

# 柳园口灌区参考作物腾发量的长期变化趋势 及其对灌溉需水量的影响

罗玉峰, 缴锡云, 彭世彰

(河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098)

**摘要:** 研究该文的目的在于揭示了柳园口灌区参考作物腾发量的长期变化规律, 阐明其产生原因及可能产生的影响, 为应对气候变化对农业生产带来的负面影响提供基础。采用 FAO-56 推荐的 Penman-Monteith 公式计算河南省柳园口灌区 1983—2003 年的逐日参考作物腾发量, 用 Mann-Kendall 检验对灌区的参考作物发量进行长期变化趋势分析, 对参考作物腾发量的长期变化趋势及其与气象因素、灌溉引水量的关系进行了分析。结果表明, 在过去的 20 多年中,  $ET_0$  呈极显著的下降趋势, 其下降的幅度约为 50mm/10 年; 导致  $ET_0$  下降的主要原因是日照时数下降, 其次是风速的下降, 气温升高并不足以抵消日照时数和风速的下降而使  $ET_0$  上升;  $ET_0$  的下降主要出现在 4 月和 6—8 月。在降雨量变化不明显的情况下, 灌溉季节的  $ET_0$  的下降使灌区的灌溉需水量呈下降趋势, 而灌区近年来的引黄水量减少也证明了这一事实。因此, 除了节水灌溉技术的推广, 气候变化使灌溉需水量减少, 灌区的节水也有气候变化的“贡献”。

**关键词:** 气候变化; 参考作物腾发量; 趋势检验; 柳园口灌区

**中图分类号:** S2      **文献标识码:** A

## Long-term Trend of Reference Evapotranspiration in Liuyuankou Irrigation System and its Impacts on Irrigation Water Requirements

Luo Yufeng, Jiao Xiyun, Peng Shizhang

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

**Abstract:** The long-term trend of reference evapotranspiration ( $ET_0$ ) and its relationships with weather parameters and irrigation water use were analyzed, and the reasons and impacts of  $ET_0$  trend were investigated. Daily meteorological data for the years of 1983–2003 of Liuyuankou Irrigation Area, Henan Province from Huibei Irrigation Experiment Station were collected, then daily, monthly and annual  $ET_0$  were calculated using the FAO-56 Penman-Monteith model. Mann-Kendall tests were conducted to detect trends in  $ET_0$  and corresponding meteorological parameters. The results show that in Liuyuankou Irrigation System,  $ET_0$  decreased 50mm/a in the last two decades; decreasing  $ET_0$  was caused mainly by decreasing sunshine hour firstly and wind speed secondly, increasing air temperature was not enough to counteract the impacts of the former two; annual  $ET_0$  decrease was contributed by decrease in April, June, July and August; when there was no significant trend in rainfall, decreasing  $ET_0$  resulted in decreasing trend in irrigation requirement, which was confirmed by reduced diverted irrigation water from Yellow River. Therefore, besides dissemination of water-saving irrigation techniques, reduced diverted irrigation water from Yellow River was partially contributed from the decreasing irrigation water requirements due to climate change.

**Key words:** climate change, reference evapotranspiration, trend detection, Liuyuankou Irrigation Area

**基金项目:** “十一五”国家科技支撑计划项目 (2006BAD11B09-3); 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放研究基金项目 (2006411211)。

**第一作者简介:** 罗玉峰, 男, 1977 年出生, 江西遂川人, 助理研究员, 博士, 主要从事灌溉水文和节水灌溉研究。通信地址: 210098 南京市西康路 1 号河海大学国家重点实验室。Tel: 025-83786015, Email: yfluo@hhu.edu.cn。

**收稿日期:** 2008-07-01, 修回日期: 2008-07-08。

全球表面平均温度在 20 世纪增加了  $0.6\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ , 其它的气象参数, 如降雨, 云量和蒸发量也被研究过并显示有很强的全球和区域性的变化趋势<sup>[1]</sup>。气候变化很可能影响水循环并影响可利用的水资源量、洪水及干旱的发生, 最终影响农业生产<sup>[2]</sup>。腾发量的长期变化趋势影响地表水文和土壤水分状况并最终影响自然和农业生态系统<sup>[3]</sup>。参考作物腾发量( $ET_0$ )是表达大气蒸发能力的一个气象参数, 是计算作物腾发量及农田耗水量的基础<sup>[4]</sup>, 也是确定地表耗水量、水量平衡研究及水资源配置的基本依据<sup>[5]</sup>。探讨气候变化条件下的腾发量变化趋势对于克服气候变化带来的负面影响, 提高农业生产率和确保中国的粮食安全具有重要意义。

Thonmas(2000)<sup>[3]</sup>注意到关于中国参考作物腾发量变化趋势的早期研究(Kayane, 1971; 气候变化对农业影响及其对策课题组, 1992)<sup>[6,7]</sup> 采用了并不合适的 Thornthwaite 公式, 首次分析了用 Penman-Monteith 公式计算 1954—1993 年全中国 65 个站点的参考作物腾发的年及季节序列的变化趋势。分析的结果认为, 如果降雨和腾发量的趋势保持不变, 未来的农业生产, 特别是南方和西南地区将可能要面对作物生长期内的缺水问题。霍再林等(2004)<sup>[8]</sup>根据内蒙古 135 个站点, 30 年气象资料, 用 Penman-Monteith 公式计算得参考作物腾发量, 在此基础上, 对参考作物腾发量在中国北方干旱寒冷区时空上变化进行了分析。胡顺军等(2004)<sup>[9]</sup>利用 Penman-Monteith 公式, 根据阿克苏水平衡试验站 1989—1996 年逐日气象资料, 计算了逐日参考作物潜在腾发量, 参考作物潜在腾发量年值系列的最大值、最小值、极差、均值、标准差及变异系数, 认为参考作物腾发量年值计算结果较为稳定, 年际变化不大。田俊武等(2005)<sup>[10]</sup> 根据山西潇河灌区 1978—2003 年共 26 年的气象资料计算的逐旬的参考作物腾发量, 采用时间序列分析方法对参考作物腾发量序列的随机特性进行了分析, 结果表明近 20 多年来潇河灌区参考作物腾发量序列具有递增趋势, 并与降雨序列存在负相关关系。梁丽乔等 (2006)<sup>[11]</sup> 采用松嫩平原西部 34 个气象站 1951—2000 年 5 个气象要素资料来计算参考作物腾发量, 建立了各站与区域参考作物腾发量序列。运用气候数理统计方法对参考作物腾发量序列时空变化特征进行诊断分析。迟道才等(2006)<sup>[12]</sup>采用根据抚顺地区 3 个气象站 1995—2004 年的气象资料, 分析了地区参考作物需水量与气候变化的关系。Xu 等(2006)<sup>[13]</sup>分析了长江流域的参考作物腾发量的时间变化和空间分布, 结果认为在整个流域参考作物腾发量存在显著的下降趋势, 其主要原因在于净总辐射的显著下降和风速的

一定程度的下降。倪广恒等(2006)<sup>[13]</sup>基于全国范围 200 多个气象站测站逐日气象观测资料, 选取 4 个代表气象站, 对其参考作物腾发量的历年变化及其与气象因素的关系进行了分析。分析表明, 受风速减小和气温增加的共同影响, 干旱地区、半干旱地区和半湿润地区的参考作物腾发量呈现减少趋势, 湿润地区则相对稳定。任玉敦等(2007)<sup>[14]</sup>对北京昌平、开封惠北及湖北团林 3 个灌排试验站的近几十年参考作物腾发量进行计算, 分析其变化趋势和原因。以上研究对参考作物腾发量的变化趋势及其原因作了较深入的分析, 但对于可能产生的影响方面的研究尚不多。笔者在检验柳园口灌区参考作物腾发量变化趋势及其原因的基础上, 对参考作物腾发量长期变化趋势产生的影响进行了分析。

## 1 数据与方法

该研究的步骤为: (1) 用 Penman-Monteith 公式和逐日气象数据计算逐日  $ET_0$ , 再计算逐月的日平均  $ET_0$ ; (2) 采用 Mann-Kendall(MK) 检验和季节性 M-K 检验对  $ET_0$  及相关影响因子进行趋势性分析; (3) 分析降水量和参考作物腾发量长期变化趋势对灌溉需水量的影响, 并用灌区引水量资料来进行验证。

用来计算  $ET_0$  的数据为河南省柳园口灌区惠北灌溉试验站 1983 年 1 月 1 日—2003 年 12 月 31 日共 21 年的逐日气象数据, 包括最高气温、最低气温, 平均气温、相对湿度、风速、日照时数和降水量。惠北站气象参数多年平均值如表 1 所示。试验站位于河南省开封县兴隆乡兴隆村, 东经  $114^{\circ}30'$ , 北纬  $34^{\circ}47'$ , 地面高程为 68.05m。另外收集到 1983—2003 年的年降雨量以及 1983—2001 年灌区的引黄水量。

$ET_0$  计算采用广泛应用的改进 Penman-Monteith 公式<sup>[15]</sup>。Penman-Monteith 公式如下:

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

式中  $ET_0$  为参考作物蒸发蒸腾量, mm/day;  $R_n$  为净辐射, MJ/( $\text{m}^2 \cdot \text{day}$ );  $G$  为土壤热通量, MJ/( $\text{m}^2 \cdot \text{day}$ );  $T$  为平均气温,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $U_2$  为 2m 高度处的风速, m/s;  $e_s$  和  $e_a$  分别为饱和水汽压和实际水汽压, kPa;  $\Delta$  为饱和水汽压—温度曲线上的斜率, kPa/ $^{\circ}\text{C}$ ;  $\gamma$  为湿度计常数, kPa/ $^{\circ}\text{C}$ 。净辐射可以根据净短波  $R_{ns}$  减去净长波辐射  $R_{nl}$  计算。

采用上式计算逐日  $ET_0$  时所使用的数据包括测站资料(测站高程, 测站纬度, 风速测量高程)和气象资料(日最高气温, 日最低气温, 日平均气温, 日平均风速, 日平均相对湿度, 日照时数)。根据逐日的气象资料计

表 1 惠北站气象参数多年平均值

	日照时数(h)	平均气温(°C)	最高气温(°C)	最低气温(°C)	相对湿度(%)	风速(m/s)
1月	3.7	0.4	4.9	-3.7	69	1.6
2月	4.2	3.3	8.3	-1.6	64	1.8
3月	4.8	8.2	13.0	2.9	62	2.3
4月	5.9	15.3	20.3	9.2	63	2.3
5月	6.0	20.6	25.4	14.5	67	2.0
6月	5.9	25.3	30.2	19.4	63	1.9
7月	5.2	26.8	30.7	22.3	75	1.6
8月	5.2	25.6	29.5	21.2	78	1.5
9月	5.3	21.3	26.1	16.2	73	1.7
10月	5.2	15.6	21.1	10.1	68	1.7
11月	4.8	8.4	13.7	3.3	67	2.1
12月	4.1	2.6	7.1	-1.8	70	2.0
平均	5.0	14.5	19.2	9.3	68.3	1.9

算逐日参考作物腾发量, 然后统计得出不同时段参考作物腾发量总量与平均值。

笔者采用 Mann-Kendall(MK)检验来分析 ET<sub>0</sub> 和气象因子的总体变化趋势。参数统计检验法相比, 非参数检验法更适用于实际中的非正态分布或经过删检(删去低于或高于某水平的观测值)的资料<sup>[16]</sup>。

对序列  $X_i=(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , 先确定所有对偶值  $(x_i, x_j, j>i)$  中  $(x_i$  与  $x_j$  的大小关系(设为  $\tau$ )。趋势检验的统计量为:

$$U_{MK} = \frac{\tau}{[Var(\tau)]^{1/2}} \dots\dots\dots (2)$$

式中:

$$\tau = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \text{sgn}(\theta) = \begin{cases} 1 & \text{if } \theta > 0 \\ 0 & \text{if } \theta = 0 \\ -1 & \text{if } \theta < 0 \end{cases} \dots (3);$$

$$Var(\tau) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^n t_i i(i-1)(2i+5)}{18} \dots\dots\dots (4)$$

当  $n$  大于 10 时,  $U_{MK}$  收敛于标准正态分布。

原假设为该序列无趋势, 采用双边趋势检验, 在给定显著性水平  $\alpha$  下, 在正态分布表中查得临界值  $U_{\alpha/2}$ , 当  $|U_{MK}| < U_{\alpha/2}$  时, 接受原假设, 即趋势不显著; 若  $|U_{MK}| > U_{\alpha/2}$ , 则拒绝原假设, 即认为趋势显著。

2 结果与分析

2.1 ET<sub>0</sub> 长期变化趋势

根据改进 Penman-Monteith 公式计算逐日 ET<sub>0</sub>, 由此计算各月的日平均 ET<sub>0</sub>(图 1)。从图 1 可以直观地看出, 柳园口灌区的参考作物腾发量具有下降的趋势, 下降的幅度约为 50mm/10a。对 ET<sub>0</sub> 序列进行 MK 检验,

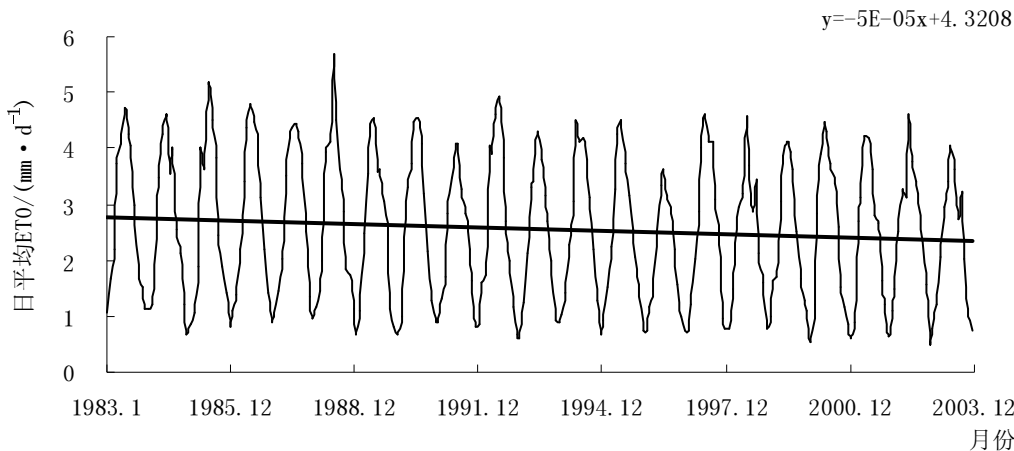


图 1 逐月日平均 ET<sub>0</sub> 长期变化过程

计算为结果  $Z=-2.71 < -1.96$ (表 2), 即 ET<sub>0</sub> 存在极显著的下降趋势(置信度水平为 95%), 这与直观分析结果相符。

对影响 ET<sub>0</sub> 各气象因素进行趋势检验, 结果如表 2。从表 2 可以看出, 在柳园口灌区, 最高气温、最低气温以及相对湿度有一定的上升趋势, 但并不明显;

表2 ET<sub>0</sub>及气象参数趋势检验结果

	ET <sub>0</sub>	平均气温	最高气温	最低气温	日照时数	相对湿度	风速	降雨
Z	2.71	2.53	1.67	0.54	3.65	1.41	2.31	0.23
显著性	**	**	*	-	**	-	**	-
趋势	↘	↗	↗	↗	↘	↗	↘	↗

注:显著性:\*\*表示极显著(置信水平≥95%),\*表示显著(90%≤置信水平<95%),-表示不显著(置信水平<90%);趋势:↗表示上升,↘表示下降;下同。

平均气温呈极显著的上升趋势;日照时数和风速则有极显著的下降趋势。气温、日照时数和风速和 ET<sub>0</sub> 呈正相关关系,相对湿度和 ET<sub>0</sub> 则呈负相关关系。在柳园口灌区,气温的上升具有引起的 ET<sub>0</sub> 上升的可能,但由于日照时数和风速的下降的影响,ET<sub>0</sub> 总体呈下

降的趋势。

对 ET<sub>0</sub> 序列进行季节性 MK 检验,结果如表 3。从表 3 可以看出,3 月和 9 月 ET<sub>0</sub> 有上升的趋势,但并不显著;其它月份均有下降趋势,其中 4 月及 6—8 月,ET<sub>0</sub> 下降趋势极显著,12 月和 1 月 ET<sub>0</sub> 下降趋势显著,

表3 ET<sub>0</sub>和降水量季节性趋势检验结果

月份	ET <sub>0</sub>			降水量		
	Z	显著性	趋势	Z	显著性	趋势
1月	-1.69	*	↘	0.55	-	↗
2月	-0.06	-	↘	0.67	-	↗
3月	0.18	-	↗	-0.30	-	↘
4月	-2.47	**	↘	-0.06	-	↘
5月	-1.33	-	↘	-0.66	-	↘
6月	-2.23	**	↘	0.79	-	↗
7月	-2.05	**	↘	1.45	-	↗
8月	-3.2	**	↘	-0.36	-	↘
9月	0.12	-	↗	-1.09	-	↘
10月	-0.72	-	↘	0.06	-	↗
11月	-1.21	-	↘	-0.03	-	↘
12月	-1.81	*	↘	-0.09	-	↘

2月及10—11月虽然有下降趋势,但并不显著。

2.2 参考作物腾发量的变化对灌溉需水量的影响

柳园口灌区位于河南省开封市,是黄河下游一个典型的引黄灌区。根据 Allen 等(1998),在没有水分胁迫的情况下,第 i 天的作物需水量为:ET<sub>i</sub>=k<sub>ci</sub>ET<sub>0i</sub>。这里 ET<sub>i</sub> 为第 i 天的作物需水量,mm/d;k<sub>ci</sub> 为第 i 天的作物系数,无量纲;ET<sub>0i</sub> 为第 i 天的参考作物需水量,mm/d。

一般来说,对于同一地区的同一种作物,k<sub>ci</sub> 年际变化并不大。当 ET<sub>0</sub> 下降时,作物需水量 ET 也随之下降。当有效降水量不能满足作物需水量时,就需要灌溉进行补充。通过对降雨的季节性检验可知,这几个月份的降水量并没有显著的变化趋势(表 3)。因此在降水不变的情况下,当 ET<sub>0</sub> 下降引起灌溉需水量的下降。

图 2 所示的柳园口灌区近年来的引黄水量变化情

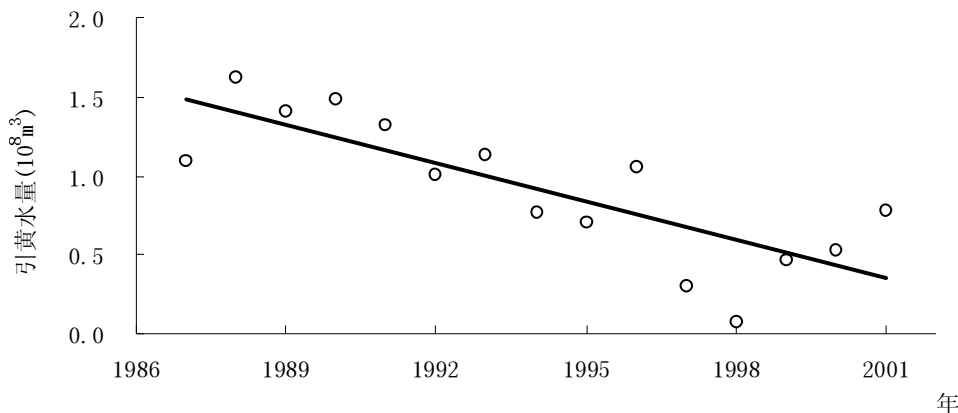


图2 柳园口灌区的引黄水量变化

况也进一步说明。从图中可以看出,自 20 世纪 80 年代末以来,灌区引黄水量具有明显的下降趋势。

### 3 讨论

对参考作物腾发量长期变化趋势的检验结果与倪广恒等(2004)<sup>[13]</sup>和任玉敦等(2007)<sup>[14]</sup>的研究结果是相符的。倪广恒等(2004)<sup>[13]</sup>的结果认为中国干半干旱和半湿润区的参考作物腾发量近年呈现减少趋势,但在每个区域只选择一个典型站点。柳园口灌区属于半湿润区,ET<sub>0</sub>的下降趋势具有典型性<sup>[11]</sup>,笔者的结果进一步证实了倪广恒等(2006)的结果。任玉敦的结果主要由直观分析得到,而笔者通过统计检验进一步证实了柳园口灌区近年来 ET<sub>0</sub>下降的事实。笔者认为柳园口灌区下降的主要原因是日照时数和风速的下降,这与任玉敦等(2007)<sup>[14]</sup>及 Xu 等(2006)<sup>[5]</sup>的结果是一致的。

对柳园口灌区近年来引黄水量下降现象,前人解释有两个方面,一是灌区实施了渠道衬砌等节水措施<sup>[17]</sup>,另一方面是由于黄河流量的减少导致分配给灌区的引水量减少<sup>[18]</sup>。笔者从气候变化的角度,说明作物需水量下降但降水量没有明显变化而引起灌溉需水量减少。虽然灌溉需水减少,但也可能对农业生产带来负面影响。

由于影响灌溉需水量的影响因素还包括灌区种植面积变化。近年来,中国城市化进程加快,耕地面积日趋减少;也是灌溉需水减少的一个可能原因。而笔者在这方面还没涉及。逐日计算长时间序列的作物需水量和灌溉需水量,将可以更清楚地反映气候变化条件下的灌溉需水量的变化过程。

在柳园口灌区,4 月为冬小麦的抽穗期,6—8 月是水稻、玉米、棉花和花生等多种作物的重要生育期。这段时期 ET<sub>0</sub>减小势必对作物光合作用强度、实际腾发量和作物生长产生重大影响,并可能最终影响作物产量。因此,在以后的研究中,不仅要注意到气候变化带来的节水效果,还要考虑它带来的负面影响。

### 4 结论

笔者通过对柳园口灌区的 ET<sub>0</sub> 进行趋势分析,得出以下结论:(1)在过去的 20 多年中,ET<sub>0</sub> 呈极显著的下降趋势,导致 ET<sub>0</sub> 下降的主要因素是日照时数下降,其次是风速的下降,而气温升高并没有直接引起 ET<sub>0</sub> 下降;(2)在降水量没有显著变化的情况下,灌溉节水的 ET<sub>0</sub> 的下降使灌溉需水量减少是柳园口灌区引黄水量减少的原因之一。灌区灌溉需水的变化既有采用节水灌溉技术和管理水平提高的原因,气候变化也会引起灌溉需水量的变化。(3)在以后的研究中,不仅要注

意到气候变化带来的节水效果,还要考虑它带来的负面影响。

### 参考文献

- [1] Trenberth K E, Jones P D, Ambenje P, et al. Observations: Surface and Atmospheric Climate Change [A]. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007:241-253.
- [2] Evans, T E. The effects of changes in the world hydrological cycle on availability of water resources. Global Climate Change and Agricultural Production. Wiley, Chichester, 1996:248pp.
- [3] Thomas A. Climatic changes in yield index and soil water deficit trends in China. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 102(2): 71-81.
- [4] 李远华,崔远来,杨常武,等.漳河灌区实时灌溉预报研究.水科学进展,1997,8(1):71-77.
- [5] Xu Chong-yu, Lebing Gong, Tong Jiang, et al. Analysis of spatial distribution and temporal trend of reference evapotranspiration and pan evaporation in Changjiang (Yangtze River) catchment. Journal of Hydrology, 2006, 327(1-2):81-93.
- [6] Kayane, I. Hydrological regions in Monsoon Asia. In: Yoshino, M. M. (Ed.), Water Balance of Monsoon Asia. University of Hawaii Press, Honolulu, 1971:287-300.
- [7] 气候变化对农业影响及其对策课题组. 气候变化对农业影响及其对策.北京:北京大学出版社,1992.
- [8] 霍再林,史海滨,陈亚新,等.内蒙古地区 ET<sub>0</sub> 时空变化与相关分析.农业工程学报,2004,20(6):60-63.
- [9] 胡顺军,康绍忠,宋郁东,等.阿拉尔灌区参考作物潜在腾发量的变化特征及相关分析.灌溉排水学报,2004,23(6):59-64.
- [10] 田俊武,尚松浩,孙艳丽,等.山西潇河灌区参考作物腾发量和降水的随机特性.农业工程学报,2005,21(10):26-30.
- [11] 梁丽乔,闫敏华,邓伟,等.松嫩平原西部参考作物蒸散量变化过程.地理科学进展,2006,25(3):22-31.
- [12] 迟道才,常秀华,张玉清.抚顺地区参考作物需水量与气候变化的关系分析.安徽农业科学,2006,34(15):3579-3581.
- [13] 倪广恒,李新红,丛振涛,等.中国参考作物腾发量时空变化特性分析.农业工程学报,2004,22(5):1-4.
- [14] 任玉敦,崔远来,江炜.参考作物腾发量随长期年际变化规律及其机理探讨.灌溉排水学报,2007,26(4):8-10.
- [15] Allen R G, Pereira L S, Raes D, Smith M. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56, United Nations - FAO, Rome, Italy. 1998.
- [16] 丁晶,邓育仁.随机水文学.成都:成都科技大学出版社,1988.
- [17] 马绍君,冯跃华,方兴华,等.开封市引黄灌区存在的问题及农业节水措施.中国农村水利水电,2003,7:28-29.
- [18] 佟春生,黄强,刘涵,等.黄河径流序列标度不变性分析及趋势预测研究.自然资源学报,2007,22(4):634-639.