

# 祁连山冰川服务价值评估及其时空特征

孙美平<sup>1,2</sup>, 马维谦<sup>1</sup>, 姚晓军<sup>1</sup>, 张明军<sup>1</sup>, 李忠勤<sup>2</sup>, 秦大河<sup>2</sup>

(1. 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070;

2. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 兰州 730000)

**摘要:** 冰川为干旱区人类福祉和社会经济发展提供必不可少的资源与服务, 开展冰川服务价值评估及时空特征研究对于区域社会经济可持续发展和环境保护具有重要意义。基于祁连山第一次和第二次冰川编目数据, 通过构建冰川服务价值评估体系, 并结合单位面积服务价格法、价值当量因子法和冰川服务价值变化指数等方法, 评估祁连山冰川服务价值及时空变化。结果表明: ① 2016年祁连山冰川服务价值为243.54亿元, 气候调节和径流调节构成该地区冰川最主要的服务, 其次是淡水资源供给和水力发电, 四者分别占总价值的60.58%、33.14%、3.47%和1.75%, 其他类型服务价值约为2.59亿元。② 在祁连山各水系中, 疏勒河流域冰川服务价值最高(77.71亿元, 占31.91%), 其次为哈尔滨腾河流域(43.21亿元, 占17.74%)和北大河流域(32.81亿元, 占13.47%)。在行政区划上, 青海省的祁连山冰川服务价值高于甘肃省11.38亿元, 其中海西蒙古族藏族自治州和酒泉市境内的冰川服务价值较高, 分别为111.24亿元(占45.68%)和77.58亿元(占31.86%)。③ 1956—2010年期间, 祁连山冰川服务价值量损失4.35亿元, 且冰川服务价值变化呈现经向地带性分异规律, 价值损失自西向东呈加快趋势。

**关键词:** 冰川; 功能与服务; 价值评估; 时空特征; 祁连山

DOI: 10.11821/dlxb202101014

## 1 引言

冰川是冰冻圈重要的组成要素, 不仅被视作气候变化的灵敏指示器, 而且对其周边区域自然和人类系统产生深刻影响<sup>[1-2]</sup>。中国是全球中低纬度地区冰川最发育的国家, 也是干旱区冰川数量最多的国家<sup>[3]</sup>。冰川及其融水在中国西北干旱区河川径流调节中扮演着重要角色, 是该地区人口、资源、生态、环境、社会经济可持续发展的物质和文化基础<sup>[1-4]</sup>。祁连山冰川融水哺育的河西走廊不仅是“丝绸之路经济带”的重要组成部分, 而且是欧亚大陆重要的贸易和文化交流通道, 冰川资源对甘肃和青海两省的水资源利用、绿洲生态和环境安全产生广泛而深刻的影响<sup>[5]</sup>。在全球变暖背景下, 冰川普遍退缩减薄<sup>[5-7]</sup>, 人类逐渐认识到冰川功能的衰退或丧失会导致冰川致利效应面临严重危机<sup>[8-11]</sup>。随着干旱地区绿洲和城市的扩张<sup>[12]</sup>, 水资源供给与需求之间的矛盾日益突显, 进一步引起人类对冰川功能与服务的极大关注。

与其他生态系统类似, 冰川亦具有完整且独特的功能和服务体系。冰川通过物质和能量交换, 促进了与大气圈的互馈联系、水圈的水循环过程、岩石圈的陆表过程和生物

收稿日期: 2020-02-24; 修订日期: 2020-10-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(41801052, 41861013); 中国科学院“西部之光”人才培养引进计划; 陇原青年创新创业人才项目 [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41801052, No.41861013; "Light of West China" Program of CAS; Longyuan Youth Innovation & Entrepreneurship Talent Program]

作者简介: 孙美平(1981-), 女, 辽宁沈阳人, 博士, 副教授, 主要从事寒区水文过程与气候变化影响评估研究。

E-mail: sunmeiping1982@163.com



木内流水系(5Y5)的重要补给来源。据中国第二次冰川编目数据,祁连山共有冰川2683条,面积1597.81 km<sup>2</sup>,冰储量约84.48 km<sup>3</sup>,在全球气候变暖背景下该区域冰川呈现加速退缩趋势<sup>[21]</sup>。

### 3 数据与方法

#### 3.1 数据来源

本文所用的祁连山冰川数据来自中国第一次和第二次冰川编目数据<sup>[22]</sup>,其处理方法、数据修订和误差校正见文献[23-25]。2016年祁连山区5个辐射台站(民勤、酒泉、敦煌、西宁、刚察)的太阳辐射年总量实测数据(图1),来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>);空气污染物二氧化硫、氮氧化物和烟尘排放强度来源于数据服务网(<http://www.3edata.com>)2016年甘肃和青海两省空气质量相关指标;二氧化硫、氮氧化物和烟尘治理价格依据中华人民共和国林业行业标准《森林生态系统服务功能评估规范(LY/T1721—2008)》;工业生产者购进价格指数、居民消费价格指数等统计数据来自《中国统计年鉴》(1978—2017);甘肃省、青海省旅游年总收入和区域生产总值(GRP)来自《甘肃发展年鉴2017》和《青海统计年鉴2017》;全国粮食平均产量和粮食平均出售价格来自《全国农产品成本收益资料汇编2017》。

#### 3.2 冰川冰储量及其变化的计算方法

冰储量作为冰川的重要参数,是核算冰川水资源及预测冰川变化的基础数据。本文对冰川冰储量的计算采用体积—面积经验公式<sup>[26]</sup>:

$$V = cS^\gamma \quad (1)$$

式中: $V$ 为冰储量(km<sup>3</sup>); $S$ 为冰川面积(km<sup>2</sup>); $c$ 和 $\gamma$ 为比例参数,采用Radić等<sup>[27]</sup>、施雅风<sup>[28]</sup>和Liu等<sup>[29]</sup>提出的经验数值的平均值。

冰川冰储量变化即两次冰川编目中冰储量的差值。由于祁连山区第一次冰川编目所用数据时间跨度较大,为便于不同流域冰川变化比较,本文采用冰储量变化速率方法<sup>[5]</sup>,计算公式为:

$$V_{GRC} = \frac{V_s - V_f}{Y_{s-f}} \quad (2)$$

式中: $V_{GRC}$ 为冰川冰储量变化速率(km<sup>3</sup>/a); $V_s$ 和 $V_f$ 分别为第二次和第一次冰川编目时的冰川冰储量(km<sup>3</sup>); $Y_{s-f}$ 为两次冰川编目时所用数据源的采集时间间隔(a),可由(3)式计算得到:

$$Y_{s-f} = \frac{\sum_{i=1}^m V_i \times Y_i}{\sum_{i=1}^m V_i} - \frac{\sum_{j=1}^n V_j \times Y_j}{\sum_{j=1}^n V_j} \quad (3)$$

式中: $V_i$ 和 $Y_i$ 分别为第二次冰川编目时某流域第*i*条冰川的冰储量和数据源年份; $V_j$ 和 $Y_j$ 分别为第一次冰川编目时该流域第*j*条冰川的冰储量和数据源年份; $m$ 和 $n$ 分别为第二次和第一次冰川编目时该流域的冰川总数量。

#### 3.3 冰川服务价值评估体系

冰川为人类社会提供的每项服务都依赖于冰川功能,涉及冰川的环境特征及过程<sup>[30]</sup>(图2)。与其他圈层或环境要素相比,冰川的显著特征是高反照率、高绝热和以固态形式存在。冰川过程包括冰川变化及其与大气圈、水圈、岩石圈、生物圈和人类系统

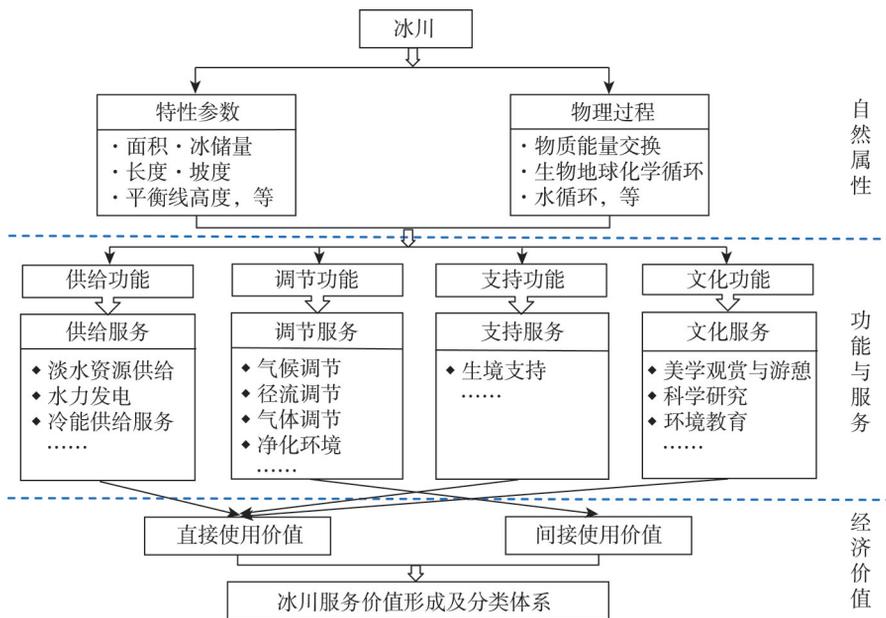


图2 冰川服务的形成过程及其价值评估体系框架

Fig. 2 The formation process of the glacial service and its value assessment system framework

的相互作用, 并通过能量和物质交换等复杂的反馈过程, 在不同时空尺度上对地球系统起着重要的调节作用<sup>[9, 31]</sup>。冰川基础功能包括改变地表能量平衡和水量平衡、改变水循环及水文过程、促进寒区旱区水热交换、促进陆地表面生物地球化学循环、养分和污染物储存和迁移、以及重压承载等, 这些功能是由冰川的自然属性决定的, 同时冰川服务在冰川功能的基础上还赋予了人类需求和价值取向, 即冰川的社会经济属性<sup>[9-10, 30]</sup>。冰川服务是冰川功能的表现, 但这些功能与服务并不一一对应, 更多情况下是一对多或者多对一的关系。

基于《千年生态系统评估》<sup>[32]</sup>并参考 Xiao 等<sup>[9]</sup>提出的冰冻圈服务功能框架, 冰川服务可分为供给服务、调节服务、支持服务和文化服务四种主要类型, 并进一步细分为淡水资源供给、水力发电、气候调节、径流调节、气体调节、净化环境、生境支持、美学观赏与游憩和科学研究与环境教育等。冰川服务的多样性决定了其具有多种价值分类方式, 根据人类的获益途径和程度, 冰川服务使用价值可分为直接使用价值和间接使用价值。直接使用价值指冰川可直接满足当前生产或消费需求的价值, 包括产成型价值(淡水资源供给和水力发电)和非产成型价值(生境支持、美学观赏与游憩、科学研究与环境教育等), 主要与供给服务、支持服务和文化服务有关。间接使用价值则是从冰川间接享用的功能效益, 如对生态系统的生命支持(气候调节、径流调节、气体调节和净化环境等), 涉及冰川的调节服务。目前生态服务价值估算的方法大致分为单位面积服务价格法<sup>[17-18]</sup>和价值当量因子法<sup>[16, 33]</sup>两大类。在评估祁连山冰川服务价值时, 采用单位面积服务价格法和价值当量因子法分别评估其经济价值并进行对比分析, 综合评价祁连山冰川服务价值的空间分布和时空变化特征。

**3.3.1 单位面积服务价格法** 单位面积服务价格法主要有市场价值法、影子工程法、影子价格法、旅行费用法、费用支出法和条件价值法等<sup>[17-18]</sup>。结合祁连山冰川特点和区域实际, 确定各服务评估方法及参数(表1)。

表1 祁连山冰川服务价值评估方法及参数

Tab. 1 Evaluation methods and parameters on glaciers service value in the Qilian Mountains

服务类型	评价指标	公式	参数	测算依据
供给服务	淡水资源供给	市场价值法 $V_w = \frac{V_{GRC} \times \rho_g}{\rho_w} \times P_w$	$V_w$ 为冰川淡水资源供给价值(元); $V_{GRC}$ 为冰储量年变化量( $\text{km}^3/\text{a}$ ); 冰川密度( $\rho_g$ )为 $0.917 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ; 水的密度( $\rho_w$ )为 $1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ; $P_w$ 为淡水资源价格,参考2016年祁连山区供水价格 $1.75 \text{ 元/m}^3$ 。	将冰储量年变化值折算为冰川为社会生态环境提供的年淡水资源量,根据水价计算其经济价值。
	水力发电	影子价格法 $V_p = V_m \times RC \times P_p$	$V_p$ 为冰川水力发电价值(元); 祁连山冰川融水( $V_m$ )取值为 $11.32 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}^{[1]}$ ; $RC$ 为单位库容发电量,祁连山区典型水库年平均单位库容发电量约为 $1.46 \text{ (kW} \cdot \text{h)/m}^3$ ; $P_p$ 为水力发电价格,参考2016年祁连山区小水电上网电价 $0.257 \text{ 元/(kW} \cdot \text{h)}$ 。	将冰川融水折算为祁连山区水库的库容总量,根据该区单位库容发电量和水力发电价格计算冰川水力发电的价值。
调节服务	气候调节	影子价格法 $V_c = (W_s + W_g) \times \eta \times P_e$ $W_s = S_g \times R \times \alpha_g \times \alpha_s$ $W_g = V_{GRC} \times \rho_g \times q_g$	$V_c$ 为冰川气候调节价值(元); $S_g$ 为第二次冰川编目冰川面积( $\text{km}^2$ ); $R$ 为祁连山区单位面积太阳辐射年总量( $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ); 冰川反照率( $\alpha_g$ )为 $0.6^{[1]}$ ; 地形遮蔽率( $\alpha_s$ )取值 $0.5$ ; $V_{GRC}$ 为冰储量年变化量( $\text{km}^3/\text{a}$ ); $\rho_g$ 为冰川密度; 冰川的融解潜热( $q_g$ )为 $3.35 \times 10^5 \text{ J/kg}$ ; $P_e$ 为电费价格,参考2016年该区域各行业平均电价 $0.51 \text{ 元/(kW} \cdot \text{h)}$ ; $\eta$ 为热能转换效率。	将冰川表面反射太阳辐射能与冰川消融吸收热量之和作为冰川抑制气候变暖的贡献值,然后将热能转换为电能,以电价计算冰川气候调节的价值 $^{[17]}$ 。
	径流调节	影子工程法 $V_r = V_m \times P_r$	$V_r$ 为冰川径流调节价值(元); $V_m$ 为祁连山冰川融水( $\text{m}^3/\text{a}$ ); $P_r$ 为2016年平均水库库容造价 $7.131 \text{ 元/m}^3$ 。	将冰川融水转换为山区水库容量,再结合单位水库蓄水成本计算冰川径流调节价值。
	气体调节	影子价格法 $V_g = V_{\text{SO}_2} + V_{\text{NO}_x}$ $V_{\text{SO}_2} = Q_{\text{SO}_2} \times S_g \times P_{\text{SO}_2}$ $V_{\text{NO}_x} = Q_{\text{NO}_x} \times S_g \times P_{\text{NO}_x}$	$V_g$ 为冰川气体调节价值(元); $Q_{\text{SO}_2}$ 和 $Q_{\text{NO}_x}$ 分别为单位面积冰川吸收 $\text{SO}_2$ 和氮氧化物的量,参考甘肃省和青海省 $\text{SO}_2$ 和氮氧化物排放强度; $S_g$ 为第二次冰川编目冰川面积( $\text{km}^2$ ); $P_{\text{SO}_2}$ 和 $P_{\text{NO}_x}$ 分别为2016年 $\text{SO}_2$ 和氮氧化物治理费用( $1.689 \text{ 元/kg}$ 和 $0.887 \text{ 元/kg}$ )。	按照祁连山冰川面积大小吸收二氧化硫、氮氧化物的量及它们的治理费用来计算气体调节价值。
	净化环境	影子价格法 $V_e = Q_{\text{烟尘}} \times S_g \times P_{\text{烟尘}}$	$V_e$ 为冰川净化环境价值(元); $Q_{\text{烟尘}}$ 为单位面积冰川吸收烟尘的量,参考甘肃省和青海省烟尘排放强度; $S_g$ 为第二次冰川编目冰川面积( $\text{km}^2$ ); $P_{\text{烟尘}}$ 为2016年烟尘治理费用 $0.211 \text{ 元/kg}$ 。	根据祁连山冰川面积大小吸附烟尘量及其治理费用来计算净化环境服务价值。
支持服务	生境支持	费用支出法 $V_h = S_g \times P_h$	$V_h$ 为冰川生境支持价值(元); $S_g$ 为第二次冰川编目冰川面积( $\text{km}^2$ ); $P_h$ 为单位面积祁连山生态保护与治理平均每年投资金额,参考《祁连山生态保护与建设综合治理规划(2012—2020年)》总投资 $79.9 \text{ 亿元}$ ,估算 $P_h$ 为 $6262.98 \text{ 元/km}^2$ 。	将冰川作为自然保护区的重要组成部分,根据单位面积祁连山生态保护与建设综合治理重大项目投资,估算冰川生境支持价值。
文化服务	美学观赏与游憩	旅行费用法与条件价值法相结合 $V_t = S \times R_g \times \frac{S_g}{S_t}$	$V_t$ 为冰川美学观赏与游憩服务价值(元); $S$ 为甘肃省和青海省旅游年总收入金额; $R_g$ 为冰川相关旅游所占旅游总费用比例; $S_g$ 为第二次冰川编目冰川面积( $\text{km}^2$ ); $S_t$ 为甘肃省和青海省冰川总面积( $\text{km}^2$ )。	通过向中外游客发放问卷调查统计以冰川旅游相关为目的的费用占游客旅游总费用的比例,结合甘肃和青海省旅游年总收入估算冰川美学观赏与游憩的价值。
	科学研究与环境教育	费用支出法 $V_s = P_i + P_f$	$V_s$ 为冰川科学研究与环境教育服务价值(元); $P_i$ 为祁连山冰川每年在教学实习方面的经济价值,为 $529.4 \times 10^4 \text{ 元}^{[34]}$ ; $P_f$ 为2016年国家自然科学基金中与祁连山冰川相关的项目科研经费 $414 \times 10^4 \text{ 元}$ 。	根据教学实习和国家自然科学基金项目经费,评估冰川科学研究与环境教育的价值。

**3.3.2 单位面积价值当量因子法** 基于 Costanza<sup>[14]</sup>原理并参考谢高地等<sup>[16]</sup>提出的中国陆地生态系统单位面积服务价值当量, 确定冰川各服务相对于农田提供生态服务单价的当量, 然后计算冰川服务价值。

$$V = \sum_{i=1}^n e_i \times E_a \times S_g \quad (4)$$

式中:  $V$ 为冰川服务总价值(元);  $e_i$ 为冰川第 $i$ 种服务单位面积价值当量; 1个生态服务价值当量因子的经济价值量( $E_a$ )等于当年全国平均粮食单产市场价值的1/7<sup>[33]</sup>, 2016年全国平均粮食产量6856.95 kg/hm<sup>2</sup>, 2016年全国粮食平均价格2.17元/kg, 由此得出 $E_a$ 为2125.65元/hm<sup>2</sup>;  $S_g$ 为第二次冰川编目冰川面积(km<sup>2</sup>)。

### 3.4 冰川服务价值变化指数

本文采用冰川服务价值变化指数( $GSCI$ )来表征冰川服务价值的相对增益或损失。 $GSCI$ 值为0时表明冰川服务价值没有变化, 为负值时表示有损失, 为正值时表示有增益。

$$GSCI = \frac{GS_s - GS_f}{GS_f} \quad (5)$$

式中:  $GS_s$ 和 $GS_f$ 分别代表最后状态和最初状态下的冰川服务价值。

## 4 结果分析

### 4.1 祁连山冰川服务价值

冰川服务价值的大小直接反映了冰川功能与服务的强弱及冰川的稳定性状况。基于单位面积服务价格法计算得到2016年祁连山冰川服务总价值约为243.54亿元, 其中间接使用的调节服务价值为228.58亿元, 远大于其他直接使用价值(14.96亿元), 而代表直接经济价值的供给服务价值不足总价值的6%(表2)。从各服务指标来看, 价值大小依次为: 气候调节>径流调节>淡水资源供给>水力发电>美学观赏与游憩>气体调节>生境支持>科学研究与环境教育>净化环境。其中, 冰川融水对河川径流调节价值为80.72亿元(33.14%), 淡水资源供给价值为8.44亿元(3.47%), 利用冰川融水和较大的高程比降进行水力发电的价值为4.25亿元(1.75%), 进一步表明祁连山冰川融水对于干旱区人们生产和生态经济发展的重要性。冰川表面较高的反照率与融化吸热对气候调节作用的价

表2 2016年祁连山冰川各类服务价值量

Tab. 2 The service value of glaciers in the Qilian Mountains in 2016

服务类型		服务价格法		价值当量因子法	
一级指标	二级指标	服务价值(亿元)	比例(%)	服务价值(亿元)	比例(%)
供给服务	淡水资源供给	8.44	3.47	7.34	21.04
	水力发电	4.25	1.75	-	-
调节服务	气候调节	147.54	60.58	1.83	5.25
	径流调节	80.72	33.14	24.22	69.44
	气体调节	0.30	0.12	0.61	1.75
	净化环境	0.02	0.01	0.54	1.55
支持服务	生境支持	0.10	0.04	0.03	0.08
文化服务	美学观赏与游憩	2.08	0.85	0.31	0.89
	科学研究与环境教育	0.09	0.04	-	-
合计		243.54	100.00	34.88	100.00

值为147.54亿元(60.58%),意味着在全球变暖背景下祁连山冰川对减缓区域气温升高具有很大的贡献。气体调节、净化环境、生境支持、美学观赏与游憩、科学研究与环境教育的服务价值为2.59亿元,仅占总价值的1.06%,但作为整个西北地区重要的生态安全屏障,祁连山冰川在维持大气化学组分平衡、稀释和转移污染物方面扮演着重要角色;其独具特色的生态类型和珍稀动植物种类,成为中国生物多样性优先保护区域;并且祁连山冰川资源丰富多样,其旅游开发空间广阔、潜力巨大;此外冰川为冰冻圈科学研究、普及冰冻圈知识、培养冰冻圈科学专业人才提供了重要科研场所<sup>[1]</sup>,因此这些服务不容忽视。

由于评价方法和数据资料的限制等原因,在刻画冰川服务价值的空间特征和时空变化时,尚难利用单位面积服务价格法进行估算,因此采用单位面积价值当量因子法进行价值评估。由表2可知,基于单位面积价值当量因子法计算的祁连山冰川服务总价值为34.88亿元/a,远小于单位面积服务价格法的计算结果。冰川主要借助对太阳辐射较高的反照率和自身相变等过程中能量和物质转化实现冰川的功能与服务,而以往的研究中冰川价值当量因子主要采用专家经验确定<sup>[16]</sup>,对冰川质量状况的时空差异缺乏考虑,难免会对计算区域冰川服务价值造成一定的误差<sup>[17]</sup>。单位面积服务价格法涉及的参数既有冰川的自然属性,还有冰川服务的潜在边际收益,估算结果更能反映冰川服务在时空上的动态变化,可信度较高。因此本文结合单位面积服务价格法的计算结果对冰川价值当量因子进行修正,得到祁连山冰川服务价值当量因子。其中淡水资源供给服务价值当量因子修正为2.485,水力发电为1.251,气候调节为43.440,径流调节为23.766,气体调节为0.088,净化环境为0.006,生境支持为0.029,美学观赏与游憩为0.612,科学研究与环境教育为0.026。采用修正后的单位面积价值当量评估祁连山冰川服务价值空间分布和时空变化,并且在计算1956—2010年期间冰川服务价值变化时,考虑通货膨胀影响因素,采用相关年份的居民消费价格指数调整单位服务价格。

## 4.2 冰川服务价值空间特征

**4.2.1 祁连山各水系冰川服务价值** 祁连山冰川属于大通河水系(5J4)、河西内流水系(5Y4)和柴达木内流水系(5Y5)三个二级流域<sup>[28]</sup>。其中河西内流水系冰川年服务价值最高(159.61亿元);其次是柴达木内流水系(80.76亿元);大通河流域冰川服务价值最低,仅3.17亿元。从三级流域冰川服务价值来看(图3),不同流域提供的冰川服务价值存在显著差异,尤其是祁连山西段的干旱区流域,冰川提供的服务价值较高。其中位于中西段北坡的疏勒河流域(5Y44)最高,为77.71亿元(31.91%);其次是西段南坡的哈尔腾河流域(5Y56)和中段北坡的北大河流域(5Y43),分别为43.21亿元(17.74%)和32.81亿元(13.47%);东中段的石羊河(5Y41)、大通河(5J42)、布哈河—青海湖(5Y51)和巴音郭勒河(5Y59)的冰川服务价值均小于6.10亿元,其中巴音郭勒河是冰川服务价值最低的流域,仅占总价值的0.14%。祁连山各流域冰川服务价值的空间差异主要受各流域冰川面积大小的影响。

**4.2.2 祁连山地区各省(市)冰川服务价值** 在行政区划上,祁连山冰川隶属于甘肃省的酒泉市、张掖市、武威市和青海省的海西蒙古族藏族自治州、海北藏族自治州。就甘肃省而言,其境内冰川年服务价值总量为116.08亿元。甘肃省祁连山冰川资源主要分布在酒泉市和张掖市,且酒泉市冰川面积和冰储量分别为张掖市的2倍和3倍多。从各市冰川服务价值来看(图3),酒泉市冰川服务价值为77.58亿元(31.86%);张掖市为37.54亿元(15.41%);武威市是祁连山地区冰川资源占有量最少的市,其冰川服务价值为0.96亿元(0.39%)。青海省境内祁连山冰川面积和冰储量均大于甘肃省,其冰川年服务价值总量亦

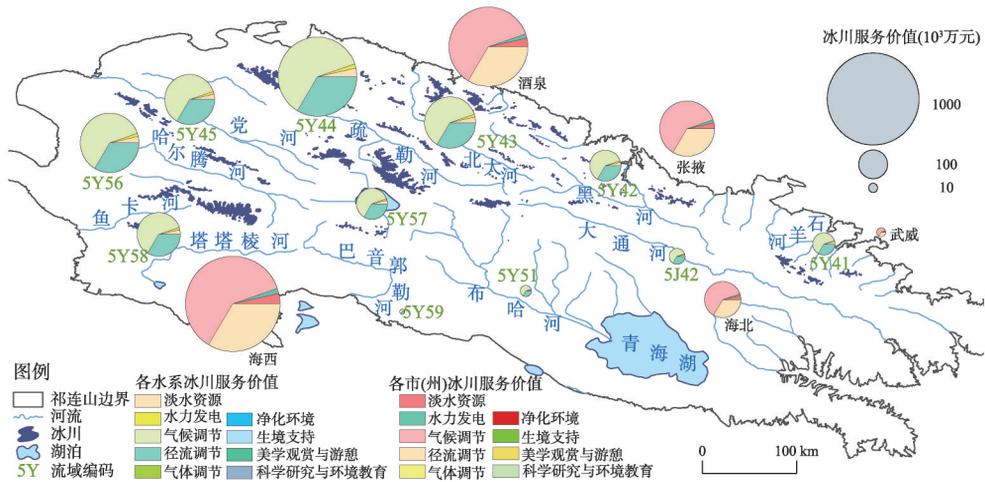


图3 祁连山各水系与各市(自治州)冰川服务价值及价值占比

Fig. 3 Service value and percentages of glaciers by watersheds and cities in the Qilian Mountains

比甘肃省多 11.38 亿元, 其中海西蒙古族藏族自治州和海北藏族自治州冰川服务价值分别为 111.24 亿元 (45.68%) 和 16.22 亿元 (6.66%), 海西蒙古族藏族自治州冰川各服务价值和总价值相比于其它市 (州) 最高。

### 4.3 祁连山冰川服务价值时空变化

统计祁连山第一、二次冰川编目数据表明, 1956—2010 年期间该山区冰川面积和冰储量分别减少 417.15 km<sup>2</sup> 和 21.16 km<sup>3</sup>, 由冰川退缩所带来的冰川服务价值量整体减少约 4.35 亿元 (-2.05%)。

从各水系冰川服务价值变化来看 (图 4a), 祁连山西段有增益, 东中段有损失。与各流域自身冰川服务价值相比, 大通河水系 (5J4) 冰川服务价值损失最多 (-40.31%); 河西内流水系 (5Y4) 价值损失 -5.30%; 柴达木内流水系 (5Y5) 价值增加 8.02%。具体而言, 位于祁连山东中段的大通河流域 (5J42) 冰川服务价值变幅为 -40.31%; 中段北坡的黑河 (5Y42) 和东段北坡的石羊河流域 (5Y41) 分别为 -33.45% 和 -23.98%; 中段的布哈河—青海湖流域 (5Y51)、北大河 (5Y43) 和巴音郭勒河 (5Y59) 的冰川服务价值变化介于 -16.37%~-4.65% 之间; 哈拉湖 (5Y57) 以西的 5 个流域冰川服务价值增益均大于 2.81%, 其中鱼卡河—塔塔棱河流域 (5Y58) 冰川服务价值增益最大, 为 10.08%。祁连山东中段冰川服务价值减损是冰川大规模退缩的结果, 而哈拉湖以西的 5 个流域冰川面积减少速率低于东中段流域<sup>[5]</sup>, 物价上涨在一定程度上弥补了冰川退缩造成的服务价值损

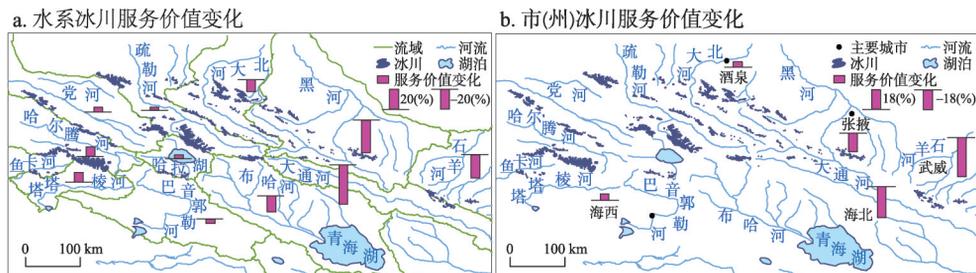


图4 1956—2010年祁连山各水系与各市(自治州)冰川服务价值变化

Fig. 4 Changes of the service value of glaciers in different watersheds and cities in the Qilian Mountains from 1956 to 2010

失, 导致西段冰川服务价值略微增加。就整个祁连山而言, 物价上涨远不能比拟冰川退缩给冰川服务价值带来的影响, 从而导致冰川服务价值整体减少。

1956—2010年甘肃省和青海省祁连山冰川服务价值分别损失3.93亿元和0.42亿元。从各市(自治州)价值变化来看(图4b), 位于祁连山东段的武威市和海北藏族自治州冰川服务价值损失较大, 分别为-36.37%和-28.70%; 张掖市损失-17.16%; 酒泉市和海西蒙古族藏族自治州分别增益5.04%和5.74%。表明祁连山冰川服务价值变化总体上呈向地带性分异规律, 价值损失自西向东呈现加快趋势。

## 5 讨论

祁连山区生态系统的特点与西北干旱区的其他山系具有相似性, 从高山冰川、森林、草地到山地农田, 构成了一个山区复合生态系统, 这些生态系统之间既相互依存又相互制约。为了更好地比较该区冰川、森林、草地、农田四类生态系统的异同, 本文收集了近年来祁连山区各生态系统服务价值评估的相关文献<sup>[35-37]</sup>, 虽然各文献研究的生态系统类型以及服务评价指标不同, 对各类生态系统不同服务贡献率的比较存在一定的局限, 但仍可为评估其相对贡献程度提供一定依据<sup>[17]</sup>。从祁连山不同生态系统各服务价值占总价值的比例来看(表3), 淡水资源供给/产品供给、气候调节和径流调节在该复合生态系统中均占有相对优势, 在祁连山区冰川、森林、草地、农田生态系统中这三类服务贡献率之和分别占到97.19%、49.40%、87.93%和52.58%, 其中森林和草地生态系统中径流调节/涵养水源为价值最大的服务(占32.09%和45.48%), 农田生态系统中产品供给服务贡献最大(36.22%), 该山区冰川提供的气候调节服务(60.58%)远高于其他三类生态系统。为了增强冰川、森林、草地和农田生态系统之间单位面积服务价值可比性, 本文采用居民消费价格指数将各生态系统服务价值转化为2016年的经济价值, 就祁连山区不同生态系统单位面积服务价值来看, 森林生态系统单位面积服务价值最高(21.37万元/hm<sup>2</sup>), 其次为冰川(15.24万元/hm<sup>2</sup>), 草地和农田生态系统相对较小(1.26万元/hm<sup>2</sup>和0.77万元/hm<sup>2</sup>)。这表明冰川与其他生态系统一样具有完整的服务体系, 冰川及其融水是维持干旱区复合生态系统的纽带, 直接关系到区域生态经济系统的可持续发展和健康运行。

表3 祁连山不同生态系统类型的服务价值

Tab. 3 Service values of different ecosystem types in the Qilian Mountains

服务类型	各生态系统服务价值所占比例(%)			
	冰川(本研究)	森林 <sup>[35]</sup>	草地 <sup>[36]</sup>	农田 <sup>[37]</sup>
淡水资源供给/产品供给	3.47	16.13	3.17	36.22
水力发电	1.75	-	-	-
气候调节	60.58	1.18	39.28	9.77
径流调节/涵养水源	33.14	32.09	45.48	6.59
气体调节/固碳释氧	0.12	0.49	2.09	5.49
净化环境/废物处理	0.01	0.38	0.07	18.00
固土保肥/土壤形成与保护	-	24.03	9.87	16.03
生境支持/生物多样性	0.04	24.68	-	7.79
美学观赏与游憩/休闲旅游	0.85	1.02	0.04	0.11
科学研究与环境教育	0.04	-	-	-

冰川服务通过转化为产品或作用于生产过程的方式支撑产业活动的一部分产出, 其服务价值也就直接或间接地影响产业活动的一部分产值。因此, 冰川服务价值与区域生产总值的比例关系体现了冰川服务对区域经济发展的贡献程度, 即区域经济发展对冰川服务的依赖度。根据本文的评估结果, 冰川服务价值在祁连山周边5个市(州)的区域生产总值(2027.2亿元)中所占比例为12.01%。这意味着, 2016年祁连山地区约1/8的区域生产总值是通过冰川资源和服务获得的, 表明冰川在干旱区人们生产生活和生态经济发展中扮演着重要角色。从祁连山各市(州)冰川服务价值占区域生产总值的比例来看, 海西蒙古族藏族自治州冰川服务价值对区域生产总值的贡献最大(22.84%), 其次为海北藏族自治州(16.11%), 武威市区域经济发展对冰川服务的依赖度最低(0.21%), 这为该地区未来生态保护和生态资产核算提供了参考依据。

祁连山冰川服务价值的空间特征和时空变化主要与冰川空间分异规律和近50年来冰川对气候变化的响应有关, 祁连山约86%的冰川面积小于 $1.0 \text{ km}^2$ <sup>[9]</sup>, 而规模较小冰川对气温升高更为敏感, 这些冰川的快速退缩导致1956—2010年祁连山冰川服务价值整体降低, 平均每年减少870万元, 进一步表明评估冰川服务价值的必要性和重要性, 这为掌握冰川服务价值现状和管理决策提供了重要的生态信息。然而, 本评估结果虽在一定程度上定量反映了祁连山冰川服务价值及其时空变化规律, 但对冰川的复杂过程和功能以及生态过程与经济过程的复杂关系等仍需深入研究, 比如通过开展野外调查研究, 并结合遥感和地理信息系统技术, 挖掘冰川更多的功能与服务; 进一步完善冰川服务的合理分类、各服务单位面积价格的量化方法, 提高冰川服务价值评估研究之间的可比性以及服务价值评估结果的精确性。同时, 本文只考虑了冰冻圈的单一要素—冰川, 对于积雪、冻土、河冰、湖冰等其他冰冻圈要素的服务价值评估将是今后研究不断探索的方向之一。将冰冻圈各要素与气候、水文、生态、环境等的联系和相互作用纳入同一系统中进行综合研究, 评估和量化过去、现在和未来气候变化所导致的冰冻圈各分量的变化及其生态经济效应, 也是下一步应重点开展的研究内容。

## 6 结论

(1) 基于祁连山第一、二次冰川编目数据, 采用单位面积服务价格法和价值当量因子法评估该山区冰川服务价值。2016年祁连山冰川服务价值为243.54亿元, 其中气候调节和径流调节构成该地区冰川主要的服务, 其次为淡水资源供给和水力发电, 四者分别占总价值的60.58%、33.14%、3.47%和1.75%, 其他类型服务价值为2.59亿元。

(2) 在祁连山区冰川编目三级流域中, 疏勒河流域冰川服务价值最高, 为77.71亿元(31.91%); 其次是哈尔腾河流域和北大河流域分别为43.21亿元(17.74%)和32.81亿元(13.47%); 巴音郭勒河是冰川服务价值最低的流域, 仅占总价值的0.14%。在行政区划上, 甘肃省和青海省境内的祁连山冰川年服务价值总量分别为116.08亿元和127.46亿元, 其中酒泉市和海西蒙古族藏族自治州境内的冰川服务价值较高, 分别为77.58亿元(31.86%)和111.24亿元(45.68%)。

(3) 1956—2010年期间祁连山冰川服务价值量损失4.35亿元, 且冰川服务价值变化呈现经向地带性分异规律, 冰川服务价值损失自西向东呈加快趋势。位于祁连山东中段的大通河流域、中段北坡的黑河和东段北坡的石羊河流域冰川服务价值变化介于-40.31%~-23.98%; 哈拉湖以西的5个流域冰川服务价值变化介于2.81%~10.08%。从行政区划来看, 位于祁连山东段的武威市和海北藏族自治州冰川服务价值损失较大, 分别

为-36.37%和-28.70%；中西段的酒泉市和海西蒙古族藏族自治州冰川服务价值均有增益，分别为5.04%和5.74%。

### 参考文献(References)

- [1] Qin Dahe, Yao Tandong, Ding Yongjian, et al. Introduction to Cryosphere Science. Beijing: Science Press, 2017. [秦大河, 姚檀栋, 丁永建, 等. 冰冻圈科学概论. 北京: 科学出版社, 2017.]
- [2] Qin Dahe, Zhou Botao, Xiao Cunde. Progress in studies of cryospheric changes and their impacts on climate of China. *Acta Meteorologica Sinica*, 2014, 72(5): 869-879. [秦大河, 周波涛, 效存德. 冰冻圈变化及其对中国气候的影响. 气象学报, 2014, 72(5): 869-879.]
- [3] Wang Zongtai, Su Hongchao. Glaciers in the world and China: Distribution and their significance as water resources. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(5): 498-503. [王宗太, 苏宏超. 世界和中国的冰川分布及其水资源意义. 冰川冻土, 2003, 25(5): 498-503.]
- [4] Gagné K, Rasmussen M B, Orlove B. Glaciers and society: Attributions, perceptions, and valuations. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2014, 5(6): 793-808.
- [5] Sun Meiping, Liu Shiyin, Yao Xiaojun, et al. Glacier changes in the Qilian Mountains in the past half century: Based on the revised First and Second Chinese Glacier Inventory. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(9): 1402-1414. [孙美平, 刘时银, 姚晓军, 等. 近50年来祁连山冰川变化: 基于中国第一、二次冰川编目数据. 地理学报, 2015, 70(9): 1402-1414.]
- [6] Kraaijenbrink P D A, Bierkens M F P, Lutz A F, et al. Impact of a global temperature rise of 1.5 degree celsius on Asia's glaciers. *Nature*, 2017, 549(7671): 257-260.
- [7] IPCC. Special Report on Global Warming of 1.5 °C. Cambridge: Cambridge University Press, 2018.
- [8] Barnett T P, Adam J C, Lettenmaier D P. Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature*, 2005, 438(7066): 303-309.
- [9] Xiao C D, Wang S J, Qin D H. A preliminary study of cryosphere service function and value evaluation. *Advances in Climate Change Research*, 2015, 6(3/4): 181-187.
- [10] Xiao Cunde, Su Bo, Wang Xiaoming, et al. Cascading risks to the deterioration in cryospheric functions and services. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(19): 1975-1984. [效存德, 苏勃, 王晓明, 等. 冰冻圈功能及其服务衰退的级联风险. 科学通报, 2019, 64(19): 1975-1984.]
- [11] Wang X M, Liu S W, Zhang J L. A new look at roles of the cryosphere in sustainable development. *Advances in Climate Change Research*, 2019, 10(2): 124-131.
- [12] Zhang Kai, Ran Shenghong, Tian Yujun, et al. Influence of oasis urban expansion on water resources in arid areas: A case study for Shihezi city. *Resources Science*, 2011, 33(9): 1720-1726. [张凯, 冉圣宏, 田玉军, 等. 干旱区绿洲城市扩张对水资源的影响: 以石河子市为例. 资源科学, 2011, 33(9): 1720-1726.]
- [13] Bateman I J, Harwood A R, Mace G M, et al. Bringing ecosystem services into economic decision-making: Land use in the United Kingdom. *Science*, 2013, 341(6141): 45-50.
- [14] Costanza R, D'Arge R, de Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.
- [15] Costanza R, De Groot R, Sutton P, et al. Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*, 2014, 26: 152-158.
- [16] Xie Gaodi, Zhang Caixia, Zhang Leiming, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(8): 1243-1254. [谢高地, 张彩霞, 张雷明, 等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1243-1254.]
- [17] Zhang Zhengyong, He Xinlin, Liu Lin, et al. Ecological service functions and value estimation of glaciers in the Tianshan Mountains, China. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(5): 856-867. [张正勇, 何新林, 刘琳, 等. 中国天山冰川生态服务功能及价值评估. 地理学报, 2018, 73(5): 856-867.]
- [18] Yang Y, Wu X J, Liu S W, et al. Valuating service loss of snow cover in Irtysh River Basin. *Advances in Climate Change Research*, 2019, 10(2): 109-114.
- [19] Liu Xuemei, Zhang Mingjun, Wang Shengjie, et al. Diurnal variation of summer precipitation and its influencing factors of the Qilian Mountains during 2008-2014. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(5): 754-767. [刘雪梅, 张明军, 王圣杰, 等. 2008—2014年祁连山区夏季降水的日变化特征及其影响因素. 地理学报, 2016, 71(5): 754-767.]

- [20] Jia Wenxiong, He Yuanqing, Li Zongxing, et al. The regional difference and catastrophe of climatic change in Qilian Mt. region. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(3): 257-269. [贾文雄, 何元庆, 李宗省, 等. 祁连山区气候变化的区域差异特征及突变分析. *地理学报*, 2008, 63(3): 257-269.]
- [21] Tian H Z, Yang T B, Liu Q P. Climate change and glacier area shrinkage in the Qilian Mountains, China, from 1956 to 2010. *Annals of Glaciology*, 2014, 55(66): 187-197.
- [22] Liu S Y, Guo W Q, Xu J L, et al. The Second Glacier Inventory Dataset of China (Version 1.0). Lanzhou: Cold and Arid Regions Science Data Center, 2014.
- [23] Wang Zongtai, Liu Chaohai, You Genxiang, et al. Glacier Inventory of China I Qilian Mountains. Lanzhou: Lanzhou Institute of Glaciology and Cryopedology, CAS, 1981. [王宗太, 刘潮海, 尤根祥, 等. 中国冰川目录 I 祁连山区. 兰州: 中国科学院兰州冰川冻土研究所, 1981.]
- [24] Guo W Q, Liu S Y, Xu J L, et al. The Second Chinese Glacier Inventory: Data, methods and results. *Journal of Glaciology*, 2015, 61(226): 357-372.
- [25] Liu Shiyin, Yao Xiaojun, Guo Wanqin, et al. The contemporary glaciers in China based on the Second Chinese Glacier Inventory. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(1): 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(1): 3-16.]
- [26] Chen J Y, Ohmura A. Estimation of alpine glacier water resources and their change since 1870s. *Hydrology in Mountainous Regions*, 1990, 193: 127-135.
- [27] Radić V, Hock R. Regional and global volumes of glaciers derived from statistical up-scaling of glacier inventory data. *Journal of Geophysical Research Earth Surface*, 2010, 115: F01010. DOI: 10.1029/2009JF001373.
- [28] Shi Yafeng. A Concise China Glacier Inventory. Shanghai: Shanghai Popular Science Press, 2005. [施雅风. 简明中国冰川目录. 上海: 上海科学普及出版社, 2005.]
- [29] Liu S Y, Sun W X, Shen Y P, et al. Glacier changes since the Little Ice Age maximum in the western Qilian Shan, Northwest China, and consequences of glacier runoff for water supply. *Journal of Glaciology*, 2003, 49(164): 117-124.
- [30] Su B, Xiao C D, Chen D L, et al. Cryosphere services and human well-being. *Sustainability*, 2019, 11(16): 43-65.
- [31] Marshall S J. The Cryosphere. Princeton: Princeton University Press, 2011.
- [32] Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and Human Well-Being*. Washington, DC: Island Press, 2005.
- [33] Xie Gaodi, Lu Chunxia, Leng Yunfa, et al. Ecological assets valuation of the Tibetan Plateau. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(2): 189-196. [谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 等. 青藏高原生态资产的价值评估. *自然资源学报*, 2003, 18(2): 189-196.]
- [34] Wang Fang. Evaluation of ecological assets value of Qilian Mountain Nature Reserve [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2012. [王方. 祁连山自然保护区生态资产价值评估研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2012.]
- [35] Ding Nana. The study on forest resources asset value of Qilian Mountain Nature Reserve [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2014. [丁娜娜. 祁连山自然保护区森林资源资产价值评估研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2014.]
- [36] Jiao Liang, Zhao Chengzhang. The analysis and evaluation on grassland ecosystem service function value of Shandan Horse Field in Qilian Mountain National Nature Reserve. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2013, 27(12): 47-52. [焦亮, 赵成章. 祁连山自然保护区山丹马场草地生态系统服务功能价值分析及评价. *干旱区资源与环境*, 2013, 27(12): 47-52.]
- [37] Shi Fuxi, Song Changchun, Zhao Chengzhang, et al. Dynamic of service value of farmland meta-ecosystem of mountain, oasis and desert and multiple regression analysis of the influence factors in the Hexi Corridor, Gansu, China. *Journal of Desert Research*, 2013, 33(5): 1598-1604. [石福习, 宋长春, 赵成章, 等. 河西走廊山地—绿洲—荒漠复合农田生态系统服务价值变化及其影响因子. *中国沙漠*, 2013, 33(5): 1598-1604.]

## Assessment and spatiotemporal characteristics of service value of glaciers in the Qilian Mountains

SUN Meiping<sup>1,2</sup>, MA Weiqian<sup>1</sup>, YAO Xiaojun<sup>1</sup>, ZHANG Mingjun<sup>1</sup>, LI Zhongqin<sup>2</sup>, QIN Dahe<sup>2</sup>

(1. College of Geography and Environmental Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China;

2. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, CAS, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** Glaciers provide essential resources and services for human well-being and socio-economic development in arid regions, and estimation on service value of glaciers and its spatiotemporal characteristics are vital for socio-economic sustainable development and environmental protection. Based on the first and second glacier inventories, this research firstly constructed an assessment system of glacier service value. The glacier service value and its variation with time and space were then estimated by combining the unit area service price method, equivalent factor method and glacier service change index. The total glacier service value in the Qilian Mountains for 2016 was 24354 million yuan. The main parts were climate regulation and runoff regulation, which occupied 60.58% and 33.14% of the total value, respectively. The minor parts were freshwater supply and hydropower, which contributed 3.47% and 1.75% to the total, respectively. The service value of the rest parts was about 259 million yuan. For glacier service value of the watersheds in the Qilian Mountains, Shule River ranked first with 7771 million yuan, or 31.91%, followed by Haerteng River with 4321 million yuan (17.74%) and Beida River with 3281 million yuan (13.47%). From an administrative perspective, the glacier service value of the Qilian Mountains in Qinghai province was 1138 million yuan higher than that of Gansu province. For Qinghai, Haixi Mongolian Tibetan Autonomous Prefecture had the highest glacier service value with 11124 million yuan, accounting for 45.68%. For Gansu, the correspondent value was Jiuquan with 7758 million yuan, or 31.86%. During the period of 1956-2010, the loss of glacier service value in the Qilian Mountains increased faster from west to east, reaching 435 million yuan. This suggested that the change of glacier service value in the study region showed an obvious longitudinal and zonal differentiation.

**Keywords:** glaciers; function and service; value estimation; spatiotemporal characteristics; Qilian Mountains