

张磊,秦小光,刘嘉麒,等.淮南采煤沉陷区积水来源的氢氧稳定同位素证据.吉林大学学报:地球科学版,2015,45(5):1502-1514. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.201505205.

Zhang Lei, Qin Xiaoguang, Liu Jiaqi, et al. Characters of Hydrogen and Oxygen Stable Isotope of Different Water Bodies in Huainan Coal Mining Area. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2015, 45(5): 1502-1514. doi: 10.13278/j.cnki.jjuese.201505205.

## 淮南采煤沉陷区积水来源的氢氧稳定同位素证据

张磊<sup>1,2</sup>, 秦小光<sup>1</sup>, 刘嘉麒<sup>1</sup>, 穆燕<sup>1</sup>, 安士凯<sup>3</sup>, 陆春辉<sup>3</sup>, 陈永春<sup>3</sup>

1. 中国科学院地质与地球物理研究所新生代地质与环境重点实验室, 北京 100029

2. 中国科学院大学地球科学学院, 北京 100049

3. 煤炭开采国家工程技术研究院煤矿生态环境保护国家工程实验室, 安徽 淮南 232001

**摘要:** 淮南是我国东部重要的能源基地, 由于长期地下采煤, 地表形成大面积的采煤沉陷区并积水, 造成严重地质灾害。针对于此, 部分学者提出利用采煤沉陷区建立“平原水库”解决周边地区干旱年份农田缺水问题的设想。然而, 一方面, 由于煤层上覆几百米厚的新生代沉积, 采煤塌陷形成的沉陷裂隙是否沟通了不同含水层之间的水力联系, 并因此改变了这个地区的地下水系统, 成为区域水资源评价需要了解的一个重要科学问题; 另一方面, 建立“平原水库”需要有稳定的补给水源, 采煤形成的沉陷裂隙如果沟通了地下不同深度含水层的水力联系, 是否使地下水成为塌陷区除降雨外的重要补给来源, 这就成为评价“平原水库”水资源潜力的重要参考依据。氢氧稳定同位素是示踪天然水体水来源的重要手段, 笔者在淮南矿区采集了旱季和雨季的浅层地下水、河水、雨水、沉陷区的积水等不同水体的水样 23 件, 分析了其氢氧稳定同位素组成并与深层地下水进行对比。结果表明: 雨季和旱季, 该地区采煤沉陷区积水的氢氧稳定同位素组成都非常接近大气降水的氢氧稳定同位素组成, 而与深层地下水的氢氧稳定同位素组成相差较大, 说明采煤沉陷区的积水来源主要是大气降水补给。采煤沉陷区的沉陷裂隙贯穿了整个新生代地层, 使地表水发生下渗与在深部与深层地下水发生不同程度的混合, 而深层地下水尚不是“平原水库”的稳定补给源。

**关键词:** 淮北平原; 采煤沉陷区; 水源; 氢氧稳定同位素

doi: 10.13278/j.cnki.jjuese.201505205

中图分类号: P641.6

文献标志码: A

### Characters of Hydrogen and Oxygen Stable Isotope of Different Water Bodies in Huainan Coal Mining Area

Zhang Lei<sup>1,2</sup>, Qin Xiaoguang<sup>1</sup>, Liu Jiaqi<sup>1</sup>, Mu Yan<sup>1</sup>, An Shikai<sup>3</sup>, Lu Chunhui<sup>3</sup>, Chen Yongchun<sup>3</sup>

1. Key Laboratory of Cenozoic Geology and Environment, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2. College of Earth Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. National Engineering Laboratory for Protection of Coal Mine Eco-Environment, Coal Mining National Engineering Technology Research Institute, Huainan 232001, Anhui, China

**Abstract:** Huainan is an important energy base in Eastern China with a large coal mining subsidence

收稿日期: 2014-12-07

基金项目: 中国工程院重大咨询项目(2012-ZD-11-1-1); 国家自然科学基金项目(41172158, 40472094, 40024202); 国家“973”计划项目(2010CB950200); 中国科学院知识创新项目(KZCX2-YW-Q1-03); 中国科学院重点战略研究项目(XDA05120502)

作者简介: 张磊(1986—), 男, 博士研究生, 主要从事第四纪地质与环境研究, E-mail: zhanglei1921@163.com。

area due to the underground mining. Groundwater aquifers may be broken by the subsidence cracks to become a critical source of subsidence area water. It means that the water cycle system may be damaged due to coal mining. To resolve this geological hazards, establishing “plain reservoir” was suggested by using coal mining subsidence areas. The “plain reservoir” may also solve water shortage during drought year. However, how to evaluate the potential water sources of the “plain reservoirs” is still an issue; and a stable water supply is another question as it is essential for “plain reservoirs”. In order to find out whether the subsidence cracks have broken the groundwater system and whether groundwater is a stable source of the subsidence area water, we analyzed the water sources of subsidence areas. We collected 23 water samples from wells, rivers, rainfalls, wetlands and subsidence areas in Huainan mining area in dry and rainy seasons, and compared with the deep groundwater. The composition of hydrogen and oxygen stable isotope is used to trace the source of water. The results show that the atmospheric precipitation is the main water source of subsidence areas. Deep groundwater is not a stable water source to “plain reservoirs”; although groundwater systems are broken by subsidence cracks at present, and surface water filters down and mixes with the deep groundwater.

**Key words:** Huaibei plain; coal mining subsidence area; source of water; hydrogen and oxygen stable isotope

## 0 引言

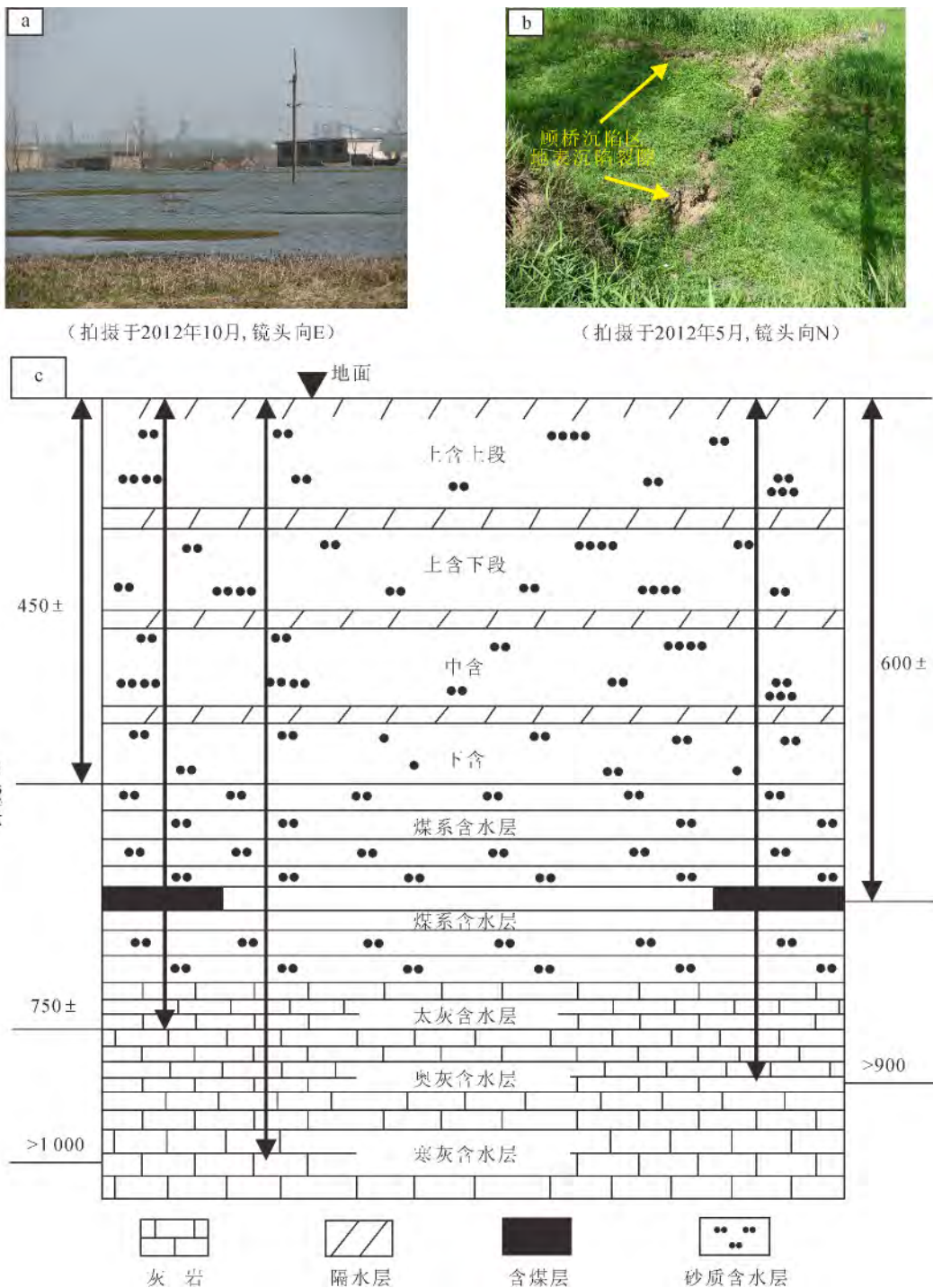
淮河流域是我国东部重要的能源基地,其煤炭资源主要分布在淮南、淮北、豫东、豫西、鲁南、徐州等矿区,已探明储量达 700 多亿 t<sup>[1-2]</sup>。经过 50 多年的开采,井工开采采用全部冒落法,导致地表变形沉陷,形成众多近似椭圆形的下沉盆地,使得地表水系遭到破坏,引发地质环境发生巨大变化,大片农田积水无法耕种(图 1a、b),对当地农业生产及居民居住均带来不利影响。随着开采的不断持续,沉陷面积及沉陷深度不断增大。预计淮南矿区到 2025 年累计采煤沉陷面积 439 km<sup>2</sup>,积水区域面积约 252.97 km<sup>2</sup>,积水区域最大积水深度 16 m,平均积水深度可达 8 m<sup>[3-7]</sup>。

为治理沉陷区,当地设想利用这些沉陷区建立“平原水库”,这样不仅能提高当地防洪能力,而且能解决周边地区干旱年份农田缺水问题,还能蓄水养鱼、发展经济、变废为宝。要建“平原水库”,其水资源潜力评价就成为重要问题。在采煤沉陷区地表现观察到存在大量的沉陷裂隙,图 1b 中的沉陷裂隙位于顾桥煤矿采煤沉陷区的边缘,沉陷裂隙地面断距约 0.5 m。由于煤层位于新生代地层之下,采煤造成地面沉陷形成的大量沉陷裂隙贯通了整个新生代地层,而新生代地层中发育有多个含水层<sup>[8-11]</sup>(图 1c),这些沉陷裂隙可能会沟通地下水与地表水的联系,从而对地下水和地表水的水资源评价产生影响,影

响“平原水库”的水资源潜力评价。

另外,要建“平原水库”需要有稳定的补给水源,大气降水虽然是沉陷区积水的直接补给,但干旱年份降雨匮乏,补给不足。近年来观测发现,淮河流域大旱年份时,洪泽湖水位下降近于干涸,但采煤沉陷区内积水未见显著减少。因此有人猜测沉陷裂隙可能沟通了地下含水层,并对沉陷区积水进行了水源补给,但是沉陷裂隙是否确实能够为“平原水库”提供稳定的地下水水源补给,还需进一步的确凿证据来证实。

环境同位素示踪被广泛应用于水循环研究<sup>[12-20]</sup>。水的氢、氧稳定同位素是示踪水循环的理想环境示踪剂,在水循环中主要受各种物理条件如雨水凝结、蒸发等的变化以及混合作用影响引起同位素分馏<sup>[12, 21-23]</sup>。刘俊杰等<sup>[24]</sup>、葛涛等<sup>[25]</sup>曾利用氢氧稳定同位素对一些煤矿的深层地下水来源进行过研究,但有关煤矿深层地下水与浅层地下水及不同季节地表水的综合对比研究鲜有报导。笔者通过对比分析淮南不同采煤沉陷区、不同季节、不同水体的氢氧稳定同位素组成,分析采煤沉陷区积水的主要来源,以便判别沉陷裂隙是否是地下含水层补给沉陷区积水的透水通道、地下水是否是“平原水库”的稳定补给源等问题,以期今后采煤沉陷区的治理与“平原水库”水资源潜力评价及其建设提供参考依据。



a. 顾桥煤矿采煤沉陷区(32° 50. 803'N, 116° 33. 383'E); b. 顾桥煤矿采煤沉陷区地表沉陷裂隙(32° 50. 967'N, 116° 33. 870'E); c. 淮南矿区含水层分布示意图, 据文献[11]修改。上含上段. 第四纪地层内含水层的上段; 上含下段. 第四纪地层内含水层的下段; 中含. 第三纪地层中上部含水层; 下含. 第三纪地层中下部含水层; 煤系含水层. 二叠纪煤系砂岩裂隙含水层; 太灰含水层. 石炭纪太原组灰岩裂隙含水层; 奥灰含水层. 奥陶纪灰岩裂隙岩溶含水层; 寒灰含水层. 寒武纪灰岩裂隙岩溶含水层。

图 1 淮南矿区地表沉陷区、沉陷裂隙及水文地质剖面示意图

Fig. 1 Huainan mining subsidence cracks and the hydrogeologic profiles in the stratigraphic

### 1 研究区概况

淮南位于淮河中游,地处中国南北气候变化的过渡带,地势西北高东南低,坡度较缓,属亚热带与暖温带过渡的湿润—半湿润气候。降水量由南向北逐渐递减,多年平均降水量 600~700 mm,年平均蒸发量 1 181.3 mm,多年平均气温 14~15 °C<sup>[26-28]</sup>。流域降水年际变化大,年内分配不均,汛期(5—9 月)降水约占年总量的 60%以上<sup>[26, 29-33]</sup>。地下水埋藏较浅,水资源丰富。

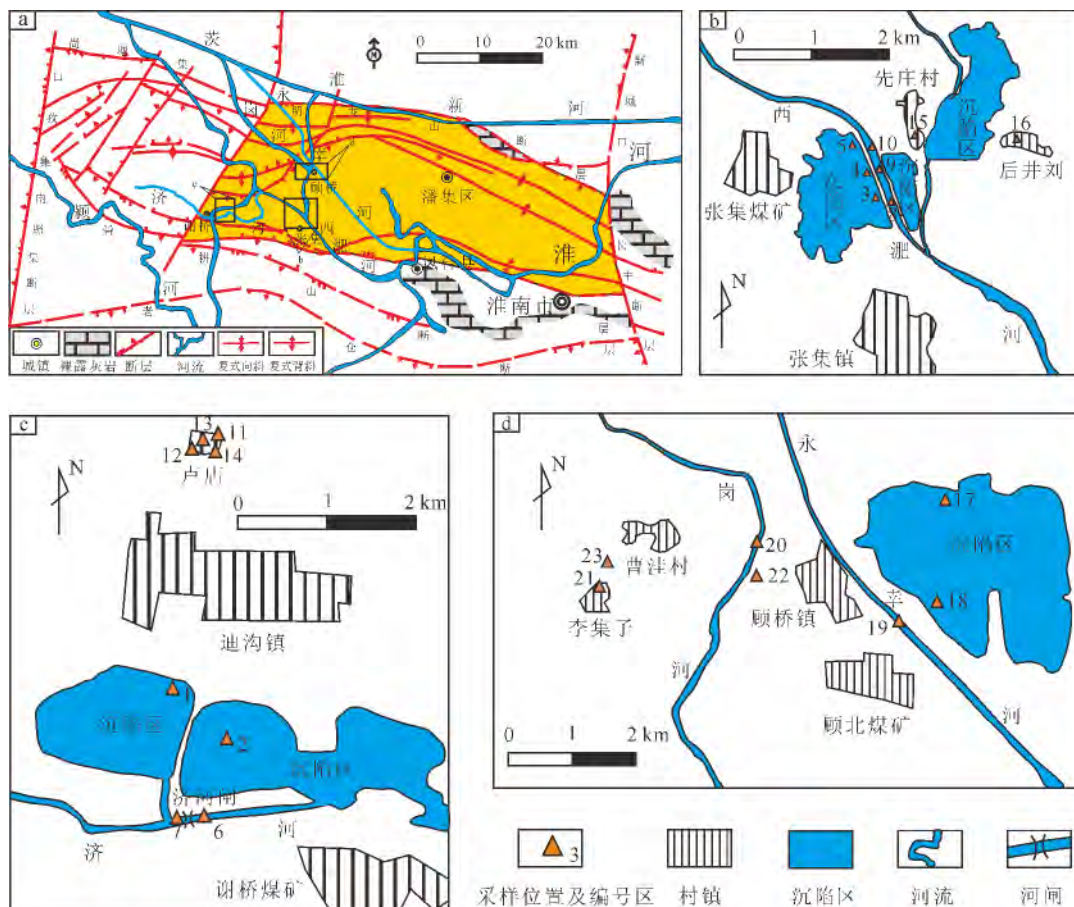
采样地区位于安徽省淮南市凤台县,该地区地形平坦,西淝河与岗河沿岸一带地势低洼,雨季易成内涝。另外由于地下采煤的原因,多处形成大面积的采煤沉陷区<sup>[34]</sup>,地面标高一般为 21~24 m。永幸河自西北至东南方向流经该地区,西淝河在鲁台孜入淮河,是地表水集中排放的主渠道,历年最高水

位 24.82 m<sup>[7, 26, 35]</sup>(图 2),此外还有纵横交错的人工沟渠。

#### 1.1 地质及水文地质背景

淮南矿区位于秦岭纬向构造带南亚带的北缘,东与华夏构造郟城庐江断裂斜接,西连周口凹陷,北接蚌埠隆起,南邻合肥凹陷。淮南煤田为近东西展布的复向斜构造,受秦岭纬向构造带南北压应力的挤压作用,促使淮南复向斜主体构造行迹呈近东西向展布,并在复向斜南北翼发育了一系列走向压扭性逆冲断层,造成复向斜两翼的叠瓦式构造<sup>[4, 36-38]</sup>。

淮南矿区在构造上属于淮南复向斜的一部分,在矿井水文地质区划上位于南方区与北方区的交界地带,属于淮北平原水文地质区(据 1:50 万安徽省水文地质图)<sup>[39]</sup>。研究区水文地质条件受区域地质、构造和新构造运动的控制,被北部的龙山断层、南部的舜耕山断层和东部的长丰断层等切割构成一



a. 淮南矿区构造简图; b. 张集采样点位置分布图; c. 谢桥采样点位置分布图; d. 顾桥采样点位置分布图。

图 2 淮南矿区构造简图及采样点位置分布图

Fig. 2 Structural framework of Huainan coal mining area and the distribution of sampling sites in the study area

个相对封闭的水文地质单元(图 2)。

矿区各个矿井地层发育相近,主要含水层由上而下分别为:新生代含水层、二叠纪煤系砂岩裂隙含水层(以下简称“煤系”)、石炭纪太原组灰岩裂隙含水层(以下简称“太灰”)、奥陶纪灰岩裂隙岩溶含水层(以下简称“奥灰”)、寒武纪灰岩裂隙岩溶含水层(以下简称“寒灰”)[25, 40]。其中,上含上段与上含下段之间、上含下段与中含之间、中含与下含之间,分别有稳定的黏土隔水层[41-43](图 1c)。

上含上段底板埋深为 20~44 m,平均厚度约 27 m;上含下段底板埋深为 95~112 m,平均厚度约 8 m;中含底板埋深为 96~420 m,平均厚度约 220 m;下含底板埋深为 445~465 m,平均厚度约 30 m。煤系含水层埋深约 600 m;太灰含水层埋深约 750 m;奥灰含水层埋深大于 900 m;寒灰含水层埋深大于 1 000 m(图 1c)[37, 39]。

## 1.2 各含水层之间的水力联系

不同含水层地下水补给来源不同。在正常的自然状态下,上含上段以大气降水和地表水补给为主,地下水位随季节变化,与上含下段无直接水力联系。中含与下含之间因厚度大且相对稳定的中隔而不发生水力联系。下含局部地段可能与基岩直接接触,水力联系较弱。煤系含水层之间因有泥质岩类相隔,自然的自然状态下无密切水力联系。太灰含水层的灰岩水头压力大大超过煤系底部岩层允许承受的最大水压值,因此太灰含水层可能是煤系底部直接充水含水层。奥灰含水层可能由于断层或其他因素导致其直接与太灰含水层发生水力联系[25, 44-46]。

## 2 水样的采集与测试

### 2.1 水样的采集

笔者共进行了 2 次野外水样的采集,采样位置见图 2。第 1 次于 2012 年 5 月(雨季,图 2d)在安徽省淮南市凤台县采集了雨季水样,共采集了 2 个河水样、2 个沉陷区水样、1 个浅层地下水样(采自压水井)、1 个湿地水样、1 个雨水样;第 2 次采集旱季水样,于 2012 年 12 月(旱季,图 2b、2c)采集了 5 个河水样、5 个沉陷区水样、6 个浅层地下水样(采自压水井),压水井都是埋藏小于 10 m 的民用生活水井。所有样品采集时,样品瓶都预先用原水反复冲洗多次,样品采集完成后立即与大气隔绝密封。

### 2.2 水样的测试

雨季水样的氢氧稳定同位素分析在中国科学院

地质与地球物理研究所稳定同位素地球化学实验室进行,采用 MAT-252 质谱仪测定  $\delta D$  和  $\delta^{18}O$ 。氢同位素测定采用锌反应法,氧同位素测定采用氧-二氧化碳平衡法[47], $\delta D$  的平均精度为  $\pm 0.5\%$ , $\delta^{18}O$  的平均精度为  $\pm 0.1\%$ , $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  值都以相对于 V-SMOW 的千分差表示:

$$\delta D = \left[ \frac{(D/H)_{\text{样品}}}{(D/H)_{V-SMOW}} - 1 \right] \times 1000\text{‰};$$

$$\delta^{18}O = \left[ \frac{(^{18}O/^{16}O)_{\text{样品}}}{(^{18}O/^{16}O)_{V-SMOW}} - 1 \right] \times 1000\text{‰}。$$

旱季水样的氢氧稳定同位素采用液态水同位素分析仪 IWA-45EP (Los Gatos Research, USA) 测定。 $\delta D$  和  $\delta^{18}O$  的平均精度分别为  $\pm 0.3\%$  和  $\pm 0.1\%$ 。 $\delta^{18}O$  和  $\delta D$  值都以相对于 V-SMOW 的千分差表示。测量结果详见表 1。

## 3 结果分析及讨论

### 3.1 区域大气降水氢氧稳定同位素特征

1961 年 Craig[48] 在研究北美大陆大气降水的过程中发现降水的氢、氧同位素组成呈线性关系,并最先提出了全球大气降水线方程: $\delta D = 8\delta^{18}O + 10$ 。郑淑慧等[49] 通过中国 8 个台站的 107 个降水氢氧稳定同位素数据得出中国的大气降水线方程为: $\delta D = 7.9\delta^{18}O + 8.2$ 。

由于淮北平原没有大气降水的同位素监测站,本文选用离该地区最近的南京站的大气降水同位素监测数据绘制大气降水线作为背景参考[50]。经计算,该区大气降水  $\delta^{18}O$  和  $\delta D$  平均值分别为  $-7.35\%$  和  $-45.08\%$  (数据从 IAEA 的网站 <http://isohis.iaea.org> 下载)。

### 3.2 雨季不同水体氢氧稳定同位素特征

雨季地表水  $\delta D$  的范围为  $-49.06\%$  ~  $-18.53\%$ ,平均值为  $-29.42\%$ , $\delta^{18}O$  的范围为  $-6.59\%$  ~  $-2.04\%$ ,平均值为  $-3.71\%$ 。从图 3 中雨季不同水体(红色符号)同位素样品测试结果看,该区雨季不同类型水体  $\delta^{18}O$ 、 $\delta D$  全部分布于区域大气降水线的右侧。对雨季不同水体的  $\delta D$ - $\delta^{18}O$  数据采用最小二乘法拟合直线,得到直线方程为  $\delta D = 6.46\delta^{18}O - 5.45$ ,该直线截距小于 10 且斜率小于区域大气降水线的斜率,反映该区雨季地表水受蒸发作用影响。

从图 3 可以看出,雨季地表水的氢氧稳定同位素(包括沉陷区积水、雨水、湿地水)集中分布且氢氧

表 1 淮南矿区旱季和雨季不同水体氢氧稳定同位素数据表  
Table 1 Hydrogen and oxygen isotopic composition of different water bodies in Huainan coal mining area

含水层	季节	序号	样品名称	采样地点	经度	纬度	$\delta D / \%$ 标准差	$\delta^{18}O / \%$ 标准差	$\delta^{18}O$ 标准差	水样类型	埋深/ m	
地表水	旱季	1	谢桥矿采煤沉陷区水样 1 号	谢桥采煤沉陷区	116°21.818'	32°47.982'	-4.89	0.05	-5.87	沉陷区积水	-	
		2	谢桥矿采煤沉陷区水样 2 号	谢桥采煤沉陷区	116°21.942'	32°47.322'	-32.80	0.39	-3.93	0.1	沉陷区积水	-
		3	张集矿采煤沉陷区水样 1 号	张集采煤沉陷区	116°30.927'	32°46.657'	-30.46	0.14	-3.11	0.05	沉陷区积水	-
		4	张集矿采煤沉陷区水样 2 号	张集采煤沉陷区	116°30.842'	32°46.834'	-30.56	0.26	-3.35	0.02	沉陷区积水	-
		5	张集矿采煤沉陷区水样 3 号	张集采煤沉陷区	116°30.737'	32°47.028'	-23.66	0.04	-2.30	0.02	沉陷区积水	-
	6	济河水样 1 号	济河	116°21.738'	32°47.140'	-42.01	0.1	-5.28	0.02	河水	-	
	7	济河水样 2 号	济河	116°21.737'	32°47.143'	-32.72	0.11	-3.72	0.05	河水	-	
	8	西淝河水样 1 号	西淝河	116°30.921'	32°46.654'	-46.99	0.14	-6.15	0.02	河水	-	
	9	西淝河水样 2 号	西淝河	116°30.843'	32°46.915'	-47.18	0.1	-6.11	0.02	河水	-	
	10	西淝河水样 3 号	西淝河	116°30.841'	32°47.018'	-47.42	0.2	-6.12	0.05	河水	-	
	雨季	11	顾桥矿采煤沉陷区水样 1	顾桥采煤沉陷区	116°33.448'	32°50.692'	-22.48	0.22	-2.54	0.04	沉陷区积水	-
		12	顾桥矿采煤沉陷区水样 2	顾桥采煤沉陷区	116°33.284'	32°49.848'	-20.74	0.22	-2.04	0.04	沉陷区积水	-
		13	永幸河水样	永幸河	116°33.141'	32°49.553'	-38.36	0.21	-5.35	0.04	河水	-
		14	岗河水样	岗河	116°31.613'	32°50.368'	-37.89	0.17	-4.96	0.03	河水	-
		15	岗河堤外湿地水	岗河边湿地	116°31.739'	32°50.092'	-18.53	0.1	-2.09	0.03	湿地水	-
浅层地下水	16	雨水	雨水	116°30.164'	32°50.128'	-18.90	0.18	-2.42	0.06	雨水	-	
	17 <sup>[25]</sup>	S2	泥河	-	-	-43.70	-	-6.10	-	河水	-	
	18 <sup>[25]</sup>	S3	淮河	-	-	-42.91	-	-5.90	-	河水	-	
	19	谢桥矿采煤沉陷区井水样 1 号	谢桥	116°21.776'	32°49.593'	-57.04	0.15	-8.02	0.04	压水井(旱季)	9	
	20	谢桥矿采煤沉陷区井水样 2 号	谢桥	116°21.735'	32°49.588'	-57.07	0.16	-8.12	0.03	压水井(旱季)	9	
	21	谢桥矿采煤沉陷区井水样 3 号	谢桥	116°21.756'	32°49.590'	-56.80	0.06	-7.96	0.07	压水井(旱季)	9	
	22	谢桥矿采煤沉陷区井水样 4 号	谢桥	116°21.765'	32°49.584'	-56.99	0.14	-7.85	0.05	压水井(旱季)	9	
	23	张集井水 1 号	张集	116°31.279'	32°47.108'	-47.42	0.25	-6.50	0.01	压水井(旱季)	7	
24	张集井水 2 号	张集	116°31.886'	32°47.127'	-47.21	0.14	-6.55	0.05	压水井(旱季)	7		
25	李集子井水	顾桥	116°30.175'	32°50.050'	-49.06	0.16	-6.59	0.04	压水井(雨季)	7		
26 <sup>[20]</sup>	GW1-1	蚌埠五道沟水文站	-	-	-59.90	-	-8.30	-	含水(上含水段水)	50		
27 <sup>[30]</sup>	GW1-2	蚌埠五道沟水文站	-	-	-58.20	-	-8.30	-	含水(上含水段水)	50		

表 1 (续)

含水层	季节	序号	样品名称	采样地点	经度	纬度	$\delta D$ / %	$\delta^{18}O$ / %	$\delta^{18}O$ 标准差	水样类型	埋深/ m
		28 <sup>[30]</sup>	GW1-3	蚌埠五道沟水文站	-	-	-56.94	-8.50	-	一含水(上含上段水)	50
		29 <sup>[30]</sup>	GW3-1	蚌埠五道沟水文站	-	-	-56.32	-7.94	-	一含水(上含上段水)	20
		30 <sup>[30]</sup>	GW3-2	蚌埠五道沟水文站	-	-	-57.18	-8.10	-	一含水(上含上段水)	20
		31 <sup>[30]</sup>	GW6-1	蚌埠五道沟水文站	-	-	-56.16	-8.00	-	三含水(中含水)	100
		32 <sup>[9]</sup>	H1	淮北临涣矿	-	-	-54.20	-7.29	-	一含水(上含上段水)	24.8~36.4
		33 <sup>[9]</sup>	H2	淮北海孜矿	-	-	-51.60	-7.20	-	一含水(上含上段水)	24.8~36.4
		34 <sup>[9]</sup>	H3	淮北董亭矿	-	-	-52.40	-7.50	-	一含水(上含上段水)	24.8~36.4
		35 <sup>[9]</sup>	H4	淮北董亭矿	-	-	-68.80	-7.08	-	四含水(下含水)	250~457
		36 <sup>[9]</sup>	H5	淮北董亭矿	-	-	-65.60	-7.98	-	四含水(下含水)	250~457
		37 <sup>[9]</sup>	H6	淮北朱庄矿	-	-	-66.70	-9.48	-	四含水(下含水)	250~457
		38 <sup>[25]</sup>	T5	淮北临涣矿	-	-	-69.73	-9.89	-	太灰含水层	-
		39 <sup>[25]</sup>	T6	张集	-	-	-81.37	-9.74	-	-	-
		40 <sup>[25]</sup>	T7	张集	-	-	-70.40	-10.00	-	-	-
		41 <sup>[25]</sup>	T9	谢桥	-	-	-36.89	-5.73	-	-	-
		42 <sup>[25]</sup>	T10	谢桥	-	-	-48.84	-5.84	-	-	-
		43 <sup>[25]</sup>	T13	颍北	-	-	-59.85	-6.67	-	-	-
		44 <sup>[25]</sup>	T14	颍北	-	-	-50.17	-6.71	-	-	-
		45 <sup>[25]</sup>	T15	颍北	-	-	-54.42	-6.08	-	-	-
		46 <sup>[25]</sup>	T18	谢桥	-	-	-71.36	-9.04	-	-	-
		47 <sup>[25]</sup>	T19	谢桥	-	-	-75.06	-9.61	-	奥灰含水层	-
		48 <sup>[25]</sup>	A22	颍北	-	-	-51.33	-5.12	-	-	-
		49 <sup>[25]</sup>	A23	颍北	-	-	-31.15	-4.11	-	-	-
		50 <sup>[25]</sup>	A24	颍北	-	-	-40.62	-4.31	-	-	-
		51 <sup>[25]</sup>	A25	谢桥	-	-	-67.89	-9.43	-	-	-
		52 <sup>[25]</sup>	A26	颍北	-	-	-71.62	-9.48	-	-	-
		53 <sup>[25]</sup>	A27	张集	-	-	-69.67	-9.46	-	-	-
		54 <sup>[25]</sup>	A28	张集	-	-	-79.91	-8.40	-	-	-
		55 <sup>[25]</sup>	A29	张集	-	-	-63.61	-8.44	-	-	-
		56 <sup>[25]</sup>	H34	谢桥	-	-	-87.65	-9.62	-	寒灰含水层	-

深层地下水

重同位素相对富集,说明湿地水以及雨季沉陷区的积水的水源补给可能主要来自大气降水。河水与压水井的样品分布相对接近,相对于地表水氢氧重同位素亏损。

测由于采煤产生的沉陷裂隙,导致局部地区地表水和浅层地下水沿着沉陷裂隙渗透到深层地下水,与太灰水和奥灰水发生不同程度的混合,产生这种氢氧同位素分布特征。总体上,含水层越深,氢氧稳定同位素值越低。

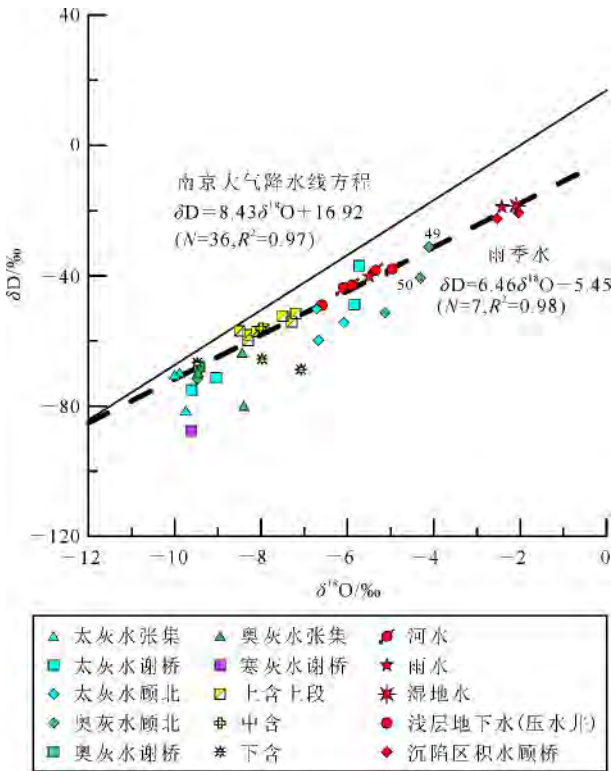


图 3 淮南矿区雨季不同水体  $\delta D-\delta^{18}O$  关系图

Fig. 3 Correlation between  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  of different water bodies in the rainy season in Huainan coal mining area

浅层地下水氢氧稳定同位素(包括上含上段、中含、以及下含)数据来自同一沉积盆地北部、与淮南矿区分别相距 60 和 130 km 的蚌埠和淮北地区。由于淮北平原水文地质条件相近<sup>[8, 9, 25, 51]</sup>,可以反映淮北平原浅层地下水相对于地表水和深层地下水的相对关系,即浅层地下水集中分布,氢氧重同位素相对地表水亏损,相对于深层地下水富集,并且浅层地下水与地表水和深层地下水之间有稳定的黏土质隔水层<sup>[52]</sup>,说明正常自然状态下浅层地下水与其他含水层之间没有密切的水力联系。

太灰水与奥灰水的水样点分布范围较广,部分水样点与河水、压水井的水比较接近,表明了深部地下水水文地质条件较为复杂<sup>[25]</sup>;与寒灰水相比,推

奥灰水中有 2 个水样点(序号分别为 49、50)的氢氧稳定同位素值比浅层地下水和河水的值略偏高,比沉陷区积水偏低(图 3)。这说明雨季沉陷区的水可能与深层地下水存在水力联系,但由于深层地下水分布范围较广,有部分与河水、浅层地下水的氢氧稳定同位素值相近,与沉陷区积水相离较远;而沉陷区积水的氢氧稳定同位素值集中分布,说明沉陷区没有受到其他含水层水的混合,这种水力联系可能是地表水通过沉陷裂隙下渗沟通的,不可能是深层地下水通过沉陷裂隙上涌补给地表沉陷区。

### 3.3 旱季不同水体氢氧稳定同位素特征

由图 4 可见,旱季地表水  $\delta D$  的范围为

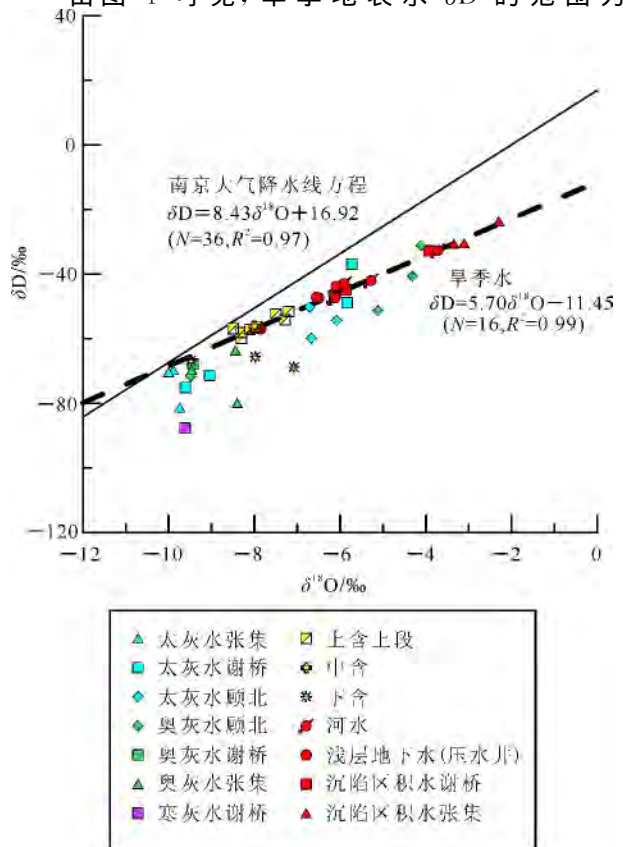


图 4 淮南矿区旱季不同含水层  $\delta D-\delta^{18}O$  关系图

Fig. 4 Correlation between  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  of different aquifers in the dry season in Huainan coal mining area



-47.42‰~-23.66‰,平均值为-43.83‰;δ<sup>18</sup>O 的范围为-6.15‰~-2.30‰,平均值为-5.68‰。该区旱季不同水体 δ<sup>18</sup>O、δD 全部分布于区域大气降水线的右侧,δD-δ<sup>18</sup>O 关系线斜率小于区域大气降水线斜率,反映该区旱季不同水体可能受蒸发作用影响较大。

从图 4 中旱季不同地表水(红色符号)同位素样品测试结果可以看出:总体上,旱季沉陷区积水的 δ<sup>18</sup>O 和 δD 值相对最高;压水井的水的 δ<sup>18</sup>O 和 δD 值相对最低;河水的 δ<sup>18</sup>O 和 δD 值介于压水井的水和沉陷区积水之间。

与其他浅层地下水相比,部分旱季压水井水样点的分布与上含上段分布在同一区域。这是由于旱季压水井受到雨水的补给较少,滞留时间相对长一些,受季节效应的影响,压水井的氢氧重同位素亏损较大形成的。

与深层地下水相比,旱季沉陷区积水与河水分布相对集中,说明地表水没有受到深层地下水的混合,可以得到与雨季相同的结论。

### 3.4 旱季和雨季同类水体氢氧稳定同位素特征

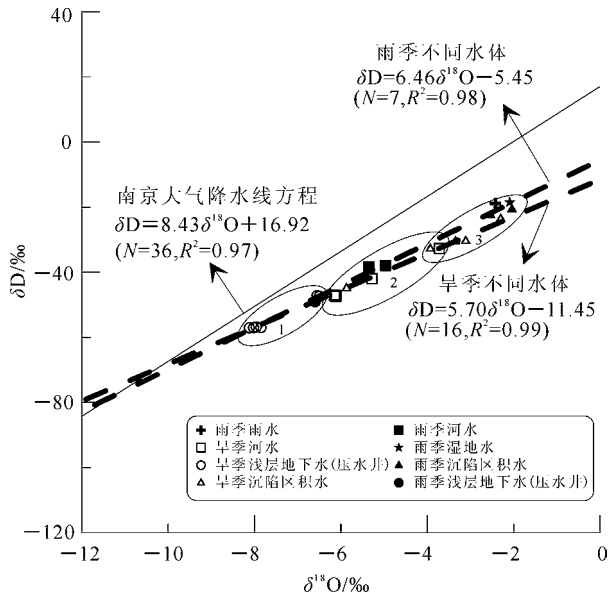
旱季和雨季河水、沉陷区积水以及压水井的水的氢氧稳定同位素分布范围见表 2。旱季河水、沉陷区积水和压水井的水的 δD 和 δ<sup>18</sup>O 值分别比雨季河水、沉陷区积水和压水井的水的 δD 和 δ<sup>18</sup>O 值都普遍偏低,也就是同类水体旱季的 δD 和 δ<sup>18</sup>O 值比雨季的偏低,这可能是由于旱季该地区正好是冬季,温度较低,雨季该地区为夏季,温度较高,温度较高的雨季大气降水普遍偏重,富集 D 和 <sup>18</sup>O,旱季反之。这与大气降水的季节效应<sup>[53]</sup>一致。

表 2 不同季节同类水体的氢氧稳定同位素分布范围  
Table 2 δD and δ<sup>18</sup>O value range of same water body in dry and rainy season in Huainan coal mining area

水体类型	季节	δD/‰			δ <sup>18</sup> O/‰		
		最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
河水	旱季	-32.72	-47.42	-43.26	-3.72	-6.15	-5.48
	雨季	-37.89	-38.36	-38.12	-4.96	-5.35	-5.16
沉陷区积水	旱季	-23.66	-44.89	-32.47	-2.30	-5.87	-3.71
	雨季	-20.74	-22.48	-21.61	-2.04	-2.54	-2.29
压水井的水	旱季	-47.21	-57.07	-53.76	-6.50	-8.12	-7.50
	雨季	-49.06	-6.59				

旱季不同水体的 δD-δ<sup>18</sup>O 关系线斜率为 5.70,雨季的为 6.46,旱季略小于雨季(图 5),则旱季蒸发作用比雨季略强,说明淮河流域季节效应存在,但不

强烈。



1. 主要为压水井的水;2. 主要为河水;3. 主要为沉陷区积水与大气降水。

图 5 淮南矿区旱季、雨季同类水体 δD-δ<sup>18</sup>O 关系对比图  
Fig. 5 Correlation between δD and δ<sup>18</sup>O of same water body between dry season and rainy season

### 3.5 采煤沉陷区积水来源综合分析

通过旱季和雨季的不同水体氢氧稳定同位素值可以看出:不管旱季还是雨季,沉陷区积水的 δ<sup>18</sup>O 和 δD 值都相对最高,集中分布;而且最接近雨水的 δ<sup>18</sup>O 和 δD 值,比同季节的压水井的水和河水的值偏高;与深层地下水相距较远,说明无论旱季还是雨季沉陷区积水的补给主要都是来源于大气降水。另外,深层地下水分布较广,有部分水样点与旱季和雨季的河水以及压水井的水都非常接近,因此推测沉陷裂隙目前可能已经沟通地表水和地下水,但主要是以地表水下渗的方式发生水力联系,深层地下水还不是沉陷区积水的主要补给源。

## 4 结论

通过研究淮南矿区沉陷区积水及其他水体的氢氧稳定同位素组成,并与深层地下水的氢氧稳定同位素组成进行对比,结合水文地质条件分析,主要得到以下结论:

1)无论雨季还是旱季,该地区采煤沉陷区积水的氢氧同位素组成都接近大气降水的氢氧同位素组

成,而与浅层地下水(井水)和河水的氢氧同位素组成相差较大,说明采煤沉陷区的积水主要来源是大气降水补给;地下水补给不明显,说明采煤沉陷区的沉陷裂隙虽然贯穿了整个新生代地层,但目前还没有形成沟通地下含水层和地表沉陷区的透水通道,不是沉陷区的主要补给水源,无法对“平原水库”形成稳定补给。在该地区利用沉陷区建设“平原水库”时还需谨慎。

2)雨季和旱季的不同水体氢氧同位素值相对于区域大气降水线右偏,说明不同水体都受蒸发作用影响。

3)同类水体,旱季的 $\delta D$ 和 $\delta^{18}O$ 值比雨季的普遍偏低,符合大气降水的季节效应。

淮南矿业集团煤炭工程技术研究院的程功林、李守勤、徐翀、陈永春、琚旭光等在资料收集、野外采样过程中给予了支持与帮助,谨致谢忱!

#### 参考文献(References):

- [1] 袁亮,张炳光,张茂出,等. 淮南煤矿地质工作的回顾与展望[J]. 中国煤炭,2000,26(1):17-19.  
Yuan Liang, Zhang Bingguang, Zhang Maochu, et al. Retrospect and Prospect of Geological Work in Huainan Coal Mine[J]. China Coal, 2000, 26(1): 17-19.
- [2] 孔德明. 淮南矿区薄煤层开采的思考[J]. 淮南职业技术学院学报,2006,6(3):41-43.  
Kong Deming. Thinking of Thin Seams Mining in Huainan Coal Mine Area [J]. Journal of Huainan Vocational & Technical College, 2006, 6(3): 41-43.
- [3] 徐良骥,严家平,高永梅. 煤矿塌陷水域水环境现状分析及综合利用:以淮南矿区潘一煤矿塌陷水域为例[J]. 煤炭学报,2009,34(7):933-937.  
Xu Liangji, Yan Jiaping, Gao Yongmei. Current Water Environmental Status Analysis of Subsided Water Areas and Its Comprehensive Utilization: A Case of Subsided Water Area in Panyi Coal Mine[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(7): 933-937.
- [4] 李月林,查良松. 淮南煤矿塌陷区生态恢复研究[J]. 资源开发与市场,2008,24(10):899-901.  
Li Yuelin, Zha Liangsong. Study on Eco-restoration of Mining-induced Subsidence Land in Huainan Coal-mine Area[J]. Resource Development & Market, 2008, 24(10): 899-901.
- [5] 王晓波,曹贵昌. 淮南矿区采煤沉陷特征与治理对策[J]. 淮南职业技术学院学报,2006,3(6):13-14.  
Wang Xiaobo, Cao Guichang. The Characteristics and Countermeasures of Huainan Coal Mining Subsidence Area[J]. Journal of Huainan Vocational & Technical College, 2006, 3(6): 13-14.
- [6] 严家平,赵志根,许光泉,等. 淮南煤矿开采塌陷区土地综合利用[J]. 煤炭科学技术,2004,32(10):56-58.  
Yan Jiaping, Zhao Zhigen, Xu Guangquan, et al. Comprehensive Reclaimed Land Resources from Mining Subsidence Area of Huainan Mining Area[J]. Coal Science and Technology, 2004, 32(10): 56-58.
- [7] 徐良骥,严家平. 煤矿塌陷区地表水系统综合治理[J]. 煤炭学报,2007,32(5):469-472.  
Xu Liangji, Yan Jiaping. Comprehensive Treatment of the Surface Water System in Subsidence Area of Coal Mine[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(5): 469-472.
- [8] 桂和荣,陈陆望,宋晓梅. 皖北矿区地下水中氢氧稳定同位素的漂移特征[J]. 哈尔滨工业大学学报,2005,37(1):111-114.  
Gui Herong, Chen Luwang, Song Xiaomei. Drift Features of Oxygen and Hydrogen Stable Isotope in Deep Groundwater in Mining Area of Northern Anhui [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2005, 37(1): 111-114.
- [9] 陈陆望,桂和荣,许光泉,等. 皖北矿区煤层底板岩溶水氢氧稳定同位素特征[J]. 合肥工业大学学报:自然科学版,2003,26(3):374-378.  
Chen Luwang, Gui Herong, Xu Guangquan, et al. Characteristics of the Hydrogen and Oxygen Stable Isotopes in Karst Water of Seam Floor in the Mining District of the Northern Anhui Province[J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science, 2003, 26(3): 374-378.
- [10] 许光泉,沈慧珍. 疏降地下水引起地面塌陷浅析:以淮南煤矿区为例[J]. 中国地质灾害与防治学报,2004,15(4):64-68.  
Xu Guangquan, Shen Huizhen. Analysis on the Land Collapse Induced by Pumping Groundwater—Huainan Coal Mine as an Example[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2004, 15(4): 64-68.
- [11] 桂和荣. 皖北矿区地下水水文地球化学特征及判别模式研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2005.  
Gui Herong. A Study of the Characteristic and Genesis Model of Underroud Water Hydrogeochemistry in Mining Area of North Anhui Province [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2005.
- [12] 胡海英,包为民,王涛,等. 氢氧同位素在水文学领域

- 中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2007(5):4-8.
- Hu Haiying, Bao Weimin, Wang Tao, et al. Application of Hydrogen and Oxygen Isotopes in Hydrology[J]. China Rural Water and Hydropower, 2007(5): 4-8.
- [13] 张人权. 同位素方法在水文地质中的应用[M]. 北京: 地质出版社, 1983.
- Zhang Renquan. Isotope Application in Hydrogeology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2003.
- [14] Dansgaard W. Stable Isotopes in Precipitation[J]. Tellus, 1964, 16(4): 436-468.
- [15] 汪集旻. 同位素水文学与水资源、水环境[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2002, 27(5): 532-533.
- Wang Jiyang. Isotope Hydrology and Water Resources Plus Hydro-Environment [J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2002, 27(5): 532-533.
- [16] Craig H. Standard for Reporting Concentrations of Deuterium and Oxygen-18 in Natural Waters [J]. Science, 1961, 133(3467): 1833-1834.
- [17] 张应华, 仵彦卿, 温小虎, 等. 环境同位素在水循环研究中的应用[J]. 水科学进展, 2006, 17(5): 738-747.
- Zhang Yinghua, Wu Yanqing, Wen Xiaohu, et al. Application of Environmental Isotopes in Water Cycle [J]. Advances in Water Science, 2006, 17(5): 738-747.
- [18] Clark I D, Fritz P. Environmental Isotopes in Hydrogeology[M]. (S. l.): Lewis Publishers, 1997.
- [19] Deshpande R D, Bhattacharya S K, Jani R A, et al. Distribution of Oxygen and Hydrogen Isotopes in Shallow Groundwaters from Southern India: Influence of a Dual Monsoon System[J]. Journal of Hydrology, 2003, 271(1): 226-239.
- [20] Tian L, Liu Z, Gong T, et al. Isotopic Variation in the Lake Water Balance at the Yamdruk-Tso Basin, Southern Tibetan Plateau [J]. Hydrological Processes, 2008, 22(17): 3386-3392.
- [21] 石辉, 刘世荣, 赵晓广. 稳定性氢氧同位素在水分循环中的应用[J]. 水土保持学报, 2003, 17(2): 163-166.
- Shi Hui, Liu Shirong, Zhao Xiaoguang. Application of Stable Hydrogen and Oxygen Isotope in Water Circulation[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17(2): 163-166.
- [22] 钱雅倩, 郭吉保, 邱永泉. 氢氧同位素交换动力学及其地质意义[J]. 火山地质与矿产, 2001, 22(4): 243-250.
- Qian Yaqian, Guo Jibao, Qiu Yongquan. The Hydrogen and Oxygen Isotope Exchange Kinetic and Its Geological Significance [J]. Volcanology & Mineral Resource, 2001, 22(4): 243-250.
- [23] 孙晓旭, 陈建生, 史公勋, 等. 蒸发与降水入渗过程中不同水体氢氧同位素变化规律[J]. 农业工程学报, 2012(4): 100-105.
- Sun Xiaoxu, Chen Jiansheng, Shi Gongxun, et al. Hydrogen and Oxygen Isotopic Variations of Different Water Bodies in Evaporation and Rainfall Infiltration Processes [J]. Transactions of the CSAE, 2012(4): 100-105.
- [24] 刘俊杰, 赵峰, 王大国. 氢氧同位素组成对阜新煤矿区矿井水来源的解释[J]. 煤炭学报, 2009, 34(1): 39-43.
- Liu Junjie, Zhao Feng, Wang Daguo. Explain About the Source of Mine Water by Oxygen and Hydrogen Isotope Composition in Fuxin Coal Mine Area [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(1): 39-43.
- [25] 葛涛, 储婷婷, 刘桂建, 等. 淮南煤田潘谢矿区深层地下水氢氧同位素特征分析[J]. 中国科学技术大学学报, 2014, 44(2): 112-118, 170.
- Ge Tao, Chu Tingting, Liu Guijian, et al. Characteristics of Hydrogen and Oxygen Isotopes of Deep Ground Water in the Panxie Mining Area in Huainan Coalfield [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2014, 44(2): 112-118, 170.
- [26] 黄远山. 淮南市近 50 多年气候变化分析[C]//中国气象学会 2008 年年会气候变化分会场论文集. 北京: 中国气象学会, 2008.
- Huang Yuanshan. The Climate Change Analysis of Huainan City Nearly 50 Years [C]//Proceedings of Climate Change Venue of Chinese Meteorological Society Annual Conference. Beijing: Chinese Meteorological Society, 2008.
- [27] 曹琨. 淮河流域气候变化特征分析[EB/OL]. (2010-04-07) [2014-07-10]. 中国科技论文在线, <http://www.paper.edu.cn>.
- Cao Kun. Study on the Characteristics of the Huaihe River Basin Climate Change [EB/OL]. (2010-04-07) [2014-07-10]. Chinese Science Paper Online, <http://www.paper.edu.cn>.
- [28] 危润初, 肖长来, 张余庆, 等. 中国降水混沌识别及空间聚类[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2014, 44(2): 626-635.
- Wei Runchu, Xiao Changlai, Zhang Yuqing, et al. Identification and Spatial Clustering for Chaos of Precipitation of China [J]. Journal of Jilin University:

- Earth Science Edition, 2014, 44(2): 626-635.
- [29] 王又丰, 张义丰, 刘录祥. 淮河流域农业气候资源条件分析[J]. 安徽农业科学, 2001, 29(3): 399-403.  
Wang Youfeng, Zhang Yifeng, Liu Luxiang. The Influence of the Climate Resource of Huaihe Watershed on the Agriculture Production[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2001, 29(3): 399-403.
- [30] 谭忠成, 陆宝宏, 孙营营, 等. 淮北平原区氢氧同位素水文实验研究[J]. 水电能源科学, 2009, 27(1): 37-39.  
Tan Zhongcheng, Lu Baohong, Sun Yingying, et al. Hydrological Experiments on Oxygen and Hydrogen Isotopic Variations in Precipitation, Groundwater and Riverwater in Huaibei Plain, Anhui Province [J]. Water Resources and Power, 2009, 27(1): 37-39.
- [31] 张爱民, 王效瑞, 马晓群. 淮河流域气候变化及其对农业的影响[J]. 安徽农业科学, 2002, 30(6): 843-846.  
Zhang Aimin, Wang Xiaorui, Ma Xiaoqun. Study on the Climate Change and Its Influence on Agriculture in Drainage Area of Northern Anhui[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2002, 30(6): 843-846.
- [32] 魏凤英, 张婷. 淮河流域夏季降水的振荡特征及其与气候背景的联系[J]. 中国科学: D 辑: 地球科学, 2009, 39(10): 1360-1374.  
Wei Fengying, Zhang Ting. Oscillation Characteristics of Summer Precipitation in the Huaihe River Valley and Relevant Climate Background[J]. Science in China ; Series D: Earth Sciences, 2009, 39(10): 1360-1374.
- [33] 卢燕宇, 吴必文, 田红, 等. 基于 Kriging 插值的 1961—2005 年淮河流域降水时空演变特征分析[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(5): 567-573.  
Lu Yanyu, Wu Biwen, Tian Hong, et al. Spatial and Temporal Variability Characteristics of Precipitation in Huai River Basin During 1961 to 2005 [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2011, 20(5): 567-573.
- [34] 范廷玉, 严家平, 王顺, 等. 采煤塌陷水域水质变化规律研究: 以淮南张集、顾桥矿为例[EB/OL]. (2011-03-9)[2014-07-10]. 中国科技论文在线, <http://www.paper.edu.cn>.  
Fan Tingyu, Yan Jiaping, Wang Shun, et al. Variation of Quality in Subsidence Water Area of Coal Mine: A Case of Zhangji Coal Mine and Guqiao Coal Mine in Huainan City[EB/OL]. (2011-03-09)[2014-07-10]. Chinese Science Paper Online, <http://www.paper.edu.cn>.
- [35] 王慧, 王谦谦. 近 49 年来淮河流域降水异常及其环流特征[J]. 气象科学, 2002, 22(2): 149-158.  
Wang Hui, Wang Qianqian. Precipitation Anomalies and the Features of Atmospheric Circulation in the Huaihe River Basin[J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2002, 22(2): 149-158.
- [36] 沈修志, 李秀新, 薛爱民, 等. 淮南复向斜区地质-地球物理场特征及煤、煤成气靶区分析[J]. 石油实验地质, 1993, 15(3): 235-242.  
Shen Xiuzhi, Li Xiuxin, Xue Aimin, et al. The Geological-Geophysical Field Properties of the Huainan Synclinorium Area and the Coal, Coal Derived Gas Prospecting Analysis [J]. Experimental Petroleum Geology, 1993, 15(3): 235-242.
- [37] 合肥工业大学. 顾北煤矿矿井水文地质类型划分报告[R]. 合肥: 合肥工业大学, 2010: 15.  
Hefei University of Technology. The Hydrogeological Report of Gubei Coal Mine[R]. Hefei: Hefei University of Technology, 2010: 15.
- [38] 闫昆. 淮南地区地质构造特征与环境效应分析[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2012.  
Yan Kun. Analysis of Geologic Tectonic Characters and Environmental Effect in Huainan Area [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2012.
- [39] 乔如瑞. 安徽煤矿水文地质环境分析[J]. 技术与创新管理, 2010, 31(5): 618-620.  
Qiao Rurui. Analysis on the Hydro-Geological Environment in Coal Mines in Anhui Province [J]. Technology and Innovation Management, 2010, 31(5): 618-620.
- [40] 刘天骄, 张春雷, 钱家忠, 等. 淮南煤田老矿区地下水微量元素多元统计研究[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2011, 34(1): 119-122.  
Liu Tianjiao, Zhang Chunlei, Qian Jiazhong, et al. Multivariate Statistical Analysis of Trace Elements in Groundwater of Old Mining Areas of Huainan Coalfield [J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science, 2011, 34(1): 119-122.
- [41] 袁文华, 方良成, 张成, 等. 谢桥煤矿煤系上覆第四纪底砾层隔水性评价[J]. 安徽理工大学学报: 自然科学版, 2003, 23(3): 1-5.  
Yuan Wenhua, Fang Liangcheng, Zhang Cheng, et al. Study on the Impermeability of the Quaternary Bottom Gravels Covered on the Coal Seal in Xieqiao Mine[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology: Natural Science, 2003, 23(3): 1-5.
- [42] 万正成, 王磊. 张集水源地地下水水质状况及保护措施

- [J]. 煤炭科技, 2004(1):5-6.
- Wan Zhengcheng, Wang Lei. Water Quality Protection Measures of the Ground Water at Zhangji[J]. Coal Science & Technology Magazine, 2004(1):5-6.
- [43] 陈兴海, 张平松, 吴荣新, 等. 淮南潘谢矿区浅部煤层开采时压架致灾水文地质特征分析[J]. 中国煤炭地质, 2012, 24(11):36-39, 62.
- Chen Xinghai, Zhang Pingsong, Wu Rongxin, et al. Hydrogeological Characteristic Analysis for Support Breakdown Accidents During Shallow Part Coal Mining in Panji-Xieqiao Mining Area, Huainan[J]. Coal Geology of China, 2012, 24(11):36-39, 62.
- [44] 王治朝, 凌标灿, 方良成. 谢桥矿陷落柱影响区各含水层之间的水力联系研究[J]. 华北科技学院学报, 2011, 8(2):23-26.
- Wang Zhichao, Ling Biaocan, Fang Liangcheng. The Study on the Hydraulic Connection Between the Aquifers in the Region Affected by the Sink Holes of Xie-Qiao Coal Mine[J]. North China Institute of Science and Technology, 2011, 8(2):23-26.
- [45] 孙鹏飞, 易齐涛, 许光泉. 两淮采煤沉陷积水区水体水化学特征及影响因素[J]. 煤炭学报, 2014, 39(7):1345-1353.
- Sun Pengfei, Yi Qitao, Xu Guangquan. Characteristics of Water Chemistry and Their Influencing Factors in Subsidence Waters in the Huainan and Huaibei Mining Areas, Anhui Province[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(7):1345-1353.
- [46] 潘凌潇, 刘汉湖, 何春东. 顾桥矿矿井水深度处理: 超滤+反渗透系统研究[J]. 中国矿业, 2013, 22(6):47-50.
- Pan Lingxiao, Liu Hanhu, He Chundong. Design Research (UF+RO) on Advance Treatment of Coal Mine Water in Guqiao Mine[J]. China Mining Magazine, 2013, 22(6):47-50.
- [47] 张琳, 陈宗宇, 刘福亮, 等. 水中氢氧同位素不同分析方法的对比[J]. 岩矿测试, 2011, 30(2):160-163.
- Zhang Lin, Chen Zongyu, Liu Fuliang, et al. Study on Methods for Hydrogen and Oxygen Isotope Analysis of Water Samples[J]. Rock and Mineral Analysis, 2011, 30(2):160-163.
- [48] Craig H. Isotopic Variations in Meteoric Waters[J]. Science, 1961, 133:1702-1703.
- [49] 郑淑蕙, 侯发高, 倪葆龄. 我国大气降水的氢氧稳定同位素研究[J]. 科学通报, 1983, 28(13):801-806.
- Zheng Shuhui, Hou Fagao, Ni Baoling. The Studies of Hydrogen and Oxygen Stable Isotopes in Atmospheric Precipitation in China[J]. Chinese Science Bulletin, 1983, 28(13):801-806.
- [50] 宋献方, 柳鉴容, 孙晓敏, 等. 基于 CERN 的中国大气降水同位素观测网络[J]. 地球科学进展, 2007, 22(7):738-747.
- Song Xianfang, Liu Jianrong, Sun Xiaomin, et al. Establishment of Chinese Network of Isotopes in Precipitation (CHNIP) Based on CERN[J]. Advances in Earth Science, 2007, 22(7):738-747.
- [51] 杨梅. 基于 GIS 的淮南老矿区地下水环境特征及突水水源判别模型[D]. 合肥:合肥工业大学, 2008.
- Yang Mei. A GIS Based Groundwater Environmental Characteristics and Diseriminating Model of Water-Inrush Source of the Old Coalfield in Huainan[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2008.
- [52] 桂和荣, 宋晓梅, 彭子成. 淮南煤田阜凤推覆构造带水文地质特征研究[J]. 地球学报, 2005, 26(2):169-172.
- Gui Herong, Song Xiaomei, Peng Zicheng. The Transmissivity of Fufeng Nappe Structural Belt in Huainan Coalfield [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2005, 26(2):169-172.
- [53] 郑永飞, 陈江峰. 稳定同位素地球化学[M]. 北京:科学出版社, 2000:1-316.
- Zheng Yongfei, Chen Jiangfeng. Stable Isotope Geochemistry[M]. Beijing: Science Press, 2000:1-316.