

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2012.01.015

淮河流域参考蒸散发量变化分析

蔡辉艺,余钟波,杨传国,鞠 琴,燕文明

(河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏 南京 210098)

摘要:利用淮河流域 26 个气象观测站的观测资料,采用 Penman-Monteith 法计算流域的参考蒸散发量,结合参考蒸散发对气象因子的敏感性分析以及气象因子在 1960—2008 年的变化,定量评估气象因子变化对蒸散发的贡献程度,进而分析流域近 50 a 来参考蒸散发量的变化及其原因。结果表明,淮河流域绝大部分地区的年参考蒸散发总量呈下降趋势,淮河以北地区的下降趋势比淮河以南地区更为显著。造成这种变化的主要原因是太阳辐射量的减少和风速的降低,淮河以南地区受相对湿度变化的影响,下降幅度小。

关键词:参考蒸散发量;气象因子;敏感系数;淮河流域

中图分类号:P339 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2012)01-0076-07

Analysis of variation of reference evapotranspiration in Huaihe Basin

CAI Hui-yi, YU Zhong-bo, YANG Chuan-guo, JU Qin, YAN Wen-ming

(State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering,
Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In this study, the reference evapotranspiration was calculated using the Penman-Monteith method based on the observed data from 26 meteorological stations in the Huaihe Basin. In order to understand the variation of meteorological factors and its causes in the basin over the last 50 years, the quantitative estimation of the contribution of the meteorological factors to reference evapotranspiration was conducted based on analysis of sensitivity of evapotranspiration to meteorological factors and variation of the meteorological factors from 1960 to 2008. The results show that for most parts of the basin there is a decreasing trend in the annual reference evapotranspiration, which is mainly caused by a significant decrease in the wind speed and radiation over the basin, and the decreasing trend to the north of the Huaihe River is more significant than to the south of the river, because the regions to the south of the river are influenced by relative humidity and have a weakly decreasing trend of reference evapotranspiration.

Key words: reference evapotranspiration; meteorological factor; sensitivity coefficient; Huaihe Basin

气候变化对水文循环的影响,已经成为当今水文界共同关注的热点^[1]。蒸散发是水文循环的重要环节,因此研究气候变化条件下的蒸散发变化具有重要意义。Wang 等^[2-5]对长江流域的研究表明,1961—2000 年流域蒸发皿蒸发量和参考蒸散发量存在显著下降趋势。郭军等^[6]利用黄淮海流域 1956—2000 年的蒸发皿观测资料分析了流域蒸发量的变化趋势,结果表明这 3 个流域的蒸发皿蒸发量存在显著下降趋势。国内外对蒸散发变化原因进行了大量的研究。如:任国玉等^[7]利用统计相关分析方法研究了中国水面蒸发量变化与 5 个气象因子之间的关系。Xu 等^[8]分析了长江流域 40 年来的 4 个气象因子的变化趋势,结合参考蒸散发对各气象因子的敏感性,得出导致长江流域参考蒸散发量显著下降的主要原因是太阳辐射量下降的结论。高歌等^[9]采

收稿日期:2011-04-15
基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2010CB951101);国家自然科学基金(50979022,50679018);教育部博士点基金(20100094110003);河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室专项(1069-50986312);中央高校基本科研业务费专项(2010B28214)
作者简介:蔡辉艺(1987—),男,福建石狮人,硕士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail:chy870421@163.com

河为分界的南北区域上气候也存在差异,表 1 给出了流域内淮河以北、以南地区 6 个气象因子的区域多年平

均值.从表 1 可以看出 2 个区域上相差较为显著的气象因子有日最低温度、相对湿度、年太阳辐射量和年日照时数.

表 1 淮河流域气象因子多年平均值

Table 1 Average values of meteorological factors during period from 1960 to 2008 in Huaihe Basin

区域	日最高 温度/℃	日最低 温度/℃	相对 湿度/%	风速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	年太阳辐射量/ ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$)	年日照时数/ ($\text{h}\cdot\text{a}^{-1}$)
淮河以北	19.4	9.1	69.6	2.51	4871.3	2288.5
淮河以南	20.0	11.2	76.7	2.65	4711.9	2099.2

1.2 气象资料

采用的气象资料来自淮河流域的 26 个国家基准地面气象观测站,观测要素包括逐日的平均气压、最高气温、最低气温、平均相对湿度、2 m 高风速、日照时数.时间选取为 1960—2008 年.气象测站的分布如图 1 所示.

2 研究方法

2.1 参考蒸散发量的估算

本文采用 FAO Penman-Monteith 法^[12]计算参考蒸散发量(ET_{ref}),由该方法计算得出的参考蒸散发量表征的是大气的蒸发能力,与作物类型、作物生长阶段以及管理措施无关,能够直接反映气象因子与蒸散发之间的关系.

世界粮农组织(FAO)将参考蒸散发定义为,假定下垫面为植被高度 0.12 m 的草地,表面阻力为 70 s/m,反照率为 0.23,植被生长旺盛和充分供水条件下的潜在蒸散发^[13].其计算公式^[12]为

$$ET_{\text{ref}} = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{t_{\text{mean}} + 273} U(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (1)$$

式中: ET_{ref} ——参考蒸散发,mm/d; Δ ——饱和水汽压温度曲线斜率,kPa/℃; R_n ——净辐射, $\text{MJ}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$; G ——土壤热通量,计算日参考蒸散发量时可忽略不计, $\text{MJ}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$; γ ——干湿常数,kPa/℃; t_{mean} ——平均气温,取最高、最低气温的平均值,℃; U_2 ——2 m 高的风速,m/s; e_s ——饱和水汽压;kPa; e_a ——实际水汽压;kPa; $e_s - e_a$ ——饱和水汽压差,kPa.

2.2 参考蒸散发对气象因子的敏感系数

不同的研究对于敏感系数的定义也不相同.如 Smajstrla 等^[14]将敏感系数定义为 ET_{ref} 对气象因子曲线的斜率,即由气象因子变化所引起的 ET_{ref} 的变化速率.Hupet 等^[15]认为敏感系数是气象因子变化所导致的 ET_{ref} 变化量的大小.本文采用 FAO Penman-Monteith 公式计算参考蒸散发,公式涉及多个气象因子,不同气象因子的单位也不相同.为比较不同气象因子间的敏感系数,采用量纲为 1 的敏感系数来进行比较,公式^[16]为

$$S_{X_i} = \lim_{\Delta X_i \rightarrow 0} \frac{\Delta ET_{\text{ref}} ET_{\text{ref}}^{-1}}{\Delta X_i X_i^{-1}} = \frac{\partial ET_{\text{ref}}}{\partial X_i} \frac{X_i}{ET_{\text{ref}}} \quad (2)$$

式中: S_{X_i} ——参考蒸散发对第 i 个气象因子的敏感系数,量纲为 1; X_i ——第 i 个气象因子.敏感系数为正数时,表示 ET_{ref} 随气象因子的增大而增大,敏感系数为负数时,表示 ET_{ref} 随气象因子的增大而减小.敏感系数绝对值越大,表明气象因子对 ET_{ref} 的影响越大.例如,某个气象因子的敏感系数为 0.1,表示保持其他气象因子不变,增大该气象因子 10%,参考蒸散发相应增大 1%.

由于太阳辐射和日照时数有较好的相关关系,因此本文只选择最高温度、最低温度、相对湿度、平均风速和太阳辐射 5 个气象因子进行敏感性分析.

2.3 定量估算气象因子变化对参考蒸散发量变化的贡献程度

影响参考蒸散发的因素有很多,本文研究了其中的 5 个气象因子(日最高温度、日最低温度、日相对湿度、日平均风速和年太阳辐射总量).对由气象因子变化所导致的参考蒸散发的改变量的定量采用公式

$$\Delta E_{X_i} = \frac{K_{X_i}}{\overline{X_i}} S_{X_i} \overline{ET_{\text{ref}}} \quad (3)$$

式中： ΔE_{X_i} ——由第 i 个气象因子改变所引起的参考蒸散发的改变量，mm/a； $\overline{X_i}$ ——第 i 个气象因子的多年平均值； K_{X_i} ——第 i 个气象因子的变化率； $\overline{ET_{ref}}$ ——参考蒸散发的多年平均值。

3 结果与分析

3.1 年参考蒸散发量的空间分布特征

图 2 所示为流域内多年平均年参考蒸散发量的空间分布情况。平均年参考蒸散发量在 832 ~ 1084 mm 之间变化，流域内不同地区的蒸散发量表现出显著的差异性。年蒸散发量大于 1000 mm 的地区都出现在淮河以北，小于 900 mm 的地区都出现在淮河以南。淮河以北、以南的平均年参考蒸散发量分别为 984.5 mm 和 923.0 mm，总体上，淮河以北的参考蒸散发量大于淮河以南。从表 1 可以看出，淮河以北的平均太阳辐射量和日照时数都大于淮河以南，并且相对湿度小于淮河以南，因此出现淮河以北参考蒸散发量较大的现象。

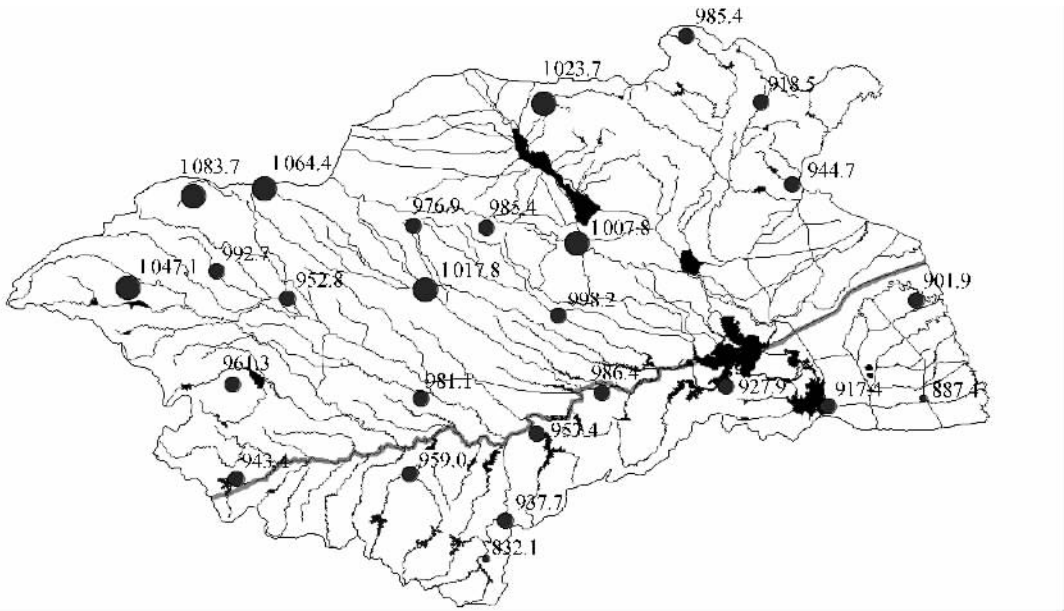


图 2 淮河流域年均参考蒸散发量的空间分布(单位：mm)

Fig. 2 Spatial distribution of annual average reference evapotranspiration in Huaihe Basin(unit : mm)

3.2 年参考蒸散发的时间变化特征

图 3 给出了流域内各站点年参考蒸散发总量的变化率。26 个站点中呈下降趋势的有 22 个，其中有 15 个通过了置信度为 0.05 的 M-K 检验，呈上升趋势的有 4 个，都未通过置信度为 0.05 的 M-K 检验。其变化范围在 - 5.29 ~ 1.38 mm/a 之间。

总体上，整个淮河流域的参考蒸散发呈下降趋势。从图 3 还可以看出，参考蒸散发量下降幅度超过 2 mm/a 的站点仅有 1 个出现在淮河以南地区，其余全都出现在淮河以北。变化趋势介于 - 2 ~ 2 mm/a 的站点大部分都分布在淮河以南地区。根据以上分析可以大致得出如下结论：淮河以北参考蒸散发的下降趋势较淮河以南显著。为了进一步比较淮河以北、以南的差异，分别对这 2 个区域取平均年参考蒸散发量，并分析其年际变化情况。如图 4 所示。从图 4 可以看出，淮河以北的下降幅度为 2.50 mm/a，以南为 0.55 mm/a，淮河以北明显大于淮河以南。

3.3 参考蒸散发对气象因子的敏感性

表 2 给出了淮河流域参考蒸散发对气象因子的敏感系数。从表 2 可以看出：只有相对湿度的敏感系数出现负值，表示参考蒸散发随相对湿度的增大而减小；其他 4 个气象因子的敏感系数值都大于 0，表示参考蒸散发量随相应气象因子的增大而增大。总体上，流域以北、以南 2 个区域，参考蒸散发对相对湿度的敏感系数的绝对值最大，表明参考蒸散发对相对湿度最敏感。相对于淮河以北地区，以南地区的敏感系数较大，也就是淮河以南地区的参考蒸散发对相对湿度更为敏感。其次是最高温度和太阳辐射，两者的敏感系数相差不大，南、北地区间存在差异。参考蒸散发对风速的敏感性次之，最低温度的敏感性最小。

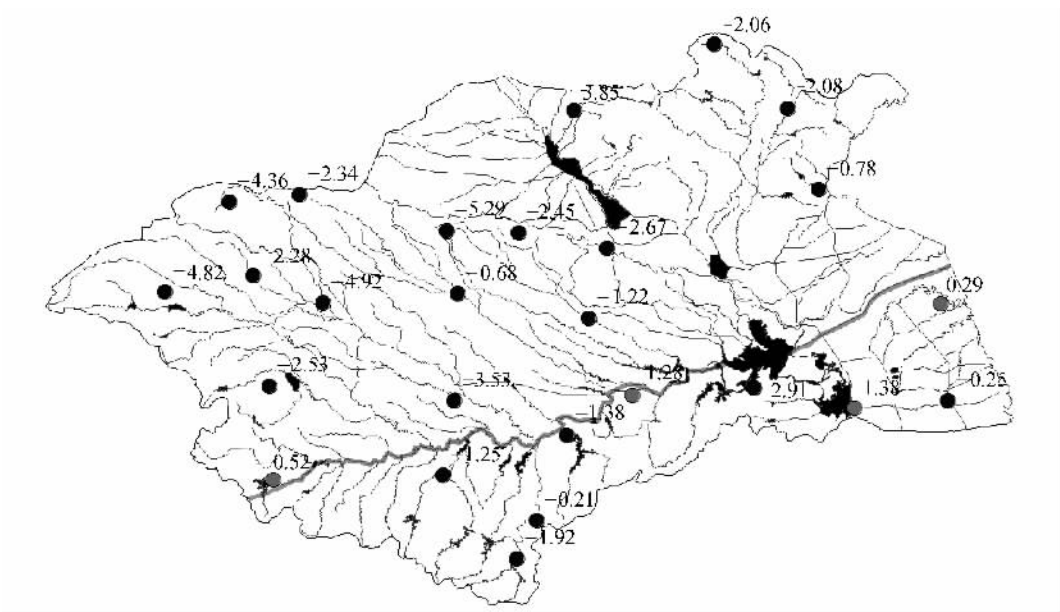


图 3 淮河流域各站点 ET_{ref} 变化趋势空间分布(单位 :mm/a)

Fig. 3 Spatial distribution of change trends of ET_{ref} at stations in Huaihe Basin(unit : mm/a)

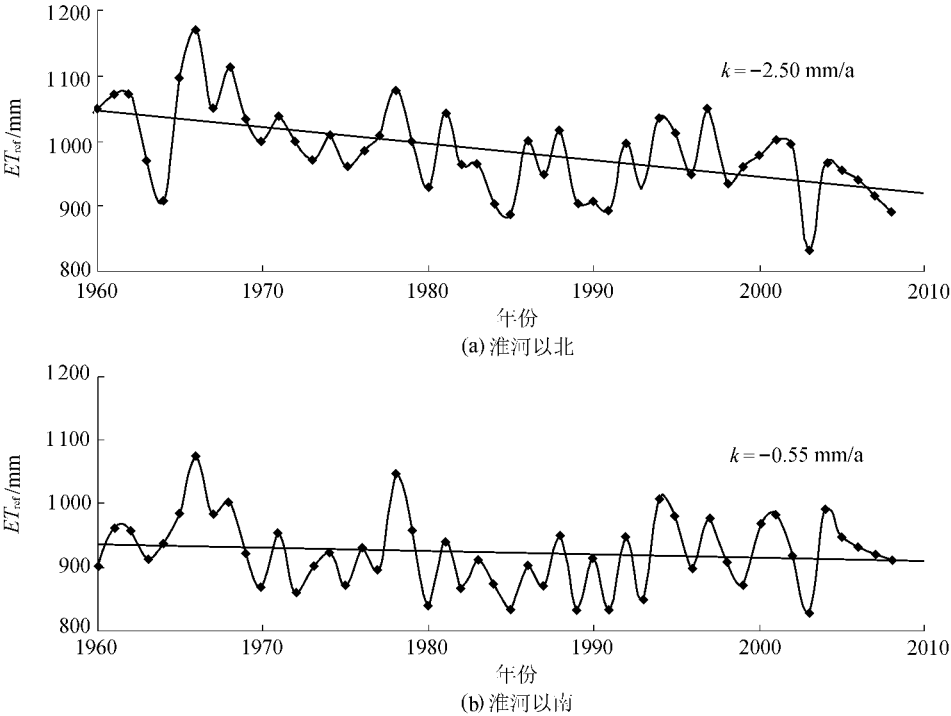


图 4 淮河流域参考蒸散发的年际变化情况

Fig. 4 Inter-annual variation of reference evapotranspiration in Huaihe Basin

表 2 淮河流域参考蒸散发对气象因子的敏感系数

Table 2 Coefficients of sensitivity of reference evapotranspiration to meteorological factors in Huaihe Basin

区 域	敏感系数				
	日最高温度	日最低温度	日相对湿度	日平均风速	日太阳辐射
淮河以北	0.401	0.094	- 1.200	0.206	0.356
淮河以南	0.396	0.130	- 1.573	0.150	0.403

3.4 气象因子的时间变化特征

表 3 给出了流域以北、以南地区各气象因子在近 50 a 内的变化趋势。根据表 3 可得出以下几点结论 (a) 整个流域的平均年太阳辐射量都出现显著下降趋势,淮河以北地区的下降幅度大于以南地区。(b) 整个流域的日均最高温度和日最低温度都出现上升趋势,都通过了显著性检验,最低温度的上升幅度明显高于最高温度。(c) 日平均风速在流域上都出现下降趋势,下降幅度较大,且都通过了显著性检验。南、北 2 个区域的差别不大。(d) 相对湿度在以北地区呈现微弱上升趋势,不显著,而在以南地区却出现较显著下降趋势。

3.5 参考蒸散发量变化原因

首先对每个站点计算由各气象因子变化所引起的参考蒸散发的改变量 (ΔET_i),然后将由最高温度、最低温度、相对湿度、风速和太阳辐射变化所引起的参考蒸散发的变化量(分别表示为 ΔET_{tmax} , ΔET_{tmin} , ΔET_{RH} , ΔET_{WD} 和 ΔET_{Rs})相加得到由各气象因子变化所引起的参考蒸散发的总改变量(ΔET),并与各站点年参考蒸散发在研究时段内的变化率 (K_{ET}) 进行比较。如图 5 所示,两者的线性拟合方程为 $K_{ET} = 0.9726\Delta ET - 0.6448$,相关系数 $R^2 = 0.9681$,两者具有很高的相关性。对于大部分站点, $|K_{ET}|$ 比 $|\Delta ET|$ 小。由于影响参考蒸散发的因素有很多,本文只考虑了其中 5 个气象因子,因此产生了这种现象。但这并不影响根据 ΔET_{tmax} , ΔET_{tmin} , ΔET_{RH} , ΔET_{WD} 和 ΔET_{Rs} 的大小,分析导致参考蒸散发产生变化的主要原因。表 4 所示

为流域内淮河以北、以南各改变量的区域平均值。根据表 4,淮河以北、以南区域平均 ΔET 为 -1.98 mm/a 和 0.14 mm/a ,而 K_{ET} 的大小分别为 -2.5 mm/a 和 -0.55 mm/a 。2 个区域平均的 K_{ET} 均小于 ΔET ,这与图 5 所示结果一致。总体上,对参考蒸散发量减少贡献较大的气

象因子主要是风速和太阳辐射,最高温度和最低温度对参考蒸散发的影响程度均较小,相对湿度对参考蒸散发的影响只在以南地区表现较为显著。从表 4 可以看出,对于淮河以北地区, ΔET_{WD} 和 ΔET_{Rs} 在 ΔET 中所占比重较大,表明由风速和太阳辐射量下降所引起的参考蒸散发量的减少对总蒸散发减少量的贡献最大,即造成淮河以北地区参考蒸散发下降的主要原因是风速和太阳辐射量的显著下降。相对于淮河以北地区,以南地区的 ΔET_{WD} 和 ΔET_{Rs} 较小,而 ΔET_{RH} 却相对较大,再加上 ΔET_{tmax} 和 ΔET_{tmin} 在一定程度上增大了参考蒸散发量,因此该区域蒸散发变化趋势不及以北地区显著。从该区域气象变量的年际变化情况也能解释这一现象。以南地区的风速和太阳辐射量下降幅度较以北地区都小,因而由这 2 个气象因子下降所引起的蒸散发的下降量也较小,而相对湿度呈显著下降趋势,加上最高、最低温度的显著上升,明显增大了该区域的蒸散发,因此以南地区出现了参考蒸散发变化趋势不显著的现象。

4 结 论

a. 从整个淮河流域来看,参考蒸散发对相对湿度最敏感,最高温度和太阳辐射的敏感性次之,其次是平均风速,最低气温的敏感系数最小。

表 3 淮河流域 5 个气象因子在 1960—2008 年的变化趋势

Table 3 Change trends of five meteorological factors in Huaihe Basin from 1960 to 2008

区 域	最高温度/ ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$)	最低温度/ ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$)	湿度/ ($\%\cdot\text{a}^{-1}$)	风速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$)	辐射/ ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)
淮河以北	0.012 *	0.034 *	0.004	-0.162 *	-16.81 *
淮河以南	0.014 *	0.034 *	-0.057 *	-0.129 *	-11.05 *

注:“-”表示呈下降趋势;“*”表示通过 $\alpha = 0.05$ 的 Mann-Kendall 显著性检验。

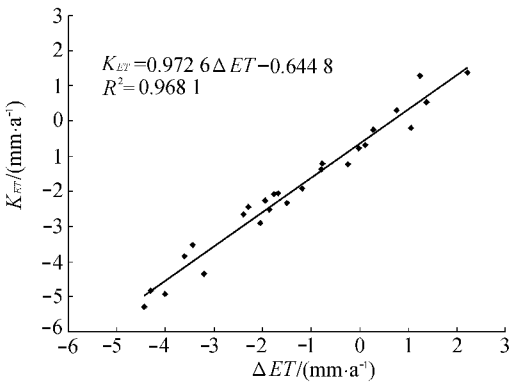


图 5 流域各站点 K_{ET} 和 ΔET 的关系
Fig. 5 Relationship between K_{ET} and ΔET at stations in Huaihe Basin

表 4 不同气象因子变化引起的参考蒸散发的变化量

Table 4 Changes in ET_{ref} resulting from changes in meteorological factors

区 域	ΔET_i /($\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$)				
	日最高温度	日最低温度	相对湿度	风速	年辐射量
淮河以北	0.24	0.35	-0.05	-1.31	-1.21
淮河以南	0.26	0.36	1.07	-0.66	-0.89

b. 从整个流域看, 年太阳辐射总量出现显著下降趋势, 且淮河以北地区的下降幅度较以南地区大. 日最高、最低温度以及风速都表现出显著上升趋势, 淮河以北、以南地区上升幅度的差异不大. 流域相对湿度的变化趋势仅在淮河以南地区表现较为显著.

c. 总体上, 流域的参考蒸散发量呈现下降趋势, 且淮河以北地区的下降趋势较以南地区显著. 造成流域内淮河以北地区参考蒸散发量显著减少的主要原因是太阳辐射量和风速的显著下降. 淮河以南地区, 由于各太阳辐射量和风速的下降幅度都不及以北地区大, 因此由这 2 个气候变量变化所引起的参考蒸散发的变化量也相对较小, 并且淮河以南的相对湿度显著下降, 这在一定程度上增大了蒸散发量, 从而抵消了部分蒸散发下降量, 因而蒸散发的变化呈现不显著趋势.

参考文献:

- [1] 江善虎, 任立良, 雍斌, 等. 气候变化和人类活动对老哈河流域径流的影响[J]. 水资源保护, 2010, 26(6): 5-7. (JIANG Shan-hu, REN Li-liang, YONG Bin, et al. The effects of climate variability and activities on runoff from the Laohahe River Basin in Northern China[J]. Water Resources Protection, 2010, 26(6): 5-7. (in Chinese))
- [2] WANG Yan-jun, JIANG Tong, BOTHE O, et al. Changes of pan evaporation and reference evapotranspiration in the Yangtze River Basin[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2007, 90: 13-23.
- [3] 王艳君, 姜彤, 许崇育. 长江流域 20 cm 蒸发皿蒸发量的时空变化[J]. 水科学进展, 2006, 17(6): 830-833. (WANG Yan-jun, JIANG Tong, XU Chong-yu. Spatial-temporal of change of 20 cm pan evaporation over the Yangtze River Basin[J]. Advances in Water Science, 2006, 17(6): 830-833. (in Chinese))
- [4] 刘猛, 夏自强, 韩帅. 黄河源区蒸散量变化与生态恶化的关系[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2009, 37(6): 631-634. (LIU Meng, XIA Zi-qiang, HAN Shuai, et al. Relationship between variation of evapotranspiration and ecological deterioration in source region of Yellow River[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2009, 37(6): 631-634. (in Chinese))
- [5] 王艳君, 姜彤, 许崇育. 长江流域 1961—2000 年蒸发量变化趋势研究[J]. 气候变化研究进展, 2005, 1(3): 99-105. (WANG Yan-jun, JIANG Tong, XU Chong-yu. Trends of evapotranspiration in the Yangtze River Basin in 1961-2000[J]. Advances in Climate Change Research, 2005, 1(3): 99-105. (in Chinese))
- [6] 郭军, 任国玉. 黄淮海流域蒸发量的变化及其原因分析[J]. 水科学进展, 2005, 16(5): 666-672. (GUO Jun, REN Guo-yu. Recent change of pan evaporation and possible climate factors over the Huang-Huai-Hai Watershed, China[J]. Advances in Water Science, 2005, 16(5): 666-672. (in Chinese))
- [7] 任国玉, 郭军. 中国水面蒸发量的变化[J]. 自然资源学报, 2006, 21(1): 31-44. (REN Guo-yu, GUO Jun. Change in pan evaporation and the influential factors over China: 1956-2000[J]. Journal of Natural Resources, 2006, 21(1): 31-44. (in Chinese))
- [8] XU Chong-yu, GONG Le-bing, JIANG Tong, et al. Analysis of spatial distribution and temporal trend of reference evapotranspiration and pan evaporation in Changjiang (Yangtze River) catchment[J]. Journal of Hydrology, 2006, 327: 81-93.
- [9] 高歌, 陈德亮, 任国玉, 等. 1956—2000 年中国潜在蒸散发变化趋势[J]. 地理研究, 2006, 25(3): 378-387. (GAO Ge, CHEN De-liang, REN Guo-yu, et al. Trend of potential evapotranspiration over China during 1956-2000[J]. Geographical Research, 2006, 25(3): 378-387. (in Chinese))
- [10] BURN D H, HESCH N M. Trends in evaporation for the Canadian Prairies[J]. Journal of Hydrology, 2007, 336: 61-73.
- [11] ZHANG Xue-qin, REN Yu, YIN Zhi-yong, et al. Spatial and temporal variation patterns of reference evapotranspiration across the Qinghai-Tibetan Plateau during 1971-2004[J]. Journal of Geophysical Research, 2009, 114: D15105.
- [12] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements irrigation and drainage paper[M]. [S. l.]: Rome FAO, 1998.
- [13] GONG Le-bing, XU Chong-yu, CHEN De-liang, et al. Sensitivity of the Penman-Monteith reference evapotranspiration to key climatic variables in the Changjiang Basin[J]. Journal of Hydrology, 2006, 329(3/4): 620-629.
- [14] SMAJSTRLA A G, ZAZUETA F S, SCHMIDT G M. Sensitivity of potential evapotranspiration to four climatic variables in Florida[J]. Soil and Crop Sci Soc of Florida, 1987(46): 21-26.
- [15] HUPET F, VANCLOOSTER M. Effect of the sampling frequency of meteorological variables on the estimation of the reference evapotranspiration[J]. Journal of Hydrology, 2001, 243(3/4): 192-204.
- [16] MCCUEN R H. A sensitivity and error analysis of procedures used for estimation evaporation[J]. Water Resource Bulletin, 1974, 10(3): 486-498.