

植被反演方法的古气候要素量化：现代数据检验

吴海斌^{①②} 罗运利^③ 姜文英^① 李 琴^① 孙爱芝^② 郭正堂^{①②}

(^①中国科学院地质与地球物理研究所, 新生代地质与环境重点实验室, 北京 100029; ^②中国科学院大学, 北京 100049;

^③中国科学院植物研究所, 系统与进化植物学国家重点实验室, 北京 100093)

摘要 气候要素的量化是古气候研究的重要方向。为了充分考虑环境条件(如大气 CO₂ 浓度)对植被生长的影响, 利用孢粉数据更加准确的重建古气候要素, 尤其是与现代气候条件具有很大差异的冰期气候要素, 我们对第一代植被反演方法进行了改进, 增强了植被类型的模拟, 并利用转换矩阵实现了模型模拟植被类型和孢粉的生物群区类型的对接。将新方法运用于东亚季风区古气候要素的量化重建, 利用我国现代代表土孢粉的生物群区化数据和气候实测资料, 对植被反演方法重建的气候要素进行了检验。结果表明: 该方法能较好地反演植被类型, 并重建各气候要素; 其中, 最冷月温度、生物有效积温(>5°C)、有效湿度、年均温度和年降水重建值与实测值之间的相关系数(*R*)分别为 0.95、0.89、0.82、0.89 和 0.94, 均在显著相关的水平上。因此, 该方法可用于古气候要素的重建, 为下一步更好揭示东亚季风气候演化历史提供了新的手段。

关键词 植被反演 孢粉 生物群区 BIOME 4 定量重建 东亚季风

中图分类号 P532, Q914.5, Q944.571 **文献标识码** A

1 引言

在应对全球气候变化面临的核心科学问题中, 理解气候变化的机制、降低未来气候变化预估的不确定性, 是古全球变化研究面临的主要挑战^[1]。由于气候器测记录历史有限, 定量的连续器测资料不过一百多年^[2], 因此难以反映地球气候系统在不同时间尺度上的变率。对气候变化机制的全面理解, 须研究更长时间尺度的气候变化历史。

过去近半个世纪, 古气候学者基于海洋、湖泊、黄土、冰芯、石笋、树轮、珊瑚等记录的生物指标^[3-5]、物理指标^[6-8]和地球化学指标^[9-14], 成功实现了全球重要区域和特征时段古气候要素的量化重建^[15-20]。这些研究, 极大地加深了我们对地球系统气候演化过程及其动力机制的认识。

陆地植物作为自然界中对气候环境变化敏感的指标之一, 因为植物生长受控于气候因子以及该记录的全球普遍性, 所以得到了古气候研究的青睐。古气候学者通过植物的孢粉记录, 根据各植物种类在现代气候条件下的地理分布及其组合特征^[21,22],

利用转换函数^[23,24]、现代类比法(也称最佳类比法)^[25]、趋势面分析^[26,27]和共存分析^[28]等方法, 建立了孢粉记录与气候要素的量化关系, 初步实现了欧洲、美洲和非洲等区域的温度、降水等气候要素的量化重建^[19,29-35]。

在这一领域, 我国学者也做了大量的工作, 取得长足的进展。通过开展东亚不同区域的表土花粉研究, 建立了花粉-气候转换函数^[5,36,37]、气候-花粉响应面^[38]、最佳类比法^[39-41]和共存分析^[42,43]等古气候量化方法; 并基于新生代以来的孢粉序列, 获得了典型区域的古气候要素定量重建^[36-46]。系统开展了孢粉数据的生物群区化研究, 尤其是近年来随着我国第四纪孢粉数据库的建立和不断充实, 在孢粉生物群区化领域取得了重要进展^[47-52]。这些研究, 为进一步揭示东亚季风区气候环境演化历史提供了重要的基础。

然而, 利用上述现代过程的统计学方法进行古气候要素的量化重建, 均以下列假说为基础^[53]: 1) 现代气候条件下的各类孢粉种属组合变化能够反映气候信息; 2) 从过去到现在植物组合与气候条

第一作者简介: 吴海斌 男 43 岁 研究员 古气候变化与碳循环研究 E-mail: haibin-wu@mail.iggcas.ac.cn

* 国家自然科学基金项目(批准号:41125011、41572165 和 41430531)和中国科学院战略性先导科技专项项目一应对气候变化的碳收支认证及相关问题(批准号:XDA05120700)共同资助

2015-12-20 收稿, 2016-03-03 收修改稿

件之间关系是不变的,因此能用于古气候的重建。以上假说表明:这些方法均未能考虑新生代以来其他环境要素,如:大气 CO_2 浓度、气候的季节性变化对植物生长可能造成的影响。

近年来的一些研究^[54-58]已揭示,新生代以来气候变化和第四纪冰期-间冰期旋回中,大气 CO_2 浓度均存在很大的波动^[59,60],其对植被生长产生很大的影响。例如:在末次盛冰期的热带地区山地植被垂直带大幅度变化,有很大部分可能是因为大气 CO_2 浓度低影响植被生长所导致,并非完全是气候变化的结果^[55,56];另一方面,在冰期时段大量的孢粉证据揭示,当时植被类型与现代植被类型存在较大的差异^[31],且过去气候区间并非与现在的完全一致^[61],有些缺乏现代的可类比性^[62]。因此,利用统计学的方法进行古气候要素重建,存在一定的不确定性。全面考虑大气 CO_2 和季节变化等环境要素对植被生长的影响,结合机理过程分析,将有助于更加可靠地重建古气候要素的变化^[57,63]。

本次研究,我们将基于模拟植物生理过程基础上的全球植被模型 BIOME4^[64],结合反演过程^[63],利用孢粉的生物群区化数据^[65],进行古气候要素的定量化重建,并将该方法运用于东亚季风区。我们将严格检验这一方法的植被反演能力和各气候要素重建的精度,以便为下一步该区古气候要素定量化重建奠定基础。

2 数据

植被反演方法的古气候重建,我们利用 BIOME6000 孢粉生物群区化方法^[65]所获得的定量化植被类型得分数据。尽管生物群区化数据可能掩盖了一些生物群区中植物种属类型变化的信息^[66],但与孢粉种属相比,生物群区能很好地反映与气候

变化之间的确定关系^[67];并且,利用孢粉种属组合而成的生物群区数据,能一定程度上克服冰期时段孢粉种属缺乏现代可类比的弱点^[31],提高重建的可靠性;此外,利用这一标准化的孢粉数据定量化方法,使大区域尺度上(如洲际或全球)揭示植被的演化和古气候要素定量化重建成为了可能。

此次研究,我们使用我国第四纪孢粉数据库中现代表土孢粉的生物群区化数据^[50];现代气候数据则基于国家气象局全国 657 个气象台站 1951~2001 年的月平均气候资料¹⁾,利用神经网络插值技术^[68],实现各孢粉采样点逐月气候要素的空间插值;土壤质地数据来源于世界粮农组织的 1:5000000 全球数字化土壤图^[69]。现代大气 CO_2 浓度设定为 340ppmv,原因在于这批表土孢粉样品的采集主要完成于 20 世纪的 70 年代至 80 年代,当时大气 CO_2 浓度大约是 340ppmv。

3 方法

利用植被反演方法进行气候要素的重建,流程如图 1 所示。其核心就是将植被模型 BIOME4^[64]与反演过程^[63]相结合,获得孢粉数据所指示的植被类型生长的气候区间,进而实现气候要素的定量化重建。

3.1 植被模型

BIOME 4^[64]是模拟全球植被类型空间分布的优秀植被模型之一。它基于植物的生理过程模拟环境要素对植物生长的影响,尤其是植物的光合作用过程,实现大气 CO_2 浓度变化对植物的同化作用、气孔导度、叶面积指数和水分循环过程的影响;通过不同植被类型之间的竞争,进而获得植被类型的空间分布。该模型在古环境重建中具有很强的优势,

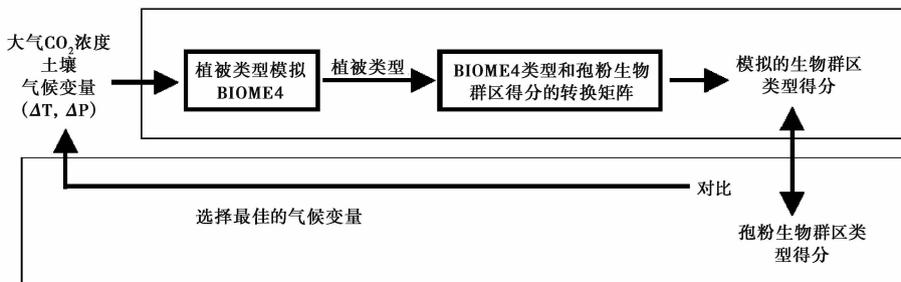


图 1 植被反演方法重建气候要素流程图

Fig. 1 Schematic diagram of the inverse vegetation modelling approach for the palaeoclimatic reconstruction

1) 中国气象局. 中国地面气象记录月报, 1951~2001

原因在于模拟仅需要有限的输入参数,如逐月温度、降水、光照、土壤质地和大气 CO₂ 浓度;而这些参数较容易在古气候模拟或古气候参数重建中获得,其中土壤质地、大气 CO₂ 浓度可从古环境和冰芯记录中得到。

由于植被的生长主要受控于气候条件,尤其是生物气候条件,如: > 5℃ 生物有效积累温度(GDD5)、最冷月平均温度(MTCO)、最热月平均温度(MTWA)和有效湿度(α);因此,基于植被反演方法,模拟输出上述生物气候要素,获得孢粉所指示植被类型的生物气候区间。此外,利用现代的逐月气候信息和古气候变量,实现对过去年均温度和年降水量的定量化重建。

3.2 植被反演过程

植被反演方法重建气候要素就是基于孢粉记录所指示的当时植被组成状况,利用植被模型模拟这一类型组成,从而获得这一植被所需的气候区间。这是一个典型的反演问题^[70],但难以用简单的线性或非线性数学方程来完成。一种可选择的方法,利用多次循环模拟逼近,从而获得孢粉植被类型所需要的气候组合,进而得到植被生长的气候区间^[63]。要完成上述循环,需在足够大的气候区间上,进行详尽的气候要素变化采样,因此需大量的计算机运算。在本研究中,我们采用贝叶斯逼近(Bayesian approach)的方法^[71],以减少数据运算量。

因为输入参数维数的增加,将极大地增加反演的计算量(指数级增加)。为了把计算量控制在合理的范围内,我们采用四维变量的方法。即通过改变1月、7月的温度和降水变化,利用全球现代气候要素的规律方程^[63],计算获得逐月的气候要素。

具体反演过程的步骤如下:1)选取1月、7月平均温度(T_{jan} , T_{jul})和平均降水(P_{jan} , P_{jul})相对现代气候的变化值,变化范围如表1所示;2)通过经

表1 模型模拟输入参数相对于现代气候要素的变化区间

Table 1 The ranges of input parameters for simulation at modern

模型参数	变化区间
ΔT_{jan}	[-10, 10]℃
ΔT_{jul}	[-10, 10]℃
ΔP_{jan}	[-90, 100]%
ΔP_{jul}	[-90, 100]%
CO ₂	340ppmv
循环次数	10000

验方程^[63]计算获得其他各月的气候要素变化量;3)把变化量叠加到孢粉样点的现代气候要素上,运行 BIOME4 模型模拟得到相应的植被类型;4)通过转换矩阵,把植被类型转换为生物群区得分,并利用欧氏距离计算与孢粉得分之间的距离,获得模拟值与实测值之间的相似值(Likelihoods)^[63];5)这一模拟值是否合理,根据 C 法则^[72]判断。如:相似值满足这一法则,我们就保留这一气候变量;反之,则拒绝;6)我们再次随机选择其他气候变量,并返回到1)进行下一次循环的模拟。上述过程,进行上千万次循环,获得足够的趋于目标植被类型的有效气候变量值。通常在 10000 次循环中,成功模拟出 200~300 次有效值。最后,我们对上述有效值进行数理统计,获得中间值和相应的置信区间。

由于 BIOME6000 计划中孢粉生物群区类型是根据 BIOME1 模型^[67]的类型定义的,而 BIOME1 发展至 BIOME4,植被类型模拟有所增加,且植被模拟从原先主要依靠生物气候要素,改进为主要依靠植物生理参数(如 NPP、叶面指数等),能更好模拟植物类型之间的竞争,因此,BIOME4 模型中生物群区类型的定义与孢粉生物群区类型的定义有所不同。

当前,要完全实现 BIOME4 模型生物群区类型与孢粉生物群区类型的一致,还需要做大量的工作。一种简单又可行的方法,是通过构建相应的转换矩阵,实现上述模拟的对接。这一转换矩阵见表2,我们把每种 BIOME4 植被类型定义为一组矢量值,这些值在 0~15 之间,这一范围通常代表了孢粉数据中生物群区类型得分的典型范围区间。其中,0 代表 BIOME4 类型与孢粉植被类型的可比性最小,15 则最大;一些中间值(如 5、10)代表植被类型具有相似的生物气候空间,如:孢粉类型中的寒温带落叶林(CLDE)与 BIOME4 模型中寒温带混交林(CIMxFo),它们在空间分布上是相邻的。所有这些值的设置均参照了全球现代孢粉数据中各生物群区类型的得分^[65]和自然状态下植被类型的空间分布图^[67]。

4 结果

4.1 植被反演与孢粉生物群区类型的对比

为了检验植被反演方法重建气候要素的可靠性,首先对该方法反演的生物群区类型与孢粉记录的类型进行比较(图2)。从图2中可看出,植被反

表 2 BIOME4 生物群区类型与孢粉生物群区得分之间的转换矩阵
Table 2 Transfer matrix from BIOME 4 typology to the pollen biome scores

BIOME4 类型**	孢粉生物群区类型*																
	CLDE	CLMX	COCO	COMX	DESE	STEP	TAIG	TEDE	TUND	XERO	HODE	SAVA	TDFO	TRFO	TSFO	WAMX	TXWS
TrEgFo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	15	10	0	0
TrSeDeFo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	10	15	0	5
TrDeFo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	15	5	10	0	0
TeDeFo	0	5	5	10	0	0	0	15	0	0	0	0	0	0	0	10	0
TeCoFo	0	0	15	10	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
WaMxFo	0	0	0	0	0	0	0	10	0	10	0	0	0	0	0	15	0
CoMxFo	0	0	10	15	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CoCoFo	0	0	15	10	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CLMxFo	10	15	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
EgTaig	5	10	5	0	0	0	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DeTaig	10	5	0	0	0	0	15	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0
TrSav	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	15	5	0	0	0	10
TrXsSl	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	15
TeXsSl	0	0	0	0	0	5	0	0	0	15	0	0	0	0	0	5	0
TeScWo	0	0	0	0	0	5	0	0	0	15	0	5	0	0	0	10	0
TeBlSav	0	0	0	0	0	5	0	5	0	5	0	15	0	0	0	5	0
OpCoWo	0	0	10	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BoPrkl	0	0	5	0	0	10	10	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0
TrGrl	0	0	0	0	0	15	0	0	0	0	5	5	0	0	0	0	10
TeGrlc	0	0	0	0	5	15	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0
TeGrlw	0	0	0	0	5	15	0	0	0	5	0	5	0	0	0	0	0
HotDesert	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	15	0	0	0	0	0	0
Desert	0	0	0	0	15	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ShTund	5	0	0	0	0	14	5	0	15	0	0	0	0	0	0	0	0
DShTund	0	0	0	0	0	5	0	0	15	0	0	0	0	0	0	0	0
PsShTund	0	0	0	0	0	5	0	0	15	0	0	0	0	0	0	0	0
FoLiMoss	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0
Barren	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Llce	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

* 孢粉生物群区类型: CLDE, cold deciduous forest, 寒温带落叶林; CLMX, cold mixed forest, 寒温带混交林; COCO, cool coniferous forest, 冷温带针叶林; COMX, cool mixed forest, 冷温带混交林; DESE, desert, 荒漠; HODE, hot desert, 热带荒漠; SAVA, savanna, 热带稀树干草原; STEP, steppe, 草原; TAIG, taiga, 泰加林; TDFO, tropical dry forest, 热带干旱森林; TEDE, temperate deciduous forest, 温带落叶林; TRFO, tropical rain forest, 热带雨林; TSFO, tropical seasonal forest, 热带季雨林; TUND, tundra, 冻原; TXWS, tropical xerophytic woods/scrub, 热带灌丛; WAMX, broadleaved evergreen/warm mixed forest, 暖温带常绿阔叶林或混交林; XERO, xerophytic woods/scrub, 温带灌丛

** BIOME4 生物群区类型: Barren, barren land, 裸地; BoPrkl, boreal parkland, 北方草原; CLMxFo, cold mixed forest, 寒温带混交林; CoCoFo, cool evergreen needle leaf forest, 冷温带常绿针叶林; CoMxFo, cool mixed forest, 冷温带混交林; Desert, desert, 荒漠; DeTaig, cold deciduous forest, 寒温带落叶林; DShTund, erect dwarf-shrub tundra, 矮灌丛冻原; EgTaig, cold evergreen needle leaf forest, 寒温带常绿针叶林; FoLiMoss, cushion-forb, lichen, and moss tundra, 草原冻原; HotDesert, hot desert, 热带荒漠; Llce, lice land, 冰缘; OpCoWo, temperate evergreen needleleaf open woodland, 温带常绿针叶灌丛; PsShTund, prostrate dwarf-shrub tundra, 匍匐灌丛冻原; ShTund, low and high shrub tundra, 灌丛冻原; TeBlSav, temperate deciduous broadleaved savanna, 温带落叶稀树干草原; TeCoFo, temperate evergreen needle leaf forest, 温带常绿针叶林; TeDeFo, temperate deciduous broadleaf forest, 温带落叶阔叶林; TeGrlc, cool temperate grassland, 冷温带草原; TeGrlw, warm temperate grassland, 暖温带草原; TeScWo, temperate sclerophyll woodland and shrubland, 温带灌丛森林; TeXsSl, temperate xerophytic shrubland, 温带灌丛; TrDeFo, tropical deciduous broadleaf forest and woodland, 热带落叶阔叶林; TrEgFo, tropical evergreen broadleaf forest, 热带常绿阔叶林; TrGrl, tropical grassland, 热带草原; TrSav, tropical savanna, 热带稀树干草原; TrSeDeFo, tropical semi-evergreen broadleaf forest, 热带半常绿阔叶林; TrXsSl, tropical xerophytic shrubland, 热带灌丛; WaMxFo, warm-temperate evergreen broadleaf and mixed forest, 暖温带常绿阔叶林/混交林

演方法能较好的模拟孢粉所指示的类型,除了亚热带地区有部分暖温带常绿阔叶林/混交林(WAMX)类型被模拟成为温带落叶林(TEDE)外,在其它空间上不存在系统的偏差。此外,在模型反演类型与

孢粉类型的不同点位中,有很大部分的植被类型在空间分布上是相邻的,即具有相似的气候区间,如:暖温带常绿阔叶林/混交林(WAMX)和温带落叶林(TEDE)、寒温带落叶林(CLDE)和泰加林

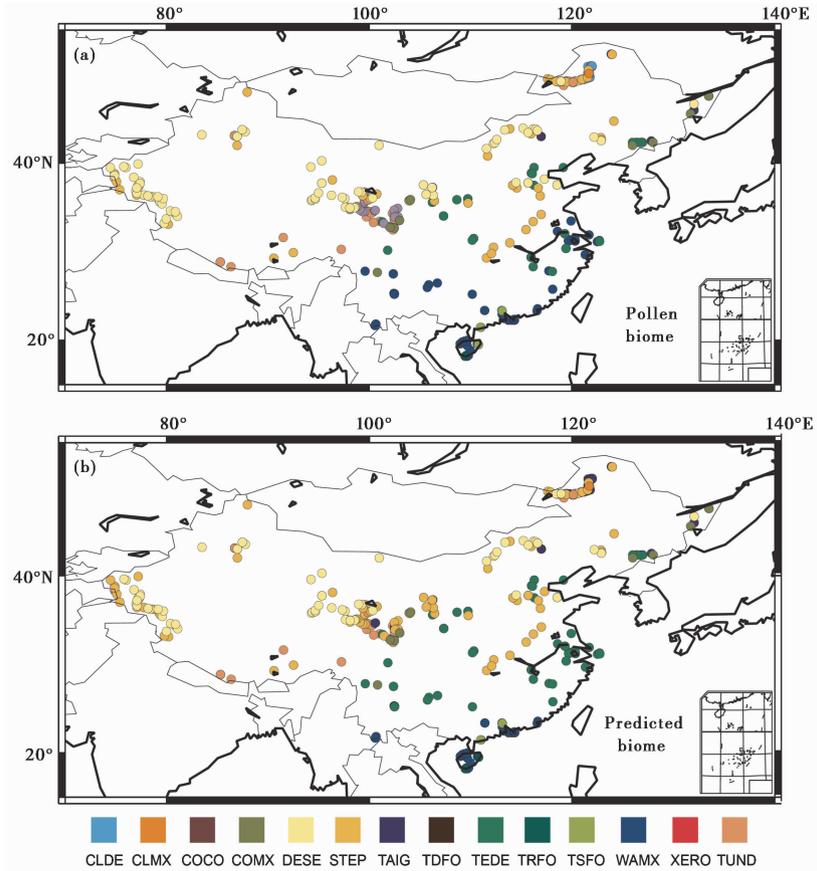


图2 中国现代表土孢粉植被类型(a)与反演重建植被类型(b)的比较
植被类型见表2

Fig. 2 Comparison of each site between pollen-based (a) and simulated (b) biomes in China at modern. See caption of Table 2 for the biome code

(TAIG)、草原(STEP)和冻原(TUND)等。

为了更好地揭示模型反演与孢粉记录的差异,对不同生物群区类型进行了统计(表3)。总体而言,53%的类型得到了准确的预测。其中,各类型的准确率存在较大的差别,主要集中在50%~100%之间,但寒温带落叶林(CLDE)、寒温带混交林(CLMX)和暖温带常绿阔叶林/混交林(MAWX)这3种植被类型的模拟准确率低。

上述结果表明,基于植被反演方法,并不能保证模拟结果全部趋向目标类型。其原因在于:利用蒙特卡罗(Monte Carlo)分析方法^[70]趋向目标函数,该逼近是基于各生物群区类型得分和孢粉得分之间的欧氏距离。尽管这一距离可趋于最小,但是由于有些样点的生物群区化过程中植被类型的最高得分与第二得分的相差很小,有的甚至得分相同^[50],因此,导致模型反演类型并非孢粉所指示的最高得分类型,而是与之相近的第二得分的类型。

此外,如接受具有相似气候区间的生物群区类

型(表3),模型的预测率将提高到80%。其它20%不成功反演可能与以下原因有关:首先,作为现代表土样品,在采集时有些样点的植被可能已受人类活动影响较大,已不能代表自然状态下的状况;其次,可能与全球孢粉生物群区方案有关。由于我国季风区植被生长有其区域特点,尽管现有的我国生物群区化方案进行了一些区域改进,但是这一方案仍未能完全反映我国季风区植被特征^[50],因此,下一步需建立适合我国季风区植被特点的生物群区化方案^[50],进而提高植被反演方法的准确性。

4.2 模型重建气候要素的检验

植被反演方法能否反演现代各气候要素,是该方法能否用于古气候重建的关键。为此,利用现代气候实测值对模型重建值进行了检验(表4)。相关性分析表明:模型重建值与实测值具有显著的线性相关(R 在0.75~0.95之间),其中,最冷月温度、生物有效积温($>5^{\circ}\text{C}$)、有效湿度、年均温和年降水

表 3 现代表土孢粉生物群区类型(‘p’)与模型反演类型(‘s’)的比较^a

Table 3 Numerical comparison of each site between pollen-derived(‘p’) and simulated(‘s’) biomes at 0 ka B.P. for China

类型	CLDE _s	CLMX _s	COCO _s	COMX _s	DESE _s	STEP _s	TAIG _s	TDFO _s	TEDE _s	TRFO _s	TSFO _s	TUND _s	WAMX _s	XERO _s	N	准确 /%	可接受 /%
CLDE _p	0	0	1	1	0	1	31	0	0	0	0	1	0	0	35	0	89
CLMX _p	0	1	1	2	0	2	18	0	1	0	0	1	0	0	26	4	73
COMX _p	0	0	0	20	1	1	15	0	1	0	0	2	0	0	40	50	53
DESE _p	0	1	5	2	71	21	1	0	5	0	0	1	0	2	109	65	84
STEP _p	0	0	1	5	2	74	13	0	7	0	0	6	0	0	108	69	76
TAIG _p	0	0	0	1	0	0	13	0	1	0	0	0	0	0	15	87	93
TEDE _p	0	0	0	4	0	4	21	0	58	0	0	0	2	0	89	65	67
TRFO _p	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	100	100
TSFO _p	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	1	0	4	50	75
TUND _p	0	0	0	5	2	22	7	0	0	0	0	40	1	1	78	51	89
WAMX _p	0	0	1	1	0	0	0	1	52	0	2	3	39	0	99	39	92
Average																53	80
Total SN															604	319	483

* SN——孢粉点位数(个), 准确——孢粉生物群区类型与模拟类型一致, 可接受——孢粉生物群区类型与模拟类型一致或相邻; 黑色数字——一致和相邻的生物群区类型; 生物群区类型见表 2。

表 4 植被反演方法重建气候要素与
实测气候要素的相关性分析^aTable 4 Regression coefficients between the reconstructed climates
by inverse vegetation model and observed meteorological values

气候要素	斜率 (slope)	截距 (intercept)	相关 系数 (R)	平均 残差 (ME)	均方根 误差 (RMSE)
年均温(°C)	0.82±0.02	0.92±0.18	0.89	0.16	3.25
最冷月温度(°C)	0.81±0.01	-1.79±0.18	0.95	-0.17	3.19
最热月温度(°C)	0.75±0.03	4.57±0.60	0.75	-0.19	4.02
年降水量(mm)	1.15±0.02	32.90±18.41	0.94	138.01	263.88
1月降水量(mm)	1.01±0.02	0.32±0.47	0.94	0.52	8.89
7月降水量(mm)	1.30±0.03	-21.67±4.52	0.89	16.45	52.90
>5°C 生物 有效积温(°C)	0.74±0.02	464.16±48.68	0.89	-106.69	693.60
有效湿度(%) (实际比潜在蒸发量)	0.87±0.03	8.84±1.42	0.82	3.06	13.18

* 样本数 N=483

的相关系数 R 分别达 0.95、0.89、0.82、0.89 和 0.94(表 4)。以上说明, 植被反演方法具有较好的气候要素重建能力。

当然, 生物有效积温在高值区重建值存在一定的负偏, 而年降水重建值存在正偏, 且误差较大。此外, 最热月温度的相关系数较低($R=0.75$)。下一步, 我们需进一步改进植被反演方法, 以提高气候要素重建的精度。

5 讨论和结论

植被反演方法, 与以往统计回归分析、趋势面

分析、最佳类比和共存分析等方法的主要区别在于: 以往的古气候重建方法是基于当前状况下的植被-气候分布空间, 通过数理统计获得它们之间的关系^[63]。因此, 这些方法不能考虑其他环境要素(如: 大气 CO_2 浓度)对过去时段植被生长的影响, 也无法获得现代气候区间以外植被与气候要素的相互关系^[61]。

利用植被反演的方法, 上述弱点可以得到很大程度上的克服^[57,63]。因为该方法基于现有植物生理过程基础上的植被模型-BIOME4, 考虑了气候要素的季节性变化、大气 CO_2 浓度对植物生长的影响; 并且在反演过去植被过程中, 该方法让气候要素的输入具有足够大的变化区间, 大气 CO_2 浓度(可从冰芯、海洋等记录中重建)作为一个输入参数, 模拟孢粉所记录的生物群区类型, 获得满足植被生长所需的气候状况, 进而实现古气候要素的定量化重建。这一方法是古气候重建从统计模型向机理过程迈出了重要的一步^[73], 使进一步更加准确地重建与现在气候环境具有较大差异的第四纪冰期和第三纪气候要素成为了可能。

与过去的第一代植被反演模型^[63]相比, 本次植被反演方法存在如下的改进: 首先, 使用了新一代的植被模型 BIOME4^[64], 与以前版本^[63]所使用的 BIOME3 模型^[74]相比, 其对高寒植被类型模拟有很大的增强, 因此能更加准确模拟植被的类型; 其次, 在反演中, 利用转换矩阵实现了 BIOME4 生物群区类型和孢粉类型的对接, 替代了原先基于现

代孢粉数据所建立的植物净初级生产力(NPP)与植被功能型(PFTs)得分之间的统计关系^[63]。尽管转换矩阵相对简单,但很实用,以上的检验也证明它能很好地实现气候要素的重建。

当然,作为古气候重建的新方法,植被反演也有它的不足之处。首先,该方法对植被模型具有很强的依赖性,重建精度直接与模型对植被模拟的准确性相关联;同时,BIOME4模型是一个全球性的植被模型,因我国季风区植被类型有其特殊性,模型对该区植被模拟精度还需要进一步的改进。其次,该方法不能保证所有的预测值均趋向于目标值,因此在逼近方法上还需进一步的改进。最后,BIOME4模拟类型与孢粉生物群区类型定义之间存在不同,这给数据之间的相互对比造成了困难,今后还需要建立统一的定义标准,实现模型和孢粉数据的直接对接。在未来,我们将利用不同的植被模型,进一步验证该方法的可靠性;同时将这一方法运用到全球其他区域,检验它的古气候定量化重建能力。

总之,植被反演方法在东亚区域的检验表明:该方法具有较好的植被反演和气候要素重建能力,为下一步定量化重建东亚季风区古气候演化历史提供了新的手段和方法。加强气候环境指标的现代过程机理研究^[75,76],全面提升我国古气候定量化研究的能力,不仅可打通现代环境研究与古环境研究的“壁垒”,并且还可带动气候和环境变化机理认识的突破,最终为气候变化趋势预估和影响评估提供更加可靠的依据。

致谢 本研究现代表土孢粉的生物群区化数据由中国第四纪孢粉数据库提供;审稿专家提出了建设性的修改意见,在此表示衷心感谢!

参考文献 (References)

- 1 丁仲礼. 试论应对气候变化中的八大核心问题. 见: 丁仲礼主编. 中国科学院 2009 年科学发展报告. 北京: 科学出版社, 2009. 98~104
Ding Zhongli. Eight core issues on climate changes. In: Ding Zhongli ed. Development Report 2009 of Chinese Academy of Sciences. Beijing: Science Press, 2009. 98~104
- 2 Jones P D, New M, Parker D E *et al.* Surface air temperature and its changes over the past 150 years. *Reviews of Geophysics*, 1999, **37** (2): 173~199
- 3 Imbrie J, Kipp N G. A new micropaleontological method for quantitative paleoclimatology: Application to a Late Pleistocene Caribbean core. In: Turekian K K ed. The Late Cenozoic Glacial

- Ages. New Haven: Yale University Press, 1971. 71~181
- 4 Lu H Y, Wu N Q, Liu K M *et al.* Phytoliths as quantitative indicators for the reconstruction of past environmental conditions in China II: Palaeo-environmental reconstruction in the Loess Plateau. *Quaternary Science Reviews*, 2007, **26**(5~6): 759~772
- 5 Lu H Y, Wu N Q, Liu K M *et al.* Modern pollen distributions in Qinghai-Tibetan Plateau and the development of transfer functions for reconstructing Holocene environmental changes. *Quaternary Science Reviews*, 2011, **30**(7~8): 947~966
- 6 Ding Z L, Liu T S, Rutter N W *et al.* Ice-volume forcing of East Asian winter monsoon variations in the past 800,000 years. *Quaternary Research*, 1995, **44**(2): 149~159
- 7 Lüthi D, Le Floch M, Bereiter B *et al.* High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000 ~ 800,000 years before present. *Nature*, 2008, **453**: 379~382
- 8 Shao X, Xu Y, Yin Z Y *et al.* Climatic implications of a 3585-year tree-ring width chronology from the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Quaternary Science Reviews*, 2010, **29**(17~18): 2111~2122
- 9 Dansgaard W. Stable isotope in precipitation. *Tellus*, 1964, **16** (4): 436~468
- 10 Nürnberg D. Magnesium in tests of *Neogloboquadrina pachyderma sinistral* from high northern and southern latitudes. *The Journal of Foraminiferal Research*, 1995, **25**(4): 350~368
- 11 Müller P J, Kirst G, Ruhland G *et al.* Calibration of the alkenone paleotemperature index $U_{37}^{K'}$ based on core-tops from the eastern South Atlantic and the global ocean (60°N~60°S). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1998, **62**(10): 1757~1772
- 12 Wang Y J, Cheng H, Edwards R L *et al.* A high-resolution absolute-dated Late Pleistocene monsoon record from Hulu cave, China. *Science*, 2001, **294**(5550): 2345~2348
- 13 Schouten S, Hopmans E C, Schefuß E *et al.* Distributional variations in marine crenarchaeotal membrane lipids: A new organic proxy for reconstructing ancient sea water temperatures? *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, **204**(1~2): 265~274
- 14 Hou J Z, D'Andrea W J, Huang Y. Can sedimentary leaf waxes record D/H ratios of continental precipitation? Field, model, and experimental assessments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, **72**(14): 3503~3517
- 15 CLIMAP Project Members. The surface of the ice-age Earth. *Science*, 1976, **191**(4232): 1131~1137
- 16 Farrera I, Harrison S P, Prentice I C *et al.* Tropical climates at the Last Glacial Maximum: A new synthesis of terrestrial palaeoclimate data. I. Vegetation, lake levels and geochemistry. *Climate Dynamics*, 1999, **15**(11): 823~856
- 17 Mann M E, Zhang Z H, Hughes M K *et al.* Proxy-based reconstructions of hemispheric and global surface temperature variations over the past two millennia. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, **105** (36): 13252~13257
- 18 MARGO Project Members. Constraints on the magnitude and patterns of ocean cooling at the Last Glacial Maximum. *Nature Geoscience*, 2009, **2** (2): 127~132

- 19 Bartlein P J, Harrison S P, Brewer S *et al.* Pollen-based continental climate reconstructions at 6 and 21ka: A global synthesis. *Climate Dynamics*, 2011, **37**(3): 775~802
- 20 Zhang Y G, Pagani M, Liu Z H. A 12-million year temperature history of the Tropical Pacific Ocean. *Science*, 2014, **344**(6179): 84~87
- 21 Grichuk V P. Late Pleistocene vegetation history. In: Velichko A A ed. Late Quaternary Environments of the Soviet Union. Minneapolis: University of Minnesota Press, 1984. 155~179
- 22 Fauquette S, Guiot J, Suc J P. A method for climatic reconstruction of the Mediterranean Pliocene using pollen data. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1998, **144**(1~2): 183~201
- 23 Imbrie J, Kipp N G. A new micropaleontological method for quantitative paleoclimatology: Application to a Late Pleistocene Caribbean core. In: Turekian K K ed. The Late Cenozoic Glacial Ages. New Haven, CT: Yale University Press, 1971. 71~181
- 24 Birds H J B, Gordon A D. Numerical Methods in Quaternary Pollen Analysis. London: Academic Press, 1985. 47~90
- 25 Guiot J, deBeaulieu J L, Pons A *et al.* A 140000-year climatic reconstruction from two European pollen records. *Nature*, 1989, **338**: 309~313
- 26 Bartlein P J, Prentice I C, Webb III T. Climatic response surfaces from pollen data for some eastern North American taxa. *Journal of Biogeography*, 1986, **13**(1): 35~57
- 27 Prentice I C, Bartlein P J, Webb III T. Vegetation and climate change in eastern Northern America since the Last Glacial Maximum. *Ecology*, 1991, **72**(6): 2038~2056
- 28 Mosbrugger V, Utescher T. The coexistence approach——A method for quantitative reconstructions of Tertiary terrestrial palaeoclimate data using plant fossils. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1997, **134**(1~4): 61~86
- 29 Guiot J, Harrison S P, Prentice I C. Reconstruction of Holocene precipitation patterns in Europe using pollen and lake-level data. *Quaternary Research*, 1993, **40**(2): 139~149
- 30 Cheddadi R, Yu G, Guiot J *et al.* The climate of Europe 6000 ago. *Climate Dynamics*, 1997, **13**(1): 1~9
- 31 Peyron O, Guiot J, Cheddadi R *et al.* Climatic reconstruction in Europe for 18,000 yr B.P. from pollen data. *Quaternary Research*, 1998, **49**(2): 183~196
- 32 Tarasov P E, Guiot J, Cheddadi R *et al.* Climate in Northern Eurasia 6000 years ago reconstructed from pollen data. *Earth Planet Science Letter*, 1999, **171**(4): 635~645
- 33 Tarasov P E, Peyron O, Guiot J *et al.* Last Glacial Maximum climate of the former Soviet Union and Mongolia reconstructed from pollen and plant macrofossil data. *Climate Dynamics*, 1999, **15**(3): 227~240
- 34 Peyron O, Jolly D, Bonnefille R *et al.* Climate of East Africa 6000 ¹⁴C yr B.P. as inferred from pollen data. *Quaternary Research*, 2000, **54**(1): 90~101
- 35 Sawada M, Viau A E, Vettoretti G *et al.* Comparison of North-American pollen-based temperature and global lake-status with CCCma AGCM 2 output at 6ka. *Quaternary Science Review*, 2004, **23**(3): 225~244
- 36 宋长青, 吕厚远, 孙湘君. 中国北方花粉-气候因子转换函数建立及其应用. 科学通报, 1997, **42**(20): 2182~2186
Song Changqing, Lü Houyuan, Sun Xiangjun. Pollen-climate transfer function in Northern China and its application. *Chinese Science Bulletin*, 1997, **42**(20): 2182~2186
- 37 Chen F H, Xu Q H, Chen J H *et al.* East Asian summer monsoon precipitation variability since the last deglaciation. *Scientific Reports*, 2015, **5**: 11186/DOI: 10.1038/srep11186
- 38 Sun Xiangjun, Wang Bengyu. Pollen-climate response surface of selected taxa from Northern China. *Science in China (Series D)*, 1996, **39**(5): 486~493
- 39 郑卓, Guiot J. 我国热带地区 40 万年以来古气候的定量恢复. 中山大学学报 (自然科学版), 1999, **38**(6): 94~98
Zheng Zhuo, Guiot J. A 400000-year paleoclimate reconstruction in tropical region of China. *Acta Scientiarum Naturalium, Universitatis Sunyatseni*, 1999, **38**(6): 94~98
- 40 Jiang W Y, Guiot J, Chu G Q *et al.* An improved methodology of modern analogues technique for palaeoclimate reconstruction in arid and semi-arid regions. *Boreas*, 2010, **39**(1): 145~153
- 41 Zheng Z, Wei J H, Huang K Y *et al.* East Asian pollen database: Modern pollen distribution and its quantitative relationship with vegetation and climate. *Journal of Biogeography*, 2014, **41**(10): 1819~1832
- 42 Yao Y F, Bruch A A, Mosbrugger V. Quantitative reconstruction of Miocene climate patterns and evolution in Southern China based on plant fossils. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2011, **304**(3~4): 291~307
- 43 Sun N, Li X Q. The quantitative reconstruction of the palaeoclimate between 5200 and 4300cal yr BP in the Tianshui basin, NW China. *Climate of Past*, 2012, **8**(2): 625~636
- 44 宋长青, 孙湘君. 花粉-气候因子转换函数建立及其对古气候因子定量重建. 植物学报, 1997, **39**(6): 554~560
Song Changqing, Sun Xiangjun. Establishment of transfer functions of the pollen-climatic factors in Northern China and the quantitative climatic reconstruction at DJ core. *Acta Botanica Sinica*, 1997, **39**(6): 554~560
- 45 穆会双, 许清海, 张生瑞等. 孢粉资料定量重建泥河湾盆地侯家窑遗址时期的古气候. 第四纪研究, 2015, **35**(3): 698~711
Mu Huishuang, Xu Qinghai, Zhang Shengrui *et al.* Pollen-based quantitative reconstruction of the paleoclimate during the formation process of Houjiayao Relic Site in Nihewan basin of China. *Quaternary Sciences*, 2015, **35**(3): 698~711
- 46 杨毅, 金培红, 董重等. 浙江天台-宁海晚中新世孢粉组合及其古植被和古气候. 第四纪研究, 2015, **35**(3): 669~682
Yang Yi, Jin Peihong, Dong Chong *et al.* Palynological assemblage from the Late Miocene of Tiantai-Ninghai area, Zhejiang, China and its paleovegetation and paleoclimate. *Quaternary Sciences*, 2015, **35**(3): 669~682
- 47 Yu G, Prentice I C, Harrison S P *et al.* Pollen-based biome reconstructions for China at 0ka and 6ka. *Journal of Biogeography*, 1998, **25**(6): 1055~1069

- 48 Yu G, Chen X, Ni J *et al.* Palaeovegetation of China: A pollen data-based synthesis for the Mid-Holocene and Last Glacial Maximum. *Journal of Biogeography*, 2000, **27**(3): 635~664
- 49 中国第四纪孢粉数据库小组. 中国中全新世 (6ka BP) 和末次盛冰期 (18ka BP) 生物群区的重建. *植物学报*, 2000, **42**(11): 1201~1209
Members of China Quaternary Pollen Data Base. Pollen-based biome reconstruction at Middle Holocene (6ka BP) and Last Glacial Maximum (18ka BP) in China. *Acta Botanica Sinica*, 2000, **42**(11): 1201~1209
- 50 中国第四纪孢粉数据库小组. 表土孢粉模拟的中国生物群区. *植物学报*, 2001, **43**(2): 201~209
Members of China Quaternary Pollen Data Base. Simulation of China biome reconstruction based on pollen data from surface sediment samples. *Acta Botanica Sinica*, 2001, **43**(2): 201~209
- 51 Ni J, Yu G, Harrison S P *et al.* Palaeovegetation in China during the Late Quaternary: Biome reconstructions based on a global scheme of plant functional types. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2010, **289**(1~4): 44~61
- 52 Ni J, Cao X Y, Jeltsch F *et al.* Biome distribution over the last 22,000 yr in China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2014, **409**: 33~47
- 53 Huntley B, Bartlein P J, Prentice I C. Climatic control of the distribution and abundance of beech in Europe and North America. *Journal of Biogeography*, 1989, **16**(6): 551~560
- 54 Polley H W, Johnson H B, Marino B D *et al.* Increase in C₃ plant water-use efficiency and biomass over glacial to present CO₂ concentrations. *Nature*, 1993, **361**(6407): 61~64
- 55 Jolly D, Haxeltine A. Effect of low glacial atmospheric CO₂ on tropic African mountain vegetation. *Science*, 1997, **276**(5313): 786~788
- 56 Street-Perrott F A, Huang Y S, Perrott A *et al.* Impact of lower atmospheric carbon dioxide on tropical mountain ecosystems. *Science*, 1997, **278**(5342): 1422~1426
- 57 Wu H B, Guiot J, Brewer S *et al.* Dominant factors controlling glacial and interglacial variations in the treeline elevation in tropical Africa. *Proceeding of the National Academy of Science of the United States of America*, 2007, **104**(23): 9720~9724
- 58 Cowling S A, Sykes M T. Physiological significance of low atmospheric CO₂ for plant-climate interactions. *Quaternary Research*, 1999, **52**(2): 237~242
- 59 EPICA Community Members. Eight glacial cycles from an Antarctic ice core. *Nature*, 2004, **429**: 623~628
- 60 Beerling D J, Royer D L. Convergent Cenozoic CO₂ history. *Nature Geoscience*, 2011, **4**: 418~420
- 61 Jackson S T, Williams J W. Modern analogs in Quaternary paleoecology: Here today, gone yesterday, gone tomorrow? *Annual Review of Earth Planetary Science*, 2004, **32**: 495~537
- 62 Guiot J, Hély-Alleau C, Wu H B *et al.* Interactions between vegetation and climate variability: What are the lessons of models and paleovegetation data. *Comptes Rendus Geoscience*, 2008, **340**(9~10): 595~601
- 63 Guiot J, Torre F, Jolly D *et al.* Inverse vegetation modeling by Monte Carlo sampling to reconstruct palaeoclimate under changed precipitation seasonality and CO₂ conditions: Application to glacial climate in Mediterranean region. *Ecological Modelling*, 2000, **127**(2~3): 119~140
- 64 Kaplan J O. Geophysical Applications of Vegetation Modeling. Lund: The Ph.D Thesis of Lund University, 2001. 15~50
- 65 Prentice I C, Jolly D, BIOME 6000 Participants. Mid-Holocene and Glacial-Maximum vegetation geography of the northern continents and Africa. *Journal of Biogeography*, 2000, **27**(3): 507~519
- 66 Williams J W, Shuman B N, Webb III T *et al.* Late-Quaternary vegetation dynamics in North America: Scaling from taxa to biomes. *Ecological Monographs*, 2004, **74**(2): 309~334
- 67 Prentice I C, Cramer W, Harrison S P *et al.* A global biome model based on plant physiology and dominance, soil properties and climate. *Journal of Biogeography*, 1992, **19**(2): 117~134
- 68 Guiot J, Cheddadi R, Prentice I C *et al.* A method of biome and land surface mapping from pollen data: Application to Europe 6000 years ago. *Palaeoclimates: Data Model*, 1996, **1**: 311~324
- 69 Food and Agriculture Organization (FAO). The Digitised Soil Map of the World (release 1.0). Report no. 67/1. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 1991
- 70 Mosegaard K, Tarantola A. Monte Carlo sampling of solutions to inverse problems. *Journal of Geophysical Research*, 1995, **100**(B7): 12431~12447
- 71 Gelman A, Carlin J B, Stein H S *et al.* Bayesian Data Analysis. New York: Chapman and Hall, 1995. 10~50
- 72 Fahmy T M. Odélisation de la Qualité Bactériologique de l'eau Potable et Optimization des Procédures de Contrôle. Paris: Doctorat, ENGREF, 1997. 1~224
- 73 Guiot J, Wu H B, Garreta V *et al.* A few prospective ideas on climate reconstruction: From a statistical single proxy approach towards a multi-proxy and dynamical approach. *Climate of the Past*, 2009, **5**(4): 571~583
- 74 Haxeltine A, Prentice I C. BIOME 3: An equilibrium terrestrial biosphere model based on ecophysiological constraints, resource availability, and competition among plant functional types. *Global Biogeochemical Cycles*, 1996, **10**(4): 693~709
- 75 倪健. 孢粉生物群区化与古植被定量重建. 第四纪研究, 2013, **33**(6): 1091~1100
Ni Jian. Biomisation and quantitative palaeovegetation reconstruction. *Quaternary Sciences*, 2013, **33**(6): 1091~1100
- 76 郑卓, 黄康有, 魏金辉等. 中国及其邻区现代孢粉数据: 空间分布特征和定量古环境重建中的应用. 第四纪研究, 2013, **33**(6): 1037~1053
Zheng Zhuo, Huang Kangyou, Wei Jinhui *et al.* Modern pollen data in China and adjacent areas: Spatial distribution features and applications on quantitative paleoenvironment reconstruction. *Quaternary Sciences*, 2013, **33**(6): 1037~1053

PALEOCLIMATE RECONSTRUCTION FROM POLLEN DATA USING INVERSE VEGETATION APPROACH: VALIDATION OF MODEL USING MODERN DATA

Wu Haibin^{①②} Luo Yunli^③ Jiang Wenying^① Li Qin^① Sun Aizhi^② Guo Zhengtang^{①②}

(^①Key Laboratory of Cenozoic Geology and Environment, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029;

^②University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049; ^③State Key Laboratory of Systematic & Evolutionary Botany, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093)

Abstract

Knowledge of quantitative palaeoclimates is a crucial for the evaluation of climate changes for the earth system. In order to improve the reliability of climate reconstruction, especially the climatologies during the glacial periods outside the modern observed climate space, an improved inverse vegetation model has been designed to quantitatively reconstruct past climates, based on pollen biome scores from the BIOME 6000 project. The method has been validated with surface pollen spectra from China by reconstructing the modern climate at each site and comparing it with the observed values. There are no systematically regional errors between pollen biomes and reconstructed biomes by inverse vegetation method. The high correlation coefficients (R) between the actual and reconstructed climate for the present-day pollen sites are 0.95, 0.89, 0.82, 0.89, and 0.94 for the mean temperature of the coldest month, the growing degree-days above 5°C, the ratio of actual to equilibrium evapotranspiration, the annual mean temperature and the annual precipitation, respectively. It demonstrated that the inversion method worked well for most climate variables in China. This new approach can improve our understanding on the climate changes of East Asian monsoon evolution.

Key words inverse vegetation approach, pollen data, biome scores, BIOME4, quantitative palaeoclimate reconstruction, East Asian monsoon