

灌区潜水蒸发有效性评价

罗玉峰^{1,2}, 李思^{1,2}, 彭世彰¹, 郑强^{1,2}, 冯跃华³, 朱非林¹, 缴锡云^{1,2}

(1. 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;
2. 河海大学南方地区高效灌排与农业水土环境教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;
3. 河南省豫东水利工程管理局惠北水利科学试验站, 河南 开封 475101)

摘要: 为了提高潜水蒸发有效利用率, 以河南省柳园口灌区为例, 基于 GIS 的区域潜水蒸发计算方法, 从潜水蒸发有效利用的必要条件入手, 提出潜水蒸发有效性评价标准, 区分了灌区的有效和无效潜水蒸发。结果表明: 柳园口灌区多年平均潜水蒸发量为 0.508 亿 m³, 其中无效潜水蒸发量为 0.262 亿 m³, 占 51.6%; 有效潜水蒸发主要集中在 3—5 月, 6—8 月次之, 10 月的无效潜水蒸发最多, 其他月份也都有一定的无效潜水蒸发量; 2—5 月的潜水蒸发主要发生在灌区中部和北部, 麦地的为有效潜水蒸发, 非农业用地的为无效潜水蒸发; 提出的灌区潜水蒸发有效性评价方法简单实用, 易于区域化。

关键词: 灌区; 潜水蒸发; 地下水管理; 土地利用类型; 土壤类型

中图分类号: TV93 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2014)04-0005-05

Assessment of effectiveness of groundwater evapotranspiration in an irrigation district// LUO Yufeng^{1,2}, LI Si^{1,2}, PENG Shizhang¹, ZHENG Qiang^{1,2}, FENG Yuehua³, ZHU Feilin¹, JIAO Xiyun^{1,2} (1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Key Laboratory of Efficient Irrigation-Drainage and Agricultural Soil-Water Environment in Southern China (Hohai University), Ministry of Education, Nanjing 210098, China; 3. Huibei Water Science Experiment Station, East Henan Water Projects Management Bureau, Kaifeng 475101, China)

Abstract: To improve the utilization efficiency of groundwater evapotranspiration, the regional groundwater evapotranspiration in the Liuyuankou Irrigation District was firstly calculated based on geographic information system (GIS). From the aspect of the requirements of effective use of groundwater evapotranspiration, the evaluation criteria of effectiveness of groundwater evapotranspiration was then proposed, and then the effective and non-beneficial groundwater evapotranspiration were distinguished. The results show that the annual groundwater evapotranspiration in the Liuyuankou Irrigation District is 5.08×10⁷ m³, among which 2.62×10⁷ m³, accounting for 51.6%, is non-beneficial. Most effective groundwater evapotranspiration occurs from March to May, followed by June to August and most non-beneficial groundwater evapotranspiration occurs in October, while there is some non-beneficial groundwater evapotranspiration in other months. From February to May, groundwater evapotranspiration mainly exists in the middle and north parts, among which the evapotranspiration in wheat land is effective while in non-agricultural land non-beneficial. The proposed method for evaluating effectiveness of groundwater evapotranspiration in irrigation districts is simple and practical, and is easy to be used in a regional scale.

Key words: irrigation district; groundwater evapotranspiration; groundwater management; type of land use; soil type

潜水蒸发可为作物或生态植被提供水分,但同时也引起大量的水分损失^[1]。在地下水埋深较浅(埋深 3~5m)的地区,区域性的潜水蒸发量不可忽视^[2]。海河流域东部平原的无效潜水蒸发量达 80 亿 m³,约为水资源总量的 1/5,如果能有效利用这部分潜水,华北地区的水资源供需状况将大为改善^[3]。河套灌区义长灌域多年平均潜水蒸发量达 355.5 万 m³,至少有 36.6% 不能被作物利用。新疆全区地下水埋深小于 2m 的面积有 3.9 万 km²,年潜水蒸发量达 269 亿 m³,占地下水补给总量的 68%。近年来,潜水蒸发引起的水量损失问题越来越多地受到重视,在农业用水日益紧缺的形势下,提高灌区

潜水蒸发有效性具有重要意义。

由于潜水蒸发能被作物和生态植被利用,达到减少灌溉水量和保持生态平衡的效果,潜水蒸发的有效利用较早地受到关注^[4-5]。对于潜水蒸发有效利用或减少无效损失,目前提出了一些调控措施,关于调控机理也有了初步研究。区分有效和无效潜水蒸发是进行调控机理研究的基础,因此有必要进行潜水蒸发有效性评价研究。王晓赞^[6]以小麦为例,认为有效潜水蒸发是指能被小麦吸收利用并蒸腾掉的那部分潜水蒸发量,并注意到土壤蒸发和小麦的蒸腾是同时存在的,但在试验过程中无法将二者区分开,为此提出了有效潜水蒸发系数的概念,并以此指导小麦灌溉,但这种方法需要大量试验数据支撑,在实际中由于作物种类多样和地下水位的时空变化,采用这种方法需要在灌区内布置众多试验点,不可避免地产生较高的试验成本。本文从潜水蒸发有效利用的必要条件入手,提出潜水蒸发有效性评价标准,区分有效和无效潜水蒸发,为灌区潜水蒸发调控研究提供依据。

1 灌区概况

柳园口灌区地处河南省开封市境内,位于东经114°21' ~ 114°47'、北纬34°35' ~ 34°53'之间,属于淮河流域惠济河水系,东至圈章河中支以西,西至开封市郊区,南至惠济河,北到黄河大堤。灌区从黄河柳园口闸引水灌溉,灌区内渠系与水系如图1所示。灌区控制面积为40 724 hm²,耕地面积为30 900 hm²。灌区属半湿润半干旱气候带,气候温和,无霜期长,多年平均降水量627 mm,多年平均蒸发量为1 316 mm。土壤质地为轻壤土和砂壤土,地下水平均埋深为2 ~ 4 m。灌区内以种植水稻、小麦及玉米为主。罗玉峰^[7]研究表明,柳园口灌区由于潜水蒸发引起的水量损失约为0.35 亿 m³/a,为引黄水量的44%,基于灌区潜水蒸发的有效性评价,可进一步研究灌区潜水蒸发有效性调控策略。

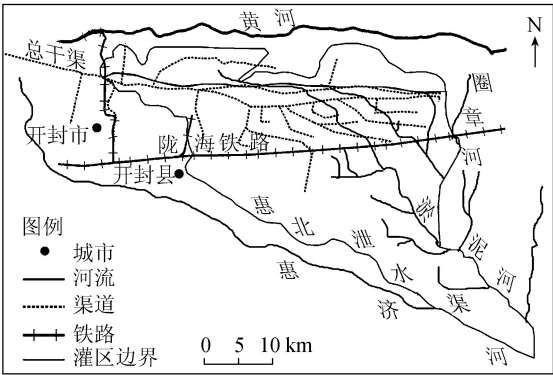


图1 柳园口灌区渠系与水系

2 灌区潜水蒸发计算

2.1 土地利用类型

对柳园口灌区近30年的遥感数据(影像为ETM+数据,分辨率为30 m×30 m)进行解译,所选用的遥感数据时相在水稻生育期,2000年的解译结果如图2(a)所示。将所得土地利用类型图输入ArcGIS 10.0系统,采用系统的“重采样”功能将栅格(分辨率)大小设置为500 m×500 m^[8],如图2(b)所示。采用系统的“重分类”功能将柳园口灌区的土地利用类型分为两类:6—9月为水田、旱地及其他用地(包括裸地、建筑用地、水域、林地等);10月至次年5月为小麦地及其他用地。

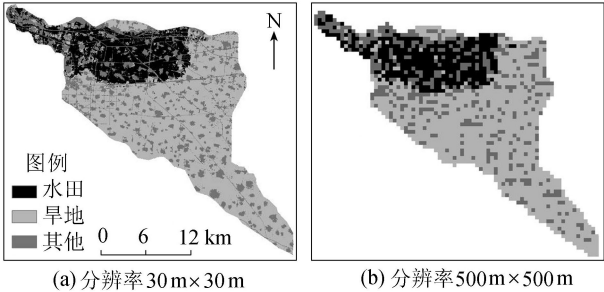


图2 2000年不同分辨率的土地利用

2.2 地下水埋深

根据柳园口灌区1981—2010年的逐月地下水埋深资料,分析地面高程与地下水位的关系,采用考虑地面高程的协克里金法对灌区地下水埋深进行栅格化插值,即首先对地下水位进行插值计算,然后通过地面高程减去地下水位即可得到地下水的埋深。选取500 m×500 m栅格大小,得到柳园口灌区30年逐月地下水埋深分布图,图3为2000年1月和6月的地下水埋深分布。

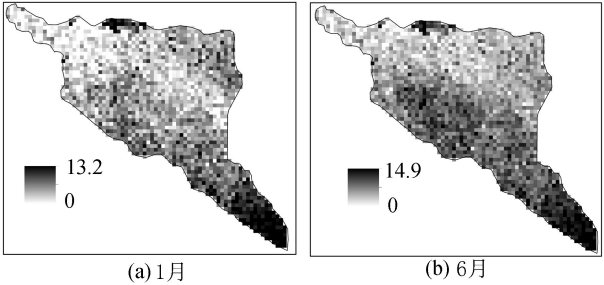


图3 2000年地下水埋深分布(单位:m)

2.3 土壤类型

通过实地调查来验证收集到的土壤类型矢量图(1:20万分县土壤类型图)。在此矢量图的基础上,使用ArcGIS10.0的Conversion Tools模块中的“转为栅格-面转栅格”工具,将土壤类型矢量图转化为500 m×500 m栅格图,实现与土地利用/覆被变化图、地下水埋深图格式与栅格大小的统一,得到灌区

土壤类型栅格分布图。柳园口灌区土壤类型主要为砂壤土和轻壤土。

2.4 水面蒸发

水面蒸发综合反映了气象因素的变化,因而可用水面蒸发表征气象因素对潜水蒸发的影响。灌区内只有河南省豫东水利工程管理局惠北水利科学试验站内的一个气象站观测水面蒸发,收集到1981—2011年的逐日水面蒸发量,整理成逐月水面蒸发量用于潜水蒸发计算。由于灌区面积并不太大,可采用这一站点的数据代表整个区域水面蒸发量。

2.5 公式参数

作物种植条件是影响潜水蒸发的主要因素之一。采用最小二乘法,运用改进的阿维里扬诺夫潜水蒸发公式^[9]计算裸地条件和作物种植条件下的潜水蒸发公式参数值(表1),其中 $K_{c,ini}$ 、 $K_{c,mid}$ 、 $K_{c,end}$ 分别为作物生长初期、中期和末期的作物影响系数; h_0 为潜水蒸发极限埋深(地下水埋深大于该值时,潜水蒸发微弱,可忽略不计); n 为经验指数,一般取1~3。

表1 不同条件下潜水蒸发公式参数值

条件	土壤类型	$K_{c,ini}$	$K_{c,mid}$	$K_{c,end}$	h_0/m	n
小麦	轻壤土	0.44	1.45	0.84	2.780 2	2.566 0
	砂壤土	0.57	1.56	1.06	3.461 3	2.668 0
玉米	轻壤土	0.52	0.78	0.74	2.659 4	2.660 4
	砂壤土	0.58	0.90	0.65	3.098 9	2.584 0
裸地	轻壤土				2.806 7	2.600 3
	砂壤土				3.123 0	2.600 3

2.6 计算方法

灌区潜水蒸发计算采用罗玉峰等^[10]提出的基于GIS的区域潜水蒸发计算方法,该方法首先确定灌区适合的栅格大小,并对该区域进行栅格划分;然后分析土地利用类型、地下水埋深、土壤类型、水面蒸发等控制因素对潜水蒸发的影响,将这些因素以栅格的形式输入ArcGIS系统,再通过基于VBA的Arcobjects编程^[11]计算各栅格的潜水蒸发量,进而计算灌区的总潜水蒸发量。采用改进的阿维里扬诺夫公式逐栅格计算潜水蒸发量:

$$E_c = K_c E_0 \left(1 - \frac{h}{h_0}\right)^n \tag{1}$$

式中: E_c 为潜水蒸发强度,mm/d; K_c 为作物影响系数,裸地时 $K_c = 1$; E_0 为水面蒸发强度,mm/d; h 为地下水埋深,m。

3 潜水蒸发有效性评价

作物生长需要的水分主要来自潜水、降水和灌溉水^[6]。在作物生长条件下的潜水蒸发可分为两部分:一部分通过作物的茎叶蒸腾散失到大气中;另

一部分通过土壤表面蒸发到大气中。王晓赞^[6]通过试验方法来区分有效和无效潜水蒸发,这种方法需要观测作物耗水量、土壤水损失量、地下水深层渗漏量及水平渗漏量等诸多参数,且难以提升到区域尺度。这里从潜水蒸发有效利用的必要条件入手,逐个栅格单元定量区分有效和无效潜水蒸发,最初

$$E_e = \begin{cases} 0 & \text{无作物} \\ E & \text{有作物} \end{cases} \tag{2}$$

式中: E_e 为有效潜水蒸发量; E 为潜水蒸发量。式(2)表明耕地和非耕地在非作物生长季节的潜水蒸发都为无效,其余则为有效。进一步考虑作物生长期内的无效潜水蒸发,则可以得到:

$$E_e = \begin{cases} 0 & \text{无作物} \\ ET_a & \text{有作物 } E \geq ET_a \\ E & \text{有作物 } E < ET_a \end{cases} \tag{3}$$

式中: ET_a 为作物耗水量(可采用联合国粮农组织推荐的FAO-56方法计算^[12])。

式(3)表明大于作物耗水量部分的潜水蒸发也是无效的。结合柳园口灌区实际情况,对不同土地利用类型及季节的潜水蒸发有效性进行分析。

如前所述,柳园口灌区土地利用类型划分为两类,其他用地包括裸地、建筑用地、水域、林地等,其中水域主要表现为水面蒸发,不产生潜水蒸发。林地由于发达的根系能利用深层地下水,且枝叶繁茂,通过蒸腾作用存在大量的潜水蒸发,将这类潜水蒸发近似归类为裸地潜水蒸发,采用计算裸地时的阿维里扬诺夫潜水蒸发公式,此类潜水蒸发全年视为无效。

在6—9月,水田及灌区地下水埋深大于 h_0 ,该区域的潜水蒸发量为零;玉米地的潜水埋深小于 h_0 ,所产生的潜水蒸发皆为有效。每年的6—9月陇海铁路以北大部分地区种植水稻,由于稻田大部分时间保持水层或土壤含水率较高,地表处较低的土水势抑制了潜水蒸发,认为该地面上的潜水蒸发量为零。旱地主要种植玉米等作物,该时段地面上产生的潜水蒸发主要用于作物生长消耗,计为有效。

从10月至次年1月,小麦旱地产生的潜水蒸发皆视为无效。9月底水稻收割,10月初为小麦播种期,该阶段田间大部分土地是裸露的,以裸地潜水蒸发为主,小麦对潜水蒸发影响很小,这一时期小麦需水量较小,降水即能满足小麦的需水要求,此时发生的潜水蒸发视为无效。在小麦苗期——分蘖期,为保证小麦正常生长,需消耗一部分水分(灌溉水或为降水),按照习惯需对小麦进行冬灌,可将此阶段的潜水蒸发视为无效。

每年2—5月小麦旱地所产生的潜水蒸发视为有效。小麦的返青——拔节期是小麦生长最旺盛的季节,在生长过程中需要消耗大量的水分,在没有降水和降水较少的情况下,小麦生长所需的水分主要来源于潜水蒸发;另一方面,此阶段小麦的根系也有了充分的发育,这也为小麦大量汲取水分提供了必要的条件,在此阶段小麦叶片也已茂盛,基本遮盖整个土面,土壤蒸发已不是主要方面。小麦的抽穗——成熟阶段是潜水蒸发最大的季节,因小麦孕穗、成熟需要消耗大量的水分,在灌溉、降水不能满足的情况下,就会大量吸收地下水,此时的潜水蒸发视为有效。

根据以上分析,整理出不同土地利用类型及季节的潜水蒸发有效性评价标准如表2所示,在ArcGIS10.0系统中进行灌区有效和无效潜水蒸发划分,然后逐月统计有效和无效潜水蒸发量。

表2 不同土地利用类型及季节的潜水蒸发有效性评价标准		
时间	土地利用类型	有效性评价
2—5月	旱地、其他	有效
		有效
	旱地	有效
6—9月	旱地	有效
	水田、其他	无效
10月至次年1月	旱地、其他	无效

4 年际间潜水蒸发量变化

根据表2对灌区进行逐个栅格单元的统计分析,得到30年各年的有效和无效潜水蒸发量及其占全年潜水蒸发总量的比例,如表3所示。灌区的多年平均潜水蒸发总量为0.505亿m³,其中多年平均无效潜水蒸发量为0.261亿m³,占51.6%。由表3可知,1985年的潜水蒸发总量达到最大值,为0.886亿m³,其中无效潜水蒸发量占56.4%,有效潜水蒸发量比例较小,而且2000—2010年的数据也显示相同的规律,这个现象与不合理的灌溉方式有很大关系。1994年的潜水蒸发总量是第2次峰值,为0.861亿m³,而此时无效潜水蒸发量占35.5%,比例有所减少。从1988—1994年,年潜水蒸发总量呈现逐年上升的趋势,这是由于1988年引黄补源,地下水埋深变浅,地下水极限埋深以上的区域面积增大,从而增加了潜水蒸发的整体面积,而且1988年作物种植结构也发生了较大变化,冬小麦、蔬菜等耗水量大的作物播种面积大大增加,导致了有效潜水蒸发量的比例显著增大。

5 年内潜水蒸量发变化

以1994年为代表年,对灌区年内有效和无效潜水蒸量发变化规律进行分析,如表4所示。该年的

表3 多年有效和无效潜水蒸发量及其所占比例

年份	年潜水蒸发总量/ 亿 m ³	有效潜水蒸发		无效潜水蒸发	
		潜水蒸发量/ 亿 m ³	比例/%	潜水蒸发量/ 亿 m ³	比例/%
1981	0.785	0.303	38.6	0.482	61.4
1982	0.731	0.264	36.2	0.467	63.8
1983	0.544	0.200	36.8	0.344	63.2
1984	0.688	0.241	35.0	0.447	65.0
1985	0.886	0.387	43.6	0.499	56.4
1986	0.586	0.208	35.6	0.378	64.4
1987	0.398	0.112	28.1	0.286	71.9
1988	0.379	0.185	49.0	0.193	51.0
1989	0.412	0.218	52.8	0.194	47.2
1990	0.516	0.282	54.7	0.234	45.3
1991	0.431	0.264	61.3	0.167	38.7
1992	0.573	0.350	61.0	0.223	39.0
1993	0.709	0.459	64.7	0.250	35.3
1994	0.861	0.555	64.5	0.305	35.5
1995	0.709	0.431	60.8	0.278	39.2
1996	0.667	0.386	57.9	0.280	42.1
1997	0.436	0.270	61.9	0.166	38.1
1998	0.566	0.296	52.3	0.270	47.7
1999	0.539	0.275	51.1	0.264	48.9
2000	0.431	0.233	54.1	0.198	45.9
2001	0.401	0.211	52.5	0.190	47.5
2002	0.212	0.105	49.6	0.107	50.4
2003	0.303	0.103	34.0	0.200	66.0
2004	0.221	0.082	37.0	0.139	63.0
2005	0.366	0.145	39.6	0.221	60.4
2006	0.133	0.051	38.0	0.083	62.0
2007	0.381	0.176	46.1	0.206	53.9
2008	0.614	0.280	45.6	0.334	54.4
2009	0.307	0.125	40.8	0.181	59.2
2010	0.372	0.133	35.7	0.239	64.3
平均	0.505	0.244	48.4	0.261	51.6

表4 年内有效和无效潜水蒸发量及其所占比例

时间	月潜水蒸发总量/ 亿 m ³	有效潜水蒸发		无效潜水蒸发	
		潜水蒸发量/ 亿 m ³	比例/%	潜水蒸发量/ 亿 m ³	比例/%
1月	0.024	0	0	0.024	100
2月	0.022	0.014	63.2	0.008	36.8
3月	0.071	0.055	77.5	0.016	22.5
4月	0.162	0.139	85.5	0.024	14.5
5月	0.208	0.176	84.6	0.032	15.4
6月	0.042	0.020	47.8	0.022	52.2
7月	0.084	0.051	60.9	0.033	39.1
8月	0.097	0.059	61.5	0.037	38.5
9月	0.069	0.041	59.1	0.028	40.9
10月	0.048	0	0	0.048	100
11月	0.020	0	0	0.020	100
12月	0.013	0	0	0.013	100
全年	0.861	0.555	64.5	0.305	35.5

潜水蒸发总量为0.861亿m³,其中无效潜水蒸发量为0.305亿m³,占35.5%。由表4可知,10—12月、1月均为无效潜水蒸发。2—5月为小麦的返青——成熟期,该阶段旱地所产生的潜水蒸发均视为有效潜水蒸发,其中4月的有效潜水蒸发量为0.139亿m³,

所占比例达到年内最大值,为 85.5%;2 月所占比例相对较小,为 63.2%;该阶段有效潜水蒸发量所占比例由大到小依次为 4 月、5 月、3 月、2 月。6—9 月为水稻、玉米生长期,其中 8 月的有效潜水蒸发量所占比例达最大值,为 61.5%;6 月所占比例相对较小,为 47.8%;该阶段有效潜水蒸发量所占比例由大到小依次为 8 月、7 月、9 月、6 月。

6 潜水蒸发空间分布

本文以 1994 年 2—9 月为例,根据潜水蒸发有效性评判标准,在 ArcGIS10.0 系统中逐个对栅格单元进行判断,最终得到每月的潜水蒸发空间分布,如图 4 所示。从图 4 可以看出,2—5 月的潜水蒸发主要发生在灌区中部和北部,有效潜水蒸发主要为种植小麦的栅格,无效潜水蒸发主要为非农业用地栅

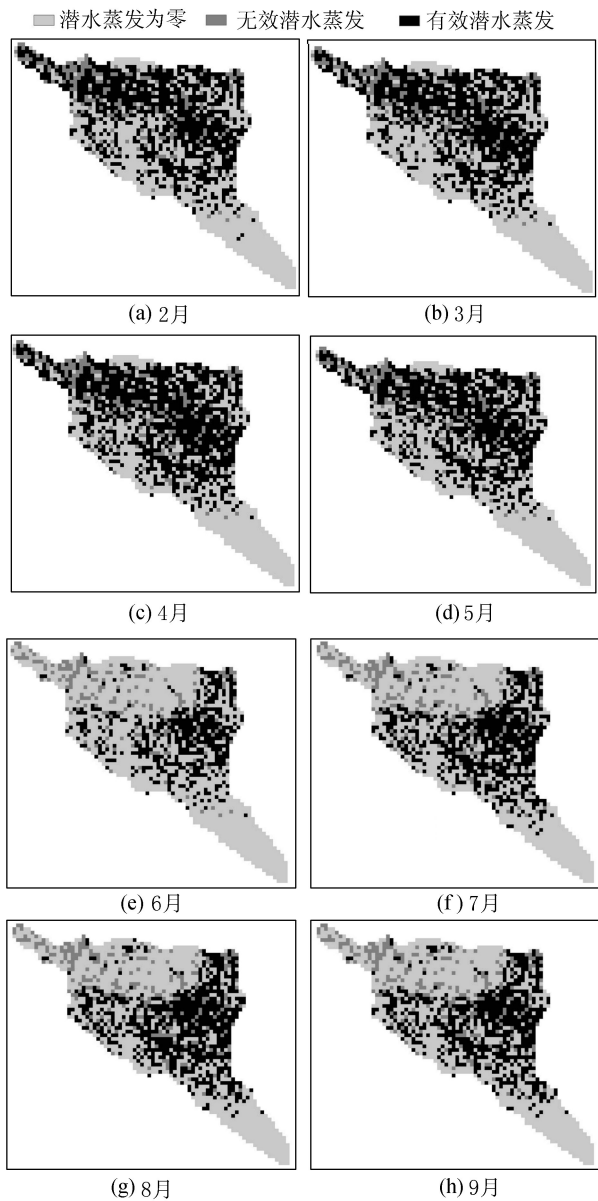


图 4 2—9 月潜水蒸发空间分布

格。在 6—9 月,种植水稻栅格由于田间水层的作用,潜水蒸发量为零;而淤泥河两岸和引黄补源区由于地下水埋深浅而发生潜水蒸发,其中在非农业用地栅格产生的则为无效潜水蒸发。

根据以上灌区潜水蒸发的时空变化规律,为提高灌区尺度的潜水蒸发有效性,可采取以下 3 种措施来进行潜水蒸发调控:①灌区上游的水稻采用间歇灌溉技术;②现在有水稻改成旱稻;③在水稻生育期的后段抽取地下水进行灌溉,以降低地下水位,减少水稻收割后的无效潜水蒸发。当然这 3 种措施可以同时进行,即部分水稻改为旱稻,如位于渠道的末端引黄地表水灌溉条件较差的下游区域的水稻先行改为旱稻,同时,上游的水稻采用间歇灌溉技术,并且在水稻生育后期抽取地下水进行灌溉,形成三位一体的柳园口灌区潜水蒸发有效性调控模式。

7 结 论

a. 从潜水蒸发有效利用的必要条件入手,提出潜水蒸发有效性评价标准,在计算出各栅格单元潜水蒸发量的基础上,区分有效和无效潜水蒸发,方法简单实用,易于区域化。

b. 柳园口灌区多年平均潜水蒸发总量为 0.508 亿 m³,其中无效潜水蒸发量为 0.262 亿 m³,占 51.6%;有效潜水蒸发主要集中在 3—5 月,6—8 月次之,10 月的无效潜水蒸发最多,其他月份也都有有一定的无效潜水蒸发量。

c. 2—5 月的潜水蒸发主要发生在灌区中部和北部,麦地的为有效潜水蒸发,非农业用地的为无效潜水蒸发;在 6—9 月,稻田内大部分时间都保持有水层,潜水蒸发量为零;而河流两岸和引黄补源区由于地下水埋深浅而发生潜水蒸发,在非农业用地产生的为无效潜水蒸发。

参考文献:

[1] 雷志栋,胡和平,杨诗秀,等. 塔里木盆地绿洲耗水分析 [J]. 水利学报, 2006, 37 (12): 1470-1475. (LEI Zhidong, HU Heping, YANG Shixiu, et al. Analysis on water consumption in oases of the Tarim Basin [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37 (12): 1470-1475. (in Chinese))

[2] YEH P J F, FAMIGLIETTI J S. Regional groundwater evapotranspiration in Illinois [J]. Journal of Hydrometeorology, 2009, 10 (2): 464-478.

[3] 贾绍凤,张士锋. 海河流域水资源安全评价 [J]. 地理科学进展, 2003, 22 (4): 379-387. (JIA Shaofeng, ZHANG Shifeng. Water resources security appraisalment of Haihe Basin [J]. Progress in Geography, 2003, 22 (4): 379-387. (in Chinese))

(下转第 19 页)

实际情况,机墩振幅计算分析时建议采用厂房整体模型,但按《规范》采用的振动荷载偏大甚至不太合理,需通过进一步的理论分析、模型试验和现场观测来进行研究和论证。

参考文献:

[1] 欧阳金惠,张超然,陈厚群,等. 巨型水电站厂房振动预测研究[J]. 土木工程学报,2008,41(2):100-104. (OUYANG Jinhui,ZHANG Chaoran,CHEN Houqun,et al. Prediction of the vibration of giant-scale hydropower houses [J]. China Civil Engineering Journal,2008,41(2):100-104. (in Chinese))

[2] 宋恩来. 红石水电站厂房振动及其加固研究[J]. 东北电力技术,2003(1):4-9. (SONG Enlai. Research on the building vibration and reinforcement of Hongshi Hydroelectric Generating Station [J]. Northeast Electric

Power Technology,2003(1):4-9. (in Chinese))

[3] 宋志强,马震岳,张运良,等. 小湾水电站机墩结构刚度分析[J]. 水电能源科学,2008,26(1):119-122. (SONG Zhiqiang,MA Zhenyue,ZHANG Yunliang,et al. Stiffness analysis of composite turbine pier structure of Xiaowan Power Station [J]. Water Resources and Power,2008,26(1):119-122. (in Chinese))

[4] SL 266—2001 水电站厂房设计规范[S].

[5] 马震岳,陈婧,刘志明,等. 三峡水电站主厂房振动分析[J]. 三峡大学学报:自然科学版,2004,26(2):111-115. (MA Zhenyue,CHEN Jing,LIU Zhiming,et al. Vibration analysis of powerhouse of Three Gorges Hydropower Station [J]. Journal of China Three Gorges University: Natural Sciences,2004,26(2):111-115. (in Chinese))

[6] 秦亮. 双排机水电站厂房结构动力分析与识别[D]. 天津:天津大学,2005.

(收稿日期:2013-06-24 编辑:周红梅)

(上接第9页)

[4] FENG L P,BOUMAN B A M,TUONG T P,et al. Effects of groundwater depth and water-saving irrigation on rice yield and water balance in the Liuyankou Irrigation System, Henan, China [C]//Agricultural Water Management in China, ACIAR. Canberra Australia: [s. n.],2006: 52-66.

[5] 胡顺军,田长彦,宋郁东,等. 裸地与柽柳生长条件下潜水蒸发计算模型[J]. 科学通报,2006,50(增刊1): 36-41. (HU Shunjun,TIAN Changyan,SONG Yudong,et al. Calculation model of phreatic evaporation from bare soil and tamarix growth conditions [J]. Chinese Science Bulletin,2006,50(Sup1): 36-41. (in Chinese))

[6] 王晓赞. 农作物有效潜水蒸发试验研究[J]. 徐州师范大学学报:自然科学版,1999,17(1): 60-63. (WANG Xiaozan. A primary analysis on analable groundwater evaporation of crop [J]. Journal of Xuzhou Normal University:Natural Science Edition,1999,17(1): 60-63. (in Chinese))

[7] 罗玉峰. 灌区水量平衡模型及其应用研究[D]. 武汉:武汉大学,2006.

[8] LUO Yufeng,KHAN Shahbaz,PENG Shizhang,et al. Effects of the discretisation cell size on the output uncertainty of regional groundwater evapotranspiration modeling [J]. Mathematical and Computer Modelling,2012,56(1/2): 1-13.

[9] 罗玉峰,毛怡雷,彭世彰,等. 作物生长条件下的阿维里扬诺夫潜水蒸发公式改进[J]. 农业工程学报,2013,29(4): 102-109. (LUO Yufeng,MAO Yilei,PENG Shizhang,et al. Modified Aver'yanov's phreatic evaporation equations under crop growing [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2013,29(4):

102-109. (in Chinese))

[10] 罗玉峰,郑强,彭世彰,等. 基于GIS的区域潜水蒸发计算[J]. 水利学报. 2014,45(1): 79-86. (LUO Yufeng,ZHENG Qiang,PENG Shizhang,et al. Calculation of regional groundwater evaporation based on GIS [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2014,45(1): 79-86. (in Chinese))

[11] CHANG K. 基于VBA的Arcobjects编程:面向任务的方法[M]. 北京:科学出版社,2010.

[12] ALLEN R G,PEREIRA L S,RAES D,et al. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements[R]. Rome:FAO,1998.

(收稿日期:2013-06-24 编辑:周红梅)

