

西藏湖泊正构脂肪酸分布特征及对古气候重建的启示

凌媛^{1,2}, 郑绵平^{2*}, 张永生², 孙青³, 张成君⁴

1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037
2. 中国地质科学院矿产资源研究所, 国土资源部盐湖资源与环境重点实验室, 北京 100037
3. 国家地质实验测试中心, 北京 100037
4. 兰州大学地质科学与矿产资源学院, 兰州 730000

摘要 脂肪酸广泛存在于各种地质载体,能够记录母源生存环境的相关信息。但关于脂肪酸的具体来源及分布特征的古气候意义尚不明确,导致脂肪酸相关指标在古气候重建中的应用较少。通过分析西藏干旱-半干旱区跨越3个气候带的湖泊和水洼的表层沉积物中的正构脂肪酸,揭示中、长链及部分短链正构烷脂肪酸的来源与正构烷烃的来源有关,可以相互对比验证。建立了指标与古气候要素的相关关系,发现正构脂肪酸含量、碳优势(CPI)指标随温度升高、降水增多而升高。提出了可用于古气候重建的中链占比(R-FA)指标,R-FA与年均气温和降水量成正比。

关键词 西藏干旱区;湖泊表层沉积物;正构脂肪酸;古气候重建

类脂化合物例如正构脂肪酸和正构烷烃,广泛存在于土壤、沉积物、泥炭和黄土等各种地质载体中,化学性质稳定,在埋藏过程中不易发生降解,能够记录母源生存环境的相关信息^[1-3]。由于湖相沉积的复杂性,类脂物代用指标常受多种因素影响,

且在不同区域的影响因子不同。在古环境重建中很难将多种因素区分开,这使得类脂物指标的解释变得复杂。现代过程研究为理解类脂物指标与气候、环境要素的关联提供了有效的途径。

大多数现代过程研究主要针对正构烷烃,而关

收稿日期:2019-04-18;修回日期:2019-08-21

基金项目:中国博士后科学基金(2017M620852),中国地质调查项目(DD20160054),国家重点研发计划项目(2017YFC0602806)

作者简介:凌媛,博士,研究方向为有机地球化学,电子信箱:lingyuan0902@126.com;郑绵平(通信作者),中国工程院院士,研究员,研究方向为盐湖学,电子信箱:zhengmp2010@126.com

引用格式:凌媛,郑绵平,张永生,等. 西藏湖泊正构脂肪酸分布特征及对古气候重建的启示[J]. 科技导报, 2020, 38(8): 77-86; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2020.08.009

于脂肪酸的很少。前人做了很多关于正构烷烃的工作,基本明确了正构烷烃的来源。短链正构烷烃主要来源于细菌、藻类等,以 $C_{17}\sim C_{19}$ 为主碳峰,没有明显的奇偶优势^[4-5],沉水和浮水植物来源的正构烷烃碳链多为中等链长 $C_{21}\sim C_{25}$ ^[4-7],而长链正构烷烃主要来源于陆生高等植物,以 C_{27} 、 C_{29} 或 C_{31} 为主峰,具有明显的奇偶优势^[8]。但是,关于脂肪酸的具体来源及分布特征的古气候意义尚不明确。植物学研究结果表明在生物合成过程中,正构脂肪酸和正构烷烃均来源于同一个前体,即正烷基酰基载体蛋白,例如, nC_{32} 正构脂肪酸和 nC_{31} 正构烷烃是由 nC_{32} 正烷基酰基载体蛋白生物合成而来^[9]。因此,正构脂肪酸与正构烷烃的来源可能相同。因此,本文将正构脂肪酸和正构烷烃的含量及特征进行对比,进一步研究正构脂肪酸的来源。

已有一些学者利用脂肪酸含量指标进行古气候重建,获得了较好的效果,证明其可用于古气候研究^[10-12]。在青藏高原植被稀少地区的湖泊沉积物中,正构脂肪酸的相对含量高于正构烷烃^[13-14],易于提取及分析,因此使用正构脂肪酸可能更具优势。由于指标的多解性以及受生物降解、区域差异的影响,需要结合现代过程调查,查明指标的适用

性及响应气候变化的机制,在系统的现代过程研究的基础上,逐步建立适用于湖泊沉积的半定量甚至定量指标。因此,本文调查西藏湖泊和水洼的表层沉积物,研究气候环境要素对于西藏干旱-半干旱区脂肪酸含量指标的影响,为今后在干旱-半干旱地区利用脂肪酸指标进行古气候重建提供参考。

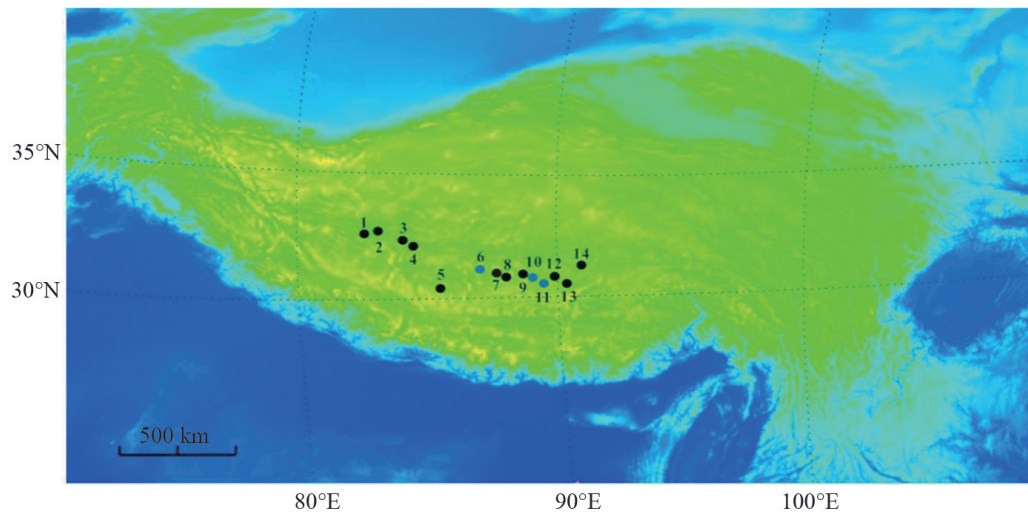
1 材料和方法

1.1 研究区概况和样品采集

研究区位于青藏高原西南部(图1),跨越了3个气候带(北羌塘寒带干旱气候区、南羌塘寒带半干旱气候区和那曲亚寒带半湿润气候区)。年均降水从60~500 mm,最大降水量出现在东部安多县,最小降水量在西部的日土县。年均温度 $-1\sim 3^{\circ}\text{C}$ 。年均相对湿度和年均蒸发量分别为31%~52%和1749~2486 mm。本研究组于2012年6月在西藏地区采集了14个湖泊和水洼的表层沉积物,采样深度约10 cm,运回实验室并保持干燥。具体采样位置信息见表1。

1.2 实验方法

所有的测试均在国家地质实验测试中心完



1—别若则错;2—达热布错;3—普当错西北小湖;4—吓噶错;5—洞错;6—吴如错南水洼;7—色林错西小湖;8—色林错南小湖;
9—班公错东小湖;10—班公错东水洼;11—拉姆措西水洼;12—热次错西小湖;13—索热错;14—错鄂湖

图1 采样点位置

表1 湖泊和水洼的位置及相关参数

编号	湖泊或水洼名	纬度	经度	海拔/m	水温/°C	电导率/($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	溶解氧/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	pH值	年均降水量/mm	年均气温/°C	年均蒸发量/mm	相对湿度/%
1	别若则错	32.41°N	82.97°E	4418	10.1	815	6.0	9.2	464.8	2.7	1750	51.7
2	达热布错	32.44°N	83.21°E	4449	16.3	479	4.8	8.6	437.8	2.0	1934	48.7
3	普当错西北小湖	32.36°N	83.70°E	4383	11.4	504	6.3	11.1	340.7	1.8	1993	44.2
4	吓噶错	32.27°N	83.84°E	4378	21.6	503	7.7	9.0	346.9	1.6	1998	44.4
5	洞错	31.18°N	84.68°E	4410	19.8	484	7.0	10.3	368.9	1.5	2006	44.9
6	吴如错南水洼	31.84°N	88.08°E	4782	17.9	694	8.4	10.0	368.9	1.5	2004	44.9
7	色林错西小湖	31.79°N	88.45°E	4562	16.1	274	5.9	9.5	361.9	1.2	2060	43.8
8	色林错南小湖	31.54°N	88.87°E	4586	17.1	437	5.3	8.8	368.5	0.8	2081	43.7
9	班公错东小湖	31.62°N	89.60°E	4608	12.9	311	5.6	8.5	367.7	0.7	2099	43.3
10	班公错东水洼	31.61°N	89.61°E	4657	17.4	65	5.1	9.1	235.6	0.7	2236	38.1
11	拉姆措西水洼	31.47°N	89.81°E	4596	7.8	11	5.9	9.8	189.5	0.7	2245	35.3
12	热次错西小湖	31.49°N	89.92°E	4694	12.6	49	6.2	9.8	196.7	0.7	2248	35.7
13	索热错	31.40°N	90.90°E	4598	12.8	2	5.7	9.6	210.5	0.6	2271	37.3
14	错鄂湖	31.57°N	91.53°E	4541	18.6	35	5.2	9.3	212.0	-0.1	2284	37.8

成。将沉积物样品中的细根和砾石去除,并过40目筛。每个样品用二氯甲烷:甲醇(体积比9:1)索氏抽提48 h。使用氨基SPE小柱分离各目标组分,用正戊烷淋洗饱和和烃组分,二氯甲烷:异丙醇(体积比2:1)淋洗中性组分,乙酸:乙醚(体积比4:96)淋洗酸性组分。按照赵江涛等^[15]的方法,将酸性组分用氮气吹干后用盐酸化甲醇酯化。酯化后的样品中加入5%氯化钠溶液,用正己烷萃取样品3次合并。将萃取溶液用银离子硅胶柱分离,用正己烷:二氯甲烷(体积比4:1)和二氯甲烷:乙酸乙酯(体积比4:1)淋洗饱和脂肪酸甲酯与不饱和脂肪酸甲酯,最后将饱和脂肪酸甲酯组分浓缩待上机。

采用气相色谱-质谱仪(GC-MS,美国安捷伦公司,型号QP2010)分析脂肪酸,色谱柱为DB-

1MS毛细管柱(30 m×0.25 mm×0.25 μm)。载气为氦气,流速为1 mL/min,进样口温度为280°C。柱箱的初始温度为60°C,升温速率为3°C/min,升至320°C再恒温20 min。无分流进样,进样量为1 μL 。采用全扫描模式,用 $\text{C}_{16}\sim\text{C}_{22}$ 饱和脂肪酸甲酯标准定量正构脂肪酸的含量。

1.3 气候环境要素数据

气候要素数据来源于<https://en.climate-data.org>网站和中国气象局官方网站(<http://data.cma.cn>)。利用ArcGIS软件插值获得各采样点的气候数据,包括年均降水(MAP)、年均气温(MAT)、年均蒸发量(MAE)和年均相对湿度(MAH)(表1)。利用水质测试仪现场测定环境要素数据,包括水温、电导率、溶解氧和pH值。

2 结果与讨论

2.1 正构脂肪酸的分布特征和来源

西藏干旱-半干旱区表层沉积物中的正构脂肪酸含量在 2.4~35.9 $\mu\text{g/g}$ 。西藏地区表层沉积物中的正构脂肪酸的碳数范围在 C_{12} ~ C_{34} ，有的样品中 C_{12} 、 C_{13} 、 C_{31} 、 C_{32} 、 C_{33} 和 C_{34} 由于含量太低无法准确定量。所有的样品均存在足够定量的 C_{14} ~ C_{30} ，分布主

要呈双峰模式，短链主要以 C_{16} 占主导，长链主要以 C_{24} 占主导，具有明显的偶奇优势（图 2）。一般认为，短链脂肪酸（ C_{14} ~ C_{18} ）来源于藻类、沉水植物和陆生高等植物，中链脂肪酸（ C_{20} ~ C_{24} ）来源于浮水或沉水植物，长链脂肪酸（ C_{26} ~ C_{32} ）主要来自陆生高等植物^[6-7]。但是，通过对脂肪酸含量的主成分分析（图 3）， C_{13} ~ C_{17} 明显聚为一类， C_{20} ~ C_{30} 聚为一类，而 C_{18} 和 C_{19} 呈相对孤立状态。

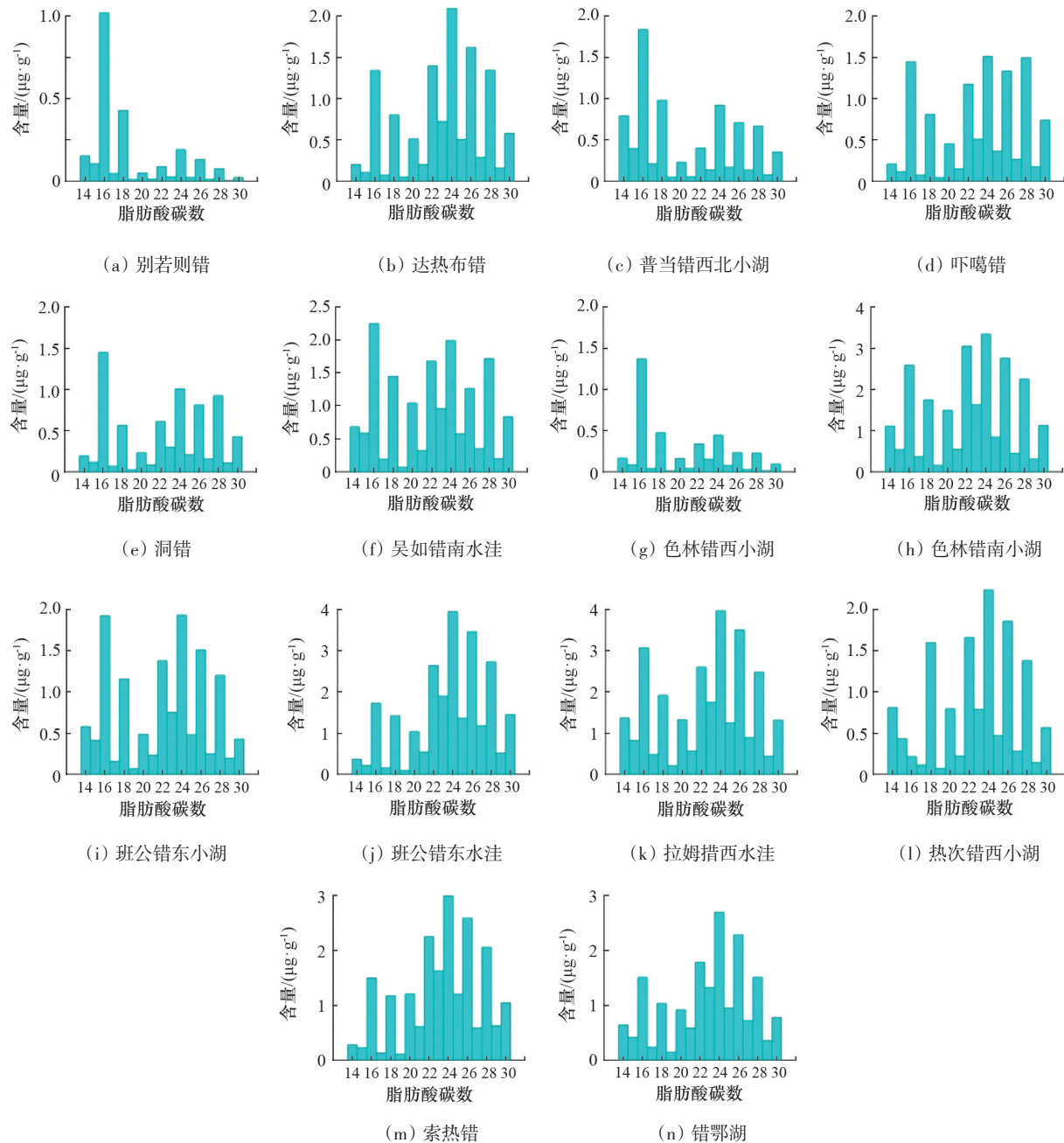


图2 湖泊和水洼中正构脂肪酸的分布特征

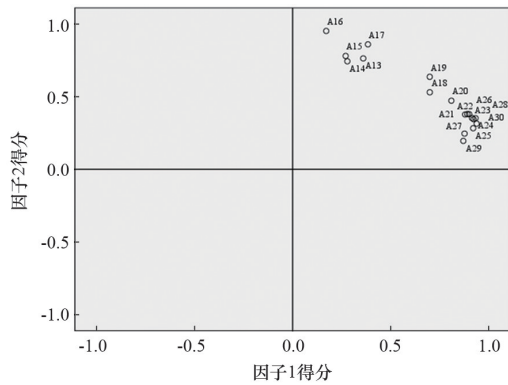


图3 正构脂肪酸含量的主成分分析

利用SPSS软件分析了各正构脂肪酸和烷烃间

的相关关系,相关系数和显著水平见表2,可见中、长链脂肪酸(C₂₃~C₃₀)含量与正构烷烃的含量相关性较好,C₂₀~C₂₂的含量与C₂₀正构烷烃的含量相关性较好。因此,中、长链脂肪酸(C₂₀~C₃₀)与正构烷烃的来源可能相同。另外,短链的脂肪酸C₁₃~C₁₉的含量与正构烷烃含量均不存在相关性,表明这些碳数的脂肪酸的来源和烷烃来源不同。根据前人结论,C₁₃~C₁₉正构脂肪酸的来源可能比较复杂,可能来源于藻类、菌类、沉水植物和陆生高等植物。结合本研究的主成分分析结果(图3),C₁₃~C₁₇的来源可能类似,偏向于藻类或菌类。C₁₈和C₁₉离中、长链

表2 正构脂肪酸与正构烷烃单体含量的相关性

相关系数	A13	A14	A15	A16	A17	A18	A19	A120	A121	A122	A123	A124	A125	A126	A127	A128	A129	A130	
Ac13	R	-0.313	-0.165	-0.181	-0.202	0.432	-0.207	-0.163	0.092	-0.208	0.196	0.078	0.042	0.060	0.091	0.092	0.248	0.050	0.062
	P	0.322	0.608	0.573	0.529	0.160	0.519	0.613	0.776	0.517	0.541	0.810	0.896	0.853	0.779	0.777	0.437	0.878	0.848
Ac14	R	-0.282	-0.140	-0.131	-0.093	0.487	0.051	-0.008	0.294	-0.253	0.252	0.129	0.122	0.155	0.133	0.104	0.212	0.050	0.072
	P	0.328	0.633	0.655	0.752	0.078	0.862	0.978	0.308	0.383	0.384	0.660	0.678	0.598	0.650	0.725	0.467	0.866	0.807
Ac15	R	-0.228	-0.163	-0.154	-0.102	0.472	0.081	0.020	0.315	-0.236	0.278	0.157	0.177	0.203	0.186	0.139	0.250	0.096	0.116
	P	0.433	0.578	0.600	0.729	0.088	0.783	0.947	0.272	0.417	0.336	0.592	0.544	0.486	0.524	0.634	0.389	0.745	0.693
Ac16	R	-0.092	0.026	0.024	0.016	0.468	0.058	0.055	0.336	-0.001	0.413	0.283	0.292	0.276	0.251	0.223	0.295	0.192	0.166
	P	0.754	0.930	0.935	0.957	0.092	0.843	0.852	0.240	0.997	0.142	0.326	0.311	0.340	0.386	0.444	0.306	0.510	0.571
Ac17	R	-0.124	-0.011	0.007	0.040	0.558	0.177	0.146	0.464	-0.097	0.451	0.315	0.318	0.336	0.297	0.263	0.354	0.207	0.212
	P	0.672	0.969	0.980	0.892	0.038	0.545	0.618	0.094	0.742	0.105	0.272	0.268	0.241	0.303	0.364	0.214	0.478	0.466
Ac18	R	-0.025	0.080	0.136	0.203	0.446	0.346	0.317	0.569	-0.061	0.498	0.414	0.422	0.446	0.442	0.414	0.542	0.382	0.422
	P	0.931	0.785	0.643	0.487	0.110	0.225	0.270	0.034	0.837	0.070	0.141	0.133	0.110	0.114	0.141	0.045	0.178	0.133
Ac19	R	0.089	0.116	0.174	0.257	0.482	0.435	0.393	0.696	0.051	0.579	0.470	0.496	0.511	0.452	0.407	0.489	0.357	0.380
	P	0.763	0.694	0.551	0.375	0.081	0.120	0.164	0.006	0.864	0.030	0.090	0.071	0.062	0.105	0.149	0.076	0.211	0.180
Ac20	R	0.218	0.132	0.219	0.319	0.375	0.485	0.482	0.734	0.083	0.619	0.509	0.571	0.575	0.552	0.504	0.653	0.482	0.528
	P	0.454	0.652	0.452	0.266	0.187	0.079	0.081	0.003	0.778	0.018	0.063	0.033	0.031	0.041	0.066	0.011	0.081	0.052
Ac21	R	0.261	0.166	0.266	0.369	0.305	0.545	0.532	0.788**	0.132	0.648	0.576	0.628	0.649	0.586	0.554	0.639	0.534	0.569
	P	0.368	0.571	0.359	0.194	0.289	0.044	0.050	0.001	0.652	0.012	0.031	0.016	0.012	0.028	0.040	0.014	0.049	0.034
Ac22	R	0.216	0.275	0.368	0.452	0.377	0.560	0.551	0.791**	0.152	0.677	0.598	0.629	0.625	0.609	0.579	0.701**	0.558	0.597
	P	0.459	0.341	0.196	0.104	0.184	0.037	0.041	0.001	0.604	0.008	0.024	0.016	0.017	0.021	0.030	0.005	0.038	0.024
Ac23	R	0.286	0.271	0.369	0.448	0.392	0.583	0.596	0.831**	0.171	0.750**	0.684	0.720**	0.732**	0.697	0.672	0.758**	0.648	0.679
	P	0.322	0.349	0.194	0.108	0.165	0.029	0.024	0.000	0.559	0.002	0.007	0.004	0.003	0.006	0.009	0.002	0.012	0.008
Ac24	R	0.214	0.336	0.425	0.496	0.450	0.613	0.603	0.832**	0.175	0.738**	0.678	0.693*	0.698**	0.676	0.651	0.725**	0.620	0.644
	P	0.462	0.240	0.130	0.071	0.106	0.020	0.022	0.000	0.550	0.003	0.008	0.006	0.005	0.008	0.012	0.003	0.018	0.013
Ac25	R	0.347	0.321	0.416	0.486	0.422	0.626	0.657	0.860**	0.227	0.798**	0.746**	0.780**	0.795**	0.754**	0.726**	0.779**	0.697	0.719
	P	0.225	0.263	0.139	0.078	0.133	0.017	0.011	0.000	0.436	0.001	0.002	0.001	0.001	0.002	0.003	0.001	0.006	0.004
Ac26	R	0.245	0.375	0.458	0.520	0.483	0.627	0.632	0.848**	0.226	0.773**	0.722**	0.721**	0.731**	0.700**	0.680	0.739**	0.642	0.662
	P	0.398	0.186	0.100	0.057	0.080	0.016	0.015	0.000	0.438	0.001	0.004	0.004	0.003	0.005	0.007	0.003	0.013	0.010
Ac27	R	0.212	0.390	0.473	0.513	0.421	0.619	0.615	0.797**	0.237	0.768**	0.778**	0.737**	0.778**	0.732**	0.759**	0.766**	0.743**	0.742**
	P	0.468	0.167	0.088	0.060	0.133	0.018	0.019	0.001	0.414	0.001	0.001	0.003	0.001	0.003	0.002	0.001	0.002	0.002
Ac28	R	0.269	0.431	0.504	0.560	0.440	0.624	0.644	0.807**	0.321	0.760**	0.726**	0.713**	0.710**	0.706**	0.694*	0.787**	0.677	0.693
	P	0.352	0.124	0.066	0.037	0.116	0.017	0.013	0.000	0.264	0.002	0.003	0.004	0.004	0.005	0.006	0.001	0.008	0.006
Ac29	R	0.521	0.303	0.398	0.473	0.357	0.607	0.705**	0.864**	0.326	0.827	0.771**	0.835**	0.845**	0.795**	0.748**	0.808**	0.719**	0.747**
	P	0.056	0.293	0.158	0.088	0.210	0.021	0.005	0.000	0.255	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.002	0.000	0.004	0.002
Ac30	R	0.286	0.438	0.506	0.550	0.468	0.615	0.649	0.804**	0.342	0.791**	0.761**	0.734**	0.743**	0.729**	0.730**	0.812**	0.713**	0.721**
	P	0.322	0.118	0.065	0.042	0.091	0.019	0.012	0.001	0.232	0.001	0.002	0.003	0.002	0.003	0.003	0.000	0.004	0.004

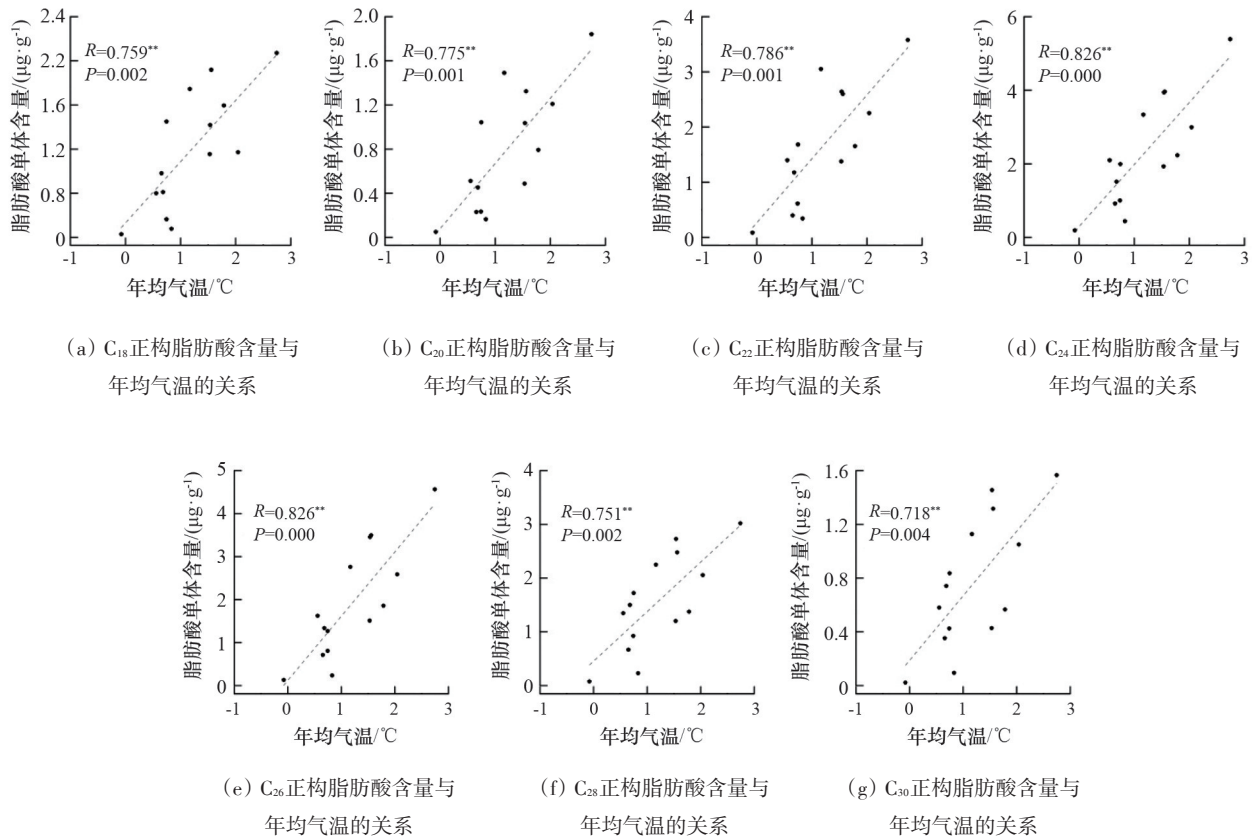
注:R为相关性系数;P为显著性系数;*表示相关;**表示显著相关。

正构烷脂肪酸距离较近,可能是混合来源,包括藻类、菌类、沉水植物和陆生高等植物,且偏向于沉水植物和陆生高等植物。

结合前人的结论和本地区研究的结果,总的来说,西藏地区沉积物中的中、长链正构脂肪酸的来源可以借鉴和对比正构烷烃的来源,两者相互验证。长链脂肪酸($C_{26}\sim C_{30}$)主要来自陆生高等植物,中链脂肪酸($C_{20}\sim C_{25}$)来源于浮水或沉水植物。短链脂肪酸($C_{13}\sim C_{19}$)为混合来源(藻类、菌类、沉水植物和陆生高等植物),其中 $C_{13}\sim C_{17}$ 的来源偏向于藻类或菌类, C_{18} 和 C_{19} 的来源偏向于沉水植物和陆生高等植物。

2.2 正构脂肪酸含量与温度的关系

通过分析正构脂肪酸含量与温度的相关关系(图4),可知在西藏地区,正构脂肪酸($C_{18}\sim C_{30}$)的含量随年均气温升高而增加。部分正构脂肪酸含量也随降水量增多而增加。生物类指标可能都具有这样的特性,即当气温升高时,某些生物会大量生长或繁殖,进而产生更多的正构脂肪酸。另外,脂肪酸含量并不受其他环境因素,例如电导率、溶解氧和pH值等因素影响。因此,在西藏地区利用正构脂肪酸进行古气候重建时,脂肪酸含量的增大可能意味着环境温度的升高,环境适宜,生物量相对较大。



**表示显著相关

图4 正构脂肪酸含量与年均气温的关系

2.3 正构脂肪酸代用指标与气候环境要素的关系

由于正构脂肪酸代用指标的研究以及应用较少,主要参照正构烷烃代用指标的研究方法,在此

基础上寻找更多的可靠指标。ACL(average chain length)为高等植物来源的正构烷烃平均链长,反映植物的蜡质组分保持水分的能力。当气候干旱或

者温度较高时,植物就会合成更多长链正构烷烃保持水分,ACL就会升高^[10]。Paq(Proportion of aquatic macrophytes to the total plant community)是Ficken等^[6]根据现代植物的研究结果定义的一个指数,表示大型水生植物来源的正构烷烃占水生和陆生植物来源的正构烷烃的比例,间接反映有效湿度。碳优势指数CPI(carbon preference index)表示奇数碳链长的正构烷烃相对于偶数碳链长的正构烷烃的相对丰度,受控于降水、温度和有机质降解程度^[16]。计算公式为

$$ACL_{26-30} = \frac{26w(C_{26}) + 28w(C_{28}) + 30w(C_{30})}{w(C_{26}) + w(C_{28}) + w(C_{30})}$$

$$Paq = \frac{w(C_{20}) + w(C_{22}) + w(C_{24})}{w(C_{20}) + w(C_{22}) + w(C_{24}) + w(C_{26}) + w(C_{28}) + w(C_{30})}$$

$$CPI_{18-30} = 0.5 \left(\frac{\sum w(C_{19} \sim C_{29}) \text{ (奇)}}{\sum w(C_{20} \sim C_{30}) \text{ (偶)}} + \frac{\sum w(C_{19} \sim C_{29}) \text{ (奇)}}{\sum w(C_{18} \sim C_{28}) \text{ (偶)}} \right)$$

式中, $w(C_i)$ 示碳数为 i 的正构脂肪酸的含量。

通过分析气候环境要素与ACL、Paq和CPI指标的相关关系,发现ACL、Paq与所有的气候、环境要素均不存在明显的相关关系(表3),说明在西藏

表3 ACL、Paq、CPI、R-FA指标与气候环境要素的相关系数

气候环境要素	相关系数			
	ACL	Paq	CPI	R-FA
纬度	-0.108	0.257	-0.555*	-0.559*
经度	-0.088	-0.015	0.764**	0.829**
海拔	0.078	0.019	0.488	0.517
水温	-0.323	0.320	0.077	-0.014
电导率	-0.246	0.138	0.686**	0.754**
溶解氧	-0.173	-0.119	0.234	0.144
pH值	-0.268	-0.094	-0.188	-0.195
年均降水量	-0.084	0.089	0.774**	0.866**
年均气温	-0.102	-0.211	0.836**	0.879**
年均蒸发量	0.166	0.005	-0.809**	-0.890**
年均相对湿度	-0.205	0.113	0.796**	0.891**

注:*,相关;** ,显著相关。

地区,ACL、Paq指标不能直接运用于正构脂肪酸。CPI指标与年均气温、降水量和有效湿度成正比,与年均蒸发量成反比(图5)。

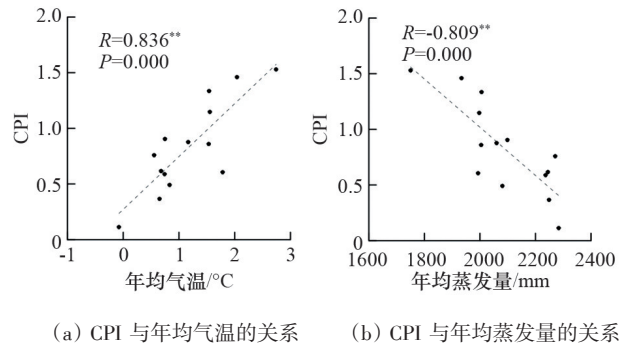


图5 正构脂肪酸CPI指标与年均气温、蒸发量的相关关系

前人的研究表明CPI反映的是有机质的来源和保存情况。有机质在沉积过程及沉积后会随着微生物降解作用而逐渐减小^[17]。其中,气候变化影响微生物降解作用,从而导致CPI发生变化。一般来说,暖湿气候条件下,微生物降解和改造作用较强,CPI较小^[16,18-21]。因此,本文结果与以往的大部分认识相反。另外,除了微生物活动,西藏地区CPI的空间变化也受其他因素影响,例如植被类型和沉积物中营养状况等^[22],导致本区CPI指标与气候要素间的相关性较为特殊。

通过对比不同碳数正构脂肪酸含量间的比值与古气候要素的关系,提出一个新的指标R-FA(Ratio of n -fatty acids,中链占比),计算公式为

$$R-FA = \frac{w(C_{21})}{w(C_{18}) + w(C_{19}) + w(C_{20}) + w(C_{28}) + w(C_{29}) + w(C_{30})}$$

R-FA指标与年均气温、降水量、蒸发量和相对湿度呈显著的相关关系(表3、图6)。当西藏地区温度升高或者降水量充沛时,R-FA会越来越大,暗示合成 C_{21} 正构脂肪酸的来源生物越来越繁盛,或者是由于温度、水文条件的改变导致某些正烷基酰基载体蛋白生物更易于合成 C_{21} 正构脂肪酸。通过对研究区正构烷脂肪酸来源的研究认为, C_{21} 正构脂肪酸可能主要来源于浮水或沉水植物。当温度升高或者降水量增多时,大型水生植物繁

盛,导致C₂₁的相对比例增大。目前,关于正构脂肪酸的具体来源不明确限制了对于代用指标响应气候变化机制的理解。因此,还需要从植物学角度深

入研究正构脂肪酸的来源,必要时结合分子生物学手段,才能为古气候重建提供更多和更为可靠的代用指标。

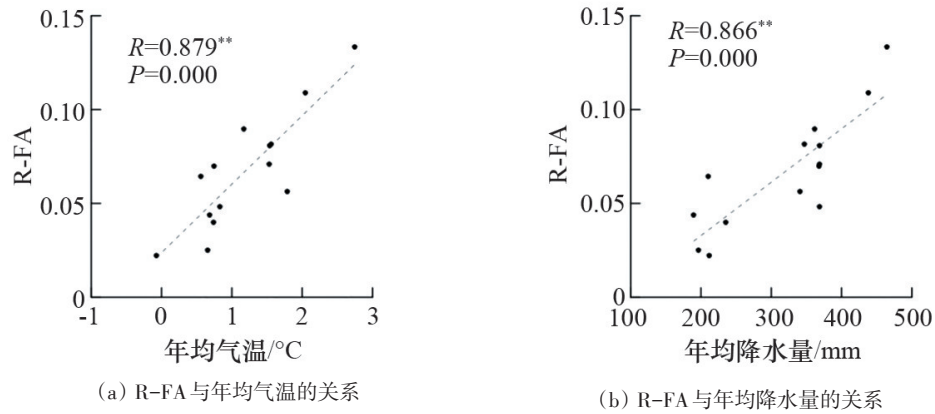


图6 正构脂肪酸R-FA指标与年均气温、降水量的相关关系

2.4 对于古气候研究的启示

研究表明,西藏地区正构脂肪酸的分布特征受区域的气候环境因素影响,尤其是温度和水文条件。因此,正构脂肪酸代用指标可以用于古气候、古环境重建。但是,CPI指标与气候要素的关系并不同于以往认识,表明该指标的古气候意义并不是一成不变的,而受区域气候条件影响,在西藏干旱-半干旱区具有特殊性。首次提出的R-FA指标与气候要素紧密相关,为正构脂肪酸指标应用于古气候重建提供了更多的可能。由于CPI指标还受电导率等因素影响,且无法分离温度和水文因素,所以西藏地区的正构脂肪酸指标目前只能用于古气候要素的半定量分析。另外,脂肪酸的含量增加或减少,表明气候环境变为暖湿或者冷干,也可为认识古气候变化提供参考。

西藏地区表层沉积物中,正构脂肪酸的相对含量高于正构烷烃,易于提取及分析,因此使用正构脂肪酸可能更具优势。但由于正构脂肪酸中羧基的存在,其稳定性略次于正构烷烃。将多种指标相结合,能够为古气候、古环境重建提供更为准确、全面的信息。

3 结论

分析了西藏地区跨越3个气候带的14个湖泊和水洼表层沉积物中的正构脂肪酸,对其来源和古气候代用指标进行了研究,得到以下结论。

1) 中、长链及部分短链正构烷脂肪酸(C₂₀~C₃₀)的来源与正构烷烃的来源有关,可以相互对比验证。长链脂肪酸(C₂₆~C₃₀)主要来自陆生高等植物,中链脂肪酸(C₂₀~C₂₅)来源于浮水或沉水植物。短链脂肪酸(C₁₃~C₁₉)为混合来源(藻类、菌类、沉水植物和陆生高等植物),其中C₁₃~C₁₇的来源偏向于藻类或菌类,C₁₈和C₁₉的来源偏向于沉水植物和陆生高等植物。

2) 西藏地区正构脂肪酸含量随温度升高、降水增多而增加。因此,正构脂肪酸含量的增减也可为认识区域古气候变化提供参考。

3) 正构脂肪酸CPI₁₈₋₃₀和R-FA指标与温度和水文要素的相关性很好,表明这些指标可以应用于西藏干旱-半干旱区的古气候重建。但由于无法分离温度和水文因素,所以目前只能应用于半定量重建。

参考文献(References)

- [1] Meyers P A. Organic geochemical proxies of paleoceanographic, paleolimnologic, and paleoclimatic processes[J]. *Organic Geochemistry*, 1997, 27(5/6): 213–250.
- [2] 谢树成, 梁斌, 郭建秋, 等. 生物标志化合物与相关的全球变化[J]. *第四纪研究*, 2003, 23(5): 521–528.
- [3] Castañeda I S, Schouten S. A review of molecular organic proxies for examining modern and ancient lacustrine environments[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2011, 30(21): 2851–2891.
- [4] Cranwell P A, Eglinton G, Robinson N. Lipids of aquatic organisms as potential contributors to lacustrine sediments-II[J]. *Organic Geochemistry*, 1987, 11(6): 513–527.
- [5] Meyers P A, Ishiwatari R. Lacustrine organic geochemistry: An overview of indicators of organic matter sources and diagenesis in lake sediment[J]. *Organic Geochemistry*, 1993, 20(7): 867–900.
- [6] Ficken K J, Li B, Swain D L, et al. An *n*-alkane proxy for the sedimentary input of submerged/floating freshwater aquatic macrophytes[J]. *Organic Geochemistry*, 2000, 31(7/8): 745–749.
- [7] Liu H, Liu W G. Concentration and distributions of fatty acids in algae, submerged plants and terrestrial plants from the northeastern Tibetan Plateau[J]. *Organic Geochemistry*, 2017, 113: 17–26.
- [8] Eglinton G, Hamilton R G. Leaf epicuticular waxes[J]. *Science*, 1967, 156: 1322–1335.
- [9] Chikaraishi Y, Naraoka H. $\delta^{13}\text{C}$ and δD relationships among three *n*-alkyl compound classes (*n*-alkanoic acid, *n*-alkane and *n*-alkanol) of terrestrial higher plants[J]. *Organic Geochemistry*, 2007, 38(2): 198–215.
- [10] Zhou W J, Xie S C, Meyers P A, et al. Reconstruction of late glacial and Holocene climate evolution in southern China from geolipids and pollen in the Dingnan peat sequence[J]. *Organic Geochemistry*, 2005, 36: 1272–1284.
- [11] Zheng Y H, Zhou W J, Meyers P A, et al. Lipid biomarkers in the Zoigê-Hongyuan peat deposit: Indicators of Holocene climate changes in West China[J]. *Organic Geochemistry*, 2007, 38: 1927–1940.
- [12] Li X M, Wang M D, Hou J Z, et al. Centennial-scale climate variability during the past 2000 years derived from lacustrine sediment on the western Tibetan Plateau[J]. *Quaternary International*, 2018, doi: 10.1016/j.quaint.2018.12.018.
- [13] Tuo J C, Wu C J, Zhang M F, et al. Distribution and carbon isotope composition of lipid biomarkers in Lake Erhai and Lake Gahai sediments on the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2011, 37(3): 447–455.
- [14] Aichner B, Feakins S J, Lee J E, et al. High resolution leaf wax carbon and hydrogen isotopic record of late Holocene paleoclimate in arid Central Asia[J]. *Climate of the Past*, 2015, 11(6): 619–633.
- [15] 赵江涛, 刘卫国, 安芷生. 两种纯化方法获得脂肪酸的链长及碳同位素分布特征对比[J]. *岩矿测试*, 2013, 32(1): 101–107.
- [16] Luo P, Peng P A, Lü H Y, et al. Latitudinal variations of CPI values of long-chain *n*-alkanes in surface soils: Evidence for CPI as a proxy of aridity[J]. *Science China: Earth Science*, 2012, 55(11): 1134–1146.
- [17] 周卫健, 陈清敏, 郑艳红. 我国不同空间格局泥炭类脂分子化石记录信息的时空对比[J]. *地球环境学报*, 2011, 2(1): 257–262.
- [18] Xie S C, Nott C J, Avsejs L A, et al. Molecular and isotopic stratigraphy in an ombrotrophic mire for paleoclimate reconstruction[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004, 68(13): 2849–2862.
- [19] Liu W G, Huang Y S. Compound specific D/H ratios and molecular distributions of higher plant leaf waxes as novel paleoenvironmental indicators in the Chinese Loess Plateau[J]. *Organic Geochemistry*, 2005, 36(6): 851–860.
- [20] Zhang Z H, Zhao M X, Eglinton G. Leaf wax lipids as paleovegetational and paleoenvironmental proxies for the Chinese Loess Plateau over the last 170 kyr[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2006, 25(5): 575–594.
- [21] Rao Z G, Zhu Z Y, Wang S P, et al. CPI values of terrestrial higher plant-derived long-chain *n*-alkanes: A potential paleoclimatic proxy[J]. *Frontiers of Earth Science in China*, 2009, 3(3): 266–272.
- [22] Huang X Y, Meyers P A, Xue J T, et al. Paleoclimate significance of *n*-alkane molecular distributions and $\delta^2\text{H}$ values in surface peats across the monsoon region of China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2016, 461: 77–86.

Distribution characteristics of *n*-fatty acids in the arid Tibet lakes: Implications for paleoclimatic studies

LING Yuan^{1,2}, ZHENG Mianping^{2*}, ZHANG Yongsheng², SUN Qing³, ZHANG Chengjun⁴

1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China
2. Key Laboratory of Saline Lake Resources and Environments, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China
3. National Research Center of Geoanalysis, Beijing 100037, China
4. School of Geological Sciences and Mineral Resources, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

Abstract Fatty acids are widely distributed in various geological carriers, and can be taken as records of the living environment of the maternal sources. However, the specific sources and the paleoclimatic significance of the distribution characteristics of the fatty acids are still not completely clear, therefore, only a limited application of fatty acids is made in the paleoclimatic reconstruction. By analyzing the *n*-fatty acids in the surface sediments of lakes and puddles spanning three climatic zones in the arid/semi-arid Tibet, this paper reveals that the sources of middle, long chain *n*-fatty acids and a part of short chain ones are related to that of *n*-alkanes, which can be compared. The correlation between the indices and the paleoclimatic factors is established. It is shown that the content of the normal fatty acid and the CPI indices increase with the increase of the temperature and the precipitation. An R-FA indices for the paleoclimate reconstruction is proposed, which is proportional to the annual average temperature and precipitation.

Keywords arid region of Tibet; surface sediment of lakes; *n*-fatty acids; paleoclimate reconstruction ●



(责任编辑 刘志远)