体系中含水量的丰寡与断裂的性质(张性或压性)、发育的地质部位和年代等因素有关。断裂构造对水的这种蓄—导—隔作用, 在不同地理单元是不同的: 在地势较高的部位以导为主, 在低洼的地方则以蓄为主, 而在前二者之间的过渡区则以导—隔为主。额济纳盆地地下水位变化和(或潜在水资源)量的大小是以地表径流补给为主、地下水为辅, 是区域蒸发、蒸腾和水资源利用之间平衡过程的表现, 而在巴丹吉林沙漠区, 特别是其东南部众多的湖泊区则是以地下水补给为主, 加之以古水为辅。虽然我们还不十分清楚巴丹吉林沙漠内部高大沙丘和湖泊形成时期的相互作用和依存关系, 但是我们却有足够的证据证明高大沙丘形态的维持与湖泊之间不存在必然的因果关系。直接通过阿尔金山断裂体系对额济纳盆地和巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠水量的贡献是否真正存在还缺乏地质证据或者至少是十分有限。对中国西部干旱—极端干旱区水资源进行科学而深入、系统而规范、全面而统一的调查和规划, 调整和协调, 采用科学的流域管理模式, 利用生态修复、动态调控、工程保障等措施对于维持整个流域生态环境的稳定和持续发展, 维系中下游, 特别是酒泉基地和额济纳绿洲是十分必要而迫切的。对于巴丹吉林沙漠东南部地下水和湖泊水的开发和利用的设想既不利于该区生态环境的维持和改善, 也缺乏科学依据和工程的可行性。西北干旱—极端干旱区水文循环和水量是气候环境决定的, 不仅现代如此, 过去也是如此。

**关键词** 极端干旱区; 水文与湖泊演化; 巴丹吉林沙漠

**中图分类号** P343.3 **文献标识码** A

## 1 问题的提出

陈建生等于 2004 年在 *Nature* 432 卷和国内刊

物上发表文章及在国内学术会议上认为, 位于青藏高原东北缘的阿尔金山压扭性走滑断裂( strike-slip Altyn Tagh fault) 犹如一条巨大的地下河向巴丹吉

收稿日期: 2005-09-06, 修回日期: 2006-03-04.

\* 基金项目: 国家自然科学基金项目“居延海及巴丹吉林沙漠末次冰期间冰段古湖泊与环境变化”(编号: 40371117); 中国科学院“百人计划”资助。

作者简介: 张虎才(1962-), 男, 陕西凤翔人, 研究员, 主要从事第四纪地质学与自然地理学、湖泊沉积与环境变化、人类活动与古气候模拟方面的研究. E-mail: zhanghc@niglas.ac.cn

林沙漠和腾格里沙漠输水,维系了那里的湖泊和地下水变化。为了寻找地球化学证据的支持,如具有足够的水量和溶解的碳酸盐矿物,作者提出位于祁连山东南部山区的地下水(那里存在中生代碳酸盐岩沉积)通过断裂体系携带矿物质向西北方向输移数百公里后与阿尔金山断裂相汇,再由并不十分肯定、未被地质调查和研究所证实的断裂经由地下输送到沙漠区,这些地下水在沙漠区以泉水的形式出露,形成湖泊,这种现象在过去几万年以来一直如此(陈建生认为我们重建的形成于 $^{14}\text{C}$ 年代 $20\sim 40\text{ ka BP}$ 腾格里大湖就是通过这种作用形成的)。同时,这些地下水不但在沙丘中做垂向迁移使沙丘中水分含量增高,因而维系了巨大沙丘的稳定性,而且这些地下水流经了地形高差变化十分微小的沙漠区向西北一直达到位于巴丹吉林沙漠和额济纳盆地过渡的古日乃、额济纳(旗)和北部的拐子湖。最后,作者通过计算得出仅在巴丹吉林沙漠东南部众多湖泊区每年即有巨达 $5\times 10^6\text{ m}^3$ 的水量被蒸发而浪费,他们认为费用巨大的黑河工程应当废弃而改用沙漠区被浪费的水来改善那里的生态环境。

## 2 我们的观点、理由与根据

本短文认为,陈建生等赖以支持其观点与推论的地质证据和分析数据存在商榷之处,我们的地质证据和大量的考察研究以及前人的勘探和研究结果并不支持他们的观点与结论。

首先,阿尔金山断裂是青藏高原西北缘自新生代以来即存在和发育的一条主断裂带<sup>[1-26]</sup>。那么,自从那时阿尔金山断裂一直就是一条水输送的“地下河”吗?如果不是,什么时候开始作为一条水输送的“地下河”的?原因又如何呢?这里我们并不完全否定断裂体系储水的可能性,而且认为断裂带不但具有蓄水、导水的作用,还具有隔水作用。但是,地质知识告诉我们在犹如阿尔金山这样的压扭性断裂中,含水量总体来讲是十分有限的,断裂带分布的地理位置、深度、宽度和空隙度等因素都会影响断裂带含水的能力,含水量的变化也随着区域大气降水和地表径流(与大气降水、冰川融水和地表性状有关)的不同而变化。大量的地质证据表明,阿尔金山断裂一方面不但高位展布,在多处被强烈错断而发生位移,严格来讲它并不是一条十分连续贯通的断裂构造带,另一方面在不同段其构造活动性各不相同<sup>[27-39]</sup>。这些现象和地质事实均不利于把阿尔金山断裂作为一条连续而有效的水输送通道。再

者,祁连山整体来讲西北高而东南低,故发育于祁连山的黑河上游自西北向东南流动,那么是什么原因或有什么证据说明其地下水是逆地形和地表水流动的呢?这种推论也有悖于地貌和构造对水系形成与发育控制的一般规律和基本理论。另外,河西走廊大量的水文地质调查和钻探资料均未发现或证明在地下几百米的范围内存在年输水量达亿级立方米那样的“地下河”。

第二,他们对于锶同位素的解释是不恰当甚至是错误的,因为 $0.710\sim 0.713$ 量级 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值(可与地壳上部的平均值 $0.7119$ 比较)与 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为 $0.705\sim 0.709$ (可与现代海水和海相碳酸盐沉积 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 平均值 $0.709198\pm 0.000020$ 比较)的地质意义是完全不同的。从地球化学理论的角度来分析前者与后者之间不存在确定而必然的联系,也就没有理论根据将沙漠区碳酸盐沉积的成因与(祁连山区)古老的碳酸岩直接简单的联系起来,因为从理论的角度我们无法解释具有携带海相碳酸岩低 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值的水是如何在沙漠区形成具有高于地壳上部 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值的碳酸盐沉积的。这里需要进一步指出的是,由于元素锶( $\text{Sr}$ )基本地球化学性质所决定,海水和大洋沉积 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值在漫长的地质历史过程中十分稳定(如在过去 $100\text{ Ma}$ 以来,海水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值仅从 $0.707375\pm 18$ 增加到现代的 $0.709205\pm 41$ <sup>[40]</sup>。 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值的描述从严格的地球化学意义上一般要求精确到小数点后 $4\sim 6$ 位(如 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值的标准 $\text{NBS-987}$ 为 $0.710235$ 或 $0.71024$ )。当一个地质样品 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值小数点后 $3$ 位数值不同于另一个样品值时,即分析结果大于或小于现代海水平均值时则表明二者之间存在相异的成因机制和环境条件。此处尚需指出的另外一个重要事实是,他们对于研究区大气降水 $^{18}\text{O}-\text{D}$ 的解释也存在问题,因为气象资料揭示自有记录以来研究区的温度上升了 $0.3\sim 0.8$ ,仅这一温度上升就可以导致降水 $^{18}\text{O}$ 值发生 $-0.2\text{‰}\sim -0.52\text{‰}$ 的变

此处我们无法理解陈建生等文中用 $0.705$ 这一 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值?因为 $1$ 无论在海相还是陆相沉积中,还未见有 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值低于 $0.707$ 的报道,如中国西部塔里木盆地石炭系碳酸盐 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值平均为 $0.70860$ (朱如凯等,新疆石油地质,2002,23(5):382-384);全球石炭系碳酸盐 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值 $0.70760\sim 0.78080$ (Burke W N. Geology, 1982, 10:516-519);奥陶系碳酸盐 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值平均为 $0.711048$ (变化于 $0.708988\sim 0.718266$ , 2004. 黄思静等. 成都理工大学学报, 2004, 31(1):1-7); $2$   $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值低于 $0.707$ ,特别是低于 $0.705$ 的情况出现于地幔,如大陆地幔 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值最高,为 $0.70577$ 。

化(其机理见 Rozanski 等<sup>[41]</sup>; Rademacher<sup>[42]</sup>; 文献 [43, 44] 图 2) 因此在数据解释中应当做适当的校正, 而陈建生等文章中并未进行这样的工作, 故而其解释也就存在问题, 缺乏令人信服基础。

第三, 中国西部(这里特指以河西走廊为轴的相临地区) 干旱区水文循环是一个复杂而尚未解决的问题之一(图 1)。石羊河、黑河 2 大流域水资源问题及其利用是该地区长期以来存在争议的主要问题, 围绕这个问题在过去开展了大量的地质勘探和研究工作<sup>[45-73]</sup>。不同研究者关于该区水资源量的计算结果之间存在明显的差异(见图 1 注释)。这里我们并不打算详细讨论陈建生等论文中关于如何计算水蒸发量, 也不再讨论水样年代及其可靠性和精确性, 但是, 我们强调这样一个问题: 即气象观测点所获得的干旱—极端干旱区蒸发量在理论上讲应

该视为“潜蒸发量”而非“净蒸发量”, 或者称为“理论蒸发量”而不是“实际蒸发量”。这种观测所得的“潜蒸发量”或“理论蒸发量”在不同观测点之间存在很大的差别。如根据 1951—1980 年实际观测资料, 额济纳(旗) 观测点(41.57°N, 101.04°E) 的平均值为 3769.6 mm, 拐子湖(41.22°N, 102.22°E) 为蒸发量 4111.2 mm, 而金塔(40.00°N, 98.54°E) 仅为 2538.6 mm。陈建生等论文中并没有考虑这些因素, 更没有考虑湖面不仅存在蒸发, 同时在夜间水汽会再凝结并返回湖泊的过程。因此, 我们认为他们的实际计算量可能超过湖面真实的水分损失量, 其结果既缺乏严格的科学性, 也缺乏可靠性。巴丹吉林沙漠东南部维持湖泊水平衡的水分主要来源于 2 个途径: (1) 河西走廊祁连山前缘洪积扇地下

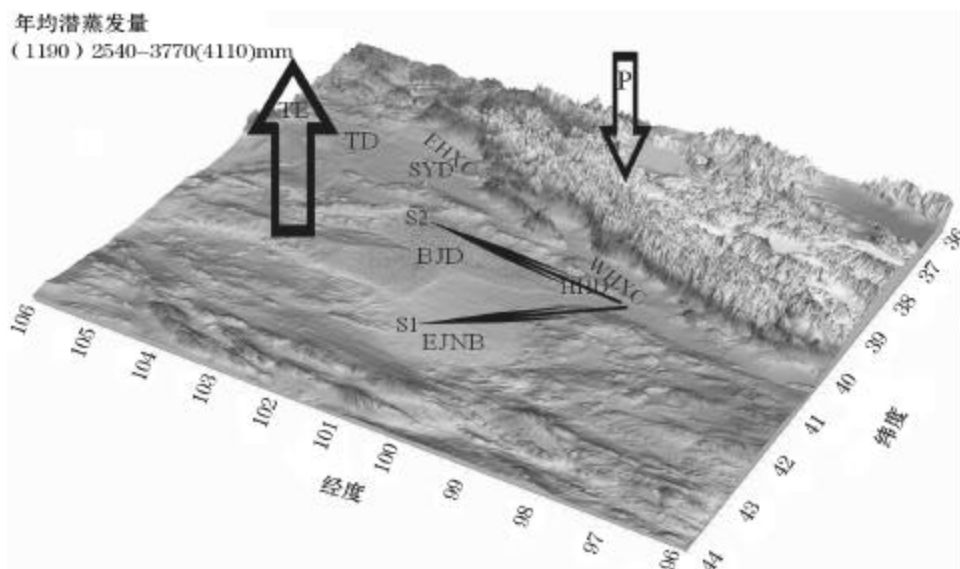


图 1 石羊河和黑河流域水文循环示意图

Fig.1 Hydrological circulation in drainages of Shiyang river and Hei river

说明: 该图中由于没有统一而规范的计算方法, 各个研究者给出不同的蒸发和降水量数据变化很大, 因而还不能给出令人满意且可靠的具体数量。但可以肯定的是整个区域地下水均在快速且有加速下降的趋势, 如在石羊河流域的绿洲, 仅 2000 年地下水的抽去量达到  $6.24 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 造成地下水水位下降达 12~8 m; 在黑河流域中段, 泉水泄水量从 1986 年的  $18.01 \times 10^8 \text{ m}^3$  减少为 1998 年的  $14.74 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 相应的泉水出露高度下降 200~600 m。其结果是水资源利用量愈大, 地下水位越低, 生态环境越恶化。图中缩写字母分别代表: E: 总蒸发量; P: 总降水量(约为  $268 \times 10^8 \text{ m}^3$ ); HXC: 河西走廊东段; HXC: 河西走廊西段; SYD: 石羊河流域(SYDm: 石羊河流域山中段; SYDu: 石羊河流域中段; SYDl: 石羊河流域下游段); HHD: 黑河流域(HHDm: 黑河流域山中段; HHDu: 黑河流域中段; HHDl: 黑河流域下游段); TD: 腾格里沙漠; BJD: 巴丹吉林沙漠; EJNB: 额济纳盆地; 1: 降水量从民勤的 115 mm/a 增加至祁连山的  $>500 \text{ mm/a}$ ; 2: 降水量从额济纳(旗)的 38 mm/a 增加至祁连山的  $>500 \text{ mm/a}$ ; S1: 金塔至额济纳(旗)的地形坡降率( = -1.15 m/km); S2: 金塔至巴丹吉林沙漠的地形坡降率( = -0.59 m/km)。从 S1、S2 值可以知道如此之小的地形坡降率不可能产生很高的压力梯度, 因而地下水的流速也不会很快。

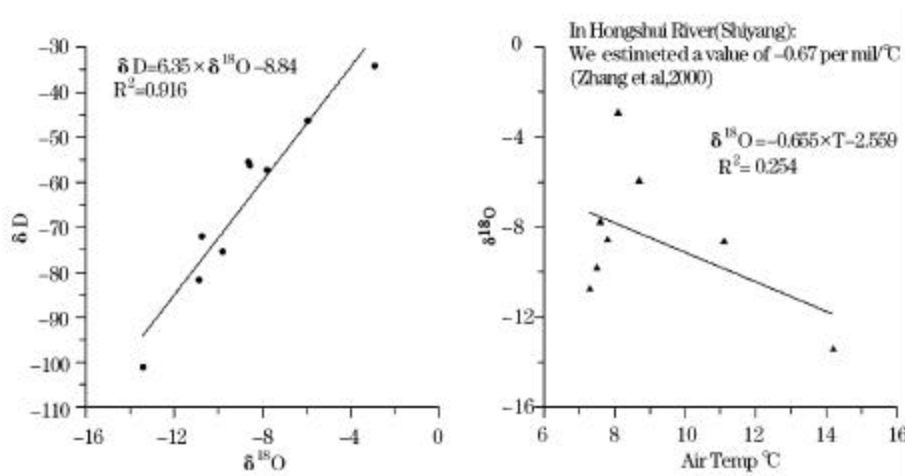


图 2 研究区(张掖)降水  $^{18}\text{O}$ — $\text{D}$  关系(左)和  $^{18}\text{O}$ —大气温度相关关系(右)

Fig.2 The  $^{18}\text{O}$ — $\text{D}$  relation of the precipitation (left) and  $^{18}\text{O}$ —air temperature (right) at Zhangye

水的补给;(2) 沙漠西北部由于构造抬升 使得地下古老水向东南集中。前者主要补充了蒸腾蒸发一再凝结过程的水分损失量,维持了湖面水位的基本稳定,后者主要保持了地下深层水位的稳定。大量湖泊出现的干涸现象,说明第一部分来水减少,是人类活动的结果。同时,大量的研究作业已证实巴丹吉林高大沙丘的形成机理是十分复杂的。我们的研究结果发现湖泊的存在并不是保持沙丘形态的决定性因素,因为在过去已经有大量的湖泊干涸,如在古日乃与巴丹吉林沙漠过渡区我们获得年代为 32 ka BP 干盐湖沉积,湖泊的干涸并没有引起沙丘明显的移动。古湖泊作用的地貌遗迹、古湖泊沉积分布范围的测量和大量  $^{14}\text{C}$  和 AMS 年代数据揭示额济纳盆地在 20 ~40 ka BP 发育巨大的古湖泊。这个古湖泊的形成与演化过程可以与腾格里沙漠相应时期古湖泊演化对比,古湖泊的形成与演化原因是区域气候变化的结果而并非断裂水造成的现象<sup>[74-86]</sup>。

### 3 我们的认识与建议

陈建生等在论文中主要基于以下两条理由反对黑河流域的调水工程:(1) 整个黑河流域调水工程投资达 40 亿元人民币(约合 5 亿美元);(2) 根据他们的计算仅在巴丹吉林沙漠东南部每年因蒸发作用就浪费了 5 亿  $\text{m}^3$  的水,这部分水可以用来改善流域内的生态环境。同样基于以下 2 条理由我们并不赞同他们的建议:

(1) 从沙漠腹地调水仅资金投入一项可能会更大,这是因为我们还不能确切地知道究竟有多少水可以被利用,恶劣的沙漠环境条件和艰巨的工程量及其不可预测性使得投入和实际结果具有很大的盲目性和不确定性。

(2) 沙漠中的地下水和湖泊水已经是环境系统中密不可分的重要组成部分。我们目前还没有成熟或可行的办法阻止或大量减少水蒸发造成的损失,开发那里的水资源必然引起业已脆弱的平衡遭受破坏,导致湖泊和地下水位的迅速下降,其生态后果是无法预测和估量的:它可能在短时间内快速而彻底的打破那里自然系统的稳定性,导致生态系统的崩溃而造成影响范围广泛、持续、不可修复的严重环境灾害,这是任何人都不愿看到的。

恰恰相反,我们认为国家和政府应拿出足够甚至充分的资金投资到中国西部干旱区生态环境建设上去,把中国西部的水资源和环境问题在充分尊重

(1) W. Günemann B., Hartmann K. Morphodynamics and Paleohydrography of the Gaxun Nur Basin, Inner Mongolia, China. Zeitschr. für Geomorphologie N.F., Suppl. Bd. 2002, 126: 147-168;  
 (2) Hartmann K. Spätpleistozäne und holozäne Morphodynamik im nördlichen Gaxun-Nur-Becken, Innere Mongolei, NW China. Dissertation am Fachbereich Geowissenschaften der Freien Universität Berlin;  
 (3) H. Iz, S. Polag, D. Becken, M. et al. Electromagnetic and Geoelectric Investigation of the Gurinai Structure, Inner Mongolia, NW China (in reviewing).  
 张虎才,明庆忠,李斌,等.额济纳古湖化石贝壳和湖相沉积  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  组成及其形成年代.待刊.

自然规律的基础上作为一个整体来研究,来管理。改变流域分割管理、本位主义和局部利益为上、资源分配不公和浪费的现象,把长远利益和眼前利益结合起来,把国家利益和地区利益统筹起来,把生态效益和经济效益平衡起来。这不但要有科学的思维、科学的态度和综合的能力,同样需要胆识与勇气——如果考虑到国家的长治久安、社会的和谐进步、生态环境的可持续发展和当地人民的切身利益的话,值得我们去努力。

本文主要是对陈建生等在自然杂志(Nature 432, 2004)发表文章商榷短文(自然杂志对该类文章篇幅和字数的要求如此)的中文稿(略有不同)。由于多种原因(主要是和两位审稿人之一在二审过程中对于地球化学资料解释方面严重的分歧,本文作者认为该审稿人并不是地球化学方面的专家或者至少不十分熟悉地球化学知识,但我们又不能放弃对地球化学知识的理解和对数据解释科学性的态度),该短文最终并未被 Nature 发表。虽然国内也已有过这方面的讨论,我们还是希望通过《地球科学进展》将该文发表,以使大家了解我们的研究,表明我们对中国西部水资源与环境问题的观点和关注。我们虽然质疑他们的地质证据和数据解释,也不完全支持陈建生教授等的观点,但是我们却不否认该论文的发表和随之的讨论对于中国西部水资源与环境问题研究的推动作用(我们也注意到了国内的讨论和对媒体报道的不同看法,如《科学时报》2005年1月13日A3版提出的学术观点“依据要充分可靠——质疑陈建生教授关于巴丹吉林沙漠和额济纳盆地地下水资源的观点”2005年2月8日“陈建生教授致本报编辑部的一封信”)。这一点,本文作者之一(张虎才)应陈建生教授之邀在河海大学进行的学术报告和讨论中作了明确的表态。在此,我们赞赏与陈教授坦诚的讨论并感谢与汪集院士和顾慰祖老师的交流。

#### 参考文献(References):

- [1] Arnaud N, Delville N, Montel JM, et al. Paleozoic to Cenozoic Deformation along the Altyn Tagh Fault in the Altun Shan Massif area, Eastern Qilian Shan, NE Tibet, China [J]. American Geophysical Union Annual Meeting Abstracts, 1999, 71018.
- [2] "Altyn Active Fault Zone" Team, State Seismological Bureau. Altyn Active Fault Zone [M]. Beijing: Seismological Publishing House, 1992.
- [3] Bendick R, Bilham R, Freymueller J, et al. Geodetic evidence for a low slip rate in the Altyn Tagh fault system [J]. Nature, 2000, 404: 69-72.
- [4] Bradley D R, Uiderico B. Magnitude of post-Middle Jurassic (Bajocian) displacement on the central Altyn Tagh fault system, northwest China [J]. GSA Bulletin, 2000, 112(1): 61-74.
- [5] Cowgill E, An Y, Wang X F, et al. Is the north Altyn fault part of a strike-slip duplex along the Altyn Tagh fault system? [J]. Geology, 2000, 28(3): 255-258.
- [6] Cui J W, Li L, Yang J S, et al. The Altyn fault: Its geometry, nature and mode of growth [J]. Acta Geologica Sinica, 2001, 75(2): 133-143.
- [7] Edward R S, Arnaud N. A possible middle Paleozoic suture in the Altyn Tagh, NW China [J]. Tectonics, 1999, 18(1): 64-74.
- [8] Wittlinger G, Tapponnier P, Paupinet G, et al. Tomographic evidence for localized lithospheric shear along the Altyn Tagh fault [J]. Science, 1998, 282: 74-76.
- [9] Guo S M, Xiang H F. A study on spatial-temporal distribution of the fault sinistral displacement in the Altyn structure system since Cretaceous-Miocene [J]. Seismology and Geology, 1998, 20(1): 92, 17.
- [10] Jivert M, Roger F, Arnaud N. Exhumation history of the Altun Shan with evidence for the timing of the subduction of the Tarim block beneath the Altyn Tagh system, North Tibet [J]. Earth & Planetary Science, 1999, 329: 749-755.
- [11] Li H B, Yang J S, Xu Z Q, et al. Geological and chronological evidence of Indo-Chinese strike-slip movement in the Altyn Tagh fault zone [J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47(2): 27-32.
- [12] Liu Y J, Ye H W, Ge X H, et al. Laser probe  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating of micas on the deformed rocks from Altyn fault and its tectonic implications, western China [J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 46(4): 322-325.
- [13] Molnar P, Tapponnier P. Cenozoic tectonics of Asia: Effect of a continental collision [J]. Science, 1975, 189: 419-426.
- [14] Royden L H, Burchfiel B C, King B W, et al. Surface deformation and lower crustal flow in eastern Tibet [J]. Science, 1997, 276: 788-790.
- [15] Ren S M, Ge X H, Liu Y J. Progress in Altyn fault belt's research [J]. Advance in Earth Sciences, 2003, 18(3): 386-391.
- [16] Rumelhart P E, An Y, Cowgill E, et al. Cenozoic vertical axis rotation of the Altyn Tagh fault system [J]. Geology, 1999, 27(9): 819-822.
- [17] Sobel E R, Arnaud N. A possible middle Paleozoic suture in the Altyn Tagh, NW China [J]. Tectonics, 1999, 18(1): 64-74.
- [18] Tapponnier P, Molnar P. Active faulting and Cenozoic tectonics of China [J]. Journal of Geophysical Research, 1977, 82(20): 2905-2930.
- [19] Washburn L Z, Arowsmith J R, Steven L F, et al. Late Holocene earthquake history of the central Altyn Tagh fault, China [J]. Geology, 2001, 29(11): 051-054.
- [20] Yang F, Ye S J, Cao C H, et al. Right lateral characteristics of the Middle Eastern segment of Altyn fault in Cenozoic era [J]. Scientia Geologica Sinica, 1994, 29(4): 346-354.
- [21] Yue Y J, Bradley D R, Graham S A. Initiation and long-term slip history of the Altyn Tagh fault [J]. International Geology Review, 2001, 43: 1-7.
- [22] Zhang J X, Zhang Z M, Xu Z Q, et al. Discovery of khondalite series from the western segment of Altyn Tagh and their petrological and geochronological studies [J]. Science in China (Series D), 2000, 43(3): 308-316.
- [23] Zheng J D. Geometry of the Altyn fracture zone [J]. Regional Geology of China, 1991, 1(1): 54-59.
- [24] Zhou Y, Pan Y S. The initial shear sense of the Altyn fault and

- its timing[J]. *Geological Review*, 1999, 45(1): 1-9.
- [25] Zhou D, Stephan A G. Extrusion of the Altyn Tagh wedge: A kinematic model for the Altyn Tagh fault and palinspastic reconstruction of northern China[J]. *Geology*, 1996, 24(5): 427-430.
- [26] Zhu Y Z, Zhong J H, Wu B H, et al. Preliminary approach to relationship between uplifting history of Alun mountains and salt forming condition in Tarim and Qaidam basins[J]. *Oil & Gas Geology*, 1990, 11(2): 136-142.
- [27] Ding G Y. River offsets of active strike-slip faults and earthquakes[J]. *Earthquake*, 1982, 1: 1-8.
- [28] He G Q, Zhang B A, Liao Y M, et al. Discussion on the microgas distribution and the recent activity of Aejin fault[J]. *Northwestern Seismological Journal*, 1989, 11(1): 16-20.
- [29] Gaudemer Y, Tapponnier P, Turcotte D L. River offsets across active strike-slip fault[J]. *Annales Tectonica*, 1989, 3(2): 55-76.
- [30] Gao S M, Xiang H F. A study on spacial-temporal distribution of the fault-sinistral displacement in the Altun structure system since Oligocene-Miocene[J]. *Seismology and Geology*, 1998, 20(1): 9-17.
- [31] Meng Q R, Hu J M, Yang F Z. Timing and magnitude of displacement on the Altyn Tagh fault: Constraints from stratigraphic correlation of adjoining Tarim and Qaidam basins, NW China[J]. *Terra Nova*, 2001, 13: 86-91.
- [32] Meyer B, Tapponnier P, Gaudemer Y, et al. Rate of left-lateral movement along the easternmost segment of the Altyn Tagh fault, east of 96°E (China)[J]. *Geophysical Journal of International*, 1996, 124: 29-44.
- [33] Peltzer G, Tapponnier P. Formation and evolution of strike-slip faults, rifts, and basins during the India-Asia collision: An experimental approach[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1988, 93: 15 085-15 117.
- [34] Peltzer G, Tapponnier P, Armijo R. Magnitude of late Quaternary left-lateral displacements along the northern edge of Tibet[J]. *Science*, 1989, 246: 1 285-1 289.
- [35] Wang E C. Displacement and timing along the northern strand of the Altyn Tagh fault zone, northern Tibet[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1997, 150: 55-64.
- [36] Tapponnier P, Molnar P. Slip-line field theory and large-scale continental tectonics[J]. *Nature*, 1976, 264: 319-324.
- [37] Tapponnier P, Xu Z Q, Roger F, et al. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau[J]. *Science*, 2001, 294: 1 671-1 677.
- [38] Xiang H F, Gao S M, Zhang W X, et al. River offset and slip rate of the east segment of Altyn Tagh fault zone since Quaternary[J]. *Seismology and Geology*, 2000, 22(2): 129-138.
- [39] Zachary W ashburnl, Arrowsmith J R, Steven L F, et al. Late Holocene earthquake history of the central Altyn Tagh fault, China[J]. *Geology*, 2001, 29(11): 1 051-1 054.
- [40] Hess J, Bender M L, Schilling J, et al. Evolution of the ratio of strontium 87 to strontium 86 in seawater from Cretaceous to Present[J]. *Science*, 1986, 231: 979-984.
- [41] Rozanski K, Aragus L, Gonfiantini R. Relation between long-term trends of oxygen-18 isotope composition of precipitation and climate[J]. *Science*, 1992, 258: 981-985.
- [42] Rademacher L K, Clark J F, Hudson G B. Temporal changes in stable isotope composition of spring waters: Implications for recent changes in climate and atmospheric circulation[J]. *Geology*, 2002, 30(2): 139-142.
- [43] Dataset: <http://is.chis.iaea.org/news.asp>, 2005.
- [44] Zhang H C, Ma Y Z, Wijnemann B, et al. A Holocene climatic record from arid northwestern China[J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2000, 162: 389-401.
- [45] Chen Bailin, Dang Guangmin, Cui Wei, et al. Advances in study of crustal stability in Hexi Corridor, Northwestern China[J]. *Journal of Geomechanics*, 2003, 3: 14-20.
- [46] Chen Longheng, Qi Yaoguang, et al. Rational Development and Utilization of Water and Land Resources in Hexi Region[M]. Beijing: Science Press, 1992.
- [47] Chen Longheng. Land desertification and its control in the lower reaches of Heihe River[J]. *Natural Resources*, 1996, 1: 35-43.
- [48] Ding Hongwei, Wang Guiling, Huang Xiachui. Runoff reduction into Hongyashan reservoir and analysis on water resources crisis of Minqin Oasis[J]. *Journal of Desert Research*, 2003, 1: 84-89.
- [49] Ding Hongwei, Zhang Ju. The problem of environment caused by groundwater level continuous decline in the inland basins of arid area, Northwest China[J]. *Hydrology and Engineering Geology*, 2002, 3: 71-75.
- [50] Ding Hongwei, Yao Xingrong, Yan Chengyun, et al. Orientation of water seeking in the area of water shortage located in Qilianshan Mountain piediment of Hexi Corridor[J]. *Hydrology and Engineering Geology*, 2002, 6: 17-34.
- [51] Dong Zhi, Yao Xunfeng, Li Hongqi, et al. Present situation and countermeasure comprehensive restoration of the environment of Ejina Oasis[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2000, 14 (suppl.): 1-4.
- [52] Dong Guanrong, Gao Quanzhou, Zou Xueyong, et al. Climatic changes in the southern fringe of Badain Jaran, since the Late Pleistocene[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1995, 40(13): 1 214-1 218.
- [53] Earth Sciences Division of Chinese Academy of Sciences. Investigation report of water uses and ecological rescues[J]. *Advances of Earth Science*, 1996, 11(1): 124.
- [54] Earth Sciences Division of Chinese Academy of Sciences. Urgent recommendation on rescuing Ejina Oasis[J]. *Advances of Earth Sciences*, 1996, 11(1): 526.
- [55] Gao Qianshao, Li Fuxing, et al. Case Study of Rational Development and Utilization of Water Resources in the Heihe River Basin[M]. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press, 1991.
- [56] Gao Qianshao, Li Xiaoyan, Wu Yanqing, Hu Xinglin. Transformation of water resources in the inland river basins of Hexi region[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 26(1): 48-54.
- [57] Gao Quanzhou, Dong Guangrong, Li Baosheng, et al. Evolution of southern fringe of Badain Jaran Desert since late Pleistocene[J]. *Journal of Desert Research*, 1995, 15(4): 345-352.
- [58] Gong Jiadong, Dong Guangrong, Li Sen, et al. Degradation of physical environment and its control in Ejina Oasis at the lower reaches of Heihe river[J]. *Journal of Desert Research*, 1998, 18

- (1) 44-50.
- [59] Hu Chunyuan, Li Yubao, Gao Yong, et al. Reactions of changes of ecological environment and human being activities in Heihe lower reaches [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2000, 14 (suppl): 10-14.
- [60] Lan Yongchao, Kang Eisi, Zhang Jishi, et al. Trends and characteristics on mountainous runoff in Hexi inland arid region [J]. *Journal of Desert Research*, 2002, 22(2): 135-141.
- [61] Ma Jinzhu, Wei Hong. The ecological and environmental problems caused by the excessive exploitation and utilization of groundwater resources in the Minqin basin, Gansu Province [J]. *Arid Zone Research*, 2003, 20(4): 262-265.
- [62] Mebus A Geyh, Gu Weizuo, Liu Yong, et al. Isotopically anomalous groundwater of Alxa plateau, Inner Mongolia [J]. *Advances in Water Science*, 1998, 9(4): 333-337.
- [63] Qu Jianjun, Chang Xueli, Dong Guangrong, et al. Fractal behavior of aeolian sand landform in typical Madune area of Badain Jaran desert [J]. *Journal of Desert Research*, 2003, 23(4): 361-365.
- [64] Wang Genxu, Cheng Guodong. Changes of hydrology and ecological environment during late 50 years in Heihe River Basin [J]. *Journal of Desert Research*, 1998, 18(3): 233-238.
- [65] Wang P H. The disputes on water utilization and distribution system in Hexi Corridor of the Qing Dynasty [J]. *Journal of Agriculture in Present and Past*, 2004, 2(2): 60-67.
- [66] Wu Yanqing, Mu Fuqiang, He Yixian, et al. Analysis of the transformation path between stream flow and groundwater from Dingxin to Shaomaying in Heihe River, Catchment west China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2000, 22(1): 73-77.
- [67] Wu Yi, Guo Jianqiang, Zhu Qingjun, et al. Geophysical prospecting techniques for the interchange between bedrock water and plan water [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2004, 25(3): 369-372.
- [68] Wunnemann B, Pachur H J, Zhang H. Climatic and environmental changes in the deserts of Inner Mongolia, China, since the Late Pleistocene [C]. Alsharhan A S, et al. eds. *Quaternary Deserts and Climatic Changes*. Balkema, 1998: 381-394.
- [69] Yan Mancun, Wang Guangqian, Li Baosheng, et al. Formation and growth of high Madunes in Badain Jaran desert [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56(1): 83-91. [闫满存, 王光谦, 李保生, 等. 巴丹吉林沙漠高大沙山的形成发育研究 [J]. *地理学报*, 2001, 56(1): 83-91.]
- [70] Yang Xiaping. Landscape types and its formation mechanism in the Badain Jaran Desert and its surrounding areas [J]. *Journal of Desert Research*, 2000, 20(2): 166-170.
- [71] Yang Xiaping. Water chemistry of the lakes in the Badain Jaran desert and their Holocene evolution [J]. *Quaternary Sciences*, 2002, 22(2): 97-104.
- [72] Zhang Huiling, Yang Xiaoling, Liu Mingchun, et al. Climate variation in eastern Hexi corridor and countermeasures for utilizing climatic resources [J]. *Meteorological Science and Technology*, 2004, 32(2): 101-104.
- [73] Ma Yuzhen, Zhang Hucai, Li Jijun, et al. Wunnemann, A study on the palynoflora and climatic environment during Late Pleistocene in Tengger Desert [J]. *Acta Botanica Sinica in Chinese with English abstract*, 1998, 40(9): 871-879.
- [74] Peng Jinan, Zhang Hucai, Ma Yuzhen. Late Pleistocene limnic ostracods and their environmental significance in the Tengger Desert, northwestern China [J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 1998, 15(1): 22-30.
- [75] Wunnemann B, Pachur H J, Li Jijun, et al. Chronologie der pleistozänen und holozänen Sepiegelschwankungen des Gaxin Nur/Sogo Nur und Baijian Hu, Innere Mongolei, NW-China [J]. *Petermanns Geographische Mitteilungen*, 1998, 142: 191-206.
- [76] Feng Zhaodong, Chen Fahu, Zhang Hucai, et al. Contribution to global change of Mongolian Plateau and Loess Plateau in the Last Glaciation and Interglacial periods [J]. *Journal of Desert Research*, 2000, 20(2): 172-177.
- [77] Zhang H C, Ma Yuzhen, Bernd Wunnemann, et al. Abrupt climatic changes during last glacial period in NW China [J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(16): 3203-3206.
- [78] Zhang H C, Bernd Wunnemann, Ma Yuzhen, et al. Lake level and climate change between 42 000 and 18 000 <sup>14</sup>C years BP in Tengger desert, NW China [J]. *Quaternary Research*, 2002, 58: 62-72.
- [79] Zhang Hucai, Ma Yuzhen, Pen Jinan, et al. Palaeolake and palaeoenvironment between 42-18 ka BP in Tengger Desert, NW China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(23): 1946-1956.
- [80] Ma Yuzhen, Zhang Hucai, Pachur H J, et al. Late Glacial and Holocene vegetation history and paleoclimate of the Tengger Desert, northwestern China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(14): 1457-1463.
- [81] Zhang H C, Pachur H J, Wunnemann B, et al. Late Quaternary development and levels of palaeolakes in Tengger desert, NW China [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2004, 211: 41-58.
- [82] Ma Yuzhen, Zhang Hucai, Pachur Hans J, et al. Modern Pollen-Based Interpretations of the Middle Holocene Paleoclimate (8500 to 3000 yr cal BP) in the Southern margin of the Tengger Desert, NW China [J]. *The Holocene*, 2004, 14(6): 841-850.
- [83] Shi Yafeng, Yu Ge, Liu Xiaodong, et al. Reconstruction of the 30-40 ka BP enhanced Indian monsoon climate based on geological records from the Tibetan Plateau [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2001, 169: 69-83.
- [84] Shi Yafeng, Jia Yulian, Yu Ge, et al. Features, impacts and causes of the high temperature and large precipitation event in the Tibetan Plateau and its adjacent area during 40-30 ka BP [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2002, 14(1): 1-11.
- [85] Shi Yafeng, Yu Ge. Warm-humid climate and transgressions during 40-30 ka BP and their potential mechanism [J]. *Quaternary Sciences*, 2003, 1: 1-11.
- [86] Yang Bao, Shi Yafeng. Warm-humid climate in northwest China during the period of 40-40 ka BP geological records and origin [J]. *Quaternary Sciences*, 2003, 1: 60-68.