

Accurately Determined on the Large Ductile Shear Zone in Southern Anhui

Changming Chen, Jian Wang, Jishan Wang, Jun Zhang*

Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan Hubei
Email: 444641855@qq.com, *zhangjun@cug.edu.cn

Received: May 28th, 2017; accepted: Jun. 17th, 2017; published: Jun. 20th, 2017

Abstract

There are many large size ductile shear zones of northeastern run in southern Anhui province. And they were developed in the boundary of different geological bodies. This paper uses the Tianjingshan section, Xiaohe section, Baishikeng section, Tianzikeng section, Hanjia section and Dapian section that 6 geological sections and a large number of microstructures research to precise determination the Huangmao-Wucheng-Tunxi ductile shear zone from the structural geometry and structural petrology, structural kinematics etc. And we described the ductile shear zone about the extension direction, scale, shear deformation characteristics, deformation condition and the metamorphic facies.

Keywords

Large-Ductile Shearzone, Huangmao-Wucheng-Tunxi Shear Zone, Southern Anhui

皖南地区大型韧性剪切带的精确厘定

陈昌明, 王 健, 王积善, 张 均*

中国地质大学(武汉)资源学院, 湖北 武汉
Email: 444641855@qq.com, *zhangjun@cug.edu.cn

收稿日期: 2017年5月28日; 录用日期: 2017年6月17日; 发布日期: 2017年6月20日

摘 要

皖南地区发育多条北东向大型韧性剪切带, 其发育在不同地质体的边界。本文利用天井山、小贺、白石坑、田子坑、韩家、大片等6条重要实测构造地质剖面, 和大量室内显微构造的专题研究, 从构造几何

*通讯作者。

文章引用: 陈昌明, 王健, 王积善, 张均. 皖南地区大型韧性剪切带的精确厘定[J]. 地球科学前沿, 2017, 7(3): 366-375.
<https://doi.org/10.12677/ag.2017.73040>

学、构造岩石学、构造运动学等方面进行了璜茅-五城-屯溪韧性剪切带的精确厘定。阐述了韧性剪切带的延伸方向、规模、剪切变形特征、变形条件及形成的变质相。

关键词

大型韧性剪切带, 璜茅-五城-屯溪剪切带, 皖南地区

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

前人对皖南地区金矿经过多年勘查工作, 对该区的金矿特征已有诸多论述[1]-[8], 同时对岩石地球化学、同位素地球化学、成矿流体的研究也取得了许多的新认识[6] [9] [10] [11]。数十年来, 谁都说皖南地区金成矿条件有利, 找矿前景好, 找矿潜力大。但迄今尚未取得大的找矿突破。

前人虽然也注意到了屯溪-五城韧性剪切带可能是区域上最重要的控矿构造, 甚至有学者提出天井山金矿可能为韧性剪切带型金矿[2] [3] [4] [5] [6] [8]。但迄今未能提供韧性剪切带存在的确凿证据及其形变特征, 亦未对区内大型韧性剪切带及其与金成矿作用关系进行过系统研究。比如, 区内是否确切存在大型韧性剪切带? 韧性剪切带的几何学、运动学和动力学特征? 韧性剪切带的含金性评价及其与金成矿作用关系? 韧性剪切带结构与金矿化富集、金矿体定位的对应匹配关系? 等诸多关键问题都尚缺乏系统、深入的认识。

本文通过野外地质观测及光学显微镜、透射电镜、EBSD 等专项测试分析, 对屯溪-五城韧性剪切带及其与金成矿作用之间的关系进行了精确厘定。

2. 五成-屯溪韧性剪切带的宏观特征

皖南天井山地区位于扬子陆块与华夏古陆块结合部位, 江南隆起带(造山带)东段, 皖浙赣深大断裂贯穿全区(图 1(a))。本文通过大片剖面、天井山剖面、捉马-古积田剖面、捉马-白石坑剖面、韩家剖面和璜茅剖面等 6 条构造地质剖面及九亩丘、小莲口、璜尖等地区外围观测点(图 1(b))对屯溪-五城韧性剪切带进行了宏观厘定。确定韧性剪切带向北东延伸至九亩丘以北地区, 向南西延伸至新岭脚以南地区。

2.1. 典型构造地质剖面

本文以天井山构造地质剖面(IV)作为典型剖面进行详细分析。天井山构造地质剖面位于小贺矿段与韩家矿段之间(D062-D060), 总体方向 108° , 全长约 0.8 km, 以岩体出露为主(图 2)。在剖面西端出露一小段千枚岩地层, 灰黄色, 地层中发育片理化, 受后期构造运动破碎明显。地层产状 $335^\circ \angle 46^\circ$, 沿 108° 方向。D062 以东出露灵山岩体为主, 岩体从初糜岩逐渐过渡到糜棱岩。矿物碎基含量增多, 矿物颗粒细化, 暗色矿物呈针状, 表现出强烈定向性, 在 D059 可见发育石英旋转碎斑, 表明该处受韧性剪切作用强烈, 由旋转碎斑所显示出的运动方向, 表现其受左行剪切的运动学特征。D057 取得的定向样中测得压应变产状为 $339^\circ \angle 51^\circ$, 线理的倾伏向 7° , 倾伏角 45° , 所测得的产状显示韧性剪切的运动方向大致为 NE 向。

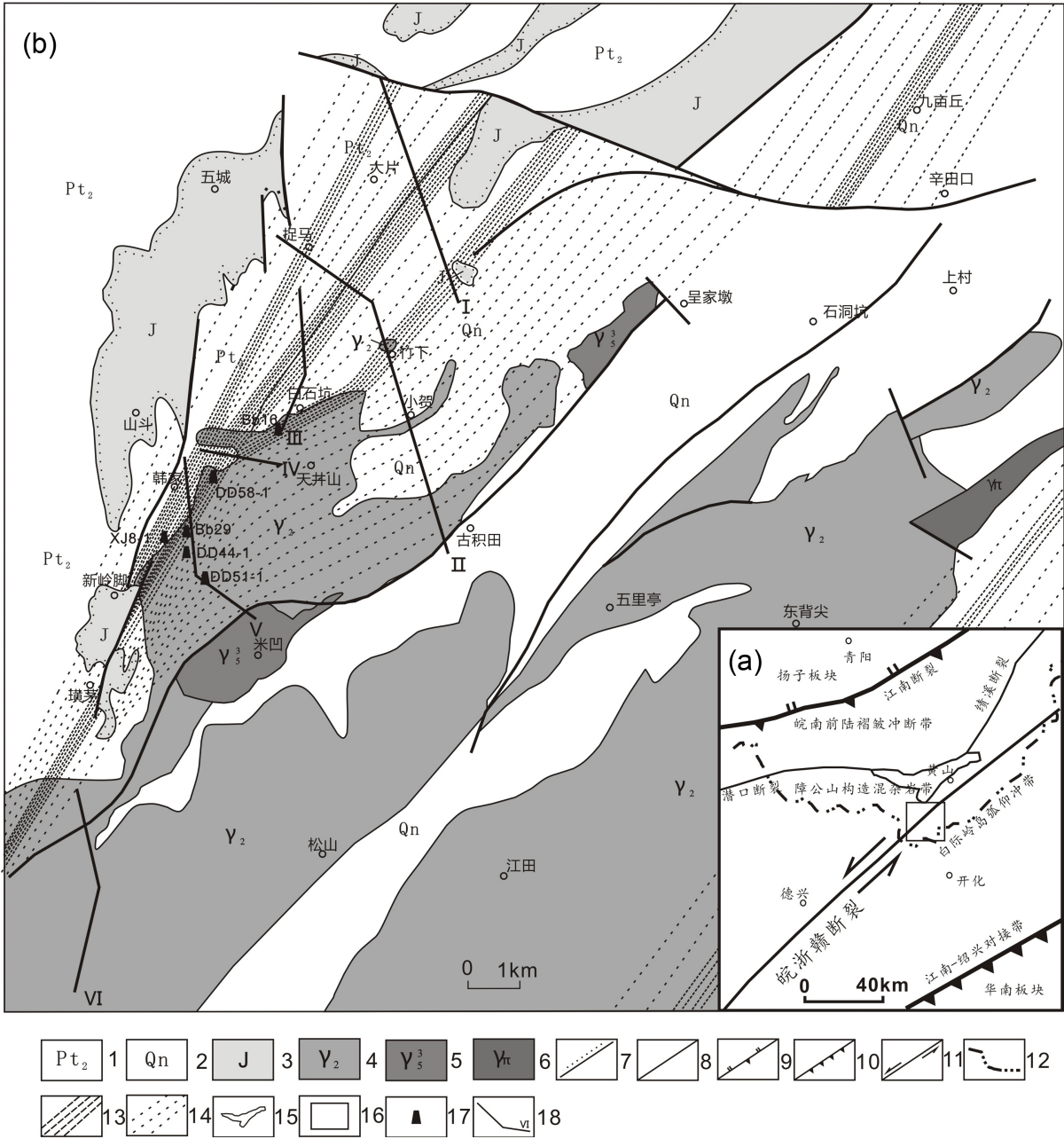


Figure 1. Geological tectonic sketch map of Wannan
图 1. 皖南地区地质构造略图

2.2. 其他观察点及短剖面

为全面研究区内韧性剪切带的分布范围及特征，除 6 条典型剖面外还进行了观测点及短剖面工作。观测点主要为九亩丘、新岭脚、璜尖矿点。

九亩丘矿点位于研究区北东端，矿化赋存于井潭组等地层内，受剪切带控制千枚岩变质为糜棱岩，花岗闪长岩脉经剪切作用形成糜棱岩。矿点范围为剪切带强变形区，说明剪切带向东北方向延伸。

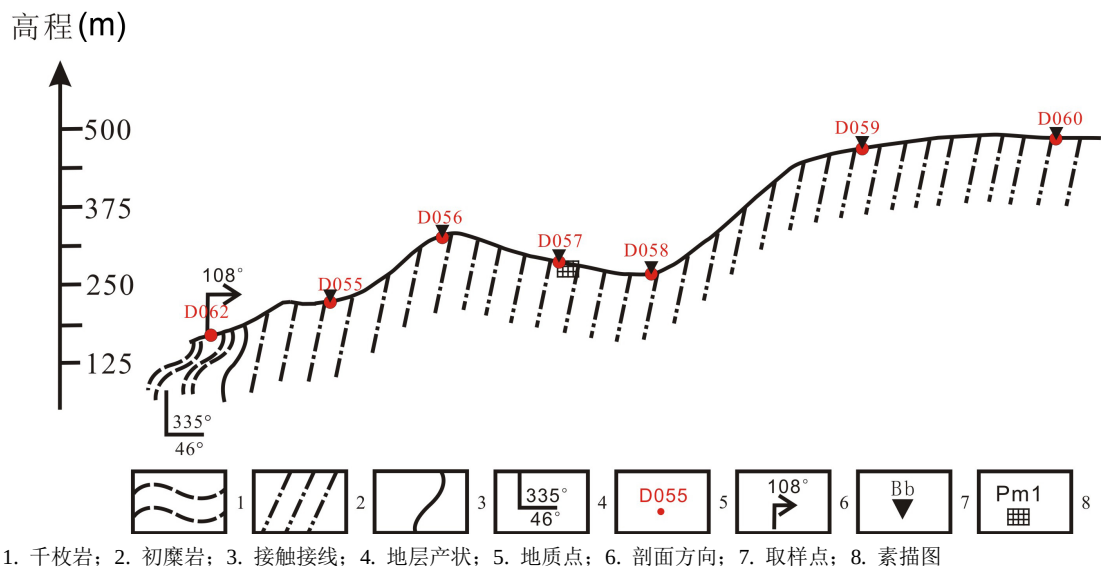


Figure 2. Structural section sketch of Tianjingshan
图 2. 天井山构造地质剖面素描图

新岭脚矿点位于研究区南西端，是小贺 - 天井山 - 韩家金矿带向南西的延伸。矿体赋存于井潭组地层内，地层揉皱发育。说明矿体产于璜茅 - 五城 - 屯溪韧性剪切带强变形带内。

璜尖金矿点位于研究区南西侧，赋存于晋宁期花岗斑岩与井潭组地层的接触带的内接触带，赋矿围岩主要为长英质糜棱岩。璜尖金矿点为研究区外围另一条韧性剪切带 - 龙田 - 璜尖 - 白际岭韧性剪切带内。龙田 - 璜尖 - 白际岭韧性剪切带的存在说明在皖南地区韧性剪切作用普遍存在。

2.3. 线理、面理特征

大量的野外观察，发现研究区内韧性剪切带内地层面理、线理发育，主要的面理为片理、糜棱面理。选择 10 个典型观测点，在每个点小范围内量取 30 组以上面理产状，做玫瑰花图(图 3 和表 1)得出片理面优选方位为 NW 方向，大致倾向 310°左右，倾角多在 55°~65°之间。

2.4. 韧性剪切带宏观特征

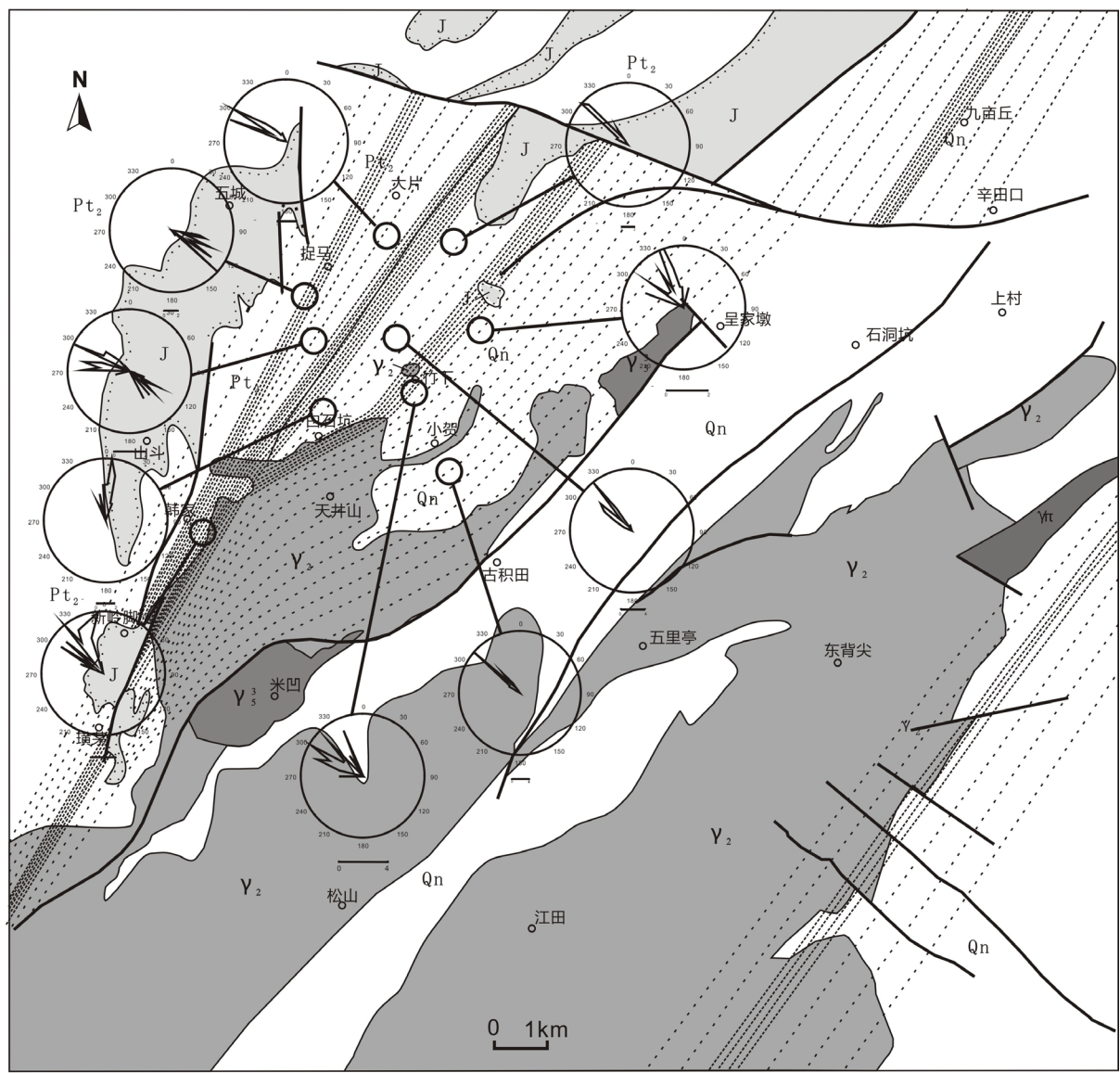
结合六条实测构造地质剖面及外围观测点的野外地质观测、分析和研究，认为璜茅 - 五城 - 屯溪剪切带具有如下特征：

1) 几何学特征

区内普遍经历了剪切作用，形成了多条韧性剪切带，通过野外观测，重点研究和厘定了璜茅 - 五城 - 屯溪韧性剪切带，同时对龙田 - 璜尖 - 白际岭韧性剪切带做了野外调研。区内剪切带由多期多阶段构成，经历了韧性剪切变形阶段、韧 - 脆性剪切变形阶段、脆性剪切变形阶段等多个阶段。璜茅 - 五城 - 屯溪韧性剪切带发育在灵山岩体与井潭组接触带附近，宽 2~5 km 不等，总体呈喇叭状，向北东发散，向南东收敛，总体走向北东，倾向北西，倾角较陡。龙田 - 璜尖 - 白际岭韧性剪切带位于璜茅 - 五城 - 屯溪韧性剪切带南东侧，与璜茅 - 五城 - 屯溪韧性剪切带近于平行。在璜茅 - 五城 - 屯溪剪切带内部可分为若干强、弱变质变形区，强变形区呈条带状分布，总体沿晋宁期花岗岩与井潭组地层接触边界附近产出。

2) 岩石学特征

璜茅 - 五城 - 屯溪韧性剪切带内北西侧为井潭组及牛屋组地层，经过韧性剪切作用形成千枚岩，局



1. 中元古界; 2. 青白口系; 3. 侏罗系; 4. 晋宁期花岗岩; 5. 燕山期花岗岩; 6. 花岗斑岩; 7. 不整合界线; 8. 性质不明断层; 9. 韧性剪切带强应变带; 10. 韧性剪切带弱应变带; 11. 玫瑰花图

Figure 3. Rose diagram of joint in Tianjingshan area
图 3. 天井山地区节理玫瑰花图

部形成糜棱岩。南东侧为晋宁期花岗岩、花岗斑岩，经过韧性剪切作用形成初糜棱岩、糜棱岩、超糜棱岩。带内岩石学特征随着剪切带的强弱分带而显示出规律性变化，在接触带附近的强变形带，井潭组地层与牛屋组地层内出现大量的揉皱，石英定向排列，S-C 组构发育，可见旋转碎斑，弱变形区形成小的膝褶皱，偶尔可见呈石英鱼状定向排列的石英脉。糜棱岩、构造千枚岩倾向北西，倾角变化较大。

在剪切带靠南东侧形成长英质初糜棱岩、糜棱岩以及片麻状花岗岩，未见超糜棱岩。根据其变质变形程度可分为：片麻状花岗岩，分布范围最广，多远离强变形带；长英质初糜棱岩，糜棱构造明显，分布范围较狭窄，成条带状分布，可见长石碎斑系，呈眼球状，石英定向拉长，S-C 组构发育；长英质糜

Table 1. Line and surface processing statistics of felsic mylonite in ductile shear zone
表 1. 韧性剪切带长英质糜棱岩线理面理产状统计表

点号	面理	线理	点号	面理	线理
DD58-1	38°∠14°	86°~14°	DD51-1	302°∠71°	206°~5°
DD57-1	339°∠51°	7°~45°	DD48-1	63°∠39°	338°~5°
Bb13	55°∠54°	40°~54°	DD40-1	274°∠27°	352°~4°
Bb12	44°∠30°	23°~24°	DD52-1	306°∠60°	223°~4°
DD43-1	210°∠10°	175°~8°	DD47-1	134°∠4°	172°~4°
DD44-1	285°∠12°	357°~6°	Bb2	130°∠64°	205°~30°
DD42-1	233°∠51°	311°~11°	DD09-2	313°∠25°	245°~8°
DD028	160°∠19°	198°~5°	Bb20	355°∠64°	68°~26°
Bb29	323°∠65°	25°~49°	BB16	300°∠74°	274°~5°
BB23	187°∠88°	100°~53°			

棱岩，多出现在剪切带强变形区的中心地带，呈带状分布，岩石中基质一般多于碎斑，碎斑多为长石，具明显的定向。

3) 运动学特征

旋转碎斑系指糜棱岩中的碎斑在剪切过程中经历过旋转并形成了拖尾的构造。残斑主要由长石组成，还有少量石英或石英、长石集合体。拖尾主要由基质矿物组成，拖尾与碎斑的中轴线所夹锐角指示对盘的相对运动方向。韧性剪切带内发育的碎斑的大小不同，在露头尺度和偏光显微镜尺度内都可见到。此次工作在孔田湾和天井山金矿区的短剖面均发现了旋转碎斑构造，其中在孔田湾的糜棱岩中长石斑晶最大可达 3~4 mm，均指示了韧性剪切带的左行剪切。在天井山和捉马的地层中均发现了 S-C 面理，同样指示了一个左行剪切的作用。

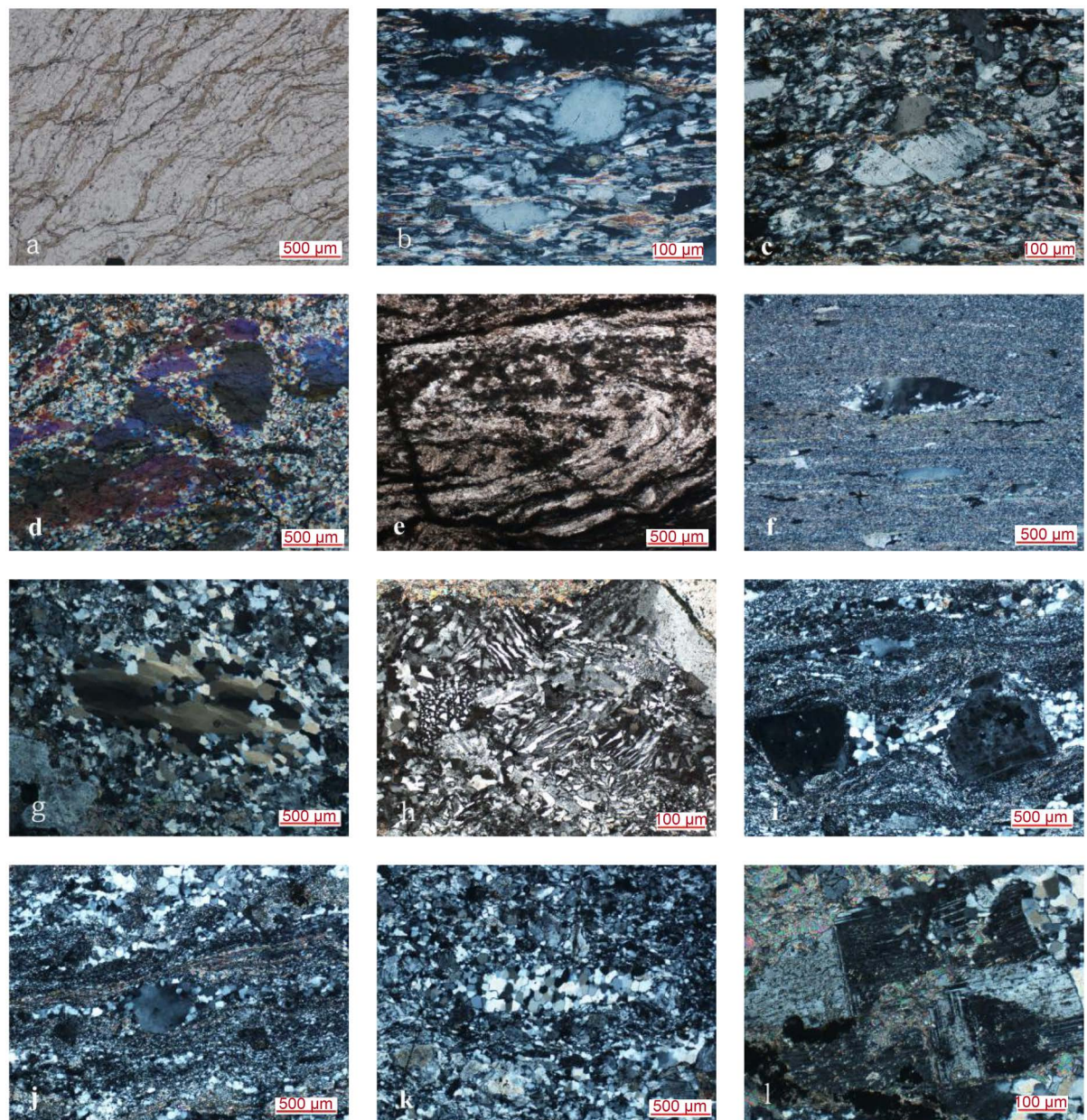
在竹下村糜棱岩中可见到早期左行糜棱岩内叠加晚期右行剪切作用形成的雁行张节理细脉，故判断在皖南地区至少经历过两期韧性剪切作用。

3. 五成 - 屯溪韧性剪切带的微观特征

3.1. 韧性剪切带显微镜下特征

皖南地区发育的糜棱岩主要为长英质糜棱岩，其原岩为晋宁期花岗岩或花岗斑岩[12][13]。长英质糜棱岩比较常见，研究相对比较成熟。皖南地区发育大量的不同时期花岗岩、花岗斑岩，经过剪切作用形成了典型的长英质糜棱岩。要将长英质糜棱岩显微变形特征描述清楚，有必要对地区的长英质糜棱岩内典型的显微变形现象进行系统的观察、描述，以下根据糜棱岩的变形机制，从显微裂隙典型现象、晶质塑性变形典型现象、颗粒边界滑移典型现象、扩散物质迁移典型现象等四种变形机制表现的典型光学现象进行介绍。最后根据不同变质程度不同矿物表现的光学现象，确定糜棱岩所处的变质相及变质环境。

天井山地区韧性剪切带发育有较为丰富的微观构造。在天井山 - 米凹剖面中，沿北西 - 南东连续取样切片观察，TJS1-1 为糜棱岩化千枚岩，可见似 S-C 组构(图 4)，整体显示弱的韧性变形，处于韧性剪切带的弱应变域边缘位置。TJS1-2~TJS1-4 为元古代地层受动力变质作用形成的糜棱岩，发育 S-C 组构，石英斑晶形成压力影、透镜体以及多米诺骨牌，长石斑晶主要形成压力影构造，总体显示韧性变形程度不高。



(a) 糜棱岩化千枚岩似 S-C 组构; (b) 糜棱岩石英压力影; (c) 糜棱岩石英多米诺骨牌; (d) 糜棱岩石英小脉亚颗粒化及动态重结晶; (e) 糜棱岩 A 型褶皱; (f) 超糜棱岩及石英透镜体; (g) 糜棱岩石英波状消光及亚颗粒旋转重结晶; (h) 糜棱岩应力蠕英结构; (i) 糜棱岩长石斑晶布丁构造; (j) 初糜岩石英旋转碎斑; (k) 初糜岩重结晶石英小颗粒; (l) 初糜岩长石机械双晶

Figure 4. Micro photographs showing the ductile shear zone in Hanjia-Mi'ao geological section

图 4. 韩家 - 米凹剖面中韧性剪切带微观照片

3.2. 韧性剪切带 EBSD 石英组构分析

对皖南天井山地区璜茅 - 五城 - 屯溪韧性剪切带特征进行了重点剖析。结果显示, 璜茅 - 五城 - 屯溪韧性剪切带为大型韧性剪切带, 在研究区内总体呈喇叭状展布, 宽约 2~5 km, 向 NE 发散, 向 SW 收敛。并在元古代中形成了大型的 A 型褶皱。宏观上强弱分带明显, 以元古代地层和晋宁期岩体的接触带为最强应变带, 发育超糜棱岩, 应变强度向两侧逐渐减弱, 在弱应变带发育糜棱岩化千枚岩和初糜岩。微观上, 韧性变形显微构造发育较好, 以发育旋转碎斑、压力影和石英的膨突动态重结晶为主, 其韧性

变形机制为中低温条件下的位错滑移、碎裂流动以及扩散物质迁移[14] [15] [16]。在不同的温压条件下,形成的石英晶内滑移和优选方位模型有所不同[17] [18] [19]。EBSD 对韧性剪切带的石英组构分析显示,石英以菱面{10-11} <a>和底面{0001} <a>滑移为主,变形温度为中低温(400℃~550℃)及低温(<400℃) [20]。宏观运动学特征和石英组构特征显示韧性剪切带至少经历了两次活动。塑性变形机制和 EBSD 石英组构显示韧性剪切带变质相为低绿片岩相 - 高绿片岩相,局部可达低 - 中角闪岩相[21] [22] [23] [24] [25]。

本次研究选取的 6 个样品测试样品均采自天井山矿区内,即璜茅 - 五城 - 屯溪韧性剪切带南段变形岩石,所测试样品主要岩石类型有花岗质糜棱岩、含炭质糜棱岩。

石英残斑 EBSD 组构特征测试在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室环境扫描电子显微镜实验室完成。本次测量的都是石英颗粒,以测量石英颗粒相对于切片面的光轴方位,通过 EBSD 系统的配套软件——HKI 公司开发的 Channel 5,将测量数据采用等面积下半球投影,获得矿物的优选方位极点等面积图。样品石英给出光轴<0001>投影图、网面{11-20}、{10-10}、{10-11}、{01-10}极图。事实上,极图各个方位的投影图所代表的意义是相同的,或者说,后四个图虽然各不相同,但是都可以从这些图中的任何一个推导出石英光轴的<0001>投影图[26] [27]。天井山地区定向构造样品石英 c 轴组构图表现为简单的点极密、环带极密以及点极密和环带极密叠加(图 5)。

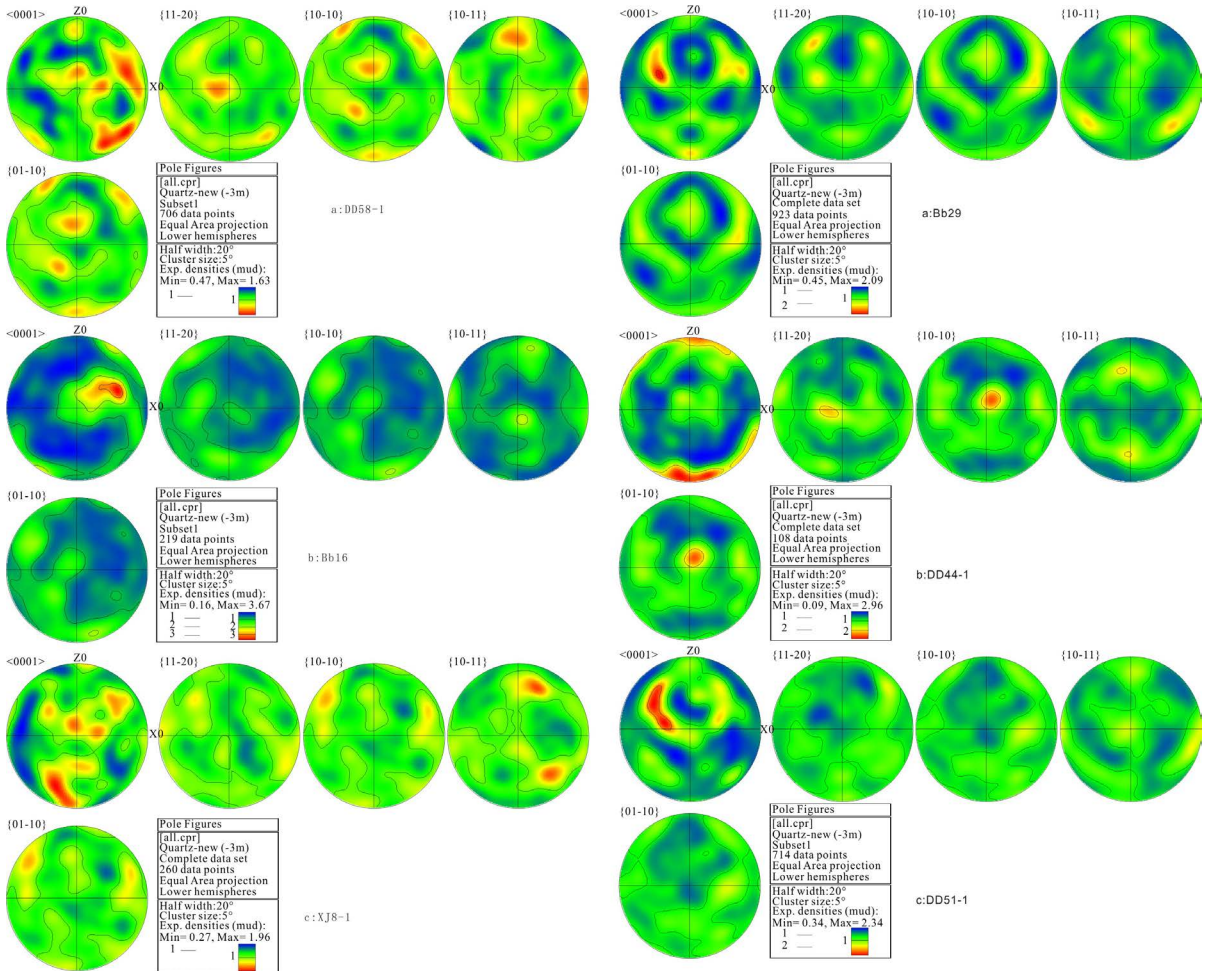


Figure 5. Stereographic projections (lower hemisphere equal area) of quartz crystal preferred orientation of Huangmao-Wu-cheng-Tunxi ductile shear zone determined by EBSD
图 5. 璜茅 - 五城 - 屯溪剪切带石英 EBSD 组构图

综上所述,天井山地区的韧性剪切带石英变形表现为 $\{10\text{-}11\}$ $\langle a \rangle$ 滑移为主,叠加有 $\{0001\}$ $\langle a \rangle$ 滑移,变形温度为中低温($400^{\circ}\text{C}\sim 550^{\circ}\text{C}$),而多数还表现为 $\{0001\}$ $\langle a \rangle$ 滑移,变形温度为低温($<400^{\circ}\text{C}$)。可以说明剪切带的变质相为绿片岩相到角闪岩相,而更多表现为低绿片岩相。与显微镜下观察石英以波状消光为主,推断的剪切带形成环境相吻合。从测试的6个样品中5个都表现出中温、中低温叠加低温的变质变形温度,说明剪切带经历了多期活动。

4. 结论

以璜茅-五城-屯溪剪切带为对象,准确厘定了皖南地区大型韧性剪切带的存在。并从构造几何学、构造岩石学、构造运动学等三大路径,进行了大型韧性剪切带地质特征的精确厘定和精细研究。

1) 璜茅-五城-屯溪剪切带为大型韧性剪切带,在研究区内总体呈喇叭状展布,宽约2~5 km,向NE发散,向SW收敛。宏观上强弱分带明显,以元古代地层和晋宁期岩体的接触带为最强应变带,发育超糜棱岩,应变强度向两侧逐渐减弱,在弱应变带发育糜棱岩化千枚岩和初糜岩。在元古代糜棱岩地层中可见A型褶皱,S-C组构,透镜状石英发育。在长英质糜棱岩中可见长石石英斑晶形成的旋转碎斑,且面理线理均较为发育,面理线理产状显示韧性剪切带总体呈NE-NNE走向,且以水平位移为主;同期的次级剪切系变形强度显著低于主剪切带,以脆韧性或脆性剪切特征控矿;

2) 璜茅-五城-屯溪韧性剪切带微观特征与宏观特征相符,初糜岩-超糜岩均有分布,宏观上S-C组构和透镜状石英以及微观上的旋转碎斑和书斜构造显示璜茅-五城-屯溪韧性剪切带兼具左行和右行剪切的特征,而EBSD石英组构特征显示石英为中低温变形和低温变形的叠加,同样指示韧性剪切带具有多期活动特征,通过宏观上岩脉的变形判断韧性剪切带为先右行剪切,后左行剪切;微观上,在韧性剪切带内的石英普遍具有波状消光、拔丝状拉长、亚颗粒化等膨凸和亚颗粒旋转动态重结晶,部分石英颗粒显微破裂作用形成布丁构造,书斜构造,局部可见压溶作用形成的压力影、对向不对称生长石英脉等,以及晶质塑性变形形成的旋转碎斑等,动态重结晶主要为膨突重结晶以及少量的亚颗粒旋转动态重结晶;长石无显著变形,仅少量双晶弯曲,指示主剪切带韧性变形温度不超过 400°C 。由长石、石英变质变形特征可以得出,韧性剪切带变形变质机制主要是在中低温条件下的位错滑移、显微-超显微破裂以及压溶作用;重结晶石英新晶粒粒径在镜下的测量结果显示,具有一定蚀变的糜棱岩与没有蚀变的糜棱岩的重结晶石英颗粒粒径无明显差别,均在 $0.015\sim 0.025\text{ mm}$ 之间,利用石英动态重结晶新晶粒大小法对韧性剪切带差异应力进行计算,得到皖南地区璜茅-五城-屯溪韧性剪切带差应力值变化范围为 $74.97\sim 106.08\text{ MPa}$;

3) EBSD对韧性剪切带的石英组构分析显示,韧性剪切带中石英以中低温菱面滑移和低温底面滑移为主,说明韧性剪切带主要为中低温、低温变质环境;石英光轴表现为平行于b轴和c轴的点极密,叠加ac环带极密,即说明石英以柱面 $\{10\text{-}10\}$ $\langle a \rangle$ 滑移和菱面 $\{10\text{-}11\}$ $\langle a \rangle$ 叠加底面 $\{0001\}$ $\langle a \rangle$ 滑移为主,变形温度为中温、中低温($400^{\circ}\text{C}\sim 550^{\circ}\text{C}$)和低温($<400^{\circ}\text{C}$)。塑性变形机制和EBSD石英组构特征均显示韧性剪切带为中低温条件下的变质变形;

4) 宏微观运动学特征及EBSD石英组构特征显示璜茅-五城-屯溪韧性剪切带至少发生了两次韧性剪切活动,且先为右行韧性剪切,后为左行韧性剪切;

5) 石英、长石变形机制及EBSD石英组构指示的变质温度环境说明皖南地区璜茅-五城-屯溪韧性剪切带变质相主要为低绿片岩相-高绿片岩相,局部可达低-中角闪岩相。

基金项目

安徽省公益性地勘基金项目(2013-K-8)。

参考文献 (References)

- [1] 地质队安徽省地矿局. 安徽省休宁县天井山金矿普查报告[R]. 安徽黄山, 1986.
- [2] 王郁. 皖南小贺——古汉金矿化带及其地质意义[J]. 冶金地质动态, 1990(5): 3-6.
- [3] 周涛发, 袁峰, 侯明金, 等. 江南隆起带东段皖赣相邻区的成矿条件与资源潜力对比研究[J]. 自然科学进展, 2003, 13(10): 30-35.
- [4] 郑新建, 程金华, 胡文华, 等. 安徽省休宁县小贺毒砂——多金属伴生金矿地质地化特征及找金前景浅析[J]. 安徽地质, 2006, 16(3): 185-189.
- [5] 吴建阳, 张均. 从天井山金矿和金山金矿的成矿特征对比谈天井山金矿的找矿前景及突破方向[J]. 矿床地质, 2010, 29(S1): 1003-1004.
- [6] 段留安, 杨晓勇, 孙卫东, 等. 皖南天井山金矿床地质-地球化学特征及找矿前景[J]. 地质学报, 2011, 85(6): 965-978.
- [7] 杜建国, 许卫. 安徽省金矿资源潜力评价成果报告[R]. 安徽合肥, 2011.
- [8] 杨果林. 皖南休宁县白石坑-上村一带金矿成矿地质特征及找矿前景浅析[J]. 四川地质学报, 2012, 32(S1): 13-16.
- [9] 薛怀民, 马芳, 宋永勤, 等. 江南造山带东段新元古代花岗岩组合的年代学和地球化学: 对扬子与华夏地块拼合时间与过程的约束[J]. 岩石学报, 2010, 26(11): 3215-3244.
- [10] 张定源, 王爱国, 鲍晓明, 等. 安徽天井山金矿区韩家岩体成因与成矿意义[J]. 资源调查与环境, 2014, 35(1): 1-11.
- [11] 姜妍岑, 谢玉玲, 唐燕文, 等. 安徽天井山金矿成矿流体特征及成矿过程初探[J]. 岩石矿物学杂志, 2013, 32(3): 329-340.
- [12] 吴荣新, 郑永飞, 吴元保. 皖南新元古代花岗闪长岩体锆石 U-Pb 定年以及元素和氧同位素地球化学研究[J]. 岩石学报, 2005, 21(3): 587-606.
- [13] 赵玲, 陈志洪. 皖南谭山岩体的锆石定年及地质意义[J]. 资源调查与环境, 2014, 35(3): 185-191.
- [14] 胡玲, 刘俊来, 纪沫, 等. 变形显微构造识别手册[M]. 北京: 地质出版社, 2009.
- [15] Passchier, C.W. and Trouw, R.A.J. (1996) Microtectonics. Springer-Verlag, Berlin, 25-253.
- [16] Stipp, M., Stünitz, H., Heilbronner, R., et al. (2002) The Eastern Tonale Fault Zone: A 'Natural Laboratory' for Crystal Plastic Deformation of Quartz over a Temperature Range from 250 to 700°C. *Journal of Structural Geology*, **24**, 1861-1884. [https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(02\)00035-4](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(02)00035-4)
- [17] Brunel, M. and Maliakov, Y. (1972) Utilisation de l'orientation préférentielle du quartz comme marqueur de la déformation hercynienne dans le granite préhercynien du Mendic (Massif Central français). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences Paris*, **274**, 2627-2630.
- [18] Hara, I., Takeda, K. and Kimura, T. (1973) Preferred Lattice Orientation of Quartz in Shear Deformation. *Journal of Science of the Hiroshima University*, **7**, 1-11.
- [19] Mainprice, D., Bouchez, J.L., Blumenfeld, P., et al. (1986) Dominant c Slip in Naturally Deformed Quartz: Implications for Dramatic Plastic Softening at High Temperature. *Geology*, **14**, 819-822. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1986\)14<819:DCSIND>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1986)14<819:DCSIND>2.0.CO;2)
- [20] 嵇少丞. 部分熔融的构造地质意义(1): 变形机制转变的实验研究[J]. 地质科学, 1988(4): 347-356.
- [21] 周永胜, 何昌荣. 地壳岩石变形行为的转变及其温压条件[J]. 地震地质, 2000, 22(2): 167-178.
- [22] Hippertt, J., Rocha, A., Lana, C., et al. (2001) Quartz Plastic Segregation and Ribbon Development in High-Grade Striped Gneisses. *Journal of Structural Geology*, **23**, 67-80. [https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(00\)00129-2](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(00)00129-2)
- [23] Fitz Gerald, J.D. and Stünitz, H. (1993) Deformation of Granitoids at Low Metamorphic Grade. I: Reactions and Grain Size Reduction. *Tectonophysics*, **221**, 269-297. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(93\)90163-E](https://doi.org/10.1016/0040-1951(93)90163-E)
- [24] Ross, J.V. and Lewis, P.D. (1989) Brittle-Ductile Transition: Semi-Brittle Behavior. *Tectonophysics*, **167**, 75-79. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(89\)90295-3](https://doi.org/10.1016/0040-1951(89)90295-3)
- [25] Fliervoet, T.F., White, S.H. and Drury, M.R. (1997) Evidence for Dominant Grain-Boundary Sliding Deformation in Greenschist- and Amphibolite-Grade Polyminerale Ultramylonites from the Redbank Deformed Zone, Central Australia. *Journal of Structural Geology*, **19**, 1495-1520. [https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(97\)00076-X](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(97)00076-X)
- [26] 徐海军, 金淑燕, 郑伯让. 岩石组构学研究的最新技术——电子背散射衍射(EBSD)[J]. 现代地质, 2007, 21(2): 213-225.
- [27] 刘俊来, 曹淑云, 邹运鑫, 等. 岩石电子背散射衍射(EBSD)组构分析及应用[J]. 地质通报, 2008, 27(10): 1638-1645.

期刊投稿者将享受如下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：ag@hanspub.org