

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.20180005

韩宇平,张丽璇,王春颖,等.寒区湿地实际蒸散发动态特征及影响因素研究[J].南水北调与水利科技,2018,16(1):28-34.
HAN Y P,ZHANG L X,WANG C Y,et al. Dynamic characteristics and influencing factors of actual evapotranspiration in cold wetland[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(1): 28-34. (in Chinese)

寒区湿地实际蒸散发动态特征及影响因素研究

韩宇平¹,张丽璇¹,王春颖¹,袁建平^{1,2},魏怀斌¹

(1.华北水利水电大学,郑州 450045; 2.水利部水资源管理中心,北京 100053)

摘要:为了解寒区湿地实际蒸散发(ET_a)过程,有效利用水资源,基于哈尔滨金河湾湿地2015年8月-2016年7月涡度相关系统通量观测数据,分析了不同时间尺度下 ET_a 变化规律及影响因素。研究期间年 ET_a 为660 mm,日最高值达8.1 mm/d,夏季(3.4 mm/d)最高,春季(2.3 mm/d)、秋季(1.4 mm/d)次之,冬季(0.1 mm/d)偏低且变化平稳。5月生长期作物系数(K_c)由0.95增加到1.18左右,6月-8月中旬稳定期 K_c 在1.05~1.18之间,8月下旬-9月枯萎期 K_c 由1.05减小到0.85左右。影响 ET_a 的主要气象因素为净辐射和饱和水汽压差。不同时间尺度下 ET_a 与气象因子相关性略有不同:净辐射和饱和水汽压差与 ET_a 的相关性在两个尺度上均很显著,但30 min尺度净辐射与 ET_a 的相关性更高。温度与 ET_a 的相关性在两个尺度上基本一致,高温促进 ET_a 蒸散发而低温抑制 ET_a 蒸散发。日尺度上空气湿度与 ET_a 在秋、冬季相关性明显,30 min尺度上春、冬季相关性明显。风速与 ET_a 仅在30 min尺度上夏、秋季有一定的相关性。

关键词:涡动相关仪;实际蒸散发量;作物系数;气象因子

中图分类号: P426.2; TV213 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2018)01-0028-07

Dynamic characteristics and influencing factors of actual evapotranspiration in cold wetland

HAN Yuping¹, ZHANG Lixuan¹, WANG Chunying¹, YUAN Jianping^{1,2}, WEI Huaibin¹

(1. North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China;

2. Water Resource Management Center, Ministry of Water Resource, Beijing 100053, China)

Abstract: In order to understand the actual evapotranspiration (ET_a) process in cold wetland and to make effective management of water resources, we analyzed the variation of ET_a in Harbin Jinhewan wetland and its influencing factors under different time scales based on the measured data of eddy covariance system from August 2015 to July 2016. The annual ET_a was 660mm during the study period, and the maximum daily ET_a was up to 8.1mm/d. The ET_a was the highest in summer (3.4 mm/d), second highest in spring (2.3 mm/d) and autumn (1.4 mm/d), and was the lowest and stable in winter (0.1 mm/d). The crop coefficient (K_c) increased from 0.95 to about 1.18 in May (plant growing period). The K_c was between 1.05~1.18 from June to the middle of August (plant stabilizing period), and it decreased from 1.05 to 0.85 during late August to September (plant withering period). The main meteorological factors affecting the ET_a were net radiation and vapor pressure deficit. The correlations between ET_a and meteorological factors were different at different time scales. The correlations of net radiation and water vapor pressure deficit with ET_a were significant at both scales, but net radiation was more correlated to ET_a at the 30min scale. The correlation between temperature and ET_a was basically consistent at both scales. High temperature would promote ET_a and low temperature would suppress ET_a . At the daily scale, the correlation between air humidity and ET_a was obvious in autumn and winter; at the 30 min scale, the correlation was obvious in spring and winter. The correlation between wind speed and ET_a was only obvious in summer and autumn at the 30 min scale.

Key words: eddy covariance system; actual evapotranspiration; crop coefficient; meteorological factors

收稿日期: 2017-08-22 修回日期: 2017-10-17 网络出版时间: 2018-01-10

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180110.1150.006.html>

基金项目: 国家自然科学基金(51379079; 51609084)

Funds: National Natural Science Foundation of China(51379079; 51609084)

作者简介: 韩宇平(1975-),男,宁夏彭阳人,教授,博士,主要从事水文学、水资源、水生态等方面的研究。E-mail: hanyup@ncwu.edu.cn

通讯作者: 袁建平(1971-),男,湖北鄂州人,教授,博士,主要从事水资源保护、水生态保护与修复、水土保持等方面的研究。E-mail: yuanjianpingncwu@163.com

湿地既是蓄水池也是水源地,它能更好地调节气候,从生物多样性角度来看,尽管淡水湿地覆盖了地球表面的1%,但这些湿地提供了世界物种40%以上的栖息地^[1]。目前受自然因素和人类活动影响,全球范围内湿地退化现象非常突出,出现了湿地面积减少、蓄水量减少、水质恶化、生态系统功能降低及生物多样性减少等问题^[2,3]。中国约有60%以上的自然湿地属寒区湿地,寒区湿地在我国占独特优势,是极为重要的湿地类型^[4,5]。寒区湿地对气候和环境的变化尤为敏感,退化现象尤为严重^[6]。湿地水文过程(降雨、径流、蒸散发及渗流损失等)控制着湿地的生物和化学过程,是影响湿地功能和演化的最重要的因素^[7]。对大多数湿地而言,蒸散发是湿地水循环的重要组成部分和水分损失主要途径,很大程度上影响着湿地功能^[7,8]。

目前,对湿地蒸散发过程的测定方法有许多种,如蒸渗仪法、波文比法、遥感方法、涡度相关法等。针对湿地蒸散发的监测,蒸渗仪法、波文比法、遥感方法与涡度相关法相比存在一些明显的缺点^[9]。蒸渗仪法成本昂贵且不能计算短时段的蒸散发量,适用于测定小型土壤和植被较长时段的总蒸散发量,对于长度在一周或一周以上时段的蒸散发的测定比较适用。当下垫面处于很湿润的情况下时,用波文比法计算所得的结果会偏低,导致精度下降。遥感技术在较复杂下垫面的区域应用时,往往精度较低难以达标。涡度相关法具有相对较大的空间代表性,无需经验参数,计算方法有完善的理论验证,可以连续观测实际蒸散发量和气象要素,精度较高,可以评价不同时间尺度的实际蒸散发特征及其影响因素,已被许多国家和地区的研究者所采用^[9,13]。然而涡度相关技术在森林和农田生态系统应用较多,在湿地系统中的应用较少^[14]。

国内外学者对湿地蒸散发的影响因素开展了大量研究,但仍存在一些不足。作物系数是实际蒸散发量与参考作物蒸散发量的差异,联合国粮农组织(FAO)推荐的单作物系数参考值往往不适用于植被复杂的湿地系统^[8,15]。准确估算湿地系统作物系数可以综合反映各种环境因素和作物对蒸散发的影响。潮湿的湿地环境下,土壤含水量对蒸散发的影响作用低于气象因素的影响^[8]。影响蒸散发的气象因素有很多,例如饱和水气压差、辐射、温度、风速和相对湿度等^[10,13,16,17]。以往研究表明蒸散量与气象因子相关关系随时间尺度变化而变化。然而目前对湿地系统不同时间尺度下实际蒸散发与气象因子的相关关系的研究较少,不同时间尺度下湿地系统实际

蒸散发对气象因子的响应过程仍不明确^[10,13,17,18]。因此基于涡度相关法研究寒区湿地蒸散发特征及其影响因素对于保护湿地生态环境既有科学意义,更有现实意义。

金河湾湿地是典型的北方寒区泛洪平原湿地和河川型湿地。本文以金河湾湿地为例,基于涡度相关仪通量观测和气象站数据,采用偏相关分析方法,初步分析金河湾湿地2015年8月—2016年7月的实际蒸散发变化规律,探讨作物系数和不同时间尺度下气象因子对实际蒸散发的影响,以期在气候变化背景下了解寒区湿地实际蒸散发的影响因素及精确估算实际蒸散发量提供理论依据,为寒区湿地生态系统保护和供指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

金河湾湿地位于中国东北黑龙江省哈尔滨市松花江流域,该地属于松花江哈尔滨主城区左岸,东经126°30′,北纬45°47′,海拔126.77 m,面积 1.8×10^6 m²,东西长3 800 m,最宽处1 500 m。研究区属于典型的半湿润温带大陆性季风气候,冬季受蒙古西北气流控制,同时受东部鄂霍茨克寒流影响,漫长寒冷;夏季多受太平洋西伸北跃西南气流影响,炎热多雨;春秋两季短促多风且干燥,一年中寒暑温差较大。21世纪以来该地区年平均气温约为5.5℃,呈上升趋势,年平均降水量约为500 mm,无明显变化趋势^[19]。金河湾湿地三面环水,河池相通,水陆相连,物种多样,通过人工辅助措施和自然繁衍,已恢复陆生、砂生、湿生水生植物近300多种,主要植物为芦苇。该湿地是典型的北方寒区泛洪平原湿地和河川型湿地。

1.2 数据来源与处理

1.2.1 数据来源

研究区域日尺度的气象数据采用中国气象局哈尔滨气象站的数据,主要包括净辐射、平均温度、相对湿度以及风速等。研究区域30 min尺度的数据通过全自动涡度协方差开路系统(简称涡度相关仪,美国Campbell Scientific公司生产)测定,包括显热通量和潜热通量。三维超声风速仪(CSAT-3, Campbell Scientific, Logan, USA)观测三维风速和空气湿度。30 min平均水热通量以及其他必要数据的记录和储存由Logger Net软件自动完成。研究期间选择数据较完整一年观测期(2015年8月至2016年7月)。

1.2.2 数据观测与处理

涡度相关仪采集数据的质量控制是数据处理必要步骤。在整个观测时段内,由于环境因素影响或仪器设备限制等引起的数据记录缺失较多^[20],因此对搜集到的每 30 min 通量数据进行检查,对原始数据出现的异常值进行判断并剔除^[13,21]。在异常点剔除后,对该点做插值处理。一般来说,当缺失时段大于 2 h,采用平均日变化法(MDV)进行数据插补,以保证数据的连续性。用 MDV 方法插补缺失数据时,缺失值用邻近几天(窗口)相同时段的观测值的平均值代替,通常用 7~14 d 的窗口^[13,22]。

1.3 数据分析方法

1.3.1 实际蒸散发量计算

根据插补后的完整连续潜热通量数据计算蒸散发量。通过计算潜热通量和汽化潜热的比值可得到相应时段中作物实际蒸散发量(ET_a),公式如下:

$$ET_a = 1800 \times LE / \lambda \quad (1)$$

式中: ET_a 为蒸散发量(mm/30min); LE 为时段内潜热通量(W/m^2); λ 为汽化潜热(J/kg)。

1.3.2 湿地作物系数的计算

作物系数(K_c)是指实际蒸散发量与参考作物蒸散发量的比值,是联合国粮农组织(FAO)推荐的标准计算方法,它综合反映作物本身的生物学特性、产量水平、土壤水肥状况以及管理水平等的影响^[23,25]。其计算公式如下:

$$K_c = ET_a / ET_o \quad (2)$$

式中: ET_a 为作物实际蒸散发量(mm); ET_o 为参考作物蒸散发量(mm)。

联合国粮农组织(FAO)推荐的参考作物蒸散发量(ET_o)标准计算方法为 Penmar Monteith 公式(简称为 P-M)。美国土木工程协会和欧洲研究中均证实不论在干旱还是潮湿的气候 P-M 公式的计算相对准确^[15,26]。FAO-56 分册推荐的 P-M 公式为:

$$ET_o = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 U_2)} \quad (3)$$

式中: ET_o 为参考作物蒸散发量(mm/d); R_n 为作物表面的净辐射 [$MJ/(m^2 \cdot d)$]; G 为土壤热通量 [$MJ/(m^2 \cdot d)$]; U 为 2 m 高度的日平均风速(m/s); T 为 2 m 高度处的日平均温度($^{\circ}C$); e_s 为饱和水汽压(kPa); e_a 为实际水汽压(kPa); Δ 为斜率水汽压曲线(kPa/ $^{\circ}C$); γ 为湿度常数(kPa/ $^{\circ}C$)。

1.3.3 偏相关分析

本文以气象因子(饱和水汽压差、净辐射、温度、

空气湿度、风速)为自变量,以实际蒸散发为因变量,运用 SPSS19.0 进行偏相关分析。偏相关分析中的偏相关系数是在对其他变量的影响进行控制的条件下,衡量多个变量中某两个变量之间的线性相关程度的指标。所以用偏相关系数来描述两个变量之间的内在线性联系会更合理、更可靠^[27]。

2 结果与分析

2.1 实际蒸散发量及作物系数随时间变化特征

蒸散发量随时间变化见图 1(a)。由图可见,实际蒸散发量与潜在蒸发量的变化趋势一致,均呈现明显的季节性变化,夏季实际蒸散发明显较高(3.4 mm/d),春季次之(2.3 mm/d),秋季(1.4 mm/d)冬季(0.1 mm/d)明显偏低,整体近似呈“U”型分布。但实际蒸散发量波动比潜在蒸发量波动略大。研究时段内实际蒸散发量为 660 mm,日内实际蒸散发量最高值可达 8.1 mm。图 1(b)是四个代表日的实际蒸散发随时间的变化规律。整体来看,2015 年 8 月 15 日的蒸散发量明显较高,2016 年 4 月 15 日次之,再次说明夏春季的蒸散发量整体高于秋冬季。另外,实际蒸散发量日变化特征明显。2015 年 8 月 15 日、2015 年 11 月 15 日、2016 年 4 月 15 日在中午 12:00 左右实际蒸散发量值达到最大而后逐渐降低,而 2016 年 1 月 18 日日内实际蒸散发量变化较为平稳。实际蒸散发量在夜间可能会出现负值,这是由于涡度相关系统受仪器本身、天气等因素的影响较大。

图 1(c)是作物系数随时间的变化特征。由于 2016 年 6 月、7 月中国气象局日气象数据的缺失导致期间作物系数数据相应缺失,作物系数在作物生长稳定期曲线不平缓,但整体变化趋势没有太大变化,结合相关研究^[13,15]可以得出作物在初始期阶段(5 月 1 日)开始生长,此时土壤含水量丰富(表层冻土开始融化,补给水分),可以充分供应作物生长和土壤蒸发,叶面积指数不断增加,作物系数随时间呈增大趋势,由 0.95 增加到 1.18 左右;在作物生长的稳定期(6 月初到 8 月初),叶面积指数不会再有太大的变化,此时作物系数增长到最大值后基本保持平稳,位置在 1.10 左右;到作物生长后期(8 月初至 9 月末),作物进入枯萎期,作物系数由 1.05 减小到 0.85 左右。本研究估算的作物系数可以综合反映湿地各种环境因素和植物对蒸散发的影响,未针对湿地每一种植物估算不同生长阶段的作物系数。

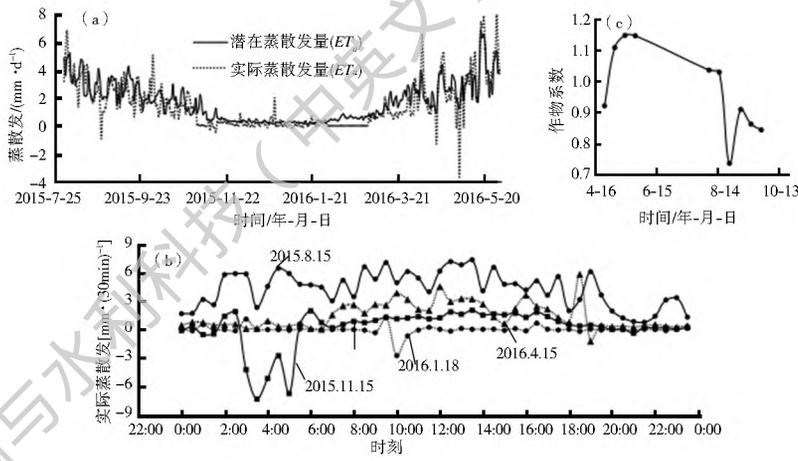


图1 实际蒸散发量(ET_a)及作物系数(K_c)随时间变化特征

Fig. 1 Changes of actual evapotranspiration (ET_a) and crop coefficient (K_c) over time

2.2 气象因子随时间变化规律

日气象因子(饱和水气压差、净辐射、温度、空气湿度、风速)随时间变化见图2。由图2(a)、2(b)可看出饱和水气压差(VPD)、净辐射(R_n)有明显的季节性变化,变化形状大致呈“U”型,生长期(5月至9月)较高。另外净辐射在生长季中期(6月至8月)的值高于生长季初期(5月)和末期(9月)的值。日内总净辐射最高值可达 187 W/m^2 。温度(T)随时间变化规律与净辐射的基本一致但稍有滞后,净辐射在12月初期到12月末期降到最小值并趋于稳定,但温度在1月末期降到最小值,趋势近似为不规则的“V”型。空气湿度(RH)、风速(U)随时间变化见图2(c),可以看出在观测时段内空气湿度的季节变化特征不明显,波动相对较小,尤其在冬季阶段。观测期风速的变化趋势也不明显,但是变化幅度较大。

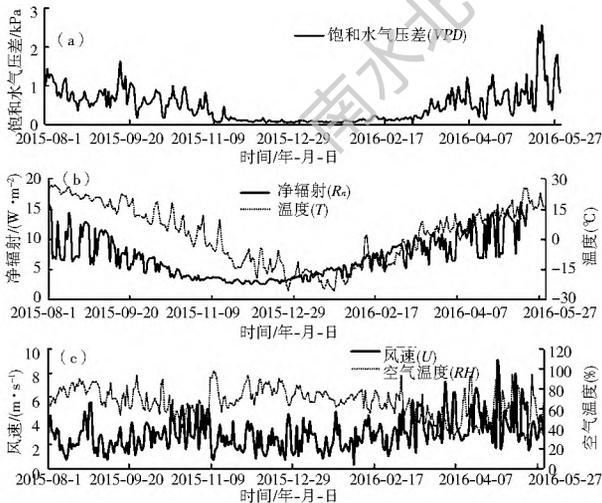


图2 日饱和水气压差、净辐射、温度、空气湿度、风速随时间变化
Fig. 2 Changes of daily vapor pressure deficit, net radiation, temperature, air humidity, and wind speed over time

为研究日尺度下金河湾湿地实际蒸散发与气象因子的关系,本研究选择2015年8月(夏)、11月(秋)以及2016年1月(冬)、4月(春)四个代表月的数据展开分析。为研究30 min尺度下气象因子日

内变化规律及实际蒸散发量与气象因子的关系,选取2015年8月15日、11月15日以及2016年1月18日、4月15日数据较为完整的四个代表日来反应实际蒸散发与气象因子的偏相关关系。

2.3 气象因子对实际蒸散发的影响

2.3.1 日尺度下气象因子对实际蒸散发的影响

不同季节蒸散发量与气象因子在日尺度上的关系见表1。饱和水气压差对蒸散发量既有促进作用也有抑制作用,最大偏相关系数为0.36。综合研究区12个月的数据,日尺度上饱和水气压差对蒸散发量的促进作用在春季比较明显,其次为夏季,且偏相关系数均为正值。蒸散发量与净辐射呈正相关,这表明不同季节净辐射对蒸散发量都是促进作用。2015年8月和2016年1月净辐射对蒸散发的促进作用不明显则有其它因素占主导作用。综合研究区12个月的数据,净辐射对蒸散发量无抑制情况发生,蒸散发量与净辐射在秋季相关性最为显著。2015年8月蒸散发量与温度的相关性显著,而其它3个月相关性不高,并且偏相关系数为负。蒸散发量与温度既存在正相关也有负相关,综合研究区12个月的数据,显著水平最高出现在2015年8月和2015年12月此时的偏相关系数分别为0.40、-0.45。由此可见研究区冬季气温比较低,较低温度对蒸散发有明显抑制作用;夏季温度回升相关性逐渐增强,并且此时的温度对蒸散发逐渐起到促进作用,蒸散发量与温度在夏季相关性最为显著。风速对蒸散发也有相对促进或抑制作用,但相对于其他气象因子作用较弱,最大偏相关系数为0.24。综合研究区12个月的数据,风速与蒸散发量的相关性在春、秋季最为显著,其余季节均无显著性。空气湿度与蒸散发量偏相关系数最大值出现在2015年8月。综合研究区12个月的数据,显著水平最高出现

表 1 日尺度实际蒸散量与气象因子的偏相关系数

Tab. 1 Partial correlation between actual evapotranspiration and meteorological factors at daily scale

时间/年-月	饱和水气压差	净辐射	温度	风速	空气湿度
2015-08(夏季)	0.11	0.05	0.40**	0.11	0.21
2015-11(秋季)	0.01	0.51***	-0.15	0.06	0.01
2016-01(冬季)	0.28	0.15	-0.37	-0.08	-0.08
2016-04(春季)	0.36	0.43**	-0.33	0.24	0.12
综合	0.46**	0.35**	-0.15	-0.007	0.08

注：“*”、“**”和“***”分别代表统计检验显著水平为 0.1、0.05 和 0.01。

在 2015 年 9 月及 2016 年 2 月,次之为 2015 年 12 月,此时的偏相关系数分别为 -0.48、-0.45、0.33,蒸散量与空气湿度既有正相关也有负相关,秋、冬季相关性最显著。从不同季节蒸散量与气象因子在日尺度上的相关性可看出,夏季影响蒸散发的主要气象因子为温度,秋季主要为净辐射,冬季不明显,春季主要为净辐射,其次为饱和水气压差和温度。整个研究期间日尺度下实际蒸散量与净辐射的相关关系很强,这与以往基于涡动相关仪和大型称重式蒸渗仪的研究成果一致^[10]。本研究发现影响实际蒸散量的次要因素依次为温度和空气湿度,这与该研究中大型称重式蒸渗仪的研究成果一致,而该研究中涡动相关仪器的研究结果表明影响实际蒸散量的次要因素依次为空气湿度和温度。

2.3.2 30 min 尺度下气象因子对实际蒸散发的影响

不同季节实际蒸散发与净辐射在 30 min 尺度上的关系见表 2。实际蒸散量与饱和水气压差相关性不显著。但综合研究区 12 个月同时段日内数据,实际蒸散发与饱和水气压差在冬季相关性显著,最大相关系数为 0.79(2016 年 2 月 15 日)。实际蒸散发与净辐射相关性显著,偏相关系数均很高,最高可达 0.97。综合研究区 12 个月同时段日内数据,实际蒸散发与净辐射在四个季节的相关性显著,同时净辐射对实际蒸散发有明显促进作用。实际蒸散发与温度的相关性不显著。综合研究区 12 个月同时段日内数据,实际蒸散发与温度在冬、春季相关性显著,2016 年 2 月 15 日最高,次之为 2016 年 5 月 15 日、2016 年 4 月 15 日和 2015 年 12 月 15 日,偏相关系数分别为 -0.76、0.33、0.27 和 -0.25,其余均无显著性。实际蒸散发与风速的偏相关系数最高值出现在 2015 年 8 月 15 日。综合研究区 12 个月同时段的日内数据,偏相关系数最高值分别为 0.75(2016 年 3 月 15 日)、0.65(2016 年 8 月 15 日)、0.64(2015 年 9 月 15 日)、0.56(2015 年 10 月 15

表 2 30min 尺度实际蒸散量与气象因子的偏相关系数

Tab. 2 Partial correlation between actual evapotranspiration and meteorological factors at 30min time scale

时间/年-月-日	饱和水气压差	净辐射	温度	风速	空气湿度
2015-08-15(夏季)	0.20	0.97**	-0.10	0.65**	0.10
2015-11-15(秋季)	0.05	0.20	0.01	0.03	-0.02
2016-01-18(冬季)	0.08	0.86**	-0.10	0.10	0.31**
2016-04-15(春季)	-0.10	0.13	0.28	0.06	0.66**
综合	0.33**	0.60**	0.06	0.15*	0.26**

注：“*”、“**”和“***”分别代表统计检验显著水平为 0.1、0.05 和 0.01。

日)及-0.49(2015 年 12 月 15 日)。说明实际蒸散发与风速无季节性变化规律。实际蒸散发与空气湿度在 2016 年 4 月 15 日相关性最显著,其次为 2016 年 1 月 18 日综合研究区 12 个月同时段日内数据,实际蒸散发与湿度的显著水平最高出现在 2016 年 5 月 15 日、2016 年 2 月 15 日、2016 年 4 月 15 日及 2015 年 9 月 15 日,偏相关系数为 0.86、0.67、0.66 和 0.41,说明春、冬季空气湿度对实际蒸散发的影响较明显。从不同季节蒸散量与气象因子在 30 min 尺度下的相关性可看出,四个季节影响蒸散发的主要气象为净辐射和饱和水气压差。夏季除了净辐射,风速也是主要影响因子。春、冬季除了净辐射,空气湿度也是主要影响因子。整个研究期间 30 min 尺度下,影响蒸散量的主要因素是净辐射和饱和水气压差;次要因素为空气湿度和风速。

两种时间尺度对比发现:30 min 尺度下实际蒸散发与净辐射及饱和水汽压差的相关关系强于与空气湿度及风速的关系,这与日尺度研究结果一致。30 min 尺度下蒸散量与温度的相关关系有所下降,并且低于与空气湿度及风速的相关关系,这与日尺度的研究结果不一致。30 min 尺度下蒸散量与净辐射的相关关系有明显提升。两种尺度下,蒸散量与风速的相关关系均不明显,这与以往研究结果一致^[18]。

3 结论

本研究基于哈尔滨金河湾湿地涡度相关仪的通量观测数据和中国气象局哈尔滨气象站数据,分析了寒区湿地实际蒸散量变化规律与影响因素。年实际蒸散量为 660 mm,日内实际蒸散量最高值可达 8.1 mm,具有明显的季节性变化。作物系数在生长初期逐渐上升到生长期达到最大值并基本保持稳定,随后在作物枯萎期逐渐减小。通过分析日尺度和 30 min 尺度下不同气象因子(饱和水汽压差、辐射、温度、相对湿度及风速)与实际蒸散量的

相关关系,明确了不同时间尺度下影响实际蒸散发量的主要影响因素为净辐射、饱和水汽压差和温度。除气象因素外,湿地水文状况和作物种类及生长也可能是影响实际蒸散发过程的重要因素,有待于进一步研究。研究结论可以为寒区湿地实际蒸散发的连续动态监测及估算提供科学依据和指导。

参考文献(References):

[1] MITRA S, WASSMANN R, VLEK P. Global inventory of wetlands and their role in the carbon cycle[J]. Discus. Pap. 2003, 18771.

[2] 薛静, 孙震. 湿地退化及其引起的景观格局变化对湿地旅游业的影响[J]. 当代旅游(学术版), 2014(8): 3F33. (XUE J, SUN Z. The influence of wetland degradation and its landscape pattern change on wetland tourism[J]. Contemporary Tourism(Academic Edition), 2014(8): 3F33. (in Chinese))

[3] M ALVÁREZ A I. Temperate freshwater wetlands: types, status, and threats[J]. Environmental Conservation, 2002, 29(2): 115-133.

[4] 谭雅懿, 王烜, 王育礼. 中国寒区湿地研究进展[J]. 冰川冻土, 2011, 33(1): 197-204. (TAN Y Y, WANG X, WANG Y L. Advances in studies on Wetlands in cold regions of China[J]. Glaciers and Frozen Soil, 2011, 33(1): 197-204. (in Chinese))

[5] 孙志高, 刘景双, 李彬. 中国湿地资源的现状、问题与可持续利用对策[J]. 干旱区资源与环境, 2006, 20(2): 83-88. (SUN Z G, LIU J S, LI B. Current situation, problems and Counter measures of sustainable utilization of wetland resources in China[J]. Arid Area Resources and Environment, 2006, 20(2): 83-88. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1003-7578. 2006. 02. 016.

[6] 杨思忠, 金会军, 吉延峻, 等. 寒区线性工程沿线冻土区的植被恢复[J]. 冰川冻土, 2008, 30(5): 875-882. (YANG S Z, JIN H J, JI Y J, et al. [J]. Vegetation restoration of frozen soil area along the linear engineering of cold region[J]. Glacier Frozen Soil, 2008, 30(5): 875-882. (in Chinese))

[7] 孙丽, 宋长春. 三江平原典型沼泽湿地能量平衡和蒸散发研究[J]. 水科学进展, 2008, 19(1): 43-48. (SU N L, SONG C C. Study on energy balance and evapotranspiration of typical marsh wetland in Sanjiang plain[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(1): 43-48. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 1001-6791. 2008. 01. 007.

[8] 王昊, 许士国. 扎龙湿地芦苇沼泽蒸散发计算与分析[J]. 水利水电技术, 2005, 36(2): 22-24. (WANG H, XU S G. Zhalong Wetland reed swamp evapotranspiration calculation and analysis of[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2005, 36(2): 22-24. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-0860. 2005. 02. 006.

[9] 苏建伟. 基于通量站的农田蒸散发研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2013, 3. (SU J W. Study on farmland evapotranspiration based on flux station[D]. Xi'an University of Technology, 2013, 3. (in Chinese))

[10] 刘国水, 刘钰, 蔡甲冰, 等. 农田不同尺度蒸散发量的尺度效应

与气象因子的关系[J]. 水利学报, 2011, 42(3): 284-289. (LIU G S, LIU Y, CAI J B, et al. The relationship between the scale effect of different scale evapotranspiration and meteorological factors[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(3): 284-289. (in Chinese))

[11] 刘冉, 王勤学, 唐立松, 等. 盐生荒漠地表水热与二氧化碳通量的季节变化及驱动因素[J]. 生态学报, 2009, 29(1): 67-75. (LIU R, WANG Q X, TANG L S, et al. Seasonal variation and driving factors of surface water heat and carbon dioxide fluxes in the desert ecosystem[J]. Chinese Journal of Ecology, 2009, (1): 67-75. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 1000-0933. 2009. 01. 009.

[12] 王雯. 黄土高原旱作麦田生态系统 CO₂ 通量变化特征及环境响应机制[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013. (WANG W. Characteristics of CO₂ flux change and environmental response mechanism in Rainfed Wheat Field Ecosystem on Loess Plateau[D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2013. (in Chinese))

[13] 郭映, 董阳, 党慧慧, 等. 基于不同时间尺度玉米蒸散发腾量及其影响因素[J]. 资源科学, 2014, 36(7): 1501-1508. (GUO Y, DONG Y, DANG H H, et al. Different time scales of maize evapotranspiration and its influencing factors based on[J]. Resources Science, 2014, 36(7): 1501-1508. (in Chinese))

[14] 闫巍, 张宪洲, 石培礼, 等. 青藏高原高寒草甸生态系统 CO₂ 通量及其水分利用效率特征[J]. 自然资源学报, 2006, 21(5): 756-767. (YAN W, ZHANG X Z, SHI P L, et al. Tree species, alpine meadow ecosystem CO₂ flux and water use efficiency of[J]. Journal of Natural Resources, 2006, 21(5): 756-767. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 1000-3037. 2006. 05. 009.

[15] ALLEN R G. Crop Evapotranspiration Guidelines for computing crop water requirements[J]. FAO Irrigation & Drainage Paper, 1998, 56.

[16] SALVADOR Sanchez C, Sanchez Carillo, MIGUEL Alvarez Cobelas, Manuel Benitez, et al. A simple method for estimating water loss by transpiration in wetlands[J]. Hydrological Sciences Journal, 2001, 46(4): 537-552.

[17] 张雪松, 闫艺兰, 胡正华. 不同时间尺度农田蒸散发影响因子的通径分析[J]. 中国农业气象, 2017, 38(4): 20F-210. (ZHANG X S, YAN Y L, HU Z H. Size analysis at different time scales evapotranspiration factors through[J]. China Agricultural Meteorology, 2017, 38(4): 20F-210. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-6362. 2017. 04. 001.

[18] 李菊, 刘允芬, 杨晓光, 等. 千烟洲人工林水汽通量特征及其与环境因子的关系[J]. 生态学报, 2006, 26(8): 2449-2456. (LI J, LIU Y F, YANG X G, et al. The characteristics of water vapor flux and its relationship with environmental factors in the artificial forest of thousand tobacco[J]. Journal of Ecology, 2006, 26(8): 2449-2456. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 000-0933. 2006. 08. 005.

[19] 张雪梅, 陈莉, 姬菊枝, 等. 1881—2010年哈尔滨市气候变化及其影响[J]. 气象与环境学报, 2011, 27(5): 13-20. (ZHANG

- X M, CHEN L, JI J Z, et al. In Harbin city from 1881 to 2010 and its impact on climate change[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2011, 27 (5): 13-20. (in Chinese)
- [20] 沈艳, 刘允芬, 王堰. 应用涡动相关法计算水热、CO₂ 通量的国内外进展概况[J]. 大气科学学报, 2005, 28(4): 559-566. (SHEN Y, LIU Y F, WANG Y. An overview of the application of the eddy correlation method to the calculation of water heat and CO₂ flux at home and abroad[J]. Journal of Atmospheric Sciences, 2005, 28 (4): 559-566. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1674-7097.2005.04.018.
- [21] 雷慧闽. 华北平原大型灌区生态水文机理与模型研究[D]. 北京: 清华大学, 2011. (LEI H M. Study on the mechanism and model of ecological hydrology in large irrigation area of North China Plain[D]. Beijing: Tsinghua University, 2011. (in Chinese))
- [22] 谭丽萍, 刘苏峡, 莫兴国, 等. 华北人工林水热碳通量环境影响因子分析[J]. 植物生态学报, 2015, 39(8): 773-784. (TAN L P, LIU S X, MO X G, et al. Analysis of the environmental factors affecting the carbon and water fluxes in the artificial forests of North China[J]. Journal of Plant Ecology, 2015, 39 (8): 773-784. (in Chinese)) DOI: 10.17521/cjpe.2015.0074.
- [23] 高磊, 申双和, 等. 水稻蒸散特征及日尺度作物系数估算. 中国农业气象, 2016, 37(2): 158-165. (GAO L, SHEN S H, et al. Characteristics of rice evapotranspiration and estimation of daily crop coefficients[J]. Chinese Agriculture Meteorology, 2016, 37 (2): 158-165. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-6362.2016.02.005.
- [24] 张淑杰, 周广胜, 李荣平. 基于涡度相关的春玉米逐日作物系数及蒸散模拟[J]. 应用气象学报, 2015, 26(6): 695-704. (ZHANG S J, ZHOU G S, LI R P. The daily crop coefficient and evapotranspiration simulation of spring maize based on eddy covariance[J]. Applied Meteorological Journal, 2015, 26 (6): 695-704. (in Chinese)) DOI: 10.11898/100F-7313.20150606.
- [25] 王笑影, 梁文举, 闻大中. 北方稻田蒸散需水分析及其作物系数确定[J]. 应用生态学报, 2005, 16(1): 69-72. (WANG X Y, LIANG W J, WEN D Z. Evapotranspiration analysis of rice field in North China and determination of its crop coefficients[J]. Journal of Applied Ecology, 2005, 16 (1): 69-72. (in Chinese))
- [26] 焦醒, 刘广全, 匡尚富, 等. Penmar Monteith 模型在森林植被蒸散研究中的应用[J]. 水利学报, 2010, 41(2): 245-252. (JIAO X, LIU G Q, KUANG S F, et al. Application of Penmar Monteith model in the study of forest vegetation evapotranspiration[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41 (2): 245-252. (in Chinese))
- [27] 严丽坤. 相关系数与偏相关系数在相关分析中的应用[J]. 云南财经大学学报, 2003, 19(3): 78-80. (YAN L K. The application of correlation coefficient and partial correlation coefficient in correlation analysis[J]. Journal of Yunnan University of Finance and Economics, 2003, 19(3): 78-80. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1674-4543.2003.03.018.

《南水北调与水利科技》录用定稿网络首发公告

《南水北调与水利科技》已与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签署《CAJ-N 网络首发学术期刊合作出版协议》,从2017年11月15日起,凡经我刊审定录用的稿件(录用定稿)均率先在CAJ-N正式出版期刊网络版。以网络首发方式发表单篇论文是出版网络版的实质意义所在,对作者研究成果首发权、学术影响力,以及读者获取科技信息与知识的及时性具有重要意义。录用定稿网络首发之后,在后续的排版定稿、整期汇编定稿网络版和印刷版中,不得修改论文题目、作者署名、作者单位以及其学术内容,只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

《南水北调与水利科技》编辑部