

# 基于MOD16产品的嫩江流域蒸散发量 时空特征分析

田逸飞<sup>1,2</sup>, 马振亮<sup>3</sup>

<sup>1</sup>长江水利委员会水文局, 湖北 武汉

<sup>2</sup>流域水模拟与预报调度智能技术创新中心, 湖北 武汉

<sup>3</sup>油气地球化学与环境湖北省重点实验室(长江大学资源与环境学院), 湖北 武汉

收稿日期: 2023年11月2日; 录用日期: 2023年12月20日; 发布日期: 2023年12月28日

## 摘要

本文基于NASA团队的MOD16遥感数据集, 统计分析了嫩江流域2000~2014年地表蒸散发量的年际和年内时空变化状况, 探讨了不同地表类型下蒸散发量的差异性变化特征。通过分析得到: 利用水量平衡方程检验, 相对误差在10.96%, MOD16产品的精度能够满足研究分析嫩江流域蒸散发量时空变化的要求。根据MOD16产品数据, 嫩江流域2000~2014年多年平均蒸散发量为396 mm。嫩江流域全年的蒸散发量年内分布大致呈双峰型格局, 在三月出现一个小峰值, 在七月或八月出现年最大值。流域内地表蒸散发量受地表覆盖的土地类型影响, 蒸散发量大小的排序依次为“林地 > 草地 > 农田 > 城镇 > 裸地”。分析五种土地利用类型的蒸散发量年内分布, 可以看出林地的年内分布的变异系数最大, 离散程度最强。

## 关键词

MOD16, 嫩江流域, 地表蒸散发量, 时空分布

## Spatial-Temporal Variation of Evapotranspiration in Nenjiang River Basin Using MOD16 Product Paper

Yifei Tian<sup>1,2</sup>, Zhenliang Ma<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Bureau of Hydrology, ChangJiang Water Resources Commission, Wuhan Hubei

<sup>2</sup>Center of Technology Innovation for Intelligent Water Simulation, Forecasting and Operation of the River Basin, Wuhan Hubei

<sup>3</sup>Hubei Key Laboratory of Petroleum Geochemistry and Environment (College of Resource and Environment, Yangtze University), Wuhan Hubei

## Abstract

Based on the MOD16 remote sensing data set of the NASA team, this article statistically analyzes the interannual and intraannual spatiotemporal changes in surface evapotranspiration in the Nenjiang River Basin from 2000 to 2014, and explores the differential change characteristics of evapotranspiration under different surface types. Based on the water balance model, this paper verified the accuracy of MOD16 product. The average relative error was about 10.96%. The accuracy of the MOD16 product can meet the requirements for studying and analyzing the spatial and temporal changes of evapotranspiration in the Nenjiang River Basin. The results show that the mean value of annual evapotranspiration was  $396 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$  in Nenjiang River basin from 2000 to 2014. The monthly variation of ET roughly showed a bimodal pattern. The smaller peak value will occur in March, and the bigger peak value will occur in July or August, which was the maximum value during the entire year. The spatial distribution of ET is related to land cover characteristics, which have an effect on the ET distribution in the Nenjiang River basin, and the order of ET intensity by land cover types is woodland > grassland > farmland > building land > unused land. The monthly change of the different land cover in Nenjiang River basin can be found by the coefficient of variation (CV). It can be found that the CV of woodland was higher than the CV of the other land cover type.

## Keywords

MOD16, Nenjiang River Basin, Surface Evapotranspiration, Spatio-Temporal Distribution

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

地表实际蒸散发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]。目前,已发展了从传统方法,模拟方法到遥感方法等很多种方法用于估算一个区域的蒸散发量。

传统方法包括水量平衡法、器测法、经验公式法、模式计算法等。传统方法的劣势在于:蒸散发的时空分布特征与区域气候条件、土壤水分状况、植被覆盖等因素密切相关,传统的方法都是以点的观测资料为基础来开展蒸散发的研究[2],因此,很难直接运用于蒸散发研究所需要的区域尺度。遥感方法以其能够获知大范围的地表特征信息的优势为较为准确估算地表蒸散发提供了可能。基于遥感信息的蒸散发估算方法在国内外得到迅速发展,主要有统计经验法、特征空间法和能量平衡法,代表模型有基于 Penman-Monteith 公式的 VITT 模型、基于 Priestly-Taylor 公式的三角形模型以及基于能量平衡的 SEBAL 模型、SEBS 模型和 TSEB 模型等。但遥感方法也存在一些问题,例如,地表参数反演困难,模型有局限性及误差,在区域尺度上检验困难[3]。

近年来,国内从遥感蒸散发模型的发展,到地表蒸散发观测试验,以及典型生态系统类型的蒸散发模拟都取得了很多的成果[4] [5] [6] [7]。然而,由于遥感蒸散发模拟的复杂性,区域蒸散发的模拟主要应用在一些特定的区域或流域,针对更大空间尺度的研究不多。目前,SEBS 模型、Priestley-Taylor 模型、

NOAH 陆面模式和 BEPS 模型已应用于整个中国区域的陆面蒸散发模拟研究。

吴桂平、位贺杰和范建忠等人已率先运用 MOD16 产品分别运用于鄱阳湖流域、渭河流域及陕西省的地表实际蒸散发的时空分布特征研究, 并且都取得了良好的、具有实际意义的分析结果[8] [9]。这些研究的过程及结果都对本课题的研究提供了有力的理论基础和参考依据[10] [11]。

2011 年美国 NASA 研究团队在 MODIS 遥感数据蒸散发反演算法上取得了重要研究成果, 并通过 NASA 地球观测系统发布了全球 MODIS 陆地蒸散发产品数据 MOD16 [12], 该产品不仅提供了地表蒸散发量的参数, 还具有高时间分辨率以及免费获取的特点, 因此利用 MOD16 产品来反映嫩江流域地表蒸散量的时空分布特征及其与土地利用类型的关系具有一定的优势。

本文将主要使用 MOD16A2 和 MOD16A3 产品, 作为本课题研究的基础。NASA EarthData 提供的 MOD16 产品有 MOD16A2、MOD16A3 两种, 均提供包括蒸散发(ET)、潜热通量(LE)、潜在蒸散发(PET)、潜在潜热通量(PLE)等要素, MOD16A2 产品的时间分辨率为 8 天, 空间分辨率为 500 m; MOD16A3 产品的时间分辨率为 1 年, 空间分辨率为 500 m。本文首先探讨运用该产品研究嫩江流域地表蒸散发量的可行性。然后, 在结合嫩江流域土地利用数据, 分析嫩江流域在不同时间尺度下地表蒸散发的数量特征和空间格局特。最后, 再更进一步对不同土地利用类型下蒸散发量进行统计分析, 从而可以为嫩江流域水文分析计算、水资源管理及高效利用提供参考。

## 2. 研究区概况及数据来源

### 2.1. 研究区概况

嫩江流域位于中国东北部, 西侧以大兴安岭分水岭为界, 北侧以伊勒呼里山为界, 南侧以霍林河南部的分水岭为界, 东侧大部分以嫩江为界, 坐标为  $119^{\circ}12' \sim 127^{\circ}54'$ , 北纬  $44^{\circ}02' \sim 51^{\circ}42'$ , 土地总面积为 28.30 万平方米, 地跨黑龙江、内蒙古、吉林 3 省区。该流域属于寒温带半湿润大陆性气候, 春季多风少雨干旱, 夏季短促高温多雨, 秋季降温急剧且常有霜冻, 冬季漫长严寒干燥。多年平均气温  $2^{\circ}\text{C} \sim 4^{\circ}\text{C}$ , 冬季嫩江冰封期达 150 天左右, 冰厚约为 1 米。研究区范围: 以大赉站控制范围作为本论文的研究区范围。

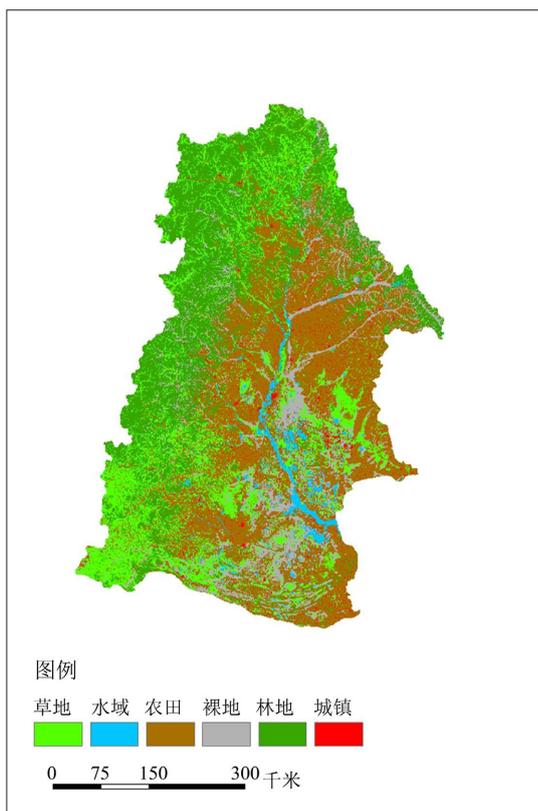
嫩江流域多年平均径流深为 76.5 mm, 多年平均降雨 447 mm, 天然年径流总量 227.3 亿  $\text{m}^3$ 。流域的径流主要来自于降水, 春季会有一些由于冰雪融化带来的融水。径流量的年内和年际变化均比较大, 每年的 1、2、3、11、12 月份是枯水、枯冰期, 降水量会明显减少, 河川径流主要靠地下水补给; 4、5、6、10 月份是一年的平水期; 7、8、9 月份是丰水期, 常发生大、暴雨, 且易形成洪水。

嫩江流域北部、西部和南部三面地势较高, 东部地势较低, 形成著名的松嫩平原。土地利用类型多样, 有林地、草地、耕地、水域、湿地等类型。林地、草地主要分布在北部、西部高山地区, 东部和南部零星分布; 耕地和水域主要分布在东部平原区, 湿地主要有位于流域东南部的扎龙、莫莫格湿地群, 位于南部的向海湿地, 如图 1。嫩江是我国重要的农牧业, 工业, 能源生产基地。近些年来, 气候变化与人类对水土资源不合理开发利用, 引起下游湿地入流量减少和蒸散量增加等。

### 2.2. 数据来源

本研究使用的数据具体来源见表 1。MOD16-ET 产品的算法是 Mu 等[12]在 Penman-Monteith 公式的基础上改进的, 算法将地表分为裸土和冠层两种组分, 又将冠层分为湿润和干燥两种类型, 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, 然后结合 MODIS 数据产品估算[12]。模型主要输入的变量及其来源: 叶面积指数(LAI)和植被光合有效辐射分量(FPAR)从 MODIS 遥感数据中的 MOD15 产品获取; 陆地覆盖类型(LAND COVER)来自 MODIS 遥感数据 MOD12Q1 产品; 相关气象数据来自 GMAO 气象网站。根据 MODIS 数据轨道号的排列规律及嫩江流域所在的地理位置, 选择的卫星

轨道号为 h25v03、h25v04、h26v03 和 h26v04。下载到的数据从 2000 年至 2014 年共 15 年的数据。根据嫩江流域的土地利用方式和分析精度要求, 将研究区域的土地利用类型归并为 6 个一级地类, 包括林地、农田、草地、城镇、裸地和水域。



**Figure 1.** Schematic diagram of land use types in the Nenjiang River Basin  
**图 1.** 嫩江流域土地利用类型示意图

**Table 1.** Data used in the study  
**表 1.** 本研究所用的数据资料

数据名称	主要特点	数据用途	数据来源
MODIS ET	8 天合成, 空间分辨率 1 km 月合成, 空间分辨率 1 km 年合成, 空间分辨率 1 km	获取流域地表蒸散量	<a href="http://www.ntsg.umn.edu/project/mod16">http://www.ntsg.umn.edu/project/mod16</a> (美国蒙大拿大学森林学院工作组)
土地利用数据	1:10 万土地利用图	获取土地利用类型	<a href="http://westdc.westgis.ac.cn">http://westdc.westgis.ac.cn</a>
水文气象数据	降雨、径流数据资料	MOD16 产品精度检验	国家水文水资源科学数据共享平台

### 3. 研究方法

#### 3.1. 数据预处理

对于 MOD16 数据的处理方法的具体如下:

(1) 原始的 MOD16 产品采用的是 HDF 数据格式, 投影类型为正弦曲线投影(sinusoidal)。因此, 需要用到 NASA 提供的 MRT 软件进行格式转换, 将 MOD16-ET 产品的 HDF 文件转化为 WGS-1984 经纬

度坐标系统下的 GeoTiff 格式文件, 在转换格式的同时进行重采样等操作。

(2) 根据嫩江流域的地理位置, 将不同卫星轨道的数据(h25v03, h25v04, h26v03, h26v04)用 ArcGIS 软件进行轨道镶嵌, 制成一个栅格数据集, 然后利用 ArcGIS 软件对经过投影转换、轨道镶嵌之后的 MOD16 数据基于嫩江流域的边界进行掩膜截取, 从而可以得到研究区域的每一种时间尺度下地表蒸散发量的空间分布图。通过统计可以计算得到在不同时间尺度下, 不同空间尺度下蒸散发量的平均值、最大值、最小值等数据。

(3) 为了能够利用 MOD16 产品进一步分析研究嫩江流域地表蒸散发量的变化特点和时空分布特点, 利用 ArcGIS 软件和配准后的嫩江流域土地利用类型图, 掩膜截取五种不同土地利用类型的区域, 再通过上述步骤计算出年尺度下各种土地利用类型的蒸散发量的平均值, 最后分析不同土地利用类型蒸散发量的变化特征。

### 3.2. 数据精度检验

MOD16 产品的精度是本文研究的基础, 为了验证 MOD16 产品数据可以用于嫩江流域的地表蒸散发量的研究, 首先需要对流域 MOD16 产品地表蒸散发量的有效值进行检验, 检验的依据是流域水量平衡方程。

$$P = E + R \tag{1}$$

公式(1)中,  $P$  为降雨量(mm)、 $E$  为蒸散量(mm)、 $R$  为径流量(mm)。在年尺度上可以用水量平衡方程式对流域内的 MOD16 地表产品的适用性进行评估和验证。

### 3.3. 技术路线图

本文技术路线图见图 2, 共分为 3 个步骤, 1) 数据处理, 包括针对源数据的格式转换以及淹没截取等; 2) 精度检验, 利用水量平衡原理对遥感产品的结果进行评价; 3) 分析嫩江流域蒸散发时空分布特征。

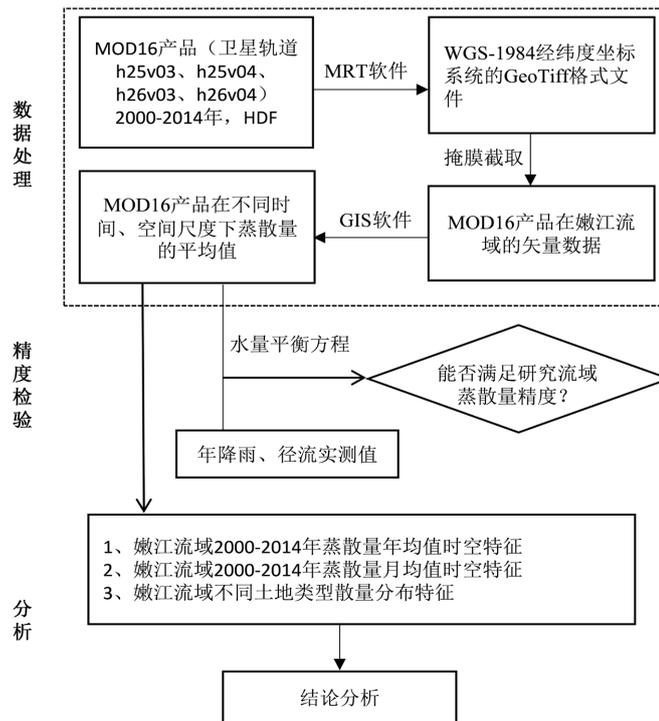


Figure 2. Technology roadmap of this article  
图 2. 本文技术路线图

## 4. 结果分析

### 4.1. MOD16 产品精度检验

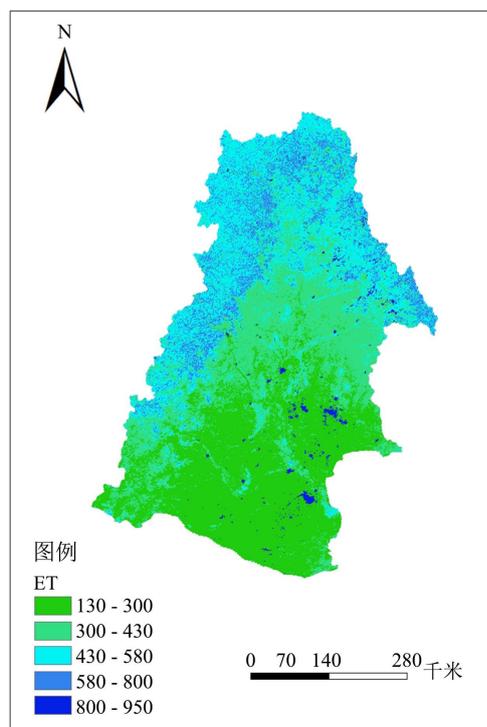
利用嫩江流域大赉水文站 2005 年~2012 年的降雨径流数据, 估算出年均降雨量与年均径流深, 从表 2 结果来看, 总体上呈现出了较好的一致性。

**Table 2.** MOD16 product accuracy inspection form in the Nenjiang River Basin from 2005 to 2012

**表 2.** 2005 年~2012 年嫩江流域 MOD16 产品精度检验表

年份	实测降雨量 (mm)	实测径流量 (mm)	MOD16 数据 (mm)	计算蒸发量 (mm)	相对误差
2006	454.09	36.28	382.9	417.81	9.12%
2007	360.12	21.32	389.5	338.80	13.02%
2008	441.01	17.43	401.3	423.58	5.55%
2009	464.69	53.43	359.5	411.27	14.40%
2010	359.87	49.27	392.9	310.59	20.95%
2011	412.71	56.99	384.8	355.73	7.56%
2012	484.48	53.93	405.6	430.55	6.15%

图 3 展示的是嫩江流域多年蒸散发量的平均值空间分布, 嫩江流域多年平均蒸散发量呈现由北向南逐渐降低的趋势, 这也与图 1 显示的嫩江流域土地利用类型分布规律相吻合, 所以 MOD16 地表蒸散产品在嫩江流域研究区范围内的精度总体上是符合要求的, 所以我们可以继续利用 MOD16 产品数据对流域蒸散发量的时空分布规律进行后续的分析研究。

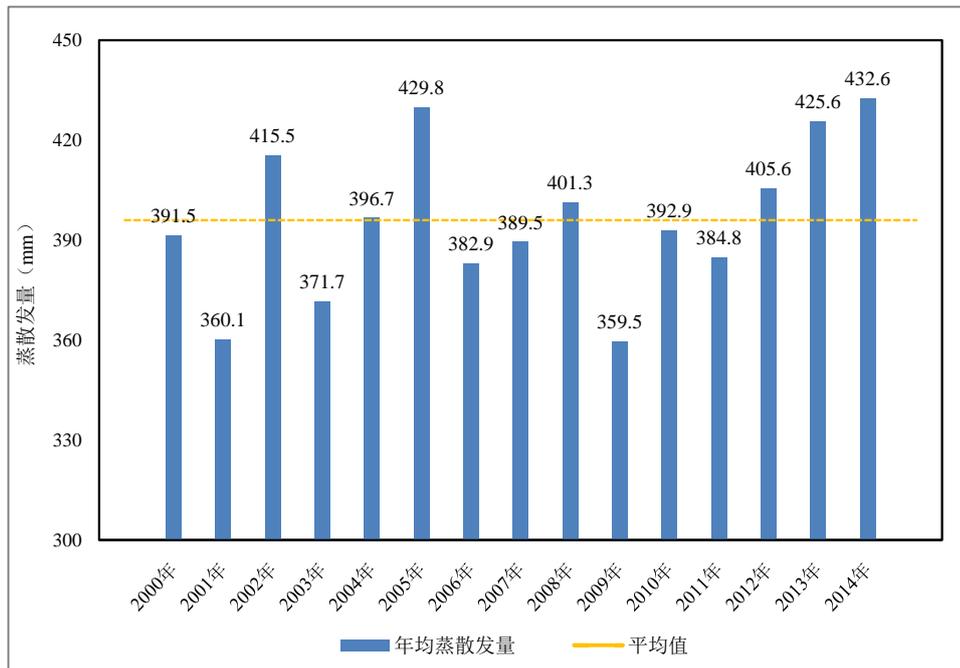


**Figure 3.** Spatial distribution of multi-year ET average values in the Nenjiang River Basin

**图 3.** 嫩江流域多年 ET 平均值空间分布示意图

## 4.2. 蒸散发量年平均值变化特征

对 MOD16/Annual ET 产品数据经过上文介绍过的方法处理, 得到嫩江流域地表 2000 年至 2014 年逐年蒸散发量的数值。下图显示了嫩江流域地表蒸散量的逐年变化过程。



**Figure 4.** Change process of surface evapotranspiration in the Nenjiang River Basin from 2000 to 2014  
**图 4.** 嫩江流域 2000~2014 年地表蒸散发量变化过程

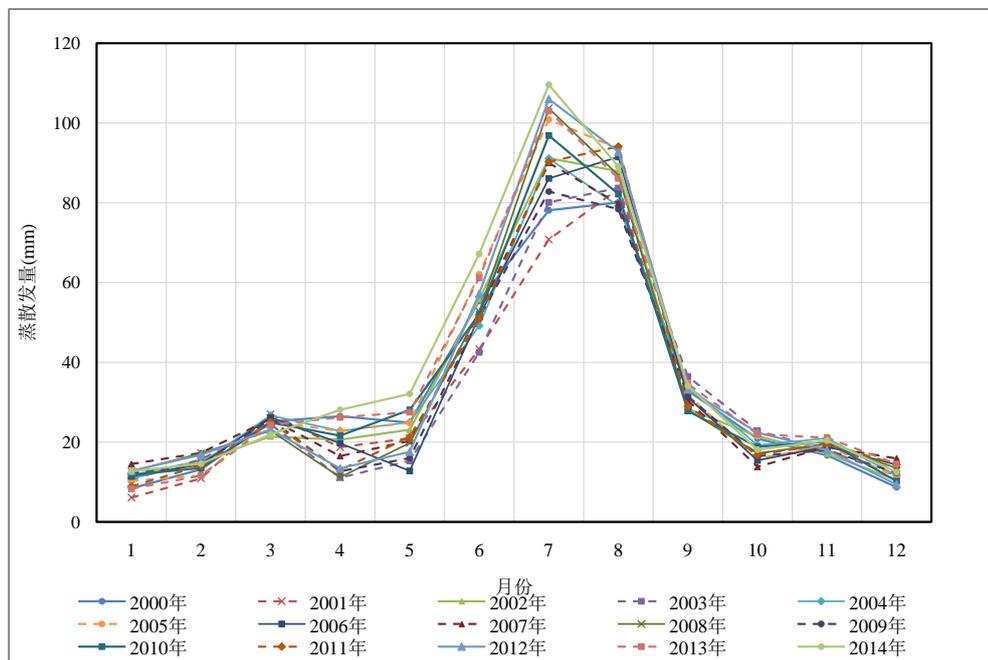
由图 4 可知, 年均蒸散发量的波动范围在 359.5~432.6 mm/a 之间, 而且各年间的平均蒸散发量平均值呈现出一定的波动。可以计算得出嫩江流域多年平均蒸散发量为 396 mm/a (如图中虚线所示)。超出多年蒸散发量平均值的年份出现在 2002 年、2004 年、2005 年、2008 年、2012 年、2013 年、2014 年, 其中, 2004 年接近多年平均蒸散发量, 其余年份均低于多年平均蒸散发量。其中最大值出现在 2014 年, 蒸散发量为 432.6 mm/a, 最小值出现在 2009 年, 蒸散发量为 359.5 mm/a。

## 4.3. 蒸散发量多年月平均值时空分布特征

根据 MOD16/Monthly 产品数据统计分析 2000~2014 年嫩江流域月平均蒸散发量的结果, 如图 5 所示, 总体来看, 嫩江流域地表蒸散发量从 12 月到 2 月的变化较为平缓, 在 3 月份会出现一个小的峰值, 最大值出现在 7 月份或者 8 月份。蒸散发量主要集中在 6 月、7 月、8 月, 这三个月的蒸散发量能占到全年蒸散发量的 50% 以上。2000~2014 年各年 6、7、8 月的蒸散发量占到一年中蒸散发量的比例, 如表 3 所示。

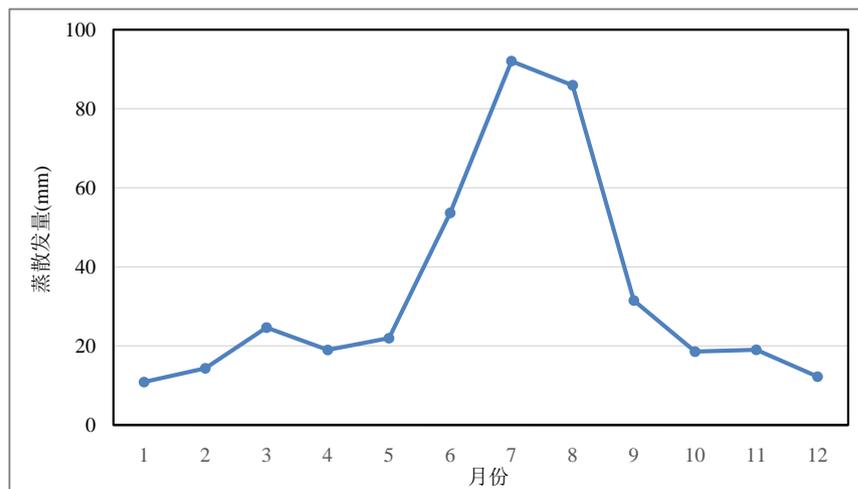
**Table 3.** Proportion of evapotranspiration in June, July and August from 2000 to 2014  
**表 3.** 2000 年~2014 年 6、7、8 月蒸散发量所占比例

年份	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
比例	54.6%	54.9%	58.1%	55.4%	54.1%	59.8%	58.2%	56.2%
年份	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	
比例	60.0%	57.1%	56.7%	59.2%	60.5%	56.8%	57.8%	



**Figure 5.** Distribution of surface evapotranspiration in different months in the Nenjiang River Basin from 2000 to 2014

**图 5.** 嫩江流域 2000 年~2014 年不同月份地表蒸散发量分布



**Figure 6.** Annual distribution of evapotranspiration in the Nenjiang River Basin from 2000 to 2014

**图 6.** 嫩江流域 2000~2014 年蒸散发量年内分布

15 年中, 6、7、8 三个月的总蒸散发量所占的比例变化范围在 54% 到 61% 之间, 表明嫩江流域的蒸散发量受到流域的温度和降雨的影响很大。6 月之后, 嫩江流域的温度显著提升, 大气循环加快, 降雨也达到一年中的最大值, 可以推断降雨是嫩江流域蒸散发最重要的来源。2000~2014 年, 各月平均蒸散发平均值的年内分布如图 6 所示。

分析出现这些现象的原因是: 12 月、1 月、2 月嫩江流域气温低, 日照时间短, 降水主要以降雪为主, 地表水主要以固态的形式储存, 不利于蒸发。所以呈现出一种平缓的趋势。3 月份, 气温开始回升,

大量以固态储存的水开始大量转化为液态形成地表径流, 液态水相对于固态水更利于蒸发, 同时植被开始发育, 加大了植物散发, 因此 3 月份蒸散发量会出现一个小峰值。到了 6 月, 气温继续上升, 降雨量也大大增加, 供水量大, 日照充足, 再加上风速大, 因此地表蒸散发将大大增加, 到了 7、8 月达到峰值。9 月之后, 气温开始缓慢降低, 降雨量也开始下降, 各种因素又向着不利于蒸发的方向发展, 因此蒸散发量降到一年中的最低值。

#### 4.4. 不同土地利用类型的蒸散发量分布特征

根据 MOD16/Annual 产品数据, 结合嫩江流域土地利用类型, 可以统计分析在 2000 年~2014 年间, 5 种土地利用类型的年均蒸散发量并绘制年际变化曲线, 如图 7 所示。可以看出 5 种土地利用类型的年际波动变化在趋势大体上是一致的。但是在数值上有很大的差异。

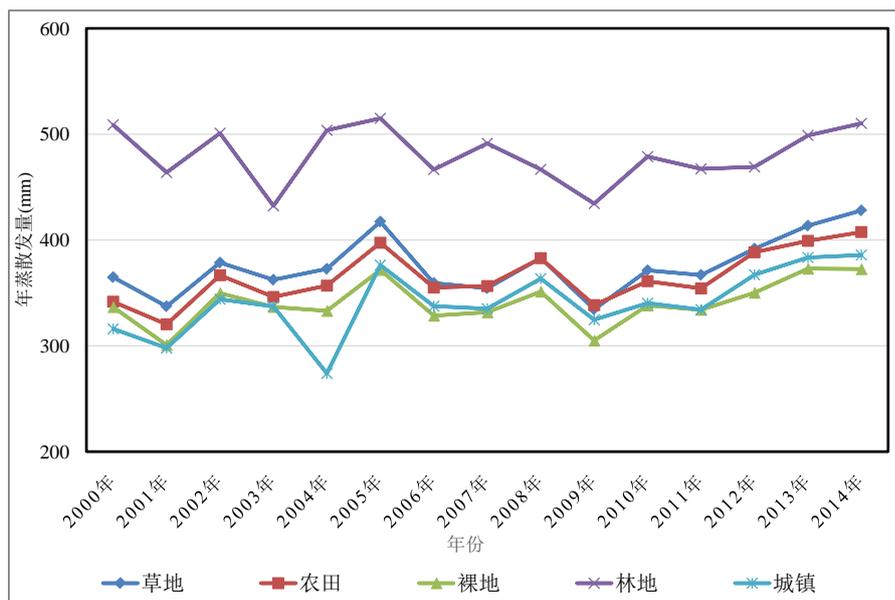


Figure 7. Average annual evapotranspiration process curve for different land use types  
图 7. 不同土地利用类型的年均蒸散发量过程曲线

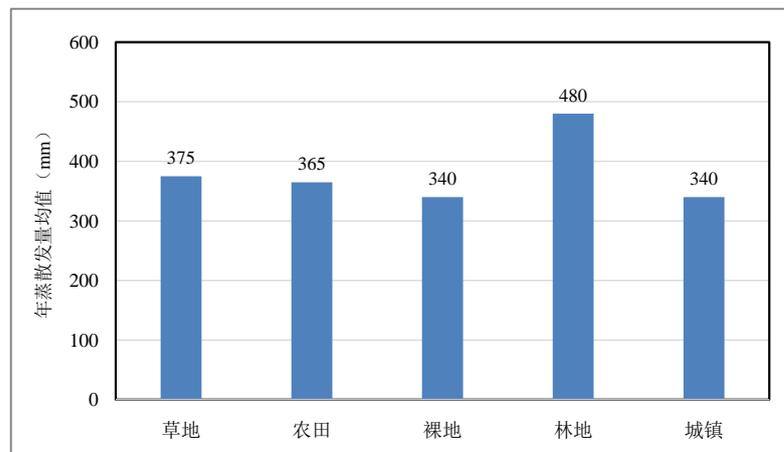


Figure 8. Average annual evapotranspiration for different land use types  
图 8. 不同土地利用类型的年均蒸散发量

在一个区域环境中, 由于不同土地利用类型本身的生理生态特性, 会影响平均蒸散发量。为了能够分析嫩江流域上不同土地利用类型的蒸散发特点, 运用 ArcGIS 软件的掩膜截取和空间统计功能, 按照不同的土地利用类型(农田、林地、裸地、城镇、草地)进行裁剪, 然后统计计算嫩江流域内不同土地利用类型的年均蒸散量, 如图 8 所示, 由图中可以看出不同土地利用类型跟蒸散量密切相关, 蒸散量的大小按照“林地 > 草地 > 农田 > 城镇 > 裸地”的顺序递减。这也印证了植被覆盖好的地方, 蒸散发量高。其中林地的年均蒸散发量最高, 达到 480.6 mm/a。城镇和裸地的年均蒸散发量最小, 城镇的年均值是 341.1 mm/a, 裸地的年均值是 340.8 mm/a。在鄱阳湖流域的蒸散发研究中, 各土地利用类型的年均蒸散发量的顺序为“林地 > 草地 > 农田 > 裸地 > 城镇”。

从图 8 中可以看出, 在 11、12、1、2 月份各种土地利用类型的蒸散发量区别不大, 在某些月份林地的蒸散发量相比其他土地利用类型的蒸散发量要小, 这与林地年均蒸散发量最大正好相反。原因可能是冬天的时候嫩江流域林地都被冰雪所覆盖, 也很少受到人类活动影响, 十分不利于蒸散发。不过到了 6、7、8 月份, 林地的蒸散发量要远远大于其他土地利用类型的蒸散发量。

结合图 3, 可以发现每种土地利用类型的年内分布在 4 至 9 月份的差别很大, 分别计算每种土地利用类型的变异系数, 变异系数可以反映一组数据的离散程度。由表 4, 可以看出林地的变异系数最大, 裸地的变异系数最小。这表明林地的月均值离散程度最大, 这是因为林地的蒸散发量在一年中对温度和降雨量的影响最敏感。

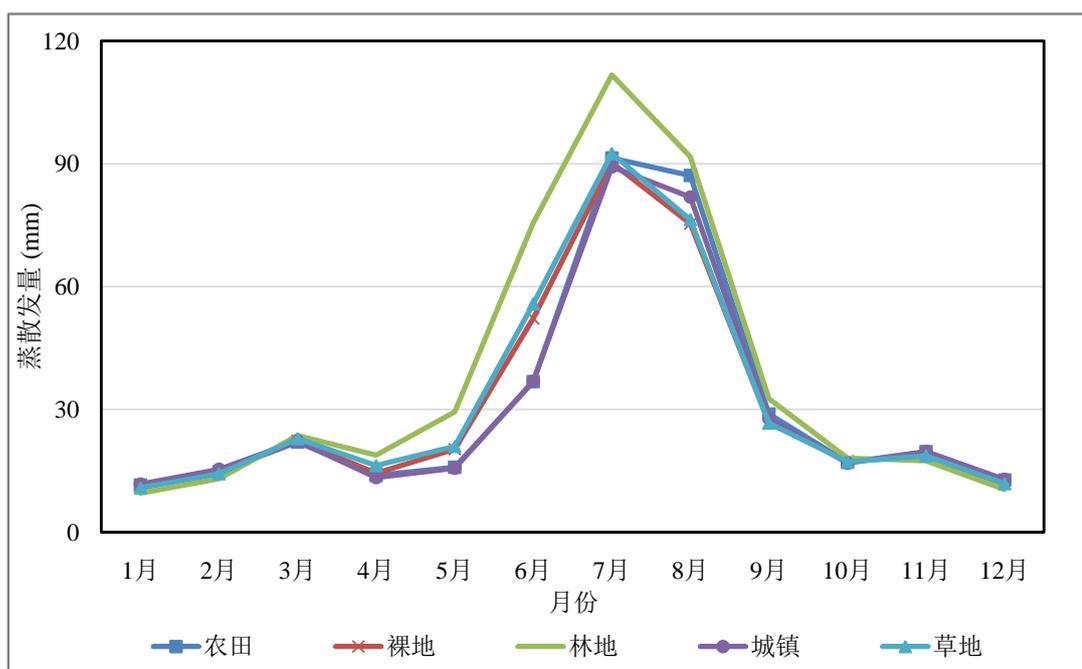


Figure 9. Intra-year distribution of evapotranspiration by different land use types from 2008 to 2014

图 9. 2008 年~2014 年不同土地利用类型的蒸散发量的年内分布

从图 9 中可以看出, 在 11、12、1、2 月份各种土地利用类型的蒸散发量区别不大, 在某些月份林地的蒸散发量相比其他土地利用类型的蒸散发量要小, 这与林地年均蒸散发量最大正好相反。原因可能是冬天的时候嫩江流域林地都被冰雪所覆盖, 也很少受到人类活动影响, 十分不利于蒸散发。不过到了 6、7、8 月份, 林地的蒸散发量要远远大于其他土地利用类型的蒸散发量。

**Table 4.** Coefficient of variation of annual changes in different land use types**表 4.** 不同土地利用类型年内变化的变异系数

土地类型	农田	裸地	林地	城镇	草地
变异系数	87.2%	81.7%	88.8%	84.7%	81.8%

结合图 3, 可以发现每种土地利用类型的年内分布在 4 至 9 月份的差别很大, 分别计算每种土地利用类型的变异系数, 变异系数可以反映一组数据的离散程度。由表 4 可知, 林地的变异系数最大, 裸地的变异系数最小。这表明林地的月均值离散程度最大, 这是因为林地的蒸散发量在一年中对温度和降雨量的影响最敏感。

## 5. 结论

(1) 通过嫩江流域水文站的降雨、径流资料统计分析, 利用水量平衡方程, 实测降水量与实测径流量估算的流域的蒸散发量与 MOD16 产品测算出的流域蒸散发量有较好的一致性, 所以 MOD16 产品的精度和有效性能够满足用于研究嫩江流域地表蒸散发量时空变化分析的需求。

(2) 通过统计分析年尺度的 MOD16 产品, 从时间序列上来看, 在 2000 年~2014 年中, 最大值出现在 2014 年, 最小值出现在 2009 年, 多年平均蒸散发量为 396 mm/a。从空间分布上来看, 流域地表蒸散发量呈现出由北向南逐渐减小的趋势。

(3) 嫩江流域蒸散发量年内分布由于受到气温、降雨量、风速、太阳辐射等影响, 各月间会出现较大的波动。大致呈现双峰型的分布趋势。在三月会出现一个小峰值, 在七月或八月出现一年中的极大值。而一年中超过一半的蒸发量出现在 6、7、8 月。

(4) 通过 2000 年~2014 年的年尺度的 MOD16 产品结合嫩江流域的土地利用类型, 可以分析得到林地的年均蒸散量最大, 达到 480.6 mm/a。之后依次是草地、农田、城镇、裸地。

(5) 通过 2008 年~2014 年的月尺度的 MOD16 产品结合嫩江流域的土地利用类型, 可以分析得到各种土地利用类型的蒸散发量的年内分布于整个流域的蒸散发量的年内分布大致吻合, 但是林地的月均蒸散发量变异系数最大, 裸地的最小。这种现象是各个土地利用类型受到自身特性、气象条件、农作物特性和人类活动等综合作用的结果。

## 基金项目

中国长江三峡集团有限公司科研项目资助(0799251, 0704189)。

## 参考文献

- [1] 缪韧. 水文学原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [2] 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.
- [3] 赵昱响. 基于遥感数据的蒸散量估算研究概述[J]. 科技信息, 2014(8): 94, 128.
- [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.
- [5] 位贺杰, 张艳芳, 朱妮, 王鹏涛, 喻元. 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.
- [6] 贺添, 邵全琴, 等. 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, 2014, 16(6): 10.
- [7] 曾丽红, 宋开山, 张柏, 王宗明, 杜嘉, 等. 松嫩平原不同地表覆盖蒸散发特征的遥感研究[J]. 农业工程学报, 2010, 26(9): 233-242.

- 
- [8] 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, 23(9): 1536-1543.
- [9] 曾丽红, 宋开山, 张柏, 等. 基于 SEBAL 模型与 MODIS 产品的松嫩平原量蒸散发研究[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(1): 140-147.
- [10] 董李勤, 章光新, 王毅勇, 等. 气候变化对嫩江流域湿地水文水资源的影响及适应对策[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国科学院研究生院(东北地理与农业生态研究所), 2013.
- [11] Masutomi, Y., Inui, Y., Takahashi, K., *et al.* (2009) Development of Highly Accurate Global Polygonal Drainage Basin Data. *Hydrological Processes*, **23**, 572-584. <https://doi.org/10.1002/hyp.7186>
- [12] Mu, Q.Z., Zhao, M.S. and Running, S.W. (2011) Improvements to a MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration Algorithm. *Remote Sensing of Environment*, **115**, 1781-1800. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.02.019>