DOI: 10.5846/stxb201810282323

刘婵,刘冰,赵文智,朱钊岑.黑河流域植被水分利用效率时空分异及其对降水和气温的响应.生态学报,2020,40(3):888-899. Liu C, Liu B, Zhao W Z, Zhu Z C. Temporal and spatial variability of water use efficiency of vegetation and its response to precipitation and temperature in Heihe River Basin. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(3):888-899.

黑河流域植被水分利用效率时空分异及其对降水和气 温的响应

婵^{1,2},刘 冰^{1,*},赵文智¹,朱钊岑^{1,2} 刘

1 中国科学院西北生态环境资源研究院中国生态系统研究网络临泽内陆河流域研究站,中国科学院内陆河流域生态水文重点实验室,兰州 730000

2 中国科学院大学,北京 100049

摘要:植被水分利用效率(WUE)是衡量植被生态系统碳水耦合关系的重要指标,研究其时空分异特征对区域水资源合理利用 及配置有重要意义。基于改进的光能利用率模型 CASA,模拟估算了黑河流域 2000—2013 年植被净初级生产力(NPP),结合 ETWatch 模型估算的黑河流域 2000—2013 年蒸散数据 ET,进一步估算了黑河流域植被水分利用效率 WUE。分析了黑河流域 NPP、ET 和 WUE 空间格局和时间变化特征,探讨了 WUE 变化对降水和气温的相关性。结果表明:1)黑河流域空间上植被 NPP 在 2000—2013 年多年平均值为 81.05 gC m⁻² a⁻¹, ET 平均值为 133.38 mm, 植被 WUE 平均值为 0.448 gC mm⁻¹ m⁻²。植被 NPP、 ET与WUE的空间格局基本上类似,均呈现出自上游至下游逐渐减少的分布格局。2)黑河流域 2000—2013 年间植被平均 NPP 与平均 WUE 均呈现显著上升趋势(P<0.05),而 ET 平均值变化不显著。WUE 年际变化斜率与其平均值在空间分布上存在一 定的对应关系,空间上植被 WUE 的高值区同时是其呈增长趋势的主要区域,植被 WUE 平均值较低的区域其年际变化也趋于 稳定。3) 不同植被类型的 WUE 差异较为显著,植被自身受环境影响形成的生理生态参数是其 WUE 差异的主要原因,不同植 被类型 WUE 平均值关系为:灌丛>草地>森林>农田>沼泽>荒漠。中游绿洲区栽培植被平均 WUE 仅为 0.90 gC mm⁻¹ m⁻²,因此 应当重视提高其对水资源的利用效率。4)整体上黑河流域植被 WUE 年际变化主要受降水的影响,植被 WUE 与降水呈负相关 的区域主要分布在中游绿洲灌溉区,表明人为活动干扰会削弱气候因素对植被 WUE 的影响。

关键词: 植被净初级生产力; 蒸散; 水分利用效率; CASA 模型; 黑河流域

Temporal and spatial variability of water use efficiency of vegetation and its response to precipitation and temperature in Heihe River Basin

LIU Chan^{1,2}, LIU Bing^{1,*}, ZHAO Wenzhi¹, ZHU Zhaocen^{1,2}

1 Linze Inland River Basin Research Station, Chinese Ecosystem Network Research, Key Laboratory of Ecohydrology of Inland River Basin, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Water use efficiency (WUE) is an important index to measure the coupling relationship between water and carbon in vegetation ecosystem. Research on the WUE spatial and temporal variability is of great significance to rational utilization and allocation of regional water resources. In this study, the net primary productivity (NPP) was estimated by improved Carnegie-Ames-Stanford Approach (CASA) model. Combined with the evapotranspiration data (ET) estimated by the ETWatch model, we studied the spatial pattern and temporal variations of the NPP, ET and WUE in Heihe River Basin

基金项目:国家重点研发计划(2017YFC0504305-01);中国科学院战略性先导科技专项 A 类(XDA23060304);国家自然科学基金项目 (41771038, 41807150)

收稿日期:2018-10-28; 网络出版日期:2019-11-20

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: liubing@lzb.ac.cn

http://www.ecologica.cn

from 2000 to 2013, and discussed the response of WUE to precipitation and air temperature. The results showed that: 1) the annual average value of NPP was 81.05 gC m⁻² a⁻¹ in Heihe River Basin in 2000—2013. Meanwhile, the annual ET averaged 133.38 mm and WUE was 0.448 gC mm⁻¹ m⁻². The spatial pattern of the NPP, ET and WUE were gradually decreasing from upstream and middle to downstream. 2) The average annual NPP and WUE showed an obvious upward trend from 2000 to 2013, while the ET showed a slightly upward trend. There is a corresponding relationship between slope of WUE of vegetation and its average value in spatial distribution. The high-value area of WUE is also the main area for its growth in spatial distribution. By contrast, the inter-annual variation of WUE tends to be stable in the area with lower average WUE value. 3) There were significant differences in WUE among different vegetation types. The main reason for the difference in WUE was the physiological and ecological parameters of vegetation which formed by the influence of the environment. The annual average WUE was listed in order of shrub > grassland > forest > farmland > swamp > desert. The average WUE of cultivated vegetation in the oasis area in the middle reaches is only 0.90 gC mm⁻¹ m⁻². We should to pay more attention to improving its utilization efficiency of water resources. 4) The inter-annual change of WUE is mainly affected by precipitation, but there showed a negative correlation between WUE change and precipitation in the middle reaches of oasis area, which indicating that human activity will weaken the influence of climatic factors on WUE of vegetation.

Key Words: net primary productivity of vegetation; evapotranspiration; water use efficiency; CASA model; Heihe River Basin

在干旱半干旱区,水分是限制植被生长、呼吸作用等生态系统过程最重要的因素之一,也是制约该区域生 境安全和社会发展的重要因素^[1-2],而降水是其水分补给的最基本来源^[3-4]。全球气候变暖和人类活动深刻 影响着植被生产力格局^[5],同时引发干旱半干旱地区的水资源危机^[6]。干旱半干旱区的植被由于长期适应 干旱气候形成了独特的生理生态适应功能,对于全球变化引起的水热变化的响应更为敏感^[7]。所以,越来越 多的研究开始关注于干旱区植被的水碳耦合及其相互影响机制。水分利用效率(Water Use Efficiency, WUE) 反映了植被的光合过程与耗水特性之间的关系^[8],是联系植被生态系统水碳循环耦合关系的重要指标^[9-10]。 因此,掌握干旱半干旱地区植被 WUE 时空动态特征,有助于理解生态系统碳水耦合及植被对于气候变化的 响应机制和适应性策略,促进干旱区内陆河流域的可持续发展。

遥感技术的发展使得获取长时效、大范围地表参数和植被生理参数成为可能,从而能够为更大时空尺度 上揭示陆地生态系统水碳循环提供依据^[11-12]。因此,遥感技术和方法对区域尺度上植被 WUE 的定量表达, 是对传统实验和小尺度研究的重要补充,对于理解区域尺度上生态系统碳-水之间的交互关系等具有重要的 意义。在区域尺度上,计算 WUE 首先需要确定生态系统植被净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP) 和蒸散(Evapotranspiration, ET)。针对区域尺度上 NPP 和 ET 的研究已有较成熟的模型^[13],并且仍然是国内 外研究的热点。估算 NPP 的模型中,CASA 模型是基于光能利用率的过程模型,充分考虑了植被生长的生理 过程且模型参数获取方便,有着较为广泛的应用^[14-18]。陈正华等^[19]通过对模型进行交叉验证和野外实测验 证,表明 CASA 模型在用于估算黑河流域植被的 NPP 时准确性较高。对于 ET 的模型中,由于估算 ET 涉及到 较多复杂的地表参数,是估算植被 WUE 中较难提取的分量,常用的模型有 SEBAL 模型 SEBS 模型。吴炳方 等^[20]利用 ETWatch 系统估算 ET,该系统集成了具有不同应用优势的遥感蒸散模型,通过算法的优化与改进 以及遥感数据的精细处理等措施,提高了蒸散数据的应用精度,可以满足不同的应用需求。因此,基于 CASA 模型和 ETWatch 系统可以作为较精确估算区域尺度 WUE 的可靠手段。

黑河流域作为中国第二大内陆河流域,水资源不仅是维系河西走廊绿洲发育的源泉,也是联系流域内生态和经济的纽带^[21]。有限的水资源不仅要保障中上游的生产生活需求,也要确保下游生态环境的稳定^[22]。由于气候变化和人类活动造成该区域的水资源问题日益加剧^[23],生态环境退化严重。如何合理的利用和配

置水资源,权衡生态环境修复和社会经济发展即"固碳"与"耗水"之间的关系,对区域社会经济以及环境的持续与协调发展起着重要作用^[24]。WUE 是水碳耦合的重要因子,较高的WUE 表示植被可以利用有限的水资源获得更多的光合产物。因此,黑河流域植被WUE 的研究对于该区域退化植被的恢复与重建、水资源的高效利用和合理配置有着重要的意义。到目前为止,针对黑河流域植被WUE 的研究,多集中在利用传统生态学手段在植物个体尺度或者种群上的研究,如苏培玺等^[25]、刘冰等^[26]对荒漠植物沙拐枣、梭梭和泡泡刺等以及付爱红等^[27]对黑河下游荒漠河岸林水分利用特征的研究。在区域尺度上,李肖娟等等^[28]利用 MODIS-GPP及 ET 产品研究了黑河流域的WUE 的时空特征,但遥感数据产品在干旱区内陆河流域的适用性给研究结果带来一定的不确定。因此,为了提高模型估算精度,本文利用改进的 CASA 模型估算了黑河流域 2000—2013年植被 NPP,结合 ETWatch 模型估算的 ET 数据,研究了黑河流域上中下游 NPP、ET 和 WUE 时空变化特征,探讨了不同植被类型 WUE 空间分布及其对降水和气温的响应,这将有助于理解全球气候变化对黑河流域植被生态系统水碳循环的影响,以期为该区域生态环境可持续发展与水资源实现高效利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黑河流域(37°50′—42°40′N,96°42′—102°00′E)是中国第二大内陆河流域,面积约14.29×10⁴ km²,地处 欧亚大陆中部,流域地跨甘肃、青海和内蒙古三省区(图1)。该区域位于中国西北干旱区,属于典型的大陆性 干旱气候,受地形分布影响,流域内气候条件、土壤及植被分布均呈现出差异性。黑河发源于祁连山区,流经 莺落峡进入河西走廊平原,再经过正义峡进入阿拉善高原。黑河流域上游地区是水资源的形成区,多年降水 量平均在200—700 mm 之间,年平均气温1.5—2.0 ℃,年蒸发量约700 mm。植被类型属温带山地森林草原, 土壤类型主要为寒漠土、高上草甸土、高山草原土等;黑河流域中游地区气候相对干燥,年平均气温2.8—7.6 ℃,年降水量由东部的平均250 mm向西部递减为50 mm以下。主要土壤类型为灌淤土、盐土、以及灰棕荒漠 土和灰漠土等,中游地区植被类型主要有人工栽培农作物及林木,超旱生小灌木、半灌木等;黑河流域下游地 区深居内陆腹地,年均降水量在50 mm以下,但潜在蒸发强度达4000 mm以上,年均温度为8 ℃。土壤类型 以灰棕荒漠土和灰漠土为主,植被类型以温带小灌木、半灌木等荒漠植被类型为主,还分布有胡杨、红柳等荒 漠河岸林类型。

1.2 数据来源

在区域尺度上,一般将WUE 定义为NPP与ET的比值。本研究中NPP数据采用CASA模型来估算,ET数据来自吴炳方采用ETWatch模型估算获得。利用CASA模型估算NPP所需基础数据包括NDVI数据、气象数据和植被类型数据,以及用于插值气象数据的DEM数据。NDVI数据来自美国USGS网站提供的MOD13A3数据集,影像空间分辨率为1km,时间范围为2000年1月—2013年12月。气象数据来自中国气象数据网(http://data.cma.cn/)提供的《中国地面气候资料月值数据集》和《中国辐射月值数据集》,包括月总降水量、月平均气温和月太阳总辐射等要素,在剔除掉部分无效数据后采用Anusplin法进行空间插值。气象数据插值所需的DEM数据来自SRTM(shuttle radar topography mission)数据,并将90m分辨率的DEM数据重采样为1km分辨率。植被类型数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn)提供的中国1:100万植被类型空间分布数据,研究区内分布有针叶林、阔叶林、草甸、草原、高山植被、栽培植被、沼泽、灌丛、荒漠及无植被地共十种类型(图1)。为统计WUE需要,本文将针叶林、阔叶林合并为森林类型,草甸、草原及高山植被合并为草地类型,灌丛、栽培植被与沼泽类型不变,无植被类型不参与统计,共计六类。

1.3 NPP 估算模型

CASA (Carnegie-Ames-Stanford Approach)模型是从植被机理出发建立的基于光能利用率的过程模型,近 年来被广泛应用于大尺度生态系统 NPP 的估算。CASA 模型中, NPP 主要由植被吸收的光合有效辐射 (APAR)和光能转化率(*ε*)两个变量决定。模型计算公式如下:



图1 研究区位置图及植被类型图



$$NPP_{(x,t)} = APAR_{(x,t)} \times \varepsilon_{(x,t)}$$
(1)

$$APAR_{(x,t)} = SOL_{(x,t)} \times FPAR_{(x,t)} \times 0.5$$
⁽²⁾

$$FPAR_{(x,t)} = \min[(SR - SR_{\min}) / (SR_{\max} - SR_{\min}), 0.95]$$
(3)

$$SR_{(x,t)} = (1 + \text{NDVI}_{(x,t)}) / (1 - \text{NDVI}_{(x,t)})$$
(4)

$$\varepsilon_{(x,t)} = T_{\varepsilon^{1}(x,t)} \times T_{\varepsilon^{2}(x,t)} \times W_{\varepsilon(x,t)} \times \varepsilon_{\max}$$
(5)

式中,*x* 表示空间位置,*t* 表示时间;式(2)中 SOL 为太阳总辐射量(MJ/m²),FPAR 为植被层对入射光合有效 辐射(PAR)的吸收比例,而常数 0.5 代表植被所能利用的太阳有效辐射(波长为 0.4—0.7 μ m)所占太阳总辐 射的比例;波特等提出的 FPAR 取决于植被类型和植被覆盖状况,可根据 NDVI 计算得到,见公式(3—4);光 能转化率(ε)是主要受温度、降水等因素的影响,式(5)中, T_{s1} 和 T_{s2} 为温度胁迫影响系数, T_{s1} 反映在低温和高 温时植物内在生化作用对光合作用的限制, T_{s2} 表示植物光能利用率随着环境温度从最适温度向高温或低温 变化时逐渐变小的趋势,二者可由月平均气温计算得到, W_{ε} 为水分胁迫系数,可根据月总降水量求得^[30]。 ε_{max} 为理想条件下植物最大光合转化率,其值的大小根据不同植被类型而有所差异。本文 ε_{max} 取值参考朱文 泉等在中国范围的研究成果^[30],取针叶林 0.389,阔叶林 0.692,灌丛 0.429,草甸 0.542,草原、高山植被 0.341, 栽培植被 0.542,沼泽 0.319,荒漠及其他 0.217,(单位 gC/MJ)。

1.4 数据处理方法

1.4.1 ANUSPLIN 法插值气象数据

ANUSPLIN 是运用普通薄盘和局部薄盘样条函数作为理论的插值方法,允许引入线性子模型作为协变

量,使得气象要素插值中能够充分考虑多个因子的影响。利用 ANUSPLIN 法插值气象数据估算 NPP 较其他插值方法具有最高的精度^[31],因此本研究中选用该方法来进行气象数据的空间插值。局部薄盘光滑样条可表示为以下数学公式:

$$Z_{i} = f(x_{i}) + b^{T} y_{i} + e_{i} \qquad (i = 1, 2, \cdots, N)$$
(6)

式中, Z_i 是*i*点的因变量, x_i 为*d*维样条的独立变量, $f(x_i)$ 为未知光滑函数, y_i 是*p*维独立协变量,*b*为 y_i 的*P*维 系数, e_i 为期望值为0和方差为 $W_i^{\sigma^2}$ 的自变量随机误差,其中 σ^2 为误差方差, w_i 为局部相对变异系数。函数*f* 和系数*b*可使用最小二乘估计得到:

$$\sum_{i=1}^{N} \left(\frac{Z_i - f(x_i) - b^T y_i}{w_i} \right)^2 + \rho J_m(f)$$
(7)

式中, *ρ*为光滑参数, *J_m*(*f*) 是 *f*(*x_i*)的 *m* 阶偏导数, *作*为*f*(*x_i*)的粗糙度测度函数, *m* 指局部薄盘光滑样条法中为样条次数。在本研究中, 对于气象因子的插值采用经度和纬度作为独立变量, 高程作为协变量, 样条次数为3 的三变量局部薄盘光滑样条函数, 其中降水的插值采用平方根变换来降低数据的值域范围, 最后再运用普通双变量的薄盘样条函数。

1.4.2 年际变化趋势分析

本文采用一元线性回归方法分析每个栅格上 NPP、ET 及 WUE 的变化趋势,计算公式为:

Slope =
$$\frac{n \sum_{i=1}^{n} (i \times Y_i) - \sum_{i=1}^{n} i \sum_{i=1}^{n} Y_i}{n \times \sum_{i=1}^{n} i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} i\right)^2}$$
(8)

式中,n为年数,i为年序号, Y_i 为第i年对应的 NPP/ET/WUE 值,当 Slope>0 时,表示在该时间段内该要素值 呈现增大的趋势,反之呈现减小的趋势。

1.4.3 WUE 与气象因子相关性分析

本文中采用偏相关分析来研究 WUE 对单独气候因子的响应,偏相关系数较简单相关系数更能反映两个 变量之间的联系。计算公式为:

$$r_{x_1y,x_2} = \frac{r_{x_1y} - r_{x_1x_2}r_{x_2y}}{\sqrt{1 - r_{x_1x_2^2}}\sqrt{1 - r_{x_2y^2}}}$$
(9)

式中, $r_{x_{1y}}$ 、 $r_{x_{2y}}$ 、 $r_{x_{1x_2}}$ 分别为 WUE 与一个气候因子的、WUE 与另外一个气候因子、以及两个气候因子之间的简单相关关系。 r_{x_{1y},x_2} 表示除去变量 x_2 的影响后, WUE 与其中一个气象因子的直线相关。

2 结果分析

2.1 净初级生产力(NPP)时空变化

在黑河流域,2000 — 2013 年植被 NPP 均值在 0.05—758.32 gC m⁻² a⁻¹之间,空间上 NPP 平均值为81.05 gC m⁻² a⁻¹,NPP 总值为 11.2TgC (1 Tg = 10¹²g)。空间分布上植被 NPP 具有明显的差异性,呈现出自上游至下游递减的空间格局(图 2)。黑河流域上游、中游、下游的植被 NPP 年平均值分别为 355.53 gC m⁻² a⁻¹、139.28 gC m⁻² a⁻¹、15.96 gC m⁻² a⁻¹。黑河流域上中下游地形分布的差异是导致其植被 NPP 空间差异的主要原因,上游祁连山区属温带山地森林草原带,降水多且有冰雪融水补给,因此其植被 NPP 值最高。黑河中游地区属于河西走廊平原,主要分布有栽培农作物,是重要的农业生产区,其 NPP 值次之。黑河下游地区除额济纳绿洲、黑河河岸绿洲有少量农作物及荒漠河岸林分布外,其余地区主要被荒漠戈壁覆盖,因此其 NPP 值最低。时间变化上,黑河流域植被 NPP 平均值在 2000—2013 年呈现出显著上升的趋势 (*P*=0.001),变化速率为 1.98 gC m⁻² a⁻¹(图 3)。由此可以得出,黑河流域内植被总体固碳量在 2000—2013 年间有所上升。逐栅格计算 NPP 在空间上的变化趋势,全区大部分区域 NPP 均呈现上升趋势,NPP 呈现上升和下降趋势的面积分别占 91.3%

和 9.7% (图 4)。在不同植被类型中,NPP 变化趋势均值森林类型最高 (7.30 gC m⁻² a⁻¹),其余类型顺序分别 为草地(6.68 gC m⁻² a⁻¹)、灌丛(5.92 gC m⁻² a⁻¹)、沼泽(4.07 gC m⁻² a⁻¹)、农田 (2.57 gC m⁻² a⁻¹)和荒漠(0.52 gC m⁻² a⁻¹)(图 4)。



图 2 2000-2013 年黑河流域年均 NPP、ET、WUE 空间分布图

Fig.2 The spatial patterns of NPP, ET, WUE in Heihe River basin from 2000-2013





Fig.3 Change of annual mean NPP, ET, WUE from 2000 to 2013 in the Heihe River Basin

2.2 蒸散(ET)时空变化

从空间分布上,黑河流域 ET 值从上游至下游逐渐降低(图 2),上游、中游、下游的 ET 年平均值分别为 307.48、195.42、78.02 mm,流域内 ET 空间平均值为 132.36 mm。黑河流域上游属于水资源的生成区,水分充 足,其 ET 值最高。中游地区绿洲农田由于灌溉供水的原因,其 ET 值也较高,绿洲外围则相对较低。下游地 区气候干燥,蒸发强度大,但由于水分供应不充足,因此属于 ET 的低值区。时间变化上,黑河流域内 ET 空间 平均值呈现出波动上升的趋势(Slope=1.04,*P*=0.03),其中 2001 年最低(114.29 mm),2013 年最高(143.75 mm)(图 3)。逐栅格计算得到的 ET 在 2000—2013 年间的变化斜率显示,ET 呈现上升和下降趋势的面积分 别占 87.2%和 12.8%。呈现上升趋势的区域主要分布在上游草甸草原区、中游绿洲区以及河流、湖泊周围,而 呈现下降趋势的区域主要分布在中游绿洲区、绿洲外围以及上游部分地区(图 4)。从不同类型的平均值来 看,荒漠 ET 均值变化率最高(1.12 mm/a),其次为草地(0.90 mm/a),灌丛和农田 ET 变化趋势接近,其变化率 均为 0.45 mm/a;然而,沼泽和森林 ET 呈现下降趋势,其平均值分别为-0.92 mm/a 和-0.05 mm/a(图 4)。



图 4 黑河流域 2000—2013 年 NPP、ET、WUE 变化趋势空间特征及不同植被类型趋势特征

Fig.4 The spatial patterns and different vegetation types of the change rate of NPP/ET/WUE in the Heihe River Basin during 14 years (2000-2013)

2.3 植被水分利用效率(WUE)时空特征

2.3.1 植被水分利用效率(WUE)空间分布

黑河流域植被 WUE 空间分布特征与植被 NPP 和 ET 的格局基本近似,呈现出自上游至下游减少的趋势(图 2)。上游、中游、下游的植被 WUE 年平均值分别为 1.29 、0.68 、0.21 gC mm⁻¹ m⁻²,在 2000—2013 年空间上

植被 WUE 均值为 0.419 gC mm⁻¹ m⁻²。黑河流域上游地区属于植被 NPP、ET 的高值区,也属于植被 WUE 的高 值区,其整体范围在 1.0—1.8 gC mm⁻¹ m⁻²之间。中游绿洲范围内由于 ET 值较高,因此在同等植被 NPP 水平下 其植被 WUE 属于中等水平,其范围约在 0.4—0.8g C mm⁻¹ m⁻²之间。中游地区除绿洲外及下游地区的多数区域, 其 NPP 与 ET 值均属于较低的水平。因此其 WUE 属于较低的水平,其值约在 0—0.4 g C mm⁻¹ m⁻²之间。 2.3.2 植被水分利用效率(WUE)时间变化

黑河流域植被 WUE 在空间上的平均值 2000 年最低,为 0.36 gC mm⁻¹ m⁻²,而 2007 年最高,达 0.52 gC mm⁻¹ m⁻²。植被平均 WUE 在 2000—2013 年间呈现显著的上升趋势(图 3,Slope=0.0066, P=0.007),意味着 在研究区内单位面积上(m²)每蒸散 1 mm 水,植被对于 CO₂同化量每年约增加 0.0066 g。逐栅格计算得到的 植被 WUE 在 2000—2013 年间的变化斜率表明,植被 WUE 呈现上升和下降趋势的面积分别占 73.3% 和 26.7%。植被 WUE 呈增长趋势的区域主要分布在流域的上游以及中游的南部,下游以及中游绿洲外围荒漠 区其植被 WUE 变化趋势不明显。在六种植被类型的趋势平均值中,沼泽类型 WUE 变化率均值最高,达0.041 gC mm⁻¹ m⁻² a⁻¹,其次序依次为森林、灌丛、草地、农田和荒漠,值分别为 0.035、0.030、0.027、0.020 和 0.003 gC mm⁻¹ m⁻² a⁻¹(图 4)。总体而言,黑河流域 2000—2013 年间植被 WUE 呈现增长趋势,说明近年来研究区内整 体上植被耗水效率得到了提升。

2.3.3 不同植被类型水分利用效率(WUE)比较

黑河流域不同植被类型及生长在不同区域的相同 类型的植被,其WUE特征有较大的差异,主要取决于 不同植被类型各自的光合特征和耗水功能的差异。如 图 5 所示,2000—2013年黑河流域植被大类中WUE关 系为:灌丛(1.23 gC mm⁻¹ m⁻²)>草地(1.05 gC mm⁻¹ m⁻²)>森林(0.96 gC mm⁻¹ m⁻²)>花田(0.90 gC mm⁻¹ m⁻²)>沼泽(0.74 gC mm⁻¹ m⁻²)>荒漠(0.21g C mm⁻¹ m⁻²),在草地的二级植被类型中,草甸的WUE 最高 (1.26 gC mm⁻¹ m⁻²),森林的二级植被类型中针叶林的 WUE(1.08 gC mm⁻¹ m⁻²)大于阔叶林WUE(0.74 gC mm⁻¹ m⁻²)。

2.4 水分利用效率空间分布与气象因子的关系

以年为时间单位,计算 2000—2013 年植被 WUE 与 年降水量、年平均气温的偏相关系数(图 6),以分析 WUE 的年际变化对气候因子的关系。如图 6 所示,黑



图 5 2000—2013 年黑河流域不同植被类型 WUE 的差异及年际 变化

Fig.5 Water use efficiency (WUE) in Heihe River Basin during 2001-2013 for different vegetation types

河流域年降水量在空间上分配不均匀,上游祁连山区年均降水量达到 300 mm 以上,而下游地区额济纳旗年 降水量不足 50 mm,呈现出明显的空间差异。黑河流域大部分区域(约占总面积的 74.96%)植被 WUE 对降水 量的相关性为正相关(图 6),植被 WUE 的年际变化对于气温的响应呈正相关和负相关的区域分别占总面积 的 59.57%和 40.43%(图 6)。在空间分布上,植被 WUE 与气温呈现正向相关的区域主要分布在黑河上游年 均温小于 0 ℃以及下游温度在 5—10 ℃之间的区域,植被 WUE 年际波动与气温呈负相关的区域分布在年均 温大于 10 ℃的区域。总体来说,黑河流域植被 WUE 的年际波动主要受到降水的影响较大,对于气温的响应 不如降水明显,但是在不同区域 WUE 与气象因子具有不同的响应关系,其最终受气温和降水的共同影响。

3 讨论

3.1 模型验证

本文对 CASA 模型模拟 NPP 结果进行验证。由表 1 的结果可知,本文与程春晓等^[16]、陈正华等^[19]利用



图 6 黑河流域 2000—2013 年平均降水量、平均气温及平均 WUE 与年均降水量、平均气温的偏相关关系图

Fig.6 The spatial distribution of the mean annual precipitation, mean annual temperature and the partial correlation coefficient between WUE and precipitation, temperature in Heihe River Basin between 2000-2013

橙色区域: 植被 WUE 与降水量呈现正相关区域主要集中在流域上游祁连山区以及下游的大部分区域, 蓝色区域: 呈现负相关的区域则主 要分布在中游绿洲区域

CASA 模型估算的 NPP 结果在 NPP 总量以及平均值范围内均较为相似,较卢玲等^[32]使用 C-FIX 模型模拟结 果偏低。本文模拟黑河上游 NPP 平均值为 283.79 gC m⁻² a⁻¹, 与闫敏等利用改进的 MOD-17 模型模拟的结果 较为接近。总体来看,本文利用 CASA 模型估算黑河流域 NPP 具有较高的可信度。

Table 1 Comparisons of simulated NPP and exiting research results							
数据来源 Data sources	模型 Model	研究区域 Research area	时间段 Periods of time	NPP 平均值 Mean NPP/ (gC m ⁻² a ⁻¹)	NPP 总值 Total NPP/ Tg		
程春晓等[16]	CASA 模型	黑河流域	1998—2007	76.65	10.97		
卢玲等[32]	C-FIX 模型	黑河流域	2002	106	18.16		
闫敏等[33]	改进的 MOD-17 模型	黑河上游山地	2001—2012	235.19	—		
陈正华等[19]	CASA 模型	黑河流域	1998—2002	—	11.85		
本文 This article	CASA 模型	黑河流域	2000—2013	79.55	11.2		

表1 NPP 模拟值与已有研究 NPP 值比较 - - -----

. .

为了进一步验证 WUE 估算精度,对比了前人在黑河流域不同植被类型的实测 WUE 值(表2)。由表2 可 以得出,本文 WUE 估算值与实测值的范围区间较为吻合。因此,本文对 WUE 的估算有一定可信度。同时由 于 WUE 受到季节内气候因素、水分条件等影响,同种植被 WUE 在年内变化较大。

3.2 WUE 的时空动态及其对水热条件的响应

黑河流域气候状况自上游至下游呈现出明显的地带性差异[35],热量与水分及其配合状况的分配不均引 起植被在空间分布上具有明显的地带性,区内植被类型自上游至下游大致为森林植被-草原植被-灌溉栽培植 被-荒漠植被的分布格局,植被的地带性差异造成流域内植被 WUE 自上游至下游逐渐减少的趋势。除此之 外,植被的群落组成结构、土地利用情况以及水热条件及其配合状况等都有可能引起植被 WUE 的差异^[36]。 黑河流域植被 WUE 的高值区分布在上游高海拔区域以及下游河岸林区,这是由于上游祁连山区降水量高, 在以降水为主要水分来源的干旱半干旱区,更利于植被的生长发育,而下游河岸林地区地下水埋深较浅,植被 群落可利用浅层地下水进行生长,因此在降水量稀少的荒漠区植被能够产生更多的干物质量[27],从而具有更 高的 WUE。在时间变化上,本文得出黑河流域在 2000—2013 年间 NPP 平均值呈现出显著上升的趋势 (P= 0.001),这与程春晓等^[16]、张福平等^[17]的研究结果一致。此外,植被 WUE 在 2000—2013 年间呈现出上升趋势,表明黑河流域植被的固碳能力以及水分利用效率在该时段内得到了提升。

Table 2 Estimated and measured WUE values of different vegetation in heihe river basin							
地点 Location	植被类型 Vegetation types	WUE 实测值 Measured values of WUE/(gC mm ⁻¹ m ⁻²)	WUE 估算值 Estimated value of WUE/(gC mm ⁻¹ m ⁻²)	实测 WUE 数据来源 Source of measured WUE data			
黑河中游 Middle reaches of Heihe river	荒漠灌木(梭梭、沙拐 枣等)	1.44—2.5	0.70—1.72	文献[25]			
黑河中游 Middle reaches of Heihe river	灌溉农作物	0.47—1.07	0.68—1.42	文献[34]			
黑河下游 Lower reaches of Heihe river	河岸林(胡杨)	0.79—1.02	0.54—1.36	文献 ^[27]			

表 2 黑河流域不同植被类型 WUE 模型估算值与实测值比较 Fable 2 Fstimated and measured WUE values of different vegetation in heibe river bas

不同植被类型间 WUE 具有明显的差异性,主要由于植被长期适应环境所形成的独特的生理生态参数所 决定。黑河流域植被 WUE 以草甸类型最高(1.26 gC mm⁻¹ m⁻²),与李红琴等^[37]计算得到的海北高寒草甸植 被 WUE 年均值基本接近(0.958 g mm⁻¹ m⁻²)。草甸是生长在低温且水分充足环境下的特殊植被类型,具有较高的植被生产力,其生长主要受到气温条件的影响。在全球温暖化背景下,高寒植被水分利用效率将会呈现 上升的趋势^[38]。森林类型的 WUE 略低于草地和灌丛,其主要原因是是在祁连山区的森林类型中,以青海云 杉和祁连圆柏,属于常绿针叶林,其植被气孔导度较低,因此光合速率低^[39]。同时,祁连山森林主要分布在年 均温低于零度的高海拔区,低温环境也不利于植被进行光合作用。黑河流域栽培植被主要分布在河西走廊地 区,具有较为丰富的光照条件以及适宜的生长条件,但受到农业灌溉方式不合理的影响导致其水资源浪费严重,约70%的渠系水以渗漏、蒸发等形式被浪费^[40],因此其 WUE 并不高(0.90 gC mm⁻¹ m⁻²)。若以 g/kg 为单 位计,则意味着植被固定每 9 gC 需蒸散水 10 kg,因此,应当重视如何提高绿洲农田对于灌溉水的利用效率, 在产生相同生物量或者经济效益的情况下消耗更少的水。荒漠是黑河流域分布最广泛的类型,在个体尺度, 荒漠植被适应干旱环境具有较高的光合速率且蒸腾速率较低,通常具有较高的 WUE^[32,4142]。然而,在区域尺 度上,本文得出荒漠植被 WUE 平均为 0.21 gC mm⁻¹ m⁻²,这主要是由遥感数据本身的空间分辨率决定的。荒 漠植被平均不足 10%的极低覆盖率,对于 1 km×1 km 栅格的植被生产力及蒸散数据,存在混合像元问题,因 此造成整体上植被生产力水平低,且土壤蒸发量占总蒸发比例大,因此得出的荒漠植被的 WUE 值偏低。

在黑河流域,植被 WUE 的年际波动主要受降水的影响较大,这与前人结果一致^[36]。荒漠区大部分区域 对于降水量的响应为正相关,其原因是荒漠植被主要依赖降水完成其生命史,因此在蒸发量维持不变的情况 下,降水量增加通过提升植被生产力从而影响荒漠植被水分利用效率。然而,在中游灌溉农田内植被 WUE 对降水响应为负相关,该区域主要为栽培植被,受人为活动的影响剧烈,气候因素对植被 WUE 的影响可能会 被削弱^[41]。植被 WUE 与气温呈现正相关的区域主要分布在黑河上游年均气温小于 0 ℃以及下游年均气温 在 5—10 ℃之间的区域,其主要原因是当气温低于植被光合作用的最适宜温度时,气温的上升将提升植被的 光合作用速率,从而产生更多的干物质量,进而提高植被 WUE^[43]。植被 WUE 年际波动与气温呈负相关的区 域则主要分布在年均温大于 10 ℃的区域,气温的升高会加速土壤水分的蒸发,造成 ET 的升高,从而导致植 被 WUE 的降低。以上分析表明,黑河流域植被 WUE 的时空特征与所处环境的水热条件密切相关,整体上降 水对于植被 WUE 的影响高于气温。

4 结论和展望

本文基于 CASA 模型估算的 NPP 和 ET-Watch 模型估算的 ET 数据,结合遥感数据定量估算了 2000—2013 年黑河流域植被 WUE,进一步研究植被 NPP、ET 及 WUE 在时空变化特征以及 WUE 对于气象因子的响

应关系,主要得出以下结论:

(1) 植被 WUE 在空间上大致呈现自上游至下游逐渐减少的趋势,由热量与水分及其配合状况而引起植被分布的地带性差异造成。流域内植被 NPP 以及植被 WUE 总体上均呈现出显著的上升的趋势,表明黑河流域整体上植被的固碳能力和水分利用效率在该时段内均得到了提升,但下游地区的植被 NPP 与 WUE 较中上游地区相比,不仅平均值较低且年际增加趋势较弱。

(2)不同植被类型 WUE 呈现出显著的差异性,其中草甸 WUE 最高,荒漠 WUE 最低。植被长期适应环境 形成独特的生理生态参数,造成不同植被类型 WUE 具有明显的差异。人类活动的干扰对生态系统 WUE 的 影响同样不容忽视,黑河中游地区以灌溉为主的栽培植被总体 WUE 偏低,需要通过合理的调控方式提高 其 WUE。

(3) 从流域整体来看,降水量是影响植被 WUE 年际变化的主要因子,黑河上游与下游均分布有大量的自然植被,在以降水为主要水分补给的干旱半干旱区,降水量的增加有利于提升植被 NPP,从而提高植被 WUE。 但在中游灌溉农田内植被 WUE 对降水响应为负相关,表明人为活动干扰会削弱气候因素对植被 WUE 的 影响。

植被 WUE 作为表征生态系统碳水耦合的重要指标,利用遥感技术进行大面积估算可作为对传统小尺度 研究的重要补充。本研究对黑河流域植被 WUE 的时空动态特征进行了分析,且对模型估算结果做了验证, 保证其模拟结果的有效性,但遥感数据的空间分辨率特征等不可避免地会对结果造成一定影响,因此还需考 虑估算模型中输入更高空间分辨率遥感数据进行结果比对。同时,本研究中侧重于自然因子对植被 WUE 的 影响分析,但植被 WUE 的影响因素是综合且复杂的,因此应当进一步增加其他因素如干旱状况、人类活动等 对于 WUE 的影响方式,并定量区分其影响程度贡献比例。

参考文献(References):

- [1] 鲍超,方创琳.干旱区水资源开发利用对生态环境影响的研究进展与展望.地理科学进展,2008,27(3):38-46.
- [2] 陈亚宁,杨青,罗毅,沈彦俊,潘响亮,李兰海,李忠勤.西北干旱区水资源问题研究思考.干旱区地理,2012,35(1):1-9.
- [3] Dube O P, Pickup G. Effects of rainfall variability and communal and semi-commercial grazing on land cover in southern African rangelands. Climate Research, 2001, 17(2): 195-208.
- Mooney H A, Canadell J, Chapin III F S, Ehleringer J R, Körner C, McMurtrie R E, Parton W J, Pitelka L F, Schulze E D. Ecosystem physiology responses to global change//Walker B H, Steffen W L, Canadell J, Ingram J S I, eds. The Terrestrial Biosphere and Global Change: Implications for Natural and Managed Ecosystems. Cambridge: Cambridge University Press, 1999: 141-189.
- [5] 程国栋,肖洪浪,傅伯杰,肖笃宁,郑春苗,康绍忠,延晓冬,王毅,安黎哲,李秀彬,陈宜瑜,冷疏影,王彦辉,杨大文,李小雁,张甘霖,郑元润,柳钦火,邹松兵.黑河流域生态--水文过程集成研究进展.地球科学进展,2014,29(4):431-437.
- [6] Deng X P, Shan L, Zhang H P, Turner N C. Improving agricultural water use efficiency in arid and semiarid areas of China. Agricultural Water Management, 2006, 80(1/3): 23-40.
- [7] Yang Q Y, Zhao W Z, Liu B, Liu H. Physiological responses of *Haloxylon ammodendron* to rainfall pulses in temperate desert regions, Northwestern China. Trees, 2014, 28(3): 709-722.
- [8] 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. 生态学报, 2009, 29(3): 1498-1507.
- [9] Yu G R, Wang Q F, Zhuang J I E. Modeling the water use efficiency of soybean and maize plants under environmental stresses: application of a synthetic model of photosynthesis-transpiration based on stomatal behavior. Journal of Plant Physiology, 2004, 161(3): 303-318.
- [10] Tian HQ, Chen G S, Liu M L, Zhang C, Sun G, Lu C Q, Xu X F, Ren W, Pan S F, Chappelka A. Model estimates of net primary productivity, evapotranspiration, and water use efficiency in the terrestrial ecosystems of the southern United States during 1895-2007. Forest Ecology and Management, 2010, 259(7): 1311-1327.
- [11] 张荣华, 杜君平, 孙睿. 区域蒸散发遥感估算方法及验证综述. 地球科学进展, 2012, 27(12): 1295-1307.
- [12] 刘宁,孙鹏森,刘世荣. 陆地水-碳耦合模拟研究进展. 应用生态学报, 2012, 23(11): 3187-3196.
- [13] 袁文平,蔡文文,刘丹,董文杰.陆地生态系统植被生产力遥感模型研究进展.地球科学进展,2014,29(5):541-550.
- [14] Nayak R K, Patel N R, Dadhwal V K. Estimation and analysis of terrestrial net primary productivity over India by remote-sensing-driven terrestrial biosphere model. Environmental Monitoring and Assessment, 2010, 170(1/4): 195-213.

- [15] 朱文泉,潘耀忠,阳小琼,宋国宝. 气候变化对中国陆地植被净初级生产力的影响分析. 科学通报, 2007, 52(21): 2535-2541.
- [16] 程春晓,徐宗学,张淑荣,王志慧.黑河流域 NPP 对气候变化及人类活动的响应.北京师范大学学报:自然科学版,2016,52(5): 571-579.
- [17] 张福平, 冯起, 李旭谱, 魏永芬. 黑河流域 NPP 遥感估算及其时空变化特征. 中国沙漠, 2014, 34(6): 1657-1664.
- [18] 张禹舜, 贾文雄, 赵一飞, 刘亚荣, 赵珍, 陈京华. 基于 CASA 模型研究祁连山地区植被净初级生产力的时空变化. 西北植物学报, 2014, 34(10): 2085-2091.
- [19] 陈正华,麻清源,王建,祁元,李净,黄春林,马明国,杨国靖.利用 CASA 模型估算黑河流域净第一性生产力.自然资源学报,2008,23 (2):263-273.
- [20] 吴炳方, 熊隽, 闫娜娜, 杨雷东, 杜鑫. 基于遥感的区域蒸散量监测方法——ETWatch. 水科学进展, 2008, 19(5): 671-678.
- [21] 宁宝英,何元庆,和献中,李宗省.黑河流域水资源研究进展.中国沙漠,2008,28(6):1180-1185.
- [22] 孙栋元,李元红,胡想全,王军德,卢书超,程玉菲.黑河流域水资源供需平衡与配置研究.水土保持研究, 2014, 21(3): 217-221.
- [23] 程国栋,赵传燕.西北干旱区生态需水研究.地球科学进展,2006,21(11):1101-1108.
- [24] 粟晓玲, 康绍忠. 干旱区面向生态的水资源合理配置研究进展与关键问题. 农业工程学报, 2005, 21(1): 167-172.
- [25] 苏培玺,赵爱芬,张立新,杜明武,陈怀顺. 荒漠植物梭梭和沙拐枣光合作用、蒸腾作用及水分利用效率特征. 西北植物学报, 2003, 23 (1):11-17.
- [26] 刘冰,赵文智. 荒漠绿洲过渡带柽柳和泡泡刺光合作用及水分代谢的生态适应性. 中国沙漠, 2009, 29(1): 101-107.
- [27] 付爱红, 陈亚宁, 李卫红. 中国黑河下游荒漠河岸林植物群落水分利用策略研究. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(4): 693-705.
- [28] 李肖娟, 张福平, 王虎威, 雷声剑, 高张. 黑河流域植被水分利用效率时空变化特征及其与气候因子的关系. 中国沙漠, 2017, 37(4): 733-741.
- [29] 朱文泉,潘耀忠,张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算. 植物生态学报, 2007, 31(3): 413-424.
- [30] 朱文泉. 中国陆地生态系统植被净初级生产力遥感估算及其与气候变化关系的研究[D]. 北京: 北京师范大学, 2005.
- [31] 任璇, 郑江华, 穆晨, 闫凯, 徐廷豹. 不同气象插值方法在新疆草地 NPP 估算中的可靠性评价. 草业科学, 2017, 34(3): 439-448.
- [32] 卢玲,李新, Veroustraete F. 黑河流域植被净初级生产力的遥感估算. 中国沙漠, 2005, 25(6): 823-830.
- [33] 闫敏,李增元,田昕,陈尔学,谷成燕.黑河上游植被总初级生产力遥感估算及其对气候变化的响应.植物生态学报,2016,40(1): 1-12.
- [34] 苏培玺, 张立新, 杜明武, 毕玉蓉, 赵爱芬, 刘新民. 胡杨不同叶形光合特性、水分利用效率及其对加富 CO₂的响应. 植物生态学报, 2003, 27(1): 34-40.
- [35] 曹玲, 窦永祥, 张德玉. 气候变化对黑河流域生态环境的影响. 干旱气象, 2003, 21(4):45-49.
- [36] Feng X M, Fu B J, Lu N, Zeng Y, Wu B F. How ecological restoration alters ecosystem services: an analysis of carbon sequestration in China's Loess Plateau. Scientific Reports, 2013, 3: 2846.
- [37] 李红琴,李英年,张法伟,刘晓琴,吴启华,毛绍娟. 高寒草甸植被生产量年际变化及水分利用率状况. 冰川冻土, 2013, 35(2): 475-482.
- [38] 王庆伟, 于大炮, 代力民, 周莉, 周旺明, 齐光, 齐麟, 叶雨静. 全球气候变化下植物水分利用效率研究进展. 应用生态学报, 2010, 21 (12): 3255-3265.
- [39] Chabot B F, Hicks D J. The ecology of leaf life spans. Annual Review of Ecology and Systematics, 1982, 13: 229-259.
- [40] 吴建民,高焕文.甘肃河西走廊水资源供需分析及耕作节水研究.农业工程学报,2006,22(3):36-39.
- [41] 穆少杰,周可新,齐杨,陈奕兆,方颖,朱超.内蒙古植被降水利用效率的时空格局及其驱动因素.植物生态学报,2014,38(1):1-16.
- [42] Ehleringer J R, Cerling T E, Helliker B R. C₄ photosynthesis, atmospheric CO₂, and climate. Oecologia, 1997, 112(3): 285-299.
- [43] 李伏生, 康绍忠, 张富仓. 大气 CO, 浓度和温度升高对作物生理生态的影响. 应用生态学报, 2002, 13(9): 1169-1173.