

区域应对特大干旱水源储备现状分析——以南水北调中线工程受水区为例*

王坤¹, 王宗志^{1,3**}, 万文华¹, 王文琪¹, 马睿², 姜龙^{3,4}

(1.南京水利科学研究院 水灾害防御全国重点实验室, 南京 210029;
2.水利部水利水电规划设计总院, 北京 100120;
3.长江保护与绿色发展研究院, 南京 2100983;
4.河海大学水文水资源学院, 南京, 210098)

摘要: 明晰应对特大干旱水源储备现状是构建区域水源储备体系、提升区域抗旱能力的重要基础。针对当前应对特大干旱水源储备概念界定不清与储备规模计算方法缺失的问题, 本文在辨析水源储备相关概念基础上, 界定了应对特大干旱水源储备的内涵, 构建了适用于湖库水、河道水、地下水、外调水四类水源的应对特大干旱水源储备规模计算方法。将该方法应用于南水北调中线受水区, 结果表明: 受水区应对特大干旱水源储备总规模达 122.52 亿 m³, 其中湖库水、河道水、地下水、外调水四类水源储备分别占总储备的 10.86%、15.7%、56.31%和 17.12%。受水区 20 座城市中, 仅 7 座城市的水源储备涵盖上述 4 类水源, 13 个地市的地下水储备规模占比超过了 50%, 储备水源类型单一。另有 4 座城市现状水源储备总体规模偏小且储备类型单一, 亟需进一步完善其应对特大干旱水源储备体系。

关键词: 特大干旱; 水网; 水源储备; 南水北调中线

Analysis the current status of regional water reserves for extreme drought: a case study of the water-receiving area of the middle route of the South-to-North Water Transfer Project

Wang Kun¹, Wang Zongzhi^{1,3**}, Wan Wenhua¹, Wang Wenqi¹, Ma Rui²& Jiang Long^{3,4}

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing 210029, P.R.China)
(2. MWR General Institute of Water Conservancy Resources and Hydropower Planning and Design, Beijing 100120, P.R.China)
(3. Yangtze River Protection and Green Development Institute, Nanjing 210098, P.R.China)
(4. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, P.R.China)

Abstract: Clarifying the current situation of water reserves for coping with extreme drought is a crucial foundation for constructing a regional water reserve system and enhancing regional drought resistance. To address the existing issues of unclear conceptual definitions and the lack of calculation methods for the scale of water source reserves for extreme drought, this paper proposes the definition of water source reserves for extreme drought on the basis of distinguishing the related concepts of water source reserves, and constructs a calculation method for the scale of water source reserves for four types of water sources: lake and reservoir water, river water, groundwater, and transferred water. This method was applied to the water-receiving area of the Middle Route of the South-to-North Water Transfer Project. The results show that the total water reserves for extreme drought in the water-receiving area reached 12.252 billion m³, among which the water reserves from lakes and reservoirs, rivers, groundwater, and transferred water accounted for 10.86%, 15.7%, 56.31%, and 17.12% respectively. Among the 20 cities in the water-receiving area, only 7 have water resource reserves covering all four types of water sources; groundwater reserves account for more than 50% of the total reserves in 13 cities, indicating a single type of reserve water source. In addition, 4 cities have both a small overall scale of current water source reserves and a single type of reserve, which urgently requires further improvement of their water source reserve systems to respond to extreme drought.

Key words: extreme drought; water network; water resources reserve; middle route of the South-to-North Water Diversion Project

干旱作为全球性自然灾害, 在我国尤为频发且影响深重。干旱灾害发生次数占我国所有自然灾害的 1/3^[1-2]。气候变化和“人类世”背景下, 我国干旱事件呈现频次增加、持续时间延长、影响范围扩大、强度增强的趋势, 特大干旱的发生概率持续攀升^[2-3]。特大干旱一旦发生, 将对区域供水安全、粮食安全和能源安全, 乃至经济社会稳定构成严重威胁。水源储备作为应对干旱缺水的“压舱石”, 是提升区域特大干

* 2025-07-16收稿; 2026-01-12收修改稿。

国家重点研发计划项目(2023YFC3006602)、国家自然科学基金项目(52409037)和江苏省基础研究计划自然科学基金青年基金项目(BK20230122)联合资助

**通信作者: Email: zzwang@nhri.cn

早应对能力的核心举措和战略考量^[5-6]。《中国 21 世纪初可持续发展行动纲要》已将水资源置于与石油、粮食同等的战略高度，列入国家重要资源储备体系中^[7-8]。2006 年水利部完成的《全国城市饮用水水源安全保障规划》指出全国省级行政区要建立健全水源储备体系，特别是在人口聚集、水源单一的城市。早期城市水源储备主要是为了应对水源污染、工程地质灾害等突发事件引发的缺水问题，大部分城市规划建设了应急水源地和备用水源地，同期相关研究集中在应急水源地规划、建设及管理方面^[9-10]。但对“应急水源”和“备用水源”，在定位、功能方面的区别一直比较模糊。史正涛等^[11]探讨了城市应急水源地的概念、内涵与作用，指出应急水源地具有“应急”、“备用”、“水质要求高”三层含意；“应急”强调的是时效性，要求在发生突发事件时能够在短时间内迅速取用，“备用”是指在迫不得已的情况下才可动用，“水质要求高”是指水质要满足居民基本生活用水要求。王胜军等^[12]认为“应急水源”是指为应对突发性水源污染而建设的水源，以最大限度满足城市居民生存、生活用水为目标；备用水源是指为应对干旱或周期性咸潮、季节性排涝等而导致的常用水源可取水量不足或水质无法满足要求而建设的水源。韩丽等^[13]从应对风险事件特性的差异性出发，将水源储备模式划分为应急储备、中期储备和长期储备 3 种，其中长期储备是用来应对特大干旱等长期水资源危机的储备模式，是不得已才动用的储备水量。上述研究表明，应对特大干旱的水源储备在目标定位、启用机制和时间尺度上显著区别于应急/备用水源。水源储备体系能否在应对特大干旱事件中发挥“压舱石”的作用，关键在于科学确定应对特大干旱的水源储备规模与空间布局^[14-15]，但目前尚未建立起“应对特大干旱的水源储备”（Water resource reserve for extreme drought）的科学定义及其规模的计算方法。

南水北调中线工程是国家水网的主骨架和大动脉，其受水区（京津冀豫）是我国缺水地区中经济最发达、人口最密集的地区之一，以占我国 3%的水资源量支撑了全国 14.9%的人口，13.3%的 GDP 和 14.3%的灌溉面积^[16]，水资源保障问题突出。受季风气候和复杂地理条件影响，中线受水区历史上干旱多发、重发，是明崇祯大旱、清光绪大旱等全国历史典型极端干旱事件的中心地区^[4]。此外，研究表明全球变暖背景下中线受水区干旱事件的发生频率和持续时间呈现增加趋势^[17]。因此，开展中线受水区特大干旱水源储备研究，不仅是提升区域抗旱能力的迫切需要，更是完善国家水网“纲-目-节”体系建设的重大战略命题。

因此，本研究首先辨析应对特大干旱水源储备的相关概念，进而提出不同水源应对特大干旱储备规模计算方法；最后分析南水北调中线受水区应对特大干旱的水源储备类型、规模及空间分布。研究可为区域水源储备体系建设和水网规划建设提供参考。

2. 水源储备的定义与内涵

与粮食储备类似^[18]，水源储备内涵的核心是“储而有备、以防不测”，它与保障经济社会日常用水的常规水量调蓄在功能上有着本质区别。常规水源调蓄具有平常性质，其功能在于维持日常生产、生活、生态用水；而水源储备则具有非常形式，其功能在于应对水量短缺风险、调节水源非正常缺水/断水，因此只在特殊情况下才能动用。

为应对不同的缺水风险，国家出台了应急水源地、备用水源地建设及管理的指导文件，学者们在风险事件应对中提出了应急水源储备、战略储备等概念^[12-13,19]，但各类水源储备应对的风险及其自身定义仍较为模糊，为此本研究首先对各类水源储备应对的风险类型及其特性进行梳理，在此基础上尝试给出不同水源储备的定义。

2.1 水源储备应对风险辨析

水源储备主要是为了应对不同类型的水资源短缺风险事件，一般按造成供水短缺的原因将其分为工程事故、公共卫生事件、气象干旱和极端水文事件四类。

工程事故主要指战争、地震、山洪等导致的水源破坏、供水设施损毁，从而引发供水不足或断水的风险，具有应急性、偶然性、突发性。这类事件一般影响范围较小、持续时间短。此类风险的应对要求储备水源能与常规水源快速切换，而事故的轻重缓急和灾难程度、恢复时间长短等会直接影响供水的后续保障工作。

公共卫生事件是指水源或供水设施遭受有毒化工产品、致病原微生物污染、藻类大规模增殖等水污染导致不能正常供水的风 险，具有应急性、突发性。这类事件影响范围、持续时间与导致事件发生的原因有较强相关性，但一般来说影响范围相对较小、持续时间较短，要求储备水源能与常规水源快速切换，其污染范围、程度、恢复时间长短等直接影响后续供水保障工作。

气象干旱是指某时段内，由于蒸散量和降水量的收支不平衡，水分支出大于水分收入而造成地表水分短缺的现象。现行国家标准《气象干旱等级》中采用降水量距平百分率（PA），相对湿润度指数、标准化降水指数等指数将气象干旱划分为无旱、轻旱、中旱、重旱和特旱 5 个等级。其中特旱影响程度最高，其发生将导致土壤水分持续严重不足，出现较厚干土层（大于 10cm），作物出现大面积枯死；多条河流出现断流，水资源严重不足，对生产、生活造成严重影响。

极端水文事件主要指在特定流域和一定时间尺度内,发生水文要素明显变化的、概率极小且具有一定破坏力的水文事件,包括极端洪涝、强潮汐运动、水文干旱等事件^[20]。水源储备主要应对该类事件导致的水源水量或水质问题,进而引发供水中断或不足的风险事件。其中,极端洪涝、强潮汐运动等事件持续时间相对较短,对水源要求类似工程事故、公共卫生事件。《旱情等级标准》将水文干旱分为轻度干旱、中度干旱、严重干旱和特大干旱,洪涝、潮汐运动等极端水文事件的影响范围和持续时间等风险特征与严重干旱等级以下的干旱具有相似性,而特大干旱具有出现频率低、危害程度大、预见性不强等特点,与其他极端水文事件具有很大差别^[21],为方便区分将特大干旱以下干旱事件统称为一般干旱(包括轻度干旱、中度干旱、严重干旱)。研究表明,可依据研究区历史干旱过程的综合强度指数,采用百分位数法划分干旱等级。其中,特大干旱的阈值为综合强度指数的95%分位数^[22]。

综上,本文拟按风险特征将风险事件分为特大干旱、极端水文和一般干旱、工程事故和公共卫生事件四类(详见表1)。

表1 极端情景下水资源安全风险类型及特征
Tab.1 Types and characteristics of water resource security risks under extreme scenarios

风险类型	风险原因	风险特征
特大干旱	长历时、大范围降水不足	可预见性低,水量性缺水,影响范围大(跨流域和行政区)、持续时间长(一年及以上)、水量缺口大(年降水距平小于-10%) ^[23]
极端水文和一般干旱	周期性咸潮、季节性排涝、降水不足等	具有周期性和可预见性,水量或水质性缺水,影响范围较大、持续时间较长
工程事故	地震、台风、山洪、泥石流、战争等	具有突发性、应急性,水量性缺水,影响范围、持续时间与事件与灾难程度和范围有关,总体较极端气候和水文事件小
公共卫生事件	水源和供水设施水污染	具有突发性、应急性,水质性缺水,影响范围和持续时间有限

2.2 水源储备内涵界定

应急水源储备是为应对公共卫生事件和工程事故等突发性、不可预见性、非周期性的水资源风险事件,通过建立独立应急水源地而实现的水源储备。在风险事件发生时,可利用这类水源储备快速解决居民生存和生活用水短期需要,水源的水质要求可在保证饮水安全和健康的前提下降低部分指标标准。综上,应急水源储备是指为应对突发事件导致的临时断水或供水减少,建立的水质符合基本要求、水量满足居民生存和生活用水需求、具备与常规水源快速切换运行的水源储备。

备用水源储备是为了应对一般干旱、周期性咸潮、季节性排涝等可预见性、周期性的水资源风险事件,通过建立独立备用水源地而实现的水源储备。相较于应急水源储备,备用水源储备具有更高的水质与水量要求,应具备常规水源相互切换互为备用的条件,并且备用水源储备的规模和运用时机具有可预测性。因此,备用水源储备定义为:为应对一般干旱或周期性咸潮、季节性排涝等水源水量或水质问题导致的常规水源可取水量不足或无法取用而建设,能与常规水源互为备用、切换运行的水源储备。

应对特大干旱的水源储备主要是为了应对特大干旱导致的长时期、大范围水资源短缺风险,用于补充因特大干旱导致的相对于一般干旱的更大水量缺口。在特大干旱发生发展的早期,如从轻旱发展到一般干旱,应急水源、备用水源可能就已启用完毕,难以利用上述两种水源地作为特大干旱应急水源地。由于此类干旱发生频率低、水量缺口大,单独新建水源工程效益不高,因此多通过启用非常规水源实现,如动用大型水库死库容、深层地下水或调整河湖生态用水等。该储备本质上是对常规水源地在极端条件下的潜力挖掘,依赖正常条件下对部分水量的限制使用。因此,应对特大干旱水源储备定义为:为应对特大干旱导致长时期、大范围、高强度缺水,通过突破水源常规供水限制增加特大干旱期间可供水量而形成的水源储备。

3 储备规模计算方法

根据上述关于应对特大干旱水源储备概念与内涵,本节首先识别了河道水、湖库水、外调水、地下水4种应对特大干旱水源储备类型,分别构建各类水源储备规模计算方法,各类水源储备规模计算思路如图1所示。根据第2节中定义,本研究中应对特大干旱水源储备规模,指区域从一般干旱发展到特大干旱后可启用的水量。对同一水源(如大型湖库、大江大河),一般干旱期间相较于日常供水额外利用的水量,不计入应对特大干旱储备规模;即一般干旱期间仍然存储于湖库、河道、地下含水层中的水量,才计入应对特大水源储备规模。基于上述原则分别界定并建立各类水源应对特大干旱储备规模的定义与计算方法。考虑到特大干旱条件下中小型湖库及一般河道往往趋于干涸,难以承担集中供水任务,湖库水仅考虑大型湖库作为应对特大干旱的水源储备,河道水主要考虑跨区域河流及本地大江大河。储备规模要求以水量作为量化指标。然而,现行干旱分级标准多采用降水距平、标准化降水指数(SPI)、受影响人口等指标,难

以直接对应不同干旱等级下的水量或流量阈值。因此，在实际评价中可参考水文干旱研究中的常用做法，选取一般干旱年（75%年份）作为一般干旱事件的代表^[25-26]。

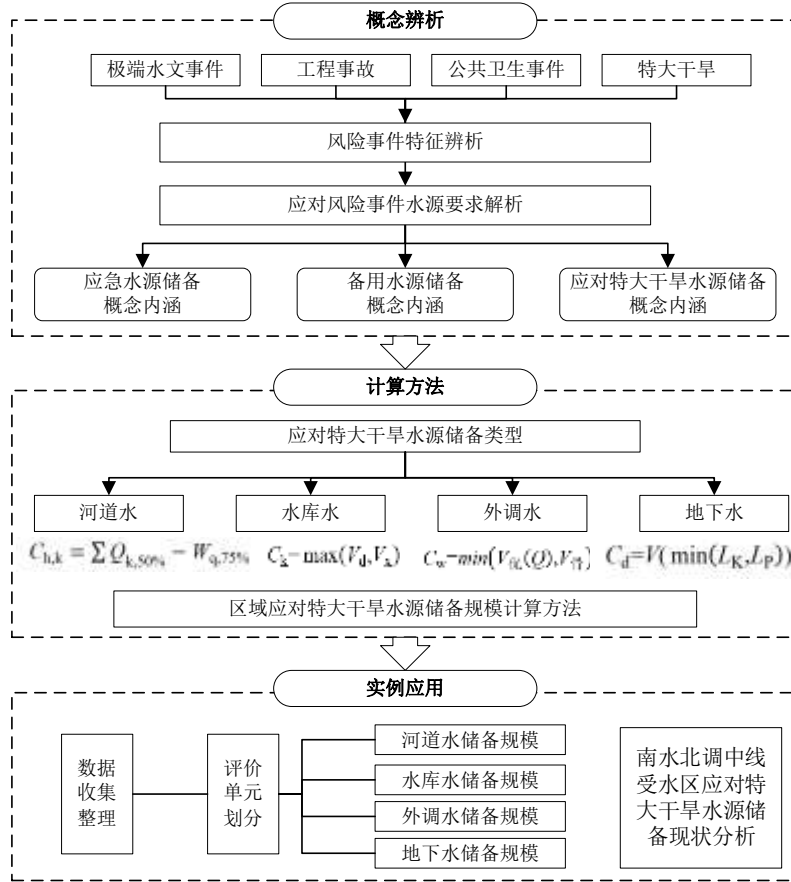


图1 研究思路图
Fig. 1 Research flowchart

3.1 水源储备分类及格局

常见水源类型可分为常规水源与非常规水源两大类：常规水源包含地表水和地下水。非常规水则涵盖再生水、集蓄雨水、微咸水、淡化海水^[24]。其中，地表水可进一步按水源类型细分为湖库水、河道水、外调水。结合特大干旱期间的供水保障核心目标（以生活用水为主），水质需满足饮用水水质基本要求，因此再生水和微咸水因水质限制不纳入应对特大干旱水源储备范畴。此外，集蓄雨水和淡化海水通常为即制即用、难以储存，不具备储备属性。综上，应对特大干旱水源储备核心类型确定为湖库水、河道水、地下水 and 外调水四类。

按水体的空间分布，可将上述四类水源储备划分为地表水储备区和地下水储备区。其中，地表水储备区主要指具备储备能力的大型湖库、骨干河道；对调水工程受水区，还应包含调水工程水源区地表水库、调水工程的调蓄库。地下水储备区指地下水开采源地相对集中，且补、径、排条件相对较好，具备应急开采潜力的区域。区域应对特大干旱的水源储备格局指地表水储备区和地下水储备区空间分布。

3.2 湖库水储备规模

根据定义，应对特大干旱水源储备主要指大规模水源工程常规供水尚未用到那部分水，对于大型湖库，可能存在两种情况：一是调节能力大、水量丰沛的水库，一般干旱年份（75%年份）最低运行水位仍高于死水位，那么则认为最低运行水位以下库容为应对特大干旱水源储备量；二是来水量较小的水库，一般干旱年份最低运行水位为死水位，其死水位以下库容为应对特大干旱水源储备量。那么，大型湖库应对特大干旱水源储备规模可由下式计算：

$$C_k = \max(V_d, V_x) \quad (1)$$

式中， C_k 为水库储备规模（万 m^3 ）， V_d 为水库死水位以下库容（万 m^3 ）， V_x 为一般干旱年份最低运行水位以

下库容 (万 m³)。

3.3 河道水储备规模

河道是重要地表水源地之一,考虑到特大干旱发生时区域内河流基本断流,因此在计算区域河流内应对特大干旱水源储备量时,仅计算入境的大江大河(七大江河及其一级支流),一般属跨省或跨水资源二级区的跨区河流。对发源于计算区域的跨区河流,应对特大干旱水源储备规模是一般干旱年内出境断面径流量减去下游地区河道外正常取用水量,其含义是在保障下游地区用水安全前提下一般干旱河道内留存水量(包括生态水量)均可用于特大干旱期间区域内抗旱(图 2a)。

$$C_h = \sum Q_{k,75\%} - W \quad (2)$$

式中, C_h 为河流应对特大干旱水源储备量 (万 m³); $Q_{75\%}$ 为一般干旱年份 (75%) 河道出境断面径流过程; W 为跨区河流下游地区河道外取用水量,下游地区取水量按正常年份取水量计。

对于流经计算区域的跨区河流,一般干旱年内出境断面的径流受上游河道来水 Q_k 和区域内用水共同影响,在一定经济社会发展水平和人口情况下,一般干旱年内用水量是确定的,则河道出境断面径流 ($Q_{k,75\%}$) 主要由跨区河流来水决定:

$$\sum Q_{k,75\%} = \sum Q_k - W_{q,75\%} \quad (3)$$

式中, Q_k 为受水区一般干旱年内,跨区河流进入计算区域断面的来水过程,理论上该值是随机值; $W_{q,75\%}$ 是一般干旱年内本区域从跨区河流取用的总水量。已有研究表明,跨区河流上中下游不同地区同时发生干旱的概率较低^[27-29],为简化计算,入境断面来水可采用平水年 (P=50%) 的来水,则跨区河道应对特大干旱的水源储备可由下式计算:

$$C_{h,k} = \sum Q_{k,75\%} - W_{qd} = \sum Q_{k,50\%} - W_{q,75\%} - W_{qd} \quad (4)$$

其中, $C_{h,k}$ 为跨区河道应对特大干旱水源储备量; $Q_{k,50\%}$ 为 P=50% 年份跨区河流进入受水区断面的流量过程; W_{qd} 为正常年份河道下游地区取用水量,有明确分水方案的可按正常年份引水指标计。

对区域内河流,应对特大干旱水源储备量是指一般干旱年 (75% 年份) 河道内径流量总量,其含义是一般干旱年留存在河道内的水量 (包括生态水量) 均可用于应对特大干旱,可按下式计算储备规模。

$$C_h = \sum Q_{75\%} \quad (5)$$

式中, $Q_{75\%}$ 为本区域一般干旱年 (75% 年份) 河道径流过程。由于年径流量是随机变量,因此 C_h 也可以从年径流频率曲线上统计得到 (图 2b)。

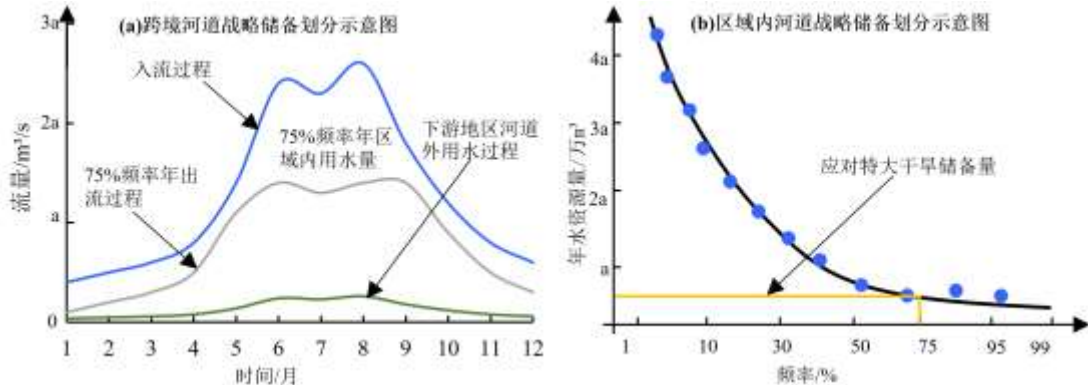


图 2 河道应对特大干旱水源储备规模示意图

Fig.2 Schematic diagram of river channel water reserve scale for coping with extreme drought

3.4 地下水储备规模

对于地下水,应对特大干旱水源储备空间主要由地下水控制开采水位和一般干旱年内地下水最低水位决定,取两者中较低的作为地下水储备空间计算的基础(图 3),则地下水储备规模计算方法如下式:

$$C_d = V(\min(L_K, L_P)) \quad (6)$$

式中, C_d 为地下水水源地应急储备规模 (万 m³), L_K , L_P 分别为地下水开采控制水位和一般干旱年内地下水最低水位, V 为相应水位下地下水水源地最大可开采规模。

3.5 外调水储备规模

外调水储备规模是指在保障水源地供水安全前提下,通过水源地优化调度或联合调度,骨干调水工程能够增供的水量。根据定义可知,外调水储备规模主要受两个因素影响,一是水源地来水情况,即受水区

干旱时水源区在保证自身供水前提下还可以增供的水量，大量研究表明，大型跨流域调水工程调水区 and 受水区同旱的概率很小^[15,17,30]，因此认为受水区发生特大干旱情况下，调水工程能保证供水；二是骨干调水工程供水能力，即相较于常规调水量，骨干调水工程满负荷运转能增加的调水量，二者取小值。理论规模计算如下式：

$$C_w = \min(V_{\text{优}}(Q), V_{\text{骨}}) \quad (7)$$

式中， C_w 为外调水储备规模，万 m^3 ； $V_{\text{优}}(Q)$ 指水源区来水为 Q 情景下，优化调度方案较常规调度方案可增加的外调水量，万 m^3 ； $V_{\text{骨}}$ 则指骨干调水工程调水能力与常规调水量之差，万 m^3 。

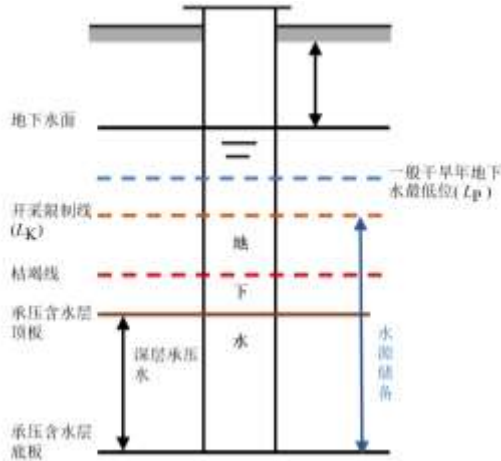


图3 地下水应对特大干旱水源储备规模示意图

Fig.3 Schematic diagram of groundwater water reserve scale for coping with extreme drought

4 南水北调中线受水区应对特大干旱水源储备现状

4.1 研究区域与数据

南水北调中线工程从汉江流域丹江口水库调水，途径湖北、河南、河北，最后到达北京团结湖，受水区包括北京、天津、河南、河北四省的 20 个地市，涉及黄、淮、海三大流域。区域内地势整体西高东低，东部以广大平原为主。截至 2015 年，区域内已建成大中水库 80 座，大部分水库坐落在西部山区（图 4）。



图4 研究区概况

Fig.4 Overview of the study area

为定量计算区域内应对特大干旱的水源储备现状，本研究根据水库、入境河道、地下水和外调水储备量计算需求，收集了区域内大型水库分布与库容参数数据、主要河流径流数据、各市地下水调查数据、南水北调中线工程设计供水能力以及通水以来各口门实际分水量数据等。其中河流径流数据、地下调查数据来源于第三次全国水资源调查评价成果；南水北调设计供水能力和各口门实际分水量数据来自南水北调中线干线工程建设管理局 2015~2020 年上报水利部的《南水北调中线一期工程年度水量调度工作总结报告》；河南、河北沿黄各市分水量数据来自《河南省黄河水资源节约集约利用专项规划》等报告。需要说明的是，由于河道和外调水储备量与干旱历时相关，相关研究中中线受水区特大干旱历时在一年以上，为使计算结果具有代表性，本文计算中统一按干旱历时一年计算。

4.2 地表水储备现状

利用收集到研究区大型水库库容参数，根据式（1）计算了各个大型水库应对特大干旱储备规模。图 5 展示了现状条件下中线受水区湖库应对特大干旱水源储备总规模，受水区 20 地市湖库应对特大干旱水源储备规模为 13.88 亿 m^3 ，储备规模最大的为河北石家庄市（4.68 亿 m^3 ），周口市、濮阳市、漯河市、许昌市、衡水市、廊坊市湖库应对特大干旱水源储备量为 0，主要是因为这些城市位于受水区东部平原区，缺少建设大型水库的条件。

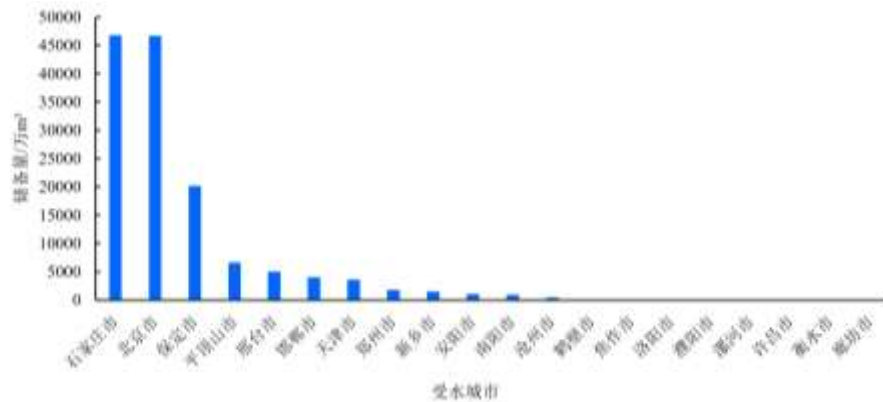


图 5 中线受水城市水库应对特大干旱水源储备量

Fig.5 Water reserve volume of the Mid-Route of the South-to-North Water Diversion Project Water-Receiving urban reservoirs for coping with extreme drought

在中线受水区河道应对特大干旱水源储备计算中，考虑到发生特大干旱时大部分河流已经干涸，为简化计算，仅考虑一级河流作为分析对象。由于淮河仅上游小部分河流位于受水区，暂不考虑，因此仅以黄河这一入境河流作为分析对象。根据式（3），利用再分析数据计算了现状工程条件下，黄河入河南省断面历年水资源量（1902-2015，详细过程见文献[31]），并扣除了河南、河北、山东正常年份引黄指标，分别为 55.4 亿 m^3 、20 亿 m^3 、70 亿 m^3 。如图 6 所示，扣除河南、河北、山东三省正常年份引黄指标后，黄河入中线受水区断面的年均剩余径流量为 84.12 亿 m^3 。然而，在 50%频率年份（即平水年），流出受水区断面的水量仅为 17.18 亿 m^3 。根据相关规划和文件，统计了受水区沿黄各市引黄比例（表 2），作为特大干旱前期间各市占用黄河储备量，并将 17.18 亿 m^3 储备规模按该比例分配给受水区各个市。如表 2 所示，受水区 20 个城市中，14 个城市有河道储备，6 个城市无河道储备，其中有河道储备量最大的为洛阳市，达到 3.76 亿 m^3 。

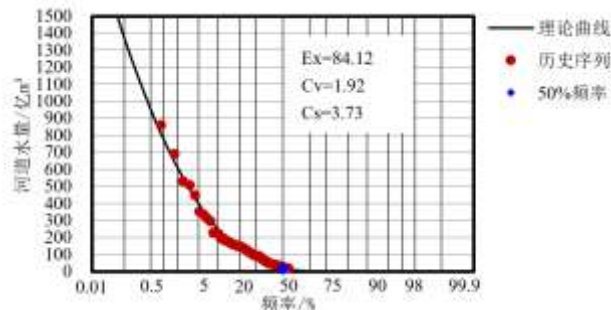


图 6 扣除河南、河北、山东正常年份引黄指标后黄河入中线受水区断面历年水量频率分布，蓝色点为 50%频率年份
Fig.6 Interannual water volume frequency distribution at the mid-line water-receiving area section of the yellow river after deducting normal-year yellow river water diversion quotas in Henan, Hebei, and Shandong provinces (blue dots representing 50% frequency years)

表2 中线受水区各市河道储备规模
Table 2 River Channel reserve scale of cities in the mid-line water-receiving area

省	市	比例	黄河储备量 (亿 m ³)	省	市	比例	黄河储备量 (亿 m ³)
河南	郑州市	0.11	1.95	河南	平顶山市	0.02	0.31
	新乡市	0.16	2.73	北京	北京市	0.00	0.00
	安阳市	0.02	0.36	天津	天津市	0.00	0.00
	南阳市	0.00	0.00	石家庄市	0.00	0.00	
	鹤壁市	0.00	0.00	保定市	0.00	0.00	
	焦作市	0.08	1.31	沧州市	0.16	2.73	
	周口市	0.01	0.17	河北	衡水市	0.08	1.46
	濮阳市	0.12	2.08	廊坊市	0.04	0.62	
	漯河市	0.00	0.00	邢台市	0.11	1.95	
	许昌市	0.01	0.16	邯郸市	0.20	3.36	

根据国务院正式批复的《南水北调工程总体规划》，中线工程渠首引水能力为 350~420 m³/s，满负荷运行状态相应的年调水量为 132 亿 m³。2014 年通水以来，南水北调中线年调水量逐年攀升，2023 年总调水量达到 85.37 亿 m³，即将接近一期规划年调水量 95 亿 m³，为便于计算中线工程常规调度方案年调水按 95 亿 m³ 计。因此，对中线受水区来说，骨干工程调水工程调水能力与常规调水量之差为 37 亿 m³。文献 [32] 调算了现状工程条件下和引江补汉工程通水后中线工程可调水量，以及优化后可调水水量，结果表明现状工程和调度方案下 90.2 亿 m³，通过引江补汉工程补水和优化调度，可增加陶岔渠首年均引水量 25.8 亿 m³。则优化调度方案较常规调度方案年均可增加的外调水量为 21 亿 m³。根据式 (7) 计算得到中线受水区的外调水储备规模为 21 亿 m³。为了计算中线受水区各市的外调水储备规模，首先根据中线工程运行以来受水区各省水量分配结果，将总储备量分配给受水区四省，然后根据河南、河北各市 95% 年份缺水量，按比例将两省储备量分配给各个地市。图 7a 展示了中线受水区现状地表水应对特大干旱水源储备规模，20 个地市均有外调水储备，规模在 0.15-2.74 亿 m³ 之间，其中北京市外调水规模最大，南阳市最小。外调水储备规模超过 2 亿 m³ 有 3 个市，分别是北京、天津和郑州，前两个作为省级行政区，占南水北调分水比例较大，郑州市在全省遭遇 95% 来水年份时缺水量占河南省中线受水城市的 27%，其储备量也比较大。对比来说，河北省各市外调水储备量大于河南省。

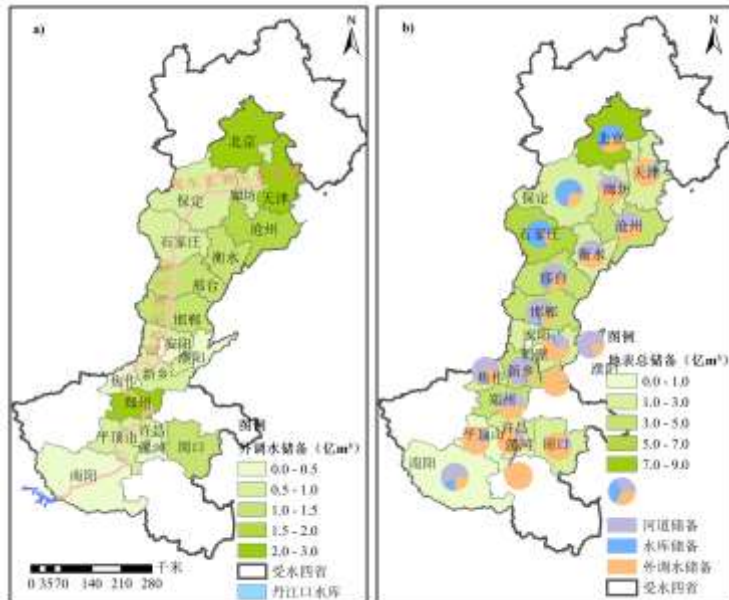


图7 中线受水区外调水储备与地表水总体储备格局。a) 外调水储备，b) 地表水总体储备格局
Fig.6 Reserve patterns of external and surface water in the SNWDP Mid-Route water receiving area. (a) External reserves; (b) Surface water reserves

图 7b 展示南水北调中线受水区地表水储备格局, 20 个地市地表水总储备规模为 53.53 亿 m^3 , 其中北京、石家庄 2 市地表水总储备规模超过 5 亿 m^3 , 郑州、沧州、邯郸市地表总储备规模超过 4 亿 m^3 , 总储备规模在 3~4 亿 m^3 、2~3 亿 m^3 、1~2 亿 m^3 和 0~1 亿 m^3 的城市数量分别为 2 座、4 座、5 座和 4 座。从水源储备组成上看, 受水区仅 7 座城市同时具备存在河道水、湖库水和外调水三种储备方式, 主要分布在受水区西侧靠近黄河两岸地区, 分别是新乡、邢台、郑州、邯郸、安阳、南阳、沧州, 且河道储备规模远大于水库储备规模; 6 座城市仅有水库水与外调水储备, 包括许昌、石家庄、衡水、焦作、廊坊、周口; 6 座城市仅有湖库水与外调水, 北京、天津、石家庄、保定、鹤壁、平顶山; 此外漯河市仅有外调水这一种应对特大干旱水源储备水源。

4.3 地下水储备现状

图 8a 展示了南水北调中线受水区各市地下水应对特大干旱水源储备规模, 21 个市均有地下水储备, 规模在 0.6~12 亿 m^3 之间, 其中北京市地下水储备规模最大、鹤壁市储备规模最小。总体来看, 受水区各市地下水储备规模较小, 仅北京、石家庄市、保定市、南阳市、焦作市 5 市地下水储备规模超过了 4 亿 m^3 , 占 24%; 储备规模在 2~4 亿 m^3 之间的城市有 11 个, 占比达到了 50%, 剩余 4 市地下水储备规模小于 2 亿 m^3 主要分布于河南省和河北省中部。

4.4 总体储备格局

受水区 20 座城市应对特大干旱水源储备总规模为 122.52 亿 m^3 , 其中湖库水、河道水、地下水、外调水四类水源储备分别占总储备的 10.86%、15.7%、56.31% 和 17.12%。图 8b 展示了受水区各市地表地下水总储备规模及其所占比例的分布。现状条件下, 北京市总储备规模最大, 达到了 19.41 亿 m^3 , 与文献 [13] 中计算的“20 亿 m^3 长期储备 (非极端情况下不动用)”相近; 储备规模最小的为鹤壁市, 仅 1.08 亿 m^3 , 应对特大干旱水源储备规模超过 10 亿 m^3 的仅石家庄和北京两座城市, 规模在 5~10 亿 m^3 的有 9 座城市。从应对特大干旱水源储备组成来看, 大部分省市以地下水储备为主, 13 座城市地下水储备占比超过了 50%; 天津、郑州、濮阳、衡水、沧州、邢台、邯郸地下水储备规模在 20%~50% 之间, 这 7 座城市中仅天津以外调水为主要储备类型, 发生特大干旱时严重依赖中线供水; 其余 6 市则主要以黄河河道水储备为主, 发生特大干旱时黄河来水对区域抗旱保供有重大影响。对比来看, 郑州、安阳、南阳、新乡、邢台、邯郸、沧州 7 市应对特大干旱水源储备水源组成包括了湖库水、河道水、地下水、外调水四类水源, 总规模在 4.2~7.14 亿 m^3 之间, 属总量相对较大、储备类型丰富的地区, 储备体系较为完备; 北京、石家庄、保定和焦作 4 市虽均具备 3 类水源储备, 但总体储备量相对较大, 应对特大干旱的能力较强; 鹤壁、平顶山、周口、漯河 4 市总储备规模不足 3 亿 m^3 , 且地下水储备规模占比超过了 85%, 属于总体规模小、且储备方式单一的省市, 亟需进一步完善储备体系。

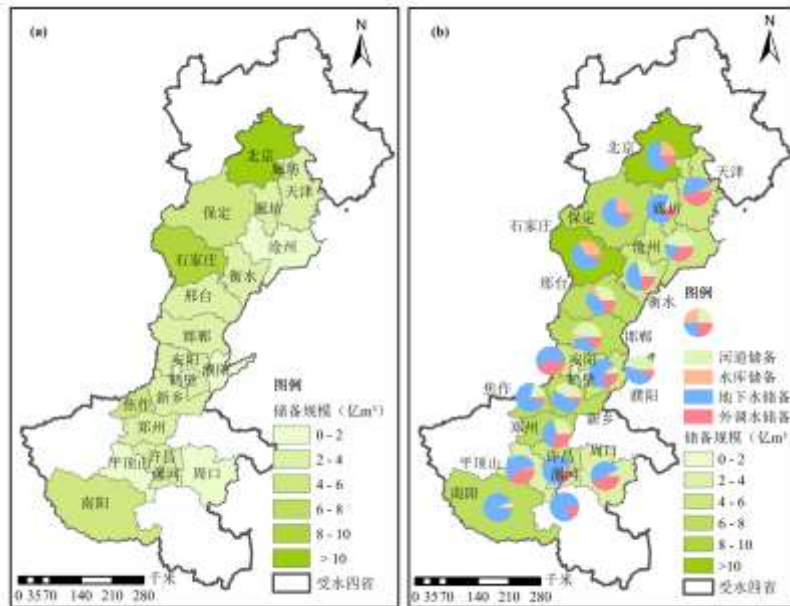


图 8 现状条件下中线受水区地下水与总储备格局: (a) 地下水储备, (b) 总体储备格局

Fig. 8 Water reserve patterns of groundwater and total resources in the SNWDP Mid-Route water receiving area (Current Scenario): (a) Groundwater; (b) Total reserves

5 结论与展望

本文构建了区域应对特大干旱的水源储备规模测算方法,并以南水北调受水区为例,系统评价了湖库水、河道水、地下水以及外调水等多水源应对特大干旱的储备规模及其空间分布特征。研究将应对特大干旱水源储备界定为:为应对特大干旱导致长时期、大范围、高强度缺水,通过突破水源常规供水限制增加特大干旱期间可供水量而形成的水源储备;明确了区域应对特大干旱的四类主要水源储备形式及其内涵:湖库水储备规模主要指死水位或多年运行最低水位以下库容;河道水储备规模指一般干旱条件下河道内尚未利用的水量(含生态水量);地下水储备规模由地下水控制开采水位和一般干旱年内最低水位共同约束,其较小值以下的地下水蓄水量为地下水储备规模;外调水储备规模是在保障水源区供水安全前提下,通过水源区优化调度或联合调度,调水工程较常规调水能够增供的水量。在此基础上,建立了不同水源应对特大干旱储备规模定量计算方法,并将其应用于南水北调中线受水区 20 个地市应对特大干旱水源储备现状评估。结果表明,中线受水区储备规模较大,总量达 122.52 亿 m^3 ,其中地下水储备规模最大占比超过 50%,是应对特大干旱的主要水源。然而,受水区内部差异显著,部分地市存在储备规模偏小且储备结构单一的问题,仅 7 座城市具备 4 类水源储备,鹤壁、平顶山、周口、漯河等城市面临“规模不足-结构单一”的双重约束,亟需完善多水源协同的水源储备体系。

需指出的是,河道水与外调水两类水源储备规模,受特大干旱期间河道及调水工程水源区天然来水影响较大,理论上具有较强不确定性,其准确计算需要大量径流监测和工程调度资料,是当前储备量计算中的难点^[33]。受研究区复杂性和资料限制,本文在实例应用中采用年均值、50%水平年等特征值进行简化计算,相关结果仍有进一步细化空间,未来有必要对河道水与外调水储备规模开展更高分辨率和情景化研究。此外,特大干旱情景下,各类水源储备的运用可能面临工程、管理和生态等约束,如地下水储备利用依赖深层开采井及配套供水设施;湖库储备虽具备较好可操作性,但受取水口最低水位限制,部分湖库仍需技术改造;河道储备利用相对便利,但需协调上下游用水关系,如黄河可建立特大干旱情景下的应急分水机制;外调水储备利用的工程条件成熟、调度灵活,需妥善处理水源区与受水区之间的利益协调,完善相应的储备启用预案。与此同时,深层地下水、河流生态流量的利用可能会带来严重的生态环境问题,如何在保障供水安全的同时实现水源储备分级、分期、科学启用是未来区域特大干旱应对需要研究的关键问题。

6 参考文献

- [1] XIA Jun, CHEN Jin, SHE Dunxian. Impacts and countermeasures of extreme drought in the Yangtze River Basin in 2022. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2022, 53(10): 1143-1153. [夏军,陈进,余敦先.2022 年长江流域极端干旱事件及其影响与对策.水利学报, 2022, 53(10): 1143-1153.]
- [2] 张建云, 王国庆. 气候变化对水文水资源影响研究. 北京: 科学出版社, 2007.
- [3] IPCC. AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis, 2021.
- [4] QU Yanping, LYU Juan, ZHANG Weibing, et al. Progress in research on historical extreme drought in China. *Advances in Water Science*, 2018, 29(02): 283-292. [屈艳萍,吕娟,张伟兵,等.中国历史极端干旱研究进展.水科学进展, 2018, 29(02): 283-292.]
- [5] LIU Xianfeng, FU Bojie. Drought impacts on crop yield: Progress, challenges and prospect. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(11): 2632-2646. [刘宪锋,傅伯杰.干旱对作物产量影响研究进展与展望.地理学报, 2021, 76(11): 2632-2646.]
- [6] JIANG Yunzhong, YAN Ziqi, JIA Shaofeng, et al. Initiatives on comprehensive response to severe drought in the context of global changes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2023, 54(03): 347-357. [蒋云钟,严子奇,贾绍凤,等.全球变化背景下特大干旱综合应对研究框架.水利学报, 2023, 54(03): 347-357.]
- [7] WAN Peng, LI Yi, HE Yu. Scheme study and engineering design of regional emergency water supply system. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(04): 46-50. [万鹏,李毅,贺雨.区域应急供水系统方案研究与工程设计.中国给水排水, 2021, 37(04): 46-50.]
- [8] WANG Xiaohong, GAO Linna, SUN Chong. Indicator system of security assessment for emergency urban drinking water sources in China. *Environmental Protection*, 2016, 44(21): 17-23. [王晓红,高丽娜,孙翀.我国城市应急备用水源地建设安全评价指标体系研究.环境保护, 2016, 44(21): 17-23.]
- [9] CAO Baoming, HUANG Haoshu, ZHAO Xia. The evolutionary logic, practical contradictions and optimization path of China's Food Reserve System. *Issues in Agricultural Economy*, 2022, (11): 25-33. [曹宝明,黄昊舒,赵霞.中国粮食储备体系的演进逻辑、现实矛盾与优化路径.农业经济问题, 2022, (11): 25-33.]
- [10] XU Lingyan, WANG Huimin, MA Xianying, et al. Study on framework and adaptive strategies of drought disaster risk management in Yunnan Province. *Areal Research and Development*, 2013, 32(02): 103-108. [许玲燕,王慧敏,马显莹,等.云南旱灾风险管理框架及对策研究.地域研究与开发, 2013, 32(02): 103-108.]
- [11] SHI Zhengtao, LIU Xinyou. Urban water security and emergency water source construction: A Case Study of Kunming City. *Urban Problems*, 2008(02): 24-28. [史正涛,刘新有.城市水安全与应急水源地建设——以昆明市为例.城市问题, 2008(02): 24-28.]
- [12] WANG Shengjun, QIE Yanqiu, YANG Li, et al. Research of urban water supply emergency and alternate water resources planning and design standard. *Water & Wastewater Engineering*, 2020, 56(05): 101-104. [王胜军,戚燕秋,杨力,等.城市供水应急和备用水源规划设计标准研究.给水排水, 2020, 56(05): 101-104.]
- [13] HAN Li, ZHENG Ke, HAN Zhonghua, et al. Strategic water reserve utilization model and countermeasures for Beijing. *Water Resources Planning and Design*, 2024(02): 1-6. [韩丽,郑科,韩中华,等.北京市水资源战略储备动用模型及对策措施.水利规划与设计, 2024(02): 1-6.]
- [14] WANG Yu, PENG Shaoming, ZHENG Xiaokang, et al. Key scientific issues of dealing with extreme dry events in the Yellow River

- basin under the layout of water network. *Advances in Water Science*, 2024, 35(01):11-23. [王煜,彭少明,郑小康,等.水网布局下黄河流域应对极端枯水的关键科学问题. *水科学进展*,2024,35(01):11-23.]
- [15] ZHANG Lu, LU Yijie, ZHANG Zengxi, et al. Risk assessment of drought in the source and receiving areas of the middle route of South-to-North Water Transfer Project. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2022, 20(6):1148-1157. [张璐,卢一杰,张增信,等.南水北调中线水源区和受水区干旱遭遇风险评估. *南水北调与水利科技(中英文)*,2022, 20(06): 1148-1157.]
- [16] YANG Mingming, ZHAO Yong, QIN Changhai, et al. Comprehensive benefit evaluation and prediction for Phase I of the East and Middle Routes of South-to-North Water Diversion Project. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2025,56(05):659-671. [杨明明,赵勇,秦长海,等.南水北调东、中线一期工程综合效益评估及预测. *水利学报*, 2025, 56(05): 659-671.]
- [17] LIU Xiaomang, LUO Yuzhou, YANG Tiantian, et al. Investigation of the probability of concurrent drought events between the water source and destination regions of China's water diversion project. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42, 8424–8431.
- [18] DUAN Jian, WANG Weiting, CHEN Jing, et al. Scales and spatial distribution patterns of grain reserves on the Qinghai-Tibet Plateau. *Progress in Geography*, 2023, 42(10): 1869-1881. [段健,王维婷,陈静,等.青藏高原区域粮食储备规模测算与粮库空间选址研究. *地理科学进展*,2023,42(10):1869-1881.]
- [19] ZHANG Le, WANG Huimin. The cooperative stockpile model of emergency water resources for extreme drought events. *Resources Science*, 2014,36(02):342-350. [张乐,王慧敏,佟金萍.干旱灾害应急水资源合作储备模型研究. *资源科学*, 2014, 36(02):342-350.]
- [20] QIN Guoshuai. Impact of extreme hydrological events on water security and countermeasures. *Water Resources Development Research*, 2022, 22(9): 10-13. [秦国帅. 极端水文事件对水安全保障的影响及应对措施. *水利发展研究*, 2022, 22(9): 10-13.][21] QU Yanping, CHEN Xixi, GAO Hui, et al. An analysis of distribution characteristics of agricultural drought disaster risks in China. *China Water Resources*, 2023, (08):23-27. [屈艳萍,陈茜茜,高辉,等.我国农业干旱灾害风险评估及分布特征分析. *中国水利*,2023,(08):23-27.]
- [22] XIE Wusan, ZHANG Qiang, LI Wei, et al. Identification and assessment of regional drought processes of Middle Route Project of South-to-North Water Diversion Project[J]. *Meteorological Monthly*, 51(10): 1203-1214. [谢五三,张强,李威,等.南水北调中线工程区域性干旱过程识别与评估[J]. *气象*,2025,51(10):1203-1214.]
- [23] TAN Xuming. Study of major drought catastrophes in China in recent 500 years. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2003, 23(02): 77-83. [谭徐明.近 500 年我国特大旱灾的研究. *防灾减灾工程学报*, 2003, 23(02):77-83.]
- [24] MA Tao, LIU Jiufu, PENG Anbang, et al. Progress in development and utilization of non-conventional water resources in China. *Advances in Water Science*, 2020, 31(06): 960-969. [马涛,刘九夫,彭安帮,等.中国非常规水资源开发利用进展. *水科学进展*, 2020,31(06):960-969.]
- [25] ZHANG Zhanyu, SI Han, FENG Baoping, et al. An optimal model for agriculture water and soil resources configuration in water shortage irrigation area. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2014, 45 (4): 403-409. [张展羽,司涵,冯宝平,等. 缺水灌区农业水土资源优化配置模型. *水利学报*, 2014, 45(4): 403-409.]
- [26] HUANG Li, FAN Xingke. Predicting the water requirement of dwarf planted apple sapling in northern Shaanxi. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(6): 200-207. [黄丽,范兴科. 陕北矮化栽培山地苹果幼树需水规律预判. *水土保持学报*, 2018, 32(6): 200-207.]
- [27] PENG Gaohui, SONG Bao, MA Jianqin, et al. Modeling of coupled theory of runs and 2-D copula functions and its application. *YELLOW RIVER*, 2023,35(9):8-11. [彭高辉,宋宝,马建琴等. 游程理论与二维 Copula 函数的耦合建模及应用. *人民黄河*, 2023,35(9):8-11.]
- [28] HUANG Tao, XU Ligang, FAN Hongxiang, et al. Temporal and spatial variation characteristics and the evolution trends of droughts in the Yangtze River Basin. *Research of Environmental Sciences*, 2018, 31(10): 1677-1684. [黄涛,徐力刚,范宏翔,等. 长江流域干旱时空变化特征及演变趋势. *环境科学研究*, 2018, 31(10): 1677-1684.]
- [29] CHEN Huopo, Sun Jianqi. Changes in drought characteristics over China using the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 2015, 28(13): 5430-5447.
- [30] RUAN Yuli, ZHANG Jianyun1, WANG Yueyang, et al. Analysis of precipitation wetness-dryness encountering and its uncertainty in the Yangtze River and Yellow River basins. *Advances in Water Science*, 35(6): 865-876. [阮俞理,张建云,王乐扬等. 长江和黄河流域降水丰枯遭遇及不确定性分析. *水科学进展*, 35(6): 865-876.]
- [31] WANG Kun, WANG Zongzhi, XU Jing, et al. Floodwater utilization potential assessment of China based on improved conceptual model and multi-reservoir basin assessment method. *Journal of Hydrology*. 2023,625, 129921.
- [32] XU Jijun, ZHANG Xiaoqi, ZHOU Tao, et al. Analysis on the adjustable water volume of the Middle Route of South-to-North Water Transfers Project after the implementation of the water diversion from Three Gorges Reservoir to Hanjiang River. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2023, 21(4): 790-799. [许继军,张晓琦,周涛,等. 引江补汉工程实施后的南水北调中线水源工程可调水量分析. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2023, 21(04): 790-799.]
- [33] LI Zhengrong, PENG Tao, LIN Qingxia, et al. Hydrological drought evolution and its response to meteorological drought in the middle-lower reach of the Yangtze River triggered by Three Gorges Reservoir. *Journal of Lake Sciences*, 2022,34(05):1683-1696. [李峥嵘,彭涛,林青霞,等.三峡水库影响下长江中下游水文干旱演变及对气象干旱的响应. *湖泊科学*,2022,34(05):1683-1696.]