DOI: 10.5846/stxb201408121602

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): - . . Zhang Y D, Pang R, Gu F X, Liu S R.Temporal-spatial variations of WUE and its response to climate change in alpine area of southwestern China. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(6): - .

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

张远东1,庞 瑞1,顾峰雪2,*,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,国家林业局森林生态环境重点实验室,北京 1000912 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

摘要:水分利用效率是深入理解生态系统水碳循环耦合关系的重要指标。西南高山地区是响应气候变化的重点区域,研究西南 高山地区水分利用效率动态及其对气候变化的响应,对于评估区域碳水耦合关系及对全球气候变化的响应具有重要意义。本 研究应用生态系统模型 CEVSA(Carbon Exchange between Vegetation, Soil, and the Atmosphere)估算了 1954-2010 年西南高山地 区水分利用效率(Water use efficiency, WUE)的时空变化,分析了其对气候变化的响应。结果表明:(1)西南高山地区 1954-2010 水分利用效率均值为 1.13 g C mm⁻¹ m⁻²。三种主要植被类型草地、常绿针叶林和常绿阔叶林的 WUE 分别为 1.35、1.14 和 0.99 g C mm⁻¹ m⁻²。在空间分布上, WUE 与海拔显著正相关 (r=0.156, P<0.05), 而与温度则显著负相关(r=-0.386, P<0.01)。 (2)在时间尺度上,1954—2010年西南高山地区整体 WUE 降低趋势显著(P<0.01),变动区间为 0.83-1.46g C mm⁻¹ m⁻²,平均每 年下降 0.006g C mm⁻¹ m⁻²。整体 WUE 年际变化与温度呈显著负相关(r=-0.727, P<0.01), 与降水量相关性不显著; 整体 WUE 下降主要原因是温度上升引起的 ET 增加速率大于 NPP 增加速率。(3) 1954—2010 年西南高山地区三种主要植被类型草地、 常绿针叶林及常绿阔叶林 WUE 均显著下降(P<0.01),下降速度分别为-1.03×10⁻²、-6.17×10⁻³和-1.37×10⁻³g C mm⁻¹ m⁻² a⁻¹。 西南高山地区 76.3%格点 WUE 年际变化与温度显著负相关(P<0.05),34.1%格点 WUE 年际变化与降水量显著正相关(P< 0.05)。草地和常绿针叶林 WUE 年际变化与温度显著负相关(r=-0.889, P<0.01; r=-0.863, P<0.01), 与降水量相关性不显 著。由于西南高山地区降水较为丰富,且过去 57 年降水变化不显著,因此该地区 WUE 的时空格局主要受温度变化的影响。 1954—2010 年期间温度升高造成的 ET 增加显著高于 NPP 的增加是该地区 WUE 下降的主要原因。未来需要获取更高空间分 辨率的气候、土壤、植被数据,从而更加准确和精确地模拟西南高山地区水碳循环及其耦合关系对气候变化的响应。 关键词:水分利用效率:西南高山地区:气候变化:CEVSA 模型

Temporal-spatial variations of WUE and its response to climate change in alpine area of southwestern China

ZHANG Yuandong¹, PANG Rui¹, GU Fengxue^{2,*}, LIU Shirong¹

1 Key Laboratory of Forest Ecology and Environment, State Forestry Administration, 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

Abstract: The various types of ecosystems and complex landforms found in the cold alpine area of southwestern China make this region ideal for researching regional responses to global climate change. Therefore, to evaluate the responses of regional

基金项目:林业公益性行业科研专项(201404201);国家自然科学基金(31370463,31070398);公益性科研院所基本科研业务费专项(CAF-RIFEEP201411)

收稿日期:2014-08-12; 网络出版日期:2015- -

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: xuefgu@163.com

carbon and water cycles to climate change; it is of great importance to investigate the response of water use efficiency (WUE) to the climate in this region. A process-based ecosystem model, Carbon Exchange between Vegetation, Soil, and the Atmosphere (CEVSA), was used to estimate temporal and spatial variations of WUE in the terrestrial ecosystems in the alpine area of southwestern China during 1954-2010. First, we ran the model using the average climate data from 1954 to 2010 until an ecological equilibrium was reached, then we conducted dynamic simulations with climate data at a time-step of 10 days during the same period. Moreover, the correlation coefficients between WUE and climate variables were calculated to analyze the relative effects of temperature and precipitation on variations of WUE. To achieve the results, various types of computer software were used, such as ANUSPLIN4.1, Fortran 95, Arcgis9.3, and SPSS18.0. The results showed that the average WUE in the studied region was 1.13 g C mm⁻¹m⁻² during 1954—2010. The mean WUE of three main vegetation types included 1.35 g C mm⁻¹m⁻² for herbaceous cover, 1.14 g C mm⁻¹m⁻² for evergreen needle-leaf tree cover, and $0.99 \text{ g C mm}^{-1}\text{m}^{-2}$ for evergreen broadleaf tree cover. In spatial distribution, significant positive correlations were found between the annual WUE and altitude (r=0.156, P < 0.05), and significant negative correlation was found between the annual WUE and annual mean temperature (r = -0.386, P < 0.01). Moreover, the annual mean WUE in the entire region showed a significantly decreasing trend at a rate of 0.006 g C mm⁻¹ m⁻² a⁻¹ (P < 0.01). Significant negative correlations were found between the annual mean WUE and annual mean temperature (r = -0.727, P < 0.01), and no significant correlations were found between the annual mean WUE and annual precipitation. The decrease in WUE resulting from an increase in evapotranspiration (ET) was more than that of net primary production (NPP) from the temperature increase during the study period. Furthermore, decreasing trends were highly significant in herbaceous cover at 1.37×10^{-3} g C mm⁻¹m⁻² a⁻¹, evergreen needle-leaf tree cover at 6.17×10^{-3} g C mm⁻¹m⁻² a⁻¹, and evergreen broadleaf tree cover at 1.03×10^{-2} g C mm⁻¹ m⁻² a⁻¹ during the study period. The annual WUE showed significant negative correlations with temperature in 76.3% of the study area (P < 0.05) and significant positive correlations with annual precipitation in 34.1% of the study area (P < 0.05). Herbaceous and evergreen needle-leaf tree cover in the study area were both correlated negatively with temperature (r = -0.889, P < 0.01; r = -0.863, P < 0.01) and were not correlated with annual precipitation.

Key Words: WUE(water use efficiency); alpine area; climate change; CEVSA model

陆地生态系统碳循环和水循环是多尺度紧密耦合的,超过 40%的区域水分有效性是制约植物生长的主要限制因子,而另外 33%的区域则是由于低温导致水分不能被植物利用^[1]。水分利用效率(WUE, water use efficiency)是深入理解生态系统水碳循环间耦合关系的重要指标^[1-2]。气候变暖可能会促进受热量限制的高纬度和高海拔地区植物的生长,然而在许多受水分限制的地区,温度升高可能导致干旱的加剧,使植物生长减慢和生态系统干扰增多,从而导致陆地碳吸收能力减弱^[3]。Lu 和 Zhuang^[4]发现水分利用效率(GPP/ET)会受干旱影响,当干旱强度缓和时,WUE 会有所升高;反之,干旱强度加重时,WUE 有降低的趋势,这与Reichstein 等^[5]和 Yu 等^[6]应用涡度相关法的研究结果一致。研究 WUE 对环境因子的响应有助于提高预测或减缓气候变化对生态系统的不利影响的能力。

WUE 是指植物消耗单位质量的水分所生产的 CO₂或干物质的量,最初对 WUE 的研究集中在叶片和个体 水平,随着观测技术的发展^[7]和全球变化问题的日益突出,WUE 的研究逐渐扩展到冠层和生态系统水平^[2]。 随着生态系统涡度相关通量观测数据的积累,使我们能够更好地分析理解不同类型生态系统的水碳循环、生 产力和水分利用效率是如何响应环境要素变化的^[8]。但由于区域尺度上生态系统类型复杂多样,水碳耦合 过程的复杂性及其对环境要素响应的不确定性使得区域尺度的 WUE 定量研究还相对较少^[1]。生态系统过 程模型使 WUE 的研究不仅从个体和植株水平扩展到生态系统尺度,且能更好地理解长时间范围内区域尺度 上生态环境因子的变化对 WUE 的影响。Zhang 等^[9]基于 IBIS 模型(Integrated Biosphere Simulatointegrated

3

ecosystem model)对 1951—2000 中国区域 WUE(NPP/ET)的研究结果表明,WUE 的高值区位于中国东南地区,为 0.8—1.0 g C/kg H₂O,低值区为裸地较多的西北地区,而青藏高原大部分地区 WUE 为 0.3—0.5 g C/kg H₂O。由于地形及气候因子的不同,不同地区 WUE 有所差异。Tian 等^[1]通过 DLEM 模型(Dynamic Land Ecosystem Model, DLEM)对美国南部地区 1895—2007 年 WUE(NPP/ET)的研究表明平均 WUE 为 0.71 g C/kg H₂O,在研究时间段内增加了 25%,且各植被类型 WUE 从大到小顺序为:森林(0.93 g C/kg H₂O)>湿地(0.75 g C/kg H₂O)>草地(0.58 g C/kg H₂O)>农田(0.54 g C/kg H₂O)>灌丛(0.45 g C/kg H₂O),WUE 增长幅度最大的为农田,依次为灌丛和草地^[1]。然而,Tian 等^[10]用同样的方法对亚洲季风地区的研究表明,1948—2000 年水分利用效率下降了 3.64%,且近几十年下降速率最大,其中草地的 WUE 对气候变化最为敏感,下降幅度最大(8.10%),其次是农田(2.97%)和森林(0.82%)。可见不同地区 WUE 变化趋势及各植被类型的WUE 动态具有地域差异性。Zhang 等^[9]应用 IBIS 模型模型对 WUE(NPP/ET)的研究结果同样表明 WUE 对气候因子的响应随地区而不同,在亚热带地区 WUE 与温度显著负相关,在青藏高原地区则与温度显著正相关,而在湿润地区与降水量为正相关关系。WUE 对主要环境变量的响应研究有助于提高对气候变化背景下水碳耦合过程的认识。

西南高山地区位于"世界第三极"青藏高原东南边缘,是我国南方和东南亚主要河流(包括长江、怒江和 湄公河等)的水源区,素有"中华水塔"之称,同时也是我国第二大天然林区,是我国最重要的生物碳库之一。 20世纪 50-90年代,西南高山森林经历了大规模采伐利用;进入 21世纪以来,随着天然林保护工程和退耕还 林工程的相继启动,该区又经历大面积的森林恢复。森林固碳功能的增加需要以消耗更多的水分为代价^[11], 使得西南高山林区的水碳耦合研究突显重要。目前,青藏高原正成为全球气候变暖的敏感区,在过去的 30年 里,亚高山森林带(2600—3600m a.s.l.)升温速率为 0.19—0.25°C/10年^[12-13]。同时,该区复杂的高山峡谷地 貌,显著的气候垂直分异,不同发育阶段的土壤和植被,使得植物物候、生长、生殖与生理对温度、降水和 CO2 浓度的变化给予极强的反馈,对全球气候变化具有重要的调节和指示作用^[14-15],是研究全球气候变化响应的 理想区域。本文应用高分辨率的气候数据和生态系统过程模型估算 1954—2010年期间西南高山地区净初级 生产力(NPP)和蒸散(ET),分析水分利用效率(NPP/ET)时空动态及其对气候变化的响应,从而为该区域的 植被恢复和水碳管理提供决策建议。

1 研究地区和研究方法

1.1 研究地区概况、数据来源和模型介绍

西南高山地区为我国第二大天然林区,地理范围北部西接青藏高原,北侧及东侧与黄土高原相接壤,东侧 南段与四川盆地分界,南界东段与云贵高原相接,西南段为国境线^[16](吴中伦,1997)(图1),西南高山地区总 的地势是西北高、向东南倾斜,主要为高山峡谷地貌,植被类型复杂,年平均气温约为5—10℃,年降水量约为 600-1000mm,温度及降水各地段差异较大^[17-18]。

本研究中,模型所需的气象数据(10天平均温度,降水量,相对湿度和云量)来自国家气象信息中心,包括 1954—2010年全国约756个台站的旬观测数据,应用 ANUSPLINE 软件进行内插获得分辨率 0.1°的栅格数据 作为模型气象输入数据^[19]。大气 CO₂浓度资料来自于美国 NOAA Mauna Loa CO₂数据集(http://co2now.org/ Current-CO2/CO2-Now/noaa-mauna-loa-co2-data.html)。土壤类型和质地资料取自 1:100 万土壤类型图和第二 次土壤普查数据,并使之匹配于气候数据的空间分辨率。植被数据来源于 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)。

水分利用效率(water use efficiency, WUE)的定义因研究对象和研究过程时空尺度的改变而不同^[20],本 文的水分利用效率采用生态系统尺度上 NPP 与 ET 比值这一定义(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,所以广泛应用于



图 1 西南高山地区地理位置 Fig. 1 The location of alpine area of southwestern China

生态系统尺度的研究^[9-10]。

CEVSA 建立于 1998 年,该模型是一个基于生理生态过程模拟植物-土壤-大气系统能量交换和水碳氮耦 合循环的生物地球化学循环模型^[21-23]。CEVSA 模型包含三个子模型:植被子模型用来计算植被的 NPP、分配 和凋落物产量;生物物理子模型计算蒸散、土壤水分动态和气孔导度;生物地球化学子模型计算凋落物和土壤 有机碳的分解和传输^[22]。CEVSA 模型已应用于区域和全球尺度,模拟分析了陆地生态系统碳循环对气候变 化的响应^[17,18,21-29]。在 CEVSA 模型中,光合作用速率决定于叶肉组织光合酶对 CO₂的利用效率和 CO₂向叶肉 组织的扩散速率,气孔导度的变化采用改进的 Ball-Berry 模型模拟。

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

$$g_{s} = (g_{0}(T) + g_{1}(T)AR_{h}/P_{a})k_{g}(w_{s})$$
⁽²⁾

式中: A_{b} 代表由酶系统活性决定的碳同化速率, g_{s} 为气孔传导度, W_{e} 由 Rubisco 所决定的羧化速率, W_{j} 是由电 子传递速度决定的羧化速率, W_{p} 决定于光合反应过程对磷酸丙糖(Triose phosphate)的利用效率。 P_{o} 和 P_{e} 分 别是叶肉组织中 O_{2} 和 CO_{2} 的分压。 τ 是 Rubisco 的特异因子, R_{d} 为白昼非光合呼吸速率。 g_{o} 是在光补偿点下 光合速率为零时的气孔传导度, g_{1} 是灵敏度参数,A 为实际光合速率, $k_{g}(w_{s})$ 为气孔导度对土壤含水量 w_{s} 的反 应函数。

CEVSA 采用 Penman-Monteith 方程计算冠层的蒸散,

$$ET = \frac{sR_n + c_p \rho g_a D}{\lambda \left(s + \gamma \left(1 + g_a / g_n\right)\right)}$$
(3)

式中, c_p 是空气的比热, g_n 是冠层气孔导度, g_a 是边界层导度, R_n 是净辐射, γ 是湿度常数, λ 是蒸发潜热, ρ 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。

1.2 模型运行与验证

本研究中首先应用 1954—2010 年平均气候数据驱动 CEVSA 模型,使其运行至生态系统平衡态,即净生态系统生产力为零,净初级生产力等于异养呼吸量,而凋落物量亦与土壤异养呼吸相等,且各个状态变量如土壤含水量、土壤有机碳储量等变量的年际变化小于 0.1%,然后再应用 1954—2010 每 10 天气候数据来进行动

态模拟,为消除假定的生态系统状态变量的初始值(即平衡态假设)对动态模拟输出结果的影响,需反复运行 模型,之后即得到最终模拟结果^[18,30]。

CEVSA 模型应用的生物学及生态学原理,计算方程和参数均取自大量的试验和观测。陶波等^[30-31]曾应 用叶片、植株生理试验数据、样点初级生产力观测数据和遥感反演数据对 CEVSA 模型进行了验证,模型估算 的植被生物量和土壤有机碳储量,净初级生产力与实地调查观测获得的数据具有很好的一致性。20 世纪 90 年代中期以后,由于大型环境控制试验和涡度相关技术的应用,为模型的验证提供了大量连续、长期的生态系 统尺度的水碳通量观测数据^[32],顾峰雪等^[33]应用涡度相关通量观测数据对 CEVSA 模型的验证和评价表明, CEVSA 模型较好地模拟了不同类型生态系统水碳通量的动态特征及其对气候变化的响应。

本文对西南高山地区 CEVSA 模型模拟的 NPP 和 ET 进行了验证。在四川省理县米亚罗林区(31°24′— 31°55′N, 102°35′—103°4′E)应用树木年轮法和异速生长方程^[34]得到 1977—2009 年时间段的年 NPP,然后 将其与模型输出的年 NPP 进行了比较,进行了样地尺度的验证。结果表明,树木年轮法 NPP 与 CEVSA 模拟 值在年际波动上基本一致,1977—2009 年平均 NPP 分别为 430 g C m⁻² a⁻¹和 399 g C m⁻² a⁻²,相差百分数绝对 值历年平均为 8.09%(图 2)。ET 的验证数据由流域水量平衡方法获得,即流域的年 ET 为年降水量与年产水 量之差^[35],将应用水量平衡方法获得的岷江上游 1954–1998 年 ET 与模型模拟结果进行了比较,在岷江上游 (紫平铺水文站以上)对 ET 进行了验证。结果表明,水量平衡法与 CEVSA 模拟值在年际波动上基本一致, 1954—1998 年平均 ET 分别为 324 mm/a 和 350 mm/a,相差百分数绝对值历年平均为 18.12%(图 3)。

尽管模型模拟的 NPP 和 ET 平均值及年际波动与观测值基本一致,但从图 1、2 也可以看出,模拟值与观测值之间还存在较大误差。分析其原因主要包括:(1)模型模拟的空间分辨率与观测值存在较大差距。基于 树木年轮法测定的 NPP 基于单株树木的测定结果,而模型模拟的是 0.1°×0.1°空间范围内的平均状况。(2) 模型模拟的误差。CEVSA 模型对产流的模拟能力还有待进一步的提高,需要进一步与水文模型相结合,以便 更好地模拟流域的水文状况。(3)观测值本身的误差。基于树木年轮法计算的 NPP 和基于水量平衡法计算 的 ET 本身受计算方法等的原因存在较大误差。



图 2 1977—2009 年西南高山地区年 NPP 树木年轮法测定值和 模拟值年际变化

Fig. 2 Interannual variations between the measured values form tree ring and CEVSA simulation values of NPP during the period 1954—2010 in alpine area of southwestern China



图 3 1954—1998 年西南高山地区年水量平衡法蒸散和模型模拟 蒸散年际变化

Fig. 3 Interannual variations between ET by water balance method and CEVSA model during the period 1954—1998 in alpine area of southwestern China

1.3 数据分析

基于 CEVSA 模型完成 1954—2010 年全国 0.1°空间分辨率的模拟后,提取西南高山地区的输入和输出数据加以分析,输入数据包括温度、降水、土地覆盖类型数据,而输出数据则包括土壤有机碳储量、土壤异养呼吸、净初级生产力(NPP)、蒸散(ET)等数据。相关性分析采用 Pearson 相关系数法,对 CEVSA 模型估算出的

1954—2010年水分利用效率分别与年平均温度、年降水量数据逐点计算相关系数,得到WUE与温度、降水的相关系数图,然后设置0.05、0.01两个显著性水平对相关系数进行分类。WUE年际变化趋势的分析采用线性趋势倾向率方法^[36-37],在研究区域内逐点进行线性回归,最小二乘法拟合得到的一元线性方程斜率即为趋势倾向率,并用相关系数检验法来确定变化是否显著^[38-41],同样设置0.05、0.01两个显著性水平对相关系数进行分类,查相关系数临界值表得*r*_{0.05}=0.261,*r*_{0.01}=0.339。

2 结果分析

2.1 WUE 空间分布

西南高山地区 1954—2010 年 WUE 均值为 1.13 g C mm⁻¹ m⁻²。其中研究区域内 WUE 较高的地区主要位 于西北部的草地覆盖地区,及东部低海拔地区(>1.1g C mm⁻¹ m⁻²),WUE 较低的地区主要为大渡河雅砻江金沙 江云杉冷杉林区南部的常绿针叶林地区及雅鲁藏布江 南部的常绿阔叶林地区(<0.8g C mm⁻¹ m⁻²)(图 4)。西 南高山地区 WUE 最高的植被覆盖类型为稀疏草地/稀 疏灌丛(1.51g C mm⁻¹ m⁻²),其次为定期水淹灌丛/草地 (1.28g C mm⁻¹ m⁻²)和草地(1.35g C mm⁻¹ m⁻²)和,最低 的为落叶灌丛(0.60 g C mm⁻¹ m⁻²)(表 1)。三种主要 植被类型草地、常绿针叶林和常绿阔叶林的 WUE 分别



图 4 西南高山地区 1954—2010 年均 WUE 空间分布 Fig. 4 Spatial distribution of mean annual WUE during the period of 1954—2010 in alpine area of southwestern China

为 1.35、1.14 和 0.99 g C mm⁻¹ m⁻²。W UE 的空间分布与海拔显著正相关(*r*=0.156,*P*<0.05),与降水量亦为 正相关关系,相关性不显著(*r*=0.100),而与温度则显著负相关,相关系数为-0.386(*P*<0.01)。

表1 西南高山地区 1954—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 tendency rate and its correlation coefficient with mean annual temperature and annual precipitation of different land cover during the period 1954—2010 in alpine area of southwestern China

土地覆盖类型 Land cover type	面积百分比 Area ratio/ (%)	NPP 均值 Mean NPP/ (gC/m ⁻²)	ET 均值 Mean ET/ (mm)	WUE 均值 Mean WUE/ (g C mm ⁻¹ m ⁻²)	趋势倾向率 Tendency rate/ (gC mm ⁻¹ m ⁻²)	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	15.3	504	509	0.99	-1.37×10 ^{-3 **}	-0.133	-0.075
落叶阔叶林(郁闭)							
Tree cover, broadleaved, deciduous, closed	1.04	548	652	0.84	1.02×10 ⁻³ **	-0.538 **	0.354 **
常绿针叶林							
Tree cover, needle-leaved, evergreen	31.2	443	388	1.14	-6.17×10 ^{-3 **}	-0.863 **	-0.108
林木与其它天然植被嵌合区							
Mosaic: Tree cover/other natural vegetation	1.95	617	642	0.96	1.94×10 ⁻³ **	-0.387 *	0.246
常绿灌丛							
Shrub cover, closed-open, evergreen	3.30	546	574	0.95	8.19×10 ⁻⁴ *	-0.207	0.170

续表

土地覆盖类型 Land cover type	面积百分比 Area ratio/ (%)	NPP 均值 Mean NPP/ (gC/m ⁻²)	ET 均值 Mean ET/ (mm)	WUE 均值 Mean WUE/ (g C mm ⁻¹ m ⁻²)	趋势倾向率 Tendency rate/ (gC mm ⁻¹ m ⁻²)	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
落叶灌 <u>丛</u> Shrub cover, closed-open, deciduous	0.02	351	585	0.60	1.05×10 ⁻² **	-0.980**	-0.098
草地 Herbaceous cover, closed- open	35.5	430	318	1.35	-1.03×10 ^{-2 **}	-0.889 **	-0.096
稀疏草地/稀疏灌 <u>丛</u> Sparse herbaceous or sparse shrub cover	0.14	379	250	1.51	-1.47×10 ⁻² **	-0.850 **	-0.034
定期水淹灌丛/草地 Regularly flooded shrub and/or herbaceous cover	0.99	348	271	1.28	1.29×10 ⁻³	-0.797 **	-0.087
耕作和管理区 Cultivated and managed areas	4.99	686	641	1.07	5.06×10^{-4}	0.084 **	0.043
农田、林木或其它天然植被嵌 合 区 Mosaic: cropland/tree cover/other natural vegetation	e 2.01	471	506	0.93	1.15×10 ⁻³ *	-0.259	0.082
裸地 Bare areas	0.21	_	_	_	—	—	—
水体 Water bodies	1.62	_	_		_	_	_
雪和冰 Snow and ice	1.74	_	_	_	_	_	_

NPP(Net primary productivity),净初级生产力;ET(Evaportranspiration),蒸散;WUE(Water use efficiency),水分利用效率

*,P<0.05; ***,P<0.01. 土地覆盖类型数据来源于 http://www-gem.jrc.it/glc2000。

2.2 WUE 整体年际变化趋势

西南高山地区 1954—2010 年 WUE 变动区间为 0.83-1.46g C mm⁻¹ m⁻²,降低趋势显著(*P*<0.01),平均每 年下降 0.006g C mm⁻¹ m⁻²(图 5)。研究时段内,区域整体 WUE 年际变化与温度呈显著负相关(*r*=-0.727,*P*<0.01),与降水量则相关性不显著,WUE 的下降主要是由温度上升造成的,温度升高,则有 76.0% 的年份 WUE 是下降的,温度降低,有 80.6% 的年份 WUE 反而是升高的。高温年份如 2006、2007 年,WUE 较低,低温年份 如 1965、1997 年,而 WUE 较高。

图 5c 表明,在 1954—2010 年 WUE 的变化可以分为两个时期,1954—1980 年,WUE 显著上升而 1981—2010 年则下降。由 1954—1980 年的气温和降水距平(图 5a)可以看出,在该时段气温显著下降,同时降水也下降,ET 对气温和降水变化的响应相比 NPP 更为敏感,在该时段下降显著(图 5b)。而在 1981-2010 年,气温显著升高,而降水变化不显著,该时段内,NPP 和 ET 均呈上升趋势,而 ET 的上升速度明显高于 NPP,造成该时段 WUE 的显著下降。

2.3 WUE 年际变化趋势空间分布

西南高山地区 WUE 上升最快的植被类型为落叶灌丛(1.05×10^{-2} g C mm⁻¹ m⁻² a⁻¹),而下降最快的为稀疏 草地/稀疏灌丛和草地,分别为- 1.47×10^{-2} g C mm⁻¹ m⁻² a⁻¹、 -1.03×10^{-2} g C mm⁻¹ m⁻² a⁻¹。三种主要植被类型 草地、常绿针叶林及常绿阔叶林水分利用效率均显著下降(P < 0.01),下降速度分别为- 1.03×10^{-2} 、- 6.17×10^{-3} 和- 1.37×10^{-3} gC mm⁻¹ m⁻² a⁻¹(表 1)。

西南高山地区 WUE 增加与下降区域并存,其中上升显著区域主要为东南低海拔地区及雅鲁藏布江流域,而下降显著的区域主要位于西北部高海拔地区的草地植被覆盖类型(图6)。

西南高山地区大部分格点 WUE 与温度呈负相关,且西北部较东南部与温度负相关性更为明显,相关系数为负值的区域占研究区域的 87.4%,其中通过显著性检验的面积占 76.3%(P<0.05),而 WUE 与温度显著

8



图 5 1954-2010 年西南高山地区温度和降水(a), NPP 和 ET(b) 与 WUE 时间动态(c)

Fig. 5 Interannual variations in temperature, precipitation (a), NPP, ET (b) and WUE (c) during the period of 1954-2010 in alpine area of southwestern China



图 6 西南高山地区 1954—2010 年 WUE 变化趋势(a) 及其相关系数法显著性检验(b)

Fig. 6 Trend of annual WUE changes(a), and its significance test by the correlation coefficient method (b) during the period 1954-2010 in alpine area of southwestern China

正相关地区仅为1.28%,且主要位于东南部的低海拔地区(图7)。WUE 与降水量相关系数主要为正值,占林 区面积的量 68.9%,主要位于洮河白龙江云杉冷杉林区、岷江冷杉林区大部分地区、大渡河雅砻江金沙江云杉 冷杉林区北部及雅鲁藏布江地区,其中通过显著性检验为34.1%(P<0.05),而与降水量显著负相关区域占 $9.93\% (P < 0.05)_{\odot}$

9

研究区域内,大部分植被类型 WUE 与温度显著负相关,其中相关性最高的为落叶灌丛,相关系数为 -0.980(P<0.01),其次为草地和常绿针叶林,相关系数分别为-0.889(P<0.01)、-0.863(P<0.01)。各植被类型与降水量的关系不如温度显著,通过显著性检验的植被类型只有落叶阔叶林(郁闭),相关系数为 0.354(P<0.01),而其他植被类型均未通过显著性检验(表1)。





3 讨论

3.1 西南高山地区 WUE 空间分布及年际变化

西南高山地区 1954—2010 年 WUE 均值为 1.13 g C mm⁻¹ m⁻²。Zhang 等^[9]基于 IBIS 模型对 1951—2000 年中国区域 WUE(NPP/ET)的研究结果表明,WUE 的高值区位于中国东南地区,为 0.8-1.0 g C mm⁻¹ m⁻²,而 西南地区则在 0.6—0.8 g C mm⁻¹ m⁻²。Tian 等^[1]应用 DLEM 模型对美国南部的研究得出 1895—2007 年水分 利用效率平均为 0.71 g C mm⁻¹ m⁻²。本研究估算的 WUE 较其他研究结果偏高,可能是由于模型估算的西南 高山地区 ET 较低,研究时间段内平均 ET 为 492mm/a,而 Tian 等^[1]估算的美国南部的 ET 为 710 mm/a。本研 究模拟的 WUE 在研究时段内先上升后显著下降,WUE 的变化主要受温度的影响,由于 ET 对温度的变化比 NPP 更为敏感,在气温总体上升的趋势下,WUE 表现为下降趋势。NPP 和 ET 均与温度显著正相关而与降水 量变化相关性不显著,但由于 ET 随温度升高的上升速率明显高于 NPP,造成 WUE 与温度负相关。Tian 等^[10]对东亚的模拟结果也表明 1948—2000 年 WUE 下降,且近几十年下降速率最大。由此可以看出在气候 变暖的情景下,生态系统消耗了更多的水分却没有生产更多的碳,因此未来西南地区增加森林的生产力和碳 汇能力则要以消耗更多的水分作为代价。

西南高山地区三种主要植被类型水分利用效率从大到小依次是草地(1.35g C mm⁻¹ m⁻²)、常绿针叶林(1.14g C mm⁻¹ m⁻²)、常绿阔叶林(0.99 g C mm⁻¹ m⁻²)。草地植被类型 NPP 虽然是三种植被中最低的,为430 g C m⁻² a⁻¹,然而其 ET 也是最低的,为444 mm⁻¹/m²,二者综合作用导致草地 WUE 较高。常绿阔叶林虽然 NPP 较常绿针叶林高,然而其 ET 同样高于常绿针叶林,导致常绿针叶林的 WUE 略高于常绿阔叶林。Tian 等^[1] 对美国南部的模拟发现,WUE 最高的是森林,草地和灌丛的 WUE 要低于其他植被类型。由于不同区域 不同植被类型分布的地理环境差异,造成不同植被类型间 WUE 的差异,美国南部地区草地和灌丛分布的地 区较为干旱高温,而西南高山地区的草地和灌丛分布区则是低温湿润的地区。

1954 至 2010 年, 草地、常绿针叶林及常绿阔叶林 WUE 均下降趋势显著, 下降速度从大到小依次是: 草地 $(1.03 \times 10^{-2} \text{ g C mm}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ a}^{-1}) > (常绿针叶林 6.17 \times 10^{-3} \text{ g C mm}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ a}^{-1}) > 常绿阔叶林(1.37 \times 10^{-3} \text{ g C mm}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ a}^{-1}), 且三者均与温度呈显著负相关, 而与降水量相关性不显著, 且草地 WUE 较常绿针叶林对温度变化$

最为敏感。Tian 等^[10]同样表明草地植被类型 WUE 对气候变化响应最为显著,在 1948—2000 年平均下降速 率为 8.10%,高于研究地区 WUE 整体下降速率 3.64%。

西南高山地区 WUE 年际变化与温度负相关,这与 叶片尺度研究结果不同^[42]。年尺度生态系统 WUE 涉 及更多的生态系统过程,其年际动态取决于 NPP、ET 对 气候因子的响应。Zhang 等^[9]的分析也发现,在中国南 方 WUE 与气温负相关。相关分析表明,NPP、ET 均同 温度显著正相关而与降水量相关性不显著,这是由于西 南高山地区降水相对丰富,年均降水量在 600— 1000mm,且在研究时段内,降水量的变化不显著。西南 高山地区 1954—2010 年 NPP、ET 均显著上升(*P* < 0.01),且 ET 的上升趋势要大于 NPP 的上升趋势,每年 增加量分别为 1.023 mm⁻¹ m⁻² a⁻¹和 1.007 g C m⁻² a⁻¹。 1954—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(图 8),



图 8 1954—2010 年西南高山地区 NPP 和蒸散对温度敏感性 Fig. 8 Sensitivity to temperature of NPP and ET in alpine area of southwestern China during the period 1954—2010

在研究时段内,尤其是 1981-2010 年期间,温度的显著上升,导致 ET 的升高显著快于 NPP 的升高,由此导致 WUE 呈下降趋势。由此可以看出,在低温湿润的地区,气温上升将对生态系统的水碳循环和水碳耦合关系产 生重要影响。

3.2 研究中的不确定性

水碳耦合涉及诸多因子,为极其复杂的生态系统过程,其中一些机制尚未完全清楚,使得模型估算结果具 有一定的不确定性,作为 NPP 与 ET 比值的 WUE,其估算结果的不确定性要大于 NPP。从模型本身来看, CEVSA 仅仅考虑了气候及 CO₂浓度变化对碳水收支的影响,而并未考虑土地利用/土地覆被变化(land use and cover change, LUCC)、氮沉降等其他环境因子的影响,综合考虑西南地区各种环境要素的变化,其估算结 果可能会有很大的变化^[30]。

另外,西南高山地区复杂的地理环境、地形地貌需要更高分辨率的气候、土壤和植被输入数据,以提高区 域模拟的精度^[17]。西南高山地区温度和降水量地区间差异较大,植被类型复杂,土壤种类、质地和土壤性质 多样,目前模拟的 0.1°×0.1°空间分辨率不能准确表达西南高山地区复杂的地理环境特点,未来需要进一步获 取更高分辨率的输入数据和参数集,以便更加准确和精确地模拟复杂地理环境下区域的水碳循环特点。

最后,尽管 CEVSA 模型在多尺度上都进行了大量的验证,表明 CEVSA 模型对不同类型生态系统的水碳 循环均具有较高的模拟精度^[30-31,33],然而 CEVSA 模型在西南高山地区只进行了小范围局部的验证,对该地区 的模型验证尚需更多长序列观测数据,通过观测数据的校准与验证,从而使得该地区的模拟结果更加可靠。

参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Reichstein M, Tenhunen J D, Roupsard O, Ourcival J, Rambal S, Miglietta F, Peressotti A, Pecchiari M, Tirone G, Valentini R. Severe drought effects on ecosystem CO₂ and H₂O fluxes at three Mediterranean evergreen sites: revision of current hypotheses? Global Change Biology, 2002, 8 (10): 999-1017.
- [6] Yu G R, Song X, Wang Q F, Liu Y F, Guan D X, Yan J H, Sun X M, Zhang L M, Wen X F. Water-use efficiency of forest ecosystems in eastern

China and its relations to climatic variables. New Phytologist, 2008, 177(4): 927-937.

- [7] Mooney H A, Bullock S H, Ehleringer J R. Carbon isotope ratios of plants of a tropical dry forest in Mexico. Functional Ecology, 1989, 3(2): 137-142.
- [8] Rambal S, Ourcival J M, Joffer R, Mouillot F, Nouvellon Y, Reichstein M, Rocheteau A. Drought controls over conductance and assimilation of a Mediterranean evergreen ecosystem; scaling from leaf to canopy. Global Change Biology, 2003, 9(12); 1813-1824.
- [9] Zhang Z, Jiang H, Liu J X, Zhou G M, Liu S R, Zhang X Y. Assessment on water use efficiency under climate change and heterogeneous carbon dioxide in China terrestrial ecosystems. Procedia Environmental Sciences, 2012, 13: 2031-2044.
- [10] Tian H Q, Lu C Q, Chen G S, Xu X F, Liu M L, Ren W, Tao B, Sun G, Pan S F, Li J Y. Climate and land use controls over terrestrial water use efficiency in monsoon Asia. Ecohydrology, 2011, 4(2): 322-340.
- [11] JacksonR B, Jobbágy E G, Avissar R, Roy S B, Barrett D J, Cook C W, Farley K A, le Maitre D C, McCarl B A, Murray B C. Trading water for carbon with biological carbon sequestration. Science, 2005, 310(5756): 1944-1947.
- [12] 刘晓东, 侯萍. 青藏高原及其邻近地区近 30 年气候变暖与海拔高度的关系. 高原气象, 1998, 17(3): 245-249.
- [13] 姚檀栋,刘晓东,王宁练.青藏高原地区的气候变化幅度问题.科学通报,2000,45(1),98-106.
- [14] 谷晓平,黄玫,季劲钧,吴战平.近20年气候变化对西南地区植被净初级生产力的影响.自然资源学报,2007,22(2):251-259.
- [15] 刘彬,杨万勤,吴福忠.亚高山森林生态系统过程研究进展.生态学报,2010,30(16):4476-4483.
- [16] 吴中伦. 中国森林. 北京: 中国林业出版社, 1997: 486-498.
- [17] 庞瑞,顾峰雪,张远东,侯振宏,刘世荣.西南高山地区净生态系统生产力时空动态.生态学报,2012,32(24):7844-7856.
- [18] 张远东,庞瑞,顾峰雪,刘世荣.西南高山地区土壤异养呼吸时空动态.生态学报,2013,33(16):5047-5057.
- [19] Hutchinson M F. A new objective method for spatial interpolation of meteorological variables from irregular networks applied to the estimation of monthly mean solar radiation, temperature, precipitation and windrun // Fitzpatrick E A, Kalma J D, eds. Need for Climatic and Hydrological Data in Agriculture in South-East Asia. Proceedings of the United Nations University Workshop, December 1983). Division of Water Resources Technical Memorandum 89/5, CSIRO, Canberra, 1989: 95-104.
- [20] Steduto P. Water use efficiency // Pereira L S, Feddes R A, Gilley J R, Lesaffre B, eds. Sustainability of Irrigated Agriculture. NATO ASI Series E: Applied Sciences. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996: 193-209.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] Cao M K, Woodward F I. Dynamic responses of terrestrial ecosystem carbon cycling to global climate change. Nature, 1998, 393(6682): 249-252.
- [24] 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.
- [25] Cao M K, Prince S D, Shugart H H. Increasing terrestrial carbon uptake from the 1980s to the 1990s with changes in climate and atmospheric CO₂. Global Biogeochemical Cycles, 2002, 16(4): 17-1-17-11.
- [26] Cao M K, Tao B, Li K R, Shao X M, Prience S D. Interannual variation in terrestrial ecosystem carbon fluxes in China from 1981—1998. Acta Botanica Sinica (Chinese Edition), 2003, 45(5): 552-560.
- [27] Cao M K, Prince S D, Tao B, Small J, Li K R. Regional pattern and interannual variations in global terrestrial carbon uptake in response to changes in climate and atmospheric CO₂. Tellus B, 2005, 57(3): 210-217.
- [28] 陶波. 中国陆地生态系统净初级生产力和净生态系统生产力模拟研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2003.
- [29] 李克让, 王绍强, 曹明奎. 中国植被和土壤碳储量. 中国科学(D辑: 地球科学), 2003, 33(1): 72-80.
- [30] 陶波, 曹明奎, 李克让, 顾峰雪, 季劲钧, 黄玫, 张雷明. 1981—2000 年中国陆地净生态系统生产力空间格局及其变化空间格局及其变化. 中国科学 (D 辑: 地球科学), 2006, 36(12): 1131-1139.
- [31] 陶波,李克让,邵雪梅,曹明奎.中国陆地净初级生产力时空特征模拟.地理学报,2003,58(3):372-380.
- [32] Running S W, Baldocchi D D, Turner D P, Gower S T, Bakwin P S, Hibbard K A. A global terrestrial monitoring network integrating tower fluxes, flask sampling, ecosystem modeling and EOS satellite data. Remote sensing of Environment, 1999, 70(1): 108-127.
- [33] 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.
- [34] Liu Y C, Zhang Y D, Liu S R. Aboveground carbon stock evaluation with different restoration approaches using tree ring chronosequences in Southwest China. Forest Ecology and Management, 2012, 263: 39-46.
- [35] Zhang Y D, Liu S R, Wei X H, Liu J T, Zhang G B. Potential impacts of afforestation on water yield in the sub-alpine region of southwestern China. Journal of the American Water Resources Associate, 2008, 44(5): 1144-1153.
- [36] 蔡福, 张淑杰, 于贵瑞, 祝青林, 刘新安. 基于空间化技术对中国近 50 年平均气温时空演变特征的研究. 高原气象, 2006, 25(6): 1168-1175.
- [37] 姚玉璧,杨金虎,王润元,陆登荣. 50年长江源区域植被净初级生产力及其影响因素变化特征. 生态环境学报, 2010, 19(11): 2521-2528.
- [38] 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.
- [39] 何晓群, 刘文卿. 应用回归分析. 北京: 中国人民大学出版社, 2001.
- [40] 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.
- [41] 杨英莲. 青海省天然草地 NDVI 的时空化与气温和降水的关系分析[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2008.
- [42] 于贵瑞, 王秋凤. 植物光合、蒸腾与水分利用的生理生态学. 北京: 科学出版社, 2010.

11