

基于绿洲灌区尺度的生态需水及水资源配置效率研究 ——黑河中游案例

蒙古军 汪疆玮 王雅[†] 周朕 江颂

地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京大学城市与环境学院, 北京 100871; [†] 通信作者, E-mail: wangyayas@sina.com

摘要 以黑河中游农业绿洲灌区为研究对象, 以基础地理信息数据、土地覆被数据和绿洲灌区统计数据等为数据源, 基于Penman-Monteith公式和NDVI数据, 研究生态需水量的时空分异, 在此基础上, 结合实际引水量和单产耗水量, 分析绿洲灌区水资源配置的效率, 得到以下结果。1) 年潜在蒸散量在800~1200 mm/a之间, 每年6—8月为峰值。多年平均生态需水量在614~999 mm之间, 每年4—8月需求最大, 空间上呈现从东南向西北逐渐减少的变化趋势, 黑河干流沿岸灌区生态需水量相对较大。2) 黑河中游引水以地表水为主, 地下水为辅。2008年引水总量最大, 引水量较大的灌区主要集中在黑河干流沿岸。3) 黑河中游水资源配置总体情况较好, 黑河干流周边灌区供需比普遍大于1, 山丹县及民乐县灌区供需比小于1。近80%的灌区属于水资源配置高效或相对有效的地区, 仅4个灌区水资源配置效率低下, 1个灌区引水量严重不足, 因此适当调整部分灌区引水量, 进一步推广节水理念和技术, 是全面提高水资源配置效率的途径。研究结果对提高干旱区水资源配置水平有借鉴意义。

关键词 生态需水; 水资源配置效率; 绿洲灌区; 黑河中游

中图分类号 P964

A Study of Ecological Water Requirement and Efficiency of Water Allocation Based on Oasis Irrigation Area Scale: A Case of Middle Reaches of Heihe River

MENG Jijun, WANG Jiangwei, WANG Ya[†], ZHOU Zhen, JIANG Song

Laboratory for Earth Surface Processes (MOE), School of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871;

[†] Corresponding author, E-mail: wangyayas@sina.com

Abstract Based on many data sources, such as basic geographic information, land use and cover information and statistic data of irrigation areas, the authors picked agricultural irrigation areas in the middle reaches of Heihe river as a study area and analyzed the spatial-temporal distributions of ecological water requirement with Penman-Monteith equation and NDVI data. Considering the real water diversion and consumption per unit grain yield, the efficiency of water allocation was also analyzed. The results show that the annual potential evapotranspiration is between 800 and 1200 mm and the peak occurs between June and August. Average annual potential evapotranspiration is between 614 and 999 mm while maximum of demand appears from April to August. Ecological water requirement reduces from southeast to northwest gradually which is relatively larger along the Heihe river. Ground water plays major role in water diversion while underground water is minor. The yield of water diversion is the largest in 2008 and irrigation areas which have more water diversions flock around the Heihe river. Overall, water resource allocation overthere is fair good. Water supply-demand rate around Heihe river is generally greater than 1 while it is opposite in Shandan and Minle. Nearly 80% of the irrigation areas can be considered as efficient or relative efficient regions. There are four irrigation districts are inefficient and only one is short of water diversion. Therefore, adjustment of water diversion in some certain regions with promotion of water saving technology can

enhance the efficiency of water allocation roundly. The results provide feasible reference to improve the efficiency of water allocation in arid area.

Key words ecological water requirement; efficiency of water allocation; oasis irrigation area; middle reaches of Heihe river

在我国西北干旱区,降水稀少,蒸发强烈,地下水埋藏较深,植被群落主要维系地表水的补充,充足而稳定的地表水供给成为各类生态系统健康稳定的关键。生态需水量(ecological water demand)是维系生态系统生物群落基本生存和河流、湖泊等一定生态环境质量的最小水资源需求量,具有时空差异性、动态性、目标性、不确定性和阈值性等特点^[1-3]。长期以来,随着社会经济的快速发展,西北很多农业绿洲都强调优先满足农业用水的发展模式,相对忽略了水资源维持生态平衡的重要作用,导致生态退化的现象较为普遍。生态需水概念的提出,为区域用水配置提供了理论上的最小值,成为协调农业用水与生态用水间矛盾,实现区域持续发展的关键。

生态需水量的研究早期关注河道最小需水量^[4-6],后来扩展到河道外的植被生态系统需水量。Baird等^[7]研究了植物与水文过程的相互关系,Laio等^[8]研究了土壤水分亏缺对植物的耐性影响,Groenewald等^[9-10]利用 NDVI, ET 和年降雨量间的关系厘定植被生态需水量。近年来,国内学者对多目标情景下河道外植被群落的生态需水量阈值进行了大量研究。赵文智等^[11]和夏哲超等^[12]按照阈值理论,将植被生态需水量分为最高、适宜和最低 3 个级别。闵庆文等^[13]将林木凋萎含水量与阻滞含水量分别作为确定林地最小和适宜生态需水量的依据。关于生态需水量的确定,多采用水量平衡法^[14]、分布式水文模型^[15-16]和面积定额法^[17]等。一般植物的基础生理需水量很小,因此也可通过修正植物潜在蒸发量来推算植物实际需水量,并以植物的实际需水量作为植被生态需水量^[3]。陈丽华等^[18]通过植被类型和风速修正,计算北京森林的生态需水量;周丹等^[19]通过土壤和地下水埋深修正,计算西北干旱区荒漠植被的生态需水量。在干旱区,农业灌溉是用水大户,农业用水效率是影响水资源配置的关键,作物需水和引水量的时空匹配度也是制约农业用水效率的重要因素。近年来,部分学者从水分循环、灌溉过程等技术的效率来研究提高水资源配置效率的途径^[20-21],侧重对各种灌溉技术效率的实证研

究^[22-23]。一些学者则从农户投入产出的视角来衡量灌溉过程的经济性,强调灌溉带来最大的经济产出,而非使用最少的水资源^[24-25]。水资源利用效率的指标量化始终是相关研究的前提^[26]。Willardson等^[27]提出,可以用比例的概念来代替效率指标,如消耗性使用比例指作物蒸发蒸腾量占田间灌溉水量的百分数。蒋磊等^[28]利用蒸散发、降雨的差值与净引水量的比值来计算河套灌区的灌溉水利用效率。

黑河中游集中了全流域 80%的绿洲、91%的人口、95%的耕地和 80%的 GDP^[29],是整个流域主要的耗水区和径流利用区。依据“九七”甘蒙分水方案,黑河干流平均每年需分水 9.5 亿 m³维持黑河下游生态环境及农业生产,致使中游地区实际可用水量仅 15.25 亿 m³,人均可利用量 1250 m³,为全国平均水平的 57%,属于典型的资源型缺水地区。近年来,部分学者采用水量平衡、蒸腾模型和实测验证、Penman-Monteith 公式等,对黑河生态需水量进行研究。王根绪等^[30]比较了潜水蒸腾模型(阿维里扬诺夫公式及潜水蒸腾公式)与实测模型在黑河中游人工绿洲防护林的需水量。王根绪等^[31]应用 Penman-Monteith 公式,计算黑河多种天然生态系统的生态需水量。何志斌等^[14]基于水量平衡和 GIS 技术,在进行生态分区的基础上,分析植被生态需水量的时空变化以及缺水量。近年来,随着张掖市绿洲的扩张,农业发展对水资源需求的激增,黑河中游农业用水和生态需水的矛盾成为制约经济持续发展和生态环境质量改善的关键。基于上述情况,本文首次将 Penman-Monteith 公式与 NDVI 数据相结合,研究黑河中游生态需水量的时空分异,结合各灌区的实际用水量,进行水资源配置效率的研究,研究结果对实现区域水资源优化配置有借鉴意义。

1 研究区概况与数据来源

黑河是我国西北地区第二大内陆河,地跨青、甘、内蒙三省(区)。黑河中游位于河西走廊中段,地理坐标为 97°20'—102°12'E, 37°28'—39°57'N,行政区划包括甘肃省张掖市的甘州区、临泽县、高台

县、民乐县、山丹县以及肃南裕固族自治县的明花区,总面积约为 $1.96 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。黑河中游属于温带大陆性干旱气候,年降水量为 104~328 mm,年蒸发量为 1639~2341 mm。地势南高北低,东高西低,中部为绿洲、戈壁相间分布的走廊平原。黑河中游绿洲灌渠发达,可分为 24 个主要灌区。该绿洲是我国传统的农业生产基地,目前也是我国制种玉米的主要产地。长期以来,水资源问题一直是困扰黑河中游土地利用的瓶颈,出现诸如水资源供需矛盾突出^[32-34]、农业用水过大^[35]、用水效率不高^[36]等问题。

由于灌区实际灌溉影响范围主要为耕地,本文根据黑河中游2007和2011年土地覆被图,提取耕地做空间交集,然后向外缓冲 100 m,作为绿洲灌区的实际范围(图1)。共获得 24 个灌区,以此探讨水资源配置效率。本文所用的基础地理信息数据(行政区划、道路和居民点、河流湖泊水系等)和灌区数据(灌渠分布和灌区边界等)源于中国科学院寒区旱区科学数据中心的“数字黑河”项目^[37];气象数据(温度、降水、日照、风速等)来自中国气象科学数据共享服务网(<http://www.esi.cn/>),选择了与研究区相关的玉门镇、金塔、酒泉、高台、托勒、野牛沟、张掖、祁连、山丹、阿拉善右旗、永昌等 11 个气象站点1999—2012年的数据;土壤数据来源于 FAO 基于世界土壤数据库(HWSD)的中国土壤数据集(V1.1)^[38];DEM 数据是由日本 METI 和美国 NASA 联合研制,并向公众提供的数字高程数

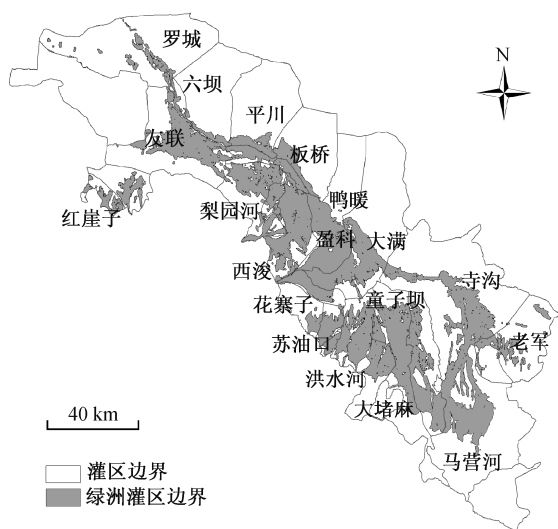


图 1 黑河中游绿洲灌区分布

Fig. 1 Distribution of oasis irrigation area in the Heihe Middle Reaches

据产品(<http://www.gscloud.cn/>),分辨率为 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$; NDVI 数据是由美国 NASA 数据站(<http://landsweb.nascom.nasa.gov/>)提供的 MODIS 16d 植被合成数据(包括 2000, 2008 和 2011 年相关数据); DMSP/OLS 2010 夜间灯光数据来源于美国国家地球物理数据中心(National Geophysical Data Center);土地利用数据(2000, 2007 和 2011 年)均来源于国家自然科学基金“黑河流域生态-水文过程集成研究”重大研究计划“面向黑河流域生态-水文过程集成研究的数据整理与服务(编号 91025001)”项目成果,是基于 Landsat 和 ETM 遥感影像,结合野外考察验证,建立的土地利用/覆被影像和矢量数据库,解译精度达 93%,空间分辨率为 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$;社会经济统计数据来源于《张掖市统计年鉴》(2012 年);灌区统计数据(地表水及地下水引用量、粮食产量等)均来源于甘肃省张掖市水务局《水利管理年报》(2000, 2008 和 2012 年)。

2 研究方法

2.1 潜在蒸散量计算模型

植被的潜在蒸散量是实际蒸散量的理论值上限,是核算生态需水量的基础。本文采用 Penman-Monteith 公式计算黑河中游植被潜在蒸散量。该模型考虑了影响蒸散的大气物理特征以及植被生理特征,为不饱和和下垫面蒸散研究开辟了新途径。公式如下:

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273.15} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 U_2)} \quad (1)$$

式中, ET_0 为植被潜在蒸散量(mm/d), Δ 为饱和水汽压与温度曲线的斜率(kPa°C), R_n 为作物表面净辐射量($\text{MJ/m}^2 \cdot \text{d}$), G 为土壤热通量($\text{MJ/m}^2 \cdot \text{d}$), γ 为湿度计常数($0.000665 \text{ hPa}^\circ\text{C}$), T 为日均温度($^\circ\text{C}$), U_2 为距离地面 2 m 处的日均风速(m/s), e_s 为空气平均饱和水汽压(kPa), e_a 为空气实际水汽压(kPa)。各参数计算方法如下:

$$R_n = (1 - \alpha) \left(\alpha + \beta \frac{n}{N} \right) R_a - \sigma \left(\frac{T_{\max}^4 + T_{\min}^4}{2} \right) \cdot \left(0.34 - 0.14 \sqrt{e_a} \right) \left[1.35 \frac{\alpha + \beta \frac{n}{N}}{(0.75 + 2 \times 10^{-5} H)} - 0.35 \right] \quad (2)$$

式中, α 和 β 为下垫面常数,在黑河中游取 $\alpha=0.25$,

$\beta=0.5$; n 为当日实际日照时数(h); N 为当日最大日照时数(h); R_a 为太阳顶层辐射($\text{MJ}/\text{m}^2\cdot\text{d}$); σ 为斯蒂芬-波尔兹曼常数($4.903\times 10^{-9} \text{ m}^2\cdot\text{K}^4$); T_{\min} 和 T_{\max} 为日最低温度与日最高温度($^{\circ}\text{C}$); H 为海拔高度(m)。

$$\Delta = 4098 \times 0.6108 e^{\frac{17.27T}{T+237.3}} / (T + 237.3)^2, \quad (3)$$

$$G = 0.12[T_i - (T_{i-1} + T_{i-2} + T_{i-3}) / 3], \quad (4)$$

$$N = \arccos(-\tan \varphi \tan \delta) 24 / \pi, \quad (5)$$

式中, φ 代表地理纬度, δ 代表太阳赤纬。本文通过黑河中游 2000, 2008 和 2011 年日均气象数据, 研究潜在蒸散的时空规律。

2.2 生态需水量计算

基于潜在蒸散量计算区域生态需水量的方法较多, 如 FAO 推荐的植被耗水系数、Shuttleworth-Wallace 模型(S-W 模型)^[39]以及 Kustas^[40]提出的多层模型。本文将潜在蒸散量与红外遥感法相结合, 利用 NDVI 反映的植被密度及叶面覆盖状况, 结合潜在蒸散量以及降水量等因素反映区域生态需水量。该方法2008年首次应用于美国加利福尼亚州、新墨西哥州以及科罗拉多州的干旱与半干旱区域^[9], 通过 Landsat 7 卫星计算 NDVI 指数, 并通过实测数据进行拟合和验证。计算公式如下:

$$\text{NDVI}^* = (\text{NDVI} - \text{NDVI}_0) / (\text{NDVI}_s - \text{NDVI}_0), \quad (6)$$

$$\text{ET}_a(\text{estimated}) = (\text{ET}_0 - \text{Precipitation}) \times \text{NDVI}^* + \text{Precipitation}, \quad (7)$$

式中, NDVI_0 和 NDVI_s 分别为区域 NDVI 最小值与最大值, NDVI^* 为经过归一化处理的植被指数; ET_a 为实际蒸散量(即生态需水量), ET_0 为植被潜在蒸散量。本文在2000, 2008和2011年潜在蒸散的基础上, 结合16天间隔的 NDVI 数据, 研究黑河中游生态需水量。

3 结果分析

3.1 潜在蒸散量时空特征

黑河中游潜在蒸散量的季节分异特征明显(图2)。日潜在蒸散量极大值约为6 mm, 出现在第161~193天(即6月中旬至7月下旬); 极小值为0.5 mm, 出现在第353天至来年的第17天(即12月至来年1月)。潜在蒸散量与日均温的季节变化趋势一致, 其中4—8月为潜在蒸散量的高峰时段(日均潜在蒸散 >4 mm)。该时段也是农业生产的关键时期, 是作物需水量的高

峰期, 成为绿洲农业用水供需矛盾最突出的时间段。

黑河中游潜在蒸散量的空间分异也很明显(图3)。潜在蒸散量大致呈现东南低、西北高的趋势。位于走廊平原区的甘州区、临泽县和高台县, 海拔较低, 光热条件较好, 潜在蒸散量较大; 南部的民乐县和山丹县毗邻祁连山区, 海拔地势较高, 降水条件较好, 但光热条件较差, 潜在蒸散量相对偏小。潜在蒸散量的空间分布与区域光热条件的分布特征大体上一致。

3.2 生态需水量时空特征

黑河中游生态需水量的时间序列分布趋势与潜在蒸散大致相同。4—8月是黑河中游生态需水量较大的时段, 日均生态需水量大于2 mm; 5—7月日生态需水量大于4 mm, 是用水高峰期。基于16天生态需水量均值数据, 得到黑河中游灌区多年平均生态需水量空间分布(图4)。可以看出, 黑河中游多年年生态需水量在310.47~1121.85 mm之间。其中, 肃南县明花区灌区植被稀疏, 生态需水较少, 在310~614 mm之间; 走廊平原各灌区是绿洲农业的精华地带, 作物的蒸发和蒸腾作用剧烈, 生态需水量在614~999 mm之间。生态需水量极值出现在南部祁连山山麓地带(1000 mm以上)。黑河中游多年平均降水量约为115.29~287.49 mm, 降水从南部的祁连山区至走廊平原区逐渐减少。位于祁连山山麓地带的山丹县和民乐县等灌区, 降水量相对较多, 年均降水量在250 mm左右。走廊平原的黑河干流及周边区域年降水量偏低(200 mm以下), 降水主要集中在第161~289天(即每年6月中旬至10月中旬)。可以看出, 黑河中游生态缺水不仅存在空间差异性, 时间异质性也较为显著。

从各灌区多年生态需水量均值分布(图5)可以看出, 位于黑河干流的灌区生态需水量较大, 如盈科、鸭暖、板桥、蓼泉等灌区, 马营河、童子坝、洪水河、大堵麻及苏油口等灌区生态需水量亦较大。临近黑河干流的灌区农业发达, 气温相对较高, 地表灌溉渠系完整, 机井密度较大, 区内作物需水补给能力较强, 生态需水量偏大; 南部山麓地带的山丹县、民乐县等灌区生态需水量由南至北依次递减。大满、西浚、沙河、平川、花寨子等灌区用水主要依赖机井及黑河干流补给, 但因植被状况相对较差, 加之受灌渠和机井等基础设施影响, 导致生态需水量较小。友联、梨园河、安阳、寺沟等灌区年生态需水量在700~750 mm之间, 红崖子、新坝、

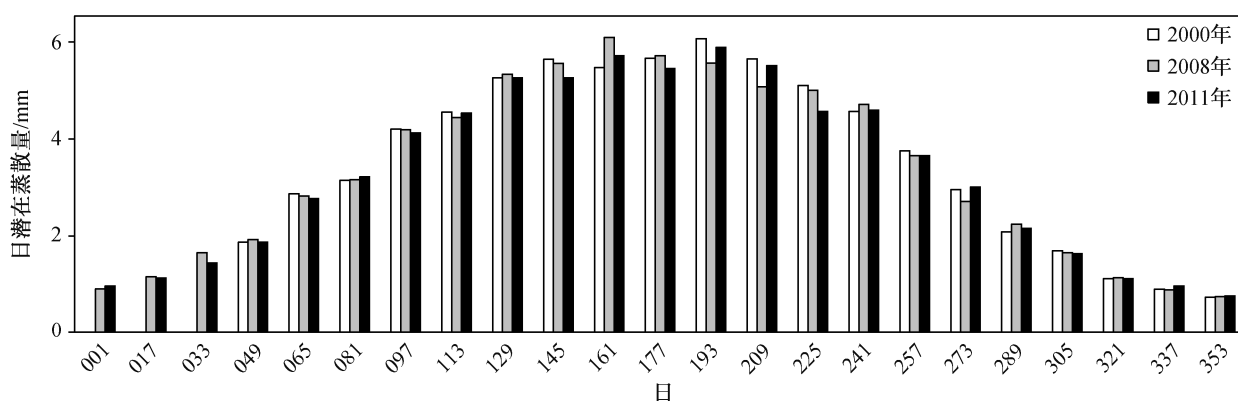


图2 黑河中游潜在蒸散量季节变化(16天均值)
Fig. 2 Seasonal variation of potential evapotranspiration (16-day mean)

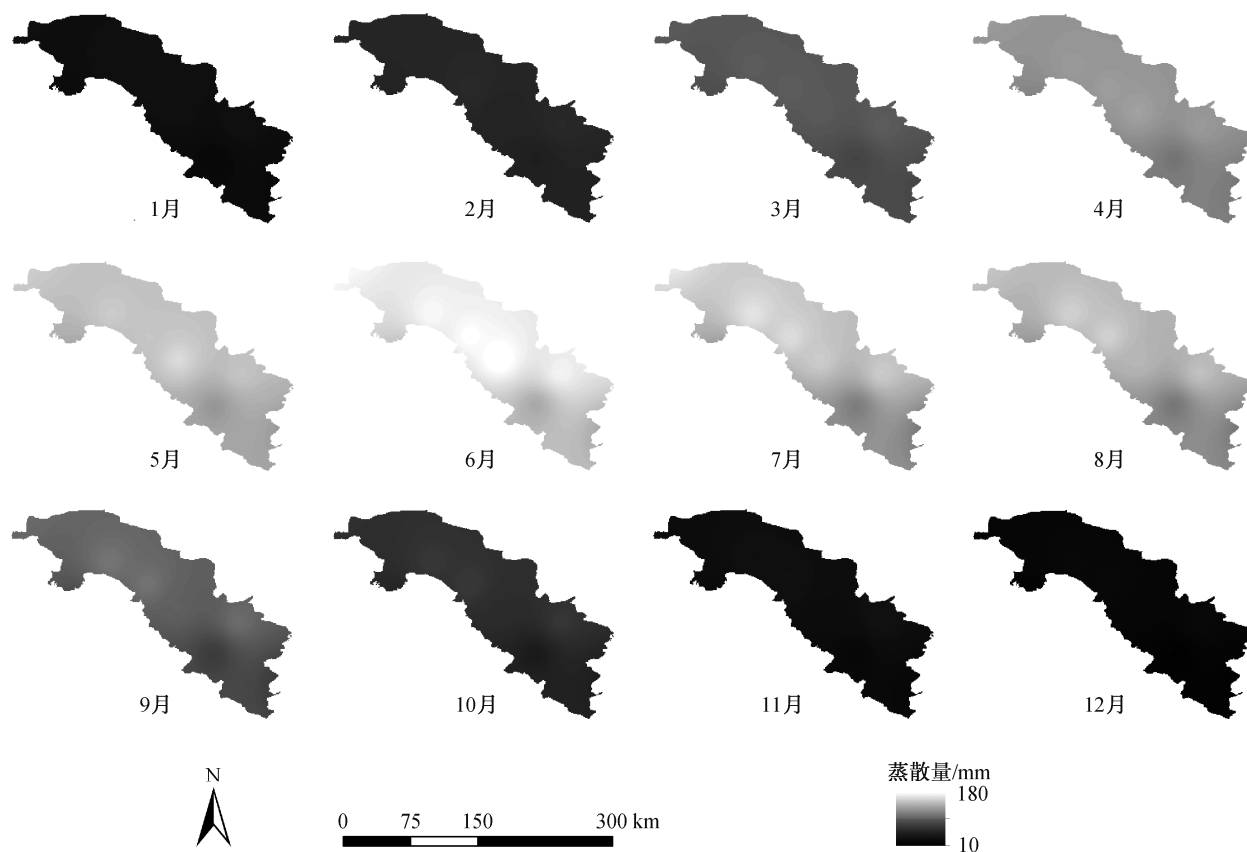


图3 黑河中游多年月均潜在蒸散量
Fig. 3 Monthly potential evapotranspiration of region

罗城、六坝、老军等灌区地理位置较远，地表水引用条件差，加之植被覆盖度较低，生态需水量最小。

3.3 引水量时空特征

黑河中游绿洲农业的水量调配及统计均以灌区作为主要单元，根据《张掖市水务局管理年报》(2000, 2008和2011年)，分析各灌区地下引水、地表

引水及总引水量时空特征。

从图6可以看出，黑河中游大部分灌区以地表引水为主，地下引水为辅。地下水开采主要集中在甘州区以及高台县，友联灌区多年平均地下水开采密度最高，约为 $0.6 \text{ m}^3/\text{m}^2$ ；西浚、大满、盈科、鸭暖、沙河等灌区年地下水引用密度约为 $0.2 \text{ m}^3/\text{m}^2$ ，

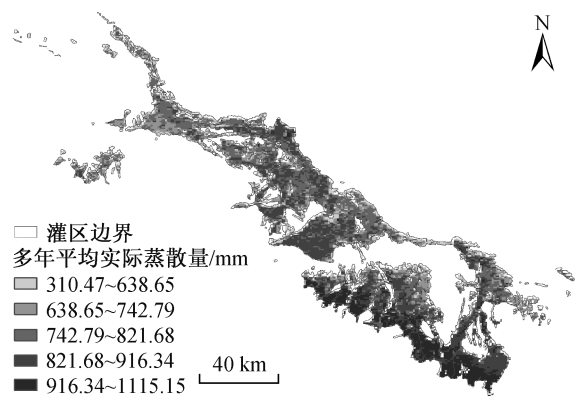


图 4 黑河中游灌区多年平均生态需水空间分布
Fig. 4 Spatial distribution of ecological water demand

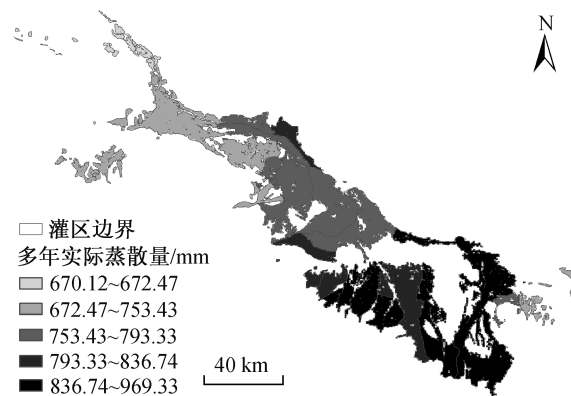


图 5 黑河中游灌区多年生态需水量均值
Fig. 5 Mean ecological water demand of irrigation area

其余灌区地下水利用程度均很低。地表水引用主要集中在黑河干流临泽县和高台县灌区,其中梨园河灌区地表水引用密度最大,多年平均地表水引用密度超过 $1.6 \text{ m}^3/\text{m}^2$;友联、鸭暖、西浚等灌区地表水年引用密度也超过 $0.8 \text{ m}^3/\text{m}^2$;南部民乐县和山丹县地表水引用密度相对偏低。

灌区引水总量空间差异显著(图7)。2000—2011年,总引水量呈先增大后减少的变化趋势,2008年总引水量高达 38.45 亿 m^3 。友联灌区是引水量最大的灌区,2008年引水量超过4亿 m^3 ,寺沟、老军、花寨子等灌区引水量不足0.01亿 m^3 。引水量较大的灌区主要集中在黑河干流两岸,包括位于甘州区的大满、盈科等灌区,临泽县的平川、板桥等灌区,以及位于高台县的友联、梨园河等灌区。偏远灌区普遍引水量较低。

3.4 水资源配置效率

1) 基于生态需水量的灌区水资源供需比。

绿洲灌区用水主要包括从地表和植物(农作物为主)表面的水分蒸发,也包括通过植物表面和植物体内的水分蒸腾。灌区用水来源则主要包括天然降水、地表水以及地下水的引用量。依据Penman-Monteith及植被指数NDVI计算的黑河中游灌区实际蒸散量包含天然降水补给,因此,可将灌区生态需水量表征为灌区实际需水量,将地表水及地下水的引用量表征为灌区供水量,水资源供需比可在一定程度上反映水资源配置的效率。

从图8可知,黑河中游部分灌区存在引水量与需水量空间不匹配问题,2008年尤为严重,灌区实际引水量远大于灌区生态需水量,其中供需比最大值超过3。2011年情况有所好转,供需差异减小,大部分灌区水资源供需比均小于1.5。从2000,2008和2011年平均值来看,平川、友联、板桥、大满、盈科、蓼泉、鸭暖、梨园河、新坝、西浚、沙河、上三、六坝等灌区多年用水供需比大于1,而洪水

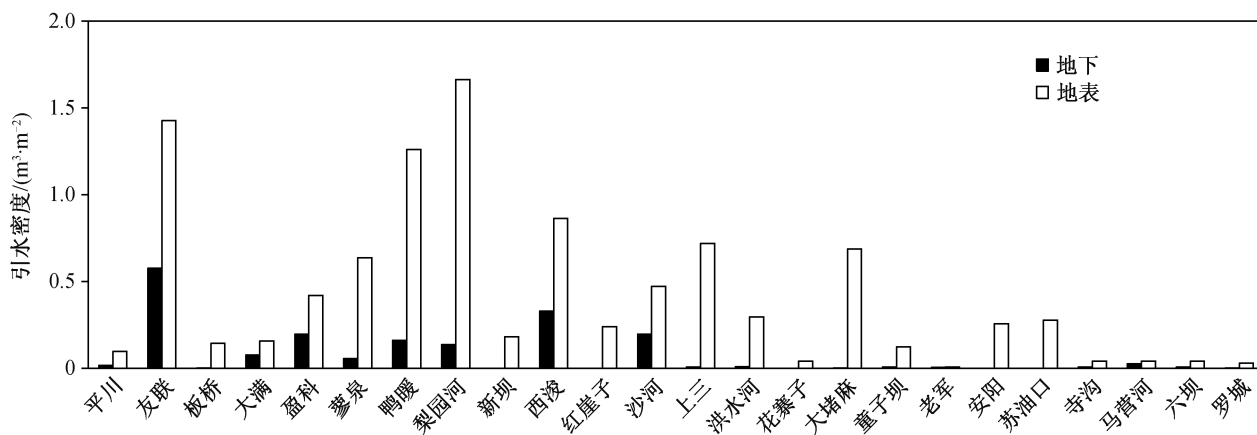


图 6 黑河中游各灌区多年平均地下及地表引水密度
Fig. 6 Annual average density of ground and underground water use in irrigation area

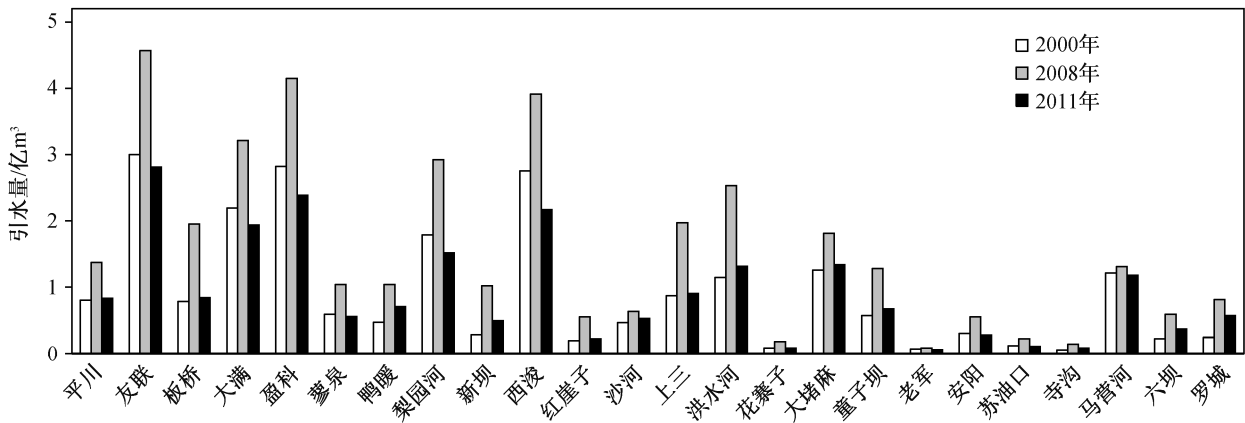


图7 黑河中游灌区 2000、2008 和 2011 年引水总量
Fig. 7 Distribution of total water in irrigation area in 2000, 2008 and 2011

河、花寨子、大堵麻、童子坝、老军、安阳、寺沟、苏油口等灌区常年用水供需比小于1，实际引水量小于灌区需水量，生态用水缺口较大。考虑到灌区有效灌溉保证率，地表引水与地下引水均只能对灌区有效灌溉农田的需水进行补充。各灌区有效农田用水供需比总体水平平均大于1，灌区引水量基本上满足农业生产需求。从空间上看，供水量小于生态需水量的灌区集中在山丹县及民乐县，黑河干流周边灌区引水量普遍大于实际需水量。

2) 基于单产耗水的灌区用水效率。

水资源供需比反映实际引水量与理想条件下最小需水量的关系，但在实际情况下不能仅凭供需比是否大于1来简单地判断灌区水资源配置的效率。某些灌区供需比大于1，但单产耗水小于平均水平，说明超出生态需水部分的引水量有效地提高了粮食

产量，因此这些灌区的水资源配置在某种程度上仍可认为是相对有效的。

因此，结合各灌区供需比和单产耗水，可将黑河中游灌区划分为4类：1) 供需比大于1，单产耗水量大于均值；2) 供需比小于1，单产耗水量大于均值；3) 供需比小于1，单产耗水量小于均值；4) 供需比大于1，单产耗水量小于均值。

从图9可见，大部分灌区属于第一类、第三类和第四类。其中甘州区的盈科、大满、西浚和高台的罗城4个灌区属于第一类灌区。此类灌区主要分布在黑河干流周边，地表引水方便，供需比大于1。但过多供水无法持续增加粮食产量，单产耗水量大于均值，存在引水过度问题，水资源配置效率偏低。马营河、寺沟、老军、苏油口、大堵麻、洪水河、童子坝、花寨子、红崖子和安阳10个灌区属于

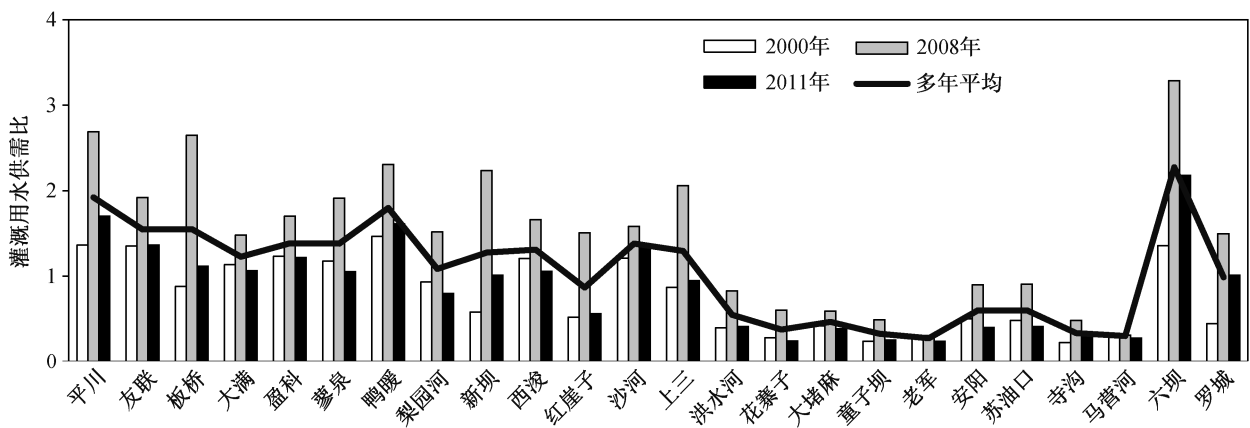


图8 黑河中游灌区 2000、2008 和 2011 年用水供需比
Fig. 8 Proportion of water demand and supply in 2000, 2008 and 2011

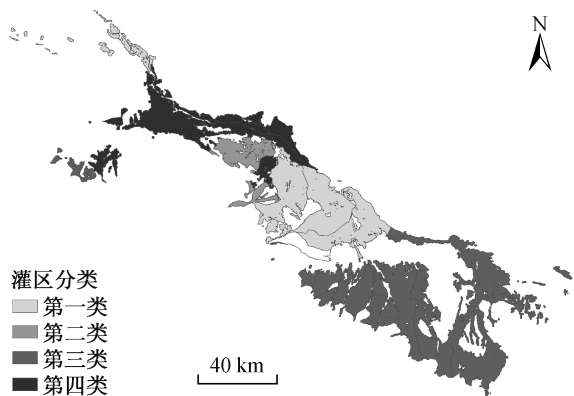


图9 黑河中游灌区用水效率分类

Fig. 9 Classification of irrigation area in the middle reaches of Heihe river

第三类, 主要分布于山丹、民乐和甘州, 近祁连山山麓地带, 地下水资源相对丰富。虽供水量略有不足, 但农业基础设施完善, 因充分利用有限供水, 使得单产耗水量小于均值, 属于水资源节约集约利用的高效地区。平川、板桥、鸭暖、蓼泉、沙河、友联、六坝和新坝8个灌区属于第四类, 主要位于临泽和高台县, 地处黑河干流沿岸, 地表引水丰富, 供需比大于1, 但多余供水有效地促进了粮食生产, 单产耗水量小于均值, 因此该类灌区水资源配置相对有效, 引水量不能轻易减少。属于第二类灌区的只有临泽县梨园河灌区, 供需比小于1, 单产耗水量大于均值, 说明该灌区引水量明显不足, 对粮食生产造成一定影响。从总体上看, 黑河中游水资源配置较好, 其中有18个灌区属于水资源配置高效或相对有效的地区, 占比接近80%; 4个灌区水资源配置效率低下, 需要引水调整及配套农业设施建设; 仅1个灌区引水不足, 需提高引水量。

4 结论和讨论

生态需水量的厘定为区域用水配置提供了理论上的最小值。本文以黑河中游灌区为研究区, 研究了生态需水量的时空分异, 结合年引水量和单产耗水量, 分析了绿洲灌区水资源配置的效率, 得到如下主要结论。

1) 年均潜在蒸散量在800~1200 mm/a之间, 生态需水量300~1100 mm/a之间, 年际变化不大, 年内季节差异显著, 峰值稳定在每年的5—7月, 日最高生态需水量>6 mm, 与相关研究结果^[14]基本上吻合。山麓地带的民乐县、山丹县的大部分灌区生态需水量较大, 而走廊平原的甘州、高台和临泽县灌区生

态需水量偏小。由于区域降水稀少, 难以满足农作物需要, 地表水引用和地下水补给成为维系绿洲农业的重要保障。黑河中游以地表水为主, 地下水为辅, 2008年引水总量最大。甘州区的大满、盈科, 高台县的友联、梨园河等灌区位于黑河沿岸, 引水方便, 引水量较大; 寺沟、老军、苏油口等偏远灌区普遍引水量较低。

2) 2000年国务院提出“黑河跨省际分水”的重要决策, 要求当黑河上游来水量达到正常年份时, 中游保证向下游增泄9.5亿m³; 2002年水利部将黑河中游张掖市确定为全国第一个节水型社会建设试点。近年来, 基于干旱的自然条件、繁重的分水压力和紧迫的生产生活需求, 张掖市逐步探索出“以水权为核心、以水票为载体”的生态节水新思路, 虽然水资源利用效率总体较好, 但目前仍存在引水量与需水量空间不匹配的问题。黑河干流周边的甘州区、临泽县、高台县等灌区供需比普遍大于1, 山丹县及民乐县灌区供需比普遍小于1。因此, 黑河中游一方面要继续坚持“总量控制, 定额管理, 以水定地, 配水到户, 公众参与, 水量交易, 水票运转, 城乡一体”的管理模式, 另一方面, 要加强对水资源节约、集约利用的推进和宣传, 着重调整供需比过大和供水严重不足的灌区引水量; 加大农业节水设施建设, 推广节水灌溉技术; 调整农业种植结构, 减少高耗水植物种植比例, 全面提高所有灌区水资源配置效率, 促进黑河中游生态恢复和经济持续发展。

本文首次用Penman-Monteith公式与NDVI数据结合的方法, 估算黑河中游生态需水量, 并与相关研究结果进行对比, 验证了该模型在西北干旱区的可行性, 提高了以往生态需水量在空间插值上的精度, 为调整有限的水资源在空间上的分配, 提高水资源利用效率提供理论基础。同时考虑供需比和单产耗水, 综合分析水资源配置效率, 可避免在水资源优化过程中过度重视生态效益而忽视经济效率的现象。

基于潜在蒸散量和NDVI计算的黑河中游生态需水量具有16天的时间精度, 在一定程度上能够反映灌区生态需水情况。但是, 由于数据限制, 供水只有基于灌区的供水总量统计, 不能反映灌区供水在时序上的分配, 对于黑河中游农业灌溉实际存在的“卡脖子旱”(即每年4—5月实际供水难以满足该时段农业生产需水)等现象则难以体现。因此, 增大灌区水量供需比的时间分辨率, 能够更好地模拟

区域水资源的现实供需。

参考文献

- [1] 钱正英, 张光斗. 中国可持续发展水资源战略研究综合报告及各专题报告. 北京: 中国水利水电出版社, 2001: 45-50
- [2] 夏军, 朱一中. 水资源安全的度量: 水资源承载力的研究与挑战(一). 自然资源学报, 2002, 17(3): 262-269
- [3] 胡广录, 赵文智, 谢国勋. 干旱区植被生态需水理论研究进展. 地球科学进展, 2008, 23(2): 193-200
- [4] Gleick P H. Water in crisis: paths to sustainable water use. *Ecological Applications*, 1988, 8(3): 571-579
- [5] Gleick P H. Water in crisis: a guide to the world's fresh water resources. New York: Oxford University Press, 1993: 40-55
- [6] Falkenmark M. Coping with water scarcity under rapid population growth // Conference of SADC Ministers. Pretoria, 1995: 23-24
- [7] Baird A J, Wilby R L. *Ecohydrology: plants and water in terrestrial and aquatic environments*. London: Routledge Press, 1999: 78-156
- [8] Laio F, Porporato A, Ridolfi L, et al. Plants in water-controlled ecosystems: active role in hydrologic processes and response to water stress: probabilistic soil moisture dynamics. *Advances in Water Resources*, 2001, 24(7): 707-723
- [9] Groeneveld D P, Baugh W M, Sanderson J S, et al. Annual groundwater evapotranspiration mapped from single satellite scenes. *Journal of Hydrology*, 2007, 344(1/2): 146-156
- [10] Groeneveld D P. Remotely-sensed groundwater evapotranspiration from alkali scrub affected by declining water table. *Journal of Hydrology*, 2008, 258(3/4): 294-303
- [11] 赵文智, 程国栋. 干旱区生态水文过程研究若干问题评述. 科学通报, 2001, 46(22): 1851-1857
- [12] 夏哲超, 潘志华, 安萍莉. 生态恢复目标下的生态需水内涵探讨. 中国农业资源与区划, 2007, 28(4): 5-8
- [13] 闵庆文, 何永涛, 李文华. 基于农业气象学原理的林地生态需水量估算——以泾河流域为例. *生态学报*, 2004, 24(10): 2130-2135
- [14] 何志斌, 赵文智, 方静. 黑河中游地区植被生态需水量估算. *生态学报*, 2005, 25(4): 705-710
- [15] 万东辉, 夏军, 宋献方, 等. 基于水文循环分析的雅砻江流域生态需水量计算. *水利学报*, 2008, 39(8): 994-1000
- [16] 刘旭升. 北京市生态需水量与生态服务功能的关系. *城市环境与城市生态*, 2009, 22(2): 1-3
- [17] 韩英, 饶碧玉. 植被生态需水量计算方法综述. *水利科技与经济*, 2006, 12(9): 605-606
- [18] 陈丽华, 王礼先. 北京市生态用水分类及森林植被生态用水定额的确定. *水土保持研究*, 2011, 8(4): 161-164
- [19] 周丹, 沈彦俊, 陈亚宁, 等. 西北干旱区荒漠植被生态需水量估算. *生态学杂志*, 2015, 34(3): 670-680
- [20] Wang Z, Zerihun D, Feyen J. General irrigation efficiency for field water management. *Agricultural Water Management*, 1996, 30(2): 123-132
- [21] Md Hazart Ali, Lee Teang Shui, Kwok Chee Yan, et al. Modeling water balance components and irrigation efficiencies in relation to water requirements for double-cropping systems. *Agricultural Water Management*, 2000, 46(2): 167-182
- [22] Batchelor C, Lowell C, Murata M. Simple microirrigation techniques for improving irrigation efficiency on vegetable gardens. *Agricultural Water Management*, 1996, 32(1): 37-48
- [23] Al-Jamal M S, Ball S, Sammis T W. Comparison of sprinkler, trickle and furrow irrigation efficiencies for onion production. *Agricultural Water Management*, 2001, 46(3): 253-266
- [24] Burke S, Mulligans M, Thornes J B. Optimal irrigation efficiency for maximum plant productivity and minimum water loss. *Agricultural Water Management*, 1999, 40(2/3): 377-391
- [25] Knox J W, Kay M G, Weatherhead E K, et al. Water regulation, crop production, and agricultural water management—understanding farmer perspectives on irrigation efficiency. *Agricultural Water Management*,

- 2012, 108(1): 3-8
- [26] 崔远来, 熊佳. 灌溉水利用效率指标研究进展. 水科学进展, 2009, 20(4): 590-598
- [27] Willardson L S, Allen R G, Frederiksen H. Elimination of irrigation efficiencies // 13th Technical Conference of the US Committee on Irrigation and Drainage. Denver, 1994: 1-17
- [28] 蒋磊, 杨雨婷, 尚松浩. 基于遥感蒸发模型的干旱区灌区灌溉效率评价. 农业工程学报, 2013, 29(20): 95-10
- [29] 王晓君, 石敏俊, 王磊. 黑河中游水资源空间动态优化配置——基于分布式水资源管理模型 // 发挥资源科技优势, 保障西部创新发展——中国自然资源学会 2011 年学术年会论文集(下册). 乌鲁木齐, 2011: 479-486
- [30] 王根绪, 张钰, 刘桂民, 等. 干旱内陆流域河道外生态需水量评价——以黑河流域为例. 生态学报, 2005, 25(10): 2467-2476
- [31] 王根绪, 程国栋. 干旱内陆流域生态需水量及其估算——以黑河流域为例. 中国沙漠, 2002, 22(2): 129-134
- [32] 蓝永超, 康尔泗, 张济世, 等. 黑河流域水资源开发利用现状及存在问题分析. 干旱区资源与环境, 2003, 17(6): 34-39
- [33] 孙栋元, 李元红, 胡想全, 等. 黑河流域水资源供需平衡与配置研究. 水土保持研究, 2014, 21(3): 217-221
- [34] 张军, 周冬梅, 张任陟. 黑河流域 2004—2010 年水足迹和水资源承载力动态特征分析. 中国沙漠, 2012, 32(6): 1779-1785
- [35] 孙琦伟, 吴普特, 王玉宝, 等. 黑河流域农业用水健康及其评价方法研究. 干旱地区农业研究, 2010, 28(3): 231-235
- [36] 蔡国英, 徐中民. 黑河流域中游地区国民经济用水投入产出分析——以张掖市为例. 冰川冻土, 2013, 35(3): 770-775
- [37] 黑河计划数据管理中心. 黑河流域水库数据集 [DB/OL]. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2011: <http://westdc.westgis.ac.cn/heihe>
- [38] Fischer G, Nachtergaele F, Prieler S, et al. Global agro-ecological zones assessment for agriculture (GAEZ 2008). Laxenburg: IIASA & FAO, 2008
- [39] Shuttleworth W J, Wallace J S. Evaporation from sparse crops-an energy combination theory. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1985, 111: 839-855
- [40] Kustas W P. Estimates of evapotranspiration with a one-and two-layer model of heat transfer over partial canopy cover. Journal of Applied Meteorology, 1990, 29(8): 704-715