

宁夏平原湿地面积动态演变对局地气候效应的影响

王豫^{1, 2, 3}, 赵小艳^{1, 3*}, 李艳春⁴, 王咏薇², 朱婷婷³

1. 南京信息工程大学应用气象学院, 江苏 南京 210044; 2. 耶鲁-南京信息工程大学大气环境中心, 江苏 南京 210044;

3. 南京信息工程大学/江苏省农业气象重点实验室, 江苏 南京 210044; 4. 宁夏气象防灾减灾重点实验室, 宁夏 银川 750002

摘要: 为了解湿地生态系统恢复与保护工作启动前后, 具有丰富湿地资源的宁夏平原湿地面积的动态演变对局地气候效应的影响, 更好地利用湿地资源缓解半干旱地区气候恶化的问题, 选用 1999—2016 年共 7 景 Landsat/TM (ETM⁺, OLI, TRIS) 遥感数据监测宁夏平原湿地面积的动态变化, 基于 SEBAL 模型反演地表热通量并分析湿地的局地气候效应。结果表明, (1) 近 17 年来, 研究区河流湿地面积减少了 20.48 km², 非河流湿地面积增加了 73.88 km², 总湿地面积变化增加了 1.86%, 湿地由修复前的零散状分布状演变为修复后的大面积连通状。(2) 修复后湿地的降温效应显著提高, 以典型湿地沙湖为例, 暖季沙湖对局地 1 500 m 范围内有显著降温作用, 最大降温幅度比修复前增加了 0.7 °C; 冷季沙湖对局地 600 m 范围内有显著降温作用, 最大降温幅度比修复前增加了 0.1 °C。(3) 湿地修复后, 研究区感热通量整体呈下降趋势, 潜热通量整体呈上升趋势, 总湿地面积的增加使得研究区暖季整体感热值下降了 25~62 W·m⁻², 整体潜热值提高了 47~114 W·m⁻²; 冷季整体感热通量下降了 6~43 W·m⁻², 潜热值提高了 21~68 W·m⁻²。湿地的波文比倒数分布呈“暖季>冷季”的时间变化规律。综上, 湿地对城市热环境的改善作用优于具有相同面积的其他地物类型。

关键词: 湿地; 动态监测; SEBAL 模型; 局地气候效应

DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2018.07.008

中图分类号: X16; X14

文献标志码: A

文章编号: 1674-5906 (2018) 07-1251-09

引用格式: 王豫, 赵小艳, 李艳春, 王咏薇, 朱婷婷. 2018. 宁夏平原湿地面积动态演变对局地气候效应的影响[J]. 生态环境学报, 27(7): 1251-1259.

WANG Yu, ZHAO Xiaoyan, LI Yanchun, WANG Yongwei, ZHU Tingting. 2018. Influence of dynamic evolution of wetland area on local climate effect in Ningxia Plain [J]. Ecology and Environmental Sciences, 27(7): 1251-1259.

湿地是自然界中生态功能最高, 受破坏和威胁最严重的生态系统之一 (Jiang et al., 2005; 贾萍等, 2003)。国家林业局最近的一次湿地资源普查结果显示: 近 10 年, 中国湿地面积减少了 339.63×10⁴ hm², 其中自然湿地占比 99.4% (耿国彪, 2014)。湿地具有增加局地空气湿度、缩小昼夜温差等气候调节作用 (Gardner et al., 2011), 作为全球最重要的碳汇 (Picek et al., 2007), 对缓解由气候变暖及城市扩张带来的一系列生态问题都具有极其重要的意义。在干旱半干旱的中国西北地区, 湿地即绿洲的“心脏” (马建林等, 2002), 它每年调节气候的生态服务价值占湿地总生态服务价值的 32%, 居各项生态价值之首 (孔东升等, 2015)。宁夏平原地处中国干旱半干旱地区, 70% 湿地资源分布在平原地区 (周立彪等, 2009)。20 世纪 60 年代, 宁夏平原素有“七十二连湖”之称, 在全球气候变

暖的大背景下, 随着城市化的快速发展, 其湿地资源大量萎缩。2003 年起, 宁夏地区实施了大面积的湿地修复与重建工作, 那么近年来宁夏平原的湿地面积是如何演变?

发达国家对湿地的研究较早、范围广, 涉及到湿地的定义 (Cowardin et al., 2005; Mitsch et al., 2007)、湿地的生态经济及保护 (Duarte et al., 2013; Webb et al., 2013) 等方面。中国开展湿地研究的时间较晚, 目前主要集中在湿地的形成与演化 (杨玉盛, 2017)、湿地生态效应 (杨丽萍等, 2010; 孟伟庆等, 2011) 等。地表温度和地表能量的流通交换是影响局地气候变化的重要因素 (Karnieli et al., 2010), 传统的测量手段均是基于点位开展的, 忽略了地表的不均一性和水热流通的动态性 (Ambast et al., 2002), 而遥感技术作为一种新兴的科学技术手段, 在受地面条件限制小的情景下可实现大范

基金项目: 2015 年宁夏回族自治区科技惠民项目“宁夏湖泊湿地的气候效应及气候变暖影响未来补水量的研究” (2015KJHM34); 南京信息工程大学大学生实践创新训练计划项目 (201610300172)

作者简介: 王豫 (1993 年生), 女, 硕士研究生, 主要从事资源环境遥感研究。E-mail: wy@nuist.edu.cn

*通信作者: 赵小艳 (1974 年生), 女, 讲师, 博士, 主要从事资源环境遥感研究。E-mail: yqxzyh@nuist.edu.cn

收稿日期: 2018-03-20

围同步观测、反映土地的动态变化,反演地表热通量,在土地利用、气候研究等方面得到了广泛的应用(张广宇,2015)。在黄河长期冲击积累下,宁夏平原具有丰富的湿地资源,这在西北干旱半干旱地区实属罕见(白林波等,2011)。目前,针对宁夏平原湿地的研究内容集中在湿地景观变化、水资源利用及地质构造等方面,但对宁夏平原湿地气候效应的定量化研究偏少。那么,在半干旱地区湿地面积的动态变化会对局地气候产生怎样的影响?

本研究以宁夏平原为研究对象,利用遥感和地理信息系统技术,分析研究区湿地面积动态演变,并量化湿地面积变化对局地气候效应的影响,为宁夏平原湿地修复效果的监测和评价以及缓解其气候恶化问题提供一定的参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

宁夏平原(105°56'~106°58'E, 38°12'~39°17'N)深居西北内陆(图1),北起惠农县,南至永宁县,东靠陶乐县,西倚贺兰山脉,海拔高度在1010~1150 m(王瑞平等,2006)。属中温带内陆干旱气候,干旱少雨(平均降水量仅为262.3~363.2 mm·a⁻¹),日照充足(年日照时间为2842 h),冬冷夏热,气温年较差及日较差均较大,7月气温最高,平均为20.0~23.1℃,1月气温最低,平均为-8.2~-6.6℃(李媛等,2016),大陆性气候特征十分典型(雍国正,2015)。

1.2 数据来源与预处理

为分析湿地修复前(1999—2003年)与修复后(2003—2016年),宁夏平原湿地面积变化对局地

气候效应的影响,从地理空间数据云下载了宁夏平原1999—2016年不同时期冷暖两季共7景云量少于1%的Landsat/TM(ETM⁺, OLI, TRIS)遥感数据,其中暖季丰水期影像用于面积变化分析,冷、暖季影像用于气候效应分析。数据应用前均进行了图像地图投影转换、辐射定标、图像间配准、大气校正、图像裁剪等预处理工作,部分ETM⁺数据进行了条带修复。

1.3 研究方法

1.3.1 湿地提取

研究区的黄河、湖泊、人工池塘等都属于水体,光谱特征相似,容易混淆,为保证湿地信息提取的精确性,结合使用监督分类法中的最大似然法(沙占江等,2005)和决策树分类法(徐涵秋,2005),并根据《全国湿地资源调查与监测技术规程》对湿地的分类标准,将研究区土地利用类型分为河流湿地(包括永久性河流、季节性或间歇性河流,主要是黄河及其支流)、非河流湿地(包括永久性或季节性淡水湖及咸水湖泊湿地、池塘、水库、水渠、水产养殖地)、植被/耕地、乡村/裸地、城市建筑地等5种类型,并于Google Earth中验证分类结果,其空间分布见图2。

1.3.2 地表温度反演

地表温度(t_s)是控制地表-大气相互作用的重要变量(Wang et al., 2011),在局地小气候中发挥重要作用。不同传感器地表温度的反演算法存在一定差异,选用覃志豪等(2003)提出的地表温度单窗反演算法对TM(ETM⁺)数据进行反演,公式:

$$t_s = [a(1-C-D) + [b(1-C-D) + C + D]T_B - DT_a] / C - 273.15 \quad (1)$$

$$C = \varepsilon\tau \quad (2)$$

$$D = (1-\tau)[1 + (1-\varepsilon)\tau] \quad (3)$$

式中, t_s 为像元地表温度(℃); a 、 b 为常量,据文献分别取值为-67.355 351、0.458 608(徐涵秋,2005); ε 为地表比辐射率,根据ASTER光谱库,对各典型地物分别进行赋值:湿地为0.99、植被/耕地为0.981、城市建筑地与乡村裸地为0.969 7; τ 为大气透过率,据文献由2 m气温和相对湿度估算得到; T_a 为大气平均作用温度(K),由2 m气温的估算方程计算得到; T_B 为地面亮度温度(K),由普朗克公式计算得到。

采用分裂窗算法(Rozenstein et al., 2014)对TIRS数据进行反演,公式如下:

$$t_s = A_0 + A_1 T_{10} - A_2 T_{11} \quad (2)$$

式中, t_s 是像元地表温度(℃); A_0 、 A_1 、 A_2 是简化参数,据文献由TIRS第10和11通道的大气透过率(Rozenstein et al., 2014)及地表比辐射

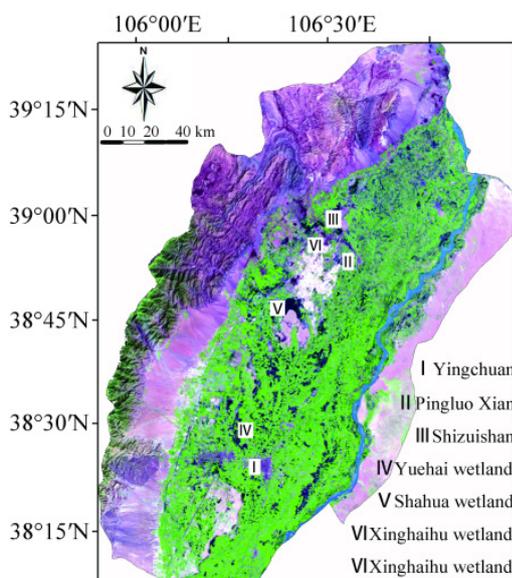


图1 研究区域

Fig. 1 The study area

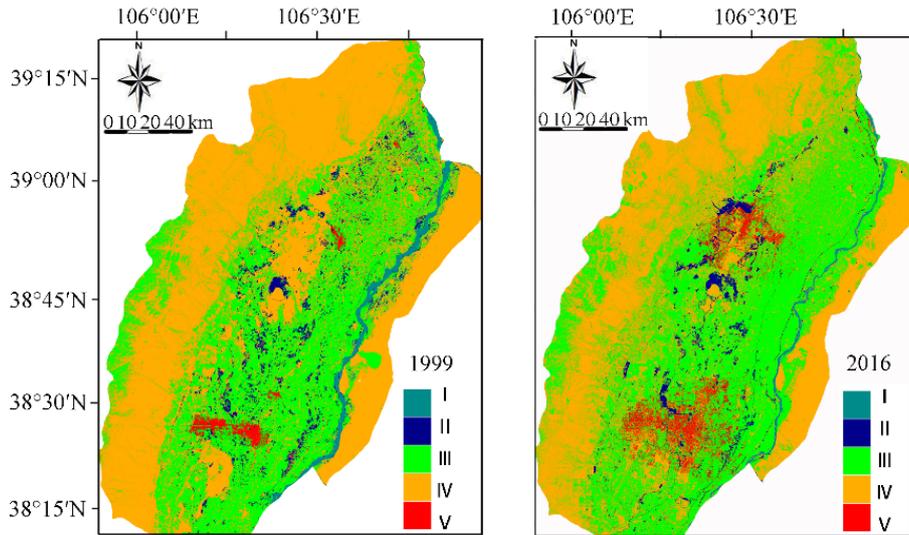


图2 宁夏平原 1999 年和 2016 年土地利用分类

Fig. 2 Land use and Land cover classification of Ningxia Plain in 1999 and 2016

I：河流湿地 river wetland；II：非河流湿地 non river wetland；III：植被/耕地 plant/farm land；IV：乡村/裸地 rural/bare land；V：城市建筑地 urban built-up land

率（杨槐，2014）计算得到； T_{10} 、 T_{11} 是第 10、11 通道的亮度温度（K），由普朗克公式得到。

1.3.3 SEBAL 模型估算热通量

地表热通量通过基于陆面能量平衡方程 SEBAL 模型估算，首先选取影像中冷热像元，建立像元地表温度和温度梯度差之间的线性关系，利用 Monin-Obukhov 相似理论多次迭代获得稳定的感热通量(H)，结合地面观测资料计算净辐射通量(R_n)、土壤热通量(G)及潜热通量(LE)（李根，2014）。

1.3.4 地表热通量及热场等级划分

为使不同时相遥感影像的热环境及热通量具有可比性，消除季节对陆面温度的影响，采用均值-标准差分类法（陈松林等，2009）对地表温度、感热通量及潜热通量进行分类，结果如表 1 所示。

1.3.5 波文比例数的计算

波文比例数 (β^1) 即自由水面向空气中蒸发水汽的耗热 (LE) 与水面与空气间的乱流交换热量 (H) 之比，可用于实现下垫面的蒸散发的高精度测定。公式如下：

$$\beta^1 = LE/H \quad (5)$$

2 结果与分析

2.1 湿地面积变化与分析

由图 2 可知，宁夏平原的非河流湿地在修复前呈零散状分布，而修复后河流湿地面积减小，存在断流现象；非河流湿地分布呈由零散状演变为整体的空间分布规律，与张荣群等（2015）指出的 1989—2010 年宁夏平原土地利用方式对湿地景观变化影响显著，人工湿地面积大幅增加，湿地总面积呈

表 1 地表热场/热通量等级划分

Table 1 Surface thermal/heat flux grade deviation

地表热场/热通量等级 Surface thermal/heat flux grade	均值-标准差划分 Mean~standard deviation
I：高温/感热通量/高潜热通量 High $T/H/LE$	$\mu + 1.5\text{std} < t_s/H/LE$
II：次高温/感热通量/次高潜热通量 Sub-high $T/H/LE$	$\mu + \text{std} < t_s/H/LE \leq \mu + 1.5 \text{std}$
III：中高温/感热通量/中高潜热通量 Mid-high $T/H/LE$	$\mu + 0.5\text{std} < t_s/H/LE \leq \mu + \text{std}$
IV：中温/感热通量/中潜热通量 Mid $T/H/LE$	$\mu < t_s/H/LE \leq \mu + 0.5 \text{std}$
V：中低温/感热通量/中低潜热通量 Mid-low $T/H/LE$	$\mu - 0.5\text{std} < t_s/H/LE \leq \mu$
VI：次低温/感热通量/次低潜热通量 Sub-low $T/H/LE$	$\mu - \text{std} < t_s/H/LE \leq \mu - 0.5 \text{std}$
VII：低温/感热通量/低潜热通量 Low $T/H/LE$	$t_s/H/LE \leq \mu - \text{std}$

$t_s/H/LE$ 为像元地表温度/热通量值； μ 为研究区地表温度平均值；std 为标准差

$t_s/H/LE$ is the surface temperature/heat flux of the pixel; μ is the average of the surface temperature in the study area; std is the standard deviation

增长趋势的结论一致。银川市的鸣翠湖、阅海、宝湖，石嘴山市的星海湖，贺兰县的沙湖等水域面积呈明显扩张，一系列零星的非河流湿地明显被连通，初步形成了以宁夏平原各主要县市（银川、石嘴山、平罗等）为主体的水环境生态圈，与白林波等（2011）指出的 1991—2006 年宁夏平原人工湿地比例上升、斑驳面积增加，湿地类型破碎化指数降低的结论一致。

由表 2 可知，近 17 年来，研究区河流湿地面积呈减少的趋势，非河流湿地面积呈增加的趋势，总

表 2 宁夏平原 1999—2016 年湿地面积及变化

Table 2 The area of wetland in Ningxia Plain and its change in 1999—2016

年份 Year	河流湿地面积 Area of river wetland/km ²	非河流湿地面积 Area of non river wetland/km ²	湿地总面积 Area of total wetland/km ²	河流湿地面积变化 change area of river wetland/%	非河流湿地面积变化 change area of non river wetland/%	总湿地面积变化 change area of total wetland/%
1999	114.67	316.31	430.98	-	-	-
2005	106.38	325.31	431.69	-7.23%	2.85%	0.16%
2010	103.82	341.92	445.74	-2.41%	5.11%	3.25%
2013	97.97	377.56	475.53	-5.63%	10.42%	6.68%
2016	94.19	390.19	484.38	-3.86%	3.35%	1.86%

湿地面积呈增加趋势，此结果与卜晓燕等（2016）分析银川平原 2000—2014 年湿地面积的变化趋势一致。河流湿地面积 1999—2016 年减少了 20.48 km²，总减幅为 19.13%，减幅在 2005 年以后降低了 4.82%。研究区自 2003 年进行大面积的湿地修复及重建工作后，1999—2016 年非河流湿地面积增加了

73.88 km²，其中 1999—2013 年累积增幅最大，可达 18.38%；1999—2016 年总湿地面积增加了 53.4 km²。

2.2 湿地修复前后的局地气候环境演变分析

2.2.1 地表热环境的时空变化特征

由图 3 可知，湿地修复前后暖季次高温及高温区均主要分布在平罗、银川、石嘴山等城市集中区以及

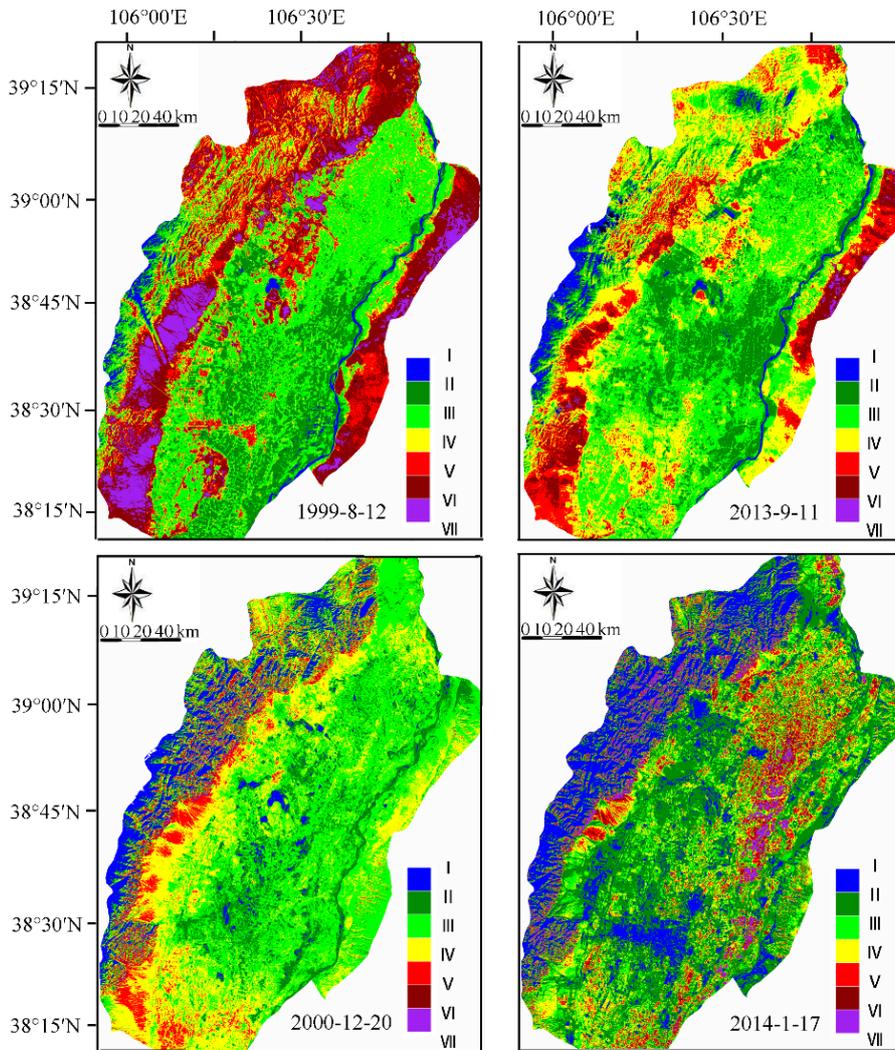


图 3 宁夏平原地表湿地修复前 (左) 湿地修复后 (右) 热环境空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of surface thermal grade in Ningxia Plain in four period before wetland restoration (left) and after wetland restoration (right)

I : 低温 Low temperature; II : 次低温 Sub-low temperature; III : 中低温 Mid-low temperature; IV : 中温 Mid-temperature; V : 中高温 Mid-high temperature; VI : 次高温 Sub-high temperature; VII : 高温 High temperature

贺兰山向阳面，次低温区主要分布于植被/耕地，低温区 85%集中在沙湖、星海湖、黄河流域及其支流等湿地周围。研究区暖季热环境强度呈城市建筑地>乡村/裸地>植被/耕地>湿地的空间分布规律。

湿地修复后，研究区冷季整体温区分布提升一个等级，修复后的温区 71%集中分布在中温及中高温区，而修复前，56%集中分布在中温及中高温区，湿地及其周围均处于低温，植被/耕地及其周围均处于次低温区，城市建筑地及裸地周围均处于中温区。

由图 4 可知，在暖季，湿地修复后整个宁夏平原的中温以上等级的热场面积低于修复前，修复后中温区面积变化最大，占比为 16.23%，高温区、次高温区、中高温区面积累计减少 745.45 km²，占比达 7.82%，中低温、次低温、低温区面积累计增加 2 291.68 km²，增加比例高达 24.05%。这与全区内加强湿地管理，进行一系列湿地保护规划和保护恢复等工作密不可分，说明湿地对研究区的局地气候起到明显的降温作用。冷季同暖季有一定的类似，冷季较高温度区域的面积在湿地修复后有一定的下降，中温区面积变化仍最大，增加比例为 9.02%，高温区、次高温区、中高温区累积面积减少 855.92 km²，占比为 8.9%，而中低温、次低温、低温区累积面积减少 3.33 km²。分析冷、暖季的差异，主要原因是研究区冷季采取供暖措施，造成研究区冷季城市热岛效应高于暖季，温度等级整体呈现“冷季>暖季”。

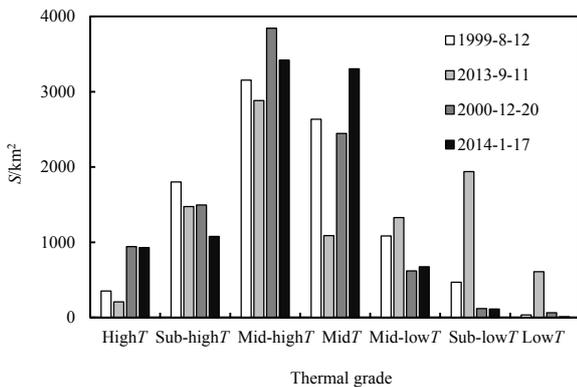


图 4 宁夏平原热场等级面积统计

Fig. 4 Thermal grade area of Ningxia Plain in four period

2.2.2 沙湖湿地降温范围变化

为确定湿地对地表温度的影响范围，考虑沙湖湿地的修复面积最大，故选取沙湖作为典型湿地，以沙湖中心点为质心构成半径为 300 m 的圆域，围绕此中心圆建立缓冲区，缓冲区间隔为 300 m，形成 10 个缓冲区，以距离中心圆第 i 个缓冲区域内的平均地表温度 (t_i , °C) 与中心圆内平均地表温度

(t_0 , °C) 的差值 (Δt , °C) 作为衡量研究区湿地降温效应贡献源区的标准：

$$\Delta t = t_i - t_0 \quad (3)$$

由图 5 可知，湿地修复前，暖季沙湖的降温效应至 1 200 m 以后趋于平稳，最大降温可达到 4.1 °C；冷季沙湖对周围地表温度产生显著影响的范围为 600 m，降温幅度为 0.5 °C。这主要是由于半干旱地区冷季平均风速较小，湖面结冰，蒸发能力弱，导致冷季沙湖对局地温度的影响小于暖季。进行湿地修复工程后，湿地降温效应显著提高，暖季沙湖的降温效应可延伸至 1 500 m，最大降温可达 4.8 °C；冷季降温范围为 600 m，降温幅度约 0.6 °C。

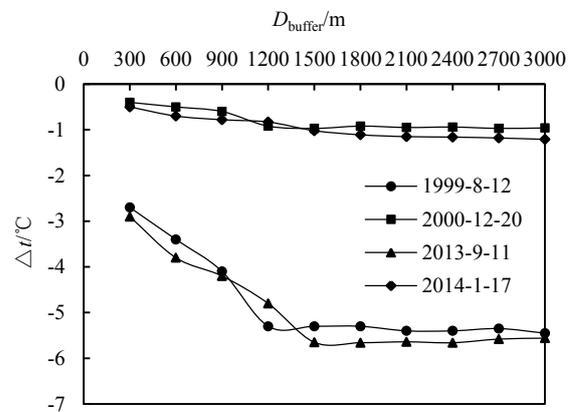


图 5 沙湖湿地降温范围

Fig. 5 The cooling range of Shahu wetland in four period

2.2.3 感热通量的时空变化特征

由图 6 可知，在平罗县、银川市等快速城市化地区，其暖季的感热通量值由湿地修复前的中高值区 (90~178 W·m⁻²) 变为修复后的中值区 (48~153 W·m⁻²)，冷季的感热通量由修复前的次低值区 (-13~28 W·m⁻²) 变为修复后的低值区 (≤-7 W·m⁻²)；在惠农、永宁等农业发达地区，其暖季的感热通量由修复前的中值区 (2~90 W·m⁻²) 变为修复后的次低值区 (-60~48 W·m⁻²)，冷季的潜热通量由修复前的低值区 (≤-13 W·m⁻²) 变为修复后的次低值区 (-7~43 W·m⁻²)。总体上，研究区感热通量值呈“暖季>冷季”的季节变化规律，不同地物类型的感热通量呈“建筑地、裸地>植被/耕地>湿地”的空间分布规律；湿地修复后冷、暖季的感热通量值均呈降低趋势，表明湿地具有降温效应。

2.2.4 潜热通量的时空变化特征

由图 7 可知，在平罗县、银川市等快速城市化地区，其暖季的潜热通量由修复前的低值区 (-158~18 W·m⁻²) 变为修复后的次低值区 (-44~65

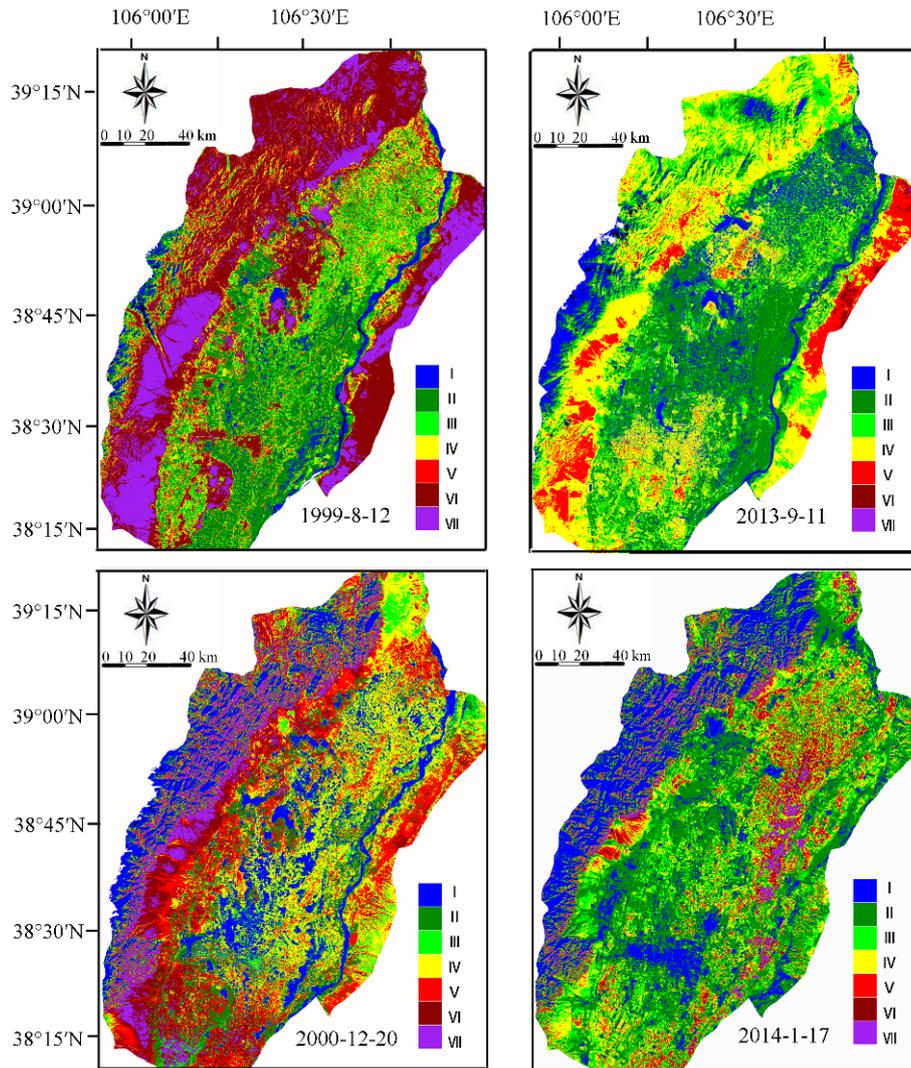


图 6 宁夏平原湿地修复前 (左) 湿地修复后 (右) 感热通量空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of sensible heat flux (H) in Ningxia Plain before wetland restoration (left) and after wetland restoration (right)

I: 低感热通量 Low H ; II: 次低感热通量 Sub-low H ; III: 中低感热通量 Mid-low H ; IV: 中感热通量 Mid H ; V: 中高感热通量 Mid-high H ; VI: 次高感热通量 Sub-high H ; VII: 高感热通量 High H

$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$), 冷季的潜热通量由修复前的中值区 ($18\sim 106 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$) 变为修复后的次低值区 ($65\sim 174 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$); 河流湿地暖季的潜热通量由修复前的次高值区 ($284\sim 391 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$) 变为修复后的高值区 ($282\sim 372 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$), 河流和非河流湿地冷季的潜热通量均由修复前的中高值区 ($198\sim 248 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$) 变为修复后的次高值区 ($147\sim 198 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$)。总体上, 研究区潜热通量呈“暖季>冷季”的季节变化规律, 不同地物类型的潜热通量呈“湿地>植被/耕地>建筑地、裸地”的空间分布规律; 湿地修复后, 研究区冷、暖季潜热通量值总体上均呈上升趋势, 暖季整体潜热值提高 $94 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, 冷季整体提高 $28 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, 湿地潜热值明显高于其他地物类型, 表明

湿地具有增湿效应。

2.2.5 波文比倒数对局地气候的影响分析

波文比倒数是潜热通量与感热通量之比, 是表示能量分配的重要指标。由图 8 可知, 非河流湿地和河流湿地的波文比倒数值远大于研究区其他土地利用类型的平均值且 4 个典型日的波文比倒数值平均值均大于 5, 非河流湿地该值高达 8.26。其他土地利用类型, 波文比倒数值均低于 2, 建筑地和裸地区域主要分布在 0.2 以下, 植被和耕地区域主要分布在 1.5~3 之间。湿地区域的波文比倒数值呈现出明显的季节变化: 暖季>冷季, 且水体对改善城市热环境的作用优于具有相同面积的植被。

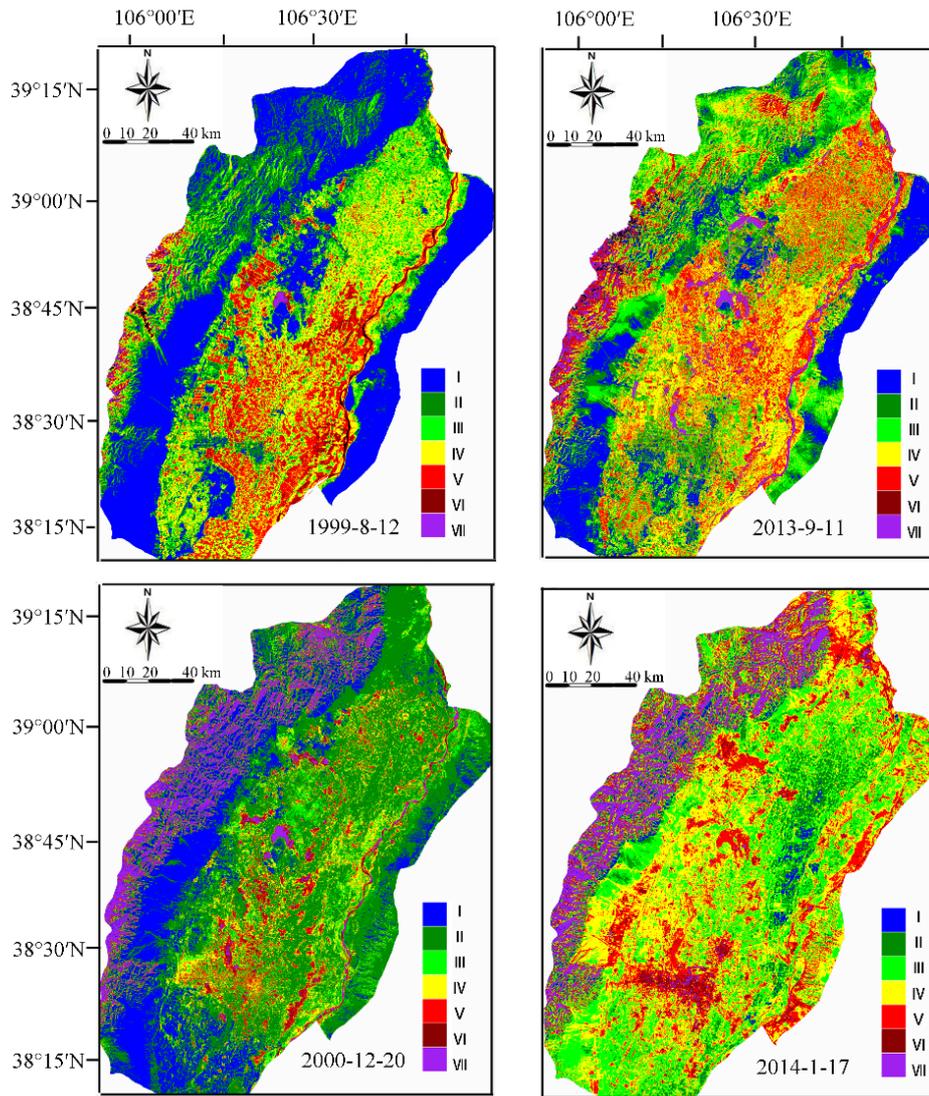


图 7 宁夏平原湿地修复前 (左) 湿地修复后 (右) 潜热通量空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of latent heat flux(LE) in Ningxia Plain in four period before wetland restoration (left) and after wetland restoration (right)

I：低潜热通量 Low LE；II：次低潜热通量 Sub-low LE；III：中低潜热通量 Mid-low LE；IV：中潜热通量 Mid LE；V：中高潜热通量 Mid-high LE；VI：次高潜热通量 Sub-high LE；VII：高潜热通量 High LE

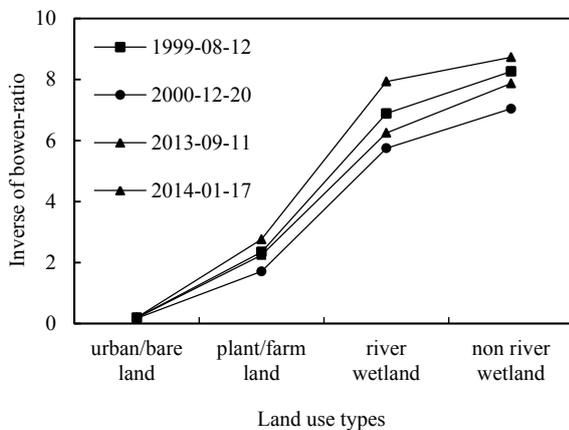


图 8 宁夏平原四个时期不同土地利用类型平均波文比例数

Fig. 8 Inverse of bowen-ratio from different land use types in Ningxia Plain in four period

3 讨论

3.1 湿地修复前后的面积变化

近 17 年来，宁夏平原河流湿地面积总趋势呈减少态，主要是由黄河径流量减小、气候变暖和研究区对河流湿地资源过度开发利用造成的；研究区成功实施大面积的湿地保护和修复工作后，非河流湿地面积呈增加态势，使得研究区湿地总面积呈增加趋势。自 2003 年研究区修复湖泊等湿地资源后，非河流湿地呈大面积连通状，以群带状存在，植被/耕地类型所占比例明显增加，这一结论与侯瑞萍 (2015) 对近 20 年来宁夏湿地动态与植被特征研究的结论基本一致。

3.2 湿地面积变化对局地气候的影响

地表热通量对气候的调节功能主要表现在热

量交换及水汽循环方面,湿地和附近的土壤表面通过水汽蒸发、植被蒸腾和水陆间湍流运动等过程,间接或直接影响到周围局地气候。2005 年以来,宁夏施行了“加快推进城镇化建设”等一系列政策,银川、平罗等城市地区工业发展迅速,北部的惠农,南部的永宁等地区农业种植面积大,植被覆盖度高,全区范围内湿地区的感热通量值均处于低值区,与王煜东等(2016)对南京不同下垫面的感热通量的时空变化规律一致,这主要是由于水体本身感热值低,蒸散发作用强,且水-陆间湍流运动强,可降低周围气温,说明湿地群对周围大气有降温作用。湿地修复后,冷季典型湿地可使周围气温最大降低 0.6 °C,暖季典型湿地可使周围气温最大降低 4.8 °C,与崔丽娟等(2015)对北京典型城市湿地小气候的研究结论“湿地最大降温效果为 4.4 °C”较接近。修复后,冷季降温范围为 600 m,暖季降温范围可延伸到 1 500 m, Hou et al. (2013) 研究北京典型湿地的降温范围为 300 m, 与本研究结果存在差异的原因是沙湖的面积大于 Hou et al. (2013) 选取的几个北京典型湿地。

城市下垫面与大气水汽交换弱、蒸发能力小,而湿地及植被等下垫面具有水汽蒸发充分和热容量大的特点,研究区快速城市化发展的同时潜热值仍呈上升趋势,说明研究区近 17 年来进行湿地及绿化带的修复扩张等工作使得研究区整体空气湿度提高,这对提高半干旱地区的人体舒适度、改善农作物生长环境均有重要生态意义。

4 结论

(1) 近 17 年来,宁夏平原河流湿地面积减少了 20.48 km²,非河流湿地面积增加了 73.88 km²,湿地总面积增加了 53.4 km²,总湿地面积增加了 1.86%。

(2) 宁夏平原湿地总面积的增加对局地气候有明显的降温作用。湿地修复后,地表热环境降温作用显著增强,典型湿地沙湖在暖季的降温效应可延伸至 1 500 m,最大降温可达 4.8 °C;冷季其降温范围为 600 m,降温幅度约 0.6 °C。

(3) 宁夏平原感热通量呈“暖季>冷季”的时间变化规律,呈“建筑地、裸地>植被/耕地>湿地”的空间分布规律;总湿地面积的增加使研究区冷、暖季的感热通量值均呈降低趋势,整体感热值暖季下降了 25~62 W·m⁻²,冷季下降了 6~43 W·m⁻²。潜热通量的时间变化规律与感热通量一致,而空间分布规律与感热通量相反;总湿地面积的增加使研究区暖季和冷季整体潜热通量分别提高了 47~114、21~68 W·m⁻²。

(4) 宁夏平原的波文比倒数呈“暖季>冷季”

的时间变化规律。对于城区而言,湿地对城市热环境的改善作用优于具有相同面积的其他地物类型。

参考文献:

- AMBAST S K, KESHARI A, GOSAIN A K. 2002. An operational model for estimating Regional Evapotranspiration through Surface Energy Partitioning (RESEP) [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 23(22): 4917-4930.
- BONAN G B. 1997. Effects of Land Use on the Climate of the United States [J]. *Climatic Change*, 37(3): 449-486.
- COWARDIN L M, CARTER V, GOLET F C, et al. 2005. Classification of Wetlands and Deepwater Habitats of the United States[M]//*Water Encyclopedia*. Washington: John Wiley & Sons, Inc..
- DUARTE C M, LOSADA I J, HENDRIKS I E, et al. 2013. The role of coastal plant communities for climate change mitigation and adaptation [J]. *Nature Climate Change*, 3(11): 961-968.
- GARDNER R C, DAVIDSON N C. 2011. The Ramsar Convention [M]. Berlin: Springer Netherlands.
- HOU P, CHEN Y, QIAO W, et al. 2013. Near-surface air temperature retrieval from satellite images and influence by wetlands in urban region [J]. *Theoretical & Applied Climatology*, 111(1-2): 109-118.
- JIANG W G, LI J, LI J H, et al. 2005. Assessment of wetland ecosystem health in the Liaohe River Delta [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 25(3): 408-414.
- KARNIELI A, PANOV N, GOLDBERG A, et al. 2010. Use of NDVI and land surface temperature for drought assessment: merits and limitations [J]. *Journal of Climate*, 23(3): 618-633.
- KEDDY P A. 2000. *Wetland ecology: principles and conservation* [M]. Cambridge: Cambridge University Press.
- MITSCH W J, GOSELINK J G. 2011. *Wetlands*, 4th Edition[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- PICEK T, CIZKOVA H, DUSEK J. 2007. Greenhouse gas emissions from a constructed wetland~Plants as important sources of carbon [J]. *Ecological Engineering*, 31(2): 98-106.
- ROZENSTEIN O, QIN Z, DERINIAN Y, et al. 2014. Derivation of Land Surface Temperature for Landsat-8 TIRS Using a Split Window Algorithm [J]. *Sensors*, 14(4): 5768-5780.
- TURNER R K, JEROEN C J M, et al. 2000. Ecological-economic analysis of wetlands: scientific integration for management and policy [J]. *Ecological Economics*, 35(1): 7-23.
- WANG Z H, SMITH J A. 2011. A spatially-analytical scheme for surface temperatures and conductive heat fluxes in Urban Canopy Models [J]. *Boundary-Layer Meteorology*: 138(2): 171-193.
- WEBB E L, FRIESS D A, KRAUSS K W, et al. 2013. A global standard for monitoring coastal wetland vulnerability to accelerated sea-level rise [J]. *Nature Climate Change*, 3(5):458-465.
- 白林波, 石云. 2011. 基于 3S 的湿地景观格局动态变化研究——以银川平原为例[J]. *测绘与空间地理信息*, 34(6): 29-32.
- 卜晓燕, 米文宝, 许浩, 等. 2016. 基于多源数据融合的宁夏平原不同湿地类型生态服务功能价值评估[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 42(2): 228-244.
- 陈松林, 王天星. 2009. 等间距法和均值标准差法界定城市热岛的对比研究[J]. *地球信息科学学报*, 11(2): 145-150.
- 崔丽娟, 康晓明, 赵欣胜, 等. 2015. 北京典型城市湿地小气候效应时空变化特征[J]. *生态学杂志*, 34(1): 212-218.
- 耿国彪. 2014. 我国湿地保护形势不容乐观——第二次全国湿地资源调查结果公布[J]. *绿色中国*, (3): 8-11.
- 侯瑞萍. 2015. 近 20 年来宁夏盐池县湿地动态与植被特征研究[D]. 北京: 北京林业大学.
- 贾萍, 宫辉力, 赵文吉, 等. 2003. 我国湿地研究的现状与发展趋势[J].

- 首都师范大学学报(自然科学版), 24(3): 84-88.
- 孔东升, 张灏. 2015. 张掖黑河湿地自然保护区生态服务功能价值评估[J]. 生态学报, 35(4): 972-983.
- 刘晓辉, 吕宪国. 2009. 湿地生态系统服务功能变化的驱动力分析[J]. 干旱区资源与环境, 23(1): 26-30.
- 李媛, 谢应忠, 王亚娟. 2016. 宁夏中部干旱带潜在蒸散量变化及影响因素[J]. 生态学报, 36(15): 4680-4688.
- 李根. 2014. 基于 SEBAL 和 SEBS 模型的鹰潭小流域蒸散发估算研究[D]. 南京: 南京信息工程大学.
- 马建林, 何彤慧. 2002. 银川平原湿地的初步研究[J]. 宁夏大学学报(自然科学版), 23(4): 377-380.
- 孟伟庆, 吴统蕾, 王中良. 2011. 湿地生态系统碳汇与碳源过程的控制因子和临界条件[J]. 生态环境学报, 20(z2): 1359-1366.
- 沙占江, 马海州, 李玲琴, 等. 2005. 利用 TM 数据提取干旱区土地覆被信息的方法比较[J]. 干旱区地理(汉文版), 28(1): 59-64.
- 覃志豪, LI W J, ZHANG M H, 等. 2003. 单窗算法的大气参数估计方法[J]. 国土资源遥感, 15(2): 37-43.
- 王瑞平. 2006. 宁夏回族自治区地图[M]. 北京: 中国地图出版社.
- 王煜东, 赵小艳, 徐向华, 等. 2016. 南京地区地表热通量的遥感反演分析[J]. 生态环境学报, 25(4): 636-646.
- 王宗明, 宋开山, 刘殿伟, 等. 2009. 1954—2005 年三江平原沼泽湿地农田化过程研究[J]. 湿地科学, 7(3): 208-217.
- 伍雄昌. 2013. 基于遥感的福州市人工热排放研究[D]. 福州: 福建师范大学.
- 徐涵秋. 2005. 利用改进的归一化差异水体指数 (MNDWI) 提取水体信息的研究[J]. 遥感学报, 9(5): 589-595.
- 杨丽萍, 巴建文. 2010. 张掖城市湿地的形成及其生态系统演化[J]. 地下水, 32(4): 20-22.
- 杨槐. 2014. 从 Landsat 8 影像反演地表温度的劈窗算法研究[J]. 测绘地理信息, 39(4): 73-77.
- 杨玉盛. 2017. 全球环境变化对典型生态系统的影响研究: 现状、挑战与发展趋势[J]. 生态学报, 37(1): 1-11.
- 雍国正. 2015. 近 42 年来银川平原绿洲时空变化特征[D]. 兰州: 西北师范大学.
- 张荣群, 乔月霞, 刘欢. 2015. 湿地景观演变与土地利用强度变化的响应关系——以银川平原为例[J]. 测绘科学, 40(10): 54-59.
- 张广宇. 2015. 基于 TM 数据的吉林西部轻度盐碱地带地表温度、湿度及地气间热交换研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 周立彪, 闫兴富. 2009. 宁夏银川国家湿地公园的生态旅游系统及其可持续发展[J]. 农业现代化研究, 30(4): 449-452.

Influence of Dynamic Evolution of Wetland Area on Local Climate Effect in Ningxia Plain

WANG Yu^{1,2,3}, ZHAO Xiaoyan^{1,3}, LI Yanchun⁴, WANG Yongwei², ZHU Tingting³

1. School of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;

2. Yale-NUIST Center on Atmospheric Environment, Nanjing 210044, China; 3. Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, Nanjing 210044, China;

4. Ningxia Key Laboratory for Meteorological Disaster Prevention and Reduction, Yinchuan 750002, China

Abstract: The objective of this study is to investigate the local climate effect caused by dynamic evolution of wetlands in the Ningxia Plain. Since 2003, wetland restoration has been used to alleviate the problem of climate deterioration in this semi-arid region. We used seven Landsat remote sensing images to monitor dynamic changes of the wetlands from 1999 to 2016 in the Ningxia Plain, and the SEBAL model was applied to compute the surface heat fluxes and analyze the local climatic effect of the wetlands. In the past 17 years, the river wetland area in the study region decreased by 20.48 km², the non-river wetland area increased by 73.88 km², and the total wetland area increased by 1.86%. Comparison of the fluxes before and after the restoration of wetlands showed that the cooling effect of the wetland after remediation was significantly higher. The paper took the Shahu Wetland as an example. In the warm season, the Shahu Wetland had a significant cooling effect within 1 500 m of the wetland and after restoration the maximum cooling rate increased by 0.7 °C. In the cold season, the Shahu Wetland had a significant temperature-reducing effect within 600 m of the distance, and after restoration the maximum cooling rate increased by 0.1 °C. After the wetlands restoration, the sensible heat flux (H) in the study region as a whole showed a downward trend, and the latent heat flux (LE) as a whole showed an upward trend. The increase of the total wetland area reduced the overall sensible heat flux in the study region by 25~62 W·m⁻², and increased the overall latent heating flux by 47~114 W·m⁻² in the warm season. In the cold season the total sensible heat flux was reduced by 6~43 W·m⁻², and the latent heat flux was increased by 21~68 W·m⁻². The inverse bowen ratio of the wetlands was lower in the warm season than that in the cold season. Sum up, the improvement on urban thermal environment of wetlands is greater than that of land types.

Key word: wetland; dynamic monitor; SEBAL model; local climate effect