利用机器学习方法重建末次冰盛期以来青藏高原植被变化

秦锋^{1*}, 赵艳^{1,3}, 曹现勇²

1. 中国科学院地理科学与资源研究所地表层格局与模拟院重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院青藏高原研究所, 青藏高原地球系统与资源环境国家重点实验室, 古生态与人类适应团队, 北京 100101;

3. 中国科学院大学, 北京 100049

* 通讯作者, E-mail: qinfeng@igsrr.ac.cn

收稿日期: 2021-05-07; 收修改稿日期: 2021-10-29; 接受日期: 2021-11-11; 网络版发表日期: 2021-12-23

国家自然科学基金项目(批准号: 41690113)、中国科学院战略性先导科技专项项目(编号: XDA20070101)和国家自然科学基金项目(批准号: 42071114、41977395、41671202)资助

摘要 地质历史时期青藏高原的植被变化为理解高寒植被响应气候变化的机制提供重要证据。然而, 由于缺少合适的利用孢粉化石等代用指标定量重建高寒植被的方法, 阻碍了对青藏高原过去植被变化的深入理解。本研究基于青藏高原及其周边地区的现代孢粉数据, 采用一种有监督机器学习方法——随机森林算法, 构建利用孢粉数据重建青藏高原植被的模型, 对比模型对现代样点的预测结果与样点实际植被及生物群区化法的重建结果, 评估随机森林算法建立孢粉-植被模型的可靠性。结果显示, 基于现代孢粉数据, 利用随机森林模型重建的现代样点植被与实际植被有较高的一致性。与生物群区化法相比, 随机森林算法重建青藏高原地区现代植被的准确性更高, 可能更适用于该地区的古植被重建。基于51条孢粉化石记录, 利用随机森林模型重建了青藏高原2.2万年以来的植被变化, 重建的古植被格局变化大体与同时期全球气候变化和东亚季风演化趋势一致。末次冰盛期时, 青藏高原大部分地区是荒漠植被, 亚热带森林分布于高原东南缘。高寒草原从末次冰消期开始扩张, 并且在高原中部和东部逐渐形成地带性植被。高寒草甸从早全新世开始占据高原东部和东南部, 高原开始形成从东南至西北分布森林-草甸-草原-荒漠的格局。中全新世时, 亚热带森林向北扩张, 反映最适宜期的植被状况。之后, 高寒草甸和高寒草原在晚全新世再次向南扩张。

关键词 植被重建, 随机森林算法, 生物群区化法, 孢粉, 末次冰盛期, 青藏高原

1 引言

青藏高原的抬升影响了东亚季风强度(An等, 2001, 2015; Molnar等, 2010), 并在高原上形成了独特

的高寒生态系统(张新时, 1978; 郑度等, 1979; 吴征镒, 1980)。地质历史时期气候变化对青藏高原高寒植被形成和发展的影响受到广泛的关注(如唐领余和李春海, 2001; Chen等, 2020; Zhao等, 2020)。末次冰盛期以来的

中文引用格式: 秦锋, 赵艳, 曹现勇. 2022. 利用机器学习方法重建末次冰盛期以来青藏高原植被变化. 中国科学: 地球科学, 52(4): 697–713, doi: 10.1360/N072021-0126

英文引用格式: Qin F, Zhao Y, Cao X. 2022. Biome reconstruction on the Tibetan Plateau since the Last Glacial Maximum using a machine learning method. Science China Earth Sciences, 65(3): 518–535, <https://doi.org/10.1007/s11430-021-9867-1>

植被动态反映植被对冰期向间冰期转换过程中气候变化的响应, 青藏高原不少化石点已基于孢粉化石开展了末次冰盛期至今的植被演变研究(如Shen等, 2006; Zhao等, 2011; Herzsuh等, 2014; Li等, 2019; Shi等, 2020).

少数综述性研究定性地描述了末次冰盛期以来青藏高原植被分布变化的大体趋势, 如唐领余和李春海(2001)整合青藏高原孢粉记录, 分析高原不同区域全新世植被的变化特征; 唐领余等(2021)基于已发表的孢粉序列, 研究了2万年以来青藏高原从东南到西北不同样点的植被演替过程.

尽管青藏高原不少样点已开展了化石孢粉分析, 但基于化石孢粉组合定量重建古植被变化的研究较少, 仅有的量化古植被重建几乎都采用生物群区化法(biomisation, Prentice等, 1996). Herzsuh等(2006)报道了兹格塘错钻孔的孢粉组合, 并按照符合当地植被特征的生物群区划分方案, 定量重建当地全新世以来温性草原和高寒草原的变化. Herzsuh等(2009)重建了晚冰期以来寇察湖周围苔原和草原植被的变化. Dallmeyer等(2011)重建了过去6000年青藏高原不同植被带4个湖泊周围森林、灌丛、草原/草甸、荒漠的变化. 上述古植被定量重建的方法相同, 但是采用了不同的生物群区划分方案, 各研究的重建结果之间无法直接对比.

一些基于孢粉化石数据利用生物群区化法(Prentice等, 1996)定量重建中国过去植被分布的研究中, 也涵盖青藏高原地区(Yu等, 2000; Ni等, 2014; Sun等, 2020). 不过, 这些研究聚焦于整个中国的植被分布格局, 对青藏高原地区过去的植被变化缺乏深入分析. Yu等(2000)重建了18和6ka BP两个时段的植被分布, 使用的生物群区划分方案中能反映高寒植被的仅有苔原(tundra)一种生物群区类型. Ni等(2014)重建了末次冰盛期以来中国的植被分布变化, 他们采用的生物群区划分方案中有多个苔原类型可以反映高寒植被, 但是这些苔原类型不能完全对应青藏高原的植被. Sun等(2020)重建了中国中全新世的植被分布, 生物群区划分中将青藏高原的植被分为两种高寒生物群区. 总之, 目前尚缺乏能够较全面地反映青藏高原植被状况的定量重建方法.

另有两项研究用模型模拟的方法重建青藏高原过去的古植被分布. Song等(2005)用生物地理-生物地球

化学模型BIOME4模拟全新世早期青藏高原的植被分布, 与基于化石孢粉数据定性描绘的同时期青藏高原植被分区图对比, 验证模拟结果的可靠性. Dallmeyer等(2011)用耦合大气-海洋-植被模型ECHAM5/JSBACH-MPIOM模拟青藏高原6000年来的植被变化, 并用生物群区化法重建不同植被带4个样点的古植被演变, 用以验证模拟结果. 两项研究中用于验证模拟可靠性的代用指标证据都略显不足, 前者采用较粗尺度上定性分析的植被分布, 而后者用少数样点的定量重建结果表征整个高原的植被状况. 利用合适的方法, 基于化石孢粉数据全面重建青藏高原古植被变化, 将为模型模拟与代用指标对比, 及深入探讨古植被变化的机制提供重要证据.

最近, 一种有监督机器学习方法(supervised machine learning method)——随机森林算法(random forest algorithm)被用于建立孢粉-植被重建模型, 并定量重建古植被变化. Sobol和Finkelstein(2018)利用非洲和阿拉伯半岛的现代孢粉数据, 检验了包括随机森林算法在内的8种方法基于孢粉数据重建植被的可靠性, 结果显示随机森林算法的准确性最高. 随后, Sobol等(2019)利用随机森林算法在南非建立具有高准确性的孢粉-植被重建模型, 并用该模型重建Wonderkrater地区过去60ka的植被变化.

机器学习方法有潜力用于青藏高原地区的古植被定量重建, 不过其可靠性尚待验证. 本研究尝试用随机森林算法定量重建青藏高原的古植被变化. 首先, 基于青藏高原及其周边地区的现代孢粉数据用随机森林算法建立孢粉-植被模型, 将新建立的模型用于现代孢粉数据, 重建的现代植被与样点实际植被对比; 同时与生物群区化法基于同一套现代孢粉数据的重建结果对比, 检验随机森林模型的可靠性. 然后, 将新建立的随机森林模型用于青藏高原51条孢粉化石序列, 重建末次冰盛期以来青藏高原植被的时空格局变化.

2 材料与方法

2.1 研究区概况

青藏高原面积约254万平方千米(张镱锂等, 2014), 高原主体海拔在4000m以上. 气候主要受控于印度夏季风、东亚夏季风及中纬度西风(Chen等, 2020). 从东南向西北沿温度和湿度梯度, 植被依次出现森林-草

甸-草原-荒漠的高原地带性分布(张新时, 1978; 郑度等, 1979; 张新时, 2007).

热带雨林主要分布于喜马拉雅山脉南坡低海拔地区, 主要由热带常绿、半常绿乔木占优势, 如 *Dipterocarpus* spp.、*Artocarpus chaplasha*、*Dysoxylum* spp.、*Canarium resiniferum*、*Tetrameles nudiflora*、*Altingia excelsa*、*Chukrasia tabularis*、*Shorea assamica* 等. 青藏高原东南部分布亚热带常绿阔叶林, 优势类群主要是壳斗科的常绿乔木, 如 *Castanopsis* spp.、*Lithocarpus* spp.、*Cyclobalanopsis* spp.、*Quercus* 中的常绿种 (*Q. aquifolioides*、*Q. rehderiana*、*Q. semicarpifolia*) 等, *Schima*、*Machilus*、*Manglietia*、*Ficus* 等属的常绿类群也常成为优势种. 此外, *Pinus densata*、*P. yunnanensis*、*Tsuga dumosa* 等针叶树在也占较大比例. 高原东南部高海拔山地有大量山地寒温性针叶林, 优势类群包括 *Picea* (*P. likiangensis*、*P. asperata*、*P. aurantiaca*、*P. purpurea*、*P. brachytyla* var. *complanata*)、*Abies* (*A. georgei*、*A. squamata*)、*Sabina* (*S. tibetica*、*S. saltuaria*)、*Pinus* (*P. griffithii*)、*Larix* (*L. chinensis*) 等(张新时, 2007).

青藏高原东部以高寒灌丛和高寒草甸植被有主. 高寒灌丛优势类群包括 *Rhododendron* (*Rh. Capitatum*、*Rh. Thimifolium*、*Rh. Przewalskii*、*Rh. Violaceum*、*Rh. Litangensis*、*Rh. Nivale*、*Rh. Cephalanthoides*、*Rh. fastigiatum*)、*Salix* (*S. cupularis*、*S. oriterpha*、*S. atopantha*、*S. sclerophylla*)、*Potentilla fruticosa*、*Rosa sericea*、*Sibiraea angustata*、*Spiraea alpina*、*Caragana jubata* 等灌木. 高寒草甸优势植物主要是莎草科 *Kobresia* (*K. pygmaea*、*K. humilis*、*K. setchwanensis*、*K. capillifolia*、*K. prattii*) 和 *Carex* (*C. lanceolata*、*C. muiliensis*、*C. meyeriana*)、以及禾本科 *Elymus nutans*、*Roegneria nutans*、*Stipa purpurea*、*S. aliena*、*Deschampsia caespitosa* 等. 高寒草甸常见丰富的杂类草, 如 *Polygonum*、*Potentilla*、*Anaphalis*、*Leontopodium*、*Taraxacum*、*Saussurea*、*Pedicularis*、*Anemone*、*Trollius*、*Ranunculus*、*Thalictrum*、*Gentiana*、*Swertia*、*Oxytropis*、*Astragalus* 等属(张新时, 2007).

青藏高原中部高寒草原和温性草原占优势, 建群种主要是 *Stipa* (*S. purpurea*、*S. bungeana*、*S. subsessiliflora* var. *basiplumosa*、*S. roborowskyi*、*S. capilla-*

cea)、*Artemisia* (*A. wellbyi*、*A. younghusbandii*、*A. stracheyi*)、*Carex* (*C. moorcroftii*、*C. montis-everestii*). 其他重要类群包括 *Littledalea racemose*、*Orinus thoroldii*、*Pennisetum flaccidum*、*Aristida adscensionis* 等草本植物, 以及 *Caragana versicolor*、*Sophora moorcroftiana*、*Sabina pingii* var. *wilsonii*、*Potentilla fruticosa* 等灌木(张新时, 2007).

青藏高原西部和北部主要分布高寒荒漠和温性荒漠. 优势类群主要是藜科植物, 如 *Ceratoides* (*C. compacta*、*C. latens*)、*Salsola* (*S. abrotanoides*)、*Haloxylon* (*H. ammodendron*)、*Kalidium* (*K. foliatum*、*K. cuspidatum*)、喜旱植物 *Ephedra* (*E. przewalskii*、*E. intermedia*)、*Zygophyllum xanthoxylon*、*Nitraria* (*N. roborowskii*、*N. sibirica*)、*Ajania tibetica*、*Artemisia* (*A. rhodantha*、*A. arenaria*) 等也能在群落中占重要地位. 禾本科 *Stipa purpurea*、*S. glareosa* 和莎草科 *Carex moorcroftii* 与上述典型荒漠植物可共同组成荒漠草原(张新时, 2007).

2.2 现代孢粉数据

整合青藏高原及其周边17个植被地带1802个样点的现代孢粉数据作为训练集(Cao等, 2014; Zheng等, 2014; Zhao等, 2021)(图1). 为了尽量涵盖化石记录中可能出现的植被类型, 现代孢粉样点的覆盖范围比青藏高原范围更广. 现代孢粉组合来自832个表土、619个苔藓及351个湖泊表层沉积物样品. 虽然不同沉积物中孢粉组合特征可能存在差异(Fall, 1992; Wilmshurt和McGlone, 2005; Zhao等, 2009; Lisitsyna等, 2012), 但研究区单一沉积物类型的现代孢粉组合所能覆盖的植被带均较为有限(图1), 所以本文采用不同沉积物类型的现代孢粉数据作为训练集. 现代孢粉数据集中含504个原始孢粉类群, 通过合并异名, 并将低等级分类单元归并为较高等级的类群, 整理为230个孢粉类群; 并重新基于陆生花粉总数计算各孢粉类群的百分含量.

现代孢粉数据集中不少样品缺乏原始的植被描述, 不同样点原始植被信息的获取方法可能存在差异, 如野外植被调查范围不同, 采用的植被分类方案不同等. 因此, 所有现代孢粉样点重新根据植被图提取植被信息, 按照样点所处植被地带划分其植被类型. 植被地带是中国植被区划中植被区域的下级区划单位

图1 青藏高原植被区划与化石、现代孢粉样点位置

(张新时, 2007). 孢粉与植被关系研究表明, 相较于识别细尺度的植物群落信息, 现代孢粉组合能更好地区分较粗尺度的植被带(Felde等, 2014; 秦锋, 2021). 因此, 在植被地带这一尺度上应能较好地反映孢粉-植被关系, 并建立孢粉-植被重建模型.

2.3 化石孢粉数据

从“东亚晚第四纪孢粉数据库”(Cao等, 2013)中选取51条青藏高原化石孢粉记录(图1; 网络版附录A中附表A1, <http://earthcn.scichina.com>)重建末次冰盛期以来的植被变化. 化石点海拔在1974~5325m asl. 12个样点位于现代亚热带森林区域, 其中4个在中亚热带常绿阔叶林地带, 8个在亚热带山地寒温性针叶林地带; 7个样点位于青藏高原的高寒灌木-高寒草甸地带, 3个位于高寒草甸地带; 总计15个样点位于草原植被中, 高寒草原地带11个、温性草原地带3个、温带南部草原地带1个; 其余14个样点位于荒漠区, 包括5个高寒荒漠

地带、1个温性荒漠地带、8个温带半灌木-灌木荒漠地带. 化石孢粉数据合计269个孢粉类群, 按照与现代孢粉数据集相同的处理方法合并为135个类群.

所选化石孢粉序列的测年点位大多在3个以上. 采用贝叶斯方法(Bayesian method, Blaauw和Christen, 2011)为化石孢粉序列建立新的年代-深度模型, 运算在R v. 3.5.1(R Core Team, 2018)中利用rbacon 2.3.7(Blaauw和Christen, 2019)完成. 冬给措那、木格措、塔若错、西门错、伍须海的原始年代已使用贝叶斯方法校正, 而敦德冰芯的年代通过年纹层确定, 这些样点保留原始的年代-深度模型. 36个化石孢粉序列的时间分辨率在500年/样, 12个在500~1000年/样, 3个超过1000年/样(附表A1). 所有化石孢粉序列均用线性插值获取500年间隔的数据, 22ka BP至今共分为45个时段. 一些化石孢粉序列测年点位较少、或样品分辨率较低(附表A1), 导致这些序列的年代可能有较大误差, 不过本文仍将这些化石孢粉数据用于古植被重建, 以增加

对青藏高原的空间代表性. 另外, 本研究用多样点重建结果, 在较大尺度上研究植被格局变化, 一定程度上减少单个化石孢粉序列年代误差的影响.

2.4 植被重建方法

2.4.1 随机森林算法

基于现代孢粉组合及其相应植被信息, 利用随机森林算法(Breiman, 2001)建立孢粉-植被重建模型. 该算法基于一套数据拟合出多个分类树, 并汇总所有分类树的结果作最终预测(Breiman, 2001; Cutler等, 2007). 每一个分类树都基于原始数据集的一个自助法取样子集用分类回归树CART(classification and regression tree, Breiman等, 1984)方法拟合. 分类树的每个节点上根据随机选取的一组预测变量中最佳预测变量进行分割, 建成一个不需修剪的分类树. 然后, 利用未选入自助法取样子集的袋外数据(out-of-bag, OOB, 大约占原始数据集的1/3)检验该分类树, 估算误差. 所有分类树的误差取平均值作为模型的误差(袋外误差), 用于评估模型的预测能力. 模型建立过程中还可以通过计算准确率平均降低程度(mean decrease in accuracy)评价特定预测变量(本文为孢粉类群)的重要性. 通过对袋外数据中某一变量的值做随机的序列改变, 并保持其他变量不变, 用分类树对改变后的袋外数据做预测. 此时, 袋外误差相对于未修改变量时的增加程度即可用于衡量该变量的重要性. 模型训练流程参考Sobol和Finkelstein(2018)、Sobol等(2019)的方案. 随机森林中分类树的数量设为500, 每个节点随机选作预测变量的孢粉类群数设为11, 样品量高于15的植被类型用于模型拟合. 参数设定相同的条件下, 算法重复100次, 袋外误差最低的模型用于后续化石孢粉数据的预测, 定量重建青藏高原各化石点的植被变化, 进而恢复末次冰盛期以来不同时段青藏高原的植被分布格局. 随机森林模型的建立和应用在R v.3.5.1(R Core Team, 2018)环境下利用randomForest 4.6-14包(Liaw和Wiener, 2002)完成.

2.4.2 生物群区化法

基于同一套现代孢粉数据用生物群区化法(biomi-sation method, Prentice等, 1996)重建现代植被, 以此与随机森林算法的预测结果对比. 该方法重建植被的步骤如下(Prentice等, 1996; Prentice和Webb III, 1998):

- (1) 建立植物功能型(plant function types, PFT)分类系统, 根据孢粉类群母体植物的生理生态学和生物气候学特征, 将各孢粉类群划归一个或多个植物功能型;
- (2) 建立生物群区(biome)分类系统, 用特征植物功能型定义生物群区;
- (3) 在前两步基础上, 建立生物群区对孢粉类群的矩阵, 表明不同生物群区中各包含哪些孢粉类群;
- (4) 基于孢粉百分含量数据, 利用下列公式计算各生物群区的相似性得分:

$$A_{ik} = \sum_j \delta_{ij} \sqrt{\max[0, (p_{jk} - \theta_j)]},$$

式中, A_{ik} 是孢粉样品 k 中生物群区 i 的相似性得分; δ_{ij} 为生物群区 $\times$ 孢粉类群矩阵中孢粉类群 j 是否出现于生物群区 i 中; p_{jk} 是孢粉样品 k 中类群 j 的百分含量; θ_j 为孢粉百分含量阈值, 本文采用0.5%. 计算出相似性得分后, 孢粉样品的植被类型指定为相似性得分最高的生物群区. 多个生物群区的相似性得分相同时, 以包含特征植物功能型最少的生物群区作为该样品的生物群区类型(Prentice等, 1996). 植物功能型和生物群区划分采用Sun等(2020)的分类方案, 详见网络版附录B的附表B1~B3. 该方案包含二个对应青藏高原高寒植被的生物群区类型, 并且用现代孢粉数据重建中国现代植被分布时显示出较高的准确性(Sun等, 2020). 生物群区化法的运算用3Pbase软件(Guiot和Goeury, 1996)进行.

3 结果

3.1 随机森林算法结果

基于13个植被地带共1764个现代孢粉组合(每个植被地带至少含15个样点)利用随机森林算法建立孢粉-植被重建模型. 模型中的植被类型包括: 北热带季雨林和半常绿雨林、亚热带季风常绿阔叶林、中亚热带常绿阔叶林、北亚热带常绿-落叶阔叶混交林、暖温带南部落叶栎林、亚热带山地寒温性针叶林、高寒灌丛-高寒草甸、高寒草甸、温带南部草原、高寒草原、温性草原、暖温带灌木-半灌木荒漠、温带半灌木-灌木荒漠.

随机森林模型的总袋外误差(OOB error rate)为23.47%, 该模型重建的现代孢粉样点的植被类型分布与研究区植被带分布大体一致(图2), 不过模型对各植被类型的预测准确率存在差异(表1).

图2 现代孢粉样点的实际植被(a)与随机森林模型重建植被(b)对比

随机森林模型对中亚热带常绿阔叶林的预测准确率最高(93.56%), 该植被类型的少数样品被误判为高寒草原(2.99%)和亚热带山地寒温性针叶林(1.95%)。亚热带山地寒温性针叶林地带的样品大多预测准确(72.94%), 不过23.53%该植被带的孢粉样点被判定为

中亚热带常绿阔叶林。

随机森林模型对其余森林样点的预测准确率较低。北热带季节雨林和半常绿雨林样品中仅39.29%重建准确, 剩余样品主要误判为中亚热带常绿阔叶林(57.14%)。南亚热带季风常绿阔叶林样品中仅29.69%

表 1 随机森林模型对现代孢粉样品的重建结果与样点实际植被的对比^{a)}

实际植被对比预测结果	NTRF	SStBEF	MStBEF	NStBEDF	StMNF	SWTDQF	SaScM	AM	STS	TS	AS	WTD	TD	准确率
NTRF	11	1	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.39
SStBEF	0	19	44	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0.30
MStBEF	0	2	625	1	13	0	4	0	0	3	20	0	0	0.94
NStBEDF	0	0	15	10	1	3	20	0	2	0	0	0	1	0.19
StMNF	0	1	40	0	124	0	4	0	1	0	0	0	0	0.73
SWTDQF	0	0	5	6	0	2	5	0	4	0	1	0	1	0.08
SaScM	0	0	1	6	0	0	74	7	1	0	2	0	1	0.80
AM	0	0	0	0	0	0	2	59	1	0	7	0	2	0.83
STS	0	0	1	0	0	0	1	1	99	0	3	4	11	0.82
TS	0	0	7	1	0	0	1	1	5	6	13	0	2	0.17
AS	0	0	20	0	0	0	4	17	4	0	42	2	35	0.34
WTD	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	118	13	0.90
TD	0	0	0	0	0	0	1	0	6	0	5	11	161	0.87

a) NTRF, 北热带季节雨林和半常绿雨林; SStBEF, 南亚热带季风常绿阔叶林; MStBEF, 中亚热带常绿阔叶林; NStBEDF, 北亚热带常绿-落叶阔叶混交林; StMNF, 亚热带山地寒温性针叶林; SWTDQF, 暖温带南部落叶栎林; SaScM, 高寒灌丛-高寒草甸; AM, 高寒草甸; STS, 温带南部草原; TS, 温性草原; AS, 高寒草原; WTD, 暖温带灌木-半灌木荒漠; TD, 温带半灌木-灌木荒漠

预测准确, 而其余大部分(68.75%)同样误判为中亚热带常绿阔叶林。北亚热带常绿-落叶阔叶混交林样品大多被重建为其他植被, 38.46%重建为高寒灌丛-高寒草甸, 28.85%为中亚热带常绿阔叶林, 仅19.23%准确重建为北亚热带常绿-落叶阔叶混交林。暖温带南部落叶栎林样品的预测准确率仅为8.33%, 其余多被误判为北亚热带常绿-落叶阔叶混交林(25.00%)、中亚热带常绿阔叶林(20.83%)、高寒灌丛-高寒草甸(20.83%)、温带南部草原(16.67%)。

随机森林模型对荒漠样品的预测准确率较高, 90.08%的暖温带灌木-半灌木荒漠和87.50%的温带半灌木-灌木荒漠样点均能准确重建为相应植被, 而误判也多划分为另一荒漠类型。

高寒草甸样品中83.10%能准确重建, 其余主要误判为高寒草原(9.86%)。高寒灌丛-高寒草甸样品也有80.43%的准确率, 其余7.61%被误判为高寒草甸, 6.52%误判为北亚热带常绿-落叶阔叶混交林。

温带南部草原样点也有较高的预测准确率(82.5%), 误判样品多被判定为温带半灌木-灌木荒漠(9.17%)。高寒草原样品的预测准确率较低(33.87%), 其他多被误判为温带半灌木-灌木荒漠(28.23%)、中亚热带常绿阔叶林(16.13%)、高寒草甸(13.71%)。温性

草原样品中仅16.67%预测准确, 36.11%被误判为高寒草原, 19.44%误判为中亚热带常绿阔叶林, 13.89%误判为温带南部草原。

孢粉类群的准确率平均降低程度(mean decrease in accuracy)显示它们对随机森林模型准确率的贡献各不相同(图3)。Pinus、Amaranthaceae/Chenopodiaceae、Alnus对随机森林模型准确率影响最大, 准确率平均降低程度均在5%以上。Cyperaceae、Ephdera、Quercus (Evergreen)、Artemisia、Betula、Castanopsis/Lithocarpus等类群的准确率平均降低程度超过2%, 对模型也有重要贡献。此外, Tsuga、Abies/Picea、Nitraria、Ranunculaceae、Quercus(Deciduous)、Juglans、Asteraceae、Ericaceae等类群准确率平均降低程度在1%以上, 重要性也较高。

3.2 生物群区化法重建现代植被

利用生物群区化法重建青藏高原及其周边现代孢粉样点的植被, 结果显示现代孢粉样点被划归14个生物群区(表2, 图4, 网络版附录C), 包括热带雨林、热带季节雨林、南亚热带常绿阔叶林、中亚热带常绿阔叶林、北亚热带混交林、暖温带混交林、温带混交林、寒温带常绿针叶林、寒温带夏绿针叶林、高寒草

表 2 生物群区化法对现代孢粉样品的重建结果与样点实际植被的对比^{a)}

a) TRFO, 热带雨林; TSFO, 热带季节雨林; STFO, 南亚热带常绿阔叶林; MTFO, 中亚热带常绿阔叶林; WAMF, 北亚热带混交林; TEDE, 暖温带混交林; COMX, 温带混交林; CLEC, 寒温带常绿针叶林; CLDC, 寒温带夏绿针叶林; ALME, 高寒草甸; ALST, 高寒草原; STEP, 温带草原; TEDS, 温带荒漠草原; DESE, 荒漠

图 4 现代孢粉样点的实际生物群区(a)和用生物群区化法重建的生物群区(b)对比

甸、高寒草原、温带草原、温带荒漠草原、温带荒漠。

利用生物群区化法重建青藏高原及其周边现代孢粉样点植被的准确率不高(表2)。温带草原样点中重建结果与实际植被一致的占70.00%，其余11.67%误判为温带混交林，9.17%误判为温带荒漠。温带荒漠样点的重建准确率达60.29%，不过有29.86%的样点被误判为温带草原。除上述两种生物群区外，高寒草甸和热带季

节雨林的重建准确率相对较高。高寒草甸样点中38.65%预测准确，29.45%样点被误判为高寒草原，28.22%被误判为温带草原。热带季风雨林样点中重建植被与实际一致的占35.71%，其余25.00%被误订为南亚热带常绿阔叶林，21.43%被订为北亚热带混交林。

其他生物群区的重建准确率较低。寒温带常绿针叶林样点中仅21.18%的重建结果与实际生物群区一致，其余大部分被误判为温带混交林(26.47%)、高寒

草甸(15.29%)、北亚热带混交林(12.94%)。近半数的高寒草原样点(44.38%)被误判为温带草原, 仅15.63%样点的重建结果与实际植被一致, 另有不少样点被重建为寒温带常绿针叶林(16.25%)和温带荒漠(15.00%)。温带混交林样点中仅一个样点重建准确, 其余大部分被误判为温带草原(75%)。暖温带混交林样点主要被重建为暖温带混交林(8.33%)、温带混交林(29.17%)、温带草原(25.00%)、高寒草甸(16.67%)、寒温带常绿针叶林(12.50%)。现代孢粉样点中, 中亚热带常绿阔叶林生物群区的样点数量最多, 但利用生物群区化法重建的结果中仅有2%重建准确, 其余大部分被误订为寒温带常绿针叶林(43.71%)和北亚热带混交林(33.23%)。大部分北亚热带混交林样点被重建成高寒草原(25.00%)、温带混交林(23.08%)、高寒草甸(19.23%)、寒温带常绿针叶林(13.46%), 准确订为北亚热带混交林的仅占1.92%。南亚热带常绿阔叶林样点全部重建为其他生物群区类型, 大部分误判为寒温带常绿针叶林(76.56%)。

3.3 古植被重建

上述两种方法的重建结果与实际植被对比, 显示随机森林模型重建青藏高原及其周边的现代植被更为准确性。因此将随机森林模型用于青藏高原51个化石点的化石孢粉数据, 定量重建青藏高原22ka以来的植被变化。以500年为间隔, 总计45个时段的植被分布变化详见网络版附录B的附图1。22ka以来可分为五个主要的植被变化阶段(图5)。

阶段I(22~17ka BP)。青藏高原广布荒漠植被。该阶段11个时段中, 高原西、中、北部几乎所有化石点都是温带半灌木-灌木荒漠和暖温带灌木-半灌木荒漠。东缘和东南缘样点出现亚热带山地寒温性针叶林和中亚热带常绿阔叶林。在18.5~17ka BP, 东部个别样点出现高寒草原和高寒灌丛-高寒草甸。

阶段II(16.5~12ka BP)。温带半灌木-灌木荒漠和暖温带灌木-半灌木荒漠分布范围逐渐退到高原北部, 中亚热带常绿阔叶林仍主要分布于东缘和东南缘。高寒草原广布于高原中部和东部, 并逐渐形成一条高寒草原带。高寒灌丛-高寒草甸主要局限在高原东南部地区。

阶段III(11.5~8ka BP)。温带半灌木-灌木荒漠和暖温带灌木-半灌木荒漠主要分布在青藏高原北部和西

部, 偶尔出现于中部和东部个别样点。中亚热带常绿阔叶林仍分布于高原东缘和东南缘地区, 偶尔扩张到高原中部样点。在高原东部至东南部逐渐形成一条高寒灌丛-高寒草甸带, 高寒草原分布范围相应缩小。

阶段IV(7.5~6ka BP)。温带半灌木-灌木荒漠和暖温带灌木-半灌木荒漠局限于高原北部和西部。亚热带山地寒温性针叶林和中亚热带常绿阔叶林向北扩张, 高寒灌丛-高寒草甸分布范围缩小。

阶段V(5.5~0ka BP)。温带半灌木-灌木荒漠和暖温带灌木-半灌木荒漠继续占据高原北部和西部。高寒草原占据高原中部, 高寒灌丛-高寒草甸主要分布于东部和南部。亚热带山地寒温性针叶林和中亚热带常绿阔叶林主要分布于高原东南缘, 个别时段向北扩张, 如4和1.5ka BP(网络版附图1)。

4 讨论

4.1 随机森林算法重建现代植被的可靠性

随机森林算法重建现代孢粉样点的植被时, 重建结果与样点实际植被有较高的一致性(图2, 表1), 但对不同植被类型的重建准确率存在差异。

随机森林模型对草甸和荒漠样点的植被重建较为准确, 包括高寒草甸、高寒灌丛-高寒草甸、暖温带灌木-半灌木荒漠、温带半灌木-灌木荒漠(表1)。森林植被类型中, 中亚热带常绿阔叶林和亚热带山地寒温性针叶林样点具有较高的预测准确率。草原植被中, 只有温带南部草原样点的预测准确率较高。

除上述两个森林类型外, 研究区其余森林类型的样点常被随机森林模型误判为中亚热带常绿阔叶林(表1), 原因可能在于不同森林样点的孢粉组合都以 *Alnus*、*Betula*、*Pinus*、*Quercus* 等乔木类群占优势。也有一些森林样点被误判为开阔植被类型, 如不少北亚热带常绿-落叶阔叶混交林样点被划归高寒灌丛-高寒草甸植被, 可能由于北亚热带常绿-落叶阔叶混交林地带与高寒灌丛-高寒草甸地带相邻(图1), 处于森林地带边缘的样点容易受周边草甸植被孢粉传播的影响, 反映植被交错带的孢粉特征。以此类推, 暖温带南部落叶栎林样点常被重建为高寒灌丛-高寒草甸和温带南部草原。

随机森林模型对青藏高原内部高寒草原和温性草原样点的重建准确率均不高(表1), 大多误判为温带南

图5 利用随机森林模型重建的青藏高原22ka以来五个主要变化阶段的典型植被格局((a)~(e), 阶段 I~V), 以及化石点现代植被分布(f)

部草原、高寒草甸、温带半灌木-灌木荒漠, 原因可能是这些植被类型的孢粉组合中相似类群较多, 如 *Artemisia*、*Amaranthaceae/Chenopodiaceae* 等。此外, 不少高寒草原和温性草原样点被误判为中亚热带常绿阔叶林, 这可能是受高原东部和东南部亚热带森林远距离传播而来的乔木花粉影响。

生物群区化法基于同一套现代孢粉数据重建现代植被的准确率不及随机森林模型(表2)。温带草原和温带荒漠样点重建准确率较高。高寒草原和高寒草甸样点常被误判为其他非森林生物群区。森林样点中, 热带季节雨林样点的重建准确率相对较高, 而重建错误

的样点常划归其他森林类型。北亚热带混交林、暖温带混交林和温带混交林样点中均至少有一半被重建为非森林植被。寒温带常绿针叶林样点被重建成五种生物群区。亚热带常绿阔叶林样点均重建错误, 不过大多被误判为其他森林类型。

生物群区划分方案与植被区划之间的差异可能影响了本文利用生物群区化法在青藏高原及其周边地区重建植被的可靠性, 例如高寒灌丛和高寒草甸是青藏高原东部的地带性植被, 但在本文采用的生物群区划分方案中二者合并为高寒草甸(Sun等, 2020)。不过, Sun等(2020)采用同一套生物群区划分方案利用生物

群区化法重建中国现代植被分布时, 结果显示重建结果与实际生物群区具有较高的一致性(80%)。可能Sun等(2020)的生物群区划分方案更适合大陆、全球等较大尺度的植被重建。

由于随机森林模型和生物群区化法的植被类型划分不一致, 二者重建结果无法直接对比。因此将二者植被类型根据生物气候上的相似性归并为更宽泛的mega-biome(归并方案详见网络版附录B中附表B4), 以便对比。因生物气候学特征相似而具有相似孢粉组合特征的植被类型合并之后, 随机森林模型和生物群区化法重建结果与实际植被对比时, 准确率均有所提高, 分别升至82.57%和43.01%。

基于孢粉数据利用随机森林模型重建的现代样点植被清晰地反映了植被的地带性分布(图6)。热带森林分布于研究区最南端, 亚热带森林处于青藏高原周边东部至东南部, 温带森林少量分布于研究区东部的温带地区, 寒温性针叶林分布于高原东南部, 高寒草甸/灌丛占据高原东部, 温带/高寒荒漠占据研究区北部, 温带/高寒草原散布于高原中部至研究区东北地区。

生物群区化法对现代孢粉数据的重建结果反映出与随机森林模型结果类似的植被分布(图6)。不同的森林类型占据高原周边东部至东南地区, 高寒草甸/灌丛主要分布在高原东部, 温带/高寒草原广布于整个青藏高原及研究区东北部温带地区, 温带/高寒荒漠同样占据研究区北部。

青藏高原的中部至西部的一些高寒草原、高寒荒漠样点, 用两种方法均重建为森林植被(图6)。这些误差可能来源于高原周边森林远距离传播的乔木花粉影响, 而且花粉远距离传播的影响在植被覆盖度较低的青藏高原内部尤为显著(Cour等, 1999)。

总之, 随机森林模型有潜力用于重建青藏高原过去的植被变化。而生物群区化法采用已有的生物群区和植物功能型划分方案时, 在研究区重建植被的准确性有待提高。

4.2 两种植被定量重建方法的优缺点

随机森林算法最近才引入到基于孢粉数据定量重建古植被的研究中(Sobol和Finkelstein, 2018; Sobol等, 2019)。而生物群区化法是近二十年来孢粉学研究中定量重建古植被的常用方法(Prentice和Jolly, 2000; Pickett等, 2004; Marchant等, 2009), 在对中国现代和过去

植被的重建中已显示出较高可靠性(Yu等, 2000; Chen等, 2010; Ni等, 2010; Ni等, 2014; Tian等, 2018; Sun等, 2020)。两种方法都有各自优缺点及适用范围。

用随机森林算法建立孢粉-植被重建模型有三方面主要优点(Sobol等, 2019): (1) 基于现代孢粉组合及其相应植被信息分析孢粉-植被关系, 避免主观划分植物功能型和生物群区; (2) 所有孢粉数据均用于分析, 减少信息丢失; (3) 模型建立过程中已包含统计检验。

作为以数据为基础的方法, 随机森林算法的可靠性主要依赖训练集的质量。孢粉鉴定的可靠性是孢粉数据集质量的重要方面。由于本文现代孢粉数据集来自过去多年积累的现代孢粉数据, 不同样点的孢粉鉴定精度存在差异。在整理孢粉类群时将分类等级较低的类群合并为较高等级的类群(科和属), 以保持一致性, 但也增加了将生态适应性不同的类群合并为同一类群的风险。

影响孢粉-植被关系的因素也会增加随机森林模型的不确定性, 如花粉远距离传播造成的误差, 不同植物花粉产量的差别, 同一植被类型内部孢粉组合的差异, 不同沉积物类型孢粉组合的差异等。另外, 随机森林算法从孢粉-植被数据中识别出数据的关系, 可能不具有生态意义(Sobol等, 2019)。

随机森林算法本身也有一些弱点。随机森林模型无法重建不包含在训练集中的植被类型, 例如青藏高原的高寒荒漠和温性荒漠包含的现代样点数量不足15个, 未包含在训练集中, 因此随机森林模型无法重建这两种植被类型。而且, 随机森林模型对样本量较低的植被类型的预测准确率通常较低。7种具有较高预测准确率的植被类型所包含的现代样点数量占整个现代孢粉数据集的81%(表1), 而其余6种植被类型的样点数量仅占19%, 预测准确率也较低。可见, 样本量较低时可能无法提供足够的代表性。

生物群区化法的优点是依循生态学规律评估孢粉组合与生物群区的关系。该方法根据植物类群的生理生态学和生物气候学特征划分植物功能型(Ni等, 2010), 依据生物地理学规律定义生物群区, 使用合乎逻辑的公式计算生物群区的相似性得分(Prentice等, 1996)。生物群区化法的可靠性有赖于综合孢粉学和生态学视角, 建立合理的生物群区和植物功能型划分方案。另外, 生物群区化法不需要先行利用训练集建立孢粉-生物群区关系, 即可直接用于重建古植被。

图 6 基于现代孢粉数据利用随机森林模型(a)和生物群区化法(b)重建的mega-biome对比

生物群区化法也有三方面的弱点(Sobol等, 2019). 首先, 划分植物功能型和生物群区时多少引入了主观判断. 其次, 生物群区化法常需人为调节植物功能型和生物群区划分方案, 可能过度拟合孢粉-生物群区的关系. 最后, 一套植物功能型和生物群区划分方案通常只适用于特定尺度的植被重建. 例如, 本文采用的Sun等(2020)方案在重建中国范围的植被分布时显示出较高可靠性, 但在本文研究区重建现代植被的准确性不高. 原因在于这套植物功能型和生物群区划分方案是依照中国全境的植被格局设计的, 可能无法全面地反

映青藏高原的区域植被特征.

在未来研究中, 随机森林模型的可靠性可以从以下三个方面进行提升: (1) 在现代样点数量不足的植被地带(高寒荒漠和温性荒漠等)开展新的现代孢粉调查, 提高现代孢粉数据对这些植被类型的代表性; (2) 开展湖泊沉积物的现代孢粉研究, 以此为湖泊钻孔的孢粉组合补充更合适的现代类比, 提高孢粉数据来源的一致性; (3) 使用ERV模型方法(Extended R-value model, Sugita, 2007a, 2007b; Bunting和Middleton, 2009)校正孢粉与植被之间的数量关系, 减少

不同孢粉类群代表性和传播能力差异的影响。对于生物群区化法, 可以依据青藏高原的区域植被特征调整植物功能型和生物群区划分方案, 提高其可靠性和适用性。

4.3 青藏高原末次冰盛期以来的植被变化

将新建立的随机森林模型用于青藏高原51个化石点的孢粉组合, 重建22ka以来青藏高原植被的时空格局变化(图5, 网络版附图1)。化石点覆盖了青藏高原不同的植被地带, 但各化石点孢粉序列跨越的时代各不相同, 因此45个研究时段上化石点数量不同, 某些时段部分地区缺乏化石点覆盖。古植被重建结果显示, 从末次冰盛期至今青藏高原的植被格局变化大致与全球气候和东亚季风的变化趋势一致。

在22~17ka BP(阶段I), 荒漠植被占据青藏高原大部分地区, 对应末次冰盛期冷干的气候条件(Shakun和Carlson, 2010; Clark等, 2012)。亚热带森林分布于高原东缘和东南缘低海拔地区。在18.5~17ka BP期间, 草甸和草原植被开始在高原东部扩张, 但尚未成为地带性植被。

在16.5~12ka BP期间(阶段II), 草原植被在高原东部和中部显著扩张, 逐渐发展成为一条草原带。高原从南到北形成亚热带森林、草原、荒漠的分布格局。相比上一阶段, 草甸植被在高原东部占更重要的地位。该阶段植被变化对应末次冰消期的环境变化(Clark等, 2012; Shi等, 2021)。16.5~13ka BP草原扩张、荒漠向北退缩; 而13ka BP之后, 荒漠带有向南扩张的趋势, 可能体现新仙女木事件的影响。

早全新世时(阶段III, 11.5~8ka BP), 草甸植被占据了青藏高原东部和东南部, 逐渐成为地带性植被。荒漠植被主要局限于北部和西部, 而森林植被向北扩张。逐渐形成从东南到西北依次分布森林-草甸-草原-荒漠的格局, 类似现今青藏高原的植被地带性分布。植被变化与早全新世全球气候变暖(Marcott等, 2013)、亚洲季风增强(Dykoski等, 2005)的趋势一致。不过, 在9.5~8kaBP期间, 荒漠植被扩张到青藏高原中部, 可能体现了8.2ka冷事件等(Alley等, 1997; Bond等, 1997)千年尺度气候波动的影响。

青藏高原植被在阶段IV(7.5~6ka BP)的分布体现了适宜期特征, 对应东亚季风区的中全新世适宜期(Chen等, 2019; Zhang等, 2021)。这一阶段亚热带森林

扩张到整个研究时段的最北端, 而荒漠局限于研究区北部和西部。

过去5.5ka(阶段V)亚热带森林向南退缩, 草甸分布区南移。草原植被逐渐占据现今的青藏高原的高寒草原区域, 间或入侵现今的高寒草甸区域。中-晚全新世青藏高原的植被变化对应气候适宜期之后相对凉干的气候(Marcott等, 2013; Chen等, 2020)。

值得注意的是, 青藏高原南部腹地一些样点常重建为亚热带森林植被, 应为重建有误, 造成误差的原因可能来自两个方面: 一方面, 高原内部的样点容易受远距离传播而来的乔木花粉影响, 尤其是高原东南的山地针叶林中针叶树的具气囊花粉传播能力强, 对高原内部样点有很大影响; 另一方面, 随机森林模型对高原腹地高寒草原和温性草原样点的预测误差较大(表1)。

大体上, 荒漠植被在末次冰盛期时占据青藏高原大部分地区, 之后其分布区逐渐北移, 主要分布在高原北部和西部。草原植被从约15ka BP开始占据重要地位, 而草甸向高原东部和东南部的扩张主要发生在全新世。亚热带森林在整个研究时段始终在高原东缘和东南缘占主导, 并在早、中全新世向北扩张。青藏高原东部和南部植被的变化最剧烈, 森林、草甸、草原、荒漠四种植被不断更替。不同时段植被对气候变化的响应也存在差异, 例如, 荒漠在相对冷干的末次冰盛期、两次仙女木事件等时期向东、南扩张, 但是在中全新世适宜期之后气候相对恶化时则局限于高原北部和西部。

利用随机森林算法开展的古植被定量重建展示了青藏高原末次冰盛期以来连续的植被变化过程。未来, 通过对比古植被重建结果与模型模拟结果或者基于孢粉数据定量重建的古气候变化数据, 可以为研究高寒植被对气候变化的响应提供重要参考。重建的古植被格局变化较好地对应了全球气候变化趋势, 从侧面反映随机森林算法重建古植被的可靠性。可见, 该方法有潜力用于其他地区的古植被定量重建。

5 结论

由于缺少合适的方法, 青藏高原尚缺乏末次冰盛期以来可靠的植被定量重建, 限制了对高寒植被响应气候变化过程的理解, 也阻碍了模型模拟与化石记录

对比揭示古植被变化机制的深入研究. 本文尝试采用有监督机器学习方法重建青藏高原古植被变化. 基于现代孢粉组合用随机森林算法建立孢粉-植被重建模型, 用该模型重建青藏高原及其周边地区现代孢粉组合的现代植被时显示出较高的准确性. 与生物群区化法相比, 随机森林算法在青藏高原地区预测现代植被的准确性更高, 不过两种方法也各有优缺点. 总之, 随机森林算法是基于化石孢粉记录重建青藏高原植被的可靠方法.

基于51个样点的化石孢粉组合, 利用新建立的随机森林模型, 定量重建青藏高原2.2万年以来的植被变化, 形成不同时期的青藏高原植被分布图, 结果显示末次冰盛期以来青藏高原植被格局变化可以分为五个主要阶段, 这些植被格局变化很好地对应了末次冰盛期以来的全球气候变化和亚洲季风演变的趋势. 本研究是在中国利用机器学习方法定量重建古植被的首次尝试. 随机森林算法在重建青藏高原古植被时显示出较高的可靠性, 按照与本文相似的流程, 该方法极有潜力用于中国其他地区的古植被定量重建. 甚至对流程进行一定的调整后, 有望用于古气候定量重建. 本文重建的青藏高原古植被数据, 可以在未来研究中为模型模拟提供证据, 增进对高寒植被变化机制的理解.

致谢 感谢中山大学郑卓教授和中国科学院南京地理与湖泊研究所肖霞云研究员分享现代孢粉数据, 感谢河北地质大学梁琛博士协助分析数据, 感谢中国科学院庐山植物园张志勇博士在生物群区化法方面的有益讨论.

参考文献

- 唐领余, 李春海. 2001. 青藏高原全新世植被的时空分布. 冰川冻土, 23: 367–374
- 唐领余, 沈才明, 吕厚远, 李春海, 马庆峰. 2021. 青藏高原第四纪孢粉研究五十年. 中国科学: 地球科学, 51: 2015–2034
- 吴征镒. 1980. 中国植被. 北京: 科学出版社
- 秦锋. 2021. 青藏高原草原带和荒漠带湖泊表层沉积物现代花粉研究. 中国科学: 地球科学, 51: 437–452
- 张新时. 1978. 西藏植被的高原地带性. 植物学报, 20: 140–149
- 张新时. 2007. 中国植被及其地理格局-中华人民共和国植被图 (1:1000000)说明书. 北京: 地质出版社
- 张懿铨, 李炳元, 郑度. 2014. 青藏高原范围界线与面积地理信息系统数据. 地理学报, 69: 65–68
- 郑度, 张荣祖, 杨勤业. 1979. 试论青藏高原的自然地带. 地理学报,

- 34: 1–11
- Alley R B, Mayewski P A, Sowers T, Stuiver M, Taylor K C, Clark P U. 1997. Holocene climatic instability: A prominent, widespread event 8200 yr ago. *Geology*, 25: 483–486
- An Z S, Kutzbach J E, Prell W L, Porter S C. 2001. Evolution of Asian monsoons and phased uplift of the Himalaya-Tibetan plateau since Late Miocene times. *Nature*, 411: 62–66
- An Z S, Wu G X, Li J P, Sun Y B, Liu Y, Zhou W J, Cai Y J, Duan A M, Li L, Mao J Y, Cheng H, Shi Z G, Tan L C, Yan H, Ao H, Chang H, Feng J. 2015. Global monsoon dynamics and climate change. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 43: 29–77
- Blaauw M, Christen J A. 2011. Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process. *Bayesian Anal*, 6: 457–474
- Blaauw M, Christen J A. 2019. rbacon: Age-Depth Modelling using Bayesian Statistics
- Bond G, Showers W, Cheseby M, Lotti R, Almasi P, Demenocal P, Priore P, Cullen H, Hajdas I, Bonani G. 1997. A pervasive millennial-scale cycle in North Atlantic Holocene and Glacial climates. *Science*, 278: 1257–1266
- Breiman L, Friedman J H, Olshen R A, Stone C J. 1984. Classification and Regression Trees. Monterey: Wadsworth and Brooks/Cole
- Breiman L. 2001. Random Forests. *Mach Learn*, 45: 5–32
- Bunting M J, Middleton R. 2009. Equifinality and uncertainty in the interpretation of pollen data: The Multiple Scenario Approach to reconstruction of past vegetation mosaics. *Holocene*, 19: 799–803
- Cao X Y, Herzschuh U, Telford R J, Ni J. 2014. A modern pollen-climate dataset from China and Mongolia: Assessing its potential for climate reconstruction. *Rev Palaeobot Palynol*, 211: 87–96
- Cao X Y, Ni J, Herzschuh U, Wang Y B, Zhao Y. 2013. A late Quaternary pollen dataset from eastern continental Asia for vegetation and climate reconstructions: Set up and evaluation. *Rev Palaeobot Palynol*, 194: 21–37
- Chen F H, Chen J H, Huang W, Chen S Q, Huang X Z, Jin L Y, Jia J, Zhang X J, An C B, Zhang J W, Zhao Y, Yu Z C, Zhang R H, Liu J B, Zhou A F, Feng S. 2019. Westerlies Asia and monsoonal Asia: Spatiotemporal differences in climate change and possible mechanisms on decadal to sub-orbital timescales. *Earth-Sci Rev*, 192: 337–354
- Chen F H, Zhang J F, Liu J B, Cao X Y, Hou J Z, Zhu L P, Xu X K, Liu X J, Wang M D, Wu D, Huang L X, Zeng T, Zhang S, Huang W, Zhang X, Yang K. 2020. Climate change, vegetation history, and landscape responses on the Tibetan Plateau during the Holocene: A comprehensive review. *Quat Sci Rev*, 243: 106444
- Chen Y, Ni J, Herzschuh U. 2010. Quantifying modern biomes based on surface pollen data in China. *Glob Planet Change*, 74: 114–131
- Clark P U, Shakun J D, Baker P A, Bartlein P J, Brewer S, Brook E,

- Carlson A E, Cheng H, Kaufman D S, Liu Z, Marchitto T M, Mix A C, Morrill C, Otto-Bliesner B L, Pahnke K, Russell J M, Whitlock C, Adkins J F, Blois J L, Clark J, Colman S M, Curry W B, Flower B P, He F, Johnson T C, Lynch-Stieglitz J, Markgraf V, McManus J, Mitrovica J X, Moreno P I, Williams J W. 2012. Global climate evolution during the last deglaciation. *Proc Natl Acad Sci USA*, 109: E1134–E1142
- Cour P, Zheng Z, Duzer D, Calleja M, Yao Z. 1999. Vegetational and climatic significance of modern pollen rain in northwestern Tibet. *Rev Palaeobot Palynol*, 104: 183–204
- Cutler D R, Edwards Jr T C, Beard K H, Cutler A, Hess K T, Gibson J, Lawler J J. 2007. Random forests for classification in ecology. *Ecology*, 88: 2783–2792
- Dallmeyer A, Claussen M, Herzsuh U, Fischer N. 2011. Holocene vegetation and biomass changes on the Tibetan Plateau—A model-pollen data comparison. *Clim Past*, 7: 881–901
- Dykoski C A, Edwards R L, Cheng H, Yuan D X, Cai Y J, Zhang M L, Lin Y S, Qing J M, An Z S, Revenaugh J. 2005. A high-resolution, absolute-dated Holocene and deglacial Asian monsoon record from Dongge Cave, China. *Earth Planet Sci Lett*, 233: 71–86
- Fall P L. 1992. Pollen accumulation in a montane region of Colorado, USA: A comparison of moss polsters, atmospheric traps, and natural basins. *Rev Palaeobot Palynol*, 72: 169–197
- Felde V A, Peglar S M, Bjune A E, Grytnes J A, Birks H J B. 2014. The relationship between vegetation composition, vegetation zones and modern pollen assemblages in Setesdal, southern Norway. *Holocene*, 24: 985–1001
- Guiot J, Goeury C. 1996. PPPBase, a software for statistical analysis of paleoecological and paleoclimatological data. *Dendrochronol*, 14: 295–300
- Herzsuh U, Borkowski J, Schewe J, Mischke S, Tian F. 2014. Moisture-advection feedback supports strong early-to-mid Holocene monsoon climate on the eastern Tibetan Plateau as inferred from a pollen-based reconstruction. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 402: 44–54
- Herzsuh U, Kramer A, Mischke S, Zhang C J. 2009. Quantitative climate and vegetation trends since the late glacial on the northeastern Tibetan Plateau deduced from Koucha Lake pollen spectra. *Quat Res*, 71: 162–171
- Herzsuh U, Winter K, Wunnemann B, Li S J. 2006. A general cooling trend on the central Tibetan Plateau throughout the Holocene recorded by the Lake Zigetang pollen spectra. *Quat Int*, 154–155: 113–121
- Li K, Liao M N, Ni J, Liu X Q, Wang Y B. 2019. Treeline composition and biodiversity change on the southeastern Tibetan Plateau during the past millennium, inferred from a high-resolution alpine pollen record. *Quat Sci Rev*, 206: 44–55
- Liaw A, Wiener M. 2002. Classification and regression by random forest. *R News*, 2: 18–22
- Lisitsyna O V, Hicks S, Huusko A. 2012. Do moss samples, pollen traps and modern lake sediments all collect pollen in the same way? A comparison from the forest limit area of northernmost Europe. *Veget Hist Archaeobot*, 21: 187–199
- Marchant R, Cleef A, Harrison S P, Hooghiemstra H, Markgraf V, van Boxel J, Ager T, Almeida L, Anderson R, Baied C, Behling H, Berrio J C, Burbridge R, Björck S, Byrne R, Bush M, Duivenvoorden J, Flenley J, De Oliveira P, van Geel B, Graf K, Gosling W D, Harbele S, van der Hammen T, Hansen B, Horn S, Kuhry P, Ledru M P, Mayle F, Leyden B, Lozano-García S, Melief A M, Moreno P, Moar N T, Prieto A, van Reenen G, Salgado-Labouriau M, Schäbitz F, Schreve-Brinkman E J, Wille M. 2009. Pollen-based biome reconstructions for Latin America at 0, 6000 and 18000 radiocarbon years ago. *Clim Past*, 5: 725–767
- Marcott S A, Shakun J D, Clark P U, Mix A C. 2013. A reconstruction of regional and global temperature for the past 11,300 years. *Science*, 339: 1198–1201
- Molnar P, Boos W R, Battisti D S. 2010. Orographic controls on climate and paleoclimate of Asia: Thermal and mechanical roles for the Tibetan Plateau. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 38: 77–102
- Ni J, Cao X Y, Jeltsch F, Herzsuh U. 2014. Biome distribution over the last 22,000 yr in China. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 409: 33–47
- Ni J, Yu G, Harrison S P, Prentice I C. 2010. Palaeovegetation in China during the late Quaternary: Biome reconstructions based on a global scheme of plant functional types. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 289: 44–61
- Pickett E J, Harrison S P, Hope G, Harle K, Dodson J R, Peter Kershaw A, Colin Prentice I, Backhouse J, Colhoun E A, D’Costa D, Flenley J, Grindrod J, Haberle S, Hassell C, Kenyon C, Macphail M, Martin H, Martin A H, McKenzie M, Newsome J C, Penny D, Powell J, Ian Raine J, Southern W, Stevenson J, Sutra J P, Thomas I, Kaars S, Ward J. 2004. Pollen-based reconstructions of biome distributions for Australia, Southeast Asia and the Pacific (SEAPAC region) at 0, 6000 and 18,000 ¹⁴C yr BP. *J Biogeogr*, 31: 1381–1444
- Prentice C, Guiot J, Huntley B, Jolly D, Cheddadi R. 1996. Reconstructing biomes from palaeoecological data: A general method and its application to European pollen data at 0 and 6 ka. *Clim Dyn*, 12: 185–194
- Prentice I C, Jolly D. 2000. Mid-Holocene and glacial-maximum vegetation geography of the northern continents and Africa. *J Biogeogr*, 27: 507–519
- Prentice I C, Webb III T. 1998. BIOME 6000: Reconstructing global

- mid-Holocene vegetation patterns from palaeoecological records. *J Biogeogr*, 25: 997–1005
- R Core Team. 2018. R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing
- Shakun J D, Carlson A E. 2010. A global perspective on Last Glacial Maximum to Holocene climate change. *Quat Sci Rev*, 29: 1801–1816
- Shen C M, Liu K B, Tang L Y, Overpeck J T. 2006. Quantitative relationships between modern pollen rain and climate in the Tibetan Plateau. *Rev Palaeobot Palynol*, 140: 61–77
- Shi F, Lu H Y, Guo Z T, Yin Q Z, Wu H B, Xu C X, Zhang E L, Shi J F, Cheng J, Xiao X Y, Zhao C. 2021. The position of the Current Warm Period in the context of the past 22,000 years of summer climate in China. *Geophys Res Lett*, 48: e91940
- Shi W, Jiang H C, Mao X, Xu H Y. 2020. Pollen record of climate change during the last deglaciation from the eastern Tibetan Plateau. *PLoS ONE*, 15: e0232803
- Sobol M K, Finkelstein S A. 2018. Predictive pollen-based biome modeling using machine learning. *PLoS ONE*, 13: e0202214
- Sobol M K, Scott L, Finkelstein S A. 2019. Reconstructing past biomes states using machine learning and modern pollen assemblages: A case study from Southern Africa. *Quat Sci Rev*, 212: 1–17
- Song M H, Zhou C P, Ouyang H. 2005. Simulated distribution of vegetation types in response to climate change on the Tibetan Plateau. *J Vegetation Sci*, 16: 341–350
- Sugita S. 2007a. Theory of quantitative reconstruction of vegetation I: Pollen from large sites REVEALS regional vegetation composition. *Holocene*, 17: 229–241
- Sugita S. 2007b. Theory of quantitative reconstruction of vegetation II: All you need is LOVE. *Holocene*, 17: 243–257
- Sun A Z, Luo Y L, Wu H B, Chen X D, Guo Z T. 2020. An updated biomization scheme and vegetation reconstruction based on a synthesis of modern and mid-Holocene pollen data in China. *Glob Planet Change*, 192: 103178
- Tian F, Cao X Y, Dallmeyer A, Lohmann G, Zhang X, Ni J, Andreev A, Anderson P M, Lozhkin A V, Bezrukova E, Rudaya N, Xu Q H, Herzschuh U. 2018. Biome changes and their inferred climatic drivers in northern and eastern continental Asia at selected times since 40 cal ka bp. *Veget Hist Archaeobot*, 27: 365–379
- Wilmshurst J M, McGlone M S. 2005. Origin of pollen and spores in surface lake sediments: Comparison of modern palynomorph assemblages in moss cushions, surface soils and surface lake sediments. *Rev Palaeobot Palynol*, 136: 1–15
- Yu G, Chen X, Ni J, Cheddadi R, Guiot J, Han H, Harrison S P, Huang C, Ke M, Kong Z C, Li S, Li W Y, Liew P, Liu G, Liu J, Liu Q, Liu K B, Prentice I C, Qui W, Ren G, Song C, Sugita S, Sun X J, Tang L Y, van C E, Xia Y, Xu Q H, Yan S, Yang X, Zhao J, Zheng Z. 2000. Palaeovegetation of China: A pollen data-based synthesis for the mid-Holocene and last glacial maximum. *J Biogeogr*, 27: 635–664
- Zhang Z P, Liu J B, Chen J, Chen S Q, Shen Z W, Chen J, Liu X K, Wu D, Sheng Y W, Chen F H. 2021. Holocene climatic optimum in the East Asian monsoon region of China defined by climatic stability. *Earth-Sci Rev*, 212: 103450
- Zhao Y, Liang C, Cui Q Y, Qin F, Zheng Z, Xiao X Y, Ma C M, Felde V A, Liu Y L, Li Q, Zhang Z Y, Herzschuh U, Xu Q H, Wei H C, Cai M T, Cao X Y, Guo Z T, Birks H J B. 2021. Temperature reconstructions for the last 1.74-Ma on the eastern Tibetan Plateau based on a novel pollen-based quantitative method. *Glob Planet Change*, 199: 103433
- Zhao Y, Tzedakis P C, Li Q, Qin F, Cui Q, Liang C, Birks H J B, Liu Y L, Zhang Z Z, Ge J Y, Zhao H, Felde V A, Deng C L, Cai M T, Li H, Ren W H, Wei H C, Yang H F, Zhang J W, Yu Z C, Guo Z T. 2020. Evolution of vegetation and climate variability on the Tibetan Plateau over the past 1.74 million years. *Sci Adv*, 6: eaay6193
- Zhao Y, Xu Q H, Huang X Z, Guo X L, Tao S C. 2009. Differences of modern pollen assemblages from lake sediments and surface soils in arid and semi-arid China and their significance for pollen-based quantitative climate reconstruction. *Rev Palaeobot Palynol*, 156: 519–524
- Zhao Y, Yu Z C, Zhao W W. 2011. Holocene vegetation and climate histories in the eastern Tibetan Plateau: Controls by insolation-driven temperature or monsoon-derived precipitation changes? *Quat Sci Rev*, 30: 1173–1184
- Zheng Z, Wei J H, Huang K Y, Xu Q H, Lü H Y, Tarasov P, Luo C X, Beaudouin C, Deng Y, Pan A D, Zheng Y W, Luo Y L, Nakagawa T, Li C H, Yang S X, Peng H H, Cheddadi R. 2014. East Asian pollen database: Modern pollen distribution and its quantitative relationship with vegetation and climate. *J Biogeogr*, 41: 1819–1832

(责任编辑: 吴海斌)