

DOI: 10.20103/j.stxb.202405281241

朱躲萍, 姚斌, 王军邦. 青藏高原草地年均波文比特征及其影响因素. 生态学报, 2025, 45(8): 4046-4058.

Zhu D P, Yao B, Wang J B. Characteristics of annual mean Bowen ratio in grassland on the Qinghai-Tibetan plateau and its influencing factors. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(8): 4046-4058.

青藏高原草地年均波文比特征及其影响因素

朱躲萍^{1,2,3}, 姚斌^{1,2,4}, 王军邦^{3,*}

1 中国林业科学研究院生态保护与修复研究所, 北京 100091

2 中国林业科学研究院荒漠化研究所, 北京 100091

3 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 生态系统大数据与模拟中心, 北京 100101

4 中国林业科学研究院生态保护与修复研究所, 林木遗传与育种国家重点实验室, 北京 100091

摘要: 波文比(β)表征陆面过程中的重要参数,能反映土壤、植被和大气之间的能量平衡和分配过程,是植被变化的生物地球物理效应研究的热点。选择青藏高原作为研究区,基于全球尺度双源遥感蒸散发模型 ARTS (air-relative-humidity-based two-source) 模拟的蒸散数据和 GLASS 的反照率数据计算 2000—2018 年均 β 。利用随机森林、结构方程模型和多元线性回归方法,结合气候因素(年总降水、年均温度、年均地表反照率)和植被因素(年均归一化植被指数),分析年均 β 的时空变化的主导因子。结果表明,2000—2018 年,青藏高原平均 β 值为 1.25 ± 0.60 , 范围为 0.32—4.83, 空间分布由东南向西北逐渐增大,荒漠类的平均 β 最高 (1.84 ± 0.44), 而热性草丛的平均 β 最低 (0.49 ± 0.09), 年均 β 呈不显著的微弱下降趋势。基于三种方法均表明降水对整个区域年均 β 的时空变化起主导作用。青藏高原区域的暖湿化以及植被的变化对年均 β 有负的影响。明显的气候变暖和降水量的增加为蒸散提供了有利的条件,植被变好使蒸散增加,以潜热形式分配的能量更多,导致年均 β 呈下降趋势。研究揭示了气候变化下植被恢复的生物地球物理机制,并论证了 β 在生态系统评价中可作为气候调节功能的指标。

关键词: 青藏高原; 波文比; 草地; 气候因素; 植被因素

Characteristics of annual mean Bowen ratio in grassland on the Qinghai-Tibetan plateau and its influencing factors

ZHU Duoping^{1,2,3}, YAO Bin^{1,2,4}, WANG Junbang^{3,*}

1 Institute of Ecological Conservation and Restoration, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

2 Institute of Desertification Studies, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

3 National Ecosystem Science Data Center, Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

4 State Key Laboratory of Tree Genetics and Breeding, Institute of Ecological Conservation and Restoration, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

Abstract: The Bowen ratio (β) is an important parameter for characterizing land surface processes, reflecting the energy balance and partitioning among soil, vegetation and the atmosphere, and it is a hotspot in the research on the biogeophysical effects of vegetation changes. In this study, the Qinghai-Tibetan plateau was chosen as the study area, utilizing evapotranspiration data obtained from the global-scale ARTS (air-relative-humidity-based two-source) remote sensing evapotranspiration model and albedo data derived from GLASS, we determined the annual mean β values spanning 2000 to

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31971507); 青海省“帅才科学家负责制”项目(2024-SF-102); 中国林业科学研究院院基金重点项目(CAFYBB2023ZA010)

收稿日期: 2024-05-28; **网络出版日期:** 2025-01-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jbwang@igsrr.ac.cn

2018. Using random forests, structural equation modelling and multivariate linear regression methods, we combined the climatic factors (annual total precipitation (MAP), mean annual temperature (MAT), mean annual albedo (MAA)) and vegetation factors (mean annual Normalized Difference Vegetation Index (MAN)) to analyze the dominant factors in the spatial and temporal variations of mean annual β . The findings indicated that between 2000 and 2018, the mean β value for the Qinghai-Tibetan plateau was 1.25 ± 0.60 , ranging from 0.32 to 4.83, with spatial distribution progressively increasing from the southeast to the northwest. The desert class exhibited the highest average β value (1.84 ± 0.44), whereas the Tropical tussock displayed the lowest average β value (0.49 ± 0.09). The mean annual β showed a weak decreasing trend that was not significant. Based on all three methods, it was shown that precipitation dominated the spatial and temporal variations of annual mean β across the region. Rising temperatures and increased humidity in the Qinghai-Tibetan plateau, along with vegetation shifts, exert a negative influence on the mean annual β . Significant warming and increased precipitation provide favourable conditions for evapotranspiration, and better vegetation increases evapotranspiration and allocates more energy in the form of latent heat, leading to a decreasing trend in mean annual β . This study reveals the biogeophysical mechanism of vegetation restoration under climate change and demonstrates that β can be used as an indicator of climate regulation function in ecosystem evaluation.

Key Words: Qinghai-Tibetan plateau; Bowen ratio; grassland; climate factors; vegetation factors

自工业革命以来,持续排放的温室气体显著加剧了温室效应,导致陆地表面温度持续上升。陆地生态系统通过生物物理和生物化学反馈机制对气候变化做出响应,导致产生区域效应(如变暖效应)^[1-5]。土地利用和植被退化与恢复将改变生态系统的物理性质^[6],如地表反照率、净辐射和地面粗糙度,进一步改变生态系统与大气之间的能量和水通量交换,从而对局地 and 区域气候产生影响。植被通过生物物理过程影响气候的研究在以往较少^[7]。这给减缓气候变化的未来战略的制定带来了不确定性。可用能量的消耗为显热通量使地表空气变暖,而作为潜热通量的能量消耗(相当于蒸散发)则缓解了这种增温效应^[8-9]。 β 是地表能量平衡的重要组成部分,定义为感热通量(H)与潜热通量(λET)之比^[10],反映了土壤、植被和大气之间的能量平衡和分配过程,并被视为解释生态系统对气候变化反馈的关键生物物理过程参数^[11]。因此,了解 β 的变化特征及其影响因素,有助于我们对生态系统中生物物理过程的理解,并为评估生物物理反馈对气候变化的影响提供参考。

近年来,许多研究使用涡度协方差技术测量不同生态系统与大气之间的能量,研究时间尺度上 β 的影响因素,且目前的研究关于地理因素、气候因素和植被因素与 β 的关系存在较大不确定性。Sun等指出气候型植被在中国陆地生态系统 β 空间格局中占主导地位^[12]。黄等指出 β 在中国的空间变化主要受年平均降水量的影响^[13]。Tang等指出空气温度主导中国东南部亚热带针叶人工林 β 的际年变化^[14]。也有研究表明生理因素(植被表面阻力)主导了温带不同森林类型之间的 β 差异。环境因素主导东亚不同森林类型间 β 的差异^[9]。 β 也受净辐射^[15]、地表气温^[16]、生物群落^[17]、水汽压差^[18]以及土壤水分等^[19]因素的影响。然而,在空间尺度上,植被变化对能量交换影响的生物地球物理反馈研究较少。

青藏高原是我国重要的生态屏障^[20],有“世界第三极”之称,不仅是气候变化的敏感区,也是生态环境脆弱区^[21-22]。青藏高原最主要的生态系统是草地生态系统,约占其总面积的60%以上^[23-24]。近年来,由于人类自然因素的影响,青藏高原区域正面临着严重的草地退化(如植被的变化)^[25-27]。因此,青藏高原是研究植被变化的理想地点。本研究基于ARTS模型模拟的蒸散数据,从气候和植被两个方面分析青藏高原地区年均 β 的时空变化及其主导因素。了解植被变化与当地气候之间的反应机制,并且为科学理解生态系统对区域气候的反馈提供依据。

1 研究区概况

被誉为“世界第三极”的青藏高原,位于 $26^{\circ}50' - 39^{\circ}19'N, 78^{\circ}27' - 104^{\circ}43'E$ 。青藏高原的平均海拔4000 m

以上。草地生态系统是青藏高原的主体生态系统类型。草地主要类型被分为热性草丛、暖性草丛、草甸草原、高寒草甸、典型草原、高寒草原、荒漠类^[28](图 1)。青藏高原的气候类型丰富,且主要是高寒山地气候类型。青藏高原降水量和气温均自东南向西北逐渐减少,年总降水量主要集中在 400—700 mm。年均温 0 °C 以下。整体上,青藏高原东南部暖热湿润,西北部寒冷干旱。

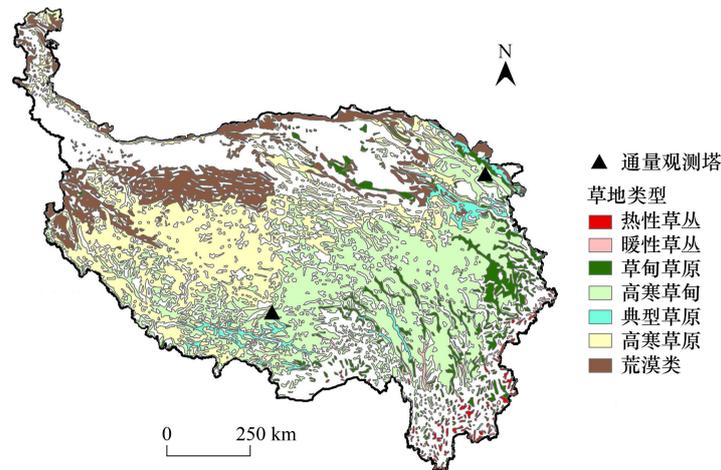


图 1 青藏高原地理位置及主要草地类型

Fig.1 Geographic location and major grassland types on the Qinghai-Tibetan Plateau

2 材料与方法

2.1 数据来源与处理

2.1.1 气象数据

利用全国和周边国家气象观测站点 (<http://data.cma.cn/>),经过空间插值得到 2000—2018 年的空间数据。这些数据具有 1 km 的空间分辨率和 8 d 的时间分辨率,包括最高、最低气温和降水量。空间插值采用了光滑薄板样条 (ANUSPLINE) 插值^[29—30]。研究表明,ANUSPLINE 插值出的数据分别能解释 94% 和 77% 的气温和降水的空间变异,明显优于其他方法^[31]。插值过程中主要考虑了经纬度和高程对各气候要素的影响。采用 90 m 空间分辨率的 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) 数字高程模型 (DEM) 数据^[32],经过重采样为 1 km,用作插值的辅助数据。

2.1.2 植被指数和地表反照率

年均归一化植被指数 (MAN),是利用 2000—2018 年 250 m 空间分辨率的 MODIS 波段反射率数据产品 (MOD09Q1) 计算而得。通过 TIMESAT 对 MAN 进行 SG 滤波^[33—34],以消除云等对 MAN 数据的影响,将数据裁剪为 1 km。年均地表反照率数据 (MAA) 来自 GLASS 数据集,空间分辨率为 1 km^[35—36]。

2.2 计算方法

2.2.1 蒸散计算

ARTS (air-relative-humidity-based two-source) 模型是基于冠层导度的双源蒸散发模型^[37]。模型以植被 P-M 为基础,考虑植被蒸腾和土壤蒸发。模型以气象数据和卫星遥感数据作为输入,模拟土壤水分充足条件下的蒸散发。计算实际蒸散量 E_a 、植被蒸腾量 E_n 和土壤蒸发量 E_s ^[38]。

$$E_a = E_n + E_s \quad (1)$$

$$E_n = \frac{\Delta A_n + \rho C_p D G_a}{\Delta + \gamma (1 + G_a / G_c)} \quad (2)$$

$$G_c = g_{smax} \times R_h \times L_{ai} \quad (3)$$

$$E_s = 1.35 \times \frac{\Delta A_s}{\Delta + \gamma} \quad (4)$$

式中, A_n 是冠层吸收的可用能量, A_s 为土壤吸收的可用能量, γ 为空气湿度常数, Δ 为饱和蒸汽压与空气温度的比值, D 为饱和水汽压差, ρ 是空气的密度, C_p 是空气在恒压下的比热, G_a 为空气动力学导度, G_c 是占植被蒸腾量的冠层导度, R_h 为相对湿度, g_{\max} 为最大气孔导度, 假设其值为 12.2 mm/s, L_{ai} 是用于将气孔导度换算为冠层导度的叶面积指数。

$$P = P_r + S_n \times S_f \quad (5)$$

$$S_f = \begin{cases} 0, & T_a < 0^\circ\text{C} \\ 0.2 T_a, & 0^\circ\text{C} < T_a \leq 5^\circ\text{C} \\ 1, & T_a > 5^\circ\text{C} \end{cases} \quad (6)$$

$$ET = \begin{cases} E_a, & P \geq E_a \\ P + \mu(E_a - P), & P < E_a \end{cases} \quad (7)$$

$$\mu = \frac{W - W_p}{W_c - W_p} \quad (8)$$

$$\lambda ET = \lambda \times ET \quad (9)$$

式中, W 是瞬时土壤含水量 (mm), P 是降水量 (mm), 包括降雨和融雪, ET 是蒸散发 (mm), P_r 是降雨量 (mm), S_n 融雪 (mm), S_f 是融雪因素, T_a 是空气温度 ($^\circ\text{C}$), E_a 为水分充足地表的总蒸散量 (mm), 在前面的式 (1) 中定义。 μ 为土壤水系数, 定义为土壤有效含水量 ($W - W_p$) 与最大土壤含水量 ($W_c - W_p$) 之比, W_c 为田间容量 (mm), W_p 为萎蔫点土壤含水量 (mm)。 λ 为潜热传递系数, 数值为 2.45 (MJ/kg)

下垫面得到的地表净辐射主要通过下垫面与低层大气之间进行的热交换 (感热), 下垫面上的水分蒸发或者植物蒸腾和凝结所吸收或释放的潜热 (λET), 下垫面与下层土壤间热交换 (G) 达到平衡, 由于土壤热通量 G 年际波动的变异性较小, 可忽略不计。

$$R_n = G + H + \lambda ET \quad (10)$$

式中, 感热根据类比欧姆定律的一维模型应用于 Penman-Monteith 方程计算^[39]:

$$H = \frac{\rho C_p (T_a - T_b)}{\gamma_a} \quad (11)$$

式中, T_a 是表面温度, T_b 是边界层空气温度, γ_a 为大气阻抗和额外阻抗之和。

2.2.2 波文比

$$\beta = \frac{H}{\lambda ET} \quad (12)$$

波文比 (β) 被定义为感热与潜热的比值, 表征潜热和感热对净辐射贡献的参数。本研究使用的蒸散数据与 Cui 等的相同^[38], 用通量塔观测数据对遥感数据进行检验。根据海北灌丛站 2003—2005 年和内蒙古草原站 2004—2005 年的气象资料, 利用气象站资料模拟的蒸散发验证结果表明, ARTS 模型模拟的蒸散发与通量塔数据拟合较好, 呈极显著的线性相关, 模型模拟的蒸散发与海北灌丛站的 R^2 为 0.80 ($P < 0.001$), 而与内蒙古草原站的 R^2 为 0.87 ($P < 0.001$), 表明模型模拟的蒸散发数据对通量塔观测的蒸散发变化具有 80% 以上的解释力。本研究中通过计算得到的年均 β 数据的空间分辨率为 1 km。

2.2.3 随机森林回归

随机森林算法最早是在 2001 年由 L. Breiman 提出, 主要用于解决分类和回归的问题, 是通过集成学习思想将多棵决策树集成的一种机器学习算法。随机森林算法能提高预测能力, 具有抗拟合能力, 模型的泛化能力强, 参数优化简单^[40]。本研究基于年均 β 空间变化的影响因子分析, 选择年总降水量 (MAP)、年均气温 (MAT)、年均地表反照率 (MAA) 和年均归一化植被指数 (MAN) 四个变量, 构建随机森林回归模型, 对变量重

要性进行评估,判断各因子对年均 β 空间变化的贡献率^[41]。基于 Python 实现随机森林回归模型,变量重要性 X 按以下计算^[42]:

$$X = \sum (E_1 - E_2) / N_{\text{tree}} \quad (13)$$

式中, E_1 为每一棵树对应的袋外数据误差, E_2 为对袋外数据的变量加入噪声干扰,重新排序和再次计算的袋外数据误差, N_{tree} 为随机森林测试样本。

2.2.4 结构方程模型

结构方程模型 (SEM) 是根据变量之间的相关系数或协方差矩阵来分析自变量对因变量的直接或间接影响的统计方法,本研究基于随机森林得到年均 β 空间变化的归因结果,使用 R 语言中的 Lavaan 软件包建立结构方程模型(以下关系式)^[43],评估 MAP、MAT、MAA 和 MAN 对年均 β 的直接和间接影响。选择卡方值、 P 值和 GFI 值来评价模型的拟合优度^[12]。

$$\beta \sim \text{MAP} + \text{MAN} + \text{MAA} \quad (14)$$

$$\text{MAA} \sim \text{MAN} + \text{MAP} + \text{MAT} \quad (15)$$

$$\text{MAN} \sim \text{MAP} + \text{MAT} \quad (16)$$

$$\text{MAP} \sim \text{MAT} \quad (17)$$

2.2.5 多元线性回归

本研究在像元水平进行多元线性回归分析^[44],确定气候因素 (MAP、MAT 和 MAA) 和植被因素 (MAN) 对年均 β 的影响程度。多元线性回归方程如下式:

$$\beta = a_1 \text{MAP} + a_2 \text{MAT} + a_3 \text{MAA} + a_4 \text{MAN} + a_0 \quad (18)$$

式中, β 为年均波文比,MAP、MAT、MAA 和 MAN 分别为年总降水量、年平均温度、年平均反照率和年平均归一化植被指数。为了比较不同自变量的相对贡献,数据被逐像元进行归一化。 a_1 、 a_2 、 a_3 和 a_4 表征归一化回归系数, a_0 为截距。采用回归方程的多重相关系数 R^2 和显著性水平 P 来确定拟合回归方程的性能。

3 结果与分析

3.1 波文比空间格局

青藏高原地区多年平均波文比(β)从东南向西北递增的空间格局(图2)。2000—2018年,青藏高原区

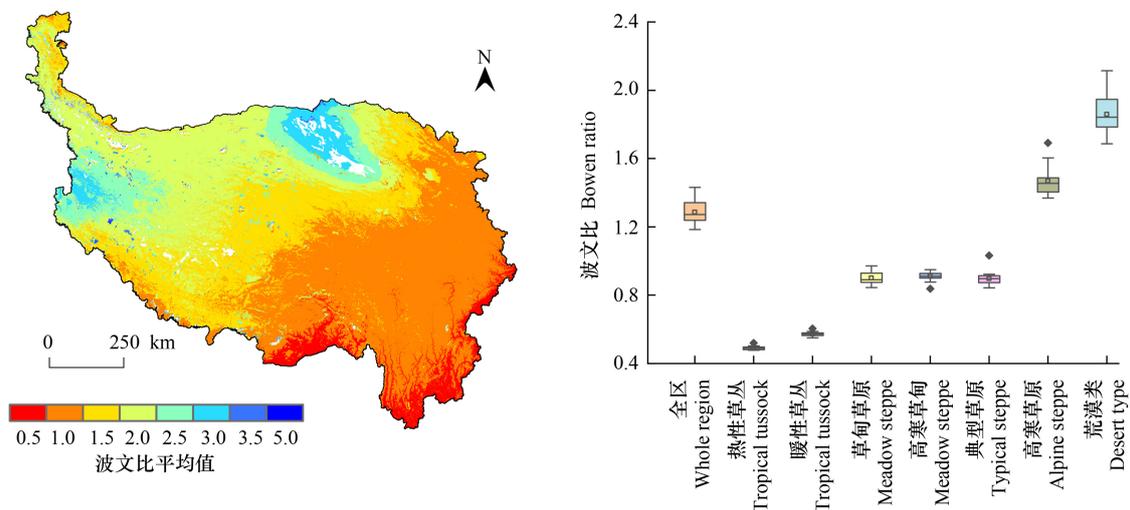


图2 2000—2018年平均波文比空间分布与不同草地平均波文比的统计特征

Fig.2 Spatial distribution of mean Bowen ratio from 2000 to 2018 and statistical characteristics of mean Bowen ratios for different grasslands

域的平均 β 在0.32—4.83之间,多年均值为 1.25 ± 0.60 (图2),潜热的能量分配大于感热。多年平均 β 值在荒漠类>高寒草原>高寒草甸>典型草原>草甸草原>暖性草丛>热性草丛7种草地类型间存在显著差异。荒漠类的多年平均 β 最高(1.84 ± 0.44),感热的能量是潜热的1.84倍。其次是高寒草原的多年平均 β 均值为 1.47 ± 0.39 。草甸草原、高寒草甸和典型草原的多年平均 β 均值接近,分别为 0.89 ± 0.55 、 0.91 ± 0.26 和 0.90 ± 0.21 。热性草丛和暖性草丛的 β 接近,分别为 0.49 ± 0.09 和 0.57 ± 0.11 。7种草地类型 β 多年均值为 1.22 ± 0.52 。只有荒漠类和高寒草原的多年平均 β 值高于青藏高原全区的(图2)。

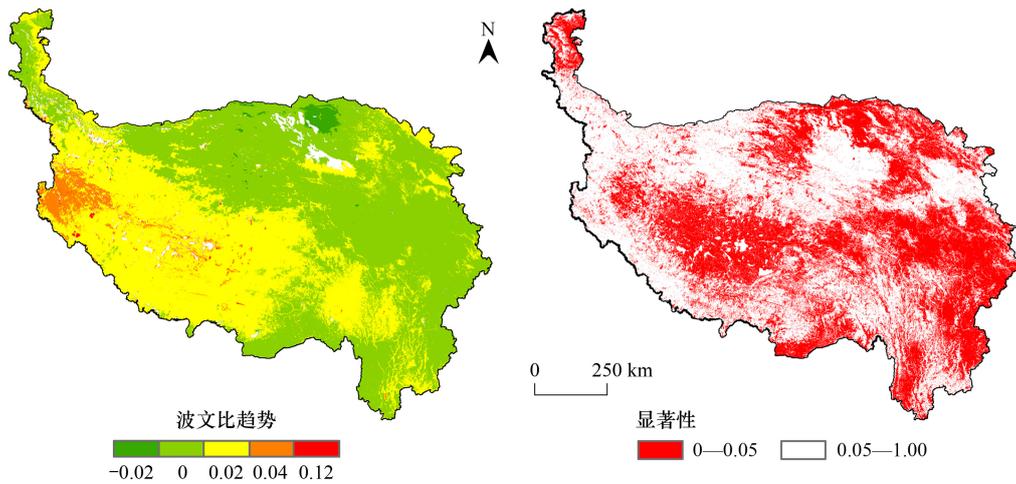


图3 2000—2018年波文比空间变化趋势与显著性

Fig.3 Spatial trend of Bowen ratio changes and significance from 2000 to 2018

3.2 波文比年际变化趋势

2000—2018年,全区的年均 β 呈下降趋势($R^2=0.09$, $P=0.78$)。年均 β 呈上升下降趋势的面积接近,分别占比48%和52%。其中显著增加趋势的区域占全区面积的15.41%,主要分布在全区的西南地区,显著减少的地区占13.18%,主要分布在全区的东北地区(图3)。全区年均 β 均大于1(图4),表明青藏高原区域感热通量大于潜热通量。青藏高原区域 β 年际变化呈现微弱的不显著下降趋势,表明在研究期间,地表净辐射分配为感热的量在减少,而分配为潜热的量在增加。7种草地类型中,高寒草甸、典型草原、高寒草原和荒漠类均呈微弱上升趋势,但只有典型草原的上升趋势是显著的,热性草丛、暖性草丛和草甸草原呈现微弱的不显著下降趋势(表1,图4)。

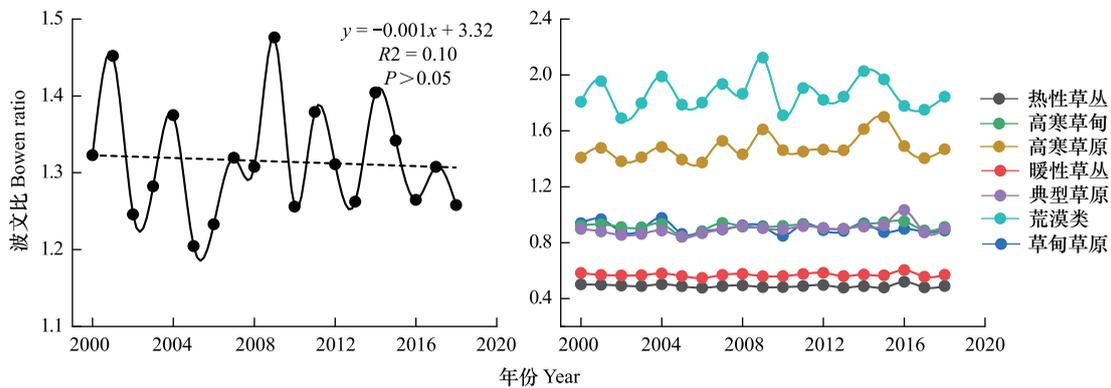


图4 2000—2018年青藏高原区域及不同草地类型年均波文比年际变化趋势

Fig.4 Interannual variation trends of annual mean Bowen ratio in the Qinghai-Tibetan Plateau region from 2000 to 2018 and among different grassland types

表 1 2000—2018 年青藏高原区域及不同草地类型年均波文比变化趋势

Table 1 The annual mean Bowen ratio variation trends in the Qinghai-Tibetan Plateau region and among different grassland types from 2000 to 2018

类型 Type	趋势 Slope	决定系数 R^2	显著性 P
全区 Whole region	-0.001	0.09	0.78
热性草丛 Tropical tussock	-0.001	0.04	0.44
暖性草丛 Warm tussock	-0.0002	0.01	0.74
草甸草原 Meadow steppe	-0.002	0.12	0.14
高寒草甸 Alpine meadow	0.001	0.01	0.61
典型草原 Typical steppe	0.004	0.27	0.023
高寒草原 Alpine steppe	0.006	0.16	0.09
荒漠类 Desert type	0.001	0.003	0.83

3.3 影响年均波文比的因素分析

3.3.1 随机森林回归分析

基于随机森林对青藏高原全区和 7 个草地类型年均波文比的空间变化进行归因分析(图 5),结果表明,MAP 对全区年均 β 空间变异的贡献率最大(40%),其次是 MAN(36%),MAT 的贡献率最低(9%)。气候因子解释了年均波文比的 64% 的空间变化(图 5)。不同植被类型间年均 β 空间变异的主导因子存在差异,但气候因素对各草地类型的年均波文比的空间变化能解释 50% 以上,除了典型草原。在 MAP 和 MAN 高的热性草丛和暖性草丛区域, MAT 主导年均 β 的空间变异,贡献率分别为 79% 和 72%。在草甸草原和高寒草原中, MAP 主导年均 β 的空间变化,贡献率分别为 40% 和 59%。然而,在植被稀疏的地区,如高寒草甸、典型草原和荒漠类中, MAN 在年均 β 的空间变化中起主导作用。

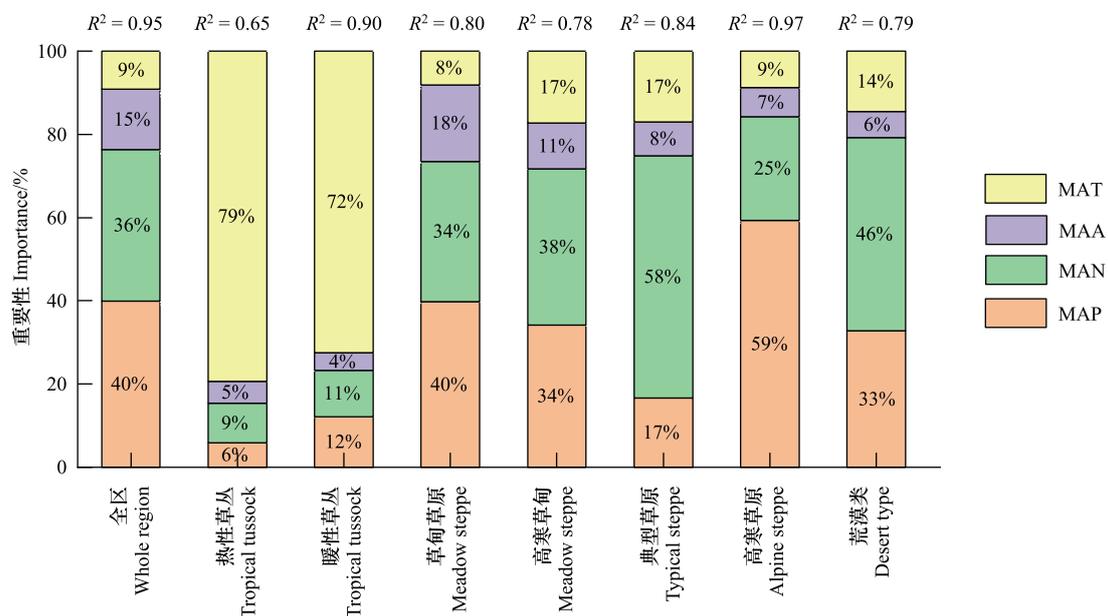


图 5 青藏高原区域及不同草地类型的年均波文比的影响因子的重要性

Fig.5 Importance of factors influencing annual mean Bowen's ratio in the Qinghai-Tibetan Plateau region and different grassland types

MAP:年总降水量 Annual total precipitation; MAT:年均气温 Mean annual temperature; MAA:年均地表反照率 Mean annual albedo; MAN:年均归一化植被指数 Mean annual normalized difference vegetation index

3.3.2 结构方程模型分析

图 6 为参考随机森林重要性排序结果,构建了波文比时间上的影响因素的结构方程模型,模型的解释能力为 0.39 ($P < 0.05$)。研究发现, β 的年际变化受气候因素(MAP、MAT 和 MAA)和植被因素(MAN)的综合影响。与主导年均 β 空间变化的因素一样,MAP 是 β 的年际变化的主导因素(-0.41),其次是 MAN(-0.39),再是 MAA(-0.31),这三个因素也是影响 β 的直接影响。随着 MAP、MAN 和 MAA 降低,年均 β 会升高。除去直接影响外,MAT 变暖驱动植被恢复(0.06),并通过植被绿化导致反照率降低对年均 β 产生间接的影响。MAT 通过影响 MAA(0.16)和 MAP(-0.55)对年均 β 产生间接影响(图 6)。

3.3.3 多元线性回归结果

采用多元线性回归分析,探讨气候因子(MAP、MAT 和 MAA)和植被因子(MAN)对年均波文比时空变化的影响。在 85.50%的置信水平下,这 4 个因子可以解释全区域年均 β 时空变化的 47%。此外,气候因子和植被因子对年均 β 均有负向影响。基于多元线性回归的结果与随机森林和结构方程模型一致。在整个区域尺度上,MAP 对年均 β 时空变化的影响最大,其标准化回归系数为-0.26,其次是 MAT(-0.21)、MAA(-0.19)和 MAN(-0.03)。 R^2 大于 0.7 的主要分布在热性草丛、暖性草丛、高寒草甸和草甸草原上(图 7)。典型草原、高寒草原和荒漠类主要分布区,气候因子和植被因子对年均 β 的变异影响不显著(图 7)。4 个因子中,MAP 主导青藏高原区域年均 β 变异的面积接近 50%,MAT 和 MAA 主导全区年均 β 的变化的面积比较接近,分别为 23.75%和 23.07%。然而,MAN 主导年均 β 变化的面积最少,占比为 7.80%(图 7)。在比较干旱且降水量下降的西南,MAP 主导高寒草原和荒漠类年均 β 的时空变化。MAT 主导热性草丛、暖性草丛、草甸草原和高寒草甸的时空变化。MAA 主导典型草原年均 β 的时空变化(图 7)。

图 7 展示了各因素年际变化对年均 β 时空变化的影响。降水上升趋势主导年均 β 下降趋势占比最大,为 24.87%。降水下降导致年均 β 上升趋势,占比 21.63%。降水趋势变化导致年均波文比的趋势变化主要分布在青藏高原西南部的荒漠类和高寒草原上(图 7,表 2),表明降水量趋势和波文比趋势存在负响应(图 3,表 1)。气温上升导致年均 β 下降主要分布在热性草丛、暖性草丛、草甸草原和高寒草甸上,占全区面积的 22.30%。气温上升趋势仅与高寒草甸年均 β 趋势存在正响应,与其他三草地类型趋势存在负响应,表明随着气温的增加,年均 β 在下降,但是高寒草甸的年均波文比呈上升趋势(表 1)。MAA 下降主导年均 β 的时空变化,占全区面积的 20.49%,且存在负响应,主要分布在典型草原上(图 7,表 2),表明 MAA 下降导致了典型草原年均 β 上升趋势(表 1)。MAN 上升趋势占 4.24%,主要主导全区东北部的高寒草甸,典型草原和荒漠类的年均 β 下降趋势(图 7)。

图 8 展示了 2000—2018 年气候因素(MAP、MAT 和 MAA)和植被因素(MAN)的趋势与年均 β 的趋势的密度图和线性回归的拟合线。MAP 和 MAN 的趋势与年均 β 的趋势呈显著的负相关,在 MAP 和 MAN 增加的趋势,而年均 β 是下降的趋势,揭示了降水量增加和植被变绿会导致年均 β 下降现象。MAT 和 MAA 的趋势与年均 β 的趋势呈显著的正相关(表 2),但是,MAP 和 MAA 主导全区年均 β 的趋势主要集中在下降趋势(图 8),表明在 MAT 和 MAA 上升趋势在增加时,年均 β 的下降趋势也在增加,但在青藏高原区域,MAT 和 MAA 的变化不是影响波文比变化的主导因素。

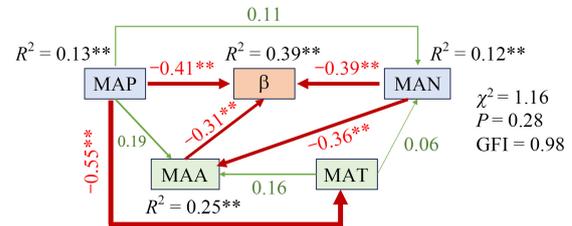


图 6 MAP、MAT、MAA 和 MAN 对年均 β 的影响模型

Fig.6 Modelling the effects of MAP、MAT、MAA and MAN on annual average β

在图中线条的宽度表示相关性强弱,绿色和红色分别表示正和负效应,标注的数值为标准化路径系数

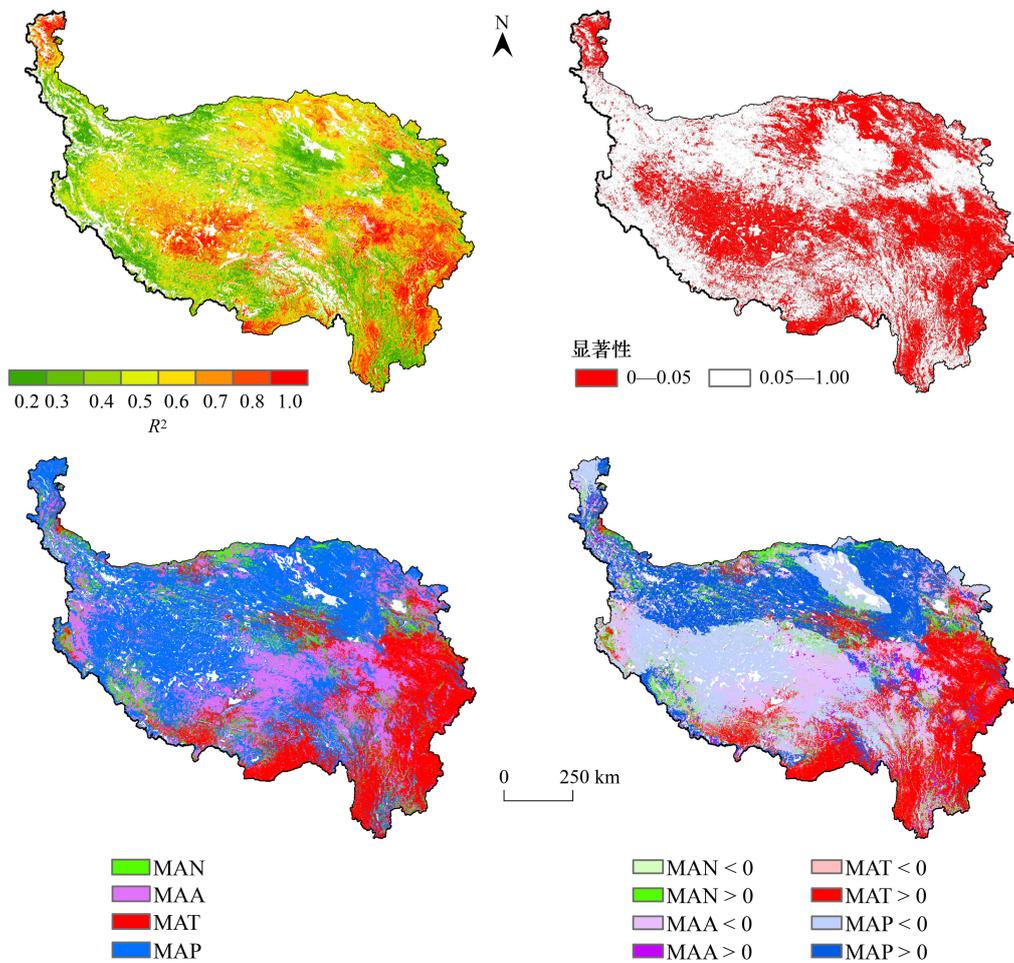


图7 气候(MAP、MAT和MAA)和植被绿度(MAN)对年均波文比时空变化影响的相关系数、显著性水平、主导的回归系数和主导因素的时间趋势

Fig.7 Correlation coefficients, significance levels, dominant regression coefficients, and temporal trends of dominant factors for the effects of climate (MAP, MAT, and MAA) and vegetation greenness (MAN) on temporal and spatial variations in mean annual Bowen's ratio

表2 青藏高原全区和7个草地类型与MAP、MAT、MAA和MAN的多元线性归一化回归系数

Table 2 Multiple linear normalised regression coefficients of the whole Qinghai-Tibetan Plateau and seven grassland types with MAP, MAT, MAA and MAN

类型 Type	年总 降水量 MAP	年均气温 MAT	年均地表 反照率 MAA	年均归一化 植被指数 MAN	决定系数 R^2	显著性 P
全区 Whole region	-0.26	-0.21	-0.19	-0.08	0.47	0.15
热性草丛 Tropical tussock	0.14	-0.47	0.02	0.04	0.50	0.17
暖性草丛 Warm tussock	0.05	-0.50	-0.05	-0.02	0.51	0.18
草甸草原 Meadow steppe	-0.14	-0.47	-0.22	-0.05	0.52	0.13
高寒草甸 Alpine meadow	-0.15	0.38	-0.28	-0.04	0.51	0.12
典型草原 Typical steppe	-0.21	-0.01	-0.23	-0.02	0.35	0.30
高寒草原 Alpine steppe	-0.43	-0.05	-0.22	-0.10	0.48	0.12
荒漠类 Desert type	-0.40	-0.06	-0.06	-0.02	0.40	0.19

MAP: 年总降水量 Annual total precipitation; MAT: 年均气温 Mean annual temperature; MAA: 年均地表反照率 Mean annual albedo; MAN: 年均归一化植被指数 Mean annual normalized difference vegetation index

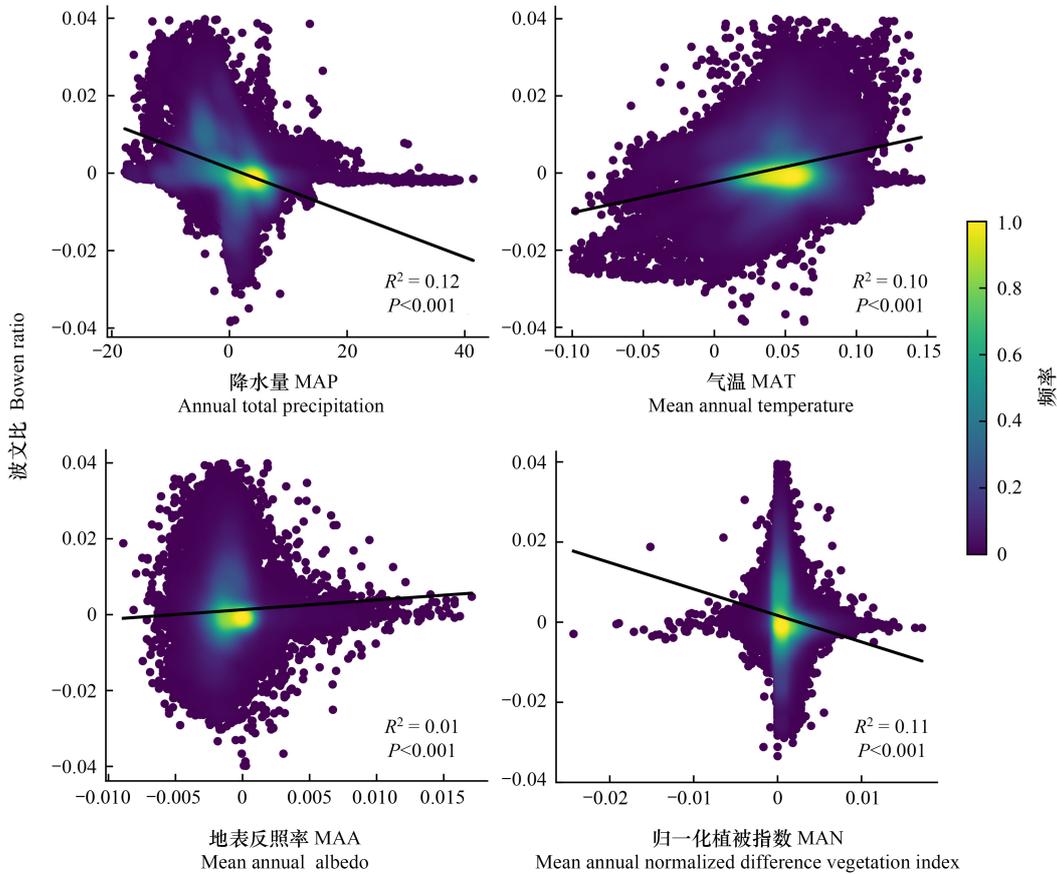


图 8 2000—2018 年波文比逐像元趋势与 MAP、MAT、MAA 和 MAN 趋势的密度图(随机取点 50000)

Fig.8 Density plots of the trends of Bowen ratio per pixel from 2000 to 2018 with trends of MAP、MAT、MAA, and MAN (randomly sampled 50000 points)

4 讨论

在本研究中波文比总体趋势随时间的波动较为平缓,呈轻微下降趋势,这与降水上升的气候背景相吻合^[45-46],说明该地区近年来干旱化程度略有减少^[47]。青藏高原全区 β 年值均大于1,表明青藏高原区域感热大于潜热。研究指出感热大于潜热会抑制地表对大气的增温作用^[48]。不同草地类型间年均 β 的显著差异,揭示了气候和植被因子对年均 β 的影响。我们发现,具有较高 MAP、MAT 和 MAN 的热性草丛和暖性草丛的年均 β 值低于高寒草原和荒漠类(图 2)。这种模式可能是由于降水量多和气温高的生态系统提供了较多水分和热量,为蒸腾作用提供了有利的条件,导致潜热分配增加^[49]。也揭示了降水和植被在调节能量分配中的关键作用。此外,温度高的区域,植被的生长期更长,使植被能够将更多的能量分配给潜热,从而导致年均 β 降低^[12, 50]。

在本研究中,基于随机森林,结构方程模型和多元线性回归均表明,降水是年均 β 的时空变化的主要因素,在中国草地生态系统中^[12],亚热带毛竹林^[51],农牧区稀疏灌丛生态系统^[52]和德国温带云杉林^[53],也发现了这一点。不同植被类型间 β 的显著差异揭示了气候和植被因子对 β 的影响。随机森林结果表明,热性草丛和暖性草丛 β 空间变化的主导因素是 MAT,比较干旱的草原区域,草甸草原和高寒草原的主导因素是 MAP,植被分布稀疏的地区,如高寒草甸,典型草原的荒漠类的 β 的年际变化的主导因素是 MAN。而多元线性回归的结果表明,青藏高原东南部的热性草丛、暖性草丛、草甸草原和高寒草原地区,该地区 MAT 的上升趋势导致这些草地类型 β 下降,但 MAT 上升导致高寒草地上升。研究指出 MAT 是控制这些生态系统中许多生理和化

学反应过程的重要因素之一,是生态系统中能量、水和养分的调节和分配者^[48]。MAP 是高寒草原和荒漠类的 β 时空变化的主导因素。因为在湿度和气温有限且植被变化的情况下,水分对 β 的主导作用更大^[12, 54]。MAA 是典型草原的年均 β 时空变化的主导因素,且典型草原年均波文比上升了。NDVI 下降^[54] 导致了 MAA 上升,净辐射减少,蒸散发减少,从而使得波文比上升。

气候和植被因子被认为是通过改变地表能量平衡的重要驱动因素之一^[1]。并且在气候变化的条件下,植被的变化,这可能导致地表能量平衡的变化,称为生物地球物理效应^[7, 55]。本研究表明气候变化和植被变化在地表能量分配中的关键作用,以及在此背景下 β 的意义。基于多元线性回归和气候与植被因子的变化,表明,MAP 和 MAN 的趋势与 β 的趋势呈显著负相关,揭示了在青藏高原西南部年均 β 上升趋势和东北下降趋势均因为 MAP 的下降和上升的趋势。研究指出,青藏高原的 MAN 和 MAP 主要是上升趋势^[46, 56],这也解释了为什么青藏高原年均 β 呈下降趋势。MAT 和 MAA 的上升趋势也会导致 β 的下降趋势, β 的减小,即潜热的增加或感热的减少,会抑制地表对大气的增温作用,从这个意义上说, β 可以作为生态系统调节功能的指标来评价生态系统质量^[48]。未来需要更多的数据产品来研究波文比对地表能量平衡中的作用。且更加关注波文比的变化对于气候的影响,以量化植被和气候变化导致的波文比变化引起的温度效应的生物地球物理机制。

5 结论

利用 ARTS 模型模拟的蒸散发数据计算了 2000—2018 年青藏高原地区的年均波文比,并分析了影响其时空变化的主导因素。结果表明,青藏高原地区的 β 值为 1.25 ± 0.60 ,且呈现不显著的微弱的下降趋势,不同草地类型中,年均 β 呈现不同的趋势。青藏高原地区的年均 β 下降,其主要原因是降水增加。具体而言,青藏高原暖湿化,将促进植被生长,降低地表反照率,导致地表净辐射增加,但与此同时,植被绿化,直接导致地表蒸散发增加,导致 β 下降。研究结果强调了在全球气候变化背景下,研究草地的变化导致的蒸散效应,扩大了对区域气候的生物物理反馈效应的关键参数的重要性的认识,并为今后将波文比作为生态系统气候调节功能评价的指标提供了知识基础。

参考文献 (References):

- [1] Bonan G B. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science*, 2008, 320(5882): 1444-1449.
- [2] Wilson K B, Baldocchi D D. Seasonal and interannual variability of energy fluxes over a broadleaved temperate deciduous forest in North America. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 100(1): 1-18.
- [3] Li Z H, Zhang Y P, Wang S S, Yuan G F, Yang Y, Cao M. Evapotranspiration of a tropical rain forest in Xishuangbanna, Southwest China. *Hydrological Processes*, 2010, 24(17): 2405-2416.
- [4] Wu D H, Zhao X, Liang S L, Zhou T, Huang K C, Tang B J, Zhao W Q. Time-lag effects of global vegetation responses to climate change. *Global Change Biology*, 2015, 21(9): 3520-3531.
- [5] Popkin G. The forest question. *Nature*, 2019, 565(7739): 280-282.
- [6] Massey R, Rogers B M, Berner L T, Cooperdock S, Mack M C, Walker X J, Goetz S J. Forest composition change and biophysical climate feedbacks across boreal North America. *Nature Climate Change*, 2023, 13(12): 1368-1375.
- [7] Alkama R, Cescatti A. Biophysical climate impacts of recent changes in global forest cover. *Science*, 2016, 351(6273): 600-604.
- [8] Beringer J, Chapin F S, Thompson C C, McGuire A D. Surface energy exchanges along a tundra-forest transition and feedbacks to climate. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 131(3/4): 143-161.
- [9] Matsumoto K, Ohta T, Nakai T, Kuwada T, Daikoku K, Iida S, Yabuki H, Kononov A V, van der Molen M K, Kodama Y, Maximov T C, Dolman A J, Hattori S. Energy consumption and evapotranspiration at several boreal and temperate forests in the Far East. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148(12): 1978-1989.
- [10] Bowen I S. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. *Physical Review*, 1926, 27(6): 779-787.
- [11] Lee X H, Goulden M L, Hollinger D Y, Barr A, Black T A, Bohrer G, Bracho R, Drake B, Goldstein A, Gu L H, Katul G, Kolb T, Law B E, Margolis H, Meyers T, Monson R, Munger W, Oren R, Kyaw Paw U, Richardson A D, Schmid H P, Staebler R, Wofsy S, Zhao L. Observed

- increase in local cooling effect of deforestation at higher latitudes. *Nature*, 2011, 479(7373): 384-387.
- [12] Sun M Y, Yu G R, Chen Z, Hao T X, Yang M, Zhu X J, Zhang W K, Han L, Liu Z G, Ma L X, Dou X J, Yao Y, Wang J L, Luo W X, Lin Y, Chen S P, Deng Z M, Dong G, Du H, Gao Y H, Gu F X, Hao X X, Hao Y B, He Q H, He Y T, He J S, Ji X B, Jiang S C, Jiang Z D, Li X H, Li Y N, Li Y Q, Li Y Z, Liu R, Liu S M, Luo W J, Mo X G, Sha L Q, Shi P L, Song Q H, Sun D, Tan J L, Tang Y K, Wang F, Wang H M, Wang J L, Wei W X, Wu J B, Wu Z X, Xin X P, Yan J H, Zhang F W, Zhang Y J, Zhang Y P, Zhang Y C, Zhao F H, Zhao L, Zhou L, Zhu J J, Zhu Z L. Climate-shaped vegetation dominated the spatial pattern of the Bowen ratio over terrestrial ecosystems in China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2024, 344: 109816.
- [13] 黄松宇,贾昕,郑甲佳,杨睿智,牟钰,袁和第.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*, 2021, 45(2): 119-130.
- [14] Tang Y K, Wen X F, Sun X M, Wang H M. Interannual variation of the Bowen ratio in a subtropical coniferous plantation in Southeast China, 2003-2012. *PLoS One*, 2014, 9(2): e88267.
- [15] Launiainen S. Seasonal and inter-annual variability of energy exchange above a boreal Scots pine forest. *Biogeosciences*, 2010, 7(12): 3921-3940.
- [16] Cho J, Oki T, Yeh P J F, Kim W, Kanae S, Otsuki K. On the relationship between the Bowen ratio and the near-surface air temperature. *Theoretical and Applied Climatology*, 2012, 108(1/2): 135-145.
- [17] Burakowski E, Tawfik A, Ouimette A, Lepine L, Novick K, Ollinger S, Zarzycki C, Bonan G. The role of surface roughness, albedo, and Bowen ratio on ecosystem energy balance in the Eastern United States. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 249: 367-376.
- [18] Ren X Y, Zhang Q, Yue P, Yang J H, Wang S. Environmental and biophysical effects of the Bowen ratio over typical farmland ecosystems in the Loess Plateau. *Remote Sensing*, 2022, 14(8): 1897.
- [19] Jiang K, Pan Z H, Pan F F, Wang J L, Han G L, Song Y, Zhang Z Y, Huang N, Ma S Q, Chen X. Influence patterns of soil moisture change on surface-air temperature difference under different climatic background. *Science of the Total Environment*, 2022, 822: 153607.
- [20] 孙鸿烈,郑度,姚檀栋,张德铨.青藏高原国家生态安全屏障保护与建设. *地理学报*, 2012, 67(1): 3-12.
- [21] Zhang J H, Yao F M, Zheng L Y, Yang L M. Evaluation of grassland dynamics in the northern-Tibet plateau of China using remote sensing and climate data. *Sensors*: Basel, Switzerland, 2007, 7(12): 3312-3328.
- [22] 姚檀栋,朱立平.青藏高原环境变化对全球变化的响应及其适应对策. *地球科学进展*, 2006, (5): 459-464.
- [23] 王常顺,孟凡栋,李新娥,姜丽丽,白玲,汪诗平.青藏高原草地生态系统对气候变化的响应. *生态学杂志*, 2013, 32(6): 1587-1595.
- [24] 张德铨,李炳元,郑度.论青藏高原范围与面积. *地理研究*, 2002, (1): 1-8
- [25] Zhang W J, Xue X, Peng F, You Q G, Hao A H. Meta-analysis of the effects of grassland degradation on plant and soil properties in the alpine meadows of the Qinghai-Tibetan Plateau. *Global Ecology and Conservation*, 2019, 20: e00774.
- [26] Zhou W, Gang C C, Zhou L, Chen Y Z, Li J L, Ju W M, Odeh I. Dynamic of grassland vegetation degradation and its quantitative assessment in the Northwest China. *Acta Oecologica*, 2014, 55: 86-96.
- [27] 刘纪远,徐新良,邵全琴.近 30 年来青海三江源地区草地退化的时空特征. *地理学报*, 2008, 63(4): 364-376.
- [28] 中华人民共和国农业部畜牧兽医司,全国畜牧兽医总站主编,中国草地资源,1996.
- [29] Hutchinson M F. Interpolation of Rainfall Data with Thin Plate Smoothing Splines-Part I: Two Dimensional Smoothing of Data with Short Range Correlation. *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*, 1998, 2(2): 139-151.
- [30] Hutchinson M. Interpolation of Rainfall Data with Thin Plate Smoothing Splines-Part II: Analysis of Topographic Dependence. *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*, 1998, 2(2): 168-185.
- [31] 王军邦,王居午,叶辉,刘亚,何洪林.2000—2012 年全国气温和降水 1 km 网格空间插值数据集. *中国科学数据*, 2017, 2(1): 73-80+205-212.
- [32] Farr T G, Rosen P A, Caro E, Crippen R, Duren R, Hensley S, Kobrick M, Paller M, Rodriguez E, Roth L, Seal D, Shaffer S, Shimada J, Umland J, Werner M, Oskin M, Burbank D, Alsdorf D. The shuttle radar topography mission. *Reviews of Geophysics*, 2007, 45(2): e2005rg000183.
- [33] Eklundh L, Jönsson P. TIMESAT for processing time-series data from satellite sensors for land surface monitoring//*Remote Sensing and Digital Image Processing*. Cham: Springer International Publishing, 2016: 177-194.
- [34] Fensholt R, Horion S, Tagesson T, Ehammer A, Grogan K, Tian F, Huber S, Verbesselt J, Prince S D, Tucker C J, Rasmussen K. Assessing drivers of vegetation changes in drylands from time series of earth observation data//*Remote Sensing and Digital Image Processing*. Cham: Springer International Publishing, 2015: 183-202.
- [35] Liu N F, Liu Q, Wang L Z, Liang S L, Wen J G, Qu Y, Liu S H. A statistics-based temporal filter algorithm to map spatiotemporally continuous shortwave albedo from MODIS data. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013, 17(6): 2121-2129.
- [36] Qu Y, Liu Q, Liang S L, Wang L Z, Liu N F, Liu S H. Direct-estimation algorithm for mapping daily land-surface broadband albedo from MODIS data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(2): 907-919.

- [37] Yan H, Wang S Q, Billesbach D, Oechel W, Zhang J H, Meyers T, Martin T A, Matamala R, Baldocchi D, Bohrer G, Dragoni D, Scott R. Global estimation of evapotranspiration using a leaf area index-based surface energy and water balance model. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 124: 581-595.
- [38] Cui M Y, Wang J B, Wang S Q, Yan H, Li Y N. Temporal and spatial distribution of evapotranspiration and its influencing factors on Qinghai-Tibet plateau from 1982 to 2014. *Journal of Resources and Ecology*, 2019, 10(2): 213-224.
- [39] Boegh E, Poulsen R N, Butts M, Abrahamsen P, Dellwik E, Hansen S, Hasager C B, Ibrom A, Loerup J K, Pilegaard K, Soegaard H. Remote sensing based evapotranspiration and runoff modeling of agricultural, forest and urban flux sites in Denmark; from field to macro-scale. *Journal of Hydrology*, 2009, 377(3/4): 300-316.
- [40] Statistics L B, Breiman L. Random forests. *Machine Learning*, 2001, 45(1): 5-32.
- [41] Wang Z Z, Fu B J, Wu X T, Wang S, Li Y J, Feng Y H, Zhang L W, Hu Y, Cheng L H, Li B B. Distinguishing trajectories and drivers of vegetated ecosystems in China's Loess Plateau. *Earth's Future*, 2024, 12(2): e2023EF003769.
- [42] 朱躲萍, 叶辉, 王军邦, 赵焯岚, 左婵, 芦光新, 张法伟, 李英年. 青海三江源区高寒植被地表反照率变化及其辐射温度效应. *生态学报*, 2022, 42(14): 5630-5641.
- [43] Rosseel Y. lavaan: An R Package for structural equation modeling. *Journal of Statistical Software*, 2012, 48(2): 1-36.
- [44] Piao S L, Sitch S, Ciais P, Friedlingstein P, Peylin P, Wang X H, Ahlström A, Anav A, Canadell J G, Cong N, Huntingford C, Jung M, Levis S, Levy P E, Li J S, Lin X, Lomas M R, Lu M, Luo Y Q, Ma Y C, Myneni R B, Poulter B, Sun Z Z, Wang T, Viovy N, Zaehle S, Zeng N. Evaluation of terrestrial carbon cycle models for their response to climate variability and to CO₂ trends. *Global Change Biology*, 2013, 19(7): 2117-2132.
- [45] Yao T D, Bolch T, Chen D L, Gao J, Immerzeel W, Piao S L, Su F G, Thompson L, Wada Y, Wang L, Wang T, Wu G J, Xu B Q, Yang W, Zhang G Q, Zhao P. The imbalance of the Asian water tower. *Nature Reviews Earth and Environment*, 2022, 3: 618-632.
- [46] Yao T D, Thompson L, Yang W, Yu W S, Gao Y, Guo X J, Yang X X, Duan K Q, Zhao H B, Xu B Q, Pu J C, Lu A X, Xiang Y, Kattel D B, Joswiak D. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings. *Nature Climate Change*, 2012, 2(9): 663-667.
- [47] 蔡依霏, 王锋, 潘绪斌, 张方敏, 任国玉, 卢琦. 中国荒漠化潜在发生区域 150 年变迁: 过去、现在和未来. *科学通报*, 2024, 69(31): 4637-4650.
- [48] Zhao X L, Wang J B, Ye H, Amir M, Wang S Q. The Bowen ratio of an alpine grassland in Three-River Headwaters, Qinghai-Tibet Plateau, from 2001 to 2018. *Journal of Resources and Ecology*, 2021, 12(3): 305-318.
- [49] Xu Z W, Liu S M, Zhu Z L, Zhou J, Shi W J, Xu T R, Yang X F, Zhang Y, He X L. Exploring evapotranspiration changes in a typical endorheic basin through the integrated observatory network. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020, 290: 108010.
- [50] Lian X, Jeong S, Park C E, Xu H, Li L Z X, Wang T, Gentine P, Peñuelas J, Piao S L. Biophysical impacts of northern vegetation changes on seasonal warming patterns. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 3925.
- [51] 孙成. 毛竹林生态系统 CO₂ 通量和能量平衡的观测研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2014.
- [52] Gong T T, Lei H M, Jiao Y, Yang H B, Yang D W. Characteristics of surface energy fluxes over a sparse shrubland ecosystem in the farming-pastoral zone of the Loess Plateau, Northwest China. *Ying Yong Sheng Tai Xue Bao = the Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(6): 1625-1633.
- [53] Grünwald T, Bernhofer C. A decade of carbon, water and energy flux measurements of an old spruce forest at the Anchor Station Tharandt. *Tellus B*, 2007, 59(3): 387-396.
- [54] Wei Y Q, Lu H Y, Wang J N, Wang X F, Sun J. Dual influence of climate change and anthropogenic activities on the spatiotemporal vegetation dynamics over the Qinghai-Tibetan Plateau from 1981 to 2015. *Earth's Future*, 2022, 10(5): e2021EF002566.
- [55] Zhao G S, Dong J W, Cui Y P, Liu J Y, Zhai J, He T, Zhou Y Y, Xiao X M. Evapotranspiration-dominated biogeophysical warming effect of urbanization in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China. *Climate Dynamics*, 2019, 52(1/2): 1231-1245.
- [56] 孟梦, 牛铮, 马超, 田海峰, 裴杰. 青藏高原 NDVI 变化趋势及其对气候的响应. *水土保持研究*, 2018, 25(3): 360-365, 372.