

宁东煤炭基地植被生态特征及矿业开发对其的影响

杜灵通^{1,2}, 徐友宁³, 官菲^{1,2}, 丹杨^{1,2}, 王乐^{1,2}, 郑琪琪^{1,2}, 马龙龙^{1,2}

DU Lingtong^{1,2}, XU Youning³, GONG Fei^{1,2}, DAN Yang^{1,2},

WANG Le^{1,2}, ZHENG Qiqi^{1,2}, MA Longlong^{1,2}

1. 宁夏大学西北土地退化与生态恢复省部共建国家重点实验室培育基地, 宁夏银川 750021;

2. 宁夏大学西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 宁夏银川 750021;

3. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西西安 710054

1. *Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwest China, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China;*

2. *Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in Northwest China of Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China;*

3. *Xi'an Center of Geological Survey, CGS, Xi'an 710054, Shaanxi, China*

摘要: 准确评估大型能源基地矿业开发活动对区域植被生态系统影响具有重要的科学意义和实践价值。利用2000—2017年中分辨率成像光谱仪(MODIS)连续观测的生态系统参量, 定量研究宁东煤炭基地开发建设以来的植被生态系统时空变化特征, 分析矿业开发对植被生态系统的影响。结果表明, 随着宁东煤炭基地开采活动的持续, 区域植被生态系统的生产力及其与大气之间的水汽交换强度整体增强, 归一化植被指数、总初级生产力、净初级生产力和蒸散的年增长幅度分别为0.0053、 $5.10\text{g}\cdot\text{C}/(\text{m}^2\cdot\text{a}^{-1})$ 、 $4.10\text{g}\cdot\text{C}/(\text{m}^2\cdot\text{a}^{-1})$ 和 $6.62\text{mm}/\text{a}$; 这4种指标在空间像元上也以增长趋势为主, 且未来多数像元有持续增强的特征, 但生态系统的水分利用效率却在降低。空间分析表明, 大尺度植被生态演变受矿业活动影响微弱, 其主要受制于气候和区域性的生态治理工程。

关键词: 植被生态; 宁东煤炭基地; 净初级生产力; 矿业开发

中图分类号: P618.11; X141 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2018)12-2215-09

Du L T, Xu Y N, Gong F, Dan Y, Wang L, Zheng Q Q, Ma L L. Characteristics of vegetation and ecology in Ningdong coal base and the effects of mining activities. *Geological Bulletin of China*, 2018, 37(12):2215-2223

Abstract: Accurate assessment of the impact of mining activities on large national coal and coal chemical industrial bases has important significance in theory and practice. On the basis of different ecosystem variables of the moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) in 2000–2017, the temporal and spatial variation characteristics of vegetation ecosystem in Ningdong coal base were quantitatively studied. The influence of mining activities on the vegetation ecosystem was also analyzed. The results showed that the productivity of the regional ecosystem and the water vapor exchange intensity with the atmosphere were enhanced with the intensification of mining activities in Ningdong coal base. The annual growth rate of the normalized difference vegetation index (NDVI), gross primary production (GPP), net primary production (NPP) and evapotranspiration (ET) were 0.0053, $5.10\text{g}\cdot\text{C}/(\text{m}^2\cdot\text{a}^{-1})$, $4.10\text{g}\cdot\text{C}/(\text{m}^2\cdot\text{a}^{-1})$ and 6.62mm , respectively. On the spatial pixel scale, the four ecosystem variables were also mainly increased over the past decade and most of the pixels have sustained growth trend in the future. However, the water use efficiency (WUE) of the ecosystem is decreasing both in annual averages and pixels value. Spatial analysis shows that the large scale vegetation ecological evolution is less influenced by the mining activities, but are mainly affected by the climate and re-

收稿日期: 2018-04-15; 修订日期: 2018-06-20

资助项目: 中国地质调查局项目《秦岭及宁东矿产资源集中开采区地质环境调查》(编号: DD20160336)、宁夏高等学校一流学科建设(生态学)项目(编号: NXYLXK2017B06)和中国科学院西部之光人才计划项目(编号: XAB2017AW01)

作者简介: 杜灵通(1980-), 男, 博士, 副研究员, 从事生态遥感应用研究。E-mail: dult80@qq.com

gional ecological restoration projects.

Key words: vegetation and ecology; Ningdong coal base; net primary productivity; mining activities

2003年,宁夏回族自治区党委、政府作出了开发建设宁东基地的重大战略决策,并将宁东基地建设确定为自治区的“一号工程”。历时15年的建设,宁东煤炭基地现已发展成为国家重要的大型煤炭基地和重要的煤化工产业基地。宁东的开发建设,也曾受到了国内外各个学界专家的关注,一些学者普遍认为,在中国西北干旱、半干旱区大规模开采煤炭资源会对区域生态安全造成威胁^[1],并针对一些重点煤炭开发基地进行研究^[2]。但现有研究多从生态风险评估角度出发^[3],或集中在矿业开发对区域生态环境影响的单一因素分析,如水资源安全^[4-5]、地下水影响^[6-7]、土壤重金属污染^[8-9]等。也有学者在考虑宁东煤炭基地生态环境背景条件的基础上,构建区域性生态安全评价指标体系^[10],或利用最新的支持向量机、人工神经网络等算法对宁东煤炭基地生态环境脆弱性进行评价^[11]。然而,这些研究均未或较少考虑区域植被生态本底信息。而自然生态是一个复杂的系统,其涉及土壤-植被-大气耦合体的互相过程,重点以植被为核心,辐射植被与土壤、植被与大气的碳水交换,是一个区域性的大尺度自然过程^[12-13],局地性矿业开发对区域大尺度植被生态过程的影响程度尚需深入研究。为此,本文以宁东煤炭基地开发过程为例,利用时间序列的卫星遥感宏观监测资料和先进的空间分析技术,从大尺度上分析宁东煤炭基地建设以来的区域植被生态特征及其演变过程,在此基础上探讨矿业开发对植被生态的影响,以期为国家生态保护提供科学依据。

1 研究区概况、数据及方法

1.1 宁东煤炭基地概况

宁东煤炭基地位于宁夏中东部,规划总面积3484km²。东起鸳鸯湖、马家滩、萌城矿区的深部边界,西至白芨滩东界,南起韦州矿区和萌城矿区南端的宁夏与甘肃省界,北至宁夏与内蒙古省界,东西宽16~41km,南北长约127km。在地理单元上,基地北临毛乌素沙地南缘,南接黄土丘陵北界,地貌主要由剥蚀残山、黄土梁、坳谷洼地、半固定沙丘组成。区域内水源缺乏,水系多为季节性洪流冲沟,主要有西天河、边沟、苦水河等,都表现出径流量小

且矿化度高的特征,无法有效利用^[14]。宁东地区为中温带干旱半荒漠气候,多年平均降水量255.2mm,多年均温7.7℃,干燥少雨,且降水多集中在7~9月,年均蒸发量2682.2mm。宁东煤炭基地侵蚀严重,北部荒漠草原区以风蚀为主,南部黄土区以水蚀为主,自然环境恶劣。区域内主要发育灰钙土,在中、南部发育部分风沙土和少量新积土、黑垆土,土壤有机质含量低,比较贫瘠。自然生态系统主要有草原生态系统、灌丛生态系统、荒漠生态系统等,植被以旱生或超旱生灌木、半灌木及草本为主^[15]。

1.2 数据获取及处理

本研究数据来源于美国航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)发布的2000—2017年中分辨率成像光谱仪(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)系列生态系统监测产品,包括归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)、总初级生产力(Gross Primary Production, GPP)、净初级净生产力(Net Primary Production, NPP)和蒸散(Evapotranspiration, ET)研究宁东煤炭基地植被生态特征。

1.2.1 归一化植被指数(NDVI)

卫星遥感技术可以利用光谱反射特征探测地表植被长势、盖度等综合信息,由红光和近红外波段反射率构建的NDVI是一种植被综合生长信息的反映,常用来监测全球和区域植被生态状况^[16]。本研究利用MOD13A3逐月NDVI产品,通过像元最大值合成算法^[15],在IDL语言中编程计算逐年最大值NDVI,用于研究植被综合生长状态变化。

1.2.2 总初级生产力(GPP)与净初级净生产力(NPP)

总初级生产力又称总第一性生产力,指单位时间内生物(绿色植物)通过光合作用吸收太阳能而产生有机碳的总量^[16],决定了进入陆地生态系统的初始物质和能量^[17],是全球生态环境变化研究的重要内容。随着遥感技术及生态模拟模型的发展,利用遥感观测数据模拟估算区域生态系统GPP成为一种有效手段^[18-19]。其中NASA发布的第6版MOD17A2产品包含16d合成的GPP数据,本研究通过提取16d合成GPP并累加求得年GPP数据集,用来研究植被生态系统的总初级生产力变化。

净初级生产力表示植被所固定的有机碳量中扣除本身呼吸消耗(R_a)的部分,NPP是植被的生长和生殖总量^[20],也称净第一性生产力,其与GPP的关系为: $NPP=GPP-R_a$,NPP反映了植物固定和转化光合产物的效率,也决定了可供异养生物(植食动物和人)利用的物质和能量^[17]。MOD17A2产品也包含16d合成的NPP数据,本研究从MOD17A2中提取NPP产品,累加合成成年NPP数据集,用于研究植被生态系统的净初级生产力变化。

1.2.3 蒸散(ET)与水分利用效率(WUE)

蒸散是生态系统向大气输送的水汽总通量,包括植物蒸腾和土壤植物表面的蒸发,其涉及植物生理学过程和空气动力学过程,决定土壤-植被-大气耦合体的水分和热量传输,在水圈、大气圈和生物圈的水分循环和能量平衡中起关键作用^[21]。本次使用MOD16A2产品研究植被生态系统的蒸散特征。

水分利用效率是反映生态系统碳水循环相互作用关系的重要指标,定义为植物消耗单位质量水分所固定的碳量(或干物质量)^[22],在遥感应用中,通常由净初级生产力除以蒸散,获得区域大尺度水分利用效率^[23],即 $WUE=NPP/ET$ 。本次利用MOD17A2的NPP产品除以MOD16A2的蒸散产品,获取宁东煤炭基地的生态系统水分利用效率。

1.3 研究方法

1.3.1 回归趋势分析

为了定量研究宁东煤炭基地植被生态系统各指标(NDVI、GPP、NPP、ET等)的变化趋势,使用一元线性回归分析方法,对时间变量和植被生态系统各指标进行回归模拟,并利用最小二乘法,计算出植被生态系统各指标的回归斜率^[24]:

$$k = \frac{n \times \sum_{t=1}^n [t \times \xi(t)] - \sum_{t=1}^n t \sum_{t=1}^n \xi(t)}{n \times \sum_{t=1}^n t^2 - (\sum_{t=1}^n t)^2} \quad (1)$$

式中, k 为回归斜率; n 为研究时间段长度; t 为时间变量, $t=1,2,\dots,n$; $\xi(t)$ 为时间序列的植被生态各指标。 k 反映植被生态各指标在研究期内的变化趋势, $k>0$ 说明该植被生态指标在研究期内处于增加趋势,反之则是减少趋势。每个像元点在研究期内的变化趋势都能得到一个 k 值,从而构成了一副 k 值图像,通过 k 值图像可以看出区域植被生态各指标的变化趋势。

1.3.2 重新标度极差分析

本次利用重新标度极差分析宁东煤炭基地植被生态各指标的未来变化趋势特征,重新标度极差分析是定量描述时间序列变量是否具有长期依赖性的有效方法,给定的时间序列变量 $\xi(t)$, $t=1,2,\dots,n$,对于任意时刻 $\tau \geq 1$,构建几种序列^[25]。

均值序列:

$$\langle \xi \rangle_{\tau} = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} \xi(t) \quad \tau = 1, 2, \dots \quad (2)$$

累计离差:

$$X(t, \tau) = \sum_{u=1}^{\tau} (\xi(u) - \langle \xi \rangle_{\tau}) \quad 1 \leq t \leq \tau \quad (3)$$

极差:

$$R(\tau) = X(t, \tau)_{\max} - X(t, \tau)_{\min} \quad \tau = 1, 2, \dots \quad (4)$$

标准差:

$$S(\tau) = \left[\frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} (\xi(t) - \langle \xi \rangle_{\tau})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad \tau = 1, 2, \dots \quad (5)$$

在计算出 $R(\tau)$ 和 $S(\tau)$ 后,定义 $R/S=R(\tau)/S(\tau)$,若 $R/S \propto \tau^H$,说明分析的时间序列存在赫斯特现象, H 称为赫斯特指数(Hurst)。Hurst指数的表征意义明确,当 $0.5 < H < 1$ 时,表明时间序列变量具有持续性,未来的变化趋势与过去一致;当 $H=0.5$ 时,表明时间序列变量为随机序列;当 $0 < H < 0.5$,表明时间序列变量具有反持续性,即未来变化趋势与过去相反。

2 结果与分析

2.1 归一化植被指数特征

2000—2017年宁东煤炭基地NDVI呈现出波动上升的态势(图1-a),17年间其平均值为0.2530,年增长幅度为0.0053/a。其中2000年和2005年较低,分别为0.1633和0.1698,最高的2012年达到0.3183。同时,随着基地开发年限的增长,区域间的NDVI标准差亦持续加大,即空间异质性在加强,这也表现在像元最大值和最小值的统计特征上(图1-b)。说明宁东煤炭基地区域总体植被状态在变好的同时,亦有部分地区植被呈现明显的退化演替。

从NDVI的空间特征看(图2-a),总体表现出中南部高、北部低的特点,中南部NDVI较高的区域主要为耕地等人工植被,而NDVI较低的区域主要为沙化严重的荒漠植被。从宁东煤炭基地近17年NDVI空间像元的变化趋势(图2-b)和显著性检验

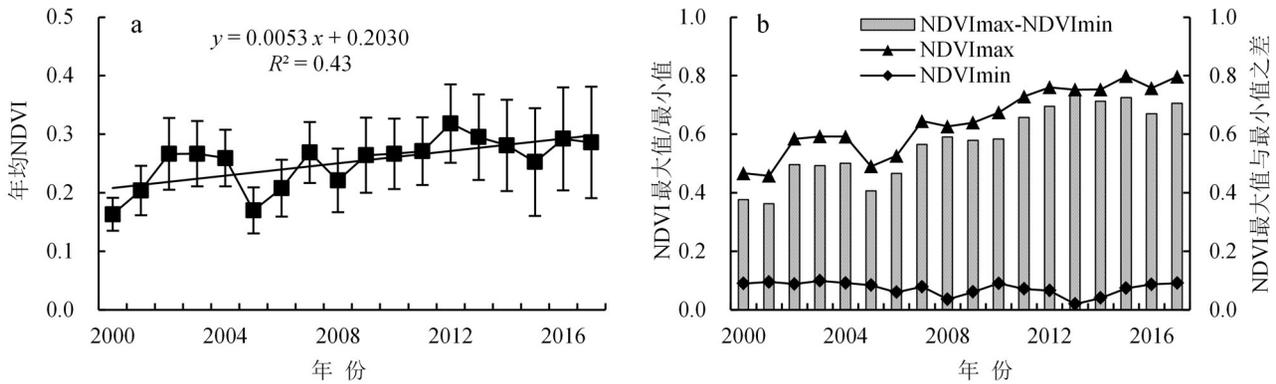


图1 宁东煤炭基地2000—2017年NDVI统计特征
 Fig. 1 Characteristics of NDVI in Ningdong coal base from 2000 to 2017

(图2-c)看,NDVI处于上升趋势的区域占总基地面积的93.30%,其中达到显著上升的区域只有47.46%;NDVI处于降低趋势的区域占总基地面积的6.70%,其中达到显著下降的区域只有0.17%;而变化趋势达不到显著水平($P < 0.05$)的像元,即呈不显著上升或不显著下降的区域分别占45.84%和6.53%,超过了基地面积的一半,这2类区域是植被最不稳定的区域。重新标度极差分析结果表明

(图2-d),宁东煤炭基地未来大部分区域NDVI还将处于升高趋势,只有个别区域未来将持续下降;而中南部地区一些NDVI处于不显著上升的区域,未来会随着气候和人类活动的扰动而发生趋势逆转。

2.2 生态系统总初级生产力与净初级净生产力特征

宁东煤炭基地主要发育有荒漠草原和草原化荒漠生态系统,生态系统的GPP和NPP都较低。

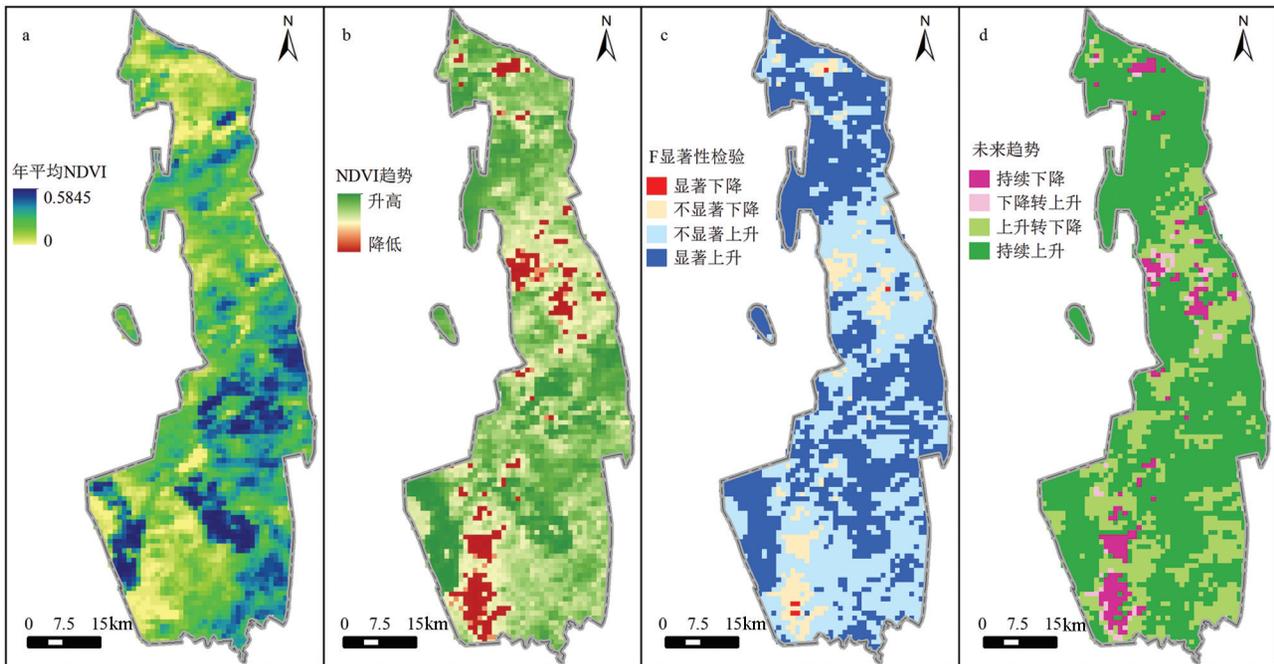


图2 宁东煤炭基地2000—2017年NDVI均值(a)、变化趋势(b)、显著性(c)及未来趋势(d)
 Fig. 2 Mean value (a), trend (b), significance (c) and future change (d) of NDVI in Ningdong coal base from 2000 to 2017

2000—2017年,宁东煤炭基地生态系统的平均GPP为 $195.22\text{g}\cdot\text{C}/(\text{m}^2\cdot\text{a}^{-1})$,其中2012年最高,为 $270.23\text{g}\cdot\text{C}/(\text{m}^2\cdot\text{a}^{-1})$;NPP均值为 $155.76\text{g}\cdot\text{C}/(\text{m}^2\cdot\text{a}^{-1})$,占GPP的79.79%。近17年来宁东煤炭基地GPP和NPP均呈波动上升趋势,GPP年增长幅度为 $5.10\text{g}\cdot\text{C}/(\text{m}^2\cdot\text{a}^{-1})$ (图3-a),NPP年增长幅度为 $4.10\text{g}\cdot\text{C}/(\text{m}^2\cdot\text{a}^{-1})$ (图3-b),这说明近十几年来宁东煤炭基地植被生态系统总体处于稳定好转状态。

植被生态系统总GPP(图4-a)和NPP(图5-a)

的空间分布均表现出北部弱、中南部强的特征,通过对比区域土地利用状况,发现GPP和NPP较低的区域主要为荒漠草原或草原化荒漠,较高的区域主要为农田、灌丛或典型草原。从近17年植被生态系统生产力空间像元的变化趋势看,大部分区域的植被生态系统生产力在增强,即多数像元的GPP和NPP均表现出上升趋势。GPP上升的区域占基地总面积的98.83%(图4-b),其中有72.59%的区域达到显著上升(图4-c);NPP上升的区域占基地总面

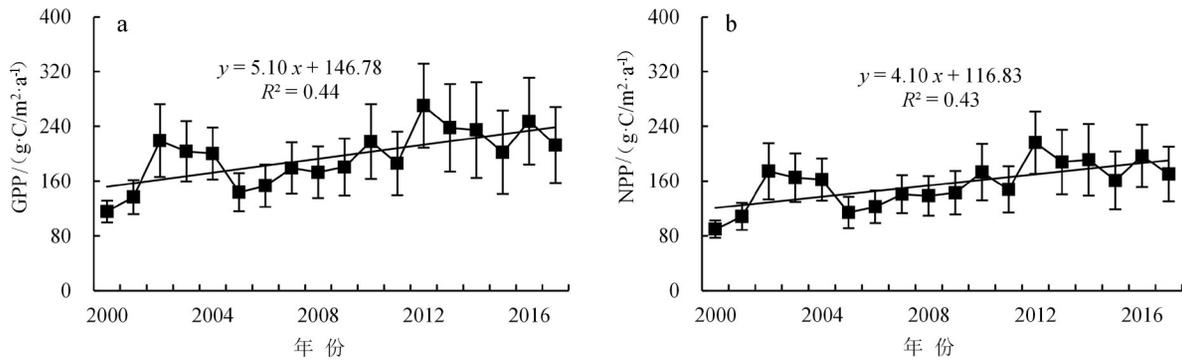


图3 宁东煤炭基地2000—2017年GPP(a)与NPP(b)变化特征

Fig. 3 Characteristics of GPP (a) and NPP (b) in Ningdong coal base from 2000 to 2017

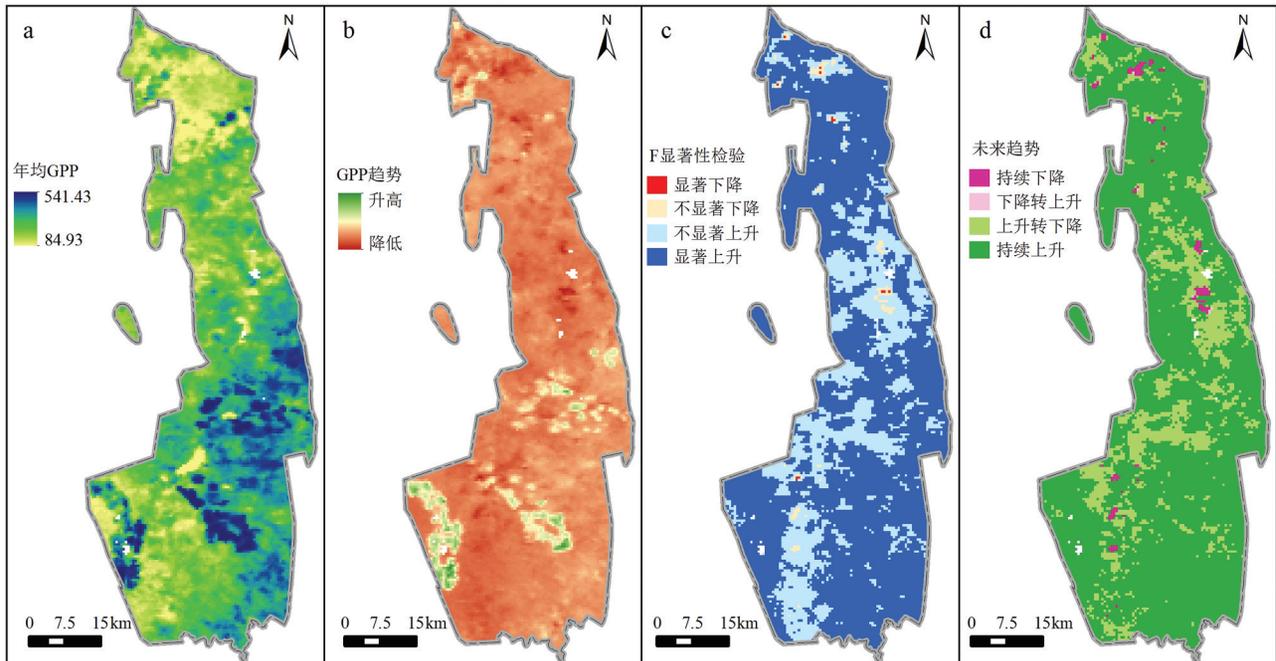


图4 宁东煤炭基地2000—2017年GPP均值(a)、变化趋势(b)、显著性(c)及未来趋势(d)

Fig. 4 Mean value (a), trend (b), significance (c) and future change (d) of GPP in Ningdong coal base from 2000 to 2017

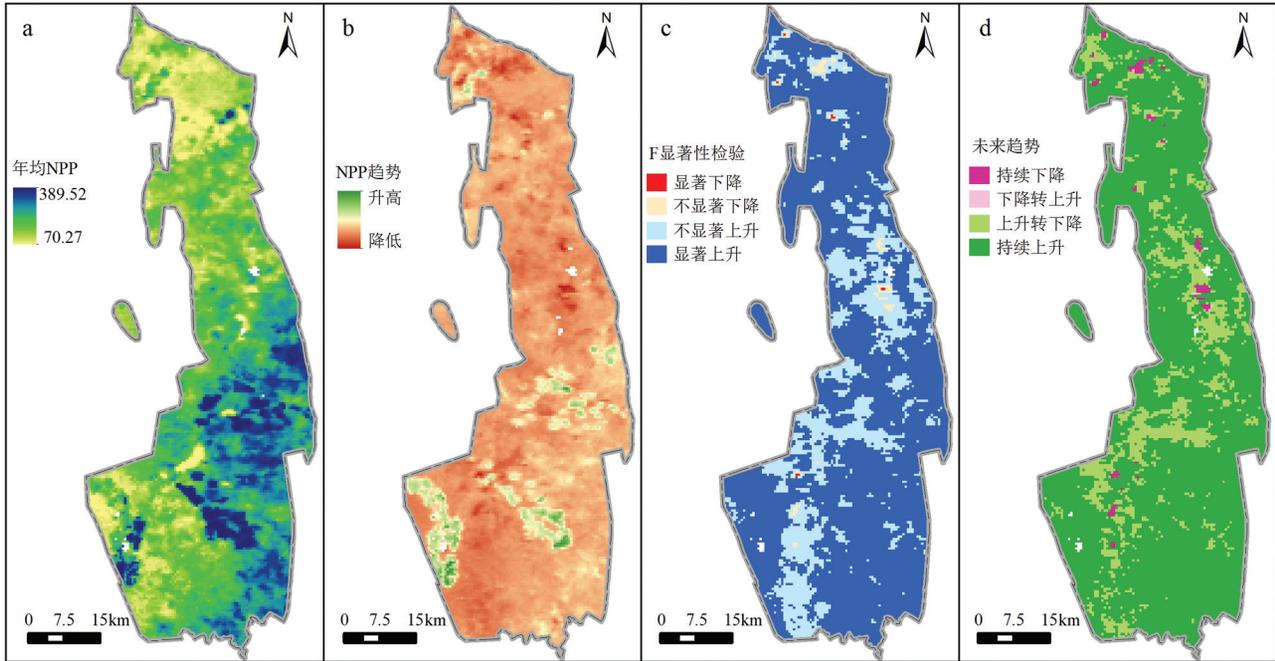


图5 宁东煤炭基地2000—2017年NPP均值(a)、变化趋势(b)、显著性(c)及未来趋势(d)

Fig. 5 Mean value (a), trend (b), significance (c) and future change (d) of NPP in Ningdong coal base from 2000 to 2017

积的99.01%(图5-b),其中76.40%的区域达到显著上升(图5-c)。重新标度极差分析结果表明,宁东煤炭基地未来大部分区域的GPP(图4-d)和NPP(图5-d)还将持续上升,即区域性植被生态系统的生产力还将增强。然而,一些矿区和工业园区的生态系统生产力出现降低,其周边一些区域的赫斯特指数小于0.5,其未来将由上升趋势逆转为下降(图4-d、图5-d),这些区域是今后生态建设与恢复需重点关注的地区。

2.3 生态系统蒸散及水分利用效率特征

ET是表征生态系统水汽交换强弱的重要指标,生态系统通过蒸散过程(包括植物蒸腾、土壤蒸发等)与大气进行水汽交换,植物通过水汽和二氧化碳交换,合成有机物,产生生物量,促进自身生长。近17年来宁东煤炭基地的生态系统ET呈显著增强趋势,上升幅度为每年6.62mm(图6-a),年平均ET为179.85mm,2017年ET最高,达251.58mm。然而,近17年来生态系统WUE却呈现每年

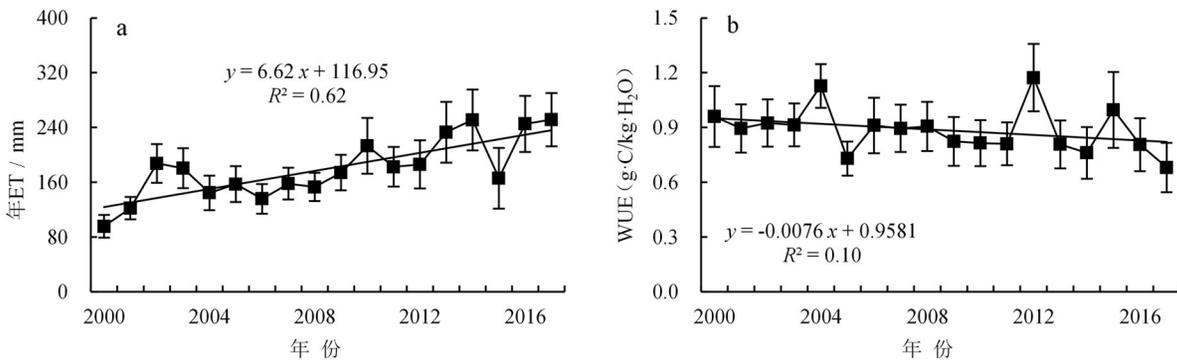


图6 宁东煤炭基地2000—2017年ET(a)与WUE(b)变化特征

Fig. 6 Characteristics of ET (a) and WUE (b) in Ningdong coal base from 2000 to 2017

0.0076g·C/(kg·H₂O)的下降趋势(图6-b),尽管宁东煤炭基地植被生态系统的生产力和大气水汽交换都在增强,但生态系统消耗水分生产干物质质量的整体效率却在降低,WUE由2000年的0.96g·C/(kg·H₂O)降低到2017年的0.68g·C/(kg·H₂O),而在2004年、2005年、2012年和2015年WUE出现较大异常波动,这与气候的强干湿波动有关。

从空间上看,宁东煤炭基地的生态系统ET存在南高、北低的特征(图7-a),ET较高的区域主要为人工农田生态系统。变化趋势分析表明,99.51%的区域ET在近17年呈上升趋势(图7-b),其中96.86%的区域通过了 $P<0.05$ 的检验(图7-c),为显著性上升,ET上升幅度也表现出南部比北部大的特点。ET上升的区域中,96.33%的区域其赫斯特指数大于0.5,表明ET上升的趋势具有持续性,未来还将继续上升(图7-d)。ET呈下降的区域面积非常小,且更集中在矿区和工业园区及周边,这一规律比生产力的空间分布特征更明显。然而,植被生态系统WUE的空间特征较独特(图8-a),83.69%的区域在近17年出现下降趋势(图8-b),其中23.55%的区域达到显著性下降,并主要分布在基地的南部(图8-c);有16.31%的区域WUE出现下降趋势,其中只有1.53%的区域达到显著性上升,并多集中在矿区和工业园区周边。重新标度极差分析表明,未来将有44.08%的区域其WUE持续下降,主要分布在基地的中南部;39.61%的区域其水分利用效率将由下降趋势逆转为上升趋势,主要发生在中北部地区(图8-d)。

2.4 矿业开发对区域植被生态的影响

利用遥感解译的宁东煤炭基地2015年1:5万的土地利用数据,提取土地利用类型为城镇及工矿用地,考虑到本研究所用遥感植被生态参数相关数据的空间分辨率为0.5km,只选取了面积超过0.25km²的城镇工矿用地为矿业活动区,用此数据裁切并统

计宁东煤炭基地矿业活动和非矿业活动区域的不同植被生态参数特征。宁东煤炭基地矿业活动的区域只占总基地面积的3.25%;煤炭开采活动强烈的城镇及工矿区的植被NDVI较非矿业活动区低,生态系统的GPP和NPP生产力明显低下,生态系统与大气的水汽交换强度也明显偏弱,即煤炭开采利用的矿业活动对工矿区植被生态有明显影响(表1)。此外,矿业活动对植被生态系统的影响不仅表现在不同植被生态参数的多年平均值上,而且表现在其近十几年的变化趋势上,由于矿业活动影响,导致工矿区NDVI、GPP、NPP和ET的增长趋势明显弱于非矿业活动区(表1)。但工矿区的WUE高于非矿业活动区,水分利用效率提高与工矿区的人工重建植被有关。

大型煤炭基地的开采对区域植被生态系统究竟有多大程度的影响,是值得商榷的问题。侯湖平等^[26]通过研究徐州九里煤矿沉陷区的农田生态系统碳库变化规律,得出煤炭开采及矿区沉陷会降低农田植被碳储量;钱者东等^[27]在调查陕西省神木县大保当煤矿后发现,煤矿开采会导致矿区景观破碎度上升、植被生物量减少和植被类型发生变化,开矿活动对区域自然生态系统的干扰较强;廖程浩等^[28]研究发现,煤炭开采活动对植被生态的影响范围是在煤矿生产区边缘往外500m的空间区域内。此外,已有研究多集中在评估煤炭开发对矿区植被盖度和景观等方面的影响,尚不清楚矿业活动对区域生态系统生产力和碳水循环过程的影响。综合分析发现,大型煤炭基地的矿业开发活动会对工矿区及其临近周边的植被生态环境产生影响,会减弱植被生态系统的生产力和大气水汽交换过程。然而,对于区域大尺度的植被生态系统状态影响不大,大尺度的植被生态系统过程及演化更多地受制于区域气候变化^[29]及大范围的生态治理工程,如退耕还林、退牧还草和封育禁牧等政

表1 宁东煤炭基地不同植被生态参数统计特征

Table 1 Statistics of different ecosystem variables in Ningdong coal base

区域	面积占比/%	NDVI		GPP/(g·C/m ² ·a ⁻¹)		NPP/(g·C/m ² ·a ⁻¹)		ET/mm		WUE/(g·C/kg·H ₂ O)	
		平均值	斜率	平均值	斜率	平均值	斜率	平均值	斜率	平均值	斜率
城镇工矿区	3.25	0.2261	0.0037	163.97	2.60	129.47	2.11	149.61	3.57	0.8891	-0.0043
非矿业活动区	96.75	0.2542	0.0054	196.60	5.18	156.95	4.16	181.27	6.75	0.8860	-0.0078
全宁东基地	100.00	0.2530	0.0053	195.22	5.10	155.76	4.10	179.85	6.62	0.8854	-0.0076

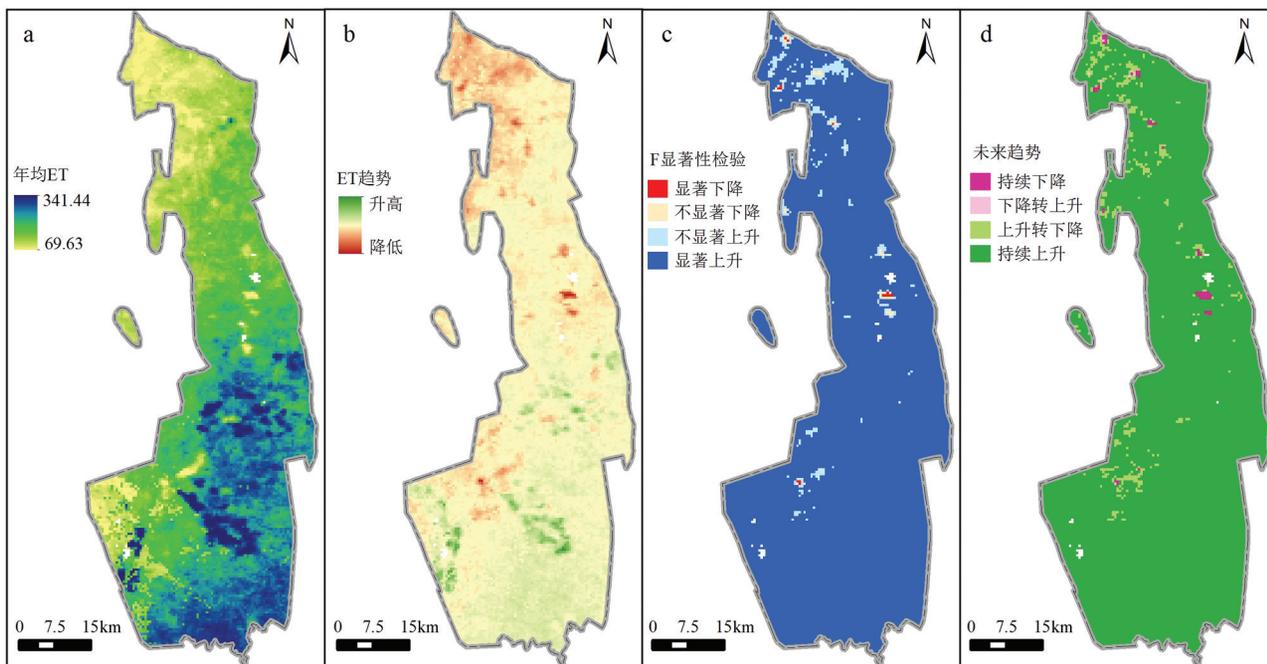


图7 宁东煤炭基地2000—2017年ET均值(a)、变化趋势(b)、显著性(c)及未来趋势(d)

Fig. 7 Mean value (a), trend (b), significance (c) and future change (d) of ET in Ningdong coal base from 2000 to 2017

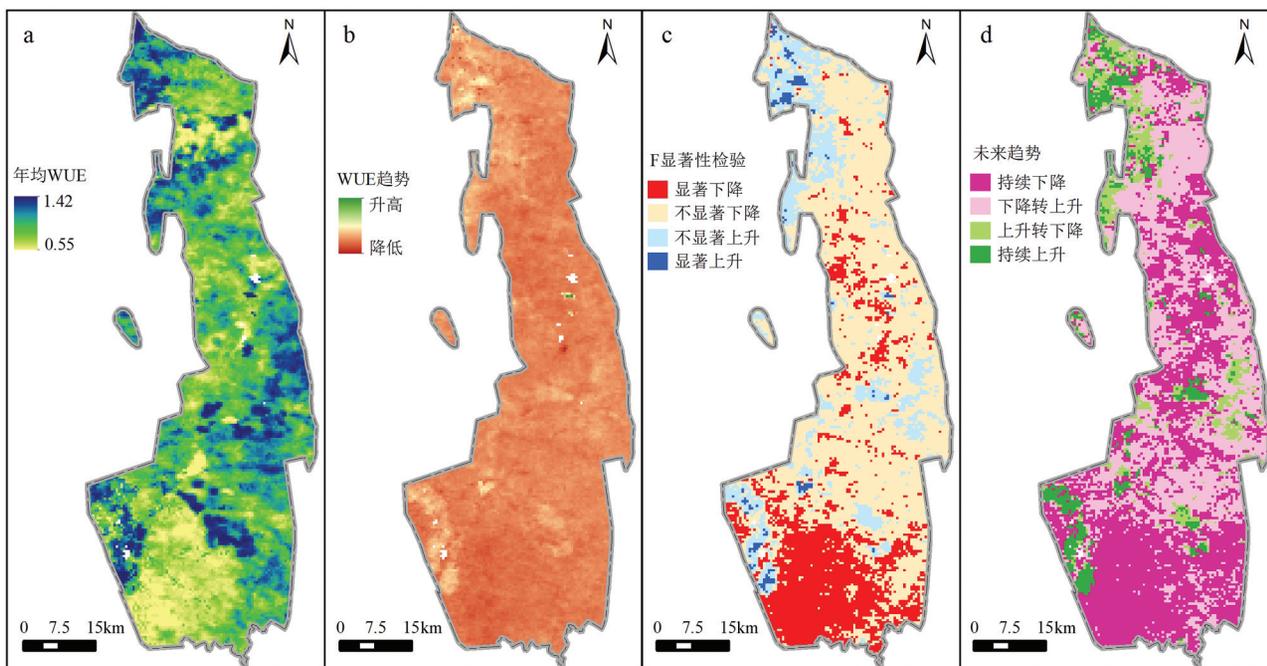


图8 宁东煤炭基地2000—2017年WUE均值(a)、变化趋势(b)、显著性(c)及未来趋势(d)

Fig. 8 Mean value (a), trend (b), significance (c) and future change (d) of WUE in Ningdong coal base from 2000 to 2017

策^[30],近几十年的气候变暖增加了宁夏植被活动强度^[31],这在一定程度上导致了宁东煤炭基地区域性植被生产力提升。

3 结论

利用2000—2017年MODIS连续观测的归一化

植被指数、总初级生产力、净初级净生产力、蒸散等生态系统参量,定量研究了宁东煤炭基地植被生态系统的时空变化特征,分析了矿业开发对其的影响,得出以下几点结论。

(1)宁东煤炭基地植被生态系统的生产力整体在增强,NDVI 年增长幅度为 0.0053,GPP 和 NPP 增长幅度分别为 $5.10\text{g}\cdot\text{C}/(\text{m}^2\cdot\text{a}^{-1})$ 和 $4.10\text{g}\cdot\text{C}/(\text{m}^2\cdot\text{a}^{-1})$;空间上也以增长像元为主,且多数像元在未来有增强的持续性特征。

(2)宁东煤炭基地植被生态系统的蒸散以每年 6.62mm 的速度增长,但生态系统的水分利用效率降低,降低速率为每年 $0.0076\text{g}\cdot\text{C}/(\text{kg}\cdot\text{H}_2\text{O})$,这与区域生态系统生产力及蒸散整体增强有关,由于蒸散增长速率比生产力增长速率更快,导致区域水分利用效率下降。

(3)从空间上看,宁东煤炭基地的城镇工矿用地及周边区域,其植被生态受矿业开发的直接影响较明显,但区域性大尺度的植被生态特征及演变受矿业活动影响微弱,区域性植被生态变化过程主要受制于气候变化和区域性大范围的生态治理工程。

致谢:感谢宁夏回族自治区遥感测绘勘察院魏采用工程师提供宁东煤炭基地规划区的城镇工矿用地数据。

参考文献

- [1]胡嘉平. 干旱半干旱地区煤矿开采对生态影响研究[J]. 内蒙古煤炭经济, 2016, 20: 59-60.
- [2]董英, 张茂省, 卢娜, 等. 陕北能源化工基地资源开发引起的植被生态风险[J]. 地质通报, 2008, 27(8): 1313-1322.
- [3]王景升, 李佳, 陈宝雄, 等. 宁东东部能源化工基地煤炭产业生态风险评估[J]. 资源科学, 2013, 35(10): 2011-2016.
- [4]张旭, 王小军, 刘永刚, 等. 宁东煤炭基地水资源需求预测分析[J]. 地下水, 2017, 39(3): 99-102.
- [5]韩秀云, 李聪. 宁东基地水环境状况及水资源综合利用初探[J]. 水土保持学报, 2014, 28(6): 278-282.
- [6]张茂省, 卢娜, 陈劲松. 陕北能源化工基地地下水开发的植被生态效应及对策[J]. 地质通报, 2008, 27(8): 1299-1312.
- [7]冯洁. 宁东煤炭资源开采对地下水的影响研究[D]. 西安科技大学硕士学位论文, 2012.
- [8]罗成科, 毕江涛, 肖国举, 等. 宁东基地不同工业园区周边土壤重金属污染特征及其评价[J]. 生态环境学报, 2017, 26(7): 1221-1227.
- [9]李聪, 王文华, 韩秀云, 等. 宁东能源化工基地土壤中汞污染现状与分布特征[J]. 安徽农业科学, 2015, 35(33): 63-66.
- [10]范小杉, 韩永伟. 宁东矿区生态安全评估[J]. 中国水土保持, 2011, 11: 56-59.
- [11]李风军, 冯晓秀, 陆桂琴. 宁东能源化工基地生态环境脆弱性评

价研究[J]. 生态科学, 2014, 33(5): 1017-1022.

- [12]Oki T, Kanae S. Global hydrological cycles and world water resources[J]. Science, 2006, 313(5790): 1068-1072.
- [13]Katul G G, Oren R, Manzoni S, et al. Evapotranspiration: A process driving mass transport and energy exchange in the soil-plant-atmosphere-climate system[J]. Reviews of Geophysics, 2012, 50(3): RG3002.
- [14]Tucker C J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation[J]. Remote Sensing of Environment, 1979, 8(2): 127-150.
- [15]Holben B. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data[J]. International Journal of Remote Sensing, 1986, 7(11): 1417-1434.
- [16]Li X, Zhu Z, Zeng H, et al. Estimation of gross primary production in China (1982-2010) with multiple ecosystem models[J]. Ecological Modelling, 2016, 324: 33-44.
- [17]方精云, 柯金虎, 唐志尧, 等. 生物生产力的“4P”概念、估算及其相互关系[J]. 植物生态学报, 2001, 25(4): 414-419.
- [18]徐博轩, 陈报章, 许光, 等. 基于叶面积指数估算植被总初级生产力[J]. 生态学报, 2016, 36(12): 3546-3555.
- [19]Zhang Y, Xiao X, Wu X, et al. A global moderate resolution dataset of gross primary production of vegetation for 2000-2016[J]. Scientific Data, 2017, 4: No.170165.
- [20]Field C B, Behrenfeld M J, Randerson J T, et al. Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components[J]. Science, 1998, 281(5374): 237-240.
- [21]刘可, 杜灵通, 侯静, 等. 2000—2014年宁夏草地蒸散时空特征及演变规律[J]. 草业学报, 2018, 27(3): 1-12.
- [22]胡中民, 于贵瑞, 王秋风, 等. 生态系统水分利用效率研究进展[J]. 生态学报, 2009, 29(3): 1498-1507.
- [23]Tian H Q, Chen G S, Liu M L, et al. Model estimates of net primary productivity, evapotranspiration, and water use efficiency in the terrestrial ecosystems of the southern United States during 1895-2007[J]. Forest Ecology & Management, 2010, 259(7): 1311-1327.
- [24]杜灵通, 田庆久. 宁夏植被覆盖动态变化及与气候因子的关系[J]. 中国沙漠, 2012, 32(5): 1479-1485.
- [25]张翀, 任志远. 黄土高原地区植被覆盖变化的时空差异及未来趋势[J]. 资源科学, 2011, 33(11): 2143-2149.
- [26]侯湖平, 徐占军, 张绍良, 等. 煤炭开采对区域农田植被碳库储量的影响评价[J]. 农业工程学报, 2014, 30(5): 1-9.
- [27]钱者东, 秦卫华, 沈明霞, 等. 毛乌素沙地煤矿开采对植被景观的影响[J]. 水土保持通报, 2014, 34(5): 299-303.
- [28]廖程浩, 刘雪华. 阳泉煤炭开采对区域植被影响范围的 3S 识别[J]. 自然资源学报, 2010, 25(2): 185-191.
- [29]刘可, 杜灵通, 侯静, 等. 近 30 年中国陆地生态系统 NDVI 时空变化特征[J]. 生态学报, 2018, 38(6): 1885-1896.
- [30]宋乃平, 杜灵通, 王磊. 盐池县 2000—2012 年植被变化及其驱动力分析[J]. 生态学报, 2015, 35(22): 7377-7386.
- [31]杜灵通, 宋乃平, 王磊, 等. 近 30a 气候变暖对宁夏植被的影响[J]. 自然资源学报, 2015, 30(12): 2095-2106.