

DOI: 10.5846/stxb202007081769

金翠, 李欣涛, 佟欣羽, 曾令辉, 李凤秀. 三江平原水田景观对局地热环境的影响. 生态学报, 2021, 41(5): 1766-1776.

Jin C, Li X T, Tong X Y, Zeng L H, Li F X. Impact of paddy field landscape on the local thermal environment in the Sanjiang Plain. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(5): 1766-1776.

## 三江平原水田景观对局地热环境的影响

金 翠<sup>1,\*</sup>, 李欣涛<sup>1</sup>, 佟欣羽<sup>1</sup>, 曾令辉<sup>1</sup>, 李凤秀<sup>2</sup>

1 辽宁师范大学地理科学学院, 大连 116029

2 河南省气候中心, 郑州 450003

**摘要:**水稻是重要粮食作物之一,水稻田灌溉导致其下垫面性质独特,具有“冷湿效应”,进而直接影响区域气候。基于 Landsat8 TIRS 热红外遥感数据反演地表温度,刻画三江平原水田种植核心区的热环境空间格局,以景观生态学格局-过程理论为视角,量化水田景观格局对水田内部地表温度分异的影响,以及对周边区域热环境的影响范围及幅度。结果表明:(1)与水田、旱田空间分布相对应,研究区地表温度具有空间极化特点,水田与旱田平均地表温差为-7.8℃。(2)水田内部的平均地表温度与水田斑块大小、连通性呈负相关,与形状呈正相关。(3)水田对周边降温距离为 60—300m,降温幅度为 0.05—9.7℃。其中,水田内部温度场对降温距离和幅度的影响最大,呈负相关;水田斑块大小、内部连通性与降温距离及幅度之间为正向相关,而水田形状的影响最弱。研究从水田与周边地表热环境交互影响的角度,强调了物质、能量横向传输的非线性过程在农田灌溉的气候效应研究中的重要作用。

**关键词:**地表温度; 地表能量过程; 景观生态; 景观指数

## Impact of paddy field landscape on the local thermal environment in the Sanjiang Plain

JIN Cui<sup>1,\*</sup>, LI Xintao<sup>1</sup>, TONG Xinyu<sup>1</sup>, ZENG Linghui<sup>1</sup>, LI Fengxiu<sup>2</sup>

1 Liaoning Normal University, Dalian 116029, China

2 He'nan Climate Centre, Zhengzhou 450003, China

**Abstract:** Rice is one of the important food crops. Paddy fields have the specifically underlying surface due to irrigation-Cold-Humid Effect, which leads to direct influence on the regional climate. This study retrieved the land surface temperature based on thermal infrared data of Landsat8 TIRS, and depicted the spatial pattern of thermal environment for the paddy-planting core region in the Sanjiang Plain. From the perspective of pattern and process of Landscape Ecology theory, this study quantified the impact of paddy field landscape pattern on the spatial differentiation of the internal land surface temperature, and the influenced range and degree on the local thermal environments. The result showed that (1) the land surface temperature had the spatial polarization feature, which matched with spatial distribution of paddy fields and dry croplands. The difference of averaged land surface temperature between paddy fields and dry croplands was -7.8℃. (2) The averaged land surface temperature of paddy fields was negatively correlated with the size and connectivity of paddy fields, and positively correlated with their shape. (3) The cooling distances of paddy fields were between 60 m and 300 m, and the cooling degree was between 0.05 ℃ and 9.7 ℃. The internal temperature of paddy fields had the most influential effect to the cooling distance and degree, which were negatively correlated. The size and connectivity of paddy fields were positively correlated with the cooling distance and degree. The shape of paddy field had the least cooling influence. In the

**基金项目:**国家自然科学青年基金项目(41801340); 辽宁省科技厅自然基金指导项目(20180550238)

**收稿日期:**2020-07-08; **修订日期:**2020-12-27

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: cuijin@lnnu.edu.cn

view of the interaction between the paddy field landscape and local thermal environment, this study emphasized the importance of the nonlinear transverse transmission of matter and energy in the study of the climate effects of agricultural irrigation.

**Key Words:** land surface temperature; land surface energy processes; landscape ecology; landscape metrics

水稻作为世界第二大粮食作物,是全球近半数以上人口的主要粮食来源。水稻生长及其种植环境所产生的农业温室气体是全球及区域气候变化的间接推手之一<sup>[1-2]</sup>;另一方面,水田受灌溉作用,其地表下垫面性质(如反照率、粗糙度、比辐射率、蒸散等)独特,导致地表能量传输中的辐射传输机制和非辐射机制与其他植被覆盖土地利用类型存在差异,具有“冷湿效应”,影响局地的热环境,进而直接影响区域气候<sup>[3-4]</sup>。在气候变化及人类需求共同作用下,寒温带地区的水田种植范围持续扩大,其种植界线迅速向北推移<sup>[5-7]</sup>。在此背景下,探寻该地区的水田种植活动对局地热环境的影响,是揭示区域气候变化的成因、理解人类活动对气候影响机制研究中的重要内容。

目前学者已通过气象观测法或气候模式模拟法探讨农业灌溉对区域尺度的近地面气温的影响,主要集中在干旱及半干旱区、亚热带湿润区<sup>[8]</sup>。其中,气象观测法对比分析灌溉与非灌溉田间的气象观测站的气温及其变化规律的差异,以此表征灌溉对气温的影响。Mahmood 等<sup>[9]</sup>基于气象观测数据对比分析发现美国中部灌溉农田的植被生长季平均最高近地面气温以每年 0.01℃ 率递减;Zhu<sup>[10]</sup> 和 Han<sup>[11]</sup> 等分别对我国新疆和吉林西部地区的长期气温观测值分析得出近地表气温的降温幅度受田间的灌溉管理制度、灌溉规模及灌溉面积影响。然而气象观测法受到观测站点数量、分布及其观测空间尺度限制,制约其在区域级或地表空间异质性大的地区应用<sup>[12]</sup>。气候模式模拟法从气候变化的物理机制出发,揭示灌溉导致区域气候时空动态特征及预测未来气候变化趋势,所得结论与气象观测法一致,即在区域尺度农业灌溉降低日最高近地表气温,而对夜间最低近地表气温的影响存在不确定性<sup>[13]</sup>。与普通旱田灌溉相比,水田灌溉特殊,需要保持长期灌水环境,其地表反照率低,地表潜热高,进而水田对局地表热环境的影响更为复杂。然而,气候模型对地表参数化中却极少区分灌溉的水田与旱田;另一方面,受物理机理复杂、模型参数化困难、大尺度高精度灌溉属性数据难获得等影响,为气候模式模拟方法模拟水田种植区的局地气候增加了更多不确定性<sup>[14]</sup>。地表温度(LST, Land Surface Temperature)是地表能量及水平衡物理过程中的关键因子,作为局地热环境主要指征而用于城市地表下垫面局部气候研究<sup>[15-16]</sup>。热红外遥感可以连续性获得大尺度的地表温度信息<sup>[17]</sup>,是研究水田灌溉对气候影响的重要潜在技术方法。三江平原是我国水稻种植最北界,近二十年内自然湿地开垦及“旱改水”过程使得水田面积扩张迅速<sup>[18]</sup>,近期已有研究采用遥感技术分析三江平原水田扩张对区域的制冷效应。Du 等<sup>[19]</sup>利用 Terra/MODIS 地表温度产品分析三江平原水旱田的分布对地表温度空间格局差异及其季节特征;Liu 等<sup>[20]</sup>基于辐射传输理论耦合遥感及气象观测数据量化辐射及非辐射机制对水田降温的贡献;Yu 等<sup>[21]</sup>利用长时序 MODIS 集合发现水田扩张导致白天地表温度下降,同引起时夜间地表温度升高,导致整个作物生长期内的区域地表温度昼夜差异显著降低。尽管以上研究以水田扩张所引起冷湿效应的时空特征及其机制分析,然而其将水田与旱田的地表能量辐射传输过程设为相互不干扰、独立发展的两个过程,直接对比水旱田地表温度差异,忽略水田与其邻接土地覆盖类型之间的物质、能量横向传输的非线性过程,例如,通过大气平流运动可以输送水汽和传导能量,导致水田灌溉对其邻近周边局地热环境产生影响。因而,水田灌溉对周边局地热环境影响的空间尺度及程度如何?水田对周边降温效应与其灌溉规模之间关系,是否与旱田灌溉的降温效应与灌溉规模呈线性关系假设一致?这些问题仍然需要进一步探讨。

景观生态学将生态系统视为由不同组分镶嵌组成<sup>[22-23]</sup>,组分格局分异特征引起地表温度存在空间异质性,进而物质和热量随温度梯度在组分内部及组分间传输,尤其在组分边界更为显著。本研究基于 2014 年 6 月 24 日 Landsat8 TIRS 热红外波段反演地表温度数据,刻画三江平原水田种植核心区域的热环境空间分异,

以景观生态学格局-过程理论为视角,量化水田斑块的大小、规模及边界、形状特征,分析水田景观格局对水田内部热环境的影响,及其对周边邻接斑块边缘交界处的热环境的影响范围及程度,为深入探讨高纬度湿冷地带农业灌溉对区域气候变化的影响提供直接科学依据;进而合理规划水稻的生产管理,以提高对气候变化的缓解和适应,为粮食安全保障提供间接参考。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

研究区位于三江平原腹地( $46.84^{\circ}$ — $47.94^{\circ}$ N,  $130.14^{\circ}$ — $132.68^{\circ}$ E),主要为农业耕作区,其气候湿冷,地形平坦,水资源、土壤资源丰富,为单季稻生长提供优越条件<sup>[24]</sup>。研究区水田面积为 $8.54 \times 10^3 \text{ km}^2$ ,约占耕地总面积的46.5% (图1)。水稻生长期约为145 d。4月中旬至5月上旬为整地泡田期,5月中旬开始秧苗移栽期,6月进入分蘖期,7月中旬进入孕穗期,自8月底开始收获于10月上旬结束<sup>[25]</sup>。本文选取作物生长对温度最敏感月份——6月份为研究时间段,该时段内水稻及旱田作物田间地表热环境差异最显著。

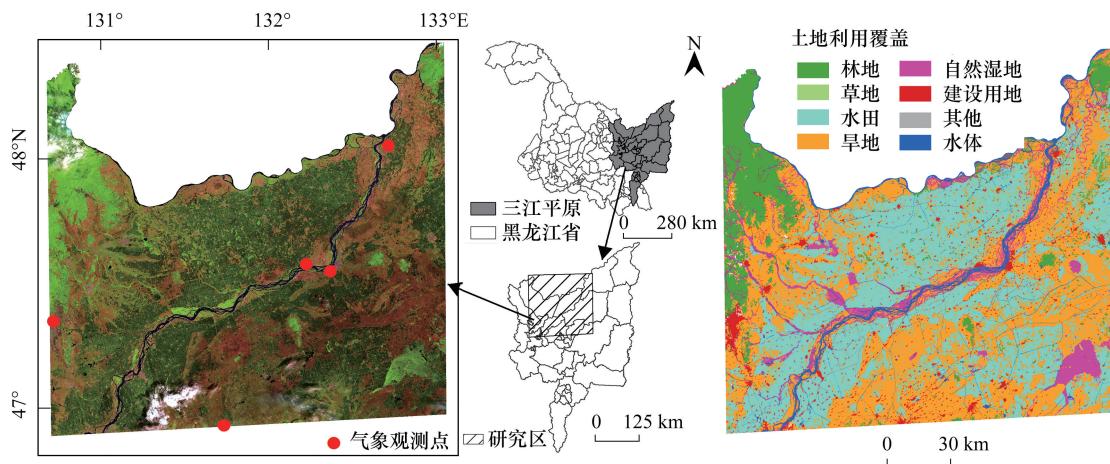


图1 研究区位置及2014年土地利用覆盖图

Fig.1 Location of study area and associated land use cover map in 2014

### 1.2 数据来源及预处理

本研究所用数据包括:Landsat8 OLI/TIRS 遥感影像、2015年研究区土地利用覆盖矢量数据、以及1km Terra MODIS 地表温度日产品(MOD11A1)。Landsat8 OLI/TIRS 遥感影像来源于美国地质调查局(<https://earthexplorer.usgs.gov/>),轨道号为P115/R027,影像时间为2014年6月24日,影像云量低(<5%),其质量满足地表温度反演要求。Terra MODIS 卫星上午过境时间为10:30,获取同日 MOD11A1 地表温度产品( $LST_{MOD11A1}$ )作为真实地表温度参考,对 Landsat8 TIRS 地表温度( $LST_{TIRS}$ )验证评价。

2015年土地利用覆盖矢量数据基于Landsat、HJ 卫星影像,采用影像分割、决策树分类及人工目视解译方法获得,其总体分类精度94%,耕地的生产者、用户精度分别为90%及89%<sup>[26-27]</sup>。为保证土地利用覆盖矢量数据与 Landsat8 影像数据时间一致性,以 Landsat8 OLI 假彩色合成影像(图1)为参考,通过目视解译更新局部地类边界。以2014年谷歌地球高空间分辨率遥感影像为真实地面参考,对不同土地利用类型随机选取地面真实参考样本(1219个像素),建立分类混淆矩阵,计算出的分类总体精度为97%,Kappa系数为0.96,其中旱田的生产者、用户精度分别为95%、93%,水田的生产者、用户精度分别为99%、97%。

## 2 研究方法

### 2.1 地表温度反演及验证

基于辐射传输方程法对 Landsat8 TIRS 热红外波段进行地表温度反演<sup>[28]</sup>:

$$L_\lambda = [\varepsilon B_\lambda(LST) + (1 - \varepsilon) L_\lambda^\downarrow] \tau + L_\lambda^\uparrow \quad (1)$$

式中,  $L_\lambda$  为 Landsat8 TIRS 10 波段的辐射亮度 ( $\text{W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ );  $\varepsilon$  为地表比辐射率, 采用 NDVI 阈值法获得<sup>[29]</sup>; LST 为地表温度 (K);  $B_\lambda$  为同等 LST 温度下的黑体辐射亮度 ( $\text{W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ )。参数  $\tau = 0.68$  为大气在热红外波段的透过率;  $L_\lambda^\uparrow = 2.49$  和  $L_\lambda^\downarrow = 4.01$  分别为大气上行和下行辐射亮度 ( $\text{W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ ), 由美国国家航空航天局的大气校正参数计算器 (<http://atmcorr.gsfc.nasa.gov>) 获得。根据  $B_\lambda(LST)$  及黑体普朗克定律, 推算 LST:

$$LST = k_2 / \ln(k_1 / B_\lambda(LST) + 1) \quad (2)$$

式中,  $k_1 = 774.89 (\text{W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1})$ ,  $k_2 = 1321.08 \text{ K}$ 。

选择 2014 年 6 月 24 日 1km Terra MODIS 地表温度日产品 (MOD11A1 v006, 即  $LST_{MOD11A1}$ ) 作为地表温度真实参考, 对 Landsat8 TIRS 数据反演的地表温度 ( $LST_{TIRS}$ ) 进行验证。为保证  $LST_{MOD11A1}$  与  $LST_{TIRS}$  像素空间尺度匹配, 计算每 1km  $LST_{MOD11A1}$  像素内的  $LST_{TIRS}$  平均值; 其次, 在研究区内随机选取  $LST_{MOD11A1}$  与 1km  $LST_{TIRS}$  匹配像素对, 通过回归分析, 比较二者回归系数, 均方根误差 (RMSE) 衡量  $LST_{TIRS}$  的偏差。

## 2.2 景观指数选取

在斑块尺度选取面积 (Area)、周长 (PERI)、形状指数 (PARA)、内聚力指数 (COHESION) 四个景观指数, 分别对水田斑块的灌溉规模、种植结构及景观聚集程度直接量化, 同时对水田斑块与周边地类边界处的热量相互传导间接表征。

表 1 景观指数及其描述

Table 1 Landscape metrics and descriptions

景观指数 Landscape metrics	表达及描述 Expressions and descriptions
面积 Area/km <sup>2</sup>	代表水田种植规模及灌溉程度, 面积越大, 集中种植灌溉规模越大
周长 PERI/km	间接描述水田种植及灌溉规模
形状指数 PARA	反映斑块形状复杂程度, PARA 越大, 形状越复杂。PAPR = $\frac{\text{PERI}_i}{\text{Aear}_i}$ 度量斑块内各组分间聚集程度, 组分分布越聚集, 内聚力越大。
内聚力 COHESION	$\text{COHESION} = \left[ 1 - \frac{\sum_{j=1}^n \text{PERI}_{ij}}{\sum_{j=1}^n \text{PERI}_{ij} \sqrt{\text{Aera}_{ij}}} \right] \times \left[ 1 \frac{1}{\sqrt{\text{Aera}_i}} \right]^{-1} \times 10$

$i, j$  分别代表水田斑块序列及每个斑块的内部组分序列

## 2.3 空间统计分析

本研究通过建立各水田斑块的景观格局指数与斑块内平均地表温度之间的回归分析, 表征水田景观格局特征对其内部热环境的影响; 此外, 在水田斑块边界向外 0—300m 之间每隔 30m 建立缓冲区, 共 10 个缓冲区 (图 2), 分析各缓冲区与斑块内部平均地表温度差值 ( $\Delta LST_{Buffer}$ ) 变化, 获得不同水田景观类型对地表温度影响的趋势、范围及幅度。其次, 通过回归分析刻画水田各景观要素与地表温度的影响趋势、范围及程度的定量关系。 $\Delta LST_{Buffer}$  计算如下:

$$\Delta LST_{Buffer} = \overline{LST}_{Buffer} - \overline{LST} \quad (3)$$

式中,  $\overline{LST}$  为水田斑块内部的平均地表温度,  $\overline{LST}_{Buffer}$  为 Buffer = 0—30m, 30—60m, …, 270—300m 缓冲区内的非水田像素的平均地表温度。

## 3 结果分析

### 3.1 水田及周边热环境分布特征

Landsat8 反演地表温度相对精确, 与 MOD11A1 地表温度具有显著的线性相关 ( $R^2 = 0.83, P < 0.001$ ),

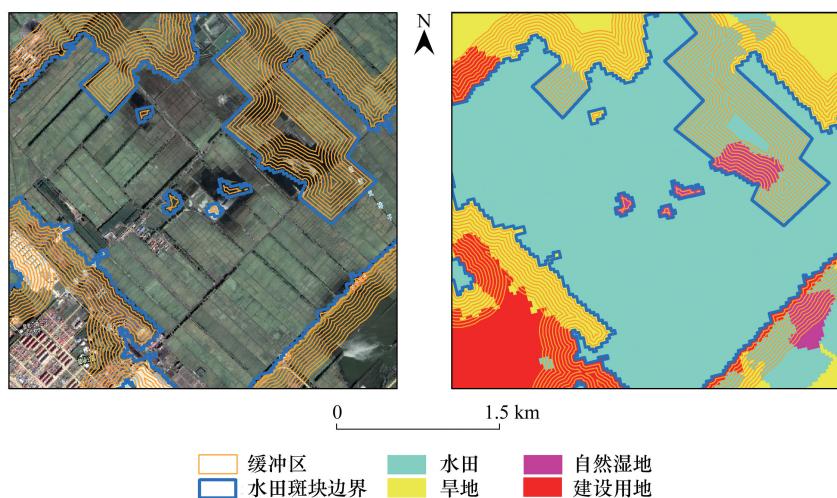


图2 水田斑块边界外每30m间隔缓冲区示意图

Fig. 2 30m buffer zones at the boundary of paddy rice patches

Landsat8 地表温度略偏低,二者的平均误差及均方根误差分别为 $1.7^{\circ}\text{C}$ 、 $2.2^{\circ}\text{C}$ (图3)。研究区地表温度介于 $12.5\text{--}50.4^{\circ}\text{C}$ ,平均地表温度为 $31.5^{\circ}\text{C}$ ,地表温度空间分布(图4)与土地利用覆盖分布格局一致(图1)。地表温度较高区域主要分布在旱田和建设用地,其平均地表温度分别为 $35.9^{\circ}\text{C}$ 和 $34.5^{\circ}\text{C}$ (表1)。地表温度较低区域为植被覆盖区,林地( $26.1^{\circ}\text{C}$ )<水田( $28.1^{\circ}\text{C}$ )<自然湿地( $29.9^{\circ}\text{C}$ )<草地( $32.1^{\circ}\text{C}$ )。受物理性质,如热力学性质、反射及自身发射电磁辐射性质等的综合作用,不同土地覆盖类型对地表能量的吸收、释放过程存在差异,土地覆盖类型的空间分布直接决定研究区的热环境空间格局。与水田、旱田空间分布相对应,研究区地表温度具有空间极化特点。研究区水旱田共占研究区面积的77.4%,在6月份,水、旱田的下垫面特征不同,二者的能量传输中的辐射机制与非辐射机制差异显著,其中水田田间含水量远高于旱田,具有降温及增湿效应,水旱田平均地表温度差为 $-7.8^{\circ}\text{C}$ 。因此,水田景观格局将直接影响水田周边局地及区域整体的热环境。

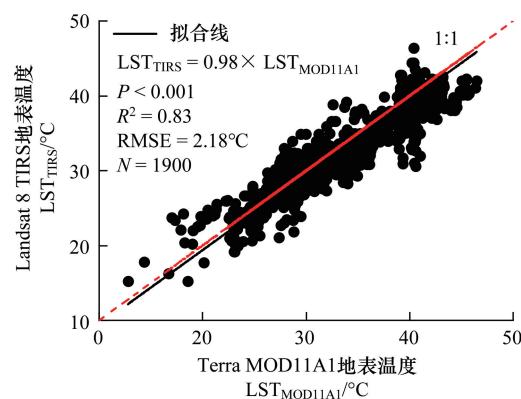


图3 Landsat8 TIRS 地表温度与 Terra MOD11A1 地表温度散点图

Fig. 3 Scatter plot between  $\text{LST}_{\text{TIRS}}$  and  $\text{LST}_{\text{MOD11A1}}$ 

表2 土地利用覆盖类型地表温度统计  
Table 2 Statistics of Land Surface Temperature for Land Use Covers

	林地 Forest	草地 Grassland	自然湿地 Natural wetland	旱地 Dry cropland	水田 Paddy field	建设用地 Construction land	其他 Others
地表温度 LST/°C	$26.1 \pm 2.66$	$32.1 \pm 3.77$	$29.9 \pm 4.74$	$35.9 \pm 4.73$	$28.1 \pm 2.16$	$34.5 \pm 3.18$	$31.8 \pm 4.32$
面积比例 Area proportion/%	9.47	0.10	6.13	41.41	35.96	3.77	0.02

### 3.2 水田景观对内部热环境的影响

同类土地覆盖类型内部地表生物物理组分非均质性,如植被覆盖度、土壤水分、植被长势等,导致其内部地表温度产生差异,引起辐射传输能量在其内部重新分配。基于景观生态学理论,景观组分的结构特征影响

内部的物质与能量流。通过回归分析,水田斑块的面积、周长、形状、内聚力指数与内部平均地表温度极显著相关( $P < 0.001$ ,图5),即水田的景观特征对其内部热环境影响显著。水田平均地表温度与斑块面积和周长呈负指数相关( $R^2 = 0.73, 0.70$ )。水田平均地表温度随着斑块面积、周长的增加迅速下降,当面积、周长分别达到临界点 $25\text{ km}^2, 120\text{ m}$ 时趋于平缓的趋势。其中最小水田斑块面积为 $0.1\text{ km}^2$ ,其内部平均地表温度最高达 $41.2^\circ\text{C}$ ,高于最大水田斑块( $2333.9\text{ km}^2$ ) $14^\circ\text{C}$ 。说明水田面积周长越大,其种植灌溉规模越大,引起田间蒸散量增大,同时,其内部环境不易受到外界环境干扰而具有较好的稳定性。形状指数越大,水田形状越复杂,其内外热量、水分传输效率增强,对应的内部地表温度越高,二者呈正对数关系( $R^2 = 0.63$ )。水田斑块内聚力指数越大,斑块内部的组分间连通性越强,斑块整体的湿度蒸散聚集度越大,其自身的冷温效应越剧烈。内聚力最大的水田斑块(COHESION=99.97)的内部平均地表温度为 $27.1^\circ\text{C}$ ,与内聚力最小的水田斑块(COHESION=90.58)相差 $-10^\circ\text{C}$ ,二者呈线性负相关( $R^2 = 0.74$ ),并且内聚力指数对水田内部平均地表温度的影响明显高于面积、周长及形状指数。

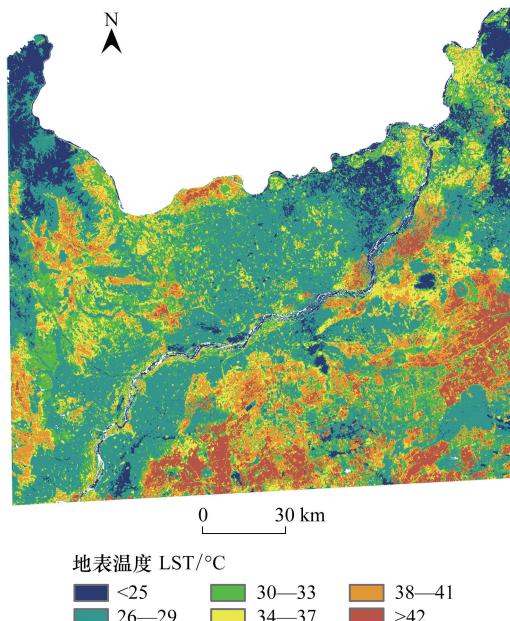


图4 地表温度空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of Land Surface Temperature

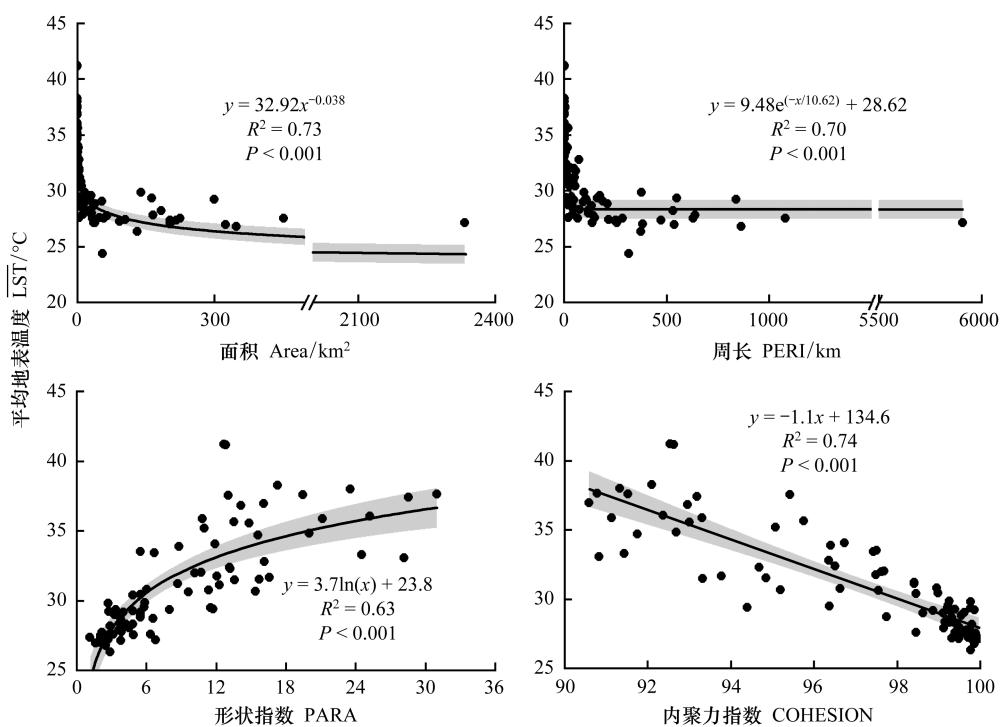


图5 水田斑块景观指数与平均地表温度回归分析

Fig. 5 Regression Analysis between the landscape metrics and LST averages of paddy rice patches

### 3.3 水田景观对周边热环境的影响

#### 3.3.1 水田景观对周边热环境的降温距离与降温幅度

物质及能量在土地覆盖类型景观组分间流动是水田对周边热环境影响的充分条件。基于景观生态学理论,物质能量流的传输途径及效率受不同的规模和属性的景观组分空间结构影响<sup>[30]</sup>。基于面积、形状和内聚力指数,根据 K-means 算法对研究区水田景观自动聚类,分析不同景观类型水田对周边地表温度的影响范围与程度。85 个水田斑块分为三类:非规则小型斑块、类规则中型斑块和规则大型斑块。其中,非规则小型斑块 12 个,其面积和内聚力指数小、形状指数大;规则大型斑块 47 个,其面积和内聚力指数较大,形状指数小。类规则中型斑块(共 26 个)景观特征介于两者之间(图 6)。

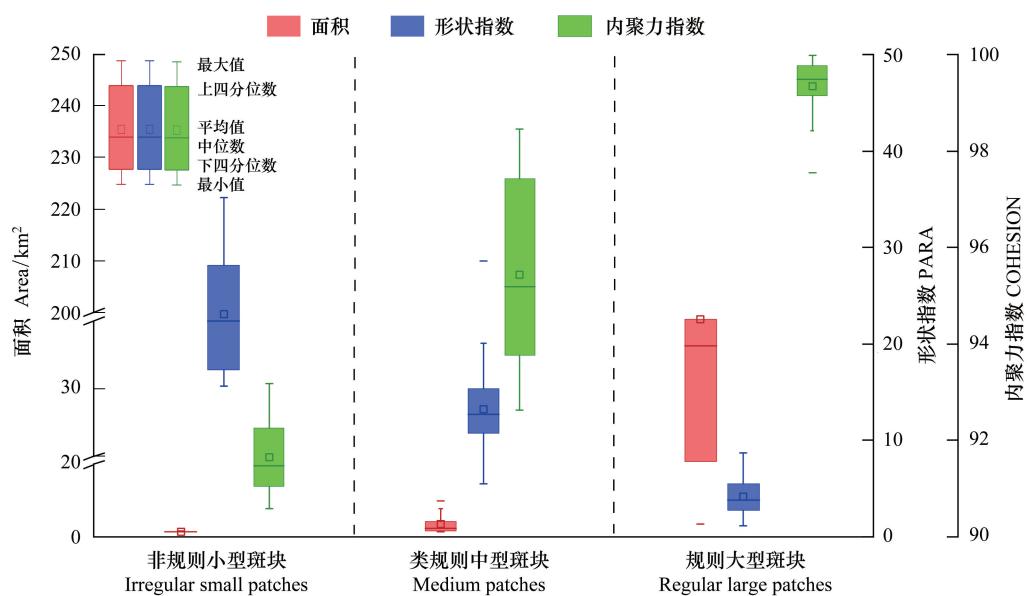


图 6 基于 K-means 算法的水田景观聚类

Fig. 6 Clusters of paddy rice patches based on K-means

统计三类水田外的每 30m 缓冲区内平均地表温度( $\overline{LST}_{Buffer}$ )随边界距离变化(图 7)。首先,三类水田斑块的  $\overline{LST}_{Buffer}$  差异显著,规则大型斑块在各缓冲区内的  $\overline{LST}_i$  最低,非规则小型斑块在各缓冲区内的  $\overline{LST}_i$  最高。其中,大型规则水田斑块的 0—300m 内的平均  $\overline{LST}_{Buffer}$  为 32.7℃,分别低于中型类规则及小型不规则水田斑块

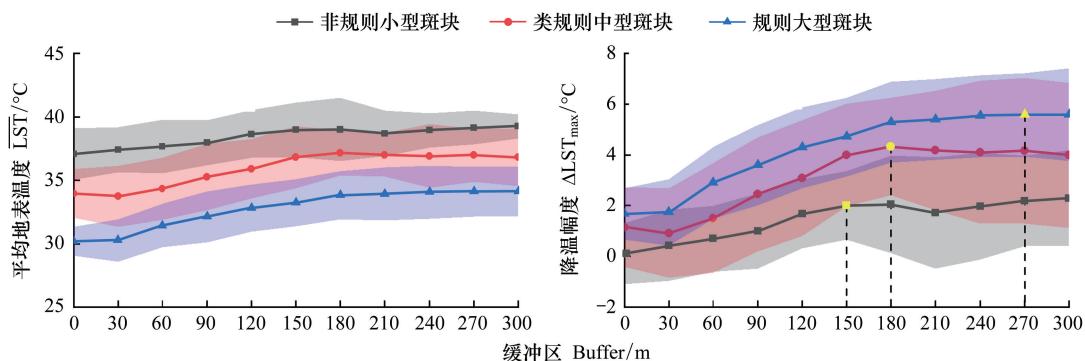


图 7 三类水田景观的每 30m 缓冲区内的平均地表温度  $\overline{LST}_i$  及降温幅度  $\Delta LST_i$

Fig. 7 Land Surface Temperature average  $\overline{LST}_i$  and cooling degree  $\Delta LST_i$  within each 30m buffer for three types of paddy rice landscapes

3.1°C、5.7°C。其次,三类水田景观对边界外具有明显的降温效应,  $\overline{LST}_i$  随缓冲区距离的增加而升高,最终保持平稳。进一步计算各缓冲区  $\overline{LST}_i$  与水田内部平均温度差异,即降温幅度 ( $\Delta LST_i$ ),采用三次多项式拟合后求切线法<sup>[31]</sup>,分别求水田的最大降温距离 ( $Buffer_{max}$ ) 及降温幅度 ( $\Delta LST_{max}$ )。非规则小型斑块、类规则中型斑块、规则大型斑块的  $Buffer_{max}$  和  $\Delta LST_{max}$  依次增加:其  $Buffer_{max}$  为 150m、180m、270m, 分别对应  $\Delta LST_{max}$  为 1.5°C、4.0°C、5.6°C。三类斑块的平均降温幅度分别为 0.7°C、2.1°C、4.1°C, 类规则中型斑块、规则大型斑块的降温速率为 0.22°C/m, 非规则小型斑块降温速率较低 (0.01°C/m)。

### 3.3.2 水田景观对周边降温影响因子

水田内部温度场是影响周边热环境的直接因素之一。将水田斑块内部平均地表温度与其对周边的最大降温距离和降温幅度拟合分析(图 8),各水田对周边的降温距离在 60m 到 300m 之间,平均降温距离为 184m;水田斑块对边界外部的平均降温幅度为 0.1—9.6°C, 其平均降温幅度平均为 5.1°C。水田斑块内部平均地表温度与降温距离和降温幅度都呈现负对数显著相关( $P < 0.01$ ),当水田斑块内部平均温度为 41°C, 降温距离最小(为 75m), 对应降温幅度接近 0°C;随着水田斑块内部平均温度降低,对周边的降温距离和降温幅度增加,降温效应增强。由于水田周边地表温度并非受水田内部温度场单因素影响,同时还受到其他因素的协同作用,如周边景观格局及周边热环境等,二者拟合的相关系数  $R^2$  在 0.5 附近。

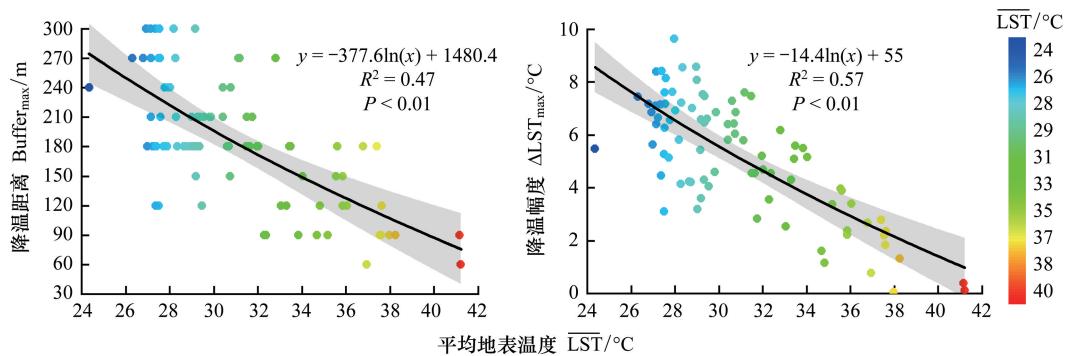


图 8 水田斑块平均地表温度 ( $\overline{LST}$ ) 与降温距离 ( $Buffer_{max}$ ) 和降温幅度 ( $\Delta LST_{max}$ ) 散点图

Fig. 8 Scatter Plots between and Land Surface Temperature averages ( $\overline{LST}$ ) within paddy rice patches and cooling distances ( $Buffer_{max}$ ), cooling degree ( $\Delta LST_{max}$ )

由 3.2, 水田景观直接决定水田内部温度,进而间接影响周边热环境。同时,水田的景观特征直接决定水田与周边地区在边界处的物质热量迁移与交换过程,进而对周边热环境产生直接影响。图 9 表明水田的景观特征与降温距离有显著的相关性( $P < 0.01$ )。其中,最大降温距离与水田面积存在对数函数关系( $R^2 = 0.47$ )。当水田面积从  $0.1\text{km}^2$  增加到  $25\text{km}^2$ , 降温距离迅速增加,其变化速率为  $8.4\text{m}/\text{km}^2$ , 当水田面积大于  $25\text{km}^2$ , 最大降温距离增加缓慢后趋于稳定。与面积相似,最大降温距离随水田周长的增加而迅速增加,最后趋于平稳( $R^2 = 0.46$ )。最大降温距离与水田的形状指数存在负对数函数关系( $R^2 = 0.40$ ), 即随着水田斑块形状复杂度的增加,最大降温距离迅速下降,最后趋于平稳。随着水田内聚力增大,其温度场降温增湿效能增强,对周围降温范围增加,二者呈现线性相关( $R^2 = 0.45$ )。

水田对周边的降温幅度与其景观指数有一定相关性(图 10)。其中,降温幅度与水田面积总体上呈现对数函数拟合关系( $R^2 = 0.38, P < 0.01$ ),当水田面积从  $0.1\text{km}^2$  增加到  $25\text{km}^2$ , 二者显著相关( $R^2 = 0.67, P < 0.01$ ), 降温幅度以  $0.33\text{°C}/\text{km}^2$  速率迅速增加;当水田面积大于  $25\text{km}^2$ , 降温幅度略有下降,其平均降温幅度为  $6.0\text{°C}$ 。降温幅度与水田周长总体上呈现弱相关性( $R^2 = 0.36, P < 0.01$ ),当水田周长在  $1.6\text{--}120\text{km}$  之间,二者显著相关( $R^2 = 0.60, P < 0.01$ );当水田周长大于  $120\text{km}$ , 降温幅度略微下降最终趋于平稳。降温幅度随形状指数的增

加而迅速下降后趋于平稳( $R^2 = 0.35, P < 0.01$ )。降温幅度与内聚力指数呈现线性正相关性( $R^2 = 0.48, P < 0.01$ )。

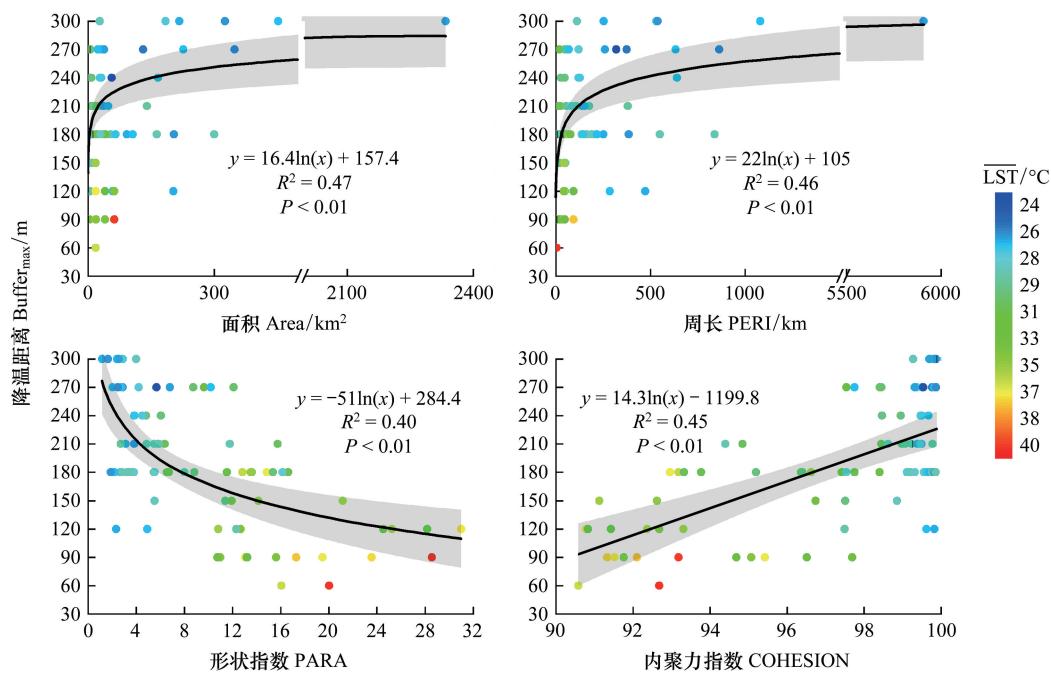


图9 水田斑块景观指数与降温距离( $\text{Buffer}_{\max}$ )散点图

Fig. 9 Scatter Plots between and landscape metrics of paddy rice patches and cooling distances ( $\text{Buffer}_{\max}$ )

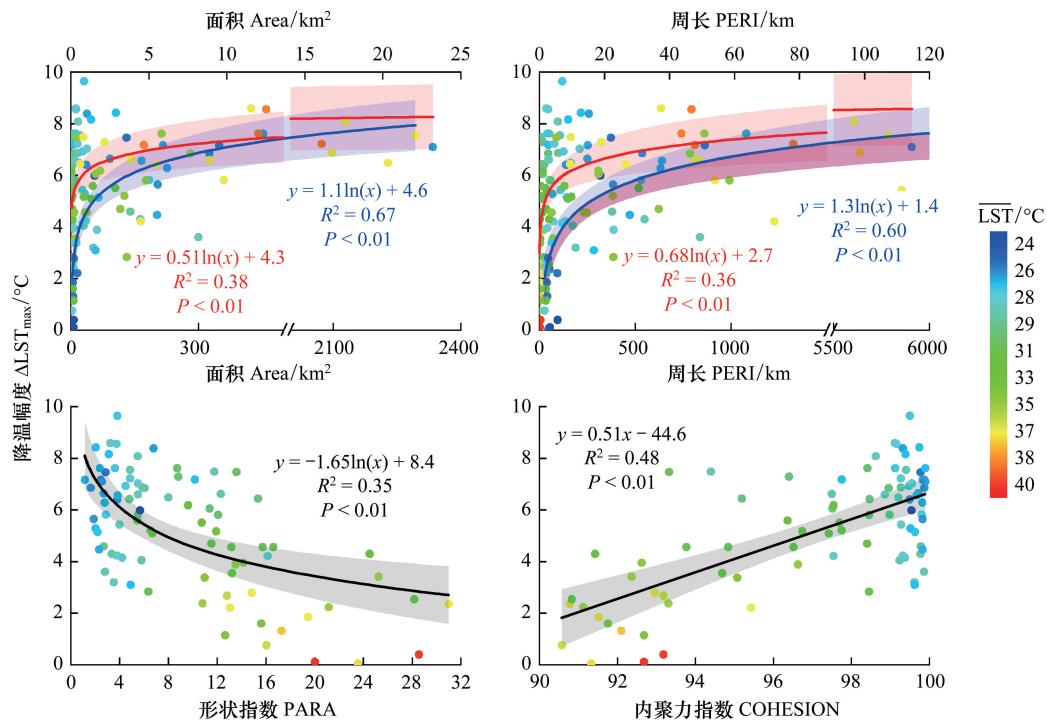


图10 水田斑块景观指数与降温幅度( $\Delta \text{LST}_{\max}$ )散点图

Fig. 10 Scatter Plots between and landscape metrics of paddy rice patches and cooling degree ( $\Delta \text{LST}_{\max}$ )

#### 4 讨论

本文通过 Landsat8 TIRS 遥感数据反演地表温度表征三江平原水稻主要种植区域的地表热环境空间格局,从景观生态学的格局—过程理论的视角,结合空间分析及统计分析法,强调物质及能量在景观组分内部,尤其在组分边界处的横向传输的重要过程,进而分析水田景观格局对水田内部及周边邻接组分的热环境的影响。本研究用遥感反演的地表瞬时温度反映日平均地表热环境具有局限性,这是目前所有基于热红外遥感表征地表热环境研究,如城市热环境遥感研究,所面临巨大挑战<sup>[32-34]</sup>。通过对研究区水田扩张的地表温度影响的文献综述<sup>[19-21]</sup>,6月中下旬是水田在整个生长过程中与旱田地表温度差异最大时段,同时也是水稻生长对田间水量敏感期。因此,本文以此时间段内水田景观对周边热环境作用相对较强为前提假设。此外,本研究为针对斑块尺度的水田对热环境影响首次探讨,以热红外遥感的高空间分辨率首要前提,进而对景观热环境影响的空间特征详细刻画及机理探索,为此采用每 16d 100m 空间分辨率的 Landsat8/TIRS 数据为数据源。在后续研究中,利用长时间序列的热红外遥感数据可以更有效地追踪水稻完整生长过程,在不同灌溉条件及局地气候下的水田景观的热环境效应。例如,采用长时序 1km MODIS 地表温度产品,对每天四个时间点(~1:30、10:30、13:30、22:30)地表温度观测,或采用 MODIS-Landsat 地表温度时空融合方法,生成高时间、高空间分辨率的热红外遥感数据集,对研究区热环境实现高频、高精度的动态刻画,有助于深入探讨水田景观格局对周边热环境的累积效应。与北方水稻种植相比,我国南方水稻的种植制度多样化(双季稻及单-双稻混合种植)、地形条件及灌溉策略复杂、农田景观破碎度高,长时序高空间分辨率的热红外遥感数据将有助于精细刻画不同地域水稻的各物候期及整个生长季的热环境格局;此外,从物质能量横向传输过程的机理出发,结合地面布点、车载、无人机的多维地表温度实测数据,进一步深化探讨水田及邻接土地覆盖类型的景观构型特征对区域热环境的影响机制。

#### 5 结论

本研究选取高纬度湿冷地区的特殊农业灌溉形式——水田灌溉为研究对象,采用遥感反演地表温度为区域热环境表征,通过景观生态学-格局过程理论,结合空间邻域分析方法,强调地表物质、能量横向传输过程在水田对周边降温效应中的重要作用,在区域特色、对象特色、分析框架三方面为农业灌溉对区域气候变化的影响研究提供新的视角。主要结论如下:

(1) 研究区地表温度具有空间极化特点,与水田、旱田空间分布相对应。水田与旱田的田间水-植-土组分比例差异大,导致地表生物物理属性差异显著,引起水田与旱田地表温度差异显著,二者平均地表温差为-7.8°C;

(2) 水田内部的平均地表温度受水田景观特征影响。其中,随斑块面积和周长的增加,水田的地表温度急剧降低后,趋于平稳状态;景观内部组分连通性强的水田斑块的平均地表温度更低,二者呈现负相关;形状复杂的水田斑块的内部地表温度较高,二者为正相关;

(3) 水田对周边最小降温距离是 60m,最大距离是 300m,降温幅度在 0.05—9.7°C 之间。水田周边局地的热环境受水田内部及邻接地类的协同作用,导致水田景观结构对周边局地降温作用较复杂,本研究中水田对周边降温贡献度约为 50%。其中,水田内部温度场、种植规模、内部连通性及水田形状对周边降温效应的影响依次减弱。

#### 参考文献(References):

- [1] Carlson K M, Gerber J S, Mueller N D, Herrero M, MacDonald G K, Brauman K A, Havlik P, O'Connell C S, Johnson J A, Saatchi S, West P C. Greenhouse gas emissions intensity of global croplands. *Nature Climate Change*, 2017, 7(1): 63-68.
- [2] Zhang G L, Xiao X M, Dong J W, Xin F F, Zhang Y, Qin Y W, Doughty R B, Moore III B. Fingerprint of rice paddies in spatial-temporal dynamics of atmospheric methane concentration in monsoon Asia. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 554.

- [ 3 ] Nishida K, Yoshida S, Shiozawa S. Theoretical analysis of the effects of irrigation rate and paddy water depth on water and leaf temperatures in a paddy field continuously irrigated with running water. *Agricultural Water Management*, 2018, 198: 10-18.
- [ 4 ] Lobell D, Bonfils C, Faurès J M. The role of irrigation expansion in past and future temperature trends. *Earth Interactions*, 2008, 12(3): 1-11.
- [ 5 ] Zhang G L, Xiao X M, Biradar C M, Dong J W, Qin Y W, Menarguez M A, Zhou Y T, Zhang Y, Jin C, Wang J, Doughty R B, Ding M J, Moore III B. Spatiotemporal patterns of paddy rice croplands in China and India from 2000 to 2015. *Science of the Total Environment*, 2017, 579: 82-92.
- [ 6 ] 方修琦, 王媛, 徐琰, 云雅如. 近20年气候变暖对黑龙江省水稻增产的贡献. *地理学报*, 2004, 59(6): 820-828.
- [ 7 ] 杜国明, 春香, 于凤荣, 张燕, 赵雅倩, 关桐桐. 东北地区水田分布格局的时空变化分析. *农业现代化研究*, 2017, 38(4): 728-736.
- [ 8 ] Nocco M A, Smail R A, Kucharik C J. Observation of irrigation-induced climate change in the Midwest United States. *Global Change Biology*, 2019, 25(10): 3472-3484.
- [ 9 ] Mahmood R, Hubbard K G, Carlson C. Modification of growing-season surface temperature records in the northern great plains due to land-use transformation: verification of modelling results and implication for global climate change. *International Journal of Climatology*, 2004, 24(3): 311-327.
- [ 10 ] Zhu X F, Liang S L, Pan Y Z. Observational evidence of the cooling effect of agricultural irrigation in Jilin, China. *Climatic Change*, 2012, 114(3/4): 799-811.
- [ 11 ] Han S J, Yang Z Y. Cooling effect of agricultural irrigation over Xinjiang, Northwest China from 1959 to 2006. *Environmental Research Letters*, 2013, 8(2): 024039.
- [ 12 ] Bonfils C, Lobell D. Empirical evidence for a recent slowdown in irrigation-induced cooling. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2007, 104(34): 13582-13587.
- [ 13 ] Kanamaru H, Kanamitsu M. Model diagnosis of nighttime minimum temperature warming during summer due to irrigation in the California Central Valley. *Journal of Hydrometeorology*, 2008, 9(5): 1061-1072.
- [ 14 ] 朱秀芳, 赵安周, 李宜展, 曹森, 李慕义. 农田灌溉对气候的影响研究综述. *生态学报*, 2014, 34(17): 4816-4828.
- [ 15 ] 姚远, 陈曦, 钱静. 城市地表热环境研究进展. *生态学报*, 2018, 38(3): 1134-1147.
- [ 16 ] 周伟奇, 田韫钰. 城市三维空间形态的热环境效应研究进展. *生态学报*, 2020, 40(2): 416-427.
- [ 17 ] 祝善友, 张桂欣, 尹球, 匡定波. 地表温度热红外遥感反演的研究现状及其发展趋势. *遥感技术与应用*, 2006, 21(5): 420-425.
- [ 18 ] 张文琦, 宋戈. 三江平原典型区水田时空变化及驱动因素分析. *农业工程学报*, 2019, 35(6): 244-252.
- [ 19 ] Du G M, Liu W Q, Pan T, Yang H X, Wang Q. Cooling effect of paddy on land surface temperature in cold China based on MODIS data: a case study in Northern Sanjiang Plain. *Sustainability*, 2019, 11(20): 5672.
- [ 20 ] Liu T X, Yu L X, Bu K, Yan F Q, Zhang S W. Seasonal local temperature responses to paddy field expansion from rain-fed farmland in the cold and humid Sanjiang Plain of China. *Remote Sensing*, 2018, 10(12): 2009.
- [ 21 ] Yu L X, Liu T X. The impact of artificial wetland expansion on local temperature in the growing season—the case study of the Sanjiang Plain, China. *Remote Sensing*, 2019, 11(24): 2915.
- [ 22 ] 傅伯杰. 景观生态学原理及应用. 北京: 科学出版社, 2001: 34-39.
- [ 23 ] 肖笃宁, 李秀珍. 景观生态学的学科前沿与发展战略. *生态学报*, 2003, 23(8): 1615-1621.
- [ 24 ] 段居琦, 周广胜. 中国单季稻种植北界的初步研究. *气象学报*, 2012, 70(5): 1165-1172.
- [ 25 ] Jin C, Xiao X M, Dong J W, Qin Y W, Wang Z M. Mapping paddy rice distribution using multi-temporal Landsat imagery in the Sanjiang Plain, northeast China. *Frontiers of Earth Science*, 2016, 10(1): 49-62.
- [ 26 ] Mao D H, He X Y, Wang Z M, Tian Y L, Xiang H X, Yu H, Man W D, Jia M M, Ren C Y, Zheng H F. Diverse policies leading to contrasting impacts on land cover and ecosystem services in Northeast China. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 240: 117961.
- [ 27 ] Mao D H, Wang Z M, Wu J G, Wu B F, Zeng Y, Song K S, Yi K P, Luo L. China's wetlands loss to urban expansion. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(8): 2644-2657.
- [ 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. *Remote Sensing*, 2020, 12(2): 294.
- [ 29 ] Jimenez-Munoz J C, Cristobal J, Sobrino J A, Soria G, Ninyerola M, Pons X. Revision of the single-channel algorithm for land surface temperature retrieval from Landsat thermal-infrared data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(1): 339-349.
- [ 30 ] 陈爱莲, 孙然好, 陈利顶. 基于景观格局的城市热岛研究进展. *生态学报*, 2012, 32(14): 4553-4565.
- [ 31 ] Jaganmohan M, Knapp S, Buchmann C M, Schwarz N. The bigger, the better? The influence of urban green space design on cooling effects for residential areas. *Journal of Environment Quality*, 2016, 45(1): 134-145.
- [ 32 ] Yang J, Zhan Y X, Xiao X M, Xia J C, Sun W, Li X M. Investigating the diversity of land surface temperature characteristics in different scale cities based on local climate zones. *Urban Climate*, 2020, 34: 100700.
- [ 33 ] Yang J, Wang Y C, Xiu C L, Xiao X M, Xia J H, Jin C. Optimizing local climate zones to mitigate urban heat island effect in human settlements. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 275: 123767.
- [ 34 ] 杨俊, 白世豪, 金翠, 乔莹莹. 热环境视角下的最小生态安全距离——以大连北三市为例. *生态学报*, 2019, 39(18): 6860-6868.