

DOI:10.13332/j.1000-1522.20190001

基于 Biome-BGC 模型的千烟洲森林水分利用效率研究

温永斌 韩海荣 程小琴 李祖政
(北京林业大学森林资源生态系统过程北京市重点实验室, 北京 100083)

摘要:【目的】为了探究全球气候变化背景下森林生态系统水分利用效率的影响因子及其对气候变化的响应。【方法】本文利用经 PEST 模型参数优化后的 Biome-BGC 模型, 对千烟洲森林生态系统 2000—2014(CK)年以及不同气候情景变化模式下的水分利用效率及其影响因子进行了探究。【结果】(1)千烟洲的年均温和最大叶面积指数同水分利用效率呈显著正相关关系($P < 0.01$), 降水同水分利用效率间的相关性不显著($P > 0.05$)。 (2)千烟洲不同情景模式水分利用效率的取值区间是 2.09~3.71 g/kg、均值 2.90 g/kg。 (3)同 CK(2.18~2.57 g/kg、均值 2.38 g/kg)相比, 千烟洲各情景模式下大气 CO₂ 浓度增加情景(2.38~3.41 g/kg、均值 2.90 g/kg)、降水和大气 CO₂ 浓度同时增加情景(2.38~3.33 g/kg、均值 2.86 g/kg)、气温和大气 CO₂ 浓度同时增加情景(2.58~3.71 g/kg、均值 3.15 g/kg)、降水和气温同时增加(2.30~2.84 g/kg、均值 2.57 g/kg)及降水、气温和大气 CO₂ 浓度同时增加情景(2.70~3.60 g/kg、均值 3.15 g/kg)的水分利用效率差异显著。但是, 降水增加情景(2.09~2.68 g/kg、均值 2.39 g/kg)和气温增加情景(2.13~2.81 g/kg、均值 2.47 g/kg)对水分利用效率的影响不显著。 (4)降水和大气 CO₂ 浓度同时增加情景与大气 CO₂ 浓度增加情景的水分利用效率差异不显著, 气温和大气 CO₂ 浓度同时增加情景与大气 CO₂ 浓度增加情景的水分利用效率差异显著。【结论】(1)千烟洲森林生态系统的水分利用效率受到气温和叶面积指数的影响, 情景分析表明水分利用效率能很好的对气候变化做出响应。 (2)降水、气温和大气 CO₂ 浓度对水分利用效率的影响存在耦合效应。 (3)增温对水分利用效率的影响要大于降水。

关键词: Biome-BGC 模型; PEST 模型; 碳水耦合; 气候变化情景

中图分类号: S718.51+2.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522(2019)04-0069-09

引文格式: 温永斌, 韩海荣, 程小琴, 等. 基于 Biome-BGC 模型的千烟洲森林水分利用效率研究 [J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(4):69-77. Wen Yongbin, Han Hairong, Cheng Xiaoqin, et al. Forest water use efficiency in Qianyanzhou based on Biome-BGC model, Jiangxi Province of eastern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(4): 69-77.

Forest water use efficiency in Qianyanzhou based on Biome-BGC model, Jiangxi Province of eastern China

Wen Yongbin Han Hairong Cheng Xiaoqin Li Zuzheng

(Key Laboratory for Forest Resources and Ecosystem Processes of Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] The objectives of this study are to explore the impact factors of forest ecosystem water use efficiency and its response to climate change in the context of global climate change. [Method] We used the Biome-BGC model optimized by PEST model parameters to explore the water use efficiency and its influencing factors of the Qianyanzhou forest ecosystem in different climate scenarios, Jiangxi Province of eastern China. [Result] (1) The annual average temperature and maximum leaf area index of Qianyanzhou were significantly positively correlated with water use efficiency ($P < 0.01$). The correlation between precipitation and water use efficiency was not significant ($P > 0.05$). (2) The water use efficiency of different scenarios in Qianyanzhou was in the range of 2.09-3.71 g/kg and the mean was 2.90 g/kg. (3) Compared with CK (2.18-2.57 g/kg, mean 2.38 g/kg), double the concentration of atmospheric carbon

收稿日期: 2019-01-20 修回日期: 2019-03-14

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0600205), 国家自然科学基金项目(31700372)。

第一作者: 温永斌。主要研究方向: 森林生态学。Email: 1744215892@qq.com 地址: 100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学林学院。

责任作者: 韩海荣, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 森林生态学。Email: hanhr@bifu.edu.cn 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

dioxide scenario (C scenario, 2.38–3.41 g/kg, mean 2.90 g/kg), annual precipitation increased by 15% and double the concentration of atmospheric carbon dioxide scenario (PC scenario, 2.38–3.33 g/kg, mean 2.86 g/kg), temperature increased by 4 °C and double the concentration of atmospheric carbon dioxide scenario (TC scenario, 2.58–3.71 g/kg, mean 3.15 g/kg), annual precipitation increased by 15% and temperature increased by 4 °C scenario (PT scenario, 2.30–2.84 g/kg, mean 2.57 g/kg) and annual precipitation increased by 15%, temperature increased by 4 °C and double the concentration of atmospheric carbon dioxide scenario (PTC scenario, 2.70–3.60 g/kg, mean 3.15 g/kg) were significantly different. However, the annual precipitation increased by 15% scenario (P scenario, 2.09–2.68 g/kg, mean 2.39 g/kg) and the temperature risen by 4 °C scenario (T scenario, 2.13–2.81 g/kg, mean 2.47 g/kg) had no significant effect on water use efficiency. (4) The water use efficiency between the PC scenario and the C scenario was not significant, and the TC scenario was significantly different from the water use efficiency of the C scenario. [Conclusion] (1) The water use efficiency of Qianyanzhou forest ecosystem was affected by temperature and leaf area index. Scenario simulations showed that water use efficiency of Qianyanzhou can respond well to climate change. (2) There existed coupling effects of precipitation, temperature and atmospheric carbon dioxide concentration on water use efficiency. (3) The effect of warming on water use efficiency was greater than precipitation.

Key words: Biome-BG C model; PEST model; carbon-water coupling; climate change scenarios

CO₂ 等温室气体的排放导致全球气候发生剧烈变化^[1]。IPCC 报告研究表明,未来气候变化将朝着增温、降雨量增加和大气 CO₂ 浓度增加的趋势发展^[2-3],这将对生态系统的碳水关系产生重大影响。水分利用效率(Water use efficiency, WUE)指生态系统每消耗单位质量的水所固定的干物质的量,是表征碳水耦合关系的重要指标^[4],对于生态系统碳、水循环的研究以及对气候变化的响应具有重要意义^[5]。

因研究目的和对象目的不同,人们从叶片至生态系统尺度对碳水耦合关系展开了相关研究^[6-7]。其中,叶片尺度主要探究外界环境对气孔导度的影响,使得水分散失与 CO₂ 的吸收速率产生变化,影响碳水平衡^[8];个体水平探讨了一定时期内植株干物质的累积同水分消耗的比值关系^[9];生态系统水平聚焦于整个生态系统碳水通量的观测、以及降水、气温、大气 CO₂ 浓度等因子对生态系统生产力与蒸散的影响^[10]。

森林生态系统作为陆生生态系统的重要组成部分,对森林碳水关系的研究及其对气候变化的响应具有重要意义。国内外学者对森林生态系统水分利用效率的研究多关注于不同植被类型水分利用效率的差异^[11],水分利用效率的时空分布^[12]以及水分利用效率的影响因素^[13]。但这些方面的研究均无定论,例如,一定程度降水量的增加会提高植被的生产力^[14],同时也会提高蒸散量^[15];因此,不同区域、不同的植被类型,水分利用效率可能提高也可能降低^[15]。现今生态系统尺度水分利用效率的研究多采用涡度相关技术、模型模拟以及两者相结合的方法^[16-18]。其中,涡度相关技术能对生态系统的碳、水通量进行长时间的观测,但受到站点数量的限制而无法进行大

尺度的通量观测;模型模拟能很好的解决大尺度碳水关系研究的短板,但模型模拟往往涉及众多生理生态参数,它们的优化成了难点^[19]。目前,国内外研究中常用到模拟退火算法模型^[20]、遗传算法模型^[21]和 PEST 模型(Model-independent parameter estimation and uncertainty analysis)^[22]等自动化校准模型对模型参数进行全局优化。在众多模型当中,Biome-BGC 模型是基于气象、生理等参数为基础的生态过程模型,在国内外生态系统碳、水通量研究当中取得了显著成效^[23-25]。

千烟洲具有典型的亚热带季风气候,进入生长季伴随着气温的上升降雨量反而下降,是研究生态系统碳水关系的天然场所。为此,本研究通过涡度相关实测数据结合 PEST 模型对 Biome-BGC 模型的生理参数进行优化,并用优化后的 Biome-BGC 模型对千烟洲的总初级生产力(Gross primary productivity, GPP)、蒸散(Evapotranspiration, ET)和 WUE (GPP/ET)进行模拟。同时对千烟洲 WUE 的影响因子进行了分析,并以 IPCC 对未来气候变化趋势的研究为基础,模拟了降雨量增加、气温升高和大气 CO₂ 浓度加倍等情景对森林生态系统碳水耦合关系的影响。探讨全球气候变化背景下森林生态系统的碳水平衡,及其对气候变化的响应。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

千烟洲森林通量观测站位于江西省吉安市泰和灌溪镇(26°44'29"N、115°03'29"E),属典型的亚热带季风性气候。千烟洲年平均气温 17.9 °C,年平均降

水量 1 542.4 mm; 土壤主要为红壤, 海拔 100 m 左右, 高差 20 ~ 50 m; 主要树种有马尾松(*Pinus massoniana*)、湿地松(*Pinus elliottii*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)和木荷(*Schima superba*)等; 平均冠层高度约 11 m, 林下植被较少。

1.2 研究方法

1.2.1 模型简介

Biome-BGC 模型是由 Montana 大学 Numerical Terradynamic Simulation 研究组开发, 以日尺度为步长的生态过程模型, 其前身为 Forest-BGC 模型^[26-27]。Biome-BGC 模型主要基于光合作用、呼吸作用和蒸腾作用等算法对生态系统的碳循环、水循环进行模拟^[28]。其驱动文件主要有如下 3 大类。(1)初始文件: 站点经纬度、海拔、土层深度、土壤质地和大气 CO₂ 浓度等;(2)气象文件: 日降水量、日最高温、日最低温、日平均温和辐射等;(3)生理参数文件: 气孔导度、冠层比叶面积、叶片及细根 C:N 比等^[29]。

PEST 模型是能独立于模型之外的非线性参数优化模型, 模型基于 Gauss-Marquardt-Levenberg 算法求取目标函数(模型模拟值与实测值间的差异函

数)的最小值, 其目标函数为^[30-32]:

$$\Phi = (\hat{\mathbf{y}} - \mathbf{y} - \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{x}))^T \mathbf{O} (\hat{\mathbf{y}} - \mathbf{y} - \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{x}))$$

式中: $\mathbf{y}$ 是含 m 个(实测值数量)元素的向量, $\mathbf{x}$ 是含 n 个(参数个数)元素的向量, $\hat{\mathbf{y}}$ 是模拟结果向量, $\hat{\mathbf{x}}$ 是待估参数向量; $\mathbf{H}$ 为 m 行 n 列的雅克比偏导矩阵, $\mathbf{T}$ 代表转置符号, $\mathbf{O}$ 为具有 m 行 m 列的实测值权重矩阵。

PEST 模型算法过程为^[33-34]: 首先识别模型中需要优化的参数并进行模型模拟, 然后选定初始参数向量 $\hat{\mathbf{x}}_0^a$, 进行模型校正; 模型模拟结果存储到向量中 $\hat{\mathbf{y}}_0^a$, 相应的实测值存储在向量 $\mathbf{y}$ 中。利用一阶泰勒展开式对 $\mathbf{H}_0$ 进行数值求解, 再通过增量向量

$$\mathbf{u}: \begin{cases} \mathbf{u}_k = (\mathbf{H}_k^T \mathbf{O} \mathbf{H}_k)^{-1} \mathbf{H}_k^T \mathbf{O} (\mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}}) \\ \hat{\mathbf{x}}_k^a = \hat{\mathbf{x}}_k^b + \mathbf{u}_k \end{cases}$$

式中: k 为迭代次数, 上标 a 表示更新前的向量, b 为更新后的向量。不断地更新参数向量 $\hat{\mathbf{x}}$, 进而计算参数增量向量 $\mathbf{u}_0$, 以及更新后的 $\hat{\mathbf{x}}_0^b$; 将 $\hat{\mathbf{x}}_0^b$ 存储到参数向量 $\hat{\mathbf{x}}_1^a$ 中, 重复以上算法步骤直到收敛, 达到目标函数最优。其关键过程见图 1^[33]。模型原理和使用详见操作指南(<http://www.pesthomepage.org/>)。

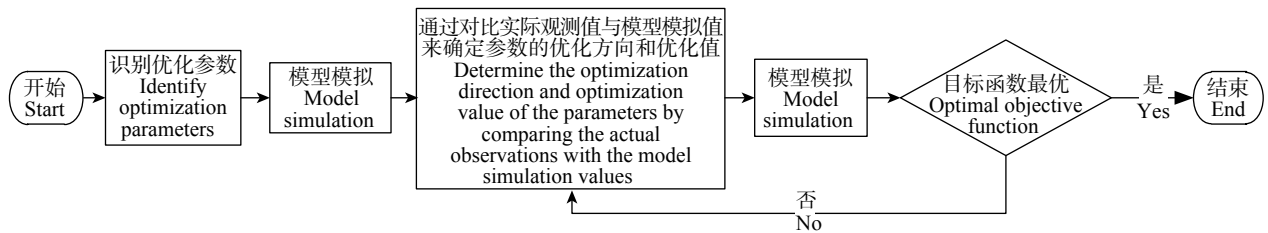


图 1 PEST 模型参数优化流程图

Fig. 1 Parameter optimization flowchart of PEST

1.2.2 模型模拟

Biome-BGC 模型模拟过程包括平衡态模拟 (spin-up) 和常规模拟 (normal-run) 两个阶段。spin-up 模式使模型在最原始的生态系统环境下进行模拟, 直到生态系统达到稳定状态为止, 然后在此基础上进行常规模拟。模型的原理详见参考文献^[35]和模型使用指南(<http://www.ntsg.umt.edu/project/biome-bgc>)。采用 PEST 模型参数优化后的 Biome-BGC 模型对千烟洲 2000—2014 年的 GPP 和 ET 进行模拟并计算 WUE (GPP/ET)。探讨年降水量 (Precipitation, PRCP)、年均温 (Average temperature, Tavg) 和最大叶面积指数 (Maximum leaf area index, maxLAI) 同水分利用效率的关系。依据 IPCC 报告(<http://www.ipcc.ch/report/ar5/index.shtml>)和相关文献^[23,36]指出未来气候变化下年降水增加 15%, 年均温升高 4 °C, CO₂ 浓度加倍; 这将对生态系统的碳、水及其相互关系带来巨大的影响。为此, 对各情景模式下的 WUE 进行

模拟。

各情景模式中, CK 是对照, P (Annual precipitation increased by 15%) 是年降雨量增加 15%, T (Temperature rises by 4 °C) 是气温升高 4 °C, C (Double the concentration of atmospheric carbon dioxide) 是大气 CO₂ 浓度加倍, PT (Annual precipitation increased by 15% and temperature increased by 4 °C) 是年降雨量增加 15% 同时气温增加 4 °C, PC (Annual precipitation increased by 15% and double the concentration of atmospheric carbon dioxide) 是年降雨量增加 15% 同时大气 CO₂ 浓度加倍, TC (Temperature increased by 4 °C and double the concentration of atmospheric carbon dioxide) 是气温增加 4 °C 同时大气 CO₂ 浓度加倍, PTC (Annual precipitation increased by 15%, temperature increased by 4 °C and double the concentration of atmospheric carbon dioxide) 是年降雨量增加 15%, 气温升高 4 °C 同时大气 CO₂ 浓度加倍。

1.3 数据来源和处理

Biome-BGC 模型所需的日尺度气象数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)。日尺度 GPP 和 ET 的验证数据来源于中国通量观测研究联盟 (ChinaFLUX) 的涡度相关实测数据 (<http://www.chinaflux.org/yjfw/index.aspx?nodeid=18&apagesize=3&pagenum=10>)。土壤质地数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心平台 (<http://www.resdc.cn>)。土层深度数据来源于寒区旱区科学数据中心平台 (<http://westdc.westgis.ac.cn/>)。CO₂ 数据来源于 CO₂ 数据库平台 (<https://www.co2.earth/historical-co2-datasets>)。数据整理与统计在 Excel 中进行, 方差分析和相关性分析在 SPSS 19.0 中进行。

表 1 Biome-BG C 模型优化前后参数对照表

Tab. 1 Biome-BG C model parameter comparison table before and after optimization

生理参数 Physiological parameter	站点 Station	
	千烟洲 Qianyanzhou	
	缺省值 Default value	优化值 Optimization value
年内叶和细根周转比 Annual leaf and fine root turnover fraction	0.500	0.546
年内活木转化比 Annual live wood turnover fraction	0.700	0.764
年度整株植株死亡率 Annual whole-plant mortality fraction	0.005	0.020
年度植物火灾死亡率 Annual fire mortality fraction	0.002	0.018
细根碳与叶碳分配比 New fine root C: new leaf C	1.000	0.802
茎干碳与叶碳分配比 New stem C: new leaf C	1.000	1.470
活木碳与总碳分配比 New live wood C: new total wood C	0.220	0.208
粗根碳与茎干碳分配比 Coarse root C: stem C	0.300	0.362
当前生长比例 Current growth proportion	0.500	0.416
叶片碳氮比 C:N of leaves	42.000	37.632
落叶碳氮比 C:N of leaf litter	49.000	54.683
细根碳氮比 C:N of fine roots	42.000	39.624
活木碳氮比 C:N of live wood	50.000	49.872
死木碳氮比 C:N of dead wood	300.000	299.994
冠层水分截留系数 Canopy water interception coefficient	0.041	0.041 3
冠层消光系数 Canopy light extinction coefficient	0.700	0.701
投影叶面积比 All-sided to projected leaf area ratio	2.000	1.997
比叶面积 Specific leaf area	12.000	11.871
阴阳叶比叶面积比 Ratio of shaded SLA:sunlit SLA	2.000	2.747
Rubisco酶中叶氮质量分数 Fraction of leaf N in Rubisco	0.060	0.062
最大气孔导度 Maximum stomatal conductance	0.005	0.005 4
叶水势传导上限 Leaf water potential: start of conductance reduction	- 0.600	- 0.582
叶水势传导下限 Leaf water potential: complete conductance reduction	- 3.900	- 3.784
水汽压差限制传导上限 Vapor pressure deficit: start of conductance reduction	1 800.000	1 798.576
水汽压差限制传导下限 Vapor pressure deficit: complete conductance reduction	4 100.000	4 097.758

将日尺度参数优化后的模拟结果、日尺度未进行参数优化的模拟结果和日尺度涡度相关实测数据

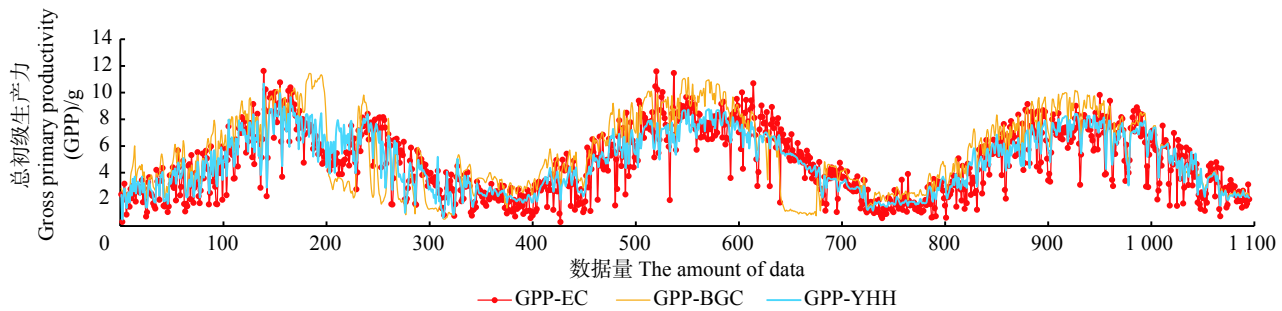
2 结果与分析

2.1 模型校验

Biome-BGC 模型中有 43 个生理生态参数, 其中有些参数用来描述站点植被类型以及特定植被类型下参数的缺省值, 例如: 描述植被是否为木本植物, 是否为 C3 或 C4 植物, 常绿阔叶林中转化期占生长季的比例, 凋落期占生长季的比例等。除去此类缺省参数对剩余的参数用 PEST 模型进行参数优化。PEST 模型通过涡度相关实测数据与模型模拟值间构建优化函数, 进而对 Biome-BGC 模型的生理参数进行优化。参数优化结果参照表 1。

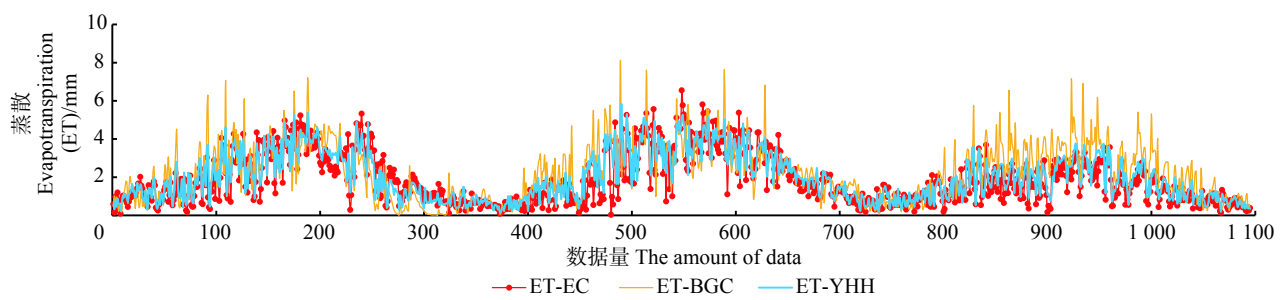
进行对比分析。其中, GPP-BGC 为未进行参数优化模拟的日 GPP, GPP-EC 为涡度相关技术实测的日

GPP, GPP-YHH 为通过 PEST 模型进行参数优化后模拟而得的日 GPP(图 2)。ET-BGC 为未进行参数优化模拟的日 ET, ET-EC 为涡度相关技术实测的日 ET, ET-YHH 为通过 PEST 模型进行参数优化后模拟而得的日 ET(图 3)。



GPP-BGC 为 Biome-BGC 模型未进行参数优化模拟的日 GPP, GPP-EC 为涡度相关技术实测的日 GPP, GPP-YHH 为通过 PEST 模型进行参数优化后模拟而得的日 GPP。GPP-BGC is a daily GPP for the Biome-BGC model without parameter optimization simulation, GPP-EC is a daily GPP measured by eddy correlation technology, GPP-YHH is a daily GPP that is simulated after parameter optimization through the PEST model.

图 2 千烟洲 2003—2005 日 GPP 值
Fig. 2 Daily GPP of Qianyanzhou from 2003 to 2005



ET-BGC 为 Biome-BGC 模型未进行参数优化模拟的日 ET, ET-EC 为涡度相关技术实测的日 ET, ET-YHH 为通过 PEST 模型进行参数优化后模拟而得的日 ET。ET-BGC is a daily ET for the Biome-BGC model without parameter optimization simulation, ET-EC is a daily ET measured by eddy correlation technology, ET-YHH is a daily ET that is simulated after parameter optimization through the PEST model.

图 3 千烟洲 2003—2005 日蒸散值
Fig. 3 Daily evapotranspiration (ET) of Qianyanzhou from 2003 to 2005

线性回归拟合分析发现, 千烟洲日尺度参数优化后的模型模拟值同日尺度涡度相关实测数据的拟合效果显著。其中, GPP 和 ET 拟合的 R^2 值分别为 0.81 和 0.82(优化前 R^2 值分别为 0.57 和 0.56, 拟合度分别提高了 0.24 和 0.26)。说明采用 PEST 模型对 Biome-BGC 模型进行参数优化能显著提高 Biome-BGC 模型的模拟精度。

模型优化前后的参数对比可以看出表征植被碳水分配和生产力的各类参数均有不同幅度的变化(表 2)。对千烟洲参数优化前后模型模拟以及涡度相关实测的日尺度 GPP 和 ET 的对比分析发现, 总体而言未进行参数优化前模型的模拟结果同比涡度相关实测数据来说略有偏大, 其中尤以日尺度蒸散相对表现的较为明显。

2.2 水分利用效率及其影响因子

WUE 的取值范围是 2.09 ~ 3.71 g/kg、均值 2.90 g/kg。方差分析表明, 各自情景模式下 WUE 的波动性不大(CK 的方差是 0.024, P 的方差是 0.036,

表 2 年水分利用效率及其影响因子相关性分析

Tab. 2 Correlation analysis of annual water use efficiency and its impact factors

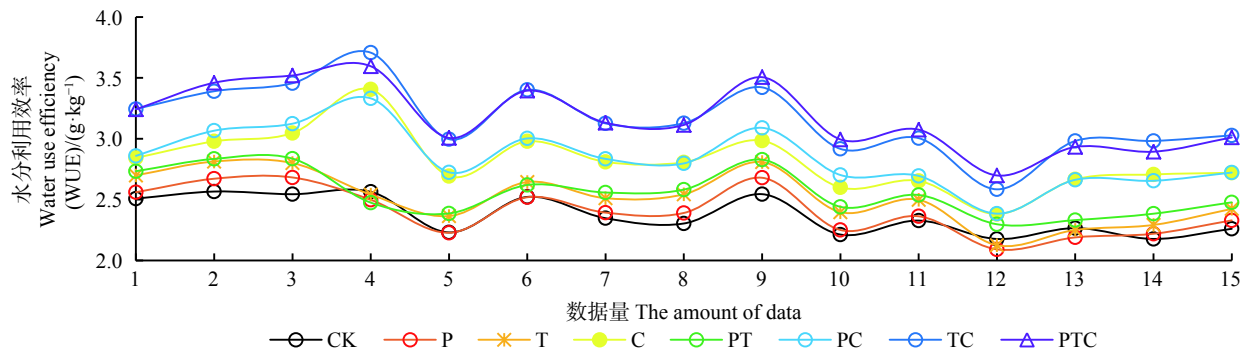
千烟洲 Qianyanzhou	WUE
降水量 Precipitation (PRCP)	0.136
平均温度 Average temperature (Tavg)	0.268**
最大叶面积指数 Maximum leaf area index (maxLAI)	0.605**

注: **代表 $P < 0.01$, 表示极显著相关。Notes: **represents $P < 0.01$, indicating extremely significant correlation.

T 的方差是 0.044, C 的方差是 0.057, PT 的方差是 0.033, PC 的方差是 0.057, TC 的方差是 0.078, PTC 的方差是 0.071), 但各情景模式间存在差异。同 CK(取值范围 2.18 ~ 2.57 g/kg、均值 2.38 g/kg)相比较, PTC 情景(取值范围 2.70 ~ 3.60 g/kg、均值 3.15 g/kg)和 TC 情景(2.58 ~ 3.71 g/kg)的 WUE 最高, 然后是 PC 情景(取值范围 2.38 ~ 3.33 g/kg、均值 2.86 g/kg)和 C 情景(取值范围 2.38 ~ 3.41 g/kg、

均值 2.90 g/kg), 最后是 PT 情景(取值范围 2.30 ~ 2.84 g/kg、均值 2.57 g/kg)、T 情景(取值范围 2.13 ~ 2.81 g/kg、均值 2.47 g/kg)和 P 情景(取值范围 2.09 ~

2.68 g/kg、均值 2.39 g/kg)。相比于其他情景模式, P 情景模式 WUE 的部分值还出现略低于 CK 的情况(图 4)。



CK 是对照, P 是年降雨量增加 15% 情景, T 是气温升高 4 ℃ 情景, C 是大气 CO₂ 浓度加倍情景, PT 是年降雨量增加 15% 同时气温增加 4 ℃ 情景, PC 是年降雨量增加 15% 同时大气 CO₂ 浓度加倍情景, TC 是气温增加 4 ℃ 同时大气 CO₂ 浓度加倍情景, PTC 是年降雨量增加 15%, 气温升高 4 ℃ 同时大气 CO₂ 浓度加倍情景。CK means control, P means annual precipitation increases by 15% scenario, T means temperature rises by 4 ℃ scenario, C means double the concentration of atmospheric carbon dioxide scenario, PT means annual precipitation increases by 15% and temperature increases by 4 ℃ scenario, PC means annual precipitation increases by 15% and double the concentration of atmospheric carbon dioxide scenario, TC means temperature increases by 4 ℃ and double the concentration of atmospheric carbon dioxide scenario, PTC means annual precipitation increases by 15%, temperature increases by 4 ℃ and double the concentration of atmospheric carbon dioxide scenario.

图 4 各情景模式年水分利用效率变化趋势

Fig. 4 Trends of annual water use efficiency in different climate scenarios

各情景模式 WUE 和 PRCP、Tavg、maxLAI 的相关性分析(表 2)表明, 千烟洲 maxLAI 和 Tavg 同 WUE 之间存在显著正相关关系, PRCP 同 WUE 间相关性不显著。各情景模式年 WUE 的方差分析表明(表 3), 千烟洲 C 情景、PT 情景、PC 情景、TC 情景和 PTC 情景下的 WUE 同 CK 间均存在显著的差异; P、T 情景的 WUE 同 CK 间的差异不显著。进一步分析发现, PC 情景同 C 情景间的 WUE 差异不显著; TC 情景同 C 情景间的 WUE 差异显著。

3 讨 论

3.1 WUE 及其影响因子

本研究发现气温和叶面积指数同水分利用效率间存在显著正相关关系, 但降水同水分利用效率的相关性不显著。研究表明, 降水同生产力之间的关系存在一定的阈值, 当降水量在 1 000 mm 以内时, 生产力与降水量呈显著正相关关系; 当降水量在 1 000 ~ 2 500 mm 之间时, 生产力同降水量之间的关系不显著; 当降水量大于 2 500 mm 时两者呈显著负相关关系^[34-37]。同理, 降水量和蒸散之间也存在类似的阈值性关系, 不同的是由于生态系统冠层结构的异质性, 使得冠层截留量、冠层蒸散以及因冠层结构的不同导致进入地表的辐射产生差异; 加之土壤结构的异质性导致土壤蒸发量的不同, 使得降水量同蒸散间的关系要比生产力同降水量间的关系要复杂^[38]。为此, 降水量同水分利用效率间的关系既有

表 3 千烟洲各情景模式年水分利用效率方差分析

Tab. 3 Annual water use efficiency analysis of variance of various scenarios in Qianyanzhou

	CK	P	T	C	PT	PC	TC	PTC
CK	1.000							
P	0.034	1.000						
T	0.144	0.110	1.000					
C	0.448*	0.414*	0.304*	1.000				
PT	0.185*	0.150	0.041	0.263*	1.000			
PC	0.473*	0.439*	0.329*	0.025	0.288*	1.000		
TC	0.788*	0.753*	0.644*	0.340*	0.603*	0.315*	1.000	
PTC	0.801*	0.767*	0.657*	0.353*	0.617*	0.328*	0.014	1.000

注: *代表 $P < 0.05$, 表示显著相关。Notes: *represents $P < 0.05$, indicating significant correlation.

正相关, 也有不相关甚至负相关的情况^[39], 这和本文结果一致。千烟洲属亚热带季风气候区, 年均降水量为 1 542 mm, 对于该区域的植被而言, 生产力和蒸散对降水的响应幅度相当, 为此降水同水分利用效率不相关。

叶面积指数增加会导致冠层截留量和冠层蒸散的增加, 同时还会降低抵达地面的太阳辐射从而降低土壤蒸发, 使得蒸散量产生变化^[40-42]。同时叶面积增大会促进冠层面积增加, 有利于光合作用的进行, 进而增加生产力^[43-45]。对于千烟洲而言, 叶面积指数对生产力的影响幅度要大于对蒸散的影响幅度; 所以, 叶面积指数同水分利用效率间呈显著正相关关系。

气温升高使得春天来的更早, 秋天到的更晚, 即生长季变得更长, 进而促进总初级生产力增加^[46-47], 该现象在我国南方地区尤为显著。同时, 增温条件下光合速率显著增加^[48], 而蒸散速率因气孔对温度变化的响应而基本保持不变甚至减小^[49], 使得 WUE 呈上升趋势。因而, 气温对千烟洲生产力的影响幅度要大于蒸散; 所以, 气温同水分利用效率间呈显著正相关关系。

3.2 WUE 对气候变化的响应

本研究表明, 气候变化对 WUE 具有显著的影响。其中, 千烟洲 PT 情景、PC 情景、TC 情景和 PTC 情景对水分利用效率有显著影响; P 情景和 T 情景对水分利用效率所产生的影响不显著。

降雨量增加提高生产力的同时蒸散量也增大, 且两者的增长幅度相当, 为此同 CK 相比差异不显著^[50]。气温升高生产力增加的同时, 因增温而导致呼吸速率增加而增大碳的消耗, 同时增温亦会促进蒸散量增加进而抵消生产力对 WUE 产生的影响; 因而同 CK 相比, WUE 变化不显著。但是, 降水增加和增温共同产生的效应对水分利用效率的影响却是显著的。这表明降水和气温之间存在耦合效应, 即两者共同作用对水分利用效率的影响要比单独作用产生的影响大。这在 PC 情景、TC 情景和 PTC 情景中更加充分的得到了验证。此外, PC 情景和 C 情景差异不显著, TC 情景和 C 情景差异显著, 说明相对于增温来说, 降水对水分利用效率的影响要小。

除 PC 情景外, 与大气 CO₂ 浓度相关的情景对水分利用效率均有显著影响。涡度相关技术与 FACE 实验表明, WUE 同 CO₂ 浓度呈显著正相关关系^[51-53], 这和本研究结果一致。CO₂ 浓度的增加能增大植被的生产力^[54-55], 同时使气孔关闭或者开度减小, 降低气孔导度, 使得失水的速率大于 CO₂ 的同化速率, 促使 WUE 呈上升趋势^[56-57]。

4 结 论

本文通过 PEST 模型参数优化后的 Biome-BGC 模型对千烟洲的水分利用效率进行了研究。结果表明: (1) 千烟洲的 Tavg 和 maxLAI 同 WUE 呈显著正相关关系, PRCP 同 WUE 间的相关性不显著。(2) 气候情景模式下, C 情景、PC 情景、TC 情景、PT 情景和 PTC 情景的 WUE 同 CK 相比存在显著差异, 差异大小排序为: PTC 情景 > TC 情景 > PC 情景 > C 情景 > PT 情景。(3) 千烟洲 P 情景和 T 情景对水分利用效率的影响不显著, 但两者的耦合 PT 情景对水分利用效率的影响显著, 即降水和气温对水分利用效率的影响存在耦合效应。这在 PC 情景、

TC 情景和 PTC 情景中得到充分验证。(4) PC 情景同 C 情景的 WUE 差异不显著, TC 情景同 C 情景的 WUE 差异显著, 表明增温对水分利用效率的影响要大于降雨量增加。

参 考 文 献

- [1] Melillo J M, McGuire A D, Kicklighter D W, et al. Global climate change and terrestrial net primary production[J]. *Nature*, 1993, 363: 234-240.
- [2] 沈永平, 王国亚. IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点 [J]. 冰川冻土, 2013, 35(5): 1068-1076.
Shen Y P, Wang G Y. Key findings and assessment results of IPCC WGI fifth assessment report[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(5): 1068-1076.
- [3] Working Group of the IPCC. Climate change 2013: the physical science basis[J]. *Contribution of Working*, 2013, 43(22): 866-871.
- [4] 米兆荣, 陈立同, 张振华, 等. 基于年降水、生长季降水和生长季蒸散的高寒草地水分利用效率 [J]. 植物生态学报, 2015, 39(7): 649-660.
Mi Z R, Chen L T, Zhang Z H, et al. Alpine grassland water use efficiency based on annual precipitation, growing season precipitation and growing season evapotranspiration[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2015, 39(7): 649-660.
- [5] 胡中民, 于贵瑞, 王秋风, 等. 生态系统水分利用效率研究进展 [J]. 生态学报, 2009, 29(3): 1498-1507.
Hu Z M, Yu G R, Wang Q F, et al. Ecosystem level water use efficiency: a review[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(3): 1498-1507.
- [6] 王庆伟, 于大炮, 代力民, 等. 全球气候变化下植物水分利用效率研究进展 [J]. 应用生态学报, 2010, 21(12): 3255-3265.
Wang Q W, Yu D P, Dai L M, et al. Research progress in water use efficiency of plants under global climate change[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(12): 3255-3265.
- [7] 熊伟, 王彦辉, 于澎涛. 树木水分利用效率研究综述 [J]. 生态学报, 2005, 24(4): 417-421.
Xiong W, Wang Y H, Yu P T. A review on the study of water use efficiency of tree species[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(4): 417-421.
- [8] 王会肖, 刘昌明. 作物水分利用效率内涵及研究进展 [J]. 水利科学进展, 2000, 11(1): 99-104.
Wang H X, Liu C M. Advances in crop water use efficiency research[J]. *Advances in Water Science*, 2000, 11(1): 99-104.
- [9] Chen S, Bai Y, Han X. Variations in composition and water use efficiency of plant functional groups based on their water ecological groups in the Xilin River Basin[J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2003, 63(3): 241-242.
- [10] 于贵瑞, 王秋风, 方华军. 陆地生态系统碳-氮-水耦合循环的基本科学问题、理论框架与研究方法 [J]. 第四纪研究, 2014, 34(4): 683-698.
Yu G R, Wang Q F, Fang H J. Fundamental scientific issues, theoretical framework and relative research methods of carbon-

- nitrogen-water coupling cycles in terrestrial ecosystems[J]. *Quaternary Sciences*, 2014, 34(4): 683–698.
- [11] Huang M, Piao S, Sun Y, et al. Change in terrestrial ecosystem water-use efficiency over the last three decades[J]. *Global Chang Biology*, 2015, 21(6): 2366–2378.
- [12] Zhu X J, Yu G R, Wang Q F, et al. Spatial variability of water use efficiency in China's terrestrial ecosystems[J]. *Global & Planetary Change*, 2015, 129: 37–44.
- [13] Guirui Y, Xia S, Qiufeng W, et al. Water-use efficiency of forest ecosystems in eastern China and its relations to climatic variables[J]. *The New Phytologist*, 2010, 177(4): 927–937.
- [14] Mi Z, Yu G R, Jie Z, et al. Effects of cloudiness change on net ecosystem exchange, light use efficiency, and water use efficiency in typical ecosystems of China[J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2011, 151(7): 803–816.
- [15] Zhang F M, Ju W M, Shen S H, et al. How recent climate change influences water use efficiency in East Asia[J]. *Theoretical & Applied Climatology*, 2014, 116(1-2): 359–370.
- [16] Yu G, Song X, Wang Q, et al. Water-use efficiency of forest ecosystems in eastern China and its relations to climatic variables[J]. *The New Phytologist*, 2008, 177(4): 927–937.
- [17] 刘宁, 孙鹏森, 刘世荣, 等. 流域水碳过程耦合模拟: WaSSI-C 模型的率定与检验 [J]. *植物生态学报*, 2013, 37(6): 492–502.
- Liu N, Sun P S, Liu S R, et al. Coupling simulation of water-carbon processes for catchment: calibration and validation of the WaSSI-C model[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2013, 37(6): 492–502.
- [18] Liu Y, Xiao J, Ju W, et al. Water use efficiency of China's terrestrial ecosystems and responses to drought[J/OL]. *Scientific Reports*, 2015, 5(5): 13799. [2018–03–10]. <https://www.Ncbi.nlm.gov/pmc/articles/PMC4562296>.
- [19] 于贵瑞, 高扬, 王秋凤, 等. 陆地生态系统碳氮水循环的关键耦合过程及其生物调控机制探讨 [J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(1): 1–13.
- Yu G R, Gao Y, Wang Q F, et al. Discussion on the key processes of carbon-nitrogen-water coupling cycles and biological regulation mechanisms in terrestrial ecosystem[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(1): 1–13.
- [20] 卢宇婷, 林禹攸, 彭乔姿, 等. 模拟退火算法改进综述及参数探究 [J]. *大学数学*, 2015, 31(6): 96–103.
- Lu Y T, Lin Y Y, Peng Q Z, et al. A review of improvement and research on parameters of simulated annealing algorithm[J]. *College Mathematics*, 2015, 31(6): 96–103.
- [21] Sahoo D, Smith P K, Ines A V M. Autocalibration of HSPF for simulation of streamflow using a genetic algorithm[J]. *Transactions of the ASABE*, 2010, 53: 75–86.
- [22] 高伟, 周丰, 董延军, 等. 基于 PEST 的 HSPF 水文模型多目标自动校准研究 [J]. *自然资源学报*, 2014, 29(5): 855–867.
- Gao W, Zhou F, Dong Y J, et al. PEST-based multi-objective automatic calibration of hydrologic parameters for HSPF model[J]. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(5): 855–867.
- [23] 吴玉莲, 王襄平, 李巧燕, 等. 长白山阔叶红松林净初级生产力对气候变化的响应: 基于 BIOME-BGC 模型的分析 [J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2014, 50(3): 577–586.
- Wu Y L, Wang X P, Li Q Y, et al. Response of broad-leaved Korean pine forest productivity of Mt. Changbai to climate change: an analysis based on Biome-BGC modeling[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2014, 50(3): 577–586.
- [24] 彭俊杰, 何兴元, 陈振举, 等. 华北地区油松林生态系统对气候变化和 CO₂ 浓度升高的响应: 基于 BIOME-BGC 模型和树木年轮的模拟 [J]. *应用生态学报*, 2012, 23(7): 1733–1742.
- Peng J J, He X Y, Chen Z J, et al. Responses of *Pinus tabulaeformis* forest ecosystem in North China to climate change and elevated CO₂: a simulation based on Biome-BGC model and tree-ring data[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(7): 1733–1742.
- [25] 张廷龙, 孙睿, 胡波, 等. 改进 Biome-BGC 模型模拟哈佛森林地区水、碳通量 [J]. *生态学报*, 2011, 30(9): 2099–2106.
- Zhang T L, Sun R, Hu B, et al. Simulation of water and carbon fluxes in Harvard forest area by using improved Biome-BGC model[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(9): 2099–2106.
- [26] 谢馨瑶, 李爱农, 靳华安. 大尺度森林碳循环过程模拟模型综述 [J]. *生态学报*, 2018, 38(1): 41–54.
- Xie Q Y, Li A N, Jin H A. The simulation models of the forest carbon cycle on a large scale: a review[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(1): 41–54.
- [27] Ueyama M, Ichii K, Hirata R, et al. Simulating carbon and water cycles of larch forests in East Asia by the BIOME-BGC model with AsiaFlux data[J]. *Biogeosciences*, 2010, 7(3): 959–977.
- [28] 李书恒, 侯丽, 史阿荣, 等. 基于 Biome-BGC 模型及树木年轮的太白红杉林生态系统对气候变化的响应 [J]. *生态学报*, 2018, 38(20): 1–11.
- Li S H, Hou L, Shi A R, et al. Response of *Larix chinensis* forest ecosystem to climate change based on Biome-BGC model and tree rings[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(20): 1–11.
- [29] 李一哲, 张廷龙, 刘秋雨, 等. 生态过程模型敏感参数最优取值的时空异质性分析: 以 BIOME-BGC 模型为例 [J]. *应用生态学报*, 2018, 29(1): 84–92.
- Li Y Z, Zhang T L, Liu Q Y, et al. Temporal and spatial heterogeneity analysis of optimal value of sensitive parameters in ecological process model: the BIOME-BGC model as an example[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(1): 84–92.
- [30] Watson T A, Doherty J E, Christensen S. Parameter and predictive outcomes of model simplification[J]. *Water Resources Research*, 2013, 49(7): 3952–3977.
- [31] 董艳辉, 李国敏, 郭永海, 等. 应用并行 PEST 算法优化地下水模型参数 [J]. *工程地质学报*, 2010, 18(1): 140–144.
- Dong Y H, Li G M, Guo Y H, et al. Optimization of model parameters for ground water flow using parallelized PEST method[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2010, 18(1): 140–144.
- [32] 梁浩, 胡克林, 李保国. 基于 PEST 的土壤-作物系统模型参数优化及灵敏度分析 [J]. *农业工程学报*, 2016, 32(3): 78–85.
- Liang H, Hu K L, Li B G. Parameter optimization and sensitivity

- analysis of soil-crop system model using PEST[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(3): 78–85.
- [33] 王礼恒, 董艳辉, 李国敏, 等. 基于 PEST 的地下水数值模拟参数优化的应用[J]. 工程勘察, 2014, 42(3): 38–42.
- Wang L H, Dong Y H, Li G M, et al. Application of groundwater numerical simulation for parameter optimization based on PEST[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2014, 42(3): 38–42.
- [34] Nolan B T, Malone R W, Doherty J E, et al. Data worth and prediction uncertainty for pesticide transport and fate models in Nebraska and Maryland, United States[J]. Pest Management Science, 2015, 71(7): 972–985.
- [35] White M A, Thornton P E, Running S W, et al. Parameterization and sensitivity analysis of the BIOME-BG C terrestrial ecosystem model: net primary production controls[J]. Earth Interactions, 2000, 4(3): 1–84.
- [36] Etheridge D M, Steele L P, Langenfelds R L, et al. Natural and anthropogenic changes in atmospheric CO₂ over the last 1000 years from air in Antarctic ice and firn[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1996, 101(D2): 4115–4128.
- [37] 张笑鹤. 西南地区 NDVI 和 NPP 时空动态及其与气候因子相关性分析[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2011.
- Zhang X H. Spatio-temporal dynamic of NDVI and NPP and their correlation with climatic factors in Southwest China[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2011.
- [38] 孙福宝. 基于 Budyko 水热耦合平衡假设的流域蒸散发研究[D]. 北京: 清华大学, 2007.
- Sun F B. Study on watershed evapotranspiration based on the Budyko Hypothesis[D]. Beijing: Tsinghua University, 2007.
- [39] 仇宽彪. 中国植被总初级生产力、蒸散发及水分利用效率的估算及时空变化[D]. 北京: 北京林业大学, 2015.
- Qiu K B. Estimating regional vegetation gross primary productivity (GPP), evapotranspiration (ET), water use efficiency (WUE) and their spatial and temporal distribution across China[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2015.
- [40] Norby R J, Zak D R. Ecological lessons from free-air CO₂ enrichment (FACE) experiments[J]. Annual Review of Ecology Evolution & Systematics, 2011, 42(1): 181–203.
- [41] Betts R A, Cox P M, Lee S E, et al. Contrasting physiological and structural vegetation feedbacks in climate change simulations[J]. Nature, 1997, 387: 796–799.
- [42] Piao S, Friedlingstein P, Ciais P, et al. Changes in climate and land use have a larger direct impact than rising CO₂ on global river runoff trends[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2007, 104(39): 15242–15247.
- [43] Betts R A, Boucher O, Collins M, et al. Projected increase in continental runoff due to plant responses to increasing carbon dioxide[J]. Nature, 2007, 448: 1037–1041.
- [44] Zhu Q, Jiang H, Peng C, et al. Effects of future climate change, CO₂ enrichment, and vegetation structure variation on hydrological processes in China[J]. Global & Planetary Change, 2012, 80–81(1): 123–135.
- [45] Hungate B A, Reichstein M, Dijkstra P, et al. Evapotranspiration and soil water content in a scrub-oak woodland under carbon dioxide enrichment[J]. Global Change Biology, 2010, 8(3): 289–298.
- [46] Körner C, Basler D. Phenology under global warming[J]. Science, 2010, 327: 1461–1462.
- [47] Gunderson C A, Edwards N T, Walker A V, et al. Forest phenology and a warmer climate growing season extension in relation to climatic provenance[J]. Global Change Biology, 2012, 18(6): 2008–2025.
- [48] Flanagan L B, Syed K H. Stimulation of both photosynthesis and respiration in response to warmer and drier conditions in a boreal peatland ecosystem[J]. Global Change Biology, 2011, 17(7): 2271–2287.
- [49] Serrat-Capdevila A, Scott R L, Shuttleworth W J, et al. Estimating evapotranspiration under warmer climates: Insights from a semi-arid riparian system[J]. Journal of Hydrology, 2011, 399(1): 1–11.
- [50] 张远东, 庞瑞, 顾峰雪, 等. 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[J]. 生态学报, 2016, 36(6): 1515–1525.
- Zhang Y D, Pang R, Gu F X, et al. Temporal-spatial variations of WUE and its response to climate change in alpine area of southwestern China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(6): 1515–1525.
- [51] Gagen M, Finsinger W, Wagnercremer F, et al. Evidence of changing intrinsic water-use efficiency under rising atmospheric CO₂ concentrations in Boreal Fennoscandia from subfossil leaves and tree ring $\delta^{13}\text{C}$ ratios[J]. Global Change Biology, 2011, 17(2): 1064–1072.
- [52] De Kauwe M G, Medlyn B E, Zaehle S, et al. Forest water use and water use efficiency at elevated CO₂: a model-data intercomparison at two contrasting temperate forest FACE sites[J]. Global Change Biology, 2013, 19(6): 1759–1779.
- [53] Keenan T F, Hollinger D Y, Bohrer G, et al. Increase in forest water-use efficiency as atmospheric carbon dioxide concentrations rise[J]. Nature, 2013, 499: 324–327.
- [54] Morison J I L. Sensitivity of stomata and water use efficiency to high CO₂[J]. Plant Cell & Environment, 1985, 8(6): 467–474.
- [55] Rogers A. The response of photosynthesis and stomatal conductance to rising [CO₂]: mechanisms and environmental interactions[J]. Plant Cell & Environment, 2007, 30(3): 258–270.
- [56] Dietergerter A. Global effects of doubled atmospheric CO₂ content on evapotranspiration, soil moisture and runoff under potential natural vegetation[J]. International Association of Scientific Hydrology Bulletin, 2006, 51(1): 171–185.
- [57] Long S P, Ainsworth E A, Rogers A, et al. Rising atmospheric carbon dioxide: plants FACE the future[J]. Annual Review of Plant Biology, 2004, 55(1): 591–628.

(责任编辑 赵 勃
责任编辑 张建国)