

# 西秦岭上古生代地层变质作用与大型 Pb、Zn 矿集区 地球化学\*

## Late Paleozoic Strata Metamorphism and Geochemistry of Large Pb-Zn Deposit Concentrated Region, Western Qinling, China

张荣华 胡书敏 王勇 王军 龚庆杰

(中国地质科学院矿产资源研究所地球化学动力学研究实验室, 北京 100037)

Zhang Ronghua, Hu Shumin, Wang Yong, Wang Jun, Gong Qingjie

(Open Research Lab. of Geochemical Kinetics, Chinese Academy of Geological Sciences, Institute of Mineral Resources, Beijing 100037, China)

**摘要** 文章讨论了西秦岭上古生代地层中低级变质过程的元素地球化学及其对成矿作用影响。重点分析成矿元素和微量元素在各种不同变质级别的岩石内的丰度。西秦岭大型 Pb、Zn 矿集区内主要分布一种层状 Pb、Zn 矿石, 产于泥盆纪地层的黑云母片岩和大理岩内, 它的变质年龄为海西期。西秦岭地区大面积上古生代地层为中低级和低级变质岩石, 变质年龄为印支期。变质前泥盆系的原始沉积地层是泥砂岩为主的碎屑岩和灰岩。沉积盆地的造山、变质过程和水热事件漫长。地球化学调查研究结果证明变质水热事的流体来源有两种: 来自地壳及地幔。通过对变质地层岩石里的元素地球化学分析获得信息: 区域变质作用和水热过程都使含矿元素迁移, 有利于矿床形成。

**关键词** 变质作用 水热事件 含矿流体

### 1 西秦岭 Pb、Zn 矿集区概况

#### 1.1 区域地质背景

秦岭造山带以徽成盆地界为界分东、西秦岭两部分。徽成盆地可能仅是一个地理分界。据张国伟等分析(2001), 夹持于商丹、勉略带之间的中秦岭带为一独立嵌入板块, 南、北秦岭分别为扬子板块北缘和华北板块的南缘大陆边缘。秦岭造山带的形成是南、北板块与秦岭嵌入板块由南向北分别拼合于印支期, 隆起造山形成的。

#### 1.2 地层分布及特征

秦岭造山带地层从前震旦到中生代地层均有出露, 从地表上看, D-T 地层呈东西向沉积盆地形态。泥盆纪以前的地层主要在该带两侧分布, 带中仅有零星出露。东起天水一成县, 西至彰县一岷县的上古生代地层是本文的主要考察对象。

泥盆系地层在本区出露最广、厚度最大。西秦岭泥盆系主要出露于商丹断裂带与岷县断裂之间, 在再曲一留坝断裂以南也有部分出露。出露地层以 D<sub>2</sub> 为主, D<sub>3</sub> 次之, D<sub>1</sub> 出露较少(且目前仍有争议)。西秦岭泥盆系在礼县一成县一带出露最宽, 向东和向西都变窄。向西逐渐呈楔形尖灭。

泥盆纪沉积区以礼县一高桥断裂和柞水一山阳断裂为界可分为两个亚带: 北亚带西秦岭中上泥盆统舒家坝组为陆源深水复理石沉积, 南亚带则主要为浅水-陆棚相沉积, 并以发育碳酸盐台地和生物礁组合为特征。在西和地区称西汉水组灰岩和砂页岩。这是西秦岭主要的铅锌矿石的赋存岩石。

西秦岭石炭-二叠系以碳酸盐岩为主夹砂页岩, 常与下伏地层整合接触, 断层接触者也颇多。该套地层分布较局限, 二叠系多出露于西秦岭西部(岷县以西), 可能代表了海水从东向西退出海盆的过程。三叠纪地层大规模出露仅局限于西秦岭的西北、西南部。在这时期内, 裂陷盆地形成于泥盆系沉积盆地之内。西秦岭其余地方均已位于海面之上。这些地层中产有 Au-Ag-Hg-Sb 矿石。

\* 本文得到地调局项目(200010200172)、科技部(2001DEA30041 和 2001DEA20023)、国土资源部项目(9501115 和 20010302)、科技部(G1999043212)及地质行业基金(HY979827)的联合资助  
第一作者简介: 张荣华, 男, 1938 年生, 研究员, 博导, 地球化学动力学开放研究实验室主任。从事高温高压下矿物(岩石)/流体反应动力学、地球化学动力学和矿床地球化学以及极端条件下的物质实验研究。建立了我国第一个地球化学动力学实验室和第一个高温高压流体实验室。

一般来说,南北板块最终碰撞于印支期,使秦岭地区沉积盆地全面回返,并隆起造山。在陆间强烈的挤压作用下,形成了一系列的叠瓦状逆冲断裂和倒转褶皱,构造方向仍主要为近东西向。

### 1.3 岩浆活动

西秦岭地区岩浆岩发育,有五大花岗岩体,主要为印支期侵入体-后造山花岗岩(为 240~210 Ma,祁思敬等,1993),形成近千公里的侵入岩带。自加里东运动以来,秦岭造山带一直有岩浆活动。岩浆多为酸性,少数为基性。幔源的岩浆活动也较普遍。幔源型为主的偏基性岩石,主要集中于商丹和勉略带。资料表明(祁思敬等,1993):西秦岭的基性岩活动在 430 Ma。较少发现在 430 Ma 至 240 Ma 时期岩浆侵入体(祁思敬等,1993)。而同期,东秦岭造山带的海西期碰撞造山带花岗岩比较多见。

### 1.4 铅锌矿集区的特征

秦岭铅锌多金属矿产在东西向上形成了几个明显的分区,即西成铅锌矿田,凤太铅锌矿田和山柞菱铁-铅锌矿田,构成了著名的铅锌成矿带。其中厂坝—李家沟铅锌矿已构成世界级超大型规模。邓家山、毕家山、洛坝(西成矿田)、铅硐山、八方山—二里河、银母寺、银洞梁(凤太矿田)、锡铜沟(镇旬矿田)、银洞子(柞山矿田)是一系列大一中型铅锌矿床的代表。本区铅锌矿床,主要集中于D<sub>2</sub>地层中。除Au, Pb, Zn外,其他成矿元素还有Cu, Fe, Hg, Sb等。

铅锌矿集区分布于近东西向,由近东西走向断裂控制。D<sub>2</sub>地层很广,但是大矿床只局限于泥盆系沉积盆地的南缘的、中级变质的D<sub>2</sub>地层。

## 2 变质地层岩石地球化学

以泥盆系地层为重点,按照变质的深度(级别)和岩性进行分类研究。由中级变质岩到低级变质岩划分为:①黑云母片岩与大理岩和白云岩;②绿片岩:绿泥石-绢云母片岩与结晶灰岩;③灰色板岩与结晶灰岩。

笔者选择研究了天水—成县、洛门—礼县—西和一石峡(年家坝)和漳—岷三大地质剖面。大剖面为NS向。按区域性地层分布进行大剖面地球化学调查。跨越前泥盆地层、泥盆系地层、石炭系和二叠系地层进行大规模取样分析。按 500 m 和 1000 m 两种间距为取岩石样品。既选取代表性岩石,又考虑岩石性质不同,进行岩石的化学分析。结果发现:在不同变质级别的同一类原始沉积岩石内的微量元素是不同的,如表 1。变质程度加深使成矿元素和微量元素Cu, Ag, Pb, Zn等迁移,导致其在岩石内丰度下降。由于选取的岩石样品在变质前含碳酸盐成分不同(岩石的钙和CO<sub>2</sub>不同),因此,同变质程度的同一类样品的微量元素的含量也有变化)。在接近大型Pb/Zn矿带时,它们在地层含量很低。在大剖面里,碱土金属波动很大,近大矿带时只有Sr增加(见图 1)。在矿床的围岩里,成矿元素含量要明显高于区域变质岩石的相应元素含量。

## 3 厂坝—李家沟铅锌矿床简况

这里超大型矿床分布于西汉水组,安家岔组中泥盆纪地层。铅锌矿石似层状为主,有两种产状:①产于大理岩系(黑云

表 1 西秦岭你盆系泥质岩的变质岩微量元素平均含量

岩石	样数	w <sub>B</sub> /10 <sup>6</sup>													
		Sr	Ba	Co	Ni	V	Cu	Pb	Zn	Cr	Ag	Ga	Cd	Mo	Be
中—低级变质作用、绿片岩变质级															
舒家坝组	6	93.33	477.5	118.2	237.3	104.7	75.97	27	80.99	112.4	0.383	17.57	0.236	7.299	1.518
低级、板岩变质级															
大草滩组	4	59.84	406.9	132.5	237.6	87.18	59.32	26.30	94.46	88.72	5.401	14.58	4.265	5.888	0.532
低级、板岩变质级															
西汉水组	6	135.8	537.1	95.33	177.2	121.0	117.4	28.2	130.2	202.6	1.834	19.90	5.339	7.286	2.124
中级、黑云母片岩变质级															
吴家山组	2	166.8	204.3	20.11	37.3	108.0	40.81	21.36	125.7	117.6	0.248	14.83	4.193	4.461	-0.053
中级、黑云母片岩变质级(厂坝矿区围岩)(矿化围岩)															
	4	467.4	11797	44.1	85.75	143.8	162.6	103.3	278.5	276.1		0	0.634	0	0
中级、黑云母片岩变质级,绿帘石化(厂坝矿区围岩)															
EP-片岩	1	364.5	8806	892.3	1639	161	190.4	69.8	132.9	220.7			0.41		
中级、黑云母片岩变质级的褪色蚀变(厂坝矿区围岩)															
	2	123.5	3019.	24.59	54.07	106.5	106.1	34.44	177.4	179.7	0	0	0.727	0	0

测试单位:北京大学地学院;测试方法:ICP-MS;检出限 2×10<sup>-9</sup>;相对检出标准(RSD)对 10×10<sup>-6</sup>(样品)为 1%~2%。

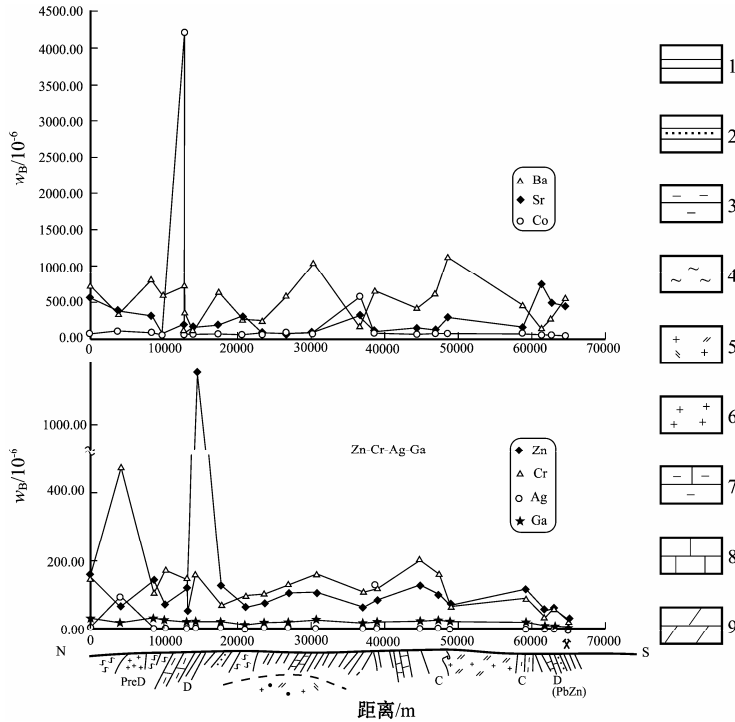


图1 天水—成县剖面地球化学调查

本图表示天水成县剖面，PbZn表示铅锌矿带，PreD前泥盆系，D前泥盆系，C石炭系。  
 1—板岩；2—变粉砂岩；3—片岩；4—千枚岩；5—斑状花岗岩；6—花岗岩；7—泥灰岩；  
 8—结晶灰岩；9—大理岩

母方解石片岩)；②产于片岩系的黑云母方解石石英片岩、黑云母片岩和石英片岩。矿石矿物以闪锌矿-方铅矿-黄铁矿为主。并含黄铜矿(少量磁黄铁矿、毒砂、硫砷铅矿)。脉石矿物以石英、重晶石、方解石为主。在矿化围岩里发育了大量的接触交代矿物：石榴石、透辉石、阳起石-透闪石、方柱石、钠长石、电气石等，另有钾长石、钡长石。

从岩石结构上分析，这些高温蚀变矿物并不全是“片理化”形式出现。有时，岩石是块状结构的。产于黑云母片岩内的黑云母石英脉中的矿物结晶颗粒很粗。晚期见有含矿石的黑云母片岩的退色蚀变现象。

变质和水热蚀变过程可分3个阶段。即，早期中级变质岩、中期含矿热水蚀变和晚期退蚀变过程。早期阶段：致密块状的黑云母石英片岩，它应当是变质后可保存成矿早期热液蚀变产物的岩石。中期阶段：致密块状变质岩结晶变粗，出现大量粗晶铅锌矿脉和粗晶黑云母石英脉。脉状矿是第二阶段的热液矿化产物。晚期阶段：已矿化的黑云母片岩发生退蚀变，形成绿泥石和绢云母化岩石及褪色蚀变。

表1说明，中期叠加强烈热液蚀变，使一部分元素增加，如Cu、Ni、Co等。退蚀变过程中成矿元素，如Pb、Zn、Cu又进一步迁移。

### 4 物质来源与变质-水热事件时代

根据区域地球化学资料，张本仁认为(1994)：在泥盆纪地层中没有Pb-Zn的矿源层或者富Pb-Zn的原始沉积岩石。方铅矿的铅同位素模式年龄为215~508 Ma。并且，铅同位素证明主要的Pb是地壳的，但是仍有不少其它来源(有的矿石的Pb同位素年龄比泥盆系地层还早)。祁思敬(1993)称秦岭地区矿床成因为混合型。因为，矿石内碳酸盐锶同位素(在方解石内)分析表明：流体是混合来源，海水与围岩的Sr混合比为1:2。

#### 4.1 变质-水热事件的年代

综上所述，按照变质矿化和水热蚀变次序研究岩石，区分出3个时间阶段产物，即地质时间顺序。这一顺序与岩石的Rb/Sr等时线年龄的顺序是一致的。

(1) 早期区域变质的已矿化的黑云母石英片岩(或是矿化的片岩)，即致密的黑云母片岩，其年龄为(346±160) Ma，(<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)为0.7113；

(2) 叠加强烈热液蚀变形成的粗粒Pb-Zn矿石(或脉)和含黑云母石英脉的黑云母石英片岩。在黑云母石英片岩中还出现和绿帘石化。( <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr) 为0.7112，年龄(298±69) Ma；

(3) 退蚀变(或退色变质)的黑云母片岩(<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)为0.7134，年龄(180±40) Ma。

测量区域变质岩中泥盆系岩石<sup>87</sup>Rb/<sup>86</sup>Sr比值和等时线年龄，也按3种变质深度对比。以中泥盆系为主的舒家坝组、西汉水组、安家岔组及吴家山组岩石的分析结果为，①中级变质：致密黑云母片岩(346±160) Ma，<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr为0.7113；②中-低级变质：绿泥石-绢云母片岩，(<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)值为0.7239，年龄(249±50) Ma；③低级变质：灰色板岩，(<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)值为0.7110，年龄(186±29) Ma。这里中级变质岩的年龄测量误差较大。但是，关于泥盆系的吴家山组中级变质岩也有400~340 Ma年龄报导(祁思敬、李英等，1993)。与本文报到的年龄数据是一致的。低级变质的年龄是印支期。作者认为：这些变质年龄有重要参考意义。它不同于火成岩的年龄测定。因为沉积岩石原始是不均匀的。中级变质岩石，还有后来的不同程度的叠加蚀变、退变质。为此，数据波动较大。但是，地质证据可以判断先后顺序。

值得注意的是在西秦岭地区没有发现大规模的海西期碰撞造山花岗岩。五大花岗岩是后造山花岗岩，侵入到强烈变形岩石中。事实表明了大事件的次序：海西期出现强烈的变形-中级变质和水热过程（350~298 Ma），中-低级变质作用在 250 Ma，而，大规模的低级变质发生于 180~186 Ma。厂坝的含矿变质岩的退变质时间与大区域的低级变质时间几乎是相同的。

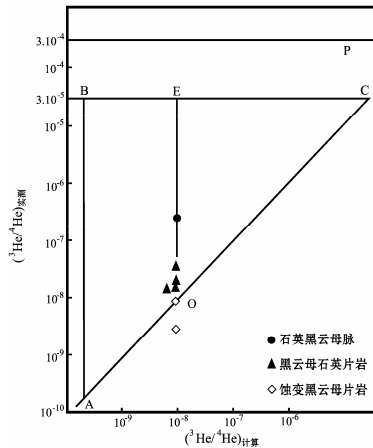


图 2 厂坝地区不同岩石计算与测得的<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He的比值  
P原始值，AC：<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He计算值等于<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He平均值的协调线。OE是岩石的放射成因氦（O）与地幔氦（E）的混合体

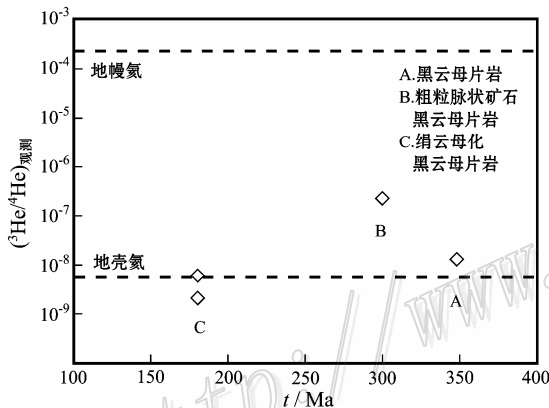


图 3 变质年龄与<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He同位素比值关系图

英流体包裹体液相含SO<sub>2</sub>。盐水溶液内阳离子常常是HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>。矿石和矿化片岩的石英内有SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>。气相成分主要为H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S、CH<sub>4</sub>。在黑云母石英片岩内的石英流体包裹体含C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>。

从流体的气相成分与均一温度关系来看，矿石中石英的气相成分随温度变化。当均一温度升高时，含N<sub>2</sub>多，CO<sub>2</sub>降低。当温度下降CO<sub>2</sub>含量升高，N<sub>2</sub>变少。大理岩内石英流体包裹体内气相含CO<sub>2</sub>数多。无论是气相还是液相，CO<sub>2</sub>与H<sub>2</sub>O含量，随温度升高的变化规律是相反的。在液相内H<sub>2</sub>S随温度升高而减少。流体包裹体的数据反映出不同阶段的流体性质不同，与来源有关。

4.3 矿物与水溶液的反应动力学实验

笔者进行了 300℃、22MPa条件下PbS<sub>2</sub>+NaCl（1mol NaCl）+HCl（0.001mol HCl）流动体系反应实验。实验结果表明：溶解输出的Pb浓度可达 4.525×10<sup>-4</sup> mol/L。这一浓度在海水中是不容易实现的。方铅矿在开放流动体系的 300℃，22 MPa条件下反应动力学实验中当流速为 1.2~1.9 ml/min时，体溶解速率（Bulk dissolution rate）为（14~31）×10<sup>-6</sup> mol/min。

在 100~300℃时，PbS<sub>2</sub>与 1 mNaCl流动溶液反应后，输出浓度铅的 0.4-1.2×10<sup>-6</sup>的数量级。如果，流动溶液与岩石反应（假如岩石含Pb为 100×10<sup>-6</sup>），那么溶解速率要减少 10<sup>4</sup>倍。在 300℃温度条件下，在中上部地壳条件下，淋滤出Pb的可能浓度为 10<sup>-9</sup>级。如果在深部地壳或上地幔条件下，已有的实验研究表明：溶解Pb的速率和Pb在流动溶液内的浓度要很高很多倍。在调查现代大洋中脊的地幔流体活动时，可看到的热液通过洋壳后，在顶部玄武岩内几百米范围内，形成含硫化物的热液脉是可能的。金属基本上是深部来源。但是，西秦岭上古生代地层内没有大规模火山岩。从实验结果看，在海水中直接沉淀

4.2 物质来源

根据变质与热液成矿作用时间顺序，对厂坝地区的主要岩石和矿石类型，分别进行岩石的氦同位素分析，见于图 2。按前面的三时间阶段划分，可见到不同的物质来源。

（1）早期、黑云母石英岩的<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He比值恰好属于标准的地壳氦同位素成分；

（2）中期、强烈矿化和结晶较粗的黑云母石英岩的<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He的数值增大，偏向于有地幔氦的来源；

（3）晚期<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He的数值又减小，流体中的氦是地壳的来源。

这一同位素研究结果意义很大：证明含矿流体是由地壳的流体与地幔流体混合而成。成矿作用过程中，地幔流体来源增加。它不是一个有简单的物质来源的矿床。厂坝-李家沟 PbZn 矿床更像一个有深部物质来源的热液矿床。而且，深部地幔物质来源的流体活动于海西期，年龄约 300Ma。图 3。

厂坝-李家沟矿床矿物流体包裹体数据（作者的数据为主）表明：石英内 w(NaCl) %高，为 4%~20%，闪锌矿内盐度低，7.5%~13%。按照矿石结构和穿叉关系可划分为两个阶段。早期阶段均一温度：185~335℃，晚期 320~470℃；早期盐度 4.5%~6.2%，晚期盐度 5.5%~19.1%。

根据厂坝Pb-Zn矿石的石英、黑云母石英片岩的石英、片岩中的石英脉和大理岩内的石英等四种产状，对石英的流体包裹体的成分进行分析。结果显示：液相内普通含有H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S、CH<sub>4</sub>。在大理岩内石

Pb的硫化物是不容易的。

## 5 讨 论

该地区中基性岩体的岩石模式年龄为 400~450 Ma, 估计基性岩侵位于 400 MPa (祁思敏等, 1993)。在泥盆纪海盆形成和沉积岩形成后, 深部热源可能不断产生影响。盆地凹陷后发生区域变质过程。中级变质作用的黑云母变质相发生于海西期 (345 Ma±?)。深部热流影响中部地壳大约是在 300 Ma。<sup>3</sup>He同位素研究表明, 这时候, 有深部流体参加成矿作用。Pb-Zn 矿石和中级变质的黑云母片岩形成于海西期。

在印支期花岗岩活动之前, 区域变质作用的中-低级变质作用, 及绿片岩相变质作用发生于 250±50 Ma。印支期后造山期花岗岩侵入活动发生于 240~200 Ma。大规模低级变质作用、板岩相变质作用可能在 186~180 Ma。最初的 Pb-Zn 矿化也应在砂质岩石和碳酸盐岩石成岩后发生的。此后, 可能出现泥盆地层流体和深部热源物质混合过程。

总之, 西秦岭泥盆-二叠纪海槽的下沉 (400~300 Ma) 应当是分区地、向西迁移的。盆地的局部压缩变形-中级变质水热作用及随后的深部地幔热流活动先后出现在海西期。海盆的南北向收缩可能起于海西期, 大陆的碰撞造山最终完成于印支期。由盆地向造山的转化过程中, 变质作用时间漫长, 水热事件多次。地层中的成矿元素不断迁移。<sup>3</sup>He同位素研究表明厂坝Pb-Zn矿石形成既与深部地幔来源流体有关, 也有地壳的流体参加了活动。变质过程中地层的成矿元素在不断迁移。变质级别越高, 元素迁移越大。变质加深有利于成矿元素的重新富集作用。

### 主 要 参 考 文 献

- 祁思敏, 李 英, 等. 1993. 秦岭汲盆系铅锌成矿带. 北京: 地质出版社.
- 张本仁, 等. 1994. 秦巴岩石圈构造及成矿规律地附化学研究. 北京: 中国地大出版社.
- 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 等. 2001. 秦岭造山带与大陆动力学. 北京: 地质出版社.

<http://www.kcdz.ac.cn/>