引文格式：张迎杰,樊雪丰,刘宣,等. 赤峰市植被碳水利用效率变化及其与干旱的关系[J]. 地理空间信息, 2026, 24(2):55-58. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2026.02.011

赤峰市植被碳水利用效率变化及其与干旱的关系

张迎杰[1]，樊雪丰[1]，刘　宣[1]，李鑫杨[1]，王海梅[2*]
（1. 内蒙古自治区赤峰市气象局，内蒙古 赤峰 024000；2. 内蒙古自治区生态与农业气象中心，内蒙古 呼和浩特 010051）

摘　要：植被的碳、水利用效率不仅受自身生理条件影响，还与气候条件密切相关。基于MODIS遥感产品，利用Theil-Sen+Mann-Kendall检验及相关分析等方法分析了2000—2022年赤峰市不同土地利用类型下，植被的碳利用效率（CUE）和水分利用效率（WUE）的时空变化及其与干旱的相关关系。结果表明：①赤峰市植被碳、水利用效率的多年平均值分别为0.591、1.39 gC/(mm·m²)，不同土地利用类型碳利用效率的大小依次为：草地（0.605）>未利用土地（0.601）>耕地（0.568）>林地（0.565），水分利用效率的大小依次为：林地（1.53 gC/(mm·m²)）>耕地（1.41 gC/(mm·m²)）>草地（1.38 gC/(mm·m²)）>未利用土地（0.86 gC/(mm·m²)）；②研究时段内，赤峰市碳、水利用效率整体呈增加趋势，林地、草地和未利用土地CUE及林地WUE呈显著增加趋势；③植被的碳利用效率比水利用效率更易受到干旱的影响，干旱程度增加时，林地、草地和未利用土地的碳利用效率显著下降。

关键词：碳利用效率；水分利用效率；干旱；时空变化；相关关系
中图分类号：P237　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2026）02-0055-04

Carbon and Water Utilization Efficiency Changes and Their Relationships with Drought in Chifeng City

ZHANG Yingjie[1], FAN Xuefeng[1], LIU Xuan[1], LI Xinyang[1], WANG Haimei[2]
(1. Chifeng Meteorological Bureau of Inner Mongolia, Chifeng 024000, China;
2. Ecological and Agricultural Meteorological Center of Inner Mongolia, Hohhot 010051, China)

Abstract: The carbon and water utilization efficiency of vegetation are not only affected by their physiological conditions, but also closely related to climatic conditions. Based on the MODIS remote sensing products, we used Theil-Sen trend analysis, Mann-Kendall significance test and correlation analysis methods to analyze the changes of vegetation carbon utilization efficiency (CUE) and water utilization efficiency (WUE) of different land-use types in Chifeng City from 2000 to 2022 and their correlations with drought. The results showed that ①the average annual CUE and WUE in Chifeng City were 0.591 and 1.39 gC/(mm · m²). The order of CUE of different land-use types was grassland (0.605 gC/(mm · m²))>unused land (0.601)> cultivated land (0.568)>forest (0.565), and the order of WUE was forest (1.53 gC/(mm · m²))> cultivated land (1.41 gC/(mm · m²))>grassland (1.38 gC/(mm · m²))>unused land (0.86 gC/(mm · m²)). ②During the study period, CUE and WUE in Chifeng City showed an increasing trend, while the CUE of forest, grassland, unused land and the WUE of forest showed a significant increasing trend. ③CUE of vegetation was more susceptible to drought than WUE. When the degree of drought increased, CUE of forest, grassland and unused land decreased significantly.

Key words: CUE, WUE, drought, spatio-temporal change, correlation relation

植被的碳、水利用效率不仅受自身生理条件影响，还与气候条件密切相关。作物缺水指数（crop water stress index，CWSI）在冠层能量平衡原理的基础上，综合考虑了植被覆盖状况和气象要素，是具有明确物理意义的干旱监测指数[1-5]，该指数在指示干旱的效果上具有较高的可靠性，在我国华北地区干旱监测中得到了较好的应用[6]。研究显示，干旱胁迫可直接影响陆地植被生长，进而影响植被的水分利用效率和碳利用效率[7-10]。不同植被生态系统在不同区域对干旱的响应具有显著的空间异质性，有必要对更多区域开展植被碳水利用效率与干旱的相关性研究。

内蒙古自治区赤峰市地处三北，是京津、辽沈地区的重要生态安全屏障，由于地处我国北方干旱—半干旱地区，干旱是制约赤峰市农业生产和生态恢复的重要因素[11]。本研究利用MODIS遥感数据反演了2000—2022年赤峰市植被碳利用效率、水分利用效率和作物缺水指数，结合土地利用类型数据，重点分析了赤峰市林地、草地、耕地及未利用土地的碳水利用

项目来源：内蒙古自治区科技计划资助项目（2022YFSH0130、2021GG0019）。
第一作者简介：张迎杰（1990—），硕士，工程师，从事气象服务与应用气象工作，E-mail：972816553@qq.com。
通信作者：王海梅（1976—），博士，正高级工程师，从事生态气象工作，E-mail：wanghmhuhe@126.com。

效率的时空变化特征及其与干旱的相关性，为赤峰市开展“三北六期工程”建设提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

赤峰市位于内蒙古自治区东南部，地处蒙古高原向辽河平原的过渡地带，属于温带半干旱大陆性季风气候区。全市年平均气温为0～7℃，年平均降水量为351~450 mm，多年平均蒸发量为1 600~2 500 mm，干旱是赤峰市发生最频繁、影响最严重的气象灾害。赤峰市主要土地利用类型为林地、草地、耕地和未利用土地，其中未利用土地主要为分布在科尔沁沙地和浑善达克沙地中的沙地（图1）。

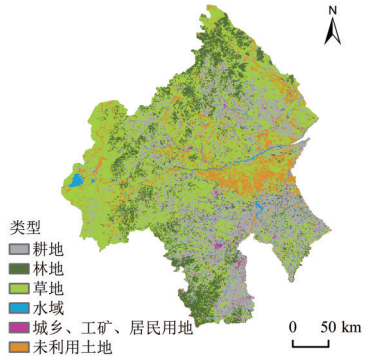


图1 2020年赤峰市土地利用类型

审图号：蒙S(2020)025

1.2 数据来源

遥感数据来自美国国家航空航天局数据中心（https：//ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/）。其中，NPP、GPP来源于MOD17A3HGF数据集，ET、PET来源于MOD16A3DF数据集，时间分辨率为年份，空间分辨率为500 m，以上数据已在生态领域内得到广泛验证及应用[12]。2000—2022年土地利用类型数据来源于武汉大学Yang等[13]教授团队发布的30 m中国逐年土地覆盖数据集（https：//data.casearth.cn/）。

1.3 研究方法

1.3.1 CUE、WUE及CWSI的计算

植被碳利用效率（CUE）、水分利用效率（WUE）和作物缺水指数（CWSI）的计算公式如下：

$$\begin{cases} \mathrm{CUE}=\dfrac{\mathrm{NPP}}{\mathrm{GPP}} \\ \mathrm{WUE}=\dfrac{\mathrm{GPP}}{ET} \\ \mathrm{CWSI}=1-\dfrac{ET}{\mathrm{PET}} \end{cases} \tag{1}$$

式中，CUE为生态系统的碳利用效率，无量纲；NPP、GPP分别为生态系统净初级生产力和总初级生产力（$\mathrm{gC/m^2}$）；WUE为植被水分利用效率（$\mathrm{gC/(mm\cdot m^2)}$）；$ET$为生态系统的蒸散量（mm）；PET为潜在蒸散（mm）。

1.3.2 趋势分析

Theil-Sen趋势分析是一种稳健的非参数趋势统计方法，计算公式如下：

$$\beta=\mathrm{Median}\left(\frac{X_j-X_i}{j-i}\right),\ 2000\leqslant i\leqslant j\leqslant 2022 \tag{2}$$

式中，β为样本数据变化趋势的斜率；X_j与X_i分别为j年和i年的数值。

采用Mann-Kendall检验对Theil-Sen趋势分析结果进行非参数显著性检验[14]，标准化检验统计量Z的计算公式如下：

$$Z=\begin{cases} \dfrac{S-1}{\sqrt{\mathrm{Var}(S)}}, S>0 \\ 0 \quad\quad , S=0 \\ \dfrac{S+1}{\sqrt{\mathrm{Var}(S)}}, S<0 \end{cases} \tag{3}$$

$$S=\sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=i+1}^{n}\mathrm{sgn}\left(X_j-X_i\right) \tag{4}$$

$$\mathrm{sgn}\left(X_j-X_i\right)=\begin{cases} 1 & , X_j>X_i \\ 0 & , X_j=X_i \\ -1 & , X_j<X_i \end{cases} \tag{5}$$

$$\mathrm{Var}(S)=\frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \tag{6}$$

式中，S为检验统计量；n为总年份数；Var( )为方差函数；sgn( )为符号函数。

变异系数（coefficient of variation，CV）定义为标准差与平均值的比，本文运用该统计量从像元尺度分析CUE和WUE在空间上的稳定性[15]。计算公式为：

$$CV=\frac{\delta}{\mu}$$

式中，δ为标准差；μ为平均值。CV值越小，稳定性越高，利用ArcGIS 10.8软件将分析结果依据自然断点分类法分为稳定性高、较高、中等、较低和低5类。

1.3.3 相关分析

采用Pearson相关系数表示干旱指数CWSI与CUE和WUE之间的相关程度[16]，计算公式如下：

$$r=\frac{\sum_{i=1}^{n}\left[\left(X_i-\bar{X}\right)\left(Y_i-\bar{Y}\right)\right]}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(X_i-\bar{X}\right)^2\sum_{i=1}^{n}\left(Y_i-\bar{Y}\right)^2}} \tag{7}$$

式中，r为线性相关系数；X_i为第i年的CWSI值；Y_i为第i年的CUE或WUE值；$\bar{X}$与$\bar{Y}$为研究时段内

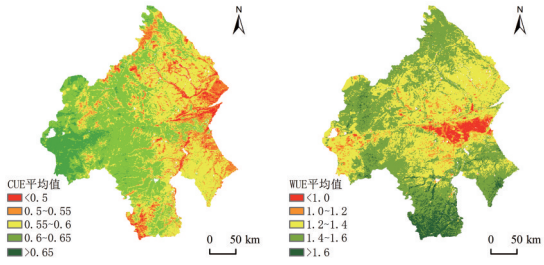
变量 X 与 Y 的平均值。

2　结果与分析

2.1　CUE和WUE的空间分布特征

2000—2022年赤峰市CUE平均值为0.591，WUE平均值为1.39 gC/(mm·m²)。空间上，CUE呈“西高东低”的分布格局。全市89.0%区域的CUE在0.5~0.65之间；CUE高于0.65的明显高值区集中在赤峰市西北部的草地，占总面积7.4%；CUE低于0.5的区域零星分布在赤峰市东部的耕地、北部边缘及西南部的林地，占总面积3.6%。赤峰市92.0%地区WUE多年平均值在1.0~1.6 gC/(mm·m²)之间，低于1.0 gC/(mm·m²)的区域主要集中在中东部科尔沁沙地及西北部的浑善达克沙地，占总面积3.2%(图2)。

结合土地利用数据，统计赤峰市林地、草地、耕地、未利用土地的面积占比及各土地利用类型多年CUE和WUE的平均值，结果显示赤峰市各土地利用类型CUE大小依次为：草地>未利用土地>耕地>林地，WUE大小依次为：林地>耕地>草地>未利用土地。



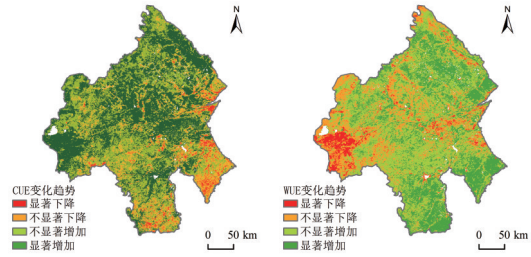
a CUE空间分布　　b WUE空间分布

图2　2000—2022年赤峰市CUE、WUE空间分布

审图号：蒙S(2020)025

2.2　CUE和WUE的时间变化特征

在像元尺度上分析赤峰市CUE和WUE的变化趋势及显著性（图3）。统计可知，研究时段内，赤峰市CUE呈增加趋势的区域占总面积81.7%，主要集中在赤峰市中部和北部地区，其中显著增加的区域占总面积41.5%，土地利用类型以未利用土地、草地和林地为主；CUE呈下降趋势的区域占总面积18.3%，主要分布在赤峰市南部及东南部地区，其中显著下降的区域占总面积3.7%，土地利用类型以耕地为主。WUE呈增加趋势的区域主要分布在赤峰市南、东南及东北地区，占总面积73.5%，其中显著增加的区域为29.1%，土地利用类型以林地和耕地为主；WUE呈下降趋势的区域分布在赤峰市中东及西北部地区，占总面积26.4%，其中显著下降的区域为5.8%，土地利用类型以未利用土地为主。



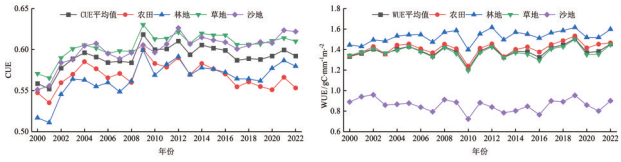
a CUE空间变化趋势　　b WUE空间变化趋势

图3　2000—2022年赤峰市CUE、WUE的空间变化趋势

审图号：蒙S(2020)025

2000—2022年赤峰市植被CUE和WUE的变异系数分别介于0.008~0.26和0.023~0.76之间，变化较稳定，二者稳定性等级为较高及以上的区域分别占总面积为76.0%和81.8%，CUE稳定性较低的区域主要为东北部的林地，WUE稳定性较低的区域主要集中在科尔沁沙地腹地。

赤峰市CUE和WUE的年际变化趋势如图4所示。通过对变化趋势显著性检验可知，研究时段内，赤峰市CUE呈显著增加趋势（$P<0.05$），年变化率为0.001，对不同土地利用类型而言，林地、草地和未利用土地的CUE均呈现极显著增加趋势（$P<0.01$），年变化率分别为0.001 9、0.001 4、0.002 0，耕地CUE的变化趋势没有通过显著性检验（图4a）。赤峰市WUE总体呈不显著上升趋势，其中林地WUE呈现显著增加趋势（$P<0.05$），年增幅为0.004 4 gC/(mm·m²)，其他土地利用类型WUE的变化趋势未通过显著性检验（图4b）。



a CUE年际变化　　b WUE年际变化

图4　2000—2022年赤峰市CUE和WUE的年际变化

审图号：蒙S(2020)025

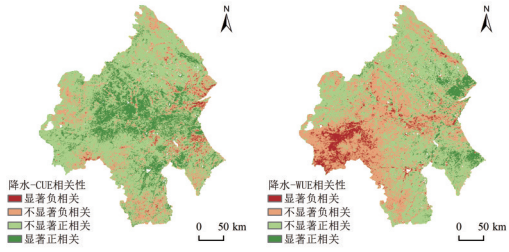
2.3　CUE和WUE与干旱的关系

在干旱-半干旱地区，降水是影响植被碳水循环的主要气象因素，分析降水与植被CUE、WUE的空间相关性（图5），由图可知，降水与CUE呈正相关关系的面积占比为82.2%，其中18.9%的区域呈显著正相关关系，涵盖各土地利用类型；而降水与CUE的相关性较弱，呈显著负相关区域主要集中在未利用土地，面积占比为6.5%。

降水的波动性往往引发气象干旱。进一步分析研究时段内赤峰市年均CUE和WUE与干旱指数CWSI的

相关性（图6）。由图可知，CUE、WUE和CWSI的相关系数具有较强的空间异质性。

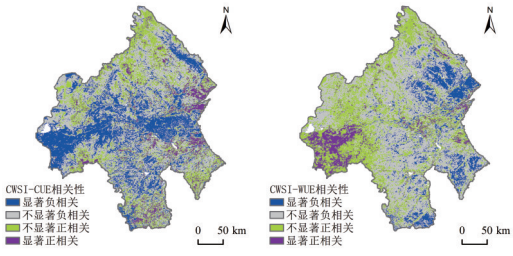
进一步统计不同土地利用类型CUE和WUE与干旱指数CWSI的关系。结果显示，林地、草地和未利用土地的CUE与CWSI的相关性通过了显著性检验，相关系数分别为−0.582（$P<0.01$）、−0.597（$P<0.01$）、−0.808（$P<0.01$），耕地CUE与CWSI的相关系数为−0.272，没有通过显著性检验。不同土地利用类型WUE与CWSI的显著性检验中，只有未利用土地WUE与CWSI的相关系数通过了95%置信度检验，相关系数为0.444，林地、草地和耕地WUE与CWSI的相关性较弱，相关系数分别为−0.199、0.026和−0.272。以上说明，在赤峰地区，植被碳利用效率对干旱比较敏感，干旱程度加重时，林地、草地和未利用土地的固碳能力减弱，而耕地的固碳能力没有显著变化，植被水分利用效率对干旱的响应相对较弱，只有未利用土地的水分利用效率随干旱程度的加重而增加。



a 降水与CUE的相关性　　b 降水与WUE的相关性

图5　2000—2022年赤峰市降水与CUE、WUE的相关性

审图号：蒙S(2020)025



a CWSI与CUE的相关性　　b CWSI与WUE的相关性

图6　2000—2022年赤峰市CWSI与CUE、WUE的相关性

审图号：蒙S(2020)025

3 结 语

本研究分析了2000—2022年赤峰市植被碳利用效率（CUE）和水分利用效率（WUE）的时空变化特征。结果表明：赤峰市CUE均值为0.59，WUE为1.39 gC/(mm·m^2)；CUE以草地最高，林地最低，WUE则以林地最高，未利用土地最低；两者均呈增加趋势，且与干旱程度呈显著负相关，CUE对干旱的响应强于WUE。研究为区域生态恢复与水资源管理提供了科学依据。

参考文献

[1] Manzoni S, Taylor P, Richter A, et al. Environmental and Stoichiometric Controls on Microbial Carbon-use Efficiency in Soils[J]. New Phytologist,2012,196(1):79-91

[2] 张婷,周军志,李建柱,等. 陆地生态系统碳水通量特征研究进展[J]. 地球环境学报,2022,13(6):645-666

[3] Tang X, Li H, Desai A, et al. How is Water-use Efficiency of Terrestrial Ecosystems Distributed and Changing on Earth?[J]. Scientific Reports,2014(4):7483

[4] 钱佳霖,赵梦扬,卜灵心,等. 黄河上游宁蒙大型灌区生态系统水分利用效率变化及其影响因素[J]. 干旱区资源与环境,2024,38(11):124-136

[5] 姚瑶,黄治勇,陈笑笑,等. 基于MOD16和地面降水数据的大别山区农业干旱与气象干旱响应关系[J]. 干旱地区农业研究,2024,42(4):262-272

[6] 吴天晓,李宝富,郭浩,等. 基于优选遥感干旱指数的华北平原干旱时空变化特征分析[J]. 生态学报,2023,43(4):1621-1634

[7] 曹晓云,周秉荣,周华坤,等. 气候变化对青藏高原植被生态系统的影响研究进展[J]. 干旱气象,2022,40(6):1068-1080

[8] Khalifa M, Elagrib N, Ribbe L, et al. Spatio-temporal Variations in Climate, Primary Productivity and Efficiency of Water and Carbon Use of the Land Cover Types in Sudan and Ethiopia[J]. Science of the Total Environment, 2018, 624:790-806

[9] 吴梦月. 中国西南地区生态系统碳循环对干旱的响应[D]. 西安:西安科技大学,2021

[10] 赵紫竹,张宝林,潘丽杰,等. 基于SPEI的内蒙古东部干旱诊断与预测[J]. 环境生态学,2023,5(7):39-48

[11] 夏国华. 内蒙古赤峰市现代农业发展研究[D]. 北京:中国农业科学院,2017

[12] 孙桂候,徐军,张静雯,等. 利用多源数据分析江苏省碳源/汇时空格局[J]. 地理空间信息,2024,22(9):7-12

[13] Yang J, Huang X. The 30 m Annual Land Cover Dataset and Its Dynamics in China from 1990 to 2019[J]. Earth System Science Data,2021,13(8):3907-3925

[14] 卫鸿飞,张唯,吉宸佳,等. 基于GEE的阿拉善左旗植被时空变化特征及驱动因子分析[J]. 地理空间信息,2024,22(2):55-60

[15] 林子琦,温仲明,刘洋洋,等. 基于遥感数据的植被碳水利用效率时空变化和归因分析[J]. 生态学报,2024,44(1):377-391

[16] 赵月帅,张秀红,范田禾,等. 西安市植被碳汇时空演变特征及影响因素解析[J]. 地理空间信息,2024,22(2):30-33