

海北高寒灌丛草甸蒸散量特征*

郑 涵^{1,2} 王秋凤^{1**} 李英年³ 朱先进¹

(¹中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; ²中国科学院大学, 北京 100049; ³中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810001)

摘 要 蒸散是陆地生态系统水分循环的重要分量, 研究典型生态系统的蒸散规律有助于认识水分循环过程, 进而为水资源合理利用提供依据. 本研究基于涡度相关法研究了 2003—2011 年海北高寒灌丛草甸生态系统的蒸散量变化特征及水分收支状况. 结果表明: 2003—2011 年, 研究区蒸散量的季节变化明显, 最大值一般出现在生长旺季的 7—8 月, 达 $4.4 \sim 5.7 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$; 最小值多出现在 1 月或 12 月 ($0.09 \pm 0.04 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$). 蒸散量的年际动态明显, 为 $451.3 \sim 681.3 \text{ mm}$, 其中, 生长季占 70% 以上. 年蒸散量与年降水量之比的平均值为 1.06 ± 0.17 , 表明该生态系统的年水分收支状况基本平衡, 几乎所有的降水都以蒸散的形式消耗.

关键词 蒸散 涡度相关法 高寒灌丛草甸 青藏高原 季节变化 年际动态 ChinaFLUX
文章编号 1001-9332(2013)11-3221-08 中图分类号 S161.4 文献标识码 A

Characteristics of evapotranspiration in an alpine shrub meadow in Haibei, Qinghai of Northwest China. ZHENG Han^{1,2}, WANG Qiu-feng¹, LI Ying-nian³, ZHU Xian-jin¹ (¹*Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*; ²*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*; ³*Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, China*). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2013, 24(11): 3221-3228.

Abstract: Evapotranspiration (ET) is an important component of hydrological cycle of terrestrial ecosystem. To study the seasonal and interannual ET variation patterns of typical ecosystems is essential to better understand the water cycle process and to provide reference for the rational utilization of water resources. By using eddy covariance method, this paper studied the seasonal and interannual variation characteristics of ET and water budget in an alpine shrub meadow ecosystem in Haibei of Qinghai from 2003 to 2011. There was an obvious seasonal variation of ET in the study area in 2003-2011, with the maximum ($4.4-5.7 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$) in the vigorous growth season (July-August) and the minimum ($0.09 \pm 0.04 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$) in January or December. The annual ET varied greatly among the nine consecutive years, being 451.3 mm in 2010 and 681.3 mm in 2007. More than 70% of the annual ET occurred in the growth season from May to September. The average ratio of annual ET to annual precipitation was 1.06 ± 0.17 , indicating that the water budget of this ecosystem was nearly balanced at year scale, and almost all the precipitation was released into atmosphere by ET.

Key words: evapotranspiration; eddy covariance method; alpine shrubland meadow; Qinghai-Tibet Plateau; seasonal variation; interannual dynamics; ChinaFLUX.

蒸散 (evapotranspiration, ET) 是陆地生态系统水分循环的重要特征参数之一, 认识并量化草地生态系统的蒸散特征有助于研究陆地生态系统的水分耗

散规律, 进而为研究生态系统水量平衡提供依据. 高寒草甸是青藏高原分布最为广泛的植被类型之一, 面积约为 120 km^2 , 相当于西藏全区草地总面积的 30.9% ^[1], 在亚洲中部及世界高寒地区均具有代表性. 因而, 研究高寒草甸的蒸散特征对评价青藏高原高寒草甸生态系统的水分循环和能量平衡具有重要意义.

* 全国生态环境十年 (2000—2010 年) 变化遥感调查与评估项目 (STSN-02-02)、国家重点基础研究发展计划项目 (2010CB833504) 和中国科学院战略性先导科技专项 (XDA05050601) 资助.

** 通讯作者. E-mail: qfwang@igsrr.ac.cn

2013-03-04 收稿, 2013-08-28 接受.

青藏高原高寒草甸生态系统主要以矮嵩草 (*Kobresia humilis*) 草甸、金露梅 (*Dasiphora fruticosa*) 灌丛草甸、小嵩草 (*K. pygmaea*) 草甸以及藏嵩草 (*K. tibetica*) 沼泽草甸为主要建群种^[2]。近年来,针对高寒草甸的蒸散特征已有相关研究和报道,但这些研究主要以矮嵩草草甸和小嵩草草甸为研究对象^[3-6],并不涉及灌丛草甸;而且因为缺乏实测资料,此类研究所依据的观测时间较短,仅分析了蒸散的日、季节变化规律,或基于相关模型对蒸散进行模拟研究^[5]。本研究利用中国陆地生态系统通量观测研究网络 (ChinaFLUX) 金露梅灌丛草甸 2003—2011 年的通量观测资料,分析了高寒灌丛草甸蒸散量的季节、年际变化特征及水分收支状况,可为深入研究高寒草甸生态系统的水分循环提供依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

本研究在中国科学院海北高寒草甸生态系统定位研究站 (海北站) 金露梅灌丛草甸试验地内 (37°39'55" N, 101°19'52" E, 海拔 3293 m) 进行。海北站地处青藏高原东北隅的青海海北藏族自治州门源县境内,金露梅灌丛草甸试验地位于海北站北部 6 km 的干柴滩。该区具有明显的高原大陆性气候特征,受海拔制约,年均温度为 -1.6 °C,最热月为 7 月 (10.1 °C),最冷月为 1 月 (-15.0 °C)。年均降水量 560 mm,降水主要集中于 7 月和 8 月^[7]。土壤类型为暗沃寒冻锥形土^[2],有机质含量丰富,土层较薄,地温较低,土壤湿度高,土质比较松软。金露梅灌丛株高 30~40 cm,最高可达 60 cm。底层草本植物组成较多,优势种为藏异燕麦 (*Helictotrichon tibeticum*) 和垂穗披碱草 (*Elymus nutans*),草本层平均株高 8~20 cm。根据当地的气候条件,该高寒灌丛草甸于 4 月底或 5 月初返青;地上生物量从 5 月开始逐渐增加,7 月底或 8 月达到最大,10 月初开始衰老^[8]。

1.2 观测方法

高寒灌丛草甸的通量观测塔建于 2002 年 9 月下旬,由一套开路涡度相关系统和一套常规气象要素测量系统组成。涡度相关系统安装高度距地面 2.2 m,由三维超声风速仪 (CSAT3, Campbell, USA) 和开路红外 CO₂/H₂O 分析仪 (Li-7500, Li-Cor Inc., USA) 组成,数据采集器 (CR23XTD, CSI, USA) 以 10 Hz 频率采集观测数据,所有变量经系统处理后输出 30 min 平均值。常规气象要素测定系统包括安装在距地面 1.5 m 的辐射测定仪 (CNR-1, Kipp &

Zonen, Netherlands) 和光量子测定仪 (LI190SB, Li-Cor Inc., USA),用于测量长、短波辐射和光合有效辐射。同时,在距离地面 1.1 和 2.2 m 处测量空气温度/湿度 (HMP45C, CSI, USA) 和风速 (014A&034A-L, CSI, USA)。在地面以下 20 和 40 cm 处使用 TDR 探针 (CS615, CSI, USA) 测量土壤含水量。降水数据采用气象观测场人工观测数据。关于海北高寒灌丛草甸通量塔的更多详细信息可参考文献^[9]。通量塔所在地地势开阔,有足够大的风浪区。已有研究表明,该生态系统能量闭合程度超过 0.7^[10]。

1.3 计算公式

本文采用涡度相关技术测定的水汽通量作为蒸散量。水汽通量是通过直接测定大气中湍流运动所产生的水汽浓度脉动和垂直风速脉动来求算^[11],计算公式为:

$$ET = \overline{w' \rho_v'}$$

式中:ET 为水汽通量,即蒸散量; w' 为垂直风速脉动值; ρ_v' 为水汽浓度脉动值;上划线表示协方差。

1.4 数据处理

本文对 2003—2011 年海北高寒灌丛草甸涡度相关系统采集的半小时平均水汽通量数据及相关微气象要素数据进行分析。涡度相关系统由于降雨、标定、断电和仪器故障等原因难免会造成部分观测数据缺失和一些数据异常点的出现,故需要对原始数据进行预处理,以控制数据质量,保证进一步研究结果的可靠性。采用 ChinaFLUX 通用数据处理流程对 30 min 通量数据进行数据处理^[12],包括三次坐标旋转、WPL 校正^[13]及无效数据剔除等。

剔除异常数据后,水汽通量的缺失小于 2 h 时使用线性内插法,大于 2 h 时则使用查表法 (look-up table) 进行插补^[14];气象数据缺失小于 2 h 时使用线性内插法,而大于 2 h 时则利用海北站气象观测场观测数据进行插补。通过对全部时间段缺失数据的插补计算,得到海北灌丛草甸生态系统全年逐日逐半小时的蒸散量数据。

生长季划分方法^[15]为:连续 5 d 平均温度大于 0 °C 为生长季的起始日期,连续 5 d 平均温度小于 0 °C 为生长季的结束日期。

本研究采用 SPSS 16.0 软件进行统计分析,采用 Matlab R2009a 进行绘图。相关性分析采用简单相关分析 (simple correlation analysis), $P < 0.05$ (双尾) 时即确定为相关性显著。

2 结果与分析

2.1 高寒灌丛草甸生态系统环境因子的季节动态

2003—2011 年,高寒灌丛草甸的气温(T_a)、饱和水汽压差(VPD)、净辐射(R_n)、降水(PPT)和土壤含水量(SWC)等环境因子的季节动态明显,均表现为生长季高、非生长季低的动态特征(图 1)。

观测期内的 T_a 最大值均出现于 7 月中旬至 8 月中旬,为 13.0~17.3 °C,平均值为(14.4±1.7) °C;最小值多出现在 1—2 月,平均值为(-21.3±1.9) °C。与 T_a 相比,各年的 R_n 最大值出现时间较早,通常出现在 6—7 月,为 19.45~21.48 MJ·m⁻²·d⁻¹;最小值出现在 1—2 月,均小于零。VPD 的年内季节性波动比

T_a 和 R_n 剧烈得多,最大值出现时间的年际差异很大,但大多情况下都出现在 4、5 月,为 0.70~1.02 kPa。

各环境因子在生长季(5—9 月)与非生长季之间表现出明显差异。观测期间,生长季的平均气温(7.0 °C)明显高于非生长季,土壤温度(T_s)和 VPD 亦然(表 1)。生长季的平均净辐射为 1833.30 MJ·m⁻²,占年总量的 64.3%。生长季降水量为 349.7~472.9 mm,占年总降水量的 81.3%~89.9%(平均值为 84.2%)。土壤含水量在降水事件发生后呈上升趋势,由于生长季降水丰富,该阶段的 SWC 值较大且波动明显(图 1),生长季 20 和 40 cm 深处 SWC 平均值分别为 0.29 和 0.27 m³·m⁻³。

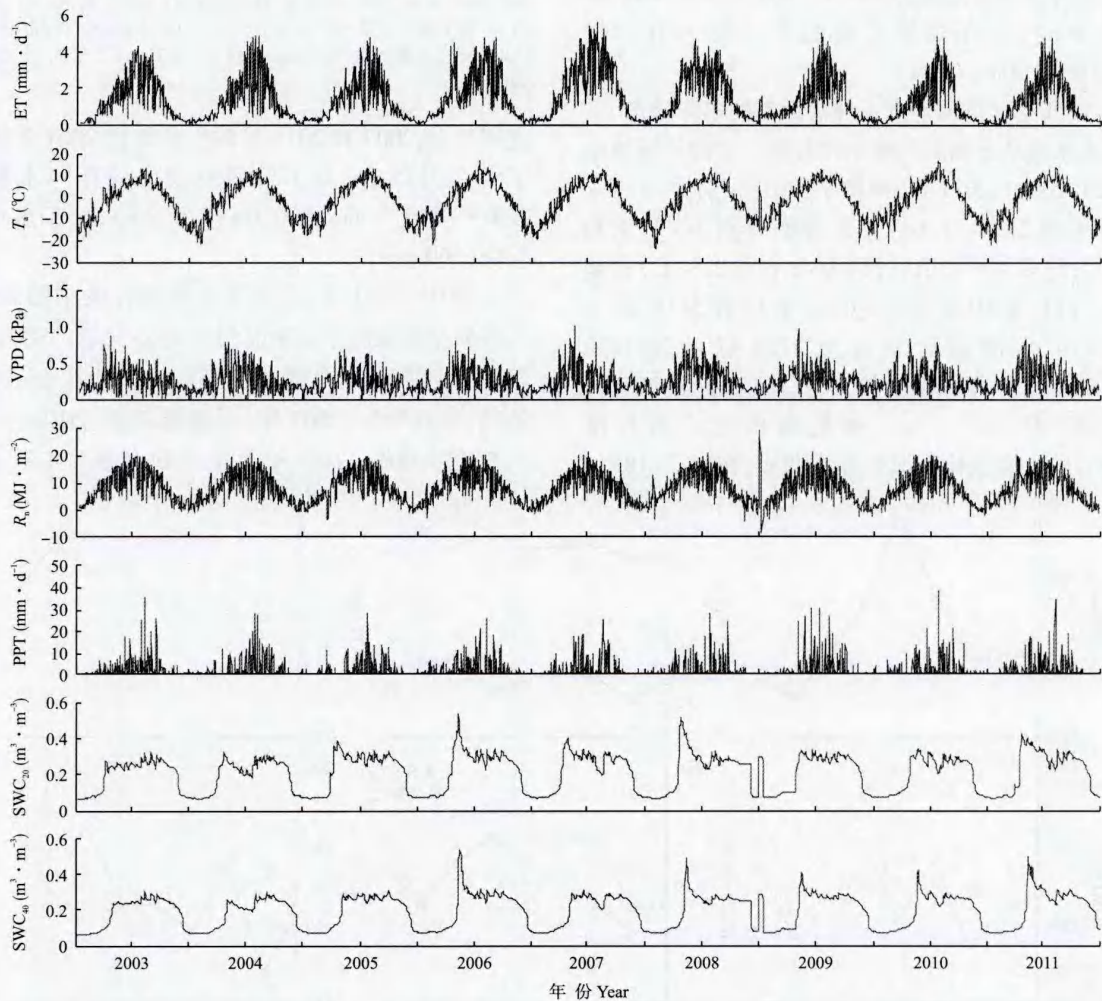


图 1 蒸散量、气温、饱和水汽压差、净辐射、降水量和土壤含水量的季节与年际变异(日尺度)

Fig. 1 Seasonal and interannual variation in evapotranspiration, air temperature, vapor pressure deficit, net radiation, precipitation and soil water content (daily scale).

ET: 蒸散量 Evapotranspiration; T_a : 气温 Air temperature; VPD: 饱和水汽压差 Vapor pressure deficit; R_n : 净辐射 Net radiation; PPT: 降水量 Precipitation; SWC₂₀ 和 SWC₄₀: 20 和 40 cm 深土壤含水量 Soil water content at the depth of 20 and 40 cm. 下同 The same below.

2.2 高寒灌丛草甸生态系统蒸散量的季节变化

2003—2011年,高寒灌丛草甸蒸散量的季节变化趋势明显且基本一致:3、4月的ET较低,进入生长季后ET逐渐升高,在生长旺季的7—8月达到最大值,之后随着生长季的结束,ET逐渐下降,并在12月降至最低。

2003—2011年,ET最大值出现的时间并不完全一致,除2006和2008年外,其他年份均出现在7月。研究期间,ET最大值在 $4.4 \sim 5.7 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$,平均值为 $(4.9 \pm 0.4) \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$;最小值一般出现在1月或12月,平均值仅 $(0.09 \pm 0.04) \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。在生长季内,植物生长旺盛,水热条件丰富,为蒸散提供了有利条件,蒸散量占全年蒸散量的比例较大。本研究中,生长季ET总量为 $347.1 \sim 504.1 \text{ mm}$ ($386.1 \pm 48.2 \text{ mm}$),占年蒸散总量的 $67.6\% \sim 76.9\%$ ($73.1\% \pm 2.5\%$) (表1)。

2.3 高寒灌丛草甸生态系统蒸散量的年际动态

高寒灌丛草甸的气候条件具有一定的年际波动(图2)。2003—2011年,年均 T_a 和 T_s 分别为 $-1.9 \sim -0.6 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $2.2 \sim 3.6 \text{ }^\circ\text{C}$,平均值分别为 -1.3 和 $2.7 \text{ }^\circ\text{C}$,与多年平均值(分别为 -1.6 和 $2.3 \text{ }^\circ\text{C}$)相差不大。VPD的年际波动较小,年均值为 $0.25 \sim 0.28 \text{ kPa}$ 。年净辐射总量为 $2720.47 \sim 3011.00 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,年际变异较大,平均值为 $(2850.12 \pm 103.34) \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。观测期内生长季长度(GSL)的逐年变化情况也非常明显,在 $147 \sim 185 \text{ d}$

表1 2003—2011年海北高寒灌丛草甸蒸散量及各环境因子的统计值

Table 1 Summary of ET and environmental factors at the alpine shrub meadow in Haibei from 2003 to 2011

环境因子 Environmental factor	全年 Annual		生长季 Growing season	
	平均值 Average	标准差 SD	平均值 Average	标准差 SD
R_n ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$)	2850.12	103.34	1833.30	36.16
T_a ($^\circ\text{C}$)	-1.30	0.40	7.00	0.50
T_s ($^\circ\text{C}$)	2.70	0.40	9.70	0.60
VPD (kPa)	0.26	0.01	0.33	0.03
PPT (mm)	500.6	43.0	422.0	40.7
SWC ₂₀ ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)	0.21	0.01	0.29	0.02
SWC ₄₀ ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)	0.20	0.01	0.27	0.02
U ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	1.73	0.10	1.64	0.10
ET (mm)	529.0	70.7	386.1	48.2

ET:蒸散量 Evapotranspiration; T_a :气温 Air temperature; VPD:饱和水汽压差 Vapor pressure deficit; R_n :净辐射 Net radiation; T_s :土壤温度 Soil temperature; PPT:降水量 Precipitation; SWC₂₀和SWC₄₀:20和40 cm深土壤含水量 Soil water content at the depth of 20 and 40 cm; U :2.2 m高处风速 Wind speed at the height of 2.2 m. 下同 The same below.

之间波动,2009和2011年的生长季比2004年提前了1个月以上(38 d)。研究期内的年降水量为 $429.9 \sim 565.2 \text{ mm}$ ($500.6 \pm 43.0 \text{ mm}$),低于多年平均值(560 mm)。

2003—2011年,受各年气候条件波动的影响,高寒灌丛草甸的年蒸散总量变化较复杂,呈明显的年际变化特征,年蒸散量在 $451.3 \sim 681.3 \text{ mm}$ 之间波动,最高年份(2007年)是最低年份(2010年)的1.51倍。2006—2008年的年ET均大于多年平均值

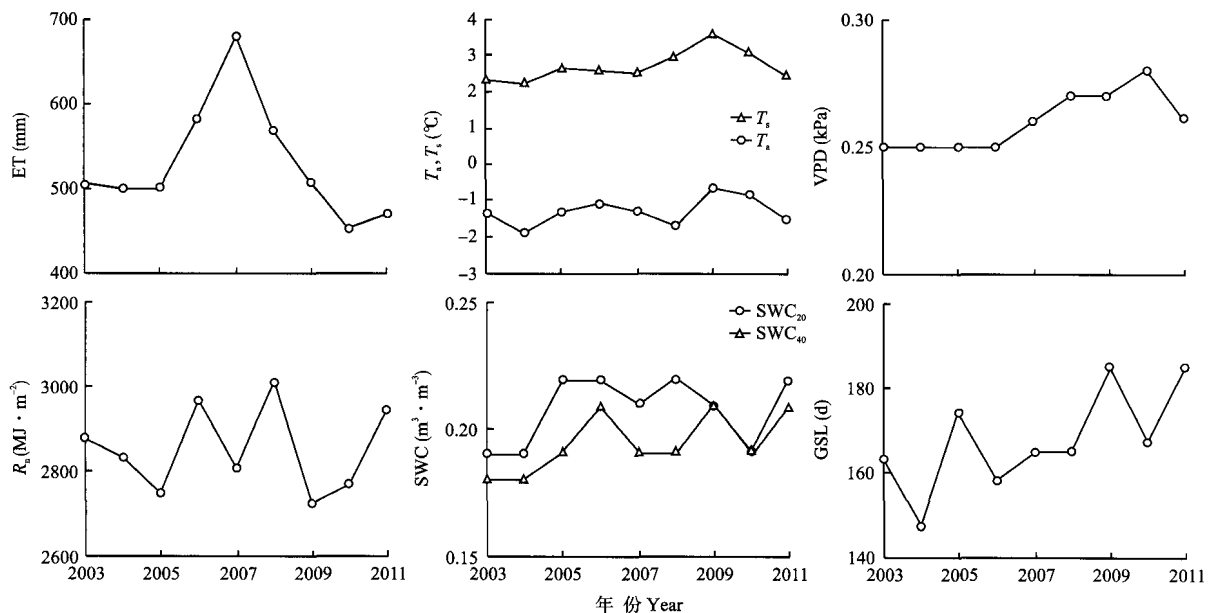


图2 海北高寒灌丛草甸年蒸散量及气候要素的年际变化

Fig. 2 Interannual variation of annual ET and climatic elements at the alpine shrub meadow in Haibei.

T_s :土壤温度 Soil temperature; GSL:生长季长度 Length of growing season.

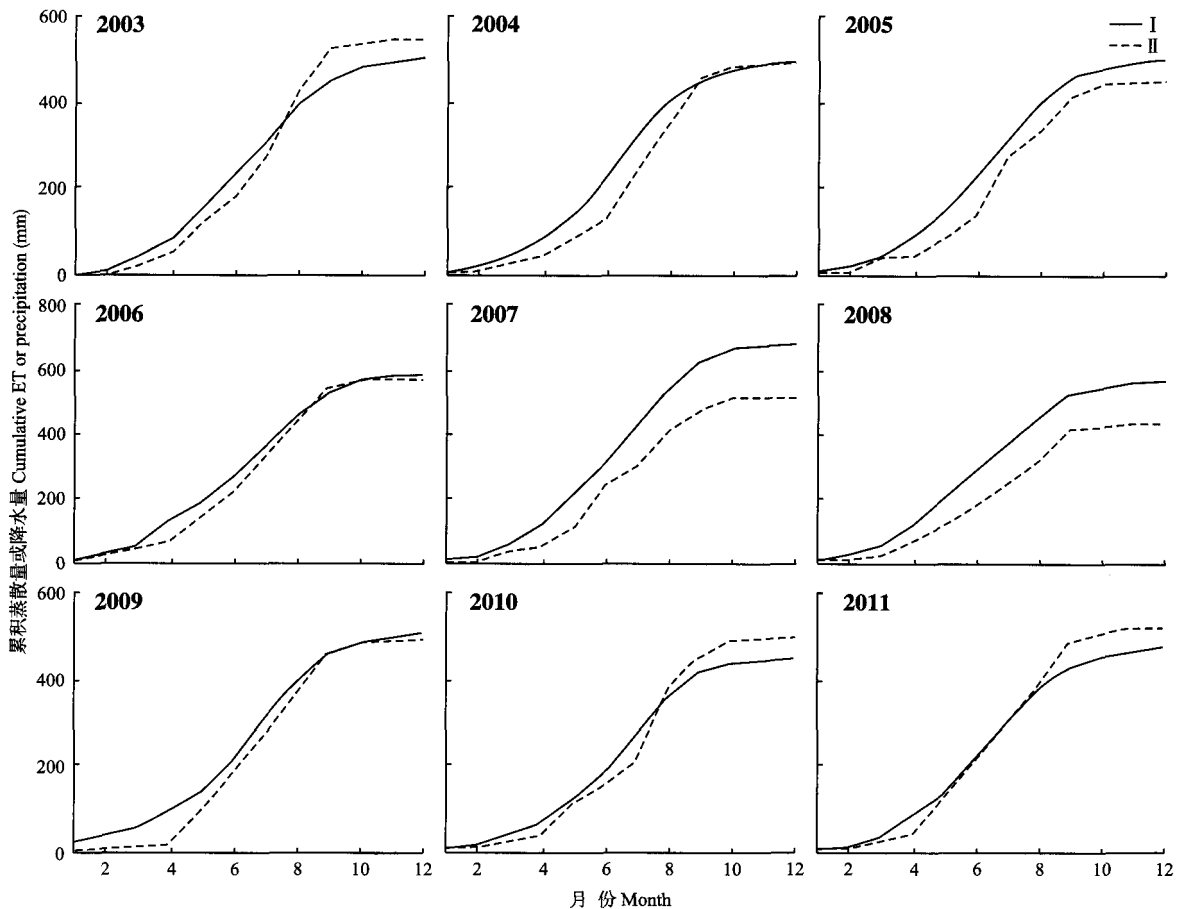


图3 2003—2011年海北高寒灌丛草甸累积蒸散量(I)和累积降水量(II)

Fig. 3 Cumulative ET (I) and precipitation (II) at the alpine shrub meadow in Haibei from 2003 to 2011.

(529.0 mm),其他年份的年ET均小于多年平均值. 2003—2011年该生态系统的年蒸散量与多年平均蒸散量的差值在-77.7~152.4 mm.

2.4 高寒灌丛草甸生态系统的水分收支状况

降水量和蒸散量分别是天然陆地生态系统中水分收入项和支出项中最大的分量,也是解释其水分收支状况的关键.由图3可以看出,研究期间,海北高寒灌丛草甸在一年中的早春时节(3、4月),累积ET明显高于累积降水量,以2007和2009年尤其明显;随着生长季的开始,降水量逐渐增加,累积降水量的增加速度超过累积ET的增加速度,在多数年份,累积降水量在年内均超过累积ET,除2005、2007和2008年累积降水量小于累积ET,并且不同年份,累积降水量超过累积ET的时间有所不同,如2003年出现在8月,2004年则出现在9月.2003、2010和2011年的累积降水量稍大于累积ET,ET占降水的比例高达91%;其余年份的累积降水量均小于累积ET,其中,2007和2008年水分亏缺比较严重,亏缺量(PPT-ET)分别为171.3和137.8 mm.研究时期内,

各年的年ET与降水量之比在0.90~1.34,平均值为 1.06 ± 0.17 ,表明该生态系统的年水分收支状况基本平衡,几乎所有的降水都以蒸散的形式消耗.

3 讨 论

本研究基于ChinaFLUX金露梅灌丛草甸2003—2011年的通量观测资料对海北高寒灌丛草甸生态系统蒸散量的季节、年际变化特征及水分收支状况进行分析,结果表明,该生态系统蒸散量的季节、年际动态明显,年水分收支状况基本平衡.此外,本研究还对比分析了海北高寒灌丛草甸与其他位于同类地区的典型草地生态系统的蒸散状况,以分析海北高寒灌丛草甸蒸散量在全球草地蒸散中的作用.

3.1 蒸散量的季节变化

高寒灌丛草甸蒸散量的季节动态明显,与矮嵩草草甸^[3]和小嵩草草甸^[6]类似.生长季前期的ET较低,这是因为此时 R_n 、 T_a 和植物叶面积指数均较低;随着生长季的开始,ET逐渐增大,并在生长旺季获得最大值,这是因为此时 R_n 也在逐渐增加,气温

升高、植物生长增强,同时,81.3%~89.9%的降水分布于生长季,也说明降水与蒸散同步;在生长季末期,蒸散量逐渐下降,在12月降至最低,这是由于太阳高度角的变化使 R_n 减小、气温下降、且植被慢慢衰老。可见,蒸散量的季节变化取决于植被的生长状况、降水的季节性分布以及有效能的变化。

海北高寒灌丛草甸蒸散量的季节变化为单峰曲线,但稍有差异,这与降水量的分布有关。如2006年DOY100—DOY119期间出现一短期ET小高峰,这与降水的分布有关,与其他年份同期相比,该段时间降雨事件较多且量较大;2008年DOY107—DOY254期间的日蒸散量变化较小,没有呈现明显的单峰值,这

与2008年生长期降雨量非常低(349.7 mm)有关。

3.2 与其他草地类型蒸散状况的比较

为了分析海北高寒灌丛草甸的蒸散量在全球草地蒸散中的作用,对比分析了海北高寒灌丛草甸与其他位于全球不同地区但同纬度地带草地生态系统以及亚洲部分典型草地生态系统的蒸散状况(表2)。从中可以看出,本研究的蒸散量与欧洲C₃-C₄混合草原^[16]的年蒸散量相当,大于西班牙高寒灌丛生态系统^[17]和细茎针茅草原^[18]。美洲各生态系统的ET变异较大,本研究中高寒灌丛草甸的蒸散量与美国休闲地生态系统^[19]相当,却远小于其高草草原^[20],但远大于一年生草地^[21]。总体而言,与全球

表2 不同草地类型蒸散状况的比较^{a)}

Table 2 Comparison of ET among different grassland types^{a)}

国家 Country	纬度、经度 Latitude, longitude	海拔 Altitude (m)	植被类型 Vegetation type	T_a (°C)	PPT (mm)	ET (mm)	时间范围 Time period	文献 Reference
美国 USA	35°58'41" N, 79°05'39" W	163	休闲地 Old field ecosystem	14.7±0.4	1092±180	563±78	2001—2004	[19]
美国 USA	36°56' N, 96°41' W	350	高草草原 Tallgrass prairie	15.3±0.7	1170±58	712±87	1997—1999	[20]
美国 USA	38°25' N, 120°57' E	129	一年生草地 Annual grassland	15.8±0.4	561±197	319±44	2001.07—2007.06	[21]
日本 Japan	36°06' N, 140°06' E	-	湿生混合草原 Wet mixed grassland	15.4	1194.2	808.5	1999	[29]
西班牙 Spain	36°56'26" N, 2°01'59" W	200	细茎针茅草原 Alpha grassland	17.2±0.4	252±42	111.1±13.4	2006.06—2009.06	[18]
西班牙 Spain	37°05' N, 2°57' W	2300	高寒灌丛 Alpine shrubland	5.8	402	386	2007	[17]
葡萄牙 Portugal	38°28'28" N, 8°01'25" W	190	C ₃ -C ₄ 混合草原 C ₃ -C ₄ co-exsiting grassland	14.2±0.5	644±220	501±112	2004.10—2008.10	[16]
蒙古 Mongolia	47°12'50" N, 108°44'14" E	1235	典型草原 Typical steppe	1.2	248	163	2003.3—2004.3	[22]
蒙古 Mongolia	47°12'50" N, 108°44'14" E	1235	典型草原 Typical steppe	1.2	157±59	143±28	2003—2006	[23]
中国 China	34°21' N, 100°30' E	3963	高寒退化草地 Alpine degraded grassland	0.2±0.4	479.0±17.7	462.02±11.20	2006—2008	[6]
中国 China	37°36' N, 101°18' E	3250	高寒矮蒿草甸 Alpine meadow	-1.2±0.5	642±79	391±45	2002—2004	[3]
中国 China	42°02'48" N, 116°17'01" E	1350	典型草原 Typical steppe	2.73	424	434	2005.12—2006.11	[24]
中国 China	43°33'16" N, 116°40'17" E	1250	退化草地 Degraded grassland	1.51	202	282	2005.12—2006.11	[24]
中国 China	43°33'02" N, 116°40'20" E	1250	围封草地 Fenced grassland	1.45	202	448	2005.12—2006.11	[24]
中国 China	43°32' N, 116°40' E	1200	典型草原 Typical steppe	-0.4	350	350	2004	[25]
中国 China	44°05' N, 113°34' E	974	荒漠草原 Desert steppe	5.89	162.1	209.1	2008—2009	[26]
中国 China	44°25' N, 122°52' E	184	退化草地 Degraded grassland	6.7±0.7	296±85	291.5±83.6	2003—2008	[27]
中国 China	44°35' N, 123°30' E	171	草甸草原 Meadow steppe	7.5	296.1	315.7 ^{b)}	2007—2008	[28]
中国 China	37°39'55" N, 101°19'52" E	3293	高寒灌丛草甸 Alpine meadow	-1.3±0.4	500.6±43.0	529.0±70.7	2003—2011	本研究 This study

a)表中数据均为涡度相关法获得 All the data in the table were acquired by the eddy covariance method. b)生长季蒸散量,其余均为全年蒸散量 Growing season ET, the rest were the annual ET.

同纬度地区其他生态系统相比, 亚洲高寒灌丛草甸生态系统的蒸散量居于欧洲和美洲草地生态系统之间。

在亚洲地区, 表 2 中所列的中国和蒙古的草地生态系统的年 ET 均小于日本的湿生混合草原^[3,6,22-29], 主要是因为该湿生混合草原的年降水量 (1194.2 mm) 远大于前两者。另外, 尽管所列举的中国地区的草地生态系统的年降水量差异较大, 但其年 ET 均大于蒙古地区。在中国, 高寒灌丛草甸的蒸散量最大。高寒地区的 3 个生态系统的蒸散量大小顺序为: 高寒灌丛草甸 > 高寒退化 (小嵩草) 草甸 > 高寒矮嵩草草甸, 温带荒漠草原和退化草地的蒸散量最低, 这可能是由不同地区降水量的差异所致。

3.3 高寒灌丛草甸的水分收支状况

蒸散量作为水分损失的重要组成部分, 在陆地水循环中起着重要作用, 全球陆地表面约 60% 的降水是通过蒸散作用再返回回到大气中^[30]。在高寒灌丛草甸, 全年 ET/PPT 的范围为 0.90 ~ 1.34, 该结果略大于高寒退化小嵩草草地 (0.95 ~ 0.98)^[3] 和高寒矮嵩草草甸 (0.58 ~ 0.64)^[6]。

降水与蒸散量的差值 (PPT-ET) 可以用来表示生态系统的水分收支状况。在本研究中, 2003、2010 和 2011 年的水分收支为正值, 表示有部分水分盈余; 其余 6 年均存在水分亏缺现象, 其中, 2007 和 2008 年水分亏缺比较严重 (分别为 171.3 和 137.8 mm), 主要是因为 2007 年生长季蒸散量较大、2008 年降水量低。本研究所得结果与青藏高原上其他研究有所差异。有研究表明, 矮嵩草草甸和小嵩草草甸的水分收支均为正值^[3,6], 除了植被类型不同外, 还可能与降水量和 ET 的年际波动有关。因而, 分析典型生态系统的水分收支状况不能单纯依靠短期观测结果, 而应致力于长期观测以获取更充分的数据来支撑相关研究结果。

在陆地水循环中, 水分支出项除了蒸散量外还包括地表径流、土壤水分渗漏和土壤水分储存。但在本研究观测期内, 蒸散量与降水量大致相当, 这可能是因为, 通量塔位置地势较平坦, 且单次降水量不大, 地表径流仅偶尔发生且总量很小, 对整个生态系统的水分收支状况影响不大。在年尺度上, 土壤水分储存项可忽略不计^[31]。生长季内, 20 和 40 cm 深的土壤含水量波动都较大 (分别为 0.18 ~ 0.54 和 0.11 ~ 0.54 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$), 表示 SWC₂₀ 和 SWC₄₀ 与蒸散和降水密切相关。SWC 作为 ET 的影响因素已在大量文献中得到证明^[3,27], 在高寒灌丛草甸, 除了表层

SWC, 深层 SWC (40 cm 深) 也受到蒸散的影响, 因而土壤水分渗漏量非常小。

参考文献

- [1] Xu L-L (徐玲玲), Zhang X-Z (张宪洲), Shi P-L (石培礼), et al. The determination of the apparent quantum yield and maximum photosynthesis rates over an alpine meadow ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Science in China Series D (中国科学·D 辑)*, 2004, **34**(suppl. II): 125-130 (in Chinese)
- [2] Li Y-N (李英年), Zhao X-Q (赵新全), Wang Q-X (王勤学), et al. The comparison of community biomass and environmental condition of five vegetational type in alpine meadow of Haibei, Qinghai Province. *Journal of Mountain Science (山地学报)*, 2003, **21**(3): 257-264 (in Chinese)
- [3] Gu S, Tang YH, Cui XY, et al. Characterizing evapotranspiration over a meadow ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research*, 2008, **113**: D08118
- [4] Qi P-T (戚培同), Gu S (古松), Tang Y-H (唐艳鸿), et al. Comparison of three methods for measurement of evapotranspiration in an alpine meadow. *Acta Ecologica Sinica (生态学报)*, 2008, **28**(1): 202-211 (in Chinese)
- [5] Fu G (付刚), Shen Z-X (沈振西), Zhang X-Z (张宪洲), et al. Modeling the evapotranspiration of an alpine meadow ecosystem in the northern Tibet Plateau based on MODIS images. *Acta Prataculturae Sinica (草业学报)*, 2010, **19**(5): 103-112 (in Chinese)
- [6] Li J-M (李婧梅), Cai H (蔡海), Cheng Q (程茜), et al. Characterizing the evapotranspiration of a degraded grassland in the Sanjiangyuan region of Qinghai Province. *Acta Prataculturae Sinica (草业学报)*, 2012, **21**(3): 223-233 (in Chinese)
- [7] Li Y-N (李英年), Zhao X-Q (赵新全), Cao G-M (曹广民), et al. Analyses on climates and vegetation productivity background at Haibei alpine meadow ecosystem research station. *Plateau Meteorology (高原气象)*, 2004, **23**(4): 558-567 (in Chinese)
- [8] Zhao L, Li YN, Xu SX, et al. Diurnal, seasonal and annual variation in net ecosystem CO₂ exchange of an alpine shrubland on Qinghai-Tibetan Plateau. *Global Change Biology*, 2006, **12**: 1940-1953
- [9] Zhao L, Li YN, Gu S, et al. Carbon dioxide exchange between the atmosphere and an alpine shrubland meadow during the growing season on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2005, **47**: 271-282
- [10] Li Z-Q (李正泉), Yu G-R (于贵瑞), Wen X-F (温学发), et al. Evaluation of the energy balance state of China flux observation network (ChinaFLUX). *Science in China Series D (中国科学·D 辑)*, 2004, **34**(suppl. II): 46-56 (in Chinese)
- [11] Yu G-R (于贵瑞), Sun X-M (孙晓敏). Principles of Flux Measurement in Terrestrial Ecosystems. Beijing:

- Higher Education Press, 2006 (in Chinese)
- [12] Yu GR, Fu YL, Sun XM, *et al.* Recent progress and future directions of ChinaFLUX. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2006, **49**: 1–23
- [13] Webb EK, Pearman GI, Leuning R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1980, **106**: 85–100
- [14] Reichstein M, Falge E, Baldocchi D, *et al.* On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: Review and improved algorithm. *Global Change Biology*, 2005, **11**: 1424–1439
- [15] Amiro B. Estimating annual carbon dioxide eddy fluxes using open-path analysers for cold forest sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, **150**: 1366–1372
- [16] Jongen M, Pereira JS, Aires LMI, *et al.* The effects of drought and timing of precipitation on the inter-annual variation in ecosystem-atmosphere exchange in a Mediterranean grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, **151**: 595–606
- [17] Reverter B, Sánchez-Cañete E, Resco V, *et al.* Analyzing the major drivers of NEE in a Mediterranean alpine shrubland. *Biogeosciences*, 2010, **7**: 2601–2611
- [18] Rey A, Belelli-Marchesini L, Were A, *et al.* Wind as a main driver of the net ecosystem carbon balance of a semiarid Mediterranean steppe in the South East of Spain. *Global Change Biology*, 2012, **18**: 539–554
- [19] Stoy PC, Katul GG, Siqueira MBS, *et al.* Separating the effects of climate and vegetation on evapotranspiration along a successional chronosequence in the south-eastern US. *Global Change Biology*, 2006, **12**: 2115–2135
- [20] Burba GG, Verma SB. Seasonal and interannual variability in evapotranspiration of native tallgrass prairie and cultivated wheat ecosystems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, **135**: 190–201
- [21] Ryu Y, Baldocchi DD, Ma S, *et al.* Interannual variability of evapotranspiration and energy exchange over an annual grassland in California. *Journal of Geophysical Research*, 2008, **113**: D09104
- [22] Li SG, Asanuma J, Kotani A, *et al.* Evapotranspiration from a Mongolian steppe under grazing and its environmental constraints. *Journal of Hydrology*, 2007, **333**: 133–143
- [23] Liu S, Li SG, Yu GR, *et al.* Seasonal and interannual variations in water vapor exchange and surface water balance over a grazed steppe in central Mongolia. *Agricultural Water Management*, 2010, **97**: 857–864
- [24] Chen SP, Chen JQ, Lin GH, *et al.* Energy balance and partition in Inner Mongolia steppe ecosystems with different land use types. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, **149**: 1800–1809
- [25] Hao YB, Wang YF, Huang XZ, *et al.* Seasonal and interannual variation in water vapor and energy exchange over a typical steppe in Inner Mongolia, China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, **146**: 57–69
- [26] Zhang F, Zhou GS, Wang Y, *et al.* Evapotranspiration and crop coefficient for a temperate desert steppe ecosystem using eddy covariance in Inner Mongolia, China. *Hydrological Processes*, 2012, **26**: 379–386
- [27] Liu HZ, Feng JW. Seasonal and interannual variations of evapotranspiration and energy exchange over different land surfaces in a semi-arid area of China. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2012, **51**: 1875–1888
- [28] Dong G, Guo JX, Chen JQ, *et al.* Effects of spring drought on carbon sequestration, evapotranspiration and water use efficiency in the Songnen meadow steppe in northeast China. *Ecohydrology*, 2011, **4**: 211–224
- [29] Li SG, Lai CT, Lee G, *et al.* Evapotranspiration from a wet temperate grassland and its sensitivity to microenvironmental variables. *Hydrological Processes*, 2005, **19**: 517–532
- [30] Yu G-R (于贵瑞), Wang Q-F (王秋凤). *Ecophysiology of Plant Photosynthesis, Transpiration, and Water Use*. Beijing: Science Press, 2010 (in Chinese)
- [31] Wang KC, Dickinson RE. A review of global terrestrial evapotranspiration: Observation, modeling, climatology, and climatic variability. *Reviews of Geophysics*, 2012, **50**: RG2005

作者简介 郑涵,女,1988年生,硕士研究生.主要从事生态系统生态学研究. E-mail: zhenghanmarch@sina.com

责任编辑 杨弘
