

# 能源“金三角”煤炭现代开采水资源及地表生态保护技术

顾大钊

(神华集团有限责任公司,北京 100011)

**[摘要]** 晋陕蒙宁甘地区是我国的能源“金三角”。该地区煤炭储量和产量均占我国的三分之二左右,已成为我国煤炭开发的主战场,但该地区水资源仅占全国的3.9%。针对该地区煤炭现代开采与水资源短缺和生态脆弱的矛盾,以神东矿区现代煤炭开采为工程依托,创新研究方法,揭示了该地区现代开采水资源的运移规律和地表生态“自修复”规律,首次开发了煤矿分布式地下水库技术和应用“自修复”规律的地表生态主动性减损及修复技术,建立了示范工程,为煤炭开采水资源和地表生态保护探索了一条新的技术途径。

**[关键词]** 能源“金三角”;煤炭现代开采;水资源及地表生态;保护技术

**[中图分类号]** TD82 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2013)04-0102-06

## 1 前言

煤炭是我国的主体能源,一直占我国一次能源生产和消费的70%左右。我国“富煤、贫油、少气”的能源赋存结构,决定了在未来相当长时期内,煤炭能源的主体地位不会有大的变化。我国晋陕蒙宁甘地区是能源资源富集区,被称为能源“金三角”。据国土资源部2010年储量通报,能源“金三角”煤炭储量达 $8.4 \times 10^{11}$  t,占全国的62.7%。能源“金三角”聚集了我国煤炭资源赋存条件好、储量集中的大型整装煤田,包括神府东胜煤田、准格尔煤田、宁东煤田等。其煤层埋藏浅,赋存稳定,地质结构相对简单,具备规模化、集约化现代开发的条件。2011年该地区产量达到 $2.382 \times 10^9$  t,占全国总产量的67.7%。

能源“金三角”地处干旱和半干旱的沙漠化地区,水资源短缺,生态环境脆弱。该地区水资源总量为 $1.212 \times 10^{11}$  m<sup>3</sup>,仅占全国的3.9%;同时该地区常年蒸发量远大于降水量,如榆神府矿区,多年平均降水量约400 mm,而平均蒸发量约2 400 mm。

煤炭开采造成煤岩层、地下含水层及隔水层的

变形、破断和运动,因此产生大量裂隙和地表沉陷,对地下水资源系统和生态环境产生影响,导致地下水沿煤岩层裂隙渗流和流失。据统计,2010年我国矿井水流失总量为 $4.96 \times 10^9$  t,而流失的主要形式是矿井水外排地表而蒸发,并造成土地盐碱化。上述问题在能源“金三角”尤为突出。因此,研究能源“金三角”煤炭现代开采对水资源和生态的影响规律,开发水资源和地表生态保护技术,实现煤炭资源与环境的协调开发具有战略意义。本文以神东矿区煤炭现代开采为例,系统分析了煤炭现代开采对水资源和生态的影响规律,介绍了水资源和生态环境保护关键技术、示范工程及取得的成效。

## 2 现代煤炭开采对水资源和地表生态的影响研究

### 2.1 研究方法创新

首次开发了以高效率、高回收率为特征的煤炭现代开采技术下地下水赋存环境和地表生态四维多属性探测技术。以神东矿区补连塔煤矿、乌兰木伦煤矿为研究对象,针对采动煤岩(即地下水赋存环境)的全周期变化过程:a.集成了现代高精度全过

**[收稿日期]** 2013-01-31

**[作者简介]** 顾大钊(1958—),男,江苏滨海县人,博士,教授,主要从事煤炭开发水资源保护等的研究与开发工作;E-mail:zgcao2008@163.com

程(采前一采中一采后一稳定期)地球物理探测(地质雷达GPR、四维地震、高精度电法、瞬变电磁法等)、全球定位系统(GPS)动态测量及钻探等技术,获得了以高精度地震数据为核心的四维多属性数据体;b.开发了基于四维多属性数据体的裂隙带结构信息提取、近地表结构及属性信息的提取方法,获得了地下水赋存环境及近地表生态环境系统在开采前、开采中、开采后和稳定期的裂隙发育度、含水性、渗透性等信息;c.基于四维多属性数据体建立了现代开采技术下地下水赋存环境的四维多属性变化过程模型;d.采用钻探测井技术获得了覆岩及地下水的定量变化规律。

## 2.2 现代开采对水资源的影响规律

采用现场观测、物理模拟和数值模拟,研究了开采前后研究区主采煤层上覆岩层结构、含水层分布及其富水性,采动岩体裂隙的时空演化及渗流演化规律。

### 2.2.1 采动覆岩结构变化规律

以神东矿区补连塔煤矿为研究对象,采用四维地震勘探技术,通过观测煤层开采前、开采中、开采后及其沉降稳定期煤系岩层变化所引起的地震响应变化,研究开采过程中煤系地层的演变规律<sup>[1]</sup>。

1)煤层未被采动时,煤层与其顶板砂岩形成良好的波阻抗界面,获得了原生状态的本底调查参数。

2)煤层经过开采后,开采前煤层与其顶板砂岩形成的波阻抗界面被破坏,地震波同相轴出现凌乱或缺失,地震波能量急剧减弱,表明煤层上覆岩层出现断裂和沉降现象。

3)煤层开采后经过一定时间的沉降,压实后的煤系地层地震反射波能量有所增强,表明地层经过沉降和压实后,采动破坏的地层呈现层状“自修复”状态,并处于平衡状态。

### 2.2.2 地下水赋存环境变化规律

1)煤炭开采对地表沙层的含水性分布有一定影响,采动使采动区附近砂土变形并发育裂隙,从而使原始干燥板结的砂土有所松动,砂土层含水性在采后基本上恢复采前状态。

2)测区普遍下伏地下含水层,局部含水性好,含水层厚度较大,局部区域含水性不均匀,在采动影响带(约200 m)表现出局部地下水渗漏流失,采动带附近地表含水层含水性变弱。

3)开采前煤层基本呈干燥不含水状态,由于开

采引起的采动裂隙使煤层呈现弱含水和局部充水现象,且煤层底板下伏岩层的含水性明显增强。

4)能源“金三角”由于煤层埋藏浅、煤层厚,要实现高效率、高回收率开采,现有开采技术难以保护含水层免遭破坏,采动裂隙必将破坏含水层和隔水层,使地下水沿采动裂隙或构造裂隙流入采煤工作面 and 采空区,形成矿井水。

## 2.3 现代开采对地表生态的影响规律

### 2.3.1 动态裂缝的发育规律与生命周期

通过补连塔矿12406工作面55条地表采动裂缝3个月的野外观测表明,开采过程中地表裂缝发育经历了裂缝发育—裂缝闭合—裂缝再次发育—裂缝稳定—裂缝再次闭合5个阶段,如图1所示<sup>[2]</sup>。

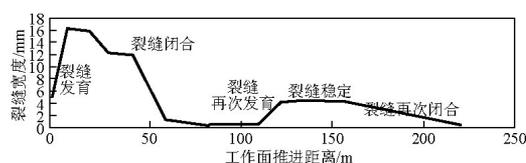


图1 裂缝平均宽度随工作面推进距离的变化

Fig.1 Average ground crack width trend with coal working face moving range

裂缝发育阶段:当工作面向前开采10 m时,裂缝呈现出最大表征,第25条裂缝发育宽度最大,其5号测点由3.3 mm递增到25 mm左右。

初次闭合阶段:工作面推进40 m时,裂缝宽度急剧下降,工作面推进81 m时,地面裂缝整体处于闭合状态。

裂缝再次发育阶段:当裂缝与回采面相对距离为108 m时,裂缝沿原断裂位置重新断开,但裂缝宽度均小于第一个阶段的宽度值。

相对稳定阶段:裂缝宽度基本无变化。

裂缝再次闭合阶段:随着裂缝与回采面相对距离的增大,裂缝出现缓慢闭合现象,当二者距离为216 m时,裂缝完全闭合,后续观测显示,裂缝未出现裂开现象。

地裂缝主要是由于地表不均匀沉降形成的,据随机介质理论以及概率积分法,单元开采造成的地表下沉盆地,其函数形式与正态分布概率密度函数相同,地裂缝宽度分布也近似于高斯分布。任意动态裂缝的任意监测点的宽度演变规律的函数模型为 $u(x) = KW(x)$ ,其中, $K$ 为修正系数,取值范围为0~1; $W(x)$ 为裂缝最大宽度动态发育函数模型。

以第25条(SD\_025)裂缝为例,5号监测点裂缝宽度最大,采用高斯分布模型,地表裂缝宽度拟合结果如图2所示。

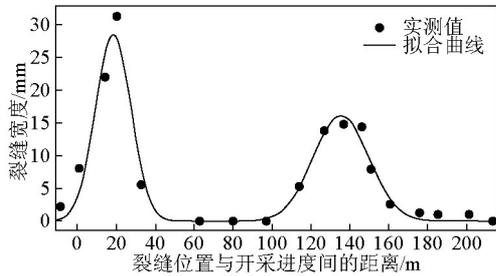


图2 动态裂缝发育过程的函数模型示意图

Fig.2 Function model diagram of dynamics fracture development process

拟合函数模型为:

$$W(x) = 28.52e^{-((x-18.35)/12.87)^2} + 16.1e^{-((x-135.5)/20.18)^2}$$

$R^2=0.9594$ 。其中, $x$ 为回采工作面与裂缝之间的相对距离,m; $W(x)$ 为裂缝的宽度,mm; $R^2$ 为 $W(x)$ 和 $x$ 的相关系数。

研究表明,西部现代开采条件下采动覆岩结构具有层状自修复趋势,近地表土壤结构具有自修复能力。开采的过程中地表受到水平变形、曲率变形、倾斜变形的影响,其中裂缝的发育主要是地表水平拉伸变形达到临界值后产生。随着工作面的推进,地面点反复经历拉伸与压缩的变形影响,监测裂缝从裂缝出现至完全闭合,具有阶段性的周期变化规律,称之为裂缝的生命周期。该区域动态裂缝生命周期约为18天,工作面推进约230 m,约等于该工作面平均采深。

### 2.3.2 地形变化

神东矿区开发应用了超大工作面开采技术,即工作面推进距离在3 000~6 000 m、工作面长度300 m以上和采高在6 m以上,超大工作面与传统工作面示意图如图3所示。

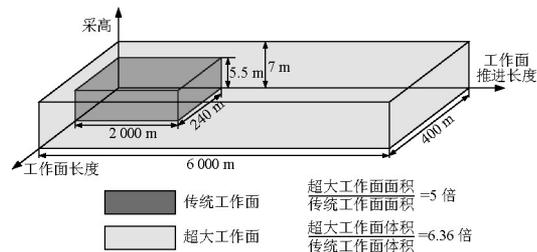


图3 超大工作面与传统工作面示意图

Fig.3 Extra large mining face and traditional mining face

研究表明,应用超大工作面开采对地表环境扰动次数显著减少,有利于动态裂缝的自修复和植物的生长<sup>[3]</sup>。超大工作面开采与传统工作面开采相比具有如下优点:a.地表下沉时间短(扰动时间短);b.沉陷盆地中间部位动态变形的最大值小于边缘的静态变形,如水平变形仅为静态变形区域的60%~80%;c.地表扰动次数少;d.地表裂缝少;e.均匀沉降面积增大,均匀沉陷面积增加40%以上,如图4所示。

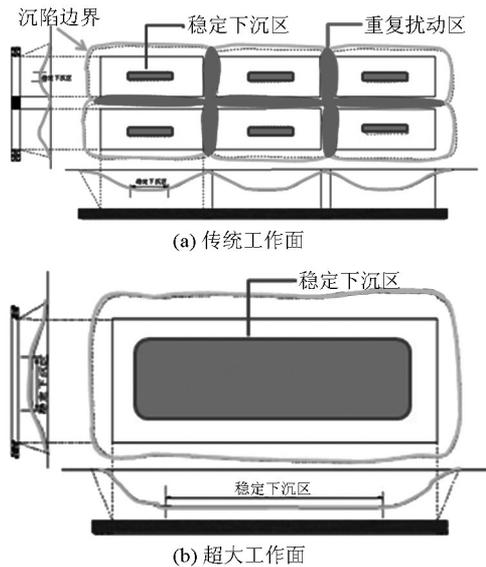


图4 超大工作面与传统工作面地表扰动对比示意图

Fig.4 Surface disturbance comparison diagram of extra large mining face and traditional mining face

## 3 现代开采水资源保护技术

### 3.1 保水开采实践

研究表明现有的充填开采、限高开采等保水开采技术难以适应能源“金三角”地区浅埋深、薄基岩的煤层地质条件和现代开采技术的要求。如神东矿区多采用一次采全高开采工艺,工作面年产量在 $1 \times 10^7$  t/a以上,而目前国内充填开采工作面平均产量在 $5 \times 10^5$  t/a,最大不超过 $1 \times 10^6$  t/a,若采用充填开采,将极大地限制工作面开采效率和效益。同时,由于采高、工作面长度等开采参数大,采空区面积大,寻找充足和合适的充填材料也是一大难题,且充填开采增加了成本。

以神东大柳塔矿为例,若采用限高开采,则造成大量煤炭资源浪费。相关研究表明,该地区冒裂带高度一般为开采高度的30倍左右,取冒裂比为

31, 计算该矿各煤层可采采高如图5所示。

由此可见,若采用限高开采保护上覆含水层,则1<sup>-2</sup>煤、2<sup>-2</sup>煤和5<sup>-2</sup>煤的弃煤率将分别达到51%、74%和26%。显然这是无法实施的。

对于类似于大柳塔矿的西部浅埋深煤层而言,采用限高开采工艺煤炭资源回收率将大幅降低。因此,必须开发符合西部现代开采特点的水资源保护技术。

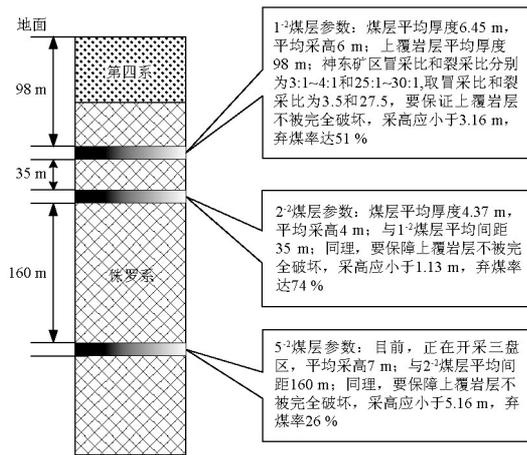


图5 神东矿区大柳塔矿限高开采计算

Fig.5 Limit high mining calculation of Daliuta mine in Shendong area

### 3.2 煤矿分布式地下水库技术

采用现代开采技术开采上述地质条件的煤层,上覆含水层的水体必然运移至煤矿井下形成矿井水,为了保证煤矿安全生产,必须将矿井水外排至地表,外排地表的矿井水将很快蒸发损失。因此,要保水就不能外排矿井水,即要把矿井水存于煤矿井下。据此,开发了煤矿分布式的地下水库技术。煤矿分布式地下水库技术包括水库规划与选址、建设、运行、监控管理等,是对开采形成的采空区加以改造形成地下储水空间(地下水库),将同一水平、不同水平,甚至矿区的多个井下含水层或煤矿地下水库通过人工通道连通,根据采煤生产接续计划,对矿井水进行分时分区储存,在地面建设相应的抽采与回灌工程,实现矿井水的抽采利用与回灌储存,形成分布式地下水库,实现矿井水不外排及有效利用<sup>[3]</sup>。

1)煤矿分布式地下水库规划与选址技术。要综合考虑矿井水运移规律及工程地质条件、水文地质条件、开采工艺、采掘接续规划,以及便于水资源

库间调度、抽出利用和回灌储存保护等因素,规划和确定煤矿分布式地下水库的建设地点。

2)煤矿分布式地下水库库容计算。根据矿井涌水量、地下空间尺寸、松散岩体孔隙率等参数,计算水库的库容,确定在某一区域煤矿分布式地下水库数量。通过相似模拟和现场观测,确定采空区冒落高度和空间及储水空间大小,计算储水系数,根据矿井水涌出量和回灌水量,确定水库库容及水库数量。

3)坝体建设技术。煤矿分布式地下水库坝体不同于地面水库的坝体,它处于采动上覆岩层动态变化的矿山压力作用下,其受力边界条件也是动态变化的。采用理论计算、实验室模拟和现场观测相结合的综合方法,研究确定坝体的结构设计、强度校核和建设技术。

4)水体调运技术。主要包括煤矿分布式地下水库补给量和煤矿分布式地下水库抽排量。煤矿分布式地下水库的水体补给主要包括自然补给和人工补给。要根据矿井上下矿井水的需求、地下水库库容、地下水库分布及水库储水安全要求等,科学配置地下水库中水资源的调入和调出。

5)安全监测与应急保障技术。煤矿分布式地下水库安全智能控制系统由传感器、若干个测量控制单元(MCU)、数据处理中心和可视化平台等组成,并充分利用现有的安全监测和自动化系统,实现数据传输共享和应急远程自动化控制。地下水库安全监测可视化平台主要包括数据储存子系统、数据可视化子系统、监测数据可视化子系统和安全预警子系统等,如图6所示。当水量、水位等指标超过预警值时,通过疏排水阀门等进行自动调节,将水排至泄水空间或调运至其他水库,保证地下水库的安全运行。

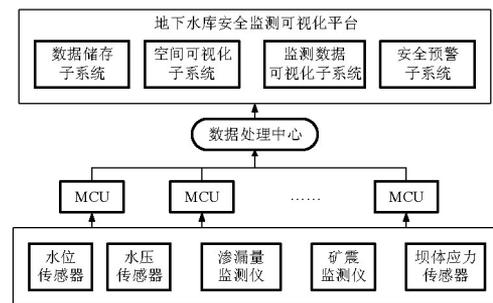


图6 地下水库安全监测系统框架图

Fig.6 Safety supervision framework of coal mine distributed underground reservoirs

### 3.3 大柳塔矿水资源保护示范工程

在神东大柳塔矿建设了煤矿分布式地下水库示范工程,如图7所示。目前,大柳塔矿1<sup>2</sup>煤和2<sup>2</sup>煤均已开采完毕,正在开采5<sup>2</sup>煤。经测算大柳塔井采空区投影面积达 $5.3967 \times 10^7 \text{ m}^2$ ,为煤矿分布式地下水库提供了足够的储水空间。综合采空区工程地质、煤壁强度和渗透性和地面用水需求等因素,选取2<sup>2</sup>煤四盘区、六盘区等采空区进行储水,并通过联巷或管道相连,形成煤矿分布式地下水库。同时,将正在开采的5<sup>2</sup>煤的矿井水,由排水钻孔向上泵排至2<sup>2</sup>煤层,通过注水孔分别注入四盘区、六盘区的采空区,利用矸石对矿井水井下净化处理并储存。目前,2<sup>2</sup>和5<sup>2</sup>煤层矿井水约10 800 m<sup>3</sup>/日,全部通过不同水平间的连接管道由注水孔注入到2<sup>2</sup>煤层的四盘区、老六盘区和新六盘区地下水库,经采空区自然过滤后,其中,3 500 m<sup>3</sup>的净化水供地面生产和生态绿化使用,其余部分储存于地下水库或供井下生产使用;实现了矿井水的循环利用。该工程于2010年建成使用,目前,大柳塔矿通过煤矿分布式地下水库储水约 $2.3 \times 10^6 \text{ m}^3$ ,实现了矿井水不外排,真正实现了保水开采,每年产生直接经济效益5 000多万元。神东矿区通过推广应用煤矿分布式地下水库技术,已在18个矿井储水2 700多万立方米,取得了显著的经济和社会效益。

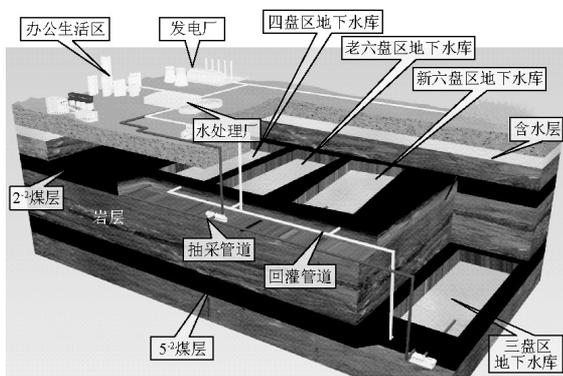


图7 大柳塔矿地下分布式水库(含水层转移)示意图

Fig.7 Daliuta mine distributed underground reservoirs (aquifer transfer) diagram

### 4 现代开采地表生态保护技术

本文开发了现代开采技术下煤矿区生态环境主动型自修复技术,主要包括以下三个方面:

1) 基于开采工艺参数的土壤结构损伤调控方

法,开发应用了超大工作面现代开采工艺技术,增加了地表均匀沉陷面积,减少了扰动次数,裂缝区面积减少;与传统工作面相比,扰动次数减少2/3,地面裂缝损伤区域面积减少45%,提高了土壤保水能力,减少水土流失;应用超大工作面开采技术,不仅提高了煤炭回采率,也减少了对地表生态的损伤,为地表生态自修复创造了条件。

2) 针对西部生态脆弱区应尽量减少工程扰动的要求,遵循生态学原理和煤炭现代开采对地表生态的影响规律,为减少地裂缝对地表水以及土壤理化性质的影响,缩短其复垦周期,确定了最佳的修复时间应处于地表裂缝演化的裂缝再次发育阶段,距离裂缝产生的时间大约10~11天,回采面与裂缝的距离约为108 m。

3) 研发了采煤沉陷区种植方法,确定植物修复型沉陷地治理的1-2-5技术模式:“1”是以灌草为主和工程修复以裂缝治理为主的植物修复思路;“2”是适用黄土沟壑区和风沙区采煤沉陷地治理的两种技术模式;“5”是集塌陷、土壤、植被要素分类综合治理的5类技术流程(非小流域、小流域区域、高大流动沙丘、半固定沙丘和道路沙害),以及基于微生物对开采扰动的敏感性和适应性,确定以菌根微生物为主的植物功能促进自我修复方法<sup>[4,5]</sup>。矿区生态环境主要指标——植被覆盖度已超过80%,近4年(2008—2011)平均为76%。

### 5 结语

我国西部地区,特别是能源“金三角”地区已成为我国煤炭开发的主战场。该地区大规模高强度煤炭开发面临的主要矛盾是短缺的水资源的保护和脆弱地表生态的修复问题。研究表明,在能源“金三角”浅埋深、薄基岩、厚煤层条件下,大规模、高效率、高回采率煤炭现代开采时,上覆岩层一般只产生冒落带和裂隙带,且冒裂带贯穿上覆含水层,使含水层破坏,造成大量矿井水迁移至煤矿井下。为了煤矿安全生产,传统方法是将矿井水外排地表。但该地区干旱缺水,外排地表的矿井水很快蒸发,这是水资源破坏和损失的主要原因。因此,该条件下的保水思路只能是将矿井水储存于井下。据此,首次提出了煤矿分布式地下水库的概念,研发了成套技术,为矿井水井下储存创造了条件。

本文研究发现,该地区煤炭开采地表生态具有“自修复”功能,且综采工作面面积增加,“自修复”

功能增强。据此,首次提出利用“自修复”机理,使地表生态主动性减损和修复的技术路线,开发应用了超大工作面综采工艺,使工作面面积大大增加,促进了地表生态的“自修复”。

煤矿分布式地下水库技术体系的建立和大柳塔煤矿分布式地下水库工程示范的成功,实现了矿井水不外排的目标,目前神东矿区井下储水已达 $2.7 \times 10^7 \text{ m}^3$ ,对能源“金三角”煤炭现代开采水资源保护具有战略意义。同时利用地表生态“自修复”功能,通过加大工作面面积,促进地表生态的“自修复”,实施地表生态主动性减损和修复,使神东矿区地表植被覆盖率超过80%,对该地区地表生态保护

具有指导意义。

#### 参考文献

- [1] 顾大钊, 张建民. 西部矿区现代煤炭开采对地下水赋存环境的影响[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(12): 114-117.
- [2] 李全生, 贺安民, 曹志国. 神东矿区现代煤炭开采技术下地表生态自修复研究[J]. 煤炭工程, 2012, 12: 120-122.
- [3] 顾大钊. 煤矿分布式地下水库技术及其应用[C]//中国工程院/国家能源局第二届能源论坛论文集. 北京:煤炭工业出版社, 2012, 68-74.
- [4] 胡振琪, 纪晶晶, 王幼珊, 等. AM真菌对复垦土壤中苜蓿养分吸收的影响[J]. 中国矿业大学学报, 2009, 38(3): 428-432, 449.
- [5] 胡振琪, 康惊涛, 魏秀菊, 等. 煤基混合物对复垦土壤的改良及苜蓿增产效果[J]. 农业工程学报, 2007, 23(11): 120-124.

## Water resource and surface ecology protection technology of modern coal mining in China's energy "Golden Triangle"

Gu Dazhao

(Shenhua Group Corporation Ltd., Beijing 100011, China)

**[Abstract]** The energy "Golden Triangle", which consists of Shanxi, Shaanxi, Inner Mongolia, Gansu and Ningxia, accounts for two-thirds of coal reserves and the overall coal production of China. The energy "Golden Triangle" plays an important role in the country's coal supply network, but it has only 3.9 percents of water resource in China. According to the contradiction between modern coal mining and severe water scarcity, the groundwater migration law and surface ecology environment self-recovery law with the development of modern coal mining is revealed, using innovative research method based on modern coal mining project of Shendong area. The coal mine distributed underground reservoirs and surface ecology recovery technology is firstly developed under the condition of modern coal mining in Western China, and the demonstration project is successfully established, which puts forward effective technical way to conservation of water resources and surface ecology recovery.

**[Key words]** energy "Golden Triangle"; modern coal mining; water resource and surface ecology; protection technology