

引用格式: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, Yusufjiang 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.] DOI:10.12082/dqxxkx.2018.170102

伊犁河谷蒸散量时空分布特征及变化趋势

阿迪来·乌甫,玉素甫江·如素力*,热伊莱·卡得尔,姜 红

1. 新疆师范大学 地理科学与旅游学院 流域信息集成与生态安全实验室,乌鲁木齐 830054;2. 新疆师范大学 新疆干旱区湖泊环境与资源重点实验室,乌鲁木齐 830054

Spatiotemporal Distribution and Variation Trend of Evapotranspiration in Ili River Valley

ADILAI Wufu, YUSUFUJIANG Rusuli*, REYILAI Kadeer, JIANG Hong

1. Institute of Geographical Science and Tourism, Laboratory of Information Integration and Eco-Security, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China; 2. Xinjiang Key Laboratory of Lake Environment and Resources in Arid Zone, Urumqi 830054, China

Abstract: Evapotranspiration (ET) plays an important role in the hydrological processes as it can substantially influence the amount and spatial distribution of water resources at regional scale. Quantitative estimation of spatiotemporal distribution and variation of surface ET is essential for understanding the hydrological cycle and water resources management. In this paper, the spatiotemporal characteristics and variation trend of ET and PET (Potential Evapotranspiration) are studied using MOD16 data during 2000-2014 in the "Wet Island of Tianshan Mountain"—Ili River valley, Xinjiang, China. The results showed that: (1) the accuracy of the MOD16-ET in Ili River valley can meet the requirements, and can be used to study the spatiotemporal distribution of surface ET; (2) the mean annual ET and PET were 392.35 and 1331.19 mm respectively, and ET/PET ratio fluctuates between 0.26 and 0.33. The low ratio of ET/PET indicates that the study area was affected by water deficit. The seasonal variation of ET and PET were a unimodal pattern in the growing season. ET/PET ratio was 0.29 in autumn, and the study area suffered drought in this period. Temperature was the main factor influencing the spatiotemporal distribution of ET and PET; (3) the spatial distribution of ET and PET are opposite. The upstream area of Kashgar river and Kunes river in the south had sufficient water supply, while the Yining city, the area of Khorgos river, Qapqal County and the downstream area of Tekkas river suffered from drought and water shortage; (4) During 2000-2014, ET decreased, and PET increased, which showed that the drought in Ili River valley was aggravated in the past 15 years.

Key words: MOD16; ET; PET; spatiotemporal distribution; variation trend; Ili River valley

*Corresponding author: YUSUFUJIANG Rusuli, E-mail: Yusupjan@xjnu.edu.cn

摘要: 基于2000-2014年MOD16蒸散量和气象站实测数据,借助于空间数据统计法和趋势分析法对中国西北干旱区“天山湿岛”—伊犁河谷地表蒸散量时空变化特征和多年变化趋势进行定量分析。结果表明:① MOD16-ET产品在伊犁河谷地区的精度

收稿日期 2017-03-15;修回日期:2017-07-19.

基金项目 国家自然科学基金项目(U1703341,41764003,41461006)。[**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China, No.U1703341, 41764003, 41461006.]

作者简介 阿迪来·乌甫(1992-),女,硕士生,研究方向为资源环境遥感。E-mail:Adilagupur@126.com

*通讯作者 玉素甫江·如素力(1975-),男,教授,博士,研究方向为流域水文与生态系统、3S技术及其应用。
E-mail: Yusupjan@xjnu.edu.cn

总体上满足要求,可用于地表ET的时空分布特征研究;②伊犁河谷地表ET、PET年际波动不大,多年平均ET为392.35 mm,多年平均PET为1331.19 mm,年均ET与PET的比例在0.26–0.33之间波动,说明研究区总体上水分不足。ET、PET年内分布处于先增大后减少的单峰型变化趋势,主要集中在5月到9月。秋季ET与PET的比例为0.29,此时研究区最干旱缺水。气温是研究区蒸散量变化的主要驱动因素之一。③ET、PET的空间分布状况正好相反,东部喀什河及巩乃斯河上游地区、南部大面积草甸覆盖区域ET值较高,PET值较低,此区域水分比较充足。伊宁市及霍尔果斯河周边地区、察布查尔县、特克斯河下游等区域ET值均较低,PET值较高,此区域干旱缺水;④从2000–2014年伊犁河谷地表ET、PET变化趋势来看,ET总体上处于减少趋势,PET处于增加趋势,说明研究区近15年内干旱加重。

关键词 MOD16产品;地表ET、PET;时空分布;变化趋势;伊犁河谷

1 引言

蒸散作为地球水圈、大气圈和生物圈之间水分交换的重要环节,在水循环和能量平衡中具有重要的研究意义。蒸散的研究包括实际蒸散(Actual Evapotranspiration, AET)和潜在蒸散(Potential Evapotranspiration, PET)。AET是发生在土壤表面的蒸发和发生在植物叶片表面的蒸腾,是水文循环和地表能量平衡的重要环节,也是植被生存必须的生理过程和地表物质循环的重要载体^[1–2]。PET是一定气象条件下,水分供应不受限制时,某一固定下垫面能达到的最大蒸发蒸腾量,是ET的理论上限,研究干旱区气候演变和水资源的决定性参考指标。在干旱半干旱内陆湖泊流域为单位的水循环中,蒸散是水量消耗的主要途径^[3],它与降水共同决定着流域的气候干旱程度,同时在合理调配水土资源、区域生态平衡研究等方面发挥着关键作用。充分认识研究区ET时空格局变化过程有利于加深气候演变、环境问题的认识,了解气候变化对水资源的影响、区域生态需水规律,同时对于合理开发水土资源、科学评价气候干旱状况等研究具有十分重要的参考意义。

遥感技术在近些年来得到迅猛发展,使大尺度非均匀陆面的ET研究取得突破性进展^[4]。20世纪70年代以来国内外陆续出现基于遥感数据的ET估算方法,其中较典型的模型有基于Penman-Monteith公式的VITT模型^[5]、基于Priestley-Taylor公式的三角形模型^[6]、SEBAL模型^[7]、SEBS模型^[8]、TSEB模型^[9]等。刘园等^[10]利用Penman-Monteith方法计算华北平原参考作物ET变化特征,并研究主次气候影响因子。李宝福等^[11]基于SEBAL模型估算塔里木河干流区ET,并对各土地利用/覆被类型的ET进行了统计分析。吴雪娇等^[12]使用SEBS模型估算黑河中游地区日尺度的AET,并进行地面验证和时空变化分析。2011年,美国NASA研究队员正式发布具有较高时间分辨率和免费获取特点的全球陆地蒸

散数据(MOD16)^[13–14]。该数据通过了全球通量塔站台的检验,模拟精度达到86%,能够提供ET的各种特征参数。国内一些研究人员利用MOD16产品对不同区域地表ET时空分布和变化特征进行了评估,如鄱阳湖流域^[15]、陕西省^[16]、渭河流域^[17]、淮河流域^[18]。贺添等^[19]分别在站点和区域尺度上检验了MOD16产品在我国的应用精度,并深入讨论中国2001–2010年的ET时空分布格局和驱动因素,此研究结果表明,在干旱程度不断加剧的西北地区因广布荒漠草原与沙地,ET的空间分布比中国其他区域显著小并有逐年显著减少的趋势。

伊犁河谷位于新疆西北部,是新疆最大的绿洲,被誉为“中国西北干旱区‘天山湿岛’”。近年来,随着河谷地区经济水平的快速发展、城市化进程的加快,水土资源大规模开发利用,导致水土资源结构不断发生改变、地表径流量减少、植被退化、土地利用变化明显。ET作为地表能量和水资源平衡的决定性变量,其变化与区域气候、生态环境及其水资源的变化息息相关,而有关伊犁河谷的研究多集中在气候^[20]、生态服务价值^[21]、土地利用变化^[22]等方面,单独针对伊犁河谷ET时空变化格局的研究则很少。基于此,本文以2000–2014年1 km空间分辨率的MOD16产品为主要数据源,对伊犁河谷在年、月时间尺度下地表ET、PET的时空分布及其变化特征进行深入分析,揭示研究区地表ET、PET的变化规律,为改善环境、水资源管理,以及生态保护与恢复提供参考依据。

2 研究区概况

伊犁河谷地区位于欧亚大陆中心,新疆天山北坡西北部,地理位置为79.91°~85.03°E,42.21°~45.02°N,面积为5.53万km²(图1)。该地区地形复杂,天山西部多支脉和纵横交错的河流将其分割为伊犁谷地、巩乃斯谷地、特克斯谷地、喀什河谷丘陵和昭苏盆地5个地域单元。整个区域地形上东、南、北三面高

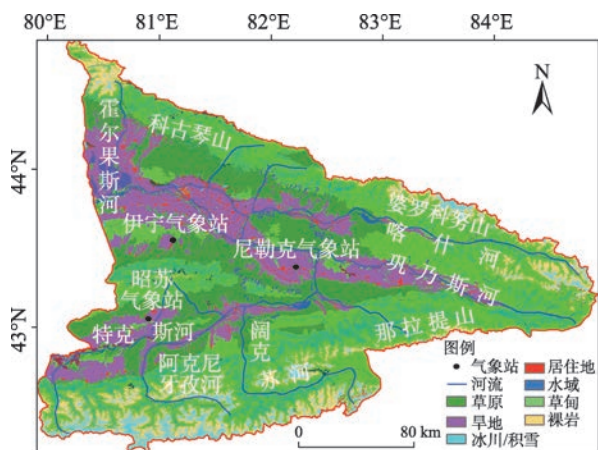


图1 研究区土地利用/覆被和气象观测站分布图

Fig. 1 The spatial distribution of land use/cover and meteorological station of the study area

山环绕,地势东高西低、东窄西宽,呈喇叭型向西敞开,可以大量接受陆地西风带来的湿润水汽。其独特的地形地貌和山体走向,使原本属于大陆性中温带干旱气候的伊犁河谷成为天山(中国境内)及亚洲中部的降水中心,孕育了干旱区的一块“湿岛”和气候资源宝库^[23]。该区是新疆生态环境最好的地区之一,年平均气温 10.4℃,年降水量 417.6 mm,年平均日照系数 2898.4 h,水、热、土、气、生等自然条件组合搭配优越,素有“塞外江南”之称^[21]。

3 数据源与研究方法

3.1 数据源及处理

(1)遥感数据。蒸散量数据为 2000–2014 年的年、月合成的,卫星轨道号为 h23v04/h24v04 的 MOD16-ET、PET 数据产品。产品是通过 Mu 等^[14,24]在 Penman-Monteith 公式基础上改进计算的,其计算过程是将地表分为裸土和冠层组分,将冠层又分为湿润和干燥两类,根据不同下垫面生物物理过程计算各自的空气动力学阻抗和冠层阻抗,结合从 MOD15 产品获取的叶面积指数(LAI)和植被光合有效辐射分量(FPAR),从 MOD12Q1 产品获取的土地利用/覆盖数据,以及相关水文气象数据估算该产品。原始的 MODIS 产品是以分级数据格式(Hierarchical Data Format, HDF)存储的,投影是正弦曲线投影,利用 MRT 软件,将 MOD16 产品的 HDF 格式文件转换为 WGS-1984 经纬度坐标系统下的 GeoTiff 格式文件,并进行投影转换、轨道镶嵌等操作。基于伊犁河谷的水系特点,获取了研究区的矢量边界图,

然后利用 ArcGIS 软件对经过投影转换的 MODIS 数据进行裁剪,从而得到不同时间和空间尺度下研究区的地表 ET、PET 数据,最后借助于 IDL 编程语言分别获取 ET、PET 的最大值、最小值和平均值,根据网站提供的数据使用说明,剔除数据中的无效值并还原真实值,再利用 ArcGIS 软件制作伊犁河谷 2000–2014 年的年、月平均地表 ET、PET 分布图。

(2)地面观测数据:采用研究区内的伊宁、尼勒克、昭苏 3 个代表性气象观测站的 2000–2011 年月时间序列的小型蒸发皿 ET 数据(表 1)。

表 1 气象观测站基本信息

Tab. 1 The Basic information of meteorological observation station

站点	覆被类型	经度/E	纬度/N	海拔高度/m
伊宁	旱地,草原	81°20'	43°57'	662.5
尼勒克	旱地,草原	82°34'	43°48'	1105.1
昭苏	旱地,草甸草原	81°08'	43°09'	1851.0

根据各个气象站的实际地理环境,剔除少量蒸发皿实测异常值。另外,3 个气象站部分实测数据存在缺测现象,气象自动观测定时数据在各仪器设备上都没有记录,数据处于空白状态,对于这些缺测蒸发皿 ET 值,将 E-601 型蒸发器的 ET 值折算为 20 cm 口径蒸发皿 ET 值来间接推算,估算精度达到 98%,处理后得到各站年、月蒸发皿实测数据,再与 MOD16-PET 数据集进行对比验证。

(3)NDVI 数据。NDVI 数据是由地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/sources>) 下载的 2001–2014 年的 MODND1M 中国 NDVI 月合成产品,其空间分辨率为 500 m。

3.2 研究方法

(1)数据精度评价

为了检验 MOD16 产品在该研究区反演地表 ET 的适用性,选取研究区内的 3 个气象站 2000–2011 年月时间序列的实测蒸发皿 ET 数据与 MOD16-PET 数据在“点”尺度上进行验证。采用复相关系数(R^2),均方根误差(RMSE),估算精度(EA)等精度评价指标对实测蒸发皿 ET 数据与 MOD16-PET 数据进行进一步对比验证。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (ET_{pan,i} - ET_{pet,i})^2}{n}} \quad (1)$$

$$EA = \left(1 - \frac{RMSE}{MEAN}\right) \times 100 \quad (2)$$

式中: n 为观测个数; i 为具体计算年份; $ET_{pan,i}$ 和 $ET_{pet,i}$ 分别为实测蒸发皿ET值和MOD16-PET。

(2) 折算系数计算方法^[24-25]

E-601型蒸发器ET与20 cm口径蒸发皿ET的折算系数计算公式为:

$$K = E_{601} / E_{20} \quad (3)$$

式中: K 为蒸发折算系数; E_{601} 为E-601型蒸发器的蒸发量/mm; E_{20} 为20 cm口径蒸发皿的蒸发量/mm。

(3) ET、PET年际变化的评估指标^[26-27]

在IDL语言环境中逐像元计算2000–2014年期间年及季节ET和PET的线性倾向率(S)。

$$S = \frac{n \sum_{i=1}^n i \times ET - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n ET_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i \right)^2} \quad (4)$$

式中: S 为线性倾向值; n 为年序列总长度($n=15$); i 为具体计算年份; ET_i 为第 i 年的MOD16-ET。当 S 为负时,随时间 i 的增加, ET 变化处于减少趋势;当 S 为正时,随时间 i 的增加, ET 变化处于增加趋势。

(4) 干旱程度评估指标

ET与PET的比例(ET/PET)越高,即接近1,表明区域水分越充足;比例越低,表明区域水分越不足^[28]。

4 结果与分析

4.1 MOD16数据精度检验

为了验证MOD16蒸散产品在伊犁河谷地区反

演地表ET时空变化的准确性,选取研究区内的伊宁、尼勒克、昭苏3个代表性气象观测站2000–2011年的年、月时间序列的小型蒸发皿ET数据在“点”尺度上进行精度验证。蒸发皿ET是水分充足的条件下,蒸发皿所在区域自由水体的最大蒸发状况^[29];在干旱半干旱区,实际ET主要是由水分和能量所决定,而蒸发皿ET不受水分的影响,决定其大小的主要因子是能量,因此蒸发皿ET与实际ET具有相反关系^[30]。PET表示充分供水情况下的某一固定下垫面最大蒸散量^[31-32]。由于蒸发皿ET与MOD16-PET相比蒸发皿ET与MOD16-ET更接近,故可通过蒸发皿ET与MOD16-PET的相关性来检验MOD16蒸散产品在伊犁河谷地区的适用性。

图2和表2给出了伊犁河谷的伊宁、尼勒克、昭苏3个气象站年、月实测蒸发皿ET与MOD16-PET数据精度验证结果。可以看出,实测蒸发皿ET与MOD16-PET之间具有较高的相关性,月实测蒸发皿ET与MOD16-PET数据相关系数都大于0.91,年实测蒸发皿ET与MOD16-PET数据相关系数分别达到伊宁 $R^2=0.84$ 、尼勒克 $R^2=0.72$ 、昭苏 $R^2=0.67$ 。各站点平均RMSE为260 m,平均EA为80%。其中,伊宁站点精度验证结果最佳,相关系数分别为0.95和0.84,EA达到84%,与观测数据比较接近。

总体上,MOD16蒸散产品在该地区验证精度良好。MOD16蒸散产品中的PET精度验证满足要求,说明MOD16产品在伊犁河谷具有适用性,可以用于该研究区地表ET的时空分布特征研究。

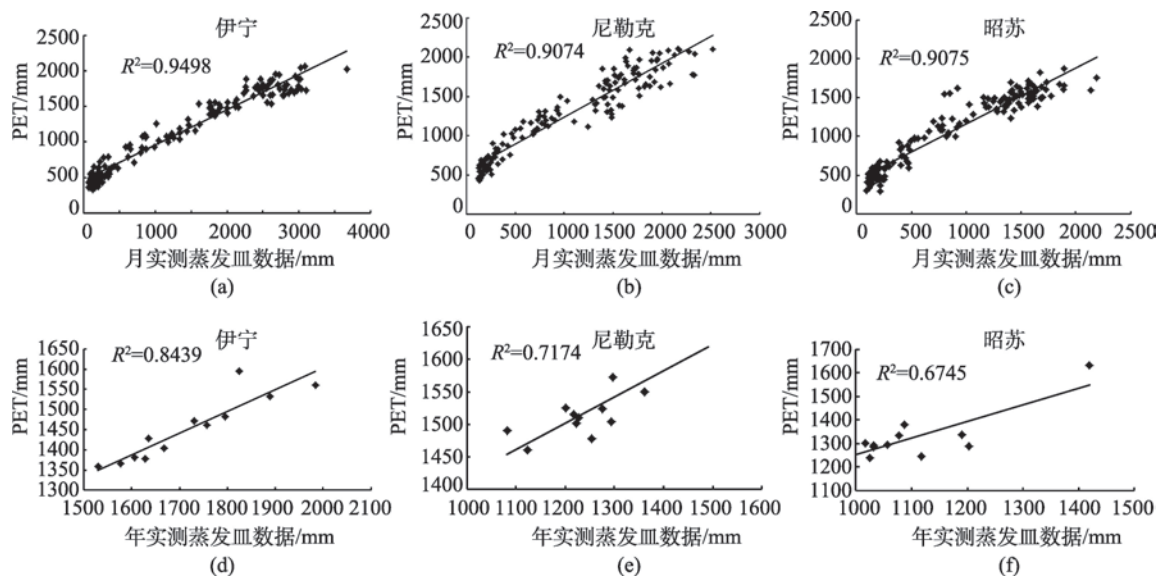


图2 气象站年、月实测ET和MOD16-PET的关系

Fig. 2 Relationship between MOD16 PET product and annual-monthly ET from meteorological station

表2 气象站年月实测ET和MOD16-PET数据精度验证结果

Tab. 2 The accuracy validation results of MOD16 PET product and annual-monthly ET from meteorological station

站点	相关系数(月)	相关系数(年)	RMSE/mm	EA/%
伊宁	0.95	0.84	275	84
尼勒克	0.91	0.72	277	78
昭苏	0.91	0.67	233	79

4.2 平均ET、PET的时间分布特征及影响因子

2000–2014年伊犁河谷地表ET、PET年际波动不大,ET波动范围为354.68~418.27 mm之间,多年平均ET为392.35 mm;PET波动范围为1258.15~

1450.13 mm,多年平均PET为1331.19 mm。年ET波动最为突出的年份是2002年和2014年,相对变化率分别为6.20%和-10.62%。年PET波动最为突出的年份是2008年和2003年,相对变化率分别为8.20%和-5.81%(图3(a))。ET为地表实际蒸散量,PET为一定气象条件下水分供应不受限制时的最大蒸发蒸腾量,ET与PET的比例在年尺度上可代表研究区水分分配状况,在季节、月尺度上则可代表研究区水分盈亏状况。从图3(a)可看出,伊犁河谷年际地表ET与PET的相对值在0.26~0.33之间波动,说明在年尺度上整个研究区水分不足。

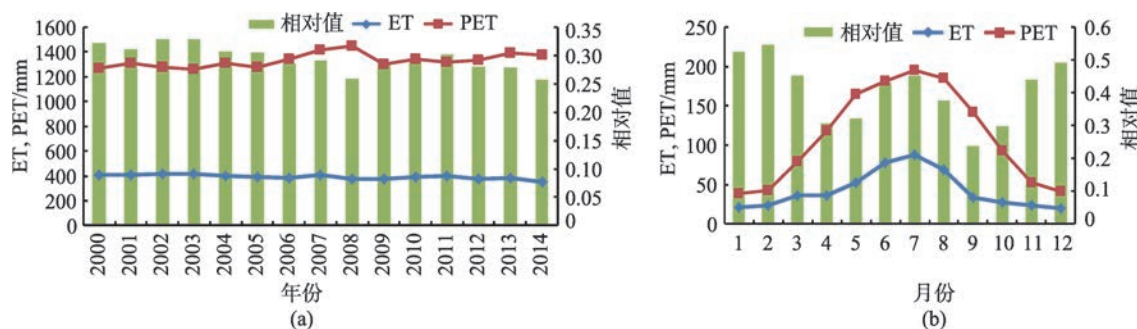


图3 2000–2014年伊犁河谷ET、PET不同年月变化

Fig. 3 Annual and monthly variation of ET and PET in Ili River valley from 2000 to 2014

伊犁河谷地表ET、PET年内分布处于先增大后减少的单峰型变化趋势,峰值位于7月(图3(b))。月平均ET约为22.90 mm左右,PET约为53.62 mm左右,ET、PET都比较集中在5–9月,5–7月处于快速增长趋势,7月达到最高值,分别为88.14 mm和195.10 mm,8月开始迅速下降,1月处于最小值,分别为20.59 mm和39.33 mm,从10月直到次年2月ET、PET波动比较平缓。4、5、9和10月ET与PET的比例较小(<0.32),此时研究区处于最干旱状态。按季节来看,春季(3–5月)ET与PET处于增加趋势,3月开始气温慢慢升高、降水量逐渐增多、植被返青,因此ET、PET也随之升高,ET与PET的比例为0.35;夏季(6–8月)气温达到最高值、受西风气流的影响,水汽来源充沛,使降雨量大、太阳辐射强烈、不同地貌类型的ET、PET达到最大值,因此在夏季ET、PET比其他季节最大。ET与PET的比例也比较大,为0.42;秋季(9–11月)气温逐渐下降,雨量减少、植被开始枯竭,ET、PET随之急剧减少,ET与PET的比例为0.29;冬天(12–2月)气温低、降水量少、太阳辐射较弱,ET、PET保持最低值,无明显的变化,ET与PET的比例为0.52。秋季ET与PET的

比例为0.29,比其他季节明显小,说明此时研究区最干旱缺水。自然界中的蒸散发过程十分复杂,受制于不同因素的影响。根据ET、PET的产生机制与相关影响因素数据的可获得性,选取研究区内的伊宁和昭苏2个代表性气象站2000–2014年月时间序列的气温、相对湿度和降水量等实测数据,在“点”尺度上进行相关性分析。

实际ET是真实的气候背景和现实的水分、能量条件下,土壤蒸发和植被蒸腾的过程。在干旱半干旱区,地表所能获得的太阳辐射较多,实际ET主要是由水分决定,而气象站实测ET是水分充足的条件下,蒸发皿所在区域自由水体的最大蒸发状况,其测量过程中水分是充足的,因此决定其大小的主要因子是太阳能量,据此可以说明气象站实测ET与实际ET具有相反关系。PET表示的是充分供水情况下的某一固定下垫面最大蒸散量^[31–32],可知气象站实测ET与MOD16-PET更接近。因此,本文通过MOD16-PET数据与气象站实测数据进行相关性分析。

从图4可看出,气温与PET呈正相关关系,相关系数为0.89,说明二者高度相关,即气温是伊犁河谷蒸散量变化的主要驱动因素之一。相对湿度与

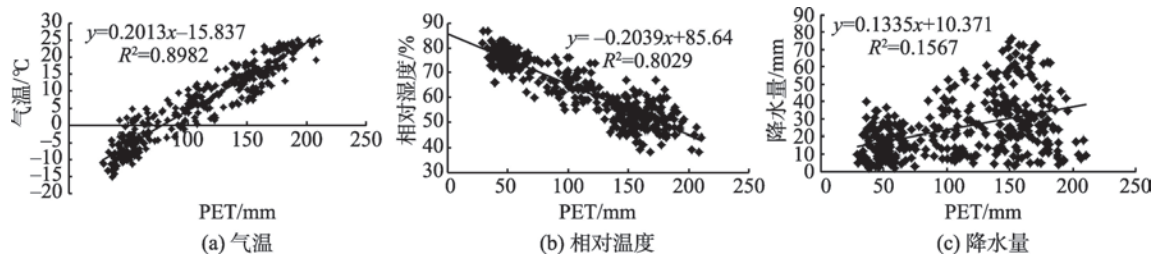


图4 主要气象因子与PET的关系

Fig. 4 The relationship between meteorological factors and MOD16-PET

PET呈明显的负相关关系,相关系数达到0.80。降水量与PET呈较弱的正相关关系,相关系数为0.15,说明从某种程度上降水量是伊犁河谷蒸散量变化的制约因素之一,但作用不明显。

为了进一步分析研究区植被覆盖状况与蒸散量的关系,选取2001–2014年NDVI数据分别与MOD16-ET、PET逐像元进行相关性分析。由散点图可以看出(图5),NDVI与ET处于明显的正相关关系,与PET处于负相关关系。相关关系比较显著的区域为河流两岸冲积平原的农牧区和大面积草甸草原区,此区域ET、PET较集中,河谷南部和东北部的少部分植被覆盖率较低的区域相关关系不明显。ET与PET跟NDVI有着相反的关系,原因是如上述内容所表达,根据蒸散发互补相关理论^[29–30],由于ET与PET具有相反关系,二者与NDVI的关系也呈现出相反关系。

4.3 平均ET、PET空间分布特征

根据图6(a)、(b)所示,伊犁河谷2000–2014年

平均ET与PET具有明显的空间分布差异,且二者的空间分布状况正好相反。多年平均ET波动范围为128.8~751.6 mm之间,PET波动范围为709.9~1994.9 mm之间。东部喀什河及巩乃斯河上游地区以及南部大面积草甸覆盖区域ET值比其他区域显著高,在345.3~751.6 mm之间,PET值比较低,在709.9~1240 mm之间。伊宁市及霍尔果斯河周边地区、察布查尔县、特克斯河下游等区域ET值均比较低,在128.8~345.3 mm之间,PET值较高,在1240~1994.9 mm之间。由于MOD16产品覆盖范围为有植被区域,所以在图中南部和东北部少部分荒漠及冰雪覆盖区等无植被区域为空白,没有数据。

根据ET与PET的相反关系可以看出,东部喀什河及巩乃斯河上游地区以及南部大面积草甸覆盖区域水分比较充足,而伊宁市及霍尔果斯河周边地区、察布查尔县、特克斯河下游等区域干旱缺水。

从图6(c)、(d)伊犁河谷不同季节ET、PET空间分布图可以看出,除了冬季ET空间分布情况与多年格局相反,春、夏、秋3个季与多年ET、PET空

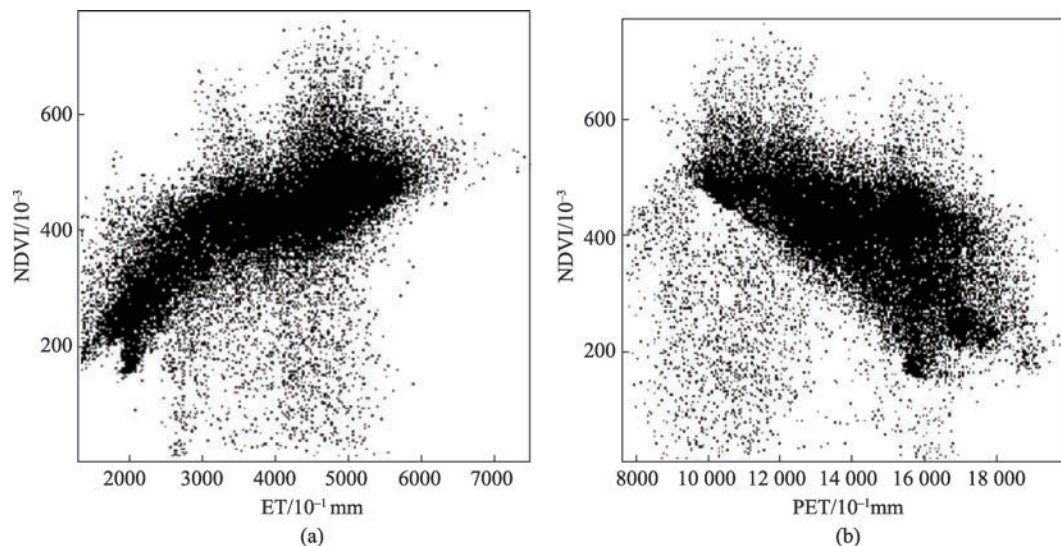


图5 ET、PET与NDVI的关系

Fig. 5 The relationship between NDVI and ET, and between NDVI and PET, respectively

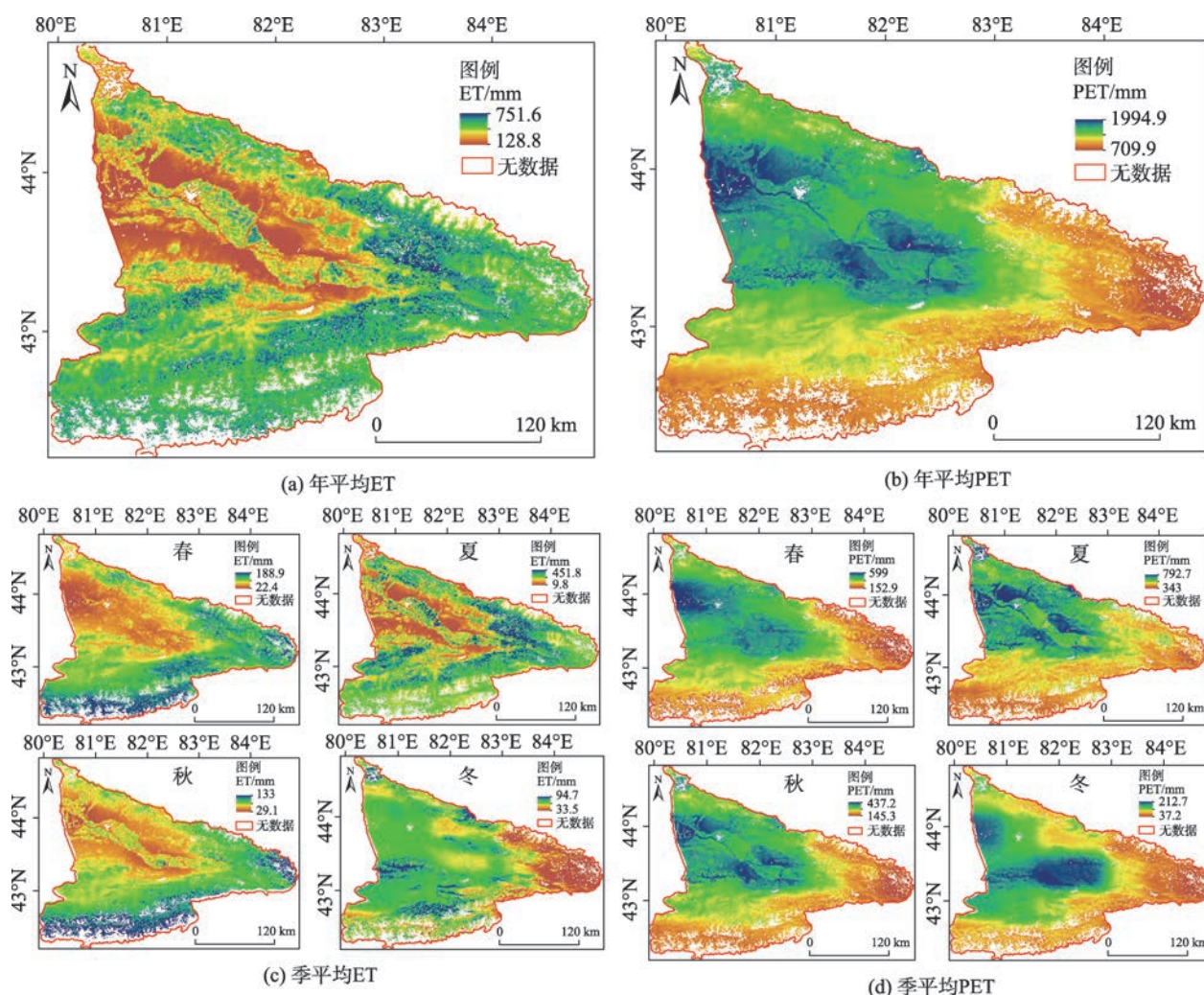


图6 伊犁河谷年与季节平均ET、PET空间分布

Fig. 6 The spatial distribution of annual and seasonal ET, PET in Ili River valley

间分布格局大致相同。ET在夏季最高,其次为春季、秋季,冬季最少。春季ET值为22.4~188.9 mm之间,平均值为99.6 mm,东部喀什河及巩乃斯河上游地区以及南部大面积草甸覆盖区域ET值比其他区域显著高;到了夏季因植被覆盖度高,加上高山融雪而引起的径流增加,蒸腾和蒸发作用旺盛,为蒸散提供了充分条件,所以ET明显增加,达到9.8~451.8 mm之间,平均值为185 mm,夏季ET空间分布格局与年际情况基本相似;在秋季,气温开始下降,降水量变少,ET也随着降低,达到29.1~133 mm之间,平均值为77 mm,尤其在伊宁县北部、尼勒克县等区域明显减少;到了冬季,气温低、太阳辐射较弱、植被覆盖度低,没有良好的蒸散条件,因此ET比其他季节最小,而且跟其他季节正好相反,约33.5~94.7 mm之间,平均值为61.5 mm。

春季PET值在152.9~599 mm之间,平均值为

369.4 mm,伊宁市及霍尔果斯河周边地区PET值显著高;到了夏季,尼勒克县和霍城县PET值明显增加,约343~792.7 mm之间,平均值为563.1 mm;秋季PET值在145.3~437.2 mm之间,平均值为289 mm。夏、秋两季PET空间分布与年际情况基本相似;冬季PET值为37.2~212.7 mm之间,平均值为120.4 mm,在特克斯河下游明显增加,尼勒克县及霍城县北部PET明显减少。

4.4 伊犁河谷地表ET、PET变化趋势分布

通过线性倾向趋势法分析近15年来伊犁河谷地表ET、PET变化趋势(图7),根据S值范围定义严重减少(ET: $S < -10$, PET: $S < -15$),轻微减少(ET: $-10 \leq S < -3$, PET: $-15 \leq S < -8$),基本不变(ET: $-3 \leq S < 3$, PET: $-8 \leq S < 8$),轻微增加(ET: $3 \leq S < 15$, PET: $8 \leq S < 19$),明显增加(ET: $S \geq 15$, PET: $S \geq 19$)等变化区间。

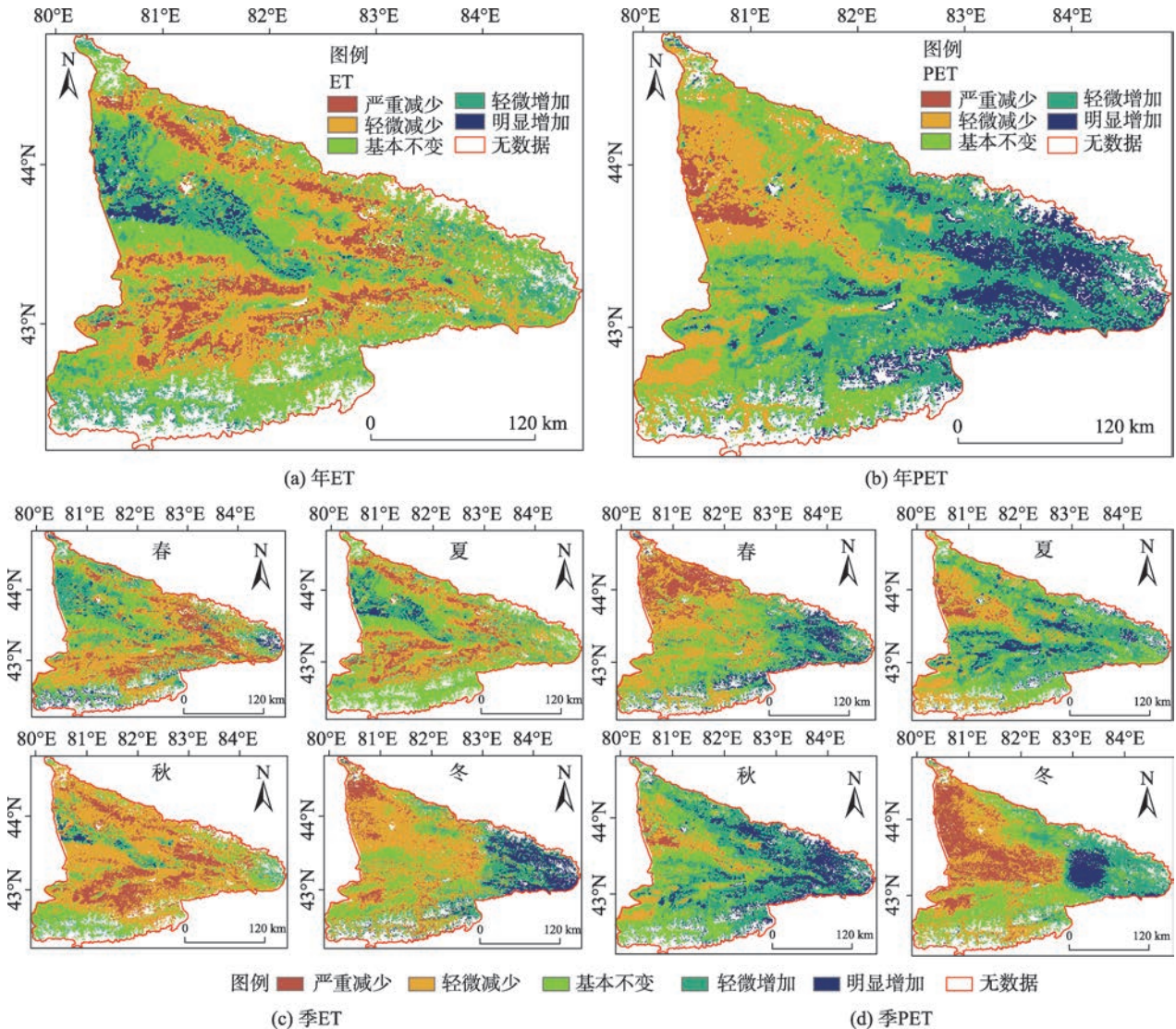


图7 2000–2014年伊犁河谷多年与不同季节ET、PET变化趋势

Fig. 7 The variation trend of annual and seasonal ET, PET in Ili River valley from 2000 to 2014

图7(a)、(b)表示近15年来伊犁河谷地表ET、PET变化趋势空间分布情况。从图中可以看出,ET在霍尔果斯河周边和察布查尔县等区域处于明显增加趋势,面积约占总面积的3%;霍城县、伊宁县、尼勒克县、新源县一带,特克斯河下游,昭苏县等区域处于减少趋势,轻微减少和严重减少区域面积分别占总面积的28%和10%;其他区域处于基本不变趋势,约占总面积的42%。PET主要在研究区东部的喀什河及巩乃斯河上游地区处于明显增加趋势,面积约占总面积的14%;霍尔果斯河和伊宁市少部分区域处于严重减少趋势,面积约占总面积的3%;霍城县、察布查尔和伊宁市,以及昭苏县西段部分区域处于轻微减少趋势,约占总面积的19%;剩下的大部分区域处于基本不变或者轻微增加趋势,分

别占总面积的33%和31%。伊犁河谷多年ET、PET总体上处于基本不变趋势,分别占总面积的42%和33%。按增加或减少趋势的区域面积所占的比例来看,ET处于增加趋势的区域面积小于处于减少趋势的区域面积,PET处于增加趋势的区域面积明显大于减少趋势的区域面积,区域ET减少趋势和PET增加趋势表明该区域干旱加重。

从伊犁河谷不同季节地表ET、PET变化趋势空间分布情况可得出(图7(c)、(d)),ET在春季只有占总面积4%的区域有明显增加趋势,基本不变的区域面积最大,占总面积的45%。夏季,ET变化趋势跟年际ET变化趋势基本上一致,霍尔果斯河周边和察布查尔县等区域处于明显增加趋势,面积约占总面积的2%,霍城县、伊宁县、尼勒克县、新源县

一带,特克斯河下游,昭苏县等区域处于减少趋势,轻微减少和严重减少区域面积分别占总面积的28%和10%;秋季,处于减少趋势的区域面积比较大,霍城县、伊宁县、尼勒克县、昭苏县以及特克斯河下游大面积区域处于轻微减少或者严重减少趋势,分别占总面积的51%和18%;冬季,东部喀什河及巩乃斯河上游地区处于明显增加趋势,约占总面积的11%,霍尔果斯西北段处于严重减少趋势,约占总面积的8%。PET在春季以基本不变趋势为主,约占总面积的33%,霍城县约占总面积的10%的区域处于严重减少趋势;夏季,基本不变和轻微增加趋势的区域面积比较大,分别占总面积的39%和33%,特克斯县和尼勒克县部分区域处于明显增加趋势,约占总面积的8%,霍尔果斯河少部分地区处于严重减少趋势,约占总面积的3%;秋季,明显增加的区域面积比其他季节相比显著大,约占总面积的18%,只有霍城县约占总面积的1.5%的区域处于严重减少趋势,剩下的大部分区域处于轻微增加或基本不变趋势,分别占总面积的36%和34%。冬季PET变化趋势与其他季节有较大差异,新源县中间的圆形区域处于明显增加趋势,约占总面积的6%,霍城县和察布查尔县的大部分区域以及巩留县部分区域处于严重减少和轻微减少趋势,约占总面积的19%和27%,剩下的部分区域处于基本不变趋势,约占总面积的30%。

5 结论

本文利用MOD16蒸散量数据产品,对伊犁河谷2000–2014年地表ET、PET时空变化格局及其变化趋势进行了分析,并揭示二者之间的时空差异性。主要结论如下:

(1)MOD16-PET与3个气象站年、月实测ET具有较高的相关性,各站点平均RMSE为260 mm,平均EA为80%,MOD16-PET与实测ET呈较高的一致性,说明MOD16产品在研究区总体上符合要求,可用于地表ET时空分布特征研究。

(2)2000–2014年伊犁河谷地表ET、PET年际波动不大,ET波动范围为354.68~418.27 mm之间,多年平均ET为392.35 mm;PET波动范围为1258.15~1450.13 mm,多年平均PET为1331.19 mm。伊犁河谷地表ET与PET的比例在0.26~0.33之间波动,在年尺度上整个研究区水分不足。ET、PET年内分布处于先增大后减少的单峰型变化趋势,主要集中在

5–9月,峰值位于7月,ET、PET分别为88.14和195.10 mm,1月处于最小值,分别为20.59 mm和39.33 mm。春、夏、秋、冬4个季节ET与PET的比例分别为0.35、0.42、0.29、0.52,秋季ET与PET的比例比其他季节明显小,说明此时研究区最干旱缺水。气温是伊犁河谷蒸散量变化的主要驱动因素之一。

(3)伊犁河谷2000–2014年平均ET、PET具有明显的空间分布特征,且两者的空间分布状况正好相反。东部喀什河及巩乃斯河上游地区以及南部大面积草甸覆盖区域ET值较高,PET值较低;伊宁市及霍尔果斯河周边地区、察布查尔县、特克斯河下游等区域ET值均较低,PET值较高。根据ET与PET的相反关系可看出,东部喀什河及巩乃斯河上游地区以及南部大面积草甸覆盖区域水分比较充足,而伊宁市及霍尔果斯河周边地区、察布查尔县、特克斯河下游等区域干旱缺水。春、夏、秋3个季节的ET、PET空间分布与多年情况大致相同,冬季则相反。

(4)从2000–2014年伊犁河谷地表ET、PET变化趋势来看,多年ET、PET总体上处于基本不变趋势,分别占总面积的42%和33%。按增加或减少趋势的区域面积所占的比例来看,ET处于增加趋势的区域面积小于处于减少趋势的区域面积,PET处于增加趋势的区域面积明显大于减少趋势的区域面积,区域ET减少趋势和PET增加趋势表明该区域干旱加重。

参考文献(References):

- [1] 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. [Cong Z T, Yang D W, Ni G H. Principle and application of evaporation[M]. Beijing: Beijing Science Press, 2013.]
- [2] Chahine M T. The hydrological cycle and its influence on climate[J]. Nature, 1996,359(6349):373-380.
- [3] 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. [Zhou Y Z, Zhou J, Li Y, et al. Simulating the evapotranspiration with SEBAL and Modified SEBAL (M-SEBAL) models over the desert and oasis of the middle reaches of the Heihe river [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014,36(6):1526-1537.]
- [4] 宋鑫博.基于MODIS数据的湖西区地表蒸散发遥感估算[D].南京:南京师范大学,2013:407-426. [Song X B. Study on estimation of evapotranspiration in Western Taihu area based on MODIS data[D]. Nanjing: Nanjing Nor-

- mal University, 2013:407-426.]
- [5] Moran M S, Rahman A F, Washburne J C, et al. Combining the Penman-Monteith equation with measurements of surface temperature and reflectance to estimate evaporation rates of semiarid grassland[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1996,80(2-4):87-109.
- [6] Jiang L, Islam S.A methodology for estimation of surface Evapotranspiration over large areas using remote sensing observations[J]. *Geophysical Research Letters*, 1999,26(17):2773-2776.
- [7] Bastiaanssen W, Pelgrum H, Wang J, et al. A remote sensing surface energy balance algorithm for land[J]. *Journal of hydrology*, 1998,212-213(1-4):198-212.
- [8] Su Z, Schmugge T, Kustas W P, et al. Two models for estimation of the roughness height for heat transfer between the land surface and the atmosphere[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2001,40(11):1933-1951.
- [9] Kustas W P, Norman J M. Evaluation of soil and vegetation heat flux predictions using a simple two-source model with radiometric temperatures for partial canopy cover [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1999,94(1):13-29.
- [10] 刘园,王颖,杨晓光.华北平原参考作物蒸散量变化特征及气候影响因素[J].*生态学报*,2010,30(4):923-932. [Liu Y, Wang Y, Yang X G. Trends in reference crop evapotranspiration and possible climatic factors in the North China Plain[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010,30(4):923-932.]
- [11] 李宝富,陈亚宁,李卫红,等.基于遥感和SEBAL模型的塔里木河干流区蒸散发估算[J].*地理学报*,2011,66(9):1230-1238. [Li B F, Chen Y N, Li W H, et al. Estimation of evapotranspiration in the Tarim River based on remote sensing and the SEBAL model[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011,66(9):1230-1238.]
- [12] 吴雪娇,周剑,李妍,等.基于涡动相关仪验证的SEBS模型对黑河中游地表蒸散发的估算研究[J].*冰川冻土*, 2014,36(6):1538-1547. [Wu X J, Zhou J, Li Y, et al. Estimating the evapotranspiration in the middle reaches of the Heihe River by SEBS model based on the eddy covariance system[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014,36(6):1538-1547.]
- [13] Mu Q Z, Zhao M S, Running S W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011,115(8):1781-1800.
- [14] Mu Q Z, Heinsch F A, Zhao M S, et al. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007,111(4):519-536.
- [15] 吴桂平,刘元波,赵晓松,等.MOD16产品的鄱阳湖流域蒸散量时空分布特征[J].*地理研究*,2013,32(4):617-627. [Wu G P, Liu Y B, Zhao X S, et al. Spatio-temporal variations of evapotranspiration in Poyang Lake basin using MOD16 products[J]. *Geographical Research*, 2013,32(4):617-627.]
- [16] 范建忠,李登科,高茂盛.基于MOD16的陕西省蒸散量时空分布特征[J].*生态环境学报*,2014,23(9):1536-1543. [Fan J Z, Li D K, Gao M S. Spatio-temporal variations of evapotranspiration in Shaanxi Province using MOD16 product[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014,23(9):1536-1543.]
- [17] 位贺杰,张艳芳,朱妮,等.基于MOD16数据的渭河流域地表ET时空特征[J].*中国沙漠*,2015,35(2):414-422. [Wei H J, Zhang Y F, Zhu N, et al. Spatial and temporal characteristics of ET in the Weihe River basin based on MOD16 data[J]. *Journal of Desert Research*, 2015,35(2):414-422.]
- [18] 杨秀芹,王磊,王凯.基于MOD16产品的淮河流域实际蒸散发时空分布[J].*冰川冻土*,2015,37(5):1343-1352. [Yang X Q, Wang L, Wang K. Spatio-temporal distribution of terrestrial evapotranspiration in Huaihe River basin based on MOD16 ET data[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015,37(5):1343-1352.]
- [19] 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[J].*地球信息科学学报*,2014,16(6):979-988. [He T, Shao Q Q. Spatial-temporal variation of terrestrial evapotranspiration in China from 2001 to 2010 using MOD16 products[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2014,16(6):979-988.]
- [20] 姜修洋,李志忠,陈秀玲,等.新疆伊犁河谷风沙沉积晚全新世孢粉记录及气候变化[J].*中国沙漠*,2011,31(4):855-861. [Jiang X Y, Li Z Z, Chen X L, et al. Late Holocene climate and environment changes inferred from pollen record of Takelmukul Desert in Yili Valley of Xinjiang, China[J]. *Journal of Desert Research*, 2011,31(4):855-861.]
- [21] 陈忠升,陈亚宁,李卫红,等.基于生态服务价值的伊犁河谷土地利用变化环境影响评价[J].*中国沙漠*,2010,30(4):870-877. [Chen Z S, Chen Y N, Li W H, et al. Evaluating effects of land use changes of environment in Ili Valley based on analysis of values of ecosystem service[J]. *Journal of Desert Research*, 2010,30(4):870-877.]
- [22] 包桂荣,白长寿,高清竹,等.新疆伊犁河流域土地利用变化及其对生态系统服务价值的影响[J].*中国农业气象*, 2008,29(2):208-212. [Bao G R, Bai C S, Gao Q Z, et al. Land use changes and its impacts on ecosystem service values in Yilihe Watershed of Xinjiang Autonomous Region[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2008,29(2):208-212.]
- [23] 魏文寿,袁玉江,喻树龙,等.中国天山山区235 a气候变化及降水趋势预测[J].*中国沙漠*,2008,28(5):803-808. [Wei

- W S, Yuan Y J, Yu S L, et al. Climate changes in recent 235 years and its trend prediction in Tianshan Mountainous Area[J]. Journal of Desert Research, 2008,28(5):803- 808.]
- [24] 胡顺军,田长彦,宋郁东,等.塔里木河流域水面蒸发折算系数分析[J].中国沙漠,2005,25(5):649-651. [Hu S J, Tian C Y, Song Y D, et al. Analysis of conversion coefficient of water surface evaporation in Tarim River Basin [J]. Journal of Desert Research, 2005,25(5):649-651.]
- [25] 段春锋,缪启龙,曹雯,等.西北地区小型蒸发皿资料估算参考作物蒸散[J].农业工程学报,2012,28(4):94-99. [Duan C F, Miao Q L, Cao W, et al. Estimation of reference crop evapotranspiration by Chinese pan evaporation in North-west China[J]. Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012,28(4): 94-99.]
- [26] 杨秀芹,王国杰,叶金印,等.基于GLEAM模型的淮河流域地表蒸散量时空变化特征[J].农业工程学报,2015,31(9):133-139. [Yang X Q, Wang G J, Ye J Y, et al. Spatial and temporal variation characteristics of terrestrial evapotranspiration in Huai River basin based on GLEAM data [J]. Transaction of the Chinese society of Agricultural Engineering, 2015,31(9):133-139.]
- [27] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].北京:气象出版社,1999:43-45. [Wei F Y. Statistics, diagnosis and prediction technology for modern climate[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1999:43-45.]
- [28] Chen L D, Wang J P, Wei W, et al. Effects of landscape restoration on soil water storage and water use in the Loess Plateau Region, China[J]. Forest Ecology & Management, 2010,259(7):1291-1298.
- [29] Allan R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements[M]. FAO Irrigation and Drainage paper 56. Food and Agricultural Organization of the united nations, Rome, Italy,1998.
- [30] 刘波,肖子牛,马柱国,等.中国不同干湿区蒸发皿蒸发和实际蒸发之间关系的研究[J].高原气象,2010,29(3):629-636. [Liu B, Xiao Z N, Ma Z G, et al. Relationship between pan-evaporation and actual evaporation in different humid and arid regions of China[J]. Plateau Meteorology, 2010,29(3):629-636.]
- [31] Cheng Y F, Wang G X, Xi H Y, et al. Variations of land evapotranspiration in the plain of the middle reaches of Heihe River in the recent 35 years[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007,29(3):406-412.
- [32] Yin Y H, Wu S H, Zheng D, et al. The regional differences of dry-wet change in China in recent 30 years[J]. Chinese Science Bulletin, 2005,50(15):1636-1642.