

DOI: 10.5846/stxb202003060431

宫兆宁, 陆丽, 金点点, 邱华昌, 张强, 关晖. 土地利用/覆被变化扎龙湿地蒸散发量及生态需水量的遥感估算. 生态学报, 2021, 41(9): 3572-3587.
Gong Z N, Lu L, Jin D D, Qiu H C, Zhang Q, Guan H. Remote sensing estimation of evapotranspiration and ecological water demand in Zhalong wetland under land use/cover change. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(9): 3572-3587.

土地利用/覆被变化扎龙湿地蒸散发量及生态需水量的遥感估算

宫兆宁¹, 陆丽¹, 金点点^{1,2,*}, 邱华昌¹, 张强³, 关晖³

1 首都师范大学资源与环境学院 三维信息获取与应用教育部重点实验室 资源环境与地理信息系统北京市重点实验室, 北京 100048

2 生态环境部卫星环境应用中心, 北京 100094

3 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100086

摘要: 地表蒸散发量是影响湿地水热平衡的主要因素, 也是水分损失的主要途径, 对湿地生态需水量的合理确定和水资源的有效管理具有重要意义。借助遥感和 GIS 技术, 利用 2002、2010、2016 年 34 景 Landsat 影像, 基于时序 NDVI 数据对湿地下垫面物候特征的定量表征, 准确获取了扎龙湿地保护区 3 个时期土地利用/覆被的动态变化信息。选用物理基础较好且应用广泛的 SEBAL 模型, 估算了湿地的瞬时蒸散发量, 并结合站点气象数据, 实现了湿地蒸散发量在时间尺度上的扩展, 分别得到日、月、年尺度的湿地蒸散发量, 深入探究了扎龙湿地蒸散发的时空分布特征; 最后从湿地湖泊需水量、植物需水量及生物栖息地需水量 3 个方面, 定量估算出扎龙湿地 3 个时期的现状生态需水量。研究发现: 扎龙湿地的土地覆被类型主要以芦苇沼泽、草地和耕地为主, 其中芦苇沼泽分布占绝对优势, 且 2002—2016 年持续增加了 205.82 km²; 草地、耕地呈持续减少态势, 分别减少了 119.35 km² 和 95.96 km², 表明 2002—2016 年扎龙湿地生态系统呈恢复态势; 湿地保护区蒸散发量年内均大致呈单峰型分布, 符合夏季>春季>秋季>冬季的规律, 在年际上呈现明显的递增趋势, 年蒸散发量由 2002 年的 518.87 mm 增加到 2016 年的 625.98 mm, 增加了 20.64%。为满足湿地内的生态消耗, 总体上 2002—2016 年湿地的生态需水量也相应的增加, 保护区适宜生态需水量的变动范围为 5.40 亿—7.08 亿 m³, 可以维持湿地湖泊、植被、动植物栖息地的健康态势。维持核心区健康状态的最小生态需水量变化范围为 2.71 亿—3.32 亿 m³。随着遥感数据时空分辨率的提高, 基于蒸散发量反演的湿地生态需水量估算将更加实用和准确, 为湿地保护区制定科学合理的补水方案提供有效的技术支撑。

关键词: 扎龙湿地; SEBAL 模型; 蒸散发量; 土地利用/覆被; 生态需水量

Remote sensing estimation of evapotranspiration and ecological water demand in Zhalong wetland under land use/cover change

GONG Zhaoning¹, LU Li¹, JIN Diandian^{1,2,*}, QIU Huachang¹, ZHANG Qiang³, GUAN Hui³

1 College of Resources Environment & Tourism, Capital Normal University Key Laboratory of 3D Information Acquisition and Application of Ministry, Key Laboratory of Resources Environment and GIS of Beijing Municipal, Beijing 100048, China

2 Center for Satellite Application on Ecology and Environment, Beijing 100094, China

3 Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100086, China

Abstract: Surface evapotranspiration is a main factor influencing wetland water-heat balance and a main way of water loss. It has important significance for the reasonable determination of ecological water demand in wetlands and the effective management of water resources. With the help of remote sensing and GIS technology, the quantitative characterization of the phenological characteristics of the underlying surface of Zhalong wetland based on temporal NDVI data was made by using

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41971381); 北京水务局重点项目 (TAHP2002-2018-ZB-YY-490S)

收稿日期: 2020-03-06; **修订日期:** 2020-11-02

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jin_diandian @ 163.com

Landsat images of 34 scenes in 2002, 2010 and 2016. At the same time, the dynamic change information of land use/cover in three periods of the wetland reserve was obtained accurately. The SEBAL model with good physical foundation and wide application was selected to estimate the instantaneous evapotranspiration of the wetland. By combining with the meteorological data of nearby hydrographic stations, the temporal expansion of evapotranspiration of the wetland was realized. The daily, monthly and annual evapotranspiration of Zhalong wetland was obtained, and the spatio-temporal distribution characteristics of evapotranspiration in Zhalong wetland were deeply investigated. At last, the present ecological water demand of Zhalong wetland in three periods was quantitatively estimated from three aspects: water demand of wetland lake bubble, water demand of plants, and water demand of biological habitat. The results indicated that the land cover types of Zhalong wetland were mainly reed marshes, grasslands and cultivated land, among which reed marshes occupied the absolute dominance, increased by 205.82 km² continuously from 2002 to 2016. Grassland and cultivated land decreased by 119.35 km² and 95.96 km², respectively, indicating that Zhalong wetland ecosystem showed a recovery trend from 2002 to 2016. The annual evapotranspiration of the wetland reserve presented a roughly single-peak distribution in the three years, which was consistent with the summer > spring > autumn > winter. The annual evapotranspiration increased significantly from 518.87 mm in 2002 to 625.98 mm in 2016, by an increase of 20.64%. In order to meet the ecological consumption in the wetland, the total ecological water demand of the wetland increased correspondingly from 2002 to 2016. The range of the appropriate ecological water demand of the wetland reserve was 540 million m³—708 million m³, which could maintain the health of the lakes, vegetation, animal and plant habitats in the wetland. The minimum ecological water demand for maintaining the health of the core area varied from 271 million m³ to 332 million m³. With the improvement of spatial and temporal resolution of remote sensing data, the estimation of wetland ecological water demand based on evapotranspiration inversion will be more practical and accurate, providing effectively technical support for the formulation of scientific and reasonable water rehydration schemes in wetland reserves.

Key Words: Zhalong wetland; SEBAL model; evapotranspiration; land use/cover; ecological water demand

湿地是指那些常年积水和过湿的下垫面,具有较高的生产力,被誉为“地球之肾”,是全球三大生态系统之一^[1],在调节气候、蓄洪防旱、涵养水源和降解环境污染等方面发挥着极其重要的作用,具有巨大的环境功能和环境效益^[2]。近年来,随着人口剧增和经济不断发展,人类对水资源无节制的开发利用,导致了湿地濒临干涸,水资源短缺和水环境恶化等问题越来越突出^[3]。为实现可持续发展,合理确定湿地的生态环境需水,已成为水资源优化配置和生态环境保护中亟待解决的重点问题^[4]。因此,准确高效的估算湿地的蒸散发情况及生态需水量,为湿地生物多样性的保护,以及区域水资源有效管理和合理利用,提供重要的科学依据。

国外学者关于湿地生态需水的研究开始于 20 世纪 80 年代。Eamus 等研究并提出了植被及土壤需水量的计算方法^[5]。Wilcox 等利用 GIS 模型模拟了湿地中植被需水的与湿地水环境之间的响应关系^[6]。Powell 等通过建立半分布式水平衡模型估算了洪泛区湿地生态需水的研究^[7]。Vymazal 等从植被及土壤需水的角度,分析了湿地健康修复的方法和途径^[8]。Xu 等提出了 LBNSCCP 模型,不仅满足了湿地最小化总供水成本,也能满足湿地芦苇生长和其他用水户的用水需求,用来支持小清河流域的供水和湿地恢复计划^[9]。国外对于湿地生态需水的研究总体上较为全面,不仅详细计算了各种类型的湿地生态需水量,而且注重研究水资源与生态系统中各因素之间的相关关系。国内对于湿地生态需水的研究起步虽晚,但进展较快。广义的湿地生态需水量是指湿地为维持自身发展过程和保护生物多样性所需要的水量,狭义的湿地生态需水量是指湿地每年用于生态消耗而需要补充的水量,主要是补充湿地生态系统蒸散发需要的水量^[10]。一些学者从各自的研究角度出发,并提出了不同的湿地生态需水量的计算方法^[11-14]。

位于黑龙江省齐齐哈尔市东南处的扎龙湿地,是我国最大的以鹤类为主的珍禽鸟类的国家级自然保护

区,拥有较为原始的湿地生态系统,1992 年被列入“世界重要湿地名录”。随着人类对湿地的不断破坏和对湿地水资源的不合理利用,导致扎龙湿地近年连续干旱,湿地面积和鹤类的数量明显减少,扎龙湿地面临萎缩甚至消亡的威胁,扎龙湿地的生态环境用水成为学者研究的热点问题^[15-17]。蒸散发包括土壤水分蒸发和植物蒸腾,是影响湿地水热平衡的主要因素和水分损失的主要途径,是计算湿地生态需水量的重要参量。之前学者的研究大多采用站点观测的蒸散发量^[18-19],主要依靠气象和水文数据得到,但存在插值外延精度低、观测成本大、时效性差等缺陷^[20]。而遥感技术基于少量的地面观测数据,结合遥感数据反演得到区域的蒸散发量,为快速、大面积估算湿地地表蒸散量提供了较有效的方法。

由于全球气候变化的影响,以及人类活动影响的加剧,扎龙湿地的水资源面临逐渐匮乏的趋势,导致自然保护区内发生过数次大火,其中 2001 年的大火持续 10d,使得湿地生态系统遭到了严重的破坏。因此,为了有效保护湿地生态系统,2001 年开始,水利部等部门建立了扎龙湿地应急补水工程。考虑到扎龙湿地关键补水节点及长时间序列 Landsat 遥感数据的可获取性,研究基于 2002、2010、2016 年 3 个时期逐月的 Landsat 遥感数据,采用应用较广泛的 SEBAL 模型估算 3 个时期日、月、年尺度的扎龙湿地蒸散发量,同时结合对应时期研究区的土地覆被类型数据,从湿地湖泊需水量、湿地植物需水量和湿地生物栖息地需水量 3 个方面,定量估算不同年份扎龙湿地生态需水量,以期为未来扎龙湿地水资源合理配置和湿地保护等提供科学支撑。

1 研究区与数据

1.1 研究区概况

扎龙湿地是中国著名的以鹤类等水禽为主体的珍稀鸟类和湿地类型国家级自然保护区,位于松嫩平原的乌裕尔河和双阳河下游湖沼、苇草地带,地理位置为 123°51.5'—124°37.5'E, 46°48'—47°31.5'N(见图 1)。扎龙湿地地势低洼平坦,平均海拔约 143m,年平均气温 3.5℃,1 月平均气温 -19.5℃,7 月份平均气温 23.0℃。扎龙湿地多年平均年降水量为 419mm,蒸发强烈。扎龙湿地内分布着众多泡沼,由于地下水位高,排水不畅,土壤盐渍化比较普遍。根据黑龙江省人民政府关于扎龙湿地自然保护区功能区划的批复,将湿地划分为 3 个区域:核心区为典型的湿地生境,主要分布为芦苇沼泽,是珍稀水禽的栖息地和巢区;缓冲区也是鹤类等珍稀水禽的活动区和鸟类栖息繁殖地,分布着成片或断续的芦苇沼泽、湖泊、村屯、铁路、公路干线和大型水利工程。实验区的生境与缓冲区相同,主要供进行鹤类试验研究,并有限的开放生态旅游。

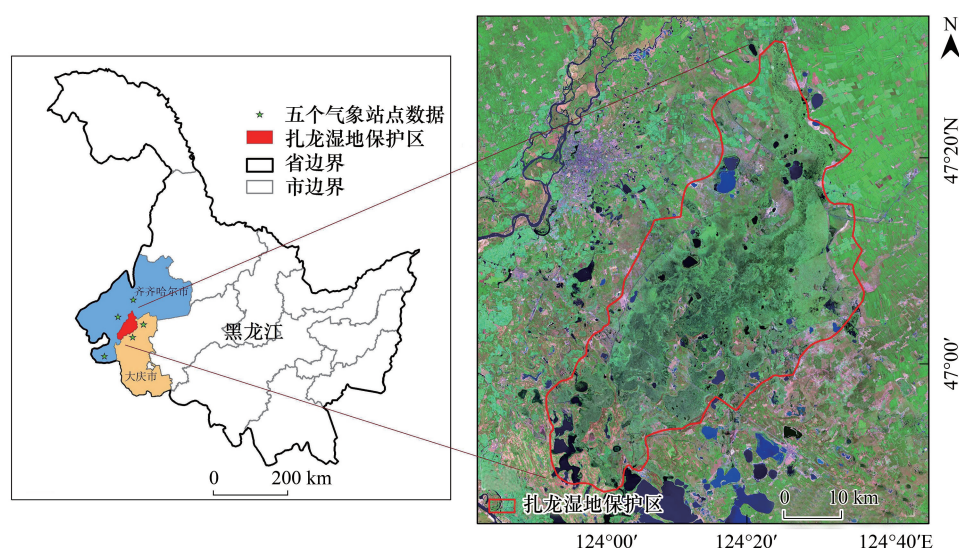


图 1 扎龙湿地保护区地理位置示意图

Fig.1 The location map of Zhalong wetland reserve

1.2 研究数据

Landsat 影像具有数据获取容易、光谱信息丰富及存储数据多等优点,及其热红外波段对地物热信息比较敏感。研究采用的 Landsat 系列遥感影像来源于 USGS 官网(<http://glovis.usgs.gov/>),研究区域行列号为 119/27 或 120/27。考虑到扎龙湿地的补水时间和长时间序列 Landsat 数据全年每月影像的可获取性,下载了 Landsat 系列影像共 34 景,且下载的影像在研究区部分含云量较少,质量较好,具体信息如表 1 所示。除 Landsat 数据外,同时下载了与 Landsat 数据过境时间相近的 MOD02 数据和 MOD11_L2,用于估算研究区域的大气水汽含量和地表温度反演结果的验证。研究所需的气象数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>),考虑到扎龙湿地内部的气象站点数据难获取性,因此需要将附近 5 个气象站点(富裕、齐齐哈尔、明水、泰来、安达)的气象要素采用克里金差值方法以得到研究区的气象数据(平均气温、风速、降水量等)。对获取的遥感影像进行几何校正、辐射定标和大气校正等预处理,并利用扎龙湿地边界裁剪,得到校正后的研究地区影像。

表 1 Landsat 系列数据信息
Table 1 The information of Landsat series data

获取时间 Time	传感器 Sensor	轨道号 Path/row	获取时间 Time	传感器 Sensor	轨道号 Path/row	获取时间 Time	传感器 Sensor	轨道号 Path/row
2002-01-09	ETM+	120/27	2010-01-23	TM	120/27	2016-03-12	ETM+	120/27
2002-02-10	ETM+	120/27	2010-02-08	TM	120/27	2016-04-29	OLI	120/27
2002-03-14	ETM+	120/27	2010-03-28	TM	120/27	2016-05-31	OLI	120/27
2002-04-15	ETM+	120/27	2010-04-13	TM	120/27	2016-06-09	OLI	119/27
2002-05-17	ETM+	120/27	2010-05-08	TM	119/27	2016-07-18	OLI	120/27
2002-06-18	ETM+	120/27	2010-06-09	TM	119/27	2016-08-03	OLI	120/27
2002-07-04	ETM+	120/27	2010-07-02	TM	120/27	2016-09-20	OLI	120/27
2002-08-14	ETM+	119/27	2010-08-12	TM	119/27	2016-10-22	OLI	120/27
2002-09-14	TM	120/27	2010-09-13	TM	119/27	2016-11-23	OLI	120/27
2002-10-16	TM	120/27	2010-10-22	TM	120/27	2016-12-09	OLI	120/27
2002-11-09	ETM+	120/27	2016-01-08	OLI	120/27			
2002-12-27	ETM+	120/27	2016-02-09	OLI	120/27			

2 研究方法 & 参数估算

本文基于少量的地面观测数据,结合遥感数据反演,可以得到湿地历史景观格局、植被演替、蒸散状况及生态需水的时空变化状况,开展扎龙湿地蒸散发量及生态需水量估算研究。首先利用 ArcGIS 10.2 和 ENVI 5.4 软件遥感解译出扎龙湿地不同年份的土地利用/覆被数据,并分析其动态变化特征。同时利用遥感影像得到 SEBAL 模型所需的各项地表参数,如植被覆盖度、地表反照率、地表比辐射率、地表温度等。其中更为精确的估算地表温度,针对 Landsat 系列数据采用三种地表温度反演算法研究其适用性。最终计算得到扎龙湿地的各项地表通量和瞬时蒸散发量,通过时间扩展得到日蒸散发量和月蒸散发量,并分析蒸散发量的时空变化规律和影响因素。结合蒸散发量反演结果、土地利用现状和气象水文数据计算得到各个年份扎龙湿地的生态需水量,为湿地生态环境提供科学建议。技术路线见图 2。

2.1 蒸散发量遥感估算方法

研究主要利用 Landsat 和 MODIS 遥感影像提取蒸散发量反演模型——SEBAL 模型中需要的一系列地表参数,包括地表反照率、比辐射率、植被覆盖度、地表温度等。本文通过中国气象数据网收集了扎龙湿地附近 5 个气象站点逐日和逐月的气温、降水和风速等气温数据。SEBAL 模型遥感反演蒸散发量的理论基础是地表能量平衡方程^[21]。

$$R_n = G + H + \lambda ET \tag{1}$$

式中, λ 为汽化潜热, ET 为蒸散发量, λET 为潜热通量 (W/m^2), R_n 为净辐射通量 (W/m^2), G 为土壤热通量 (W/m^2), H 为感热通量 (W/m^2)。

通过反演出方程中地表净辐射量、土壤热通量、显热通量,从而推算出潜热通量,进而得到蒸散发量 ET 。

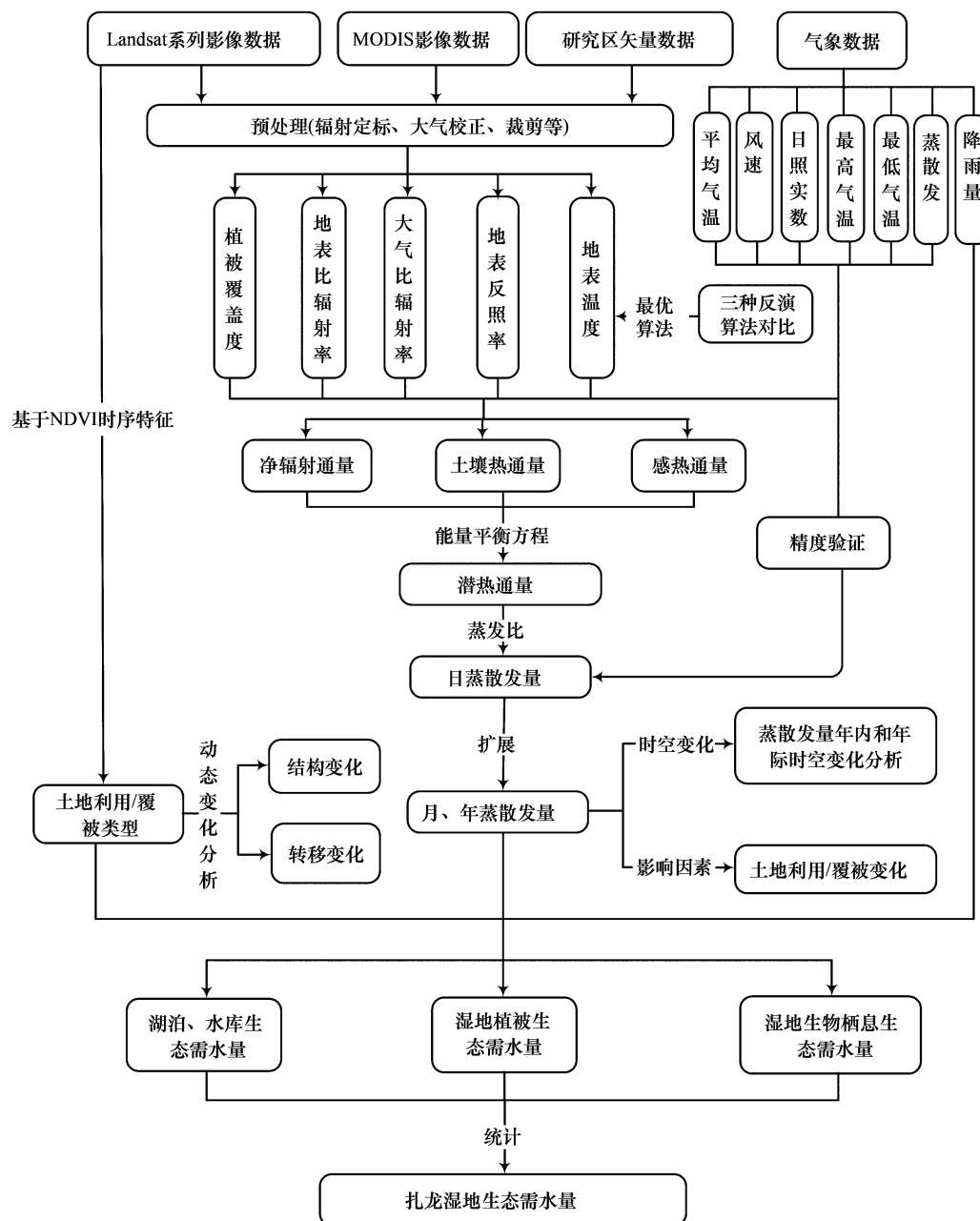


图2 研究技术流程图

Fig.2 Research technology flow chart

2.1.1 蒸散发法模型所需地表参数反演

(1) 地表反照率

地表反照率 (Albedo) 是对地表而言的总的反射辐射通量与入射辐射通量之比^[22]。地表反照率是地表能量平衡研究中的一个重要参数的比值,对于 Landsat 卫星来说,是指可见光与热红外波段的加权集合值。综合多光谱的传感器所获得的有效的大气信息和地表特征信息,利用 Liang^[23]建立的针对 Landsat-TM/ETM 的适用广、精度高的反演公式:

$$\alpha = 0.356 \alpha_1 + 0.130 \alpha_3 + 0.373 \alpha_4 + 0.085 \alpha_5 + 0.072 \alpha_7 - 0.0018 \quad (2)$$

式中, α 为地表反照率, $\alpha_1, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_7$ 分别为 1, 3, 4, 5, 7 波段的地表反射率。

(2) 地表比辐射率

地表比辐射率 ε 是指在同温度和波长下地表的辐射出射度与黑体的辐射出射度的比值, 表征地表发射能力的大小, 其取值范围为 0—1, 可以采用经验公式与 NDVI 相结合计算^[24]:

$$\varepsilon = 1.009 + 0.047 \ln \text{NDVI} \quad (3)$$

(3) 植被覆盖度

植被覆盖度是指植被的叶、茎、枝在地面上的垂直投影面积与土地总面积的比值, 是衡量地表植被状况的重要指标。研究证明, 估算植被覆盖度较常用的方法是像元二分模型, 通过归一化植被指数 NDVI 来获得^[25]:

$$F_c = \frac{\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\min}}{\text{NDVI}_{\max} - \text{NDVI}_{\min}} \quad (4)$$

$$\text{NDVI} = \frac{\rho_{\text{NIR}} - \rho_R}{\rho_{\text{NIR}} + \rho_R} \quad (5)$$

式中, ρ_{NIR} 和 ρ_R 分别为 Landsat 数据近红外与红外波段反射值; $\text{NDVI}_{\max}$ 为完全植被覆盖时的 NDVI; $\text{NDVI}_{\min}$ 为裸土时的 NDVI。

(4) 地表温度

地表温度是地表蒸散发反演的重要参数, 可通过大气校正法、单窗算法或单通道法反演得到^[26]。但是针对 Landsat 系列影像, 地表温度反演算法的适用性研究相对较少。本文以扎龙湿地自然保护区为研究区, 采用单窗算法 (Mono-window Algorithm, 之后简称 MW 算法)、单通道算法 (Single-channel Algorithm, 之后简称 SC 算法) 和辐射传输方程法 (Radiative transfer equation Algorithm, 之后简称 RTE 算法), 分别对 Landsat 5/7/8 系列热红外波段数据进行地表温度反演, 并基于 MODIS 地表温度产品对反演结果进行对比分析和精度验证, 从而研究三种方法对于不同传感器的 Landsat 数据的适用情况, 以期为基于 Landsat 系列数据地表温度反演算法的选择提供一定的科学依据, 从而达到更精确的蒸散发量反演结果。具体的计算公式和参数估算可参阅文献^[23]。

2.1.2 蒸散发量的时间扩展

由于遥感数据是瞬时影像, 因此反演所得的地表参数和能量平衡各分量均为瞬时值, 最终估算得到瞬时潜热通量, 在实际应用中, 往往需要将瞬时潜热通量在时间尺度上进行扩展, 得到日、月或年的蒸散量^[27]。SEBAL 模型假设全天中蒸发比稳定不变, 采用蒸发比法可将瞬时的蒸散量扩展为日蒸散量。蒸散发比 Λ 的计算式如下:

$$\Lambda = \frac{\lambda ET}{R_n - G} = \frac{R_n - G - H}{R_n - G} = \Lambda_{24} \quad (6)$$

可以得到 24 小时的潜热通量为:

$$\lambda ET_{24} = \Lambda (R_{n24} - G_{24}) \quad (7)$$

式中, R_{n24} 和 G_{24} 分别为日净辐射通量 (W/m^2) 和日土壤热通量 (W/m^2), 一般在计算每天的蒸散量时可以忽略土壤热通量 G ^[25]; λ 是水的汽化潜热 (J/kg), 计算公式为:

$$\lambda = (2.501 - 0.002361(T_s - 273.15)) \times 10^6 \quad (8)$$

在天气晴朗的情况下, 24 小时的净辐射通量可以通过公式 (9) 计算得到:

$$R_{n24} = (1 - \alpha) R_{a24} - 110 \tau_{sw} \quad (9)$$

$$R_{a24} = \frac{G_{sc}}{\pi \times d_r} (w_s \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \sin w_s) \quad (10)$$

$$w_s = \arccos(-\tan\varphi \tan\delta) \quad (11)$$

式中, τ_{sw} 为大气单向透射率, G_{SC} 是太阳常数(取值为 1367 W/m^2), d_r 为日地相对距离, φ 是像元的地理纬度(rad), δ 是太阳赤纬。

由此可得出日蒸散发量(mm/d), 公式如下:

$$ET_{24} = \frac{R_{n24} \times \Lambda_{24} \times 86400}{(2.501 - 0.002361(T_s - 273.15)) \times 10^6} \quad (12)$$

由于云覆盖和水汽吸收的影响, 在 1 个月中难以有连续的有效卫星观测数据, 来计算一个月的累计蒸散量。本研究通过气象站实测的蒸发数据, 结合遥感反演的日蒸散量来推算扎龙湿地的月蒸散量^[18]。转化公式为:

$$ET_m = \sum_{i=1}^{30} \frac{ET_{SEBAL}}{ET_{\text{气象站}}} ET_i \quad (13)$$

式中, ET_m 为月蒸散量; i 为 1 到 30 日的序号(随每月天数而定); ET_{SEBAL} 为模型反演的蒸散量值; $ET_{\text{气象站}}$ 为当日气象站实测值; ET_i 为第 i 日气象站实测蒸散发量。

2.2 湿地生态需水量的估算方法

根据调研结果和扎龙湿地的实际情况, 扎龙湿地生态需水量指湿地每年用于生态消耗而需要补充的水量, 主要是补充湿地生态系统蒸散需要的水量, 包括湖泊需水量、植物需水量及野生生物栖息地需水量等。

2.2.1 湿地湖泊需水量

对于北方湖泊, 蒸发大于降水, 扎龙湿地湖泊水库生态需水量是用以维持扎龙湿地湖泊水库水量平衡而消耗的净水量^[16], 计算公式为:

$$W_l = \sum A_i(ET_i - P_i) \times 10^{-3} \quad (14)$$

式中, W_l 为湖泊水库的生态环境需水量(m^3); A_i 为湖泊水库的水面面积(m^2); ET_i 为相应水面的蒸发能力(mm); P_i 为湖泊水库上的降水量(mm)。

2.2.2 湿地植物需水量

湿地植物需水量是指植物正常生长所需要的水分。其中蒸腾耗水和土壤蒸发是最主要的耗水项目, 占植物需水量的 99%。因而把植物需水量近似理解为植物叶面蒸腾和棵间土壤蒸发的水量之和, 称为蒸散发量^[28]。扎龙湿地植物的种类繁多, 结合野外踏勘和遥感图像反演, 扎龙湿地的植被分布类型是以芦苇为主^[16], 计算时主要考虑芦苇的生态需水量。其表达式为:

$$W_p = ET_p(t) A_p \times 10^{-3} \quad (15)$$

式中, W_p 为湿地植被需水量(m^3); $ET_p(t)$ 为蒸散发量(mm); A_p 为沼泽湿地植被面积(m^2)。

2.2.3 野生生物栖息地需水量

野生生物栖息地需水量是鱼类、鸟类等湿地生物栖息、繁殖需要的基本水量。其计算公式为:

$$W_q = A(t) CH(t) \times 0.1 \quad (16)$$

式中, W_q 为湿地生物栖息需水量(m^3); $A(t)$ 为湿地面积(m^2); $H(t)$ 为湿地水深(m); C 为水面面积百分比。

以湿地的不同类型为基础, 找出关键保护物种, 如鱼类或鸟类, 根据正常年份鸟类或鱼类在该区栖息、繁殖的范围, 核算其正常水量, 为避免与湿地土壤需水量的重复, 这里只核算地表以上低洼地的蓄水量(满足野生动物栖息、繁殖的水量)。

3 蒸散发量及生态需水量的估算

3.1 基于时序 NDVI 数据的土地覆被分类

多时相遥感影像能反映同一植被在不同季节的光谱差异。归一化植被指数(NDVI)是植被生长状态及植被覆盖度的最佳指示因子, 其时序数据也已成为基于生物气候特征开展大区域植被和土地覆盖分类的基本手

段^[29]。因此,本文利用多时相的遥感影像提取植被在时间上的物候特征规律,从而实现了扎龙湿地的土地利用/覆被类型的精确提取。

根据 2008 年国家林业局发布的国家标准《自然保护区土地覆被类型划分》(LY/T 1725—2008)和 2017 年国土资源部组织修订的国家标准《土地利用现状分类》(GB/T 21010—2017)对照表,结合扎龙湿地的植被、水和土地覆盖等实地情况,将研究区土地覆被分为 6 类,分别为耕地、草地、建设用地、水体、芦苇沼泽和盐碱地。

主成分分析被用来描述地表覆被类型的季节变化。主成分分析的算法是:基于每月植被指数图像的均值,计算均方差矩阵,并求特征值和特征向量,接着计算主成分变换矩阵,最后计算出 12 幅主分量图像。以 2016 年为例,基于多时相的 NDVI 数据提取出的主成分信息(见图 3),可见第一主成分反映了全年植被茂盛、稀疏分布特征,依据其低值可分离出盐碱地、水体和建筑用地。第二主成分低值区凸显水体特征,可提取湿地中的水体信息。第三主成分在一定程度上反映季节变化差异较明显的地物类型,高值区主要凸显耕地、芦苇沼泽特征,而低值区凸显盐碱地、草地和建筑用地信息。依据分类决策树构建的分类规则(见图 4),得到 2016 年扎龙湿地最终的分类结果(见图 5)。

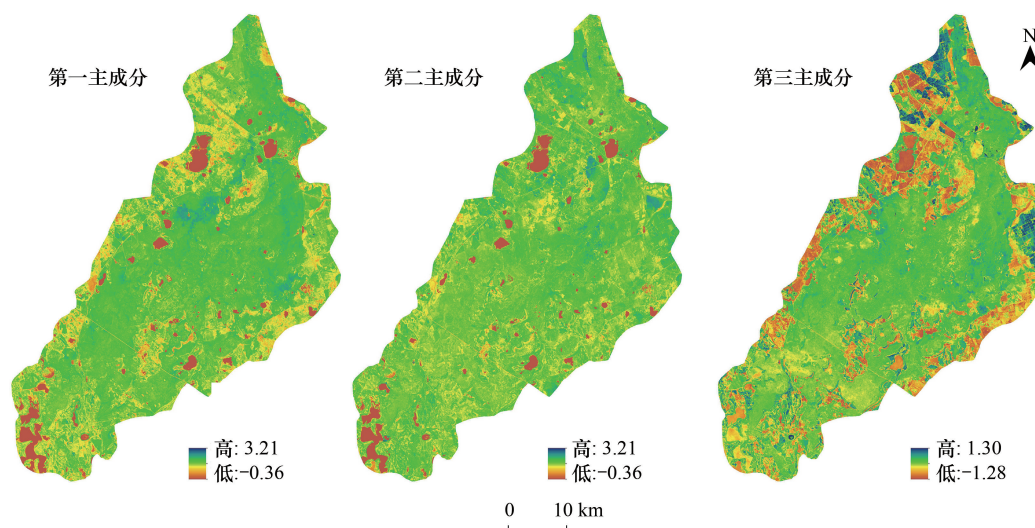


图 3 主成分信息

Fig.3 Principal component information

选取一定数量的样本,利用 ENVI 软件建立混淆矩阵,计算结果如表 2,2016 年扎龙湿地保护区土地覆被分类总体精度为 85.38%,Kappa 系数为 0.83,分类精度较高,表明该分类方法具有较高的可行性和准确性,基于 NDVI 时序特征可有效实现较为准确的扎龙湿地土地覆被类型的提取。基于 34 景逐月的 Landsat 影像数据,最终得到 3 个时期扎龙湿地高精度的土地覆被分类结果,见表 3 和图 6。

扎龙湿地自然保护区土地利用面积约为 2174.82 km²,以芦苇沼泽、草地和耕地为主要的地物类型,扎龙湿地内芦苇沼泽分布占绝对优势,且大部分分布在湿地的核心区域。扎龙湿地缓冲区内主要分布着芦苇沼泽和草地,而实验区内耕地占比较多,还分布着一些草地和盐碱地。2002—2016 年间湿地内土地利用/覆被类型发生了明显的变化:扎龙湿地的芦苇沼泽是湿地内最主要的土地利用/覆被类型,其面积 14 年间总共增加了 205.82 km²;湿地草地面积由 2002 年 551.73 km²减少至 2010 年 497.13 km²,随后慢慢减少至 2016 年 432.39 km²;研究区内耕地的面积总体上是减少的趋势,由 2002 年的 393.66 km²减少至 2010 年 359.19 km²,变化量为 34.47 km²,随后继续减少;水体对维持湿地生态系统健康发挥着重要作用,由表可知,研究区内水体面积 2002—2010 年减少量为 3.42 km²,随后在 2016 年面积略微增加,增加至 130.42 km²,整体来看水体的面积在这 14 年间基本稳定不变;扎龙湿地内 2002 年盐碱地面积的 76.88 km²,8 年后增加到 91.72 km²,而到

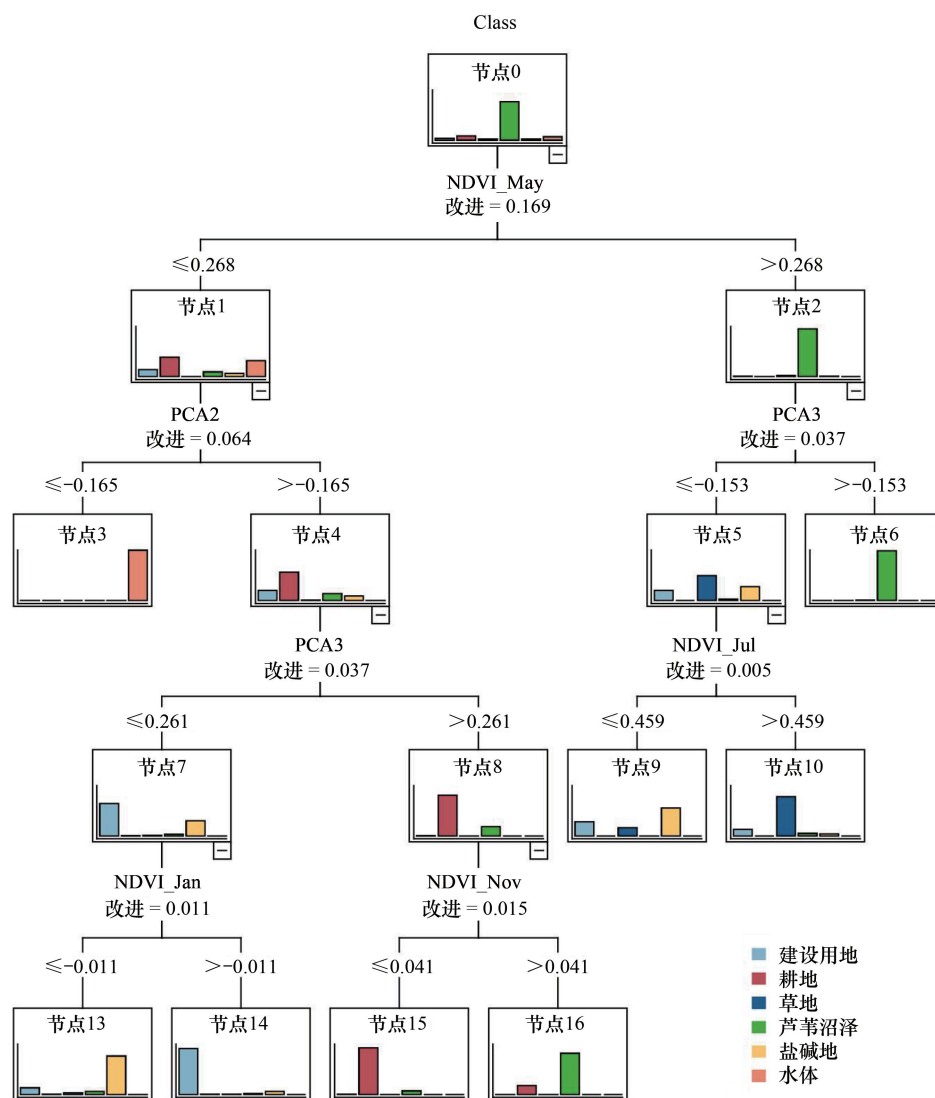


图4 CART 决策树分类模型

Fig.4 CART decision tree classification model

2016 年盐碱地面积减少了 10.77 km^2 , 但整体上看面积增加了 4.08 km^2 , 面积变化相对较少; 研究区内建设用地面积最少, 2002—2016 年这 14 年间的建设用地呈持续增长的态势, 2002—2010 年增加了 4.90 km^2 , 面积占比由 0.80% 增加到 1.03%, 而 2010—2016 年建设用地面积增加相对较少, 仅仅增加了 0.92 km^2 。

3.2 扎龙湿地蒸散发量的时空特征分析

3.2.1 蒸散发量精度验证

考虑到扎龙湿地内气象站点数据的难获取性, 本文利用扎龙湿地附近的富裕、齐齐哈尔、扎兰屯、明水、泰来 5 个气象站观测的日蒸散量值与提取蒸散发量遥感反演结果进行对比^[30-32], 得到以下相关关系图, 如图 7。根据统计比较, 发现基于 SEBAL 模型反演得到的日蒸散量值与气象观测站点实际观测值相近, 均方根误差 RMSE 为 0.714 mm 。由图可以看出, SEBAL 模型蒸散发值与气象站点实测值的相关关系较好, 两者之间的拟合优度 R^2 达到 0.8087, 此结果与蔡玉林^[10]、杜嘉等^[33]采用 SEBAL 模型反演日蒸散量的结论相近。综上可以认为基于 SEBAL 模型反演得到的蒸散发量基本符合实际, 可以作为扎龙湿地自然保护区的蒸散发遥感估算模型。

3.2.2 蒸散发量的时空特征分析

利用 SEBAL 模型估算了 2002 年、2010 年和 2016 年扎龙湿地的月均蒸散发量。以 2016 年为例,分析扎龙湿地蒸散发量的年内变化特征,图 8 和图 9 分别为扎龙湿地 2016 年逐月的蒸散量空间分布图和变化折线图。整体上看,扎龙湿地地表蒸散发量年内大致呈现单峰型分布。受到太阳辐射、地表温度和风速等的影响,扎龙湿地冬季(12—2 月)的地表蒸散发量是一年中的最低值,此时气温较低,湿地内多为裸土状态,蒸发能力较弱。结合土地覆被情况,发现仅在湖泊、水库等水体及周围区域地表蒸散发量值相对高些,其他区域均较低。其中 1 月份为一年中蒸散发量最小的月份。

3 月气温回暖,冰雪缓慢融化,地表蒸散发量逐渐增加,月均值为 49.71mm。4、5 月植被进入生长期,土壤水分多,从 4 月开始,蒸散发量持续升高,月均值为 72.50mm。与前几个月相比,除水体区域蒸散量依然较高外,4 月份耕地蒸散发量有一定的增加,芦苇蒸散发量增加也较为明显。5 月份蒸散发量整体仍在增加,平均值约为 95.31mm,其中蒸散值为 40—145mm 区域约占总面积的 86.94%。总体来看,由于气温升高、植物生长、地表温度升高等原因,扎龙湿地春季的蒸散发量较冬季明显增加。

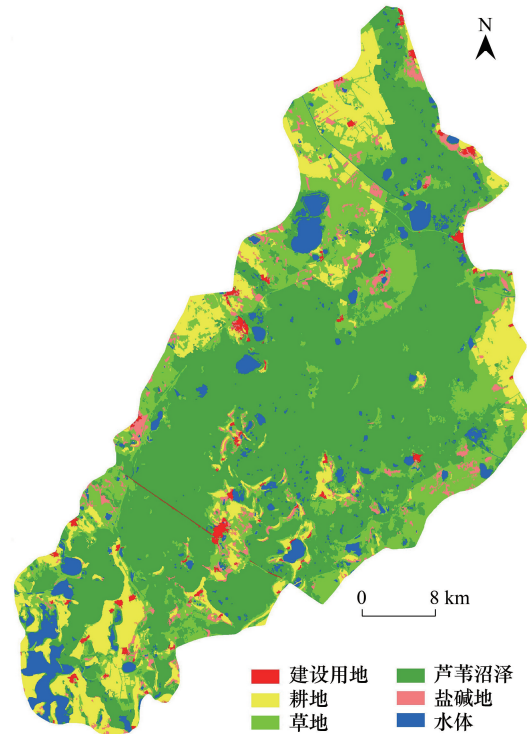


图 5 2016 年扎龙湿地保护区土地覆被分类图
Fig.5 Land cover classification map of the zhalong wetland in 2016

表 2 地表覆被分类精度验证

Table 2 Verification of classification accuracy of surface cover

土地利用/覆被类型 Land use/cover types	水体 Water	芦苇沼泽 Reed marshes	草地 Grassland	盐碱地 Saline soil	耕地 Cropland	建设用地 Build land	合计 Total
水体 Water	93	5	3	2	0	0	103
芦苇沼泽 Reed marshes	1	95	10	3	3	0	112
草地 Grassland	0	9	70	3	4	1	87
盐碱地 Saline soil	1	1	3	57	4	3	69
耕地 Cropland	0	3	5	2	68	0	78
建设用地 Build land	0	1	2	5	1	55	64
合计 Total	95	114	93	72	79	59	513
生产者精度 Producer's accuracy	90.29%	84.82%	80.46%	82.61%	87.18%	85.94%	
用户精度 User's accuracy	97.89%	83.33%	75.27%	79.16%	86.07%	93.22%	
总体精度 Overall accuracy				85.38%			
Kappa 系数 Kappa coefficient				0.83			

6、7、8 月份处于夏季,降水较多,供水充足,气温较高,日照强烈,提供了地表水分蒸散发的有利条件,因此蒸散发量较高。6 月份月均蒸散发量为 103.07mm,高值区主要分布着湖泊水库等水体和芦苇沼泽。同时耕地区域的蒸散量也随着农作物的生长有所增加。7 月月蒸散发量达到年内最大值。与 6 月份相比,7 月份湿地整体蒸散发量有一定的增加,尤其是芦苇沼泽和耕地区域增加较明显,且耕地的蒸散量达到 12 个月中的

最高值,这可能是因为春小麦和大豆的生长期在 4—7 月,此时农作物在处于成熟期所致。由于受到气温、植被覆盖度和风速等要素的影响,8 月份的蒸散发值较 7 月份有所下降,月均蒸散发量为 104.05mm。8 月份的遥感影像部分区域受到云的影响,蒸散发量较高。而其他蒸散发量高值区主要分布于水体以及芦苇区。受到农作物收割影响,耕地蒸散发量较 7 月份有所减少。总体上夏季是扎龙湿地全年蒸散发量最高的季节,全区蒸散发量都相对较高。

表 3 扎龙湿地土地利用/覆被分类
Table 3 land use/cover classification of Zhalong wetland

土地利用/覆被类型 Land use/cover types	2002 年		2010 年		2016 年		2002—2010	2010—2016
	面积/ km ² Area	比例/% Proportion	面积/ km ² Area	比例/% Proportion	面积/ km ² Area	比例/% Proportion	变化量/km ² Change	变化量/km ² Change
水体 Water	130.83	6.02%	127.41	5.86%	130.42	6.00%	-3.42	3.01
芦苇沼泽 Reed marshes	1004.27	46.18%	1077.01	49.52%	1210.09	55.64%	72.74	133.08
草地 Grassland	551.73	25.37%	497.13	22.86%	432.39	19.88%	-54.60	-64.75
盐碱地 Saline soil	76.88	3.53%	91.72	4.22%	80.95	3.72%	14.85	-10.77
耕地 Cropland	393.66	18.10%	359.19	16.52%	297.70	13.69%	-34.47	-61.49
建设用地 Build land	17.46	0.80%	22.36	1.03%	23.27	1.07%	4.90	0.92

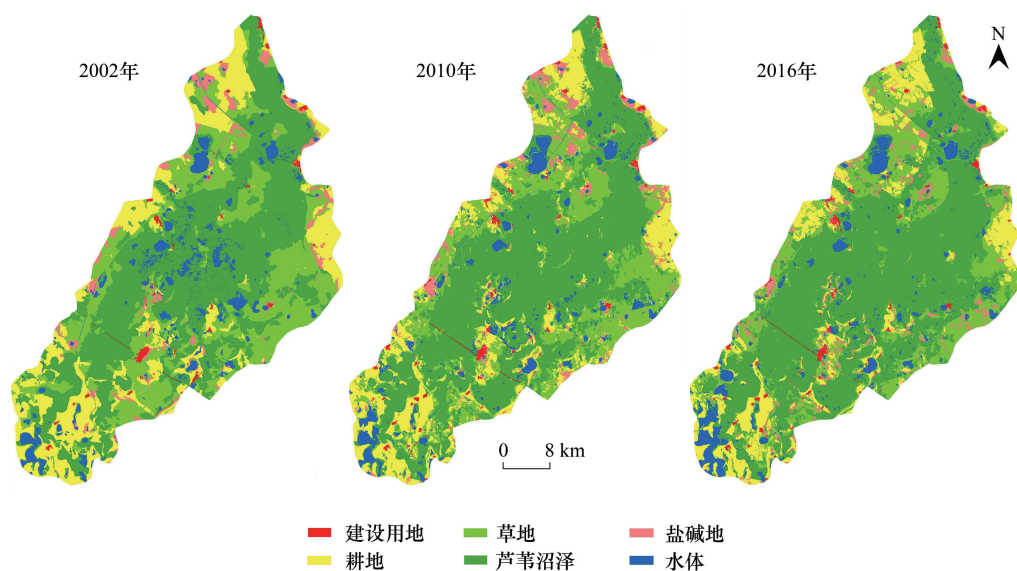


图 6 扎龙湿地土地利用/覆被类型时空分布图
Fig.6 Spatial distribution map of land use/cover types in Zhalong wetland

9 月份后,气温缓慢下降,随着植被枯萎凋落等原因,湿地蒸散量逐步下降。湿地 9 月的平均蒸散发量为 41.74mm,高值区主要位于湖泡水库等水体和中间区芦苇区域。湿地 10 月的蒸散发量持续下降,月均值为 32.91mm,其中蒸散值为 20—45mm 的区域占湿地总面积的 90.35%。高值区主要位于水体、中部芦苇区以及东北部部分区域。11 月份蒸散发量进一步降低,月均值为 11.95mm。整体来看,扎龙湿地 2016 年秋季地表蒸散发量相对较小,低于春季的蒸散发量。

总体可见,2016 年扎龙湿地蒸散量年内变化规律为:夏季>春季>秋季>冬季。夏季蒸散量最大,总蒸散量达到 312.58mm;其次为春季和秋季,各季度蒸散量分别为 217.52mm 和 86.59mm;蒸散量最小值出现在冬季。遥感估算的结果反映了扎龙湿地的自然气候特征和地表蒸散的变化规律。

根据反演的 3 个时期扎龙湿地逐月的蒸散发量,得到不同年份的月均蒸散发量曲线图(图 9)。由图 9 可

见,3 个年份的月蒸散发量曲线均属于单峰型,其蒸散发量年内规律均是夏季最大,春季和秋季次之,冬季最小。在不同的年份,扎龙湿地相同季节的蒸散发量有一些变化,但变化不大。2002 年、2010 年和 2016 年 6—8 月的蒸散发量较大,其中 2002 年和 2016 年均是 7 月地表蒸散发量最大,分别为 119.03mm 和 105.46mm;2010 年 6 月地表蒸散发量最大,为 104.45mm。2002 年、2010 年和 2016 年的年蒸散发量分别为 518.87mm、553.19mm 和 625.98mm,可以看出扎龙湿地的年蒸散发量有所增加。随着全球气候变暖,区域内作物的需水量也在增加,进而影响了区域内的水循环平衡。

3.3 湿地生态需水量的核算

降水量和蒸散发量是生态需水量估算的重要参数,本研究通过克里金插值法将扎龙湿地附近 5 个气象站点的降雨量数据进行空间插值,得到扎龙湿地降水量情况。同时结合土地覆被动态信息和蒸散发量反演结果,分别估算出水域和芦苇沼泽的月尺度蒸散发量,由于芦苇的生长期为 4—9 月,因此只统计生长期的芦苇蒸散发量。以 2002 年为例,扎龙湿地 2002 年月均降水量、水面蒸发量和芦苇蒸散发量的统计结果见表 4。

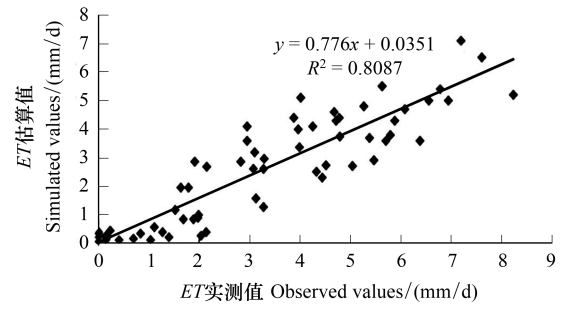


图 7 ET 估算值与实测值对比图
Fig.7 Comparison diagram of ET estimated value and measured value

表 4 扎龙湿地平均降水量和蒸发量统计表

Table 4 The average amounts of rainfall and evaporation in Zhalong wetland													
月份 Month	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	总计 Total
降水量 Precipitation/mm	6.52	0.37	0.09	74.11	20.82	106.45	72.98	73.34	3.81	20.04	5.94	1.37	385.85
水面蒸发量 Water evapotranspiration/mm	0.21	0.98	36.12	53.19	94.77	125.63	145.37	87.28	81.41	21.53	1.96	4.37	652.83
芦苇蒸散发量 Reed evapotranspiration/mm	0.00	0.00	0.00	47.26	82.61	105.04	124.81	73.15	69.01	0.00	0.00	0.00	501.88

湿地内分布着湖泊泡沼约 208 个,其中较大的有克钦湖、仙鹤湖、东升水库等^[34]。根据湖泊水库生态需水量计算方法,代入表 4 中的月均降水量和蒸散发量的值,得到扎龙湿地湖泊水库的生态需水量结果如表 5。

表 5 扎龙湿地湖泊需水量

Table 5 The eco-environmental water requirement for lakes and plants in Zhalong wetland														
月份 Month		1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	总计 Total
湖泊需水量/×10 ⁶ m ³	全区	0	0.08	4.71	0	9.66	2.5	9.46	1.82	10.14	0.19	0	0.39	38.95
Water demand of wetland lake bubble	核心区	0	0.03	1.88	0	3.87	1	3.78	0.73	4.06	0.08	0	0.16	15.59

根据实地踏勘、历史资料以及遥感图像解译结果,扎龙湿地内主要的湿地植被为芦苇群落。因此在计算湿地植被需水量中,选择以芦苇为主要植被计算扎龙湿地的植被生态需水量,得到结果如表 6 所示。

表 6 扎龙湿地植物需水量

Table 6 The eco-environmental water requirement for soils in Zhalong wetland														
月份 Month		1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	总计 Total
植被需水量/×10 ⁶ m ³	全区	0.00	0.00	0.00	47.46	82.96	105.49	125.35	73.47	69.30	0.00	0.00	0.00	504.03
Water demand of plants	核心区	0.00	0.00	0.00	24.19	42.29	53.77	63.89	37.45	35.33	0.00	0.00	0.00	256.92

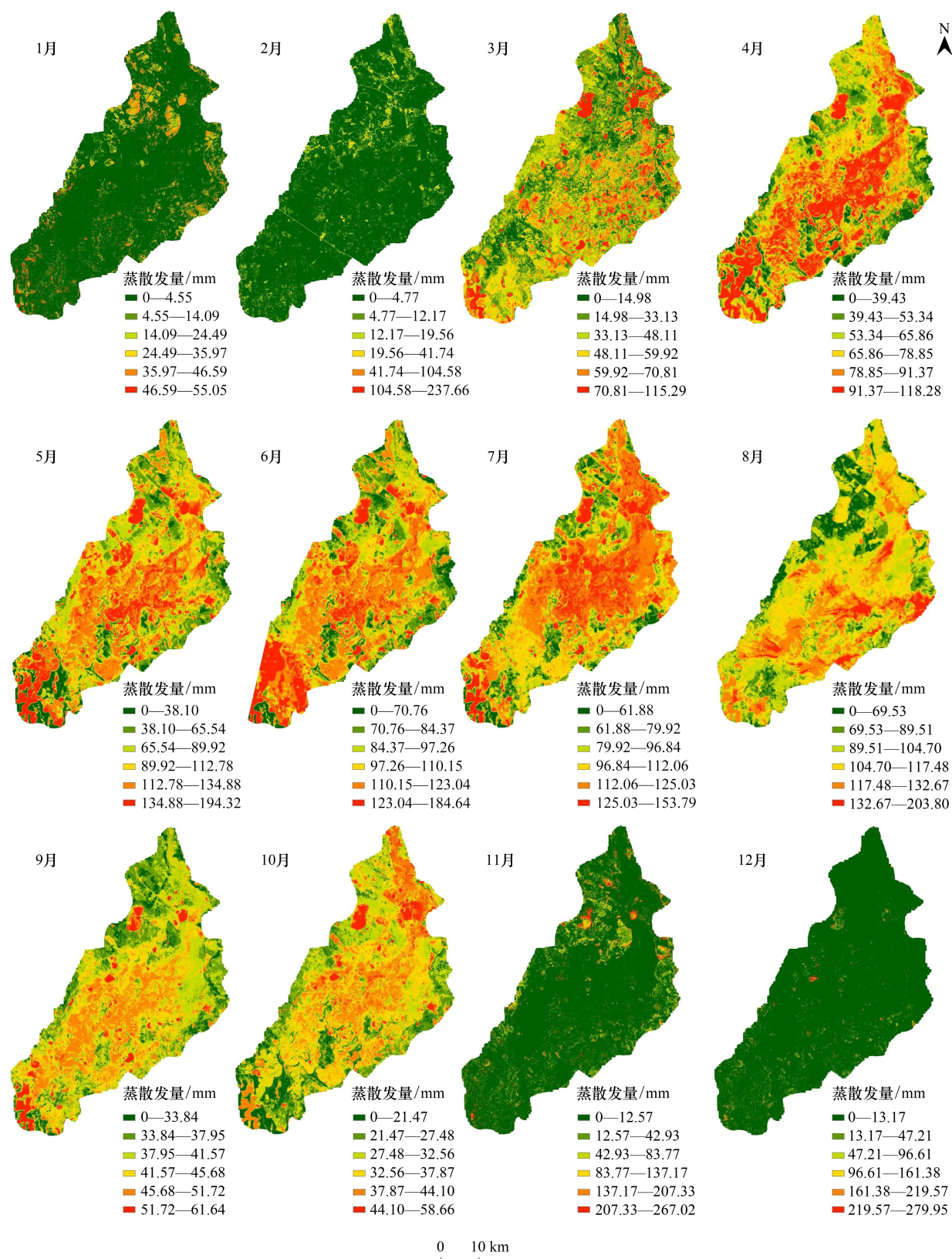


图8 2016年扎龙湿地蒸散量空间分布图

Fig.8 Spatial distribution map of evapotranspiration in Zhalong wetland in 2016

由于野生生物栖息地需水量是野生生物栖息、繁殖等活动需要的基础水量。扎龙湿地主要的保护物种为丹顶鹤,根据李兴春^[16]等学者的研究结果,扎龙湿地丹顶鹤需要的领地为 350km²,远小于核心区的面积,此部分计算的水量属于重复计算。因此,扎龙湿地需水量由湖泊、湿地植物两部分组成,其计算结果见表 7。

根据以上的计算过程,计算湖泊水库和湿地植被等需水时扣除了雨水的补充,芦苇蒸腾仅扣除了生长期(4—9月)的降雨,因此需要扣除其他月份的降雨。根据相应的降雨量数据,计算可得扎龙湿地自然保护区和核心区对应的芦苇应扣除的水量分别为 34.48×10⁶m³和 17.57×10⁶m³。最终扎龙湿地自然保护区 2002 年的生态需水总量为 5.40 亿 m³,核心区为 2.71 亿 m³。

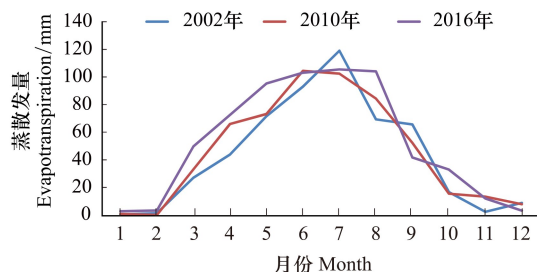


图9 2002、2010、2016 年月蒸散发量曲线图

Fig.9 Monthly evapotranspiration curve in 2002, 2010 and 2016

表7 扎龙湿地生态需水量

Table 7 The eco-environmental water requirement in Zhalong wetland

月份 Month	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	总计 Total
全区需水量/×10 ⁶ m ³ Total water demand	0	0.08	4.71	44.73	92.63	107.99	134.8	75.29	79.44	0.2	0	0.39	540.26
核心区需水量/×10 ⁶ m ³ Core water demand	0	0.03	1.88	23.1	46.15	54.77	67.67	38.17	39.38	0.08	0	0.16	271.39

综上所述,扎龙湿地自然保护区 2002 年满足 5.40 亿 m³适宜生态需水量时,可以维持湿地湖泊、植被的现状,从而维系健康的湿地动植物栖息地,其中芦苇等湿地植被现状的所需的生态需水量最大,约占湿地生态需水总量的 93.3%。同时,扎龙湿地保护区的最小生态需水量是维持湿地核心区生态健康所需的生态需水量,即湿地 2002 年最小生态需水量为 2.71 亿 m³。

李兴春^[15]和王建群等^[16]计算扎龙湿地 2002 年的生态需水量时,均以湿地 1956—2000 年多年平均的蒸散发气象站点统计值作为参数进行计算,未能考虑湿地复杂下垫面情况下现实的蒸散情况,其计算的扎龙湿地适宜生态需水量分别为 5.09 亿 m³和 5.55 亿 m³。而本研究利用实时的遥感数据反演得到的蒸散发量计算湿地的生态需水量,虽仍有一定偏差,但更加符合实际的现状需水量的情况,为湿地水资源的平衡和可持续发展提供科学可靠的依据。

根据遥感反演,同样得到 2010 年和 2016 年的扎龙湿地的每月的降水量和蒸散发量数据(见表 8),通过上述计算方法统计得到 3 个年份扎龙湿地自然保护区和核心区对应的生态需水量(见图 10)。

表8 扎龙湿地平均降水量和蒸发量统计表/mm

Table 8 Statistical Table of Average Precipitation and Evaporation of Zhalong wetland

月份 Month		1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	总计 Total
2010	降水量	2.15	3.51	8.67	28.85	96.35	35.94	120.74	84.42	14.99	7.90	9.14	13.45	426.11
	水面蒸发量	2.13	0.56	32.90	68.52	95.79	135.67	121.89	120.34	71.76	15.43	18.65	3.93	687.57
	芦苇蒸散量	0.00	0.00	0.00	74.29	85.97	127.05	108.61	88.31	61.23	0.00	0.00	0.00	545.46
2016	降水量	0.42	2.49	8.13	10.32	31.24	109.88	27.59	36.35	110.55	32.28	21.97	1.48	392.70
	水面蒸发量	12.29	3.45	12.56	99.43	148.17	131.02	134.03	122.37	53.41	43.84	46.29	25.75	832.61
	芦苇蒸散量	0.00	0.00	0.00	82.06	109.72	110.59	116.11	111.87	43.26	0.00	0.00	0.00	573.61

从统计结果可看出,2002—2016 年扎龙湿地保护区生态需水量的变动范围为 5.40 亿 m³—7.08 亿 m³,湿

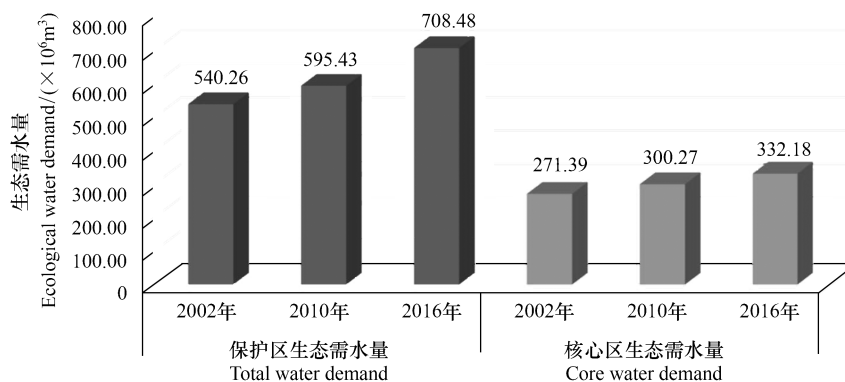


图 10 2002—2016 年扎龙湿地的生态需水量

Fig.10 Zhulong wetland corresponds to ecological water demand

地生态需水量呈现持续升高的趋势,这与近年来扎龙湿地的恢复态势,湿地植被如芦苇沼泽分布面积增加有关。根据遥感提取的下垫面土地覆被类型的变化,随着人们对于湿地管理和保护意识的提升,2002—2016 年扎龙湿地内的耕地面积大约减少了 95.96 km^2 ,水体面积虽无太大变化,但芦苇沼泽的面积大量增加,湿地植被生长旺盛造成蒸散发量也相应升高。同时,2002 年、2010 年和 2016 年扎龙湿地的年蒸散发量分别为 518.87mm、553.19mm 和 625.98mm,扎龙湿地内的蒸散发量在整体上是逐年升高的,增加了 20.64%。因此基于需水量计算公式,扎龙湿地生态需水量必定是增加的。而核心区生态需水量的变化范围为 2.71 亿—3.32 亿 m^3 ,核心区的生态需水量也是逐年升高,但变化范围没有全区的变化大,主要是因为湿地的核心区是典型的湿地生境,分布着大量的芦苇沼泽,15 年间核心区土地利用/覆被变化不大,蒸散发一直较为强烈。

4 结论与讨论

扎龙湿地结构完整、功能齐全,是具有代表性的典型湿地生境,具有较高的科研价值。本研究根据所确定的生态需水量的计算方法,在运用 Landsat 系列数据使用 SEBAL 模型计算扎龙湿地蒸散发量的基础上,得到了扎龙湿地自然保护区不同年份对应的生态需水量。扎龙湿地需水量由湖泊、湿地植物和湿地土壤需水量三部分组成,2002—2016 年扎龙湿地保护区生态需水量的变动范围为 5.40 亿—7.08 亿 m^3 ,核心区即湿地最小生态需水量变化范围为 2.71 亿—3.32 亿 m^3 ,需水量呈现持续升高的趋势。

由于人类活动的影响,扎龙湿地的水资源逐渐减少,自然保护区内发生过数次大火,其中 2001 年的大火持续 10d,使得湿地内损失惨重。因此,为了保护湿地生态系统,2001 年开始,水利部等部门建立了扎龙湿地应急补水工程,连续几年对湿地进行应急补水,从本文的结果中可以看出此工程取得了较好的效果,扎龙湿地的湿地植被面积逐渐增加,植被旺盛的生长导致蒸散发量的升高。为了满足湿地内的蒸散所需要的水量,2002—2016 年湿地的生态需水量也相应的增加,湿地生态需水量的增加继续促进扎龙湿地生态补水、生态修复工程的实施,这也是维持湿地生态系统健康、稳定的前提条件,最终实现扎龙湿地内资源和环境的可持续发展。

湿地环境往往较为复杂,很多区域人为难以进入。本文也缺少实际观测数据验证中间参数及最终结果,另外遥感数据源的缺失也对最终生态需水量的估算造成影响。但随着遥感技术的进步,遥感影像的时间和空间分辨率更高,这将会为遥感监测湿地的地表温度、蒸散发量等各种环境变量提供更为精确便利的数据源。同时随着遥感反演模型的不断改进,基于蒸散发量反演的湿地生态需水量估算将更加实用,为湿地保护区管理人员制定科学合理的补水方案提供科学建议。

参考文献(References):

- [1] 金云峰, 杨玉鹏, 蒋伟. 国外湿地公园保护与管理研究综述. 中国城市林业, 2015, 13(6): 1-5, 22-22.
- [2] 朱婧, 王利民, 贾凤霞, 张微, 刘建昌, 范秀英. 我国华北地区湿地生态需水量研究探讨与应用实例. 环境工程学报, 2007, 1(11): 112-118.
- [3] 宋松, 许有鹏, 张建新, 陈奕. 生态保护目标体系下海河流域湿地需水研究——以河北省衡水湖湿地自然保护区为例. 水土保持通报, 2010, 30(4): 219-223.
- [4] 刘金鹏, 费良军. 民勤盆地生态环境需水优先次序和需水量. 生态学报, 2009, 29(9): 4911-4917.
- [5] Eamus D, Hatton T, Cook P, Colvin C. Ecohydrology: vegetation function, water and resource management. Collingwood: CSIRO Publishing, 2006.
- [6] Wilcox D A, Xie Y C. Predicting wetland plant community responses to proposed water-level-regulation plans for lake Ontario: GIS-based modeling. Journal of Great Lakes Research, 2007, 33(4): 751-773.
- [7] Powell S J, Letcher R A, Croke B F W. Modelling floodplain inundation for environmental flows: Gwydir wetlands, Australia. Ecological Modelling, 2008, 211(3/4): 350-362.
- [8] Vymazal J. Long-term performance of constructed wetlands with horizontal sub-surface flow: ten case studies from the Czech Republic. Ecological Engineering, 2011, 37(1): 54-63.
- [9] Xu Y, Wang Y, Li S, Huang G H, Dai C. Stochastic optimization model for water allocation on a watershed scale considering wetland's ecological water requirement. Ecological Indicators, 2018, 92: 330-341.
- [10] 崔保山, 杨志峰. 湿地生态环境需水量研究. 环境科学学报, 2002, 22(2): 219-224.
- [11] 张晓春, 马春, 陈卫平, 李洪远. 天津滨海新区湿地生态恢复需水量评估. 南水北调与水利科技, 2012, 10(5): 63-66.
- [12] 赵晓瑜, 杨培岭, 任树梅, 许廷武. 内蒙古河套灌区湖泊湿地生态环境需水量研究. 灌溉排水学报, 2014, 33(2): 126-129.
- [13] 刘春彤, 曹升乐, 刘阳, 薛树文, 杨裕恒, 李晶莹. 不同生态目标玉符河湿地生态需水量. 科学技术与工程, 2017, 17(26): 290-294.
- [14] 赵晓瑜, 杨培岭, 任树梅, 张振林. 基于生态水位差比法的高海拔湿地生态环境需水量研究——以乌梁素海湿地为例. 灌溉排水学报, 2018, 37(5): 59-65.
- [15] 李兴春, 林年丰, 汤洁, 李青山, 王教和. 扎龙湿地生态环境需水量研究. 吉林大学学报: 理学版, 2004, 42(1): 143-146.
- [16] 王建群, 韩丽, 马铁民. 扎龙湿地生态系统需水量. 湖泊科学, 2006, 18(2): 114-119.
- [17] 戴向前, 刘昌明, 陈敏建, 郑红生, 朱芮芮. 扎龙湿地生态需水研究. 南水北调与水利科技, 2007(5): 41-47.
- [18] Swinbank W C. The measurement of vertical transfer of heat and water vapor by eddies in the lower atmosphere. Journal of Meteorology, 1951, 8(3): 135-145.
- [19] Monteith J L. Evaporation and environment. Symposia of the Society for Experimental Biology, 1965, 19: 205-234.
- [20] 曾丽红, 宋开山, 张柏, 杜嘉. 应用 Landsat 数据和 SEBAL 模型反演区域蒸散发及其参数估算. 遥感技术与应用, 2008, 23(3): 255-263.
- [21] 蔡玉林, 于慧娜, 高宗军, 宋翠玉, 张春荣. 大沽河流域蒸散量时空变化. 遥感信息, 2016, 31(5): 126-132.
- [22] 罗冲. 气候变化下的玛纳斯河流域土壤盐渍化动态演变研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2016.
- [23] Liang S L. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I: Algorithms. Remote Sensing of Environment, 2001, 76(2): 213-238.
- [24] 王介民, 高峰. 关于地表反照率遥感反演的几个问题. 遥感技术与应用, 2016, 19(5): 295-300.
- [25] 王颖, 张科利, 李峰. 基于 10 年 MODIS 数据的锡林郭勒盟草原植被覆盖度变化监测. 干旱区资源与环境, 2012, 26(9): 165-169.
- [26] 金点点, 宫兆宁. 基于 Landsat 系列数据地表温度反演算法对比分析——以齐齐哈尔市辖区为例. 遥感技术与应用, 2018, 33(5): 830-841.
- [27] 赵昱昀. 区域蒸散发遥感估算研究与实现[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2014.
- [28] 杨志峰, 崔保山, 刘静玲, 王西秦, 刘昌明. 生态环境需水量理论、方法与实践. 北京: 科学出版社, 2003: 50-54.
- [29] 曾丽红, 宋开山, 张柏, 王宗明, 杜嘉. 基于 SEBAL 模型与 MODIS 产品的松嫩平原蒸散量研究. 干旱区资源与环境, 2011, 25(1): 140-147.
- [30] 王海波, 马明国. 基于遥感和 Penman-Monteith 模型的内陆河流域不同生态系统蒸散发估算[J]. 生态学报, 2014, 34(19): 5617-5626.
- [31] Filgueiras R, Almeida T S, Mantovani E C, Dias S H B, Fernandes-Filho E I, Da Cunha F F, Venancio L P. Soil water content and actual evapotranspiration predictions using regression algorithms and remote sensing data. Agricultural Water Management, 2020, 241: 106346.
- [32] 曹永强, 刘明阳, 李元菲, 肖春柳. 不同潜在蒸散发估算方法在辽宁省的适用性分析. 资源科学, 2019, 41(10): 1780-1790.
- [33] 杜嘉, 张柏, 宋开山, 王宗明, 曾丽红. 基于 MODIS 产品和 SEBAL 模型的三江平原日蒸散量估算. 中国农业气象, 2010, 31(1): 104-110, 162-162.
- [34] 东迎欣. 扎龙湿地生态环境需水量研究[D]. 长春: 吉林大学, 2006.