科学通报 2020 年 第 65 卷 第 24 期: 2636 ~ 2650
论 文
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

冰冻圈水资源对中国社会经济的重要性: 基于多级流域尺度分析

黄怡[1,2], 效存德[1*], 苏勃[1], 许章华[2]

1. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875;
2. 福州大学环境与资源学院, 福州 350108
* 联系人, E-mail: cdxiao@bnu.edu.cn

2020-02-01 收稿, 2020-05-10 修回, 2020-05-11 接受, 2020-06-16 网络版发表
国家自然科学基金(41671058, 41690145)、北京师范大学人才引进项目(12807-312232101)和国家留学基金委员会2019年高水平大学公派研究生项目(201906040104)资助

摘要 冰冻圈水资源为全球寒区旱区生态安全和社会经济发展提供重要保障. 随着气候变暖导致冰冻圈水资源供给变化以及社会经济增长对水资源需求增加, 区域水资源短缺风险不断加剧. 鉴于此, 加强冰冻圈水资源与社会经济关联研究至关重要. 本研究首先在三级流域尺度上系统分析了中国冰冻圈水资源的空间分布特征及其影响区人口和GDP时空变化格局, 然后进一步综合供给和需求两侧指标, 评估了冰冻圈水资源对社会经济的重要性. 结果表明: (1) 中国冰冻圈及其影响区共涵盖7个一级流域、38个二级流域和84个三级流域. (2) 从冰冻圈要素的重要性看, 塔里木河、羌塘高原以及雅鲁藏布江等流域冰川面积和储量较大, 青藏高原腹地和松花江流域多年冻土覆盖率较高, 松花江区、新疆北部以及青藏高原西南部平均积雪深度较大. (3) 以2015年为基准, 计算得到冰冻圈水资源重要影响区人口和GDP分别约为2.63亿和11.4万亿元, 分别占全国23.1%和16.5%, 主要分布在我国一、二级地形阶梯分界线的东南部和北部以及三级阶梯北部; 1995~2015年间冰冻圈重要影响区人口占全国比重增加(由24.4%增为26.8%), GDP占全国比重下降(由21%降为19%). (4) 冰冻圈水资源对中国社会经济的重要性与冰冻圈影响区社会经济规模在空间上基本一致, 然而, 青藏高原西南部虽然冰冻圈水资源供给功能强大, 但因为社会经济规模很小, 所以服务的现实作用有限.

关键词 冰冻圈, 融水资源, 人口, GDP, 冰冻圈功能

冰冻圈由冰川(包括山地冰川和极地冰盖)、冻土(包括多年冻土和季节冻土)、积雪、海/河/湖冰, 以及大气圈中的冻结状水体等要素组成, 是地球表层系统中具有一定厚度的负温圈层[1]. 冰冻圈以固体形式储存着全球75%的淡水[2], 尤其是山地冰川和积雪在暖季释放融水, 对全球广大寒区旱区生态保育、农业灌溉、高山发电、工业和生活用水提供重要水源, 多年冻土则对维持和调节河川基流起到重要作用[2,3]. 据IPCC第五次评估报告 (IPCC, 2013)和海洋与冰冻圈特别报告(SROCC, 2019)统计, 全球山地冰川储量约为113915~191879 Gt, 融水供给影响到约三分之一的世界人口[4]. 全球陆地每年从降雪获得淡水补给量达到5.95×10^{12} m^3, 为全球12亿人口的生产生活用水提供重要保障[2].

我国是世界上中低纬度冰冻圈最为发育的国家, 其中冰川储量约4.3×10^3~4.7×10^3 km^3, 面积达

引用格式: 黄怡, 效存德, 苏勃, 等. 冰冻圈水资源对中国社会经济的重要性: 基于多级流域尺度分析. 科学通报, 2020, 65: 2636–2650
Huang Y, Xiao C D, Su B, et al. Importance of cryosphere water resources to China's socio-economy: Based on multi-level basins analysis (in Chinese). Chin Sci Bull, 2020, 65: 2636–2650, doi: 10.1360/TB-2020-0073

© 2020《中国科学》杂志社

5.18×10^4 km^2，占全球中、低纬度冰川面积的50%以上[5]；多年冻土地下冰储量估算达到9.5×10^6 km^3，面积约2.20×10^6 km^2；若将积雪日数>60 d作为稳定积雪区，我国多年平均稳定积雪区面积达到4.2×10^6 km^2[6].

近几十年来全球快速变暖，山区冰冻圈呈现加速退缩态势，并对区域水资源产生深远影响[7~13]，我国也不例外. 基于野外监测、遥感观测和模型模拟等技术和手段，国内外学者对冰冻圈水资源变化进行了大量研究，空间尺度从局地到山脉、流域、区域乃至全球. 主要结论包括[3,13]：(1) 冰川融水量在一定时期内增加，但越过“拐点”后将持续下降；(2) 在以积雪融水补给为主的地区，积雪融水呈现下降趋势，而且随着雪期变短和融雪季提前，形成更持久的干旱；(3) 多年冻土解冻则可能导致地下冰中的水释放或者间接改变流域水文变化. 融水资源一方面随冰冻圈要素存量及其对气候响应速度而动态变化，另一方面随着人口增长、城市扩张，社会经济发展需水量不断增加，导致区域水资源短缺风险不断加剧，进而给区域社会-生态系统可持续发展带来严峻挑战[14].

为了深入评估区域冰冻圈水资源变化对社会经济系统的影响，指导区域可持续发展实践，我们亟须将气候变化相关的冰冻圈水文变化与社会经济动态关联起来，进而明确冰冻圈水资源对区域社会经济发展的重要性，以及变化环境下区域水资源短缺风险. 然而，以往研究对此很少关注. Immerzeel等人[15]在“世界水塔”重要性和脆弱性研究中指出，水资源的供需在流域尺度上是相互联系的，流域是水塔单元的基础，考虑到冰冻圈融化后进入河流，而河流的上中下游本属于一个不可分割的生命系统，同时河流和社会经济系统相互依存、紧密相连，因此本研究从多级流域尺度系统分析中国冰冻圈水资源(冰川、多年冻土和稳定积雪)的空间分布特征以及1995~2015年中国冰冻圈水资源影响区人口和GDP时空变化格局，进而综合供给和需求两侧评估冰冻圈水资源对我国社会经济发展的重要性.

1 数据与方法

1.1 数据来源

本研究涵盖三类数据：第一类是基础地理数据，包括中国行政边界、流域边界和DEM高程数据；第二类是冰冻圈数据，包括冰川边界和面积、多年冻土边界、积雪深度和稳定积雪区边界；第三类是社会经济数据，包括1995~2015年中国人口和GDP空间分布数据. 数据来源及说明如表1所示.

1.2 冰冻圈水资源影响区的确定

在中国，冰冻圈水资源要素主要涉及冰川、多年冻土和稳定积雪三大冰冻圈要素，其以流域作为基本单元影响着区域社会-生态系统. 通过将冰冻圈要素空间分布与不同级别流域边界进行叠加，获得冰冻圈水资源要素直接影响的流域范围. 如图1和表2所示，我国冰冻圈水资源影响区共包括7个一级流域、38个二级流域和84个三级流域. 当分析单一冰冻圈要素的影响区时，重叠部分按各自类别讨论.

表 1 数据来源及说明[a)]

Table 1 Data sources and descriptions

数据类别	数据名称	数据来源	数据类型	年份	空间分辨率(km)
基础地理数据	中国行政边界	中国科学院资源环境科学数据中心	矢量	—	—
	中国流域边界	中国科学院资源环境科学数据中心	矢量	—	—
	DEM	中国地理国情监测云平台	栅格	2013	1
冰冻圈数据	冰川边界和面积	中国第二次冰川编目[16]	矢量	2005~2006	—
	多年冻土边界	中国寒区旱区科学数据中心[17]	矢量	—	—
	积雪深度	中国寒区旱区科学数据中心[18,19]	栅格	1995~2015	1
	稳定积雪区边界	中国科学院西北生态环境资源研究院遥感与地理信息科学研究室	矢量	—	—
	冰雪融水径流/贡献率	文献[20~24]	—	—	—
社会经济数据	中国人口空间分布数据集	中国科学院资源环境科学数据中心	栅格	1995~2015	1
	中国GDP空间分布数据集	中国科学院资源环境科学数据中心	栅格	1995~2015	1

a) “—”表示不具有该列的属性

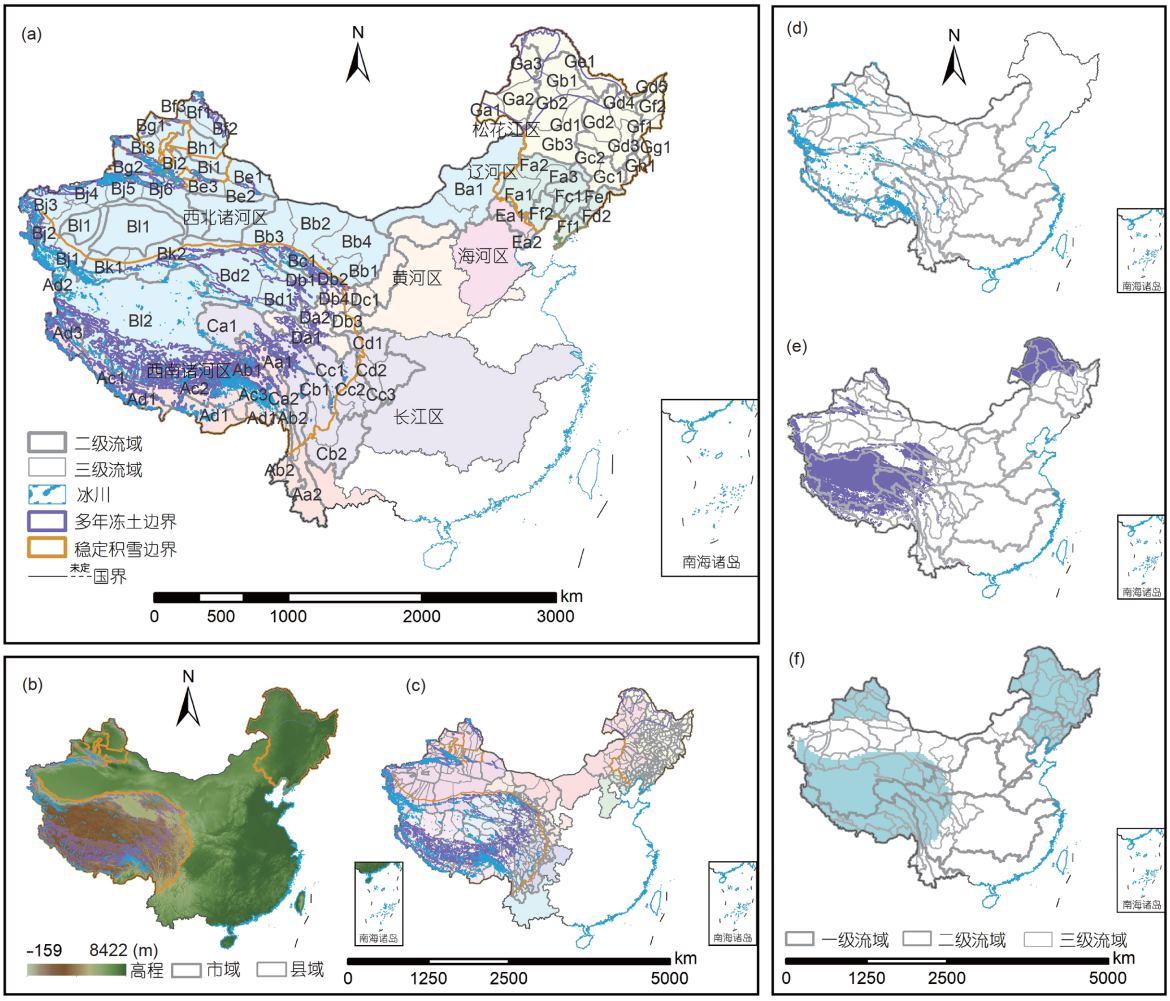


图 1 冰冻圈及其各要素在流域和行政区划上的分布图. (a) 流域内中国冰冻圈分布图; (b) 中国冰冻圈高程分布图; (c) 行政区划内中国冰冻圈分布图; (d) 流域内中国冰川分布图; (e) 流域内多年冻土分布图; (f) 流域内中国稳定积雪分布图

Figure 1 Distribution of cryosphere and its components in basin and administrative divisions. (a) Distribution of China's cryosphere in basin; (b) elevation of China's cryosphere; (c) distribution of China's cryosphere in the administrative divisions; (d) distribution of China's glaciers in basin; (e) distribution of permafrost in basin; (f) distribution of China's stable snow basin

1.3 冰冻圈水资源影响区人口和GDP变化分析

为获得冰冻圈水资源影响区社会经济时空变化格局, 基于1995~2015年中国人口、GDP格点数据和冰冻圈水资源影响区流域分布边界, 从不同流域尺度分别计算了1995~2015年冰冻圈水资源影响区人口和GDP的变化量和变化率.

人口和GDP变化量计算如式(1)所示:

$$C_{(\Delta k,\mathrm{CFA})}=\left(\sum_{i=1}^{n}n_{(k_2,i)}-\sum_{i=1}^{n}n_{(k_1,i)}\right)\times D_{(\mathrm{CFA},i)}, \tag{1}$$

其中, $C_{(\Delta k,\mathrm{CFA})}$表示冰冻圈水资源影响区(CFA)的人口或GDP在$k_1$~$k_2$年之间的变化; $n_{(k_1,i)}$和$n_{(k_2,i)}$分别指第i个格点k_1年和k_2年的人口或GDP; $D_{(\mathrm{CFA},i)}$为类值, 如果i格点位于CFA中, 该值设为1, 否则设为0.

冰冻圈影响区人口和GDP变化率利用下式计算:

$$CR(\%)=\left(\sqrt[k_2-k_1]{\frac{x_{k_2}}{x_{k_1}}}-1\right)\times 100, \tag{2}$$

其中, CR表示冰冻圈水资源影响区人口或GDP在k_1~k_2年之间的变化率; x_{k_1}和x_{k_2}分别指第i个流域从k_1年和k_2年的人口或GDP.

1.4 冰冻圈水资源对社会经济的重要性指数

冰冻圈水资源对社会经济的重要性由冰冻圈水资

表 2　包含中国冰冻圈水资源要素的流域

Table 2　Basins containing China's cryosphere water resources

一级流域	二级流域	三级流域
西南诸河区(A)	澜沧江(Aa)	沘江口以上(Aa1), 沘江口以下(Aa2)
	怒江及伊洛瓦底江(Ab)	怒江勐古以上(Ab1), 伊洛瓦底江(Ab2)
	雅鲁藏布江(Ac)	拉孜以上(Ac1), 拉孜至派乡(Ac2), 派乡以下(Ac3)
	藏南诸河(Ad)	藏南诸河(Ad1)
	藏西诸河(Ae)	奇普恰普河(Ae1), 藏西诸河(Ae2)
西北诸河区(B)	内蒙古高原内陆河(Ba)	内蒙古高原东部(Ba1)
	河西走廊内陆河(Bb)	石羊河(Bb1), 黑河(Bb2), 疏勒河(Bb3), 河西荒漠区(Bb4)
	青海湖水系(Bc)	青海湖水系(Bc1)
	柴达木盆地(Bd)	柴达木盆地东部(Bd1), 柴达木盆地西部(Bd2)
	吐哈盆地小河(Be)	巴伊盆地(Be1), 哈密盆地(Be2), 吐鲁番盆地(Be3)
	阿尔泰山南麓诸河(Bf)	额尔齐斯河(Bf1), 乌伦古河(Bf2), 吉木乃诸小河(Bf3)
	中亚西亚内陆河区(Bg)	额敏河(Bg1), 伊犁河(Bg2)
	古尔班通古特荒漠区(Bh)	古尔班通古特荒漠区(Bh1)
	天山北麓诸河(Bi)	东段诸河(Bi1), 中段诸河(Bi2), 艾比湖水系(Bi3)
	塔里木河源流(Bj)	和田河(Bj1), 叶尔羌河(Bj2), 喀什噶尔河(Bj3), 阿克苏河(Bj4), 渭干河(Bj5), 开孔河(Bj6)
	昆仑山北麓小河(Bk)	克里亚河诸小河(Bk1), 车尔臣河诸小河(Bk2)
	羌塘高原内陆河(Bl)	羌塘高原区(Bl1)
长江区(C)	金沙江石鼓以上(Ca)	通天河(Ca1), 直门达至石鼓(Ca2)
	金沙江石鼓以下(Cb)	雅砻江(Cb1), 石鼓以下干流(Cb2)
	岷沱江(Cc)	大渡河(Cc1), 青衣江和岷江干流(Cc2), 沱江(Cc3)
	嘉陵江(Cd)	广元昭化以上(Cd1), 涪江(Cd2)
	龙羊峡以上(Da)	河源至玛曲(Da1), 玛曲至龙羊峡(Da2)
黄河区(D)	龙羊峡至兰州(Db)	大通河享堂以上(Db1), 湟水(Db2), 大夏河与洮河(Db3), 龙羊峡至兰州干流区间(Db4)
海河区(E)	滦河及冀东沿海(Ea)	滦河山区(Ea1), 滦河平原及冀东沿海诸河(Ea2)
辽河区(F)	西辽河(Fa)	西拉木伦河及老哈河(Fa1), 乌力吉木仁河(Fa2), 西辽河下游(苏家铺以下)(Fa3)
	东辽河(Fb)	东辽河(Fb1)
	辽河干流(Fc)	柳河口以上(Fc1), 柳河口以下(Fc)
	浑太河(Fd)	浑河(Fd1), 太子河及大辽河干流(Fd2)
	鸭绿江(Fe)	浑江口以上(Fe1), 浑江口以下(Fe2)
	东北沿黄渤海诸河(Ff)	辽东沿黄渤海诸河(Ff1), 沿渤海西部诸河(Ff2)
松花江区(G)	额尔古纳河(Ga)	呼伦湖水系(Ga1), 海拉尔河(Ga2), 额尔古纳干流区间(Ga3)
	嫩江(Gb)	尼尔基以上(Gb1), 尼尔基至江桥(Gb2), 江桥以下(Gb3)
	第二松花江(Gc)	丰满以上(Gc1), 丰满以下(Gc2)
	松花江(三岔口以下)(Gd)	三岔口至哈尔滨(Gd1), 哈尔滨至通河(Gd2), 牡丹江(Gd3), 通河至佳木斯干流区间(Gd4), 佳木斯以下(Gd5)
	黑龙江干流(Ge)	黑龙江干流(Ge1)
	乌苏里江(Gf)	穆棱河口以上(Gf1), 穆棱河口以下(Gf2)
	绥芬河(Gg)	绥芬河(Gg1)
	图门江(Gh)	图门江(Gh1)

源供给和社会经济需求共同决定. 这里将每个流域水资源的供给和需求进行量化, 构建供水指数和需水指数, 如式(3)和(4)所示, 为了便于比较将其分别放大100倍:

$$SI = 100 \times (NG + NS + NP) / 3, \quad (3)$$

$$DI = 100 \times (NPop + NGDP) / 2, \quad (4)$$

其中*SI*表示流域供水指数, 由归一化流域平均冰川储量*NG*、归一化流域平均积雪深度*NS*和归一化流域平均冻土面积计算得到; *DI*表示流域需水指数, 由归一化人口*NPop*和归一化国内生产总值*NGDP*计算得到.

当一个流域冰冻圈水资源更丰富, 并且该流域对水资源的需求更高时, 该流域冰冻圈水资源对社会经济发展的重要性就较高, 反之亦然. 所以, 重要性指数[15]用公式(5)进行计算:

$$BI = SI \times DI. \quad (5)$$

2 研究结果及分析

2.1 中国冰冻圈空间分布特征

以往研究基本上都是对冰冻圈单要素的空间划分, 例如对冰川而言, 基于山系、分省、大区或冰川编目大流域对中国冰川时空分布进行探讨, 对积雪和多年冻土而言, 多从区域尺度分布进行空间划分和相关研究[6,25~27], 缺乏从不同层级流域尺度对冰冻圈各要素空间分布特征开展的系统分析, 很难建立起与冰冻圈服务(社会经济要素)的对应关系. 这里从多级流域尺度对中国冰冻圈水资源要素(冰川、多年冻土、稳定积雪)的空间分布特征进行系统分析.

2.1.1 冰川空间分布特征

我国冰川主要分布在西部高山地区, 涵盖4个一级流域、22个二级流域和44个三级流域, 如图2所示. 总体来看, 各级流域的冰川面积和体积分布具有相对一致性, 我国冰川水资源最丰富的地区主要集中在塔里木河、羌塘高原以及雅鲁藏布江等流域.

从一级流域尺度看, 冰川面积和体积最大的流域都是西北诸河区, 分别约3×10^4 km^{2}和3×10^{13} m^3, 其次是西南诸河区, 最少的是黄河区, 面积仅为130 km^2, 体积仅为1.17×10^{11} m^3. 但冰川覆盖率最高的区域是西南诸河区, 达2.2%, 其次是西北诸河区, 最少的是黄河区, 覆盖率仅为0.02%. 从二级流域尺度来看, 冰川面积和体积最大的区域都是塔里木河源流, 面积达到1580 km^2, 体积达8.6×10^{11} m^3, 其次是雅鲁藏布江, 最少的是嘉陵江, 冰川面积仅为1 km^2, 体积仅为2.4×10^7 m^3; 但冰川覆盖率最高的区域是雅鲁藏布江, 覆盖率达4.1%, 其次是藏南诸河, 最少的是嘉陵江, 覆盖率几乎为0. 从三级流域尺度来看, 冰川面积最大的区域是羌塘高原区, 面积达到7×10^3 km^2, 其次是派乡以下, 最少的是乌伦古河, 冰川面积不到1 km^2; 而冰川体积最大的流域是派乡以下, 体积达到4.6×10^{11} m^3, 其次是羌塘高原区, 最少的是乌伦古河, 冰川体积4×10^6 m^3. 冰川覆盖率最高的流域也是派乡以下, 覆盖率达13.2%, 其次是奇普恰普河, 最少的是乌伦古河, 覆盖率几乎为0.

2.1.2 多年冻土空间分布特征

中国多年冻土主要包括东北地区的高纬度多年冻土以及西部高山高原的高海拔多年冻土, 共涵盖5个一级流域、26个二级流域和60个三级流域. 各级流域尺度多年冻土面积及其覆盖率如图2所示, 总体而言, 青藏高原腹地和松花江流域多年冻土覆盖率最高.

从一级流域尺度看, 多年冻土面积最大的区域是西北诸河区, 面积达9.85×10^5 km^2, 其次是松花江区, 最少的是黄河区, 仅为4.87×10^4 km^2; 但覆盖率最高的区域是松花江区, 覆盖率达39.3%, 其次是西北诸河区, 最少的是黄河区, 覆盖率仅为6.1%. 从二级流域尺度来看, 多年冻土面积最大的区域是羌塘高原, 面积达到5.8×10^5 km^2, 其次是金沙江石鼓以上流域, 最少的是嘉陵江, 仅为33 km^2; 但覆盖率最高的区域是额尔古纳河, 覆盖率达87.3%, 其次是羌塘高原, 最少的是嘉陵江, 覆盖率几乎为0. 从三级流域尺度来看, 多年冻土面积最大的区域也是羌塘高原, 其次是通天河, 最少的是伊洛瓦底江, 多年冻土面积仅为1.22 km^2; 但覆盖率最高的区域是奇普恰普河, 覆盖率达99.9%, 紧接着的是海拉尔河、额尔古纳干流区间、尼尔基以上, 这3个流域的冻土覆盖率均高达99%以上, 最少的是伊洛瓦底江, 覆盖率几乎为0.

2.1.3 稳定积雪空间分布特征

积雪储存时间较短且储量变化大, 积雪日数作为重要的气候和水文因子, 人们通常以积雪日数>60 d的地区作为稳定积雪区[7]. 在我国主要包括东北、华北、北疆和青藏高原地区[7], 涵盖7个一级流域、39个二级流域、84个三级流域, 如图1(f)所示. 不同流域尺度上稳定积雪覆盖率及多年(1995~2015年)平均雪深流

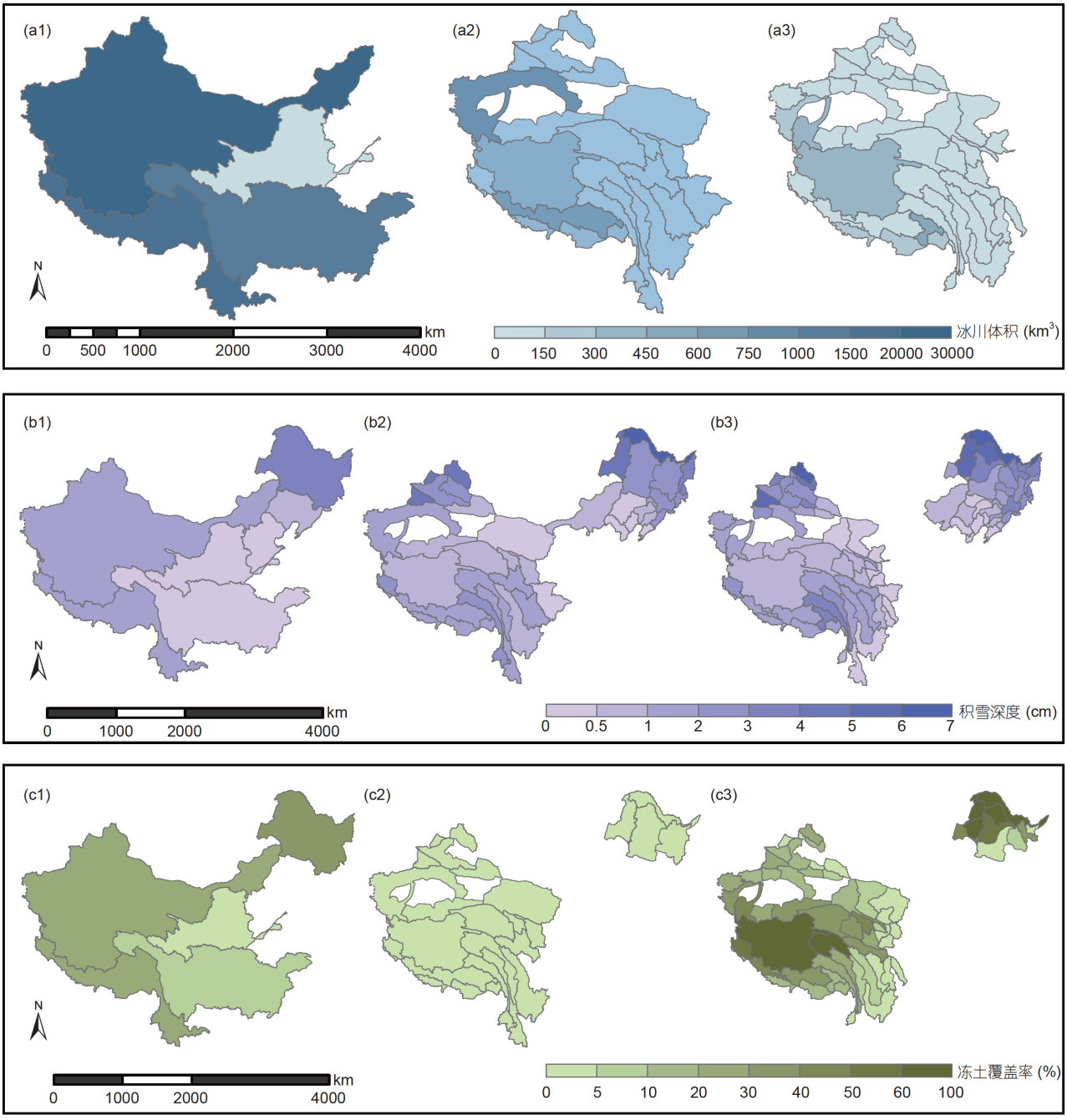


图 2 多流域尺度中国冰川体积、积雪深度和多年冻土覆盖率空间分布. (a1) 一级流域冰川体积; (a2) 二级流域冰川体积; (a3) 三级流域冰川体积; (b1) 一级流域多年平均雪深; (b2) 二级流域多年平均雪深; (b3) 三级流域多年平均雪深; (c1) 一级流域多年冻土覆盖率; (c2) 二级流域多年冻土覆盖率; (c3) 三级流域多年冻土覆盖率

Figure 2 Spatial distribution of China's glacier volume, stable snow depth and permafrost coverage rates at multi basin scale. (a1)–(a3) The glacier volume of the first, second and third level basin respectively; (b1)–(b3) the stable snow depth of the first, second and third level basin respectively; (c1)–(c3) the permafrost coverage rates of the first, second and third level basin respectively

域空间分布如图2所示, 总体来看, 松花江区、新疆北部以及青藏高原西南部平均积雪深度最大.

从一级流域尺度来看, 稳定积雪覆盖率最高的区域是辽河区, 覆盖率达94.7%, 其次是西南诸河区, 最少的是海河区, 覆盖率仅为0.6%; 但多年平均积雪深度最深的区域是松花江区, 平均雪深达到3.54 cm, 其次是

西南诸河区，最少的是海河区，多年平均雪深仅为0.17 cm. 从二级流域尺度来看，稳定积雪覆盖率最高的区域是黄河龙羊峡以上、青海湖水系和东辽河，覆盖率高达100%，其次是松花江三岔口以下、浑太河、羌塘高原内陆河、金沙江石鼓以上和辽河干流，积雪覆盖率都在99%以上，最少的是内蒙古高原内陆河，覆盖率仅为2.8%. 但多年平均积雪最深的区域是黑龙江干流，雪深达到6.33 cm，其次是阿尔泰山南麓诸河，最少的是东北沿黄渤海诸河，稳定积雪深度仅为0.42 cm. 从三级流域尺度来看，稳定积雪覆盖率达100%的共计16个流域，稳定积雪覆盖率在99%~100%的有10个流域，最少的是滦河平原及冀东沿海诸河，覆盖率仅为0.37%；但多年平均积雪最深的区域是黑龙江干流，雪深达到6.27 cm，其次是额尔齐斯河，最少的是泄江口以下，多年平均雪深几乎为0，即积雪常年融化.

2.2 1995~2015年中国冰冻圈水资源影响区人口和GDP时空格局

这里从多级流域尺度探讨1995和2015年中国冰冻圈水资源影响区人口和GDP空间分布及其变化，其中一级流域涵盖了冰冻圈水资源的最大影响范围，随着离上游冰冻圈的距离增大，冰冻圈融水在总径流量中所占比例越来越小，冰冻圈水资源的影响越来越小.

2.2.1 冰冻圈水资源影响区人口变化

图3显示了1995和2015年不同流域尺度中国冰冻圈水资源影响区人口分布及其变化. 从一级流域来看，1995和2015年冰冻圈水资源影响区人口分别为7.73亿和9.02亿，分别占全国的67.9%和79%，20年间增长率为16.7%. 长江区2015年人口最多，达4.56亿人，近20年来人口增长也最多，增长了5636万人. 西南诸河区人口最少，2015年人口仅为0.23亿人. 近20年来辽河区人口呈现负增长，共减少了154万，变化率为−2.7%. 从二级流域尺度来看，1995和2015年冰冻圈水资源影响区人口分别为2.78亿和3.05亿，分别占全国的24.4%和26.8%，20年间增长率为9.8%. 2015年人口最多的流域为嘉陵江，达3977万人，人口最少的为藏西诸河，约4万人. 1995~2015年人口增长最多的流域为岷沱江，达606万人，其次是兰州至河口镇；人口呈现负增长的流域包括东辽河、辽河干流、乌苏里江、西辽河、浑太河和嘉陵江，分别减少了1.5万人、8万人、21万人、79万人、146万人和451万人；藏西诸河人口增长率最大(这主要与人口基数少有关)，其次是塔里木河源流(79.9%)和柴达木盆地(73.14%)，特别是塔里木河源流，在20年内人口增长了434万；嘉陵江人口负增长率最大(−10.2%). 从三级流域尺度看，1995和2015年冰冻圈水资源影响区人口分别为2.38亿和2.63亿，分别占全国的20.9%和23.1%，20年间增长率为10.7%. 2015年青衣江和岷江干流人口最多(达1970万人)，20年来增长也最多(758万人)，但人口增长率最高的为开孔河，达219.1%；2015年奇普恰普河人口最少(0.45万人)，20年来浑太河的太子河及大辽河干流人口负增长率最高(−23.2%).

冰冻圈水资源对一级流域(特别是黄河和长江中下游地区)的社会经济发展影响有限[28]，冰冻圈水资源影响我国人口最多的地区主要分布在一、二级地形阶梯分界线的东南部和北部以及三级阶梯北部，青藏高原腹地虽然冰冻圈水资源丰富，但是人口较少.

2.2.2 冰冻圈水资源影响区GDP变化

图4显示了1995和2015年不同流域尺度中国冰冻圈水资源影响区GDP分布及其变化. 总体来看，GDP分布与人口基本一致，20年来东北和西南诸河区大多数子流域GDP呈负增长.

从一级流域尺度来看，1995和2015年冰冻圈水资源影响区GDP总量分别为36万亿和45万亿元，分别占全国的63%和64%，20年间增长率为23.6%. 2015年长江区GDP总量最高(23万亿元)，且增长量最多(5万亿元)，西南诸河区2015年GDP总量最低(0.5万亿元). 1995~2015年间GDP呈现负增长的为辽河区和松花江区，分别减少3313万元和3817万元；黄河区GDP增长率最高，达53.2%，其次是西北诸河区；松花江区GDP负增长率最高，为−12.9%. 从二级流域尺度来看，1995和2015年冰冻圈水资源影响区GDP总量分别为12万亿元和13.4万亿元，分别占全国的21%和19%，20年间增长率为12.2%. 2015年岷沱江流域GDP总量最高，达1.81万亿元，其次是兰州至河口镇，最低的为藏西诸河，为4万元；20年间的黄河兰州至河口镇段GDP增长最多(7449万元)，增长率也最高(124.2%)，GDP负增长的流域有14个，其中浑太河流域减少最多(2646万元)；GDP负增长率最高的为吐哈盆地小河(−34.2%). 从三级流域尺度来看，1995和2015年冰冻圈水资源影响区GDP总量分别为11万亿元和11.4万亿元，分别占全国的19%和16.5%，20年间增长率为5.7%. 青衣江和岷江干流2015年GDP总量最高(1.02万亿元)，1995年以来增长最多(3625万元)；20年间河西荒漠区GDP增长率最高(284.6%)，吐鲁番盆地负增长率最高(−68.86%)，浑太

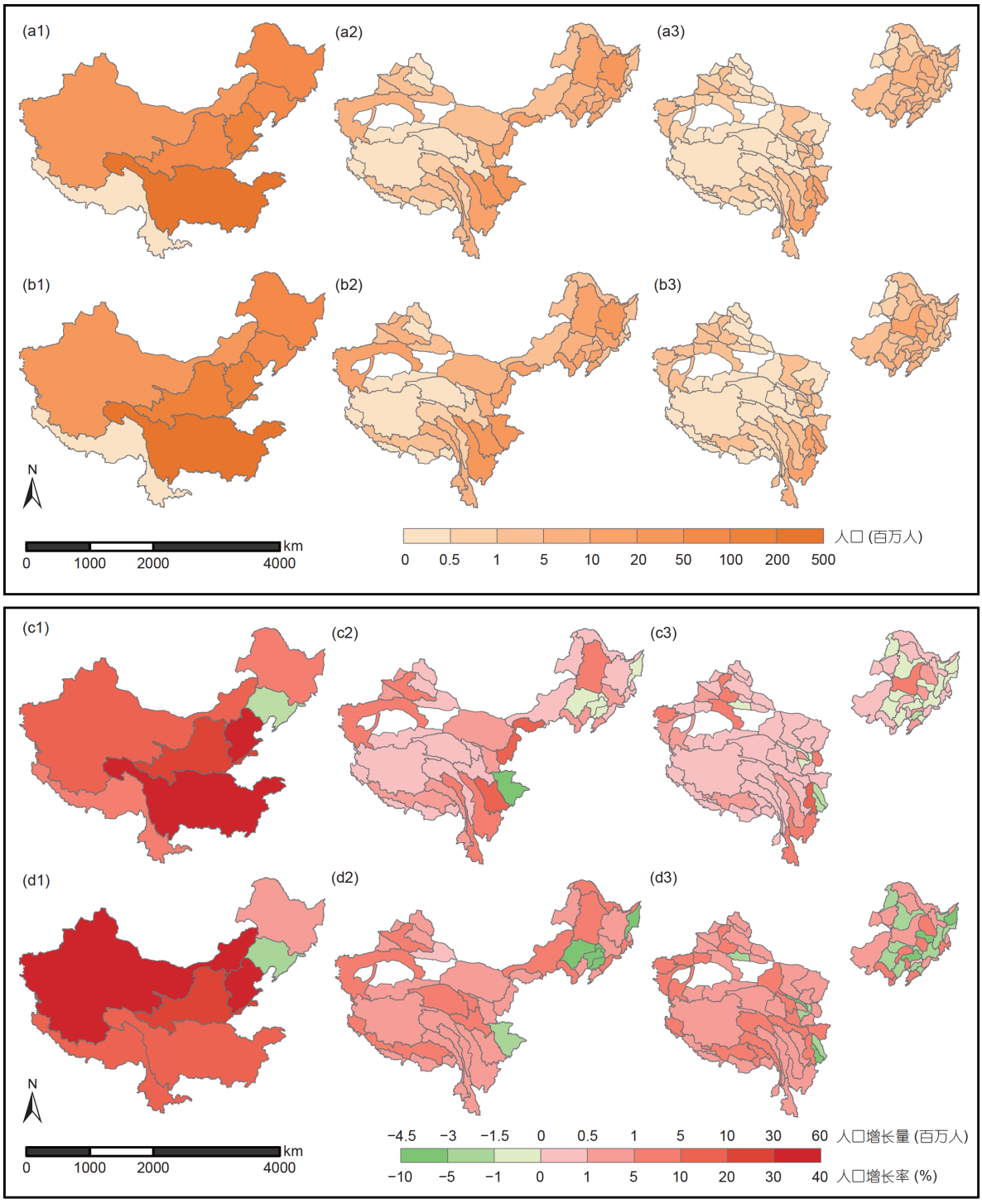


图 3 1995和2015年多级流域尺度中国冰冻圈水资源影响区人口分布及人口变化. (a1) 一级流域1995年人口; (a2) 二级流域1995年人口; (a3) 三级流域1995年人口; (b1) 一级流域2015年人口; (b2) 二级流域2015年人口; (b3) 三级流域2015年人口; (c1) 1995~2015年一级流域人口增长量; (c2) 1995~2015年二级流域人口增长量; (c3) 1995~2015年三级流域人口增长量; (d1) 1995~2015年一级流域人口增长率; (d2) 1995~2015年二级流域人口增长率; (d3) 1995~2015年三级流域人口增长率

Figure 3 Population and its growth rate of China's cryosphere affected area at multi-level watershed scale in 1995 and 2015. (a1)–(a3) The population of the first, second and third level basin respectively in 1995; (b1)–(b3) the population of the first, second and third level basin respectively in 2015; (c1)–(c3) the population growth of the first, second and third level basin respectively during 1995 to 2015; (d1)–(d3) the population growth rate of the first, second and third level basin respectively during 1995 to 2015

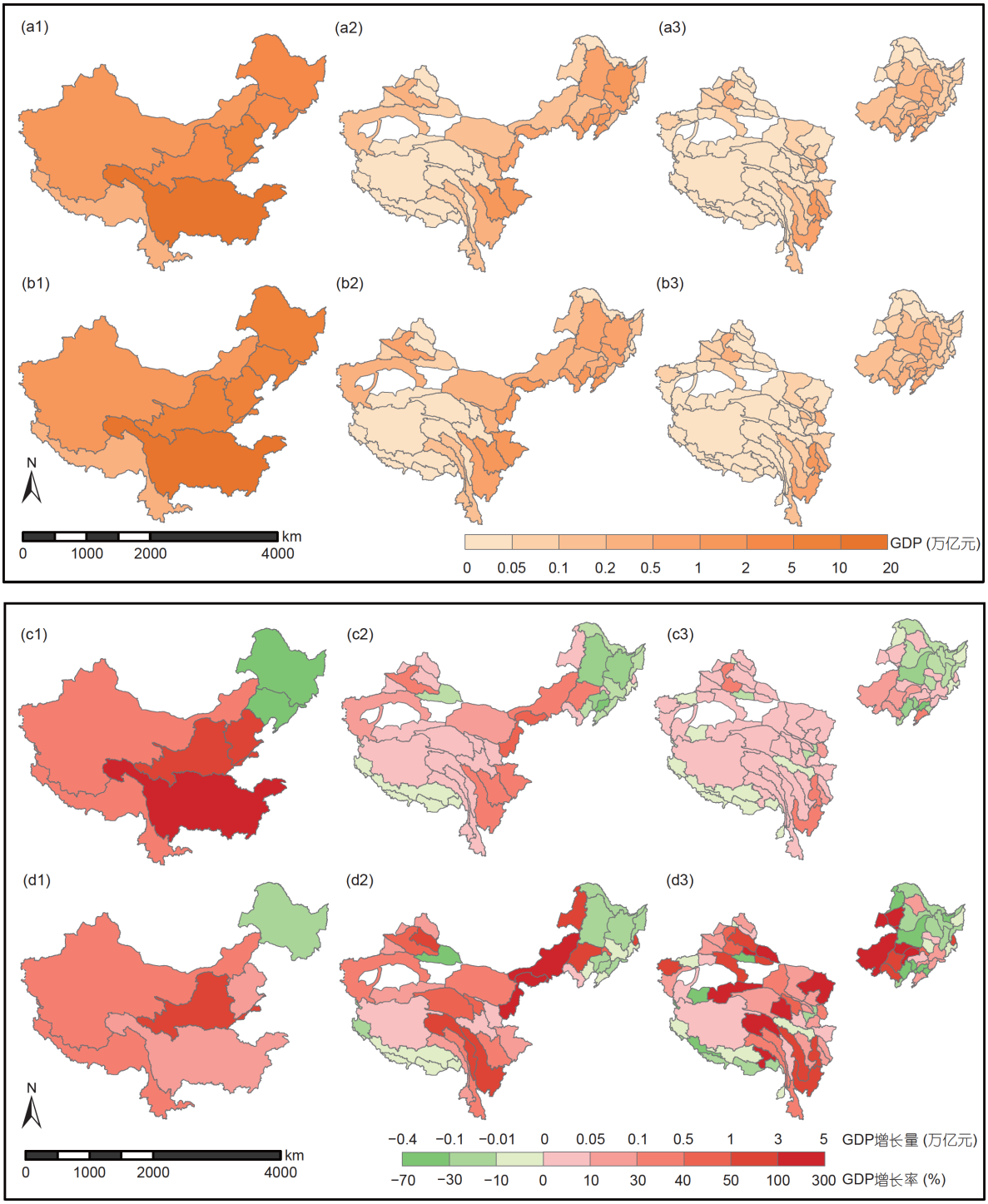


图 4 1995和2015年多级流域尺度中国冰冻圈水资源补给区GDP分布. (a1) 一级流域1995年GDP; (a2) 二级流域1995年GDP; (a3) 三级流域1995年GDP; (b1) 一级流域2015年GDP; (b2) 二级流域2015年GDP; (b3) 三级流域2015年GDP; (c1) 1995~2015年一级流域GDP增长量; (c2) 1995~2015年二级流域GDP增长量; (c3) 1995~2015年三级流域GDP增长量; (d1) 1995~2015年一级流域GDP增长率; (d2) 1995~2015年二级流域GDP增长率; (d3) 1995~2015年三级流域GDP增长率

Figure 4 GDP and its growth rate of China's cryosphere affected area at multi-level watershed scale in 1995 and 2015. (a1)–(a3) The GDP of the first, second and third level basin respectively in 1995; (b1)–(b3) the GDP of the first, second and third level basin respectively in 2015; (c1)–(c3) the GDP growth of the first, second and third level basin respectively during 1995 to 2015; (d1)–(d3) the GDP growth rate of the first, second and third level basin respectively during 1995 to 2015

河流域的太子河及大辽河干流减少最多, 达3223万元.

2.3 冰冻圈水资源对中国社会经济的重要性评估

如图5所示, 不同流域冰冻圈水资源供给指数和社会经济用水需求指数存在较大差异, 导致冰冻圈水资源对不同流域社会经济的重要性存在差异. 总体来看, 冰冻圈水资源对中国社会经济的重要性与冰冻圈影响区社会经济规模在空间上基本一致.

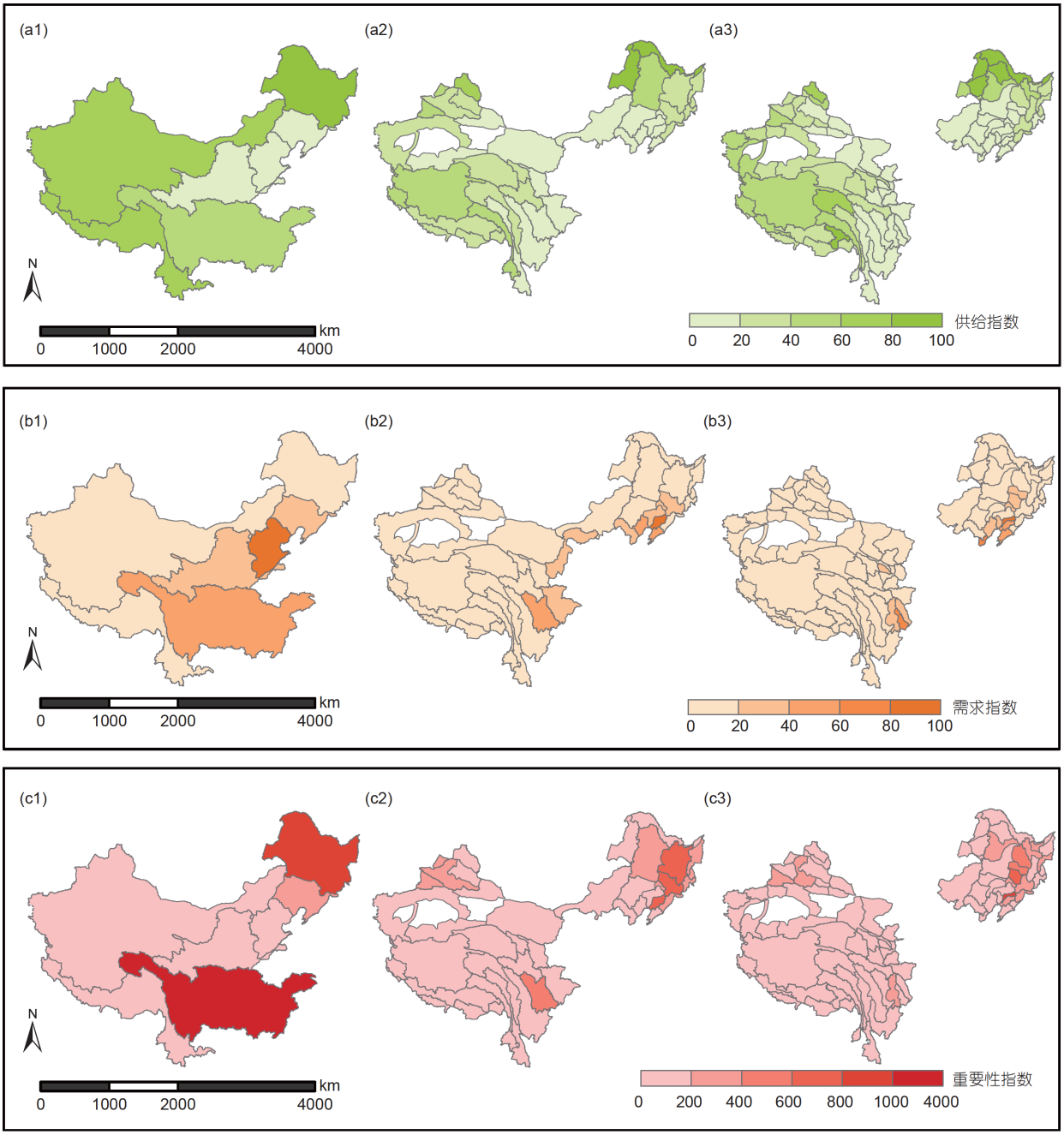


图 5 中国冰冻圈流域供水指数、流域需水指数、流域重要性指数空间分布. (a1) 一级流域冰冻圈水资源供给指数; (a2) 二级流域冰冻圈水资源供给指数; (a3) 三级流域冰冻圈水资源供给指数; (b1) 一级流域冰冻圈水资源需求指数; (b2) 二级流域冰冻圈水资源需求指数; (b3) 三级流域冰冻圈水资源需求指数; (c1) 一级流域冰冻圈水资源重要性指数; (c2) 二级流域冰冻圈水资源重要性指数; (c3) 三级流域冰冻圈水资源重要性指数

Figure 5 Spatial distribution of *SI*, *DI* and *BI* of China's cryosphere affected area at multi-level watershed scale. (a1)–(a3) *SI* of the first, second and third level basin respectively; (b1)–(b3) *DI* of the first, second and third level basin respectively; (c1)–(c3) *BI* of the first, second and third level basin, respectively

从一级流域尺度来看, 由于冰川储量相对丰富, 积雪深度较高, 冻土覆盖广, 松花江区供给指数最高(100), 其次是西南渚河区(70), 最低的是海河区(接近0). 由于社会经济规模最大, 所以海河区需水指数最大(100), 其次是长江区(56), 西北渚河区需水指数最低(接近0). 综合供给和需求两侧, 一级流域尺度重要性指数从高到低依次是长江区(3197)、松花江区(908)、辽河区(220)、西南诸河区(178)、黄河区(118)、海河区(接近0)、西北渚河区(接近0). 从二级流域尺度看, 供给指数最高的区域是黑龙江干流(100), 其次是额尔古纳河(85), 最低的是东北沿黄渤海渚河(接近0); 需水指数最高的流域是浑太河(100), 其次是东北沿黄渤海渚河(48), 羌塘高原内陆河最低(接近0). 综合供给和需求两侧, 重要性指数最高的流域是浑太河(781), 其次是第二松花江(774), 东北沿黄渤海渚河重要性最低(接近0). 从三级流域尺度来看, 供给指数最高的区域是尼尔基以上(100), 其次是额尔古纳河干流区间(99), 最低的是泚江口以下(接近0); 浑河需水指数最高(100), 其次是沱江(70), 羌塘高原区最低(接近0). 综合供给和需求两侧, 浑河的重要性指数最高(985), 其次是丰满以下(603), 泚江口以下重要性最弱(接近0).

3 结论与讨论

本研究从多级流域尺度分析了中国冰冻圈水资源(冰川、多年冻土和稳定积雪)的空间分布特征以及1995~2015年冰冻圈水资源影响区人口和GDP时空变化格局. 在此基础上, 进一步综合供给和需求两侧评估了冰冻圈水资源对中国社会经济的重要性. 结果表明:

(1) 中国冰冻圈及其影响区共涵盖了松花江区、辽河区、海河区、黄河区、长江区、西南诸河区和西北诸河区等7个一级流域、38个二级流域和84个三级流域.

(2) 中国冰冻圈主要分布在我们西部高山和高原地区以及东部高纬度地区, 其中塔里木河、羌塘高原以及雅鲁藏布江等流域冰川面积和储量较大, 青藏高原腹地和松花江流域多年冻土覆盖率较高, 松花江区、新疆北部以及青藏高原西南部平均积雪深度较大.

(3) 2015年冰冻圈水资源重要影响区(按三级流域尺度计算)人口和GDP分别约2.63亿和11.4万亿元, 分别占全国23.1%和16.5%, 主要分布在我国一、二级阶梯分界线的东南部和北部以及三级阶梯北部; 1995~2015年间冰冻圈重要影响区人口占全国比重增加, GDP占全国比重轻微上涨, 增幅远小于人口.

(4) 冰冻圈水资源对中国社会经济的重要性与冰冻圈影响区社会经济规模在空间上基本一致, 松花江流域、塔里木河流域、长江和黄河上游重要性指数最大. 虽然青藏高原西南部冰冻圈水资源丰富, 但是社会经济规模很小, 所以服务能力和重要性有限.

本研究在不同流域尺度系统分析了中国冰冻圈水资源的空间分布特征及其影响区人口和GDP时空变化格局, 在此基础上将冰冻圈水资源与社会经济关联起来构建指标, 探讨了冰冻圈水资源对中国社会经济的重要性. 本研究结果表明: 二级流域尺度上, 冰冻圈影响区承载了全国的26.8%的人口和19%的国内生产总值(以2015年数据为基础), 说明冰冻圈水资源与社会经济之间存在着密切联系, 尤其是西北干旱区的水资源很大程度上依赖于融水, 定量化支持了前期认识[29~32]. 本研究多尺度分析可以细化至小流域, 例如, 浑太河流域在水资源供需指数上都很高、重要性指数最大, 这有助于针对性地指导水资源的优化配置以及深刻理解水资源的重要性[33]. 此外, 我们也收集了现有研究中的冰雪融水径流贡献率(图6), 但受研究区资料类型和丰富度所限, 采用的研究方法不尽一致, 包括冰川融水径流模数法、流量与气温关系法、对比观测实验法以及冰川系统对气候变化响应的功能模型等. 一级流域上, 西北渚河区的冰川径流贡献率大, 而长江、黄河等流域水资源多受降雨等的影响, 冰川对径流贡献率小; 在诸多二级流域中, 塔里木河源流的冰冻圈径流贡献率最大, 达38.5%, 藏西诸河次之, 约23.6%, 而嘉陵江的冰冻圈径流贡献率最小, 仅为0.2%. 相对于外流河, 冰川融水对于内陆河流域的重要性更高. 随着气候变暖, 冰川径流逐渐逼近拐点, 将直接影响其社会经济.

冰冻圈水资源与社会经济系统之间的系统认识有赖于综合考虑降水、地下水以及蒸发等多个变量, 构建涵盖多要素和多过程的集成模型进行机理分析和模拟预测[15], 也有赖于更精细的冰冻圈数据和社会经济数据开展更细致的研究. 然而, 由于数据有限, 本研究尚未从全要素、人地系统耦合模型手段分析冰冻圈水资源对中国社会经济的影响, 尤其尚未探讨未来气候变化情景下冰冻圈水资源变化对社会经济带来的可能风险, 这些工作将来需要进一步加强.

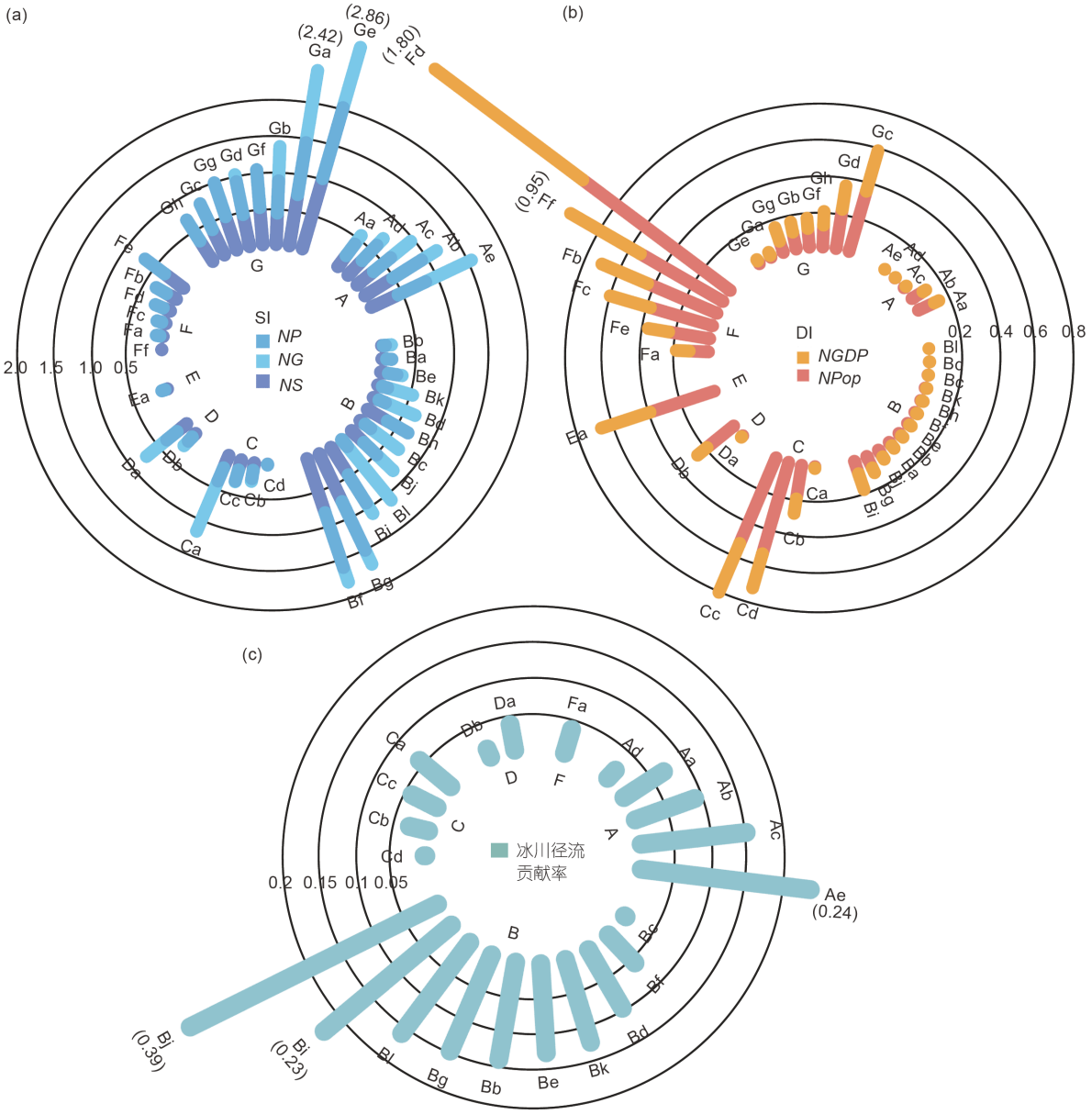


图 6 二级流域供水指数、需水指数和冰冻圈径流贡献率. (a) 供水指数*SI*, 按一级流域分组, 各二级流域的*SI*值沿径向递增, A~G代表7个一级流域, 其中*NP*、*NG*、*NS*分别代表归一化流域平均冰川储量、归一化流域平均积雪深度和归一化流域平均冻土面积; (b) 需水指数*DI*, 按一级流域分组, 各二级流域的*DI*值沿径向递增, A~G代表7个一级流域, 其中*NGDP*和*NPop*分别代表归一化国内生产总值和归一化人口; (c) 冰冻圈径流贡献率, A~D、F代表5个一级流域

Figure 6 Water supply index, water demand index, and contribution rate of cryosphere meltwater to runoff in secondary basins. (a), (b) Water supply index and demand index grouped by primary basins and ordered by *SI*/*DI* value of each secondary basin, respectively. A−G represent 7 primary basins. In (a), the stacked bars show the three indicator values for normalized permafrost area (*NP*), normalized glacier volume (*NG*) and normalized snow depth (*NS*), respectively. In (b), the stacked bars show the two indicator values for normalized GDP (*NGDP*) and normalized population (*NPop*), respectively; (c) contribution rate of cryosphere meltwater to runoff in secondary basins. A−D and F represent 5 primary basins

致谢 文中涉及的中国地图经由自然资源部地图技术审查中心审查, 审图号为GS(2020)2543号.

参考文献

1 Qin D H, Yao T D. Introduction to Cryosphere Science (in Chinese). Beijing: Science Press, 2017 [秦大河, 姚檀栋. 冰冻圈科学概论. 北京: 科学

出版社, 2017]
2 Su B, Xiao C D, Chen D L, et al. Cryosphere services and human well-being. Sustainability, 2019, 11: 43−65
3 Su B, Gao X J, Xiao C D. Interpretation of IPCC SR1.5 on cryosphere change and its impacts (in Chinese). Clim Change Res, 2019, 15: 395−404 [苏勃, 高学杰, 效存德. IPCC《全球1.5℃增暖特别报告》冰冻圈变化及其影响解读. 气候变化研究进展, 2019, 15: 395−404]
4 Huss M, Hock R. Global-scale hydrological response to future glacier mass loss. Nat Clim Chang, 2018, 8: 135–140
5 Liu S Y, Yao X J, Guo W Q, et al. The contemporary glaciers in China based on the Second Chinese Glacier Inventory (in Chinese). Acta Geogr Sin, 2015, 70: 3−16 [刘时银, 姚晓军, 郭万钦, 等. 基于第二次冰川编目的中国冰川现状. 地理学报, 2015, 70: 3−16]
6 Che T, Li X. Spatial distribution and temporal variation of snow water resources in China during 1993−2002 (in Chinese). J Glaciol Geocryol, 2005, 27: 64−67 [车涛, 李新. 1993−2002年中国积雪水资源时空分布与变化特征. 冰川冻土, 2005, 27: 64−67]
7 Milner A M, Khamis K, Battin T J, et al. Glacier shrinkage driving global changes in downstream systems. Proc Natl Acad Sci USA, 2017, 114: 9770–9778
8 Hansen J, Sato M, Ruedy R, et al. Global temperature change. Proc Natl Acad Sci USA, 2006, 103: 14288–14293
9 Pepin N, Bradley R S, Diaz H F, et al. Elevation-dependent warming in mountain regions of the world. Nat Clim Chang, 2015, 5: 424−430
10 Jacob T, Wahr J, Pfeffer W T, et al. Recent contributions of glaciers and ice caps to sea level rise. Nature, 2012, 482: 514–518
11 Immerzeel W W, van Beek L P H, Bierkens M F P. Climate change will affect the Asian water towers. Science, 2010, 328: 1382–1385
12 Lutz A F, Immerzeel W W, Shrestha A B, et al. Consistent increase in High Asia's runoff due to increasing glacier melt and precipitation. Nat Clim Chang, 2014, 4: 587–592
13 Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. 2018[2019-09-20]. https://archive.ipcc.ch/srocc/
14 Shen Y, Li S, Chen Y, et al. Estimation of regional irrigation water requirement and water supply risk in the arid region of Northwestern China 1989–2010. Agric Water Manag, 2013, 128: 55–64
15 Immerzeel W W, Lutz A F, Andrade M, et al. Importance and vulnerability of the world's water towers. Nature, 2019, 577: 364–369
16 Guo W Q, Liu S Y, Xu L, et al. The second Chinese glacier inventory: Data, methods and results. J Glaciol, 61: 357−372
17 Zhou Y W, Guo D X, Qiu G Q. Frozen Soil in China (in Chinese). Beijing: Science Press, 2010 [周幼吾, 郭东信, 邱国庆. 中国冻土. 北京: 科学出版社, 2010]
18 Che T, Li X, Jin R, et al. Snow depth derived from passive microwave remote-sensing data in China. Ann Glaciol, 2008, 49: 145−154
19 Dai L, Che T, Ding Y. Inter-calibrating SMMR, SSM/I and SSMI/S data to improve the consistency of snow-depth products in China. Remote Sens, 2015, 7: 7212–7230
20 Xie Z C, Wang X, Kang E S, et al. Glacial runoff in China: An evaluation and prediction for the future 50 years (in Chinese). J Glaciol Geocryol, 2006, 28: 5−14 [谢自楚, 王欣, 康尔泗, 等. 中国冰川径流的评估及其未来50 a变化趋势预测. 冰川冻土, 2006, 28: 5−14]
21 Kang E S, Yang Z N, Lai Z M, et al. Runoff of Snow and Ice Meltwater and Mountainous Rivers (in Chinese). Beijing: Science Press, 2000. 190−233 [康尔泗, 杨针娘, 赖祖铭, 等. 冰雪融水径流和山区河流. 北京: 科学出版社, 2000. 190−233]
22 Peng S J. The study on technology and method of water resources assessment of the typical ecosystem in arid area (in Chinese). Master Dissertation. Hohhot: Inner Mongolia Agriculture University, 2007 [彭淑娟. 干旱地区典型生态系统水资源评价技术方法研究. 硕士学位论文. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2007]
23 Zhang Y, Zhang J J, Zhang Y D, et al. Spatial variation of long-term runoff trends and response to precipitation change in the three-river headwaters region (in Chinese). Res Environ Sci, 2017, 30: 40−50 [张岩, 张建军, 张艳得, 等. 三江源区径流长期变化趋势对降水响应的空间差异. 环境科学研究, 2017, 30: 40−50]
24 Zhang X F, Yan H C, Yue Y, et al. Analysis on the sectional annual runoff change of the Jinsha River Basin in the recent 50 years (in Chinese). Resour Environ Yangtze Basin, 2018, 27: 134−143 [张小峰, 闫昊晨, 岳遥, 等. 近50年金沙江各区段年径流量变化及分析. 长江流域资源与环境, 2018, 27: 134−143]
25 Gao S R, Zeng W Z, Wu Q B, et al. Temporal and spatial variations of the maximum frozen depth of seasonally frozen soil in Tibet from 1990 to 2014 (in Chinese). J Glaciol Geocryol, 2018, 40: 223−230 [高思如, 曾文钊, 吴青柏, 等. 1990−2014年西藏季节冻土最大冻结深度的时空变化. 冰川冻土, 2018, 40: 223−230]
26 Zhao L, Liu G Y, Jiao K Q, et al. Variation of the permafrost in the headwaters of the Urumqi River in the Tianshan Mountains since 1991 (in Chinese). J Glaciol Geocryol, 2010, 32: 223−230 [赵林, 刘广岳, 焦克勤, 等. 1991−2008年天山乌鲁木齐河源区多年冻土的变化. 冰川冻土, 2010, 32: 223−230]
27 Cheng G D, Zhao L, Li R, et al. Characteristic, changes and impacts of permafrost on Qinghai-Tibet Plateau (in Chinese). Chin Sci Bull, 2019, 64: 2783–2795 [程国栋, 赵林, 李韧, 等. 青藏高原多年冻土特征、变化及影响. 科学通报, 2019, 64: 2783−2795]
28 Kaser G, Grosshauser M, Marzeion B. Contribution potential of glaciers to water availability in different climate regimes. Proc Natl Acad Sci USA, 2010, 107: 20223–20227

29 Tang Q H, Liu X C, Zhou Y Y, et al. Cascading impacts of Asian water tower change on downstream water systems (in Chinese). Bull Chin Acad Sci, 2019, 34: 1306–1312 [汤秋鸿, 刘星才, 周园园, 等. “亚洲水塔”变化对下游水资源的连锁效应. 中国科学院院刊, 2019, 34: 1306–1312]
30 Wang X M, Zhang J L, Liu S W, et al. Socioeconomic significance of Asian water tower in High Asia region (in Chinese). Bull Chin Acad Sci, 2019, 34: 1332–1340 [王晓明, 张靖琳, 刘世伟, 等. “亚洲水塔”在高亚地区的社会经济作用. 中国科学院院刊, 2019, 34: 1332–1340]
31 Zhang J T, He X J, Shangguang D H, et al. Impact of intensive glacier ablation on arid regions of northwest China and its countermeasure (in Chinese). J Glaciol Geocryol, 2012, 34: 848–854 [张九天, 何霄嘉, 上官冬辉, 等. 冰川加剧消融对我国西北干旱区的影响及其适应对策. 冰川冻土, 2012, 34: 848–854]
32 Sorg A, Bolch T, Stoffel M, et al. Climate change impacts on glaciers and runoff in Tien Shan (Central Asia). Nat Clim Chang, 2012, 2: 725–731
33 Wang S J, Ding Y J, Xiao C D. Integrated impacts of cryosphere change on the economic and social system and its adaptive management strategies (in Chinese). J Glaciol Geocryol, 2018, 40: 863–874 [王世金, 丁永建, 效存德. 冰冻圈变化对经济社会系统的综合影响及其适应性管理策略. 冰川冻土, 2018, 40: 863–874]

Summary for “冰冻圈水资源对中国社会经济的重要性: 基于多级流域尺度分析”

Importance of cryosphere water resources to China’s socio-economy: Based on multi-level basins analysis

Yi Huang[1,2], Cunde Xiao[1*], Bo Su[1] & Zhanghua Xu[2]

[1] *State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;*
[2] *College of Environment and Resources, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China*
* Corresponding author, E-mail: cdxiao@bnu.edu.cn

Cryosphere water resources (CWR) play indispensable roles in ecological security and socio-economic development in cold and arid regions of the world. The amount of melt water will continue to decrease once it reaches the maximum (peak water) due to climate change, while the sustainable and rapid development of socio-economy puts higher demand for water resources, which causes an increasing risk of regional water shortage. Therefore, a national assessment on the relationship between CWR and socio-economy is notable. The supply and demand of CWR are linked at the river basin scale, although the upper, middle and lower reaches of the river vary in the contribution of CWR to water availability. Here we analyze the spatial distribution characteristics of China’s CWR and the spatial-temporal patterns of population and GDP in cryosphere-fed-areas (CFA) at three-level basins scale. Then we present an Importance Index, which ranks all basins in terms of their water-supplying role and the downstream dependence of socio-economy. We conclude that: (1) CFA covers 7 primary basins, 38 secondary basins and 84 tertiary basins in China. (2) The top three with large glacier reserves are Tarim River, Qiangtang Plateau and the Yalu Tsangpo River Basin. Central Tibetan Plateau and the Songhua River Basin have high permafrost coverage. Songhua River Basin, northern Xinjiang and the southwest of the Tibetan Plateau have large average snow depth. (3) In 2015, population and GDP in CFA are about 263 million and 11.4 trillion yuan respectively, accounting for 23.1% and 16.5% of the total China, mainly distribute in the southeast and north of the boundary of the first and second steps and the north of the third step of topography of China. From 1995 to 2015, the proportion of population in the CFA increased from 24.4% to 26.8%, while the proportion of GDP in the whole country decreased from 21% to 19%. (4) For the CFA, the larger the socio-economic amounts, the higher the importance of water resources. However, the amount of water supply does not completely match the socio-economic distribution. Although the cryosphere water resources are abundant in the southwest of Tibetan Plateau, the socio-economic demand is small, representing a lower water service there. We have noticed that at the secondary basin scale, 26.8% of people were populated in the CFA, and nearly one-fifth (19%) of economic activities took place there in 2015. This indicates a lager dependence on CWR in socio-economy, especially in the arid northwest China. These conclusions quantitatively support the previous understanding. However, the multi-scale method we used can analyze the small watershed deeply. For example, the Huntai River Basin are of great importance due to its high water supply and demand index, which is conducive to guiding the optimal allocation of water resources and a deep understanding of the importance of water resources.

cryosphere, cryosphere melt water resources, population, GDP, cryospheric functions

doi: 10.1360/TB-2020-0073