

伊犁河流域地表蒸散量时空特征分析

梁红闪¹, 王丹¹, 郑江华^{1,2,3*}

(1. 新疆大学 资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046; 2. 新疆大学 干旱生态与环境研究所, 乌鲁木齐 830046; 3. 新疆大学 绿洲与生态重点实验室, 乌鲁木齐 830046)

摘要:【目的】探究伊犁河流域2000—2014年蒸散量时空特征, 为跨境水资源确权与分配提供依据。【方法】本文利用变异系数、Theil-Sen median 趋势分析、Mann-Kendall 和 Hurst 指数方法研究了伊犁河流域 2000—2014 蒸散量时空变化特征及波动性。【结果】①伊犁河流域多年平均蒸散量值为 249.80 mm, 其波动范围在 224.03~274.10 mm 之间。②多年平均 ET 值在空间上具有明显差异, 取值范围在 115.6~758.79 mm 之间, 总体上呈自上游向下游减少的空间格局。③该流域年内蒸散量具有明显的季节差异, 总体呈先增后减的单峰波趋势。④该流域内各土地利用多年平均蒸散量表现为: 耕地(327.23 mm) > 林地(319.10 mm) > 草地(239.50 mm) > 稀疏植被(151.67 mm)。⑤2000—2014 年该流域的多年平均 ET 整体上变异程度不明显, 变异程度中比较稳定和稳定所占面积比为 85.47%; 变异系数在空间上取值范围为 0.01~0.71, 其平均值为 0.097。⑥整个流域内 ET 减少的趋势和增加的趋势所占面积比例分别为 64.48%和 26.72%, 变化趋势以减小为主, 变化率为-1.152 mm/a, 该流域未来 ET 的变化状况与过去一致, 以持续性减少为主。【结论】利用变异系数、Theil-Sen median 趋势分析、Mann-Kendall 和 Hurst 指数方法能够有效发现伊犁河流域时空变化特征, 研究结果可为伊犁河流域规划及合理分配流域水资源提供依据。

关键词: 蒸散; MOD16; 流域; 时空特征; 趋势分析

中图分类号: K903

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2019415

梁红闪, 王丹, 郑江华. 伊犁河流域地表蒸散量时空特征分析[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(7): 100-110.

LIANG Hongshan, WANG Dan, ZHENG Jianghua. Temporal and Spatial Characteristics of Surface Evapotranspiration in the Ili River Basin [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(7): 100-110.

0 引言

【研究意义】蒸散发 (Evapotranspiration, ET) 是土壤、植被和大气相互作用的重要参数, 是地表能量和水分平衡的重要组成部分^[1], 对蒸散量的估算在水分监测以及水资源管理中扮演重要的角色, 尤其是在中亚干旱地区, 蒸散发的监测与估算对区域规划、水资源管理以及可持续发展意义重大^[2]。伊犁河流域横跨中哈两国, 气候复杂, 涵盖半湿润、半干旱以及干旱等多种气候类型^[3], 流域内主要河流—伊犁河, 水资源主要产于我国, 消耗于下游哈萨克斯坦^[4], 其具有中亚河流的共同点—河流为跨界河流, 上下游水资源及灌溉农业与自然生态系统之间存在竞争关系^[5]。巴尔喀什湖每年 70%~80% 的水量来源于伊犁河,

随着咸海的消耗, 它已成为中亚最大的湖泊。伊犁河下游三角洲总面积约 8 000 km², 为中亚最大的三角洲和湿地综合体^[4], 其生态服务价值对中亚干旱区至关重要。长期以来伊犁河流域水资源分布不均匀、缺乏统一管理调度, 灌溉制度不完善、灌溉方式和技术落后, 使得流域内生态环境日益恶化^[6]。鉴于此, 研究该流域水资源的利用与消耗迫在眉睫, 蒸散量作为量化水资源消耗的重要方式之一, 研究该流域的蒸散量时空特征对于该流域水资源确权与分配具有重要意义。【研究进展】随着遥感技术的发展, 利用遥感信息对大面积区域的蒸散发进行计算成为可能。国内外已有学者利用遥感数据进行了流域蒸散发研究^[7], 尤其是由美国 NASA 地球观测系统发布的全球 MODIS 陆地蒸散产品数据 (MOD16) 在国内外得到广泛使用^[8], 并取得了不错的成果^[9]。MOD16 产品已成为分析区域及全球地表蒸散量时空分布的重要遥感数据产品^[8]。【切入点】目前已有的对该流域基于遥感的蒸散量的研究仅限上游地区^[10]或下游地区^[4], 对整个流域地表蒸散量的相关研究比较短缺。

收稿日期: 2019-12-03

基金项目: 国家社会科学基金重大项目 (17ZDA064); 教育部促进与美大地区科研合作与高层次人才培养项目 (117-40101)

作者简介: 梁红闪 (1992-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为跨境水资源监测与分配。E-mail: 573486004@qq.com

通信作者: 郑江华 (1973-), 男, 浙江江山人, 教授, 博士, 主要研究方向为遥感和地理信息系统研究及水资源利用。E-mail: zheng_jianghua@126.com

【拟解决的问题】本研究采用 MOD16 地表蒸散量遥感产品, 从不同角度对伊犁河流域地表蒸散量进行研究, 探究该流域的蒸散量时空特征及变化趋势, 分析其不同土地利用类型下的蒸散量, 从而为估算该流域的生态耗水量提供依据, 为该流域的水资源分配提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

伊犁河流域位于中国新疆西部、哈萨克斯坦东南部, 地理位置在 $73^{\circ}18'—85^{\circ}N$ 、 $42^{\circ}16'—49^{\circ}22'E$ 之间^[11]。伊犁河由特克斯河、巩乃斯河及喀什河三大支流组成, 其主流特克斯河发源于汗腾格里峰北坡, 从哈萨克斯坦流入中国, 由西向东穿过昭苏—特克斯谷地, 折向南接纳了巩乃斯河, 然后又向西与喀什河汇合, 穿过伊犁谷地进入哈萨克斯坦境内, 为中哈跨界河流。经卡普恰盖水库调节后进入辽阔的伊犁河三角洲, 最后汇入巴尔喀什湖。该流域为典型的大陆性气候, 受流域纬度和地形影响, 地势从西北向东南逐渐抬升, 造成水文气候之间的差异和山区与平原之间的差异。该流域大部分位于哈萨克斯坦境内, 小部分位于中国境内, 是目前世界上保存最好的半干旱区域生态景观之一^[11]。

1.2 数据及处理

1.2.1 数据来源

本文采用蒸散数据 (MOD16) 对伊犁河流域的地表蒸散量进行时空变化状况的研究。由美国 NASA 发布的全球 MODIS 陆地蒸散产品数 (MOD16) (<http://www.nts.g.umd.edu/protect/MOD16>) 已经得到来自全球 232 个流域测量 ET 的验证^[12], 且已在全球不同尺度、流域得到了很好的应用^[7, 13-15, 16-21]。MOD16 产品的算法是在 Mu 等^[22]基于 Penman-Monteith 公式基础上改进的, 该数据集包括 4 种产品: 地表蒸散发 (ET)、潜在蒸散发 (PET)、潜热通量 (LE)、潜在潜热通量 (PLE) 空间分辨率有 1 km、 0.05° 和 30 arcsec, 时间分辨率为 8 d 合成、月合成和年合成。该数据具备较高的时空分辨率且免费获取^[9]。降水资料来自英国 East Anglia 大学气候研究中心 (Climatic Research Unit, CRU) 发布的全球陆地表面月平均气候数据集 (<http://www.uea.ac.uk/>), 空间分辨率 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$; 选取的时间序列为 2000 年 1 月—2014 年 12 月。陈发虎等^[23]通过分析中亚地区整体平均单位格点所用站点数的时间序列以及不同时段所用的插值站点发现, 1930 年以后的 CRU 资料具有可靠性和适用性。土地利用数据来自欧洲太空局气候变化倡议 (CCI) 计划发布的 1992—2015 年全球 300 m 分辨率年度土地覆

盖 (LC) 数据集 (以下简称为 CCI-LC 数据集) (<http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/>), 涵盖了从 1992—2015 年共 24 a 的数据集。CCI-LC 经地面参考数据和替代传感器等独立数据验证, 具有较高的数据质量^[24-27]。流域边界来自全球流域数据库^[28]

1.2.2 数据处理

使用 MRT 工具将 HDF 格式的 MOD16 数据进行拼接、投影、重采样等处理后, 利用 ArcGIS 软件除去 MODIS16 数据中的无效值, 根据流域边界矢量图裁剪出研究区内的蒸散数据。将 CCI-LC 数据重分类为耕地、林地、草地、稀疏植被、裸地、水体和城镇。由于 MODIS16 数据集对无植被覆盖的裸地、水体和城镇等区域的蒸散发量不进行计算, 故本研究中将裸地、水体和城镇区域的 ET 值设置为无数据。基于重分类的 CCI-LC 全球地表覆盖数据和 MOD16 数据, 利用 ArcGIS 空间统计分析工具, 统计 2000—2014 年伊犁河流域耕地、林地、草地和稀疏植被的蒸散量。

1.3 研究方法

利用变异系数、Theil-Sen median 趋势分析、Mann-Kendall 和 Hurst 指数方法研究了伊犁河流域蒸散量时空变化特征及波动性。

1.3.1 变异系数

变异系数 (Coefficient of Variation, CV) 是标准差和平均数的比值^[29-30], 反映每年蒸散量的变异程度^[31]。变异系数的计算式为:

$$CV = \frac{SD_{ij}}{\overline{ET}_{ij}}, \quad (1)$$

式中: $\overline{ET}_{ij}$ 为第 i 行、 j 列的像元的年均值 (像元大小为: $300\text{ m}\times 300\text{ m}$); SD_{ij} 为第 i 行、 j 列的像素标准差^[31]。将 CV 值分为比较稳定 ($CV\leq 0.1$)、稳定 ($0.1<CV\leq 0.2$)、不稳定 ($0.2<CV\leq 0.3$)、很不稳定 ($CV>0.3$) 4 个等级^[9, 31], CV 值越大, 表明各年份之间数据分布越离散, 时间序列数据波动较大, 时序不稳定; 相反, 说明各年份之间数据分布较为集中, 时序较为稳定。

1.3.2 Theil-Sen median 趋势分析与 Mann-Kendall 检验

Theil-Sen median 趋势分析与 Mann-Kendall 检验结合使用, 用于判断长时间序列数据趋势^[32-33]。Theil-Sen median 趋势分析是一种稳健的非参数计算方法, 计算式为:

$$S_{ET} = \text{median} \left(\frac{ET_j - ET_i}{j - i} \right), \quad 2000 \leq i < j \leq 2014, \quad (2)$$

式中: S_{ET} 指计算 $n(n-1)/2$ 个数据组合的斜率的中位数, ET_i 和 ET_j 代表 i 和 j 年的 ET 值。如果 $S_{ET} > 0$, 则 ET 呈现上升趋势, 否则, ET 呈下降趋势。Mann-Kendall 检验为非参数统计检验, 其优点为样本不需要遵从一

定的分布,也不受少数异常值得干扰。Mann-Kendall 检验被广泛应用于分析具有水文和气象的时间序列分析中^[34-35],用于判断时间序列数据是否具有上升或下降的趋势。以 W_Z 作为像元 ET 衰减指标,计算式为:

$$W_Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(ET_j - ET_i), \quad (4)$$

$$\text{var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18}, \quad (5)$$

$$\text{sign}(ET_j - ET_i) = \begin{cases} 1 & ET_j - ET_i > 0 \\ 0 & ET_j - ET_i = 0 \\ -1 & ET_j - ET_i < 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: ET_i 和 ET_j 为像素 i 和 j 的 ET 值; n 为时间序列的长度; sign 为符号函数。本文在置信度为 $\alpha=0.05$ 上判断 2000—2014 年 ET 变化趋势的显著性。 $|W_Z| > 1.96$ 表示时间序列置信水平 $\alpha < 0.05$, $|W_Z| < 1.96$ 表示置信水平 $\alpha > 0.05$ 。

1.3.3 Hurst 指数

Hurst 指数是一种区分时间序列数据可持续的方法,用于定量描述时间序列数据的可持续性,已被广泛应用于水文学,气候学,经济学和地质学等领域^[33]。计算过程参考相关研究^[32,36-37]。不同的 Hurst 指数(H)对应的时间序列趋势变化不同,总体可分为 3 种情况:当 $0.5 < H < 1$ 时,意味着未来变化趋势与过去趋势一致,且 H 越接近于 1,持续性越强;当 $H=0.5$ 时,为随机序列,即未来变化趋势与过去趋势无关;当 $0 < H < 0.5$ 时,序列具有反持续性,即未来变化趋势与过去趋势相反,且 H 越接近于 0,反持续性越强^[37]。

2 结果与分析

2.1 伊犁河流域地表蒸散量时空分布特征

2.1.1 伊犁河流域年际蒸散量变化特征

2000—2014 年伊犁河流域年际 ET 变化如图 1。可以看出 ET 波动范围在 224.03~274.10 mm 之间多年 ET 均值为 249.80 mm,相对变化较显著。各年份间的年际差异较小,研究期间整体上呈下降趋势,变化率为 -1.15 mm/a; 有 7 个年份的蒸散量超出多年平均蒸散量值,其余 8 个年份均低于 15 a 蒸散量均值; 2004 年的年际 ET 值最高达到 274.10 mm,年际 ET 值最低为 224.03 mm,出现在 2008 年, ET 年际最高值与最低值差值为 50.07 mm。从总体上来看,该流域的 ET 年际变化主要是受上游降水量的影响。

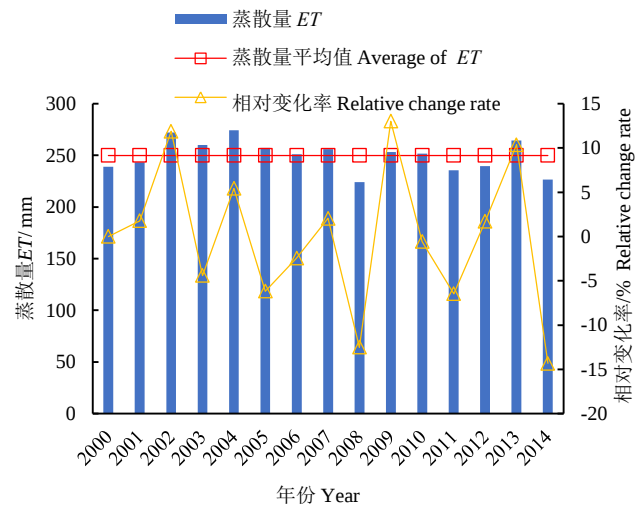


图 1 伊犁河流域地表蒸散量年际变化

Fig.1 Annual variation of evapotranspiration in Ili River Basin

2.1.2 伊犁河流域地表多年 ET 均值空间特征

由图 2 可以看出,伊犁河流域 2000—2014 年蒸散量和降水量的空间分布特征。从整个伊犁河流域来看,该流域年均蒸散量范围在 115.6~758.79 mm 之间,空间分异明显,呈现出上游高、中游和下游低的趋势。另外,从国际视角来看,该流域的多年蒸散量均值在中国境内部分 (401.18 mm) 显著高于在哈萨克斯坦境内部分 (194.45 mm)。该流域蒸散量空间分布的不均匀主要与该流域降水量和植被覆盖度的不均匀分布联系紧密。该流域上有伊犁河谷地带降水量显著高于下游,其植被覆盖度相对较高,为蒸散发提供有利条件。

2.1.3 伊犁河流域多年四季 ET 时间变化特征

根据植被生长习性 & 该流域物候特点将 3—5 月、6—8 月、9—11 月、12 月一次年 2 月分别被定为春季、夏季、秋季、冬季。在受流域内温度、降水、海拔、气压、空气湿度等诸多因素影响,从图 3 可以看出,该流域四季蒸散量差异明显。陆地蒸散量变化与温度、降水的变化联系密切^[38-39],温度升高可能会导致空气中含有水汽增多,从而促进蒸发蒸腾,加速地表与大气间的水汽循环,在受水分限制的干旱半干旱地区,降水可以通过增加土壤含水量、促进植物生长^[40]等方式成为影响蒸散发的关键变量。整个流域春季的地表蒸散量均值为 70.70 mm,随着温度上升、降水量增多、万物复苏,植被逐渐恢复生机,地表蒸散量相对冬季逐渐增多。夏季是该流域的雨季,雨热同期,太阳辐射强烈,植被生长旺盛,为地表蒸散发提供了较好的条件^[8],夏季的地表蒸散量均值为 91.63 mm。秋季温度逐渐下降,降水减少,植被处于停止生长或衰败的阶段,相应的地表蒸散量也呈下降趋势,平均蒸散量值为 60.14 mm。而冬季,随着气温降低,太阳辐射强度变低,气候干冷,大多数植物停止生长,从

而致使该流域内地表蒸散量的波动趋于平稳状态,地表蒸散量的平均值为 53.27 mm。综上可知,该流域一年内四季地表蒸散量均为冬季<秋季<春季<夏季。此外,从图 3 可以看出,该流域各季节蒸散量在中国境内均大于其在哈萨克斯坦境内,伊犁河上游河

谷地带地形特殊,降水丰富,素有“西域湿岛”和“塞外江南”的美誉^[41],有大量的林地和耕地,植被覆盖度明显高于该流域其他地区,为蒸散发提供了优越的条件。

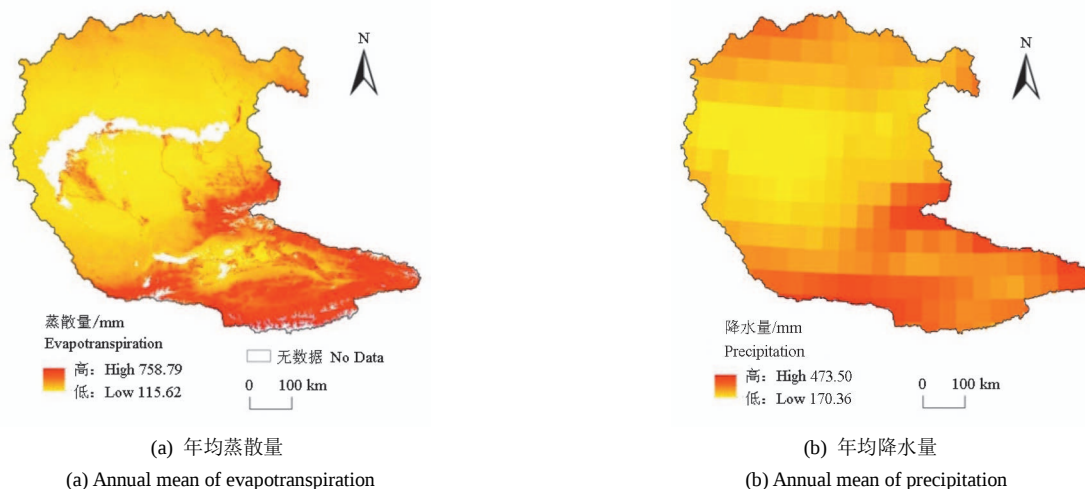


图 2 伊犁河流域 ET 均值和降水量空间分布

Fig.2 Average ET and precipitation of Ili River Basin

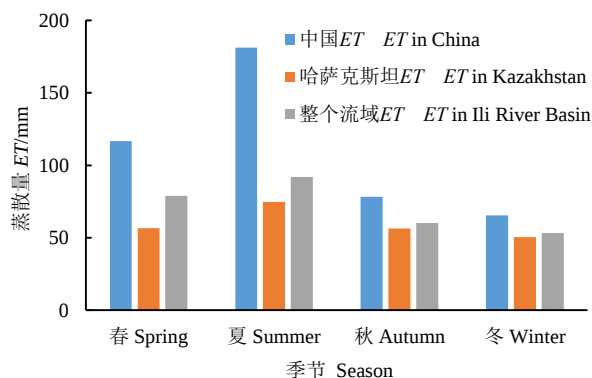


图 3 伊犁河流域四季蒸散量

Fig.3 Four Seasons Evapotranspiration in Ili River Basin

2.1.4 伊犁河流域多年四季 ET 空间变化特征

伊犁河流域季度 ET 分布情况见图 4。四季地表蒸散量变化趋势与多年地表蒸散量值在空间上表现一致,为上游蒸散量平均值>中游蒸散量平均值>下

游蒸散量均值。冬季的空间差异相对春夏秋 3 个季节不明显,夏季的空间差异在 4 个季节中最明显。春季受流域内气温回升,冰雪融化,万物复苏,伊犁河上游林地和下游三角洲高植被覆盖区地表蒸散作用逐渐增大,使其成为蒸散量高值区,伊犁河谷主要为耕地覆盖区受人为因素影响植被蒸散作用较弱,蒸散量在这一时期较小,下游巴尔喀什湖周边是蒸散量低值区;夏季该流域降水充沛,温度较高,为地表蒸散发提供了比较有利的条件^[8],在这一时期,植被生长旺盛,植被蒸腾作用和地表蒸散作用达到年内最强烈状态,使整个流域地表蒸散量皆高于其他 3 个季节,尤其是上游伊犁河谷地带成为流域内蒸散量高值区;秋季与冬季气温低,空气干冷,太阳辐射较弱,地面蒸发作用受到抑制,整个流域内的蒸散量值均比较低。

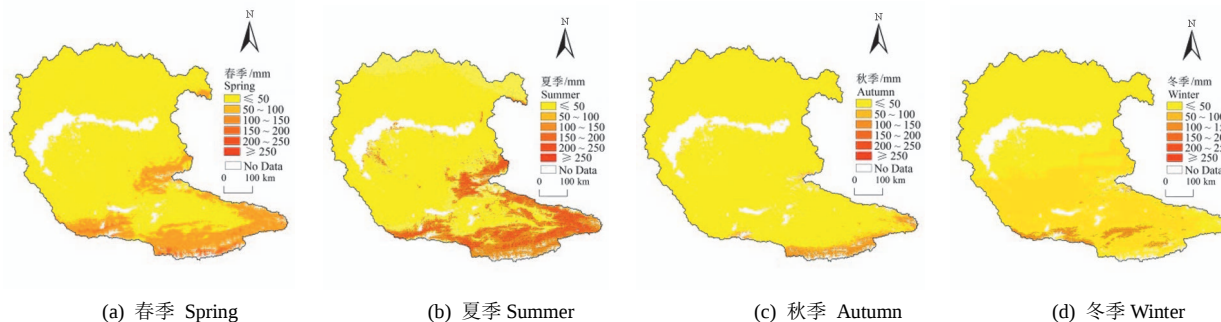


图 4 伊犁河流域多年季度 ET 均值空间分布

Fig.4 Quarterly variation of average evapotranspiration for multi-year in Ili River Basin

2.1.5 伊犁河流域 ET 值年内变化

伊犁河流域 2000—2014 年多年月平均 ET 值变

化如图 5 所示。流域整体及其在中国境内部分和在境外哈萨克斯坦部分年内 ET 呈周期性单峰波变化

趋势, 2—4 月呈缓慢上升, 4—6 月呈快速上升, 在 6 月达到最高值, 7—10 月呈快速下降趋势, 10—12 月呈缓慢下降趋势, 12 月一次年 2 月出现最低值。多年月平均 ET 值在整个流域和境外部分波动范围相对较小, 其范围分别为 17.38~33.32 mm 和 15.74~27.63 mm, 最大值与最小值之差分别为 15.94 mm 和 11.88 mm; 而在中国境内部分多年月平均 ET 值波动较大, 其范围在 20.97~64.45 mm, 其最大值与最小值差距为 43.48 mm。伊犁河流域横跨中哈二国, 流域内降水分布不均、植被覆盖差异明显, 导致该流域年内 ET 在境内和境外空间差异显著。研究^[42-44]表明在干旱、半干旱区降水与温度均对蒸散作用影响强烈, 而在该流域 11 月一次年 2 月该流域气候干冷, 大多数植被进入生长休止期, 植被蒸腾作用减弱, 地表蒸散能力下降, 而 4—6 月该流域气温回升, 降水增多, 太阳辐射强度大, 植被逐渐进入生长旺盛期, 为地表蒸散作用提供充足的有利条件。

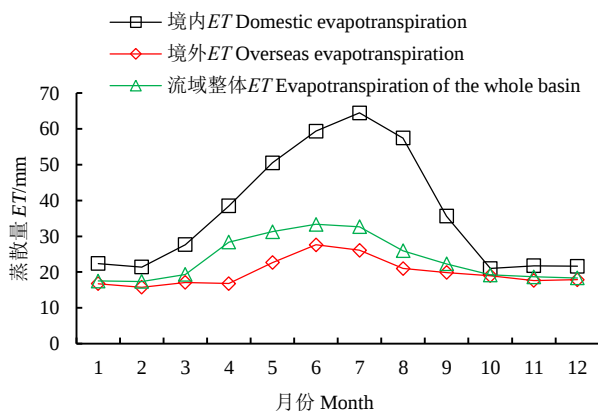


图5 伊犁河流域 2000—2014 年多年月平均 ET 变化

Fig.5 ET over the Ili River Basin from 2000 to 2014

2.2 不同土地利用类型的 ET 变化特征

不同土地利用类型其年均 ET 与 PET 不同, 对图 6 中伊犁河流域不同土地利用类型统计其不同土地覆盖的年均 ET 值和年均 PET 值见表 1。

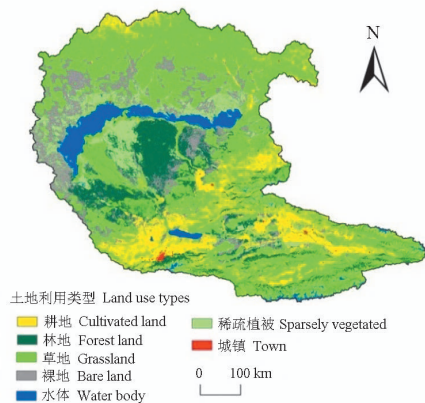


图6 伊犁河流域不同土地利用类型

Fig.6 Different land use types in Ili River Basin

表1 2000—2014年伊犁河流域
不同土地利用类型年均 ET 和年均 PET

Table 1 Annual average ET and PET of different land use types in Ili River Basin from 2000 to 2014

土地利用类型 Land use types	ET /mm	PET /mm
耕地 Cultivated land	327.23	1 554.07
林地 Forest land	319.10	1 715.17
草地 Grassland	239.50	1 547.82
稀疏植被 Sparsely vegetated	151.67	1 023.74

从表 1 可以看出, 耕地年均 ET 值在该流域最高, 为 327.23 mm, 稀疏植被年均 ET 值最低, 为 151.67 mm; 年均 PET 最高的是林地, 为 1 715.17 mm, 稀疏植被年均 PET 值最低, 为 1 023.74 mm。在该流域耕地主要为水浇地, 上游中国境内耕地中作物以谷物 (玉米和小麦)、油料、棉花和甜菜为主, 哈萨克斯坦境内主要作物为小麦、玉米、甜菜和烟草, 作物大多为灌溉作物, 其蒸散量大小与空间变化受自然因素和人为因素共同影响, 与土壤含水率、作物种类和农业技术措施等有关; 该流域林地主要为自然植被, 蒸散作用主要受自然因素影响, 上游伊犁河谷地带降水丰富, 有较多的阔叶林和针叶林, 下游巴尔喀什湖周边林地灌灌木林, 其蒸散作用低于上游阔叶林地。

2.3 伊犁河流域蒸散量变化趋势

将 Theil-Sen median 趋势分析与 Mann-Kendall 检验结合得到蒸散量在 2000—2014 年该流域像元尺度下的变化趋势, 如图 7 所示。从图 7 可以看出, 整个流域 ET 变化趋势, 在巴尔喀什湖北部及伊犁河入湖口处 ET 表现为一般增加趋势, 仅在伊犁河谷和伊犁河下游三角洲等较少的地区 ET 表现为显著增加趋势, 伊犁河上游地区 ET 主要表现出显著减小变化趋势, 中下游主要表现为略微减小趋势。通过表 2 可以看出, 研究期间整个流域 ET 变化趋势在面积上表现出: 略微减小 (55.64%) > 略微增加 (25.61%) > 显著减小 (8.84%) > 显著增加 (1.11%), 整个流域 ET 减少的趋势和增加的趋势所占面积比例分别 64.48% 和 26.72%。在研究期间整个流域 ET 变化趋势以减小为主, 在中国 ET 主要表现为减小趋势, 其面积比例达到 74.74%, 其中显著减小与略微减小的比例分别为 36.87% 和 37.87%; 在哈萨克斯坦 ET 主要表现为略微减小趋势 (58.51%)。

2.4 伊犁河流域 ET 稳定性的空间格局

伊犁河流域蒸散量的变异系数 (CV) 空间分布如图 8 所示, 将研究区像元尺度的 CV 进行分类统计得到表 3。该流域 CV 平均值为 0.097, 各变异程度面

积比例为：比较稳定（63.25%）>稳定（26.22%）>不稳定（1.97%）>很不稳定（0.18%），说明该流域的 ET 相对稳定，变异程度不明显。变异程度相对较大的区域主要在伊犁河谷、卡普恰盖水库周围和伊犁河下游三角洲地区，这些地区往往是在土地利用类型发生转变的区域^[38]，不同土地利用导致其地表蒸散作用程度不一^[45]，故其蒸散量变化比其他区域大。

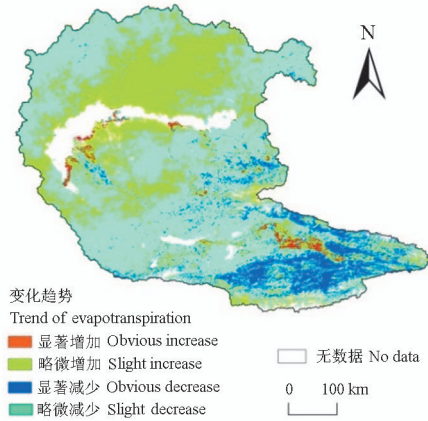


图 7 伊犁河流域 2000—2014 年 ET 变化趋势

Fig.7 Trend of ET in Ili River Basin from 2000 to 2014

表 2 伊犁河流域 2000—2014 年 ET 变化趋势统计

Table 2 Statistics on evapotranspiration trends in Ili River Basin from 2000 to 2014

S_{ET}	$ W_z $	ET 变化趋势 Trend of ET	占总面积百分比/% Percentage of the whole area	中国 China /%	哈萨克 斯坦 Kazakhstan/%
$S_{ET}<0$	$ W_z >1.96$	显著减小	8.84	36.87	4.33
$S_{ET}<0$	$ W_z \leq 1.96$	略微减小	55.64	37.87	58.51
$S_{ET}>0$	$ W_z \leq 1.96$	略微增加	25.61	11.92	27.82
$S_{ET}>0$	$ W_z >1.96$	显著增加	1.11	3.45	0.74
—	—	无数据	8.8	9.89	8.6

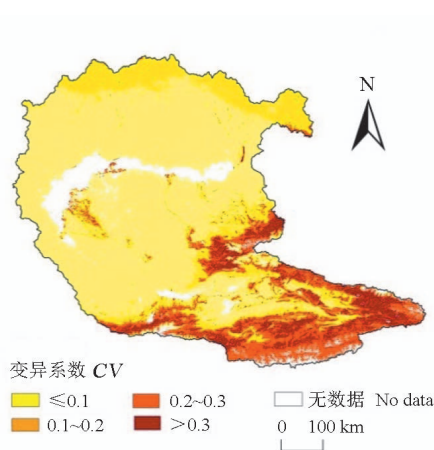


图 8 伊犁河流域 ET 的 CV 空间分布

Fig.8 CV spatial distributions of ET in Ili River Basin

表 3 伊犁河流域 ET 值变异系数统计

Table 3 Statistics of variation coefficient of evapotranspiration in Ili River Basin

变异系数 CV	变异程度 Volatility degree	占总面积百分比/% Percentage of the whole area
≤ 0.1	比较稳定	63.25
0.1~0.2	稳定	26.22
0.2~0.3	不稳定	1.97
> 0.3	很不稳定	0.18
无数据	—	8.37

2.5 伊犁河流域 ET 的可持续分析

伊犁河流域 2000—2014 年 ET 的 Hurst 指数空间分布如图 9 所示。从图 9 可以看出，整个流域仅少量象元 H 值在 0~0.5 之间，整个流域的 H 均值为 0.54， H 值大于 0.5 的区域所占比例为 66.51%，小于 0.5 的区域所占比例为 33.49%， H 值为 0.5 的象元数为 0，表明整个研究区 ET 趋向于正向持续性，未来 ET 的变化状况与过去一致。

将 ET 变化趋势与 H 值进行组合，得到变化趋势与持续性耦合结果，类型包括：持续性显著减小、持续性略微减小、持续性略微增加、持续性显著增加，见图 10、表 4。流域内 ET 未来变化类型的面积由高至低依次为：持续性略微减小（37.55%）>无法确定（32.36%）>持续性略微增加（14.67%）>持续性显著减小（5.88%）>持续性显著增加（0.79%），表明流域内 ET 未来变化趋势以持续性减少为主。有研究^[46]表明水分供给不足会导致陆面蒸散量下降，近些年来哈萨克斯坦干旱指数呈上升趋势^[47]，而该流域 ET 呈现持续性减少区域主要分布在哈萨克斯坦境内，说明这些区域供水不足影响了其蒸散作用。

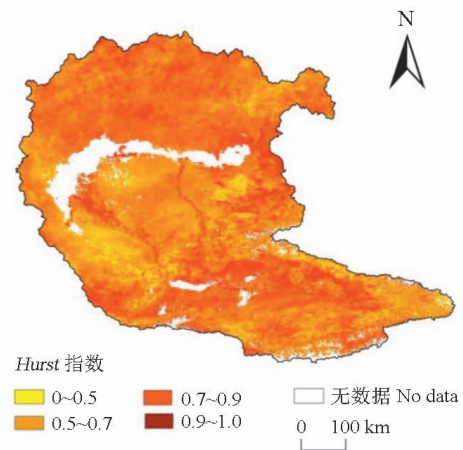


图 9 Hurst 指数空间分布

Fig.9 Spatial distribution of Hurst index

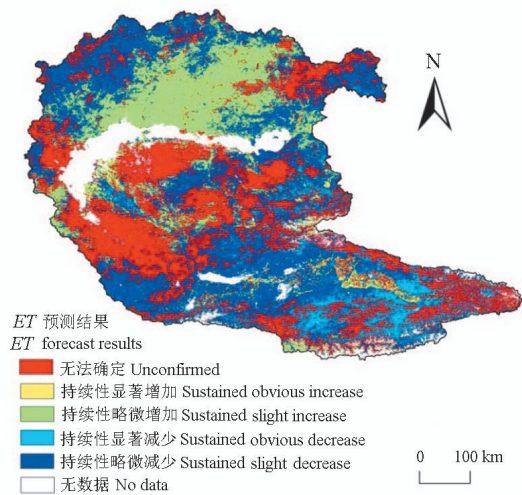
图 10 伊犁河流域 ET 未来变化趋势

Fig.10 Future changes in evapotranspiration in the Ili River Basin

表 4 伊犁河流域 ET 未来变化趋势类型统计

Table 4 Types of future trends of evapotranspiration in the Ili River Basin

S_{ET}	$ W_z $	H 值	ET 预测结果 ET forecast results	占总面积 百分比/% Percentage of the whole area
$S_{ET} < 0$	$ W_z > 1.96$	> 0.5	持续性显著减小	5.88
$S_{ET} < 0$	$ W_z \leq 1.96$	> 0.5	持续性略微减小	37.55
$S_{ET} > 0$	$ W_z \leq 1.96$	> 0.5	持续性略微增加	14.67
$S_{ET} > 0$	$ W_z > 1.96$	> 0.5	持续性显著增加	0.79
—	—	< 0.5	无法确定	32.36
—	—	—	无数据	8.76

3 讨论

伊犁河流域多年 ET 均值仅为 249.80 mm, 这与李超凡等^[39]对中亚地区研究得出的多年 ET 均值 (235.98 mm) 相接近, 且本研究中多年 ET 均值相对李超凡等^[39]略高主要原因为在中亚 ET 高值区主要集中于北部、东南部的农业区以及东部山区, 低值区分布在中西部的荒漠以及塔吉克斯坦东南部的高山区, 而本研究区主要位于中亚 ET 相对高值区, 因此多年 ET 均值相对略高。另外该流域多年 ET 均值在中国境内部分 (401.18 mm) 显著高于在哈萨克斯坦境内部分 (194.45 mm), 空间差异显著, 呈现出这种差异的原因主要受地形地貌、海拔高度、所处区域降水量、温度、土地利用类型等影响^[7,48]。而蒸散与温度、降水的相关程度具有区域差异性, 这种差异与降水和辐射能量在区域内分布的不均匀性有一定的关系, 干旱半干旱区降水 (土壤湿度) 是蒸散的主要控制因子, 蒸散量的变化主要受土壤储存的可蒸散水量限制

^[37,39]。伊犁河流域的上游中国新疆部分是新疆降水量最丰富的地区^[3,49], 降水丰富, 山地能自然形成植被。年均降水量可达 600~1 000 mm, 植被覆盖率为新疆最高的地区, 平均覆盖度达到 90%, 丰富的降水和较高的植被覆盖度为蒸散发提供了充分的条件, 所以流域上游蒸散量较高。而中下游区域主要分布在哈萨克斯坦境内, 为该国的干旱、半干旱区域, 降水量只有 100~200 mm, 靠近巴尔喀什地区年降水量不到 100 mm^[50], 植被覆盖度较低, 主要为裸地、稀疏植被和草地, 植物蒸腾和地表蒸发不明显, 从而致使中下游地区蒸散值较低。

研究期间伊犁河流域蒸散量减少的趋势和增加的趋势所占面积比例分别为 64.48% 和 26.72%, 总体呈下降趋势, 变化率为 -1.15 mm/a, 未来以持续性减少为主。人类活动与降水变化均对蒸散量产生影响^[17,36,51], 伊犁河流域地处内陆, 降水稀少, 2/3 的径流来自新疆伊犁河谷^[5], 而杨昕馨^[52]研究发现近些年来伊犁河上游产水区降水量呈下降趋势, 降水量降低使土壤水分减少, 导致该流域实际蒸散量减少^[32]。本文研究结果与 Jung 等^[46]研究发现的全球地面蒸散量下降趋势相符。人类活动的影响主要反映在地表覆盖上, 近些年来伊犁河流域蒸散量较高的区域—伊犁河下游三角洲地区、伊犁河谷地及中上游等地区植被覆盖因人类活动影响呈恶化趋势^[11], 植被覆盖度越高其蒸散发作用越强烈, 相反降低植被覆盖度蒸散作用减弱^[15]。

研究期内伊犁河流域的 ET 值其稳定和相对稳定的面积所占比达 89.47%, 不稳定和很不稳定的面积所占比例为 2.15%。整体上看, 整个流域 ET 变化相对稳定, 变异程度不明显。变异程度较大的区域仅出现在一些土地利用类型发生转变的区域, 土地覆盖的变化直接影响地表蒸散过程^[32], 研究期间, 伊犁河谷和下游三角洲地带农业较为发达, 具有相对高密度绿洲农业发展, 人工灌溉的耕地相对相同气候条件下的草地、裸地和稀疏植被地区其土壤湿度和植被覆盖度较高, 在相对容易获得水资源的伊犁河谷和伊犁河下游三角洲地区也是农用地扩张相对容易的地区, 致使相应的 ET 值有显著增加趋势, 而在上游产水区 ET 变化趋势主要表现为显著减少, 这与研究期内 ET 值相对较高的林地大幅度转化为 ET 值相对较低的草地有关^[38], 该流域境外部分 ET 变化趋势表现为略微减小的区域主要受苏联解体的影响, 导致流域内哈萨克斯坦农田面积的大面积萎缩, 大量农田面积撂荒退化为天然草地。本文采用的相对较高模拟精度和时空分辨率的遥感数据—MODIS ET 数据, 在一定程度上打破了该跨界流域用于研究水资源问题的壁垒, 但该数据也

有更新缓慢的缺陷。未来该流域水文循环与地表过程的变化还需要更加全面和更长时间的数据作为支撑。

4 结 论

1) *ET* 多年均值为 249.80 mm, 波动范围在 224.03~274.10 mm 之间, 研究期间整体上呈下降趋势, 变化率为-1.15 mm/a; 该流域多年 *ET* 均值在中国境内明显高于哈萨克斯坦。

2) 该流域整体及其在中国境内部分和在哈萨克斯坦境内部分年内 *ET* 呈周期性单峰波变化趋势, 2—4 月呈缓慢上升, 4—6 月呈快速上升, 在 6 月达到最高值, 7—10 月呈快速下降趋势, 10—12 月呈缓慢下降趋势, 12 月一次年 2 月出现最低值。

3) 整个流域的 *ET* 值相对稳定, 变异程度不明显。该流域的 *CV* 的平均值为 0.097, 各变异程度面积比例为: 比较稳定 (63.25%) > 稳定 (26.22%) > 不稳定 (1.97%) > 很不稳定 (0.18%)。

4) 整个流域内 *ET* 变化趋势以减小为主。*ET* 变化趋势在面积上表现出: 略微减小 (55.64%) > 略微增加 (25.61%) > 显著减小 (8.84%) > 显著增加 (1.11%), 减少的趋势和增加的趋势所占面积比例分别为 64.48 %和 26.72 %。

5) 整个流域 *ET* 趋向于正向持续性, 未来 *ET* 的变化状况与过去一致, 以持续性减少为主。*ET* 未来变化类型的面积由高至低依次为: 持续性略微减小 (37.55%) > 无法确定 (32.36%) > 持续性略微增加 (14.67%) > 持续性显著减小 (5.88%) > 持续性显著增加 (0.79%)。

参考文献:

[1] LIU S M, XU Z W, ZHU Z L, et al. Measurements of evapotranspiration from eddy-covariance systems and large aperture scintillometers in the Hai River Basin, China[J]. Journal of Hydrology, 2013, 487: 24-38.

[2] 金学杰, 周剑. 基于SEBS模型和Landsat 8数据的黑河下游蒸散发时空特性分析[J]. 冰川冻土, 2017, 39(3): 572-582.

JIN Xuejie, ZHOU Jian. Analysis of spatial-temporal characteristics of evapotranspiration in the lower reaches of Heihe River based on surface energy balance system model and Landsat 8 data [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(3): 572-582.

[3] 叶佰生, 赖祖铭, 施雅风. 伊犁河流域降水和气温的若干特征[J]. 干旱区地理, 1997(1): 46-52.

YE Baisheng, LAI Zuming, SHI Yafeng. Some characteristics of precipitation and air temperature in the Yili river basin [J]. Arid land geography, 1997(1): 46-52.

[4] 谢蕾, 龙爱华, 邓铭江, 等. 伊犁河下游三角洲生态耗水研究[J]. 冰川冻土, 2011, 33(6): 1 330-1 340.

XIE Lei, LONG Aihua, DENG Mingjiang, et al. Study on Ecological Water Consumption in Delta of the Lower Reaches of Ili River [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(6): 1 330-1 340.

[5] THEVS N, NURTAZIN S, BECKMANN V, et al. Water consumption of agriculture and natural ecosystems along the Ili River in China and Kazakhstan[J]. Water, 2017, 9(3): 207.

[6] 李吉玫, 徐海量, 宋郁东, 等. 伊犁河流域水资源承载力的综合评价[J]. 干旱区资源与环境, 2007(3): 39-43.

LI Jimei, XU Hailiang, SONG Yudong, et al. Evaluation of Water Resources Carrying Capacity in Yili Rive[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2007, 21(3): 39-43.

[7] 张特, 刘冀, 董晓华, 等. 基于MOD16的渭河流域蒸散发时空分布特征[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(8): 121-128.

ZHANG Te, LIU Ji, DONG Xiaohua, et al. Spatiotemporal Variation of Evapotranspiration in Huan River Basin Using the MOD16 Dataset [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(8): 121-128.

[8] 张猛, 曾永年, 齐玥. 基于MOD16的洞庭湖流域2000—2014年地表蒸散发时空变化分析[J]. 农业工程学报, 2018, 34(20): 160-168, 315.

ZHANG Meng, ZENG Yongnian, QI Yue. Analyzing spatio-temporal variations of evapotranspiration in Dongting Lake Basin during 2000—2014 based on MOD16[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(20): 160-168, 315.

[9] 王芳, 汪左, 张运, 等. 基于MOD16的安徽省地表蒸散量时空变化特征[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(3): 523-534.

WANG Fang, WANG Zuo, ZHANG Yun, et al. patio-temporal Variations of Evapotranspiration in Anhui Province Using MOD16 Products[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(3): 523-534.

[10] 阿迪来·乌甫, 玉素甫江·如素力, 热伊莱·卡得尔, 等. 伊犁河谷蒸散量时空分布特征及变化趋势[J]. 地球信息科学学报, 2018, 20(2): 217-227.

ADILAI · Wufu, YUSUFUJIANG · Rusuli, REYILAI · Kadeer, et al. Spatiotemporal distribution and variation trend of evapotranspiration in Ili River valley [J]. Journal of Geo-information Science, 2018, 20(2): 217-227.

[11] 王洪亮, 冯爱萍, 高彦华, 等. 伊犁河流域最大植被覆盖度的时空动态变化[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(6): 161-167.

WANG Hongliang, FENG Aiping, GAO Yanhua, et al. Temporal-spatial Dynamic Change on Maximum Vegetation Coverage Degree of Ili River Basin[J]. Environmental Science & Technology, 2018, 41(6): 161-167.

[12] MU Q, ZHAO M, RUNNING S W. Algorithm theoretical basis document: MODIS global terrestrial evapotranspiration (*ET*) product (NASA MOD16A2/A3) collection 5[J]. Nasa Headquarters, 2013.

[13] 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.
- [14] HASSAN A, ISMAIL S S, ELMOUSTAFA A, et al. Evaluating evaporation rate from high Aswan Dam Reservoir using RS and GIS techniques[J]. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 2018, 21(3): 285-293.
- [15] DA SILVA H J F, GONCALVES W A, BEZERRA B G. Comparative analyzes and use of evapotranspiration obtained through remote sensing to identify deforested areas in the Amazon[J]. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, 2019, 78: 163-174.
- [16] 刘可, 杜灵通, 候静, 等. 2000—2014年宁夏草地蒸散时空特征及演变规律[J]. *草业学报*, 2018, 27(3): 1-12.
- LIU Ke, DU Lingtong, HOU Jing, et al. Spatio-temporal characteristics and evolution of evapotranspiration of natural grassland in Ningxia during 2000—2014[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2018, 27(3): 1-12.
- [17] 张静, 任志远. 基于MOD16的汉江流域地表蒸散发时空特征[J]. *地理科学*, 2017, 37(2): 274-282.
- ZHANG Jing, REN Zhiyuan. Spatiotemporal Characteristics of Evapotranspiration Based on MOD16 in the Hanjiang River Basin [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2017, 37(2): 274-282.
- [18] 李伟光, 易雪, 蔡大鑫, 等. 基于MOD16蒸散量的海南岛干旱特征分析[J]. *自然灾害学报*, 2016, 25(5): 176-183.
- LI Weiguang, Yi Xue, CAI Daxin, et al. Analysis of drought characteristics in Hainan Island based on MOD16 evapotranspiration data[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2016, 25(5): 176-183.
- [19] 田义超, 梁铭忠, 胡宝清. 2000—2013年北部湾海岸带蒸散量时空动态特征[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(8): 146-158.
- TIAN Yichao, LIANG Mingzhong, HU Baoqing. Temporal-spatial Dynamic Change Characteristics of Evapotranspiration in Beibu Gulf Coastal Zone during 2000—2013[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(8): 146-158.
- [20] HU Guangcheng, JIA Li, MENENTI Massimo. Comparison of MOD16 and LSA-SAF MSG evapotranspiration products over Europe for 2011[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 156:510-526.
- [21] 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.
- WU Guiping, LIU Yuanbo, ZHAO Xiaosong, et al. Spatio-temporal variations of evapotranspiration in Poyang Lake Basin using MOD16 products[J]. *Geographical Research*, 2013, 32(4): 617-627.
- [22] MU Q, HEINSCH F A, ZHAO Maosheng, et al. Running. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 111(4): 519-523.
- [23] 陈发虎, 黄伟, 靳立亚, 等. 全球变暖背景下中亚干旱区降水变化特征及其空间差异[J]. *中国科学:地球科学*, 2011, 41 (11) :1 647-1 657.
- CHEN Fahu, HUANG Wei, JIN Liya, et al. Spatiotemporal precipitation variations in the arid Central Asia in the context of global warming[J]. *Science China:Earth Sciences*, 2011, 41 (11) :1 647-1 657.
- [24] NOWOSAD J, STEPINSKI T F, NETZEL P. Global assessment and mapping of changes in mesoscale landscapes: 1992—2015[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2019, 78: 332-340.
- [25] LIU X, YU L, LI W, et al. Comparison of country-level cropland areas between ESA-CCI land cover maps and FAOSTAT data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 39(20): 6 631-6 645.
- [26] LIU X, YU L, SI Y, et al. Identifying patterns and hotspots of global land cover transitions using the ESA CCI Land Cover dataset [J]. *Remote Sensing Letters*, 2018, 9(10): 972-981.
- [27] CHUVIECO E, SANDOW C, GUENTHER K P, et al. Global Burned Area Mapping from European Satellites: the ESA FIRE_CCI Project[C]// XXII Isprs Congress, 2012.
- [28] MASUTOMI Y, INUI Y, et al. Development of highly accurate lobal polygonal drainage basin data [J]. *Hydrological Processes*, 2009, 23(4): 572-584.
- [29] FENG J, BROWN David. Spike output jitter, mean firing time and coefficient of variation[J]. *Journal of Physics: Mathematical and General*, 1998, 31(4): 1 239-1 252.
- [30] WHELEN T, SIQUEIRA P. Coefficient of variation for use in crop area classification across multiple climates[J]. *International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation*, 2018, 67: 114-122.
- [31] 张圣微, 赵鸿彬, 张发, 等. 基于MODIS NDVI的锡林郭勒草原近10年的时空动态[J]. *草业科学*, 2014, 31(8): 1 416-1 423.
- ZHANG Shengwei, ZHAO Hongbin, ZHANG Fa. Temporal and spatial dynamic of Xilingol steppe based on MODIS NDVI in recent ten years[J]. *Pratacultural Science*, 2014, 31(8): 1 416-1 423.
- [32] 邓兴耀, 刘洋, 刘志辉, 等. 中国西北干旱区蒸散发时空动态特征[J]. *生态学报*, 2017, 37(9): 2 994-3 008.
- DENG Xingyao, LIU Yang, LIU Zhihui, et al. Temporal-spatial dynamic change characteristics of evapotranspiration in arid region of Northwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(9): 2 994-3 008.
- [33] JIANG W, YUAN L, WANG W, et al. Spatio-temporal analysis of vegetation variation in the Yellow River Basin[J]. *Ecological Indicators*, 2015, 51: 117-126.
- [34] MOSTOWIK K, SIWEK J, KISIEL M, et al. Runoff trends in a changing climate in the Eastern Carpathians (Bieszczady Mountains, Poland)[J]. *Catena*, 2019, 182: 104-174.
- [35] 王梅, 杨倩, 郑江华, 等. 1963—2012年新疆棉花需水量时空分布特征[J]. *生态学报*, 2016, 36(13): 4 122-4 130.
- WANG Mei, YANG Qian, ZHENG Jianghua, et al. Spatial and temporal distribution of water requirement of cotton in Xinjiang from 1963 to 2012[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(13) : 4 122-4 130.
- [36] 宋佳, 徐长春, 杨媛媛, 等. 基于MODIS16的新疆干湿气候时空变化及影响因素[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(5): 210-214, 221.

- SONG Jia, XU Changchun, YANG Yuanyuan, et al. Temporal and Spatial Variation Characteristics of Evapotranspiration and Dry-Wet Climate in Xinjiang Based on MODIS16 [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(5): 210-214, 221.
- [37] 孙锐, 陈少辉, 苏红波. 2000—2016年黄土高原不同土地覆盖类型植被NDVI时空变化[J]. 地理科学进展, 2019, 38(8): 1 248-1 258.
- SUN Rui, CHEN Shaohui, SU Hongbo. Spatiotemporal variations of NDVI of different land cover types on the Loess Plateau from 2000 to 2016 [J]. Progress in Geography, 38(8): 1 248-1 258.
- [38] ZHANG K, PAN S, ZHANG W, et al. Influence of climate change on reference evapotranspiration and aridity index and their temporal-spatial variations in the Yellow River Basin, China, from 1961 to 2012[J]. Quaternary international, 2015, 380: 75-82.
- [39] 李超凡, 罗格平, 李均力, 等. 近20 a中亚净初级生产力与实际蒸散发特征分析[J]. 干旱区地理, 2012, 35(6): 919-927.
- LI Chaofan, LUO Geping, LI Jun, et al. Net primary productivity and actual evapotranspiration of Central Asia in recent 20 years[J]. Arid Land Geography, 2012, 35(6): 919-927.
- [40] LI Y, FAN J, HU Z, et al. Comparison of evapotranspiration components and water-use efficiency among different land use patterns of temperate steppe in the Northern China pastoral-farming ecotone [J]. International Journal of Biometeorology, 2016, 60(6): 827-841.
- [41] 闫俊杰, 张静, 雷雨, 等. 2000—2016年新疆伊犁河谷草地NDVI变化趋势分析[J]. 草地学报, 2018, 26(4): 859-868.
- YAN Junjie, ZHANG Jing, LEI Yu, et al. Analysis of the Changing Trend of Grassland NDVI in the Ili Valley of Xinjiang during 2000—2016[J]. Acta Agrestia Sinica, 2018, 26(4): 859-868.
- [42] LI S G, ASANUMA J, KOTANI A, et al. Evapotranspiration from a Mongolian steppe under grazing and its environmental constraints [J]. Journal of Hydrology, 2007, 333(1): 133-143.
- [43] 温媛媛, 郭青霞, 王炎强. 基于SEBS模型的岔口小流域蒸散量特征及影响因子研究[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(4): 80-87.
- WEN Yuanyuan, GUO Qingxia, WANG Yanqiang. Evapotranspiration and the Factors Affecting It in Chakou Basin Studied with the SEBS Model[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(4): 80-87.
- [44] UM M J, KIM Y, PARK D, et al. Impacts of potential evapotranspiration on drought phenomena in different regions and climate zones [J]. Science of the Total Environment, 2019: 135590.
- [45] ODONGO V O, VAN Oel P R, VAN der Tol C, et al. Impact of land use and land cover transitions and climate on evapotranspiration in the Lake Naivasha Basin, Kenya [J]. Science of the Total Environment, 2019, 682: 19-30.
- [46] JUNG M, REICHSTEIN M, CIAIS P, et al. Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply. Nature, 2010, 467(7318): 951-954.
- [47] 他志杰. 中亚地区干湿时空演变特征及未来情景预估研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2019.
- TA Zhijie. The Analysis and Projection of Dry and Wet Climate Change in Central Asia [D]. Urumqi: Xin Jiang University, 2019.
- [48] 王志成, 李稚, 张辉, 等. 阿克苏河流域灌区土地利用变化对蒸散耗水的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(6): 79-85.
- WANG Zhicheng, LI Wei, ZHANG Hui, et al. The Impact of Land Use Change on Evapotranspiration of the Irrigated Areas in Aksu Basin [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(6): 79-85.
- [49] 蔡明勇, 杨胜天, 周秋文, 等. 伊犁河跨界流域土地利用变化特征分析[J]. 世界地理研究, 2013, 22(3): 151-159.
- CAI Mingyong, YANG Shengtian, ZHOU Qiuwen, et al. Land Use/Cover Change Analysis in Transboundary Ili River Basin[J]. World Regional Studies, 2013, 22(3): 151-159.
- [50] 龙爱华, 邓铭江, 李湘权, 等. 哈萨克斯坦水资源及其开发利用[J]. 地球科学进展, 2010, 25(12): 1 357-1 366.
- LONG Aihua, DENG Mingjiang, LI Xiangquan, et al. An analysis of water resources development in Kazakhstan and water problems[J]. Advances in Earth Science, 2010, 25(12): 1 357-1 366.
- [51] LYU Xizhi, ZUO Zhongguo, SUN Juan, et al. Climatic and human-related indicators and their implications for evapotranspiration management in a watershed of Loess Plateau, China[J]. Ecological indicators, 2019, 101: 143-149.
- [52] 杨昕馨. 浅析新疆伊犁河流域50余年降水时空分布[J]. 水资源开发与管理, 2018(6): 65-68.
- YANG Xinxin. Analysis on spatial and temporal distribution of precipitation in Xinjiang Ili River Basin for more than 50 years [J]. Water Resources Development and Management, 2019, 101: 143-149.

Temporal and Spatial Characteristics of Surface Evapotranspiration in the Ili River Basin

LIANG Hongshan¹, WANG Dan¹, ZHENG Jianghua^{1, 2, 3*}

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;

2. Institute of Arid Ecology and Environment, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;

3. Key Laboratory of Oasis Ecology, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

Abstract: **【Objective】** This paper is to explore the temporal and spatial characteristics of the evapotranspiration in the Ili River Basin from 2000 to 2014, and to provide a basis for the determination and distribution of cross-border water resources. **【Method】** In this paper, the temporal and spatial variation characteristics and volatility of evapotranspiration in the Ili River Basin were studied by using the methods of variation coefficient, Theil-Sen median, Mann-Kendall and Hurst index. **【Result】** The result showed that: ①The annual average evapotranspiration of the Ili River Basin was 249.80 mm, and its fluctuation range was 224.03~274.10 mm. ②The average *ET* value of multi years had obvious difference in space, ranging from 115.6 mm to 758.79 mm, which showed the spatial pattern of decreasing from upstream to downstream. ③The annual evapotranspiration of the basin had obvious seasonal difference, and the overall trend of unimodal wave increased first and then decreased. ④The annual average evapotranspiration of land use in the basin was as follows: cultivated land (327.23 mm) > forest land (319.10 mm) > grassland (239.50 mm) > sparsely vegetation (151.67 mm). ⑤During the study period, the variation degree of annual average *ET* in the basin was not obvious as a whole, and the proportion of stable and stable areas in the variation degree was 85.47%. The spatial value range of variation coefficient was 0.01~0.71, and the average value was 0.097. ⑥The decreasing trend and increasing trend of *ET* in the whole basin account for 64.48% and 26.72% of the total area, respectively. The main trend of *ET* change was decreasing, with a change rate of -1.152 mm/a. The future change of *ET* in the basin is consistent with the past, with a continuous decrease as the main trend. **【Conclusion】** Using the methods of variation coefficient, Theil-Sen median, Mann-Kendall and Hurst index, the temporal and spatial variation characteristics of the Ili River basin can be found effectively. The research results can provide a basis for planning and rational distribution of water resources in the Ili River Basin.

Key words: evapotranspiration; MOD16; Ili River Basin; temporal and spatial characteristics; trend analysis

责任编辑: 韩 洋