

新疆草地蒸散与水分利用效率的时空特征

黄小涛^{1,2} 罗格平^{1*}

¹中国科学院新疆生态与地理研究所, 荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 乌鲁木齐 830011; ²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 新疆地处中国西北干旱区, 草地分布广泛, 具有重要的经济和生态价值, 其蒸散(*ET*)与水分利用效率(*WUE*)的研究还比较薄弱, 尤其是草地*WUE*的研究还较为缺乏。该研究基于Biome-BGC模型对气候变化背景下1979–2012年新疆不同区域、不同草地类型的*ET*与*WUE*的时空特征进行了系统模拟与分析。结果表明: 1979–2012年新疆草地年平均蒸散量为245.7 mm, 其年际变化趋势与降水变化趋势大体一致, 蒸散量总体低于降水量; 蒸散量高值区主要分布在天山、阿尔泰山、阿尔金山以及昆仑山北坡中低山带, 低值区主要分布在昆仑山高山区和平原荒漠区; 1979–2012年南疆草地年平均蒸散量为183.2 mm, 天山区域草地年平均蒸散量为357.9 mm, 北疆草地为221.3 mm, 冬季北疆草地蒸散量略大于天山区域草地; 新疆6类草地年平均蒸散量从大到小依次为中山草甸、沼泽草甸、典型草原、荒漠草原、高山草甸、盐生草甸, 这6类草地均是夏季蒸散量最高, 冬季最低, 春季略高于秋季。新疆草地*WUE*较高的区域主要集中在天山和阿尔泰山区域, *WUE*较低的区域主要集中在昆仑山高山区域及部分平原区域; 新疆草地全年*WUE*平均值为0.56 g·kg⁻¹, 其中春、夏、秋季分别为0.43 g·kg⁻¹、0.60 g·kg⁻¹和0.48 g·kg⁻¹; 1979–2012年*WUE*具有显著的区域差异: 北疆平均为0.73 g·kg⁻¹, 南疆为0.26 g·kg⁻¹, 天山区域为0.69 g·kg⁻¹; 不同草地*WUE*差异也较为显著, 由高到低依次为中山草甸、典型草原、沼泽草甸、盐生草甸、高山草甸、荒漠草原。

关键词 蒸散; 水分利用效率; 气候变化; Biome-BGC; 干旱区

引用格式: 黄小涛, 罗格平 (2017). 新疆草地蒸散与水分利用效率的时空特征. 植物生态学报, 41, 506–518. doi: 10.17521/cjpe.2016.0142

Spatio-temporal characteristics of evapotranspiration and water use efficiency in grasslands of Xinjiang

HUANG Xiao-Tao^{1,2} and LUO Ge-Ping^{1*}

¹State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Ürümqi 830011, China; and ²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract

Aims Xinjiang is located in the hinterland of the Eurasian arid areas, with grasslands widely distributed. Grasslands in Xinjiang provide significant economic and ecological benefits. However, research on evapotranspiration (*ET*) and water use efficiency (*WUE*) of the grasslands is still relatively weak. This study aimed to explore the spatio-temporal characteristics on *ET* and *WUE* in the grasslands of Xinjiang in the context of climate change.

Methods The Biome-BGC model was used to determine the spatio-temporal characteristics of *ET* and *WUE* of the grasslands over the period 1979–2012 across different seasons, areas and grassland types in Xinjiang.

Important findings The average annual *ET* in the grasslands of Xinjiang was estimated at 245.7 mm, with interannual variations generally consistent with that of precipitation. Overall, the value of *ET* was lower than that of precipitation. The higher values of *ET* mainly distributed in the Tianshan Mountains, Altai Mountains, Altun Mountains and the low mountain areas on the northern slope of Kunlun Mountains. The lower values of *ET* mainly distributed in the highland areas of Kunlun Mountains and the desert plains. Over the period 1979–2012, average annual *ET* was 183.2 mm in the grasslands of southern Xinjiang, 357.9 mm in the grasslands of the Tianshan Mountains, and 221.3 mm in grasslands of northern Xinjiang. In winter, *ET* in grasslands of northern Xinjiang was slightly higher than that of Tianshan Mountains. Average annual *ET* ranked among grassland types as: mid-mountain meadow > swamp meadow > typical grassland > desert grassland > alpine meadow > saline meadow. The highest *ET* value occurred in summer, and the lowest *ET* value occurred in winter, with *ET* in spring being slightly higher than that in autumn. The higher *WUE* values mainly distributed in the areas of Tianshan Mountains and Altai Mountains. The lower *WUE* values mainly distributed in the highland areas of Kunlun

收稿日期Received: 2016-04-18 接受日期Accepted: 2017-01-03

* 通信作者Author for correspondence (E-mail: luogp@ms.xjb.ac.cn)

Mountains and part of the desert plains. The average annual WUE in the grasslands of Xinjiang was $0.56 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, with the seasonal values of $0.43 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ in spring, $0.60 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ in summer, and $0.48 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ in autumn, respectively. Over the period 1979–2012, the values of WUE displayed significant regional differences: the average values were $0.73 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ in northern Xinjiang, $0.26 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ in southern Xinjiang, and $0.69 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ in Tianshan Mountains. There were also significant differences in WUE among grassland types. The values of WUE ranked in the order of mid-mountain meadow > typical grassland > swamp meadow > saline meadow > alpine meadow > desert grassland.

Key words evapotranspiration; water use efficiency; climate change; Biome-BGC; arid area

Citation: Huang XT, Luo GP (2017). Spatio-temporal characteristics of evapotranspiration and water use efficiency in grasslands of Xinjiang. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 41, 506–518. doi: 10.17521/cjpe.2016.0142

蒸散(ET)是调节区域水热平衡、决定局地气候的重要因素(李婧梅等, 2012; Wang & Dickinson, 2012), 并且显著影响着地表生态环境变化(童新等, 2015), 尤其在干旱区 ET 约占降水的90%, 对水循环影响巨大(赵玲玲等, 2013)。生态系统 ET 同时也与生态系统净生产力高度相关, 其长期变化对碳循环有重要影响(Vicente-Serrano *et al.*, 2015; Yan *et al.*, 2015)。水分利用效率(WUE)反映了植被的耗水特性与光合生产之间的关系(胡中民等, 2009; Niu *et al.*, 2011; 高玉红等, 2012; 李辉东等, 2015), 是联系植被生态系统水碳循环的纽带(张春敏等, 2013)和衡量植物生长适宜程度的重要指标(曹生奎等, 2009; Hamerlynck *et al.*, 2014), 较高的 WUE 表示可以利用有限的水资源获得更多的光合产物(Beer *et al.*, 2009; Yang *et al.*, 2010; 米兆荣等, 2015; 张远东等, 2016)。由于干旱区水资源短缺, ET 和 WUE 问题的研究具有更为重要的现实意义。

草地是陆地生态系统的重要组成部分, 天然草地面积约占全球自然植被面积的1/3 (任继周等, 2011; 周德成等, 2012), 维持其生态功能的正常对全球及区域的生态平衡具有重要意义(李婧梅等, 2012)。同时, 草地生态系统生态环境脆弱, 对气候变化的响应较为敏感(范月君等, 2012; 周伟等, 2014), 且是放牧和水土开发等人类活动强干扰的区域(闫钟清等, 2014)。因此, 在全球变化研究中, 草地生态系统被列为重要的研究对象。新疆地处中国西北干旱区, 草地生态系统分布广泛, 约占新疆土地面积的1/3, 新疆天然草地在发展畜牧业和维持区域生态平衡等方面起着重要作用(孙慧兰等, 2011)。

由于新疆干旱区经济发展长期落后, 科研投入不足, 目前草地生态系统 ET 和 WUE 的研究不够深入。现有的对草地 ET 与 WUE 的研究, 多限于零星站

点的观测与模拟研究(周德成等, 2012; Han *et al.*, 2013; 闫人华等, 2013; 郭淑海等, 2015), 这样的研究很难获得对区域尺度草地 ET 和 WUE 时空特征的整体认识, 在地形、气候和草地类型多样化的新疆更是如此。针对新疆区域尺度草地 ET , 虽借助遥感手段做了一定的研究工作, 但仅限于对总量的估算(陈曦, 2012)。没有按照不同季节、不同区域和不同草地类型对新疆草地 ET 进行时空特征分析。而且由于遥感影像的瞬时性, 使得利用遥感方法估算连续 ET 时存在较大的不确定性(Li *et al.*, 2013)。因此, 基于以往的研究很难获得对新疆草地生态系统 ET 和 WUE 时空特征的整体认识。

各国学者针对不同研究尺度, 发展了多种草地生态系统 ET 与 WUE 的研究方法。有仪器站点观测法、模式模拟法等(邴龙飞等, 2012; 张春敏等, 2013; 孙悦和李栋梁, 2014)。模式模拟法被认为是一种估算水碳通量的有效手段(Laniak *et al.*, 2013)。由于无法在区域尺度直接测量草地生态系统 ET 与 WUE 的动态过程, 使得模拟方法已经成为草地生态系统 ET 与 WUE 研究中不可替代的手段(Dorigo *et al.*, 2007)。Biome-BGC是一个用来估算陆地生态系统水、碳、氮储存及通量的基于过程的生物地球化学模型(Thornton *et al.*, 2002; Sandor *et al.*, 2016)。此模型被成功地应用于国内外草地、农田、森林等各类陆地生态系统(Ben *et al.*, 2005; Wang *et al.*, 2005; Bai *et al.*, 2014)。

因此, 本研究基于Biome-BGC模型, 系统模拟与分析了新疆草地生态系统 ET 与 WUE 在气候变化背景下的时空特征。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

新疆位于中国西北部, 南北长1 500 km, 东西

doi: 10.17521/cjpe.2016.0142

长1 900 km, 总面积为 $1.66 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。新疆北有阿尔泰山, 南有昆仑山, 中有横亘全境的天山, 三山环抱中为广袤的准噶尔和塔里木盆地, “三山夹两盆”构成了新疆独特的地理环境特征。新疆是典型的温带大陆性干旱气候, 南疆属于暖温带, 北疆属于中温带, 新疆年平均气温 10.4°C , 年降水量 188.1 mm , 是全国降水量最少的地区。由于受特殊的地理位置、地形条件和干旱气候的影响, 新疆生态环境极为脆弱, 植物种类稀少, 覆盖度低, 类型结构简单。新疆天然草地总面积 $5.7 \times 10^5 \text{ km}^2$, 占新疆土地面积的34.4%, 其中可利用草地面积达 $4.8 \times 10^5 \text{ km}^2$, 主要分布在天山、阿尔泰山、昆仑山、阿尔金山和准噶尔盆地、塔里木盆地边缘及各河沿岸。新疆草地可分为6种类型: 高山草甸、中山草甸、典型草原、荒漠草原、盐生草甸、沼泽草甸(图1)。

1.2 模型

Biome-BGC是模拟日尺度水、碳和氮通量的有效模型。该模型是用于站点尺度模拟的, 本研究利用SHELL脚本语言对其进行了调整, 利用循环语句

在不同栅格点运行模型, 实现了Biome-BGC模型的空间化。该模型研究的空间尺度可以从 1 m^2 扩展到整个陆地生态系统。模型将植被分为7种植被功能型(常绿阔叶林、常绿针叶林、落叶阔叶林、落叶针叶林、 C_3 草本植物草地、 C_4 草本植物草地及灌木林)。模型中的蒸发和蒸腾采用Penman-Monteith方程计算。该方法具有可靠的物理基础, 计算精度较高(Running & Coughlan, 1988)。将能量在冠层和土壤表面进行分配, 冠层能量被分为用于冠层截流水量蒸发和冠层蒸腾作用两部分。这些能量分配过程都依赖于叶片尺度的空气动力学传导, 同时蒸腾还与气孔传导有关。净初级生产力(NPP)等于总初级生产力(GPP)减去生长呼吸(Petritsch *et al.*, 2007)和维持呼吸(Ryan, 1991), GPP采用光合酶促反应机理模型计算(Farquhar *et al.*, 1980)。WUE有多种定义方法, 本研究中WUE等于NPP与ET的比值($\text{WUE} = \text{NPP}/\text{ET}$)。

根据方精云和王妮(2007)提供的草干质量转换为碳质量的转换系数0.45, 地上净初级生产力

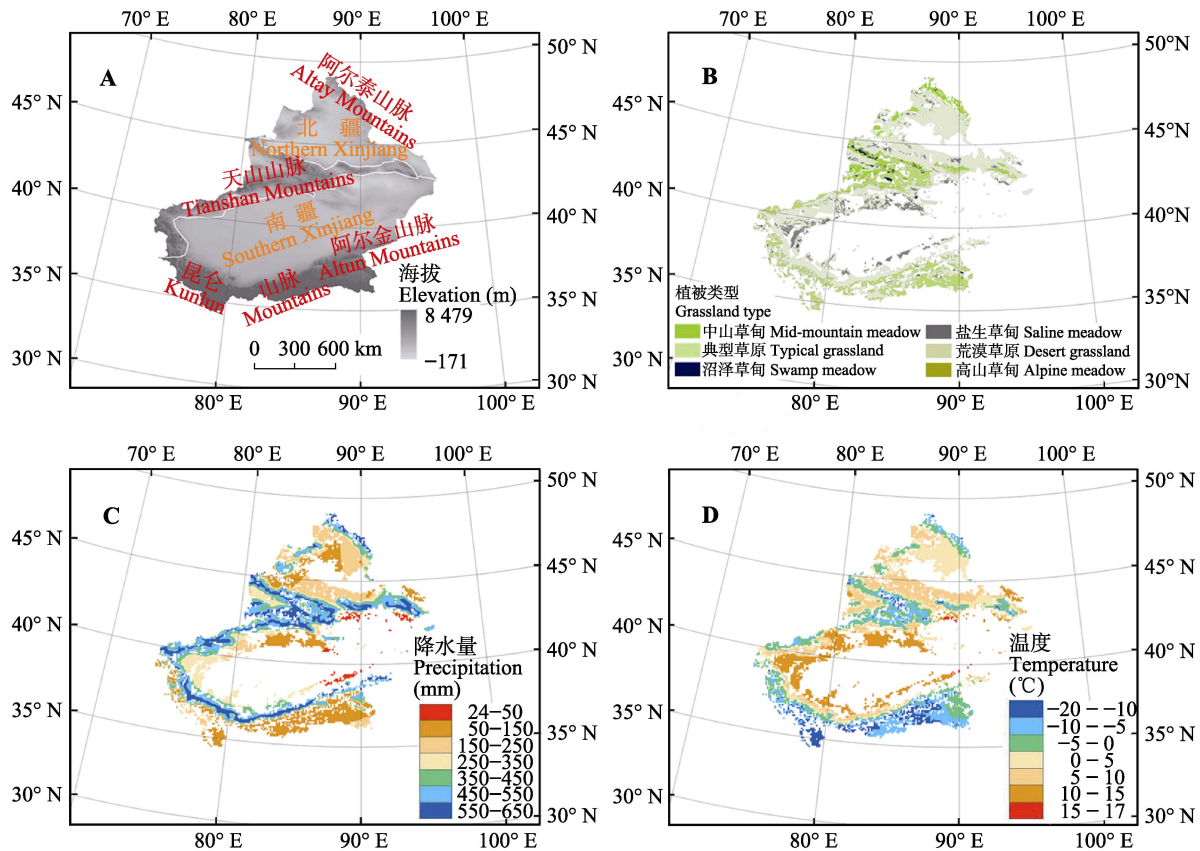


图1 研究区略图。A, 地形与分区。B, 草地类型。C, 草地年降水量。D, 草地年平均气温。
Fig. 1 Sketch map of study areas. A, Topography and regional classification. B, Grassland types. C, Mean annual precipitation in grasslands. D, Average annual temperature in grasslands.

(ANPP)等于地上生物量乘以0.45,地上生物量通过在生长季末将草的地上部分刈割后烘干称质量获得。

本研究根据新疆分区图(图1A),将ET与WUE根据南疆、北疆和天山区域进行了分区统计。结合新疆地形和植被特征制作了新疆草地类型图(图1B),并将ET与WUE根据荒漠草原、典型草原、中山草甸、高山草甸、沼泽草甸、盐生草甸6类草地类型进行了分类统计。

1.3 数据来源

模型验证点的ET数据、ANPP数据、NPP数据和气象数据通过实际观测和文献资料获得。自2012年7月起在乌鲁木齐县永丰乡低山丘陵典型草原区(43.55° N, 87.19° E, 海拔1 648 m)架设了HL20波文比系统(玖廷企业股份有限公司,台湾,中国),可以获得日尺度ET数据和气象数据,同时采集了该实验区2012–2015年的草地ANPP数据。通过实验观测获得奇台县荒漠草原(44.15° N, 89.52° E, 海拔547 m)2008年ANPP数据、典型草原(43.69° N, 89.53° E, 海拔1 356 m)2007–2008年ANPP数据和海拔2 144 m处中山草甸(43.63° N, 89.58° E, 海拔2 144 m)2007–2008年ANPP数据,并通过Vaisala MAWS301自动气象观测站(Vaisala, Helsinki, Finland)获得相应位置的气象数据。通过中国科学院寒区旱区环境与工程研究所研制的小型蒸渗仪获得了新疆阿克苏高山草甸(41.70° N, 80.17° E, 海拔3 550 m)2012年10月至2013年9月的日尺度蒸散数据,并通过观测点标准气象场获得相应气象数据。通过实验观测获得巴音布鲁克高山草甸(42.90° N, 83.72° E, 海拔2 470 m)2004–2009年的ANPP数据,并通过巴音布鲁克国际气象站获得该实验点的气象数据。通过文献资料获取了新疆草地NPP观测数据。

Biome-BGC模型输入参数主要包括3个部分:生理生态参数、气象数据、站点参数。本研究主要采用了模型默认的针对C₃草本植物的生理生态参数,并在参考前人观测研究成果的基础上,对其中部分关键参数进行了校正(表1)。气象数据是驱动Biome-BGC模型过程的主要因子,需要的气象数据包括:日最高温度、日最低温度、日平均温度、日总降水量、日平均水汽压差、日平均短波辐射通量密度和昼长。模型验证点的气象数据通过直接观测获得。区域尺度驱动模型的气象数据来源于中国区域陆面气象要素数据集(<http://westdc.westgis.ac.cn/data/7a-35329c-c5-3f-4267-aa07-e0037d913a21>),并利用C++程序进行必要的格式转换,转换为可以驱动模型的ASCII文本。所有模型验证点的土壤质地和高程,通过野外采样以及室内分析获取。区域尺度土壤质地数据来源于世界土壤数据库(harmonized world soil database, HWSD)土壤图(FAO/IIASA/ISRIC/ISS-CAS/JRC, 2012)。区域尺度高程数据来源于全球气候数据(WorldClim data)(<http://www.worldclim.org/download>)。区域尺度上模型输入数据的空间分辨率为10 km × 10 km (表2)。

2 结果和讨论

2.1 模型验证

Biome-BGC模型被成功地应用于包括草地生态系统在内的中国陆地各生态系统及世界其他区域,但模型在新疆草地ET与WUE的研究应用中,还需要进行校验。通过实际观测获得的ET、ANPP与NPP数据可以用于模型的ET、ANPP与NPP模拟验证。在乌鲁木齐县永丰乡低山典型草原和阿克苏高山草甸对ET的模拟结果进行了验证(图2),模拟值与观

表1 根据前人研究校正的Biome-BGC模型参数
Table 1 Parameters of the Biome-BGC model calibrated based on previous studies

参数 Parameter	盐生草甸、平原荒漠草原和 平原沼泽草甸 Saline meadow, plain desert grassland and plain swamp meadow	典型草原和低山沼泽草甸 Typical grassland and low mountain swamp meadow	中山草甸和中山沼泽草甸 Mid-mountain meadow and mid-mountain swamp meadow	高山草甸、高山荒漠草原和高山沼泽草甸 Alpine meadow, alpine desert grassland and alpine swamp meadow
一年中开始生长的年序日 Day of the year to start new growth	80	85	100	112
一年中结束生长的年序日 Day of the year to end litter fall	310	317	300	270
新根与新叶中碳分配比例 Ratio of C allocation to new fine roots over new leaves	4.0	3.0	2.0	2.5
冠层平均比叶面积 Canopy-average specific leaf area (m ² ·kg ⁻¹)	12.5	12.0	30.0	25.0

doi: 10.17521/cjpe.2016.0142

表2 模型输入数据及验证数据的来源
Table 2 Sources of model input data and validation data

位置 Location	草地类型 Grassland type	蒸散数据 Evapotranspiration data	地上净初级生产力数据 Aboveground net primary productivity data	净初级生产力数据 Net primary productivity data	气象数据 Meteorological data	观测点详情 Details of the observational site	高程 Elevation	土壤质地 Soil texture	生理生态参数 Eco-physiological parameters
乌鲁木齐县 观测点 Observational site in Ürümqi County	典型草原 Typical grassland	实际观测(2012年7月至2015年12月) Actual observation (July, 2012 to December, 2015)	实际观测 Actual observation	Han <i>et al.</i> , 2016	实际观测 Actual observation	围栏内 Inside the fence	野外采集 Field investigation	野外采样, 室内分析 Field sampling, lab analysis	模型默认的针对C ₃ 草本植物的生理生态参数, 并在参考前人研究成果的基础上, 对其中部分关键参数进行了校正 The default model parameters for C ₃ grass. Some of the key parameters were calibrated based on data from previous studies
奇台观测点 Observational site in Qitai	荒漠草原 Desert grassland 典型草原 Typical grassland 中山草甸 Mid-mountain meadow		实际观测 Actual observation	Han <i>et al.</i> , 2016	实际观测 Actual observation	围栏内 Inside the fence	野外采集 Field investigation	野外采样, 室内分析 Field sampling, lab analysis	模型默认的针对C ₃ 草本植物的生理生态参数, 并在参考前人研究成果的基础上, 对其中部分关键参数进行了校正 The default model parameters for C ₃ grass. Some of the key parameters were calibrated based on data from previous studies
阿克苏观测点 Observational site in Aksu	高山草甸 Alpine meadow	实际观测(2012年10月至2013年9月) Actual observation (October, 2012 to September, 2013)		Han <i>et al.</i> , 2016	实际观测 Actual observation	围栏内 Inside the fence	野外采集 Field investigation	野外采样, 室内分析 Field sampling, lab analysis	模型默认的针对C ₃ 草本植物的生理生态参数, 并在参考前人研究成果的基础上, 对其中部分关键参数进行了校正 The default model parameters for C ₃ grass. Some of the key parameters were calibrated based on data from previous studies
巴音布鲁克观测点 Observational site in Bayinbulak	高山草甸 Alpine meadow		实际观测 Actual observation	Han <i>et al.</i> , 2016	实际观测 Actual observation	围栏内 Inside the fence	野外采集 Field investigation	野外采样, 室内分析 Field sampling, lab analysis	模型默认的针对C ₃ 草本植物的生理生态参数, 并在参考前人研究成果的基础上, 对其中部分关键参数进行了校正 The default model parameters for C ₃ grass. Some of the key parameters were calibrated based on data from previous studies
新疆草地 区域数据 Regional data of grasslands in Xinjiang					中国区域陆地气象要素数据集 China Meteorological Forcing Dataset		全球气候数据 WorldClim Data	世界土壤数据库 Harmonized World Soil Database	模型默认的针对C ₃ 草本植物的生理生态参数, 并在参考前人研究成果的基础上, 对其中部分关键参数进行了校正 The default model parameters for C ₃ grass. Some of the key parameters were calibrated based on data from previous studies

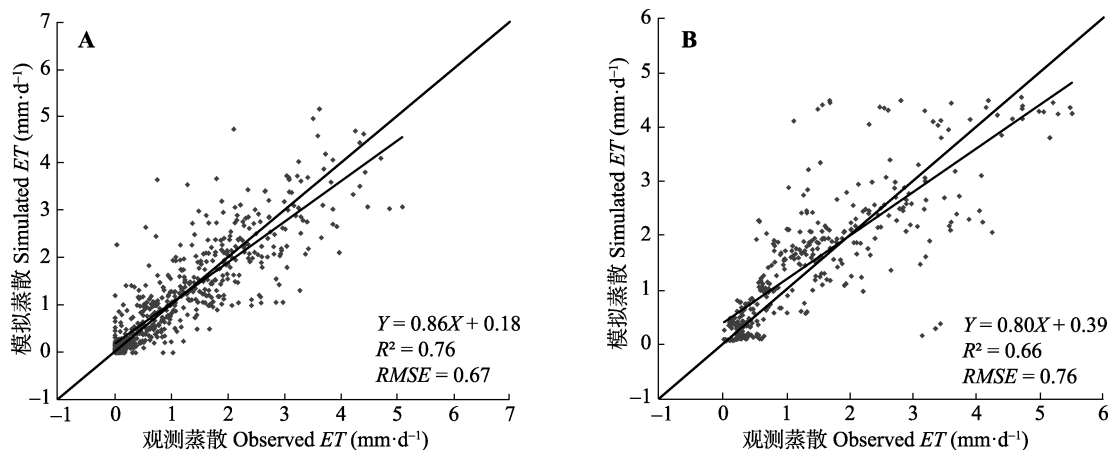


图2 Biome-BGC模型模拟日尺度蒸散(ET)验证。A, 乌鲁木齐县典型草原验证点。B, 阿克苏高山草甸验证点。RMSE, 均方根误差。

Fig. 2 Validation of simulated daily evapotranspiration (ET) by Biome-BGC model. A, Validation site in typical grassland of Ürümqi County. B, Validation site in alpine meadow of Aksu. RMSE, root mean squared error.

测值的对比表明Biome-BGC模型模拟ET效果较好。

本研究利用新疆草地ANPP观测数据和NPP观测数据对Biome-BGC模型模拟ANPP和NPP进行了验证(图3), 结果表明模型模拟ANPP和NPP效果较好。

2.2 新疆草地蒸散的时空特征

新疆草地全年蒸散量高值区主要分布在降水相对较多的昆仑山北坡中低山带、天山、阿尔泰山及阿尔金山区域, 这些区域气温总体上低于平原区域。低值区主要分布在降水相对较少的昆仑山高山区和平原荒漠区(图4A), 平原荒漠区的气温相对较高。相对于气温, 新疆草地全年蒸散量空间格局受降水影响更大。这是因为干旱区水资源短缺, 降水可以认为是草地土壤水的唯一供水源(Huxman *et*

al., 2004; 李红琴等, 2015)。对比1979–2012年全年蒸散量的年际变化及春、夏、秋、冬四季草地蒸散量的年际变化线走势, 夏季草地蒸散量数值最大, 夏季草地蒸散量的年际变化线走势和全年草地蒸散量的年际变化线走势大体一致, 说明夏季草地蒸散量对全年蒸散量的贡献占主导地位。新疆20世纪80年代中期出现了气候由暖干向暖湿转变的记录(胡汝骥等, 2002; 贺晋云等, 2011), 年蒸散量变化趋势在20世纪80年代中期也出现转变, 20世纪80年代中期年蒸散量是个明显的谷值(图4B)。根据ARCGIS软件统计, 1979–2012年新疆草地全年蒸散量均值为245.7 mm, 春季为49.7 mm, 夏季为142.4 mm, 秋季为45.9 mm, 冬季为7.7 mm。夏季气温高, 降水量大, 蒸散量最大。夏季草地蒸散量占全年蒸散量的主体,

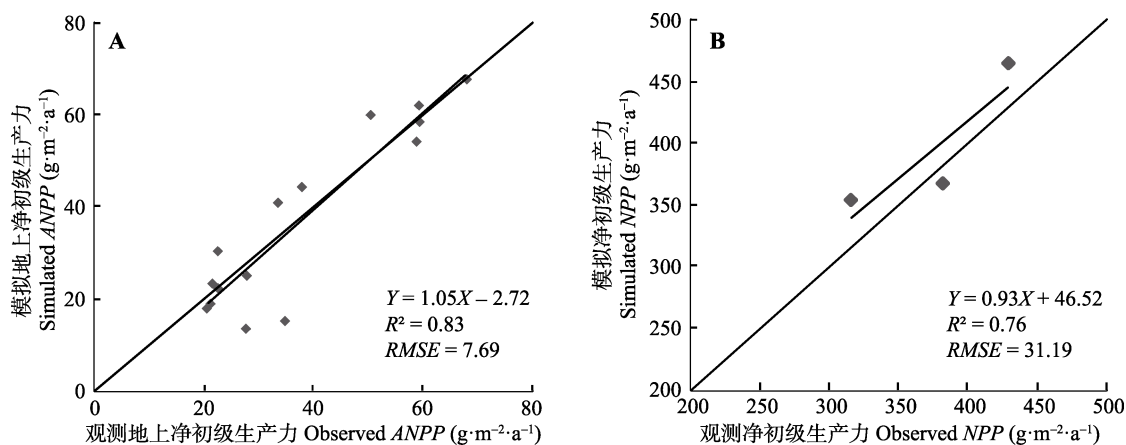


图3 Biome-BGC模型模拟地上净初级生产力(ANPP)和净初级生产力(NPP)验证。A, ANPP验证。B, NPP验证。RMSE, 均方根误差。

Fig. 3 Validation of simulated aboveground net primary productivity (ANPP) and net primary productivity (NPP) by Biome-BGC model. A, ANPP validation. B, NPP validation. RMSE, root mean squared error.

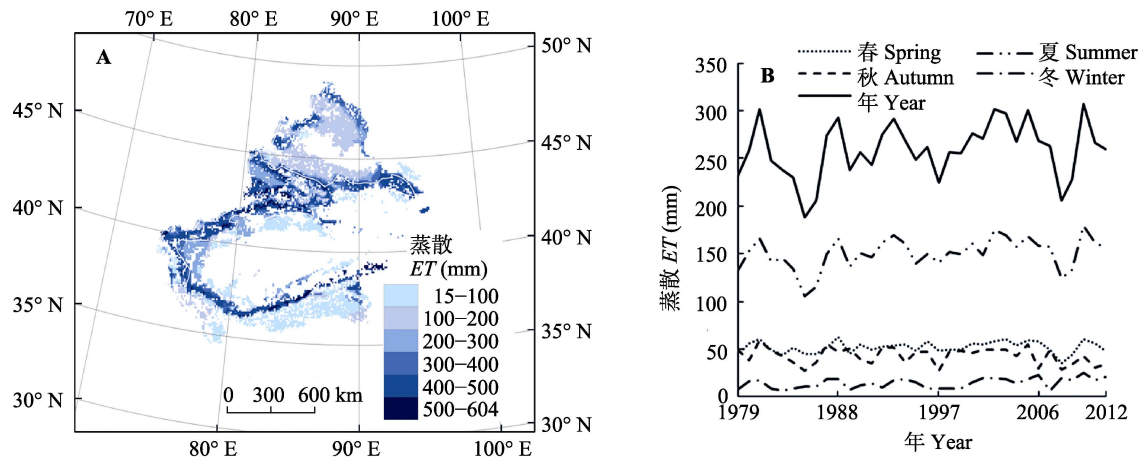


图4 1979–2012年研究区草地蒸散(ET)时空分布。A, 年平均ET空间分布。B, 不同季节ET年际变化。

Fig. 4 Spatio-temporal distribution of evapotranspiration (ET) in grasslands of study area during 1979–2012. A, Spatial distribution of annual average ET. B, Interannual variability of ET across different seasons.

约占全年蒸散量的3/5。春季有大量积雪融水, 且气温略高于秋季, 使得春季蒸散量略大于秋季; 冬季气温低, 降水量小, 冬季蒸散量最小。

草地ET受气候影响巨大, 气温和降水是反映气候特征的两个主要指标(李婧梅等, 2012; 常博等, 2014)。1979–2012年春、夏、秋、冬及全年新疆草地ET的年际变化趋势均与降水的变化趋势接近, 说明与气温相比, 新疆草地ET对降水的变化更加敏感。新疆草地蒸散量和降水量的对比可以得出: 降水主要用于蒸散(图5), 说明新疆草地涵养水源的功能较弱(李红琴等, 2015; 张雪峰等, 2016)。1979–2012年新疆草地年蒸散量总体上低于年降水量, 草地生态系统降水量与蒸散量的差值, 大部分在山区形成地表径流, 最后在绿洲和荒漠中被消耗, 少部分为出境径流。1983年、1985年、1997年、2004年、2006年全年蒸散量略大于降水量(图5A), 主要是因为这5年降水少, 严重干旱, 出现了土壤水分的亏缺(Miyazaki *et al.*, 2004; Li *et al.*, 2007)。春季新疆草地除降水外, 还有大量积雪融水, 但春季蒸散量总体上低于降水量(图5B), 这是因为新疆属于温带大陆性气候, 冬季降水最少(冬季降雪虽厚, 雪水当量还是较小的), 且冬季的降雪(包括入冬前未融化的积雪)经过冬季的蒸散, 剩余的量会更少, 春季的积雪融水和春季的降水相比, 只占相对较小的比例。春季气温较低, 但升温快速, 相当一部分积雪融水和大气降水形成地表径流或者下渗形成土壤水。部分年份夏季降水量明显大于蒸散量, 但更多年份表现为蒸散量大于降水量(图5C), 表明夏季主要表现为

土壤水分的损耗(Miyazaki *et al.*, 2004; Li *et al.*, 2007)。秋季蒸散量与降水量大体相当(图5D)。冬季气温低, 蒸散量总体略小于降水量(图5E), 这与新疆大部分山区及北疆区域整个冬季积雪覆盖的现象是完全符合的。

1979–2012年新疆草地蒸散量分区统计(表3)中, 南疆草地年蒸散量最小, 天山区域草地年蒸散量最大, 北疆居中。南疆气温高于北疆, 降水量小于北疆, 天山区域海拔较高, 气温偏低, 降水量偏大(胡汝骥等, 2002; 贺晋云等, 2011)。新疆草地蒸散量分区变化与降水量分区变化一致, 与气温分区变化不一致, 说明降水量的分区变化是新疆草地蒸散量分区变化更重要的影响因子。春、夏、秋三个季节的蒸散量和年蒸散量的区域分布格局一致, 南疆蒸散量最小, 天山区域蒸散量最大, 北疆居中。冬季蒸散量区域分布与其他3个季节及年总蒸散量区域分布格局不同, 北疆蒸散量最大, 南疆蒸散量最小, 天山区域居中, 略低于北疆冬季蒸散量。根据ARCGIS软件统计, 天山区域草地冬季年降水量23 mm, 大于北疆草地(21 mm), 蒸散量却小于北疆草地, 这是因为冬季天山区域和北疆冰雪覆盖, 气温成为影响蒸散更重要的因素。北疆冬季气温高于天山区域, 使得北疆冬季蒸散量高于天山区域。三大区域蒸散量的季节变化大体一致, 均是夏季最高, 冬季最低, 春季略高于秋季。

1979–2012年新疆6类草地春、夏、秋、冬四季蒸散量和年蒸散量分类分布格局一致, 蒸散量从大到小依次为中山草甸、沼泽草甸、典型草原、荒漠

草原、高山草甸、盐生草甸。总体上, 相对于气温, 新疆草地蒸散量分类分布格局与降水分布格局更加相似。中山草甸降水丰沛, 蒸散量最大, 沼泽草甸地表湿润, 蒸散量仅次于中山草甸, 典型草原的降水量

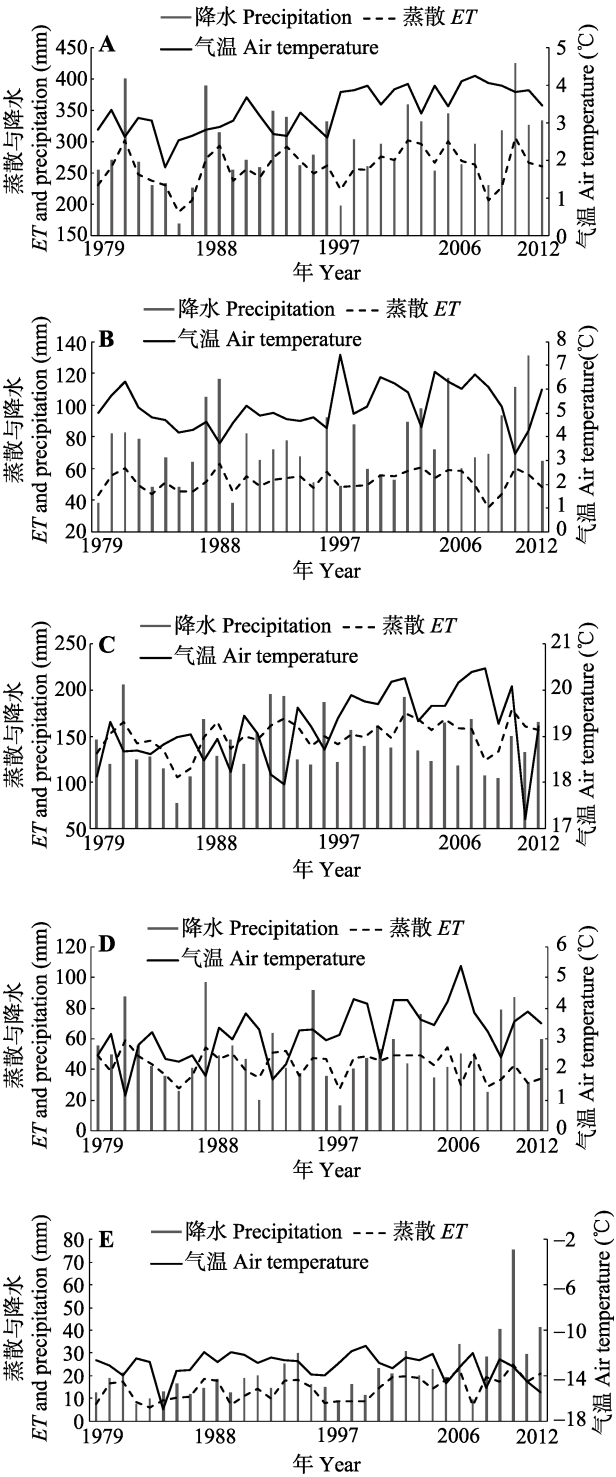


图5 1979–2012年新疆草地蒸散(ET)、降水和气温的变化。A, 全年。B, 春季。C, 夏季。D, 秋季。E, 冬季。
Fig. 5 Changes in evapotranspiration (ET), precipitation and air temperature in grasslands of Xinjiang during 1979–2012. A, Annual. B, Spring. C, Summer. D, Autumn. E, Winter.

表3 新疆草地蒸散(ET)分区统计(单位: mm)
Table 3 Regional statistics of evapotranspiration (ET) in grasslands of Xinjiang (unit: mm)

	春 Spring	夏 Summer	秋 Autumn	冬 Winter	年 Year
南疆 South Xinjiang	35.7	107.5	33.5	6.5	183.2
北疆 North Xinjiang	44.9	121.2	39.7	15.5	221.3
天山 Tianshan Mountains	67.0	213.3	63.0	14.6	357.9

表4 新疆草地蒸散(ET)分类统计(单位: mm)
Table 4 The statistics of evapotranspiration (ET) for different grassland types in Xinjiang (unit: mm)

类型 Type	春 Spring	夏 Summer	秋 Autumn	冬 Winter	年 Year
高山草甸 Alpine meadow	47.2	134.8	40.2	7.5	229.7
中山草甸 Mid-mountain meadow	72.4	231.9	64.8	18.5	387.7
典型草原 Typical grassland	64.7	202.3	59.6	17.3	343.9
荒漠草原 Desert grassland	45.1	136.1	43.0	11.9	236.2
盐生草甸 Saline meadow	32.3	87.0	28.8	6.5	154.7
沼泽草甸 Swamp meadow	68.3	212.3	60.1	17.7	358.3

大于荒漠草原, 使得其蒸散量大于荒漠草原。高山草甸情况相对特殊, 根据ARCGIS软件统计, 高山草甸年降水量318 mm, 大于荒漠草原年降水量(292 mm), 蒸散量却小于荒漠草原, 高山草甸因海拔高, 气温低, 蒸散量偏低。新疆盐生草甸多位于冲洪积扇扇缘、河流两岸的绿洲外侧和沙漠边缘(郝金标等, 2006), 降水少, 使得蒸散量偏少。新疆6类草地春、夏、秋、冬四季蒸散量均是夏季最高, 冬季最低, 春季略高于秋季(表4)。

2.3 新疆草地水分利用效率的时空特征

1979–2012年新疆草地WUE较高的区域主要集中在天山区域、阿尔泰山区域, 这些区域水热组合条件总体较好, 利于牧草生长。WUE较低的区域主要集中在昆仑山高山区域及部分平原区域(图6A), 这些区域水热组合条件较差, 不利于牧草生长。1979–2012年新疆草地夏季WUE与年WUE波动变化比较接近, 春季和秋季波动相对较大(图6B)。1988年春季WUE明显偏低, 这与1988年春季降水的空间分布异常有关。根据ARCGIS软件统计, 正常年份新疆春季降水量大的区域主要集中在中低山带及伊利盆地。而1988年春季降水量大的区域很大一部分分布在荒漠区域, 中低山带及伊利盆地的降水量比正

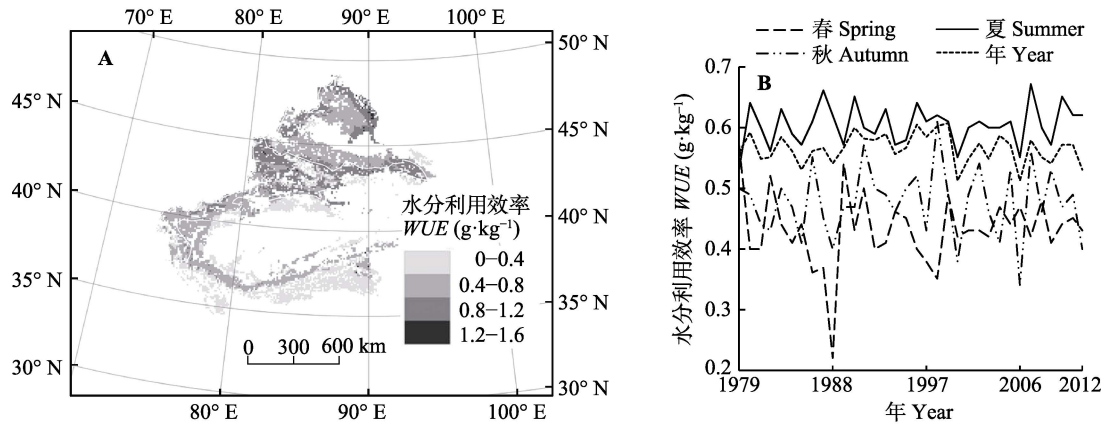


图6 1979–2012年研究区草地水分利用效率(WUE)的时空分布。A, 年平均WUE空间分布。B, 不同季节WUE年际变化。
Fig. 6 Spatio-temporal distribution of water use efficiency (WUE) in grasslands of study area during 1979–2012. A, Spatial distribution of annual average WUE. B, Interannual variability of WUE across different seasons.

常年份明显偏低。这导致了1988年春季NPP总量明显偏低。根据ARCGIS软件统计, 新疆草地WUE年平均值为 $0.56\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 春季为 $0.43\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 夏季为 $0.60\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 秋季为 $0.48\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。新疆草地夏季WUE最高, 春季略低于秋季。新疆属于雨热同期的气候, 夏季水热组合条件相对较好(胡汝骥等, 2002; 贺晋云等, 2011), 利于牧草生长。春季因有积雪融水, 水热组合条件优于秋季, 利于牧草生长, 但同时由于ET增加相对较大, WUE反而低于秋季。冬季牧草枯萎, 停止生长, 统计WUE没有意义。以上分析表明新疆草地WUE时空格局与水热组合条件密切相关。

1979–2012年新疆草地春、夏、秋三个季节及年WUE分区分布格局一致, 北疆草地WUE最高, 南疆草地WUE最低, 天山区域居中, WUE略低于北疆草地。北疆因降水量大于南疆, 水热组合条件优于南疆(胡汝骥等, 2002; 贺晋云等, 2011), 更利于牧草生长。天山区域降水量较大, 但水热组合条件垂直差异显著(周德成等, 2012; Han *et al.*, 2013), 且蒸散量显著大于北疆, 使得其WUE略低于北疆。三大区域草地WUE的季节变化均是夏季最高。南疆属于暖温带, 春季无大量积雪融水, 春秋水热组合条件相当, 使得其春秋WUE相当。北疆因积雪融水, 春季水热组合条件优于秋季, 春季更利于牧草生长, 但春季ET也会相应增加, 使得其春秋WUE相当。天山区域中高山带植被生长的限制因子是温度, 不是水分条件(周德成等, 2012; Han *et al.*, 2013)。相对于秋季, 天山区域春季较多的积雪融水和降水被无效蒸发, 使得天山区域春季WUE低于秋季(表5)。

表5 新疆草地水分利用效率(WUE)分区统计(单位: $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)
Table 5 Regional statistics of water use efficiency (WUE) in grasslands of Xinjiang (unit: $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)

	春 Spring	夏 Summer	秋 Autumn	年 Year
南疆 South Xinjiang	0.24	0.29	0.24	0.26
北疆 North Xinjiang	0.67	0.92	0.66	0.73
天山 Tianshan Mountains	0.56	0.82	0.65	0.69

1979–2012年新疆草地WUE分类统计中, 全年WUE由高到低依次为中山草甸、典型草原、沼泽草甸、盐生草甸、高山草甸、荒漠草原。中山草甸和典型草原水热组合条件相对较好, 利于牧草生长。高山草甸气温较低, 荒漠草原降水量较小, 水热组合条件相对较差, 不利于牧草生长。夏季和秋季6类草地WUE排序结果与全年WUE排序结果一致。春季WUE由高到低依次为典型草原、中山草甸、沼泽草甸、盐生草甸、荒漠草原、高山草甸。海拔较低的区域气温相对较高, 且因大量积雪融水, 春季水热组合条件相对较好, 利于牧草生长, 使得春季典型草原WUE高于中山草甸, 荒漠草原WUE高于高山草甸。春、夏、秋WUE对比来看, 均是夏季最高。高山草甸、中山草甸、典型草原和沼泽草甸秋季WUE高于春季, 主要是因为山区气温低, 植被开始生长时间相对较晚, 春季大量降水和积雪融水被无效蒸发。荒漠草原、盐生草甸春季WUE高于秋季(表6), 主要是因为平原区域气温相对较高, 且因大量积雪融水, 春季水热组合条件相对较好, 利于牧草生长。

表6 新疆草地水分利用效率(WUE)分类统计(单位: g·kg⁻¹)
Table 6 The statistics of water use efficiency (WUE) for different grassland types in Xinjiang (unit: g·kg⁻¹)

类型 Type	春 Spring	夏 Summer	秋 Autumn	年 Year
高山草甸 Alpine meadow	0.23	0.44	0.38	0.37
中山草甸 Mid-mountain meadow	0.62	1.05	0.81	0.86
典型草原 Typical grassland	0.70	1.01	0.76	0.84
荒漠草原 Desert grassland	0.36	0.41	0.31	0.34
盐生草甸 Saline meadow	0.50	0.63	0.47	0.52
沼泽草甸 Swamp meadow	0.56	0.92	0.73	0.77

3 结论和展望

基于空间化的Biome-BGC模型, 按照不同季节、不同区域和不同草地类型对新疆草地ET与WUE进行时空特征分析, 结论如下:

(1)与气温相比, 降水是新疆草地ET时空格局更重要的影响因子。高山草甸和天山区域情况相对特殊, 根据ARCGIS软件统计, 高山草甸年降水量318 mm, 大于荒漠草原年降水量(292 mm), 蒸散量却小于荒漠草原。高山草甸因海拔高, 气温低, 大量降水没有因蒸散损失, 而是形成径流。根据ARCGIS软件统计, 天山区域草地冬季年降水量23 mm, 大于北疆草地(21 mm), 蒸散量却小于北疆草地, 这是因为冬季天山区域和北疆冰雪覆盖, 气温成为影响蒸散的更重要的因素。

(2)新疆草地WUE时空分布与水热组合条件高度相关。高WUE主要对应较好的水热组合条件, 低WUE主要对应较差的水热组合条件。新疆春季情况相对特殊, 春季有积雪融水, 水热组合条件优于秋季, 利于牧草生长, 但同时由于ET增加相对较大, WUE反而低于秋季。天山区域中高山带牧草生长的限制因子是温度, 因而相对于秋季, 大量积雪融水和降水形成无效蒸发, 使得天山区域WUE低于秋季。

本研究对该模型的可靠性做了进一步验证, 保证了模型模拟结果的有效性。但因难以获取空间分辨率更高的气象数据, 本研究区域尺度的模型输入数据空间分辨率为10 km × 10 km, 分辨率较低, 这不可避免地会对模型估算结果造成一定影响, 尤其在地形复杂的山区, 较低的分辨率不能很好地反映其局地空间变化。因此, 我们希望能生产一套

空间分辨率更高的气象数据。

本研究未考虑放牧等人类活动的影响, 新疆草地受放牧等人类活动影响严重, 放牧对新疆草地蒸散与水分利用效率影响的研究将在今后工作中加强。

基金项目 国家自然科学基金(41271126和41501098)和中国科学院国际合作局对外合作重点项目(131965KYS-B20160004)。

致谢 本文阿克苏高山草甸的气象数据和蒸散数据由中国科学院寒区旱区工程研究所提供, 在此表示感谢。

参考文献

Bai J, Chen X, Li LH, Luo GP, Yu Q (2014). Quantifying the contributions of agricultural oasis expansion, management practices and climate change to net primary production and evapotranspiration in croplands in arid northwest China. *Journal of Arid Environments*, 100, 31–41. doi: 10.1016/j.jaridenv.2013.10.004.

Beer C, Ciais P, Reichstein M, Baldocchi D, Law BE, Papale D, Soussana JF, Ammann C, Buchmann N, Frank D, Gianelle D, Janssens IA, Knohl A, Köstner B, Moors E, Rouspard O, Verbeeck H, Vesala T, Williams CA, Wohlfahrt G (2009). Temporal and among-site variability of inherent water use efficiency at the ecosystem level. *Global Biogeochemical Cycles*, 23, GB2018. doi: 10.1029/2008GB003233.

Ben BL, Stith TG, Douglas EA, Peter ET (2005). Reimplementation-of-the-biome-bgc-model. *Tree Physiology*, 25, 413–424.

Bing LF, Su HB, Shao QQ, Liu JY (2012). Changing characteristic of land surface evapotranspiration and soil moisture in China during the past 30 years. *Journal of Geo-Information Science*, 14(1), 1–13. (in Chinese with English abstract) [邢龙飞, 苏红波, 邵全勤, 刘纪远 (2012). 近30年来中国陆地蒸散量和土壤水分变化特征分析. 地球信息科学进展, 14(1), 1–13.]

Cao SK, Feng Q, Si JH, Chang ZQ, Xi HY, Zhuo MC (2009). Summary on research methods of water use efficiency in plant. *Journal of Desert Research*, 29, 853–858. (in Chinese with English abstract) [曹生奎, 冯起, 司建华, 常宗强, 席海洋, 卓玛措 (2009). 植物水分利用效率研究方法综述. 中国沙漠, 29, 853–858.]

Chang B, Liu XD, Wang SL, Zhang YZ, Zhang XL, Sun YB (2014). Study on grassland evapotranspiration at different slope orientation and its impact factors in Qilian Mountains. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 34, 90–95. (in Chinese with English abstract) [常博, 刘贤德, 王顺利, 张玉珍, 张学龙, 孙于卜

doi: 10.17521/cjpe.2016.0142

- (2014). 祁连山不同坡向草地蒸散量及其影响因素的分析. 中南林业科技大学学报, 34, 90–95.]
- Chen X (2012). *Retrieval and Analysis of Evapotranspiration in Central Areas of Asia*. China Meteorological Press, Beijing, 103. (in Chinese) [陈曦 (2012). 亚洲中部干旱区蒸散发研究. 中国气象出版社, 北京, 103.]
- Dorigo WA, Zurita-Milla R, de Wit AJW, Brazile J, Singh R, Schaepman ME (2007). A review on reflective remote sensing and data assimilation techniques for enhanced agroecosystem modeling. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 9, 165–193.
- Fan YJ, Hou XY, Shi HX, Shi SL (2012). Effect of carbon cycling in grassland ecosystems on climate warming. *Acta Prataculturae Sinica*, 21, 294–302. (in Chinese with English abstract) [范月君, 侯向阳, 石红霄, 师尚礼 (2012). 气候变暖对草地生态系统碳循环的影响. 草业学报, 21, 294–302.]
- Fang JY, Wang W (2007). Soil respiration as a key below-ground process: Issues and perspectives. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 31, 345–347. (in Chinese) [方精云, 王妮 (2007). 作为地下过程的土壤呼吸: 我们理解了多少? 植物生态学报, 31, 345–347.]
- Farquhar GD, Caemmerer S, Berry JA (1980). A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species. *Planta*, 149, 78–90.
- Gao YH, Niu JY, Xu R, Wang Y, Li CJ, Qi D (2012). Effects of different film mulching on photosynthesis, transpiration rate and leaf water use efficiency of maize. *Acta Prataculturae Sinica*, 21, 178–184. (in Chinese with English abstract) [高玉红, 牛俊义, 徐锐, 王彦, 李长江, 祁迪 (2012). 不同覆膜方式对玉米叶片光合、蒸腾及水分利用效率的影响. 草业学报, 21, 178–184.]
- Guo SH, Yang GJ, Li QF, Zhao CC (2015). Observation and estimation of the evapotranspiration of alpine meadow in the upper reaches of the Aksu River, Xinjiang. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 37, 241–248. (in Chinese with English abstract) [郭淑海, 杨国靖, 李清峰, 赵传成 (2015). 新疆阿克苏河上游高寒草甸蒸散发观测与估算. 冰川冻土, 37, 241–248.]
- Hamerlynck EP, Scott RL, Cavanaugh ML, Barron-Gafford G (2014). Water use efficiency of annual-dominated and bunchgrass-dominated savanna intercanopy space. *Ecology*, 7, 1208–1215.
- Han QF, Luo GP, Li CF, Asanov S, Wu M, Abdusattor S (2016). Simulated grazing effects on carbon emission in Central Asia. *Agricultural and Forest Meteorology*, 216, 203–214. Han QF, Luo GP, Li CF, Ye H, Chen YL (2013). Modeling grassland net primary productivity and water-use efficiency along an elevational gradient of the Northern Tianshan Mountains. *Journal of Arid Land*, 5, 354–365.
- He JY, Zhang MJ, Wang P, Xin H, Huang XY (2011). New progress of the study on climate change in Xinjiang. *Arid Zone Research*, 28, 499–508. (in Chinese with English abstract) [贺晋云, 张明军, 王鹏, 辛宏, 黄小燕 (2011). 新疆气候变化研究进展. 干旱区研究, 28, 499–508.]
- Hu RJ, Jiang FQ, Wang YJ, Fan ZL (2002). A study on signals and effects of climatic pattern change from warm-dry to warm-wet in Xinjiang. *Arid Land Geography*, 25, 194–200. (in Chinese with English abstract) [胡汝骥, 姜逢清, 王亚俊, 樊自立 (2002). 新疆气候由暖干向暖湿转变的信号及影响. 干旱区地理, 25, 194–200.]
- Hu ZM, Yu GR, Wang QF, Zhao FH (2009). Ecosystem level water use efficiency: A review. *Acta Ecologica Sinica*, 29, 1498–1507. (in Chinese with English abstract) [胡中民, 于贵瑞, 王秋凤, 赵风华 (2009). 生态系统水分利用效率研究进展. 生态学报, 29, 1498–1507.]
- Huxman TE, Smith MD, Fay PA, Knapp AK, Shaw MR, Loik ME, Smith SD, Tissue DT, Zak JC, Weltzin JF, Pockman WT, Sala OE, Haddad BM, Harte J, Koch GW, Schwinning S, Small EE, Williams DG (2004). Convergence across biomes to a common rain-use efficiency. *Nature*, 429, 651–654.
- Laniak GF, Olchin G, Goodall J, Voinov A, Hill M, Glynn P, Whelan G, Geller G, Quinn N, Blind M, Peckham S, Renaney S, Gaber N, Kennedy R, Hughes A (2013). Integrated environmental modeling: A vision and roadmap for the future. *Environmental Modelling & Software*, 39, 3–23.
- Li HD, Guan DX, Yuan FH, Wang AZ, Jin CJ, Wu JB, Li Z, Jing YL (2015). Water use efficiency and its influential factor over Horqin Meadow. *Acta Ecologica Sinica*, 35, 478–488. (in Chinese with English abstract) [李辉东, 关德新, 袁凤辉, 王安志, 金昌杰, 吴家兵, 李峥, 井艳丽 (2015). 科尔沁草甸生态系统水分利用效率及影响因素. 生态学报, 35, 478–488.]
- Li HQ, Qiao XL, Zhang YL, Zhang FW, Li YN (2015). Effects of fencing on the soil water conversation in Maduo alpine grassland-source of Yellow River. *Journal of Water and Soil Conservation*, 29, 195–200. (in Chinese with English abstract) [李红琴, 乔小龙, 张镒理, 张法伟, 李英年 (2015). 封育对黄河源头玛多高寒草原水源涵养的影响. 水土保持学报, 29, 195–200.]
- Li JM, Cai H, Cheng Q, Qiao CL, Chu H, Chen DD, Xu SX, Zhao XQ, Zhao L (2012). Characterizing the evapotranspiration of a degraded grassland in the Sanjiangyuan Region of Qinghai Province. *Acta Prataculturae Sinica*, 21, 223–233. (in Chinese with English abstract) [李婧梅, 蔡海, 程茜, 乔春连, 褚晖, 陈懂懂, 徐世晓, 赵新全, 赵亮 (2012). 青海省三江源地区退化草地蒸散特征. 草业学报, 21, 223–233.]
- Li SG, Asanuma J, Kotani A, Davaa G, Oyunbaatar D (2007). Evapotranspiration from a Mongolian steppe under grazing and its environmental constraints. *Journal of Hydrology*, 333, 133–143.

- Li Z, Yang D, Hong Y (2013). Multi-scale evaluation of high-resolution multi-sensor blended global precipitation products over the Yangtze River. *Journal of Hydrology*, 500, 157–169.
- Mi ZR, Chen LT, Zhang ZH, He JS (2015). Alpine grassland water use efficiency based on annual precipitation, growing season precipitation and growing season evapotranspiration. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 39, 649–660. (in Chinese with English abstract) [米兆荣, 陈立同, 张振华, 贺金生 (2015). 基于年降水、生长季降水和生长季蒸散的高寒草地水分利用效率. 植物生态学报, 39, 649–660.]
- Miyazaki S, Yasunari T, Miyamoto T, Kaihotsu I, Davaa G, Oyunbaatar G, Natsagdorj L, Oki T (2004). Agrometeorological conditions of grassland vegetation in central Mongolia and their impact for leaf area growth. *Journal of Geophysical Research*, 109, D22106. doi: 10.1029/2004JD005658.005179.
- Niu SL, Xing XR, Zhang Z, Xia JY, Zhou XH, Song B, Li LH, Wan SQ (2011). Water-use efficiency in response to climate change, from leaf to ecosystem in a temperate steppe. *Global Change Biology*, 17, 1073–1082.
- Petritsch R, Hasenauer H, Pietsch SA (2007). Incorporating forest growth response to thinning within Biome-BGC. *Forest Ecology and Management*, 242, 324–336.
- Ren JZ, Liang TG, Lin HL, Feng QS, Huang XD, Hou FJ, Zou DF, Wang C (2011). Study on grassland's responses to global climate change and its carbon sequestration potentials. *Acta Prataculturae Sinica*, 20, 1–22. (in Chinese with English abstract) [任继周, 梁天刚, 林慧龙, 冯琦胜, 黄晓东, 侯扶江, 邹德富, 王翀 (2011). 草地对全球气候变化的响应及其碳汇潜势研究. 草业学报, 20, 1–22.]
- Running SW, Coughlan JC (1988). A general model of forest ecosystem processes for regional applications. I. Hydrologic balance, canopy gas exchange and primary production processes. *Ecological Modelling*, 42, 125–154.
- Ryan MG (1991). Effects of climate change on plant respiration. *Ecological Applications*, 1, 157–167.
- Sandor R, Barcza Z, Hidy D, Lellei-Kovacs E, Ma S, Bellocchi G (2016). Modelling of grassland fluxes in Europe: Evaluation of two biogeochemical models. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 215, 1–19.
- Sun HL, Chen YN, Li WH, Li F, Ayoupu M (2011). Study on types and ecological services values of the grassland in the Ili River Basin, Xinjiang, China. *Journal of Desert Research*, 31, 1273–1277. (in Chinese with English abstract) [孙慧兰, 陈亚宁, 李卫红, 黎枫, 木巴热克·阿尤普 (2011). 新疆伊犁河流域草地类型特征及其生态服务价值研究. 中国沙漠, 31, 1273–1277.]
- Sun Y, Li DL (2014). Features and response to climate-driven factors of the runoff in the upper reaches of the Weihe River during 1975–2011. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 36, 413–423. (in Chinese with English abstract) [孙悦, 李栋梁 (2014). 1975–2011年渭河上游径流演变规律及对气候驱动因子的响应. 冰川冻土, 36, 413–423.]
- Thornton PE, Law BE, Henry LG, Kenneth LC, Falge E, Ellsworth DS, Goldstein AH, Monson RK, Hollinger D, Falk M, Chen J, Sparks JP (2002). Modeling and measuring the effects of disturbance history and climate on carbon and water budgets in evergreen needleleaf forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 113, 185–222.
- Tong X, Liu TX, Yang DW, Duan LM, Wu Y, Wang TS, Wang HY, Gao XY (2015). Simulating evaporation from a water surface for the sand-meadow ecotone of the semiarid region in North China. *Arid Land Geography*, 38, 10–17. (in Chinese with English abstract) [童新, 刘廷玺, 杨大文, 段利民, 吴尧, 王天帅, 王海燕, 高肖彦 (2015). 半干旱沙地-草甸区水面蒸发模拟及其影响因子辨识. 干旱区地理, 38, 10–17.]
- Vicente-Serrano SM, Camarero JJ, Zabalza J, Sanguesa-Barreda G, Lopez-Moreno JJ, Tague CL (2015). Evapotranspiration deficit controls net primary production and growth of silver fir: Implications for Circum-Mediterranean forests under forecasted warmer and drier conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 206, 45–54.
- Wang KC, Dickinson RE (2012). A review on global terrestrial evapotranspiration: Observation, modeling, climatology, and climatic variability. *Reviews of Geophysics*, 50, RG2005. doi: 10.1029/2011rg000373.
- Wang QX, Watanabe M, Zhu QY (2005). Simulation of water and carbon fluxes using BIOME-BGC model over crops in China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 131, 209–224.
- Xi JB, Zhang FS, Mao DR, Tian CY, Dong ZC, Wang KF (2006). Species diversity and distribution of halophytic vegetation in Xinjiang. *Scientia Silvae Sinicae*, 42(10), 6–12. (in Chinese with English abstract) [郗金标, 张福锁, 毛达如, 田长彦, 董振成, 王开芳 (2006). 新疆盐生植物群落物种多样性及其分布规律的初步研究. 林业科学, 42(10), 6–12.]
- Yan HM, Zhan JY, Jiang QO, Yuan YW, Li ZH (2015). Multi-level modeling of NPP change and impacts of water resources in the Lower Heihe River Basin. *Physics and Chemistry of the Earth*, 79–82, 29–39.
- Yan RH, Xiong HG, Zhang F (2013). The evapotranspiration and energy budget of an *Achnatherum splendens* grassland in the Oasis-desert Ecotone in Xinjiang, China, during Summer and Autumn. *Journal of Desert Research*, 33, 133–140. (in Chinese with English abstract) [闫人华, 熊黑钢, 张芳 (2013). 夏秋季绿洲—荒漠过渡带芨芨草地蒸散及能量平衡特征研究. 中国沙漠, 33, 133–140.]
- Yan ZQ, Qi YC, Dong YS, Peng Q, Sun LJ, Jia JQ, Cao CC, doi: 10.17521/cjpe.2016.0142

- Guo SF, He YL (2014). Nitrogen cycling in grassland ecosystems in response to climate change and human activities. *Acta Prataculturae Sinica*, 23, 279–292. (in Chinese with English abstract) [闫钟清, 齐玉春, 董云社, 彭琴, 孙良杰, 贾军强, 曹丛丛, 郭树芳, 贺云龙 (2014). 草地生态系统氮循环关键过程对全球变化及人类活动的响应与机制. 草业学报, 23, 279–292.]
- Yang YH, Fang JY, Fay PA, Bell JE, Ji CJ (2010). Rain use efficiency across a precipitation gradient on the Tibetan Plateau. *Geophysical Research Letters*, 37, L15702. doi: 10.1029/2010GL043920.
- Zhang CM, Liang C, Long XJ, Wei RJ (2013). Estimating and dynamic change of vegetation water use efficiency in Yangtze and Yellow River headwater regions. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 29, 146–155. (in Chinese with English abstract) [张春敏, 梁川, 龙训建, 卫仁娟 (2013). 江河源区植被水分利用效率遥感估算及动态变化. 农业工程学报, 29, 146–155.]
- Zhang XF, Niu JM, Zhang Q, Dong JJ, Zhang J (2016). Spatial pattern of water conservation function in grassland ecosystem in the Xilin River Basin, Inner Mongolia. *Arid Zone Research*, 33, 814–822. (in Chinese with English abstract) [张雪峰, 牛建明, 张庆, 董建军, 张靖 (2016). 内蒙古锡林河流域草地生态系统水源涵养功能空间格局. 干旱区研究, 33, 814–822.]
- Zhang YD, Pang R, Gu FX, Liu SR (2016). Temporal-spatial variations of *WUE* and its response to climate change in alpine area of southwestern China. *Acta Ecologica Sinica*, 36, 1–11. (in Chinese with English abstract) [张远东, 庞瑞, 顾峰雪, 刘世荣 (2016). 西南高山地区水分利用效率时空动态及其对气候变化的响应. 生态学报, 36, 1–11.]
- Zhao LL, Xia J, Xu CY, Wang ZG, Su L (2013). A review of evapotranspiration estimation methods in hydrological models. *Acta Geographica Sinica*, 68, 127–136. (in Chinese with English abstract) [赵玲玲, 夏军, 许崇育, 王中根, 苏磊 (2013). 水文循环模拟中蒸散发估算方法综述. 地理学报, 68, 127–136.]
- Zhou DC, Luo GP, Han QF, Yin CY, Li LH, Hu YK (2012). Impacts of grazing and climate change on the aboveground net primary productivity of mountainous grassland ecosystems along altitudinal gradients over the Northern Tianshan Mountains, China. *Acta Ecologica Sinica*, 32, 81–92. (in Chinese with English abstract) [周德成, 罗格平, 韩其飞, 尹昌应, 李龙辉, 胡玉昆 (2012). 天山北坡不同海拔梯度山地草原生态系统地上净初级生产力对气候变化及放牧的响应. 生态学报, 32, 81–92.]
- Zhou W, Gang CC, Li JL, Zhang CB, Mu SJ, Sun ZG (2014). Spatial-temporal dynamics of grassland coverage and its response to climate change in China during 1982–2010. *Acta Geographica Sinica*, 69, 15–30. (in Chinese with English abstract) [周伟, 刚成诚, 李建龙, 章超斌, 穆少杰, 孙政国 (2014). 1982–2010年中国草地覆盖度的时空动态及其对气候变化的响应. 地理学报, 69, 15–30.]

责任编辑: 陈世苹 责任编辑: 王 葳



扫码向作者提问