

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2020.0144

黄李东,叶爱中,张疋亥,等.近 30 年中国典型区域水体面积变化与归因[J].南水北调与水利科技,2019,17(6):138-147,186.  
HUANG L D, YE A Z, ZHANG Y H, et al. Changes and attribution of water surface area in typical regions of China in the past 30 years[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(6): 138-147, 186. (in Chinese)

## 近 30 年中国典型区域水体面积变化与归因

黄李东<sup>1</sup>, 叶爱中<sup>1</sup>, 张疋亥<sup>1</sup>, 汤崇军<sup>2</sup>

- (1. 北京师范大学 地理科学学部, 地表过程与资源生态国家重点实验室, 陆地表层系统科学与可持续发展研究院, 北京 100875;  
2. 江西省水土保持科学研究院, 江西省土壤侵蚀与防治重点实验室, 南昌 330029)

**摘要:**在生态文明建设中,水域空间率是一项重要的指标。一般情况下,某个区域中的水体面积越大生态环境越好。而水体面积又受到气候变化与人类活动的双重影响。中国水体面积的变化规律及归因是生态文明建设中一个关键的科学问题。在全国范围内,根据气候条件和经济发展情况,选取了 9 个研究区域。基于 Google Earth Engine 云计算平台,使用多个光谱指数组合的方法,对 1986—2018 年的 Landsat 影像进行水体提取。采用 Mann-Kendall 法分析了水体面积动态变化特征,并借助双累积曲线法和分布式水文模型,进一步计算了气候变化和人类活动对水体面积变化的贡献率。结果表明:半干旱半湿润地区受人类活动影响剧烈,水体面积变化显著;湿润地区受气候变化影响,水体面积显著增加;人类对水资源的过度使用、跨流域调水以及水库修建直接决定大部分区域的水体面积变化。该研究能够为生态文明建设提供科技支撑。

**关键词:**水体面积;动态变化;气候变化;人类活动;中国

中图分类号:TV211 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



### Changes and attribution of water surface area in typical regions of China in the past 30 years

HUANG Lidong<sup>1</sup>, YE Aizhong<sup>1</sup>, ZHANG Yahai<sup>1</sup>, TANG Chongjun<sup>2</sup>

- (1. State Key Laboratory of Earth Surface and Ecological Resources, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Key Laboratory of Soil Erosion and Prevention of Jiangxi Province, Jiangxi Institute of Soil and Water Conservation, Nanchang 330029, China)

**Abstract:** The water surface area ratio is an important indicator of ecological construction. In general, the larger the water area in a region, the better the ecological environment. The water area is affected by both climate change and human activities. The law and cause of water surface area change in China are key scientific issues. In this study, nationwide 9 research areas were selected based on climatic conditions and economic development levels. Based on the Google Earth Engine cloud computing platform, the Landsat image was used to extract water surface area from 1986 to 2018 using the method of combining multiple spectral indices. The dynamic variation of water surface area was analyzed by Mann Kendall test. The contribution of climate change and human activities to water surface area changes were further calculated by double mass analysis and a distributed hydrological model. The results showed that semi-arid and semi-humid areas were strongly affected by human activities, and there was a significant change was observed in water surface area. Humid areas were affected by climate change, and the water area was also significantly increased. Human activities such as excessive use of water resources, water transfer projects and reservoir construction directly determined changes in water surface area in most areas. This research can provide scientific support for ecological construction.

收稿日期:2019-07-18 修回日期:2019-08-28 网络出版时间:2019-09-06

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190906.1325.008.html>

基金项目:江西水利科技计划项目(KT201614);国家自然科学基金(51879009)

作者简介:黄李东(1995—),女,山东菏泽人,主要从事生态水文学方面研究。E-mail: lidongh@mail.bnu.edu.cn

通信作者:叶爱中(1978—),男,安徽安庆人,教授,博士,主要从事水文集合预报研究。E-mail: azye@bnu.edu.cn

**Key words:** water surface area; dynamic change; climate change; human activity; China

2012年11月,我国开始大力推进生态文明建设。在生态文明建设中提出了水域空间率指标,即河流、湖泊、水库、湿地、塘洼等水体保护堤之内或者最高水文线以下的面积占区域总面积比例<sup>[1]</sup>。该指标强调水体面积越大区域生态环境越好。而水体面积受到气候变化与人类活动的双重影响,为了更加合理高效地建设生态文明城市,迫切需要弄清楚我国水体的时空变化特征与变化原因,并具体分析不同地区水体面积的动态变化特点,从而为我国生态文明建设提供依据。

目前,已有很多针对中国水体的研究<sup>[2-4]</sup>,但大多是研究单个水体或某个区域的一些典型湖泊或大型水库的水体面积变化,且只选择几个时间点或较短时间作为研究时段,属于较短时段的区域或流域内的水体研究;而我国国土范围大,跨越多个气候带,单个研究范围或者短时段研究都无法反映全国水体长期变化规律。

而随着遥感技术和计算机技术的发展,长时间大范围的水体面积提取工作变得越来越高效,水体提取的方法也越来越多,主要有监督与非监督分类法,混合像元分解法<sup>[5]</sup>,植被指数法(NDVI方法)<sup>[6]</sup>,计算机自动分类法,协同计算<sup>[7]</sup>。另外,大数据和云计算近年来在越来越多的领域被广泛使用,所以很多针对水体的研究也开始逐渐使用 Google Earth Engine (GEE) 云计算平台<sup>[8-9]</sup>, ABoVE Science Cloud (ASC) 平台<sup>[10]</sup>,和大数据探索以及信息提取技术,即专家系统(非参数分类器,将图像解释专业知识纳入分类过程)、可视化分析(将人类认知和感知能力与云计算平台的存储和处理能力相结合)和证据推理(程序性顺序决策树)<sup>[11-20]</sup>。但是由于水体提取方法的选取受地理环境和遥感数据等多种因素的影响,所以目前没有一个被统一使用的提取方法。由于本文拟研究近30多年的较长时间序列的水体面积变化,数据量较大,所以选择光谱指数组合和自动阈值确定相结合的计算机自动提取方法,并在 Google Earth Engine 云计算平台上进行在线计算处理 Landsat 影像。

另外,以往对于量化水文变化规律与归因的研究,大都采用趋势分析方法<sup>[21]</sup>,模型方法<sup>[22-24]</sup>。考虑到方法的通用性与稳定性,本研究拟采用 Mann-Kendall 趋势分析法给出水体面积变化规律;以及借助双累积曲线法<sup>[25]</sup>和分布式水文模型<sup>[26]</sup>来

量化气候变化和人类活动对水体面积变化的影响程度,并最终给出我国水体面积变化的时空分布特征和导致水体面积变化的原因。

## 1 研究区概况

考虑到不同的气候、空间位置以及水体特征,从全国选择4个城市和5个典型水域作为研究区域。其中在干旱半干旱区选取位于黄河流域的乌海市和红碱淖,在半干旱半湿润区选取位于海河流域的北京市和密云水库,在高寒山区西藏自治区中部选择了纳木错,在半湿润区选取位于淮河流域中部的徐州市和位于海河流域中部的白洋淀,在湿润区选取位于珠江流域下游入海口的广州市和位于长江流域中下游的鄱阳湖。

乌海市位于黄河上游,乌兰布和沙漠的边缘,多年平均降水量159.8 mm,平均蒸发量3 289 mm,人均用水358 m<sup>3</sup>,属于严重缺水城市。红碱淖位于陕西省内,地处毛乌素沙漠边缘,大陆性季风气候。北京市位于华北平原北部,毗邻渤海湾,属于大陆性季风气候,年均降水量626 mm,人均水资源量为137.08 m<sup>3</sup>,仅为全国平均水平的1/20。密云水库位于北京市,随着南水北调补充密云水库,2018年密云水库蓄水量突破22亿m<sup>3</sup>。纳木错,位于西藏自治区中部,属内流湖,每年蒸发的水量为23.04亿m<sup>3</sup>,多年平均降水量为410 mm。徐州市位于华北平原东南部,年均降水量820 mm,人均水资源量394 m<sup>3</sup>,不到全国平均水平的1/5。白洋淀位于河北省中部,年平均降水量529.7 mm。广州市地处中国南部、珠江三角洲中北缘,是西江、北江、东江三江汇合处,年降雨量约为1 720 mm。鄱阳湖是中国第二大湖,位于江西省北部,平均年降水量为1 530 mm(表1)。

## 2 数据与方法

### 2.1 数据说明

本研究采用的主要数据是数字高程,遥感影像与研究区降水、气温、蒸发能力。

数字高程数据来自美国地质勘探局(United States Geological Survey, USGS), 30 m分辨率。采用 Google Earth Engine(GEE)平台在线调用卫星影像数据,主要是 Landsat 数据。选取非汛期无云遥感影像提取水体,计算结果可靠性与代表性较高。

表 1 各研究区基本信息

Tab. 1 Basic information of study area

研究区	区域面积/ km <sup>2</sup>	年均水体面积/ km <sup>2</sup>	年降水量/ mm	年平均气温/ ℃
北京	16 299	242	626	11.2
广州	7 179	178	1 720	22.3
徐州	11 180	228	820	14.8
乌海	1 734	23	160	9.8
白洋淀	366	123	530	13.3
红碱淖	99	42	385	9.5
密云	180	103	400	11.4
纳木错	4 125	1 988	410	2.4
鄱阳湖	2 850	2 518	1 530	16.9

其中,由于 2003 年 Landsat-7 ETM+ 机载扫描校正器(SLC) 故障,Landsat-7 数据出现条带缺失,此处通过插值进行条带修复。另外,由于 Landsat-5 与 Landsat-7 数据在 2003—2013 年时间上重叠,此处通过逐一对比 Landsat-5 与 Landsat-7 数据来选取质量较好的影像数据。降水、气温与蒸发能力采用国家气象信息中心发布的实测站点数据。所用数据的具体信息见表 2。

## 2.2 多指数组合水体提取法

水体提取采用水体指数(归一化水体指数 NDWI、改进的归一化水体指数 MNDWI)和植被指数(归一化植被指数 NDVI)相组合的方法来区分水体

表 2 使用数据说明

Tab. 2 Description of data sources

数据类型	空间分辨率	时间跨度	来源
SRTM	30 m	—	USGS/SRTMGL1_003
Landsat-5	30 m	1984 年 3 月—2013 年 6 月	USGS Landsat 5 Surface Reflectance Tier 1 USGS Landsat 5 TM Collection 1 Tier 1 TOA Reflectance
Landsat-7	30 m	1999 年 4 月—2013 年 5 月	USGS Landsat 7 Surface Reflectance Tier 1 USGS Landsat 7 Collection 1 Tier 1 TOA Reflectance
Landsat-8	30 m	2013 年 2 月—2018 年 12 月	USGS Landsat 8 Surface Reflectance Tier 1 USGS Landsat 8 Collection 1 Tier 1 TOA Reflectance
气温、蒸发能力 降水	站点 0.5°	1986—2018 年 1986—2018 年	国家气象信息中心 National Meteorological Information Center https://data.cma.cn

与非水体,其中 NDWI 能够较好地区分水体和冰雪;MNDWI 能够增强建筑物与水体的反差,去除建筑物影响以提高水体提取效果<sup>[27]</sup>,还可以消除阴影、云雾带来的影响;而 NDVI 对区分水体周边的植被具有较好效果,所以该方法对城市水体提取和高寒地区水体提取具有一定适用性。另外,通过使用大津法(OTSU)先自动确定区分水体的光谱指数阈值,再通过目视解译手动调整光谱指数阈值以更好地提取水体。具体的水体提取流程见图 1。

### 2.2.1 水体指数法

水体指数是根据波段比值法原理,将水体反射强的波段和反射弱的波段分别作为分子和分母,通过比值运算进一步扩大二者的差距,使湿度信息明显的地物得到最大的亮度增强,其他背景地物受到抑制<sup>[28]</sup>。

归一化水体指数 NDWI<sup>[29]</sup> 计算公式为

$$NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR} \quad (1)$$

式中:Green 代表绿光波段;NIR 代表近红外波段。



图 1 水体提取流程

Fig. 1 Workflow for extracting the water surface area

改进的归一化水体指数 MNDWI<sup>[27]</sup>计算公式为

$$MNDWI = \frac{Green - MIR}{Green + MIR} \quad (2)$$

式中:Green 代表绿光波段;MIR 代表中红外波段。

### 2.2.2 植被指数法

归一化植被指数 NDVI<sup>[30]</sup>计算公式为

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (3)$$

式中:Red 代表红光波段;NIR 代表近红外波段。

### 2.2.3 大津法(OTSU)计算阈值

不同的光谱指数阈值会导致水体提取结果差距很大。OTSU 算法也称最大类间差法,由日本学者大津于 1979 年提出,被认为是图像分割中阈值选取的最佳算法,计算简单,不受图像亮度和对比度的影响。它是按图像的灰度特性,将图像分成背景和前景两部分。因方差是灰度分布均匀性的一种度量,背景和前景之间的类间方差越大,说明构成图像的两部分的差别越大,当部分前景错分为背景或部分背景错分为前景都会导致两部分差别变小。因此,使类间方差最大的分割意味着错分概率最小。OTSU 方法逐渐被使用来确定水体提取时光谱指数的阈值<sup>[31-32]</sup>。

### 2.3 Mann-Kendall 趋势分析法

Mann-Kendall (M-K) 检验方法是世界气象组织推荐并广泛使用的一种非参数统计方法,M-K 检验方法不要求样本遵从一定分布,也不受少数异常值干扰,适用于非正态分布的水文气象数据<sup>[33-34]</sup>。

对于时间序列  $X$ ,M-K 趋势检验的统计量  $S$  计算公式为

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (4)$$

$$\text{sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} 1 & (x_j - x_k) > 0 \\ 0 & (x_j - x_k) = 0 \\ -1 & (x_j - x_k) < 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$E(S) = 0 \quad \text{Var}(S) \approx \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (6)$$

式中: $x_j$  为时间序列的第  $j$  个数据; $n$  为样本长度;sgn 是符号函数;统计量  $S$  为正态分布,其均值  $E(S)$  为 0,Var( $S$ ) 是统计量  $S$  的方差。

当  $n > 10$  标准化统计量  $Z$  计算公式为

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: $Z$  为正值表示增加趋势,负值表示减少趋势。

在双边趋势检验中,当  $Z$  的绝对值大于等于 1.28、1.64、2.32 时,表示分别通过了 90%、95%、99% 的显著性检验。

### 2.4 双累积曲线法与贡献率计算

双累积曲线可用于检验两个参数间关系一致性及其变化。常被用于水文气象要素一致性的检验、缺值的插补或资料校正,以及趋势性变化及其强度的分析。

首先计算数据序列的累积值,得到新的逐年累积序列,即

$$X_t = \sum_{i=1}^t x_i \quad t=1,2,3,\dots,n \quad (8)$$

式中: $X_t$  为数据  $x$  的逐年累积值; $n$  为数据序列长度。

双累积曲线法将基准期与人类活动影响期的水体面积变化量分为气候变化引起的变化量和人类活动影响引起的变化量,认为突变点前为基准期,突变点后为人类活动影响期<sup>[25]</sup>。此处假定两个时期的温度序列为  $T_b$  和  $T_a$ ,降水序列为  $P_b$  和  $P_a$ ,水体面积序列为  $A_b$  和  $A_a$ 。应用公式(8)计算突变点前的累积水体面积序列  $\sum A_b$  与累积温度序列  $\sum T_b$  和累积降水序列  $\sum P_b$ ,并建立回归方程

$$\sum A_b = k_0 + k_1 \times \sum T_b + k_2 \times \sum P_b \quad (9)$$

式中: $k_0$  为常数项; $k_1$  和  $k_2$  为偏回归系数。

将突变点后的累积温度序列  $\sum T_a$  和累积降水序列  $\sum P_a$  代入回归方程(9)得到突变点后符合线性方程的累积水体面积序列  $\sum A'_a$ ,由  $\sum A'_a$  反推突变点后符合线性方程的水体面积序列  $A'_a$ ,则由气候变化引起的水体面积变化量  $\Delta A_c$  为

$$\Delta A_c = A'_a - A_b \quad (10)$$

由人类活动影响引起的水体面积变化量  $\Delta A_h$  为

$$\Delta A_h = A_a - A'_a \quad (11)$$

气候变化对水体面积变化的贡献率  $\eta_c$  为

$$\eta_c = \frac{\Delta A_c}{|\Delta A_c| + |\Delta A_h|} \times 100\% \quad (12)$$

人类活动影响对水体面积变化的贡献率  $\eta_h$  为

$$\eta_h = \frac{\Delta A_h}{|\Delta A_c| + |\Delta A_h|} \times 100\% \quad (13)$$

### 2.5 分布式水文模型与贡献率计算

时变增益水文非线性系统模型(TVGM)是夏军<sup>[26]</sup>提出的一种方法,它的概念是降雨径流的系统关系的非线性。分布式时变增益模型(DTVGM)将流域划分成子流域;产流模型是一个水量平衡模型<sup>[35]</sup>,其计算公式为

$$P_i + AW_i = AW_{i+1} + g_1 \times \left( \frac{AW_w}{WM_u \times C_j} \right) g_2 \times P_i + AW_w \times K_r + Ep_i \times K_e + AW_{gi} \times K_g \quad (14)$$

式中:  $P$  为降水;  $AW$  为子流域土壤湿度 (mm);  $AW_u$  为子流域上层土壤湿度 (mm);  $AW_g$  为子流域下层土壤湿度 (mm);  $WM_u$  为上层土壤饱和含水量 (mm);  $g_1$  为土壤饱和后径流系数;  $g_2$  为土壤水影响系数 ( $0 < g_1 < 1, 1 < g_2$ );  $C$  为覆被影响参数;  $K_r$  为土壤水出流系数;  $K_g$  为地下水出流系数;  $K_e$  为蒸发系数;  $i$  为时段数;  $j$  为子流域单元号。

汇流是在 DEM 提取的河网中采用运动波汇流<sup>[36]</sup>。

为了量化气候变化和人类活动对水体蓄水量变化的贡献率,通过 DTVGM 模拟自然条件下的流量  $Q_{sim}$ ,计算自然条件下的蓄水变化量  $\Delta V$ ,其公式为

$$\Delta V = \frac{Q_{sim} \times T - E_p \times A}{10^5} \quad (15)$$

式中:  $\Delta V$  自然条件下的蓄水变化量 ( $10^8 \text{ m}^3$ );  $T$  为时间, 1 年 =  $365 \times 24 \times 3600 \text{ s}$ ;  $E_p$  为年蒸发能力 (mm);  $A$  是提取的水体面积 ( $\text{km}^2$ )。

包含人类活动影响的蓄水变化量  $\Delta V'$  计算

公式为

$$\Delta V' = V_{t+1} - V_t \quad (16)$$

$$V = 0.000286A^2 - 0.0407A + 0.343 \quad [37] \quad (17)$$

式中:  $\Delta V'$  人类活动影响下的蓄水变化量 ( $10^8 \text{ m}^3$ );  $V$  为蓄水量 ( $10^8 \text{ m}^3$ );  $t$  为年份。

人类活动对蓄水变化量的贡献率

$$\eta_h = \frac{\Delta V' - \Delta V}{\Delta V} \times 100\% \quad (18)$$

气候变化对蓄水变化量的贡献率

$$\eta_c = 1 - |\eta_h| \quad (19)$$

### 3 研究结果

#### 3.1 水体面积年际动态变化

本研究在 GEE 云计算平台上使用多指数组合方法提取了 1986-2018 年中国 9 个研究区域的水体面积。图 2 依次给出了 (a) 水体面积占区域面积比, (b) 水体面积距平, (c) 水体面积累积的年际变化过程。

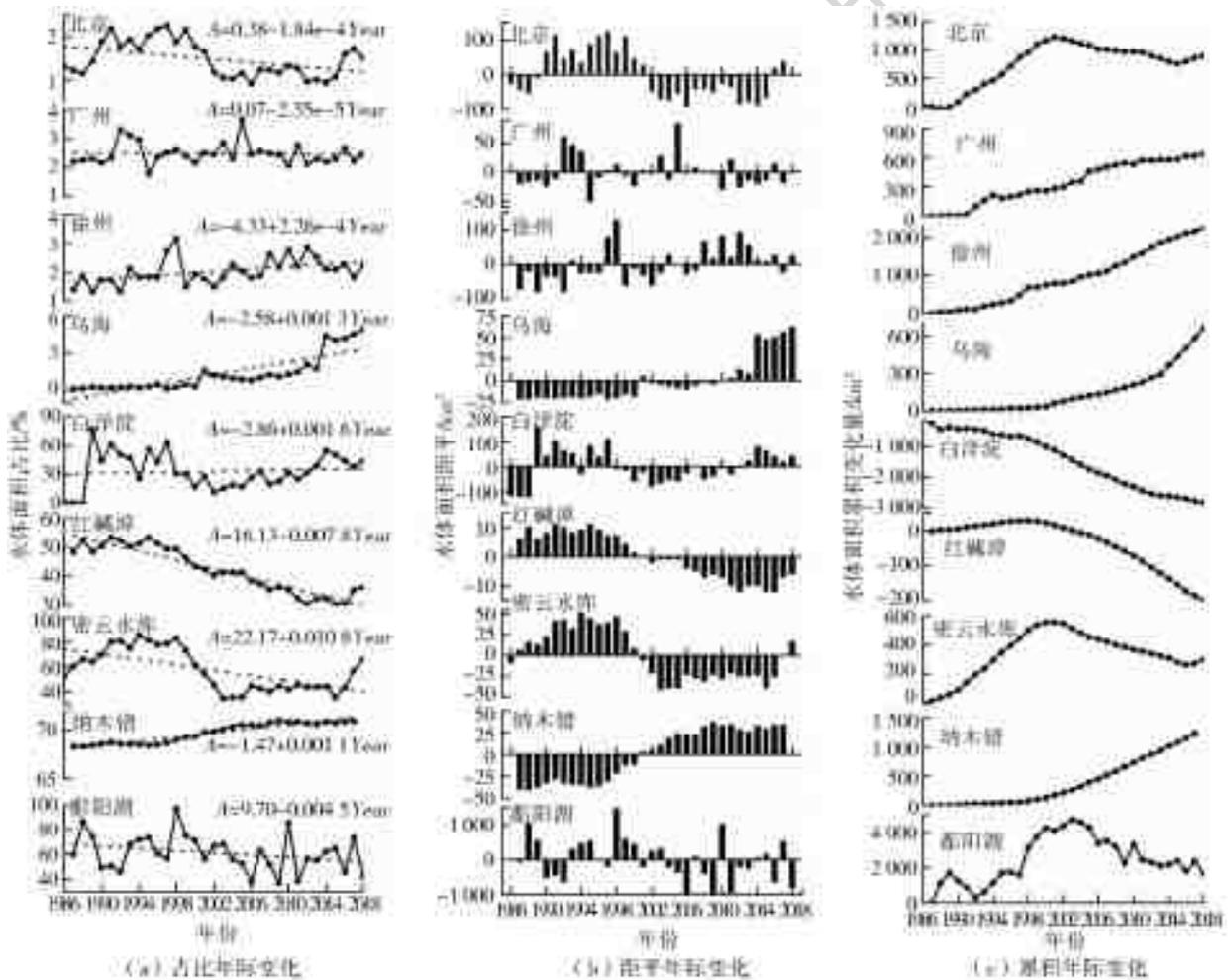


图 2 水体面积年际变化

Fig. 2 Interannual variation of water surface area

通过对比图 2(a) 中 9 个研究区水体面积占比的年际变化特征,发现在 4 个城市研究区中,各城市的水体面积占比变化范围都在 0~5%:北京的水体

面积占比大致在 1%~2%;广州在 2%~4%;徐州在 1%~3%;乌海的水体面积占比在 0~5%。对于 5 个典型水域,其水体面积占比的波动幅度远大于

城市;密云水库水体面积占比大体上是在40%~90%;白洋淀在0~60%;红碱淖在30%~60%;鄱阳湖在40%~90%;纳木错水体面积波动幅度相对较小,在68%~72%变化。从线性趋势(虚线)看:北京、密云水库在2000年左右水体面积出现了突变减小,最近3年由于南水北调调水到北京,水体面积得到了有效恢复;广州、徐州市水体面积没有显著变化;乌海市由于拦黄河修了海勃湾水利枢纽工程,2014年竣工后水面面积大增;白洋淀水体面积从1988年开始到2000年持续下降,严重时水体几乎消失,2002年后开始人工调水补充白洋淀,使白洋淀水体面积有所恢复;红碱淖由于大量的灌溉与上游水库的修建,从1986年后水体面积显著下降,近5年开始对红碱淖进行保护,并且出现丰水年,使水体面积得到了有效恢复;纳木错作为人类活动影响非常小区域,主要是全球气温的升高导致的冰川融雪径流增加,近30年水体面积显著增加;鄱阳湖受降水周期变化波动影响。

水体面积距平(图2(b))反映出:北京的水体面积绝对变化量在-100~100 km<sup>2</sup>,相当于一个密云水库的水面;徐州的水体面积变化量也在-100~100 km<sup>2</sup>;广州的水体面积变化量在-50~50 km<sup>2</sup>;乌海的在-20~50 km<sup>2</sup>;密云水库和纳木错变化量都大致在-40~40 km<sup>2</sup>;红碱淖变化量在-10~10 km<sup>2</sup>,白洋淀在-100~150 km<sup>2</sup>,鄱阳湖水体面积绝对变化量比较大,在-1 000~1 500 km<sup>2</sup>。相对于城市,湖库区域水体面积占比波动幅度比较大,绝对变化量也较大。但是城市的水体面积绝对变化量也不容忽视,如经济发展较快的生态文明建设城市北京和徐州,其水体面积绝对变化量比中国第三大咸水湖纳木错的变化要大。

自20世纪80年代以来,人类社会对自然环境的扰动愈加剧烈。为更好地衡量人类活动和自然环境变化对各个研究区水体面积的累积影响,针对各个研究区分别选取数据可获得的比较早的年份作为基准年,计算各年份水体面积相对于基准年的变化量,并逐年累加,获得自基准年以来的水体面积总变化量(图2(c))。相对于20世纪80年代中期,2018年各个研究区的水体面积累积变化量有正有负,其中:2018年北京水体面积累积增加量大概是800 km<sup>2</sup>,大概是北京面积的5%;广州水体面积累积增加量约为600 km<sup>2</sup>,大概是广州面积的8%;徐州水体面积累积增加量达到2 000 km<sup>2</sup>,大概是徐州面积的18%;乌海累积增加量约为600 km<sup>2</sup>,大概是乌海面积的35%;密云水库水体面积累积增加量大概是

300 km<sup>2</sup>,相当于其正常蓄水位水面面积的1.6倍左右;纳木错水体面积累积增加量约为1 000 km<sup>2</sup>;鄱阳湖水体面积总变化量不到200 km<sup>2</sup>;而红碱淖2018年累积减少量大概达到200 km<sup>2</sup>,是其多年平均湖面的5倍左右。

在2002年之前,北京水体面积累积变化量一致处于增加状态,2002年后累积变化量逐渐减少。密云水库在2001年前后水体面积累积变化量分别处于增加和减少状态。鄱阳湖在2003年前后水体面积累积变化量分别呈现增加和减少的现象。广州和徐州的水体面积累积变化量曲线一致处于上升状态。乌海的水体面积在2014年左右开始快速增加,2014年之前变化比较小。纳木错是在2002年左右水体面积开始快速增加,其在之前也处于相对稳定状态,水体面积累积变化量基本上保持不变。白洋淀一直处于下降状态。红碱淖在2000年之前水体面积保持相对平稳状态,在2001年左右开始加速减少。

### 3.2 水体面积变化趋势对比分析

从前面关于各个研究区水体面积年际变化特征的分析可以得到各个研究区水体面积的变化方向和变化程度存在差异。通过Mann-Kendall趋势检验方法得到各个研究区水体面积年际变化趋势和显著程度的结果。

如图3所示,水体面积M-K趋势检验的Z值有正有负,对应的水体面积变化有增有减,其中对应正Z值的有白洋淀、纳木错、徐州和乌海,对应负Z值的有密云水库、鄱阳湖、红碱淖、广州和北京。纳木错( $Z=6.32$ )、徐州( $Z=3.26$ )、乌海( $Z=6.34$ )呈现显著增加趋势;密云水库( $Z=-2.77$ )、鄱阳湖( $Z=-1.67$ )、红碱淖( $Z=-6.03$ )、北京( $Z=-2.28$ )呈现显著减少趋势;白洋淀和广州变化趋势相对不显著。

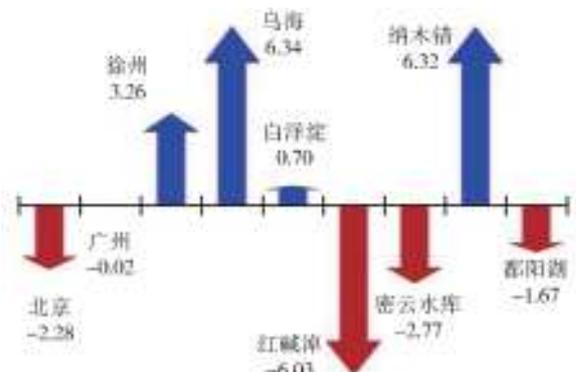


图3 各研究区水体面积的M-K趋势检验值  
 $Z(|Z|>1.64$  表示通过了置信度95%的显著性检验)

Fig. 3 M-K test value of water surface area  
 ( $|Z|>1.64$  means passing the 95% confidence test)

### 3.3 典型水域水体空间变化特征

在像元尺度上,对红碱淖、白洋淀、鄱阳湖和密

云水库水体的遥感解译结果进行水体像元出现频率统计(图 4)。

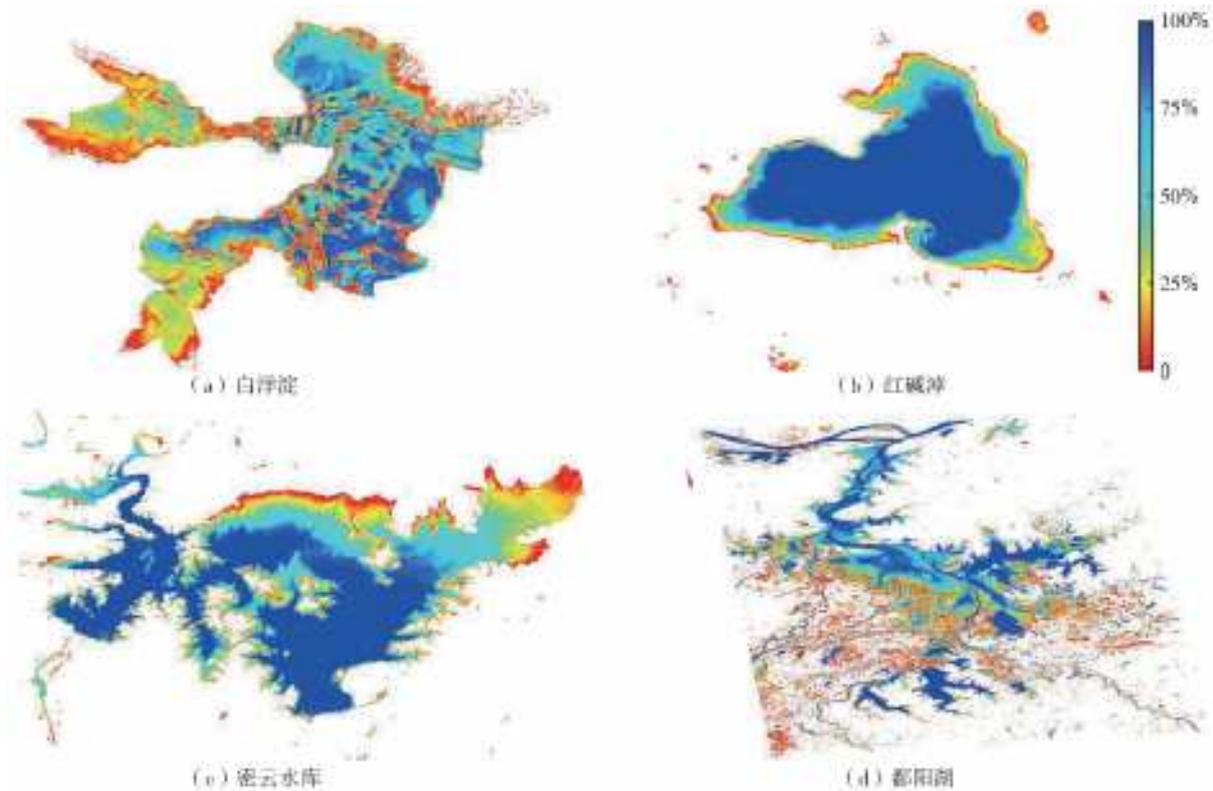


图 4 1987—2018 年典型水体淹没频率空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of typical water inundation frequency from 1987 to 2018

对比 4 个典型水域的水体淹没频率空间分布特征,发现白洋淀水体分布极不均衡,东部范围基本上常年有水,且基本上集中在东南部,而其西部的水体淹没频率大都低于 25%,大概就是个别年份会有水(见图 4(a));红碱淖水域周围较宽范围的淹没频率低于 50%,结合图 3 中红碱淖的显著减少趋势,可以看出红碱淖水域正在逐渐向内萎缩,主要是由于内蒙古在红碱淖的主要补给河流上修建了水库,红碱淖的补水河流被截留(见图 4(b));密云水库位于土石山区,库区南部地势较高,北部为平原地带,密云水库水体淹没频率从南

向北逐渐降低,其中北部尤其是东北部水体淹没频率低于 50%(见图 4(c));鄱阳湖主要依靠上游江水以及降水进行补给,水域空间分布范围很大,少水年份时,鄱阳湖湖泊主体部分大都有水,而各个支流,尤其是小支流水体淹没频率较低,低于 25%,即常年无水(见图 4(d))。纳木错选取了 1987、2000 和 2016 年 3 个代表年份的水体解译结果来分析其水体面积空间变化(见图 5),其中变化明显的主要有东北部、西部。图中 A、B、C 位置都反映出从 1987 年到 2000 年,再到 2016 年,纳木错水体范围在不断扩大。

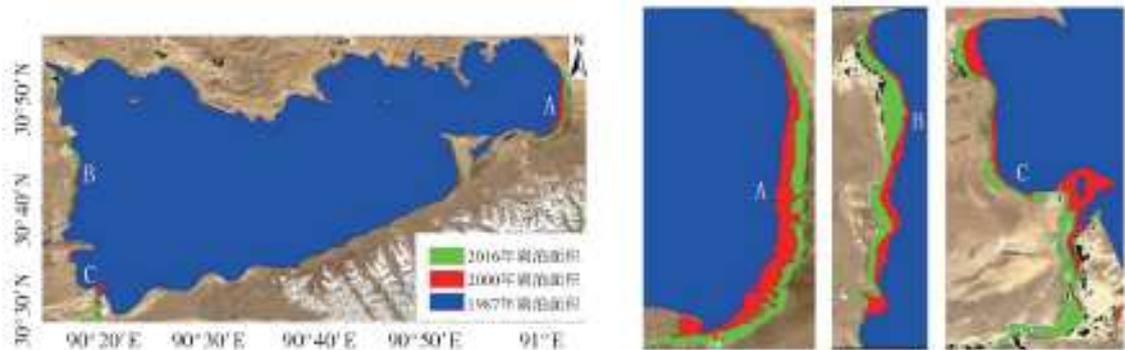


图 5 纳木错典型年份水体淹没范围

Fig. 5 Water inundation range in Nam Co Lake

### 3.4 气候变化和人类活动对水体面积影响的定量区分

依据前文关于各个研究区水体面积年际变化的分析,将各个研究区的研究期划分为基准期和人类活动影响期。各个研究区(纳木错除外)根据式(8)和(9)先计算基准期的逐年累积水体面积数据、累积气温和累积降水数据,然后建立多元回归模型,

其中各个研究区的多元回归公式、水体面积遥感观测值和水体面积回归模拟值的相关性信息见表 3。从表 3 可以看出回归模拟的水体面积与观测的水体面积的相关系数均较高,说明多元累积回归模型能够很好的模拟水体面积变化。进而根据式(10)至(13)计算得到气候变化和人类活动对水体面积的贡献率。

表 3 研究区水体面积与气温、降水的多元回归模型

Tab. 3 Multiple regression model for relationship between lake water area and hydrothermal factors

研究区	基准期	多元回归公式	拟合优度	$R_{A_{obs}-A_{sim}}$
北京	1986—1999 年	$\Sigma A = -245.86 + 9.54 \Sigma T + 0.35 \Sigma P$	0.996	0.381
广州	1987—1998 年	$\Sigma A = -42.75 + 1.84 \Sigma T + 0.08 \Sigma P$	0.998	0.604
徐州	1987—1998 年	$\Sigma A = -51.44 + -8.71 \Sigma T + 0.43 \Sigma P$	0.995	0.798
乌海	1987—2000 年	$\Sigma A = -2.43 + -0.40 \Sigma T + 0.08 \Sigma P$	0.996	0.618
白洋淀	1989—2000 年	$\Sigma A = 146.38 + 1.77 \Sigma T + 0.27 \Sigma P$	0.995	0.776
红碱淖	1987—2000 年	$\Sigma A = 1.18 + 2.16 \Sigma T + 0.08 \Sigma P$	0.999	0.791
密云	1986—2000 年	$\Sigma A = -70.92 + 5.88 \Sigma T + 0.14 \Sigma P$	0.999	0.690
鄱阳湖	1987—1998 年	$\Sigma A = 517.15 + 148.25 \Sigma T + 2.60 \Sigma P$	0.997	0.716

注: $R_{A_{obs}-A_{sim}}$ 为遥感观测与模拟水体面积的相关系数; $T$ 为气温( $^{\circ}C$ ); $P$ 为降水量(mm); $\Sigma$ 为逐年累积符号。

纳木错由于位于西部高寒地区,气象站点较少,气象数据代表性不太好,此处借助 DTVGM 模型模拟纳木错流量,进而通过式(15)计算只受自然环境变化引起的湖泊蓄水变化量  $\Delta V$ ,然后通过参考库容面积式(16)、(17)计算受到人类活动和自然环境变化影响的湖泊蓄水变化量  $\Delta V'$ ,其中 DTVGM 模拟的流量(蓄水变化量)与遥感观测流量(蓄水变化量)的相关性信息见表 4。观测的水体库容变化、入湖流量同模拟水体库容变化、入湖流量相关系数达到 0.84 以上,说明水文模型能够很好的模拟出纳木错的入湖水量,估算出水体面积的变化。利用公式(18)、(19)进一步计算得到气候变化和人类活动对纳木错水体变化的贡献率。

而在其它区域,人类活动占据主导作用,北京(密云水库)、乌海人类活动影响超过 90%,白洋淀、红碱淖、鄱阳湖人类活动影响也都超过 65%。乌海由于人类活动的影响,其水体面积增加,这主要是当地水利工程的修建,增加了蓄水而引起水体面积扩大;除乌海以外,其它区域的人类活动均导致了水体面积的减小,这主要是大量的灌溉引水以及区域上游修建水库导致下游来水减少,水体面积减小。气候变化,主要是降水变化,与大部分区域的水体面积变化有关,北京、乌海和白洋淀由于降水减少,水体面积减小;而南方比较湿润地区的徐州、广州和鄱阳湖主要是由于降水增加,其水体面积增加;另外,位于青藏高原的纳木错主要是气温升高导致其水体面积增加。

表 4 纳木错模拟流量(蓄水变化量)与遥感观测流量(蓄水变化量)相关性

Tab. 4 Nam Co' simulated flow (water storage) and remote sensing observation flow (water storage)

研究区	基准期	$R_{\Delta V-\Delta V'}$	$R_{Q_{obs}-Q_{sim}}$
纳木错	1988—1998 年	0.842	0.844

注: $\Delta V$ 自然条件下的蓄水变化量; $\Delta V'$ 人类活动影响下的蓄水变化量; $Q_{obs}$ 遥感观测流量,由公式(15)至(17)反推求得; $Q_{sim}$ 是 DTVGM 模拟流量; $R$ 指观测与模拟的相关系数。

对各个研究区水体面积变化原因的定量分析结果见图 6。纳木错和徐州气候变化的贡献率分别达到 93.7%和 70.88%,说明在该区域气候变化占主导作用,其水体面积变化受人类活动干扰相对较轻;

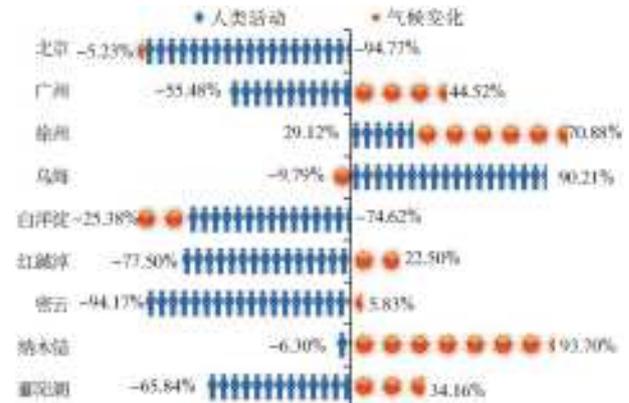


图 6 气候变化和人类活动对水体面积变化的相对贡献率  
Fig. 6 The relative contribution rate of climate change and human activities to changes in water area

## 4 结 论

近 30 多年来,我国不同研究区的水体面积表现出不同的变化规律。在干旱半干旱区域,由于水资源短缺,水体面积显著减少,如:北京、密云水库和红碱淖水体面积逐渐减少,其中红碱淖的减少趋势显著。在湿润地区,由于降水增加导致水体面积增加,如:徐州。高寒山区由于气温升高,水体面积显著增加,如:纳木错。

总体来说,人类活动在很大程度上影响着水体面积变化,只是在各个研究区作用程度不同。在降水比较充沛的半湿润地区和湿润地区,如广州、鄱阳湖和徐州,以及人口密度比较低的西部地区纳木错,人类活动对水体面积变化的影响程度不太剧烈;降水偏少的半干旱地区,人类活动影响超过 70%,如:白洋淀、红碱淖、密云水库、北京。其中乌海水体面积受到人类活动的正向影响,水利工程的修建明显增大了乌海的水体面积占比。

水体面积变化直接影响我国生态文明建设,同时水体面积研究对水资源的管理规划有一定意义。水体面积变化会引起水面蒸发量的变化,曾有学者指出各地干旱和半干旱地区的湖泊和水库存在大量蒸发损失,这是水资源管理中需要重要考虑的因素,尤其是水库等水利工程的修建新增的蒸发损失不容忽视,所以针对缺水地区来说,水体的蒸发损失很值得进一步研究。

### 参考文献(References):

- [1] SL/Z 738—2016,水生态文明城市建设评价导则[S]. (SL/Z 738—2016, Evaluation guide of water ecological civilization construction[S]. (in Chinese))
- [2] 廖杰,王涛,薛娴. 黑河调水以来额济纳盆地湖泊蒸发量[J]. 中国沙漠, 2015, 35(1): 228-232. (LIAO J, WANG T, XUE X. Lake's evaporation in the Ejin Basin since transferring water from the Heihe River [J]. Journal of Desert Research, 2015, 35(1): 0228-0232. (in Chinese)). DOI:10. 7522/j. issn. 1000-694X. 2013. 00448.
- [3] 徐若秋扬. 东居延海面积变化及湖泊蒸发量的计算[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2017. (XU R Q Y. Change of water area and lake evaporation estimation of East Juyan Lake [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2017. (in Chinese))
- [4] SONG C Q, KE L H, PAN H, et al. Long-term surface water changes and driving cause in Xiong'an, China, from dense Landsat time series images and synthetic analysis[J]. Science Bulletin, 2018, 63(11): 708-716. DOI:10. 1016/j. scib. 2018. 05. 002.
- [5] 陈亮,张友静,何厚军,等. 基于混合像元分解的水体面积提取算法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2014, 42(4): 346-350. (CHEN L, ZHANG Y J, HE H J, et al. Water body area extraction algorithm based on pixel unmixing[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2014, 42(4): 346-350. (in Chinese)) DOI: 10. 3876/j. issn. 10001980. 2014. 04. 012.
- [6] 邵佳丽,郑伟,刘诚. 卫星遥感洞庭湖主汛期水体时空变化特征及影响因子分析[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(8): 1315-1321. (SHAO J L, ZHENG W, LIU C. Analysis of temporal and spatial variation characteristics and influence factors of water body in Dongting Lake during satellite flooding[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(8): 1315-1321. (in Chinese)) DOI:10. 11870/cjlyzyyhj201508008.
- [7] 沈占锋,李均力,于新菊. 基于协同计算的白洋淀湿地时序水体信息提取[J]. 地球信息科学学报, 2016, 18(5): 690-698. (SHEN Z F, LI J L, YU X J. Water information extraction of Baiyangdian Wet Land based on the collaborative computing method[J]. Journal of Geo-Information Science, 2016, 18(5): 690-698. (in Chinese)) DOI:10. 3724/SP. J. 1047. 2016. 00690.
- [8] DONCHYTS G, BAART F, WINSEMIUS H, et al. Earth's surface water change over the past 30 years [J]. Nature Climate Change, 2016, 6(9): 810-813. DOI: 10. 1038/nclimate3111.
- [9] ZOU Z H, DONG J W, MENARGUEZ M A, et al. Continued decrease of open surface water body area in Oklahoma during 1984 - 2015[J]. Science of the Total Environment, 2017, 595: 451-460. DOI: 10. 1016/j. scitotenv. 2017. 03. 259.
- [10] CARROLL M L, WOOTEN M, DIMICELI C, et al. Quantifying surface water dynamics at 30 meter spatial resolution in the north American high northern latitudes 1991-2011[J]. Remote Sensing, 2016, 8(8): 622. DOI:10. 3390/rs8080622.
- [11] DIRK E, ANNOR F, IANNINI L, et al. Remotely sensed monitoring of small reservoir dynamics: A bayesian approach[J]. Remote Sensing, 2014, 6(2): 1191-1210. DOI:10. 3390/rs6021191.
- [12] ISIKDOGAN F, BOVIK A C, PASSALACQUA P. Surface water mapping by deep learning [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2017, 10(11): 4909-4918. DOI: 10. 1109/JSTARS. 2017. 2735443.
- [13] KAPTU A, HANAN N P, PRIHODKO L, et al. Characterization of the spatial and temporal variability of surface water in the Soudan-Sahel region of Africa[J].

- Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2013, 118(4): 1472-1483. DOI: 10.1002/jgrg.20121.
- [14] KHANDELWAL A, KARPATNE A, MARLIER M E, et al. An approach for global monitoring of surface water extent variations in reservoirs using MODIS data[J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 202: 113-128. DOI: 10.1016/j.rse.2017.05.039.
- [15] LYONS E A, SHENG Y W. Lake Time: Automated seasonal scene selection for global lake mapping using Landsat ETM+ and OLI[J]. Remote Sensing, 2018, 10(1): 54. DOI: 10.3390/rs10010054.
- [16] MUELLER N, LEWIS A, ROBERTS D, et al. Water observations from space: Mapping surface water from 25 years of Landsat imagery across Australia[J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 174: 341-352. DOI: 10.1016/j.rse.2015.11.003.
- [17] PEKEL J F, COTTAM A, GORELICK N, et al. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes[J]. Nature, 2016, 540 (7633): 418. DOI: 10.1038/nature20584.
- [18] SUI Y J, FU D J, WANG X F, et al. Surface water dynamics in the north America arctic based on 2000-2016 Landsat Data[J]. Water (Switzerland), 2018, 10(7): 824.
- [19] TULBURE M G, BROICH M, STEHMAN S V, et al. Surface water extent dynamics from three decades of seasonally continuous Landsat time series at subcontinental scale in a semi-arid region[J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 178: 142-157. DOI: 10.1016/j.rse.2016.02.034.
- [20] ZHANG F F, LI J S, ZHANG B, et al. A simple automated dynamic threshold extraction method for the classification of large water bodies from landsat-8 OLI water index images[J]. International Journal of Remote Sensing, 2018, 39(11): 3429-3451. DOI: 10.1080/01431161.2018.1444292.
- [21] 吴杰峰, 陈兴伟, 高路, 等. 人类活动对晋江流域径流演变影响的分析与定量评估[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(2): 65-72, 79. (WU J F, CHEN X W, GAO L, et al. Quantitative assessment of runoff changes under the impact of human activities in the Jinjiang River basin [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(2): 65-72, 79. (in Chinese)). DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2017.02.010.
- [22] 陈鑫, 刘艳丽, 刁艳芳, 等. 基于 SWAT 模型对气候变化与人类活动影响下径流变化的量化分析[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(4): 9-18. (CHEN X, LIU Y L, YAN Y F, et al. A quantitative study of impacts of climate change and human activities on runoff in Haihe River basin by SWAT model[J]. South-to-North Water Transfer and Water Science & Technology, 2019, 17(4): 9-18 (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2019.0079
- [23] 刘剑宇, 张强, 陈喜, 等. 气候变化和人类活动对中国地表水文过程影响定量研究[J]. 地理学报, 2016, (11): 1875-1885. (LIU J Y, ZHANG Q, CHEN X, et al. Quantitative analysis the influences of climate change and human activities on hydrological processes in Poyang basin [J]. Journal of Lake Sciences, 2016, (11): 1875-1885. (in Chinese)) DOI: 10.11821/dlxb201611001.
- [24] 夏军, 马协一, 邹磊, 等. 气候变化和人类活动对汉江上游径流变化影响的定量研究[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(1): 1-6. (XIA J, MA X Y, ZOU L, et al. Quantitative analysis of the effects of climate change and human activities on runoff in the Upper Hanjiang River basin [J]. South-to-North Water Transfer and Water Science & Technology, 2017, 15(1): 1-6. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2017.01.001.
- [25] ZHAGN Q, XIAO M Z, SINGH V P, et al. Evaluation of impacts of climate change and human activities on streamflow in the Poyang Lake basin, China [J]. Hydrological Processes, 2016, 30 (14): 2562-2576. DOI: 10.1002/hyp.10814.
- [26] XIA J. Identification of a constrained nonlinear hydrological system described by volterra functional series[J]. Water Resources Research, 1991, 27(9): 2415-2420. DOI: 10.1029/91wr01364.
- [27] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J]. 遥感学报, 2005, 9(5): 589-595. (XU H Q. Study on extracting water body information using improved normalized difference water index [J]. Journal of Remote Sensing, 2005, 9(5): 589-595. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1007-4619.2005.05.012.
- [28] 张莉芳, 潘华海, 单定军, 等. 基于遥感技术的柘林水库库容曲线复核[J]. 水利水电技术, 2017, 48(6): 1-6, 22. (ZHANG L F, PAN H H, SHAN D J, et al. Remote sensing technology-based re-checking of reservoir storage capacity curve of Zhelin reservoir [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(6): 1-6, 22. (in Chinese)) DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2017.06.001.
- [29] MCFEETERS, S. K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features [J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17(7): 1425-1432. DOI: 10.1080/01431169608948714.

(下转第 186 页)

- [21] SHUKLA I, TUPKARI S S, RAMAN A K, et al. Wall Y+ approach for dealing with turbulent flow through a constant area duct[C]// American Institute of Physics, 2012.
- [22] HSIEH S C, LOW Y M, CHIEW Y M. Flow characteristics around a circular cylinder subjected to vortex-induced vibration near a plane boundary[J]. Journal of Fluids and Structures, 2016(65): 257-277.
- [23] MARIANI R, QUINN M K, KONTIS K, et al. Shock-free compressible vortex rings impinging on a stationary surface: Effects of surface angle variation[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2013(47): 126-142.
- [24] TOKYAY T E, CONSTANTINESCU S G. Validation of a large-eddy simulation model to simulate flow in pump intakes of realistic geometry[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 132(12): 1303-1315.
- [25] TAKATA T, KAWATA Y, KOBAYASHI T, et al. Large eddy simulation of unsteady turbulent swirl flow in a pump intake[C]// Computational Fluid Dynamics. Computational Fluid Dynamics '92, 1992.

(上接第 147 页)

- [30] BOLAND, D. H. Trophic classification of lakes using landsat-1 (ERTS-1) multispectral scanner data[Z]. US: US Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Corvallis Environmental Research Laboratory, Assessment and Criteria Development, 1976.
- [31] LI W B, DU Z Q, LING F, et al. A comparison of land surface water mapping using the normalized difference water index from TM, ETM+ and ALI[J]. Remote Sensing, 2013, 5(11): 5530-5549. DOI: 10. 3390/rs5115530.
- [32] YANG, K, LI M C, LIU Y X, et al. River delineation from remotely sensed imagery using a multi-scale classification approach[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2014, 7: 4726-4737. DOI: 10. 1109/JSTARS. 2014. 2309707.
- [33] MANN, H. B. Nonparametric test against trend[J]. Econometrica, 1945, 13(3): 245. DOI: 10. 2307/1907187.
- [34] KENDALL, M. G. Rank Correlation Methods[M]. London: Griffin, 1948. DOI: 10. 1007/978-1-4684-6683-6\_9.
- [35] YE A Z, DUAN Q Y, ZENG H J, et al. A distributed time-varying gain hydrological model based on remote sensing[J]. Journal of Resources and Ecology, 2010, 1(3): 222-229, 230. DOI: 10. 3969/j. issn. 1674-764x. 2010. 03. 005.
- [36] YE A Z, DUAN Q Y, ZHAN C S, et al. Improving kinematic wave routing scheme in community land model[J]. Hydrology Research, 2013, 44(5): 886-903. DOI: 10. 2166/NH. 2012. 145. DOI: 10. 2166/nh. 2012. 145.
- [37] 严家宝, 贾绍凤, 吕爱锋, 等. 近十年中国陆地水储量变化及其时空分布规律[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(4): 21-28. (YAN J B, JIA S F, LYU A F, et al. Spatial-temporal variation characteristics of China terrestrial water storage in the last ten years[J]. South-to-North Water Transfer and Water Science & Technology, 2016, 14(4): 21-28. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2016. 04. 004.