

神农架大九湖孢粉气候因子转换函数与古气候重建

朱诚*, 陈星, 马春梅, 朱青, 李中轩, 徐伟峰

南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210093;

南京大学大气科学系, 南京 210093.

* E-mail: zhuchengnj@yahoo.com.cn)

2007-06-03 收稿, 2007-09-20 接受

国家自然科学基金重大项目(批准号: 90411015)、国家自然科学基金项目(批准号: 40475035)、教育部高等学校博士点基金项目(批准号: 20050284011)、南京大学重大基础预研项目(编号: 0209005206)、中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室开放基金项目(批准号: SKLLQG0503)、中国气象局气候变化专项项目(批准号: CCSF2007-40)和南京大学现代分析中心测试基金(编号: 0209001309)资助

摘要 利用在神农架地区采集的 121 个表土样品孢粉鉴定得出的结果, 结合对应的采样区 7 个相关气象站 30 年来(1971 年 1 月至 2000 年 12 月)连续观测的气象资料库, 选取 55 种常见孢粉, 采用空间拟合与逐步回归方法建立了神农架地区孢粉气候因子年平均温度的转换函数: $T=7.649-2.33097X_{\text{冷杉属}}-0.10873X_{\text{桦属}}-0.17352X_{\text{菊科}}-0.13176X_{\text{十字花科}}+0.13356X_{\text{大戟科}}-0.83069X_{\text{桔梗科}}+1.96494X_{\text{石韦属}}+0.38411X_{\text{凤尾蕨}}+2.77741X_{\text{卷柏属}}+0.04439X_{\text{厚壁单缝孢属}}$, 并利用大九湖 297 cm 厚的全新世泥炭剖面的孢粉百分比含量数据对上述函数做了检验, 重建了大九湖 15.753 kaBP 以来的年平均温度变化序列. 该温度序列较好地反映了晚冰期以来的气候变化特征, 对最老仙女木期、老仙女木、新仙女木、8.2 kaBP 等极端冷气候事件和博令阿勒罗德暖期及气候波动都有准确的指示, 还揭示了全新世适宜期、晚全新世温干气候、及近 1 ka 以来大九湖的气候变化特征. 研究表明, 神农架大九湖地表和地层剖面孢粉样本同样具有重要气候意义, 其温度转换函数和重建的温度序列对研究末次冰期以来的气候变化有着重要参考价值.

关键词

神农架大九湖
孢粉
气候因子
转换函数

孢粉是古气候研究的重要代用资料之一, 利用孢粉浓度、类型与气候环境演变的关系建立孢粉气候因子转换函数并对古气候进行定量重建, 是古气候研究量化的有效手段^[1~5]. 可靠转换函数的建立决定于两个方面, 一是高质量的孢粉采样样本, 二是对最优孢粉因子的筛选. 本文利用神农架大九湖地区采集的地表孢粉得出孢粉百分比含量数据, 结合该区气象观测资料建立了温度转换函数^[6,7], 同时利用文献[8]的孢粉数据定量重建了大九湖晚冰期以来的温度序列.

大九湖位于神农架西端海拔 1760 m 的山间盆地, 面积约 16 km², 年平均温度 7.2℃, 夏季最高温 17.1℃, 冬季最低温度 -2.4℃, 年降水量 1500 mm 左右, 分布有成层的沼泽, 并普遍埋藏泥炭, 泥炭中富含孢粉化石, 记录了该区域环境演变的信息. 李文漪等人^[9]、刘光琇^[10]、刘会平等人^[11]和何报寅等人^[12]曾

对大九湖地层做过较详细的孢粉研究, 获得了大量该地区全新世以来孢粉和植被序列与气候波动变化的信息, 表明这一地区是研究全新世自然环境和古气候演变的重要地点.

1 研究方法

本研究在野外实地踏勘基础上, 进行了孢粉样品采集. 除了大九湖盆地内为表层土样外, 其余选择神农架地区林间空旷处的苔藓进行采样, 时间为 2004 年 2 月 16~18 日. 按自然地形海拔每上升 100 m 采一个样, 采样地点 GPS 地理范围为 31.4°~31.8°N, 109.8°~110.6°E, 海拔高度在 700~2800 m 之间(图 1), 本次共采得表土孢粉样品 121 块(采样位置见表 1). 样品在中国地质调查局水文地质工程地质技术方法研究所利用重液浮选法进行前处理后制成活动玻片, 在双目显微镜下用高倍镜头进行观察、鉴定和统计.

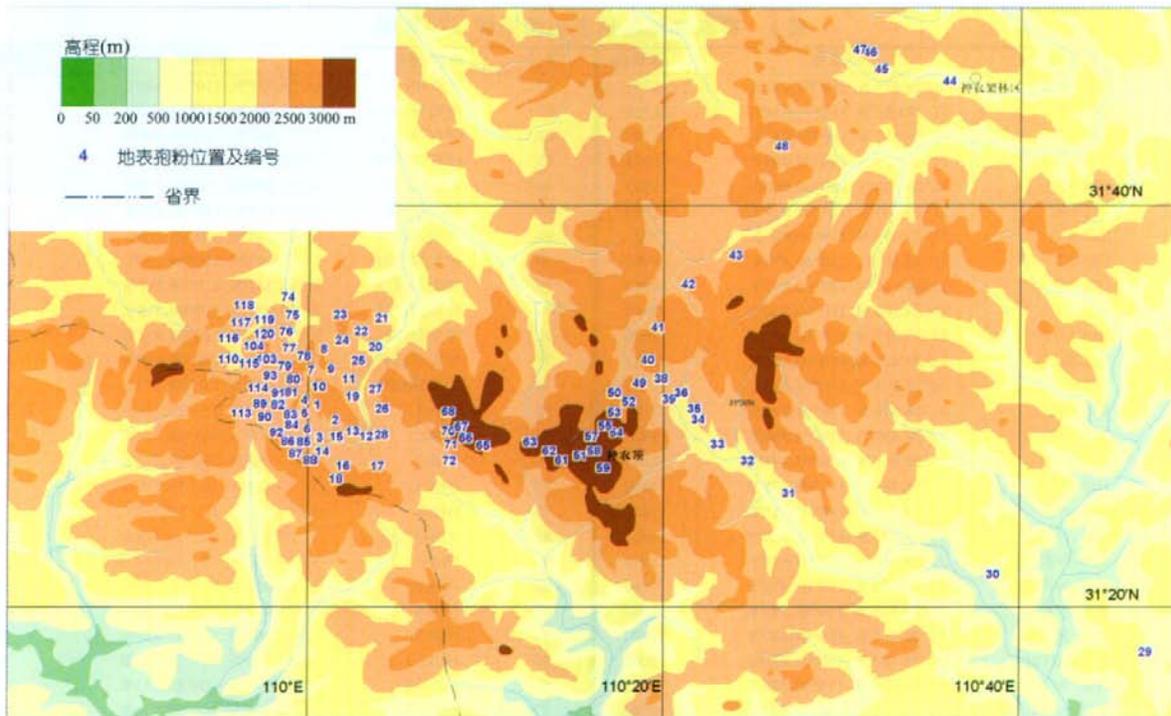


图 1 神农架大九湖地区地表孢粉采样点图

图中数字代表采样点编号

对应的采样区气象要素资料则来自于神农架大九湖周边地区 7 个相关气象站 30 年来(1971 年 1 月至 2000 年 12 月)连续观测的气象资料库(图 2). 为最大限度获取孢粉所包涵的气候信息, 本研究选取 55 种常见孢粉, 采用空间拟合与逐步回归方法建立孢粉气候因子转换函数, 并利用大九湖 297 cm 厚的全新世泥炭剖面(31.5°N, 109°59.75'E, 海拔 1760 m)^[1]得出的 15.753 kaBP 以来孢粉百分比含量数据重建了该时期的古气候温度曲线.

2 孢粉特征

本次孢粉样本含植物种属丰富, 分属于 93(科)属. 孢粉中种子植物高于蕨类植物种属, 种子植物中又以被子植物居优势地位, 裸子植物次之. 针叶树种属较少, 含量相对较低. 所有样品中以落叶阔叶乔木为主, 热带亚热带常绿阔叶乔木比例较少. 灌木植物种属繁多, 含量却较低. 草本植物种属较多, 含量比灌木植物稍高. 根据各类孢粉数量和质量选取如下: 55 种成分建立气候转换函数, 乔木植物和灌木植物有铁杉属(*Tsuga*)、冷杉属(*Abies*)、云杉属(*Picea*)、松属(*Pinus*)、桦属(*Betula*)、鹅耳枥属(*Carpinus*)、桤木属

(*Alnus*)、榛(*Corylus*)、糙叶树属(*Aphananthe*)、核桃属(*Juglans*)、枫杨属(*Pterocarya*)、山核桃属(*Carya*)、黄杞属(*Engelhardtia*)、栲属(*Castanopsis*)、栗属(*Castanea*)、落叶栎(*Quercus*(D))、常绿栎(*Quercus*(E))、水青冈属(*Fagus*)、漆树科(Anacardiaceae)、石栗属(*Aleurites*)、枫香(*Liquidambar*)、杨梅科(Myriaceae)、无患子科(Sapindaceae)、芸香科(Rutaceae)、紫罗兰(Biraceae)、木犀科(Oleaceae)、蔷薇科(Rosaceae)、绣线菊(*Spiraea*)、忍冬科(Caprifoliaceae)和麻黄属(*Ephedra*); 草本植物有藜科(Chenopodiaceae)、菊科(Compositae)、蒿属(*Artemisia*)、葎草(*Humulus*)、十字花科(Cruciferae)、地榆属(*Sanguisorba*)、伞形科(Umbelliferae)、茜草科(Rubiaceae)、大戟科(Euphorbiaceae)、龙胆科(Gentianaceae)、豆科(Leguminosae)、石竹科(Caryophyllaceae)、桔梗科(Campanulaceae)、禾本科(Gramineae)、莎草科(Cyperaceae)、香蒲属(*Typha*)、海金沙(Lygodaceae)和水龙骨科(Polypodiaceae); 蕨类植物有石韦属(*Pyrrosia*)、瓦韦属(*Lepisorus*)、凤尾蕨(*Pteris*)、石松科(Lycopodiaceae)、卷柏属(*Selaginella*)、厚壁单缝孢属(*Monolites*)和三缝孢(*Trilites*)等.

表1 神农架地区地表孢粉采样点位置表

序号	采样编号	经纬度	海拔/m	序号	采样编号	经纬度	海拔/m
1	JHS-S	31°28.975'N, 110°01.002'E	1745	62	神农顶(13)	31°26.937'N, 110°15.080'E	2177
2	JHS-S	31°29.086'N, 110°01.031'E	1765	63	神农顶(14)	31°26.946'N, 110°14.471'E	2705
3	JHS-S	31°29.112'N, 110°01.035'E	1787	64	神农顶(15)	31°27.407'N, 110°13.390'E	2606
4	JHS-S	31°29.125'N, 110°00.982'E	1815	65	神农顶(16)	31°27.645'N, 110°13.453'E	2576
5	JHS-S	31°29.129'N, 110°00.956'E	1842	66	神农顶(17)	31°27.261'N, 110°10.738'E	2504
6	JHS-S	31°29.137'N, 110°00.937'E	1869	67	神农顶(18)	31°27.617'N, 110°09.761'E	2400
7	JHS-S	31°29.093'N, 110°00.885'E	1921	68	神农顶(19)	31°28.204'N, 110°09.516'E	2291
8	JHS-S	31°29.143'N, 110°00.870'E	1960	69	神农顶(20)	31°28.603'N, 110°09.141'E	2182
9	JHS-S	31°29.147'N, 110°00.871'E	1989	70	神农顶(21)	31°28.334'N, 110°09.311'E	2081
10	JHS-S	31°29.165'N, 110°00.840'E	2017	71	神农顶(22)	31°27.971'N, 110°08.774'E	1978
11	JHS-S(11)	31°29.177'N, 110°00.824'E	2039	72	神农顶(23)	31°27.307'N, 110°08.933'E	1874
12	JHS-S(12)	31°29.122'N, 110°00.827'E	2032	73	神农顶(24)	31°26.783'N, 110°08.839'E	1769
13	JHS-N	31°28.898'N, 110°01.340'E	1782	74	神农顶(25)	31°26.542'N, 110°08.767'E	1669
14	JHS-N	31°28.876'N, 110°01.372'E	1802	75	JHB-1	31°29.598'N, 109°59.726'E	1729
15	JHS-N	31°28.858'N, 110°01.398'E	1822	76	JHB-2	31°29.569'N, 109°59.724'E	1731
16	JHS-N	31°28.866'N, 110°01.398'E	1841	77	JHB-3	31°29.561'N, 109°59.722'E	1730
17	JHS-N	31°28.866'N, 110°01.478'E	1862	78	JHB-4	31°29.528'N, 109°59.718'E	1729
18	JHS-N	31°28.868'N, 110°01.515'E	1882	79	JHB-5	31°29.511'N, 109°59.716'E	1731
19	JHS-N	31°28.875'N, 110°01.519'E	1902	80	JHB-6	31°29.491'N, 109°59.718'E	1730
20	JHS-N	31°28.875'N, 110°01.538'E	1922	81	JHB-7	31°29.472'N, 109°59.717'E	1731
21	JHS-N	31°28.878'N, 110°01.579'E	1962	82	JHB-8	31°29.452'N, 109°59.719'E	1732
22	JHS-N	31°28.878'N, 110°01.579'E	1962	83	JHB-9	31°29.432'N, 109°59.720'E	1732
23	JHS-N(11)	31°28.862'N, 110°01.587'E	1982	84	JHB-10	31°29.404'N, 109°59.716'E	1732
24	JHS-N(12)	31°28.848'N, 110°01.610'E	2002	85	JHB-11	31°29.374'N, 109°59.711'E	1732
25	JHS-N(13)	31°28.842'N, 110°01.596'E	2022	86	JHB-12	31°29.355'N, 109°59.723'E	1733
26	JHS-N(14)	31°28.832'N, 110°01.627'E	2045	87	JHB-13	31°29.336'N, 109°59.734'E	1732
27	JHS-N(15)	31°28.827'N, 110°01.625'E	2072	88	JHB-14	31°29.323'N, 109°59.738'E	1732
28	JHS-N(16)	31°28.820'N, 110°01.717'E	2117	89	JHB-15	31°29.457'N, 109°59.749'E	1732
29	宜松-1	30°49.905'N, 110°23.651'E	205	90	SNDE01	31°29'N, 109°59'E	1730
30	宜松-2	30°160'N, 110°30.277'E	716	91	SNDE02	31°29'N, 109°59'E	1730
31	宜松-3	31°671'N, 110°28.076'E	856	92	SNDE03	31°29'N, 109°59'E	1730
32	宜松-4	31°26.331'N, 110°25.716'E	1044	93	SNDE04	31°29'N, 109°59'E	1730
33	宜松-5	31°27.181'N, 110°24.048'E	1144	94	SNDE05	31°29'N, 109°59'E	1730
34	宜松-6	31°28.438'N, 110°22.981'E	1279	95	SNDE06	31°29'N, 109°59'E	1730
35	宜松-7	31°28.968'N, 110°22.757'E	1381	96	SNDE07	31°29'N, 109°59'E	1730
36	宜松-8	31°768'N, 110°22.029'E	1498	97	SNDE08	31°29'N, 109°59'E	1730
37	宜松-9	31°29.997'N, 110°22.117'E	1616	98	SNDE09	31°29'N, 109°59'E	1730
38	宜松-10	31°29.693'N, 110°21.670'E	1724	99	SNDE10	31°29'N, 109°59'E	1730
39	宜松-11	31°29.457'N, 110°21.327'E	1845	100	SNDE11	31°29'N, 109°59'E	1730
40	宜松-12	31°29.997'N, 110°22.117'E	1669	101	SNDE12	31°29'N, 109°59'E	1730
41	宜松-12	31°31.434'N, 110°20.132'E	1741	102	SNDE13	31°29'N, 109°59'E	1730
42	宜松-13	31°33.067'N, 110°20.718'E	1634	103	SNDE14	31°29'N, 109°59'E	1730
43	宜松-14	31°35.222'N, 110°22.457'E	1520	104	SNDE15	31°29'N, 109°59'E	1730
44	宜松-15	31°36.665'N, 110°25.141'E	1398	105	SNDE16	31°29'N, 109°59'E	1730
45	宜松-16	31°45.278'N, 110°37.335'E	975	106	SNDE17	31°29'N, 109°59'E	1730
46	宜松-17	31°45.897'N, 110°33.511'E	1132	107	SNDE18	31°29'N, 109°59'E	1730
47	宜松-18	31°46.776'N, 110°32.859'E	1255	108	SND01	31°29'N, 109°59'E	1730
48	宜松-19	31°46.903'N, 110°32.270'E	1372	109	SND02	31°29'N, 109°59'E	1730
49	宜松-20	31°42.092'N, 110°27.800'E	2087	110	SND03	31°29'N, 109°59'E	1730
50	神农顶	31°30.291'N, 110°19.628'E	1863	111	SND04	31°29'N, 109°59'E	1730
51	神农顶	31°29.821'N, 110°18.224'E	1963	112	SND05	31°29'N, 109°59'E	1730
52	神农顶	31°26.684'N, 110°16.237'E	2811	113	SND06	31°29'N, 109°59'E	1730
53	神农顶	31°29.620'N, 110°18.512'E	2066	114	SND07	31°29'N, 109°59'E	1730
54	神农顶	31°28.830'N, 110°18.212'E	2153	115	SND08	31°29'N, 109°59'E	1730
55	神农顶	31°28.567'N, 110°18.131'E	2199	116	SND09	31°29'N, 109°59'E	1730
56	神农顶	31°28.169'N, 110°17.662'E	2302	117	SND10	31°29'N, 109°59'E	1730
57	神农顶	31°27.942'N, 110°17.387'E	2404	118	SND11	31°29'N, 109°59'E	1730
58	神农顶	31°27.309'N, 110°17.132'E	2508	119	SND12	31°29'N, 109°59'E	1730
59	神农顶	31°26.894'N, 110°17.216'E	2563	120	SND13	31°29'N, 109°59'E	1730
60	神农顶	31°26.585'N, 110°17.439'E	2609	121	SND14	31°29'N, 109°59'E	1730
61	神农顶(11)	31°27.153'N, 110°16.872'E	2706				

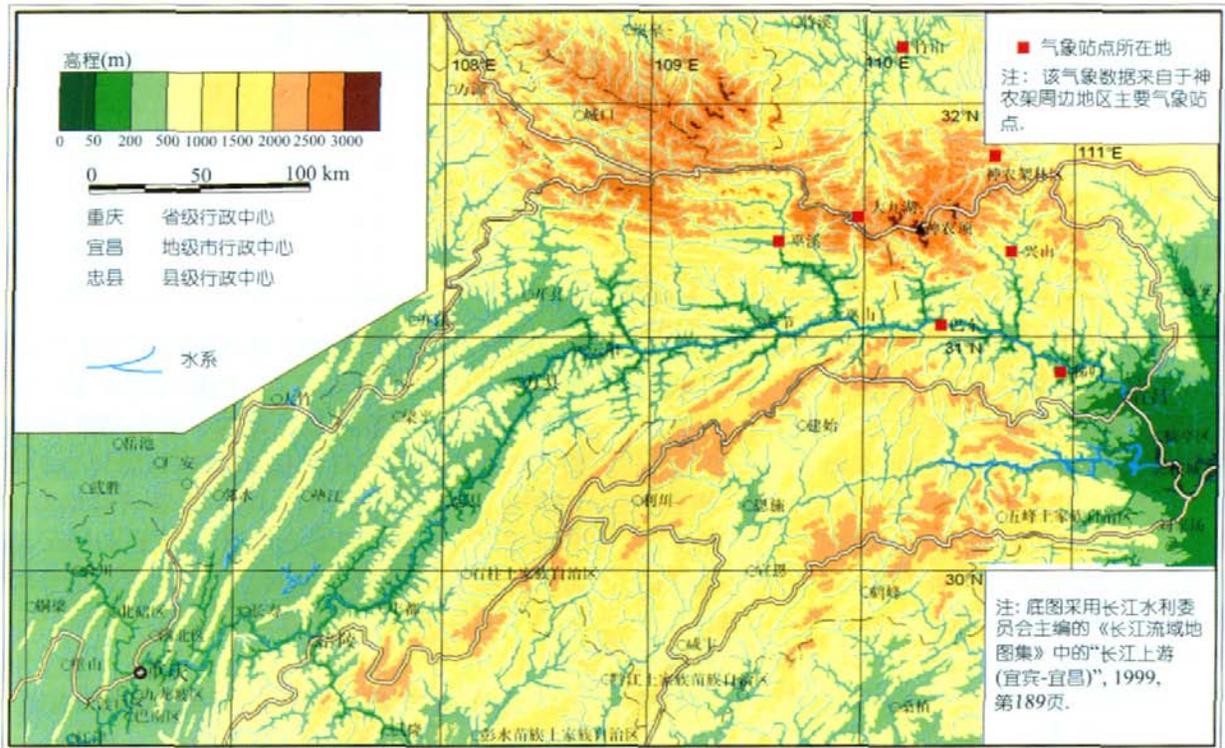


图2 神农架大九湖地区气象站点分布图

3 转换函数的建立和大九湖古气候重建

植被的分布主要受温度和降水等气候因子决定。神农架大九湖地区海拔高差大，气候因子随高度变化显著，与此相对应的植被类型分布亦随高度而改变。从不同海拔高度采集的地表孢粉样本包涵了气候要素的垂直变化信息和空间分布特征，因此可以根据植被与气候的关系建立孢粉气候因子转换函数。由于大九湖采样地区没有足够的气象观测站记录，特别是由于山区降水空间的差异性较大、连续性差，由该地区地表孢粉样本建立降水转换函数缺乏可靠性。但是由于温度的空间连续性较好，利用大九湖地区温度记录可以建立温度的空间分布函数，再由温度分布函数计算各孢粉采样点的温度就可以建立该地区的温度转换函数。根据这一原理，本文建立了神农架大九湖年平均温度的转化函数，并根据泥炭剖面的孢粉数据检验^[8]，重建了大九湖 15.753 kaBP 以来的年平均温度变化序列。

3.1 大九湖地区温度空间函数的建立

本文选择了大九湖周边地区有 30 年连续气象观测资料的竹山、房县、郧阳、神农架、兴山、巴东和

大九湖 7 个气象站温度观测数据用于大九湖地区温度空间函数的建立。对于给定的地点，其多年平均温度(T)决定于纬度(ϕ)、经度(λ)和海拔高度(H)，即年平均温度可以近似表示为：

$$T(\phi, \lambda, H) = a_0 + a_1\phi + a_2\lambda + a_3H, \quad (1)$$

通过最小二乘方法和显著性检验，可以得出拟合系数而建立区域年平均温度的空间分布函数。本文根据大九湖地区 7 个气象站多年年平均温度和各站点的地理信息资料拟合出该地区的年平均温度函数为：

$$T = 61.657 - 1.375\phi - 0.006H, \quad (2)$$

该式表明，大九湖地区的年平均温度主要决定于纬度和海拔高度，随纬度和高度的增加温度逐渐降低，但与经度关系不大。对大九湖地表孢粉采样点的地理信息进行比较分析后，从 716m 至 2811m 共 73 个高度上的采样点计算了年平均温度分布。计算结果显示，该分布函数较好地反映了大九湖地区温度的空间分布特征。例如由(2)式计算出大九湖泥炭剖面采样点大九湖(31.5°N, 1760m)^[8]的年平均温度为 7.78，实际观测值是 7.2，绝对误差约 0.58，相对误差 8%；对神农架气象站(31.75°N, 937.2m)计算的年平均温度是 12.31，实际观测值是 12.1，绝

表2 建立温度空间函数所用气象站点及拟合年平均温度比较

站名	北纬/(°)	东经/(°)	海拔高度/m	观测温度/	拟合温度/
竹山	32.23	110.23	309.0	15.4	15.35
房县	32.03	110.77	427.1	14.3	15.05
鄖阳	32.65	110.78	253.9	15.4	15.23
神农架	31.75	110.67	937.2	12.1	12.31
兴山	31.23	110.77	275.6	16.8	17.06
巴东	31.07	110.40	295.6	17.3	17.16
大九湖	31.50	110.00	1760.0	7.2	7.78

对误差和相对误差分别为 0.21 和 1.7%，其他各站的温度计算值与观测值都拟合得很好(表 2)，可见(2)式给出的温度分布函数计算结果是可靠的。根据该温度函数得出神农架大九湖地区在海拔 716~2811 m 之间的年平均温度变化范围是 1.57~15.63 ，相当于中国东部地区 30°~45°N 之间的气候年平均温度变化，即从神农架地区的中亚热带气候到中国东北地区的中温带气候，横跨中亚热带、北亚热带、南温带和中温带 4 个气候区。可见神农架地区约 2000 m 垂直范围内的地表孢粉信息的变化可以代表水平地带大尺度范围内的温度变化，具有重要的气候学意义。

3.2 孢粉温度转换函数的建立

本文根据前述大九湖地区 73 个高度上的 55 个科属地表孢粉样本，采用常规逐步回归方法^[6,7,13]在 $\alpha=0.05$ 显著水平上对不同的选取和剔除阈值 F_1 和 F_2 进行计算，得出复合相关系数相对较大、选入因子个数适中的温度转换函数。计算试验表明，选入因子相对较多时，复合相关系数较高，但因子太多不便于实际计算。根据本文计算比较，最终选取 10 个因子建立转换函数，其复合相关系数达到 0.8962。大九湖年平均温度转换函数为：

$$T=7.649-2.33097X_{冷杉属}-0.10873X_{桦属}-0.17352X_{菊科}-0.13176X_{十字花科}+0.13356X_{大戟科}-0.83069X_{桔梗科}+1.96494X_{石韦属}+0.38411X_{凤尾蕨}+2.77741X_{卷柏属}+0.04439X_{厚壁单缝孢属}, \quad (3)$$

式中 $X_{冷杉属}$, $X_{桦属}$, $X_{菊科}$, $X_{十字花科}$, $X_{大戟科}$, $X_{桔梗科}$, $X_{石韦属}$, $X_{凤尾蕨}$, $X_{卷柏属}$ 和 $X_{厚壁单缝孢属}$ ，分别代表冷杉属、桦属、菊科、十字花科、大戟科、桔梗科、石韦属、凤尾蕨、卷柏属和厚壁单缝孢属的相对百分比含量(%)。从转换函数(3)式可以看出，冷杉属、桦属、菊科、十字花科和桔梗科相对百分比含量的增加指示温度降低，而大戟科、石韦属、凤尾蕨、卷柏属和厚壁单缝孢属的相对百分比含量的增加则指示温度升高。

为对拟合结果误差进行定量分析，本文以文

献[14]给出的大九湖地区不同高度上年平均温度观测值作为参考(见原文表 1)，选取相近的 23 个高度，分别求出本文转换函数重建的年平均温度和观测值的相关系数与均方根误差(RMSE)分别为 0.9113 及 1.5090，相关系数通过 $\alpha = 0.01$ 的显著性检验。观测和重建序列的平均温度分别为 7.6 和 8.1、标准差分别为 3.7 和 3.3，重建的温度比观测值平均高约 0.5。可以看出，本文重建的温度与观测值吻合较好。

3.3 大九湖 15.753 kaBP 以来温度序列的重建

根据转换函数(3)式，使用大九湖泥炭剖面中的孢粉百分比含量数据^[8]对 15.753 kaBP 以来的年平均温度进行了重建计算，得到如图 3 所示的年平均温度时间序列，图中粗实线为三点滑动平均。

图 3 显示，约 15ka 以来神农架大九湖地区气候经历了几个典型阶段，新仙女木、全新世气候适宜期、8.2 kaBP 气候事件和小冰期以来的气候变化特征都在重建的温度序列中有显著指示。15.753~11.0 kaBP 该区域经历了从晚冰期向全新世过渡时期冷暖波动频繁的气候变化特征，其中 15.753~15.4, 14.7~14.4 和 12.6~11.2 kaBP 分别对应于最老仙女木(MOD)、老仙女木(OD)和新仙女木(YD)气候寒冷期，在 12.0 ~11.4 kaBP 之间为快速降温的 YD 气候突变特征；而 15.4~14.7 和 14.4~12.6 kaBP 分别对应于博令暖期(BW)和阿勒罗德暖期(AW)，温度明显升高；11.2~9.4 kaBP 为由晚冰期气候向全新世温暖气候转换的早全新世升温过渡期，在 11.2~10.8 kaBP 之间为快速温度回升，然后进入缓慢回升期，反映出 YD 气候突变的典型特征；此后 9.4~7.8 kaBP 代表了中全新世前期的气温波动上升期，在约 7.9 kaBP 达到全新世最高温度；7.5~4.0 kaBP 为中全新世气候适宜期，气温波动较小。4.0~1.0 kaBP 为晚全新世温暖气候向偏凉气候渐变的特征，且波动加大；1.0~0.0 kaBP 为由温凉气候向现代偏暖气候的转变，其中可

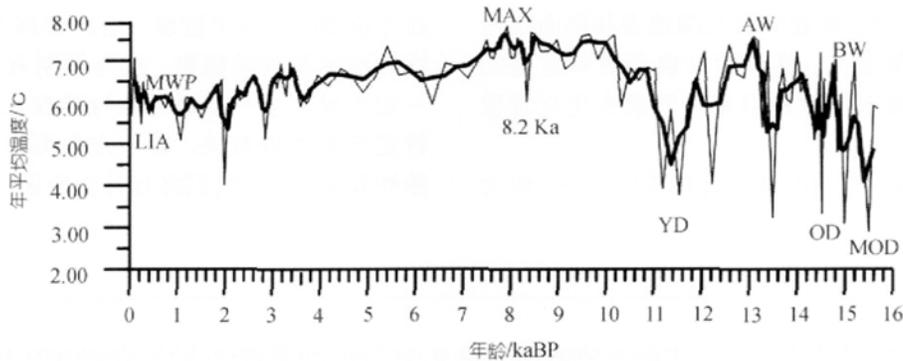


图3 根据神农架大九湖 297 cm 厚剖面泥炭层孢粉样本重建的 15.753 kaBP 以来的年平均温度曲线
图中：粗线为三点滑动平均，YD：新仙女木事件，OD：老仙女木事件，MOD：最老仙女木事件，AW：阿勒罗德暖期，BW：博令暖期，MAX：温度最高点，8.2ka：早全新世冷事件

以看出中世纪暖期(MWP)、小冰期(LIA)和现代温度升高的气候变化特征。

从整个重建温度变化曲线可以看出，15 kaBP 以来神农架大九湖地区经历了与北半球类似的气候变化，温度变化幅度在 2.89 (MOD)~7.92 (MAX)之间，振幅约 5℃，YD 时期的温度比现代平均温度约低 3.5℃，这与有关研究和模拟结果十分接近^[15]。在 YD 事件之前为剧烈的冷暖气候波动，以 YD 和阿勒罗德暖事件(AW)为典型特征。在经历约 1 ka(12~11 kaBP)的 YD 气候突变之后进入全新世及温暖气候适宜时期，其间出现典型的 8.2 kaBP 气候突变事件。气候适宜期平均温度比现代约高 1.0℃，这与其他相关研究结果相一致^[16,17]。自 4.0 kaBP 以来，气候进入一个新的波动时期，其波动幅度要远小于 YD 事件之前。图 3 还显示，虽然自 LIA 以来大九湖地区温度开始快速回升，但其温暖程度仍低于全新世气候适宜期和最暖期，也低于阿勒罗德暖期(AW)。值得注意的是，大九湖地区 LIA 以来的增温趋势是与全球变暖趋势相一致的，可以认为，温室效应对该地区植被变化有显著影响。

为了对本文重建温度的区域气候特征有更进一步的认识，这里与宋长青等人^[7]建立的中国北方地区孢粉气候函数和重建年平均温度曲线进行对比。文献^[7]使用包括新疆地区在内的中国北方 215 块表土孢粉样品得出了温度转换函数。转换函数因子包括的孢粉种类有云杉属、松属、桦属、栎属、莎草科、麻黄属、菊科和蒿属，其中乔木类和草本(蕨类)各占 1/2，与本文转换函数中相同的孢粉因子只有桦属和菊科，其他都不相同，表现出很大的区域差异。文献^[7]利用地层

孢粉和气候转换函数重建的 DJ 年平均温度序列与本文得出的年平均温度序列在总体趋势上基本一致，但数值稍低，而且对 YD 气候突变期表现得不显著，YD 以后的温度回升较缓慢，中全新世暖期持续时间稍短且温度偏低；同时对中全新世暖期以来的温度变化和近 1ka 以来的温度拟合与实际情况偏差较大，这可能反映了植被分布区域性差异的影响。

4 结论

() 通过对神农架大九湖地区地表孢粉样本分析，得出了不同科属孢粉随海拔高度变化的百分比含量数据，再根据神农架和周边地区气象站观测资料得出年平均温度的空间分布函数并计算出各孢粉采样点的年平均温度，在此基础上建立了神农架大九湖地区孢粉温度转换函数。该转换函数通过 10 种孢粉百分比含量可以定量恢复对应的温度值。

() 通过对大九湖地区 297 cm 厚泥炭层孢粉样本^[8]获得的孢粉浓度百分比含量，重建了该地区 15.753 kaBP 以来的年平均温度序列(图 3)。

() 该温度序列较好地反映了晚冰期以来的气候变化特征，对最老仙女木期、老仙女木、新仙女木、8.2kaBP 等极端冷气候事件和博令、阿勒罗德暖期及气候波动都有准确的指示，清楚地再现了晚冰期及其向全新世过渡时期冷暖波动频繁的温度变化特征。温度曲线还指示出大九湖从晚冰期冷湿气候向全新世温暖气候转变及早全新世缓慢升温的过渡时期、中全新世前期的气温波动上升期及 7.9kaBP 前后的最高温度。

() 重建的温度序列还揭示了全新世适宜期、晚全新世温干气候及近 1ka 以来大九湖的气候变化

特征. 因此可以认为, 神农架大九湖地表和剖面孢粉样本具有重要气候意义, 其温度转换函数和重建的温度序列对于研究末次冰期以来的气候变化有着重要参考价值.

转换函数显示, 在 10 种显著孢粉因子中, 作为

高等植物的乔木类孢粉只有冷杉属和桦属, 其他 8 种均为草本和蕨类植物, 这与早期有关研究结论^[11]有一定差异, 这一方面可能与神农架地区植被所处的特定气候条件有关, 另一方面可能与孢粉的气候敏感性有关, 对此我们将有另文论述.

参考文献

- 1 Webb III T, Bryson R A. Late and postglacial climate change in the Northern Midwest, USA: Quantitative estimates derived from fossil pollen spectra by multivariate statistic analysis. *Quat Res*, 1972, 2: 70—115
- 2 Shen Caiming, Tang Lingyu, Wang Sumin. Vegetation and Climate during the last 250000 years in Zoige Region. *Acta Micropalaentol Sin*, 1996, 13(4): 373—386
- 3 Deng Y, Zheng Z, Cour P, et al. Relation between pollen ratios and climate in east China and an attempt of paleoclimate reconstruction. *Acta Palaeontol Sin*, 2002, 41(4): 508—516
- 4 Liu H Y, Cui H T, Tian Y H, et al. Temporal-Spatial variances of holocene precipitation at the marginal area of the East Asian monsoon influences from pollen evidence. *Acta Botanica Sinica*, 2002, 44(7): 864—871
- 5 Peyron O, Bégeot C, Brewer S, et al. Late-Glacial climatic changes in Eastern France (Lake Lautrey) from pollen, lake-levels, and chironomids. *Quat Res*, 2005, 64(2): 197—211
- 6 Shi P J, Song C Q. Palynological records of environmental changes in the middle part of Inner Mongolia, China. *Chin Sci Bull*, 2003, 48(14): 1433—1438
- 7 宋长青, 吕厚远, 孙湘君. 中国北京花粉-气候因子转换函数建立及应用. *科学通报*, 1997, 42(20): 2182—2186
- 8 朱诚, 马春梅, 张文卿, 等. 神农架大九湖 15.753kaBP 以来的孢粉记录和环境演变. *第四纪研究*, 2006, 26(5): 814—826
- 9 李文漪, 刘光琇, 周明明. 湖北西部全新世温暖期植被与气候. 见: 施雅风主编, 孔昭宸副主编. *中国全新世大暖期气候与环境*. 北京: 海洋出版社, 1992. 94—99
- 10 刘光琇. 神农架大九湖地区表土孢粉分析. *西北植物学报*, 1990, 10(3): 170—175
- 11 刘会平, 唐晓春, 孙东怀, 等. 神农架大九湖 12.5kaBP 以来的孢粉与植被序列. *微体古生物学报*, 2001, 18(1): 101—109
- 12 何报寅, 张穗, 蔡述明. 近 2600 年神农架大九湖泥炭的气候变化记录. *海洋地质与第四纪地质*, 2003, 23(2): 109—115
- 13 吕厚远, 吴乃琴, 刘东生, 等. 最近 15 万年以来宝鸡黄土剖面植物硅酸体组合所反映的季节性气候变化. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 1996, 26(2): 131—136
- 14 刘会平, 唐晓春, 刘胜祥. 神农架花粉-气候转化函数的建立与初步应用. *华中师范大学学报(自然科学版)*, 2000, 34(4): 454—459
- 15 陈星, 于革, 刘健. 东亚地区 Younger Dryas 气候突变的数值模拟研究. *第四纪研究*, 2004, 24(6): 654—662
- 16 安芷生, 波特 S, 吴锡浩, 等. 中国中、东部全新世气候适宜期与东亚夏季风变迁. *科学通报*, 1993, 38(14): 1302—1305
- 17 陈星, 于革, 刘健. 东亚中全新世的气候模拟及其温度变化机制探讨. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2002, 32(4): 335—345