



## 1995—2019年云南千湖山小微水体景观特征及影响因素研究

梁克敏 张勇 窦小东 郑秋竹 马燕丹 王晓蓉 吴凯婷

## Landscape Characters of Small and Micro Waterbodies and Its Drivers in Mt. Qianhu, Yunnan Province from 1995 to 2019

Liang Kemin, Zhang Yong, Dou Xiaodong, Zheng Qiuzhu, Ma Yandan, Wang Xiaorong, Wu Kaiting

引用本文:

梁克敏, 张勇, 窦小东, 郑秋竹, 马燕丹, 王晓蓉, 吴凯婷. 1995—2019年云南千湖山小微水体景观特征及影响因素研究[J]. *西南林业大学学报*, 2023, 43(6):45–53. doi: 10.11929/j.swfu.202209066

Liang Kemin, Zhang Yong, Dou Xiaodong, Zheng Qiuzhu, Ma Yandan, Wang Xiaorong, Wu Kaiting. Landscape Characters of Small and Micro Waterbodies and Its Drivers in Mt. Qianhu, Yunnan Province from 1995 to 2019[J]. *Journal of Southwest Forestry University(Natural Science)*, 2023, 43(6):45–53. doi: 10.11929/j.swfu.202209066

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11929/j.swfu.202209066>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 滇西北哈巴雪山2个针叶树种径向生长与气候因子的关系

The Relationship Between Radial Growth of 2 Conifer Trees and Climatic Factors in the Haba Snow Mountain  
*西南林业大学学报*. 2021, 41(6): 79–85 <https://doi.org/10.11929/j.swfu.202005056>

#### 云南紫溪山冬季鸟类丰富度年间变化研究

Annual Change of Avian Species Richness in Winter at Zixi Mountain, Yunnan  
*西南林业大学学报*. 2019, 39(4): 110–115 <https://doi.org/10.11929/j.swfu.201901015>

#### 昆明市绿地斑块特征对地表降温的影响

Effects of Green Space Patches Characteristics on Surface Cooling in Kunming  
*西南林业大学学报*. 2018, 38(6): 151–158 <https://doi.org/10.11929/j.issn.2095-1914.2018.06.020>

#### 甘肃祁连山西水林区草地土壤水势变化特征研究

Study on the Variation Characteristics of Grassland Vegetation Soil Water Potential in Xishui Forest Area of Qilian Mountains, Gansu  
*西南林业大学学报*. 2021, 41(2): 177–181 <https://doi.org/10.11929/j.swfu.202004025>

#### 云南高黎贡山10种高山雀形目鸟类卵壳显微结构观察

Eggshell Ultrastructure of 10 Apline Passerine Birds in Mt. Gaoligong, Yunnan  
*西南林业大学学报*. 2019, 39(2): 160–166 <https://doi.org/10.11929/j.swfu.201808016>

#### 5种北美栎树秋冬季叶色变化机理分析

Leaf Color Transformation of 5 America Introduced *Quercus* spp. in Autumn and Winter  
*西南林业大学学报*. 2021, 41(4): 56–62 <https://doi.org/10.11929/j.swfu.202006055>

DOI: 10.11929/j.swfu.202209066

引文格式: 梁克敏, 张勇, 窦小东, 等. 1995—2019年云南千湖山小微水体景观特征及影响因素研究 [J]. 西南林业大学学报 (自然科学), 2023, 43(6): 45–53.

## 1995—2019年云南千湖山小微水体景观特征及影响因素研究

梁克敏<sup>1,2</sup> 张勇<sup>1,2</sup> 窦小东<sup>3</sup> 郑秋竹<sup>1,2</sup> 马燕丹<sup>1,2</sup> 王晓蓉<sup>1,2</sup> 吴凯婷<sup>1,2</sup>

(1. 西南林业大学云南省高原湿地保护修复与生态服务重点实验室, 云南昆明 650233; 2. 西南林业大学国家高原湿地研究中心, 湿地学院, 云南昆明 650233; 3. 云南省气象服务中心, 云南昆明 650034)

**摘要:** 以滇西北千湖山为研究区, 使用 1995—2019 年的 Landsat 系列影像资料提取小微水体的空间分布, 分析 1995—2019 年该区域小水体和微水体的景观特征变化规律, 并探讨了气候变化对它们的影响。结果表明: 小水体和微水体的平均分布海拔分别为 3953.1 m 和 3987.8 m, 小水体和微水体分布区的坡度分别为 9°~14°和 6°~13°, 2 种水体主要分布在千湖山的东坡和北坡, 南坡分布得最少。小水体的斑块面积大于微水体, 趋于聚集分布; 微水体斑块数量多于小水体, 趋于离散分布。1995—2019 年, 小水体和微水体的斑块面积、斑块数量和分离度指数均呈先增加后减少的趋势。1995—2019 年, 千湖山地区气候整体呈暖干化趋势。海拔和坡度对小微水体的景观特征有显著影响; 气温升高对小微水体斑块数量、斑块面积增加有正向作用, 但会导致斑块破碎度增加; 降水减少对小微水体景观特征的影响与气温升高相反。本研究表明, 在千湖山地区, 地形因素(海拔和坡度)控制着小水体的空间分布, 气候暖干化对小微水体的景观特征变化有显著影响, 微水体对环境变化的敏感性高于小水体。

**关键词:** 地形特征; 气温; 降水; 斑块数量; 斑块面积; 分离度指数; 千湖山

中图分类号: P901

文献标志码: A

文章编号: 2095-1914(2023)06-0045-09

## Landscape Characters of Small and Micro Waterbodies and Its Drivers in Mt. Qianhu, Yunnan Province from 1995 to 2019

Liang Kemin<sup>1,2</sup>, Zhang Yong<sup>1,2</sup>, Dou Xiaodong<sup>3</sup>, Zheng Qiuzhu<sup>1,2</sup>,  
Ma Yandan<sup>1,2</sup>, Wang Xiaorong<sup>1,2</sup>, Wu Kaiting<sup>1,2</sup>

(1. Yunnan Key Laboratory of Plateau Wetland Conservation, Restoration and Ecological Services, Southwest Forestry University, Kunming Yunnan 650233, China; 2. National Plateau Wetlands Research Center / College of Wetlands, Southwest Forestry University, Kunming Yunnan 650233, China; 3. Yunnan Meteorological Service Center, Kunming Yunnan 650034, China)

**Abstract:** This study obtained the distribution of small and micro waterbodies based on Landsat images in the Mt. Qianhu(MQH) in northwestern Yunnan Province from 1995 to 2019. Then the changes in landscape pattern of small and micro waterbodies in MQH were analyzed. Meanwhile, the effects of climatic factors on the changes of landscape pattern were discussed. The results showed that the average distribution altitude of small waterbodies and micro waterbodies were 3953.1 m and 3987.8 m, respectively. The distribution slope of small waterbodies

收稿日期: 2022-09-27; 修回日期: 2022-11-22

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0307)资助; 云南省教育厅科学研究基金项目(2018JJS38)资助。

第1作者: 梁克敏(1997—), 女, 硕士研究生。研究方向: 高原湿地保护和管理。Email: 21429904@qq.com。

通信作者: 张勇(1988—), 男, 博士, 副教授。研究方向: 高寒生态环境变化及适应。Email: zhy1902@126.com。

was between  $9^{\circ}$  and  $14^{\circ}$ , and it was between  $6^{\circ}$  and  $13^{\circ}$  for micro waterbodies. These 2 types of waterbodies mainly distributed on the eastern and northern slope, and a few distributed on the southern slope of MQH; the patch area of small waterbodies was larger than that of micro waterbodies, while the patch number of micro waterbodies was larger than the small waterbodies. The patches of small waterbodies showed a concentrated distribution tendency, while the patches of micro waterbodies showed an opposite distribution tendency. Generally, the patch area, patch number and the separation index of small and micro waterbodies increased firstly and then decreased from 1995 to 2019; it was a climatic warming and drying trend in MQH from 1995 to 2019. The altitude and slope had significant impacts on the landscape characteristics of small and micro waterbodies. The increase of annual temperature tended to increase the patch number, patch area and patch separation index of the small and micro waterbodies. The reduce of annual precipitation, however, played an opposite role in changing landscape characteristics of small and micro waterbodies. This study shows that topography factors(i.e., altitude and slope) control the spatial distribution of small and micro waterbodies, climatic warming and drying could strong change the landscape characteristics of these waterbodies in the MQH. Furthermore, the micro waterbodies were more sensitive than small waterbodies in responding to environmental changes in MQH.

**Key words:** topographic character; temperature; precipitation; patch number; patch area; separation index; Mt. Qianhu

气候变化已对全球湿地生态系统的数量和功能稳定性产生影响<sup>[1]</sup>。研究发现,在1970—2015年,全球约35%的天然湿地已经转变为其他生态系统类型<sup>[2]</sup>。遏制湿地减少和退化、对退化湿地进行生态恢复是湿地保护研究关注的核心问题。目前,我国对滨海湿地、内陆沼泽湿地和湖泊湿地等大面积分布的湿地类型的研究较多,对这些湿地类型也形成了相对成熟的管理和保护措施<sup>[3]</sup>。在全国湿地资源调查工作中也主要关注大面积的湿地资源,如2003年我国开展的第一次全国湿地资源调查的起调面积为 $100\text{ hm}^2$ ,2013年开展的第二次全国湿地资源调查中,参考国际湿地调查标准,将湿地资源起调面积调整为 $8\text{ hm}^2$ <sup>[4-5]</sup>。小型湖泊、小型溪流、泉水、沟渠等面积在 $8\text{ hm}^2$ 以下的小微湿地具有缓解雨洪和改善水质等生态功能<sup>[6-7]</sup>,特别的,在高山地区分布的小微水体生态系统可充当物种迁移生态网络中的垫脚石斑块、加强栖息地间的连通性<sup>[8]</sup>,能有效保护区域稀有物种、促进高寒生境的生物多样性保育功能<sup>[9-11]</sup>。但由于面积小、分布离散,小微湿地常在当前的湿地保护体系、湿地认定体系和湿地资源调查中“缺席”。

不同国家和研究团体对小微湿地的定义不尽相同,我国对小微湿地的研究尚处于起步和探索

阶段,目前一般将面积小于 $8\text{ hm}^2$ 的湖泊类水体定义为小微湿地。在理论探索方面,崔丽娟等<sup>[12]</sup>系统梳理了小微湿地的定义、分类及生态功能。在管理实践方面,2018年国际湿地公约预备会通过了中国政府提交的《小微湿地保护与管理》决议<sup>[13]</sup>,指出湿地的空间分布是由大量的小微湿地和少数大型湿地组成的异质网络,明确了小微湿地有助于维持生境或生物多样性等生态作用<sup>[5,14]</sup>。2021年发布的《青海省小微湿地认定规范》(DB63/T 1988—2021)<sup>[15]</sup>将小微湿地定义为面积在 $8\text{ hm}^2$ 以下,具有一定生态、文化服务功能的小型湿地,可分为自然型及人工型两大类。为切实保护和利用小微湿地,亟需加强小微湿地对环境变化响应的研究。

滇西北位于青藏高原东南端,是云南省高原湿地的集中分布区<sup>[16]</sup>。已有研究表明滇西北高山地区集中分布有大量的微水体,千湖山地区的小微水体数量尤其可观,其密集分布在山脊线两侧<sup>[17]</sup>。由于分布在高海拔地区,小微水体的生境具有内在的脆弱性,其对外界环境扰动的响应比其他大面积水体更敏感。1960—2011年,滇西北地区的年均气温显著上升<sup>[18]</sup>,极端干旱事件的发生频率也呈增加趋势<sup>[19-20]</sup>。在此气候变化背景下,有必要探讨滇西北高寒山区小微水体景观格局的变化规律。鉴于此,本研究以滇西北地区小微水体的

典型分布区——千湖山为研究对象，基于 Landsat 系列影像提取该地区 1995—2019 年小微水体的空间分布，进而分析其景观特征的变化规律及对气候变化的响应特征，为该区域小微水体的保护和利用提供依据。

## 1 研究区概况

千湖山位于云南省迪庆藏族自治州香格里拉市南部，千湖山北端距市区约 20 km。该区域年降水量 849.8 mm，年平均温度 5.8 °C<sup>[21]</sup>。夏秋季降水多，冬春季降水少。该区域 3—9 月的遥感影像云量均高于 60%，10—12 月的遥感影像云量普遍低于 10%<sup>[22]</sup>。千湖山地区平均海拔在 3800 ~ 4200 m<sup>[21]</sup>，冰川作用强烈<sup>[23]</sup>。据已有研究结果<sup>[17]</sup>和数据预分析，本研究对千湖山南北向山脊线两侧 20 km 范围（该范围涵盖绝大部分小微水体）的小微水体进行提取和分析，研究区面积约 525 km<sup>2</sup>，海拔介于 2285 ~ 4250 m（图 1）。

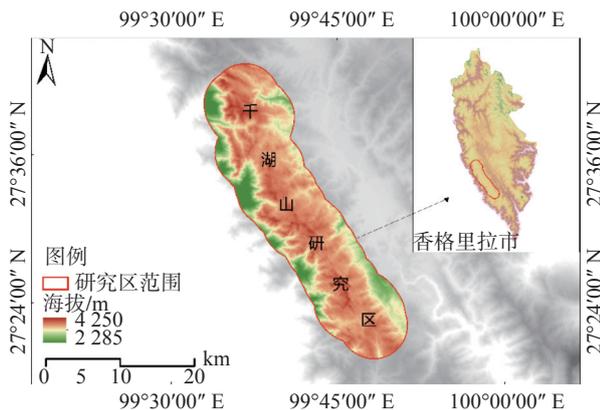


图 1 研究区位置

Fig. 1 The illustration of study area

## 2 材料与方法

### 2.1 数据来源与分析

#### 2.1.1 气象数据

本研究从“国家青藏高原科学数据中心”（<http://data.tpdc.ac.cn>）获取 1995—2019 年研究区近地表的年均气温和年降水量网格数据（空间分辨率 1 km × 1 km）<sup>[24-25]</sup>。基于上述气候因子计算研究区的湿润度指数，计算公式为<sup>[26]</sup>：

$$I = P / (T + 10) \quad (1)$$

式中： $P$  为年降水量（mm）； $T$  为年平均气温（°C）， $I$  值越大表示地表越湿润。

#### 2.1.2 遥感影像数据

从美国地质调查局官网（USGS，[https://](https://www.usgs.gov/)

[www.usgs.gov/](https://www.usgs.gov/)）获取 1995—2019 年拍摄的遥感影像共 10 景，这些影像的云量介于 0.87% ~ 39%，但各景影像中的研究区范围内几乎没有云覆盖（表 1）。采用 FLAASH 大气校正消除遥感影像的辐射畸变，采用 VECA 模型<sup>[22]</sup>进行地形校正以消除地形阴影和几何畸变，遥感影像预处理均在 ENVI 5.3 软件中完成。

表 1 1995—2019 年千湖山地区的遥感影像数据概况

Table 1 The overview of remote sensing image data in Mt. Qianhu from 1995 to 2019

卫星	日期	轨道号	分辨率/m	含云量/%
Landsat 5 TM	1995-11-28	Path132/Row41	30	4
Landsat 5 TM	1997-11-07	Path132/Row41	30	2
Landsat 7 ETM	2000-11-07	Path132/Row41	30	39
Landsat 5 TM	2003-11-24	Path132/Row41	30	28
Landsat 5 TM	2005-11-13	Path132/Row41	30	16
Landsat 5 TM	2008-10-20	Path132/Row41	30	14
Landsat 7 ETM	2011-12-29	Path132/Row41	30	1
Landsat 8 OLI	2013-11-19	Path132/Row41	30	3
Landsat 8 OLI	2015-11-25	Path132/Row41	30	8
Landsat 8 OLI	2019-12-06	Path132/Row41	30	1

#### 2.1.3 DEM 数据

本研究从空间信息联盟（<http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp>）获取千湖山地区 30 m 分辨率的 DEM 数据，基于该数据，在 ArcGIS 10.2 中计算小水体和微水体的分布海拔、坡度和坡向。

### 2.2 小水体和微水体的提取

采用基于阈值的波段间关系构建水体指数（WI）以提取小微水体，该方法适用于地形起伏较大、阴影较多的山地地区水体的提取<sup>[27-29]</sup>，WI 计算公式如下：

$$WI = (TM2 + TM3) - (TM4 + TM5) \quad (2)$$

将  $WI > 0$  的区域识别为水体。完成水体提取后，本研究将面积为 0.01 ~ 0.08 km<sup>2</sup> 的水体定义为小水体，面积为 0.0009 ~ 0.01 km<sup>2</sup> 的水体定义为微水体。

#### 2.3 提取精度验证

采用 TM、ETM 影像的 7（SWIR2）、4（NIR）和 3（Red）波段组合，OLI 影像的 5（NIR）、6（SWIR1）和 4（Red）波段组合进行假彩色影

像合成以凸显水体信息,在此基础上通过目视方法统计研究区小微水体的数量。将基于水体指数提取的小微水体数量与目视方法统计的小微水体数量的比值作为小微水体的整体提取精度。

本研究中,1995—2019年,千湖山地区小微水体的整体提取精度为89%~97%,平均精度为94%,满足研究要求。

## 2.4 景观格局指数的计算

本研究基于斑块面积、斑块数量和分离度指数(SPLIT)分析小微水体的景观完整性。其中,某一斑块类型的斑块面积为该类型所有斑块面积之和;某一斑块类型的斑块数量为该类型所有斑块的个数;分离度指数表示斑块分布的离散程度,其计算公式见式(3)<sup>[30]</sup>。在Fragstats 4中计算上述景观格局指数。

$$SPLIT = \frac{A^2}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a_{ij}^2} \quad (3)$$

式中: $A$ 为研究区域总面积; $m$ 为景观类型数目; $n$ 为某一类型的斑块个数。

为了对比小水体和微水体景观指数对环境变

化响应的敏感性,计算各景观指数的变异系数。变异系数越大,说明其对环境变化的响应越敏感。计算公式为:

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \quad (4)$$

式中:CV为变异系数; $\sigma$ 为标准差; $\mu$ 为算术平均值。

## 2.5 分析方法

在CANOCO 5中采用冗余分析(RDA)探讨环境因素(包括海拔、坡度、年均气温、年降水量和湿润度)与小水体和微水体景观特征(包括斑块数量、斑块面积和斑块分离度)的关系。

## 3 结果与分析

### 3.1 千湖山小水体和微水体分布区的环境特征

#### 3.1.1 千湖山小水体和微水体分布区的地形特征

1995—2019年,小水体分布区的平均海拔高度为3953.1 m(范围为3926~3979 m),微水体分布区的平均海拔高度为3987.8 m(范围为3978~4006 m)(图2)。小水体分布区的平均坡度为10.2°(范围为9°~14°),微水体分布区的平均坡度为9.7°(范围为6°~13°)(图2)。

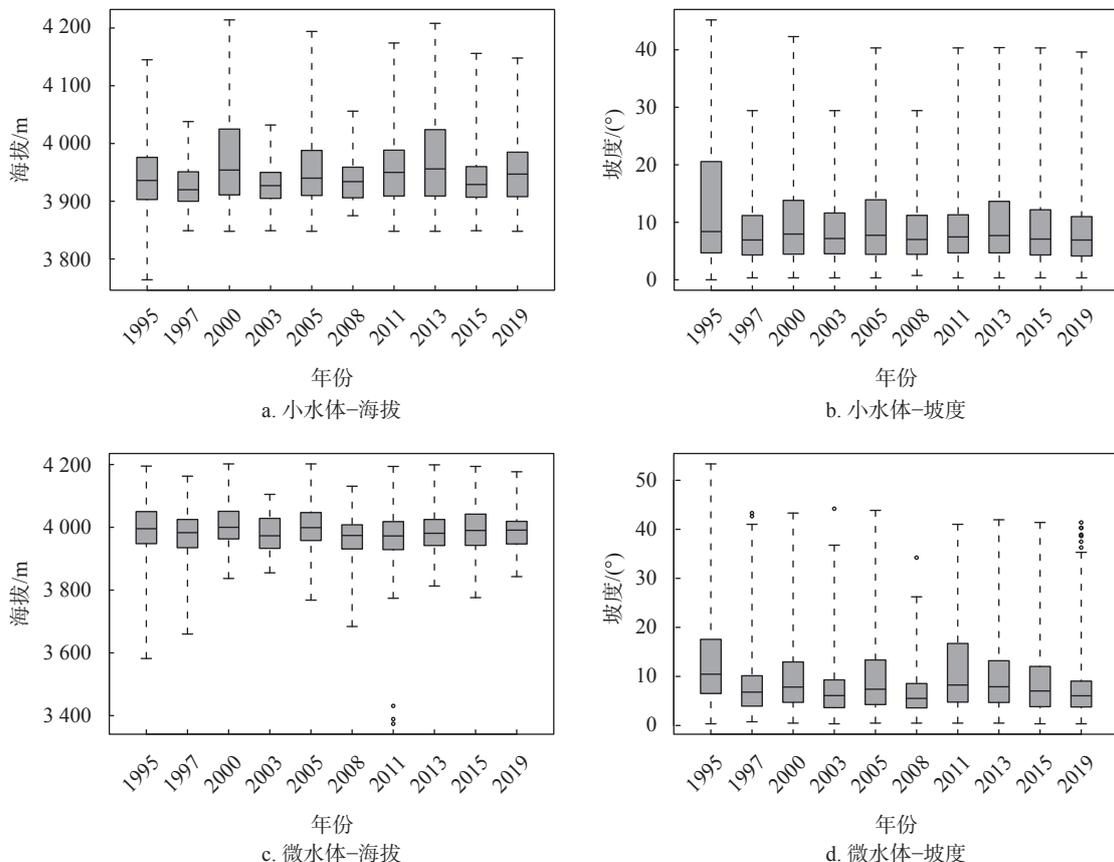


图2 1995—2019年千湖山地区小水体和微水体的海拔和坡度特征

Fig. 2 Elevation and slope of small and micro waterbodies in Mt. Qianhu from 1995 to 2019

1995—2019 年，千湖山地区的小水体和微水体主要分布在东坡和北坡，南坡最少。按面积统

计，小水体和微水体分布坡向的排序为：东坡>北坡>西坡>南坡（图 3）。

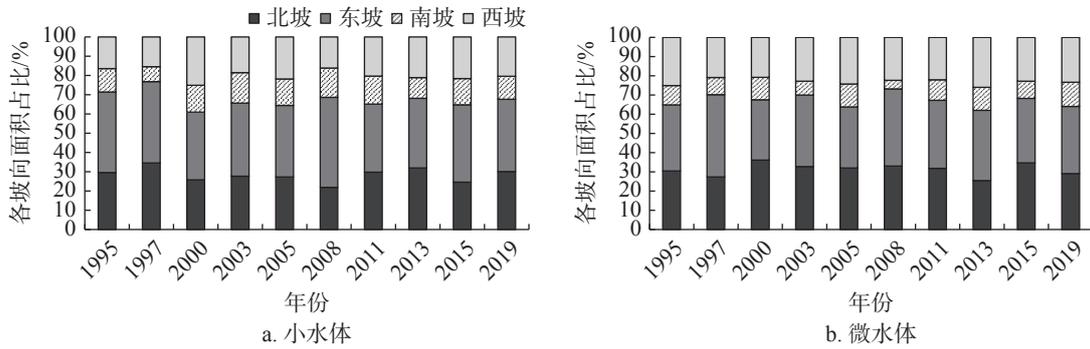


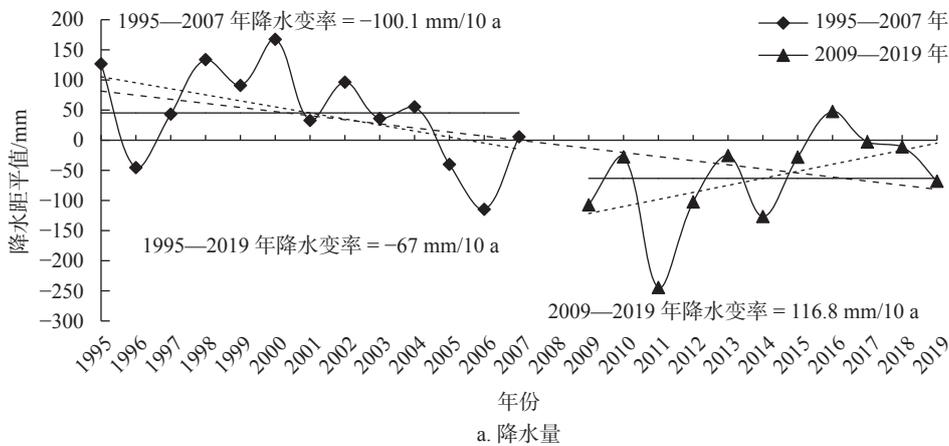
图 3 1995—2019 年千湖山地区小水体和微水体的坡向特征

Fig. 3 Aspects of small and micro waterbodies in Mt. Qianhu from 1995 to 2019

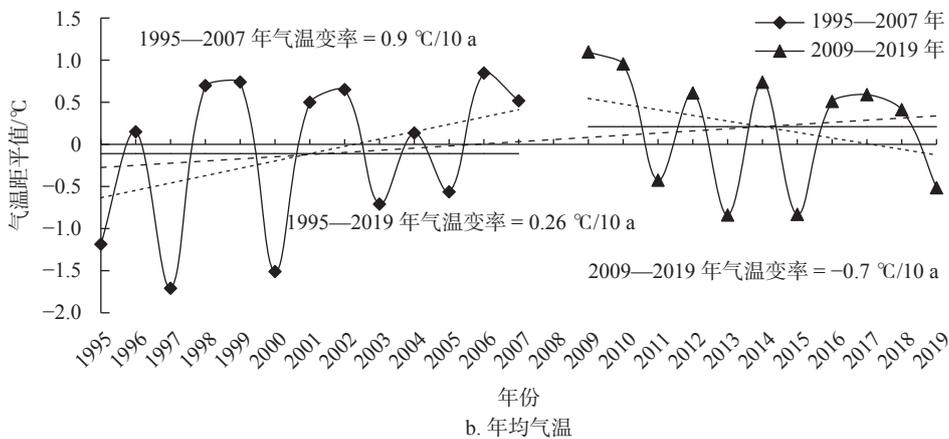
3.1.2 千湖山小水体和微水体分布区的气候因素变化

1995—2019 年，千湖山地区年降水量总体呈波动下降趋势，其变化过程分为 2 个阶段：2008 年以前，降水量减少倾向率为 10 mm/a，但大部分年份仍高于多年平均值；2008 年以后，降水量的增加倾向率为 11.7 mm/a，但大多数年份低于多年平均值。年均气温整体呈上升趋势，上升

过程也可分为 2 个阶段：2008 年以前，气温的升高倾向率为 0.09 °C/a；2008 年以后，其下降倾向率为 0.07 °C/a。相应地，该地区的湿润程度呈整体下降的趋势，其变化过程也分为 2 个阶段：2008 年以前，湿润度的下降倾向率为 1.1/a；2008 年以后，湿润度的增加倾向率为 1.1/a，但大多数年份低于多年平均值（图 4）。



a. 降水量



b. 年均气温

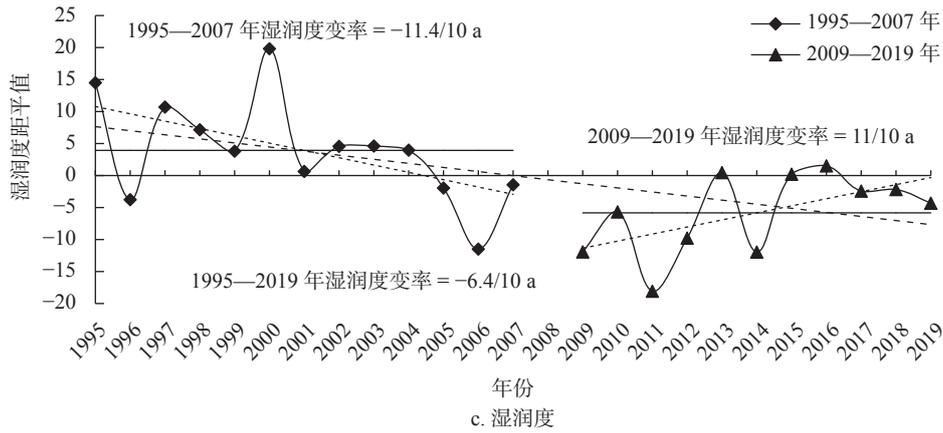


图 4 1995—2019 年千湖山地区年降水量、年均气温和湿润度的变化趋势

Fig. 4 Changes of annual precipitation, temperature and humidity in Mt. Qianhu from 1995 to 2019

### 3.2 千湖山小水体和微水体的景观特征

1995—2019 年，千湖山地区小水体和微水体的景观特征变化趋势相似：小水体和微水体的斑块面积、斑块数量和分离度指数均以 2 a 为周期，呈先上升后下降的趋势。具体地，1995—2019 年，千湖山地区小水体的平均斑块数量为 32 个（范围介于 23~43 个），变异系数为 0.23。小水体的平均斑块面积为 0.68 km<sup>2</sup>（范围介于 0.42~0.9 km<sup>2</sup>），变异系数为 0.25。小水体的平均斑块

分离度为 24.64（范围介于 14.85~33.24），变异系数为 0.27（图 5）。

1995—2019 年，千湖山地区微水体的平均斑块数量为 152 个（范围介于 93~232 个），变异系数为 0.33。微水体的平均斑块面积为 0.42 km<sup>2</sup>（范围介于 0.25~0.6 km<sup>2</sup>），变异系数为 0.3。微水体的平均斑块分离度为 83.44（范围介于 25.96~140.61），变异系数为 0.44（图 5）。

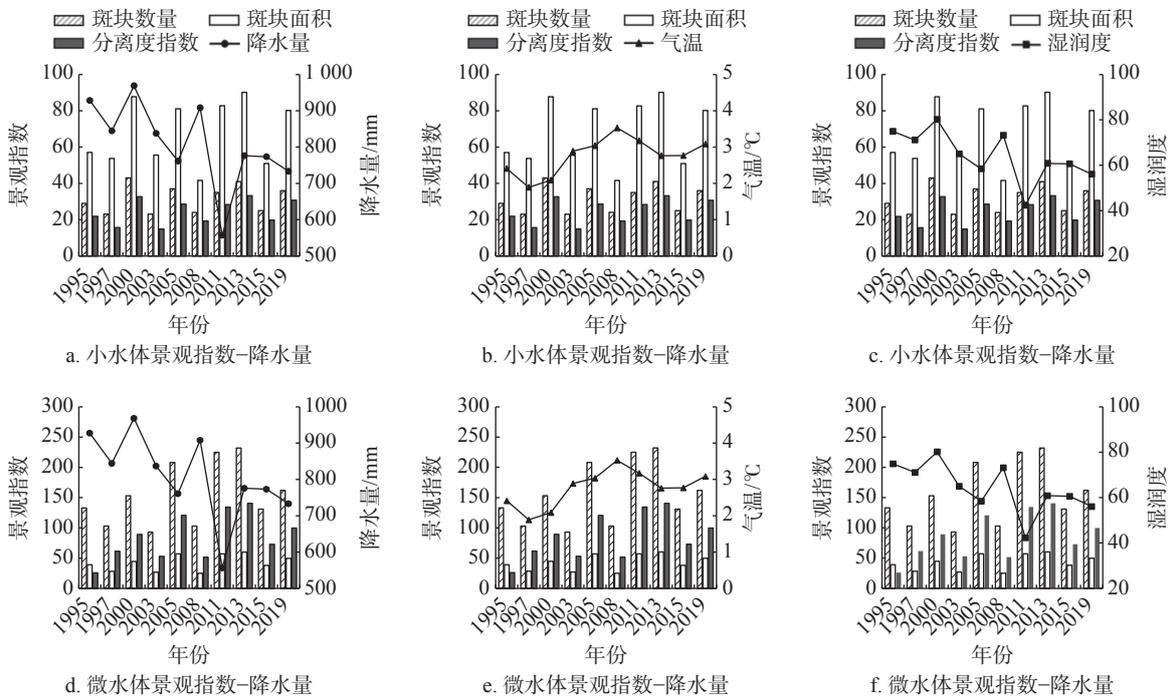


图 5 1995—2019 年千湖山地区小水体和微水体斑块面积、斑块数量和分离度指数

Fig. 5 Patch number, patch area and patch splitting index of small and micro waterbodies in Mt. Qianhu from 1995 to 2019

### 3.3 千湖山地区小水体和微水体景观特征与环境因素的关系

1995—2019 年、1995—2005 年和 2008—2019

年小水体景观特征与环境因素 RDA 分析的第 1 轴（代表地形）和第 2 轴（代表气候）的累计解释量分别达到 82.76%、99.91%、99.76%；在上述

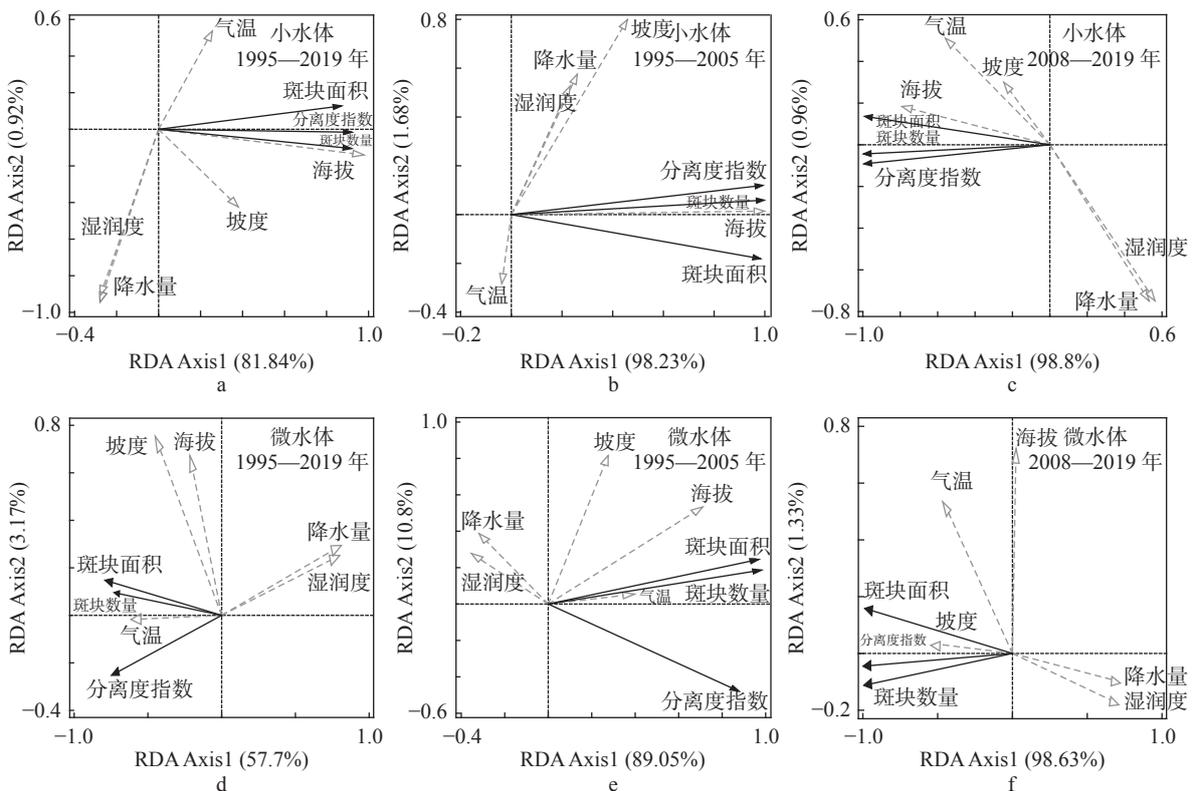
3 个时间段，微水体景观特征与环境因素分析第 1 轴（代表气候）和第 2 轴（代表地形）的累计解释量则分别达到 60.87%、99.85% 和 99.96%。

以 1995—2019 年为时间尺度的 RDA 分析结果表明，千湖山小水体和微水体景观特征与环境因素的关系整体上具有相似性，即小水体和微水体的斑块面积、斑块数量和分离度指数与海拔、坡度和气温存在正相关关系，与降水量和湿润度呈负相关关系（图 6）。

以 1995—2005 年为时间尺度的 RDA 分析结

果表明，在该时间段内小水体景观指标主要受海拔影响，与气温存在负相关关系；微水体景观指标主要受气温和海拔影响，与年降水量和湿润度呈负相关关系。

以 2008—2019 年为时间尺度的 RDA 分析结果表明，该时间段内小水体景观指标主要受海拔影响，而微水体景观指标则主要受坡度影响，小水体和微水体的景观特征均与气温存在正相关关系，与降水量、湿润度呈负相关关系（图 6）。



图中灰色虚线箭头代表千湖山地区环境因子，黑色实线箭头代表小水体和微水体的景观指数。

图 6 1995—2019 年千湖山地区环境因素与小水体和微水体景观指数的关系

Fig. 6 Relationships between environmental factors and landscape indexes of small and micro waterbodies in Mt. Qianhu from 1995 to 2019

## 4 结论与讨论

### 4.1 讨论

本研究发现地形（海拔和坡度）是控制千湖山地区小水体和微水体分布的重要因素。滇西北地区的山体坡度通常随海拔升高而增加，平坦地形随之减少，因此微水体的分布海拔高于小水体。从太阳辐射强度来看，相较于北坡和东坡，南坡的太阳辐射强，水分蒸发量大，不利于小水体和微水体的形成和留存<sup>[31]</sup>，这可能是导致本研

究小水体和微水体坡向分布特征的原因。此外，在同样的太阳辐射强度下，微水体由于面积小且水浅，其较小水体更易蒸发。因此，从空间分布上看，千湖山地区微水体分布区的生境比小水体脆弱。对比 1995—2019 年 2 类水体的景观指数的变异系数发现，微水体斑块面积、斑块数量和分离度指数的变异系数均大于小水体，说明微水体对环境变化的响应敏感性高于小水体。

青藏高原腹地的气候呈“暖湿化”趋势<sup>[32-33]</sup>，但本研究发现 1995—2019 年千湖山地区年降水

量下降、年均气温升高、湿润度下降,这些均表明该区域的气候呈暖干化趋势,该变化趋势与滇西北高山地区树轮研究得出的结论一致<sup>[34-35]</sup>,此外,1996—2015年滇西北香格里拉市植被净初级生产力的升高也印证了这一点<sup>[36]</sup>,这表明滇西北地区的气候变化模式与青藏高原腹地不同。

水源补给量是影响地表水面面积变化的主要因素。在青藏高原腹地的研究发现,气候“暖湿化”引起的降水增多和冰雪融水增加是导致高原大型湖泊面积和数量增加的重要原因<sup>[37-38]</sup>。本研究发现,气候“暖干化”对千湖山地区小微水体景观特征的年际波动有重要影响,该影响过程分为2个阶段:1995—2008年,气候呈现典型的暖干化趋势,这一过程有利于千湖山的积雪融化,为小水体和微水体补给了水量,因此小水体和微水体的斑块数量和斑块面积均呈增加趋势。2009—2019年,虽然年均气温呈下降趋势、年降水量呈增加趋势,但与正常年份相比,该阶段的暖干程度较深,有些年份甚至出现了特大干旱的情况,如2011年<sup>[39]</sup>,在这样的气候背景下,小微水体的景观特征变化规律性减弱。此外,持续的气候暖干化过程可能加剧了冰川退缩<sup>[40-41]</sup>,导致冰雪融水对小微水体的补给能力不足,从而导致小微水体的斑块数量和斑块面积开始呈减少趋势。

特别的,本研究发现千湖山地区年降水量与小微水体斑块数量和斑块面积呈负相关关系。导致该现象的原因可能有2个:1)冰川冻融作用在千湖山地区形成了大量面积小、零散分布的小型凹地,它们是该区域小微水体发育的基础,这些小型凹地的水体容积有限且具有封闭性<sup>[23]</sup>。年降水量增加时,超过凹地容积的补水量对小微水体的增加作用有限,反而会将毗邻分布的小微水体连成片,造成小微水体数量和面积减少,但景观完整性增加的现象,本研究中小微水体的景观破碎度随降水量增加而降低可能就是部分证据。2)气候变暖背景下,滇西北地区降水量的季节分配差异增加,如2000—2010年滇西北地区年降水量呈显著下降趋势,雨季降水量显著减少是导致该现象的主要原因<sup>[42]</sup>,同期的冬季降雪则有增加的趋势<sup>[43]</sup>,因此用更细致的降水量数据(如分季节)进行分析可能会得到更完善的结论,后续研究可加强这方面的探讨。

#### 4.2 结论

研究表明,1995—2019年千湖山地区小微水体的斑块数量和面积呈先增加后减少的趋势,

小水体趋于集中分布,微水体趋于离散分布。地形是控制千湖山地区小微水体分布的重要因素,微水体分布区的生境比小水体更脆弱,前者对环境变化的敏感性高于后者。1995—2019年千湖山地区气候呈暖干化趋势,其对小微水体景观特征变化有重要影响,年均气温升高有利于增加小微水体的数量和面积,但会增加小微水体斑块的离散度;年降水量和湿润度增加会导致小微水体的数量和面积减少,但有利于降低小微水体的景观破碎度。

#### [参 考 文 献]

- [1] 张晓宁,刘振亚,李丽萍,等.大气增温对滇西北高原典型湿地湖滨带优势植物凋落物质量衰减的影响[J].生态学报,2017,37(23):7811-7820.
- [2] 安树青,张轩波,张海飞,等.中国湿地保护恢复策略研究[J].湿地科学与管理,2019,15(2):41-44.
- [3] 王靖辉.云南高原两个山间盆地小微湿地网络结构及其生物多样性效应[D].昆明:云南大学,2020.
- [4] 国家林业局组织.中国湿地资源:青海卷[M].北京:中国林业出版社,2015.
- [5] 赵晖,陈佳秋,陈鑫,等.小微湿地的保护与管理[J].湿地科学与管理,2018,14(4):22-26.
- [6] Biggs J, Fumetti S, Kelly-Quinn M. The importance of small waterbodies for biodiversity and ecosystem services: implications for policy makers[J]. Hydrobiologia, 2017, 793(1): 3-39.
- [7] 刘硕然,杨道德,李先福,等.滇西北高山微水体与溪流生境底栖动物多样性和环境特征[J].生物多样性,2019,27(12):1298-1308.
- [8] Liu S R, Fornacca D, Yang D D, et al. Species richness and biodiversity significance of alpine micro-waterbody systems in Gaoligong Mountain, Northwest Yunnan, China[J]. Journal of Mountain Science, 2020, 17(4): 907-918.
- [9] Williams P, Whitfield M, Biggs J, et al. Comparative biodiversity of rivers, streams, ditches and ponds in an agricultural landscape in Southern England[J]. Biological Conservation, 2004, 115(2): 329-341.
- [10] Scheffer M, van Geest G J, Zimmer K, et al. Small habitat size and isolation can promote species richness: second-order effects on biodiversity in shallow lakes and ponds[J]. Oikos, 2006, 112(1): 227-231.
- [11] Chen X, Cai Q H, Tan L, et al. Species diversity and community structure of crustacean zooplankton in the highland small waterbodies in Northwest Yunnan, China[J]. PeerJ, 2021, 9: e12103.
- [12] 崔丽娟,雷茵茹,张曼胤,等.小微湿地研究综述:定

- 义、类型及生态系统服务[J]. 生态学报, 2021, 41(5): 2077-2085.
- [13] 安树青. 小微湿地保护与管理[R]. 斯里兰卡: 国际湿地公约秘书处、斯里兰卡可持续发展与野生生物部, 2018.
- [14] 陈新芳, 冯慕华, 关保华, 等. 微地形对小微湿地保护恢复影响研究进展[J]. 湿地科学与管理, 2020, 16(4): 62-65, 70.
- [15] 青海省林业和草原局. 青海省小微湿地认定规范: DB63/T 1988—2021[S]. 西宁: 青海省市场监督管理局, 2021.
- [16] 杨岚, 李恒. 云南湿地[M]. 北京: 中国林业出版社, 2010.
- [17] 刘硕然, 和晓阳, 杨文书, 等. 滇西北高山微水体空间分布格局及研究意义初探[J]. 水生态学杂志, 2017, 38(1): 18-23.
- [18] Fan Z X, Bräuning A, Thomas A, et al. Spatial and temporal temperature trends on the Yunnan Plateau (Southwest China) during 1961-2004[J]. International Journal of Climatology, 2011, 31(14): 2078-2090.
- [19] 覃顺萍, 吴巩固, 李丽, 等. 1961—2010年云南省极端干旱的特征分析[J]. 海南师范大学学报(自然科学版), 2014, 27(3): 306-311.
- [20] 何娇楠, 李运刚, 李雪, 等. 云南省 1961—2012年干旱时空变化特征[J]. 山地学报, 2016, 34(1): 19-27.
- [21] 李宇宸, 张军, 刘陈立. Sentinel-2影像的云南千湖山细小冰湖提取方法[J]. 测绘科学, 2021, 46(4): 114-120.
- [22] 崔媛, 郭辉军, 张勇, 等. 基于 Landsat TM 冬季影像的香格里拉高寒草甸分布的提取与验证[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2021, 41(3): 130-138.
- [23] 张威, 刘蓓蓓, 李永化, 等. 云南千湖山第四纪冰川发育特点与环境变化[J]. 地理学报, 2012, 67(5): 657-670.
- [24] 彭守璋. 中国 1km 分辨率逐月降水量数据集(1901—2020)[DS]. 国家青藏高原科学数据中心, 2020.
- [25] 周纪, 王伟, 马晋. 青藏高原 0.01°空间分辨率近地表气温数据集(1979—2018)[DS]. 国家青藏高原科学数据中心, 2020.
- [26] 孟猛, 倪健, 张治国. 地理生态学的干燥度指数及其应用评述[J]. 植物生态学报, 2004, 28(6): 853-861.
- [27] 毕海芸, 王思远, 曾江源, 等. 基于 TM 影像的几种常用水体提取方法的比较和分析[J]. 遥感信息, 2012, 27(5): 77-82.
- [28] 都金康, 黄永胜, 冯学智, 等. SPOT 卫星影像的水体提取方法及分类研究[J]. 遥感学报, 2001, 5(3): 214-219.
- [29] 苏龙飞, 李振轩, 高飞, 等. 遥感影像水体提取研究综述[J]. 国土资源遥感, 2021, 33(1): 9-19.
- [30] 姜亮亮, 刘海隆, 包安明, 等. 玛纳斯河流域景观格局演变特征与驱动机制分析[J]. 水土保持研究, 2014, 21(4): 256-262.
- [31] 王有兵, 姜健发, 杨建军, 等. 高山微水体空间分布格局研究: 以白马雪山国家级自然保护区为例[J]. 人民长江, 2020, 51(7): 71-74, 135.
- [32] Tong G. Long-term changes and variability of ecologically-based climate indices along an altitudinal gradient on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Climate, 2020, 9(1): 1.
- [33] 余迪, 段丽君, 温婷婷, 等. 青藏高原雨季特征及其对气候增暖的响应[J]. 气象与环境学报, 2021, 37(2): 12-18.
- [34] 尹定财, 孙梅, 张卫国, 等. 气候变暖对香格里拉油麦吊云杉径向生长的影响[J]. 东北林业大学学报, 2019, 47(3): 1-7.
- [35] 张贇, 尹定财, 张卫国. 滇西北哈巴雪山不同海拔长苞冷杉径向生长对气候变化的响应[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(17): 6778-6783.
- [36] 栗忠飞, 王小莲, 徐钰涛, 等. 1996—2015年滇西北香格里拉植被净初级生产力变化[J]. 生态学报, 2022, 42(1): 266-276.
- [37] 王鹏飞, 郭云艳, 周康, 等. 1961—2018年呼伦湖水面面积变化特征及其对气候变化的响应[J]. 环境科学研究, 2021, 34(4): 792-800.
- [38] Zhang G Q, Yao T D, Piao S L, et al. Extensive and drastically different alpine lake changes on Asia's high plateaus during the past four decades[J]. Geophysical Research Letters, 2017, 44(1): 252-260.
- [39] 王佳津, 孟耀斌, 张朝, 等. 云南省 Palmer 旱度模式的建立: 2010年干旱灾害特征分析[J]. 自然灾害学报, 2012, 21(1): 190-197.
- [40] 王宁练, 姚檀栋, 徐柏青, 等. 全球变暖背景下青藏高原及周边地区冰川变化的时空格局与趋势及影响[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(11): 1220-1232.
- [41] 叶庆华, 程维明, 赵永利, 等. 青藏高原冰川变化遥感监测研究综述[J]. 地球信息科学学报, 2016, 18(7): 920-930.
- [42] 纪智荣, 黄中艳, 谢国清. 1961—2010年云南干湿气候变化[J]. 气象科技, 2013, 41(6): 1073-1079.
- [43] 段长春, 段旭, 段苏芬, 等. 近 50 年云南省降雪的气候变化特征[J]. 气象, 2011, 37(5): 599-606.

(责任编辑 陆 驰)

