

# 中国西部晚中新世以来气候演化初探

## — 以甘肃临夏红色盆地中 $\text{Cl}^-$ 含量变化为例<sup>①</sup>

奚晓霞<sup>1</sup> 穆德芬<sup>2</sup> 方小敏<sup>2</sup> 李吉均<sup>2</sup>

1(兰州大学大气科学系 兰州 730000) 2(兰州大学地理系 兰州 730000)

**摘要**  $\text{Cl}^-$  是封闭湖盆中反映气候变化的敏感指标。临夏盆地晚新生代地层  $\text{Cl}^-$  含量变化表明,气候的长期演化呈现明显的阶段性与周期性,在约 6.3 Ma 气候突然产生显著的由湿变干,并于 5.3~4.5 Ma 达到极端干旱,其干旱程度是第四纪早期的 33 倍,低频上,气候呈现出约 40 万年的干湿波动,在晚中新世与早上新世,与同周期的全球热冷(凉)波动相对,而在第四纪早期,则与冷暖相对,可能反映亚洲季风系统于晚上新世才开始逐步形成,并于第四纪初建立,3.4 Ma 开始强烈隆升的青藏高原可能与此密切相关。

**关键词** 中国西部 晚新生代 氯离子 气候演化

**第一作者简介** 奚晓霞 女 37 岁 讲师 环境大气化学

### 1 前言

临夏盆地位于黄土高原与青藏高原东北边缘的接壤处,属大型陇中盆地的一部分(图 1)。盆地中堆积了巨厚的以湖相为主的新生代沉积。据古地磁等综合测年分析,盆地地层形成于约 30~0 Ma,其中仅在 3.4 Ma 左右有部分地层缺失,其余均为连续沉积<sup>[3,4]</sup>,是研究气候变化的理想地点。早先的研究表明, $\text{Cl}^-$  是封闭湖盆中对流域气候变化非常敏感的指标,而且具有反映气候变化的范围宽(从湿润气候到极端干旱气候)和受侵蚀原岩类型影响小等优点<sup>[10,5,7]</sup>, $\text{Cl}^-$  主要来源于大气和流域中原岩风化,热液成因的  $\text{Cl}^-$  可能也是部分来源<sup>[3]</sup>。不管成因如何, $\text{Cl}^-$  最终汇集到湖盆中,以氯的阴离子或络阴离子化合物形式存在,具有很高的溶解度。一般地,随流域气候变湿,湖水位上升,氯化物盐类多溶于水,仅少量  $\text{Cl}^-$  保存于湖底沉积物中(多为粘土矿物吸附,少量呈类质同相或存在于孔隙水中)。如果流域气候变干,湖水浓缩,水中  $\text{Cl}^-$  浓度增大。相对来说,有更多的  $\text{Cl}^-$  以被粘土吸附、类质同相、阴离子交换,甚至以卤化物矿物形式被固定在湖底沉积物中<sup>[10,2]</sup>。因此,测定湖相沉积物中  $\text{Cl}^-$  的含量就可反演当时流域内的古气候状况,而且主要是干湿变化状况。

早先我们分析了临夏盆地第四纪湖相地层中  $\text{Cl}^-$  的含量变化及其气候意义,发现  $\text{Cl}^-$  含量在本区对气候有很好的指示性<sup>[7]</sup>,因而本文在原有研究的基础上集中分析和讨论临夏盆地红层最上部晚中新世—早上新世湖相地层中  $\text{Cl}^-$  含量的变化及其所反映的气候长期演化和极端干旱气候,这对认识我们今天的干旱气候变化规律具有积极意义。

### 2 地层概况及年代控制

本文研究主要基于临夏盆地东乡县毛沟剖面进行。毛沟剖面总厚 443 m,全为第三纪红层,由晚渐新世他拉组至早上新世何王家组共七个地层组 31 个模式层序组成<sup>[3]</sup>(图 2a)。本次实际仅分析了东乡组上部至何王家组,即层序 27~31 地层中的  $\text{Cl}^-$  变化(图 2c)。同时对临夏县王家山剖面中的积石组也进行了分析(层序 32~33)(图 2a)。东乡组上段为紫红色泥岩,夹大量近似韵律的灰白色—青灰色泥灰岩条带,柳树组下段(层序 28)为褐黄色泥岩,上段(层序 29)以粉砂质泥岩—粉砂岩为主,含大量钙结核。何王家组底部为细砾岩(层序 30),中、上部为含石膏的块状泥岩(层序 31)(图 2a)。在毛沟剖面以外,可见第三纪红层之上为厚层的巨砾岩层(积石组)(层序 32~33),两者之间为不整合接触(图 2a)。

① 国家自然科学基金委及国家八五攀登青藏项目联合资助项目  
收稿日期: 1996-06-15 日 收修改稿日期: 1997-06-15

巨砾岩之上为第三纪东山组湖相粉砂沉积(层序 34~36),之上为黄河最高阶地砾石层(井沟头组)(层序 37),最上为厚层的连续至今的黄土沉积(层序 38~41)(图 2a)。据古地磁测年,在积石组至黄土地层中发现了标准极性年表中所有的主要磁极性倒转或事件,测得积石组底部年龄为  $3.4 \text{ Ma}^{[3]}$ (图 2b)。何王家组主要跨越了吉尔伯特世的中、下部,发现了其中的 Nunivak, Sidufjall 和 Thvera 事件,形成于距今约  $5.4 \sim 4.0 \text{ Ma}^{[3]}$ 。柳树组跨越了磁极性第 5~7 期,形成于  $7.0 \sim 5.4 \text{ Ma}$ ,而东乡组形成于  $7.0 \sim 11.9 \text{ Ma}$  以前<sup>[3]</sup>(图 2b)。除磁性地层以外,同时还进行了大量生物地层,和绝对年代研究,例如  $^{14}\text{C}$  TL OSL 和裂变径迹年代测定<sup>[3,4,6]</sup>,它们所给出的年代与古地磁年代基本相同(图 2a),但古地磁测年定出了地层年龄的细节(图 2b)。

## 4 Cl 含量变化与气候演化

图 2 和表 1 总结了临夏盆地晚中新世以来 Cl 含量在地层中的变化。可以看出,Cl 含量呈现非常明显的阶段性变化和近周斯性变化,变化幅度非常大,以  $340 \text{ m}$ ,  $442 \text{ m}$ (不整合面所在)及  $478 \text{ m}$  为界,可将 Cl 含量变化大致划分成三个大的阶段,从早到晚依次为晚中新世较湿润期、最晚中新世-早上新世干旱期、晚上新世过渡期和早第四纪较湿润期(图 2)。在较湿润期中,Cl 含量普遍很低,平均约为  $0.13 \sim 0.21 \text{ m. \%}$ ,最大也仅变化于  $0.35 \sim 0.38 \text{ m. \%}$ ,变化幅度小,仅为  $0.26 \sim 0.28 \text{ m. \%}$ (标准偏差为  $0.04 \sim 0.05 \text{ m. \%}$ )(图 2,表 1)。相比之下,干旱期中 Cl 含量普遍大幅增加,平均为  $1.78 \text{ m. \%}$ ,而且变化幅度非常大,达  $25.27 \text{ m. \%}$ (标准偏差达  $4.05 \text{ m. \%}$ ),两者分别高达较湿润期的 10 倍和 93 倍左右(标准差达 90 倍),如不包括其中的极端干旱期,其平均值及变幅(标准差)仍高达  $0.56 \sim 0.58 \text{ m. \%}$  和  $2.74 \sim 5.19 \text{ m. \%}$ ( $0.52 \sim 0.94 \text{ m. \%}$ )(图 2,表 1),两者分别是较湿润期的约 6 倍和 15 倍(16 倍)。干旱期中还可以  $371 \text{ m}$ ,  $382 \text{ m}$  和  $415 \text{ m}$  高度为界划分出一个明显的较湿润期( $371 \sim 183 \text{ m}$ )和一个极端干旱期( $383 \sim 415 \text{ m}$ ),后者 Cl 含量平均达  $4.3 \text{ m. \%}$ ,最高达  $25.41 \text{ m. \%}$ ,而且变幅极大,达  $25.14 \text{ m. \%}$ (标准偏差达  $6.29 \text{ m. \%}$ )(图 2,表 1),两者分别是较湿润期的约 25 倍和 93 倍(标准差达 140 倍),比一般干旱期(即前、后干旱期;见图 2 和表 1)也分别高出约 8 倍和 6 倍。过渡期中 Cl 含量变化介于干旱期和较湿润期之间(图 2,表 1)。

如果将 Cl 含量变化转化到古地磁年表中,可以大致看出快速的 Cl 含量变化叠加于约 40 万年的干湿波动周期上(图 3a),并与反映全球水量(温度)变化的深海氧同位素冷热波动(图 3b)有很好的对比,即干与炎热相对,湿与冷或凉相对,说明至少晚中新世-早上新世西北无现代形式的季风存在,也即无现代高度的青藏高原存在。

约  $8 \sim 6.3 \text{ Ma}$  为气候较湿润时期,气候波动较小(图 3a,表 1)。从  $6.3 \text{ Ma}$ (磁极性 Epoch-6 见图 2)开始,Cl 含量突然从平均  $0.21 \text{ m. \%}$  猛增至平均  $0.56 \text{ m. \%}$ ,增幅近 3 倍以上,而且伴有强烈的波动,波幅是早期湿润期的约 11 倍(表 1),表明气候突然转入一个不稳定的干旱期(图 3a)。在世界

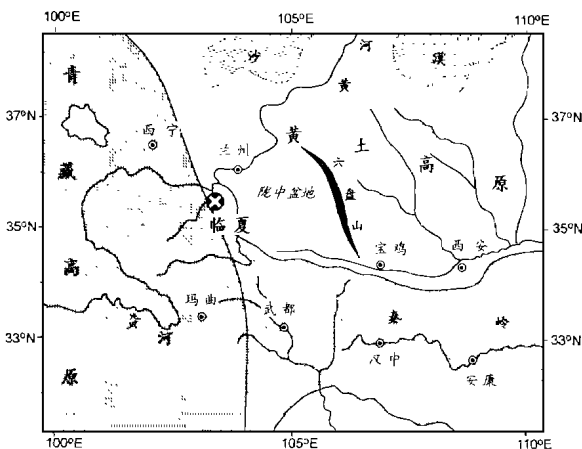


图 1 研究区位置和地貌特征示意图

Fig. 1 Diagram showing the locality and geomorphology of the studied region

## 3 样品的采集与分析

采样间隔在东乡组-柳树组中为  $0.5 \sim 1 \text{ m}$ ,在何王家组中为  $1 \text{ m}$ ,分辨率分别介于  $12 \sim 25 \text{ ka/m}$  和  $17 \sim 29 \text{ ka/m}$ 。样品经风干、研磨均匀后,称取  $10 \text{ g}$ ,用  $50 \text{ ml}$  蒸馏水浸取,通过离心得到待测液,然后用  $\text{AgNO}_3$  标准溶液采用标准容量分析方法<sup>[1]</sup>,测得 Cl 的含量。

表 1 晚中新世以来临夏盆地地层中 Cl<sup>-</sup> 含量变化特征

Table 1 Statistical characteristics of variation of anion chlorine in the Miocene- Quaternary stratigraphy in the Linxia Basin

	晚中新世 湿润期	前干旱期	最晚中新世 湿润期	极端干 旱期	后干旱期	干旱期	本次研究 剖面平均	晚上新世 过渡期	第四纪较 湿润期* *
高度 (m)	(300- 340)	(340- 371)	(371- 383)	(383- 415)	(415- 442)	(340- 442)	(300- 442)	(443- 478)	(478- 555)
年龄 (Ma)	~ 7.8- 6.3	6.3- 5.6	5.6- 5.3	5.3- 4.5	4.5- 4.0	6.3- 4.0	~ 7.8- 4.0	3.4- 2.5	~ 2.4- 1.7
平均	0.21 <sup>#</sup>	0.56	0.26	4.30	0.58	1.78	1.15	0.27	0.13
最小	0.12	0.14	0.19	0.27	0.18	0.14	0.12	0.14	0.07
最大	0.38	2.88	0.49	25.41	5.37	25.41	25.41	1.32	0.35
变幅	0.26	2.74	0.30	25.14	5.19	25.27	25.29	1.18	0.28
标准差	0.05	0.52	0.09	6.29	0.94	4.05	3.23	0.24	0.04

\* 单位均为 m. %

\*\* 资料来源于奚晓霞等, 1996<sup>[7]</sup>

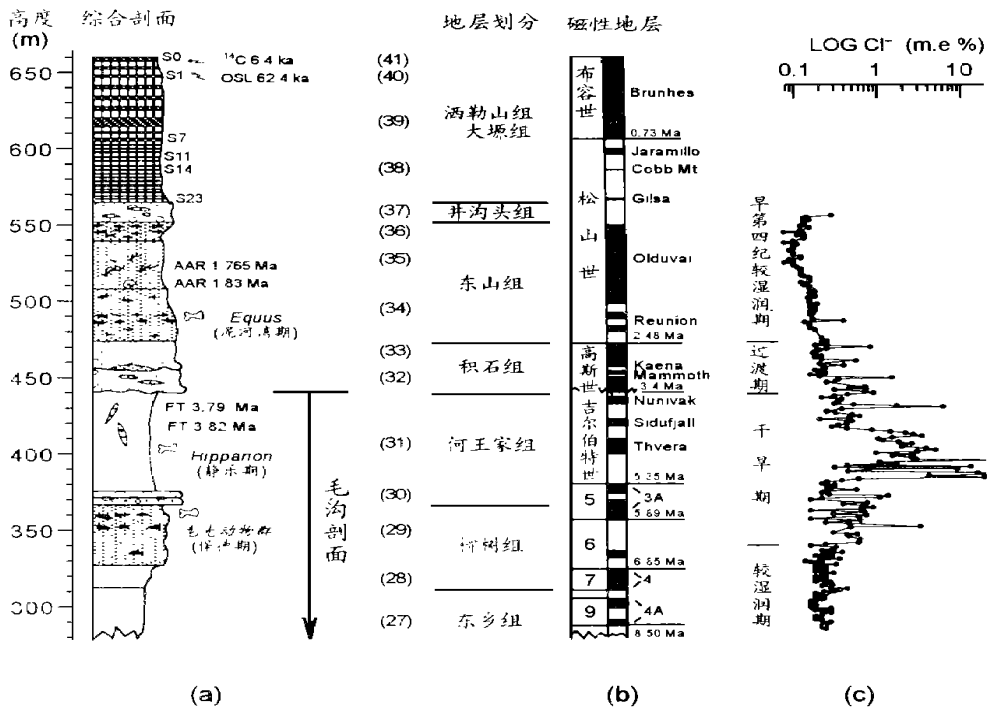


图 2 临夏盆地晚新生代地层 (a) 古地磁测年 (引自李吉均等<sup>[3]</sup>, 1995, 并依最新古地磁量数据略为修改) (b) 及氯离子含量的变化 (c)

Fig. 2 Late Cenozoic stratigraphy (a), observed magnetic polarity (b) and variation of content of anion chlorine (c) in the Linxia Basin

其它许多地区普遍发现在古地磁 Epoch- 6 期有显著的气候突变, 在几大海洋沉积物中均有记录, 称为 Epoch- 6 事件<sup>[18, 14]</sup>。在南亚和非洲的地层中, 约 7 Ma 气候突变从早先的森林环境转变成其后的草原

环境<sup>[13, 16, 15]</sup>,并被解释为高原当时已隆升到现代高度下激发的印度季风所为<sup>[16]</sup>。临夏盆地 Epoch-6期间的 Cl 突变,以及其它记录这一时期指标的气候突变可能与南亚的这一气候事件对比,因而具有全球性<sup>[8]</sup>。从我们的记录(图 3a)与西南太平洋高分辨率氧同位素记录(图 3b)的对比看,临夏前干旱期对应于氧同位素指标的一个大暖热期(约 6.3~ 5.6 Ma),其中较为湿润的短暂时期对应于大暖热期中的相对短暂的较冷时期(图 3),它表明南亚的季风在当时至多是很弱的海陆季风,而不象当今的印度季风,可以强烈的影响本区气候。因此,仅用南亚一隅的气候变化来推断当时高原已隆升到现代的高度

是不合适的。

约 5.6 Ma, Cl 含量突然降低到近似于干旱期以前较湿润期的水平,平均为 0.26 m.e.%, 变幅小,并持续至约 5.3 Ma(图 3a,表 1),代表了一个相对显著的湿润期。据深海氧同位素记录研究,全球温度和海平面在这一时期产生最晚中新世以来一次最明显的下降<sup>[11]</sup>,南极冰盖迅速显著扩展<sup>[17]</sup>,使得晚中新世以来由于构造作用不断隆起的地中海西部最终由于这次全球海面大下降而与大西洋隔绝,蒸干地中海海水,形成巨厚的主(下)盐层<sup>[12]</sup>(图 3c)。

约 5.6 Ma, Cl 含量突然急增近 60倍,并持续至约 4.5 Ma,形成临夏地区的极端干旱气候时期

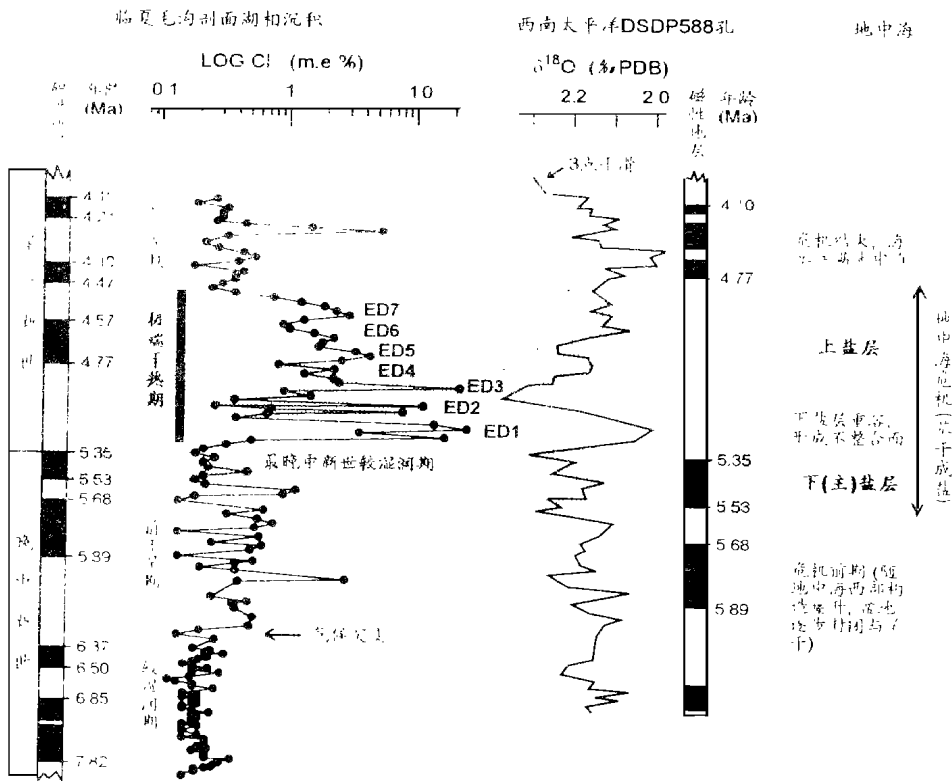


图 3 晚中新世 - 早上新世期间临夏盆地 Cl 含量所揭示的气候变化及其与西南太平洋高分辨率氧同位素气候记录 (Hodell et al.<sup>[11]</sup>,1986)及地中海事件 (Hsu et al.<sup>[12]</sup>, 1977)的对比。它表明无论是临夏盆地还是地中海均受到全球气候变化的影响

Fig 3 Variation of anion chlorine since Middle Miocene in the Linxia Basin and its comparison with the high resolution oxygen isotope climate record from the South- West Pacific Ocean (Hodell et al., 1986)and Mediterranean Salinity Crisis(Hsu et al., 1977).

(Extreme Drought,简称 ED)(图 3a,表 1)。其间气候极不稳定,产生快速大幅度的波动,波幅达 25.14

m. % ,即最大值是最小值的 94 倍(表 1)。如果平滑掉短暂的快速波动,极端干旱期进一步可以划分成七个亚期,第一亚期为 5.3~ 5.2 Ma, Cl<sup>-</sup> 含量为晚中新世至上新世期间的最大值,平均达到 15.01 m. % ,高出全剖面平均值(1.15 m. % )约 3 倍(见图 3a 中 ED1),代表了极端干旱期中的最干旱时期。深海氧同位素记录表明这一时期全球进入一个显著的暖热时期<sup>[17,11]</sup>,海面大幅上升,海水重新注入地中海,溶解早先的盐层,形成地中海中显著的大范围的不整合面<sup>[12]</sup>(图 3b, c)。

5.2~ 5.0 Ma, Cl<sup>-</sup> 含量急剧减少,平均为 2.71 m. % (图 3 中 ED2),全球温度和海面再度急剧下降(下降程度是晚中新世—早上新世时期最醒目的)<sup>[11]</sup>(图 3b),地中海再度与大西洋隔绝,形成上盐层<sup>[12]</sup>(图 3c)。

ED3- ED7(约 5.0~ 4.5 Ma)是一个 Cl<sup>-</sup> 含量普遍较高而变幅相对较小、频率相对较大的时期(图 3a),基本上反映了一个相对较长的持续极端干旱时期,它可与世界各地广泛记录的早上新世大暖期<sup>[17,11,9]</sup>(图 3b)进行很好的对比,全球冰量的减少使得海面上升,大西洋海水重返地中海,并以此结束了“地中海盐化危机”<sup>[12]</sup>(图 3c)。

张彭熹在分析青藏高原盐湖演化时曾指出上新世是柴达木盆地第一成盐期<sup>[5]</sup>。现在看来,临夏为 5.3~ 4.5 Ma 的极端干旱期是这一成盐期间气候特征和年代的详细记录。

极端干旱期后,本区气候仍维持在一个较干旱的水平面上,但与极端干旱相比,气候已大为湿润(图 3a,表 1)。世界气候在大暖期后,也再度产生明显降温<sup>[17,12]</sup>(图 3b)。

最后必须指出的是,毛沟剖面晚中新世至早上新世地层中 Cl<sup>-</sup> 含量尽管有干旱与较湿润之分,但总平均仍达到 1.15 m. % ,其中较湿润期达到 0.2 m. % 以上,比起第四纪早期 Cl<sup>-</sup> 的平均含量 0.13 m. % 仍高出许多(表 1,图 2),表明第三纪晚期本区总的背

景是干旱,结合氧同位素记录分析,这种干旱是在全球较温暖的背景下进行,因此干湿变化可理解为干热和湿凉的变化。而在第四纪早期,Cl<sup>-</sup> 指标的干湿变化已与冷暖相对,并揭示 1.7~ 1.8 Ma 为本区第三纪以来最湿时期(图 2),指示了本区现代形式季风的存在<sup>[7]</sup>。而在第四纪与早上新世之间,即过渡期,Cl<sup>-</sup> 含量呈现明显的逐步下降趋势(图 2,表 1),

因此,可以推断亚洲季风系统的建立可能始于晚上新世,它可能是最近揭示的 3.4 Ma 青藏高原开始首次强烈隆起<sup>[4]</sup>的同时相伴产物。

## 5 结论

(1)晚中新世—早上新世临夏地区气候总的较为干旱,气候的变化呈现阶段性与周期性。

(2)气候于约 6.3 Ma 突然由较湿润变干,并于 5.3~ 4.5 Ma 达到极端干旱,其程度是第四纪早期的 33 倍。在干旱与极端干旱时期,气候的波动性与不稳定性显著高于较湿润时期,两者之差达 93 倍。

(3)低频上本区气候以约 40 万年周期进行干湿变化,并可与全球相似周期的热冷(凉)变化对比,即干与热、湿与冷(凉)搭配,无现代形式的季风形成。

(4)晚上新世可能为亚洲季风系统逐步形成时期,并于第四纪开始(2.5 Ma)稳定建立,形成干冷与温暖的水热搭配,这一水热形式的变化可能与 3.4 Ma 开始的青藏高原强烈隆升密切相关。

(5)Cl<sup>-</sup> 含量是干旱区湖盆中气候干湿变化的敏感指示器。

## 参 考 文 献

- 1 中国科学院南京土壤研究所.土壤理化分析.上海:上海科学技术出版社,1983.211~ 222
- 2 刘英俊,曹励明,李兆麟等.元素地球化学.北京:科学出版社,1984.481~ 489
- 3 李吉均,方小敏,朱俊杰等.临夏盆地新生代地层古地磁年代与模式序列.青藏高原形成演化.环境变迁与生态系统研究.北京:科学出版社,1995.41~ 54
- 4 李吉均,方小敏,马海州等.晚新生代黄河上游地貌演化与环境变迁.中国科学(D),1996,26(4):316~ 322
- 5 张彭熹.青藏高原盐湖几个有关地质问题的讨论.见:中国科学院盐湖研究所编青海柴达木盆地晚新生代地质环境演化.北京:科学出版社 1986.50~ 58
- 6 陈怀录,方小敏,李吉均等.临夏盆地石膏裂变径迹年龄的测定及形成时代探讨.见:青藏项目专家委员会编.青藏高原形成演化.环境变迁与生态系统研究.北京:科学出版社,1995.73~ 76
- 7 奚晓霞,穆德芬,方小敏,李吉均.早更新世东山古湖氯离子含量变化与季风演化.冰川冻土,1996,18(2):125~ 130
- 8 Cerling T E, Wang Yang, Quade J. Expansion of C4 ecosystems as an indicator of global ecological change in late Miocene. Nature, 1993, 361: 344~ 345
- 9 Crowley T J. Modeling Pliocene warmth. Quaternary Science Reviews, 1991, 10: 275~ 282
- 10 Hakanson L, Jansson M. Principles of lake sedimentology. Berlin: Springer-Verlag, 1983. 60~ 95

- 11 Hodell D A, Elmstrom K M, Kennett J P. Latest Miocene benthic &  $^{18}\text{O}$  changes global ice volume, sea level and the "Messinian salinity crisis". *Nature*, 1986, 320: 411-414
- 12 Hsu K J, Montadert L, Bernouilli D. History of the Mediterranean salinity crisis. *Nature*, 1977, 267: 399-403
- 13 Krishnamurthy R V, Bhattacharya S K, Kusumgar S, Palaeoclimatic changes deduced from  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  and C/N ratios of Karewa lake sediments, India. *Nature*, 1986, 323: 150-152
- 14 Loutit T S, Keigwin Jr L D. Stable isotopic evidence for latest Miocene sea-level fall in the Mediterranean region. *Nature*, 1982, 300: 163-166
- 15 Morgan M E, Kingaton J D, Marino B D. Carbon isotopic evidence for the emergence of C4 plants in the Neogene from Pakistan and Kenya. *Nature*, 1944, 367: 162-165
- 16 Quade J, Cerling T E, Bowman J R. Development of Asian monsoon revealed by marked ecological shift during the latest Miocene in northern Pakistan. *Nature*, 1989, 342: 163-166
- 17 Shackleton N J, Kennett J P. Late Cenozoic oxygen and carbon isotopic changes at DSDP Site 284: Implications for glacial history of the northern hemisphere and Antarctica. *Init. Rep. DSDP*, 1975, 284(29): 801-807
- 18 Vincent E, Killingley J J, Berger W H. The magnetic Epoch 6 carbonate shift, a change in the ocean's  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  ratio: 6.2 million years ago. *Mar. Micropaleontol.*, 1980, 5: 185-203

## Climatic Change Since the Late Miocene in West China: Evidence from Anion Chlorine in the Linxia Red Basin

Xi Xiaoxia<sup>1</sup> Mu Defen<sup>2</sup> Fang Xiaomin<sup>2</sup> Li Jijun<sup>2</sup>

1(Department of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000)

2(Department of Geography, Lanzhou University, Lanzhou 730000)

### Abstract

Anion Chlorine in inland lakes is a common indicator highly sensitive to climatic change. The variation of the content of anion chlorine in the Late Cenozoic stratigraphy in the Linxia Basin, Gansu Province, China, demonstrates that climate changes clearly in phase (step) and periodicity. The climate was shifted rapidly at about 6.3 Ma from relatively humid to very dry environments, and reached an extreme dry environment between 5.3 Ma and 4.5 Ma, with drought degree 33 times the early Quaternary. In low frequency, climate presents ca. 400 ka periodicity of dry-humid fluctuation, matching global hot-cold (cool) fluctuation in similar periodicity in the Late Miocene-Early Pliocene; while matching global cold-warm fluctuation in the early Quaternary. The change of moisture-heat regime from the Late Pliocene to the early Quaternary may suggest that the Asian monsoon system began to form gradually since the Late Pliocene and was completely established in the early Quaternary. The strong whole uplift of the Tibetan plateau at ca. 3.4 Ma may be responsible for such change.

**Key words** West of China Late Cenozoic Anion Chlorine climatic Change