

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2022.06.25

新疆玛纳斯河流域植被水分利用效率 时空格局及影响因素研究

孔晶晶¹, 咎梅^{1,2}, 王雪梅^{1,2}, 杨雪峰^{1,2}

(1. 新疆师范大学 地理科学与旅游学院, 新疆 乌鲁木齐 830054; 2. 新疆干旱区湖泊环境与资源重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830054)

摘要: 水分利用效率(WUE)是生态系统碳水循环的基础,是评价植被生长条件的重要生态指标。为了揭示玛纳斯河流域不同植被类型WUE的时空变化规律,分析不同植被类型WUE的差异,探讨影响WUE的驱动因子,基于MODIS数据估算了2001-2019年玛纳斯河流域水分利用效率,利用变异系数、Theil-Sen median趋势分析结合M-K显著性检验以及Hurst指数分析了研究区植被WUE时空变化的现状和未来的趋势,并利用地理探测器定量分析了WUE的影响因素。结果表明:2001-2019年玛纳斯河流域WUE在0.74~1.08 g/(mm·m²)之间,WUE多年平均值为0.88 g/(mm·m²),整体表现为波动降低趋势,降幅为6.82%。流域WUE空间差异显著,呈现中部和北部高、南部低以及中游高、上游和下游低的分布格局。研究区各植被类型中林地WUE平均值较高,其中针叶林的平均WUE最高,为1.52 g/(mm·m²);其次为阔叶林,WUE平均为1.29 g/(mm·m²)。研究区WUE主要驱动因子为CO₂、土壤湿度、温度植被干旱指数和饱和水汽压差。与单因子相比,多因子相互作用对研究区WUE的影响更明显。双因子交互探测均呈显著增强关系,解释力均在60%以上,其中CO₂与土壤湿度的交互作用解释力最高,达到90.3%。研究结果可为研究区农业高效生产、水资源优化管理及生态恢复提供科学依据。

关键词: 植被水分利用效率; 时空格局; 地理探测器; Hurst指数; 玛纳斯河流域

中图分类号:Q948

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2022)06-0196-08

Spatiotemporal pattern of vegetation water use efficiency and its influencing factors in Manas River Basin, Xinjiang

KONG Jingjing¹, ZAN Mei^{1,2}, WANG Xuemei^{1,2}, YANG Xuefeng^{1,2}

(1. School of Geographical Sciences and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China;

2. Xinjiang Laboratory of Lake Environment and Resources in Arid Zone, Urumqi 830054, China)

Abstract: Water use efficiency (WUE) is the basis of carbon and water cycle in ecosystem and an important ecological indicator for evaluating vegetation growth conditions. In order to reveal the spatiotemporal changes of WUE of different vegetation types in Manas River Basin, analyze the differences of WUE of different vegetation types, and discuss the driving factors affecting WUE, the WUE of Manas River Basin from 2001 to 2019 was quantitatively estimated based on MODIS data. Moreover, the coefficient of variation, Theil-Sen median trend analysis, M-K significance test and Hurst index were adopted to analyze the current situation and future trend of spatiotemporal changes of vegetation WUE, and geographical detectors were applied to quantitatively analyze the influencing factors of WUE in the study area. The research results show that the WUE in the Manas River Basin fluctuated between 0.74 and 1.08 g/(mm·m²) from 2001 to 2019, and the multi-year average of WUE was 0.88 g/(mm·m²), which showed an overall downward trend, with a decrease of 6.82%. The spatial difference of WUE was significant, showing a distribution pattern of high in the central and northern parts but low in the southern part; high in the

收稿日期:2022-07-03; 修回日期:2022-10-05

基金项目:新疆维吾尔自治区重点实验室招标课题(XJDX0909-2021-01);新疆师范大学博士科研启动基金项目(XJ-NUBS2003);新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2022D01A97)

作者简介:孔晶晶(1996-),女,甘肃临泽人,硕士研究生,主要从事干旱区植被水分利用效率研究。

通讯作者:咎梅(1979-),女,河北沧州人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事干旱区植被碳水循环研究。

middle reaches of the basin but low in the upper and lower reaches. The average *WUE* of forest land was relatively high among the vegetation types, and the average *WUE* of coniferous forest was the highest, which was $1.52 \text{ g}/(\text{mm} \cdot \text{m}^2)$; followed by broad-leaved forest, which was $1.29 \text{ g}/(\text{mm} \cdot \text{m}^2)$. The main driving factors of *WUE* in the study area were CO_2 , soil moisture, temperature vegetation drought index and vapor pressure deficit. Compared with single factor, the interaction of multiple factors had a greater impact on *WUE* in the study area, all the two-factor interaction detection showed a significant enhancement relationship, and each explanatory power was more than 60%, among which the explanatory power of the interaction between CO_2 and soil moisture was the highest (90.3%). The research results can provide a technical support for efficient agricultural production, optimal management of water resources and ecological restoration in the study area.

Key words: vegetation water use efficiency (*WUE*); spatiotemporal pattern; geographical detector; Hurst index; the Manas River Basin

1 研究背景

植被水分利用效率 *WUE* (water use efficiency) 是指生态系统消耗单位质量水分所固定的 CO_2 ^[1]。*WUE* 是陆地生态系统碳水循环及二者耦合关系的重要参数^[2-3],也是衡量气候变化对生态系统影响的重要指标之一^[4]。早期学者对 *WUE* 的研究多局限于植被叶片尺度和个体水平,测定方法主要包括气体交换法、田间测定法和稳定同位素法等^[4-8]。近年来很多学者利用遥感技术对 *WUE* 开展了大量研究^[9]。ZHANG 等^[10]、艾则孜提约麦尔·麦麦提等^[11]分别采用 GLASS (global land surface satellite) 数据和 MODIS (moderate-resolution imaging spectroradiometer) 数据分析得出不同区域 *WUE* 空间异质性较大;郝海超等^[12]、张永永等^[13]应用遥感数据研究发现不同研究区的 *WUE* 在时间尺度上反映出不同的变化趋势;王姣月等^[14]将遥感数据与 CASA (Carnegie-Ames-Stanford approach) 模型结合研究发现太阳辐射、降水量、风速和气温对 *WUE* 的影响程度依次减弱。以上研究表明,不同区域 *WUE* 的时空格局和变化趋势差异较大,影响 *WUE* 的因子和影响程度也不同。但这些研究选取影响 *WUE* 的因子代表性不足,缺少影响因子对 *WUE* 的量化分析,并且忽视了多因子交互作用对复杂生态系统植被 *WUE* 时空变化的影响。

新疆玛纳斯河流域具有干旱区最典型的“山地-绿洲-荒漠”复合生态系统,是中国第4大灌溉农业区^[15],水资源是该区域粮食生产和生态安全的关键制约因子。因此,本文以玛纳斯河流域为研究区,基于2001-2019年 MODIS 数据的植被净初级生产力 (net primary productivity, *NPP*) 和蒸散发 (evapotranspiration, *ET*) 产品估算流域植被 *WUE*,采

用规避误差能力较强的泰尔森中位数 (Theil-Sen median) 趋势分析、Mann-Kendall (M-K) 显著性检验以及 Hurst 指数等方法分析 *WUE* 的时空分布格局。针对研究区特点选取具有代表性的气象因素 (降水、温度)、土壤湿度 (soil moisture, *SM*)、温度植被干旱指数 (temperature vegetation dryness index, *TVDI*)、饱和水汽压差 (vapor pressure deficit, *VPD*)、 CO_2 和归一化植被指数 (normalized difference vegetation index, *NDVI*),并借助地理探测器定量分析以上因子对 *WUE* 的影响,本文研究结果可以为玛纳斯河流域农业水资源合理利用与开发以及对该流域生态系统保护和碳水循环的研究提供参考。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

玛纳斯河流域位于天山北麓中部,准噶尔盆地南缘 ($43^{\circ}04'N \sim 45^{\circ}58'N, 84^{\circ}40'E \sim 86^{\circ}40'E$),研究区面积为 $3.40 \times 10^4 \text{ km}^2$,地貌复杂,地势南高北低,自南向北依次为山地、绿洲和荒漠。研究区属于典型的温带干旱大陆性气候,年均气温为 7.7°C ,年均降水量为 $114 \sim 200 \text{ mm}$,年蒸发量为 $1500 \sim 2100 \text{ mm}$,气候干燥,气温年较差较大,降雨量少,蒸发量大。研究区是新疆维吾尔自治区最大的绿洲农耕地,水资源利用率较高^[1,16],其主要水源为高山冰雪融水和上游山区降水。研究区水系及主要植被类型分布见图1。

2.2 数据来源

从美国航空航天局数据系统 (<https://landsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>) 平台上下载了研究区2001-2019年19期空间分辨率为 500 m 的植被净初级生产力 (*NPP*, MOD17A3)、蒸散发 (*ET*, MOD16A2) 和植被类型数据 (MCD12Q1)。对于植

被类型数据本文结合了玛纳斯河流域植被分布特征,采用第五类植被功能型(plant functional type, PFT)分类方案,将研究区植被类型具体划分为针叶林、阔叶林、草地、农作物和裸地。研究区 2001 - 2019 年空间分辨率为 1 km 的月尺度归一化植被指数 (NDVI, MOD13A3)、温度植被干旱指数 (TVDI)、CO₂ 数据和土壤湿度数据 (SM) 分别来自于美国航空航天局数据系统、国家基础条件平台 - 国家地球系统科学数据中心 (<http://www.geodata.cn>)、全球环境研究中心 (https://db.cger.nies.go.jp/dataset/ODIAC/DL_odiac2020b.html) 和 Google Earth Engine (GEE) 平台。研究区空间分辨率为 0.5°, 月尺度的气温 (temperature, TMP)、降水 (precipitation, PRE) 和蒸汽压数据来自于英国国家大气科学中心 (<https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hr/>)。本文使用的饱和水汽压差 (VPD) 是由气温、降水和蒸汽压数据计算并插值获得。大量研究表明,以上数据具有较高的精度,对本研究区的适应性较好^[11-12,17]。此外,本文对以上数据分别进行了投影变换、裁剪和无效值去除。利用站点数据通过反距离权重空间插值法获得了研究区 CO₂ 空间分布数据。为了统一时空分辨率本文对 NDVI、TVDI、CO₂、SM、TMP、PRE 数据进行了重采样并将月尺度数据处理为年尺度数据。

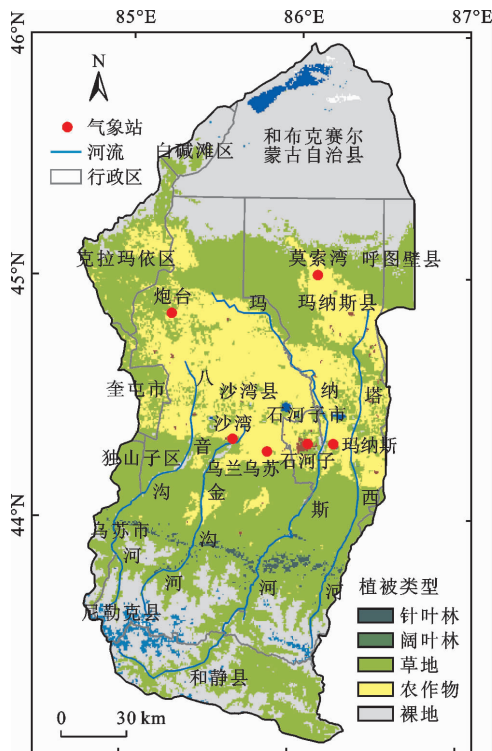


图1 研究区水系及主要植被类型分布

2.3 研究方法

2.3.1 WUE 估算 本文水分利用效率 (WUE) 的估算采用植被光合作用产生的净初级生产力 (NPP) 与蒸散发 (ET) 的比值来表示,表示单位面积上植物每蒸散 1 mm 水所能固定的有机碳克数^[5]。具体公式如下^[6]:

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

式中:WUE 的单位为 $g/(mm \cdot m^2)$; NPP 的单位为 g/m^2 ; ET 的单位为 mm。

2.3.2 变化趋势分析法 使用变异系数 (coefficient of variation, C_v) 定量地表征 2001 - 2019 年玛纳斯河流域 WUE 的波动程度,其计算公式如下^[10]:

$$C_{v_{WUE}} = \frac{\sigma_{WUE}}{\overline{WUE}} \quad (2)$$

式中: σ_{WUE} 为 2001 - 2019 年 WUE 时间序列的标准差; \overline{WUE} 为该时间范围内的平均 WUE。 $C_{v_{WUE}}$ 为 WUE 的变异系数,该值越大,表明 WUE 时间序列波动越大,反之,表明 WUE 时间序列越稳定。

利用 Theil - Sen median 趋势分析法结合 M - K 检验法综合提取 2001 - 2019 年研究区 WUE 的时空变化特征。具体公式如下^[10]:

$$\beta = \text{median} \left(\frac{WUE_j - WUE_i}{j - i} \right) \quad (i, j \in \text{研究期数}) \quad (3)$$

式中: β 为变化趋势;median 为中位数函数; i, j 为时间序数; WUE_i, WUE_j 分别为第 i 年、第 j 年对应的 WUE 值。当 $\beta > 0$ 时,表明 WUE 呈增大趋势;反之,呈下降趋势。给定显著性水平 $\alpha = 0.05$,判断 WUE 变化趋势是否显著。

采用 Hurst 指数 H 预测未来的变化趋势,即过去的变化趋势是否具有可持续性。 H 可利用最小二乘法拟合得到。 H 的值域为 $[0, 1]$,当 $0 \leq H < 0.5$ 时,表示相比过去该时间序列数据在未来呈相反的持续性趋势(反持续性);当 $0.5 < H \leq 1$ 时,表示该时间序列数据在未来与过去呈一致的可持续性趋势(正持续性);当 $H = 0.5$ 时,表示时间序列为随机序列。

2.3.3 地理探测器 地理探测器是探测空间分异性以及揭示变量背后驱动力的影响程度及因子间交互作用的工具^[7]。本文使用因子探测器和交互探测器分析不同因子对水分利用效率的影响程度。

因子探测用于识别引起空间分异性的驱动因子,其影响程度计算公式如下^[7]:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (h = 1, 2, \dots, L) \quad (4)$$

式中: q 为影响因素对水分利用效率的影响程度,即解释力强度,值域为 $[0, 1]$, q 值越大表明因子对水分利用效率的影响越大; L 为因变量 WUE 和自变量因子的分级或分类数; N_h 和 N 分别为层 h 和全区内的样本数; σ_h^2 和 σ^2 分别为层 h 和全区内 WUE 的方差。

交互探测可以识别不同影响因子 X 之间的交互作用,即评估两因子共同作用时是否会增强或减弱对因变量 Y 的解释力。其评估结果通过比较单因子对 Y 的 q 值和它们交互时的 q 值得出。交互作用结果可分为不同类型,如表 1 所示。

表 1 因子交互作用结果类型^[7]

变化趋势	q 值比较
非线性减弱	$q(X_1 \cap X_2) < \text{Min}(q(X_1), q(X_2))$
单因子减弱	$\text{Min}(q(X_1), q(X_2)) < q(X_1 \cap X_2) < \text{Max}(q(X_1), q(X_2))$
	$\text{Max}(q(X_1), q(X_2)) < q(X_1 \cap X_2) < q(X_1) + q(X_2)$
双因子增强	$q(X_1) + q(X_2)$
独立作用	$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$
非线性增强	$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$

3 结果与分析

3.1 WUE 的时空分布特征

3.1.1 WUE 的时间分布特征 2001 - 2019 年研究区 WUE 年均值的变化趋势如图 2 所示。由图 2 可以看出,研究期内玛纳斯河流域年均 WUE 整体呈降低趋势,降幅为 6.82%,年均 WUE 在 $0.74 \sim 1.08 \text{ g}/(\text{mm} \cdot \text{m}^2)$ 之间波动, WUE 多年平均值为 $0.88 \text{ g}/(\text{mm} \cdot \text{m}^2)$ 。研究区年均 WUE 的最小值出现在 2015 年,为 $0.74 \text{ g}/(\text{mm} \cdot \text{m}^2)$,比多年平均值小 15.91%;其次是 2017 年,为 $0.77 \text{ g}/(\text{mm} \cdot \text{m}^2)$,比多年平均值小 12.50%;2003 和 2009 年研究区年均 WUE 呈现峰值,分别为 1.08 和 $1.07 \text{ g}/(\text{mm} \cdot \text{m}^2)$,分别比平均值大 22.72% 和 21.59%。

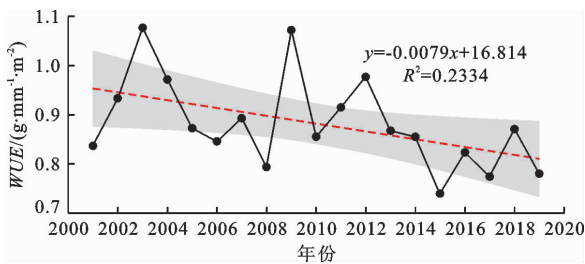


图 2 2001 - 2019 年玛纳斯河流域年均 WUE 的时间变化趋势

3.1.2 WUE 的空间分布特征 2001 - 2019 年研究区 WUE 年均值及其波动性的空间分布如图 3 所示。由图 3 (a) 可以看出,2001 - 2019 年研究区 WUE 年平均值的空间分布呈显著的空间差异性,表现出中部和北部高、南部低以及流域中游高、上游和下游低的空间格局。 WUE 的高值区主要分布在流域中部和北部的草地区域,具体分布在沙湾县的北部和中南部、玛纳斯县的中南部和西北部、石河子市的南部、克拉玛依市的中部和南部地区,占流域总面积的 16.45%;低值区主要分布在玛纳斯河流域的南部高海拔山区及耕地北部,包括和静县、沙湾县及玛纳斯县北部部分地区,占流域总面积的 14.99%;接近均值的区域主要集中在玛纳斯河流域中部的耕地、林地及东北部的草地区域。

为了探究研究区多年 WUE 的稳定性,将 2001 - 2019 年研究区年均 WUE 根据自然断点法分为高波动、中高波动、中波动、中低波动、低波动 5 类。由图 3 (b) 可以看出,研究区 WUE 在流域上中游波动较低,下游波动较高。波动较低的区域主要分布在研究区的草地和林地区域,占流域总面积的 28.71%;高波动区主要分布在流域中北部的耕地区域,占流域总面积的 5.19%。由于耕地种植结构和灌溉用水量的多少受人为干预性强,不确定因素较多,变化较大,因此波动性较高;而天然林地和草地主要靠地下水、河水和降水供给, WUE 波动较低的林地和草地处于流域上游,水分条件相对充足,稳定性较强。表明水分条件相对丰富地区的 WUE 比供水受限的地区更为稳定。

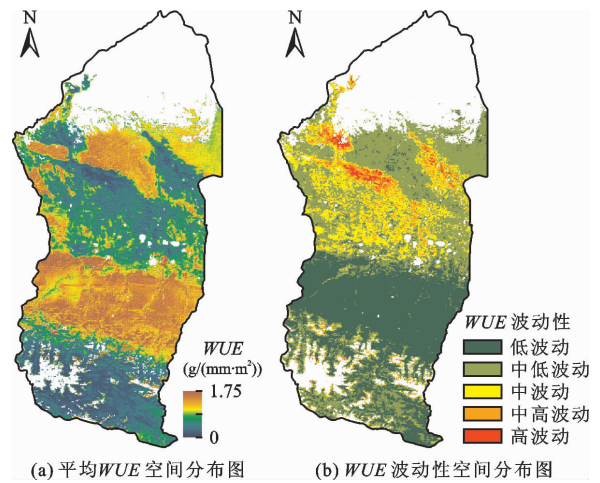


图 3 2001 - 2019 年玛纳斯河流域年均 WUE 及其波动性的空间分布

Theil - Sen 斜率估计用于计算趋势值,通常与 M - K 非参数检验结合使用,即先计算 Sen 趋势值,

然后使用 M-K 方法判断趋势显著性。利用 Theil-Sen 方法分析得到的研究区 WUE 多年空间变化趋势和利用 M-K 检验法得到的研究区变化趋势显著性分别见图 4(a) 和 4(b)。由图 4(a) 可知, 2001-2019 年玛纳斯河流域大部分区域 WUE 表现出降低的趋势, 少部分区域呈增大趋势, 其中呈降低和增大趋势的面积分别占流域总面积的 42.71% 和 30.63%, 流域中部和南部主要表现为降低趋势。通过对图 4(b) 中的变化趋势显著性分析可知, 区域中部 WUE 呈显著降低趋势, 降低趋势显著的面积占流域总面积的比例为 15.01%; 降低趋势不显著的面积占流域总面积的 27.70%, 主要分布在流域南部。WUE 呈显著增大趋势的区域主要分布于北部与沙漠接壤的草地植被区域, 占流域总面积的 3.29%; 中部耕地的 WUE 变化趋势不显著, 占流域总面积的

26.66%。总之, 上述 WUE 的空间分布特征说明 2001-2019 年流域内部不同区域 WUE 的变化趋势也不相同。

采用 Hurst 指数 H 预测、分析未来研究区 WUE 变化趋势的空间分布, 结果见图 4(c) 和表 2。由图 4(c) 和表 2 可知, 研究区 Hurst 指数的范围为 0.10~0.88, 平均值为 0.44。相比现状, WUE 未来表现出反持续性 ($0 \leq H < 0.5$) 的区域占总面积的 33.94%, 主要分布在流域北部的裸地以及南部山地和中部农作物区域; WUE 未来表现出正持续性 ($0.5 < H \leq 1$) 的区域占总面积的 16.86%, 主要分布在流域中部的草地区域; WUE 未来呈随机性变化趋势的区域占流域总面积的 49.20%。对未来流域植被 WUE 可持续性的分析可以为研究区合理利用水资源、提高植被 WUE 提供参考。

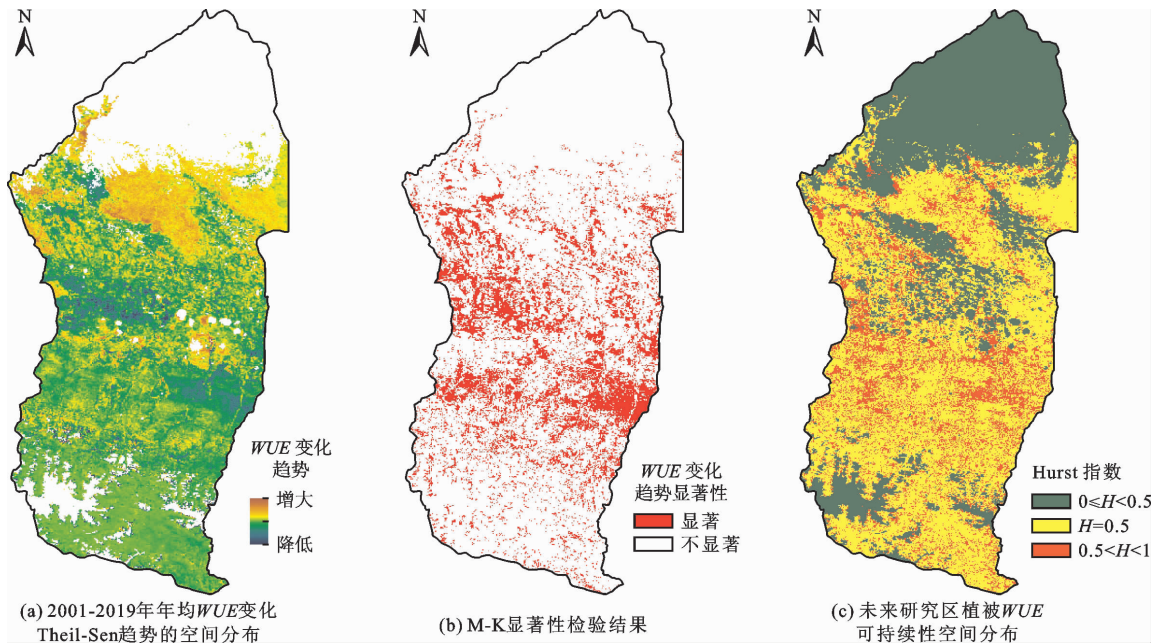


图 4 2001-2019 年研究区植被年均 WUE 变化趋势及其显著性和未来趋势的空间分布

表 2 未来玛纳斯河流域 WUE 的可持续性和变化趋势分析

2001-2019 年 WUE 变化趋势	Hurst 指数 H	未来趋势	面积 / km^2	面积 占比 / %
$\beta < 0$	$0 \leq H < 0.5$	增大	1857.90	5.46
$\beta < 0$	$0.5 < H \leq 1$	持续降低	3442.40	10.12
$\beta > 0$	$0 \leq H < 0.5$	降低	9683.23	28.48
$\beta > 0$	$0.5 < H \leq 1$	持续增大	2290.40	6.74

3.2 不同植被类型的 WUE

3.2.1 不同植被类型 WUE 的特征 不同植被类型消耗等量的水所能固定的有机碳的数量不同, 因此

研究不同植被类型的 WUE 特征具有重要意义。玛纳斯河流域不同植被类型的 WUE 均值统计计算结果见表 3。表 3 中显示, 草地占研究区面积的 59.34%, 为玛纳斯河流域最典型的植被类型, 在研究区分布广泛, 其 WUE 均值为 $1.05 \text{ g}/(\text{mm} \cdot \text{m}^2)$; 其次是农作物, 占研究区面积的 23.96%, 主要分布在流域中部, 农作物 WUE 最小, 平均值为 $0.56 \text{ g}/(\text{mm} \cdot \text{m}^2)$; 针叶林和阔叶林分别占研究区总面积的 1.08% 和 0.08%, 所有植被类型中针叶林的 WUE 最高, 平均值为 $1.52 \text{ g}/(\text{mm} \cdot \text{m}^2)$; 阔叶林的 WUE 仅次于针叶林, 平均值为 $1.29 \text{ g}/(\text{mm} \cdot \text{m}^2)$ 。

表 3 玛纳斯河流域不同植被类型的 WUE 均值

植被类型	面积比例/%	WUE 均值/(g · mm ⁻¹ · m ⁻²)
针叶林	1.08	1.52
阔叶林	0.08	1.29
草地	59.34	1.05
农作物	23.96	0.56

3.2.2 不同植被类型 WUE 的变化趋势 2001 - 2019 年玛纳斯河流域不同植被类型的年均 WUE 差异明显,整体均呈波动降低趋势,如图 5 所示。图 5 中不同植被类型年均 WUE 波动变化趋势与研究区整体 WUE 年均值的变化趋势(图 2)具有较高的一致性。其中,针叶林和农作物的 WUE 年际变化相对明显,年变化率分别为 -0.011 8 和 -0.013 3 g/(mm · m²),阔叶林和草地 WUE 年际变化相对较小。进一步分析可知,2001 - 2008 年 4 种植被类型的 WUE 均呈现波动降低趋势,波动区间为 0.22 ~ 0.46 g/(mm · m²),2008 年 4 种植被类型的 WUE 均明显降低,其中农作物 WUE 最低,为 0.35 g/(mm · m²)。2009 年农作物和草地的 WUE 达到最高值。2012 年针叶林、阔叶林和草地的 WUE 出现高值,分别为 1.65、1.50 和 1.22 g/(mm · m²),而农作物的 WUE 却较小,为 0.51 g/(mm · m²)。2013 年之后,4 种植被类型的 WUE 变化趋势基本趋于一致,年际变化范围较小,在 0.12 ~ 0.24 g/(mm · m²)之间。

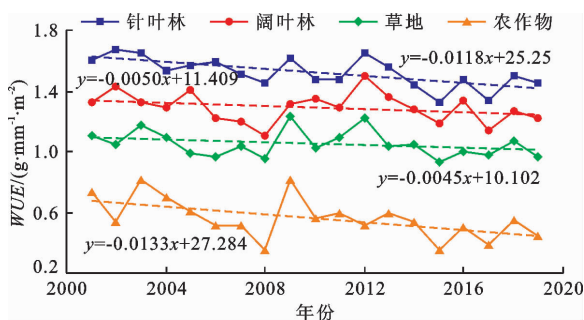


图 5 2001 - 2019 年玛纳斯河流域不同植被类型的年均 WUE 变化趋势

3.3 WUE 的影响因子分析

将研究区土壤湿度 (SM)、饱和水汽压差 (VPD)、CO₂、温度植被干旱指数 (TVDI)、温度 (TMP)、降水 (PRE)、归一化植被指数 (NDVI) 7 个因子作为自变量, WUE 作为因变量, 分别提取自变量和因变量的多年平均值, 创建研究区范围内 3 km × 3 km 的网格, 以每个网格作为样本点, 共计 3 795

个。并采用自然断点法对自变量数值进行分级, 利用地理探测器进行因子探测分析得到各因子对 WUE 的影响程度, 结果见表 4。

表 4 影响研究区植被 WUE 的单因子探测结果

参数	SM	VPD	CO ₂	TVDI	TMP	PRE	NDVI
q	0.794	0.594	0.824	0.713	0.482	0.475	0.276
P	0	0	0	0	0	0	0

表 4 中 P 值反映了影响因子对主因子的影响是否显著; q 值表示对 WUE 的影响力, 也是对空间分异特征的解释力。由表 4 可以看出, 单因子 P 值均为 0, 表示对 WUE 的影响较显著, 可作为影响因素对其分异性进行分析。不同因子对研究区 WUE 影响程度由大到小的顺序为: CO₂ > SM > TVDI > VPD > TMP > PRE > NDVI, 其中 CO₂、SM、TVDI 和 VPD 是研究区 WUE 的主要驱动因子, q 值分别为 0.824、0.794、0.713 和 0.594。TMP 和 PRE 是研究区植被 WUE 的次要影响因子, q 值分别为 0.482 和 0.475。NDVI 对应的 q 值最低, 为 0.276。总之, 除了 WUE 的主要驱动因子 CO₂、SM、TVDI 和 VPD 外, 其他因子对 WUE 也有影响但影响程度相对较弱。

图 6 为影响研究区植被 WUE 的多因子交互探测结果。图 6 显示, 研究区多因子交互探测结果呈现显著的双因子增强关系, 解释力均达到 60% 以上, 且因子间交互作用的解释力均大于单因子独立作用的解释力。交互作用解释力达到 90% 的为 CO₂ ∩ SM 和 CO₂ ∩ TMP, 其余从大到小依次是 CO₂ ∩ PRE (0.894) > VPD ∩ CO₂ (0.884) > SM ∩ TMP (0.875) > TVDI ∩ CO₂ (0.864) > SM ∩ VPD (0.863) > SM ∩ TVDI (0.856) > SM ∩ NDVI (0.851), 且解释力均在 85% 以上。从表 4 可以看出, NDVI 的单因子解释力最低, 但与其他因子发生交互作用时对 WUE 的影响程度却增强到 60% 以上。总之, 研究区 WUE 的变化特征是多因子交互作用的结果。

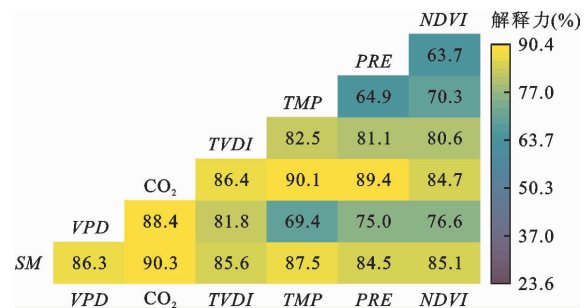


图 6 影响研究区植被 WUE 的多因子交互探测结果

4 讨论

4.1 WUE 时空变化特征的原因分析

本文研究结果表明,2001-2019年玛纳斯河流域植被 WUE 整体呈缓慢降低趋势,不同植被类型年均 WUE 也呈波动降低趋势,该结论与前人研究得出的变化趋势相同^[11]。此外,研究区植被 WUE 均值在空间上由南向北依次呈现低-高-低-高分布的特征与孙琪等^[18]的研究结果一致。说明本文 WUE 估算结果和提取的时空分布特征可信度较高。其中,2008-2009年 WUE 波动较大的原因主要是2008年5月至2009年12月新疆维吾尔自治区发生了严重的干旱事件^[19-21],极端干旱导致温度升高,降水量减少,植被呼吸作用增强,植被只能维持个体的水碳代谢平衡, NPP 下降,导致 WUE 降低^[19,22]。此外,研究区裸地和荒地面积较大,其地表植被生长条件差, WUE 值较小。

研究表明不同植被类型(森林、草地和农作物)光合作用产生的干物质所消耗的水量不同^[10]。由于海拔高度不同引起的水、热和光照差异导致同种植被在不同海拔的 WUE 也不同。此外,人为管理和干预对人工植被 WUE 的影响较大。研究区大量天然森林主要分布在南部的天山北麓,其位置处于山区河流的上游,降水和夏季冰雪融水丰富,树木根系也能汲取地下水,因而该区域森林固定和转化光合产物的效率高, WUE 也较大。流域平原地区植被主要以 WUE 较小的草地和农作物为主,其中,玛纳斯河流域中游、下游草地 WUE 普遍高于农作物的 WUE,这一特征与卢玲等^[23]关于西部植被水分利用效率空间分布的研究发现具有一致性,同时与 Law 等^[24]和 Tian 等^[25]的研究结果也相同。主要是由于天然草地的生长依赖于环境降水和地下水,干旱区草地耐旱性强,在水分胁迫下草地能够提高水分利用效率,维持正常的生理生长过程^[26-27]。而农作物的 WUE 受到种植结构、灌溉方式和薄膜覆盖等技术的影响较大,对干旱的承受能力较低。此外,物候因素对植被 WUE 也有影响,有研究指出干旱指数增大到一定范围时,林地和草地的 WUE 增长速率会发生相反的变化,这也可能对流域 WUE 分布的差异产生影响^[28]。随着研究区自然植被和绿洲植被对水资源需求的不断增加,迫切需要提高植被水资源利用效率^[29]。

4.2 WUE 与影响因子的关系分析

不同因子对研究区植被 WUE 的影响较为复杂。本文研究结果表明,CO₂、SM、TVDI 和 VPD 对玛纳斯

河流域 WUE 空间分布的影响较大。CO₂ 主要通过光合作用影响植被的结构和生长; SM 直接影响植被的生存、生长和分布^[30-31]; TVDI 反映了干旱强度,不同植被对干旱强度的耐受性和适应能力差异较大,其 WUE 对干旱影响的滞后效应也不同^[32]。研究区植被 WUE 在轻微干旱条件下保持稳定,在中度至重度干旱条件下显著降低,主要还取决于植物蒸腾能力和生产力的大小。1961-2017年新疆维吾尔自治区的 VPD 持续增加^[19],有研究表明,VPD 增大时会导致植物光合作用的气孔关闭,减缓植物生长,降低植被的覆盖度,这也可能是造成流域 WUE 下降的原因^[33]。温度和降水对玛纳斯河流域 WUE 空间分布的影响较小。温度过高或过低均会影响植被的光合作用和呼吸作用,温度上升会导致 VPD 的增加,土壤水分的蒸发,影响植被生长,导致 WUE 降低;降水的增加或减少可能会改变土壤的蒸发、冠层的蒸腾和土壤的水分含量,这些因素反过来会对植物的功能以及水分的收支产生影响^[33]。玛纳斯河流域耕地面积大,农作物主要依靠人工灌溉及地下水汲取,对降水的依赖较低。研究区森林大部分处于流域上游山区,降水和地下水资源相对丰富,所以水资源不是研究区山区森林生长的限制因子^[31]。多种因素的共同作用决定了 NDVI 的大小,NDVI 反映了植被覆盖度和植被生长状况,进而影响植被 WUE 的时空分布特征。总之,不同因子以及不同因子的交互作用对植被 WUE 产生了复杂多变的影响。

在今后的研究中应该考虑人类活动(土地利用变化)和自然因素对 WUE 的共同作用,还可以分析不同因子对植被 WUE 季节尺度影响的差异以及对 WUE 正负效应的差异。此外,还可以通过野外实测手段提高 WUE 的估算精度,从而提高研究区农业和生态系统用水效率提供参考。

5 结论

本文基于 MODIS 遥感产品计算得到新疆维吾尔自治区玛纳斯河流域长时间序列植被 WUE,分析了 WUE 的时空分布特征、变化趋势和不同植被类型 WUE 的差异,探讨了研究区 WUE 驱动因子的影响程度。具体结论如下:

(1)2001-2019年玛纳斯河流域植被 WUE 的年均值为 0.88 g/(mm·m²),其变化范围为 0.74~1.08 g/(mm·m²),整体表现为降低趋势,降幅为 6.82%。研究区 WUE 空间差异性显著,呈现出中部和北部高、南部低以及流域中游高、上游和下游低的

分布格局。

(2)2001 - 2019 年研究区不同植被类型年均 *WUE* 差异明显,各植被类型年均 *WUE* 均呈波动降低趋势。森林平均 *WUE* 较高,其中针叶林的平均 *WUE* 最高,为 $1.52 \text{ g}/(\text{mm} \cdot \text{m}^2)$,其次是阔叶林,平均 *WUE* 为 $1.29 \text{ g}/(\text{mm} \cdot \text{m}^2)$ 。相比阔叶林和草地,针叶林和农作物的 *WUE* 年际变化较明显。

(3)各影响因子对研究区植被 *WUE* 时空分异的影响程度差异明显, CO_2 、*SM*、*TVDI* 和 *VPD* 是影响 *WUE* 的主要驱动因子。多因子交互探测呈显著的双因子增强关系,解释力均达到 60% 以上。其中, CO_2 与 *SM* 的交互作用最强,解释力为 90.3%。

参考文献:

- [1] GUERRIERI R, LEPINE L, ASBJORNSEN H, et al. Evapotranspiration and water use efficiency in relation to climate and canopy nitrogen in US forests[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2016, 121(10): 2610 - 2629.
- [2] AGUILOS M, STAHL C, BURBAN B, et al. Interannual and seasonal variations in ecosystem transpiration and water use efficiency in a tropical rainforest[J]. *Forests*, 2019, 10(1): 14.
- [3] 裴婷婷,李小雁,吴华武,等. 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]. *农业工程学报*, 2019, 35(5): 119 - 125 + 319.
- [4] 王庆伟,于大炮,代力民,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 - 65.
- [5] 张春敏,梁川,龙训建,等. 江源区植被水分利用效率遥感估算及动态变化[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(18): 146 - 155.
- [6] 杜晓铮,赵祥,王昊宇,等. 陆地生态系统水分利用效率对气候变化的响应研究进展[J]. *生态学报*, 2018, 38(23): 8296 - 8305.
- [7] 王劲峰,徐成东. 地理探测器:原理与展望[J]. *地理学报*, 2017, 72(1): 116 - 134.
- [8] GANG Chengcheng, WANG Zhaoqi, CHEN Yizhao, et al. Drought-induced dynamics of carbon and water use efficiency of global grasslands from 2000 to 2011[J]. *Ecological Indicators*, 2016, 67: 788 - 797.
- [9] JIANG Gaoming, DONG Ming. A comparative study on photosynthesis and water use efficiency between clonal and non-clonal plant species along the Northeast China Transect (NECT)[J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2000, 42(8): 855 - 863.
- [10] ZHANG Qi'ao, CHEN Wei. Ecosystem water use efficiency in the Three-North Region of China based on long-term satellite data[J]. *Sustainability*, 2021, 13(14): 7977.
- [11] 艾则孜提约麦尔·麦麦提,玉素甫江·如素力,何辉,等. 2000 - 2017 年新疆天山植被水分利用效率时空特征及其与气候因子关系分析[J]. *植物生态学报*, 2019, 43(6): 490 - 500.
- [12] 郝海超,郝兴明,花顶,等. 2000 - 2018 年中亚五国水分利用效率对气候变化的响应[J]. *干旱区地理*, 2021, 44(1): 1 - 14.
- [13] 张永永,税伟,孙晓瑞,等. 云南省植被水分利用效率时空变化及影响因素[J]. *生态学报*, 2022, 42(6): 2405 - 2417.
- [14] 王皎月,秦树高,张宇清. 毛乌素沙地植被水分利用效率的时空格局[J]. *中国沙漠*, 2020, 40(5): 120 - 129.
- [15] 李建军,罗格平,丁建丽,等. 近 50 a 人工灌排技术进步对玛纳斯河流域耕地格局变化的影响[J]. *自然资源学报*, 2016, 31(4): 570 - 582.
- [16] 位宏,李晓蕾,徐丽萍,等. 玛纳斯河流域 NDVI 时空变化及对气象因子的响应[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(1): 215 - 220.
- [17] WANG Chendong, LI Wenqing, SUN Mingxing, et al. Exploring the formulation of ecological management policies by quantifying interregional primary ecosystem service flows in Yangtze River Delta region, China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 284: 112042.
- [18] 孙琪,徐长春,罗映雪,等. 新疆不同土地利用类型 *WUE* 的时空变化及其对气候因子的响应[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(5): 237 - 243.
- [19] LI Moyan, YAO Junqiang, GUAN Jingyun, et al. Observed changes in vapor pressure deficit suggest a systematic drying of the atmosphere in Xinjiang of China[J]. *Atmospheric Research*, 2021, 248: 105199.
- [20] 姚俊强,毛炜峰,陈静,等. 新疆气候“湿干转折”的信号和影响探讨[J]. *地理学报*, 2021, 76(1): 57 - 72.
- [21] YAO Junqiang, TUOLIEWUBIEKE D, CHEN Jing, et al. Identification of drought events and correlations with large-scale ocean-atmospheric patterns of variability: A case study in Xinjiang, China[J]. *Atmosphere*, 2019, 10(2): 94.
- [22] ZHAO Jingxue, FENG Huaze, XU Tongren, et al. Physiological and environmental control on ecosystem water use efficiency in response to drought across the northern hemisphere[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 758: 143599.
- [23] 卢玲,李新,黄春林,等. 中国西部植被水分利用效率的时空特征分析[J]. *冰川冻土*, 2007, 29(5): 777 - 784.
- [24] LAW B E, FALGE E, GU Langlang, et al. Environmental controls over carbon dioxide and water vapor exchange of terrestrial vegetation[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113(1 - 4): 97 - 120.

(下转第 212 页)

- 从生态系统蒸散组分分配及其影响因子[J]. 应用生态学报, 2021, 32(7): 2407 - 2414.
- [12] 刘翠红, 戴红武, 胡艳清, 等. 蒸渗仪的研究与应用现状[J]. 农机化研究, 2014, 36(8): 228 - 231 + 236.
- [13] 高磊, 申双和, 邵立瑛, 等. 水稻蒸散特征及日尺度作物系数估算[J]. 中国农业气象, 2016, 37(2): 158 - 165.
- [14] 敬峰, 段爱旺, 张莹莹, 等. 基于大型蒸渗仪的冬小麦蒸散规律及其模拟[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(5): 17 - 26.
- [15] 吴辰, 王国庆, 郝振纯, 等. 长武塬区实际蒸散发变化及驱动因素分析[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(5): 37 - 42.
- [16] WILLIAMS L E, FIDELIBUS M W. Measured and estimated water use and crop coefficients of grapevines trained to overhead trellis systems in California's San Joaquin Valley[J]. Irrigation Science, 2016, 34(6): 431 - 441.
- [17] 刘文娜, 贾剑波, 涂志华, 等. 北京山区林地凝结水特征研究[J]. 水土保持通报, 2016, 36(6): 298 - 302.
- [18] 马瑞莎, 乔长录, 葛瑞晨. 膜下滴灌棉田凝结水量研究[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(5): 93 - 99.
- [19] BANIMAH D S A, KHALILI D, KAMGAR - HAGHIGHI A A, et al. Evaluation of groundwater potential recharge models considering estimated bare soil evaporation, in a semi-arid foothill region[J]. Hydrological Sciences Journal, 2016, 61(1): 162 - 172.
- [20] 雷涛, 郭向红, 孙西欢, 等. 不同灌溉方式下果园棵间蒸发特性研究[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(Z1): 179 - 184.
- [21] DUGAS W A, BLAND W L. The accuracy of evaporation measurements from small lysimeters[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1989, 46(1 - 2): 119 - 129.
- [22] RUTH C E, MICHEL D, HIRSCHI M, et al. Comparative study of a long-established large weighing lysimeter and a state-of-the-art mini-lysimeter[J]. Vadose Zone Journal, 2018, 17(1): 1 - 10.
- [23] 刘笑吟, 王冠依, 杨士红, 等. 不同时间尺度节水灌溉水稻腾发量特征与影响因素分析[J]. 农业机械学报, 2016, 47(8): 91 - 100 + 170.
- [24] 李亚威, 刘笑吟, 徐哲威, 等. 不同蒸散量时间尺度提升法用于节水灌溉稻田的对比分析[J]. 农业工程学报, 2021, 37(21): 90 - 99.
- [25] 郭晓楠, 查天山, 贾昕, 等. 典型沙生灌木生态系统凝结水量估算[J]. 北京林业大学学报, 2016, 38(10): 80 - 87.
- [26] MEISSNER R, SEEGER J, RUPP H, et al. Measurement of dew, fog, and rime with a high-precision gravitation lysimeter[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2007, 170(3): 335 - 344.
- [27] 刘九卿. 称重传感器电路补偿机理及补偿电阻计算[J]. 衡器, 2014, 43(1): 23 - 29.
- [28] SCHMIDT C D S, PEREIRA F A C, OLIVEIRA A S D, et al. Design, installation and calibration of a weighing lysimeter for crop evapotranspiration studies[J]. Water Resources & Irrigation Management, 2013, 2(2): 77 - 85.
- [29] 王富庆, 许雅欣, 高士佩, 等. 自动地下轨道称重式蒸渗仪测控系统的研制[J]. 中国农村水利水电, 2017(8): 36 - 39.
- [30] 余映军, 齐学斌, 韩洋, 等. 蒸渗仪在农业科研上的应用现状及发展趋势[J]. 中国农学通报, 2020, 36(20): 127 - 135.
- [31] 季辰, 朱忠礼, 徐自为. 高精度称量式蒸渗仪数据处理方法研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2016, 52(5): 628 - 634.
- [32] 卓成市. 称重传感器测试与数字补偿系统的设计研究[D]. 南京: 东南大学, 2020.

(上接第 203 页)

- [25] TIAN Hanqin, CHEN Guangsheng, LIU Mingliang, 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.
- [26] 史晓亮, 吴梦月, 张娜. 中国典型陆地生态系统水分利用效率及其对气候的响应[J]. 农业工程学报, 2020, 36(9): 152 - 159.
- [27] 常娟, 张增信, 田佳西, 等. 西北地区草地水分利用效率时空特征及其对气候变化的响应[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2020, 44(3): 119 - 125.
- [28] 常晓格, 王志慧, 肖培青, 等. 黄土高原生态系统水分利用效率演变及驱动因素空间分异规律[J]. 水土保持研究, 2022, 29(5): 244 - 252.
- [29] WANG Haibo, LI Xin, XIAO Jingfeng, et al. Evapotranspiration components and water use efficiency from desert to alpine ecosystems in drylands[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2021, 298 - 299: 108283.
- [30] 聂冲, 杨军, 黄从红. 北京城区地表水体对城市热环境的调节作用分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2019, 27(6): 1258 - 68.
- [31] 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 + 313 - 314.
- [32] 王金杰, 赵安周, 胡小枫. 京津冀植被净初级生产力时空分布及自然驱动因子分析[J]. 生态环境学报, 2021, 30(6): 1158 - 1167.
- [33] YUAN Wenping, ZHENG Yi, PIAO Shilong, et al. Increased atmospheric vapor pressure deficit reduces global vegetation growth[J]. Science Advances, 2019, 5(8): 1396 - 1407.