三维古地貌重建技术在中生代羌塘地体古地理演化分析中的应用

于 淼,陈建平,严 琼,武 婴,王春女,于萍萍
YU Miao, CHEN Jian-ping, YAN Qiong, WU Zhao, WANG Chun-nü,YU Ping-ping

中国地质大学(北京)国土资源与高新技术研究中心/北京市国土资源信息研究开发重点实验室,北京 100083
Institute of High and New Techniques Applied to Land Resources, China University of Geosciences/ Land Resources Information Development and Research Key Laboratory of Beijing, Beijing 100083, *China*

摘要:近年来,从古地貌-沉积组合与油藏关系的角度进行油气远景评价成为研究热点。针对古地貌的复原研究,提出一种建立三维古地貌模型的方法,将二维平面古地理图通过对资料的整理、挖掘与转换,并结合 GIS 技术生成了三维立体模型,补充了区域地形地貌的相关信息。利用该方法,建立了青藏高原油气资源潜力最大的区域——羌塘地体在三叠纪和侏罗纪的一系列三维古地貌模型,进而对其古环境和演化过程进行分析,这对于该区域的沉积矿产资源的预测与评价有重要的参考价值。

关键词:三维古地貌模型;GIS;羌塘地体;中生代
中图分类号:P531; P534.5 **文献标志码**:A **文章编号**:1671-2552(2011)05-0694-08

Yu M, Chen J P, Yan Q, Wu Z, Wang C N, Yu P P. The application of the technology for three-dimensional reconstruction of ancient landform in the Mesozoic paleographic evolution of Qiangtang terrane, Tibet. ***Geological Bulletin of China,*** **2011, 30(5):694-701**

Abstract: In recent years, the evaluation of petroleum prospective has become a hot research topic from the aspect of the relationship between the ancient landform-sedimentary assemblage and the oil reservoir. Aimed at the restoration of ancient landform, the authors put forward a method for building three-dimensional reconstruction model of the ancient landform. Meanwhile, in combination with the GIS technology, 3D stereo model was created by reshaping, tapping and converting data of 2D plane paleographic chart. A series of 3D Jurassic and Triassic landform models were built by this method for Qiangtang terrane, the largest petroleum resource potential region in Qinghai-Tibetan Plateau. Moreover, the paleographic evolution process of this region was analyzed, and the results obtained are of great reference value in the prediction and evaluation of sedimentary mineral resources in this region.

Key words: three-dimension ancient landform; GIS; Qiangtang terrane; Mesozoic

古地理学作为一门重要的地球科学，受到了国内外学者的重视,取得了丰硕的科研成果,其中包括大量的古地理图[1-2]。在此基础上,随着 3D、GIS 技术的日趋成熟,古地貌的复原研究也取得了一些进展。Ron Blakey 在所编制的一系列古地理图的基础上,应用 3D 晕渲技术，完成了含有古地貌信息的美国西部古地理演化图集[3]。刘学锋等[4]基于 GIS 技术利用回剥分析对盆地古构造进行再造，为含油气盆地古构造演化史提供了多维的直接证据。

近年来，青藏高原以其特殊的地质构造和资源

收稿日期:2011-02-25;修订日期:2011-03-23
资助项目:中国石油化工股份有限公司项目《青藏特提斯活动古地理与油气远景》(编号:T060007ZS15)
作者简介:于淼(1984-),女,在读博士,地球探测与信息技术专业。E-mail: yumiao4503210@126.com
通讯作者:陈建平(1959-),男,教授,博士生导师,从事矿产资源定量预测评价和"3S"技术集成应用的教学与研究工作。E-mail: 3s@cugb.edu.cn

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

能源潜力成为国内外地学界普遍关注的热点和研究的难点[5-7],其中中生代羌塘盆地被认为是青藏高原油气资源潜力最大的首选盆地。研究表明,通过古地形地貌的复原重建可以揭示沉积区、剥蚀区、海陆变迁等古地理环境,有助于深刻了解沉积盆地的演化史,对石油、天然气和沉积矿产资源的寻找有重大的实用价值。

因此,笔者提出了一种基于 GIS 技术建立三维古地貌模型的方法[8],以岩相古地理图和相关地质背景资料为基础,将沉积相信息挖掘转换为高程信息,从而建立含地形地貌特征的三维立体模型。本文首先介绍建模相关的技术方法,然后建立羌塘地体三叠纪和侏罗纪一系列的三维古地貌模型,进而分析其古地理演化过程。

1　建模理论依据和步骤

1.1　原理和地质模型

Ziegler 等[9]提出的古地貌复原的基本原则:现代地表环境、大地构造背景及其高程、地形学特征表示的对应关系是可以应用到过去的,即遵从均变论(Uniformitariansim)。这里需要指出,地学问题是很复杂的,局部地区可能不符合"均变论",但是作为地质模型,目前的研究是在"均变论"的假设下,根据所研究区域的具体地质背景略作调整。

具体复原方法概括如下。

有沉积记录的区域可以根据沉积相特征推断其古地形地貌。如河流、湖泊、三角洲、滨海、浅海、深海沉积相等都可以通过现代地形地貌特征推断其古地形地貌。

山脉作为沉积物源区,其位置需根据古沉积相来进行推断:利用洪积扇、冲积扇等相单元来推断山坡走势;波痕等古水流方向用于指示剥蚀山脉的大致方位。山脉的整体展布可以根据与造山相关的古构造进行推测。如近似平行于碰撞带的造山带,在收缩挤压应力作用下形成谷-脊构造,与造山带走向平行或斜交的伸展拉应力形成盆岭构造等。结合冰川沉积相的分析,对于古山脉位置的展布和古高程的确定也有很重要的意义。

利用上述方法对该区域古地理环境有了初步认识的基础上,结合项目组针对研究区域沉积相类型、构造特点整理的古地形和古水深高程值的范围对各类沉积边界进行赋值(表 1)。本研究在单个沉积相的高程范围的基础上,还考虑了各临近沉积相在空间上的相互关系,来确定具体的高程值。

表 1　古高程和古水深的高程范围

Table 1　Elevation ranges of palaeotopography and palaeobathymetry

沉积相	高程/m
大洋盆底	-5000～-6000
大洋盆地	-2000～-3000
海底扇	比盆底浅 10～100
斜　坡	-300～-3000
陆　棚	-50～-300
碳酸盐岩台地	0～-300
滨　岸	50～-50
三角洲	5～-200
冲积扇	0～50
曲流河与冲积平原	0～50
辫状河	100～500
洪积扇	500～1000
古　陆	0～3000

1.2　空间插值和 3D 晕渲

本研究利用 GIS 空间分析工具,通过对已知高程等值线插值生成数字古高程模型(Palaeo-DEM),将上述对地形地貌的推断结果用比较直观准确的方式表达出来。基本思路是岩相古地理图中各种沉积相指示着对应的地貌,可以认为沉积相边界的高程是基本一致的,将其作为等值线,设置对应高程值后插值生成古高程模型。

为了突出图中各种沉积相类型和地貌高程变化,利用 3D 晕渲技术(3D Shaded-Relief),根据各沉积相高程值的特点设置了分级节点,并相应选择了能够鲜明地表达地表和水深的颜色生成特定的晕渲色彩方案。

1.3　建模技术流程

本研究建模的方法主要分为 2 个步骤:首先从岩相古地理图中提取古地理单元边界和属性,结合解释的古高程和古水深范围,进行古地形地貌的复原;然后利用相关数学算法和 GIS 技术对等值线图进行空间插值得到古地形高程数据;再通过 3D 晕渲技术,实现含地貌特征的三维古地理图的表达方式。图 1 为建立古高程模型方法流程图。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

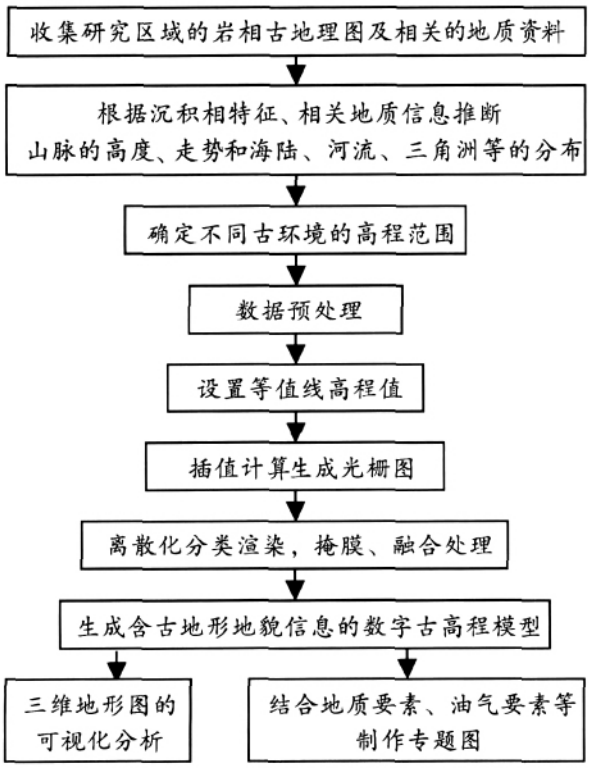


图1 建立三维古地貌模型方法流程

Fig. 1 Flowchart of establishment of the Palaeo-DEM

2 羌塘地体中生代三维古地貌模型

2.1 区域地质背景

羌塘地体位于青藏高原巨型造山带内，东经78~98°、北纬31~34°之间，南北分别以可可西里-金沙江缝合带和班公湖-怒江缝合带为界，具有长期复杂的演化历史，是中国中生代面积最大的海相沉积盆地，油气资源潜力巨大。按照沉积充填特征和演化过程的差异，以龙木错-双湖缝合带为界，将其划分为西羌塘和东羌塘地体。图2为羌塘地体的位置及构造划分图。

2.2 岩相古地理演化

中生代羌塘盆地自北而南由羌北盆地、中央隆起带和羌南盆地3个次级构造单元构成，该格局形成于晚三叠世并持续演化至早白垩世。早三叠世，由于东、西羌塘拼贴，在缝合带处沿东西向分布出露一个中央隆起带，总体古地理格局为南北两盆中央一隆，主体为开阔台地亚相(图3)。中三叠世，中央隆起面积减小，海域面积扩大，东南部海域较大范围隆升成为暴露陆地，东北海域演变为局限台地亚相和颗粒滩亚相，西部海域主体仍为开阔台地亚相(图3)。晚三叠世，受羌塘地体与北部昆仑地体碰撞的影

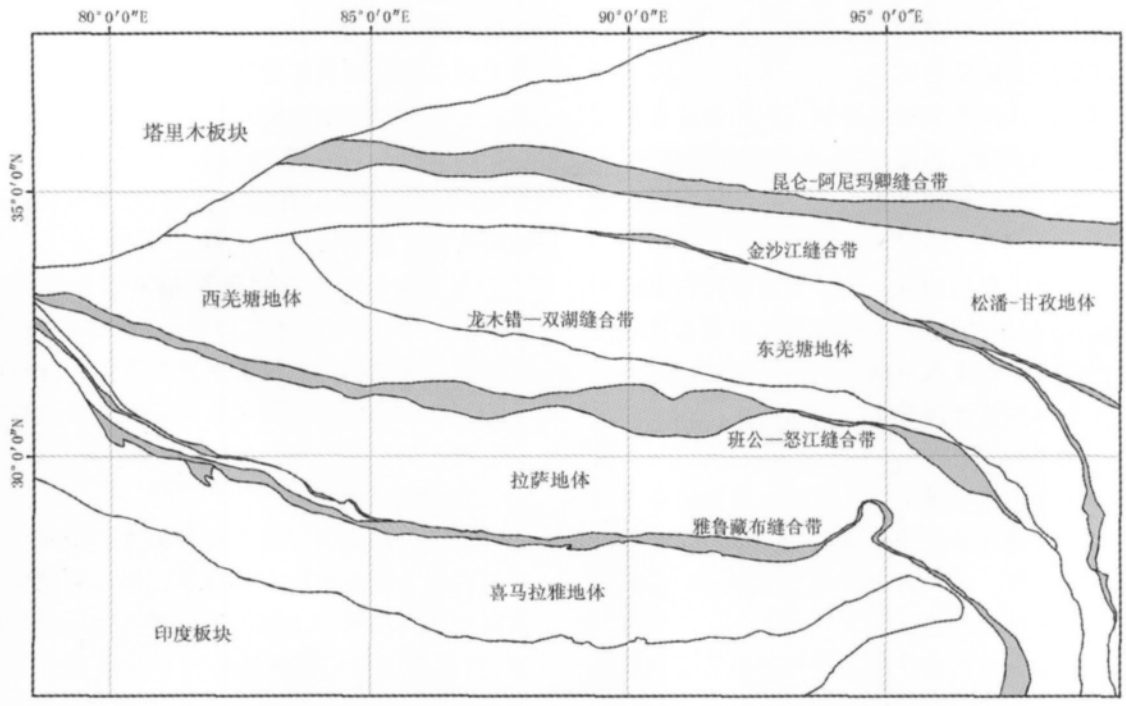


图2 羌塘地体位置及构造划分图①

Fig. 2 Location and tectonic boundary map of Changthang Terrane

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

响，原中央隆起处于挤压状态而逐渐隆升[10]，西部和东部也出现了大量的陆地，在陆地与陆棚过渡带发育了大量三角洲相，海域面积缩小，南北两侧产生了深海远洋和海底扇相。早侏罗世对应于班公湖–怒江缝合带主碰撞期，总体呈现北陆南海的格局，陆源剥蚀区主要为北侧的可可西里带和中央隆起带，南部海域明显萎缩。海相以内外陆棚亚相为主，出现潮坪和泻湖相，在原中央隆起带出现了较大规模的火山带。中侏罗世是羌塘地体最大的海侵期，海水频繁地越过中央隆起带向北浸漫，沉积范围显著扩大，盆地整体性下沉[11]，陆源剥蚀区缩小，原暴露古陆西部和东北部大部分保留为陆地，并发育了河流、三角洲等。晚侏罗世，由于拉萨地体与羌塘地体碰撞，中央隆起表现为低平陆地或水下隆起[12]，海水大量退出，海域面积减少，但海水仍残留在羌塘地体的低地中，呈北西—南东向横穿于大陆之间①。

岩相古地理图包含了准确详细的沉积相类型和分布信息，是建立古地貌模型的基础图件资料，但作为项目内部成果，本文仅引用羌塘地体早三叠世的岩相古地理图(图 3)作为示例。

2.3　模型成果及分析

从上述资料中可以看出，目前关于羌塘地体中生代的古地理相关研究成果比较丰硕，但是对于古地形地貌的认识较少。通过收集羌塘地体的岩相古地理图、古地理演化、地质构造背景等资料，在对研究区域

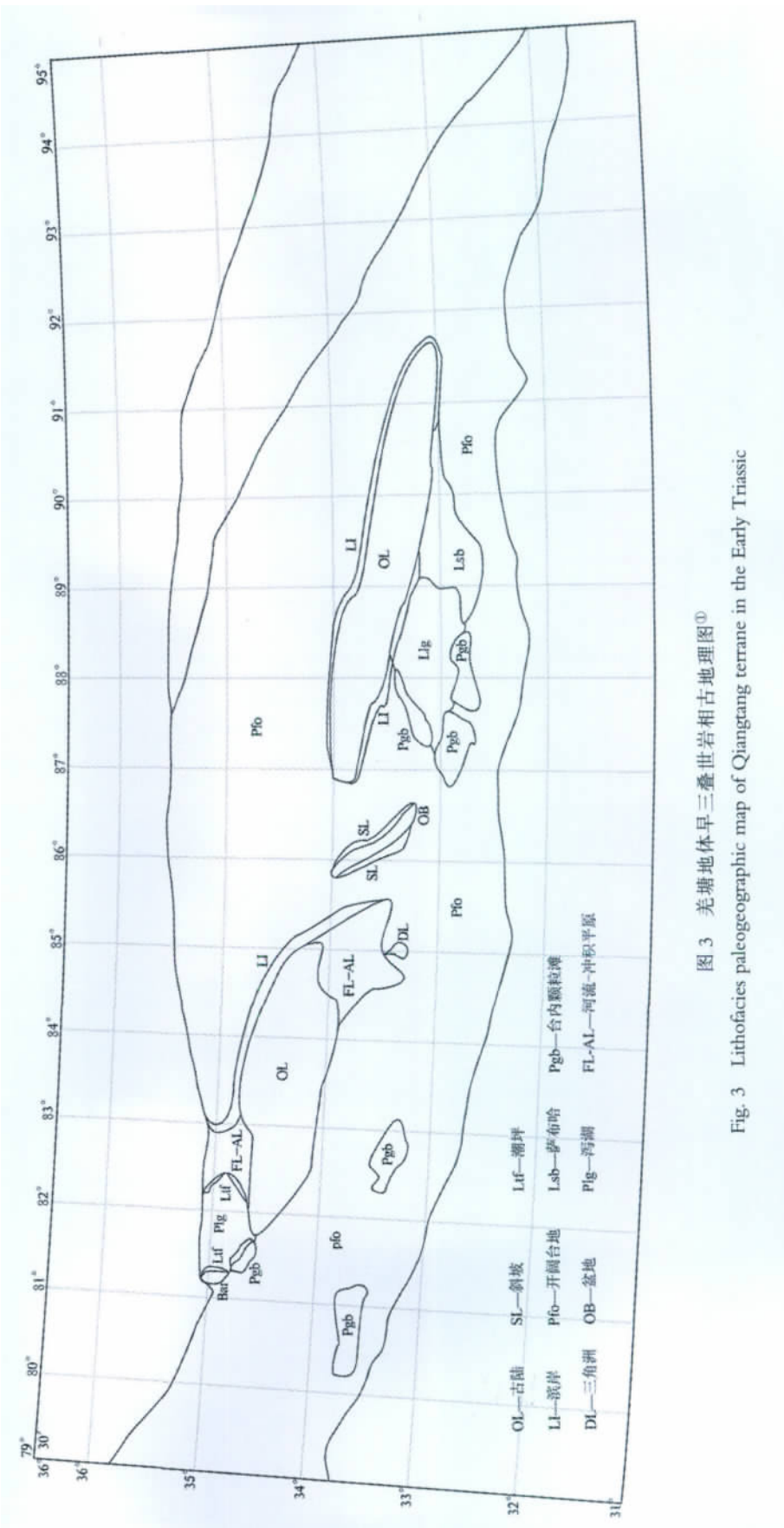


图 3　羌塘地体早三叠世岩相古地理图①

Fig. 3　Lithofacies paleogeographic map of Qiangtang terrane in the Early Triassic

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

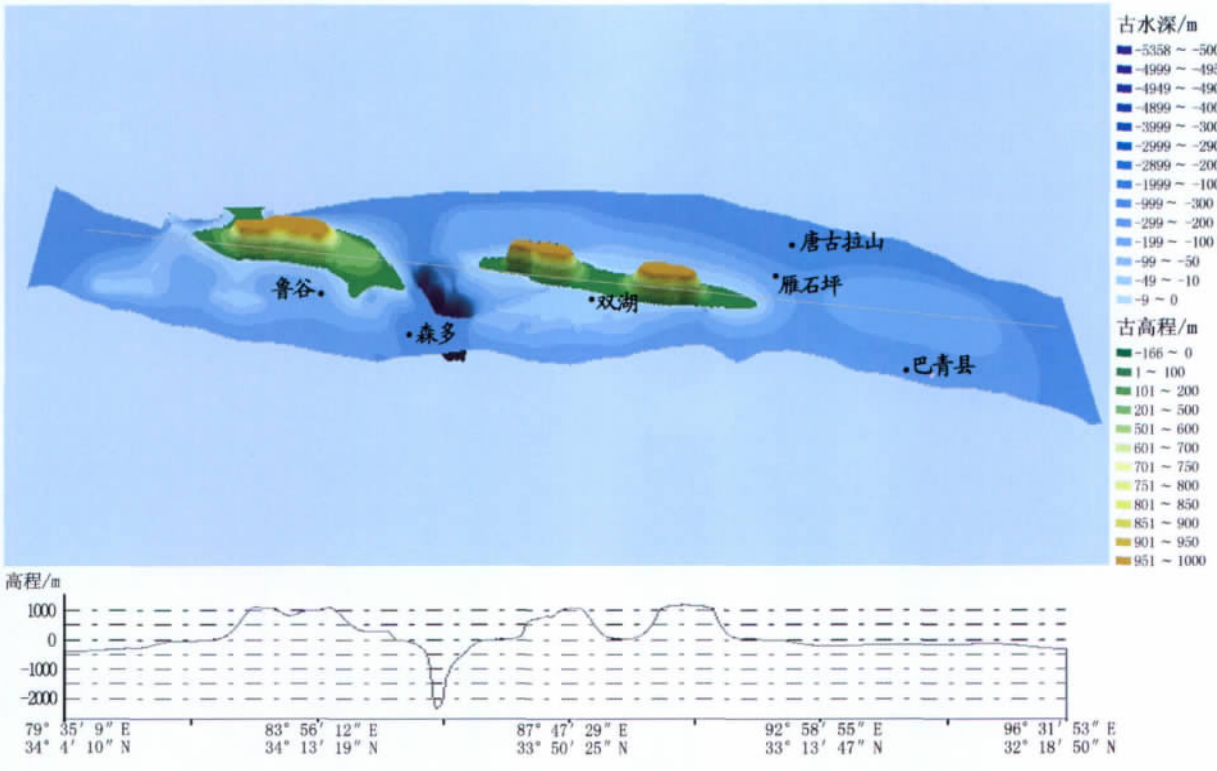


图 4 羌塘地体早三叠世三维地形图

Fig. 4 Three-dimensional topographic map of Qiangtang terrane in the Early Triassic

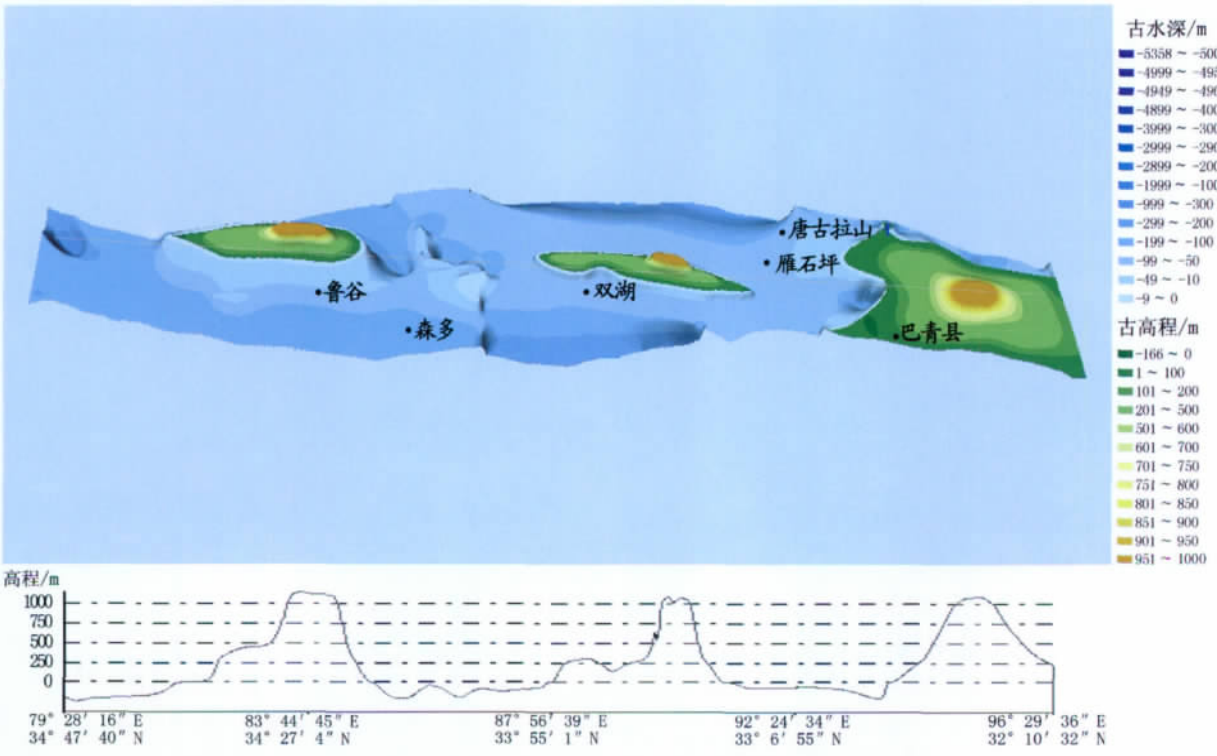


图 5 羌塘地体中三叠世三维地形图

Fig. 5 Three-dimensional topographic map of Qiangtang terrane in the Middle Triassic

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

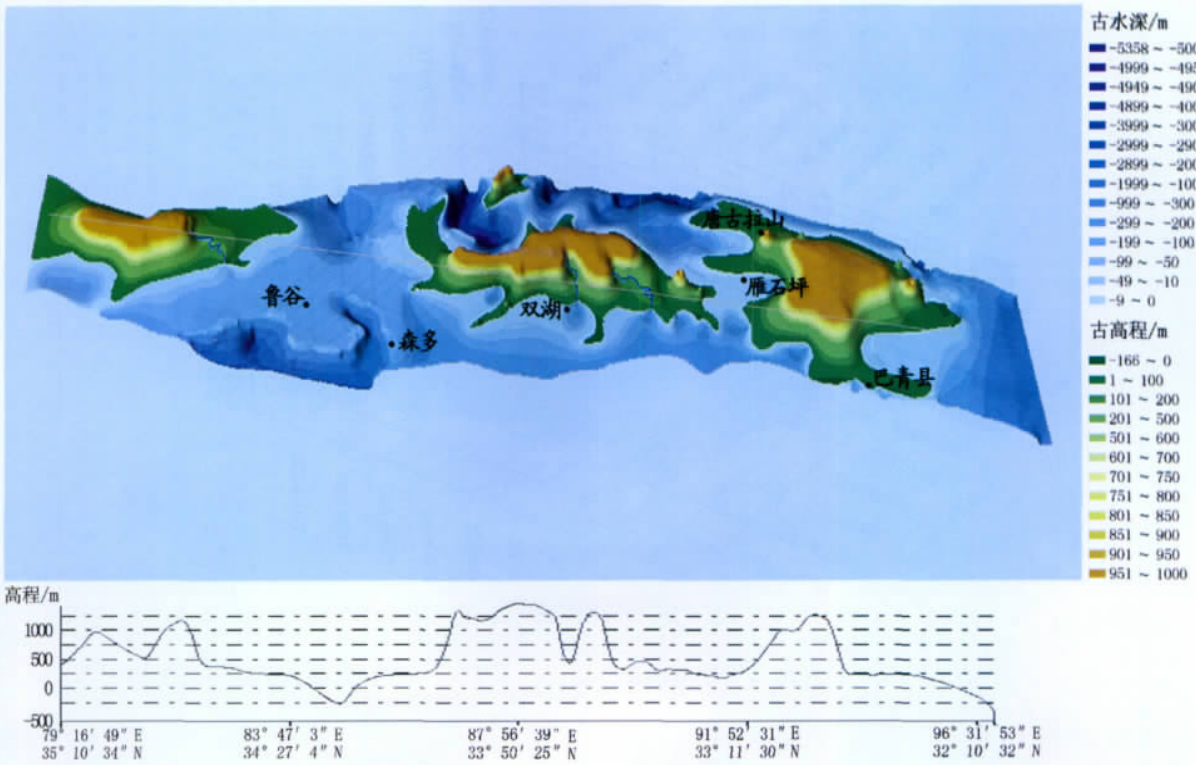


图 6　羌塘地体晚三叠世三维地形图

Fig. 6　Three-dimensional topographic map of Qiangtang terrane in the Late Triassic

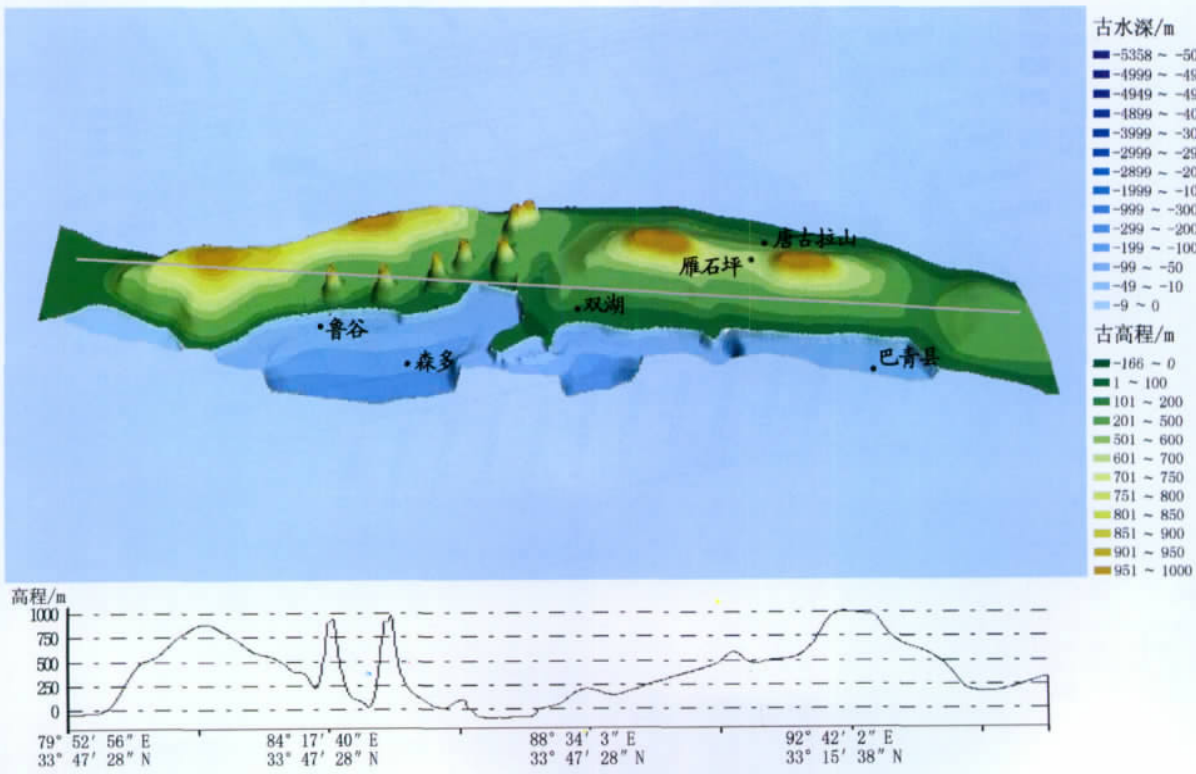


图 7　羌塘地体早侏罗世三维地形图

Fig. 7　Three-dimensional topographic map of Qiangtang terrane in the Early Jurassic

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

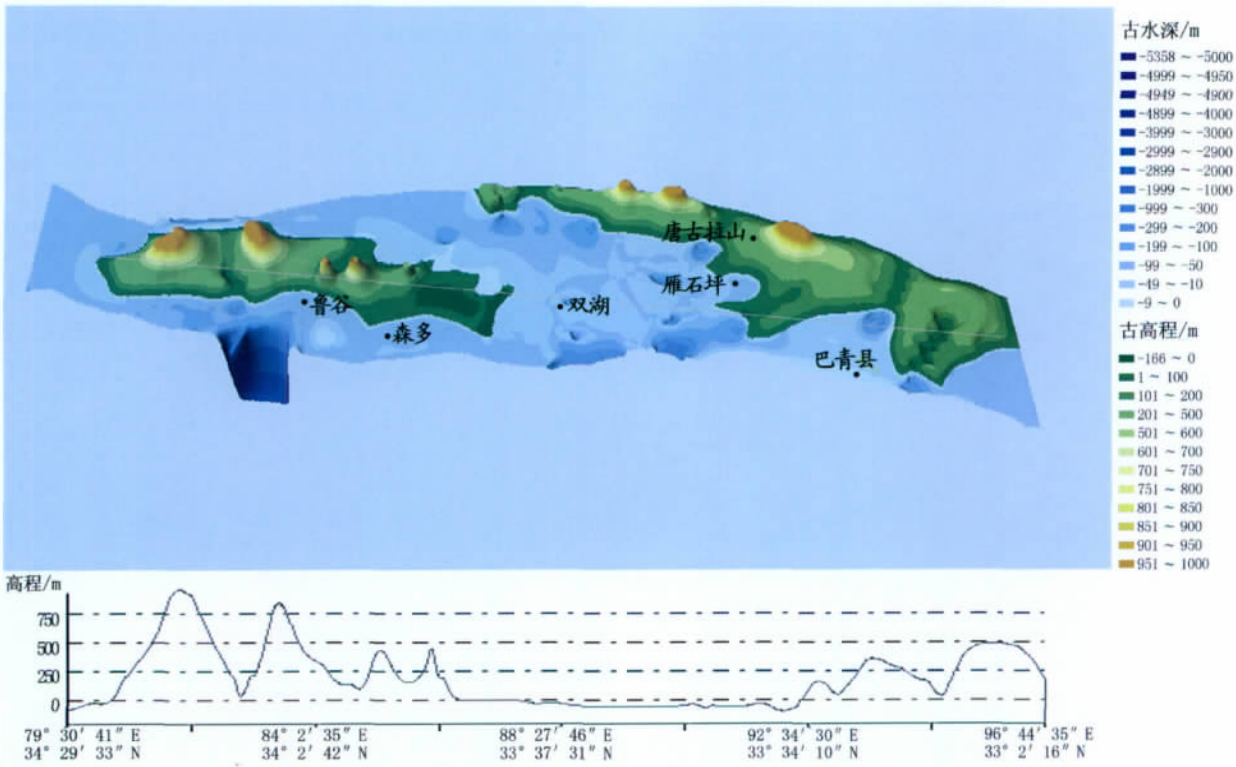


图 8 羌塘地体中侏罗世三维地形图

Fig. 8 Three-dimensional topographic map of Qiangtang terrane in the Middle Jurassic

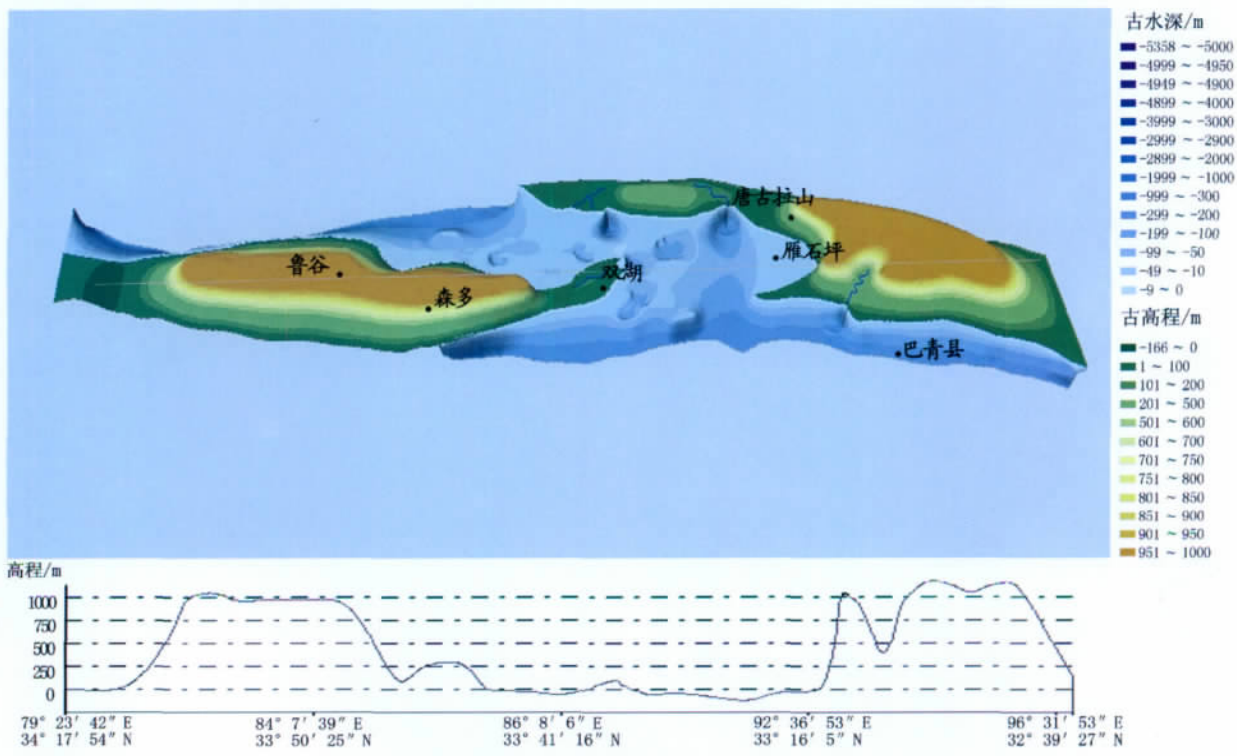


图 9 羌塘地体晚侏罗世三维地形图

Fig. 9 Three-dimensional topographic map of Qiangtang terrane in the Late Jurassic

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

有了充分认识的基础上，首先对上述地质资料进行整理和挖掘,然后基于 GIS 技术实现三维模型的建立和表达。如图 4 至图 9 为羌塘地体三叠纪和侏罗纪以“世”为单位的三维古地貌模型,其下方曲线为对应的地形剖面图。

通过建立一系列的古地貌立体模型，可以直观清楚地看到羌塘地体早三叠世—晚侏罗世不同地质年代的地形地貌特征及演化过程。早三叠世,作为龙木错一双湖缝合带碰撞造山作用的产物，中央隆起带是分隔南北部盆地的构造地貌高地且带中存在较深的凹陷,如图 4 所示。中三叠世,中央隆起陆源物质减少,高程降低,东南部暴露陆地,地形较平坦,位于中央隆起带中部的凹陷变浅，海底出现了多种地貌类型,见图 5。晚三叠世,金沙江缝合带的碰撞闭合导致陆海面积的增减变化，同时地表隆升幅度较大,原中央隆起地形相对复杂,如图 6 所示。早侏罗世,由于碰撞挤压从中央隆起向北区域出露海面,形成大面积的暴露古陆,地表地形起伏较复杂,沿海陆边界有火山地貌,见图 7。中侏罗世,随着盆地的下沉和海水的侵漫,中央隆起东段大部分地区被夷平,西南部存在山区地貌剥蚀区，古地形总体趋于平坦并伴有火山和辫状河流地貌，如图 8 所示。晚侏罗世,由于地体碰撞导致陆地面积增加,地势升高且地形较单一,海域面积相对减少,仍保留丰富的地貌类型,见图 9。

3　结　论

结果表明,按照三维古地貌重建的方法,对古环境进行近似的 3D 渲染复原是可行的，建立的三维古地貌模型可以清楚地将羌塘地体在不同地质年代的沉积区与剥蚀区的分界，在不同的地质事件影响下陆地的高程和形态的变化，盆地水深和海底不同的沉积特征的变化,凹陷、三角洲、辫状河流等不同地形地貌类型都直观地表达出来，为羌塘沉积盆地古环境演化的研究提供了有效的途径。

本研究将二维平面古地理图，通过对相关资料的整理、挖掘与转换,并结合 GIS 技术,生成了三维立体模型，补充了研究区域地形地貌的相关信息和细节，多角度地表达了研究区域的古环境背景及其演化过程。这对石油、天然气和沉积矿产资源的寻找有重大的实用价值,同时将计算机和 GIS 技术应用于古地理重建工作，为中国古地理重建的信息化与定量化发展提供了一种新的研究方法和手段。

致谢:感谢中国石化勘探研究院郑和荣副院长、孙红军总工、吴博博士的协助和项目组专家王成善教授、李祥辉教授等的指导。

参考文献

[1]王鸿祯.中国古地理图集[M].北京: 地图出版社, 1985:1-85(中文), 1-28(英文).

[2]Golonka J, Ford D. Pangean (Late Carboniferous-Middle Jurassic) paleoenvironment and lithofacies[J]. Palaeogeography, Palaeolimatology, Palaeoecology, 2000,161(1/2):1-34.

[3]Dr Ron Blakey. Paleogeography and Tectonic Evolution of Late Paleozoic Sedimentary Basins, Southwestern North America.http://jan.ucc.nau.edu/~rcb7/garmabstract.html. Northern Arizona University, 2005.

[4]刘学锋,孟令奎,黄长青,等. GIS 支持下的盆地古构造再造——以松辽盆地北部古中央隆起带为例[J].地球科学, 2003,28(3):346-35.

[5]陈建平,唐菊兴,丛源,等.藏东玉龙斑岩铜矿地质特征及成矿模型[J].地质学报, 2009,83(12):1887-1900.

[6]王成善,李亚林,李永铁.青藏高原油气资源远景评价问题[J].石油学报, 2006,27(4):1-7.

[7]侯增谦,莫宣学,杨志明,等.青藏高原碰撞造山带成矿作用:构造背景、时空分布和主要类型[J].中国地质, 2006,33(2):340-351.

[8]于淼,陈建平,龚福秀.一种基于 GIS 建立数字古高程模型的方法[J].古地理学报, 2010,12(4):489-496.

[9]Ziegler A M,David B Rowley,Ann L Lottes, et al. Paleogeographic interpretation: with an example from the Mid-Cretaceous[J]. Earth Planet. Sci., 1985, 13: 385-425.

[10]和钟铧,李才,杨德明,等.羌塘盆地三叠纪岩相古地理及构造控制[J].古地理学报, 2002,4(4):9-18.

[11]贾建称,吴新国,王根厚,等.羌塘盆地东部中生代沉积特征与构造演化[J].中国地质, 2006,33(5):999-1004.

[12]李勇,王成善,伊海生,等.青藏高原中侏罗世—早白垩世羌塘复合型前陆盆地充填模式[J].沉积学报, 2001,19(1):20-27.

① 王成善.《青藏特提斯活动古地理与油气远景》项目内部成果资料.中国地质大学(北京),2010.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net