

2001—2015 年伊犁河谷草地蒸散发时空变化分析

闫俊杰^{1,2,3,4}, 付秀东⁴, 赵玉⁴, 刘影⁴, 吕光辉¹, 崔东⁴, 刘海军⁴

(1.新疆大学 资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046; 2.中国科学院 新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011; 3.中国科学院大学, 北京 100049; 4.伊犁师范大学, 新疆 伊宁 835000)

摘 要:蒸散发(Evapotranspiration, ET)是陆地生态系统环境调节的重要方式。草地退化背景下,研究草地蒸散发的时空变化,对掌握草退化生态效应具有重要意义。选择草地退化严重的伊犁河谷作为研究区,利用 2001—2015 年 MODIS ET 和 NDVI 遥感数据以及气温和降水站点数据,借助于 GIS 空间分析技术,反演植被覆盖度,插值生成气温和降水空间分布数据,进而进行差值和相关性计算,对该区草地 ET 时空变化及其影响因素进行分析和探讨。结果表明:(1)伊犁河谷草地多年平均 ET 为 395.74 mm;空间上 43.21%区域 ET 位于 400~500 mm;全区 ET 不仅海拔分异明显,且与覆盖度的空间分异总体一致;(2)近 15 a 伊犁河谷全区草地平均 ET 减少 11.06%,空间上 ET 发生减少面积占到 98.07%,其中 51.82%的减少比例位于 10%~20%,主要分布在海拔较低的洪积平原和低山区;(3)2011—2015 年时段 ET 变化的空间分异发生较大转变,低海拔区 ET 减少比例明显缩减,而高海拔区 ET 减少比例扩大;(4)伊犁河谷草地植被覆盖度与 ET 的相关性最高,植被覆盖度是决定草地 ET 空间分布及时空变化的关键因素,降水对草地 ET 空间分布及变化的影响高于气温。伊犁河谷植被覆盖度、降水及气温的降低均构成草地 ET 降低的驱动因素,但复杂的地形使伊犁河谷草地 ET 与其影响因素的相关性呈现明显且多样的空间差异。

关键词:蒸散发; MOD16; 时空变化; 伊犁河谷

中图分类号: Q948.15

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2019)06-0184-07

Spatiotemporal Variation of Evapotranspiration in the Grassland of Yili Valley from 2001 to 2015

YAN Junjie^{1,2,3,4}, FU Xiudong⁴, ZHAO Yu⁴, LIU Ying⁴, LÜ Guanghui¹, CUI Dong⁴, LIU Haijun⁴

(1.College of Resources and Environment Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;

2.Xinjiang Institute of Ecology and Geography, CAS, Urumqi 830011, China; 3.University of Chinese

Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4.Yili Normal University, Yining, Xinjiang 835000, China)

Abstract: Evapotranspiration (ET) is an important way of environmental regulation in terrestrial ecosystems. Under the background of grassland degradation, study on the spatiotemporal changes of grassland ET is of great importance for grasping the ecological effects of grassland degradation. Based on remote sensing data of MODIS ET and NDVI and station data of temperature and precipitation, and using technologies and methods of spatial analysis of GSI, inversion of grassland coverage, interpolation of temperature and precipitation and calculation of difference and correlation, we chose the Yili Valley, featured with serious grassland degradation, as the study area, and analyzed and discussed the spatiotemporal variation of grassland ET from 2001 to 2015 and its influencing factors. The results showed that: (1) the annual average ET of grassland in Yili Valley was 395.74 mm, and ET of the 43.21% grassland was 400~500 mm; ET showed obvious spatial differentiation along elevation, and the spatial differentiation was consistent with the spatial differentiation of coverage; (2) in the past 15 years, ET in grassland of Yili Valley had decreased by 11.06% in total; spatially, 98.07% of the grassland ET decreased at various degrees, among which ET of 51.82% of the total grassland decreased by 10%~20%, and mainly located in the flood plain and low mountain areas; (3) during the period of 2011—2015, the spatial differentiation of the ET change altered obviously, the proportion of ET reduction in low altitude areas decreased while that in high altitude areas increased; (4) the correlation

收稿日期: 2019-04-09

修回日期: 2019-04-22

资助项目: 国家自然科学基金“全球变化背景下伊犁山地草原苦豆子无性种群生活史的响应及调节机理”(31360101)

第一作者: 闫俊杰(1984—), 男, 河南林州人, 在读博士, 讲师, 主要从事生态遥感监测相关研究。E-mail: yan3550@sina.com

通信作者: 赵玉(1978—), 男, 安徽阜阳人, 教授, 主要从事植物生态学、入侵生态学相关研究。E-mail: zhaoyuliuying@126.com

between vegetation coverage and ET was the highest in Yili Valley; coverage was the key factor to determine the spatial distribution and temporal change of grassland ET. The effect of precipitation on the spatial distribution and change of grassland ET was higher than that of air temperature. The decrease of vegetation coverage, precipitation and temperature in the Yili Valley constituted the driving factors for the decrease of grassland ET in together. However, the complex terrain made the correlation between grassland ET and its influencing factors present obvious and diverse spatial differences.

Keywords: actual evapotranspiration; MOD16; spatiotemporal variation; Yili Valley

全球草地面积 34 亿 hm^2 (FAO, 1991 年), 约占陆地表面面积的 24%, 是陆地表面生态组成的关键部分, 然而目前, 全球约有一半的草地已处于退化或正在退化的状态^[1], 草地退化的环境效应及对生态功能的影响被广泛关注。蒸散发 (Evapotranspiration, ET) 是植被及地面向大气输送水汽的总通量^[2], 是地表能量和水量平衡的关键环节及重要组成部分^[3-4], 全球约有 60% 的地表净辐射能量在蒸散发过程被消散^[5], 约 60%~65% 的降水通过蒸散发返回到大气^[6-7], 其中 80% 左右通过植物的蒸腾作用实现^[8], 研究退化草地蒸散发的时空动态对掌握草地退化的生态效应具有重要意义。

蒸散发长期以来就是陆地表层水循环最难估算的分量^[9], 自 1802 年 Dalton 提出蒸散发的计算方法至今^[10], 国内外相关学者相继发展了多种观测和计算方法, 如蒸渗仪、波文比和涡动相关等观测方法, 以及水量平衡、互补相关模型, 陆地表面模型和基于遥感数据的估算模型等计算方法^[11], 其中基于遥感数据的方法是面向区域的蒸散发估算方法, 其计算结果为蒸散发空间分布数据, 减少了站点数据非均质界面上尺度外推所造成的误差^[12-13], 是满足全球和区域尺度蒸散发动态监测的有效方法^[14], 因而被广泛关注和采用。起始于 2000 年的 MODIS MOD16 数据是由美国航空航天局 (NASA) 制作并公开发布的全球蒸散发成品数据集, 被国内外大量研究人员采用, 用于全球及区域尺度 ET 时空动态研究^[15-17]。

伊犁河谷地处欧亚大陆腹地, 新疆西天山。河谷内草地植被发育良好, 是新疆优质畜牧基地, 然而随着社会发展, 人类活动对草地生态的干扰强度不断增强, 草地生产能力逐步降低^[18-19], 生态效益受损^[19]。本文以伊犁河谷为研究区, 利用 2001—2015 年 MODIS ET 和 NDVI 时间序列遥感数据, 以及气温和降水数据, 分析伊犁河谷草地 ET 时空变化特征, 及其与覆盖度、气温和降水关系, 以期对伊犁河谷生态保护与管理提供科学依据。

1 研究区概况

伊犁河谷地理位置介于 $80^{\circ}09'42''$ — $84^{\circ}56'50''\text{E}$,

$42^{\circ}14'16''$ — $44^{\circ}53'30''\text{N}$, 河谷呈东西直向, 东高西低, 西宽东窄, 呈喇叭状向西坦荡展开, 东部顶点为巩乃斯河源头, 西部底边朝向中哈边界, 科古琴—博罗克努山横亘与河谷北部, 中部为乌孙山, 南部为哈尔克—那拉提山, 山脉之间盆地、河谷、平原及丘陵广布。受地形影响, 河谷内降水丰沛, 被称为西域湿岛。伊犁河谷气候温带大陆性气候, 但高山气候特征明显^[20], 平原与山区气候差异明显^[21], 年均降水量 200~900 mm, 年均气温 $2.9\sim 9.1^{\circ}\text{C}$ ^[22]。复杂的地形、多变的气候及充沛的降水为植被的生长提供了多样的生境, 河谷内植被类型多样, 草地植被发育良好, 分布有高寒草甸类、山地草甸类、温性草甸草原类、温性草原类、温性荒漠草原类、温性荒漠类及低平地草甸类等草地类型^[23]。

2 材料与研究方法

2.1 数据来源与预处理

ET 数据来自 MODIS MOD16A2 数据集, 时间序列 2001 年 1 月—2015 年 12 月, 时间和空间分辨率分别为 8 d 和 1 000 m。NDVI 数据来自 MODIS MOD13Q1 数据集, 时间序列与 ET 数据一致, 其时间和空间分辨率分别为 16 d 和 250 m。对获得的 ET 及 NDVI 遥感数据除进行数据格式转换、镶嵌、投影转换及研究区提取等预处理外, 还进行了年累积 ET 数据及年最大值 NDVI 数据合成, 以获得年 ET 和 NDVI 数据。利用年 NDVI 数据和像元二分模型^[24], 反演获得年草地植被覆盖度数据。

草地空间分布矢量数据通过对伊犁河谷 2015 年 6—9 月 Landsat8 OLI 影像的解译获得。对草地分布的矢量数据进行栅格化处理, 转化为栅格数据。

2001—2015 年的年累积降水和年平均气温数据来自中国气象信息中心。包括伊犁河谷之内霍城、霍尔果斯、察布查尔、昭苏、特克斯、伊宁市、伊宁县、巩留、新源和尼勒克及附近巴音布鲁克共计 11 气象站点的的天数据。利用 Anusplin4.2 软件对获得的气象数据进行插值计算, 获得年累积降水和年平均气温空间分布数据。最后为保证多源数据的空间匹配, 数据像元均重采样为 $250\text{ m}\times 250\text{ m}$ 。

2.2 差值分析

单个年份 ET 随机波动较大,为削弱这种随机性对 ET 变化评估的影响,文中将 2001—2015 年序列数据分为了 2001—2005 年、2006—2010 年及 2011—2015 年 3 个时间段,计算各个时段 ET 的 5 a 平均值,以平均值代表各个时段 ET 水平。并分别对 2001—2005 年与 2006—2010 年、2001—2005 年与 2011—2015 年以及 2006—2010 年与 2011—2015 年的 ET 空间分布数据进行差值运算,分析 2001—2010 年、2001—2015 年及 2006—2015 年 3 个时期草地植被 ET 变化特征。

3 结果与分析

3.1 ET 总体特征及其变化

根据 15 a 的平均数据,伊犁河谷草地 ET 等级以 300~400 mm 和 400~500 mm 为主,两者所占比例

分别为 19.69%和 43.21%(表 1)。经计算,近 15 a 内伊犁河谷草地 ET 的平均值为 400.57 mm(表 2),相对于新疆地表近 15 a 年间 ET 均值 364.29 mm^[1],高出 9.96%。空间上,就 15 a 平均来看(图 1),伊犁河谷草地 ET 海拔分异明显,ET <200 mm 的区域主要分布在巩乃斯河下游至伊犁河一线两侧的洪积冲积扇底部和低山丘陵区,ET 为 200~400 mm 的分布区海拔有所提高,主要分布在巩乃斯河中下游至伊犁河两侧洪积冲积扇,以及喀什河中下游两侧和特克斯河中下游两侧的低山丘陵区;而 ET 为 400~600 mm 的区域则主要分布在河谷东部、南部以及北部的高山区域;ET >600 mm 的区域仅在河谷东部有部分分布。而 ET 为 500~600 mm 的区域主要分布在婆罗科努山脉以南和那拉提山脉以北的高山丘陵地带及其巩乃斯河上游与喀什河的下游(图 1)。

表 1 草地植被 ET 均值及变化

等级/mm	15 a 平均		2001—2005 年		2006—2010 年		2011—2015 年	
	面积/万 hm ²	比例/%	面积/万 hm ²	比例/%	面积/万 hm ²	比例/%	面积/万 hm ²	比例/%
<200	24.24	7.76	9.18	2.94	28.52	9.13	36.70	11.75
200~300	45.57	14.59	45.73	14.64	44.54	14.26	47.92	15.34
300~400	61.51	19.69	47.04	15.06	58.51	18.73	89.28	28.58
400~500	134.98	43.21	124.10	39.73	122.17	39.11	122.79	39.31
500~600	44.70	14.31	79.75	25.53	56.29	18.02	15.34	4.91
>600	1.37	0.44	6.56	2.10	2.34	0.75	0.34	0.11
共计	312.37	100	312.37	100	312.37	100	312.37	100

表 2 草地植被 ET 均值及其变化

2001—2005 年	2006—2010 年		2011—2015 年		2001—2015 年	总体变化
ET 均值	ET 均值	变化	ET 均值	变化	ET 均值	
426.41 mm	396.03 mm	7.13%	379.26 mm	4.23%	400.57 mm	11.06%

2001—2005 年、2006—2010 年和 2011—2015 年 3 个时间段,伊犁河谷全区草地 ET 均值分别为 426.41 mm,396.03 mm,379.26 mm,ET 量逐步降低,2001—2005—2006—2010 年减少 7.13%,2006—2010—2011—2015 年减少 4.23%,15 a 内共降低了 11.06%(表 2)。根据表 1 中的统计数据,在各等级类型中,ET 为 300~400 mm 的面积增加最多,面积由 47.04 万 hm²增加到 89.28 万 hm²,增加了 42.24 万 hm²,增加比例达 89.80%;而 ET 为 500~600 mm 的面积减少最多,由 79.75 万 hm²减少到 15.34 万 hm²,减少了 64.41 万 hm²,减少比例为 80.76%;ET 为 400~500 mm 的几乎无明显变化。ET<200 mm 的也有较大面积的增加,增加了 27.52 万 hm²,增加比例达到 74.99%;ET >600 mm 的面积减少了 6.22 万 hm²,但减少比例高达 94.82%。可见,近 15 a 年来伊犁河谷草地植被 ET 呈现 ET 高值(ET>500 mm)区域面积减少而 ET 低值(ET<400 mm)区域面积增加的变化趋势,空间上,前者主要分布于

巩乃斯河上游、河谷北部的科古琴山与阿吾拉山南部以及昭苏盆地周围,后者主要分布于伊犁河河谷两侧山前洪基冲击扇区(图 1)。

3.2 ET 变化的空间特征

从图 2 可以看出,2001—2015 年伊犁河谷绝大部分草地 ET 出现降低,根据统计结果(表 3),15 a 内 ET 降低区域总面积高达 306.35 万 hm²,占草地总面积的 98.07%。其中以降低比例为 10%~20%的面积最广,面积为 161.86 万 hm²,占草地总面积的 51.82%,其主体分布在喀什河下游和伊犁河河谷两侧的洪积平原和低山区;降低比例为 20%~30%和 0%~10%的面积比例也分别达到了 25.83%和 1.88%,主体分布在科古琴山东南部以及特克斯河上游;降低比例为>30%的面积很小,仅占 1.88%,主要在河谷北部低山丘陵和特克斯河中下游西北的低山区有零星分布。ET 增加区域面积为 6.03 万 hm²,仅占草地总面积的 1.93%,仅在河谷西北部 and 东部有零星分布。

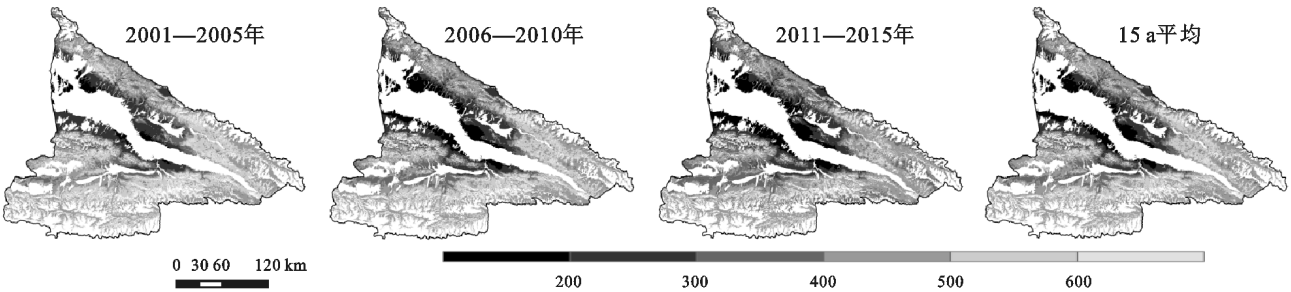


图 1 2001—2015 年 3 个时段及 15 a 平均草地植被 ET 等级

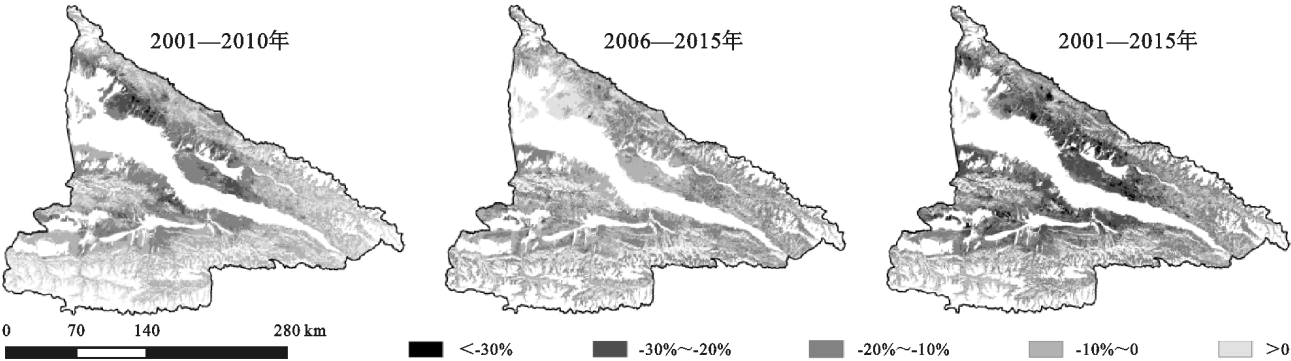


图 2 草地植被 ET 变化等级空间分布

对于不同时期,由图 2 中 2001—2010 年和 2001—2015 年两个时期 ET 变化等级空间分布图可知,伊犁河谷草地 ET 发生减少的面积在增强。其比例由 86.35% 增加到了 98.07%(表 3),同时,ET 减少程度也在加深。巩乃斯河中下游至伊犁河出国境口一线两侧的很大区域,ET 的减少比例由 10%~20%或 0%~10%加深到了 20%~30%,而河谷北部、东部、南部和中部的中山和高山区内的很大区域 ET 由增加或减少 0%~10%变为了减少 20%~30%;具体来看,ET 减少 >20%的面积比例由 6.47% 增加到 27.71%,ET 减少为 10%~20%的比例则由 38.78% 增加到了 51.82%,而减少为 0%~10%的比例则由 49.10% 减少到

18.54%,同时 ET 不变和有所增加的面积比例也由 13.65% 减少到 1.93%。

此外,由图 2 中 2001—2010 年和 2006—2015 年两个时期 ET 变化等级空间分布图可知,2011—2015 年,伊犁河谷 ET 变化在空间上发生了较大变化,巩乃斯河中下游至伊犁河出国境口一线两侧的很大区域,ET 的减少比例由 >10% 级别减弱为 <10% 级别和增加,表明这些区域 ET 的减少速率有所减缓;而河谷北部、东部及南部的中山和高山区域内有很大面积的 ET 则由减少 0%~10% 或增加变为了减少 10%~20%,表明这些区域 ET 的减少速率有所增大,但全区 ET 平均减少速率在增大(表 3,图 2)。

表 3 草地植被 ET 变化等级统计

等级	2001—2010 年		2006—2015 年		2001—2015 年	
	面积/万 hm ²	比例/%	面积/万 hm ²	比例/%	面积/万 hm ²	比例/%
<-30%	0.62	0.20	0.06	0.02	5.86	1.88
-30%~-20%	19.59	6.27	2.59	0.83	80.70	25.83
-20%~-10%	96.15	30.78	124.39	39.82	161.86	51.82
-10%~0	153.37	49.10	161.13	51.58	57.93	18.54
>0	42.64	13.65	24.20	7.75	6.03	1.93
共计	312.37	100.00	312.37	100.00	312.37	100.00

3.3 ET 与覆盖度、气温及降水量关系

基于 2001—2015 年草地年 ET 和年覆盖度空间分布数据,以及 10 个气象站(不包括巴音布鲁克气象站)年平均气温和年累积降水量数据,分别计算其年平均值,绘制草地 ET、覆盖度、降水和气温年际变化

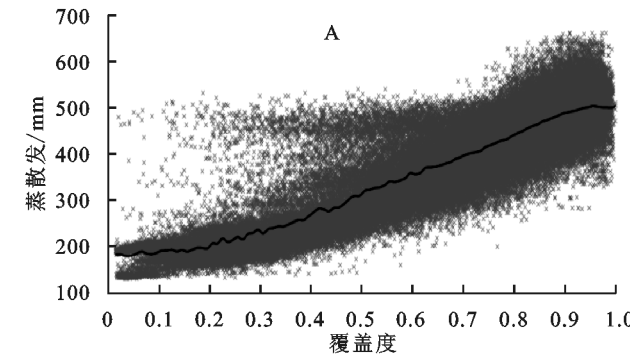
曲线(图 3)。

由图 3 可知,2001—2015 年伊犁河谷草地覆盖度、降水和气温均呈降低趋势,促使 ET 也呈现降低趋势。但在年际波动上,相对于降水和气温,ET 与覆盖度年际波动高度一致(图 3A);ET 与降水年际

波动也较为一致,较大的差异存在于 2010 年、2011 年和 2014 年(图 3B);而 ET 与气温年际波动的差异较大,两者差异不仅表现在年际多动的峰值和估值出现的年份上,且在 2006—2010 年,气温的 5 a 平均值均高于 2001—2005 年和 2011—2015 年的 5 a 平均值,气温出现先增高后降低的变化,而 ET 则呈持续降低的变化(图 3C)。同时,经计算,ET 与覆盖度、降水量和气温的相关系数分别为 0.96,0.61,0.09,草地 ET 年际变化与覆盖度年际变化的相关性最高,可见,就整体的平均状况而言,草地覆盖度年际变化对其 ET 年际变化具有重要影响;而对于降水量和气温,降水年际变化与 ET 年际变化的相关性明显高于气温年际变化与 ET 年际变化的相关性。

4 讨论

根据上文分析,伊犁河谷草地覆盖较低的河谷平原区 ET 减小比例相对较高,而植被覆盖较高的山区 ET 减小比例相对较小(图 2),闫俊杰等^[18]对伊犁河谷草地覆盖度变化的分析结果表明,伊犁河谷草地覆盖较低的河谷平原区也是草地覆盖度减小比例相对较高的区域,且植被覆盖较高的山区也是草地覆盖度减小比例相对较小的区域,可见,ET 变化与覆盖度变化在空间上也具有较高的一致性。利用伊犁河谷草地 ET 和植被覆盖度的 15 a 平均空间分布数据以及 ET 和覆盖度 15 a 变化比例空间分布数据,分别绘制 ET 与覆盖度以及 ET 变化比例与覆盖度变化比例的散点图(图 4),进一步分析 ET 与植被覆盖度相关性的空间分异特征。



由图 4A 可知,ET 随覆盖度的增加而逐步增加,表明在空间上植被覆盖度高的区域其 ET 也高,经计算,两者相关系数达到了 0.89(表 4),但对 ET 变化与覆盖度变化的关系,其相关系数为 0.50(表 4),同时由图 4B 可以看出,覆盖度变化比例由 -25.00% 缩减到 -2.50% 时,ET 平均变化比例迅速由 -23.00% 缩减到 -11.58%,ET 平均减小比例随覆盖度减小比

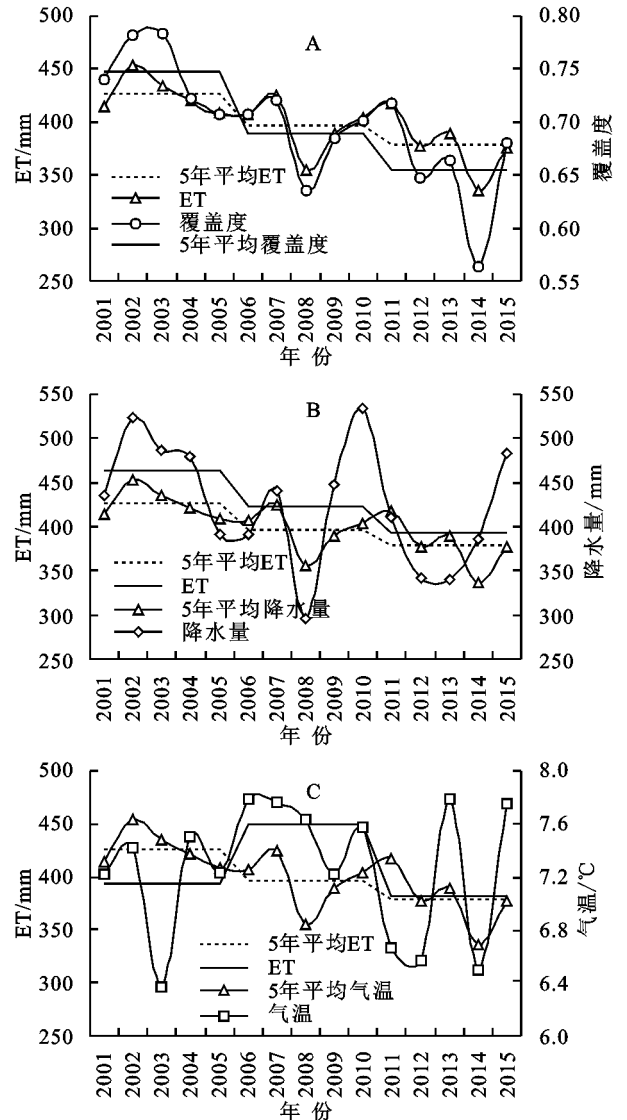


图 3 ET、覆盖度、降水量和气温年际变化

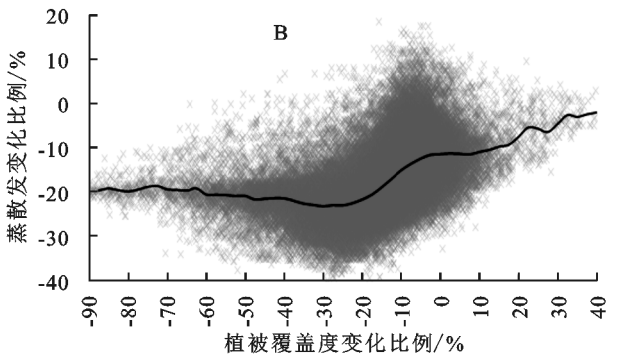
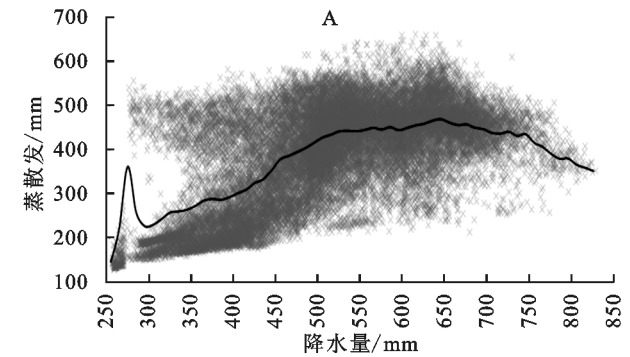


图 4 ET 与覆盖度散点图

例的降低而缩减;覆盖度变化比例为 -90.00% ~ -25.00% 时,ET 平均减少比例虽然也逐步扩大,但变化速率明显减小;覆盖度变化比例由 -2.50% 变为 40.00% 时,ET 平均变化比例也快速由 -11.58% 变为 -2.00%,但覆盖度变化比例位于此范围的区域面积较小,根据统计其面积比例为 12.44%。可见,在空间上,覆盖度变化不同时 ET 的变化存在差异。

对于降水和气温,同样利用草地 ET、降水量和气温的 15 a 平均空间分布数据,以及 ET、降水量和气温的 15 a 变化比例空间分布数据,分别绘制 ET 与降水量及



气温的散点图(图 5A、图 6A)和 ET 变化比例与气降水量变化比例及温变变化比例的散点图(图 5B 及图 6B),分析 ET 与降水和气温相关性的空间分异特征。

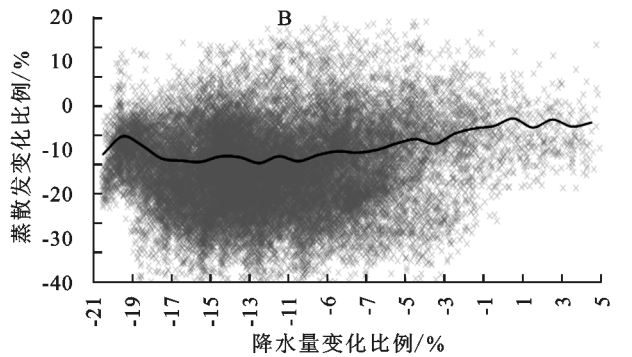


图 5 ET 与降水量散点图

由图 5 和表 4 可知,ET 与降水量总体呈正相关,平均 ET 与平均降水量相关系数为 0.59,而 ET 变化比例与降水量变化比例相关系数仅为 0.10。同时 ET 与降水量关系也存在区域差异,其中降水量为 295~645 mm 的区域,ET 总体随降水量增加而增加,而降水量>645 mm 的区域,ET 总体随降水量增

加而减小;降水量变化比例为-19.50~12.50%的区域,ET 平均减小比例随降水量减小比例的缩减而逐步由 12.44%扩大到了 17.48%,而降水量变化比例为-12.50%~5.00%的区域,ET 平均减小比例随降水量由减少转变为增加而逐步缩减,比例由 17.48%缩减为了 9.84%。

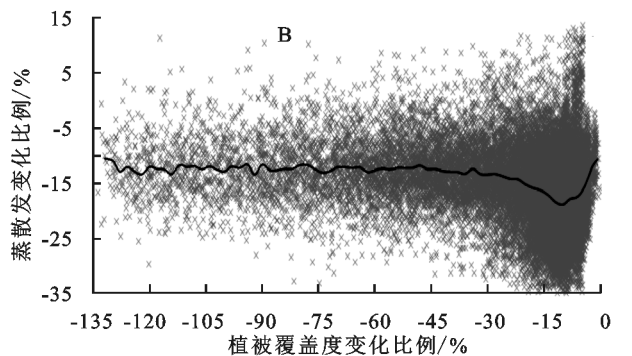
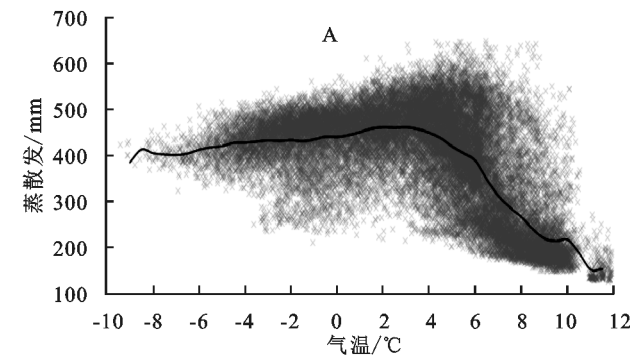


图 6 ET 与气温散点图

平均 ET 与平均气温以及 ET 变化比例与气温变化比例的相关系数分别为-0.51 和-0.25(表 4),呈负相关,而 ET 年际变化与气温年际变化相关系数虽仅为 0.09,然而却为正,此差异可能与 ET 与气温相关性较小且存在较大空间差异有关。由图 6A 可知,对于平均气温为-9.00~3.00℃的区域,平均 ET 随气温的增加由 386.99 mm 逐步增加到 463.41 mm,温度高的区域 ET 也高;对于平均气温为 3.00~12.00℃的区域,平均 ET 随气温的增加由 463.41 mm 逐步降低到 126.59 mm,温度高的区域 ET 反而

较低。同时,由图 6B 可知,2001—2015 年伊犁河谷全区气温均发生不同程度降低(图 6 中气温变化比例均<0),对于气温减低比例大于 47.99%的区域,其 ET 平均变化比例相对稳定,在-12.00%左右;而对于气温变化比例为-47.99%~-9.96%的区域,ET 平均减小比例由 11.82%逐步扩大到了 18.93%,ET 减小比例随气温降低比例的减小而扩大;气温减小比例由 9.96%缩减到 0 的区域,其 ET 平均减小比例也逐步 18.93%缩减为了 10.72%,ET 减小比例随气温降低比例的减小而缩减。

表 4 2001—2015 年 ET 及其变化比例与覆盖度、气温和降水量及其变化比例的相关系数

关系因子	平均 ET			ET 变化比例		
	平均覆盖度	平均气温	平均降水量	覆盖度变化比例	气温变化比例	降水量变化比例
相关系数	0.89	-0.51	0.59	0.50	-0.25	0.10

ET 作为地表热量平衡及水分循环的重要分量,链接了地球水圈、大气圈和生物圈^[25-26],需要大气、植被及土壤等环境要素的参与。伊犁河谷地处天山山

脉,河谷内植被及气候垂直分异特征明显,草地分布由低海拔区的荒漠草地向中高海拔区的温性草原以及高海拔区的山地草甸和高寒草甸逐步演变^[23],降

水随海拔增加由 250 mm 增高到 860 mm(图 5A),气温则由 12℃ 逐步降低到 -10℃(图 6A),海拔较低的区域虽然温度较高,但降水较少,降水是植被生长的重要限制因子,而在高海拔区,降水虽然相对丰富,但气温较低,气温成为限制植被生长的重要因子。同时河谷河流及山脉纵横交错,分布有山间盆地、冲积平原、丘陵及高山等多种地形地貌,复杂的地形使植被和气候的空间分布在垂直分异规律的基质上表现出复杂且多样的局地特性,ET 及其变化也随之呈现明显而复杂的空间差异。上文分析中不同覆盖度、气温及降水量取值范围内 ET 所存在的不同甚至相反的变化趋势也正是复杂地形控制下的气候、植被及其他环境要素配置在空间上的异质性所支配的水分循环复杂性的体现。

5 结论

(1) 伊犁河谷草地 ET 近 15 a 平均值为 394.57 mm,其中 43.21% 区域 ET 位于 400~500 mm,空间上,ET 随海拔分异明显,呈现由山前洪积冲积扇区向高山区逐步增加的总体变化。

(2) 15 a 内伊犁河谷草地平均 ET 逐步降低,由 2001—2005 年时段的 427.26 mm 降低到了 2011—2015 年时段的 361.27 mm,降低了 11.06%;ET 位于 300~400 mm 的面积明显增加,而 ET 位于 500~600 mm 的面积明显减少。

(3) 差值分析表明,伊犁河谷 98.07% 草地 ET 发生不同程度的减少,其中 51.82% 的 ET 降低比例在 10%~20% 之间,主要分布在喀什河下游和伊犁河谷两侧的洪积平原和低山区;2011—2015 年时段 ET 变化在空间上发生较大变化,山前洪积冲积扇区及低山丘陵区 ET 减少比例明显缩减甚至变为增加,而中山和高山区域 ET 则减少比例扩大甚至由增加变为减少。

(4) 植被覆盖度、降水及气温的降低均构成了伊犁河谷草地 ET 降低的驱动因素,但植被覆盖度是决定伊犁河谷草地 ET 空间分布及时空变化的关键因素,降水对草地 ET 空间分布及变化的影响高于气温;同时,由于复杂地形控制下的植被及气候条件配比的复杂性,不仅在空间分布上 ET 与降水和气温的相关性存在空间差异,而且在时空变化上 ET 变化与气温及降水变化的相关性也存在明显且多样的空间差异。

参考文献:

[1] 希吉勒.围封对草地生态系统碳储量影响的研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2012.

- [2] 丛振涛,杨大文,倪广恒.蒸发原理与应用[M].北京:科学出版社,2013.
- [3] 郭淑海,杨国靖,李清峰,等.新疆阿克苏河上游高寒草甸蒸散发观测与估算[J].冰川冻土,2015,37(1):241-248.
- [4] Wang K C, Robert E D. A review of global terrestrial evapotranspiration: Observation, modeling, climatology, and climatic variability[J]. Reviews of Geophysics, 2012, 50:1-54.
- [5] Rasmus F, Tobias L, Kjeld R, et al. Greenness in semi-arid areas across the globe 1981—2007, an Earth Observing Satellite based analysis of trends and drivers [J]. Remote Sensing of Environment, 2012,121(2):144-158.
- [6] Rivas R, Caselles V. A simplified equation to estimate spatial reference evaporation from remote sensing-based surface temperature and local meteorological data[J]. Remote Sensing of Environment, 2004,93:68-76.
- [7] Jin Y, Randerson J T, Goulden M L. Continental-scale net radiation and evapotranspiration estimated using modis satellite observations [J]. Remote Sensing of Environment, 2011,115:2302-2319.
- [8] Trenberth K E, Fasullo J T, Kiehl J. Earth's global energy budget [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2009,90(3):311-323.
- [9] 李发鹏,徐宗学,李景玉.基于 MODIS 数据的黄河三角洲区域蒸散发量时空分布特征[J].农业工程学报,2009, 25(2):113-120.
- [10] 周彦昭,周剑,李妍,等.利用 SEBAL 和改进的 SEBAL 模型估算黑河中游戈壁、绿洲的蒸散发[J].冰川冻土, 2014,36(6):1526-1537.
- [11] 蹇东南,李修仓,陶辉,等.基于互补相关理论的塔里木河流域实际蒸散发时空变化及影响因素分析[J].冰川冻土,2016,38(3):750-760.
- [12] 张淑兰,于澎涛,王彦辉,等.泾河上游流域实际蒸散量及其各组分的估算[J].地理学报,2011,66(3):385-395.
- [13] Batra N, Islam S, Venturini V, et al. Estimation and comparison of evapotranspiration from MODIS and AVHRR sensors for clear sky days over the Southern Great Plains [J]. Remote Sensing of Environment, 2006,103(1):1-15.
- [14] Courault D, Seguin B, Olioso A. Review on estimation of evapotranspiration from remote sensing data: From empirical to numerical modeling approaches[J]. Irrigation and Drainage Systems, 2005,19(3/4):223-249.
- [15] Kim H W, Hwang K, Mu Q, et al. Validation of MODIS16 global terrestrial evapotranspiration products in various climates and land cover types in Asia[J]. Ksce Journal of Civil Engineering, 2012,16(2):229-238.

(下转第 197 页)

- 定性评价与防治措施建议[J].中国地质灾害与防治学报,2016,27(2):55-60.
- [10] 刘晓东,青藏高原隆升对亚洲季风形成和全球气候变化与环境的影响[J].高原气象,1999,18(3):321-332.
- [11] 韦志刚,黄荣辉,董文杰,青藏高原气温和降水的年际和年代际变化[J].大气科学,2003,27(2):157-170.
- [12] 马耀明,胡泽勇,田立德,等.青藏高原气候系统变化及其对东亚区域的影响与机制研究进展[J].地球科学进展,2014,29(2):207-215.
- [13] 齐冬梅,李跃清,陈永仁,等.近50年四川地区旱涝时空变化特征研究[J].高原气象,2011,30(5):1170-1179.
- [14] 白莹莹,张焱,高阳华,等.四川盆地降水变化的区域差异[J].地理科学,2011,31(4):478-484.
- [15] 陈超,庞艳梅,张玉芳.近50年来四川盆地气候变化特征研究[J].西南大学学报:自然科学版,2010,32(9):115-120.
- [16] 郑浩,许武成,孙高敏. ENSO事件对川西高原区气候的影响[J].气象与环境学报,2013,29(1):40-46.
- [17] 李川,陈静,朱燕君.川西高原近50年气候变化的初步研究[J].高原气象,2003(S1),138-144.
- [18] 朱歆炜,叶成志,彭晶晶,等.湖南省55 a极端气温事件变化特征[J].沙漠与绿洲气象,2016,10(2):82-88.
- [19] 姜世中.黄河源区达日至玛曲段近50年径流量变化趋势分析[J].地理研究,2008,27(1):221-228.
- [20] Morlet J, Arens G, Fourgeau, et al. Wave propagation and sampling theory and complex waves[J]. Geophysics, 1982,47(2):222-236.
- [21] Meyers S D, Kelly B G, O'Brin J J. An introduction to wavelet analysis in oceanography and meteorology: with application to the dispersion of Yanai waves[J]. Mon. Wea. Rev., 1993,121:2858-2866.
- [22] 刘俊萍,田峰巍,黄强.黄河上游河川径流变化多时间尺度分析[J].应用科学学报,2003,21(2):117-121.
- [23] 李柏桢,周广胜.干旱指标研究进展[J].生态学报,2014,34(5):1043-1052.
- [24] 齐冬梅,李跃清,王莺,等.基于Z指数的四川干旱时空分布特征[J].干旱气象,2017,35(5):734-744.
- [25] 刘琳,徐宗学.西南地区旱涝特征及其趋势预测[J].自然资源学报,2014,29(10):1792-1801.
- [26] 范思睿,王维佳,陈添宇,等.西南地区春季降水异常与大尺度环流关系[J].干旱区地理,2016,39(1):47-57.
- [27] 杨辉,宋洁,晏红明,等.2009/2010年冬季云南严重干旱的原因分析[J].气候与环境研究,2012,17(3):315-326.
- [28] Hulme M. Estimating global changes in precipitation [J]. Weather, 1995,50(2):34-42.
- [29] 聂光荣,刘斌华.青藏高原及毗邻地区的环流对甘孜州旱涝的影响[J].高原气象,2004,23(S1):104-108.
- [30] 西南师范学院地理系四川地理研究室.四川地理[M].重庆:西南师范学院学报编辑部,1982.
- [31] 符淙斌,王强.气候突变的定义和检测方法[J].大气科学,1992,16(4):482-493.
- [32] 张丽艳,杨东,薛双奕,等.陕西省降水特征及其对旱涝灾害的影响[J].中国农学通报,2017,33(21):126-133.
- ~~~~~
- (上接第190页)
- [16] Jang K, Kang S, Lim Y J, et al. Monitoring daily evapotranspiration in Northeast Asia using MODIS and a regional Land Data Assimilation System[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2013, 118(23): 927-940.
- [17] 吴桂平,刘元波,赵晓松,等.基于MOD16产品的鄱阳湖流域地表蒸散量时空分布特征[J].地理研究,2013,32(4):617-627.
- [18] 闫俊杰,黄辉,崔东,等.2001—2015年伊犁河谷草地植被覆盖度时空变化特征[J].华中师范大学学报:自然科学版,2017,51(6):865-872.
- [19] 闫俊杰,黄辉,崔东,等.新疆伊犁河谷草地退化及其对生态服务价值的影响[J].生态经济,2018,34(1):191-196.
- [20] 张军民.伊犁河流域气候资源特点及其时空分布规律研究[J].干旱气象,2006,24(2):1-4.
- [21] 赵丽,杨青,韩雪云.1961—2009年伊犁地区降水指数的时空分布及变化特征分析[J].干旱区资源与环境,2014,28(10):82-89.
- [22] 周聿超.新疆河流水文水资源[M].乌鲁木齐:新疆科技卫生出版社,1999.
- [23] 刘芳,张红旗,董光龙.伊犁河谷草地植被NDVI变化及其降水敏感性特征[J].资源科学,2014,36(8):1724-1731.
- [24] Purevdorj T S, Tateishi R, Ishiyama T. Relationships between percent vegetation cover and vegetation indices [J]. International Journal of Remote Sensing, 1998,19(18):3519-3535.
- [25] Xu S Q, Yu Z B, Yang C G, et al. Trends in evapotranspiration and their responses to climate change and vegetation greening over the upper reaches of the Yellow River Basin[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2018,263:118-129.
- [26] Chang Y, Qin D, Ding Y, et al. A Modified MOD16 Algorithm to Estimate Evapotranspiration over Alpine Meadow on the Tibetan Plateau, China[J]. Journal of Hydrology, 2018,561:16-30.