引文格式：胡晓娟,李霞,王亚兰. 矿山生态修复区植被净初级生产力变化监测[J]. 地理空间信息, 2025, 23(9): 6-9. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.09.002

矿山生态修复区植被净初级生产力变化监测

胡晓娟[1,2]，李　霞[1,2,3]，王亚兰[1,2]
（1. 甘肃省基础地理信息中心，甘肃 兰州 730000；2. 甘肃省自然资源卫星应用技术中心，甘肃 兰州 730000；
3. 兰州大学资源环境学院 西部环境教育部重点实验室，甘肃 兰州 730000）

摘　要：为实现对矿山生态修复效果的定量评估，以高分辨率遥感影像、国土变更调查数据为主要数据源，利用改进的CASA模型对甘肃省定西市某矿山生态修复区进行了植被净初级生产力（NPP）变化监测。结果表明，2017—2023年该矿山生态修复区的NNP值明显提高，说明生态修复措施在一定程度上促进了植被的恢复；生态修复区内、外的植被NPP值还存在较大差距，需进一步加强矿山生态恢复治理与已修复区域植被的保护。研究结果证明基于高精度数据获得的植被NPP能更准确地反映矿山生态修复区等小尺度区域植被状况变化的空间异质性，为矿山生态修复成效评估和措施制定提供重要参考。

关键词：高精度数据；矿山；生态修复；植被NPP
中图分类号：P237　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）09-0006-04

Net Primary Productivity Change Monitoring of Vegetation in Mining Ecological Restoration Areas

HU Xiaojuan[1,2], LI Xia[1,2,3], WANG Yalan[1,2]
(1. Gansu Geomatic Information Center, Lanzhou 730000, China;
2. Gansu Natural Resources Satellite Application Technology Center, Lanzhou 730000, China;
3. Key Laboratory of Western Ministry of Environmental Education, School of Resources and Environment of Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: To quantitatively evaluate the outcomes of ecological restoration at mines, taking the high-resolution remote sensing imagers and land-use change survey data as primary data sources, we used the refined CASA model to monitor the changes of net primary productivity (NPP) in a designated ecological restoration zone of a mine in Dingxi City, Gansu Province. Results indicate that a significant rise in the NPP values within the zone from 2017 to 2023, suggesting that the restoration efforts have somewhat facilitated vegetation recovery. Nonetheless, a substantial disparity remains between the NPP values within the restoration zone and those of the natural vegetation outside it, underscoring the need to reinforce both the ecological restoration at mines and the preservation of vegetation in the revitalized areas. The findings confirm that NPP data derived from high-precision data can accurately capture the spatial changes of vegetation conditions within small regions, like ecological restoration zones of mines, thus furnishing vital insights for the effectiveness evaluation of ecological restoration measures at mines and formulating new strategies.

Key words: high-precision data, mine, ecological restoration, NPP of vegetation

矿产资源开发为我国的经济发展做出了重要贡献，但“重开发、轻保护”的开采利用方式引发了环境污染、植被破坏、水土流失等大量矿山生态环境问题[1-2]。党的十八大以来，我国将生态文明建设提升到前所未有的高度，不断推进重大生态保护和修复工程，加强矿山矿区的生态修复和治理[3]。遥感技术因其全天候、宽覆盖、快速、高效等特点，已被广泛应用于矿山恢复治理监测领域[4-7]。植被是连接土壤、大气和水分等土地覆盖要素的“自然纽带”[8]，因此植被恢复是当前矿山生态修复中的重点。定性和定量分析矿区植被生态演变特征，掌握矿区植被恢复状况，对于典型矿区生态恢复、有效治理具有重要意义[9]。植被净初级生产力（NPP）是植物在单位时间、单位面积上由光合作用产生的有机物质总量扣除自养呼吸后的剩余部分，受气候变化和人类活动共同影响[10]，能直接反映植物群落在自然环境条件下的生产能力，是生态系统中物质与能量运转研究的基础[11]。目前遥感和模型方法已成为评估植被NPP变化最有效的手段

项目来源：甘肃省自然资源厅重点攻关资助项目（202204）。
第一作者简介：胡晓娟（1983—），高级工程师，主要从事遥感技术应用研究、遥感监测等相关工作，E-mail：121693716@qq.com。

之一[12-14]。常用的遥感数据包括低分辨率的MODIS数据、中分辨率的Landsat数据等[12,15-16]，而基于高分辨率影像进行植被NPP计算的案例较少。单个矿山的面积较小，利用中低分辨率遥感影像计算获得的植被NPP数据难以准确反映矿山生态修复区植被恢复情况，因此本文以甘肃省定西市境内的岷县三沟金矿历史遗留废弃矿山为研究对象，基于优于2 m分辨率的卫星影像、国土变更调查数据、气象数据等数据资料，研究基于高精度数据的矿山生态修复区植被NPP计算方法，并分析了矿山生态修复区生态修复前后植被NPP的变化情况，实现了对矿山生态修复效果的定量评估。

1　研究区概况

岷县三沟金矿历史遗留废弃矿山是岷县最大的露天开采矿山，位于岷县县城以东60 km，地理范围为34°25′~34°36′N、104°42′~104°44′E。矿区属西秦岭中低山区，地貌类型较简单，地势开阔，西北高、东南低，海拔为2 500~2 800 m，相对高差为120~125 m，坡度为15~35°，沟谷深切多呈V形。2008—2013年矿山存在露天开采活动，2013年之后因纠纷和政策性原因关闭，2016年之后实施了渣堆平整、覆土植草绿化、修建拦渣坝等恢复治理工作。为全面评估矿山生态修复效果，以矿山为中心，本文选取东西5 km、南北4 km，总面积为20 km^2的区域作为研究区，其中矿山生态修复区面积为4.81 km^2。

2　数据来源与技术方法

2.1　数据资料

1）本文采用2017年和2023年国土变更调查数据，数据格式为Shapefile。土地利用类型包括耕地、园地、林地、草地、商务用地、住宅用地、公共管理与公共服务用地、工矿用地、特殊用地、交通运输用地、水域及水利设施用地、其他土地等。国土变更调查数据基于优于1 m分辨率的遥感影像，采用内业判识与外业调查相结合的方式采集，具有较高的分类精度[17]。

2）本文采用研究区2017年和2023年每个月优于2 m分辨率的卫星影像。对各期影像进行多光谱与全色融合、几何纠正、空间配准、裁剪、波段组合等处理。影像融合后的分辨率为2 m，包括蓝、绿、红、近红外4个波段。

3）由于矿区周边气象站点较少，且矿区范围较小，矿区及其周边气温、降水和太阳辐射数据并无明显差异，因此本文采用国家青藏高原科学数据中心网站（https://data.tpdc.ac.cn）发布的逐月平均气温、降水量和太阳辐射数据，数据格式为nc。逐月平均气温数据的空间分辨率为1 km，数据单位为0.1℃；降水量数据的空间分辨率为1 km，数据单位为0.1 mm；太阳辐射数据的空间分辨率为10 km，数据单位为W/m^2。

2.2　技术方法

本文采用的技术路线为：①基于高分辨率卫星影像，利用人工目视解译方法勾绘出矿山生态修复区范围；②对2017年和2023年共24期卫星影像进行NDVI指数计算和波段组合，形成2017年和2023年月度序列NDVI数据；③对国土变更调查数据进行地类归并和栅格化处理，形成栅格格式的土地利用数据；④对逐月平均气温、降水量和太阳辐射数据进行格式转换、空间计算、重采样等处理；⑤基于上述数据，利用基于CASA改进的遥感NPP估算模型进行2017年和2023年NPP遥感反演；⑥根据反演结果分析矿山生态修复区及其周边区域NPP变化情况。

1）矿山生态修复范围提取。基于2017年和2023年高分辨率影像，采用人工目视解译方法勾绘矿山生态修复范围。矿山生态修复区在2017年影像上表现为露天采场、渣堆、矿石堆场、工业场地等，在2023年影像上表现为植被或平整后的地块。

2）年度NDVI序列构建。计算经过预处理的2017年和2023年共24期月度序列高分辨率卫星影像的NDVI值，公式为：

$$NDVI=(NIR-R)/(NIR+R) \quad (1)$$

式中，NIR、R为近红外、红光波段的像元反射率。

按照月度顺序，利用GIS软件的波段组合工具分别对2017年和2023年12个月的NDVI数据进行波段组合，形成2017年和2023年NDVI时序数据。

3）土地利用数据处理。由于国土变更调查数据的土地利用分类较细，涉及地类较多，考虑到数据空间运算的简便性，根据植被类型和地类的相似性，本文对两期国土变更调查数据进行地类归并、重新编码和格式转换（表1），生成栅格大小、空间范围与NDVI序列数据一致的栅格数据。

4）气象数据处理。利用GIS软件的多维数据转换工具，将nc格式的2017年和2023年逐月平均气温、降水量和太阳辐射数据转换为tif格式；再利用栅格计算工具将数据像素值转换为float格式的真实值，并重采样为与NDVI序列数据相同的栅格大小。

表1　地类归并对照表

国土变更调查地类		归并后地类	
地类编码	地类名称	地类编码	地类名称
0304 森林沼泽 0306 灌丛沼泽 0402 沼泽草地 0603 盐田 1106 内陆滩涂 1108 沼泽地	湿地	00	湿地
0100	耕地	01	耕地
0200	园地	02	园地
0301	乔木林地	03	乔木林地
0302	竹林地	04	竹林地
0305	灌木林地	05	灌木林地
0307	其他林地	06	其他林地
0400	草地	07	草地
0500	商务用地	08	人工地表
0600	工矿用地		
0700	住宅用地		
0800	公共管理与公共服务用地		
0900	特殊用地		
1000	交通运输用地		
1100	水域及水利设施用地	09	水域
1200	其他土地	10	其他土地

5）植被NPP计算。采用基于CASA模型改进的遥感NPP估算模型[18]，充分考虑植物自身生长特性和气温、土壤、水分状况等对植物光合作用有调节能力的非生物因子，逐像元计算矿山生态修复区NPP。CASA模型估算的NPP主要由植物吸收的光合有效辐射和实际光能利用率决定，计算公式为：

$$NPP(x,t) = APAR(x,t) \times \varepsilon(x,t) \quad (2)$$

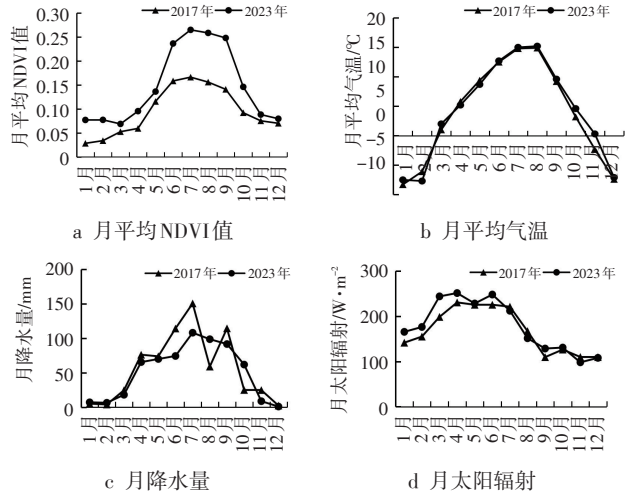
式中，$APAR(x,t)$为像元x在t月吸收的光合有效辐射（$MJ \cdot m^{-2}$）；$\varepsilon(x,t)$为像元x在t月的实际光能利用率（$gC \cdot MJ^{-1}$），具体解算过程参考文献[18]。

本文采用变化率来反映不同年份间NPP值的变化特征，为更好地反映研究区NPP值的变化程度，本文将变化率分为明显减少（<–0.5）、中度减少（–0.5~–0.3）、轻微减少（–0.3~0）、无变化（0）、轻微增加（0~0.3）、中度增加（0.3~0.5）、显著增加（>0.5）7个级别。

3　研究结果与分析

3.1　矿区生态修复区NDVI与气象因子变化分析

2017年和2023年矿山修复区的月平均NDVI值、逐月平均气温、降水量和太阳辐射数值见图1。从NDVI变化来看，生态修复区2023年月平均NDVI值整体高于2017年，尤其在6—9月植被生长旺盛期，两个年度的月平均NDVI值差距明显；2023年年平均NDVI值（0.15）较2017年（0.09）提高了66.7%。从气温变化来看，生态修复区2017年和2023年的逐月平均气温变化趋势基本一致，但2023年年平均气温比2017年高9.25%。从降水量变化来看，在5—10月植被生长季两个年度的月降水量存在明显差异，2023年年累积降水量比2017年低9.3%。从太阳辐射来看，2023年各月太阳辐射整体高于2017年，全年太阳辐射总值比2017年高6.0%。整体来看，相较于2017年，生态修复区2023年呈现气温升高、降水减少、太阳辐射值增加的暖干化现象，同时生态修复区内NDVI值明显提高。



a 月平均NDVI值　b 月平均气温　c 月降水量　d 月太阳辐射

图1　矿山生态修复区2017年和2023年NDVI值与气象因子变化

3.2　矿区生态修复前后NPP变化分析

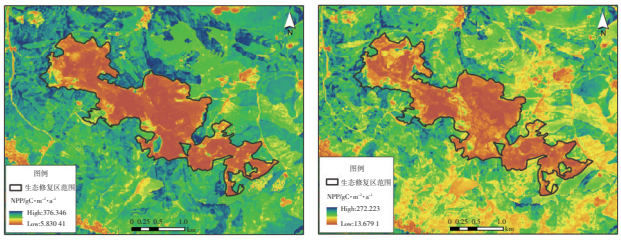
2017年和2023年研究区NPP的空间分布以及2017—2023年研究区NPP变化情况见图2、3，生态修复区及其周边区域NPP变化情况见表2，可以看出，2017—2023年受降水减少和气温上升趋势影响，生态修复区周边区域NPP值整体呈减少趋势，且以中度减少和明显减少为主，NPP均值由181.02 $gC \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$降至116.77 $gC \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$，NPP总量变化率为–0.35；而在矿山生态修复区范围内，由于土地平整、绿化等人工生态修复措施的实施，其NPP值呈增加趋势，NPP均值由15.50 $gC \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$增至54.80 $gC \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$，NPP总量变化率为2.54；NPP变化类型以显著增加为主，占比为57%。从空间分布来看，NPP增加区域主要分布于生态修复区中部，生态修复区边缘仍存在NPP减少的现象。

由此可见，矿山生态修复措施的实施在一定程度上改善了矿区植被状况，促进了植被恢复，对生态环境改善具有重要意义；但从NPP值来看，生态修复区

表2　2017年和2023年矿山生态修复区NPP变化

区域	像元数	2017年NPP值/gC·m^{-2}·a^{-1}		2023年NPP值/gC·m^{-2}·a^{-1}	
		平均值	总量	平均值	总量
矿山生态修复区	1 202 526	15.50	18 639 153.0	54.80	65 898 424.8
矿山生态修复区周边区域	3 797 518	181.02	687 426 708.4	116.77	443 436 176.9

NPP均值与周边自然生长的植被NPP仍存在较大差距，因此后期需进一步加强生态修复区治理和对已修复区域植被的保护。



a 2017年　　b 2023年

图2　2017年和2023年研究区NPP空间分布图

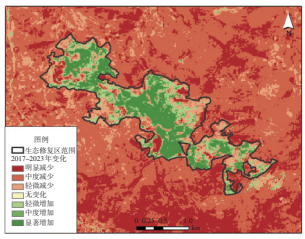


图3　2017—2023年研究区NPP变化图

4　结　语

为检验本文中NPP计算精度，以美国宇航局Terra MODIS NPP数据集中的MOD17A3 HGF V6（https://ladsweb.modaps. eosdis.nasa.gov/）为参考数据，通过对比发现，本文计算得到的研究区NPP与MOD17A3产品中相同年份相同区域的NPP值具有较好的一致性；但MOD17A3产品的空间分辨率为500 m，无法准确反映单个矿山NPP变化的空间特征。本文以优于2 m分辨率的遥感影像作为NDVI计算的基础数据，以具有较高分类精度的国土变更调查数据作为土地分类数据，获得的NPP数据可更准确地反映矿山及其周边区域NPP变化的空间异质性，可为矿山生态修复效果评估与恢复治理措施的制定提供重要依据。

根据前人研究结果[19-20]，降水和气温是影响区域NPP变化的主要因素，相较于2017年，研究区2023年降水减少、气温升高，增强了植被蒸腾作用，进一步抑制了植被的生长和光合作用，从而影响植物净光合作用所固定的有机物质总量[21-22]。在气候变化导致区域NPP整体降低的情况下，生态修复区NPP值却呈现显著增加趋势，进一步表明人类活动对区域生态环境的影响力。

本文以甘肃省定西市境内的岷县三沟金矿历史遗留废弃矿山及其周边区域为研究区，探索了基于高分辨率卫星影像、国土变更调查数据、气象数据等计算植被NPP的方法，计算并分析了2017—2023年研究区植被NPP的变化情况。

1）基于高精度数据获得的植被NPP能更准确地反映矿山生态修复区等小尺度区域植被状况变化的空间异质性。

2）受降水减少和气温升高等气候因素影响，2017—2023年生态修复区周边区域NPP值整体减少，但由于生态修复措施的实施，生态修复区内NPP值明显提高，总量约增长254%，表明生态修复措施在一定程度上促进了矿山开采区域植被的恢复，对于区域生态环境改善具有重要意义。

3）与修复区外自然植被的NPP均值相比，生态修复区内的NPP均值还存在较大差距，因此需进一步加强矿山生态恢复治理和对已修复区域植被的保护。

参考文献

[1] 张进德,郗富瑞. 我国废弃矿山生态修复研究[J]. 生态学报,2020,40(21):7 921-7 930

[2] 潘欣,崔冬龙. 矿产资源开发对生态环境的影响及对策浅析[J]. 南方农业,2020,14(23):181-182

[3] 闫石,孟祥芳,马妍,等. 矿山生态修复成效评估[J]. 洁净煤技术,2023,29(增刊2):593-599

[4] 孙娅琴,邸宝刚,安娜,等. 长江经济带废弃露天矿山生态修复典型模式遥感监测:以湖北省为例[J]. 中国矿业,2022,31(12):50-57

[5] 王书青,邓锟. 内蒙古煤矿矿山环境恢复治理遥感监测[J]. 地理空间信息,2022,20(9):50-52

[6] 吴凤敏,郑稚棚,余静,等. 基于Landsat8与高分数据的矿山植被动态监测研究[J]. 地理空间信息,2022,20(8):18-23

[7] 姜杉钰,王佳佳,冯聪,等. 基于文献计量的矿山生态修复技术研究述评[J/OL]. 中国国土资源经济(2024-07-02)[2024-08-07]. https://doi. org/10. 19676/j. cnki. 1672-6995. 001068

[8] 李美丽,尹礼昌,张园,等. 基于MODIS-EVI的西南地区植被覆盖时空变化及驱动因素研究[J]. 生态学报,2021,41(3):1 138-1 147

（下转第47页）