#### DOI: 10.5846/stxb201901020010

邵辉,张远东,顾峰雪,缪宁,刘世荣.长江经济带水分利用效率变化及与温度和降水的关系.生态学报,2020,40(16):5579-5590. Shao H, Zhang Y D, Gu F X, Miao N, Liu S R.Changes of water use efficiency in the Yangtze River Economic Zone and its relationship with temperature and precipitation. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(16):5579-5590.

### 长江经济带水分利用效率变化及与温度和降水的关系

### 邵 辉1,张远东1,\*,顾峰雪2,缪 宁3,刘世荣1

1 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所,国家林业和草原局森林生态环境重点实验室,北京 100091
 2 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所,农业部旱作节水农业重点实验室,北京 100081
 3 四川大学生命科学学院,生物资源与生态环境教育部重点实验室,成都 610064

摘要:通过水分利用效率(Water Use Efficiency, WUE)深入理解生态系统水碳循环的相互关系,可以较好地评估生态系统对气候变化的响应。长江经济带自然资源丰富、生态系统格局复杂,是中国重要的经济发展区,同时也是响应气候变化的重要区域。基于生态系统过程模型 CEVSA2(Carbon Exchange between Vegetation, Soil and Atmosphere),估算了 1981—2010 年长江经济带WUE 的时空动态变化,并分析其与温度和降水之间的关系。结果表明:(1)长江经济带 1981—2010 年 WUE 均值为 1.14 g Cmm<sup>-1</sup>m<sup>-2</sup>, WUE 的空间分布与降水量呈显著正相关关系(r=0.571,P<0.01),而与温度呈显著负相关(r=-0.740,P<0.01);(2) 长江经济带 1981—2010 年 WUE 变动区间为 1.04—1.19 g Cmm<sup>-1</sup>m<sup>-2</sup>, WUE 总体呈减少趋势,平均每年降低 0.0030 g Cmm<sup>-1</sup>m<sup>-2</sup>;(3)研究区域内四种主要植被类型常绿针叶林、常绿阔叶林、草地和常绿灌丛的水分利用效率均呈下降趋势,下降速率分别为-3.29×10<sup>-3</sup>、-2.99×10<sup>-3</sup>、-3.30×10<sup>-3</sup>、-2.65×10<sup>-3</sup> g Cmm<sup>-1</sup>m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>。研究区域内各植被类型的 WUE 与降水量的相关性不如温度显著,温度对 WUE 的影响要大于降水对 WUE 的影响。今后在提高时空分辨率的基础上,更精确地模拟和预测未来温度、降水等气候因子变化下长江经济带 WUE 变化趋势及分析该地区水碳耦合关系。

关键词:水分利用效率;气候变化;长江经济带;CEVSA2模型

# Changes of water use efficiency in the Yangtze River Economic Zone and its relationship with temperature and precipitation

SHAO Hui<sup>1</sup>, ZHANG Yuandong<sup>1,\*</sup>, GU Fengxue<sup>2</sup>, MIAO Ning<sup>3</sup>, LIU Shirong<sup>1</sup>

1 Key Laboratory of Forest Ecology and Environment of National Forestry and Grassland Administration, Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

2 Key Laboratory of Dryland Agriculture, Ministry of Agriculture, Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

3 Key Laboratory of Bio-resources and Eco-environment (Ministry of Education), College of Life Sciences, Sichuan University, Chengdu 610064, China

Abstract: Through water use efficiency (WUE), we can have a deep understanding of the relationship between water and carbon cycles in ecosystems and better assess the responses of ecosystems to climate change. The Yangtze River Economic Zone, with rich natural resources and complex ecosystem patterns, is an important area for economic development and responding to climate change in China. In order to study the changes of WUE and its relationship with temperature and precipitation, an ecosystem process model, Carbon Exchange between Vegetation, Soil and Atmosphere (CEVSA2), was used to estimate the temporal and spatial variation of WUE in the Yangtze River Economic Zone from 1981 to 2010. The evapotranspiration (ET) and net primary productivity (NPP) were obtained by CEVSA2 and the correlation coefficients

基金项目:国家重点研发计划(2018YFC0507302);国家自然科学基金(31971460, 31770490)

收稿日期:2019-01-02; 网络出版日期:2020-06-08

<sup>\*</sup>通讯作者 Corresponding author.E-mail: zyd@ caf.ac.cn

between annual mean WUE and annual precipitation and mean temperature were calculated. SPSS19, ArcGIS10.2 and Envi 5.3 were used in the analysis. The results showed that: (1) the mean WUE of the Yangtze River Economic Zone from 1981 to 2010 was 1.14 g C mm<sup>-1</sup>m<sup>-2</sup>. In spatial distribution, WUE was significantly positive correlated with annual precipitation (r=0.571, P<0.01), while significantly negative correlated with annual temperature (r=-0.740, P<0.01). (2) The WUE variation range of the Yangtze River Economic Zone was 1.04—1.19 g C mm<sup>-1</sup>m<sup>-2</sup> during 1981—2010, and the WUE showed a decreasing trend by 0.0030 g C mm<sup>-1</sup>m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>. (3) The WUE of four main vegetation types, including evergreen needle-leaved tree cover, evergreen broadleaved tree cover, herbaceous cover, and evergreen shrub cover, showed a downward trend with rate  $-3.29 \times 10^{-3}$ ,  $-2.99 \times 10^{-3}$ ,  $-3.30 \times 10^{-3}$  and  $-2.65 \times 10^{-3}$  g C mm<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>, respectively. In 81.58% of the study area (P<0.05), the WUE was negatively correlated with annual mean temperature between 1981 and 2010, while positively correlated with annual precipitation in 85.92% of the study area (P<0.05) during the same period. The correlation between WUE and precipitation of all vegetation types was not as significant as that between WUE and temperature. Therefore, the impact of temperature on WUE is greater than precipitation in this study area. In the future, higher spatial resolution and longer time series observation data are needed to simulate the water and carbon cycle and analyze its coupling relationship.

Key Words: water use efficiency; climate change; the Yangtze River Economic Zone; CEVSA2 model

随着工业社会的发展,由于人们大量使用煤炭、石油等化石燃料,造成大气中 CO<sub>2</sub>等温室气体的浓度逐渐 上升。温室气体增多导致全球逐渐变暖,这在一定程度上影响了全球水碳平衡<sup>[1-2]</sup>,造成某些地区水分不足, 进而会影响该地区植物对水分的利用。水分利用效率(Water Use Efficiency, WUE)不仅能够反映生态系统水 平上植物对吸收的碳和消耗的水之间的平衡,即碳水耦合特征<sup>[3-4]</sup>,而且在一定程度上能够体现植物对水分 的利用效果<sup>[5]</sup>。因此,通过研究其对外界环境因子变化的响应,如:气候变暖、CO<sub>2</sub>浓度升高、降水变化、氮沉 降等<sup>[6]</sup>,有助于了解和预测气候变化对生态系统的影响,为应对气候变化提供新的依据。

WUE 指植物消耗单位水量所生产出的碳同化量,可以作为评价植物生长适宜度的综合生理生态指标。 早期对植被 WUE 的研究主要为试验观测,多采用田间直接测定法<sup>[7]</sup>。之后,随着观测技术的发展,涡度相关 技术逐渐应用到对不同类型的生态系统水碳循环、生产力和 WUE 等的模拟<sup>[8-10]</sup>。在区域尺度上,随着遥感技 术的发展,使得大尺度上植被生长和水分状况的获取成为可能<sup>[11-12]</sup>,并在研究生态系统水平上的 WUE 取得 突破性进展<sup>[13]</sup>。Zhang 等<sup>[14]</sup>利用 CASA 模型(Carnegie Ames Stanford Approach model)和粮农组织 Penman-Monteith 模型,对长江源区 2000—2010 年植被 WUE 的研究发现,植被 WUE 呈明显下降趋势。Gang 等<sup>[15]</sup>研 究评估 2000—2013 年全球草地 WUE 的时空动态时发现,有 37.89%的草原生态系统 WUE 有所下降,其中 3.34%显著下降,而且南北半球每种草地类型的 WUE 对气候变化的反应不同。Zhou 等<sup>[16]</sup>使用 BEPS 模型 (Boreal Ecosystem Productivity Simulator model)和遥感数据,模拟西南地区森林生态系统 WUE 在干旱胁迫下 的变化,研究结果表明,干旱引起森林生态系统》WUE 表现为对干旱的积极响应,表明森林生态系统具有抗旱性。

长江经济带东起上海市,西至云南省,覆盖11省(市)五大城市群,其面积约占我国国土面积的21%,该 地区经济发达,城市体系完整,人口超过全国人口的40%,是我国重大战略发展区,也是我国"三大支撑带"之 一<sup>[17-18]</sup>。长江经济带在生态区位上同样具有重要的地位,该地区生态系统类型多样,有森林、草地、灌丛、湿 地等,生物多样性丰富,拥有多种珍稀水生生物物种,重要保护物种近1400余种,是我国生态文明建设的示范 带<sup>[19-20]</sup>。本文使用生态系统过程模型 CEVSA2(Carbon Exchange between Vegetation, Soil and Atmosphere)估 算 1981—2010年期间,长江经济带11省(市)的 NPP 和 *ET*,通过揭示 WUE 时空变化,分析其对温度和降水 的响应,以便今后为该地区生态恢复与水碳管理提供建议。

#### 1 资料和方法

#### 1.1 研究区概况

长江经济带(图1)主要位于东经97°21′—122°25′,北纬21°08′—35°20′之间,覆盖四川、云南、贵州等11 省(市),面积约205万平方公里,横跨东中西三大区域<sup>[21]</sup>。地理位置优越,地势西高东低,呈多级阶梯性地 形,西部为青藏高原东缘的高山峡谷区,中东部低山丘陵与平原相间分布,湖泊众多(太湖、洞庭湖、鄱阳湖、 巢湖等)。气候湿润,降雨充沛,水资源丰富,大部分地区属亚热带季风气候,平均年降水量约1067 mm,平均 干旱指数为0.86,属于湿润地带<sup>[22-23]</sup>。



#### 1.2 数据来源

本研究 CEVSA2 模型所需要的数据包括 CO<sub>2</sub>浓度、土壤类型、植被数据以及气象资料,其中温度、降水等 气象数据,均来自国家气象信息中心。利用 ANUSPLIN 软件插值得到分辨率 0.1°×0.1°的栅格数据,作为模型 的气象输入数据。大气 CO<sub>2</sub>浓度资料来自于美国 NOAA Mauna Loa CO<sub>2</sub>数据集,自 CO<sub>2</sub>·earth 网站下载 (https://www.co2.earth/)。土壤类型和质地资料来自 1:100 万土壤类型图和第二次土壤普查数据,并对其进 行重采样,使得其与气候数据的空间分辨率一致。植被数据采用 2000 年全球土地覆盖数据集(European Commission, Joint Research Centre, 2003.http://bioval. Jrc.ec.europa.eu/products/glc2000/glc2000.php)。 **1.3** 模型介绍

CEVSA2 是一个基于生理和生态过程的生物地球化学循环模型,用于模拟植物-土壤-大气系统能量交换和水-碳-氮耦合循环过程<sup>[24-27]</sup>。利用该模型可以模拟区域至全球尺度上生态系统过程对大气 CO<sub>2</sub>浓度变化、 气候变化、氮沉降等的响应<sup>[28-30]</sup>。在 CEVSA2 模型中,对于碳循环的模拟主要基于光合、自养呼吸、凋落、异 养呼吸等过程的定量表达,而这些过程受生理生态特征和环境条件的共同控制。CEVSA2 模型通过计算辐 射、水和热的传输过程来模拟水循环过程<sup>[31-32]</sup>。

在 CEVSA2 模型中,基于 Farquhar<sup>[33]</sup>方程模拟光合作用,综合考虑了光合作用、气孔导度、呼吸作用、氮

吸收和蒸发蒸腾量等生理生态过程来决定 NPP, NPP 是植被冠层的总光合速率(A)与植物自养呼吸(R)的差值。

$$NPP = A - R_a \tag{1}$$

式中,*A*为植被冠层的光合速率,*R*<sub>a</sub>为叶、茎或根的呼吸消耗产物量。在 CEVSA2 模型中光合速率由生物化学 过程和气孔传导共同决定。模型中采用连续迭代的方法解有关的非线性方程组使由生物化学过程和气孔传 导度决定的光合速率相等,此时的光合速率即为*A*。由植物的生物生化过程决定的光合速率*A*<sub>a</sub>为,

$$A_{b} = \min\{W_{c}, W_{i}, W_{p}\}(1 - 0.5P_{o}/\tau P_{c}) - R_{d}$$
(2)

气孔导度决定的光合速率 A<sub>d</sub>由下式计算:

$$A_{d} = g_{s}(P_{a} - P_{c})/160 \tag{3}$$

式中, $W_e$ 由光合酶,即二磷酸核酮糖-羧化酶-氧化酶(Rubisco)活性所决定,与叶片氮含量直接相关。 $W_j$ 取决于光合反应过程中的电子传递速度,决定于叶片吸收的光合有效辐射。 $W_p$ 决定于光合反应过程对磷酸丙糖 (Triose Phosphate)的利用效率,决定于叶片对光合产物的利用和输出能力。 $P_a$ 和  $P_e$ 分别是叶肉组织中  $O_2$ 和 CO<sub>2</sub>的分压,决定于大气 CO<sub>2</sub>分压和叶片气孔传导度。 $\tau$ 是 Rubisco 对 CO<sub>2</sub>浓度的特定反应参数,在模型中  $\tau$ 是温度的函数, $R_d$ 为白昼非光合呼吸速率。 $g_s$ 是植物叶片的气孔导度, $P_a$ 和  $P_e$ 分别是叶片表面和细胞内的 CO<sub>2</sub>分压。

在 CEVSA2 模型中,自养呼吸  $R_a$ 包括维持呼吸  $R_m$ 和生产呼吸  $R_g$ 两部分。 $R_g$ 是总初级生产力减去维持呼吸剩余部分的 20%。而维持呼吸又分为叶片和非叶组织两部分分别计算<sup>[34]</sup>,叶片的维持呼吸( $R_{ml}$ )取决于叶 片氮含量(N)和温度(T)<sup>[35]</sup>:

$$R_{ml} = \frac{N}{50} e^{r_1(T) - \frac{r_2(T)}{8.3144T_k}}$$
(4)

式中, $r_1(T)$ 和 $r_2(T)$ 分别是温度的响应函数, $T_k$ 是绝对温度。

非叶组织的维持呼吸则取决于非叶组织的质量(m<sub>w</sub>)和温度:

$$R_{ms} = k_m m_w R_R(T_k) \tag{5}$$

式中, $k_m$ 为呼吸速率, 一般  $k_m = 0.35$ ,  $R_R(T_k)$  为维持呼吸的温度响应函数。

Penman-Monteith 方程通过气孔阻抗与植物的光合同化过程联系在一起,从而能够更好地模拟冠层水碳的耦合循环。因此 CEVSA2 中采用 Penman-Monteith 方程计算冠层的蒸散,

$$ET = \frac{sR_n + c_p \rho g_a D}{\lambda \left(s + \gamma \left(1 + g_a / g_n\right)\right)}$$
(6)

式中,*c*<sub>*p*</sub>是空气的比热,*g*<sub>*n*</sub>是冠层气孔导度,*g*<sub>*a*</sub>是边界层导度,*R*<sub>*a*</sub>是净辐射,*g*是干湿表常数,*l*是蒸发潜热,*r*是空气密度,*D*是水汽压差,*s*是饱和水汽压差对温度的曲线斜率。

1.4 模型运行与验证

本研究中,模型运行的时间步长为 10d,空间分辨率为 0.1°。首先应用 1961—2010 年的平均气候数据运 行模型至生态系统平衡态,即各个状态变量如植被、土壤碳贮量以及土壤含水量等年际变化量小于 0.1%,且 NPP、LT(Litter Productivity,凋落物产生量)与 HR(Heterotrophic Respiration,异氧呼吸)相等,然后用 1961— 2010 年每旬资料进行动态模拟,并反复运行模型以消除假定的生态系统状态变量的初始值(即平衡态假设) 对模拟结果的影响。从最终模拟结果中提取长江流域的数据进行分析。

在 CEVSA2 模型的发展建立和区域应用过程中,应用了大量的水碳循环观测数据对模型的模拟结果进行 了验证。IGBP 的 GPPDI 计划搜集和编制了近 1600 个基于实际测定的全球 0.5 经纬度网格 NPP 数据库,它 包括各种植被类型的代表性样点。CEVSA 模拟值与 GPPDI 观测值的比较表明,两者之间不仅有很强的相关 性,绝对值也非常接近<sup>[36]</sup>。顾峰雪等<sup>[37]</sup>在 2007 年利用不同站点的通量观测数据对 CEVSA2 模型进行了验 证,验证结果表明,CEVSA2 模型能够很好地模拟不同站点水碳交换的季节、年际动态特征及其对环境变化的 响应,对 ET 的验证结果表明在日尺度上,长白山、千烟洲、海北和哈佛站的观测值与模拟值的 R<sup>2</sup>达到 0.65 以上。Gu 等<sup>[27]</sup>用中国 420 个森林清查样地、335 个草地调查样方和 1246 个县级单元的统计数据计算的 NPP 样点观测数据对 CEVSA2 模型进行了验证,结果表明 CEVSA2 模型能够很好地模拟观测 NPP 的时空动态。 张远东等<sup>[38]</sup>也利用西南高山地区的 NPP 和 ET 观测值对 CEVSA2 模型进行了验证。

1.5 数据分析

本研究中 WUE 采用生态系统尺度上 NPP 与 *ET* 的比值(NPP/*ET*), NPP 和 *ET* 关系密切且均为陆地生态 系统的重要过程,基于 NPP 与 *ET* 的 WUE,能反映生态系统生产力和水的耦合关系,因此该定义广泛应用于 生态系统尺度的研究。

基于 CEVSA2 模型,模拟得到 1981—2010 年全国 0.1°×0.1°空间分辨率的植被 ET、NPP 等数据。采用 Pearson 相关系数法,分别计算长江经济带 WUE 与年平均降水量、年平均温度之间的相关系数,并在 AreGIS10.2 中将相关系数按照 0.05,0.01 两个显著性水平进行分类,制作得到 WUE 与降水、温度的相关系数 图。之后,采用线性趋势倾向率法分析 WUE 年际变化趋势,借助软件 Envi 5.3 对 30 年的数据进行线性回归,利用最小二乘法拟合得到一元线性方程,其斜率即趋势倾向率<sup>[39-41]</sup>。查相关系数临界值表得 r<sub>0.05</sub> = 0.361, r<sub>0.01</sub> = 0.463。

#### 2 结果分析

#### 2.1 WUE 空间分布

长江经济带 1981—2010 年 WUE 均值为 1.14 g C mm<sup>-1</sup>m<sup>-2</sup>。其中,WUE 较高的地区主要位于贵州省东 部、东北部,重庆市东南部,湖南省西南部、东北部等地区。安徽省、江苏省、浙江省的小部分地区 WUE 较高 (>1.5 g C mm<sup>-1</sup>m<sup>-2</sup>)。WUE 较低的地区主要位于四川省的西部以及云南省的北部等地区(<0.8 g C mm<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>)(图 2)。长江经济带 WUE 最高的植被覆盖类型为农田、灌丛或草地嵌合区(1.22 g C mm<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>),其次为 常绿灌丛(1.21 g C mm<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>),林木或其他天然植被嵌合区(1.19 g C mm<sup>-1</sup>m<sup>-2</sup>)和耕作和管理区(1.16 g C mm<sup>-1</sup>m<sup>-2</sup>),最低为稀疏草地/稀疏灌丛(0.60 g C mm<sup>-1</sup>m<sup>-2</sup>)。四种主要植被类型常绿针叶林、常绿阔叶林、草 地和常绿灌丛的 WUE 分别为 1.12、1.11、0.97、1.21 g C mm<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>(表 1)。







长江经济带 WUE 的空间分布与温度呈负相关,相关系数为-0.740(P<0.01),中东部地区与温度负相关 比西南地区更为明显,相关系数为负值的区域占总面积的94.97%,其中通过显著性检验的面积占81.58%(P<0.05),与温度呈极显著正相关的区域为0.95%(P<0.01),主要位于重庆市东北部以及云南省西北部部分地区

## (图 3)。WUE 与降水量呈正相关,相关系数为 0.571(*P*<0.01),主要位于江苏省、浙江省、安徽省、江西省等省份,相关系数为正值的区域占总面积的 89.78%,其中通过显著性检验的面积占 85.92%(*P*<0.05)(图 4)。

表 1 长江经济带 1981—2010 年不同土地覆盖类型 NPP、ET、WUE 均值,WUE 趋势倾向率及其与温度、降水相关系数 Table 1 Annual NPP, annual ET, annual mean WUE, WUE trend tendency rate of different land cover types in the Yangtze River Economic Zone from 1981 to 2010, and their correlation coefficients with annual temperature and annual precipitation

土地覆盖类型 Land cover type	面积百分比 Area ratio/ %	NPP 均值 Mean NPP/ (g C m <sup>-2</sup> )	<i>ET</i> 均值 Mean <i>ET/</i> mm	WUE 均值 Mean WUE/ (g C mm <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> )	WUE 趋势 倾向率 Tendency rate of WUE/ (g C mm <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup> )	WUE 与温度 相关系数 Correlation coefficients between WUE and temperature	WUE 与降水量 相关系数 Correlation coefficients between WUE and precipitation
常绿阔叶林 Tree cover, broadleaved, evergreen	11.33	772.87	703.08	1.11	-2.99×10 <sup>-3</sup>	-0.474 **	0.391 *
落叶阔叶林(郁闭) Tree cover, broadleaved, deciduous, closed	0.62	781.29	751.58	1.03	-2.69×10 <sup>-4</sup>	-0.334 *	0.562 **
常绿针叶林 Tree cover, needle-leaved, evergreen	26.04	777.96	705.13	1.12	-3.29×10 <sup>-3</sup>	-0.536 **	0.409 *
林木或其他天然植被嵌合区 Mosaic: tree cover/other natural vegetation	2.65	850.62	703.29	1.19	-2.74×10 <sup>-3</sup>	-0.444 *	0.458 *
常绿灌 <u>从</u> Shrub cover, closed-open, evergreen	11.26	862.12	727.77	1.21	-2.65×10 <sup>-3</sup>	-0.491 **	0.532 **
落叶灌丛 Shrub cover, closed-open, deciduous	0.02	582.77	455.59	0.84	-3.69×10 <sup>-3</sup>	-0.151	0.207
草地 Herbaceous cover, closed-open	13.78	555.37	570.37	0.97	-3.30×10 <sup>-3</sup>	-0.585 **	0.125
稀疏草地/稀疏灌丛 Sparse herbaceous or sparse shrub cover	0.02	352.28	403.07	0.60	-1.88×10 <sup>-3</sup>	-0.595 **	0.084
定期水淹灌丛/草地 Regularly flooded shrub and/or herbaceous cover	0.59	632.90	540.88	1.05	-4.14×10 <sup>-3</sup>	-0.632 **	0.493 **
耕作和管理区 Cultivated and managed areas	28.04	880.84	757.72	1.16	-4.02×10 <sup>-3</sup>	-0.580 **	0.612 **
农田、林木或其他天然植被嵌 合区 Mosaic: cropland/tree cover/ other natural vegetation	0.07	547.48	532.25	0.90	-4.09×10 <sup>-3</sup>	-0.611 **	-0.032
农田、灌丛或草地嵌合区 Mosaic: cropland/shrub and/or grass cover	1.93	920.93	753.50	1.22	-2.81×10 <sup>-3</sup>	-0.474 **	0.509 **
裸地 Bare areas	0.06	_	_	_	_	_	_
水体 Water bodies	3.37	_	_	_	_	_	_
雪和冰 Snow and ice	0.12	_	_	_	_	—	—
人工表面及相关区域 Artificial surfaces and associated areas	0.10	_	_	_	_	_	_

\* P < 0.05; \*\* P < 0.01; NPP: 净初级生产力 Net primary productivity; ET: 蒸散 Evapotranspiration; WUE: 水分利用效率 Water use efficiency

研究区域内,大部分植被类型 WUE 与温度呈显著负相关,其中相关性最高的为定期水淹灌丛草地,相关 系数为-0.632(P<0.01),其次为农田、林木或其他天然植被嵌合区和稀疏草地/稀疏灌丛,相关系数分别为 -0.611(P<0.01)、-0.595(P<0.01),只有落叶灌丛没有通过显著性检验。各植被类型 WUE 与降水量呈显著 正相关,其中相关性最高的为耕作和管理区,相关系数为0.612(P<0.01),其次为落叶阔叶林(郁闭)和常绿灌 丛,相关系数分别为0.562(P<0.01)、0.532(P<0.01),而落叶灌丛、草地、稀疏草地/稀疏灌丛、农田、林木或其 他天然植被嵌合区均没有通过显著性检验(表1)。



图 3 长江经济带 1981—2010 年 WUE 与年温度相关系数空间分布

Fig.3 Spatial distribution of correlation coefficient between annual WUE and annual temperature during the period of 1981—2010 in the Yangtze River Economic Zone



图 4 长江经济带 1981—2010 年 WUE 与年降水量相关系数空间分布

Fig.4 Spatial distribution of correlation coefficient between annual WUE and annual precipitation during the period of 1981—2010 in the Yangtze River Economic Zone

#### 2.2 WUE 整体年际变化趋势

长江经济带 1981—2010 年 WUE 变动区间为 1.04—1.19 g C mm<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>,其中 1993 年 WUE 最大,2004 年

最小。1981—2010年期间, WUE 平均每年降低 0.0030 g C mm<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>, 总体变化趋势为减少(图 5)。长江经济 带 WUE 的空间分布与温度呈显著负相关,相关系数为-0.740(P<0.01),温度对 WUE 变化的影响大于降水, 温度较高的年份,如 2004、2006年,WUE 较低;温度较低的年份,如 1982、1984年,WUE 较高。图 5 表明,在 1981—2010年间,随着气温上升,NPP和 ET 均呈上升趋势,而 ET 的上升速率高于 NPP,造成研究时间段内 WUE 显著下降。其中, WUE 的变化可以分为两个时期, 1981—1998年, WUE 下降趋势不明显, 而 1999—2010 年则显著下降。



图 5 1981—2010 年长江经济带温度和降水, NPP 和 ET 与 WUE 时间动态



A 为 WUE 总体趋势线; B 为 1981—1998 年 WUE 变化趋势线; C 为 1999—2010 年 WUE 变化趋势线; NPP: 净初级生产力 Net Primary Productivity; ET: 蒸散 Evapotranspiration

#### 2.3 WUE 年际变化趋势空间分布

长江经济带 WUE 下降最慢和最快的植被类型分别为落叶阔叶林(郁闭)和定期水淹灌从/草地,下降速 率分别为 2.69×10<sup>-4</sup> g C mm<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>、4.14×10<sup>-3</sup> g C mm<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>。四种主要植被类型常绿针叶林、常绿阔叶 林、草地和常绿灌丛的水分利用效率均呈下降趋势,下降速率分别为 3.29×10<sup>-3</sup>、2.99×10<sup>-3</sup>、3.30×10<sup>-3</sup>、2.65×  $10^{-3}$  g C mm<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup> (表 1)

长江经济带 WUE 上升显著区域主要位于四川西部、贵州贵阳、湖北西北部、安徽北部以及江苏西北部部 分地区;而下降显著的区域主要位于浙江省,湖南省大部分地区、湖北省中部地区以及四川省西北部等区域, 通过显著性检验的区域占 59.03%(P<0.05)(图 6)。

#### 结论与讨论 3

3.1 长江经济带 WUE 空间分布及年际变化 本研究中,长江经济带上游地区的贵州省东部、东北部,重庆市东南部,中游地区的湖南省西南部、东北部

5586

成都







等地区 WUE 较高,而四川省的西部、云南省的东北部地区 WUE 较低。Zhang 等<sup>[42]</sup>利用 IBIS 模型(Integrated Biosphere Simulator model)模拟了 1956—2006 年长江经济带水分利用效率和时空变化模式,结果表明,对于整个研究区域,四川东部、江西和湖南西部地区具有较高的 WUE,四川西部 WUE 最低。Liu 等<sup>[43]</sup>使用 BEPS 模型并结合遥感数据评估 2000—2011 年期间中国陆地生态系统的 WUE 空间格局和变化趋势,研究发现,长江上游等作物产区具有较高的 WUE(>1.0 g C/kg H<sub>2</sub>O),高于中国东南部、华中地区、西南部地区的年 WUE (0.5—0.8 g C/kg H<sub>2</sub>O)。本文研究结果与先前学者的研究结果较为一致,但局部地区有一定的区别。主要原因是本研究采用的是 CEVSA2 模型,该模型能较好的分析气候因子,如:温度、降水、CO<sub>2</sub>浓度变化等对生态系统的影响,而不同的学者所使用的模型不同<sup>[15, 42-43]</sup>,得到的结果会有所差别。另外,不同的研究所使用的数据源以及时空范围不一致同样会引起差异。

长江经济带四种主要植被类型的 WUE 从小到大分别为:草地(0.97 g C mm<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>)<常绿阔叶林(1.11 g C mm<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>)<常绿针叶林(1.12 g C mm<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>)<常绿灌丛的 NPP 值较高,为 862 g C m<sup>-2</sup>,对 WUE 的影响较大。常绿阔叶林与常绿针叶林的 NPP 与 *ET* 都相差不大,因此两者 WUE 较为相近。Tian 等<sup>[44]</sup>对美国南部生态系统生产力和水资源的影响研究中发现,森林的 WUE 最高,灌丛最低。Wang 等<sup>[45]</sup>发现长江三角洲常绿阔叶林 WUE 最高,其次为落叶阔叶林,农田 WUE 最低。而本研究发现常绿灌丛 WUE 最高,草地 WUE 最低,因为植被的生长受当地的气候条件影响较大,不同地区不同的气候条件下,相同的植被类型其生理生态会有所差别。

40 卷

长江经济带 1981—2010 年 NPP、*ET* 均显著上升(*P*<0.01),且 *ET* 的上升趋势要大于 NPP,*ET* 和 NPP 每 年增加量分别为 4.067 mm<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>和 2.391 g C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>。1981—2010 年 NPP 和 *ET* 对温度变化的相对响应速率差 异显著,*ET* 对温度变化的响应明显大于 NPP。两者对降水变化呈现相反的趋势,NPP 随降水的增加而上升,然而 *ET* 随降水的增加而下降(图 7)。研究时间段内,NPP 和 *ET* 对温度更加敏感,温度对 WUE 的影响要大 于降水对 WUE 的影响,温度变化对长江经济带生态系统水碳循环具有重要影响。





WUE 反映了生态系统中 NPP 与 ET 之间的权衡,即碳增加与水消耗之间的关系。研究发现长江经济带 1981—2010 年间 NPP 的增加速率小于 ET,水分消耗量大于固碳增加量,导致 WUE 呈现下降的趋势。今后总体上,长江经济带地区应逐步提高植被的固碳能力,适时适地造林,使不同林龄段的林木分布合理,并加强森林保护,减少森林病虫害的破坏,防止乱砍滥伐林木等违法行为的出现。就区域而言,长江上游是重要的生态 屏障区,该地区天然林分布相对较多,应保护好天然林,防止天然林被破坏,并增加资金投入,建立健全生态补 偿机制,稳步实施退耕还林还草工程;长江中下游地区以集体林为主,在植树造林时应充分考虑林分密度,对 林地适当砍伐补植,提高森林固碳能力,其次该地区温度适宜、降水丰富,是我国主要的经济作物产区,在农作 物管理中应完善管理措施,做好预防工作,减少因天气、病虫害等原因造成农作物面积减少。

#### 3.2 不确定性分析

(1)长江经济带是我国社会经济最为发达的地区之一,土地利用/覆盖变化频繁而剧烈,土地开发强度远超全国平均水平,在研究时段内长江经济带植被覆盖发生了很大的变化<sup>[46-48]</sup>。而研究使用的是静态的植被图,用该植被图分析不同区域和不同植被类型的水分利用效率动态变化时会存在一定的误差。今后应利用多期土地利用/覆盖图,结合温度、降水、CO<sub>2</sub>浓度、氮沉降等环境变化,分析长江经济带水碳循环特征。

(2)长江经济带横跨 11 省份,自然资源分异明显,生态系统格局和气候条件复杂,温度和降水在不同地 区间差异较大<sup>[49]</sup>,尤其是西部高山和亚高山地区,局地的生态系统类型和气候均有较大差异。尽管本研究 0.1°的空间分辨率能够准确描述区域范围内水碳循环及其耦合关系的空间分异特征,但在局部区域无法准确 表达其复杂的环境特点。在未来的研究中,应进一步使用具有较高时空分辨率的最新数据,精确模拟出水碳 循环过程,以减少误差,得到更高精度的结果。

(3)目前,在长江流域的水碳循环模拟主要集中在长江源区、长江中上游以及长江三角洲地区<sup>[42,50-51]</sup>,对 整个长江经济带的水碳模拟研究相对较少,需要进一步整合各种数据资源,模拟分析在各种环境变化要素驱 动下的水碳循环变化特征,并预测未来气候变化条件下,该区域水碳循环的变化趋势及其响应特征。

#### 参考文献(References):

[1] Baker J M, Griffis T J. Examining strategies to improve the carbon balance of corn/soybean agriculture using eddy covariance and mass balance

techniques. Agricultural and Forest Meteorology, 2005, 128(3/4): 163-177.

- [2] 许振柱,周广胜.陆生植物对全球变化的适应性研究进展.自然科学进展,2003,13(2):113-120.
- [3] Cowan I R, Farquhar G D. Stomatal function in relation to leaf metabolism and environment//Jennings D H, ed. Integration of Activity in the High Plant. Cambridge: Symposia of the Society for Experimental Biology, 1977: 471-505
- [4] 李机密,黄儒珠,王健,郑怀舟,黄玮. 陆生植物水分利用效率. 生态学杂志, 2009, 28(8): 1655-1663.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Donovan L A, Dudley S A, Rosenthal D M, Ludwig F. Phenotypic selection on leaf water use efficiency and related ecophysiological traits for natural populations of desert sunflowers. Oecologia, 2007, 152(1): 13-25.
- [8] Tang X G, Ding Z, Li H P, Li X Y, Luo J H, Xie J, Chen D Q. Characterizing ecosystem water-use efficiency of croplands with eddy covariance measurements and MODIS products. Ecological Engineering, 2015, 85: 212-217.
- [9] Medlyn B E, De Kauwe M G, Lin Y S, Knauer J, Duursma R A, Williams C A, Arneth A, Clement R, Isaac P, Limousin J M, Linderson M L, Meir P, Martin-StPaul N, Wingate L. How do leaf and ecosystem measures of water-use efficiency compare? New Phytologist, 2017, 216(3): 758-770.
- [10] Zhou S, Yu B F, Huang Y F, Wang G Q. Daily underlying water use efficiency for AmeriFlux sites. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2015, 120(5): 887-902.
- [11] Jung M, Reichstein M, Ciais P, Seneviratne S I, Sheffield J, Goulden M L, Bonan G, Cescatti A, Chen J Q, de Jeu R, Dolman A J, Eugster W, Gerten D, Gianelle D, Gobron N, Heinke J, Kimball J, Law B E, Montagnani L, Mu Q Z, Mueller B, Oleson K, Papale D, Richardson A D, Roupsard O, Running S, Tomelleri E, Viovy N, Weber U, Williams C, Wood E, Zaehle S, Zhang K. Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply. Nature, 2010, 461(7318): 951-954.
- [12] Tang X G, Wang Z M, Liu D W, Song K S, Jia M M, Dong Z Y, Munger J W, Hollinger D Y, Bolstad P V, Goldstein A H, Desai A R, Dragoni D, Liu X P. Estimating the net ecosystem exchange for the major forests in the northern United States by integrating MODIS and AmeriFlux data. Agricultural and Forest Meteorology, 2012, 156: 75-84.
- [13] 张春敏,梁川,龙训建,卫仁娟.江河源区植被水分利用效率遥感估算及动态变化.农业工程学报,2013,29(18):146-155.
- [14] Zhang C M, Liang C, Long X J, Wei R J. Estimating and dynamic change of vegetation water use efficiency in Yangtze and Yellow River headwater regions. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(18): 146-155.
- [15] Gang C, Wang Z, Zhou W, Chen Y, Li J, Chen J, Qi J, Odeh I, Groisman P Y. Assessing the Spatiotemporal Dynamic of Global Grassland Water Use Efficiency in Response to Climate Change from 2000 to 2013. Journal of Agronomy and Crop Science, 2016, 202(5): 343-354.
- [16] Zhou L, Wang S Q, Chi Y G, Ju W M, Huang K, Mickler R A, Wang M W, Yu Q Z. Changes in the Carbon and Water Fluxes of Subtropical Forest Ecosystems in South-Western China Related to Drought. Water, 2018, 10(7): 821.
- [17] 方创琳,周成虎,王振波.长江经济带城市群可持续发展战略问题与分级梯度发展重点.地理科学进展,2015,34(11):1398-1408.
- [18] 黄国华,刘传江,赵晓梦.长江经济带碳排放现状及未来碳减排.长江流域资源与环境,2016,25(4):638-644.
- [19] 孔令桥,张路,郑华,徐卫华,肖燚,欧阳志云.长江流域生态系统格局演变及驱动力.生态学报,2018,38(3):741-749.
- [20] 杨桂山, 徐昔保, 李平星. 长江经济带绿色生态廊道建设研究. 地理科学进展, 2015, 34(11): 1356-1367.
- [21] 卢新海,柯善淦.基于生态足迹模型的区域水资源生态补偿量化模型构建——以长江流域为例.长江流域资源与环境,2016,25(2): 334-341.
- [22] 刘文茹, 居辉, 陈国庆, 刘恩科, 刘勤. 典型浓度路径(RCP)情景下长江中下游地区气温变化预估. 中国农业气象, 2017, 38(2): 65-75.
- [23] 吴英姿. 长江中下游地区水稻水分利用效率研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2014.
- [24] Cao M K, Woodward F I. Dynamic responses of terrestrial ecosystem carbon cycling to global climate change. Nature, 1998, 393(6682): 249-252.
- [25] 顾峰雪,曹明奎,于贵瑞,陶波,温学发,刘允芬,张雷明.典型森林生态系统碳交换的机理模拟及其与观测的比较研究.地球科学进展,2007,22(3):313-321.
- [26] Cui G S, Lee W K, Kim D, Lee E J, Kwak H B, Choi H A, Kwak D A, Jeon S, Zhu W H. Estimation of Forest Carbon Budget from Land Cover Change in South and North Korea between 1981 and 2010. Journal of Plant Biology, 2014, 57(4): 225-238.
- [27] Gu F X, Zhang Y D, Huang M, Tao B, Guo R, Yan C R. Effects of climate warming on net primary productivity in China during 1961-2010. Ecology and Evolution, 2017, 7(17): 6736-6746.
- [28] Cao M K, Zhang Q F, Shugart H H. Dynamic responses of African ecosystem carbon cycling to climate change. Climate Research, 2001, 17(2): 183-193.
- [29] Cao M K, Prince S D, Li K R, Tao B, Jennifer S, Shao X M. Response of terrestrial carbon uptake to climate interannual variability in China.

Global Change Biology, 2003, 9(4): 536-546.

- [30] Zhang Y X, Tao B, Yu L. Assessment on the vulnerability of different ecosystems to extreme rainfalls in the middle and lower reaches of Yangtze River. Theoretical and Applied Climatology, 2015, 121(1/2): 157-166.
- [31] Tao B, Cao M K, Li K R, Gu F X, Ji J J, Huang M, Zhang L M. Spatial patterns of terrestrial net ecosystem productivity in China during 1981-2000. Science in China Series D: Earth Sciences, 2007, 50(5): 745-753.
- [32] 庞瑞.西南高山地区陆地生态系统碳循环及水分利用效率时空动态[D].北京:中国林业科学研究院, 2013.
- [33] Farquhar G D, von Caemmerer S, Berry J A. A biochemical model of photosynthetic CO<sub>2</sub> assimilation in leaves of C<sub>3</sub> species. Planta, 1980, 149 (1): 78-90.
- [34] Woodward F I, Smith T M, Emanuel W R. A global land primary productivity and phytogeography model. Global Biogeochemical Cycles, 1995, 9 (4): 471-490.
- [35] Harley P C, Thomas R B, Reynolds J F, Strain B R. Modelling photosynthesis of cotton grown in elevated CO<sub>2</sub>. Plant, Cell and Environment, 1992, 15(3): 271-282.
- [36] Cao M K, Woodward F I. Net primary and ecosystem production and carbon stocks of terrestrial ecosystems and their responses to climate change. Global Change Biology, 1998, 4(2): 185-198.
- [37] 顾峰雪. 典型陆地生态系统水碳循环关键过程的机理模拟及其与通量观测的比较研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2007.
- [38] 张远东,庞瑞,顾峰雪,刘世荣.西南高山地区水分利用效率时空动态及其对气候变化的响应.生态学报,2016,36(6):1515-1525.
- [39] 杜加强,舒俭民,张林波,郭杨.黄河上游不同干湿气候区植被对气候变化的响应.植物生态学报,2011,35(11):1192-1201.
- [40] 何晓群, 刘文卿. 应用回归分析(第三版). 北京: 中国人民大学出版社, 2011: 16-28.
- [41] 朴世龙,方精云. 1982~1999年青藏高原植被净第一性生产力及其时空变化. 自然资源学报, 2002, 17(3): 373-380.
- [42] Zhang Z, Hong J, Liu J X, Zhu Q A, Wei X H, Zhou G M, Liu S R, Zhang X Y. Modeling the spatial-temporal dynamics of water use efficiency in Yangtze River Basin using IBIS model. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(5): 246-253.
- [43] Liu Y B, Xiao J F, Ju W M, Zhou Y L, Wang S Q, Wu X C. Water use efficiency of china's terrestrial ecosystems and responses to drought. Scientific Reports, 2015, 5: 13799.
- [44] 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.
- [45] Wang F, Jiang H, Zhang X M. Spatial-temporal dynamics of gross primary productivity, evapotranspiration, and water-use efficiency in the terrestrial ecosystems of the Yangtze River Delta region and their relations to climatic variables. International Journal of Remote Sensing, 2015, 36 (10): 2654-2673.
- [46] 陈婷,梁四海,钱开铸,万力.近22年长江源区植被覆盖变化规律与成因.地学前缘,2008,15(6):323-331.
- [47] Liu X F, Zhang J S, Zhu X F, Pan Y Z, Liu Y X, Zhang D H, Lin Z H. Spatiotemporal changes in vegetation coverage and its driving factors in the Three-River Headwaters Region during 2000-2011. Journal of Geographical Sciences, 2014, 24(2): 288-302.
- [48] 吴丹, 邵全琴. 近 30 年来长江源区土地覆被变化特征分析. 地球信息科学学报, 2014, 16(1): 61-69.
- [49] 曾小凡, 翟建青, 苏布达, 姜形, 朱进. 长江流域年平均气温的时空变化特征. 长江流域资源与环境, 2009, 18(5): 427-431.
- [50] 刘宁,孙鹏森,刘世荣,孙阁. 流域水碳过程耦合模拟——WaSSI-C 模型的率定与检验. 植物生态学报, 2013, 37(6): 492-502.
- [51] Wang F, Jiang H, Chen X F, Niu X D. Bamboo Forest Water Use Efficiency in the Yangtze River Delta Region, China. Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences, 2016, 27(6): 981-989.