

半干旱草地能量分配长期变化特征

李溪盈

成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都

收稿日期: 2023年11月8日; 录用日期: 2023年12月21日; 发布日期: 2023年12月28日

摘要

为了解中国黄土高原半干旱地表能量分配及蒸散生物物理控制长期变化的驱动机制, 本文用榆中站点2006年5月至2012年12月的观测数据, 分析了研究期黄土高原半干旱草地地表各主要能量分量(净辐射、地表土壤热通量、感热通量、潜热通量和波文比)的月、年变化特征, 及其受气候和生物因子(植被指数NDVI和气孔导度)的影响。结果表明: (1) 地表能量随季节变化, 感热和潜热均是春季高、秋季低, 波文比在冬季较大, 因为冬季感热的增长速度大于潜热的增长速度。(2) 半干旱草地生态系统中的各气象要素的变化有很明显的季节性, 夏季大、冬季小。净辐射随季节波动变化; 土壤含水量总体上是夏季大冬季小, 波动较小; 空气湿度夏季高冬季低, 变化较快; 空气温度呈波动变化, 最大值几乎不变, 最小值有起伏变化; 土壤温度的变化与空气温度十分相似。(3) 气候条件中辐射、温度、土壤温度、风速四个变量与波文比呈较弱的正相关; 湿度和波文比呈较强的负相关; 土壤含水量和波文比呈较弱的负相关。(4) 生物因素中植被指数和气孔导度与波文比是负相关, 波文比随着它们的升高而降低。(5) 各气象要素和生物因素对波文比产生影响的路径系数不同。净辐射对波文比的正向影响最大, 土壤温度和地面风速次之, 空气湿度对波文比的负向影响最大, 其次是气孔导度。

关键词

黄土高原, 半干旱草地, 能量, 对比分析

Characteristics of Long-Term Changes in Energy Partitioning in Semi-Arid Grassland

Xiying Li

School of Atmospheric Science, Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan

Received: Nov. 8th, 2023; accepted: Dec. 21st, 2023; published: Dec. 28th, 2023

Abstract

In order to understand the driving mechanism of long-term changes in semi-arid land-surface

energy distribution and Biophysical control of evapotranspiration on the Loess Plateau of China, this paper uses the observations from May 2006 to December 2012. By analyzing the monthly and annual variation characteristics of the main energy components (net radiation, surface soil heat flux, sensible heat flux, latent heat flux and bowen ratio) during the research period, and the influence of climate and biological factors (vegetation index NDVI and stomatal conductivity), the results indicate that: (1) Surface energy varies with the season, and both sensible heat and latent heat are high in spring and low in autumn. The value of Bowen ratio is larger in winter, because the growth rate of sensible heat in winter is greater than that of latent heat. (2) The variation of various meteorological elements in the semi-arid grassland ecosystem is obviously seasonal, large in summer and small in winter. Net radiation changes with seasonal fluctuations; soil water content is large in summer and small in winter, the fluctuation is relatively small; air humidity is high in summer and low in winter, but changes very quickly with no obvious rules; the air temperature fluctuates, the maximum value is almost constant, and the minimum value fluctuates; soil temperature is very similar to air temperature. (3) The four variables of radiation, temperature, soil temperature and wind speed showed a weak positive correlation with the Bowen ratio; humidity and Bowen ratio showed a strong negative correlation; soil water content and Bowen ratio showed a weak negative correlation. (4) Vegetation index and stomatal conductance are negatively correlated with the Bowen ratio, which decreases with the increase. (5) The path coefficients of the influence of various meteorological elements and biological factors on the Bowen ratio differ. The net radiation has the greatest positive effect on Bowen ratio, followed by soil temperature and ground wind speed, and the air humidity has the greatest negative effect on Bowen ratio, followed by stomatal conductance.

Keywords

Loess Plateau, Semi-Arid Grassland, Energy, Comparative Analysis

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

干旱问题具有全球性，而且对全球各个国家造成的损失巨大[1]。近年来，随着全球变暖带来的多种气候问题，各种极端天气现象也随之而来，干旱问题也有上升的趋势。在中国，干旱/半干旱地区约占陆地面积的三分之一以上[2]。与其他下垫面相比，干旱/半干旱地区对气候变化的响应速率更为敏感，半干旱区的水资源匮乏、生态环境恶化、沙漠化等一系列环境问题，严重威胁到这些地区人们的生存环境和经济的可持续发展。中国气象网观测资料表明，在过去几十年间，中国北方地区，尤其是半干旱地区的气候发生了明显变化。有研究表明，半干旱温带草原的能量和水分循环对温度升高、降水量减少以及降水空间分布变化十分敏感[3]。另外，半干旱草地是较为脆弱的生态区域，对人类活动十分敏感，天然的生态平衡很容易因为人类不合理的生产生活受到影响。

干旱、半干旱生态系统一向受到人们关注，关于干旱、半干旱的课题也十分热门。上世纪90年代在美国亚利桑那州展开了半干旱区陆面大气相互作用观测计划(Semi-Arid Land-Surface-Atmosphere Project, SALSA)，这个实验以半干旱区域的能量平衡和水循环作为主要的研究课题之一，取得了许多成果[4]。Rana 和 Katerji 总结了欧洲地中海气候下陆地生态系统蒸散的测量和估算[5]。

21 世纪初开展的 EBEX-2000 试验专门针对地表能量平衡问题进行观测研究[6] [7]。目前来看，土

壤-植被-大气之间的能量储存未充分计入是造成地表能量不平衡的主要原因之一[8]。

2007~2008年 Hao 等利用两年的时间观测数据,研究了半干旱草原地表能量和水汽的季节与年际变化,指出草原能量分配、实际蒸散与降水的分配、频率密切相关[9]。2008年 Ryu Y 研究了加利福尼亚州地中海型气候下生长的一年生草地上的蒸散和能量通量的年际变化能力[10]。2009年王雷和刘辉志研究了放牧强度对内蒙古半干旱草原生态系统地气间能量和物质通量交换的影响,指出放牧降低植被覆盖率,使潜热通量减小,表明土壤水分状况是半干旱草原地表能量收支的决定性因素[2]。

近年来,利用涡旋协方差技术对草地生态系统在北美的温带草原,地中海气候区,蒙古高原的大草原,和青藏高原的草原进行了大量关于能量分配和蒸散的研究[11]。在气候变暖条件下,半干旱地区受到降水减少、干旱加剧和沙漠化的威胁[12][13]。草原比其他生态系统更容易受到这种变化的影响[14]。先前的研究也表明,当蒸散低于阈值时,蒸散受到气孔导度(Gs)的强烈影响[12][13][15][16]。此外,较大的蒸散通常与较大的气孔导度有关,而且草的生长对降水的年变化非常敏感[17][18],半干旱草原的蒸散阈值应该存在年际变化,所以环境条件对蒸散的影响随植被类型和环境条件而变化很大[17][19][20]。

在局地、区域和全球尺度上,地表与大气之间的陆地表面的能量交换和水汽交换是地球地气系统首要的驱动因素[11][21](Pielke, 2001; Ryu *et al.*, 2008)。半干旱地区草地生态系统地表的蒸散在年际尺度上主要由年降水量来决定,但是在月以及季节尺度上的影响蒸散的因子存在差异,不同的生态系统地表蒸散主要影响因子也大同小异,具有较大的年际变化。研究半干旱区域的能量交流互换的过程,对进一步了解区域气候系统的能量和物质循环以及气候变化过程有很大的帮助[22]。因此,确定半干旱草地蒸散的主要影响因素可更好地了解半干旱地区蒸散及其与其他地球系统过程之间的联系。然而,关于气候变化,特别是年降水的波动和季节性的变化如何影响半干旱草地的能量分配及蒸散仍然缺乏研究[11]。

本文用榆中站点 2006 年 5 月至 2012 年 12 月的观测数据,研究了黄土高原半干旱草地地表各主要能量分量(净辐射、地表土壤热通量、感热通量、潜热通量和波文比)的月、年变化特征,及其与气候和生物因子(植被指数 NDVI 和气孔导度)的相关性。

2. 资料与方法

2.1. 研究区概况

本研究主要对黄土高原半干旱草地的气候变化特征进行分析。黄土高原是一个独特的地区,由于其面积广阔,地理位置特殊,对全球气候变化极其敏感[14][23]。中国半干旱黄土高原地区的多个生态系统经常受到缺水的影响,特别是在春末和初夏,植被往往遭受土壤干旱的影响[24]。本文以榆中站点为代表研究黄土高原半干旱草地,所用的数据为榆中站点的观测资料。榆中县位于甘肃省中部,在兰州市境内,地处陇西黄土高原,大部分地区的地表覆盖着黄土,属于温带大陆性气候,有明显的季节变化,且雨热同期。春季干旱,夏季炎热多雨,秋季凉爽,冬季寒冷干燥。年平均气温 9℃,夏季和冬季的气温变化大,日早晚的温差在 10℃左右。

2.2. 资料概况

本文所用的数据为榆中站点 2006 年 5 月至 2012 年 12 月的观测资料,包括净辐射,感热,潜热,温度,湿度,土壤含水量,土壤温度以及近地面风速。变量每隔 30 分钟观测一次,每个月有 1500 左右个数据。由于观测产生的误差不可避免,并且缺测值有很多,所以异常值的排除和缺测值的替代十分重要。本文通过平均值加减四倍标准差来排除异常值,但由于有些异常值偏离正常值太多,这些异常值是直接

排出的,对于缺测值,用差值或另外几年的平均值来代替缺测月份的数据,得到更符合客观情况的数据。在求 2006 年的年平均值时,由于 2006 年缺少 1、2、3、4 月的数据,求得的平均值不是十分准确,用其他 6 年对应月份的平均值来代替,得到更为准确的数据。

2.3. 研究方法

陆地生态系统通过感热和潜热的形式与大气进行热量和水汽交换,不同的生态系统由于自然气候环境和下垫面性质不同,地表热量交换存在差异[8]。通过分析各个时间段黄土高原半干旱草地地表各主要能量分量(净辐射、感热通量、潜热通量,地表土壤热通量和水汽通量)的年内的变化特征,年际变化趋势,对数据进行统计分析,得到半干旱草地生态系统各种能量分配年内和年际变化。

草地生态系统与土壤水分是相互作用[25]在植被的生长过程中利用和消耗水分从而影响土壤水分,同时土壤水分作为干旱区植物生长最重要的条件。分析感热、潜热和波文比的变化特征以及各气象要素对波文比的影响。

气孔导度表示的是气孔张开的程度,它是影响植物光合作用,呼吸作用及蒸腾作用的主要因素[26][27]。根据黄土高原半干旱草地上植被在不同条件下的气孔导度,以及不同的气孔导度下黄土高原半干旱草地的蒸散程度,绘制各气象要素与波文比的相关性散点图,得到黄土高原半干旱草地对蒸散影响的气孔导度阈值。

气孔导度的计算

为了更好的研究蒸散的作用,用下列公式计算气孔导度[28]:

$$Gs = \frac{\gamma LE Ga}{s(LE + Hs) + \rho Cp VPD + LE(s + \gamma)} \quad (1)$$

其中 Ga 为空气动力电导(m/s),采用以下方程进行计算[29]:

$$Ga = \left((U/u_*^2) + 6.2u_*^{-0.67} \right)^{-1} \quad (2)$$

其中, LE 为潜热通量, Hs 为感热通量, ρ 为空气密度(数值为 1.293 kg/m^3), Cp 在一个恒定的压力下,空气的比热容(J/kgK), P 为大气压(kPa), U 为地面风速, u^* 摩擦速度是(m/s), VPD 为饱和水汽压差(kPa), γ 为干湿常数(数值为 0.066 kPa/K), s 为饱和水汽压与温度相关的函数。

3. 结果分析

3.1. 微气象条件年内、年际变化规律

3.1.1. 辐射

图 1(a)为 2006 年 4 月~2012 年 12 月共 81 个月的净辐射逐月变化图, X 轴为月份, Y 轴为净辐射通量(W/m^2),其中最大值为 137.1 W/m^2 ,最小值为 -2.9 W/m^2 。从图中可以看出净辐射的变化有明显的随季节波动变化的特征,夏季辐射通量大且最大值在 6、7、8 三个月,冬季辐射通量小且最小值在 12、1、2 三个月,最大值和最小值之间的差距很大,大部分在 110 左右,只有两年的差值在 100~105。同时观察每年的最大最小值的变化,发现最大最小值都是明显的上升趋势。

图 1(b)为 2006 年 4 月~2012 年共 7 年的净辐射的年平均变化图, X 轴为年份, Y 轴为净辐射通量(W/m^2),其中最大值为 77.6 W/m^2 ,最小值为 59.7 W/m^2 。从图中可以看出净辐射的年平均呈明显的上升趋势,虽然在 2009 年略微下降但总体还是上升的,并且上升的速度很快。

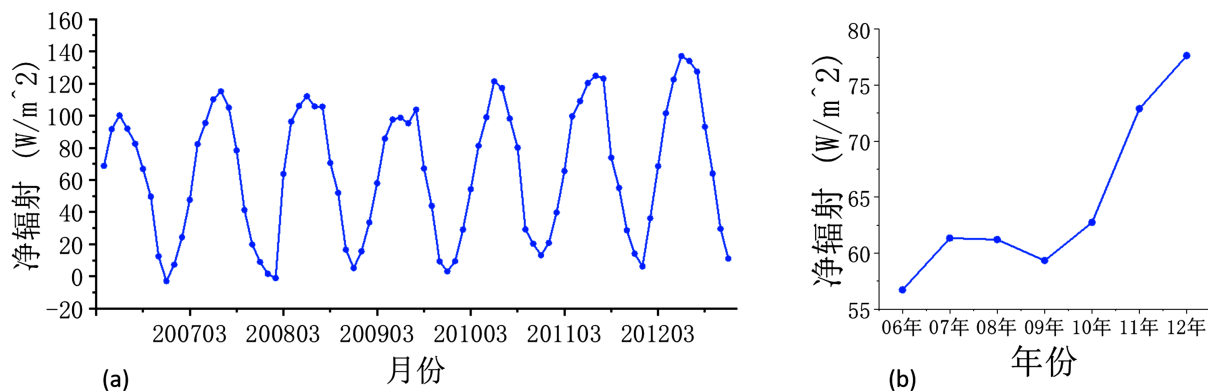


Figure 1. Changes of net radiation from 2006 to 2012

图 1. 2006~2012 年净辐射的变化图

3.1.2. 土壤

图 2(a)为 2006 年 5 月~2012 年 12 月共 80 个月的土壤含水量的逐月变化图, X 轴为月份, Y 轴为土壤含水量, 其中最大值为 0.23, 最小值为 0.06。从图中可以看出 2006 年的土壤含水量数值总体偏小, 2007 和 2008 年的数值明显很大, 而且土壤含水量虽然是夏季多冬季少, 但与季节没有明显的相关性, 并且变化的速度非常快, 没有什么连续性。如 2009 年的 8 月为当年的最大值, 但 7 月的值却十分小。

图 2(b)为 2006~2012 年共 7 年的土壤含水量的年变化图, X 轴为年份, Y 轴为土壤含水量, 其中最大值为 0.138, 最小值为 0.101。从图中可以看出从 2006 年到 2012 年, 土壤含水量数值呈一个先升后降而后又上升的变化过程, 2007 的数值明显很大, 从 2007 年往后呈一个下降的趋势, 到了 2012 年有略有回升。

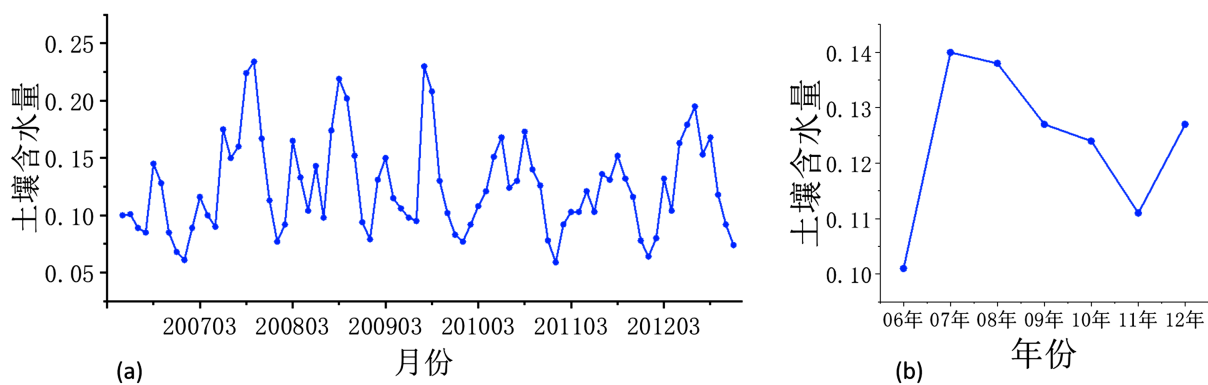


Figure 2. The change diagram of soil water content from 2006 to 2012

图 2. 2006~2012 年土壤含水量的变化图

3.1.3. 空气湿度

图 3(a)为 2006 年 5 月~2012 年 12 月共 80 个月的空气湿度的逐月变化图, X 轴为月份, Y 轴为空气湿度(%), 其中最大值为 77.7%, 最小值为 32.2%。从图中可以看出空气湿度虽然是夏季高冬季低, 但与季节没有明显的相关性, 并且变化的速度非常快, 没有什么连续性。仔细观察得到 2006 年虽然最大值的所在年份, 但却有很多个较大值而且与其它年份相比月变化迅速且突然, 起伏较大。

图 3(b)为 2006~2012 年共 7 年的空气湿度的年变化图, X 轴为年份, Y 轴为空气湿度(%), 其中最大值为 58%, 最小值为 52%。从图中可以看出空气湿度的变化明显是先上升后下降而后又上升, 2010 年是 7 年中的最低值, 2007 年是 7 年中的最高值。

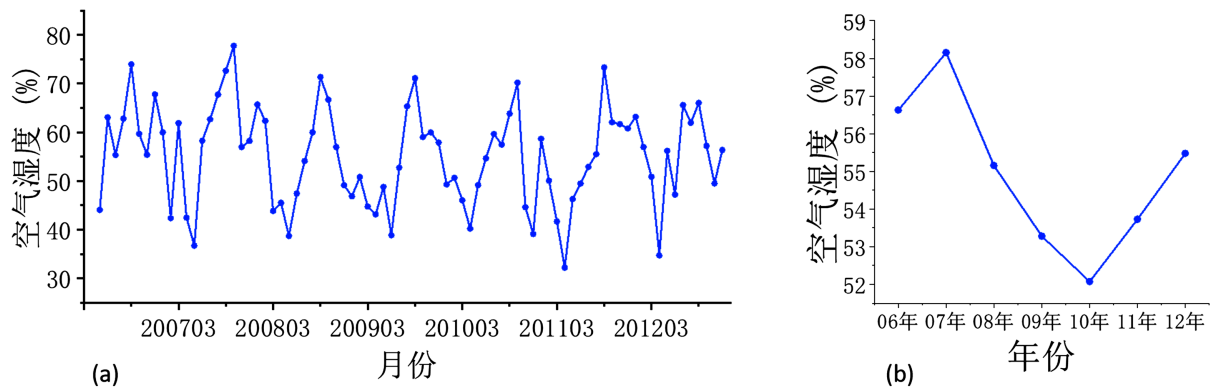


Figure 3. Changes of air humidity from 2006 to 2012

图 3. 2006~2012 年空气湿度的变化图

与图 2 土壤含水量相比, 虽然逐月的变化趋势大致相同, 但从年平均来比较, 可以发现空气温度与土壤含水量的变化趋势正好相反。土壤含水量的变化虽然中间下降, 但比较 2006 年和 2012 年的数值, 整体是上升的。但空气温度的变化是中间略有上升, 但比较 2006 年和 2012 年的数值, 整体是下降的。

3.1.4. 空气温度

图 4(a) 为 2006 年 5 月~2012 年 12 月共 80 个月的空气温度的逐月变化图, X 轴为月份, Y 轴为空气温度($^{\circ}\text{C}$), 其中最高温度为 22.65°C , 最低温度为 -10.25°C 。从图中可以看出空气温度的变化有明显的随季节波动变化的特征, 夏季气温高且最大值在 6、7、8 三个月, 冬季气温低且最小值在 12、1、2 三个月, 最高温度和最低温度之间的差值变化很大, 2007 年和 2010 年气温差在 30°C 左右, 2009 年的气温差只有 25°C 左右。同时观察每年的最高温和最低温的变化, 发现最高温度几乎没有变化, 在 20°C 左右, 但最低温有明显的起伏变化。

图 4(b) 为 2006~2012 年共 7 年的空气温度的年变化图, X 轴为年份, Y 轴为净辐射通量($^{\circ}\text{C}$), 其中最大值为 8.6°C , 最小值为 7.4°C 。从图中可以看出空气温度先是下降, 在 2009 年有所回升然后又持续下降, 到 2012 年达到最低值。

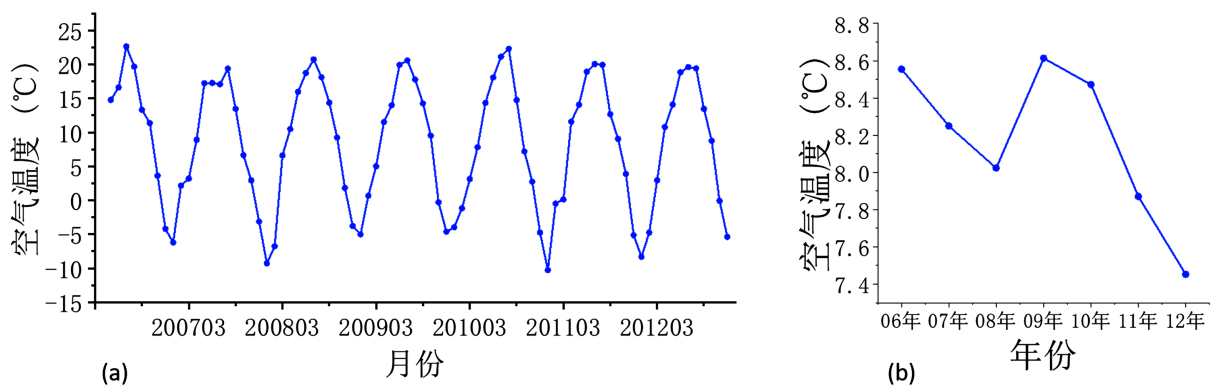


Figure 4. Change diagram of air temperature from 2006 to 2012

图 4. 2006~2012 年空气温度的变化图

3.1.5. 土壤温度

图 5(a) 为 2006 年 5 月~2012 年 12 月共 80 个月的净辐射逐月变化图, X 轴为月份, Y 轴为土壤温度($^{\circ}\text{C}$), 其中最大值为 25.3°C , 最小值为 -7.7°C 。从图中可以看出土壤温度的变化有明显的随季节波动变化的特

征, 夏季土壤温度大且最大值在 6、7、8 三个月, 冬季土壤温度小且最小值在 12、1、2 三个月, 最大值和最小值之间的差距很大, 大部分在 30℃ 左右, 2007 年偏小。同时观察每年的最大最小值的变化, 发现最大值没有明显的变化, 最小值略有起伏。

图 5(b) 为 2006~2012 年共 7 年的土壤温度的年变化图, X 轴为年份, Y 轴为土壤温度(℃), 其中最大值为 11.3℃, 最小值为 10.2℃。从图中可以看出土壤温度的变化明显是先下降后上升而后又下降, 2012 年是 7 年中的最低值, 2009 年是 7 年中的最高值。

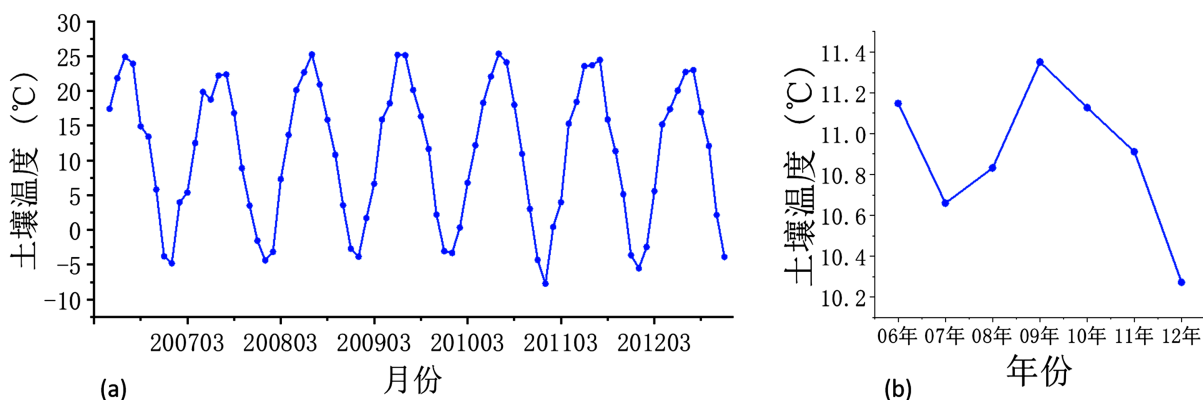


Figure 5. Plot of soil temperature from 2006 to 2012

图 5. 2006~2012 年土壤温度的变化图

与图 4 空气温度相比, 两者无论是逐月变化还是年变化, 变化几乎一样。比较逐月图, 两者都为波动变化, 最大最小值上升下降的年份、月份也可以一一对应。

3.2. 生物因子变化特征

3.2.1. 气孔导度

图 6(a) 为 2006 年 5 月~2012 年 12 月共 80 个月的气孔导度的逐月变化图, X 轴为月份, Y 轴为气孔导度(mm/s), 其中最大值为 46.1 mm/s, 最小值为 1.3 mm/s。从图中可以看出气孔导度的变化没有明显的随季节波动变化的特征, 但还是可以看出夏季大, 冬季小。最大值和最小值之间的差距很大, 但没有明显的规律, 如 2006 年起伏明显且大值多, 2009 年和 2011 年的起伏小且在低值附近徘徊。但整体上气孔导度都在 35 mm/s 以下。

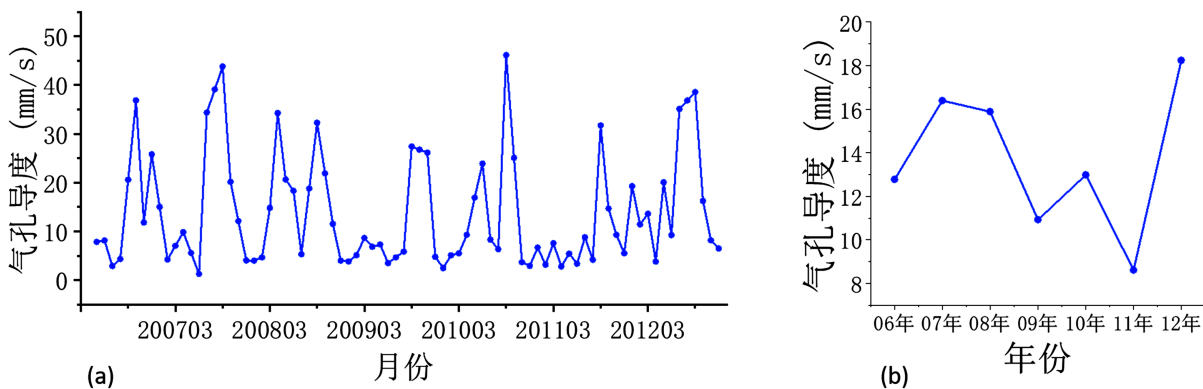


Figure 6. Changes of stomatal conductance from 2006 to 2012

图 6. 2006~2012 年气孔导度的变化图

图 6(b)为 2006~2012 年共 7 年的气孔导度的年变化图, X 轴为年份, Y 轴为气孔导度(mm/s), 其中最大值为 18.2 mm/s, 最小值为 8.6 mm/s。从图中可以看出气孔导度的变化没有什么特征。2011 年是气孔导度的最小值, 2012 年是气孔导度的最大值。

3.2.2. 植被指数 NDVI

图 7(a)为 2006 年 4 月~2012 年 12 月共 81 个月的植被指数 NDVI 的逐月变化图, X 轴为月份, Y 轴为植被指数, 其中最大值为 0.49, 最小值为 0.10。从图中可以看出植被指数的变化有明显的随季节波动变化的特征, 夏季植被指数大, 冬季植被指数小, 最大值和最小值之间的差距很明显, 最大值是最小值的 5 倍。同观察每年的最大最小值的变化, 发现最大最小值都是没有明显的规律, 但可以看出 2006 年整体偏小, 2009 年整体偏大。

图 7(b)为 2006~2012 年共 7 年的植被指数的年变化图, X 轴为年份, Y 轴为植被指数, 其中最大值为 0.246, 最小值为 0.154。从图中可以看出植被指数的变化是先升后降在上升的, 最大值和最小值之间的差距很明显, 最小值在 2006 年, 最大值在 2009 年。

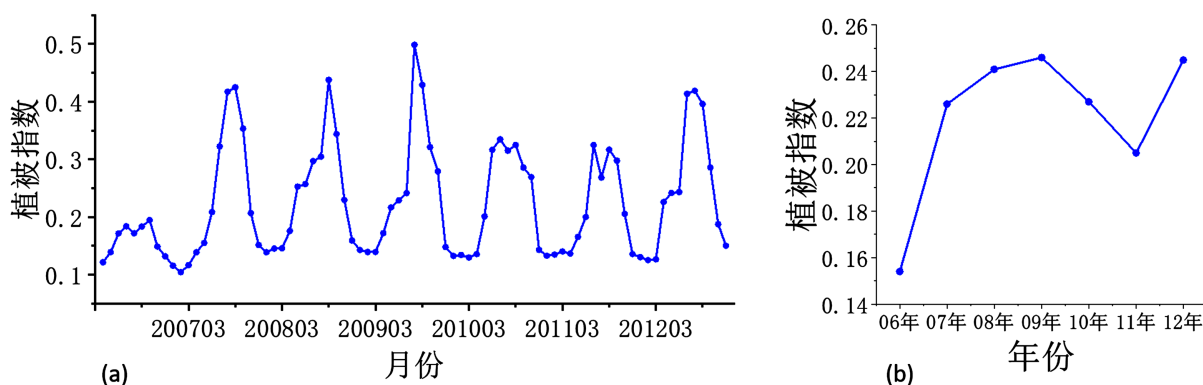


Figure 7. Changes of the vegetation index from 2006 to 2012

图 7. 2006~2012 年植被指数的变化图

3.3. 能量分配和蒸散变化特征

感热、潜热和波文比

图 8(a)为 2006 年 5 月~2012 年 12 月共 80 个月的感热通量逐月变化图, X 轴为月份, Y 轴为感热通量(W/m^2), 其中最大值为 $62.2 W/m^2$, 最小值为 $5.4 W/m^2$ 。从图中可以看出感热通量的变化有明显的随季节波动变化的特征, 春季(4~5 月份)时感热通量大, 秋季(10~11 月份)感热通量小, 最大值和最小值之间的差距很大, 大部分在 45 左右, 2006 年的差距特别大, 2010 年的差距特别小。同时观察每年的最大最小值的变化, 发现最大值没有明显的变化, 最小值有上升的趋势。

图 8(b)为 2006~2012 年共 7 年的感热通量的年变化图, X 轴为年份, Y 轴为感热通量(W/m^2), 其中最大值为 $38 W/m^2$, 最小值为 $29 W/m^2$ 。从图中可以看出感热通量的变化是先减小后增大再减小的, 2007 年是感热通量的最小值, 2011 年为最大值。

图 9(a)为 2006 年 5 月~2012 年 12 月共 80 个月的潜热通量的逐月变化图, X 轴为月份, Y 轴为潜热通量(W/m^2), 其中最大值为 $74.1 W/m^2$, 最小值为 $3.4 W/m^2$ 。从图中可以看出潜热通量的变化有明显的随季节波动变化的特征, 春夏季(5~6 月份)时潜热通量大, 秋冬季(10~11 月份)潜热通量小, 最大值和最小值之间的差距很大, 差距最大的是 2012 年, 差了 $70 W/m^2$, 差距最小的是 2006 年, 差了 $36 W/m^2$ 。同时观察每年的最大最小值的变化, 发现最大值的变化范围太大, 没有明显规律, 最小值的变

化不大。

图 9(b)为 2006~2012 年共 7 年的潜热通量的年变化图, X 轴为年份, Y 轴为潜热通量(W/m^2), 其中最大值为 $33.1 \text{ W}/\text{m}^2$, 最小值为 $18.9 \text{ W}/\text{m}^2$ 。从图中可以看出感热通量的变化是先增大后减小再增大的, 中间减小的过程中在 2009~2010 年略有增加, 但增加的量不多。2007 年为潜热通量的最大值, 2011 年为最小值。

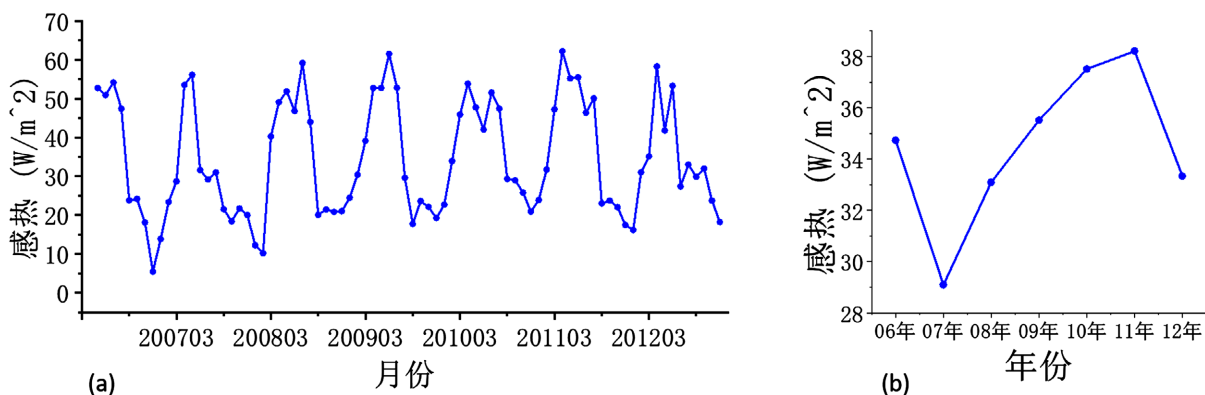


Figure 8. Changes of heat change from 2006 to 2012

图 8. 2006~2012 年感热的变化图

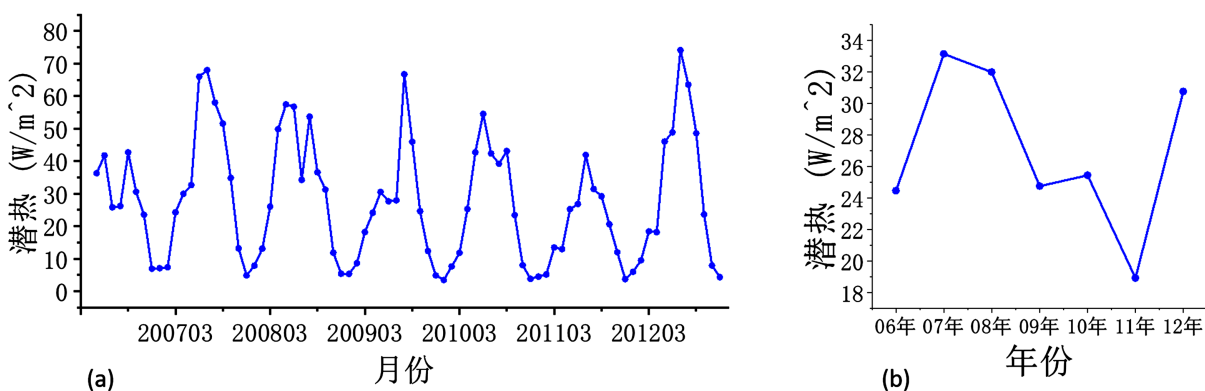


Figure 9. Changes of latent heat from 2006 to 2012

图 9. 2006~2012 年潜热的变化图

图 10(a)为 2006 年 5 月~2012 年 12 月共 80 个月的波文比的逐月变化图, X 轴为月份, Y 轴为波文比, 其中最大值为 6.57, 最小值为 0.36。从图中可以看出波文比的变化有明显的随季节波动变化的特征, 夏季波文比小且最小值在 6、7、8 三个月, 冬季波文比大且最大值在 1、2 月份, 最大值和最小值之间的差距很明显, 2010 年和 2011 年最大最小值的差距较大, 2006 年和 2007 年最大最小值的差距较小。同时观察每年的最大最小值的变化, 发现最大值是一个先升后降的趋势, 最小值比较稳定。

图 10(b)为 2006 年~2012 年共 7 年的波文比的年变化图, X 轴为年份, Y 轴为波文比, 其中最大值为 2.9, 最小值为 1.3。从图中可以看出波文比整体是先降后升的。

波文比是感热与潜热的比值。对比图 8、图 9 和图 10, 可以看出感热的最高值小于潜热的最高值, 感热的最低值大于潜热的最低值。并且感热的最低值在逐渐升高, 潜热的最高值在逐渐降低, 只有 2012 年数值有所回升, 所以波文比整体在 2006 年到 2011 年一直持续升高, 在 2012 年才略微降低。波文比的峰值在 1、2 月份, 因为冬季感热的增长速度大于潜热的增长速度。

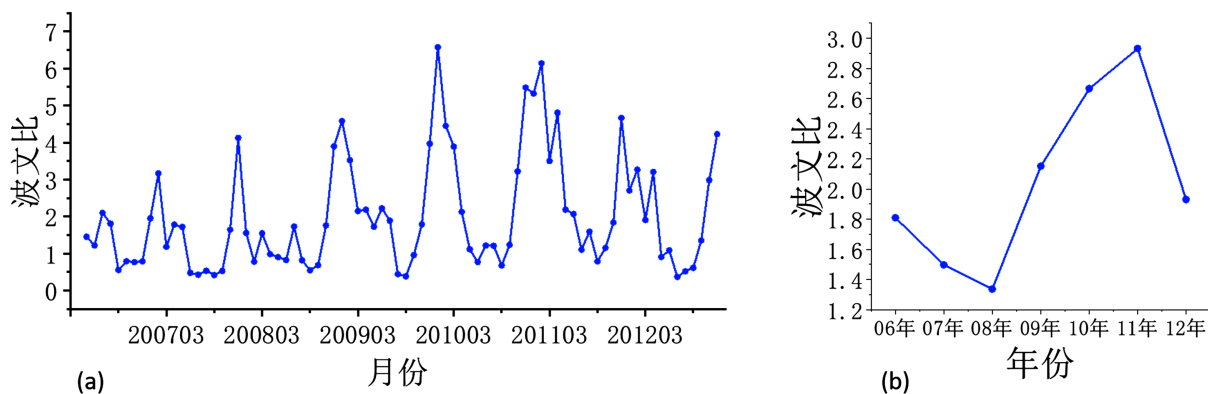


Figure 10. Plot of the Bowen ratio from 2006 to 2012

图 10. 2006~2012 年波文比的变化图

3.4. 波文比的影响因素

3.4.1. 气象条件对波文比的影响

图 11 是气象条件的距平值与波文比距平值的相关性散点图。由于各项气象要素受季节变化的影响，夏季和冬季的差别很大，画出来的相关性散点图没有太大的准确性，所以本文对各气象要素求距平值(每个月值 - 该月多年的平均值)，并以此为依据画图。

其中图 11(a)是净辐射与波文比的相关性散点图，红线是对净辐射和波文比进行线性拟合后得到的斜线，反映了净辐射与波文比的相关性，随着净辐射的增大，波文比也增大，但波文比受净辐射的影响小。由图可知，散点分布大致都集中在中间偏上区域，成左下 - 右上分布，看不出什么相关性，但对数据进行线性拟合后得出净辐射与波文比的相关系数的平方为 0.040，拟合线的斜率为 0.02 左右，说明净辐射与波文比呈较弱的正相关。

图 11(b)是空气温度与波文比的相关性散点图，红线是对空气温度与波文比进行线性拟合后得到的斜线，反映了空气温度与波文比的相关性，波文比随着温度的增加而增加。由图可知，散点分布大致都集中在中间偏上区域，散点比较分散，且分布比较均匀，对数据进行线性拟合后得出空气温度与波文比的相关系数的平方为 0.054，拟合线的斜率为 0.14 左右，呈较弱的正相关。

图 11(c)是土壤温度与波文比的相关性散点图，红线是对土壤温度与波文比进行拟合后得到的斜线，反映了土壤温度与波文比的相关性，波文比随着土壤温度的增加而增加。由散点图可知，散点分布大致都集中在中间偏上区域，散点比较分散，对数据进行线性拟合后得出土壤温度与波文比的相关系数的平方为 0.047，拟合线的斜率为 0.15 左右，呈较弱的正相关。

图 11(d)是风与波文比的相关性散点图，红线是对风速与波文比进行拟合后得到的斜线，反映了风速与波文比的相关性，波文比随着风速的增加而增加。由散点图可知，圆点分布在图的中间位置，比较分散，对数据进行线性拟合后得到的回归线显示风速与波文比的相关系数的平方为 0.004，拟合线的斜率为 0.17 左右，两者为正相关，相关性较弱。

图 11(e)是空气湿度与波文比的相关性散点图，红线是对空气湿度与波文比进行拟合后得到的斜线，反映了空气湿度与波文比的相关性，空气湿度越大，波文比越小。由散点图可知，散点分布大致都集中在中间偏上区域，散点走向成左上 - 右下分布，对数据进行线性拟合后得到的回归线显示空气湿度与波文比的相关系数的平方为 0.348，拟合线的斜率为 -0.6 左右，两者为负相关，相关性较强。

图 11(f)是土壤含水量与波文比的相关性散点图，红线是对土壤含水量与波文比进行拟合后得到的斜线，反映了土壤含水量与波文比的相关性，土壤含水量越大，波文比越小。由散点图可知，散点分布大

致都集中在中间偏左上区域，散点比较分散，对数据进行线性拟合后得到的回归线显示土壤含水量与波文比的相关系数的平方为 0.068，拟合线的斜率为-0.26 左右，两者为负相关，相关性较弱。

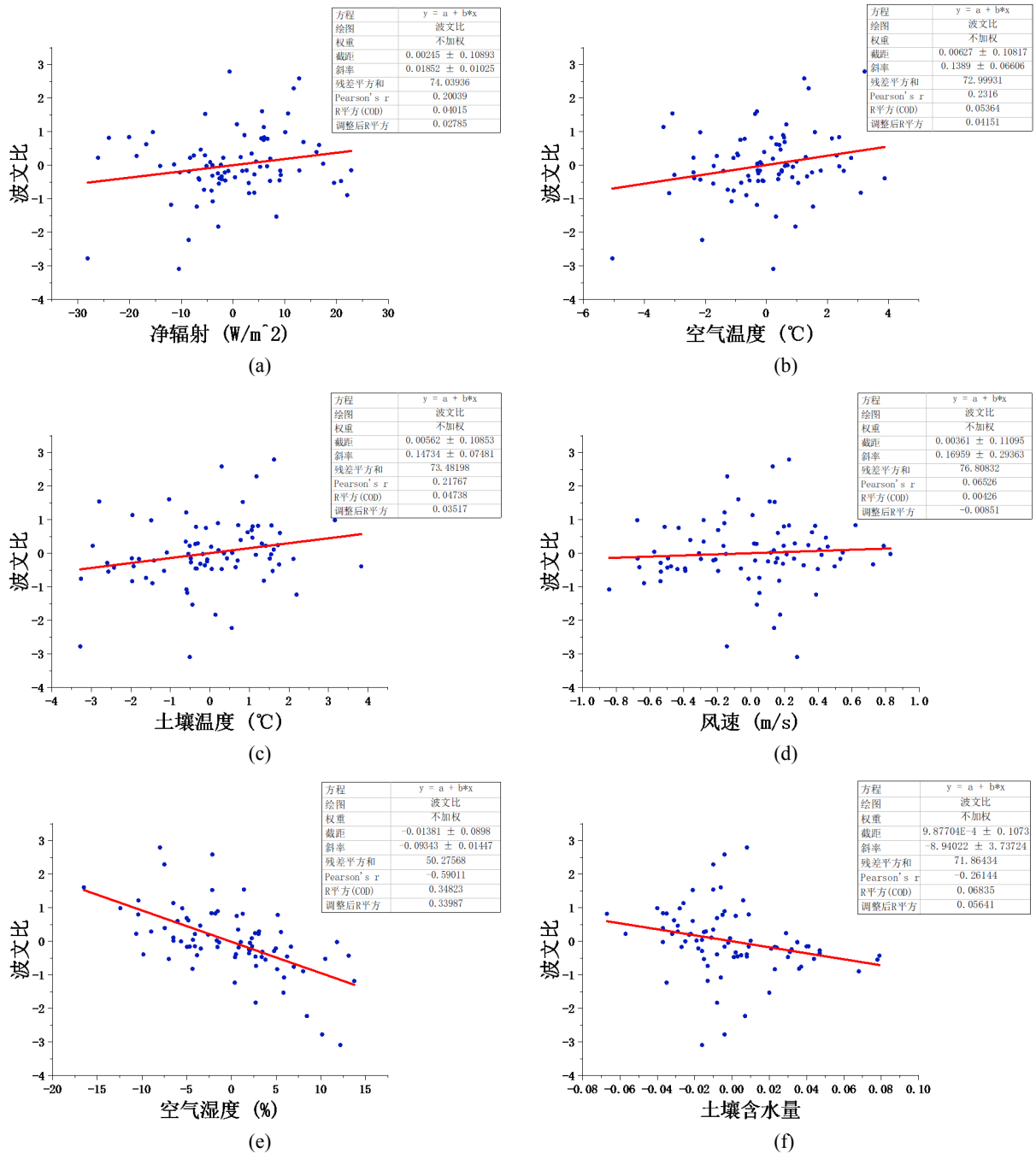


Figure 11. Scatter plot of the correlation between the meteorological conditions and the Bowen ratio

图 11. 气象条件与波文比的相关性散点图

3.4.2. 生物物理因素对波文比的影响

图 12 是生物物理因素的距平值与波文比距平值的相关性散点图。由于 NDVI 和气孔导度受季节变化的影响，夏季和冬季的差别很大，画出来的相关性散点图没有太大的准确性，所以本文对各气象要素求

距平值(每个月值 - 该月多年的平均值), 并以此为依据画图。

图 12(a)是 NDVI 与 Bowen 比的相关性散点图, 红线是对 NDVI 与 Bowen 比进行拟合后得到的斜线, 反映了 NDVI 与 Bowen 比的相关性, Bowen 比随 NDVI 的增大而减小。由散点图可知, 圆点分布在图的中间, 大多数集中在 NDVI 的数值为-0.05~0.05 之间, 在这个区域的散点不多, 看不出相关性, 对数据进行线性拟合后得到的回归线显示 NDVI 与 Bowen 比的相关系数为 0.029, 拟合线斜率为-0.17, NDVI 与 Bowen 比两者为负相关, 相关性较弱。

图 12(b)是气孔导度与 Bowen 比的相关性散点图, 红线是对气孔导度与 Bowen 比进行拟合后得到的斜线, 反映了气孔导度与 Bowen 比的相关性, Bowen 比随气孔导度的增大而减小。由散点图可知, 圆点分布在图的左侧, 比较集中, 且气孔导度越大, Bowen 比越小, 在气孔导度的距平在-10~0 时 Bowen 比的距平较大, 当气孔导度的距平大于 0 时, Bowen 比的值开始快速下降。对数据进行线性拟合后得到的回归线显示气孔导度与 Bowen 比两者的相关系数的平方为 0.229, 斜率为-0.48, 气孔导度与 Bowen 比两者为负相关, 相关性较弱。

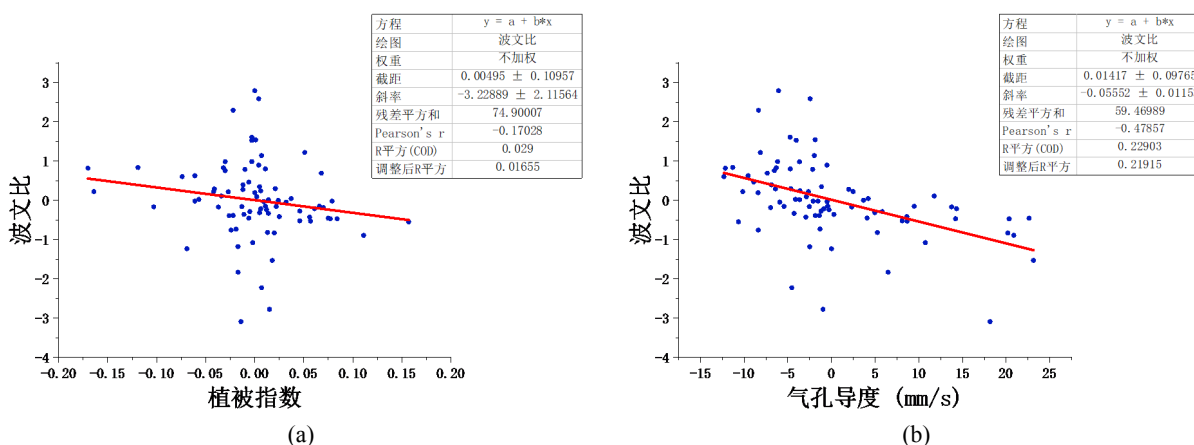


Figure 12. Effect of biophysical factors on the Bowen ratio

图 12. 生物物理因素对 Bowen 比的影响

3.4.3. 通经分析

表 1 为各气象要素的月距平之间协方差关系(即相关关系), 由表 1 可知: 在 28 对变量之间, 有 4 对变量之间通过了 0.05 水平的显著性检验, 有 11 对变量没有通过显著性检验, 剩下的 13 对变量通过了 0.01 水平的显著性检验。

Table 1. Covariance relationship between the lunar distance levels of the meteorological elements

表 1. 各气象要素的月距平之间协方差关系

X	Y	非标准估计系数(Coef.)	标准误(Std. Error)	z	p	标准估计系数(Std. Estimate)
Gs	RN	19.283	10.285	1.875	0.061	0.214
NDVI	RN	0.226	0.067	3.395	0.001	0.410
Soil_T	RN	0.663	1.726	0.384	0.701	0.043
Soil_VWC	RN	0.101	0.036	2.808	0.005	0.331
RH	RN	-9.152	7.440	-1.230	0.219	-0.139
Ta	RN	2.112	1.960	1.077	0.281	0.121

Continued

WS	RN	-1.488	0.479	-3.108	0.002	-0.371
NDVI	Gs	0.134	0.051	2.617	0.009	0.306
Soil_T	Gs	-1.939	1.390	-1.395	0.163	-0.158
Soil_VWC	Gs	0.057	0.028	2.031	0.042	0.233
RH	Gs	17.130	6.174	2.774	0.006	0.326
Ta	Gs	-2.165	1.569	-1.380	0.168	-0.156
WS	Gs	-0.758	0.368	-2.061	0.039	-0.237
Soil_T	NDVI	-0.013	0.009	-1.545	0.122	-0.175
Soil_VWC	NDVI	0.001	0.000	5.020	0.000	0.678
RH	NDVI	0.070	0.037	1.899	0.058	0.217
Ta	NDVI	-0.010	0.010	-1.033	0.302	-0.116
WS	NDVI	-0.008	0.002	-3.463	0.001	-0.420
Soil_VWC	Soil_T	-0.012	0.005	-2.524	0.012	-0.294
RH	Soil_T	-3.635	1.085	-3.350	0.001	-0.404
Ta	Soil_T	1.952	0.344	5.675	0.000	0.821
WS	Soil_T	0.247	0.067	3.673	0.000	0.450
RH	Soil_VWC	0.061	0.021	2.880	0.004	0.340
Ta	Soil_VWC	-0.002	0.005	-0.343	0.731	-0.038
WS	Soil_VWC	-0.003	0.001	-2.482	0.013	-0.289
Ta	RH	-4.582	1.246	-3.677	0.000	-0.451
WS	RH	-0.132	0.262	-0.502	0.616	-0.056
WS	Ta	0.270	0.076	3.580	0.000	0.437

表 2 为各气象要素的月距平对波文比的直接影响系数，由表可知只有净辐射 RN、气孔导度 Gs 和相对湿度 RH 三个变量与波文比之间的相关关系通过了 0.01 水平的显著性检验，其余变量都没有通过显著性检验。

Table 2. Direct effect coefficient of variables on Bowen ratio

表 2. 变量对波文比的直接影响系数

X	→	Y	非标准化路径系数	SE	z (CR 值)	p	标准化路径系数
RN	→	波文比	0.027	0.009	3.043	0.002	0.294
Gs	→	波文比	-0.044	0.010	-4.265	0.000	-0.378
NDVI	→	波文比	0.695	2.297	0.303	0.762	0.037
Soil_T	→	波文比	-0.054	0.111	-0.489	0.625	-0.080
Soil_VWC	→	波文比	-5.294	4.597	-1.152	0.249	-0.155

Continued

RH	→	波文比	-0.066	0.017	-3.923	0.000	-0.419
Ta	→	波文比	-0.013	0.104	-0.127	0.899	-0.022
WS	→	波文比	0.201	0.280	0.719	0.472	0.077

备注：→表示路径影响关系。

图 13 是净辐射(RN)、潜热(LE)、感热(Hs)、风速(WS)、空气温度(Ta)、空气湿度(RH)、土壤含水量(Soil_VWC)、土壤温度(Soil_T)、气孔导度的月距平对波文比的影响路径图。标准化路径系数为 0.1 的影响力偏小, 为 0.3 的影响力适中, 为 0.5 的影响力偏大, 大于 0.5 代表影响力非常大。从表 3 中可以看出在各气象要素中, 有的因素对波文比是正向影响, 有的因素对波文比是负向影响。从直接影响的路径系数来看, 净辐射、风速和植被指数对波文比的路径系数为正, 其他 5 个变量的路径系数都为负。其中, 净辐射的直接路径系数是各变量中最大的, 为 0.294, 是正向影响且影响力较为适中, 空气湿度的直接路径系数是各变量中最小的, 为-0.419, 是负向影响且影响力偏大。说明各气象要素中净辐射对波文比的影响最大。从间接影响的路径系数来看, 净辐射、风速、空气温度和土壤温度对波文比的路径系数为正, 其他 4 个变量的路径系数都为负。间接影响是通过其他变量对因变量波文比进行影响。其中, 净辐射的间接路径系数最大, 为 0.473, 有些偏大, 空气湿度的间接路径系数最小, 为-0.494, 偏大。

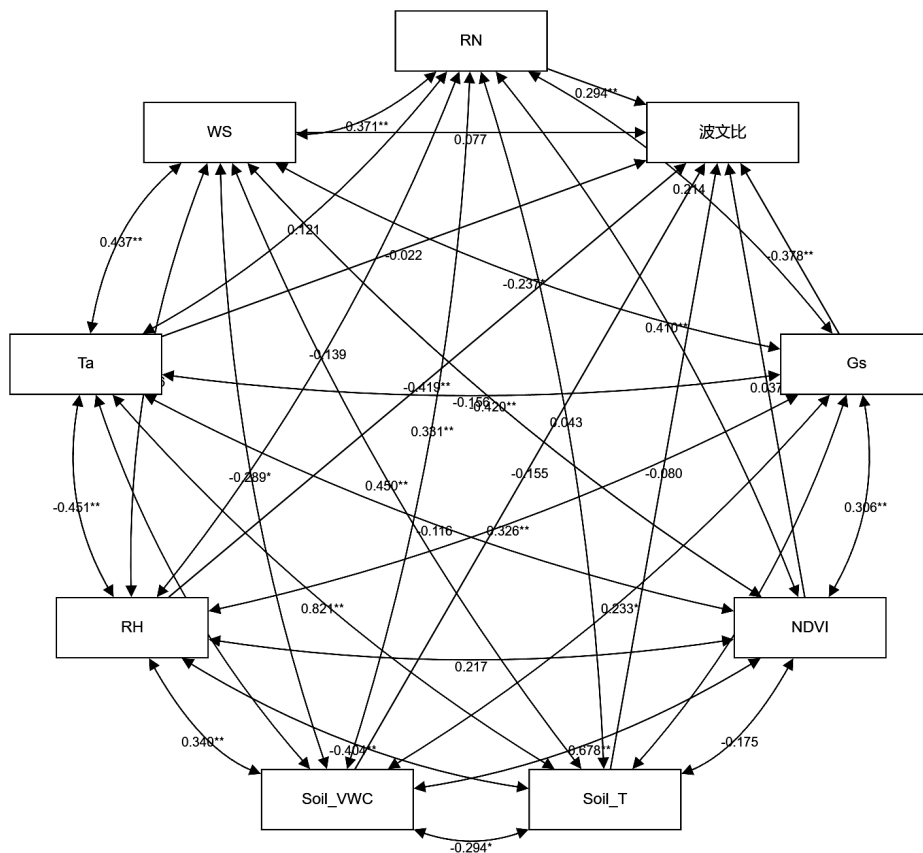


Figure 13. The effect paths of RN, WS, Ta, RH, Soil_VWC, Soil_T, NDVI, and Gs. The numbers in the figure are the standardized path coefficient, and the * number indicates the significance (* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$)

图 13. RN、WS、Ta、RH、Soil_VWC、Soil_T、NDVI、Gs 对波文比的影响路径。图中数字为标准化路径系数, *号表示显著性($p < 0.05$, ** $p < 0.01$)

Table 3. Path coefficients for the direct and indirect effects of RN, WS, Ta, RH, Soil_VWC, Soil_T, NDVI, and Gs on the Bowen ratio**表 3.** RN、WS、Ta、RH、Soil_VWC、Soil_T、NDVI、Gs 对 Bowen 比的直接和间接影响的路径系数

	RN	WS	Ta	RH	Soil_VWC	Soil_T	NDVI	Gs
直接通经	0.294	0.077	-0.022	-0.419	-0.155	-0.080	0.037	-0.378
间接通经	0.473	0.011	0.049	-0.494	-0.317	0.304	-0.061	-0.479
合计	0.767	0.088	0.027	-0.913	-0.472	0.224	-0.024	-0.857

说明各气象要素中净辐射通过其他 7 个要素对 Bowen 比造成的影响最大，其次是土壤温度和地面风速。净辐射、风速、空气温度和土壤温度对 Bowen 比有正的总路径系数，空气湿度、土壤含水量、植被指数和气孔导度对 Bowen 比有负的总路径系数。

综上所述，净辐射对 Bowen 比的正向影响最大，土壤温度和地面风速次之，空气湿度对 Bowen 比的负向影响最大，其次是气孔导度。

4. 结论

本文所用的数据为榆中站点 2006 年 5 月至 2012 年 12 月的观测资料，分析净辐射，感热，潜热，温度，湿度，土壤含水量，土壤温度以及近地面风速。绘制了各气象要素的年内，年际变化图，以及各气象要素与 Bowen 比之间的散点图，得出如下结论：

(1) 半干旱草地生态系统中地表能量随季节变化，感热和潜热都是冬季高，夏季低，感热的最高值小于潜热的最高值，感热的最低值大于潜热的最低值。Bowen 比的峰值在 1、2 月份，因为冬季感热的增长速度大于潜热的增长速度。

(2) 半干旱草地生态系统中的各气象要素的变化有很明显的季节性，春季大，秋季小。净辐射随季节波动变化，最大最小值都有上升的趋势，年平均整体是上升的；土壤含水量总体上是夏季大冬季小的，但变化较为突然，没有太大的规律，年平均整体是在上升；空气湿度夏季高冬季低，但变化非常快，没有明显的规律，年平均先升后降再上升；空气温度季节波动变化，最大几乎不变，最小值有起伏变化，年平均整体是下降的；土壤温度的变化与空气温度十分相似，上升下降的月份、年份基本能够相对应。

(3) 气候条件中辐射、温度、土壤温度、风速四个变量与 Bowen 比成正相关，Bowen 比随着它们的升高而升高，但相关性弱；湿度和土壤含水量则是负相关，Bowen 比随着它们的升高而降低，其中湿度的相关性较强，土壤含水量的相关性弱。

(4) 生物因素中植被指数和气孔导度与 Bowen 比是负相关，Bowen 比随着它们的升高而降低。其中气孔导度对蒸散起很大的作用，气孔导度的距平大于 0 时，Bowen 比开始快速下降。

(5) 各气象要素和生物因素对 Bowen 比产生影响的路径系数不同。净辐射对 Bowen 比的正向影响最大，土壤温度和地面风速次之，空气湿度对 Bowen 比的负向影响最大，其次是气孔导度。

参考文献

- [1] 侯静茹. 内蒙古东部农牧交错带干旱风险评估与区划[D]: [硕士学位论文]. 呼和浩特市: 内蒙古大学, 2017.
- [2] 王雷, 刘辉志, Bettina, K., 等. 放牧强度对内蒙古半干旱草原地气间能量和物质交换的影响[J]. 大气科学, 2009, 33(6): 1201-1211.
- [3] Gao, Q., Yuan, B. and Chess, A. (2000) Convergent Projections of *Drosophila* Olfactory Neurons to Specific Glomeruli in the Antennal Lobe. *Nature Neuroscience*, 3, 780-785. <https://doi.org/10.1038/77680>

- [4] 辛蕙羽, 王凯, 杨新明, 等. 半干旱夏季放牧草地能量收支和地表蒸散量变化特征[J]. 成都信息工程学院学报, 2014, 29(5): 539-546.
- [5] Rana, G. and Katerji, N. (2000) Measurement and Estimation of Actual Evapotranspiration in the Field under Mediterranean Climate: A Review. *European Journal of Agronomy*, **13**, 125-153. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(00\)00070-8](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(00)00070-8)
- [6] 岳平, 张强, 牛生杰, 等. 半干旱草原下垫面能量平衡特征及土壤热通量对能量闭合率的影响[J]. 气象学报, 2012, 70(1): 136-143.
- [7] Mauder, M., Oncley, S.P., Vogt, R., et al. (2007) The Energy Balance Experiment EBEX-2000. Part II: Intercomparison of Eddy-Covariance Sensors and Post-Field Data Processing Methods. *Boundary-Layer Meteorology*, **123**, 29-54. <https://doi.org/10.1007/s10546-006-9139-4>
- [8] 岳平, 张强, 杨金虎, 等. 黄土高原半干旱草地地表能量通量及闭合率[J]. 生态学报, 2011, 31(22): 6866-6876.
- [9] Hao, Y., Wang, Y., Huang, X., et al. (2007) Seasonal and Interannual Variation in Water Vapor and Energy Exchange over a Typical Steppe in Inner Mongolia, China. *Agricultural and Forest Meteorology*, **146**, 57-69. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2007.05.005>
- [10] Ryu, Y., Baldocchi, D.D., Ma, S., et al. (2008) Interannual Variability of Evapotranspiration and Energy Exchange over an Annual Grassland in California. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **113**, D09104. <https://doi.org/10.1029/2007JD009263>
- [11] Yue, P., Zhang, Q., Zhang, L., et al. (2019) Long-Term Variations in Energy Partitioning and Evapotranspiration in a Semiarid Grassland in the Loess Plateau of China. *Agricultural & Forest Meteorology*, **278**, Article ID: 107671. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107671>
- [12] Ma, N., Zhang, Y., Guo, Y., et al. (2015) Environmental and Biophysical Controls on the Evapotranspiration over the Highest Alpine Steppe. *Journal of Hydrology*, **529**, 980-992. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.09.013>
- [13] Trepekli, A., Loupa, G. and Rapsomanikis, S. (2016) Seasonal Evapotranspiration, Energy Fluxes and Turbulence Variance Characteristics of a Mediterranean Coastal Grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, **226-227**, 13-27. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.05.006>
- [14] Guo, L., Cheng, J., Luedeling, E., et al. (2017) Critical Climate Periods for Grassland Productivity on China's Loess Plateau. *Agricultural & Forest Meteorology*, **233**, 101-109. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.11.006>
- [15] Aires, L.M., Pio, C.A. and Pereira, J.S. (2008) The Effect of Drought on Energy and Water Vapour Exchange above a Mediterranean C3/C4 Grassland in Southern Portugal. *Agricultural & Forest Meteorology*, **148**, 565-579. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2007.11.001>
- [16] Miao, H., Chen, S., Chen, J., et al. (2009) Cultivation and Grazing Altered Evapotranspiration and Dynamics in Inner Mongolia Steppes. *Agricultural and Forest Meteorology*, **149**, 1810-1819. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.06.011>
- [17] Wever, L.A., Flanagan, L.B. and Carlson, P.J. (2002) Seasonal and Interannual Variation in Evapotranspiration, Energy Balance and Surface Conductance in a Northern Temperate Grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, **112**, 31-49. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(02\)00041-2](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(02)00041-2)
- [18] Liu, S., Li, S.G., Yu, G.R., et al. (2010) Seasonal and Interannual Variations in Water Vapor Exchange and Surface Water Balance over a Grazed Steppe in Central Mongolia. *Agricultural Water Management*, **97**, 857-864. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.01.016>
- [19] Zhu, G.F., Lu, L., Su, Y.H., et al. (2014) Energy Flux Partitioning and Evapotranspiration in a Sub-Alpine Spruce Forest Ecosystem. *Hydrological Processes*, **28**, 5093-5104. <https://doi.org/10.1002/hyp.9995>
- [20] Zhang, Y.Y., Zhao, W.Z., He, J.H., et al. (2016) Energy Exchange and Evapotranspiration over Irrigated Seed Maize Agroecosystems in a Desert-Oasis Region, Northwest China. *Agricultural & Forest Meteorology*, **223**, 48-59. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.04.002>
- [21] Pielke, R.A. (2001) Influence of the Spatial Distribution of Vegetation and Soils on the Prediction of Cumulus Convective Rainfall. *Reviews of Geophysics*, **39**, 151-177. <https://doi.org/10.1029/1999RG000072>
- [22] Ochsner, T.E., Sauer, T.J. and Horton, R. (2007) Soil Heat Storage Measurements in Energy Balance Studies. *Agronomy Journal*, **99**, 311-319. <https://doi.org/10.2134/agronj2005.0103S>
- [23] Huang, J.P., Zhang, W., Zuo, J.Q., et al. (2008) An Overview of the Semi-Arid Climate and Environment Research Observatory over the Loess Plateau. *Advances in Atmospheric Sciences*, **25**, 906-921. <https://doi.org/10.1007/s00376-008-0906-7>
- [24] Du, S., Wang, Y.L., et al. (2010) Sapflow Characteristics and Climatic Responses in Three Forest Species in the Semiarid Loess Plateau Region of China. *Agricultural and Forest Meteorology*, **151**, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.08.011>

-
- [25] 邹慧, 高光耀, 傅伯杰. 干旱半干旱草地生态系统与土壤水分关系研究进展[J]. 生态学报, 2016, 36(11): 3127-3136.
- [26] 任艳华. 过表达 ZmPEPC 对大豆光合效率, 耐旱和耐盐性的影响[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京农业大学, 2019.
- [27] 付嵘. 嗜钙与嫌钙金花茶的营养元素含量及对钙胁迫响应研究[D]: [硕士学位论文]. 南宁: 广西大学, 2019.
- [28] Monteith, J. and Unsworth, M. (2013) Principles of Environmental Physics: Plant, Animals, and Atmosphere. Elsevier, Oxford. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386910-4.00001-9>
- [29] Tang, Y.K., Wen, X.F., Sun, X.M., *et al.* (2014) Interannual Variation of the Bowen Ratio in a Subtropical Coniferous Plantation in Southeast China, 2003-2012. *PLOS ONE*, **9**, e88267. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0088267>