

中国干旱半干旱区水分利用效率的时空变异及其影响因素

徐清宸

曲阜师范大学地理与旅游学院, 山东 日照
Email: zhuosan@163.com

收稿日期: 2021年4月10日; 录用日期: 2021年5月14日; 发布日期: 2021年5月21日

摘 要

水分利用效率(WUE)作为陆地生态系统中碳水循环之间的重要连接, 衡量了生态系统水分消耗与碳积累之间的关系。本文基于MODIS净初级生产力(NPP)和蒸散(ET)产品数据, 分析了中国干旱半干旱区WUE的时空变异及其影响因素。结果表明: 1) 2001至2014年, 整个研究区NPP和ET均呈上升趋势, WUE呈下降趋势; 2) WUE低值区主要分布在青藏高原地区, 其年际变化呈上升趋势; WUE高值区主要分布在新疆北部和松嫩平原西部, WUE年际变化呈下降趋势; 3) 研究区大部分地区WUE与降水呈正相关。在青藏高原高寒草甸区, WUE与温度呈负相关, 而在内蒙古高原温带草甸区, WUE与温度呈正相关。4) 不同时间尺度的SPEI与WUE相关性趋势大体一致, 即干旱促进大部分研究区植被WUE且SPEI-12与WUE的显著相关比例最大。

关键词

水分利用效率, 植被, 影响因素, 中国干旱半干旱区

Spatiotemporal Variation of Water Use Efficiency and Its Influencing Factors in Arid and Semi-Arid Areas of China

Qingchen Xu

College of Geography and Tourism, Qufu Normal University, Rizhao Shandong
Email: zhuosan@163.com

Received: Apr. 10th, 2021; accepted: May 14th, 2021; published: May 21st, 2021

Abstract

As an important link between carbon and water cycle in terrestrial ecosystems, water use efficiency (WUE) measures the relationship between water consumption and carbon. In this paper, net primary production (NPP) and evapotranspiration (ET) data from MODIS products were used to analyze the spatial and temporal characteristics of water use efficiency in arid and semi-arid areas of China, and the response of vegetation to climate factors. Results showed that, 1) During 2001-2014, both NPP and ET showed an upward trend, while WUE showed a downward trend. 2) Spatially, the low WUE values are mainly distributed in the Tibetan plateau and show an upward trend; while the high WUE values are mainly distributed in the north of Xinjiang and the west of Songnen plain. 3) WUE of different vegetation types is shown as follows: Evergreen Needle leaf forest > Croplands > Mixed forest > Closed shrub lands > Grasslands > Open shrub lands. 4) Precipitation is positively correlated with most areas of the study area; temperature is negatively correlated with the alpine meadow on the Tibetan plateau and positively correlated with the temperate meadow on the Inner Mongolia plateau. A certain degree of drought can promote water use efficiency of vegetation.

Keywords

Water Use Efficiency, Vegetation, Influencing Factors, The Arid and Semiarid Zones of China

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

水分利用效率(Water Use Efficiency, WUE)定义为植被净初级生产力(Net Primary Production, NPP)与蒸散(Evapotranspiration, ET)的比值[1] [2], 表示植物单位固碳所消耗的水量[3]。这一指标综合了陆地生态系统的生物过程和物理过程, 对理解陆地生态系统与大气之间的碳水通量耦合有重要意义[4]。WUE影响生态系统生产力和碳汇功能, 同时也是研究植物生存和适宜性的重要指标[5]。在气候变化背景下, 气温和降水格局变化会对生态系统 WUE 造成显著影响[6]。已有研究在各个尺度上开展了 WUE 的实验和模拟研究: 在全球尺度上, Ito [7]等人基于 VISIT 模型的研究发现森林生态系统有着较高的 WUE; 在区域尺度上, Tian [8]等利用 DLEM 模型模拟了亚洲季风区 WUE, 发现在 1948 至 2000 年间 WUE 呈下降趋势, 尤其在 20 世纪 90 年代下降最为显著; 在站点尺度上, Warren Webb [6]对美国三种生态系统 WUE 进行研究发现, 森林生态系统的 WUE 要明显高于草地生态系统, 最低的则是荒漠生态系统。WUE 影响因素的研究也已在不同尺度开展并得到相应的结论: 在全球尺度上, Yang [9]等利用 WUE 观测数据集研究 WUE 与湿润指数和帕默尔干旱指数之间的关系发现, 在赤道较为湿润的生态系统中, 干旱对 WUE 起到抑制作用, 而在澳大利亚等较为干旱的生态系统中, 干旱对 WUE 起到促进作用; Ling Huang [10]等人利用 MODIS 数据对全球 WUE 评估时同样发现, 在干旱的生态系统中 WUE 与标准化降水蒸散指数(Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI)呈负相关。在区域尺度上, 影响海河流域生态系统 WUE 的主要因素是降水, 且随着降水的增多 WUE 上升[11]; 而在较为湿润的安徽省植被 WUE 则随着降水的增多而下降[12]; 张远东和裴婷婷[13]分别研究发现, 中国西南高山地区 WUE 与温度呈显著负相

关,而黄土高原地区植被 WUE 与温度呈正相关[14]。干旱对区域 WUE 的影响也有不少研究,例如 Limai Guo [15]等人 and Yibo Liu [16]等人分别得到干旱对中国部分地区的 WUE 起到促进作用;邹杰[17]等人也在中亚地区干旱对 WUE 的滞后效应做出相关研究。在站点尺度上,闫巍[18]等人利用位于青藏高原的当雄县碳通量观测站对 2003 年到 2005 年高寒草甸生态系统研究发现,雄县高寒草甸的生态系统 WUE 与降水呈正相关关系;Maricar Aguilos [19]等人也利用单个涡度通量数据集对法属圭亚那热带雨林 2004 至 2014 连续 11 年的 WUE 进行估算并分析,结果表明水分的缺乏对生态系统 ET 的影响要比对光合作用的影响更大。

综上,WUE 主要受气候因素影响,但不同区域 WUE 的时空变异及影响因素不同,因此在更多区域开展对 WUE 及其影响因素的研究至关重要。中国干旱和半干旱地区是对气候变化最敏感的地区之一,研究该区 WUE 时空变异及其驱动因素有助于理解生态系统对气候变化的适应策略。本文基于 MODIS 数据产品,分析 WUE 和气温、降水和 SPEI 的相关关系,讨论 2001 至 2014 年 WUE 在中国干旱半干旱区的时空变化特征以及对气候变化的响应,研究可为干旱半干旱区的生态系统管理提供一定的依据。

2. 材料和方法

2.1. 研究区概况

中国干旱半干旱区位于中国北部,被定义为干旱指数小于 0.5 的区域,即降水和蒸散的比率小于 0.5 的区域(中国科学院自然区划委员会)。经度范围是东经 $73^{\circ}29' \sim 125^{\circ}51'$,纬度范围是北纬 $27^{\circ}14' \sim 50^{\circ}08'$,包括新疆、西藏、青海、内蒙古等 12 个省。主要地形区包括准噶尔盆地、吐鲁番盆地、塔里木盆地、青藏高原、黄土高原、内蒙古高原和松嫩平原西部,总面积为 $4,556,650 \text{ km}^2$ [20]。主要的气候类型为温带大陆性气候和高原山地气候。主要的植被类型为草地、农用地和稀疏灌木。

2.2. 数据来源与处理

2.2.1. MODIS 数据

净初级生产力数据使用 MOD17A3 产品,是第一个监测全球植被生产力的连续数据集。NPP 数据时间分辨率为年,空间分辨率为 $1 \times 1 \text{ km}$ 。ET 数据采用 MOD16A2 产品,时间分辨率为 8 天,空间分辨率为 $1 \times 1 \text{ km}$ 。利用 Matlab 将每 8 天 ET 数据合成为年数据。原始数据从 NASA (<https://search.earthdata.nasa.gov/search/>)获取。

2.2.2. 气象数据

气候数据包括研究区域内各气象站的年平均气温和降水量,数据来源于国家气象数据中心 (<http://data.cma.cn/>)。利用 Auspline 方法将气候参数由站点数据插值得到 $1 \times 1 \text{ km}$ 空间分辨率的研究区连续栅格数据。

2.2.3. 标准化降水蒸散指数

标准化降水蒸散指数(Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI)是一种多时间尺度的干旱指数,可以比较不同时间尺度的干旱严重程度。较为广泛的使用步长是 1、3、6、12 和 24 个月。本次研究我们采用的时间步长为 1、3、6、12 月尺度的 SPEI。该数据来自于由 Begueria Santiago 和 Vicente Serrano Sergio M.开发的 SPEIbase v.2.5 (<https://digital.csic.es/handle/10261/153475>)。

2.2.4. 土地利用数据

中国干旱半干旱区的土地利用和土地覆被数据采用 MODIS 的土地利用产品 MCD12Q1 数据集,空间分辨率为 $1 \times 1 \text{ km}$ 。本研究选取的是 2011 年的土地覆盖数据,并采用国际地圈生物圈计划(IGBP)的全

球植被分类方案, 该方案包含 17 个土地覆盖类型。根据 IGBP 的植被分类和研究区的具体情况, 选择其中面积较大的六种植被类型进行主要分析。根据面积从大到小依次是草地、农用地、稀疏灌木、混交林、常绿针叶林和稠密灌木(图 1)。

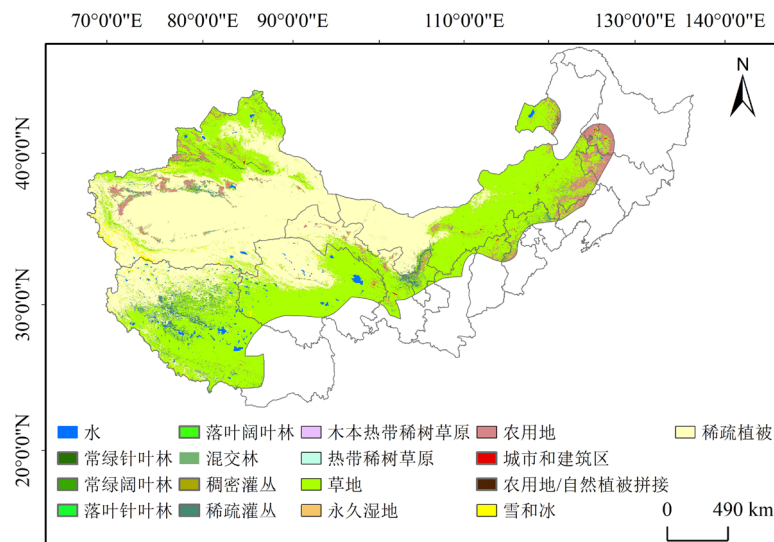


Figure 1. Land use type map of study area

图 1. 研究区土地利用类型图

2.3. 研究方法

2.3.1. WUE 计算

WUE 采用 NPP 与 ET 的比值表示:

$$WUE = \frac{NPP}{ET} \quad (1)$$

式中: WUE 为水分利用效率($g \cdot C \cdot mm^{-1} \cdot m^{-2}$); NPP 指植被通过光合作用所累积有机干物质的总量, 是植被通过光合作用所产生的有机质总量减去自养呼吸所消耗后的剩余部分[21]; ET 为生态系统实际蒸散发(mm), 是土壤蒸发和植物蒸腾的总和[22]。

2.3.2. 趋势分析

采用一元线性回归法对 2001~2014 年研究区 NPP 、 ET 和 WUE 进行分析, 得到 NPP 、 ET 和 WUE 的变化趋势, 如公式(2)所示, 并采用 Pearson 相关系数法对 WUE 与温度、降水和 $SPEI$ 进行相关分析, 并设置显著性水平为 0.05, 计算公式如下:

$$SLOPE_z = \frac{n \sum_{i=1}^n (t_i \times z_i) - \sum_{i=1}^n t_i \sum_{i=1}^n z_i}{n \times \sum_{i=1}^n t_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n t_i \right)^2} \quad (2)$$

$$P_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

式中： $SLPOE_z$ 为斜率； t 为年份； $n=14$ ； z_i 为第 i 年 NPP、ET 或 WUE 的值。 P_{xy} 为 x 、 y 变量相关系数， x_i 为第 i 年的气候因子值； y_i 为第 i 年的 WUE； $\bar{x}$ 为 14 年内气候因子的平均值； $\bar{y}$ 为 WUE 的平均值。

3. 结果与分析

3.1. 净初级生产力时空变异

2001~2014 年间中国干旱半干旱区域 NPP 年平均值为 $134.92 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$ ，不同植被类型的 NPP 年平均值存在差异；混交林的 NPP 最高，其值为 $306.1 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$ ，常绿针叶林次之，其值为 $285.3 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$ 。稠密灌丛、农用地和草地的 NPP 分别为 $271.7 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $249.4 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$ 、和 $134.1 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$ 。稀疏植被的 NPP 最低，其值为 $40.1 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$ 。中国干旱半干旱区 NPP 在空间分布上呈现东北地区 and 甘肃地区较高，青藏地区较低的特点。研究期间，研究区 NPP 呈显著上升的区域占总面积的 17.93%，位于内蒙古高原东部、松嫩平原西部和甘肃青海等地，主要的土地类型为草地和农用地；显著下降的区域占总面积的 11.73%，主要位于新疆阿尔泰山和天山地区(图 2)。

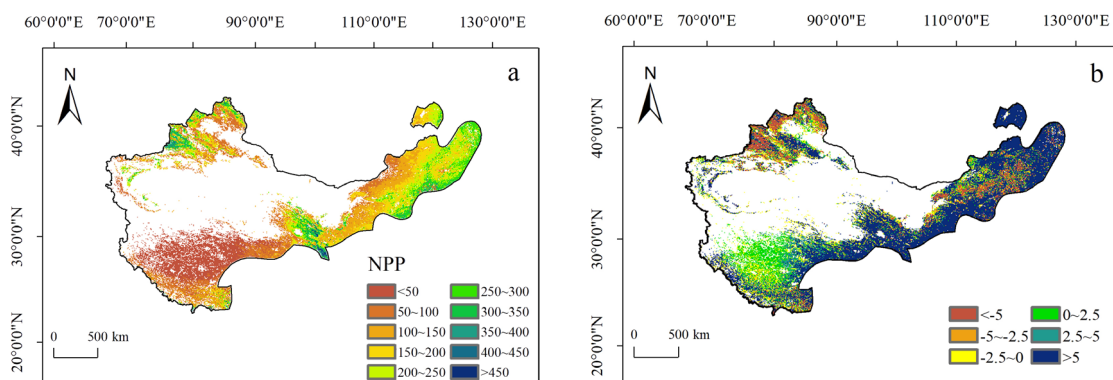


Figure 2. Spatial distribution (a) and interannual variation (b) of NPP ($\text{g C} \cdot \text{m}^{-2}$) in the arid and semiarid zones of China from 2000 to 2014

图 2. 中国干旱半干旱区 2001~2014 年 NPP($\text{g C} \cdot \text{m}^{-2}$)空间分布(a)与 NPP 年际变化(b)

3.2. 蒸散时空变异

2001~2014 年间中国干旱区半干旱区的 ET 年平均值为 255.81 mm 。稠密灌丛的 ET 最高，其值为 410.60

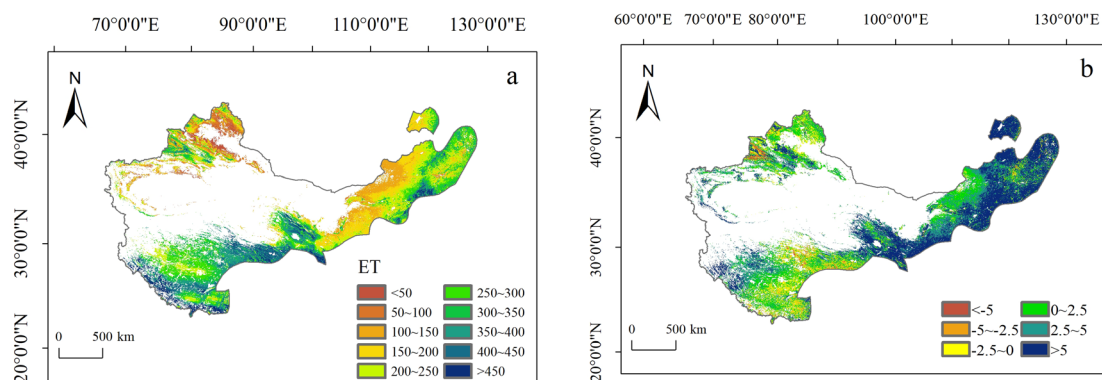


Figure 3. Spatial distribution (a) and interannual variation (b) of ET (mm) in the arid and semiarid zones of China from 2001 to 2014

图 3. 中国干旱半干旱区 2001~2014 年 ET (mm)空间分布(a)与 ET 年际变化(b)

mm; 混交林次之, 其值为 399.9 mm; 然而有着较高 NPP 的常绿针叶林 ET 并不高, 其值为 288 mm; 农用地、草地和稀疏灌丛 ET 分别为 260.61 mm、256.31 mm 和 239.97 mm。图 3 结果显示, 青藏高原地区和研究区东部的 ET 较高, 新疆北部和内蒙古草原地区的 ET 较低。同为草地生态系统的内蒙古温带草原和青藏高寒草原的 ET 差异明显, 高寒草原 ET 明显高于温带草原。研究期间, ET 呈显著上升趋势面积占研究区总面积的 42.88%, 主要位于内蒙古高原的东北部和松嫩平原的西部; 研究区只有 0.6% 的区域 ET 呈现显著下降, 主要位于天山山脉的西缘。

3.3. 水分利用效率的时空变异

2001~2014 年间, 研究区内 WUE 平均值为 $0.52 \text{ g C} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。常绿针叶林的 WUE 年平均值最高, 为 $0.99 \text{ g C} \cdot \text{kg}^{-1}$; 其次为农用地, 值为 $0.96 \text{ g C} \cdot \text{kg}^{-1}$; 混交林和稠密灌丛的值分别为 $0.77 \text{ g C} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.67 \text{ g C} \cdot \text{kg}^{-1}$;

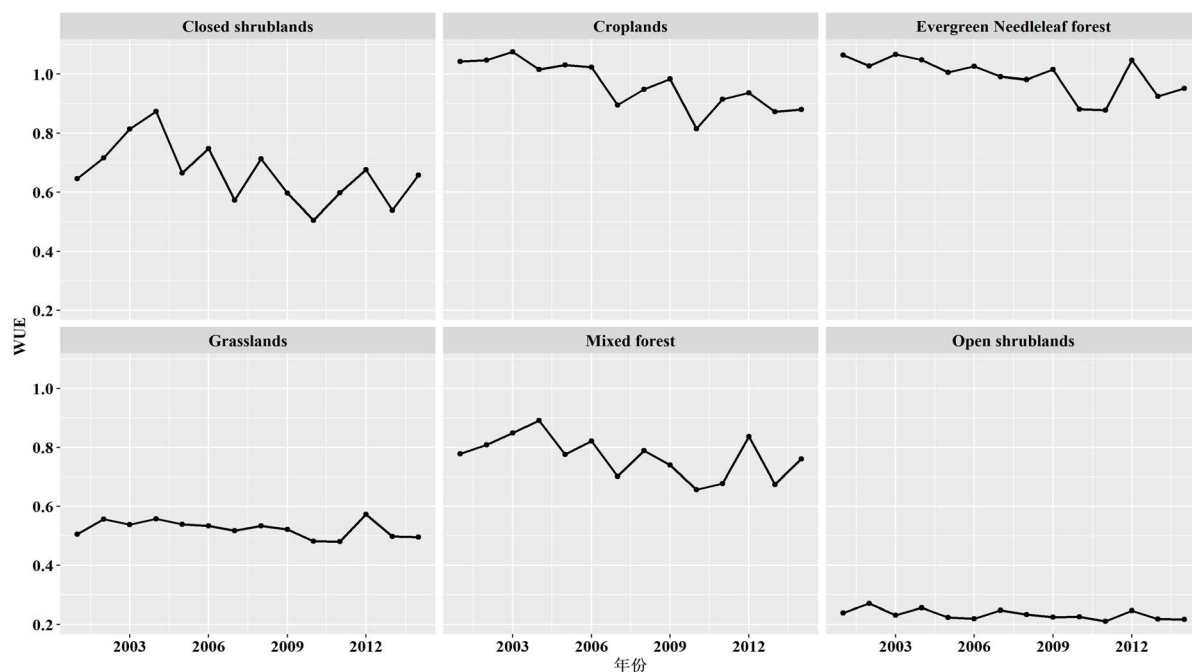


Figure 4. Interannual variation of WUE ($\text{g C} \cdot \text{kg}^{-1}$) of different vegetation types in the arid and semiarid zones of China from 2001 to 2014

图 4. 中国干旱半干旱区 2001~2014 年不同植被类型 WUE ($\text{g C} \cdot \text{kg}^{-1}$) 年际变化

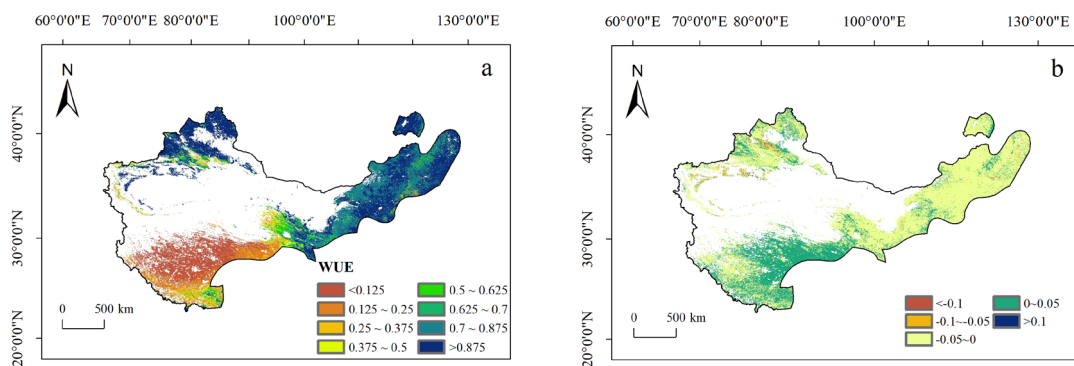


Figure 5. Spatial distribution (a) and interannual variation (b) of WUE ($\text{g C} \cdot \text{kg}^{-1}$) in the arid and semiarid zones of China from 2001 to 2014

图 5. 中国干旱半干旱区 2001~2014 年 WUE ($\text{g C} \cdot \text{kg}^{-1}$) 空间分布(a)与 WUE 年际变化(b)

再次是草地, 值为 $0.52 \text{ g C} \cdot \text{kg}^{-1}$; 最低的是稀疏灌丛, 其值为 $0.23 \text{ g C} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。图 4 为研究区内不同植被类型 WUE 变化趋势, 结果显示近 14 年植被 WUE 状况整体下降, 与 NPP 得出的结果相反。农用地和稠密灌丛的下降程度最大; 草地与稀疏灌丛变化并不明显, 但在 2012 年有明显升高。图 5 显示, 青藏高原地区 WUE 明显低于其他区域, 与内蒙古草原界限明显。这与 ET 的显示结果完全相反, 表明研究区 ET 的变化对 WUE 的影响较 NPP 更为明显。在 2001 到 2014 年期间, WUE 显著上升面积占研究区总面积的 2.7%, 位于青藏高原地区 and 新疆阿尔泰山和天山地区; 显著下降面积占研究区总面积的 27.53%, 位于内蒙古高原东部、黄土高原和松嫩平原西部。

3.4. 温度降水对 WUE 的影响

气候因素的年际变化是影响中国干旱半干旱区 WUE 的重要因素。通过计算植被 WUE 和温度、降水的相关性, 揭示了 WUE 对气候因子的敏感性。

如图 6(b) 显示, 研究区大部分区域 WUE 与降水呈显著正相关, 显著正相关的面积达到 76.62%。表明研究区大部分植被 WUE 会随者降水的增多而升高; 显著负相关的面积只占到 9.05%, 以稀疏灌丛为主。而图 6(a) 的结果显示, 温度的升高对生态 WUE 影响差异较大。温度与 WUE 呈显著正相关的区域面积占研究区总面积的 55.6%, 主要位于新疆的天山和阿尔泰山区域、内蒙古草原以及松嫩平原西部, 主要植被类型为温带草原; 呈显著负相关的区域面积占研究区总面积的 15.17%, 主要位于西藏、青海以及甘肃地区, 主要的植被类型为高寒草原。两种草地类型的界限较为明显。

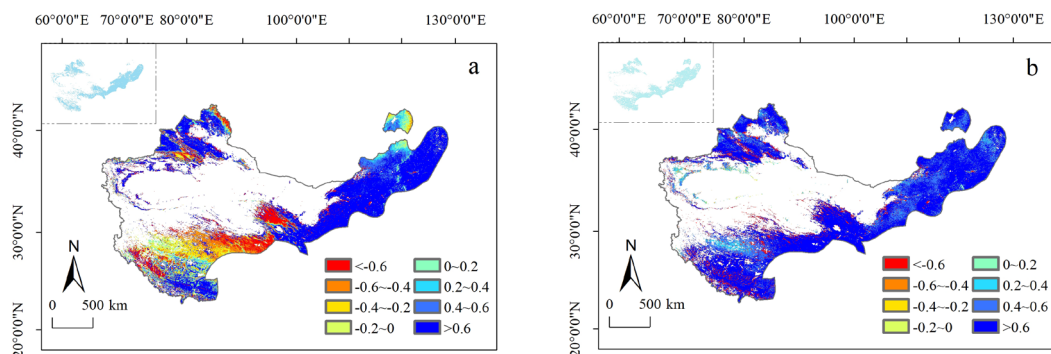


Figure 6. Spatial distribution of correlation coefficients between WUE and temperature (a) and precipitation (b) in the arid and semiarid zones of China from 2001 to 2014

图 6. 中国干旱半干旱区 2001~2014 年 WUE 与气温(a)、降水(b)相关系数空间分布

3.5. 干旱指数 SPEI 对 WUE 的影响

为研究 WUE 对不同时间尺度干旱的响应, 采用不同时间尺度的 SPEI 来进行分析。SPEI-03 表示为 3 个月时间尺度 SPEI, 与植被的生长季密切相关; SPEI-12 表示为 12 个月时间尺度 SPEI, 可以较为清晰的反映干旱的长期变化特征[23]。图 7 显示, 不同时间尺度的 SPEI 与 WUE 相关性趋势大体一致, 但 SPEI-12 的显著相关比例最大。研究区大部分地区 WUE 与 SPEI 呈负相关, 意味着一定程度的干旱对研究区 WUE 起促进作用; 呈正相关的区域主要位于青藏高原南部, 干旱对该地区 WUE 起抑制作用。

4. 讨论

4.1. 时空变异讨论

2001~2014 年间, 研究区 WUE 平均值为 $0.52 \text{ g C} \cdot \text{kg}^{-1}$, 相比 Yibo Liu [16] 等人利用 BEPS 模型估算

2010~2011 年中国陆地生态系统 WUE 值为 $0.79 \text{ g C} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的结果较低。图 8 结果显示, 近 14 年研究区的 NPP 与 ET 状况整体上升, ET 的年均增幅高于 NPP, 致使研究区植被 WUE 状况整体下降。Tian 等人利用 DLEM 模型评估同样发现, 在 20 世纪 90 年代中国西北部和蒙古区域的生态系统 WUE 明显下降, 可能的原因是在土地覆盖类型的转变[8]。据图 5(a)结果显示, 青藏高原地区 WUE 明显低于其他区域, 且与内蒙古草原界限明显, 与闫巍[18]等人的研究结果一致: 闫巍等人利用涡度技术的观测不同生态系统

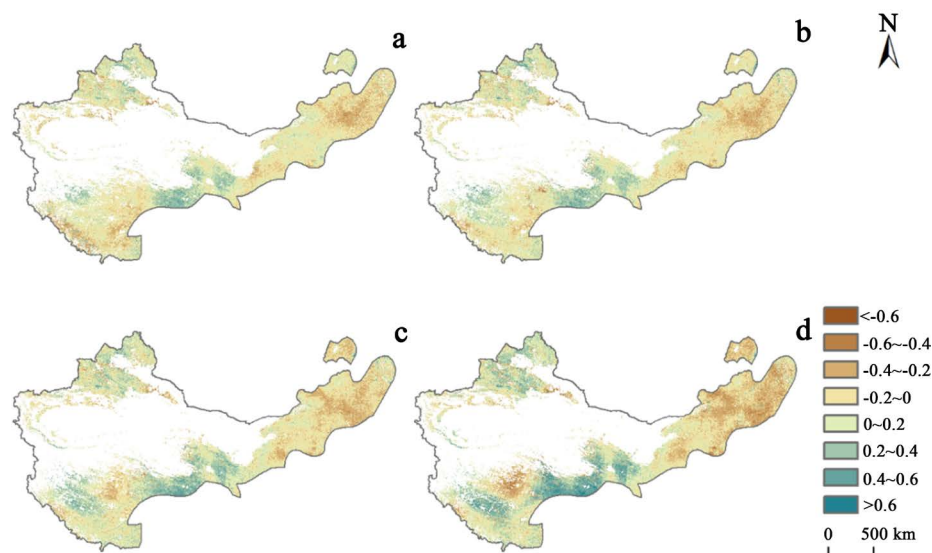


Figure 7. The spatial distribution of correlation coefficients between WUE and SPEI-01 (a), SPEI-03 (b), SPEI-06 (c) and SPEI-12 (d) in the arid and semiarid zones of China from 2001 to 2014

图 7. 中国干旱半干旱区 2001~2014 年 WUE 与 SPEI-01 (a)、SPEI-03 (b)、SPEI-06 (c) 和 SPEI-12 (d) 相关系数空间分布

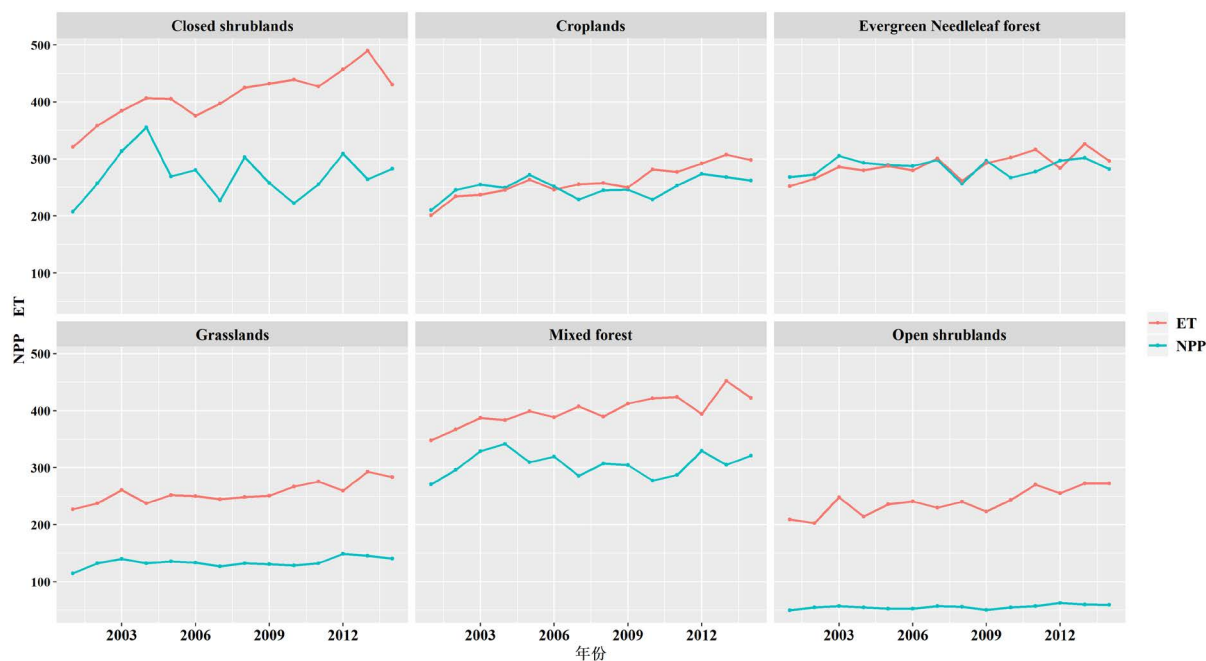


Figure 8. Interannual variation of NPP ($\text{g C} \cdot \text{m}^{-2}$) and ET (mm) of different vegetation types in the arid and semiarid zones of China from 2001 to 2014

图 8. 中国干旱半干旱区 2001~2014 年不同植被类型 NPP ($\text{g C} \cdot \text{m}^{-2}$)、ET (mm) 年际变化

WUE 发现,青藏高原的高寒草原生态系统的 WUE 明显低于内蒙古干旱草原生态系统的 WUE。Limai Guo [15]等人评估了 1982~2015 年中国生态系统 WUE 的结果同样显示,青藏高原地区 WUE 最低,东北地区 WUE 最高。如图 5(b),虽然青藏高原地区 WUE 较低,但在研究期间却存在上升趋势。Limai Guo 的研究结果也表明,WUE 在中国呈负增长趋势的区域位于内蒙古东部地区、东北地区和西北地区,而青藏高原地区的 WUE 呈增加趋势。从不同植被类来看,常绿针叶林 WUE 最高,其次分别是农用地、混交林、稠密灌丛、草地和稀疏灌丛。Warren Webb [6]在对美国三种生态系统 WUE 研究时同样发现,森林生态系统的 WUE 要明显高于草地生态系统,最低的则是荒漠生态系统。稀疏灌丛与草地的蒸散相似,根据图 8 的结果显示,稀疏灌丛 ET 要远大于其 NPP,导致稀疏灌丛 WUE 最低;对比来看常绿针叶林有着中等程度 ET,但同时有着较高程度 NPP,导致常绿针叶林有着较高 WUE;草地与常绿针叶林有着相同程度 ET, NPP 却远低于常绿针叶林,从而草地 WUE 要小于常绿针叶林 WUE。

4.2. 驱动力分析

由于不同生态系统内生态过程对水文气候条件变化的敏感性不同,导致研究区内不同草地类型的 WUE 与温度的相关性差异明显:位于内蒙古高原的温带草原与温度呈正相关,而位于青藏高原的高寒草原与温度呈负相关。张远东等人利用 CEVSA 模型估算了 1954 年到 2010 年中国西南高山地区的 WUE,发现 WUE 与温度呈显著负相关的面积占研究区总面积的 76.3% [13],这与我们得出的结论一致。他在研究中发现, NPP 与 ET 均与温度呈正相关,但 ET 上升的速率明显高于 NPP,导致在气候变暖的情况下,青藏高原地区需要消耗更多的水分来维持生态系统的碳累积。在温度同样较低的比利时草原,De Boeck 在进行田间试验时也发现,气温升高会降低该区的生态系统 WUE [24]。而位于气温相对较高的内蒙古地区 WUE 与温度则呈正相关。裴婷婷等人利用 MODIS 对黄土高原植被进行研究时同样得到 WUE 与温度呈正相关[14],与我们的研究结果一致。气温升高提升植被光合作用速率,促进植被生产力增加,并且幅度大于蒸散的增加,导致在气候变暖条件下,内蒙古等地生态系统利用相同的水分就可以获得更多的碳汇。

降水是影响 WUE 时空变化的主要因素之一,特别是干旱半干旱生态系统。如图 6(b)所示,研究区内大多地区降水与 WUE 呈正相关,说明在该地区降水的增加使植被对碳的同化速率大于生态系统水分的损失率。闫巍和石培礼[18]等人利用位于青藏高原的当雄县碳通量观测站对 2003 年到 2005 年高寒草甸生态系统研究发现,当雄县高寒草甸的生态系统 WUE 与降水也呈一定的正相关关系;同样利用 MODIS 数据,对海河流域 WUE 研究发现,WUE 与降水同样呈正相关[11]。也有研究结果表明植被 WUE 与降水呈负相关[2];还有研究表明随着降水量的增加,WUE 会出现先增加后减少的趋势[25],植被 WUE 在降水程度上会存在一个特定的阈值。由于不同植被类型本身的光合作用与呼吸作用存在差异;同时,不同区域存在不同的气候条件,导致不同区域对 WUE 对气温和降水的变化响应并不一致。

到 21 世纪末,干旱将会更加严重和频繁,尤其是在北半球的中高纬度[26]。本文的研究结果显示,研究区大部分区域 WUE 与 SPEI 呈负相关,只有青藏高原南部等小部分地区 WUE 与 SPEI 呈正相关。Yibo Liu [16]等人研究发现干旱通常使中国东北和内蒙古地区 WUE 升高,而使中国中部的 WUE 降低;Limai Guo [15]同样发现了这一规律。Muhammad Khalifa [27]等人研究同样发现,2009 年的干旱导致苏丹大部分土地覆盖类型 WUE 增加。在之前的研究中,人们通常认为,植被气孔导度会随着水分胁迫的加剧而降低,所以一定程度的干旱会使 WUE 有所增高,但现在随着对 WUE 研究的深入,发现 WUE 在干旱和湿润这两种生态系统中对干旱的响应差异明显。例如,Yuting Yang 与 Ling Huang [9] [10]分别利用站点数据和遥感数据研究发现,在较为湿润的生态系统中,干旱对 WUE 会起到抑制作用;而在干旱生态系统中,干旱则会促进生态系统 WUE。这一假设得到了现场测量与建模方法研究的支持:当干旱程度较为缓和时,WUE 会有所升高;当干旱程度加强时,WUE 会出现下降的趋势[28]。

5. 结论

本文基于 2001 至 2014 年 MODIS 数据和气象数据, 利用回归分析和相关分析, 揭示中国干旱半干旱区 14 年来植被 WUE 时空变化特征, 并分析气候变化对 WUE 的影响, 为区域植被 WUE 的影响因素提供更多参考, 并有助于更好地理解不同生态系统对气候变化的适应策略。结论如下:

1) 研究期间, WUE 的均值为 $0.52 \text{ g C} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。青藏高原地区 WUE 明显低于其他区域, 与内蒙古草原界限明显。不同植被类型 WUE 从大到小依次为: 常绿针叶林 > 农用地 > 混交林 > 稠密灌丛 > 草地 > 稀疏灌丛。

2) 研究期间, 植被 NPP 与 ET 状况整体上升, 植被 WUE 却整体下降。青藏高原地区 WUE 呈上升趋势。

3) 研究区内降水促进植被 WUE; 温度在不同区域对 WUE 影响不同, 青藏高原 WUE 与温度呈负相关, 内蒙古高原 WUE 与温度呈正相关。

4) 研究区大部分区域 SPEI 与 WUE 呈负相关, 且 SPEI-12 与 WUE 的显著相关比例最大。

参考文献

- [1] Clark, J.A. (1976) Reviews: Microclimate: The Biological Environment. By N. J. Rosenberg. *Journal of Ecology*, **64**, 389-390. <https://doi.org/10.2307/2258713>
- [2] 王庆伟, 于大炮, 代力民, 周莉, 周旺明, 齐光, 等. 全球气候变化下植物水分利用效率研究进展[J]. 应用生态学报, 2010, 21(12): 3255-3265.
- [3] 米兆荣, 陈立同, 张振华, 贺金生. 基于年降水、生长季降水和生长季蒸散的高寒草地水分利用效率[J]. 植物生态学报, 2015, 39(7): 649-660.
- [4] 胡中民, 于贵瑞, 王秋凤, 赵风华. 生态系统水分利用效率研究进展[J]. 生态学报, 2009, 29(3): 1498-1507.
- [5] Jarvis, P.G. and Mcnaughton, K.G. (1986) Stomatal Control of Transpiration: Scaling Up from Leaf to Region. *Advances in Ecological Research*, **15**, 1-49. [https://doi.org/10.1016/S0065-2504\(08\)60119-1](https://doi.org/10.1016/S0065-2504(08)60119-1)
- [6] Webb, W., Szarek, S., Lauenroth, W., Kinerson, R. and Smith, M. (1978) Primary Productivity and Water Use in Native Forest, Grassland, and Desert Ecosystems. *Ecological*, **59**, 1239-1247. <https://doi.org/10.2307/1938237>
- [7] Ito, A. and Inatomi, M. (2012) Water-Use Efficiency of the Terrestrial Biosphere: A Model Analysis Focusing on Interactions between the Global Carbon and Water Cycles. *Journal of Hydrometeorology*, **13**, 681-694. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-10-05034.1>
- [8] Tian, H., Lu, C., Chen, G., Xu, X., Liu, M., Ren, W., et al. (2011) Climate and Land Use Controls over Terrestrial Water Use Efficiency in Monsoon Asia. *Ecohydrology*, **4**, 322-340. <https://doi.org/10.1002/eco.216>
- [9] Yang, Y., Guan, H., Batelaan, O., McVicar, T.R., Long, D., Piao, S., et al. (2016) Contrasting Responses of Water Use Efficiency to Drought across Global Terrestrial Ecosystems. *Scientific Reports*, **6**, Article No. 23284. <https://doi.org/10.1038/srep23284>
- [10] Huang, L., He, B., Han, L., Liu, J., Wang, H. and Chen, Z. (2017) A Global Examination of the Response of Ecosystem Water-Use Efficiency to Drought Based on MODIS Data. *Science of the Total Environment*, **601-602**, 1097-1107. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.084>
- [11] 赵安周, 张安兵, 冯莉莉, 王冬利, 承达瑜. 海河流域生态水分利用效率时空变化及其与气候因子的相关性分析[J]. 生态学报, 2019, 39(4): 1452-1462.
- [12] 王芳, 张运, 黄静, 汤志, 何好, 王银银. 基于 MODIS 数据的安徽省植被水分利用效率时空变化及影响因素[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(6): 1314-1323.
- [13] 张远东, 庞瑞, 顾峰雪, 刘世荣. 西南高山地区水分利用效率时空动态及其对气候变化的响应[J]. 生态学报, 2016, 36(6): 1515-1525.
- [14] 裴婷婷, 李小雁, 吴华武, 吴秀臣, 陈英, 谢保鹏. 黄土高原植被水分利用效率对气候和植被指数的敏感性研究[J]. 农业工程学学报, 2019, 35(5): 127-133.
- [15] Guo, L., Sun, F., Liu, W., Zhang, Y., Wang, H., Cui, H., et al. (2019) Response of Ecosystem Water Use Efficiency to Drought over China during 1982-2015: Spatiotemporal Variability and Resilience. *Forests*, **10**, 598-612.

- <https://doi.org/10.3390/f10070598>
- [16] Liu, Y., Xiao, J., Ju, W., Zhou, Y., Wang, S. and Wu, X. (2015) Water Use Efficiency of China's Terrestrial Ecosystems and Responses to Drought. *Scientific Reports*, 5, Article No. 13799. <https://doi.org/10.1038/srep13799>
 - [17] 邹杰, 丁建丽, 秦艳, 王飞. 遥感分析中亚地区生态系统水分利用效率对干旱的响应[J]. 农业工程学报, 2018, 34(9): 145-152.
 - [18] 闫巍, 张宪洲, 石培礼, 杨振林. 青藏高原高寒草甸生态系统 CO₂ 通量及其水分利用效率特征[J]. 自然资源学报, 2006, 21(5): 756-767.
 - [19] Aguilos, M., Stahl, C., Burban, B., Hérault, B., Courtois, E., Coste, S., *et al.* (2018) Interannual and Seasonal Variations in Ecosystem Transpiration and Water Use Efficiency in a Tropical Rainforest. *Forests*, 10, 14-33. <https://doi.org/10.3390/f10010014>
 - [20] Mao, D., Wang, Z., Wu, B., Zeng, Y., Luo, L. and Zhang, B. (2018) Land Degradation and Restoration in the Arid and Semiarid Zones of China: Quantified Evidence and Implications from Satellites. *Land Degradation & Development*, 29, 3841-3851. <https://doi.org/10.1002/ldr.3135>
 - [21] 李登科, 王钊. 基于 MOD17A3 的中国陆地植被 NPP 变化特征分析[J]. 生态环境学报, 2018, 27(3): 397-405.
 - [22] 宫菲, 杜灵通, 刘可, 朱玉果, 丹杨, 王乐, 等. 两种遥感蒸散产品在干旱半干旱地区的应用对比[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(1): 197-202.
 - [23] 张钦, 唐海萍, 崔凤琪, 戴路炜. 基于标准化降水蒸散指数的呼伦贝尔草原干旱变化特征及趋势分析[J]. 生态学报, 2019, 39(19): 7110-7123.
 - [24] Deboeck, H.J., Lemmens, C.M., Bossuy, T.H., Malchair, S., Carnol, M., Merckx, R., *et al.* (2006) How Do Climate Warming and Plant Species Richness Affect Water Use in Experimental Grasslands? *Plant and Soil*, 288, 249-261. <https://doi.org/10.1007/s11104-006-9112-5>
 - [25] Niu, S., Xing, X., Zhang, Z., Xia, J., Zhou, X., Song, B., *et al.* (2011) Water-Use Efficiency in Response to Climate Change: From Leaf to Ecosystem in a Temperate Steppe. *Global Change Biology*, 17, 1073-1082. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02280.x>
 - [26] Meehl, G.A. and Tebaldi, C. (2004) More Intense, More Frequent, and Longer Lasting Heat Waves in the 21st Century. *Science*, 305, 994-997. <https://doi.org/10.1126/science.1098704>
 - [27] Khalifa, M. (2018) Spatio-Temporal Variations in Climate, Primary Productivity and Efficiency of Water and Carbon Use of the Land Cover Types in Sudan and Ethiopia. *Science of the Total Environment*, 624, 790-806. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.090>
 - [28] Yang, G. (2014) Water Use Efficiency Threshold for Terrestrial Ecosystem Carbon Sequestration under Afforestation in China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 195-196, 32-37. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.04.010>