

中国北方植被水分利用效率的时间变化特征及其影响因子

冯朝阳 王鹤松* 孙建新

北京林业大学林学院, 北京 100083

摘要 水分利用效率(*WUE*)既是衡量植被生长适应性的重要指标,也是连接生态系统水碳循环的纽带。认识不同类型植被*WUE*的时间变化特征及驱动机制有助于增进对生态系统水碳循环过程的理解。已有研究表明,在不同时间尺度下,*WUE*呈现不同的时间变化特征,但现有研究多是集中在单一的时间尺度下开展的,对不同植被类型在不同时间尺度下的动态变化及影响因子分析开展得较少。该研究选用中国北方地区9个定位观测台站的通量与气象数据,分析了*WUE*的日内变化和季节变化特征,并在0.5 h、1 d、8 d以及月尺度下,分别分析了气温(T_a)、相对湿度(*RH*)、饱和水汽压差(*VPD*)以及光合有效辐射(*PAR*)等非生物因子对*WUE*的影响。同时,该研究也分析了植被叶面积指数(*LAI*)和降水(*P*)对*WUE*的影响。研究发现:(1) *WUE*的日变化呈现不对称的“U”型特征,日出时的*WUE*普遍高于日落时。荒漠地区*WUE*的季节变化呈“U”型,而其他站点呈现单峰型。不同站点*WUE*的季节变化可以分为总初级生产力(*GPP*)主导型和蒸散发(*ET*)主导型,并随着时间尺度的扩大,*GPP*或*ET*的主导作用逐渐增强。(2)在较短的时间尺度(0.5 h、1 d)上, T_a 、*RH*、*VPD*和*PAR*是影响*WUE*变化的主要因子,但随着时间尺度的扩大, T_a 和*RH*成为影响*WUE*变化的主要因子,并且与*WUE*的相关关系受*GPP*或*ET*对*WUE*主导作用的影响,随着时间尺度增大, T_a 和*RH*与*WUE*的线性关系更加显著。(3) *WUE*大体上随*LAI*的增加而增加,但当*LAI*超过一定值时,在长白山、海北和张掖站,*WUE*对*LAI*的敏感性降低。降水与*WUE*的关系在研究区域内并不显著。(4)不同植被类型的*WUE*由大到小依次为森林、农田、草地、湿地和荒漠。

关键词 水分利用效率; 通量观测; 总初级生产力; 蒸散发; 气象因子

冯朝阳, 王鹤松, 孙建新 (2018). 中国北方植被水分利用效率的时间变化特征及其影响因子. 植物生态学报, 42, 453–465. DOI: 10.17521/cjpe.2017.0214

Temporal changes of vegetation water use efficiency and its influencing factors in Northern China

FENG Chao-Yang, WANG He-Song*, and SUN Osbert Jianxin

College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract

Aims Water use efficiency (*WUE*) is an important variable for evaluating the growth adaptation of vegetation; it links carbon and water cycles of terrestrial ecosystems. Characterizing the spatial and temporal variations in *WUE* and the driving factors not only can help understand the processes and regulations of ecosystem carbon and water cycles, but also provides scientific basis for formulating sustainable regional development policies and guiding water resources management. This study was conducted to determine the patterns of temporal changes for different vegetation types in northern China.

Methods Flux and meteorological data of nine field observation sites in northern China were used to analyze the changes of *WUE* under different temporal scales, including half-hourly, daily, 8-day intervals, and monthly. The effects of temperature (T_a), relative humidity (*RH*), vapor pressure deficit (*VPD*) and photosynthetically active radiation (*PAR*) on *WUE* under different time scales were also examined.

Important findings (1) Diurnal change of *WUE* displayed an asymmetric “U” shape, with greater values at the sunrise than at the sunset. The seasonality of *WUE* in the Gobi and desert areas displayed a pattern of “U” shape, while it occurred as a single peak in other regions. The seasonal changes of *WUE* can be further divided into the

收稿日期Received: 2017-08-10 接受日期Accepted: 2018-03-15

基金项目: 国家林业公益性行业科研专项(201404201)、国家重点基础研究发展计划(973计划)(2014CB954204)和中央高校基本科研业务费专项(BLX2015-16)。Supported by the Program of Forestry Research for the Public Benefits of Ministry of Finance of China (201404201), the National Basic Research Program of China (2014CB954204), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (BLX2015-16).

* 通信作者Corresponding author (wanghs119@126.com)

types of gross primary production (*GPP*)-driven and the evapotranspiration (*ET*)-driven; the significance of either driven type increases with time. (2) T_a , *RH*, *VPD* and *PAR* were the main factors influencing the changes of *WUE* on a shorter temporal scale (half-hourly and daily). With increasing temporal scale, T_a and *RH* continue to remain the main factors affecting the changes of *WUE*, and their correlations with *WUE* were influenced by the prevailing role of *GPP* or *ET*. Moreover, the correlation coefficients became more significant with increasing temporal scales. (3) *WUE* increased with increases in leaf area index (*LAI*) until a certain value, beyond which the sensitivity of *WUE* to *LAI* decreased at the Changbai Mountain, Haibei and Zhangye stations. The relationship between precipitation and *WUE* was not significant in all the study areas. (4) Among the vegetation types, *WUE* ranked in order from high to low as forest, cropland, grassland, wetland and desert.

Key words water use efficiency; flux measurement; gross primary production; evapotranspiration; meteorological factor

Feng CY, Wang HS, Sun OJ (2018). Temporal changes of vegetation water use efficiency and its influencing factors in Northern China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 42, 453–465. DOI: 10.17521/cjpe.2017.0214

植物的水分利用效率(*WUE*)是其生理活动过程中消耗水形成有机物质的基本效率,是确定植物体生长发育所需最优水分供应的重要指标(Bohn & Kershner, 2002),它也在一定程度上反映了植物的耗水性和干旱适应性(Munns, 2005)。植物的光合作用和蒸腾作用是生态系统能量流动和物质循环的两个基本生理生态学过程,*WUE*是二者联系的重要纽带(于贵瑞等, 2006)。高的*WUE*既是植物应对水分亏缺的一种调控机制(孙学凯等, 2008),也是植物适应干旱环境的一种重要生理指标(Jaleel *et al.*, 2008)。研究*WUE*的时间变化特征及其与外界驱动因子之间的关系不仅有助于增进对生态系统水碳循环过程与驱动机制的理解(Wang *et al.*, 2016),而且对模拟和评估生态系统对未来气候变化的响应具有重要意义(Guo *et al.*, 2010)。中国北方大部分地区属于干旱半干旱气候,随着经济发展、粮食需求增加以及城市化的加剧,该地区水分供需间的矛盾日益突出,使水资源问题成为制约区域发展的主要因素(李新周等, 2004; 黄荣辉等, 2013)。为使区域发展更好地应对气候变化的挑战,政府部门在制定水资源管理政策时需要相应的科学依据。

目前常用的*WUE*观测方法主要有腔室气体交换法、同位素法以及涡度相关法。腔室气体交换法通过测定密闭空间内单叶 CO_2 和 H_2O 的瞬时交换量来计算,主要用于叶片尺度研究(Farquhar & Sharkey, 1982)。这种方法操作简单、方便快捷,但由于其测得的叶片尺度瞬时值与长期植株总体值的关系尚不确定,不能很好地进行尺度扩展与分析(王庆伟等, 2010)。同位素法利用稳定同位素(如 $\delta^{13}\text{C}$)分析植被在一定时间内总体*WUE*,不适用于短时间尺度

下的动态研究与相关性分析(陈世莘等, 2002)。涡度相关法可在高时间分辨率下观测生态系统冠层尺度的 CO_2 和 H_2O 交换量,进而可实现*WUE*的连续观测,这为研究*WUE*的时间动态过程及其在不同时间尺度下对环境变化的响应提供了一个有效的观测手段(Law *et al.*, 2002)。目前基于涡度相关法,已经开展了大量关于*WUE*的研究工作,如Hu等(2008)在中国北方和青藏高原对比分析了4个草地生态系统的*WUE*; Yu等(2008)对中国东部3个不同气候带森林生态系统的*WUE*进行了比较和影响因子分析;此外也有在更大区域范围内对不同生态类型*WUE*的时间动态和影响因子进行对比分析的工作(Beer *et al.*, 2009; Zhang *et al.*, 2014; 李辉东等, 2015; Wang *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2017)。但上述研究大多是集中在单一时间尺度下开展的。已有研究发现,在不同时间尺度下*WUE*呈现不同的时间变化特征(Song *et al.*, 2017),控制生态系统*WUE*的主导因子也会随着时间尺度的变化而变化。比如多数研究发现饱和水汽压差(*VPD*)与*WUE*呈负相关关系,但这种关系多局限于短时间尺度的研究(Ponton *et al.*, 2006; 胡中民等, 2009),也有研究发现随着时间尺度的扩大,*VPD*与*WUE*并无明显关系(Liu *et al.*, 2017; Song *et al.*, 2017)。那么,在不同时间尺度下的不同植被类型中,影响*WUE*的主要因子是保持同步性变化,还是因植被类型的不同而表现出差异性?

综上所述,本研究选择了代表中国北方地区不同植被类型的9个通量台站数据,分析了*WUE*在不同时间尺度下的时间变化特征,并结合气象与遥感资料分别研究了温度(T_a)、相对湿度(*RH*)、水汽压亏缺(*VPD*),光合有效辐射(*PAR*)和降水量(*P*)等非生

物因素以及生物因素叶面积指数(LAI)在不同时间尺度上对WUE的影响。研究主要开展了以下几方面工作: 1)分析WUE的日内变化动态与季节变化动态; 2)分析不同时间尺度下, 影响WUE的生物与非生物因子; 3)比较不同植被类型WUE的大小。

1 材料和方法

1.1 研究站点

本研究选取的数据来自中国通量观测研究联盟(ChinaFLUX, <http://www.chinaflux.org/>)和寒区旱区科学数据中心(WestDC, <http://westdc.westgis.ac.cn/>)。具体包括ChinaFLUX中的长白山、海北和内蒙古3个台站以及WestDC中的大兴、密云、大满、张掖、巴吉滩和花寨子6个台站的数据(图1; 表1)。这些站点都通过涡度相关法进行水碳通量观测, 主要仪器包括: CSAT3超声风速仪(Campbell Scientific, Logan, USA), LI7500红外气体分析仪(LI-COR, Lincoln, USA)以及自动气象观测站(Xu *et al.*, 2013; Liu *et al.*, 2016)。它们分布在北京、内蒙古、吉林、甘肃和青海等省市自治区, 代表了不同水分梯度, 涵盖了包括森林、农田、草原、湿地、荒漠在内的不同的生态系统类型。

1.2 数据处理与分析方法

通量数据通过涡动相关系统和自动气象站进行同步观测与采集, 其中涡动相关观测的采集频率为10 Hz, 气象数据为每10 min一次。各站点对涡动原始数据的处理主要包括: 野点剔除、延迟时间校正、坐标旋转、频率响应修正、超声虚温修正以及密度(WPL订正)修正。同时, 我们对各通量值进行了质

量评价, 包括大气平稳性和湍流相似性特征的检验。并对输出的30 min通量数据进行了筛选: (1)剔除仪器故障时的观测数据; (2)剔除降水前后1 h的观测数据; (3)剔除原始10 Hz数据中, 每30 min内缺失率大于3%的数据; (4)剔除夜间弱湍流观测数据; (5)对缺失时间较短的数据进行非线性拟合, 对缺失时间较长的数据则直接舍弃。观测数据经上述处理后, 通量数据与气象数据统一输出为30 min时间间隔, 详细的数据处理步骤见Xu等(2013)和Liu等(2016)。叶面积指数(LAI)的空间分辨率为500 m, 时间分辨率为8 d, 来源于MODIS陆地产品的第6版数据集(MOD15A2H, <https://modis.ornl.gov/cgi-bin/MODIS/global/subset.pl>)。

本文中WUE ($\text{g C} \cdot \text{kg}^{-1} \text{H}_2\text{O}$)的计算采用以下公式(Liu *et al.*, 2017):

$$WUE = GPP/ET \quad (1)$$

式中蒸发散(ET)是由涡度观测中的潜热通量LE

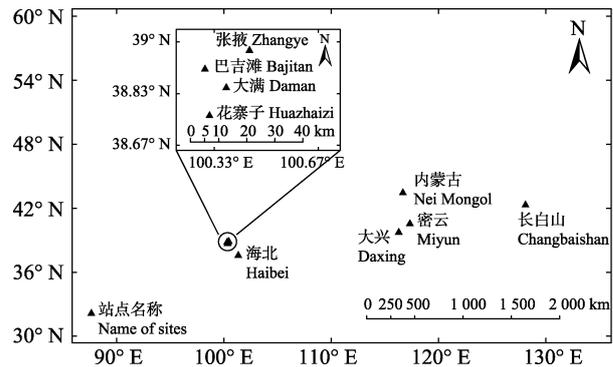


图1 各通量站点的空间分布图。
Fig. 1 Geographical location of the flux sites.

表1 各站点基础地理与植被信息

Table 1 Information on geography and vegetation of the study sites

站点 Site	纬度 Latitude (°N)	经度 Longitude (°E)	数据时期 Data period	年降水量 Mean annual precipitation (mm)	年平均气温 Mean annual Temperature (°C)	海拔 Altitude (m)	仪器高度 Height of Instrument (m)	植被类型 Vegetation type
长白山 Changbaishan	42.40	128.09	2003–2005	695	3.6	738	40.0	针阔混交林 Evergreen broad-leaved forest
密云 Miyun	40.63	117.32	2008–2009	615	10.9	350	26.6	玉米、果树 Maize, fruit tree
内蒙古 Nei Mongol	43.54	116.67	2004–2005	350	-0.4	1 252	4.0	温带草原 Temperate steppe
大兴 Daxing	39.62	116.43	2009–2010	590	11.6	20	3.0	玉米/小麦 Maize/wheat
海北 Haibei	37.67	101.33	2003–2005	560	-1.6	3 358	2.2	灌丛 Shrubland
大满 Daman	38.86	100.37	2013–2014	122	7.3	1 556	4.5	玉米 Maize
花寨子 Huazhaizi	38.77	100.32	2013–2014	130	7.3	1 731	2.9	荒漠 Desert
张掖 Zhangye	38.98	100.30	2013–2014	130	6.0	1 460	5.2	湿地 Wetland
巴吉滩 Bajitan	38.92	100.30	2013–2014	130	7.3	1 562	4.6	荒漠 Desert

($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)换算得到的(Tang *et al.*, 2015):

$$ET = LE/\lambda \quad (2)$$

其中 λ 为蒸发潜热, 单位是 $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$, 表示为:

$$\lambda = (2500 - 2.4T_a) \times 10^3 \quad (3)$$

式中 T_a 是空气温度, 单位是 $^{\circ}\text{C}$ 。而式中的总初级生产力(GPP)是由公式

$$GPP = NEP + R_e = -NEE + R_e \quad (4)$$

得到的(Yu *et al.*, 2008), R_e 表示白天生态系统的呼吸, NEE 表示白天生态系统 CO_2 净交换量, 可以经观测直接得到。根据夜间生态系统呼吸与土壤温度的关系可以推算得到生态系统白天的呼吸值(Reichstein *et al.*, 2007)。

从国家气象科学数据共享服务平台(<http://data.cma.cn/>)选择了临近通量台站的基准气象站, 得到了长白山、内蒙古、海北三个ChinaFLUX台站逐日尺度的 RH 数据。同时, 选取 T_a 、 RH 、 VPD 和 PAR 来分析其在不同时间尺度下与 WUE 的相关性。目前ChinaFLUX中未提供0.5 h土壤温度的数据, 故不能使用夜间土壤温度与夜间生态呼吸的关系推算出0.5 h尺度的 GPP 。因此本文对长白山、内蒙古、海北3个站分别在1 d、8 d、月时间尺度下对气象因子与 WUE 的关系进行分析, 而对其他6个站点分别进行了以0.5 h、1 d、8 d和1月为时间尺度的分析。在不同时间尺度的计算中, 均采用该时间尺度内的平均值。

降水对生态系统 WUE 的影响有一定的延迟性, 同时 LAI 也不会在这段时间内剧烈变化, 故单独进行降水量(P)和 LAI 与 WUE 关系的分析。在各因子对 WUE 的影响的分析中, 我们采用了Pearson系数来分析各因子与 WUE 的相关性, 公式(Zhang *et al.*, 2015)为:

$$R = \frac{\Sigma(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\Sigma(x - \bar{x})^2 \Sigma(y - \bar{y})^2}} \quad (5)$$

R 表示皮尔逊相关系数; x 表示自变量, 这里指代影响 WUE 的各因子; y 表示因变量, 这里指代 WUE 。数据的作图在Origin 8.0中完成。

基于SPSS 19.0软件, 分别在0.5 h、1 d、8 d和1月的时间尺度对 T_a 、 RH 、 VPD 、 PAR 与 WUE 进行了逐步回归分析(杜家菊和陈志伟, 2010)。

2 结果

2.1 各个站点 WUE 的日内变化与季节变化特征

WUE 的日内变化大致呈现不对称的“U”型曲线

(图2), 表现为先下降后缓慢回升的趋势, 2个峰值分别出现在早晨和傍晚, 最高值大多出现在早晨。同时, 通过对比发现每个站点 WUE 的最低值及其出现的时间都有所不同, 各个站点 WUE 的最低值、最低值及出现的时间分别为: 巴吉滩 $0.74 \text{ g C}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$, 12:00; 大满 $1.95 \text{ g C}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$, 15:30; 大兴 $2.05 \text{ g C}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$, 14:30; 花寨子 $0.64 \text{ g C}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$, 10:30; 密云 $1.56 \text{ g C}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$, 13:00; 张掖 $0.89 \text{ g C}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$, 15:00。其中花寨子与巴吉滩较为干旱的站点 WUE 达到最小值的时间较早。

各个站点 WUE 的季节变化特征为: 在巴吉滩与花寨子荒漠站 WUE 总体呈现“U”型变化趋势, 在生长季开始和结束的时候较高, 而在生长季中期, WUE 值较低。在其他站点, WUE 呈现单峰型的变化趋势在生长季早期和末期较低, 而在生长季中期较高(图3)。在大兴站, WUE 在一年内呈现2个峰, 这是由于大兴站为农田站, 一年两熟种植制度(种植小麦(*Triticum aestivum*)和玉米(*Zea mays*)), 所以 WUE 会在小麦收割后, 玉米成长前急速下降。内蒙古站由于2005年遭逢大旱(Hu *et al.*, 2008), 故相比于2004年, 无论 GPP 最大值还是年 GPP 总量, 都有显著的降低, 因此造成2005年 WUE 的显著降低。

2.2 WUE 对环境因子的响应

为了探究在不同时间尺度下 WUE 的驱动因子, 我们将各因子与 WUE 进行单因素相关性分析并将通过显著性检验的因子显示出来(图4)。在0.5 h尺度上, 影响 WUE 的主要气象因子为 T_a 、 RH 、 VPD 和 PAR , 通过对比发现在0.5 h尺度上 RH 的相关性最高, 在水分条件较好的站(大满、大兴、密云和张掖)呈现正相关关系, 而在花寨子和巴吉滩两个荒漠站中则呈负相关关系, VPD 和 PAR 在0.5 h尺度上与 WUE 主要呈负相关关系。在日尺度上, 影响 WUE 的气象因子主要为 T_a 、 RH 、 VPD 和 PAR , 其中 VPD 和 PAR 主要与 WUE 呈现负相关关系, T_a 、 RH 与 WUE 主要呈正相关关系。在8 d以及月尺度上, 影响 WUE 的主要气象因子为 T_a 和 RH 。总体看来, 随着时间尺度的扩大, 与 T_a 、 RH 相关性显著的站点会减少, 但线性关系更加显著。 VPD 和 PAR 则是在对 WUE 的影响降低的同时, 相关站点数也减少。

逐步回归分析的结果与单因素分析结果大体一致(表2)。总体表现为随着时间尺度的增大, 各站点回归方程的决定系数(R^2)增大。同时, 显著影响

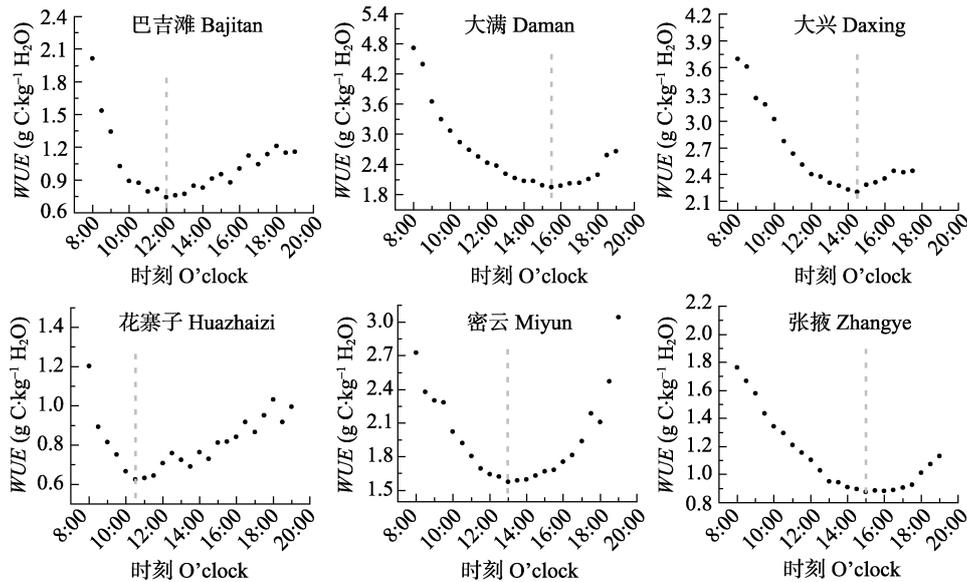


图2 本研究台站水分利用效率(WUE)的日变化, 虚线标注了WUE达到最小值的时间。
Fig. 2 Diurnal changes of water use efficiency (WUE) for the study sites. The dash line indicates the time of WUE reached the minimum.

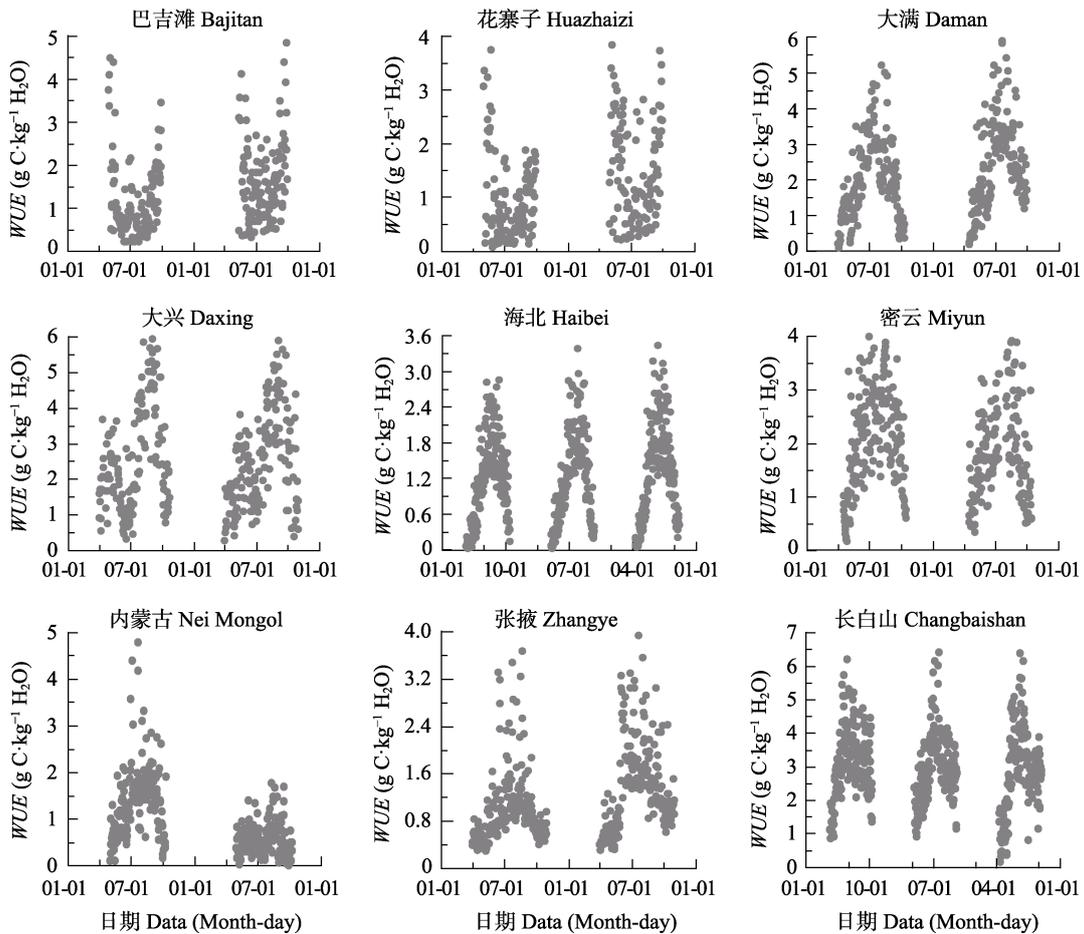


图3 本研究台站水分利用效率(WUE)的季节变化。河北和长白山是3年的数据, 其他站点是2年的数据。
Fig. 3 Seasonal changes of water use efficiency (WUE) for the study sites. Data of three years from Haibei and Changbaishan, and two years form others.

WUE的因子减少, 从0.5 h尺度的 T_a 、 RH 、 VPD 和 PAR 逐步减少为月尺度的 T_a 和 RH 。逐步回归分析与单因

素相关性分析的结果比较再次说明, T_a 、 RH 、 VPD 和 PAR 在0.5 h尺度上与1 d尺度上都是影响WUE的

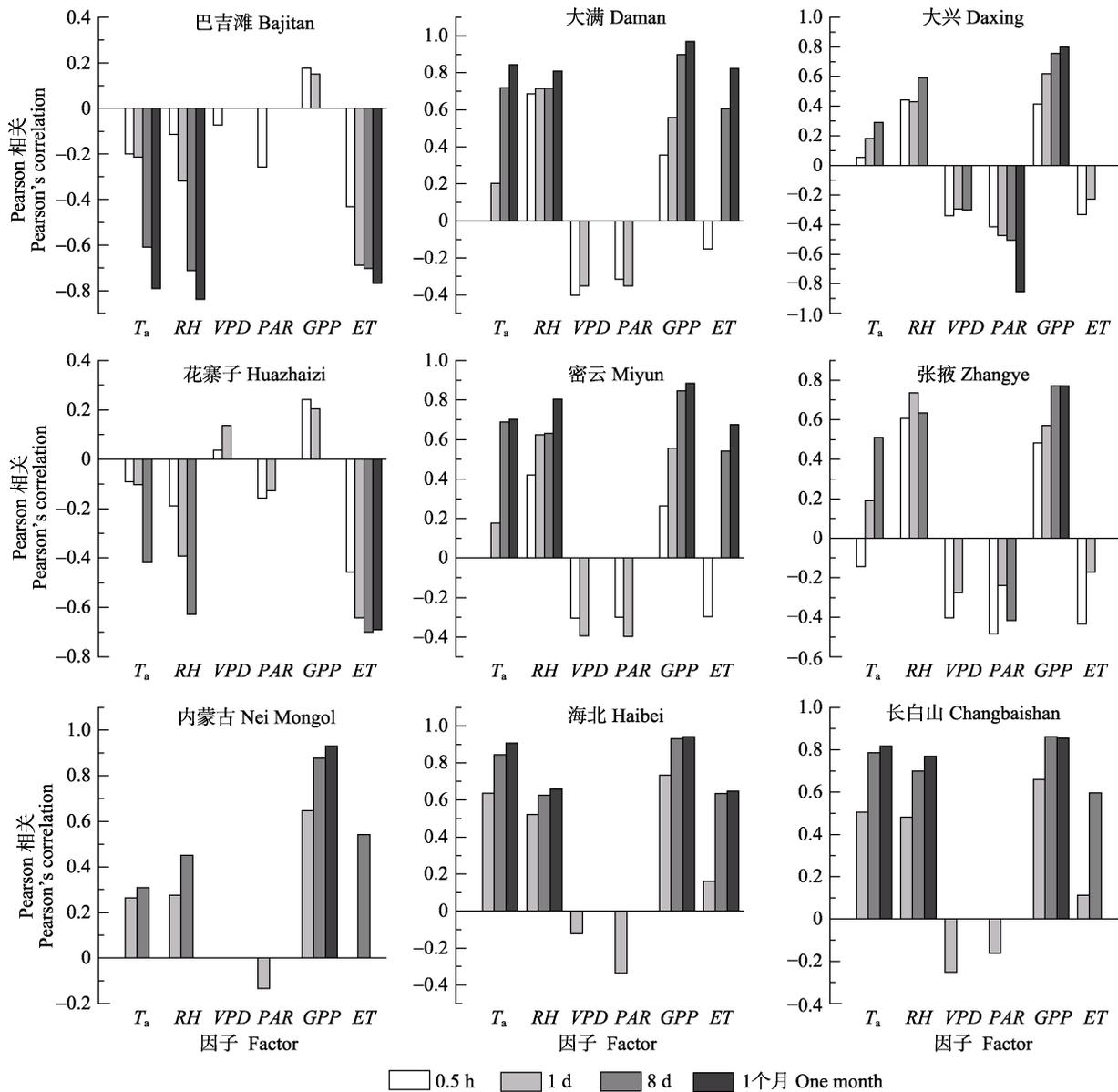


图4 本研究台站不同因子与水分利用效率(*WUE*)的相关性($p < 0.05$)。GPP ($\text{g C}\cdot\text{m}^{-2}$), 总初级生产力; ET ($\text{kg H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}$), 蒸发散; PAR ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$), 光合有效辐射; RH (%), 相对湿度; T_a ($^{\circ}\text{C}$), 温度; VPD (kPa), 大气水汽压亏缺。

Fig. 4 Pearson's correlations of different factors with water use efficiency (*WUE*). GPP ($\text{g C}\cdot\text{m}^{-2}$), gross primary production; ET ($\text{kg H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}$), evapotranspiration; PAR ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$), photosynthetically active radiation; RH (%), relative humidity; T_a ($^{\circ}\text{C}$), temperature; VPD (kPa), vapor pressure deficit.

主要气象因子, 而对于8 d以及逐月相对较长的时间尺度而言, 主要影响因子是 T_a 和RH, 即在短期时间尺度上, 影响*WUE*的主要气象因子为 T_a 、RH、VPD和PAR, 而在长期时间尺度上, 影响*WUE*的主要气象因子为 T_a 、RH, 并且它们与*WUE*的相关性也逐渐增加。随着时间尺度的扩大, 在巴吉滩与花寨子荒漠站, *WUE*与ET的相关性逐渐增加, 而GPP与*WUE*的相关性逐渐减小, 在其他站, 随着时间尺度的扩大, *WUE*与GPP的相关性逐渐增强, 而ET与*WUE*的相关性由负相关变为正相关或者不相关。

2.3 LAI和降水对*WUE*的影响

由于巴吉滩与花寨子站植被稀疏, LAI信息弱, MODIS数据没有很好地捕捉到LAI, 故没有使用这两个站点的LAI数据。从图5可看出, 总体来看, *WUE*随着LAI的增加而增加, 尤其是在LAI较小时, *WUE*随LAI增加而增加得较快, 随着LAI的进一步增大, 表现出2种不同的趋势: 张掖、长白山和海北3站, *WUE*与LAI并非呈现线性关系, 当LAI增大到某一值时, 随LAI的增大, *WUE*的增加速率变小; 而在其他站点, *WUE*与LAI呈线性变化趋势, 在海北站LAI与

表2 不同时间尺度下逐步回归方程中各气象因子标准回归系数及总体决定系数(R^2) ($p < 0.05$)

Table 2 Standardized regression coefficients of meteorological factors and coefficient of determination (R^2) in stepwise regression equations in different time scales ($p < 0.05$)

台站名 Site	0.5 h	R^2	1 d	R^2	8 d	R^2	逐月 Monthly	R^2
长白山 Changbaishan			T_a (0.97), RH (-0.54), VPD (-0.91), PAR (-0.17)	0.49	T_a (0.83), VPD (-0.27)	0.68	T_a (0.82)	0.67
内蒙古 Nei Mongol			T_a (0.29), RH (0.14), PAR (-0.19)	0.14	RH (0.45)	0.20	(无显著因子) (No significant factor)	
海北 Haibei			T_a (0.90), VPD (-0.42), PAR (-0.27)	0.71	T_a (1.05), VPD (-0.36), PAR (-0.12)	0.93	T_a (0.89), PAR (-0.33)	0.94
大兴 Daxing	T_a (0.51), VPD (-0.57), PAR (-0.34)	0.36	T_a (0.80), RH (-0.27), VPD (-0.80), PAR (-0.37)	0.46	RH (0.61)	0.40	PAR (-0.85)	0.73
密云 Miyun	T_a (0.18), RH (0.26), VPD (-0.13), PAR (-0.18)	0.20	T_a (0.71), VPD (-0.57), PAR (-0.33)	0.49	RH (0.51), T_a (0.57)	0.69	RH (0.80)	0.65
张掖 Zhangye	T_a (0.30), RH (0.50), PAR (-0.39)	0.45	T_a (0.32), RH (0.70), PAR (-0.14)	0.61	T_a (0.36), RH (0.58), PAR (-0.44)	0.69	(无显著因子) (No significant factor)	
大满 Daman	T_a (0.68), RH (0.37), VPD (-0.52), PAR (-0.21)	0.57	T_a (0.54), RH (0.53), PAR (-0.31)	0.63	T_a (0.94), VPD (-0.46)	0.70	T_a (0.84)	0.71
巴吉滩 Bajitan	T_a (-0.36), RH (-0.48), PAR (-0.24)	0.20	T_a (-0.33), RH (-0.58), PAR (-0.12)	0.30	RH (-0.77), VPD (-0.46)	0.70	RH (-0.87)	0.70
花寨子 Huazhaizi	RH (-0.27), PAR (-0.27)	0.12	RH (-0.65), PAR (-0.50)	0.31	RH (-0.66)	0.40	(无显著因子) (No significant factor)	

PAR ($W \cdot m^{-2}$), 光合有效辐射; RH (%), 相对湿度; T_a ($^{\circ}C$), 气温; VPD (kPa), 大气水汽压亏缺。

PAR ($W \cdot m^{-2}$), photosynthetically active radiation; RH (%), relative humidity; T_a ($^{\circ}C$), air temperature; VPD (kPa), vapor pressure deficit.

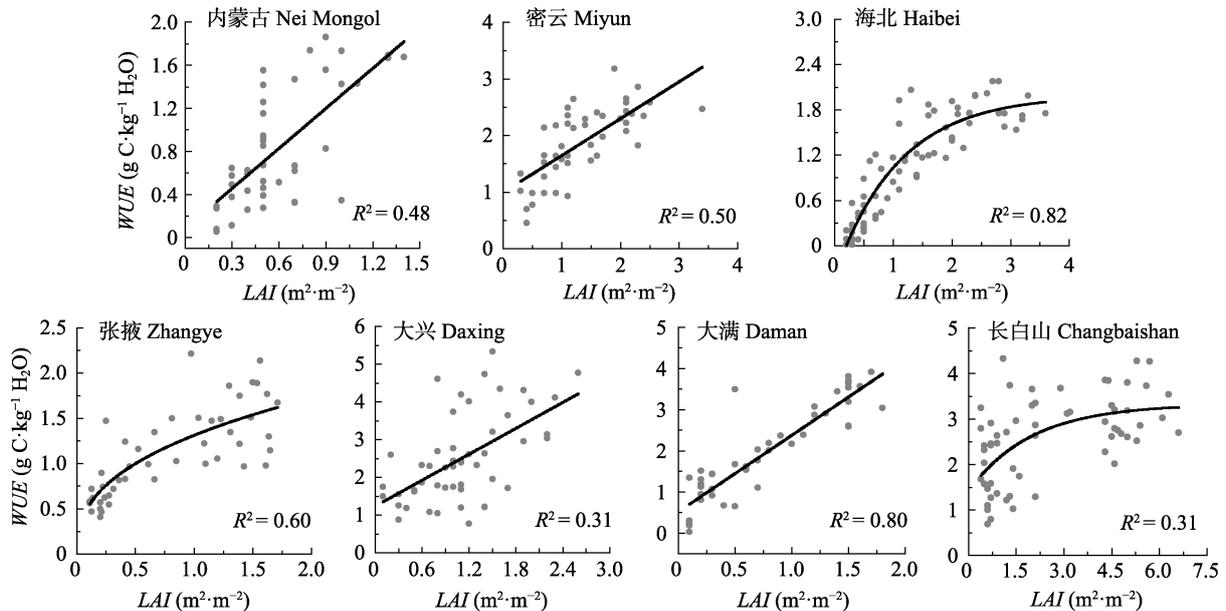


图5 不同站点叶面积指数(LAI)与水分利用效率(WUE)的关系($p < 0.05$)。

Fig. 5 Relationships between leaf area index (LAI) and water use efficiency (WUE) for different sites ($p < 0.05$).

WUE 的相关性最高, R^2 达到了0.82。从图6年生长期平均LAI与年平均WUE的关系图来看, 在研究区域内, WUE 随着LAI的增加而增大, R^2 达到了0.52, 说明在我国北方, LAI是决定WUE大小的一个重要因子。

由于大兴与密云站缺少降水量数据, 因此只分析其余7个站点的降水与WUE关系。在8 d尺度上, 除海北站WUE随降水量有明显的相关关系外, 在其

他站点降水量与WUE并没有明显的相关性(图7), 由图8可以看出, 在年尺度上, 在降水量较大的地区, WUE 年际波动较小, 如长白山、海北站; 而在降水量较小的地区, 如巴吉滩、花寨子、张掖站, 其WUE年际波动较大。通过内蒙古站干旱年的数据可以看出, 当年降水量较低时, WUE 也会下降很多, 即遭遇大旱时, 会严重影响该生态系统的WUE。

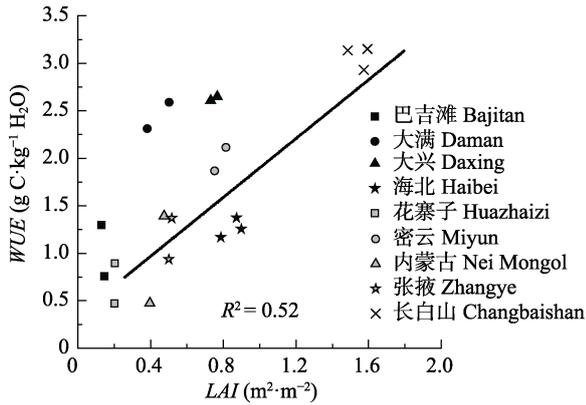


图6 年生长季平均叶面积指数(LAI)与年平均水分利用效率(WUE)的关系($p < 0.05$)。
Fig. 6 Relationship between annual average leaf area index (LAI) and water use efficiency (WUE) in growing season ($p < 0.05$).

2.4 台站间WUE的比较

WUE由大到小依次为: 长白山>大兴>大满>密云>内蒙古>海北>张掖>巴吉滩>花寨子, 按照植被类型依次为: 森林>农田>草地>湿地>荒漠(图9)。Lu和Zhuang (2010)在对美国通量网的28个通量站研究中发现生态系统水平, 生长季平均WUE为森林>灌丛>农田>草地, 而在Beer等(2009)选择的美国通量网的43个通量站研究中发现就生态系统平均WUE而言, 森林>农田>草地>湿地。戈壁与荒漠地区由于植被较少, 生产力较弱, GPP因此较低, 同时在这些地区土壤裸露, 植被蒸腾较低, 使得土壤蒸发在ET中占主导作用, 从而导致这些地区的WUE

较低(Zhang *et al.*, 2014)。值得注意的是, 生态系统WUE是由生态系统的GPP与ET共同决定的, 高的GPP并不代表其生态系统的WUE也较高, 比如张掖湿地的GPP是高于草原站的, 但是由于其平均每天ET值较大, 从而导致其WUE低于草原站WUE。

3 讨论

3.1 GPP和ET与WUE的关系(8 d尺度)

由图10可以看出在生长季内, 除巴吉滩与花寨子荒漠站外, 其余站点的WUE与GPP的季节性变化具有高度的一致性, 且根据图10, 在8 d尺度上, 这些站点的GPP可以解释WUE季节变化的60%以上。根据图11同样可以发现在这些站点WUE与ET呈现正相关或不相关关系。这种变化可能是因为GPP对WUE的影响远大于ET所产生的影响所致, 即WUE与GPP之间变化的同步性表明光合作用可能是主导WUE季节差异的主要原因(Hu *et al.*, 2008)。在张良侠等(2014)与胡中民等(2009)的研究中同样发现, 在干旱地区的生态系统内, WUE的变化与GPP具有同步性, 即在生长季内, WUE在生长季初期与末期较低, 而在生长旺盛期较高。同时, Tang等(2015)对美国3个农田站的研究也发现WUE与GPP的变化具有同步性。

根据图11可以看出在巴吉滩与花寨子荒漠站WUE与ET呈反比关系, R^2 超过0.7。同时, 这两个站点WUE与GPP相关性很低, 由此可以看出在荒漠中

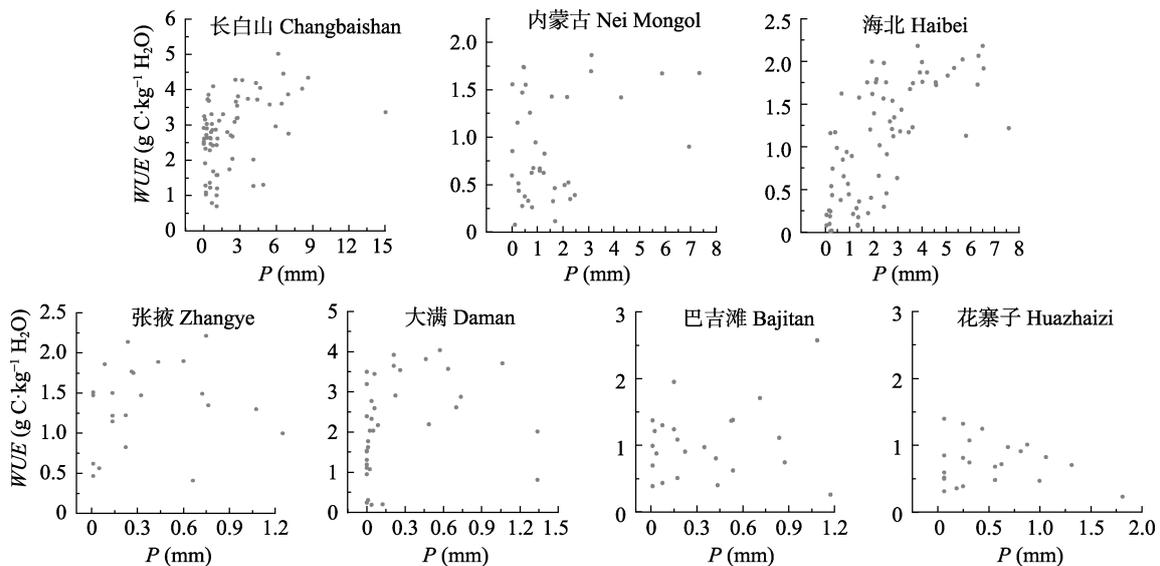


图7 不同站点8 d平均降水量(P)与8 d平均水分利用效率(WUE)的关系。
Fig. 7 Relationships between precipitation (P) and water use efficiency (WUE) at 8-days scale.

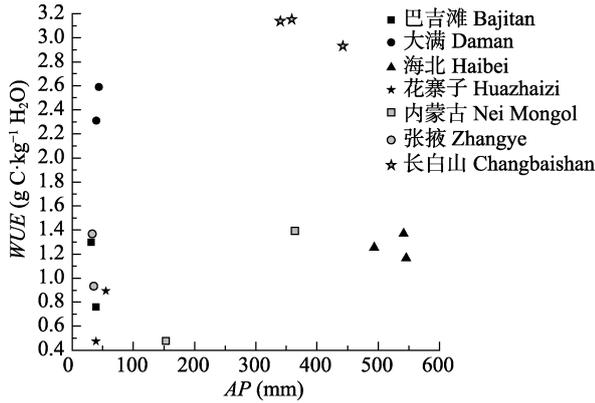


图8 年降水量(AP)与年平均水分利用效率(WUE)的关系。
Fig. 8 Relationship between annual precipitation (AP) and water use efficiency (WUE) in growing season.

ET是主导WUE生长季变化的主要原因。这可能是由于荒漠地区植被稀疏, LAI较小, 土壤蒸发在整个生态系统蒸发散中占较高比例。在Hu等(2008)以及赵

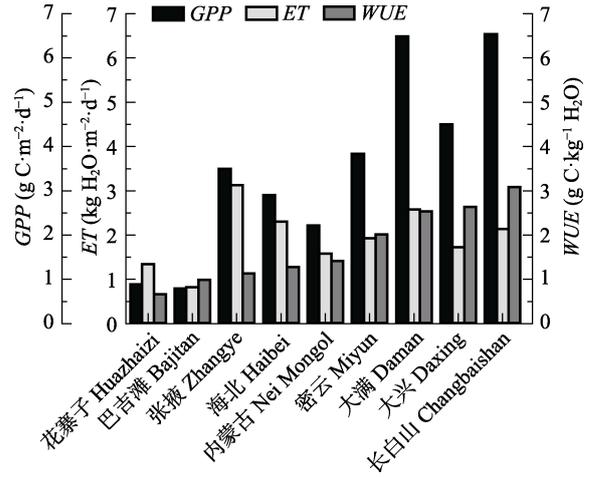


图9 各站点平均每天总初级生产力(GPP)、蒸发散(ET)和水分利用效率(WUE)的值。横坐标根据WUE的由小到大的顺序排列的。

Fig. 9 The average daily gross primary production (GPP), evapotranspiration (ET) and water use efficiency (WUE) for the study sites. The sites were arranged in the order of increasing WUE.

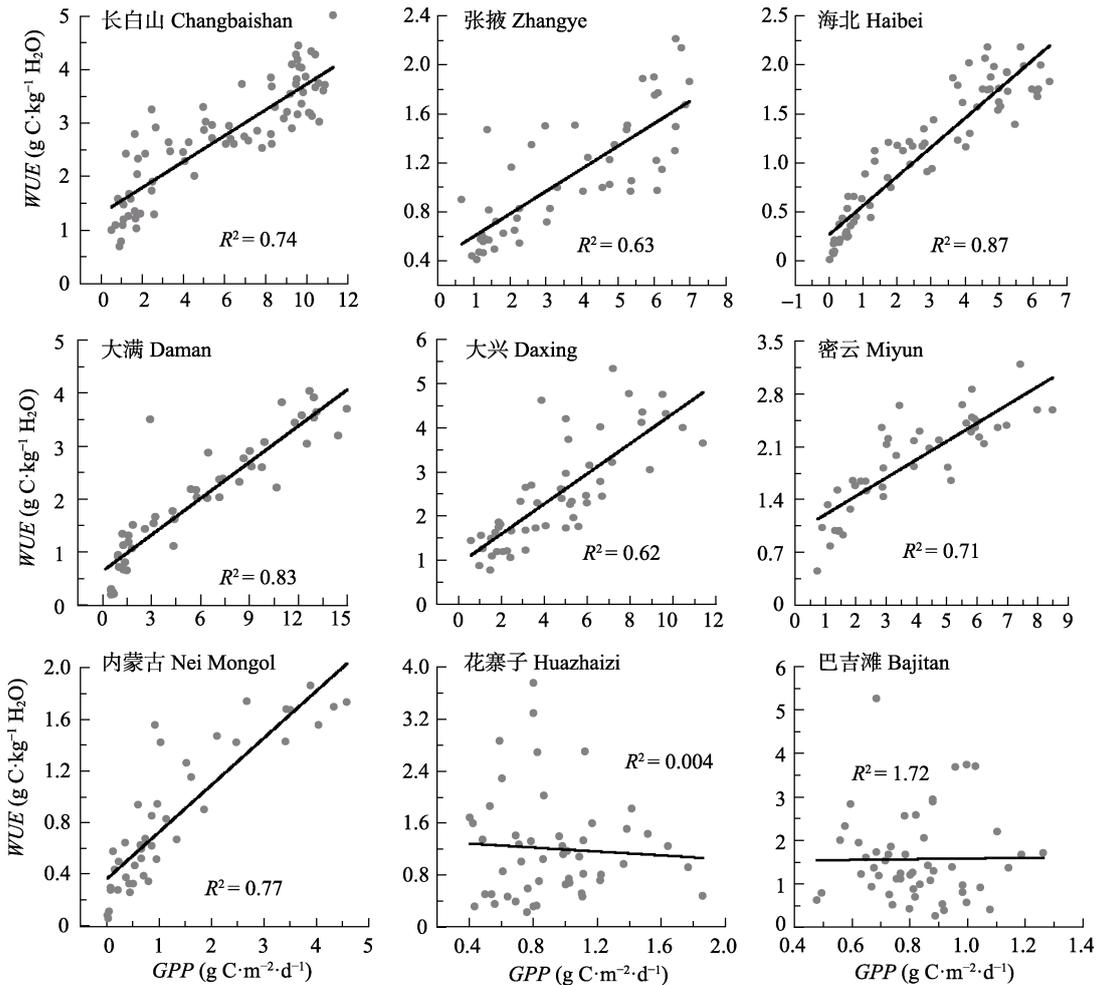


图10 不同站点水分利用效率(WUE)与总初级生产力(GPP)的相关关系($p < 0.05$)。

Fig. 10 Relationships between water use efficiency (WUE) and gross primary production (GPP) for the study sites ($p < 0.05$).

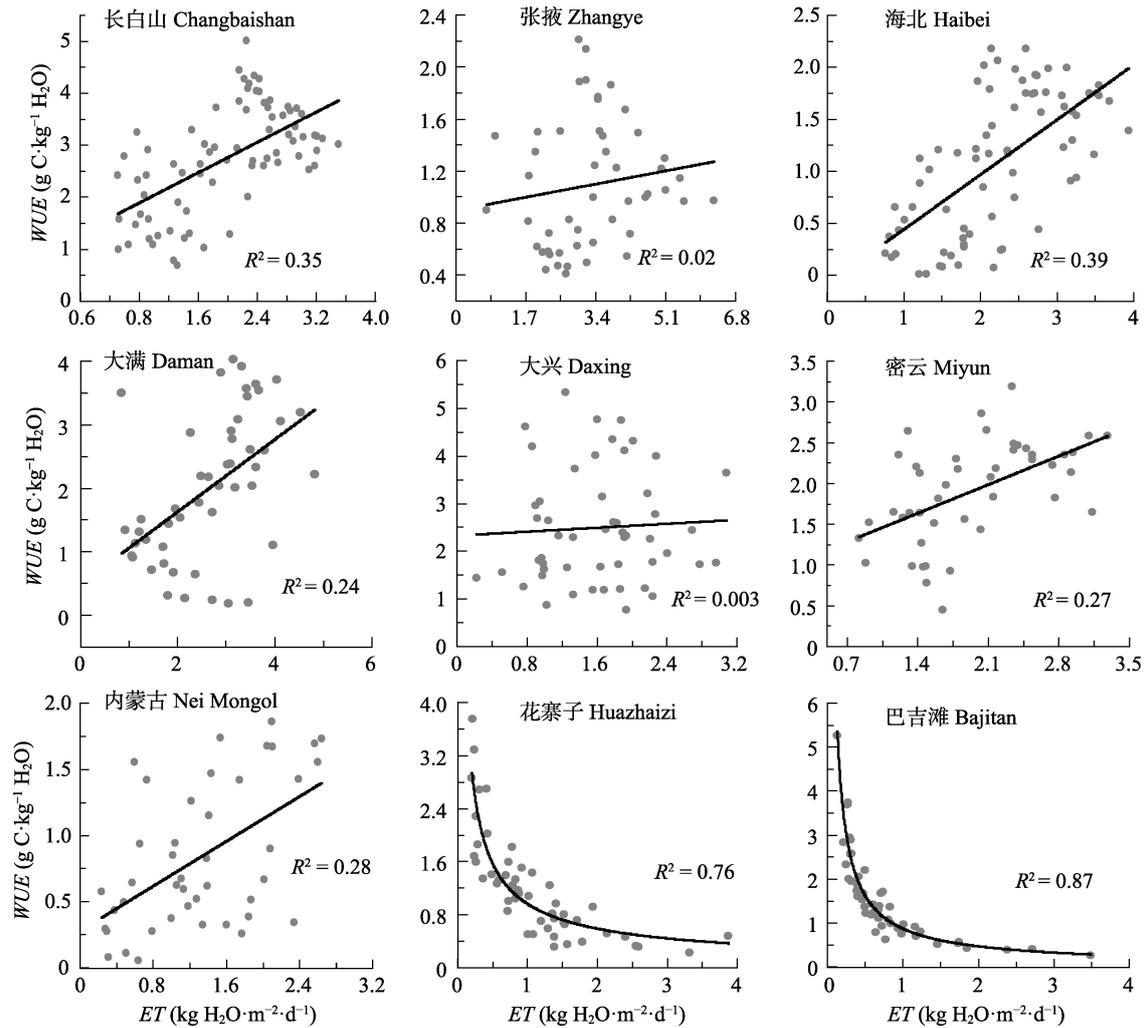


图11 不同站点水分利用效率(WUE)与蒸发散(ET)的相关关系($p < 0.05$)。

Fig. 11 Relationships between water use efficiency (WUE) and evapotranspiration (ET) for the study sites ($p < 0.05$).

丽雯等(2015)的研究中都发现, 当LAI较小时, 土壤蒸发会在生态系统ET中占较高的比例。随着夏季的到来, 在LAI较小的地区可能由于温度的升高、降水的增多而导致ET明显升高, 但GPP在此时增加有限, 从而使得ET成为该地区WUE变化的主导因子。

3.2 不同时间尺度下影响WUE的因子

WUE的影响因子随地区和尺度的不同而变化(Tan *et al.*, 2015)。在0.5 h、1 d的时间尺度上, PAR和VPD与WUE的相关关系显著, 呈现负相关关系, 尤其是在0.5 h时间尺度上, 它们与WUE的相关关系更加显著, 这表明在短时间尺度上, 环境因子是影响WUE变化的主要因素。在叶片水平上, 较高的VPD会降低气孔导度, 而气孔导度的降低, 相比于对碳吸收速率的限制, 对蒸腾速率的影响更大, 从而会增加叶片的WUE, 但在生态系统尺度, 尽管气孔关闭, ET也是增加的, 故WUE与VPD呈负相关关

系(Farquhar & Sharkey, 1982; Ponton *et al.*, 2006)。虽然植物的固碳能力以及植物对水分的消耗都随着PAR的增大而增加, 但是GPP与ET对PAR的响应程度及其响应方式存在差异, 即当GPP在强光条件下逐渐达到饱和状态时, ET仍随着PAR的增大而增加, 因此WUE会随着PAR的增大而减小。而在8 d、逐月尺度上, PAR和VPD对WUE变化的影响并不显著。很多研究也发现在1 d、0.5 h或者更小的时间尺度上, WUE与VPD有很强的相关性(Zhou *et al.*, 2015)。Song (2017)在对亚热带常绿林5年WUE的研究中发现仅在较短的时间尺度上, VPD显著影响WUE。Hu等(2008)认为在较短的时间内, VPD可以显著影响WUE变化的主要原因是在较短的时间内LAI变化较小, 蒸腾(T)与ET的比值相对稳定, 在这种情况下环境因子就会起主导作用, 故VPD在较短的时间内可以显著影响WUE的变化。

有研究发现 WUE 随温度的升高而降低 (Law *et al.*, 2002; Ponton *et al.*, 2006), 这是因为在较高的温度下, ET 增加的速率大于 GPP 增加的速率 (Yu *et al.*, 2008), 但在本研究中, 在逐日以及更长的时间尺度上, 除巴吉滩与花寨子外, 其他站点, WUE 与 T_a 为正相关, 与他人的研究结果相同。通过对亚洲区域水分利用效率的研究, Zhang等(2014)发现在 25° – 40° N 范围内 WUE 随温度的增加而增加, 认为可能的原因是温度对光合作用的影响大于 ET 的影响。随着时间尺度的扩大, WUE 与 T_a 的相关性逐渐增强, 同时在这些站点出现 ET 与 WUE 不相关或者正相关的情况, 也说明随着温度的升高, GPP 的上升速率大于 ET 。另外, 由于我国雨热同季的季风气候, 在温度升高的时候, LAI 也增大, 也促进了 GPP 更快增长。

随时间尺度的扩大, T_a 、 RH 、 VPD 和 PAR 与 WUE 的相关关系是负相关还是正相关, 这可能是由该站点的 WUE 是由 GPP 主导还是由 ET 主导所决定的。比如在 1 d 以及 1 d 以上的时间尺度上, T_a 和 RH 与 WUE 呈现负相关关系的站点是 ET 主导型的巴吉滩和花寨子站, 而在 GPP 主导型的其余站点中, 并没有出现 T_a 和 RH 与 WUE 呈现负相关的现象, 这间接说明了在不同地区 GPP 、 ET 对相同气象因子的响应是不同步的, 而对 WUE 显著影响的因子在不同的时间尺度下是不同的, 也说明了时间尺度对于 WUE 研究的重要性, 在不同的时间尺度下开展的研究可能得出不同的结论。

3.3 LAI 和降水与 WUE 的关系

LAI 不仅能有效地增强植物的光能利用率, 也能有效地抑制土壤蒸发, 是研究 WUE 变化的一个重要影响因子 (Tong *et al.*, 2009)。由图 5 可见 WUE 总体上随 LAI 的增加而增加, 当 LAI 较小时, WUE 随其增加而增加, 当 LAI 大于某一值时, 长白山、张掖、海北站 WUE 随 LAI 的增加而缓慢增加。这可能是因为当 LAI 较小时, 随着 LAI 的增大, 冠层能够拦截光能的有效面积迅速增大, 同时也减少了下垫面土壤的蒸发 (Hu *et al.*, 2008), 因此 WUE 能迅速增加。而当 LAI 达到某一值时, 即使 LAI 继续增加, 能够有效拦截光能的表面积也变化不明显, 故而后期 WUE 增加缓慢 (Muraoka *et al.*, 2010)。而对于农田和果园这样的人为干预较大的生态系统 (如大兴、大满和密云站), WUE 随 LAI 的增加而持续增加, 这可能是由于

人为的灌溉活动维持了 GPP 的增长强度, 使得 WUE 与 LAI 保持了同步的增长。至于内蒙古站, 由于 LAI 较小, 并未达到饱和, 故 LAI 与 WUE 保持了线性增加的关系。

年降水量是驱动年际间生态系统 WUE 和 NEP 差异的主要因子 (Dong *et al.*, 2011), 但在本研究中, 降水并未能很好地解释 WUE 的变化, 说明降水并不是主导研究区域内 WUE 变化的主要因素。在 Jia 等 (2016) 对半干旱地区灌木的研究中发现, 年际间降水量的差异并不能解释年际间 GPP 、 ET 和 WUE 变化的差异, 因为在较高的降水年份, 灌木林表现出了较低的 GPP 与 WUE , 这可能是因为小的降水事件并不能有效地补充植物可利用的水分, 反而可能引起浅层土壤微生物的呼吸。还有研究发现, 即使年降水总量是一定的, 但降水的频次和每次降水量的不同也可能会对植物生长产生不同的影响 (Thomey *et al.*, 2011)。同时 WUE 与降水量 (P) 关系的弱相关也可能是因为: 生态水文过程主要取决于物候期可利用水的多少, 而 P 与植物需求量并不一定同步 (Dong *et al.*, 2011); ET 中的水分并不完全来自 P , 也可能来自径流或地下水的补给; 降水具有延迟效应, 即上一年的降水可能会对今年的生态系统产生影响 (Sala *et al.*, 2012), 可见降水对 WUE 影响的复杂性, 这也告诉我们应该从多角度来看待降水对陆地生态系统的影响。

4 结论

在中国北方地区, WUE 的日变化大致呈“U”型变化趋势, 即早晨与傍晚的值相对较大, 中午前后较小。整个生长季的 WUE 可以分为 GPP 主导型和 ET 主导型, 并且随着时间尺度的扩大, 其主导作用会逐渐增强。在 GPP 主导型地区, WUE 季节变化趋势与 GPP 大致相同, 呈现单峰变化趋势。而在 ET 主导型地区, WUE 的变化趋势大致呈现“U”型。 VPD 和 PAR 仅在短时间尺度内对 WUE 的影响效果显著, 而 T_a 和 RH 无论时间尺度长短都是影响 WUE 的重要气象因子。随着时间尺度的增大, T_a 和 RH 与 WUE 的线性关系会更加显著。 LAI 不仅是影响 WUE 季节变化的重要因子, 而且在一定程度上决定了不同生态系统间 WUE 的差异。由于降水对生态系统影响的过程较为复杂, 本文并未发现降水与 WUE 关系的显著性。通过比较不同植被类型发现, WUE 由大到小依

次为: 森林、农田、草地、湿地和荒漠。需要注意的是, 受台站数量限制, 本研究仅就 *WUE* 的时间变化与影响因子开展了初步的分析与讨论, 今后应进一步增加研究选取的台站数量, 来深入分析 *GPP* 主导型和 *ET* 主导型的 *WUE* 的变化差异及其影响因素。

致谢 感谢“中国通量观测研究联盟(ChinaFLUX)”“黑河流域生态-水文过程综合遥感观测试验”“海河流域观测试验”提供数据资料。

参考文献

- Beer C, Ciais P, Reichstein M, Baldocchi D, Law BE, Papale D, Soussana JF, Ammann C, Buchmann N, Frank D (2009). Temporal and among site variability of inherent water use efficiency at the ecosystem level. *Global Biogeochemical Cycles*, 23, GB2018. DOI: 10.1029/2008GB003233.
- Bohn BA, Kershner JL (2002). Establishing aquatic restoration priorities using a watershed approach. *Journal of Environmental Management*, 64, 355–363.
- Chen SP, Bai YF, Han XG (2002). Application of stable carbon isotope techniques to ecological research. *Acta Phytocologica Sinica*, 26, 549–560. [陈世莘, 白永飞, 韩兴国 (2002). 稳定性碳同位素技术在生态学研究中的应用. *植物生态学报*, 26, 549–560.]
- Du JJ, Chen ZW (2010). Methods of path analysis using SPSS linear regression. *Bulletin of Biology*, 45, 4–6. [杜家菊, 陈志伟 (2010). 使用SPSS线性回归实现通径分析的方法. *生物学通报*, 45, 4–6.]
- Dong G, Guo JX, Chen JQ, Sun G, Gao S, Hu LJ, Wang YL (2011). Effects of spring drought on carbon sequestration, evapotranspiration and water use efficiency in the Songnen meadow steppe in northeast China. *Ecohydrology*, 4, 211–224.
- Farquhar GD, Sharkey TD (1982). Stomatal conductance and photosynthesis. *Annual Review of Plant Physiology*, 33, 317–345.
- Guo RP, Lin ZH, Mo XG, Yang CL (2010). Responses of crop yield and water use efficiency to climate change in the North China Plain. *Agricultural Water Management*, 97, 1185–1194.
- Hu ZM, Yu GR, Fu YL, Sun XM, Li YN, Shi PL, Wang YF, Zheng ZM (2008). Effects of vegetation control on ecosystem water use efficiency within and among four grassland ecosystems in China. *Global Change Biology*, 14, 1609–1619.
- Hu ZM, Yu GR, Wang QF, Zhao FH (2009). Ecosystem level water use efficiency: A review. *Acta Ecologica Sinica*, 29, 1498–1507. [胡中民, 于贵瑞, 王秋凤, 赵风华 (2009). 生态系统水分利用效率研究进展. *生态学报*, 29, 1498–1507.]
- Huang RH, Zhou DG, Chen W, Zhou LT, Wei ZG, Zhang Q, Gao XQ, Wei GA, Hou XH (2013). Recent progress in studies of air-land interaction over the arid area of Northwest China and its impact on climate. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 37, 189–210. [黄荣辉, 周德刚, 陈文, 周连童, 韦志刚, 张强, 高晓清, 卫国安, 候旭宏 (2013). 关于中国西北干旱区陆—气相互作用及其对气候影响研究的最近进展. *大气科学*, 37, 189–210.]
- Jaleel CA, Gopi R, Sankar B, Gomathinayagam M, Panneerselvam R (2008). Differential responses in water use efficiency in two varieties of *Catharanthus roseus* under drought stress. *Comptes Rendus Biologies*, 331, 42–47.
- Jia X, Zha TS, Gong JN, Wang B, Zhang YQ, Wu B, Qin SG, Peltola H (2016). Carbon and water exchange over a temperate semi-arid shrubland during three years of contrasting precipitation and soil moisture patterns. *Agricultural and Forest Meteorology*, 228, 120–129.
- Law BE, Falge E, Gu LV, Baldocchi DD, Bakwin P, Berbigier P, Davis K, Dolman AJ, Falk M, Fuentes JD (2002). Environmental controls over carbon dioxide and water vapor exchange of terrestrial vegetation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 113, 97–120.
- Li HD, Guan DX, Yuan FH, Wang AZ, Jin CJ, Wu JB, Li Z, Jing YL (2015). Water use efficiency and its influential factor over Horqin Meadow. *Acta Ecologica Sinica*, 35, 478–488. [李辉东, 关德新, 袁凤辉, 王安志, 金昌杰, 吴家兵, 李峥, 井艳丽 (2015). 科尔沁草甸生态系统水分利用效率及影响因素. *生态学报*, 35, 478–488.]
- Li XZ, Liu XD, Ma ZG (2004). Analysis on the characteristics of aridification in the main arid areas of the world in recent 100 years. *Arid Zone Research*, 21, 97–103. [李新周, 刘晓东, 马柱国 (2004). 近百年来全球主要干旱区的干旱化特征分析. *干旱区研究*, 21, 97–103.]
- Liu SM, Xu ZW, Song LS, Zhao QY, Ge Y, Xu TR, Ma YF, Zhu ZL, Jia ZZ, Zhang F (2016). Upscaling evapotranspiration measurements from multi-site to the satellite pixel scale over heterogeneous land surfaces. *Agricultural and Forest Meteorology*, 230, 97–113.
- Liu XD, Chen XZ, Li RH, Long FL, Zhang L, Zhang QM, Li JY (2017). Water-use efficiency of an old-growth forest in lower subtropical China. *Scientific Reports*, 7, 42761. DOI: 10.1038/srep42761.
- Lu XL, Zhuang QL (2010). Evaluating evapotranspiration and water-use efficiency of terrestrial ecosystems in the conterminous United States using MODIS and AmeriFlux data. *Remote Sensing of Environment*, 114, 1924–1939.
- Muraoka H, Saigusa N, Nasahara KN, Noda H, Yoshino J, Saitoh TM, Nagai S, Murayama S, Koizumi H (2010). Effects of seasonal and interannual variations in leaf photosynthesis and canopy leaf area index on gross primary production of a cool-temperate deciduous broadleaf forest in Takayama, Japan. *Journal of Plant Research*, 123, 563–576.
- Munns R (2005). Genes and salt tolerance: Bringing them

- together. *New Phytologist*, 167, 645–663.
- Ponton S, Flanagan LB, Alstad KP, Johnson BG, Morgenstern K, Kljun N, Black TA, Barr AG (2006). Comparison of ecosystem water-use efficiency among Douglas-fir forest, aspen forest and grassland using eddy covariance and carbon isotope techniques. *Global Change Biology*, 12, 294–310.
- Reichstein M, Ciais P, Papale D, Valentini R, Running S, Viovy N, Cramer W, Granier A, Ogee J, Allard V (2007). Reduction of ecosystem productivity and respiration during the European summer 2003 climate anomaly: A joint flux tower, remote sensing and modelling analysis. *Global Change Biology*, 13, 634–651.
- Sala OE, Gherardi LA, Reichmann L, Jobbagy E, Peters D (2012). Legacies of precipitation fluctuations on primary production: Theory and data synthesis. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 367, 3135–3144.
- Song QH, Fei XH, Zhang YP, Sha LQ, Liu YT, Zhou WJ, Wu CS, Lu ZY, Luo K, Gao JB (2017). Water use efficiency in a primary subtropical evergreen forest in Southwest China. *Scientific Reports*, 7, 43031. DOI: 10.1038/srep43031.
- Sun XK, Fan ZP, Wang H, Jie B, Zhang Y, Deng DZ (2008). Photosynthetic characteristics and water use efficiency of three broad-leaved tree species in the Horqin Sandland. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 10, 188–194. [孙学凯, 范志平, 王红, 白洁, 张营, 邓东周 (2008). 科尔沁沙地复叶槭等3个阔叶树种的光合特性及其水分利用效率. 干旱区资源与环境, 10, 188–194.]
- Tan ZH, Zhang YP, Deng XB, Song QH, Liu WJ, Deng Y, Tang JW, Liao ZY, Zhao JF, Song L (2015). Interannual and seasonal variability of water use efficiency in a tropical rainforest: Results from a 9 year eddy flux time series. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120, 464–479.
- Tang XG, Li HP, Griffiths TJ, Xu XB, Ding Z, Liu GH (2015). Tracking ecosystem water use efficiency of cropland by exclusive use of MODIS EVI data. *Remote Sensing*, 7, 11016–11035.
- Thomey ML, Collins SL, Vargas R, Johnson JE, Brown RF, Natvig DO, Friggens MT (2011). Effect of precipitation variability on net primary production and soil respiration in a Chihuahuan Desert grassland. *Global Change Biology*, 17, 1505–1515.
- Tong XJ, Li J, Yu Q, Qin Z (2009). Ecosystem water use efficiency in an irrigated cropland in the North China Plain. *Journal of Hydrology*, 374, 329–337.
- Wang F, Jiang FL, Chen XF, Niu XD (2016). Bamboo forest water use efficiency in the Yangtze River Delta Region, China. *Terrestrial, Atmospheric & Oceanic Sciences*, 27, 981–989.
- Wang QW, Yu DP, Dai LM, Zhou L, Zhou WM, Qi G, Qi L, Ye YJ (2010). Research progress in water use efficiency of plants under global climate change. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 21, 3255–3265. [王庆伟, 于大炮, 代力民, 周莉, 周旺明, 齐光, 齐麟, 叶雨静 (2010). 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, 21, 3255–3265.]
- Xu ZW, Liu SM, Li X, Shi SJ, Wang JM, Zhu ZL, Xu TR, Wang WZ, Ma MG (2013). Intercomparison of surface energy flux measurement systems used during the Hi-WATER-MUSOEXE. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118, 13140–13157.
- Yu GR, Song X, Wang QF, Liu YF, Guan DX, Yan JH, Sun XM, Zhang LM, Wen XF (2008). Water-use efficiency of forest ecosystems in eastern China and its relations to climatic variables. *New Phytologist*, 177, 927–937.
- Yu GR, Fu YL, Sun XM, Wen XF, Zhang LM (2006). Research progress and development of China's Terrestrial Ecosystem Fluorescence Observation Network (China-FLUX). *Science in China Series D Earth Science*, S1, 1–21. [于贵瑞, 伏玉玲, 孙晓敏, 温学发, 张雷明 (2006). 中国陆地生态系统通量观测研究网络 (ChinaFLUX) 的研究进展及其发展思路. 中国科学. D 辑: 地球科学, S1, 1–21.]
- Zhang FM, Ju WM, Shen SH, Wang SQ, Yu GR, Han SJ (2014). How recent climate change influences water use efficiency in East Asia. *Theoretical and Applied Climatology*, 116, 359–370.
- Zhang L, Tian J, He HL, Ren XL, Sun XM, Yu GR, Lu QQ, Lü LY (2015). Evaluation of water use efficiency derived from MODIS products against eddy variance measurements in China. *Remote Sensing*, 7, 11183–11201.
- Zhang LX, Hu ZM, Fan JW, Shao QQ, Tang FP (2014). Advances in the spatiotemporal dynamics in ecosystem water use efficiency at regional scale. *Advances in Earth Science*, 29, 691–699. [张良侠, 胡中民, 樊江文, 邵全琴, 唐凤沛 (2014). 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. 地球科学进展, 29, 691–699.]
- Zhao LW, Zhao WZ, Ji XB (2015). Division between transpiration and evaporation, and crop water consumption over farmland within oases of the middlestream of Heihe River basin, Northwestern China. *Acta Ecologica Sinica*, 35, 1114–1123. [赵丽雯, 赵文智, 吉喜斌 (2015). 西北黑河中游荒漠绿洲农田作物蒸腾与土壤蒸发区分及作物耗水规律. 生态学报, 35, 1114–1123.]
- Zhou S, Yu B, Huang YF, Wang GQ (2015). Daily underlying water use efficiency for AmeriFlux sites. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 120, 887–902.

责任编辑: 陈世莘 责任编辑: 王 葳



扫码加入读者圈
听语音, 看问答

DOI: 10.17521/cjpe.2017.0214