灌溉对景泰灌区年潜在蒸散量的影响

韩松俊[1]，刘群昌[1]，胡和平[2]，杨大文[2]

（1. 中国水利水电科学研究院水利研究所，北京 100048；
2. 清华大学水利水电工程系水沙科学与水利水电工程国家重点实验室，北京 100084）

摘要：基于蒸散发互补相关原理，定量分析和预测了引黄灌溉发展对甘肃景泰灌区年潜在蒸散量的影响。景泰灌区从1972年开始引黄灌溉，年蒸发皿蒸发量和潜在蒸散量随着灌溉引水消耗的增大而减小，其中空气动力学项下降的趋势非常明显，潜在蒸散量的变化主要受到风速下降和相对湿度增大的影响，与引黄灌溉有密切关系。根据互补相关平流-干旱模型分析了年潜在蒸散量随灌区耗水量的变化规律，并在假定年降水量和年潜在蒸散量中辐射项保持多年平均值的情况下，预测了不同耗水量情景下的年潜在蒸散量。

关键词：灌溉；潜在蒸散量；互补相关；气候变化

中图分类号：S161.4　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1001-6791(2010)03-0364-06

潜在蒸散量对实际蒸散量的估算和区域气候特性的分析具有非常重要的意义。研究发现，过去50年全球及中国潜在蒸散量都发生了显著下降[1-2]。潜在蒸散量的变化一方面受到自然因素变化的影响，另一方面也受到区域小气候变化的影响。在农业地区，灌溉引水的变化影响区域小气候，使当地气温、相对湿度甚至风速等气象要素发生变化[3]，进而影响潜在蒸散量[4]。例如位于黄河流域甘肃省景泰县中部的景泰一期提水灌区，自1972年从黄河提水以来，灌区的耗水量和气候特性都发生了显著变化，同时潜在蒸散量也发生了明显变化。一方面，分析灌溉对潜在蒸散量变化的影响对于认识绿洲灌区维持机理，进行灌区生态环境建设和保护具有非常重要的意义[5]。另一方面，潜在蒸散量的变化会影响灌区需水量，进而影响灌区水资源消耗，如果以当前蒸散发能力去估算未来情景下的实际蒸散量，则会引起预测结果的偏差。因此在灌区需水预测、灌溉定额确定等工作中需要分析研究灌溉引水对潜在蒸散量的影响，确定不同灌溉情景下潜在蒸散量的大小。

由于涉及陆面和大气之间复杂的相互作用机制，难以在一个地区进行灌溉对潜在蒸散变化影响的定量分析和研究。蒸散发互补相关原理基于陆面与其上部大气之间的相互作用，研究陆面实际蒸散发与潜在蒸散发之间的相互影响，可分析因灌溉引起的实际蒸散的变化对潜在蒸散的影响[4]。互补相关原理在降水稀少、人类活动影响剧烈的干旱、半干旱灌区已得到了验证和应用，如土耳其的Harran Plain平原灌区[4]，塔里木河流域叶尔羌平原绿洲灌区[6]等。本文基于蒸散发互补相关平流-干旱模型建立了适用于干旱区绿洲灌区的蒸散发互补相关模型，在甘肃省景泰引黄灌区得到了验证，定量分析和评价了灌溉引水变化对景泰灌区潜在蒸散量的影响，并预测了灌溉引水量增大情景下潜在蒸散量的变化。

1 研究区概况

景泰一期提水灌区位于甘肃省河西走廊地区景泰县中部，位于103°39′～104°11′E，37°04′～37°20′N之间，总面积366.7 km^2，现状灌溉面积20 000 hm^2，是从黄河提水的大型高扬程提水灌区，地理位置见图1。

收稿日期：2009-07-10
基金项目：国家自然科学基金资助项目(50579031；50909097)；“十一五”国家科技支撑计划资助项目(2006BAD11B08)
作者简介：韩松俊(1981－)，男，湖北老河口人，博士，主要从事蒸散发规律与节水灌溉等方面研究。
E-mail：hansj@iwhr.com

灌区离黄河最近距离约 10 km，内部基本无常年性地表径流，只有 3 条干沟在暴雨季节形成短暂的洪流，灌区的灌溉水源全部来自黄河。引黄灌溉工程于 1972 年开始引水，灌溉面积由最初的 3466.7 hm^2 发展到 2009 年的 20400 hm^2，提水量由 0.35 亿 m^3 增加到 1991 年最大 1.73 亿 m^3，之后灌溉引水量基本保持稳定[7]。

景泰灌区位于暖温带荒漠地区，属温带干旱大陆性气候，多年平均降水量 183 mm，多年平均蒸发皿蒸发量 2600 mm（Φ20）。本文收集和整理了中国气象局发布的研究区内景泰气象站从 1957～2005 年的月降雨量、日平均气温、最高气温和最低气温、相对湿度、2 m 风速和日照时数等气象观测资料。灌区耗水量数据采用陈文根据水量平衡计算的结果[7]，尽管由于土壤蓄水量的变化等因素存在一定误差，但水量平衡法对灌区年灌溉引水消耗量计算能够满足精度要求，且通过水量平衡计算结果与其它方法如面积定额还原法差异不大。在分析过程中将耗水量平均到整个灌区，得到面平均耗水量。

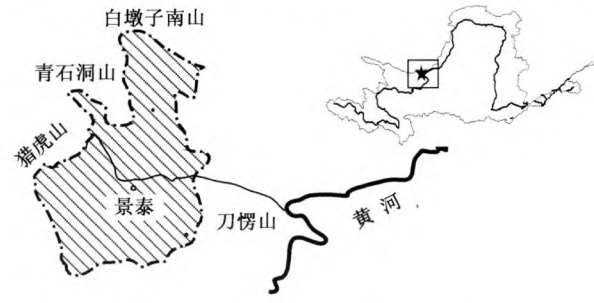

图 1　研究区地理位置示意图

Fig. 1　Sketch of the study area

2　景泰灌区潜在蒸散量变化及影响因素分析

2.1　景泰灌区潜在蒸散量变化

在研究期内，由于灌溉引水的变化，景泰灌区的耗水量以及潜在蒸散量都发生了显著的变化。图 2 中给出了景泰灌区从 1957～2001 年的年耗水量（E_{Irr}）、蒸发皿蒸发量（E_{pan}）和 Penman 潜在蒸散量（E_0）的变化过程。由于降水稀少，且年际变化并不显著，景泰灌区耗水量的变化一定程度上反映了灌区实际蒸散量的变化。从图 2 中可以看出，景泰灌区年潜在蒸散量与蒸发皿蒸发量具有相似的变化过程，文中将主要针对潜在蒸散量进行分析。

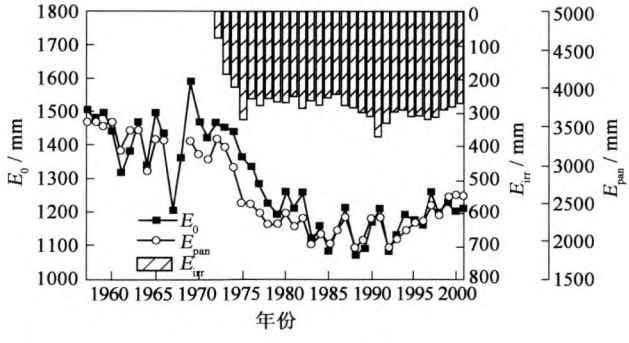

图 2　1957～2001 年景泰灌区年潜在蒸散量、蒸发皿蒸发量和耗水量的变化过程

Fig. 2　Plots of E_0, E_{pan} and E_{irr} in Jingtai irrigation district from 1957 to 2001

Penman 潜在蒸散量（E_0）由辐射项（E_{rad}）与空气动力学项（E_{aero}）两部分组成。把景泰灌区分为引黄灌溉前（1957～1971 年）、灌溉引水量增大（1972～1991 年）和灌溉引水量基本保持稳定（1992～2001 年）3 个阶段，采用 Yue 等[8]提出的经过无趋势白化预处理的非参数统计检验 Mann-Kendall 方法分析了年耗水量（E_{irr}）、年降水量（P）、年蒸发皿蒸发量、年潜在蒸散量中的辐射项（E_{rad}）和空气动力学项（E_{aero}）的变化趋势和标准化的检验统计量（表 1）。当 $|Z_{MK}| > |Z_{1-\alpha/2}|$ 时，在显著性水平 α 上拒绝无趋势假定，其中 $Z_{1-\alpha/2}$ 是概率超过 $\alpha/2$ 时标准正态分布值，如取 $\alpha = 0.05$，则当 $|Z_{MK}| > 1.96$ 时，趋势具有该水平上的显著性。

从图 2 和表 1 可看出，景泰灌区蒸发皿蒸发量和潜在蒸散量的变化与耗水量的变化具有一定联系。在引黄灌溉之前，景泰灌区蒸发皿蒸发量和潜在蒸散量基本保持稳定，略有下降趋势；在耗水量迅速增大的 1972～1991 年（趋势值 8.17 mm/a），年蒸发皿蒸发量和潜在蒸散量显著减小；而在 1992 年灌溉引水消耗开始基本稳定并略有减小阶段，年蒸发皿蒸发量和潜在蒸散量产生回升的趋势。潜在蒸散量中辐射项和空气动力学项的变化趋势具有显著不同，辐射项相对稳定，而空气动力学项具有显著的变化趋势，特别是在灌溉引水量增加的 1972～1991 年趋势值达到了 −33.93 mm/(10a)。

表1 景泰灌区实际蒸散发和潜在蒸散量变化趋势 mm/(10a)

Table 1 Trends of actual and potential evapotranspiration in Jingtai irrigation district

分析时段			E_{irr}	P	E_{pan}	E_0	E_{rad}	E_{aero}
引黄灌溉前	1957~1971	Z_{MK}	-	0.55	-2.54	-0.33	0.44	-0.55
		趋势	-	4.55	-33.70	-3.45	1.23	-5.08
引黄灌溉后	1972~1991	Z_{MK}	0.52	-0.31	-2.61	-3.23	0.52	-3.02
		趋势	8.17	1.49	-125.24	-34.26	2.43	-33.93
	1992~2001	Z_{MK}	1.61	0.14	3.29	2.45	2.10	2.38
		趋势	1.75	0.84	29.75	4.39	1.40	2.69

2.2 影响潜在蒸散量的气象因子

潜在蒸散发中辐射项和空气动力学项分别受到太阳辐射、气温、风速、相对湿度等多项气象因子的影响，表2中对比列出了引黄灌溉前后景泰灌区平均气温(T_{mean})、太阳辐射(R_s)、相对湿度(RH)和风速(U_2)的大小。从中可看出，引黄灌溉前后日平均气温显著上升(10%)，风速显著下降(-48%)，相对湿度有一定增大(2%)，而太阳辐射没有明显变化。

表2 引黄灌溉前后景泰灌区平均潜在蒸散发量及气象变量

Table 2 Average meteorological conditions before and after irrigation

时段	T_{mean}/℃	Rs/($W^2 \cdot m^{-1}$)	RH/%	U^2/($m \cdot s^{-1}$)
1957~1971	8.29	185.79	45.73	3.67
1972~1991	8.30	186.91	47.61	2.54
1992~2001	9.16	185.94	46.53	1.91

由于景泰灌区的日平均气温、风速和相对湿度存在变化趋势，分别分析这3种气象变量的变化对潜在蒸散量的影响。在分析中分别采用去趋势化后的日平均气温、相对湿度和风速，而其它气象要素保持不变，重新计算了年潜在蒸散量及其辐射项和空气动力学项[6]。表3中分别给出了去趋势化处理前后景泰灌区不同阶段潜在蒸散量及其辐射项和空气动力学项的大小。从中可以看出，对日平均气温进行去趋势化后，辐射项增大的趋势减弱，但潜在蒸散量的下降趋势没有受到太大影响；对相对湿度进行去趋势化后，由于空气动力学项的变化，潜在蒸散量下降的趋势有一定减弱；对2 m风速进行去趋势化后，空气动力学项受到影响，潜在蒸散量下降的趋势变得非常不明显。综合以上的分析可知，景泰灌区潜在蒸散量的下降主要受到风速下降和相对湿度增大的影响，且风速的影响尤为明显。

表3 气象因子去趋势化处理后不同阶段潜在蒸散发量与原值对比 mm

Table 3 Variations in potential evapotranspiration and values recalculated from detrended meterological variables

时段	原值			T_{mean}去趋势化			RH去趋势化			U_2去趋势化		
	E_{rad}	E_{aero}	E_0	E_{rad}	E_{aero}	E_0	E_{rad}	E_{aero}	E_0	E_{rad}	E_{aero}	E_0
1957~1971	624.0	803.3	1427.3	619.7	798.1	1417.8	623.3	807.6	1430.9	624.0	860.3	1484.3
1972~1991	629.8	610.0	1239.8	615.2	597.5	1212.7	627.7	621.4	1249.2	629.8	800.2	1430.0
1991~2001	638.1	548.5	1186.6	615.7	529.9	1145.7	634.5	565.6	1200.1	638.1	877.2	1515.4

与全国和西北地区气候变化趋势对比发现，研究期间景泰灌区气温的变化趋势(0.21℃/(10a))与全国(约0.22℃/(10a))和西北地区(约0.2℃/(10a))年平均气温变化的趋势值差异不大；景泰灌区太阳辐射变化趋势并不明显，而同期西北地区太阳辐射的变化也并不显著；景泰灌区相对湿度呈增大趋势，特别是引黄灌溉初期1972~1991年增大显著(1.06%/(10a))，比西北地区相对湿度的变化趋势显著；风速的显著下降，特别是引黄灌溉前后风速从第一阶段的3.67 m/s下降到第三阶段约1.91 m/s，远大于全国(每10a 0.095 m/s)和西北地区风速变化趋势[9]。这些对比说明景泰灌区潜在蒸散量的变化既受到大尺度气象要素变化的影响，同时也受到局地小气候特性变化的影响，而通过前面的分析可知，景泰灌区局地小气候的变化明显受到引黄灌溉发展的影响。韩松俊等[9]在塔里木河流域的16个绿洲气象站点，曹红霞等[10]在关中地区，Ozdogan在土耳其东南部Harran平原的一个灌区[4]也发现了这种灌溉引水增大与潜在蒸散发和风速显著下降同时发生的现象。景泰灌区灌溉发展前后年潜在蒸散量下降17%，而风速下降约50%，与其它绿洲灌区变化的量级也比较接近。

3　引黄灌溉对景泰灌区潜在蒸散量的影响

3.1　基于互补相关原理的分析

蒸散发互补相关原理假定，在给定的辐射条件下，当充分供水时实际蒸散量与潜在蒸散量相等，定义为湿润环境蒸散发(E_w)。当下垫面供水量减少时，实际蒸散量会减少，从而释放出更多的能量成为显热，大气与陆面的相互作用使该地区气候特性发生变化，从而导致潜在蒸散量增加，增加量与实际蒸散量减少量可以假定为某一比例。基于蒸散发互补相关原理的平流-干旱模型应用广泛[4]，认为潜在蒸散量 E_0 由 Penman 公式计算，湿润环境蒸发量 E_w 由 Prestley-Taylor 公式计算，可以表示为以下的形式：

$$E_0 - E_w = b(E_w - E) \tag{1}$$

式中　b 为比例系数，主要反映区域特性的影响。

对景泰灌区这样的干旱区提水灌区，降水稀少，不能形成有效的产汇流并且大多直接用于蒸发，河道和地下水侧渗对区域蒸散发的影响很小，区域年蒸散发消耗的水量由耗水量与降水量($P + E_{irr}$)两部分组成，且主要由灌溉引水量供给。将实际蒸散发和湿润环境蒸散发的表达式代入式(1)，并在两端同时除以潜在蒸散量，通过代数变换把式(1)转化为以下形式：

$$\frac{P + E_{irr}}{E_0} = a\left(1 + \frac{1}{b}\right)\frac{E_{rad}}{E_0} - \frac{1}{b} \tag{2}$$

式中　a 为 Priestley-Taylor 公式系数，取值约为 1.26。

为了验证景泰灌区的蒸散发互补相关关系，以年耗水量与年降水量之和作为 1972 ~ 2001 年的年实际蒸散量，而 1971 年之前以年降水量作为年实际蒸散量。把景泰灌区从 1957 ~ 2001 年的年 E/E_0 和 E_{rad}/E_0 的数据点绘到图 3(a)中并采用式(2)进行拟合。较好的拟合效果($R^2 = 0.80$)说明蒸散发互补相关关系在景泰灌区是成立的。

在年时间尺度，降水量在实际蒸散量中所占比例较小且相对稳定，根据式(2)，在不考虑区域互补相关特性变化(即 a 和 b 保持不变)的情况下，耗水量与潜在蒸散量之间存在相互作用关系，当灌区耗水量发生变化时，潜在蒸散量也会随之发生变化。图 3(b)中点绘了年潜在蒸散量及其辐射项随灌区实际蒸散量的变化过程，从中看出年潜在蒸散量中辐射项与灌区实际蒸散量之间并没有明显的相关关系，并且辐射项基本保持稳定，而空气动力学项随着实际蒸散量的增大而下降。已知降水的变化趋势并不显著，因此可知景泰灌区潜在蒸散量随着灌区耗水量的增大而下降。

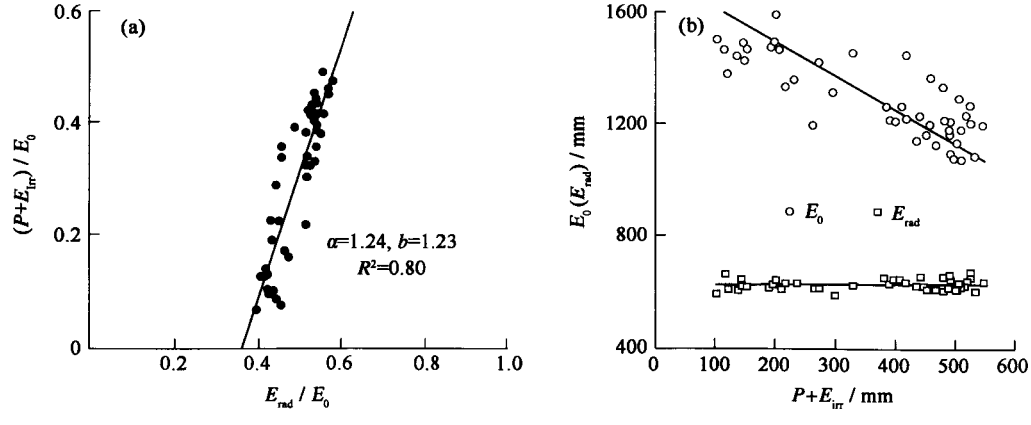

图 3　景泰灌区(a)$(P + E_{irr})/E_0$ 与 E_{rad}/E_0 和 (b) E_0(E_{rad}) 与 $P + E_{irr}$ 关系图

Fig. 3　Plots of $(P + E_{irr})/E_0$ vs E_{rad}/E_0(a), E_0 and E_{rad} vs $P + E_{irr}$(b) in Jingtai Irrigation district

3.2　引黄灌溉对潜在蒸散量影响的预测

在景泰灌区发展的不同历史时期，不同的灌溉引水量对应着不同的蒸散发能力水平。由于潜在蒸散量中

辐射项保持稳定,取其多年平均值630 mm,通过式(2)拟合计算了1957～2001年景泰灌区的潜在蒸散量,其变化过程及与通过Penman公式计算的潜在蒸散量的比较见图4。从图4中可以看出,这种方法对年潜在蒸散量的拟合较好,预测值与Penman公式计算值采用截距为0的线性拟合确定性系数为0.67。

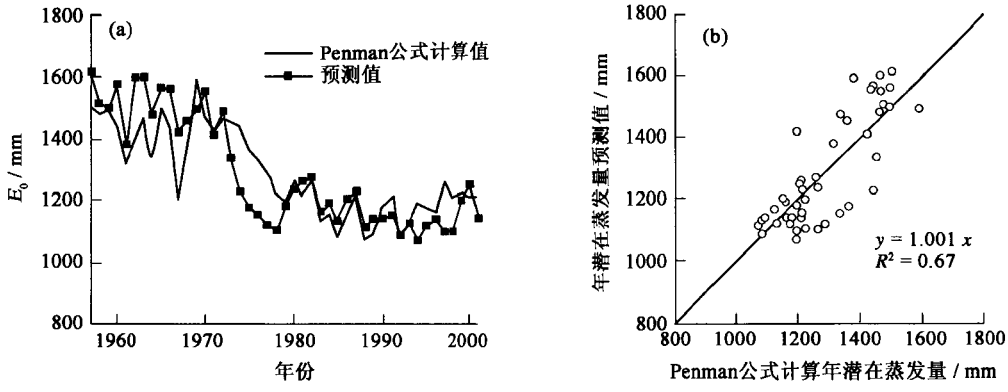

图4 景泰灌区年潜在蒸散量Penman公式计算值与预测值的比较

Fig. 4 Comparison between predicted and measured potential evaporation in Jingtai irrgation district

由于灌溉引水变化引起的实际蒸散发的变化将会影响潜在蒸散量的大小,如果把不同耗水水平下的潜在蒸散量作为一个定值,则在灌区规划和需水预测时会造成显著的误差,因此,需要分析不同灌区耗水水平下年潜在蒸散量的变化。根据蒸散发互补相关平流-干旱模型可以预测不同耗水量情景下景泰灌区潜在蒸散量的大小,在分析过程中假定辐射项保持不变,并且取降水量为多年平均值。则当耗水量分别增大到400 mm、450 mm和500 mm情景下,潜在蒸散量的值应为1051 mm、990 mm和928 mm。但是需要注意的一点是,式(2)所表示的蒸散发互补相关模型在湿润的环境下存在系统偏差,当耗水量增大较多时通过式(2)预测的潜在蒸散量可能会存在一定偏差。

4 结 论

景泰灌区引黄灌溉之后实际蒸散发和潜在蒸散量都发生了显著变化。在景泰灌区引水灌溉之前(1957～1971年),潜在蒸散量没有显著的变化趋势,而随着1972年开始引黄灌溉,灌溉引起灌区实际蒸散量显著增大,与此同时,年潜在蒸散量中的空气动力学项随之发生相反趋势的变化。潜在蒸散量的变化主要受到风速下降和相对湿度增大的影响,与引黄灌溉具有紧密联系。当耗水量增大时,灌区的潜在蒸散量相应下降,耗水量、降水量、潜在蒸散量以及其辐射项的变化规律符合蒸散发互补相关关系。根据蒸散发互补相关模型可以定量预测不同耗水量情景下潜在蒸散量的大小。

在干旱区绿洲灌区,灌溉发展引起风速下降、相对湿度增大等,造成潜在蒸散量的减小在绿洲维持与发展中非常重要,在灌区生态环境建设和保护中需要考虑灌溉的影响。另一方面由于灌溉影响潜在蒸散量,不同的灌溉耗水水平与一定的潜在蒸散量对应,如果以当前耗水水平下蒸散发能力去估算未来情景下的实际蒸散量,则会引起预测结果的偏差。因此在灌区需水预测、灌溉定额确定等工作中需要确定不同灌溉引水消耗水平下潜在蒸散量的大小。

参考文献:

[1] 丛振涛,倪广恒,杨大文,等. "蒸发悖论"在中国的规律分析[J]. 水科学进展, 2008, 19(2): 147-152. (CONG Zhen-tao, NI Guang-heng, YANG Da-wen, et al. Evaporation paradox in China[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(2): 147-152. (in Chinese))

[2] BRUTSAERT W A M. Hydrologic cycle explains the evaporation paradox[J]. Nature, 1998, 396: 30.

[3] 李建云,王汉杰. 南水北调大面积农业灌溉的区域气候效应研究[J]. 水科学进展, 2009, 20(3): 343-349. (LI Jian-yun,

WANG Han-jie. Regional climate effects of large-scale agricultural irrigation related to South-to-North Water Transfer Project in China[J]. Advances in Water Science, 2009, 20(3): 343-349. (in Chinese))

[4] OZDOGAN M, SALVUCCI G D. Irrigation-induced changes in potential evapotranspiration in southeastern Turkey: Test and application of Bouchet's complementary hypothesis[J]. Water Resources Research, 2004, 40, W04301。[doi:10.1029/2003WR002822].

[5] 高艳红，陈玉春，吕世华. 灌溉在现代绿洲维持与发展中的重要作用[J]. 中国沙漠, 2002, 22(4): 383-386. (GAO Yan-hong, CHEN YÜ-chun, LU Shi-hua. Role of irrigation in maintenance and development of modern oasis[J]. Journal of Desert Research, 2002, 22(4): 383-386. (in Chinese))

[6] 尚松浩，孙丽艳，郝增超. 互补相关原理在绿洲月蒸发量估算中的应用[J]. 水文, 2008, 28(3): 67-69. (SHANG Song-hao, SUN Li-yan, HAO Zeng-chao. Using complementary relationship to estimate monthly evapotr anspir ation in arid oasis[J]. Journal of China Hydrology, 2008, 28(3): 67-69. (in Chinese))

[7] 陈文. 景泰川"提黄"灌区水量还原分析研究[J]. 农业科技与信息, 2005(6): 47-48. (CHEN Wen. Analysis on the restoration of water amount in jingtaichuan irrigation strict[J]. Information of Agriculatural Science and Technology, 2005(6): 47-48. (in Chinese))

[8] YUE S, PILON P, PHINNEY B, et al. The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series[J]. Hydrological Processes, 2002, 16: 1807-1829.

[9] HAN S, HU H, YANG D, et al. Differences in changes of potential evaporation in the mountainous and oasis regions of the Tarim basin, Northwest China[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2009, 52(7): 1981-1989.

[10] 曹红霞，粟晓玲，康绍忠，等. 陕西关中地区参考作物蒸发蒸腾量变化及原因[J]. 农业工程学报,, 2007, 23(11): 8-16. (CAO Hong-xia, SU Xiao-ling, KANG Shao-zhong, et al. Changes of reference crop evapotranspiration and causes in Guanzhong region of Shaanxi province[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(11): 8-16. (in Chinese))

Impacts of irrigation on annual potential evapotranspiration in Jingtai irrigation district*

HAN Song-jun[1], LIU Qun-chang[1], HU He-ping[2], YANG Da-wen[2]

(1. *Department of Irrigation and Drainage, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing* 100048, *China*;

2. *State Key Laboratory of Hydro-Science and Engineering, Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing* 100084, *China*)

Abstract: Changes in potential evapotranspiration will affect the projection of water demand and the determination of irrigation quota in a region. In order to evaluate the influence of irrigation on the maintenance and development of agricultural oasis, the impacts of irrigation on annual potential evapotranspiration in Jingtai irrigation district of Gansu province are quantitatively analyzed and projected using the advection-aridity complementary relationship in regional evapotranspiration. A declined trend has been observed from both annual pan evaporation records and estimated potential evapotranspiration since the introduction of Yellow River irrigation in 1972. The observed aerodynamic forcing has been significantly weakened in the region, and the declined trend in potential evapotranspiration is likely due to the weakening in wind speed and increasing in relative humidity that is affected by irrigation. Future variations in potential evapotranspiration with different water consumptions are simulated using the long-term mean annual precipitation and the solar radiation conditions, and the results are presented.

Key words: irrigation; potential evapotranspiration; complementary relationship; climate change

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 50579031; No. 50909097) and the National Key Technologies R&D Program of China during the 11th Five-year Plan Period (No. 2006BAD11B08).