

杨树新, 姚瑞, 崔效锋等. 中国大陆与各活动地块、南北地震带实测应力特征分析. 地球物理学报, 2012, 55(12): 4207-4217, doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.12.032.

Yang S X, Yao R, Cui X F, et al. Analysis of the characteristics of measured stress in Chinese mainland and its active blocks and North-South seismic belt. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(12): 4207-4217, doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.12.032.

中国大陆与各活动地块、南北地震带 实测应力特征分析

杨树新^{1,2}, 姚 瑞^{1*}, 崔效锋¹, 陈群策³, 黄禄渊¹

1 中国地震局地壳应力研究所, 北京 100085

2 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044

3 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081

摘 要 本文以“中国大陆地壳应力环境基础数据库”为基础, 补充了迄今为止查阅到的中国大陆水压致裂法与应力解除法的实测地应力数据, 在 1474 个测点上得到 3586 条数据, 研究区经度范围 75°E—130°E, 纬度范围 18°N—47°N, 深度范围 0~4000 m, 基本覆盖了中国大陆的各活动地块与南北地震带各段等研究区. 本文采用等深度段分组归纳的方法解决了实测地应力数据样本数量沿深度分布的不均匀问题, 给出了中国大陆与各研究区地壳浅层测量深度范围内应力量值、方位特征. 结果显示: (1) 中国大陆地壳浅层最大水平应力、最小水平应力、垂直应力随深度呈线性增加; (2) 中国大陆地区侧压系数随深度的变化特征为: 浅部离散, 随着深度增加而集中, 并趋向 0.68, $D=465$ m 是水平作用为主导向垂直作用为主导的转换深度, $K_{av}=1$; (3) 中国大陆水平差应力在地表为 3 MPa 左右, 随深度增加以 5.8 MPa/km 的梯度增大; (4) 在测量深度范围内, 中国大陆各研究区最大水平应力中间值(深度为 2000 m 时的统计回归值) 从大到小的顺序是: 青藏地块 63.6 MPa、南北带北段 57.3 MPa、华南地块 51.4 MPa、华北地块 50.5 MPa、南北带中段 47.9 MPa、西域地块 47.5 MPa、南北带南段 45.4 MPa、东北地块 44.8 MPa, 总体表现为“西强东弱”的基本特征, 反映了印度板块与欧亚板块的强烈碰撞是中国大陆构造应力场强度总体特征的主要来源; (5) 与其他研究区相比较, 青藏地块地壳在从南向北的挤压作用下呈现出明显的“浅弱深强”特点; (6) 最大水平应力方向的总体特征, 基本以青藏高原为中心, 呈辐射状展布, 由西向东, 从近 N-S 方向逐步顺时针旋转至 NNE-SSW、NE-SW、NEE-SWW、NW-SE 方向, 与深部的震源机制解研究结果有一致性.

关键词 中国大陆, 地应力测量, 回归分析, 活动地块, 地震带

doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.12.032

中图分类号 P542

收稿日期 2012-01-17, 2012-11-25 收修定稿

Analysis of the characteristics of measured stress in Chinese mainland and its active blocks and North-South seismic belt

YANG Shu-Xin^{1,2}, YAO Rui^{1*}, CUI Xiao-Feng¹, CHEN Qun-Ce³, HUANG Lu-Yuan¹

1 Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China

2 Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

3 Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China

Abstract The latest hydraulic fracturing and stress relief measurement data of Chinese mainland was collected and supplemented to the “Database of Crustal Stress in China and Adjacent Area”

基金项目 深部探测技术与实验研究专项 SinoProbe-04(国土资源部公益性行业科研专项 201011068), 地震行业科研专项(201108008)和中央级科研院所基本科研任务专项(ZDJ2012-20)资助.

作者简介 杨树新, 男, 1964 年生, 副研究员, 主要从事数值模拟与地球动力学方面的研究. E-mail: yangshuxin1964@263.net

*** 通讯作者** 姚瑞, 女, 1985 年生, 研习员, 主要从事地应力测量数据应用、构造应力场和数值模拟方面的研究. E-mail: yaorui_4123@163.com

which was established in 2003. The entries of in situ stress data measured at 1474 points are 3586. The longitude, latitude, and depth range is 75°E — 130°E , 18°N ~ 47°N and 0 ~ 4000 meters respectively. Every active block and each section of north-south seismic belt have data more or less. Depth-grouping analysis was used in this paper to solve the problem caused by uneven distribution of measurement data along the depth. The magnitude and direction characteristics of stresses measured in the shallow crust of Chinese mainland and each study area were given. The result is summarized as follows. (1) The magnitudes of maximum horizontal stress, minimum horizontal stress, and vertical stress all increase linearly with depth; (2) The characteristics of the lateral pressure coefficient with depth can be described as follow. The distribution of K_{av} is scattered in superficial crust, becomes more concentrated in the deeper crust and trends to 0.68. At a depth of 465 m K_{av} equals to 1 which indicates the transition from horizontal to vertical stress domination. (3) The magnitude of horizontal differential stress equals to 3 MPa at surface. The growth gradient is 5.8 MPa/km. (4) In the middle depth range of measurement data in Chinese mainland (i. e. depth equals to 2000 meters), the descending order of stress magnitudes in various blocks is: 63.6 MPa in Qinghai-Tibet, 57.3 MPa in north section of north-south seismic belt, 51.4 MPa in south China, 50.5 MPa in north China, 47.9 MPa in middle section of north-south seismic belt, 47.5 MPa in northwestern China, 45.4 MPa in south section of north-south seismic belt, and 44.8 MPa in northeast China. Generally, the basic characteristic of magnitude is high in west and weak in east. This indicates that the strong collision of Indian plate and Eurasian plate determines the general strength characteristics of tectonic stress field in Chinese mainland. (5) Compared to most other study regions, the crustal stress magnitude feature of the Qinghai-Tibet block under northward compression is lower in the shallow and higher in the deep. (6) The general direction characteristics of maximum horizontal stress basically spread radially from the center of Tibetan Plateau. The directions of maximum horizontal stress gradually rotate clockwise from N-S to NNE-SSW, NE-SW, NEE-SWW, NW-SE and are consistent with the result of focal mechanism solution.

Keywords Chinese mainland, In-situ stress measurement, Regression analysis, Active block, Seismic belt

1 引言

地应力测量是研究地应力场最直接的方法,可直接获得测点处地应力的大小和方向.但其局限性是测量数据仅反映地壳浅部局部应力状态,如何通过实测地应力资料分析区域应力场特征是国内外地球科学家一直探索的问题.

基于一定数量的实测数据,用统计分析方法研究应力场宏观规律方面前人做了大量工作,取得许多有价值的成果:Hast^[1]最早对 Fennoscandian 板块水平应力与埋深进行了回归;G. Worotniki 和 D. Denham^[2]建立了澳大利亚的平均水平应力和垂直应力随埋深的线性回归关系;Hoek 和 Brown^[3]统计了全球实测平均水平应力与垂直应力之比随埋深

的分布规律;T. R. Stacey 和 J. Wesseloo^[4]研究了南非矿区水平应力与垂直应力的比值,并对数据根据拟合度分级;由 Zoback 主编的《世界应力图》反映了岩石圈应力状态和全球应力场基本格局^[5].

李方全等根据我国原地应力实测资料讨论了浅部地壳应力随深度的变化,推测深部应力状态,并结合国外学者的成果进行了比较分析^[6];蔡美峰等研究了我国局部地区的地应力分布规律及岩性对地应力的影响^[7];朱焕春等讨论了应力大小与岩石杨氏模量之间是否存在某种正相关性^[8];景锋等结合统计方法认为岩石地质成因与三大类岩石地应力分布规律相关^[9];朱焕春和陶振宇还利用统计分析和数值模拟的方法研究了地形地貌对应力场的影响^[10];赵德安等分析了我国不同岩性岩石的侧压比随深度变化的规律^[11];石耀霖讨论了地应力主应力的方位角

求和与平均,论述了将区域内若干主应力方位测量结果的平均值作为区域主应力方向存在的一些问题^[12]。

前人的研究受到实测数据较少的限制,基本是用实测数据研究中国大陆地应力随深度的总体特征,在量值及方位方面的分析不够充分,尤其缺少不同区域的具体分析.本文广泛收集整理原地应力测量数据,以较为丰富的实测数据为基础,利用统计分析的方法,对中国大陆实测地应力总体特征开展了进一步的研究,进而对活动地块、南北地震带等各研究区地壳浅部实测地应力特征进行了具体的分析与比较,得出了一些有益的结论.

2 地应力数据

2.1 数据收集

中国地震局地壳应力研究所于 20 世纪 50 年代末开展地应力测量与研究,并广泛地收集了测量报告和公开发表的论文中的地应力观测资料和研究成果,于 2003 年建成了“中国大陆地壳应力环境基础数据库系统”^[13].笔者在此数据库的基础上,补充收集了 2002 年迄今公开发表的文献中的水压致

裂和应力解除实测地应力数据,补充收集了地壳应力研究所、国土资源部地质力学研究所的工作报告中水压致裂和应力解除实测地应力数据,数据情况见表 1,这些数据构成了本文研究的基础.

2.2 数据分布

张培震等^[14]在研究中国大陆强震活动时,定义了“活动地块”,根据活动地块边界带从晚第四纪至今强烈活动的原则对中国大陆及邻区进行了 2 级分区,其中 6 个 I 级活动地块区分别是:青藏地块、西域地块、华南地块、滇缅地块、华北地块和东北地块,本文使用了该研究成果.南北地震带集中了中国有历史记录以来一半的 8 级以上大地震,是东西部活动地块边界,也是中国大陆地应力场一级分区的边界^[15],地震带应力状态应有其特殊性,本文按单独的区域进行分析.南北地震带的划分本文使用了中国地震局闻学泽研究员提供的最新研究结果,分为北段、中段、南段三个区,考虑到滇缅地块与南北地震带南段基本是重合的,合并为一个区进行研究.我们尝试根据实测地应力数据给出各地块和南北地震带各段等研究区地壳浅部地应力大小和方向特征.数据分布情况如图 1 所示.

表 1 数据情况表

Table 1 The data in this paper

HF 数量	OC 数量	HF 深度范围	OC 深度范围	HF 经度范围	OC 经度范围	HF 纬度范围	OC 纬度范围
2985 条	601 条	4~3984 m	3~1271 m	82°E—128°E	75°N—130°N	22°E—46°E	18°N—47°N

注:HF 代表水压致裂测量方法;OC 代表应力解除测量方法.

2.3 数据处理

为保证研究成果的可靠性,我们对数据进行了优化处理:(1)首先去掉了深度、最大、最小水平应力量值或主应力信息不完整的数据;(2)通过检验主应力方向交角,剔除交角小于 85°或大于 95°的数据.(3)我们收集的数据有很大部分是为了解某些特定的工程部位的应力状态而测量的,其中有些数据难免受工程建设和局部地质条件影响过大,产生异常.为使研究结果更能反映研究区地应力整体特征,我们对实测数据进行优化处理,具体方法是:先将全部数据进行线性拟合,以线性拟合直线为中心做两条对称的直线,使 95% 的数据落在两条对称线内侧;两条对称线外侧 5% 的数据,我们理解为偏离回归线较大,为异常数据,予以剔除,如图 2 所示,图中数据点代表实测的最大水平应力 σ_H 、最小水平应力 σ_h 和垂直应力 σ_v .筛选后,水压致裂数据有 2904 条,深度 D 范围是 4~3984 m;应力解除数据有 461 条,深

度范围是 3~1271 m.

3 实测地应力随深度变化规律

前人关于中国大陆实测地应力随深度变化的统计回归研究中,没有给出数据样本数量沿深度分布不均匀问题的处理方法.由于浅部的数据多,深部数据少,统计回归的结果更多反映了浅部特征,更能代表较大区域的深部数据由于较少而被淹没在浅部数据中,在统计回归的结果中没有合理体现,使得统计回归的结果出现偏差.本文中我们采用一种等深度段分组归纳的方法解决上述问题,具体方法是:(1)按相等的深度段将数据分组;(2)按组计算数据的平均深度、平均量值;(3)用各组的平均深度、平均量值回归分析地应力随深度变化规律.

3.1 σ_H 、 σ_h 、 σ_v 随深度变化

中国大陆 σ_H 、 σ_h 、 σ_v 随深度变化规律如表 2、图 3

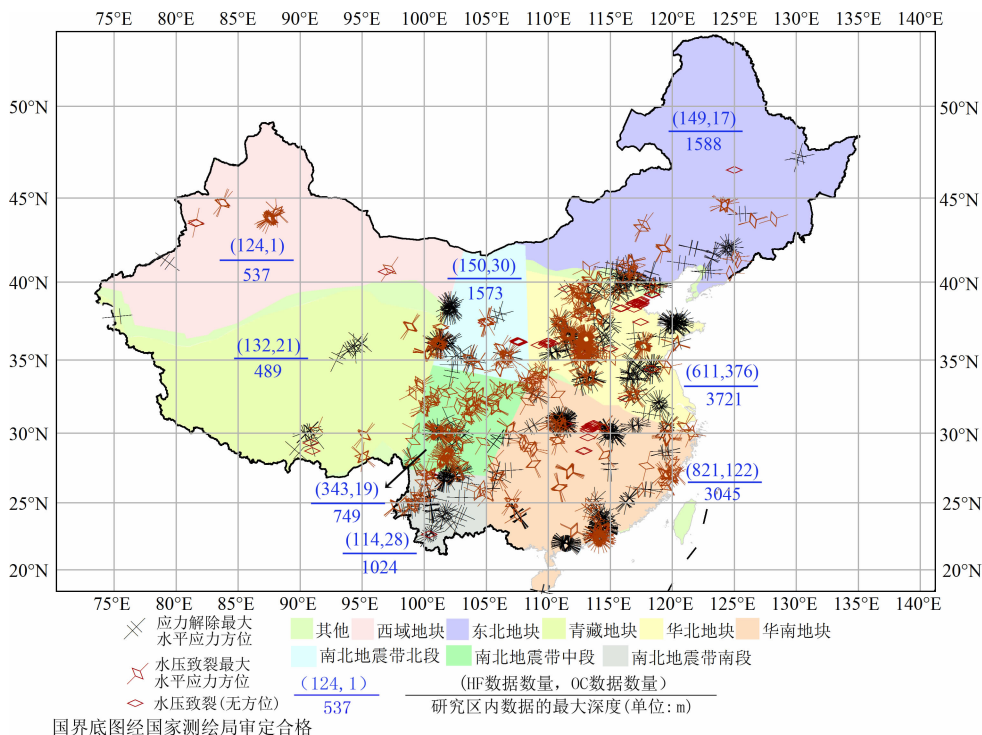


图 1 各研究区地应力数据分布

Fig. 1 The distribution of in-situ stress measurement data in each research region

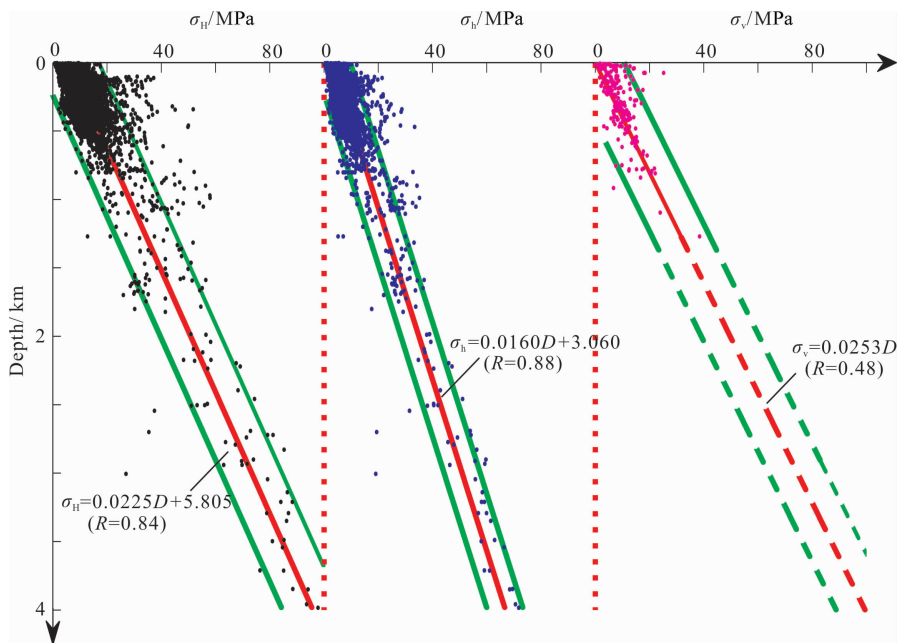


图 2 实测应力随深度变化与数据优化示意图

Fig. 2 Measured stresses variation with depth and data optimization

所示,比较直接分析结果与采用 10 m 等深度段分组归纳方法的分析结果,从随深度分布图与回归方程可以看到,等深度段分组归纳后的回归线与深部数据吻合的更好, σ_H 、 σ_h 与 D 的相关系数都达到 0.99,可信度提高. 水平应力 σ_H 、 σ_h 随深度的变化规律,本文得到的结果与景锋等^[16]的结果比较接近

(表 2).

通过地表值为 0 的约束回归方法(即常数项为 0),得到垂直应力随深度变化的线性方程: $\sigma_v = 0.0238 D, R = 0.80$. 这一结果与理论值 $\sigma_{vth} = 0.0265 D$ 有较大偏差. 分析实测数据发现,可能是受地形、岩性的不均匀性等因素影响,100 m 以上的数

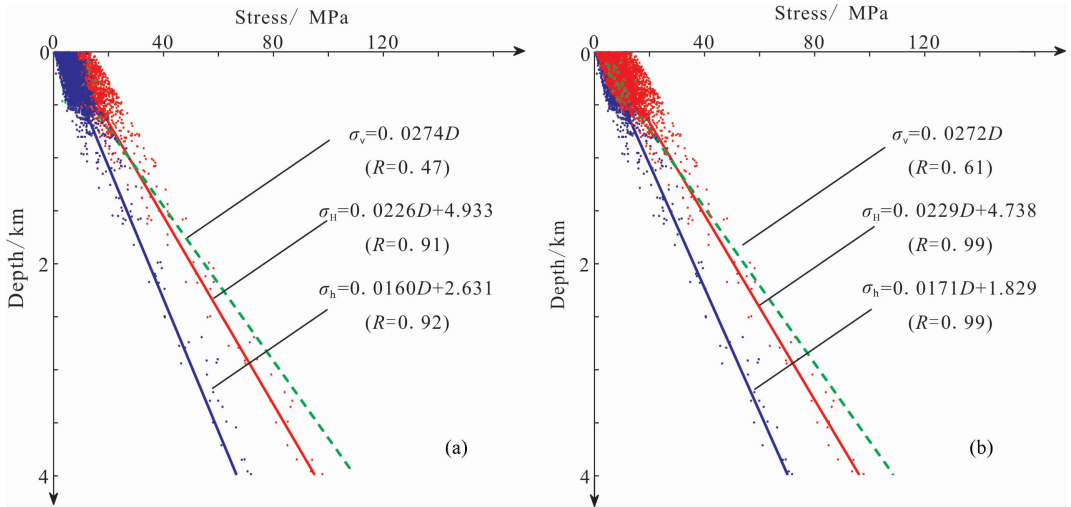


图3 实测应力随深度变化图与回归方程

(a)直接分析;(b)10 m等深度段分组处理.

Fig. 3 Measured stresses variation with depth and regression equations

(a) Analysis without depth-grouping; (b) Depth-grouping analysis with each 10 meters section.

据较离散且比理论值偏大;500 m 以下的的数据很少,只有 46 条,并集中在湖北三峡坝区、青海省海南州茨哈峡、陕西韩城电厂等少数几个测点,存在较大局限性.因此本文采用了深度在 100~500 m 数据的分析结果(表 2).

表 2 中国大陆 σ_H 、 σ_h 、 σ_v 随深度变化情况

Table 2 Regression equations between stresses and depth

统计方法	σ_H	σ_h	σ_v
不分段	$0.0226D+4.933$	$0.0160D+2.631$	$0.0274D$
10 m 分段	$0.0229D+4.738$	$0.0171D+1.829$	$0.0272D$
景锋等 ^[16]	$0.0216D+6.7808$	$0.0182D+2.2328$	$0.0271D$
李方全等 ^[6]	$0.049D+$ (4.5 ± 2.5)	$0.030D+$ (1.5 ± 1.0)	没有给出

从统计回归的结果看,中国大陆地区 σ_H 、 σ_h 和 σ_v 随深度变化的相互关系呈如下特征: $D < 181$ m 时, $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$; $181 \text{ m} < D < 1102$ m 时, $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$; $D > 1102$ m 时,各研究区 σ_H 、 σ_h 、 σ_v 随深度变化特征与线性回归方程如图 4 所示. σ_H 地表值($D=0$ m)由高到低依次为西域地块 6.9 MPa、南北带南段 6.2 MPa、南北带中段 6.1 MPa、东北地块 5.4 MPa、青藏地块 5.2 MPa、南北带北段 5.1 MPa、华北地块 4.7 MPa、华南地块 4.0 MPa;随深度的梯度值从大到小依次是青藏块体、南北带北段、华南地块、华北地块、南北带中段、西域地块、东北地块、南北带南段.

地表值与梯度值反映了构造作用随深度变化的特点.地表值大,梯度值小,反映出靠近地表水平构造作用较强;地表值小,梯度值大,反映出靠近地表

水平构造作用较弱.从统计结果看,各活动地块(西部,由青藏地块到西域地块;东部,由华南到华北、东北地块)的实测应力 σ_H 表现为由南向北地表值增大,梯度值减小.对比南北地块,在地壳浅层呈现出南部地块“深强浅弱”,北部地块“深弱浅强”的构造作用特点,其中青藏地块“深强浅弱”特点尤为明显.这些特征与地球物理、活动构造研究结果相吻合^[17-25].南北地震带各段的实测应力 σ_H 表现为由南向北地表值减小,梯度值增大,表现出与活动地块相反的构造作用特点.

各研究区地应力状态转换深度(表3)反映不同深度范围内岩体与断层、裂隙、节理等所处力学状态的转变,对地下工程岩体稳定性与区域稳定性分析有直接的指导意义.其中青藏地块和南北带北段比

表 3 各研究区地应力状态转换深度

Table 3 The transition depth of in situ stress state in each study region

名称	转换深度		
	$\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$	$\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$	$\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$
西域地块	$D < 309$	$309 < D < 1004$	$D > 1004$
东北地块	$D < 223$	$223 < D < 714$	$D > 714$
青藏地块	$D < 368$	$368 < D$	无
华北地块	$D < 170$	$170 < D < 1083$	$D > 1083$
华南地块	$D < 192$	$192 < D < 1139$	$D > 1139$
南北带北段	$D < 270$	$270 < D < 4667$	$D > 4667$
南北带中段	$D < 302$	$302 < D < 974$	$D > 974$
南北带南段	$D < 232$	$232 < D < 814$	$D > 814$

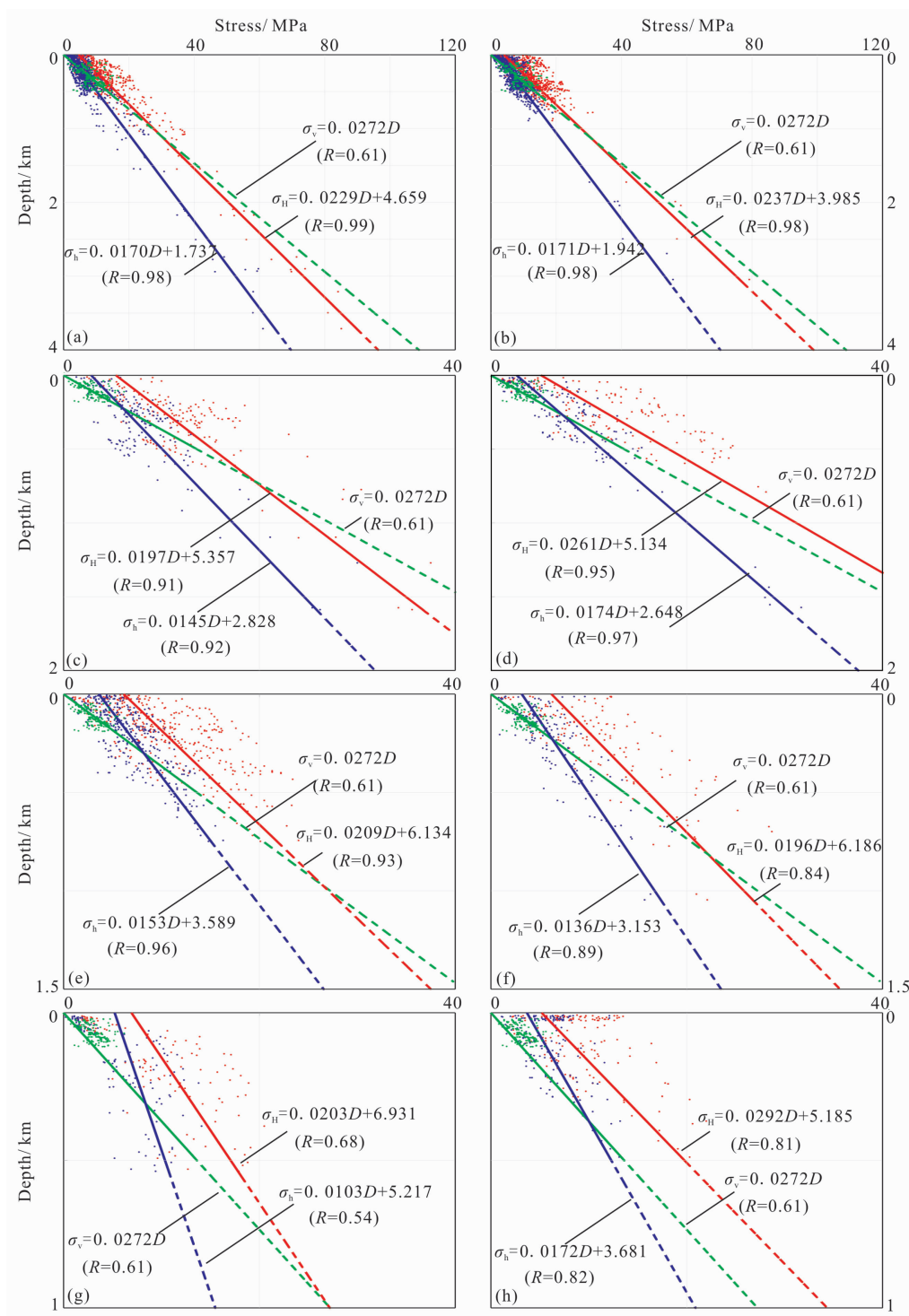


图4 实测应力随深度分布图

(a) 华北地块; (b) 华南地块; (c) 东北地块; (d) 南北带北段; (e) 南北带中段; (f) 南北带南段; (g) 西域地块; (h) 青藏地块.

Fig. 4 In situ stress variation with depth

(a) North China block; (b) South China block; (c) Northeast China block; (d) North section of NS seismic belt; (e) Middle section of NS seismic belt; (f) South section of NS seismic belt; (g) Northwestern China block; (h) Qinghai-Tibet block.

较特殊,在研究深度内始终是水平应力占据主导地位.

3.2 侧压系数随深度变化

本文采用Hoek和Brown方法研究平均水平

应力 $(\sigma_H + \sigma_h)/2$ 与垂直应力 σ_v 的比值,即侧压系数 $K_{av} = (\sigma_H + \sigma_h)/2\sigma_v$ 随深度的变化(图5).结果显示,埋深小于465 m时, $K_{av} > 1$,水平应力起主导作

用,侧压系数十分离散,而深度到了 465 m 以下,垂直应力起主导作用,侧压系数快速收敛,并随着埋深增加,向 0.68 附近集中.本文给出的中国大陆侧压系数随深度变化的总体特征与前人的分析结果相一致.

表 4 给出了各研究区 K_{av} 值随深度变化的回归方程.结果表明:各研究区的 K_{av} 随深度分布形态与中国大陆总体分布形态相近,均表现为越接近地表越大,也越分散;当埋深大于一定深度后,波动范围迅速减小,且逐渐趋近于一个恒定值.其恒定值从大到小排列为:西域地块 0.98、南北带北段 0.92、华南地块 0.80、华北地块 0.70、南北带中段 0.63、东北地块 0.53、南北带南段 0.52、青藏地块 0.35.

3.3 最大水平差应力 $\sigma_H - \sigma_h$ 值随深度变化

本文同时给出了中国大陆最大水平差应力 $\sigma_H - \sigma_h$ 随深度的变化(图 6).结果表明,水平差应力 $\sigma_H - \sigma_h$ 在地表面约为 3 MPa,随深度以 5.8 MPa/km 的梯度增大.在地壳浅部(0~4000 m 测量深度内),差

应力 $\sigma_H - \sigma_h$ 随深度以恒定的梯度增大,可能是由于岩石的弹性模量、强度随深度增大所致.

各研究区的水平差应力随深度增加呈线性增大(表 5). $\sigma_H - \sigma_h$ 地表值($D=0$ m)由高到低依次为南北带南段 3.03 MPa、华北地块 2.92 MPa、南北带中段 2.55 MPa、东北地块 2.53 MPa、南北带北段 2.49 MPa、华南地块 2.04 MPa、西域地块 1.71 MPa、青藏地块 1.50 MPa;随深度变化的梯度值从大到小依次是青藏块体 11.9 MPa/km、西域地块 10.0 MPa/km、南北带北段 8.6 MPa/km、华南地块 6.6 MPa/km、南北带南段 6.1 MPa/km、华北地块 6.0 MPa/km、南北带中段 5.6 MPa/km、东北地块 5.2 MPa/km.

3.4 各研究区实测应力量值特征比较

为评估各活动地块、地震带在 0~4000 m 测量深度范围内水平构造作用的强弱,我们取 $D=2000$ m 时的回归中间值进行比较(表 6,图 7). σ_H 由高到低依次为青藏地块、南北带北段、华南地块、华北地块、南北带中段、西域地块、南北带南段、东北地块. $\sigma_H - \sigma_h$

表 4 各研究区 K_{av} 随深度变化

Table 4 K_{av} variation with depth in each study region

名称	K_{av} 变化趋势	K_{av} 变化范围
西域地块		
东北地块	$K_{av} = \frac{90.66}{D} + 0.983$	$\frac{39.97}{D} + 0.210 < K_{av} < \frac{329.51}{D} + 1.026$
青藏地块	$K_{av} = \frac{295.37}{D} + 0.354$	$\frac{24.05}{D} + 0.285 < K_{av} < \frac{498.57}{D} + 0.862$
华北地块	$K_{av} = \frac{135.32}{D} + 0.692$	$\frac{31.40}{D} + 0.382 < K_{av} < \frac{247.40}{D} + 1.078$
华南地块	$K_{av} = \frac{119.02}{D} + 0.798$	$\frac{25.00}{D} + 0.345 < K_{av} < \frac{298.72}{D} + 1.133$
南北带北段	$K_{av} = \frac{107.55}{D} + 0.920$	$\frac{8.76}{D} + 0.510 < K_{av} < \frac{288.43}{D} + 1.361$
南北带中段	$K_{av} = \frac{177.50}{D} + 0.628$	$\frac{30.14}{D} + 0.382 < K_{av} < \frac{276.36}{D} + 1.334$
南北带南段	$K_{av} = \frac{190.58}{D} + 0.512$	$\frac{62.93}{D} + 0.195 < K_{av} < \frac{496.52}{D} + 0.722$

表 5 各研究区 $\sigma_H - \sigma_h$ 值随深度变化

Table 5 $\sigma_H - \sigma_h$ variation with depth in each research region

名称	$\sigma_H - \sigma_h$ /MPa	相关系数 R
西域地块	$0.0100D + 1.714$	0.80
东北地块	$0.0052D + 2.529$	0.71
青藏地块	$0.0119D + 1.504$	0.76
华北地块	$0.0060D + 2.043$	0.90
华南地块	$0.0066D + 2.043$	0.96
南北带北段	$0.0086D + 2.487$	0.84
南北带中段	$0.0056D + 2.545$	0.71
南北带南段	$0.0061D + 3.033$	0.55

表 6 中国大陆与各活动地块、地震带 $D=2000$ m 深度回归值

Table 6 Regression values of stresses at 2000 m depth in Chinese Mainland and each active block and seismic belt

研究区名称	σ_H /MPa	σ_h /MPa	$\sigma_H - \sigma_h$ /MPa	K_{av}
中国大陆	50.533	30.029	14.512	0.763
西域	47.531	25.817	21.714	1.037
东北	44.757	31.828	12.929	0.651
青藏	63.585	38.081	25.304	0.505
华北	50.485	35.737	14.922	0.765
华南	51.385	36.142	15.243	0.864
南北带北段	57.334	37.447	19.687	0.974
南北带中段	47.933	34.189	13.745	0.722
南北带南段	45.385	30.352	15.233	0.612

注: $\sigma_H - \sigma_h$ 的值由表 5 和图 6 得出.

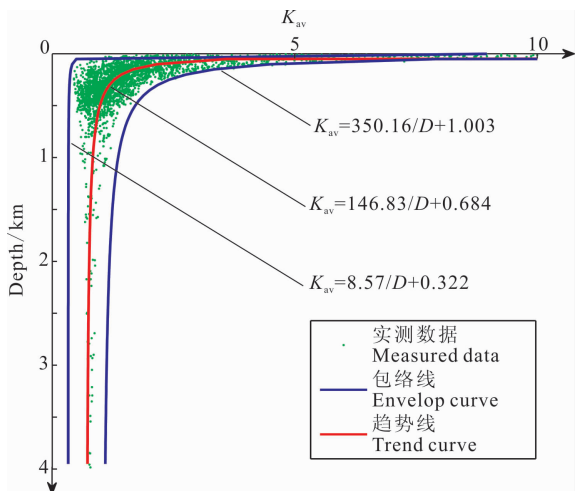


图 5 中国大陆侧压系数随深度变化

Fig. 5 Lateral pressure coefficient K_{av} variation with depth in Chinese Mainland

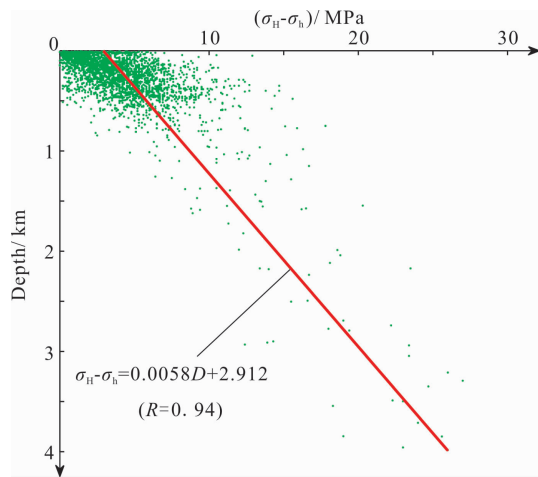


图 6 中国大陆最大水平差应力随深度变化

Fig. 6 $\sigma_H - \sigma_h$ variation with depth in Chinese Mainland

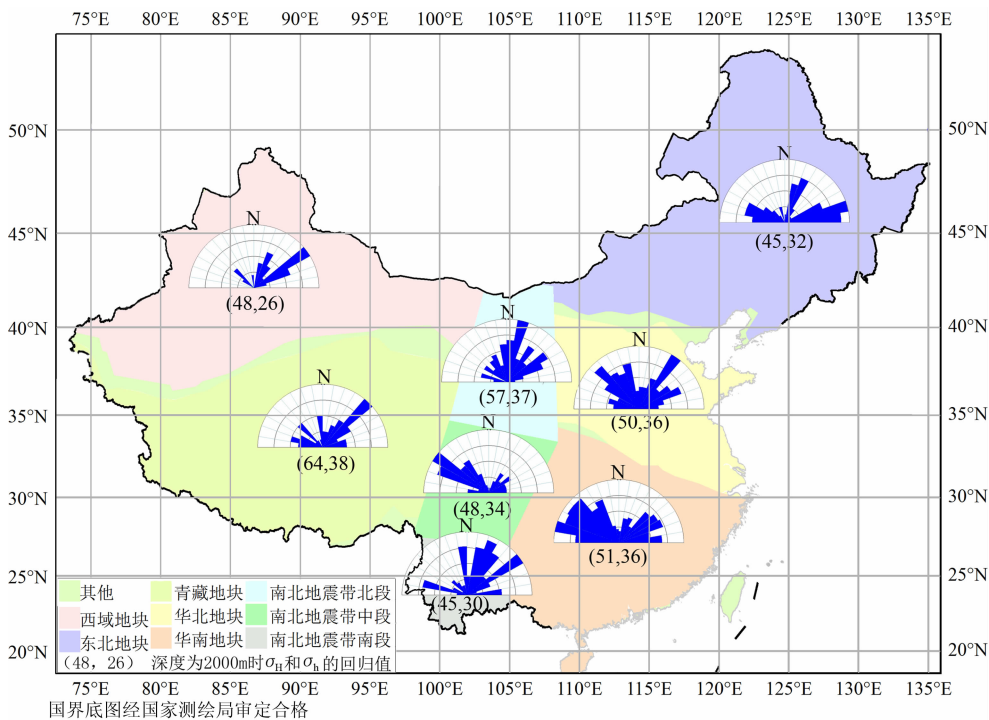


图 7 各研究区水平应力量值与方位特征

Fig. 7 The magnitudes of horizontal stresses and direction of maximum horizontal stress in each research region

由高到低依次为青藏地块、西域地块、南北带北段、华南地块、南北带南段、华北地块、南北带中段、东北地块。最大水平应力、水平最大差应力均表现出西部较高，东部较低的特征。除西域地块 K_{av} 略大于1，其余研究区 K_{av} 均小于1，说明在2000 m深度垂直应力为主导。

总体来看，各研究区实测应力的量值与中国大陆板块主要受印度板块近北东向推挤和太平洋板块

与菲律宾板块北西—北西西向的挤压下的力源控制特征相吻合。印度板块北东向推挤作用使青藏地块的量值明显高于其他各研究区，并沿着北东向传递到南北地震带北段而向正北与正东方向的传递作用较弱，各地块的GPS观测结果^[14]表明，青藏地块北东向运动受到东北地块与华北地块阻挡，致使南北带北段运动减弱，应力集中，其应力量值仅低于青藏地块而高于其他地块。

4 各活动地块、南北地震带实测应力方位特征分析

图 7 给出了各研究区最大水平应力方位玫瑰花图. 青藏地块实测数据都分布在地块东半区, 优势统计方向为 NE-SW 向, 所反映的青藏地块东部最大水平主压应力方向与震源机制解一致; 西域地块实测数据较少, 主要分布在地块西北部, 优势统计方向也为 NE-SW 向; 南北带南段优势方向有两个, 一组主导的优势方位是近 N-S 到 NE-SW 向, 另一组是 NWW-SEE 向; 南北带中段优势方向是 NWW-SEE 向; 南北带北段实测数据主要分布在南端, 优势方向表现较为复杂, 一组主导的优势方位为 NNE-SSW, 另一组是 NNW-SSE 向, 还有一组是 NE-SW 向; 华南地块优势方向范围是 NNW-SSE 到 NE-SW 向, 主体优势方向是 NW-SE 向; 华北地块优势方向是 NE-SW 和 NW-SE 到 NNW-SSE; 东北地块实测数据主要分布在东南端, 优势方向近 E-W.

方位统计结果与板块间作用相吻合: 西域、青藏、南北地震带北段三个地块表现出明显受印度板块控制, 优势方位呈 NNE-SSW 到 NEE-SWW; 南北地震带中段受印度板块作用与华北地块的阻挡作用, 向 SE 偏转, 优势方位呈 NWW-SEE 向; 南北地震带南段的西部优势方位为 NE-SW 向附近, 主要受印度板块推挤的影响, 其东部优势方位为 NWW-SEE 向, 主要受到菲律宾板块的作用; 华北地块主要是受到太平洋板块和菲律宾板块推挤作用影响, 地块西侧受到青藏地块与西域地块的挤压, 显现出 NE-SW 和 NW-SE 优势方向; 华南地块优势方位主要为 NW-SE 到 NWW-SEE, 主要是受菲律宾板块 NW 向推挤作用影响; 东北地块数据较少, 落入优势方位的数据为 8 条, 但仍可看出大部分数据方位集中在近 E-W 向, 主要受控于太平洋板块 NWW 向的推挤作用. 各板块内的最大主应力优势方向与 GPS 观测到的运动方向及震源机制研究结果大体一致.

5 结论与讨论

水压致裂与套芯解除地应力测量方法是国际岩石力学学会推荐使用的两种地应力测量方法, 本文收集了 3000 多条这两种方法得到的测量数据. 通过

统计回归的方法分析了中国大陆现今地壳浅部应力状态总体特征与不同区域地壳浅部应力状态特征. 主要结论如下:

(1) 中国大陆地区 σ_H 、 σ_h 、 σ_v 随埋深均呈线性增大:

$$\sigma_H = 0.0229D + 4.738,$$

$$\sigma_h = 0.0171D + 1.829,$$

$$\sigma_v = 0.0272D,$$

σ_H 和 σ_h 的应力变化梯度均小于岩石容重. 深度 465 m 以上, 平均水平应力大于垂直应力. 实测垂直应力 σ_v 总体上随埋深呈线性关系变化, 量值约等于岩体自重. 但埋深 500 m 范围内, 实测垂直应力总体上稍大于上覆岩体自重, 与全球的统计结果类似.

(2) 在 0~4000 m 测量深度范围内, 中国大陆地区最大水平应力中间值从大到小的顺序是: 青藏地块 63.6 MPa、南北带北段 57.3 MPa、华南地块 51.4 MPa、华北地块 50.5 MPa、南北带中段 47.9 MPa、西域地块 47.5 MPa、南北带南段 45.4 MPa、东北地块 44.8 MPa. 总体表现为“西强东弱”的基本特征, 反映了印度板块与欧亚板块的强烈碰撞是中国大陆构造应力场强度总体特征的主要来源.

(3) 中国大陆地区侧压系数 $K_{av} = 146.83/D + 0.684$, 浅部离散, 随着深度增加而集中, 并趋向 0.68, $D=465$ m 时, $K_{av}=1$, 是水平作用为主导向垂直作用为主导的转换深度. 随深度的变化范围: $8.57/D + 0.322 < K_{av} < 350.16/D + 1.003$.

(4) 中国大陆地区最大水平应力优势统计方向大体表现为: 以青藏高原为中心, 呈辐射状展布, 由西向东, 从近 N-S 方向逐步顺时针旋转至 NNE-SSW、NE-SW、NEE-SWW、NW-SE 方向.

(5) 中国大陆的水平差应力地表值为 3 MPa 左右, 随深度增大以 5.8 MPa/km 的梯度增大. 各活动地块、南北地震带的水平差应力 $\sigma_H - \sigma_h$ 值均表现为随深度线性增加.

(6) 中国大陆西部的青藏地块、西域地块受到印度板块向北的强烈碰撞作用控制, 优势方位为 NE 向. 地壳在从南向北由强渐弱的挤压作用下, 与其他研究区相比较, 青藏地块的南北向挤压作用呈现出明显的“浅弱深强”特点.

(7) 中国大陆东部的东北地块、华北地块主要受到太平洋板块的俯冲作用, 地壳浅部最大水平应力方向分别为总体表现为 E-W 向、NEE-SWW 和 NW-SEE 方向, 挤压作用强度较青藏板块弱; 华南地块受菲律宾板块俯冲作用, 地壳浅部最大水平应力优势方向为 NW-SE 方向, 挤压作用强度较青藏

板块弱,稍强于华北地块。

(8)南北地震带处于中国大陆西部和东部两个一级地应力场分区的结合部位,受到印度板块、太平洋板块、菲律宾板块综合作用。地壳浅部应力场表现为:北段的最大水平应力优势方向为 NNE-SSW 三组,挤压作用强度仅次于青藏板块;中段的最大水平应力优势方向为 NW-SEE 方向,挤压作用强度弱于北段强于南段;南北带南段地壳浅部的最大水平应力优势方向是近 S-N 到 NE-SW 向,挤压作用强度弱于北段和南段。

(9)以上由大量实测数据的统计分析得出的中国大陆地壳浅部应力场宏观分布的一些规律性的认识,可为科学研究与工程应用提供参考。但也只是一种初步的尝试,还有许多问题需进一步探讨解决。首先是相对中国大陆广阔的地域,数据量仍然偏少且分布不均匀,会直接影响统计分析结果的代表性,如 1000 m 以下的的数据只有 140 条,数量很少,减少了深部结果的可靠性。其次是大多数的数据来源于工程建设项目,受工程区地质条件限制,测量数据质量会受到很大影响。再次是分析中没有考虑地形、岩性影响,也会使分析结果产生偏差。因此针对具体科学与工程问题,必须结合具体情况做更深入具体的分析研究。

致 谢 十分感谢中国地震局郭启良研究员、李宏研究员提供了他们在地应力测量研究工作中获得的宝贵数据,感谢中国地震局闻学泽研究员提供了南北地震带划分的最新研究结果。

参考文献(References)

- [1] Hast N. The state of stress in the upper part of the Earth's crust. *Tectonophysics*, 1969, 8(3): 169-211.
- [2] Worotniki G, Denham D. The state stress in the upper part of the Earth's crust in Australia according to measurements in tunnels and mines and from seismic observation: Investigation of Stress in Rock-Advances in Stress Measurement, Int. Soc. Rock Mech. Symp. Sydney, Australia: [s. n.], 1976: 71-82.
- [3] Brown E T, Hoek E. Trends in relationships between measured in-situ stresses and depth. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, 1978, 15(4): 211-215.
- [4] Stacey T R, Wesseloo J. In situ stresses in mining areas in South Africa. *JIS. Afr. Inst. Min. Metall.*, 1998, 98(7): 365-368.
- [5] Zoback M L. First- and second-order patterns of stress in the lithosphere: the world stress map project. *J. Geophys. Res.*, 1992, 97(B8): 11703-11728.
- [6] 李方全, 祁英男. 地壳应力随深度的变化规律. *岩石力学与工程学报*, 1988, 7(4): 301-309.
- Li F Q, Qi Y N. Variation of crustal stresses with depth in China. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* (in Chinese), 1988, 7(4): 301-309.
- [7] 蔡美峰. 地应力测量原理和技术. 北京: 科学出版社, 2000. Cai M F. *The Principle and Technology of In-Situ Stress Measurement* (in Chinese). Beijing: Science Press, 2000.
- [8] 朱焕春, 陶振宇. 不同岩石中地应力分布. *地震学报*, 1994, 16(1): 49-63. Zhu H C, Tao Z Y. Geostress distributions in different rocks. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 1994, 16(1): 49-63.
- [9] 景锋, 盛谦, 张勇慧等. 不同地质成因岩石地应力分布规律的统计分析. *岩土力学*, 2008, 29(7): 1877-1883. Jing F, Sheng Q, Zhang Y H, et al. Statistical analysis of geostress distribution laws for different rocks. *Rock and Soil Mechanics* (in Chinese), 2008, 29(7): 1877-1883.
- [10] 朱焕春, 陶振宇. 地形地貌与地应力分布的初步分析. *水利水电技术*, 1994, 223(1): 29-34. Zhu H C, Tao Z Y. A preliminary analysis on ground stress and topography morphology. *Water Resources and Hydropower Engineering* (in Chinese), 1994, 223(1): 29-34.
- [11] 赵德安, 陈志敏, 蔡小林等. 中国地应力场分布规律统计分析. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(6): 1265-1271. Zhao D A, Chen Z M, Cai X L, et al. Analysis of distribution rule of geostress in China. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* (in Chinese), 2007, 26(6): 1265-1271.
- [12] 石耀霖. 地应力主应力的方位角求和与平均. *地震学报*, 2004, 26(1): 106-109. Shi Y L. Summation and decomposition of principal stresses in the crust. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2004, 26(1): 106-109.
- [13] 谢富仁, 陈群策, 崔效锋等. 中国大陆地壳应力环境研究. 北京: 地质出版社, 2003. Xie F R, Chen Q C, Cui X F, et al. *Research on Crustal Stress State in China and Adjacent Area*. Beijing: Geological Publish House, 2003.
- [14] 张培震, 邓起东, 张国民等. 中国大陆的强震活动与活动地块. *中国科学(D辑)*, 2003, 33(增): 12-20. Zhang P Z, Deng Q D, Zhang G M, et al. Active tectonic blocks and strong earthquakes in the continent of China. *Science in China (Series D)*, 2003, 46(Suppl.): 13-24.
- [15] 谢富仁, 崔效锋, 赵建涛等. 中国大陆及邻区现代构造应力场分区. *地球物理学报*, 2004, 47(4): 654-662. Xie F R, Cui X F, Zhao J T, et al. Regional division of the recent tectonic stress field in China and adjacent areas. *Chinese J. Geophysics.* (in Chinese), 2004, 47(4): 654-662.
- [16] 景锋, 盛谦, 张勇慧等. 中国大陆浅层地壳实测地应力分布规律研究. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(10): 2057-2062. Jing F, Sheng Q, Zhang Y H, et al. Research on distribution rule of shallow crustal geostress in China mainland. *Chinese*

- Journal of Rock Mechanics and Engineering* (in Chinese), 2007, 26(10): 2057-2062.
- [17] 许忠淮, 石耀霖. 岩石圈结构与大陆动力学. *地震学报*, 2003, 25(5): 512-527.
Xu Z H, Shi Y L. Lithospheric structure and continental geodynamics. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2003, 25(5): 512-527.
- [18] 邓起东, 张裕明, 许桂林等. 中国构造应力场特征及其与板块运动的关系. *地震地质*, 1979, 1(1): 11-22.
Deng Q D, Zhang Y M, Xu G L, et al. On the tectonic stress field in China and its relation to plate movement. *Seismology and Geology* (in Chinese), 1979, 1(1): 11-22.
- [19] 许忠淮, 汪素云, 黄雨蕊等. 由大量的地震资料推断的我国大陆构造应力场. *地球物理学报*, 1989, 32(6): 636-647.
Xu Z H, Wang S Y, Huang Y R, et al. The tectonic stress field of Chinese continent deduced from a great number of earthquakes. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1989, 32(6): 636-647.
- [20] 阚荣举, 张四昌, 晏凤桐等. 我国西南地区现代构造应力场与现代构造活动特征的探讨. *地球物理学报*, 1977, 20(2): 96-108.
Kan R J, Zhang S C, Yan F T, et al. Present tectonic stress field and its relation to the characteristics of recent tectonic activity in Southwestern China. *Acta Geophysica Sinica* (*Chinese J. Geophys.*) (in Chinese), 1977, 20(2): 96-108.
- [21] 王连捷, 吴珍汉, 王薇等. 青藏高原中段现今构造应力场的数值模拟. *地质力学学报*, 2006, 12(2): 140-149.
Wang L J, Wu Z H, Wang W, et al. Numerical modeling of the present tectonic stress field in the central Qinghai-Tibet plateau. *Journal of Geomechanics* (in Chinese), 2006, 12(2): 140-149.
- [22] 张春山, 吴满路, 廖椿庭等. 青海格尔木—五道梁地区现今地应力测量结果及其构造分析. *地球物理学报*, 2005, 26(2): 183-186.
Zhang C S, Wu M L, Liao C T, et al. Current stress measurement and structure analysis of Golmud-Wudaoliang region in Qinghai province. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005, 26(2): 183-186.
- [23] 邓阳凡, 李守林, 范蔚茗等. 深地震测深揭示的华南地区地壳结构及其动力学意义. *地球物理学报*, 2011, 54(10): 2560-2574.
Deng Y F, Li S L, Fan W M, et al. Crustal structure beneath South China revealed by deep seismic soundings and its dynamics implications. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, 54(10): 2560-2574.
- [24] 张辉, 高原, 石玉涛等. 基于地壳介质各向异性分析青藏高原东北缘构造应力特征. *地球物理学报*, 2012, 55(1): 95-104.
Zang H, Gao Y, Shi Y T, et al. Tectonic stress analysis based on the crustal seismic anisotropy in the northeastern margin of Tibetan plateau. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(1): 95-104.
- [25] 姜辉, 高祥林. 欧亚东边缘的双向板块汇聚及其对大陆的影响. *地球物理学报*, 2012, 55(3): 897-905.
Jiang H, Gao X L. Two-directional plate convergence along the east margin of Eurasia and its influence on the continent. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(3): 897-905.

(本文编辑 胡素芳)