

文章编号:1005-0523(2022)05-0010-10



## 砒砂岩的结构组成研究

董晶亮<sup>1</sup>, 陈磊伟<sup>1</sup>, 郑福焱<sup>1</sup>, 刘 璠<sup>2</sup>, 肖桂元<sup>3</sup>, 涂发强<sup>4</sup>, 张小清<sup>5</sup>, 张海娜<sup>1</sup>

(1. 华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071;  
3. 桂林理工大学广西岩土力学重点实验室, 广西 桂林 541004; 4. 江西建工第一建筑有限责任公司, 江西 南昌 330013;  
5. 广州南沙置业有限公司, 广东 广州 511457)

**摘要:**明晰砒砂岩的结构组成和矿物组成,是揭示砒砂岩地区水土流失机制及研发治理砒砂岩地区水土流失方法的基础。通过借助定量XRD及光学显微镜分析等材料分析法,分析中国内蒙古鄂尔多斯地区砒砂岩的结构组成和矿物组成。结果表明:砒砂岩的结构由颗粒状骨架物质和黏土类胶结物质组成,其胶结方式为接触式胶结;砒砂岩颗粒状骨架物质主要由石英、碳酸钙及长石等组成,黏土类胶结物质为蒙脱石、绿泥石、高岭石及氧化铁等;砒砂岩颗粒状骨架晶体(石英和长石等)是依靠亲水弱胶结黏土物质的胶结力、晶体间的摩擦力、机械咬合力及颗粒支撑作用所形成的固体混合物,为三元颗粒支撑渗透式结构。

**关键词:**砒砂岩;结构组成;矿物组成;胶结方式

**中图分类号:**TV41

**文献标志码:**A

**本文引用格式:**董晶亮,陈磊伟,郑福焱,等. 砒砂岩的结构组成研究[J]. 华东交通大学学报,2022,39(5):10-19.

## Study on the Structural Composition of Pisha Sandstone

Dong Jingliang<sup>1</sup>, Chen Leiwei<sup>1</sup>, Zheng Fuyan<sup>1</sup>, Liu Liu<sup>2</sup>, Xiao Guiyuan<sup>3</sup>, Tu Faqiang<sup>4</sup>, Zhang Xiaqing<sup>5</sup>, Zhang Haina<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 3. Guangxi Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 4. First Construction Co., Ltd., Jiangxi Construction Engineering Group, Nanchang 330013, China; 5. Nansha of Guangzhou Real Estate Co., Ltd., Guangzhou 511457, China)

**Abstract:** Clarifying the structural composition and mineral composition of arsenic sandstone is the basis for revealing the mechanism of soil erosion in the arsenic sandstone area and developing methods for controlling soil erosion in the arsenic sandstone area. This article analyzes the structural composition and mineral composition of arsenic sandstone in the Ordos area of Inner Mongolia by means of material analysis methods such as quantitative XRD and optical microscope analysis. The results show that: the structure of arsenic sandstone is composed of granular framework materials and clay-like cementing materials, and its cementing method is contact cementation; arsenic sandstone granular framework materials are mainly composed of quartz, calcium carbonate and feldspar, etc. Clay cementing materials are montmorillonite, chlorite, kaolinite and iron oxide, etc.; arsenic granular framework crystals (quartz and feldspar, etc.) rely on the cementing force of hydrophilic weak cementing

收稿日期:2021-10-30

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0504506);国家自然科学基金青年项目(51708220);中央级公益科研院所基本业务费专项项目(HKY-JBYW-2016-38);华东交通大学科研启动基金项目(10012003417017)

clay materials. The solid mixture formed by friction between crystals, mechanical bite force and particle support is a ternary particle support permeable structure.

**Key words:** pisha sandstone; structural composition; mineral composition; cementation mode

**Citation format:** DONG J L, CHEN L W, ZHENG F Y, et al. Study on the structural composition of pisha sandstone[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2022, 39(5): 10–19.

我国水土流失和土地沙漠化异常严峻, 每年的水土流失量约为  $5 \times 10^9$  t, 占全世界每年水土流失 20% 左右, 其中以黄河流域黄土高原砒砂岩地区最为严重, 每年的水土流失量约为  $1.6 \times 10^9$  亿 t, 占全国水土流失总量的 32% 左右<sup>[1-2]</sup>。我国的粮食供给保障、环境问题和耕地面积受到了水土流失和土地沙漠化的严重威胁。大量流失的泥沙汇入黄河会引起河道阻塞, 从而影响航运, 甚至造成洪涝灾害, 危害人民群众的生命财产安全。近些年北京发生的沙尘暴天气, 也与内蒙古地区的砒砂岩息息相关。

1919—1959 年, 由于黄土高原地区的水土流失导致每年约有 16 亿 t 泥沙汇入黄河。在国家有关部门的精心治理下, 水土流失得到控制, 2011 年以来每年因水土流失汇入黄河的泥沙量减少至 1.7 亿 t<sup>[3]</sup>。砒砂岩区产生的泥沙, 主要为容易淤积在黄河下游河道的粗泥沙, 粒径大于 0.05 mm。钱宁<sup>[4]</sup>指出“因为粒径大于 0.05 mm 的粗砂是黄河下游淤积泥沙的主要组成部分; 因此, 只需要在黄河中游找到粗泥沙的集中产区并进行有效治理, 就能够有效缓解黄河中下游河道泥沙淤积的问题”。通过调查发现, 伊金霍洛旗、准格尔旗、内蒙古鄂尔多斯市东胜区、达拉特旗和陕西省神木、府谷 6 县的砒砂岩地区 (约为  $1.7 \times 10^4$  km<sup>2</sup>) 是黄河中游粗泥沙的集中来源区。

砒砂岩分布区水土流失严重, 植物生长困难。砒砂岩地区每年注入黄河的粗泥沙占黄河粗泥沙总量的 62% 和黄河下游河道淤积量的 25%, 为黄土高原上最集中的碎屑基岩产沙区。砒砂岩地区刚好位于黄河中游, 是中游水土流失最严重的地方, 这里的土地侵蚀面积达到了 3~4 万 t/(km<sup>2</sup>·a), 为内蒙古土地沙化最严重的区域<sup>[5-13]</sup>。为了有效减少黄河河床泥沙淤积问题和土地沙化, 就必须加大对内蒙古砒砂岩地区水土流失的整治。

想要有效治理砒砂岩地区的水土流失, 需弄清砒砂岩的形成机制, 而分析形成机制的关键在

于明确砒砂岩的矿物组成和结构组成。明晰砒砂岩的矿物组成与结构组成, 有助于了解砒砂岩的性质, 是揭示砒砂岩地区水土流失机制及研发出治理水土流失方法的基础。因砒砂岩地区的水土流失十分严重, 是黄河粗泥沙的主要产区, 带来的危害性巨大, 所以对砒砂岩的研究一直是国内的热点<sup>[14-23]</sup>。国内众多学者对砒砂岩的化学成分、矿物组成和颜色的多样性展开了大量的研究。叶浩等<sup>[24]</sup>发现砒砂岩的化学组成成分主要为二氧化硅、三氧化二铝和氧化钙。其中二氧化硅的含量最高为 64.73%, 其次是三氧化二铝含量为 10.06%, 氧化钙含量为 7.40%。砒砂岩的颜色具有多样性, 常见的砒砂岩颜色为灰白色, 紫红色和灰白紫红相间 3 种颜色<sup>[25-27]</sup>。宋土顺等<sup>[28]</sup>指出“烃类流体”的漂白作用造成了砒砂岩颜色上的差异, 漂白的原理为酸性流体环境下硫酸盐和天然气的还原作用, 且白色的砒砂岩就是红色砒砂岩受到了该漂白作用所形成。虽然砒砂岩的颜色不同, 但主要矿物成分都为碳酸钙、云母、伊利石、高岭石、石英、钾长石、蒙脱石和斜长石<sup>[29]</sup>。尽管如此, 国内对砒砂岩的化学组成、矿物组成及颜色差异性的研究还是远远不够且不系统, 并没有给出砒砂岩的结构组成模型, 也未对不同粒度的砒砂岩所含矿物进行定量分析<sup>[30]</sup>。只有对砒砂岩的认识更深, 对砒砂岩的结构组成展开更详细的研究, 才能找到最佳的治理方法, 并且从源头上治理我国的水土流失问题。主要针对白色砒砂岩和红色砒砂岩两种砒砂岩的矿物组成、粒度组成及结构组成展开研究。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

砒砂岩 (红色和白色块体) 取自中国内蒙古鄂尔多斯, 原岩抗压强度约为 1.0 MPa, 密度为  $1\ 600 \sim 1\ 800$  kg/m<sup>3</sup>。

## 1.2 试验方法

1) 砒砂岩的结构物质组成及特征,即粒度组成与矿物分析。称量红色和白色砒砂岩各 5 000 g,倒入料盆后加水至液面浸过砒砂岩并搅拌、静置 48 h、筛分、烘干(105 ℃,24 h),最后统计不同粒度砒砂岩的质量。然后利用光学显微镜对不同粒度砒砂岩展开矿物组成分析,同时采用德国 Siemens 公司 D500 型 X 射线衍射光谱分析仪对磨细以后不同粒度的砒砂岩展开定量分析。

2) 砒砂岩的结构形式及特征,即砒砂岩结构组成分析。将红色和白色砒砂岩加工成为长、宽和高为 2 cm×2 cm×1 cm 的长方体,然后利用光学显微镜对其进行观察分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 砒砂岩的结构物质组成及特征

#### 2.1.1 砒砂岩的粒度组成

从图 1 可以得出,白色砒砂岩中颗粒的粒度基本集中在 0.15~1.25 mm,占总量的 79.02%,其中 0.3~0.6 mm 占比最大,高达 43.96%;红色砒砂岩的粒度组成基本集中在小于 0.075 mm,占总量的 83.44%。红色砒砂岩的粒径要远小于白色砒砂岩,其加权平均粒径仅为白色砒砂岩的 0.19 倍。红色砒砂岩的粘粒要远多于白色砒砂岩。这可能是红色砒砂岩相对白色砒砂岩遇水不易发生溃散的原因之一。

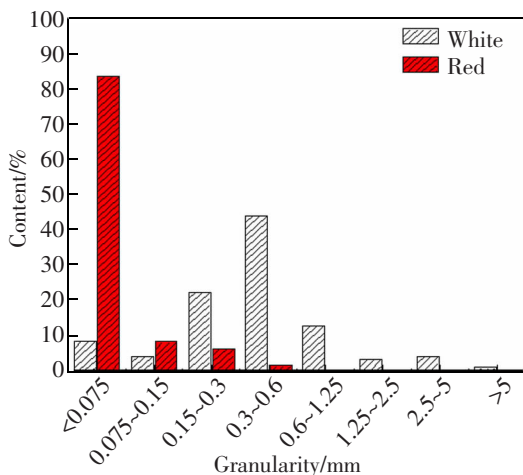


图 1 砒砂岩的粒度分布范围

Fig.1 Granularity distribution range of Pisha sandstone

#### 2.1.2 不同粒度砒砂岩的 XRD 矿物组成定量分析

图 2 和图 3 是采用德国 Bruker D8 Advance

(40 kV,40 mA,步长 0.01°,扫描时间 0.5 s) X 射线衍射仪(XRD)对不同粒度的砒砂岩进行物相分析得出。

图 2 表明,白色砒砂岩的主要矿物成分为石英、钾长石、高岭石和蒙脱石,还含有少量的氧化铁以及碳酸钙等。粒度小于 0.15 mm 的范围内,白色砒砂岩的主要矿物成分是石英、钠长石、钾长石、蒙脱石和高岭石。同时可以发现在粒度为 0.075~0.15 mm 的范围内,集中了大量的黑云母,其它粒度范围只有少量的黑云母。粒度在 0.15~0.3 mm 和大于 0.3 mm 的范围内,白色砒砂岩的主要矿物成分都是石英、钾长石、钠长石和碳酸钙 4 种晶体。在光学显微镜的观察下,发现支撑起砒砂岩整个骨架的是它的粗颗粒部分,主要为石英、钾长石、钠长石和碳酸钙这 4 种晶体。白色砒砂岩中还存在蒙脱石、氧化铁和高岭石等矿物。这 3 种矿物都具有一定的胶结能力,能够将砒砂岩中的其它晶体矿物胶结在一起形成砒砂岩岩体。

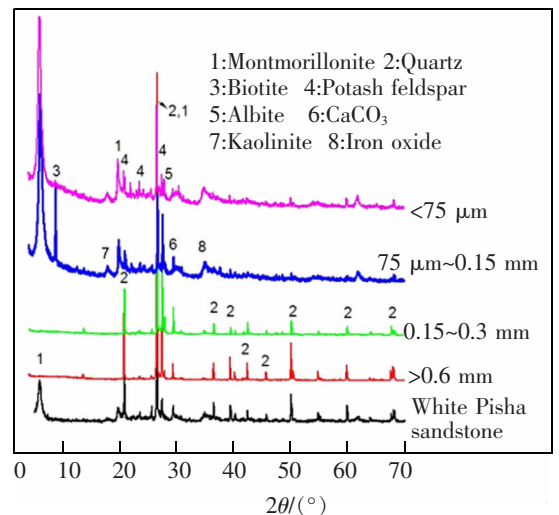


图 2 白色砒砂岩不同粒度的 XRD 衍射图谱

Fig.2 XRD pattern of white Pisha sandstone in different granulosity

图 3 可以得出,红色砒砂岩所含的矿物与白色砒砂岩相似。不同之处在于每个粒度区间中矿物的分布及含量有所差异,蒙脱石在红色砒砂岩中的分布更加均匀,并且仅红色砒砂岩含有绿泥石。红色和白色砒砂岩具有相似的结构。红色砒砂岩也含有石英、钾长石、钠长石和碳酸钙等 4 种晶体矿物。红色砒砂岩中具有胶结能力的矿物为蒙脱石、氧化铁、绿泥石和高岭石。

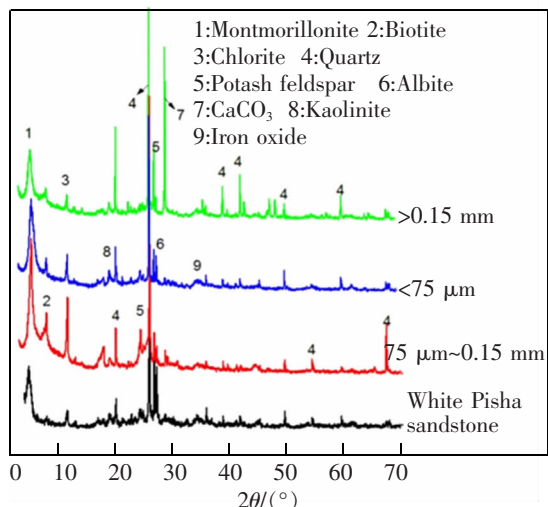
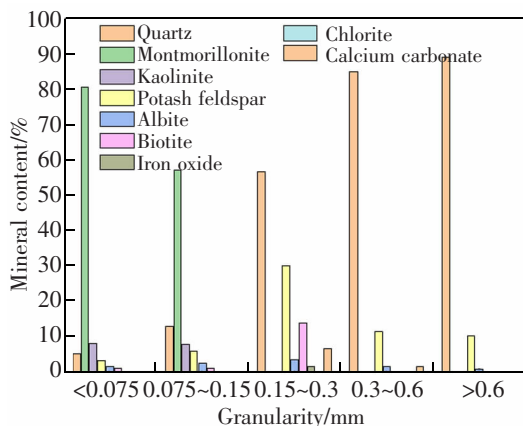


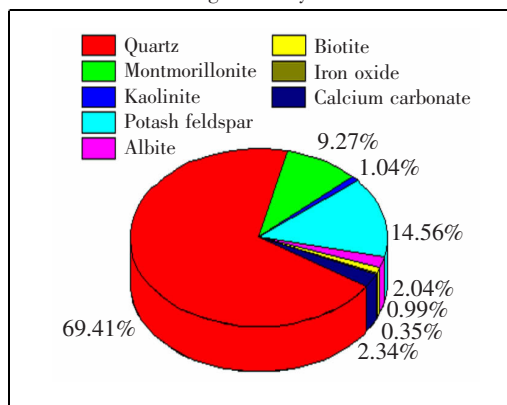
图 3 红色砭砂岩不同粒度的 XRD 衍射图谱

Fig.3 XRD pattern of red Pisha sandstone in different granularity

基于不同粒度的砭砂岩物相分析结果,并结合 TOPAS 4.2 对砭砂岩中各矿物成分的定量计算表明(图 4,图 5),仅红色砭砂岩含有绿泥石,其余矿物



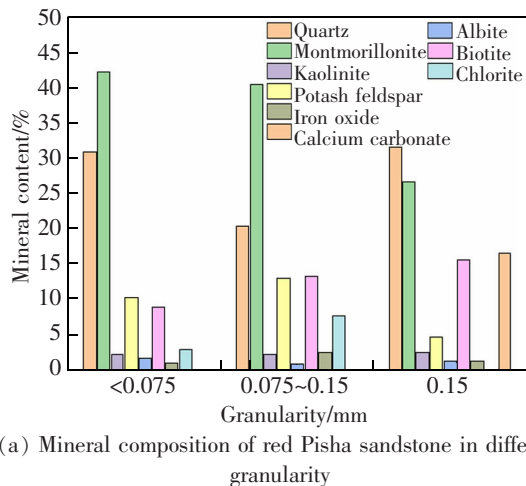
(a) Mineral composition of white Pisha sandstone in different granularity



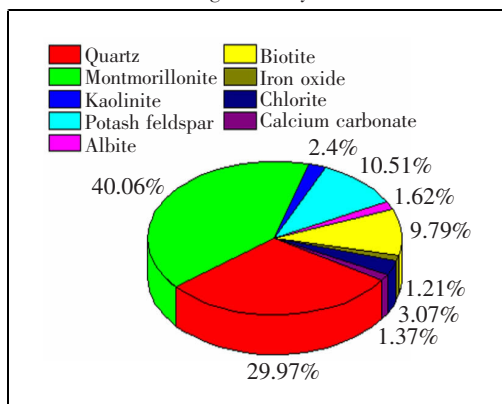
(b) Mineral content of white Pisha sandstone

图 4 白色砭砂岩的矿物组成

Fig.4 Mineral composition of white Pisha sandstone



(a) Mineral composition of red Pisha sandstone in different granularity



(b) Mineral content of red Pisha sandstone

图 5 红色砭砂岩的矿物组成

Fig.5 Mineral composition of red Pisha sandstone

种类白色砭砂岩与红色砭砂岩相同,但在不同粒度区间内所含的矿物种类以及含量有较大的差异。白色砭砂岩中石英的含量高达 69.2%;蒙脱石和高岭石只分布在粒度小于 0.15 mm 的范围内,属于细颗粒,且蒙脱石的含量随着粒度的减小而增加;钾长石和钠长石在各粒度范围都有分布,且分布较为均匀;黑云母集中分布在粒度小于 0.3 mm 的范围内;氧化铁的含量最少仅为 0.35%,分布在粒度为 0.15~0.3 mm 的范围内;碳酸钙分布在粒度为 0.15~0.6 mm 的范围内。红色砭砂岩中各矿物的分布比白色砭砂岩均匀,除了绿泥石和碳酸钙,其余矿物在各粒度范围内均有分布。与白色砭砂岩不同,红色砭砂岩中矿物含量最高的为蒙脱石,约为 40%,且在各粒度范围内的分布量较均匀;其次是石英和钾长石,分别为 29.97%和 10.51%。红色和白色砭砂岩主要的矿物都为石英、蒙脱石和钾长石,但矿物含量却大不相同。白色砭砂岩中石英和钾长石的含量要高于红色砭砂岩,分别为红色砭砂岩的 2.31 倍和



1.46倍;而白色砒砂岩中的蒙脱石和黑云母的含量要远低于红色砒砂岩,分别为白色砒砂岩的0.23倍和0.1倍。综合上述结论,可以明确砒砂岩中的蒙脱石和高岭石等次生矿物是由砒砂岩中的原生矿物(长石)风化得到的,因而砒砂岩是一种风化严重的泥岩。

表1和表2为白色砒砂岩和红色砒砂岩按照风化带中矿物的稳定性对所含矿物的分类。其中碳酸钙为不稳定矿物,钾长石、钠长石和黑云母为次稳定矿物,石英、蒙脱石、高岭石和氧化铁为稳定矿物。由表1可知,不稳定矿物只存在于粒径为0.36~0.6 mm和0.15~0.3 mm的范围内,总体的含量极少,约占白色砒砂岩整体质量的2.34%。次稳定和稳定矿物在各粒径范围都存在,且分布较均匀,它们分别占白色砒砂岩整体质量的17.59%和80.07%。由表2可知,不稳定矿物只存在于粒径大于0.15 mm的范围内,且含量极少,占红色砒砂岩整体质量的1.37%。红色砒砂岩中次稳定矿物和稳定矿物分别占红色砒砂岩整体质量的21.92%和76.71%,且它们在不同粒径的分布十分均匀。由表1和表2对比可知,白色砒砂岩和红色砒砂岩的不稳定矿物、次稳定矿物和稳定矿物的含量相似。

### 2.1.3 不同粒度砒砂岩的光学显微分析

图6表明,白色砒砂岩的不同粒度区间都分布着大量的白色透明晶体和红褐色晶体,它们分别为石英和钾长石。可以得出,石英与钾长石为白色砒砂岩的主要矿物组成,含量高达84%,构成砒砂岩的骨架结构。当粒度为0.3~0.6 mm时,白色透明晶体石英的含量最高,且部分石英外表裹有红褐色物质(氧化铁),它起到胶结石英和钾长石等晶体的作用;在粒度为0.15~0.3 mm时,能观察到黑色的颗粒状晶体钠长石;当粒度为0.075~0.15 mm时,可以观察到黑色无规则形状的晶体,其为黑云母;当粒度小于0.075 mm时,发现大量片状白色晶体,依据XRD结果分析可知其为蒙脱石。通过光学显微镜观察到石英与钾长石的表面较均匀地分布着蒙脱石和黑云母,对石英和钾长石起到包裹和胶结的作用。白色砒砂岩中以粒径较大的晶体为主,晶体间胶结弱。

图7表明,红色砒砂岩的矿物分布比白色砒砂岩均匀。在粒径大于0.15 mm的红色砒砂岩中,可

表1 白色砒砂岩矿物组成

Tab.1 White Pisha sandstone mineral composition %

Chemical composition	Unstable mineral	Sub-stable minerals	Stable minerals
>0.6 mm	0	11.09	88.91
0.36~0.6 mm	1.81	13.53	84.66
0.15~0.3 mm	6.88	34.92	58.2
0.075~0.15 mm	0	22.71	77.29
<0.075 mm	0	6.33	93.67
White Pisha sandstone	2.34	17.59	80.07

表2 红色砒砂岩矿物组成

Tab.2 Red Pisha sandstone mineral composition %

Chemical composition	Unstable mineral	Sub-stable minerals	Stable minerals
>0.15 mm	16.5	21.55	61.95
0.075~0.15 mm	0	26.96	73.04
<0.075 mm	0	20.81	79.19
Red Pisha sandstone	1.37	21.92	76.71

以观察到白色透明的石英,红褐色的钾长石,白色片状的蒙脱石和乳白色的碳酸钙,以及少量的黑云母;当粒度在0.075~0.15 mm,红色砒砂岩中含有大量蒙脱石,黑云母以及绿色的片状晶体绿泥石,这3种晶体在红色砒砂岩中起到胶结物质的作用;当粒度小于0.075 mm时,在红色砒砂岩中可以观察到大量粒径较小的蒙脱石、石英和钾长石。综上所述可知,红色砒砂岩在不同的粒度区间含有的矿物种类基本相同,但是含量的多少存在很大差异。红色砒砂岩中以粒径较小的粘粒为主,胶结状态强于白色砒砂岩。

### 2.1.4 砒砂岩的SEM分析

图8为白色砒砂岩与红色砒砂岩的扫描电镜图像,从图8(a)中可以看出白色砒砂岩的内部胶结程度很差,裂纹与空隙较多,结构松散,呈现颗粒状分布;从图8(b)中可以看出红色砒砂岩的胶结程度要优于白色砒砂岩,结构更加密实,呈现褶皱状。白色砒砂岩以颗粒状晶体石英和钾长石为主,覆盖在

颗粒状晶体表面的胶结物质为蒙脱石和黑云母,晶体间的胶结能力较差。红色砒砂岩中含有大量的片状蒙脱石以及片状的晶体绿泥石,它们为红色砒砂

岩的胶结物质。红色砒砂岩中的胶结物质蒙脱石含量较高,胶结能力强;因此扫描电镜图像中红色砒砂岩结构更加密实。

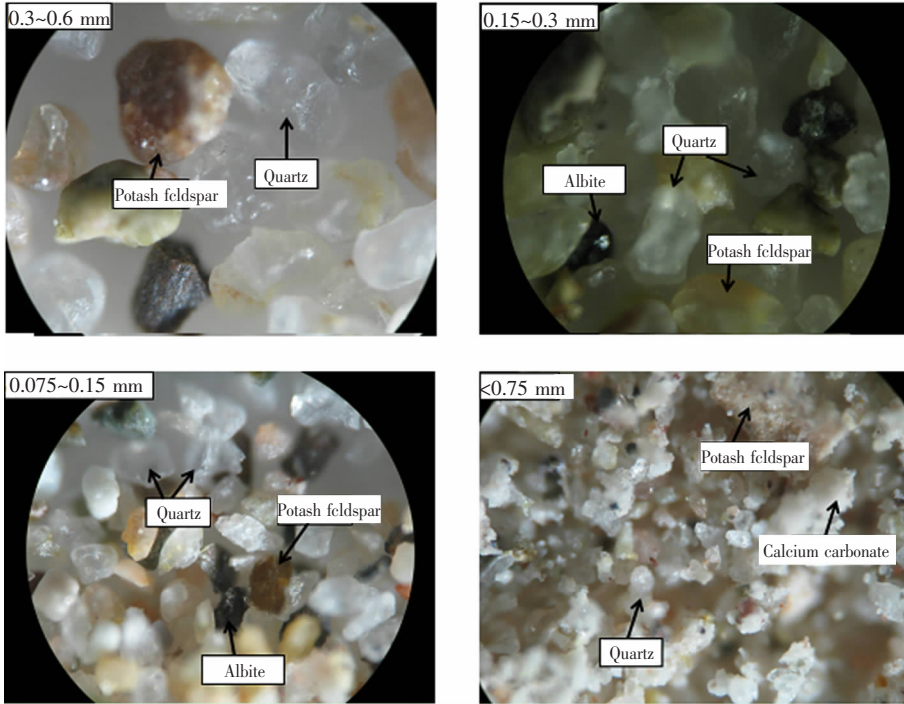


图 6 白色砒砂岩不同粒度的光学显微图片(100 倍)

Fig.6 Optical micrograph of different granularity white Pisha sandstone

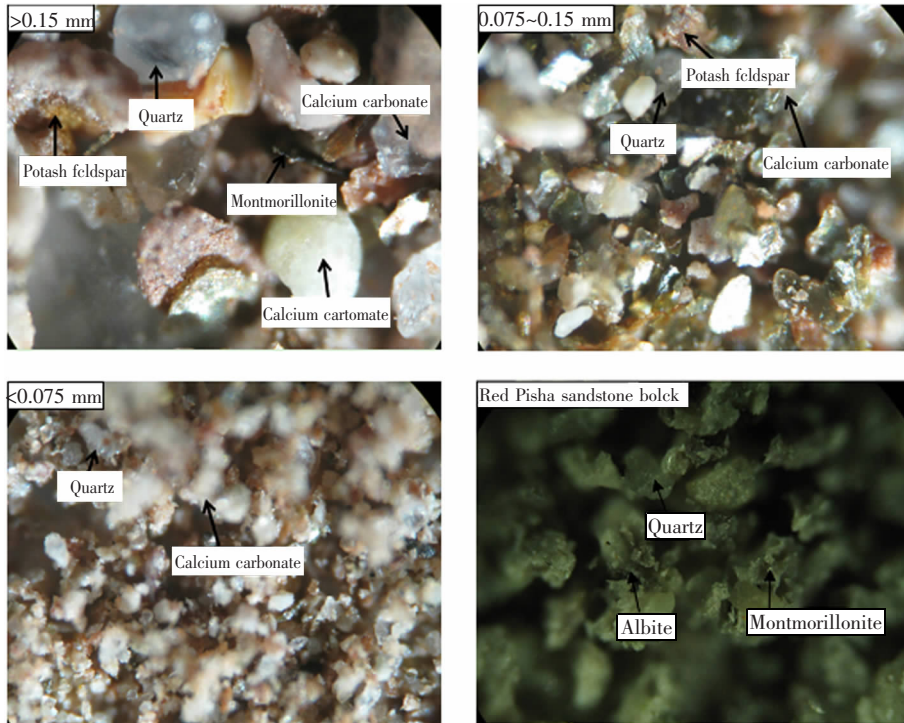
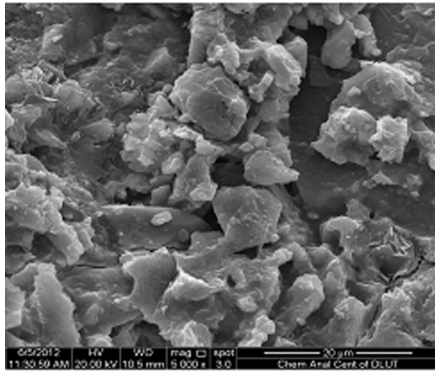
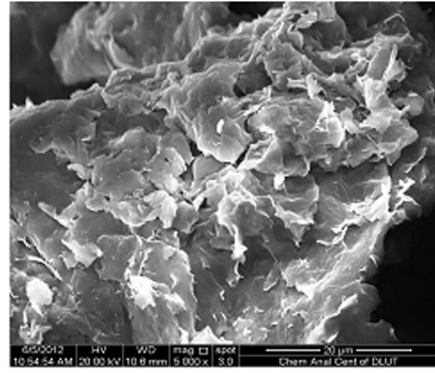


图 7 红色砒砂岩光学显微图片(100 倍)

Fig.7 Optical micrograph of different granularity red Pisha sandstone



(a) SEM image of white Pisha sandstone



(b) SEM image of red Pisha sandstone

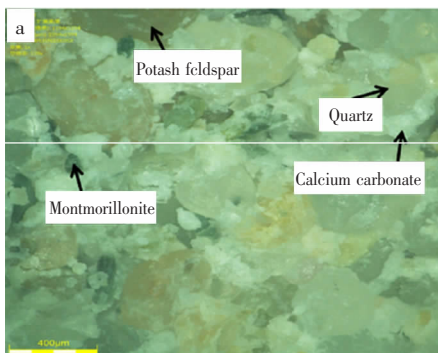
图8 砒砂岩扫描电镜图片  
Fig.8 SEM image of Pisha sandstone

## 2.2 砒砂岩的结构形式及特征

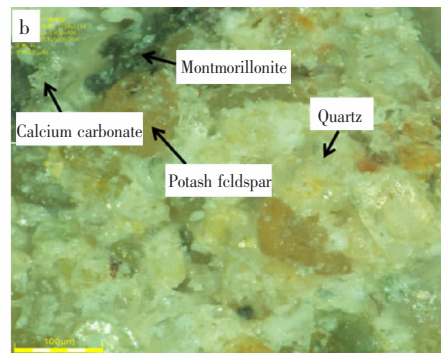
图9为砒砂岩在光学显微镜下的观察结果。从图9(a)中能观察到白色砒砂岩中含有大量的白色透明晶体石英和红褐色晶体钾长石。石英与钾长石构成了白色砒砂岩的骨架,其中还含有少量的黑色颗粒状晶体钠长石及乳白色晶体碳酸钙,而均匀分布在它们之间起到胶结物质作用的为亲水弱胶结粘土矿物蒙脱石和黑云母。白色砒砂岩中不同晶体的辨别度很高,界限非常清晰,各晶体之间依靠亲水弱胶结粘土矿物胶结在一起,同时砒砂岩体含有大量的孔隙结构,造成其结构强度低。图9(c)为块状白色砒砂岩表面的3D光学显微扫描图,因白色透明的颗粒状晶体石英的含量最高,所以整体呈现白色。还能观察到少量红褐色和灰黑色部分,分别为钾长石以及钠长石晶体。

图9(b)为块状红色砒砂岩的结构组成图,可以观察到大量的白色黏土矿物蒙脱石,它把石英、钾长石及黑云母等晶体颗粒胶结在一起。红色砒砂岩

中红褐色的钾长石晶体与黑色的黑云母晶体含量要高于白色砒砂岩,且白色的石英晶体含量少于白色砒砂岩,红色砒砂岩整体的颜色更加混浊不如白色砒砂岩亮白。蒙脱石和氧化铁为亲水性弱胶结物质,红色砒砂岩因蒙脱石含量较高,胶结能力强,使红色砒砂岩基体更加密实,所以红色砒砂岩的结构强度要高于白色砒砂岩。图9(d)是对块状红色砒砂岩表面的3D光学显微扫描图,观察发现红色砒砂岩中的颗粒状晶体以白色石英和红褐色的钾长石为主,还含有少量黑色的钠长石。此外,红色砒砂岩中能观察到大量的白色黏土矿物蒙脱石,蒙脱石与氧化铁等胶结物质把颗粒状的晶体胶结成整体,外观呈现红色。综上可知,砒砂岩是由颗粒状的骨架晶体石英、钾长石和钠长石通过亲水弱胶结物质蒙脱石和氧化铁等的胶结作用及晶体间的摩擦力和机械咬合力作用所形成的固体混合物,同时颗粒与颗粒之间由于胶结物的不完全填充导致砒砂岩基体存在大量的孔隙,其胶结方式是接触式胶结。



(a) White Pisha sandstone block



(b) Red Pisha sandstone block



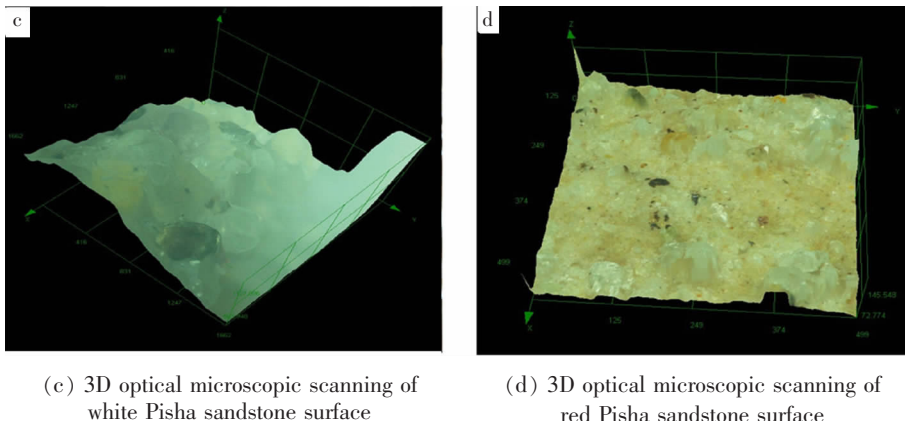


图 9 砒砂岩的光学显微分析

Fig.9 Optical microscope images of Pisha sandstone

2.3 砒砂岩结构元及几何模型

由前述分析知,砒砂岩实际上是颗粒状骨架晶体(石英、钠长石和钾长石)通过蒙脱石和氧化铁等亲水弱胶结黏土物质的胶结作用及晶体间的摩擦力、机械咬合力作用所形成。砒砂岩结构松散,含有较多的空隙,其矿物成分依据遇水特性的不同可分为三大类:膨胀元、约束元和支撑元。膨胀元:遇水易发生膨胀的黏土矿物如蒙脱石和绿泥石等即为膨胀元;约束元:能对发生膨胀的黏土矿物起到约束作用的胶结物质,如氧化铁等,砒砂岩遇水发生溃散的根本原因在于胶结物产生的胶结力不足以约束膨胀黏土矿物产生的膨胀力;支撑元:砒砂岩的主要晶体颗粒组成部分如石英、钾长石和碳酸钙,也起到砒砂岩骨架的作用。砒砂岩本质是一种亲水弱胶结的颗粒支撑渗透式结构,其几何结构具有三元特征,其几何模型如图 10。

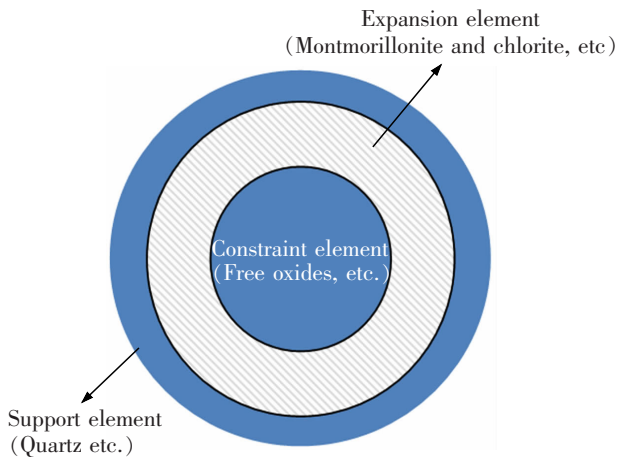


图 10 砒砂岩的三元结构几何模型

Fig.10 Geometric model of ternary structure for Pisha sandstone

3 结论

通过对砒砂岩矿物组成粒度分布、微观结构、矿物特性与组成、膨胀源及胶结物质、结构组成等进行全面的分析,得到如下结论。

1) 红色和白色砒砂岩所含的矿物种类基本相同,均为石英、钾长石、钠长石、蒙脱石、黑云母、氧化铁和碳酸钙等,但它们在各个不同粒度范围内的矿物类型及含量存在差别。

2) 白色砒砂岩中的颗粒状晶体矿物含量远高于红色砒砂岩,石英和钾长石的含量分别为红色砒砂岩的 2.31 倍和 1.46 倍。但是,白色砒砂岩中的胶结物质含量远低于红色砒砂岩,蒙脱石和黑云母的含量分别为红色砒砂岩的 0.23 倍和 0.1 倍。并且绿泥石仅存在于红色砒砂岩中。白色砒砂岩比红色砒砂岩更加容易遇水发生溃散。

3) 砒砂岩依靠亲水弱胶结黏土矿物胶结颗粒状晶体而成,主要的胶结方式为接触式胶结,为三元结构特征。胶结矿物有膨胀黏性土矿物(蒙脱石、高岭石和绿泥石等)、非膨胀性黏性土矿物(氧化铁),这些胶结矿物不仅有胶结作用,还起到了填充作用,减少了砒砂岩基体的空隙,使其结构更加密实,强度增加。砒砂岩的溃散机理是胶结矿物的胶结力小于膨胀黏土矿物产生的膨胀力,对膨胀黏土矿物达不到约束效果。

参考文献:

[1] 姚文艺,吴智仁,刘慧,等. 黄河流域砒砂岩区抗蚀促生技术试验研究[J]. 人民黄河,2015,37(1):6-10.  
YAO W Y, WU Z R, LIU H, et al. Experimental research



- on the anti-erosion and vegetation promotion for sandstone region in the Yellow River basin[J]. *Yellow River*, 2015, 37(1):6-10.
- [2] 宋瑞平. 水土保持基本理论及其在废黄河流域综合治理中的应用研究[D]. 南京:河海大学, 2005.  
SONG R P. Research on the basic theory and application in the comprehensive treatment of water and soil conservation in the Oldyellow River Basin[D]. Nanjing: Hohai University, 2005.
- [3] 胡春宏, 张晓明. 关于黄土高原水土流失治理格局调整的建议[J]. *中国水利*, 2019(23):5-7.  
HU C H, ZHANG X M. Suggestions on adjusting the pattern of soil and water loss control in the loess plateau[J]. *China Water Resources*, 2019(23):5-7.
- [4] 钱宁. 泥沙运动力学的发展与前瞻[J]. *力学进展*, 1979(4):1-13.  
QIAN N. Development and prospect of sediment movement mechanic[J]. *Advances in Mechanics*, 1979(4):1-13.
- [5] LI C M, ZHANG T T, WANG L J. Effect of dosage of fly ash and NaOH on properties of Pisha sandstone-based mortar[J]. *ACI Materials Journal*, 2016, 113(2):173-183.
- [6] QING Z, ZHENG J Y, HE H H, et al. Effects of Pisha sandstone content on solute transport in a sandy soil[J]. *Chemosphere*, 2016, 144:2214-2220.
- [7] 郑好, 刘行刚, 张升东. 黄河上中游水土流失防治技术要点[J]. *中国建设信息化*, 2021(6):71-73.  
ZHENG H, LIU H G, ZHANG S D. Key points of prevention and control techniques for soil and water loss in the upper and middle reaches of the Yellow River[J]. *Informatization of China Construction*, 2021(6):71-73.
- [8] 冉大川, 李占斌, 罗全华, 等. 黄河中游淤地坝工程可持续减沙途径分析[J]. *水土保持研究*, 2013, 20(3):1-5.  
RAN D C, LI Z B, LUO J H, et al. Analysis on sustainable sediment reduction approaches of warping dam project in the middle reaches of the Yellow River[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2013, 20(3):1-5.
- [9] 乔荣荣, 韩艳, 季树新, 等. 基于地形指数的砒砂岩黄土区土壤侵蚀分析[J]. *中国沙漠*, 2021, 41(5):175-182.  
QIAO R R, HAN Y, JI S X, et al. Analysis of soil erosion in loess area of sandstone based on terrain index[J]. *Journal of Desert Research*, 2021, 41(5):175-182.
- [10] 顾珍逵, 师长兴, 阳辉, 等. 内蒙古十大孔兑流域地貌演化格局及其成因机制[J]. *干旱区地理*, 2017, 40(6):1188-1197.  
GU Z K, SHI C X, YANG H, et al. Landform evolution pattern of the ten Kongdui basins and its genetic mechanisms in Inner Mongolia of China[J]. *Arid Land Geography*, 2017, 40(6):1188-1197.
- [11] 饶良懿, 徐也钦, 胡剑汝, 等. 砒砂岩覆土区小流域土壤可蚀性 K 值研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2020, 28(4):763-773.  
RAO L Y, XU Y Q, HU J R, et al. Study on soil erodibility factor K on soil cover area of Pisha sandstone region[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2020, 28(4):763-773.
- [12] 吴永红, 胡建忠, 闫晓玲, 等. 砒砂岩区沙棘林生态工程减洪减沙作用分析[J]. *中国水土保持科学*, 2011, 9(1):68-73.  
WU Y H, HU J Z, YAN X L, et al. Reduction effects of flood and sediment yield of hippophae rhamnoides linn forest in soft sandstone area[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2011, 9(1):68-73.
- [13] 刘卉芳, 曹文洪, 秦伟, 等. 淤地坝在流域水土保持措施中的贡献研究[J]. *中国农村水利水电*, 2011(1):55-58.  
LIU H F, CAO W H, QIN W, et al. The contribution of silt dam for soil and water conservation measures[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2011(1):55-58.
- [14] QIANG Z, SONG Z P, LI X L, et al. Deformation behaviors and meso-structure characteristics variation of the weathered soil of Pisha sandstone caused by freezing-thawing effect[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2019, 167(1):102864-102864.
- [15] LI C M, DONG J L, ZHAO S B, et al. Development of low cost supplementary cementitious materials utilizing thermally activated Pisha sandstone[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 174(20):484-495.
- [16] ZHANG P, WENYI Y, GUOBIN L, et al. Experimental study of sediment transport processes and size selectivity of eroded sediment on steep Pisha sandstone slopes[J]. *Geomorphology*, 2020, 363(15):1-9.
- [17] DONG J L, LI C M, LIU H, et al. Investigating the mechanical property and reaction mechanism of geopolymers cement with red Pisha Sandstone[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 201(20):641-650.
- [18] LIANG Z S, WU Z R, YAO W Y, et al. Pisha sandstone: Causes, processes and erosion options for its control and prospects[J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2019, 7(1):1-8.
- [19] CLAUSI M, JIMENEZ F, ANA M, et al. Reuse of waste sandstone sludge via alkali activation in matrices of fly ash and metakaolin[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 172(30):212-223.

- [20] 李长明,宋丽莎,姚文艺,等. 砒砂岩膨胀溃散及抑制机理研究[J]. 人民黄河,2018,40(6):96-99.  
LI C M, SONG L S, YAO W Y, et al. Study on swelling collapse and swelling inhibit mechanism of Yellow River pisha sandstone[J]. Yellow River, 2018, 40(6):96-99.
- [21] 姚文艺,李长明,张攀,等. 砒砂岩侵蚀机理研究与展望[J]. 人民黄河,2018,40(6):1-7.  
YAO W Y, LI C M, ZHANG P, et al. Prospect and research on the erosion mechanism of pisha sandstone[J]. Yellow River, 2018, 40(6):1-7.
- [22] 马文梅,马云飞,张兴昌. 砒砂岩区原状和扰动土壤水分入渗过程[J]. 水土保持学报,2018,32(2):128-133.  
MA W M, MA Y F, ZHANG X C. Water infiltration process in the undisturbed and disturbed soil in the Pisha sandstone area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(2):128-133.
- [23] 李长明,王立久,张婷婷,等. 用砒砂岩制备地聚物材料的研究[J]. 建筑材料学报,2016,19(2):373-378.  
LI C M, WANG L J, ZHANG T T, et al. Preparation of geopolymeric materials by Pisha sandstone[J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(2):373-378.
- [24] 叶浩,石建省,王贵玲,等. 砒砂岩化学成分特征对重力侵蚀的影响[J]. 水文地质工程地质,2006(6):5-8.  
YE H, SHI J S, WANG G L, et al. Effect of chemical compositions of Pisha sandstone on the gravity erosion[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2006(6):5-8.
- [25] 白杭改,明晓冉,刘立,等. 暖水乡砒砂岩地球化学分类类型与物源区特征[J]. 人民黄河,2017,39(9):79-85.  
BAI H G, MING X R, LIU L, et al. Geochemical classifications and provenance characteristics of Pisha sandstones in nuanshui town[J]. Yellow River, 2017, 39(9):79-85.
- [26] 葛磊,卢垚杰,曹婷婷. 黄棕色砒砂岩微结构特征及崩散微观特征研究[J]. 电子显微学报,2021,40(2):126-131.  
GE L, LU Y J, CAO T T. Study on microstructure characteristics and disintegration microscopic characteristics of yellow-brown soft rock[J]. Journal of Chinese Electron Microscopy Society, 2021, 40(2):126-131.
- [27] 李长明,张婷婷,王立久. 砒砂岩火山灰活性及碱激发改性[J]. 硅酸盐学报,2015,43(8):1090-1098.  
LI C M, ZHANG T T, WANG L J. Pozzolanic activity of Pisha sandstone and mechanical properties of alkali-activated Pisha sandstone materials[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2015, 43(8):1090-1098.
- [28] 宋土顺,刘立,王玉洁,等. 鄂尔多斯盆地漂白砒砂岩特征及成因[J]. 石油与天然气地质,2014,35(5):679-684.  
SONG T S, LIU L, WANG Y J, et al. Characteristics and genesis of the bleached Pisha sandstone in Ordos basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(5):679-684.
- [29] 石迎春,叶浩,侯宏冰,等. 内蒙古南部砒砂岩侵蚀内因分析[J]. 地球学报,2004(6):659-664.  
SHI Y C, YE H, HOU H B, et al. The internal cause of the erosion in Pisha sandstone area, southern Inner Mongolia [J]. Acta Geosciences Sinica, 2018, 40(6):1-7.
- [30] 刘永胜,詹学才,邱传传. 层状复合岩石三轴压缩力学性能研究[J]. 华东交通大学学报,2021,38(3):1-6.  
LIU Y S, ZHAN X C, QIU C C. Study on mechanical properties of layered composite rock under triaxial compression[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2021, 38(3):1-6.



第一作者:董晶亮(1988—),男,副教授,博士,硕士研究生导师,研究方向为砒砂岩溃散机理及新型土工材料研发、混凝土及其改性材料研究;2010年本科毕业于武汉科技大学,2012年硕士毕业于大连理工大学,2016年博士毕业于大连理工大学。E-mail:dongjingliang19881@163.com。

(责任编辑:刘棉玲)