

基于地表水循环遥感观测的黑河流域水平衡分析

闫柏琨, 李文鹏, 甘甫平, 郑跃军, 祁晓凡, 白娟, 郭艺, 吴艳红, 王龙凤, 马燕妮

Water balance analysis based on remote sensing observation of surface water cycle in the Heihe River watershed

YAN Bokun, LI Wenpeng, GAN Fuping, ZHENG Yuejun, QI Xiaofan, BAI Juan, GUO Yi, WU Yanhong, WANG Longfeng, and MA Yanni

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202112029>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

蒸散发水源组成与测定方法研究进展

A review of the advances in water source composition and observation methods of evapotranspiration

王周锋, 王文科, 李俊亭 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 1-9

基于MODIS蒸散量数据的淮河流域蒸散发时空变化及影响因素分析

Spatio-temporal change and influencing factors of evapotranspiration in the Huaihe River Basin based on MODIS evapotranspiration data

郭晓彤, 孟丹, 蒋博武, 朱琳, 龚建师 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 45-52

基于MOD16的银川平原地表蒸散量时空特征及影响因素分析

An analysis of spatio-temporal characteristics and influencing factors of surface evapotranspiration in the Yinchuan Plain based on MOD16 data

王卓月, 孔金玲, 李英, 张在勇, 刘慧慧, 蒋镒竹, 钟炎伶, 张静雅 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 53-61

“水文地质与水资源调查计划”进展

Achievements of Investigation Program on Hydrogeology and Water Resources of CGS

李文鹏 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 1-6

黄河三角洲浅层地下水埋深动态与降水的时空响应关系

An analysis of the space-time patterns of precipitation-shallow groundwater depth interactions in the Yellow River Delta

张晨晨, 黄, 何云, 刘庆生, 李贺, 吴春生, 刘高焕 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 21-30

玛纳斯河流域山前平原区蒸散发时空异质性分析

Analyses of the spatio-temporal heterogeneity of evapotranspiration in the piedmont of the Manas River Basin

席丹, 王文科, 赵明, 马稚桐, 侯昕悦, 张在勇 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 25-34



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202112029

闫柏琨, 李文鹏, 甘甫平, 等. 基于地表水循环遥感观测的黑河流域水平衡分析[J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(3): 44-56.
YAN Bokun, LI Wenpeng, GAN Fuping, et al. Water balance analysis based on remote sensing observation of surface water cycle in the Heihe River watershed[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(3): 44-56.

基于地表水循环遥感观测的黑河流域水平衡分析

闫柏琨^{1,2}, 李文鹏³, 甘甫平^{1,2}, 郑跃军³, 祁晓凡³, 白娟^{1,2}, 郭艺^{1,2},
吴艳红⁴, 王龙凤³, 马燕妮^{1,2}

(1. 中国自然资源航空物探遥感中心, 北京 100083; 2. 自然资源部航空地球物理与
遥感地质重点实验室, 北京 100083; 3. 中国地质环境监测院, 北京 100081;
4. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094)

摘要: 流域内水循环各环节的水量及其时空分布是不断变化的, 掌握流域水循环与水平衡状况是进行流域水资源合理开发利用的重要基础。以 2000—2019 年黑河流域水文显著变化期为研究时段, 综合应用 TRMM 与 GPM 卫星观测的降水量、遥感估算的蒸散发量等数据并结合气象站点、水文站点等观测数据, 对流域降水、蒸散发与径流等水循环要素的水平衡进行了分析。结果表明: 祁连山区是主要产流区, 向中游年均下泄水量约为 $45.11 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。其中, 消耗于中游的年均量约为 $29.92 \times 10^8 \text{ m}^3$, 约占 66%; 补充下游的年均量约为 $15.19 \times 10^8 \text{ m}^3$, 约占 34%。民乐—张掖盆地是黑河中游水资源消耗的主要区域, 年均消耗的上游来水和当地降水量达 $43.97 \times 10^8 \text{ m}^3$, 约占中游消耗量的 75%; 中游农田蒸散发年均消耗水量约 $20.3 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占总消耗量的 35%; 上游区降水量增加是黑河干流出口径流量增加的主因, 对径流量增加的贡献率为 96%, 导致年均径流增加 $0.35 \times 10^8 \text{ m}^3$, 潜在蒸散发对径流增加几乎没有贡献。根据目前黑河干流上游径流量变化与中游水资源消耗现状, 如果未来水文周期变化导致上游径流减少, 中下游用水矛盾凸显的风险较大。地表水循环遥感观测可作为流域水平衡分析的方法之一, 分析流域地表水水资源的分布状况、揭示水资源变化趋势与原因, 支撑水资源合理配置, 陆面实际蒸散发是水平衡分析不确定性的主要来源, 准确估测不同类型下垫面实际蒸散发量是提升分析可靠性的关键。基于互补相关的陆面实际蒸散发估算方法相对简单, 但其中用于计算湿环境蒸散发量的 Priestley-Taylor 公式中乘性经验系数受地形影响空间变异很大, 区域上采用统一数值会对结果造成不可忽视的影响。

关键词: 水资源; 水文; 降水; 蒸散发; 径流; 水循环; 水平衡

中图分类号: P333.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)03-0044-13

Water balance analysis based on remote sensing observation of surface water cycle in the Heihe River watershed

YAN Bokun^{1,2}, LI Wenpeng³, GAN Fuping^{1,2}, ZHENG Yuejun³, QI Xiaofan³, BAI Juan^{1,2}, GUO Yi^{1,2},
WU Yanhong⁴, WANG Longfeng³, MA Yanni^{1,2}

(1. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Natural Resources, Beijing 100083, China;
2. Key Laboratory of Aero Geophysical and Remote Sensing Geology, Ministry of Natural Resources of the
People's Republic of China, Beijing 100083, China; 3. China Institute of Geo-Environmental Monitoring,
Beijing 100081, China; 4. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences,
Beijing 100094, China)

收稿日期: 2021-12-05; 修订日期: 2022-01-08

投稿网址: www.swd zgcdz.com

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20221642-3; DD20190322); 国家自然科学基金重大研究计划重点支持项目(91025019)

第一作者: 闫柏琨(1977-), 男, 教授级高级工程师, 主要从事水文遥感研究。E-mail: 55561161@qq.com

通讯作者: 李文鹏(1959-), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事地下水调查监测评价与水资源可持续利用研究。

E-mail: liwenpeng@mail.cgs.gov.cn

Abstract: Water cycle in a basin is constantly changing. It is an important basis for the allocation of water resources to survey the state of water cycle and analyze the water balance. The significant hydrological change period of the basin from 2000 to 2019 is taken as the research period in this study, and the data, including TRMM and GPM satellite precipitation, remote sensing evapotranspiration, in situ data of meteorological and hydrological gauges, are synthetically used to analyze the water cycle balance of the watershed. The results show that (1) the Qilian mountain area is the main runoff producing area, with an average annual discharge of about $45.11 \times 10^8 \text{ m}^3$ to the middle reaches, and the middle reaches is the main consumption area of the runoff water resources. About 66% ($29.92 \times 10^8 \text{ m}^3$) of the upstream incoming water is used in the middle reaches, and about 34% ($15.19 \times 10^8 \text{ m}^3$) is used to supplement the downstream area. (2) The Minle-Zhangye basin is the main consumption area of water resources in the middle reaches, with an average annual consumption of about $43.97 \times 10^8 \text{ m}^3$ including water from upper reaches and precipitation at local area (accounting for 75% of the consumption in the middle reaches), and the evapotranspiration consumption of farmland in the middle reaches is about $20.3 \times 10^8 \text{ m}^3$ (accounting for 35% of the evapotranspiration water in the middle reache areas). (3) The increase in precipitation of the upper reach is the main reason for the increase in runoff in the upper reaches of the main stream of the Heihe River. The contribution rate of precipitation to the increase of runoff is 96%, resulting in an average increase of runoff of $0.35 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, and potential evapotranspiration has little contribution to the increase of the runoff. (4) According to the current water resource consumption, if the upstream runoff decreases in the future, there will be a risk of prominent contradiction between water used for agricultural development in the middle reaches and water used for ecological protection in the downstream area. Remote sensing observation of the surface water cycle can be used as one of the technologies of the basin water balance analysis to analyze the spatial distribution of basin surface water resources, reveal the temporal change trend and the causes, and support the rational allocation of water resources. The actual evapotranspiration on the land surface is the main source of the analysis uncertainty, and the key to improve the reliability of water balance analysis is to accurately estimate the actual evapotranspiration of different types of landcover. The estimation method of land actual evapotranspiration based on complementary correlation is relatively simple, but the multiplicative empirical coefficient in the Priestley-Taylor formula, which is used to calculate evapotranspiration in wet environment, is greatly affected by terrain, and the use of same value across the region will have a significant impact on the results.

Keywords: water resource; hydrology; precipitation; evapotranspiration; runoff; water cycle; water balance

西北干旱内流区甘肃黑河流域南起祁连山脉、北至荒漠戈壁,孕育了上游寒区高山草甸、中游农田绿洲、下游荒漠绿洲的生态系统格局,是河西走廊主要经济、文化、生态走廊,是国家重点粮油、生态、经济保护区。但中下游干旱少雨、中游农业开发水资源消耗量较大,水资源矛盾突出。由于中游水土资源开发利用程度提高,造成了下游湖泊萎缩消亡,西居延海 1961 年干涸,东居延海 1992 年干涸。为缓解下游水资源紧张状况,从 2000 年开始通过水量统一调度实施黑河分水方案,规定了不同保证率条件下进入下游的水量,从 2003 年开始东居延海实现连年不干涸,水域面积常年维持在 36 km^2 以上,下游生态系统健康状况明显好转^[1-5]。

2000 年以来,黑河流域自然与社会水文条件经历了很大变化。由黑河干流上游径流数据(莺落峡水文

站)可知,2000 年后,年径流量总体呈显著增加趋势^[6-8],2006—2018 年期间年平均径流量较往年增加了 27.4%^[9]。由于上游径流量显著增加^[10-12],向下游分水量增加,这是下游缺水得以缓解的重要原因之一。2001 年实施水资源治理工程以来,流域下游狼心山水文站年径流量总体呈增加趋势,气候变化是主因,治理工程的实施也发挥了重要的积极作用^[11]。尽管如此,尚未达到国务院 97 分水方案的要求,而且未来转入枯水年或平水期,上游径流量可能减少,向下游的下泄水量势必下降,下游天然生态健康存在较大的逆转风险^[4]。黑河流域未来是否仍面临“中下游用水矛盾凸显的可能”,需加强流域水循环研究与水平衡分析,促进中下游水资源合理配置与协调发展。

地表水循环遥感观测技术快速发展,正逐步成为流域水平衡分析、水资源合理配置的重要手段。黑河

流域具有西北内流盆地特有的水文条件,可作为水循环遥感观测技术研发应用的重要基地。多手段集成的天—空—地综合观测试验^[13]、陆面蒸散发与水面蒸发估算方法研究^[14-17]、山区水文模拟^[18]、农田水文模拟^[19-20]等水文生态过程监测、模拟、分析方法的研究,促进了流域水循环监测技术的进步。目前尽管各种地表水循环遥感观测技术快速发展,但仍以单项要素反演方法研究为主。本次研究以流域水资源问题为导向,综合应用多种遥感观测技术,开展地表水循环分析与水平衡分析。

本文以 2000—2019 年黑河流域水文显著变化期

为研究时段,综合应用 TRMM 与 GPM 卫星数据观测的降水量、遥感估算的蒸散发量数据,结合气象站点、水文站点等观测数据进行了研究,以期对流域地表水资源时空变化特征进行分析,为地表水资源协调利用提供依据,促进地表水循环遥感观测技术的发展,明确技术瓶颈与发展方向。

1 研究区概况

黑河流域地处青海、甘肃、内蒙古三省(区)交界,是我国第二大内陆河,发源于南部青海祁连山中段,北至中蒙边界(图 1)。

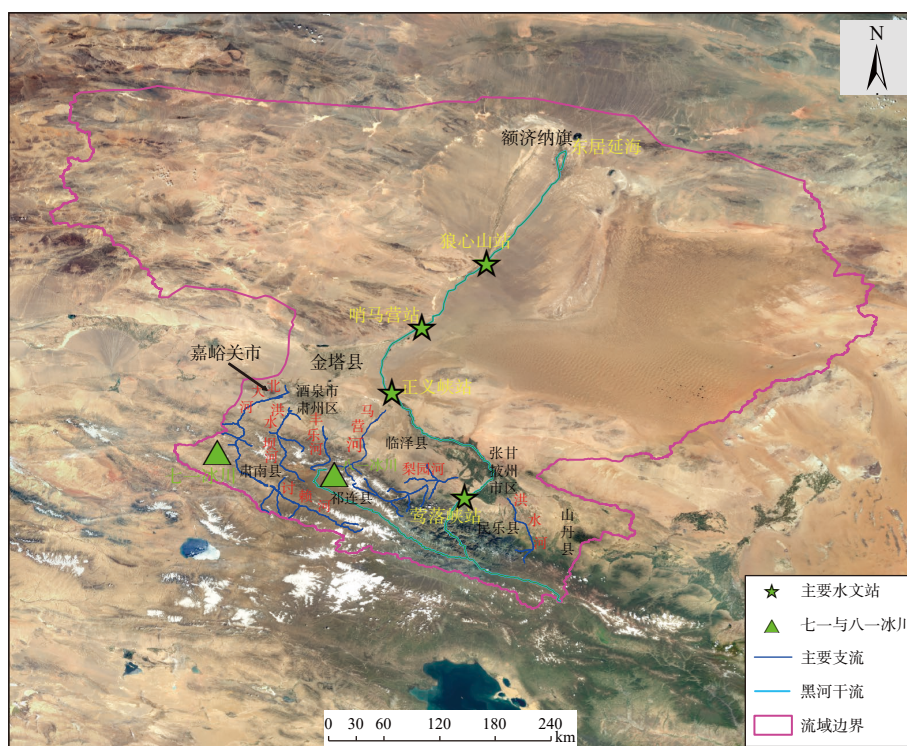


图 1 黑河流域范围及位置

Fig. 1 Location of the Heihe River Basin

根据地表水力联系可分为东、中、西 3 个相对独立的子水系。东部子水系包括黑河干流、梨园河及 20 多条支流。中部子水系为酒泉马营河至丰乐河诸小河流域,为浅山短流,归宿于肃南县明花区至高台盐池盆地。西部子水系为酒泉洪水坝河至讨赖河水系,多为浅山短流,只有洪水坝河与讨赖河可贯穿酒泉盆地,讨赖河经嘉峪关市后改称北大河并经鸳鸯池水库进入北部金塔盆地。

黑河干流发源于青海省祁连县,从祁连山发源地到东居延海,全长约 928 km。莺落峡以上为上游,海拔高,气候严寒湿润,年降水量为 250~500 mm,年蒸

发量为 700~800 mm,是全流域的产流区。莺落峡—正义峡之间为中游,绿洲、荒漠、戈壁、沙漠断续分布,地势平坦,年降水量为 110~370 mm,年蒸发量为 1 200~2 200 mm,是河西走廊重要的灌溉农业区。正义峡以下为下游,地势开阔平坦,分布有东居延海等湖盆洼地和广阔的沙漠戈壁,属荒漠干旱区和极端干旱亚区,年降水量为 40~54 mm,年蒸发量为 2 200~2 400 mm^[21]。

2 数据与方法

2.1 数据源

数据源主要包括气象站点数据、卫星数据(GPM

降水卫星、MODIS 陆地观测卫星)、陆面模式产品、土地覆盖产品、径流数据(表 1)。

表 1 主要数据源及说明
Table 1 Descriptions of the main data

名称	特征	作用	数据来源
GPM降水率	空间分辨率: 10 km, 时间分辨率: 0.5 h	月降水量估算	NASA全球降水观测网 (https://gpm.nasa.gov)
气象站点数据(国家基本站)	包括降水量	月降水量估算	国家气象信息中心(http://data.cma.cn)
气象站点插值月降水数据	0.5°×0.5° 网格	月降水量检验, 上游径流变化原因分析	国家气象信息中心(http://data.cma.cn)
地表温度	MODIS产品, 空间分辨率: 1 km		NASA地球观测数据网 (https://earthdata.nasa.gov/)
地表反照率	MODIS产品, 空间分辨率: 1 km		
地表发射率	MODIS产品, 空间分辨率: 1 km		
太阳短波辐射	FLDAS陆面模式产品, 空间分辨率: 10 km	月蒸散发量估算	
大气长波辐射	FLDAS陆面模式产品, 空间分辨率: 10 km		NASA FLDAS陆面数据同化系统 (https://ldas.gsfc.nasa.gov/ldas)
栅格气象数据	FLDAS陆面模式产品, 空间分辨率: 10 km, 包括 气温、气压、湿度、风速		
土地覆盖	2000、2010、2020 年 3 期, 空间分辨率: 30 m	不同土地覆盖蒸散发量统计	中国研制的 30 m 空间分辨率全球地表覆 盖数据GlobeLand30 ^[22]
年径流数据	莺落峡、正义峡2000—2019 年年径流数据	水平衡检校、径流变化分析	甘肃省张掖水文站

2.2 研究方法

以水循环要素遥感观测为基础, 进行了不同分区水量平衡关系与地表水循环分析、黑河干流上游径流变化原因分析、黑河中游主要土地覆盖类型蒸散发水量消耗等水平衡分析。研究方法与流程主要包括:

(1)综合降水卫星数据及气象与遥感数据, 估算月尺度降水量、陆面蒸散发量、水面蒸散发量、潜在蒸散发量等水循环观测参量;

(2)根据河流水系、地形高程、地下水分区及水文站点位置进行水循环分区的划分, 并明确各分区的水量平衡关系;

(3)计算不同水循环分区的多年平均水循环量(流入量、流出量、降水量、蒸散发量);

(4)基于 Budyko 水热模型计算黑河干流上游降水、潜在蒸散发对径流变化的贡献率, 并分析原因;

(5)计算黑河中游主要土地覆盖类型的蒸散发耗水量;

(6)针对黑河流域的现状, 重点探讨了黑河干流 2000 年以来径流量增加的原因及可持续性、中游农业用水与下游湖泊蓄水矛盾、蒸散发量估算的不确定性其原因。

3 结果

3.1 水循环遥感观测

3.1.1 降水量

根据卫星降水 (TRMM/GPM) 与站点降水对比研究, 发现在月尺度上卫星降水与站点降水存在很好的

线性关系, 可达 0.96^[23]。由于流域内国家基本气象降水站点稀疏(有 4 个站点), 且降水量空间变异大, 内插误差大, 采用线性校正法以全国基本气象站月降水量数据为基准逐月校正生成了 2000—2019 年全国卫星月降水量数据并裁剪得到黑河流域月降水量, 发挥了站点数据单点精度高与卫星数据区域分布精度高的优势。对比同期 TRMM、GPM 与站点监测降水量的相关性, 发现 GPM 数据融合了雷达降水探测精度高与红外高轨卫星数据时间分辨率高的优势, 相关性更高。2000 年 1—5 月由于无 GPM 数据, 采用 TRMM 数据, 2000 年 6 月—2019 年 12 月采用 GPM 数据。与流域内 4 个站点月降水量数据对比, 二者一致性高, 均方根误差为 8.39 mm(图 2)。全流域 2000—2017 年卫星降水数据(经站点降水数据校正后)与 0.5°×0.5°网格站点插值降水数据多年平均降水量分别为 88.86, 89.14 mm, 二者各年相对偏差最小值、最大值、平均值分别为 1.00%、20.23%、8.80%。

3.1.2 陆面实际蒸散发量

基于互补相关模型估算了陆面实际蒸散发, 该方法认为在地表水分供应不充足时潜在蒸散发越大, 则实际蒸散发越小, 当地表水分供应逐渐充足时, 二者趋于相同。基于新发展的非线性互补相关法, 估算了 2000—2019 年月陆面蒸散发, 经与 13 个涡度相关站点实测数据对比, 全国范围内均方根误差为 4.9~16.2 mm^[24]。考虑到陆面蒸散发过程影响因素多, 估算精度低于降水量的估算精度, 假设在全流域尺度上多年平均降水量等于多年平均蒸散发量, 以降水量为基准

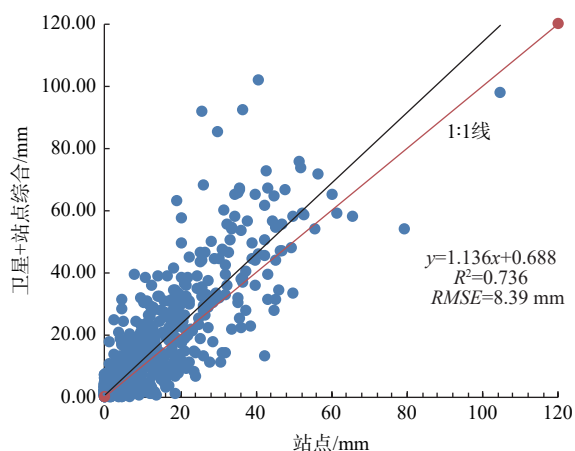


图2 卫星月降水量与站点实测月降水量对比

Fig. 2 Comparison between the monthly measured precipitation and monthly satellite precipitation

对蒸散发数据进行核校,系数为1.22,二者对比见图3。

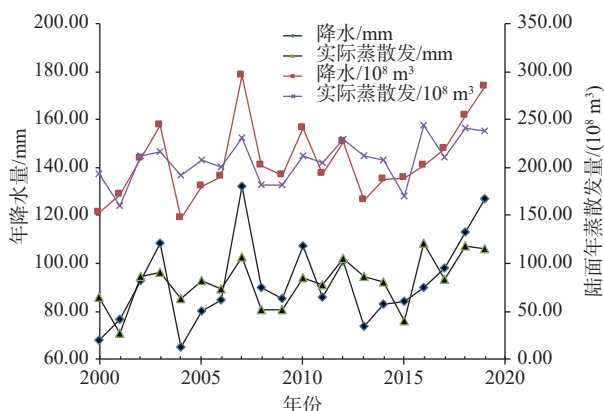


图3 流域年降水量、陆面年蒸散发量变化

Fig. 3 Changes of annual precipitation and land surface evapotranspiration in the basin

3.1.3 湖泊水面蒸发量与流域潜在蒸散发量

水面蒸发量估测方法有实测法、模型估算法。如果蒸发皿直径较小或架设于陆面之上,因蒸发皿与周围环境的蒸发气象条件差异显著,测量的蒸发量与湖泊实际蒸发量差别较大,可高达40%,本文采用架设于开阔水面的大型蒸发皿(如E601)实测的蒸发数据,可准确测量湖泊实际蒸发量^[16]。本文采用FAO参考作物蒸散发模型模拟开阔湖面蒸发^[25],经与湖面E601蒸发皿2014年与2015年4—9月实测数据对比,二者一致性高,均方根误差为39.33 mm,相对于湖面1178.9~1183.7 mm/a的蒸发量,相对误差约为3.3%。

根据每年的湖面面积(基于LandSat、Sentinel-2中分辨率系列卫星提取)与湖面蒸发量模拟值,计算了多年湖面蒸发量,多年年均蒸发量为 $0.65 \times 10^8 \text{ m}^3$,其

中2000—2002年因湖面干涸、2012年因水面分布数据缺失,无水面蒸发量数据(图4)。

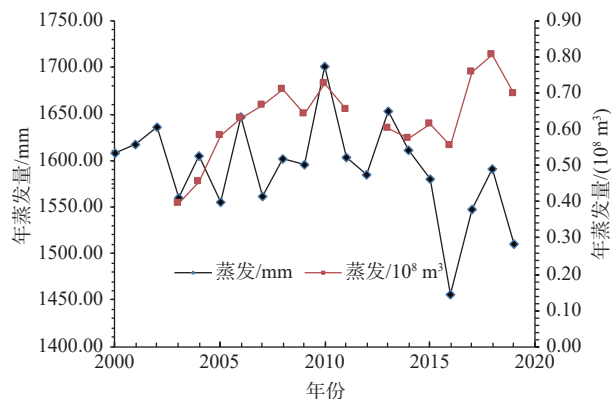


图4 东居延海年蒸发量

Fig. 4 Annual evaporation of the Eastern Juyan Lake

3.2 不同分区水量平衡关系

为了分析流域内水资源平衡,需对地表水循环进行分区,以便于统计分析各分区内水资源的补给、消耗、排泄量。分区主要考虑因素为:(1)区内产汇流及水资源消耗条件相对趋同;(2)现有水文站点分布位置。

产流条件分析的主要依据是地形、高程,分区边界需与自然分水岭一致。

汇流条件分析的主要依据是水系、流向、连通关系,分区需包含主干河流及其各汇入支流。

水资源消耗条件分析的主要依据为:(1)蒸发的地理与气象条件,避免分区大面积横跨山区与平原区,因为山区与平原区气象条件(辐射、气温、气压、风速、湿度)差异较大,潜在蒸散发量差别明显,水循环条件不同;(2)因为该流域内农业灌溉用水、农田蒸发、作物蒸腾量较大,分区尽可能涵盖完整的大型农业灌溉区。

此外,水文站点分布是分区的必要约束因素,分区边界尽可能与重要水文站重合。

按照以上分区原则,黑河流域内划分出15个分区:祁连山区5个,山前平原区3个,下游荒漠戈壁区7个(图5)。各分区水资源补给、产流、排泄、消耗、水储量及变化等,各分区水资源流向关系,水平衡公式详见表2。

流域水资源平衡分析中,水储量变化是需要考虑的变量。对于山区,无大型的储水盆地,地下水主要通过河川基流的方式排泄,且黑河上游祁连山区无大型农灌区抽取山间盆地地下水,可认为水储量在多年

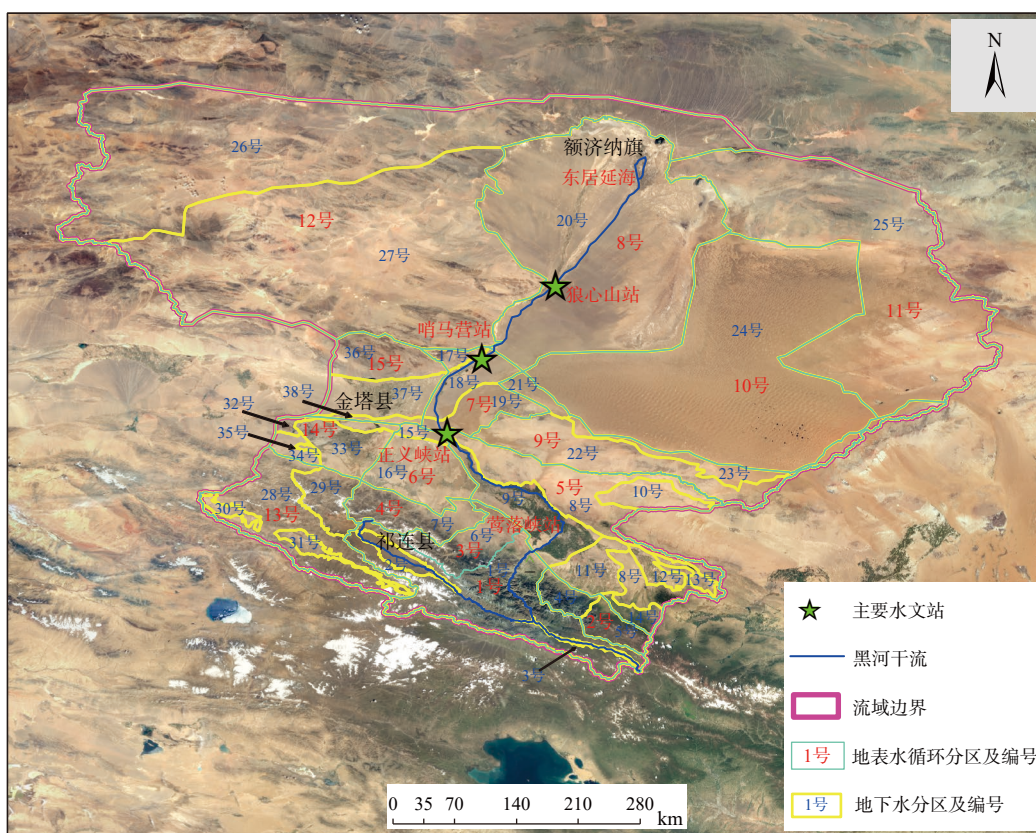


图5 黑河流域地表水循环分区方案

Fig. 5 Scheme of surface water cycle zoning in the Heihe River basin

尺度上不变。流域中下游盆地地下水储变量是根据2000—2019年地下水水位测量数据求算的平均年度变化量。土壤中含水量多年尺度也可以认为保持不变^[26]。

3.3 不同分区水循环分析

因不同分区水文地理条件不同,遥感反演的蒸散发量偏差不同,需基于各分区水平衡公式(表2)对各分区蒸散发量进行校准。

(1)将分区1水平衡计算的蒸散发与遥感蒸散发量之比作为所有山区(分区1~4、13)遥感蒸散发校正系数,将山区校正前后差值部分计入所有平原区(分区5~12、14~15)蒸散发量,得到校正后的平原区蒸散发量。

(2)将分区12水平衡计算的蒸散发(假设分区12的多年平均降水量与蒸散发量相同)与遥感蒸散发量之比作为分区11、12遥感蒸散发校正系数,将分区5水平衡计算的蒸散发与遥感蒸散发量之比作为分区5、6、14遥感蒸散发校正系数(依据是分区11与12,分区5、6与14的地形高程相似,蒸散发估算的偏差量及偏差趋势相似),根据校正系数对各分区蒸散发量进行校正。

(3)将上一步校正前后差值部分按照剩余分区面

积比,计入其余各分区。最终各分区的多年平均水循环量见表3。

由于黑河干流上游永久冰川分布面积较小、冰川消融在径流中的占比较小^[27],且缺乏冰川消融量准确数据,所以分析中忽略该量。流域7号水循环区向额济纳盆地(8号分区)供给水资源约 $14.25 \times 10^8 \text{ m}^3$ (7号分区的流出量),与2015—2019年哨马营水文断面实测年均下泄水量(据黑河流域管理局网站公开数据计算,为 $10.6 \times 10^8 \text{ m}^3$)相近,说明了各区循环量的合理性。

根据各分区多年平均地表水循环量可知(表3),祁连山区是径流主要产流区,向中游下泄约 $45.11 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ (1~4、13号分区流出量之和),其中黑河干流为 $19.00 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ (约占43%),中游是上游来水的主要消耗区,上游来水中约66%($29.92 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,上游来水减去5号分区与14号分区的流出量)用于中游消耗,约34%($15.19 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,5号分区与14号分区流出量)用于补充下游;中游(5~6、14号分区)消耗水资源约 $58.68 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,其中临泽、张掖、民乐一带是中游水资源主要消耗区,年均消耗的上游来水和当地降水量约

表 2 黑河流域地表水循环分区说明
Table 2 Descriptions of the zones of surface water cycle

流域分区	分区编号	流入	区内产流	流出	地下水分区及地下水储存变化	水资源消耗	水平衡公式
南部水资源主要形成区	1	无	八一冰川消融降水产流	5号分区	包括1~3号地下水分区。地下水储存区分布在黑河东线支流河谷区、西线支流河谷区,区内无大型耕作区,不需抽取地下水灌溉,可认为水储变量不变	植被蒸腾、土壤蒸发	$P+Gm=ET+Q_{out,5}$
	2	无	降水产流	5号分区	包括4~5号地下水分区。无大型平原、河谷等地下水储存区,可认为水储变量不变	植被蒸腾、土壤蒸发	$P=ET+Q_{out,5}$
	3	无	降水产流	5号分区	包括6号地下水分区。无大型平原、河谷等地下水储存区,可认为水储变量不变	植被蒸腾、土壤蒸发	$P=ET+Q_{out,5}$
	4	无	降水产流	6号分区	包括7号地下水分区。无大型平原、河谷等地下水储存区,可认为水储变量不变	植被蒸腾、土壤蒸发	$P=ET+Q_{out,6}$
东中水资部子源耗系统散区	5	1、2、3号分区	降水产流	7号分区	包括8~14号地下水分区。地下水储存区主要分布在张掖盆地地区;农田灌溉以地表水为主,地下水储量变化为 $-0.35\times 10^8\text{ m}^3$	作物、植被蒸腾,土壤蒸发	$P+Q_{in,1}+Q_{in,2}+Q_{in,3}=ET+Q_{out,7}+\Delta S$
	6	4号分区	降水产流	5号分区	包括15~16号地下水分区。农田灌溉以地表水为主,地下水储量变化为 $-0.22\times 10^8\text{ m}^3$	作物、植被蒸腾,土壤蒸发	$P+Q_{in,4}=ET+Q_{out,5}+\Delta S$
	7	5、15号分区	降水产流	8号分区	包括17~19号地下水分区。地下水储量变化为 $-0.18\times 10^8\text{ m}^3$	植被蒸腾、土壤蒸发	$P+Q_{in,5}+Q_{in,15}=ET+Q_{out,8}+\Delta S$
	8	7、10、12号分区	降水产流	无	包括20号地下水分区。农田灌溉以地表水为主,地下水储量变化为 $0.1\times 10^8\text{ m}^3$	作物、植被蒸腾,土壤蒸发	$P+Q_{in,7}+Q_{in,10}+Q_{in,12}=ET+\Delta S$
北部水资源次要形成区	9	无	降水产流	10号分区	包括21~23号地下水分区。无大型平原、河谷等地下水储存区,区内无大型耕作区,不需抽取地下水灌溉,可认为水储变量不变	植被蒸腾、土壤蒸发	$P=ET+Q_{out,10}$
	10	9、11号分区	降水产流	8号分区	包括24号地下水分区。区内无大型耕作区,不需抽取地下水灌溉,可认为水储变量不变	土壤、水面蒸发	$P+Q_{in,9}+Q_{in,11}=ET+Q_{out,8}$
	11	无	降水产流	10号分区	包括25号地下水分区。区内无大型耕作区,不需抽取地下水灌溉,可认为水储变量不变	土壤蒸发	$P=ET+Q_{out,10}$
	12	无	降水产流	8号分区	包括26~27号地下水分区。区内无大型耕作区,不需抽取地下水灌溉,可认为水储变量不变	土壤蒸发	$P=ET+Q_{out,8}$
西部子系统	13	无	七一冰川消融降水产流	14号分区	包括28~31号地下水分区。地下水储存区分布在讨勒河谷区内无大型耕作区,不需抽取地下水灌溉,可认为水储变量不变	植被蒸腾、土壤蒸发	$P+Gm=ET+Q_{out,14}$
	14	13号分区	降水产流	15号分区	包括32~35号地下水分区。农田灌溉以地表水为主,地下水储量变化为 $0.40\times 10^8\text{ m}^3$	作物、植被蒸腾,土壤蒸发	$P+Q_{in,13}=ET+Q_{out,15}+\Delta S$
	15	14号分区	降水产流	7号分区	包括36~38号地下水分区。农田灌溉以地表水为主,地下水储量变化为 $-0.61\times 10^8\text{ m}^3$	作物蒸腾、土壤蒸发	$P+Q_{in,14}=ET+Q_{out,7}+\Delta S$

为 $43.97\times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$ (5号分区蒸散发量,约占中游消耗量的75%),高台、酒泉、嘉峪关一带次之,消耗量约为 $14.71\times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$ (6号与14号分区蒸散发量之和,约占中游消耗量的25%)。

3.4 黑河干流上游径流变化原因

应用 Budyko 水热(降水与蒸发)平衡模型^[11, 28]对黑河干流上游降水、蒸发、径流关系进行建模,并对径流变化进行归因分析。

$$Q = P - \frac{P \times ET_0}{(P^n + ET_0^n)^{1/n}} \quad (1)$$

式中: Q ——流域年径流深/mm;
 P ——年降水量/mm;
 ET_0 ——潜在年蒸散发量/mm;
 n ——流域下垫面特征的概化参数。

经对比,相对于 GPM 卫星降水数据, $0.5^\circ\times 0.5^\circ$ 网格降水数据输入 Budyko 模型模拟的年径流量与实测

径流量更接近,因此选用 $0.5^\circ\times 0.5^\circ$ 网格降水数据进行黑河干流上游径流变化的原因分析。黑河流域上游人类活动干扰少,可认为下垫面特征概化参数 n 保持不变。经计算, n 取值 0.7 时, 2000—2019 年实测与模拟径流最为接近,均方根误差为 $1.96\times 10^8\text{ m}^3$, 相对于 2000—2019 年年均径流量,相对误差为 10.3%(图 6),表明 Budyko 模型可以很好地解释黑河干流上游径流量的变化。

对式(1)进行求导,得出年降水、年潜在蒸散发对年径流变化的贡献分别为^[11]:

$$dQ_P = \left(\frac{P}{Q_B} \times \left(1 - \frac{\partial E_B}{\partial P} \right) \right) \times \frac{dP}{P} \times Q_B \quad (2)$$

$$dQ_{ET_0} = - \left(\frac{ET_0}{Q_B} \times \frac{\partial E_B}{\partial ET_0} \right) \times \frac{dET_0}{ET_0} \times Q_B \quad (3)$$

式中: dQ_P ——降水导致的年径流变化/mm;
 dQ_{ET_0} ——潜在蒸散发导致的年径流变化/mm;

表 3 各地表水循环分区多年平均水循环量 (2000—2019 年)

Table 3 Average surface water cycle pattern in each water division from 2000 to 2019

地表水 循环分区	地下水 分区	地表水循环分区 流入量/(10 ⁸ m ³)	地表水循环分区 降水量/(10 ⁸ m ³)	地下水分区 降水量/(10 ⁸ m ³)	地表水循环分区 蒸散发量/(10 ⁸ m ³)	地下水分区蒸 散发量/(10 ⁸ m ³)	地表水循环分区 流出量/(10 ⁸ m ³)	地下水分区总 储变量/(10 ⁸ m ³)	平衡 偏差/%
1	1~3	—	33.72	30.87, 2.15, 0.70	14.72	13.60, 0.90, 0.22	19.00	—	
2	4~5	—	9.68	4.28, 5.40	3.33	1.35, 1.98	6.35	—	
3	6	—	7.11	7.11	2.58	2.58	4.53	—	
4	7	—	9.80	9.8	2.87	2.87	6.93	—	
5	8~14	35.25	19.80	7.8, 4.53, 1.22, 3.23, 1.0, 0.57, 1.45	43.97	16.08, 11.36, 1.93, 6.66, 2.36, 1.41, 4.17	11.43	-0.35	
6	15~16	6.93	5.07	0.24, 4.83	6.84	0.39, 6.45	5.38	-0.22	
7	17~19	14.52	2.76	0.33, 1.12, 1.31	3.22	0.4, 1.48, 1.34	14.25	-0.18	
8	20	14.25	17.64	17.64	30.08	30.08	1.71	0.1	
9	21~23	—	8.09	0.45, 6.25, 1.39	6.57	0.4, 5.22, 0.95	1.52	—	
10	24	8.16	18.97	18.97	27.98	27.98	-0.85	—	3.0
11	25	—	16.69	16.69	10.05	10.05	6.64	—	
12	26~27	—	30.80	12.4, 18.4	30.80	15.23, 15.57	0.00	—	
13	28~31	—	18.68	11.11, 5.56, 0.61, 1.4	10.39	7.1, 1.94, 0.6, 0.75	8.30	—	
14	32~35	8.30	3.73	0.57, 2.43, 0.6, 0.07	7.87	1.06, 5.36, 1.25, 0.19	3.76	0.4	
15	36~38	3.76	3.85	1.67, 1.84, 0.34	5.13	2.29, 2.55, 0.29	3.09	-0.61	

注: (1)流出量是收入量与蒸散发量之差,收入量为流入量+降水量-地下水储变量;(2)理论上,收入量减去蒸发量不可为负值,出现负值说明存储平衡计算偏差,以负值绝对值作为平衡差,除以流入量与降水量之和即为平衡偏差。

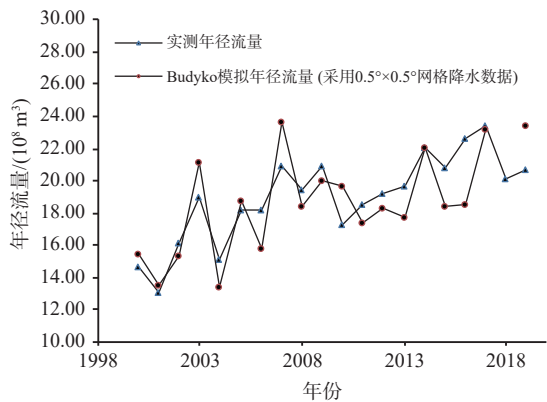


图 6 黑河干流上游年实测与 Budyko 模拟径流量

Fig. 6 Annual measured and Budyko simulated runoff in the upper reaches of the main stream of the Heihe River

注: 2018 年降水数据缺失, 所以无模拟径流量值。

P ——年降水量/mm;
 B ——模拟的实际年蒸散发/mm;
 Q_B ——径流深/mm;
 ET_0 ——年潜在蒸散发量/mm。

除降水与潜在蒸发外, 下垫面、降水强度变化等其它因素均会导致径流量改变。实际径流变化量减去式(2)(3)中 dQ_P 、 dQ_{ET_0} 之和, 即为其它因素导致的径流变化量。2000—2019 年黑河干流上游, 降水量增加是径流量增加的主因, 导致年均径流量增加 $0.35 \times 10^8 \text{ m}^3$, 约占 96%; 其它因素是次因, 导致年均径流量增加 $0.014 7 \times 10^8 \text{ m}^3$, 约占 4%, 潜在蒸散发对径流量的

影响更小, 导致年均径流量减少仅为 $0.001 2 \times 10^8 \text{ m}^3$ (图 7)。

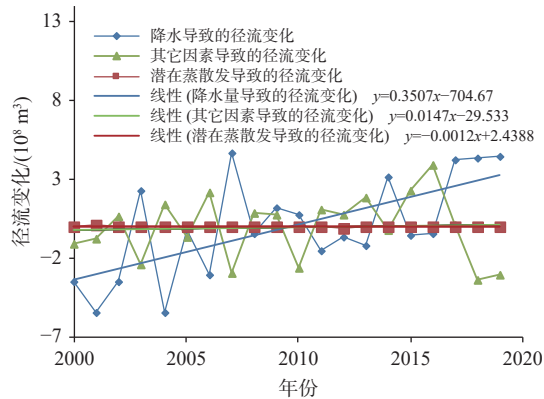


图 7 黑河干流上游径流变化原因分析图

Fig. 7 Attribution of runoff variation in the upper reaches of the main stream of the Heihe River

注: 径流变化量基准为莺落峡 2000—2019 年实测年平均径流量。

3.5 黑河中游主要土地覆盖类型蒸散发水量消耗

统计流域中游主要土地覆盖类型区实际蒸散发量, 见表 4。干流中游的民乐—张掖盆地 (5 号分区) 农田蒸散发量最大, 达 372~442 mm; 盐池与酒泉盆地次之, 为 236~330 mm。张掖、盐池、酒泉盆地 (分别为 5、6、14 号分区) 种植结构相似, 均以夏玉米为主^[29-30]; 民乐县以小麦/燕麦为主。民乐—张掖盆地单位面积农田、草地、裸地实际蒸散发比例约为 3.2:2.6:1, 盐池盆地单位面积农田、裸地实际蒸散发比例约为 1.9:1.2:1, 酒泉盆地单位面积农田、裸地实际蒸散

发比例约为 1.5 : 1.2 : 1。综合表 3、表 4 可知,流域中游(张掖、盐池、酒泉盆地)水资源蒸散发消耗中,农田、草地、裸地年均水资源消耗量分别约 20.3×10^8 , 21.5×10^8 , $16.4 \times 10^8 \text{ m}^3$, 各占消耗总量的 35%、37%、28%。

表 4 黑河流域中游主要土地覆盖类型蒸散发量

Table 4 Evapotranspiration of main land covers in the middle reaches of the Heihe River basin

分区	主要土地覆盖类型	2000 年			2010 年			2019 年		
		面积 /km ²	蒸散发量 /mm	蒸散发量 /(10 ⁸ m ³)	面积 /km ²	蒸散发量 /mm	蒸散发量 /(10 ⁸ m ³)	面积 /km ²	蒸散发量 /mm	蒸散发量 /(10 ⁸ m ³)
5(民乐—张掖盆地)	农田(玉米、小麦/燕麦为主)	3 808.5	372.23	14.2	3 806.5	428.29	16.3	3 954.82	442.86	17.5
	草地	6 310.63	292.8	18.5	6 190.27	329.6	20.4	5 564.56	355.5	19.8
	裸地	5 926.52	118.3	7.0	5 954.32	127.0	7.6	5 910.47	137.6	8.1
6(盐池盆地)	农田(夏玉米为主)	522.12	236.0	1.2	544.66	306.5	1.7	652.23	319.4	2.1
	草地	731.54	145.8	1.1	680.93	187.6	1.3	685.19	206.1	1.4
	裸地	2 913.35	124.6	3.6	2 945.26	151.2	4.5	2 822.63	167.3	4.7
14(酒泉盆地)	农田(夏玉米为主)	810.49	252.9	2.0	859.55	311.0	2.7	928.49	330.3	3.1
	草地	263.96	192.5	0.5	249.59	259.7	0.6	274.75	274.8	0.8
	裸地	2 538.62	164.6	4.2	2 423.32	197.2	4.8	2 207.3	219.4	4.8

4 讨论

4.1 黑河干流上游径流量增加的可持续性

前人^[6,9]对黑河干流上游径流变化特征与原因已有一定研究, 尽管研究时段不完全相同, 认识基本一致: (1)2000 年以来, 径流显著增加, 增加幅度达 27.4%^[9]; (2)径流增加与降水增加、冰川积雪融化、潜在蒸散发减小等自然因素有关, 与人类活动及下垫面变化无关。

本文研究进一步表明, 降水是径流增加主因, 降水对径流增加的贡献率为 96%, 其它因素只占 4%。其它因素包括下垫面变化、人类取水、冻土消融、降水强度等。根据 Budyko 模型, 黑河干流上游降水量每减少 10%, 将引起径流量减少 14%。如未来年降水量回落至 292 mm(2000—2005 年平均), 莺落峡年径流量将减少至 $15.8 \times 10^8 \text{ m}^3$, 相比 2015—2019 年年均径流量减少 $5.73 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。考虑到降水量的波动变化, 黑河干流上游径流量难以维持在较高水平, 中下游水资源利用规划应以枯水年为基准。

4.2 黑河中游农业用水与下游湖泊蓄水矛盾分析

根据表 3、4, 民乐—张掖盆地是黑河中游水资源消耗的主要区域, 约占中游 75%, 其中农田消耗占全盆地的 39%, 农田水资源消耗以引自黑河干流的灌溉用水为主。因此该盆地农田蒸散发耗水量是分析中游农业用水与下游湖泊蓄水矛盾的关键。根据张掖甘州区农灌区涡度相关仪观测与遥感蒸散发估算结果^[31], 农灌区年蒸散发量约为 600 mm, 除本地年均降水量 135 mm 外, 另需约 465 mm 的年均灌溉用水量。

如因黑河干流上游径流量减少至 2000—2005 年平均水平, 且不减少向下游的下泄水量, 中游农业灌溉年均亏缺量约为 $5.73 \times 10^8 \text{ m}^3$, 每年约 1 232 km² 的农田灌溉水源无法得到保证。

黑河流域中游农业用水与下游生态保护用水矛盾仍存在较大的显现风险。根据水资源利用多目标规划模型模拟结果^[32]可知, 只有通过灌区节水措施降低灌溉定额才能有效解决黑河干流中游与下游的用水矛盾。

4.3 蒸散发估算的不确定性与原因探讨

实际蒸散发既是水平衡计算、又是不同类型下垫面耗水量统计的关键数据。黑河流域中游农田蒸散发是流域耗水量统计的基础。实际蒸散发量时空分布合理、不同类型下垫面蒸散发数值比例准确, 且与多年降水量相平衡。张掖盆地实际蒸散发量分布(图 8)显示, 蒸散发空间分布总体合理, 裸地、草地、农田蒸散发量由小变大, 裸地位于该区北部, 紧邻荒漠区, 蒸散发量与降水量基本相当, 草地分布于农田外围与祁连山北麓之间, 水资源供应除降水外, 还有山区来水补给, 水分供应相对充足, 蒸散发量明显增加, 人工灌溉农田蒸散发量最大, 其中张掖甘州区尤甚。

实际蒸散发受气象、土地覆盖类型、植被长势、土壤水分供应能力等多方面因素的影响, 且植被蒸腾、土壤蒸发物理过程复杂。蒸散发量在时间、空间进行全面精确评价超过本文范围。尽管据此得出了相对合理的不同类型下垫面蒸散发耗水的比例数据, 但以降水、径流作为约束对蒸散发量进行核校方可完

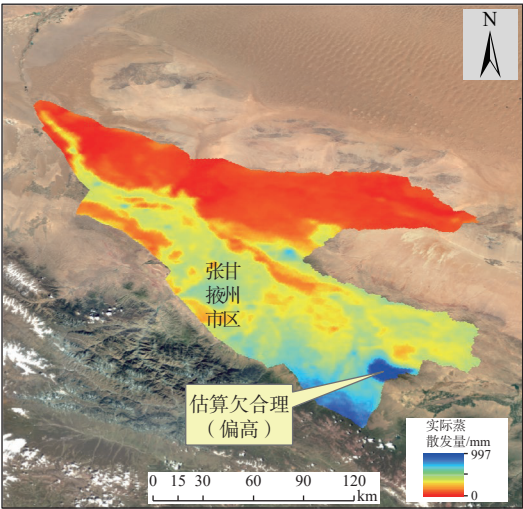


图 8 民乐—张掖盆地 2019 年实际蒸散发量

Fig. 8 Actual evapotranspiration of the Minle—Zhangye basin (water resources division 8) in 2019

成水平衡分析。这表明实际蒸散发的估算仍是水循环观测中的主要难点。

张掖盆地 2019 年实际蒸散发量分布(图 8)存在 2 处估算偏高区, 偏高区下垫面类型为分布于孤立山

丘之上的非人工林地与草地。全年蒸散发量高于甘州玉米育种灌溉区, 原因有待研究。根据互补相关法的基本原理, 基于 Priestley-Taylor 计算的湿环境(近地表空气湿度饱和)蒸散发量(ET_{wes})对估算结果影响较大, 该数值越大计算的蒸散发越大。对照 ET_{wes} 分布图可以发现在上述孤立山丘处 ET_{wes} 偏高。由此可见该系数空间变异很大, 易受地形影响。因此, Priestley-Taylor 湿环境蒸散发量计算公式中, 乘性经验系数在全流域采用统一数值会引入较大误差。

通过对比研究区已公开的代表性的蒸散发方法反演的蒸散发量(表 5), 有助于进一步理解蒸散发估算的不确定性与原因。区域蒸散发反演方法可分为基于物理模型与基于统计模型 2 种。基于物理模型的方法是对蒸散发物理过程进行参数化并估算蒸散发量。基于统计模型的方法需要基于一定数量的实测数据建立蒸散发与诸多影响参量间的统计关系。考虑到基于统计模型的方法机理难辨析, 结果难推广, 本次仅对基于物理模型的方法与结果进行对比分析。

表 5 收集的用于对比分析的流域实际蒸散发量

Table 5 Evapotranspiration data collected for comparisons

数据	空间分辨率/km	空间范围	时间范围	方法
中国-东盟区蒸散发数据	5	覆盖全流域	2013—2014年	以P-M模型为基础的 Shuttleworth-Wallace 双源模型 ^[31, 33-34]
中国陆地实际蒸散发数据集(1982—2015)	10	覆盖全流域	1982—2015年	互补相关法 ^[24]
基于地表能量平衡的全球陆地每天每月地表蒸发产品	5	覆盖全流域	2000—2017年	SEBS 能量平衡法 ^[38]
全球PML_V2陆地蒸散发与总初级生产力数据集	5	覆盖全流域	2003—2018年	以P-M模型为基础、融合植被GPP的模型 ^[35-36]
黑河流域1km分辨率月尺度地表蒸散发数据	1	基本覆盖5号分区	2014年	ETWatch 能量平衡法 ^[26, 37]

基于物理模型的方法可分为 Penman-Monteith、互补相关、能量平衡 3 类。Penman-Monteith(P-M)是一种直接计算蒸散发量的方法, Shuttleworth-Wallace 双源模型是基于 P-M 模型估算植被冠层蒸散与冠层下/间土壤蒸发的方法^[31, 33-34], PML(Penman-Monteith-Leuning)是以 P-M 为基础融合了植被 GPP(总初级生产力)的模型^[35-36]。互补相关通过“实际蒸散发与潜在蒸散发间存在近似对称/互补关系”现象, 根据潜在蒸散发推算实际蒸散发量^[24]。能量平衡法基于“地表感/显热通量、潜热通量、热通量三者之和等于地表净辐射通量”这一能量平衡原理, 通过估算地表感/显热通量、热通量间接推算潜热通量与实际蒸散发量^[26, 37-38]。

多种蒸散发数据对比可发现 2 个基本特点(图 9): (1)在全流域、张掖农田灌区(5 号分区)各数据间以

及与水平衡估算的蒸散发均存在不可忽略的差异; (2)均存在山区高估, 平原区低估的现象, 其表现是全流域高于或略低于水平衡估算量, 而平原农灌区远小于水平衡估算量。

由各模型计算结果可知, 以 P-M 模型为基础的 Shuttleworth-Wallace 双源模型反演数据与水平衡估算量接近。

5 结论

(1)祁连山区是径流主要产流区, 向中游下泄量约为 $45.11 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 其中消耗于中游的水量约为 $29.92 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 占 66%; 补充下游的水量约为 $15.19 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 占 34%。张掖盆地是黑河中游水资源消耗的主要区域, 消耗的上游来水和当地降水量达 $43.97 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,

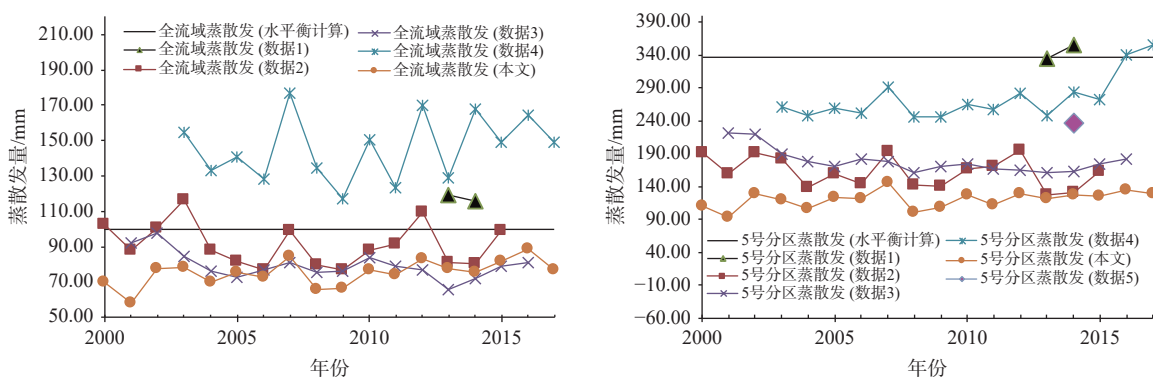


图 9 不同方法估算蒸散发量对比

Fig. 9 Comparisons of annual evapotranspiration data

注: 图例中数据序号与表 5 对应。

约占中游消耗量的 75%。中游农田蒸散发量约 $20.3 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 占上游来水的 45%。降水量增加是黑河干流上游径流增加的主因, 对径流量增加的贡献率为 96%, 导致径流增加 $0.35 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。潜在蒸散发对径流增加几乎没有贡献。根据目前黑河干流上游径流量变化与中游水资源消耗现状, 如果未来由于水文周期变化导致上游径流减少, 中下游用水矛盾凸显的风险较大。

(2) 地表水循环遥感观测可作为流域水平衡分析的技术之一, 分析流域地表水资源的分布状况、揭示水资源变化趋势与原因, 支撑水资源合理配置。陆面实际蒸散发量是水平衡分析中主要的不确定性因素, 准确估测不同类型下垫面实际蒸散发量是提升分析可靠性的关键。

(3) 基于互补相关法估算地表实际蒸散发时, 发现用于计算湿环境蒸散发量的 Priestley-Taylor 公式中乘性经验系数受地形影响空间变异很大, 区域上采用统一数值会对结果造成不可忽视的影响。这是互补相关法在流域水平衡分析应用中需解决的首要问题。

参考文献 (References):

- [1] 王海燕, 周圆, 杨燕. 黑河生态调水筑牢祖国北疆生态安全屏障[J]. 内蒙古水利, 2020(11): 50–51. [WANG Haiyan, ZHOU Yuan, YANG Yan. Heihe ecological water transfer to build a stronger ecological security barrier in northern Xinjiang[J]. Inner Mongolia Water Resources, 2020(11): 50–51. (in Chinese with English abstract)]
- [2] ZHAO W W, DING J Y, WANG Y P, et al. Ecological water conveyance drives human-water system evolution in the Heihe watershed, China[J]. *Environmental Research*, 2020, 182: 109009.
- [3] 达来, 王玉华, 布仁图雅, 等. 近40年额济纳河流域生态环境演变特征[J]. 环境与发展, 2020, 32(4): 200–203. [DA Lai, WANG Yuhua, BURENTUYA, et al. Evolution characteristics of ecological environment in Ejina River Basin in recent 40 years[J]. *Environment and Development*, 2020, 32(4): 200–203. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 谭美宝, 冉有华, 苏阳, 等. 黑河流域2001—2017年植被变化特征及其可持续性评价[J]. 遥感技术与应用, 2020, 35(2): 335–344. [TAN Meibao, RAN Youhua, SU Yang, et al. Characteristics and sustainability evaluation of vegetation change in Heihe River Basin during 2001 to 2017[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2020, 35(2): 335–344. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 乔雪梅, 刘普幸, 任媛, 等. 基于遥感的黑河流域生态环境变化特征及成因分析[J]. 中国环境科学, 2020, 40(9): 3962–3971. [QIAO Xuemei, LIU Puxing, REN Yuan, et al. Analysis of the characteristics and driving factors of ecological environment changes in Heihe River Basin based on remote sensing data[J]. *China Environmental Science*, 2020, 40(9): 3962–3971. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 李秋菊, 李占玲, 王杰. 黑河流域上游径流变化及其归因分析[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(3): 31–39. [LI Qiuju, LI Zhanling, WANG Jie. Variation and attribution of runoff over the upper reaches of Heihe River Basin[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2019, 17(3): 31–39. (in Chinese with English abstract)]
- [7] ZHANG A J, ZHENG C M, WANG S, et al. Analysis of stream flow variations in the Heihe River Basin, northwest China: Trends, abrupt changes, driving factors and

- ecological influences[J]. *Journal of Hydrology:Regional Studies*, 2015, 3: 106 – 124.
- [8] 张如强,刘俊国,冒甘泉,等.基于改进RVA法的黑河上游水文情势变化分析[J].干旱区研究,2021,38(1): 29 – 38. [ZHANG Ruqiang, LIU Junguo, MAO Ganquan, et al. Flow regime alterations of upper Heihe River based on improved RVA[J]. *Arid Zone Research*, 2021, 38(1): 29 – 38. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 刘琴,沈天成,程鹏.1960—2018年黑河上游径流量变化特征分析[J].甘肃科学学报,2021,33(4): 26 – 33. [LIU Qin, SHEN Tiancheng, CHENG Peng. Analysis on the characteristics of runoff variation in the upper Heihe from 1960 to 2018[J]. *Journal of Gansu Sciences*, 2021, 33(4): 26 – 33. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 蒋晓辉,夏军,黄强,等.黑河“97”分水方案适应性分析[J].地理学报,2019,74(1): 103 – 116. [JIANG Xiaohui, XIA Jun, HUANG Qiang, et al. Adaptability analysis of the Heihe River “97” water diversion scheme[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(1): 103 – 116. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 司源,尹冬勤,侯胜林,等.气候变化及人类活动对黑河流域径流演变影响分析[J].应用基础与工程科学学报,2018,26(6): 1177 – 1188. [SI Yuan, YIN Dongqin, HOU Shenglin, et al. Impacts of climate change and anthropogenic activities on runoff in the Heihe River Basin[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2018, 26(6): 1177 – 1188. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 阴晓伟,吴一平,赵文智,等.西北旱区潜在蒸散发的气候敏感性及其干旱特征研究[J].水文地质工程地质,2021,48(3): 20 – 30. [YIN Xiaowei, WU Yiping, ZHAO Wenzhi, et al. Drought characteristics and sensitivity of potential evapotranspiration to climatic factors in the arid and semi-arid areas of northwest China[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(3): 20 – 30. (in Chinese with English abstract)]
- [13] LI X, LIU S, XIAO Q, et al. A multiscale dataset for understanding complex eco-hydrological processes in a heterogeneous oasis system[J]. *Scientific Data*, 2017, 4: 170083.
- [14] 李海涛,陈伟涛,陈邦松,等.基于恒定蒸发比的区域蒸散量计算研究[J].水文地质工程地质,2015,42(6): 12 – 17. [LI Haitao, CHEN Weitao, CHEN Bangsong, et al. Calculation of regional evapotranspiration based on constant evaporative ratio[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2015, 42(6): 12 – 17. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 李海涛,邹毅,陈伟涛,等.区域蒸散量分离技术研究[J].水文地质工程地质,2016,43(5): 23 – 27. [LI Haitao, ZOU Yi, CHEN Weitao, et al. Research on separation of regional evapotranspiration[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2016, 43(5): 23 – 27. (in Chinese with English abstract)]
- [16] YU T F, SI J H, FENG Q, et al. Simulation of pan evaporation and application to estimate the evaporation of Juyan lake, northwest China under a hyper-arid climate[J]. *Water*, 2017(12): 952.
- [17] PACIOLLA N, CORBARI C, HU G C, et al. Evapotranspiration estimates from an energy-water-balance model calibrated on satellite land surface temperature over the Heihe Basin[J]. *Journal of Arid Environments*, 2021, 188: 104466.
- [18] LU Z X, ZOU S B, XIAO H L, et al. Comprehensive hydrologic calibration of SWAT and water balance analysis in mountainous watersheds in northwest China[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2015, 79/80/81/82: 76 – 85.
- [19] XU X, JIANG Y, LIU M H, et al. Modeling and assessing agro-hydrological processes and irrigation water saving in the middle Heihe River Basin[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 211: 152 – 164.
- [20] JIANG Y, XIONG L Y, XU Z X, et al. A simulation based optimization model for watershed multiscale irrigation water use with considering impacts of climate changes[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 598: 126395.
- [21] 黄河水利委员会黑河流域管理局.黑河流域概况[EB/OL]. <http://hrb.yrcc.gov.cn/category/hhlyjbqk>.
- [22] JUN C, BAN Y F, LI S N. China: Open access to Earth land-cover map[J]. *Nature*, 2014, 514(7523): 434.
- [23] XU F L, GUO B, YE B, et al. Systematical evaluation of GPM IMERG and TRMM 3B42V7 precipitation products in the Huang-Huai-Hai plain, China[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(6): 697.
- [24] MA N, SZILAGYI J, ZHANG Y S, et al. Complementary relationship based modeling of terrestrial evapotranspiration across China during 1982—2012: Validations and spatiotemporal analyses[J]. *Journal of Geophysical Research:Atmospheres*, 2019, 124(8): 4326 – 4351.
- [25] ALLEN R G. Crop Evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirement[R]. Logan: FAO Irrigation and Drainage Paper, 1998.

- [26] WU B F, ZHU W W, YAN N N, et al. Regional actual evapotranspiration estimation with land and meteorological variables derived from multi-source satellite data[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(2): 332.
- [27] WU F, ZHAN J Y, WANG Z, et al. Streamflow variation due to glacier melting and climate change in upstream Heihe River Basin, Northwest China[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2015, 79/80/81/82: 11 – 19.
- [28] CHOUDHURY B. Evaluation of an empirical equation for annual evaporation using field observations and results from a biophysical model[J]. *Journal of Hydrology*, 1999, 216(1/2): 99 – 110.
- [29] 边增淦, 王文, 江渊. 黑河流域中游地区作物种植结构的遥感提取[J]. *地球信息科学学报*, 2019, 21(10): 1629 – 1641. [BIAN Zenggan, WANG Wen, JIANG Yuan. Remote sensing of cropping structure in the middle reaches of the Heihe River Basin[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2019, 21(10): 1629 – 1641. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 程良晓, 江涛, 谈明洪, 等. 基于NDVI时间序列影像的张掖市农作物种植结构提取[J]. *地理信息世界*, 2016, 23(4): 37 – 44. [CHENG Liangxiao, JIANG Tao, TAN Minghong, et al. Crop structure extraction of Zhangye City based on time-series images[J]. *Geomatics World*, 2016, 23(4): 37 – 44. (in Chinese with English abstract)]
- [31] HU G C, JIA L. Monitoring of evapotranspiration in a semi-arid inland river basin by combining microwave and optical remote sensing observations[J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(3): 3056 – 3087.
- [32] 康宁, 崔虎群. 黑河干流中游水资源可持续利用多目标规划模型研究[J]. *水文地质工程地质*, 2018, 45(6): 15 – 22. [KANG Ning, CUI Huqun. Study on multi-objective programming model of sustainable utilization of water resources in the middle reaches of the Heihe River[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2018, 45(6): 15 – 22. (in Chinese with English abstract)]
- [33] 贾立, 胡光成, 郑超磊, 等. 中国-东盟1 km分辨率地表蒸散发数据集(2013)[J]. *全球变化数据学报(中英文)*, 2017, 1(3): 282 – 289. [JIA Li, HU Guangcheng, ZHENG Chaolei, et al. 1 km/daily evapotranspiration data product over China-ASEAN(2013)[J]. *Journal of Global Change Data & Discovery*, 2017, 1(3): 282 – 289. (in Chinese with English abstract)]
- [34] CHEN Q T, JIA L, MENENTI M, et al. A numerical analysis of aggregation error in evapotranspiration estimates due to heterogeneity of soil moisture and leaf area index[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 269/270: 335 – 350.
- [35] ZHANG Y Q, PEÑA-ARANCIBIA J L, MCVICAR T R, et al. Multi-decadal trends in global terrestrial evapotranspiration and its components[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 19124.
- [36] ZHANG Y Q, KONG D D, GAN R, et al. Coupled estimation of 500 m and 8 day resolution global evapotranspiration and gross primary production in 2002-2017[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 222: 165 – 182.
- [37] 吴炳方, 熊隽, 闫娜娜. ETWatch的模型与方法[J]. *遥感学报*, 2011, 15(2): 224 – 239. [WU Bingfang, XIONG Jun, YAN Nana. ET Watch: models and methods[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2011, 15(2): 224 – 239. (in Chinese with English abstract)]
- [38] CHEN X L, MASSMAN W J, SU Z B. A column canopy-air turbulent diffusion method for different canopy structures[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, 124(2): 488 – 506.

编辑: 张若琳