

华北平原参考作物蒸散量变化特征及气候影响因素

刘 园, 王 颖, 杨晓光*

(中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

摘要: 参考作物蒸散量是估算作物需水量的关键因子, 对指导农田灌溉是有十分重要的现实意义。在气候变化的背景下, 利用 Penman-Monteith 方法, 计算华北平原典型站点 1961—2007 年逐日参考作物蒸散量, 并从能量平衡和动力学角度对其分解, 分析年际变化和季节变化特征; 结合数理统计方法, 研究影响参考作物蒸散量及其构成项变化的主次气候因子, 为该区农田水分管理提供更有利的科学指导。研究结果表明: 在华北平原全区温度显著上升、日照时数、相对湿度、平均风速呈显著下降的背景下, 绝大部分站点参考作物蒸散量及构成项呈显著下降趋势。夏季的参考作物蒸散量和辐射项值相对最高, 冬季值最低; 春季的空气动力学项值相对比例最高。辐射项与空气动力学项年际间呈负相关关系, 春夏两季之间呈不显著正相关趋势, 秋冬两季呈不显著负相关趋势。辐射项的变化主要受日照时数、风速及温度的影响, 其中风速的贡献是负效应; 空气动力学项的变化主要受风速、相对湿度及平均温度的影响, 相对湿度的贡献是负效应。参考作物蒸散量的变化主要受日照时数、相对湿度、温度日较差和风速的综合影响。此外, 降水与其呈显著负相关关系, 下降幅度略高于参考作物蒸散量的变化幅度。

关键词: 华北平原; 参考作物蒸散量; Penman-Monteith 公式; 影响因子

Trends in reference crop evapotranspiration and possible climatic factors in the North China Plain

LIU Yuan, WANG Ying, YANG Xiaoguang*

College of Resources and Environmental Science, China Agricultural University, Beijing 100193, China

Abstract: Reference crop evapotranspiration (ET_0) is the key factor to estimate crop water requirement and guide farming irrigation scheduling. Under the climate change background, daily reference crop evapotranspiration at typical stations across the North China Plain (NCP) during the period from 1961 to 2007 were calculated by the Penman-Monteith approach. The seasonal and annual characteristics of ET_0 were analyzed from the view of energy balance and dynamics. Using the mathematical statistics, primary and secondary climatic impact factors were studied for reference crop evapotranspiration and its constituents (ET_{rad} and ET_{aero}) respectively, for guiding farming water management more effective in the NCP. The results showed that the annual reference crop evapotranspiration and its constituents (ET_{rad} and ET_{aero}) were significantly declined, while annual mean temperature was significantly increased, annual mean sunshine hour, related humidity and wind speed were significantly decreased. The highest reference crop evapotranspiration and ET_{rad} were in summer, and lowest in winter, while the spring ET_{aero} value was highest across the NCP. The relationship between annual ET_{rad} and ET_{aero} was slightly negative, while was positive in spring and summer as well as negative in autumn and winter. The main climatic factors for the change of ET_{rad} were sunshine hour, wind speed and mean temperature, and the impact of wind speed was negative to ET_{rad} . However, the main climatic factors for the change of ET_{aero} were wind speed, related humidity and mean temperature, and the impact of related humidity was negative. Therefore, the change of reference crop evapotranspiration was synthetically impacted by sunshine hour, relative humidity, difference of maximum and minimum temperature and wind speed. In addition, the correlation between rainfall and reference crop evapotranspiration was

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)课题资助项目(2009CB118608); 国家科技基础性工作专项资助项目(2007FY120100); 国家公益性行业(农业)科研专项资助项目(200803028); 国家农业部 948 资助项目(2006-G52A-Q08)

收稿日期: 2009-08-25; 修订日期: 2009-10-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yangxg@cau.edu.cn

significantly negative, while the decline rate of rainfall was a little more than that of reference crop evapotranspiration.

Key Words: the North China Plain; reference crop evapotranspiration; Penman-Monteith formula; impact factor

参考作物蒸散量既是热量平衡的重要组成分量,也是水分平衡的重要组成分量,历来是多个领域研究的热点问题之一。在农业生产中,参考作物蒸散量不仅是计算作物需水量的重要依据,也是指导合理灌溉的重要参数之一^[1-3]。目前,计算参考作物蒸散量多采用 FAO 于 1998 年推荐的 Penman-Monteith 方法,该方法计算准确度较高^[4-6],因其仅受当地气候条件、海拔的影响,应用范围较为广泛^[7-12]。近几十年来,在全球气候变化的大背景下^[13],不仅实际观测的蒸散量、蒸发量有较大变化,而且基于气候资料计算的参考作物蒸散量也不断变化。Hulme 等^[14]认为温度升高会促进潜在蒸发增加,但近 50 年来全球实际蒸发量除个别地区升高外大部分地区呈下降趋势,且不同地区的变化原因不同^[15]。北半球云量加厚,相对湿度增加及辐射减少是造成美国、前苏联和印度等地区潜在蒸发下降的主要原因^[16-17];南半球云量和气溶胶浓度的增加同样造成澳大利亚和新西兰地区潜在蒸发下降^[18]。相反,Cohen 等^[19]发现以色列地区过去 30 多年实际蒸发量升高且夏季变化不显著,主要受水汽压差和风速增加的影响。同样,我国参考作物蒸散量在过去几十年中的变化趋势非常明显^[20-24]。各区域参考作物蒸散量呈下降趋势^[25];而黄土高原地区整体变化趋势不明显^[26];北京、河北、山东和安徽等地的参考作物蒸散量不同程度的下降^[27-28],这些变化与当地日照时数,风速及相对湿度等气候要素的变化密不可分。不同区域的气候要素特征不同,在计算参考作物蒸散量的过程中所起的贡献不同,各地区参考作物蒸散量的变化特征也不完全相同,但任何变化都将对农田水分平衡和农业生产产生影响。因此,综合评价各气候要素在不同时期内对参考作物蒸散量的影响和作用,是准确估算作物需水量的前提。

华北平原地处东亚季风带,不仅是我国气候敏感区之一,也是我国重要的粮食主产区之一^[2]。该区域的水资源亏缺制约了农业发展,也影响农业生态环境^[29],鉴于此水资源供需状况及变化特征备受关注^[30]。参考作物蒸散量是区域作物需水量的基础参数,准确的估算和科学客观的分析,是衡量作物需水量的关键,是制定灌溉决策和水资源优化配置的重要依据和基础,为农业合理用水和科学灌溉提供可靠支撑。本文采用 FAO 推荐的 Penman-Monteith 方法,利用华北平原典型站点 1961—2007 年逐日气象资料计算参考作物蒸散量;并从能量平衡和动力学的角度分解参考作物蒸散量,分析其年际变化和季节变化特征,研究不同时间尺度上参考作物蒸散量各构成项之间的相关关系;基于气候变化的背景,明确影响参考作物蒸散量及其构成项——辐射项和空气动力学项变化的主要气象因子和次要气象因子。

1 研究地区与研究方法

1.1 资料来源

华北平原地处我国中纬度地带,属温带大陆性季风区。光热资源丰富,雨热同季,降水量的年际变化大且多集中于 7—8 月份。主要种植制度为一年两熟。

本文根据区域内气候分布特征,并参考行政区划,在全区选取 9 个气象站点进行分析,其中,河北省 2 个(黄骅和石家庄),河南省 4 个(卢氏、南阳、新乡和信阳),山东省 3 个(菏泽、淄博、莱阳)。典型站点选择的依据是:(1)所选站点均匀分布于华北平原,温度和降水量等气象要素从南到北递减,基本能代表各气候要素的倾向率变化区域;(2)所选站点为国家气象局的基准站点,从建站至今数据记录较完整,数据质量较高;(3)所选站点主体种植制度是冬小麦和夏玉米一年两熟。气象资料来自于中国气象局,为 1961—2007 年 47a 逐日气象资料,包括:平均温度,最高气温,最低气温,降水量,日照时数,平均相对湿度及平均风速。所选站点分布见图 1。

1.2 研究方法

1.2.1 参考作物蒸散量计算方法

参考作物蒸散量(ET_0)为假设作物高度为 0.12m,叶面阻力为常数 70 s m^{-1} ,地面反射率为 0.23 条件下

的蒸散量,即高度一致,生长旺盛且完全覆盖的开阔地表,土壤水充分满足情况下的蒸散量。本文采用 FAO 于 1998 年推荐的 Penman-Monteith 公式计算参考作物蒸散量,从能量平衡和动力学两方面分析并将其分解为辐射项(ET_{rad})和空气动力学项(ET_{aero}),具体公式如下^[31]:

$$ET_0 = ET_{rad} + ET_{aero} \quad (1)$$

$$ET_{rad} = \frac{0.408\Delta(R_n - G)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (2)$$

$$ET_{aero} = \frac{\gamma \frac{900}{t + 273} U_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (3)$$

式中, ET_0 为参考作物蒸散量(mm d^{-1}), ET_{rad} 为辐射项(mm d^{-1}), ET_{aero} 为空气动力学项(mm d^{-1}), Δ 为水汽压对温度的斜率($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), R_n 为到达作物表面的净辐射($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), G 为土壤热通量密度($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)(本文忽略不计), γ 为干湿球常数, t 为 2m 高处空气温度($^\circ\text{C}$), U_2 为 2m 高处风速(m s^{-1}), e_d 为饱和水汽压(kPa), e_a 为实际水汽压(kPa)。

1.2.2 统计方法

本文利用 Microsoft Excel 和 SPSS 统计软件,采用 Pearson 相关分析,偏相关分析及线性回归等方法进行统计分析,并进行显著性检验。

2 结果与分析

2.1 气候要素变化特征

1961—2007 年典型站点各气候要素的气候倾向率如表 1 所示,由此可以看出:过去 47a 中,各站点气温呈上升趋势,变化范围在 $0.05\text{—}0.44^\circ\text{C} (10\text{a})^{-1}$ 之间,通过 $\alpha = 0.01$ 的显著性检验。全区最高温度、最低温度的气候倾向率均为正值。最低温度升幅的范围在 $0.09\text{—}0.68^\circ\text{C} (10\text{a})^{-1}$,通过 $\alpha = 0.01$ 显著性检验,高于最高温度的变幅 2 倍多,因此,最高温度与最低温度之差——气温日较差的气候倾向率为负值,且同样通过 $\alpha = 0.01$ 显著性检验。地处华北西部卢氏站海拔较高(568.8m),平均温度和最低温度呈微弱上升趋势。左洪超等^[32]研究也发现,华北地区在过去 50a 间是增温最快、范围最大的区域之一,且增温幅度高于全球平均增温水平。

气候变化与大气环流密切相关,是影响降水的最直接因素^[32]。由表 1 可知,华北平原全区年降水量呈下降趋势,仅黄骅站通过 $\alpha = 0.05$ 的显著性检验。过去几十年中,全国年降水量变化不明显,但中纬度地区明显减少,其中,华北地区无论在范围和强度上都强于其他地区。这也可能是北方干旱化加剧的另一个原因^[32-33]。此外,该区域年平均日照时数、相对湿度和风速均呈下降趋势,且通过 $\alpha = 0.05$ 的显著性检验。

2.2 参考作物蒸散量及其构成项变化特征

2.2.1 参考作物蒸散量及其构成项年际变化特征

如图 2 所示,1961—2007 年,华北平原参考作物蒸散量呈下降趋势。华北中部和西南部的 6 个站点参考作物蒸散呈下降趋势,降幅 $9 \text{ mm} (10\text{a})^{-1}$ (黄骅)— $32 \text{ mm} (10\text{a})^{-1}$ (菏泽),其中,石家庄、南阳、菏泽 3 站通过 $\alpha = 0.01$ 的显著性检验,卢氏和新乡两站通过 $\alpha = 0.05$ 的显著性检验。华北东部(莱阳和淄博)参考作物蒸散量呈上升趋势,变化幅度为每 10a 增加 12mm,莱阳站通过 $\alpha = 0.01$ 的显著性检验。这一结果与李春强等、Zuo 等以及张方敏和申双和^[27, 34-35]的研究结果相似。

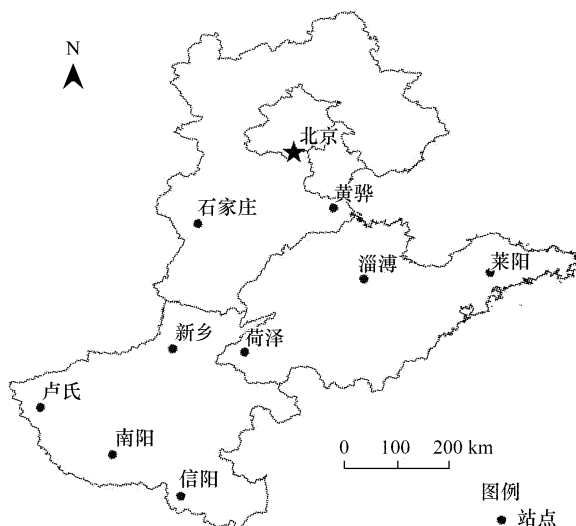


图 1 华北平原典型气象站分布

Fig. 1 Locations of typical meteorological stations across the North China Plain

注:菏泽站和淄博站自 1995 年业务分别由定陶站(纬度 $35^\circ 06'$, 经度 $115^\circ 33'$, 海拔 50.5m)和淄川站(纬度 $36^\circ 38'$, 经度 $117^\circ 57'$, 海拔 95m)替代,1995—2007 年气象数据为后者提供

表1 华北平原典型站点1961—2007年各气象要素的气候倾向率

Table 1 Climatic tendency rate of each climatic variable at each station across the NCP, 1961—2007

省份 Province	站点 Station	气候倾向率 Climatic tendency rate							
		平均温度 Average temperature	最高温度 Maximum temperature	最低温度 Minimum temperature	日较差 Difference of temperature	降水量 Precipitation	日照时数 Sunshine hours	相对湿度 Related humidity	风速 Wind speed
		/(℃ (10a) ⁻¹)				/(mm(10a) ⁻¹)	/(h(10a) ⁻¹)	/(%(10a) ⁻¹)	/(m s ⁻¹ (10a) ⁻¹)
河北	黄骅	0.36 **	0.26 **	0.52 **	-0.26 **	-44.2 *	-0.37 **	-0.05	-0.14 **
Hebei	石家庄	0.39 **	0.16 *	0.66 **	-0.50 **	-18.5	-0.54 **	-0.08 *	-0.04
河南	卢氏	0.05	0.23 **	0.09	0.15	-0.7	-0.04	0.04	-0.21 **
Henan	南阳	0.16 **	0.03	0.32 **	-0.29 **	-1.4	-0.32 **	0.02	-0.18 **
	新乡	0.22 **	0.07	0.35 **	-0.28 **	-18.9	-0.26 **	-0.04	-0.14 **
	信阳	0.18 **	0.09	0.22 **	-0.1	0	-0.30 **	-0.09 **	0.15 **
山东	菏泽	0.15 **	0.06	0.21 **	-0.15 **	-0.1	-0.33 **	0.11 **	-0.13 *
Shandong	莱阳	0.37 **	0.26 **	0.46 **	-0.19 **	-32.3	-0.16 **	-0.11 **	0.03
	淄博	0.44 **	0.23 **	0.68 **	-0.45 **	8.1	-0.23 **	-0.12 **	-0.03

* 表示通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验; ** 表示通过 $\alpha=0.01$ 的显著性检验

辐射项和空气动力学项作为参考作物蒸散量的构成项,在不同地区所占比例并不相同^[7]。由图2可知,参考作物蒸散量中辐射项所占比例均大于空气动力学项所占的比例,范围在52%—80%之间。与参考作物蒸散量年际变化特征类似,辐射项和空气动力学项也存在明显的年际波动。所有站点辐射项均呈下降趋势(通过

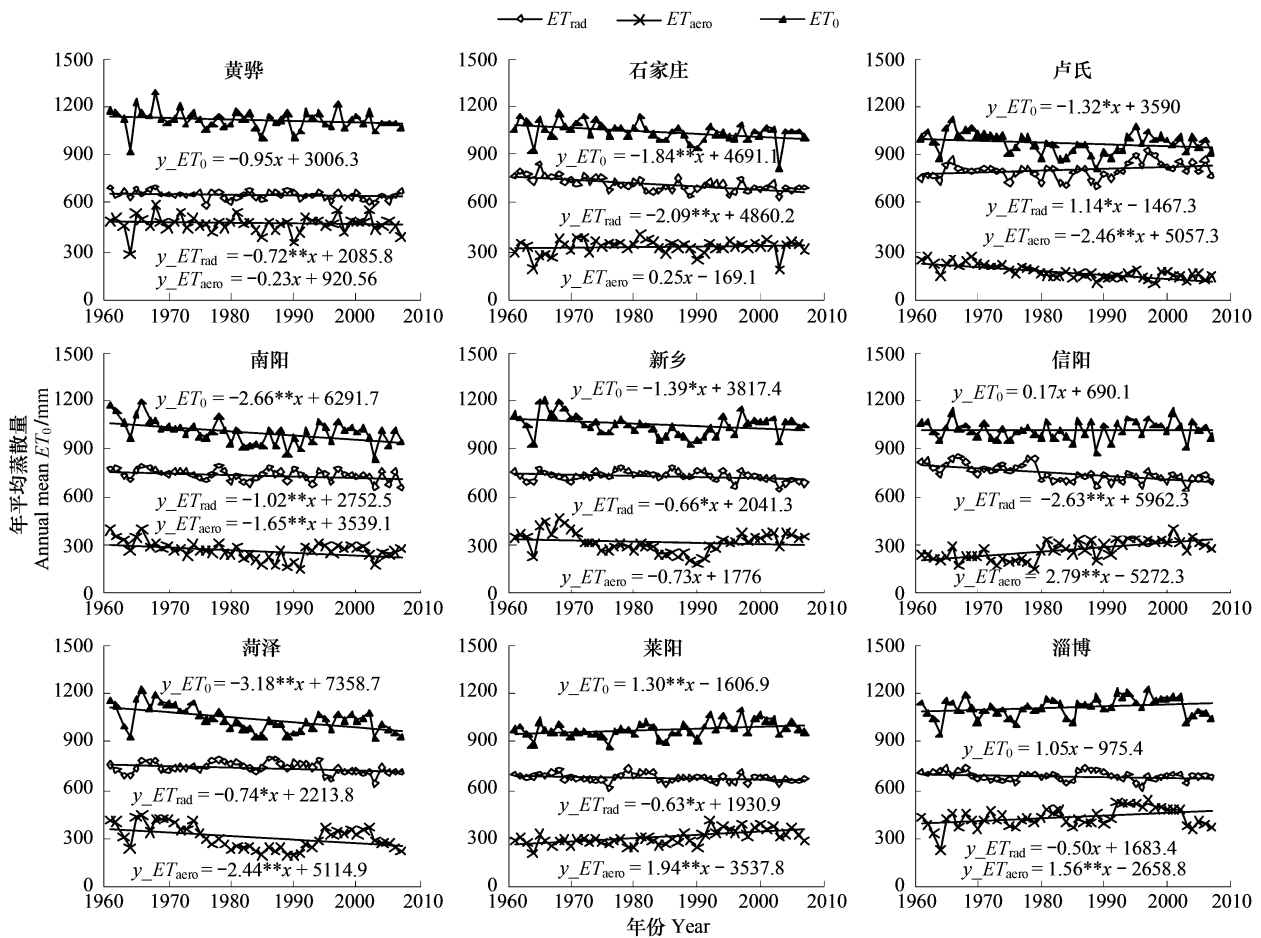


图2 华北平原典型站点参考作物蒸散量及其构成项年际变化

Fig.2 Trends in annual mean ET_0 , ET_{rad} and ET_{aero} at each typical meteorological station across the NCP

* 表示通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验; ** 表示通过 $\alpha=0.01$ 的显著性检验

$\alpha=0.05$ 或 $\alpha=0.01$ 的显著性检验), 降幅为 5—26 mm(10a)⁻¹, 小于参考作物蒸散量的下降速率。而西部的卢氏辐射项呈上升趋势($\alpha=0.05$)。动力学项的变化趋势同参考作物蒸散量年值变化较为一致, 只有中部(石家庄)呈上升趋势, 但没有通过显著性检验。

2.2.2 参考作物蒸散量及其构成项季节变化特征

华北平原地处温带, 依其气候特点, 3—5 月份为春季, 6—8 月份为夏季, 9—11 月份为秋季, 12—翌年 2 月份为冬季^[36]。参考作物蒸散量及其构成项季节变化特征见表 2。由表可见, 夏季温度、太阳辐射和相对湿度等气象要素变化幅度相对较大, 参考作物蒸散量的变化亦较为强烈^[25]。全区夏季参考作物蒸散量占全年比例最高, 其次是春季和秋季, 冬季相对最低。除东部的淄博和莱阳两站夏季参考作物蒸散量微弱下降, 其余地区显著下降, 降幅为四季中最大。春、秋和冬 3 季, 东部的莱阳和淄博以及西南的信阳呈上升趋势, 春秋两季上升显著, 其余地区呈微弱下降趋势。

表 2 华北平原典型站点参考作物蒸散量及其构成项的四季气候倾向率

Table 2 Seasonal climatic tendency rate of ET_0 , ET_{rad} and ET_{aero} at each study station across the NCP

省份 Province	站点 Station	季节 Season	气候倾向率 Climatic tendency rate / (mm(10a) ⁻¹)		
			辐射项 ET_{rad}	空气动力学项 ET_{aero}	参考作物蒸散量 ET_0
河北 Hebei	黄骅	春	0.9	-3.3	-2.4
		夏	-7.8 **	0.1	-7.7 *
		秋	-1.3 *	2.3	1.0
		冬	1.0 **	-1.5	-0.5
	石家庄	春	-4.0 **	0.1	-3.9
		夏	-14.8 **	3.6 *	-11.1 **
		秋	-2.8 **	1.8	-1.0
		冬	0.6 *	-3.0 *	-2.3
河南 Henan	卢氏	春	6.8 **	-3.6 *	3.2
		夏	-1.6	-13.1 **	-14.6 **
		秋	4.3 **	-4.7 **	-0.5
		冬	1.9 **	-3.3 **	-1.3
	南阳	春	1.7	-0.7	1.0
		夏	-13.4 **	-8.9 **	-22.3 **
		秋	0.9	-3.1	-2.2
		冬	0.5	-3.7 **	-3.2 *
	新乡	春	1.3	0.1	1.4
		夏	-8.5 **	-4.8 *	-13.3 **
		秋	-0.2	0.6	0.5
		冬	0.8	-3.3 *	-2.5
	信阳	春	-2.9 *	12.5 **	9.6 **
		夏	-18.6 **	3.0	-15.7 **
		秋	-3.1 *	8.2 **	5.0 *
		冬	-1.7 **	4.3 **	2.7
山东 Shandong	菏泽	春	1.7	-11.3 **	-9.7 **
		夏	-9.6 **	-9.0 **	-18.6 **
		秋	-0.1	-1.6	-1.8
		冬	0.6	-2.5	-1.8
	莱阳	春	0.4	6.4 **	6.8 **
		夏	-6.1 **	4.7 **	-1.4
		秋	-1.2	6.3 **	5.1 **
		冬	0.6 *	1.9 **	2.5 **
	淄博	春	1.6	5.2	6.8 *
		夏	-6.7 **	3.3	-3.5
		秋	-0.9	5.5 **	4.5 *
		冬	1.0 **	1.7	2.7

* 表示通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验; ** 表示通过 $\alpha=0.01$ 的显著性检验

由于辐射项占参考作物蒸散量一半以上,因此,辐射项的季节变化与参考作物蒸散量的变化类似。夏季辐射项所占比例仍为4季中最高,冬季最低。与参考作物蒸散量不同的是,夏季,除西部的卢氏外,其余站点均显著下降($\alpha = 0.01$),降幅最大的是西南的信阳,每10a下降18.6 mm。而空气动力学项4季变化特征不同于上述两项。最明显的是春季空气动力学项比例相对最高,其次为夏季和秋季,最低的是冬季。冬季该项变化趋势尤为突出,年参考作物蒸散量呈上升趋势的是信阳及东部的莱阳和淄博,冬季动力学项呈非常显著的上升趋势($\alpha = 0.01$)。其余各站冬季动力学项呈下降趋势,西部卢氏通过 $\alpha = 0.01$ 的显著性检验。

2.2.3 辐射项和空气动力学项的相关关系

辐射项和空气动力学项对参考作物蒸散量的影响是相互关联的,存在一定的相关关系,两项均受温度、风速和气压等气候要素变化的影响。本文利用 Pearson 相关分析法分析辐射项和空气动力学项之间的相关关系,发现两者之间存在着一定的相关关系,但这种关系并不显著:辐射项和空气动力学项年值之间呈负相关关系,只有南阳和黄骅两站呈正相关,但相关关系不显著。春、夏两季,辐射项和空气动力学项之间呈微弱正相关关系;秋季和冬季有微弱的负相关关系。

表3 典型站点辐射项和空气动力学项相关关系

Table 3 Correlations between ETrad and ETaero at annual and seasonal range at study stations

省份 Province	站点 Station	年值 Annual	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter
河北 Hebei	黄骅	0.17	0.31	0.26	0.05	-0.15
	石家庄	-0.02	0.38	-0.11	-0.10	-0.21
河南 Henan	卢氏	-0.06	0.20	0.30	-0.09	0.06
	南阳	0.41	0.53 *	0.55 *	0.23	0.27
	新乡	-0.18	0.25	0.10	-0.06	-0.12
	信阳	-0.48 *	0.08	0.03	-0.17	0.04
	菏泽	-0.12	-0.06	0.38	0.02	-0.15
山东 Shandong	莱阳	-0.11	0.18	0.11	-0.23	0.05
	淄博	-0.20	0.29	0.04	-0.05	0.02

* 表示通过 $\alpha = 0.05$ 的显著性检验; * * 表示通过 $\alpha = 0.01$ 的显著性检验

2.3 参考作物蒸散量变化的主要影响因素

不同区域参考作物蒸散量及其构成项变化的原因是不同的。为了深入分析华北平原典型站点参考作物蒸散量变化的主要气候原因,本文利用线性逐步回归的统计方法着重分析参考作物蒸散量及其构成项与同期的气候要素之间的关系,并将通过 $\alpha = 0.05$ 显著性检验的气候因子引入回归方程。

2.3.1 辐射项和动力项变化的主要影响因素

参考作物蒸散量的两个构成项与同期各气象要素间的统计分析结果如表4所示。对于辐射项来讲,日照时数、平均风速和日平均温度的变化对其影响最为突出,其中风速的贡献是负的。线性回归方程的决定系数(R^2)均达到0.80以上;日照时数因子的变化可以解释50%以上的辐射项变化。辐射项的能量主要来自于太阳辐射,表现为参考作物蒸散量尤其是辐射项与日照时数呈正相关关系,即日照时数越高辐射越大,参考作物蒸散量的辐射项越大。过去47a中,华北平原日照时数显著下降,必然导致参考作物蒸散量的辐射项呈下降趋势。

空气动力学项主要与平均风速、日平均温度和最高、最低温度、相对湿度、水汽压差等气象因子有关,从表4可知,通过 $\alpha = 0.05$ 显著性的检验引入回归方程的仅有风速、相对湿度和日平均温度,回归方程的决定系数(R^2)达0.90以上;单一风速或相对湿度的气象因子可解释50%以上的动力学项变化。另外,相对湿度对动力学项的贡献为负的。过去47a中,华北平原相对湿度减少,风速降低,温度升高的综合结果导致参考作物蒸散量动力学项的变化趋势。

表 4 典型站点参考作物蒸散量构成项与各气候要素的相关关系排序

Table 4 Sequential correlation between ET_{rad} and ET_{aero} vs climatic variables at the study stations						
辐射项 ET_{rad}						
省份 Province	站点 Station	第 1 项 First term	第 2 项 Second term	第 3 项 Third term	第 4 项 Fourth term	R^2
河北 Hebei	黄骅	日照时数	最低温度	风速 *	—	0.78 (0.51)
	石家庄	日照时数	风速 *	最低温度	—	0.88 (0.75)
河南 Henan	卢氏	日照时数	风速 *	最低温度	—	0.93 (0.75)
	南阳	日照时数	风速 *	最低温度	—	0.85 (0.69)
	新乡	日照时数	风速 *	降水 *	日较差	0.80 (0.44)
	信阳	日照时数	风速 *	平均温度	平均大气压	0.94 (0.75)
山东 Shandong	菏泽	日照时数	风速 *	最低温度	—	0.87 (0.35)
	莱阳	日照时数	风速 *	最高温度	—	0.84 (0.58)
	淄博	日照时数	风速 *	最高温度	—	0.84 (0.57)
空气动力学项 ET_{aero}						
省份 Province	站点 Station	第 1 项 First term	第 2 项 Second term	第 3 项 Third term	第 4 项 Fourth term	R^2
河北 Hebei	黄骅	相对湿度 *	风速	最高温度	—	0.90 (0.58)
	石家庄	风速	相对湿度 *	平均温度	—	0.93 (0.49)
河南 Henan	卢氏	风速	相对湿度 *	平均温度	最低温度	0.97 (0.80)
	南阳	风速	相对湿度 *	平均温度	降水	0.97 (0.61)
	新乡	风速	相对湿度 *	平均温度	—	0.98 (0.71)
	信阳	风速	相对湿度 *	平均温度	—	0.97 (0.66)
山东 Shandong	菏泽	风速	相对湿度 *	平均温度	—	0.98 (0.79)
	莱阳	相对湿度 *	风速	平均温度	—	0.96 (0.72)
	淄博	风速	相对湿度 *	平均温度	—	0.96 (0.46)

表中给出的相关因子按照贡献率递减顺序排列, * 在过去 47a 间该因子对主因子的贡献是负的;括号内的 R^2 是由第一项单一因子建立对主因子的线性回归方程所得到的相关系数

2.3.2 参考作物蒸散量变化的主要影响因素

偏相关系数法可排除要素间的相互影响,选择与参考作物蒸散量变化关系最为密切的气候要素,表 5 为华北平原参考作物蒸散量与各气候要素的偏相关系数。可知,参考作物蒸散量同日照时数、日较差、风速呈显著正相关,与相对湿度和降水呈密切负相关,降水虽没有直接参与计算过程,但与参考作物蒸散量关系密不可

表 5 典型站点参考作物蒸散量与各气象要素的偏相关系数

Table 5 Partial correlation coefficients between ET_0 and climatic variables in the study stations							
参考作物蒸散量 ET_0							
省份 Province	站点 Station	降水 Rainfall	日平均温度 Mean temperature	日较差 Defference of temperature	日照时数 Sunshine hour	相对湿度 Related humidity	风速 Wind speed
河北 Hebei	黄骅	-0.48 *	0.15	0.72 **	0.61 **	-0.65 **	0.47 *
	石家庄	-0.38	-0.06	0.69 **	0.74 **	-0.43	0.47 *
河南 Henan	卢氏	-0.53 *	0.53 *	0.60 **	0.88 **	-0.48 *	0.43
	南阳	-0.39	0.42	0.76 **	0.87 **	-0.68 **	0.70 **
	新乡	-0.32	0.33	0.62 **	0.67 **	-0.67 **	0.70 **
	信阳	-0.58 **	0.55 *	0.63 **	0.54 *	-0.72 **	0.20
山东 Shandong	菏泽	-0.30	0.10	0.70 **	0.85 **	-0.73 **	0.67 **
	莱阳	-0.43	0.51 *	0.27	0.43	-0.79 **	0.36
	淄博	-0.49 *	0.43	0.05	0.41	-0.63 **	0.51 *

* 表示通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验; * * 表示通过 $\alpha=0.01$ 的显著性检验

分。原因在于参考作物蒸散量与降水天气需要的气象条件相反,云层越厚,日照时数越短,空气湿度变大,空气流动越慢,越有利于降水的形成,但不利于蒸散。结合表 1,华北平原西南部地区(信阳)风速显著增加和东部地区(莱阳和淄博)风速微弱增加,与其参考作物蒸散量的年际变化呈上升趋势有着密不可分的关系。总体来讲,基于 Penman-Monteith 公式计算得到的参考作物蒸散量,主要受各种气候因子的综合作用。华北平原参考作物蒸散量受日照时数、相对湿度、风速和温度日较差的影响最大。

3 结论

本文在华北平原全区温度呈显著上升,日照时数,相对湿度和风速均显著下降,且降水微弱下降的大背景下,选择典型站点分析了 1961—2007 年典型站点参考作物蒸散量及其构成项的变化特征和气候影响因素,得到如下结论:

华北平原参考作物蒸散量及其构成项呈明显的年际变化和季节变化特征。近 47a 参考作物蒸散量呈下降趋势,下降范围在 $10\text{--}32\text{mm}(10\text{a})^{-1}$ 之间,且下降趋势通过显著性检验。西南部及东部(信阳、莱阳和淄博)个别站点呈上升趋势。夏季参考作物蒸散量和夏季辐射项占其全年比例相对最高,其次是春季和秋季,冬季值最低,且各站夏季下降趋势尤为显著。春季空气动力学项占其全年比例最高,冬季相对较低。辐射项与动力学项的年值之间有一定的负相关关系;春、夏两季,辐射项和动力学项之间具有正相关关系;秋、冬两季有负相关关系。但不管是年值还是季节值的相关关系并不显著。

参考作物蒸散量的辐射项主要受日照时数,风速及温度影响,相关系数达 0.80 以上,其中风速贡献是负值,即过去 47a 中,风速减小能在一定程度上促进辐射项增加;空气动力学项主要受风速,相对湿度及平均温度影响,相关系数达 0.90 以上,其中相对湿度贡献是负值,即过去 47a 中相对湿度减小在一定程度上加速了空气动力学项的减小。该区参考作物蒸散量年值主要受日照时数,相对湿度,日较差,风速的综合作用影响,与降水呈负相关,且下降幅度略低于降水。

4 讨论

科学估算作物需水量,对于减少作物生育期的无效水分消耗,提高水分有效利用效率,指导节水灌溉具有十分重要的现实意义。作物需水量是提高农田水分利用效率以及制定农田灌溉制度必不可少的关键参数,在缺少实际资料的地区,计算参考作物蒸散量显得尤为重要。受各气候要素综合影响,华北平原参考作物蒸散量的降低,将会影响当地主要作物冬小麦和夏玉米的年需水量的降低。而且该区降水量年际分布不均,主要集中在夏玉米生长季,而冬小麦的生长则依靠灌溉才能达到高产稳定。因此,春季和秋季参考作物蒸散量的降低,在作物系数不变的前提下,冬小麦生长季内的需水量亦随之降低,在一定程度上稍许缓解了华北平原的水资源不足的现状;而夏季参考作物蒸散量的降低尤为显著,夏玉米生育期内需水量下降幅度要高于冬小麦。冬小麦和夏玉米生育期内需水量虽然降低,能在一定程度上能缓解农业用水压力,但还需要考虑当地降水量,土壤条件等因素,明确冬小麦和夏玉米体系的周年需水量,根据不同作物生长阶段对水分的敏感程度进行适量、有效的灌溉,制定优化的灌溉制度。

References:

- [1] Yang J P, Ding Y J, Chen R S, Liu L Y. Variations of precipitation and evaporation in North China in recent 40 years. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2002, 57(6): 655-661.
- [2] Liu X Y, Li Y Z, Hao W P. Trend and causes of water requirement of main crops in North China in recent 50 years. *Transaction of the CSAE*, 2005, 21(10): 155-159.
- [3] Ma X Q, Zhang H. Spatial and temporal characteristics of dry/wet land surface in Anhui province with their impacts on agriculture in recent 30 years. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2007, 18(6): 783-790.
- [4] Allen R G, Jensen M E, Wright J L, Burman R D. Operational estimates of reference evapotranspiration. *Agronomy Journal*, 1989, 81: 650-662.
- [5] Jensen M E, Burman R D, Allen R G. *Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements*. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice, No 70. New York: American Society of Civil Engineers, 1990: 332.
- [6] Peng S Z, Xu J Z. Comparison of reference crop evapotranspiration computing methods. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2004, 23(6): 5-9.

- [7] Gong Y S. Comparison of the reference evapotranspiration estimated by the Penman-Monteith and FAO-PPP-17 Penman Methods. *Acta Agriculture Universitatis Pekinensis*, 1995, 21(1): 68-75.
- [8] Mao F, Zhang G Z, Xu X D. Several methods of calculating the reference evapotranspiration and comparison of their results. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 2000, 11(S1): 29-35.
- [9] Zhang J S, Meng P, Yin C J. Review on methods of estimating evapotranspiration of Plants. *World Forestry Research*, 2001, 14(2): 23-28.
- [10] Liu X Y, Li Y Z, Wang Q S. Evaluation on several temperature-based methods for estimating reference crop evapotranspiration. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(6): 12-18.
- [11] Fan J, Shao M A, Wang Q J. Comparison of many equations for calculating reference evapotranspiration in the Loess Plateau of China. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(3): 98-102.
- [12] Liu N, Xia W, Wu X W, Ding J, Xu J B, Fan X L. Comparative study on calculation methods of reference crop evapotranspiration. *Journal of Hebei University of Science and Technology*, 2009, 30(1): 17-24.
- [13] Zhai P, Sun A, Ren F, Liu X, Gao B, Zhang Q. Changes of climate extremes in China. *Climatic Change*, 1999, 42: 203-218.
- [14] Hulme M, Zhao Z C, Jiang T. Recent and future climate change in East Asia. *International Journal of Climatology*, 1994, 14: 637-658.
- [15] Roderick M L, Farquhar G D. The Cause of Decreased Pan Evaporation over the Past 50 Years. *Science*, 2002, 298: 1410-1411.
- [16] Peterson T C, Golubev V S, Groisman P Y. Evaporation Losing its strength. *Nature*, 1995, 377: 687-688.
- [17] Chattopadhyay N, Hulme M. Evaporation and potential evapotranspiration in India under conditions of recent and future climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1997, 87: 55-73.
- [18] Roderick M L, Farquhar G D. Changes in Australian pan evaporation from 1970 to 2002. *International Journal of Climatology*, 2004, 24: 1077-1090.
- [19] Cohen S, Iancet A, Stanhill G. Evaporative climate changes at Bet Dagan, Israel, 1964 — 1998. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 111: 83-91.
- [20] Thomas A. Spatial and temporal characteristics of potential evapotranspiration trends over China. *International Journal of Climatology*, 2002, 20: 381-296.
- [21] Chen S B, Liu Y F, Axel T. Climatic Change on Tibetan Plateau: Potential Evapotranspiration Trends from 1961 — 2000. *Climatic Change*, 2006, 76: 291-319.
- [22] Xie X Q, Wang L. Changes of potential evaporation in Northern China over the Past 50 years. *Journal of Natural Resources*, 2007, 22(5): 683-691.
- [23] An Y G, Li Y H. Change of evaporation in recent 50 years in Hebei Region. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2005, 19(4): 159-162.
- [24] Zhao S H, Yang Y H, Qiu G Y, Fan T, Hu Y K. Analyzing the climatic changes in Hebei Plain over the last 34 years. *Resources Science*, 2007, 29(4): 109-113.
- [25] Gao G, Chen D L, Ren G Y, Chen Y, Liao Y M. Trend of potential evapotranspiration over China during 1956-2000. *Geographical Research*, 2006, 25(3): 378-387.
- [26] Wang Y Q, Fan J, Shao M A, Bai Y R. Analysis of effects of climate change on reference evapotranspiration on the Loess Plateau in recent 50 years. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(9): 6-10.
- [27] Li C Q, Hong K Q, Li B G. Analysis of temporal-spatial variations of reference evapotranspiration during 1965 and 1999 in Hebei Province. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2008, 29(4): 414-419.
- [28] Duan Y H, Tao Y, Li B G. Spatial and temporal variations of reference crop evapotranspiration in Beijing. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2004, 25(2): 22-25.
- [29] Lin Y M, Ren H Z, Yu J J, Yao Z J. Balance between land use and water resources in the north China Plain. *Journal of Natural Resources*, 2000, 15(3): 252-258.
- [30] Jiang Y F. Analysis on water scarcity in the North China Plain. *Journal of China Water Resources*, 2000, (1): 23-25.
- [31] Allen R G, Pereira L S, Raes D, Smith M. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56, ISBN 92-5-104219-5//FAO, Land and Water Development Division. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998: 37-58.
- [32] Zuo H C, Lu S H, Hu Y Q. Variations trends of yearly mean air temperature and precipitation in China in the last 50 years. *Plateau Meteorology*, 2004, 23(2): 238-244.
- [33] Chen W H, Liu Y X, Ma Z G. The seasonal characteristics of climatic change trend in China from 1951 to 1997. *Plateau Meteorology*, 2002, 21(3): 252-257.

- [34] Zuo H C, Li D L, Hu Y Q, Bai Y, Lu S H. Characteristics of climatic trends and correlation between pan-evaporation and environmental factors in the last 40 years over China. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 150(12): 1235-1241.
- [35] Zhang F M, Shen S H. Analysis of temporal-spatial variations of reference crop evapotranspiration in Shandong Province. *Advanced Agricultural Science and Technology*, 2007, 3: 70-72.
- [36] Miu Q L, Wang Y. Dividing the Chinese season and trend characteristic. *Proceedings of Chinese Meteorological Society*, 2007. 693-701.

参考文献:

- [1] 杨建平, 丁永健, 陈仁升, 刘连友. 近40年来中国干湿气候界限的10年际波动. *地理学报*, 2002, 57(6): 655-661.
- [2] 刘晓英, 李玉中, 郝卫平. 华北主要作物需水量近50年变化趋势及原因. *农业工程学报*, 2005, 21(10): 155-159.
- [3] 马晓群, 张辉. 近30年安徽省地表干湿时空变化及对农业的影响. *应用气象学报*, 2007, 18(6): 783-790.
- [6] 彭世彰, 徐俊增. 参考作物蒸发蒸腾量计算方法的应用比较. *灌溉排水学报*, 2004, 23(6): 5-9.
- [7] 龚元石. Penman-Monteith公式于FAO-PPP-17Penman修正式计算参考作物蒸散量的比较. *北京农业大学学报*, 1995, 21(1): 68-75.
- [8] 毛飞, 张光智, 徐祥德. 参考作物蒸散量的多种计算方法及其结果比较. *应用气象学报*, 2000, 11(S1): 29-35.
- [9] 张劲松, 孟平, 尹昌君. 植物蒸散耗水量计算方法综述. *世界林业研究*, 2001, 14(2): 23-28.
- [10] 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. *农业工程学报*, 2006, 22(6): 12-18.
- [11] 樊军, 邵明安, 王全九. 黄土区参考作物蒸散量多种计算方法的比较研究. *农业工程学报*, 2008, 24(3): 98-102.
- [12] 刘倪, 夏伟, 吴晓蔚, 丁杰, 徐建斌, 范小雷. 几种参考作物蒸散量计算方法的比较. *河北科技大学学报*, 2009, 30(1): 17-24.
- [22] 谢贤群, 王菱. 中国北方近50年潜在蒸发的变化. *自然资源学报*, 2007, 22(5): 683-691.
- [23] 安月改, 李元华. 河北省近50年蒸发量气候变化特征. *干旱区资源与环境*, 2005, 19(4): 159-162.
- [24] 赵少华, 杨永辉, 邱国玉, 樊彤, 胡玉昆. 河北平原34年气候变化趋势分析. *资源科学*, 2007, 29(4): 109-113.
- [25] 高歌, 陈德亮, 任国玉, 陈峪, 廖要明. 1956-2000年中国潜在蒸散量变化趋势. *地理研究*, 2006, 25(3): 378-387.
- [26] 王幼奇, 樊军, 邵明安, 白一茹. 黄土高原地区近50年参考作物蒸散量变化特征. *农业工程学报*, 2008, 24(9): 6-10.
- [27] 李春强, 洪克勤, 李保国. 河北省近35年(1965-1999年)参考作物蒸散量的时空变化. *中国农业气象*, 2008, 29(4): 414-419.
- [28] 段永红, 陶澍, 李本纲. 北京市参考作物蒸散量的时空分布特征. *中国农业气象*, 2004, 25(2): 22-25.
- [29] 林耀明, 任鸿遵, 于静洁, 姚治君. 华北平原的水土资源平衡研究. *自然资源学报*, 2000, 15(3): 252-258.
- [30] 蒋业放. 华北地区缺水分析. *中国水利*, 2000, (1): 23-25.
- [32] 左洪超, 吕世华, 胡隐樵. 中国近50年气温及降水量的变化趋势分析. *高原气象*, 2004, 23(2): 238-244.
- [33] 陈文海, 柳艳香, 马柱国. 中国1951-1997年气候变化趋势的季节特征. *高原气象*, 2002, 21(3): 252-257.
- [35] 张方敏, 申双和. 山东省参考作物蒸散量分布研究. *现代农业科技*, 2007, 3: 70-72.
- [36] 缪启龙, 王勇. 中国四季的划分及变化特征分析. *中国气象学会年会论文集*, 2007: 693-701.