

# 1968—2018年辽河流域生长季潜散量变化及 主控气象因素

王亚蕾<sup>1</sup>, 董晔<sup>2</sup>

(1.新疆师范大学 地理科学与旅游学院, 乌鲁木齐 830054; 2.新疆师范大学 商学院, 乌鲁木齐 830054)

**摘要:**为了探析辽河流域潜散量变化及主控气象因素,为促进该流域农业水资源合理利用和农业生产规划提供参考,基于辽河流域内23个气象站点1968—2018年生长季逐日气象数据,利用Penman-Monteith公式计算了辽河流域参考作物蒸散量,采用线性趋势分析、逐步回归分析、克里金空间插值分析和通径分析研究了辽河流域参考作物蒸散量的时空变化特征及主控气象因素。结果表明:(1)辽河流域1968—2018年生长季参考作物蒸散量整体呈下降趋势,下降速率为 $-0.303\text{ mm/a}$ ,5月、6月、7月 $\text{ET}_0$ 呈下降趋势,8月、9月 $\text{ET}_0$ 呈上升趋势;(2)辽河流域生长季参考作物蒸散量在空间分布上呈中间高、四周低、西部高于东部的分布特征,各月 $\text{ET}_0$ 空间分布特征与整体分布特征相近;(3)各气象因子对辽河流域生长季参考作物蒸散量的影响程度从高至低依次为日照时数、相对湿度、风速、最低气温和最高气温,主控气象因素是日照时数。总体而言,辽河流域生长季潜散量在1968—2018年间呈下降趋势,日照时数是该区域潜散量变化的主导因子。

**关键词:**参考作物蒸散量;主导因子;辽河流域

中图分类号:P426.2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)06-0162-06

## Spatiotemporal Distribution of Potential Evapotranspiration and Its Main Meteorological Factors in Liaohe River Basin During Growing Season from 1968 to 2018

WANG Yalei<sup>1</sup>, DONG Ye<sup>2</sup>

(1.School of Geography and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054,  
China; 2.Business School, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China)

**Abstract:** In order to analyze the change of potential evapotranspiration and the main meteorological factors in the Liaohe River Basin, and provide references for promoting the rational use of agricultural water resources and agricultural production planning in the basin, based on the daily meteorological data of the 23 meteorological stations in the Liaohe River Basin from 1968 to 2018, we used Penman-Monteith formula to calculate the reference crop evapotranspiration in the Liaohe River Basin, used linear trend analysis, stepwise regression analysis, Kriging spatial interpolation analysis and path analysis to study the temporal and spatial characteristics of reference crop evapotranspiration and the main meteorological factors in the Liaohe River Basin. The results showed that: (1) the reference crop evapotranspiration in the growing season from 1968 to 2018 in the Liaohe River Basin showed a downward trend, at a rate of  $-0.303\text{ mm/a}$ ;  $\text{ET}_0$  showed a downward trend in May, June and July, and the increased trends in August and September; (2) the spatial distribution of the reference crop evapotranspiration of growing season in the Liaohe River Basin was high in the middle, low in the surroundings, and higher in the west than in the east; the monthly  $\text{ET}_0$  spatial distribution was similar to the overall distribution; (3) the degree of influence of various meteorological factors on the reference crop evapotranspiration in the growing season in the Liaohe River Basin decreased in the order: sunshine duration > relative humidity > wind speed > minimum temperature > maximum temperature, and the main

收稿日期:2020-10-24

修回日期:2020-11-19

资助项目:国家自然科学基金“乌鲁木齐河流域水质演变对城市化的时空响应”(42061007)

第一作者:王亚蕾(1997—),女,新疆额敏县人,硕士研究生,研究方向为自然地理学。E-mail:1079192464@qq.com

通信作者:董晔(1974—),女,内蒙古呼和浩特人,教授,博士,主要从事人口、资源与环境经济学研究。E-mail:77069059@qq.com

meteorological factor was sunshine duration. In general, the latent dispersion in the growing season of the Liaohe River Basin showed a downward trend from 1968 to 2018, and the sunshine duration was the dominant factor in the variation of the latent dispersion in this region.

**Keywords:** reference crop evapotranspiration; dominant factor; Liaohe River Basin

参考作物蒸散量(reference crop evapotranspiration,  $ET_0$ )作为一种假想性指标,其联合国粮农组织(FAO)定义为:当作物高度为 0.12 m,冠层阻力为 70 s/m,反射率为 0.23 时的假设参考作物,参考表面与宽阔的、高度均匀、生长活跃、完全覆盖地面、水分充足的绿草表面非常相似<sup>[1]</sup>。计算参考作物蒸散量  $ET_0$  常用的方法有辐射法<sup>[2]</sup>、温度法<sup>[3]</sup>和蒸发皿法等<sup>[4]</sup>。 $ET_0$  作为水文循环的重要参数<sup>[5]</sup>,对它的科学计算可为解决现实问题提供数据参考,研究分析  $ET_0$  及其变化趋势对农业水资源分配,估算作物需水量<sup>[6]</sup>,规划区域农业活动以及评价区域干湿变化等<sup>[7]</sup>方面具有重要参考价值。

随着全球气候异常、世界人口增加和水资源短缺等问题愈加严重,人们开始关注蒸散发的变化,对  $ET_0$  的研究也越来越广泛。黄娟等<sup>[8]</sup> 根据全国 529 个气象站 1961—2010 年的观测数据,表明中国参考作物蒸散量总体呈下降趋势,下降幅度不大,指出中国西北和西南地区近 50 a 的  $ET_0$  平均值明显大于东北地区和中部腹地;王鹏涛等<sup>[9]</sup> 研究表明,华北平原  $ET_0$  在 1960—2012 年总体呈下降趋势,在空间上呈高低值相间分布;白爱娟等<sup>[10]</sup> 研究表明,青海湖流域 1971—2007 年  $ET_0$  呈减弱趋势,夏季减少最为显著,秋冬季存在弱增加的趋势;李雪<sup>[11]</sup> 对辽河流域(辽宁段)的  $ET_0$  进行研究,表明,该河段内 11 个气象站在 1960—2006 年  $ET_0$  大多呈下降趋势,但多数不显著,各气象站  $ET_0$  随时间非线性变化;吴佳蔚<sup>[12]</sup> 研究表明,在辽河流域的干湿过渡和半湿润区  $ET_0$  以  $-17.16, -12.71 \text{ mm}/10 \text{ a}$  的递减速率下降,在半干旱区域以  $0.87 \text{ mm}/10 \text{ a}$  的递增速率增加。根据已有研究可看出,在不同地区、不同环境条件下  $ET_0$  的时空变化趋势不同。

蒸散发作为连接陆地循环和大气循环的中间环节<sup>[13]</sup>,其整个过程会受到众多气象因素的影响。吴霞等<sup>[14]</sup> 研究表明,中国 1961—2015 年  $ET_0$  呈减少趋势主要是由风速减小、日照时数降低和水汽压微弱增加共同导致的;钟巧等<sup>[15]</sup> 对影响博斯腾湖流域  $ET_0$  变化的气象因子进行贡献率分析,结果表明,该流域  $ET_0$  变化对净辐射最为敏感,其次为风速和最高气温,对相对湿度和水汽压的敏感性较弱;张淑杰等<sup>[16]</sup> 研究表明,影响东北地区 1961—2007 年  $ET_0$  变化的主要气象因素为日照时数和风速;张伟科等<sup>[17]</sup> 研究表明,西辽河流域

1974—2005 年  $ET_0$  与气温、日照时数和风速呈显著正相关,与平均相对湿度呈显著负相关;王炳亮等<sup>[18]</sup> 研究表明,在辽河三角洲的半干旱区,敏感系数由大到小依次是相对湿度、风速、太阳辐射和平均气温,在半湿润区和滨海干湿过渡区,敏感系数由大到小依次是相对湿度、太阳辐射、平均气温和风速。根据现有研究可看出,  $ET_0$  随气象因子的变化而变化,  $ET_0$  的变化主要与气温、日照时数、风速、相对湿度、气压等气象因子相关<sup>[19]</sup>,在不同气候条件下,各气象因子对  $ET_0$  的敏感性和贡献率具有较大差异。

## 1 研究区概况

辽河流域地理位置介于东经  $116^{\circ}30'$ — $125^{\circ}47'$ ,北纬  $38^{\circ}43'$ — $45^{\circ}00'$ ,位于我国东北地区南部,发源于河北省平泉县七老图山脉的光头山,流经河北省、内蒙古自治区、吉林省和辽宁省,最终注入渤海,全长 1 345 km,是我国七大河流之一。流域内地势自北向南、自东西两侧向中间倾斜,其西部为大兴安岭、七老图山和努鲁儿虎山,东部为吉林哈达岭、龙岗山和千山,中下游为辽河平原。辽河流域上游山区水土流失严重,植被覆盖率低于 30%,多年平均实测最大含沙量为  $300 \sim 700 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。辽河流域大部分地区位于温带半湿润半干旱季风气候区,年降水量区域变率大,东部地区降水量大于西部地区,但总量大于东北地区其他河流。该流域气温分布不均,平原较高,山地较低,年平均气温在  $4 \sim 9^{\circ}\text{C}$ ,自南向北递减,位于我国一年一熟耕作区,农作物以小麦、玉米、大豆和油料作物为主,是我国重要的商品粮基地,与此同时,辽河流域还是我国重要的工业基地和畜牧业基地,因此该区需水量大,水污染现象严重,又是我国水资源贫乏地区之一。

## 2 数据来源及研究方法

### 2.1 数据来源

本文所采用的基础气象数据来源于中国地面气候资料日值数据集(V3.0),该数据集包含了研究区内具有代表性的 23 个气象站点的基础数据,各气象站点的分布状况(图 1),从中选取 1968—2018 年生长季(5—9 月)的 5 项基本气象数据,分别为最高气温( $T_{\max}$ )、最低气温( $T_{\min}$ )、日照时数( $h$ )、相对湿度(RH)和风速( $u$ )。

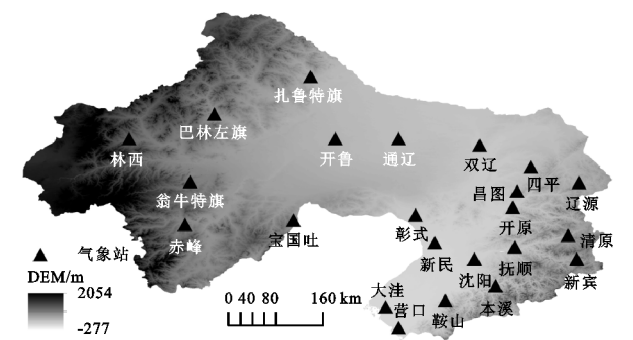


图 1 辽河流域气象站点分布

2.2 研究方法

2.2.1 Penman-Monteith 公式 本文采用联合国粮农组织 FAO 推荐的 Penman-Monteith 公式来计算辽河流域参考作物蒸散量  $ET_0$ , 计算公式如下:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (1)$$

式中:  $ET_0$  为参考作物蒸散量 (mm/d);  $R_n$  为参考作物表面净辐射 [ $MJ/(m^2 \cdot d)$ ];  $G$  为土壤热通量 [ $MJ/(m^2 \cdot d)$ ];  $T$  为平均温度 ( $^{\circ}C$ );  $e_s$  为平均饱和水汽压 (kPa);  $e_a$  为实际水汽压 (kPa);  $\Delta$  为饱和水汽压与温度曲线的斜率 (kPa/ $^{\circ}C$ );  $\gamma$  为干湿常数 (kPa/ $^{\circ}C$ );  $U_2$  为 2 m 高处的风速 (m/s) [1]。

2.2.2 克里金空间插值分析 克里金空间插值法是建立在变异函数和结构分析上的一种空间插值方法, 该方法所确定的权重系数是根据插值过程中某种趋势函数的变动来决定的 [20-21]。可以表示为:

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (2)$$

式中:  $Z(x_0)$  为待估位置  $x_0$  的估计值;  $Z(x_i)$  为已知位置的  $x_i$  观测值;  $\lambda_i$  为分配给  $Z(x_i)$  的权重;  $n$  为估计使用的观测值个数。

2.2.3 通径分析 通径分析是一种标准化变量的多元线性回归分析 [22], 该方法可以得出自变量对因变量的直接和间接影响, 进而分析各变量间的相互关系。

3 结果与分析

3.1 辽河流域  $ET_0$  时间序列变化

3.1.1 辽河流域  $ET_0$  年际变化 辽河流域内 23 个气象站点 1968—2018 年生长季逐日气象数据的  $ET_0$  处理表明 (图 2), 该流域多年平均  $ET_0$  为 705.52 mm, 最大值 763.79 mm (1972 年), 最小值 643.73 mm (1990 年), 年际极差为 120.06 mm。从变化趋势看, 辽河流域 1968—2018 年生长季多年平均  $ET_0$  呈下降趋势, 下降速率为  $-0.3027 \text{ mm/a}$ , 与全国及十大流域 1956—2000 年  $ET_0$  变化趋势相近, 均呈下降

趋势, 但全国及十大流域的  $ET_0$  下降趋势较辽河流域  $ET_0$  下降趋势显著, 下降速率为  $-1.18 \text{ mm/a}$  [23]。

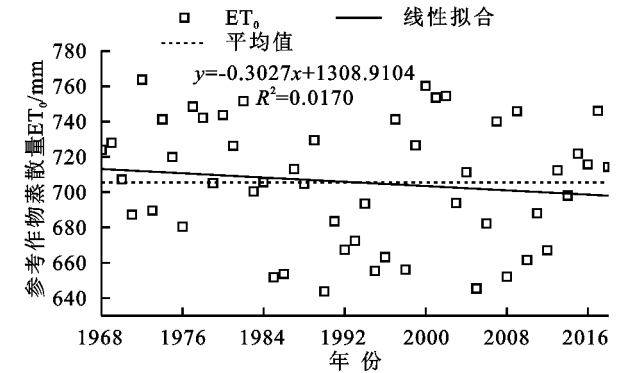


图 2 1968—2018 年辽河流域生长季平均  $ET_0$  变化趋势

3.1.2 辽河流域生长季  $ET_0$  月际变化 对辽河流域 1968—2018 年生长季各月  $ET_0$  进行线性分析表明 (表 1), 5—9 月平均  $ET_0$  为 168.27, 158.91, 145.31, 130.57, 102.71 mm, 各月平均  $ET_0$  占生长季平均  $ET_0$  的 24%, 23%, 21%, 19%, 15%, 说明 5 月、6 月对生长季  $ET_0$  的贡献大, 占生长季的 47%。从变化趋势看, 辽河流域近 51 a 来 5—9 月平均  $ET_0$  呈下降趋势, 气候倾向率为  $-0.1533, -0.1349, -0.0279, 0.0006, 0.0166 \text{ mm/a}$ , 但各月决定系数较小, 表明线性拟合效果不好, 其中, 5 月、6 月、7 月多年平均  $ET_0$  呈下降趋势, 8 月、9 月多年平均  $ET_0$  呈上升趋势, 但变动的趋势性不显著。从变化范围和幅度来看, 辽河流域近 51 a 来 5—9 月  $ET_0$  变化范围在 85~195 mm, 整体变化幅度不大, 5 月、6 月、7 月  $ET_0$  变化范围在 120~195 mm, 8 月、9 月  $ET_0$  在 85~150 mm, 7 月变化幅度最大。辽河流域 1968—2018 年  $ET_0$  最大值为 192.36 mm (1974 年 5 月), 最小值为 85.03 mm (2016 年 9 月), 极值比为 2.26 倍。

表 1 1968—2018 年辽河流域生长季 (5—9 月)  $ET_0$  变化

月份	$ET_0$ 平均值/mm	气候倾向率/ ( $\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$ )	决定系数
5	168.27	-0.1533	0.0329
6	158.91	-0.1349	0.0229
7	145.31	-0.0279	0.0008
8	130.57	0.0006	9.0405E-7
9	102.71	0.0166	0.0012

3.2 辽河流域生长季  $ET_0$  空间分布

3.2.1 多年生长季  $ET_0$  空间分布特征 对辽河流域 1968—2018 年生长季  $ET_0$  进行克里金空间插值分析 (图 3), 根据空间插值结果可知, 该流域  $ET_0$  空间分布整体上呈中间高, 四周低, 西部高于东部的分布特征。流域内多年平均  $ET_0$  变化范围在 563.15~807.17 mm, 其中, 中部地区以开鲁和通辽为中心的  $ET_0$  分布范围为 762.30~807.17 mm, 是辽河流域

ET<sub>0</sub> 的高值区;西部地区以巴林左旗为中心的 ET<sub>0</sub> 空间分布自东向西呈递减趋势,ET<sub>0</sub> 变化范围在 736.61~744.03 mm,变动幅度较小;东部地区 ET<sub>0</sub> 空间分布差异大,ET<sub>0</sub> 自中心向东南由高至低的分布,最低值位于该区域的东部。

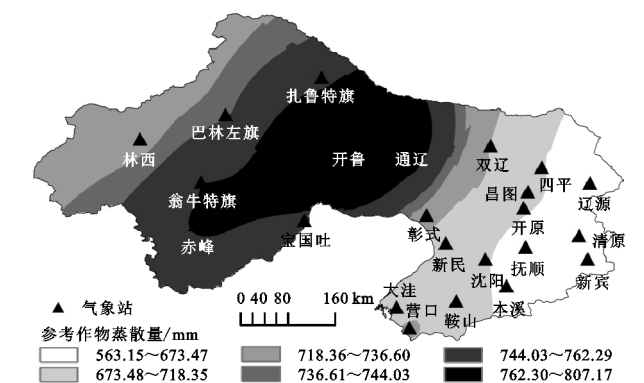


图 3 1968—2018 年辽河流域 ET<sub>0</sub> 空间分布状况

3.2.2 生长季各月 ET<sub>0</sub> 空间分布特征 对辽河流域 1968—2018 年生长季各月 ET<sub>0</sub> 进行空间分析,对比分析各月 ET<sub>0</sub> 空间变化差异及分布特征,生长季各月 ET<sub>0</sub> 空间分布(图 4)与多年平均 ET<sub>0</sub> 空间分布特征相似,均呈中间高,四周低,西部高于东部的分布特征,ET<sub>0</sub> 变化范围为 127.63~196.00 mm,121.78~185.71 mm,114.88~170.97 mm,105.11~150.71 mm,76.90~119.95 mm。其中,5 月、6 月 ET<sub>0</sub> 的高值区位于辽河流域的中部地区,低值区位于辽河流域的东部地区;7 月、8 月、9 月 ET<sub>0</sub> 的高值区主要位于辽河流域的中部、西南部和东南部,低值区位于辽河流域的东部。

3.3 辽河流域 ET<sub>0</sub> 主控气象因素分析

ET<sub>0</sub> 的变化与气象、地形及土地利用方式等<sup>[24]</sup> 因素有关,本文主要分析影响 ET<sub>0</sub> 变化的气象因素。影响 ET<sub>0</sub> 的主要气象因素为气温、降水、日照时数、风速、气压、相对湿度等<sup>[25]</sup>,本文选取最高气温( $T_{max}$ )、最低气温( $T_{min}$ )、日照时数( $h$ )、相对湿度(RH)和风速( $u$ )5 个气象因子来分析其对辽河流域多年生长季 ET<sub>0</sub> 的影响程度,以此来确定主控气象因素。

3.3.1 基于逐步回归分析的辽河流域 ET<sub>0</sub> 气候影响因素分析 通过逐步回归法对影响辽河流域 1968—2018 年生长季 ET<sub>0</sub> 的气候因素进行分析(表 2),近 51 a 来各气象因子对 ET<sub>0</sub> 的影响程度:日照时数>相对湿度>风速>最低气温>最高气温,各气象因子的回归系数为 0.526, -0.402, 0.293, 0.217, 0.201,其中,日照时数对 ET<sub>0</sub> 的影响程度最大,表明日照时数为研究区多年 ET<sub>0</sub> 的主控气象因素,相对湿度对该区 ET<sub>0</sub> 的影响程度仅次于日照时数,表明相对湿度是影响该区域 ET<sub>0</sub> 变化的重要气象因素。

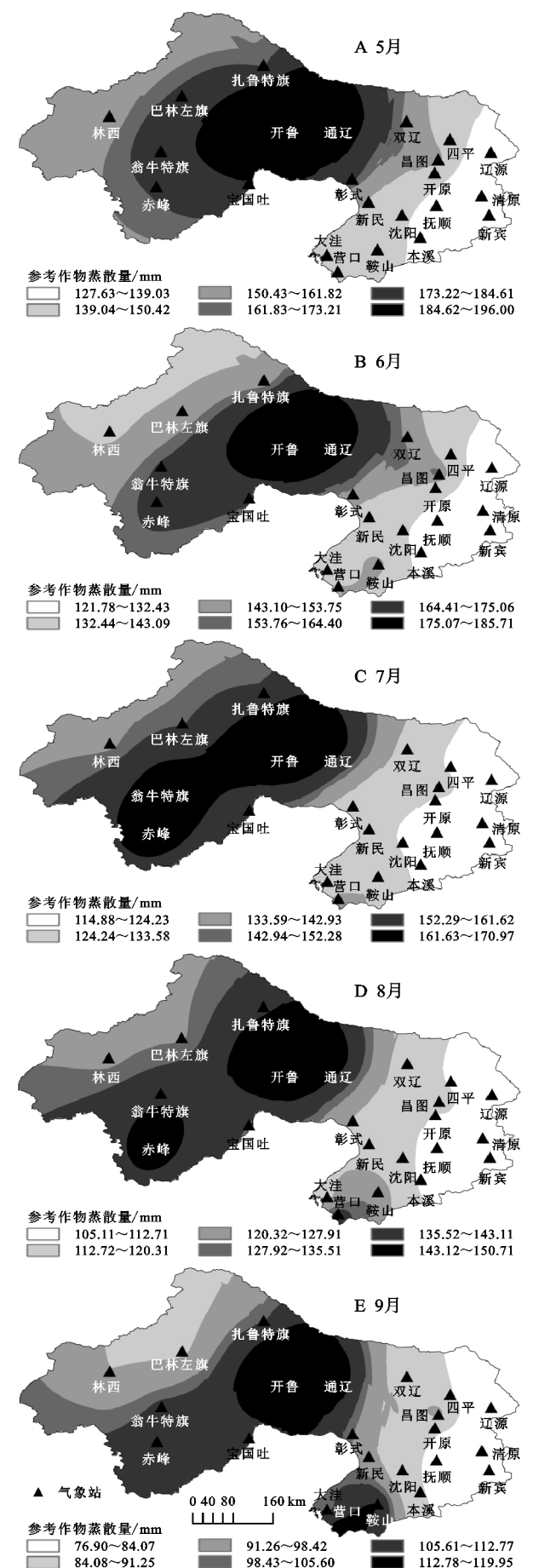


图 4 辽河流域生长季各月(5—9 月)ET<sub>0</sub> 空间分布



5 月各气象因子对  $ET_0$  的影响程度:风速>日照时数>相对湿度>最高气温>最低气温,其中,风速的回归系数为 0.392,对  $ET_0$  的影响程度最大,表明 5 月  $ET_0$  的主控气象因素为风速;6 月各气象因子对  $ET_0$  的影响程度为日照时数>相对湿度>风速>最高气温>最低气温,其中,日照时数的回归系数为 0.582,对  $ET_0$  的影响程度最大,表明 6 月  $ET_0$  的主控气象因素为日照时数;7 月各气象因子对  $ET_0$  的影响程度为:日照时数>相对湿度>风速>最高气温>最低气温,其中,日照时数的回归系数为 0.728,对  $ET_0$  的影响程度最大,表明 7 月  $ET_0$  的主控气象因素为日照时数;8 月各气象因子对  $ET_0$  的影响程度为:日照时数>相对湿度>最低气温>风速>最高气温,其中,日照时数的回归系数为 0.760,对  $ET_0$  的影响程度最大,表明 8 月  $ET_0$  的主控气象因素为日照时数;9 月各气象因子对  $ET_0$  的影响程度为:日照时

数>相对湿度>风速>最高气温>最低气温,其中,日照时数的回归系数为 0.565,对  $ET_0$  的影响程度最大,表明 9 月  $ET_0$  的主控气象因素为日照时数。

表 2 辽河流域 1968—2018 年生长季各气象因子回归系数

月份	最高气温	最低气温	日照时数	相对湿度	风速
5—9	0.201	0.217	0.526	−0.402	0.293
5	0.258	0.120	0.370	−0.339	0.392
6	0.171	0.080	0.582	−0.314	0.276
7	0.095	0.070	0.728	−0.266	0.181
8	0.133	0.168	0.760	−0.248	0.165
9	0.259	0.234	0.565	−0.340	0.296

注:以上系数均通过了 0.01 的显著性检验。

3.3.2 基于通径分析的辽河流域  $ET_0$  气候影响因素分析 利用 SPSS 17.0 对影响  $ET_0$  的气象因素进行通径分析,根据所得出的通径系数表以及通径系数原理来计算各气象因子对  $ET_0$  的直接与间接作用,通径系数见表 3。

表 3 辽河流域 1968—2018 年生长季气象因子的通径系数

气象因子	直接通径系数	间接通径系数						相关系数	对 $E$ 总贡献
		$T_{\max}$	$T_{\min}$	$h$	RH	$u$	合计		
$T_{\max}$	0.201		0.140	0.171	0.013	−0.026	0.299	0.499	0.100
$T_{\min}$	0.217	0.129		−0.111	−0.160	0.006	−0.136	0.081	0.018
$h$	0.526	0.066	0.046		0.214	0.016	0.342	0.775	0.408
RH	−0.402	−0.007	0.087	−0.280		−0.079	−0.279	−0.681	0.274
$u$	0.293	−0.018	0.004	0.028	0.109		0.123	0.416	0.122

注: $E$  为回归方程估测可靠程度。

对所选取的气象因子进行通径分析(表 3), $ET_0$  的变化与表中 5 种气象因素均相关,但各气象因素对  $ET_0$  的直接作用和间接作用存在差异。日照时数对  $E$  的总贡献为 0.408,表明日照时数是影响该区域的决定性因素;相对湿度对  $E$  的总贡献为 0.274,表明相对湿度对该区域  $ET_0$  的影响程度仅次于日照时数;最高气温对  $E$  的总贡献为 0.100,表明最高气温对该区域  $ET_0$  变化的影响程度较小;风速对  $E$  的总贡献为 0.122,表明风速是影响该区域  $ET_0$  变化的重要气象因素;最低气温对  $ET_0$  的贡献为 0.018,表明最低气温对研究区  $ET_0$  的影响程度最小。按各气象因子对  $E$  的总贡献进行排序:日照时数>相对湿度>风速>最高气温>最低气温;按直接通径系数进行排序:日照时数>相对湿度>风速>最低气温>最高气温;按各气象因素的间接通径系数进行排序:日照时数>最高气温>相对湿度>最低气温>风速。

通过以上两种统计分析方法对辽河流域 1968—2018 年生长季  $ET_0$  的气候影响因素进行分析,结果表明,最高气温、最低气温、日照时数、风速和相对湿度 5 种气象因素对  $ET_0$  的影响程度不同,其中,日照时数是影响该流域多年  $ET_0$  变化的主控气象因素,

对  $ET_0$  的影响程度最大。对生长季各月  $ET_0$  气象影响因素分析表明,风速对 5 月  $ET_0$  的影响程度最大,回归系数为 0.392,是该月的主控气象因素,其余各月的主控气象因素均为日照时数,与多年  $ET_0$  变化的主控气象因素相一致。

4 讨论与结论

4.1 讨论

本文研究发现,辽河流域近 51 a 来  $ET_0$  呈下降趋势, $ET_0$  变化与日照时数呈正相关,与相对湿度呈负相关,这与李雪<sup>[11]</sup>对辽河流域(辽宁段)1960—2006 年  $ET_0$  变化趋势相近,与影响该河段  $ET_0$  变化的气象因素相似,均与日照时数呈正相关,与相对湿度呈负相关。但根据前人研究发现, $ET_0$  变化趋势及影响因素在不同地区存在差异。钱多等<sup>[26]</sup>研究表明,毛乌素沙地在 1955—2014 年  $ET_0$  呈缓慢上升趋势,并指出气温是影响该区域的主导因子;段娅楠等<sup>[27]</sup>研究发现,雅鲁藏布江流域  $ET_0$  呈显著上升趋势,平均气温对该流域的贡献率最大;吕明权等<sup>[28]</sup>研究表明,嘉陵江流域  $ET_0$  呈减少趋势,减少斜率为 0.43 mm/a,其主控气象因素为风速和太阳辐射。本

文认为,由于各地区所处的地理位置以及自身地理条件的不同,导致各地区  $ET_0$  变化趋势存在差异。 $ET_0$  是一个复杂的系统,受气温、相对湿度、日照时数等多种气象因素的影响,且近年来随着全球变暖趋势加剧,极端天气频发,导致在不同地区影响  $ET_0$  变化的主控气象因素不同。

在全球大环境的背景下,本文仅从气象方面来分析影响  $ET_0$  变化的原因,具有一定的局限性,还需进一步分析影响  $ET_0$  变化的其他因素,以便为流域内的农业发展、规划与管理进行更科学的指导。

## 4.2 结论

(1) 辽河流域 1968—2018 年生长季  $ET_0$  整体呈下降趋势,多年平均  $ET_0$  为 705.52 mm,下降速率为  $-0.303 \text{ mm/a}$ 。近 51 a 的生长季中,各月  $ET_0$  变化范围为 85~195 mm,其中,5 月、6 月、7 月  $ET_0$  呈下降趋势,8 月、9 月  $ET_0$  呈上升趋势。

(2) 辽河流域 1968—2018 年生长季平均  $ET_0$  的空间分布呈中间高,四周低,西部高于东部的分布特征,多年平均  $ET_0$  变化范围为 541.68~827.36 mm,最高值出现在辽河流域中部地区,最低值位于辽河流域东部地区。生长季各月平均  $ET_0$  空间分布特征与多年平均  $ET_0$  空间分布特征相似,均呈中间高,四周低,西部高于东部的分布特征。

(3) 各气象因子对辽河流域 1968—2018 年生长季  $ET_0$  的影响程度为:日照时数>相对湿度>风速>最低气温>最高气温,日照时数为辽河流域近 51 a 年来生长季  $ET_0$  的主控气象因素,相对湿度次之,最高气温与  $ET_0$  的相关性最弱。

## 参考文献:

- [1] Allen R G. Crop Evapotranspiration: Guideline for Computing Crop Water Requirements[M]. Rome: FAO, 1998.
- [2] 宋璐璐,尹云鹤,吴绍洪.蒸散发测定方法研究进展[J].地理科学进展,2012,31(9):1186-1195.
- [3] 刘晓英,李玉中,王庆锁.几种基于温度的参考作物蒸散量计算方法的评价[J].农业工程学报,2006,22(6):12-18.
- [4] 刘波.近四十年中国蒸发皿蒸发变化与气候变化的关系及潜在蒸散的估算[D].南京:南京信息工程大学,2005.
- [5] 赵璐,梁川,崔宁博,等.川中丘陵区参考作物蒸发蒸腾量近 60 年变化成因研究[J].水利学报,2013,44(2):183-190.
- [6] 尚虎君.作物需水量计算模型组件及灌区需水过程研究[D].咸阳:西北农林科技大学,2012.
- [7] 陈超,庞艳梅,徐富贤,等.西南区域单季稻生长季干湿演变及影响因素分析[J].中国生态农业学报(中英文),2020,28(4):492-502.
- [8] 黄娟,申双和,李新建,等.1961—2010 年中国参考作物蒸散量变化趋势与时空格局[J].水土保持研究,2016,23(5):240-244.
- [9] 王鹏涛,延军平,蒋冲,等.华北平原参考作物蒸散量时空变化及其影响因素分析[J].生态学报,2014,34(19):5589-5599.
- [10] 白爱娟,假拉,徐维新.基于潜在蒸散量对青海湖流域干旱气候以及影响因素的分析[J].干旱区地理,2011,34(6):79-87.
- [11] 李雪.辽河流域(辽宁段)参考作物腾发量估算与预测模型研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2013.
- [12] 吴佳蔚.近 50 年辽河流域潜在蒸散时空变化趋势研究[J].黑龙江水利科技,2018,46(10):18-22.
- [13] 李修仓.中国典型流域实际蒸散发的时空变异研究[D].南京:南京信息工程大学,2013.
- [14] 吴霞,王培娟,霍治国,等.1961—2015 年中国潜在蒸散时空变化特征与成因[J].资源科学,2017,39(5):964-977.
- [15] 钟巧,焦黎,李稚,等.博斯腾湖流域潜在蒸散发时空演变及归因分析[J].干旱区地理,2019,42(1):103-112.
- [16] 张淑杰,张玉书,隋东,等.东北地区参考蒸散量的变化特征及其成因分析[J].自然资源学报,2010,25(10):1750-1761.
- [17] 张伟科,杨艳昭,封志明,等.西辽河流域潜在蒸散量时空格局[J].地理科学进展,2010,29(9):1115-1120.
- [18] 王炳亮,李国胜.1961—2010 年辽河三角洲参考蒸散发变化特征及主导因子分析[J].地理科学,2014,34(10):1233-1238.
- [19] 李迎,吕谋超,张海文,等.参考作物蒸散量对气象要素的敏感性分析[J].灌溉排水学报,2017,36(7):94-99.
- [20] 周体鹏.基于克里金插值法的昆明市  $PM_{2.5}$  预测[D].昆明:云南大学,2016.
- [21] 孟庆香,刘国彬,杨勤科.基于 GIS 的黄土高原气象要素空间插值方法[J].水土保持研究,2010,17(1):10-14.
- [22] 程新意,李绍疆.通径分析的数学模型[J].工程数学,1990,7(4):99-105.
- [23] 高歌,陈德亮,任国玉,等.1956—2000 年中国潜在蒸散量变化趋势[J].地理研究,2006,25(3):378-387.
- [24] 杨艳昭,张伟科,封志明,等.土地利用变化的水土资源平衡效应研究:以西辽河流域为例[J].自然资源学报,2013,28(3):437-449.
- [25] 尹云鹤,吴绍洪,戴尔阜.1971—2008 年我国潜在蒸散时空演变的归因[J].科学通报,2010,61(22):2226-2234.
- [26] 钱多,查天山,吴斌,等.毛乌素沙地参考作物蒸散量变化特征与成因分析[J].生态学报,2017,37(6):1966-1974.
- [27] 段娅楠,季璇,郭若愚,等.雅鲁藏布江流域潜在蒸散发的气候敏感性及其变化的主导因子分析[J].水土保持研究,2020,27(2):261-268.
- [28] 吕明权,张磊,吴胜军.嘉陵江流域参考蒸散的年际变化趋势及成因分析[J].水土保持研究,2019,26(3):77-85.