

文章编号: 0559-9350(2007)09-1128-07

水账户方法及其在流域水分生产率分析中的应用

龙爱华^{1,2}, 王 浩¹, 程国栋², 于福亮¹

(1 中国水利水电科学研究院 水资源研究所, 北京 100044;

2 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所 冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 引入水账户理论和方法, 以研究流域水资源的利用状况。介绍了水账户的概念体系、基本数学表述、尺度和平衡要素。该方法根据水平衡原理, 对流域内不同用途的水进行分类。通过分析水资源在生态经济系统中的流向、流量和存量等的变化过程, 完整地呈现研究区内的所有用户, 以便分析提高可用水量的途径及节水的可能性。应用该方法对黑河流域中游张掖市水资源利用情况的分析表明, 研究时间内田间尺度所有可用水均被损耗殆尽, 导致土壤水储量减少, 减少水分的无效损耗量是提高灌区水资源利用率的重要措施。从流域尺度上看总入境水量中 92.6% 被损耗利用, 该市的水资源利用处于不可持续的极限状态。最后讨论了不同尺度水分生产率转化、农业节水措施选择、流域生态健康与水利用效率的关系等, 指出仅提高渠系利用率和渠道衬砌率等措施不能从根本上提高水分生产率, 水利用效率的提高应以全流域水利用效率为指标。

关键词: 水账户; 过程损耗; 水分生产率; 尺度转化; 节水型社会建设; 张掖市

中图分类号: TV214

文献标识码: A

随着经济社会的发展, 农业可用水量将越来越少, 提高农业水分生产率将在缓解水资源竞争压力、遏制环境退化和保障粮食安全方面发挥重要作用^[1-3]。为挖掘节水潜力, 减少水资源浪费及非生产性利用, 必须制定既能获得更高生产率, 同时又保护或改善生态系统健康的用水策略。二战后, 世界各国的科学家一直在努力研究水分生产率的提高问题, 但由于研究背景不同, 出发点不一, 工作领域相对杂乱而相互脱节^[2]。因此, 深入理解水资源开发利用过程对现有用水模式的影响等问题, 以及加强不同人员之间的沟通则日益重要。1997 年, 国际灌溉管理研究所 Molden 提出水资源利用与核算账户(简称水账户)研究, 试图通过账户方式完整呈现水资源在生态经济系统中的流向、流量和存量情况, 辨明节水机会, 为水管理研究开发一套通用语言^[4]。

水账户是一个分析流域背景下的水利用、损耗和水分生产率的分析工具, 它可清楚呈现水资源利用现状, 为不同知识背景、利益团体理解和分析水资源生产利用状况, 提供一个通用框架和交流平台, 为流域水资源配置提供依据。1997 年, Molden 提出水账户理论方法, 随后便在印度 Bhakra 流域、巴基斯坦 Chishtian 流域、斯里兰卡的 Huruluwewa 地区及南部的 Kihndi Oya 地区开展了实例研究^[4,5]; 2003 年, Peranganing、Droogers 等采用类似的方法分析了印度尼西亚 Singkarak-Ombilin 流域、土耳其西部 Geduz 流域的水资源利用情况, 模拟研究了田间、灌区和流域的水分生产率, 进一步完善了水账户的理论^[6-8]。本文在阐述水账户研究基本理论方法的基础上, 以黑河流域张掖市为实例, 应用该方法分析研究区的水分生产率及其尺度转化问题, 并就提高水分生产率与相关节水措施、流域生态健康等关系进行讨论分析。

收稿日期: 2006-10-26

基金项目: 国家重点基础发展计划(973)资助项目(2006CB403405); 国家自然科学基金重点基金(40235053)

作者简介: 龙爱华(1976-), 男, 湖南安仁人, 博士, 主要从事水资源规划与生态经济研究。E-mail: ahlorg@lzb.ac.cn

1 水账户研究的基本理论

1.1 水账户概念体系 水账户概念体系建立在水平衡基础上,根据水平衡各要素的利用途径进行分类,主要概念包括^[4]: (1) 指定用途水资源和未指定用途水资源。指定用途水资源指预期用于某种用途的水资源,例如下游环境需水量或下游水权的出境水。未指定用途水资源指没有被损耗或指定用途、理论上仍可在研究区内被利用、但由于缺乏蓄存能力或利用设施而流出域外的水资源。(2) 域、开放流域与闭合流域。域指在水账户分析所涉及的时空范围。存在未指定用途水资源的流域是开放流域;而可用水资源被完全用于指定用途的流域属于闭合流域。(3) 总流入水量和净流入水量。总流入水量指以降水、地表及地下水形式流入研究区的水资源总量。净流入水量等于总流入水量减去研究区水账户期初到期末时间内水资源储量变化后的水量,当水资源从研究区储量中被转移出去时,净流入水量大于总流入水量;如果储量增加,则净流入水就小于总流入水量。(4) 水资源损耗与非损耗利用。损耗利用指在研究区内由于某种目的利用或被转移出去后不能被进一步利用的水利用。非损耗利用指产生预期结果又不损耗水资源的水利用,如水力发电。水资源损耗是水账户的关键概念。(5) 过程损耗量与非过程损耗量。过程损耗量指生产预期产品所转化和损耗的水资源量。如农业种植的过程损耗等于蒸腾水量加上进入植物组织的水量;与过程损耗量对应,非过程损耗量是被非预期生产过程损耗的水量。(6) 水分生产率。指总流入水量、净流入水量、损耗水量、过程损耗量及可用水的生物物质产量或经济价值。(7) 损耗比例。损耗比例指过程和非过程损耗量占入境量的比例。

上述分类法可清晰描述研究区内水资源的利用过程,是基于过程信息的水资源利用描述。它突破按部门分类描述水资源分配利用状况的方法,将有益利用和无效消耗进行清晰区分,克服了环境经济综合核算体系(SEEA)框架下水资源核算账户中缺乏描述水资源利用过程的不足^[9],使有关人员能较准确地把握不同研究区水分生产率的提高潜力和水资源可持续利用的途径。从评价指标体系看,水账户克服了传统水效率的两个主要不足之处,水账户评价指标:(1) 包括了非农业用水;(2) 更清晰地呈现了非农业用户与其他用户的相互作用^[7]。水账户通过追踪水资源在生态经济系统中的流向(即是过程损耗还是非过程损耗)、流量(即过程损耗量和非过程损耗量)和存量(即储量变化、指定用途水资源量和未指定用途水资源量)等过程,完整呈现研究区内所有水用户,阐明提高可用水量的途径及节水机会。

1.2 水账户的基本数学描述 水账户的水平衡方程如下:

$$NI = GI + \Delta S = Q_{in} + R + \Delta S = Q_{out} + E = TD + UO + NUO + C = PD + NPD + UO + NUO + C \quad (1)$$

式中: NI 为净流入水量; GI 为总流入水量; ΔS 是研究区内研究时间段内的地下水水量、地表水量和非饱和带储水量的变化; Q_{in} 为地表流入水量和地下流入水量之和; R 为降水; Q_{out} 为地表、地下流出水量之和; E 为蒸腾和蒸发量; PD 为过程损耗,为蒸腾蒸发量与其他损耗量(如嵌入产品、工业汽化、人畜饮用等)之和; NPD 为非过程损耗,等于非预期的蒸腾蒸发加其他不可再利用的损耗水量(如流入海洋的水量或其他无效区域的水量和重度污染的水量); TD 为总损耗; UO 指当前基础设施能力下可利用的但又未指定用途的流出水量; NUO 是当前无法利用、未指定用途的流出水量; C 为指定用途水量。

可用水量计算方程:

$$AW_{pot} = NI - C - NUO_{pot} \quad (2)$$

式中: AW_{pot} 指现有技术、经济条件下的最大可用水量; NUO_{pot} 是无论如何均不可利用、未指定用途的流出水量。在完全开发的情况下, NUO_{pot} 和 NUO 均为 0。

1.3 水账户尺度及平衡要素 水账户将地下水、土壤水和地表水统一到一个综合框架下,基本可分为田间、灌区、流域 3 种尺度,图 1 是流域尺度水账户的构成分类^[4,6,10]。在田间尺度,水通过降水、地下径流、灌溉等方式进入田间后,一部分通过作物蒸腾、棵间蒸发、灌溉入渗等方式被损耗,其余部分则以地表(下)径流方式流出田间域或以土壤水分储存保留下来。在灌区尺度,大部分的水通过作物损耗掉,同

时也被灌区居民和牲畜生活、工业生产、淡水养殖以及其他(农田防护林、杂草、树木、休耕地、水体等)等利用。在流域尺度,降水一般是唯一的入境源;如果存在流域间的水资源转化和地下水流动,那么这些转化入境水也是重要的入境源。

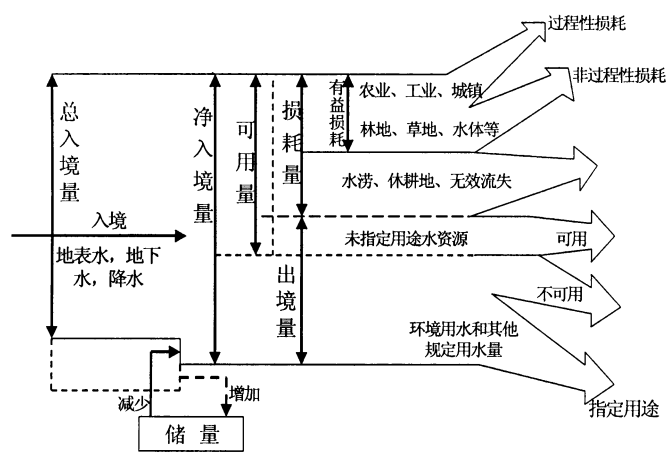


图1 流域尺度水账户的构成分类(据文献[4,10]修改)

2 实例研究:以黑河流域中游张掖市为例

水资源可持续管理是黑河面临的发展机遇和严峻挑战。随着全国第一个节水型社会建设试点的开展,围绕提高水分生产率为核心的节水建设工程在张掖市全面展开,测量不同尺度上的水分效率,并试图找到水分效率在不同尺度上的变化与转化关系,对流域水资源可持续利用具有重要意义。

2.1 水账户各平衡要素参数标定

2.1.1 田间尺度水账户:以张掖市临泽内陆河流域综合研究站试验地为例 田间尺度水账户的研究区位于腾格里沙漠西南边缘的黑河流域张掖市临泽县平川乡“中国生态系统研究网络临泽内陆河流域综合研究站”百亩实验地内,主要试验作物为春小麦(净作)、玉米(净作)和带田(春小麦与玉米)。限于篇幅,详细实验过程参见文献[10],这里不再赘述。

总损耗包括过程损耗和非过程损耗两部分。综合各种计算蒸散耗水量方法,本文采用以FAO推荐的Penman-Monteith公式为核心的CROPWAT软件计算作物蒸散量^[12]。即将研究区的地理位置、逐月气象资料、灌溉时间及制度、作物类型(考虑作物系数)、种植模式、土壤湿度(分为低、中、高3种湿度类型,考虑水分胁迫)输入到CROPWAT软件制作成文件,然后应用该软件进行不同作物的实际蒸散量计算。由于药剂和人工辅助除草的同时使用,杂草蒸散发量以0处理。根据当地实验成果^[13]、农户灌耕经验和农业工程专家意见,作物生长期(夏灌)垂直渗漏按每次灌水量的15%处理,冬灌水按灌溉量的40%计算。土壤蒸发量测定比较复杂,本文采用水量平衡方法进行计算。

2.1.2 灌区尺度水账户:以临泽县平川灌区为例 本文灌区水账户的研究区为田间水账户所在的平川灌区(主要靠引黑河干流水灌溉),时间为2001年4月1日~2002年4月1日。灌区水账户平衡要素分类见文献[10]。2001年,灌区灌溉耕地6130hm²,农田防护林面积83.83hm²(以二白杨为主),大、小牲畜各9280、45720头;引地表水6169万m³,灌区外地表径流入境量638万m³,地下水开采195万m³^{①②}。

本文采用3套实测数据综合计算研究区土壤湿度变化。据区内4个代表性地下水观测井(黄二村、一工程、单家庄村、四坝村)的监测,同时参考平川灌区内典型区28种不同植被的土壤水分动态监测结果和ENVIS土壤湿度观测数据^③,计算得到灌区储量变化为19.2mm。

① 张掖市水务局. 关于报送2001年水利管理年报的报告. 2002. 1.
 ② 平川统计站. 平川乡2001年农村经济基本情况提要本. 2002. 3.
 ③ 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所. 中国生态系统研究网络临泽内陆河流域综合研究站2002~2003年年报. 2003. 12.

灌区过程损耗包括作物、农田防护林和渔业的蒸散。尽管已有应用遥感手段测量灌区尺度作物蒸散发量的案例,但鉴于遥感技术在小块地面计算上的局限,因此大部分研究还是对田间尺度进行分类加总^[8,14]。灌区尺度单一作物的蒸散发计算方法与农田尺度一样,将多种单一作物的蒸散发结果经面积加权后,得到灌区作物的平均蒸散量。农田防护林蒸散发参考文献[15]的结果进行计算。渔业蒸散发和自由水面蒸发参考文献[16]计算得到。由于研究区位于腾格里沙漠边缘,气候干旱,区内尚无生活排水设施,指定用途水(包括牲畜用水和生活用水)总量(根据2001年实际定额计算^①)不大,损耗率为100%。

非过程损耗包括土壤(包括裸地)蒸发、自由水面蒸发、灌溉水土壤入渗和污染4个过程。灌溉水土壤入渗(包括土壤入渗补给和渠系渗漏)的计算方法、过程与田间尺度计算相同。灌区内绝大部分农田为耕作历史长、质地较好的灌耕土,参考临泽站在平川灌区开展的农田试验结果和咨询农业专家的意见^③,生长期灌水和冬灌水的下渗率分别按5%、30%计算。渠系渗漏补给系数和斗农渠渗漏系数根据2001年平川灌区的渠系实际情况和参考文献[13]联合确定,分别取值0.35和0.49。

2.1.3 流域尺度水账户——以黑河流域中游张掖市为例 流域尺度水账户除了要考虑土壤湿度变化和地下水储量变化,还要考虑地表水尤其是水库储水的年变化。黑河流域有35条小支流,按目前的水系和水力联系,张掖市可独立划分为一个子流域。2001年张掖市(计算面积40934km²)降水量、径流量、地下水供给量、地下水储量、大中型水库总蓄水、潜水蒸发、不可再用退化水量(超V类水质)、生活用水和工业用水数据均来自甘肃省2001年水资源公报^①。流域尺度的生活(包括人和牲畜)、工业用水损耗率分别按70%、45%计算。

流域尺度的过程损耗主要包括农作物蒸散、植被与非作物等蒸散、渔业养殖水面蒸发、工业和生活用水以及用于湿地环境的生态耗水。农作物、渔业养殖蒸散量计算方法与灌区尺度相同。植被蒸散是一个复杂的物理过程和生物过程,即使是模拟效果较好的非均一下垫面条件下的计算模式,在实际工作中也难以推广应用^[17],因此本文采用水量平衡方法计算。

自由水面蒸发量按分区进行计算^[16]。土壤水分蒸发计算分草地、林地、未利用土地和城镇(包括交通用地)分别进行计算,各类型土地面积统计采用中国科学院寒区旱区环境与工程研究所制作的“黑河流域2000年TM/ETM+影像图土地利用解译结果”数据。研究区气候干旱,降雨稀少,因此未利用土地、城镇的蒸发量与其降水量近似。草地土壤蒸发分高覆盖度(平均65%)、中覆盖度(平均45%)和低覆盖度(平均25%)三种类型,天然草场无草本覆盖区域(=100% - 盖度)以降水近似作为其总蒸发。林地土壤蒸发分有林地和灌木林地分别计算。其中,有林地土壤蒸发量的测量结果为96mm^[18],考虑到未测量期间的林内大气温度和地温都较低、气压梯度减小,假设未测定期间土壤蒸发量也为96mm;研究区上游灌木林地的蒸发量取550mm,近似作为其年蒸发量^[18,19]。

2.2 黑河流域中游张掖市2001(2002)年水账户分析 根据以上方法,构建出张掖市2001/2002年水账户,田间尺度、灌区尺度和流域尺度水账户结果分析如下。

2.2.1 田间尺度 田间尺度上,所有的灌溉水和降水都被损耗殆尽,同时土壤水储量减少,损耗比例高达101%。小麦、玉米、带田的过程损耗比例分别为69%、68%、67%,可见减少灌溉水的垂直渗透和表层蒸发(如采用地膜覆盖等)对提高水资源有效利用率具有重要意义。净流入水量和总损耗量的单位产出小麦最低,玉米最高,因此从过程损耗单位产出角度,种植玉米最有优势。尽管带田充分发挥了水、肥、劳力和气候资源的潜力,其实物产出具有一定优势,但在水源不足的地区,种植带田可能会加剧水资源的紧缺状况,甚至引发超采地下水,在大范围内更可能对生态环境不利。因此,合理安排种植结构是提高水分生产率的有效途径之一。

2.2.2 灌区尺度 2001年,平川灌区内当年水分储量减少19.2mm,净流入水1237.2mm,总损耗量(1196.8mm)分别占总流入水量和净流入水量的98.3%和96.7%。由于自由水面、土壤蒸发和渠系入渗的增加,灌区尺度上的非过程损耗比例相比田间尺度明显提高,占总损耗的51.97%,而土壤蒸发和入渗分别占其中的53.51%和45.13%。农作物蒸散发仍是过程损耗的主要部分,约占过程损耗量的

① 甘肃省水利厅. 甘肃省水资源公报 2001. 2002. 4.

95%,单位损耗的经济价值为 2.64 元/m³;尽管渔业养殖蒸散量只占过程损耗量的 3.88%,单位损耗的经济价值达 18.95 元/m³,但在研究区大规模挖塘养鱼不符合研究区水资源可持续模式,应加以限制。指定用途水资源中,单位工业水损耗的经济价值为 85.47 元/m³。因此从灌区角度,减少土壤蒸发和土壤入渗、提高渠系利用率是提高灌区水资源利用率的必然趋势,大力调整产业结构、积极发展以农产品为原料的工业对提高水资源的经济生产率,潜力巨大。

2.2.3 流域尺度 2001 年,张掖市总入境水量中 92.6% 被损耗利用,净流入水损耗比例为 91.4%,可用水量已几乎完全利用(98.2%)。尽管社会经济系统的显性过程损耗只占可用水量的 15.6%,但对张掖市的水资源利用空间的改善潜力仍需谨慎。主要分布于祁连山山麓的林地、灌木林地和草场等类型植被是张掖市天然的“绿色水库”,其土壤蒸发作为水源涵养林水分循环的基本过程,具有不可或缺的重要作用^[18]。若将林草土壤蒸发(共计 19.765 亿 m³)计为有益损耗,则可用水的有益损耗比例提高到 39.61%。因此,对以任何方式改变水源涵养林水分利用率的决策,都应慎之又慎。

3 讨论

3.1 不同尺度的水资源生产率转化 水账户提供了一个分析不同尺度水资源利用的统一框架。在田间尺度,忽略作物类型市场价值差异,水利用的根本目标是提高进入田间单位水量的实物量产出,其提高途径是尽可能地减少田间非过程损耗。本文中田间水过程损耗比例为 61%~68%,提高过程损耗比例的空间还较大,目前灌溉方法本身还可以改善。灌区尺度上,一半以上的水分被无效损耗,但粮经作物过程损耗单位产出高于田间水账户。流域尺度上,损耗比例仍很高,但过程比例却很低(15.6%),过多的平原水库加剧了张掖市水资源的紧张程度。

内陆河流域地表水和地下水转换关系复杂,从灌溉渠道和田间渗漏的地表水不断重新补给地下水,或供生态之需,或在其它地方以地表水的形式出露被其它用水单位重新利用,因此改善灌区的灌溉效益并不一定意味着流域灌溉效率的改善^[8,12,20,21]。最近国内研究成果也表明,水稻水分生产率总体上表现出随空间尺度变大而提高的趋势^[22]。对水文系统循环转换频繁、生态脆弱的内陆河流域而言,提高水资源利用效率应以全流域的水利用效率为指标,仅通过提高渠系利用率和渠道衬砌率措施,从长期来看并不一定能从根本上提高水资源生产率,甚至可能产生巨大的生态负效应。尽管存在较大的非过程损耗量,但考虑到流域生态系统的脆弱性,其提高空间的现实性还有待进一步研究,水资源开发利用的策略要适当谨慎。

3.2 张掖市农业节水措施的探讨 从水账户平衡要素构成出发,节水可从提高有益损耗比例、降低无益或低效益损耗率、减少指定用水和指定出境四方面入手。尽管通过提高效率节约用水的潜力看似巨大,但水资源利用的一个重要特征是并非所有被支配的水都被耗尽,其中大部分依然回归到水文系统中,还可以被再次捕获利用,因此,虽然特定局地的生产效率可能较低,但系统整体效率可能较高。鉴于农田灌溉效率与流域灌溉效率的明显差异,因而,农田用水效率的提高不等于流域用水效率的提高。因此,本文认为张掖市农业水资源生产率提高的途径应是:(1)种植可以提高单位损耗作物产量或经济效益的作物品种;(2)稳定水资源供给,合理安排灌溉时间,降低作物关键生长期水分胁迫;(3)增加除水以外的农业投入要素(如劳力或肥料)的投入途径;(4)减少存在较多无效蒸发的自由水面面积(如平原水库),合理安排地下水开采以提高灌溉、渗漏回水利用率等,减少无益损耗。

3.3 流域生态健康与水利用效率 内陆流域内气候干燥,降水稀少,其植被的生长发育或退化、种群演替以及绿洲存亡与地下水位埋深基本呈动态平衡关系^[23]。黑河流域中游地区的地下水主要来源为出山河(洪)水及引灌河水(渠系、田间)的垂向入渗补给。多年来,张掖市境内黑河、黎园河等主要河流多年出山径流量并未出现显著减少现象^[24],但大规模水利化建设(渠系利用率由 1950 年的 40%~45% 增加到 2002 年的 65%~70%)^①引起了水资源利用与分布格局、生态系统的明显衰退,表现在:(1)河道

① 张掖市水务局. 关于报送 2002 年水利管理年报的报告. 2003. 1.

入渗补给地下水的数量大幅减少,主要补给区北移至细土平原,地下水力坡度变缓,地下水位呈区域性持续下降趋势(0.25~1.04m);(2)天然状态下的山前-泉水带水循环系统逐步演变为细土平原-泉水带的局部水循环系统,并以每年0.03~0.06m的速度持续下降,泉口普遍下移200~1000m,单泉流量减少0.2~1.4l/s,甚至干涸^[25],泉水灌区不得不开采地下水来弥补灌溉水源的不足,加速了泉水资源衰减,最终导致主要由泉水构成(占65.8%)的黑河过正义峡河川径流量逐步减少。2000年黑河分水方案实施以来,甘州区、高台县和临泽县地下水平均降幅分别达0.9~1.29m、0.18~0.71m和0.13~0.27m,地下水位迅速下降^[26]; (3)河岸林带和灌丛草场迅速退化消失,沼泽、湿地及水生植被大幅度减少衰退,土地盐渍化和沙漠化加速,下游断流时间越来越长,额济纳绿洲岌岌可危。

4 结语

本文引入水账户理论方法,并以黑河流域中游张掖市为例进行了应用分析,结果表明研究时间内,田间尺度所有可用水均被损耗殆尽,且导致了土壤水储量的减少,减少水分的无效损耗量是提高灌区水资源利用率的必然趋势。流域尺度上,总入境水量的92.6%被损耗利用,研究区的水资源利用处于不可持续的极限状况,仅以渠道衬砌率措施来提高渠系利用率可能并不是提高水分生产率的根本措施,提高水资源利用效率应以全流域的水利用效率为指标,否则将不利于张掖市生态经济系统的持续健康。由于当前大多数地方的资料贮备(尤其在灌区和流域尺度)尚达不到水账户研究要求,因此目前国外水账户研究也是正处于发展和探索阶段,本文研究在应用观测数据的同时,也采用了较多的经验估计,今后需要进一步依靠观测数据和模拟技术进行精确。另外,当前的水账户工作都是针对特定年份,其结论完善尚待通过建立序列年水账户来检验,并据此探索不同尺度水分生产率的转化规律;同时结合未来气候变化情景建立预测账户,对流域水资源可持续利用具有重要意义。

致谢:中国科学院寒区旱区环境与工程研究所的徐中民研究员和赵文智研究员、云南农业大学水利水电与建筑学院王新华博士以及中国生态环境国家野外科学观测临泽内陆河流域综合研究站提供了帮助,在此一并致谢!

参 考 文 献:

- [1] Molden D, Sakhivadivel R. Water accounting to assess use and productivity of water[J]. Water Resour Dev, 1999, 15: 55- 71.
- [2] Kijne J W, Barker R, Molden D. (Eds.). Water productivity in agriculture: limits and opportunities for improvement [M]. CAB/ IWMI publishing: Wallingford/ Colombo, 2003.
- [3] Bessembinder J J E, Leffelaar P A, Dhindwal A S. Which crop and which drop, and the scope for improvement of water productivity[J]. Agricultural Water Management, 2005, 73(2): 113- 130.
- [4] Molden D. Accounting for Water Use and Productivity[R]. International Water Management Institute, SWIM, Colombo, Sri Lanka, 1997.
- [5] Molden D, Sakhivadivel R, Habib Z. Basin-level use and productivity of water: Examples from South Asia[R]. International Water Management Institute (IWMI), Research Report 49, Colombo, Sri Lanka, 2001.
- [6] Natalia Peranginangin, Ramaswamy Sakhivadivel, Norman R Scott, et al. Water accounting for conjunctive groundwater/ surface water management: case of the Singkarak-Ombilin River basin, Indonesia[J]. Journal of Hydrology, 2004, 292(1- 4): 1- 22.
- [7] Peter Droogers, Geoff Kite. Water productivity from integrated basin modeling[J]. Irrigation and drainage systems, 1999, 13: 275- 290.
- [8] Droogers P, Kite G. Simulation modeling at different scales to evaluate the productivity of water[J]. Phys Chem Earth (B), 2001, 26(11- 12): 877- 880.
- [9] 陈东景,徐中民,陈仁升.水资源账户的建立——环境经济综合核算的一个实例[J].水科学进展,2003,14(5): 631- 637.
- [10] 龙爱华.水资源账户与社会化管理研究——以黑河流域张掖市为例[D].兰州:中国科学院寒区旱区环境与

- 工程研究所, 2004.
- [11] 王金鑫, 黄季, Scott Rozelle. 地下水灌溉系统产权制度的创新及流域水资源核算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
- [12] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements[R]. FAO: FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Rome, 1998.
- [13] 陈满祥. 陈满祥水文水资源论文集[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 2002.
- [14] Peter Droogers, Geoff Kite. Estimating productivity of water at different spatial scales using simulation modeling[R]. International Water Management Institute, research report 53, Colombo, Sri Lanka, 1997.
- [15] 赵文智. 内陆河流域生态需水和生态地下水水位研究[D]. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2002.
- [16] 潘启民, 田水利. 黑河流域水资源[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2001.
- [17] 马耀明, 王介民. 卫星遥感结合地面观测估算非均匀地表区域能量通量[J]. 气象学报, 1999, 57(2): 180-189.
- [18] 金博文, 康尔泗, 宋克超, 等. 黑河流域山区植被生态水文功能的研究[J]. 冰川冻土, 2003, 25(5): 580-584.
- [19] 宋克超, 康尔泗, 金博文, 等. 黑河流域山区植被带草地蒸散发试验研究[J]. 冰川冻土, 2004, 26(3): 349-356.
- [20] Bagley J M. Effects of competition on efficiency of water use[J]. Journal of Irrigation and Drainage Division of the American Society of Civil Engineers, 1965, 91(IR1): 69-77.
- [21] Palacios-Velez E. Water use efficiency in irrigation districts[A]. In: Garduno H., Arreguin-Cortes F. (eds.). Efficient water use[R]. Montevideo: UNESCO ROSTILAC, 1994.
- [22] 崔远来, 董斌, 李远华. 水分生产率指标随空间尺度变化规律[J]. 水利学报, 2006, 37(1): 45-51.
- [23] 钟华平, 刘恒, 王义, 等. 黑河流域下游额济纳绿洲与水资源的关系[J]. 水科学进展, 2002, 13(2): 223-228.
- [24] 王根绪, 程国栋. 近 50a 来黑河流域水文及生态环境的变化[J]. 中国沙漠, 1998, 18(2): 233-238.
- [25] 丁宏伟, 翟振卿. 黑河干流中游地区泉水资源衰减原因及趋势分析[J]. 甘肃地质学报, 2001, 10(1): 69-74.
- [26] 陈仁升, 康尔泗, 杨建平, 等. 黑河干流中游地区季平均地下水位变化分析[J]. 干旱区资源与环境, 2003, 17(5): 36-43.

Water accounting method and its application to river basin water productivity analysis

LONG A+hua^{1,2}, WANG Hao¹, CHENG Guo-dong², YU Fu-liang¹

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China;
2. State Key Laboratory of frozen Soil Engineering, CAREERI, CAS, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The water accounting method is introduced to study the utilization status of water resources. The conceptual frame of this method and its mathematical expression are presented. By analyzing the variation process of flow direction, discharge and water storage the water users in the district to be investigated can be clearly identified. Thus, the ways of elevating the usable water amount and the possibility of water saving may suggest accordingly. The method is applied to analyze the water resources status in Zhangye City, located at the mid stream of Heihe River. The result shows that in the given time period all water on field scale was depleted and the water storage in soil was reduced. To reduce the useless water consumption is the important measure to elevate the utilization rate of irrigated area. Since 92.6% of water on river basin scale is consumed the water resources of this city is in a critical unsustainable status. It is pointed out that the water saving measures including the improvement of utilization coefficient and increasing the lining ratio of irrigation channel will not significantly elevate the productivity of water use, the water utilization index of whole basin is the unique index for assessing the water use efficiency of the river basin.

Key words: water accounting; process depletion; water productivity; scale transformation; Zhangye City
(责任编辑: 王成丽)