利用蒸腾蒸发管理技术实现真实节水研究

王树谦[1],李秀丽[2]

(1.河北工程大学资源学院,河北 邯郸 056038;2.华北水利水电学院水利学院,河南 郑州 450011)

摘要:依据研究区域降水量、灌溉水量、土壤含水量,分析计算单一作物的耕地蒸腾蒸发、多种作物的耕地蒸腾蒸发、耕地与非耕地的综合蒸腾蒸发;依据降水量、可利用的入境水量计算区域可利用水量,并结合水资源配置等因素分析确定目标蒸腾蒸发。利用目标蒸腾蒸发进行水权分配。采用3种节水措施,建立相应水资源配置方案,利用SWAT模型进行情景分析,通过方案比较,制定符合特定区域的、切实可行的用水规划方案。试验结果表明,采用综合节水措施后的节水效果优于单一的工程措施,综合节水措施与种植结构调整相结合节水效果更佳。

关键词:蒸腾蒸发;蒸腾蒸发管理;真实节水;水资源;可持续利用

中图分类号:S161.4 文献标识码:A 文章编号:1004-6933(2008)06-0068-04

Realization of water-saving using evapotranspiration management technique

WANG Shu-qian[1], LI Xiu-li[2]

(1. *School of Resources Science, Hebei University of Engineering, Handan* 056038, *China*; 2. *Faculty of Water Conservancy Engineering, North China University of Water Conservancy and Electric Power, Zhengzhou* 450011, *China*)

Abstract: According to the precipitation, irrigation water and soil moisture content in the study area, the evapotranspiration (ET) of arable land with a single crop, the ET of arable land with several crops, and the comprehensive ET of arable land and non-arable lands are analyzed. The target ET is determined by considering the allocation of water resources and other factors as well as the available water quantity in the area are calculated from the precipitation and the available entry water quantity. Water rights are allocated on the basis of the target ET. In order to determine a practical planning scheme for water resources in the area, three water-saving measures and the corresponding water resources allocation schemes were compared through scenario analysis with the SWAT model. The test results show that the water-saving effect of comprehensive water-saving measures is better than that of a single measure, and the water-saving effect is even better when comprehensive water-saving measures are combined with the planting structure adjustment.

Key words: evapotranspiration (ET); ET management; water-saving; water resources; sustainable utilization

我国多年平均降水总量为61 990亿m^3,其中45%转化为地下水或地表水资源,55%消耗于蒸腾蒸发。农业是用水大户,约占总用水量的60%~70%,所以许多地方用水危机首先出现在农业上[1]。随着社会发展、城市化进程加快和人口增加,今后一段时期内全社会需水总量必将逐步增加,水资源供需矛盾会更加尖锐。因此,减少区域蒸腾蒸发(ET)将成为缓解农业水资源供需矛盾的重要方面,也是减少区域水资源消耗量、保障水资源可持续利用、经济社会可持续发展的有效途径。

水资源的总补给来源为大气降水,其真正的消耗为蒸腾蒸发(ET)。在水资源越来越紧缺的今天,必须考虑如何从根本上节约水资源,确保植物生长所需的蒸腾水量,减少无效蒸发,提高农业有效水分生产率是体现现代水资源真实节水的核心。ET管理的技术理念,能够有效降低农业ET,实现真实节水。

作者简介:王树谦(1954—),男,河北大名人,教授,主要从事水文及水资源研究工作。E-mail:wsq9681@sina.com.cn

1 ET与ET管理的理念

ET是指水分的蒸腾蒸发，包括土壤蒸发、植物蒸腾（散发）、水面蒸发等。一个区域的蒸发又可分为：耕地蒸发——$ET_{耕}$、非耕地蒸发——$ET_{非耕}$及综合蒸发——$ET_{综}$。非耕地蒸发和耕地蒸发中的土壤蒸发属无效蒸发，耕地蒸发中的植物散发属有效蒸发。

根据水量平衡方程

$$P - E = \Delta S$$

式中：P为降水量；E为蒸发量；ΔS为研究时段内的蓄水变化量。

区域水分净耗水量$ET_{综}$能真实反映一个区域的用水程度，也能够反映节水效果。只有水分蒸腾蒸发，才是水量的实际减少，也就是真实的耗水量——$ET_{综}$。传统的节水理念更多地体现为用水节约，而不是水资源节约。如传统的灌溉节水，以灌溉水有效利用率的提高幅度作为衡量标准，节水效果是以节水灌溉面积的扩大幅度作为评价标准，按照这种理念发展节水灌溉，真实的耗水量只会增大而不会减少，不能保障水资源可持续利用[2]。要实现“真实节水”，应依据水资源补给状况及水量平衡关系分析确定各区域的目标ET值（合理的区域耗水量），特定区域的目标ET值应等于该区域的水资源补给总量（降水量及入出境水量差之和）。通过现代技术手段，减少无效蒸发，控制区域的综合ET不大于区域的目标ET，可实现‘真实节水’，能够保障水资源可持续利用。这种基于ET控制降低实际耗水量，实现‘真实节水’的管理方式，称为ET管理。

ET管理的理念，实际上是把减少地下水的开采量与资源型节水（真实节水）联系在一起，把工程节水、农业措施节水和管理节水统一起来，共同以减少蒸腾蒸发为目标，从根本上解决资源型缺水地区的水资源问题，并充分地体现在区域综合ET降至与当地多年平均水资源补给总量相当、地下水的采补达到动态平衡、最终实现地下水的零超采等客观指标上。在实践上不再把水利工程措施作为节水的唯一途径，而是把逐步被遗忘的传统的农业措施、现代的管理措施与水利工程措施视为同等重要甚至更为重要的节水途径，并通过规范化的管理，把‘三项’节水措施（包括工程节水、农业措施节水和管理节水）和‘三大’目标（包括农业增产和农民增收、节水和水资源的可持续利用）都能得到实现。

2 ET分析计算

ET的分析计算方法有多种，如水文学方法、微气象学法、植物生理学方法、卫星遥感监测等[3]。ET计算模型有Logistic曲线模拟模型[4]、温度法及基于温度资料的bp人工神经网络计算模型[5]，亦有采用辐射参数、实际水汽压分析计算或利用蒸发计、蒸渗仪估测等方法计算ET[6-9]。于此仅介绍一种便于实施的计算方法。应该指出，现区域ET的分析计算方法均存在一些缺陷，有待进一步研究。

2.1 ET_i的计算

利用土壤水分消耗法计算单一作物的ET_i，土壤水分消耗法是依据项目区降雨情况和农作物灌溉情况，采用土壤水分监测法分别监测降雨前后（或灌溉前后）和播种前后土壤含水量，利用监测值求得次降雨（或次灌溉）后蓄存在土壤中的水量以及播种前后土壤含水量的差值，在此基础上求得单一作物的ET_i。

$$ET_i = \sum (T_{后i} - T_{前i}) + (T_{播} - T_{熟})$$

式中：ET_i为单一作物值；$T_{后i}T_{前i}$为第i次降雨或灌水前后的土壤含水量；$T_{播}$为作物种植前土壤含水量；$T_{熟}$为作物收获后的土壤含水量。

2.2 $\overline{ET}$计算

作物的平均$\overline{ET}$，由项目区耕地上多种作物各自的ET_i，按种植面积F_i占耕地总面积F的百分比的加权平均值计算得到。

$$\overline{ET} = \frac{\sum F_i}{F} \times ET_i = \sum f_i \times ET_i$$

式中：$\overline{ET}$为作物平均值；F_i为该作物的种植面积；F为耕地总面积；f_i为单一作物种植面积与耕地面积的比值。

2.3 $ET_{综}$计算

研究区域的$ET_{综}$是由耕地的ET值和非耕地的ET值两部分组成，其中非耕地的ET值可近似用年降水量减去径流量和降雨对地下水的补给量求得，在海河平原地区亦可按$0.6ET$估算。

$$ET_{综} = \eta \overline{ET} + (1 - \eta) 0.6 \overline{ET}$$

式中：η为耕地面积占总面积的百分比；$\overline{ET}$为作物平均ET值；$ET_{综}$为耕地和非耕地的综合ET值。

3 依据ET管理实施水资源利用规划

3.1 可利用水量分析及目标ET确定

针对特定的研究区域，进行水资源评价，分析降水量、自产地表径流、地下水、入境水、出境水的时空变化规律；依据区域蓄水、引水、提水工程及用水状况计算区域可利用水量；在此基础上，综合考虑现状ET分布、区域水平衡关系和水资源配置等因素分析确定目标ET。就多年平均而言，目标ET等于多年平均降水量与多年平均入境水量（可利用的入境水

量,对有生态流量要求的河流应扣除出境水量)之和。为了尽可能满足农作物需水要求,以及水资源的丰、平、枯变化特性,应分别确定丰、平、枯水年的目标 ET。总的用水原则是 枯水年允许适量多开采地下水,丰水年回补地下水,地下水保持动态平衡。

3.2 现状耗水量分析及现状 ET 计算

依据用水现状,分析计算区域内各种用水的实际消耗量(包括降水所产生的蒸发量),将其换算为水深 mm 即为现状 ET。计算方法可采用本文介绍的 ET 计算法以及水量平衡法和卫星遥感监测 ET。如果研究区域的现状 ET 大于目标 ET,就必须采取合理的措施减少用水量。

3.3 利用目标 ET 值进行水权分配

科学而有效地减少和控制用水量之措施是利用目标 ET 值分配取水水权[2]。所谓取水水权就是通过工程措施,一个地区可以利用的水量的使用权,可利用水量即区域总水资源量扣除不可控蒸发量后的剩余水量。水权的分配可以分为地表水水权的分配和地下水水权的分配。水权分配应结合区域用水现状及水资源优化配置进行。这实际上是以供定需的用水原则,也是通过控制用水指标实现对 ET 的控制与管理,最终实现地下水动态平衡,水资源可持续利用。

3.4 农业节水措施与用水规划

用水量缩减之后,应制定相应的节水措施和用水规划,以保证农业增产(或不减产)和农民增收。节水措施包括种植结构调整、制定科学灌溉制度、土壤保墒(机械蓄水保墒,秸秆还田覆盖蓄水保墒,塑料薄膜覆盖保墒)、种植抗旱节水高产品种作物、科学施肥、化学制剂调控等。依据各种节水措施,计算相应用水量,并建立新的水资源优化配置方案,借助比较复杂的水文分布模型(如 SWAT 模型、二元模型)进行情景分析,通过方案比较,制定符合特定区域的、切实可行的用水规划方案。这种用水方案应能够最大限度地减少无效蒸发、提高农业有效水分生产率、体现水资源的真实节水、降低区域的实际耗水量即 $ET_{综}$。

4 实例应用

本文仅以全球环境基金项目河北省一项目县为例,说明区域综合 ET 的分析计算和部分节水措施的实际效果。

4.1 ET 计算

项目县选择了 3 个项目区,每个项目区又划分为典型区和对照区,各区均种植小麦、玉米和棉花。根据年内每次降雨或灌溉前后的土壤含水量监测资料,计算单项作物 ET、作物平均 ET 和综合 ET,计算结果见表 1。从表中 ET 值变化可以看出,采取节水措施的典型区的 ET 值明显小于对照区。

4.2 真实节水试验

项目县作为世行节水项目'真实节水'及水平衡分析专题技术研究示范区,在真实节水方面做了大量的试验研究工作。在此列举 3 种典型试验:

a. 试验一 :土渠改为管道输水,田间采用喷灌,维持取水量不变,把节省下来的水用于扩大灌溉面积;

b. 试验二 :土渠改为管道输水,田间采用喷灌等综合节水措施;

c. 试验三 :土渠改为管道输水,田间采用喷灌等综合节水措施,并结合种植结构调整[10]。

试验结果表明,采用综合节水措施后的节水效果优于单一的工程措施,综合节水措施与种植结构调整相结合节水效果更佳 在该项目区,节水即为少开采了地下水,减少了灌水量,降低了土壤湿度,所以试验区 ET 值亦相应下降,地下水位降幅相应减少或者得以回升。3 种典型试验的真实节水量、ET 值及地下水位变化情况分别见表 2、表 3 和表 4.

表 2 真实节水量分析结果统计

例序	一项目区		二项目区	
	真实节水量/mm	节水率/%	真实节水量/mm	节水率/%
试验一	20	6	21	6
试验二	118	37	108	33
试验三	155	49	158	48

表 1 ET 值变化趋势

区 域		第 1 年					第 2 年					第 2 年				
		小麦	玉米	棉花	$\overline{ET}$	$ET_{综}$	小麦	玉米	棉花	$\overline{ET}$	$ET_{综}$	小麦	玉米	棉花	$\overline{ET}$	$ET_{综}$
一项目区	典型区(一)	340.2	368.8	461.5	649.6	563.8	323.7	359.0	415.8	616.0	534.7	403.0	299.9	496.5	641	556
	对照区	360.6	373.7	473.2	671.7	583.0	359.9	416.2	499.6	711.6	617.7	422.0	369.1	521.1	674	585
二项目区	典型区(二)	363.3	381.9	474.6	665.6	577.7	355.2	345.3	394.7	604.6	524.8	423.0	318.7	500.7	647	562
	对照区	378.4	397.5	504.2	710.8	617.0	388.1	378.0	410.0	654.4	568.2	440.0	321.2	508.5	677	588
三项目区	典型区(三)	358.4	384.5	474.2	675.6	605.3	387.0	434.4	428.7	660.7	592.0	423.8	371.8	503.5	698	625
	对照区	358.4	384.5	474.2	675.6	605.3	474.1	465.9	453.7	872.1	781.4	426.9	382.6	510.0	710	636
项目区均值		354.0	378.4	470.1	663.6	582.3	355.3	379.6	413.1	627.1	550.5	416.6	330.1	500.2	662	581
对照区均值		365.8	385.2	483.9	686.0	601.8	407.4	420.0	454.4	746.0	655.8	429.6	357.6	513.2	687	603
全 县		360.0	381.8	477.0	674.8	592.1	381.4	400.0	433.8	686.6	603.2	423.1	343.9	506.7	674.5	592

表 3　*ET* 值分析结果统计

例序	一项目区		二项目区	
	ET 减少值/mm	减少率/%	*ET* 减少值/mm	减少率/%
试验一	0	0	0	0
试验二	98	14	87	13
试验三	135	20	137	20

表 4　水平衡分析及地下水位统计　mm

例序	一项目区			二项目区		
	取水量	补给量	Δh	取水量	补给量	Δh
试验一	567	181	-386	589	290	-299
试验二	211	176	-35	312	255	-57
试验三	172	174	2	241	248	-7

注：表中取水量为开采的地下水量，补给量为降水量与灌溉水对地下水的补给。

5　结　论

在资源型缺水地区，实施"真实节水"、降低 ET 即减少水资源的净消耗量对保障水资源可持续利用是十分必要的。结合特定区域的具体情况，通过实施 3 项节水措施（工程节水、农业措施节水和管理节水），可以有效降低 ET 值。

在以开发利用地下水为主的地区，将先进的 ET 管理理念应用于水资源开发利用和规划管理，辅以高水平的监测技术（包括降雨量、土壤含水率、地下水位及 ET 监测），能够实现水资源的优化配置和高效利用，有效改善水环境，保障社会经济可持续发展。

ET 管理技术目前还是一种新的管理模式，有诸多问题尚需完善和提高，但随着管理技术的不断完善和监测技术的不断提高，ET 管理将是水资源和水环境综合管理规划的既科学而又有效的技术方法。

参考文献：

[1] 高健磊，吴泽宁，左其亭，等．水资源保护规划理论方法与实践[M]．郑州：黄河水利出版社，2002．

[2] 钟玉秀．基于 ET 的水权制度探析[J]．水利发展研究，2007(2)：14-16．

[3] 屈艳萍，康绍忠，张晓涛，等．植物蒸发蒸腾量测定方法述评[J]．水利水电科技进展，2006，26(3)：72-77．

[4] 徐俊增，彭世彰，李道西，等．基于 Logistic 曲线的作物累积蒸发蒸腾量模拟研究[J]．河海大学学报：自然科学版，2007，35(2)：225-228．

[5] 丁加丽，彭世彰，徐俊增，等．基于温度资料的参考作物蒸发蒸腾量计算方法[J]．河海大学学报：自然科学版，2006，34(6)：239-242

[6] 张莉，彭世彰，罗玉峰，等．辐射参数计算方法对参考作物蒸发蒸腾量计算值的影响[J]．河海大学学报：自然科学版，2008，36(3)：306-310．

[7] 张瑞美，彭世彰，徐俊增，等．不同 ea 计算方法对 Penman-Monteith 公式的影响[J]．河海大学学报：自然科学版，2006，34(6)：660-663．

[8] 张晓涛，康绍忠．利用蒸发计估测参考作物蒸发蒸腾量的试验研究[J]．水利水电科技进展，2007，27(1)：91-94．

[9] 彭世彰，李荣超．覆膜旱作水稻蒸发蒸腾量计算模型研究[J]．河海大学学报：自然科学版，2001，29(3)．51-54．

[10] 周忠生，王跃军．科学灌溉高效运筹 ET[J]．地下水，2007(3)：92-95．

（收稿日期：2007-12-20　编辑：高渭文）

（上接第 63 页）

为更好地表示灌溉条件下单位面积棕壤总磷流失量及其累计量变化与时间的关系，令 $a_{TP1}=0.0384$，$b_{03}=0.0026$；$a_{TP}=0.0105$，$b_3=0.7005$。

从而可以将式(1)、(2)分别表示为：

$$W_{TP} = a_{TP1}e^{-b_{03}t} \tag{3}$$

$$W'_{TP} = a_{TP}t^{b_3} \tag{4}$$

式中：a_{TP1}，b_{03}，a_{TP}，b_3 为总磷流失量经验系数，与棕壤的结构有关。

4　结　论

a．在一定降雨量范围内，棕壤下渗率主要与土壤的结构有关，土壤自身磷含量对渗流总磷流失量的影响不大。

b．下渗率是影响棕壤总磷流失量的最主要因素。凡是能控制下渗率的措施，都能减少磷的流失。

c．疏松性棕壤的总磷流失主要通过下渗方式进行，密实性棕壤则主要通过径流方式进行。

d．灌溉条件下，棕壤渗流总磷流失量与时间成指数函数关系，总磷流失累计量与时间成幂函数关系。

参考文献：

[1] 彭奎，朱波．试论农业养分的非点源污染与管理[J]．环境保护，2001(1)：15-17．

[2] US EPA．National water quality inventory：report to congress executive summary[R]．Washington DC：US EPA，1995：497．

[3] 李贵宝，尹澄清，周怀东．中国"三湖"的水环境问题和防治对策与管理[J]．水问题论坛，2001(3)：36-39．

[4] 朱兆良，NORSE D，孙波．中国农业面源污染控制对策[M]．北京：中国环境科学出版社，2006．

[5] 付伟章，史衍玺．施用不同氮肥对坡耕地径流中 N 输出的影响[J]．环境科学学报，2005，25(12)：1676-1681．

[6] 王晓燕．非点源污染及其管理[M]．北京：海洋出版社，2003：24-28．

[7] 赖格英，于革．太湖流域营养物质输移的模拟评估研究[J]．河海大学学报：自然科学版，2007(2)：140-144．

（收稿日期：2008-03-30　编辑：徐　娟）