



中国典型陆地生态系统波文比特征及影响因素

黄松宇^{1,2} 贾昕^{1,2,3*} 郑甲佳^{1,2} 杨睿智^{1,2} 牟钰^{1,2} 袁和第¹

¹北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; ²宁夏盐池毛乌素沙地生态系统国家定位观测研究站, 北京 100083; ³北京林业大学水土保持国家林业和草原局重点实验室, 北京 100083

摘要 波文比(β)是陆面过程中的重要参数,影响着地表和大气间的能量交换,明确 β 的空间变异规律和影响因素有助于对地表能量平衡和气候间反馈关系的预测。该研究收集了在中国不同生态系统类型开展的用涡度相关法(EC)测量地表能量平衡的公开发表文献,构建了 β 和气象环境因子数据库,分析了 β 在生态系统之间的差异、空间变异特征及影响因素。主要结果: (1) 所有生态系统 β 平均值为 0.95 ± 0.64 , 变异系数67%, 偏度1.58, 峰度3.07, 整体服从对数正态分布, β 平均值最高为灌木生态系统(1.26), 最低为湿地生态系统(0.49)。 (2) β 在生态系统类型间差异显著: 森林和湿地生态系统 β 无显著差异, 灌木生态系统 $\beta >$ 草地生态系统 $\beta >$ 森林和湿地生态系统 β , 农田生态系统 β 介于草地生态系统与森林和湿地生态系统之间。 (3) β 随着纬度的增加而增加, 不随经度和海拔变化。纬度每增加 1° , β 增加0.038。 (4) β 随着年降水量(MAP)、年平均气温(MAT)、净辐射(R_n)、当年降水量(PPT)、当年平均气温(T_a)和叶面积指数(LAI)的增加而降低。 (5) 不同生态系统中 β 对生物和非生物因素的响应存在显著差异: 草地、森林和灌木生态系统的 β 对生物和非生物因素变化较为敏感, 而农田和湿地生态系统的 β 与所有生物和非生物因素均无显著相关关系。 (6) MAP和 R_n 是 β 变化的直接影响因素, LAI通过影响 R_n 间接影响 β 。结果表明了植被类型与气候因素之间具有交互作用, 能量分配最主要的影响因素是降水, 叶面积对能量分配的调节作用并不显著。

关键词 波文比; 潜热通量; 显热通量; 生态系统; 能量分配; 气候; 叶面积指数

黄松宇, 贾昕, 郑甲佳, 杨睿智, 牟钰, 袁和第 (2021). 中国典型陆地生态系统波文比特征及影响因素. 植物生态学报, 45, 119-130. DOI: 10.17521/cjpe.2019.0301

Characteristics and influencing factors of Bowen ratio variation in typical terrestrial ecosystems in China

HUANG Song-Yu^{1,2}, JIA Xin^{1,2,3*}, ZHENG Jia-Jia^{1,2}, YANG Rui-Zhi^{1,2}, MU Yu^{1,2}, and YUAN He-Di¹

¹School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; ²Yanchi Ecology Research Station of MU US Desert, Beijing 100083, China; and ³Key Laboratory of State Forestry and Grassland Administration on Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract

Aims Bowen ratio (β) is an important parameter in land-surface processes. It affects the energy exchange between the surface and the atmosphere. This paper used integrated analyses to investigate the spatial variability and influencing factors of β .

Methods We collected the published literature on the measurement of surface energy balance by the Eddy Covariance (EC) method carried out in different ecosystem types in China, constructed the database of β and meteorological environment factors and analyzed the difference of β among ecosystems, the spatial variation characteristics of β and its influencing factors.

Important findings (1) The variation of β follows a lognormal distribution. The average β in all ecosystems was 0.95 ± 0.64 , the coefficient of variation of β was 67%, the skewness was 1.58, and the kurtosis was 3.07. The shrub ecosystem has the highest mean value (1.26) and the wetland ecosystem has the lowest (0.49). (2) β is significantly different among ecosystems: β of shrub ecosystems is significantly higher than those in grassland, forest and wetland ecosystems, and β of croplands is between grassland ecosystems and forest with wetland ecosystems. (3) β increases with increasing latitude and does not change with longitude and altitude. For every 1° increase in latitude, β increases by 0.038. (4) β decreases with increase in mean annual precipitation (MAP), mean

收稿日期Received: 2019-11-06 接受日期Accepted: 2020-05-12

基金项目: 国家自然科学基金(31670708、31670710和31901366)和中央高校基本科研业务费专项资金(2015ZCQ-SB-02). Supported by the National Natural Science Foundation of China (31670708, 31670710 and 31901366), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (2015ZCQ-SB-02).

* 通信作者Corresponding author (xinjia@bjfu.edu.cn)

annual temperature (MAT), net radiation (R_n), precipitation of the studied year (PPT), mean temperature of the studied year (T_a), and leaf area index (LAI). (5) There are significant differences in the response of β to biotic and abiotic factors in different ecosystems: β of grassland, forest and shrub ecosystems are sensitive to changes in biotic and abiotic factors, while β of croplands and wetland ecosystems have no correlations with biotic and abiotic factors. (6) MAP and R_n are the direct factors influencing β . MAT affects β indirectly by affecting MAP , R_n and LAI . LAI affects β indirectly by affecting R_n . Our results indicate significant effect of the interaction between vegetation types and climatic factors on β . The most important factor affecting energy distribution is precipitation, and the regulation of leaf area on energy distribution is not significant.

Key words Bowen ratio; latent heat flux; sensible heat flux; ecosystems; energy partitioning; climate; Leaf Area Index

Huang SY, Jia X, Zheng JJ, Yang RZ, Mu Y, Yuan HD (2021). Characteristics and influencing factors of Bowen ratio variation in typical terrestrial ecosystems in China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 45, 119-130. DOI: 10.17521/cjpe.2019.0301

地表与大气之间的能量平衡影响生物地球化学循环(如碳、氮、水循环)过程,并调控区域气候(原文文等, 2015; 张翔等, 2017)。作为表面能量平衡的重要组分, 显热通量(H)和潜热通量(LE)通过对温度、水分传输和植被的生长发育的调控驱动区域气候的变化(Chen *et al.*, 2009; 岳平等, 2011)。波文比(β)是 H 和 LE 的比值(H/LE),它能够反映地表能量交换特征(Bowen, 1926; 陈云飞等, 2013; 夏露和张强, 2014; 葛骏等, 2016),在众多陆面过程相关分析的研究中有所涉及,在天气预报和气候预测中也有诸多应用(Jo *et al.*, 2004; 何学敏等, 2017)。了解 β 的变化特征及影响因素,有助于深入理解陆-气相互作用模式,准确预测区域或全球尺度的水文循环、能量平衡和气候变化(Chen *et al.*, 2009; Tang *et al.*, 2014; Morwal *et al.*, 2017)。

已有研究表明 β 受到地理(纬度)、气候(温度、降水、净辐射)和生物(叶面积指数)等因素的影响(Matsumoto *et al.*, 2008; Launiainen, 2010; 张强等, 2014; Launiainen *et al.*, 2016; 王佩等, 2017)。但是,就目前的研究来说,地理因素和气候因素与 β 的关系存在较大不确定性。例如,孙成(2014)在对亚热带毛竹(*Phyllostachys edulis*)林能量通量的研究中认为, β 的变异受降水量及其他因素的综合影响;Grünwald 和 Bernhofer (2007)在对德国温带云杉(*Picea abies*)林长达10年的通量观测研究中也指出,年 β 主要受到年降水量的控制。而很多学者在研究之后发现,年降水量和年 β 之间并不存在显著的相关关系(Ryu *et al.*, 2008; Liu *et al.*, 2009; Tang *et al.*, 2014; Yue *et al.*, 2018)。在空间尺度上, β 的研究相对较少,目前仅张强等(2014)在黄土高原地表能量通量的研究中表明, β 随降水的增加而降低,但没有明

确 β 随温度的变化。Burakowski等(2017)在研究 β 对美国东部生态系统能量平衡的作用时提及, β 会根据生物群落和纬度而变化,但是并未明确给出 β 是如何在生物群落间和纬度上变化的。另外,由于目前的研究大部分仅在单个的生态系统内进行,因此生物和非生物因素对 β 变异的影响以及 β 在不同生态系统间的差异都不明确,需要进一步的研究。

本文通过收集基于涡度相关法测定的地表能量平衡的公开发表文献,构建 β 与生物和非生物因子数据库,研究 β 在生态系统间的差异及其空间分布,以期揭示 β 的影响因素,旨在提高对陆-气间能量交换的理解,为在区域尺度准确预测能量分配提供重要参数。

1 材料和方法

1.1 数据来源及质量控制

利用中国知网数据库(<http://www.cnki.net/>),选取“波文比”和“中国”、“能量分配/平衡”和“中国”等关键词组合检索与波文比有关的中文文献;利用Web of Science数据库(<http://www.isiknowledge.com/>),选取“Bowen ratio/energy partitioning/energy exchange/energy flux”和“China”等关键词组合检索中国地区与波文比相关的英文文献。文献检索的截止日期为2018年11月30日。检索得到的同行评审的期刊论文以及公开发表的论文共计196篇。用以下筛选标准对所得文章进行筛选:

(1)为消除方法不一致带来的不确定性,提高可比性,数据测量的方法均为涡度相关法。涡度相关法作为一种标准的测量方法,以其高精度、高时间分辨率的优点被迅速广泛地运用到陆地生态系统的物质和能量交换研究中。本研究检索得到的文献中,

采用涡度相关法测量能量通量的文章占比为147/196。

(2)至少包括完整一年的显热和潜热通量数据。计算波文比的显热和潜热通量时间为年累积值($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$),排除由时间差导致的气候差异所带来的数据误差,保证数据的统一性和可比性。

根据上述标准筛选后,得到有效文献共计49篇。根据筛选得到的文献,建立本研究的文献数据库。从文献中获取的信息包括:地理信息(包括研究地点、经度(*Lon*)、纬度(*Lat*)和海拔(*Alt*))、生态系统类型、气候因素(包括多年平均气温(*MAT*)、年降水量(*MAP*)、当年平均气温(*T_a*)、当年降水量(*PPT*)、净辐射(*R_n*))、生物因素(叶面积指数(*LAI*))、能量平衡组分(包括*H*、*LE*、 β)、能量平衡评价指标(包括能量闭合度(*EBC*)及能量平衡比率(*EBR*))、研究期、作者信息及文献信息。数据库中包含的主要信息的名称、英文缩写及单位见表1。*LAI*为生长季最大值;*R_n*、*G*、*H*、*LE*均为年总值。对于同一参数单位不同的情况,按照表1中给出的单位进行转换统一。若文献中没有给出需要的相关信息,但该文献图中含有相关的数据,则通过软件 GetData Graph Digitizer v2.24 (<http://www.getdata-graph-digitizer.com/>)从图中进行数据获取。部分没有提供的实验数据如经纬度、海拔、温度、降水量等,通过相关的文献及气候数据库获取。文献中未提及也无法通过其他渠道获取的数据,以缺失值NaN表示。为排除同一站点多年数据导致的时间变异带来的分析误差,对同一站点同一生态系统类型的所有变量进行了平均,因此数据分析时使用的当年值为年平均值。为避免站点发生较为严重的干旱或其他极端天气状况使数据产生特殊性,将降水量和温度划分为多年值和当年值以增

加数据的可靠性。最终构建的中国典型陆地生态系统波文比数据库,包含数据57条,涉及17个省市自治区,纬度跨越范围为 19.54° – 44.57° N,经度跨越范围为 91.08° – 128.10° E,海拔跨越范围为3.80–4 333.0 m。包含森林生态系统(FOR)、草地生态系统(GRA)、农田生态系统(CRO)、灌木生态系统(SHR)及湿地生态系统(WET)等5个生态系统类型。数据来源站点的具体分布情况如图1所示。

1.2 数据分析

数据分析时发现, FOR中的离群值(Zhu *et al.*, 2014)会影响分析结果,即该点会改变FOR中 β 的整体趋势:该点使本无显著相关关系的 β 和*Alt*显著相关,使本该有显著相关关系的 β 和*Lat*、*Lon*、*MAP*、*PPT*之间无显著相关关系。Zhu等(2014)的研究地处青藏高原,海拔较高(2 800 m),地面获得的太阳辐射和净辐射都非常高(高于97%的站点数据),但是该处降水量却相对较少(平均年降水量435 mm,研究期当年降水量428 mm)。水分亏缺导致蒸散发不足,因此用于驱动蒸散发的能量较少,大部分净辐射分配给显热通量,导致该地区波文比值异常地高。在数据分析中去掉了此异常值点。

所有的数据分析使用R 3.5.2完成。采用单因素方差分析法检验5种生态系统类型之间 β 差异的显著性。方差分析前,对 β 进行了对数化处理,以符合数据正态分布和方差齐性。采用图凯忠实显著性差异(Turkey HSD)法对不同植被类型之间的 β 差异进行多重比较。采用线性回归和非线性回归分析 β 和地理因素、环境因素及生物因素之间的相关关系,选择最优模型以描述 β 随各影响因素的变化情况。由于数据量不足(样本量 $N < 4$),灌木生态系统中,无法分析与*LAI*、*PPT*、*T_a*之间的关系,森林和湿地生态系

表1 中国典型陆地生态系统波文比数据库主要信息

Table 1 Main information of the Bowen ratio dataset in Chinese typical terrestrial ecosystems

变量名称 Variable name	缩写 Abbreviation	单位 Unit	变量名称 Variable name	缩写 Abbreviation	单位 Unit
纬度 Latitude	<i>Lat</i>	°	当年降水量 Annual precipitation of the studied year	<i>PPT</i>	mm
经度 Longitude	<i>Lon</i>	°	净辐射 Net radiation	<i>R_n</i>	$\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$
海拔 Altitude	<i>Alt</i>	m	土壤热通量 Soil heat flux	<i>G</i>	$\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$
年平均气温 Mean annual air temperature	<i>MAT</i>	°C	显热通量 Sensible heat flux	<i>H</i>	$\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$
年降水量 Mean annual precipitation	<i>MAP</i>	mm	潜热通量 Latent heat flux	<i>LE</i>	$\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$
生态系统类型 Ecosystem type	–	–	波文比 Bowen ratio	β	–
叶面积指数 Leaf Area Index	<i>LAI</i>	$\text{m}^2\cdot\text{m}^{-2}$	能量闭合度 Energy balance closure	<i>EBC</i>	–
当年平均气温 Mean annual air temperature of the studied year	<i>T_a</i>	°C	能量平衡比率 Energy balance ratio	<i>EBR</i>	–

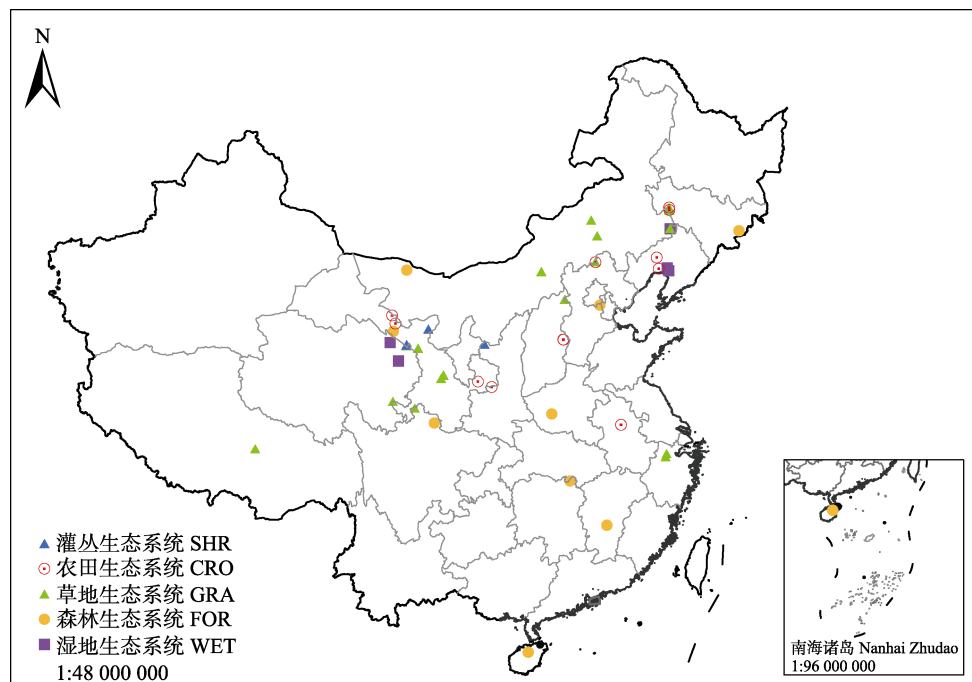


图1 中国典型陆地生态系统波文比数据来源站点分布图。

Fig. 1 Distribution of the data resources of Bowen ratio in typical terrestrial ecosystems in China. CRO, cropland ecosystems; FOR, forest ecosystems; GRA, grassland ecosystems; SHR, shrubland ecosystems; WET, wetland ecosystems.

统中无法分析与 LAI 之间的关系。采用协方差分析分析生态系统类型和环境因素对 β 是否存在交互影响(生态系统类型为固定因子, 环境因素为协变量)。采用结构方程模型(SEM)评价气候因素(MAP 、 MAT 及 R_n)和生物因素(LAI)对 β 的直接和间接影响。在气候因素中, 选择 MAP 和 MAT 代表降水量和温度, 因为 MAP 和 MAT 具有更充足的数据($N_{MAP} = 52$, $N_{PPT} = 39$; $N_{MAT} = 51$, $N_{Ta} = 33$), 且 MAP 和 PPT 显著相关($p < 0.01$), MAT 和 T_a 显著相关($p < 0.01$)。SEM的结果以标准化的路径系数呈现。直接路径系数是由多元回归给出的标准化偏回归系数(−1–1之间), 间接路径系数是路径上所有直接系数的乘积之和。总路径系数是直接系数和间接系数的总和。根据已知理论和前人研究建立初始模型, 去除不显著路径($p > 0.05$)后重新计算, 得到最终模型。

为确定能量闭合程度以及能量平衡校正是否会对 β 产生影响, 文章中收集了能量平衡闭合度(包括30 min和日尺度)、能量平衡比率以及土壤热通量的数据。但是有关能量闭合程度评估的数据量较少, 仅42%的文章中报道了相关数据, 导致无法进行能量平衡校正。并且后续的分析中发现能量闭合程度对 β 无显著影响, 因此在文后不再对能量闭合程度进行分析和讨论。

2 结果

2.1 波文比分布特征

图1显示, β 在纬度方向(从南至北)上及经度方向(由西至东)上有明显分布。另外, 草地和农田生态系统的位置主要偏北, 森林生态系统更多地分布在南方, 灌木和湿地生态系统样本数较少分布规律不显著。所有生态系统类型的 β 平均值(\pm 标准差)为 0.95 ± 0.64 ($n = 105$), 在0.07–3.43之间变化, 大多(87%)分布在0–1.5之间(图2)。 β 变异系数为67%, 偏度1.58, 峰度3.07, 整体服从对数正态分布。 β 在生

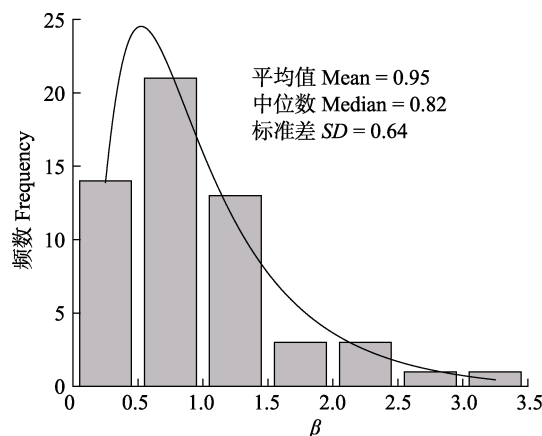


图2 中国典型陆地生态系统波文比(β)频数分布。

Fig. 2 Frequency distribution of Bowen ratio (β) in typical terrestrial ecosystems in China.

态系统类型间差异显著($F_{4,98} = 26, p < 0.01$)(图3), 灌木生态系统最高(1.26), 湿地生态系统最低(0.49)。森林和湿地生态系统 β 无显著差异, 灌丛生态系统 β 显著高于草地生态系统, 草地生态系统 β 显著高于森林和湿地生态系统。农田生态系统 β 介于草地生态系统和森林、湿地生态系统之间。

2.2 波文比影响因素

2.2.1 地理因素

β 随纬度的增加而增加, 与经度和海拔没有显著相关关系(图4A–4C)。纬度每增加 1° , β 增加0.038。 H 的地理格局体现在其与海拔的关系上, 海拔增加100 m时, H 随之增加 $6.5 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; H 没有随经度和纬度的变化趋势(图4D–4F)。 LE 随纬度的变化趋势与 β 相反, 纬度每增加 1° , LE 降低 $54.26 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; 而 LE 不随经度和海拔变化(图4G–4I)。

单个生态系统 β 对地理因素的响应只体现在森林生态系统中(表2)。纬度每增加 1° , β 随之增加0.016, 经度每增加 1° , β 随之增加0.014。 H 仅在灌木生态系统随纬度变化(表3), 纬度每增加 1° , H 增加 $373.96 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。 LE 在单个生态系统中对地理因

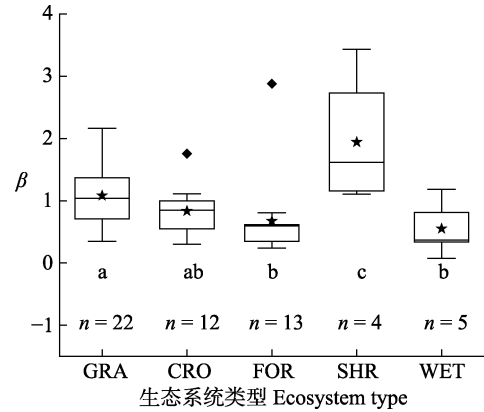


图3 不同生态系统类型波文比(β)分布箱线图。小写字母表示多重比较的结果, 相同的字母表示生态系统之间的 β 差异不显著($p > 0.5$), 不同的字母表示生态系统之间的 β 差异显著($p < 0.5$)。n为样本量。CRO, 农田生态系统; FOR, 森林生态系统; GRA, 草地生态系统; SHR, 灌丛生态系统; WET, 湿地生态系统。

Fig. 3 Boxing diagram of the Bowen ratio (β) of different ecosystem types. Lowercase letters indicate the results of multiple comparisons. The same letter indicates that the difference of β between ecosystems is not significant ($p > 0.5$), while different letters indicate significant differences in β between ecosystems ($p < 0.5$). n is the sample size. CRO, cropland ecosystems; FOR, forest ecosystems; GRA, grassland ecosystems; SHR, shrubland ecosystems; WET, wetland ecosystems.

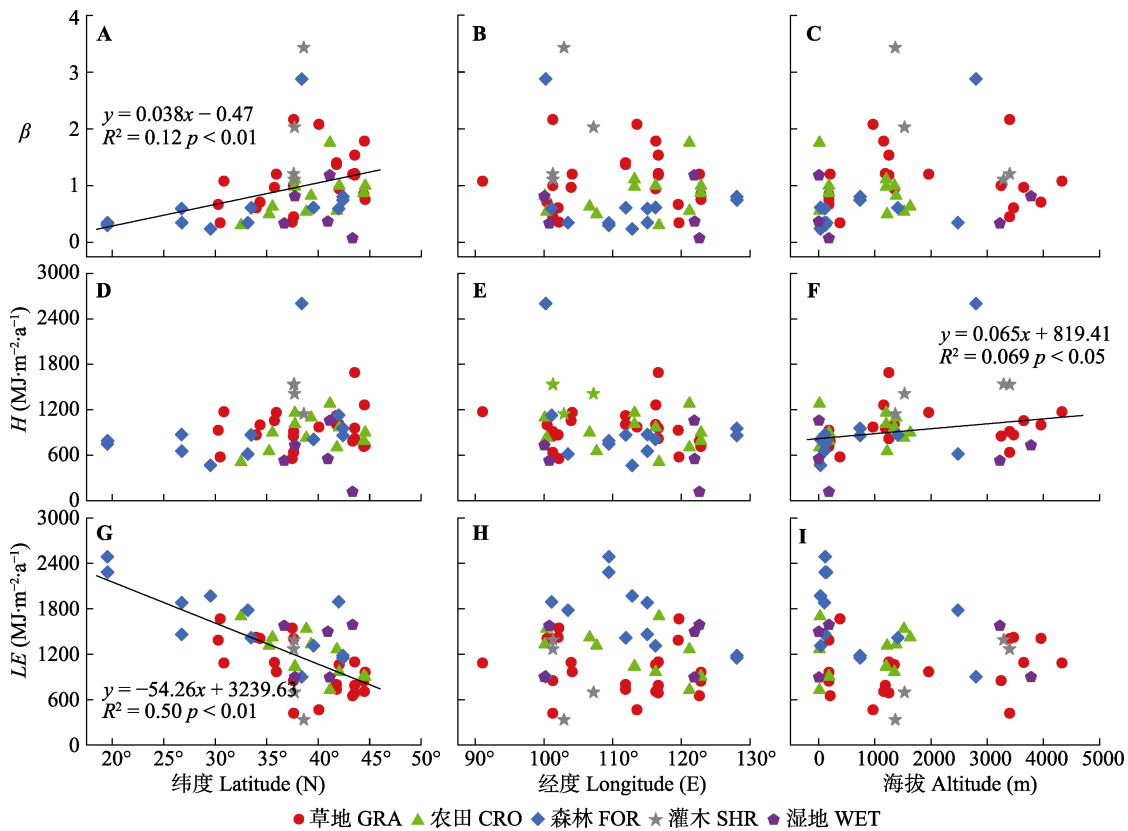


图4 中国陆地生态系统的波文比(β)、显热通量(H)、潜热通量(LE)与纬度、经度和海拔高度之间的关系。

Fig. 4 Relationships between the Bowen ratio (β), sensible heat flux (H), latent heat flux (LE) and latitude, longitude and altitude of terrestrial ecosystems in China. CRO, cropland ecosystems; FOR, forest ecosystems; GRA, grassland ecosystems; SHR, shrubland ecosystems; WET, wetland ecosystems.

表2 波文比(β)与地理、气候及生物因素在不同生态系统中的线性回归结果

Table 2 Linear regressions between Bowen ratio (β) and geographical, climatic and biological factors in different ecosystems

影响因素 Influencing factor	生态系统类型 Ecosystem type	回归方程 Regression equation	样本数 Sample size	R^2
纬度 Lat	FOR	$\beta = 0.016Lat - 0.02$	12	0.57**
经度 Lon	FOR	$\beta = 0.014Lon - 1.13$	12	0.32*
	GRA	$\beta = -0.00076MAP + 1.46$	22	0.22*
年降水量 MAP	FOR	$\beta = -0.00021MAP + 0.73$	12	0.36*
	SHR	$\beta = -0.0046MAP + 3.73$	4	0.91*
当年降水量 PPT	GRA	$\beta = -0.00082PPT + 1.43$	15	0.41**
	FOR	$\beta = -0.00025PPT + 0.77$	10	0.42*
年平均气温 MAT	FOR	$\beta = -0.017MAT + 0.74$	11	0.45*
当年平均气温 T_a	FOR	$\beta = -0.020T_a + 0.77$	8	0.48*
	GRA	$\beta = -0.00063R_n + 2.54$	20	0.34***
净辐射 R_n	SHR	$\beta = -0.0021R_n + 7.09$	4	0.97*
叶面积指数 LAI	GRA	$\beta = -0.20LAI + 1.45$	12	0.34*

FOR, 森林生态系统; GRA, 草地生态系统; SHR, 灌丛生态系统。*, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$; ***, $p < 0.001$ 。
 LAI , Leaf Area Index; Lat , latitude; Lon , longitude; MAP , mean annual precipitation; MAT , mean annual air temperature; PPT , annual precipitation of the studied year; R_n , net radiation; T_a , mean annual air temperature of the studied year. FOR, forest ecosystems; GRA, grassland ecosystems; SHR, shrubland ecosystems. *, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$; ***, $p < 0.001$.

表3 显热通量(H)与地理、气候及生物因素在不同生态系统中的线性回归结果

Table 3 Linear regressions between sensible heat flux (H) and geographical, climatic and biological factors in different ecosystems

影响因素 Influencing factor	生态系统类型 Ecosystem type	回归方程 Regression equation	样本数 Sample size	R^2
纬度 Lat	SHR	$H = -373.96Lat + 15579.69$	4	0.90*
当年降水量 PPT	FOR	$H = -0.20PPT + 1015.80$	10	0.41*
净辐射 R_n	SHR	$H = 0.36R_n + 521.99$	4	0.99**

FOR, 森林生态系统; SHR, 灌丛生态系统。*, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$ 。
 Lat , latitude; PPT , annual precipitation of the studied year; R_n , net radiation. FOR, forest ecosystems; SHR, shrubland ecosystems. *, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$.

表4 潜热通量(LE)与地理、气候及生物因素在不同生态系统中的线性回归结果

Table 4 Linear regressions between latent heat flux (LE) and geographical, climatic and biological factors in different ecosystems

影响因素 Influencing factor	生态系统类型 Ecosystem type	回归方程 Regression equation	样本数 Sample size	R^2
	GRA	$LE = -45.40Lat + 2767.46$	22	0.36**
纬度 Lat	CRO	$LE = -57.21Lat + 3424.40$	12	0.48**
	FOR	$LE = -40.80Lat + 3032.86$	12	0.62**
经度 Lon	CRO	$LE = -21.36Lon - 3604.25$	12	0.30*
	FOR	$LE = -36.92Lon + 5944.80$	12	0.39*
海拔 Alt	SHR	$LE = 0.43Alt - 116.08$	4	0.89*
	GRA	$LE = 0.64MAP + 683.66$	22	0.34**
年降水量 MAP	CRO	$LE = 1.18MAP + 500.76$	10	0.52*
	FOR	$LE = 0.50MAP + 1203.54$	12	0.36*
	SHR	$LE = 2.19MAP - 78.90$	4	0.97**
当年降水量 PPT	GRA	$LE = 0.65PPT + 725.23$	15	0.44**
	FOR	$LE = 45.30MAT + 1122.30$	11	0.61**
年平均气温 MAT	SHR	$LE = -80.99MAT + 1200.72$	4	0.90*
当年平均气温 T_a	FOR	$LE = 54.34T_a + 1024.19$	8	0.62*
	GRA	$LE = 0.47R_n - 53.39$	20	0.51***
净辐射 R_n	FOR	$LE = 0.58R_n + 39.06$	12	0.61**
	WET	$LE = 0.69R_n - 441.67$	5	0.77*

CRO, 农田生态系统; FOR, 森林生态系统; GRA, 草地生态系统; SHR, 灌丛生态系统; WET, 湿地生态系统。*, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$; ***, $p < 0.001$ 。
 Lat , latitude; Lon , longitude; MAP , mean annual precipitation; MAT , mean annual air temperature; PPT , annual precipitation of the studied year; R_n , net radiation; T_a , mean annual air temperature of the studied year. CRO, cropland ecosystems; FOR, forest ecosystems; GRA, grassland ecosystems; SHR, shrubland ecosystems; WET, wetland ecosystems. *, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$; ***, $p < 0.001$.

素的响应与 H 明显不同(表4)。纬度每增加1°, 草地、40.80 MJ·m⁻²·a⁻¹; 经度每增加1°, 农田和森林生态系统 LE 分别减少45.40、57.21、系统 LE 分别减少21.36、36.92 MJ·m⁻²·a⁻¹。而海拔增

加时, 仅灌木生态系统中 LE 会随之增加。

2.2.2 气候因素

在所有的生态系统类型中, 气候因素的影响表现为 MAP 、 MAT 、 R_n 、 PPT 和 T_a 增加时, β 显著降低(图5)。 β 与 MAP 的关系呈对数形式, 拟合结果具有相对较高的决定系数($R^2 = 0.38$)。 β 随着 PPT 增加呈线性降低, PPT 每增加100 mm, β 降低0.071。 MAT 和 T_a 对 β 的影响都呈线性, β 随着 MAT 和 T_a 的增加而降低。相对来说, β 对 MAT 变化比对 T_a 更加敏感: MAT 每增加1 °C, β 降低0.035, 而 T_a 每增加1 °C, β 降低0.032。 β 与 R_n 的关系为幂函数, 有38%的结果可以被该方程解释。

而 H 对 MAT 、 R_n 和 T_a 的变化无响应, 仅当降水量(MAP/PPT)增加时随之降低(图6), 并且 H 对 MAP 和 PPT 变化的敏感性相近。 LE 对气候因素的响应则恰好与 β 相反, LE 随着 MAP 、 MAT 、 R_n 、 PPT 和 T_a 的增加而增加(图7)。

气候因素对 β 的影响因生态系统中的植被类型而异。生态系统植被的类型和 MAP 对 β 存在交互影响(MAP , $F_{1,41} = 46.77$, $p < 0.01$; 植被类型, $F_{5,41} =$

8.18, $p < 0.01$; $MAP \times$ 植被类型, $F_{4,41} = 6.35$, $p < 0.01$)。草地、灌木和森林生态系统中 β 随 MAP 的增加而显著降低, 农田和湿地生态系统中 β 与 MAP 无相关关系(表2)。其中, 灌木生态系统 MAP 对 β 影响的解释度最高($R^2 = 0.91$), β 对的变化 MAP 也最为敏感(MAP 每增加100 mm, 灌木生态系统 β 降低0.46, 而草地和森林生态系统分别降低0.076和0.021)。相似地, 生态系统类型和 PPT 对 β 也存在交互效应(PPT , $F_{1,30} = 31.17$, $p < 0.01$; 植被类型, $F_{4,30} = 13.82$, $p < 0.01$; $PPT \times$ 植被类型, $F_{3,30} = 3.72$, $p < 0.05$)。 PPT 增加时, 草地和森林生态系统中 β 显著降低, 但 PPT 对农田、灌木和湿地生态系统 β 没有影响(表2)。相较于森林生态系统, 草地生态系统 β 对 PPT 的变化更敏感。

不同生态系统类型植被类型中的 β 对 MAT 的响应存在明显差异(MAT , $F_{1,40} = 13.58$, $p < 0.01$; 植被类型, $F_{4,40} = 6.30$, $p < 0.01$; $MAT \times$ 植被类型, $F_{4,40} = 4.62$, $p < 0.01$)。森林生态系统 β 随 MAT 的增加而降低, 而其他生态系统中 β 不随 MAT 的变化而变化(表2)。而 T_a , 仅森林生态系统中 β 对其变化有显著响应(表2), T_a 和生态系统类型对 β 的影响不存在交互作用($p = 0.85$)。

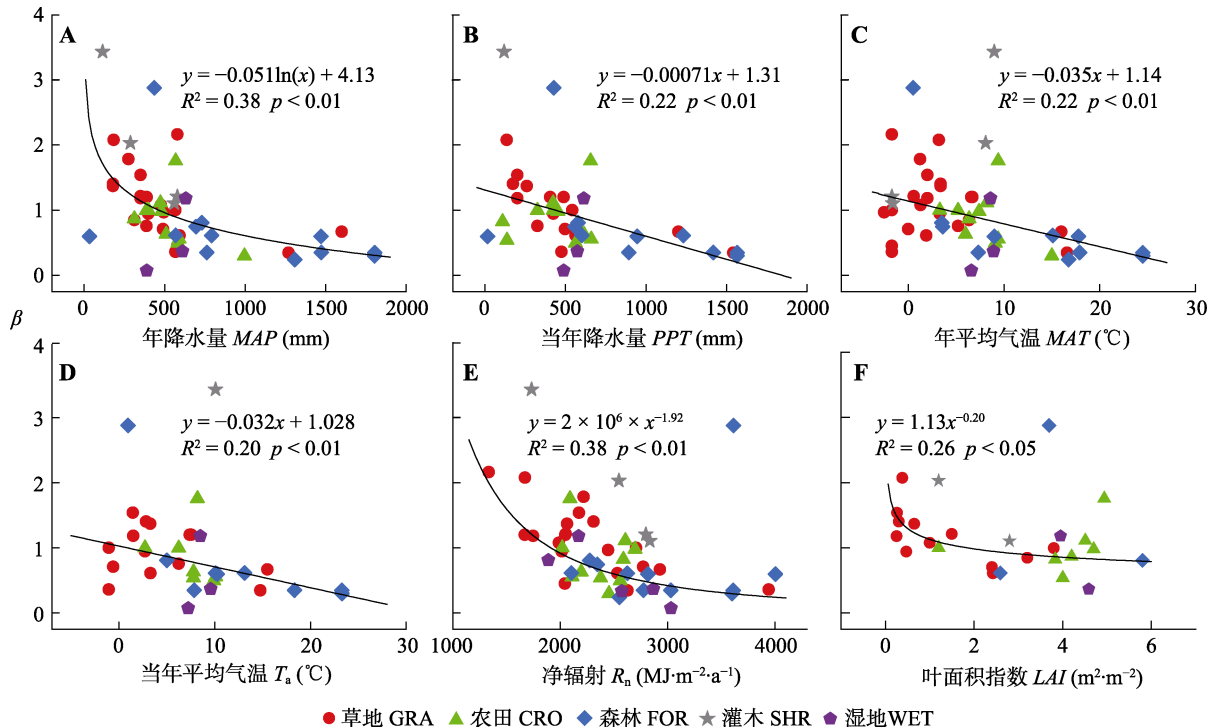


图5 中国陆地生态系统的波文比(β)与年降水量(MAP)、当年降水量(PPT)、年平均气温(MAT)、当年平均气温(T_a)、净辐射(R_n)和叶面积指数(LAI)的关系。

Fig. 5 Relationships between Bowen ratio (β) and mean annual precipitation (MAP), annual precipitation of the studied year (PPT), mean annual air temperature (MAT), mean annual air temperature of the studied year (T_a), net radiation (R_n) and Leaf Area Index (LAI) of China's terrestrial ecosystems. CRO, cropland ecosystems; FOR, forest ecosystems; GRA, grassland ecosystems; SHR, shrubland ecosystems; WET, wetland ecosystems.

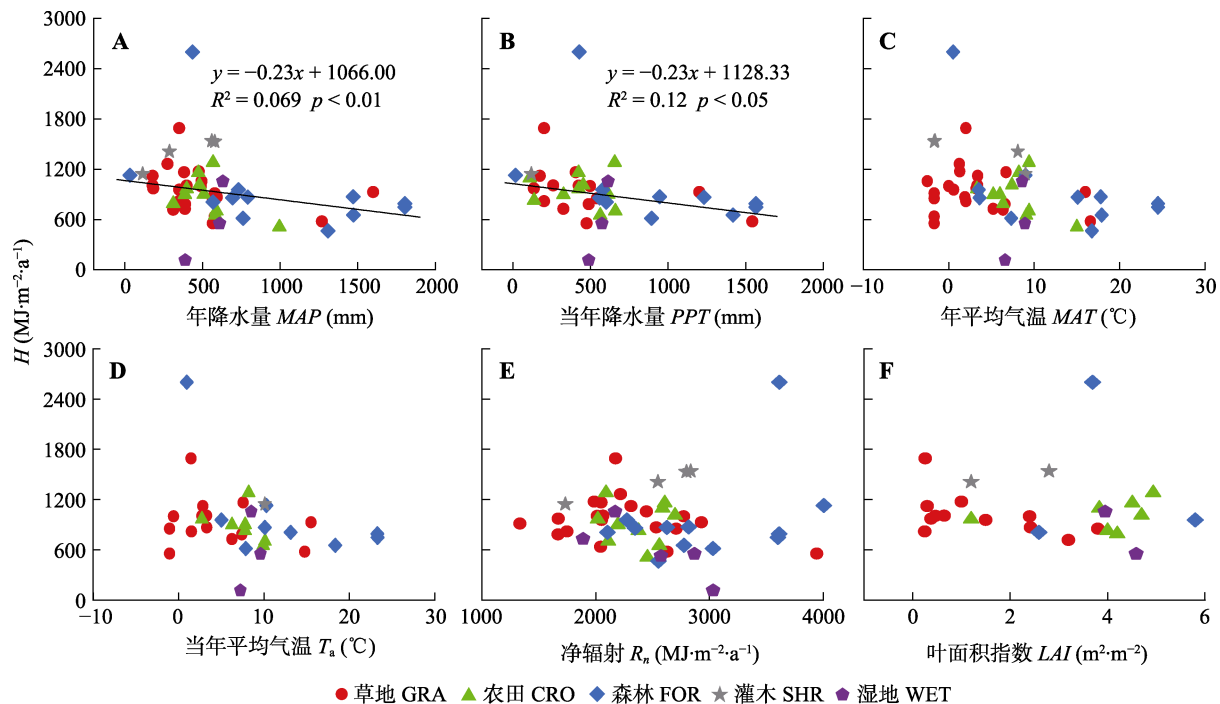


图6 中国陆地生态系统的显热通量(H)与年降水量(MAP)、当年降水量(PPT)、多年平均气温(MAT)、当年平均气温(T_a)、净辐射(R_n)和叶面积指数(LAI)之间的关系。

Fig. 6 Relationships between sensible heat flux (β) and mean annual precipitation (MAP), annual precipitation of the studied year (PPT), mean annual air temperature (MAT), mean annual air temperature of the studied year (T_a), net radiation (R_n) and Leaf Area Index (LAI) of China's terrestrial ecosystems. CRO, cropland ecosystems; FOR, forest ecosystems; GRA, grassland ecosystems; SHR, shrubland ecosystems; WET, wetland ecosystems.

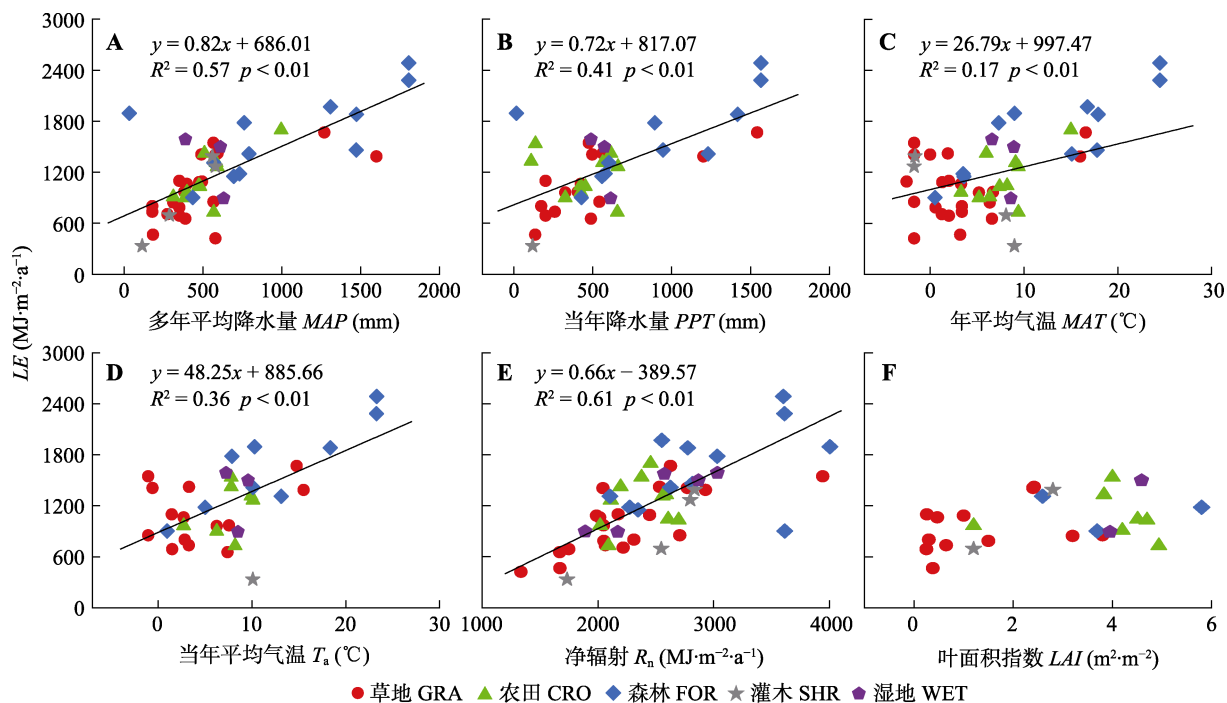


图7 中国陆地生态系统的潜热通量(LE)与年降水量(MAP)、当年降水量(PPT)、多年平均气温(MAT)、当年平均气温(T_a)、净辐射(R_n)和叶面积指数(LAI)之间的关系。

Fig. 7 The relationships between latent heat flux (LE) and mean annual precipitation (MAP), annual precipitation of the studied year (PPT), mean annual air temperature (MAT), mean annual air temperature of the studied year (T_a), net radiation (R_n) and Leaf Area Index (LAI) of China's terrestrial ecosystems. CRO, cropland ecosystems; FOR, forest ecosystems; GRA, grassland ecosystems; SHR, shrubland ecosystems; WET, wetland ecosystems.

不同生态系统的植被类型和 R_n 对 β 同样存在交互影响(R_n , $F_{1,41} = 54.31$, $p < 0.01$; 植被类型, $F_{4,41} = 11.59$, $p < 0.01$; $R_n \times$ 植被类型, $F_{4,41} = 5.61$, $p < 0.01$): 草地和灌木生态系统 β 随 R_n 增加而降低, 农田、森林和湿地生态系统 β 与 R_n 无显著相关关系(表2)。其中, 灌木生态系统中 R_n 对 β 变化的解释度高达97%, β 对 R_n 变化的敏感性也较高(R_n 每增加 $100 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 草地生态系统 β 降低0.063, 而灌木生态系统 β 降低0.21)。

气候因素对 H 和 LE 的影响也同样因生态系统的植被类型而异(表3, 表4)。 MAP 、 MAT 和 T_a 对单个生态系统中的 H 没有影响, 森林生态系统 H 随 PPT 的增加而降低, 灌木生态系统中 H 随 R_n 的增加而增加。草地、农田、森林和灌木生态系统中 LE 随 MAP 的增加而增加, 草地生态系统 LE 随 PPT 的增加而降低。 MAT 增加时, 森林和灌木生态系统 LE 呈现出两种相反的变化趋势(森林生态系统增加, 灌木生态系统降低)。而 T_a 增加时, 仅森林生态系统 LE 随之增加。 R_n 增加时, 草地、森林和湿地生态系统的 LE 随之增加。

2.2.3 生物因素

当合并所有生态系统类型数据时, β 随 LAI 的增加而降低(图5), 而 H 与 LE 与 LAI 没有显著相关性(图6, 图7)。在单个的生态系统中, 草地生态系统中 β 随 LAI 的增加而降低, 农田、森林、灌木和湿地生态系统中 β 与 LAI 无显著相关性(表2)。尽管草地生态系统和其他生态系统 β 对 LAI 的响应不同, 协方差分析的结果并未显示 LAI 和生态系统植被类型对 β 具有交互作用($p = 0.093$)。而与整体的 H 和 LE 类似, 单个生态系统 H 和 LE 对 LAI 没有响应。

2.3 气候及生物因素的直接和间接影响

结构方程的结果证明, β 受气候因素和生物因素的综合影响。 MAP 和 R_n 是 β 的直接影响因素, LAI 和 MAT 是 β 变化的间接影响因素。除直接影响以外, MAP 还通过影响 R_n 、 MAT 和 LAI 对 β 产生复杂的间接影响, 同样地, R_n 也通过影响 MAP 和 MAT 对 β 产生间接影响。 LAI 通过影响 R_n ($p < 0.01$)间接影响 β , 而 MAT 则通过对 MAP 、 R_n 和 LAI 的影响, 而间接影响 β (图8)。

3 讨论

3.1 中国典型陆地生态系统波文比变异特征

研究结果显示, β 在0.07–3.43间变化, 平均值为 0.95 ± 0.59 , H 和 LE 消耗的 R_n 近乎相等。Han等(2017)

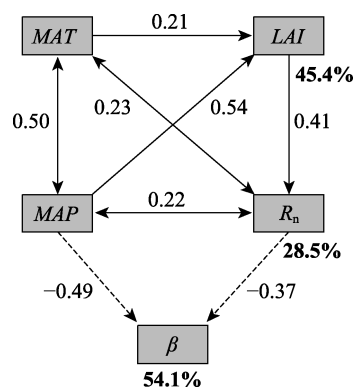


图8 年降水量(MAP)、年平均气温(MAT)、净辐射(R_n)和叶面积指数(LAI)对波文比(β)影响的路径分析图。结构方程模型(SEM)的统计结果为 $\chi^2 = 1.75$, $df = 2$, $p = 0.093$, $RMSEA = 0.038$ 。实线和虚线箭头分别代表正相关和负相关。每个箭头上的数字为标准化路径系数。粗体数字分别为 LAI 、 R_n 和 β 统计结果的解释度 R^2 。

Fig. 8 Path diagrams for the effects of mean annual precipitation (MAP), mean annual air temperature (MAT), net radiation (R_n) and Leaf Area Index (LAI). The statistical results of the structural equation model (SEM) are $\chi^2 = 1.75$, $df = 2$, $p = 0.093$, $RMSEA = 0.038$. Solid and dashed arrows represent positive and negative correlations, respectively. The figure for each arrow is the standardized path coefficient. The bold numbers are the explained variance (R^2) of LAI , R_n and β , respectively.

将全球划分为极寒带、极湿带、半湿带、半干带以及极干带等5个气候带, 对应的 β 值范围分别为 $(-\infty, 0)$, $(0, 0.5)$, $(0.5, 2)$, $(2, 10)$, $(10, +\infty)$ 。本研究包括的站点属半湿带, 部分地区属极湿带和半干带, 因此与Han等(2017)的估算基本一致。

不同生态系统类型间的 β 的差异表现为灌木林的 β 高于草地高于森林和湿地, 而农田介于草地和森林与湿地之间, 这种差异来源于生态系统间冠层结构和水分条件的不同。冠层结构能够通过影响 LAI 、地面粗糙度和地表反照率影响能量分配(Bonan, 2008; Boisier *et al.*, 2012), 与冠层结构简单的生态系统相比, 冠层结构复杂的生态系统具有更强的蒸散发和冷却效应(即更低的 β)(Juang *et al.*, 2007; Kueppers *et al.*, 2007; Li *et al.*, 2015)。而水分直接影响生态系统的蒸散发(即 LE)。我们的研究结果也证实了这一点(图5)。相对其他生态系统来说, 森林和湿地具有更复杂的冠层结构和更充足的水分条件, 因此 β 显著较低。灌木生态系统由于分布在干旱地区, 水分稀缺, 且植被覆盖度低, 冠层结构简单, 因此 β 均值最高。草地生态系统的水分条件介于灌木生态系统与森林和湿地生态系统之间, 其植被覆盖度远低于森林和湿地生态系统。由于数据样本点问题, 草地和灌木生态系统难以进行 LAI 的比较, 但从结

构方程的结果可知,水分的影响远高于叶面积指数对 β 的影响,所以在无法比较植被覆盖时,认为水分对 β 的影响占主导。因此,草地生态系统的 β 均值高于森林和湿地生态系统而低于灌木生态系统。而与草地和森林、湿地差异都不显著的农田生态系统,其 β 变异主要受人类活动影响。

3.2 中国典型陆地生态系统波文比影响因素

3.2.1 地理因素

β 随着 Lat 的增加而增加,是由 LE 与 Lat 负相关导致,因为 H 与 Lat 无显著相关关系(图4)。 Lat 的变化伴随着气候的空间变化(Zhu *et al.*, 2015),影响了生态系统类型中 β 的空间分布。张强等(2014)在黄土高原的研究表明, H 从南至北逐渐增加,而 LE 从南向北逐渐降低,即 β 从南到北增加,本文的结果与之基本一致。张强等认为, LE 随纬度的变化受夏季风降水的影响, β 随纬度的变化受夏季风降水和 R_n 的影响。我们的研究中,气候因素(MAP 、 MAT 、 R_n)随 Lat 显著变化($p < 0.01$, 结果未显示), LE 也受气候因素(MAP 、 MAT 、 R_n)的显著影响(图7)。而 LE 与气候因素的多元回归结果显示, LE 受 MAP 和 R_n 影响显著($p < 0.01$, 结果未显示), MAT 对 LE 影响不显著,因此 MAT 对 LE 的影响主要是通过 MAP 和 R_n 的协同变化实现。由此我们认为, β 在纬度方向上的变化是 MAP 和 R_n 共同作用的结果,这是由于降水充沛且净辐射较高的地区多以森林生态系统为主,具有丰富的冠层结构,气孔能够完全张开促进蒸腾和呼吸,并且有足够的能量和水分用于植被蒸腾和土壤水分蒸发,因此能量更多地分配给了 LE ,使 β 降低。

β 与 Lon 无显著相关关系,因为 H 和 LE 都不随 Lon 变化。在张强等(2014)的研究中, H 没有随 Lon 变化而变化, LE 随 Lon 的增加而增加,我们的结果与之略有不同。张强等(2014)认为, H 受 R_n 的控制, LE 受夏季风降水控制。我们的研究中,气候因素中仅降水(MAP/PPT)对 H 有显著影响, LE 受降水和净辐射综合影响,而气候因素在经度方向上并无显著变化($p > 0.05$, 结果未显示),从而导致 H 和 LE (β)不随 Lon 变化。

尽管 H 随海拔的增加而增加, LE 不随海拔变化,但是 β 并没有随海拔变化的趋势。张强等(2014)的结果显示 H 和 LE 随海拔的增加而降低,并且认为该趋势受辐射和温度的影响。而我们的研究结果中,海拔方向上 MAP 逐渐减少($p < 0.05$, 结果未显示),而 H 随 MAP 减少而增加(图6A),因此 H 随 Alt 的增加而

增加。海拔越高,温度越低,降水越稀少,越容易限制植被生长,因此森林、湿地和农田等植被组成较为丰富、生长过程中用水较多的生态系统更多分布在低海拔地区,而高海拔地区更容易分布灌木和草地生态系统(图4)。所以高海拔地区植被蒸腾和土壤蒸发较少,能量更多地用于 H 的消耗。而 LE 由于受多种气候因素影响,不随 Alt 的变化而变化,导致 β 与 Alt 没有显著相关关系。

3.2.2 气候因素

降水增加时, H 随之降低, LE 随之增加,因此 β 随之降低(图5)。张强等(2014)的研究结果也表明, H 随降水量增加而降低而 LE 随降水量增加而增加,我们的结果与之一致。在降水量较高的低纬度地区,水分充足,植被覆盖度高,土壤水分蒸发和植物蒸腾强烈,因此蒸散发耗能大, LE 消耗的 R_n 增加, H 占比减少, β 降低。SEM的结果也验证了 β 随降水增加而降低这一点(图8)。

温度增加时, H 无明显变化, LE 增加, β 随之降低(图5),这与前人的研究结果(Tang *et al.*, 2014; 张强等, 2014)相近。SEM的结果中,温度通过与降水和净辐射的相互作用以及对 LAI 的调节影响 β (图8)。温度的影响主要是通过降水实现,因为就整合的站点来说,年平均气温高的地区通常会有更多的降水和更强的蒸散发。

R_n 是SEM中另一个直接影响 β 的因素(图8), β 随着 R_n 的增加而降低(图5)。其直接影响是由于 R_n 增加时 H 不随之变化,但 LE 会随之增加。而另一方面, R_n 通过和降水、温度的相互作用影响 β ,但这种影响同样主要通过降水实现。 R_n 较高的地区通常是降水充沛、蒸散发强烈的低纬度地区,能量更多地分配给 LE ,而 H 没有随 R_n 的增加而变化的趋势。但 R_n 的直接影响效应(-0.37)与降水相比较低(图8)。

另外,不同生态系统的 β 对气候因素的响应存在很大差异(表2)。其中,森林生态系统中 β 对气候因素的变化最为敏感,当降水、温度、净辐射增加时,森林生态系统的 β 都会随之降低,而农田和湿地生态系统的 β 对气候因素的变化没有任何响应。

3.2.3 生物因素

当 LAI 增加时, β 随之降低(图5),与Jia等(2016)、Launiainen等(2016)和王佩等(2017)的研究结果相似。 LAI 主要通过增加地表反照率、粗糙度和林分蒸腾来调节能量分配(Jia *et al.*, 2016)。SEM的结果中,

LAI 通过 R_n 间接影响 β , 与Jia等(2016)的结果一致, 但是 LAI 通过 R_n 的间接影响较小, 该条路径的影响效应仅为0.15。植被能够通过改变 β 影响气候变化(Bonan, 2008; Chen & Dirmeyer, 2016), 其影响不可忽略。但在我们的研究结果中, 相比气候因素来说, 植被的作用并不突出。

4 结论

通过文献数据整合, 分析了中国典型陆地生态系统 β 变异特征及影响因素, 得到以下主要结论: (1) 中国地区 β 均值为0.95, 大多(87%)分布在0.0–1.5之间, 且 β 在5种生态系统类型之间具有显著差异($F_{4,98} = 26, p < 0.01$): 森林和湿地生态系统的 β 显著小于草地小于灌木, 而农田生态系统 β 和森林、湿地和草地之间差异都不显著; (2) 地理因素(纬度)、气候因素和生物因素都影响 β 的变化, 气候因素的影响因生态系统类型而异; (3) MAP 和 R_n 是 β 变化的直接影响因素, LAI 是 β 变化的间接影响因素, 其中降水是最主要的影响因素, 其他因素都会通过降水影响 β 。我们的研究阐明了 β 的空间分布状况以及空间格局上生物和非生物因素对其的影响, 分析得出植被类型与气候因素对 β 的影响具有交互作用。我们的结果还表明, 空间尺度上的能量分配主要受降水影响, 以及, 尽管叶面积指数对能量分配具有调节作用, 但这种调节作用并不显著。全球气候模型预测未来的降水会更加多变, 根据我们的研究结果, 未来空间尺度能量分配的格局也会更加多变, 因此, 我们需要更多的研究数据来进行更大尺度的调查和研究以加深对能量平衡和气候变化的理解。另外, 未来的研究应侧重于细化水分对能量分配的影响。

参考文献

- Boisier JP, de Noblet-Ducoudré N, Pitman AJ, Cruz FT, Delire C, van den Hurk BJJM, van der Molen MK, Müller C, Voldoire A (2012). Attributing the impacts of land-cover changes in temperate regions on surface temperature and heat fluxes to specific causes: results from the first LUCID set of simulations. *Journal of Geophysical Research*, 117, D12116. DOI: 10.1029/2011JD017106.
- Bonan GB (2008). Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science*, 320, 1444-1449.
- Bowen IS (1926). The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. *Physical Review*, 27, 779-787.
- Burakowski E, Tawfik A, Ouimette A, Lepine L, Novick D, Ollinger S, Zarzycki C, Bonan G (2017). The role of surface roughness, albedo, and Bowen ratio on ecosystem energy balance in the Eastern United States. *Agricultural and Forest Meteorology*, 249, 367-376.
- Chen L, Dirmeyer PA (2016). Adapting observationally based metrics of biogeophysical feedbacks from land cover/land use change to climate modeling. *Environmental Research Letters*, 11, 034002. DOI: 10.1088/1748-9326/11/3/034002.
- Chen SP, Chen JQ, Lin GH, Zhang WL, Miao HX, Wei L, Huang JH, Han XG (2009). Energy balance and partition in Inner Mongolia steppe ecosystems with different land use types. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149, 1800-1809.
- Chen YF, Jiang H, Zhou GM, Sun C, Chen J (2013). Energy flux and energy balance closure of intensively managed Lei bamboo forest ecosystem. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 24, 1063-1069. [陈云飞, 江洪, 周国模, 孙成, 陈健 (2013). 高效经营雷竹林生态系统能量通量过程及闭合度. 应用生态学报, 24, 1063-1069.]
- Ge J, Yu Y, Li ZC, Xie J, Liu C, Zan BL (2016). Impacts of freeze/thaw processes on land surface energy fluxes in the permafrost region of Qinghai-Xizang Plateau. *Plateau Meteorology*, 35, 608-620. [葛骏, 余晔, 李振朝, 解晋, 刘川, 咎蓓蕾 (2016). 青藏高原多年冻土区土壤冻融过程对地表能量通量的影响研究. 高原气象, 35, 608-620.]
- Grünwald T, Bernhofer C (2007). A decade of carbon, water and energy flux measurements of an old spruce forest at the Anchor Station Tharandt. *Tellus*, 59(B), 387-396.
- Han B, Lü SH, Li RQ, Wang X, Zhao L, Zhao CL, Wang DY, Meng XH (2017). Global land surface climate analysis based on the calculation of a modified Bowen ratio. *Advances in Atmospheric Sciences*, 34, 663-678.
- He XM, Qin L, Lü GH, Yang JJ, Gong YM, Yang XD (2017). Surface energy balance of an arid desert wetland in Ebinur Lake basin, Xinjiang, China. *Chinese Journal of Ecology*, 36, 309-317. [何学敏, 秦璐, 吕光辉, 杨建军, 公延明, 杨晓东 (2017). 新疆艾比湖流域干旱荒漠区湿地地表能量收支特征. 生态学杂志, 36, 309-317.]
- Jia X, Zha TS, Wu B, Zhang YQ, Qin SG, Chen GP, Feng W, Kellomäki S, Peltola H (2016). Energy partitioning over a semi-arid shrubland in northern China. *Hydrological Processes*, 30, 972-985.
- Jo YH, Yan XH, Pan JY, Liu WT, He MX (2004). Sensible and latent heat flux in the tropical Pacific from satellite multi-sensor data. *Remote Sensing of Environment*, 90, 166-177.
- Juang JY, Katul G, Siqueira M, Stoy P, Novick K (2007). Separating the effects of albedo from eco-physiological changes on surface temperature along a successional chronosequence in the southeastern United States. *Geophysical Research Letters*, 34, L21408. DOI: 10.1029/

- 2007GL031296.
- Kueppers LM, Snyder MA, Sloan LC (2007). Irrigation cooling effect: regional climate forcing by land-use change. *Geophysical Research Letters*, 34, L03703. DOI: 10.1029/2006GL028679.
- Launiainen S (2010). Seasonal and inter-annual variability of energy exchange above a boreal Scots pine forest. *Biogeosciences*, 7, 3921-3940.
- Launiainen S, Katul GG, Kolari P, Lindroth A, Lohila A, Aurela M, Varlagind A, Grelle A, Vesala T (2016). Do the energy fluxes and surface conductance of boreal coniferous forests in Europe scale with leaf area? *Global Change Biology*, 22, 4096-4113.
- Li Y, Zhao M, Motesharrei S, Mu Q, Kalnay E, Li S (2015). Local cooling and warming effects of forests based on satellite observations. *Nature Communications*, 6, 6603. DOI: 10.1038/ncomms7603.
- Liu S, Li SG, Yu GR, Sun XM, Zhang LM, Hu ZM, Li YN, Zhang XZ (2009). Surface energy exchanges above two grassland ecosystems on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Biogeosciences Discussions*, 6, 9161-9192.
- Matsumoto K, Ohta T, Nakai T, Kuwada T, Daikoku K, Iida S, Yabuki H, Kononov AV, Molen MK, Kodama Y, Maximov TC, Dolman AJ, Hattori S (2008). Energy consumption and evapotranspiration at several boreal and temperate forests in the Far East. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148, 1978-1989.
- Morwal SB, Narkhedkar SG, Padmakumari B, Maheskumar RS, Deshpande CG, Kulkarni JP (2017). Intra-seasonal and inter-annual variability of Bowen ratio over rain-shadow region of north peninsular India. *Theoretical and Applied Climatology*, 128, 835-844.
- Ryu Y, Baldocchi DD, Ma S, Hehn T (2008). Interannual variability of evapotranspiration and energy exchange over an annual grassland in California. *Journal of Geophysical Research*, 113, D09104. DOI: 10.1029/2007JD009263.
- Sun C (2014). *The Study on the CO₂ Flux and Energy Balance Variations in a Phyllostachys edulis Forest Ecosystem*. PhD dissertation, Zhejiang A&F University, Lin'an, Zhejiang. [孙成 (2014). 毛竹林生态系统CO₂通量和能量平衡的观测研究. 博士学位论文, 浙江农林大学, 浙江临安.]
- Tang YK, Wen XF, Sun XM, Wang HM (2014). Interannual variation of the Bowen ratio in a subtropical coniferous plantation in southeast China, 2003-2012. *PLOS ONE*, 9, e88267. DOI: 10.1371/journal.pone.0088267.
- Wang P, Ma QS, Wang JQ, Huang JY, Li W, Zhang CC (2017). Comparison of evapotranspiration and Bowen ratio method by eddy correlation and Bowen ratio system in a temperate grassland. *Acta Agrestia Sinica*, 25, 453-459. [王佩, 马琪顺, 王家琪, 黄洁钰, 李炜, 张赐成 (2017). 温带草地蒸散发及波文比观测与比较: 涡动相关及波文比系统. 草地学报, 25, 453-459.]
- Xia L, Zhang Q (2014). Plateau surface energy balance components and interannual variability in response to climate fluctuations. *Acta Physica Sinica*, 63(11), 119-201. [夏露, 张强 (2014). 黄土高原地表能量平衡分量年际变化及其对气候波动的响应. 物理学报, 63(11), 119-201.]
- Yuan WW, Tong XJ, Zhang JS, Meng P, Li J, Zheng N (2015). Characteristics of energy balance of a mixed plantation in the Xiaolangdi area in the growing season. *Acta Ecologica Sinica*, 35, 4492-4499. [原文文, 同小娟, 张劲松, 孟平, 李俊, 郑宁 (2015). 黄河小浪底人工混交林生长季能量平衡特征. 生态学报, 35, 4492-4499.]
- Yue P, Zhang Q, Yang JH, Li HY, Sun XY, Yang QG, Zhang JZ (2011). Surface heat flux and energy budget for semi-arid grassland on the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 31, 6866-6876. [岳平, 张强, 杨金虎, 李宏宇, 孙旭映, 杨启国, 张建忠 (2011). 黄土高原半干旱草地地表能量通量及闭合率. 生态学报, 31, 6866-6876.]
- Yue P, Zhang Q, Yang Y, Zhang L, Zhang HL, Hao XC, Sun XY (2018). Seasonal and inter-annual variability of the Bowen smith ratio over a semi-arid grassland in the Chinese Loess Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 252, 99-108.
- Zhang Q, Zhang L, Huang J, Zhang LY, Wang WY, Sha S (2014). Spatial distribution of surface energy fluxes over the Loess Plateau in China and its relationship with climate and the environment. *Science China: Earth Sciences (Chinese Version)*, 44, 2062-2076. [张强, 张良, 黄菁, 张立阳, 王文玉, 沙莎 (2014). 我国黄土高原地区陆面能量的空间分布规律及其与气候环境的关系. 中国科学: 地球科学(中文版), 44, 2062-2076.]
- Zhang X, Liu XQ, Zhang LF, Niu B, Zhao L, Gu S (2017). Energy balance of an artificial grassland in the Three-River Source Region of the Qinghai-Tibet Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 37, 4973-4983. [张翔, 刘晓琴, 张立锋, 牛犇, 赵亮, 古松 (2017). 青藏高原三江源区人工草地能量平衡的变化特征. 生态学报, 37, 4973-4983.]
- Zhu Gf, Lu L, Su YH, Wang XF, Cui X, Ma JZ, He JH, Zhang K, Li CB (2014). Energy flux partitioning and evapotranspiration in a sub-alpine spruce forest ecosystem. *Hydrological Processes*, 28, 5093-5104.
- Yu GR, Zhu XJ, Fu YL, He HL, Wang QF, Wen XF, Li XR, Zhang LM, Zhang L, Su W, Li SG, Sun XM, Zhang YP, Zhang JH, Yan JH, et al. (2013). Spatial patterns and climate drivers of carbon fluxes in terrestrial ecosystems of China. *Global Change Biology*, 19, 798-810.

责任编辑: 陈世苹 编辑: 赵航