

## 滇池、抚仙湖、阳宗海长期水位变化(1988—2015年)及驱动因子\*

贺克雕<sup>1,2</sup>, 高伟<sup>1</sup>, 段昌群<sup>1\*\*</sup>, 朱远高<sup>2</sup>, 潘瑛<sup>1</sup>, 刘嫦娥<sup>1</sup>, 张唯<sup>1</sup>, 杨桂英<sup>1,3</sup>

(1: 云南大学生态学与环境学院暨云南省高原山地生态与退化环境修复重点实验室, 昆明 650504)

(2: 云南省水文水资源局, 昆明 650106)

(3: 西南林业大学, 昆明 650224)

**摘要:** 水位变化影响湖泊水质、水量和生态系统功能, 是研究湖泊演变的重要内容, 但目前针对滇中高原湖群水位变化特征还少见系统报道。本文选择滇池、抚仙湖、阳宗海 3 个滇中高原湖泊作为研究对象, 基于 1988—2015 年实测水位数据和 Mann-Kendall 趋势检验法评估了 3 个湖泊水位变化特征; 运用 RClimDex 模型获得了流域极端降水指标, 结合其他指标构建了基于极端气象因子的湖泊水位驱动力指标体系; 采用主成分—多元回归模型, 解析了极端降水、蒸发等气象因子对滇中高原湖泊水位变化的贡献。结果表明: ①滇池、抚仙湖、阳宗海水位年际波动不突出。滇池的年平均水位总体略呈上升趋势, 年均上升 0.025 m。阳宗海和抚仙湖水位无明显变化。②滇中高原湖泊流域的极端降水指数年际变化趋势不明显。滇池的蒸发量呈明显减小趋势, 年均减小 21.05 mm。抚仙湖蒸发量呈明显增加趋势, 平均每年增加 5.52 mm。阳宗海蒸发量的变化不明显。③气象指标可解释滇池水位变化的 49.7%, 滇池水位变化受气候变化和人类活动的综合影响; 阳宗海和抚仙湖水位变化主要受气象条件控制, 蒸发量、综合降水指标和连续降水指标对阳宗海水位变化的解释率高达 93.3%; 综合降水指标和干旱状况指标可以解释抚仙湖水位变化的 64.5%。极端降水指标对解释高原湖泊水位变化具有重要作用。

**关键词:** 滇池; 抚仙湖; 阳宗海; 水位; 极端降水; 驱动因子

## Water level variation and its driving factors in Lake Dianchi, Fuxian and Yangzong during 1988–2015

HE Kediao<sup>1,2</sup>, GAO Wei<sup>1</sup>, DUAN Changqun<sup>1\*\*</sup>, ZHU Yuangao<sup>2</sup>, PAN Ying<sup>1</sup>, LIU Chang'e<sup>1</sup>, ZHANG Wei<sup>1</sup> & YANG Guiying<sup>1,3</sup>

(1: *School of Ecology and Environmental Sciences & Yunnan Key Laboratory for Plateau Mountain Ecology and Restoration of Degraded Environments, Yunnan University, Kunming 650504, P.R.China*)

(2: *Yunnan Hydrology and Water Resources Bureau, Kunming 650106, P.R.China*)

(3: *Southwest Forestry University, Kunming 650224, P.R.China*)

**Abstract:** As an emerging research topics of limnology, variations in water level play a key role in regulating water quality, volume and ecosystem function of lakes. However, the characteristics of plateau lake group located in central Yunnan of China have not been well studied. Taking Lake Dianchi, Fuxian and Yangzong as the study cases, the trends of water level were analysed based on Mann-Kendall statistic approach, and an index system related to fluctuations of water level were established with extreme precipitation index generated from RClimDex and other metrological index. Coupling multiple linear regression and principal factor model, a model for water level alteration of plateau lakes was built to distinguish main driving factors and their effects. Results showed that no significant trend was observed in the annual water level fluctuation of these lakes from 1988 to 2015. However, water level had a significant increase trend in Lake Dianchi at a rate of 0.025 m per year, while no trends found in the other two lakes. The extreme climate index in the lake basins had no significantly statistic trend of temporal alteration. Reverse trends of evaporations were observed in Lake Dianchi and Fuxian that have been decreasing by 21.05 mm per year and increasing by 5.52 mm per year, respectively. The trend of evaporation in Lake Yangzong was not pronounced. Variation of water level in Lake Dianchi can be explained by

\* 国家自然科学基金项目(31670522)和云南省科技项目(2018BC001, 2017IB031, 2018DG005)联合资助。2018–12–02 收稿; 2019–01–27 收修修改稿。贺克雕(1983~), 女, 博士研究生; E-mail: bluekey@126.com.

\*\* 通信作者; E-mail: en-ecology@qq.com.

climatic indexes which accounted for 49.7% of total variation, indicating that water level change can be ascribed to the combined effects of anthropogenic activities and climatic conditions. By contrast, water level variations of Lake Fuxian and Yangzong were mainly influenced by climatic conditions. For Lake Yangzong, evaporation, amount of precipitation and days of consecutive precipitation accounted for 93.3% of variation of water level. Index of precipitation and dry spell can explain 64.5% of variation of water level in Lake Fuxian. Extreme precipitation indices play an important role in explaining water level change in plateau lakes.

**Keywords:** Lake Dianchi; Lake Fuxian; Lake Yangzong; water level; extreme precipitation; driving factors

水位是反映水体水情最直观的因素,水位变化在调节湖泊水质、水量<sup>[1]</sup>和生态系统功能<sup>[2]</sup>方面发挥着重要作用,是湖沼学的重要研究内容.湖泊的类型不同,季节性和空间性变化特征不同,水位变化的影响因素也各异.平原地区河成湖的水位变化受到干流水位的顶托和拉空作用以及上游水利枢纽工程的调度影响<sup>[3]</sup>,青藏高原冰川湖的水位变化受到降水和冰川融水的影响<sup>[4]</sup>,青藏高原、云贵高原的构造湖水位变化影响因素则较为复杂.国内外学者围绕湖泊水位变化及其驱动力开展了一些实证研究.米玛次仁等<sup>[5]</sup>分析了羊卓雍错湖水位变化及其主要原因,认为2005年之前水位变化的主要影响因素是降水量和蒸发量,2005年之后人类活动可能是主要影响因素.秦伯强<sup>[6]</sup>研究了近百年来气候变化和人类活动对亚洲中部内陆湖泊水位变化的影响.张鑫等<sup>[4]</sup>基于多源遥感数据对青藏高原中南部湖泊的水位序列进行了重构,并开展了水位动态变化分析.李均力等<sup>[7]</sup>探讨了中亚地区高山封闭湖、外流湖和平原尾间湖水位的时空变化特征,指出不同区域、不同类型的湖泊水位变化模式不同,水位变化与降水量变化呈显著正相关.李林等<sup>[8]</sup>探讨了青海湖水位对入湖流量、降水量、蒸发量等的响应,研究表明,当年的湖泊水位受到上年入湖流量、降水量、蒸发量的决定性影响.Xiao等<sup>[9]</sup>在美国白熊湖开展了蒸发量对水位的影响研究,指出白熊湖1986—1990年、2003—2012年的水位下降是低降水量和高蒸发量共同作用造成的.Yapiyev等<sup>[10]</sup>对哈萨克斯坦布拉拜国家公园的内流湖开展了湖泊容积变化的研究,把湖泊面积范围和容积的减小归因于蒸发量持续大于降雨量造成的水量亏损.Mishra等<sup>[11]</sup>在印度特索莫利里湖开展了融雪和降水的季节性变化对湖泊水位变化的作用研究.Alifujiang等<sup>[12]</sup>探究了吉尔吉斯斯坦伊赛克湖水位变化的主要驱动力及两者的相互作用.此外,Ma等开展了蒸发变化对青藏高原纳木错湖近年面积急速扩张的影响研究<sup>[13]</sup>.也有学者针对新疆的博斯腾湖开展了水位变化的相关研究<sup>[14-16]</sup>.目前主要关注的是常规气象指标对湖泊水位的影响,极端降水指标尚未得到充分重视,但已有研究表明极端降水具有重要的水文效应<sup>[17-18]</sup>.

云贵高原湖泊地处长江、珠江等重要江河的上游地区,在流域调蓄水资源、防洪、调节区域气候、维持生物多样性、支撑区域经济社会发展等方面作用重大,对其水位变化的研究有助于深入了解湖泊水文过程,认识生态环境的演变动态,防控高原湖泊富营养化.目前,针对云贵高原湖泊水位变化的研究,尤其是云南滇中高原湖泊的水位变化及影响因素的研究较少.本文基于多年气象和水文实测数据,采用RCLimDex<sup>[19]</sup>对滇池、抚仙湖、阳宗海3个滇中高原湖泊的极端降水指标进行统计,建立了基于极端降水和常规气象指标的湖泊水位多元回归模型,开展湖泊水位变化及驱动因子解析,以期为滇中高原湖泊的水资源管理和水生态保护提供科学依据.

## 1 研究区概况

滇中是云南省经济社会发展的核心区域,分布着云南省高原湖泊最为集中的湖群<sup>[20]</sup>.滇中高原湖泊处于低纬度、高海拔、亚热带地区,均为构造断陷型湖泊,以南北向伸展,具有南北向宽、东西向窄的共同特征<sup>[21]</sup>,湖泊处于不同的演化阶段,老龄化、中龄化与年轻态湖泊并存,深水湖与浅水湖并存.滇中高原湖泊主要包括滇池、抚仙湖、阳宗海、杞麓湖和异龙湖5大湖泊,根据水文观测资料的完整性和湖泊的代表性,本研究选择滇池、抚仙湖、阳宗海3个典型高原湖泊作为研究对象(图1和表1).滇池属长江流域金沙江水系,主要入湖河流有35条,多数分布于滇池北部、东部与南部,出湖河流有海口河和西园隧洞,是云南省湖面面积最大的湖泊,在全国名列第6,属浅水湖泊,处于老龄化阶段.滇池流域水资源以大气降雨补给为主,通过掌鸠河引水、清水海引水、牛栏江补水工程等外流域引水解决流域内的水资源短缺问题.抚仙湖属珠江流域南盘江水系,和位于上游仅相隔2.5 km的星云湖形成一对高原“姊妹湖”.抚仙湖共有大小入湖河流103条,海口河是历史上唯一的明河出水口,经出流改道后,隔河是抚仙湖的出湖河流之一,抚仙湖水经隔河泄入星

云湖。抚仙湖湖容和平均水深均名列云南全省湖泊之冠,湖泊面积占全国第8位<sup>[22]</sup>,是中国第二深的淡水湖泊,属深水湖泊,处于中龄化阶段。抚仙湖流域水资源主要靠降雨地表径流补给。阳宗海属珠江流域南盘江水系,主要入湖河流有3条,北部汤池河是唯一的出湖河流。阳宗海属深水湖泊,处于年轻态,流域面积小,天然补给水资源有限,通过摆夷河引水渠引水进行水资源补给。

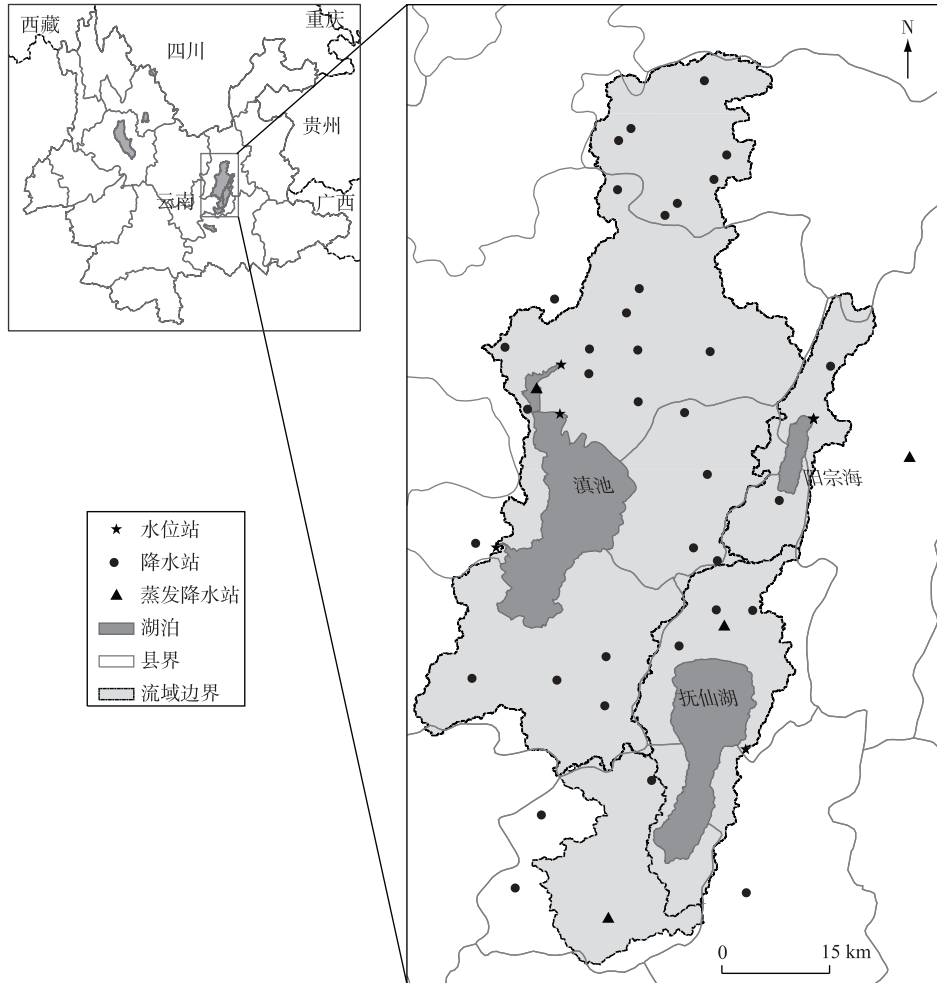


图1 研究区地理位置与监测站点分布  
Fig.1 Location of study sites and their gauging stations

表1 湖泊流域概况\*  
Tab.1 General situation of the lake basins

湖泊(经纬度)	流域面积/km <sup>2</sup>	法定高水位/m	湖面面积/km <sup>2</sup>	湖容积/亿 m <sup>3</sup>	平均水深/m	多年平均降水量/mm
滇池(24°40'~25°02'N, 102°37'~102°48'E)	2920	1887.50(外海)	309.5	15.60	5.3	927.4
抚仙湖(24°21'~24°38'N, 102°49'~102°57'E)	675	1723.35	216.6	206.21	95.2	948.1
阳宗海(24°51'~24°58'N, 102°59'~103°02'E)	192	1769.90	31.9	6.04	20.0	963.5

\* 资料来源于云南省水文水资源局内部使用资料《云南河湖》。

## 2 材料与方法

### 2.1 数据来源

本文分析数据为 1988—2015 年滇池、抚仙湖、阳宗海流域降水量、蒸发量及湖泊水位。滇池采用流域内 27 个雨量站的逐日降水量,海埂站的逐月蒸发量,海埂、中滩站的逐月平均水位数据,因海埂、中滩站水位观测值具有很好的一致性,采用两站的平均水位作为滇池水位;抚仙湖采用抚仙湖—星云湖流域内 11 个雨量站的逐日降水量,澄江海口站的逐月蒸发量和逐月平均水位数据;阳宗海采用流域内 5 个雨量站的逐日降水量,宜良站的逐月蒸发量,汤池站的逐月平均水位数据。其中,澄江站、江川站的降水量数据及宜良站的降水量、蒸发量数据来源于资源环境数据云平台的中国气象要素站点观测逐日数据集(<http://www.resdc.cn/Default.aspx>),其余数据均来源于云南省水文水资源局。

### 2.2 研究方法

2.2.1 极端降水指数分析 极端降水指数采用 RCLimDex 模型进行分析。RCLimDex 模型是由加拿大环境部气候研究中心 Zhang 等<sup>[19]</sup>研究开发的,软件基于 R 语言在 Windows 环境下运行。模型只需输入逐日降水量、日最高气温、日最低气温等数据,即可计算 27 个气候指数,并能对日输入数据进行质量控制,统计获得的指数中与降水相关的指数有 11 个<sup>[23]</sup>(表 2),与气候变化检测和指数专家组(Expert Team on Climate Change Detection and Indices, ETCCDI)推荐的指标<sup>[24]</sup>基本一致。根据研究需要,本文选取 CDD(Consecutive Dry Days)、CWD(Consecutive Wet Days)、 $R_{10\text{ mm}}$ 、 $R_{20\text{ mm}}$ 、 $R_{n\text{ mm}}$ 、 $R_{95pTOT}$ 、 $R_{99pTOT}$ 、SDII(Simple Daily Intensity Index)、 $PRCP_{TOT}$  共 9 个极端降水指数(表 2)进行分析。

表 2 RCLimDex 软件中极端降水指数\*

Tab.2 Definition of the indices for extreme precipitations in the RCLimDex

分类	指数名称	符号	单位	定义
历时指数	持续干日	CDD	d	连续干旱的最长日数
	持续湿日	CWD	d	连续降水的最长日数
极值指数	月 1 日最大降水量	$R_{x1day}$	mm/d	每月日最大降水量
	月连续 5 日最大降水量	$R_{x5day}$	mm/5d	每月连续 5 日最大降水量
超阈值时间指数	年内降水大于 10 mm 的天数	$R_{10\text{ mm}}$	d/a	年内日降水量 $\geq 10\text{ mm}$ 的天数
	年内降水大于 20 mm 的天数	$R_{20\text{ mm}}$	d/a	年内日降水量 $\geq 20\text{ mm}$ 的天数
	年内降水大于 $n\text{ mm}$ 的天数	$R_{n\text{ mm}}$	d/a	年内日降水量 $\geq n\text{ mm}$ 的天数
相对阈值指数	年强降水日降水总量	$R_{95pTOT}$	mm/a	湿日降水量超过 95% 分位数的年降水总量
	年极强降水日降水总量	$R_{99pTOT}$	mm/a	湿日降水量超过 99% 分位数的年降水总量
总量指数	普通湿日雨强	SDII	mm/d	年湿日降水总量/年湿日天数
	年降水量	$PRCP_{TOT}$	mm/a	年湿日的降水总量

\* 干日指日降水量  $< 1\text{ mm}$  的降水事件;湿日指日降水量  $\geq 1\text{ mm}$  的降水事件;  $n$  为用户自定义的日降水量阈值,默认为 25 mm。

2.2.2 水位变化与驱动因素的关系分析 选择多元线性回归模型来定量表达水位与驱动因子之间的联系及密切程度。多元线性回归的一般数学模型为:

$$y = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2 \cdots + \beta_m \cdot x_m + \varepsilon \quad (1)$$

式中,  $y$  为因变量;  $x_j(j=1, 2, \dots, m)$  为  $m$  个不同的自变量;  $\beta_0$  为截距;  $\beta_j(j=1, 2, \dots, m)$  为  $m$  个对应的回归系数;  $\varepsilon$  为随机误差,一般假定其服从正态分布。

为了消除量纲不同和数量级的差异带来的影响,进行多元回归前,要对自变量和因变量进行标准化,公式为:

$$Z = \frac{X - \bar{X}}{\sigma} \quad (2)$$

式中,  $Z$  为标准化值;  $X$  为指标值;  $\bar{X}$  为算术平均值;  $\sigma$  为标准差。

常规气象指标与水位的模型构建是把水位作为因变量,年降水量和年蒸发量作为自变量进行多元线性回归.多元回归要求自变量之间没有相互关联,即解释变量相互之间不允许有多重共线性.本文运用 SPSS 将 9 个极端降水指标进行降维处理,采用主成分分析法,选择特征值大于 1 决定主成分数,分析得到一组互不相关的变量即主成分.为了抑制随机误差对测试数据的影响,本文采用滑动平均法对蒸发量及主成分数据进行了滑动平均处理,再将处理后的数据进行逐步多元回归分析,建立水位与驱动因子的多元线性回归模型,基于多元线性回归方程的调整  $R^2$  (可决系数) 来判断驱动因子对湖泊水位的影响程度.湖泊水位影响因素总体分为气候变化和人类活动两大类,本文将不能被气象因子解释的部分归因于综合人类活动的影响.

### 3 结果与分析

#### 3.1 滇中高原湖泊水位变化特征

1988—2015 年滇池年平均水位为 1886.94 m,最高年平均水位为 1887.42 m,最低年平均水位为 1885.93 m.1990—1991 年上升后又有所下降,至 1993 年水位降至 1990s 以来的最低水位,之后水位上升,至 1997 年达到历年第 2 高水位,2000 年后水位上升和下降交替出现,但变化较为平稳,2014 年水位达到历年最高值.阳宗海年平均水位为 1767.72 m,最高年平均水位为 1769.77 m,出现在 2000 年,最低年平均水位为 1764.52 m,出现在 2013 年.阳宗海水位经历了 1988—1993 年下降、1993—1998 年上升、1998—2008 年平稳、2008—2013 年下降、2013—2015 年上升几个阶段.抚仙湖年平均水位为 1722.25 m,最高年平均水位为 1723.14 m,出现在 2008 年,最低年平均水位为 1720.87 m,出现在 2014 年,先后经历了上升、平稳、下降 3 个阶段.受 2009—2012 年 4 年连旱的影响,抚仙湖水位在 2008—2014 年下降明显,使 2014 年出现研究时段内的最低水位值(图 2).

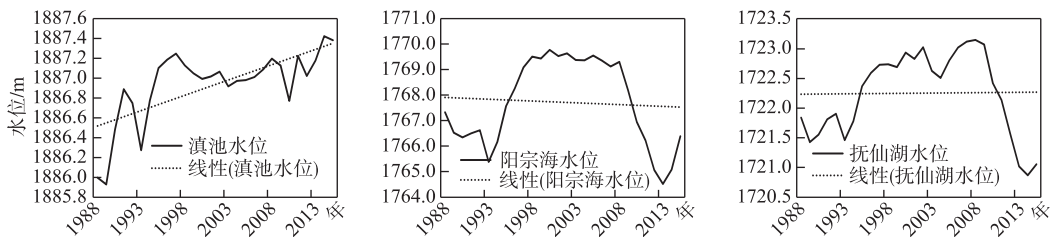


图 2 1988—2015 年滇中湖泊水位变化

Fig.2 Variations of water level in central Yunnan lakes from 1988 to 2015

为量化变化趋势,引入 Kendall 倾斜率  $\beta$  来估算趋势的变化幅度,检验结果见表 3.研究时段内,滇池的年平均水位总体呈显著上升趋势,根据水位倾斜率  $\beta$ ,滇池水位年均上升 0.025 m.阳宗海水位略有下降,抚仙湖的水位有所上升,但未通过显著性检验,变化趋势不明显.

表 3 湖泊年平均水位的 Mann-Kendall 检验结果  
Tab.3 Results of Mann-Kendall test for lake water level

湖泊名称	检测值 $Z$	$P$ (双侧)	趋势	$\beta / (m/a)$
滇池	3.52	0.00	上升	0.025
阳宗海	-0.45	0.65	不显著	—
抚仙湖	1.13	0.26	不显著	—

通过计算湖泊月尺度水位序列的变差系数  $C_v$ ,判断各湖泊年际水位变动幅度.从计算结果看,滇池变差系数为  $3.50 \times 10^{-5} \sim 2.73 \times 10^{-4}$ ,1990 年波动最大,阳宗海变差系数为  $6.49 \times 10^{-5} \sim 5.78 \times 10^{-4}$ ,1994 年波动最大,抚仙湖变差系数为  $4.75 \times 10^{-5} \sim 3.30 \times 10^{-4}$ ,1994 年波动最大.总体来看,滇池、阳宗海、抚仙湖水位年际波动不大,波动幅度为阳宗海>抚仙湖>滇池,水位在 1990s 的波动幅度相对较大,3 个湖泊的波动特征相似(图 3).从月平均水位的年内分布来看,滇池、阳宗海、抚仙湖的年最低水位一般出现在 5—6 月,年最高水位一

般出现在 10—12 月, 1—12 月呈现出先下降而后上升的变化特征(图 4)。云南的雨季是 5—10 月, 由于湖泊水位对湖流量的响应具有滞后性<sup>[8]</sup>, 一般在雨季结束前后才达到一年中的峰值。

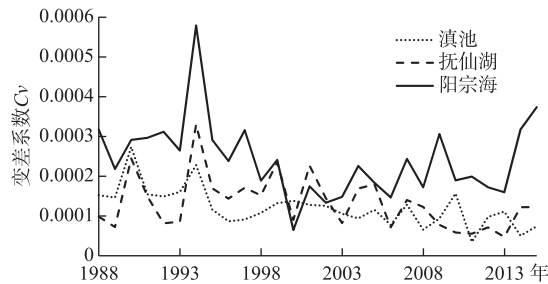


图 3 1988—2015 年滇中湖泊水位年际变化

Fig.3 Interannual variations of water level in central Yunnan lakes from 1988 to 2015

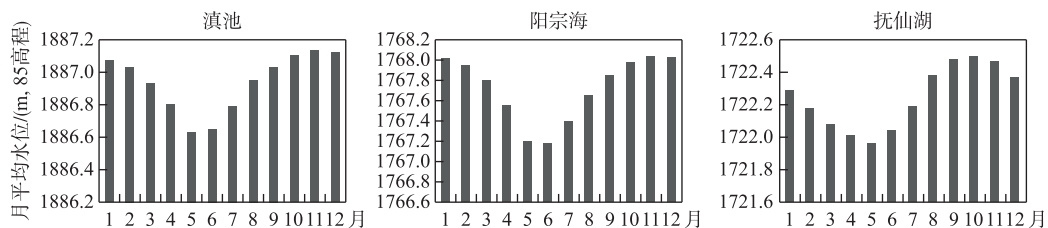


图 4 滇中湖泊水位年内变化

Fig.4 Monthly water level in central Yunnan lakes

### 3.2 气象驱动因子解析

运用 RClimDex 模型计算 3 个湖泊年尺度的极端降水指数, 并对其中的 CDD、CWD、 $R_{10\text{ mm}}$ 、 $R_{20\text{ mm}}$ 、 $R_{n\text{ mm}}$ 、 $R_{95p\text{TOT}}$ 、 $R_{99p\text{TOT}}$ 、SDII、 $\text{PRCP}_{\text{TOT}}$  共 9 个极端降水指数进行年际变化分析, 结果如图 5 所示。3 个湖泊的极端降水指标具有显著的年际差异, 部分指标呈现出显著的变化趋势。阳宗海、抚仙湖的 CDD 总体呈下降趋势, 滇池呈上升趋势, 但趋势不明显。3 个湖泊的 CWD 均呈缓慢下降趋势。滇池、抚仙湖的  $R_{10\text{ mm}}$ 、 $\text{PRCP}_{\text{TOT}}$  均呈缓慢减少趋势, 阳宗海则缓慢增加。 $R_{20\text{ mm}}$ 、 $R_{95p\text{TOT}}$ 、 $R_{99p\text{TOT}}$ 、SDII 4 个指数均呈上升趋势。滇池、阳宗海年内降水大于  $n\text{ mm}$  的天数 ( $R_{n\text{ mm}}$ ,  $n$  为 25) 呈上升趋势, 抚仙湖则呈下降趋势。

蒸发量是湖泊水量损失的重要途径, 根据对 3 个湖泊蒸发量和 Mann-Kendall 趋势检验结果(表 4 和图 5), 滇池的蒸发量呈显著减小趋势, 年均减小 21.05 mm。抚仙湖蒸发量呈显著增加趋势, 年均增加 5.52 mm, 阳宗海的蒸发量以 0.58 mm/a 的速率增加, 但趋势不显著。3 个湖泊中, 阳宗海的蒸发量变化最为平缓。

表 4 1988—2015 年滇中湖泊流域蒸发量的 Mann-Kendall 检验结果

Tab.4 Results of Mann-Kendall test for precipitation and evaporation in central Yunnan lakes from 1988 to 2015

湖泊名称	检测值 Z	P(双侧)	趋势	$\beta/(\text{mm/a})$
滇池	-4.76	<0.01	下降	-21.05
阳宗海	0.34	0.74	不显著	0.58
抚仙湖	2.71	0.01	上升	5.52

### 3.3 水位变化驱动因子评估

为了定量分析降水和蒸发对水位变化的影响, 把年平均水位作为因变量, 年极端降水指数和年蒸发量作为自变量, 进行多元线性回归, 分析多个自变量对因变量的影响程度。根据 SPSS 对 9 个极端降水指数的统计分析结果, 滇池提取了 3 个主成分, 累积方差贡献率达到 88.5%; 阳宗海提取了两个主成分, 累积方差贡

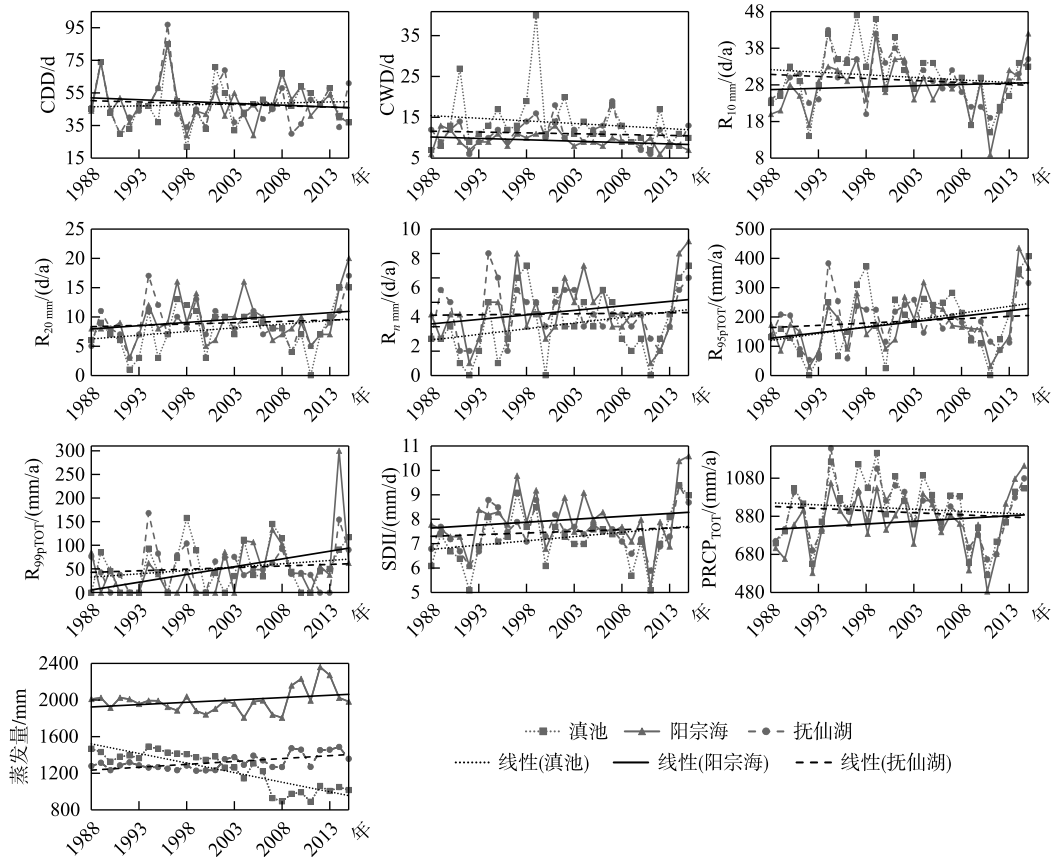


图 5 1988—2015 年极端降水指标与蒸发量的年际变化

Fig.5 Interannual variations of extreme precipitation indices and evaporation from 1988 to 2015

献率达到了 75.4%；抚仙湖提取了 3 个主成分，累积方差贡献率达到了 86.4%。3 个湖泊降水指数的主成分矩阵见表 5。3 个湖泊的第 1 主成分与  $R_{10\text{mm}}$ 、 $R_{20\text{mm}}$ 、 $R_n\text{mm}$ 、 $R_{95p\text{TOT}}$ 、 $R_{99p\text{TOT}}$ 、 $\text{SDII}$ 、 $\text{PRCP}_{\text{TOT}}$  的相关系数大多超过了 0.6（阳宗海  $R_{99p\text{TOT}}$  除外），甚至有高达 0.95 的，因此可以将第 1 主成分命名为综合降水指标；滇池、阳宗海第 2 主成分与 CWD 的相关系数较高，直接命名为连续降水指标，抚仙湖第 2 主成分仅与 CDD 的相关系数较高，直接命名为连续干旱指标；滇池的第 3 主成分与 CDD 的相关系数较高，直接命名为连续干旱指标，抚仙湖的第 3 主成分与 CDD、CWD 的相关系数较高，分别呈正相关和负相关，可命名为干旱状况指标。

为减小随机误差的影响，采用滑动平均法对蒸发量及主成分数据进行滑动平均处理，再采用 SPSS 进行回归分析。为选择较为合适的滑动年数，根据本文时间序列长度，对上述数据分别滑动了 2~7 年。阳宗海和抚仙湖滑动 6 年的调整  $R^2$  值最大，而滇池滑动 3 年的调整  $R^2$  值稍大，滑动 5 年后回归模型无变量输入。滑动平均处理后，滇池有 26 个样本参与回归，阳宗海和抚仙湖有 22 个样本参与回归。选择 3 个湖泊调整  $R^2$  最大的模型作为最终回归模型，模型参数见表 6。

根据回归结果，滇池的调整  $R^2$  较小，蒸发量、综合降水指标和连续干旱指标可解释滇池水位变化的 49.7%。蒸发量与滇池水位呈负相关，综合降水指标和连续干旱指标与滇池水位呈正相关，综合降水指标对滇池水位变化的影响程度更大。蒸发量、综合降水指标、连续降水指标是影响阳宗海水位变化的主要指标，3 项指标的解释率高达 93.3%，综合降水指标、连续降水指标与阳宗海水位呈正相关，蒸发量与阳宗海水位呈负相关，综合降水指标对阳宗海水位变化的影响程度最大。综合降水指标、干旱状况指标可以解释抚仙湖水位变化的 64.5%，综合降水指标与抚仙湖水位呈正相关，干旱状况指标与抚仙湖水位呈负相关，而综合降水

指标对抚仙湖水位变化的影响程度更大.

表 5 降水指数的主成分矩阵  
Tab.5 Component matrix of precipitation indices

原变量	滇池主成分			阳宗海主成分		抚仙湖主成分		
	1	2	3	1	2	1	2	3
CDD	-0.022	-0.478	0.821	-0.239	0.585	0.137	0.616	0.672
CWD	0.357	0.836	0.093	-0.086	0.709	0.408	0.281	-0.727
R <sub>10 mm</sub>	0.815	0.320	0.382	0.760	0.523	0.776	0.501	-0.120
R <sub>20 mm</sub>	0.940	-0.191	-0.006	0.907	0.023	0.915	0.094	0.151
R <sub>n mm</sub>	0.910	-0.263	-0.169	0.948	-0.019	0.891	-0.271	0.146
R <sub>95pTOT</sub>	0.909	-0.321	-0.196	0.951	-0.189	0.912	-0.367	0.058
R <sub>99pTOT</sub>	0.740	-0.092	-0.385	0.556	-0.561	0.671	-0.596	0.112
SDII	0.920	-0.113	0.151	0.935	0.077	0.921	0.059	0.026
PRCP <sub>TOT</sub>	0.868	0.360	0.181	0.893	0.247	0.891	0.279	-0.137

表 6 湖泊水位回归模型参数  
Tab.6 Regression model parameters of lake water level

湖泊名称	a	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>3</sub>	c	调整 R <sup>2</sup>	常规气象 R <sup>2*</sup>
滇池	-0.466	0.636		0.517	0.206	0.497	无参数输入
阳宗海	-0.661	1.577	0.606		0.108	0.933	0.941
抚仙湖		1.380		-1.130	0.111	0.645	0.551

\* 常规气象 R<sup>2</sup>是指仅使用降水量和蒸发量作为自变量的回归方程可决系数.

## 4 讨论

### 4.1 滇中高原湖泊水位变化原因探讨

1988—2015年,滇池水位经历了几次较大的波动. 1980s,昆明城区急速扩张、人口快速增长,水使用量大幅增加,1985—1989年用水量进入快速增长期,从滇池的取用水量增加使得滇池水位降低,这与滇池水位1989年出现低值十分吻合. 人口的猛增使乱砍滥伐、盲目开荒、陡坡种植等现象更加突出,造成流域水土流失加重,1980s滇池流域土壤流失每年达到106万t,进入滇池的数量达39万t<sup>[25]</sup>,泥沙的淤积使得滇池水位抬升,这是1990—1991年滇池水位上升的主要原因. 滇池流域工业的快速增长使得工业用水在1993年达到用水量最高值,总量为2.282亿m<sup>3</sup>,为历史之最,加之从1993年开始实施草海疏浚工程,使1993年滇池水位处于研究时段内的第2低值. 1993—2000年随着生产工艺的提高和节水技术的推广,工业用水量逐年下降,从滇池的取水减少,城市发展,耕地大幅减少,水资源重复使用率增高<sup>[26]</sup>,加之这个时期滇池流域的平均降水量有所上升,使得1993—1997年水位上升. 滇池2014年的水位最高值则很大程度上与牛栏江—滇池补水工程的补水有关. 阳宗海、抚仙湖的水位变化不明显,而三湖水位在1990s均发生了较大的波动,这可能与昆明市经济社会的快速发展以及玉溪市旅游业的逐渐兴起有关. 本文的三湖水位峰值与采用遥感分析得出的表面水体面积峰值<sup>[27-28]</sup>出现的时间稍有差异,这是因为所使用的方法、数据以及数据连续性存在差异.

研究期内,滇中三湖仅滇池水位变化趋势显著. 滇池年平均水位总体呈明显上升趋势,年均上升0.025m,与朱珊珊等<sup>[29]</sup>对滇池1970—2010年水位变化的研究结论一致,在滇池年降水量总体呈缓慢下降趋势的情况下,滇池水位的上升主要与近年来滇池流域外调水有关. 2007年3月建成投入运行的掌鸠河引水工程、2012年4月建成通水的清水海引水工程等外流域引水解决了流域内的城市供水问题,减少了对流域内水资源量的需求,2013年底建成通水的牛栏江—滇池补水工程设计每年向滇池补水5.72亿m<sup>3</sup><sup>[30]</sup>,弥补了滇池流域水资源的不足. 同时,最严格水资源管理制度的落实和节水型社会建设都一定程度上减少了人类活动从



滇池流域的引水量,这也是湖泊水位上升的原因之一。此外,滇池流域1988—2015年不透水表面增加了 $500.11 \text{ km}^2$ <sup>[31]</sup>,这也会使地表径流增加而加快水位上升<sup>[32]</sup>。

#### 4.2 滇中高原湖泊水位变化驱动因子的差异

气候变化与人类活动是影响湖泊水位变化的两大驱动因素。人类活动短期内会对湖泊水位变化产生剧烈影响,而气候变化是长时间尺度上影响湖泊水位的重要因素。目前,关于湖泊水位变化的气候变化影响研究主要集中在气温、降水、蒸发以及冰川融化等方面<sup>[8-9,13,33]</sup>。湖泊所处的区域不同、湖泊类型不同,水位变化的影响因素有较大差异。1988—2015年,滇池水位变化受到气候变化和人类活动的综合影响,气象指标可解释滇池水位变化的49.7%;阳宗海流域来水量主要来自大气降水<sup>[34]</sup>,气象指标是阳宗海水位变化的关键驱动力,阳宗海水位变化主要受气候变化影响;气象指标可以解释抚仙湖水位变化的64.5%,王新等<sup>[35]</sup>通过对抚仙湖近40年来湖泊面积与体积变化的驱动力分析指出,气温、地面蒸发量、降水量等气候要素是抚仙湖面积和体积变化的主要驱动力和制约因子,说明气象指标的影响程度更大,抚仙湖水位变化可能是气候变化和人类活动综合作用的结果。处于青藏高原不同位置的湖泊水位变化受气温、降水、蒸发等因素的影响不同<sup>[4]</sup>。青藏高原的高山封闭型湖泊水位主要受冰川融雪的影响,外流湖则主要受农业灌溉等引水活动影响。青海湖水位下降主要受降水量、蒸发量等气候变化因素的影响<sup>[8]</sup>。新疆博斯腾湖水位受最大支流开都河的径流量直接影响<sup>[15]</sup>。西洞庭湖和南洞庭湖中西部受到入湖流量和出湖流量的影响。而东洞庭湖和南洞庭湖东部水域水位变化则主要受长江干流水情变化引起的拉空和顶托作用的影响<sup>[3]</sup>。处于云贵高原的滇中三湖水位变化的驱动因子具有显著差异,与青藏高原湖泊变化的显著区域差异性类似,而与其他高原湖泊的影响因子有一定区别。滇中三湖的地理位置、湖泊形态以及流域的社会经济发展程度可能是造成水位变化驱动因子差异显著的原因。

#### 4.3 极端降水指标对滇中高原湖泊水位变化的解释意义

近年来,在全球气候变化背景下,云南省乃至全国的极端降水事件发生频率和强度均有所增加,连续干旱、旱涝急转时有发生,不仅制约着社会经济的发展,而且威胁着人类赖以生存的生态环境。目前的文献报道中,影响湖泊水位变化的降水指标主要采用降水总量进行分析探讨。本文除蒸发量和常规降水总量以外,着重采用9个极端降水指标对湖泊水位变化的影响进行分析。为了对比加入极端降水指标与常规降水总量参与回归的效果,本文还分析了仅使用降水量和蒸发量作为自变量回归的常规气象 $R^2$ (表6)。尽管本研究与吉文娟等<sup>[36]</sup>的研究由于采用的蒸发站点及时间序列不一致导致蒸发量减小速率存在差异,但均得出滇池的蒸发量呈明显减小趋势。然而,在未加入极端降水指标的情况下,滇池的蒸发量和常规降水量均未输入回归模型,在加入极端降水指标后,蒸发量、综合降水指标和连续干旱指标均成为回归模型参数。本文与赵耀等<sup>[37]</sup>的研究均认为抚仙湖蒸发量呈明显增大趋势,但参数并未输入参与回归,抚仙湖的常规气象 $R^2$ 较采用极端降水指标的调整 $R^2$ 小。这都说明了加入极端降水指标对水位变化进行解释具有显著意义。阳宗海的常规气象 $R^2$ 比采用极端降水指标的调整 $R^2$ 稍大,这可能是由于阳宗海是主要受到气候因素影响的湖泊。在常规气象指标之外,加入极端降水指标对解释湖泊水位变化具有重要意义,未来湖泊水位变化的分析有必要将极端降水指标纳入到影响因素中。

#### 4.4 滇中高原湖泊水位变化的生态效应

水位变化作为湖泊水文过程和水量平衡的动态反映,是湖泊生态环境的重要影响因素<sup>[38]</sup>。水位变化会改变湖泊的物理化学特性,从而引起生物种类数和丰度以及生态系统结构的变化。此外,湖泊容积的减小会引起湖泊盐度的升高。Langer等关于五大湖开展的水位波动研究指出,水位变化会对当地鱼类群落组成和区域的鱼类多样性产生影响<sup>[39]</sup>。湖泊水位变化还会影响水体的富营养化程度<sup>[40]</sup>。Chen等对云南程海湖的研究表明,湖容积的下降直接引起了湖泊盐度的升高,间接对浮游植物群落和水体pH产生了影响<sup>[41]</sup>。对于水深岸陡型高原湖泊洱海来说,水位下降可能使冬季潜水鸭和潜水类水鸟的物种丰富度和多度增加<sup>[42]</sup>。位于滇中的滇池、阳宗海、抚仙湖区域差异显著,其水位变化也必然会不同程度地引起湖泊水质、水量和水生态系统的变化,从而影响区域生态环境、社会经济的可持续发展,尤其是各湖泊都存在不同程度富营养化发展的趋势,对其进行防控需要结合水位、水文和水资源动态进行综合研判。

## 5 结论

1988—2015年,滇池的年平均水位总体呈上升趋势,年均上升0.025 m;阳宗海和抚仙湖的年平均水位变化趋势不明显。三湖水位年际变化不大;从年内分布看,年最低水位一般出现在5—6月,年最高水位一般出现在10—12月。3个湖泊的极端降水指标变化各有差异,阳宗海的年降水量缓慢上升,滇池、抚仙湖的年降水量缓慢下降,但变化趋势均不显著。滇池的蒸发量呈显著减小趋势,抚仙湖的蒸发量呈显著增大趋势,阳宗海的变化趋势不显著。滇池水位变化受到气候变化和人类活动的综合影响,气象指标可解释滇池水位变化的49.7%;气象条件是阳宗海水位变化的关键驱动力,阳宗海水位变化主要受气候变化影响;气象指标可以解释抚仙湖水位变化的64.5%,抚仙湖水位变化可能是气候变化和人类活动综合作用的结果。在常规气象指标之外,加入极端降水指标解释湖泊水位变化具有重要意义。

需要说明的是,本研究仅关注降水与蒸发两项指标,其他气象指标如风速、气温、辐射指标未作分析,文中着重探讨气象因子对水位的解释,不能解释的归因于综合人类活动,但没有详细解剖各种人类活动的单独影响,如取水、土地利用变化、水库调度等,可能会对结果造成一定的不确定性。未来需要更长时间序列的水文气象资料,从水利工程、土地利用等人类活动对湖泊水位的影响,以及湖泊的面积、体积、演化阶段的差异对极端降水指标的影响等方面继续深入研究。

## 6 参考文献

- [ 1 ] Jiang T, Zhang YJ, Bao ZF *et al.* Water level control for quality of lakes: A case study of Cihu Lake. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2018, **51**(7): 570-576. [蒋婷, 张艳军, 鲍正风等. 湖泊水质调控的水位研究——以磁湖为例. 武汉大学学报: 工学版, 2018, **51**(7): 570-576.]
- [ 2 ] Gownaris NJ, Rountos KJ, Kaufman L *et al.* Water level fluctuations and the ecosystem functioning of lakes. *Journal of Great Lakes Research*, 2018, **44**(6): 1154-1163.
- [ 3 ] Cheng JX, Xu LG, Wang Q *et al.* Temporal and spatial variations of water level and its driving forces in Lake Dongting over the last three decades. *J Lake Sci*, 2017, **29**(4): 974-983. DOI: 10.18307/2017.0421. [程俊翔, 徐力刚, 王青等. 洞庭湖近30a水位时空演变特征及驱动因素分析. 湖泊科学, 2017, **29**(4): 974-983.]
- [ 4 ] Zhang X, Wu YH, Zhang X. Water level variation of inland lakes on the south-central Tibetan Plateau in 1972–2012. *Acta Geographica Sinica*, 2014, **69**(7): 993-1001. [张鑫, 吴艳红, 张鑫. 1972—2012年青藏高原中南部内陆湖泊的水位变化. 地理学报, 2014, **69**(7): 993-1001.]
- [ 5 ] Mima CR, Tian LD, Wen R *et al.* Recent water level change of Yamzhog Yumco Lake, Tibet. *Journal of China Hydrology*, 2013, **33**(2): 64-69. [米玛次仁, 田立德, 文蓉等. 西藏羊卓雍错近期湖水水位变化及其原因分析. 水文, 2013, **33**(2): 64-69.]
- [ 6 ] Qin BQ. A preliminary investigation of lake evolution in 20-century in Inland Mainland Asia with relation to the global warming. *J Lake Sci*, 1999, **11**(1): 11-19. DOI: 10.18307/1999.0102. [秦伯强. 近百年来亚洲中部内陆湖泊演变及其原因分析. 湖泊科学, 1999, **11**(1): 11-19.]
- [ 7 ] Li JL, Chen X, Bao AM. Spatial-temporal characteristics of lake level changes in central Asia during 2003–2009. *ACTA Geographica Sinica*, 2011, **66**(9): 1219-1229. [李均力, 陈曦, 包安明. 2003—2009年中亚地区湖泊水位变化的时空特征. 地理学报, 2011, **66**(9): 1219-1229.]
- [ 8 ] Li L, Zhu XD, Wang ZY *et al.* Impacting factors and changing tendency of water level in Qinghai lake in recent 42 years. *Journal of Desert Research*, 2005, **25**(5): 689-696. [李林, 朱西德, 王振宇等. 近42a来青海湖水位变化的影响因素及其趋势预测. 中国沙漠, 2005, **25**(5): 689-696.]
- [ 9 ] Xiao K, Griffisa TJ, Bakera JM *et al.* Evaporation from a temperate closed-basin lake and its impact on present, past, and future water level. *Journal of Hydrology*, 2018, **561**: 59-75.
- [ 10 ] Yapiyev V, Samarkhanov K, Tulegenova N *et al.* Estimation of water storage changes in small endorheic lakes in Northern Kazakhstan. *Journal of Arid Environments*, 2019, **160**: 42-55.
- [ 11 ] Mishra PK, Prasad S, JehANGIR A *et al.* Investigating the role of meltwater versus precipitation seasonality in abrupt lake-level rise in the high-altitude Tso Moriri Lake (India). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2018, **493**:

- 20-29.
- [12] Alifujiang Y, Abuduwaili J, Ma L *et al.* System dynamics modeling of water level variations of Lake Issyk-Kul, Kyrgyzstan. *Water*, 2017, **9**: 989.
- [13] Ma N, Szilagyi J, Niu GY *et al.* Evaporation variability of Nam Co Lake in the Tibetan Plateau and its role in recent rapid lake expansion. *Journal of Hydrology*, 2016, **537**: 27-35.
- [14] Gao HZ, Yao YF. Quantitative effect of human activities on water level change of Bosten Lake in recent 50 years. *Scientia Geographica Sinica*, 2005, **25**(3): 305-309. [高华中, 姚亦锋. 近50年来人类活动对博斯腾湖水位影响的量化研究. *地理科学*, 2005, **25**(3): 305-309.]
- [15] Wang R, Giese E, Gao QZ. The recent change of water level in the Bosten Lake and analysis of its causes. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, **25**(1): 60-64. [王润, GIESE E, 高前兆. 近期博斯腾湖水位变化及其原因分析. *冰川冻土*, 2003, **25**(1): 60-64.]
- [16] Mamat A, Halik U, Keram A. Remote sensing based analysis on environment changes of typical lakes in Tian-shan mountains - A case study of Bosten Lake and Issyk - Kul Lake. *Journal of ARID Land Resources and Environment*, 2017, **31**(8): 143-147. [阿依努尔·买买提, 玉米提·哈力克, 阿依加马力·克然木. 天山典型湖泊水位变化影响因素对比分析——以博斯腾湖与伊塞克湖为例. *干旱区资源与环境*, 2017, **31**(8): 143-147.]
- [17] Zeng XF, Ye L, Zhai JQ *et al.* Research on changes of extreme precipitation in the Jialingjiang River basin and its potential impacts on hydrological process. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2014, **23**(s1): 159-164. [曾小凡, 叶磊, 翟建青等. 嘉陵江流域极端降水变化及其对水文过程影响的初步研究. *长江流域资源与环境*, 2014, **23**(s1): 159-164.]
- [18] Knapp AK, Beier C, Briske DD *et al.* Consequences of more extreme precipitation regimes for terrestrial ecosystems. *Bio Science*, 2008, **58**(9): 811-821.
- [19] Zhang XB, Yang F. RCLimDex(1.0) user manual. Canada, 2004.
- [20] Duan CQ, He F, Liu CE *et al.* Challenges and solutions of the water environmental issues of plateau lakes in Yunnan of China-from the perspective of ecosystem health. *Engineering Sciences*, 2010, **12**(6): 60-64, 70. [段昌群, 何峰, 刘嫦娥等. 基于生态系统健康视角下的云南高原湖泊水环境问题的诊断与解决理念. *中国工程科学*, 2010, **12**(6): 60-64, 70.]
- [21] Zhao GZ, He B eds. Research on sustainable development conditions and countermeasures in plateau lake basin of Yunnan. Beijing: Science Press, 2011. [赵光洲, 贺彬. 云南高原湖泊流域可持续发展条件与对策研究. 北京: 科学出版社, 2011.]
- [22] Gao W, Chen Y, Xu M *et al.* Trend and driving factors of water quality change in Lake Fuxian (1980-2011). *J Lake Sci*, 2013, **25**(5): 635-642. DOI: 10.18307/2013.0503. [高伟, 陈岩, 徐敏等. 抚仙湖水质变化(1980-2011年)趋势与驱动力分析. *湖泊科学*, 2013, **25**(5): 635-642.]
- [23] Chen CC, Zhang YQ, Wang LC *et al.* Research on the change of extreme precipitation in Jiangxi province based on RCLimDex model. *China Rural Water and Hydropower*, 2013, (11): 41-45. [陈昌春, 张余庆, 王腊春等. 基于RCLimDex模型的江西省极端降水时空变化研究. *中国农村水利水电*, 2013, (11): 41-45.]
- [24] Keggenhoff I, Elizbarashvili M, Amiri-farahani A *et al.* Trends in daily temperature and precipitation extremes over Georgia, 1971-2010. *Weather and Climate Extremes*, 2014, (4): 75-85.
- [25] Tang CB. Soil erosion in Dianchi Lake basin. *Yunnan Environmental Protection*, 1991, (1): 6-9. [汤承彬. 滇池流域的水土流失. *云南环保*, 1991, (1): 6-9.]
- [26] Bai LF. Study on ecological environment change in Dianchi Lake basin and urban development of Kunming during 1949-2009 [Dissertation]. Kunming: Yunnan University, 2011; 92-122. [白龙飞. 当代滇池流域生态环境变迁与昆明城市发展研究(1949-2009) [学位论文]. 昆明: 云南大学, 2011; 92-122.]
- [27] Xiao Q, Yang K, Hong L. Remote sensing monitoring and temporal-spatial analysis of surface water body area changes of lakes on the Yunnan-Guizhou Plateau over the past 30 years. *J Lake Sci*, 2018, **30**(4): 1083-1096. DOI: 10.18307/2018.0421. [肖茜, 杨昆, 洪亮. 近30a云贵高原湖泊表面水体面积变化遥感监测与时空分析. *湖泊科学*, 2018, **30**(4): 1083-1096.]
- [28] Li HJ, Zhong D, Fan S *et al.* Remote sensing monitoring of the nine plateau lakes' surface area in Yunnan in recent thirty years. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, **25**(Z1): 32-37. [李浩杰, 种丹, 范硕等. 近三十年云南

- 九大高原湖泊水面面积遥感变化监测. 长江流域资源与环境, 2016, 25(Z1): 32-37.]
- [29] Zhu SS, Yao L. Analysis on the variation trend and affecting factors of water level in Dianchi Lake. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2012, 23(2): 182-184. [朱珊珊, 姚林. 滇池水位变化趋势及影响因素初步分析. 水资源与水工程学报, 2012, 23(2): 182-184.]
- [30] Mao JZ, Sun YL, He KD *et al.* Study of water environment improvement effect by Niulan River-Dianchi Lake Water Supplement Project in Waihai area of Dianchi Lake. *Water Resources Protection*, 2017, 33(2): 47-51. [毛建忠, 孙燕利, 贺克雕等. 牛栏江——滇池补水工程对滇池外海的水环境改善效果研究. 水资源保护, 2017, 33(2): 47-51.]
- [31] Chen JY. Research of impervious surface area change impact on Dianchi lake surface water temperature in recent 30 years [Dissertation]. Kunming: Yunnan Normal University, 2017. [陈俊屹. 近30年来滇池流域不透水表面演变对滇池表面水温影响研究[学位论文]. 昆明: 云南师范大学, 2017.]
- [32] Engel BA, Ahiablame ML, Leroy JD. Modeling the impacts of urbanization on lake water level using L-THIA. *Urban Climate*, 2015, 14: 578-585.
- [33] Mishra PK, Prasad S, Jehangir A *et al.* Investigating the role of melt water versus precipitation seasonality in abrupt lake-level rise in the high-altitude Tso Moriri Lake (India). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2018, 493: 20-29.
- [34] Deng LX, Kong GF, Yang SQ *et al.* Study on the relationship between water quality and water quantity of Lake Yangzong. *Journal of China Hydrology*, 2008, 28(4): 43-45, 67. [邓丽仙, 孔桂芬, 杨绍琼等. 阳宗海湖泊水质与来水量的关系研究. 水文, 2008, 28(4): 43-45, 67.]
- [35] Wang X, Li S. Volume change of Fuxian Lake in the last 40 years. *Journal of Yuxi Normal University*, 2017, 33(8): 36-42. [王新, 李石. 近40年来抚仙湖湖泊面积与体积变化驱动力分析. 玉溪师范学院学报, 2017, 33(8): 36-42.]
- [36] Ji WJ, Yang XP, Zhang JY. Variation characteristics and trend of evaporation in Dianchi Lake basin. *Meteorological Science and Technology*, 2016, 44(4): 631-639. [吉文娟, 杨晓鹏, 张加云. 滇池流域蒸发量时空变化特征及趋势分析. 气象科技, 2016, 44(4): 631-639.]
- [37] Zhao Y, Li C, Wang D *et al.* Variation trend and cause analysis of evaporation and precipitation in Fuxian Lake watershed. *Shandong Agricultural Sciences*, 2017, 49(10): 100-105. [赵耀, 李超, 王栋等. 抚仙湖流域蒸发与降水的变化趋势及原因分析. 山东农业科学, 2017, 49(10): 100-105.]
- [38] Wang G, Wang P, Wang TY *et al.* The variation of Lake Baikal water level and causal analysis since 1900. *Resources Science*, 2018, 40(11): 2177-2185. [王冠, 王平, 王田野等. 1900年以来贝加尔湖水位变化及其原因分析. 资源科学, 2018, 40(11): 2177-2185.]
- [39] Langer TA, Cooper MJ, Reisinger LS *et al.* Water depth and lake-wide water level fluctuation influence on  $\alpha$ - and  $\beta$ -diversity of coastal wetland fish communities. *Journal of Great Lakes Research*, 2018, 44(1): 70-76.
- [40] Du BX, Xu LG, Zhang J *et al.* The spatial-temporal characteristics of eutrophication in Poyang Lake and its relationship with the water level. *Research of Environmental Sciences*, 2019, 32(5): 795-801. [杜冰雪, 徐力刚, 张杰等. 鄱阳湖富营养化时空变化特征及其与水位的关系. 环境科学研究, 2019, 32(5): 795-801.]
- [41] Chen XK, Liu XB, Peng WQ *et al.* Hydroclimatic influence on the salinity and water volume of a plateau lake in southwest China. *Science of the Total Environment*, 2018. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.013.
- [42] Zhang SX, Wang RX, Shen JX *et al.* Potential relationship of wintering waterbirds community composition and water-level fluctuation in Lake Erhai. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2018, 13(4): 143-148. [张淑霞, 王荣兴, 沈建新等. 洱海冬季水鸟群落结构与水位变化的潜在关系. 生态毒理学报, 2018, 13(4): 143-148.]