

# 基于 MOD16 的关中地区实际蒸散发时空特征分析

喻元, 白建军, 王建博, 位贺杰

(陕西师范大学旅游与环境学院, 陕西 西安 710119)

**摘要:** 基于新型 MOD16 遥感数据集, 在产品数据精度验证的基础上, 利用 GIS 与 RS 技术统计分析关中地区 2000—2012 年间实际蒸散发(ET)时空演变特征及不同土地利用类型蒸散差异。结果表明: (1) MOD16-ET 在关中地区数据精度良好, 验证相对误差和相关系数分别为 10.38% 和 0.69; (2) 关中地区多年 ET 均值为 520.05 mm·a<sup>-1</sup>, 空间分布大致呈西南-东北递减的三级阶梯格局, 四季 ET 空间分布与多年平均情况基本一致。(3) ET 空间分布受地表覆盖类型影响显著, 各地类蒸散强度排序依次为林地(623.67 mm·a<sup>-1</sup>) > 草地(504.51 mm·a<sup>-1</sup>) > 园地(460.86 mm·a<sup>-1</sup>) > 农田(448.89 mm·a<sup>-1</sup>) > 裸地(408.77 mm·a<sup>-1</sup>); (4) 关中地区 ET 年际变化趋势以 0.87 mm·a<sup>-1</sup> 的速率增加, 空间分布呈东部减小西部增加的趋势, 其中春、夏季变化区域面积比例较大且以增加趋势为主, 秋、冬季节绝大部分地区 ET 年际变化不甚明显。关中地区年内各月 ET 大致呈先升后降的变化趋势, 且蒸散量主要集中于夏季。

**关键词:** 实际蒸散发量; 时空变化; MOD16; 土地利用类型; 关中地区

**中图分类号:** S161.4      **文献标志码:** A

## Analysis on spatio-temporal characteristics of ET based on MOD16 in Guanzhong Region

YU Yuan, BAI Jian-jun, WANG Jian-bo, WEI He-jie

(College of Tourism and Environment, Shaanxi Normal University, Xi'an, 710119, China)

**Abstract:** Based on the new MOD16 remote sensing data sets and the precision validation, statistically analyzed the spatio-temporal evolving characteristics and the difference of evapotranspiration (ET) by various land using types in Guanzhong region during 2000—2012 with support of GIS and RS technology. The results showed that: (1) MOD16-ET data has a good precision in Guanzhong region, the validated relative error and correlation coefficient were 10.38% and 0.69, respectively; (2) The average multi-years ET in Guanzhong Region was 520.05 mm·a<sup>-1</sup>, the spatial distribution was showed the three step pattern as approximately decreasing from southwest to northeast. The ET spatial distribution in four seasons was the basic consistent with the multi-year average situation. (3) The ET spatial distribution had a significant effect by the land cover types, the sequence of ET intensity for each land cover type is forest (623.67 mm·a<sup>-1</sup>) > grassland (504.51 mm·a<sup>-1</sup>) > garden (460.86 mm·a<sup>-1</sup>) > farmland (448.89 mm·a<sup>-1</sup>) > bare land (408.77 mm·a<sup>-1</sup>); (4) The annual variation trend of ET in Guanzhong Region was increased at 0.87 mm·a<sup>-1</sup>, the spatial distribution was showed a tendency of decreasing in east and increasing in west, among them, in spring and summer seasons had a rather greater proportion for changing areas, while in autumn and winter seasons, most of Guanzhong Region has no obvious ET variation. The monthly ET roughly showed a change trend of increasing first then decreasing, also the annual ET was mainly concentrated in summer season.

**Keywords:** ET; spatio-temporal change; MOD16; land using type; Guanzhong Region

蒸散发 (evapotranspiration, ET) 包括土壤表面的蒸发和植物冠层的蒸腾, 是水平衡、水循环中最为重要的过程之一, 同时也是区域能量收支的重要组成

部分<sup>[1]</sup>。陆地上大约 62% 的降水都会以自然蒸散发的形式回归到大气中, 而在干旱区这个比例可以达到 90%<sup>[2-4]</sup>, 因此合理精确地估算蒸散发对于合

收稿日期: 2014-06-17

基金项目: 国家自然科学基金(41171310)

作者简介: 喻元(1989—), 男, 湖北随州人, 硕士研究生, 研究方向为 GIS 与遥感应用。E-mail: yuyuan\_100@163.com。

通信作者: 白建军(1969—), 男, 陕西澄城人, 博士, 教授, 主要从事 GIS 理论与应用、农业干旱遥感研究。E-mail: bj@snnu.edu.cn。

理利用水资源及维持区域生态环境平衡具有重要意义,然而受气候、地形、土壤水等诸多因子影响,ET 成为水文循环中最难准确估算的分项之一<sup>[5]</sup>。

传统的 ET 测算多使用蒸渗仪、波文比-能量平衡观测系统、涡动相关仪、大孔径闪烁仪等基于“点”尺度的仪器观测,而在较大空间尺度内陆面特征和水热传输往往具有非均匀性,因而这种观测或模拟方法难以适应较大区域范围内的实时观测。遥感技术能够对地表辐射、植被状况等进行大面积同步观测,从而方便快捷地为 ET 的反演估算提供地表能量信息等各种下垫面特征参数<sup>[6]</sup>。自 20 世纪 70 年代中期至今,陆续发展了基于不同原理的遥感蒸散发模型,如基于能量平衡原理的 SEBAL<sup>[7]</sup>、SEBS<sup>[8]</sup>模型;基于统计经验的 SEBI 模型<sup>[9]</sup>;基于 P-M 公式的 VITT 模型等<sup>[10]</sup>。而卫星数据中 MODIS 作为新一代资源卫星传感器,其数据和产品被广泛应用于地表蒸散发的监测研究<sup>[11-13]</sup>。2011 年美国 NASA 研究团队基于 P-M 公式结合 MODIS 数据在 ET 的反演算法上取得重大成果,并发布了全球陆地蒸散发数据(MOD16)<sup>[14-15]</sup>。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<sup>[16]</sup>。

关中地区是我国重要的商品粮产区,同时也是水资源相对匮乏区,近年来,国内外学者也相继对该地区的水分蒸散进行了研究,刘闻等<sup>[17]</sup>依据 11 个气象站点的气象资料结合 FAO P-M 公式分析了渭河流域关中段 1955—2012 年的潜在蒸散发时空变化特征;曹红霞等<sup>[18]</sup>根据关中地区 30 个气象站点数据研究了参考作物蒸发蒸腾量的年际年内变化及成因,梅星等<sup>[19-20]</sup>利用关中地区 7 个站点的气象资料基于 CRAE 模型计算分析了关中地区的年际蒸散发变化特征及影响因素,但该地区现有蒸散发研究大多基于离散气象站点资料在“点”尺度上的研究<sup>[21]</sup>,且受计算模型的限制,研究多集中于潜在蒸散发方面<sup>[22]</sup>,因而缺乏对整个关中地区“面”域尺度上实际蒸散发时空特征更加精细化的认识。本文基于 1 km 分辨率 MOD16-ET 产品数据,在对区域数据精度验证的基础上,统计分析了关中地区 ET 时空变化特征及不同土地利用类型的蒸散发差异,以期揭示关中地区地表实际蒸散量的时空变化规律,为关中地区旱涝成因及水文生态保护提供依据,同时为该地区发展农业节水灌溉,实现水资源的高效利用提供参考。

## 1 研究区概况

关中地区亦称关中平原<sup>[23-24]</sup>,位于陕西省中部,西起宝鸡,东至潼关,南界秦岭,北接渭河北山,东西长约 300 km,南北宽 30~80 km,西窄东宽,平均海拔 520 m,总面积 5.55 万 km<sup>2</sup>,号称“八百里秦川”,包括西安、宝鸡、咸阳、渭南、铜川五市及杨凌区,约占全省土地面积的 19%。该地区地貌类型主要为渭河平原,此外还包括一部分秦岭山地和黄土高原丘陵沟壑区,农田、林地比例分别为 60.79%、33.61%,地势南北高、中东部低(图 1a);关中地区属于暖温带半湿润季风气候区,年均气温 11℃~13℃,年均降雨量 500~700 mm,人均水资源只有 380 m<sup>3</sup>,是西北地区水资源较为匮乏的地区。

## 2 数据源及分析方法

### 2.1 数据来源与预处理

主要数据为 2000—2012 年 MOD16-ET,辅助数据包括关中地区及周边 2000—2012 年 28 个气象站点降雨、蒸发等气象数据以及该地区的土地利用数据,数据资料详细信息如表 1。利用 NASA 官网提供的 MODIS 专业转投影工具 MRT,将原始 MOD16 的 SIN 投影 HDF 数据集统一转成 WGS-1984 经纬度坐标下的 GeoTiff 格式图像文件,并进行轨道镶嵌、重采样等操作,最终将坐标统一为 Albert 等积投影系统。根据下载网站提供的数据使用说明,对数据进行异常值剔除和真实值还原。利用 ENVI5.0 软件对 MOD16 数据进行矢量裁剪得到研究各年、月 ET,同时根据土地利用分类图制作不同土地利用类型的感兴趣 ROI,掩膜裁剪不同时间序列下的 ET 数据,使用 Arcgis10.0 软件进行统计分析处理。

### 2.2 分析方法

借鉴植被变化监测方法<sup>[25-26]</sup>,本文采用像元尺度上的时空序列分析法测算研究区相关参数的时间和空间变化特征,分别选取标准差法和趋势线斜率分析关中地区 ET 在栅格单元(1 km×1 km)上 2000—2012 年月的波动情况和变化趋势规律,计算公式为:

$$Std_{ij} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (ET_{ij}^t - \overline{ET}_{ij})^2} \quad (1)$$

式中, $Std_{ij}$  代表图像中第  $i$  行,第  $j$  列像元的标准差值; $\overline{ET}_{ij}$  代表图像中第  $i$  行第  $j$  列在该时间段内的均值; $t$  表示时间序列,该方法可以反映某一像元偏离均值的波动水平,该值越大表示时间序列值波动越强烈,反之则越稳定。

$$Slope_{ij} = \frac{n \sum_{t=1}^n t \overline{ET}_{ij}^t - \sum_{t=1}^n t \sum_{i=1}^n \overline{ET}_{ij}^t}{n \sum_{t=1}^n t^2 - [\sum_{t=1}^n t]^2} \quad (2)$$

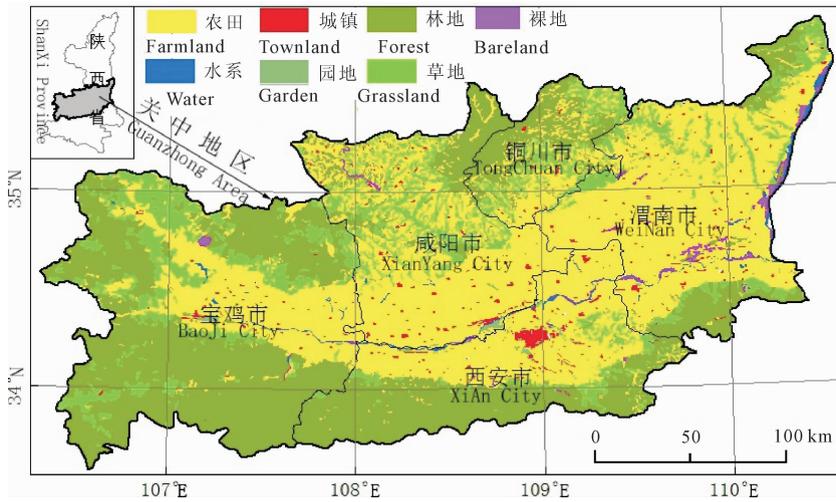
式中,其它参数意义同上, $Slope_{ij}$  代表某像元的趋势线斜率,是该像元在 13 a 的均值 ET 用一元线性回归模拟出的一个总的变化趋势,回归方程通过了置信度水平 95% 的显著性检验, $Slope > 0$  表示该像元在研究的时间段内趋势是增加的,反之则是减少。

### 3 结果与分析

#### 3.1 MOD16 - ET 数据精度验证

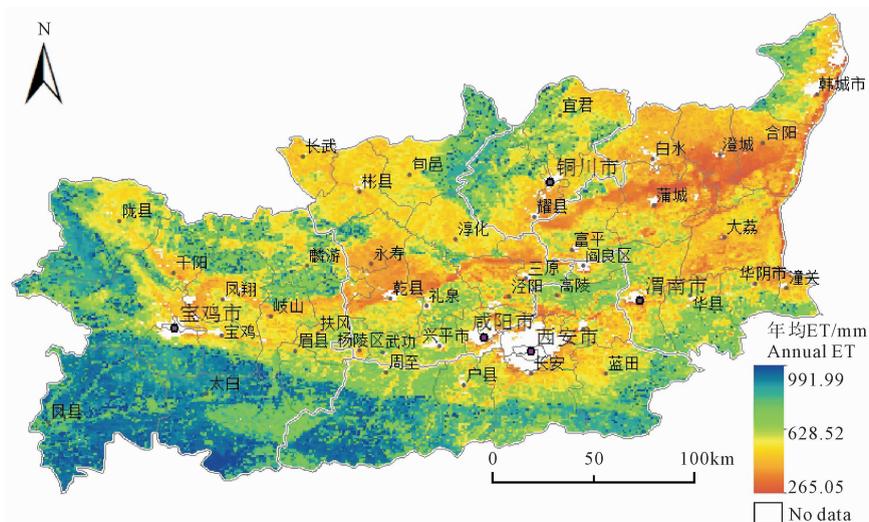
为保证 MOD16 产品在该地区 ET 时空监测的准确性,本文采用关中地区及周边 28 个气象站点的小

型蒸发皿数据分别在“点”尺度和“面”尺度上对 MOD16 数据进行精度验证(表 2)。利用 2000—2010 年的日值数据剔除异常值后汇总处理得到多年各站点的年、月均值蒸发量,因蒸发皿蒸发条件与天然水体不同,根据各个站点的实际地理环境,分别设置不同的折算系数对蒸发皿数据进行校正。“点”尺度验证剔除位于城市范围内的无效站点后提取各气象站点周边半径 3 km 范围内的 MOD16 数据均值,再与气象站点的校正蒸发皿数据做误差分析,结果如表 2;“面”尺度上验证先对所有站点年内各月蒸发皿数据利用克里金插值得到与 MOD16 像元大小一致的研究区栅格蒸发数据,再利用公式(3)计算图层相关系数,结果如图 2。



(a) 关中地区土地利用分类图(2005 年)

(a) Classification map of land utilization in Guanzhong Region



(b) 关中地区多年均值 ET 空间分布特征

(b) The spatial distribution feature of multi-year average ET in Guanzhong Region

图 1 关中地区土地利用分类图(a)与 ET 多年平均值空间分布(b)

Fig.1 Classification map of land utilization (a) and spatial distribution of multi-year average ET (b) in Guanzhong Region

表 1 研究所用数据资料详细信息

Table 1 The detail data and information for research

数据名称 Data name	主要特点 Main features	用途 Purpose	数据来源 Data source
MODIS ET	产品时段:2000—2012 年 Products time slot:2000—2012 空间分辨率:1 km Spatial resolution:1 km	获取研究区地表实际蒸散量 To obtain the actual ET of land surface	美国蒙大拿大学森林学院工作组 ( <a href="http://www.nts.gov.umt.edu/project/mod16">http://www.nts.gov.umt.edu/project/mod16</a> )
MCD12Q1 土地利用数据 Land use data	数据时间:2005 Data time:2005 空间分辨率:500 m Spatial resolution:500 m 分类方法:IGBP Classification method:IGBP	获取地表土地利用类型 To obtain the Land cover types	美国 NASA LP DAAC 陆地数据档案中心 ( <a href="https://lpdaac.usgs.gov/products/modis_products_table">https://lpdaac.usgs.gov/products/modis_products_table</a> )
气象数据 Meteorological data	关中地区及周边 28 个气象站点实测 蒸发皿、降雨数据 The measured data of rainfall and evaporation	MOD16 - ET 数据精度检验及原因分析 Accuracy test and reason analysis	中国气象数据共享服务网 ( <a href="http://cdc.cma.gov.cn/home.do">http://cdc.cma.gov.cn/home.do</a> )
全国矢量数据 The vector administrative data	全国省市区矢量行政区划数据 The national provincial and county administrative division data vector	获取研究区各级边界 To obtain study area's boundaries	陕西省测绘与地理信息中心 Bureau of surveying and mapping

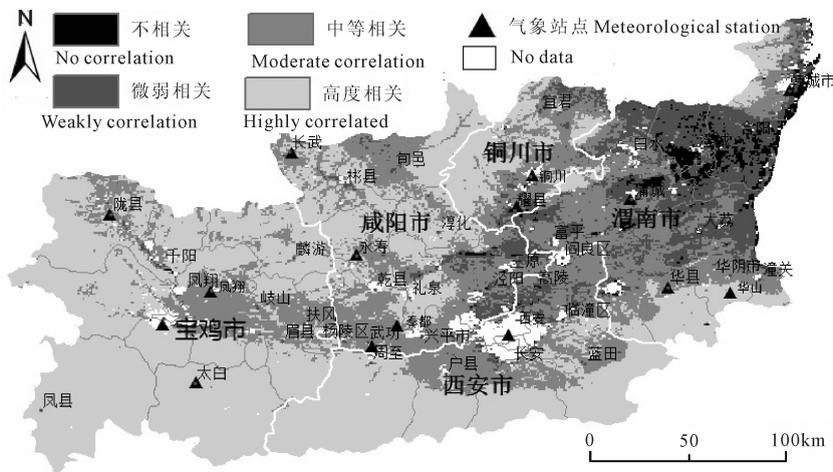


图 2 MOD16 数据精度验证相关性分布

Fig.2 The correlation distribution for precision verification of MID16 data

表 2 MOD16 数据站点精度检验

Table 2 Accuracy test for data sites of MOD16

台站名称 Site name	校正蒸发皿 Evaporating dish data /(mm·a <sup>-1</sup> )	MOD16 - ET /(mm·a <sup>-1</sup> )	绝对误差 Absolute error /(mm·a <sup>-1</sup> )	相对误差 Relative error /%
长武 Changwu	542.20	493.64	48.56	8.96
陇县 Longxian	523.88	488.82	35.06	6.69
凤翔 Fengxiang	561.64	466.02	95.62	17.03
太白 Taibai	567.40	473.40	94.00	16.57
武功 Wugong	516.80	426.99	89.81	17.38
华山 Huashan	481.08	476.17	4.91	1.02
秦都 Qindu	592.96	632.70	-39.74	-6.70
华县 Huaxian	535.92	489.30	46.62	8.70

$$r_{ij} = \frac{\sum_{t=1}^{12} (ET_{ij}^t - \overline{ET_{ij}})(EAP_{ij}^t - \overline{EAP_{ij}})}{\sqrt{\sum_{t=1}^{12} (ET_{ij}^t - \overline{ET_{ij}})^2 \sum_{t=1}^{12} (EAP_{ij}^t - \overline{EAP_{ij}})^2}} \quad (3)$$

式中,  $r_{ij}$  代表图像中第  $i$  行, 第  $j$  列像元的像元相关系数;  $ET_{ij}^t$  意义同公式(1);  $EAP_{ij}^t$  代表插值得到的蒸发皿栅格数据中第  $i$  行, 第  $j$  列在第  $t$  月的蒸发值;  $r$  值范围位于  $-1$  至  $1$  之间,  $r$  绝对值越接近  $1$ , 说明二者相关性越高, 吻合效果越好。

从站点数据精度检验可以看出, 校正蒸发皿数据除秦都站外均比 MOD16 数据值大, 与实际情况较为相符, 年 ET 绝对误差均值为  $56.79$  mm, 相对误差均值为  $10.38\%$ , 表明 MOD16 数据在关中地区与校

正后实测蒸发数据较为吻合。分析相关系数分布图发现,整个研究区相关系数处于 $-0.24 \sim 0.98$ 之间,区域均值为 $0.69$ ,通过了 $0.01$ 水平上的显著性检验,表明ET数据与地面实测蒸发皿数据相关性水平较高。根据数理统计中对相关性的有关界定以及显著性检验结果,进一步对相关系数验证分级统计: $r \leq 0.3$ 不相关, $0.3 < r \leq 0.5$ 微弱相关, $0.5 < r \leq 0.7$ 中等相关, $r > 0.7$ 高度相关,高度相关与中度相关分别通过了 $0.01$ 和 $0.05$ 水平上的显著性检验,二者之和占区域总面积的 $86.85\%$ ,其中高度相关比例为 $55.34\%$ ,表明MOD16产品在该区域数据验证精度良好,能较好地代表关中地区的蒸散发分布情况,微弱相关与不相关比例分别为 $11.08\%$ 、 $2.07\%$ ,主要分布于渭南市东北部以及泾阳县、高陵县等区域,反映出这些区域ET与蒸发皿一致性欠佳,可能与局部地区的异常气候条件有关。从整体上来看,MOD16数据在研究区内的精度满足要求,可以用于地表蒸散发的时空分析研究。

### 3.2 关中地区多年ET年均值时空特征

关中地区2000—2012年逐年ET及相对变化率统计结果如图3,可以看出,13 a间关中地区年均ET值波动范围处于 $457.20 \sim 571.88 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 之间,多年平均蒸散量为 $520.05 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。整个关中区域年际波动明显,高于多年平均水平的年份有2003—2008年、2012年,其它年份则低于多年平均ET,其中尤以2001年和2003年波动最为剧烈,分别低于和超出多年ET均值 $62.85 \text{ mm}$ 和 $51.83 \text{ mm}$ ,相对变化率也分别达到了 $-12.09\%$ 和 $9.97\%$ 。分析气象数据及相关资料发现,2001年,陕西关中地区出现了严重的春夏连旱,年均降雨量仅为 $537.15 \text{ mm}$ ,低于多年平均降雨量 $21.35\%$ <sup>[27]</sup>,较少的降水量导致地表水分严重亏缺,从而使地表蒸散量在也呈现较低水平。而2003年关中地区年降雨量达 $953.65 \text{ mm}$ ,比多年平均降雨量高出 $28.28\%$ ,充足的水分供应为植被和土壤提供了良好的蒸腾及蒸发条件。

从空间分布来看(图1b),整体上关中地区ET分布大致呈现西南高、东北低、中部居中的三级阶梯格局;从地形上看南部秦岭山地蒸散量较高,低值蒸散区域则主要分布于关中盆地、渭北台塬以及渭南大部分地区,其中又以渭南北部、乾县、永寿、岐山等地较为突出,呈现带状低值蒸散区域。宝鸡峡、泾惠渠、渭惠渠、沔惠渠等各大灌区的蒸散量也较高,表明区域灌溉等农业生产会间接影响蒸散发的大小和空间分布。从各地(市)空间统计来看(图4),各地(市)多年ET均值与整体相差不大,由大到小依次

为宝鸡( $592.51 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ ) > 西安( $561.41 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ ) > 铜川( $504.81 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ ) > 咸阳( $467.35 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ ) > 渭南( $421.93 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ )。对比土地利用分类图发现ET的空间分布明显受地表覆盖类型的影响,宝鸡、西安等林地比例较高的地区蒸散量也较高,而农用地和城镇较为集中的区域蒸散量则较低。

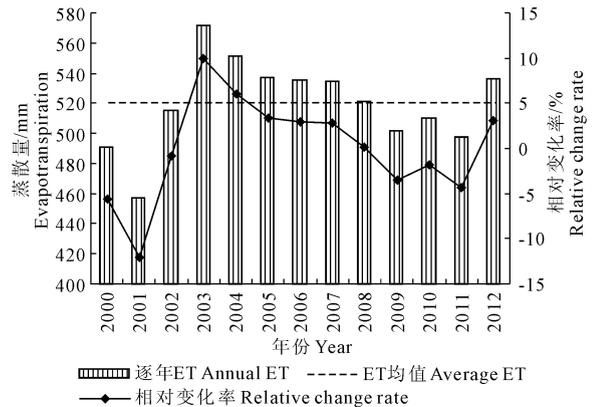


图3 关中地区蒸散量年际变化

Fig.3 Annual variation of ET in Guanzhong Region

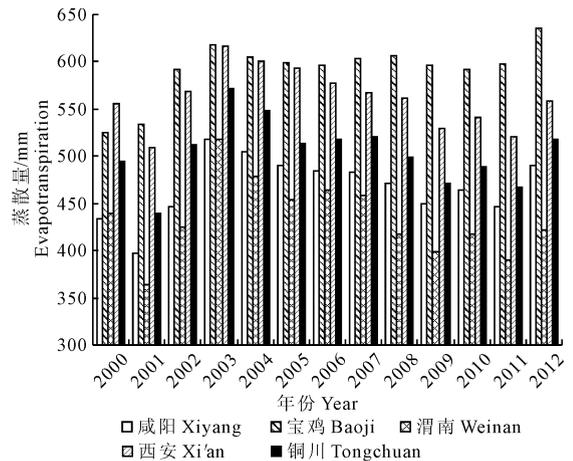


图4 各地(市)多年平均ET统计

Fig.4 The statistics of multi-year average ET in each city

为更加精确分析土地利用类型对ET空间分布的影响,统计分析关中地区各土地利用类型的多年ET均值,得到如图5的统计结果(城市用地和水域在MOD16数据中为极值未参与统计),图中误差线为正负一个标准差。从统计图中可以看出不同地类年ET均值差异显著,由大到小依次为林地( $623.67 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ ) > 草地( $504.51 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ ) > 园地( $460.86 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ ) > 农田( $448.89 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ ) > 裸地( $408.77 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ )。究其原因,一方面是因为不同的地表覆盖类型有其特定的生理生态特性,林地聚落组成复杂,层次结构明显,能量转换和物质循环最为旺盛,因而蒸散耗水量也较高;草地类型层次单一,植株矮

小水分蒸散量低于林地;园地和农田均为人工景观,园地因种植要求植株间距较大且经过人工修剪后枝条减少,使得依赖叶面蒸发的植被水分蒸散减少;农田中农作物因生长周期较短,一年中部分时期无作物植被覆盖,因而年 ET 值也较低;裸地地表基本无植被覆盖,因而大多较为干燥,可供蒸散水分较少。另一方面各土地利用类型所处区域的降水、温度等气候条件也有所不同。关中地区林地大多分布于秦岭山脉,该区域降雨量较多( $600 \sim 1\,200 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ ),水汽充足,同时林地的枯枝落叶层能够涵养较多水分,使其得到持续良好的水分供应;园地和农田大部分位于关中盆地,该地区降雨量相对较少( $550 \sim 750 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ ),可供蒸散量也较少。

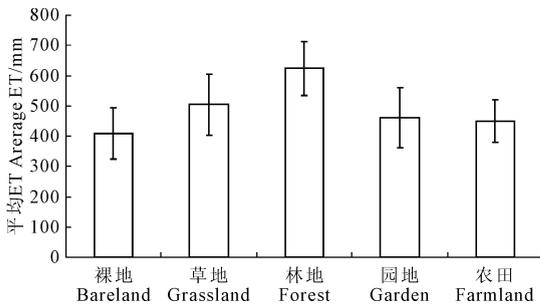


图 5 不同土地利用类型多年平均 ET

Fig.5 The multi-year average ET for various land covers

### 3.3 关中地区多年 ET 月均值时空特征

图 6 为 2000—2010 年月均蒸散变化图。从整个关中地区来看,其年内各月变化趋势呈先升后降的单峰型变化趋势,3—5 月蒸散量缓慢上升,6 月份出现微弱下降低谷,之后又持续上升,8 月蒸散量最大,达到  $83.73 \text{ mm}$ ,随后 9—10 月急剧下降,11 月、12 月下降趋于平缓直到次年的 1 月、2 月基本处于  $24 \text{ mm}$  左右。各子区域年内各月变化趋势与整体趋势基本一致,5—8 月各区域蒸散量差别较为明显,宝鸡与西安整体各月高于区域均值,而渭南与咸阳低于整体均值,这也与年际统计情况基本相符。这种年内变化的特征主要是由区域光照、水热等气候条件年内分布不均造成的,同时也受地表覆盖类型的构成比例影响。

对不同土地利用类型的年内变化统计结果如图 7,整体而言,2000—2012 年关中地区各土地利用类型月均 ET 变化趋势与年 ET 均值较为一致,均呈现先升后降的单峰型变化模式,各地类的 ET 年内变化与整体趋势也基本一致,但是不同的土地利用类型也有各自特有的特征。以林地和农田为例,林地全年各月蒸散均高于其它地类,尤其在 4—10 月,该

段时期累积 ET 与其它地类极差达  $207.93 \text{ mm}$ ;农田在 6 月有一个明显低峰值,反常于其它类型 6 月继续上升的趋势,究其原因主要是关中地区 6 月份正是冬小麦的收割季,而此时夏玉米正处于三叶期,作物高度较低,农田裸露较多,植被覆盖较低,因而蒸散量接近于裸地蒸散。这也较好地解释了图 6 中 6 月份各地(市)ET 有不同程度下降的原因,ET 下降的幅度与各区域农田所占的比例有较好的一致性,农田比例越大,6 月份 ET 减小幅度也越大。随后伴随夏玉米的出苗拔节期以及人工灌溉的跟进、降雨量的上升,蒸散量又持续上升,农田 ET 进入 8 月份达到峰值,此时正是夏玉米籽粒灌浆时期,需水量旺盛带动蒸散量上升,随后受气温逐渐下降,日照时间逐步减少,农田蒸散量也持续减少。

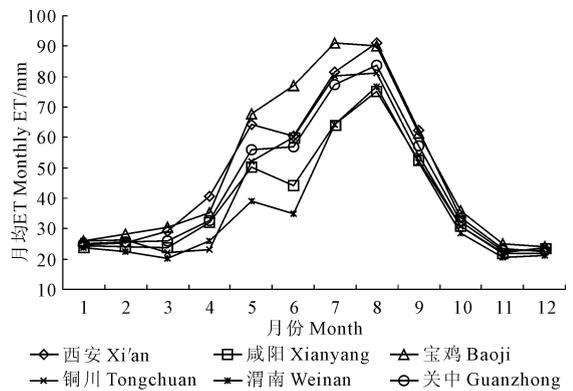


图 6 各地(市)年内各月 ET 变化趋势

Fig.6 The monthly ET change trend for each region(city)

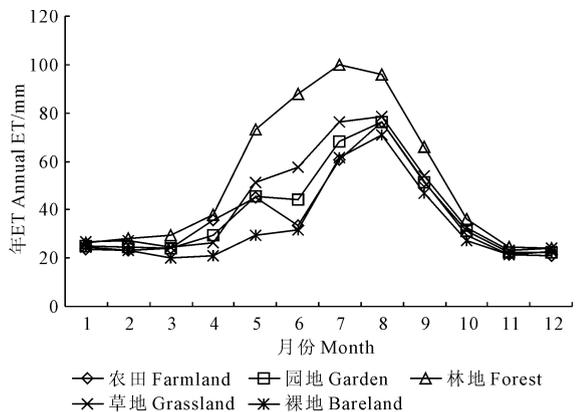


图 7 不同土地利用类型 ET 年内各月变化趋势

Fig.7 The monthly ET change trend for the different land cover types

### 3.4 关中地区 ET 季节分布特征

季节性差异是蒸散量年内变化的重要特征,对关中地区各季节蒸散量进行空间统计,结果如图 8,总体而言各季节空间分布与多年平均格局基本一致,但是受季节性太阳辐射、地表温度,风速,空气湿

度等因子年内分配不均的影响,关中地区四季蒸散量空间分布也表现出一定差异性。春季(3—5月)蒸散量在38~248 mm之间,均值为114.55 mm,占全年蒸散量的22.12%。春季地表慢慢回暖,此时正值冬小麦返青、拔节期,需水量逐步提升,虽然此时降雨量较少,但受人工春灌影响,宝鸡峡、泾惠渠、渭惠渠、洋惠渠等灌区仍保持较高蒸散水平;夏季(6—8月)蒸散量在75~514 mm之间,ET均值为217.82 mm,占全年蒸散量的42.07%,为一年中最高季,且区域高低相差悬殊,主要原因是夏季降雨量增加,水分供给充足,同时较高的气温和较大的风速以及充足的日照时间给蒸散发提供了良好的条件;秋季(9—11月)蒸散发开始回落,ET减小至70~202 mm之间,均值为112.34 mm,占全年蒸散量的21.69%。受气温下降、日照时间缩短、降雨减少的影响,蒸散发也逐步减小;冬季(12月—翌年2月)随着气温进一步下降,蒸散降至45~114 mm之间,ET均值为73.10 mm,占全年蒸散量的14.12%,此时正是冬小麦越冬时期,作物生长缓慢,因而农地呈现连片的低值区域。而秦岭林区由于落叶林叶子枯黄凋落,植被蒸散减弱,导致在该季节秦岭山区ET出现特有的低值斑块,尤其在秦岭主峰太白山沿线因冬季长期被冰雪覆盖,地表蒸散显著低于其它季节。整体来看,关中地区季节蒸散量由大到小依次为夏季>春季>秋季>冬季。

### 3.5 关中地区 ET 变化特征分析

利用标准差法分析关中地区年际ET稳定性,并将结果按照自然间断法分为三级<sup>[28]</sup>(图9a)。从图中可以看出,整个关中地区大致呈现东西部波动较大,中部较为稳定的经向分布规律。ET年际微弱波动区域占研究区面积的42.32%,标准差值位于13~39之间,连片分布于南部秦岭宝鸡段,渭河沿岸以及咸阳、铜川的大部分区域,反映出这些地区ET值相对稳定,年际波动较小;ET年际中等波动区域面积比例为45.04%,标准差值为40~56,主要分布于渭南、秦岭西安段、宝鸡东部地区;关中地区年际ET变化显著波动面积比例为12.64%,标准差均大于56,显著波动基本伴随中等波动出现,零散分布于显著波动的局部地区,表明这些地区蒸散受年际气候因子影响较大,容易产生波动。

依据线性趋势法分析关中地区的年际变化趋势(图9b),并根据该实际情况按照趋势线斜率值的大小分为5级: $Slope < -8$  严重减少,  $-8 \leq Slope < -3$  轻微减少,  $-3 \leq Slope < 3$  基本不变,  $3 \leq Slope < 8$  轻微增加,  $Slope \geq 8$  显著增加。从整个关中地区来看,

蒸散量年际变化呈增加趋势,增加速率为 $0.87 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ ,空间分布大致呈东部减小西部增加的趋势。年际ET减少的区域面积比例为24.25%,其中又以轻微减少为主(19.93%),主要分布于西安、咸阳、铜川等城市建成区周边,以及渭南中南部,秦岭西安段部分区域,反映出城市发展会对周边的水文过程产生一定程度影响,使城市周边蒸散量减少。ET值基本不变的区域占41.65%,秦岭宝鸡段、铜川市郊区及渭河冲击平原大部ET值年际变化均不明显,这也与波动性结果较为吻合。ET年际变化呈增加趋势区域面积占34.1%,主要连片分布于宝鸡北部、咸阳西北部,或呈条带状分布于秦岭北麓及西北部部分谷地。可能的原因是宝鸡市2004年开始大力实施的水资源治理工程初见成效,改善了该地区的生态环境,可利用水资源也呈缓慢上升趋势<sup>[29]</sup>。

进一步对各季节ET变化趋势进行统计分析,四季ET变化趋势空间分布除冬季差异较大,其它季节与全年变化趋势基本一致(图略),其中春季与夏季ET变化整体呈增加趋势,增加速率分别为 $1.15 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $1.49 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ ,而秋季与冬季年际蒸散呈减小趋势,减小速率分别为 $0.67 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $0.96 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。从各级变化趋势统计表(表3)中可以看出,秋冬季关中地区ET绝大部分地区变化微弱,而春季和夏季分别有15.23%和41.21%比例的区域有不同程度的减小或增加,其中又以夏季对全年ET变化趋势贡献最大。

表3 四季及全年变化趋势比例统计/%

Table 3 The proportion statistics for change trend over four seasons and whole year

时期 Time	减小 Decrease ( $Slope \leq -3$ )	不变 Constant ( $-3 < Slope \leq 3$ )	增加 Increase ( $Slope > 3$ )
春季 Spring	1.08	84.77	14.15
夏季 Summer	9.36	58.79	31.85
秋季 Autumn	1.64	98.30	0.07
冬季 Winter	0.00	100.00	0.00
全年 Whole year	24.25	41.65	34.10

## 4 结论与讨论

本研究基于MOD16-ET遥感资料,在精度验证基础上,分析了关中地区13a间地表实际蒸散量时空特征,初步得出以下结论:(1)MOD16-ET数据在关中地区数据精度良好,“点”尺度与“面”尺度验证相对误差和相关性均值分别为10.38%和0.69,可以一定程度上用于该地区蒸散时空变化特征研究。(2)在时间序列上,关中地区13a间年际变化

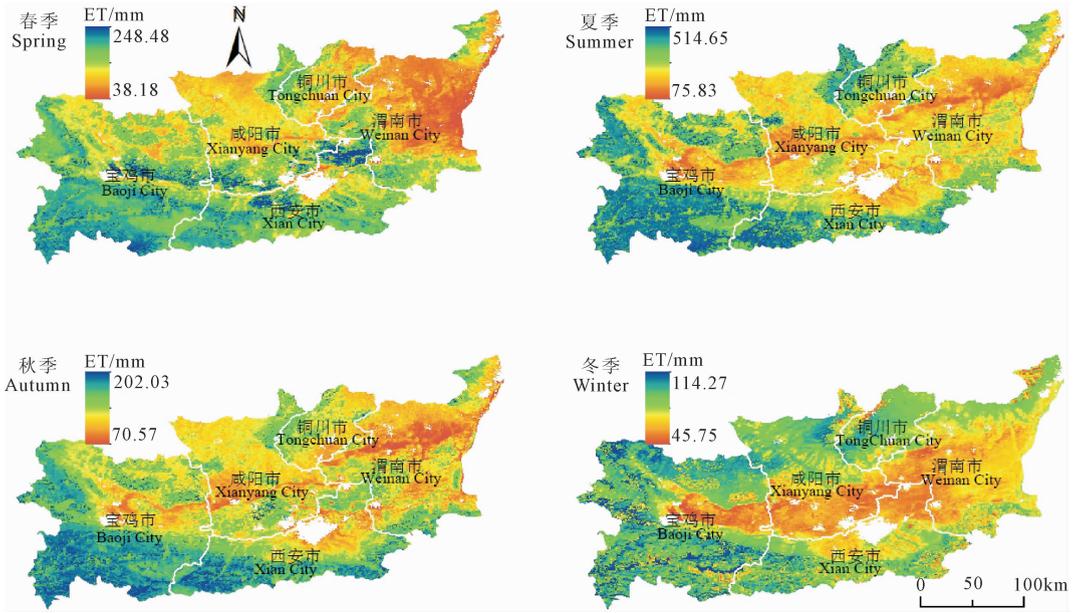


图 8 关中地区四季 ET 时空分布

Fig.8 The spatial distribution of ET in four seasons in Guanzhong Region

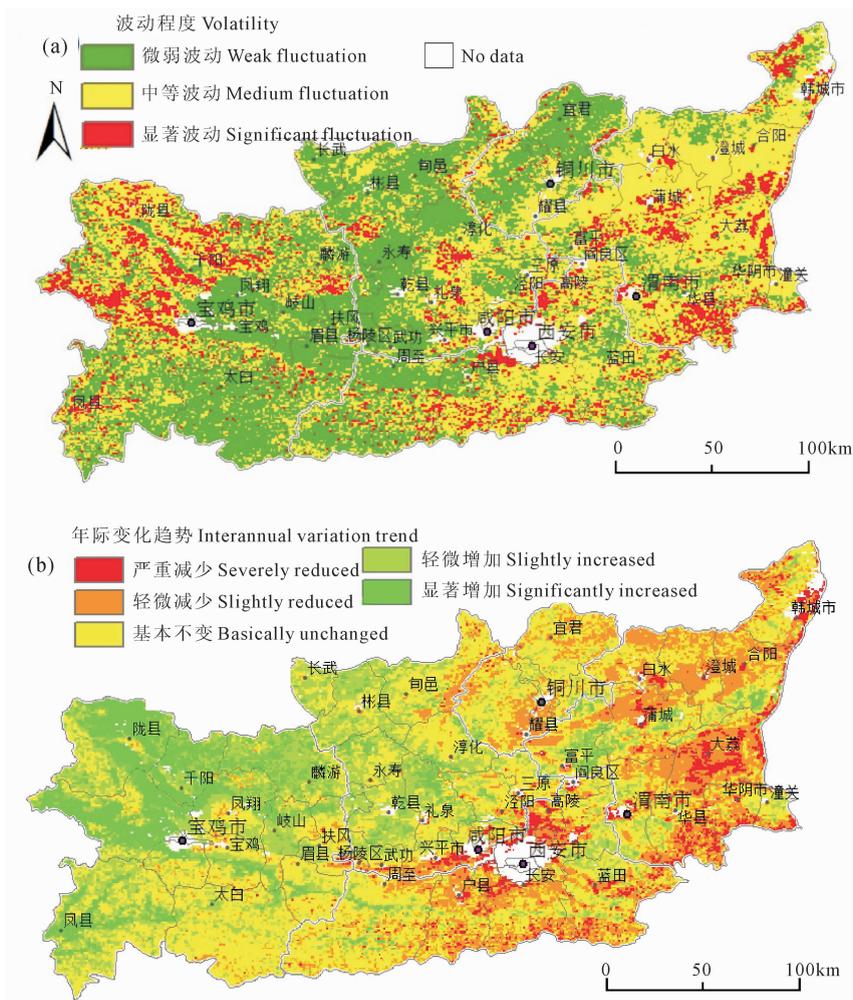


图 9 2000—2012 年关中地区 ET 年际波动程度 (a) 与变化趋势 (b)

Fig.9 The fluctuation degree (a) and change trend (b) of ET during 2000—2012 in Guanzhong Region

水平以中等波动为主,其中高于多年平均 ET 的年份有 2003—2008 年及 2012 年;年内各月 ET 大致呈先升后降的单峰型变化趋势,且蒸散量主要集中于夏季。从变化趋势上来看,关中地区 ET 年际变化整体以  $0.87 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$  的速率增加,空间分布呈东部减小西部增加的趋势,其中春、夏季以增加为主,秋、冬季则以减小趋势为主,且夏季对年际增加趋势贡献最大。(3) 在空间分布上,关中地区多年 ET 大致呈西南—东北依次递减的三级阶梯格局,四季 ET 分布与多年情况基本一致,春冬季各大灌区及秦岭部分林区与多年空间分布差异较大。土地覆盖类型对关中地区地表蒸散发分布影响显著,多年平均水平上各地类蒸散量由大到小依次为林地、草地、园地、农田、裸地,年内各月 ET 大小顺序也基本一致,其中 4—8 月各地类蒸散差异最为显著。

蒸散作为表征地球大气系统的能量收支和水量平衡变化的关键性指标,利用遥感估算监测越来越体现出其优势,而随着卫星遥感技术的进一步发展以及相关资料的持续积累,未来遥感蒸散研究将会更加精细、准确,从而为地表能量平衡与水分循环提供更多研究思路。后续研究可以结合气象资料,针对蒸散的过程及机理对蒸散的影响因素做更为详细的分析探讨。

#### 参考文献:

- [1] Li Z, Tang R, Wan Z, et al. A review of current methodologies for regional evapotranspiration estimation from remotely sensed data[J]. *Sensors*, 2009, 9(5): 3801-3853.
- [2] Allen R G, Pereira L S, Howell T A, et al. Evapotranspiration information reporting: II. Recommended documentation[J]. *Agricultural Water Management*, 2011, 98(6): 921-929.
- [3] 郭晓寅,程国栋. 遥感技术应用于地表面蒸散发的研究进展[J]. *地球科学进展*, 2004, 19(1): 107-114.
- [4] Rosenberg N J, Blad B L, Verma S B. *Microclimat e-the Biological Environment of Plants*[M]. New York: John Wiley & Sons, 1983.
- [5] 冯景泽,王忠静. 遥感蒸散发模型研究进展综述[J]. *水利学报*, 2012, 43(8): 914-925.
- [6] 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.
- [7] Bastiaanssen W G M, Menenti M, Feddes R A, et al. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) formulation[J]. *Journal of Hydrology*, 1998, 198-212.
- [8] Su Z. An evaluation of two models for estimation of the roughness height for heat transfer between the land surface and atmosphere[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2001, 40(11): 1933-1951.
- [9] 姚云军,程 洁,赵少华,等. 基于热红外遥感的农田蒸散估算方法研究综述[J]. *地球科学进展*, 2012, 27(12): 1308-1318.
- [10] Morn M. 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(24): 87-109.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 王万同,钱乐祥. 基于 MODIS 数据的伊洛河流域地表蒸散空间和年内变化特征[J]. *资源科学*, 2012, 34(8): 1582-1590.
- [14] Mu Q Z, Zhao M S, Running S W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm[J]. *Remote sensing of environment*, 2011, 115: 1781-1800.
- [15] 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: 519-536.
- [16] 吴桂平,刘元波,赵晓松. 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.
- [17] 刘 闻,曹明明,邱海军,等. 渭河流域关中段潜在蒸发量时空变化特征[J]. *地理科学*, 2014, 34(9): 1145-1152.
- [18] 曹红霞,粟晓玲,康绍忠,等. 陕西关中地区参考作物蒸腾量变化及原因[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(11): 8-16.
- [19] 梅 星,沈 冰,莫淑红. 关中地区实际蒸散发量年际变化成因分析[J]. *水电能源科学*, 2012, 30(8): 5-8.
- [20] 梅 星,沈 冰,莫淑红. 陕西关中地区实际蒸发量的时空变化特性分析[J]. *黑龙江大学学报*, 2012, 3(1): 11-16.
- [21] 李 玮,陈根发,刘家宏,等. 黑龙江地区夏玉米生长期综合 ET 试验研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2011, 29(5): 128-132.
- [22] 王旭明,刘海军,张睿录,等. 河套灌区参考作物蒸腾量估算方法研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2014, 32(3): 95-101.
- [23] 薛 亮,任志远. 基于格网 GIS 的关中地区生态安全研究[J]. *地理科学*, 2011, 31(1): 123-128.
- [24] 粟晓玲,赵 晨,马黎化. 关中地区近 20 年用水结构演变及其驱动力研究[J]. *灌溉排水学报*, 2008, 27(5): 71-73.
- [25] 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.
- [26] 马明国,王 建,王雪梅. 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.
- [27] 刘安麟,李兴敏,何延波,等. 作物缺水指数法的简化及在干旱遥感监测中的应用[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(2): 210-214.
- [28] 杜昭阳,辛 磊,李 超,等. 基于质量评价的耕地建设分区研究—以河北省望都县为例[J]. *农业现代化研究*, 2013, 34(6): 733-737.
- [29] 谢元礼,张 苏,王文娟,等. 基于 TM 的渭河宝鸡段水域面积时序变化分析[J]. *地下水*, 2011, 33(2): 128-165.