

黄河流域兰州—头道拐区间 ET 管理应用

成丽婷

(山西省水利水电勘测设计研究院,山西 太原 030024)

摘要:黄河水权分配指标与取水管理相脱节,致使一些省份引黄耗水量超出了分水指标。ET 管理能够明确区域的水循环过程与真实耗水,为区域水资源管理部门节水管理以及河道管理部门取水管理提供技术支持。本文研究了基于 ET 的水资源管理模式,并将 ET 管理应用于黄河流域兰州—头道拐区间,具体介绍了 ET 管理的应用思路,并建立了区域取耗水关系,使河道管理部门取水管理具有可操作性。

关键词:ET 管理;现状 ET;目标 ET;分布式水文模型;耗水定额法

中图分类号:P334⁺.1

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2015)02-0053-06

引言

1987 年国务院批准了《关于黄河可供水量分配方案的报告》(简称“87 分水方案”),为流域水权分配体系的建立奠定了基础。根据 1988~2005 年《黄河水资源公报》统计,多年平均引黄耗水量超“87 分水方案”正常年份指标的有内蒙古自治区、山东省、宁夏回族自治区不少年份也超过指标,出现此问题的症结就是黄河水资源管理目前实行的是河道取水管理,只能控制用水部门的河道引水量,而“87 分水方案”分配的是耗水量。目前河道管理部门使用基于河道水量平衡方程的河道差法和引退水差法进行耗水量的控制,但是两方法均存在缺陷,河道差法计算的河道耗水量误差较大,原因在于区间汇入水量设定汇流系数,对当地降雨和土地利用对区间入流的影响缺位,而且控制断面仅仅考虑地表水量,地下测向径流无法测定;引退水差法中具体的耗水去向及相对应的水量完全是一个未知的黑箱子,只能采用少量的引退水资料进行经验换算,缺少一定的理论支持,缺乏精度。以上两种方法的本质缺陷在于,研究区域的水循环转化不清晰,水资源消耗量与去向不清晰。这样就导致管理部门与用水部门在区域的真实耗水量上存在很大的分歧,既不利于管理部门对水资源的管理,也不利于水资源的高效利用。若要管理部门与用水部门在区域的耗水量上达成一致,就

需要将区域水循环转化为白箱子。

2001~2005 年的世行农业节水灌溉项目首次提出了 ET 管理的理念^[1-2],ET 管理是一种新的水资源管理模式,立足于水循环整个过程,是从水资源的消耗来切入管理,使经济社会发展与可利用水资源量相匹配。秦大庸等^[3-4]系统地提出了目标 ET 的理论和计算方法,为区域目标 ET 的制定奠定了理论基础,并以天津市为例,具体介绍了区域目标 ET 的计算过程及评估方法,但针对立足于现状 ET,实现目标 ET,如何具体应用 ET 管理模式,未做探讨。

本文在系统阐述 ET 管理内涵的基础上,提出了 ET 分项指标体系与 ET 计算方法,论述了 ET 管理模式,并将 ET 管理应用于黄河流域兰州—头道拐区域,旨在明确区域的真实耗水,不仅为区域水资源管理部门节水指明方向,而且为河道管理部门进行取水管理提供依据。

1 基于 ET 的水资源管理内涵

1.1 ET 内涵

ET 为英文“evapotranspiration”的缩写,其物理含义表示水分从地球表面移向大气的过程,包含了土壤与植物表面液相或固相水的蒸发和植物组织的蒸腾。本文涉及的 ET 是指广义 ET,是一个区域参与水循环的所有水量的实际消耗,包括:(1)土壤、水面、植被的

蒸散发;(2)人类生活、生产过程中产生的蒸发;(3)固化在产品中,被运出本区域的水量。

1.2 基于 ET 的水资源管理理念

基于 ET 的水资源管理(以下简称“ET 管理”),主要有以下几方面的特点:

首先,ET 管理立足于水循环全过程,深入研究自然水循环的“地表—地下—土壤—植被”四水转化过程和社会水循环的“供水—用水—耗水—排水”过程中产生的 ET,即区域的真实耗水量;

其次,ET 管理实质是“耗水管理”,是从水资源的消耗来切入管理,以效率为中心对生态、生活、生产耗水进行评价,通过采取相应措施减少无效消耗来实现节水。

总之,ET 管理基于水循环全过程,深入研究项目区真实耗水量,通过采取节水措施实现项目区的真实节水。

2 ET 管理模式

2.1 目标 ET

区域目标 ET 是指区域内一个特定发展阶段,以其水资源条件为基础,生态环境良性循环为约束,满足经济持续发展与和谐社会建设要求的可消耗水量。目标 ET 为 ET 管理提供导向,合理确定目标 ET,是 ET 管理的核心。从水平衡角度,目标 ET 计算公式如下:

$$ET_{\text{目标}} = P + W_{\text{入境}} + W_{\text{引调}} - W_{\text{出境}} - W_{\text{入海}} - \Delta W \quad (1)$$

式中: $ET_{\text{目标}}$ 为区域目标 ET; P 为年降水总量; $W_{\text{入境}}$ 为年入境水量; $W_{\text{引调}}$ 为外流域调入(调出)水量,调入为正,调出为负; $W_{\text{出境}}$ 为年出境水量; $W_{\text{入海}}$ 为年入海水量; ΔW 为当地水资源蓄变量,当地水资源增加为正值,当地水资源减少为负值。

2.2 现状 ET

区域现状 ET 是指现阶段经济科技发展水平、土地利用状况以及管理制度下区域真实耗水量。现状 ET 是进行 ET 管理的基础,也是进行 ET 消减的基础。

2.2.1 ET 分项

研究区域 ET 分项,是 ET 计算及 ET 管理的基础。按照不同的分类标准,ET 有不同的分项体系。在水资源管理实践中,为使总量控制,定额管理具有可操作性,本文按照下垫面条件,将区域 ET 分为三项:天然 ET(包括林地、草地、未利用地、湖泊、湿地等天然地貌的 ET)、耕地 ET 和城乡居民生活及工业用地 ET(以下

简称“城乡居工地 ET”,包括工业、第三产业、城市生活、农村生活的 ET)。

其中天然 ET,水分来源是天然降水,人类活动的直接干扰很小,属于不可控 ET;耕地 ET 的水分来源包括天然降水和人工灌溉补水,属于可控 ET,可以通过种植结构和灌溉制度的调整减少 ET;城乡居工地 ET,水分来源于人工补给,属于可控 ET。

2.2.2 计算方法

由于自然界陆面特征复杂多样,大尺度的 ET 研究较少。随着遥感(RS)技术和分布式水文模型的发展,从区域/流域尺度反演和模拟 ET 的研究得到了长足的发展。遥感(RS)技术克服传统定点观测的局限性,将监测数据推广到大面积,使得大尺度研究 ET 成为可能。遥感反演区域 ET 采用陆面能量平衡算法^[5](Surface Energy Balance Algorithm for Land, SEBAL 模型),获得区域不同时间段的 ET 值。但是,遥感反演 ET 值未兼顾 ET 在水循环系统中维持水量平衡的作用。分布式水文模型,能够客观反映下垫面及气候的空间分布,从水循环的动力学机制来描述水文循环的各个环节,可以给出较为全面的水循环各个过程的模拟结果。然而,目前分布式水文模型的研究主要立足于产汇流过程及影响因素方面的研究,尚未集中关注对 ET 的研究。能量循环与水循环相互作用,能量循环是水循环的驱动力,水循环过程也会对能量循环产生影响。若能综合考虑能量循环与水循环的耦合作用,将为区域 ET 计算寻求更为精确的计算方法。

本文针对上述 ET 分项,天然 ET 和耕地 ET 采用分布式生物水文模型 DBHM^[6-7](Distributed Biosphere Hydrological Model, DBHM),此模型适用于宏观尺度(区域/流域尺度),空间尺度为 10km,时间尺度为 1h,输入 DEM 资料、土地利用资料、土壤资料、逐日气象资料以及上游逐日入流资料,输出天然 ET、耕地 ET 时空展布以及下游径流结果(未扣除城乡居工地 ET),通过将水循环各要素过程联系起来进行水循环全要素模拟,其中蒸发蒸腾模拟考虑了能量循环与水循环的耦合作用,可以提供较为精确的 ET 计算结果。城乡居工地 ET 采用耗水定额法进行计算。

2.3 ET 指标对比

将现状 ET 与目标 ET 进行对比,当现状 ET 小于等于目标 ET 时,认为可以基本达到水资源的可持续利用;而当现状 ET 大于目标 ET 时,就需要根据 ET 分析,划分可控 ET 及不可控 ET,针对可控 ET 研究优化方

案, 落实具体措施削减区域 ET, 从而实现区域 ET 控制在目标 ET 范围之内, 最终达到水资源的可持续利用。

3 ET 管理应用实例

本文选取黄河流域兰州-头道拐区间为研究区域, 从区域水循环的角度出发, 分别计算现状 ET 与目标 ET, 通过对比现状 ET 和目标 ET, 设定不同的节水措施削减 ET, 最终实现目标 ET。

3.1 研究区域概况

黄河上游兰州-头道拐区间, 位于 $104^{\circ}\sim 111^{\circ}\text{E}$, $36^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$ 之间, 地面高程 1 000~2 000m, 集水面积 163 415km², 占黄河流域总面积的 21.8%, 为大尺度区域, 河长 1 353km, 其中流经宁夏境内 397km, 内蒙古境内 830km, 两自治区交叉 23km, 落差 527m。此区间属于中温带, 干旱和半干旱地区, 气候干燥, 雨量少, 蒸发量大, 平均年水面蒸发量为 1 470mm, 水面蒸发量最小月出现在 1 月或 12 月, 最大月出现在 5、6 月份, 最大月与最小月的比值在 1.4~2.3 之间, 大部分在 1.7 左右, 多年平均年陆地蒸发量为 267.6mm, 陆地蒸发量与降水量的比值为 0.97。气温年内变化呈现出最低在 1 月, 最高大多在 7 月的特征,

因区间气候干燥、降雨量少, 大部分河道穿行于腾格里沙漠与毛乌素、库不齐沙漠之间, 无大支流加入, 且宁蒙河套灌区引水量大, 沿程水量是减小的, 兰州的洪水过程经长距离洪水演进到头道拐更趋低平。兰州站多年平均(1919~1975 年系列)径流量 $322.6\times 10^8\text{m}^3$, 头道拐多年平均径流量 $312.6\times 10^8\text{m}^3$ 。研究区域内分布 30 个气象站点, 兰州站、青铜峡、石嘴山和头道拐等水文站点。

3.2 目标 ET 计算

研究区域目标 ET, 即流域水量平衡条件下可以消耗的 ET 值, 采用下式计算:

$$ET_{\text{目标}} = P + Q_{\text{兰州}} - Q_{\text{头道拐}} \quad (2)$$

式中: $ET_{\text{目标}}$ 为研究区域目标 ET (10^8m^3); P 为研究区域降雨量 (10^8m^3); $Q_{\text{兰州}}$ 为上游兰州站的入流量 (10^8m^3); $Q_{\text{头道拐}}$ 为下游头道拐站的出流量 (10^8m^3)。

计算区域的目标 ET, 首先需要设定计算水平年和相应的水资源条件(包括降水、入境、出境、跨流域调水、超采等)。确定目标 ET, 设定 2020 年为水平年, 年降水量取 1919~1975 年系列的均值 276mm($451\times 10^8\text{m}^3$), 根据“87 分水方案”思想, 考虑区域经济发展, 保障

下游用水以及入海水量, 宁蒙河段上游兰州站和下游头道拐多年平均径流量分别为 $322.6\times 10^8\text{m}^3$ (1919~1975 年系列)、 $312.6\times 10^8\text{m}^3$ (1919~1975 年系列), 无跨流域调水, 地下水超采为 0。由上式计算求得研究区域可以消耗的 ET 量, 即目标 ET 量为 $461\times 10^8\text{m}^3$ (281mm)。

3.3 现状 ET 计算

3.3.1 模型率定及验证

采用 1990~1992 年资料进行了模型参数率定, 采用 1993~1997 年资料进行了模型验证, 青铜峡、石嘴山、头道拐水文站径流多年平均相对误差分别为 10%、6%、12%, Nash-Suttcliffe 系数分别为 0.68、0.72、0.63, 表明模拟过程与实测过程吻合很好。

3.3.2 现状 ET 计算

分别采用 DBHM 模型与耗水定额法计算 1990~1997 年各分项 ET, 取各年平均值作为现状 ET。表 1 为研究区域 1990~1997 年水量平衡分析, 满足区域水量平衡式, 见式(3):

$$Q_{\text{兰州}} + P - ET = Q_{\text{头道拐}} \quad (3)$$

式中: P 为年降水总量 (mm); $Q_{\text{兰州}}$ 为兰州站流量 ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$); $Q_{\text{头道拐}}$ 为头道拐站流量 ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$); ET 为区域消耗水量 (mm)。

现状 ET 取多年平均值为 311mm ($508\times 10^8\text{m}^3$), 其中天然 ET 属于不可控 ET, 耕地 ET 和城乡居工地 ET 属于可控 ET, 多年平均耕地 ET 为 105mm, 多年平均城乡居工地 ET 为 6.2mm, 耕地 ET 占可控 ET 的 94%, 多年平均逐月现状 ET 如表 2 所示, 逐月 ET 分布如图 1 所示。

由图 1 看出, 一、四季度 ET 值较小, 二、三季度 ET 值较大, ET 变化除了气象因素影响之外, 还受农业的

表1 研究区域水量平衡分析

Table 1 The water balance analysis for the study area

年份	P /mm	天然 ET /mm	耕地 ET /mm	城乡居 工地 ET /mm	$Q_{\text{兰州}}$ / $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$	$Q_{\text{头道拐}}$ / $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$
1990	301	223	106	4.8	993	827
1991	217	184	85	5.2	798	506
1992	299	216	111	5.5	789	620
1993	216	175	93	5.9	942	647
1994	283	219	106	6.3	913	668
1995	302	205	127	6.7	835	650
1996	281	203	114	7.2	730	512
1997	226	177	96	7.7	641	363

说明: 表中天然 ET 包括陆地 ET, 水域 ET

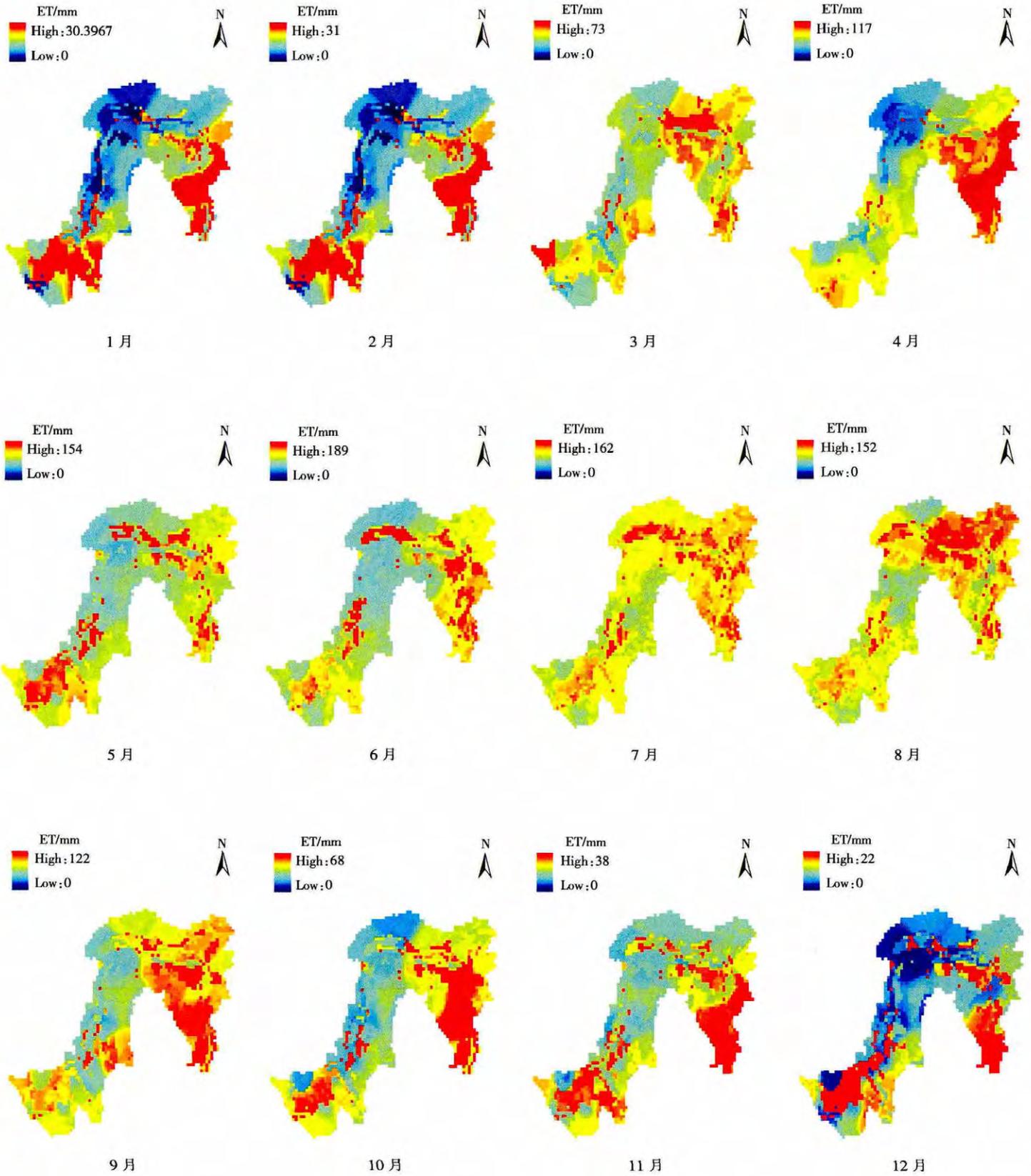


图1 研究区域多年平均逐月现状 ET 分布

Fig.1 The annual mean monthly current ET distribution in the study area

影响,图2为研究区域灌区分布图。农田灌溉从4月下旬开始,图1中1~4月份,灌区ET值小于其它区域,5月份开始灌区ET值明显增大,且大于其它区域,耕地ET占区域现状ET比例较大,10月以后,灌溉结束,耕地ET明显回落。

3.4 水平年 ET 调整计算

将目标 ET 与现状 ET 进行比较,确定区域内需要减少的 ET 量。现状 ET 为 311mm($508 \times 10^8 \text{m}^3$),目标 ET 为 281mm($461 \times 10^8 \text{m}^3$),需要消减的 ET 量为 30mm ($47 \times 10^8 \text{m}^3$)。

水平年 2020 年 DEM 资料、土地利用资料、土壤资料采用现状年 2000 年数据,由于 1996 年降雨资料与研究区域多年平均值相近,所以气象资料及上游兰州站入流采用 1996 年实测资料。

要使研究区域 ET 值达到目标 ET 值,需要在现状 ET 的基础上采取措施,消减可控 ET 值。本区域可控 ET 包括耕地 ET 和城乡居工地 ET,其中耕地 ET 占可控 ET 的 94%,要实现区域的 ET 管理,应该重在研究农田灌溉的节水潜力,只有将区域范围内需要消减的 ET 量落实到灌溉水量的减少上,才具有可操作性。通过采取灌溉节水措施,设定不同的农业耕作和灌溉措施,计算不同方案的区域 ET 值,最后选取符合目标结果的方案,为水资源管理提供依据。以下设定 4 种方

案(见表3),采取不同的农业节水措施,分别计算不同方案下的 ET 值,各个方案下的城乡居工地 ET 以多年平均值 6.2mm 计。

经过运算,得到 4 个方案 ET 结果,如表 4 所示,从表中可以看出,方案 1(采取调亏灌溉和工程措施)与方案 4(充分灌溉和无工程措施)比较,不仅使耕地 ET 从 111mm 大幅度减少到 91mm,而且也使得天然 ET 从 189mm 减少到 183mm,区域 ET 总量共减少了 26mm,从而使得水平年的 ET 总量达到 280mm,小于目标 ET,达到目标 ET 管理效果,下游头道拐站流量从 $587 \text{m}^3/\text{s}$ 增加至 $724 \text{m}^3/\text{s}$,保障了下游用水需求。

3.5 建立区域取耗水关系

考虑到现在黄河水资源管理在河道层面上予以实施,尚未深入到区域范围,只能控制取水量,而区域 ET 计算结果表征了整个区域范围的耗水情况,与河道管理相脱节。同时鉴于区域 ET 代表的是区域所有水量损失,这部分水量损失来源既包括了本区域的降雨量,也包括了本区域从黄河河道的取水量,因此单纯建立区域 ET 与河道取水量之间的关系是不科学的,这样就忽视了本地降雨对黄河河道径流量的贡献。为了解决管理方面的问题,可以建立区域 ET 与水资源来源(包括降雨和黄河河道取水)之间的关系。

根据 1990~1997 年相关数据计算结果,建立研究

表2 研究区域多年平均逐月现状ET

Table 2 The annual mean monthly current ET in the study area

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ET/mm	4.4	6.9	14.6	16.5	27.9	47.7	63.3	67.4	34.9	16.1	7.4	3.9

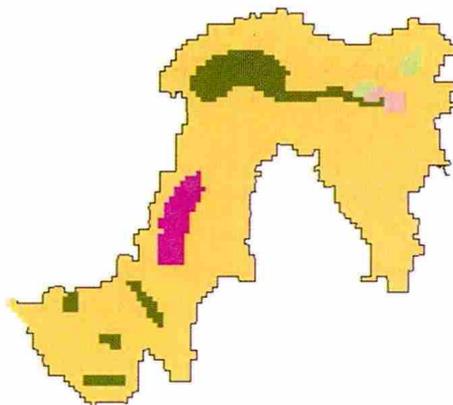


图2 研究区域灌区分布

Fig.2 The irrigated area distribution in the study area

表3 方案设定表

Table 3 The scheme setting

方案编号	模式	农业措施
1	高节水	调亏灌溉,有工程措施
2	中节水	调亏灌溉,无工程措施
3	中节水	充分灌溉,有工程措施
4	低节水	充分灌溉,无工程措施

表4 各方案水量平衡表

Table 4 The water balance of the various schemes

方案编号	P/mm	天然 ET /mm	耕地 ET /mm	城乡居工地 ET /mm	$Q_{\text{兰州}} / \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$Q_{\text{头道拐}} / \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
1	281	183	91	6.2	724	724
2	281	183	100	6.2	724	685
3	281	180	104	6.2	724	685
4	281	189	111	6.2	724	587

区域来水与区域消耗(即 ET)之间的相关关系,如图 3 所示。在实际管理中,根据规划的区域耗水值,由区域来水和耗水相关关系得到相应的来水量,然后从中减去预报的降雨值,就可以推求出黄河河道的取水量,为管理部门提供取水管理数据支撑。

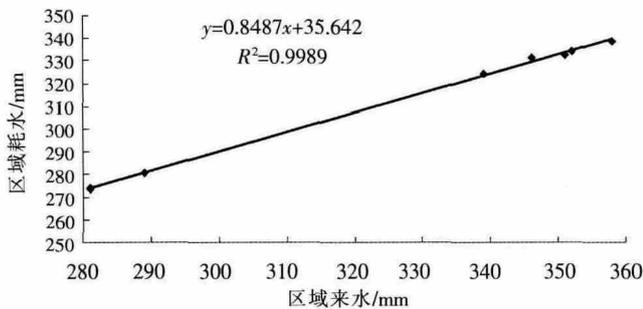


图 3 研究区域来水与耗水关系曲线

Fig.3 The relation between the incoming flow and water consumption in the study area

4 结语

(1)应用分布式生物水文模型 DBHM,从水循环机理出发,蒸发蒸腾模拟考虑了能量循环与水循环的耦合作用,提供的ET 计算结果,更加科学、合理、客观。

(2)将ET 管理应用于黄河流域兰州—头道拐区间,具体介绍了ET 管理的应用思路,立足于现状ET,分析得到研究区域耕地ET 占可控 ET 的 94%以上,因此重点研究农田灌溉的节水潜力;设定计算水平年,确定目标ET;对比现状ET 和目标ET,得到ET 消减量;最后采取相应农业措施调整可控ET,达到区域ET 小于等于目标ET。这样,为区域水资源管理部门进行节水管理和改革指明了方向。

(3)鉴于河道管理部门只能控制用水部门的河道取水量,建立了区域取耗水关系,为河道部门进行河道取水量的管理提供了技术支撑。

参考文献:

- [1] 钟玉秀. 基于 ET 的水权制度探析[J].水利发展研究. 2007,7(2):14-16. (ZHONG Yuxiu. Analysis of water right system based on ET[J]. Water Resources Development Research, 2007,7(2):14-16. (in Chinese))
- [2] 田园. 世界银行贷款农业节水灌溉项目 ET 监测分析评价与 ET 管理[OL]. http://www.lrn.cn/specialtopic/gtzygljydjt/xncjs/200706/t20070607_65643.htm. (ET monitor analysis evaluation and ET management of agricultural water-saving irrigation project from World Bank loan[OL]. http://www.lrn.cn/specialtopic/gtzygljydjt/xncjs/200706/t20070607_65643.htm. (in Chinese))
- [3] 秦大庸,吕金燕,刘家宏,等. 区域目标 ET 的理论与计算方法[J].科学通报, 2008,53(19):2384-2390. (QIN Dayong, LV Jinyan, LIU Jiahong, et al. Theory and calculation method of target ET in area[J]. Chinese Science Bulletin, 2008,53(19):2384-2390. (in Chinese))
- [4] 刘家宏,秦大庸,王明娜,等. 区域目标 ET 的理论与计算方法:应用实例[J]. 中国科学 E 辑:技术科学, 2009,39(2):318-323. (LIU Jiahong, QIN Dayong, WANG Mingna, et al. Theory and calculation method of target ET in area: application example [J]. SCIENTIA SINICA Technologica, 2009,39(2):318-323. (in Chinese))
- [5] Richard G, Allen, Anthony Morse, Masahiro Tasumi, et al. Evapotranspiration from Landsat (SEBAL) for Water Rights Management and Compliance with Multi-State Water Compacts [C]. IEEE, 2001.
- [6] Tang, Q. A Distributed Biosphere-Hydrological Model for Continental Scale River Basins[D]. University of Tokyo, 2006.
- [7] Tang, Q., Oki, T., Hu, H. A distributed biosphere hydrological model(DBHM) for large river basin [J]. Ann.J. Hydraulic Engerring, 2006.50:37-42.

ET Management Application in Lanzhou-Toudaoguai Reach of Yellow River Basin

CHENG Liting

(Shanxi Hydroelectric Investigation and Design Institute, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The disjunction of water rights allocation index and water-fetching management leads to water-fetching from the Yellow River in some provinces exceed the water rights allocation index. ET management can provide regional water cycle process and real water consumption and provide technical support for water-saving management of regional water resources department and water-fetching of river department. In this paper, the water resources management mode based on ET was studied. Then ET management was applied in the region from Lanzhou to Toudaoguai in the Yellow River Basin with specific application idea. In addition, the relation between incoming flow and water consumption in the study area was built to serve for water-fetching management of river department.

Key words: ET management; current ET; target ET; distributed hydrological model; water consumption norm method