

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.02.018

# 基于知识图谱的长江流域内地表蒸散研究进展

季永月<sup>1,2</sup>, 陈吉龙<sup>1</sup>, 唐青青<sup>1,2</sup>, 吴胜军<sup>1</sup>, 晏黎明<sup>3</sup>, 谭大明<sup>4</sup>

(1. 中国科学院重庆绿色智能技术研究院, 重庆 400714; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;  
3. 荆江水文水资源勘测局, 湖北 荆州 434099; 4. 西藏自治区农牧科学院农业资源与环境研究所, 西藏 拉萨 850000)

**摘要:**以 CNKI 和 Web of Science 数据库为数据源, 将长江流域范围内地表蒸散研究与国内外地表蒸散研究利用 CiteSpace 信息可视化软件进行了计量比较分析。结果表明:1992—2020 年, 国内外共发表地表蒸散为主题的文章 5 216 篇, 其中长江流域范围内 179 篇, 2016 年前中英文文章数量皆呈增加趋势; 长江流域内地表蒸散研究中, 南京信息工程大学、河海大学和中国科学院南京地理与湖泊研究所论文数量在研究机构中名列前茅, 这些研究机构主要依靠所属试验站提供实测蒸散数据和气象数据进行蒸散模拟与验证研究; 研究内容以蒸散获取和数值模拟为重点, 其次为地表蒸散变化机制与时空演变过程分析, 而关于地表蒸散变化的生态环境效应研究相对较少; 从高引用趋势可以发现, 在地表蒸散估算精度不断提高的情况下, 学者们也逐渐关注蒸散组分、变化机制的研究, 环境因子对长江流域内地表蒸散的影响研究较多, 而土地利用、地表覆被、植被类型等下垫面性质及变化对蒸散的影响研究较少; 蒸散变化效应分析则主要集中在地表蒸散对水平衡、湿地处理以及作物产量的影响。

**关键词:**地表蒸散; 长江流域; 计量分析; CiteSpace

**中图分类号:** P426.2; G250      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1004-6933(2022)02-0128-11

**Research progress on land-surface evapotranspiration in the Yangtze River Basin based on knowledge mapping**//JI Yongyue<sup>1,2</sup>, CHEN Jilong<sup>1</sup>, TANG Qingqing<sup>1,2</sup>, WU Shengjun<sup>1</sup>, YAN Liming<sup>3</sup>, TAN Daming<sup>4</sup> (1. *Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China*; 2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*; 3. *Jingjiang Hydrology and Water Resources Survey Bureau, Jingzhou 434099, China*; 4. *Institute of Agricultural Resources and Environment, Tibet Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences, Lhasa 850000, China*)

**Abstract:** Taking CNKI and web of science database as data sources, a bibliometric comparative analysis was carried out on the study of land-surface evapotranspiration in the Yangtze River Basin and that of domestic and foreign countries by using CiteSpace information visualization software. The results showed that from 1992 to 2020, 5216 articles on land-surface evapotranspiration were published at home and abroad, including 179 articles in the Yangtze River Basin. The number of articles in Chinese and English showed an increasing trend before 2016. In the study of land-surface evapotranspiration in the Yangtze River Basin, Nanjing University of Information Science and Technology, Hohai University and Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences ranked among the top three research institutions. These research institutions mainly rely on the measured evapotranspiration data and meteorological data provided by their subordinate experimental stations to carry out evapotranspiration simulation and verification research. The research content focuses on evapotranspiration acquisition and numerical simulation, followed by the analysis of land-surface evapotranspiration change mechanism and temporal and spatial evolution process, while there are relatively few studies on the eco-environmental effects of land-surface evapotranspiration change. From the highly cited trend, it can be found that with the continuous improvement of the estimation accuracy of land-surface evapotranspiration, scholars gradually pay attention to the study of evapotranspiration components. In terms of change mechanism, there are many studies on the impact of environmental

基金项目: 国家自然科学基金(42061015); 中国科学院青年创新促进会项目(2018417)

作者简介: 季永月(1996—), 女, 硕士研究生, 主要从事陆面过程观测与模拟研究。E-mail: jiyongyue\_happy@163.com

通信作者: 陈吉龙(1983—), 男, 副研究员, 博士, 主要从事陆面过程观测与模拟研究。E-mail: chenjilong@cigit.ac.cn

factors on land – surface evapotranspiration in the Yangtze River Basin, but there are few studies on the impact of land use, surface cover, vegetation type and other underlying surface properties and changes on evapotranspiration. The effect analysis of evapotranspiration mainly focuses on the impact of land-surface evapotranspiration on water balance, wetland treatment and crop yield.

**Key words:** land-surface evapotranspiration; the Yangtze River Basin; bibliometric analysis; CiteSpace

地表蒸散 (evapotranspiration, *ET*) 是指特定区域内不同下垫面性质和气候要素影响下, 地表蒸发和植物组织蒸腾流失到大气中的水分总量, 包括土壤蒸发、植被蒸腾、冠层截留蒸发和积雪升华等<sup>[1]</sup>。在全球尺度上, 地表蒸散约占到降水量耗散的 70%<sup>[2]</sup>。在干旱区域超过 90% 的降水量以蒸散的形式返回到大气中<sup>[3]</sup>, 相应的陆面潜热通量约占净辐射通量的 51% ~ 58%<sup>[4]</sup>。由此可见, 地表蒸散既是土壤-植被-大气系统中能量平衡的重要组分, 也是水平衡的最主要分量<sup>[5]</sup>, 是连接能量循环和碳水循环的重要纽带<sup>[6]</sup>。作为水循环的主要组成部分, 地表蒸散研究有利于水资源、农业和生态系统健康监测; 作为能量平衡的重要组分, 地表蒸散和相关热通量的变化对研究区域和全球气候变化也具有重要意义<sup>[7]</sup>。

长江流域 (90°33'E ~ 122°25'E, 24°30'N ~ 35°45'N) 发源于青藏高原的唐古拉山脉各拉丹冬峰西南侧, 干流流经青海、西藏、四川、云南、重庆、湖北、湖南、江西、安徽、江苏、上海等 11 个省、自治区、直辖市, 注入东海, 支流展延至贵州、甘肃、陕西、河南、浙江、广西、广东、福建等 8 个省、自治区。流域总面积约 180 万 km<sup>2</sup>, 占国土面积的 18.8%<sup>[8]</sup>, 是我国第一大流域、世界第三大流域。2017 年长江流域总人口占全国人口总量的 33%, 地区生产总值占全国的 35.4%, 经济总量占全国的 50% 以上<sup>[9]</sup>, 是中国经济发展水平和贸易开放化水平较高的地区之一。流域内降雨和蒸散时空分布不均, 长江流域上游年降水量约 200 ~ 800 mm, 年蒸散约 300 ~ 600 mm; 中下游年降水量约 800 ~ 1 600 mm, 且多集中在夏季, 年蒸散则超过 700 mm<sup>[10]</sup>, 可见长江流域蒸散占总流域降水消耗的绝大部分, 是水量平衡的最大支出项。另外, 长江流域的居民用水、灌溉、航运、排污以及南水北调工程、三峡工程等使长江流域的土地利用发生急剧变化<sup>[11-13]</sup>, 这一系列地表覆被的变化必然会打破原来的土壤-植被-大气系统能量和水汽交换平衡, 从而使流域内地表蒸散发生变化。近年来, 长江流域气候发生了显著变化, 极端降水事件逐渐增加<sup>[14]</sup>, 使流域内洪水干旱灾害频繁。而作为水平衡和能量平衡的主要纽带, 研究长江流域地表蒸散变化特征、机制与效应对研究流域水文及气候变化机

制、水土资源管理、生态环境保护都具有重要意义。

国内学者对长江流域地表蒸散研究起步晚, 但近年来发展迅速, 在地表蒸散数据获取及数值模拟、时空演变、变化机制和生态环境效应方面都已开展了一些研究, 但不同文献关注的科学问题和研究侧重点不同。目前仍未见对该区域地表蒸散研究的文献计量分析, 导致对长江流域范围内地表蒸散研究状况仍缺乏总体了解。鉴于此, 本文基于文献计量分析的方法和 CiteSpace 信息可视化软件, 对长江流域范围内地表蒸散有关研究文献进行了统计、分析和述评, 并以 Web of Science 核心集中全球范围下的地表蒸散研究作为比较, 回顾地表蒸散研究热点, 分析长江流域范围内地表蒸散研究现状和特征, 探讨地表蒸散研究存在的主要问题和发展趋势, 以期后续相关的研究提供参考和借鉴。

## 1 研究数据与方法

本文数据来自中国知网 (CNKI) 核心期刊库和 Web of Science 核心集数据库, 借助 CiteSpace 计量软件进行分析。地表蒸散包括植被蒸腾与土壤蒸发, 因此蒸散又可称为蒸发、蒸腾或腾发量, 以及代表着农田植株蒸腾量和行间蒸发量的作物需水量。中文文献以 CNKI 为数据源, 并分别以篇名中含“蒸散”“蒸发”“蒸腾”“腾发”“作物需水量”, 但不包括“参考”“潜在”为检索条件, 共检索到中文文献 1 421 篇, 进一步筛选出主题为蒸散、研究区在长江流域内的文献共 127 篇, 其中期刊论文 86 篇, 学位论文 41 篇。英文文献以 Web of Science 为文献信息获取平台, 以标题中包含“evapotranspiration”但不包括“potential”“reference”为检索条件, 共检索出外文文献 3 795 篇, 通过阅读摘要或全文进一步确定研究范围在长江流域的英文文章共 52 篇。因此, 长江流域地表蒸散论文数量共 179 篇, 而 Web of Science 核心集中提供的全球地表蒸散论文数量共 3 795 篇。中英文文献检索及引用信息查询截止时间为 2020 年 7 月。

## 2 结果与分析

### 2.1 文献总体情况

以长江流域范围内地表蒸散为主题的中文文献

共 127 篇,占地表蒸散中文发文量的 8.94%。其中,第一篇中文论文发表在 1992 年(图 1),康文星等<sup>[15]</sup>和李临颖<sup>[16]</sup>分别在 1992 年 7 月 1 日在《植物生态学与地植物学学报》与《应用气象学报》发表了“杉木人工林水量平衡和蒸散的研究”和“冬小麦农田日蒸散量的计算”。1995 年前仅仅检索到 7 篇关于长江流域地表蒸散的论文,且均是有关如何从仪器或在 Penman-Monteith 公式基础上获取地表蒸散量。1996—2001 年未检索到相关中文论文,直到 2002 年才有长江流域地表蒸散研究成果发表,2002—2016 年公开发表的中文论文呈逐年增加的趋势,而 2016 年后中文发文量呈下降趋势。长江流域地表蒸散研究的英文文献共 52 篇,占国内外地表蒸散英文发文量的 1.37%。Zhao 等<sup>[14]</sup>于 2007 年在《IEEE》发表了“A modified S-SEBI algorithm to estimate evapotranspiration using landsat ETM plus image and meteorological data over the Hanjiang Basin, China”一文,这是公开检索到的有关长江流域地表蒸散研究的第一篇英文文献,2007—2016 年英文论文量较少,随着测量仪器的精确度、灵敏度和稳定性逐渐提高、地表蒸散空间尺度的扩展以及模式的利用与改进,2016 年后发文量也逐渐增多,到 2018 年达到 11 篇,但 2019 年发文量比 2018 年下降了 3 篇。

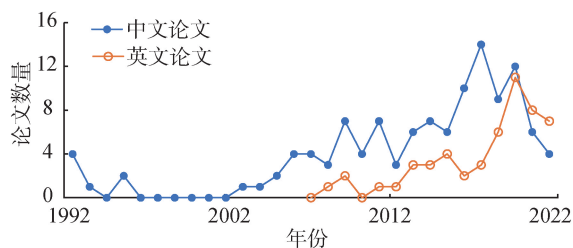


图 1 1992—2020 年长江流域地表蒸散发文量

Fig. 1 Number of papers of land-surface evapotranspiration in the Yangtze River Basin

Web of Science 核心集数据库中研究地表蒸散的文章共 3795 篇,且起始于 1962 年,较长江流域地表蒸散研究早了 30 年。从发文趋势看(图 2),1962—2002 年,Web of Science 的核心集数据库中地表蒸散研究共发文 832 篇,占总发文量的 23.31%,年均发文量 20.3 篇,年均增加 0.90 篇;2003—2006 年发文量为 256 篇,占总发文量的 7.17%,年均发文量 64.0 篇,年均增加 10.0 篇;2007—2019 年发文量为 2481 篇,占总发文量的 69.52%,年均发文量高达 190.8 篇,年均增加 20.7 篇,发文量明显增加。2003 年后地表蒸散研究量呈现快速增加趋势,这主要由于遥感影像技术的快速

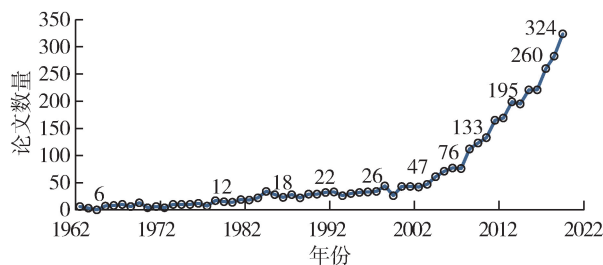


图 2 Web of Science 核心集地表蒸散发文量

Fig. 2 Number of papers on land-surface evapotranspiration in Web of Science core set

发展为地表蒸散进行区域尺度的研究提供了丰富的数据基础和处理手段。

## 2.2 研究机构分布

对 179 篇论文所属研究机构进行统计,主要发文量的研究机构如表 1 所示,其中南京信息工程大学发文量最多,该机构主要利用南京信息工程大学农业气象试验站(118°42'E,32°14'N)得到多年冬小麦农田实测大型称重式蒸渗仪数据及农业气象观测数据,分析不同时间尺度农田蒸散量的分布特征及其影响因子,同时利用实测值来修正模型参数<sup>[17]</sup>。除站点分析外,南京信息工程大学研究团队也会利用水平衡法验证 GLEAM 卫星同化产品<sup>[10]</sup>与重力恢复和气候试验(gravity recovery and climate experiment, GRACE)光学遥感数据<sup>[18]</sup>,并得到长江流域地表蒸散的时空格局。发文量次之的是河海大学,该机构主要研究农田蒸散及节水灌溉对蒸散速率的影响<sup>[19-20]</sup>。中国科学院南京地理与湖泊研究所主要利用地表温度/归一化植被指数三角法对 MOD16 实际蒸散资料进行修正,得到鄱阳湖<sup>[21]</sup>、太湖流域地表蒸散量<sup>[22]</sup>,发文量仅次于南京信息工程大学和河海大学。江苏大学研究内容集中于温室作物蒸散,发文量有 8 篇。中国科学院地理科学与自然资源研究所主要依靠千烟洲试验站利用连续涡动协方差测量得到较为精确的试验站点实测蒸散数据,一方面模拟蒸散及其组分变化,而后利用实测数据进行验证<sup>[23-24]</sup>,另一方面利用实测蒸散数据研究地表蒸散年际变化对气候因子和生态系统的响应<sup>[25]</sup>,或利用基于过程的模型模拟得到鄱阳湖流域多年蒸散量<sup>[26]</sup>。武汉大学、四川大学研究范围分别集中在江西稻田、岷江流域。南京大学对长江流域范围内地表蒸散的研究比较分散,基于区域的鄱阳湖流域、汉江流域、长江三角洲研究,或者基于试验站点的卧龙自然保护区、南京 4 种湿地研究都有所涉及。四川农业大学 4 篇地表蒸散文献研究内容主要集中于四川省不同地区作物蒸散。中国科学院成都山地灾害与环境研究所、南京林业大学、兰州大



学、江西师范大学、东南大学依据其研究区域与研究对象的差别,研究内容分别集中在贡嘎山冷杉林、次生栎林与岷江冷杉、长江源区、鄱阳湖流域、人工湿地的蒸散估算、时空特征与影响因素分析上。因此,对于小范围、点尺度上的地表蒸散研究,如农田、次生栎林与岷江冷杉、贡嘎山冷杉林蒸散,均为隶属于研究机构的试验站点提供实测水汽通量及气象数据进行分析,此类研究区域一般为试验站及其周围小范围区域。而对于流域内、面尺度的地表蒸散研究,如鄱阳湖流域、太湖流域等,则更多通过遥感数据模拟得到,因此研究区域与研究机构所处位置关联不大。

表 1 主要研究机构地域分布和数量统计

Table 1 Regional distribution and quantity statistics of main research institutions

| 研究机构              | 区域 | 论文数量 |
|-------------------|----|------|
| 南京信息工程大学(原南京气象学院) | 江苏 | 28   |
| 河海大学              | 江苏 | 11   |
| 中国科学院南京地理与湖泊研究所   | 江苏 | 10   |
| 江苏大学              | 江苏 | 8    |
| 中国科学院地理科学与自然资源研究所 | 北京 | 5    |
| 武汉大学              | 湖北 | 5    |
| 四川大学              | 四川 | 5    |
| 南京大学              | 江苏 | 5    |
| 四川农业大学            | 四川 | 4    |
| 中国科学院成都山地灾害与环境研究所 | 四川 | 3    |
| 南京林业大学            | 江苏 | 3    |
| 兰州大学              | 甘肃 | 3    |
| 江西师范大学            | 江西 | 3    |
| 东南大学              | 江苏 | 3    |

基于 CiteSpace 软件中 country 和 institution 分析功能,对 3 795 篇文献的论文所属国家和机构进行分析,得到机构与国家合作图谱(图 3)。从发文量可以看出,Web of Science 核心集中地表蒸散研究集中在中美两国。但在机构发文上,中国科学院、美国农业部、中国科学院大学、北京师范大学以及内布拉斯加大学发文数位居前 5, 占总发文量的

23. 27%; 发文量在 40 篇以上的机构共 16 所, 占总发文量的 37. 55%, 说明地表蒸散的发文量主要集中在前 5 所机构, 其他机构对于蒸散发的研究较少。其中, 南京信息工程大学发文量排名第 13, 共发表关于地表蒸散的文章 42 篇, 这之中有 7 篇研究范围在长江流域内, 表明除了局部的试验站观测外, 南京信息工程大学也进行大尺度或其他区域地表蒸散规律的研究, 对于地表蒸散的研究已经相当成熟。从国家上说, 中美两国对于地表蒸散的发文量要远多于其他国家, 但中国发文量高的机构要远多于美国, 说明美国进行地表蒸散的研究机构更分散, 而中国研究机构关于地表蒸散的研究则更为集中、系统。

2. 3 关键词分类统计

2. 3. 1 长江流域地表蒸散研究主题与关键词统计

根据长江流域地表蒸散研究内容进一步将文献分为以下 4 个主题: ①地表蒸散数据获取(主题 I)。蒸散数据的获取主要分为地面实测及模型模拟。地面实测主要利用蒸渗仪、波文比-能量平衡观测系统、涡动相关仪、大孔径闪烁仪等不同地面观测仪器得到不同时空尺度蒸散量<sup>[27]</sup>。目前遥感估算区域水热通量的方法主要有地表能量平衡模型(包括单源模型如 SEBAL 模型, 双源模型如 Shuttleworth-Wallace 模型)、Penman-Monteith 公式、温度-植被指数特征空间方法、Priestley-Taylor 类模型和其他方法(包括经验统计方法、互补相关模型和陆面过程与数据同化方法)<sup>[28]</sup>。②地表蒸散时空演变过程(主题 II), 包括长江流域地表蒸散空间分异规律及不同时间尺度下(年、季度、月)地表蒸散变化趋势分析。③地表蒸散变化机制(主题 III), 包括主要气象因子(如辐射、降水、气温等)以及宏观尺度的气候变化(如环流、厄尔尼诺现象等)、植被覆盖、土地利用对地表蒸散的影响。④地表蒸散变化的生态环境效应(主题 IV), 包括地表蒸散变化对流域内水分收

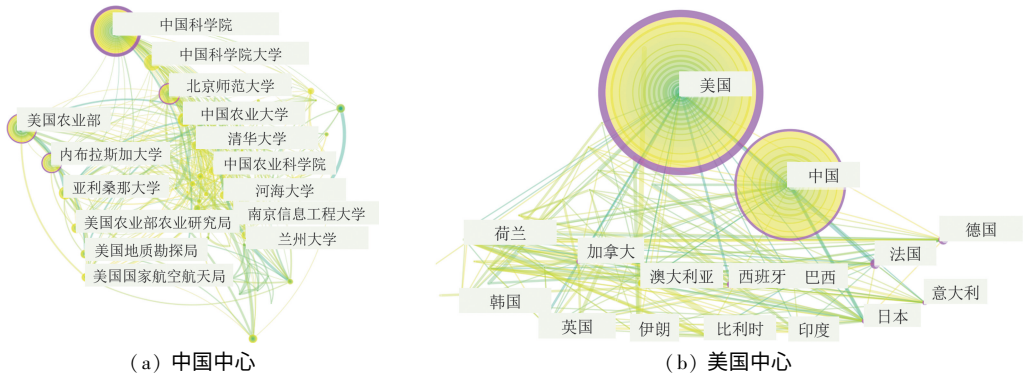


图 3 Web of Science 核心集地表蒸散研究的机构和国家知识图谱

Fig. 3 Organization and national knowledge mapping of land-surface evapotranspiration research in Web of Science core set

支、能量通量分配、土地覆盖变化等的影响。

通过统计不同主题中英文发文量得到,目前对长江流域内地表蒸散的研究还主要集中于地表蒸散数据获取及数值模拟方面,其中英文发文量分别为 66、26 篇,其次为蒸散变化机制分析,中英文发文量分别为 36、22 篇,地表蒸散时空演变分析文章数量次之,中英文分别有 40、13 篇,关于蒸散变化的生态环境效应的文章数量最少,中英文分别有 6、3 篇。

对不同的研究主题论文中出现次数较多的关键词进行分类统计(表 2),可以发现每个研究主题重点关注的内容和对象。主题Ⅰ地表蒸散数据获取及数值模拟重点研究蒸散模拟的原理及模型,因此出现次数较多,关键词也与模型、原理、仪器及方法有关。主题Ⅱ时空演变过程除了重点研究区域地表蒸散时空变化特征外,还会进一步分析影响因素,如“土地利用/土地覆被”“气候变化”及其对蒸散变化的贡献,以解释地表蒸散变化机制。因此,主题Ⅱ关键词中除了出现最多的“时空变化特征”“时空分布”“时空格局”外,与主题Ⅲ变化机制的关键词“土地利用/土地覆被变化”“气候变化”也有一定的重合。主题Ⅳ蒸散变化的生态环境效应重点研究地表蒸散对水资源管理(如“农作物灌溉”)、水平衡、植被恢复的影响,因此该主题下出现次数较多的关键词为“人工湿地”“蒸腾”“森林恢复”“降水”“径流”。

表 2 长江流域地表蒸散研究论文关键词的分类统计

Table 2 Classification and statistics of key words in research papers on land-surface evapotranspiration in the Yangtze River Basin

| 研究内容        | 关键词                                                                                 |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 地表蒸散数据获取    | 稻田(蒸散)、Shuttleworth-Wallace 模型、Penman-Monteith 公式、冠层阻力、水量平衡、土壤蒸发、蒸渗仪、遥感、涡度协方差、作物需水量 |
| 地表蒸散时空演变过程  | 时空变化特征(时空分布、时空格局)、植被恢复、土地利用/覆被变化、水量平衡、气候变化、鄱阳湖流域、MODIS、作物需水量                        |
| 地表蒸散变化机制    | 植被指数、灌溉、涡度相关法、土地利用/覆被变化、太湖流域、气象因子、鄱阳湖流域、三峡库区、能量平衡(分配)、MODIS                         |
| 蒸散变化的生态环境效应 | 人工湿地、蒸腾、森林恢复、降水、径流、灌溉效率                                                             |

表 3 长江流域地表蒸散研究论文中高频率关键词

Table 3 High frequency keywords in research papers on land-surface evapotranspiration in the Yangtze River Basin

| 关键词                 | 词频 | 关键词      | 词频 | 关键词                     | 词频 |
|---------------------|----|----------|----|-------------------------|----|
| 蒸散(地表蒸散/实际蒸散/蒸散发)   | 97 | 蒸发蒸腾     | 9  | 土壤水分                    | 5  |
| 时空特征                | 29 | 作物需水量    | 8  | 长江源区                    | 5  |
| 能量平衡/分配/交换/收支/限制/通量 | 27 | 土壤蒸发     | 7  | 气候变化                    | 5  |
| 遥感                  | 15 | MODIS    | 6  | 腾发量                     | 4  |
| 水稻(稻田/杂交稻/再生稻)      | 15 | 三峡库区     | 6  | SEBS                    | 4  |
| 水量平衡/水量收支           | 13 | 蒸渗仪      | 6  | Shuttleworth-Wallace 模型 | 4  |
| 植被蒸腾                | 13 | 模型       | 6  | 干湿交替                    | 4  |
| 灌溉(节水灌溉/灌溉制度/灌溉效率)  | 13 | 蒸发       | 6  | 冠层阻力                    | 4  |
| Penman-Monteith 公式  | 11 | SEBAL 模型 | 5  | 互补相关                    | 4  |
| 作物系数                | 11 | 冬小麦      | 5  | 降水                      | 4  |
| 鄱阳湖流域               | 10 | 敏感性分析    | 5  | 秦淮河流域                   | 4  |

对所有论文中出现频次大于 4 次的关键词进行统计排序(表 3)。其中,蒸散、时空特征、能量平衡、遥感、水稻、水量平衡与水量收支、植被蒸腾、灌溉是出现频率最高的词汇;鄱阳湖流域、三峡库区、长江源区、秦淮河流域是热点研究区;而水稻、冬小麦是出现频次最高的农田蒸散研究对象;时空特征/变化/格局、Penman-Monteith 公式、遥感是出现最频繁的研究内容。

2.3.2 Web of Science 核心集地表蒸散研究主题与关键词统计

CiteSpace 文献共引分析用来探究研究领域的重点专题及其发展过程(图 4),可以看出 Web of Science 核心集中地表蒸散研究侧重于:①时空特征分析(包括日变化、季节变化、年际变化);②影响因素分析,尤其是地表蒸散对气候变化、土地利用的响应,主要是研究全球变暖(如二氧化碳浓度增加、温室效应增强)对区域地表蒸散的影响;③蒸散模型方法或参数改进与修正,另外蒸散组分的研究也初具规模。因此,较之 Web of Science 核心集中地表蒸散研究而言,长江流域内地表蒸散响应全球变暖方面的研究还较为薄弱,实际上全球变暖正在改变地球上的水碳循环过程以及能量平衡<sup>[29]</sup>,准确评估历史和未来地表蒸散变化有助于了解全球变暖背景下大气水汽需求、土壤湿度和地下水含量变化,以便

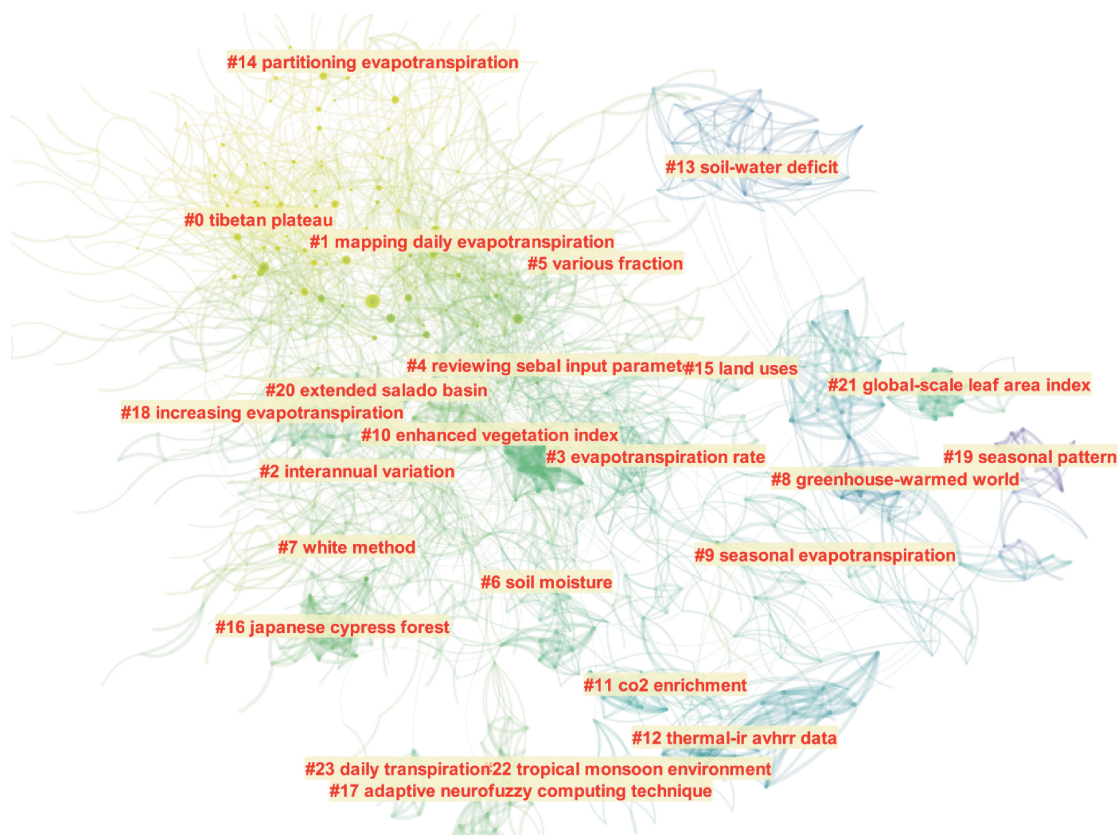


图 4 基于 Web of Science 核心集全部地表蒸散论文的 CiteSpace 文献共引知识图谱

Fig. 4 CiteSpace literature co-citation knowledge mapping based on all land-surface evapotranspiration papers of Web of Science core set

为地方水资源管理提供决策。

关键词知识图谱由被分析文献的所有关键词提取绘制得出,可以直观地呈现出该研究领域的中心词汇及研究重点<sup>[30]</sup>。对 Web of Science 核心集地表蒸散论文进行关键词共现分析(图 5),可以发现地表蒸散的关键词知识图谱的最大节点为“蒸散”,其次为“蒸发”“模型”和“蒸腾”,这 3 个关键词分别出现了 838、579、429 次,表明目前对于蒸散的两大组成部分即蒸发、蒸腾的侧重研究比较多。这与研究目的有关,蒸发是水循环中最直接受下垫面和气

候变化影响的一部分,关于蒸发的研究更多关联到地表覆盖、气候变化对自由水面蒸发、土壤蒸发、土壤湿度、植被需水量的影响,研究尺度更宏观;蒸腾是植物对水分吸收和运输的主要动力,是土壤-植物-大气连续体系统进行水分运移和热量传输的基础<sup>[31]</sup>,目前蒸腾研究主要在农作物生长、灌溉、大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高对植被蒸腾耗水的影响等。

## 2.4 高频引用论文

长江流域内地表蒸散研究被引用大于 20 次的论文如表 4 所示,引用次数最高的论文是“长江源区蒸散量变化规律及其影响因素”。高频引用论文中有 9 篇研究蒸散量获取、模拟及计算,表明蒸散量的数据获取及模拟依然是关注的热点方向。其他的高频引用论文则侧重于蒸散时空演变过程,而重点关注长江流域地表蒸散变化因素与效应的文章引用次数较少,说明长江流域地表蒸散研究优势仍在机理与模型研究阶段。其中,在侧重于地表蒸散数据获取的 8 篇文章,多为利用实测蒸散数据进行直接分析或用于模型检验的论文,在 2008、2012 年也有两篇关于蒸散组分的高引论文。起初的地表蒸散研究利用蒸渗仪观测获取数据,并分析蒸散的变化规律及与环境因素的关系,随着研究时空尺度的扩大,有限的地面观测已无法满足区域尺度上蒸散研究的

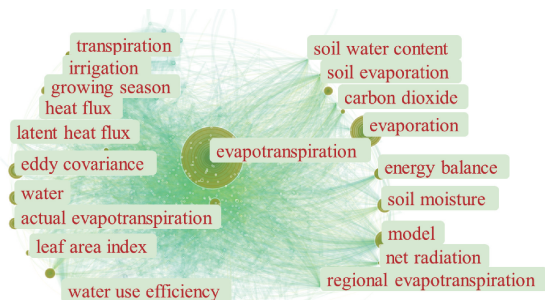


图 5 基于 Web of Science 核心集地表蒸散论文的关键词共现可视化知识图谱

Fig. 5 Keyword co-occurrence visual knowledge mapping of land-surface evapotranspiration papers based on Web of Science core set



表 4 长江流域地表蒸散研究引用频次较高的论文

Table 4 Highly cited papers on land-surface evapotranspiration in the Yangtze River Basin

| 篇名                                                                                                                        | 第一作者    | 年份   | 文献来源                                                | 被引次数 | 所属主题 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|------|-----------------------------------------------------|------|------|
| 长江源区蒸散量变化规律及其影响因素                                                                                                         | 裴超重     | 2010 | 现代地质                                                | 413  | Ⅱ、Ⅲ  |
| 杉木人工林水量平衡和蒸散的研究                                                                                                           | 康文星     | 1992 | 植物生态学与地植物学学报                                        | 84   | Ⅱ    |
| 基于 MOD16 产品的鄱阳湖流域地表蒸散量时空分布特征                                                                                              | 吴桂平     | 2013 | 地理研究                                                | 78   | Ⅱ    |
| 贡嘎山亚高山森林带蒸散特征模拟研究                                                                                                         | 程根伟     | 2003 | 北京林业大学学报                                            | 71   | Ⅱ    |
| 汉江上游流域蒸散量计算方法的比较及改进                                                                                                       | 张东      | 2005 | 资源科学                                                | 56   | I    |
| 红壤坡地不同土地利用方式土壤蒸发和植被蒸腾规律研究                                                                                                 | 王晓燕     | 2007 | 农业工程学报                                              | 38   | Ⅱ、Ⅲ  |
| 控制灌溉条件下水稻蒸发蒸腾量及作物系数试验研究                                                                                                   | 丁加丽     | 2006 | 河海大学学报(自然科学版)                                       | 35   | Ⅱ、Ⅲ  |
| 杉木人工林蒸散规律的研究及乱流扩散法应用的探讨                                                                                                   | 康文星     | 1992 | 植物生态学与地植物学学报<br>(现更名为《植物生态学报》)                      | 34   | Ⅱ    |
| Watershed evapotranspiration increased due to changes in vegetation composition and structure under a subtropical climate | SUN Ge  | 2008 | Journal of the American Water Resources Association | 34   | Ⅲ    |
| 基于遥感的千烟洲人工林蒸散及其组分模拟研究                                                                                                     | 魏焕奇     | 2012 | 自然资源学报                                              | 32   | I    |
| 基于改进的 SEBAL 模型估算区域蒸散发(学位论文)                                                                                               | 陈玲      | 2007 | 兰州大学                                                | 31   | I    |
| 基于 Penman-Monteith 方程的节水灌溉稻田蒸散量模型                                                                                         | 丁加丽     | 2010 | 农业工程学报                                              | 31   | I    |
| 作物需水量灰色预测模型                                                                                                               | 郭宗楼     | 1995 | 水电能源科学                                              | 30   | I    |
| 土壤蒸发、蒸散模型的研究                                                                                                              | 蒋俊明     | 1995 | 四川林业科技                                              | 25   | I    |
| 基于 MODIS 数据的湖西区地表蒸散发遥感估算(学位论文)                                                                                            | 宋鑫博     | 2013 | 南京师范大学                                              | 22   | I    |
| 冬小麦农田日蒸散量的计算                                                                                                              | 李临颖     | 1992 | 应用气象学报                                              | 22   | I    |
| Partitioning evapotranspiration flux components in a subalpine shrubland based on stable isotopic measurements            | XU Zhen | 2008 | Botanical Studies                                   | 22   | I    |

需要,这时遥感影像提供的地表参数被作为输入数据,地表蒸散的模型估算方法也不断出现,但不同模型、不同区域地表蒸散估算精度不一,如利用通量观测站实测数据对中国的地表蒸散模型验证,其决定系数在 0.5~0.8 之间<sup>[32]</sup>,这与模型结构、输入数据质量等有关。随着对地表蒸散过程研究的深入及数值模拟技术的发展,对长江流域蒸散组分的模拟也开展了一些探索性工作。因此,在之后关于地表蒸散的研究中,应更注重区域蒸散模拟的改善、地表蒸散变化机制与效应分析以及准确评估植被蒸腾、土壤蒸发、开阔水面蒸发、冠层截留蒸发对总蒸散趋势的影响及其影响因素。

## 2.5 长江流域地表蒸散不同主题研究进展

### 2.5.1 地表蒸散数据获取

传统的蒸散研究通常在“点”尺度上,主要方法有波文比法、涡度相关法<sup>[33]</sup>和土壤水平衡法<sup>[32]</sup>,虽然利用蒸渗仪对地表蒸散进行地面观测是目前最准确的方法<sup>[34]</sup>,但由于观测和维护成本高,导致配置有观测设备的观测站点稀少;并且由于下垫面的复杂性和水热传输的动态性<sup>[35]</sup>,这些站点的代表性也受到怀疑,限制了站点蒸散数据在区域尺度上的推广和应用。而遥感技术提供了大范围、多时相地表特征信息,为大尺度非均匀下垫面地表蒸散的动态监测提供了新途径。

长江流域范围内地表蒸散研究以蒸散数据获取及数值模拟为重点的论文共有 92 篇,与该主题相关的关键词主要有稻田(蒸散)、Shuttleworth-Wallace

模型、Penman-Monteith 公式、冠层阻力、水量平衡、土壤蒸发、蒸渗仪、遥感、涡度协方差等(表 2)。李临颖<sup>[16]</sup>最早于 1992 年采用 Penman-Monteith 公式法、能量平衡法、波文比法和空气动力学等方法估算了南京和滁州冬小麦农田日蒸散量,发现使用修正后的 Penman-Monteith 公式计算日蒸散量更为准确;周英等<sup>[36]</sup>在 1993 年引进了仅需输入常规的气象观测资料和作物叶面积指数的半经验模式来估算农田蒸散,结果发现半经验模式的精确度明显高于 Penman-Monteith 公式法。20 世纪后更多的地表蒸散计算方法引入,包括 Penman-Monteith 公式法、SEBS 模型、SEBAL 模型、Priestley-Taylor 模型、Shuttleworth-Wallace 双源模型、地表温度/归一化植被指数三角法等,但运用最多的仍属于联合国粮农组织(FAO)提供的 Penman-Monteith 公式法。

### 2.5.2 地表蒸散时空演变过程

时空演变过程也是长江流域地表蒸散研究的主要内容之一,与该主题相关的论文有 58 篇,占总发文量的 40.2%,关注的热点区域主要集中于鄱阳湖流域、岷江上游、三峡库区和长江源区等。研究表明整个长江流域年地表蒸散呈增加趋势<sup>[10,18]</sup>,尤其在长江中下游地区,由于植被蒸腾作用增强,蒸散增加趋势更快<sup>[10]</sup>,季节上,蒸散在夏季最高,秋冬季最低<sup>[18]</sup>。鄱阳湖流域地表蒸散量呈先增加后减少的“几”字形季节变化特征<sup>[37]</sup>,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 7 月<sup>[38]</sup>;空间格局呈现四周高、中间低的分布规律,尤

其在高植被覆盖区蒸散量较大<sup>[37]</sup>。岷江上游地表蒸散在 1970—2003 年呈现先上升后下降的趋势<sup>[39]</sup>,且四季都呈现下降趋势<sup>[40]</sup>,但下降转折点仍有争议。三峡库区的修建显著增加了整个区域内的地表蒸散量<sup>[18]</sup>,年际变化上呈增加趋势,且蒸散量由高到低顺序为:蓄水阶段(10—12 月)、低水位阶段(7—8 月)、高水位阶段(12 月—翌年 1 月)、放水阶段(2—5 月)<sup>[41]</sup>。

### 2.5.3 地表蒸散变化机制

研究地表蒸散变化机制有助于深入了解水文水循环过程与植被、气象因子等水热条件之间的关系。蒸散作为气候系统和陆地水循环的重要组成部分,受气候变化、人类活动和土壤水分变化的共同影响。全球水分循环给地区的干湿状况带来了不可忽视的变化<sup>[42]</sup>。当土壤水分供应充足,蒸散主要受到大气水分的限制,而当土壤过于干燥,则主要受到土壤水分的限制。Budyko<sup>[43]</sup>指出陆地蒸发主要受降水量和潜在蒸发能力的影响;在极端干旱条件下,全部降水将消耗于蒸发,当年降水量很大时,辐射平衡余热全部用于蒸发耗热。在下垫面条件一致的情况下区域实际蒸散取决于潜在蒸散。而潜在蒸散受到辐射、气温、风速、相对湿度等气象因子的影响。植被蒸腾耗水则易受环境条件和生理状况的影响,通常饱和和水汽压差、太阳辐射和土壤含水量是影响蒸腾的主要环境因子。在生理控制方面,植被通过调节叶片气孔开闭来响应外界环境变化<sup>[44]</sup>。总而言之,地表蒸散不仅受辐射、气温、风速、相对湿度等气象因子的影响,也与下垫面土地利用/覆被类型、植被类型、植被覆盖度、土壤含水量、水体面积、水位变化、地下水埋深等因素有关。

长江流域内以地表蒸散变化机制为主题的文章共有 53 篇。研究发现降水和温度对长江流域地表蒸散的影响最大,辐射和土壤水分次之,降水在中下游地表蒸散中起主要作用,温度在上游起决定性作用<sup>[10,18]</sup>;而关于下垫面对长江流域的影响研究还未涉及。鄱阳湖流域作为中国第一大淡水湖,其植被和降水量是造成流域地表蒸散空间差异的主要原因<sup>[26]</sup>。其中,气候变化对蒸散影响为负,而植被绿化影响为正。植被、气温和降水对鄱阳湖流域蒸散的单独影响均为正向,但气温和降水的联合效应会导致蒸散下降。因此,从整体上,植被恢复是驱动地表蒸散增加的主要原因,大规模造林和农业经营是使鄱阳湖流域耗水量长期呈增加趋势的主要驱动力<sup>[26]</sup>。土地利用方式对蒸散量有显著的影响,各土地利用类型的平均蒸散量由高到低为:林地、耕地、草地、未利用地<sup>[37]</sup>。

### 2.5.4 地表蒸散变化的生态环境效应

研究长江流域内地表蒸散变化的生态环境效应的论文仅有 9 篇,远远低于其他 3 个主题发文量,研究内容上主要集中在蒸散变化对水平衡、湿地中污染物的去除、湿地中颗粒的有效孔隙度以及稻田产量的作用。在地表蒸散对水平衡影响上,Liu 等<sup>[45]</sup>通过降水、实际蒸散、径流、流域储水量之间的关系研究了长江上游地区实际蒸散对年际和年内尺度上区域水平衡的影响,得出 1960—2007 年长江上游地区下垫面是大气的水源。孙磊<sup>[46]</sup>以基于 MIKE SHE 分布式生态水文模型对秦淮河流域的包括蒸散、径流过程、土壤水分以及地下水在内的全过程进行详细模拟,并量化其对流域水量平衡变化的贡献,发现蒸散是秦淮河流域水分输出的最主要贡献项。在蒸散对湿地影响方面,钱卫一<sup>[47]</sup>研究了富贵竹、美人蕉、芦苇、空心菜及茶花湿地蒸散所造成的水量损失及其对人工湿地中 COD、TN、TP 去除效果的影响,发现各湿地日 COD、TN、TP 去除率变化与各自蒸散量的日变化呈对应关系,得到湿地蒸散对湿地污染物去除率有重要影响的结论;Hua 等<sup>[48]</sup>进一步得到蒸散虽不是增加垂直流人工湿地中水源颗粒的有效孔隙度的主要因素,但由于蒸散使得孔隙内水分减少,因此相对于氧气来说,蒸散也起到了缓解生物阻塞的作用。在地表蒸散对稻田产量的影响上,包莉<sup>[49]</sup>依据 3 年重复基础数据资料及渗漏试验和控水试验,分析罗江灌区杂交稻腾发量和稻田渗漏量对产量的影响,结果发现腾发量越大,其产量越大。

## 3 结 论

a. 长江流域内地表蒸散研究起步较晚,1992—1995 年是长江流域地表蒸散研究的起始阶段,1996—2002 年研究几近停滞,2002 年后长江流域内地表蒸散研究发文量才重新出现并呈增加趋势;长江流域内地表蒸散研究的英文论文发表起始于 2007 年,较中文文献晚了 15 年,但发文量近年来增长迅速。

b. 长江流域内地表蒸散研究机构主要分布在江苏和四川,南京信息工程大学、河海大学和中国科学院南京地理与湖泊研究所论文数量在研究机构中名列前 3,这些研究机构主要依靠所属试验站进行一系列地表蒸散研究。Web of Science 核心集地表蒸散研究集中在中美两国,在机构发文上,中国科学院、美国农业部、中国科学院大学、北京师范大学以及内布拉斯加大学发文数位居前 5。

c. 长江流域范围内地表蒸散研究依然以地表蒸散数据获取和数值模拟为重点,其次为地表蒸散



变化机制与时空演变过程分析,而关于地表蒸散变化效应的研究相对少,并且较之 Web of Science 核心集中地表蒸散研究而言,长江流域内地表蒸散响应全球变暖方面的研究尤为薄弱;关键词统计中,蒸散、时空特征、能量平衡、遥感、水稻、水量平衡与水量收支、植被蒸腾灌溉是出现频率最高的词汇。Web of Science 核心集地表蒸散研究则侧重于蒸腾、土壤蒸发的论文较多,而研究冠层截留蒸发的较少。

d. 在高频引用论文中,地表蒸散数据获取和数值模拟论文依然最多,但从引用趋势可以看出,在地表蒸散估算精度不断提高的情况下,学者们也逐渐关注蒸散组分的研究。因此,在之后关于地表蒸散的研究中,应更注重区域蒸散模拟的改善、地表蒸散变化机制尤其是其对全球变暖的响应以及地表蒸散的生态环境效应的分析,更进一步准确评估植被蒸腾、土壤蒸发、开阔水面蒸发、冠层截留蒸发对总蒸散趋势的影响及其影响因素。

e. 在地表蒸散数据获取上,蒸渗仪、波文比-能量平衡观测系统、涡动相关仪等是应用最多的方法,在模型估算上,Penman-Monteith 公式、Shuttleworth-Wallace 模型等使用广泛;时空演变过程研究主要关注鄱阳湖流域、岷江上游、三峡库区、长江源区等地区;在变化机制方面,学者们更关注环境因子对长江流域地表蒸散的影响,而关于土地利用/覆被类型、植被类型等下垫面性质及变化对地表蒸散的研究还较少;长江流域内地表蒸散变化的生态环境效应分析还较为薄弱,且主要集中在地表蒸散对水平衡、湿地处理以及作物产量的影响。

## 参考文献:

[ 1 ] ZHANG F, GENG M Q, WU Q L, et al. Study on the spatial-temporal variation in evapotranspiration in China from 1948 to 2018[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 1-13.

[ 2 ] GOOD S P, NOONE D, BOWEN G. Hydrologic connectivity constrains partitioning of global terrestrial water fluxes[J]. Science, 2015, 349: 175-177.

[ 3 ] 童瑞, 杨肖丽, 任立良, 等. 黄河流域 1961—2012 年蒸散发时空变化特征及影响因素分析[J]. 水资源保护, 2015, 31(3): 16-21. (TONG Rui, YANG Xiaoli, REN Liliang, et al. Temporal and spatial characteristics of evapotranspiration in the Yellow River Basin during 1961-2012 and analysis of its influence factors[J]. Water Resources Protection, 2015, 31(3): 16-21. (in Chinese))

[ 4 ] WEI Z W, YOSHIMURA K, WANG L X, et al. Revisiting the contribution of transpiration to global terrestrial

evapotranspiration [J]. Geophysical Research Letters, 2017, 44(6): 2792-2801.

[ 5 ] TIMM A U, ROBERTI D R, STRECK N A, et al. Energy partitioning and evapotranspiration over a rice paddy in Southern Brazil[J]. Journal of Hydrometeorology, 2014, 15(5): 1975-1988.

[ 6 ] LI G, ZHANG F M, JING Y S, et al. Response of evapotranspiration to changes in land use and land cover and climate in China during 2001-2013[J]. Science of the Total Environment, 2017, 596: 256-265.

[ 7 ] CHEN Y, XIA J Z, LIANG S L, et al. Comparison of satellite-based evapotranspiration models over terrestrial ecosystems in China[J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 140: 279-293.

[ 8 ] 陈敏. 长江流域防汛抗旱减灾体系建设与成就[J]. 中国防汛抗旱, 2019, 29(10): 36-42. (CHEN Min. Construction and achievements of flood control, drought relief and disaster reduction systems in the Yangtze River Basin[J]. China Flood & Drought Management, 2019, 29(10): 36-42. (in Chinese))

[ 9 ] 雷蕾, 杨恺钧. 经济发展、进出口贸易与水污染的关系研究: 基于中国长江流域省级数据的面板计量分析[J]. 生态经济, 2018, 34(9): 166-171. (LEI Lei, YANG Kaijun. Study on the relationship between economic development, import and export trade and water pollution: analysis of panel data based on provinces along the Yangtze River[J]. Ecological Economy, 2018, 34(9): 166-171. (in Chinese))

[ 10 ] LU J, WANG G J, GONG T T, et al. Changes of actual evapotranspiration and its components in the Yangtze River valley during 1980-2014 from satellite assimilation product[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2019, 138(3): 1493-1510.

[ 11 ] 刘克, 甘宇航, 张涛, 等. 南水北调中线工程核心水源区土地利用空间格局动态变化研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2019, 42(4): 4-8. (LIU Ke, GAN Yuhang, ZHANG Tao, et al. Study on land use change in the water supplying core area of middle route of South-to-North Water Transfer Project[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2019, 42(4): 4-8. (in Chinese))

[ 12 ] 庞敏, 周启刚, 马泽忠, 等. 三峡库区蓄水前后土地利用与经济发展协调度[J]. 水土保持研究, 2020, 27(1): 66-72. (PANG Min, ZHOU Qigang, MA Zezhong, et al. Coordination degree of land use and economic development before and after storing water in Three Gorges Reservoir area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(1): 66-72. (in Chinese))

[ 13 ] 胡思, 曾祎, 王磊, 等. 长江流域极端降水的区域频率及时空特征[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(8): 2008-2018. (HU Si, ZENG Yi, WANG Lei, et al. Regional frequencies and spatio-temporal characteristics of extreme

- precipitation over Yangtze River Basin[J]. Resources and Environment in the Yangtze River Basin, 2019, 28(8): 2008-2018. (in Chinese))
- [14] ZHAO D, ZHANG W C, LIU C S. A modified S-SEBI algorithm to estimate evapotranspiration using landsat ETM+ image and meteorological data over the Hanjiang Basin, China [C]//2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Barcelona; IEEE, 2007: 3253-3256.
- [15] 康文星, 田大伦, 文仕知, 等. 杉木人工林水量平衡和蒸散的研究[J]. 植物生态学与地植物学学报, 1992(2): 187-196. (KANG Wenxing, TIAN Dalun, WEN Shizhi, et al. Studies on water balance and laws of evapotranspiration in a Chinese fir plantation[J]. Journal of Plant Ecology and Geobotany, 1992(2): 187-196. (in Chinese))
- [16] 李临颖. 冬小麦农田日蒸散量的计算[J]. 应用气象学报, 1992(2): 248-253. (LI Linying. The calculation of daily evapotranspiration in the field of winter wheat [J]. Journal of Applied Meteorology, 1992(2): 248-253. (in Chinese))
- [17] 刘春伟, 曾懿婷, 邱让建. 用分时段修正双源模型估算南京地区冬小麦生育期蒸散量[J]. 农业工程学报, 2016, 32(增刊1): 80-87. (LIU Chunwei, ZENG Xiying, QIU Rangjian. Simulated total evapotranspiration of winter wheat with modified Shuttleworth-Wallace model in different stages in Nanjing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(Sup1): 80-87. (in Chinese))
- [18] TIAN X J, JIN S G. Evapotranspiration variations in the Yangtze River Basin from multi-satellite remote sensing data[J]. Journal of Water and Climate Change, 2020, 11(2): 451-467.
- [19] 刘笑吟, 徐俊增, 杨士红, 等. 节水灌溉稻田蒸散时空尺度特征及影响因素[J]. 水资源保护, 2018, 34(2): 42-51. (LIU Xiaoyin, XU Junzeng, YANG Shihong, et al. Characteristics and influencing factors of evapotranspiration in water-saving irrigation paddy field on different space-time scales [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(2): 42-51. (in Chinese))
- [20] 刘笑吟, 王冠依, 杨士红, 等. 不同时间尺度节水灌溉水稻腾发量特征与影响因素分析[J]. 农业机械学报, 2016, 47(8): 91-100. (LIU Xiaoyin, WANG Guanyi, YANG Shihong, et al. Influence factors and characteristics of transpiration and evaporation in water-saving irrigation paddy field under different temporal scales [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2016, 47(8): 91-100. (in Chinese))
- [21] PENG J, LIU Y, ZHAO X, et al. Estimation of evapotranspiration from MODIS TOA radiances in the Poyang Lake basin, China[J]. Hydrology & Earth System Sciences, 2013, 17(4): 1431-1444.
- [22] ZHAO X S, LIU Y B, HASHIGUCHI H. Relative contribution of the topographic influence on the triangle approach for evapotranspiration estimation over mountainous areas[J]. Advances in Meteorology, 2014, 1: 1-16.
- [23] 魏焕奇, 何洪林, 刘敏, 等. 基于遥感的千烟洲人工林蒸散及其组分模拟研究[J]. 自然资源学报, 2012, 27(5): 778-789. (WEI Huanqi, HE Honglin, LIU Min, et al. Modeling evapotranspiration and its components in Qianyanzhou Plantation based on remote sensing data[J]. Journal of Natural Resources, 2012, 27(5): 778-789. (in Chinese))
- [24] 沈竟, 张弥, 肖薇, 等. 基于改进 SW 模型的千烟洲人工林蒸散组分拆分及其特征[J]. 生态学报, 2016, 36(8): 2164-2174. (SHEN Jing, ZHANG Mi, XIAO Wei, et al. Modeling evapotranspiration and its components in qianyanzhou plantation based on modified SW model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(8): 2164-2174. (in Chinese))
- [25] XU M J, WEN X F, WANG H M, et al. Effects of climatic factors and ecosystem responses on the inter-annual variability of evapotranspiration in a coniferous plantation in subtropical China[J]. PloS One, 2014, 9(1): e85593.
- [26] BAI M, SHEN B, SONG X Y, et al. Multi-temporal variabilities of evapotranspiration rates and their associations with climate change and vegetation greening in the Gan River Basin, China[J]. Water, 2019, 11(12): 2568-2594.
- [27] 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[J]. Advances in Earth Science, 2012, 27(12): 1295-1307. (in Chinese))
- [28] 周偶, 彭志晴, 辛晓洲, 等. 非均匀地表蒸散遥感研究综述[J]. 遥感学报, 2016, 20(2): 257-277. (ZHOU Ti, PENG Zhiqing, XIN Xiaozhou, et al. Remote sensing research of evapotranspiration over heterogeneous surfaces: a review[J]. Journal of Remote Sensing, 2016, 20(2): 257-277. (in Chinese))
- [29] CONDON L E, ATCHLEY A L, MAXWELL R M. Evapotranspiration depletes groundwater under warming over the contiguous United States [J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 1-8.
- [30] 翟慧敏, 程启先, 李书覃, 等. 海绵城市理念演变的知识图谱可视化分析[J]. 水资源保护, 2020, 36(2): 34-40. (ZHAI Huimin, CHENG Qixian, LI Shuqin, et al. Visual analysis of knowledge map of sponge city concept evolution [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(2): 34-40. (in Chinese))

- [31] 齐长雪,张丹蓉,赵磊,等. 毛乌素沙地沙柳蒸腾特征研究[J]. 陕西农业科学, 2018, 64(10): 1-5. (QI Changxue, ZHANG Danrong, ZHAO Lei, et al. Study on *Salix psammophila* transpiration characters in Mu Us Sand Land[J]. Shaanxi Journal of Agricultural Sciences, 2018, 64(10): 1-5. (in Chinese))
- [32] 张淑兰,于澎涛,王彦辉,等. 泾河上游流域实际蒸散量及其各组分的估算[J]. 地理学报, 2011, 66(3): 385-395. (ZHANG Shulan, YU Pengtao, WANG Yanhui, et al. Estimation of actual evapotranspiration and its component in the upstream of Jinghe Basin [J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(3): 385-395. (in Chinese))
- [33] 雷慧闽,蔡建峰,杨大文,等. 黄河下游大型引黄灌区蒸散发长期变化特性[J]. 水利水电科技进展, 2012, 32(1): 13-17. (LEI Huimin, CAI Jianfeng, YANG Dawen, et al. Long term variation characteristics of evapotranspiration in large irrigation areas of the lower Yellow River [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32(1): 13-17. (in Chinese))
- [34] LI Q, LUO Z C, ZHONG B, et al. An improved approach for evapotranspiration estimation using water balance equation: case study of Yangtze River Basin [J]. Water, 2018, 10(6): 812.
- [35] 刘远,周买春. 空间插值气象数据在 Shuttleworth-Wallace 潜在蒸散发模型中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(1): 8-16. (LIU Yuan, ZHOU Maichun. Application of spatially interpolated meteorological data in estimation of potential evapotranspiration using Shuttleworth-Wallace model [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(1): 8-16. (in Chinese))
- [36] 周英,申双和,孙睿. 南京地区稻田蒸散的研究[J]. 南京气象学院学报, 1993, 16(4): 492-499. (ZHOU Ying, SHEN Shuanghe, SUN Rui. A study of paddy rice evapotranspiration in Nanjing area [J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 1993, 16(4): 492-499. (in Chinese))
- [37] 朱婧瑄,齐述华,刘贵花,等. 2000—2013 年鄱阳湖流域蒸散量时空变化[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(增刊 1): 9-16. (ZHU Jingxuan, QI Shuhua, LIU Guihua, et al. Spatiotemporal variation of terrestrial evapotranspiration in Poyang Lake Watershed from 2000 to 2013 [J]. Resources and Environment in the Yangtze River Basin, 2016, 25(Sup1): 9-16. (in Chinese))
- [38] 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 [J]. Geographical Research, 2013, 32(4): 617-627. (in Chinese))
- [39] 尹铎皓,范雲鹤,周君华,等. 基于傅抱璞模型的岷江上游流域实际蒸散研究[J]. 中国农村水利水电, 2016(2): 33-36. (YIN Duohao, FAN Yunhe, ZHOU Junhua, et al. Simulation and analysis of actual evapotranspiration in the upper reaches of Minjiang River based on Fu Baopu model [J]. China Rural Water and Hydropower, 2016(2): 33-36. (in Chinese))
- [40] 周君华,尹铎皓,范雲鹤,等. 基于 Budyko 假设的岷江流域实际蒸散模拟研究[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(1): 107-112. (ZHOU Junhua, YIN Duohao, FAN Yunhe, et al. Simulation and analysis of actual evapotranspiration in Minjiang River Basin based on Budyko Hypothesis [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(1): 107-112. (in Chinese))
- [41] ZHENG Y H, WANG L S, CHEN C, et al. Using satellite gravity and hydrological data to estimate changes in evapotranspiration induced by water storage fluctuations in the Three Gorges Reservoir of China [J]. Remote Sensing, 2020, 12(13): 2143.
- [42] 冯怡,薛联青,张敏,等. 基于两种 SPEI 序列的淮河流域干湿特征变化[J]. 水资源保护, 2019, 35(1): 35-40. (FENG Yi, XUE Lianqing, ZHANG Min, et al. Change of dry-wet characteristics in Huaihe River Basin based on two SPEI sequences [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(1): 35-40. (in Chinese))
- [43] BUDYKO M. The heat balance of the Earth's surface [J]. Post-Soviet Geography and Economics, 1961, 2(4): 3-13.
- [44] 陈胜楠,孔喆,陈立欣,等. 半干旱区城市环境下油松林分蒸腾特征及其影响因子[J]. 生态学报, 2020, 40(4): 1269-1280. (CHEN Shengnan, KONG Zhe, CHEN Lixin, et al. The stand transpiration characteristics of *Pinus tabulaeformis* and its influential factors in a semi-arid urban environment [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(4): 1269-1280. (in Chinese))
- [45] LIU B, HU Q, WANG W P, et al. Variation of actual evapotranspiration and its impact on regional water resources in the upper reaches of the Yangtze River [J]. Quaternary International, 2011, 244(2): 185-193.
- [46] 孙磊. 不同土地利用类型蒸散变化对稻田流域关键生态水文过程的影响模拟[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2017.
- [47] 钱卫一. 人工湿地的蒸发蒸腾及其对去除效果的影响[D]. 南京: 东南大学, 2005.
- [48] HUA G F, CHEN Q W, KONG J, et al. Evapotranspiration versus oxygen intrusion: which is the main force in alleviating bioclogging of vertical-flow constructed wetlands during a resting operation? [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24(22): 18355-18362.
- [49] 包莉. 罗江灌区杂交稻腾发量变化及控水条件对产量构成的影响[D]. 成都: 四川农业大学, 2016.

(收稿日期: 2021-01-21 编辑: 王芳)