

近3万年来巴丹吉林沙漠的景观发育与雨量变化

杨小平

(中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029. Email: xpyang@public2.east.cn.net)

摘要 在对巴丹吉林沙漠不同地区进行了考察的基础上, 通过对数个高大沙山的地貌学、沉积学和年代学研究, 对该地区近3万年来景观发育、雨量演变的过程和机制找到了新的证据. 巴丹吉林沙漠的沙丘普遍具有4个代表较为湿润环境的古沙丘胶结面. 依据测年数据推断, 该沙漠地区在近3万年以来有过4次比现代湿润的时期. 沙丘大面积的被固定和广布的古湖泊及湖岸阶地都说明, 研究地区的气候在近3万年来有周期性的波动, 这暗示着西风环流和东亚季风环流在阿拉善地区的强弱变化, 同时也说明在末次冰盛期前后, 研究地区曾出现过雨量较高的时段.

关键词 沙漠 古沙丘 湖泊 全球变化 巴丹吉林

不少学者都先后涉足于阿拉善高原上的巴丹吉林沙漠及其边缘地区. 30年代时中国-瑞典西北联合考察团对弱水下游的终端湖进行了考察^[1], 50和60年代时中国科学院治沙队对巴丹吉林沙漠的自然地理特征和社会经济状况展开过综合调查研究^[2~6]. 近10余年来, 阿拉善地区又得到了诸多学者的关注^[7~13]. 但由于沙丘高大, 进入沙丘腹地非常不便, 因而涉及沙漠腹地高大沙丘及湖泊形成过程和机制的工作仍很少. 因巴丹吉林沙漠既位于全球西风环流的中部, 又距夏季风的末端较近, 所以它应该能够为揭示西北干旱区气候变化的规律和机制提供重要依据. 本文在对巴丹吉林沙漠不同地点进行线路考察的基础上, 运用气候地貌学和沉积学方法, 通过对数个地点沙丘的较详细研究(图1), 来窥探内蒙西部干旱区近3万年来雨量演

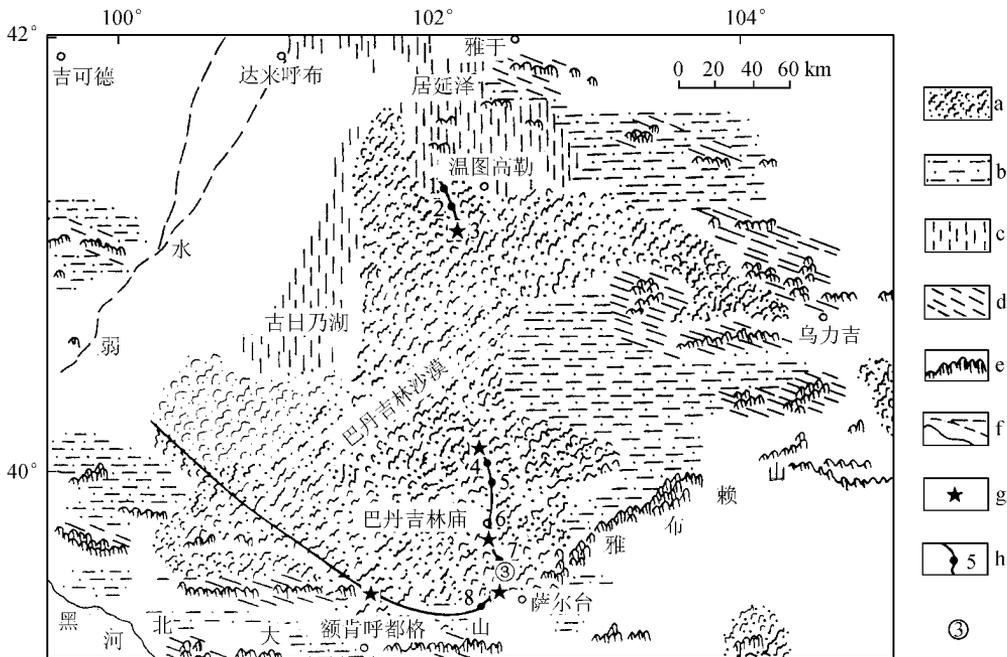


图1 巴丹吉林沙漠略图

a——沙丘, b——荒漠平原, c——古湖盆, d——准平原, e——山脉, f——河流, g——古沙丘表面胶结面观察地点, h——主要考察路线和地点(样品点), ③——图3所在位置

变的过程和机制。

1 巴丹吉林沙漠的景观特征

巴丹吉林沙漠地貌景观的突出特征是世界上最高大的沙丘(最高近 500 m)密布,沙山总体上呈北东-南西走向,高大沙丘主要集中于巴丹吉林沙漠南部地区,在该沙漠的北部沙丘比较矮小.在沙漠的东南部地区,沙丘的相对高度最大,其形态大多属复合类型.沙丘顶部全为流沙,其坡面倾角达 31.5° .在个别沙丘的顶部也有基岩露头,这说明有的沙丘是风成砂覆盖于基岩丘陵之上而形成的,但风沙已改变了原始地形的几何形态特征.新的流动沙丘的相对高度都在数米之内,常出现于丘间地、干枯的湖底和老沙丘上.

与世界上其他大沙漠明显不同的是,在巴丹吉林沙漠东南部丘间地带仍有不少永久性湖泊.在野外考察期间发现,这些湖泊的面积和水位变化较大,部分湖泊已经完全干枯(图 2).现存的湖泊面积最大的是诺尔图,其面积约为 1.5 km^2 ,最大深度达 16 m.这些深浅不同、大小不一的湖泊的含盐量变化范围非常之大,有的含盐量很小 ($< 5 \text{ g/L}$),但有的超过 300 g/L .根据野外导电性测量结果得知,注入湖泊的泉水水质均为淡水.因水位下降,一些大湖被分为几个小湖,大多数小湖现已干枯.在有的干枯的湖相沉积物上已发育了风蚀地形,但以前的湖岸阶地仍可找到.在现代环境状况下,流沙不仅直接从湖岸下滑至水中,而且在风力搬运下从水面沉降于湖底,使湖底沉积中含有较多的风沙沉积.巴丹吉林庙南部小湖 6.5 m 水深处 1 m 长钻孔的上部沙粒仍为风成沙的特征,颜色为浅黄色,再往下才是黑色淤泥.

2 古沙丘与高大沙丘的发育

根据高大沙丘上古沙丘胶结面形态结构的接触关系及其空间广泛分布的属性,判断这里的沙丘是在新老沙丘叠加的基础上发育的.从不同沙层之间的接触关系看,高大沙丘的表面主要有 4 个代表不同时期的胶结面(图 3),胶结物质以碳酸钙为主.这些钙质胶结层的厚度差别甚大.第 1 层最厚,厚度为 $30 \sim 40 \text{ cm}$,而在沙漠腹地个别地方如呼和浩特出露的厚度达 60 cm .第 2 胶结面的厚度约 20 cm ,第 3 层的厚度仅 $10 \sim 20 \text{ cm}$.而第 4 个胶结面则由

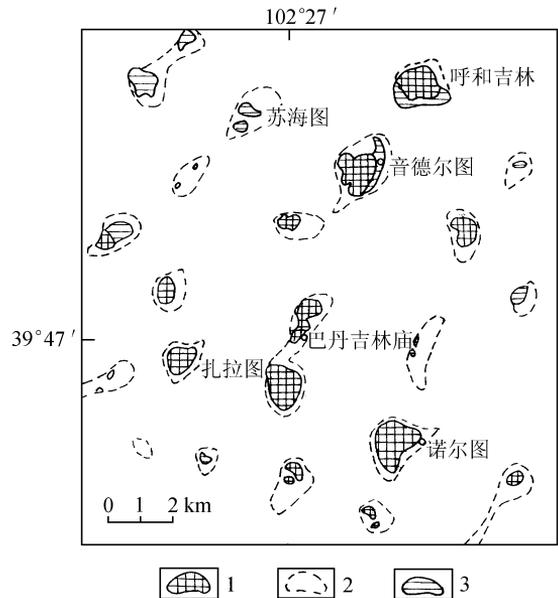


图 2 巴丹吉林沙漠东南部的湖泊分布
据文献[9]改编. 1——现代湖泊, 2——古湖岸线, 3——盐碱地

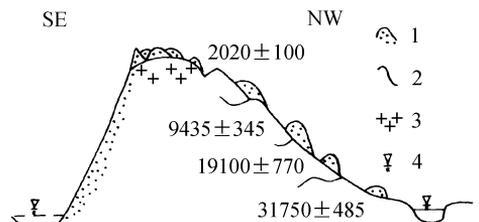


图 3 巴丹吉林沙漠保日陶勒盖大沙丘的形态结构示意图(位置见图 1)
1——现代流动沙丘, 2——古沙丘胶结面及其形成时期/a BP, 3——基岩, 4——现代湖面

多层中间夹沙的薄层(2~8 mm)胶结组成。根据地层的接触关系判断,目前连续出露的第1期的古沙丘的形态为一缓起伏的沙塬。有些地段的表面被一薄层小砾石覆盖,砾石颗粒上有荒漠岩漆,其最大的直径约3~5 mm,沙塬上仍长有蒿属(*Artemisia*)和其他植物。第2期沙丘覆盖在沙塬面上,沙粒略显黄色,其上也有较密集的植物分布。第3期沙丘分布的范围最广,但表面胶结相对较弱。第4期沙丘为半流动沙丘,沙粒颜色浅,主要分布于较老沙丘的坡面上。现代流动沙丘广泛发育于这些老的胶结面上。这4种不同的胶结面代表了古沙丘的形态,它们分别形成于4个不同的时期。在钙质胶结层中也发现有不少钙质胶结的植物根系管,不同时代的根管也零散露于沙丘表面。第1层胶结层中根管管径可达4~5 cm,在出露的地点密集分布。第2和第3胶结层中根管的管径较小,仅2~3 cm,在第4胶结面上根管最细,常不足1 cm。用¹⁴C对沙漠东南部古沙丘(见图3)面上的根管测年结果见表1。

表1 不同胶结面上植物根系的¹⁴C年龄

| 物质 | 部位 | 实验室编号 | 年龄/a BP |
|------|---------|----------|------------|
| 钙质根管 | 第1古沙丘表层 | Hv 15943 | 31 750±485 |
| 钙质根管 | 第2古沙丘表层 | Hv 15944 | 19 100±770 |
| 钙质根管 | 第3古沙丘表层 | Hv 15938 | 9 435±345 |
| 钙质根管 | 第4古沙丘表层 | Hv 15937 | 2 070±100 |

3 沙丘发育的沉积学证据

先后从沙漠北部、东南部和南部边缘深入沙漠考察,由于沙丘各部位物质不尽相同,对每个沙丘都从底、中和顶部取样,分析时利用混合样品。为了减少随机因素,每个样点分析2~3个沙丘,然后取其平均值。分析结果表明,巴丹吉林沙漠地区沙丘上物质的区域不规则变化明显,在南北方向上粒度没有分异规律(图4),风沙物质的重矿物组成各地的差别突出(图5),

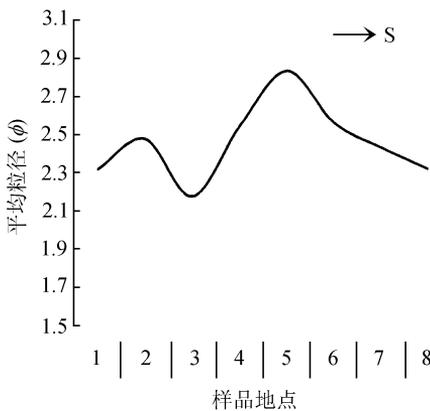


图4 巴丹吉林沙漠南北大剖面上沙丘沙的平均粒径变化

采样地点见图1。平均粒径(f) = $(f_{16} + f_{50} + f_{84})/3$, 其中 $f = -\log_2 x$, x = 粒径(mm)

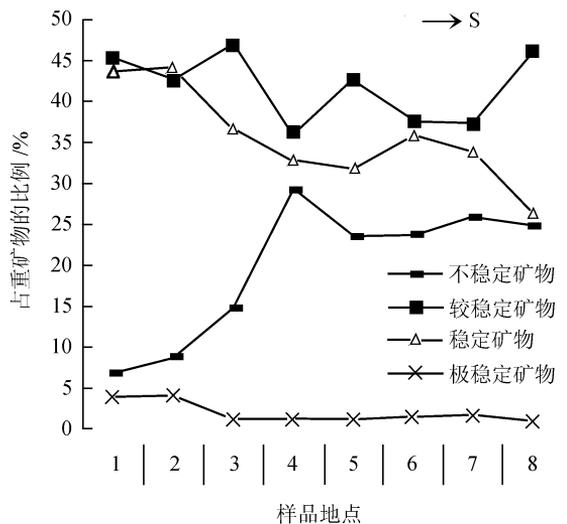


图5 巴丹吉林沙漠南北大剖面上沙丘沙的重矿物含量变化

采样地点见图1

这反映出在巴丹吉林地区风向复杂, 不同方向的风在沙丘的形成过程中都起了作用, 同时也说明沙漠地区的物质有多个不同的源地. 另外, 也可能是因为湖泊的大量存在对沙粒搬运起了阻碍作用. 在整个沙漠地区, 高大沙丘多为复合型沙丘和金字塔沙丘, 证实了近地面多方向风的共同作用. 沙漠周围地区现代气象观测资料也证实, 该地区的主导风向的区域差别较大. 例如, 在位于沙漠北部的温图高勒, 平均起沙风(≥ 6 m/s)的主导方向为东风, 而沙漠东缘乌力吉道气象站的主导风向则为西风, 在这里一年中仅在春季以西北风为主, 8 月份以东北风为主, 而其他月份西风均占主导地位^[14,15].

从石英砂表面微结构可以看出, 本地区风力作用在景观环境的塑造中起着重要作用. 对 13 个样品的 114 个颗粒进行了详细分析, 结果表明巴丹吉林沙漠东南部石英砂粒的表面主要是由风力搬运作用所形成的麻面结构和由于温度剧烈变化所导致的氧化硅的溶解和沉淀结构(图 6). 麻面结构、新月形坑和碟形坑都是在风力的作用下砂粒互相碰撞而形成的. 由于在干旱地区温度的日变化剧烈, 当砂面温度低于近地层空气温度时, 粒间空隙中产生凝结水, 其中含有被溶解的盐分, pH 值相应升高, 使得砂粒表面 SiO_2 溶解; 当白天温度升高时, 蒸发作用又使被溶解的 SiO_2 沉淀于颗粒表面. 颗粒经机械作用或风化作用, 在解理边缘形成一些平行的翘起薄片, 以后这些薄片又迭加了氧化硅沉淀层, 使其片理模糊. 尽管如此, 它们的基本轮廓仍得以残存, 貌似上翻. 研究地区石英砂表面上上翻解理薄片的频繁出现说明研究地区气候的突出特征是风力强大、日温差大.

新、老沙丘虽在颜色上有区别, 但它们的沉积物在重矿物组成方面的差别较小, 都以较

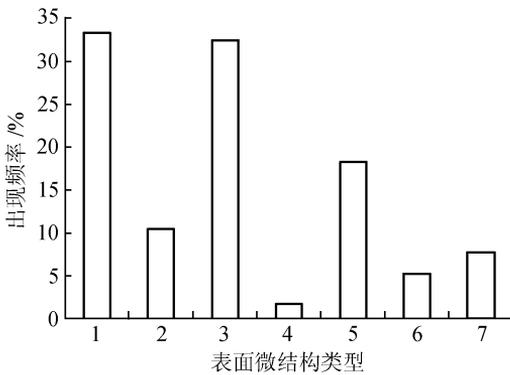


图 6 巴丹吉林沙漠东南部石英砂表面各种微结构的出现频率

1——麻面结构, 2——新月形坑, 3——上翻解理薄片, 4——解理面, 5——碟形坑, 6——槽沟, 7——溶蚀结构

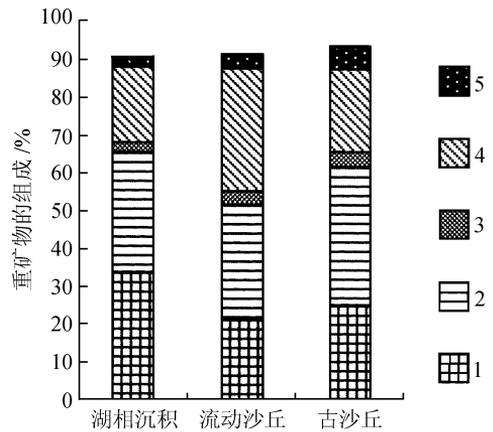


图 7 巴丹吉林庙地区不同类型沉积物的重矿物组成

1——角闪石, 2——绿帘石, 3——黝帘石, 4——不透明矿物, 5——石榴石

稳定矿物、稳定矿物和不稳定矿物为主, 极稳定矿物的含量很少. 这说明新老沙丘与新沙丘的形成环境相似. 巴丹吉林庙地区古湖相沉积物的重矿物组成与其上新、老沙丘的重矿物组成种类非常相似(图 7), 说明本地湖盆沉积和风沙物质的相互联系极为紧密, 丘间地湖泊沉积是沙丘沙的主要源地之一.

4 近3万年来雨量变化讨论

干旱的气候使流动沙丘得到发育,而在沙丘表面水分条件较好的情况下,这种沙丘趋于固定.由于在巴丹吉林沙漠高大沙山的坡面上没有地下水出露,沙丘上部因远离河谷和湖泊,沙丘大面积的胶结应是当地雨量增加的标志.根据沙丘剖面上出现的钙质胶结层、植物的胶结根管(见图1、表1)和丘间地湖泊的湖岸阶地,可以推测:在大约30和20 ka BP时,巴丹吉林地区的气候较现在湿润,在末次冰期总体干冷的气候条件下,在巴丹吉林地区曾出现过比较湿润的时期.另外,在全新世初期和2 ka BP时,气候也比现在湿润.根据野外地层观测判断,巴丹吉林沙漠地区湖泊的补给主要是地下水.各大沙山脚下均有下降泉分布,而且呈环状,表明泉水是从沙丘上流下来的.水样同位素分析证明,巴丹吉林沙漠地区的地下水与其西部河流的河水没有交换的迹象^[13].所以可以肯定地说,沙丘丘间地湖泊的高水位也是当地相对湿润气候条件存在的另一个重要证据.

巴丹吉林地区西北缘湖泊高水位的出现与沙漠地区沙丘的固定时期有耦合关系,这也验证了整个区域雨量增加历史的存在.对苏古诺尔最高的湖岸阶地的¹⁴C测年研究显示,约33 ka BP时水位最高^[1].取于苏古诺尔西边的嘎顺诺尔的钻孔样品^[16,17]也说明嘎顺诺尔地区湖泊水位最高的时期出现在39~21 ka BP.在13 ka BP以来,湖泊水位又有上升的记录.从航片和卫星相片上可以看出,湖泊周围地区有许多古河道.需要说明的是,弱水下游的湖泊也受控于河流上游青藏高原的冰雪融水量,因而不完全反映当地气候状况.依据巴丹吉林沙漠与雅布赖山之间的地层剖面¹⁴C年龄和沉积速率推测建立的年代,可以看出,地层的孢粉组合和CaCO₃含量随时间变化较大^[8].在雅布赖山的地表基岩上,以前流水侵蚀的痕迹仍很清楚,在该山的东侧还有洪积扇裙存在,说明当时山地降雨也较大.

从巴丹吉林沙漠的古沙丘形成的环境推断,我国西部沙漠地区沙丘的控制因素主要是雨量.因为东亚地区在冰期时冬季风加强而主要表现为寒冷、干旱的特征^[18],在现代,夏季风的北缘也只不过位于毛乌素沙漠和腾格里沙漠^[19],所以对巴丹吉林沙漠在末次冰期时的湿润可以做两种解释.一是西风环流作用的加强,也就是说,巴丹吉林沙漠在末次冰期时曾在西风带的影响下出现过相对湿润的时期.西风携带的水汽在遇到来自蒙古高压的寒冷气流时受阻而抬升,在我国干旱沙漠地区形成降雨和降雪.另一解释是在30和20 ka BP时,尽管冬季风占主导地位,然而在短时期内夏季风也很强盛,其强度甚至超过现代.但在全新世的较湿润时期应是夏季风的作用,因为在间冰期夏季风的强度明显增加.总而言之,近3万年来巴丹吉林地区的气候发育史不是单一的干旱化,而是有多次波动,万年尺度的湿润期的周期性较明显,并导致了区域景观的变化.

致谢 J. Hoevermann、H. Mensching、刘东生、朱震达、D. Jaekel 等教授对本项工作给予了大力支持和指导,¹⁴C年代由 M. A. Geyh 教授测定.本工作为国家重点基础研究专项经费资助项目(批准号:G1999043400)、中国科学院资源与生态环境研究重点项目(批准号:KZ952-51-438)、国家自然科学基金(批准号:49902015)和德国 DFG 及 Max-Planck-Gesellschaft 资助项目.

参 考 文 献

- 1 Norin E. Sven Hedin Central Asia Atlas, Memoir on Maps. Vol III. Stockholm: Statens Etnografiska Museum, 1980. 94 ~ 110

- 2 于守忠, 李博, 蔡蔚祺, 等. 内蒙西部戈壁及巴丹吉林沙漠考察. 治沙研究, 1962, 3: 96 ~ 107
- 3 楼桐茂. 甘肃民勤至巴丹吉林庙间沙漠成因及其改造利用. 治沙研究, 1962, 3: 90 ~ 95
- 4 谭见安. 内蒙古阿拉善荒漠的地方类型. 地理集刊, 1964, 8: 1 ~ 31
- 5 孙培善, 孙德钦. 内蒙高原西部水文地质初步研究. 治沙研究, 1964, 6: 245 ~ 317
- 6 朱震达, 吴正, 刘恕, 等. 中国沙漠概念. 北京: 科学出版社, 1980. 68 ~ 76
- 7 王涛. 巴丹吉林沙漠形成演变的若干问题. 中国沙漠, 1990, 10(1): 29 ~ 40
- 8 董光荣, 高全洲, 邹学勇, 等. 晚更新世以来巴丹吉林沙漠南缘气候变化. 科学通报, 1995, 40(13): 1214 ~ 1218
- 9 中国科学院兰州沙漠研究所编制. 陆锦华, Jäkel D, 主编. 巴丹吉林高大沙山典型区景观图. 1 : 10 万. 兰州: 兰州大学出版社, 1996
- 10 中国科学院兰州沙漠研究所编制. 陆锦华, Jäkel D, 主编. 巴丹吉林沙漠及毗邻地区地貌图. 1 : 50 万. 兰州: 兰州大学出版社, 1998
- 11 Jäkel D. The Badain Jaran Desert: its origin and development. Geowissenschaften, 1996, 7/8: 272 ~ 274
- 12 Hofmann J. The lakes in the SE Part of Badain Jaran Shamo, their limnology and geochemistry. Geowissenschaften, 1996, 7/8: 275 ~ 278
- 13 Geyh M A, Gu W Z, Jäkel D. Groundwater recharge study in the Gobi Desert, China. Geowissenschaften, 1996, 7/8: 279 ~ 280
- 14 Domrös M, Peng G. The Climate of China. Berlin: Springer-Verlag, 1988. 336
- 15 Yang X. Geomorphologische Untersuchungen in Trockenräumen NW-Chinas Unter Besonderer Berücksichtigung von Badanjilin und Takelamagan. Göttingen: Verlag Erich Goltze, 1991. 88 ~ 91
- 16 Pachur H J, Wünnemann B, Zhang H. Lake evolution in the Tengger Desert, Northwestern China, during the last 40 000 years. Quaternary Research, 1995, 44: 171 ~ 180
- 17 Wünnemann B, Pachur H J, Zhang H. Climatic and environmental changes in the deserts of Inner Mongolia, China, since the Late Pleistocene. In: Alsharhan A S, Glennie K W, Whittle G L, et al. Quaternary Deserts and Climatic Change. Rotterdam: A A Balkema, 1998. 381 ~ 394
- 18 An Z, Liu T, Lu Y, et al. The long-term paleomonsoon variation recorded by the loess paleosol sequence in Central China. Quaternary International, 1990, 7/8: 91 ~ 95
- 19 任美镔. 中国自然地理纲要. 修订版. 北京: 商务印书馆, 1982. 28

(1999-09-02 收稿, 1999-11-22 收修改稿)