

塔里木河流域 12 kaBP 以来沙漠演化 与气候变化研究^{*}

冯 起^① 苏志珠^② 金会军^①

(^①中国科学院兰州冰川冻土研究所冻土工程国家重点实验室, 兰州 730000; ^②中国科学院
兰州沙漠研究所, 兰州 730000)

摘要 通过对塔里木河流域 12 kaBP 以来地层沉积相特征研究和气候环境代用指标的测试分析, 从时空的角度讨论了该流域沙漠演化过程、发育模式与气候变迁的关系. 认为从 12 kaBP 以来随着全球气温的回升, 在 12~10 kaBP 期间, 气候温凉偏干旱、泛洪堆积明显、风沙活动弱; 10~8 kaBP 期间, 气候干冷、风沙活动强烈, 是沙漠大规模扩展时期; 8~3 kaBP 期间的全新世高温期, 气候干燥炎热, 塔里木河流域周围和山区冰雪融水增多, 河流水量增加, 河流泛洪沉积十分活跃, 但流沙规模的缩小、沙丘固定仅限制在河湖沿岸和沙丘低洼地区; 从 3 kaBP 至今, 在新冰期作用下, 加上人类不合理的经济活动导致流域环境恶化、风沙活动盛行、沙尘暴频繁. 地层沉积相的古气候证据提示: 12 kaBP 以来该流域在全球气候波动的影响下叠加了内陆干旱盆地的环境效应, 是总体干燥气候条件下, 具有暖干与冷干交替变化规律.

关键词 塔里木河流域 12 kaBP 以来 沙漠演化 气候变化

塔里木河流域沙漠演化、河流变迁和气候变化一直受到许多学者的关注^[1~3]. 由于受塔里木河水系变迁的影响, 尤其是全新世以来该河发生了多次摆动, 使其沙漠演化过程和发育模式较为特殊, 前人对此问题曾有涉及^[4], 但对整个塔里木河流域(上、中、下游)的系统研究尚少. 近年来, 作者对塔里木河流域进行了广泛的地质、地貌调查. 在前人工作的基础上, 对整个流域地层沉积特征进行了研究, 并结合测年和粒度、孢粉、CaCO₃ 及地球化学气候指标 C 值的分析结果, 恢复了塔里木河流域 12 kaBP 以来的古气候变化序列, 探讨了该流域沙漠演化过程、发育模式及其与气候变化的关系.

1 地层沉积相特征与时代划分

1.1 地层分布与沉积相特征

塔里木河流域位于天山、昆仑山的山前倾斜平原和塔克拉玛干沙漠之间(见图 1). 该流域现代气候特征为: 气候干旱、降水稀少、日较差大, 冬季干冷、夏季炎热. 区域地表流沙广布,

1998-06-16 收稿, 1999-04-14 收修改稿

^{*}国家重点科技资助项目(编号: 96-912-03-03)及 96 博士后资助项目

植被以河流两岸分布较多, 古河道和远离河流地区稀少. 塔里木河流经地区原为塔里木河故道平原, 其上发育横向新月型沙垄, 水流穿越沙丘之间的平地 and 丘间洼地. 受季节水量变化影响, 该河不断地南北迁移摆动, 当山区降水和融水增多, 河流水量增加, 主、支河水流聚集, 河流相沉积物沿河沉积. 反之, 裸露的支流、主河床风沙活动明显, 风将较细的河流相沉积物吹蚀、堆积, 沿岸形成流动沙丘. 因此, 该流域地层垂向结构上主要表现为风成相与河流冲积相互迭覆的沉积序列. 以该河中游 2-G 剖面发育较好(图 1), 其岩性自上而下为

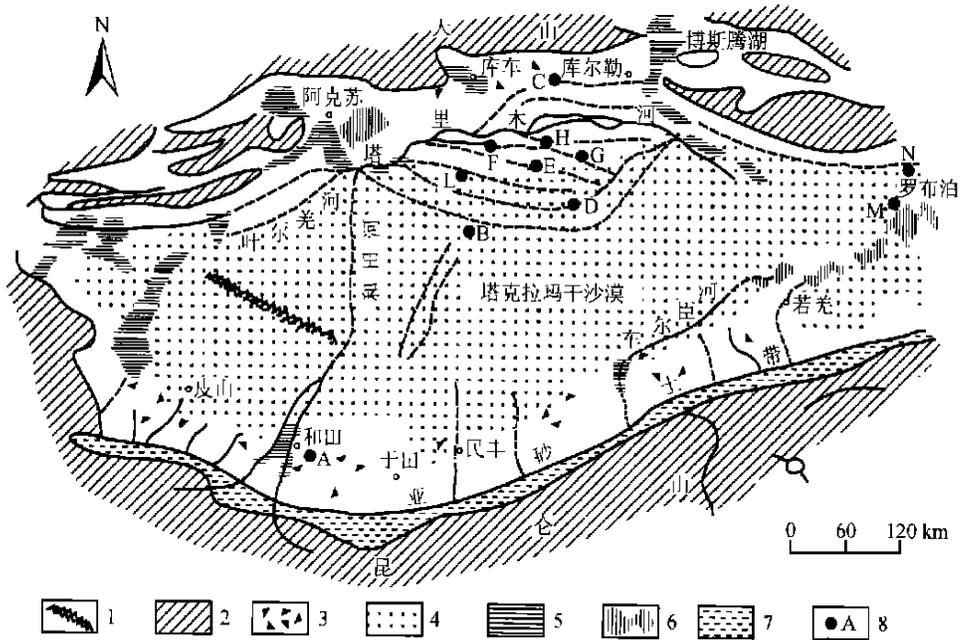


图 1 塔里木河地层剖面分布位置

1. 沙漠内山地, 2. 山地, 3. 戈壁, 4. 沙漠, 5. 绿洲, 6. 沼泽, 7. 黄土, 8. 剖面位置

(1) 现代风成砂, 浅黄色, 少量枯枝落叶, 松散, 厚 15 cm;

(2) 粉砂土, 灰色, 具有水平和斜层理, 松散, 地层中埋藏枯木经 ^{14}C 测年为 (1684 ± 64) aBP, 厚 45 cm;

(3) 泛洪沉积物, 青灰色亚粘土, 具有水平层理, 表面龟裂, 坚实, 层内淤积层 ^{14}C 测年为 (2403 ± 68) aBP, 厚 30 cm;

(4) 浅灰黄色风成砂, 松散, 厚 150 cm;

(5) 亚粘土, 浅灰绿色, 具斜层理, 有大量锈斑和虫孔, 较紧实, 层内淤积层经 ^{14}C 测年为 $(4\ 497 \pm 97)$ aBP, 厚 25 cm;

(6) 黄色风成砂, 松散, 层内有少量根状组成和锈斑, 厚 55 cm;

(7) 亚粘土, 青灰色, 具有水平或波状层理, 富含植物残体和锈斑, 淤积层 ^{14}C 测年为 $(7\ 746 \pm 108)$ aBP, 厚 20 cm;

(8) 风成砂, 灰黄色, 含较多锈斑和植物残体, 厚 70 cm;

(9) 亚粘土, 灰褐色, 紧实, 虫孔较多, 表层黑色淤积层 ^{14}C 测年 (11190 ± 177) aBP, 厚 40 cm;

(10) 风成砂, 灰黄色, 厚 150 cm 以上(未见底).

1.2 地层时代划分

依据该区地层沉积相特征、年代测定及邻近地区地层对比,可大致建立整个塔里木河流域 12 kaBP 以来地层时间序列. 由图 2 看出,整个塔里木河流域在 12~10 kaBP 之间普遍发育 1~2 层河流相亚粘土或粘土. 上游地区该层发育时代为 $(11\ 050 \pm 250)$ aBP (图 2-A)、 $(10\ 250 \pm 300)$ aBP (图 2-A) 和 $(10\ 569 \pm 96)$ aBP (图 2-B); 中游地区为 $(10\ 350 \pm 135)$ aBP (图 2-C)、 $(12\ 860 \pm 230)$ aBP (图 2-D)、 $(10\ 600 \pm 165)$ aBP (图 2-D)、 $(11\ 190 \pm 117)$ aBP (图 2-G) 和 $(11\ 820 \pm 220)$ aBP (图 2-H); 下游地区为 $(9\ 360 \pm 120)$ aBP (图 2-M). 这些测年数据均可与季风区西北边缘区沙漠砂下伏古土壤层发育时期 $(10\ 500 \pm 950)$ aBP^[13] 和北疆地区巴里坤剖面全新世下界 $(12 \sim 10.87)$ kaBP^[14] 时发育的粘质土层对比. 河流相的冲积淤积普遍发育的另一时段主要集中在 $(8 \sim 3)$ kaBP 间的全新世气候最适宜期^[15]. 这套沉积物在塔里木河上游地区的克里雅河及其支流最早出现时间为 $(7\ 510 \pm 67)$ aBP (图 2-B); 中游地区为 $(7\ 240 \pm 170)$ aBP (图 2-D)、 $(6\ 970 \pm 100)$ aBP 与 $(7\ 370 \pm 550)$ aBP (图 2-E)、 $(7\ 746 \pm 108)$ aBP (图 2-G) 等; 下游地区为 $(8\ 000 \pm 160)$ aBP 和 $(7\ 705 \pm 150)$ aBP (图 2-L). 最晚结束于 $(4\ 400 \pm 320)$ aBP (图 2-A)、 $(3\ 750 \pm 195)$ aBP、 $(3\ 100 \pm 160)$ aBP (图 2-L)、 $(3\ 610 \pm 90)$ aBP (图 2-M) 和 $(3\ 100 \pm 160)$ aBP (图 2-L). 在 $8 \sim 3$ kaBP 之间,尽管塔里木河流域地中层夹有风成砂沉积,但以冲积淤积的河流相沉积为主. 3 kaBP 以后整个塔里木河流域以风成沙堆积为主,局部地区地层中仍出现冲淤积的河流相沉积,如 $(2\ 023 \pm 78)$ aBP (图 2-E)、 $(1\ 920 \pm 80)$ aBP (图 2-F)、 $(1\ 684 \pm 64)$ aBP (图 2-G) 和 $(1\ 555 \pm 105)$ aBP (图 2-L).

2 塔里木河流域沙漠演化与气候变化

塔里木河流域地区风成沙与河流相沉积物的存在与否或范围大小,在指示沙漠演化上虽不及东部季风区风成沙-沙质古土壤序列直观,但它同样是气候环境变化的可靠记录. 因为在温暖时期克拉玛干沙区降水量不增多,在该地区未达到使流沙固定成壤的程度,但当塔里木河流域河水增大甚至泛滥、致使地势低洼的流沙区沙漠面积缩小;而在冷期,河流水量减小,塔里木河主流河床干旱裸露,风蚀起沙,所以在地层中出现河流相冲淤积物与风成沙互层序列. 因此可根据以上地层时代划分,将 12 kaBP 以来塔里木河流域的沙漠演化和气候变化在时间上分为以下几个阶段:

2.1 12~10 kaBP 期间

从塔里木河流域地层沉积物和年代数据分析,可见该时期虽出现过风沙堆积记录,但整个塔里木河流域以泛洪堆积现象更为普遍,包括上游支流库山河和克里雅河等地都广泛发育了河流相冲积、淤积物. 此时克里雅河上游阿什库勤盆地中的湖泊曾出现高湖面^[16]. 对地层剖面(2-G)中沉积物的颗粒组成和反映气候变化的其他环境指标的测试表明,该期沉积物的颗粒组成偏细、分选性差(表 1). 反映气候环境的敏感指标碳值 $\{C = \frac{\sum(\text{Fe} + \text{Mn} + \text{Al} + \text{Cr} + \text{Co} + \text{Ni})}{\sum(\text{K} + \text{Na} + \text{Ca} + \text{Mg} + \text{Sr} + \text{Ba})} \times \%\}$ 和 CaCO_3 含量较高,说明此时气温不高、蒸发量较小. 判断沉积过程中水介质状况指标 Sr/Ba 比值(0.41)为全剖面最低值(表 2),判断氧化-还原环境的 P/Mn 值^[17] 和反映水体盐度的沉积磷酸盐比值 $\text{Ca}/(\text{Ca} + \text{Fe})$ ^[18] (表 2),均反映当时的主河道及汉河洼地存在一些水质偏淡的浅水淤积环境,使营淡水、微咸水生活的腹足类软体动物生长,如亚粘土地层中伴有直隶平卷螺 [*Planorbis. Chiblinsis. (Ping)*]. 这反映出冰后期随着气

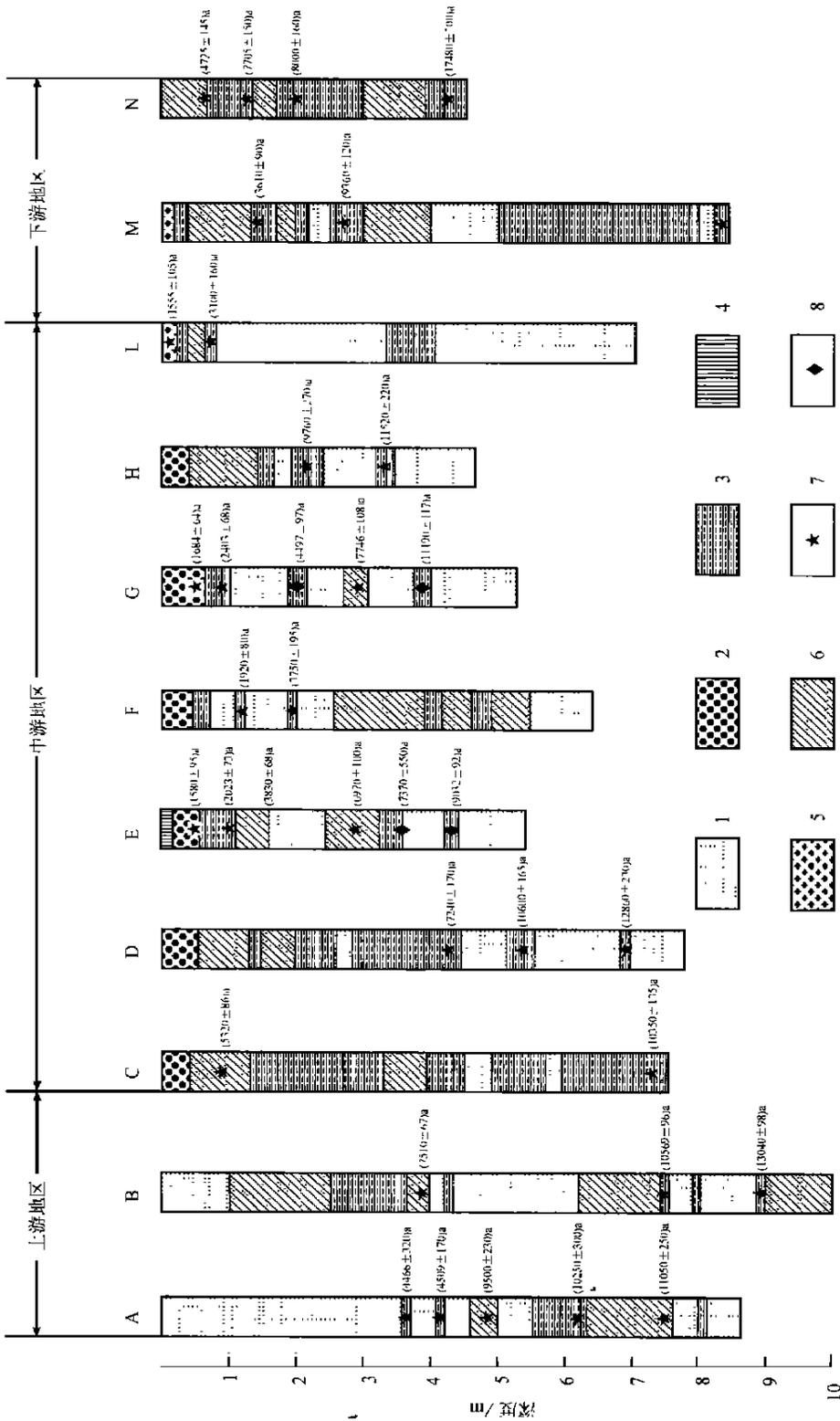


图 2 塔里木河流域地层分布及年代

A——文启志(1990)^[7]; B——新鹤龄(1994)^[8]; C、D、E——陈广庭(1992)^[9]; L——周兴佳(1992)^[10]; M——严富华(1983)^[11]; N——吴玉书(1994)^[12]; 1 风成细沙; 2 现代流沙; 3 亚粘土; 4 盐壳; 5 枯枝落叶层; 6 粉砂土; 7. ¹⁴C 年代; 8. 热释光年代(aBP)

温波动性的回升,盆地周围有大量冰雪融化,河流水量增加,河流沉积作用盛行,塔里木河流域泛滥事件增多。虽塔里木河流域剖面中因水量增加形成较多的泛洪沉积层,但远离河流地区的植被组成仍以麻黄、藜科和杂草等草本植物为主(表 3),如剖面 2-G 中属于该时期沉积的地层中孢粉缺少(8, 10 层)或表征干旱植物的蒿属和麻黄在孢粉总数中所占的比率(A/C_1)大于 0.6(表 2 的 9 层),反映整个塔里木河流域气候环境仍较温凉偏旱,为中温带半干旱荒漠景观。河湖附近沙漠面积有所缩小,甚至被河湖相冲积和淤积物覆盖。

表 1 各沉积物的粒度变化

层号	岩性	沙丘的粒径平均百分含量/%					Md(φ)	δ	Sk	kg
		1~0.25	0.25~0.1	0.1~0.05	0.05~0.005	<0.005				
		/mm	/mm	/mm	/mm	/mm				
1	风成砂	0.45	69.85	23.34	6.36	---	3.29	0.59	0.04	1.47
2	粉砂土	0.25	14.32	72.56	10.76	2.11	4.93	0.82	0.48	0.98
3	亚粘质土	---	---	2.32	52.06	45.62	7.7	1.76	0.08	0.81
4	风成砂	0.85	14.53	73.67	10.95	---	3.49	0.43	0.00	0.88
5	亚粘质土	---	---	7.02	73.39	19.59	6.27	1.73	0.34	1.10
6	风成砂	0.32	5.66	50.08	41.32	2.62	4.12	0.64	0.19	1.03
7	亚粘质土	---	---	10.36	51.26	38.38	7.61	1.65	0.13	0.82
8	风成砂	---	2.55	76.84	18.18	2.43	4.15	0.57	0.18	1.24
9	亚粘质土	---	---	27.10	51.16	34.16	7.5	1.88	0.31	0.59
10	风成砂	2.34	74.79	22.45	0.42	---	3.03	0.49	0.29	1.12

表 2 塔里木河流域地层综合因子分析表^{a)}

层序	分层厚度 /m	岩性	¹⁴ C 年代 /aBP	C	Sr/Ba	P/Mn	SO ₂ /Al ₂ O ₃	Ca/ (Ca+Fe)	ZRT /%	稳定 系数	A/C	CaCO ₃ /%
1	0.0~0.15	风成砂		0.161	0.41	1.13	5.66	0.89	2.05	0.25	---	13.45
2	0.15~0.6	粉砂土	(1684±64)	0.154	0.46	1.09	5.78	0.77	1.50	0.40	0.35	14.18
3	0.6~0.9	亚粘质土	(2403±68)	0.189	0.83	0.64	5.09	0.76	2.95	0.41	1.25	24.66
4	0.9~2.4	风成砂		0.182	0.53	1.23	5.54	0.97	2.85	0.30	0.11	10.58
5	2.4~2.65	亚粘质土	(4497±97)	0.194	1.13	0.58	5.04	0.51	5.27	0.21	1.01	20.31
6	2.65~3.2	风成砂		0.174	0.59	0.78	5.39	0.80	3.05	0.30	0.42	18.77
7	3.2~3.4	亚粘质土	(7746±108)	0.213	0.89	0.67	4.98	0.81	3.25	0.33	0.98	23.74
8	3.4~4.1	风成砂		0.123	0.52	0.98	6.11	0.84	3.02	0.40	---	12.02
9	4.1~4.5	亚粘质土	(11190±177)	0.210	0.41	0.54	4.00	0.50	3.84	0.36	0.69	23.55
10	4.5~6.0	风成砂		0.140	0.55	1.31	5.59	0.92	2.75	0.28	---	16.14

a) $C = \frac{\sum(Fe+Mn+Al+Cr+Co+Ni)}{\sum(K+Na+Ca+Mg+Sr+Ba)} \times \%$

2.2 全新世早期(10~8 kaBP)

全新世早期,塔里木河流域气候仍较干凉,河流沉积作用减弱。克里雅河附近裸露的泛洪沉积物随着流水作用的减弱,在强劲的风力作用下形成大面积的流沙,是沙漠扩展的主要时期。特别 9 kaBP 以来,沙漠扩展更为迅速。如策勒县达玛沟在 10~9.6 kaBP 以来,风砂夹层较多沙丘广泛发育。塔里木河中游普遍发育了厚层风成细砂,即 10.6~7.24 kaBP 期间(图 2-D)、(7370±550)aBP 前(如图 2-E)、(11190±177)aBP~(7746±108)aBP 期间(如图 2-G)和(11820±220)~(9760±270)aBP 期间(如图 2-H)。粒度分析表明:地层以细砂为主,分选性好,具有风成砂的特征(表 1)。重矿物稳定系数{(稳定矿物+极稳定矿物)/(较稳定矿物+不稳

表 3 剖面 2-G 各层沉积物中的孢粉含量(从上到下顺序, 单位: m)

孢粉数	1 ^{a)}	2	3	4	5	6	7	8	9	10
总数	---	34	52	10	34	26	93	---	134	---
云杉 (<i>Picea</i>)	---	1	---	---	---	---	---	---	4	---
冷杉 (<i>pinus</i>)	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
榆 (<i>Ulmus</i>)	---	1	1	1	---	---	---	---	---	---
桑 (<i>Morus</i>)	---	---	2	1	---	1	3	---	16	---
胡颓子 (<i>Elaeagnus</i>)	---	---	---	---	1	---	---	---	1	---
柏科 (<i>Cupressaceae</i>)	---	---	---	---	---	---	---	---	2	---
无患子科 (<i>Sapindaceae</i>)	---	---	---	---	---	---	1	---	---	---
十字花科 (<i>Cruciferae</i>)	---	---	1	---	---	---	1	---	---	---
莎草科 (<i>Cyperaceae</i>)	---	---	---	---	1	---	---	---	---	---
禾本科 (<i>Graminaeae</i>)	---	10	3	2	4	7	6	---	16	---
蔷薇科 (<i>Posaceae</i>)	---	---	---	---	1	2	3	---	---	---
蒿属 (<i>Artemisia</i>)	---	3	17	1	7	1	24	---	24	---
藜科 (<i>Chenopodiaceae</i>)	---	11	7	2	3	---	25	---	31	---
麻黄 (<i>Ephedra</i>)	---	6	12	---	10	7	22	---	31	---
柽柳科 (<i>Tamarix</i>)	---	---	6	3	5	7	2	---	4	---
蒺藜 (<i>Tribulus</i>)	---	---	2	---	1	---	3	---	5	---
白刺 (<i>Nitraria</i>)	---	2	---	---	1	1	1	---	---	---
香蒲 (<i>Typha</i>)	---	---	1	---	---	---	2	---	---	---

a) 地层序号(1, 2 3, 4 5, 6 7, 8 9 10)

定矿物)}为0.4(表2);不稳定矿物和ZRT(即锆英石、电气石、金红石的百分含量之和)含量很高;C值最低, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值最高, 这些都反映干旱气候. 年代测定表明塔里木河中下游南岸(8 600±430)aBP为新沙开始形成年代^[19]. 而罗布泊在9 kaBP向南退缩. 车尔臣河自阿尔金山流出到洪积-冲积三角洲上部后, 在风沙迫进下改向东北流, 使西南地区沙漠面积扩大. 因此, 该时期是塔里木河流域现代沙漠开始形成的重要时期. 但该时期气候也有次一级温湿波动, 在地层中表现为泛洪堆积. 如下游罗布泊地区此时堆积厚约6 m以上的冲积湖积层, 沉积物主要由亚砂土、红粘土、细砂, 且于(9 360±120)aBP前广泛沉积了厚约0.4 m的黑色淤泥层或泥层, 罗布泊面积扩大并东进到罗布泊4井一带^[11].

2.3 全新世中期(8~3 kaBP)

该时期为全新世高温期^[20], 塔里木河流域干旱炎热, 气温升高, 蒸发量增大. 高温引起流域周围山地冰川、积雪消融, 流域水量增加, 致使塔里木河流域的河流相沉积和泛洪堆积作用加强. 塔里木河中游普遍发育2~3层泛洪堆积的亚粘土, 一些地层中出现大量蜗牛化石^[21]. 如在(5 320±86)aBP(图2-C)、(7 240±170)aBP(如图2-D)、(7 370±550)aBP(图2-E)和(6 970±100)aBP(如图2-E)、(7 746±108)aBP(图2-G)和(4 497±97)aBP(图2-G)期间形成的亚粘土层就是河流相冲积淤积或泛洪堆积的地层佐证. 此时克里雅河下游地区在6.5~5.3 kaBP也经历了一次泛滥期^[19], 塔里木河下游罗布泊地区在(7 705±150)aBP前湖面相对稳定, 湖滨沉积了灰黑色泥炭层^[22]. 李吉均研究也认为此时新疆的湖泊出现过高水位现象^[23]. 此时塔里木河中下游地区, 河流汉道增多, 自然堤发育, 主河床由南向北迁移, 促使塔里木河与孔雀河汇合东流, 在7 kaBP左右形成台地^[24]. 在5~4 kaBP间塔里木河流域上游剖面存在生草层和炭化层(4.5 kaBP)^[25], 如克里雅河达玛沟沙丘中的炭化层(4.5 kaBP)和普鲁沙山的生

草层(4.5 kaBP)^[25], 下游库姆塔格沙漠中的红柳根测年为 4.6 kaBP^[26], 甚至少数河流还能进入沙漠腹地, 如中游地区在(3 830±68) aBP(图 2-E)和(3 750±195) aBP(图 2-F)形成的冲积淤积层就是佐证. 从这些河流泛滥事件及湖面高水位现象都证实当时气温较高, 河湖水量增多, 反映塔里木流域水分条件较好. 剖面中相应层段孢粉丰度增加, 水生植物香蒲、芦苇花粉较多(如表 2, 3), 特别是含有大量的萝卜螺壳(*Radix. sp.*)等营淡水生活的腹足类动物遗迹. 但孢粉组合仍以藜科、蒿属、麻黄、禾本科为代表的荒漠草原环境, 如克里雅河上游 8~3 kaBP 地层中孢粉以耐旱成份为主, pH 值处于高值, 气候指标 C 值相对较小, 指示干旱炎热气候环境. 下游孢粉以罗 4 井为例, 地层中麻黄、蒿属、藜科分别占 69.7%, 23.8%, 13.5%, 而禾本科仅占总孢粉的 3.4%^[12], 也反映了较为干旱的气候环境. 尽管冲积、淤积的泛滥事件在 8~3 kaBP 的全新世高温期也达到了相当规模, 但仅在河流沿岸和部分低洼地区形成大面积的固定沙丘.

2.4 全新世晚期(3 kaBP 至今)

约 3 kaBP 前后气候出现短暂降温, 这可能与全球 3.5 kaBP 左右全新世晚期的波动性降温有关. 温度的降低多与蒸发的减少相对应, 致使 3~2 kaBP 期间罗布泊再度充水, 湖水淹没了罗 4 井, 楼兰三角洲汊河纵横, 洼地增多^[27], 并有大量泥炭层堆积, 河湖沿岸及洼地风沙活动有所减弱, 流沙面积趋于缩小, 部分流沙趋于半固定状态. 地层沉积物中化学元素分析表明, C 值增高, Sr/Ba 比值下降(表 2), 孢粉丰度增加, 但仍以麻黄、蒿属、藜科为主, 仅出现少量榆树花粉(表 3), 反映气候环境仍较干旱, 属荒漠、半荒漠或荒漠草原环境.

2 kaBP 以来, 整个塔里木盆地更加干燥, 风蚀风积作用更为强烈, 沙尘暴频繁, 并逐渐发展成为现今的干燥气候环境. 特别是 2 kaBP 以来人类活动的加剧, 对该流域河道变迁和沙漠扩张有着巨大影响. 塔里木河流域风沙堆积使进入三角洲的主河道淤塞, 库鲁克塔格沙漠发育并形成羽毛状沙垅^[28], 罗布泊水体减少, 湖泊向西退缩, 并留下向南退缩的同心纹和“耳轮”构造痕迹^[29]. 此时塔里木河处于大范围瓦解状态, 克里雅河、喀什噶尔河、滑干河、迪那河相继脱离塔里木河. 导致塔里木河水量减少, 使上游和田河两支流合二为一, 泛滥范围缩小. 下游个别地区出现断流现象, 沿岸沙化现象十分严重, 并导致下游基面后退, 即从 2 kaBP 的英苏地区退至 700 aBP 的群克尔地区, 下游入湖水量骤减, 使古楼兰消失, 罗布泊也因水量减少而逐渐缩小变干. 尤其是 1.5 kaBP 以来, 气候继续向干暖方向发展, 使环境进一步退化, 地表径流和降水急剧减小, 风沙活动盛行, 雅丹和干盐湖主要形成于这个时期.

近年来, 塔里木河流域气候进一步干旱化, 加上人类在中游地区不合理开发利用水资源^[30], 使水量进一步减少, 天然植被破坏, 流域沙漠化面积扩大, 仅 1950~1980 年 30 年内, 本区沙漠化面积从 9.05%发展到 23.67%, 上升了 14.62%^[31]. 唐代以来形成的群尔库姆沙漠, 随着自然条件的恶化和人为破坏, 流沙面积大幅度扩大, 部分地段形成新月型沙丘、沙垅; 局部为复合型新月型沙丘链^[32]. 50 年代以来, 沙漠面积扩展更为迅速. 下游区台特马湖, 由于水量减少, 就地起沙, 位于罗布庄 5 km 以东的塔里木河和且末河河床都已被现代沙丘埋没, 流沙埋平了低洼地, 致使湖区较为平坦, 库鲁克塔格沙漠已向南偏西扩展 1.5~31 km. 这都反映近年来塔里木河流域气候环境恶化, 沙漠化发展迅速.

3 沙漠演化与气候变化讨论

从以上讨论看, 塔里木河流域气候总体为干旱性, 表现为冷干-暖干交替变化, 并趋向于进

一步干旱化。塔克拉玛干北地层沉积物主体为亚粘质土和风成细砂夹杂着粉砂土,且地层中未出现古土壤层和钙质淋溶层,体现该地 12 kaBP 以来,气候干燥、降水量较少,地表水体的变化主要与上游高山的冰雪融水量有关,而降水量对该地影响很小。由于该区淋溶性差,使 CaCO_3 含量平均达 17.6% (如表 2)。在高温气候条件下,河水随着流动溶解沿岸的碳酸盐,并在下游水流扩散区因水域蒸发而富集,使 CaCO_3 含量在泛洪沉积物中较高;风成砂中 CaCO_3 含量均值为 13.4% (表 2),比被认为干冷草原环境下堆积的马兰黄土高 (12%)^[33]。Sr/Ba 比值和 P/Mn 比值变化 (表 2),也基本反映了该流域地表处于强氧化的咸水环境,蒸发强烈,气温高。但该区孢粉组合主要是草本植物,喜盐的麻黄类较多,并有藜、蒿等干旱种属,乔木极少 (表 2, 3),属荒漠型和荒漠草原环境。地层不稳定和较稳定矿物含量高,在 72% 以上,重矿物稳定系数较低,小于 0.41 (表 2)。这些分析均表明该流域 12 kaBP 以来气候的干燥性特点。但从塔里木河流域地层沉积物组合看,古风成沙 (细砂) 与亚粘质土形成环境有一定差异。古风成沙 (细砂) 形成环境近似于现代干冷条件下形成的沙丘砂,亚粘质土形成与现代泛洪沉积环境趋同。即前者类似于风沙活动频繁,冷凉干燥的秋冬气候,后者类似于高温干燥的夏季气候。由于冷凉干燥气候不利于生物作用和化学风化的进行,致使化学性质较稳定的湿润气候型性元素 Fe, Mn, Ti, Cr 等在风成沙层中含量相对分散^[34, 35]。当该流域处于高温干燥气候时 (约 8 ~ 3 kaBP), 虽区域降水量仍很少,但高山冰川消融量大增,多数元素以水为介质进行迁移,大范围稳定分布在河湖相沉积中,反映湿润气候的元素相对富集,碳酸钙含量也随水流侵蚀而强烈富集 (表 2),水体呈现半咸水氧化环境。据全新世以来,塔克拉玛干地区的主要湿润期,即洪侵沙漠腹地,河湖水量增大,大多出现在中国的温暖时期;而这一地区古风成砂形成时期和重要古城废弃的时间,大多发生在中国气候变冷时期 (3.5, 1.6 kaBP), 呈现冷、暖的变化^[36]。由于塔里木河流域所处的独特的地理位置,沉积物变化表现为局部河湖附近因水域条件暂时的改变出现流沙的固定和扩大外,大部分地区总趋势为流沙不断出现、扩大的直线式发展趋势,流沙逐步吞食河流旁和盆地周围的绿洲,使该区沙漠面积扩张,荒漠化现象严重。

上述沙漠演化过程与气候变化既受全球气候变化的制约,又深受内陆盆地地貌环境的影响,其成因机制与区域环流特征是密切相关的。塔里木盆地深居内陆、远离海洋、周边高山高原环绕,长途跋涉而来的湿润海洋气流达到该区上空时所含水分已所剩无几,加之控制该盆地的高空气流多为反气旋性,因此形成塔里木盆地降水稀少,蒸发强烈的干旱气候环境。研究表明^[37],末次冰期以来该区在全球气候波动背景下,总的处于干旱状态。当全球气温回升转暖时,由于塔里木盆地周围高大山体和高原对西南暖湿气流和北冰洋冷湿气流向北和向南输送的障碍,盆地内降水较少,高空西风气流也因高原高山阻挡而绕行,仅在盆地四周山地形成一定降水,而盆地内气温增加较快,孕育着较强的热低压,气候炎热、干燥。在整个大气增温和盆地热低压作用加强并向四周山地扩散,使周围山地冰雪的消融和盆地内河流水量增加,沿河地带发育冲积、淤积的泛洪沉积,绿洲扩大,流域范围内沙漠规模缩小甚至固定。如 12 ~ 10 kaBP 的晚冰期的气温回升阶段,气候温凉偏干旱,塔里木河流域广泛发育冲淤积的河流相,尤其是在 8 ~ 3 kaBP 的全新世高温期泛洪作用和洪水事件明显增多,尽管此时流域内有大量河湖水域存在,但地层中孢粉组合仍以蒿、藜、麻黄组成的旱生植被为主,气候环境为干旱性质。当全球气温降低时,盆地周围山地冰川前进扩展,低温抑制了山地冰雪的消融,河流水量减小,流水作用减弱,绿洲缩小,同时盆地内受到西伯利亚-蒙古反气旋飓风系的影响,气候冷凉,为多风

沙活动, 尘暴频繁, 流域内沙丘活动强烈. 如在 8 kaBP 前后新冰期时, 流域内普遍发育风成沙, 流沙面积扩大. 特别是在 3.5 kaBP 前后的新冰期, 世界各地均处于全新世晚期波动性降温阶段. 冰岩芯研究表明, 4 kaBP 左右有一次冷波动^[38], 乌鲁木齐河源保留有(4 080 ±150) aBP 和 2.8 kaBP 时古冰川终碛, 表明天山 4 kaBP 以来至少有两次冰川前进扩张时期^[39], 塔里木河流域气候冷凉、干燥、沙漠迅速扩展. 2 kaBP 以来, 气候急剧变化, 特别是 1.5 kaBP 以来, 气候继续向寒冷、干燥方向发展, 加上人类对水资源的不合理利用的影响, 造成河流迁移改道, 中下游水量枯竭, 使得流域环境恶化, 沙漠化发展极为迅速. 所以, 塔里木河水量的丰缺和迁移方向是影响该流域沙漠演化和发育性质的一个决定性因素. 而对河流水量变化起作用的主要不是当地降水(因为很小), 而是气温, 例如通过分析塔里木河上游各地 1950~1995 年中诸月的平均气温、径流和降水曲线后发现, 温度低, 径流小, 反之径流大. 特别是上游地区月气温高于 20℃时, 径流量便发生突变. 6~8 月河水量大主要是平均气温快速上升导致高山冰川大量融化造成的. 因此夏季的水量占全年的 70%以上. 由此可见, 塔里木河流域风成相和冲积淤积的互层堆积序列, 是在全球气候波动的背景条件下, 叠加了内陆干旱盆地环境效应的影响, 是在总的干燥气候条件下, 冷干和暖干交替的结果. 即使是全球增温时, 塔里木河流域仅在干支流所在地由于四周山地冰雪消融, 河流水量增多, 泛洪堆积广泛;但在河道以外地区却因流域内部仍为干燥气候控制, 不像受东亚季风影响的中国东部沙区那样, 因降水增多而普遍经历了流沙固定生草成壤过程^[40]. 这是塔里木河流域沙漠演化过程和气候变迁模式与我国东部季风区明显不同之处.

致谢 本文所用的¹⁴C 年代、元素分析由中国科学院兰州沙漠研究所胡智育、关有志完成, 颗粒、矿物、孢粉分析由中国科学院兰州冰川冻土研究所张红、马正海、王睿等完成, CaCO₃ 由兰州大学王建民博士测定. 成文过程中得到董光荣研究员和程国栋院士的指导. 作者在此一并致谢.

参 考 文 献

- 1 朱震达, 陆锦华, 江伟静. 塔克拉玛干沙漠克里雅河下游地区风沙地貌的形成发育与环境变化趋势的初步研究. 中国沙漠, 1988, 8(2): 1~4
- 2 周兴佳. 克里雅河入塔里木河的历史考证与克里雅河老河道沙漠化过程研究. 见: 尹泽生等主编. 西北干旱地区全新世环境变迁与人类文明兴衰. 北京: 地质出版社, 1992. 135~142
- 3 奚国金. 近二百年来塔里木河下游水系变迁的探讨. 干旱区地理, 1985, 8(1): 57~58
- 4 周延儒, 赵 济. 南疆塔里木河中游变迁的问题. 新疆维吾尔自治区自然条件(论文集). 北京: 科学出版社, 1959. 60~74
- 5 樊自立. 历史时期塔里木河变迁的研究. 新疆地理, 1979, 2(2): 10~15
- 6 关有志, 李志中. 塔克拉玛干沙漠北部全新世地层中化学元素分布与古气候. 干旱区地理, 1994, 17(3): 9~12
- 7 文启忠, 乔玉楼. 新疆地区 13 000 年以来的气候序列初探. 第四纪研究, 1990, (4): 363~371
- 8 靳鹤龄, 董光荣. 塔克拉玛干沙漠晚冰期以来的环境与气候变化. 中国沙漠, 1994, 14(3): 31~37
- 9 陈广庭, 冯 起. 塔里木盆地沙漠石油公路沿线风沙环境的形成与演变. 北京: 中国环境科学出版社, 1997. 53~54
- 10 周兴佳. 塔里木河流域水系变迁与流域土地沙漠化的初步研究. 见: 尹泽生等主编. 西北干旱地区全新世环境变迁与人类文明兴衰. 北京: 地质出版社, 1992. 158~178

- 11 严富华,叶永烈. 新疆罗布泊 4 井浅坑孢粉组合及其意义. 地质地震, 1983, 5(4): 75~80
- 12 吴玉书. 新疆罗布泊 F4 浅坑孢粉的组合及意义. 干旱区地理, 1994, 17(1): 24~29
- 13 高尚玉,陈渭南,勒鹤龄,等. 全新世中国季风区西北缘沙漠演化的初步研究. 中国科学, B 辑, 1993, 23(2): 204~208
- 14 韩淑,瞿章疆. 北疆巴里坤湖全新世环境变迁序列. 地质科学, 1992, (增刊): 247~260
- 15 施雅风,孔昭宸,王苏民,等. 中国大暖期鼎盛阶段的气候与环境. 中国科学, B 辑, 1993, 23(8): 865~873
- 16 李栓科,张青松. 中昆仑山区距今 17 000 年以来湖面波动研究. 地理研究, 1991, 10(2): 27~37
- 17 Goldsmith J R, Graf D L. Relationship between lattice constants and composition of the Ca-Mg carbonates. *American Mineralogist*, 1958, 42: 84~101
- 18 Tarutani T, Clayton R N, Mayeda T K. The effect of polymorphs and magnesium substitution on oxygen isotope fraction between calcium carbonate and water. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1969, 33: 987~996
- 19 李保生,董光荣,祝一志,等. 末次冰期以来塔里木盆地沙漠、黄土的沉积环境与演化. 中国科学, B 辑, 1993, 23(6): 644~651
- 20 施雅风,孔昭宸,王苏民,等. 中国全新世大暖期的气候波动与重要事件. 中国科学, B 辑, 1992, 22(12): 1 300~1 308
- 21 冯 起,陈广庭,朱震达. 塔克拉玛干沙漠北部全新世环境演变(I). 环境科学学报, 1996, 16(2): 238~243
- 22 中国科学院新疆分院罗布泊科学考察队编著. 罗布泊科学考察与研究. 北京: 科学出版社, 1988. 23~30
- 23 李吉均. 中国西北地区晚更新世以来环境变迁模式. 第四纪研究, 1990, (3): 197~204
- 24 郑本兴. 中国西部末次冰期以来冰川、环境及变化. 第四纪研究, 1990, (2): 101~110
- 25 李保生,董光荣,金 . 塔克拉玛干沙漠南缘普鲁沙山地层剖面的初步研究. 科学通报, 1988, 35(23): 1 815~1 818
- 26 夏训诚,胡文康. 塔克拉玛干沙漠资源与环境. 中国科学, B 辑, 1993, 23(8): 889~896
- 27 曹琿英,夏训诚. 新疆克里雅河下游地貌与第四纪地质的初步研究. 地理科学, 1992, 12(1): 34~43
- 28 阎 顺,穆桂金. 塔里木盆地晚新生代环境演变. 干旱区地理, 1990, 13(1): 1~9
- 29 夏训诚,樊自立. 塔里木河下游土地沙漠化及其防治问题. 见: 中国科学院新疆分院罗布泊科学考察队编著. 罗布泊科学考察与研究. 北京: 科学出版社, 1988. 132~140
- 30 曲耀光. 塔里木河水资源合理开发和利用. 中国科学院兰州沙漠研究所集刊, 1982, 第 2 号: 15~23
- 31 周兴佳. 塔克拉玛干沙漠研究的若干进展. 见: 中国地理学会地貌与第四纪专业委员会编. 地貌过程与环境. 北京: 地震出版社, 1993. 156~158
- 32 周兴佳. 历史时期塔里木盆地沙漠化探讨. 中国沙漠, 1989, 9(3): 15~23
- 33 安芷生,吴锡浩,汪品先,等. 最近两万年中国古环境变迁的初步研究. 见: 刘东生主编. 黄土·第四纪地质·全球变化. 北京: 科学出版社, 1990, (第二辑): 1~26
- 34 任明达. 现代沉积环境概论. 北京: 科学出版社, 1985. 23~25
- 35 冯 起,王建民. 塔克拉玛干沙漠北部全新世环境演变. 沉积学报, 1998, 16(2): 130~135
- 36 任振球. 塔克拉玛干地区干湿波动与全球温湿度变化关系探讨. 中国沙漠, 1994, 14(2): 1~8
- 37 李保生,董光荣,张甲坤,等. 塔克拉玛干沙漠及其以南风成相带划分与认识. 地质学报, 1995, 69(1): 78~92
- 38 姚檀栋. 敦德冰芯记录与过去 5 ka 温度变化. 中国科学, B 辑, 1992, 22(10): 1 089~1 093
- 39 蒲庆余. 末次冰期以来中国自然环境变迁及其与全球变化的关系. 第四纪研究, 1991, (3): 9~19
- 40 董光荣,陈惠忠,王贵勇,等. 150 ka 以来中国北方沙漠、沙地演化与气候变化. 中国科学, B 辑, 1995, 25(12): 1 303~1 312