

DOI: 10.5846/stxb201601270190

邓兴耀, 刘洋, 刘志辉, 姚俊强. 中国西北干旱区蒸散发时空动态特征. 生态学报, 2017, 37(9): - .

Deng X Y, Liu Y, Liu Z H, Yao J Q. Temporal-spatial dynamic change characteristics of evapotranspiration in arid region of Northwest China. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(9): - .

中国西北干旱区蒸散发时空动态特征

邓兴耀^{1,2,3}, 刘 洋^{1,2,3}, 刘志辉^{2,3,*}, 姚俊强⁴

1 新疆大学资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046

2 新疆大学干旱生态环境研究所, 乌鲁木齐 830046

3 新疆大学绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046

4 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 乌鲁木齐 830002

摘要:利用 MODIS ET 数据集中 2000—2014 年的地表实际蒸散发量产品, 运用变异系数、Theil-Sen median 趋势分析与 Mann-Kendall 检验和 Hurst 指数法, 研究了中国西北干旱区蒸散发的空间格局、不同维度的空间异质性和时间变化特征及未来趋势预测。结果表明: (1) 2000—2014 年全区蒸散发量总体较小, 蒸散发量小于 200 mm 的区域占总面积的 38.329%。在空间上 ET 自山区向两侧平原减少, 不同土地覆盖的 ET 大小为: 林地>农用地>草地>稀疏植被。受降水和土地覆盖的综合影响, ET 的高值区(>400 mm)主要在降水丰富的山区林地和草地, 而低值区(<200 mm)主要在降水较少的平原稀疏植被区和草地。(2) 近 15 年全区蒸散发变异程度不明显, 以相对较低的波动变化为主。各亚区内波动较低区域的比例为: 北疆>天山>祁连山>内蒙西部>河西走廊>南疆。(3) 15 年间全区年均蒸散发量呈波动变化, 总体有微弱的减小趋势, 变化率为-0.9348 mm/a。基于像元尺度的分析也表明全区 ET 以减小的变化趋势为主, 但各亚区的减小程度各异: 天山>内蒙西部>河西走廊>北疆>祁连山, 仅南疆有增加趋势。(4) 全区 ET 的 Hurst 指数均值为 0.689, Hurst 指数大于 0.5 的范围所占比例为 80.033%, 未来全区蒸散发的变化趋势以持续性减小为主。其中 22.003% 区域的变化趋势无法确定。未来各亚区 ET 的减少趋势为: 内蒙西部>天山>河西走廊>北疆>祁连山>南疆。

关键词: MODIS; 蒸散发; 西北干旱区; 趋势分析; 气候变化

Temporal-spatial dynamic change characteristics of evapotranspiration in arid region of Northwest China

DENG Xingyao^{1, 2, 3}, LIU Yang^{1, 2, 3}, LIU Zhihui^{2, 3, *}, YAO Junqiang⁴

1 College of Resource and Environment Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

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

3 Key Laboratory of Oasis Ecology of Education Ministry, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

4 Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, China

Abstract: Using MODIS ET data of actual surface evapotranspiration products that were concentrated between 2000 to 2014, we used variable coefficients, the Theil-Sen median trend analysis, Mann-Kendall test, and Hurst index, to investigate the spatial pattern of evapotranspiration, spatial heterogeneity of different dimensionalities, characteristics of time variation, and future trends considering an arid region in Northwest China. The results showed the following: 1) Evapotranspiration over the entire region was very low from 2000 to 2014, and the area of evapotranspiration, less than 200 mm, accounts for 38.329% of the total area. Evapotranspiration decreases from mountainous areas to the plains.

基金项目: 国家科技支撑计划项目课题(2012BAC23B01); 水利部公益性行业科研专项经费项目(201301103); 新疆维吾尔自治区研究生科研创新项目(XJGRI2015019); 国家国际科技合作项目(2010DFA92720-12)

收稿日期: 2016-01-27; **网络出版日期:** 2016-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lzh@xju.edu.cn

Evapotranspiration data were obtained for different land covers, which are forest land, cropland, grassland, and sparse vegetation, arranged from high to low. Mountain forests and grasslands that receive high rainfall have higher values of evapotranspiration (more than 400 mm) than sparse vegetation plains and grasslands that experience low rainfall (less than 200 mm). 2) The degree of variation in evapotranspiration over the past 15 years for the entire region is not obvious, but shows a slight fluctuation. The proportion of areas with slight fluctuations in each subregion ranged from large to small in the order of Northern Xinjiang, Tianshan Mountain, Qilian Mountain, Western Inner Mongolia, Hexi Corridor, and Southern Xinjiang. 3) The degree of variation in evapotranspiration over the past 15 years for the entire region shows changes in the fluctuations with a weakly decreasing trend, at a change rate of -0.9348 mm/a . An analysis based on the pixel scale also shows a mainly decreasing trend. The degree of decreases in each subregion ranged from large to small in the order of Tianshan Mountain, Western Inner Mongolia, Hexi Corridor, Northern Xinjiang, and Qilian Mountain. Only Southern Xinjiang showed an increasing tendency. 4) The Hurst index average of evapotranspiration for the entire region is 0.689. The area of the Hurst index greater than 0.5 accounts for 80.033% of the total area. The trend of changes in evapotranspiration in the future for the entire region is mainly towards a persistent decrease. However, the trend of changes for 22.003% of the area cannot be determined. The future trend of change in the degree of decreases for each subregion from large to small follows the order of Western Inner Mongolia, Tianshan Mountain, Hexi Corridor, Northern Xinjiang, Qilian Mountain, and Southern Xinjiang.

Key Words: MODIS; evapotranspiration; the arid region of Northwest China; trend analysis; climate change

蒸散发 (Evapotranspiration, ET) 包括土壤、水面蒸发和植被蒸腾, 连接着地表水分、能量和碳的循环过程, 是构成气候系统的中心环节^[1]. 研究陆面过程中的蒸散发, 对天气预报、旱涝监测、水资源和农业管理以及全球变化等领域有重要意义^[2].

基于地面观测的资料可获得长时间序列的蒸散发信息, 但站点观测值并不能提供蒸散发的空间分布特征, 尤其是在观测站点稀疏的西北干旱区. 结合遥感技术可以反映蒸散发的空间异质性, 满足全球和区域尺度的研究. Jung 等^[3]发布了 1982—2008 年全球陆地蒸散发年尺度数据集; 欧洲气象卫星应用组织发布了覆盖欧洲、非洲和南美洲东部的 LSA-SAF MSG ET 数据集^[4]; 美国蒙大拿大学森林学院工作组制作了 2000 年至今的全球 MODIS ET 数据集^[5].

MODIS ET 数据集凭借较高模拟精度和时空分辨率, 已成功应用于全球和区域蒸散发的动态监测. 贺添等^[6]利用中国陆地生态系统通量观测研究网络数据和水文数据, 验证了 MODIS ET 数据的精度. Kim 等^[7]利用亚洲通量网 17 个站点的涡度相关仪数据对 MODIS ET 产品进行验证, 并分析了该数据集在不同气候和下垫面条件下的适用性; Liu 等^[8]利用中国海河平原的大孔径闪烁仪观测数据, 验证 2008—2010 年 MODIS ET 产品的精度, 并分析了 3 种下垫面蒸散发量的季节和年变化规律; Jang 等^[9]利用 MODIS ET 产品和 MODIS-KLDAS ET 驱动数据监测 2006—2008 年东北亚地区日蒸散发量, MODIS ET 产品的精度通过了区域通量塔观测的验证.

中国西北干旱区是亚洲中部干旱区的重要组成部分之一, 区内地形复杂, 山地盆地相间分布, 沙漠与绿洲共存, 各自然要素时空分布极不均匀, 是生态环境脆弱地区, 也是对全球变化响应最敏感地区之一^[10]. 全球气候变化改变了陆面水循环要素和蒸散发量^[3]. 水资源是干旱区农业和社会经济发展的制约因素. 在此背景下, 全球变化和人类活动共同驱动下的干旱区蒸散发时空分布及其变化受到诸多学者的关注. 李宝富^[11]、王海波^[12]分别以西北干旱区典型内陆河塔里木河流域、黑河流域为研究区, 发展了干旱区遥感估算蒸散发量的模型. 马金龙^[13]、张鑫^[14]利用涡度相关系统和波文比系统监测绿洲农田蒸散发, 为干旱区作物生长阶段不同灌溉时期和灌溉量的确定以及田间水分管理提供科学依据. 刘春雨^[15]研究了气候变化背景下的西北干旱区蒸散发响应. 李稚等^[16]利用 1958—2010 年的气象站观测数据, 得出西北干旱区蒸发皿蒸发量在过去 50 年内以

1993 年为转折点,由下降趋势逆转为显著上升的趋势的结论.但是由于不同的干湿背景,干旱区蒸发皿蒸发和实际蒸散发之间的关系尚存在较大争论^[17-18].

可见,目前针对西北干旱区蒸散发的研究成果较多,但这些研究选用的站点资料有限,或以整体分析为主,缺乏不同时空维度的变异性研究,难以反映研究区特殊的“山地—绿洲—荒漠”系统的异质性,对全区未来蒸散发变化趋势的定量研究还相对比较薄弱.研究西北干旱区蒸散发的时空变化规律和未来的变化趋势,对提高应对气候变化能力有重要意义,为促进区域经济社会可持续发展提供参考.

1 研究区概况

中国西北干旱区位于亚洲中部,深居大陆腹地,为多年平均降水量小于 200 mm 的极端干旱区和干旱区,属于典型的大陆性气候^[19],自然条件恶劣.该地区东以贺兰山为界,南至昆仑山—阿尔金山—祁连山,北侧和西侧直抵国界,介于 73—107°E 和 35—50°N 之间,包括新疆维吾尔自治区全境、甘肃河西走廊、祁连山区、内蒙古阿拉善高原及黄河宁夏段以西的宁夏回族自治区部分,区内有天山、阿尔泰山、昆仑山、祁连山等一系列高大山系,包围着准噶尔盆地、塔里木盆地等内陆盆地和河西走廊,分布着大片沙漠和戈壁,构成以山地—绿洲—荒漠三大生态系统为基本特征的特殊自然单元.根据前人的研究成果^[19]和区域自然地理差异,将西北干旱区分为北疆(新疆北部)、南疆(新疆南部)、天山、祁连山、河西走廊和内蒙古西部等 6 个亚区(图 1).

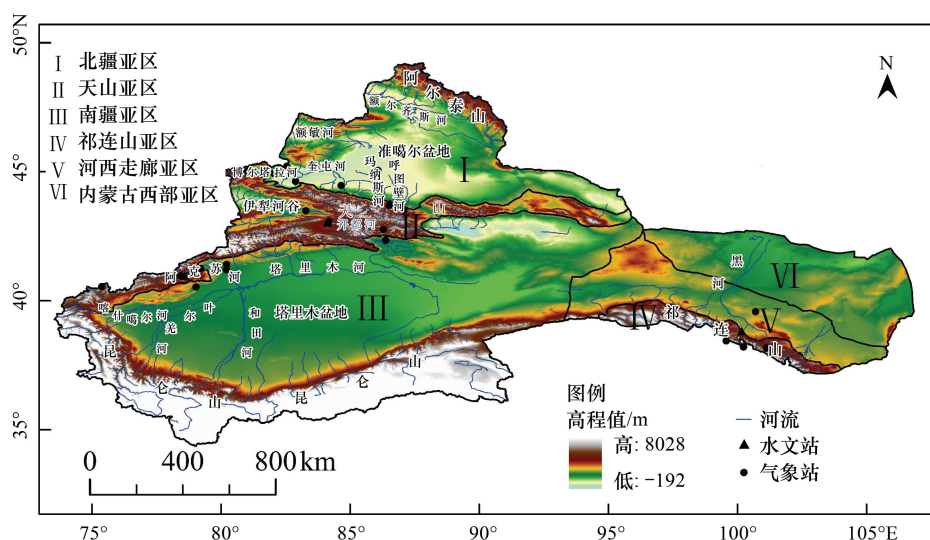


图 1 研究区概况

Fig.1 Sketch map of arid region of Northwest China

2 数据与方法

2.1 数据来源

MODIS ET 数据集包括地表实际蒸散发量(ET)、潜热通量(LE)、潜在蒸散发量(PET)和潜在潜热通量(PLE)产品,空间分辨率为 1 km×1 km,时间分辨率有 8 天、1 月和 1 年.其算法是 Mu 等^[20]在 Penman-Monteith 公式基础上改进的,具体反演流程如图 2.该数据集考虑了土壤表面蒸发、冠层截流水分蒸发和植物蒸腾,较好地反映了荒漠和绿洲下垫面的非均匀性,适用于干旱区地表蒸散发的研究.本文选用地表实际蒸散发数据的年合成产品(MOD16A3),时间序列从 2000 年 1 月至 2014 年 12 月,在美国蒙大拿大学森林学院工作组网站下载(<http://www.ntsg.umt.edu/project/mod16>),使用 MRT(Modis Reprojection Tool)工具对数据进行重投影等预处理.

DEM 数据为 SRTM3(Shuttle Radar Topography Mission),空间分辨率为 90 m×90 m,来自中国科学院数据

云(<http://www.csdb.cn/>).

土地覆盖数据为 2001 年和 2013 年的 MODIS MCD12Q1 产品(下载地址: <https://lpdaac.usgs.gov/>), 空间分辨率为 500 m, 该产品采用国际地圈生物圈计划全球植被分类方案, 将地表类型分为 17 种, 本文将其合并为水体、林地、草地、农用地、城市和建筑区、冰雪与稀疏植被 7 大类.

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 月至 2014 年 12 月. 该资料不包含卫星观测, 不使用模式同化, 仅用数学方法对数据进行整合和插值^[21]. CRU 气候资料尽管包含插值带来的误差, 但经对比, CRU 降水除青藏高原西部外与中国台站的观测具有很好的一致性^[22], 故可用于本文的研究.

径流数据为水文站的观测, 首先考虑河流上游的控制水文站, 以尽可能避免选取有大型水库及大规模灌溉用地的流域. 同时, 尽量选择资料系列较长的流域. 按此标准, 选取研究区 5 个典型流域, 包括天山北坡的博尔塔拉河与呼图壁河, 天山南坡的阿克苏河与开都河, 祁连山水系的黑河. 降水数据为各流域内及周边 24 个气象站的实测, 所有站点均在图 1 中标注.

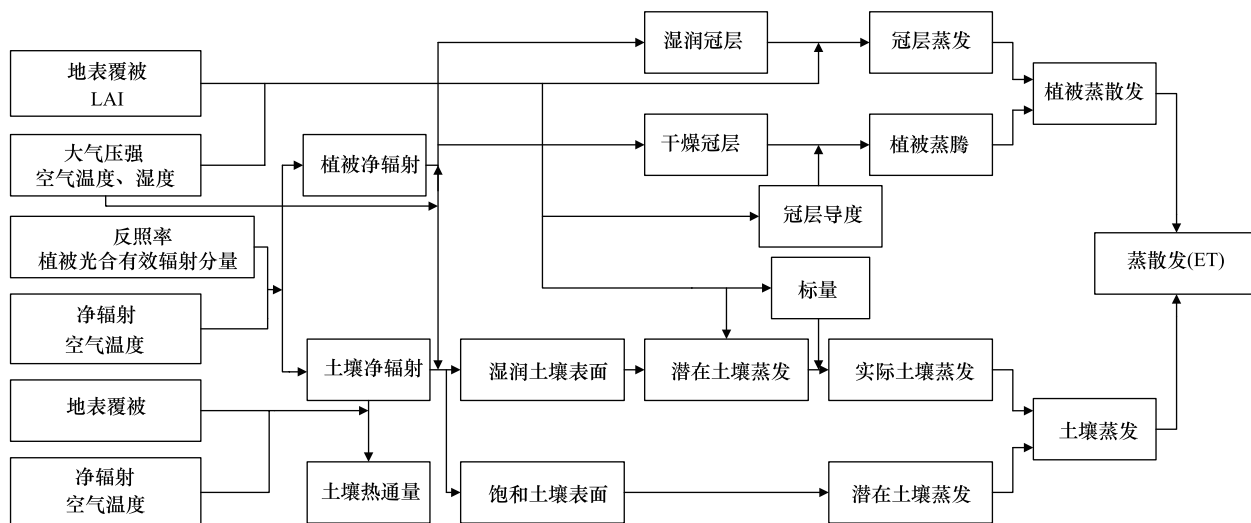


图 2 MOD16 ET 反演算法流程图

Fig.2 Flow chart of MOD16 ET inversion algorithm

2.2 研究方法

2.2.1 流域水量平衡法

采用流域水量平衡法验证 MOD16A3 产品在西北干旱区的模拟精度^[6].

2.2.2 变异系数法

变异系数是描述随机变量分散程度的统计量, 用来分析蒸散发空间格局与空间分异规律^[23].

$$CV_{ET} = \frac{\sigma_{ET}}{\overline{ET}} \quad (1)$$

其中, CV_{ET} 指 ET 的变异系数; σ 为像元的标准差; $\overline{ET}$ 为像元的均值. 逐像元计算 2000—2014 年 ET 的变异系数, 统计分析 ET 在时间序列上的稳定性. CV_{ET} 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; 反之, 表明各年份之间数据分布较为集中, 时序较为稳定.

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

Theil-Sen median 趋势分析与 Mann-Kendall 检验相结合, 用以判断长时间序列数据的趋势^[24]. 其中, Theil-Sen median 趋势分析是一种稳健的非参数统计的趋势计算方法, 计算公式为:

$$\beta = \text{median}\left(\frac{ET_j - ET_i}{j - i}\right) \quad (2)$$

其中, ET_i 和 ET_j 为样本数据值 ($2000 \leq i < j \leq 2014$); β 指计算 $n(n-1)/2$ 个数据组合的斜率的中位数, 用以量化单调趋势 ($n=15$, 为时间序列的长度). 当 $\beta > 0$ 时, 反映了这一时间序列的蒸散发量呈增强趋势; 反之, 则为衰减趋势.

Mann-Kendall 属于非参数检验方法, 与其他参数检验方法相比, 不需要样本遵从一定的分布, 也不受少数异常值干扰, 更适合顺序变量. Mann-Kendall 检验已经在水文、气象的时间序列分析中得到成功应用^[25-26], 用于判断时间序列数据是否具有上升或下降的趋势.

在用 Mann-Kendall 法进行 ET 趋势检验时, 将某时序的 ET 值看作一组独立分布的样本数据, 以参数 Z_c 作为像元 ET 衰减指标, 计算公式如下:

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

其中,

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

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

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

其中, sign 为符号函数. 本文在置信水平 $\alpha = 0.05$ 上判断 ET 变化趋势的显著性^[24]. 当 $|Z_c| > 1.96$ 时表示时间序列置信水平 $\alpha < 0.05$, $|Z_c| < 1.96$ 表示置信水平 $\alpha > 0.05$.

2.2.4 Hurst 指数

Hurst 指数用于定量描述时间序列数据的可持续性. 在水文学、经济学、气候学等领域有着广泛的应用^[27]. 考虑 ET 时间序列 $\{ET(t)\}$ ($t=1, 2, 3, 4, \dots, n$) 对于任意正整数 $t \geq 1$, 定义该时间序列的均值序列:

$$\overline{ET}_{(\tau)} = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} ET_{(t)} \quad \tau = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

计算累积离差为:

$$X_{(t, \tau)} = \sum_{i=1}^t (ET_{(i)} - \overline{ET}_{(\tau)}) \quad 1 \leq t \leq \tau \quad (8)$$

极差序列为:

$$R_{(\tau)} = \max_{1 \leq t \leq \tau} X_{(t, \tau)} - \min_{1 \leq t \leq \tau} X_{(t, \tau)} \quad \tau = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

标准差序列为:

$$S_{(\tau)} = \left[\frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} (ET_{(t)} - \overline{ET}_{(\tau)})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad \tau = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

计算 Hurst 指数:

$$\frac{R_{(\tau)}}{S_{(\tau)}} = (c\tau)^H \quad (11)$$

其中, c 为常数. 对公式 (11) 两边同时取对数即得到 Hurst 经验公式. 基于时间序列并利用 Hurst 经验公式得到一簇 H 值进行最小二乘法拟合, 得出的直线斜率即为修正后的 Hurst 指数 (H), 它揭示了时间序列的分形特征.

不同的 H 对应不同的时间序列趋势变化:当 $H=0.5$ 时,表明时间序列是完全独立的,没有相关性或只是短程相关; $0<H<0.5$ 时,意味着未来的变化状况与过去相反,即反持续性, H 越小,反持续性越强;当 $H>0.5$ 时,意味着未来的变化状况与过去趋势一致,整个过程具有持续性, H 越大,持续性越强。

3 结果与分析

3.1 MOD16A3 蒸散发产品精度评估

分析表 1,水量平衡法计算的多年蒸散发量均值与 MOD16A3 数据的年均蒸散发量较为吻合,二者的平均绝对误差为 38.33 mm,平均相对误差为 12.29%,均方根误差为 39.88 mm.MODIS ET 产品的年蒸散发值总体偏高,但其精度基本满足区域尺度的研究,可以用于研究西北干旱区蒸散发的时空动态特征。

表 1 西北干旱区典型流域 MOD16A3 数据精度评价

Table 1 Accuracy assessment of MOD16A3 over the inland river basin in arid region of Northwest China

典型流域 Typical river basin	MOD16A3—ET/mm ET of MOD16A3	水量平衡—ET/mm ET based on water balance model	绝对误差/mm Absolute error	相对误差/% Relative error
博尔塔拉河 Boertala River	300.47	259.60	40.87	15.74
呼图壁河 Hutubi River	415.24	377.73	37.51	9.93
阿克苏河 Aksu River	321.84	272.40	49.44	18.15
开都河 Kaidou River	397.53	351.59	45.94	13.07
黑河 Heihe River	408.39	390.49	17.90	4.58

3.2 蒸散发量的空间分布特征

将 2000—2014 年的 MODIS 蒸散发量和 CRU 降水数据逐像元逐年平均(图 3),用以分析 ET 的空间分布特征。

将年均 ET 值分为 8 级,进行像元统计分析(表 2)。全区低蒸散发区域($ET<200\text{mm}$)占总面积的 38.329%,各亚区内低蒸散发量区面积百分比为:内蒙古西部(90.197%)>河西走廊(54.379%)>北疆(53.018%)>南疆(50.557%)>天山(10.149%)>祁连山(2.686%)。全区高蒸散发区域($ET>400\text{mm}$)占总面积的 21.834%。

表 2 西北干旱区年均 ET 分级

Table 2 Coefficient of level of average evapotranspiration in arid region of Northwest China

蒸散发/mm Evapotranspiration	占总面积 百分比/% Percentage of the whole area	北疆/% Northern Xinjiang	天山/% Tianshan Mountain	南疆/% Southern Xinjiang	祁连山/% Qilian Mountain	河西走廊/% Hexi Corridor	内蒙西部/% Western Inner Mongolia
≤ 100	2.192	0.042	0.005	11.206	0.000	0.972	8.169
$100<ET\leq 200$	36.137	52.976	10.144	39.351	2.686	53.407	82.028
$200<ET\leq 300$	23.121	25.301	19.185	23.923	22.953	30.159	9.340
$300<ET\leq 400$	16.716	14.751	21.494	11.960	30.087	13.656	0.457
$400<ET\leq 500$	14.790	5.683	32.452	8.550	28.451	1.807	0.007
$500<ET\leq 600$	6.562	1.177	15.714	4.164	15.532	0.000	0.000
$600<ET\leq 700$	0.458	0.070	0.987	0.739	0.291	0.000	0.000
> 700	0.024	0.000	0.019	0.106	0.000	0.000	0.000

近 15 年西北干旱区 ET 值总体较小,空间分布上表现为自山区向两侧平原减少的特点.这种差异是因为干旱区的实际蒸散发主要受水分状况(降水量)影响,降水直接影响地表土壤含水率大小,从而影响蒸散发量大小^[28].西北干旱区虽然海拔较高、太阳辐射多,蒸散发的能量充足,但是地处内陆,降水量稀少、土壤湿度低,使得蒸散发量低值区面积广大.分析近 15 年降水量(图 3)可以看出,区域东南部及祁连山区受西南暖湿

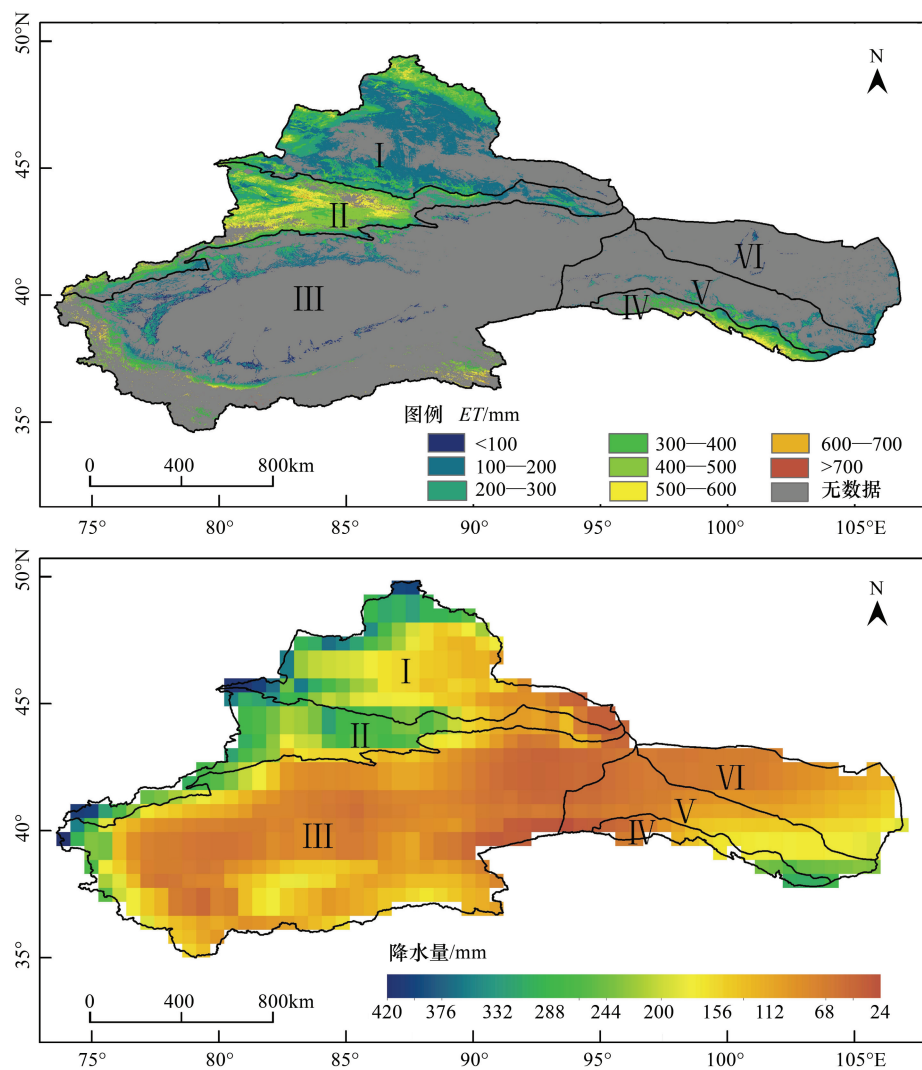


图 3 2000—2014 年西北干旱区年均 ET 和降水量空间分布

Fig.3 Spatial distribution of average annual evapotranspiration and precipitation in arid region of Northwest China from 2000 to 2014

气流和东亚季风影响,降水量大;西部为西风环流的通道,带来大西洋的湿润气流,在山地迎风坡形成丰富的降水,而平原地区降水量较小。

土地覆盖亦影响 ET 的空间格局。结合图 4 可以看出:ET 的高值区主要分布在天山、阿尔泰山和祁连山等山区的林地和草地。低值区主要在南疆塔里木盆地边缘、北疆准噶尔盆地、河西走廊的草地和稀疏植被区。同时,绿洲区农用地的 ET 高于绿洲边缘植被稀疏区。为进一步分析不同土地覆盖类型的蒸散发量特征,统计研究区典型的 4 种土地覆盖的 ET 平均值(图 5),2001 年和 2013 年各土地覆盖类型的 ET 平均值为:林地>农用地>草地>稀疏植被,这是因为不同土地覆盖的动力和热力性质存在差异,导致地气相互作用中能量的重新分配^[29]。绿洲区农用地因人工种植和灌溉,其植被覆盖度和土壤水分都高于绿洲边缘的稀疏植被区,使得蒸散发表现出显著的空间异质性。

由于 MODIS ET 数据集对于无植被覆盖的裸土、沙漠、戈壁等区域的蒸散发量不进行计算,故在本研究中将塔克拉玛干沙漠、古尔班通古特沙漠、巴丹吉林沙漠和戈壁区域的 ET 值设置为 NoData,且不计入面积统计范围。

3.3 蒸散发量的区域分异特征

运用变异系数法分析西北干旱区 ET 的空间格局变异性(图 6),将研究区像元尺度的变异系数 CV_{ET} 分为

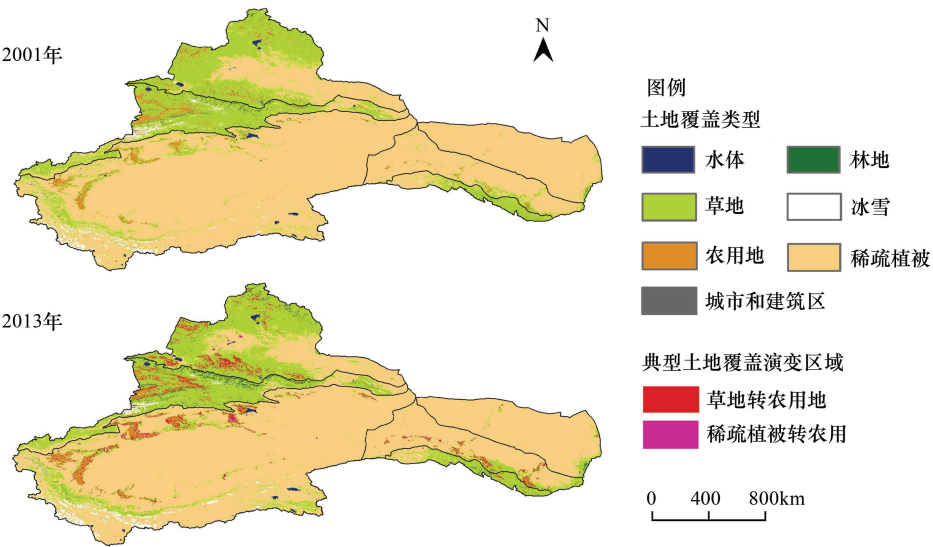


图 4 2001 年和 2013 年西北干旱区土地覆盖的空间变化

Fig.4 Spatial distribution of land cover types in arid region of Northwest China in 2001 and 2013

5 级(表 3).可以看出,全区不同变异程度的面积比例为:相对较低的波动变化(40.905%)>中等波动变化(38.549%)>相对较高的波动变化(11.061%)>高波动变化(6.515%)>低波动变化(2.970%),即全区蒸散发的变异程度不明显.各亚区内波动较低区的面积百分比依次为:北疆(60.482%)>天山(50.667%)>祁连山(25.54%)>内蒙古西部(16.238%)>河西走廊(13.619%)>南疆(9.694%).

从图 6 可以看出,南疆昆仑山北坡蒸散发呈高波动变化($CV_{ET}>0.20$),因为该区域属于典型的高海拔干旱生态脆弱区^[30],分析 2000—2014 年西北干旱区和昆仑山区降水量的变化(图 7)发现,昆仑山区降水量的变化幅度明显大于全区.年降水量变化较大,使得蒸散发表现出明显的不稳定性;北疆额敏河流域、博尔塔拉河流域、奎屯河流域、玛纳斯河流域、呼图壁河流域,天山伊

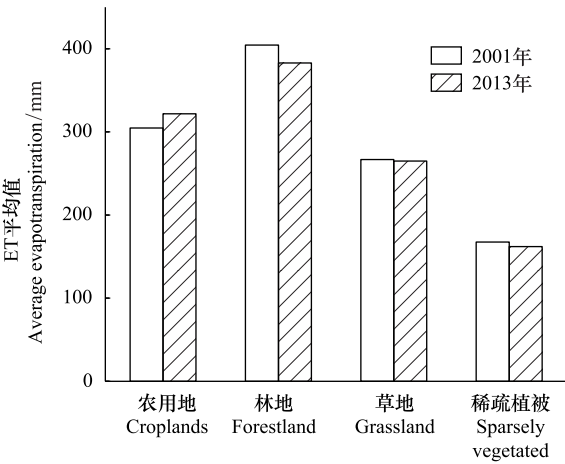


图 5 2001 年和 2013 年西北干旱区 4 种土地覆盖的 ET 平均值

Fig.5 The average evapotranspiration of four kinds of land cover types in arid region of Northwest China in 2001 and 2013

表 3 西北干旱区 ET 值的变异系数统计

Table 3 Statistics of variation coefficient of evapotranspiration in arid region of Northwest China								
ET 的变异系数 Variation coefficient of evapotranspiration	变异程度 Volatility degree	占总面积 百分比/% Percentage of the whole area	北疆/% Northern Xinjiang	天山/% Tianshan Mountain	南疆/% Southern Xinjiang	祁连山/% Qilian Mountain	河西走廊/% Hexi Corridor	内蒙西部/% Western Inner Mongolia
$CV_{ET} \leq 0.05$	低波动变化	2.970	3.223	5.527	0.207	0.000	0.045	0.128
$0.05 < CV_{ET} \leq 0.10$	相对较低的波动变化	40.905	57.259	45.140	9.487	25.540	13.574	16.110
$0.10 < CV_{ET} \leq 0.15$	中等波动变化	38.549	30.513	35.281	44.526	66.876	60.526	81.177
$0.15 < CV_{ET} \leq 0.20$	相对较高的波动变化	11.061	4.784	12.145	22.611	7.509	24.695	2.058
$CV_{ET} > 0.20$	高波动变化	6.515	4.222	1.908	23.168	0.076	1.160	0.527

犁河谷,南疆塔里木河流域、喀什噶尔河流域有零星的斑点状高波动变化区域,这是因为绿洲面积扩大、种植结构调整和种植品种变化等人为因素引起绿洲 NDVI 的波动^[31],导致区域蒸散发的高波动变化。

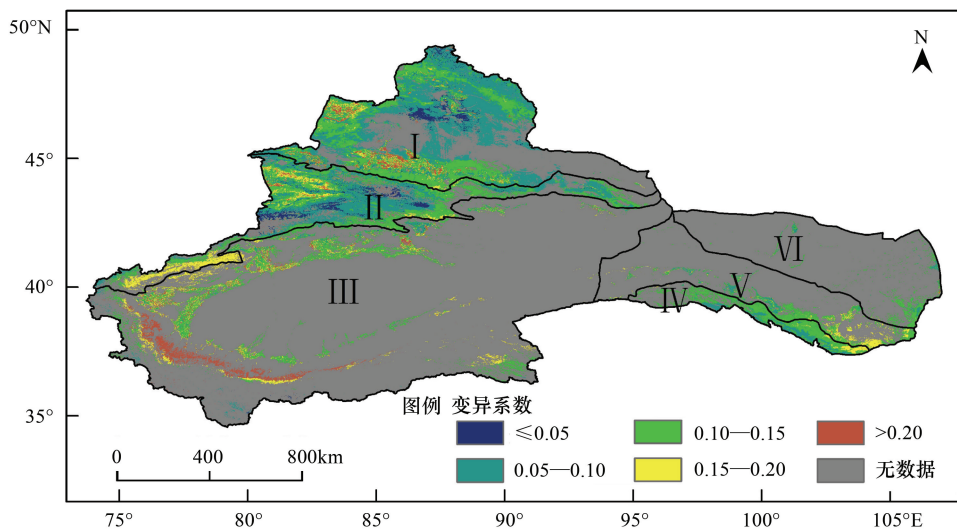


图 6 2000—2014 年西北干旱区 ET 值变异程度

Fig.6 Spatial distribution of variation coefficient of evapotranspiration in arid region of Northwest China from 2000 to 2014

3.4 蒸散发量的时间变化特征

为说明西北干旱区蒸散发量随时间变化的特点,将 2000—2014 年 MODIS ET 的区域均值作一元线性回归分析(图 8).15 年间,全区蒸散发量大致稳定分布在 225—285 mm 之间,其中最小值出现在 2008 年(224.69 mm),最大值出现在 2003 年(282.13 mm).各亚区中,祁连山和天山蒸散发量相对较高,最大值分别出现在 2003 年(414.92 mm)和 2002 年(387.15 mm),最小值分别在 2000 年(295.12 mm)和 2008 年(305.96 mm);内蒙古西部亚区蒸散发量最小,稳定在 117.71 mm(2013 年)至 165.90 mm(2003 年)之间。

近 15 年全区年均蒸散发量呈波动变化,总体有微弱的减小趋势,变化率为 -0.9348 mm/a .各亚区的 ET 在时间序列上呈不同程度的减小趋势,变化率为:天山(-2.9116 mm/a)>内蒙西部(-1.8266 mm/a)>河西走廊(-0.573 mm/a)>北疆(-0.533 mm/a)>祁连山(-0.2559 mm/a),仅南疆有增加趋势,变化率为 1.4216 mm/a 。

结合 Theil-Sen median 趋势分析与 Mann-Kendall 检验的结果,得到 2000—2014 年全区像元尺度的 ET 变化趋势(表 4、图 9).在 Theil-Sen median 趋势分析中,根据 β 值的计算结果,分为增强趋势($\beta>0$)和衰减趋势($\beta<0$)两类;在 Mann-Kendall 检验中选取显著性检验的置信水平为 0.05,将结果划分为显著变化($Z_c>1.96$ 或 $Z_c<-1.96$)和变化不显著($-1.96\leq Z_c\leq 1.96$)。

从表 4 可以看出:2000—2014 年,全区 ET 各变化趋势的面积比例依次为:轻微减小(53.518%)>轻微增加(25.475%)>显著减小(15.761%)>显著增加(5.246%),即西北干旱区蒸散发变化趋势以减小为主,各亚区 ET 减小程度为:内蒙西部(94.363%)>天山(83.022%)>北疆(76.367%)>河西走廊(70.039%)>祁连山(44.556%)>南疆(35.056%)。

从变化趋势分布(图 9)可以看出:北疆额敏河流域、博尔塔拉河流域、奎屯河流域、玛纳斯河流域、呼图壁

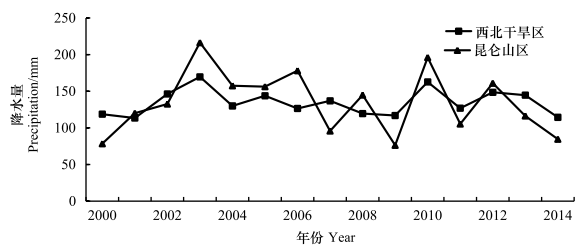


图 7 2000—2014 年西北干旱区和昆仑山区年际降水量变化

Fig.7 Inter-annual variation of precipitation in arid region of Northwest China and Kunlun Mountain from 2000 to 2014

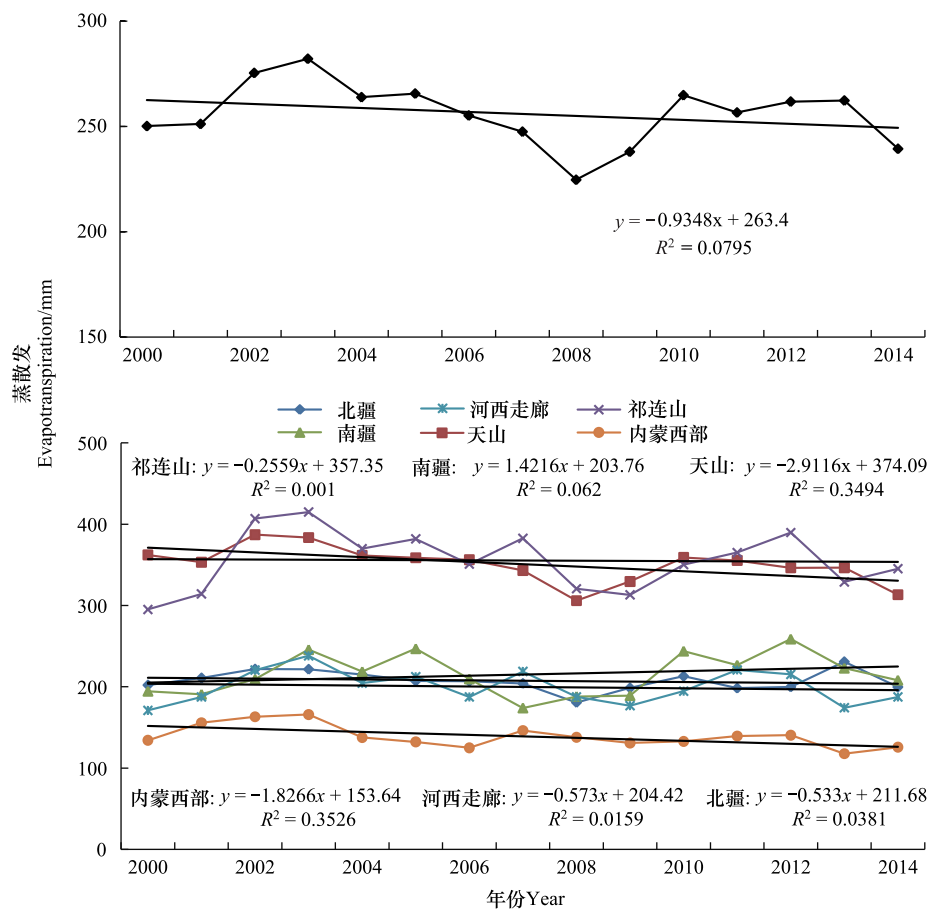


图 8 2000—2014 年西北干旱区年际 ET 变化

Fig.8 Inter-annual variation of evapotranspiration in arid region of Northwest China from 2000 to 2014

河流域,天山伊犁河谷中部,南疆塔里木河流域、喀什噶尔河流域蒸散发有显著增加趋势.这是因为以上流域均有高密度的绿洲农业发展,土地覆盖的变化影响地表蒸散过程的信息链.结合研究区代表年份的土地覆盖类型空间分布(图 4)和转移矩阵(表 5),分析区域蒸散发量对土地覆盖变化的响应.结合表 6 可以看出,2001—2013 年,绿洲边缘的草地和稀疏植被区演变为农用地,导致草地净减少 16569.63 km²,稀疏植被区净减少 6366.32 km²,而农用地净增加 22935.95 km².稀疏植被演变为农用地的区域,平均蒸散发量增加了 82.41 mm,草地转化为农用地的区域,平均蒸散发量亦增加了 62.77 mm.这是因为人工灌溉的耕地其土壤湿度和植被覆盖度都高于同气象条件下的草地和稀疏植被区,故伴随着农用地扩张的进程,以上流域的蒸散发都有显著增加趋势.

表 4 西北干旱区 ET 值的变化趋势统计

Table 4 Statistics of evapotranspiration trend in arid region of Northwest China

β	$ Z_c $	ET 变化趋势 Trend of evapotranspiration	占总面积 百分比/% Percentage of the whole area	北疆/% Northern Xinjiang	天山/% Tianshan Mountain	南疆/% Southern Xinjiang	祁连山/% Qilian Mountain	河西走廊/% Hexi Corridor	内蒙西部/% Western Inner Mongolia
$\beta < 0$	$ Z_c > 1.96$	显著减小	15.761	10.055	32.502	4.947	3.572	9.316	42.385
$\beta < 0$	$ Z_c \leq 1.96$	轻微减小	53.518	66.312	50.520	30.109	40.984	60.723	51.978
$\beta > 0$	$ Z_c \leq 1.96$	轻微增加	25.475	17.315	15.868	53.340	55.354	25.967	4.811
$\beta > 0$	$ Z_c > 1.96$	显著增加	5.246	6.318	1.110	11.604	0.090	3.994	0.826

同时,天山山地和平原过渡带的蒸散发为显著减小趋势.这是因为地表实际蒸散发亦受植被覆盖变化的影响,据相关研究^[32-33],1982—2012 年和 1982—2013 年天山山地和平原过渡带植被 NDVI 呈显著下降趋势.

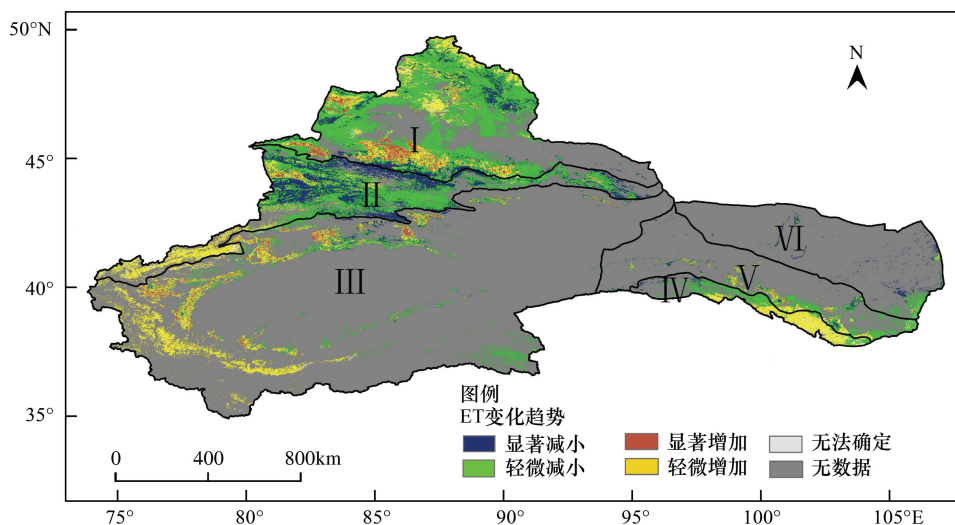


图 9 2000—2014 年西北干旱区 ET 变化趋势

Fig.9 Spatial distribution of the coefficient of variation of evapotranspiration in arid region of Northwest China from 2000 to 2014

表 5 2001—2013 年西北干旱区土地覆盖类型转移矩阵/ km^2

Table 5 Transfer matrix of land cover types in arid region of Northwest China in 2001 to 2013

土地覆盖面积 Area of land cover		2013 年				
		林地 Forestland	草地 Grassland	农用地 Croplands	稀疏植被 Barren or sparsely vegetated	总计 Grand total
2001 年	林地	946.41	140.20	391.41	1478.03	
	草地	8467.47		34751.85	43536.97	86756.30
	农用地	691.66	18182.23		231.01	19104.89
	稀疏植被	777.60	122898.57	6597.32		130273.50
	总计	9936.73	142027.21	41489.38	44159.39	237612.72

表 6 2001—2013 典型土地覆盖演变区域蒸散发量的变化/mm

Table 6 Variation of evapotranspiration with the land cover types changed in 2001 to 2013

蒸散发量的变化 Variation of evapotranspiration	稀疏植被——农用地 Barren or sparsely vegetate-Croplands	草地——农用地 Grassland-Croplands
2001 年	127.30	267.73
2013 年	209.71	330.50

3.5 蒸散发量的预测

分析 2000—2014 年全区 ET 的 Hurst 指数空间分布图(图 10),研究 ET 变化趋势的复杂度及对未来变化趋势进行预测.全区 ET 的 Hurst 指数均值为 0.689, Hurst 指数小于 0.5 的范围所占比例为 19.67%,大于 0.5 的范围所占比例为 80.033%,表明西北干旱区蒸散发的正向持续性较强,即未来的变化状况与过去一致.

为揭示 ET 未来的变化趋势及其持续性,将 2000—2014 年 ET 的变化趋势结果与 Hurst 指数结果进行叠加分析,得到变化趋势与持续性的耦合结果(图 11、表 7),全区各预测类型的面积比重依次为:持续性轻微减小(37.922%)>无法确定(22.003%)>持续性轻微增加(20.783%)>持续性显著减小(14.282%)>持续性显著增加(5.01%),即西北干旱区未来 ET 变化趋势以持续性减小为主。各亚区内 ET 未来的变化趋势减小程度为:内蒙西部(87.265%)>天山(69.888%)>河西走廊(57.542%)>北疆(50.895%)>祁连山(40.483%)>南疆

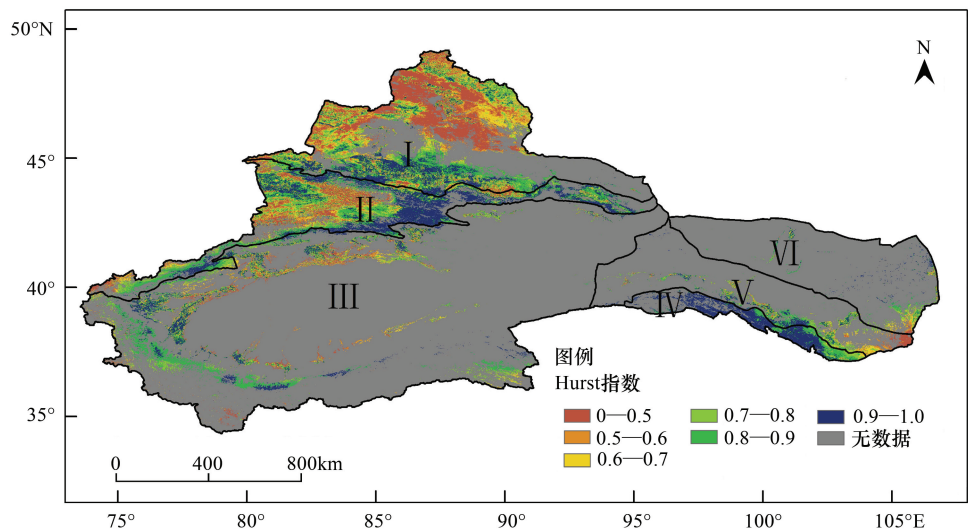


图 10 2000—2014 年西北干旱区 ET 的 Hurst 指数分布

Fig.10 Spatial distribution of Hurst Index of evapotranspiration in arid region of Northwest China from 2000 to 2014

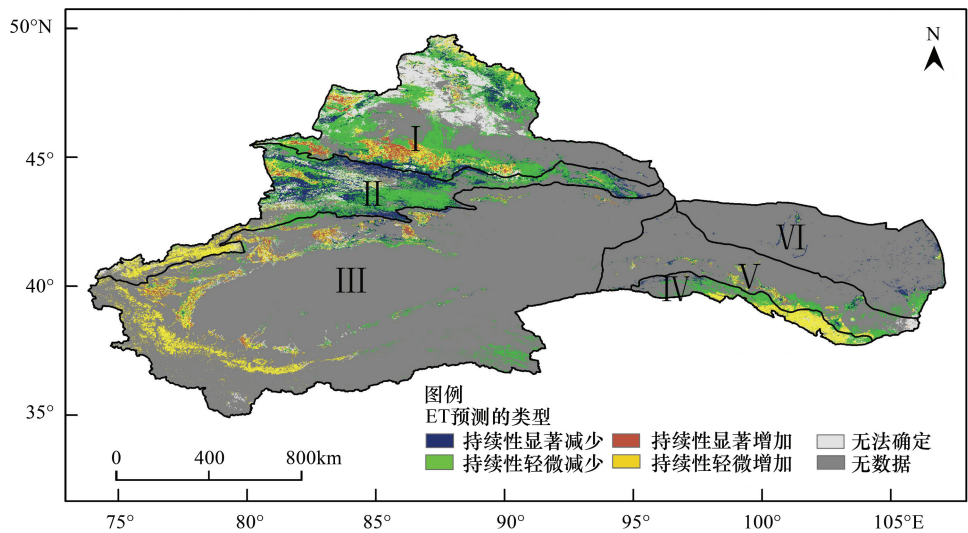


图 11 西北干旱区 ET 的预测

Fig.11 The predictions for the future of evapotranspiration in arid region of Northwest China

表 7 西北干旱区 ET 预测的类型统计

Table 7 Statistics of the predictions for the future of evapotranspiration in arid region of Northwest China

β	$ Z_c $	H	ET 预测的类型 Predictions for evapotranspiration	占总面积 百分比/% Percentage of the whole area	北疆/% Northern Xinjiang	天山/% Tianshan Mountain	南疆/% Southern Xinjiang	祁连山/% Qilian Mountain	河西走廊/% Hexi Corridor	内蒙西部/% Western Inner Mongolia
$\beta < 0$	$ Z_c > 1.96$	> 0.5	持续性显著减小	14.282	9.176	29.444	4.445	3.252	8.775	40.944
$\beta < 0$	$ Z_c \leq 1.96$	> 0.5	持续性轻微减小	37.922	41.719	40.444	21.677	37.231	48.767	46.321
$\beta > 0$	$ Z_c \leq 1.96$	> 0.5	持续性轻微增加	20.783	10.812	13.469	47.698	50.312	23.661	3.604
$\beta > 0$	$ Z_c > 1.96$	> 0.5	持续性显著增加	5.010	6.027	1.054	11.140	0.082	3.805	0.791
—	—	< 0.5	无法确定	22.003	32.266	15.589	15.039	9.122	14.993	8.340

(26.122%).全区 22.003%的区域未来变化趋势无法确定,主要分布在阿尔泰山南坡、准噶尔盆地北部,该区域未来蒸散发的变化状况需要持续关注.

4 结论与讨论

4.1 结论

(1)基于水量平衡法评估了 MOD16A3 产品在西北干旱区的模拟精度,平均绝对误差为 38.33 mm,平均相对误差为 12.29%,均方根误差为 39.88 mm.MODIS ET 产品的模拟值总体偏高,但其精度基本满足区域尺度的研究.

(2)空间格局上,近 15 年西北干旱区 ET 值总体较小,ET 小于 200 mm 的区域占总面积的 38.329%.受降水量影响,蒸散发量在空间上表现为自山区向两侧平原减少的特点;受土地覆盖影响,ET 的高值区(>400 mm)主要在天山、阿尔泰山和祁连山等山区的林地和草地,ET 的低值区(<200 mm)主要在南疆塔里木盆地边缘、北疆准噶尔盆地、河西走廊的草地和稀疏植被区,不同土地覆盖的蒸散发量差异显著:林地>农用地>草地>稀疏植被.

(3)区域分异特征方面,15 年间西北干旱区蒸散发变异程度不明显,各变异程度的比例为:相对较低的波动变化(40.905%)>中等波动变化(38.549%)>相对较高的波动变化(11.061%)>高波动变化(6.515%)>低波动变化(2.970%).各亚区内波动较低区的比例为:北疆(60.482%)>天山(50.667%)>祁连山(25.54%)>内蒙古西部(16.238%)>河西走廊(13.619%)>南疆(9.694%).值得一提的是,昆仑山北坡蒸散发的高波动变化是年际降水变率较高所致,额敏河流域等的高波动变化则与绿洲面积扩大、种植结构调整和种植品种变化等人为因素有关.

(4)在时间序列上,近 15 年西北干旱区年均蒸散发量呈波动变化,总体有微弱的减小趋势,变化率为 -0.9348mm/a .各亚区的减小趋势程度各异:天山(-2.9116mm/a)>内蒙西部(-1.8266mm/a)>河西走廊(-0.573mm/a)>北疆(-0.533mm/a)>祁连山(-0.2559mm/a),仅南疆有增加趋势,变化率为 1.4216mm/a .

基于像元尺度的分析也表明全区 ET 以减小的变化趋势为主,各变化比例为:轻微减小(53.518%)>轻微增加(25.475%)>显著减小(15.761%)>显著增加(5.246%).其中,北疆玛纳斯河流域、天山伊犁河谷中部、南疆塔里木河流域等蒸散发有显著增加趋势,与土地覆盖演变有关.天山山地和平原过渡带的蒸散发为显著减小趋势,是受植被覆盖变化的影响.

(5)对未来趋势的预测方面,西北干旱区 ET 的 Hurst 指数均值为 0.689, Hurst 指数大于 0.5 的范围所占比例为 80.033%,表明全区蒸散发未来的变化状况与过去一致.具体来讲,各预测类型的面积比重为:持续性轻微减小(37.922%)>无法确定(22.003%)>持续性轻微增加(20.783%)>持续性显著减小(14.282%)>持续性显著增加(5.01%),即未来全区的 ET 变化趋势以持续性减小为主.其中 22.003%区域的变化趋势无法确定,主要分布在阿尔泰山南坡、准噶尔盆地北部,该区域未来蒸散发的变化状况需要持续关注.各亚区的空间异质性分析中,减小趋势为:内蒙西部(87.265%)>天山(69.888%)>河西走廊(57.542%)>北疆(50.895%)>祁连山(40.483%)>南疆(26.122%).

4.2 讨论

(1)MODIS ET 数据集的反演算法考虑了土壤表面蒸发、冠层截流水分蒸发和植物蒸腾,较好地反映了荒漠和绿洲下垫面的非均匀性.通过水量平衡法的验证,该产品的模拟值总体偏高,但其精度基本满足区域尺度的研究.因此,高空间分辨率的 MODIS ET 数据集可以被用于揭示区域蒸散发的时空动态特征,尤其在观测站点稀疏的西北干旱区.

(2)西北干旱区蒸散发的空间格局受降水和土地覆盖的综合影响.地处内陆,降水稀少,决定了实际蒸散发低值区面积广大.祁连山和天山等高大山脉迎风坡有丰富的降水,而周边盆地和走廊降水稀少,使蒸散发量

表现出山区大于平原的特点;同时,由于动力和热力性质差异,不同土地覆盖的蒸散发量差异显著:林地>农用地>草地>稀疏植被.王海波等^[12]在西北干旱区典型内陆河黑河流域,模拟了高寒草地和干旱区农田的蒸散发,得出生长季农田蒸散发量大于草地的结论.田静等^[34]利用 NOAH 陆面过程模拟了中国陆地蒸散发,认为年降雨量是决定蒸散发量大小的主要因素,西北地区不同土地利用类型的蒸散发量为:林地>耕地>草地>未利用地,与本研究的结论相似.因此,本研究的结论对认识西北干旱区不同空间维度的蒸散发格局增添了新的证据.

(3)受人类活动和气候变化的共同影响,2000—2014 年全区蒸散发以相对较低的波动变化与中等波动变化为主.西北干旱区内陆河流域发展了典型的绿洲农业,土地覆盖演变、绿洲面积扩大、种植结构调整和种植品种变化均会引起蒸散发的波动;除人类活动,气候变化对蒸散发的分异亦产生深刻影响,尤其是生态环境脆弱的高寒山区.气候变化背景下的地表蒸散发响应^[15,17-18]和中国陆地蒸散发的时间序列变化^[34-35]已有较多探讨.与以上研究相比,本研究有以下优势:根据自然地理差异,将西北干旱区分为 6 个亚区,分析不同尺度的蒸散发时间变化和分异特征,揭示了空间异质性,得出蒸散发波动变化在 6 个亚区内程度不一的结论,北疆和天山以相对较低的波动变化为主,南疆、祁连山、河西走廊和内蒙古西部以中等波动变化占主导.西北干旱区“山地—绿洲—荒漠”系统自然要素的分异特征十分鲜明,在全球干旱区具有很强的代表性.本研究的结论,对认识干旱区内部不同干湿背景下蒸散发的异质性提供了参考.

(4)2000 年以来西北干旱区大部分区域蒸散发有微弱的减小趋势,变化率为 -0.9348 mm/a ,这与区域降水变化有一定联系.据陈亚宁等^[36]的研究,最近 10 年,西北干旱区降水量的增加幅度降低,并且约有 45% 台站的降水量较 20 世纪 90 年代表现为减少趋势.降水量降低使土壤水分减少,导致西北干旱区实际蒸散发量减少.本研究与 Nature^[3]上发表的由于水分供给不足导致的全球陆面蒸散发呈下降趋势的结论是一致的.与杨秀芹等^[35]利用 GLEAM 遥感模型计算中国 1980—2011 年地表蒸散发,得到的西北西部地表蒸散发量存在下降趋势有较好的一致性.本研究对西北干旱区蒸散发的变化趋势增加了定量的分析,为认识全球变化和人类活动共同驱动下的干旱区蒸散发变化研究提供了一定参考.

(5)未来,全区蒸散发持续减小的面积比重近一半,各亚区的减小趋势依次为:内蒙古西部>天山>河西走廊>北疆>祁连山>南疆.这种持续减小的变化趋势,对绿洲、沙尘暴和湖泊等干旱区特殊的生态环境要素造成影响^[10].蒸散发量的减小,对高山草原和绿洲灌溉农业等有有利的影响,同时也能够缓解荒漠绿洲过渡带的退化.随着区域气候系统的变化和人类活动干预,蒸散发减小的趋势是否会持续发展,干旱区水文循环、生态系统和地表过程将如何响应,尤其是对荒漠生态环境的保护和修复将产生怎样的影响,需要全面的、长序列的数据进行深入研究.

参考文献 (References):

- [1] Xiong Y J, Zhao S H, Tian F, Qiu G Y. An evapotranspiration product for arid regions based on the three-temperature model and thermal remote sensing. *Journal of Hydrology*, 2015, 530: 392-404.
- [2] Zhang K X, Pan S M, Zhang W, Xu Y H, Cao L G, Hao Y P, Wang Y. 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. *Quaternary International*, 2015, 380-381: 75-82.
- [3] Jung M, Reichstein M, Ciais P, Seneviratne S I, Sheffield J, Goulden M L, Bonan G, Cescatti A, Chen J Q, de Jeu R, Dolman A J, Eugster W, Gerten D, Gianelle D, Gobron N, Heinke J, Kimball J, Law B E, Montagnani L, Mu Q Z, Mueller B, Oleson K, Papale D, Richardson A D, Rouspard O, Running S, Tomelleri E, Viovy N, Weber U, Williams C, Wood E, Zaehle S, Zhang K. Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply. *Nature*, 2010, 467(7318): 951-954.
- [4] Ghilain N, Arboleda A, Gellens-Meulenberghs F. Evapotranspiration modelling at large scale using near-real time MSG SEVIRI derived data. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, 15(3): 771-786.
- [5] Mu Q Z, Heinsch F A, Zhao M S, Running S W. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 111(4): 519-536.
- [6] 贺添, 邵全琴. 基于 MOD16 产品的我国 2001—2010 年蒸散发时空格局变化分析. *地球信息科学学报*, 2014, 16(6): 979-988.

- [7] Kim H W, Hwang K, Mu Q Z, Lee S O, Choi M. Validation of MODIS 16 global terrestrial evapotranspiration products in various climates and land cover types in Asia. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2012, 16(2): 229-238.
- [8] Liu S M, Xu Z W, Zhu Z L, Jia Z Z, Zhu M J. Measurements of evapotranspiration from eddy-covariance systems and large aperture scintillometers in the Hai River Basin, China. *Journal of Hydrology*, 2013, 487: 24-38.
- [9] Jang K, Kang S, Lim Y J, Jeong S, Kim J, Kimball J S, Hong S Y. Monitoring daily evapotranspiration in Northeast Asia using MODIS and a regional land data assimilation system. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(23): 12927-12940.
- [10] 姚俊强, 杨青, 陈亚宁, 胡文峰, 刘志辉, 赵玲. 西北干旱区气候变化及其对生态环境影响. *生态学杂志*, 2013, 32(5): 1283-1291.
- [11] 李宝富, 陈亚宁, 李卫红, 曹志超. 基于遥感和 SEBAL 模型的塔里木河干流区蒸散发估算. *地理学报*, 2011, 66(9): 1230-1238.
- [12] 王海波, 马明国. 基于遥感和 Penman-Monteith 模型的内陆河流域不同生态系统蒸散发估算. *生态学报*, 2014, 34(19): 5617-5626.
- [13] 马金龙, 刘丽娟, 李小玉, 王进, 杨会巾. 干旱区绿洲膜下滴灌棉田蒸散过程. *生态学杂志*, 2015, 34(4): 974-981.
- [14] 张鑫, 佟玲, 李思恩, 康绍忠. 干旱区两种微气象学法测定农田蒸散发的比较研究. *水利学报*, 2011, 42(12): 1470-1478.
- [15] 刘春雨, 董晓峰, 刘英英. 西北干旱区遥感 ET 与潜在 ET 对气候变化的响应——以甘南草原区域为例. *兰州大学学报: 自然科学版*, 2014, 50(2): 194-199, 207-207.
- [16] Li Z, Chen Y N, Shen Y J, Liu Y B, Zhang S H. Analysis of changing pan evaporation in the arid region of Northwest China. *Water Resources Research*, 2013, 49(4): 2205-2212.
- [17] Penman H L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical and Physical Sciences*, 1948, 193(1032): 120-145.
- [18] Bouchet R J. Evapotranspiration réelle et potentielle, signification climatique. *General Assembly of Berkeley, Red Book*, 1963, 62: 134-142.
- [19] 姚俊强, 杨青, 刘志辉, 李诚志. 中国西北干旱区降水时空分布特征. *生态学报*, 2015, 35(17): 5846-5855.
- [20] Mu Q Z, Zhao M S, Running S W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(8): 1781-1800.
- [21] 闻新宇, 王绍武, 朱锦红, Viner D. 英国 CRU 高分辨率格点资料揭示的 20 世纪中国气候变化. *大气科学*, 2006, 30(5): 894-904.
- [22] 马柱国, 符淙斌. 中国干旱和半干旱带的 10 年际演变特征. *地球物理学报*, 2005, 48(3): 519-525.
- [23] Milich L, Weiss E. GAC NDVI interannual coefficient of variation (CoV) images: ground truth sampling of the Sahel along north-south transects. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, 21(2): 235-260.
- [24] Jiang W G, Yuan L H, Wang W J, Cao R, Zhang Y F, Shen W M. Spatio-temporal analysis of vegetation variation in the Yellow River Basin. *Ecological Indicators*, 2015, 51: 117-126.
- [25] Yue S, Pilon P, Cavadias G. Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. *Journal of Hydrology*, 2002, 259(1/4): 254-271.
- [26] Fensholt R, Langanke T, Rasmussen K, Reenberg A, Prince S D, Tucker C, Scholes R J, Le Q B, Bondeau A, Eastman R, Epstein H, Gaughan A E, Hellden U, Mbow C, Olsson L, Paruelo J, Schweitzer C, Seaquist J, Wessels K. Greenness in semi-arid areas across the globe 1981—2007—an earth observing satellite based analysis of trends and drivers. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 121: 144-158.
- [27] Jiapaer G, Liang S L, Yi Q X, Liu J P. Vegetation dynamics and responses to recent climate change in Xinjiang using leaf area index as an indicator. *Ecological Indicators*, 2015, 58: 64-76.
- [28] Roderick M L, Hobbins M T, Farquhar G D. Pan evaporation trends and the terrestrial water balance. II. Energy balance and interpretation. *Geography Compass*, 2009, 3(2): 761-780.
- [29] 何延波, Su Z, Jia L, 王石立. 遥感数据支持下不同地表覆盖的区域蒸散. *应用生态学报*, 2007, 18(2): 288-296.
- [30] 朱军涛, 李向义, 张希明, 曾凡江, 林丽莎, 杨尚功, 桂东伟, 王辉, 刘波. 昆仑山北坡前山带塔里木沙拐枣对不同海拔生境的生理生态响应. *生态学报*, 2010, 30(3): 602-609.
- [31] 郭锐, 朱燕君, 王介民, 邓朝平. 近 22 年来西北不同类型植被 NDVI 变化与气候因子的关系. *植物生态学报*, 2008, 32(2): 319-327.
- [32] 刘宪锋, 朱秀芳, 潘耀忠, 李宜展, 赵安周. 1982-2012 年中国植被覆盖时空变化特征. *生态学报*, 2015, 35(16): 5331-5342.
- [33] 许玉凤, 杨井, 陈亚宁, 杨雅雪. 近 32 年来新疆地区植被覆盖的时空变化. *草业科学*, 2015, 32(5): 702-709.
- [34] 田静, 苏红波, 陈少辉, 孙晓敏, 陈庆美. 近 20 年来中国内陆地表蒸散的时空变化. *资源科学*, 2012, 34(7): 1277-1286.
- [35] 杨秀芹, 王国杰, 潘欣, 张余庆. 基于 GLEAM 遥感模型的中国 1980-2011 年地表蒸散发时空变化. *农业工程学报*, 2015, 31(21): 132-141.
- [36] 陈亚宁, 李稚, 范煜婷, 王怀军, 方功焕. 西北干旱区气候变化对水文水资源影响研究进展. *地理学报*, 2014, 69(9): 1295-1304.