

基于 MOD16 的北洛河流域蒸散发 空间格局演变研究

赫晓慧², 梁冰洁¹, 郭恒亮², 田智慧²

(1. 郑州大学 水利与环境学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州大学 郑州智慧城市研究院, 河南 郑州 450001)

摘要: [目的] 探究北洛河流域地表实际蒸散发年际和年内的时空变化特征, 为该区域的生态基准与生态需水量研究、退耕还林效果研究提供理论依据。[方法] 基于北洛河流域 2000—2014 年 MOD16 遥感数据、气象数据、水文数据和 2011 年土地利用数据, 采用流域水量平衡法、均值法、标准差法和线性趋势法进行蒸散发(ET)时空变化特征分析。[结果] 流域年蒸散量在波动中缓慢上升, 波动范围为 395.4~517.4 mm/a, 15 a ET 均值为 446.74 mm/a, 年内蒸散量呈单峰型分布, 季节性变化特征明显, 地表蒸散主要集中在 5—9 月, 最高值出现在 8 月; 经与北洛河流域的实测降水空间插值结果比较, MOD16-ET 估算结果的相对误差均值为 12.04%, 相关系数达到 0.81; 流域内上游至下游的 ET 剖面线波动明显, 呈不规则的“波动曲线”形态; 流域内 ET 值年际变化空间分布特征明显, 中游和上游地区以增加趋势为主, 下游以减少趋势为主。[结论] 近 15 a 来北洛河流域蒸散发整体呈现增大趋势, 主要驱动因素为人类活动, 尤其是退耕还林和水土保持等工程的实施。

关键词: MOD16; 北洛河流域; 地表蒸散发; 空间格局演变

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2017)01-0177-06

中图分类号: P426.2

文献参数: 赫晓慧, 梁冰洁, 郭恒亮, 等. 基于 MOD16 的北洛河流域蒸散发空间格局演变研究[J]. 水土保持通报, 2017, 37(1): 177-182. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2017.01.032; He Xiaohui, Liang Bingjie, Guo Hengliang, et al. Analysis of spatial and temporal variation of evapotranspiration based on MOD16 in Beiluo River basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(1): 177-182. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2017.01.032

Analysis of Spatial and Temporal Variation of Evapotranspiration Based on MOD16 in Beiluo River Basin

HE Xiaohui², LIANG Bingjie¹, GUO Hengliang², TIAN Zhihui²

(1. School of Water Conservancy and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou, He'nan 450001, China;

2. Zhengzhou Wisdom City Institute, Zhengzhou University, Zhengzhou, He'nan 450001, China)

Abstract: [Objective] The objective of this paper is to explore the spatial and temporal characteristics of evapotranspiration(ET) in the Beiluo River basin, and provide theoretical basis for the study of ecological benchmark and ecological water requirement and the effect of returning farmland to forest. [Methods] Based on MOD16 remote sensing image data, meteorological and hydrological data during 2000—2014, and the land use data in 2011, we used river basin water balance method, method of mean value, the standard deviation method and the linear trend method to analysis the spatial and temporal variation characteristics of evaporation. [Results] The mean annual evapotranspiration of Beiluo River basin increased slowly with values ranged from 395.4 to 517.4 mm, and average evapotranspiration during the past 15 years was 446.74 mm. The monthly variation of evapotranspiration within the year show a unimodal pattern, it was mainly concentrated in the period from May to September, and its peak value occurred in August. The average relative

收稿日期: 2016-04-18

修回日期: 2016-07-01

资助项目: 国家自然科学基金项目“水沙变化驱动下黄河下游河道横向演变对湿地自然植被的影响研究”(41101095)

第一作者: 赫晓慧(1978—), 女(汉族), 河南省商丘市人, 博士, 副教授, 主要从事环境遥感与水文生态、智慧城市研究。E-mail: hexh@zzu.edu.cn.

通讯作者: 郭恒亮(1971—), 男(汉族), 河南省商丘市人, 硕士, 副教授, 主要从事区域环境与城市规划研究。E-mail: guohengliang@zzu.edu.cn.

error was 12.04% between spatial interpolation results based on measured rainfall and estimates based on MOD16-ET, the correlation coefficient was 0.81. The profile line of ET changed greatly from upstream to downstream of the Beiluo River basin, which presented the irregular “wave curves”. The spatial variation of annual ET was obvious in the basin. The ET showed an increasing trend in the midstream and upstream, while it showed a decreasing trend in the downstream. [Conclusion] In the recent 15 years, the evapotranspiration in Beiluo River basin showed an increasing trend, and human activity was the main driving force, especially the implementation of grain for green project and soil and water conservation project.

Keywords: MOD16; Beiluo River basin; ET; spatial-temporal variation

地表实际蒸散发(ET)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]。充分了解蒸散发(ET)的时空格局变化过程,准确测算流域地表 ET,对于定量认识生态需水规律、旱情监测、科学灌溉以及生态保护与恢复具有重要意义^[3]。

近年来,国内的诸多学者对流域蒸散发进行了研究,如田辉等^[4]利用气象、水文及遥感数据,说明黑河流域的蒸散发与主要水资源消耗区有一定关系。然而,由于学者们对遥感数据有高时间分辨率、易获取等的需求,很多人把目光转向了 MODIS 数据,如曹永强^[5]等利用 MODIS 对海河流域蒸散发的时空演变规律进行了研究;周峰等^[6]利用 MODIS 对伊河流域地表蒸散发与植被指数和地表温度的关系进行了研究。但是他们对于蒸散发的研究多集中在北方地区,对于西北地区的黄土高原沟壑区的研究则相对较少。北洛河流域地形地貌复杂多变,植被类型多样,在黄土高原具有极佳的代表性,加之近些年在气候暖干化和人类活动影响下^[7],流域生态环境变化迅速,流域蒸散发的情况复杂。

本文拟基于 MOD16-ET 数据,在利用流域水量平衡法进行精度验证基础上,对北洛河流域地表 ET 的时空及其变化特征进行探讨,以期揭示北洛河流域地表 ET 变化规律,为认识流域生态需水规律及流域生态保护提供参考,同时为加强流域水资源管理提供依据^[8]。

1 研究区概况

北洛河流域,全长 680 km,是陕西省纵跨纬度最大的河流,流域面积 $2.69 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。北洛河属黄河流域,为渭河一级支流。发源于陕西省榆林市定边县,干流流经榆林、延安、渭南 3 地市,地理坐标为东经 $107^\circ 34' 45''$ — $110^\circ 01' 37''$,北纬 $34^\circ 57' 13''$ — $37^\circ 17' 03''$,多年平均(1956—2000 年)年降雨量 535.5 mm,属大陆性季风气候,由南向北、自东向西递减。降雨年内分布不均,集中在 7—9 月,且多暴雨,破坏性大,水土流失极为严重。自产水资源量 $1.045 \times 10^9 \text{ m}^3$,属于资源型缺水地区。

北洛河流域地形地貌复杂多变,植被类型多样,在黄土高原具有极佳的代表性。其上中游位于黄土丘陵沟壑区和破碎残源沟壑区,占 71%,属于封山育林(草)的重点区域,自 1999 年以来,区域植被覆盖率大幅上升;中游包括子午岭林区;下游属于黄土阶地区,农业生产发达。由于流域的复杂性,流域内人类活动区域差异大,水土流失严重,流域的蒸散量直接影响该区水资源可利用总量与区域生态提升效果。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源及处理

数据来源具体见表 1。MOD16 产品是美国 NASA 研究团队在 Penman-Monteith 公式的基础上进行改进后估算得到的。

表 1 研究所用数据资料

数据名称	数据信息	数据用途	数据来源(下载时间 2015—2016)
Terra/MODIS ET	产品号,h26 v05,h27 v05 月产品,1 km 分辨率 年产品,1 km 分辨率 产品时段,2000—2014 年	获取地表实际蒸散量	http://www.nts.gov.umt.edu/project/modis16 (美国蒙大拿大学森林学院工作组)
水文数据	北洛河流域状头站点实测径流量	MOD16-ET 数据检验	http://www.mwr.gov.cn/zwzc/hygb/zghlnsgb/ (中国河流泥沙公报)
气象数据	流域内及周边站点降水实测资料	MOD16-ET 数据检验	http://cdc.cma.gov.cn/home.do (中国气象科学数据共享网)
GDBD	全球流域数据库	裁取流域边界	http://www.cgcr.nies.go.jp/db/gdbd_index_c.html (日本国立环境研究所)

使用 MRT 软件将采用 HDF 格式的 MODIS16 产品转换为 WGS-1984 经纬度坐标系下的 Geo-Tiff 格式,并进行轨道拼接、投影转换、重采样等操作;利用 ArcGIS 去除 MODIS 16 数据中的无效值后,裁取研究区。

2.2 研究方法

2.2.1 MOD16 产品精度检验 为了保证遥感监测蒸散量的准确性,首先要对流域 MOD16 产品地表蒸散量的有效性进行检验。目前遥感数据反演蒸发的精度验证多采用流域水量平衡法,年尺度的流域水量平衡中,土壤蓄水量所占比例较小,因此可假定流域年降雨量等于流域年蒸发量(ET)与年径流量之和。

$$P_i = ET_i + D_i \quad (1)$$

式中: P_i ——流域某年年降雨量(mm); ET_i ——流域某年年蒸发量(mm); D_i ——流域某年年径流量(mm)。

本研究采用北洛河流域范围内 3 个变量的平均深度。年降水平均深度的求取,主要采用流域内及其周边各气象站点的实测值进行克里金插值,然后求出流域内年降水栅格数据的均值;年径流深度为流域下游水文站点状头的实测年径流量与其控制面积的比值;蒸散量平均深度为流域内 MOD16-ET 数据的栅格均值。

2.2.2 蒸散发时空演变的评估指标 研究采用均值法、标准差法和线性趋势法模拟北洛河流域每个栅格单元 2000—2014 年蒸散的空间差异、稳定性和变化趋势^[9-12]。

$$\overline{ET}_{ij} = \sum_{t=2000}^{2014} ET_{ij}^t / 15 \quad (2)$$

$$S_{ij} = \sqrt{\frac{1}{15} \sum_{t=2000}^{2014} (ET_{ij}^t - \overline{ET}_{ij})^2} \quad (3)$$

$$K = \left[\sum_{t=2000}^{2014} t ET_{ij}^t - \frac{1}{15} \left(\sum_{t=2000}^{2014} t \right) \left(\sum_{t=2000}^{2014} ET_{ij}^t \right) \right] / \left[\sum_{t=2000}^{2014} t^2 - \frac{1}{15} \left(\sum_{t=2000}^{2014} t \right)^2 \right] \quad (4)$$

式中: t ——年份(2000, ..., 2014); ET_{ij} ——第 i 行, j 列的像素年或月均值; \overline{ET}_{ij} ——第 t 年(或年内各月)第 i 行, j 列的像素值; S_{ij} ——第 i 行, j 列的像素标准差值,其值越大,该像元蒸散量在 15 a 间波动越明显,反之越稳定; K ——趋势线斜率, $k > 0$ 表明相应像元蒸散量在 15 a 内或年内各季节变化趋势是增加的,反之呈减少趋势。

3 结果与分析

3.1 MOD16-ET 数据精度验证

由北洛河流域空间插值结果与遥感估算蒸散发结果(表 2),可见插值降水量与蒸散和径流之和基本吻合,二者相关系数为 0.81,达到显著相关。北洛河流域差值降水量与 MODIS16-ET 估算精度不高,可能是因为近年来,流域上游丘陵沟壑区实时水土保持工程使蓄水量增加,导致流域的水量平衡式出现一定的偏差,尤其是在降水丰年偏差更大,如 2003, 2011 年,这一偏差与遥感反演无关。因此 MODIS16-ET 数据精度总体上满足研究区要求,可用于北洛河流域地表蒸散量的时空与变化特征研究。

表 2 2000—2013 年北洛河流域水文变量统计及 MOD16-ET 数据精度评价

年份	空间插值 降水量/mm	实测径流/ mm	MOD16-ET/ mm	绝对误差/ mm	相对误差/ %
2000	444.70	22.97	409.2	12.53	2.8
2001	499.62	27.00	395.39	77.23	15.46
2002	509.79	25.11	461.09	23.59	4.6
2003	741.74	48.71	517.43	175.6	23.67
2004	421.75	24.21	480.12	82.58	19.58
2005	444.88	21.45	438.95	15.52	3.49
2006	477.03	17.39	452.75	6.89	1.44
2007	574.38	22.69	447.83	103.86	18.08
2008	473.55	17.59	441.09	14.87	3.14
2009	562.95	23.86	464.38	80.46	13.27
2010	550.57	29.61	445.13	75.83	13.77
2011	652.53	22.52	466.51	163.5	25.06
2012	497.14	30.52	417.00	49.71	10.00
2013	546.00	24.23	444.64	77.13	14.13

3.2 北洛河流域 2000—2014 年 ET 时间变化特征

3.2.1 ET 年变化特征 由图 1 可以看出,2000—2014 年北洛河流域地表蒸散量(ET)年际波动不大,年均值的变化范围为 395.4~517.4 mm,15 a ET 平均值为 446.74 mm,各年份 ET 均值呈现一定的波动,其中明显超出多年平均值的年份为 2002—2004, 2012, 2014 年,其中 2003 年蒸散量最大,超出平均值 70.69 mm,相对变化率达到了 15.8%;明显低于多年平均值的年份为 2000, 2001, 2009, 2011 年,其中 2001 年蒸散量最小,比平均值少 51.35 mm,相对变化率达到了 -11.5%。2003 年北洛河流域降雨量较多,7—10 月较常年偏多,大幅超出多年平均降水量,较多的降雨带来较为充足的水分,良好的供水条件有利于蒸散发,此年 ET 比其余年份更接近 ET_0 。(潜在

蒸散量),其值也较大。2002,2012,2014年的降水也较为充足,其蒸散量也较高;2004年的插值降水量较计算降水量少,这可能是由插值方法本身的误差引起的。而2000年降水量的蒸散量也较少,2001,2009,2011年插值的降水量较计算降水量多,是因为空间插值本身就会有很大误差。总体来看,北洛河流域ET呈增加趋势,降水量对蒸散量有着很大的影响。

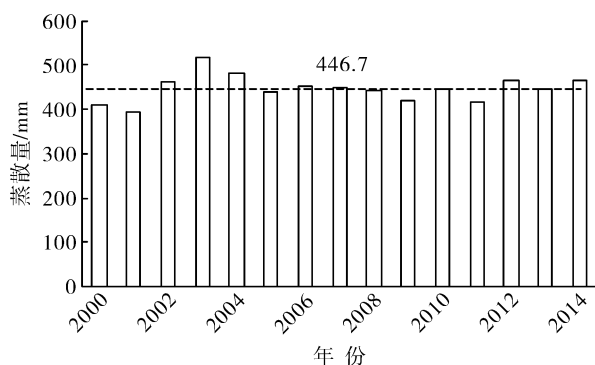


图1 北洛河流域2000—2014年地表蒸散量(不含水体和城镇)

3.2.2 ET月变化特征 北洛河流域年内地表实际蒸散量分布不均匀,整体呈现单峰型分布,11月至次年4月,ET变动较平缓,约为8 mm,5—8月ET处于快速上升期,8月达到最高,为73 mm;9,10月ET迅速下降(图2)。

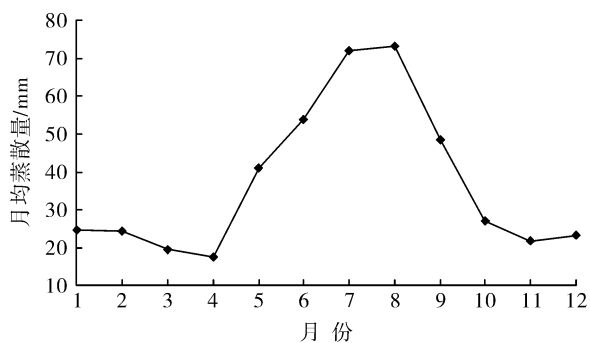


图2 北洛河流域不同月份多年平均地表蒸散量

受流域内海拔、降雨、温度、空气湿度、太阳辐射等多种因素的综合影响^[13],北洛河流域四季地表蒸散量差异显著。春季(3—5月)地表ET为39.01~195.96 mm,随着气温的回升,地表蒸散量逐渐增加。夏季(6—8月)是北洛河流域的雨季,气温高、太阳辐射大,使得地表蒸散量显著增加,ET值处于59.73~509.94 mm;秋季(9—11月)流域ET值处于69.31~160.71 mm,流域整体蒸散量较低,差值也较小,约90 mm,因为此季北洛河流域受大陆冷高压气团的影响,降雨量减少,温度降低,蒸散量也随之降低;冬季(12,1,2月)流域ET值处于38.58~82.77 mm,各

地值均较小,受温度影响显著。总的来说,一年中的ET值,夏季>秋季>春季>冬季,多年均值分别占年蒸散量的44.67%,21.87%,17.41%,16.05%。

3.3 北洛河流域2000—2014年ET空间变异特征

北洛河流域多年蒸散平均值在248.27~925.91 mm,具有较强的空间分布规律,空间差异显著,呈现出中间高两头低的变化趋势。该特征与流域地表覆盖的地带性变化基本一致。具体表现为,葫芦河流域、沮河流域与刘家河至南城里河段由于水量较为充足,多年平均蒸散量最高,达到900 mm/a左右;家河以上河段大都是沟壑或裸露的岩石,因此该区的年均蒸散量最小,仅为260 mm/a左右;南城里至状头河段及状头以下河段属于关中平原的农耕区,年均蒸散量大致在500 mm/a左右。

北洛河流域ET值自上游向下游先升高后降低,表现为不规则的“波动曲线”形态(图3)。位于中游的葫芦河流域、沮河流域及周水流域等子午岭林区,多年平均ET值较高;下游关中平原地区的渭南市中部等农业灌溉区ET值也较高;上游的榆林、延安局部的高原丘陵区及渭南局部的旱作农业区多年平均ET值则较低。

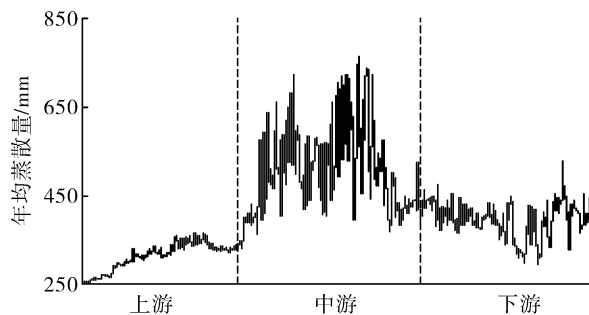


图3 北洛河流域地表蒸散剖面

不同土地利用类型由于其本身的生理生态特征及其所处区域降水量的差异,其平均蒸散量^[13]的分布特征表现出不同的变化特点。虽然原ET数据的生产计算过程中需要反照率、叶面积指数、地表覆盖类型等遥感数据和辐射等气象数据^[14],但是为了进一步分析各种土地利用类型的蒸散量特征,分别提取了各种土地覆盖类型年均蒸散量统计特征。由图4可以看出,流域内年均蒸散量与土地利用类型密切相关,不同土地覆盖类型的年均蒸散量存在着较大的差异,林地的年均蒸散量值最高,达到549.98 mm/a,大大超过其他土地利用类型的蒸散量;未利用土地的年均ET值最低,仅为383.55 mm/a。总的来说,各土地覆盖类型的年均蒸散量的排列顺序是:林地>草地>水域>建筑用地>耕地>未利用土地。

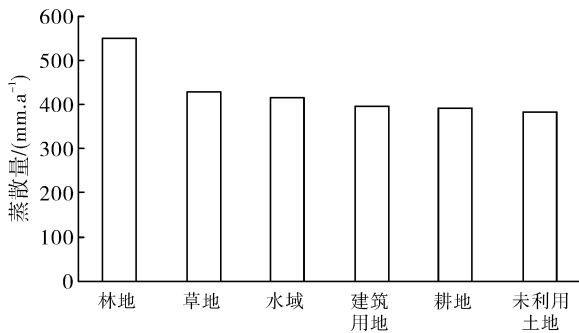


图 4 不同土地利用类型的年平均蒸散量

3.4 北洛河流域 2000—2014 年 ET 变化特征

采用标准差法来分析北洛河流域 2000—2014 年 ET 的稳定性,去除极端值后将其等间隔划分为 3 个区间^[15],北洛河流域 ET 整体呈现低波动居多,中度波动较少,高波动最少,稳定性地域较多的特征。ET 呈低波动的区域面积约为 60.2%,集中分布在流域的上游和中下游地区,并呈现出沿流域主干道呈带状分布的特点;ET 呈中度波动的面积为 35.64%,主要分布在北洛河中游的子午岭林区植被较好的地区及下游的农耕区一带,呈片状分布;ET 呈高波动的区域面积很小,不足 5%,零散的分布在北洛河的中游及下游地区。

采用线性趋势法分析北洛河流域 15 a ET 变化趋势(图 5),跟据 K 值范围定义明显减少($K < -10$)、轻微减少($-10 \leq K < -3$)、基本不变($-3 \leq K \leq 3$)、轻微增加($3 < K < 10$)、显著增加($K \geq 10$)等变化区间^[16];进一步使用线性趋势法分析流域 15 a 内各季节 ET 的变化趋势,探究流域各季节 ET 分量的变化特征。

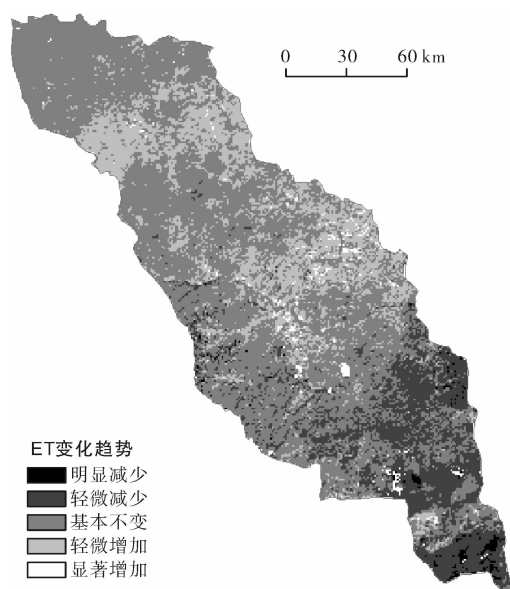


图 5 2000—2014 年北洛河流域 ET 变化趋势

北洛河流域年 ET 减少的面积约占 17.20%,轻微减少占绝大部分,主要分布在北洛河的中下游地区,集中于铜川、渭南一带。北洛河流域年 ET 基本不变的区域面积约占 60.27%,主要分布于北洛河流域北部的高原沟壑区,集中在延安市的西北部与铜川市的西北部。流域年 ET 增加的面积约占 22.53%,以轻微增加为主,主要集中在北洛河流域的东部;ET 显著增加的区域主要集中在渭南市的中东部地区,地属关中平原农作区,这一带 ET 增长趋势明显的原因是由于人为因素的影响使得该地地表水较为充足^[17]。整体上,北洛河流域春季、夏季 ET 变化趋势的空间分布与年 ET 较一致,秋季、冬季 ET 变化趋势的空间分布较一致,冬季 ET 变化趋势较小,与年 ET 和其他季节的 ET 变化趋势的空间分布存在一定的差异。年 ET 的变化趋势主要受夏季影响,其次是春季、秋季,冬季对年 ET 变化趋势的影响较弱。

4 结论

(1) 基于 MOD16 产品的估算降水量与气象站点的空间插值对比结果的相关系数为 0.81,相对误差均值为 12.04%,较高的一致性说明,MOD16 产品的精度一定程度上能够满足北洛河流域地表 ET 时空变化分析的要求。

(2) 从北洛河流域 ET 年际时序看,2002—2004,2012,2014 年为蒸散“大年”;从年内分布规律看,ET 呈单峰型分布格局,集中在 5—9 月,季节变化较明显;从流域内 ET 的空间分布看,多年 ET 均值表现为:子午岭等土石林区>高原沟壑区>关中平原农作区>丘陵沟壑区;从四季 ET 空间分布看,夏、秋季 ET 与年 ET 空间分布基本一致,春、冬季 ET 与年 ET 空间分布有差异,差异较大的主要体现在关中平原农作区。

(3) 从 15 a ET 变化特征看,北洛河上游 ET 值以增加趋势为主,显示了退耕还林的成果,中游 ET 值以基本不变和轻微增加为主,下游 ET 值则以降低趋势为主;从 15 a 各季节 ET 变化特征看,年 ET 的变化趋势主要受夏季主导,冬季对年 ET 变化趋势影响较弱。

(4) 流域内不同土地利用类型由于其物理特征等的不同,蒸散量也存在着较大的差异^[18]。在年尺度上,年 ET 均值最高的是林地,达到 925.91 mm,草地、水域、耕地次之,建筑用地最低,仅为 248.27 mm。月尺度上的大小顺序与年尺度上的基本一致,但由于人类活动^[19-20]、气象条件^[21-22]、农作物特性等因素综合作用的影响,不同土地类型 ET 的空间分布特征也不尽相同。

[参 考 文 献]

- [1] 丛振涛. 蒸发原理与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [2] Chahine M T. The hydrological cycle and its influence on climate[J]. Nature, 1992, 359(6394): 373-380.
- [3] 赵军, 刘春雨, 潘竟虎, 等. 基于 MODIS 数据的甘南草原区域蒸散发量时空格局分析[J]. 资源科学, 2011, 33(2): 341-346.
- [4] 田辉, 文军, 马耀明, 等. 夏季黑河流域蒸散发量卫星遥感估算研究[J]. 水科学进展, 2009, 20(1): 18-24.
- [5] 曹永强, 张亭亭, 徐丹, 等. 海河流域蒸散发时空演变规律分析[J]. 资源科学, 2014, 36(7): 1489-1500.
- [6] 周峰, 王文, 王晓刚. 基于植被指数—地表温度特征空间的伊河流域蒸散发量估算[J]. 地理与地理信息科学, 2013, 29(2): 116-120.
- [7] 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.
- [8] 莫兴国, 刘苏峡, 林忠辉, 等. 华北平原蒸散和 GPP 格局及其对气候波动的响应[J]. 地理学报, 2011, 66(5): 589-598.
- [9] Masutomi Y, Inui Y, Takahashi K, et al. Development of highly accurate global polygonal drainage basin data. [J]. Hydrological Processes, 2009, 23(4): 572-584.
- [10] Stow D, Daeschner S, Hope A, et al. Variability of the Seasonally Integrated Normalized Difference Vegetation Index Across the North Slope of Alaska in the 1990s[J]. International Journal of Remote Sensing, 2003, 24(5): 1111-1117.
- [11] 马明国, 王建, 王雪梅, 等. 基于遥感的植被年际变化及其与气候关系研究进展[J]. 遥感学报, 2006, 10(3): 421-431.
- [12] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 1996.
- [13] 张亚丽, 王万同. 遥感估算伊洛河流域地表蒸散的空间尺度转换[J]. 测绘学报, 2013, 42(6): 906-912.
- [14] 何慧娟, 卓静, 李红梅, 等. 基于 MOD16 产品的陕西关中地区干旱时空分布特征[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(1): 236-241.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 范建忠, 李登科, 高茂盛, 等. 基于 MOD16 的陕西省蒸散量时空分布特征[J]. 生态环境学报, 2014(9): 1536-1543.
- [18] 曾丽红, 宋开山, 张柏, 等. 松嫩平原不同地表覆盖蒸散特征的遥感研究[J]. 农业工程学报, 2010, 26(9): 233-242.
- [19] 左德鹏, 徐宗学, 隋彩虹, 等. 气候变化和人类活动对渭河流域径流的影响[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2013, 49(Z1): 115-123.
- [20] 张蓉珍, 张幸. 渭河流域陕西段近 50 年生态环境演变[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(2): 37-42.
- [21] 左德鹏, 徐宗学, 程磊, 等. 渭河流域潜在蒸散量时空变化及其突变特征[J]. 资源科学, 2011, 33(5): 975-982.
- [22] 占车生, 乔晨, 徐宗学, 等. 渭河流域近 50 年来气候变化趋势及突变分析[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2012, 48(4): 399-405.

(上接第 176 页)

[参 考 文 献]

- [1] 郑峰. 海南省年土地 2000 需求结构预测及土地宏观开发战略研究[J]. 资源科学, 1994, 16(1): 20-28.
- [2] 陈国建, 刁承泰, 黄明星, 等. 重庆市区城市建设用地预测研究[J]. 长江流域资源与环境, 2002, 11(5): 404-408.
- [3] 孙秀峰, 刁承泰, 何丹. 我国城市人口、建设用地规模预测[J]. 现人文城市研究, 2005, 12(10): 18-51.
- [4] 朱明仓, 杨韬. 城镇建设用地需求预测与配置研究[J]. 资源开发与市场, 2007, 23(1): 10-12.
- [5] 高凯, 雷磊. 土地利用规划中建设用地需求量预测模型研究: 以葫芦岛市为例[J]. 社会发展, 2010, 12(6): 64-65.
- [6] 唐晶, 周勇. 基于灰色系统理论的城镇建设用地预测模型的研究: 以湖北潜江市为例[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(24): 10607-10609.
- [7] 王希营, 付梅臣, 刘宗强. 土地利用规划中建设用地需求量预测的两种模型比较: 以东方市为例[J]. 资源与产业, 2009, 11(5): 87-91.
- [8] 朱希刚. 土地利用总体规划中建设用地需求量预测模型研究: 以克拉玛依市为例[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2010.
- [9] 闫闪闪, 王卫伟, 余迪毅. 基于灰色系统的湖北黄石市建设用地预测[J]. 农业与技术, 2012, 32(5): 166-168.
- [10] 张晓瑞, 方创琳, 王振波, 等. 基于 RBF 神经网络的城镇建成区面积预测研究: 兼于 BP 神经网络和线性回归对比分析[J]. 长江流域资源与环境, 2013, 22(6): 691-697.
- [11] 钟路, 饶文碧, 邹承明. 人工神经网络及其融合应用技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [12] 郭杰, 欧名豪, 刘琼, 等. 基于 BP 神经网络的南通市建设用地需求预测[J]. 资源科学, 2009, 31(8): 1355-1361.