

doi: 10.6046/gtzyyg.2020188

引用格式: 叶婉桐, 陈一鸿, 陆胤昊, 等. 基于 GEE 的 2000—2019 年间升金湖湿地不同季节地表温度时空变化及地表类型响应 [J]. 国土资源遥感, 2021, 33(2): 228–236. (Ye W T, Chen Y H, Lu Y H, et al. Spatio-temporal variation of land surface temperature and land cover responses in different seasons in Shengjin Lake wetland during 2000—2019 based on Google Earth Engine [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2021, 33(2): 228–236.)

基于 GEE 的 2000—2019 年间升金湖湿地不同季节地表温度时空变化及地表类型响应

叶婉桐¹, 陈一鸿¹, 陆胤昊^{1,2}, 吴鹏海^{1,2,3}

(1. 安徽大学资源与环境工程学院, 合肥 230601; 2. 湿地生态保护与修复安徽省重点实验室 (安徽大学), 合肥 230601; 3. 安徽大学物质科学与信息技术研究院, 合肥 230601)

摘要: 为更好地开展长江下游湿地生态保护与恢复建设, 以谷歌地球引擎 (Google Earth Engine, GEE) 云平台上 2000—2019 年不同季节升金湖区域 Landsat 影像为数据源, 基于辐射传输方程法批量反演地表温度, 综合分析了 2000—2019 年近 20 a 间升金湖湿地的地表温度时空变化及其与地表类型的响应关系。结果表明: ①在空间上, 不同温度等级的空间分布随季节变化具有明显差异: 高温区域在春季相对分散, 夏秋两季一般位于西北部, 在冬季多处于南部; 水域面积随季节变动, 但其温度四季均属于极低温或低温; ②在时间上, 受林地和水域的影响, 2000—2019 年间升金湖湿地始终以约占 70%~85% 的中温区和低温区为主, 各地表温度级别面积占比随季节、年份等时间趋势不同产生变化; ③不同覆盖类型的地表温度存在季节性响应差异, 基本以人造表面 > 耕地 > 林地、滩涂 > 水体的形式呈现; ④非城市化因素对天然湿地地表温度等级变化产生一定影响。研究结果对于升金湖湿地合理开发规划具有一定意义。

关键词: Google Earth Engine; Landsat; 地表温度; 时空变化; 升金湖

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-070X(2021)02-0228-09

0 引言

湿地被誉为“地球之肾”, 具有改善气候、控制污染和维持区域生态平衡等重要作用^[1], 水汽蒸发、植物蒸腾等过程吸收潜热是湿地能够调节局部气候的关键^[2]。然而, 湿地具有脆弱、破坏后难以恢复、对温度变化较为敏感的特性^[3], 相关研究表明, 气温每升高 3 ℃, 需要降雨量增加 20% 才能补偿因温度升高而产生的对湿地生态系统的不良影响^[4]。在局地尺度上, 相比气温而言, 地表温度不仅取决于热辐射, 还会随着土地利用/覆盖变化 (land use/cover change, LUCC) 而发生变化^[5]。

国内外学者通过空间分析、多元线性回归分析等方法定性或定量研究城市区域地表温度变化及其对 LUCC 的响应, 取得了系列重要结论^[6-8]; 近年来, 湿地区域地表温度相关研究也取得一定进展。

杜嘉等^[9]以洪河湿地为例从多个角度验证了 3 种地表温度反演算法的精度; 邹骁等^[10]选取冬季和夏季研究杭州西溪湿地不同土地覆盖类型的地表温度响应; 杜培军等^[11]结合 LUCC 综合分析了江苏滨海湿地不同地物类型的升温情况; 郑慧祯等^[12]利用剖面分析和模型构建方法分析了城市化进程中河口湿地表面温度的扰动特征。然而上述工作大多基于若干个年份的部分季节数据, 探究密集人类活动、建成区扩张等城市化因素对城市内部湿地或河口海岸湿地地表温度的影响; 尽管也取得了一些重要结论, 但对非城市化因素引起天然湿地的地表温度扰动特征的研究报道较少, 且缺乏对湿地区域地表温度的长时序、四季变化研究, 往往无法发现年际尺度湿地区域地表温度的季节性变化特征与规律, 不利于湿地的管理与保护。

安徽省升金湖作为长江中下游国际重要湿地, 以保护淡水湖泊生态系统和濒危鸟类为主体^[13], 正

收稿日期: 2020-06-29; 修订日期: 2020-09-03

基金项目: 国家自然科学基金项目“顾及混合像元的遥感地表温度时空变融合方法研究”(编号: 41501376)资助。

第一作者: 叶婉桐 (1999-), 女, 本科, 主要研究方向为生态环境遥感。Email: gloria_998@163.com。

通信作者: 吴鹏海 (1987-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为遥感信息智能处理及生态环境遥感。Email: wuph@ahu.edu.cn。

面临着自然过程、围湖造田、开发养殖等引起的生态系统的威胁,已吸引相关学者从宏观角度开展研究。李鑫等^[13-14]在升金湖湿地土地利用变化与景观生态风险、候鸟生境方面取得不少成果;宋昀微等^[15]在生境变化对升金湖越冬水鸟群落影响方面进行了较深入研究,此外还有一些学者从土地利用动态^[16]、景观格局与水位关系^[17]、草滩植被地上生物量遥感反演^[18]、水体悬浮物遥感反演^[19]等维度进行研究。由于升金湖湿地特殊的地理位置,受城市化进程影响较小,且湖内水域与长江水体相通,除了明显的丰水期和枯水期,地表温度的变化也使得湖内泥滩、草滩等湿地重要地表类型发生明显改变,从而影响湿地生态系统功能。因此有必要开展升金湖地区长时序、四季地表温度时空变化研究,进一步探讨诸如耕地耕作方式与种植结构、基础设施布局、植被覆盖等非城市化因素对天然湿地表面温度扰动的影响。

谷歌地球引擎(Google Earth Engine, GEE)作为一个实现全球尺度地球科学数据可视化计算的地理

空间分析云平台,其海量遥感数据存档及强大的并行计算能力为长时序四季遥感监测提供技术便利。目前已有学者基于该平台开展湿地湖泊系统 pH 值估算^[20]、城市热岛效应^[21]、土地复垦与可持续发展^[22]等方面研究。本文在 GEE 平台上筛选 2000—2019 年升金湖湿地四季 Landsat 遥感数据,基于辐射传输方程法实现地表温度的批量反演,得到 2000—2019 年间升金湖不同季节地表温度时空变化,并分析其与地表类型的响应情况,以期升金湖湿地保护与合理开发提供决策支持。

1 研究区概况与数据源

1.1 研究区概况

升金湖湿地(E116°55′~117°15′, N30°15′~30°30′)地处安徽省池州市境内、长江南岸(图 1)。作为珍稀水鸟越冬的栖息地,升金湖地区是国家级重点水禽自然保护区,2015 年被列入《国际重要湿地名录》。

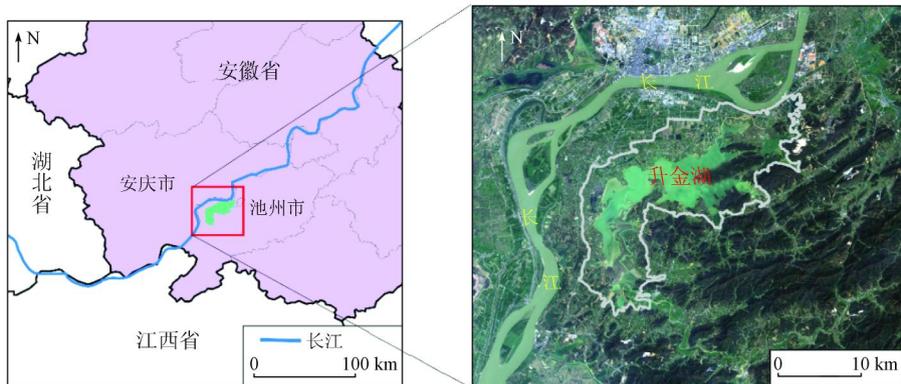


图 1 研究区域地理位置

Fig. 1 The geographical location of study area

升金湖属于内陆季节性淡水湖泊,丰水期湖区面积可达 140 km²,枯水期形成季节性草滩,水面不足 34 km²。该区域属亚热带季风气候,雨量充沛,年均降雨量 1 600 mm,年均蒸发量 757.5 mm,年平均气温为 16.14 ℃^[23]。

1.2 Google Earth Engine 平台简介

GEE 是由谷歌、卡内基梅隆大学和美国地质调查局共同开发的云端计算平台,其提供了基于 Web 端的在线 JavaScript API、离线 Python API 与分析工具等^[24]。GEE 不仅为用户提供了包括 40 多年 Landsat 系列卫星影像及其他不同分辨率的影像数据集,还提供有高程数据、气象数据和人口统计数据等。与 ENVI 等付费遥感影像处理工具相比,GEE 平台具有集免费、海量数据选择、批量处理、可视化计算于一体的优势。基于其丰富的数据集和强大的

后台运算能力,GEE 可满足用户不同的数据处理及分析需求。

1.3 数据源

考虑到数据的可获得性和逐年四季监测的需求,选择空间分辨率较高(30 m)以及时间连续性较好的 Landsat 系列数据^[25]。根据升金湖湿地的地理位置及季节特性,本文选取 2000—2019 年四季、研究区域上空无云覆盖的卫星影像共 66 景(受天气影响,每个季节的不同年份上存在数据缺失),行列号为 121/39,并将 3—5 月作为春季,6—8 月作为夏季,9—10 月作为秋季,11—次年 2 月作为冬季。数据获取时间及卫星传感器信息如表 1 所示。温度反演所用数据集采用 GEE 平台(<https://earthengine.google.com/>)上所提供的原始 DN 值影像、大气校正后的地表反射率等即用型产品。数据预处理主要包

表 1 Landsat 遥感影像数据

Tab. 1 The remote sensing data of Landsat

季节	传感器类型	获取时间
春	TM	2004-04-19, 2005-03-05, 2007-03-27, 2008-05-16
	ETM+	2000-04-16, 2001-05-21, 2002-05-24, 2003-03-08, 2006-05-19, 2009-04-09, 2010-03-11, 2011-03-30, 2017-03-14
	OLI/TIRS	2013-04-02, 2014-05-01, 2019-03-12
夏	TM	2004-07-24, 2005-08-12, 2006-07-30, 2009-06-04
	ETM+	2002-07-11, 2003-07-30, 2008-07-27, 2010-08-18, 2012-07-22, 2018-08-24
	OLI/TIRS	2016-07-25, 2017-07-28, 2019-08-19
秋	TM	2001-10-20, 2003-10-26, 2004-10-12, 2005-09-13, 2007-10-05, 2009-10-26
	ETM+	2000-10-09, 2002-09-29, 2006-09-24, 2008-10-15, 2010-10-05, 2017-10-24, 2019-09-28
	OLI/TIRS	2013-10-05, 2014-10-08, 2015-10-11, 2016-09-27, 2018-10-03
冬	TM	2000-11-02, 2001-11-21, 2002-11-08, 2004-12-31, 2005-10-31, 2006-12-21, 2008-12-10
	ETM+	2003-12-21, 2007-11-30, 2009-12-21, 2010-12-08, 2011-12-11, 2012-11-11, 2015-01-04, 2016-02-08
	OLI/TIRS	2016-12-16, 2017-12-19, 2019-01-23, 2019-11-23

括辐射定标、去条带和影像裁剪等。其他辅助数据为升金湖矢量边界和 MODIS 地表温度产品。

表 2 分类精度评价结果

Tab. 2 The evaluation results of classification accuracy

日期	总体分类精度/%	Kappa 系数	日期	总体分类精度/%	Kappa 系数	日期	总体分类精度/%	Kappa 系数
2002-05-24	93.49	0.9066	2010-03-11	95.92	0.9356	2019-03-12	92.32	0.8915
2002-07-11	94.50	0.9160	2010-08-18	98.07	0.9520	2019-08-19	94.31	0.9213
2002-09-29	95.52	0.9342	2010-10-05	96.75	0.9531	2019-09-28	90.64	0.8724
2002-11-08	92.50	0.8898	2010-12-08	96.87	0.9566	2019-11-23	92.83	0.8995

2.2 地表温度反演与精度评价

目前较为成熟的 Landsat 地表温度反演方法有单通道算法、基于辐射传输方程的大气校正法和多通道算法等^[28]。由于单窗算法、普适性单通道算法所需的升金湖地区大气参数数据获取不易，而劈窗算法需利用相邻热红外通道仅适用于 Landsat8 数据，且精度不够理想^[29]。因此，本文综合比较后采用基于辐射传输方程的大气校正法，相关研究证明其反演结果均方差在 2℃ 左右；对于长时序应用而言，精度在可接受的范围内^[30-31]。

辐射传输方程法具有明确的物理基础。假设大气、地表对热辐射均具有朗伯体性质，热红外辐射传感器所接收的能量可以表示为^[32]：

$$B(T_s) = [L_\lambda - L^\uparrow - \tau(1 - \varepsilon)L_\downarrow] / \tau\varepsilon, \quad (1)$$

由于缺乏研究区站点地表温度数据，为了验证反演的 Landsat 地表温度产品，本文选择与 Landsat 卫星过境时间相近(当地时间上午 10:30)的 Terra 卫星的第六版本 MODIS 每日地表温度产品(MOD11A1, C6, 轨道号为 h28v05)进行验证^[26]，该产品具有较好的反演精度，空间分辨率为 1 km^[27]。

2 研究方法

2.1 地表覆盖信息提取

本文对照 Google Earth、高分 1/2 号同期高分辨率影像及 Landsat 数据本身等参考影像，在研究区内均匀地选取训练样本，采用支持向量机法(support vector machine, SVM)将研究区土地利用类型划分为林地、水体、耕地、人造表面和滩涂(泥滩、草滩)5 类。需要指出的是监督分类要求独立的样本信息，难以进行 GEE 批量分类。

由于数据量较大，本文选取 2002 年、2010 年及 2019 年 3 期四季遥感数据(共 12 景)进行分类精度评价。在 ArcGIS10.2 工具下，采用抽样统计精度验证法在研究区域内生成 400 个随机点，结合同期参考影像进行人工目视判读，计算总体分类精度和 Kappa 系数。结果如表 2 所示，分类结果的 Kappa 系数总体大于 0.87，总体分类精度均大于 90%，符合本实验要求。

式中： $B(T_s)$ 为温度为 T_s 的黑体在热红外波段的辐射亮度值， $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$ ； L_λ 为热红外波段大气校正后的辐射定标值， $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$ ； ε 为地表比辐射率值； τ 为大气在红外波段的透过率； L^\uparrow 和 L_\downarrow 分别为大气上行、下行辐射亮度， $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$ 。其中， τ ， L^\uparrow 和 L_\downarrow 这 3 个参数在美国国家航空航天局官网提供的大气校正参数计算器(<http://atm-corr.gsfc.nasa.gov/>)中输入成影日期、时间及中心经纬度即可获得，该计算器主要依靠 MODTRAN 辐射传输代码和整体算法来估计特定点的透过率和大气上下辐射亮度，误差仅为 3% 左右^[33]。

根据普朗克公式的反函数，推导出地表真实温度 T_s 的计算公式为：

$$T_s = K_2 / \ln[K_1 / B(T_s) + 1], \quad (2)$$

式中: T_s 为地表真实温度, K; K_1 和 K_2 为卫星发射前传感器的预设常量, 可从头文件中获取, 对于 Landsat TM/ETM+/TIRS 传感器, K_1 分别为 607.76, 666.09 和 774.89 W/(m² sr μm), K_2 分别为 1 260.56, 1 282.71 和 1 321.08 K; 以上过程均在 GEE 平台上编程批量实现。

选取同期第六版本 MOD11A1 作为基准进行温度验证。根据 MODIS 像元大小, 对 Landsat 温度反演结果使用最近邻内插法重采样。由于空间分辨率限制, MODIS 的每个像元可能包含混合信息, 因此, 依据分层抽样的原则, 选择林地、水体、耕地等 5 种土地利用类型均质变化的区域分别验证。以 MODIS LST 为真实值, 地表温度验证公式为:

$$\delta = \frac{|LST - LST_M|}{LST_M} \times 100\% \quad (3)$$

式中: δ 为某一像元的相对误差, %; LST 为该像元 Landsat 影像温度反演结果, K; LST_M 为该像元 MODIS 地表温度产品值, K。验证结果显示, 由于过境时间差异, 除夏季外各地物类型像元相对误差在 0.01% ~ 3.74% 之间, 夏季不超过 5%, 表明温度反演结果具有可靠性。

2.3 温度分级

由于季节划分方式、温度周期性变化、影像获取时间前后气象条件差异(尽管获取时间是无云, 但该影像是否受观测时间前后可能的云、雨等影响未知)等因素存在, 地表温度存在波动难以直观地反映变化趋势。为了增强年间、年际的可比性, 需对地表温度反演结果进行归一化处理, 从而更精确地研究长时间序列下升金湖地表温度时空变化情况。本文采用归一化方法^[34]将地表温度分布范围统一到 0~1 之间, 计算公式为:

$$NLST_i = \frac{LST_i - LST_{min}}{LST_{max} - LST_{min}} \quad (4)$$

式中: $NLST_i$ 为归一化后像元 i 的值; LST_i 为像元 i 的地表温度反演值; LST_{min} 和 LST_{max} 分别为图幅范围内地表温度最小和最大值。

使用平均值和标准差将归一化的地表温度划分为 5 个级别^[7], 具体分级方法见表 3 (T_{mean} 为归一化地表温度平均值, STD 为标准差)。在对每景地表温度数据进行分类之后, 统计每个温度级别所占的面积, 探究研究时段内每个温度级别面积的变化趋势。

表 3 基于均值和标准差的地表温度分类法

Tab. 3 The classification of land surface temperature based on mean and standard deviation

等级	分级标准
极低温	$T \leq T_{mean} - 1.5STD$
低温	$T_{mean} - 1.5STD < T \leq T_{mean} - STD$
中温	$T_{mean} - STD < T \leq T_{mean} + STD$
高温	$T_{mean} + STD < T \leq T_{mean} + 1.5STD$
极高温	$T > T_{mean} + 1.5STD$

3 结果与分析

3.1 地表温度空间分布特征分析

利用上述分级策略对反演的 2000—2019 年间四季地表温度数据进行等级划分, 并对 5 个温度等级依次赋予 1~5 的值, 地表温度越高则值越大, 按季节对不同年份地表温度等级求平均, 以反映这近 20 a 间四季研究区的地表热分布差异, 如图 2 所示。总体上, 研究区 2000—2019 年地表温度呈现为春季高温区域分布相对分散(图 2(a)); 由于研究区西北部临江且人口相对密集, 反照率相对较低, 吸热能力相对较强的人造表面占比较高, 而研究区东南部主要以丘陵地形为主, 土地利用类型主要为林地, 这种土地利用的空间差异, 导致夏、秋两季西北部温度往往高于东南部(图 2(b)和(c)); 而在冬季, 由于水位下降, 受西南侧流域入湖年径流量最大的张溪河所形成的三角洲和滩涂大面积出露, 以及东南方向林间耕地的影响, 冬季高温主要分布在南部(图 2(d)); 水域四季温度均处于最低。表明升金湖四季地表温度空间分布差异明显。极高温区的空间分布与不透水面及人类的生产生活范围(人造表面及其缓冲区在内的区域)呈密切相关, 在升金湖西侧和东北角高速公路沿线沿走向分布, 在北侧村庄分布区呈零星或连片状分布。高温区作为过渡, 往往分布在极高温区的四周。此外, 还有一部分滩涂地区属于极高温区、高温区, 可能是由于泥滩上砂砾裸露, 受热升温迅速。不同季节这些滩涂的空间分布有一定差异, 春、冬两季水位较低湖床出露, 在湖北岸、东北角及西南角均有出现; 夏季少量高温滩涂集中在湖西南角。中温区分布最广, 分散于整个研究区, 主要包括林地、耕地、草滩所在位置, 如升金湖中部东岸分布有大面积林地, 植被覆盖度高, 2000—2019 年间四季均处于中温区。极低温区、低温区主要分布在升金湖的水体部分, 二者面积受沉水植物数量、湖中滩涂面积等影响, 沉水植物多、滩

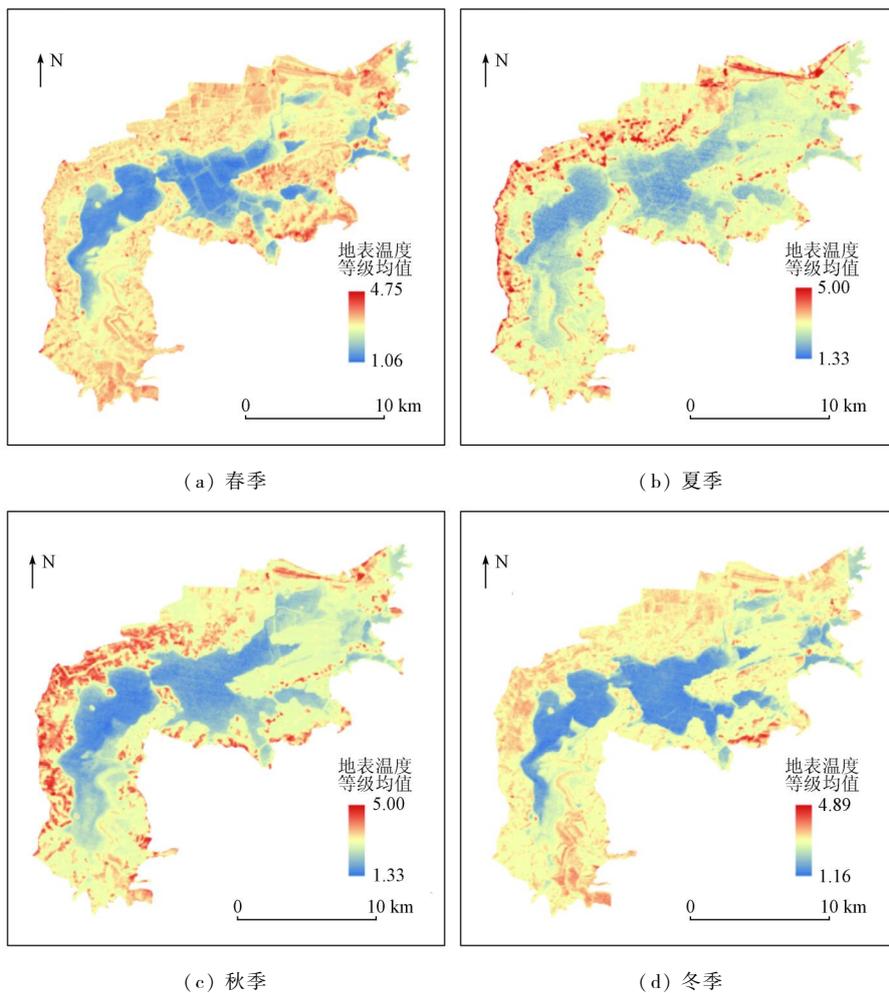


图2 近20年四季地表温度等级均值空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of land surface temperature grades average at all seasons during 20 years

涂面积大即水体面积小,低温区面积也随之减小。

基础设施布局与耕地开垦等引发地表温度级别空间分布转变。对比有高速公路穿过的研究区东北角发现,2000年春、秋季该片区区域普遍属于中温区,同年冬季转变成高温区,2001年春季进一步转化为极高温区且面积扩大,2003年夏季又以中温区为主,极高温区则明显呈细条带状与高速公路形状类似,此后每年夏季此处均存在以高速公路为中心且宽度稍大的条状极高温区。由此推断这种局部从中温向极高温的转变可能是由高速公路修建施工所造成的,修建完成后土地利用类型由耕地转为人造表面。因此,区域性地表温度的变化受基础设施建设影响较大,且这种影响是持续的。耕地耕作方式的改变虽未造成明显的土地利用类型转变,但同样使地表温度等级发生变化,其热效应在夏季较为显著,如升金湖北部区域耕地从最开始的中温区夹杂少量低温区(2003—2005年)逐渐变为极高温区(2009—2012年)又变回中温区(2017—2019年),地表温度整体呈现先上升后下降的趋势,说明耕地的开垦对地表热环境改善做出负向贡献,而在此基

础上合理的耕作方式与种植结构则产生正向贡献。

3.2 地表温度时间变化分析

图3为对2000—2019年研究区不同季节各地表温度级别占比进行统计分析。可以看出,升金湖湿地以中温区为主,面积占比在50.62%~75.42%之间,低温区次之,占比最高可达30.01%,极高温面积最小,占比在0.62%~9.88%间。2000—2019年间极高温、高温、中温、低温、极低温平均分别占总面积的4.32%,10.22%,63.78%,13.23%和8.45%。各地表温度级别面积占比随季节、年份等时间趋势不同产生变化,例如不同年份的夏季极高温占比变化较小,较为稳定,但中温区占比总体呈上升趋势。从表1中选取四季统计数据完整的共10a统计数据(2002—2006年、2008—2010年、2017年和2019年)用于各温度级别年内特征的分析。这10a里,极高温区面积占比最高的季节始终是夏季,最高可达9.88%(2003年)。中温区占比秋季最低,其年内面积占比极差平均在12.03%左右,季节间变化幅度最大的年份是2010年,夏季、秋季中温区分别占70.54%和50.62%,降幅达19.92个百分点,对比

这两景发现造成占比差异的主要原因是,该年夏季水温整体偏高导致有部分水体被划为中温区,而秋季水体与陆地温差增大,中温区占比回落;最稳定的年份为2019年,夏季、秋季中温区各占65.91%和61.98%,降幅仅3.93个百分点。从2006年开始,冬季极低温区面积占比最高,且低温区占比保持最

低(仅3.42%~10.48%),而在2006年以前,冬季低温区占比可达15%以上,表明冬季水体与陆地表面温度之间差异逐渐扩大,升金湖地区人造表面占比的增加以及入湖河流带来的泥沙共同导致冬季裸地面积占比增加是造成水陆温差增大的可能原因。

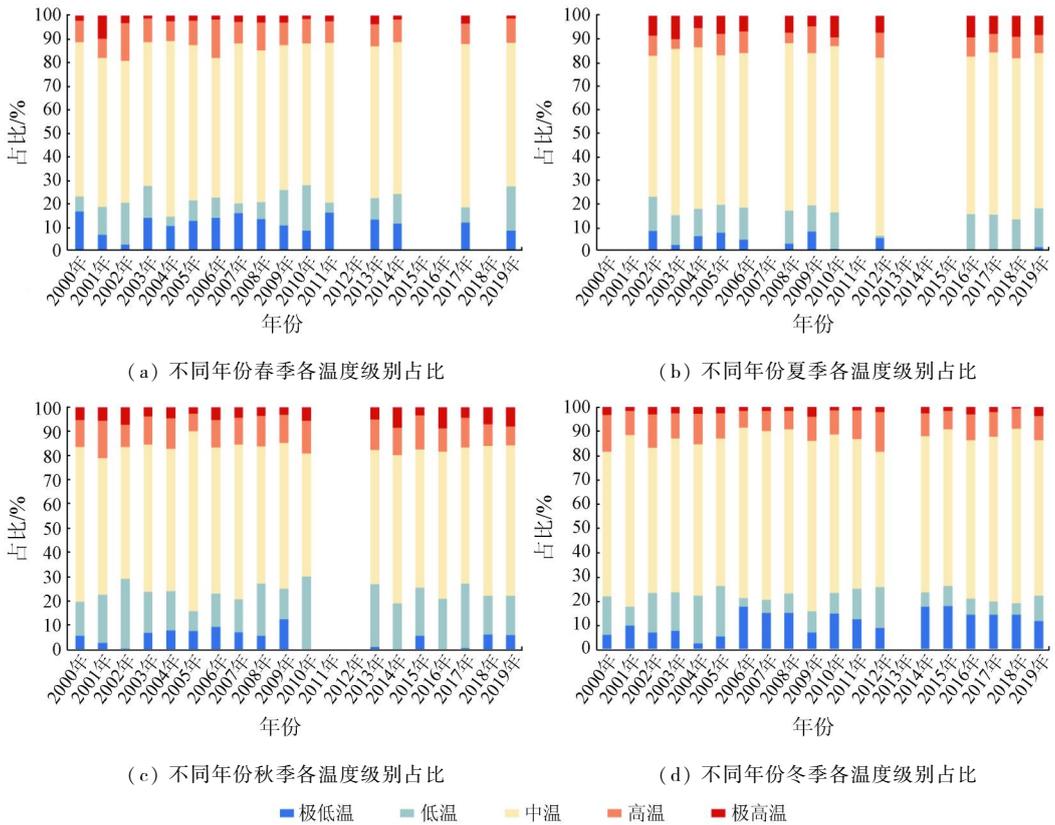


图3 2000—2019年四季不同温度级别占比

Fig. 3 Proportion of different temperature grades at all seasons from 2000 to 2019

2015—2019年间,夏季、秋季极低温区占比极低(<1%),即水域温度有所升高。水体温度升高,蒸发所吸收的热量相应减少,湿地的降温效果也随之减弱^[35]。2016年夏季、秋季极低温面积占比分别为0.35%和0.12%;2017年夏季、秋季略有增长但占比仍小于1%,分别为0.48%和0.99%;2018年夏季占比依然小于1%,但秋季有所回升达6.42%;2019年夏季极低温占比高于1%,为1.78%,秋季略微下降至6.14%。主要是因为周边地区城镇化发展迅猛、人工围网养鱼^[13]、林地覆盖度减小等不利影响逐年累积,保温保湿能力减弱,在太阳辐射强度大的夏季表现的较为明显。得益于环保意识提升、渔业养殖停止,这种现象有所好转;此外,生态保护建设推进也使得部分被挖空而裸露的山体地表转为林地,一定程度上缓解地表热环境压力,因而近两年极低温占比呈增长态势。

3.3 地表温度与地物类型响应分析

不同地表覆盖类型与地表温度之间存在响应差

异,为考察二者的对应关系,本文基于ArcGIS软件统计不同地物类型的平均温度。

结果表明,不同年份水体对应的地表温度始终最低,多年平均温度为19.11℃,人造表面、耕地所覆盖的地温最高,多年平均温度分别为24.18℃和23.20℃。在冬季,多数耕地因休耕而与裸地情况类似,偶有地表温度略高于人造表面0.07~0.53℃的情况。各地表覆盖类型间的平均最大温差以冬季最小、春季最大,春、夏、秋、冬分别为6.15℃,4.98℃,5.29℃和4.34℃。

值得注意的是,2009年、2010年春季林地地表温度最高,其主要原因是林地面积由2008年冬天的44.62 km²减少到2009年春天的39.52 km²,升金湖蜈蚣山体西部有部分林地转变成了耕地,导致林地不再大面积呈片状分布,郁闭度不足,因此太阳辐射可以穿过林冠层直射地表使其下方温度升高,且毗邻耕地的林地接收到来自耕地的热辐射、反射等,地表温度较其他林地区域有明显增高。

近些年,受国家“退耕还湿”、“植树造林”等绿色发展理念实行的影响,林地面积有所回升,湿地生态环境有所改善。但对比2000年11月2日与2019年11月23日各地表类型平均温度发现,林地、水体、耕地、人造表面及滩涂的变化分别为+2.49, +1.1, +2.58, +2.35及+3.01℃/10a,说明除了观测日期晚了20d左右带来的温差,湿地生态系统各地表类型在冬季有一定增温。

4 结论与展望

本文基于GEE平台利用2000—2019年共66景Landsat系列遥感影像,通过监督分类、地表温度反演、温度分级等定性定量分析了升金湖湿地的地表温度时空变化及其与地表覆盖的响应情况,得出以下结论:

1)研究区不同季节温度等级空间分布具有差异性。春季高温区域分布相对分散,夏、秋两季西北部温度高于东南部,冬季高温多分布在南部,水域温度四季均处于极低温或低温区。

2)研究区以中、低温为主(约70%~85%),各温度等级面积占比随季节、年份不同而发生变化,冬季水陆温差逐渐扩大。

3)不同覆盖类型的地表温度存在季节性响应差异,冬季耕地地表温度或略微高于人造表面;各地表覆盖类型间的最大温差以春季最大、冬季最小。

4)非城市化因素对天然湿地地表温度等级变化产生一定影响。基础设施建设是局部温度增高的主要影响因素,且产生持续性影响;耕地种植状态改善、植被覆盖面积提升则对地表温度降低做出有效正贡献。

根据上述研究结果,对于未来升金湖生态保护建设给出如下3点建议:①推进农田改造与“退耕还湖”工程,通过种植水生植物或转化为水塘等方式改变地表含水量,以改善地表热环境。②合理规划湿地保护区人造表面建设,尤其是高速公路等道路系统的布局优化,保证一定的生态缓冲区留出,以减缓夏秋两季极高温热效应。③大力加强水体、林地保护管理以免出现面积缩减,以植被覆盖率修复为重点,维持湿地以中温区、低温区为主的状态,提高湿地生态系统的恢复力与稳定性。

本文结合了2000—2019年近20a多时相的遥感影像数据,但由于影像获取时间的天气等不确定因素的存在,且季节界定存在一定时间跨度,监督分类的不确定性,结果可能存在一定误差;此外,所选用的影像数据分辨率仍不够精细,且缺乏社会统计

数据,得出的研究结论较为粗略,将在后续开展更加细致深入的研究。

参考文献(References):

- [1] 杨永兴. 国际湿地科学研究的主要特点、进展与展望[J]. 地理科学进展, 2002(2): 111-120.
Yang Y X. Main characteristics, progress and prospect of international wetland science research [J]. Progress in Geography, 2002(2): 111-120.
- [2] 孟宪民. 湿地与全球环境变化[J]. 地理科学, 1999(5): 385-391.
Meng X M. Wetlands and global environmental change [J]. Scientia Geographica Sinica, 1999(5): 385-391.
- [3] Turner S J. Landscape ecology concepts, methods and applications [J]. Landscape Ecology, 2005, 20(8): 1031-1033.
- [4] Larson D L. Effects of climate on numbers of northern prairie wetlands [J]. Climate Change, 1995, 30: 169-180.
- [5] 王艳慧, 肖 瑶. 北京市1989—2010年地表温度时空分异特征分析[J]. 国土资源遥感, 2014, 26(3): 146-152. doi:10.6046/gtzyyg. 2014. 03. 24.
Wang Y H, Xiao Y. A temporal-spatial variation analysis of land surface temperature in Beijing [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2014, 26(3): 146-152. doi:10.6046/gtzyyg. 2014. 03. 24.
- [6] 梁保平, 李晓宁. 城市LUCC时空格局对地表温度的影响效应研究——以广西柳州市为例[J]. 中国土地科学, 2016, 30(11): 41-49, 2.
Liang B P, Li X N. The effects of urban LUCC spatio-temporal structure on land surface temperatures: A case study in Liuzhou City [J]. China Land Sciences, 2016, 30(11): 41-49, 2.
- [7] Firozjai M K, Kiavarz M, Alavipanah S K, et al. Monitoring and forecasting heat island intensity through multi-temporal image analysis and cellular automata-Markov chain modelling: A case of Babol City, Iran [J]. Ecological Indicators, 2018, 91: 155-170.
- [8] Chaudhuri G, Mishra N B. Spatio-temporal dynamics of land cover and land surface temperature in Ganges-Brahmaputra delta: A comparative analysis between India and Bangladesh [J]. Applied Geography, 2016, 68: 68-83.
- [9] 杜 嘉, 张 柏, 宋开山, 等. 基于Landsat-5 TM的洪河湿地地表温度估算方法对比研究[J]. 遥感技术与应用, 2009, 24(3): 312-319, 252.
Du J, Zhang B, Song K S, et al. A comparative study on estimated surface temperature based on Landsat-5 TM in the Honghe wetland [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2009, 24(3): 312-319, 252.
- [10] 邹 骁, 李寅雷, 蒋景刚. 杭州市西溪湿地冬、夏季地表温度特征与地表类型关系分析[J]. 建设科技, 2013(2): 76-80.
Zou X, Li Y L, Jiang J G. Analysis of the relationship between land surface temperature characteristics and land cover of Xixi wetland in winter and summer in Hangzhou [J]. Construction Science and Technology, 2013(2): 76-80.
- [11] 杜培军, 陈 宇, 谭 琨. 江苏滨海湿地土地利用/覆盖变化与地表温度响应遥感监测[J]. 国土资源遥感, 2014, 26(2): 112-120. doi:10.6046/gtzyyg. 2014. 02. 19.

- Du P J, Chen Y, Tan K. The remote sensing monitoring of land use/cover change and land surface temperature responses over the coastal wetland in Jiangsu [J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2014, 26(2): 112 - 120. doi:10.6046/gtzyyg.2014.02.19.
- [12] 郑慧祯, 陈燕红, 潘文斌, 等. 河口湿地表面温度扰动特征及其关键影响因素[J]. *生态学杂志*, 2018, 37(8): 2463 - 2473.
Zhen H Z, Chen Y H, Pan W B. Land surface temperature fluctuation characteristics and key influencing factors in estuarine wetland [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(8): 2463 - 2473.
- [13] 李鑫, 董斌, 孙力, 等. 基于TM像元的湿地土地利用生态风险评价研究[J]. *水土保持研究*, 2014, 21(4): 114 - 118, 321.
Li X, Dong B, Sun L, et al. Study on ecological risk assessment of Shengjing Lake wetland land use based on TM image pixels [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2014, 21(4): 114 - 118, 321.
- [14] 陈凌娜, 董斌, 彭文娟, 等. 升金湖自然湿地越冬鹤类生境适宜性变化研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(3): 556 - 563.
Chen L N, Dong B, Peng W J, et al. Study on the change of landscape pattern on habitat environment of winter cranes in Shengjin Lake nature wetland [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, 27(3): 556 - 563.
- [15] 宋昀微, 周立志. 生境变化对升金湖越冬水鸟群落时空动态的影响[J]. *安徽农业大学学报*, 2019, 46(4): 610 - 617.
Song Y W, Zhou L Z. Effects of habitat changes on spatio-temporal pattern of the wintering waterbird community at Shengjin Lake [J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2019, 46(4): 610 - 617.
- [16] 陈广洲, 葛欢, 施金菊, 等. 4个时期升金湖湿地的土地利用动态研究[J]. *湿地科学*, 2017, 15(1): 20 - 24.
Chen G Z, Ge H, Shi J J, et al. Dynamic of land use of Shengjin Lake wetlands in four periods [J]. *Wetland Science*, 2017, 15(1): 20 - 24.
- [17] 张双双, 董斌, 杨斐, 等. 升金湖湿地景观格局变化对越冬鹤类地理分布的影响[J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(10): 2461 - 2470.
Zhang S S, Dong B, Yang F, et al. Influence of landscape pattern change of Shengjin Lake wetland on the geographical distribution of overwintering cranes [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(10): 2461 - 2470.
- [18] 高燕, 梁泽毓, 王彪, 等. 基于无人机和卫星遥感影像的升金湖草滩植被地上生物量反演[J]. *湖泊科学*, 2019, 31(2): 517 - 528.
Gao Y, Liang Z Y, Wang B, et al. UAV and satellite remote sensing images based aboveground biomass inversion in the meadows of Lake Shengjin [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, 31(2): 517 - 528.
- [19] 王行行, 王杰, 崔玉环. 基于Sentinel-2 MSI影像的河湖系统水体悬浮物空间分异遥感监测: 以安徽省升金湖与连接长江段为例[J]. *环境科学*, 2020, 41(3): 1207 - 1216.
Wang H H, Wang J, Cui Y H. Remote sensing monitoring on spatial differentiation of suspended sediment concentration in a river-lake system based on Sentinel-2 MSI imaging: A case for Shengjin Lake and connected Yangtze River section in Anhui Province [J]. *Environmental Science*, 2020, 41(3): 1207 - 1216.
- [20] Pereira O J R, Merino E R, Montes C R, et al. Estimating water pH using cloud-based Landsat images for a new classification of the Nhecolândia lakes (Brazilian Pantanal) [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(7): 1090.
- [21] Adeola F O, Gbenga A E, Oludapo O A, et al. Land use/land cover change and land surface temperature of Ibadan and environs, Nigeria [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2020, 192(2): 109.
- [22] Sengupta D, Chen R S, Meadows M E, et al. Mapping trajectories of coastal land reclamation in nine deltaic megacities using Google Earth Engine [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(22): 2621.
- [23] 宋金春. 安徽升金湖国家级自然保护区湿地保护与恢复建设方案初探[J]. *华东森林经理*, 2008(1): 61 - 64.
Song J C. Preliminary discussion on wetland protection and restoration plan of Shengjin Lake national nature reserve in Anhui province [J]. *East China Forest Management*, 2008(1): 61 - 64.
- [24] 徐晗泽宇, 刘冲, 王军邦, 等. Google Earth Engine平台支持下的赣南柑橘果园遥感提取研究[J]. *地球信息科学学报*, 2018, 20(3): 396 - 404.
Xu H Z Y, Liu C, Wang J B, et al. Study on extraction of citrus orchard in Gannan region based on Google Earth Engine platform [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2018, 20(3): 396 - 404.
- [25] 朱娴飞, 陆雨婷, 吴鹏海, 等. 近30年长江下游升金湖湿地不同季节景观生态风险时空分析[J]. *湖泊科学*, 2020, 32(3): 813 - 825.
Zhu X F, Lu Y T, Wu P H, et al. Spatial-temporal analysis of landscape ecological risk in different seasons during the past 30 years in Lake Shengjin wetland, lower reaches of the Yangtze River [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2020, 32(3): 813 - 825.
- [26] 赵国辉, 张耀南, 康建芳. 中巴经济走廊2013—2018年地表温度高分辨率反演数据集[J/OL]. *中国科学数据*, 2018. (2018 - 10 - 22). <http://www.cnki.com.cn/Article/CJFDTotal-KXGZ201903007.htm>
Zhao G H, Zhang Y N, Kang J F. A dataset of high-resolution land surface temperature inversion for the China-Pakistan Economic Corridor (2013 - 2018) [J/OL]. *China Scientific Data*, 2018. (2018 - 10 - 22). <http://www.cnki.com.cn/Article/CJFDTotal-KXGZ201903007.htm>
- [27] Duan S B, Li Z L, Li H, et al. Validation of Collection 6 MODIS land surface temperature product using in situ measurements [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 225: 16 - 29.
- [28] Sekertekin A, Bonafoni S. Land surface temperature retrieval from Landsat 5, 7, and 8 over rural areas: Assessment of different retrieval algorithms and emissivity models and toolbox implementation [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(2): 294.
- [29] 徐涵秋. 新型Landsat8卫星影像的反射率和地表温度反演[J]. *地球物理学报*, 2015, 58(3): 741 - 747.
Xu H Q. Retrieval of the reflectance and land surface temperature of the newly-launched Landsat 8 satellite [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(3): 741 - 747.
- [30] 白洁, 刘绍民, 扈光. 针对TM/ETM+遥感数据的地表温度反演与验证[J]. *农业工程学报*, 2008(9): 148 - 154, 2.
Bai J, Liu S M, Hu G. Inversion and verification of land surface

- temperature with remote sensing TM/ETM + data[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008(9):148 – 154, 2.
- [31] 史新, 周买春, 刘振华, 等. 基于 Landsat 8 数据的 3 种地表温度反演算法在三河坝流域的对比分析[J]. 遥感技术与应用, 2018, 33(3):465 – 475.
- Shi X, Zhou M C, Liu Z H, et al. Comparative analysis on three land surface temperature inversion algorithm based on Landsat 8 data over Sanheba basin[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2018, 33(3):465 – 475.
- [32] Otle C, Stoll M. Effect of atmospheric absorption and surface emissivity on the determination of land surface temperature from infra-red satellite data [J]. International Journal of Remote Sensing, 1993, 14(10):2025 – 2037.
- [33] Barsi J A, Schott J R, Palluconi F D, et al. Validation of a web – based atmospheric correction tool for single thermal band instruments[J]. Proceedings of Spie the International Society for Optical Engineering, 2005, 5882.
- [34] 乔治, 田光进. 北京市热环境时空分异与区划[J]. 遥感学报, 2014, 18(3):715 – 734.
- Qiao Z, Tian G J. Spatiotemporal diversity and regionalization of the urban thermal environment in Beijing[J]. Journal of Remote Sensing, 2014, 18(3):715 – 734.
- [35] 康晓明, 崔丽娟, 赵欣胜, 等. 北京市湿地缓解热岛效应功能分析[J]. 中国农学通报, 2015, 31(22):199 – 205.
- Kang X M, Cui L J, Zhao X S, et al. Analysis of alleviation of urban heat island effect by wetlands in Beijing[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(22):199 – 205.

Spatio – temporal variation of land surface temperature and land cover responses in different seasons in Shengjin Lake wetland during 2000—2019 based on Google Earth Engine

YE Wantong¹, CHEN Yihong¹, LU Yinhao^{1,2}, Wu Penghai^{1,2,3}

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Anhui University, Hefei 230601, China; 2. Key Laboratory of Ecological Protection and Restoration of Wetland in Anhui Province, Anhui University, Hefei 230601, China; 3. Institute of Physical Science and Information Technology, Anhui University, Hefei 230601, China)

Abstract: In order to better carry out the ecological protection and restoration of the wetland in the lower reaches of the Yangtze River, the authors selected the Landsat images of Shengjin Lake in different seasons from 2000 to 2019 as the research data with the support of Google Earth Engine (GEE) cloud platform. The land surface temperature (LST) was retrieved by a batch program using radiative transfer equation method. The spatio – temporal variation of LST and its responses to land cover in Shengjin Lake during the past 20 years were comprehensively analyzed. The results are as follows: ① From the perspective of space, the spatial distribution of different temperature grades has shown obvious differences with the seasonal changes. The high – temperature region is dispersed in spring, generally located in the northwest in summer and autumn, and mostly in the south in winter. The area of the lake varies with the seasons, but its temperature belongs to very low or low temperature grade at all seasons. ② From the perspective of time, in the past 20 years, affected by forest and water, the Shengjin Lake wetland has always been dominated by the medium and low temperature grades that account for a large proportion of 70% – 85% or so. The area proportion of temperature grades varies with the time trend such as seasons and years. ③ There exist seasonal differences in the responses of LST to land cover. It is basically presented in the form of a descending order of artificial surface > cultivated land > forest and mudflat > water. ④ Non – urbanization factors have a certain impact on the surface temperature of natural wetland. The research results are certainly significant for the reasonable development of Shengjin Lake.

Keywords: Google Earth Engine; Landsat; land surface temperature; spatio – temporal variation; Shengjin Lake
(责任编辑: 李 瑜)