

# 长江滩地杨树林生态系统水分利用效率及影响因子

王 妍<sup>1</sup>, 江泽慧<sup>2</sup>, 彭镇华<sup>3,\*</sup>, 刘杏娥<sup>2</sup>

(1. 中国林学会, 北京 100091; 2. 国际竹藤网络中心, 北京 100102; 3. 中国林业科学研究院林业研究所, 北京 100091)

**摘要:**通过涡度相关设备监测湖南岳阳长江外滩地杨树人工林生态系统与大气间的碳、水交换, 研究生态系统水分利用效率 ( $WUE = F_{CO_2}/F_{H_2O}$ ) 的规律及其与环境因子的响应变化关系。测定了杨树林生态系统  $WUE$  不同季节 10 个晴朗日 09:00—16:00 时半小时平均值的日变化, 不同季节,  $WUE$  的变化不同。生态系统  $WUE$  受环境因子的影响较大, 4—9 月份,  $WUE$  随着温度升高有减小的趋势; 10 月到翌年 3 月份, 系统  $WUE$  随着气温升高而升高。汛期林地土壤淹水的情况下, 系统  $WUE$  随土壤体积分含水量 ( $SWC$ ) 增加而增大; 林地没淹水情况下, 生态系统  $WUE$  随着含水量的增加变化不规律。非汛期土壤热通量 5d 平均值与系统  $WUE$  的关系, 随着土壤热通量的增加,  $WUE$  也增加。生态系统  $WUE$  与系统饱和水汽压差呈负相关。经主成分分析, 土壤含水量与大气温度在杨树林生态系统  $WUE$  影响因子中占较大的特征比例。

**关键词:**杨树林生态系统; 水分利用效率; 环境因子

## Water use efficiency and its correlation with environmental factors in a popular ecosystem in bottomland of Yangtze River

WANG Yan<sup>1</sup>, JIANG Zehui<sup>2</sup>, PENG Zhenghua<sup>3,\*</sup>, LIU Xinge<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Chinese Society of Forestry, Beijing 100091, China

<sup>2</sup> International Centre for Bamboo and Rattan, Beijing 100102, China

<sup>3</sup> Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry; Beijing 100091, China

**Abstract:** The regularity of Water use efficiency ( $WUE$ ) of the variation in response to changes of environmental factors in popular (including *P. deltoides* cv. '2KEN8', *P. deltoides* cv. '55/65' and *P. × euramiercana* cv. 'N1-80121') ecosystem were studied by the eddy-covariance that has monitored the carbon and water flux between atmosphere and poplar ecosystem in bottomland of Yangtze River. The  $WUE$  of the ecosystem had regular diurnal variation decided by ecophysiological characteristics in different seasons. And environmental factors also affected the  $WUE$  obviously. (1) The  $WUE$  had a razor-thin decrease with the temperature increasing from April to September and increased from October to March in next year as the temperature increasing. (2) In the flood season,  $WUE$  increased in case of soil ponded, and changed irregularly under the non-ponded situation as the rising of  $SWC$ . (3) In non-flood season, the average of soil heat flux showed a positive correction with the average five-days  $WUE$ . (4)  $WUE$  and  $VPD$  significantly correlated negatively. By the principle analyze,  $SWC$  and air temperature had larger impact on the  $WUE$  in popular ecosystem.

**Key Words:** popular ecosystem;  $WUE$ ; environmental factors

水分利用效率 (Water use efficiency,  $WUE$ ) 最早是从研究农作物的田间水分利用状况开始的, 后来运用于其他植被、群落以及生态系统的研究, 但由于研究目的、途径和方法不同, 对水分利用效率的定义也不尽相同<sup>[1]</sup>。Bolger 和 Turner 认为: 经典意义上的水分利用效率是指植物的生物量与蒸腾、蒸发所消耗水量的比值; 随着现代气体交换测量技术的发展, 可以在单叶水平上测定蒸腾效率, 即瞬间  $CO_2$  的同化速率 ( $A$ ) 与蒸腾

基金项目: 国家林业局 948 资助项目 (2006-4-16)

收稿日期: 2009-03-31; 修订日期: 2010-01-10

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wykelly@126.com

速率( $E$ )或叶片气孔导度( $gs$ )之比<sup>[2]</sup>。最近几年,有学者发现植物对空气中的稳定碳同位素 $^{13}C$ 具有分馏作用,植物组织中的碳同位素分辨率被发展为测定蒸腾效率的一种方法,在群体水平上测定  $WUE$  提供了新的思路<sup>[3-4]</sup>。对于农田群体水平上的水分利用效率,用某一生育期内作物干物质积累量与同期内农田蒸散量之比表示。国内有关水分利用效率的研究起步相对较晚,20 世纪 80 年代才开始系统研究,多注重农田水平上作物产量与水分关系,即产量水平上水分利用效率研究<sup>[5-6]</sup>。

森林生态系统的  $WUE$  可用一定时间内生物量积累与同期内森林生态系统水分的蒸散量比值来表示。但森林生态系统由于其高大、复杂的植被特点,直接量化系统的蒸散量较困难,一些学者常用间接方法,如模型法推导森林生态系统的  $WUE$ <sup>[7]</sup>。近年来随着高塔监测手段的引进以及近红外监测设备的发展和完善,涡度相关设备得以应用于监测生态系统界面碳、水通量变化,计量不同时间段生态系统的  $WUE$  值成为可能<sup>[8]</sup>,不仅为研究森林生态系统碳通量变化提供直接的瞬时变化值,也为计量森林生态系统  $WUE$  提供了较科学的手段。国内宋霞等利用涡度相关设备研究千烟洲人工针叶林的  $WUE$  变化,以及对气温、大气饱和水汽压差等的变化规律,认为不同的季节、干旱程度,生态系统的  $WUE$  对环境因子的响应规律不同。本文运用涡度相关系统揭示滩地杨树林生态系统  $WUE$  的瞬时变化规律,由于该系统属湿地生态系统,土壤含水量较高,空气湿度较大,这些特点必然会影响生态系统的  $WUE$  变化规律。因此,土壤含水量及其与其它环境因子的相互作用,将共同影响生态系统的  $WUE$  及变化规律。

## 1 试验点概况和研究方法

### 1.1 试验点概况

观测站点位于湖南省岳阳市君山区广兴洲镇长江外滩,是洞庭湖中的一个岛屿,地形平坦,海拔平均为 31m,在林区地面高差小于 2m,北纬  $29^{\circ}31'40''$ ,东经  $112^{\circ}51'34''$ 。君山区属于中亚热带向北亚热带过渡气候区,具有典型的亚热带湿润季风气候特征,春季多雨,秋季多旱,冬季严寒。年平均降水量 1200.7—1414.6mm。年平均气温 16.5—17.0℃,大于 10℃ 的年活动积温 5254.1—5529.2℃,极端低温 -13.7℃,出现在 1 月份,极端高温 39.3℃,出现在 7 月份,无霜期 263.7—276.6d,年日照 1644.3—1813.8h。土壤为江湖滩地特有的潮土类型,土层深度达 2m 以上,矿质养分丰富,有机质含量较高。

杨树林生态系统由 2KEN8 号杨(*P. deltoides* cv. '2KEN8')、55/65 杨(*P. deltoides* cv. '55/65')、NL-80121 杨(*P. × euramiercana* cv. 'NL-80121')等欧美杨无性系统组成,2000 年造林,密度为 495 株/hm<sup>2</sup>,株行距为 4m×5m,平均胸径约 14cm,平均树高约 16m。林下由于季节性的水淹,生长着季节性很强的草本植物,盖度为 70%—80%,主要种有:狗牙根(*Cynodon dactylon*)、水芹(*Oenanthe javanica*)、扬子毛茛(*Ranunculus sieboldii*)、益母草(*Leonurus artemisia*)、羊蹄(*Rumex japonicus*)、苔草(*Carex* sp.)、鸡矢藤(*Paederia scandens*)、泥胡菜(*Hemistepta lyrata*)、大蓟(*Cirsium japonicum*)、一年蓬(*Erigeron annuus*)、土牛膝(*Achyranthes aspera*)、荻(*Triarrhena lutarioriparia*)等。

### 1.2 研究方法

高 30m 的监测塔建于林带的中间地段,地上部分的常规气象观测系统包括:雨量筒(TE525, Campbell, USA)安装在距地 25m 高处;净辐射传感器(CNR-1, Kipp & Zonen, Holland)、光量子传感器(LI-190SB, LiCor Inc. USA)、光合有效辐射(LI-200X, LiCor Inc. USA)、总辐射(Q7.1, Campbell, USA)均安装在 23m 高处;空气温湿度传感器(HMP45C, Vaisala, Helsinki, Finland)共分 4 层,分别安装在离地面 4、11、14、18m 处;三维超声风速仪(CAST-3, Campbell, USA)以及开路式 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O 红外分析仪(Li-7500, LiCor Inc., USA)组成的开路式涡度相关系统,安装在距地面 23m 处。地下部分监测系统主要包括:3 层土壤温度传感器(107-L, Campbell, USA),深度为 5、10、20cm;土壤含水量(CS616-L, Campbell, USA)距地表 15cm;土壤水势传感器(257-L, Campbell, USA)埋入表土下 10cm 和 20cm;土壤热通量板(HFP01, Hukseflux, The Netherlands)距地表 2cm。

Li-7500、CAST-3 监测数据采集频率设定为每秒 10 次(10 Hz),其余要素的取样频率为 0.5Hz,通过计算处理输出 30min 的平均值。10Hz 数据通过 WPL 校正及二次坐标轴旋转修正后,运用加和平均值法计算碳、

水、能量通量 30min 平均值。夜间风速较小易形成平流或泄流现象,以夜间风速  $u_* > 0.2 \text{ m/s}$  的通量值为有效数据,同时,剔除受降雨等气象因子影响造成突变数据,用能量平衡来评价站点数据质量,该站点能量闭合度 EBR 为 0.88。对于缺失数据,半小时缺失值采用查表法,选择邻近相似气象条件(温度、湿度)下的值来替代。如果缺失值太多,采用平均值插补法,用邻近天的平均值补齐;日通量值,白天一般采用前后 14d 左右的数据平均值补足,夜间一般用 7d 左右平均值求得,避免由于时间太长,因气象因子变化而增大估算的误差<sup>[9-13]</sup>。

本文选择 2005 年 4 月到 2006 年 3 月监测到的通量数据,研究森林生态系统  $WUE$  的变化及与环境因子的关系。生态系统的  $WUE$  由系统  $\text{CO}_2$  净吸收量(即  $\text{CO}_2$  通量值  $F_{\text{CO}_2}$ )与水汽的净蒸散量(水汽通量值  $F_{\text{H}_2\text{O}}$ )来计算。

$$WUE_{\text{eco}} = F_{\text{CO}_2} / F_{\text{H}_2\text{O}}$$

## 2 结果与分析

### 2.1 $WUE$ 变化规律

从 1 月开始,3 个月为 1 季,1—3 月份为春季,以此计算,分别为夏、秋和冬季。植物不同季节的生理特性以及环境因子的变化影响生态系统的碳吸收和排放量,以及冠层的水汽蒸发量,所以不同季节,杨树林生态系统  $WUE$  变化也不相同。

图 1 是杨树林生态系统  $WUE$  不同季节 10 个晴朗日 09:00—16:00 时半小时平均值的日变化情况,从图中可以看出,4—6 月份生态系统  $WUE$  最高,09:00—15:00 时期间变化较小,从 15:00 时后,变化起伏较大;7—9 月份  $WUE$  值小于 4—6 月份,变化幅度较小,在 14:00 以后略有降低;1—3 月份的  $WUE$  值小于 4—9 月

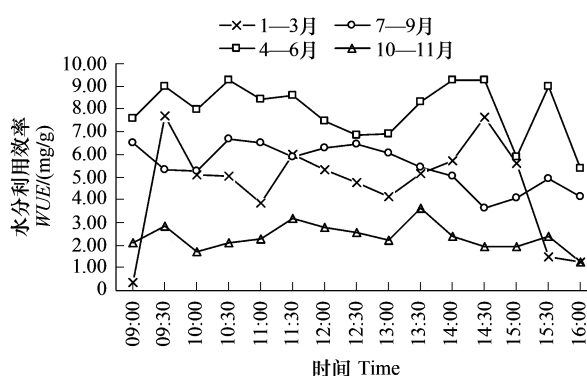


图 1 生态系统水分利用效率不同季节日变化

Fig.1 Diurnal WUE in different seasons

份,从 09:00 左右  $WUE$  值很快升高,到 15:00 期间一直保持在一定范围内变化,15:00 以后又迅速降低;最低是 10—11 月份(11 月中旬到 1 月中旬生态系统的  $\text{CO}_2$  排放量大于吸收量,所以此段时间不计其  $WUE$ ),  $WUE$  变化幅度较小。滩地杨树人工林生态系统的  $WUE$  在杨树生长季较非生长季高,这与杨树生长季较高的碳吸收有关,而 7—9 月份虽然仍处于杨树生长季,但由于气温升高,森林蒸散量加大,大大降低了  $WUE$  值。

### 2.2 生态系统 $WUE$ 与环境因子的关系

生态系统的  $WUE$  不仅受系统内生物生长规律的控制,植被的光合作用、蒸腾作用、土壤呼吸、林地蒸散等都受到温度、湿度等生态环境因子的影响,所以生态系统的  $WUE$  与这些因子之间存在密切关系<sup>[14]</sup>。

#### 2.2.1 $WUE$ 与温度的关系

据相关研究,一定范围内,生态系统碳通量( $F_c$ )值,即生态系统净  $\text{CO}_2$  吸收量会随着温度的升高而增大,同时生态系统的蒸散( $F_{\text{H}_2\text{O}}$ )作用也会加强<sup>[15]</sup>,增加速度不同,由二者决定的生态系统  $WUE$  的值也不同,同时受其他因子影响,  $WUE$  会出现较复杂的变化。图 2 是不同季节杨树林生态系统日平均半小时  $WUE$  值与温度的变化关系。杨树林生态系统在生长季(图 2a 表示 4—6 月份、图 2b 表示 7—9 月份),  $WUE$  随温度变化较小,特别是 7—9 月份,随着气温升高,  $WUE$  有减小的趋势。在非生长季,杨树林生态系统  $WUE$  与气温的关系见图 2c(10—12 月份)和图 2d(1—3 月份),随着气温升高,  $WUE$  逐渐增大。

#### 2.2.2 $WUE$ 与土壤含水量的关系

土壤不仅供给植物生理代谢所需养分、水分,影响光合与呼吸作用,而且土壤含水量也直接关系到林地蒸散量。由于土壤含水量随时间变化不大,以 5d 内的 30min 平均值来研究与生态系统  $WUE$  的关系。图 3a 为非汛期林地土壤未被水淹情况下,土壤含水量与系统  $WUE$  的相互关系,可以看到随着土壤含水量的增加,系

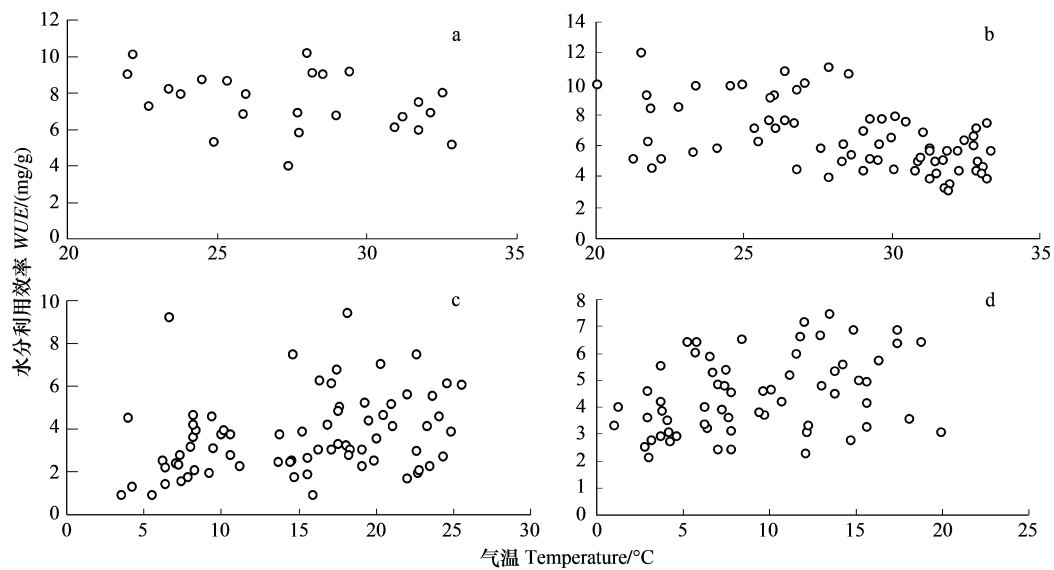


图2 生态系统水分利用效率与温度的变化关系

Fig. 2 The relationship between average WUE and temperature

统 WUE 的变化不规律。图 3b 为汛期林地土壤被水淹情况下,二者的关系,随着土壤含水量的增加,系统 WUE 也逐渐增大。

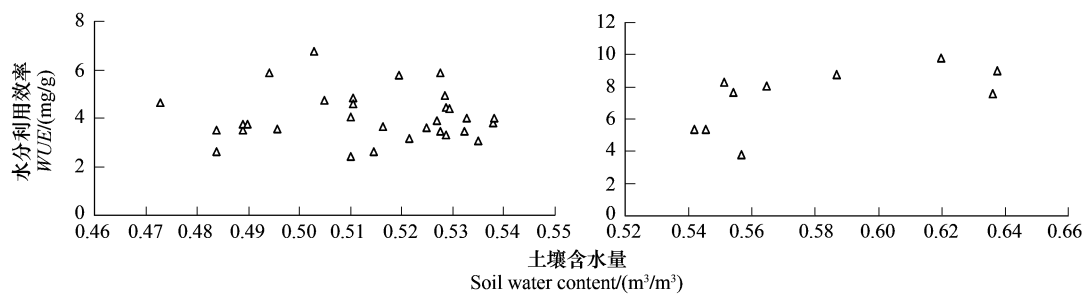


图3 生态系统 WUE 和土壤含水量的关系

Fig. 3 The relationship between WUE and soil water content

### 2.2.3 WUE 与土壤热通量的关系

土壤热通量是指土壤与外界的热交换量 ( $W/(m^2 \cdot s)$ )。土壤热通量受辐射、湿度、温度、土壤理化结构等多种因子综合影响。一般情况,白天太阳辐射强,气温高,热量由外界输入土壤,热通量值通常用正值表示,而晚上,气温低,土壤热量向外扩散,土壤热通量用负值表示。图 4 是非汛期土壤热通量 5d 平均值与系统 WUE 的关系,随着土壤热通量的增加,WUE 也增加。

### 2.2.4 WUE 与饱和水汽压差的关系

饱和水汽压差 (VPD) 反应了大气温度和湿度,是生态系统水分蒸发潜力的参数,因此 VPD 与 WUE 存在密切的关系。饱和水汽压的计算公式采用 1996 年公布的《气象仪器和观测方法指南》中公布的 WMO 公式:

$$e_{sw} = e_0 \cdot \exp[17.62t/(2.43 + t)]$$

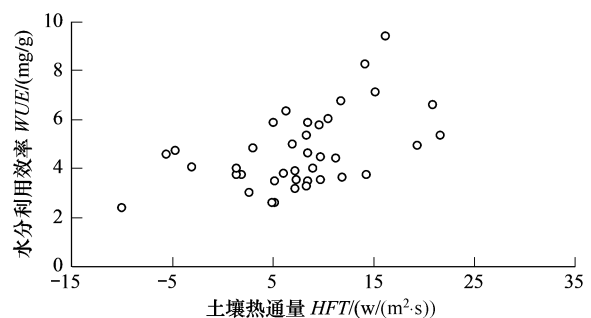


图4 系统 WUE 和土壤热通量的关系

Fig. 4 The relationship between WUE and soil heat flux

式中, $e_{sw}$ 指水面饱和水汽压; $t$ 指温度。

与相关研究类似,滩地杨树林生态系统的  $VPD$  与  $WUE$  呈显著的负相关,图 5 是不同月份选择几个晴朗天气情况下半小时  $VPD$  变化与  $WUE$  的响应变化关系,随着  $VPD$  增加  $WUE$  降低,但可以看出在  $VPD$  大于 0.5 以后, $WUE$  降低的速度明显减缓,这可能因为当生态系统蒸发强度增加的时候,受高温影响,植被叶片的保护作用降低了气孔导度,从而降低了系统的蒸散量,使  $WUE$  降低的速度减小<sup>[16]</sup>。

2.2.5 主成分分析

生态系统的  $WUE$  受多种环境因子的影响,空气温度、土壤含水量、土壤热通量和  $VPD$  等因子相互作用,同时在不同程度上影响着系统  $WUE$  的变化。将这 4 个因子做主成分分析,得到如下结论,见表 1,从表中可以看到,土壤含水量和空气温度是影响生态系统  $WUE$  的主要因子,但其累积贡献率只达到了 67.37%。系统的  $VPD$  主要决定因子也是由空气温度与土壤含水量,因此  $VPD$  在这 4 个因子中所占的特征比例也较大,约为 17.4%。

3 讨论

本研究将森林生态系统水分利用效率定义为生态系统碳通量与水通量的比值,虽然受野外条件、气候因素以及监测系统内部的响应频率等的影响,存在一定误差,但数据经过检测,能量平衡闭合度达到 0.88,因此剔除了受降雨等气象因素影响的数据外,监测数据基本上可以反映森林生态系统与大气间  $CO_2$ 、 $H_2O$  气交换的真实情况<sup>[17]</sup>。

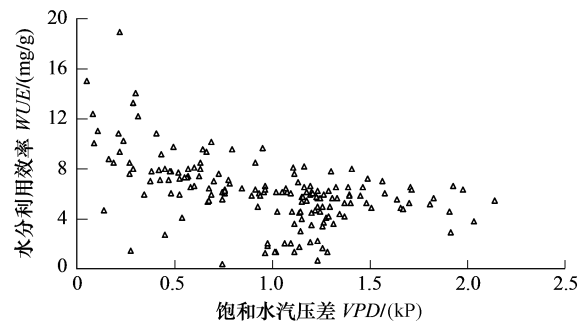


图5 系统  $WUE$  和  $VPD$  的关系

Fig.5 The relationship between  $WUE$  and  $VPD$

表 1 解释的总方差

Table 1 Total variance explained

成分 Component	初始特征值 Initial eigenvalues			提取平方和载入 Extraction sums of squared loadings		
	合计 Total	方差的 /% of variance	累积/% Cumulative	合计 Total	方差/% of variance	累积/% Cumulative
土壤含水量 SWC	1.548	38.692	38.692	1.548	38.692	38.692
空气温度 $T_{air}$	1.147	28.681	67.373	1.147	28.681	67.373
饱和大气压差 $VPD$	0.696	17.405	84.779			
土壤热通量 $HFT$	0.609	15.221	100.000			

生态系统不同季节  $WUE$  日变化符合森林生态系统的生长物候变化特点,但和其他学者的研究结果相比, $WUE$  的日变化波动较大,这可能与计算  $WUE$  的方法不同有关,涡度相关系统主要以半小时平均值监测的碳、水通量值来计算,与其他方法推导出的变化相比,它更强调了变化的实时性,也易受监测误差的影响<sup>[18]</sup>。

杨树林生态系统的碳、水通量由于受到自身生长规律和环境因子的多重影响,而且同一因子对碳通量和水通量的影响程度不同,导致水分利用效率的变化比较复杂<sup>[19-20]</sup>。根据主成分分析,土壤含水量和大气温度对滩地杨树林生态系统  $WUE$  的影响最大,这与湿地生态系统的特征有关,土壤含水量的大小不仅直接影响到根系吸收水的速度,更重要的是,对湿地生态系统,林地土壤含水量直接影响林地蒸发量的大小,从而影响到整个生态系统的  $WUE$  值。但从特征因子的影响来看,土壤含水量和大气温度这两个因子的累积贡献率较低,也就是说  $VPD$  和土壤热通量也在很大程度上影响着系统  $WUE$ <sup>[21-22]</sup>。

事实上,从各因子之间的相互关系来看,如温度是各种气象因子和生态系统内部物理化学变化的关键驱动之一,直接影响到了植物生理反应规律和林地蒸散作用。据有关研究表明,在一定范围内,温度升高,植物

光合作用呈指数或线性增长,但温度过高会抑制植物的光合作用,如有些植物叶片的光合作用会出现午休现象,因此,不同温度范围,生态系统光合与蒸散对温度的响应程度是不同的。而且,气温、地温、土壤含水量、土壤热通量等因素对系统 *WUE* 的影响相互制约,其协同作用对生态系统水分利用效率的影响还有待进一步研究<sup>[23-26]</sup>。

## References:

- [1] Xu Z Z, Zhou G S. Agricultural water use efficiency and its response to environments and managing activities. *Journal of Nature Resources*, 2003, 18(3):294-303.
- [2] Karner P J, Kozlowski T T. *Physiology of Woody Plants*. London: Academic Press, 1979: 443-444.
- [3] Sun S F, Huang J H, Lin G H, Zhao W, Han X G. Application of stable isotope technique in the study of plant water use. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(9):2362-2371.
- [4] Chen T, Feng H Y, Xu S J, Zhang W Y, An L Z. Stable carbon isotope composition of desert plant leaves and water-use efficiency. *Journal of Desert Research*, 2002, 22(3):288-291.
- [5] Xie X Q. A study on water cycle in agro-ecosystem and relationship between crops and water. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2001, 9(1):9-12.
- [6] Wang S X, Cui J B, Zhuang J P. Characteristics of field water cycling in semiarid area of western Liaoning I. status of field water supply. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1998, 9(6):603-607.
- [7] Zhang X Y, Kang E S, Si J H, Zhou M X. Stem Sap Flow of Individual Plant of *Populus euphratica* and Its Conversion to Forest Water Consumption. *Scientia Silvae Sinicae*, 2006, 42(7):28-32.
- [8] Benjamin T J. Carbon, water and nutrient flux in Maya homegardens in the Yucatan peninsula of Mexico. *Agroforestry Systems*, 2001, 53:103-111.
- [9] Suyker A E, Verma S B. Year-round observation of the net ecosystem exchange of carbon dioxide in a native tallgrass prairie. *Global Change Biology*, 2001, 7:279-289.
- [10] Graeme J J. Strategies to estimate national forest carbon stocks from inventory data: the 1990 New Zealand baseline. *Global Change Biology*, 2001, 7:389-403.
- [11] Makela A. Derivation of stem taper from the pipe theory in a carbon balance framework. *Tree Physiology*, 2002, 22:891-905.
- [12] Knohl A K O, Minayeva T Y, Milyueva I M, Vygodskaya N N, Foken T, Schulze E D. Carbon dioxide exchange of a Russian boreal forest after disturbance by wind throw. *Global Change Biology*, 2002, 8:231-246.
- [13] Law B E. Carbon storage and fluxes in ponderosa pine forests at different developmental stages. *Global Change Biology*, 2001, 7:755-777.
- [14] Wu J C, Wu Z M, Hong S Y, Shi L. Comparative studies on transpiration speed and water use efficiency for different age stages of *Pinus taiwanensis*. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2007, 34(2):239-243.
- [15] Jiang G M, He W M. Species and Habitat variability of Photosynthesis, Transpiration and Water Use Efficiency of Different Plant Species in Maowusu Sand Area. *Acta Botanica Sinica*, 1999, 41(10):1114-1124.
- [16] Song X, Yu G R, Liu Y F. The season variation of *WUE* and efficiency of environmental factors for stands in sub-tropic. *China Science D*, 2006, 36(s I):111-118.
- [17] Zhu L, Xu X. Review on influential factors of plant water use efficiency. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2005, 23(6):204-209.
- [18] Zhao F H, Yu G R. A Review on the Coupled Carbon and Water Cycles in the Terrestrial Ecosystems. *Progress in Geography*, 2008, 27(1):32-38.
- [19] Wang Y. The Carbon and Water Flux and Carbon Storages of Snail Control and Chistosomiasis Prevention Forest Ecosystem in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2006.
- [20] Niu S L, Jiang G M, Gao L M, Li Y G, Jiang C D, Liu M Z, Cui H X, Ding L, Peng Y. Comparison of photosynthesis and water use efficiency between three plant functional types in Hunshandak sandland. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(4):699-704.
- [21] Hu Z M, Yu G R, Wang Q F, Zhao F H. Ecosystem level water use efficiency: A review. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(3):1498-1507.
- [22] Feng M Y, Gong S, Wei L, Zhang W H, Hu F X, Zhang C H, Xiao J X. A study on the features of  $\text{CO}_2$  concentration and flux changes and *WUE* in rice field. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2008, 30(5):928-932.
- [23] Hu S J, Kang S Z, Song Y D, Tang C Y, Pang Y, Li Y. Variation of phreatic evaporation and its calculation method in Tarim River basin in Xinjiang Region. *Transactions of the CSAE*, 2004, 20(2):49-53.
- [24] Gerdol R, Anfodillo T, Gualmini M, Cannone N, Bragazza L, Brancaloni L. Biomass distribution of two subalpine dwarf-shrubs in relation to soil moisture and nutrient content. *Journal of Vegetation Science*, 2004, 15(4):457-464.

- [25] Hu S J, Kang S Z, Song Y D, Wang J L. Estimating water consumption of reed with observed data of ground water regime. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2003,22(3):19-21.
- [26] Zhao P, Zeng X P. Daily variation of gas exchange, stomatal conductance and water use efficiency in summer leaves of *Ormosia Pinnata*. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2000,8(1):35-42.

#### 参考文献:

- [1] 许振柱,周广胜. 农业水分利用率及其对环境和管理的影响. *自然资源学报*,2003,18(3):294-303.
- [3] 孙双峰,黄建辉,林光辉,赵威,韩兴国. 稳定同位素在植物水分利用研究中的应用. *生态学报*,2005,25(9):2362-2371.
- [4] 陈拓,冯虎元,徐世建,张维亚,安黎哲. 荒漠植物叶片碳同位素组成及其水分利用效率. *中国沙漠*,2002,22(3):288-291.
- [5] 谢贤群. 农田生态系统水分循环与作物水分关系研究. *中国农业生态学*,2001,9(1):9-12.
- [6] 王仕新,崔剑波,庄季屏. 辽西半干旱地区农田水分循环特征的研究 I. 农田供水状况研究. *应用生态学报*,1998,9(6):603-607.
- [7] 张小由,康尔泗,司建华,周茂先. 胡杨蒸腾耗水的单木测定与林分转换研究. *林业科学*,2006,42(7):28-32.
- [14] 武金翠,吴泽民,洪淑媛,石雷. 不同年龄黄山松蒸腾速率及水分利用效率的比较研究. *安徽农业大学学报*,2007,34(2):239-243.
- [15] 蒋高明,何维明. 毛乌素沙地若干植物光合作用、蒸腾作用和水分利用效率种间及生境间差异. *植物学报*,1999,41(10):1114-1124.
- [16] 宋霞,于贵瑞,刘允芬. 亚热带人工林水分利用效率的季节变化及其环境因子的影响. *中国科学 D 辑*,2006,36(增刊 I):111-118.
- [17] 朱林,许兴. 植物水分利用效率的影响因子综述. *干旱地理农业研究*,2005,23(6):204-209.
- [18] 赵风华,于贵瑞. 陆地生态系统碳-水耦合机制初探. *地理科学进展*,2008,27(1):32-38.
- [19] 王妍. 长江中下游滩地抑螺防病林生态系统碳水通量及碳贮量研究. 博士学位论文. 北京:中国林业科学研究院,2006.
- [20] 牛书丽,蒋高明,高雷鸣,李永庚,姜闯道,刘美珍,崔红霞,丁莉,彭羽. 浑善达克水地不同植物功能型光合作用和水分利用特征比较. *生态学报*,2005,25(4):699-704.
- [21] 胡中民,于贵瑞,王秋风,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.
- [22] 冯敏玉,宫松,魏丽,张文红,胡逢喜,张崇华,肖金香. 稻田 CO<sub>2</sub> 浓度和通量变化特征以及水分利用效率的研究. *江西农业大学学报*,2008,30(5):928-932.
- [23] 胡顺军,康绍忠,宋郁东,田长颜,潘渝,李艳. 塔里木盆地潜水蒸发规律与计算方法研究. *农业工程学报*,2004,20(2):49-53.
- [25] 胡顺军,康绍忠,宋郁东,王举林. 利用地下水动态观测资料估算芦苇耗水量. *灌溉排水学报*,2003,22(3):19-21.
- [26] 赵平,曾小平. 海南红豆夏季叶片气孔交换、气孔导度和水分利用效率的日变化. *热带亚热带植物学报*,2000,8(1):35-42.