

采矿活动和气候变化对煤矿区生态环境损失的影响

徐占军¹, 侯湖平^{1,2}, 张绍良^{1,2*}, 丁忠义^{1,2},
马昌忠^{1,2}, 公云龙¹, 刘严军³

(1. 中国矿业大学环境与测绘学院, 徐州 221116; 2. 江苏省资源环境信息工程重点实验室, 徐州 221116;
3. 山西长治国土资源局, 长治 046000)

摘要: 系统评价煤矿区生态环境损失驱动因素的相对作用力, 对矿区土地资源配置和生态环境治理具有重要指导作用。该文从生态学的角度, 以徐州矿区为例, 选择植被净初级生产力作为统一气候变化和采矿活动对矿区生态环境损失的衡量指标, 通过该指标实现气候变化和采矿活动对矿区生态环境损失的可比性。研究表明: 1) 矿区植被净初级生产力 NPP 变化是气候因素和采矿因素综合作用的结果, 气候变化对 NPP 的影响范围为 0.111~3.333 g/(m²·月) (以每月每平方米植被生产的 C 计) 之间, 采矿活动对 NPP 影响的范围为 90.525~107.892 g/(m²·月), 采矿活动对 NPP 的影响大于气候变化对 NPP 的影响, NPP 变化对采矿活动具有敏感性。2) 气候变化推动 NPP 是向正向发展, 采矿活动推动 NPP 向负向发展。1987—1998 年采矿活动是推动 NPP 变化的主导因素, 1998—2005 年气候变化是推动 NPP 变化的主导因素, 2005—2008 年采矿活动成为推动 NPP 变化的主导因素, 同时, 随着采矿活动的加剧, 采矿活动对 NPP 推动变成主导因素, 并且推动 NPP 向负向发展的比例在增大。3) 在采矿活动破坏区内, 采矿活动对矿区生态环境的影响具有主导作用, 主要表现为耕地 NPP 的大幅下降, 通过土地复垦措施增加林地的 NPP, 可改变矿区生态环境的发展方向; 在采矿活动的影响区内, 气候变化对生态环境的影响具有主导作用。

关键词: 气候变化, 生态, 煤矿, 采矿活动, 相对作用

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.05.039

中图分类号: X171

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-05-0232-09

徐占军, 侯湖平, 张绍良, 等. 采矿活动和气候变化对煤矿区生态环境损失的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(5): 232—240.

Xu Zhanjun, Hou Huping, Zhang Shaoliang, et al. Effects of mining activity and climatic change on ecological losses in coal mining areas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(5): 232—240. (in Chinese with English abstract)

0 引言

随着煤炭资源的大规模开采, 煤矿区土地利用和生态环境产生或轻或重的负面影响, 尤其是地下开采造成了土地大面积塌陷, 导致农作物减产、土地利用结构变化、土壤污染、地下水系破坏等, 使得矿区生态系统的微气候、水文、植被、生物等生境发生变化, 造成整个矿区生态环境破坏, 进而发展为不可逆转的生态问题^[1-2]。对于矿区生态环境评价的研究比较多, 目前主要采用多指标法进行评价^[3-6], 但该方法在不同矿区无法进行比较。采煤对矿区生态环境的影响形成了具有采矿活动特征的地表植被的格局与变化过程, 因此本文从植被变化入手, 引入植被净初级生产力 (net primary productivity, NPP)

研究矿区生态损失量。NPP 与植被本身生物学特性及降水、温度等区域环境因素密切相关^[7-8], 并能够以统一的尺度标准来衡量区域生态系统结构和功能的变化过程对植被的影响程度, 并直接反映植被群落在自然环境条件下的生产能力, 表征矿区生态系统运行质量状况。因此分析采矿对 NPP 的影响可以作为矿区生态环境效应研究的重要组成部分。文献[9]研究表明, 矿区 NPP 对采矿活动的反映具有敏感性。因此, NPP 能够以统一的尺度标准来衡量矿产资源开发过程对地表植被的影响程度。

对于采矿活动对矿区生态系统的影响, Hou Huping 等^[10]研究结果表明采矿因素、地质因素、地下水活动等对矿区生态系统的生境产生不同程度的影响。其中煤层的埋深、煤层倾角、上覆岩层的岩性、地质构造是生态环境要素变化的主要控制因素, 表现为地表沉陷下沉, 土壤质量下降, 水分受到污染; 植被覆盖度降低, 生物量减小; 生态景观的形状指数降低, 平均分维数减小, 生物多样性增大, 景观异质性增大。

本文在上述研究的基础上, 进一步探究矿区 NPP 变化的驱动力。将煤矿区推动生态系统变化的影响因素归为两大类, 主要是气候因素和采矿活动因素, 气候因素包括温度、水分等, 采矿活动因素包括煤炭储量、采矿方式、地质因素等。为了研究方便, 将土地复垦活动也

收稿日期: 2011-05-18 修订日期: 2012-02-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51074154); 江苏省资源环境信息工程重点实验室基金资助项目 (JS200903); 教育部新世纪优秀人才支持计划基金资助项目 (NCET-07-0805); 江苏省资源环境信息工程重点实验室基金资助项目 (20080301); 江苏高校优势学科建设工程资助项目。

作者简介: 徐占军 (1983—), 男, 汉族, 山西省朔州市人, 博士生, 主要从事土地利用, 矿区生态修复方面的研究。Email: zjxu163@126.com

*通信作者: 张绍良 (1968—), 男, 汉族, 安徽太湖人, 教授, 博士生导师, 主要从事土地评价、矿区生态监测方面的研究。Email: slzhang@vip.163.com

农业工程学会会员: 徐占军 (E040000268A)

是为采矿活动之一。以 NPP 作为矿区生态损失的本质指标，将两类影响因素对矿区生态系统的影响统一到对 NPP 的影响上，通过研究气候变化对 NPP 的影响和采矿活动对 NPP 的影响，建立气候变化和采矿活动引起的 NPP 变化与生态损失的对应关系，从而计算相应空间上气候变化与采矿活动在推动矿区生态系统演变过程中的相对作用。

1 材料与方法

1.1 研究区域

研究区域位于徐州九里煤矿区，地处温暖带湿润半湿润大陆性季风气候区，年均气温 14℃，无霜期 200~230 d，年日照时数为 2284~2495 h，日照率 52%~57%，年平均降水量 800~930 mm，常年主导风向东北偏东，风速 2.1 m/s。土壤类型以棕土、褐土、潮土为主，土地利用类型主要以耕地为主。研究区域煤矿密集，有庞庄、夹河、垓城、卧牛山等 4 个大型煤矿，6 个矿井，矿区面积 230 km²。其中夹河煤矿年生产能力 150 万 t/a，垓城煤矿年生产能力 105 万 t/a，庞庄煤矿的庞庄井年生产能力 120 万 t/a，庞庄煤矿张小楼井年生产能力 105 万 t/a，庞庄煤矿的东城井于 2005 年关闭，卧牛山煤矿的年生产能力 15 万 t/a，属于资源枯竭、濒临关闭的衰老矿井。煤田含煤地层属石炭二迭系，煤系地层厚度平均 485 m，包括 3 个含煤组，自下而上为上石炭统太原组，下二迭统山西组及石盒子组。煤系地层共含煤 29 层，可采 17 层，可采煤层总厚度平均 19.49 m，含煤系数 4.02%。

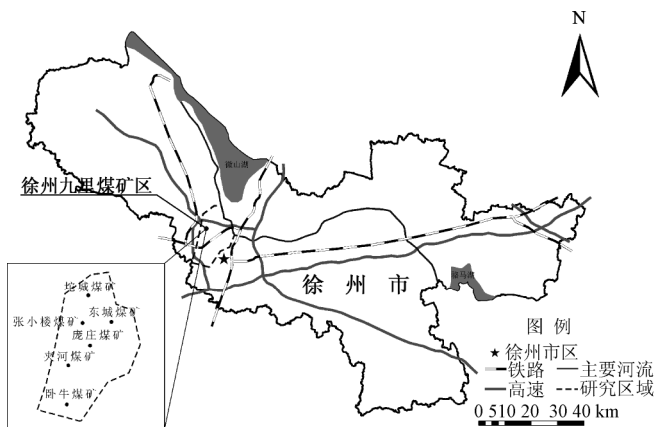


图 1 徐州九里煤矿区地理位置示意图

Fig.1 Location of Xuzhou Jiuli coal mining area

1.2 数据来源

本研究以六月份 NPP 的变化量对矿区生态损失进行研究，选取 Landsat5 TM 数据，轨道号为 121-36，日期为 1987 年 6 月 8 日、1998 年 6 月 6 日、2005 年 6 月 19 日、2008 年 6 月 1 日，分辨率为 30 m。所有数据都进行了日照差异纠正、图像几何校正，采用决策树分类法和支持向量机法进行土地植被覆盖分类。由于研究区域属于高潜水位矿区，采矿破坏表现为地表沉陷积水和矸石山的压占，同时 6 月份植被主要以小麦为主，其次分布零星的苗圃林地，因此将土地植被覆盖分为耕地、林地、

水域、建设用地、废弃地等 5 类。

气象数据来源于徐州市气象局 11 个气象监测站点的 1987、1998、2005、2008 年的六月份的平均降水量、平均气温、太阳总辐射、平均相对湿度、平均实际蒸发量，以及 11 个气象站点的经纬度。然后采用空间插值分析法得到像元大小与土地覆盖分类数据投影相同、空间分辨率相同的气象要素栅格图。

1.3 研究方法

1.3.1 生态损失量的测算方法

NPP 是表达生态系统能量大小和物质质量的直接指标，本文以此作为生态损失量化指标。

NPP 的测算可以用改进 CASA (carnegie-ames-stanford approach) 模型，它是由遥感数据、温度、降水、太阳辐射，以及植被类型、土壤类型共同驱动的光能利用率模型。该模型中 NPP 是植被吸收光合有效辐射 (APAR)、光能利用率 (ϵ) 的函数^[11]，见其基本式 (1)。采用 GIS 软件和 ENVI 软件，利用 IDL 语言编程，来测算 NPP^[9]。

$$NPP_{(x,t)} = APAR_{(x,t)} \times \epsilon_{(x,t)} \quad (1)$$

式中， $APAR_{(x,t)}$ 表示像元 x 在 t 月份植被所吸收的光合有效辐射，MJ/m²； $\epsilon_{(x,t)}$ 表示像元 x 在 t 月份光能利用率，g/MJ； t 表示时间， x 表示像元。

$$\begin{aligned} APAR_{(x,t)} &= PAR_{(x,t)} \times FPAR_{(x,t)} \\ &= SOL_{(x,t)} \times 0.5 \times FPAR_{(x,t)} \end{aligned} \quad (2)$$

其中， $PAR_{(x,t)}$ 表示 t 月份 x 像元处的光合有效辐射，MJ/m²； $FPAR_{(x,t)}$ 表示 t 时间 x 像元处的植被光合有效辐射的吸收比例； $SOL_{(x,t)}$ 表示 t 月份 x 像元处的太阳总辐射量，MJ/m²；常数 0.5 表示植被所能利用的太阳有效辐射（波长为 0.38~0.71 μm ）占太阳总辐射大约一半的比例^[12-13]。

$$\epsilon_{(x,t)} = T\epsilon_{1(x,t)} \times T\epsilon_{2(x,t)} \times W\epsilon_{(x,t)} \times \epsilon^* \quad (3)$$

式中， $T\epsilon_{1(x,t)}$ 和 $T\epsilon_{2(x,t)}$ 表示温度胁迫系数，反映温度对光能利用率的影响； $W\epsilon_{(x,t)}$ 表示水分胁迫影响系数，反映水分条件的影响； ϵ^* 是理想条件下的最大光能利用率，g/MJ^[14-16]。

1.3.2 气候因素和采矿因素对 NPP 影响的计算方法

本研究中采用 CASA 模型计算的 NPP 为实际 NPP，是气候因素和采矿活动因素综合作用的结果，需要将气候因素和采矿活动因素对 NPP 的影响区分开来。

1) 气候因素对 NPP 影响的计算方法

气候变化对 NPP 的影响主要是通过气温、水分、太阳辐射等因子来影响植被的光合作用、呼吸作用、蒸腾作用等进而影响 NPP，因此，假定其他因素没有变化，只考虑气候因素对 NPP 的影响来测算矿区 NPP 即为气候变化对 NPP 的影响值，即为潜在 NPP。

潜在 NPP 的测算主要是指受气候作用影响的 NPP。根据 Budyko 的辐射平衡公式^[17]以及 IBP 研究计划对世界潜在植被净初级生产力 (NPP) 的研究而编制的 Chikug 模型进行计算，该模型对 NPP 的估算时，只考虑植被的气候因子，即太阳辐射、蒸发量、气温、水分等因素^[18]，因此该模型测算的结果可以作为潜在 NPP，计算式为

$$NPP' = 0.29 \times [\exp^{(-0.216 \times RDI)}] \times Rn \times 0.45 \times 0.0917 \quad (4)$$

式中, RDI 为月平均辐射干燥度; Rn 为月陆地表面所获得净辐射, mm; NPP 潜在植被净初级生产力, $g/(m^2 \cdot 月)$ 。

2) 采矿活动对 NPP 影响的计算方法

本研究通过模型测算的 NPP 是实际的 NPP, 通过文献查询可知, NPP 主要受气候变化影响和人为活动的影响, 因此本研究是基于一定的假设条件: 假定矿区 NPP 的变化只受采矿活动和气候变化的影响。因此, 采矿活动对 NPP 的影响采用潜在 NPP 与实际 NPP 差值来衡量, 即

$$NPP'' = NPP' - NPP \quad (5)$$

式中, NPP'' 指采矿活动对植被净初级生产力的影响值, $g/(m^2 \cdot 月)$; NPP 指气候条件影响的植被净初级生产力, 即潜在 NPP, $g/(m^2 \cdot 月)$; NPP' 指根据改进的 CASA 模型测算的 NPP, 即实际 NPP, $g/(m^2 \cdot 月)$ 。

1.3.3 NPP 变化趋势分析

采用一元线性回归分析法对比分析矿区不同时相 NPP 的变化特征, 模拟每个栅格的变化趋势采用最小二乘法的线性回归斜率来计算, 计算式为

$$\Theta_{Slope} NPP_{t \rightarrow t+i} = \frac{i \times \sum_{j=t}^{t+i} j \times \overline{NPP}_j - (\sum_{j=t}^{t+i} j)(\sum_{j=t}^{t+i} \overline{NPP}_j)}{i \times \sum_{j=t}^{t+i} j^2 - \left(\sum_{j=t}^{t+i} j \right)^2} \quad (6)$$

式中, i 为监测时间段的年数; \overline{NPP}_j 为第 j 年 NPP 的平均值, $g/(m^2 \cdot 月)$; $\Theta_{Slope} NPP_{t \rightarrow t+i}$ 是趋势线的斜率; t 为监测时间的起点。当其斜率为正, 表示 NPP 向增加方向发展, 生态系统向正向发展, 有利于矿区生态的可持续发展; 反之 NPP 向减少的方向发展, 矿区生态环境向逆向发展, 应该加强生态环境的保护工作。根据 $\Theta_{Slope} NPP_{t \rightarrow t+i}$ 在研究区域的变化范围, 将其增减情况分为 5 个变化区间, 轻微变化 ($0 < \Theta_{Slope} NPP_{t \rightarrow t+i} \leq 3$); 一般变化 ($3 < \Theta_{Slope} NPP_{t \rightarrow t+i} \leq 15$); 中度变化 ($15 < \Theta_{Slope} NPP_{t \rightarrow t+i} \leq 25$); 明显变化 ($25 < \Theta_{Slope} NPP_{t \rightarrow t+i} \leq 60$); 重度变化 ($\Theta_{Slope} NPP_{t \rightarrow t+i} > 60$)。

1.3.4 采矿活动和气候因素的相对作用评价方法

矿区 NPP 在不同年际的变化是气候变化和采矿活动共同作用的结果, 根据气候变化和采矿活动对植被净初级生产力测算原理^[19-20], 得出气候变化对生态系统植被净初级生产力的相对作用测算式为

$$R_{climate} = \frac{|NPP'_{t2} - NPP'_{t1}|}{|NPP'_{t2} - NPP'_{t1}| + |NPP''_{t2} - NPP''_{t1}|} \times 100\% \quad (7)$$

采矿活动对生态系统植被净初级生产力的相对作用测算式为

$$R_{human} = \frac{|NPP''_{t2} - NPP''_{t1}|}{|NPP'_{t2} - NPP'_{t1}| + |NPP''_{t2} - NPP''_{t1}|} \times 100\% \quad (8)$$

式中, NPP'_{t1} 为 $t1$ 时刻气候条件影响的植被净初级生产力, $g/(m^2 \cdot 月)$; NPP'_{t2} 为 $t2$ 时刻气候条件影响的植被净初

级生产力, $g/(m^2 \cdot 月)$; NPP''_{t1} 为 $t1$ 时刻气候条件影响的植被净初级生产力, $g/(m^2 \cdot 月)$; NPP''_{t2} 为 $t2$ 时刻气候条件影响的植被净初级生产力, $g/(m^2 \cdot 月)$; $R_{climate}$ 气候条件对植被净初级生产力的相对作用力, %; R_{human} 为采矿活动对植被净初级生产力的相对作用力, %。

气候变化和采矿活动均有可能推动矿区生态系统 NPP 向正向和逆向 2 个方向发展。其中正向发展的可能情景有以下 5 种:

1) 气候变化的作用是正向的, 采矿活动没有影响。这时气候变化对 NPP 的作用为 100%, 生态系统 NPP 的变化完全受气候变化的影响且沿着正向方向发展。

2) 采矿活动的作用是正向的, 气候变化没有影响。这时采矿活动对 NPP 的作用为 100%, 生态系统 NPP 的变化完全受采矿活动的影响且沿着正向方向发展。

3) 气候变化的作用是正向的, 采矿活动的作用是正向的。这时气候变化和采矿活动对 NPP 的作用分别为 $R_{climate}$ 和 R_{human} , 生态系统 NPP 的变化是气候变化和采矿活动综合作用的结果, 共同推动生态系统向正向方向发展。

4) 气候变化的作用是逆向的, 但采矿活动的作用是正向的。这时生态系统的变化受气候变化和采矿活动的综合作用。当气候变化的相对作用 $R_{climate}$ 小于采矿活动的相对作用 R_{human} 时, 生态系统向正向方向发展。

5) 气候变化的作用是正向的, 但采矿活动的作用是逆向的。这时生态系统的变化也受到气候变化和采矿活动的综合作用。当气候变化的相对作用 $R_{climate}$ 大于采矿活动的相对作用 R_{human} 时, 生态系统向正向方向发展。

矿区生态系统 NPP 逆向演变的可能情景有以下 5 种:

1) 气候变化的作用是逆向的, 采矿活动没有影响。这时气候变化对 NPP 的作用为 100%, 生态系统 NPP 的变化完全受气候变化的影响且沿着逆向方向发展。

2) 采矿活动的作用是逆向的, 气候变化没有影响。这时采矿活动对 NPP 的作用为 100%, 生态系统 NPP 的变化完全受采矿活动的影响且沿着逆向方向发展。

3) 气候变化的作用是逆向的, 采矿活动的作用也是逆向的。这时气候变化和采矿活动对生态系统的作用分别为 $R_{climate}$ 和 R_{human} , NPP 的变化是气候变化和采矿活动综合作用的结果, 共同推动生态系统向逆向方向发展。

4) 气候变化的作用是正向的, 采矿活动的作用是逆向的。这时生态系统 NPP 的变化受气候变化和采矿活动的综合作用。当气候变化的相对作用 $R_{climate}$ 小于采矿活动的相对作用 R_{human} 时, 生态系统向逆向方向发展。

5) 气候变化的作用是逆向的, 采矿活动的作用是正向的。这时生态系统 NPP 的变化受气候变化和采矿活动的综合作用。当气候变化的相对作用 $R_{climate}$ 大于采矿活动的相对作用 R_{human} 时, 生态系统向逆向方向发展。

2 结果与分析

2.1 气候因子对矿区 NPP 的影响分析

研究区域内温度空间差异不到 3°C , 降水空间差异也不到 10 mm, 但时间分布差异比较大, 温度变化范围为

0~4.2℃且随着时间推移温度趋向于增加。降水量的变化范围从 0.8~337.8 mm，6 月份的变化范围为 16.2~116.3 mm。根据表 1 可知，同一时期内 NPP 变化幅度为 0.110~3.333 g/(m²·月)，变化幅度比较小。不同时期内变化幅度大，为-48.99~25.194 g/(m²·月)，对 NPP 的变化与温度、降水进行相关性分析，NPP 变化与温度变化呈正相关 ($r=0.941, p<0.01$)，NPP 变化与降水量变化呈负相关 ($r=-0.728, p<0.01$)，表明 6 月份温度是植物生长的主要限制因子，适宜的温度对植物的生长有较大影响，进而影响植被的生产力，而降水对植被的生产力影响很大。但由于研究区域属于东部平原矿区，属高潜水位区，6 月份属于降水量充沛的时段，同时因采矿造成的地表塌陷，极易形成地面积水和植被淹渍；但植被生长，不仅取决于降水量，更重要的是取决于水热组合和光照条件，

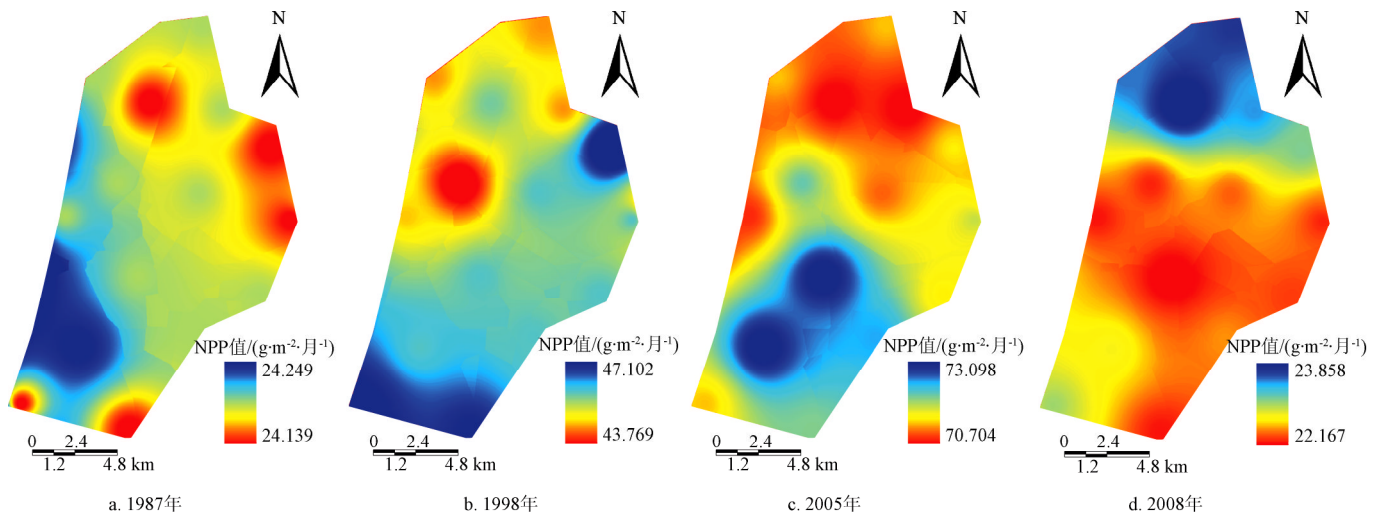
同时与植被的覆盖类型、密度等都有关系。因此，6 月份降水不是该矿区植被生长的主要限制因子，降水过多反而增加了渍害和光照胁迫，具有很强的负相关性。从空间分布来看（图 2），NPP 变化的最大值主要分布在矿区生态的影响区，并且与温度的分布呈一致性。

表 1 气候变化对矿区 NPP 的影响值

Table 1 Impact of climate change on NPP in mining area g·m⁻²·月⁻¹

年份	最大值	最小值	平均值	标准差
1987 年	24.249	24.139	24.186	0.021
1998 年	47.102	43.769	46.500	0.196
2005 年	73.098	70.704	71.694	0.568
2008 年	23.858	22.167	22.704	0.375

注：NPP 为植被净初级生产力，下同。



注：以每月每平方米植被生产的 C 计。

图 2 不同年份气候变化对植被净初级生产力 (NPP) 的影响值

Fig.2 Impact of climate change on net primary productivity (NPP) in different years

气候因子对 NPP 变化趋势 Θ_{slope} ：在 1987—2008 年间， $15 < \Theta_{slope} \leq 25$ ，从表 2 得出，NPP 变化趋势处于中度增加阶段，可以得出，所有气候因子光、热、水、气等的综合作用对 NPP 的影响是正向的，推进矿区生态系统向良好方向发展。

表 2 矿区气候变化导致 NPP 变化趋势统计

Table 2 Change trends statistic of climate change to NPP in mining area g·m⁻²·月⁻¹

NPP 变化趋势	变化级别	1987—1998 年	1998—2005 年	2005—2008 年
15~25	中度增加	19.583~22.963	23.258~24.455	18.920~23.823

2.2 采矿活动因素对矿区 NPP 的影响

从上表 2 可以看出，采矿活动对矿区 NPP 影响的变化比较大，1987、1998、2005、2008 年 NPP 变化幅度分别为 97.736、99.114、90.525、103.890 g/(m²·月)，根据图 3 对 NPP 进行空间分析，随着时间推移，NPP 值小的区域主要分布在垞城矿井、夹河矿井、东城矿井等，这些矿井开发时间相对短，采矿设计产量大；NPP 值大的主

要分布在卧牛矿井、张小楼矿井、及生态影响区等，该矿井设计产量低，可见采矿时间和煤炭产量会导致矿区 NPP 减少。总体上看，1987—2008 年，采矿活动对矿区 NPP 的影响值在不断增加且年均增幅在增大，分别为 2.623、5.718 g/(m²·月)，主要原因是随着经济快速发展，煤炭资源的价值上升，采煤速度迅猛增加，采矿活动对矿区生态环境影响程度增强；尽管采取了相应的修复措施，但土地整理和复垦的速度远低于破坏的速度，造成矿区 NPP 不断下降。

从表 4 得出，在 1987—1998 年采矿活动对矿区 NPP 的影响剧烈，变化趋势大于 25 的面积比例达到 75.58%。在 1998—2005 年，有 491.38 hm² 的 NPP 轻微减少，明显增加的面积与 1998 年相比减少了 418.13 hm²，重度增加的面积与 1998 年的 7 206.26 hm² 相比减少了 7 199.25 hm²，采矿活动对矿区生态环境的影响开始缓和，主要因为这个期间内采矿活动对生态环境的破坏已引起高度重视，开始采取相应的保护性开采的措施，但在开采量大的夹河煤矿、庞庄井等区域，NPP 的影响趋势还是继续增大。在 2005—2008 年 NPP 变化的趋势大幅减小，变化

级别以一般变化为主。分析原因,在 1987—2008 年垵城煤矿区的 NPP 降低量在增大,夹河煤矿、庞庄井和张小楼井的 NPP 降低量的幅度在上涨,卧牛山煤矿、东城井区域的 NPP 降低量在减小,可见,随着采矿生产能力的增大,NPP 的降低速度在增加,矿区生态环境的破坏速度在加剧;矿井在不同生命周期阶段,NPP 变化的分布呈现一定特征,在投产期,NPP 的值开始降低,在稳产高产期,NPP 值降低幅度最大,NPP 降低量达到最大,在衰退期,NPP 降低幅度在减小,并且 NPP 开始向正方向发展。主

要原因是生态系统对采矿造成的破坏具有滞后性,采矿对生态环境的破坏具有累加性。随着采矿时间的增加,开采破坏的程度加剧,破坏面积增大,生物生境遭到破坏的程度增大,使得 NPP 受到采矿的影响越来越大,生态系统开始向负的方向发展。当矿井进入衰退期时,一方面采矿生产力降低,采矿破坏程度降低,同时由于进行土地复垦和生态修复,矿区生态系统处于修复阶段,使得 NPP 降低幅度减小并开始出现增加的趋势,矿区生态环境向良好的方向演替。

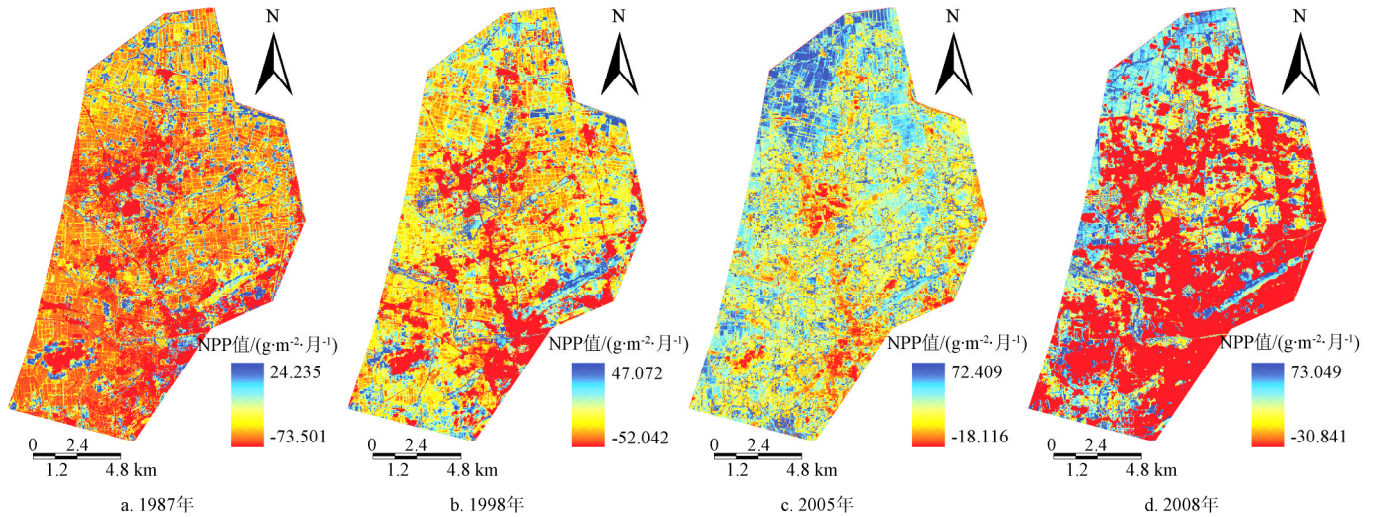


图3 不同年份采矿活动对植被净初级生产力(NPP)的影响

Fig.3 Impact of mining activities on net primary productivity (NPP) in different years

表3 采矿活动对矿区 NPP 的影响值

Table 3 Impact of mining activities on NPP in mining area $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{月}^{-1}$

年份	最大值	最小值	平均值	标准差
1987 年	24.235	-73.501	-6.177	19.540
1998 年	47.072	-52.042	20.573	13.641
2005 年	72.409	-18.116	38.935	12.219
2008 年	73.049	-30.841	56.090	16.385

表4 矿区采矿活动导致 NPP 变化趋势的面积分布特征

Table 4 Area distribution characteristics of NPP Change trends to mining activities in mining area hm^2

NPP 变化趋势	变化级别	1987—1998 年	1998—2005 年	2005—2008 年
>0~3	轻微	0	585.32	5226.45
>3~15	一般	0	4928.51	15722.68
>15~25	中度	5609.69	7538.88	2020.12
>25~60	明显	10153.30	9735.17	0
>60	重度	7206.26	7.01	0

总之,同一时期内气候变化对 NPP 影响的变化幅度为 $0.110\sim 3.333 \text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{月})$ 之间,采矿活动对 NPP 影响的变化幅度为 $90.525\sim 103.890 \text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{月})$,采矿活动对 NPP 的影响大于气候变化对 NPP 的影响,说明 NPP 变化对采矿活动具有敏感性,矿区的生态环境变化可以通过 NPP

的变化来反映。

2.3 气候因子和采矿活动对矿区 NPP 影响的相对作用分析

从图 4、5 和表 5、6、7 得出,采矿活动和气候变化共同综合作用推动矿区 NPP 变化。

在 1987—1998 年,矿区内 NPP 总量下降了 $74\ 121.77 \text{ Pg}/(\text{m}^2\cdot\text{月})$,下降率为 17.91%,其中耕地 NPP 的降低量最大,达到 25.04%。采矿活动推动矿区 NPP 向负向发展,气候变化推动矿区 NPP 向正向发展,但采矿活动是导致矿区 NPP 变化的主导因素,以采矿活动为主的相对作用达到 50%以上的,推进 NPP 向负向发展的土地面积为 $16\ 459.19 \text{ hm}^2$,占总面积的比例为 71.66%,其中采矿活动的相对作用达到 50%~60%的土地面积占总面积的比例达到 44.60%,而气候相对作用达到 40%~50%的土地面积的比例占到 45.19%。分析原因,采矿活动对自然生态环境影响剧烈,由于矿区属于农田生态系统,破坏的土地类型主要以耕地为主,破坏区域分布在采动破坏区,由于采矿活动一方面影响地层结构,破坏地表景观及其生境,导致耕地面积减少和耕地植被覆盖度降低;另一方面是采矿所产生的大气、矸石山、废矿、废渣等对土壤质量、地表植被的影响,是导致矿区 NPP 下降的直接原因。而以气候活动为主的区域主要分布在矿区周边生态环境未受采矿活动影响的区域。

在 1998—2005 年,矿区总 NPP 的减少量 $64\ 704.38 \text{ Pg}/(\text{m}^2\cdot\text{月})$,其中耕地和林地的 NPP 降低量最大,分别为 $13\ 416.03 \text{ Pg}/(\text{m}^2\cdot\text{月})$ 、 $3\ 630.71 \text{ Pg}/(\text{m}^2\cdot\text{月})$,但气候变化因

素是导致矿区 NPP 变化的主要因素，以气候变化为主的相对作用达到 50% 以上的，推进 NPP 向正向发展的土地面积为 19 656.30 hm²，占总面积的比例为 85.58%，采矿活动相对作用达到 50% 以上，推进 NPP 向负向发展的土地面积为 2 691.81 hm²，占总面积的比例 11.72%，推动 NPP 向正向发展的土地面积 473.49 hm²，占总面积比例

2.07%。从空间分布来看，以采矿活动为主推进 NPP 向正向发展的区域主要分布在矿区的采空区，由于已破坏的矿区通过采取生态修复措施生态环境开始恢复，矿区生态系统开始向新的稳定生态系统方向发展。而以气候活动为主推进 NPP 向正向发展的主要分布在矿区周边生态环境未受影响的区域。

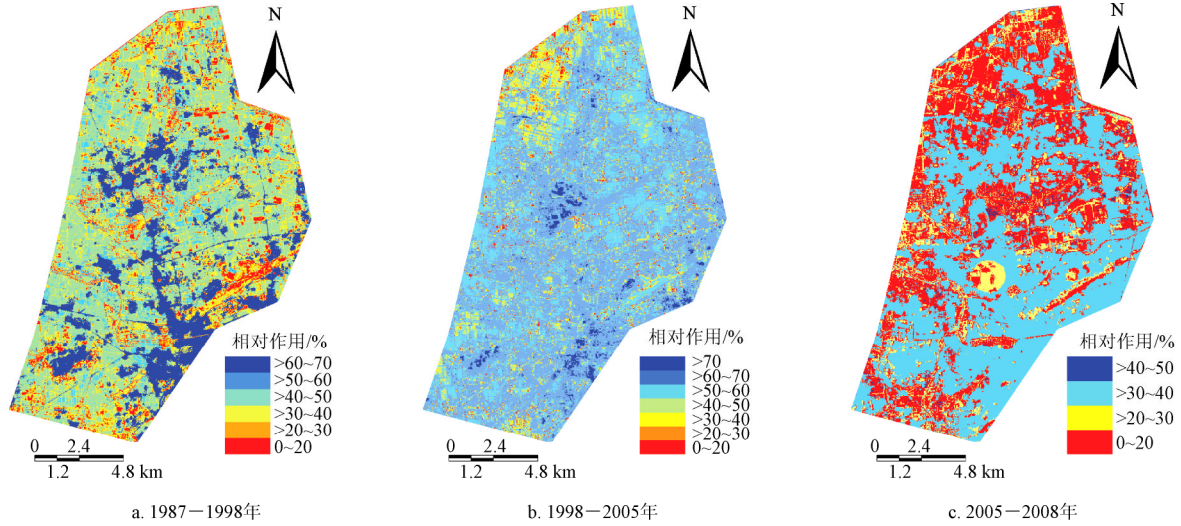


图 4 不同年份气候变化对矿区植被净初级生产力 (NPP) 影响的相对作用图

Fig.4 Relativity of impact of climate change on net primary productivity (NPP) in different years

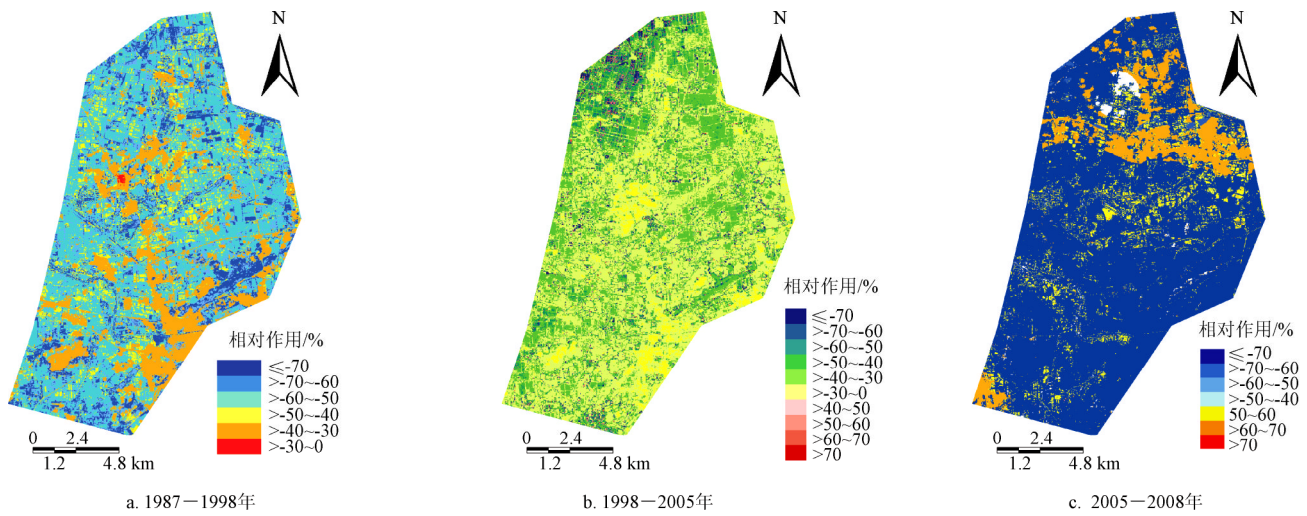


图 5 不同年份采矿活动对矿区植被净初级生产力 (NPP) 影响的相对作用图

Fig.5 Relativity of impact of mining activities on net primary productivity (NPP) in different years

表 5 气候变化对矿区 NPP 影响的相对作用的面积统计表
Table 5 Relative area statistics of impact of climate change to NPP in mining area

相对作用/%	hm ²		
	1987—1998 年	1998—2005 年	2005—2008 年
0~20	1 252.74	45.32	8 500.94
>20~30	1 562.83	182.93	2 597.50
>30~40	3 553.11	808.82	11 866.81
>40~50	10 380.81	2 275.89	4.00
>50~60	1 849.37	7 089.80	0
>60~70	4 370.38	12 029.18	0
>70	0	537.32	0

表 6 采矿活动对矿区 NPP 影响的相对作用面积统计表
Table 6 Relative area statistics table of impact of mining activities to NPP in mining area

相对作用 /%	hm ²				
	1987—1998 年	1998—2005 年		2005—2008 年	
	负向	负向	正向	负向	正向
0~30	0.11	861.71	0	0	0
>30~40	4 370.27	12 345.83	0	0	0
>40~50	2 139.68	6 594.40	2.00	0.80	0
>50~60	10 245.07	1 914.67	298.74	1.84	0.02
>60~70	3 458.07	603.84	136.48	17.66	2 101.94
>70	2 756.06	173.31	38.27	19 019.12	1 827.87

表7 矿区各种用地类型的NPP模拟值

Table 7 NPP simulation value of land cover area of different types in different years

年份	Pg·月 ⁻¹					
	耕地	林地	水域	建设用地	废弃地	总NPP值
2008年	23 891.36	8 156.21	3 723.20	63.50	8.21	212 718.22
2005年	36 045.99	6 716.93	3 532.95	49.82	3.76	275 056.77
1998年	49 462.02	3 086.22	4 676.01	24.72	3.21	339 761.15
1987年	62 646.92	3 017.74	4 038.96	34.68	2.61	413 882.92

在2005—2008年时段内,研究区域的总NPP减少了62 338.55 Pg/(m²·月),其中耕地总NPP的降低量为12 154.63 Pg/(m²·月),而林地的总NPP增加了1 439.28 Pg/(m²·月)。采矿活动是导致矿区NPP变化的主要因素,采矿活动相对作用达到50%以上的土地面积为22 964.63 hm²,占总面积的比例为99.98%;其中17.11%的推进NPP向正向发展,82.89%的推进NPP向负方发展。以气候变化为主相对作用达到40%以上的,推进NPP向正向发展的土地面积为4 hm²,占总面积的比例1.74%。可见,采矿活动是导致矿区NPP变化的主要推动力,但采矿活动推动矿区NPP向正方向发展的比例开始增大,从空间分布来看,以采矿活动为主推进NPP向正向发展的区域主要分布在东城井、张小楼井、垞城矿范围内,由于该区域属于徐州政府老工业基地改造区域,政府投入大量资金进行生态修复,增加林地面积。而对于矿区周边开采沉陷的区域,矿区NPP继续下降,继续向负向发展。分析原因,主要是因为本研究没有对采矿活动以外的土地复垦措施等人为对生态环境的治理进行考虑,把除气候因素以外的因素归结为采矿活动,而土地复垦措施改善矿区生态环境,增加矿区林地、耕地的面积,提高地表的植被覆盖度,提高了矿区NPP,改善了矿区生态环境,因此,需要对具体采矿活动及土地复垦措施对矿区NPP变化的影响进行继续深入研究和探讨。

总之,采矿活动和气候变化共同作用影响矿区生态环境的变化,气候变化推动矿区NPP向正向发展,随着采矿活动的加剧,采矿活动推动NPP向负向发展,且相对作用的比例不断增大,采矿活动成为推动矿区生态环境变化的主要因素,采矿活动破坏了土壤质量和植物生长的生境,导致耕地、林地的NPP大幅度降低,进而导致矿区NPP总量的下降,生态环境遭到破坏,通过采取土地复垦措施,增加耕地、林地面积,可以增大矿区NPP,进而改善矿区生态环境。

3 结论与讨论

本文从植被生态的角度对矿区生态环境损失进行定量研究,选择植被净初级生产力(NPP)作为统一气候变化和采矿活动对矿区生态破坏影响的指标,通过该指标实现了气候变化和采矿活动对矿区生态变化作用的可比性,并以此作为其相对评价的基础。在本研究过程中,假定导致NPP变化的因素只有采矿活动和气候变化,忽略了其他因素的影响,通过气候模型测算的潜在NPP为气候变化对矿区生态系统的影响,而潜在NPP和实际

NPP的差值为采矿活动的影响,基于以上假定条件,通过研究得出如下结论:

1) NPP变化是气候因素和采矿因素综合作用的结果,在矿区采矿活动对NPP的影响值大于气候变化对NPP的影响值。气候变化对NPP影响的波动范围为0.111~3.333 g/(m²·月),而采矿活动对NPP影响的波动范围为90.525~107.892 g/(m²·月),NPP变化对采矿活动具有敏感性,因此采用NPP来衡量矿区生态系统变化是可行的。

2) 对矿区NPP影响因素相对作用的测度分析表明:采矿活动和气候变化共同作用影响矿区NPP的变化,气候变化推动NPP是向正方向发展,采矿活动推动NPP向负向发展。1987—1998年采矿活动是推动NPP变化的主导因素,1998—2005年气候变化是推动NPP变化的主导因素,2005—2008年采矿活动成为推动NPP变化的主导因素,同时,随着采矿活动的加剧,采矿活动推动NPP向负方向发展的比例在增大。

3) 在采矿活动破坏区内,NPP受采矿活动影响的作用明显,在采矿活动的影响区内,NPP受气候变化影响的作用明显,土地复垦可以改变采矿活动对NPP的影响。

本研究结果表明,矿区生态系统的变化主要由于采矿活动影响造成的,所以在煤炭开采过程中,一方面可以通过改进煤炭资源开采技术和方法,降低开采过程中对矿区生态植被、地表塌陷等生态环境因子的影响;另一方面可以通过在开采过程中,根据煤炭开采地表沉陷规律特征,在煤炭开采的稳沉区域,采取相对应的生态修复工程、生物措施,在煤炭开采的非稳沉区域,采取生态修复的物理、化学措施,对改善矿区生态环境,降低矿区生态修复成本,保证煤炭资源的持续开采具有明显的效果。

本文对气候变化和采矿活动所包含的具体驱动因素在矿区生态损失中的相对作用没有探讨,但是这种研究很有必要,是寻求主导驱动因素所必需的,因此,还需对具体采矿活动进行详细的分类来进行进一步研究,以提高成果的实用性。另外NPP测算模型至关重要,其精度直接影响到矿区生态环境演替方向的判断,因此要进一步研究高精度的NPP模型。

[参 考 文 献]

- [1] 李保杰,顾和和,纪亚洲. 矿区土地复垦景观格局变化和生态效应[J]. 农业工程学报, 2012, 28(3): 251—256.
Li Baojie, Gu Hehe, Ji Yazhou. Evaluation of landscape pattern changes and ecological effects in land reclamation project of mining area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(3): 251—256. (in Chinese with English abstract)
- [2] 连达军,汪云甲,张华. 矿区生态环境要素的采动损害定量评价方法研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2009, 61(5): 10—14.
Lian Dajun, Wang Yunjia, Zhang Hua. Study on mining-induced damage evaluation of Eco-environment factors in mining areas[J]. Nonferrous Metals, 2009, 61(5): 10—14. (in

- Chinese with English abstract)
- [3] 索永录, 姬红英, 辛亚军, 等. 采煤引起的矿区生态环境影响评价指标体系探析[J]. 煤矿安全, 2010(5): 120—122. Suo Yonglu, Ji Hongying, Xin Yajun, et al. Study on ecological environment assessment index system in the coalmining effected area[J]. Mine Safety, 2010(5): 120—122. (in Chinese with English abstract)
- [4] 王霖琳. 资源枯竭矿区生态环境损害评价指标体系研究[J]. 煤炭科学技术, 2009, 37(9): 125—128. Wang Linlin. Study on ecological environment damaged assessment index system of resource-exhausted mining areas[J]. Coal Science and Technology, 2009, 37(9): 125—128. (in Chinese with English abstract)
- [5] 李永峰. 煤炭资源开发对矿区资源环境影响的测度研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2007. Li Yongfeng. Study on the Measurement of the Effect of Coal Resource Development on Resource Environment in Mining Area[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [6] 王行风, 汪云甲, 马晓黎, 等. 煤矿区景观演变的生态累积效应——以山西省潞安矿区为例[J]. 地理研究, 2011, 30(5): 879—892. Wang Xingfeng, Wang Yunjia, Ma Xiaoli, et al. Cumulative effects of landscape changes in coal mining areas: A case study in lu'an coal mining areas, Shanxi Province[J]. Geographical Research, 2011, 30(5): 879—892. (in Chinese with English abstract)
- [7] 孟婷婷, 倪健, 王国宏. 植物功能性状与环境 and 生态系统功能[J]. 植物生态学报, 2007, 31(1): 150—165. Meng Tingting, Ni Jian, Wang Guohong. Plant functional Traits, Environments and ecosystem functioning[J]. Journal of Plant Ecology, 2007, 31(1): 150—165. (in Chinese with English abstract)
- [8] Pyankov V I, Gunin P D, Tsoog S, et al. C₄ plants in the vegetation of Mongolia: their natural occurrence and geographical distribution in relation to climate[J]. Oecologia, 2000, 123(1): 15—31.
- [9] 侯湖平. 基于遥感的煤矿区植被净初级生产力变化的监测与评价[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2010. Hou Huping. Monitoring and Evaluation of net Primary Productivity Change in Coal Mine Based on Remote Sensing[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2010. (in Chinese with English abstract)
- [10] Hou Huping, Zhang Shaoliang, Renna S A, et al. The Analysis on the change degree of Eco-environmental factors in Mining disturbance Area, XIV International congress of the ISM. 2010.8, 477—488.
- [11] 朱文泉, 潘耀忠, 张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算[J]. 植物生态学报, 2007, 31(3): 413—424. Zhu Wenquan, Pang Yaozhong, Zhang Jingshui. Estimation of net primary productivity of Chinese terrestrial vegetation based on remote sensing[J]. Journal of Plant Ecology, 2007, 31(3): 413—424. (in Chinese with English abstract)
- [12] McGuire A D, Melillo J M, Kicklighter D W, et al. Equilibrium responses of soil carbon to climate change—empirical and process-based estimated[J]. Journal of Biogeography, 1995, 22(4/5): 785—796.
- [13] Rahman A F, Gamon J A. Detecting biophysical properties of a semi-arid grassland and distinguishing burned from unburned areas with hyperspectral reflectance[J]. Journal of Arid Environments, 2004, 58(4): 597—610.
- [14] 周广胜, 张新时. 全球气候变化的中国自然植被的净第一性生产力研究[J]. 植物生态学报, 1996, 20(1): 11—19. Zhou Guangsheng, Zhang Xinshi. Study on NPP of natural vegetation in china under global climate change[J]. Acta Phytocologica Sinica, 1996, 20(1): 11—19. (in Chinese with English abstract)
- [15] 葛忠强, 许景伟, 王德友. 县域植被净第一性生产力遥感估算模型及应用[J]. 山东林业科技, 2008, 177(4): 15—18. Ge Zhongqiang, Xu Jingwei, Wang Deyou. Application and model of the NPP of natural vegetation on remote sensing in county[J]. Shandong Forestry Science and Technology, 2008, 177(4): 15—18. (in Chinese with English abstract)
- [16] 朱文泉, 潘耀忠, 何浩, 等. 中国典型植被最大光能利用率模拟[J]. 科学通报, 2006, 51(6): 700—706. Zhu Wenquan, Pang Yaozhong, He Hao, et al. Simulate on radiation use efficiency of the typical vegetation in China[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(6): 700—706. (in Chinese with English abstract)
- [17] Budyko M I. The heat balance of the earth's surface[M]. Leningrad, Russia: Gidrometeoizdat, 1956.
- [18] 侯光良, 游松才. 用筑后模型估算我国植物气候生产力[J]. 自然资源学报, 1990, 5(1): 60—65. Hou Guanliang, You Songcai. Estimated plant productivity using the model of building climate[J]. Natural Resources, 1990, 5(1): 60—65. (in Chinese with English abstract)
- [19] 许端阳, 康相武, 刘志丽, 等. 气候变化和人类活动在鄂尔多斯地区沙漠化过程中的相对作用研究[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2009, 39(4): 516—528. Xu Duanyang, Kang Xiangwu, Li Zhili, et al. Study on the relative role of climate change and human activities in the process of desertification in the ordos region[J]. Science in China Series D: Earth Science, 2009, 39(4): 516—528. (in Chinese with English abstract)
- [20] 许端阳, 李春蕾, 庄大方, 等. 气候变化和人类活动在沙漠化过程中相对作用评价综述[J]. 地理学报, 2011, 66(1): 68—76. Xu Duanyang, Li Chunlei, Zhuang Dafang, et al. Assessment of the relative role of climate change and human activities in desertification: A review, Acta Geographica Sinica, 2011, 66(1): 68—76. (in Chinese with English abstract)

Effects of mining activity and climatic change on ecological losses in coal mining areas

Xu Zhanjun¹, Hou Huping^{1,2}, Zhang Shaoliang^{1,2*}, Ding Zhongyi^{1,2}, Ma Changzhong^{1,2},
Gong Yunlong¹, Liu Yangjun³

(1. School of Environment Science and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China;

2. Jiangsu Key Laboratory of Resources and Environmental Information Engineering, Xuzhou 221008, China;

3. Land and Resources Bureau in Changzhi, Changzhi 046000, China)

Abstract: It is of an important guiding meaning for making the planning of the exploitation of mineral resource and ecological environment improvement to evaluate the relative effect of ecological environmental loss in mine regions. From view of ecological point, the study selected NPP as the measuring indicator to unify the impacts of climate change and mining activities on the losses of ecological environment in mining areas. Through the indicator it achieved the comparability of the impacts of climate change and mining activities on the loss of ecological environment in mining areas. The results showed that: 1) Net primary productivity of vegetation (Net Primary Productivity) in the mining was the result of the comprehensive effect of climate factors and mining factors, the impact of climate change on NPP ranged from 0.111 to 3.333 g/(m²·mon) and the impact of mining activities on NPP ranged from 90.525 to 107.892 g/(m²·mon). The impact of mining activities on NPP was greater than that of climate change on NPP and NPP was sensitive to the changes of mining activities. 2) Climate change promoted NPP change towards the positive direction, mining activities promoted NPP change towards both positive and negative direction. In 1987-1998, mining activity was the dominant factor for promoting NPP change; In 1998-2005 climate change was leading factor for promoting NPP change, and in 2005-2008 mining activity became the dominant factor for promoting NPP change. At the same time, as the impact of mining activities increased, the effect of mining activities turned out to be the leading factor, and the proportion of NPP change to the negative direction increased. 3) In the mining destruction region, the impact of mining activity played a decisive role in the ecological environment, it was showed by the NPP decrease of crop land. Through taking ecological reclamation measures, the ecological environment can be improved with the NPP increase of woodland. In the mining impact region, the impact of climate change on NPP plays a decisive role.

Key words: climate change, ecology, coal mines, mining activities, relative effect