

DOI: 10.5846/stxb201406061168

李明旭, 杨延征, 朱求安, 陈槐, 彭长辉. 气候变化背景下秦岭地区陆地生态系统水分利用率变化趋势. 生态学报, 2016, 36(4): - .

Li M X, Yang Y Z, Zhu Q A, Chen H, Peng C H. Evaluating water use efficiency patterns of Qinling Mountains under climate change. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(4): - .

气候变化背景下秦岭地区陆地生态系统水分利用率变化趋势

李明旭, 杨延征, 朱求安*, 陈槐, 彭长辉

西北农林科技大学林学院生态预测与全球变化实验室, 杨凌 712100

摘要:为探究未来气候变化背景下秦岭地区陆地生态系统水分利用率(WUE)的变化规律及其对气候变化的响应,本研究结合IPCC第五次报告资料中心的CCSM4、GISS-E-R、GISS-E-H、IPSL-CM5R-LR-CM、NorESM1-1-ME等五个模型相关模拟结果,预测和分析秦岭地区2006–2100年在RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0和RCP8.5四种未来典型气候变化情景下其水分利用率的变化趋势及其与降雨、气温、CO₂浓度等关键气候变化因子之间的关系。研究结果表明:四种未来情景下预测的秦岭地区生态系统WUE几乎全为正距平,各情景下WUE倾向率为0.0136–0.13 g C · kg⁻¹ H₂O · (10a)⁻¹,均达到极显著水平,且随辐射强迫增加,WUE距平值与倾向率也相应增加。各情景下GPP的增长趋势强于ET,使得两者的比值(即WUE)呈现增长趋势,并随辐射强迫的增加,两者的差异愈发显著,即WUE增长随辐射强迫的增强而更显著。同时,各模型预测的年均气温倾向率为0.21–0.498℃/10a,降雨量倾向率为7.78–17.66 mm/10a。由于气温、降雨量、CO₂等关键气候变化因子调控GPP正增长速率大于ET,以及生态系统LAI值和自身的植被演替过程直接影响生态系统WUE,最终使得生态系统WUE呈正增长趋势。其中GPP的显著增加是未来秦岭地区生态系统WUE增长的直接因素,而气温的显著增加与大气CO₂浓度的升高则是WUE变化的主要环境因素,降雨量的影响相对较弱。

关键词:水分利用率; 气候变化; 秦岭地区

Evaluating water use efficiency patterns of Qinling Mountains under climate change

LI Mingxu, YANG Yanzheng, ZHU Qian*, CHEN Huai, PENG Changhui

Laboratory for Ecological Forecasting and Global Change, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

Abstract: As a key metric for measuring the dry matter yield gained per unit water used by plants, water use efficiency (WUE) has already become a hot topic for agro-forestry production and ecological research in arid and semi-arid areas. The WUE at the ecosystem level is usually defined as the ratio of the gross primary productivity (GPP) to the total evapotranspiration (ET). The ecology of the Qinling Mountains responds quite sensitively to climate change as a typical geographical transition zone and fragile ecological area. It has gradually become an important region in research on global change. To explore the variation in ecosystem water use efficiency in the Qinling Mountains and the responses of its ecology to current and projected climate change, we used five models (CCSM4, GISS-E2-R, GISS-E2-H, IPSL-CM5R-LR and NorESM1-ME) from the PCMDI database to forecast the trend of dynamic change in mean annual precipitation, mean annual air temperature, and ecosystem water use efficiency in the Qinling Mountains. During the period 2006–2100, four typical scenarios were studied (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, and RCP8.5). The correlation between WUE and the key

基金项目:陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2012JQ3016); 高等学校博士学科点专项科研基金(20120204120007)

收稿日期:2014-06-06; **网络出版日期:**2015- -

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhuqa@nwsuaf.edu.cn

factors of climate change, including mean annual precipitation, mean annual air temperature, and CO_2 concentration, were analyzed. The results indicated the following: 1) The ecosystem-level WUE in the Qinling Mountains during 2006—2100 showed an obvious increasing trend in all scenarios, and the average tendency rate ranged from 0.0136 to 0.13 g C/kg H_2O every 10 years. With the growth in radiative forcing, the tendency rate and increasing range of WUE also increased. 2) The ecosystem-level GPP in the Qinling Mountains during 2006—2100 showed an obvious increasing trend in all scenarios; the average tendency rate ranged from 1.970 to 10.434 g C · m^{-2} every year, but the average tendency rate of the ecosystem-level GPP ranged from 0.338 to 0.738 kg H_2O · m^{-2} during 2006—2100 in these scenarios. Compared to ET, ecosystem-level GPP in the Qinling Mountains had a higher tendency rate, in these scenarios. 3) The tendency rate of mean annual air temperature ranged from 0.21 to 0.498 °C every 10 years at a highly significant level. The tendency rate of mean annual precipitation was about 7.78—17.66 mm every 10 years, but most results from the models showed insignificant upward trends. 4) Driven by these meteorological factors (e.g., air temperature, precipitation, and CO_2 concentration), both GPP and ET showed a rising trend; nevertheless, the increasing rate of GPP was more significant in comparison. Meanwhile, the subtropical evergreen broad-leaved forest on the south slopes of the Qinling Mountains has the tendency to move northwards, and may replace the warm-temperate deciduous broad-leaved forest now on the north slopes of Qinling Mountains, in response to climate change. Because of the increase in air temperature, precipitation, and CO_2 concentration, in addition to the increased leaf area index (LAI) of the ecosystem and the underlying succession of vegetation from 2006 to 2100, the ecosystem-level WUE in the Qinling Mountains showed an apparent trend of increase. The remarkable increases in air temperature and CO_2 concentration were the main driving factors for enhancing the WUE of the ecosystem in the Qinling Mountains, while precipitation was relatively insignificant.

Key Words: water use efficiency; climate change; Qinling Mountains

随着水资源匮乏程度加剧,如何利用有限的水资源最大化植物生产力,已成为国内外干旱、半干旱地区农林生产和生态研究的热点问题^[1-3]。从 20 世纪初开始,许多学者先后提出了多种衡量植物干物质产量与耗水量之间关系的指标,如蒸腾比 (Widtsøe, 1911)、需水量 (Bringgs and Shantz, 1913)、蒸腾效率 (Tranquillini, 1969) 等,但上述这些定义都存在一定的局限性^[4]。1976 年 Begg 和 Turner 将植物产生的干物质质量与耗水量的比值定义为水分利用率 (Water Use Efficiency, WUE, g CO_2 /kg H_2O)^[5]。随着学科的发展和研究尺度的拓展,这一定义逐渐被多个学科和研究领域所采纳^[6]。在生态学研究,生态系统水分利用率可定义为区域内生态系统总初级生产力 (GPP, g C m^{-2} a^{-1}) 与总蒸散量 (ET, kg H_2O m^{-2} a^{-1}) 的比值^[7-8], 其中, ET 由植被蒸腾 (Transpiration)、表层土壤蒸发 (Soil Evaporation) 和植被表面蒸发 (Vegetation Evaporation) 三部分组成。水分利用率不仅可以用来计算生态系统生产力和水汽耗散的平衡状况^[9-10], 也可以将其作为生态系统水、 CO_2 通量的耦合节点, 纳入碳水耦合相关模型计算之中^[11-12]。

在以 CO_2 浓度升高、气候变暖为主要特征的全球气候变化背景下^[13], 生态系统 WUE 的时空变化及其对气候变化响应研究已经受到国内外许多学者的广泛关注, 如 Li 和 John 等人在美国切斯皮克湾 (Chesapeake Bay) 就 CO_2 浓度的增加对生态系统 WUE 的影响进行了长达 12 年的试验, 其结果表明当空气中 CO_2 浓度上升至 765 $\mu\text{mol}/\text{mol}$ 时, 生态系统 WUE 大约增长了 83%^[14]; 于贵瑞等应用 ChinaFLUX 通量观测数据计算出 2003—2005 年长白山、千烟洲、鼎湖山等三个中国东部森林生态系统 WUE 约为 6.90—9.43 mg C /g H_2O , 并分析了水热资源同步性对 WUE 提高的重要作用^[9]; 卢玲等人结合 C-FIX 模型研究得出中国西部植被单位面积上年均 WUE 约为 0.32 g C/mm H_2O , 且 WUE 时空分布格局具有显著的异质性等^[15]。蒋冲等人利用周广胜—张新时模型、彭曼公式等并结合气象站点历史数据对 1960—2011 年间秦岭地区 WUE 时空变化特征进行了分析, 并得出在该时间段内秦岭绝大部分地区 WUE 有不显著的上升趋势, 且 WUE 值由南向北逐渐降低^[16]。

秦岭地区作为典型的自然地理过渡区和生态脆弱区,对气候变化的响应更加敏感^[17],是全球气候变化研究重点区域之一。虽然前人们在该地区已进行了大量的科学研究,并取得了一些阶段性的研究成果,但多集中于历史时间段气候、植被分布变化等研究^[18-19],对该地区水分利用率相关研究仅见于蒋冲等人的研究成果^[16],但缺乏在未来全球变化背景下的水分利用率及其对气候变化的响应研究。本研究以秦岭地区作为研究对象,结合 IPCC 第五次报告资料中心的相关模型,模拟预测秦岭地区 2006—2100 年在未来典型气候变化情景下水分利用率及其与气温、降雨和 CO₂ 浓度等关键气候变化因子之间的关系,以揭示秦岭地区陆地生态系统未来水热条件下 WUE 的动态格局,探讨陆地植被生态系统对全球变化的响应和适应对策,以为秦岭地区林业生产和水分管理工作的政策安排提供科学依据。

1 数据来源与研究方法

1.1 研究区域概况

秦岭位于东经 103°48′—113°04′,北纬 32°25′—35°16′,是横贯中国中部的一条东西走向的褶皱山脉,属于我国地理上南北分界线的重要组成部分,同时也是黄河水系和长江水系的重要分水岭。该区域作为北亚热带常绿阔叶林带和暖温带落叶阔叶林带的过渡区,森林覆盖率较高,动植物物种丰富多样,在林业生产、生态保护和自然科学研究上都具有重要意义。

1.2 数据简介

1.2.1 数据来源

本研究采用的数据均源自美国气候模式诊断和对比计划委员会(Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison, PCMDI)数据库(<http://pcmdi9.llnl.gov>)。PCMDI 资料由 IPCC 资料统计中心分发,在对所有模拟情况及相关结果进行统计汇总之后,建立上述数据库,并提供免费共享^[20]。目前为止,PCMDI 数据库共包含了约 27 个国际知名模式中心共 60 个模型参与气候模式对比,这些模型设计了气溶胶模式与植被动态模式,发展了气溶胶模式和植被动态模式^[21],包含古气候、历史、RCP 未来等多个情景,目的在于定量评估气候变化机理和预测未来气候变化。由于不同模型预测方向和模块差异,同时 PCMDI 数据库仍在不断完善中,结合研究目的和情景等相关统计量的数据完整性,从该数据库中选取了 CCSM4、GISS-E-R、GISS-E-H、IPSL-CM5R-LR-CM、NorESM1-1-ME 等五个模型,它们涵盖 RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0 和 RCP8.5 四种典型未来情景(表 1),以及本研究所需要的各项数据,包括 2006—2100 年的总初级生产力(GPP)、植被蒸腾量(Transpiration)、土壤蒸发量(Soil Evaporation)、植被表面蒸发量(Vegetation Evaporation)等逐年预测值以及相应的年降雨量(Mean Annual Precipitation, MAP)、年均气温(Mean Annual Temperature, MAT)和大气中 CO₂ 浓度等。

表 1 模型简介^[22]

Table 1 Introduction of models^[22]

模型 Models	空间分辨率 Spatial resolution/(度, lat x lon)	研发机构 Research institutes
CCSM4	0.9375x1.25	National Center for Atmospheric Research(USA)
GISS-E-R	2x2.5	NASA Goddard Institute for Space Studies(USA)
GISS-E-H	2x2.5	NASA Goddard Institute for Space Studies(USA)
IPSL-CM5R-LR-CM	2x2.5	Institut Pierre-Simon Laplace(France)
NorESM1-1-ME	1.875x2.5	Norwegian Climate Centre(Norway)

1.2.2 情景简介

IPCC 第四次评估报告后,相关学者致力于研究新一代未来情景模式,新的情景模式不仅能对某指标进行长期预测,还可以描述该对象在时间序列上的具体变化过程。2007 年 9 月进行的 IPCC 专家会议最终根据

IPCC 第三工作组提供的 32 种候选情景中遴选出 RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0 和 RCP8.5 四种情景,分别代表至 2100 年到达地球表面的辐射强迫约为 2.6、4.5、6.0、8.5 W/m² 等四种未来典型浓度目标 (Representative Concentration Pathways, RCPs),作为耦合模式比较计划第五阶段 (Coupled Model Intercomparison Project, CMIP5) 中的新一代情景模式^[23]。表 2 列出了四种典型未来情景下 2100 年时到达地球表面辐射强迫与相应的 CO₂ 浓度水平。

表 2 不同情景下 2100 年到达地球表面的辐射强迫与大气 CO₂ 浓度比较

Table 2 Radiation forcing reaching the earth's surface and concentration of CO₂ equivalently under the four scenarios by 2100

未来情景 Future scenarios	辐射强迫 Radiative forcing/(W/m ²)	CO ₂ 浓度 CO ₂ concentration/(ppm)
RCP2.6	2100 年前达到峰值 3 W m ⁻² 后降低至 2.6 W m ⁻²	2100 年前达到峰值 490ppm 后降低
RCP4.5	2100 年达到 4.5 W m ⁻² 后保持稳定	2100 年达到 650ppm 后保持稳定
RCP6.0	2100 年达到 6.0 W m ⁻² 后保持稳定	2100 年达到 850ppm 后保持稳定
RCP8.5	至 2100 年高于 8.5 W m ⁻²	至 2100 年高于 1,370ppm

1.3 研究方法

1.3.1 预处理

从 PCMDI 数据库获取原始数据后,首先提取秦岭地区 GPP 和 ET 等相关数据并计算研究区栅格均值,然后求出 CCSM4、GISS-E-R、GISS-E-H、IPSL-CM5R-LR-CM、NorESM1-1-ME 等五个模型模拟平均值,最终计算出各模型模拟的秦岭地区 2006—2100 年逐年 WUE、GPP、ET、MAP 和 MAT 均值。

1.3.2 变量时间序列分析

在分析 WUE、GPP、ET、MAT、MAP 和 CO₂ 浓度等变量的时间序列变化时,不同情景以及模型间模拟结果差异较大,为突显时间序列上的趋势变化,以 WUE 为例,将 2006—2012 年间 WUE 均值作为基准值,计算 2006—2100 年各年 WUE 值与基准值的差值(即距平值)以进行时间序列分析(倾向率计算和相关性分析过程中仍使用原始值)。

1.3.3 气候变化趋势分析

气候变化因子随时间梯度的变化趋势一般用气候倾向率表示^[24-25],即:

$$Y_i = a_0 + a_1 t_i \quad (1)$$

式中, Y_i 为第 i 个时间段的气候变化因子, t_i 为时间序列, a_0 为截距, a_1 为气候倾向率,表示气候变化因子的年变化趋势,记作某要素单位/a 或某要素单位/10a。本研究对秦岭地区 WUE、GPP、ET、MAP、MAT 都进行了时间序列分析,并用倾向率表示相应的变化趋势。

2 结果与分析

2.1 秦岭地区 WUE 的时间动态变化

RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0 和 RCP8.5 四种未来情景下预测的秦岭地区生态系统 WUE 几乎全为正距平(图 1),即在近 100 年内该地区 WUE 值相比于基准值(2006—2100 年 WUE 均值)有所增加,并随预测辐射强迫的增加,该增长趋势越发显著。同时,四种情景下秦岭地区 WUE 倾向率分别为 0.0136、0.0569、0.0788、0.13 g C · kg⁻¹ H₂O · (10a)⁻¹,且都达到极显著水平(表 3)。不同情景下 WUE 倾向率皆为正,且随辐射强迫增加而不断变大,表明各模型预测的秦岭地区 WUE 值不仅在时间序列上不断增加,而且年际增长量与辐射强迫呈正相关关系。蒋冲等人研究结果显示 1959—2009 年间秦岭地区 WUE 平均倾向率为 0.122 g C · kg⁻¹ H₂O · (10a)⁻¹^[16],本研究结果与其相似,说明秦岭地区生态系统 WUE 值在未来近 100 年内可能继续保持这种增长趋势。而 Zhu 等^[10]利用 IBIS 模型模拟 1950—2099 年在多种情景下中国地区 WUE 对未来气候变化的响应,研究发现在该研究时间段内,多数情景下全国不同地区 WUE 皆呈正增长趋势,其中也包括了秦岭地区。

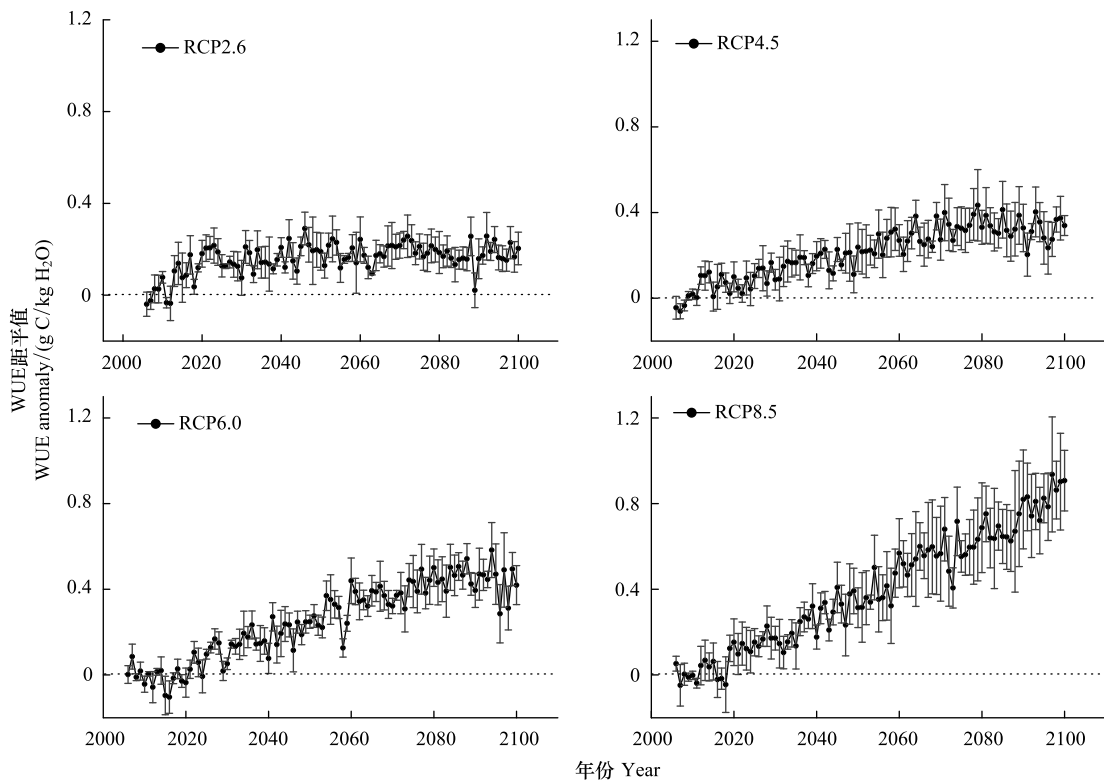


图 1 不同情景下各模型 WUE 均值距平比较分析

Fig. 1 Comparison of the average of WUE anomaly from different models under four scenarios

表 3 四种情景下 WUE、GPP、ET 与 MAT、MAP 倾向率比较分析

Table 3 Tendency rate of the WUE, GPP, ET, MAT, MAP under four scenarios

未来情景 Future scenario	WUE/ g C / (kg H ₂ O · a)	GPP/ g C / (m ² · a)	ET/ kg H ₂ O / (m ² · a)	MAT/ ℃/a	MAP/ g H ₂ O/a
RCP2.6	0.00136 **	1.970 **	0.338 *	0.0212 **	0.778
RCP4.5	0.00569 **	4.739 **	0.501 **	0.0187 **	1.076 *
RCP6.0	0.00788 **	6.003 **	0.294 *	0.0257 **	0.493
RCP85	0.0130 **	10.434 **	0.738 **	0.0498 **	1.766 **

* —— 在 0.05 水平上显著增长 ** —— 在 0.01 水平上显著增长

WUE, water use efficiency, 水分利用效率; GPP, gross primary productivity, 总初级生产力;

ET, evapotranspiration, 蒸发散; MAT, mean annual temperate, 年均气温; MAP, mean annual precipitation, 年均降雨量

2.2 秦岭地区 GPP 与 ET 的时间动态变化

WUE 作为 GPP 与 ET 的比值,其变化趋势受后两者的直接影响,而 WUE 的变化可能是由多种情况引起,为探究其变化本质,我们对秦岭地区未来情景下 GPP 和 ET 的时间序列变化也做了相应分析。研究结果表明,各情景下预测的秦岭地区生态系统 GPP 几乎全为正距平,而 ET 距平值相对较低,甚至在部分年份存在负距平现象;四种未来情景下 GPP 倾向率分别为 1.970、4.739、6.003 和 10.434 g C m⁻² a⁻¹,均达到极显著水平,而 ET 倾向率分别为 0.338、0.501、0.294 和 0.738 kg H₂O m⁻² a⁻¹,均达到显著水平,但增长量低于 GPP(图 2)。由于 GPP 在时间序列上呈显著增长,而 ET 的增长量相对较低,且在部分年份呈现负增长现象,使得两者的比值(即 WUE)呈现增长趋势,并随辐射强迫的增加,两者的差异愈发显著,使得 WUE 增长随辐射强迫的增强而更显著。同时,上述结果也表明 GPP 的显著增长是未来近百年内秦岭地区 WUE 增加的直接因素,这与 Hu 等人^[26]通过对 2003—2005 年中国北方地区和青藏高原的四个典型草地生态系统的碳水通量数据观测研究得出 GPP 是 WUE 变化的主导因素的结论相一致。

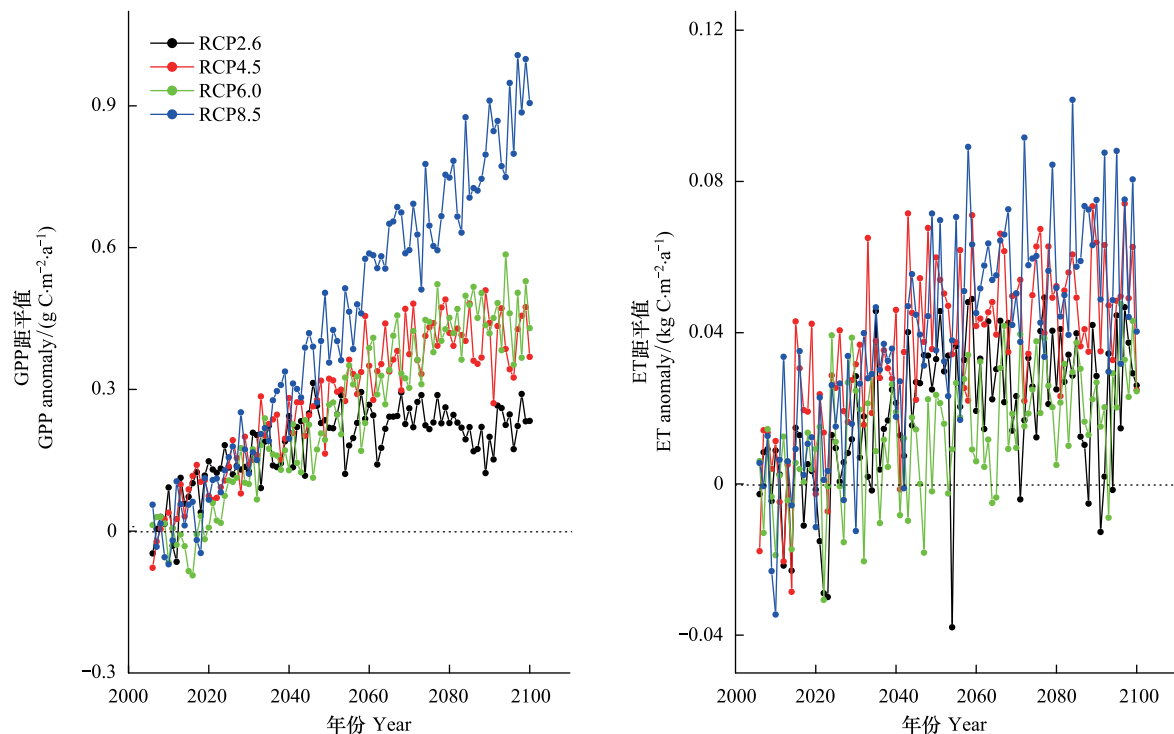


图2 四种情景下各模型 GPP 与 ET 均值距平比较分析

Fig. 2 Comparison of the average of GPP, ET anomaly from different models under four scenarios

GPP, gross primary productivity, 总初级生产力; ET, evapotranspiration

2.3 秦岭地区 WUE 的关键气候变化影响因素

生态系统 WUE 不仅受到系统内部植被类型、群落结构等因素影响,同时也是植被与气候条件相适应的结果,而 CO_2 浓度、气温和降雨则是影响生态系统 WUE 的关键气候变化因子^[27-28]。

2.3.1 关键气候变化因子趋势分析

作为模型的驱动数据,对于同一种情景,不同模型采用相同的 CO_2 浓度数据,其在时间序列上的变化一致,且随辐射强迫的增强 CO_2 浓度增幅变高(表 2 和图 3)。各情景下模型预测的年均气温(MAT)在时间序列上基本上为正距平,且随着辐射强迫的增强,距平值不断增大;而年降雨量(MAP)的距平值在时间序列上有正有负,且随辐射强迫的增强变化不显著(图 3)。同时,各模型预测的 MAT 倾向率为 $0.21\text{--}0.498^\circ\text{C}/10\text{a}$,多数情景下达到极显著水平;MAP 倾向率为 $7.78\text{--}17.66\text{ mm}/10\text{a}$,多数情景下未通过显著性检验或显著性水平较低(表 3)。张立伟等人对 1960–2009 年间秦岭地区气象资料统计显示秦岭南坡和关中(北坡)气温倾向率分别为 0.121 和 $0.203^\circ\text{C}/10\text{a}$ ^[17],高翔等人研究表明 1959–2009 年间秦岭南、北坡的气温倾向率分别为 0.15 、 $0.24^\circ\text{C}/10\text{a}$,且降雨量倾向率分别为 3.2 、 $14.7\text{ mm}/10\text{a}$ ^[29],与本文研究结果相近。由此推测秦岭地区在未来 100 年内可能延续暖湿化的趋势,具体表现为年均气温呈显著上升趋势,而降雨量呈较弱的增长趋势。

2.3.2 GPP、ET 与关键气候变化因子相关性

由于不同模型在水碳耦合相关环节的表达存在较大差异,各模型模拟的 WUE 对气候变化响应方式有所区别,而不同模型的 GPP、ET 计算方法基本一致,故本文结合各情景下模拟的 GPP、ET 分别与年均气温(MAT)、年降雨量(MAP)以及 CO_2 浓度的相关性,间接分析 WUE 对气候变化的响应机制。结果表明,GPP 在各情景下与 CO_2 浓度、MAT 相关性很好,而与 MAP 的相关性较差,甚至在个别情景中不相关;ET 与 MAT、 CO_2 浓度相关性相对较好,但弱于 GPP,而 ET 与 MAP 的相关性在各情景中较差,或显现出不相关现象(图 4)。说明在未来 100 年内气温和 CO_2 浓度可能是秦岭地区影响 GPP 和 ET 的主导气象因素,降雨量同时也会对两者的大小有所影响,但影响程度相对较低。WUE 作为两者的比值,气温和 CO_2 浓度因而成为未来情景下秦岭地

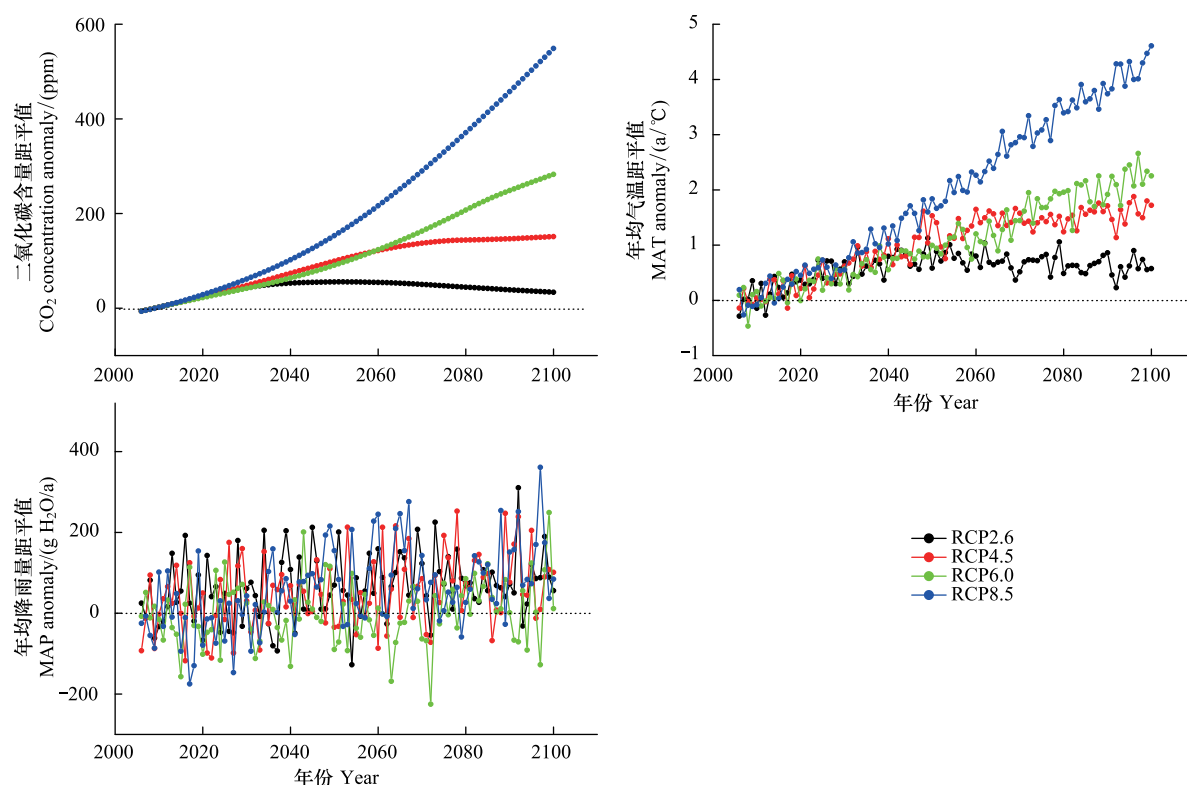


图 3 四种情景下各模型 CO_2 浓度、MAT 和 MAP 均值距平比较分析

Fig. 3 Comparison of the average of CO_2 concentration, MAT and MAP anomaly from different models under four scenarios

MAT, mean annual temperature, 年均气温; MAP, mean annual precipitation, 年均降雨量

区 WUE 的关键环境影响因素,而降雨量对 WUE 影响相对较弱。

3 讨论

3.1 秦岭地区 WUE 增长格局

WUE 作为衡量生态系统生产力和水汽耗散的重要指标,关联了光合作用、蒸发散两个关键生态过程。其变化不仅反映了生态系统对气候变化的响应,而较高 WUE 也意味着能利用有限的水资源最大化生产力,对促进林业生产和调节地方气候等有着不可估量的价值。本研究发现在全球未来气候变化背景下,秦岭地区 WUE 将保持正增长趋势,且该趋势随辐射强迫增加变得更加显著。结合相关研究,我们推断该地区 WUE 保持正增长现象的原因有:

(1) 从数值层面分析,四种未来情景下 GPP 和 ET 多为正增长趋势,且 GPP 的增幅强于 ET,使得未来时间序列上 WUE 也呈现正增长趋势,其中 GPP 的显著增长是未来近百年内秦岭地区 WUE 提高的直接因素。

(2) 结合关键气候变化因子分析,影响生态系统 WUE 的关键气候变化因子有气温、降雨量、 CO_2 浓度等。首先,气温和降雨量的增加不仅能通过增强植物光合作用提高生态系统 GPP,同时也会促进植物的蒸腾作用和地表、植物表面的水汽蒸发能力,但秦岭地区气温相对较低且降水相对充足,气温的显著增加与降雨量不显著增长使得植物光合增长量高于系统蒸散量;其次,随辐射强迫增强,意味着相应的 CO_2 浓度的升高,而当 CO_2 浓度增长,生态系统 GPP 相应增加,但也可能导致植物气孔导度和植物蒸腾能力的降低^[30-32],从而降低生态系统蒸散量增长,解释了本研究中随辐射强迫增强,WUE 增长趋势越显著的原因。由于上述气象因子的综合作用促使生态系统 GPP 相对增长高于 ET,最终导致秦岭地区 WUE 的增加。

(3) 考虑叶片面积指数(LAI)和植被演替因素。随秦岭地区整体气候暖湿化,该区植被生长速度和覆盖

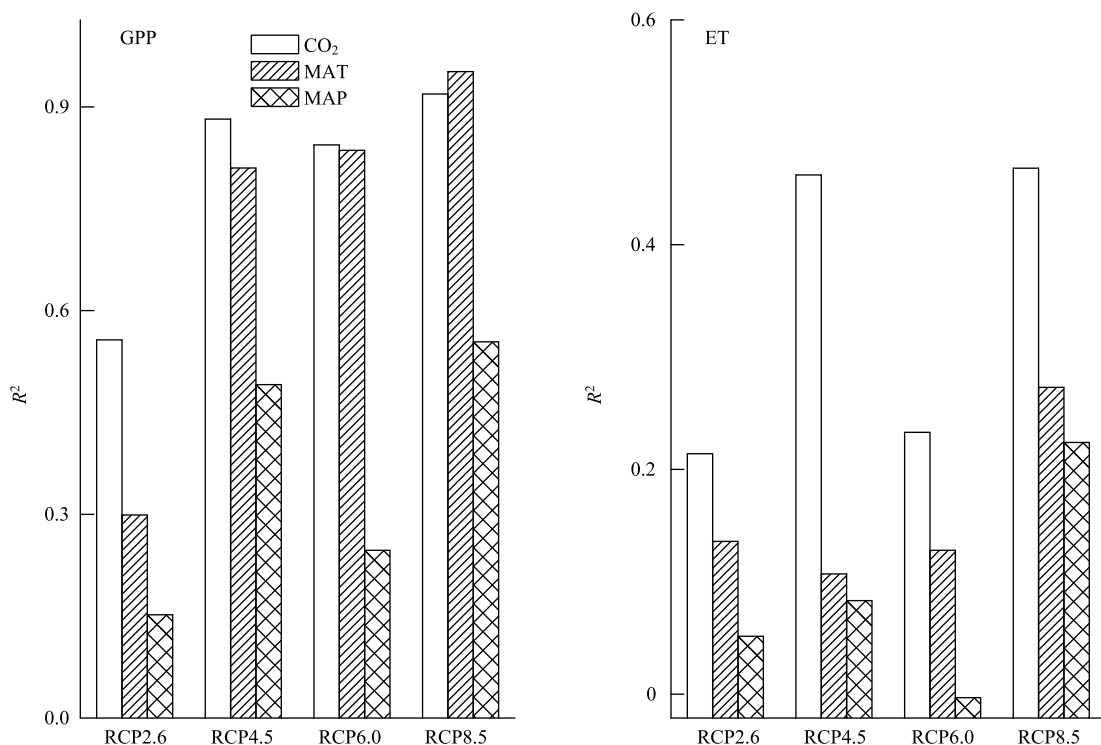


图4 四种情景下各模型中关键气候变化因子分别与 GPP、ET 的相关性比较

Fig. 4 The correlations between CO₂ concentration, MAP and MAT and GPP, ET from different models under four scenarios

本研究中所有显著与极显著相关皆为正相关关系,图中 R² 为线性方程决定系数

* —— 在 0.05 水平上显著相关 * * —— 在 0.01 水平上显著相关

率不断提升,使得生态系统 LAI 值增大,而 Hu 等人的研究指出 LAI 值与生态系统 WUE 有着显著的正相关关系^[26],故气候暖湿化导致的 LAI 值增大可能是生态系统 WUE 增加的一个重要原因。还有研究表明:每种植被类型适应于特定的气候条件,当气候条件发生变化,植被的地理分布也会相应的发生改变^[33-34],如在气候变暖、CO₂ 浓度增加条件下,植被带可能存在北移的现象^[35-36],加之亚热带常绿阔叶林的水分利用率一般高于温带落叶阔叶林^[37-40]。所以,我们推测在秦岭地区气候变暖、CO₂ 浓度和降雨量增加背景下,秦岭的亚热带常绿阔叶林可能存在北移现象,替代部分现有的温带落叶阔叶林,从而提高整个秦岭地区的 WUE 值。

正是由于降雨量、气温、CO₂ 等关键气候变化因子调控 GPP 相对增长速率大于 ET,以及生态系统 LAI 值增加和自身的植被演替过程直接影响生态系统 WUE,最终使得生态系统 WUE 呈正增长趋势。

3.2 WUE 与关键气候变化因子的相关性

CO₂ 作为光合作用的碳源,其浓度大小不仅直接影响生态系统 GPP 的高低,而且 CO₂ 浓度对植物气孔导度和植物蒸腾能力也有所抑制,故 CO₂ 浓度大小对生态系统 WUE 有着重要影响。本研究中各情景下模型预测的 GPP、ET 值与年均气温为极显著正相关关系,从而使得 WUE 与 MAT 也存在正相关关系,但也有相关研究指出植物 WUE 与温度可能存在负相关关系^[41-42]。需要说明的是:对于植物 WUE,存在某最佳温度值(即阈值,其大小通常与植被类型相关)。低于阈值,温度升高,生态系统 GPP 因光合作用增强而增加,植物的蒸腾与地表、植物表面的蒸发量也会相应增加,但 ET 由植物蒸腾量和植物、地表蒸发量两部分组成,ET 变化原因相对复杂性(如植物蒸腾量的影响因素有气温、环境湿度和 LAI 等^[26],蒸发量大小除上述因素外,还涉及地形、土壤等)可能使得 ET 与温度的相关性弱于 GPP,如本文研究结果,随温度升高,GPP 增加量大于 ET,最终生态系统的 WUE 增加;但是当温度高于该阈值后,高温使得植物光合相关酶活性降低而减少 GPP,但 ET 继续增加,从而降低生态系统 WUE^[43]。秦岭地区海拔大多为 1500—2500m,高海拔导致气温相对较低,不易达到阈值,故未来气温的显著升高可能成为影响该地区 WUE 变化的关键因子。

GPP、ET 与年降雨量相关性显著水平较低,其主要原因在于:秦岭境内的河流沟谷众多,渭河、汉江、嘉陵江等较大的二级河流皆发源于此,近 50 年来年均降雨量在 640—910mm 左右^[29],处于半湿润—湿润气候过渡区域,水分相对充足。本研究中各情景下年降雨量增长趋势较弱,未对该地区 GPP 和 ET 造成显著影响,从而不是未来近 100 年内该区 WUE 的主要限制因素。

总的来说,在未来全球气候变化背景下,CO₂浓度和气温可能为该区域生态系统 WUE 的主要限制因子,同时降雨条件也会造成一定的影响。

4 结论

(1)四种未来情景下预测的秦岭地区生态系统 WUE 几乎全为正距平,都达到极显著水平,而且随辐射强迫增加,距平值与倾向率也相应增加。各情景下 GPP 的增长趋势强于 ET,使得两者的比值(即 WUE)呈现增长趋势,并随辐射强迫的增加,两者的差异愈发显著,即 WUE 增长随辐射强迫的增强而更显著。

(2)气温、降雨量、CO₂等关键气候变化因子调控 GPP 正增长速率大于 ET,以及生态系统 LAI 值和自身的植被演替过程直接影响生态系统 WUE,最终使得生态系统 WUE 呈正增长趋势。其中 GPP 的显著增加是未来秦岭地区生态系统 WUE 增长的直接因素,而气温的显著增加与大气 CO₂浓度的升高是则是 WUE 变化的主要环境因素,降雨量的影响相对较弱。

(3)秦岭南北坡气候、植被等差异显著,对于全球气候变化的响应策略有所区别,但由于源数据分辨率较低,本文只得将秦岭地区作为一个整体进行预测分析。在下一步工作中将利用区域气候模式等方法对模型数据作降尺度处理,以详细研究秦岭内各地区在未来气候变化背景下 WUE 的时空变化格局。

(4)不同模型的参数、结构和驱动因子不同,模拟的结果也不尽相同,在后续研究中我们将获取更多气候变化模式数据,形成 WUE 的变化集合区间,进一步完善研究结果。

参考文献(References):

- [1] Sun B N, Dilcher D L, Beerling D J, Zhang C J, Yan D F, Kowalski E. Variation in *Ginkgo biloba* L. leaf characters across a climatic gradient in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2003, 100(12): 7141-7146.
- [2] Sun H Y, Shen Y J, Yu Q, Flerchinger G N, Zhang Y Q, Liu C, Zhang X M. Effect of precipitation change on water balance and WUE of the winter wheat-summer maize rotation in the North China Plain. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(8): 1139-1145.
- [3] Evett S R, Schwartz R C, Casanova J J, Heng L K. Soil water sensing for water balance, ET and WUE. *Agricultural Water Management*, 2012, 104: 1-9.
- [4] 李荣生, 许煌灿, 尹光天, 杨锦昌, 李双忠. 植物水分利用效率的研究进展. *林业科学研究*, 2003, 16(3): 366-371.
- [5] Begg J E, Turner N C. *Crop water deficits*. Canberra: Division of Plant Industry, 1976.
- [6] 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.
- [7] Ponton S, Flanagan L B, Alstad K P, Johnson B G, Morgenstern K, Kljun N, Black T A, Barr A G. Comparison of ecosystem water-use efficiency among Douglas-fir forest, aspen forest and grassland using eddy covariance and carbon isotope techniques. *Global Change Biology*, 2006, 12(2): 294-310.
- [8] Jassal R S, Black T A, Spittlehouse D L, Brümmer C, Nesic Z. Evapotranspiration and water use efficiency in different-aged Pacific Northwest Douglas-fir stands. *Agricultural and forest meteorology*, 2009, 149(6): 1168-1178.
- [9] 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.
- [10] Zhu Q A, Jiang H, Peng C H, Liu J X, Wei X H, Fang X Q, Liu S R, Zhou G M, Yu S Q. Evaluating the effects of future climate change and elevated CO₂ on the water use efficiency in terrestrial ecosystems of China. *Ecological Modelling*, 2011, 222(14): 2414-2429.
- [11] NMJ Crout, S D Young, R G Bradley. *PARC—technical manual*. Natural Resources Institute, UK: Chatham of University, 1997.
- [12] Beer C, Reichstein M, Ciais P, Farquhar G, Papale D. Mean annual GPP of Europe derived from its water balance. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(5): 1-4.
- [13] 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, 冰川冻土, 2013, 35(5): 1068-1076.
- [14] Li J, Erickson J E, Peresta G, Drake B G. Evapotranspiration and water use efficiency in a Chesapeake Bay wetland under carbon dioxide

- enrichment. *Global Change Biology*, 2010, 16(1): 234-245.
- [15] 卢玲, 李新, 黄春林. 中国西部植被水分利用效率的时空特征分析. *冰川冻土*, 2007, 29(5): 777-784.
- [16] 蒋冲, 王飞, 穆兴民, 李锐. 气候变化对秦岭南北植被净初级生产力的影响 (II)——气候变化对秦岭南北植被净初级生产力的影响. *中国水土保持科学*, 2012, 10(6): 45-51.
- [17] 张立伟, 宋春英, 延军平. 秦岭南北年极端气温的时空变化趋势研究. *地理科学*, 2011, 31(8): 1007-1011.
- [18] Ren Z Y, Li J. The Valuation of Ecological Services from the Vegetation Ecosystems in the Qinling-Daba Mountains. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(4): 503-511.
- [19] He H, Zhang Q, Zhou J, Fei J, Xie X. Coupling climate change with hydrological dynamic in Qinling Mountains, China. *Climatic change*, 2009, 94(3/4): 409-427.
- [20] 王澄海, 吴永萍, 崔洋. CMIP 研究计划的进展及其在中国地区的检验和应用前景. *地球科学进展*, 2009, 24(5): 461-468.
- [21] 赵宗慈, 罗勇, 黄建斌. 对地球系统模式评估方法的回顾. *气候变化研究进展*, 2013, 9(1): 1-8.
- [22] Program For Climate Model Diagnosis and Intercomparison. The Availability Data Access of CMIP5. [2014-06-05]. <http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/availability.html>.
- [23] Moss R H, Edmonds J A, Hibbard K A, Manning M R, Rose S K, van Vuuren D P, Carter T R, Emori S, Kainuma M, Kram T. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 2010, 463(7282): 747-756.
- [24] 贺伟, 布仁仓, 熊在平, 胡远满. 1961—2005 年东北地区气温和降水变化趋势. *生态学报*, 2013, 33(2): 519-531.
- [25] 喻彦, 徐建华, 周双喜, 蒙桂云. 近 50 年西双版纳最高最低气温对气候变化的响应. *气象科技*, 2013, 41(2): 334-338.
- [26] Hu Z M, Yu G R, Fu Y L, Sun X M, Li Y N, Shi P L, Wang Y F, Zheng Z M. Effects of vegetation control on ecosystem water use efficiency within and among four grassland ecosystems in China. *Global Change Biology*, 2008, 14: 1609-1619.
- [27] Farquhar G D. Isotopic Composition of Plant Carbon Correlates with Water-use Efficiency of Wheat Genotypes. *Plant Physiology*, 1984, 11: 539-552.
- [28] Morecroft M, Woodward F. Experimental investigations on the environmental determination of $\delta^{13}\text{C}$ at different altitudes. *Journal of Experimental Botany*, 1990, 41(10): 1303-1308.
- [29] 高翔, 白红英, 张善红, 贺映娜. 1959—2009 年秦岭山地气候变化趋势研究. *水土保持通报*, 2012, 32(1): 207-211.
- [30] Morison J I, Gifford R M. Stomatal Sensitivity to Carbon Dioxide and Humidity a comparison of two C_3 and two C_4 grass species. *Plant Physiology*, 1983, 71(4): 789-796.
- [31] Centritto M, Lee H S, Jarvis P G. Interactive effects of elevated CO_2 and drought on cherry (*Prunus avium*) seedlings I. Growth, whole - plant water use efficiency and water loss. *New Phytologist*, 1999, 141(1): 129-140.
- [32] Centritto M, Magnani F, Lee H S, Jarvis P G. Interactive effects of elevated CO_2 and drought on cherry (*Prunus avium*) seedlings II. Photosynthetic capacity and water relations. *New Phytologist*, 1999, 141(1): 141-153.
- [33] 方精云, 宋永昌, 刘鸿雁, 朴世龙. 植被气候关系与我国的植被分区. *植物学报*, 2002, 44(9): 1105-1122.
- [34] 于海英, 许建初. 气候变化对青藏高原植被影响研究综述. *生态学杂志*, 2009, 28(4): 747-754.
- [35] 陈雄文. 1896 年和 1986 年黑龙江省几种森林景观的特征变化(英). *植物学报*, 2000, 42(9): 979.
- [36] 袁婧薇, 倪健. 中国气候变化的植物信号和生态证据. *干旱区地理*, 2007, 30(4): 465-473.
- [37] R B J, B F L, N B, R E J. Carbon isotope composition of boreal plants; functional grouping of life forms. *Oecologia*, 1997, 110(3): 301-311.
- [38] Ito A, Oikawa T. Global mapping of terrestrial primary productivity and light-use efficiency with a process-based model. *Global Environmental Change in the Ocean and on Land*, Tokyo: Terrapub, 2004.
- [39] Zhao L, Li Y N, Zhao X Q, Xu S X, Tang Y H, Yu G R, Gu S, Du M Y, Wang Q X. Comparative study of the net exchange of CO_2 in 3 types of vegetation ecosystems on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(16): 1767-1774.
- [40] 胡中民, 于贵瑞, 王秋风, 赵风华. 生态系统水分利用效率研究进展. *生态学报*, 2009, 29(3): 1498-1507.
- [41] Körner C, Farquhar G, Roksandic Z. A global survey of carbon isotope discrimination in plants from high altitude. *Oecologia*, 1988, 74(4): 623-632.
- [42] 蒋高明, 林光辉, Marino BD. 美国生物圈二号内生长在高 CO_2 浓度下的 10 种植物气孔导度, 蒸腾速率及水分利用效率的变化. *植物学报*, 1997, 39(6): 546-553.
- [43] 王庆伟, 于大炮, 代力民. 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.