

# 中国天山冰川生态服务功能及价值评估

张正勇<sup>1</sup>, 何新林<sup>1</sup>, 刘琳<sup>1</sup>, 李忠勤<sup>2</sup>, 王璞玉<sup>2</sup>

(1. 石河子大学, 石河子 832000;

2. 中国科学院寒区寒区环境与工程研究所 冰冻圈科学国家重点实验室, 兰州 730000)

**摘要:** 山岳冰川是干旱区生态环境和社会经济可持续发展的物质基础和特色文化基础, 具有独特且无法替代的生态服务功能, 而目前对冰川调节生态环境和提供人类福祉等方面服务功能和价值估算研究很少。本文基于第一、二次冰川编目数据, 分析中国天山冰川面积和冰储量变化特征; 梳理并构建山岳冰川生态服务功能体系, 结合单位面积服务功能价格法和当量因子法, 评估中国天山冰川年生态服务价值。结果显示: ① 1970-2010年间, 中国天山冰川面积减少1274 km<sup>2</sup>, 退缩了13.9%, 年平均冰川储量减少约4.08×10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>。高海拔区(> 5200 m)冰川面积出现增加, 可能是由于该区域降水增加对冰川积累的作用大于气温上升对冰川消融作用造成的。② 中国天山冰川年生态服务价值为602亿元, 气候调节、水文调节和淡水资源供给价值分别占总价值的66.4%、21.6%和9.3%, 水力发电的年均生态服务价值约为3.5亿元, 其他类型的调节和服务功能价值约12.8亿元。③ 比较分析冰川、森林、草地和湿地生态系统不同服务价值所占总价值比例发现, 淡水资源供给/实物生产和生态调节功能在生态系统中均占比较大, 冰川单位面积生态服务价值高于其他类生态系统。本文以期能提高冰川对人类福祉和维持生态环境等方面的认知, 服务于冰冻圈生态安全、环境保护以及资源的可持续利用规划与管理。

**关键词:** 山岳冰川; 生态功能; 服务价值; 评估; 中国天山

DOI: 10.11821/dlxb201805006

## 1 引言

地球陆地面积的1/10为冰川所覆盖, 冰川是气候的产物, 对气候变化有着高度的敏感性和反馈作用, 在全球变暖背景下, 亚洲中低纬度地区的冰川经历了显著的负物质平衡过程, 冰川的大幅度退缩已成为近期冰川变化的主导趋势。其中山岳冰川中67%分布在最需淡水资源的中低纬度带, 中国是该纬度带冰川规模最大的国家, 又是世界荒漠区和贫水国中冰川最多的国家<sup>[1-3]</sup>。山岳冰川因其特殊的时空分布和变化过程, 是一种不可替代和不可逆转的稀缺资源, 在内陆干旱荒漠景观所需的淡水资源严重短缺的现实下, 冰川被看做干旱区“生命线”, 是干旱区人口、资源、环境和社会经济可持续发展的物质基础和特色文化基础, 具有独特且无法替代的生态服务功能<sup>[4-5]</sup>。中国天山区冰川在新疆水资源构成中占有重要地位, 受气候变化和人类活动的影响, 其变化引起的水文效应、环境效应、资源效应、生态效应、灾害效应和社会效应日趋显著, 对区域生态与环境安

收稿日期: 2017-03-28; 修订日期: 2018-01-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(41761108, 41461086, 41641003); 石河子大学“3152”高层次人才培养支持计划项目(CZ0227) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41761108, No.41461086, No.41641003; Shihezi University High-level Talents Support Program, No.CZ0227]

作者简介: 张正勇(1978-), 男, 博士, 副教授, 主要从事水文水资源及气候变化研究。E-mail: zyz0815@163.com

通讯作者: 何新林(1966-), 男, 博士, 教授, 从事水文水资源及农业水资源高效利用研究。E-mail: 564623267@qq.com

856-867页

全和社会经济等产生广泛和深刻的影响<sup>[6-7]</sup>。

山岳冰川作为全球生态系统中特殊而重要的组成部分,对维持区域生态稳定和调节河流径流供水具有重要意义。然而冰川生态和社会经济服务功能不止于此,其与其他生态系统一样具有完整且相对独立的服务功能体系。如山岳冰川对气温、降水和湿度等区域气象参数和全球气候有明显影响,加之其作为特殊下垫面,较大的反射率对全球升温具有一定的抑制性<sup>[8]</sup>;同时冰川由于其低温、寡营养等较为独特的环境特征,为冰缘植物和微生物等提供了理想的生存环境<sup>[9]</sup>;另外冰川消融/积累过程参与了大气交换,有学者认为随着冰川的消退和永冻土的融化,大规模的CH<sub>4</sub>泄漏将会对全球气候产生重大影响<sup>[10]</sup>,其实冰川在此起到了“封存”温室气体的功能;通过大气—粒雪—冰川冰演化的物理化学过程封存了人类和自然排放的污染物,称作“冷凝器”的冰川经常被用来作为研究污染历史的自然档案,如李全莲等研究发现高山冰川积聚了较高浓度的持久性有机污染物(POPs)<sup>[11]</sup>,也证实了冰川具有对地球环境的净化功能。近年来,众多学者在草原、森林和湿地等各类生态系统的服务功能及价值评估方面有了较系统的研究,并取得了丰硕成果<sup>[12-13]</sup>,而冰川资源的生态和社会经济服务功能被公众认知度较低且没有得到足够重视<sup>[14]</sup>。张宏锋等<sup>[15]</sup>对玛纳斯河流域冰川的提供水资源和气候调节功能做了定性描述,并采用替代工程法估算了其水文调节功能价值;王新华等<sup>[16]</sup>、满苏尔·沙比提等<sup>[17]</sup>对研究区中冰川的部分服务功能价值进行了评估,参照中国陆地生态系统服务价值当量估算了其生态服务价值。而当前冰川的原材料供给、土壤保持、维持养分循环、维持生物多样性服务的价值当量因子主要采用专家经验确定<sup>[18]</sup>,导致在客观定量分析其动态服务价值方面有明显的局限性。冰川独特的自然特性和变化过程决定了与其他生态系统的服务功能具有明显差异性,通过冰川生态服务功能体系梳理和价值评估,不仅能提高冰川对人类福祉和维持生态环境等方面的认知,也使得区域生态系统乃至全球生态系统服务功能研究更完整。

现有的山岳冰川研究多集中于形态、分布、消融/积累、冰化学、径流补给等过程和机理方面的自然属性研究<sup>[4-5, 19-23]</sup>,而对于冰川生态环境属性和社会属性方面研究还不够深入,尤其对冰川调节生态环境和提供人类福祉等方面服务功能和价值定量估算研究很少涉及<sup>[14, 18]</sup>。为此本文选择以中国天山区冰川为研究对象,以冰川学、生态经济学等学科理论为指导,在分析1970-2010年间中国天山冰川面积变化特征基础上,结合GIS空间分析技术、单位面积服务功能价格法和当量因子法,评估中国天山冰川生态服务价值,服务于冰冻圈生态安全、环境保护以及资源的可持续利用规划与管理。

## 2 研究区概况

天山是世界上最大的独立纬向山系,同时也是世界上距离海洋最远的山系和全球干旱地区最大的山系。其东西横跨中国、哈萨克斯坦、吉尔吉斯斯坦和乌兹别克斯坦四国,全长2500 km,南北平均宽250~350 km,最宽处达800 km以上。天山呈东西走向,绵延中国境内(简称中国天山)1700 km,占天山山系长度的2/3以上<sup>[24]</sup>(图1),根据第一次中国冰川编目,中国天山分布有冰川9035条,冰川面积为9225 km<sup>2</sup>,冰储量为1011 km<sup>3</sup>,是巴尔喀什湖内流水系、塔里木内流水系、准噶尔内流水系和吐鲁番—哈密盆地内流水系发源地。

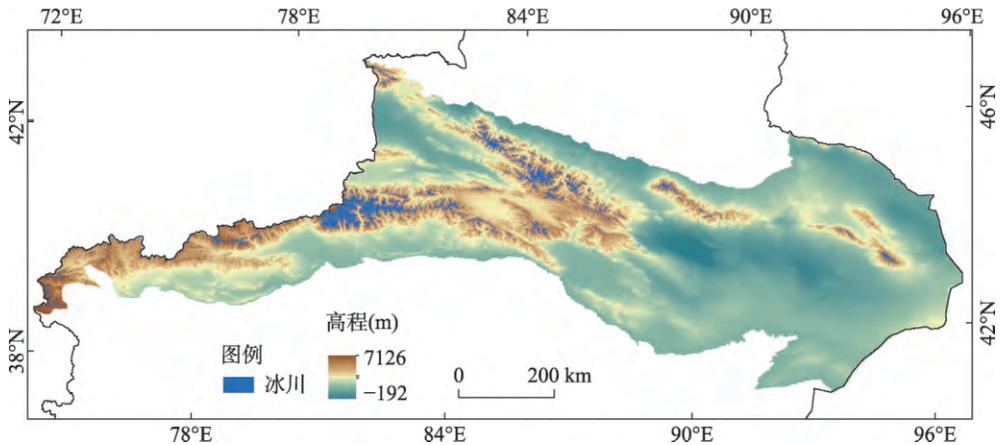


图1 研究区位置示意图

Fig. 1 Location map of the Tianshan Mountains

### 3 研究方法

本文冰川变化数据来自中国天山山区第一、二次冰川编目数据和地形图；DEM数据为90 m分辨率的SRTM3 V4.1，数据来自中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站 (<http://datamirror.csdb.cn>)。

#### 3.1 冰川面积变化信息提取

中国科学院兰州冰川冻土研究所于1987年依据国际冰川编目规范进行了中国天山山区的第一次冰川编目，以20世纪70-80年代利用航空摄影测量技术绘制的1:5万和1:10万地形图为数据源，由于当时技术条件所限，本次编目中冰川边界界定和面积量算精度均较低，为此本文收集了编制所采用的航空照片，结合地形图对冰川边界轮廓进行系统检查和修订，利用GIS软件对扫描后的地形图进行几何纠正等预处理，然后矢量化修正后的冰川边界并录入冰川编码和名称等冰川参数，从而形成第一次冰川编目的空间和属性矢量数据集。天山山区第二次冰川编目所用数据源主要为2008-2010年（7-9月）间云雪较少干扰的LandsatTM/ETM+遥感影像，该部分影像数据于美国地质调查局（USGS）网站 (<http://glovis.usgs.gov>) 下载获得，第二次冰川编目中冰川信息提取方法具体参考文献<sup>[25]</sup>。天山山区第二次冰川编目成果是基于ENVI软件的遥感影像自动分类下人工修订后完成，尽管工作人员均进行过大量的野外考察和具备一定专业知识，但冰川边界解译结果仍然与客观存在一些偏差（如像元位置偏移等）。冰川信息解译精度受控于传感器和图像配准误差影响，为此本文运用Hall等<sup>[26]</sup>提出的不确定性公式来计算冰川面积误差：

$$\alpha = 2\lambda \times \sqrt{\lambda^2 + \epsilon^2} \quad (1)$$

式中： $\alpha$ 为面积误差； $\lambda$ 为影像分辨率（空间分辨率为30 m）； $\epsilon$ 为配准误差（按1个像元计算）。计算表明，中国天山内单条冰川面积误差为 $\pm 0.0021 \text{ km}^2$ ，冰川面积总误差为 $\pm 88.20 \text{ km}^2$ ，占山区第二次冰川编目中冰川总面积的1.12%。

冰川储量变化可以显示冰川融水对河川径流量的贡献。本文冰储量采用冰川面积与冰储量相关关系计算公式<sup>[9]</sup>得出：

$$V = 0.04S^{1.35} \quad (2)$$

式中： $V$ 为冰储量（ $\text{km}^3$ ）； $S$ 为冰川面积（ $\text{km}^2$ ）。

### 3.2 冰川生态服务功能及价值评估方法

参照千年生态系统评估方法<sup>[18]</sup>, 将山岳冰川生态服务分为供给服务、调节服务、支持服务和文化服务4大类, 并进一步细分出9项具体服务功能(表1)。由于冰川生态系统服务功能具有多样性和复杂性, 不能使用单一的评价方法来估算, 需要根据服务功能的不同来构建合理的数学模型综合评价其价值。冰川直接使用价值包括提供淡水资源产出型价值和非竞争性以及非排他性的服务型价值, 服务型价值中又包含科研、环境教育、美学观赏、文化艺术和生境服务等; 其间接使用价值是冰川变化过程或功能中间接获得的惠益价值, 主要包括调节气候、调节径流、净化环境和生态调节功能等价值。其中淡水资源供给、水力发电、水文调节、气候调节、美学景观和科研与环境教育等6项功能用单位面积功能价格法估算; 由于山岳冰川的气体调节、净化环境和生物多样性服务等功能实现过程比较复杂, 在缺少基础实验数据的情况下难以采用功能价格法客观评估其价值, 为此本文对这3项功能采用单位面积当量因子法。

表1 中国天山山岳冰川各类生态服务功能价值量

Tab. 1 The ecological service value of mountain glaciers in the Tianshan Mountains

服务功能		服务价值(元/年)		比例(%)
一级指标	二级指标	功能价格法	当量因子法	
供给服务功能	水资源供给	$5.6 \times 10^9$	$2.4 \times 10^9$	9.30
	水力发电	$3.5 \times 10^8$		0.58
调解服务功能	水文调节	$1.3 \times 10^{10}$	$8.0 \times 10^9$	21.58
	气候调节	$4.0 \times 10^{10}$	$6.1 \times 10^8$	66.40
	气体调节		$2.0 \times 10^8$	0.33
	净化环境		$1.8 \times 10^8$	0.30
支持服务功能	生物多样性		$1.1 \times 10^7$	0.18
文化服务功能	美学景观	$7.8 \times 10^8$	$1.0 \times 10^8$	1.29
	科研与环境教育	$1.9 \times 10^7$		0.03
合计		$6.0 \times 10^{10}$	$1.2 \times 10^{10}$	100

**3.2.1 单位服务功能价格法** (1) 淡水资源供给。山岳冰川为人类社会提供充沛且优质的淡水资源。用1970-2010年冰川储量多年平均变化值代替其为人类社会系统提供淡水资源年供给量, 采用直接市场法计算该项服务的经济价值。

$$V_w = V_{\text{冰川}} \times P_w \quad (3)$$

式中:  $V_w$ 为冰川提供的淡水资源供给价值(元);  $V_{\text{冰川}}$ 为冰川储量多年平均变化数值( $\text{m}^3$ );  $P_w$ 为淡水资源单价(元/ $\text{m}^3$ ), 本文中水价以乌鲁木齐市2010年综合供水价格1.36元/ $\text{m}^3$ 为准。

(2) 水力发电。研究显示阿尔卑斯山、美国、挪威等地区借充足的冰雪水源和较大高差进行水力发电开发<sup>[27]</sup>。本文采用影子工程法计算其水力发电的潜在价值, 将年冰川融水量折算为对应山区水库的库容总量, 用分布于中国天山的7个典型山区水库为准, 估算出单位库容的多年平均发电量, 最后将年发电总量折算成电费。

$$V_p = V_{\text{冰川}} \times E \times P_w \quad (4)$$

式中:  $V_p$ 为冰川融水水力发电潜在价值(元);  $V_{\text{冰川}}$ 为冰川储量多年平均变化数值( $\text{m}^3$ );  $E$ 为单位库容发电量( $\text{kW} \cdot \text{h} / \text{m}^3$ ), 中国天山山区水库多年平均单位库容发电量为 $0.37 \text{ kW} \cdot \text{h} / \text{m}^3$ ;  $P_w$ 为水力发电价格(元/ $\text{kW} \cdot \text{h}$ ), 本文水力发电价格由新疆小水电上网电价( $0.235 \text{ 元} / \text{kW} \cdot \text{h}$ )替代。

(3) 水文调节。“高山固态水库”对水热变化敏感,其积累/消融过程伴随着物质和能量转换,对河川径流有天然调节作用。用影子工程法估算其价值,将年均冰储量换算成对应的水库容量,再结合单位库容所需工程费用进行计算。

$$V_a = V_{\text{冰川}} \times P_r \quad (5)$$

式中:  $V_a$ 为冰川体积变化对河川径流的水文调节价值(元);  $V_{\text{冰川}}$ 为冰川储量多年平均变化数值( $\text{m}^3$ );  $P_r$ 为单位库容的工程造价(元/ $\text{m}^3$ ),参照谢高地等引用的单位库容投入成本3.071元/ $\text{m}^3$ 为准<sup>[18]</sup>。

(4) 气候调节。冰川作为特殊下垫面以其较高反照率和消融耗热等过程,对全球和区域气候具有一定的调节作用。冰雪反照率不仅是影响冰雪消融的关键因素,而且是冰雪与气候密切耦合的关键反馈因素,随着不同区域气候环境的差异以及气候环境的变化,新降干雪、湿雪、粒雪、干洁冰川和冰碛物等表面反照率值存在巨大差异<sup>[28-29]</sup>。冰川由固相转为液相和气相过程中会消耗大量热量,其实也是对气温升高具有一定抑制作用,该过程中主要包括消融耗热、蒸发升华耗热和感热等能量转换,冰面能量平衡随季节和海拔变化有明显不同。该功能价值采用直接市场法进行估算,为方便研究,将冰川表面反射太阳辐射与消融吸收热能之和作为冰川对抑制气候变暖的贡献值,将热能转化为等值的电能以电价计算其年服务价值。

$$V_c = (S_{\text{冰川}} \times R \times \alpha_a \times \alpha_s + V_{\text{冰川}} \times \rho_{\text{冰}} \times q_{\text{冰}}) \times P_e \quad (6)$$

式中:  $V_c$ 为冰川气候调节价值(元);  $S_{\text{冰川}}$ 为第二次编目冰川总面积;  $V_{\text{冰川}}$ 为冰川储量多年平均变化数值( $\text{m}^3$ ); 公式中涉及到的参数均来自相关参考文献,中国天山年太阳辐射量( $R$ )取值为5000 MJ/ $\text{m}^2 \cdot \text{a}$ ,冰雪反照率( $\alpha_a$ )为0.6,地形遮蔽率( $\alpha_s$ )为0.5,冰川密度( $\rho_{\text{冰}}$ )为0.9 g/ $\text{cm}^3$ ,冰川融化比热容( $q_{\text{冰}}$ )为336000 J/kg;  $P_e$ 为电费价格(元/kw·h),参考乌鲁木齐市2010年各行业用电的平均价格0.515元/kw·h。

(5) 美学景观。天山连绵的雪岭和林立的冰峰形成了独具特色的景观,吸引着大量中外游客,冰川和雪山寄托了各族人民的热爱、敬畏和赞颂之情,为诗歌、小说等文学创作、民族歌曲和绘画艺术提供了创作灵感和丰富的题材,另外宗教人士也对冰山赋予了一定的信仰内涵,所以其也具有独特的文化艺术价值。通过问卷调查的形式结合旅行费用法估算出冰川的美学价值。研究中向外地和当地游客共发放调查问卷500份,有效问卷482份,统计游客总体旅行费用中以冰川相关旅游为目的的费用所占比例,结合新疆年旅游收入总额进行估算。

$$V_l = T \times R_g \quad (7)$$

式中:  $V_l$ 为冰川提供的美学景观和文化价值(元);  $T$ 为研究区当地旅游年收入总额(元);  $R_g$ 为冰川相关旅游所占比例(%);新疆2010年旅游收入总额 $6.54 \times 10^{10}$ 元。

(6) 科研与环境教育。冰川是气候和环境变化等相关研究独一无二的介质和对象,也经常被用来作为研究污染历史的自然档案。该部分服务型价值采用每年国家和地方政府为天山区冰川相关研究提供的科研经费额度来体现其价值。

$$V_s = S_r \quad (8)$$

式中:  $V_s$ 为冰川提供的科研与环境教育价值(元);  $S_r$ 为国家和地方对研究区冰川相关科研项目提供的科研经费(元);为简化统计本文以2010年度立项的国家自然科学基金项目总经费 $1.87 \times 10^7$ 元为参考数据。

**3.2.2 单位面积价值当量因子法** 该部分服务价值借鉴谢高地等<sup>[18]</sup>提出的中国陆地生态系

统服务价值当量, 参照满苏尔·沙比提等研究得出的2005-2014年新疆单位面积农田食物生产服务功能价值<sup>[7]</sup>, 确定中国天山冰川以上4类生态服务功能相对于农田提供生态服务单价的当量, 最后估算出各类冰川生态服务价值(表1)。

## 4 结果分析

### 4.1 冰川面积变化特征

据第一、二冰川编目数据统计结果显示, 20世纪70-80年代中国天山区冰川覆盖面积为9158 km<sup>2</sup>, 冰川储量为892.3 km<sup>3</sup>, 2008-2010年中国天山冰川面积为7884 km<sup>2</sup>, 冰储量为728.9 km<sup>3</sup>; 1970-2010年间中国天山冰川面积减少了1274 km<sup>2</sup>, 退缩13.9%, 年平均冰川储量减少约4.08×10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>。就冰川空间分布来看(图2), 40年来冰川末端位置由2200 m消退至2800 m, 位于3800~4800 m高程带的冰川面积占总面积的80%以上,

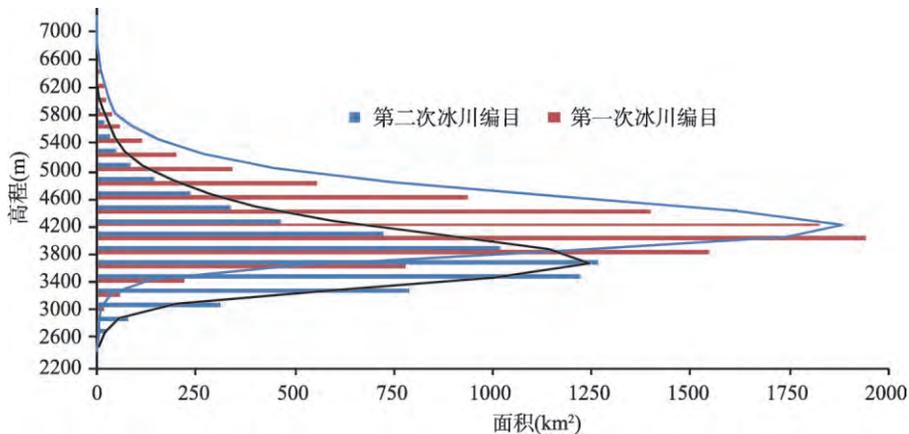


图2 中国天山冰川面积依高程带分布

Fig. 2 Hypsography of glacier area in the Tianshan Mountains

3600 m以下冰川变化最为敏感, 其面积缩减量占总变化的52.8%, 而高程5200 m以上冰川面积增加了8.95%。就其朝向分布来看(图3), 北朝向和南朝向分布了绝对大数的冰川, 这两个朝向冰川覆盖面积约为总数的81%以上, 其中东北向冰川面积最大, 西向面积最小, 各南向冰川面积退缩均比较明显, 其变化率均在44.4%以上。

与其他相关研究结果比对发现, 本文中冰川年变化率(-0.35%/a)与王圣杰对中国天山近50年约3000条冰川面积变化率(-0.31%/a)统计分析结果接近<sup>[7]</sup>, 略低于孙美平等基于两次冰川编目数据得出祁连山区冰川面积变化率(-0.4%/a)<sup>[5]</sup>, 可能是由于天山区冰川规模远大于祁连山区, 小面积或小规模冰川对气温升高更敏感所致。朝南向冰川退缩较其他坡向的更加剧烈, 是由于南向作为阳坡获得了

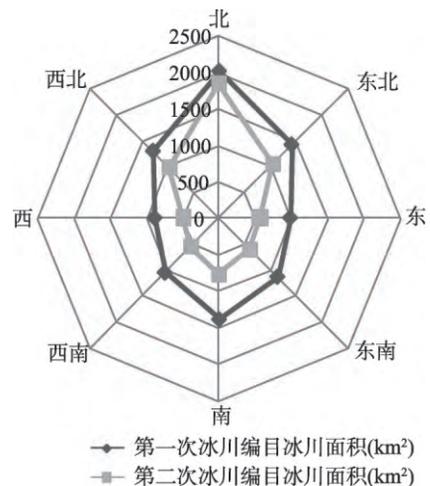


图3 中国天山不同朝向冰川面积分布  
Fig. 3 Orientational characteristics of glacial changes in the Tianshan Mountains

更多的太阳辐射；而比较特殊的是高海拔区 (> 5200 m) 冰川面积出现了增加的现象，冰川发育依赖于山区气温和降水量二者组合作用，可能是由于全球气候变化背景下西北北地区气候出现暖湿化特征，该区域降水量增加对冰川积累的作用大于气温上升对冰川消融作用造成的。

#### 4.2 冰川生态服务功能价值分析

基于中国天山1970-2010年间冰储量年均变化量和2008-2010年冰川覆盖面积，采用功能价格法和当量因子法估算估算出其年生态服务价值(表1)。统计发现中国天山冰川年生态服务价值达560亿元，按服务功能价值高低排序，依次为气候调节>水文调节>水资源供给>美学景观>水力发电>气体调节>净化环境>科研与环境教育>生物多样性。其中冰川表面较高反照率和消融吸热对气候的抑制功能价值占总价值的66.40%，对河川径流的调节和淡水资源供给功能价值分别占总价值的21.58%和9.30%(图4)，这进一步说明高寒区冰川的存在对气候变暖抑制作用非常明显，冰川融水对于干旱区径流补给的稳定性、工农业生产、绿洲区和生态发展具有非常重要的意义。而中国天山冰川的净化环境、气体交换、生物多样性和科研教育等方面的价值往往被人们所忽视或低估，通过估算发现它们的年生态服务价值可达到12.8亿元，这可使人们更加直观的意识认识到冰川保护的重要生态地位。以往相关研究中很少涉及冰川水力发电服务功能，而本文发现冰川融水利用较大的地形高差进行水力发电的年均生态服务价值约为3.5亿元。总体来看，在全球气候变暖情势下，山岳冰川对区域乃至全球气温升高抑制作用的贡献很大，该服务功能的实现机理或许会对全球气候变化研究具有重要意义；冰川融水作为干旱区河川径流补给的重要且相当稳定的组成部分，其水文调节功能亦不可忽视。

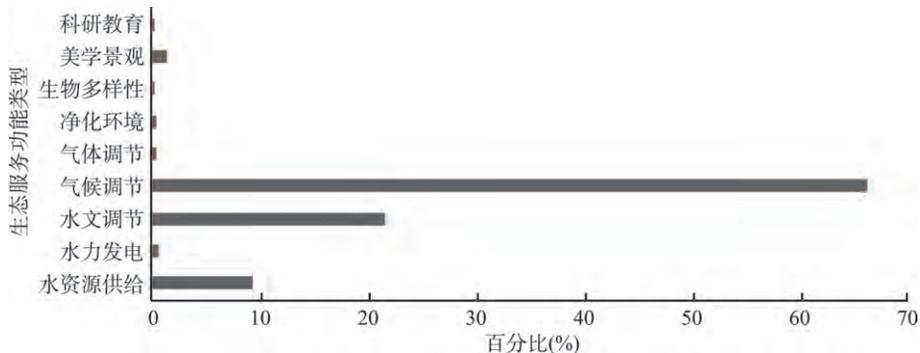


图4 中国天山冰川各类生态服务价值百分比

Fig. 4 Percentage of the ecological service value of mountain glaciers in the study area

本文运用两种价值估算法得出的水资源供给、水文调节、气候调节和美学景观价值量对比发现，当量因子法的结果低于功能价格法的价值共约435亿元。正如有学者认为很多生态系统服务价值都被低估了<sup>[18]</sup>。冰川的生态服务功能主要是借助较强反照率和冰川消融/积累过程中物质和能量转化实现的，而以往研究中冰川的单位面积生态服务价值当量是由专家经验法得出，这难免会对客观估算生态服务价值带来偏差。以上这些冰川生态服务功能仅靠静态描述和主观定量显然缺少了对其变化机理的分析，在气候变暖驱动和人类活动干扰下，冰川服务的稀缺性不断增强，其生态和社会经济功能具有增强和衰弱过程<sup>[14]</sup>。另外由于冰川积累/消融具有明显的时间(干/湿季)和空间(高程、坡向等)差异性，这使得其生态服务功能也存在一定动态特征，若将冰川气象、冰化学等变

化过程实验与3S (RS、GIS和GPS) 技术相结合, 能很好刻画冰川生态服务功能价值的动态性和空间异质性规律。

## 5 讨论

为了能更好比对森林、草地和湿地3类主要陆地生态系统和山岳冰川生态服务功能的异同。本文专门收集了近年来新疆区域内基于生态功能价格法对陆地生态系统服务价值估算的相关文献(表2), 尽管各文献涉及的生态系统类别及其服务功能体系不同, 对服务功能的贡献率比较研究存在一定局限性, 但仍可为评估相对贡献程度提供重要依据, 也可为优化指标体系和各服务功能权重分配提供理论支撑。就各类生态系统不同服务价值所占总价值比例来看, 淡水资源供给/实物生产和生态调节功能在4类生态系统中均占有绝对的贡献率, 冰川、森林、草地和湿地生态系统中这两大类贡献率之和分别占到94.12%、69.57%、44.57%和88.42%, 其中森林和湿地生态系统中水文调节/涵养水源为价值最大的服务功能, 草地系统中净化环境/废物处理为最大贡献服务功能; 冰川提供生物多样性/生物栖息功能方面远低于其他3类生态系统。本着简化和可操作的原则, 为增强冰川、森林、草地和湿地等生态系统单位面积服务价值可比性, 采用不同年份CPI指数将其他各生态系统服务的原价值转化为2010年的经济价值。就各生态系统单位面积生态服务价值比较来看, 中国天山冰川单位面积服务价值(7.6万元/hm<sup>2</sup>·a)最高, 湿地(艾比湖、博斯腾湖、科克苏)和森林(新疆山地森林)生态系统单位面积服务价值差别不大, 分别为4.05万元/hm<sup>2</sup>·a和3.55万元/hm<sup>2</sup>·a, 草地(全疆草地、伊犁河谷草地)单位面积生态服务价值(0.82万元/hm<sup>2</sup>·a)最低, 对比发现, 山岳冰川资源与其它生态系统一样具备完整的生态服务功能, 其对气候变化的抑制功能和河川径流的调控功能价值高于其他类生态系统, 进一步证实了冰川及其融水对区域生态环境安全、工农业发展和社会经济的影响重大。

表2 不同生态系统服务类型的生态服务价值

Tab. 2 Comparison of ecological service values of different ecosystems

服务功能类型	各服务价值所占比例(%)			
	冰川 <sup>[本研究]</sup>	森林 <sup>[30]</sup>	草地 <sup>[31-32]</sup>	湿地 <sup>[33-35]</sup>
水资源供给/实物生产	17.3	1.48	4.82~21.26	0.99~18.86
水力发电	1.07	-	-	-
水文调节/涵养水源	23.4	44.16	11~13.54	32.79~82.92
气候调节	56.1	-	12.39	-
气体调节/固碳释氧	0.32	23.93	2.75~11	4.11~35.08
净化环境/废物处理	0.35	5.01	14.75~18.02	0.02~12.06
生物多样性/生物栖息	0.02	20.38	8.61~15.00	0.63~37.03
美学景观/娱乐休闲	1.4	-	0.55~2.55	0.58~0.91
科研与环境教育/文化价值	0.03	-	2.90	7.54~9.13

陆地生态系统不仅能直接提供人类社会所需的淡水、食物和原料等物质, 还能在系统物质和能量转换过程中改善生态环境, 通过涵养水源、调节气候和气体交换等方式协调人类对环境的干扰和抑制全球气候变化。本文中应用当量因子法估算出的几项生态服务价值(气体调节、净化环境和生物多样性)均远远低于其他陆地生态系统中同类服务

价值所占比例,一方面是不同的生态系统其服务功能的内在差异造成,另外可能是由于当量因子法中各服务功能权重分配所致;生态系统的科研和文化服务价值具有明显的不可替代性,也是研究各类生态服务功能最基础的试验场所。陆地生态系统的生态服务功能实现是一个复杂的过程,依赖于生态系统结构组成和物质能量转化机制等生态学基础,通过对各系统的结构、生态过程与服务功能关系的深入研究,可进一步挖掘生态系统更大潜在服务价值和更多的服务功能。

## 6 结论与展望

(1) 据第一、二冰川编目数据统计结果显示,1970-2010年间中国天山冰川面积减少1274 km<sup>2</sup>,退缩了13.9%,年平均冰川储量减少约4.08×10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>。而比较特殊的是高海拔区(>5200 m)冰川面积出现了增加的现象,可能是由于该区域降水量增加对冰川积累的作用大于气温上升对冰川消融作用造成的。

(2) 通过梳理山岳冰川的生态服务功能体系,采用单位功能价格法和当量因子法评估了中国天山冰川生态服务价值。中国天山冰川年生态服务价值为602亿元,气候调节、水文调节和淡水资源供给价值分别占总价值的66.4%、21.6%和9.3%,水力发电的年均生态服务价值约为3.5亿元,其他类型的调节和服务功能价值约12.8亿元。

(3) 比较分析各类生态系统不同服务价值所占总价值比例发现,淡水资源供给/实物生产和生态调节功能在生态系统中均占比例较大,冰川、森林、草地和湿地生态系统中这两大类贡献率之和分别占到94.12%、69.57%、44.57%和88.42%,其中森林和湿地生态系统中水文调节/涵养水源为价值最大的服务功能,草地系统中净化环境/废物处理为最大贡献服务功能;提供生物多样性/生物栖息功能方面远低于其他3类生态系统。

半个世纪以来,众多学者在冰川物理学、冰川对气候变化的响应、机理与模拟、雪冰过程与气候环境记录、冰川水文与气象、第四纪冰川与冰缘地貌、冰缘植被与旱区生态等领域取得了丰硕成果,为中国区域水资源管理与高效利用及可持续发展政策规划制定提供了重要的科学依据,但很少涉及对冰川生态服务功能及其经济价值评估方面的研究,这不仅是学术研究上的一个缺憾,在全球变暖冰川快速退化的情势下,对冰川水资源和冰川对区域乃至全球生态平衡影响的认知和管理更是极为不利的。

### 参考文献(References)

- [1] 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.]
- [2] Shi Yafeng. Estimation of the water resources affected by climatic warming and glacier shrinkage before 2050 in West China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2001, 23(4): 333-341. [施雅风. 2050年前气候变暖冰川萎缩对水资源影响情景预估. *冰川冻土*, 2001, 23(4): 333-341.]
- [3] Qin Dahe. Climate change science and sustainable development. *Progress in Geography*, 2014, 33(7): 874-883. [秦大河. 气候变化科学与人类可持续发展. *地理科学进展*, 2014, 33(7): 874-883.]
- [4] Guo W, Liu S, Xu L, et al. The second Chinese glacier inventory: Data, methods and results. *Journal of Glaciology*, 2015, 61(226): 357-372.
- [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] Shen Yongping, Su Hongchao, Wang Guoya, et al. The responses of glaciers and snow cover to climate change in Xinjiang (I): Hydrological effect. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(3): 513-527. [沈永平, 苏宏超, 王国亚, 等. 新疆冰川、积雪对气候变化的响应(I): 水文效应. *冰川冻土*, 2013, 35(3): 513-527.]
- [7] Wang Shengjie, Zhang Mingjun, Li Zhongqin, et al. Response of glacier area variation to climate change in Chinese Tianshan Mountains in the past 50 Years. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(1): 38-46. [王圣杰, 张明军, 李忠勤, 等. 近50年来中国天山冰川面积变化对气候的响应. *地理学报*, 2011, 66(1): 38-46.]
- [8] Li Zhongqin, Han Tianding, Jing Zhenfan, et al. Summary of 40-year observed variation facts of climate and glacier No.1 at headwater of Urumqi River, Tianshan, China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(2): 117-123. [李忠勤, 韩添丁, 井哲帆, 等. 乌鲁木齐河源区气候变化和1号冰川40a观测事实. *冰川冻土*, 2003, 25(2): 117-123.]
- [9] Zhang Shuhong, Hou Shugui, Qin Xiang, et al. Progress in research on resources of glacial microbiology. *Environmental Science & Technology*, 2014(12): 62-67. [张淑红, 侯书贵, 秦翔, 等. 冰川微生物资源研究进展. *环境科学与技术*, 2014(12): 62-67.]
- [10] Li Yuhong, Zan Liyang, Chen Liqi. Advances in the study of methane in the Arctic Ocean. *Advances in Earth Science*, 2014, 29(12): 1355-1361. [李玉红, 詹力扬, 陈立奇. 北冰洋CH<sub>4</sub>研究进展. *地球科学进展*, 2014, 29(12): 1355-1361.]
- [11] Li Quanlian, Wang Ninglian, Wu Xiaobo, et al. Sources and distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons of different glaciers over the Tibetan Plateau. *Science China: Earth China*, 2010, 40(10): 1399-1409. [李全莲, 王宁练, 武小波, 等. 青藏高原冰川雪中多环芳烃的分布特征及其来源研究. *中国科学: 地球科学*, 2010, 40(10): 1399-1409.]
- [12] Song C, Lee W, Choi H, et al. Spatial assessment of ecosystem functions and services for air purification of forests in South Korea. *Environmental Science & Policy*, 2016, 63: 27-34.
- [13] Stavi I, Bel G, Zaady E. Soil functions and ecosystem services in conventional, conservation, and integrated agricultural systems: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 2016, 36(2): 1-12.
- [14] Xiao Cunde, Wang Shijin, Qin Dahe. A preliminary study on cryosphere service function and its value estimation. *Climate Change Research*, 2016, 12(1): 45-52. [效存德, 王世金, 秦大河. 冰冻圈服务功能及其价值评估初探. *气候变化研究进展*, 2016, 12(1): 45-52.]
- [15] Zhang Hongfeng, Ouyang Zhiyun, Zheng Hua, et al. Valuation of glacier ecosystem services in the Manas River Watershed Xinjiang. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(11): 5877-5881. [张宏锋, 欧阳志云, 郑华, 等. 新疆玛纳斯河流域冰川生态系统服务功能价值评估. *生态学报*, 2009, 29(11): 5877-5881.]
- [16] Wang Xinhua, Zhang Zhiqiang. Effect of land-use change on ecosystem services value in Heihe river basin. *Ecology and Environment*, 2004, 24(4): 608-611. [王新华, 张志强. 黑河流域土地利用变化对生态系统服务价值的影响. *生态环境*, 2004, 24(4): 608-611.]
- [17] Mansur Sabit, Nasima Nasirdin, Arslan Mamut. Analysis on the change of land uses/cover ecological service value in Tomur National Nature Reserve. *Geographical Research*, 2016, 35(11): 2116-2124. [满苏尔·沙比提, 娜斯曼·那斯尔丁, 阿尔斯朗·马木提. 托木尔峰国家级自然保护区土地利用/覆被生态服务价值变化分析. *地理研究*, 2016, 35(11): 2116-2124.]
- [18] 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.]
- [19] Wang M, Xu B, Cao J, et al. Carbonaceous aerosols recorded in a southeastern Tibetan glacier: Analysis of temporal variations and model estimates of sources and radiative forcing. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, 15(3): 1191-1204.
- [20] Shakun J D, Lea D W, Lisiecki L E, et al. An 800-kyr record of global surface ocean  $\delta^{18}\text{O}$  and implications for ice volume-temperature coupling. *Earth and Planetary Science Letters*, 2015, 426: 58-68.
- [21] Pieczonka T, Bolch T. Region-wide glacier mass budgets and area changes for the Central Tien Shan between similar to 1975 and 1999 using Hexagon KH-9 imagery. *Global and Planetary Change*, 2015, 128: 1-13.
- [22] Margold M, Stokes C R, Clark C D. Ice streams in the Laurentide Ice Sheet: Identification, characteristics and comparison to modern ice sheets. *Earth-Science Reviews*, 2015, 143: 117-146.
- [23] Duan Keqin, Yao Tandong, Shi Peihong, et al. Simulation and prediction of equilibrium line altitude of glaciers in the eastern Tibetan Plateau. *Scientia Sinica Terrae*, 2017, 47(1): 104-113. [段克勤, 姚檀栋, 石培宏, 等. 青藏高原东部冰川平衡线高度的模拟及预测. *中国科学: 地球科学*, 2017, 47(1): 104-113.]
- [24] Zhang Zhengyong, He Xinlin, Liu Lin, et al. Spatial distribution of rainfall simulation and the cause analysis in China's

- Tianshan Mountains area. *Advances in Water Science*, 2015, 26(4): 500-508. [张正勇, 何新林, 刘琳, 等. 中国天山山区降水空间分布模拟及成因分析. *水科学进展*, 2015, 26(4): 500-508.]
- [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] Hall D K, Bayr K J, Schner W, et al. Consideration of the errors inherent in mapping historical glacier positions in Austria from ground and space (1893-2001). *Remote Sensing of Environment*, 2003, 86(4): 566-577.
- [27] Che Tao, Jin Rui, Li Xin, Wu Lizong. Glacial lakes variation and the potentially dangerous glacial lakes in the Pumqu Basin of Tibet during the last two decades. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 26(4): 397-402. [车涛, 晋锐, 李新, 吴立宗. 近20a来西藏朋曲流域冰湖变化及潜在溃决冰湖分析. *冰川冻土*, 2004, 26(4): 397-402.]
- [28] Mao Ruijuan, Jiang Xi, Guo Zhongming, et al. Study of them inversion precision of albedo on the Qiyi Glacier in the Qilian Mountain based on TM/ETM+ image. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(2): 301-309. [毛瑞娟, 蒋熹, 郭忠明, 等. 基于TM/ETM+影像反演祁连山七一冰川反照率精度比较研究. *冰川冻土*, 2013, 35(2): 301-309.]
- [29] Cai Fu, Zhu Qinglin, He Honglin, et al. Estimation and spatio-temporal distribution of monthly mean surface albedo in China. *Resources Science*, 2005, 27(1): 114-120. [蔡福, 祝青林, 何洪林, 等. 中国月平均地表反照率的估算及其时空分布. *资源科学*, 2005, 27(1): 114-120.]
- [30] Li Jimei, Zhang Yutao, Bai Zhiqiang, et al. Assessment of service functions value of mountain forest ecosystem in Xinjiang Province, China. *Journal of Southwest forestry University*, 2016, 36(4): 97-102. [李吉玫, 张毓涛, 白志强, 等. 新疆山地森林生态系统服务功能价值评估. *西南林业大学学报*, 2016, 36(4): 97-102.]
- [31] Ye Mao, Xu Hailiang, Wang Xiaoping, et al. An assessment of the value and valuation of the grassland ecosystem in Xinjiang. *Acta Prataculturae Sinica*, 2006, 15(5): 122-128. [叶茂, 徐海量, 王小平, 等. 新疆草地生态系统服务功能与价值初步评价. *草业学报*, 2006, 15(5): 122-128.]
- [32] Sun Huilan, Chen Yaning, Li Weihong, et al. Study on types and ecological services values of the grassland in the Ili River Basin, Xinjiang, China. *Journal of Desert Research*, 2011, 31(5): 1273-1277. [孙慧兰, 陈亚宁, 李卫红, 等. 新疆伊犁河流域草地类型特征及其生态服务价值研究. *中国沙漠*, 2011, 31(5): 1273-1277.]
- [33] Xie Zhengyu, Li Wenhua, Xie Zhengjun, et al. Evaluation of the ecological service Ebinur Lake Wetland Nature Reserve. *Arid Land Geography*, 2011, 34(3): 532-540. [谢正宇, 李文华, 谢正君, 等. 艾比湖湿地自然保护区生态系统服务功能价值评估. *干旱区地理*, 2011, 34(3): 532-540.]
- [34] Sun Yufang, Liu Weizhong. Evaluation on the service functional values of the wetland ecosystem in the Bosten Lake Basin Xinjiang. *Arid Zone Research*, 2008, 25(5): 741-744. [孙玉芳, 刘维忠. 新疆博斯腾湖湿地生态系统服务功能价值评估. *干旱区研究*, 2008, 25(5): 741-744.]
- [35] Tian Runwei, Cai Xinbin, Maryamgul Abdurahman, et al. Evaluation on ecosystem services of Xinjiang Aletai Kekesu Wetland Natural Reserve. *Wetland Science*, 2015, 13(4): 491-494. [田润炜, 蔡新斌, 买尔燕古丽·阿不都热合曼, 等. 新疆阿勒泰科克苏湿地自然保护区生态服务价值评价. *湿地科学*, 2015, 13(4): 491-494.]

## Ecological service functions and value estimation of glaciers in the Tianshan Mountains, China

ZHANG Zhengyong<sup>1</sup>, HE Xinlin<sup>1</sup>, LIU Lin<sup>1</sup>, LI Zhongqin<sup>2</sup>, WANG Puyu<sup>2</sup>

(1. Shihezi University, Shihezi 832000, Xinjiang, China; 2. State Key Laboratory of Cryospheric Sciences, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** The mountain glacier which has unique and irreplaceable ecological service function is the material basis and characteristic cultural foundation of the ecological environment and socio-economic sustainable development in arid area. However, there are few studies on estimating service function and value of ice regulating ecological environment and providing human welfare and so on. Based on the data of the first and second glacier catalogs, this research examines variations of glacier area and ice reserves of the Tianshan Mountains in China and constructs the ecosystem service function of mountain glaciers. And this study combines the unit area service function price method and equivalent factor method to evaluate the annual ecological service value of glacier in the research area. The research results are shown as follows: Firstly, in the last 40 years, glacier area decreases by 1274 km<sup>2</sup>, with the shrinking rate being 13.9%, and the annual average glacial reserve decreases by about 4.08×10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>. And the increased area in glacier area of the high altitude (> 5200 m) may be due to the fact that the effect of glacier accumulation caused by precipitation enhancement is greater than that of glacier melting caused by temperature rise. Secondly, the annual ecological service value of glaciers in the research area is 60 billion yuan. And the value of climate regulation, hydrology regulation and freshwater resources supply contribute respectively 66.4%, 21.6% and 9.3% of the total value, and the average annual ecological service value of hydroelectric power is about 350 million yuan. Other regulation and the service function value is about 1.3 billion yuan. Finally, this study finds that supply of fresh water resources, physical production and the ecological regulating function account for the absolute contribution in the ecological system, through the comparative analysis of ice, forest, grassland and wetland ecosystem service value of different proportions of the total value, and the ecological service value of the glacier unit area is higher than those of other kinds of ecosystems. Therefore the purpose of the research is to improve the understanding of human beings on impact of glacier about the human welfare, the maintenance of ecological environment and other aspects, and provide a basis for policy making in cryosphere ecological security, environmental protection and sustainable use of resources for planning and management.

**Keywords:** mountain glacier; ecological function; service value; evaluation; Tianshan Mountains