

# 近30年京津冀地区湖泊面积的变化

张恒<sup>1</sup> 陶胜利<sup>2</sup> 唐志尧<sup>1</sup> 方精云<sup>1,†</sup>

1. 北京大学城市与环境学院生态学系, 北京 100871; 2. Laboratoire Evolution et Diversité Biologique (EDB), Université Toulouse III -Paul Sabatier, Toulouse 31013; †通信作者, E-mail: jyfang@urban.pku.edu.cn

**摘要** 利用遥感、气候和社会经济统计数据, 探究1987—2017年间京津冀地区湖泊面积的变化及其与自然和社会因素的关系。结果表明, 该地区湖泊面积过去30年间整体上呈减少趋势, 每年减少约2%, 这是自然和人为因素双重影响的结果。可分为3个阶段: 前10年(1987—1996年), 湖泊面积增加约 $4.8 \times 10^2 \text{ km}^2$  (约占76%), 由自然因素主导( $R^2=0.849$ ,  $p=0.001$ ); 1997—2009年的13年间, 湖泊面积呈减少趋势(减少约 $4.7 \times 10^2 \text{ km}^2$ , 占43%), 主要由人为因素主导( $R^2=0.536$ ,  $p=0.013$ ); 最近8年(2010—2017年)中, 湖泊面积呈增加趋势(增加约 $2.3 \times 10^2 \text{ km}^2$ , 占36%), 也主要由人为因素导致。虽然最近8年来该地区湖泊面积减少的趋势得到扭转, 但地表水资源供需矛盾仍然严峻。

**关键词** 京津冀地区; 湖泊面积变化; 归一化水体指数; 相对水体面积变化率

## Lake Area Changes in Jing-Jin-Ji Region in Recent 30 Years

ZHANG Heng<sup>1</sup>, TAO Shengli<sup>2</sup>, TANG Zhiyao<sup>1</sup>, FANG Jingyun<sup>1,†</sup>

1. Department of Ecology, College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871;  
2. Laboratoire Evolution et Diversité Biologique (EDB), Université Toulouse III -Paul Sabatier, Toulouse 31013;  
† Corresponding author, E-mail: jyfang@urban.pku.edu.cn

**Abstract** By using remote sensing data, climatic data and socio-economic data, this study revealed that the lake area of Jing-Jin-Ji region tended to an overall decrease between 1987 and 2017 (approximately 2% per year) due to effects of both natural and human factors. The 30-year lake area change could be divided into three periods: in 1987–1996, it increased (about  $4.8 \times 10^2 \text{ km}^2$ , 76%) as a consequence of climate changes ( $R^2=0.849$ ,  $p=0.001$ ); during 1997–2009, it decreased (about  $4.7 \times 10^2 \text{ km}^2$ , 43%) because of intense human impacts ( $R^2=0.536$ ,  $p=0.013$ ); and in the recent eight years (2010–2017), it increased again (about  $2.3 \times 10^2 \text{ km}^2$ , 36%) due to human regulations. Although the severe lake decreasing trend of the study region has been reversed in recent eight years, the contradiction between supply and demand of surface water is still remarkable.

**Key words** Jing-Jin-Ji region; lake area change; normalized difference water index; relative water area

京津冀地区位于中国华北, 是中国北方经济核心区, 国内生产总值占全国的10.2%, 城镇化水平显著高于全国平均水平<sup>[1-2]</sup>。虽然京津冀地区面积仅占国土面积的2.3%, 该地区总人口却占全国总人口的8.1%, 人口密度是全国平均水平的3.6倍<sup>[2]</sup>。京津冀地区水资源压力位于全国前列, 其体量庞大的工业和农业生产、城市化扩张以及水体污染消耗大量的可利用水资源<sup>[3]</sup>, 相对不利的气候条件使该

地区水资源供需矛盾更加突出<sup>[4-5]</sup>。2017年的统计数据显示, 京津冀地区的水资源总量约为 $18 \times 10^9 \text{ m}^3$ , 仅占全国的0.6%, 人均水资源量只有全国平均值的6.5%<sup>[2]</sup>。水资源匮乏成为限制京津冀地区可持续发展的主要因素之一<sup>[3-4]</sup>。

作为地表水资源的重要组成部分, 陆地湖泊与局部地区水资源的各个部分存在联通性, 能直观地反映该地区地表水资源的变化趋势<sup>[6-7]</sup>。研究湖泊

国家自然科学基金(31621091)资助

收稿日期: 2019-01-31; 修回日期: 2019-03-09

的面积变化,对地区湖泊资源和水资源的可持续利用和管理具有指导意义<sup>[8]</sup>。近年来,利用高分辨率遥感卫星影像研究区域乃至全球尺度长时间序列(约30年)的湖泊变化趋势成为热点,因素分析揭示出自然和人为因素共同影响湖泊面积的变化<sup>[9-10]</sup>。对京津冀地区湿地变化的研究(利用7期土地覆盖数据)显示,近30年来该地区湿地面积呈现先略微增长、后明显下降的趋势<sup>[11]</sup>。

然而,关于京津冀地区湖泊变化的系统研究仍十分缺乏,定量地研究京津冀地区湖泊面积的变化趋势及其驱动因素具有重要的现实意义,可为京津冀地区的可持续发展提供必要的科学支撑。遥感技术的广泛应用为湖泊的动态变化监测提供了理想的方法,长期积累的高分辨率卫星影像数据为长时间跨度的湖泊变化分析提供了有利保障<sup>[9-10,12]</sup>。本文利用遥感数据,通过定量分析京津冀地区湖泊面积的变化,研究自然因素和人为因素对京津冀地区水资源和水环境的影响。

## 1 数据和方法

### 1.1 构建数据库

#### 1.1.1 湖泊水体数据

使用1987—2017年美国航空航天局(NASA)的陆地卫星Landsat 5 Thematic Mapper (TM), Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)和Landsat 8 Operational Land Imager (OLI)卫星遥感影像监测湖泊面积变化。为了准确地提取陆地湖泊水体,首先在谷歌地球引擎(Google Earth Engine)平台<sup>[13]</sup>上选取6—9月30 m分辨率Tier 1等级Landsat卫星的大气表观反射率数据(top-of-atmosphere reflectance)作为每年的影像集合。然后,采用最小云量影像方法,对每年的影像集合进行合成并拼接,得到一幅无云影像。使用归一化水体指数(normalized difference water index, NDWI)检测遥感影像中的水体(该方法广泛应用于水体识别和湖泊检测的研究中,准确度高达98%<sup>[10,14-15]</sup>)。Landsat 5 TM影像和Landsat 7 ETM+影像采用式(1)计算NDWI, Landsat 8 OLI影像采用式(2)计算NDWI:

$$\text{NDWI} = \frac{\text{band2} - \text{band5}}{\text{band2} + \text{band5}}, \quad (1)$$

$$\text{NDWI} = \frac{\text{band3} - \text{band6}}{\text{band3} + \text{band6}}. \quad (2)$$

接下来,对照谷歌地球(Google Earth)的高分辨率影

像,仔细地去除河流和滨海地区的地表水体。最后,选择1988, 1997和2017年3期影像,统计3年影像中出现的面积大于0.5 km<sup>2</sup>的湖泊水体,得到113个监测水体(图1)。使用ArcGIS软件(版本号为10.3, ESRI<sup>®</sup>),在Albert等面积投影中计算得到监测水体的面积。

一个地区湖泊面积的总体变化趋势可以采用相对水体面积变化率(relative water area, RWA)进行定量的描述<sup>[10]</sup>。该指数能够消除湖泊大小差异对变化率的影响,已广泛应用于湖泊变化的研究中。本文采用式(3)<sup>[16]</sup>计算RWA:

$$\text{RWA}(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{A_i^t - \bar{A}_i}{\bar{A}_i}, \quad (3)$$

$n$ 表示湖泊数量, $A_i^t$ 表示第*i*个湖泊在第*t*年的面积, $\bar{A}_i$ 表示第*i*个湖泊在1987—2017年的平均面积(若湖泊干涸,按面积为0计算)。

#### 1.1.2 气候数据

作为重要的气候指标,温度和降水量对湖泊面积的变化有显著影响<sup>[9]</sup>。本研究的气候数据来自中国区域地面气象要素数据集<sup>[17-18]</sup>。基于1987—2016年0.1°×0.1°空间分辨率的气温和降水数据,计算京津冀地区的年平均温度(mean annual temperature, MAT)、年降水量(annual precipitation, AP)、水分盈余量(water surplus, WS)和Thornthwaite水分指数(Thornthwaite's moisture index,  $I_m$ )。Thornthwaite水分指数(简称水分指数)按式(4)<sup>[19-20]</sup>计算:

$$I_m = \frac{100 \times \text{WS} - 100 \times \text{WD}}{\text{PET}}, \quad (4)$$

式中,WD表示水分亏缺量(water deficit),PET表示最大潜在蒸散量(potential evapotranspiration)。为了更准确地计算水分盈余量和水分指数,使用全球根区土壤持水量的数据<sup>[21]</sup>,经过自适应样条插值降尺度,用以匹配中国区域地面气象要素数据集。年平均温度、年降水量、水分指数与相对水体面积变化有显著的滞后一年趋势,故下面分析中这些因素均采用滞后一年的数据。

#### 1.1.3 土地利用数据

土地利用数据来自欧洲航空航天局发布的1992—2015年Climate Change Initiative Land Cover (ESA-CCI-LC)土地利用数据<sup>[22]</sup>(<https://www.esa-land-cover-cci.org/>)。提取每年京津冀地区农田和城市建成区的区域,并计算面积。趋势分析显示,京津冀地

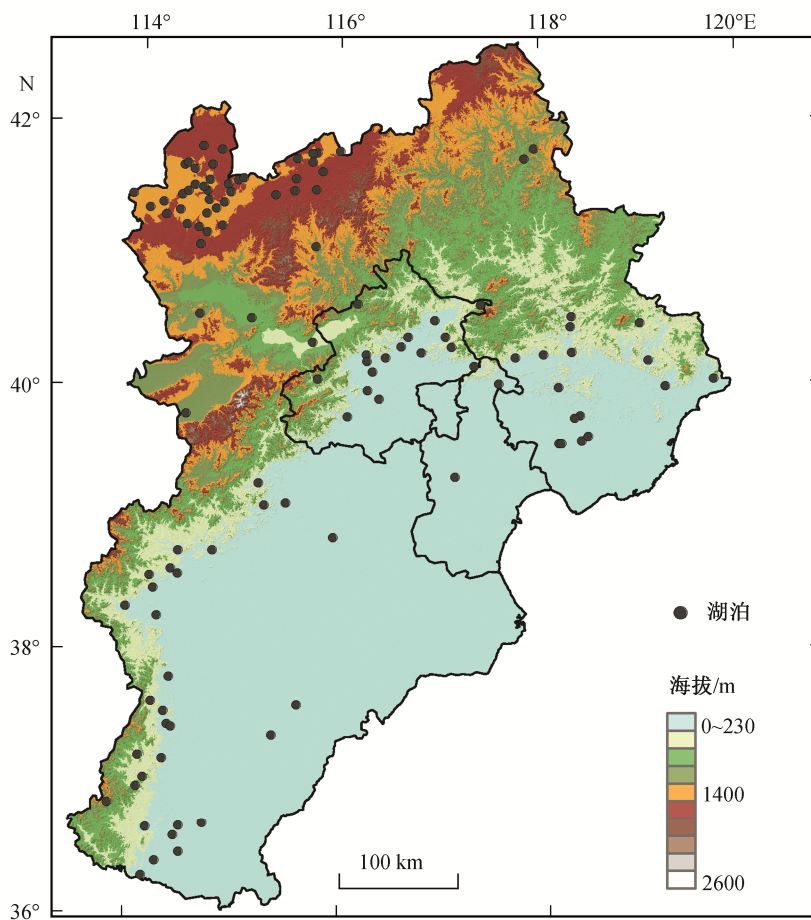


图 1 京津冀地区湖泊分布  
Fig. 1 Distribution of lakes in Jing-Jin-Ji region

区城市面积自 2000 年以来快速增加( $p < 0.001$ ), 而农田面积则有小幅度的下降(约 7.3%)。

#### 1.1.4 社会经济数据

使用 1988—2017 年《中国统计年鉴》<sup>[23]</sup>、《河北经济年鉴》<sup>[24]</sup>、《北京统计年鉴》<sup>[25]</sup>、《天津统计年鉴》<sup>[26]</sup>和部分河北省地级市年鉴中人口数量、国内生产总值、农产品产量、工业产品产量和城市生活供水量等数据, 建立京津冀地区 1987—2016 年社会经济数据库。

京津冀地区的农业生产(包括种植业和畜牧业)占据一半以上的耗水量<sup>[27]</sup>。对于《水污染防治行动计划》(“水十条”)中明确划分的高耗水行业, 京津冀地区占全国很大的比重(钢铁 28.8%, 石油 19.1%, 电力 7.7%, 化工 5.4%)<sup>[23,28-29]</sup>。城市化过程伴随着城市面积和城市人口增加, 假定每个城市居民消耗的水资源量保持稳定且城市供水量与用水量达到平衡, 那么城市化对水资源的影响可由城市生

活供水量衡量。另外, 自 2014 年以来, 南水北调中线工程为京津冀地区持续输送清洁水源, 调水量逐年增加, 明显地缓和了京津冀地区水资源紧张的形势<sup>[30-31]</sup>。因此, 我们收集南水北调输水量, 单独进行讨论。

我们采用不同指标来定量描述社会经济的不同方面: 将人为因素拆分成生产因素、城市化因素与调水因素 3 个类型。生产因素由国内生产总值(gross domestic product, GDP)衡量, 其中, 农业生产因素包括农作物产量和畜产品产量(称农产品产量), 工业生产因素包括发电量、钢铁产量、石油产量和化工产品等产量; 城市化因素包括城市生活供水量; 调水因素是南水北调中线工程受水量。

#### 1.2 分析方法

我们采用 Theil-Sen 稳健回归、Mann-Kendall 趋势检验和相关性分析方法, 定量地分析自然因素和人为因素对于京津冀地区湖泊面积变化的影

响<sup>[32-35]</sup>。这些统计方法广泛应用于水文与气候的研究中<sup>[36-37]</sup>。在趋势分析的基础上,采用多元线性回归模型,进一步衡量不同时期和局域尺度上各类因素的相对贡献。趋势分析与回归分析使用R软件(版本号为3.5.1)完成<sup>[38]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 湖泊整体面积的变化

图2显示1987—2017年间京津冀地区湖泊相对面积的变化。整体而言,湖泊面积呈现下降趋势( $\tau=-0.342, p=0.007$ ),平均下降幅度约为每年2%。

我们采用Spearman相关性分析方法,检验各因素与湖泊面积变化的相关程度(表1)。结果显示,近30年京津冀地区湖泊面积的变化受到自然因素和人为因素的共同影响。

### 2.2 不同时期湖泊面积的变化

京津冀地区湖泊面积变化呈现先波动上升,后直线下降,最后再次波动上升的3个不同变化时期(图2)。湖泊面积在1996年达到峰值,在2009年达到最小值。据此,可将研究期的30年划分为1987—1996年、1997—2009年和2010—2017年3个时

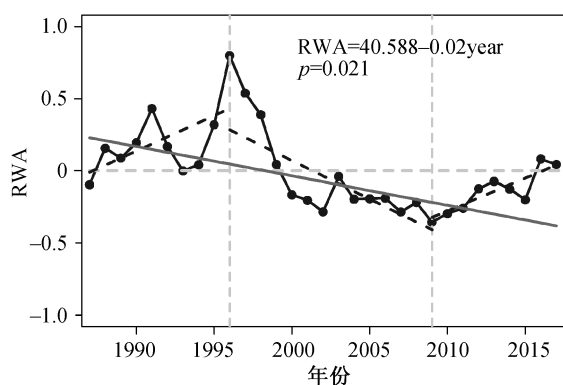


图2 1987—2017年京津冀地区湖泊相对水体面积变化率  
Fig. 2 Change in relative water area (RWA) of lakes in Jing-Jin-Ji region between 1987 and 2017

表1 1987—2017年京津冀地区湖泊相对水体面积变化的相关性分析

影响因素类型	影响因素	相关性系数	<i>p</i>
自然因素	水分指数	0.383	0.038**
	水分盈余量	0.349	0.059*
人为因素	GDP	-0.580	0.002**
	城市生活供水量	-0.585	0.001**

注: \*\*  $p < 0.05$ , \*  $0.05 \leq p < 0.1$ 。下同。

期。在此基础上,利用多元线性回归分析方法,定量地探究不同时期湖泊面积变化的主导因素。

#### 2.2.1 1987—1996年

1987—1996年,京津冀地区湖泊面积呈现波动上升的趋势( $\tau=0.378, p=0.152$ )。1996年的湖泊面积比1987年增加约 $4.8 \times 10^2 \text{ km}^2$ (约76%)。线性回归分析结果显示,这个时期自然因素是湖泊面积变化的主导因素(表2)。

#### 2.2.2 1997—2009年

土地利用变化分析结果显示,京津冀地区城市面积自2000年以来快速增长,城市化进程加快,同时,农作物产量持续增长,工业产品产量(如钢铁产量和发电量)保持高速增长态势。Mann-Kendall趋势分析结果表明,1997—2009年间,京津冀地区湖泊面积显著减少( $\tau=-0.641, p=0.003$ ),2009年的湖泊面积比1996年减少约 $4.7 \times 10^2 \text{ km}^2$ (约43%),但年降水量、水分指数却呈增加趋势(年降水量的 $\tau=0.333, p=0.127$ ;水分指数的 $\tau=0.308, p=0.161$ ),故气候变化不是导致京津冀地区湖泊面积减少的因素。人为因素(如工业生产和城市化因素)与整个地区湖泊面积减少趋势呈显著线性关系(钢铁产量的 $R^2=0.326, p=0.024$ ;发电量的 $R^2=0.443, p=0.008$ ;石油产量的 $R^2=0.442, p=0.008$ ;化工产品产量的 $R^2=0.477, p=0.005$ ;城市生活供水量的 $R^2=0.560, p=0.003$ )。

线性回归分析结果显示,这个时期人为因素对京津冀地区湖泊面积的变化有显著影响(表3),快速增长的工农业生产和城市化进程大量消耗该地区

表2 1987—1996年京津冀地区湖泊相对水体面积变化的线性回归分析

Table 2 Linear regression analyses on changes in RWA of lakes in Jing-Jin-Ji region between 1987 and 1996

影响因素类型	变量组合	$R^2$	<i>p</i>
自然因素	水分指数+水分盈余量	0.849	0.001**
人为因素	GDP+城市生活供水量	0.314	0.264

表3 1997—2009年京津冀地区湖泊相对水体面积变化的线性回归分析

Table 3 Linear regression analyses on changes in RWA of lakes in Jing-Jin-Ji region between 1997 and 2009

影响因素类型	变量组合	$R^2$	<i>p</i>
自然因素	水分指数+水分盈余量	0.059	0.296
人为因素	GDP+城市生活供水量	0.536	0.013**

的地表水资源,导致湖泊持续萎缩,甚至干涸,人类活动对京津冀地区湖泊面积的变化起负向作用。

### 2.2.3 2010—2017 年

京津冀地区湖泊面积的变化趋势自 2010 年来由负转正( $\tau=0.571, p=0.063$ ), 2017 年的湖泊面积比 2009 年增加约  $2.3 \times 10^2 \text{ km}^2$  (约 36%), 说明地表水资源持续减少的趋势得到一定程度的改善。Mann-Kendall 趋势分析结果显示, 这个时期京津冀地区气候条件可能不利于湖泊面积增长(年降水量的  $\tau=-0.238, p=0.548$ ; 水分指数的  $\tau=-0.238, p=0.548$ )。在排除气候因素影响后, 2010—2017 年人为因素主导该地区湖泊面积的变化, 但这个时期人为因素起正向作用。

我们推测, 这一增长趋势可能由 3 个方面的因素导致: 一是京津冀地区总用水量减少或增速大幅度放缓, 水资源循环利用率增加; 二是外流域调水量增加, 水资源供求矛盾有所缓解; 三是生态环境用水增加, 河湖水系得到水源补充。据《中国统计年鉴》数据, 与 2010 年相比, 京津冀地区 GDP 在 2016 年增加 72.9%, 但农业用水量和工业用水量却分别下降 11.8% 和 5.5%<sup>[23]</sup>。关于再生水利用的研究结果显示, 2015 年该地区再生水利用总量是 2005 年的 4.06 倍<sup>[39]</sup>。南水北调中线工程明显地提高了京津冀地区的水资源承载力<sup>[40]</sup>。截至 2018 年 9 月, 该工程为京津冀地区累计供水约  $10 \times 10^9 \text{ m}^3$ , 缓解了大城市水资源紧张的局势, 部分地区的地下水位出现回升现象<sup>[41]</sup>。另外, 近年来京津冀地区生态环境用水占比逐步上升, 部分地区河湖水系得到有效的水

源补充<sup>[42]</sup>。据《中国水资源公报》数据, 2017 年京津冀地区生态用水量达到约  $2.6 \times 10^9 \text{ m}^3$ , 而 2011 年仅为  $0.92 \times 10^9 \text{ m}^3$ , 6 年间增长 184%<sup>[43-44]</sup>。这些证据说明, 在 2010—2017 年这一时期, 人为因素对京津冀地区湖泊面积的变化起到正向作用。

尽管近年来京津冀地区水资源供需紧张的矛盾有明显的改善, 但没有从根本上解决, 体量庞大的农业生产仍主要依赖过量开采地下水来维持<sup>[9,45-46]</sup>。虽然有南水北调工程的水分补给, 该地区仍然面临可利用水资源匮乏的困境<sup>[40]</sup>。

## 2.3 不同区域湖泊面积变化

京津冀地区有平原、山地、高原等多种地貌类型, 气候复杂多样, 自然因素具有较大的区域异质性<sup>[5,47]</sup>。另一方面, 该地区经济发展不均衡, 北京和天津两个直辖市集中了社会经济的优势资源, 导致区域内部人为因素的分布存在明显差异<sup>[48]</sup>。为研究湖泊面积变化驱动因素的空间分布特点, 我们对京津冀地区各地级市或直辖市的湖泊逐个进行研究, 并比较自然因素和人为因素的相对影响。我们发现, 在 13 个地级市或直辖市中, 承德、张家口、保定、沧州和北京 5 个城市的湖泊面积呈现减少的趋势。

使用线性回归分析方法, 进一步分析 5 个地级市或直辖市湖泊面积减少的原因。由于缺少地级市城市生活供水量数据, 我们用城市建成区面积代替城市生活供水量来衡量城市化因素的影响(两者的 Pearson 相关系数  $r=0.919, p<0.001$ )。结果(表 4)表明, 张家口和北京湖泊面积减少主要由人为因素

表 4 1987—2017 年京津冀地区各地级市或直辖市湖泊相对水体面积变化的线性回归分析

Table 4 Linear regression analyses on changes in RWA of lakes in the cities of Jing-Jin-Ji region between 1987 and 2017

城市	影响因素类型	变量组合	$R^2$	$p$
承德	自然因素	水分指数+水分盈余量	0.299	0.004**
	人为因素	GDP+城市建成区面积	—	—
张家口	自然因素	水分指数+水分盈余量	0.069	0.150
	人为因素	GDP+城市建成区面积	0.558	<0.001**
保定	自然因素	水分指数+水分盈余量	0.576	<0.001**
	人为因素	城市建成区面积	0.093	0.081*
沧州	自然因素	水分指数+水分盈余量	0.374	0.001**
	人为因素	GDP	0.107	0.046*
北京	自然因素	水分指数+水分盈余量	0.194	0.023*
	人为因素	城市建成区面积	0.534	<0.001**

说明: “—”表示无法建立可行解释模型。

导致,其余地级市或直辖市的减少趋势主要受自然因素影响。

### 3 结论

最近30年(1987—2017年)京津冀地区湖泊面积变化经历了增加、减少、再增加3个不同时期,这种变化受自然因素和人为因素的共同影响。第一个时期主要受自然因素影响,后两个时期主要受人为因素影响。第二个时期人为因素起负向作用,第三个时期人为因素起正向作用。从行政区划来看,近30年,承德、张家口、保定、沧州和北京5个城市的湖泊面积呈现减少趋势,其中张家口和北京湖泊面积的减少主要由人为因素导致。

致谢 研究工作得到北京大学生态研究中心的帮助,在此表示衷心的感谢。

### 参考文献

- [1] 陆大道. 京津冀城市群功能定位及协同发展. 地理科学进展, 2015, 34(3): 265–270
- [2] 河北省人民政府. 河北经济年鉴——2017. 北京: 中国统计出版社, 2017
- [3] Cai Jialiang, Varis O, Yin He. China's water resources vulnerability: a spatio-temporal analysis during 2003–2013. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 142: 2901–2910
- [4] 封志明, 刘登伟. 京津冀地区水资源供需平衡及其水资源承载力. *自然资源学报*, 2006, 21(5): 689–699
- [5] 李鹏飞, 刘文军, 赵昕奕. 京津冀地区近50年气温、降水与潜在蒸散量变化分析. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(3): 137–143
- [6] Sophocleous M. Interactions between groundwater and surface water: the state of the science. *Hydrogeology Journal*, 2002, 10(1): 52–67
- [7] Winter T C. Relation of streams, lakes, and wetlands to groundwater flow systems. *Hydrogeology Journal*, 1999, 7(1): 28–45
- [8] 杨桂山, 马荣华, 张路, 等. 中国湖泊现状及面临的重大问题与保护策略. *湖泊科学*, 2010, 22(6): 799–810
- [9] Pekel J F, Cottam A, Gorelick N, et al. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, 2016, 540: 418–422
- [10] Tao Shengli, Fang Jingyun, Zhao Xia, et al. Rapid loss of lakes on the Mongolian Plateau. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2015, 112(7): 2281–2286
- [11] 吕金霞, 蒋卫国, 王文杰, 等. 近30年来京津冀地区湿地景观变化及其驱动因素. *生态学报*, 2018, 38(12): 4492–4503
- [12] Fang Leqi, Tao Shengli, Zhu Jiangling, et al. Impacts of climate change and irrigation on lakes in arid northwest China. *Journal of Arid Environments*, 2018, 154: 34–39
- [13] Gorelick N, Hancher M, Dixon M, et al. Google Earth Engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 202: 18–27
- [14] McFeeters S K. The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, 17(7): 1425–1432
- [15] Xu Hanqiu. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, 27(14): 3025–3033
- [16] Fang Jingyun, Wang Zhiheng, Zhao Shuqing, et al. Biodiversity changes in the lakes of the Central Yangtze. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2006, 4(7): 369–377
- [17] Chen Yingying, Yang Kun, He Jie, et al. Improving land surface temperature modeling for dry land of China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2011, 116(D20): D20104
- [18] Yang Kun, He Jie, Tang Wenjun, et al. On downward shortwave and longwave radiations over high altitude regions: observation and modeling in the Tibetan Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, 150(1): 38–46
- [19] Thornthwaite C W. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 1948, 38(1): 55–94
- [20] Fang Jingyun, Yoda K. Climate and vegetation in China III water balance and distribution of vegetation. *Ecological Research*, 1990, 5(1): 9–23
- [21] Wang-Erlandsson L, Bastiaanssen W G M, Gao H, et al. Global root zone storage capacity from satellite-based evaporation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2016, 20(4): 1459–1481
- [22] Hollmann, R, Merchant C J, Saunders R, et al. The

- ESA climate change initiative: satellite data records for essential climate variables. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2013, 94(10): 1541–1552
- [23] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 1988–2018
- [24] 河北省人民政府. 河北经济年鉴. 北京: 中国统计出版社, 1988–2017
- [25] 北京市统计局. 北京统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 1988–2017
- [26] 天津市统计局. 天津统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 1988–2017
- [27] Zhao Dandan, Tang Yu, Liu Junguo, et al. Water footprint of Jing-Jin-Ji urban agglomeration in China. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 167: 919–928
- [28] 国务院. 水污染防治行动计划[EB/OL]. (2015–04–16) [2018–12–26]. [http://fgs.mee.gov.cn/fg/gwyfbdg/fxwj/201811/t20181129\\_676575.shtml](http://fgs.mee.gov.cn/fg/gwyfbdg/fxwj/201811/t20181129_676575.shtml)
- [29] 石效卷, 李璐, 张涛. 水十条 水实条——对《水污染防治行动计划》的解读. *环境保护科学*, 2015, 41(3): 1–3
- [30] 张欧亚, 孟静, 李启东. 南水北调中线工程通水 3 年, 累计向京津冀豫送水 114 亿立方米[EB/OL]. (2017–12–13) [2018–12–16]. [http://www.hubei.gov.cn/zwgk/hbyw/hbywqb/201712/t20171213\\_1234134.shtml](http://www.hubei.gov.cn/zwgk/hbyw/hbywqb/201712/t20171213_1234134.shtml)
- [31] 马立亚, 吴泽宇, 雷静, 等. 南水北调中线一期工程水量调度方案研究. *人民长江*, 2018, 49(13): 59–64
- [32] Theil H. Henri Theil's contributions to economics and econometrics. Berlin: Springer-Verlag, 1992
- [33] Sen P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 1968, 63: 1379–1389
- [34] Mann H B. Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 1945, 13(3): 245–259
- [35] Kendall M. Rank correlation methods. Oxford: Charles Griffin, 1948
- [36] Burn D H, Elnur M A H. Detection of hydrologic trends and variability. *Journal of Hydrology*, 2002, 255(1/2/3/4): 107–122
- [37] Hess A, Iyer H, Malm W. Linear trend analysis: a comparison of methods. *Atmospheric Environment*, 2001, 35(30): 5211–5222
- [38] R Core Team. R: A language and environment for statistical computing [EB/OL]. (2013) [2018–07–05]. <https://www.r-project.org/>
- [39] 张秀智. 京津冀等七大城市群节约用水和再生水利用状况比较分析. *给水排水*, 2017, 53(7): 39–48
- [40] 韩雁, 张士锋, 吕爱锋. 外调水对京津冀水资源承载力影响研究. *资源科学*, 2018, 40(11): 2236–2246
- [41] 陈晨. 南水北调东中线一期工程累计调水 200 亿立方米. *光明日报*, 2018–01–14(15)
- [42] 鲍超, 贺东梅. 京津冀城市群水资源开发利用的时空特征与政策启示. *地理科学进展*, 2017, 36(1): 58–67
- [43] 中华人民共和国水利部. 2011 年中国水资源公报[EB/OL]. (2011–12–31) [2018–12–28]. [http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/szygb/201612/t20161222\\_776051.html](http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/szygb/201612/t20161222_776051.html)
- [44] 中华人民共和国水利部. 2017 年中国水资源公报[EB/OL]. (2018–11–01) [2018–12–28]. [http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/szygb/201811/t20181116\\_1055003.html](http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/szygb/201811/t20181116_1055003.html)
- [45] Feng Wei, Shum C K, Zhong Min, et al. Groundwater storage changes in China from satellite gravity: an overview. *Remote Sensing*, 2018, 10(5): 674
- [46] Huang Zhiyong, Pan Yun, Gong Huili, et al. Sub-regional-scale groundwater depletion detected by GRACE for both shallow and deep aquifers in North China Plain. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(6): 1791–1799
- [47] 张健, 章新平, 王晓云, 等. 京津冀地区近 47 a 降水量的变化特征. *干旱气象*, 2009, 27(1): 23–28
- [48] 薄文广, 陈飞. 京津冀协同发展: 挑战与困境. *南开学报(哲学社会科学版)*, 2015(1): 110–118