

DOI:10.12403/j.1001-1498.20230015

基于 Biome-BGC 模型的刺槐人工林 生产力和内在水分利用效率研究

张蓝霄^{1,2,3}, 李雅婧^{1,2,3}, 胡晓创^{1,2,3}, 孙守家^{1,2,3*},
张劲松^{1,2,3}, 蔡金峰², 孟平^{1,2,3}

(1. 中国林业科学研究院林业研究所, 国家林业和草原局林木培育重点实验室, 北京 100091; 2. 南京林业大学南方现代林业协同创新中心, 江苏南京 210037; 3. 河南黄河小浪底关键带国家野外科学观测研究站, 河南济源 454650)

摘要: [目的] 探究刺槐人工林生产力和内在水分利用效率 ($iWUE$) 的影响因子及其对气候变化的响应。[方法] 使用过程模型 Biome-BGC 对我国半湿润区内比较干旱的陕西省白水縣和比较湿润的河南省民权县的刺槐人工林模拟净初级生产力 (NPP_s), 并用实测净初级生产力 (NPP_m) 数据进行验证, 根据模拟结果计算生态系统内在水分利用效率 ($iWUE_s$)。分析两地刺槐人工林的生态系统与树轮 $iWUE$ 变化趋势的差异。[结果] 两地刺槐年际生物量均随年龄增大而首先迅速增加, 具有明显的幼龄效应, 随后逐步稳定并在一定范围内波动; 在不包含幼龄林数据时, 两地刺槐人工林 NPP_s 与 NPP_m 呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 树轮年际内在水分利用效率 ($iWUE_m$) 则均呈波动上升趋势。白水縣刺槐林的 $iWUE_s$ 与 $iWUE_m$ 呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 但民权县刺槐林的 $iWUE_s$ 与 $iWUE_m$ 呈显著正相关 ($P < 0.05$)。[结论] 温度是影响 $iWUE_m$ 的关键因子, 年降水量和大气 CO_2 浓度是影响生物量的关键因子。Biome-BGC 模型能较好地模拟幼龄林以后的刺槐人工林的 NPP , 在半湿润区内湿润程度不同地点之间, 刺槐人工林的生长关系一致, 但碳水关系比较复杂。

关键词: 刺槐; Biome-BGC 模型; 水分利用效率; 净初级生产力; 气象因子

中图分类号: S792.27

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2023)03-0001-10

自进入工业化以来, 大气中 CO_2 等温室气体浓度的持续增加造成了全球气候变暖和降水格局变化, 未来极端气候和森林火灾发生频率有升高趋势^[1-2]。根据 IPCC 第五次评估报告, 到 2100 年大气 CO_2 浓度将达到 $1\ 370\ cm^3 \cdot m^{-3}$, 平均气温升高 $4\ ^\circ C$, 全球气候变化进一步加剧。恢复森林覆盖是缓解气候变化的关键行动, NASA 卫星数据表明, 在过去 20 年地球变绿了, 中国新增植被面积的 42% 来自于植树造林工程^[3], 人工林面积大量增加为我国实现双碳目标奠定了坚实基础。尽管我国人工林面积稳居世界第一, 但多为结构单一的人工林^[4], 由于缺乏对其生态系统中碳水关系的系统

理解, 使得我国植树造林碳吸收作用常常被低估。生态系统的碳循环和水循环是 2 个密切联系、相互耦合的过程, 受到多种生物、生理和气候因子的共同控制^[5]。因此, 确定不同区域树木碳水耦合关系的差异, 对气候变化下的人工林管理至关重要。

水分利用效率 (WUE) 将碳循环和水循环过程联系起来, 是表征碳水耦合的重要指标, 对理解陆地生态系统的碳水平衡非常关键^[6]。然而, 单株植物和生态系统的 WUE 涉及不同的碳和水过程。在单株尺度上, 内在水分利用效率 ($iWUE$) 表征为 CO_2 同化率与气孔导度的比率, 通常通过稳定碳同位素来获得^[7], 受气孔导度和叶片氮含量的调

收稿日期: 2023-01-11 修回日期: 2023-02-20

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目 (CAFYBB2022ZA00102); 国家重点研发计划项目课题 (2020YFA0608101) 和南京林业大学南方现代林业协同创新中心项目资助

* 通讯作者: 孙守家, 研究员, 硕士生导师。主要研究方向: 植物水分生理生态。电话: 13161793988。Email: sunshj@caf.ac.cn

节。在生态系统尺度上, *iWUE* 是通过总初级生产力 (*GPP*)、饱和水汽压差 (*VPD*) 与蒸散 (*ET*)、大气压的比率获得, 受冠层结构、物种间相互作用和土壤蒸发的调节。单株 *iWUE* 增加未必导致生态系统 *iWUE* 的平行增加^[8], 不同植被在全球水平上的变化模式不完全一致^[9], 甚至相反^[10], 这增加了同一植被不同地点的单株-生态系统 *iWUE* 关系的不确定性。

受观测方法限制, 生态系统尺度上 *iWUE* 难以连续和长期观测, 在研究中多用卫星遥感或模型模拟。Biome-BGC 是基于气象、生理生态参数的过程模型, 能较好模拟陆地生态系统的碳水过程^[11], 在森林^[12] 和高寒草原^[13] 等生态系统总初级生产力、净初级生产力、蒸散的空间分布研究中广泛应用。然而, 人工林种植后经历不同生长发育阶段, 存在明显的幼龄效应。Biome-BGC 模型输出的是准平衡态下的理想结果, 但能否很好地模拟人工林历史的 *NPP* 和 *iWUE* 尚未见报道。通过林分密度、树轮宽度、稳定碳同位素能获得人工林生态系统 *NPP* 及树轮 *iWUE* 的长序列历史数据, 可用来验证 Biome-BGC 模型模拟结果。因此, 树木年轮学、稳定同位素技术和 Biome-BGC 模型为研究人工林应对长期环境变化过程中的碳水耦合关系提供了有效工具。

刺槐 (*Robinia pseudoacacia* Linn.) 是绿化常用先锋树种, 耐干旱瘠薄, 生长迅速^[14], 在我国北方广泛种植。我国北方气候有明显差别, 暖湿化和暖干化趋势同时存在, 不同地区刺槐林生长和水分利用可能会存在差异。本研究选择了造林时间长、生长相对一致的陕西省白水縣和河南省民权县刺槐人工林, 假设: (1) 影响两地刺槐生长和 *iWUE* 的关键因子不同; (2) Biome-BGC 模型能很好地模拟幼龄林以后的刺槐人工林生态系统 *NPP*; (3) 两地刺槐人工林生态系统 *iWUE* 和树轮 *iWUE* 变化趋

势不一致。因此, 本研究通过实测刺槐人工林密度和树轮宽度, 获得刺槐人工林生态系统 *NPP* 的长序列历史数据, 用于验证参数优化后 Biome-BGC 模型模拟结果, 同时比较两地刺槐人工林生态系统 *iWUE* 与树轮 *iWUE* 变化趋势差异, 旨在确定干旱程度存在明显差异地点的刺槐人工林生长和碳水关系之间的差异, 为今后气候变化背景下刺槐人工林的造林规划、抚育维护、营林管理等提供科学依据。

1 研究区概况

试验区位于黄河流域的白水縣和民权县。白水縣处于关中平原与陕北高原的过渡地带, 海拔 1 210 m, 属暖温带半干旱大陆性季风气候, 年均气温 11.9 °C, 年均降水量 558 mm, ≥ 10 °C 的年均积温 3 745.4 °C, 年均无霜期 207 d, 受复杂的地形影响, 境内气候差异很大。民权县地处豫东平原, 海拔 90 m, 属暖温带半干旱大陆性季风气候, 年均气温 14.5 °C, 年均降水量 684 mm, ≥ 10 °C 的年均积温 5 192.6 °C, 年均无霜期 213 d, 雨热同季, 四季分明, 干旱和风灾频繁。

2 研究方法

2.1 样品的采集与处理

2020 年 6 月在民权县和白水縣选择生长良好的刺槐林, 每个地区设置 3 个 100 m × 100 m 采样点, 测定树高、胸径、密度和郁闭度 (表 1), 获得代表林分的标准木。在每个采样点中分别选取 20 棵生长状况良好且胸径接近于标准木的刺槐, 在胸径 (1.3 m) 处用生长锥向东西和南北 2 个方向垂直钻取 2 根树芯^[15]。在实验室中将树芯样本放置于通风处自然阴干, 之后固定于样品盒中并用 200 目和 600 目的砂纸打磨至年轮清晰可见, 在显微镜下使用骨架法对样本交叉定年, 测定年轮宽度。

表 1 研究区域及刺槐人工林情况

Table 1 The statistical description of *R. pseudoacacia* plantation at the experimental site

地点 Sites	纬度 (N) Latitude	经度 (E) Longitude	平均胸径 Mean DBH/cm	平均树高 Mean tree height/m	密度 Density/(株·hm ⁻²)	郁闭度 Canopy density
白水 BS	35.28°	109.36°	28.04	15.13	927	0.72
民权 MQ	34.72°	115.09°	31.71	17.28	822	0.70

2.2 年际单株生物量和生态系统 *NPP*

年际单株生物量 (叶、枝、干、根) 是通过

2 个实验点所在省份的异速生长方程计算求得^[16-17], 第 *n* 年刺槐直径为 *n* 年树轮宽度总和加上

相应比例的树皮厚度,第 n 年的树高是通过样地所在地区调查刺槐胸径和树高获得胸径-树高方程计算得到。假设林分密度在一定的刺槐人工林生长过程中无变化,标准木年际生物量乘以密度就可获得生态系统上的年际实测净初级生产力 (NPP_m)。根据《森林采伐更新规程》,10 a 以内的刺槐林设定为幼龄林,10~15 a 的为中龄林,用于历史 NPP 的分析。

2.3 树轮年际 $iWUE$

有研究证实,测定 4 棵树的树芯 $\delta^{13}C$ 就基本可代表研究区 $\delta^{13}C$ 的绝对含量和变化趋势^[18-19]。在 2 地采集到的树芯样品中,各选取了 4 根年轮清晰、无缺轮的树芯,进行稳定碳同位素测定,进行逐年剥离、烘干粉碎并过 80 目筛,每个年轮称量 2 mg 样品放入总有机碳元素分析仪 (TOC, 德国) 中充分燃烧,利用气体混合仪 (Li-6000, 中国) 和 CO_2 同位素测定仪 (LGR-912, 美国) 测量 $\delta^{13}C$, 精度为 0.1‰, $\delta^{13}C$ 值测定以 VPDB 为标准,计算公式如下^[20]:

$$\delta^{13}C = \left(\frac{R_{\text{sample}}}{R_{\text{standard}}} - 1 \right) \times 1000\text{‰}$$

式中: R_{sample} 、 R_{standard} 分别为样品和标准物质的 $^{13}C/^{12}C$ 。

依据 McCarroll 等^[21]的方法及数据,对 $\delta^{13}C$ 值进行校正,消除工业革命以来造成的 CO_2 浓度大幅变化对 $\delta^{13}C$ 的影响。稳定碳同位素辨别值 $\Delta^{13}C$ 用 Farquhar 等^[22]的公式计算:

$$\Delta^{13}C = \left(\frac{\delta^{13}C_{\text{atm}} - \delta^{13}C_t}{1 + \delta^{13}C_t/1000} \right)$$

式中: $\delta^{13}C_{\text{atm}}$ 、 $\delta^{13}C_t$ 分别表示大气中 $\delta^{13}C$ 值和树轮中 $\delta^{13}C$ 值。

实测单株内在水分利用效率 ($iWUE_m$) 可以用 $\Delta^{13}C$ 与胞间 CO_2 (C_a) 浓度和大气 CO_2 浓度 (C_i) 之间的线性关系计算^[23],通过使用气孔导度 (g_{sc}) 和叶肉导度 (g_m) 的比值来消除计算过程中默认无限大 g_m 对 $iWUE$ 高估的影响,当 g_m 未知时, g_{sc}/g_m 设定为 0.79^[24]。

$$iWUE_m = \frac{C_a(b - \Delta^{13}C)}{1.6(b - a)} \times \frac{g_{sc}}{g_m}$$

式中: $a = 4.4\text{‰}$ 、 $b = 27\text{‰}$ 分别为 CO_2 扩散和羧化过程中的同位素分馏系数,数值 1.6 为水蒸

气和 CO_2 在空气中的扩散比率。

2.4 Biome-BGC 模拟

Biome-BGC 过程模型是基于 Forest-BGC 模型发展改进后的版本,本研究使用 Biome-BGC 模型 4.2 版本,通过输入气象数据、生理生态参数和站点参数 3 类初始化文件,对研究区生态系统碳水通量循环过程进行日尺度模拟。模拟过程分为 3 步:首先,进行初始化模拟,利用研究区域的初始化参数运转模型,直至运行至系统稳定状态;在达到稳定生态系统的条件下,初始化模拟到稳定状态会生成初始化文件,该文件中包含了生态系统经过长期变化后平衡状态的一系列参数;其次,模型将初始化文件、气候参数和植被生理生态参数输入模型,模拟输出该稳定状态下的植被 GPP 、 NPP 、 ET ;第三,为衡量模型及其参数在本研究区域的适用性,用实测生态系统净初级生产力 NPP_m 对模型模拟的净初级生产力 NPP_s 进行验证。生态系统内在水分利用效率 ($iWUE_s$) 用模型输出的 GPP 和 ET 计算^[25]:

$$iWUE_s = \frac{GPP}{ET} \times \frac{VPD}{ATM}$$

式中: VPD 为饱和水汽压差, ATM 为大气压。

2.5 数据来源

气象数据包括日尺度上的降水量、温度、最高温度、最低温度、饱和水汽压差和太阳辐射等因子,来自于实验地附近的国家气象站。站点信息包括经纬度、海拔、土壤有效深度、土壤质地等指标来自于实地调查和测定,其他土壤质地指标源于中国科学院资源环境科学数据中心平台 (<http://www.resdc.cn>), CO_2 浓度数据来源于 CO_2 数据库平台 (<https://www.co2.earth/>)。生理生态参数包括气孔导度、冠层比叶面积、冠层消光系数、叶片及细根碳氮比等 43 个参数,其中,叶片碳氮比来自于实际测定,其他参数来源于模型自带参数以及同树种文献实测参数^[26-28]。数据的相关性分析、多重比较、LSD 检验、共线性分析和偏相关分析在 SPSS 26.0 中进行,绘图在 Origin 2018 中完成。

3 结果与分析

3.1 气象因子

图 1 显示:在 1980-2020 年,民权县年均降水量为 684 mm,比白水高约 22.4%,民权县降水趋势基本不变,白水降水则呈递减趋势。两地

区年均温度均呈上升趋势,民权县年均温度为14.5℃,比白水县高约21.2%。民权县和白水县的相对湿度均呈下降趋势,民权县年均相对湿度70.2%,比白水县高约12.6%。两地的饱和水汽压

差(VPD)均呈升高趋势,民权县年均VPD为0.54kpa,比白水县低约8.8%。民权县的降水、温度和相对湿度均高于白水县,而VPD则低于白水县,表明白水县比民权县更干旱。

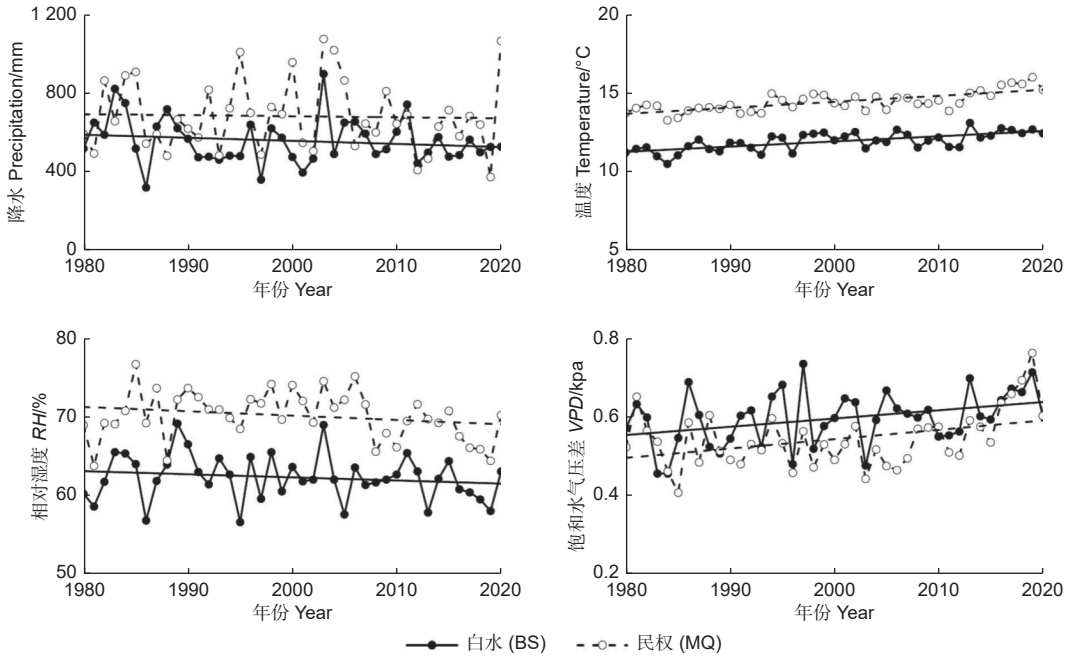


图1 白水和民权降水、温度、相对湿度和饱和水汽压差的年际变化

Fig. 1 Variation in precipitation, temperature, relative humidity and VPD during the study period at MQ and BS at annual timescale.

3.2 单株生物量和内在水分利用效率 ($iWUE_m$) 年际变化及其与气象因子关联

图2显示:民权刺槐的年际生物量变化范围为2.87~11.87 kg·a⁻¹,均值为8.44 kg·a⁻¹;白水刺槐的年际生物量变化范围为1.86~8.49 kg·a⁻¹,

均值为6.17 kg·a⁻¹,比民权低26.90%。在幼龄期,两地刺槐年际生物量迅速增加,幼龄期以后稳定在一定范围内,波动较小,整个生长过程符合Logistic生长曲线。

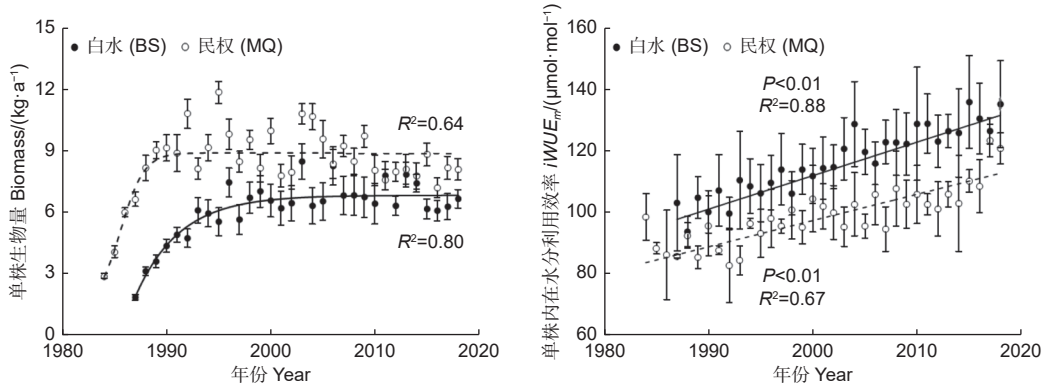


图2 白水和民权的单株刺槐生物量和单株内在水分利用效率的年际变化

Fig. 2 Annual variations of single tree biomass and $iWUE_m$ for *R. pseudoacacia* at BS and MQ sites.

白水刺槐年际 $iWUE_m$ 范围为93.80~136.00 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$,均值为116.73 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$;民权刺

槐年际 $iWUE_m$ 范围为82.82~123.49 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$,均值为98.89 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。两地刺槐年际 $iWUE_m$

均随林龄增加呈显著上升趋势 ($P<0.01$), 但白水地区的刺槐 $iWUE_m$ 比民权高约 18.04%。

表 2 表明: 在年尺度上, 白水刺槐年际生物量与降水显著正相关 ($P<0.05$), 与 CO_2 浓度极显著正相关 ($P<0.01$), 而 $iWUE_m$ 与温度显著正相关

($P<0.05$), 与 CO_2 浓度极显著正相关 ($P<0.01$)。民权刺槐生物量与降水极显著正相关 ($P<0.01$), 与 VPD 显著负相关 ($P<0.05$), 而 $iWUE_m$ 与相对湿度显著负相关 ($P<0.05$), 与温度、 VPD 和 CO_2 极显著正相关 ($P<0.01$)。

表 2 白水和民权刺槐生物量和单株内在水分利用效率与环境因子在年尺度上的相关系数

Table 2 The coefficients of biomass and $iWUE_m$ related with environmental factors at BS and MQ sites at an annual timescale.

指标 Index	地点 Site	温度 Temperature	降水 Precipitation	相对湿度 RH	饱和水汽压亏缺 VPD	二氧化碳 CO ₂
生物量 Biomass	白水 BS	0.23	0.36*	0.01	-0.04	0.63**
	民权 MQ	-0.03	0.58**	0.33	-0.37*	-0.17
单株内在水分利用效率 $iWUE_m$	白水 BS	0.39*	-0.08	-0.24	0.25	0.93**
	民权 MQ	0.72**	-0.04	-0.43*	0.52**	0.83**

注: *和**分别代表 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平。下同。

Note: Asterisks * and double asterisks ** indicate significant differences at $P<0.05$ and $P<0.01$, respectively. The same below.

根据方差膨胀因子结果 ($VIF>10$) 筛选出, 温度与 VPD 有共线关系, $iWUE_m$ 与 CO_2 有共线关系。在去除共线性的气象因素后, 表 3 的偏相关分

析结果显示: 温度是影响 $iWUE_m$ 的最重要因素, 降水和 CO_2 浓度是影响生物量的最重要因素。

表 3 白水和民权刺槐单株内在水分利用效率和生物量与温度、降水、相对湿度、 VPD 和 CO_2 的偏相关分析

Table 3 Partial correlations between $iWUE_m$, Biomass, Temperature, RH, VPD, and CO_2 of *R. pseudoacacia* for BS and MQ sites.

地点 Sites	$iWUE_m$ 与温度 $iWUE_m$ vs Temp ^a	$iWUE_m$ 与温度 $iWUE_m$ vs Temp ^b	$iWUE_m$ 与相对湿度 $iWUE_m$ vs RH ^c	生物量与降水 Biomass vs Prec ^e	生物量与 CO_2 Biomass vs CO ₂ ^e
白水 BS	-0.142	0.390*	-0.229	0.544**	-0.459**
民权 MQ	0.365*	0.727**	-0.433*	0.579**	-0.705**

注: ^a控制 CO_2 浓度变化的偏相关, ^b控制降水变化的偏相关, ^c控制年龄变化的偏相关。

Notes: ^a Partial correlation controlled for changes in atmospheric CO_2 . ^b Partial correlation controlled for changes in precipitation. ^c Partial correlation controlled for changes in age.

3.3 生态系统 NPP_s 和 $iWUE_s$ 的模拟验证

图 3 表明: 白水刺槐人工林年际 NPP_s 变化范围为 0.49~0.82 $kg \cdot m^{-2}$, 均值为 0.66 $kg \cdot m^{-2}$; 民权刺槐 NPP_s 变化范围为 0.48~0.86 $kg \cdot m^{-2}$, 均值为 0.72 $kg \cdot m^{-2}$ 。用异速生长方程得到的刺槐生态系统 NPP_m 结果显示: NPP_m 在白水的变化范围为 0.17~0.79 $kg \cdot m^{-2}$, NPP_m 在民权的变化范围为 0.24~0.98 $kg \cdot m^{-2}$ 。从数值上看, 幼龄林的 NPP_m 快速升高, 低于 Biome-BGC 模型模拟的 NPP_s , 从中龄林开始 2 地刺槐林的 NPP_m 和 NPP_s 的变化趋势相对一致。

使用 NPP_m 数据对 Biome-BGC 模型输出的 NPP_s 进行验证, 如果从刺槐人工林种植到取样测

定前, 白水和民权刺槐的 NPP_s 与 NPP_m 均不相关 ($P>0.05$), 若不考虑幼龄林, 则两地刺槐 NPP_s 与 NPP_m 均呈极显著相关 ($P<0.01$, 图 4)。上述结果表明, 尽管 Biome-BGC 未能准确模拟刺槐人工林整个历史的年际 NPP , 但可以精确地模拟幼龄林以后的年际 NPP 动态变化。

图 5 表明: 从中龄林开始, 白水刺槐的 $iWUE_s$ 变化范围为 22.40~37.67 $\mu mol \cdot mol^{-1}$, 均值为 28.32 $\mu mol \cdot mol^{-1}$; 民权刺槐的 $iWUE_s$ 变化范围为 20.39~33.49 $\mu mol \cdot mol^{-1}$, 均值为 27.08 $\mu mol \cdot mol^{-1}$ 。白水刺槐的 $iWUE_m$ 变化范围在 99.72~136.00 $\mu mol \cdot mol^{-1}$, 民权刺槐的 $iWUE_m$ 变化范围为 82.82~123.49 $\mu mol \cdot mol^{-1}$ 。从数值上

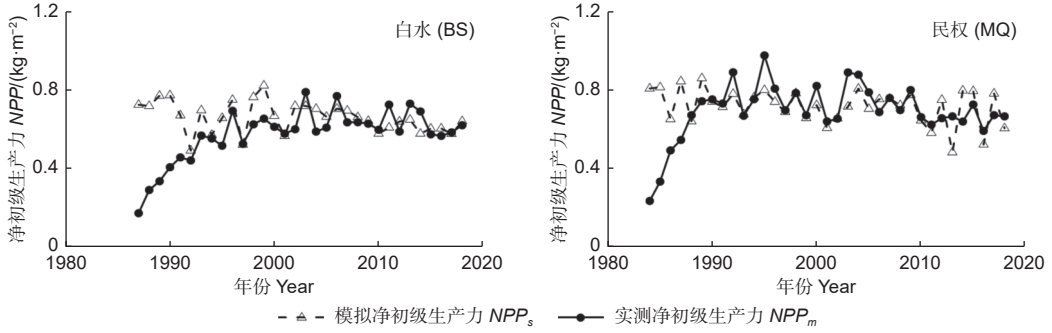


图 3 白水和民权刺槐的 NPP_s 与 NPP_m 的比较

Fig. 3 Comparison between NPP_s and NPP_m of *R. pseudoacacia* at BS and MQ sites.

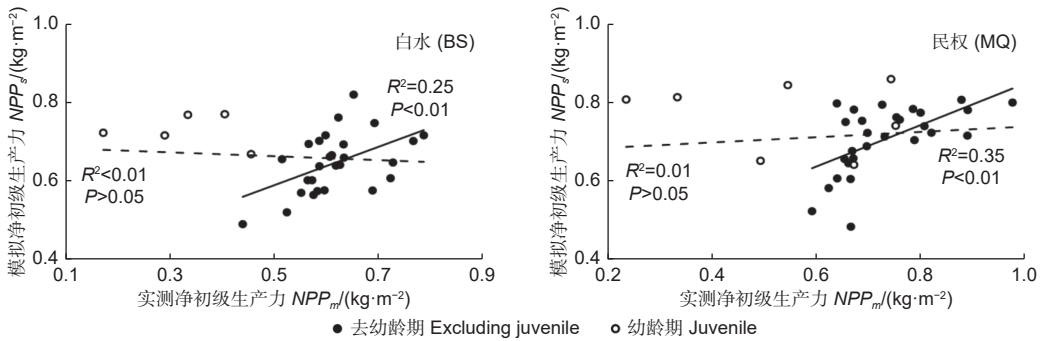


图 4 白水和民权刺槐的 NPP_s 与 NPP_m 的相关关系

Fig. 4 Relationship between NPP_s and NPP_m of *R. pseudoacacia* at BS and MQ sites.

看, Biome-BGC 模型模拟的 $iWUE_s$ 低于 $iWUE_m$ 。从变化趋势看, 2 地刺槐 $iWUE_m$ 均呈升高趋势,

不同的是白水的 $iWUE_s$ 略有下降, 而民权的略有上升。

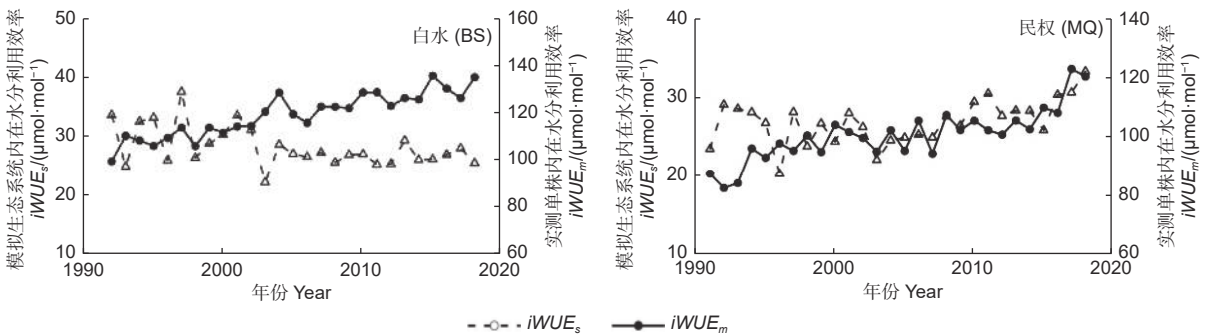


图 5 白水和民权刺槐的 $iWUE_s$ 与 $iWUE_m$ 的比较

Fig. 5 Comparison between $iWUE_s$ and $iWUE_m$ of *R. pseudoacacia* at BS and MQ sites

图 6 表明: 在幼龄林以后, 白水刺槐的 $iWUE_s$ 与 $iWUE_m$ 变化趋势相反, 呈极显著负相关 ($P<0.01$); 民权刺槐的 $iWUE_s$ 与 $iWUE_m$ 变化趋势相对一致, 呈显著正相关 ($P<0.05$)。

4 讨论

4.1 气象因子和年龄对生物量和树轮 $iWUE$ 的影响
气象因子对人工林的生物量和 $iWUE$ 有着重要

影响。本研究中, 白水和民权的刺槐生物量与降水显著正相关。控制年龄因素后, 偏相关分析结果显示, 生物量与降水极显著正相关, 而与 CO_2 浓度极显著负相关 (表 3), 这可能是白水县位于黄土高原, 海拔较高, 较干旱, 而民权县为黄河古道, 土壤为沙土, 保水能力差, 降水能增加土壤水分的有效性, 从而促进刺槐生长。先前研究显示, 生长季的降水量增加会提高森林的 NPP , 但缺水会降低

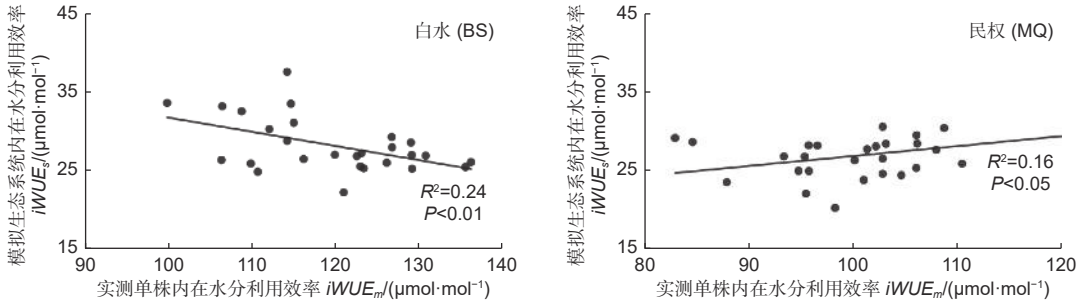


图6 白水和民权刺槐的 $iWUE_s$ 与 $iWUE_m$ 的相关关系

Fig. 6 Relationship between $iWUE_s$ and $iWUE_m$ of *R. pseudoacacia* at BS and MQ sites.

森林生物量。本研究中,民权降水比白水高约22.4%(图1),因此,白水刺槐生物量比民权的低26.90%(图2),这与干旱地区森林生物量较低的研究结果一致^[29]。大气 CO_2 浓度升高背景下,树木生物量并没有如预期增加,表明其他因素的负面影响已超过了 CO_2 的潜在施肥效应,这些因素可能包括气候变化(特别是干旱)以及树木对 CO_2 浓度升高的生理长期适应,故此干旱北方森林生态系统 NPP 可能不会随大气 CO_2 浓度增加而增加。

温度是影响2地刺槐 $iWUE_m$ 的重要因子,饱和水汽压差(VPD)也是影响民权刺槐 $iWUE_m$ 的关键因子。先前研究发现,气温是影响 $iWUE$ 的主要因素,年均温度是预测 $iWUE$ 变化的最强因子^[10]。在生态系统尺度上,VPD是 WUE 的主要驱动因素^[25]。近些年来,白水和民权的温度都出现明显升高趋势(图1)。较高温度会增加 CO_2 同化率和VPD,同时使植物关闭部分气孔和减少水分蒸发,会导致 $iWUE$ 增加。在中国西南地区,橡胶种植园的 WUE 主要受温度而非降水控制^[30]。民权和白水刺槐 $iWUE$ 的差异主要由于2个地区气候因子不同造成的。

树木的生物量不仅受气候因子影响,而且与林龄密切相关。通常树木生物量在幼龄期快速增加,在成熟期达到最大值,在老龄期逐渐下降。本研究中,两地刺槐生物量在幼龄期迅速升高,随后在一定范围内波动(图2),增长趋势符合Logistic函数,存在明显的幼龄效应,与对樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongholica* Litv.)、油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.)的生物量-年龄关系观测结果一致^[31]。生产力较高地点的生物量在较早年龄达到较高值,但此后下降速度更快,下降的主要原因是木质组织生物量随年龄增长而下降,民权刺槐生长过程更符合此种趋势。两地刺槐的 $iWUE_m$ 随年龄增

加而波动升高,但未见幼年期迅速增加现象。 $iWUE$ 是通过碳同位素计算得到的,有研究认为, $\delta^{13}C$ 存在幼龄效应,可能会增加1‰^[32];也有研究认为, $\delta^{13}C$ 没有幼年效应^[33],但 $\delta^{13}C$ 会随树木高度和林冠层次而变化^[34]。本研究中,刺槐为人工林,在同一地点种植时间相同,生长一致,还未形成复层结构,故此没有观测到 $iWUE$ 的幼年效应。

4.2 Biome-BGC 模型准确模拟中龄林后的 NPP_s

NPP 是生态系统功能性状的重要指标,Biome-BGC模型能很好模拟生态系统的 NPP 。本研究结果显示,幼龄林的年际 NPP_m 快速增加,近熟林和成熟林的年际 NPP_m 较稳定,刺槐人工林的生长有明显的幼年效应。若使用全部 NPP_m 数据验证模型输出结果, NPP_s 与 NPP_m 无显著相关性。若使用生长稳定的中龄林以后数据, NPP_s 与 NPP_m 值则呈极显著正相关($P<0.01$,图4),表明Biome-BGC模型能用来模拟中龄林后的 NPP 。先前研究表明,Biome-BGC模拟不同生态系统 NPP 空间模式是成功的,但未能很好地模拟历史 NPP 动态^[35],往往容易高估森林生长量。如果纳入现有生物量信息则会部分改善模拟结果。仅从变化趋势而不考虑数值大小,模型输出的 NPP 年际变化与树木年轮指数RWI的时间模式基本一致^[36]。

4.3 2地刺槐林生态系统 $iWUE_s$ 与树轮 $iWUE_m$ 变化趋势差异

叶片、冠层和生态系统 WUE 是用不同方法获得的,叶片水平上 $iWUE$ 与生理过程直接相关,当从叶片延伸到生态系统时还需考虑土壤水分蒸发率、叶片蒸腾作用和植被覆盖度^[37]。在干旱环境中,叶片气孔关闭会快速降低瞬时蒸腾速率,但会缓慢降低光合作用速率,从而提高单个植物的 $iWUE$ 。因此,树轮 $iWUE$ 随干旱程度增加而逐渐升高。在生态系统尺度上,叶面积指数(LAI)是

WUE 的主驱动力, LAI 增加能提高单位面积的总生产力, 减少裸土的水分损失而降低蒸散 (ET)^[38]。所以, 湿润地区有较高的生态系统 $iWUE$, 干旱地区有较低的生态系统 $iWUE$ 。

本研究中, 白水刺槐树轮的 $iWUE_m$ 与生态系统的 $iWUE_s$ 呈极显著负相关, 而民权的 $iWUE_m$ 与 $iWUE_s$ 呈显著正相关, 表现出相反趋势 (图 6)。白水县降水量呈下降趋势, 水资源承载力较低, 植被生长稀疏, LAI 相对较低, 水分损失主要是由裸露土壤蒸发造成的, GPP 下降而 ET 增加, 导致生态系统 $iWUE$ 较低, 树轮 $iWUE_m$ 因干旱和 CO_2 浓度升高呈上升趋势, 因此, 树轮的 $iWUE_m$ 与生态系统 $iWUE_s$ 是负相关。民权降水趋势保持稳定, 生态系统 GPP 略有下降而 ET 下降更多, 导致生态系统 $iWUE$ 升高, 而树轮中 $iWUE_m$ 因 CO_2 浓度升高而增加, 使得树轮 $iWUE_m$ 与生态系统 $iWUE_s$ 正相关。Lu 等^[39] 研究发现, 与其他水文气候条件相比, 中度水分胁迫增强了生态系统 WUE , 这与叶片尺度 $iWUE$ 响应是一致的。不同地区干旱对生态系统 $iWUE$ 影响不同, 干旱地区生态系统 $iWUE$ 随干旱指数 (AI) 增加而降低, 但在半干旱和潮湿地区, $iWUE$ 和 AI 之间的关系遵循对数函数关系。在干旱和半干旱土地之间的过渡地带, 干旱造成生态系统 WUE 下降最明显。无论水文气候条件和生物群落如何, 严重和极端干旱都会导致 WUE 减少^[40]。

5 结论

在白水 and 民权两地存在气象和环境条件差异, 两地刺槐人工林的年际生物量均存在幼龄快速增加的效应, 树轮年际 $iWUE$ 均呈波动上升趋势。在年尺度上, 温度是影响 $iWUE$ 的重要因素, 降水和 CO_2 浓度是影响生物量的重要因素。Biome-BGC 不能准确模拟刺槐人工林整个生命史的年际 NPP , 但可以准确模拟中龄林以后的 NPP 。白水刺槐林生态系统的 $iWUE_s$ 与树轮 $iWUE_m$ 呈显著负相关, 但民权刺槐的正好相反, 显示出不同地区刺槐人工林的水碳利用对环境的响应较为复杂。

参考文献:

[1] Working Group I Contribution to the IPCC fifth assessment report (AR5). Climate Change 2013: The physical science basis [R/OL]. IPCC, 2013. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>.

[2] 宗学政, 田晓瑞, 尹云鹤. 未来气候情景下中亚地区的森林草原火险评估[J]. 林业科学研究, 2021, 34 (3): 13-22.

[3] CHEN C, PARK T, WANG X, *et al.* China and India lead in greening of the world through land-use management[J]. Nature sustainability, 2019, 2(2): 122-129.

[4] 莫其锋, 孔杰君, 王艺颖, 等. 马占相思人工林不同林下灌木叶片功能性状的差异[J]. 林业科学研究, 2021, 34 (3): 135-144.

[5] GESSLER A, CAILLERET M, JOSEPH J, *et al.* Drought induced tree mortality—a tree-ring isotope based conceptual model to assess mechanisms and predispositions[J]. New Phytologist, 2018, 219(2): 485-490.

[6] 胡中民, 于贵瑞, 王秋凤, 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.

[7] 陈平, 张劲松, 孟平, 等. 稳定碳同位素测定水分利用效率——以决明子为例[J]. 生态学报, 2014, 34 (19): 5453-5459.

[8] GEA-IZQUIERDO G, GUIBAL F, JOFFRE R, *et al.* Modelling the climatic drivers determining photosynthesis and carbon allocation in evergreen Mediterranean forests using multiproxy long time series[J]. Biogeosciences, 2015, 12(12): 3695-3712.

[9] MEDLYN B E, DE KAUWE M G, LIN Y S, *et al.* How do leaf and ecosystem measures of water-use efficiency compare?[J]. New Phytologist, 2017, 216(3): 758-770.

[10] YU X, YANG X, WU Y, *et al.* Sonneratia apetala introduction alters methane cycling microbial communities and increases methane emissions in mangrove ecosystems[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2020, 144: 107775.

[11] 康满春, 朱丽平, 许行, 等. 基于Biome-BGC模型的北方杨树人工林碳水通量对气候变化的响应研究[J]. 生态学报, 2019, 39 (7): 2378-2390.

[12] 张少伟, 张弓乔, 惠刚盈. 内蒙古大兴安岭森林净初级生产力时空格局分析[J]. 林业科学研究, 2019, 32 (5): 74-82.

[13] YOU Y, WANG S, MA Y, *et al.* Improved modeling of gross primary productivity of Alpine Grasslands on the Tibetan Plateau using the biome-BGC model[J]. Remote Sensing, 2019, 11(11): 1287.

[14] 甘红豪, 赵帅, 杨泽坤, 等. 刺槐幼苗对NaCl胁迫的生理生化响应[J]. 林业科学研究, 2020, 33 (4): 75-82.

[15] 阮亚男, 萧英男, 杨立新, 等. 大连市黑松树木水分利用效率的环境响应[J]. 应用生态学报, 2017, 28 (9): 2849-2855.

[16] 宋变兰. 黄土丘陵区两典型森林生态系统生物量、碳氮库和碳固存特征研究[D]. 咸阳: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2015.

[17] 赵勇. 太行山低山丘陵区退化生态系统植被恢复过程生态特征分析与评价[D]. 郑州: 河南农业大学, 2007.

[18] 周佳, 孟平, 张劲松, 等. 河南民权与陕西白水刺槐径向生长与水分利用效率对气候响应的差异[J]. 林业科学研究, 2021, 34 (6): 1-8.

[19] 路伟伟, 余新晓, 贾国栋, 等. 基于树轮 $\delta^{13}C$ 值的北京山区油松水

- 分利用效率[J]. 生态学报, 2017, 37(6): 2093-2100.
- [20] 孙守家, 李春友, 何春霞, 等. 基于树轮稳定碳同位素的张北杨树防护林退化原因解析[J]. 应用生态学报, 2017, 28(7): 2119-2127.
- [21] MCCARROLL D, LOADER N J. Stable isotopes in tree rings[J]. Quaternary Science Reviews, 2004, 23(7-8): 771-801.
- [22] FARQUHAR G D, O'LEARY M H, Berry J A. On the relationship between carbon isotope discrimination and the intercellular carbon dioxide concentration in leaves[J]. Functional Plant Biology, 1982, 9(2): 121-137.
- [23] GAGEN M, FINSINGER W, WAGNER - CREMER 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.
- [24] SIGDEL S R, WANG Y, CAMARERO J J, *et al.* Moisture - mediated responsiveness of treeline shifts to global warming in the Himalayas[J]. Global Change Biology, 2018, 24(11): 5549-5559.
- [25] YI K, MAXWELL J T, WENZEL M K, *et al.* Linking variation in intrinsic water - use efficiency to isohydricity: a comparison at multiple spatiotemporal scales[J]. New Phytologist, 2019, 221(1): 195-208.
- [26] 张 瑜. 黄土高原降水梯度带典型植物适宜盖度空间分布特征[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
- [27] 张 艺, 余新晓, 范敏锐, 等. 北京山区刺槐林净初级生产力对气候变化的响应[J]. 水土保持研究, 2012, 19(3): 151-155.
- [28] 芦 琛. 典型水土保持林地植被水分利用效率与承载力模型模拟研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
- [29] PANTHI S, FAN Z X, VAN DER SLEEN P, *et al.* Long - term physiological and growth responses of Himalayan fir to environmental change are mediated by mean climate[J]. Global change biology, 2020, 26(3): 1778-1794.
- [30] LIN Y X, GRACE J, ZHAO W, *et al.* Water-use efficiency and its relationship with environmental and biological factors in a rubber plantation [J]. Journal of hydrology, 2018, 563: 273-282.
- [31] ZHANG C, JU W, CHEN J, *et al.* Sustained biomass carbon sequestration by China's forests from 2010 to 2050[J]. Forests, 2018, 9(11): 689.
- [32] YAN J, ZHANG Y, YU G, *et al.* Seasonal and inter-annual variations in net ecosystem exchange of two old-growth forests in southern China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2013, 182-183: 257-265.
- [33] DAUX V, ÉDOUARD J L, MASSON-DELMOTTE V, *et al.* Can climate variations be inferred from tree-ring parameters and stable isotopes from *Larix decidua*? Juvenile effects, budmoth outbreaks, and divergence issue[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2011, 309(3-4): 221-233.
- [34] MCDOWELL N G, BEERLING D J, Breshears D D, *et al.* The interdependence of mechanisms underlying climate-driven vegetation mortality[J]. Trends in ecology & evolution, 2011, 26(10): 523-532.
- [35] CHERUBINI P, BATTIPAGLIA G, INNES J L. Tree vitality and forest health: can tree-ring stable isotopes be used as indicators? [J]. Current Forestry Reports, 2021, 7(2): 69-80.
- [36] SABELLA E, MORETTI S, GÄRTNER H, *et al.* Increase in ring width, vessel number and $\delta^{18}\text{O}$ in olive trees infected with *Xylella fastidiosa* [J]. Tree physiology, 2020, 40(11): 1583-1594.
- [37] HATFIELD J L, DOLD C. Water-use efficiency: advances and challenges in a changing climate[J]. Frontiers in plant science, 2019, 10: 103.
- [38] HUANG M, PIAO S, SUN Y, *et al.* Change in terrestrial ecosystem water - use efficiency over the last three decades[J]. Global Change Biology, 2015, 21(6): 2366-2378.
- [39] LU X, ZHUANG Q. Evaluating evapotranspiration and water-use efficiency of terrestrial ecosystems in the conterminous United States using MODIS and AmeriFlux data[J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(9): 1924-1939.
- [40] YVON-DUROCHER G, ALLEN A P, BASTVIKEN D, *et al.* Methane fluxes show consistent temperature dependence across microbial to ecosystem scales[J]. Nature, 2014, 507(7493): 488-491.

Productivity and Intrinsic Water Use Efficiency of *Robinia pseudoacacia* Plantations based on Biome-BGC Model

ZHANG Lan-xiao^{1,2,3}, LI Ya-jing^{1,2,3}, HU Xiao-chuang^{1,2,3}, SUN Shou-jia^{1,2,3},
ZHANG Jin-song^{1,2,3}, CAI Jin-feng², MENG Ping^{1,2,3}

(1. Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation of National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100091, China; 2. Co-Innovation for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing 210037, Jiangsu, China; 3. Henan Xiaolangdi Earth Critical Zone National Research Station on the Middle Yellow River, Jiyuan 454650, Henan, China)

Abstract: [Objective] To explore the impact factors of productivity and intrinsic water use efficiency (*iWUE*) of plantation and their responses to climate change. [Method] Biome-BGC, a process-based model, was used to simulate the net primary productivity (*NPP*) of *Robinia pseudoacacia* plantation (*NPP_s*) in Baishui County (BS) and Minquan County (MQ) in China and the simulation results were verified with the measured *NPP* (*NPP_m*). The intrinsic water use efficiency of the ecosystem was calculated according to the simulation results (*iWUE_s*). The differences of the variation of *iWUE* between the ecosystem and tree-ring (*iWUE_m*) of *R. pseudoacacia* plantation at two sites were also analyzed. [Results] Annual biomass of both sites increased rapidly with age at first time, with obvious juvenile effect, and then fluctuated within a certain range. Without the young forest data, the *NPP_s* and *NPP_m* of *R. pseudoacacia* plantation at the two sites showed a significant positive correlation ($P < 0.01$). The *iWUE_s* and *iWUE_m* of BS showed a highly significant negative correlation ($P < 0.01$), while a reverse pattern was observed at MQ site ($P < 0.05$). [Conclusion] Temperature is the key factor affecting *iWUE_m*, and annual precipitation and atmospheric CO₂ concentration are the important factors affecting biomass. Biome-BGC model can well simulate the *NPP* of *R. pseudoacacia* plantation after the young stage. The growth relationship of *R. pseudoacacia* plantation is consistent between sites with different humidity levels in semi-humid regions, but the relationship between carbon and water is more complex.

Keywords: *Robinia pseudoacacia*; Biome-BGC model; water use efficiency; net primary productivity; climate factors

(责任编辑: 徐玉秀)