

文章编号: 1001-8166(2006)05-0451-08

## 青藏高原隆升及其环境效应

郑 度<sup>1</sup>, 姚檀栋<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>·中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; <sup>2</sup>·中国科学院青藏高原研究所, 北京 100085)

**摘 要:**“青藏高原形成演化及其环境资源效应”项目选择青藏高原为典型地区, 特别注意高原与毗邻地区的联系, 以从全球尺度探讨高原的各种过程, 目标集中在大陆碰撞过程和高原隆升过程, 以过程为主线贯通碰撞机制、环境变化和资源分布规律的研究, 时间上着重新生代以来, 在不同精细时间尺度上定量地描述碰撞和隆升的动态过程及环境变化。运用地球科学、生命科学、环境科学及各学科之间有机交叉、综合研究的方法, 开展大陆碰撞动力学、环境变化、现代表生过程及各圈层相互作用等重大理论问题的研究, 为青藏高原地区的资源开发和环境调控提供科学依据。按照统观全局、突出重点的原则, 项目主要研究内容包括以下 4 个方面: 大陆岩石圈碰撞过程及其成矿效应, 高原隆升过程与东亚气候环境变化, 青藏高原现代表生过程及相互作用机理, 青藏高原区域系统相互作用的综合研究。在完成研究计划任务的基础上, 项目取得如下的突出研究成果和创新性进展: 印度大陆与欧亚大陆初始碰撞时限, 青藏高原南北缘山盆岩石圈尺度的构造关系, 青藏高原整合构造模型与成矿成藏评价, 新生代高原北部重大的构造变形隆升事件序列, 高原周边环境变化事件及高原隆升对亚洲季风发展变化的影响, 高分辨率气候动态过程及变化趋势, 高原主要生态系统碳过程对气候变化的响应, 高原气候变化及冰冻圈变化与预测, 高原土地覆被变化、恢复整治及管理。

**关键词:** 青藏高原, 大陆岩石圈, 碰撞与隆升过程, 气候环境变化, 现代表生过程  
中图分类号: X141 文献标识码: A

### 1 引 言

自 20 世纪 50 年代以来, 我国对青藏高原进行了长期的科学考察研究, 取得了重大进展。目前已初步揭示了青藏高原及周边地球物理场特征和壳幔结构, 建立了高原形成和演化的基本框架, 提出了从冈瓦纳古陆分裂出来向北漂移的若干地体在不同地质时期拼合的青藏高原大地构造演化模式, 探讨了高原岩石圈演化和隆升机制的各种假设和模型; 研究了高原强烈隆起的时代、幅度和形式, 初步揭示了晚新生代以来自然环境急剧演变的事实, 阐述了过去 10 多万年以来高分辨率记录所反映的重大环境变化特征; 分析了高原动力、热力作用对大气环流的

影响, 阐明了高原气候大尺度特征及其可能成因, 初步查明了高原的主要生物物种和生态系统类型与演化, 揭示了自然地带三维空间分布的规律和格局。

国外科学家长期在高原周边也开展了一系列专题性考察。随着国际岩石圈计划(ILP)、国际地圈生物圈计划(IGBP)、世界气候研究计划(WCRP)、大陆动力学计划的相继实施, 青藏高原已成为当前国际学术界激烈竞争的一个极为重要的场所。面对这一形势, 我们应当抓住机遇, 积极组织, 发挥地利和综合优势, 开展高原形成演化及其环境、资源效应研究, 这是我国地球科学方面有希望产生理论突破和达到国际前沿水平的研究领域之一。

收稿日期: 2006-04-05, 修回日期: 2006-04-20.

\* 基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目“青藏高原形成演化及其环境资源效应”(编号: G1998 0408 00)资助。

作者简介: 郑度(1936-), 男, 广西揭西人, 研究员, 中国科学院院士, 主要从事自然地理综合研究. E-mail: zhengd@igsrr.ac.cn

## 2 主要研究内容、目标和计划完成情况

本项目选择青藏高原为典型地区,特别注意高原与毗邻地区的联系,以从全球尺度探讨高原的各种过程。在内容上集中研究新生代以来碰撞过程和高原隆升过程及其影响,以过程为主线,揭示青藏高原形成演化动力学及其环境、资源效应<sup>[1]</sup>。

### 2.1 主要研究内容和目标

主要研究领域包括如下 4 个方面: 大陆岩石圈碰撞过程及成矿效应; 青藏高原隆升过程与东亚气候环境变化; 青藏高原现代生过程及相互作用机理; 青藏高原区域系统动力学及其与全球变化关系。在领域之下再分解为研究内容具体、目标明确的 12 个课题。具体研究内容如下:

(1) 大陆岩石圈碰撞过程及其成矿效应。以建立碰撞过程的时间坐标为主线,研究新生代碰撞变形的几何学、运动学和年代学,查明阿尔金断裂系东延情况及其特征,揭示弧前盆地沉积环境的变化与大陆碰撞的关系,高原变形的扩展方式及过程,研究高原北缘碰撞变形的深部过程,高原深部三维物性结构、物质状态及其形成的动力学过程,陆壳和岩石圈形成和演化的时空坐标,大陆碰撞过程中壳幔物质与能量交换、盆山转换过程对巨型矿集区形成及油气聚集的制约作用。

(2) 高原隆升过程与东亚气候环境变化。通过对高原地貌、新生代剖面、湖泊沉积、冰芯、湖岩芯、树轮等证据的研究,确定青藏高原隆升和环境变化过程的时空序列,建立青藏高原整体隆起及快速抬升时空坐标,高原环境变化及其对构造事件的响应;高分辨率气候环境动态过程及变化趋势,阐明青藏高原气候环境突变特征,揭示其可能机制,从高原外缘及邻近地区的气候环境记录,提取高原隆升过程信息,深入认识高原隆升过程对周边地区环境变化的影响。

(3) 青藏高原现代生过程及相互作用机理。通过对高原现代生过程的观测分析,研究高原现代气候与环境变化规律与机制;高原冰川冻土动态变化趋势和区域差异,阐明高原不同区域冰冻圈现代变化特征,高原生态系统界面过程及其与气候变化的相互作用,揭示高原主要生态系统类型碳循环过程与碳吸收排放规律,高原典型地区土地利用与土地覆被变化机理与驱动机制,阐明高原典型退化环境的形成过程并提出恢复途径。

(4) 青藏高原区域系统相互作用的综合研究。

高原岩石圈构造、演化时空分布特征及动力学,揭示高原大陆碰撞过程的不同阶段与空间格局,阐明大陆碰撞过程与地球深部的制约关系,高原隆升与气候环境演化的时空耦合,阐明高原隆升与亚洲季风演化的关系,高原环境与生态资产的空间格局,高原气候、生态与环境演化趋势,高原环境与发展的协调对策。

本项目注意从全球尺度来探讨青藏高原新生代以来的各种过程,提出陆陆碰撞过程几个关键阶段的时间坐标和空间分异,探讨高原隆升过程及深部作用的制约关系,建立高原隆升过程的时空坐标,阐明高原隆升与区域气候环境演化的耦合,揭示高原现代生过程的动态特征及环境的变化趋势,为青藏高原及其周边地区的资源开发和环境调控提供决策依据。

### 2.2 研究计划完成情况

自本项目实施以来,根据各课题的年度计划安排,进行了多次野外考察,全面完成了设计的剖面布设、试验观测和地球物理数据采集、野外地质地貌考察和采样工作,冰芯、湖岩芯、树轮、古生态等钻探取样,对地面气候、大气辐射、冰冻圈过程以及生态系统类型碳循环等进行定位、半定位的系统观测研究和生态与环境的样带和路线调查。在室内研究方面,对所采集的大量各类样品、标本进行分析、测试和鉴定。如各类样品的测年(热释光测年、<sup>14</sup>C 测年、<sup>39</sup>Ar-<sup>40</sup>Ar 测年、Ar/Ar 等时线年龄、K/Ar 年龄、U-Pb 锆石定年等)岩石的常量、微量和稀土元素化学分析、电子探针分析,古地磁样品系统的磁性测量,部分湖泊水样、冰芯样化学成分及同位素含量测定,表土孢粉分析,树轮样品处理、读数及建立部分年表等,室内模拟实验研究,如岩石高温高压、地震波层析成像,青藏高原地体运动、碰撞过程数值模拟,岩石物性实验、“三轴变形实验”、在拉张、拱起与挤压环境下的物理模拟实验等,完成了许多图件的整编,卫片图像解译等工作,按计划完成了预期的研究任务。

## 3 主要研究进展

在完成研究计划任务的基础上,“青藏高原形成演化及其环境资源效应”项目各课题组围绕预期目标,深入分析,加强学科交叉和综合,发表了一批高水平的研究论文。在青藏高原研究领域所取得的突出研究成果和创新性进展简要概括如下:

### 3.1 印度大陆与欧亚大陆初始碰撞时限

在雅鲁藏布江缝合带南侧发现古新世深水沉

积 确定了雅鲁藏布江缝合带的前陆盆地系统。对林周盆地林子宗火山岩的典型解剖表明,不整合覆盖在晚白垩世设兴组之上的林子宗火山岩典中组的下限年龄为 64 Ma,中部年波组为 55 Ma,上部帕那组为 38.7 Ma<sup>[2]</sup>。古地理格局研究表明,白垩纪末期印度大陆与欧亚大陆间仍存在生物地理的分异,但古新世之后浅海生物、陆相轮藻等区系特征趋同,指示在此期间深海隔离消失。结合地层、构造、火成岩及同位素年代证据,判定雅鲁藏布江缝合带中部印度大陆与欧亚大陆初始碰撞时限大致为 65 Ma BP<sup>[3]</sup>,然后向东西两侧穿时性封闭。国际上普遍接受的观点为:印度与欧亚板块在印巴境内的西喜马拉雅构造结首先碰撞(55 Ma BP),然后向东穿时性封闭,达到我国境内的东喜马拉雅构造结时的时间为晚始新世(38 Ma BP)。这项研究综合各方面的证据,提出印度大陆与欧亚大陆初始碰撞的时间与过程,是具有创新的突破性进展。

### 3.2 青藏高原南北缘山盆岩石圈尺度的构造关系

研究表明阿尔金山走滑断裂带在印支期已开始活动,认为阿尔金山断裂走滑过程中伴随强烈的隆升作用,走滑作用控制和影响着青藏高原北部隆升和扩展。该研究结果对高原形成的模式和过程都提出了一个新的认识,不同于著名的构造学家 Tappomier 提出的阿尔金山断裂是新生代以来的大型左行走滑断裂,是在印度板块与欧亚板块碰撞之后形成的模式;该成果将对高原的形成和隆升历史、速率的计算,对高原北部大地构造的解释和研究,产生深远意义和影响。

横过阿尔金山断裂系和雅鲁藏布江缝合带实施了人工地震深地震反射剖面、深地震测深剖面、大地电磁测深剖面及宽频地震观测,首次得到了高原北缘山盆结合部位岩石圈的精细结构,发现了塔里木与青藏高原在岩石圈下部发生面对面双向挤压碰撞地震学证据<sup>[4]</sup>,揭示出青藏高原北缘山盆岩石圈尺度的“V”型构造关系,即塔里木地壳向青藏高原北缘造山带地壳楔入、岩石圈地幔与高原相向俯冲,建立了青藏高原北部不同边界碰撞隆升的深部过程<sup>[5]</sup>,研究成果对大陆内部陆陆碰撞动力学及青藏高原隆升动力学有重要推动作用。

同时探测得到高原西部雅鲁藏布江缝合带两侧详细的深部速度模型与电性结构<sup>[6]</sup>,揭示出印度板块俯冲前缘,藏布江缝合带两侧地壳与上地幔盖层的差异构造样式,发现印度板块向北俯冲,穿越雅鲁藏布江缝合带后地壳即与上地幔盖层脱离,印度板

块地壳未穿越雅鲁藏布江缝合带的证据。研究成果对在青藏高原南部揭露印度板块与亚洲板块碰撞的深部过程这一挑战全球的大科学问题有重要推动作用。

### 3.3 青藏高原整合构造模型与成矿成藏评价

基于新生代火成岩时空分布识别出三种构造体制:碰撞构造体制、大型走滑构造体制和岩石圈崩塌构造体制。印度与亚洲大陆的强烈碰撞是控制高原岩石圈演化的主要因素,是控制主碰撞带岩浆活动与成矿作用的主要构造体制;由于板块碰撞而滋生大型走滑与块体挤出构造体制控制了沿深大断裂分布的岩浆活动和成矿作用<sup>[7]</sup>,陆壳增厚导致的岩石圈根部崩塌与软流圈反弹体制控制了高原腹地离散性岩浆活动的分布和成矿成藏作用。因此,三种构造体制的相互作用导致了青藏高原新生代成矿成藏构造体制的产生。根据这种整合构造模型,识别出了 4 套典型的成矿体系,为冈底斯带成矿远景提供了重要事实和理论依据,揭示出沿青藏高原腹地冈底斯火山—岩浆弧发育了一条长约 350 km 的斑岩铜矿成矿带<sup>[8]</sup>。45 Ma BP 开始的高原腹地岩石圈分段崩塌过程不仅造就了岩浆活动的中心扩展式分布,而且触发了深部流体的大规模上升,是区域金属矿产和油气成藏的重要基础。在对羌塘盆地已有资料分析统计的基础上,利用国际通用的有机碳法对盆地生烃量和资源量进行计算,初步结果证实羌塘盆地生烃量巨大,盆地存在两次生油过程,其中新生代为盆地主要生油阶段,新生代高原强烈变型时期与二次生油时代一致,新生代构造形成了良好的构造圈闭,为盆地油气聚集成藏提供了良好场所,使油气藏得以较好保存,盆地具有良好的油气资源远景。

### 3.4 新生代高原北部重大的构造变形隆升事件序列

通过对青藏高原及其周边地区大范围夷平面和阶地等层状地貌<sup>[9]</sup>、主要块体中岩体热历史反映的隆升剥蚀过程、典型山前和山间盆地新生代地层沉积与构造演化<sup>[10]</sup>、高原的湖泊沉积和高原东面陆相粉尘堆积环境变迁序列的研究,确定了青藏高原至少发育过三级夷平面。目前保存下来可确认的夷平面有两级,山顶面主要由高原上各大山系主要山峰线组成,主夷平面构成当前高原的主体,海拔高度由西向东南和东北降低,建立了青藏高原北面完整的新生代高分辨率、高精度的磁性地层年代序列,建立了新生代高原北部重大的构造变形隆升事件序列,揭示出高原北部的隆起是一个多旋回、阶段性的同

步异幅过程,即经历了 4 期显著的阶段性隆升和 3 期夷平。四期隆升分别发生在约 45 ~40 Ma BP、33 ~30 Ma BP、23 ~22 Ma BP 和 8 Ma BP 以来,夷平面形成于前 3 次隆升的末期。进一步确认开始于 3.6 Ma BP 的青藏运动以来隆升具有强烈的整体性和阶段性,但隆升幅度的差异性显著,总体向东减弱,尔后经过昆仑—黄河运动等一系列的隆升,最终形成今天的地貌格局<sup>[11]</sup>。这是首次对同一个地区从地貌、地层和岩体 3 个独立的角度,通过大量高精度的测量数据,建立了青藏高原北部重大构造变形隆升事件的序列,并揭示出高原北部的隆升与大地貌形成过程是一个多旋回、阶段性的同步异幅过程。对青藏高原整个隆起过程及其动力学机制以及我国大地貌和环境格局形成演化的认识,将有重要的影响。

### 3.5 高原周边环境变化事件及高原隆升对亚洲季风发展变化的影响

磁性地层学研究表明,青藏高原东北侧甘肃陇中地区一套黄土—古土壤序列的形成时代为 22 ~ 6.2 Ma BP。这是全球迄今发现的最为连续完整的晚新生代陆相风尘堆积序列,其起始年代可上溯到中中新世初期。根据风尘堆积的沉积速率,恢复了中中新世早期以来亚洲内陆干旱化大尺度演化历史的时间序列,比来自北太平洋具同等分辨能力的亚洲干旱化记录长约 1 000 万年,从而为认识东亚新生代环境演化与喜马拉雅—青藏高原隆升的关系提供了重要证据<sup>[12]</sup>。通过对 6.2 Ma 以来风尘堆积的研究,揭示出北极冰盖形成以来,亚洲内陆荒漠化的发展的若干界限与青藏高原隆升在时代上吻合,但荒漠化发展的具体过程与北极冰盖的形成演化存在高度一致性,表明北极冰盖的形成演化和青藏高原隆升都是 6.2 Ma 以来亚洲内陆荒漠化的重要驱动因素。首次以 10% 的高原高度间隔用大气环流模式 (GCM R15L9) 进行了青藏高原地形高度对季风影响的系列数值试验,探讨了东亚与南亚季风对高原隆升的敏感性及其差异,青藏高原隆升对亚洲季风形成发展和内陆干旱化的影响等。细致地揭示了高原隆升对东亚季风的影响特点,提出高原隆升达到现代高度的一半是东亚北部出现近地面风冬、夏反向的重要条件,并且高原隆升对东亚冬季风的影响远大于对东亚夏季风的影响。利用美国大气研究中心的公用气候系统模式 (NCAR CCSM T31\_g3v4\_L26) 经过对一组同时改变地形高度和地球轨道参数的系列数值试验模拟的风速、大气湿度、土壤湿度等要素的详细分析,结果发现高原的存在放大了东

亚夏季风对轨道强迫的响应,因而明确提出青藏高原是东亚季风轨道尺度气候变率的放大器<sup>[13]</sup>。这些数值模拟结果可为高原邻近地区相关的地质气候记录提供合理的解释。此外,通过收集、整理和分析了青藏高原及其邻近地区大部分台站有器测记录以来的逐月气温、降水资料,结合气候变暖情景下 GCM 的数值模拟结果,探讨了高原气候变化的敏感性及预警作用。

### 3.6 高分辨率气候动态过程及变化趋势

利用湖芯、冰芯和树木年轮对过去环境变化的研究取得进一步突破。现代湖泊沉积物的硅藻与湖水化学参数的关系表明:不同的硅藻种属及其组合与湖水的盐度变化具有明显的对应关系,并据此探讨了藏南沉错过去 300 年的湖水盐度变化过程。对青藏高原大气降水中稳定同位素与现代气候环境要素的关系研究发现,在高原北部,大气降水氧同位素与大气温度有很好的正相关关系,在高原中部,这种关系减弱,在高原南部,大气降水氧同位素则与季风降水过程关系密切<sup>[14]</sup>。对柴达木盆地德令哈地区的柏树生长状态与温度降水的相关分析研究,确认降水变化是对该地区树木生长的第一控制要素<sup>[15]</sup>。

不同介质在不同的参数及其组合上对环境变化具有各自的敏感反映。在藏南沉错和藏中错鄂利用湖泊沉积物的多指标建立了 2 万年以来环境变化序列。末次冰盛期湖泊沉积物具有普遍较低沉积速率、较低有机质的特征,在 16 ka BP 左右的冰消期,普遍反映了有机质增加、沉积速率加大的过程。YD 事件在水深不大的湖泊沉积中得以反映,但深水沉积中体现不明显。湖泊沉积与冰芯研究表明,青藏高原全新世环境变化的一致性和区域差异。全新世早期以 YD 事件结束气候开始转暖为标志,到 7 ka BP 左右结束,期间出现了 8.2 ka BP 的冷事件,反映了全新世早期气候变化的不稳定性。中期大约在 7 ~3 ka BP,气候环境继续转暖并在一个水平上得以维持,但是 5.2 ka BP 出现了冷事件和在 4 ka BP 出现了一个显著湿润事件后环境开始表现为干旱的特征,并在 3 ka BP 左右进入晚期。青藏高原南部的沉错记录则提供了 1.4 ka BP 以来高分辨率的环境变化序列,明确揭示了隋唐暖期、中世纪暖期和小冰期的存在和环境特点<sup>[16]</sup>。

利用青藏高原达索普冰芯首次建立了极地以外过去 2 ka 来大气甲烷浓度的变化<sup>[17]</sup>。研究表明:气候变暖时,大气甲烷浓度增加,气候变冷时,大气甲烷浓度减少。受亚洲季风和中低纬度湿地变化双

重影响,在全球变暖背景下青藏高原甲烷浓度值不但高于南极地区,也高于北极地区。通过对青藏高原敦德、古里雅、达索普、普若岗日、马兰等地的冰芯分析,过去 2000 年来的气候变化特征表现为温度在波动中逐渐升高,曾出现过 8 次相对暖的时期和 7 次冷的时期。小冰期以来青藏高原发生过 3 次冷期和 3 次暖期。3 次冷暖变化出现的时间和变化幅度在不同地区是不同的,其位相和变幅差异十分明显。藏南希夏邦马峰达索普冰芯研究表明,冰川积累量在百年尺度上有 4 次突变,其中,1750s 和 19 世纪初发生了 2 次由低向高的突变。

在青藏高原北部柴达木盆地的德令哈和乌兰等地取得的树轮记录研究表明,目前具有明确温度/降水指示意义的多样本序列只有 1 ka 左右。对比发现,德令哈地区树轮宽度指数具有高度敏感的降水变化的代表性<sup>[15]</sup>,其反映的降水变化高低也与敦德冰芯中代表风沙作用的微粒含量变化具有很好的对应关系。祁连山林线附近的树轮宽度指数则反映了温度对树木生长的控制作用,树轮宽度序列揭示了千年尺度的温度变化,并得到该区敦德冰芯氧同位素记录结果的支持,具有很好的一致性。

### 3.7 高原主要生态系统碳过程对气候变化的响应

在青藏高原分别代表亚高山森林、高寒草甸、农田以及高寒草原生态系统类型的贡嘎山、海北和拉萨 3 个定位站以及班戈与五道梁 2 个半定位站对生态系统温室气体( $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ )释放进行了连续 3 年的监测,获得了温室气体释放的日变化和年变化规律,并阐明了土壤呼吸与环境因子之间的关系。与此同时,通过调查生态系统净第一性生产力以及区分土壤呼吸中的根呼吸和土壤微生物呼吸,对不同生态系统的碳平衡进行了估算。结果表明,青藏高原主要生态系统均表现为碳汇,其土壤呼吸速率与植被类型密切相关,季节变化极为明显,与表层地温,尤其是 5 cm 地温表现出较好的相关性<sup>[18]</sup>,高寒草甸生态系统中的氮沉降显著促进了碳截留<sup>[19]</sup>。通过贡嘎山东坡垂直样带和林芝色齐拉山(森林)—米拉山(森林—灌丛草甸)—拉萨(灌丛草甸)—当雄/那曲(高寒草甸)—沱沱河/五道梁(高寒草原)水平样带的调查研究,发现青藏高原自然植被净初级生产力、地上/地下生物量、叶面积指数及相关叶性因子与水热气候因子的关系均遵循韦伯定律,即在相同的自然环境条件下,不管物种组成如何,达到充分适应的植物群落的结构功能特征具有趋同性,并可用类似的逻辑斯谛函数拟合<sup>[20]</sup>。这些

相关规律为进一步建立区域尺度陆地生态系统模型提供了一种新思路。

### 3.8 高原气候变化及冰冻圈变化与预测

青藏高原对“温室气体”作用的响应比其他地域灵敏,并与全球环境变化关系密切。研究表明,青藏高原近代气候变化及其环境响应显著<sup>[21]</sup>。青藏高原百年来的气候经历了 3 次突变(4 个阶段)<sup>[20]</sup>。20 世纪初至 20 年代初为冷期,20 年代至 60 年代初为暖期,60 年代中至 80 年代初气候转冷,80 年代以来高原各地先后进入一个气温持续偏高的时期。高原气温变化的阶段性与北半球基本一致,气温变幅大于中国东部。这种冷、暖气候期分别对应着弱、强的高原季风活动。新近分析表明,近几十年来高原的气温变化比我国东部要早 4 ~8 a,高原百年尺度的冷暖变化比我国东部要早 10 ~60 a。自 50 年代中叶以来,青藏高原主体各台站有变暖趋势,特别是在冬季更为明显。与全球和北半球相比较,1955—1996 年高原台站的年平均线性增温率为 0.16 /10 a,冬季平均为 0.32 /10 a,超过北半球及同纬度地区。

小冰期以来青藏高原冰川规模的变化表现出明显的规律,即冰川的萎缩率从高原东南部向高原西北部呈减小趋势,而且冰川规模越大其萎缩率相对较小。另外,不同方位的冰川变化也存在明显的差异<sup>[22]</sup>。青藏高原冰川虽然曾在 20 世纪初至 20 ~30 年代和 70 ~80 年代出现过两次退缩速度减缓或相对稳定甚至前进的状态,但近百年来普遍处于退缩的总趋势。随着全球气候变暖,特别是进入 1980 年代以来的快速增温,高原冰川末端在近几十年间出现了快速退缩。另外,20 世纪青藏高原冰川变化在地域上表现出与小冰期相似的变化特征,即高原中北部山区和羌塘地区的冰川变化幅度较小,而高原东部和南部边缘山地的冰川变化幅度显著增大。在未来气候变暖情况下高原东南部海洋性冰川的退缩幅度最大,高原西北部的极大陆性冰川退缩幅度最小。

经过近年对青藏公路沿线冻土变化的野外观测和近几十观测资料的室内研究分析,得到了大量观测数据和成果。对未来不同气候变化情景下高原冻土变化的预测结果表明,若气温年增温 0.02 /50 年后多年冻土面积缩小约 8.8%;如果升温率达 0.052 /a,则 50 年后多年冻土面积缩小约 13.5%<sup>[23]</sup>。这直接关系到青藏公路、青藏铁路的维护与建设,对于生态环境保护也有积极的意义。

### 3.9 高原土地覆被变化、恢复整治及管理

青藏高原典型区土地利用与土地覆被变化研究

发现过去 30 年中,土地覆被组成结构特征(如类型、各类型所占比例的顺序等)未发生质变;草地、林地和未利用地是面积最大、变化最为明显的类型,拉萨地区主要为草地面积减少和林地面积增加<sup>[24]</sup>,而大渡河上游地区恰恰相反<sup>[25]</sup>,三江源地区则表现为草地减少和未利用土地增加,变化动因有明显的区域差异。研究表明,高原区域土地退化比较严重,带来明显的资源衰减和环境恶化的负效应。未来 10~30 年的变化趋势分析得出,拉萨地区与大渡河上游地区的整体环境逐渐好转,而三江源地区环境将继续恶化。高原东部森林区皆伐引起迹地环境的急剧退化,微环境“干旱化”明显,迹地植被结构和功能迅速变化。迹地环境退化成为苗木更新和生长的关键制约,是传统造林技术失效的根本原因<sup>[26]</sup>。迹地恢复试验表明,微生境更新技术突破了森林恢复重建的技术瓶颈,为青藏高原东部高海拔林区天然林保护工程与生态环境建设提供了有效的技术支持。本项目进行了青藏高原生态系统功能的区域划分,并提出了生态恢复重建的持续性管理策略、政策和技术措施,为国家和区域生态环境建设和社会经济可持续发展提供了可供决策参考的依据。

#### 4 青藏高原研究展望

根据对国内外青藏高原研究的基础、成果和迫切需要解决的理论与实际应用问题的分析,今后 15 年内,青藏高原研究领域将十分关注以下几个方面:

##### 4.1 高原岩石圈结构、深部过程及大陆动力学

青藏高原是阐明岩石圈组成和结构、造山机制、盆地转换、全球大陆动力学等一系列重大理论问题,建立地球科学新理论、新模式的关键地区,被誉为“打开地球动力学大门的钥匙”。高原具有复杂而独特的岩石圈结构和巨厚地壳,至今仍然是固体地球表层构造活动异常活跃的地区。高原处于冈瓦纳大陆与欧亚大陆之间特提斯大洋岩石圈消亡、洋—陆转换、陆—陆碰撞的关键部位,是不同块体漂移、碰撞、拼贴和在长期挤压作用下的“聚焦”区域。在深部物质运移影响下,它受到南、北双向力系作用影响,具有仰冲、俯冲、碰撞、对冲等多种运动方式和不同运动过程及强度。在漫长的地质历史中,它既记录了深部作用和圈层间相互作用的信息,又表现出与周边大陆岩石圈的耦合关系。

##### 4.2 高原隆起的时空过程及气候环境演化规律

青藏高原的隆起对中国、亚洲乃至全球环境变化影响极大。青藏高原是影响全球变化的一个关键

区域。高原隆起的时间与空间发展过程直接影响到全球环境格局。随着全球气候变化研究程度的深入,科学家们越来越相信中低纬度地区特别是青藏高原对全球气候环境变化具有重要影响。在高原地区开展分辨率高、信息量大的各种替代指标记录(树轮、冰芯、湖泊岩芯和天然地层剖面)研究,将能够揭示全球气候环境变化的耦合机制与过程,阐明高原地区气候与环境的演化规律,并预测其未来发展趋势。

##### 4.3 地气系统与表生过程及其相互作用

高原冰冻圈形成、运动和演变的规律及与其他圈层的相互作用是青藏高原与全球变化研究的重要内容。高原隆起后成为一个独特的地域单元,其特有的冰冻圈能敏感地接受和显示气候变化,使高原成为气候变化的预警区。高原特有的地气系统的物理过程,包括地气间能量交换和水分循环以及大气化学和生物过程是青藏高原与全球变化研究的重要问题。发展建立青藏高原的区域数值模型,并不断提高分析精度,才能预测高原气候和环境变化。在高原隆起中演化形成的高原生态系统为环境变迁研究提供了珍贵的本底资料,在其结构功能和动态变化的研究基础上,进一步探讨其对全球变化的响应过程具有重要的意义。

##### 4.4 高原区域环境与发展的协调

青藏高原拥有较丰富的自然资源,是高原区域可持续发展的重要基础。但是,高海拔山地环境复杂,易受人类活动的干扰和影响,导致土地退化和环境恶化,造成难以逆转的环境问题。当地居民尚较贫困、文化素质和科技水平有待提高。由于自然条件及社会、历史的原因,青藏高原地区与内地存在着很大的差距。如何解决脆弱的自然环境与日益增长的社会需求之间的矛盾,是这一地区发展长期面临的问题。随着青藏铁路的运营通车,给高原区域发展带来新的机遇,更需要协调好发展与环境的关系。

青藏高原是我国地学、生物学、资源与环境科学有特色的优势研究领域和难得的天然实验室,国际上亦十分重视。<sup>5</sup>年来国家重点基础研究发展计划项目“青藏高原形成演化及其环境资源效应”在青藏高原研究领域取得了显著进展。然而,关于高原岩石圈地球动力学、青藏高原与全球环境变化以及高原区域可持续发展等方面还有许多未知领域和问题,有待人类深入探索和研究。我们要瞄准国际学术前沿,立足实地取得原创数据,加强学科交叉和综合论证,争取在青藏高原研究领域的理论和实践方

面取得新的突破,做出中国科学家应有的贡献。

致谢:G1998040800 项目组全体成员为圆满完成计划任务,实现预期目标做出了重要贡献,特致谢忱。

#### 参考文献(References):

- [1] Zheng Du, Yao Tandong. Uplifting of Tibetan Plateau with its environmental effects [M]. Beijing: Science Press, 2004. 1-564. [郑度, 姚檀栋. 青藏高原隆升与环境效应[M]. 北京: 科学出版社, 2004. 1-564.]
- [2] Ding Lin, Kapp P, Wan X. Paleocene-Eocene record of ophiolite obduction and initial India-Asia collision, south-central Tibet [J]. *Tectonics*, 2005, 24(1-18): TC3001, doi:10.1029/2004TC001729.
- [3] Wan X, Ding L. Discovery of the latest Cretaceous planktonic foraminifera from Gyirong of southern Tibet and its chronostratigraphic significance [J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 2002, 41: 89-95.
- [4] Gao R, Huang D D, Lu D Y, et al. Deep seismic reflection profile across the contact zone of the West Kunlun orogenic belt and the Tarim Basin [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(2): 281-286.
- [5] Rui Gao, Zhanwu Lu, Qusheng Li, et al. Geophysical survey and geodynamic study of crust and upper mantle in the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Episodes*, 2005, 28(4): 263-273.
- [6] Tan Handong, Wei Wenbo, Martyn Unsworth, et al. Crustal electrical conductivity structure beneath the Yarlung Zangbo Jiang suture in the southern Xizang Plateau [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2004, 47(4): 685-690. [谭捍东, 魏文博, Martyn Unsworth, 等. 西藏高原南部雅鲁藏布江缝合带地壳电性结构[J]. 地球物理学报, 2004, 47(4): 685-690.]
- [7] Luo Z H, Xiao X C, Cao Y Q, et al. The Cenozoic mantle magnetism and motion of lithosphere on the north margin of the Tibetan Plateau [J]. *Science in China (Series D)*, 2001, 44(suppl): 10-17.
- [8] Qu X M, Hou Z Q, Li Y G. Melt components derived from a subducted slab in late orogenic ore-bearing porphyries in the Gangdese copper belt, southern Tibetan Plateau [J]. *Lithos*, 2004, 74: 131-148.
- [9] Pan B T, Burbank D W, Wang Y X, et al. A 900 ka record of strath terrace formation during glacial-interglacial transitions in northwest China [J]. *Geology*, 2003, 31(11): 957-960.
- [10] Fang X M, Yan M D, R Van der Voo, et al. Late Cenozoic deformation and uplift of the NE Tibetan Plateau: evidence from high-resolution magnetostratigraphy of the Guide Basin, Qinghai Province, China [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2005, 117(1): 208-225.
- [11] Song C H, Gao D L, Fang X M, et al. High-resolution magnetostratigraphy of late Cenozoic sediments from the Kunlun Shan Pass Basin and its implications on deformation and uplift of the northern Tibetan Plateau [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(17): 1912-1922.
- [12] Guo Z T, Ruddiman W F, Hao Q Z, et al. Onset of Asian desertification by 22 Ma ago inferred from loess deposits in China [J]. *Nature*, 2002, 416: 159-163.
- [13] Liu X D, Kutzbach J E, Liu Z, et al. The Tibetan Plateau as amplifier of orbital-scale variability of the East Asian monsoon [J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(16): 1839, doi:10.1029/2003GL017510.
- [14] Tian L, Yao T, Schuster P F, et al. Oxygen-18 concentrations in recent precipitation and ice cores on the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2003, 108(D9): 4293-4302.
- [15] Shao Xuemei, Huang Lei, Liu Hongbin, et al. Reconstruction of precipitation variation from tree rings in recent 1000 years in Delingha [J]. *Science in China (Series D)*, 2004, 34(2): 145-153. [邵雪梅, 黄磊, 刘洪滨, 等. 树轮记录的青海德令哈地区千年降水变化[J]. 中国科学 D 辑, 2004, 34(2): 145-153.]
- [16] Zhu L P, Zhang P Z, Xia W L, et al. 1400-yr cold/warm fluctuations reflected by environmental magnetism of a lake sediment core from the Chen Co, southern Tibet, China [J]. *Journal of Paleolimnology*, 2003, 29(4): 391-401.
- [17] Yao Tandong, Xu Baiqing, Duan Keqin, et al. Temperature and methane records over the past 2 ka in Dasuopu ice core from the Tibetan Plateau [J]. *Science in China (Series D)*, 2002, 32(4): 346-352. [姚檀栋, 徐柏青, 段克勤, 等. 青藏高原达索普冰芯 2 ka 来温度与甲烷浓度变化记录[J]. 中国科学 D 辑, 2002, 32(4): 346-352.]
- [18] Cao G M, Tang Y H, Mo W H, et al. Grazing intensity alters soil respiration in an alpine meadow on the Tibet plateau [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, 36: 237-243.
- [19] Xu X L, Ouyang H, Cao G M, et al. Nitrogen deposition and carbon sequestration in alpine meadows [J]. *Biogeochemistry*, 2004, 71: 353-369.
- [20] Luo T X, Li W H, Zhu H Z. Estimated biomass and productivity of natural vegetation on the Tibet Plateau [J]. *Ecological Applications*, 2002, 12(4): 980-997.
- [21] Zheng Du, Lin Zhenyao, Zhang Xueqin. Progress in studies of Tibetan plateau and global environmental change [J]. *Earth Science Frontiers*, 2002, 9(1): 95-102. [郑度, 林振耀, 张雪芹. 青藏高原与全球环境变化研究进展[J]. 地学前沿, 2002, 9(1): 95-102.]
- [22] Wang Ninglian, Ding Liangu. Study on the Glacier Variation in Bujiangri Section of the East Tanggula Range since the Little Ice Age [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 24(3): 234-244. [王宁练, 丁良福. 唐古拉山东段布加岗日地区小冰期以来的冰川变化研究[J]. 冰川冻土, 2002, 24(3): 234-244.]
- [23] Nan Zhuotong, Li Shuxun, Cheng Guodong. Prediction of permanent frost distribution on the Qinghai-Tibet Plateau in the next 50 and 100 years [J]. *Science in China (Series D)*, 2005, 48(6): 797-804.
- [24] Zhang Yili, Li Xiubin, Fu Xiaofeng, et al. Urban land use change in Lhasa [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(4):

- 396-406. [张德铨, 李秀彬, 傅小锋, 等. 拉萨城市用地变化分析[J]. 地理学报, 2000, 55(4): 396-406.]
- [25] Yan Jianzhong, Zhang Yili, Bai W anqi, et al. Land cover changes based on plant successions; Deforestation, rehabilitation and degeneration of forest in the upper Dadu River watershed[J]. Science in China(Series D), 2005, 48(12): 214-2230.
- [26] Bao W eikai, Zhang Yili, Wang Qian, et al. Rehabilitation and degradation for subalpine coniferous forest on the upper reaches of Dadu River of Eastern Tibetan Plateau[J]. Journal of Mountain Research, 2002, 20(2): 194-198. [包维楷, 张德铨, 王乾, 等. 大渡河上游林区森林资源的退化及其恢复与重建[J]. 山地学报, 2002, 20(2): 194-198.]

注 限于篇幅, 参考文献仅列举本项目的部分研究成果。请参阅本项目的学术专著《青藏高原隆升与环境效应》及在各种刊物上发表的相关论文。

## Uplifting of Tibetan Plateau with Its Environmental Effects

ZHENG Du<sup>1</sup>, YAO Tan-dong<sup>2</sup>

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. Institute of Tibetan Plateau, CAS, Beijing, 100085, China)

**Abstract:** The plateau is an ideal natural laboratory for studies on the earth dynamics of lithosphere and the environmental change, with broad applying prospective for the regional sustainable development of the plateau. By taking Tibetan Plateau as a key area, the project has specially focused on linkages with surrounding regions and the globe. The project emphasizes the study of the process of continental collision and uplift process of the plateau, while the processes are considered as a key clue through the studies on collision mechanism, environmental changes and resource effects. The research is devoted to quantitatively depict the dynamic processes of tectonic collision and uplift and environmental changes at different time scales since the Cenozoic Era. By applying synthetic and interdisciplinary methods borrowed from earth sciences, life sciences, environmental science and their hybridized integration, the important theoretical issues such as continental collision dynamics, environmental changes, contemporary epigenetic processes and interactions between biosphere, hydrosphere, cryosphere and atmosphere have been studied, which has provided scientific bases for the resource exploitation and environment harnessing on the plateau.

Since the implementation of the project in 1998, the project has been carried out many field excursions, during which field geological, geographical and ecological survey and sampling have been finished. Meanwhile, systematic long-term and temporary observation in the field and research, and laboratory analysis, testing, and identification of collected samples and specimens were carried out. The following achievements have been made: to find out the time limit of initial stage of collision between Indian and Eurasian continents; to explain the tectonic-geological relationship at a mountain-basin lithosphere scale in the northern and southern margin of the plateau; to put forward tectonic systems and to evaluate the mineralization belt and oil gas resources of the plateau; to establish a series of major tectonic-deformation and uplift events in the northern plateau during the Cenozoic Era; to reveal a high resolution dynamic process and change tendency of climate; to elaborate the effects of the plateau uplifting on the evolution and changes of the Asian monsoon; to clarify absorption and release of the green-house gas of main ecosystem types on the plateau; to predict changes of cryosphere with climate changes on the plateau and to illustrate land-cover changes as well as the rehabilitation and management of the degraded land.

**Key words:** Tibetan Plateau; Continental lithosphere; Collision and uplifting process; Climatic and environmental changes; Contemporary epigenetic processes.