

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. Scientia Geographica Sinica, 2017, 37(2): 274-282.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2017.02.014

基于MOD16的汉江流域地表蒸散发时空特征

张静^{1,2},任志远¹

(1.陕西师范大学旅游与环境学院,陕西 西安 710119;2.陕西理工大学历史文化与旅游学院,陕西 汉中 723001)

摘要:基于MOD16遥感产品,在数据精度验证的基础上,运用GIS统计法、线性趋势法等研究了2000~2014年汉江流域蒸散发的年际和年内变化规律及不同土地覆被类型下的蒸散发特征。结果表明:① 2000~2014年,潜在蒸散发(PET)多年平均值为1 476 mm,呈东南向西北递减态势;实际蒸散发(ET)多年平均值约654 mm,ET呈东低西高,南高北低态势。不同土地覆被类型下年均PET和ET大小顺序相反。② PET年际变化率为13.63 mm/a,呈弱增加趋势;ET年际变化率为-2.3 mm/a,呈弱减少趋势,表明汉江流域水资源呈减少趋势。PET空间上呈东增西减趋势,ET呈东减西增趋势,东北部具有干旱化倾向。③ 年内PET和ET呈单峰型。PET在6月最大,ET在7月最大,二者均在12月最小。二者在4~6月差距最大,形成春旱。不同土地覆被类型下PET和ET呈单峰型,植被生长季节ET差距大,林地增长速度最快。④ PET和ET具有较强的季节性。ET季节性空间差异非常显著,在于林地的植被蒸腾作用对全年ET贡献较大。流域西部山地ET季际增加趋势明显而东部呈减少趋势,整体上冬季年际变化最明显,春季最弱。

关键词:蒸散发;MOD16;土地覆被类型;汉江流域

中图分类号:P426.2

文献标识码:A

文章编号:1000-0690(2017)02-0274-09

蒸散发(Evapotranspiration,简称ET),包括土壤蒸发和植被蒸腾,是联系大气圈、水圈和生物圈的重要纽带,Rosenberg等指出陆地表面降水量的70%会以蒸发或蒸散作用的形式返回到大气中,干旱地区该比例达到90%,可见蒸散发是陆地水平衡和水文循环的重要组成部分^[1-3]。不仅频繁的洪涝灾害、气候变化和调水工程的实施使流域内水量平衡关系发生变化;而且下垫面物理性质的差异性使大气-地表相互作用间的能量转换发生变化,会导致不同地表覆盖下能量的再分配,从而引起地表热通量和蒸散量的空间差异^[4,5]。因此,充分认识不同地表覆盖下的蒸散量及其时空变化特征,不仅可以加深对流域陆面过程的认识,而且对流域水量平衡、水资源管理与评价、洪涝特征分析具有重要的现实意义。

衡量区域蒸散发情况的指标有:地表实际蒸散发(Actual evapotranspiration,简称ET),反映直

接参与陆地水文循环的量^[6]。潜在蒸散发(Potential evapotranspiration,简称PET),反映水分充足情况下的蒸散估计值^[7],对农业灌溉管理和水资源优化配置研究提供基础参考^[8]。DET(Difference of evapotranspiration)为潜在蒸散发与实际蒸散发的差值。在蒸发的研究中,ET与PET之间的关系对于分析气候与水文相互作用关系具有非常重要的作用^[9]。已有学者分析汉江流域1961~2011年多年平均实际蒸散发呈下降趋势,主导因素是风速和日照时数^[6]。还有学者证实了汉江流域的潜在蒸散发中Hargreaves公式与Penman-Monteith公式(简称P-M公式)相关性最好^[10]。2011年基于P-M公式结合MODIS数据,美国NASA研究团队发布了全球陆地蒸散数据(MOD16)^[11]。该数据通过了全球通量塔站台的检验,数据集特征参数提供完整、时间分辨率较高且免费获取,因而在区域地表蒸散发时空分布特征监测研究方面具有一定优势^[4]。本文

收稿日期:2016-03-07;**修订日期:**2016-09-26

基金项目:国家自然科学基金项目(41371523)、教育部人文社会科学重点研究基地项目(14JJD840004)资助。[Foundation:National Natural Science Foundation of China(41371523); Project of Key Research Base for Humanities and Social Sciences of Ministry of Education (14JJD840004).]

作者简介:张静(1981-),女,副教授,博士研究生,主要从事资源环境评价与GIS研究。E-mail: zj2003y@126.com

通讯作者:任志远,教授。E-mail: renzhy@snnu.edu.cn

以MOD16数据为基础,结合汉江流域土地覆被数据,分析流域ET和PET的时空变化规律,探寻不同土地覆被类型下2种蒸散发的时空特征,旨在揭示汉江流域2种蒸散发的时空变化特征,为流域气候变化对水循环的影响以及水资源的合理配置提供科学依据。

1 研究区域

汉江全长1 570 km,流域面积 $15.9 \times 10^4 \text{ km}^2$,北依秦岭、外方山和伏牛山,南靠大巴山、荆山,西以褶皱隆起中低山为主,东以平原丘陵为主。属亚热带季风区,气候温和湿润,年降水量873 mm,水量较丰沛;但年内分配不均,5~10月径流量占全年75%左右,年际变化较大,是长江各大支流中变化最大的河流。流域水能资源丰富,水能理论蕴藏量 $1\,093 \times 10^4 \text{ kW}$,可开发容量 $614 \times 10^4 \text{ kW}$ 。汉江上游为南水北调中线工程水源地,以林地为主,中下游以种植业用地为主(图1)。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

蒸发皿实测蒸散发数据主要来自中国气象数据共享网。蒸散发数据(MOD16)来自美国蒙大拿大学MODIS数据官网,包括2000~2014年共15 a的数据,文中主要应用了月和年尺度的ET和PET数据。土地覆被数据主要是2007年的MOD12Q1产品,2种数据产品均通过MRT工具拼接转换为Albers等积投影,空间分辨率为1 km。MOD16-ET产品的算法是Mu等^[11]在P-M公式基础上改进的,算法将地表分为裸土和冠层2种组分,且将冠层分为湿润和干燥2种类型,分别根据

不同下垫面的生物物理过程计算各自的空气动力学阻抗和冠层阻抗,估算该系列产品^[12]。

2.2 研究方法

1) 平均值法:

$$\overline{ET_{ij}} = \sum_{i=2000}^{2014} ET_{ij}^i / 15 \quad (1)$$

2) 标准差法:

$$STD_{ij} = \sqrt{\frac{1}{15} \sum_{i=2000}^{2014} (ET_{ij}^i - \overline{ET_{ij}})^2} \quad (2)$$

3) 变异系数法:

$$CV = (STD_{ij} / \overline{ET_{ij}}) \times 100\% \quad (3)$$

4) 线性趋势法:

$$B_{slope} = \frac{\sum_{i=1}^n ET_i t_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ET_i \sum_{i=1}^n t_i}{\sum_{i=1}^n t_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n t_i)^2} \quad (4)$$

式中, STD_{ij} 是第*i*年ET的标准差。 $\overline{ET_{ij}}$ 是第*i*年ET的平均值,反映数据的平均状态。 B_{slope} 为线性倾向值,反映区域ET每个像元随时间变化的年际状况。 t 为年份, $n=13$ 。当 $B_{slope} > 0$ 时,表明随着时间的推移,ET呈上升趋势;反之,ET呈下降趋势。在此说明,公式中ET均可替换为PET。

3 结果与分析

3.1 MOD16数据检验

目前遥感数据反演蒸散发的精度验证有多种方法,流域水量平衡法较真实地反映地表蒸散量,但数据序列偏短^[13]。运用气象站点实测值,分别从时间和空间上验证,往往空间验证精度不高^[14],基于“面”尺度的验证,往往对气象站点数据质量要求较高^[15]。本文基于“点”尺度,依据气象站点蒸发皿实测数据与估算数据PET的相关性检验

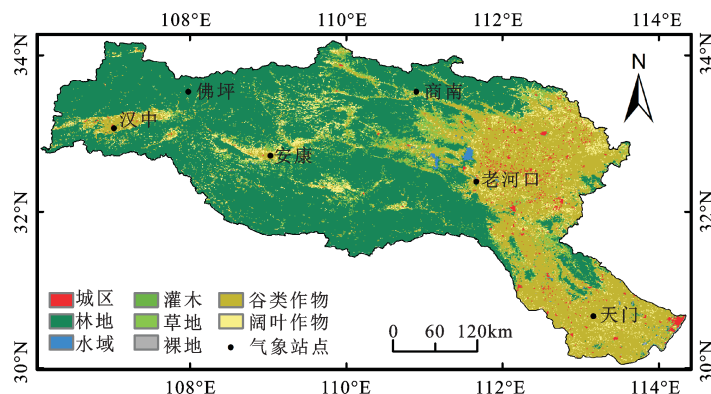


图1 汉江流域主要气象站点及土地覆被类型(2007年)

Fig.1 Meteorological stations and land cover types of the Hanjiang River Basin in 2007

MOD16蒸散数据的精度。由于各气象站点收集的蒸散发数据有大、小口径蒸发皿2种,长时间序列,数据口径一致性难满足。为了保证气象站点实测数据的精度,利用2000~2014年筛选了空间上均匀分布的6个站点日实测数据,剔除了不连续不同一口径值及异常值,通过处理及折算系数得到各站点逐年月蒸发量。然后获取6个站点缓冲半径3 km范围内MOD16数据的逐年月均值,做各个站点实测蒸发量与估算PET逐年月均值的相关性,既检验了数据在时间尺度上的相关性,又验证了数据空间上的一致性,见图2。采用Pearson相关系数法,在0.01水平上各站点蒸发皿实测蒸发量与PET呈双侧显著相关,相关系数均在0.87以上,表明MOD16PET产品与气象站点实测蒸发量在时间和空间分布上保持较高的一致性,MOD16

数据在流域内的精度满足需要,可用于地表蒸发时空分布的研究。

3.2 流域ET和PET空间分布特征

汉江流域2000~2014年多年平均PET和ET值的空间分布情况见图3。汉江流域多年平均PET空间取值范围约为1 139~1 911 mm间,呈东南向西北递减态势,这一变化与降水量的空间变化近似^[16](图3a)。汉江流域多年平均ET空间取值范围为353~1 184 mm间,呈现南高北低,周高中低态势,东北部蒸发不旺,见图3b。PET和ET空间分布规律呈现显著差异性,可能在于影响二者的主导因素存在差异性。

不同土地覆被类型下的PET和ET存在明显差异。不同土地覆被类型下多年平均PET由大到小的顺序为裸地(1 626 mm/a)>城区(1 570 mm/a)>

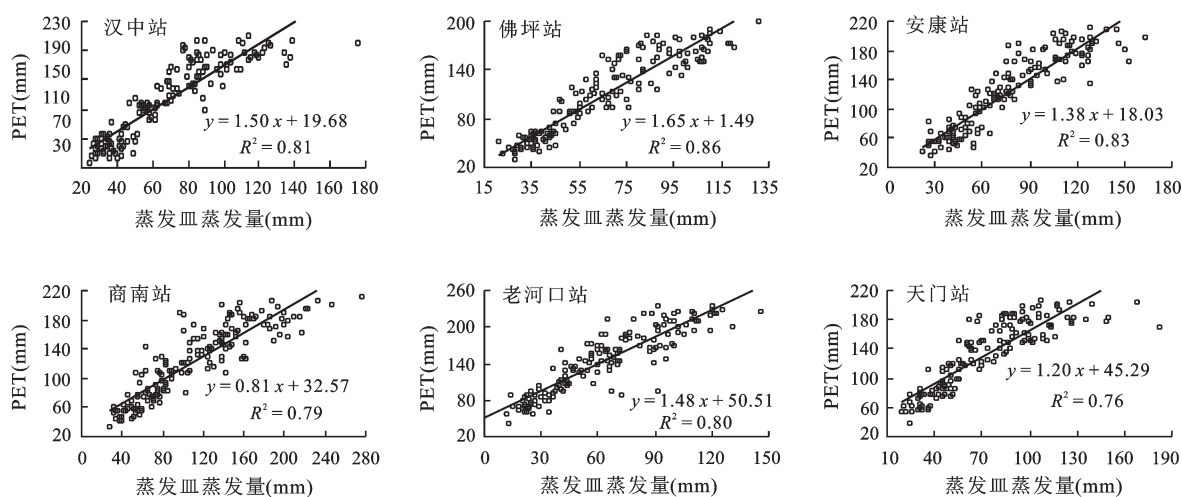


图2 MOD16 PET与气象站点实测值逐年每月的相关性

Fig.2 Relativity between monthly PET of MOD16 and evaporation of meteorological station

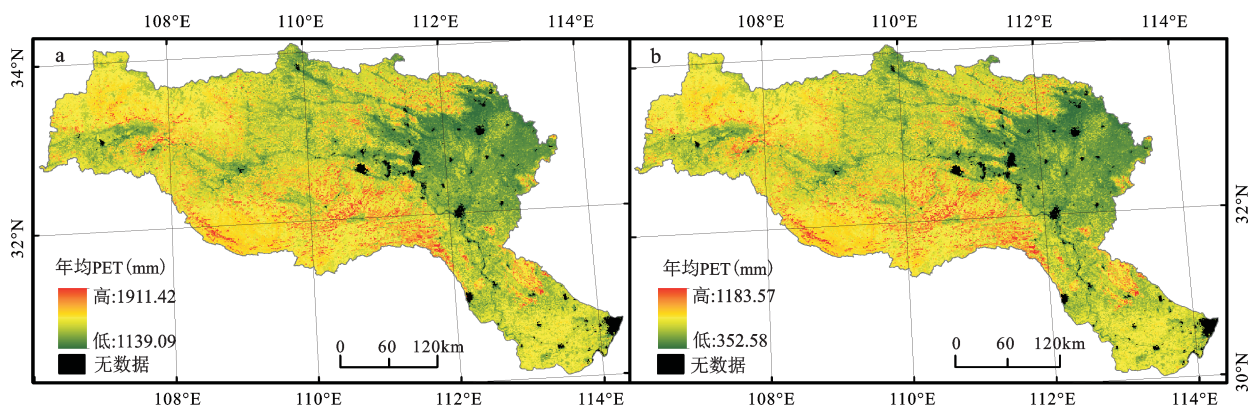


图3 汉江流域PET(a)和ET(b)多年平均值空间分布特征

Fig.3 Spatial distribution of multi-year average PET(a) and ET(b) in the Hanjiang River Basin

谷类作物(1 554 mm/a)>阔叶作物(1 520 mm/a)>灌木(1 515 mm/a)>草地(1 507 mm/a)>林地(1 430 mm/a)。而多年平均ET由大到小依次为:林地(705 mm/a)>灌木(636 mm/a)>草地(613 mm/a)>阔叶作物(592 mm/a)>谷类作物(575 mm/a)>城区(539 mm/a)>裸地(532 mm/a)。通过PET和ET对比,有植被覆盖的ET值要高些,无植被覆盖的PET值要高些,说明植被的蒸腾作用对区域蒸散发影响明显。裸地只能蒸发土壤浅层水分,城区不透水面积大,使ET较小。林灌木根系可以吸收到土壤深层的水分,阔叶作物叶面积比谷类作物叶面积大,所以林灌木ET较高,阔叶作物比谷类作物的ET高。2000~2014年间不同土地覆被类型下ET数据的离散度CV由大到小为:裸地(10.8%)>城区(9.7%)>谷类作物(7.5%)>阔叶作物(7.1%)>灌木(5.1%)>草地(4.6%)>林地(3.5%)。说明当外在条件发生变化时,不同土地覆被类型的ET变化程度不同,裸地和城区数据离散程度大且误差范围也大,而林地、灌木和草地数据离散程度小且标准误差小,主要在于有植被覆盖和无植被覆盖的ET作用机理存在差异性,林地和灌木的植物蒸腾作用明显,草地、谷类作物和阔叶作物的土壤水分对地表蒸散发贡献明显^[7]。不同土地覆被类型PET数据的离散度CV由大到小为:裸地(6.4%)>城区(6.1%)>谷类作物(5.98%)>草地(5.97%)>灌木(5.88%)>阔叶作物(5.85%)>林地(5.1%)。证实外在条件发生变化时,不同土地覆被类型下PET也发生变化,但数据离散程度小,谷类作物、草地、灌木和阔叶作物近似。DET由大到小依次为:裸地(1 094 mm/a)>城区(1 031 mm/a)>谷类作物(980 mm/a)>阔叶作物(928 mm/a)>草地(894 mm/a)>灌木(879 mm/a)>林地(725 mm/a)。表明林地和灌木对流域水源涵养具有重要意义,草地、阔叶作物和谷类作物对植物截留,提高土壤水分具有现实意义。

3.3 流域ET和PET的年际变化时空特征

汉江流域PET多年平均值为1 476 mm,最大值在2013年约1 615 mm,最小值在2003年约1 286 mm。ET多年平均值约654 mm,最大值在2003年约696 mm,最小值在2011年约595 mm。二者DET多年平均相差822 mm,最大差值在2013年为974 mm;最小差值在2003年为589 mm,见图4。流域2000年以来,PET呈弱增加趋势,ET呈弱

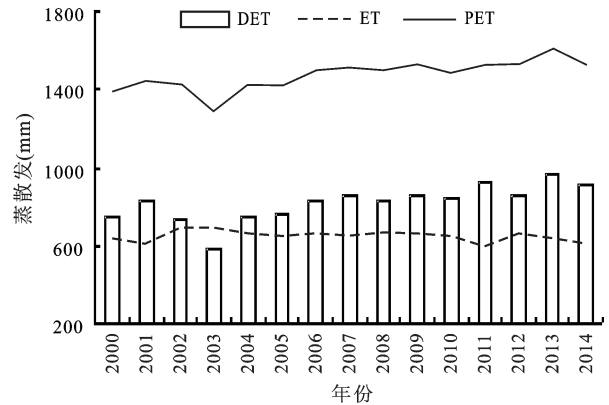


图4 汉江流域地表蒸散发的年变化

Fig.4 Annual variation of ET and PET in 2000-2014

减少趋势,PET比ET的年际变化明显,DET呈弱增加趋势,表明汉江流域干旱化倾向渐明显。

2000~2014年期间,PET空间年变化率介于-76.98~86.88 mm/a,年变化率为13.63 mm/a,见图5a。年变化率高值区处于汉江流域丘陵地区,90.92%的面积呈显著性变化。其中,年变化率大于10 mm/a的面积占79.07%。ET空间年变化率介于-30.88~24.27 mm/a,年变化率为-2.3 mm/a,见图5b。年变化率高值区主要分布在汉江流域上游中低山区,32.5%的面积呈显著性变化,其中显著减少的面积占24.9%,年变化率大于10 mm/a的面积仅占1.06%,年变化率显著减少速度大于10 mm/a的占6.54%。变化趋势空间上PET呈东北部增加、西部减少趋势;ET呈东部减少、西部增加趋势。表明流域内西部地区水分增加,东部具有干旱化倾向,尤其是东北部干旱化倾向较为严重。主要汉江流域西部以山地为主,林地面积广,水源涵养功能明显;流域东北部位于中游农业生产发达,以谷类作物为主。

3.4 流域ET和PET的年内月变化时空特征

汉江流域蒸散发年内月变化呈单峰型,具有周期性变化规律,见图6。一年当中ET最大值在7月约110 mm,最小值在12月约22 mm,从3月ET开始逐月上升,7月开始下降,11月~次年2月间变化不明显,ET约25 mm,与年内地表温度变化规律同步;PET最大值在6月约184 mm,最小值在12月约59 mm,从2月PET开始上升,6月开始下降,与年内太阳辐射变化规律同步,已有成果证实PET变化最主要的因素是太阳辐射^[14]。11月至次年2月PET约66 mm。3月以后,随着PET和ET的增

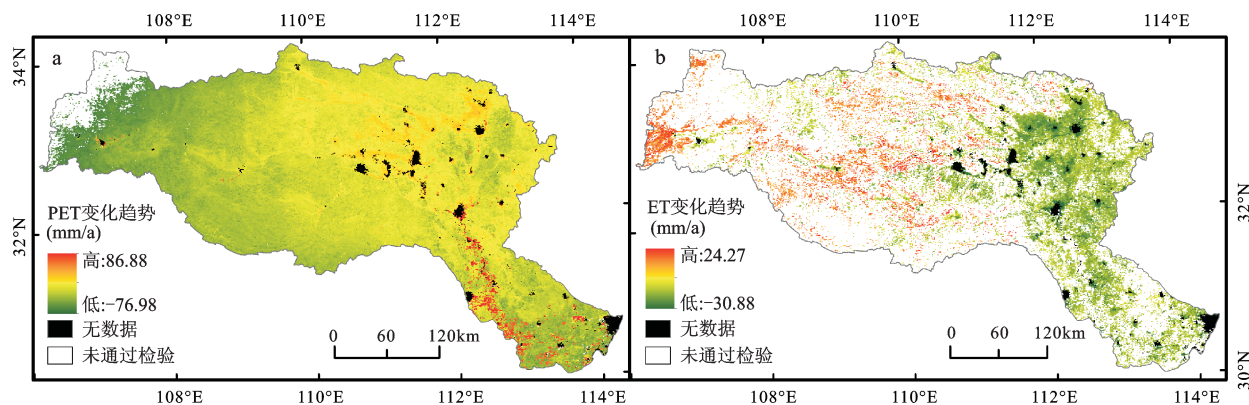


图5 2000-2014年汉江流域PET(a)和ET(b)变化趋势及显著性检验

Fig.5 Change trends and their significations of PET(a) and ET(b) in the Hanjiang River Basin in 2000-2014

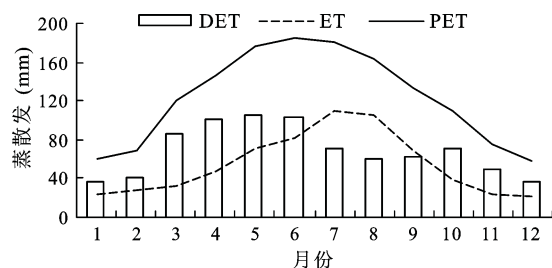


图6 汉江流域ET和PET的月变化

Fig.6 Monthly variation of ET and PET in Hanjiang River Basin

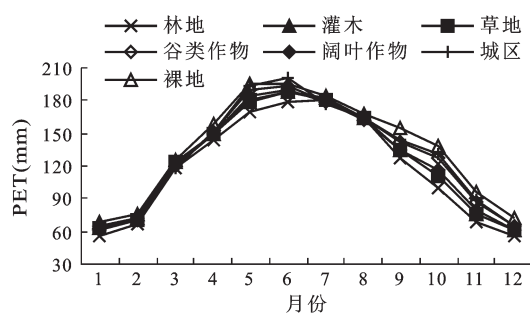


图7 汉江流域不同土地覆被类型下PET年内各月变化

Fig.7 Monthly variation of PET for different land cover type

长,DET随之逐月扩大,二者年内最大差值在5月为105 mm,最小差值在1月约36 mm,差值集中在4~6月,为汉江流域春旱时期。在9~11月间形成2次干旱,即秋旱,主要在于流域内秋季作物为谷类作物,ET较小,12月到次年2月,PET和ET均最小。

不同土地覆被类型下的ET和PET的年内月变化也呈现单峰型。不同土地覆被类型年内最大PET均在6月份,呈单峰型,见图7。裸地各月PET均高,林地各月均低,在5~6月和9~11月不同土地覆被类型下的PET差异明显,主要在于该时期分别是植被的生长期和成熟期。不同土地覆被类型下月最大ET在7月。4月以后不同土地覆被类型下的ET开始快速增加,9月开始急剧下降。其中林地上升速度最快,其余依次是灌木、草地、阔叶作物。4~7月由于不同土地覆被类型在生长期的植物蒸腾作用差异大,ET差异也显著;9月~次年3月不同土地覆被类型下ET差异不显著,见图8。主要在于汉江流域属于亚热带季风性气候,夏雨型为主,且一年两熟制。其中落叶阔叶林占总面积的51.5%,谷类作物占总面积的28.1%,常

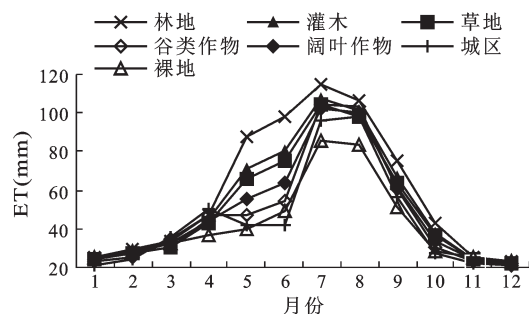


图8 汉江流域不同土地覆被类型下ET年内各月变化

Fig.8 Monthly variation of ET for different land cover type

绿针叶林占总面积的4.3%,阔叶作物占总面积的6.4%,4~7月为各类植被生长季节,雨水充足,植物繁茂,ET增加且差异显著。9月以后,农作物早已收获,树木凋零,降水稀少,ET接近且减少。

3.5 流域ET和PET的年内季变化时空特征

依据植被生长特点,划分春季(3~5月)、夏季(6~8月)、秋季(9~11月)和冬季(12~次年2月)四季,PET各季均值依次约为443 mm、528 mm、317

mm 和 188 mm, ET 各季均值依次约为 152 mm、296 mm、132 mm 和 75 mm, 二者差值 DET 的各季均值依次为 291 mm、232 mm、184 mm 和 106 mm。从季相来看, PET 和 ET 季相变化由大到小依次均是夏季>春季>秋季>冬季。一年中各季节 PET 占多年平均潜在蒸散发的比例依次为 30.0%、35.8%、21.5% 和 12.7%, 各季节平均 ET 依次分别占年内蒸散量的 23.2%、45.2%、20.2% 和 11.4%。DET 由大到小依次是春季>夏季>秋季>冬季, 证明了汉江流域四季分明, 具有春旱的特点。主要是夏季降水量大, 气温高, 植物蒸腾作用和土壤蒸发作用均较强; 秋季气温下降, 植被凋零, 植物蒸腾作用和土壤蒸发作用均下降, 直到冬季, 气温最低, 降水量最少且植物蒸腾作用最弱, 春季气温低, 土壤蒸发也不强, 但逢植物生长时节, 植物蒸腾作用强。因此, 汉江流域蒸散发最大值在夏季, 最小值在冬季, 春季降水不足而形成春旱。

ET 真实地反映了土壤-植被-大气系统中物质与能量转换和输送过程, 影响着流域内地表面降水的重新分配, 因此文中深入分析了 ET 在不同土地覆被类型下的数据离散情况, 见图 9。流域内春季数据离散度大, 其次是夏季、秋季和冬季。除了林地, 其他几种土地覆被类型均是春季数据离散度大, 且各季节数据离散度差异明显。林地在夏季数据离散度高, 秋、冬季节数据离散度相近。说明流域内 ET 空间差异性在春夏季节非常显著。根据流域内土地覆被空间特征, 中上游林地集中分布区 ET 较高, 西部 ET 高于东部, 周边高于中部。下游农用地面积广且降水量年际变化大^[6], ET 变异系数高, 未来势必加强水源涵养工程, 防止水旱灾害。

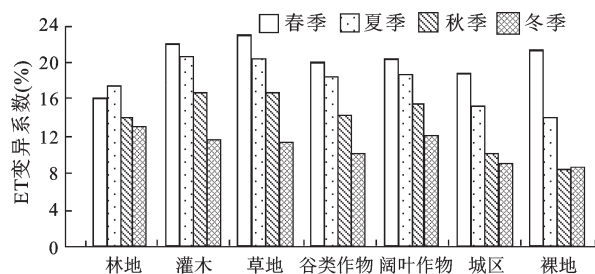


图9 不同土地覆被类型下各季节ET变异系数

Fig.9 Variation coefficient of seasonal ET for different land type

2000~2014年间夏、秋、冬三季流域西部ET逐

年增加, 东部ET逐年减少, 见图10。夏、秋和冬三季ET变化趋势的空间分布与ET年际变化趋势具有一致性。春季年变化率为 -0.039 mm/a , 占总面积的3.5%, 显著性减少, 5.2%的面积显著性增加, 主要集中在中下游东北部, 以谷类作物为主。夏季年变化率为 -0.192 mm/a , 变化范围比其他季节大, 占总面积的12.7%, 显著性减少, 14.8%的面积显著性增加, 上游明显增加, 中下游东北部明显减少。秋季年变化率为 -0.553 mm/a , 8.8%的区域显著性减少, 4.3%的区域显著性增加。冬季年变化率为 -1.677 mm/a , 87.2%的区域呈显著性减少, 仅0.007%呈显著性增加。夏季、秋季和冬季显著性减少区域主要集中在中下游东北部。整体上西部山地区ET季际增加趋势明显而东部呈减少趋势, 主要在于气温显著升高后^[18], 西部林地的植被蒸腾作用明显增强。整体上冬季变化强度最大, 主要在于暖冬的出现和降水量最少的季节。

4 讨论

汉江流域为南水北调中线工程水源地, 加强流域地表蒸散发监测, 对流域水量平衡、大气调节、调水工程、水资源利用、监测旱涝灾害具有重要意义。通过以上研究, PET比ET变化趋势平缓, 主要在于二者计算的陆面水分环境参数不同^[14]。ET更真实地反映了土壤-植被-大气参与水循环和大气调节的过程, 近年来ET呈下降趋势, 对流域调水工程、流域内农作物需水量及局部气候变化产生重要影响。流域DET呈弱增加趋势, 表明流域ET具有可提升空间。不同土地利用下林地ET最大, 表明林地对流域水源涵养具有重要意义, 加强用地优化与合理配置, 对水量年内分配不均和空间分布不合理起着重要作用, 防止干旱化的加剧。MODIS数据精度高, 监测范围广, 在研究过程中具有一定的优势, 但对比气象资料, 其时间尺度短, 有待进一步验证数据的可靠性和相关结论。此外还需进一步研究流域内气象因子与ET之间的关系, 探讨影响流域ET的主导因子, 以便加强水资源的利用与管理, 改善流域气候环境。

5 结论

1) 汉江流域多年平均PET为1 476 mm, 呈东南向西北递减态势。多年平均ET为654 mm, 呈东低西高, 南高北低态势, 表明流域西部水分充足,

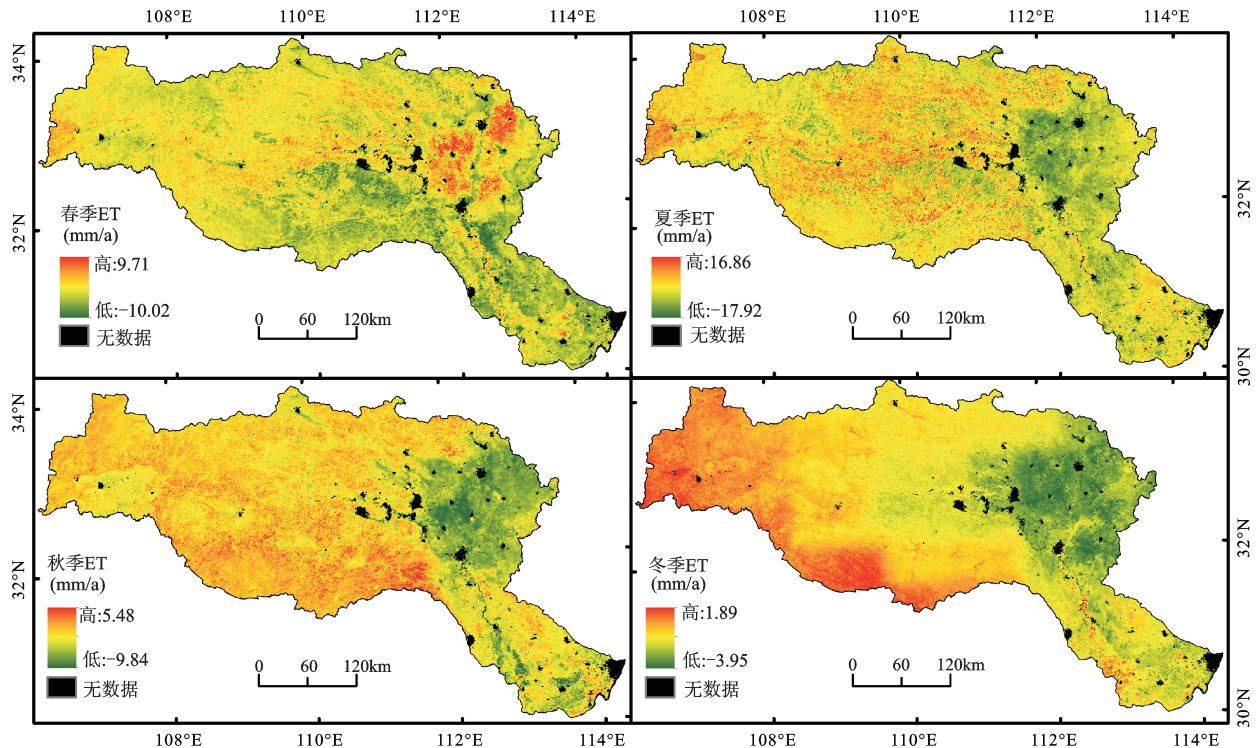


图 10 2000~2014 年汉江流域季 ET 变化趋势

Fig.10 Change trend of seasonal ET in the Hanjiang River Basin in 2000-2014

东部蒸发不旺。不同土地覆被类型下蒸散发存在差异性。PET 由大到小依次为裸地、城区、谷类作物、阔叶作物、灌木、草地、林地。ET 由大到小依次为:林地、灌木、草地、阔叶作物、谷类作物、城区和裸地,表明林地、灌木和草地对流域水源涵养具有重要意义,阔叶作物和谷类作物对植物截留,提高土壤水分具有现实意义。

2) 2000~2014 年间 PET 呈弱增加趋势,年变化率为 13.63 mm/a,ET 呈弱减少趋势,年变化率为 -2.3 mm/a,汉江流域出现干旱少水现象。空间变化趋势上,PET 年变化率介于 -76.98~86.88 mm/a,呈东增西减趋势,年变化率高值区处于汉江流域丘陵地区;ET 年变化率介于 -30.88~24.27 mm/a,呈东减西增趋势,年变化率高值区主要分布在汉江流域上游中低山区,表明流域内西部地区水分增加,东部具有干旱化倾向,尤其是东北部干旱化倾向较为严重。

3) 流域 PET 和 ET 均呈单峰型。ET 最大值在 7 月,最小值在 12 月,与年内地表温度变化规律同步;PET 最大值在 6 月,最小值在 12 月,与年内太阳辐射变化规律同步。DET 最大差值在 5 月为 105 mm,最小差值在 1 月约 36 mm,4~6 月间 DET 较

大,为流域春旱时期。不同土地覆被类型下 PET 和 ET 呈单峰型,最大 PET 均在 6 月,最大 ET 均在 7 月。根据植被生长的季节性,不同土地覆被类型下 ET 差距大,林地增长速度最快,而不同土地覆被下 PET 近似。

4) 流域 PET 和 ET 具有很强的季节性,呈春旱的特点。PET 和 ET 各季均值由大到小依次均是夏季>春季>秋季>冬季,二者差值由大到小依次是春季>夏季>秋季>冬季。不同土地覆被类型下各季平均 ET 的空间离散度,由大到小依次为春季、夏季、秋季和冬季。林地在夏季数据离散度高,其他几种土地覆被类型均是春季数据离散度高,说明流域内 ET 空间差异性非常显著,主要在春、夏季节,林地的植被蒸腾作用对全年地表蒸散发贡献较大。2000~2014 年间流域西部山区 ET 季际增加趋势明显而东部呈减少,四季中冬季变化强度最大。

参考文献(References):

- [1] Priestley C H B, Taylor R J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters[J]. Monthly Weather Review, 1972, 100: 81-92.

- [2] Rosenberg N J, Blad B L, Verma S B. Microclimate the biological environment of plants[M]. New York: John Wiley&Sons, 1983.
- [3] 高彦春, 龙笛. 遥感蒸散发模型研究进展[J]. 遥感学报, 2008, 12(3): 515-528. [Gao Yanchun, Long Di. Progress in models for evapotranspiration estimation using remotely sensed data. Journal of Remote Sensing, 2008, 12(3): 515-528.]
- [4] 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. Geographical Research, 2013, 32(4): 617-627.]
- [5] 何延波, Su Z, L Jia, 等. 遥感数据支持下不同地表覆盖的区域蒸散[J]. 应用生态学报, 2007, 18(2): 288-296. [He Yanbo, Su Z, L Jia et al. Regional evapotranspiration of different land covers based on remote sensing. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(2): 288-296.]
- [6] 朱非林, 王卫光, 孙一萌, 等. 汉江流域实际蒸散发的时空演变规律及成因分析[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2013, 41(4): 300-306. [Zhu Feilin, Wang Weiguang, Sun Yimeng et al. Spatial and temporal variations of actual evapotranspiration and their causes in hanjiang river basin. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2013, 41(4): 300-306.]
- [7] 彭世彰, 徐俊增. 参考作物蒸发蒸腾量计算方法的应用比较[J]. 灌溉排水学报, 2004, 23(6): 5-9. [Peng Shizhang, Xu Junzeng. Comparison of reference crop evapotranspiration computing methods. Journal of Irrigation and Drainage, 2004, 23(6): 5-9.]
- [8] 刘昌明, 张丹. 中国地表潜在蒸散发敏感性的时空变化特征分析[J]. 地理学报, 2011, 66(5): 579-588. [Liu Changming, Zhang Dan. Temporal and spatial change analysis of the sensitivity of potential evapotranspiration to meteorological influencing factors in China. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(5): 579-588.]
- [9] 范伶俐, 张光亚. 广东实际蒸散发与潜在蒸散发的关系研究[J]. 广东海洋大学学报, 2013, 33(3): 71-77. [Fan Lingli, Zhang Guangya. Relationship between Actual Evapotranspiration and Potential Evapotranspiration in Guangdong. Journal of Guangdong Ocean University, 2013, 33(3): 71-77.]
- [10] 张晓琳, 熊立华, 林琳, 等. 五种潜在蒸散发公式在汉江流域的应用[J]. 干旱区地理, 2012, 35(2): 229-237. [Zhang Xiaolin, Xiong Lihua, Lin Lin et al. Application of five potential evapotranspiration equations in hanjiang basin. Arid Land Geography, 2012, 35(2): 229-237.]
- [11] Mu Qiaozhen, Heinsch F A, Zhao Maosheng et al. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data[J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 111: 519-536.
- [12] 张荣华, 杜君平, 孙睿. 区域蒸散发遥感估算方法及验证综述[J]. 地球科学进展, 2012, 27(12): 1295-1307. [Zhang Ronghua, Du Junping, Sun Rui. Review of estimation and validation of regional evapotranspiration based on remote sensing. Advances in Earth Science, 2012, 27(12): 1295-1307.]
- [13] 位贺杰, 张艳芳, 朱妮, 等. 基于MOD16数据的渭河流域地表实际蒸散发时空特征[J]. 中国沙漠, 2015, 35(2): 414-422. [Wei Hejie, Zhang Yanfang, Zhu Ni et al. Spatial and temporal characteristic of ET in the weihe river basin based on Mod16 data. Journal of Desert Research, 2015, 35(2): 414-422.]
- [14] 何慧娟, 卓静, 董金芳, 等. 基于MOD16监测陕西省地表蒸散发变化[J]. 干旱区地理, 2015, 38(5): 960-967. [He Huijuan, Zhuo Jing, Dong Jinfang et al. Surveying variations of evapotranspiration in Shaanxi province using Mod16 products. Arid Land Geography, 2015, 38(5): 960-967.]
- [15] 喻元, 白建军, 王建博, 等. 基于MOD16的关中地区实际蒸散发时空特征分析[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(3): 245-253. [Yu Yuan, Bai Jianjun, Wang Jianbo et al. Analysis on spatio-temporal characteristics of ET based on Mod16 in Guanzhong Region. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(3): 245-253.]
- [16] 李景刚, 黄诗峰. 基于TRMM数据的汉江流域1998年-2010年降水变化特征[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(6): 48-53. [Li Jinggang, Huang Shifeng. Variation characteristics analysis of the precipitation from 1998 to 2010 in hanjiang basin based on the TRMM data. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2011, 9(6): 48-53.]
- [17] 何明轩. 三峡库区土地利用/覆被与地表蒸散发动态变化及二者关系研究[D]. 重庆: 西南大学, 2013. [He Mingxuan. Land use/cover and evapotranspiration dynamic change and their relationship in three gorges reservoir area Chongqing: Master's Thesis of Southwest University, 2013.]
- [18] 李雨, 王雪, 张国学. 1956-2013年汉江流域降雨和气温变化特性分析[J]. 水资源研究, 2015, 4(4): 345-352. [Li Yu, Wang Xue, Zhang Guoxue. The characteristic analysis of rainfall and temperature between 1956 and 2013 in the hanjiang river basin. Journal of Water Resources Research, 2015, 4(4): 345-352.]

Spatiotemporal Characteristics of Evapotranspiration Based on MOD16 in the Hanjiang River Basin

Zhang Jing^{1,2}, Ren Zhiyuan¹

(1. College of Tourism and Environment, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, Shaanxi, China;

2. School of History and Tourism, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, Shaanxi, China)

Abstract: Based on MOD16 products from remote sensing and its precision verification, this article analyzed the spatiotemporal characteristics of interannual and annual evapotranspiration and variation characteristics of evapotranspiration under different land cover types from 2000 to 2014, using statistical analysis of GIS, linear trend method and variation coefficient method et al. The results showed as follows: 1) In 2000-2014, the 15-year averaged PET was 1 476 mm and the spatial distribution of PET was decreasing trend from southeast to northwest while the 15-year averaged ET was 654 mm and the spatial distribution of ET in the west and south was higher than in the east and north. The averaged PET and ET are in the opposite order under different land cover types. 2) The interannual variability of PET was 13.63 mm/a and showed a weak increasing trend while ET was -2.3 mm/a and showed a weak decreasing trend. The gap of PET and ET showed an increasing trend, which indicated that water resources in the Hanjiang River Basin was decreasing. Spatial variation trend of PET was “the increasing in the East and the decreasing in the West” while ET was “the decreasing in the East and the increasing in the West”. There was the tendency of drought in the northeast. 3) Interannual PET and ET was a single peak. PET was the largest in June and ET was the largest in July. Both of them were the smallest in December. The maximum gap between PET and ET was the spring drought from April to June. Monthly averages of PET and ET showed a single peak type under different land cover types. The difference of monthly ET for different land cover types was obvious in the vegetation growing season when monthly ET in forestland was the fastest growth rate. 4) Seasonal averages of PET and ET had obvious differences among the four seasons. Spatial distribution of seasonal ET was very significant which greatly attributed to the transpiration of forestland because it was greatest contribution to the annual ET. In 2000-2014, spatial change of seasonal ET was significantly increasing in mountainous western region of the Hanjiang River Basin, while decreasing in eastern region. On the whole, the annual change of seasonal ET was the most obvious in winter, and the weakest in spring.

Key words: evapotranspiration; MOD16; land cover type; the Hanjiang River Basin