

京津冀山区水平衡演变及其影响因素识别

白 华, 杨会峰, 张英平, 孟瑞芳, 包锡麟, 戴 磊, 李祥志

Identifying the evolution of water balance and influencing factors in the mountainous area of Beijing-Tianjin-Hebei

BAI Hua, YANG Huifeng, ZHANG Yingping, MENG Ruifang, BAO Xilin, DAI Lei, and LI Xiangzhi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202305007>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

京津冀水源涵养区水化学环境分析——以承德市兴隆县为例

Hydrochemical environment in a typical conservation area in the Beijing-Tianjin-Hebei region: A case study in Xinglong County of Chengde

鲁重生, 刘文波, 李志明, 武雄, 康伟, 任玉祥 水文地质工程地质. 2020, 47(6): 132-141

基于地表水循环遥感观测的黑河流域水平衡分析

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

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 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 44-56

三江平原地下水流场演化趋势及影响因素

An analysis of the evolution trend and influencing factors of the groundwater flow field in the Sanjiang Plain

刘伟朋, 崔虎群, 刘伟坡, 程旭学, 李志红 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 10-17

缺水基岩山区蓄水构造类型划分及其属性分析

Classification and attribute analysis of water-storing structures in water deficient bedrock mountainous areas

张福存, 王新峰, 李伟, 程旭学, 韩双宝, 潘晓东, 龚磊 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 7-16

“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

基于时间序列植被指数资料的承德市植被覆盖时空演变分析

Temporal and spatial evolution of vegetation cover in Chengde based on time series NDVI data

贺军亮, 韦锐, 李丽, 金雁琳 水文地质工程地质. 2020, 47(6): 91-98



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202305007

白华, 杨会峰, 张英平, 等. 京津冀山区水平衡演变及其影响因素识别 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(6): 25-40.

BAI Hua, YANG Huifeng, ZHANG Yingping, *et al.* Identifying the evolution of water balance and influencing factors in the mountainous area of Beijing-Tianjin-Hebei[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(6): 25-40.

京津冀山区水平衡演变及其影响因素识别

白 华^{1,2,3}, 杨会峰^{1,2}, 张英平^{1,2}, 孟瑞芳^{1,2}, 包锡麟^{1,2}, 戴 磊^{1,2}, 李祥志^{1,2}

(1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061; 2. 河北沧州平原区地下水与地面沉降国家野外科学观测研究站, 河北 石家庄 050061; 3. 中国地质大学环境学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 定量识别水平衡演变影响因素及其贡献是开展生态环境保护和水资源科学管理的前提。以往成果对人类活动中不同影响因子的归因识别与定量研究较少。在识别京津冀山区水平衡演变的基础上, 采用双累计曲线法、径流变化定量分离法分析了降水变化和人类活动对水平衡演变的影响; 分别选择滦源盆地、清水河小流域, 分析了用水增加以及林业耗水增加对水平衡演变的影响。结果显示: (1) 近 65 a 来, 京津冀山区年降水量总体呈缓慢减少趋势, 速率为 0.97 mm/a, 21 世纪以来, 年降水量有小幅增加趋势; (2) 相比于 1956—1979 年基准期, 1980—2000 年降水变化和人类活动对天然径流衰减的影响程度分别为 49.25%、50.75%, 水土保持和植树造林是影响水平衡变化的主要人类活动因素, 2001—2020 年天然径流衰减的主要原因为人类活动, 影响程度达到 68.2%, 其中地下水开采增加是主要人类活动因素, 林业耗水量增加是重要人类活动因素; (3) 山区水库蓄水及用水增加直接造成实际径流衰减, 是造成平原区水平衡加剧的主要原因; (4) 清水河小流域研究结果表明, 在一定规模下, 林地耗水增加与山区径流衰减呈正相关关系。林地面积增加对径流衰减的影响存在 15~20 a 的滞后性。林地面积达到 23.48% 后, 林地耗水增加对天然径流产生了明显负作用, 平均每增加 1 km² 林地, 耗水量增加 37.25×10⁴ m³/a, 天然径流量衰减 59×10⁴ m³/a, 林地年均耗水增加量占流域天然径流衰减量的 63.22%, 表明林地面积增加起到水源涵养的作用, 同时也造成了有效径流的减少。研究成果对开展京津冀山区生态环境保护、水资源科学管理以及水平衡调控具有重要意义。

关键词: 水平衡演变; 水资源量衰减; 影响因素; 定量识别; 京津冀山区

中图分类号: P641.8

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)06-0025-16

Identifying the evolution of water balance and influencing factors in the mountainous area of Beijing-Tianjin-Hebei

BAI Hua^{1,2,3}, YANG Huifeng^{1,2}, ZHANG Yingping^{1,2}, MENG Ruifang^{1,2}, BAO Xilin^{1,2},
DAI Lei^{1,2}, LI Xiangzhi^{1,2}

(1. *The Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Science, Shijiazhuang, Hebei 050061, China*; 2. *National Field Scientific Observation and Research Station on Groundwater and Ground Subsidence in the Plain Area of Cangzhou, Hebei, Shijiazhuang, Hebei 050061, China*; 3. *School of Environment, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China*)

收稿日期: 2023-05-04; 修订日期: 2023-07-18

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 国家自然科学基金地质联合基金(U2244214); 中国地质调查局地质调查项目(DD20190336; DD20230078); 中国地质科学院科研业务费项目(SK202118; SK202216; KY202301)

第一作者: 白华(1987-), 男, 博士研究生, 研究实习员, 主要从事地下水资源调查评价与水循环研究。E-mail: baihua@mail.cgs.gov.cn

通讯作者: 杨会峰(1978-), 男, 博士, 研究员, 主要从事水文地质与水资源研究。E-mail: yanghuifeng06@163.com

Abstract: Quantitatively identifying the effects and contributions on the water balance evolution is the premise of ecological environmental protection and scientific management of water resources. However, most of the previous studies focused on the effects of climate change and human activities on runoff attenuation; few studies paid attention to the attribution and quantitative identification of different factors in human activities. On the basis of identifying the evolution process of water balance in the study area, the effects of precipitation change and human activities on the evolution of water balance at different time periods were analyzed by using the double cumulative curve method and the quantitative separation method of runoff change. The effects of the increase of water resource exploitation and forestry water consumption on water balance evolution were analyzed in the Laiyuan Basin and Qingshuihe Basin, respectively. The results show that: (1) The annual precipitation presented a slightly decreasing trend with a decreasing rate of 0.97 mm/a in the past 65 years; since the 21st century, precipitation has increased slightly. (2) Compared with the period of 1956–1979, the natural runoff attenuation during 1980–2000 was affected by precipitation change and human activities, with corresponding contributions of 49.25% and 50.75%, respectively. Soil and water conservation and afforestation are the main factors of human activity affecting the change of water balance. the decrease in natural runoff was mainly caused by human activities, with the influence contribution of 68.2%. The increase of groundwater exploitation was the main factor of human activity, and the increase of water consumption was the second factor of human activity. (3) The increase in reservoir storage and water consumption in mountainous areas led to the actual runoff attenuation directly, which was the main reason for the intensification of water balance in the plain areas. (4) In the Qingshuihe River Basin, there was a positive correlation between the increase of forest water consumption and the decline of mountain runoff at a certain scale. The effect of runoff attenuation on the increase of forest area was not immediate, with a lag of 15–20 a. As the forest area reached 23.48%, the increase in forest water consumption had a significant negative effect on the natural runoff. An average increase of 1 km² of forest land led to water consumption being increased by 37.25×10^4 m³/a, and the natural runoff being decreased by 59×10^4 m³/a. The increase in annual water consumption of forest land accounted for 63.22% of the natural runoff attenuation. It indicated that the increase in forest area played an important role in water conservation, resulting in a decrease in effective runoff. The results of the study are of great significance for the ecological and environmental protection, scientific management of water resources and regulation of water balance in the Beijing-Tianjin-Hebei mountain area.

Keywords: water balance evolution; water resources attenuation; influence factors; quantitative identification; the mountainous area of Beijing-Tianjin-Hebei

京津冀山区是京津冀主要产水区,也是平原的重要生态屏障和水源涵养区。自 20 世纪 80 年代以来,水资源显著减少^[1],已成为我国水资源衰减最为严重的地区之一;相比于 1956—1979 年,1980—2000 年、2001—2020 年山区水资源量分别衰减了 20.96%^[2]、35.40%。山区来水减少导致下游平原地表水可供水量减少、河道断流、湖泊湿地萎缩^[3],同时由于减少了河水对地下水的补给,加剧了平原区地下水超采,引发了地面沉降、地裂缝、海水入侵等一系列环境地质问题^[4-5],严重制约着区域经济社会、生态环境协调发展。

径流特别是天然径流变化是山区水平衡变化的重要体现。通常把径流衰减归因于气候变化和人类活动影响。气候变化通过驱动降水、蒸发等水文要素

发生改变^[6],影响大气过程和陆面过程中的水量平衡和能量交换,进而改变径流的时空分布^[7],其中,降水是气候变化中最主要的影响因素,能够直接影响径流量^[8]。人类活动通过直接取用水以及改变下垫面从而影响区域水循环过程,进而影响降水—径流关系^[9],其影响因素众多,如土地利用/覆被变化、水利工程、水资源开发利用等^[10]。有关径流衰减的研究表明,气候变化和人类活动对径流变化的影响存在地域差异;气候变化对我国南方地区径流影响较北方显著^[11],对长江上游年径流量影响超过 70%^[12];人类活动对北方地区径流影响显著,其贡献率多在 50% 以上^[13-14]。进入 21 世纪以来,京津冀平原水资源衰减已趋稳定,但山区仍在持续发展^[15],尚未达到拐点。有关径流衰减归

因的常用分析方法有双累计曲线法、水文模型模拟法、基于 Budyko 假设的弹性系数法等。以往成果多研究气候变化和人类活动对实际径流的影响,对反映流域水资源本底状况的天然径流影响的研究较少。此外,对人类活动中不同影响因子的归因识别与定量研究较少。近年来,京津冀山区用水、土地利用以及水库蓄水等变化对水平衡的影响不断增大,已成为径流减少的重要原因^[16]。山区水利工程蓄水以及用水增加直接造成径流减少。植被是全球气候和陆地生态环境变化的指示器^[17],而林地是水源涵养的主体。随着水土保持、退耕还林等工程的相继实施,山区土地利用/覆盖开始发生了复杂的变化^[18]。林地通过影响流域产流过程进而影响水平衡,其影响程度受气候、地域、尺度、林地类型、林地管理方式等影响,过程复杂^[19]。有关林地面积增加对径流的影响一直存在争议,多数结论认为林地覆盖率增加会不同程度地减少年径流量,在干旱半干旱地区尤为明显^[20],这与林地面积变化导致的蒸散发与流域产水量的变化密切相关^[21-22]。目前有关林水效应的研究多以试验站尺度开展,在区域尺度上研究山区林地面积变化对水资源的影响效应尚无定论,制约着生态环境保护和水资源科学管理。

本文以水平衡问题严峻的京津冀山区为对象,研究其水资源与水平衡演变过程并识别主要影响因素。选择清水河流域以及涑源盆地分别研究林业耗水以及用水增加对水平衡演变的影响,在此基础上识别水平衡变化的主控因子,定量评估不同影响因素对径流变化的贡献。研究成果对京津冀地区水资源开发利用、水源涵养和生态保护具有重要意义。

1 研究区概况

京津冀山区西为太行山脉,北为坝上高原和燕山,东接华北平原,地势西高东低,面积 $12.26 \times 10^4 \text{ km}^2$,占京津冀总面积的 56.63%(图 1)。行政区包括北京、天津和河北三个省市山区,辖 80 个县市。

土地利用类型以林地、草地为主,林地类型主要为针阔混交林与落叶阔叶林。20 世纪 70 年代末以来,该区一直是我国“三北”防护林体系、京津风沙源治理防护林体系重点建设工程区和国家级水土保持重点治理区。经过综合治理,林地面积、植被覆盖率大幅提高,生态环境明显改善;同时,随着山区经济社会发展,水利工程不断修建,水库蓄水以及用水不断增大。山区面临着生态环境与水资源的诉求。

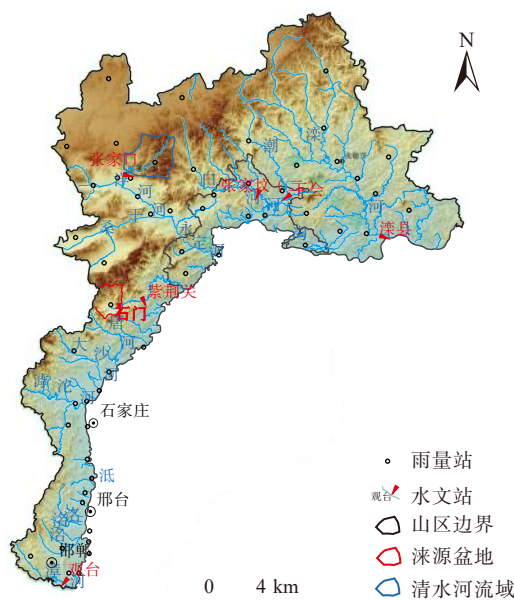


图 1 研究区位置图

Fig. 1 Map of study area location

典型盆地选择保定西北部的涑源盆地。该盆地是一个泉排型岩溶水系统,同时也是一个典型的向斜式汇水盆地^[23],面积为 $1\,092 \text{ km}^2$ 。地下水以泉群的形式排泄于拒马河,成为拒马河源头,其水量大小对下游及白洋淀生态环境具有举足轻重的作用。近年来,随着城镇化的发展,盆地用水量不断增加,导致地下水水位下降,泉流量减少,泉水流量由最高年份(1996 年)的 $4.68 \text{ m}^3/\text{s}$,减小到 2000 年的 $3.5 \text{ m}^3/\text{s}$,2014 年仅为 $0.9 \text{ m}^3/\text{s}$ ^[24]。由于用水增加导致的泉流量衰减问题受到关注。

典型小流域选择张家口崇礼区的清水河流域。该流域是永定河水系洋河上游的一条较大的支流,流域面积为 $2\,380 \text{ km}^2$ 。土地利用类型主要为林地、草地、耕地,林地类型为阔叶林、针阔混交林、落叶针叶林、灌木丛等。近年来,区内林地面积不断增加,2022 年底森林覆盖率已达 71.53%。林地面积的增大,改变了降水入参与产流过程,关于林地面积增加对水平衡变化的影响需要进一步研究。

2 数据与研究方法

2.1 数据

本文所用资料包括遥感解译数据、气象水文数据、水资源数据、林业面积数据等。

(1) 京津冀山区 1985、1990、2000、2010、2015、2020 年土地利用分布特征,通过 LandSat 卫星遥感解译获取,经过人机交互判读结合监督分类将土地利用类型

分为梯田、林地、草地 3 类,作为趋势性分析研究的依据。京津冀山区 1950 年以来逐年林地面积数据来自《中国林业年鉴》^[25]以及河北省^[26]、北京市^[27]、天津市^[28]《统计年鉴》。

(2)1956 年以来京津冀山区 65 a 的降水量数据通过国家气象数据平台气象站点获取,雨量站点 52 个。水文数据参考水文部门水文站资料,水文站点 7 个。

(3)地表水资源数据采用水利部门三次水资源评价成果;地下水资源采用自然资源部地下水资源评价数据,参考《华北地区地下水资源评价》^[29]《京津冀地区地表水及浅层地下水资源调查评价》^[30]以及《海河流域地下水资源调查评价》^[31]成果。京津冀山区不同时期出入境水量、水资源开发利用量、水库蓄变量等通量变化数据以上述数据来源以及各省市水资源公报综合确定。

(4)崇礼区清水河流域林业来源于《张家口经济统计年鉴》(1999—2019)^[32]、《张家口国民经济和社会发展统计公报》(1999—2021)^[33]、《张家口崇礼区国民经济和社会发展统计公报》(2020—2021)^[34]和《河北省林木种质资源》^[35]等。涑源盆地水文数据来源于《保定市地质环境监测报告》以及水文年鉴。1980—2020 年地下水开采量数据、地下水水位埋深数据参考历年《保定市地质环境监测报告》^[36]《保定市水资源公报》^[37]《河北省水利年鉴》^[38]等综合确定。

2.2 研究方法

(1)趋势分析方法

Mann-Kendall(MK)检验法被广泛应用于水文气象变量的趋势检验,包括降水、径流等要素,该方法不要求样本遵从一定的分布特征,可以直接检验变量的变化趋势^[39-40],是一种非参数统计检验方法,同传统的参数方法比较有明显的优越性。

(2)双累计曲线法

双累计曲线法是目前用于水文气象要素一致性分析中最简单、直观的方法,可通过绘制降水-径流累积值关系检查降水-径流关系是否随时间一致。曲线或关系的显著变化表明降水以外的因素对水流有影响,因此被广泛应用于计算降水与人类活动对年径流量变化的相对贡献率^[41]。

(3)径流变化定量分离方法

利用人类活动扰动前的天然径流数据作为背景值,将水文系列突变点前后的径流变化总量分为 2 部分:气候要素变化的影响和人类活动的影响。然后进行这 2 个随机系列的特征比较,可发现气候变化和人

类活动导致下垫面条件改变对天然径流量的各自影响程度。

径流变化总量为基准期和变异期年均径流量之差,是气候变化和人类活动对年径流量变化的综合影响结果。计算公式为:

$$\Delta Q_t = \Delta Q_c + \Delta Q_{hr} \quad (1)$$

$$\eta_c = \Delta Q_c / \Delta Q_t \times 100\% \quad (2)$$

$$\eta_{hr} = \Delta Q_{hr} / \Delta Q_t \times 100\% \quad (3)$$

式中: ΔQ_t ——径流总变化量/mm;

ΔQ_c 、 ΔQ_{hr} ——人类活动、气候变化引起的径流变化量/mm;

η_c 、 η_{hr} ——气候变化、人类活动对天然径流量变化的贡献率/%。

(4)遥感解译方法

基于 1985、1990、2000、2010、2020 年夏季长时间序列 LandSat 系列卫星遥感影像,对京津冀山区的梯田、林地及草地 3 种土地利用类型进行解译,利用地物遥感训练样本库,通过深度学习框架下的遥感训练分类与信息提取技术,开展遥感土地类型信息提取与解译。利用 MODIS 遥感卫星解译不同时期的蒸散发量。

(5)林地耗水量计算

根据不同林木单株季节变化耗水数据,按照不同类型林地分别计算后再按面积和林分密度加权进行尺度放大,进而推算某个区域的林地耗水量。林地耗水量包括林木耗水和林分耗水。

区域林木耗水总量计算公式为:

$$W = \sum_{j=1}^n (Q_j \times D_j \times S_j) \quad (4)$$

林分耗水量计算公式为:

$$Q_j = \sum_{i=k}^m q_i = \sum_{i=k}^m (V_i \times C \times 24 \times d_i) \quad (5)$$

式中: W ——区域树木耗水量/kg;

Q_j ——某树种生长季林分耗水量/kg;

D_j ——林分密度或株数密度/(株·km⁻²);

S_j ——某树种的种植面积/km²;

q_i ——某树种第 i 月的林分耗水量/kg;

k ——该树种在一个生长季树干液化流结束的月份/mon;

V_i ——该树种第 i 月的月平均液流速率/(kg·h⁻¹·cm⁻¹);

C ——该树种的木质周长总和/cm;

d_i ——第*i*月的液流天数/d。

3 京津冀山区水平衡演变过程

3.1 径流变化特征

20世纪50年代以来,山区河流径流发生了显著变化,20世纪80年代后径流衰减尤为明显。以滦河、潮河、白河以及彰河为例,这几条河流径流在1980

年、2000年左右发生了2次明显的突变,见图2。根据突变点可将径流系列分为3段:1956—1979年天然期阶段,1980—2000年变异期第I阶段,2001—2020年变异期第II阶段。经统计,京津冀山区3个阶段河流出口径流总量分别为 131.01×10^8 , 57.69×10^8 , $30.91 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。相比于天然期阶段,变异期第I阶段、第II阶段径流衰减程度分别为55.97%和76.41%。

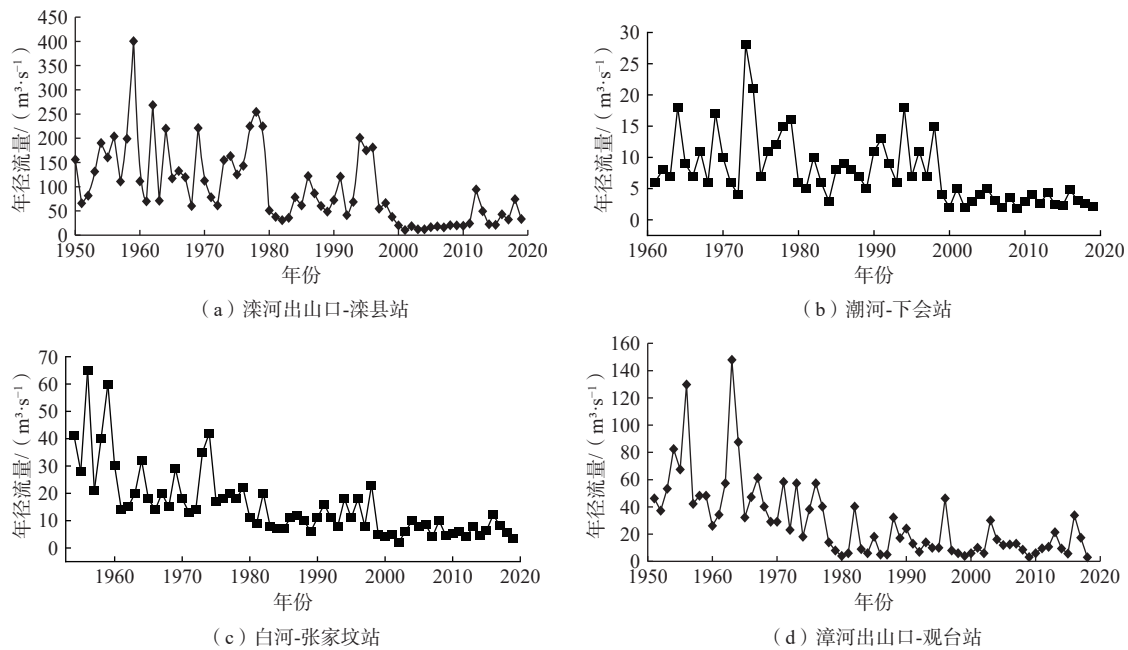


图2 山区河流径流变化

Fig. 2 Runoff variation from the hydrological stations in major rivers

3.2 水资源演变特征

本文阐述的水资源为狭义水资源,即地表水资源量与地下水资源量之和,再减去两者之间的重复量。与径流变化同步,山区水资源状况也发生了变化,对比3个阶段水资源评价成果,水资源总量、地表水资源量、地下水资源量均呈递减趋势(图3)。相比于1956—1979年,1980—2000年、2001—2020年水资源

总量分别衰减了 30.37×10^8 , $51.63 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 衰减程度分别为20.96%、35.40%;地表水资源量(即天然径流量)衰减程度分别为34.70%、55.64%,地下水资源量衰减程度分别为11.07%、14.98%。山区水资源量衰减主要表现在地表水资源量衰减,地下水资源量衰减幅度相对较小。

3.3 水平衡演变过程

径流和地下水水位变化是诊断区域水平衡状态的指示器。京津冀山区(含盆地)不同阶段水平衡通量变化见图4,对比分析不同阶段主要补给通量以及排泄通量变化,将水平衡演变过程分为3个阶段:基本稳定、失衡显现、失衡加剧。

基本稳定阶段(1956—1979年):该阶段降水量较大,地表水资源丰富,开始修建以防洪为主的水库等水利工程;地下水开采规模较小,地下水水位基本处于天然状态。从水平衡通量角度分析,该阶段降水总

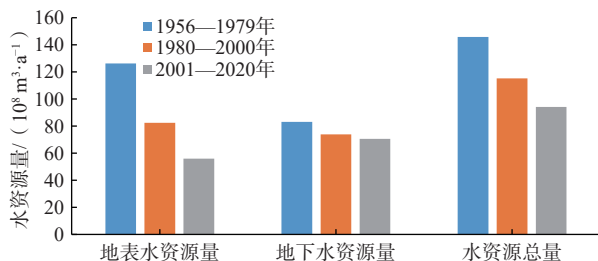


图3 京津冀山区不同阶段水资源演变特征

Fig. 3 Evolution characteristics of water resources at different stages in the mountainous area of Beijing-Tianjin-Hebei

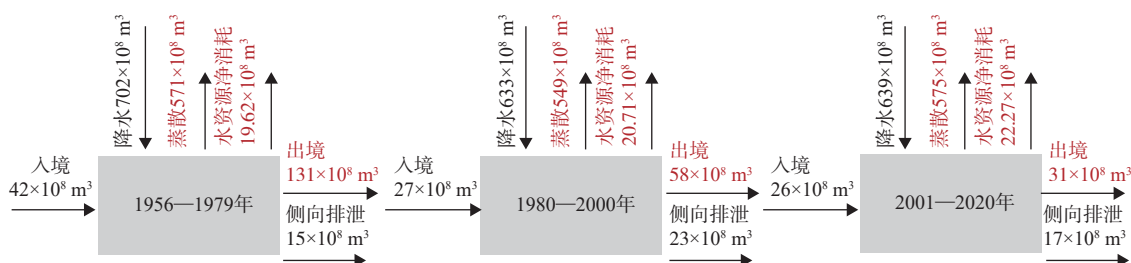


图 4 京津冀山区不同时期主要水平衡通量变化图

Fig. 4 Changes of major water balance flux at different periods

注: 本次计算的水平衡通量中并不包括小型水库及塘坝等地表水体蓄变量、山区(不含盆地)地下水蓄变量以及土壤水蓄变量等。

量为 $702.24 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 入境水量为 $41.7 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$; 蒸散发总量为 $570.9 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 出境水量为 $131 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 侧向排泄量为 $14.99 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 水资源净消耗量为 $19.62 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$; 该阶段大中型水库蓄变量为 $1.61 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。

失衡显现阶段(1979—2000年): 该阶段山区水库拦蓄以及地表水开发利用量增加, 同时水土保持与植树造林等措施开始大面积实施, 山区径流量显著减小; 地下水开采量有所增加, 区域地下水水位下降不明显。从水平衡通量变化角度分析, 该阶段降水量减少了 $69.41 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 上游山西、内蒙入境径流量减少了 $14.8 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$; 而区域蒸散发消耗量减少了 $21.58 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 加上本区用水增加, 导致出境水量减小了 $73.33 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 山区盆地地下水储量减少 $0.23 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 大中型水库蓄水量增加 $0.94 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。平原区水位下降导致山前侧向径流量增加了 $7.71 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。

失衡加剧阶段(2000—2020年): 该阶段山区水库拦蓄用水及林地面积进一步增加, 出山口径流减少; 同时由于地下水开采量加大甚至超采, 山间盆地和岩溶泉域地下水水位显著下降, 出现局部地下水降落漏斗, 山区地下水储量明显减少, 河流基流量与泉流量

锐减, 甚至无法维系基本的生态流量, 下游平原河道断流成为常态。从水平衡通量角度分析, 虽然该阶段降水总量缓慢增加至 $639.03 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 但是蒸散发量增加至 $575.18 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 入境水量减小至 $22.27 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 出境水量减小至 $30.91 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。山区盆地地下水储量减少 $1.13 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 大中型水库蓄水量增加 $2.47 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。径流量衰减一部分由于上游山西、内蒙古来水减少, 主要原因在于本区产水与耗水的不平衡导致。

4 天然径流衰减原因分析

4.1 气候变化对水平衡的影响

河川径流源于降水, 降水量是影响径流量的主要因素。从 52 个气象站 1956—2020 年降水量年际变化来看(图 5), 京津冀山区年降水量总体呈减小趋势, Mann-Kendall 检验结果表明减少趋势不显著, 衰减速率为 $0.97 \text{ mm}/\text{a}$, 多年平均降水量为 538.31 mm 。1956—1979 年、1980—2000 年、2001—2020 年 3 个时段, 年均降水量分别为 $572.96, 516.33, 521.44 \text{ mm}$ 。相比于 1956—1979 年, 后 2 个时段, 年均降水量分别减少了 $56.53, 51.42 \text{ mm}$ 。而进入 21 世纪后, 降水量有小幅增加趋势。

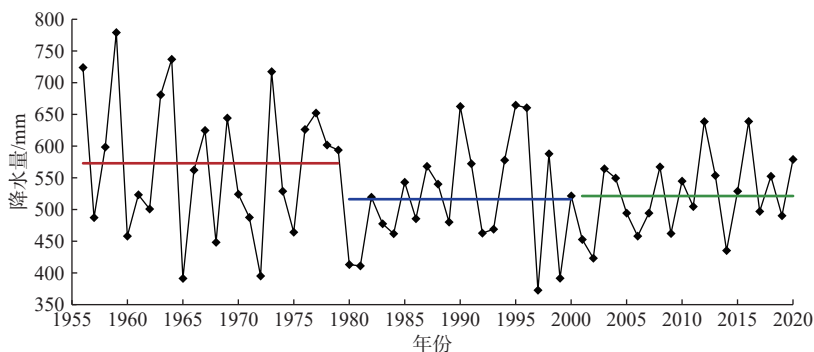


图 5 京津冀山区降水量年际变化

Fig. 5 Interannual variation of precipitation

将实测径流还原为天然径流是开展地表水资源变化归因识别及定量研究的关键。由于 1956—1979 年人类活动影响较小, 可认为接近天然状态, 作为基

准期。根据《海、滦河流域水资源调查评价初步分析报告》(1982)^[42] 中京津冀山区 1956—1979 年逐年天然径流、降水数据, 绘制了降水与径流关系曲线(图 6)。

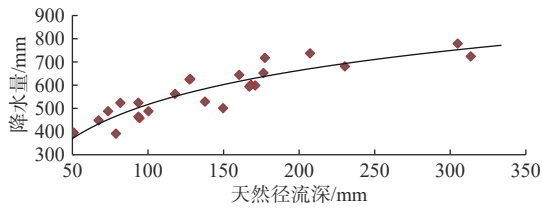


图 6 京津冀山区降水-径流关系图 (1956—1979 年)

Fig. 6 The relationship between precipitation and runoff (1956—1979)

采用径流变化定量分离法对天然径流衰减进行分析。以基准期降水径流关系曲线为计算依据, 通过输入不同阶段多年平均降水量, 得出降水变化对径流衰减的影响量, 再从水文系列突变点前后的径流变化

总量中分离出降水变化的影响量即可得出人类活动变化的影响量。由表 1 可知, 相比于基准期, 1980—2000 年、2001—2020 年天然径流分别减少了 56.0, 79.83 mm。降水变化和人类活动对 1980—2000 年天然径流的影响量分别为 -27.58, -28.42 mm, 影响程度分别为 49.25% 和 50.75%; 降水变化和人类活动对 2001—2020 年天然径流的影响量分别为 -25.38, -54.42 mm, 影响程度分别为 31.81%、68.19%, 表明人类活动是该阶段天然径流量衰减的主要原因。相比于 1980—2000 年, 2001—2020 年在降水量有所增加的情况下, 天然径流量仍衰减了 23.81 mm, 说明 2001 年以后人类活动对天然径流量的影响进一步加剧。

表 1 京津冀山区天然径流衰减定量分析

Table 1 Quantitative analysis of natural runoff attenuation

阶段	降水量/mm	天然径流深/mm	总变化量/mm	降水变化影响		人类活动影响	
				数量/mm	比例/%	数量/mm	比例/%
1956—1979	572.96	130.23					
1980—2000	516.33	74.24	-56.0	-27.58	49.25	-28.42	50.75
2001—2020	521.44	50.43	-79.80	-25.38	31.81	-54.42	68.19

4.2 人类活动对水平衡的影响

人类活动影响是包括因土地利用和植被覆盖变化而改变流域下垫面、拦蓄工程以及用水变化等的总计。林业面积增加导致的林地耗水增加, 山间盆地、河谷、岩溶区用水增加以及水利工程拦蓄地表水增加是影响山区水平衡过程的主要人类活动因素。

4.2.1 林地耗水增加对水平衡影响

(1) 区域林地耗水变化对水平衡的影响

京津冀山区 1985、1990、2000、2010、2020 年 5 期土地利用类型遥感解译成果见表 2。由表可知, 山区土地类型, 面积大小为林地>草地>梯田。相比于 1985 年, 梯田、草地面积呈减小趋势, 林地面积增加, 林地面积占比由 1985 年的 35.87%, 增加至 2020 年的 46.21%。从空间分布上, 林地主要分布在太行山、燕山一带, 以承德、北京、张家口最多。发生上述变化的原因是该区域先后开展了“三北”防护林、水土保持小流域治

理、林草生态工程等山区生态建设和生态修复项目。草地、梯田面积减少的主要原因是草地、梯田改种林地。

京津冀山区林地面积、林地耗水量、降水量与地表水资源量(天然径流)变化关系见图 7。林地面积、林地耗水量呈增长趋势, 地表水资源量呈衰减趋势。林地耗水量与降水量的比值由 20 世纪 60 年代的 1.69% 增大到了 2020 年的 43.47%。根据林业年鉴资料, 在 1963 年 8 月洪水事件之前, 山区以荒山为主, 1948 年林地面积仅 $7.18 \times 10^4 \text{ hm}^2$; 20 世纪 60 年代中期至 80 年代, 开展以水土保持为主的植树造林, 林地面积年均增加 $17.6 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 在林地面积增长初期, 天然径流衰减并不明显, 径流明显衰减发生在 1984 年, 也就是在植树造林 20 年后。1980—1999 年, 林地面积保持稳定, 1999 年以后太行山绿化工程启动, 林地面积进一步增长, 年均增加 $16.3 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 同时天然径流显著衰减, 以 1995—2002 年最为显著, 也就是 20 世纪 70 年代末大范围造林之后 20 a。随着林地面积持续增加, 林地耗水/山区降水量的比值不断升高, 但是地表水资源量/山区降水量的比值趋于稳定。以上分析表明京津冀山区林地面积增加到一定程度后会显著减少天然径流, 林地对天然径流衰减影响在 20 a 后达到最大, 至于影响程度如何需要进一步研究。

表 2 京津冀山区土地利用占比

Table 2 The variation of proportion of land use

年份	林地面积占比/%	草地面积占比/%	梯田面积占比/%
1985	35.87	32.22	31.91
1990	36.62	31.79	31.59
2000	40.35	30.77	28.88
2010	43.38	30.79	25.83
2020	46.21	27.62	26.17

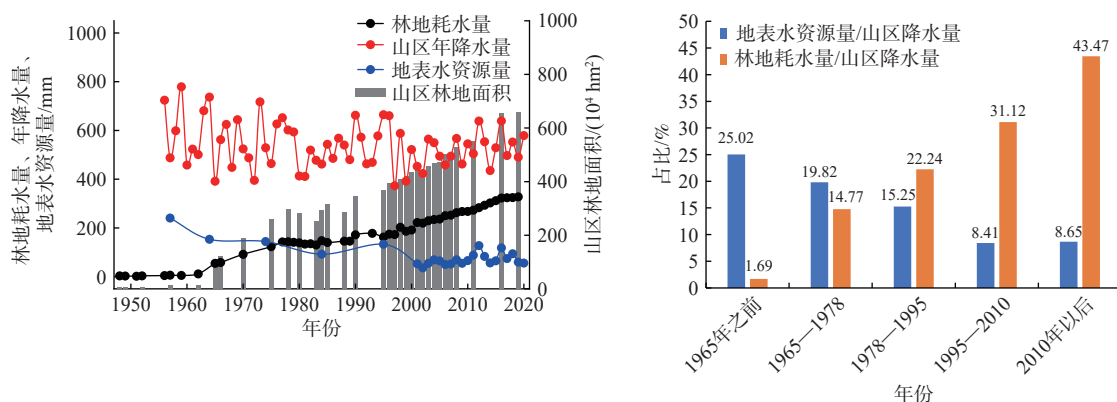


图 7 京津冀山区年降水量、地表水资源量、林地面积、林业耗水量关系图

Fig. 7 The relationship between precipitation, surface water resources, forest land area, and forestry water consumption

(2) 清水河典型流域林地耗水增加对水平衡影响识别
为进一步研究林地耗水对区域水平衡的影响,以张家口市崇礼区清水河流域为重点开展研究。由于 20 世纪 80 年代以来,林地面积的增加是清水河流域下垫面变化的重要因素。因此可用于分析不同阶段林地耗水对水平衡的影响。

林分群体耗水量包括林木蒸腾耗水量和林地地

表蒸发耗水量。受林分结构、组成和立地条件的影响,林木蒸腾耗水通常占林地蒸散耗水的绝大部分,生长正常的成龄郁闭林达到 67% 以上,林地树木蒸腾耗水量占林地蒸散耗水量的 80% 以上。不同林种结构数据参考《河北省林木各质资源》^[35](表 3),由表可知,清水河流域优势树种为白桦及华北落叶松。清水河流域优势树种单株生长季平均耗水情况见表 4。

表 3 清水河流域现状树种面积及其占比^[43]

Table 3 The area and proportion of the tree species in the Qingshuihe River Basin

树种	白桦	华北落叶松	杨树	蒙古栎	白榆	柳	八棱海棠	油松	樟子松	云杉	沙棘	山杏	枸杞	果木类
面积/km ²	239.1	178.7	58.3	14.6	22.5	0.2	0.12	35.3	0.55	1.46	1.08	306.2	0.1	18.0
占比/%	27.29	20.40	6.65	1.67	2.57	0.02	0.01	4.03	0.06	0.17	0.12	34.95	0.01	2.05

表 4 清水河流域优势树种耗水情况^[44-48]

Table 4 Water consumption of dominant tree species in the Qingshuihe River Basin^[30-34]

树种	生长月份	胸径/cm	树高/m	生长季平均耗水量/(kg·a ⁻¹)
白桦	4—10	10.2~21.9	9.8~10.6	10 743.32
杨树	4—10	15.6~29.5	6.5~12.5	7 452.00
蒙古栎	4—10	12.3~25.6	5.5~10.8	207.74
白榆	4—10	4.0~9.5	5.0~10.5	539.41
旱柳	4—10	8.6~15.6	4.5~6.5	1 494.00
华北落叶松	4—10	13.5~20.3	9.5~10.8	2 455.41
油松	4—11	12.3~21.8	8.6~10.2	2 696.08
樟子松	4—11	3.5~7.5	3.5~4.8	132.68
山杏	5—10	3.5~8.3	1.0~2.5	76.60
果木类	4—9	4.5~7.8	2.0~3.5	600.00

清水河流域 1985 年以来的林地面积数据参考《张家口经济统计年鉴》^[32],林分密度参考《河北省森林规划设计调查操作细则》^[49]。根据不同林木单株季节变化耗水数据,按照不同类型林地分别计算后再按面积和林分密度加权进行尺度放大,进而推算区域林木耗水量,清水河流域典型年林地耗水量见表 5。从 1985—

2020 年,清水河流域林地面积持续增加,由 1985 年的 437.65 km² 增加到了 2020 年的 1 009.75 km²,增加了 130%。相应的林地耗水量由 1985 年的 1.168×10⁸ m³,增加到了 2020 年的 3.172×10⁸ m³。平均每增加 1 km² 林地,林地耗水量增加近 37.25×10⁴ m³/a。

表 5 清水河流域林地耗水情况

Table 5 Water consumption of forest land in Qingshui River Basin

年份	林地面积/km ²	林地耗水量/10 ⁸ m ³
1985	437.65	1.168
1990	439.12	1.379
1995	460.21	1.561
2000	558.95	1.492
2005	646.15	1.725
2010	663.13	2.083
2015	929.18	2.481
2020	1 009.75	3.172

采用双累计曲线法,对清水河流域径流进行突变分析(图 8)。降水径流关系在 2000 年发生了显著突

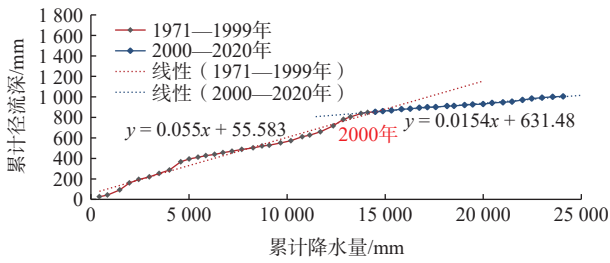


图 8 清水河流域降水-径流双累计曲线 (1971—2020 年)

Fig. 8 Double accumulation curve of precipitation and runoff in Qingshuihe River Basin (1971—2020)

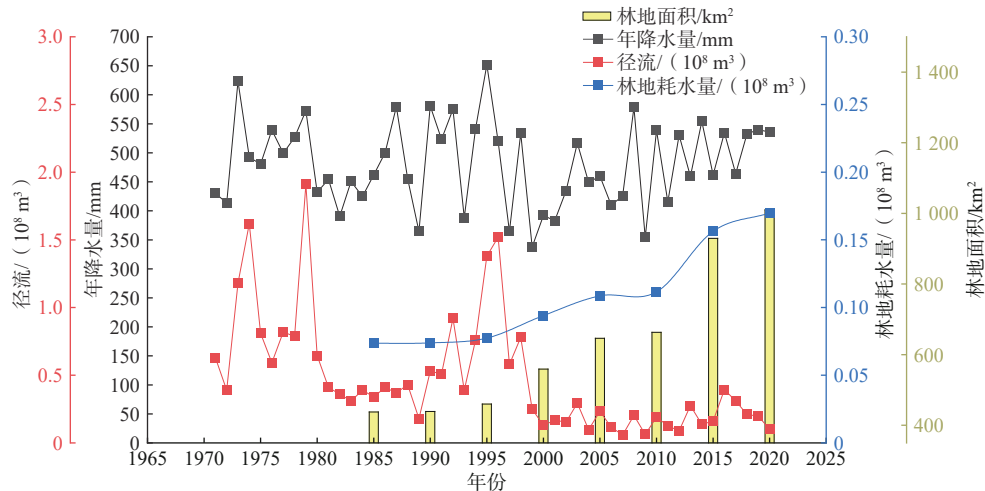


图 9 清水河流域降水、径流、林地面积、林地耗水关系曲线

Fig. 9 The relationship between precipitation, surface water resources, forest land area, and forestry water consumption

清水河流域 1971—2020 年系列降水、径流、林地面积、林地耗水等要素多年变化特征见图 9。

1971—1999 年阶段: 年径流量与降水量呈显著正相关关系。该阶段径流变化主要受降水影响波动变化, 林地面积基本未发生变化。

2000—2020 年阶段: 在降水量并未显著变化的情况下, 径流衰减明显。2000 年开始张家口市开始实施退耕还林工程, 林地面积在 2000—2005 年缓慢增长, 2006—2014 年保持稳定, 2015 年以后为了迎接冬奥会开始加大绿化面积, 林地面积进一步增长。2000 年以后, 清水河流域林地面积增加了 450.8 km², 年均增加 22.54 km²; 林业耗水量增加了 1.679×10⁸ m³, 年均增加了 0.084×10⁸ m³, (相当于径流深度为 3.53 mm/a), 占流域天然径流衰减量为 (5.58 mm/a) 的 63.22%。也就是说平均每增加 1 km² 林地, 林地耗水增加 37.25×10⁴ m³/a, 天然径流衰减量 59×10⁴ m³/a。因此, 林地耗水增加是造成清水河流域 2000 年以后天然径流衰减的重要人类活动因素。2000 年以后林地面积占比超过 23.48%, 耗水量持续增加, 对区域水资源产生了明显的负作用。

变。1971—1999 年多年平均径流深为 28.47 mm, 2000—2020 年多年平均径流深为 7.42 mm, 径流衰减量达 21.06 mm。气候变化和人类活动对径流衰减的影响分别为 4.64, 16.42 mm, 影响程度分别为 22.02%、77.97%。结合《河北省水利年鉴》^[38] 数据, 2001—2020 年, 清水河流域地下水耗水量为 0.258×10⁸ m³/a(折合径流深 10.84 mm/a), 因此, 该阶段林地耗水增加引起的径流衰减量为 5.58 mm/a, 对天然径流衰减的影响程度达 26.50%, 占人类活动影响量的 33.98%。

4.2.2 山区用水增加对水平衡的影响

(1) 区域用水变化对水平衡的影响

山间盆地是农业耗水的主要地区之一。京津冀山间盆地包括张宣盆地、蔚县盆地、涿怀盆地、延庆盆地、遵化盆地、迁安盆地、井陘盆地。以往的研究成果^[50] 揭示了山区径流衰减最为显著的几条河分别为滹沱河、洋河及桑干河, 这几条河上游均有大型山间盆地或者大中型灌区。

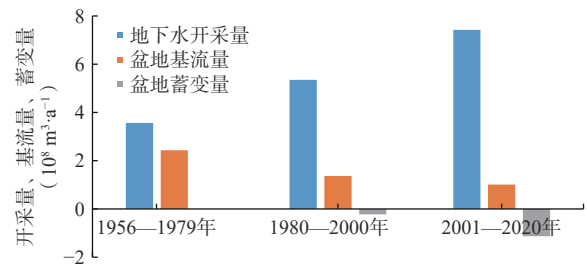


图 10 京津冀山区主要盆地不同时期地下水开采量、基流量、蓄变量关系图

Fig. 10 The relationship between groundwater extraction, base discharge, and storage variables in major basins

据统计,京津冀山间盆地不同时期地下水开采量、基流量、地下水蓄变量之间的关系如图 10。地下水开采量呈增加趋势,由 1956—1979 年的 $3.56 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 增加至 1980—2000 年、2001—2020 年的 5.37×10^8 , $7.42 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$; 盆地基流量与地下水开采量呈负相关关系,相对基准期的 $2.43 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 1980—2000 年、2001—2020 年基流量分别减少了 1.07×10^8 , $1.42 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。地下水超采造成地下水水位持续下降,地下水蓄水量不断衰减,1980—2000 年、2001—2020 年地下水多年平均蓄变量分别为 -0.23×10^8 , $-1.13 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。盆地用水增加导致基流减少,地下水超采导致地下水蓄水量持续衰减。

(2) 典型盆地(涑源盆地)水平衡影响因素识别

石门站是涑源盆地内唯一一个国家水文站,形成了 1956—1994 年 39 a 连续径流监测系列数据。以往

研究成果表明,石门站与下游紫荆关径流相关性好,相关系数达到 0.87^[51]。因此,本次采用紫荆关站长系列径流资料,对石门站 1994—2020 年径流进行了展延,形成了 1956—2020 年径流系列。利用基流分割方法得到涑源盆地 1956—2020 年基流量(即泉域泉水总量)。

涑源盆地降水、天然径流、基流、水资源开发利用量、地下水水位动态变化特征如图 11。由图可知,65 a 来,涑源盆地降水量总体呈小幅下降趋势,但不存在显著突变点,衰减速率为 $0.76 \text{ mm}/\text{a}$ 。2000 年以前,天然径流、基流与降水变化相关性好,该阶段水资源开发利用程度低,年均开采量仅为 $717.49 \times 10^4 \text{ m}^3$,地下水水位动态呈与降水同步的自然波动特征。2000 年以后,盆地地下水开采量增加,地下水水位下降,其中径流区地下水水位下降了近 3 m,排泄区地下水水

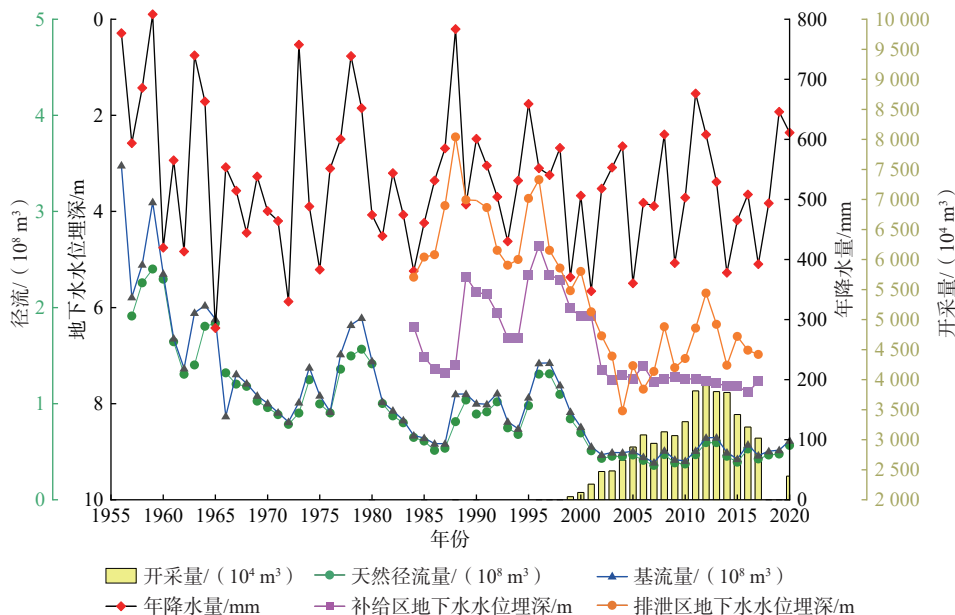


图 11 涑源盆地水文要素变化图 (1956—2020 年)

Fig. 11 Changes of hydrological elements in the Laiyuan basin (1956—2020)

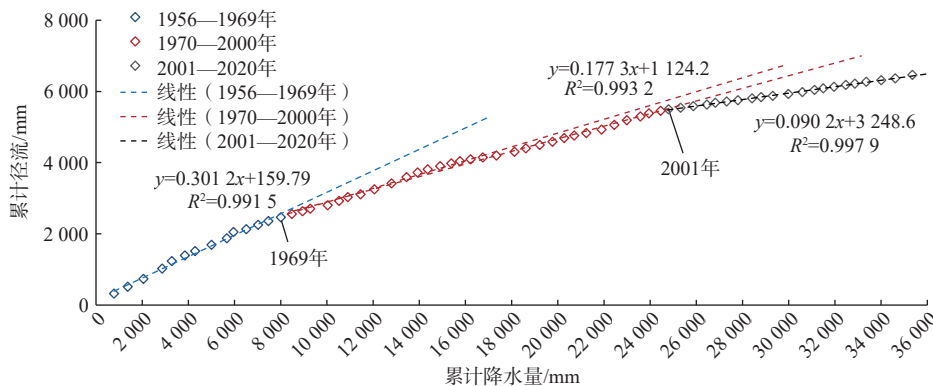


图 12 涑源盆地降水-天然径流双累积曲线 (1956—2020 年)

Fig. 12 Dual accumulation curve of precipitation and natural runoff in the Laiyuan Basin (1956—2020)

位下降了近 0.5 m; 天然径流、基流也呈下降趋势, 与降水量变化相关性变差, 但是与地下水水位变化趋势一致, 相关性好。

采用累计双曲线法绘制了涑源盆地降水-径流关系图, 通过分析, 天然径流在 1969 年和 2001 年发生了 2 次突变, 见图 12。以泉水排泄为主的拒马河源头, 由于泉域降水补给有一定的滞后性, 径流变化具有多年调节性, 泉水流量不仅受到当年降水影响还受到前期降水影响。根据前人研究成果^[52], 涑源泉域泉流量与连续 3 a 降水平均值相关性最好。因此, 建立了不同时期 3 a 滑动平均降水与天然径流量的拟合关系, 见图 13。

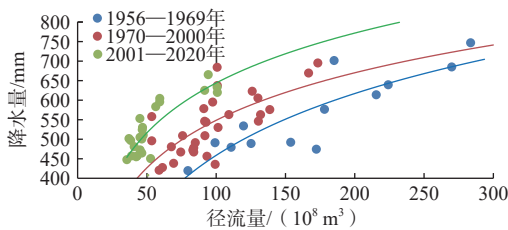


图 13 涑源盆地不同时期降水-径流关系图

Fig. 13 The relationship between precipitation and runoff in the Laiyuan Basin

采用径流变化定量分离法开展涑源盆地天然径流衰减分析。由表 6 可知, 相比于基准期 1956—1969 年, 1970—2000 年、2001—2010 年天然径流深度分别减少 53.54, 96.06 mm。人类活动和气候变化在 1970—2000 年期间的影响量分别为 -25.09, -28.44 mm, 气候变化和人类活动对径流量的影响分别为 46.87%、53.13%, 两者贡献率相当。气候变化和人类活动在 2001—2020 年期间的影响量分别为 -34.55, -61.51 mm, 对天然径流衰减的影响占比分别为 35.97% 和 64.03%, 说明该阶段主要影响因素为人类活动。2001 年以后, 涑源盆地土地利用类型变化不明显, 该阶段用水量增加主要因素是人类活动, 2001—2020 年地下水开采对天然径流影响量为 -26.96 mm。相比 1970—2000 年, 2001—2020 年地下水开采量对天然径流量影响程度达到 63.41%, 是 2001 年后天然径流量进一步衰减的主要因素。根据保定市地质环境监测报告数据, 该阶段地表水与地下水耗水量为 $2\ 360 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ (折合径流深度为 31.47 mm/a), 盆地地下水储量减少 $1\ 469 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ (折合径流深度为 3.92 mm/a), 耗水量略大于地下水储量亏损量与径流减少量之和。

表 6 涑源盆地天然径流衰减贡献分析

Table 6 Analysis on contribution of natural runoff attenuation in the Laiyuan Basin

阶段	降水量/mm	天然径流深度/mm	总变化量/mm	气候变化影响		人类活动影响		地下水开采影响	
				数量/mm	占比/%	数量/mm	占比/%	数量/mm	占比/%
1956—1969	560.36	142.15							
1970—2000	523.91	88.61	-53.54	-25.09	47	-28.44	53		
2001—2020	508.21	46.08	-96.06	-34.55	36	-61.51	64	-26.96	28

4.2.3 山区水利工程蓄水增加对水平衡的影响

自 20 世纪 50 年代初期以来, 京津冀山区修建了大量水利工程, 包括水库、引渠等。先后兴建了官厅、密云等 26 座大型水库, 68 座中型水库, 1 087 座小型水库, 总库容 $283 \times 10^8 \text{ m}^3$, 控制了山区面积的 85% 以上。20 世纪 50 年代修建的水库多以防洪为主, 兼顾下游农业灌溉, 水库水资源利用属性为附属功能; 20 世纪 70 年代末到 80 年代初, 京津冀地区干旱少雨, 为解决城市工业生活的水资源供需矛盾, 水库的水资源利用功能开始凸显; 20 世纪 80 年代以后, 相继建设了引滦入津入唐、引青济秦等以城市供水为主的一批调水工程。山区水利工程在防涝除害方面发挥了工程效益, 产生了一定的经济效益和社会效益, 同时改变了流域内水量时空分布。

据统计, 京津冀山区大型水库库容及蓄水量呈增加

趋势。多年平均库容由 1956—1979 年的 $149.58 \times 10^8 \text{ m}^3$, 增加至 1980—2000 年的 $229.32 \times 10^8 \text{ m}^3$, 2001—2020 年进一步增加至 $24\ 632 \times 10^8 \text{ m}^3$; 多年平均蓄水量由 1956—1979 年的 $37.5 \times 10^8 \text{ m}^3$, 增加至 1980—2000 年的 $55.86 \times 10^8 \text{ m}^3$, 2001—2020 年进一步增加至 $70.38 \times 10^8 \text{ m}^3$; 2013 年以后山区降水量增加, 加上南水北调、引黄等外调水的补充, 京津冀山区水库蓄水量进一步增加(图 14)。1956—1979 年、1980—2000 年、2001—2020 年 3 个阶段水库年均蓄变量分别为 1.61×10^8 , 0.94×10^8 , $2.47 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占同期天然径流量的 1.27%、1.14%、4.41%。

同时, 山区水库供水量总体呈现增加趋势, 特别是在 20 世纪 80 年代以后, 水库供水量不断增加。据统计, 2000 年后, 京津冀山区大中型水库供水量为 $35.65 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 其中河北山区为 $20.65 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。大中型水库蓄水量增加以及水库供水量几乎达到了同期山区天

然径流的 68%。以上分析表明山区水利工程的修建导致水库蓄水、引水增加,是山区实际径流量减少的主要原因。

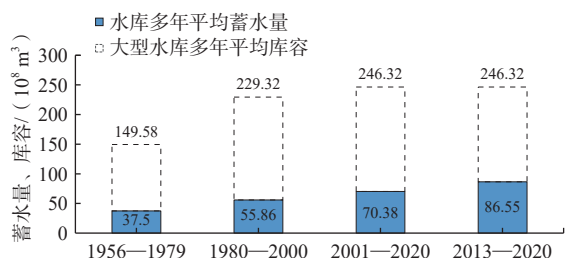


图 14 京津冀山区不同阶段大中型水库蓄水、大型水库库容变化

Fig. 14 Changes of water storage and storage capacity of large and medium-sized reservoirs at different stages

4.3 京津冀山区不同时期水平衡变化主控因素

影响京津冀水平衡变化的因素有气候(降水)以及人类活动影响。不同时期降水和人类活动对水平衡的影响不同,水平衡的主要控制因素不同。

(1) 1956—1979 年时期

该阶段整体降水量大,1964 年以前山区植被覆盖率低、耗水量小,地表产流能力强,水库建设多以防洪为主对径流影响较小,同时地下水开采量很少,地下水水位为天然波动状态。1965 年以后,山区林地面积迅速增长,但是在造林初期天然径流并未明显衰减,林地效应的发挥具有延迟性,这主要与不同树龄的耗水差异有关。在树龄较小时,耗水量较少,不能充分发挥其水源涵养功能。因此,该阶段山区基本处于天然水平衡状态。

(2) 1980—2000 年时期

相比于 1956—1979 年,该阶段降水量减少了 9.88%,水资源量衰减了 43%,降水对水资源衰减的影响程度达到 49.25%。该阶段山区水库拦蓄及用水增加造成出山口径流衰减,地下水开采量虽然有所增加,但并未造成大范围地下水水位下降。20 世纪 80 年代开始,京津冀山区一直是我国“三北”防护林体系建设、京津风沙源治理等防护林体系重点建设工程区和重要水库上游国家级水土保持重点治理区,大量水土保持项目的实施改变了地表产流条件,林地面积年均增长 $16.3 \times 10^4 \text{ hm}^2$,林业耗水不断增大。因此,该阶段天然径流衰减的主控因素为降水变化和人类活动,大范围水土保持项目和植树造林是主要人为因素。

(3) 2001—2020 年时期

相比于 1980—2000 年,该阶段降水量有小幅增长,但是天然径流量衰减近 32.06%。该阶段山区城镇

化迅速发展,人口增长、工农业迅速发展,山区水库蓄水用水量进一步增多,同时地下水开采量显著增加,区域地下水水位的持续下降,造成河流基流量、径流量减少。1999 年以后,太行山绿化工程启动,林地面积进一步增长,林地耗水量增加,山区天然径流量进一步衰减。该阶段径流量衰减的主控因素为人为因素,其中地下水开采增加造成基流量减少,是山区径流量衰减的主要因素,山区林地面积增加导致的林地耗水量增加是天然径流量衰减的重要因素,山区水库蓄水及地表水供水增多是实际径流量衰减的主要因素。

5 讨论

5.1 用水增加对水资源的影响

从滦源盆地研究成果可知,山区地下水开采量增加会造成基流量的减少,进而造成天然径流量减少,水库蓄水及地表用水增加不会改变天然径流量,两者均不会造成水资源总量的明显减少。从水资源形成角度分析,山区地下水过量开采会造成地下水水位下降,导致一小部分降水滞留在包气带中,无法形成有效水资源,是造成水资源总量衰减的主要因素,其对水资源衰减程度受地下水水位下降及包气带岩性影响,机制复杂。水库蓄水量增加造成水面蒸发量增加,在一定程度上减少了水资源总量,但影响不大。但是山区用水量增加造成出山口径流量减少,是引发下游平原区水平衡失衡的部分原因。

5.2 林地对水源的涵养与消耗作用

从水源涵养角度分析,森林水源涵养功能是森林生态系统服务的重要部分,森林植被能够影响水文过程、促进降雨再分配、影响土壤水分运动以及改变产流汇流条件等,从而缓和地表径流,增加土壤径流和地下径流,在一定程度上起到了削峰补枯的作用^[53]。随着林地规模的增大,森林系统水源涵养能力增强,同时也减少了森林系统对下游的淡水供应能力,增大了土壤的蓄水能力。从消耗水源角度分析,林地蒸散发耗水是林地耗水的主要组成部分,林地面积规模过大,蒸腾耗水量会增大,同时降水量增加并不明显,不利于产流。从径流变化突变时间上看,京津冀山区年径流量突变的 2 个时间为 1980 年和 2001 年,大规模造林突变点为 1965 年和 1974 年,年径流衰减在造林后的 15 a 开始显现,但是对径流衰减影响效应最大的时间为造林后 20 a,之后林木长至成年期后蒸散发趋于减少,径流变化趋于稳定。因此,林地面积并非越

大越好,如何合理确定林业面积阈值兼顾水源涵养和产流需要从降水、地表水、地下水、土壤水平衡角度考虑。

从清水河小流域研究成果看,平均每增加 1 km^2 林地,林地耗水增加 $37.25\times 10^4\text{ m}^3/\text{a}$,天然径流衰减 $59\times 10^4\text{ m}^3/\text{a}$ 。若以此推算,相比于1956—1979年林地面积 $17\ 059\text{ km}^2$,1980—2000年、2001—2020年京津冀山区林地面积分别增加至 $20\ 707, 44\ 501\text{ km}^2$,年均增加了 $1\ 035, 2\ 225\text{ km}^2$,由林地耗水量增加造成的天然径流衰减量分别为 $6.11\times 10^8, 13.13\times 10^8\text{ m}^3/\text{a}$,分别占人为因素造成天然径流衰减量的17.54%和19.68%,表明林地耗水量增加是造成京津冀山区天然径流量衰减的重要原因。而造成天然径流量衰减的其他人为原因还有很多,如土地修复与整治、城市化建设等,需要在后面的研究中进一步细化。林地耗水量与涉及植被的类型、密度、树林、树龄相关,准确计算林地耗水量难度很大,本次计算的林地耗水量是在梳理前人开展的单株林木耗水量成果基础上,扩展到区域林地耗水量尺度,研究结果可能存在一定的误差,另外,不同林种耗水量时间变化特征不同,从不同林业结构角度考虑,通过典型试验站开展土壤水分补给、消耗与运移研究是解决上述问题的关键。

6 结论

(1)近65 a来,京津冀山区年降水量总体呈减少趋势,减小速率为 $0.97\text{ mm}/\text{a}$ 。相比于1956—1979年基准期,1980—2000年天然径流量衰减的主控因素是降水变化和人类活动,影响程度分别达到49.25%、50.75%,水土保持工程和植树造林是影响水平衡变化的重要人类活动因素;2001—2020年天然径流量衰减的主控因素为人类活动,影响程度达到68.2%。与1980—2000年相比,2001—2020年天然径流量进一步衰减,主要人类活动因素为地下水开采增加,此外,林地面积增大引起的耗水量增加是影响水平衡的重要因素。

(2)山区地表水利用及水库蓄水直接造成实际径流衰减,地下水开采是影响基流变化的重要因素,两者均不会造成水资源量的明显减少。但是,山区用水及蓄水增加导致下游地表水可利用量减少,是造成平原区水平衡加剧的主要原因。

(3)在一定规模下,林地耗水增加与山区径流衰减呈正相关关系。林地面积增加对径流衰减的影响效应并不是立刻产生的,而是存在15~20 a的滞后性,这与林地规模、林地结构、林种、树龄等有关。清

水河小流域水平衡分析结果显示,林地种植面积达到23.48%后,林地耗水增加对天然径流产生了明显负作用,平均每增加 1 km^2 林地,耗水增加 $37.25\times 10^4\text{ m}^3/\text{a}$,天然径流衰减 $59\times 10^4\text{ m}^3/\text{a}$,林地年均耗水增量占流域天然径流衰减量的63.22%。林地面积增加起到水源涵养的作用,同时也造成了有效径流的减少。

参考文献 (References) :

- [1] 王佰伟,张存龙,刘诗剑.海河流域水资源量演变分析研究[J].上海国土资源,2022,43(3):15-18. [WANG Baiwei, ZHANG Cunlong, LIU Shijian. Study on the situation of water resource quantity change in the Haihe River Basin[J]. Shanghai Land & Resources, 2022, 43(3): 15 - 18. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 任宪韶.海河流域水资源评价[M].北京:中国水利水电出版社,2007. [REN Xianshao. Evaluation of water resources in Haihe River Basin[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2007. (in Chinese)]
- [3] 夏军.变化环境下中国北方水循环与水安全研究面临的问题与展望——以华北地区水问题为例[C]//中国自然资源学会土地资源研究专业委员会.中国土地资源态势与持续利用研究.2004:45-52. [XIA Jun. Problems and perspective of water security to change environment in North China[C]//Land Resources Research Committee of China Society of Natural Resources. Research on the situation and sustainable utilization of land resources in China. 2004: 45 - 52. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 张兆吉,雒国中,王昭,等.华北平原地下水资源可持续利用研究[J].资源科学,2009,31(3):355-360. [ZHANG Zhaoji, LUO Guozhong, WANG Zhao, et al. Study on sustainable utilization of groundwater in North China plain[J]. Resources Science, 2009, 31(3): 355 - 360. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 郭海朋,李文鹏,王丽亚,等.华北平原地下水位驱动下的地面沉降现状与研究展望[J].水文地质工程地质,2021,48(3):162-171. [GUO Haipeng, LI Wenpeng, WANG Liya, et al. Present situation and research prospects of the land subsidence driven by groundwater levels in the North China Plain[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(3): 162 - 171. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 栗士棋,刘颖,程芳芳,等.环境变化对水资源影响研究进展及其借鉴与启示[J].水利科学与寒区工程,2020,3(5):1-6. [LI Shiqi, LIU Ying, CHENG Fangfang, et al. Research progress and reference for the impact of environmental change on water resources[J]. Hydro Science and Cold Zone Engineering, 2020, 3(5):

- 1 - 6. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 夏军, 刘春葵, 任国玉. 气候变化对我国水资源影响研究面临的机遇与挑战 [J]. 地球科学进展, 2011, 26(1): 1 - 12. [XIA Jun, LIU Chunzhen, REN Guoyu. Opportunity and challenge of the climate change impact on the water resource of China[J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(1): 1 - 12. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 张士锋, 贾绍凤. 降水不均匀性对黄河天然径流量的影响 [J]. 地理科学进展, 2001, 20(4): 355 - 363. [ZHANG Shifeng, JIA Shaofeng. A research of the impacts of uneven precipitation on the natural runoff in the Yellow River[J]. *Progress in Geography*, 2001, 20(4): 355 - 363. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 王乐扬, 李清洲, 王金星, 等. 变化环境下近 60 年来中国北方江河实测径流量及其年内分配变化特征 [J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2020, 41(2): 36 - 42. [WANG Yueyang, LI Qingzhou, WANG Jinxing, et al. The variation characteristics of recorded runoff and its annual distribution in North China during the recent 60 years in the context of environment change[J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition)*, 2020, 41(2): 36 - 42. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 师忱, 袁士保, 史常青, 等. 滦河流域气候变化与人类活动对径流的影响 [J]. 水土保持学报, 2018, 32(2): 264 - 269. [SHI Chen, YUAN Shibao, SHI Changqing, et al. Effects of climate change and human activities on runoff in Luanhe Basin[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(2): 264 - 269. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 王国庆, 张建云, 管晓祥, 等. 中国主要江河径流变化成因定量分析 [J]. 水科学进展, 2020, 31(3): 313 - 323. [WANG Guoqing, ZHANG Jianyun, GUAN Xiaoxiang, et al. Quantifying attribution of runoff change for major rivers in China[J]. *Advances in Water Science*, 2020, 31(3): 313 - 323. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 秦鹏程, 刘敏, 夏智宏, 等. 气候变化对我国水资源和重大水利工程影响研究进展 [J]. 气象科技进展, 2022, 12(6): 7 - 15. [QIN Pengcheng, LIU Min, XIA Zhihong, et al. Progress in assessing the impacts of climate change on China's water resources and major water conservancy projects[J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2022, 12(6): 7 - 15. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 杨永辉, 任丹丹, 杨艳敏, 等. 海河流域水资源演变与驱动机制 [J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(10): 1443 - 1453. [YANG Yonghui, REN Dandan, YANG Yanmin, et al. Advances in clarification of the driving forces of water shortage in Haihe River Catchment[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(10): 1443 - 1453. (in Chinese with English abstract)]
- [14] LIU Lüliu, DU Jianjun. Documented changes in annual runoff and attribution since the 1950s within selected rivers in China[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2017, 8(1): 37 - 47.
- [15] 曾卉洁. 海河流域水资源衰减机理与演变预测 [J]. 高科技与产业化, 2022, 28(5): 30 - 35. [ZENG Huijie. Attenuation mechanism and evolution prediction of water resources in the Haihe River Basin[J]. *High-Technology & Commercialization*, 2022, 28(5): 30 - 35. (in Chinese)]
- [16] 水利部水利水电规划设计总院. 中国水资源及其开发利用调查评价 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014. [Investigation and evaluation of water resources and their development and utilization in China[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2014. (in Chinese)]
- [17] 姜萍. 1982-2015 年中国植被覆盖变化及其对气候变化的敏感性分析 [D]. 兰州: 兰州大学, 2022. [JIANG Ping. Analysis of vegetation change in China and its sensitivity to climate variability from 1982 to 2015[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2022. (in Chinese with English abstract)]
- [18] HUA Wenjian, CHEN Haishan, ZHU Siguang, et al. Hotspots of the sensitivity of the land surface hydrological cycle to climate change[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(30): 3682 - 3688.
- [19] 陈军锋, 李秀彬. 森林植被变化对流域水文影响的争论 [J]. 自然资源学报, 2001, 16(5): 474 - 480. [CHEN Junfeng, LI Xiubin. The impact of forest change on watershed hydrology: Discussing some controversies on forest hydrology[J]. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(5): 474 - 480. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 周金星, 彭镇华, 李世东. 森林生态工程建设对水资源的影响 [J]. 世界林业研究, 2002, 15(6): 54 - 60. [ZHOU Jinxing, PENG Zhenhua, LI Shidong. The relationship between forestry eco-engineering and water resource exploitation and utilization[J]. *World Forestry Research*, 2002, 15(6): 54 - 60. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 王礼先, 张志强. 森林植被变化的水文生态效应研究进展 [J]. 世界林业研究, 1998, 11(6): 14 - 23. [WANG Lixian, ZHANG Zhiqiang. Advances in the study of ecohydrological effects from vegetation changes[J]. *World Forestry Research*, 1998, 11(6): 14 - 23. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 吕一河, 胡健, 孙飞翔, 等. 水源涵养与水文调节: 和而不同的陆地生态系统水文服务 [J]. 生态学报, 2015, 35(15): 5191 - 5196. [LÜ Yihe, HU Jian, SUN Feixiang, et al. Water retention and hydrological

- regulation: Harmony but not the same in terrestrial hydrological ecosystem services[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(15): 5191 - 5196. (in Chinese with English abstract)
- [23] 王新峰, 刘蕴, 李伟, 等. 涑源盆地水文地质特征及缺水现状分析 [J]. *南水北调与水利科技*, 2012, 10(6): 74 - 78. [WANG Xinfeng, LIU Yun, LI Wei, et al. Analysis of hydrogeological conditions and water shortage status in the Laiyuan Basin[J]. *South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology*, 2012, 10(6): 74 - 78. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 杜兵建. 拒马河流域水文地质环境现状与思考 [C]// 京津冀六区市县协同发展研讨会论文集(地质水利篇). 2015. [DU Bingjian. Current situation and consideration of hydrogeological environment in Juma River Basin[C]// *Proceedings of the Seminar on Coordinated Development of Cities and Counties in the Six Districts of Beijing, Tianjin and Hebei (Geology and Water Resources)*. 2015. (in Chinese)]
- [25] 国家林业局. 中国林业年鉴 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1949 - 2020. [National Forestry Administration. *China forestry yearbook* [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1949 - 2020. (in Chinese)]
- [26] 河北省统计局. 河北省统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 1985 - 2020. [Hebei Provincial Bureau of Statistics. *Hebei statistical yearbook* [M]. Beijing: China Statistics Press, 1985 - 2020. (in Chinese)]
- [27] 北京市统计局. 北京市统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 1980 - 2020. [Beijing Municipal Bureau of Statistics. *Beijing statistical yearbook* [M]. Beijing: China Statistics Press, 1980 - 2020. (in Chinese)]
- [28] 天津市统计局, 国家统计局天津调查总队. 天津市统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2002 - 2020. [Tianjin Bureau of Statistics, National Bureau of Statistics Tianjin Survey Team. *Tianjin statistical yearbook* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2002 - 2020. (in Chinese)]
- [29] 孟瑞芳, 杨会峰, 白华, 等. 华北地区地下水资源评价 [R]. 石家庄: 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 2021. [MENG Ruifang, YANG Huifeng, BAI Hua et al. Evaluation of groundwater resources in North China[R]. Shijiazhuang: Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, 2021. (in Chinese)]
- [30] 杨会峰, 白华. 京津冀地区地表水及浅层地下水资源调查评价 [R]. 石家庄: 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 2020. [YANG Huifeng, BAI Hua. Investigation and evaluation of surface water and shallow groundwater resources in the Beijing-Tianjin-Hebei Region[R]. Shijiazhuang: Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, 2020. (in Chinese)]
- [31] 杨会峰, 孟瑞芳, 白华, 等. 海河流域地下水资源调查评价 [R]. 石家庄: 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 2023. [YANG Huifeng, MENG Ruifang, BAI Hua, et al. Investigation and evaluation of groundwater resources in Haihe River Basin[R]. Shijiazhuang: Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, 2023. (in Chinese)]
- [32] 张家口市人民政府. 张家口经济年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 1999 - 2019. [The People's Government of Zhangjiakou Municipality. *Zhangjiakou economy year book* [M]. Beijing: China Statistics Press, 1999 - 2019. (in Chinese)]
- [33] 张家口统计局. 张家口市国民经济和社会发展统计公报 [R]. 1999 - 2021. [Zhangjiakou Municipal Bureau of Statistics. *National economic and social development statistical bulletin of Zhangjiakou* [R]. 1999 - 2021. (in Chinese)]
- [34] 张家口崇礼区国民经济和社会发展统计公报 [R]. 2020 - 2021. [National Economic and Social Development. *Statistical bulletin of Chongli district of Zhangjiakou* [R]. 2020 - 2021. (in Chinese)]
- [35] 张立彬, 王印肖. 河北林木种质资源 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2015. [ZHANG Libin, WANG Yinshao. *Tree germplasm resources in Hebei* [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2015. (in Chinese with English abstract)]
- [36] 保定市地质环境监测报告 [R]. 石家庄: 河北省地质环境监测总站, 1987 - 2020. [Geo-environment monitoring report of Baoding city[R]. Shijiazhuang: Geological Environment Monitoring Institute of Hebei Province, 1987 - 2020. (in Chinese)]
- [37] 河北省保定水文勘测研究中心/保定市人民政府水资源办. 保定市水资源公报 [R]. 保定: 保定市水利局, 2000 - 2020. [Hydrology Survey and Research Center of Baoding/ the Water Resource Administration Office of Baoding Municipality, Hebei Province. *Water resources bulletin of Baoding city* [R]. Baoding: Baoding Water Authority, 2000 - 2020. (in Chinese)]
- [38] 张磊, 孙运芳, 宋金玲, 等. 河北省水利年鉴 [M]. 石家庄: 河北省水利厅, 2002 - 2020. [ZHANG Lei, SUN yunfang, SONG, jinling, et al. *Hebei water statistical yearbook* [M]. Shijiazhuang: Department of Water Resources of Hebei Province, 2002 - 2020. (in Chinese)]
- [39] 杨继翔. 基于 Mann-Kendall 检验对近 10 年滨州市全年降水量的探究 [J]. *农业灾害研究*, 2022, 12(5): 42 - 44. [YANG Jixiang. Research on annual precipitation of Binzhou city in recent ten years based on mann-kendall test[J]. *Journal of Agricultural*

- Catastrophology, 2022, 12(5): 42 – 44. (in Chinese with English abstract)]
- [40] 曹洁萍, 迟道才, 武立强, 等. Mann-Kendall 检验方法在降水趋势分析中的应用研究 [J]. 农业科技与装备, 2008(5): 35 – 37. [CAO Jieping, CHI Daocai, WU Liqiang, et al. Mann-kendall examination and application in the analysis of precipitation trend[J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2008(5): 35 – 37. (in Chinese with English abstract)]
- [41] LI Qiang, WEI Xiaohua, ZHANG Mingfang, et al. The cumulative effects of forest disturbance and climate variability on streamflow components in a large forest-dominated watershed[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 557: 448 – 459.
- [42] 海、滦河流域水资源调查评价初步分析报告 [R]. 天津: 水利电力部天津勘测设计院, 1982. [Preliminary analysis report on investigation and evaluation of water resources in Haihe and Luanhe River Basin [R]. Tianjin: Tianjin Survey and Design Institute and Research Institute of Water Resources and Hydropower, 1982. (in Chinese)]
- [43] 孙鹏森, 马履一. 水源保护树种耗水特性研究与应用 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002. [SUN Pengsen, MA Lvyi. Study and application of water consumption characteristics of water source protection tree species[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002. (in Chinese with English abstract)]
- [44] 桂云鹏. 区域耗水核算方法与演变驱动研究——以京津冀地区为例 [D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2018. [GUI Yunpeng. Research on regional water consumption accounting method and evolution drive[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2018. (in Chinese with English abstract)]
- [45] 李洁, 任启文, 孙杰肖. 张家口崇礼区 3 种优势树种蒸腾耗水特征研究 [J]. 西北林学院学报, 2018, 33(6): 40 – 46. [LI Jie, REN Qiwen, SUN Jiexiao. Water consumption of three dominant tree species at Qingshuihe watershed of Chongli district in Zhangjiakou[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(6): 40 – 46. (in Chinese with English abstract)]
- [46] 杨良辰, 张健强, 杨新兵, 等. 华北土石山区 7 种优势乔木树种耗水分析 [J]. 中南林业科技大学学报, 2019, 39(3): 69 – 75. [YANG Liangchen, ZHANG Jianqiang, YANG Xinbing, et al. Water consumption analysis on seven dominant arbor tree species in earth and rock mountains in Northern China[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2019, 39(3): 69 – 75. (in Chinese with English abstract)]
- [47] 任启文, 忻富宁, 李联地, 等. 冀北山地华北落叶松全生长季树干液流及蒸腾耗水特征 [J]. 中南林业科技大学学报, 2018, 38(5): 91 – 97. [REN Qiwen, XIN Funing, LI Liandi, et al. Stem sap flow and water consumption of Larix principis-rupprechtii during growth season in northern mountain areas of Hebei Province[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2018, 38(5): 91 – 97. (in Chinese with English abstract)]
- [48] 刘春鹏. 河北省平山县石质山区主要造林树种耗水特征研究 [D]. 保定: 河北农业大学, 2011. [LIU Chunpeng. Water-consumption characteristics of main planting tree species in the rocky mountainous area of Pingshan County, Hebei Province[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2011. (in Chinese with English abstract)]
- [49] 河北省森林规划设计调查操作细则 [M]. 石家庄: 河北省林业调查规划设计院, 2015. [Operation detailed rules of forest planning and design and survey of Hebei Province[M]. Shijiazhuang: Forestry Survey and Planning and Design Institute of Hebei Province, 2015. (in Chinese)]
- [50] 田菲, 韩淑敏, 胡玉昆. 海河流域典型山区子流域近 34 年气候及径流变化趋势 [J]. 中国农业气象, 2009, 30(1): 60 – 65. [TIAN Fei, HAN Shumin, HU Yukun. Variance tendency of precipitation and runoff in mountain watershed of Hai River Basin in recent 34 years[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2009, 30(1): 60 – 65. (in Chinese with English abstract)]
- [51] 王海宁, 乔光建. 涞源岩溶地下水系统泉水量变化特征分析 [J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(6): 54 – 57. [WANG Haining, QIAO Guangjian. Variations of spring volume of the Karst groundwater system in the Laiyuan region[J]. South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology, 2011, 9(6): 54 – 57. (in Chinese with English abstract)]
- [52] 李志先. 利用降水量推算涞源泉流量方法的探讨 [J]. 水文地质工程地质, 1984, 11(2): 48 – 50. [LI Zhixian. Discussion on the method of calculating the flow rate of Laiyuan spring by precipitation[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1984, 11(2): 48 – 50. (in Chinese)]
- [53] 张彪, 李文华, 谢高地, 等. 森林生态系统的水源涵养功能及其计量方法 [J]. 生态学杂志, 2009, 28(3): 529 – 534. [ZHANG Biao, LI Wenhua, XIE Gaodi, et al. Water conservation function and its measurement methods of forest ecosystem[J]. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(3): 529 – 534. (in Chinese with English abstract)]