

引用格式:王平,王田野,王冠,等. 西伯利亚淡水资源格局与合作开发潜力分析[J]. 资源科学, 2018, 40(11): 2186–2194. [Wang P, Wang T Y, Wang G, et al. Spatial distribution and potential exploration of water resources in Siberia[J]. *Resources Science*, 2018, 40(11): 2186–2194.] DOI :10.18402/resci.2018.11.05

# 西伯利亚淡水资源格局与合作开发潜力分析

王平<sup>1</sup>, 王田野<sup>1,2</sup>, 王冠<sup>1,2</sup>, 张学静<sup>1,2</sup>, 李泽红<sup>2,3</sup>, Безруков Л.А.<sup>4</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国科学院地理科学与资源研究所资源利用与环境修复重点实验室, 北京 100101;

4. 俄罗斯科学院西伯利亚分院地理研究所, 伊尔库茨克 664033)

**摘要:**淡水是人类生存的基础,也是全球战略性资源。总面积为969万km<sup>2</sup>的俄罗斯西伯利亚地区,拥有蓄水量占全球地表淡水资源总量约22%的贝加尔湖,以及总长度约500万km的河流和多座大型水库,其中叶尼塞河、勒拿河、鄂毕河等大型河流的水资源量极为丰富。据分析,该地区多年平均地表水资源量为2.35万亿m<sup>3</sup>,占全俄水资源总量的55%;水能资源蕴藏量为1.556万亿kW·h,占全俄65%;水运资源量为5.65万km,占全俄55.8%。尽管该地区水资源丰富,但由于人口稀少(不足2400万人,仅占全俄总人口的16%左右),水资源利用程度低,具有很大的开发潜力。西伯利亚山区河流水量丰沛,水能开发及水电发展具有广阔的前景。随着全球变暖,西伯利亚平原区河流的结冰期变短,航运价值不断提高。同时,在俄罗斯西伯利亚周边地区严重缺水的背景下,通过虚拟水贸易或跨流域调水,向中亚、蒙古和中国北方地区输送淡水资源具有重要的战略意义,将推动这一地区的经济与社会协同发展。随着“一带一路”倡议和“中蒙俄经济走廊”的规划实施,中蒙俄三方在水资源与水电能源等方面的合作具有广阔的前景。

**关键词:**俄罗斯;西伯利亚;水资源;合作开发;跨流域调水

DOI :10.18402/resci.2018.11.05

## 1 引言

水不仅是人类最宝贵的基础性自然资源,而且已经与粮食、石油并列成为全球战略性的经济资源<sup>[1]</sup>。据估计,地球上水体总量为138.3亿亿m<sup>3</sup>,而陆地上的淡水资源储量仅占其中的2.5%<sup>[2]</sup>。其中,绝大部分陆地淡水资源(约68.7%)以固体冰川的形态分布在南极、北极及高海拔地区,另有约29.9%的淡水资源储存在地下含水层。因此,地球上仅有约0.26%的淡水资源集中在湖泊、河流及水库,这些水资源不仅是淡水生态系统维持的基础,而且是人类活动与社会经济发展的重要保障<sup>[2,3]</sup>。

当前,在气候变化与人类活动的双重影响下,水资源短缺已成为全球面临的最严峻问题之一<sup>[4]</sup>。据遥感分析,1984–2015年间,全球消失的地表水体面积达9万km<sup>2</sup><sup>[5]</sup>。在水资源短缺的干旱区,天然河流频繁断流,其中超过30%的常年性河流已经转变成间歇性河流<sup>[6,7]</sup>,而且这一比例仍在增加<sup>[8]</sup>。此外,地下水严重超采<sup>[9,10]</sup>以及地表与地下水体污染<sup>[11]</sup>所引发的各种问题已经严重影响人类的生存与发展。目前,全球40%以上的人口正在遭受中度或极度缺水的困扰(“水荒”),据估计到21世纪中叶,全球将有约2/3的人口面临水资源短缺问题<sup>[12]</sup>。

收稿日期:2018-04-27;修订日期:2018-10-09

基金项目:国家科技基础资源调查专项课题(2017FY101302, 2017FY101301);中国科学院战略性先导科技专项子课题(XDA2003020101);中国科学院重点部署项目(ZDRW-ZS-2017-4)。

作者简介:王平,男,安徽肥西人,副研究员,主要从事水文水资源研究。E-mail: wangping@igsrr.ac.cn

通讯作者:李泽红, E-mail: lizehong@igsrr.ac.cn

全球淡水资源不仅短缺,而且在国家与地区间分布极不均衡。水资源总量较为丰富的国家包括巴西、俄罗斯、加拿大、印度尼西亚、中国、哥伦比亚、美国、秘鲁和印度。俄罗斯地表水与地下水资源总储量位居全球第一,河川径流量占全球的11%,仅次于巴西<sup>[12]</sup>,但其水资源主要集中在面积广袤、人口稀少的西伯利亚地区。俄罗斯学者对西伯利亚水资源的研究始于对水资源量的评估,尤其关注地表水资源的分布格局、动态及开发利用前景<sup>[13, 14]</sup>。近来,在全球气候变化背景下,北半球高纬度地区的增温放大效应引起了学界广泛关注,包括俄罗斯学者在内的研究人员开始更多地关注增暖背景下的西伯利亚地区大型河流的径流过程变化<sup>[15-18]</sup>。目前,研究已表明,气候变暖导致西伯利亚地区天然年径流量整体呈增加趋势,受此影响,注入北冰洋的淡水资源总量及西伯利亚地区旱涝灾害频率均发生了显著变化。另一方面,人类活动也加剧了对西伯利亚地区地表水资源动态的影响,一系列梯级水库的修建与运行极大地改变了水库上游河流的水文过程<sup>[16, 19]</sup>。鉴于西伯利亚丰富的地表水资源,俄罗斯学者曾提出从鄂毕河向中亚调水的构想<sup>[20, 21]</sup>,但考虑到调水对生态环境可能造成不可逆转的破坏性,“北水南调”的各种方案都被先后否决<sup>[20, 21]</sup>。

本文以2015年度俄罗斯《国家水资源公报:地表水与地下水资源、利用及水质》<sup>[22]</sup>的数据为基础,通过梳理俄罗斯学者在西伯利亚水资源领域所发表的研究成果,并综合国内外文献资料,分析俄罗斯

西伯利亚地区的水资源现状与格局,并在此基础上探讨中蒙俄关于西伯利亚水资源开发合作的前景。

## 2 研究区概况

俄罗斯西伯利亚地区(俄语:Сибирь,英语:Siberia)位于俄罗斯乌拉尔地区和远东地区之间,西起乌拉尔山山脉,东至太平洋沿岸分水岭山脉,北临北冰洋,南与哈萨克斯坦、蒙古和中国接壤。该地区总面积约969万km<sup>2</sup>,覆盖了亚洲北部的大部分区域,约占全球陆地总面积的6.5%<sup>[12]</sup>。西伯利亚地区涵盖了俄罗斯3个联邦管区的14个俄联邦主体(图1),包括西伯利亚联邦管区的12个俄联邦主体(阿尔泰共和国、布里亚特共和国、图瓦共和国、哈卡斯共和国、阿尔泰边疆区、外贝加尔边疆区、克拉斯诺亚尔斯克边疆区、伊尔库茨克州、克麦罗沃州、新西伯利亚州、鄂木斯克州、托木斯克州)、乌拉尔联邦管区的秋明州(内含汉特-曼西自治区和亚马尔-涅涅茨自治区)以及远东联邦管区的萨哈(雅库特)共和国。尽管西伯利亚的面积占俄罗斯领土的56.7%,但是人口相对稀少,约为2390万人(2016年1月1日统计数据),占全国总人口的16.3%。

西伯利亚地处欧亚大陆的东北部中高纬度地区,加之远离大西洋和太平洋的不冻海,却具有广阔的北冰洋出海口,因而形成了该地区特殊的气候分布特征,即从南向北横跨亚温带大陆性气候、亚寒带大陆性气候和极地气候带<sup>[23]</sup>。俄罗斯和整个北半球的两大寒极正是位于西伯利亚东北部的上扬斯克和奥伊米亚康,这里一月份的平均气温达零下

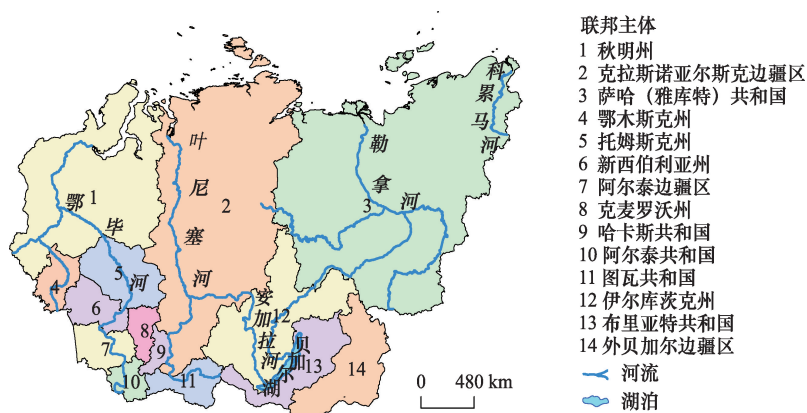


图1 西伯利亚地理位置及行政区划

Figure 1 Geographical location and administrative division of Siberia

50℃,绝对最低温度可达零下70℃,是世界上气温年较差最大的地区<sup>[12]</sup>。但在西伯利亚南部的西伯利亚大铁路沿线区域,却具有与俄罗斯欧洲部分基本相似的相对舒适的自然和气候条件。

从水文地理学的角度看,西伯利亚属于北冰洋流域的亚洲部分。受大气环流和地形影响,降水总体趋势表现为由南向北、自西向东递减。西南部的阿尔泰山地年降水量可达1000~2000mm,中部针叶林地带年降水量约500~600mm,而北冰洋沿岸年降水量仅为100~250mm,75%~80%的降水主要集中在夏季。西伯利亚地区按地形可以分为西西伯利亚低地(平均海拔约120m)、中西伯利亚高原(平均海拔约500~1500m)、东部和南部山地(平均海拔约1000~2000m)<sup>[23, 24]</sup>。受气候、地形、土壤及海陆条件等因素影响,植被覆盖呈现出明显的地带性特征,其中自南向北依次为草原带—林地草原—林地带—林地苔原带—苔原带,自东向西则依次为草原带—林地带—林地水域交错带<sup>[23]</sup>。尽管西伯利亚地区自然环境极端多样,但具有极其丰富的自然资源和巨大的地域经济开发潜力<sup>[25]</sup>。

### 3 水资源分布格局与利用现状

#### 3.1 水资源分布格局

水资源通常是指与人类生存和发展密切相关的、可以利用的、可更新的淡水,即当地降水所形成的地表径流量与降水入渗补给地下水量之和<sup>[1]</sup>。水资源还包括湖泊和水库中每年可更新的水量,但不能多于从中流出的水量。比如,贝加尔湖尽管水储量很大,但每年的可更新水量(即每年从贝加尔湖流入到安加拉河的径流量)约600亿m<sup>3</sup>,仅为贝尔加湖储量的0.26%<sup>[12]</sup>。西伯利亚拥有世界最大的淡水湖——贝加尔湖及鄂毕河、叶尼塞河、勒拿河等大型河流<sup>[26]</sup>。该地区多年平均地表径流量为2.35万亿m<sup>3</sup>/a,占全俄水资源总量的55%<sup>[12, 27]</sup>。其中,约90%的地表径流量形成于西伯利亚境内(本地径流),其余的10%地表径流量则来自于相邻地区。

西伯利亚的水资源主要集中在各大水量充足的河流中,包括总长度约500万km的近150万条大小河流。俄罗斯三大河流——叶尼塞河、勒拿河和鄂毕河,以及流量最大的前20条河流中的阿尔丹河、安加拉河、科雷马河、下通古斯卡河、哈坦加河、

额尔齐斯河、皮亚西纳河、维季姆河、奥廖克马河和塔兹河都位于这一地区<sup>[27]</sup>。其中,叶尼塞河、勒拿河和鄂毕河径流量占西伯利亚河川径流总量中的2/3。

西伯利亚的各大水库储水量也构成了水资源储量中相当大的一部分。这一地区的多座水库均属于俄罗斯境内大型水库,包括安加拉河—叶尼塞河梯级水电站的水库,即安加拉河的伊尔库茨克水库、布拉茨克水库、乌斯季—伊利姆斯克水库和博古恰内水库,叶尼塞河的萨彦—舒申斯科耶水库、迈恩水库和克拉斯诺亚尔斯克水库。此外,在其他河流也建有一些中大型水库,如鄂毕河的新西伯利亚水库、汉泰卡河的乌斯季—汉泰卡水库、库列伊卡河的库列伊卡水库、维柳伊河的维柳伊水库、马马坎河的马马坎水库<sup>[12]</sup>。

西伯利亚地区分布的众多湖泊也储存了大量的水资源<sup>[28]</sup>,包括三个大型湖泊——贝加尔湖(23万亿m<sup>3</sup>)、泰梅尔湖(130亿m<sup>3</sup>)和恰内湖(43亿m<sup>3</sup>),以及一些稍小的湖泊,比如:皮亚西诺湖、捷列茨科耶湖、拉马湖、阿加塔湖、古西诺耶湖、乌宾斯科耶湖等。另外,北极地区岛屿和山脉中的约3000条冰川,面积约100万km<sup>2</sup>的沼泽湿地,以及含水层中的地下水都是西伯利亚地区水资源的重要组成部分<sup>[12]</sup>。此外,在西伯利亚北部地区存在大面积多年冻土,里面储存有大量的固态水。在未来气候变化情景下,随着冻土消融加剧,可能导致地下水径流不断增加,引起水资源的重新分配,并影响当前的水资源空间分布格局。

西伯利亚的地表水资源年际变化显著。以这一地区三大河流为例,鄂毕河、叶尼塞河、勒拿河的多年平均径流量分别为4050亿m<sup>3</sup>/a、6350亿m<sup>3</sup>/a、5370亿m<sup>3</sup>/a。然而,在过去16年间(2001—2016年),鄂毕河、叶尼塞河、勒拿河的年均径流量分别为4200亿m<sup>3</sup>/a、6780亿m<sup>3</sup>/a、5980亿m<sup>3</sup>/a,均高于多年平均径流量。如图2所示,这三条河流的径流量在年际间变化很大,2001—2016年间分别达到2550亿m<sup>3</sup>/a、2800亿m<sup>3</sup>/a、2020亿m<sup>3</sup>/a。此外,这三大河流在过去16年的径流量呈现不同的变化趋势,其中叶尼塞河径流量则呈现显著下降趋势(-90亿m<sup>3</sup>/a),鄂毕河径流量呈现缓慢增加趋势(4亿m<sup>3</sup>/a),勒拿河径流量呈现显著增加趋势(27亿m<sup>3</sup>/a)。



2018年11月

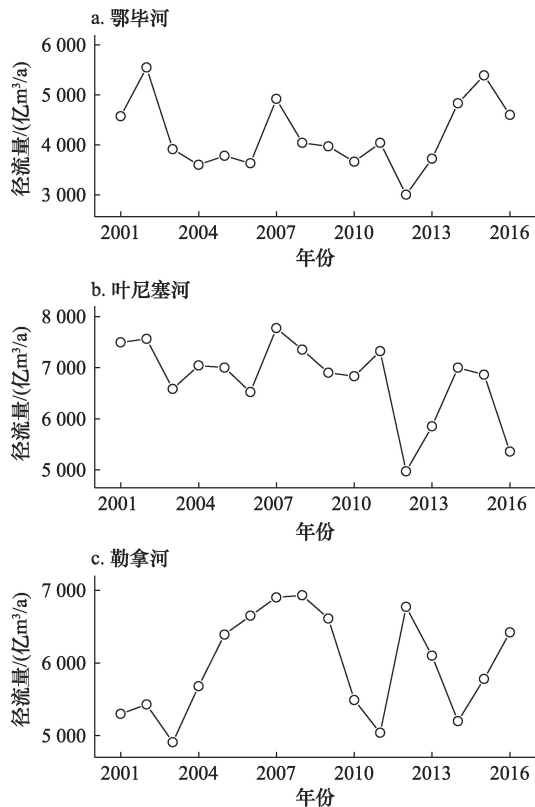


图2 2001—2016年俄罗斯西伯利亚三大河流径流量变化

Figure 2 Variation in annual runoff of three major rivers in Siberia, Russia from 2001 to 2016

西伯利亚地区水资源虽然丰富,但在空间上分布极不均匀。根据2015年度俄罗斯《国家水资源公报:地表水与地下水资源、利用及水质》<sup>[22]</sup>,在河川径流总量方面,西伯利亚下辖的联邦主体间相差达27倍(表1),其中克拉斯诺亚尔斯克边疆区水资源最为丰富,河川径流量为9302亿 $\text{m}^3/\text{a}$ ,而阿尔泰共和国的河川径流量仅为340亿 $\text{m}^3/\text{a}$ 。从人均水资源量方面来看,供水最有保障的是水量充足但是人口稀少的俄罗斯北部地区——亚马尔-涅涅茨自治区和萨哈共和国(雅库特)(人均水资源量约90万 $\text{m}^3$ ),而供水保障度最低(人均水资源量不足2.5万 $\text{m}^3$ )的是克麦罗沃州、鄂木斯克州、新西伯利亚州和阿尔泰边疆区,这些地区的特点是人口多但水资源量相对较少。

### 3.2 水资源利用现状

西伯利亚水资源主要用于居民生活、工业生产和农业灌溉三个方面。其中每年用于生活饮用与社会经济活动的水资源量约占地表水与地下水可更新水资源量的2%左右<sup>[12]</sup>。

工业用水是水资源利用的主体部分,约占总用水量的73%<sup>[12]</sup>,其中克拉斯诺亚尔斯克边疆区、克麦罗沃州、秋明州、伊尔库茨克州、托木斯克州、布里亚特共和国和新西伯利亚州是工业用水大州(图3)。工业用水的最大用户是热能部门,水几乎被全部用

表1 俄罗斯西伯利亚地区联邦主体水资源量

Table 1 Water resources of the Siberian constituent entities, Russia

俄联邦主体	面积 /万 $\text{km}^2$	人口 /万	多年平均水 资源量/亿 $\text{m}^3$	历年最大水 资源量/亿 $\text{m}^3$	历年最大水 资源量年份	历年最小水 资源量/亿 $\text{m}^3$	历年最小水 资源量年份	人均水资 源量/万 $\text{m}^3$
克拉斯诺亚尔斯克边疆区	237	287	9 302	12 802	1974	7 714	1956	33
萨哈(雅库特)共和国	308	96	8 811	10 725	1978	7 718	1972	93
秋明州	146	362	5 837	8 138	1979	4 275	1967	16
伊尔库茨克州	78	241	3 095	3 936	1938	2 524	1943	13
托木斯克州	31	108	1 823	2 383	1941	1 270	1968	17
哈卡斯共和国	6	54	977	1 308	1966	699	1945	18
布里亚特共和国	35	98	971	1 394	1973	679	1972	10
外贝加尔边疆区	43	108	756	1 099	1958	527	1954	7
新西伯利亚州	18	276	643	880	1938	429	1945	2
阿尔泰边疆区	17	238	551	830	1958	387	1974	2
图瓦共和国	17	32	455	604	1966	341	1945	14
克麦罗沃州	10	272	432	629	1941	268	1968	2
鄂木斯克州	14	198	413	690	1947	235	1951	2
阿尔泰共和国	9	22	340	506	1938	212	1945	16

注:数据来自文献[22](人口统计截止2016年1月)。

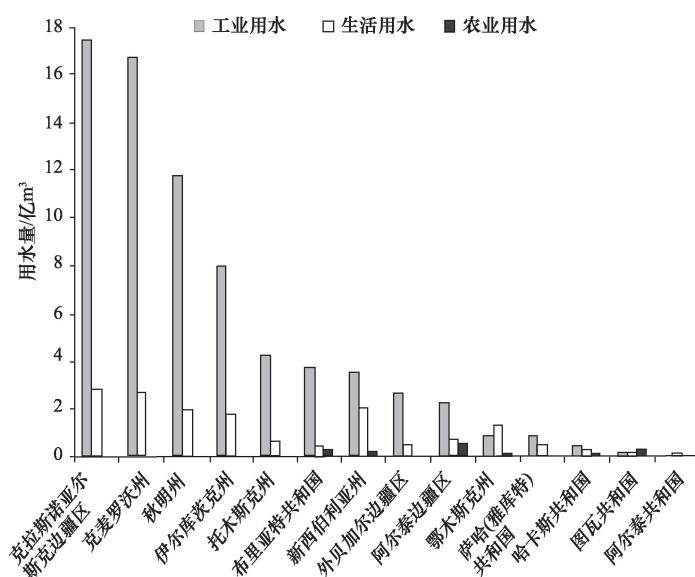


图3 2011年俄罗斯西伯利亚地区淡水资源利用状况

Figure 3 Utilization of fresh water in Siberia's regions in 2011

注:图中数据参考文献[12]。

于机组的冷却。另外,造纸和石化企业的用水量也相当大(每1t产品用水400~500m³到2500~5000m³)。因此,这些企业迫切需要使用节能和环保技术,以降低工业用水量。

西伯利亚地区约占16%的淡水资源被优先用于生活饮用水,其中以克拉斯诺亚尔斯克边疆区、克麦罗沃州和新西伯利亚州消耗的淡水资源量最大(图3)。据统计,克拉斯诺亚尔斯克边疆区每年消耗的水资源量约占全俄水资源总量的4%以上<sup>[12]</sup>。然而,近年来几乎所有的地表水源都遭受到人为影响和污染,因此水质往往不能满足生活饮用水卫生标准。目前,只有18%的西伯利亚居民点供应的是优质水,而在萨哈共和国(雅库特),只有2%的居民点的饮用水满足卫生要求,约70%的居民使用的是外运水,而这些外运水的水质大多不好<sup>[12]</sup>。

西伯利亚地区农业生产以雨养农业为主,农业灌溉用水仅占区域总用水量的3%<sup>[12]</sup>。在西伯利亚各地区中,以阿尔泰边疆区的农业用水量最多(图3)。人类活动用水给地表水体造成了严重污染,特别是未净化或未完全净化的污水对水环境产生的不良影响最为严重。在整个西伯利亚地区,每年未净化污水的数量约为30亿m³,相当于全俄罗斯未净化污水总量的15%<sup>[12]</sup>。未净化污水的最大一部分进入了伊

尔库茨克州(6.14亿m³)和克麦罗沃州(5.72亿m³)的水体,污染水约占总排水体的28%<sup>[12]</sup>。

## 4 水资源利用潜力与合作开发前景

### 4.1 水资源利用潜力

水资源综合蕴藏量是反应水资源开发利用潜力的一项重要指标,它包含了供水蕴藏量、水能蕴藏量、水运蕴藏量和渔业蕴藏量。较高的水资源蕴藏量意味着拥有较大的水能资源和水资源储量,较好的航道开发条件,以及在个别地段有发展渔业的有利条件<sup>[12]</sup>。在西伯利亚地区,无论是水的综合蕴藏量,还是单项蕴藏量都处于较高水平,水资源开发利用潜力很大。

根据2015年度俄罗斯《国家水资源公报:地表水与地下水资源、利用及水质》<sup>[22]</sup>,从产水模数上看,西伯利亚地区与全俄平均水平相当;但从人均水资源量上看,西伯利亚地区则远高于全俄平均水平。西伯利亚地区的叶尼塞河、勒拿河(不包括上游)、鄂毕河、安加拉河、贝加尔湖、额尔齐斯河,以及科雷马河、阿尔丹河、下通古斯卡河、因迪吉尔卡河、维季姆河和哈坦加河的下游都拥有极高的水资源蕴藏量。特别是贝加尔湖作为全世界最大的淡水湖,淡水资源储量十分丰富,达23万亿m³。

西伯利亚地区具有较高水资源蕴藏量的地表水体约140个,其中32个位于一级河流的上游,其特点是供水蕴藏量非常高<sup>[12]</sup>。其中具有极高供水蕴藏量的河流主要有鄂毕河的大型支流(卡通河、比亚河、托木河、丘雷姆河、克季河、瓦赫河和北索西瓦河)、叶尼塞河的大型支流(大叶尼塞河、小叶尼塞河、石泉通古斯卡河、下通古斯卡河)、勒拿河的大型支流(基廉加河、维季姆河、奥廖克马河和恰拉河、阿尔丹河和乌丘尔河以及马亚河和维柳伊河)、安加拉河的大型支流(塔谢耶瓦河)、阿穆尔河的大型支流(石勒喀河)、贝加尔湖的大型支流(色楞格河)的下游和中游地段,以及科雷马河(包括奥莫隆河下游)和因迪吉尔卡河的中游、北部地区河流——纳德姆河、普尔河、塔兹河、皮亚西纳河、哈坦加河和赫塔河与科图伊河、奥列尼奥卡河、亚纳河的下游。这些河流水量充沛,对于山区河流而言,其水能资源很高,而对于平原区河流来说,其水运

2018年11月

蕴藏很高。多条河流(尤其是流入大海的河流)具有很高的渔业蕴藏量。

西伯利亚地区对于俄罗斯水电能源发展意义重大,该地区水能蕴藏量为年均发电量1.556万亿kW·h,占全俄罗斯发电量的65%<sup>[29]</sup>。其中,叶尼塞河(年均潜在发电量为1580亿kW·h)、勒拿河(1440亿kW·h)和安加拉河(940亿kW·h)水能蕴藏量位于俄罗斯的前列。依托安加拉河和叶尼塞河丰富的水能资源,在这一地区已经建成了规模少有的安加拉河-叶尼塞河梯级水电站。此外,鄂毕河、维季姆河、阿尔丹河、下通古斯卡河、科雷马河(图4)在水能潜在储量方面都位列俄罗斯前十。然而,各大、中型河流的水能总蕴藏量在西伯利亚各地区的分布极不均衡,这种差别主要是由于面积、海拔和水能资源的单位丰度等差异造成的。拥有最多水能蕴藏量的地区是萨哈共和国(雅库特),占全西伯利亚总量的32.6%;其次是克拉斯诺亚尔斯克边疆区和哈卡斯共和国(占27.0%)以及伊尔库茨克州(占12.9%)。平原地区的鄂木斯克州和新西伯利亚州拥有的水能资源量最少,仅占全西伯利亚地区总量的0.2%和0.4%<sup>[12]</sup>。

西伯利亚的水运资源量主要由总长度为5.65万km(占全俄罗斯总量的55.8%)的内河航道网络构成<sup>[30]</sup>。在运输中起主要作用的是干线水路和地方水路。克拉斯诺亚尔斯克边疆区、萨哈共和国(雅库特)和秋明州及其周边地区水运相对发达,拥有俄罗斯国内多条大型干线水路——叶尼塞河、勒拿河、

鄂毕河和额尔齐斯河,这些干线水路同时连接铁路和北冰洋出海口,承担了大吨位船舶的主要运输量。

尽管西伯利亚地区拥有巨大的水资源储量,而且栖息着品种繁多的经济鱼类,但是捕鱼量相对不大。目前,对于西伯利亚的经济来说,渔业资源的贡献较小,主要的渔业区位于北部大河的下游近出海口处。

## 4.2 水资源合作开发前景

与西伯利亚相邻的哈萨克斯坦、蒙古以及中国北方地区水资源均十分短缺,比如中国北方黄河流域的人均水资源量仅是东西伯利亚地区的1/4500<sup>[12]</sup>。目前,主要通过虚拟水和瓶装水贸易两种方式从西伯利亚向周边缺水国家输出一定数量的水资源。其中,虚拟水贸易是通过经营安加拉河(实际是贝加尔湖)和叶尼塞河的水资源,利用廉价水和水能取得的竞争优势供应电能,以及向国外销售铝和纸浆。随着博古恰内水电站和新铝厂的投产,虚拟水贸易量预计将会进一步扩大。

在全球的水产业中,瓶装水的产量自20世纪90年代起正在迅速增长,年增长速率约为8%~9%。据统计,2012年全球瓶装水销售量为2880亿L,2017年销售量已增长至3900亿L。在俄罗斯,瓶装饮用水的市场规模也正在逐年扩大。瓶装水生产厂商的总数已经超过500家,而瓶装水的销售公司已经达到几千家,同时产量正以每年12%~15%的速度增长<sup>[12]</sup>。西伯利亚的瓶装水市场也在发展,而且潜力巨大。新西伯利亚州是其中的龙头,该州瓶装水销售量约占全俄总销售量的7%(居全俄罗斯第三位)<sup>[12]</sup>。2017年6月,俄罗斯布里亚特共和国首批生产的贝加尔湖瓶装水销往中国。同年,俄罗斯伊尔库茨克州政府投资委员会审议通过“Akvasib”公司在贝加尔湖南岸的伊尔库茨克州库尔图克小镇建立一家向中国出口贝加尔湖瓶装水的项目。总的来说,俄罗斯政府对水资源出口持积极态度,西伯利亚地区在瓶装水贸易市场上存在很大的潜力。

由于西伯利亚水资源丰富,对其进行跨流域调水具有广阔前景。特别是近年来气候变暖引起西伯利亚三大河流地表径流量增加,在此背景下,有可能将一部分流入北冰洋的淡水调到西伯利亚南部及毗邻国家的缺水地区。实际上,跨流域调水的构想早已有之。早在1871年俄罗斯学者就曾提出将

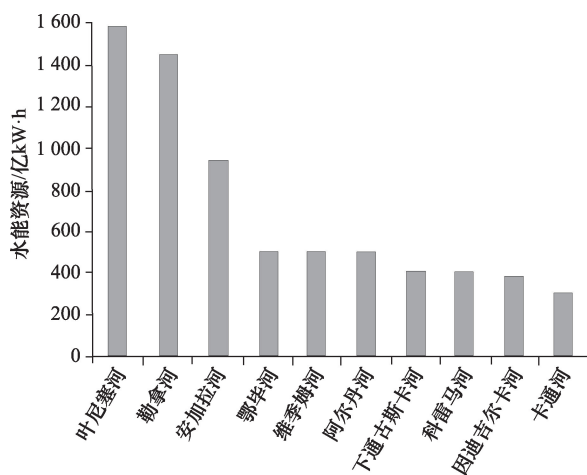


图4 俄罗斯西伯利亚地区大型河流水能资源

Figure 4 Hydropower resources of large rivers in Siberia, Russia



西伯利亚河川径流向南部干旱地区调水的主张<sup>[21]</sup>。1970至1980年代又曾立项研究把西伯利亚西部的主要河流——鄂毕河和额尔齐斯河的部分河水大规模引出至中亚和哈萨克斯坦<sup>[20]</sup>,但是该方案在后来的苏联政治改革期间被否决。到了21世纪,以莫斯科市前市长卢日科夫为代表的俄罗斯政府官员又重新提起由西伯利亚向周边缺水地区的调水主张,但是出于经济和生态方面的考虑,俄罗斯多数学者与民众对此持反对意见。

随着社会经济的迅速发展,中国北方水资源供需矛盾日益突出,据估计长江以北地区的用水缺口为每年700亿 $\text{m}^3$ <sup>[12]</sup>。一系列大型水利工程和措施的成功实施(如华北地区南水北调工程和西部干旱区生态输水工程)在一定程度上缓和了这种矛盾。近年来,中国、俄罗斯与蒙古学者在多个国际会议论坛上开始提出并讨论将西伯利亚水资源调入中国和蒙古的可行性。比如,俄罗斯学者<sup>[12]</sup>建议沿着蒙古纵贯铁路(由俄罗斯乌兰乌德经蒙古乌兰巴托至中国乌兰察布铁路线)铺设直径为1.5m的输水管道,直达中国内蒙古(总长1000km)甚至北京(总长1750km);此外,中国学者<sup>[31]</sup>提出从西伯利亚向中亚、蒙古等地调水的中北亚北水南调路线。然而,由于中蒙俄三国政治、经济发展不平衡,文化存在差异,加之中国与俄罗斯、蒙古在边界历史认知以及流域水文化认同等方面仍存在一定分歧,三方基于自身战略利益考虑,对跨界水资源合作开发还存在戒备和防范心理<sup>[32]</sup>。比如,俄罗斯反对蒙古国在俄蒙跨界河流——色楞格河上修建水电站。针对中国近年提出的“从贝加尔湖向中国调水工程”、“贝水兰调”提案,俄罗斯民众与媒体纷纷感到恐慌与不满。

贝加尔湖水量丰富、水质优良,可以为中北亚“北水南调”方案提供水源保障。据估算,贝加尔湖每年可以调用的水量不超过可更新水资源总量的5%,即30亿 $\text{m}^3$ <sup>[12]</sup>。即便如此,这一水量也能弥补中国北方京津冀及内蒙古西部缺水地区的生活用水缺口。从工程技术角度看,从贝加尔湖到中国北部缺水地区沿途没有高山阻隔,工程技术难度较小<sup>[33]</sup>。但是,该方案也面临诸多困难与挑战,首先是调水可能引起贝加尔湖地区潜在的生态环境风险。在苏联时期,苏联中央政府曾组织专家就贝加尔湖调水问题进行过多次讨论,但考虑到可能的生态环境影响,最

终没有论证通过以贝加尔湖为水源的“北水南调”工程。其次,在极端枯水年如果过度调用贝加尔湖湖水,将对安加拉梯级水库的水力发电带来损失。另外,在气候变化情景下,未来西伯利亚地区及贝加尔湖流域水资源可能的变化仍缺乏系统的研究。

总之,包括贝加尔湖在内的西伯利亚地区水资源丰富,当前提出的中北亚“北水南调”构想,从工程技术角度来看是可行的,尽管其对生态环境的影响仍需要进行全面与深入的研究。目前看来,这一构想能为中国北方缺少地区应对未来水资源风险提供新的解决方案。同时,中国在“南水北调”工程中已经积累了一定的成功经验,这将为此方案的评估和实施提供很好的借鉴。随着中俄在政治与经济领域内的合作不断加强,其实施前景值得进一步讨论和研究。

## 5 结语

俄罗斯西伯利亚地区地广人稀,水资源丰富且开发利用程度较低。水资源作为这一地区重要的战略与经济资源,对其的合理开发利用有望带动该地区的社会与经济发展。近年来,随着“一带一路”倡议和“中蒙俄经济走廊”的规划实施,中俄之间的能源合作不断得到加强。2016年中蒙俄三方签署的《建设中蒙俄经济走廊规划纲要》<sup>[34]</sup>,明确指出继续推动三方在水电能源方面的合作,中俄在这一领域的合作将具有广阔的前景。

与石油天然气等矿产资源不同,水资源是可再生资源,只要合理加以利用,防止水体污染,水资源将不会枯竭。在俄罗斯西伯利亚周边地区严重缺水的背景下,通过虚拟水贸易或跨流域调水向中亚、蒙古和中国北方地区输送淡水资源具有重要的战略意义,将推动这一地区的经济与社会协同发展。

当然,水资源,尤其是地表水资源容易受到污染。在全球水污染日趋严重的背景下,已有研究表明西伯利亚地区地表水的水质也正在遭受不同程度的污染。因此,在开发利用这一地区水资源的同时,一定要加强水资源的保护,特别是加强保护贝加尔湖宝贵的淡水资源。

**致谢:**感谢中国科学院地理科学与资源研究所于静洁研究员、杜朝阳博士、张一驰博士在本文修改与完善过程中所提出的宝贵意见与建议。

## 参考文献(References):

- [1] 李原园, 曹建廷, 沈福新, 等. 1956~2010年中国可更新水资源量的变化[J]. 中国科学:地球科学, 2014, (9):2030-2038.[Li Y Y, Cao J T, Shen F X, et al. The changes of renewable water resources in China during 1956-2010[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2014, (9): 2030-2038.]
- [2] Shiklomanov I A. Appraisal and assessment of world water resources[J]. *Water International*, 2000, 25(1):11-32.
- [3] Oki T, Kanae S. Global hydrological cycles and world water resources[J]. *Science*, 2006, 313(5790):1068-1072.
- [4] Famiglietti J S, Rodell M. Water in the Balance[J]. *Science*, 2013, 340(6138):1300-1301.
- [5] Pekel J F, Cottam A, Gorelick N, et al. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes[J]. *Nature*, 2016, 540(7633):418-422.
- [6] Datry T, Larned S T, Tockner K. Intermittent rivers: a challenge for freshwater ecology[J]. *Bioscience*, 2014, 64(3):229-235.
- [7] Tooth S. Process, form and change in dryland rivers: a review of recent research[J]. *Earth Science Reviews*, 2000, 51(1):67-107.
- [8] 王平. 西北干旱区间歇性河流与含水层水量交换研究进展与展望[J]. 地理科学进展, 2018, 37(2):183-197.[Wang P. Progress and prospect of research on water exchange between intermittent rivers and aquifers in arid regions of northwestern China[J]. *Progress in Geography*, 2018, 37(2): 183-197.]
- [9] Famiglietti J S. The global groundwater crisis[J]. *Nature Climate Change*, 2014, 4(11):945-948.
- [10] Wada Y, Van Beek L P H, Van Kempen C M, et al. Global depletion of groundwater resources[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(20):114-122.
- [11] Schwarzenbach R P, Egli T, Hofstetter T B, et al. Global water pollution and human health [J]. *Social Science Electronic Publishing*, 2010, 35(1):109-136.
- [12] Безруков Л А, Гагаринова О В, Кичигина Н В, et al. Водные ресурсы Сибири: Состояние, проблемы и возможности использования[J]. *География И Природные Ресурсы*, 2014, (4):30-41.
- [13] Морейдо В М, Калугин А С. Оценка возможных изменений водного режима реки Селенги в XXI в. На основе модели формирования стока[J]. *Водные Ресурсы*, 2017, 44(3):275-284.
- [14] Шикломанов И А (Ред.). Водные Ресурсы России И Их Использование[M]. СПб: ГИИ, 2008.
- [15] Shiklomanov A I, Yakovleva T I, Lammers R B, et al. Cold region river discharge uncertainty—estimates from large Russian rivers[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 326(1-4):231-256.
- [16] Yang D, Ye B, Kane D L. Streamflow changes over Siberian Yenisei River Basin[J]. *Journal of Hydrology*, 2004, 296(1):59-80.
- [17] Peterson B J, Rahmstorf S. Increasing river discharge to the Arctic Ocean [J]. *Science*, 2002, 298(5601):2171-2173.
- [18] Yang D, Kane D L, Hinzman L D, et al. Siberian Lena River hydrologic regime and recent change[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2002, 107(23):1-14.
- [19] Выручалкина Т Ю. Байкал и Ангара до и после создания водохранилищ[J]. *Водные Ресурсы*, 2004, 31(5):526-532.
- [20] 瓦洛帕也夫 Г В, 宋德武. 预测调西伯利亚的河流部分径流对自然条件的影响[J]. 海河水利, 1984, (S2):74-78. [Valopaev G V, Song D W. Effects of partial runoff on natural conditions in Siberia[J]. *Haihe Water Resources*, 1984, (S2): 74-78.]
- [21] 玛尔柯娃 О Л, 袁子恭. 水资源区域再分配问题的设计方案[J]. 地理科学进展, 1982, 1(3):29-32. [Markova O L, Yuan Z G. Design scheme of regional redistribution of water resources[J]. *Progress in Geography*, 1982, 1(3): 29-32.]
- [22] Росгидромет. Водный Кадастр Российской Федерации. Ресурсы Поверхностных И Подземных Вод, Их Использование И Качество. Ежегодное Издание, 2015 Год [M]. СПб.: ООО "Эс Пэ Ха", 2016.
- [23] 张宇硕, 陈军, 陈利军, 等. 2000-2010年西伯利亚地表覆盖变化特征—基于GlobeLand30的分析[J]. 地理科学进展, 2015, 34(10):1324-1333.[Zhang Y S, Chen J, Chen L J, et al. Characteristics of land cover change in Siberia based on GlobeLand30, 2000-2010[J]. *Progress in Geography*, 2015, 34(10): 1324-1333.]
- [24] Mueller L, Sheudshen A K, Eulenstein F. Novel Methods for Monitoring and Managing Land and Water Resources in Siberia[M]. Berlin: Springer International Publishing, 2016.
- [25] 李同升, 李献波, 李青阳. 西伯利亚自然资源及其开发潜力[J]. 干旱区地理, 2008, 31(6):966-971.[Li T S, Li X B, Li Q Y. Natural resources and exploitation potential in Siberia[J]. *Arid Land Geography*, 2008, 31(6): 966-971.]
- [26] Магрицкий Д В, Фролова Н Л, Евстигнеев В М, et al. Водные Ресурсы И Режим Рек Арктической Зоны Сибири: Современное Состояние, Прогнозируемое Изменение, Масштабы И Структура Ураховляемого И Использования[С]. Барнаул: Институт водных и экологических проблем СО РАН, 2017.
- [27] Babkin V I. Water resources of the Russian Federation in the 20th century[J]. *Water Resources*, 2004, 31(4):357-362.
- [28] 奥格涅夫 А К, 赵秋云. 俄罗斯贝加尔湖水资源的合理利用问题[J]. 水利水电快报, 2007, 28(23):5-6.[Ognev A K, Zhao Q Y. Rational utilization of water resources in Baikal Lake, Russia[J]. *Express Water Resources & Hydropower Information*, 2007, 28(23): 5-6.]
- [29] Вознесенский А Н (Ред.). Энергетические Ресурсы СССР. Гидроэнергетические Ресурсы[M]. Москва: Наука, 1967.
- [30] Порочкин Е М, Зарбаилов А Ю. Внутренние Водные Пути СССР: Справочник[M]. Москва: Транспорт, 1975.
- [31] 梁书民, 于智媛. 欧亚草原跨流域调水与内河航道工程技术分析[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(4):107-118.[Liang S M, Yu Z Y. Technical analysis on Eurasian grassland's inter-basin water transfer projects and inland waterways[J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2017, 28(4): 107-118.]



- [32] 肖阳. 中国水资源与周边“水外交”-基于国际政治资源的视角[J]. 国际展望, 2018, (3):89-110. [Xiao Y. China's soft international political resources and neighborhood water diplomacy[J]. *World Outlook*, 2018, (3):89-110.]
- [33] Коротный Л. М. Байкалитрубы[J]. *Исток*, 2011, 3(85):11-12.
- [34] 国家发展和改革委员会. 建设中蒙俄经济走廊规划纲要[EB/OL]. (2016-09-13)[2018-10-15]. [http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbghwb/201609/t20160912\\_818326.html](http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbghwb/201609/t20160912_818326.html).

## Spatial distribution and potential exploration of water resources in Siberia

WANG Ping<sup>1</sup>, WANG Tianye<sup>1,2</sup>, WANG Guan<sup>1,2</sup>, ZHANG Xuejing<sup>1,2</sup>,  
LI Zehong<sup>2,3</sup>, Bezrukov L.A.<sup>4</sup>

(1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Key Laboratory for Resource Use and Environmental Remediation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

4. Institute of Geography, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Irkutsk 664033, Russia)

**Abstract:** Freshwater is the foundation of human survival and a global strategic resource. The Siberian region of Russia has a total area of 9.69 million km<sup>2</sup>, which includes the Lake Baikal (~ 22% of the total surface freshwater resources), rivers with a total length of ~5 million km and large reservoirs. The large rivers such as Yenisei, Lena, and Ob are extremely rich in water resources. The average annual water resources in this area are 2350 km<sup>3</sup>, accounting for 55% of the total water resources in Russia. The hydropower resources are 1.556 trillion kilowatt hours, accounting for 65% of the total hydropower resources in Russia. The water transport resources are 56,500 km, accounting for 55.8% of the total water transport resources in Russia. This area is rich in water resources, while it is sparsely populated (less than 24 million people, accounting for only about 16% of the total Russian population). Therefore, this region demonstrates a low utilization of water resources, with great potential for development. Mountain Rivers in Siberian are rich in water resources. Therefore, the water power development has broad prospects. As the results of the global warming, the icing period of plain rivers in Siberian becomes shorter and the shipping capacity continues to increase. Additionally, under the background of severe water shortages in the surrounding areas of Siberian, the supply of freshwater resources to Central Asia, Mongolia, and northern China through virtual water trade or inter-basin water transfer indicate an important strategic significance and will promote the coordinated economic and social development of the region. With the implementation of the "Belt and Road Initiative" and the "China-Mongolia-Russia International Economic Corridor", China, Mongolia, and Russia have broad prospects for cooperation in hydropower and energy.

**Key words:** Russia; Siberia; water resources; cooperative development; inter-basin water transfer