

基于 Google Earth Engine 平台的官厅水库 流域开放水体动态研究*

焦晨泰¹⁾ 宋世雄^{1,2)} 黄庆旭^{1,2)†} 夏显旺¹⁾ 张颖¹⁾

(1)北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室人与环境可持续研究中心, 100875, 北京;

2)北京师范大学地理科学学部自然资源学院土地资源与区域发展研究中心, 100875, 北京)

摘要 利用二阶段城市水体指数(two steps urban water index)结合地形坡度掩膜方法, 基于 Google Earth Engine (GEE)平台调用了 5 196 幅 Landsat 影像, 提取并分析了官厅水库流域 1987—2018 年长时间序列的开放水体动态. 水体提取总体精度达到 93.5%, Kappa 系数达到 0.871, 提取的开放水体可用于动态分析. 在此基础上, 基于分段线性回归, 将 1987—2018 年官厅水库流域开放水体面积划分为缓慢上升、快速下降和迅速回升 3 阶段的变化. 相应地, 1987—1996、1997—2010 和 2011—2018 年水体面积年均变化量分别为 5.50、-7.45 和 15.19 km². 年均降水量的变化是官厅水库流域开放水体面积变化的重要影响因素, 一元线性回归决定系数为 0.29($P < 0.01$). 1997 年后, 流域水体面积变化受人类用水增加及土地利用变化的影响增强. 研究结果可为城市化背景下区域水资源保护, 促进区域可持续发展提供借鉴.

关键词 城市化流域; 水体指数; Google Earth Engine (GEE); 遥感大数据; 城市可持续

中图分类号 P23

DOI: 10.12202/j.0476-0301.2021084

0 引言

陆地开放水体包括河流、湖泊、水库、渠道和池塘等, 不仅在提供农业、渔业、工业与生活用水方面有重要作用, 还在调节陆地水文、生态环境方面有重要意义. 开放水体的时空变化可能受到多种因素影响, 包括年均温、年降水量等气候因素与农业灌溉、水体占用、水利工程修筑等人为因素^[1]. 由于气候与人为因素作用, 我国干旱、半干旱地区开放水体在 2000—2010 年减少了 7.4×10^3 km²^[2]. 开放水体的萎缩对区域农业系统、社会稳定与生态环境均存在威胁^[3-6]. 因此, 开放水体动态的监测在流域生态安全与可持续发展等方面具有重要意义.

遥感方法是开展大空间尺度水体监测的重要手段. 水体遥感识别有较长的研究历史. 基于卫星定量遥感的水体识别研究最早由 Work 等^[7]于 1976 年完成, 使用了 Landsat 遥感影像与监督分类的方法. 随着 3S 技术的发展, 研究者发展了多种指数提取开放水体. 如: McFeeters^[8]与 Gao^[9]于 1996 年先后构建了 2 种水体指数, 均称为归一化差异水体指数(normalized difference water index, NDWI), 是最早提出的遥感水体识别指数; Wu 等^[10]于 2018 年提出了一种新型水体指

数——二阶段城市水体指数(two steps urban water index, TSUWI). TSUWI 是一种有效的城市地表水体提取指数, 在消除阴影干扰等方面有较大优势, 在城市环境中可靠性高, 也有望在多山环境中达到较好的提取效果. 然而, 大多已有研究仅监测个别时间点的变化, 无法全面认识长时间序列动态变化. 这是由于传统的遥感影像处理自动化程度低, 随着数据量的增大, 处理时间与工作量也将大大增加, 因而长时间序列的水体变化监测存在一定困难.

Google Earth Engine(GEE)平台为长时间序列的地理大数据研究提供了解决手段. 用户可通过这一平台快速获取多种遥感数据, 并远程使用超级计算机资源处理海量地理数据集, 从而显著提升处理大量遥感数据的效率^[11]. 近年来, GEE 平台在地理研究领域得到广泛应用, 尤其在空间尺度广、时间序列长的研究方面发挥了重大作用. 如: Hansen 等^[12]基于 GEE 平台调用了 65.4 万景 Landsat ETM+影像, 完成了 2000—2012 年内全球范围的森林变化情况分析; Gong 等^[13]基于 GEE 平台调用了来自 Landsat 1~8 卫星的 MSS、TM、ETM+、OLI 多种遥感数据, 完成了 1978—2017 年中国居民点(不透水面)的动态变化研究.

鉴于此, 本文基于 GEE 平台对官厅水库流域进

* 国家自然科学基金资助项目(41971225); 北京市自然科学基金资助项目(8192027)

† 通信作者: 黄庆旭(1984—), 男, 副教授. 研究方向: 城市景观过程和城市可持续性. E-mail: qxhuang@bnu.edu.cn

收稿日期: 2021-04-05

行长时间序列的开放水体识别与分析:首先,以 TSUWI 作为水体识别规则,并引入地形坡度掩膜的方式,进行官厅水库流域开放水体提取;然后,利用分段线性回归,对官厅水库流域开放水体的空间分布与时间序列上的动态变化进行分析;最后,结合流域气候变化、土地利用变化等数据,探究官厅水库流域水体变化的驱动因素. 研究结果揭示了 1987 年以来官厅水库流域开放水体面积的动态变化状况,并阐明流域开放水体变化的主要驱动因素,从而为后续生态建设提供科学参考与政策建议.

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究区概况 官厅水库流域(111°48′~116°27′E, 38°50′~41°16′N)位于中国华北地区,北京市西北,地

跨北京市、河北省、山西省、内蒙古自治区,流域面积约 46 744 km²,包含永定河子流域、桑干河子流域和洋河子流域. 流域地势呈西高东低的特点,区域中主要水体包括流域东部延庆至怀来盆地内的官厅水库、洋河、桑干河及北京的“母亲河”——永定河^[14],为北京市的水源地之一(图 1). 官厅水库流域属暖温带大陆性季风气候,冬季寒冷干燥,夏季高温且降雨集中,年均温 6~8 °C,年降水量约 400 mm,其中 6—9 月份降水占全年降水量的 80%. 流域内重要河流桑干河、洋河大部分河段位于干旱半干旱地区,年径流量较低,水资源状况相对紧张^[15]. 2015 年,流域内总人口为 1 353 万人, GDP 为 3 717 亿元^[16],经济发展水平较为落后. 改革开放以来,随工农业发展与人口增加,区域水资源短缺问题逐渐突出^[17].

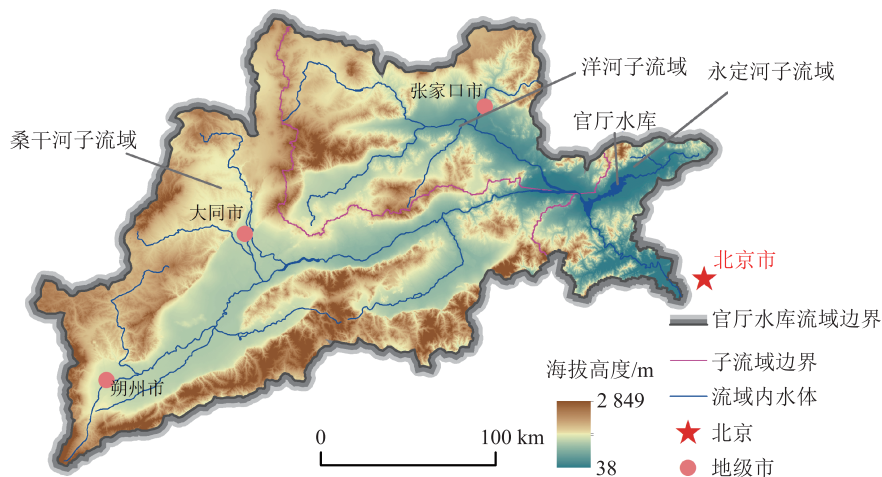


图 1 研究区概况

1.2 数据来源 选取的遥感数据来自美国地质勘探局 Landsat 系列卫星遥感影像^[18],并选用经 LEDAPS 算法(Landsat 5、7)和 LaSRC 算法(Landsat 8)进行大气校正预处理的表面反照率影像集^[19],通过 GEE 云平台进行数据获取与处理. 综合考虑研究时间跨度与遥感数据有效性,于 1987—2011 年使用 Landsat 5 TM 影像,2012 年使用 Landsat 7 ETM+影像,2013—2018 年使用 Landsat 8 OLI 影像,且均使用了各年度内全部可用影像,使用的影像总数为 5 196 景(图 2).

气象数据下载自国家气象数据中心,包括官厅水库流域内部 3 个气象站点、流域周边 200 km 内 29 个气象站点 1987—2018 年期间的共 1 024 个逐年降水量数据值,其中缺测值数目为 30 个,所处年份、站点分散,对后续分析影响较小. DEM 数据来自 NASA 提供的航天飞机雷达地形测绘数据 SRTM-DEM^[20],分辨率为 30 m. 使用的土地利用数据来自刘纪远等^[21-22]建立的全国土地利用数据库. 这一数据库的原始数

据源包括 Landsat TM、OLI 影像及中国资源一号卫星 CCD 数据,采用土地利用变化遥感信息人机交互快速提取方法进行解译. 本文使用了 1990、2000、2010 和 2015 年共 4 期分辨率为 30 m 的土地利用分类数据.

1.3 研究方法 首先,利用 GEE 平台,获取研究区内遥感影像并进行去云掩膜处理;之后将各年度影像集成中位数合成影像,利用 TSUWI 提取潜在开放水体. 在潜在开放水体的提取结果基础上,利用 DEM 数据生成地形坡度掩膜,叠加提取流域内的开放水体,并开展精度验证、水体动态分析、影响因素分析等工作(图 3).

1.3.1 遥感数据预处理 自 GEE 平台获取的研究区 Landsat 表面反射率影像集的影像数量、品质不稳定,且影像集庞大,无法直接用于水体提取. 故需先对影像进行预处理. 应用常见的 F-Mask 算法对影像进行云层/冰雪掩膜^[23]. 为表征各年份流域水体的一般状况,基于中位数合成遥感影像开展水体提取和分析,

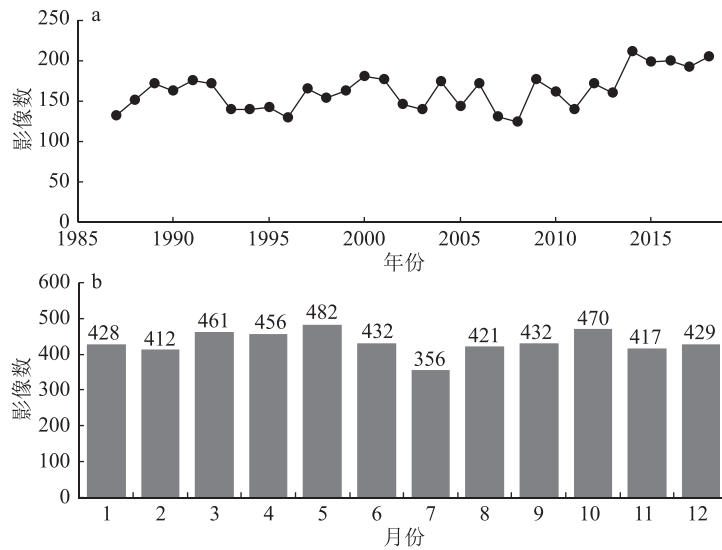


图 2 研究区 Landsat 影像

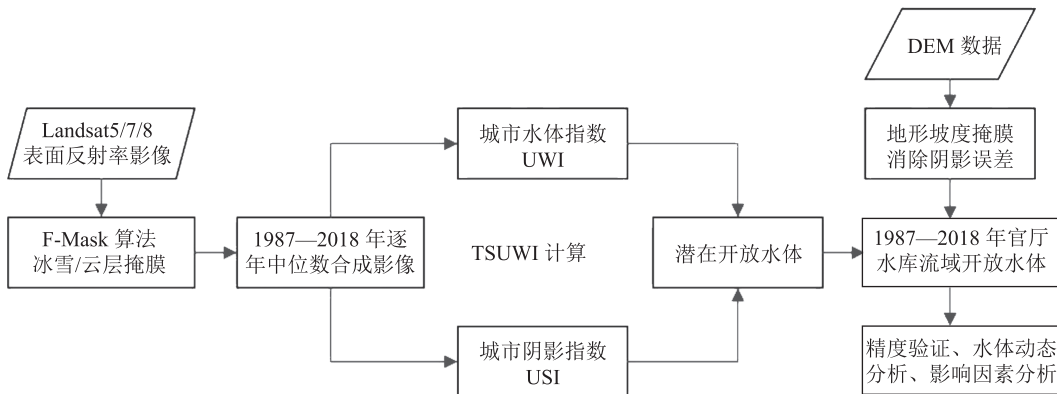


图 3 研究流程

以尽可能多地将影像纳入研究, 并保证不同年份提取结果的可比性, 规避影像选择随机性对水体提取分析的影响。

1.3.2 提取水体 基于 GEE 云平台, 运用 TSUWI 与地形坡度掩膜的联合方法进行地表水体自动化提取。TSUWI 包括联合使用的城市水体指数 (urban water index, UWI) 和城市阴影指数 (urban shadow index, USI)。指数计算式为

$$I_{TSUW} = (I_{UW} > T_1) \wedge (I_{US} > T_2), \quad (1)$$

$$I_{UW} = \frac{G - 1.1 \times R - 5.2 \times R_{NI} + 0.4}{|G - 1.1 \times R - 5.2 \times R_{NI}|}, \quad (2)$$

$$I_{US} = 0.25 \times GR - 0.57 \times R_{NI} / G - 0.83 \times B / G + 1.0, \quad (3)$$

式中: B 、 G 、 R 、 R_{NI} 分别为 Landsat 影像的蓝、绿、红、近红外波段; T_1 、 T_2 分别为 I_{UW} 与 I_{US} 的阈值, 默认使用 0 作为提取阈值^[10]。计算所得 I_{TSUW} 为二值变量, 若 $I_{TSUW}=1$, 则认为该像元是水体, 否则认为该像元为非水体。通过 I_{UW} 与 I_{US} 这 2 个子指数的联合使用, 可有效排除阴

影等暗像元对水体提取的影响, 并互相订正错分误差, 从而达到较高的分类精度。鉴于 I_{TSUW} 在山区复杂地形条件下仍无法完全排除山体阴影的干扰, 本文利用 DEM 数据生产了坡度数据, 并对研究区内坡度 $\geq 10^\circ$ 的像元进行掩膜, 以进一步提高提取精度。

为验证水体提取精度, 选取 1996、2006 和 2016 年 3 个年份的水体提取结果, 以等量分层随机抽样方法选取 500 个样本点, 对照来自 Google Earth 的高分辨率影像及 Landsat TM 影像目视解译的结果, 绘制混淆矩阵, 并计算总体精度 (overall accuracy, OA) 及 Kappa 系数, 以对提取精度进行定量表示^[24]。

1.3.3 分析流域水体的动态 对官厅水库流域水体的动态变化进行了定性与定量分析: 定性方面, 绘制了官厅水库流域水体的空间分布图, 及流域内水体面积的时间序列变化图; 定量方面, 运用了分段线性回归 (piecewise linear regression) 的方式^[25], 依据残差和最小的原则, 对水体面积变化趋势进行定量拟合, 并以此为依据, 对流域开放水体面积变化的不同阶段进行划分。

1.3.4 探讨驱动因素 流域水体面积变化的驱动因素可能包括人类活动与气候变化等. 陈月平^[26]、刘桂环等^[27]、程大珍等^[28]分别指出降水量变化、耕地开垦、水资源开发利用等因素对官厅水库入库水量、官厅水库流域水体面积存在影响. 据此, 本文针对自然与人类活动因素, 对流域水体面积变化驱动强度进行了分析. 自然因素方面, 主要考虑降水量对流域水体面积的影响. 为得到流域内的平均降水量, 需对气象站点年降水量观测数据进行插值处理. 参考现有针对类似区域的降水量插值方法, 选择了反距离权重法 (inverse distance weighting) 进行年降水量插值. 模型参数中, 参考刘劲松等^[29]的研究, 搜索站点数设置为 12, 距离权重设置为 4, 并分区统计官厅水库流域及其各子流域内的逐年平均降水量. 在此基础上, 运用相关分析和分段线性回归方法, 以流域开放水体面积为因变量, 流域前 1 年年均降水量为自变量线性拟合, 进行降水量和水体面积的关系分析. 人类活动因素方面, 主要考虑水资源利用及土地利

用变化对流域水体面积的影响; 水资源利用方面, 根据现有研究结论^[26,30], 考察区域用水量及地下水开采情况对流域水体面积的影响; 土地利用方面, 基于转移矩阵的方法, 通过对多时段水体空间范围变化与土地利用数据的叠加分析, 探讨水体与其余各类用地的转换关系.

2 结果分析

2.1 精度验证 提取的官厅水库流域开放水体面积精度较高. 3 组样本点的平均总体精度为 93.5%, Kappa 系数为 0.871(表 1). 对比现有同类研究, 如: Tian 等^[31]基于哨兵 1 号卫星遥感影像与哨兵 1 号水体指数提取模型, 在洞庭湖流域水体提取中获得了 91.9% 的总体精度与 0.82 的 Kappa 系数; Chen 等^[32]基于 Landsat 8 遥感影像与改进的 NDWI, 在青藏高原地区冰川湖泊提取中, 获得了最高为 97.7% 的总体精度与 0.95 的 Kappa 系数. 本文的水体提取精度与现有研究相似, 提取结果可靠, 可用于进一步研究.

表 1 开放水体提取的精度评价混淆矩阵

年份	TSUWI分类结果(预测值)	Google Earth影像目视解译结果(真实值)			
		水体	非水体	合计	用户精度
1996	水体	241	9	250	96.4%
	非水体	13	237	250	94.8%
	合计	254	246	500	总体精度为95.6%
	生产者精度	94.9%	96.3%		Kappa为0.912
2006	水体	246	4	250	98.4%
	非水体	30	220	250	88.0%
	合计	276	224	500	总体精度为93.2%
	生产者精度	89.1%	98.2%		Kappa为0.864
2016	水体	244	6	250	97.6%
	非水体	35	215	250	86.0%
	合计	279	221	500	总体精度为91.8%
	生产者精度	87.5%	97.3%		Kappa为0.836

2.2 2018 年官厅水库流域水体格局 官厅水库流域内的水体分布不均衡. 2018 年, 官厅水库流域内水体总面积为 164.59 km², 占官厅水库流域总面积的 0.35%. 从子流域角度看: 永定河子流域包括了官厅水库大型开放水体, 水体呈现连片集中特点, 子流域内水体面积为 93.30 km², 占官厅水库流域内水体面积的 56.7%; 桑干河子流域内的水体面积次之, 子流域内水体面积为 59.74 km², 占官厅水库流域水体总面积的 36.3%, 重要的大型开放水体包括桑干河干流上的册田水库、支流上的壶流河水库等; 洋河子流域内的

水体面积最小且分散, 少有大型水体存在, 子流域面积为 11.56 km², 仅占官厅水库流域水体总面积的 7.0%.

2.3 1987—2018 年官厅水库流域水体动态变化 1987—2018 年, 官厅水库流域水体面积总体呈现缓慢上升—快速下降—快速上升的趋势. 根据分段线性拟合残差和最小的原则, 1987—2018 年官厅水库流域开放水体的变化可分为 3 个阶段: 1987—1996 年的缓慢上升期, 1997—2010 年的快速下降期和 2011—2018 年的快速上升期, 除 1987—1996 年外, 线性回归结果均可通过置信度为 99% 的显著性检验(图 4, 表 2). 其中:

1987—1996 年的 10 a 中, 官厅水库流域水体面积增加 54.95 km², 年均增加 5.50 km²; 1997—2010 年, 水体面积快速下降, 这 14 a 中水体面积减少 104.35 km², 年均减少 7.45 km², 至 2010 年, 全流域水体面积减少至 43.06 km², 仅为 1996 年水体面积峰值的 29.2%; 2011—

2018 年, 官厅水库流域水体面积再次呈现上升趋势, 这 8 a 中, 水体面积增加 121.53 km², 年均增加 15.19 km², 2018 年水体面积达到 164.59 km², 为时间序列中的极大值。

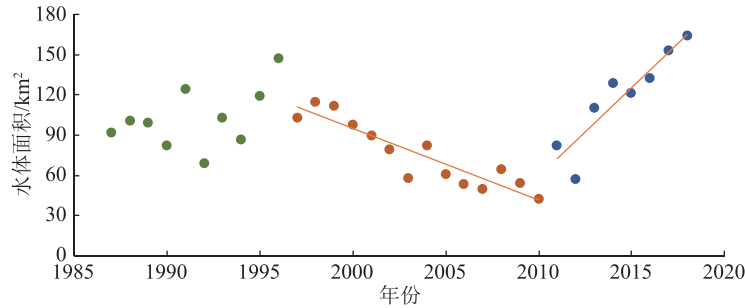


图 4 官厅水库流域 1987—2018 年开放水体面积变化分段拟合结果

表 2 1987—2018 年开放水体面积变化分段拟合方程、相关系数与显著性

时间段	回归方程	决定系数R ²	显著性统计量P
1987—1996	$y=3.462x-6792$	0.212	0.180
1997—2010	$y=-5.344x+10784$	0.840	<0.001
2011—2018	$y=13.23x-26532$	0.842	0.001

1987—2018 年, 子流域尺度上的开放水体变化存在明显差异(图 5-a)。其中, 永定河子流域的流域水体开放面积呈上升—下降—上升的趋势。流域开放水体面积最大值为 97.85 km², 出现于 1996 年; 最小值为 24.03 km², 出现于 2010 年。永定河子流域水体变化与全流域水体面积变化的趋势一致, 水体变化最为强烈, 累计面积变化量绝对值占全流域的 45.9%。桑干河子流域水体面积呈波动上升趋势: 水体面积最大值为 59.74 km², 出现于 2018 年; 最小值为 12.75 km², 出现于 2003 年。洋河子流域水体面积呈上升趋势: 水体面积最大值为 12.62 km², 出现于 2013 年; 最小值为 0.43 km², 出现于 1992 年。

2.4 水体动态变化的影响因素

2.4.1 气候变化因素 降水量与流域开放水体面积具有显著的正相关关系(图 5-b)。1988—2018 年, 官厅水库流域开放水体面积与降水量回归决定系数为 0.291 ($P<0.01$) (表 3)。其中: 1988—1996 年内的回归决定系数最高, 达到 0.459 ($P<0.05$); 2011—2018 年内的回归决定系数为 0.449 ($P<0.1$)。证明上述 2 个时段内流域水体面积与降水量变化的相关性较强, 降水量年际变化是影响官厅水库流域水体面积变化的重要因素。1997—2010 年流域开放水体面积与降水量回归决定系数低且不具显著性, 降水量变化仅在较长时间尺度

上对流域水体面积动态变化造成显著影响。同时, 现有大量研究结果说明, 20 世纪 90 年代后期以来, 官厅水库流域受到了较长时间连续干旱的影响, 降水量异常偏少^[26,33-34]。1997—2010 年官厅水库流域降水量相比 1987—1996 年下降 12.6%, 长期的旱情是开放水体面积下降的原因之一。

表 3 官厅水库流域水体面积和前一年降水量一元线性回归参数

时间段	回归方程	决定系数R ²	显著性统计量P
1988—2018	$y=0.258x-12.940$	0.291	0.002
1988—1996	$y=0.234x+1.153$	0.459	0.045
1997—2010	$y=-0.004x+77.550$	<0.001	0.977
2011—2018	$y=0.428x-76.679$	0.449	0.069

2.4.2 人类活动因素 1997 年后, 人类活动对官厅水库流域水体面积变化的影响进一步增强。基于 Zhou 等^[35] 计算的中国城市年用水量, 官厅水库流域内的张家口、大同、朔州 3 市年用水量自 1987 年的 1.91×10^9 m³ 上升至 2010 年的 2.18×10^9 m³, 增长 14.1%。对官厅水库而言, 于淼等^[34] 指出, 上游用水量的增大、用水结构的变化和水库梯次拦截是官厅水库入库水量下降的主要原因。张建成^[36]、胡润将^[37] 和赵玉峰等^[38] 分别指出, 大同市、朔州市、张家口坝下地区 1997 年来存在不同程度的地下水超采问题, 其中张家口市区 1998—2015 年地下水位下降 >15 m, 且社会经济因素是地下水位下降的主导因素^[30]。地下水位的下降对流域开放水体面积存在负面影响^[30,39]。

官厅水库流域开放水体面积动态变化与土地利用方式转变具有较强关联(图 6)。二者的关联在 2000—2010 年最为显著。在这个阶段, 官厅水库流域

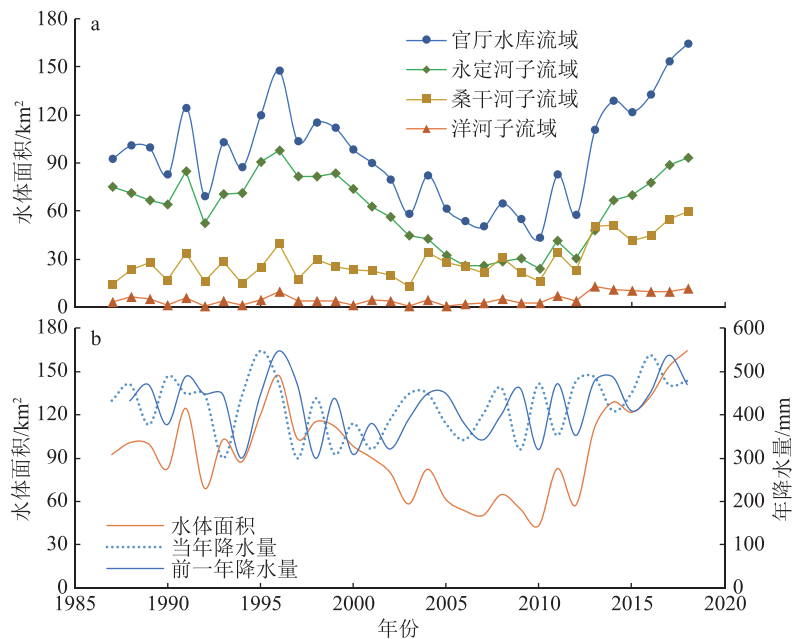


图 5 开放水体面积年际变化 (a) 及 1988—2018 年降水量与水体面积的关系 (b)

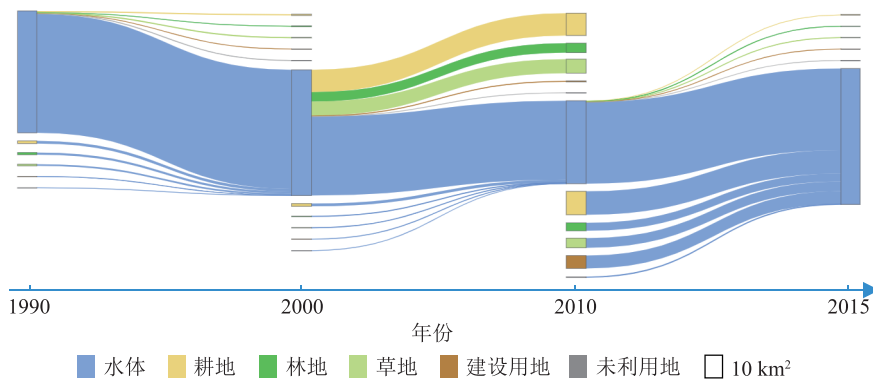


图 6 1990—2015 年官厅水库流域水体与其余用地类型转化情况

内水体表现出强烈的萎缩趋势,用地转化的整体趋势为水体变为非水用地,减少的水体中约 3/4 转变为耕地与草地.此阶段内土地利用方式变化既包括退水河滩地—草地—开垦为耕地的转化路径^[40],也包含围水造田、城乡建设用地扩张等行为对水体的直接占用^[41].1990—2000 年,水体与其余用地类型的转化面积绝对值较小,且主要表现为非水用地转化为水体,这一时期内,人类活动对官厅水库流域水体的影响相对较小.2010—2015 年,官厅水库流域内水体呈现扩张趋势,这一时期内用地转化的趋势为非水用地转化为水体,新增水体面积约 40% 来自耕地,25% 来自建设用地.此阶段内退耕还湿、湿地建设等措施的生态效果开始显现,表现出人类活动对前期不合理开发的修复.

3 结论与讨论

3.1 结论 基于 GEE 平台,运用 TSUWI 和分段线性

回归方法,完成了官厅水库流域 1987—2018 年长时间序列、自动化、定量化的水体动态提取和分析.结论如下:

1)官厅水库流域开放水体面积的时间动态变化呈现“缓慢上升—快速下降—快速上升”的特点:1987—1996 年,流域水体面积波动上升,增加量为 54.95 km²;1997—2010 年水体面积下降显著,减小量为 104.35 km²;2011—2018 年水体面积快速回升,增加量为 121.53 km².

2)降水量的变化与人类活动影响是官厅水库流域水体面积动态变化的主要原因.1987—1996 年降水量的变化是影响水体面积变化波动的主要因素,1997 年后人类活动影响进一步增强,2000—2010 年主要表现为对水资源的过度利用及对水体的破坏与占用,2010 年后则更多表现为对水体的修复与保护.

3.2 讨论 2011 年至今,官厅水库流域水体面积呈现上升趋势,证明生态措施已取得一定成效.21 世纪

以来,北京市、河北省相关单位已针对官厅水库周边及流域开展多项生态恢复举措,重要的措施包括退耕还林(草、湖)、生态涵养林建设、滨水湿地修复及生产生活节水等。如:2004年启动的土地退耕和库滨生态涵养林带建设,3年内共完成6.7 km²区域的生态治理^[42];2009年起,北京、河北两地政府合作进行了京冀生态水源保护林建设^[43];2015年,河北怀来官厅水库国家湿地公园湿地保护与恢复建设项目获批,至2020年10月已完成湿地综合治理35.4 km²,湿地公园正式开园^[44]。此外,技术进步与产业结构的积极调整,降低了流域人类活动用水量。盛文萍等^[45]指出,2013年官厅水库流域内张家口市、延庆区部分总用水量相比2004年下降了约9×10⁸ m³(10.6%),万元GDP耗水量下降约250 m³(75.8%),从而对开放水体恢复起到正面作用。最后,跨流域调水对流域开放水体恢复具有积极作用。万家寨引黄入晋北线工程与南水北调中线工程于2011和2016年先后建成通车,2017年起,万家寨引黄入晋北线工程直接向桑干河进行生态补水,促进了流域开放水体的恢复^[46-47]。

2000年后,人类活动对官厅水库流域水体面积变化的影响进一步增强,流域水资源利用与水体占用/恢复对水体面积有重要的影响。故未来调节人类活动仍将是保护、恢复流域水体的必要措施。为此,有关方面应当采取一定政策措施引导。可行措施主要包括:1)推进湿地公园、流域水源涵养林的建设,在上游河段建立两岸1 km生态岸线,在官厅水库带建立生态缓冲区^[48];2)进一步改善流域水资源利用结构与效率,鼓励发展节水农业、工业,加强公民节水宣传等。

水体提取与分析过程虽获得了精度较高的水体提取效果,并进行了初步的归因分析,但仍存在一些可以改进之处:1)TSUWI最初是用于单景、单期水体提取的方法,不能完全实现快速自动化提取长时间的开放水体,效率有待进一步提升。该问题有望通过利用机器学习方法进行阈值选择等方式得以解决。2)坡度掩膜操作受制于DEM数据的分辨率,无法还原真实地表坡度。故该操作虽降低了山区的水体错分误差,但有引入漏分误差的可能性。考虑到本文所使用的方法已经得到验证^[10],且提取精度较高,故以上的不足并不影响本研究获取区域开放水体信息的有效性。3)受制于气象、水文、人文数据源的限制,对官厅水库流域水体面积变化的影响因素尚未完成定量模型的建立。后续仍可在本研究的基础上,结合更多可用数据开展更深入的定量分析。

4 参考文献

- [1] ZOU Z H, XIAO X M, DONG J W, et al. Divergent trends of open-surface water body area in the contiguous United States from 1984 to 2016[J]. *Proceedings of the National Academy of the Sciences of the United States of America*, 2018, 115(15): 3810
- [2] 师俞晨,王荣华. 中国陆表水空间展布及动态变化分析[J]. *地理信息世界*, 2017, 24(1): 121
- [3] 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
- [4] HANJRA M A, QURESHI M E. Global water crisis and future food security in an era of climate change[J]. *Food Policy*, 2010, 35(5): 365
- [5] LAKE P S. Ecological effects of perturbation by drought in flowing waters[J]. *Freshwater Biology*, 2003, 48(7): 1161
- [6] BOND N R, LAKE P S, ARTHINGTON A H. The impacts of drought on freshwater ecosystems: an Australian perspective[J]. *Hydrobiologia*, 2008, 600(1): 3
- [7] WORK E A, GILMER D S. Utilization of satellite data for inventorying prairie ponds and lakes[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1976, 42(5): 685
- [8] 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
- [9] GAO B C. NDWI: a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 58(3): 257
- [10] WU W, LI Q Z, ZHANG Y, et al. Two-step urban water index (TSUWI): a new technique for high-resolution mapping of urban surface water[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(11): 1704
- [11] GORELICK N, HANCHER M, DIXON M, et al. Google Earth Engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 202: 18
- [12] HANSEN M C, POTAPOV P V, MOORE R, et al. High-resolution global maps of 21st-century forest cover change[J]. *Science*, 2013, 342(6160): 850
- [13] GONG P, LI X C, ZHANG W. 40-Year (1978-2017) human settlement changes in China reflected by impervious surfaces from satellite remote sensing[J]. *Science Bulletin*, 2019, 64(11): 756
- [14] MENG S T, HUANG Q X, ZHANG L, et al. Matches and

- mismatches between the supply of and demand for cultural ecosystem services in rapidly urbanizing watersheds: a case study in the Guanting Reservoir basin, China[J]. *Ecosystem Services*, 2020, 45: 101156
- [15] 刘桂环,文一惠,孟蕊,等. 官厅水库流域生态补偿机制研究:生态系统服务视角[J]. *中国人口·资源与环境*, 2011, 21(增刊2): 61
- [16] HUANG Q X, ZHAO X, HE C Y, et al. Impacts of urban expansion on wetland ecosystem services in the context of hosting the Winter Olympics: a scenario simulation in the Guanting Reservoir basin, China[J]. *Regional Environmental Change*, 2019, 19(8): 2365
- [17] RUBEN G B, ZHANG K, DONG Z C, et al. Analysis and projection of land-use/land-cover dynamics through scenario-based simulations using the CA-Markov model: a case study in Guanting Reservoir basin, China[J]. *Sustainability*, 2020, 12(9): 3747
- [18] WULDER M A, LOVELAND T R, ROY D P, et al. Current status of Landsat program, science, and applications[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 225: 127
- [19] SCHMIDT G L, JENKERSON C B, MASEK J, et al. Landsat ecosystem disturbance adaptive processing system (LEDAPS) algorithm description: U. S. Geological Survey Open-File Report 2013-1057, 17
- [20] FARR T G, ROSEN P A, CARO E, et al. The shuttle radar topography mission[J]. *Reviews of Geophysics*, 2007, 45(2): 361
- [21] 刘纪远,匡文慧,张增祥,等. 20世纪80年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局[J]. *地理学报*, 2014, 69(1): 3
- [22] 刘纪远,宁佳,匡文慧,等. 2010—2015年中国土地利用变化的时空格局与新特征[J]. *地理学报*, 2018, 73(5): 789
- [23] ZHU Z, WOODCOCK C E. Object-based cloud and cloud shadow detection in Landsat imagery[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 118: 83
- [24] 【美】约翰 詹森 R. 遥感数字影像处理导论[M]. 陈晓玲,张展,侯雪娇,等译. 北京:机械工业出版社, 2018: 478-485
- [25] WU X T, WEI Y P, FU B J, et al. Evolution and effects of the social-ecological system over a millennium in China's Loess Plateau[J]. *Science Advances*, 2020, 6(41): 10
- [26] 陈月平. 官厅水库水资源现状分析[J]. *北京水务*, 2007(6): 7
- [27] 刘桂环,文一惠,张惠远. 基于生态系统服务的官厅水库流域生态补偿机制研究[J]. *资源科学*, 2010, 32(5): 856
- [28] 程大珍,陈民,史世平,等. 永定河上游人类活动对降雨径流关系的影响[J]. *水利水电工程设计*, 2001, 20(2): 19
- [29] 刘劲松,陈辉,杨彬云,等. 河北省年均降水量插值方法比较[J]. *生态学报*, 2009, 29(7): 3493
- [30] 丁宏伟,张荷生. 近50年来河西走廊地下水资源变化及对生态环境的影响[J]. *自然资源学报*, 2002, 17(6): 691
- [31] TIAN H, WANG J, PEI J, et al. High spatiotemporal resolution mapping of surface water in the Southwest Poyang Lake and its responses to climate oscillations[J]. *Sensors*, 2020, 20(17): 4872
- [32] CHEN F, ZHANG M M, TIAN B S, et al. Extraction of glacial lake outlines in Tibet Plateau using landsat 8 imagery and google earth engine[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, 10(9): 4002
- [33] 贾琪璟. 官厅水库流域降水量的时间变化分析[J]. *北京水务*, 2010(4): 16
- [34] 于淼,魏源送,刘俊国,等. 永定河(北京段)水资源、水环境的变迁及流域社会经济发展对其影响[J]. *环境科学学报*, 2011, 31(9): 1817
- [35] ZHOU F, BO Y, CIAIS P, et al. Deceleration of China's human water use and its key drivers[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, 117(14): 7702
- [36] 张建成. 大同市地下水超采区地下水位回升线性预测分析[J]. *地下水*, 2017, 39(4): 65
- [37] 胡润将. 朔州市地下水超采区现状及治理对策[J]. *山西水利*, 2018, 34(4): 3
- [38] 赵玉峰,罗专溪,于亚军,等. 京津冀西北典型区域地下水位时空演变及驱动因素[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(6): 1301
- [39] WINE M L, RIMMER A, LARONNE J B. Agriculture, diversions, and drought shrinking Galilee Sea[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 651: 70
- [40] 武鹏飞,宫辉力,周德民. 基于复杂网络的官厅水库流域土地利用/覆被变化[J]. *地理学报*, 2012, 67(1): 113
- [41] 侯蕾,彭文启,刘培斌,等. 永定河上游流域土地利用变化及生态环境效应研究[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2017, 15(6): 430
- [42] 袁博宇,张跃武. 官厅水库流域水生态环境修复与治理效果研究[C]/*民生水利:理念与行动:中国水利学会2010学术年会论文集*. 贵阳:知网, 2010: 38
- [43] 张连伟,张琳. 北京永定河流域生态环境的演变和治理[J]. *北京联合大学学报(人文社会科学版)*, 2017, 15(1): 118
- [44] 冯哲,郑洋. 库滨湿地生态修复研究及其工程应用:以官厅水库国家湿地公园为例[J]. *湿地科学与管理*, 2020, 16(2): 4
- [45] 盛文萍,甄霖,闵庆文. 京冀水资源生态合作成效与建议:以官厅水库为例[J]. *生态经济*, 2017, 33(9): 160
- [46] 杜勇,万超,杜国志,等. 永定河全线通水需水量及保障方案研究[J]. *水利规划与设计*, 2020(7): 14

- [47] 康姁, 袁敏洁. 南水北调中线向永定河生态补水条件分析[J]. 水利发展研究, 2020, 20(12): 38
- [48] 张君伟, 万超, 杜国志, 等. 官厅水库生态节点规划建设探索与思考[J]. 水利发展研究, 2020, 20(9): 24

Dynamics of open-surface water in Guanting Reservoir basin: a Google Earth Engine platform study

JIAO Chentai¹⁾ SONG Shixiong^{1,2)} HUANG Qingxu^{1,2)†} XIA Xianwang¹⁾ ZHANG Ying¹⁾

(1) Center for Human-Environment System Sustainability (CHESS), State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology (ESPRE), Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2) School of Natural Resources, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract Open-surface water plays an important role in social-ecological system. Dynamics of open-surface water has significant effect on variations in water resource supply and ecological integrity. Timely long-term monitoring of open-surface water would provide guidance for protection and sustainable utilization of water resources. The Google Earth Engine platform was used to extract 5196 Landsat TM, ETM+ and OLI images from 1987 to 2018, which were then processed and composed to medians per year. The two-step urban water index and slope-mask method were then used to obtain long-term dynamics of open-surface water in Guanting Reservoir basin. Validation revealed an overall accuracy of up to 93.5% with a Kappa coefficient of 0.87. Piecewise linear regression was applied to analyze the dynamics of open-surface water. The open-surface water from 1987 to 2018 experienced a slow increase, followed by a rapid decrease, and a sharp increase. The average annual changes in open-surface water area were found to be 5.50 km² during the slow increase period from 1987 to 1996, -7.45 km² during the rapid decrease period from 1997 to 2010, and 15.19 km² during the sharp increase period from 2011 to 2018. Variations in annual precipitation had major influence on the area of open-surface water, with a regression determination coefficient of 0.29 ($P < 0.01$). Anthropogenic impacts, i.e., increased water consumption from both open-surface water and groundwater, and land use change associated with open-surface water, became more notable after 1997. This study provides helpful tips for water resource protection and regional sustainable development in the context of rapid urbanization.

Keywords urbanizing basin; water index; Google Earth Engine (GEE); remote sensing big data; urban sustainability

【责任编辑: 刘先勤】