

文章编号: 2097-096X(2022)-06-0485-07

中华水塔面临的挑战与应对战略

王 浩, 王 芳, 严登华, 赵 勇

(中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘要: 传统的“中华水塔”范围是指青藏高原东部黄河、长江、澜沧江的三江源地区, 多年平均产水量为 499 亿 m^3 , 而整个青藏高原面积 257 万 km^2 , 多年平均产水量约 7780 亿 m^3 , 孕育了流出高原的大中型河流 20 条。受气候变化及人类活动影响, 青藏高原冻土退化、冰川消融和蒸发增加, 对资源、生态与环境等造成重大影响, 保护好“中华水塔”是“国之大者”。本文提出将“中华水塔”范围由三江源扩展到整个青藏高原, 有助于推进青藏高原生态保护的關鍵工程建设, 以遏制水源涵养功能的加速退化; 有助于构建涵盖雅鲁藏布江、怒江、澜沧江的国家水网, 以应对中低海拔冰川消融和冻土释水消失后北方地区的缺水危机; 有助于加强青藏高原地区饮用水安全保障, 以应对生源要素改变与病原微生物进入水体带来的水环境风险。

关键词: 中华水塔; 水资源; 气候变化; 青藏高原; 生态退化

中图分类号: TV213

文献标识码: A

doi: 10.13244/j.cnki.jiwhr.20220063

根据全国第二次水资源调查评价结果, 我国多年平均水资源量为 2.84 万亿 m^3 。我国人均水资源是世界平均水平的 1/4, 汛期非汛期水量比为 65:35 的时间不均匀性, 400 mm 降水线形成 7:93 的空间不均匀性, 以及水资源与矿产、土地等资源分布的不匹配性, 已经成为制约我国经济社会发展的重要瓶颈。

水往低处流, 水的落差是水资源开发利用的先决条件。“中华水塔”海拔高, 具备作为全国水资源调配水源的先天条件。

“中华水塔”一词最早应该出自青海省的水利同仁, 1993 年青海省水利厅李乃昌在一篇有关农村电气化的文章中用“中华水塔”来描述青海省水资源的丰富性^[1], “中华水塔”由此正式见诸报端。1990 年代中后期, 青藏高原大旱, 生态退化, 黄河源头断流, 江河源区的保护被提上日程, “中华水塔”见诸于报刊杂志增多。与此同时, “九五”期间国际河流的开发研究也提出青藏高原国际河流域的水资源开发对我国长期考虑的“南水北调”工程和中南半岛五国的社会经济和生态环境影响广泛, 属于中华水塔保护的主体部分^[2]。2000 年三江源自然保护区正式成立, 随后三江源保护一、二期工程建设, 使得“中华水塔”成为三江源的代名词。三江源地区多年平均水资源量 499 亿 m^3 ^[3], 是我国 15 个省级行政区经济社会发展的重要水源, 号称“中华水塔”名副其实。但是, 在全球气候变化带来水资源问题凸显的今天, 需要未雨绸缪, 用更广的视角重新定位“中华水塔”。

1 “中华水塔”定位

青藏高原东部是黄河、长江、澜沧江三江源的发祥地, 三江源地区多年平均产水量为 499 亿 m^3 , 是目前界定的“中华水塔”范围(见图 1); 高原南部发育的怒江、雅鲁藏布江、恒河、印度河、阿姆河等五条亚洲大河, 多年平均水资源总量约 4100 亿 m^3 ^[4]; 高原北部的喀喇昆仑山和祁连山的阴坡孕育了塔里木盆地南部与河西走廊 8 条中小型河流, 虽然水资源只有 295 亿 m^3 , 但是构成了我国重要的战略绿洲廊道; 同时, 占青藏高原面积近一半的内陆区, 发育构造型湖泊 50 900 km^2 ^[5], 在已查清的

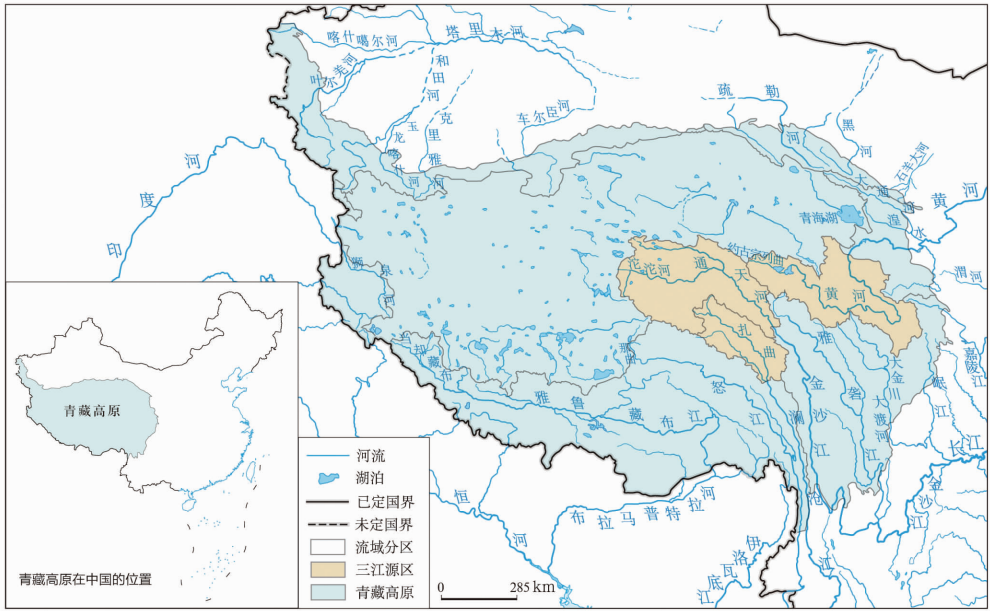
收稿日期: 2022-04-06; 网络首发时间: 2022-10-08

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1788.TV.20220930.1055.001.html>

作者简介: 王浩(1953-), 中国工程院院士, 主要从事水文水资源研究。E-mail: wanghao@iwhr.com

湖泊中，淡水和盐度小于 10 g/L 微咸水湖^[6] 面积占 28%，没有盐分积累，说明这些湖泊不是水循环的最终汇集区，初步计算当地水平衡有一定的余量，根据陈建生的研究，这部分水资源参与深层水循环补给流域外的其他地区^[7]。

青藏高原面积 257 万 km²，多年平均产水量约 7780 亿 m³，孕育了流出高原的大中型河流 20 条，决定了中国近 2/3 地区的国民经济和社会发展；同时，青藏高原在气候变化情势严峻的今天，冻土退化、冰川消融和蒸发增加引发水循环巨变，由此产生的资源、生态与环境问题将会对中国产生深远的影响。强调青藏高原为“中华水塔”，利责同担，加强青藏高原生态的有效保护，才有水资源的可持续利用，才可保障国际河流水资源的利益共享。



审图号：GS 京(2022)0972 号

图 1 中华水塔及其水系分布图

2 问题与风险

2.1 陆域生态的水源涵养功能正在加速退化

2.1.1 植被退化现状 青藏高原典型的陆域植被是高寒草甸，广泛分布于青藏高原东部及其周围山地，分布面积约 70 万 km²。高寒草甸特有的毡状根系和以腐殖质为主的土壤层，是江河源头涵养水源的关键层。作为世界屋脊的青藏高原对气候变化的响应十分敏感，号称北极、南极之后的第三极，近 40 年来年际增温速率为 0.70 ℃/10a，是全球平均水平的三倍^[8]。增温对植被的影响，主要是冻土区释水使根际土壤含水量减少，土壤碳氮代谢快，植物生长季提前并生长加速，土壤二氧化碳排放量大，土壤有机质库存损失增强，以莎草科为优势种的高寒草甸发生演替。根据李成阳等^[9]在三江源的研究，占总草地面积 19.4%的中度退化草地和 28.1%的重度退化草地，与未退化草地相比，莎草科优势种分别是未退化地的 60%和 21%，土壤上层有机碳分别是未退化草地的 54.5%和 45%。青藏高原原本的冻融侵蚀，加之气候变化加剧的流水侵蚀，导致青藏高原的土地退化加剧。近期的研究利用 2000 年和 2018 年(基于 MODIS MOD13A1 系列 NDVI 数据和全球 30 m 地表覆盖数据 GlobeLand30，对青藏高原 2018 年土地利用图进行了校核)的土地利用图进行分析发现，2000 年以来 2.9 万 km²以高寒草甸为主的中高盖度草地直接退化为裸岩或沙地等典型荒漠地类，即青藏高原近 20 年来 2.9 万 km²的高寒草甸变成了重度荒漠化区。

2.1.2 植被退化的趋势与风险 冻土退化是植被退化的直接驱动因素，青藏高原多年冻土面积达 106

万 km^2 ，根据程国栋等^[10]的研究，多年冻土退化表现在地温升高、冻土融化，活动层增厚、连续率降低、剖面上出现不衔接，形成局部融区或融区扩大、加深或贯穿，以及冻结期缩短、融化期延长、范围出现萎缩迹象和多年冻土厚度减薄的趋势，青藏高原腹地活动层以 3.6~7.5 cm/a 的速率增加，多年冻土退化呈现加速趋势，活动层厚度增加 0.15 m/10a，冻结时长缩短 9.7 d/10a。按照这个退化速率，再过 10 年，青藏高原腹地的冻土活动层继续增厚，冻结层上水将不能支撑草甸的生长，如果没有人为干预措施，高寒草甸将会严重退化。植被退化的直接影响主要有两方面，一是水源涵养的功能削弱，李成阳等^[9]在三江源的研究表明，中度退化草地和重度退化草地水源涵养能力分别是未退化草地的 88.4% 和 72.0%；二是碳汇演变成碳源，青藏高原典型植被高寒草甸，形成腐殖质为主的土壤层，是全球重要的碳库，其碳含量占全球土壤碳库的 2.4%，植被的退化加速腐殖质土层的碳排放，有机质也会进入水体影响水环境。

2.2 青藏高原北部产水能力显著减少

2.2.1 径流演变分析 基于三江源 1958—2016 年水文系列的分析表明，西南部径流增加明显，长江直门达站和澜沧江香达站分别增加 6.69 亿 m^3 /10a 和 1.1 亿 m^3 /10a，东北部的黄河源呈显著减少趋势，平均减少 1.65 亿 m^3 /10a。张建云等^[11]的研究表明，黄河唐乃亥站 1980—2000 年和 2001—2018 年实测径流量较基准期 1956—1979 年分别变化 1.8% 和 -5.9%。上述结论是实测径流的变化，其中包括冻土释水和冰川融水的纯增加项。王芳等^[12]在研究大通河时，利用几乎不受开发影响的尕斯库勒站与天堂寺站的区间径流分析，规避了源头区冻土释水与冰川融水的影响，发现 1997 年以后，单位面积的年均蒸发量增加 3.8 万 m^3/km^2 ，折算出因蒸发增加而减少的径流量占总径流量的 17.7%，但是，实测径流呈增加趋势。产水能力减少在我国整个北方区已经非常明显，李原园等^[13]依据第三次全国水资源调查评价初步成果，发现海河区、黄河区和辽河区水资源衰减突出，2001—2016 年系列与 1956—2000 年系列相比，西辽河、永定河等流域加上植被建设的影响，河川径流量减少超过 30%。我国水资源总的演变趋势是 1956—2018 年全国地表水资源量约为 27 266 亿 m^3 ，较第二次全国水资源评价结果偏少 122 亿 m^3 ^[11]。

2.2.2 径流演变趋势及其风险 青藏高原隆起将西风带分为南北两支，北支影响下的中国北方在万年尺度上一直是干旱化，气候变化逆转的趋势几乎不可能，继续下去对中国水资源的影响主要有三个方面：一是气温每升高一度，地表蒸发蒸腾量要增加 5%~10%；二是温度升高，冻土层下移，导致土壤不饱和水气带变厚，降雨-蒸发-径流的水循环变成单一的降雨-蒸发垂向运动，产流减少；三是温度升高，雪线上升，冰川退缩，融冰量加大^[14-15]。现阶段径流的演变，由于冰川融雪与冻土释水这些本属于静储量的水资源补给以及相对偏丰年份较多，2001—2016 年系列与 1956—2000 年系列相比，疏勒河、黑河、石羊河、奎屯河、玛纳斯河、塔里木河等河川径流量增加超过 10%^[13]。根据王宁练、姚檀栋等^[16]研究，在全球增温 1.5 $^{\circ}\text{C}$ ，青藏高原地区将升温 2.1 $^{\circ}\text{C}$ 的情况下，塔里木河占径流总量 40.2% 的冰川冻土融水在 2030 年左右达到最大，占径流量 4%~30% 的北疆和河西走廊诸河在 2030 年之前就出现峰值，之后冰川融水将逐渐减少。到 2050 年前后，西北地区冰川融尽和冻土释水红利消失后断崖式缺水出现，人们赖以生存的绿洲生态与国民经济用水都不能保障，尤其是新疆，大约 95% 的水资源利用都是灌溉用水，暖湿化的降水还不足以改变 50~150 mm 降水支撑的荒漠本底，如果为减少农业用水，大面积退地将变成新的风沙策源地。

2.3 水域生态支撑的饮用水安全发生演变

2.3.1 陆域微生物驱动下生源要素与污染物迁移转化改变水环境 根据近期王蓝翔、董慧科等对多年冻土退化下碳、氮和污染物循环研究综述^[17]，冻土区（尤其是多年冻土区）成为全球物质储库的重要组成部分，储存了大量的有机碳（SOC）、氮素等，同时，由于长距离传输及全球冷捕集效应，导致冻土中也储存了持久性有机污染物（POPs）、汞（Hg）等污染物，多年冻土退化使得原本处于冻结状态的物质释放出来，活动层的加深和热喀斯特地貌的发育会改变多年冻土中物质的迁移。有机质重新暴露于微生物过程中，被分解成 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 等温室气体，释放到大气中；气态汞和挥发性较强的 POPs 等污染物也会释放进入大气，而溶解性的物质会随着融水输送到河流与热融湖塘等水生系统中。

长江源头的调查表明,长江源区河流总碳、总无机碳和总有机碳平均含量分别为 17.03 mg/L、14.56 mg/L 和 2.46 mg/L,明显高于低海拔河流^[18];河流表层沉积物中汞(Hg)的平均含量是中国沉积物背景中值的 3.70 倍,明显高于由地质条件本身引起的其他三项超标项 Ni、Pb、Cd 超标 1.13~1.41 倍^[19]。

2.3.2 冰川冻土中病原微生物的直接影响 冰川冻土环境拥有丰富的微生物群落,保存着古老微生物多样性和进化历史的珍贵记录,冰冻圈中细胞密度范围为 $10 \sim 10^8 \text{ cells} \cdot \text{mL}^{-1}$,细胞总数可达 $10^{25} \sim 10^{28}$ 个^[20]。不仅覆盖冰川表面 1%~10% 的冰尘洞内被病毒、原核生物和真核生物等多种微生物定殖,而且在青藏高原古里雅冰芯不同深度的冰芯样本(约 520~15000 年冰龄)中发现了 33 个病毒物种,其中 4 个物种可归入已知病毒,其余 29 个物种属于未知病毒种类^[21]。病毒通过侵染宿主来参与微生物群落结构的调控和地球元素的生物化学循环,而且病毒很可能是控制冰川微生物群落的主要生物因子^[22]。徐静阳等关于冰冻圈微生物演变综述研究表明^[20],已有研究估计每年约有 $10^{17} \sim 10^{21}$ 个微生物细胞从冰冻环境中释放,且证实休眠的微生物在百万年后仍可复苏,当复苏的古微生物进入当今地球生物圈,其中的病原体 and 抗生素抗性基因将对人类健康构成潜在威胁,研究者已在世界多处冰冻圈环境中分离得到病原微生物,例如,可感染免疫缺陷人群的条件致病菌隐球酵母(*Cryptococcus*),具有多种极端环境适应性的条件致病菌黑酵母菌(*Aureobasidium pullulans*);还有短梗霉菌、隐球菌、白念珠菌等古老的真菌,以及古病毒的发现及复苏病毒所展示出的感染宿主的能力。这些研究结果都预示着冰冻圈缩减所导致的极大生物安全风险。

2.3.3 水生态环境与饮用水安全风险 青藏高原是号称地球第三极的重要生态系统,拥有独特丰富的高寒生物资源基因库。随着未来气候进一步转暖,水文过程和生源要素迁移转化过程的改变,以及生态系统分解环节微生物的改变,必然会使水域生态发生一定的改变,自然水循环的改变必将累及到社会水循环做出相应的适应。就不远的将来,主要是水环境和病原微生物对饮用水安全的影响。青藏高原冻土区 0~3 m 土层储存了 1 802 Tg 总氮,其中近一半储存在 1~3 m 土层中;另有研究指出青藏高原 0~3 m 冻土中储存了 21.65 Gg 汞,其中活动层储存了 16.58 Gg 汞,且从 23 个探坑中发现,大多数垂直剖面中观察到了近地表出现总汞浓度峰值,在祁连山疏勒河流域的研究发现 0~60 cm 土层中储存了约 130.6 t Hg 汞^[18]。而且,长江源河流表层沉积物的调查,汞含量已经明显高于背景值,集聚于地表的汞含量的继续释放,将会给一些分散型饮用水源带来一定风险,随着生物富集,也有可能随食物链进入人群环境。同时,水的循环与水资源利用是病原微生物进入现代生活的主要通道,2016 年,西伯利亚爆发了炭疽热,2000 多头驯鹿因此死亡和 96 人住院,是由于多年冻土的融化使得一具感染了炭疽芽孢的鹿尸解冻而引起的^[23]。“中华水塔”本来是最清洁的水源,在气候变化形势严峻的今天面临着最致命的风险。

3 对策建议

3.1 应对方略 气候变化是 21 世纪人类所面临的最重大挑战。早在 2003 年,美国国防部就发布了《气候变化情景对美国国家安全意义》的报告,指出气候变化通过影响粮食、水资源、能源等战略资源的供应与再分配,将引发社会动荡和边界冲突^[24]。联合国粮农组织(FAO)2021 年的报告《世界粮食和农业领域土地及水资源状况:系统濒临极限》认为地球土壤、土地和水资源状况在过去十年急剧恶化,压力与日俱增,均已“濒临极限”,到 2050 年时难以满足将近 100 亿全球人口的粮食需求^[25]。

2020 年 8 月,中央第七次西藏工作座谈会指出,保护好青藏高原生态就是对中华民族生存和发展的最大贡献。2021 年 6 月国家发改委会同自然资源部和国家林草局联合发布《全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划(2021—2035 年)》。

青藏高原是作为“中华水塔”乃至“亚洲水塔”,在气候变化形势严峻的今天,需要系统布局,积极行动。总体应对策略是:扭转传统保护是最佳应对的观念,深刻认识青藏高原冻土草甸退化的关键时期,实施青藏高原区林草、土地、气象、水利行业合作的综合保护措施,有效阻止植被退化及其相关的环境负效应;积极谋篇布局发挥“中华水塔”的水资源周济调配作用,履行“亚洲水塔”上

游国家公平互利的水资源开发权益,面向水资源、粮食、能源等战略资源,统一布局合理规划,有效应对 2050 年以后气候变化带来更深远的影响;加强冰川冻土病原微生物的研究,加强饮用水源的监测和检测力度,提升有毒有害微生物的检测技术,建立从饮用水源到饮水卫生的系统管理体制,防患于未然。

3.2 主要建议

(1) 积极推进生态保护关键工程建设

有关研究结果^[9]表明,高寒草甸到重度退化的时候地上生物量才下降,而中度退化状态优势群落就从莎草科变成杂类草,更重要的是 0~10 cm 的原本毡状的根系层净生物量在减少,而 30~50 cm 的杂类草的根系层的净生物量在增加。因此,多数遥感植被调查结果显示植被盖度增加,不应该再简单认为是生态好转。高寒草甸中度退化不仅是生态演替的关键期,也是水源涵养能力退化的起点。

近 20 年来,青藏高原生态保护建设的重点工程包括:三江源生态保护和建设一二期工程,重要水源补给生态功能区生态保护与建设工程,祁连山、拉萨河流域山水林田湖草生态保护修复工程等,生态保护与建设工程以退耕还林、退牧还草、黑土滩治理、鼠虫害防治等项目为主;山水林田湖草生态保护修复工程除了生态系统保护修复工程外,增加了矿山生态修复与水环境治理。总的来说,生态保护工程主要集中在对破坏严重的地段进行重建式治理,以及如何减少人为影响,由于贫困地区与生态脆弱区域存在高度重合,生态保护工程相当一部分是扶贫脱贫工程,对自然变化的干预力度并不大。

保障高寒草甸关键生命期相对充足的水分是预防退化的关键,需要加强空中水资源调控工程在青藏高原生态保护中的作用,如利用天河水汽^[26]调控改变孟加拉湾暖湿水汽在青藏高原的时空分配,保障高寒草甸所需的土壤水分。事实上,早在三江源二期保护工程就有 1.6 亿投入的人工增雨工程;近年来,气象部门在人工影响天气能力建设方面不断加强,去年中国气象报报道甘肃已启动改善祁连山生态的常态化增雨;空中水资源利用的常态化,催生了空陆水资源联合利用问题,南京水科院已开始相关政策制度的研究^[27]。目前,存在部门壁垒,建议在《青藏高原生态屏障区生态保护和修复重大工程建设规划(2021—2035 年)》实施中能够考虑天空地一体化的综合性工程,切实阻止高寒草甸的退化,保护“中华水塔”的水源涵养能力。

(2) 着力构建包括西南三江的国家水网

前述分析表明我国北方未来水资源严重衰减。2002 年国务院批复的《南水北调总体规划》是基于全国第二次水资源调查评价成果,未考虑 21 世纪以来气候变化影响下严重的水资源衰减。同时,南水北调东中线一期工程通水后,北京、天津等受水城市,人均水资源量加上外调水仍不到 150 m³,比以色列人均水资源量 285 m³还要低。考虑到这些地区严重挤占生态用水,未来整个北方区面临着严重的缺水局面。赵勇等^[28]的研究显示京津冀地区当新增外调水量为 29 亿 m³时,仅能保障最低限度的生态用水和地下水采补平衡,超载的水生态系统难以得到修复;若新增外调水为 50 亿 m³,才可保障适宜生态用水同时满足地下水 50 年恢复要求。

2021 年 5 月 14 日,南水北调后续工程高质量发展座谈会提出加快构建国家水网主骨架和大动脉。建设国家水网是促进水资源与生产力布局相匹配的战略措施,是国家治水布局下的一盘大棋。在这个棋盘上,南水北调东中线和西线都是关键棋子,通过南水北调三条调水线路与长江、淮河、黄河和海河等四大江河的联系,逐步形成以“四横三纵”为主骨架和大动脉的国家大水网。

西线调水事关战略全局,西部调水线路海拔高、覆盖范围广,能够沟通澜沧江、怒江和雅鲁藏布江等西南诸河以及长江、黄河和西北诸河,辐射影响淮河、海河等流域,具有南水北调中线和东线难以比拟的战略优势。统筹开发利用长江上游各河流和西南出境河流,短期可以借用长江上游各河流量,远期以出境河流量置换。由于长江流域水资源开发利用率已经达到 21%,且长江大保护的任务很重,若西线调水只考虑长江,调水将损失现有基础设施的水电效益;而且,西线调水只考虑长江,将导致西线现有规划工程^[29]与西南三江引水衔接上的重复建设,同时将增加工程的难度。

因此,西线调水应重点考虑雅鲁藏布江、怒江、澜沧江三条河流的开发,充分发挥“中华水塔”

的周济调配功能,也是将“被动补水”的思路转变为“主动的水资源布局”,提高我国水土资源匹配性、促进南北和东西经济协调发展。

(3)切实加强高原地区饮用水安全保障

青藏高原当地居民与驻藏部队饮用水源以地表水与浅层地下水为主,水源分散。“十三五”期间,农村牧区饮用水在水量、用水方便程度和供水保证率三个方面已取得显著成效,但水质达标保障仍然是困扰农村饮水安全的主要因素。一项随机选择相对发达6省8县的32处消毒与不消毒各半的农村集中供水水质的调查结果显示,消毒剂余量不达标或不采取消毒措施时,出厂水及末梢水与水源水的总大肠菌群和菌落总数超标率基本相同^[30]。某部驻高海拔地区边防部队生活饮用水水质调查显示,水质合格率20%,不合格样品总大肠菌群均超标100%^[30]。

民以食为天,食以水为先。气候变化对水环境的影响已经初露端倪,尤其是冰川冻土中的病原微生物,让最清洁的水源面临最致命的风险,因此需要加强冰川冻土病原微生物的研究,让病原微生物的研究成为青藏高原水资源保护的重点内容之一;加强饮用水源的监测和检测力度,提升有毒有害微生物的检测技术。

青藏高原的分散水源或小型集中供水水源距离潜在污染源较近,加上广大游牧民族席地而饮的卫生习惯,最容易受水环境污染和病原微生物的影响。因此,需要加强水源卫生防护,制定适应新情况的饮用水管理制度,建立从饮用水源到饮水卫生的系统管理体制,消除饮用水微生物安全隐患。

参 考 文 献:

- [1] 李乃昌. 加快中小水电开发和农村初级电气化县建设[J]. 水利经济, 1993(1): 59-60.
- [2] 刘天仇, 其美多吉. 青藏高原国际河流域水资源特征及开发利用前景[J]. 地理学报, 1999, 54(S): 11-20.
- [3] 中国国际工程咨询中心, 青海省工程咨询中心. 三江源国家公园总体规划[R]. 2017.
- [4] 何大明, 刘昌明, 杨志峰. 中国国际河流可持续发展研究[J]. 地理学报, 1999, 54(S): 1-10.
- [5] 李兰. 青藏高原湖泊演化及生态环境效应研究[D]. 西安: 长安大学, 2021.
- [6] 王苏明, 窦鸿升. 中国湖泊志[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [7] CHEN Jiansheng, LI Ling, WANG Jiyang, et al. Groundwater maintains dune landscape[J]. Nature, 2004, 32(4): 459-460.
- [8] YAO T, XUE K, CHEN D, et al. Recent Third Pole's rapid warming accompanies cryospheric melt and water cycle intensification and interactions between monsoon and environment multidisciplinary approach with observations, modeling, and analysis[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2019, 100(3): 423-444.
- [9] 李成阳, 赖焱敏, 彭飞, 等. 青藏高原北麓河流域不同退化程度高寒草甸生产力和群落结构特征[J]. 草业科学, 2019, 36(4): 1044-1052.
- [10] 程国栋, 赵林, 李韧, 等. 青藏高原多年冻土特征、变化及影响[J]. 科学通报, 2019, 64(27): 2783-2795.
- [11] 张建云, 王国庆, 金君良, 等. 1956-2018年中国江河径流演变及其变化特征[J]. 水科学进展, 2020, 31(3): 153-161.
- [12] 王芳, 王天慈, 白雁翎, 等. 大通河降雨径流关系演变与水资源衰减初步研究[J]. 中国水利水电科学研究院院报, 2021, 19(4): 361-370.
- [13] 李原园, 李云玲, 何君. 新发展阶段中国水资源安全保障战略对策[J]. 水利学报, 2021, 52(11), 1340-1346.
- [14] 丁永健, 张世强, 陈仁升. 冰冻圈水文学[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [15] 严登华, 任立良, 王国庆, 等. 关于陆地水循环演变及其在全球变化中的作用研究设想[J]. 水科学进展, 2016, 27(6): 935-943.
- [16] 王宁练, 姚檀栋, 徐柏青, 等. 全球变暖背景下青藏高原及周边地区冰川变化的时空格局与趋势及影响[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(11): 1220-1232.
- [17] 王蓝翔, 董慧科, 龚平, 等. 多年冻土退化下碳、氮和污染物循环研究进展[J]. 冰川冻土, 2021, 43(5): 1365-1382.

- [18] 赵登忠, 汪朝辉, 申邵洪, 等. 青藏高原典型河流与湖泊表层水体碳时空变化特征初步分析[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(11): 13-19.
- [19] 刘敏, 邓玮, 赵良元, 等. 长江源区主要河流表层沉积物及沿岸土壤重金属分布特征及来源[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(7): 143-154.
- [20] 徐静阳, 张强弓, 施一. 冰冻圈微生物演变与生物安全[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(5): 632-640.
- [21] ZHONG Z P, SOLOVENKO N E, LI Y F, et al. Glacier ice archives fifteen-thousand-year-old viruses[J/OL]. bioRxiv. 2020. doi: 10.1101/2020.01.03.894675.
- [22] 臧琳, 刘勇勤, 刘晓波. 冰川表面冰尘洞内病毒研究进展[J]. 冰川冻土, 2019, 41(6): 1496-1504.
- [23] 陈拓, 张威, 刘光琇, 等. 冰冻圈微生物: 机遇与挑战[J]. 中国科学院院刊, 2020, 35(4): 434-442.
- [24] 刘长松, 徐华清. 对气候变化与国家安全问题的几点认识与建议[ER/OL]. [2022-04-06]. <http://www.ncsc.org.cn/yjcg/zlyj/201804/P020180920508770426540.pdf>, 2018-04-25.
- [25] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture - Systems at Breaking Point[EB/OL]. [2022-04-06]. http://www.gov.cn/zhengce/2022-02/22/content_5675035.htm.
- [26] 王光谦, 钟德钰, 李铁键, 等. 天空河流: 发现、概念及其科学问题[J]. 中国科学: 技术科学, 2016, 46(6): 649-656.
- [27] 吴巍, 王高旭, 关铁生, 等. 空陆水资源联合利用政策制度协调性分析[C]//中国水利学会 2021 学术年会, 水资源卷. 2021.
- [28] 赵勇, 王庆明, 王浩, 等. 京津冀地区水安全挑战与应对战略研究[J]. 中国工程科学. doi: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4421.G3.20220314.0836.002.html>.
- [29] 张金良, 景来红, 唐梅英, 等. 南水北调西线工程调水方案研究[J]. 人民黄河, 2021, 43(9): 9-24.
- [30] 王华然, 杨忠委, 陈照立, 等. 某部驻高海拔地区边防部队生活饮用水水质调查[J]. 解放军预防医学杂志, 2017, 35(9): 1034-1036.

Challenges and coping strategies of China's Water Tower

WANG Hao, WANG Fang, YAN Denghua, ZHAO Yong

(State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin,
China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: Traditionally, 'China's water tower' refers to the Sanjiangyuan area covering the source area of the Yellow, Yangtze and Lancang Rivers in the east of the Qinghai-Tibet Plateau. The Sanjiangyuan area has an average annual water yield of approximately 49.9 billion m³, whereas the Qinghai-Tibet Plateau covers an area of 2.57 million km² with an average annual water yield of 778 billion m³ and 20 large or medium-sized rivers originating from the plateau. Due to climate change and human activities, glaciers and frozen ground on the plateau melt and the evaporation rate increases, severely affecting resources, ecology and the environment. Therefore, protecting 'China's water tower' is of vital importance to the country. In this paper, the defined range of 'China's water tower' is expanded from the Sanjiangyuan area to the entire Qinghai-Tibet Plateau, which has the following advantages. First, it facilitates the construction of key projects for the ecological protection of the plateau, thus curbing its accelerated degradation and maintaining its role in conserving water resources. Second, it aids in establishing a national water network covering the Nu, Yarlung Zangbo and Lancang Rivers to solve the water shortage crisis in the northern region when glaciers and frozen ground melt at middle and low altitudes. Third, it helps guarantee safe drinking water on the plateau by eliminating the risks associated with changes in biogenic elements and the mixing of pathogenic microorganisms in the water environment.

Key Words: China's Water Tower; water resources; climate change; Tibetan Plateau; ecological degradation

(责任编辑: 王学风)