

伊犁河谷草地生态系统水分利用效率 时空变化及影响因素

付秀东, 闫俊杰, 沙吾丽·达吾提, 刘海军, 崔东, 陈晨

(伊犁师范大学 资源与生态研究所, 新疆 伊宁 835000)

摘要:水分利用效率(Water Use Efficiency, WUE)是表征生态系统碳水耦合的重要指标,研究退化草地 WUE 的时空变化,对探明草地退化的环境效应具有重要意义。选择草地退化严重的伊犁河谷为研究区,基于 MODIS NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)、GPP(Gross Primary Productivity)、ET(Evapotranspiration)以及气象数据,并借助于 GIS 空间分析及趋势分析等方法,对 2000—2014 年伊犁河谷草地生态系统 WUE 时空变化及其影响因素进行了研究。结果表明:(1)伊犁河谷草地 WUE、ET 及 GPP 均呈现明显的海拔分异,但 WUE 高值区域并未出现在干旱的荒漠区,而是主要分布在 GPP 为高值($GPP > 650 \text{ g C/m}^2$)且 ET 相对较高(300~500 mm)的区域;(2)近 15 年伊犁河谷草地 ET 及 GPP 总体呈降低趋势,WUE 则总体呈增加趋势;空间上,全区 79.20%区域 WUE 有所增加,ET 和 GPP 发生减少的比例则分别为 92.31%和 78.10%;(3)研究区 WUE 增加主要是由于 ET 减少程度高于 GPP,但 ET 变化与 GPP 关系紧密,WUE 的变化并不由单一的 GPP 或 ET 变化所主导,而是两者变化综合作用的结果;(4)近 15 年伊犁河谷降水的减少导致植被覆盖降低和 ET 减少,进而影响 WUE 的变化。WUE 变化具有明显的空间异质性,15 年内全区平均 WUE 增加 6.61%,降水的减少是导致伊犁河谷 WUE 增加的主要气候因子。

关键词:水分利用效率;影响因素;MODIS;草地;伊犁河谷

中图分类号:Q948.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)01-0124-08

Spatiotemporal Variation of Water Use Efficiency and Its Influencing Factors in the Grassland Ecosystem of Ili River Valley

FU Xiudong, YAN Junjie, Shawuli · Davuti, LIU Haijun, CUI Dong, CHEN Chen

(Institute of Resources and Ecology, Yili Normal University, Yining, Xinjiang 835000, China)

Abstract: Water use efficiency (WUE) is an important index indicating the coupling of carbon and water in the ecosystem. Study on the spatiotemporal variation of WUE in degraded grassland is of great significance for verifying the environmental effects of grassland degradation. Ili River Valley, labeled with serious grassland degradation, was selected as the study area. Based on data of MODIS NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), GPP (Gross Primary Productivity), ET (Evapotranspiration) and meteorological factors, and with the help of GIS technology and the method of trend analysis, the spatiotemporal variation of WUE in the grassland ecosystem of Ili River Valley in 2000—2014 and its influencing factors were studied. The results showed that: (1) WUE, ET and GPP in the grassland of Ili River Valley all showed obvious differentiation along the altitude; areas with high WUE did not appear in arid desert area, but mainly distributed in area with high GPP ($GPP > 650 \text{ g C/m}^2$) and relatively high ET (300~500 mm); (2) in the past 15 years, ET and GPP in the grassland of Ili River Valley decreased, while WUE increased; spatially, WUE increased in 79.20% of the grassland; the proportions of areas with decreased ET and GPP were 92.31% and 78.10%, respectively; (3) the increase of WUE in the study area was mainly due to the fact that the decrease of ET was higher than that of GPP; however, the change of ET was closely related to that of GPP; the change of WUE was not resulted from the single change in GPP or ET, but from the comprehensive interac-

收稿日期:2020-03-18

修回日期:2020-04-02

资助项目:伊犁师范大学植物生态学重点学科科研项目“基于饱和修正 NDVI 的伊犁河谷草地退化影响因素量化研究”(YLUPE201801)

第一作者:付秀东(1998—),男,新疆阿勒泰市人,本科,地理科学专业。E-mail:764375674@qq.com

通信作者:闫俊杰(1984—)男,河南林州人,博士,副教授,主要从事遥感生态应用研究。E-mail:yan3550@sina.com

tion of changes in the both; (4) in the past 15 years, the decrease of precipitation in Ili River Valley was the main reason for the decrease of vegetation coverage, which affected the variations of WUE further. Variations of WUE in the grassland of Ili River Valley showed obvious regional characteristics. WUE increased by 6.61% on average within 15 years. The decrease of precipitation was the main climate factor that led to the increase of WUE in Ili River Valley.

Keywords: water use efficiency; influencing factors; MODIS; grassland; Ili River Valley

草地是陆地生态系统的重要组成部分,研究表明全球一半以上草地发生退化^[1],草地退化的环境效应被广泛关注^[2-3]。水分利用效率(Water Use Efficiency, WUE)代表了植物固定单位质量碳消耗的水分^[4],由生态系统生产力和蒸散发(Evapotranspiration, ET)共同作用^[5-6],是表征生态系统碳水耦合的重要指标^[7],也是预测生态系统对环境变化响应的重要参数^[8]。分析草地退化对生态系统 WUE 的影响,对从生态调节的角度来揭示草地退化的环境效应具有重要意义。

前人对植物个体或农田植被 WUE 特征及其影响因素进行了广泛研究^[9-10]。遥感技术的发展促进了生态系统水平 WUE 研究的广泛开展^[11-12]。基于遥感技术, Xia 等^[13]对全球陆地 2000—2013 年 WUE 分析表明非洲和大洋洲由北向南以及欧洲和南美洲由东向西, WUE 有所增加,而 Chen 等^[10]发现 1999—2008 年温带欧亚草原 WUE 整体呈增加趋势,但存在明显的空间分异;邹杰等^[14]对 2000—2014 年包括新疆在内的中亚地区 WUE 分析表明,该区域内主要生态系统的 WUE 均有所增加。对于 WUE 的影响因素,研究发现干旱是促使生态系统 WUE 变化的重要原因^[15-16],适度干旱将激发植物通过自身调节提高对水分的利用效率^[17];穆少杰等^[18]发现,相对于温度,降水量的变化对 WUE 的影响更大。除气候影响因素外, Jin 等^[19]研究表明植被物候的改变也是生态系统 WUE 变化的重要影响因素。Zheng 等^[20]发现植被重建促进了黄土高原生态系统 WUE 的提高;同时, Huang 等^[21]的研究发现高强度的放牧活动致使新疆覆盖水平较高的草地 WUE 发生明显降低(牧民更偏向于在覆盖度高的草地放牧)。可见除气候因素影响外,植被覆盖水平及物候等自身特性的改变也是影响生态系统 WUE 变化的重要原因。

位于我国天山西段的伊犁河谷,草地发育良好,是我国重要的优质牧场^[22],但近 15 a 在气候变化和过渡放牧等干扰影响下,草地退化日趋严重^[23]。基于此,本文利用遥感数据及气象数据,借助于 GIS 空间分析技术,对伊犁河谷草地 WUE 时空变化进行分析,探讨气候变化及草地退化对 WUE 影响,以期对草地退化环境效应的研究提供支持和参考。

1 研究区概况

伊犁河谷介于 80°09′42″—84°56′50″E, 42°14′16″—44°53′30″N, 地处天山山脉西端(图 1), 北、南、东三面高山环绕, 地形呈向西敞开的“V”字; 特殊的地形为西风带湿润水汽抬升凝结成雨提供了有利条件, 河谷内降水充沛, 造就了其“塞外江南”的美誉^[24-25]。境内有巩乃斯河、喀什河、特克斯河以及伊犁河等主要河流。山脉和河流将整个河谷分割为伊犁河谷、特克斯谷地、巩乃斯谷地、喀什河谷丘陵和昭苏盆地 5 个地域单元, 形成了独特的“山地—盆地—河谷平原”地形地貌^[26]。河谷内年平均降水量 200~800 mm, 受到地形影响, 山区降水是平原的 3~5 倍; 年平均日照时数达到 2 700~3 000 h, 年均气温 2.9~9.1℃。河谷内草地植被发育良好, 类型丰富, 且垂直分异明显^[27]。

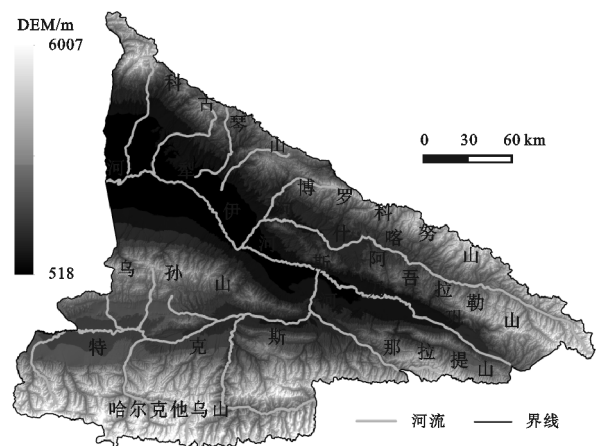


图 1 研究区概况

2 材料与方法

2.1 数据来源与预处理

本研究所用到的遥感数据包括 MODIS 的 NDVI、ET 以及总初等生产力(Gross Primary Productivity, GPP)成品数据, 时间序列为 2000—2014 年。NDVI 数据为 MODIS MOD13Q1 产品数据, 该数据为 16 d 合成数据, 其空间分辨率为 250 m; GPP 和 ET 数据分别为 MODIS MOD17A3 和 MOD16A3 产品数据, 时间和空间分辨率分别为 1 a 和 1 km。GPP 和 ET 数据由蒙大拿大学密苏拉分校地球动态数值

模拟研究组制作,数据经过全球多个区域地面通量数据的验证,被广泛应用于区域及全球尺度的相关研究^[28-29]。草地空间分布数据是基于 Landsat 8 OI 近外、红和绿波段假彩色合成影像,利用目视解译方式获得其矢量数据,为便于数据处理,将矢量数据转换为栅格数据。

气象数据来自中国气象局气象数据中心,包括 2000—2014 年伊宁市、伊宁县、霍城、察布查尔、霍尔果斯、尼勒克、巩留、新源、昭苏、特克斯及巴音布鲁克 11 个气象站月平均气温和月累积降水量数据。利用 Anusplina 4.2 软件进行空间插值生成月气温和月降水量栅格数据。之后利用月气温和月降水量栅格数据,按照标准化降水蒸散发指数的计算步骤^[30],逐像元计算,获得年 SPEI 空间分布数据,用 SPEI 指数来表征研究区干旱状况。

为保证多种数据的空间匹配,在数据计算和预处理过程中,将栅格化的草地空间分布数据、气温、降水和 SPEI 空间分布栅格数据以及 NDVI、GPP 和 ET 的像元大小统一设置或重采样为 250 m。

2.2 研究方法

2.2.1 单调趋势的 Mann-Kendall 非参数检验法

Mann-Kendall 非参数检验方法特别适用于类型变量和顺序变量的趋势检验^[31],广泛应用于水文、气象、植被及其他长时间序列数据趋势检验,其计算过程如下:

$$Z_c = \begin{cases} \frac{s-1}{\sqrt{\text{var}(s)}} & s > 0 \\ 0 & s = 0 \\ \frac{s+1}{\sqrt{\text{var}(s)}} & s < 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(x_k - x_i) \quad (2)$$

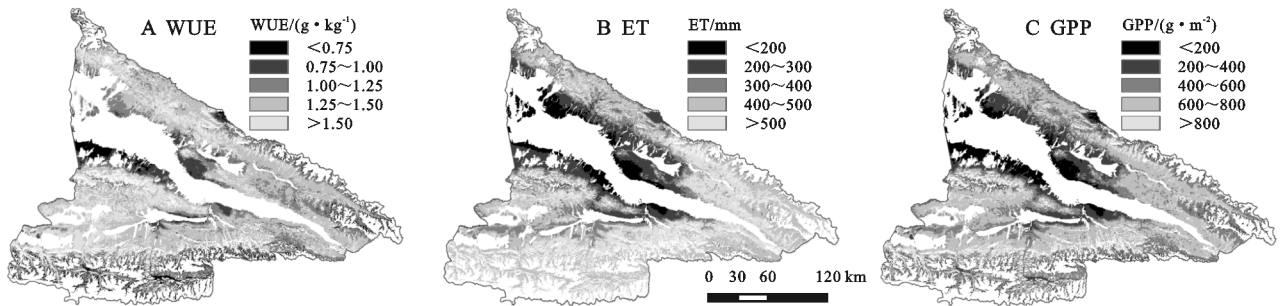


图2 伊犁河谷和等级空间分布

由图 2A 可知,伊犁河谷草地 WUE 海拔分异明显,WUE 较高($>1.25 \text{ g C/kg H}_2\text{O}$)的区域主要分布在乌孙山—昭苏盆地—那拉提山以及科古琴山—阿吾勒拉山的中山区,而 WUE 较低($<1.25 \text{ g C/kg H}_2\text{O}$)的区域则主要分布河谷平原、低山丘陵以及河谷周围的高山区。具体来看, $1.25 \text{ g C/kg H}_2\text{O} <$

$$\text{var}(s) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (3)$$

$$\text{sign}(x_k - x_i) = \begin{cases} 1 & x_k - x_i > 0 \\ 0 & x_k - x_i = 0 \\ -1 & x_k - x_i < 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: x_k, x_i 表示第 k 和第 i 个时间的 ET、GPP 或 WUE 值;sign 为符号函数; n 为时间序列长度。 Z_c 为时间序列数据变化趋势检验统计量。若 $Z_c > 0$,则时间序列变化趋势为上升,若 $Z_c < 0$,则变化趋势为下降; $\alpha = 0.05$ 水平上; $|Z_c| = 1.96$,若 $|Z_c| > 1.96$,则时间序列变化趋势在 0.05 水平上显著。

2.2.2 WUE 计算方法 WUE 通常利用固碳量与耗水量的比值来计算,但对固碳量和耗水量两个分量表达时所选指标常有不同^[15]。净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)^[4,10,13] 和 GPP^[5,7,14,32] 常用来表达固碳量,但也有用地表 NPP 和净生态系统生产力(Net Ecosystem Productivity, NEP)来表达^[33];对耗水量的表达,ET 是通用指标,但也有用降水量来表达^[15]。为便于与国内相关研究^[5,7,14,32] 的对比,本文采用 GPP 与 ET 比值计算,详细公式为:

$$\text{WUE} = \text{GPP} / \text{ET} \quad (5)$$

式中:WUE、GPP 和 ET 分别为生态系统水分利用效率($\text{g C/kg H}_2\text{O}$),总初级生产力(g C/m^2)和蒸散发(mm)。

3 结果与分析

3.1 草地 WUE、ET 和 GPP 的空间分布特征

基于 2000—2014 年伊犁河谷草地 ET、GPP 和 WUE 的年空间分布数据,计算其多年平均值,用其代表伊犁河谷草地 ET、GPP 和 WUE 空间分布,制作空间等级分布图(图 2),依次分析其空间特征。

WUE $< 1.50 \text{ g C/kg H}_2\text{O}$ 分布面积比例最大,为 43.88%,空间上主要分布在乌孙山、昭苏盆地—那拉提山以及科古琴山—阿吾勒拉山的中山区大部分区域; $1.00 \text{ g C/kg H}_2\text{O} < \text{WUE} < 1.25 \text{ g C/kg H}_2\text{O}$ 的面积比例为 23.24%,主要分布于霍城县的低山丘陵、喀什河中游及特克斯河下游的两岸、以及—阿吾勒拉

山的部分区域; $WUE < 1.00 \text{ g C/kg H}_2\text{O}$ 的比例为 17.09%, 主要分布于河谷南部婆罗科努山—那拉提山高山区、河谷北部科古琴山—阿吾勒拉山高山区, 以及伊犁河两岸河谷平原及部分的低山丘陵区; $WUE > 1.50 \text{ g C/kg H}_2\text{O}$ 的面积比例为 15.79%, 主要分布在科古琴山山脉中部及昭苏盆地等区域。

ET 的空间分布也呈现明显的海拔分异, 但与 WUE 的海拔分异存在一定差异(图 2A, 图 2B)。不同于 WUE, ET 低值($< 300 \text{ mm}$)区域集中分布在巩乃斯河下游—伊犁河两岸、以及喀什河下游和特克斯河下游两岸平原区和低山区, 该区域也是伊犁河谷最为干旱的荒漠区, 而河谷周围的高山区 ET 相对较高($> 400 \text{ mm}$); 此外, 昭苏盆地—特克斯周围区域为 WUE 高值区域($> 1.50 \text{ g C/kg H}_2\text{O}$)而 ET 则相对较低($300 \text{ mm} < ET < 400 \text{ mm}$); 同时, 阿吾勒拉山为 ET 的高值区域($> 500 \text{ mm}$), 而 WUE 则相对较低。具体来看, 全区 ET 位于 $400 \sim 500 \text{ mm}$ 所占的面积比例最大, 为 41.74%, 主要分布于研究区周边海拔较高的区域; 其次为 $ET > 500 \text{ mm}$ 区域, 其比例为 19.01%, 主要分布在河谷东部的阿吾勒山、昭苏—特克斯—那拉提的中山区以及乌孙山南麓; ET 为 $200 \sim 300 \text{ mm}$ 和 $300 \sim 400 \text{ mm}$ 的面积比例分别为 15.10% 和 17.56%, 主要分布于科古琴山以南—乌孙山北部—特克斯河的冲积扇两岸; 而 $ET < 200 \text{ mm}$ 面积比例最小, 为 6.59%, 仅在霍城和巩留附近分布。

对于 GPP, 对比图 2C 与图 2B 和图 1A 可以看出, 在河谷平原、低山以及中山区域, GPP 的空间分异与 ET 较为一致, 但在河谷周边的高山区域 GPP 的空间分异则与 WUE 较为一致。具体来看, 伊犁河谷 59.12% 的区域 $GPP > 500 \text{ g C/m}^2$, 空间上主要位于河谷的中山区域, 该区域中, $500 \text{ g C/m}^2 < GPP < 650 \text{ g C/m}^2$ 和 $GPP > 650 \text{ g C/m}^2$ 的比例分别达到了 31.98% 和 27.14%; $350 \text{ g C/m}^2 < GPP < 500 \text{ g C/m}^2$ 与 $200 \text{ g C/m}^2 < GPP < 350 \text{ g C/m}^2$ 的比例相当, 分别为 17.49% 和 15.16%, 空间上主要分布在河谷周边的高山区及河谷中部的低山区域; $GPP < 200 \text{ g C/m}^2$ 的比例最小, 为 8.23%, 主要分布在河谷中部的平原区域。

综合图 2A、图 2B 与图 2C 可以看出, 昭苏盆地—特克斯的区域以及科古琴山的南部低山区, 由于 GPP 高($> 650 \text{ g C/m}^2$)而 ET 相对较低($300 \text{ mm} < ET < 400 \text{ mm}$)成为伊犁河谷草地 WUE 高值($> 1.50 \text{ g C/kg H}_2\text{O}$)区域; 河谷周边的高山区域, 由于 GPP 较低($< 500 \text{ g C/m}^2$)而 ET 较高($> 400 \text{ mm}$), 因而 WUE 较低($< 1.00 \text{ g C/kg H}_2\text{O}$); 而那拉提—阿吾勒拉山一带既是 GPP 高值($> 650 \text{ g C/m}^2$)区域, 也

是 ET 高值($ET > 500 \text{ mm}$)区域, 其 WUE 则并未达到最高; 同时, 巩乃斯下游—伊犁河北岸的平原区及低山区, 其 GPP 低($< 350 \text{ g C/m}^2$), ET 也低($< 300 \text{ mm}$), 但 WUE 却并非最低; 伊犁河南岸平原区 GPP 最低($< 200 \text{ g C/m}^2$), ET 也低($< 300 \text{ mm}$), 其 WUE 也低($< 1.00 \text{ g C/kg H}_2\text{O}$)。

3.2 2000—2014 年草地 WUE, ET 和 GPP 的空间动态

由图 3A 可知, 在空间上, 伊犁河谷绝大部分区域草地 WUE 有所增加, 根据统计结果, 其比例为 79.20%, 但增大达到显著水平的面积有限, 比例为 16.61%, 空间上主要分布在河谷北部、乌孙山及那拉提山的中山区域; WUE 呈减少趋势的草地面积比例为 20.79%, 其中 20.04% 的区域呈非显著减少, 空间上主要分布在河谷南部高山区域、乌孙山南麓喀什河下游两侧的低山和洪积冲积扇区。

从图 3B 可以看出, 2000—2014 年伊犁河谷草地 ET 减少区域占了绝大比例。根据统计结果, ET 减少区域面积比例高达 92.31%, 而 ET 增加区域仅有零星分布。具体来看, ET 呈显著减少的比例达到了 48.21%, 分布于巩乃斯河两岸、尼勒克和特克斯及科古琴山中山区; ET 呈非显著减少的比例为 44.10%, 主要分布于冲积扇平原区以及那拉提—婆罗科努山—天山山脉高山区; ET 呈显著增加的比例仅为 0.35%; ET 呈非显著增加的比例仅为 7.34%, 分布于河谷周边区域。

GPP 总体变化趋势虽然与 ET 相同, 但在空间上, GPP 有所减少的区域明显少于 ET (图 3B 和图 3C)。根据统计, GPP 呈减少趋势的比例为 78.11%, 其中, 58.66% 呈非显著减少, 减少达到显著水平的比例仅为 19.45%, 空间上主要分布于特克斯河和巩乃斯河周边的低山和冲积平原区, 以及乌孙山北麓的部分区域; GPP 呈非显著增加的比例为 20.34%, 主要分布于研究区海拔较高的东部、南部和北部边缘区域, 以及伊犁河出国境口的河谷平原区; GPP 呈显著增加的比例仅为 1.55%。

3.3 2000—2014 年草地 WUE, ET 和 GPP 的时间动态

近 15 a 伊犁河谷草地 ET 总体呈现极显著下降的趋势($Z_c = -2.67, p < 0.01$)。在 2000—2002 年, ET 逐渐增加, 并在 2002 年达到最大值(453.66 mm), 之后呈现波动式下降, 在 2014 年达到最小值(335.97 mm)。GPP 在研究时间范围内同样呈现降低的趋势, 但其变化不显著($Z_c = -1.5, p > 0.05$)。在年际波动上, GPP 与 ET 的波动较为一致, 最大值和最低值分别出现在 2007 年和 2014 年, 分别为 564.84 g C/m^2 , 409.63 g C/m^2 。研究时段的 15 a 间, 伊犁河

谷草地 WUE 总体呈增加趋势,但变化趋势不显著($Z_c=1.78, p>0.05$)。2000—2007 年时,WUE 整体呈现上升的趋势,之后逐渐下降,在 2010 年达到最低

值($1.19\text{ g C/kg H}_2\text{O}$)。在 2011 年、2012 年,WUE 逐渐上升,在 2012 年达到最大值($1.35\text{ g C/kg H}_2\text{O}$),之后再次下降。

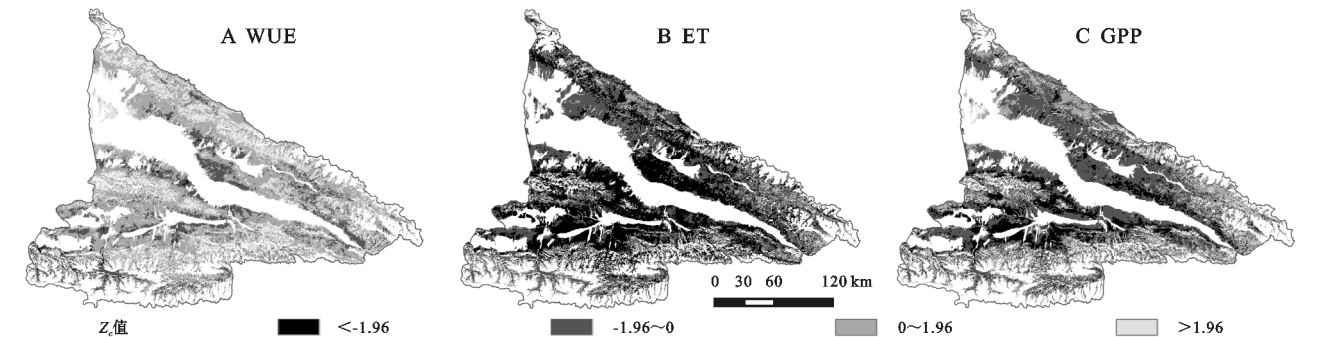


图 3 伊犁河谷 WUE、ET 和 GPP 变化趋势空间分布

对研究时段的前 3 a(2000—2002 年)及后 3 a(2012—2014 年)ET,GPP 及 WUE 求平均值,并进行差值计算,得到其变化量。ET,GPP 及 WUE 的在 2000—2002 年及 2012—2014 年的平均值分别为 427.33 mm , 524.86 g C/m^2 , $1.21\text{ g C/kg H}_2\text{O}$ 及 367.59 mm , 480.48 g C/m^2 , $1.29\text{ g C/kg H}_2\text{O}$,ET 和 GPP 分别减小 59.74 mm 和 44.38 g C/m^2 ,减小 13.98% 和 8.46% ,WUE 增加 $0.08\text{ g C/kg H}_2\text{O}$,增加 6.61% 。

4 讨论

4.1 ET 和 GPP 变化对 WUE 的影响

图 4 为利用 ET,GPP 及 WUE 变化趋势 Z_c 值空间分布数据进行叠加分析而得到的三者变化趋势交互关系图。由图 4 可见,伊犁河谷草地的绝大部分区域表现为 GPP 降低、ET 降低而 WUE 增加,表明相对于 GPP,ET 减少速率更大,因此 WUE 才有所增加。研究表明干旱生态系统中,GPP 高的季节或年份,其 WUE 也高^[34],但伊犁河谷草地 WUE 的年际波动与 GPP 存在较大差异,两者相关系数为 $0.31(p=0.27)$ 。同时 WUE 与 ET 的年际波动也存在较大差异,两者相关系数为 $-0.18(p=0.53)$ 。相反,ET 与 GPP 的年际波动一致性很高,两者相关系数高达 $0.88(p<0.001)$ (表 1)。

WUE 为 GPP 与 ET 比值,其变化由 GPP 和 ET 共同决定。但顾春杰研究表明,相对于 ET,GPP 是影响不同生态系统 WUE 的决定因素^[35],而宫菲等人对宁夏陆地生态系统 WUE 与 GPP 和 ET 关系分析表明,该区 WUE 与 ET 呈极显著负相关($p<0.01$),并指出生态恢复工程虽增加了生态系统的生产力,但也增加了水分消耗,致使生态系统 WUE 降低^[36]。而本文中伊犁河谷草地 WUE 的增大虽然是因为 GPP 减少速率小于 ET 减小速率,但 WUE 与 GPP 及 ET 的相关性均不高,而 GPP 变化与 ET 却具有很高的相关性,这表

明,不同于顾春杰及宫菲等人^[35-36]的研究结果,单一的 GPP 或 ET 均不能构成伊犁河谷草地 WUE 变化的主导原因;而同时,WUE 的变化也不仅仅是 GPP 变化与 ET 变化的简单的累加,而是 GPP 和 ET 综合作用的结果。

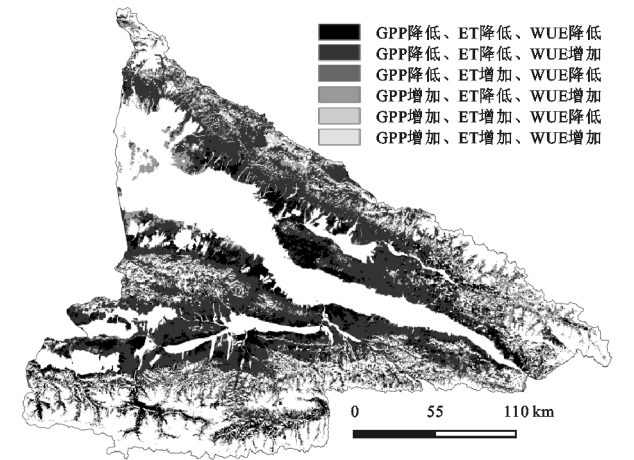


图 4 WUE 与 ET 及 GPP 变化趋势交互关系空间分布

4.2 植被覆盖变化对 WUE 的影响

用 NDVI 作为表征草地植被覆盖水平的指标,讨论植被变化对 WUE 的影响。

就 NDVI 与 WUE 的直接关系来看,由图 5 可知,2000—2014 年伊犁河谷平均 NDVI 与平均 WUE 变化趋势相反,NDVI 减小而 WUE 增加,根据表 1,两者相关系数仅为 $-0.11(p=0.71)$,表明 NDVI 变化不是影响 WUE 的直接原因;而空间上,绝大部分区域在 NDVI 减小的背景下 WUE 有所增大。

根据上文分析,伊犁河谷草地 WUE 增加主要是由于 ET 减小的程度高于 GPP 的减小程度。对于草地生态系统,植被覆盖的降低通常伴随着 GPP 的降低,根据表 1,2000—2014 年伊犁河谷 NDVI 与 GPP 的相关系数达到了 $0.86(p<0.001)$;但更为重要的是,植被覆盖对 ET 具有重要的调节作用,植被覆盖降低不仅致使草地植被蒸腾量减少^[37],还致使植被

水源涵养的功能降低^[38],使降水及冰雪融水等水分更容易形成地表径流而流失,减少可供蒸腾和蒸发的水量,从而使 ET 总量减少。同时图 6 中,伊犁河谷

草地 NDVI 与 ET 年际波动高度一致性,两者相关系数也高达 0.95($p<0.001$),这进一步表明伊犁河谷草地植被覆盖降低促使 ET 逐渐减少。

表 1 WUE 以及其他要素相互之间相关系数和 p 值

参数	ET		WUE		GPP		NDVI		气温		降水	
	相关系数	p 值	相关系数	p 值	相关系数	p 值	相关系数	p 值	相关系数	p 值	相关系数	p 值
WUE	-0.18	0.53										
GPP	0.88 **	0.00	0.31	0.27								
NDVI	0.95 **	0.00	-0.11	0.71	0.86 **	0.00						
气温	0.04	0.89	0.34	0.21	0.16	0.56	-0.03	0.93				
降水	0.55 *	0.03	-0.49	0.06	0.29	0.3	0.58 *	0.01	-0.37	0.18		
SPEI	0.64 *	0.01	-0.58 *	0.03	0.36	0.19	0.615 *	0.02	-0.4	0.14	0.88 **	0.00

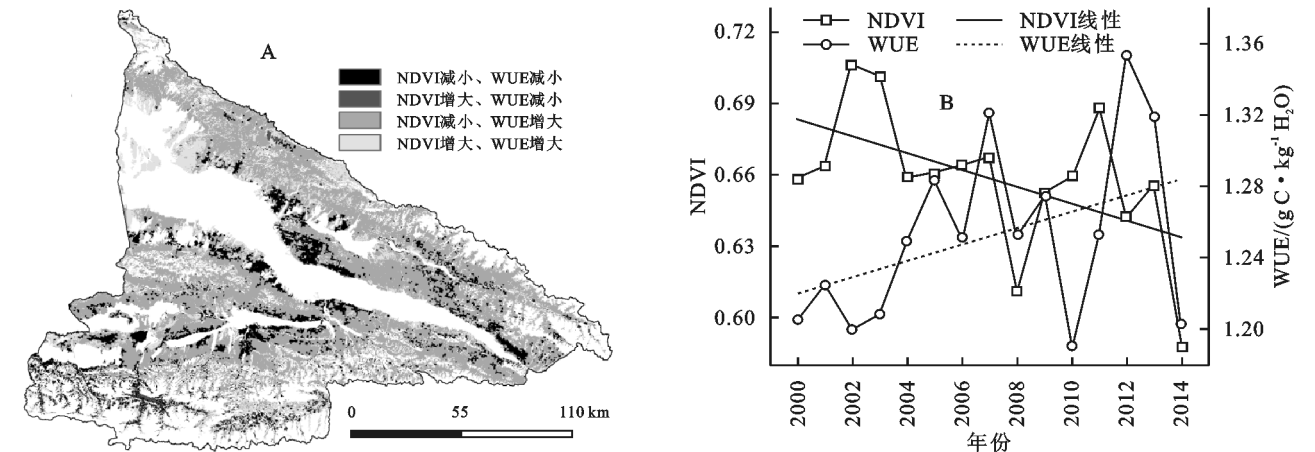


图 5 WUE 与 NDVI 变化交互关系空间分布及两者的年际变化

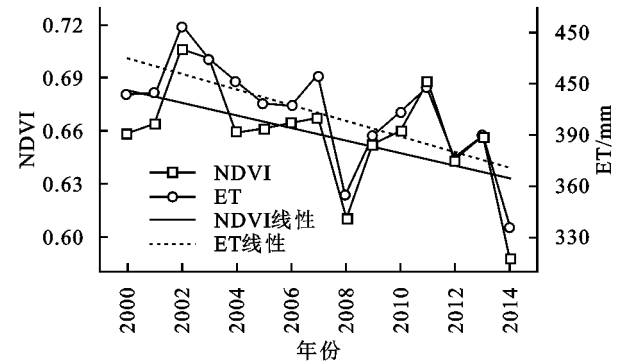


图 6 2000—2014 年伊犁河谷草地 NDVI 与 ET 年际变化

Zhu 等^[39]基于通量监测的数据发现,在我国的温性草地、高寒草甸及温带落叶阔叶林,叶面积指数能通过调控 ET 中的蒸发和蒸腾两个分量的比例来影响生态系统的 WUE。本文虽采用 NDVI 来反应植被覆盖,但由 NDVI 与 ET 却具有很高的相关性,同时,NDVI 与 WUE 的相关性并不高,由此可见,伊犁河草地 NDVI 可以通过对 ET 的调节来影响 WUE。

4.3 WUE 与气温、降水及 SPEI 指数关系

除植被覆盖外,气候因子对 WUE 的变化也具有重要影响^[40-41]。伊犁河谷草地降水及 SPEI 总体均呈现降低的变化趋势,空间上,绝大部分区域在降水减少及气候变干旱(SPEI 减小)的条件下 WUE 增

大;气温也呈降低趋势,但却存在明显的空间差异,有大面积区域在气温升高的条件下 WUE 增大,也有大面积区域在气温降低的条件下 WUE 增大。根据表 1, WUE 与降水和 SPEI 的相关系数分别达到了 -0.49 ($p=0.06$)和 -0.58($p=0.03$),而 WUE 与气温的相关系数为 0.34($p=0.21$)。可见相对于气温变化, WUE 与降水和 SPEI 相关性更高。

降水是生态系统水分的最终来源,根据表 1,ET 与降水的相关系数达到了 0.55($p=0.03$),而 ET 与气温的相关系数仅为 0.04($p=0.89$)。由此可见,相对于气温,降水的减少是导致伊犁河谷 ET 减少的主要驱动因素,因而也是促使草地 WUE 的增大的重要驱动因素。关于降水与 WUE 关系的研究较少,但这些研究表明降水是控制 WUE 时空变化的主要因子^[42],本文的研究结果支持该结论。同时,Hu 等^[43]的研究指明草地 WUE 之所受到降水的控制,原因可能是 WUE 和降水的关系主要由碳过程控制,而不是水过程,而本文中降水与 NDVI 的 GPP 的显著相关性也对该结论给予了支持,且 NDVI 降低所致使草地生态水源涵养功能的降低对 ET 减少的影响和伊犁河谷草 WUE 增加起到重要作用。

干旱是植被生长的重要抑制因子,但在一定范围内,随干旱程度增加,植物通过自身调节,使 GPP 减少低于 ET 减少^[44],提高 WUE。伊犁河谷草地 WUE 虽然与 SPEI 具有较高相关性,且全区绝大部分区域也是在干旱化的条件 WUE 有所增加,但这并不能证明干旱程度的加深就是致使伊犁河谷草地 GPP 减少程度低于 ET 减少程度的驱动因素,干旱对 WUE 的影响仍需深化研究。

5 结论

(1) 伊犁河谷草地 WUE, ET 和 GPP 均存在明显海拔分异;海拔较低的河谷平原区为三者的共同低值区,而中山区域虽为三者的共同高值区域,但该区内 WUE 与 GPP 和 ET 却存在明显空间差异;高山区域内 GPP 和 WUE 均较低,而 ET 则较高。

(2) 2000—2014 年伊犁河谷草地平均 ET 和 GPP 呈降低趋势,而平均 WUE 则呈增加趋势,但仅 ET 变化达到显著水平;15 a 内,全区平均 ET 和 GPP 减小 13.98% 和 8.46%, WUE 增加 6.61%。空间上,全区有 92.31% 和 78.10% 的区域 ET 和 GPP 有所降低,其中 48.21% 的区域 ET 降低达到显著水平,而 GPP 的该比例明显小于 ET,为 19.45%;全区 79.20% 的区域 WUE 有所增加,但达到显著水平的比例仅为 16.60%。

(3) 伊犁河谷草地 WUE 增加主要是由于 GPP 降低速率低于 ET,但 ET 变化与 GPP 关系紧密, WUE 的变化并不由单一的 GPP 或 ET 变化所主导,而是 GPP 和 ET 变化综合作用的结果。

(4) 相对于气温,降水是影响伊犁河谷草地植被覆盖和 ET 的主要气候因子。在 2000—2014 年,伊犁河谷降水的降低是导致草地 WUE 升高的主要因素。

参考文献:

- [1] Gang C C, Zhou W, Chen Y Z, et al. Quantitative assessment of the contributions of climate change and human activities on global grassland degradation[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 72(11): 4273-4282.
- [2] Guidi C, Magid J, Rodeghiero M, et al. Effects of forest expansion on mountain grassland: changes within soil organic carbon fractions[J]. *Plant and Soil*, 2014, 385(1): 373-387.
- [3] Gieselman T M, Hodges K E, Vellend M. Human-induced edges alter grassland community composition[J]. *Biological Conservation*, 2013, 158: 384-392.
- [4] Xia L, Wang F, Mu X, et al. Water use efficiency of net primary production in global terrestrial ecosystems[J]. *Journal of Earth System Science*, 2015, 124(5): 921-931.
- [5] 仇宽彪. 中国植被总初级生产力、蒸散发及水分利用效率的估算及时空变化[D]. 北京: 北京林业大学, 2015.
- [6] Chen B, Chen J M, Mo G, et al. Comparison of regional carbon flux estimates from CO₂ concentration measurements and remote sensing based footprint integration[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2008, 22(2): DOI: 10.1029/2007GB003024.
- [7] Zhu X J, Yu G R, Wang Q F, et al. Spatial variability of water use efficiency in China's terrestrial ecosystems[J]. *Global and Planetary Change*, 2015, 129(1): 37-44.
- [8] Zhu Q, Jiang H, Peng C, et al. Evaluating the effects of future climate change and elevated CO₂ on the water use efficiency in terrestrial ecosystems of China[J]. *Ecological Modelling*, 2011, 222(14): 2414-2429.
- [9] Tang X G, Ding Z, Li H P, et al. Characterizing ecosystem water-use efficiency of croplands with eddy covariance measurements and MODIS products[J]. *Ecological Engineering*, 2015, 85: 212-217.
- [10] Chen Y, Li J, Ju W, et al. Quantitative assessments of water-use efficiency in Temperate Eurasian Steppe along an aridity gradient[J]. *Plos One*, 2017, 12(7): e0179875.
- [11] 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 and Management*, 2010, 259(7): 1311-1327.
- [12] Tang X, Li H, Xu X, et al. Potential of MODIS data to track the variability in ecosystem water-use efficiency of temperate deciduous forests[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 91: 381-391.
- [13] Xia L, Wang F, Zhang W S, et al. Water use efficiency of net primary production in global terrestrial ecosystems[J]. *Journal of Earth System Science*, 2015, 124(5): 921-931.
- [14] 邹杰, 丁建丽. 2000—2014 年中亚地区主要植被类型水分利用效率特征[J]. *林业科学*, 2019, 55(3): 178-185.
- [15] Huang L, He B, Han L, et al. A global examination of the response of ecosystem water-use efficiency to drought based on MODIS data[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 601: 1097-1107.
- [16] Zhang X, Susan Moran M, Zhao X, et al. Impact of prolonged drought on rainfall use efficiency using MODIS data across China in the early 21 st century[J].

- Remote Sensing of Environment, 2014, 150:188-197.
- [17] Tang X, Ma M, Ding Z, et al. Remotely Monitoring ecosystem water use efficiency of grassland and cropland in China's arid and semi-arid regions with MODIS data [J]. Remote Sensing, 2017, 9(6):616-633.
- [18] 穆少杰,游永亮,朱超,等.中国西北部草地植被降水利用效率的时空格局[J].生态学报,2017,37(5):1458-1471.
- [19] Jin J X, Wang Y, Zhang Z, et al. Phenology plays an important role in the regulation of terrestrial ecosystem water-use efficiency in the Northern Hemisphere [J]. Remote Sensing, 2017, 9(7):664-679.
- [20] Zheng H, Lin H, Zhou W, et al. Revegetation has increased ecosystem water-use efficiency during 2000—2014 in the Chinese Loess Plateau: Evidence from satellite data [J]. Ecological Indicators, 2019, 102:507-518.
- [21] Huang X T, Luo G P, Lv N N. Spatio-temporal patterns of grassland evapotranspiration and water use efficiency in rid areas [J]. Ecological Research, 2017, 32(4):523-535.
- [22] 范天文,闫凯,靳瑰丽.伊犁河谷天然草地退化现状及修复措施[J].草业科学,2008,25(3):22-25.
- [23] 闫俊杰,刘海军,崔东,等.近15年新疆伊犁河谷草地退化时空变化特征[J].草业科学,2018,35(3):508-520.
- [24] 张军民.伊犁河流域气候资源特点及其时空分布规律研究[J].干旱气象,2006,24(2):1-4.
- [25] 李宏薇,许尔琪,张红旗.伊犁河谷土壤侵蚀综合分区[J].中国农业资源与区划,2018,39(4):116-124.
- [26] 周李磊,朱华忠,钟华平,等.新疆伊犁地区草地土壤容重空间格局分析[J].草业学报,2016,25(1):64-75.
- [27] 刘芳,张红旗,董光龙.伊犁河谷草地植被 NDVI 变化及其降水敏感性特征[J].资源科学,2014,36(8):1724-1731.
- [28] Chen X J, Mo X G, Hu S, et al. Contributions of climate change and human activities to ET and GPP trends over North China Plain from 2000 to 2014 [J]. Journal of Geographical Sciences, 2017, 27(6):661-680.
- [29] Jia Z Z, Liu S M, Xu Z W, et al. Validation of remotely sensed evapotranspiration over the Hai River Basin China [J]. Journal of Geophysical Research, 2012, 117: D13113.
- [30] Vicente S M, Santiago B, Juan I, et al. A multi-scalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index-SPEI [J]. Journal of Climate, 2010, 23(7):1696-1718.
- [31] Yue S, Pilon P, Cavadias G. Power of the Mann-Kendall and Spearman's Rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series [J]. Journal of Hydrology, 2002, 259(1):254-271.
- [32] Liu Y, Xiao J, Ju W, et al. Water use efficiency of China's terrestrial ecosystems and responses to drought [J]. Scientific Reports, 2015, 5(1):1-12.
- [33] Vanloocke A, Twine T E, Zeri M, et al. A regional comparison of water use efficiency for miscanthus, switchgrass and maize [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2012, 164:82-95.
- [34] 胡中民,于贵瑞,王秋凤,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.
- [35] 顾春杰.不同定义的生态系统水分利用效率对降水量变化响应的差异研究[D].兰州:兰州大学,2018.
- [36] 官菲,杜灵通,孟晨,等.宁夏陆地生态系统水分利用效率特征及其影响因子分析[J].生态学报,2018,39(24):9068-9078.
- [37] Trenberth K E, Fasullo J T, Kiehl J. Earth's global energy budget [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2009, 90(3):311-323.
- [38] 龚诗涵,肖洋,郑华,等.中国生态系统水源涵养空间特征及其影响因素[J].生态学报,2017,37(7):2455-2462.
- [39] Zhu X J, Yu G R, Wang Q F, et al. Seasonal dynamics of water use efficiency of typical forest and grassland ecosystems in China [J]. Journal of Forest Research, 2014, 19(1):70-76.
- [40] 李肖娟,张福平,王虎威,等.黑河流域植被水分利用效率时空变化特征及其气候因子的关系[J].中国沙漠,2017,37(4):733-741.
- [41] Gang C, Wang Z, Zhou W, et al. Assessing the spatiotemporal dynamic of global grassland water use efficiency in response to climate change from 2000 to 2013 [J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 2015, 202(5):343-354.
- [42] 张良侠,胡中民,樊江文,等.区域尺度生态系统水分利用效率的时空变异特征研究进展[J].地理科学进展,2014,29(6):691-699.
- [43] Hu Z M, Yu G R, Fu Y L, et al. Effects of vegetation control on ecosystem water use efficiency within and among four grassland ecosystems in China [J]. Global Change Biology, 2008, 14(7):1609-1619.
- [44] 邹杰,丁建丽,秦艳,等.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.