



## 河南省永城市顺河西矿区地温分布规律研究

颜少权, 杨义栋, 张超然

河南省地质矿产勘查开发局第四地质矿产调查院, 河南 郑州 451464

**摘要:** 对永城市顺河西矿区内 2 个近似稳态测温和 44 个简易测温数据进行分析, 并结合矿区地质资料, 通过数据拟合, 建立数据模型, 反映了矿区内似稳态测温钻孔孔底温度增量  $\Delta T$  与钻机静井时间  $t$  的关系。根据数据模型校正了简易测温钻孔的孔底温度, 通过数据拟合发现矿区埋深与温度之间的线性关系。在此基础上, 从横向上和纵向上分析了顺河西矿区的地温分布规律, 为下一步矿山开发提供参考依据。

**关键词:** 地温场; 地温梯度; 数值模拟; 永城市; 河南省

## GEOHERMAL DISTRIBUTION RULE OF SHUNHEXI OREFIELD IN YONGCHENG CITY, HENAN PROVINCE

YAN Shao-quan, YANG Yi-dong, ZHANG Chao-ran

No. 4 Institute of Geology and Mineral Survey, Henan Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Zhengzhou 451464, China

**Abstract:** The paper analyzes the data for approximate steady state temperature measurements of 2 boreholes and simple temperature measurements of 44 boreholes in Shunhexi orefield of Yongcheng City, and establishes data model through data fitting combined with the geological information of orefield to reflect the relationship between temperature increment at the bottom of approximate steady state boreholes and static well time. The bottom temperature of simple temperature measurement borehole is corrected according to the data model, and the linear relationship between buried depth and temperature is found through data fitting. On this basis, the horizontal and vertical distribution law of geothermal temperature in the study area is analyzed for reference of further mining development.

**Key words:** geothermal field; geothermal gradient; numerical simulation; Yongcheng City; Henan Province

### 1 矿区简述

顺河西矿区位于中国六大无烟煤生产基地之一的河南省永城市, 面积约 166 km<sup>2</sup>, 探明资源储量 5.2 × 10<sup>8</sup> t, 主要为无烟煤和贫煤, 煤层主要埋深 600~1500 m<sup>[1]</sup>。目前正处于建井前准备阶段。

#### 1.1 地层

全矿区被新生界松散沉积物所覆盖, 平均厚度

438.1 m。根据矿区钻孔揭露, 地层从老到新为奥陶系中统(O<sub>2</sub>)、石炭系上统(C<sub>2</sub>)、二叠系(P), 基岩倾角在 3~15°之间。本区二叠系山西组(P<sub>1s</sub>)为主要含煤地层, 主采二<sub>2</sub>煤层厚 0~6.76 m, 平均厚度 2.33 m<sup>[2-3]</sup>。

#### 1.2 构造特征

顺河西矿区处于华北拗陷东部边缘之永城背斜西翼的西延地带, 与鲁西南隆起接壤。受后期 E-W 向焦

收稿日期: 2019-12-23; 修回日期: 2021-01-14。编辑: 张哲。

基金项目: 河南省 2008 年度地质勘查基金(周转金)(编号 2008-1-14)。

作者简介: 颜少权(1979—), 男, 汉, 高级工程师, 主要从事地质及水工环方面研究工作, 通信地址 河南省郑州市郑东新区郑开大道 67 号, E-mail/28956876@qq.com

作-商丘断层及 NNE 向济阳断层等区域大断裂的影响, 矿区内形成了 NNW—NW 和 NNE—NE 向的多个断层及短轴背向斜, 对原始地层、煤层走向及煤层埋深等都产生较大影响<sup>[2,4]</sup>.

矿区共有 68 个钻孔, 其中 59 个钻孔见到 131 层岩浆岩, 侵入层位主要是二叠系下统. 岩浆岩多呈岩席状或似层状, 但厚度变化较大, 从 0.38~27 m 不等.

## 2 测温资料收集与处理

### 2.1 测温资料

本次收集了永城市顺河西矿区钻孔近稳态测温、钻孔简易测温数据及恒温带数据, 奠定了矿区地温场分析的基础.

1) 钻孔近似稳态测温数据. 收集了顺河西矿区 2 个近稳态测温钻孔数据, 孔深在 1500~1650 m. 钻探施工结束后按 12、12、24、24 h 的时间间隔顺序用同一仪器进行测温, 直至 24 h 内温度变化不大于 0.5 °C 或总测温时间已达 72 h 为止<sup>[5-6]</sup>.

2) 钻孔简易测温数据. 对收集到的 44 个钻孔的简易测温数据进行校正后利用, 孔深在 700~1600 m. 在钻探施工结束后, 对常规测井前后各进行一次地温测量, 间隔时间一般只有 6~8 h. 简易测温第二次测量一般是在井液停止循环时间 8 h 左右进行的, 与原始岩温相差较大, 需进一步处理才能被利用.

3) 恒温带数据. 采用永城市东大营恒温观测孔观测结果: 孔深 81 m, 孔径 110 mm, 恒温带深度 23 m, 温度 16.5 °C<sup>[7]</sup>.

### 2.2 资料处理

孔底温度恢复至近似稳态温度的过程有规律可循, 利用 Z0103、Z0708 孔近似稳态钻孔中测温数据, 经公式(1)计算出两孔温度恢复增量  $\Delta T$  (见表 1).

$$\Delta T = \frac{T - T_i}{T} \times 100 \quad (1)$$

式中:  $T$  为近似稳态钻孔最后一次测得的井底温度, °C;  $T_i$  为近似稳态钻孔某一次测得的井底温度 ( $T$  与  $T_i$  必须是同一深度点上的温度), °C;  $\Delta T$  为温度增量百分数, %.

采用指数型函数曲线类型对  $\Delta T$  与钻井液停止循环时间  $t$  的关系曲线  $\Delta T-t$  进行公式拟合<sup>[8-10]</sup>, 得出拟合曲线公式  $\Delta T = 6.59928e^{-0.04397t} - 0.26437$ , 如图 1 所示.

表 1 近似稳态测温孔  $\Delta T-t$  关系统计表

Table 1 Relationship between temperature recovery increment and time of approximate steady state boreholes

Z0103 孔		Z0708 孔	
t/h	$\Delta T/\%$	t/h	$\Delta T/\%$
2	5.75	3	6.36
14	3.38	15	2.79
26	1.82	27	1.02
50	0.36	51	0.43
74	0.07	75	0.08

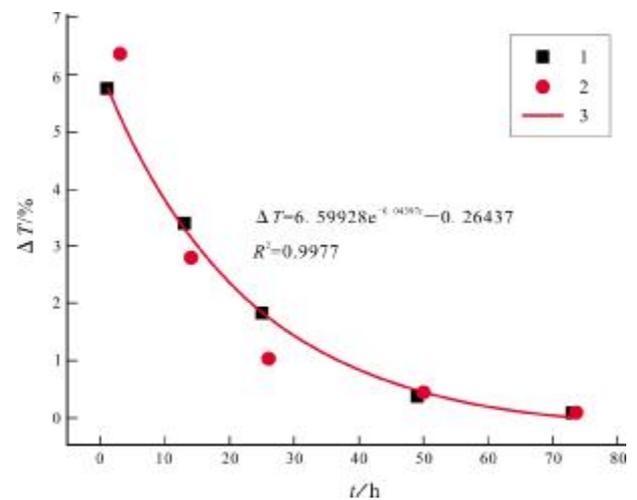


图 1 近似稳态钻孔温度恢复增量与静井时间关系图

Fig. 1 Diagram of temperature recovery increment vs. static well time of approximate steady state boreholes  
1—Z0103 孔 (Z0103 borehole); 2—Z0708 孔 (Z0708 borehole); 3—拟合曲线 (fitting curve)

将矿区内钻孔简易测温时的钻井液停止循环时间  $t$  带入校正曲线公式(1), 求出相应的增量值  $\Delta T$ , 利用简易测温温度  $T_j$  并根据公式(2)可计算出校正后的简易测温钻孔温度 (见表 2).

$$T_0 = T_j / (1 - \Delta T) \quad (2)$$

式中:  $T_j$  为简易测温钻孔温度, °C;  $T_0$  为校正后孔底温度, °C.

## 3 矿区地温分布规律

### 3.1 地温梯度

利用校正后的孔底温度、恒温带温度及深度, 利用公式(3)计算出钻孔平均地温梯度.

表 2 简易测温钻孔校正后的孔底温度  
Table 2 Corrected bottom temperature of simple temperature measurement borehole

孔号	T <sub>j</sub> /°C	t/h	ΔT/%	T <sub>0</sub> /°C
Z0102	44.52	7.9	0.0439	46.56
Z0303	42.85	7.5	0.0449	44.86
Z0304	37.95	7.7	0.0443	39.71
Z0305	46.59	7.0	0.0459	48.83
Z0402	41.01	6.4	0.0471	43.04
Z0405	39.43	6.7	0.0465	41.35
Z0410	50.20	7.2	0.0454	52.59
Z0502	44.77	7.3	0.0453	46.89
Z0503	42.51	6.9	0.0462	44.57
Z0504	38.30	6.4	0.0471	40.19
Z0506	31.74	7.5	0.0448	33.23
Z0509	46.60	7.6	0.0447	48.78
Z0510	36.33	7.4	0.0450	38.04
Z0701	37.18	6.5	0.0470	39.02
Z0702	36.91	6.1	0.0479	38.77
Z0703	42.93	6.1	0.0478	45.09
Z0901	36.49	6.3	0.0474	38.31
Z0902	36.38	7.1	0.0457	38.12
Z0903	46.05	7.9	0.0439	48.16
Z0904	44.42	7.4	0.0450	46.51
Z1002	39.42	7.4	0.0451	41.28
Z1003	45.37	6.8	0.0463	47.57
Z1201	45.66	6.1	0.0478	47.95
Z1202	44.34	6.0	0.0480	46.57
Z1402	45.41	6.7	0.0464	47.62
Z1601	48.75	6.1	0.0478	51.2
Z1901	35.13	7.2	0.0455	36.8
Z1902	43.08	6.3	0.0474	45.22
Z1904	41.71	7.6	0.0445	43.65
Z2401	38.20	6.4	0.0471	40.09
Z0101	46.97	7.0	0.0459	49.23
Z0201	33.30	7.3	0.0452	34.88
Z0205	40.97	7.4	0.0450	42.9
Z0207	44.62	6.2	0.0475	46.85
Z0306	53.14	7.0	0.0458	55.69
Z0403	40.38	6.7	0.0465	42.35
Z0407	42.83	7.9	0.0440	44.8
Z0408	40.56	7.9	0.0440	42.43
Z0409	41.89	7.6	0.0447	43.85
Z0507	38.59	6.6	0.0467	40.48
Z0508	41.70	6.9	0.0461	43.72
Z0606	43.38	6.0	0.0480	45.57
Z0607	44.86	7.2	0.0454	46.99
Z1903	36.28	7.0	0.0459	38.02

$$G = \frac{T_0 - T_s}{H - H_s} \times 100 \quad (3)$$

式中:  $G$  为钻孔平均地温梯度, °C/100 m;  $H$  为钻孔孔底深度, m;  $T_s$  为恒温带温度, °C;  $H_s$  为恒温带深度, m.

本区 46 个简易测温钻孔终孔埋深为 699.62~1 631.18 m. 经计算, 单孔地温梯度变化较大, 在 2.12~4.75 °C/100 m 之间, 地层平均地温梯度 2.75 °C/100 m. 根据矿区 46 个测温钻孔地温梯度值, 绘制永城市顺河西矿区地温梯度等值线图(图 2), 主要分布特征如下.

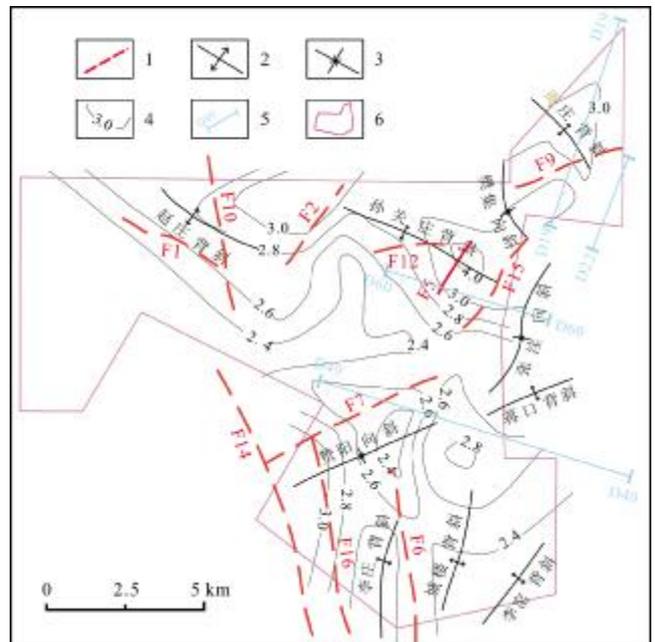


图 2 地温梯度等值线图

Fig. 2 Contour map of geothermal gradient

1—断层及编号(fault and number); 2—背斜构造线(anticline); 3—向斜构造线(syncline); 4—地温梯度等值线(geothermal gradient isoline); 5—地震线及编号(seismic exploring line); 6—工作区范围(study area)

矿区地温梯度大于 3.0 °C/100 m 为异常增温区, 主要分布在 D60 线以北、D19 线以西区域, 构造上主要是该异常增温区内背斜核部及向斜翼部位置, 总体上呈由背斜核部向周围递减的态势, 其异常增温区内钻孔平均地温梯度为 3.16 °C/100 m. 矿区地温梯度小于 3.0 °C/100 m. 为正常增温区, 主要分布在矿区的南部, 在 D60 线以南及 D22 线两侧区域, 其钻孔平均地温梯度为 2.54 °C/100 m.

### 3.2 垂向地温特征

为研究矿区平面地温场特点, 对矿区 46 个测温孔

相同深度的地温数值进行算术平均,得到矿区各深度的平均地温数值.通过数值拟合,得到矿区地温数值  $t$  与埋深  $h$  关系曲线(如图3).矿区各深度平均地温数值与埋深呈线性正相关,表现为传导型增温特征.

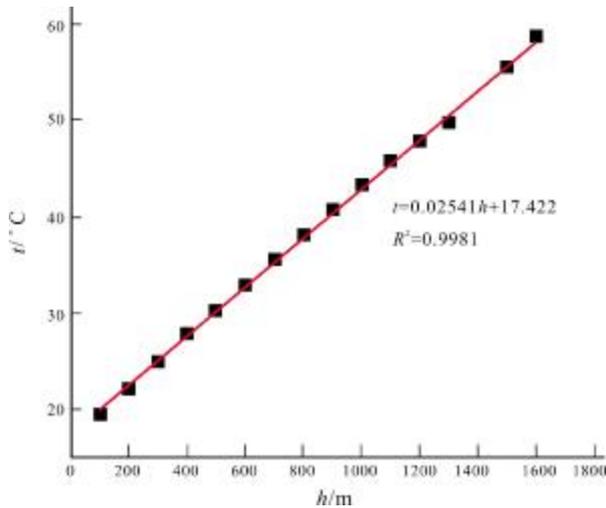


图3 矿区地温与埋深关系图

Fig. 3 Relationship between geothermal temperature and buried depth

### 3.3 水平向地温特征

根据公式(4)计算主采煤层二<sub>2</sub>煤的地温数值,本文做出二<sub>2</sub>煤底板等温线图.据《矿井降温技术规范 MT/T 1136-2011》规定,温度高于 31 °C 的区域为一级热害区,高于 37 °C 的区域为二级热害区.

$$T_c = T_0 - G(H - h_c) \quad (4)$$

式中:  $T_c$  为二<sub>2</sub>煤底板地温;  $h_c$  为二<sub>2</sub>煤层底板深度, m.

矿区等温线与煤层底板等高线基本平行,地温随煤层的加深而逐渐增大. D22 勘探线两侧,埋深 534 m 以浅,面积 2.46 km<sup>2</sup>,地温小于 31 °C,属地温正常区; F12 断层两侧及 D23 线两侧,面积 6.54 km<sup>2</sup>,埋深 534~769 m,地温 31~37 °C,为一级热害区;其余矿区面积 157.28 km<sup>2</sup>,埋深在 769 m 以深,地温大于 37 °C,属二级热害区.

## 4 地温影响因素分析

区域地温特征取决于该区所处的大地构造部位及地壳的活动性.在特定大地构造条件下,矿区地温的影响因素主要有构造、松散层厚度、岩浆活动、地下水活动等<sup>[11-14]</sup>.

### 4.1 构造形态

构造形态影响地温主要是因为不同岩石的热导率不同,热量在地壳表层垂向和侧向的传导速率不同,将来自地球内的均匀热流在地壳表部重新分配<sup>[15-16]</sup>.构造运动和岩浆活动使地壳变形,发生褶皱、断裂形成隆起和凹陷、背斜和向斜等各种规模不一的构造,从而使原本水平的岩层发生改变,热量沿裂隙、断裂面及岩层面等导热率高的介质进行传导,使得褶皱核等部位更易汇集热量,地温梯度数值同比较大,如矿区孙官庄背斜、周庄背斜等地温梯度大于 3.0 °C/100 m,而其翼部地温梯度小于 3.0 °C/100 m.地温梯度总体上呈由背斜核部向周围递减的趋势,不同部位递减的趋势不同.

### 4.2 覆盖层厚度

地球内部的热量是通过岩石向外传导的,不同的岩石具有不同的热导率,具有不同的热传导性能.一般来说,岩石的结晶程度越高,致密性越高,热导率越高.新生界的半固结或松散层沉积物孔隙度较大,胶结和压实程度较低,导致松散层沉积物热导率较低,使得新生界的覆盖层阻碍了地壳表层热的传导与散失,起到增温、保温作用<sup>[17-18]</sup>.

矿区覆盖层厚度 382.41~524.90 m,平均厚度 438.14 m,中部背斜轴区最薄,厚度变化总体呈东薄西厚的趋势,个别地段由于基岩面不平而有一定的起伏变化.矿区不同钻孔基岩界面温度和松散层厚度变化趋势呈正相关,即同一深度相同地质条件下,其上覆的新生界越厚地温也就越高.矿区不同水平地温梯度随深度的增加而降低,到埋深 450 m 左右时地温梯度的深度时趋于一致;在 450~1 300 m,基本上沿 2.2 °C/100 m 这个地温梯度在上下波动,变化不大;从埋深 1300 m 以深,地层进入奥陶系,水分的增加使岩石热导率增大,地温梯度有减小的趋势.

### 4.3 地下水活动

矿区新生界 12~18 层含水层,岩性以粉、细、中砂为主,单位涌水量 0.14~2.78 L/s·m,渗透系数 1.15~88.90 m/d,各含水层间有较厚的黏性土作隔水层,水力联系较差,以侧向径流为主要补给与排泄方式.根据钻孔测温数据及水文孔抽水试验资料分析,浅部地下水活动对本区地温及地温梯度的影响不甚明显<sup>[19-20]</sup>.

矿区基岩埋深 243~1 120 m,二叠系细、中粒砂岩

裂隙不发育,石炭系、奥陶系灰岩喀斯特较发育,单位涌水量 0.000 1~0.99 L/s·m, 渗透系数 0.0002~2.65 m/d<sup>[1]</sup>, 受泥岩隔水层阻隔,与上部含水层水力联系差.区内裂隙填充物、断层破碎带结构致密,透水性较差,岩溶水通过断层、裂隙与上部含水层进行水力联系较差,致使岩溶水地下流通性较差,径流滞缓,故岩溶水对矿区地温的影响甚微.

#### 4.4 岩浆岩

矿区内岩浆岩侵入时期为华力西期和燕山早、晚期,侵入时代较早,多呈岩席状或似层状,但厚度变化较大,从 0.38~27 m 不等,规模较小,所保留的余热不多,对本区地温场影响不大.

## 5 结论

通过对永城市顺河西矿区 2 个近似稳态测温钻孔和 44 个简易测温钻孔数据的分析,结合其他地质资料,对矿区地温场分布特征进行了深入研究,取得的主要认识如下.

1) 矿区孔底温度恢复增量与静井时间的关系式为  $\Delta T = 6.59928e^{-0.04397t} - 0.26437$ . 根据校正公式及停钻测温时间可计算出简易测温钻孔的孔底温度.

2) 垂向矿区地温数值与深度的线性关系为  $t = 0.02541h + 17.442$ , 呈现较好的正相关性. 埋藏深度 534~769 m 属一级热害区, 埋藏深度 769 m 以深属二级热害区.

3) 研究区地温主要控制因素是矿区构造和松散层厚度,对地温的影响较大. 地下水活动及岩浆岩侵入对地温影响甚微.

## 参考文献(References):

[1] 冯斌, 李文前, 刘建方. 河南永夏煤田地质[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2017: 125-130.  
Feng B, Li W Q, Liu J F. Geology of Yongxia coalfield, Henan Province [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2017: 125-130. (in Chinese)

[2] 张连强. 顺和西煤矿区地温特征及其影响因素分析[J]. 中国煤炭地质, 2012, 24(7): 29-33.  
Zhang L Q. Geotemperature characteristics and impacts from geological factors in Shunhexi Mine area[J]. Coal Geology of China, 2012, 24(7): 29-33.

[3] 何莉. 河南省东部新生界深度图及其地质意义[J]. 工程地球物理学报, 2015, 12(5): 692-699.

He L. The map of Cenozoic depth in eastern Henan and its geological significance[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2015, 12(5): 692-699.

[4] 彭松民, 李振国, 王令全, 等. 河南省侵入岩构造单元的划分及其特征[J]. 矿产与地质, 2014, 28(3): 264-271, 283.  
Peng S M, Li Z G, Wang L Q, et al. Division and characteristics of tectonic units of intrusive rocks in Henan Province [J]. Mineral Resources and Geology, 2014, 28(3): 264-271, 283.

[5] 易家伟. 宿东矿区地温分布规律及影响因素分析[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2017.  
Yi J W. Analysis of geothermal distribution and influencing factors in the Sudong mining area[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2017.

[6] 中华人民共和国国土资源部. DZ/T 0080—2010 煤炭地球物理测井规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.  
Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. DZ/T 0080—2010 Specifications for geophysical logging of coal [S]. Beijing: China Standard Press, 2010.

[7] 苏媛媛. 豫东下古生界地热资源潜力评价[J]. 山东煤炭科技, 2017(6): 185-187.  
Su Y Y. Lower Paleozoic geothermal resource potential evaluation[J]. Shandong Coal Science and Technology, 2017(6): 185-187.

[8] 王海军. 简易测温曲线的近似稳态校正方法——以 LYL 井田为例[J]. 煤田地质与勘探, 2016, 44(1): 90-93.  
Wang H J. Approximate steady state correction of simple well temperature curve: With LYL mine field as an example [J]. Coal Geology & Exploration, 2016, 44(1): 90-93.

[9] 任自强. 潘集矿区深部地温地质特征及地热资源评价[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2016.  
Ren Z Q. Geothermal characteristics and assessment of geothermal resources in the depth of Panji mining area [D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2016.

[10] 谭静强, 琚宜文, 侯泉林, 等. 淮北煤田宿临矿区现今地温场分布特征及其影响因素[J]. 地球物理学报, 2009, 52(3): 732-739.  
Tan J Q, Ju Y W, Hou Q L, et al. Distribution characteristics and influence factors of present geo-temperature field in Su-Lin mine area, Huabei coalfield[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(3): 732-739.

[11] 彭涛, 吴基文, 任自强, 等. 淮北煤田现今地温场特征及大地热流分布[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2015, 40(6): 1083-1092.  
Pen T, Wu J W, Ren Z Q, et al. Distribution characteristics of current geothermal field and terrestrial heat flow in Huabei Coalfield [J]. Earth Science — Journal of China University of Geosciences, 2015, 40(6): 1083-1092.

[12] 李腾超, 王书宏, 寇正卫. 河南省地温场分布规律及成因机制分析[J]. 城市地质, 2020, 15(2): 194-200.  
Li T C, Wang S H, Kou Z W. Analysis of the distribution and

- formation mechanism of the geothermal field in Henan Province[J]. *Urban Geology*, 2020, 15(2): 194–200.
- [13]王康, 姚多喜, 鲁海峰. 淮南潘三矿区地温分布规律及其影响因素分析[J]. *中国煤炭地质*, 2014, 26(5): 38–40, 48.  
Wang K, Yao D X, Lu H F. Geotherm distribution pattern and impacting factor analysis in Panji No.3 coalmine, Huainan[J]. *Coal Geology of China*, 2014, 26(5): 38–40, 48.
- [14]郭艳, 吴基文, 冯松宝. 宿县矿区地温特征及控制因素分析[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2015, 38(5): 694–699.  
Guo Y, Wu J W, Feng S B. Geotemperature features in Suxian mining area and control factors[J]. *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science)*, 2015, 38(5): 694–699.
- [15]张庆松, 高阳, 李术才, 等. 含水构造附近围岩温度场响应特征与影响因素研究[J]. *山东大学学报(工学版)*, 2011, 41(3): 72–77.  
Zhang Q S, Gao Y, Li S C, et al. Research on the temperature response feature of a rock mass around a water-bearing structure and affecting factors[J]. *Journal of Shandong University (Engineering Science)*, 2011, 41(3): 72–77.
- [16]黄光寿, 郭丽丽, 黄凯. 河南省沉积盆地五大构造单元地热地质特征[J]. *地质与资源*, 2020, 29(2): 172–179.  
Huang G S, Guo L L, Huang K. Geothermal geological characteristics of five tectonic units in the sedimentary basins of Henan Province[J]. *Geology and Resources*, 2020, 29(2): 172–179.
- [17]郭飒飒, 朱传庆, 邱楠生, 等. 雄安新区深部地热资源形成条件与有利区预测[J]. *地质学报*, 2020, 94(7): 2026–2035.  
Guo S S, Zhu C Q, Qiu N S, et al. Formation conditions and favorable areas for the deep geothermal resources in Xiong'an New Area[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020, 94(7): 2026–2035.
- [18]路畅, 李营, 陈志, 等. 华北断陷盆地中北部地热水地球化学特征及成因初探[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2018, 37(4): 663–673.  
Lu C, Li Y, Chen Z, et al. A primary study on geochemical characteristics and genesis of geothermal water in the north-central part of the North China Downfaulted Basin[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2018, 37(4): 663–673.
- [19]张连强. 永夏煤田水文地质特征及开采技术条件评价[J]. *中国煤炭地质*, 2012, 24(8): 48–52, 84.  
Zhang L Q. Evaluation of Yongxia Coalfield hydrogeological characteristics and mining technical conditions[J]. *Coal Geology of China*, 2012, 24(8): 48–52, 84.
- [20]张连强, 李建涛, 杨义栋, 等. 对豫东地区地下水资源的理性分析[J]. *地下水*, 2011, 33(6): 222–224.  
Zhang L Q, Li J T, Yang Y D, et al. Rational analysis of groundwater resources in eastern Henan Province[J]. *Ground Water*, 2011, 33(6): 222–224. (in Chinese)
- (上接第 464 页/Continued from Page 464)
- [25]张艳玲, 潘根兴, 李正文, 等. 土壤-植物系统中硒的迁移富集及低硒地区食物链中硒的调节[J]. *土壤与环境*, 2002, 11(4): 388–391.  
Zhang Y L, Pan G X, Li Z W, et al. Translation of selenium in the system of soil-plant and it's regulation in food-chain[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2002, 11(4): 388–391.
- [26]兰叶青, 毛景东, 计维浓. 土壤中硒的形态[J]. *环境科学*, 1994, 15(4): 56–58.  
Lan Y Q, Mao J D, Ji W N. Speciation of selenium in soils[J]. *Environmental Science*, 1994, 15(4): 56–58.
- [27]王子健. 中国低硒带生态环境中硒的环境行为研究进展[J]. *环境化学*, 1993, 12(3): 237–243.  
Wang Z J. Some biogeochemical aspects of selenium in Chinese low-selenium belt[J]. *Environmental Chemistry*, 1993, 12(3): 237–243.
- [28]布和敖斯尔, 张东威, 刘力. 土壤硒区域环境分异及安全阈值的研究[J]. *土壤学报*, 1995, 32(2): 186–193.  
Buber A, Zhang D W, Liu L. Regional environmental differentiation and regional safety threshold of soil selenium[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1995, 32(2): 186–193.
- [29]易秀. 生态环境中的硒及其地方病[J]. *西安工程学院学报*, 2000, 22(4): 69–72.  
Yi X. Selenium in ecological environment and endemic disease[J]. *Journal of Xi'an Engineering University*, 2000, 22(4): 69–72.
- [30]He Z L, Yang X E, Zhu Z X, et al. Fractionation of soil selenium with relation to Se availability to plants[J]. *Pedosphere*, 1994, 4(3): 209–216.