DOI: 10.5846/stxb201810272316

宫菲,杜灵通,孟晨,丹杨,王乐,郑琪琪,马龙龙.宁夏陆地生态系统水分利用效率特征及其影响因子.生态学报,2019,39(24):9068-9078. Gong F, Du L T, Meng C, Dan Y, Wang L, Zheng Q Q, Ma L L.Characteristics of water use efficiency in terrestrial ecosystems and its influence factors in Ningxia Province.Acta Ecologica Sinica,2019,39(24):9068-9078.

宁夏陆地生态系统水分利用效率特征及其影响因子

宫 菲^{1,2},杜灵通^{1,2,*},孟 晨^{1,2},丹 杨^{1,2},王 乐^{1,2},郑琪琪³,马龙龙^{1,2}

1 宁夏大学西北土地退化与生态恢复省部共建国家重点实验室培育基地,银川 750021
 2 宁夏大学西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室,银川 750021

3 宁夏大学农学院,银川 750021

摘要:生态系统水分利用效率(Water Use Efficiency, WUE)是表征生态系统碳水耦合程度的重要指标,能反映生态系统碳水循 环规律及其相互作用关系。基于 MODIS 数据以及宁夏生态系统类型数据,分析 2000—2017 年宁夏不同生态系统 WUE 的变化 特征,探讨了 NPP 和 ET 两种因子对 WUE 年际与年内变化的影响。结果表明:(1)全区陆地生态系统的年均 WUE 为 1.03 g·C/ kg·H₂O,值域在 0.55—2.98 g·C/kg·H₂O 之间,总体上呈现南北高、中部低的特征。(2)不同生态系统的 WUE 差异较大,由高到 低为水体及湿地、森林、农田、草地、聚落、荒漠和其他生态系统,在同类生态系统中,植被生物量和盖度越高的亚类生态系统,其 WUE 也越高。(3)宁夏陆地生态系统 WUE 存在着每年 0.0141 g·C/kg·H₂O 的下降趋势,年内 WUE 呈典型的单峰形态,变化范 围在 0.02—2.16 g·C/kg·H₂O 之间。(4)年际尺度上,宁夏陆地生态系统 WUE 与年蒸散(Evapotranspiration,ET)有极显著负相 关性(P<0.01),而与净初级生产力(Net Primary Production,NPP)没有相关性;年内尺度上,WUE 变化与 ET 呈显著正相关(P< 0.05),与 NPP 呈极显著正相关(P<0.01),这与植被的年内季节性生长过程有关。(5)根据 ET 强弱和 WUE 高低,可将宁夏陆 地生态系统水分利用效率特征划分为4类,即低 ET 低 WUE 区、低 ET 高 WUE 区、高 ET 低 WUE 区和高 ET 高 WUE 区。宁夏的 生态恢复工程在增强植被生产力的同时,也增强了区域水分消耗,致使陆地生态系统整体水分利用效率下降,这为宁夏未来水 资源调控和生态重建提供了科学依据。

关键词:水分利用效率;陆地生态系统;蒸散;净初级生产力;宁夏

Characteristics of water use efficiency in terrestrial ecosystems and its influence factors in Ningxia Province

GONG Fei^{1,2}, DU Lingtong^{1,2,*}, MENG Chen^{1,2}, DAN Yang^{1,2}, WANG Le^{1,2}, ZHENG Qiqi³, MA Longlong^{1,2}

1 Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwest China, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

2 Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in Northwest China of Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

3 School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

Abstract: Water use efficiency (WUE) is an important indicator to characterize the coupling process between carbon and water cycle in terrestrial ecosystem and can reflect their regulations and interactions. Based on MODIS 8-day composite net primary production data (MOD17A2), evapotranspiration/latent heat flux product data (MOD16A2) and ecosystem type data of Ningxia, the WUE changes in different ecosystems from 2000—2017 were analyzed. We also studied the impacts of two factors, e,g. NPP and ET on the WUE changes at monthly and annually time scales. The results showed that: (1) The average annually WUE of terrestrial ecosystems in the region was 1.03 g \cdot C/kg \cdot H₂O, with the range of 0.55—2.98 g \cdot C/kg \cdot H₂O.

收稿日期:2018-10-27; 网络出版日期:2019-09-17

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: dult80@ qq.com

http://www.ecologica.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(41661003);中国科学院"西部之光"人才培养引进计划(XAB2017AW01);宁夏高等学校一流学科建设(生态 学)项目(NXYLXK2017B06)

The higher WUE levels distributed in the terrestrial ecosystems in north and south of Ningxia province, while the lower WUE levels mainly located in the terrestrial ecosystems in the central Ningxia province. (2) The WUE of different ecosystems varied greatly. The order of WUE value from high to low is water and wetland ecosystem, forest ecosystem, farmland ecosystem, grassland ecosystem, settlement ecosystem, desert ecosystem, and other ecosystem. In the same ecosystem, the higher the vegetation biomass and coverage of the sub ecosystem, the higher the WUE. (3) The WUE has decreased by 0.0141 g·C/kg·H₂O·each year from 2000 to 2017, the monthly change of WUE showed a typical single peak shape during a year with a range of $0.02-2.16 \text{ g} \cdot \text{C/kg} \cdot \text{H}_2\text{O}$ in the terrestrial ecosystem. (4) At the annual time scale, there was a significant negative correlation (P < 0.01) between WUE and Evapotranspiration (ET) in the terrestrial ecosystem, but had no correlation with net primary production (NPP); at the monthly time scale, WUE significantly positive correlated with ET (P < 0.05), and significantly positive correlated with NPP (P < 0.01), which is related to the seasonal growth of vegetation in a year. (5) According to the strength of ET and the level of WUE, the characteristics of water use efficiency of terrestrial ecosystem in Ningxia can be divided into four types including low ET with low WUE, low ET with high WUE, high ET with low WUE, and high ET with high WUE. The ecological restoration projects implemented in Ningxia province can not only enhance the vegetation productivity, but also promoted the regional water consumption, which decreased the water use efficiency of the terrestrial ecosystem. The conclusion of this paper could provide scientific basis for water resources utilization and ecological restoration in Ningxia Province in the future.

Key Words: water use efficiency; terrestrial ecosystem; evapotranspiration; net primary productivity; Ningxia Province

作为陆地生态系统重要的物质循环过程,碳循环和水循环对生态系统能量传输和水分养分运移起着重要 作用,也是地圈-生物圈-大气圈相互联系、相互作用的重要纽带^[1]。生态系统碳的固定方式主要是光合作用, 而蒸散则是伴随光合作用而发生的植物体内气体和水分的转化与流失过程。二者在不同时空尺度上密切联 系、相互耦合。水分利用效率(Water Use Efficiency,WUE)是指生态系统损耗单位质量水分所固定的 CO₂(或 生产的干物质)的量,是深入理解生态系统水碳循环间耦合关系的重要指标^[2],揭示生态系统 WUE 的时空变 异特征及机制有助于预测未来气候变化对生态系统碳水过程的影响^[3],具有重要的生态学和水文学意义。 而 WUE 的定义依据尺度的不同而不同,叶片尺度上,是指单位水量通过叶片蒸腾耗散时所能同化的光合产 物量^[4];植物个体尺度上,指长时间植物生长过程中形成的干物质量与耗水量的比值^[5];生态系统或区域尺 度上,则可由整个区域或系统所固定的干物质与蒸散(Evapotranspiration,ET)的比值确定,干物质量可由区域 总初级生产力(Gross Primary Production,GPP)或净初级生产力(Net Primary Production,NPP)等指标代替^[6]。

目前,生态系统 WUE 研究多集中在单一植被^[7]或农田尺度^[8]上,但在全球气候变化背景下^[9],生态系统 WUE 的时空变化研究开始受到国内外学者的关注^[10-15],Ito 等利用模型估算了全球陆地生物圈的 WUE,并发 现生态系统生产力的增强与大气 CO₂浓度的增加导致 WUE 升高^[12];而邹杰等^[16]在研究中亚及新疆生态系统 WUE 时发现,GPP、ET 和 WUE 在时间序列上无显著变化,农田和草地的 WUE 变化最大;李明旭等^[17]利用 模型分析未来气候变化背景下秦岭地区陆地生态系统的 WUE 变化规律及其对气候变化的响应,表明 GPP 的 增加是未来秦岭地区 WUE 增长的直接因素。然而,WUE 由植被生产力和蒸散共同作用,哪种因子起决定作 用在不同生态系统中可能存在差异,而不同生态系统 WUE 的差异也是区域生态恢复与治理值得关注的问题。在过去的十几年中,宁夏实施了退耕还林、退牧还草等生态恢复工程,在一定程度改变了宁夏的土地覆盖 类型^[18]和景观生态特征^[19],也影响到了区域生态系统的水分利用效率。然而,宁夏区域的水分利用效率特征主要集中于植株个体尺度上研究^[20-21],区域尺度上宁夏不同生态系统的 WUE 有何特征,近十几年如何变 化尚不清楚。为此,本文利用中分辨率成像光谱仪(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)的 NPP 产品以及美国蒙大拿大学 Mu 等^[22]开发出的全球陆地 ET 产品计算宁夏区域性 WUE,并研究不同生态系统的 WUE 时空变化,探讨其与 ET、NPP 的关系,以期深入了解 WUE 变化规律及其主要影响因素,为区域

经济发展和生态环境保护提供理论基础。

1 研究区概况、数据与方法

1.1 研究区概况

宁夏地处黄河上游,不同地理区划单元气候特征差 异较大,北部为中温带干旱区,由于黄河从中穿流而过, 水资源丰沛,植被茂盛;中部属中温带半干旱区,多为缓 坡丘陵和山间盆地,除红寺堡等扬黄灌区外,大部分是 典型的荒漠化草原和退化干草地,自然生态环境脆弱; 南部丘陵山区沟壑纵横,水土流失严重,主要为温带半 干旱区及半湿润区^[23-24]。宁夏生态系统复杂且分布不 均,可分为7大类(图1),农田生态系统主要分布在引 黄灌溉区和中南部部分丘陵雨养农业区,面积约为1.67 ×10⁴ km²,占全区面积的32.20%;草地生态系统广泛分 布于宁夏中部干旱带、贺兰山山麓及黄土丘陵区,面积 约为2.25×10⁴ km²,占全区面积的43.41%,是宁夏分布 最多的陆地生态系统;而森林生态系统占比较少,主要 分布于北部的贺兰山及六盘山等山区,约有0.34×10⁴ km²,占全区的6.56%。

1.2 数据

1.2.1 数据来源

MODIS 数据来源于美国 USGS 网站(https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis)中的 MOD17A2 和 MOD16A2 陆地四级产品,分别为植被生产力和蒸散,空间分辨率为 0.5 km,时间分辨率为 8 天。这两种



产品是 Terra 卫星上 MODIS 传感器所观测数据反演的遥感陆地产品,由于过境时间相同,因而该两组数据在时间和空间上都完全一致,基于这两种产品计算出的水分利用效率(WUE)具有高时空一致性。 1.2.2 净初级净生产力(NPP)

净初级生产力表示植被所固定的有机碳量中扣除本身呼吸消耗(Ra)的部分,NPP 是植被的生长和生殖 总量^[25],也称净第一性生产力,其与 GPP 的关系为:NPP=GPP-Ra,NPP 反映了植物固定和转化光合产物的 效率,也决定了可供异养生物(植食动物和人)利用的物质和能量^[26]。本研究利用美国航空航天局发布的 2000—2017 年 MOD17A2 8d 合成 NPP 产品,累加合成月和年 NPP 数据集。

1.2.3 蒸散(ET)

蒸散是生态系统向大气输送的水汽总通量,包括植物蒸腾和土壤植物表面的蒸发,其涉及植物生理学过程和空气动力学过程,决定着土壤-植被-大气耦合体的水分和热量传输,在水圈、大气圈和生物圈的水分循环和能量平衡中起着关键作用^[27]。本研究利用美国航空航天局发布的 2000—2017 年 MOD16A2 ET 产品,累加合成月和年 ET 数据集。

1.2.4 水分利用效率(WUE)

水分利用效率是反映生态系统碳水循环相互作用关系的重要指标,定义为植物消耗单位质量水分所固定的碳量(或干物质量)^[28],在遥感应用中,通常由净初级生产力除以蒸散获得区域大尺度水分利用效率^[6],即WUE=NPP/ET。本研究利用 MOD17A2 的 NPP 除以 MOD16A2 的 ET 来获取宁夏地区的生态系统 WUE。

1.2.5 生态系统分类数据

以中国寒区旱区科学数据中心发布的2010年1:10万土地利用数据为基准,参照中国科学生态环境研究中心的生态系统分类标准^[29],将研究区分为农田、草地、森林、水体及湿地、荒漠、聚落和其他类共7种不同的生态系统类型。

1.3 研究方法

1.3.1 线性回归趋势分析

为了定量研究宁夏地区陆地生态系统 WUE 的变化趋势,使用一元线性回归分析方法,利用 IDL 编程对 2000—2017 年陆地生态系统的 WUE 时间序列进行逐像元最小二乘法回归分析,并计算出回归斜率,最后采用 F 检验对拟合结果进行显著性检验,公式如下:

$$k = \frac{n \times \sum_{i=1}^{n} i \times WUE_{i} - \sum_{i=1}^{n} i \sum_{i=1}^{n} WUE_{i}}{n \times \sum_{i=1}^{n} i^{2} - (\sum_{i=1}^{n} i)^{2}}$$
(1)

式中,k为回归斜率;n为研究时间段长度;WUE_i为第*i*年的WUE 值;当 k>0 说明WUE 处于增加趋势,反 之则是减少趋势。结合WUE 变化趋势和F检验(P=0.05),可得到显著上升、上升(但不显著)、下降(但不显 著)、显著性下降4种变化趋势。

1.3.2 重标极差分析

重标极差分析(Rescaled range analysis, R/S)是英国水文学家 Hurst 提出的一种非线性时间序列分析方 法^[30]。本研究利用重新标度极差分析陆地生态系统 WUE 等指标的未来变化趋势特征,重新标度极差分析是 定量描述时间序列变量是否具有长期依赖性的有效方法,给定的时间序列变量 $\xi(t)$, $t=1,2,\dots,n$, 对于任意 时刻 $\tau \ge 1$,构建几种序列^[31]。

$$\langle \xi \rangle_{\tau} = \frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} \xi(t) \qquad \tau = 1, 2, \cdots$$
 (2)

$$X(t,\tau) = \sum_{u=1}^{\tau} \left(\xi(u) - \left\langle \xi \right\rangle_{\tau} \right) \qquad 1 \le t \le \tau$$
(3)

$$R(\tau) = X(t,\tau)_{\max} - X(t,\tau)_{\min} \qquad \tau = 1, 2, \cdots$$
(4)

$$S(\tau) = \left[\frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} \left(\xi(t) - \left\langle \xi \right\rangle_{\tau}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} \qquad \tau = 1, 2, \cdots$$
(5)

在计算出 $R(\tau)$ 和 $S(\tau)$ 后,定义 $R/S=R(\tau)/S(\tau)$,若 $R/S \propto \tau^{H}$,则说明分析的时间序列存在赫斯特现象, H 称为赫斯特指数(Hurst)。Hurst 指数的表征意义明确,当 0.5<H<1,表明时间序列变量具有持续性,未来的 变化趋势与过去一致;当 H=0.5,表明时间序列变量为随机序列;当 0<H<0.5,表明时间序列变量具有反持续 性,即未来变化趋势与过去相反^[32]。

2 结果与分析

2.1 WUE 的基本特征

2000—2017 年宁夏陆地生态系统的年均 WUE 空间分布如图 2 所示,全区年均 WUE 为 1.03 g·C/kg·H₂O, 但不同陆地生态系统的 WUE 差异较大,值域在 0.55—2.98 g·C/kg·H₂O 之间。从空间上来看,WUE 的高值 区主要分布于六盘山、贺兰山、罗山、南华山等山麓森林,银川平原、卫宁平原、清水河河谷等灌溉农业区也具 有高的 WUE;低值区则广泛分布于宁夏中部干旱带的荒漠草原、干草原等草地区域。总体来看,宁夏陆地生 态系统的 WUE 分布呈现较强的空间异质性,这与宁夏的生态地理格局及气候条件等有关,宁夏的岛状森林 分布虽少,但由于其生态系统生产力强,导致各山麓森林的 WUE 最高;引黄灌区的灌溉农业,由于人为管理 经营,其 WUE 也明显高于其他区域;而中部干旱带的草地生态系统,由于植被覆盖度低,生态系统生产力弱,

将宁夏 WUE 数据与宁夏生态系统分类数据进行 空间叠加分析,获取宁夏各生态系统的 WUE 特征。宁 夏7类生态系统 2000—2017 年的 WUE 平均值在 0.90—1.23 g·C/kg·H,0 之间(图 3),年际间存在较大 的波动(上下误差线为极大和极小值),其中水体及湿 地生态系统的 WUE 最高,达到了 1.23 g·C/kg·H,O,其 次是森林和农田生态系统,分别为1.13g·C/kg·H₂O和 1.07 g·C/kg·H₂O, 而其他生态系统的 WUE 最低。按照 生态系统分类所依据的土地利用类型,其他生态系统主 要由裸土地、裸岩及砾石地等组成,几乎无植被覆盖,该 生态系统的蒸散贡献主要为土壤蒸发,该类生态系统消 耗水分很难产生生物量,故造成其较低的 WUE,而绿色 植被覆盖较高的几类生态系统,其 WUE 均相对偏高。 宁夏7类生态系统类型中,草地和农田占比均超过了省 域面积的30%,是宁夏的主要生态系统类型,森林面积 虽然只占 6.56%,但该类型生态系统以绿色植被为主, 其稳定性维持和演替变化与 WUE 密切相关,因此,本 文将农田、草地和森林生态系统的土地利用二级亚类的 WUE 特征进行了研究(图 3)。

在农田生态系统中,WUE 由低到高依次是丘陵旱 地、平原旱地、水田和山区旱地,而宁夏这4类农田的生 物量和盖度也依次由低到高,其中山区旱地为六盘山阴



图 2 宁夏 2000—2017 年年均 WUE 空间分布 Fig 2 Spatial characteristics of annual WUE from 2000 to 2017 in Ningxia

湿高海拔地区分布的部分农田,主要种植玉米等高生物量的作物。在草地生态系统中,各生态系统亚类的 WUE 由低到高依次是低覆盖度草地、中覆盖度草地和高覆盖度草地,而这三种生态系统亚类的植被盖度也依 次由低到高。在森林生态系统中,WUE 由低到高依次是其他林地、灌木林、疏林地和有林地,其中的其他林地 指未成林造林地、迹地和苗圃等,生物量和盖度最低,有林地指郁闭度>30%的天然林和人工林,生物量和盖度 最高。通过对比以上3种生态系统各二级亚类的WUE 与对应类型的生物量、盖度特征可以得出,在同类生态 系统中,植被生物量和盖度越高的二级亚类,其 WUE 也越高。

2.3 WUE 时间变化特征

宁夏陆地生态系统的年内 WUE 呈典型的单峰形态(图4),反映了植被年内生长的过程信息,其中每年的 11 月到次年的 3 月植被基本处于休眠状态,这段时间的 WUE 均低于 0.50 g·C/kg·H₂O,WUE 在 1 月份最低, 只有 0.02 g·C/kg·H₂O。而从 4 月份开始,宁夏陆地生态系统的 WUE 开始迅速增加,并在 5 月份达到 2.16 g·C/kg·H₂O,为年内最大值,这一时间是宁夏自然植被生长复苏和农作物开始播种生长的时期,也是整 个陆地生态系统生物量急剧增加的时期,不管是自然植被还是人工作物均能高效利用水分,快速进行光合并 积累生物量。待进入 6 月以后,自然植被已完全复苏,农作物也完成拔节的生物量积累过程,整个陆地生态系统的 WUE 开始缓缓下降。从 10 月份开始,WUE 下降加速,自然植被逐渐进入冬季休眠期,农作物完成收获。 从以上 WUE 的年内变化特征可以得出,对于宁夏区域来说,4—5 月份的水分供应不足,如气象干旱或春灌不 足,会导致整个陆地生态系统生物量的累积减弱,导致植被复苏乏力,农业生产受影响,俗称为"卡脖子旱"。而一旦进入 6 月以后,陆地生态系统完成生物量累积,生态系统生物量对干旱水分胁迫的响应则逐渐减弱。



图 3 宁夏不同生态系统的 WUE 特征

Fig.3 Characteristics of WUE in different ecosystems of Ningxia

WUE:水分利用效率 Water use efficienc; FLE:农田生态系统 farmland ecosystem; GE:草地生态系统 grassland ecosystem; FOE:森林生态系统 forest ecosystem; WWE:水体与湿地生态系统 water and wetland ecosystem; HSE:聚落生态系统 human settlement ecosystem; DE:荒漠生态系统 desert ecosystem; OE:其他生态系统 other ecosystem; I-1:丘陵旱地, I-2:平原旱地, I-3:水田, I-4:山区旱地, II-1:低覆盖度, II-2:中覆盖度, II-3:高覆盖度, III-1:其他林地, III-2:灌木林, III-3:疏林地 GLE, III-4:有林地

从 2000—2017 年 WUE 的年际变化特征来看,近十几年宁夏陆地生态系统的 WUE 存在着 0.0141 g·C/kg·H₂O a 的下降趋势(图 4), WUE 由 2000 年的 1.21 g·C/kg·H₂O 降低到 2017 年的 0.85 g·C/kg·H₂O,降幅达 近 30%。





2.4 WUE 的空间变化特征

农田生态系统 WUE 的高值区分布与沿灌区分布的平原旱地,南部山区分布的山地旱地其水分利用效率 也较高,而大部分丘陵旱地其水分利用效率值较低,尤其是宁夏中部地区的丘陵旱地。在草地生态系统中,贺 兰山北麓以及沿六盘山麓分布的高覆盖度和中覆盖度草地水分利用效率较高,宁夏中部罗山国家级自然保护 区、西南部的南华山自然保护区以及火石寨自然保护区的中覆盖度草地也有着较高的 WUE 值,而宁夏中部 的低覆盖度草原水分利用效率普遍偏低,但南部的低覆盖度草原却有着较高的水分利用效率。对于森林生态 系统而言,水分利用效率的高值分布在北部贺兰山、中部的罗山以及南部的六盘山分布的疏林地和有林地,而 宁夏中部的灌木林和其他林地水分利用效率并不高(图5)。

线性趋势的显著性检验结果为,宁夏陆地生态系统 91.28%的区域出现下降趋势(图 5),达到显著性下降的占宁夏陆地生态系统总面积的 47.24%,主要分布于宁夏的北部和南部,以及中部的灌溉区。而上升的区域占全区植被总面积的 8.73%,主要分布于六盘山西麓、大罗山以及灵武市的西部区域,还有银川、永宁、中卫这三个市的部分区域 WUE 呈现显著上升趋势。未来趋势检验结果表明,未来将有 66.49% 的区域其 WUE 将持续下降,分布于宁夏植被区域的西北部和西南部;有 24.78% 的区域未来会发生逆转,即呈现下降转上升的趋势,主要分布于宁夏的东部区域(图 5)。



图 5 宁夏陆地生态系统 WUE 的变化趋势、显著性、Hurst 指数及持续性特征 Fig.5 Linear trend, significance test, Hurst index and sustainability map of WUE in terrestrial ecosystem of Ningxia

2.5 WUE 的影响因子分析

2.5.1 年际 ET 与 NPP 波动对 WUE 的影响

影响 WUE 变化的因子很多,蒸散量、植被生产力以及气候因子等都会对生态系统的 WUE 产生影响。由 宁夏陆地生态系统 WUE 多年均值与年 ET、NPP 的散点图(图 6)可知,WUE 与年 ET 的相关系数 R 为-0.73 (P<0.01),而与 NPP 的相关系数 R 值仅为-0.33(P=0.18)(图 6),这表明宁夏陆地生态系统 WUE 与年蒸散 ET 有极显著负相关性,而与 NPP 没有相关性。由此可知,在年际尺度上,宁夏地区陆地生态系统的 WUE 波 动主要由该区域的蒸散波动决定。

宁夏从 2000 年以来的大面积退耕还林还草生态治理工程和扬黄灌溉开发是造成区域陆地生态系统 WUE 发生变化的主要原因,这些人为工程增加了区域生态系统的生产力,导致了一些生态系统发生类型转 换,同时也增加了区域生态系统的耗水量。结合同期的 ET 和 NPP 变化趋势分析可得出,宁夏近十几年来陆 地生态系统的年均 ET 和 NPP 均在升高,增速分别为 8.42 kg·H₂O/m²·a 和 5.74 g·C/m²·a,即生态系统水汽交 换和碳交换都在增强(图 7),但 ET 增长速率要高于 NPP 的增长速率,从而导致整个陆地生态系统消耗水分 生产干物质量的整体效率降低,即生态系统的 WUE 在逐渐降低(图 4)。





Fig.6 Correlationship between annual WUE and ET, NPP in terrestrial ecosystem of Ningxia



图 7 宁夏陆地生态系统 ET 及 NPP 的年际变化趋势

Fig.7 Trend of annual average ET and NPP from 2000 to 2017 in terrestrial ecosystem of Ningxia

2.5.2 年内 ET 与 NPP 变化对 WUE 的影响

从宁夏陆地生态系统的月 WUE 与同月份 ET、NPP 的散点图可看出,在年内的月时间尺度上,WUE 变化 与 ET 呈显著正相关(图 8),与 NPP 呈极显著正相关(图 8),即年内 WUE 会随着 ET 和 NPP 的增强而升高, 这与年际尺度上 ET、NPP 波动对 WUE 的影响不同,导致这一结果的原因与植被的年内季节性生长过程有 关。宁夏地处我国西北东部,为典型的大陆性气候,四季分明,农田、草地和森林等生态系统的植被生长具有 明显的季节性特征,陆地生态系统的生物量积累和水分耗散过程也具有明显的季节特征(图9)。每年的11 月到次年的3月植被基本处于休眠状态,这段期间陆地生态系统的 NPP 处于最低状态,平均每月为2.13 g·C/m²;这几个月的 ET 虽为年内较低水平,但由于土壤存在微弱蒸发,故有 11.88 kg·H₂O/m²的月平均蒸散 量。从4月份开始,植被开始复苏,陆地生态系统的 NPP 开始迅速增加,虽然 ET 也开始增加,但不及植被生 产力的增速,故导致生态系统 WUE 在年内出现随生长季变化的单峰形态(图 4)。





2.5.3 宁夏陆地生态系统 WUE 分区

由于在年际尺度上,决定 WUE 的主要影响因素为 ET,为了分析 ET 与 WUE 的空间分布关系,根据 ARCGIS 的自然断点分类法原则,将 ET 值在 30—244 kg·H, O/m²·a 之间的区域分为 ET 低值区, 244—665 kg ·H₂O/m²·a 之间列为 ET 高值区,将 WUE 在 0.50—1.05 之间的分为 WUE 低值区,1.05—2.98 g·C/kg·H₂O 之 间的分为 WUE 高值区。通过叠加分析 ET 与 WUE 的空间关系,将宁夏陆地生态系统蒸散及水分利用效率特 征分为4类(图10)。在宁夏中部干旱带主要为低ET低WUE区,这一区域主要以不同盖度的草地生态系统 为主,均为生产力较弱的生态系统,蒸散中有较多的水分通过土壤蒸发消耗,故水分利用效率较低。南部山区 大部分区域以及引黄灌区、清水河扬黄灌区为高 ET 高 WUE 区域,这些区域植被以灌溉农田、成林林地和典

9076





型长芒草草原为主,陆地生态系统的生产力强,生态系统主要通过植被蒸腾耗散水分,故水分利用效率较高。 北部贺兰山地区、引黄灌区周边等主要为低 ET 高 WUE 区;而南部西吉、海原等丘陵旱地则表现为高 ET 低 WUE 区。

3 讨论

遥感尺度上,影响陆地生态系统 WUE 的因子主要 为蒸散及植被生产力,本文利用 NPP 与 ET 估算不同生 态系统的 WUE 值,其中,草地生态系统和林地生态系 统的多年均值分别为 0.99g·C/kg·H₂0 与 1.13 g·C/kg ·H₂O.这与学者 Ito 和 Inatomi^[12]在研究全球陆地生物圈 中利用模型估算的草地以及温带森林的 WUE 值相近, 但在农田以及荒漠等其他生态系统的值有差异。在宁 夏陆地生态系统中,WUE 数值排序为:森林生态系统> 农田生态系统>草地生态系统,这与 Lu 等^[33]采用美国 通量网的数据及遥感数据模拟的结果一致。另外,邹杰 等[16]发现中亚及新疆的生态系统水分利用效率在近15 年中呈缓慢增长趋势,而本文得出宁夏地区年际尺度的 WUE 却在缓慢递减,这是由于该区域植被 ET 增加迅速 造成。生态系统 WUE 还会受到气候变化和 LUCC 的影 响^[34-35],对于 WUE 逐年增加这样的结果,另一个原因 是由于宁夏近18年的土地类型变化迅速,退耕还林造 成大量的耕地转变林地,退耕还草将大量耕地转变成草 地,扬黄农业开发又将大量荒漠草原垦殖为农田,这种



Fig.10 Mode and classification of WUE in terrestrial ecosystem

of Ningxia

植被类型间的转换造成生态系统生物生产耗水增加,从而对 WUE 造成影响。在对植被生产力的计算中,国 内学者李辉东^[14]在对科尔沁草甸生态系统的研究中利用 GPP 估算 WUE,结果表明在年内 WUE 变化中,4 月 末随着植被生长迅速增大,在6月末出现最大值,这与本次利用 NPP 估算的 WUE 在年内变化基本相似。另 外,本研究采用宏观的遥感数据估算 WUE,与站点计算的 WUE 在尺度上存在差异,由于遥感产品在估算 ET 和 NPP 时会存在不可避免的噪声信息,这会造成了 WUE 值估算的误差,未来研究应首先用模型算法对 ET 和 NPP 产品像元精度分析,重建更高精度的区域尺度 WUE 数据。

4 结论

利用 MODIS 遥感数据估算宁夏陆地生态系统的水分利用效率,定量研究了宁夏 2000—2017 年 WUE 时 空的特征及主要影响因素,得出以下几点结论:(1)全区陆地生态系统的年均 WUE 为 1.03 g·C/kg·H₂O,值域 在 0.55—2.98 g·C/kg·H₂O 之间,WUE 分布呈现较强的空间异质性。(2)宁夏 7 类生态系统的 WUE 在0.90—1.23 g·C/kg·H₂O 之间,在同类生态系统中,植被生物量和盖度越高的二级亚类,其 WUE 也越高。(3)宁夏陆地生态系统 WUE 年内呈典型的单峰形态,年际间存在着 0.0141 g·C/kg·H₂O·a 的下降趋势。(4)在年际尺 度上,宁夏地区陆地生态系统的 WUE 波动主要由该区域的 ET 波动决定,在年内尺度上,WUE 变化与 ET 和 NPP 均呈正相关关系,根据 ET 强弱和 WUE 高低,可将宁夏陆地生态系统 WUE 特征分为 4 种类型,即低 ET 低 WUE 区、低 ET 高 WUE 区、高 ET 低 WUE 区和高 ET 高 WUE 区。

总体来看,宁夏实施的大量生态治理工程极大地增加了区域地表植被盖度,增强了陆地生态系统的生产力^[36],改善了区域生态状况。然而人为植被恢复干扰和气候变化的双重扰动,也导致了陆地生态系统水分消耗的增强^[27],进而致使陆地生态系统的整体水分利用效率降低,即宁夏陆地生态系统未来将进入水分利用效率较低的高耗水期,这对调整区域水资源利用格局和生态重建政策至关重要。

参考文献(References):

- [1] Gang C C, Wang Z Q, Chen Y Z, Yang Y, Li J L, Cheng J M, Qi J G, Odeh I. Drought-induced dynamics of carbon and water use efficiency of global grasslands from 2000 to 2011. Ecological Indicators, 2016, 67: 788-797.
- [2] 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.
- [3] Chapin III F S, Carpenter S R, Kofinas G P, Folke C, Abel N, Clark W C, Olsson P, Smith D M S, Walker B, Young O R, Berkes F, Biggs R, Grove J M, Naylor R L, Pinkerton E, Steffen W, Swanson F J. Ecosystem stewardship: sustainability strategies for a rapidly changing planet. Trends in Ecology & Evolution, 2010, 25(4): 241-249.
- [4] Sun Q, Wang Y S, Geng C, Yang H, Du T S. Water use efficiency was improved at leaf and yield levels of tomato plants by continuous irrigation using semipermeable membrane. Agricultural Water Management, 2018, 203: 430-437.
- [5] 胡化广, 张振铭, 吴生才, 季芳芳. 植物水分利用效率及其机理研究进展. 节水灌溉, 2013, (3): 11-15.
- [6] Tian H Q, 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.
- [7] 于文颖,纪瑞鹏,冯锐,赵先丽,张玉书.不同生育期玉米叶片光合特性及水分利用效率对水分胁迫的响应.生态学报,2015,35(9): 2902-2909.
- [8] 赵亚丽,薛志伟,郭海斌,穆心愿,李潮海.耕作方式与秸秆还田对冬小麦-夏玉米耗水特性和水分利用效率的影响.中国农业科学, 2014,47(17):3359-3371.
- [9] Mu Q Z, Zhao M S, Running S W. Evolution of hydrological and carbon cycles under a changing climate. Hydrological Processes, 2011, 25(26): 4093-4102.
- [10] Klein T, Shpringer I, Fikler B, Elbaz G, Cohen S, Yakir D. Relationships between stomatal regulation, water-use, and water-use efficiency of two coexisting key Mediterranean tree species. Forest Ecology and Management, 2013, 302(8): 34-42.
- [11] Huang G, Li Y, Mu X H, Zhao H M, Cao Y F. Water-use efficiency in response to simulated increasing precipitation in a temperate desert ecosystem of Xinjiang, China. Journal of Arid Land, 2017, 9(6): 823-836.
- [12] Ito A, Inatomi M. Water-use efficiency of the terrestrial biosphere: a model analysis focusing on interactions between the global carbon and water cycles. Journal of Hydrometeorology, 2012, 13(2): 681-694.
- [13] 卢玲, 李新, 黄春林, Veroustraete F. 中国西部植被水分利用效率的时空特征分析. 冰川冻土, 2007, 29(5): 777-784.
- [14] 李辉东,关德新,袁凤辉,王安志,金昌杰,吴家兵,李峥,井艳丽.科尔沁草甸生态系统水分利用效率及影响因素.生态学报,2015,35 (2):478-488.
- [15] 位贺杰,张艳芳,董孝斌,鲁纳川,王雪超. 渭河流域植被 WUE 遥感估算及其时空特征. 自然资源学报, 2016, 31(8): 1275-1288.
- [16] 邹杰, 丁建丽, 杨胜天. 近 15 年中亚及新疆生态系统水分利用效率时空变化分析. 地理研究, 2017, 36(9): 1742-1754.

- [17] 李明旭,杨延征,朱求安,陈槐,彭长辉.气候变化背景下秦岭地区陆地生态系统水分利用率变化趋势.生态学报,2016,36(4): 936-945.
- [18] 王耀宗, 张颖, 柳辉, 常庆瑞. 宁夏"十一五"期间土地利用/覆盖变化及生态效应分析. 宁夏大学学报: 自然科学版, 2013, 34(1): 84-87.
- [19] 谷长磊,刘琳,邱扬,王军,栗妍,魏玮.黄土丘陵区生态退耕对草本层植物多样性的影响.水土保持研究,2013,20(5):99-103.
- [20] 侯贤清,牛有文,吴文利,徐金鹏,时龙,唐少颖,马旭,李荣.不同降雨年型下种植密度对旱作马铃薯生长、水分利用效率及产量的影响.作物学报,2018,44(10):1560-1569.
- [21] 焦炳忠,任秋实,郭媛姣,王力,孙兆军.不同灌溉定额对膜侧玉米生长及水分利用效率的影响.中国农村水利水电,2018,(5):18-22.
- [22] Mu Q Z, Heinsch F A, Zhao M S, Running S W. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data. Remote Sensing of Environment, 2007, 111(4): 519-536.
- [23] 郎勇设,柳辉,黄志刚.宁夏生态功能区划研究.宁夏大学学报:自然科学版,2009,30(1):85-90.
- [24] 杜灵通, 刘可, 胡悦, 朱玉果, 宫菲. 宁夏不同生态功能区 2000—2010 年生态干旱特征及驱动分析. 自然灾害学报, 2017, 26(5): 149-156.
- [25] Field C B, Behrenfeld M J, Randerson J T, Falkowski P. Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components. Science, 1998, 281(5374): 237-240.
- [26] 方精云, 柯金虎, 唐志尧, 陈安平. 生物生产力的"4P"概念、估算及其相互关系. 植物生态学报, 2001, 25(4): 414-419.
- [27] 刘可, 杜灵通, 候静, 胡悦, 朱玉果, 宫菲. 2000-2014 年宁夏草地蒸散时空特征及演变规律. 草业学报, 2018, 27(3): 1-12.
- [28] 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.
- [29] 欧阳志云,张路,吴炳方,李晓松,徐卫华,肖燚,郑华.基于遥感技术的全国生态系统分类体系.生态学报,2015,35(2):219-226.
- [30] 王新明,王长耀,牛铮.应用 R/S 方法分析 NDVI 时间序列. 地理与地理信息科学, 2005, 21(5): 20-23, 48-48.
- [31] 张翀,任志远.黄土高原地区植被覆盖变化的时空差异及未来趋势.资源科学,2011,33(11):2143-2149.
- [32] 刘宪锋,任志远,林志慧,刘焱序,张东海. 2000-2011 年三江源区植被覆盖时空变化特征. 地理学报, 2013, 68(7): 897-908.
- [33] Lu X L, Zhuang Q L. Evaluating evapotranspiration and water-use efficiency of terrestrial ecosystems in the conterminous United States using MODIS and AmeriFlux data. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(9); 1924-1939.
- [34] Tian H Q, Lu C Q, Chen G S, Xu X F, Liu M L, Ren W, Tao B, Ge S, Pan S F, Liu J Y. Climate and land use controls over terrestrial water use efficiency in monsoon Asia. Ecohydrology, 2011, 4(2): 322-340.
- [35] 杜晓铮,赵祥,王昊宇,何斌.陆地生态系统水分利用效率对气候变化的响应研究进展.生态学报,2018,38(23):8296-8305.
- [36] 朱玉果, 杜灵通, 谢应忠, 刘可, 宫菲, 丹杨, 王乐, 郑琪琪. 2000—2015 年宁夏草地净初级生产力时空特征及其气候响应. 生态学报, 2019, 39(2): 518-529.