

福建水库空间分布特征:沿海密度高水量少、内陆密度低水量多^{*}

朱珍香^{1,2}, 杨 军^{1**}

(1: 中国科学院城市环境研究所, 城市环境与健康重点实验室, 水生态健康研究组, 厦门 361021)

(2: 厦门大学海洋与地球学院, 厦门 361102)

摘 要: 水库是福建重要的水资源。通过 2013—2015 年遥感影像结合 Google Earth 和天地图提取福建水库 3353 座, 分布在 81 个县区, 总面积 647.51 km², 约占全省土地面积的 0.5%; 其中面积 ≤1 km² 水库 3248 座, 总面积 197.16 km², 面积 >1 km² 水库 105 座, 总面积 450.35 km²。基于经验公式估算总蓄水量 188.18 亿 m³, 其中小型水库 3078 座 (91.80%), 蓄水总量 37.06 亿 m³ (19.69%), 大中型水库 275 座 (8.20%), 蓄水总量 151.12 亿 m³ (80.31%)。从空间分布格局来看, 福建水库水资源空间分布不均, 沿海六市水库密度大于三个内陆市, 大中型水库主要分布于福建西北部, 蓄水量呈现西北多、东南少的特点。单位陆地面积水库数量沿海城市县区均多于内陆, 而单位人口水库数量则相反; 单位面积水库蓄水量沿海与内陆差异不大, 而人均蓄水量则沿海大部分县区远小于内陆。仅以水库作为供水水源, 不能满足沿海地区用水, 但内陆地区供水充足。水库蓄水对河流体水的平均滞留时间为 0.053~0.341 a, 除晋江流域受水库蓄水强烈影响外, 其他流域受水库中等程度影响。

关键词: 水库; 遥感影像; 数量; 面积; 蓄水量; 空间分布; 福建

The spatial distribution of reservoirs in Fujian Province: Higher density but lower storage in coastal than inland regions

ZHU Zhenxiang^{1,2} & YANG Jun^{1**}

(1: *Aquatic EcoHealth Group, Key Laboratory of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, P.R.China*)

(2: *College of Ocean and Earth Sciences, Xiamen University, Xiamen 361102, P.R.China*)

Abstract: Reservoirs are important water resources for economic and social sustainable development in Fujian. Using remote sensing images in conjunction with Google Earth and World Map, we identified and mapped 3353 reservoirs with a total surface area of 647.51 km² in Fujian Province. These reservoirs were distributed in 81 counties and accounted for about 0.5% of provincial land area. The majority of these reservoirs (3248) were smaller than 1 km² with a total area of 197.16 km²; while only 105 reservoirs are greater than 1 km² with total area of 450.35 km². The total estimated water storage capacity was 188.18×10⁸ m³, which is roughly equivalent to the storage reported by the Fujian Provincial Department of Water Resources in 2013. Most reservoirs are small in volume because 91.80% of reservoirs (3078) are less than 0.1×10⁸ m³ in storage, while only 8.20% of reservoirs (275) are larger than 0.1×10⁸ m³ and account for approximately 80.31% of the total storage. Further analysis indicates that the spatial distribution of reservoirs is uneven in both density and storage among the nine cities; the density of reservoirs in coastal regions is more than that in inland region, and the large-and medium-sized reservoirs are mainly distributed in the northwest of Fujian, resulting in the water storage in northwest being greater than that in southeast. At present, the reservoir water can not meet the local water needs in most coastal cities due to large human population. The water discharge in all 10 main basins or sub-basins was moderately or strongly impacted by dams, and the water residence time intercepted by the reservoirs varied from 0.053 to 0.341 year. The results of this study provide the basic data for regional water resources management and planning, and also contribute to the protection and sustainable utilization of reservoir water resources.

^{*} 国家自然科学基金项目 (31370471) 和福建省杰出青年科学基金项目 (2012J06009) 联合资助。2017-02-18 收稿; 2017-05-17 收修改稿。朱珍香 (1989~), 女, 硕士研究生; E-mail: 945430241@qq.com。

^{**} 通信作者; E-mail: jyang@iue.ac.cn。

Keywords: Reservoir; remote sensing; number of reservoirs; area of reservoirs; storage; spatial distribution; Fujian Province

水库作为防洪、蓄水、灌溉、供水、发电的主体,在缓解供水压力,促进经济发展和社会发展方面发挥着不可替代的重要作用.然而,改革开放以来,随着社会和经济高速发展,污染排放增加导致河流污染严重,越来越多的水库被选为主要的供水水源^[1].但大量建设水库不但影响流域的水量和沉积物排放量,也影响了河流水体的水生生物群落系统,甚至降低了全球海平面^[2].Yang等^[3]认为中国水库蓄水量目前已达自然湖泊的3倍.我国水利部和国家统计局于2013年联合发布《第一次全国水利普查公报》^[4],结果表明,至2011年底中国共有水库98002座,总库容9323.12亿m³.福建已建水库3663座,总库容198.94亿m³^[5],分别是全国的3.74%和2.13%.在未来气候变暖、人口增长等多重背景下,水库对区域社会经济发展的作用愈显突出,因此有必要对水库水资源的区域分布规律和蓄水量空间特征进行研究,进而为区域水资源管理、保护和可持续利用提供科学依据.

虽然第一次全国水利普查公报统计数据提供了水库水量的总体情况,但缺乏各地区的水库水资源比较分析,通过遥感技术手段可相对快速、准确、客观地提取特定期水体位置和面积信息^[6].例如,已有学者通过遥感影像提取,统计描绘了我国长江流域和黄河流域的水库水量空间分布情况^[3,7-8].从全国的湖泊分布图来看,福建无面积大于1km²的自然湖泊^[9],目前对福建水库的生态研究主要集中在数量极其有限的个别大中型水库的水质和水生生物方面^[10-13],缺少对福建水库水资源空间分布较为系统的比较研究.本文通过遥感技术手段结合高分辨率地图提取福建水库数量和面积信息;定量评估水库水量和空间分布格局;揭示县区单位面积、人均水库数量和蓄水量,以及万元GDP蓄水量分布特征;评价福建主要流域水库蓄水对河流系统的影响.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

福建位于中国东南沿海,简称“闽”,东北、西、西南分别与浙江省、江西省和广东省毗邻,东隔台湾海峡与台湾相望,共包含84个县区,归属于9个地级市,分别为宁德、福州、莆田、泉州、厦门、漳州、南平、三明和龙岩,其中前6个为沿海地级市,后3个为内陆地级市.福建省土地总面积12.14万km²,90%的土地面积为丘陵地带,是典型的山区省份,俗称“八山一水一分田”,森林覆盖率达65.95%,居全国第一.福建地势西北高、东南低,大体平行的闽西和闽中两大山带贯通全境,形似马鞍.受地质构造线和流水的侵蚀作用,在两大山带之间和山区内形成许多大小不一的串珠状河谷、盆地,水系密布,河流众多,主要河流为闽江、九龙江、汀江、晋江、交溪、木兰溪.福建省海岸线曲折,受季风环流和地形影响,气候区域差异大,闽东南沿海地区属亚热带气候,闽东北、闽北和闽西属中亚热带气候.1960—2011年全省年均降水量约为1600mm,由西北向东南递减,内陆多、沿海少,山区多、平原少^[14].

1.2 数据来源

福建水库分布数据提取自Landsat 8影像,下载自美国地质调查局(United States Geological Survey,简称USGS, <http://glovis.usgs.gov/>),用于获取水体空间位置、边界和面积信息.Landsat 8卫星携带有运营性陆地成像仪(Operational Land Imager, OLI)和热红外传感器(Thermal InfraRed Sensor, TIRS).本研究使用的是OLI上的波段数据,OLI包括9个波段,波段1~7和9的空间分辨率为30m,波段8(全色波段)的分辨率为15m,成像宽幅为185km×185km.为保证影像质量,本研究所有影像均选自2013—2015年10月,云量覆盖范围小于3%的遥感影像.

1.3 水体提取和水库识别

水体提取主要使用的是改进多波段谱间关系法(improved spectrum-photometric method, ISPM)^[15], ISPM与归一化差异水体指数(normalized difference water index, NDWI)、改进归一化差异水体指数(modified NDWI)相比^[16-17],对山区、细小水体的提取效果更好,能较为理想的去除地形阴影,因此适用于多丘陵的福建地区水库提取.针对Landsat 5(TM)和Landsat 7(ETM⁺)影像的ISPM公式为: $ISPM = (B_2 + B_3) - (B_4 + B_5) - (B_1 - B_2)$.与TM和ETM⁺相比,OLI新增了海蓝波段(B₁),用于海岸带观测,因此,本文中的ISPM公式应修

正为: $ISPM = (B_3 + B_4) - (B_5 + B_6) - (B_2 - B_3)$. $B_2 \sim B_6$ 为相应的波段简称. B_2 为蓝色波段(波长 $0.445 \sim 0.515 \mu\text{m}$), B_3 为绿色波段($0.525 \sim 0.600 \mu\text{m}$), B_4 为红色波段($0.630 \sim 0.680 \mu\text{m}$), B_5 为近红外波段($0.845 \sim 0.885 \mu\text{m}$), B_6 为中红外波段($1.560 \sim 1.660 \mu\text{m}$). 在水体提取之前,还需对影像进行辐射定标、大气校正和图像裁剪等预处理,皆在遥感处理软件 ENVI 5.1 中完成.

水体提取之后进行水库识别. 将从影像提取的水体转矢量后导入 ArcGIS 9.3 软件中,为了减少水体和陆地分界处混合像素的影响,本研究中去除了小于 4 个像素的水体图斑. 通过矢量图斑的中心坐标结合 Google Earth 和天地图确定水库水体,部分水库因为较浅或水华等原因而未被识别的区域根据影像进行人为矢量化. 根据地形地貌和水流的特点,水库分为河道型水库、平原型水库和山谷型水库,有些研究中也称山谷型水库定义为湖泊型水库^[18],本文中为了后续精确估算蓄水量,将识别的水库根据其形状和所处位置分成山谷型(包括平原型)、河道型以及介于两者之间的河道山谷型. 水库识别后,其他特征如名称、水体表面积、所在行政区域、中心坐标也添加到属性表中.

1.4 水库蓄水量估算

目前已有对全球和区域范围水库面积和蓄水量关系的研究^[3,7-8,19-20]. 水库蓄水量(C , 10^6 m^3)和表面积(A , km^2)的经验公式: $C = aA^b$,其中 a 和 b 是系数. 采用不同的模式估算水库的蓄水量将得到不同的结果,为了使得估算的蓄水量更接近实际统计结果,首先采用以下三种模式进行估算:1)将所有水库不分类型进行统一估算;2)根据 Yang 和 Lu^[7]的方法区分大型水库和小型水库进行估算;3)根据水库形状划分为山谷型、河道型及河道山谷型水库并分别估算各类型水库蓄水量. 从福建水文网和厦门水利信息网等官方网站收集了 2015 年 10 月对应的 133 座水库蓄水量数据,估算不同模式下水库蓄水总量. 根据水库库容大小分级标准^[21],本研究按蓄水量将水库分为 5 类:大 I 型($C > 10^9 \text{ m}^3$),大 II 型($10^8 < C \leq 10^9 \text{ m}^3$),中型($10^7 < C \leq 10^8 \text{ m}^3$),小 I 型($10^6 < C \leq 10^7 \text{ m}^3$)和小 II 型($C \leq 10^6 \text{ m}^3$).

1.5 统计分析

以提取的每座水库的中心坐标代表各座水库并赋予相关的面积、蓄水量、名称以及行政区域,并在 ArcGIS 9.3 软件中以蓄水量大小表示水库的分布结果. 根据落于全省 84 个县区的的水库,统计以下指标:各个县区的水库数量(座)、各个县区的水库蓄水量(亿 m^3)、各个县区单位面积水库数量(座/ 100 km^2)、各个县区单位人口水库数量(座/10 万人)、各个县区单位面积蓄水量(万 m^3/km^2)、各个县区人均蓄水量($10^2 \text{ m}^3/\text{人}$),以及各个县区万元 GDP 蓄水量($10^2 \text{ m}^3/\text{万元 GDP}$). 以县区为基本统计单元,利用 SPSS 22.0 统计软件比较福建省 6 个沿海地级市和 3 个内陆地级市间各指标的差异,对符合正态分布的数据进行单因素方差分析中的 Duncan 检验,不符合正态分布的数据应用非参数检验中的 Kruskal-Wallis 方法进行均值间的差异显著性分析.

Vörösmarty 等^[22]提出基于河流水体的滞留时间来评价水库蓄水对河流的影响. 本文结合福建省数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)和福建省水文水资源勘测局设置的 10 个水文站位置提取各个水文站的流域范围. Vörösmarty 等^[23]界定流域水体的滞留时间为给定流域内的水库蓄水总量与流域年径流量的比值,我们据此计算福建主要流域或亚流域水体的平均滞留时间.

1.6 误差分析

在水体提取和水库识别过程中,不可避免地会产生一些误差,主要来源于以下几方面:1)水体提取使用的遥感影像像素为 $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$,因此宽度小于 30 m 的小型水库或库湾不能被有效识别而使得提取水库数量和面积小于实际值;2)因为少量云覆盖和混合像素的影响,本研究中剔除小于 4 个像素的水体,从而可能会导致提取的水体数量比实际情况小;3)极少数小型水库因为藻类水华、泥沙淤积和人为影响等原因使得遥感影像不能识别;4)极少部分小型水库的大坝不易被清楚识别,以及在池塘较多的区域可能会混淆小型水库和池塘而造成误判.

2 结果

2.1 水库面积和蓄水量丰度分布特征

本研究从遥感影像中共提取水库 3353 座,统计的水库总面积是 647.51 km^2 ,约占全省土地面积的 0.5%,

其中面积 $\leq 1\text{ km}^2$ 的水库有 3248 座, 占提取总数的 96.87%, 但面积之和为 197.16 km^2 , 仅占总面积的 30.45%; 而面积 $>1\text{ km}^2$ 的水库仅有 105 座, 面积之和是总面积的 69.55% (表 1 和图 1a).

表 1 基于 2013—2015 年福建省遥感影像提取的水库数量和面积统计

Tab.1 Summary of reservoir number and area delineated on remote-sensing imagery of 2013–2015 in Fujian Province

面积/ km^2	数量/座	数量百分比/%	总面积/ km^2	总面积百分比/%
≤ 0.01	1239	36.95	7.75	1.20
$0.01 \sim 0.1$	1560	46.53	50.13	7.74
$0.1 \sim 1$	449	13.39	139.28	21.51
$1 \sim 10$	96	2.86	222.23	34.32
$10 \sim 100$	9	0.27	228.12	35.23
总计	3353	100.00	647.51	100.00

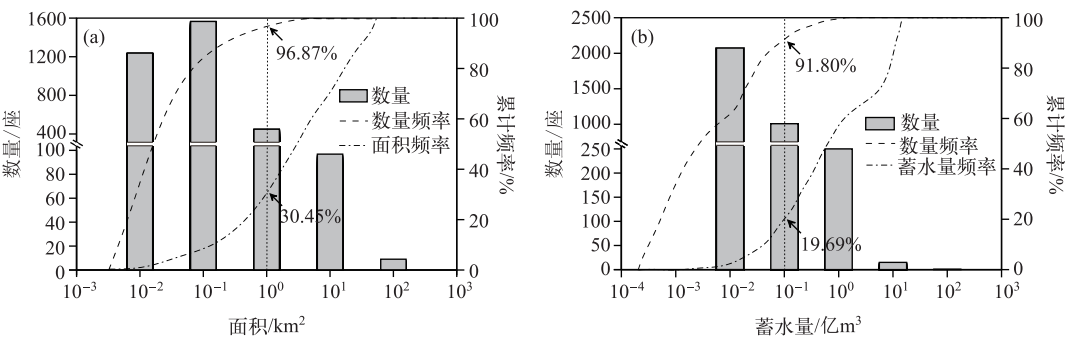


图 1 福建省水库数量、面积(a)和蓄水量(b)累计频率
(垂直虚线表示绝大多数水库面积 $\leq 1\text{ km}^2$, 蓄水量 $\leq 0.1\text{ 亿 m}^3$)

Fig.1 Cumulative frequency of number, area(a) and storage(b) of reservoirs from Fujian Province

利用 3 种不同模式估算水库蓄水量, 结果有较大差别: 1) 以所有水库不分类型按同一个经验模型公式估算的蓄水量为 130.52 亿 m^3 ; 2) 以水库面积 3.3 km^2 为界区分为大型和小型水库的估算结果为 123.59 亿 m^3 ; 3) 根据水库形状分 3 种类型估算的蓄水总量为 188.18 亿 m^3 . 根据第一次全国水利普查结果, 福建水库总库容 198.94 亿 m^3 , 因此分水库类型估算的蓄水量与统计结果最为接近. 不同水库类型的经验公式分别为: 山谷型: $C = 13.760A^{1.122}$ ($R^2 = 0.571$); 河道型: $C = 32.737A^{0.611}$ ($R^2 = 0.636$); 河道山谷型: $C = 33.245A^{0.997}$ ($R^2 = 0.927$).

根据水库分级标准, 福建省有小型水库 3078 座, 占水库总数量的 91.80%, 但小型水库蓄水量只有 37.06 亿 m^3 , 占总蓄水量的 19.69%; 大中型水库 275 座, 蓄水量 151.12 亿 m^3 , 以总数的 8.20% 贡献了 80.31% 的总蓄水量 (表 2 和图 1b). 随着水库面积的增大, 水库数量累计频率的增长速率由大于水库面积累计频率逐渐过渡到水库面积累计频率的增长速率大于水库数量累计频率 (图 1a). 同样, 随着蓄水量的增大, 水库数量和蓄水量的累计频率也呈现类似的增长趋势, 但与水库面积累计频率增长不同的是, 在蓄水量 $<0.1\text{ 亿 m}^3$ 区间内, 数量累计频率增长速率较高, 在蓄水量 $>0.1\text{ 亿 m}^3$ 之后, 数量累计频率又逐渐减缓 (图 1b).

2.2 水库数量和水量空间分布格局

福建省水库分布在数量和蓄水量方面存在明显的空间差异性 (图 2a), 沿海各市以小型水库为主, 大型水库较少, 大部分大中型水库沿着河流主干水系分布在各流域的上游和中游, 例如位于南平市和三明市的闽江流域上中游和位于龙岩市的九龙江和汀江流域上中游. 尽管 9 个地级市县平均水库数量没有显著差异 (图 2b), 厦门最低 (16 座), 漳州和龙岩最高 (均为 53 座). 一个显著特征是水库密度从沿海向内陆呈现减少趋势, 另一个显著特征是, 福建水库蓄水量分布沿海城市少、内陆城市多 (图 2c). 各县区平均蓄水量沿海

表 2 福建水库蓄水量估算结果
Tab.2 Summary of reservoir storage estimation in Fujian Province

蓄水量/亿 m ³	类型	数量/座	数量百分比/%	总蓄水量/亿 m ³	蓄水量百分比/%
0.001~0.01	小(Ⅱ)型	2070	61.74	3.41	1.81
0.01~0.1	小(Ⅰ)型	1008	30.06	33.65	17.88
0.1~1	中型	259	7.72	71.69	38.10
1~10	大(Ⅱ)型	14	0.42	49.17	26.13
>10	大(Ⅰ)型	2	0.06	30.26	16.08
总计	—	3353	100.00	188.18	100.00

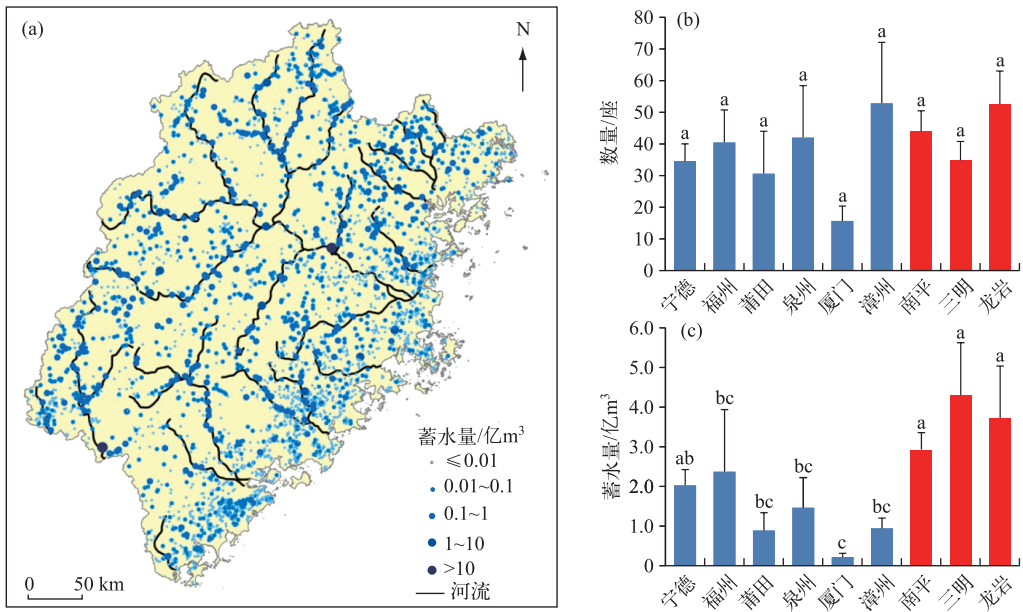


图 2 福建水库的空间分布格局(a)和基于县级水平统计的九市水库数量(b)与蓄水量(c)均值比较 (不同字母代表组间有显著差异($P<0.05$),蓝色表示沿海地级市,红色表示内陆地级市)

Fig.2 Spatial distribution pattern of the reservoirs in Fujian Province with storage(a) and comparison of reservoir number(b) and storage(c) among nine cities across Fujian Province based on county level data (The different letters represent significant differences between groups ($P<0.05$), blue columns represent coastal cities and red columns represent inland cities)

与内陆差异性显著,沿海各市蓄水量均小于内陆,厦门最低(0.22 亿 m³),三明最高(4.30 亿 m³).

2.3 县区水库数量和水量分布特征

福建省各县区的水库蓄水量分布不均(图 3),大部分沿海各县区的蓄水量、人均蓄水量及万元 GDP 蓄水量小于内陆各县区,并大致平行于海岸线由沿海各县区向内陆各县区逐渐增加. 福建西北部的南平市和三明市各县区蓄水量明显高于其他大部分县区. 福建省 46.18%的大中型水库位于三明市和南平市,两市的蓄水总量为 80.89 亿 m³,占全省蓄水总量的 42.99%. 具体而言,福州闽清县因大型水库水口水库而蓄水量最高(20.85 亿 m³),其次是三明尤溪县(12.94 亿 m³)和清流县(12.09 亿 m³). 人均蓄水量最高的是三明泰宁县(9255 m³/人),其次是三明清流县(8958 m³/人)和福州闽清县(8833 m³/人). 据 2014 年福建省水资源公报显示,全省平均万元 GDP 用水量为 85 m³,若仅以水库作为水资源供给来源,由万元 GDP 蓄水量分布结果可得,沿海各县区除宁德蕉城区(131 m³)、泉州南安市(110 m³)以及漳州云霄县(126 m³)外,其他各县区

的万元 GDP 蓄水量小于用水量, 显然水库蓄水不能满足当地经济发展用水; 内陆地区南平市各县区的蓄水供给充足, 三明市除梅列区 (36 m^3) 以及龙岩市新罗区 (18 m^3) 外, 两市各县区蓄水量也能满足其经济发展用水 (各县区的面积、人口、GDP 以及水库指标统计结果见附表)。

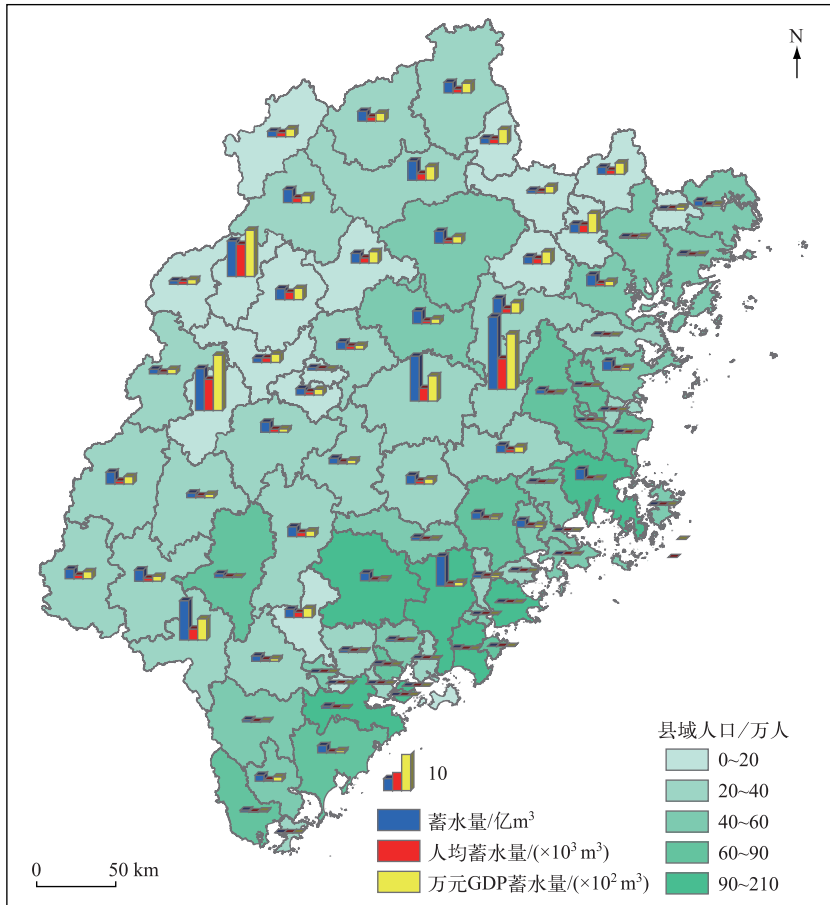


图 3 福建省各县区水库蓄水量、人均蓄水量及万元 GDP 蓄水量的空间分布

Fig.3 Spatial pattern of total, per capita and unit GDP water storages of reservoirs at county level in Fujian Province

对福建省各市单位面积水库数量、单位人口水库数量、单位面积蓄水量和人均蓄水量的县平均值进行比较分析 (图 4)。从每 100 km^2 的水库数量来看 (图 4a), 沿海水库密度与内陆差异性显著, 沿海各市均大于内陆各市, 内陆 3 个市之间无显著差异, 沿海各市中厦门与宁德差异性显著, 其中厦门最高 (6.2 座), 南平 (1.7 座) 和三明 (1.8 座) 最低。从每 10 万人口的水库数量来看 (图 4b), 沿海与内陆也有较大差异, 与水库密度相反, 沿海各市均小于内陆各市, 其中南平 (18.7 座) 和三明 (18.1 座) 最高, 厦门 (3.7 座) 和莆田 (4.8 座) 最低, 沿海各市中莆田、泉州、厦门与宁德有较大差异, 内陆各市之间没有显著差异; 从单位面积水库蓄水量县均值的统计结果来看 (图 4c), 各市之间没有显著差异, 三明市 ($23.42 \text{ 万 m}^3 / \text{km}^2$) 最高, 厦门 ($7.83 \text{ 万 m}^3 / \text{km}^2$) 和漳州 ($7.02 \text{ 万 m}^3 / \text{km}^2$) 最低; 然而从人均蓄水量的统计结果来看 (图 4d), 沿海与内陆有显著差异, 沿海各市均小于内陆各市, 三明 ($2533 \text{ m}^3 / \text{人}$) 最高, 厦门 ($42 \text{ m}^3 / \text{人}$) 最低。

2.4 河流平均滞留时间

通过对福建主要流域内水库蓄水量与径流量比值的统计分析表明 (表 3, 图 5), 流域水体滞留时间从交

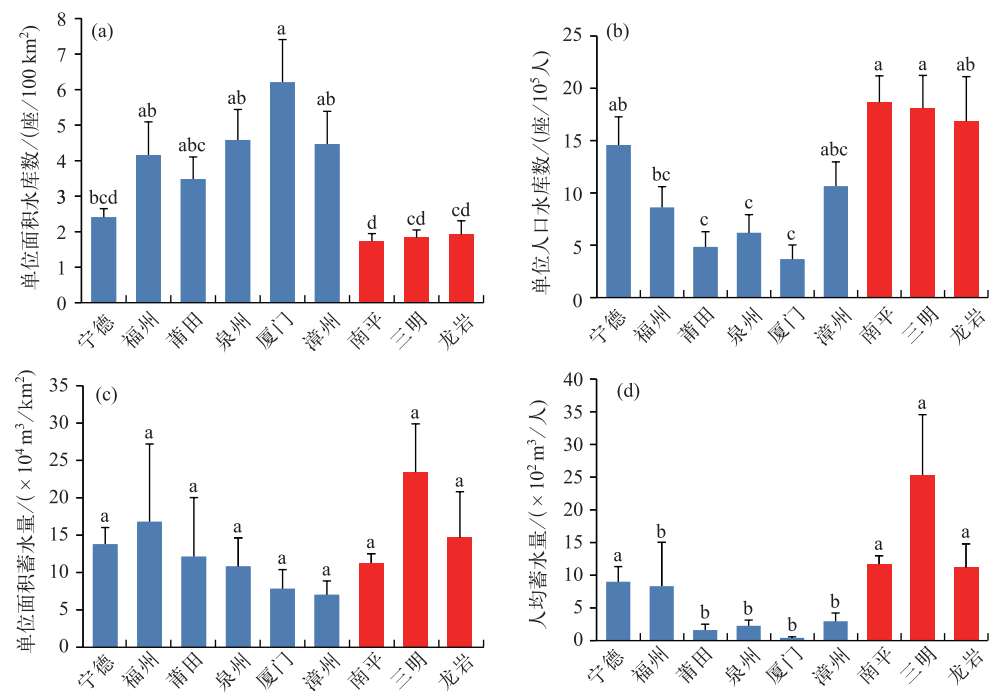


图 4 基于县级水平统计的福建九市水库数量与蓄水量比较
(不同字母代表组间有显著差异 ($P < 0.05$), 蓝色表示沿海地级市, 红色表示内陆地级市)

Fig.4 Comparison of reservoir number and water storage among nine cities at county level in Fujian Province
(The different letters represent significant differences between groups ($P < 0.05$), blue columns represent coastal cities and red columns represent inland cities)

溪的 0.053 a 至晋江的 0.341 a。福建最大流域闽江的滞留时间为 0.181 a, 其上游 3 个亚流域——建溪、富屯溪和沙溪的滞留时间分别为 0.087、0.145 和 0.259 a。福建第二大河流九龙江包括 2 大亚流域——九龙江西溪和九龙江北溪, 其水体滞留时间也有较大差异, 分别为 0.056 和 0.110 a。

表 3 福建省主要流域或亚流域水库蓄水量及滞留时间

Tab.3 Reservoir storage capacity and residence time in different watersheds in Fujian Province

流域	水文站	水库数量	蓄水量/亿 m ³	年径流量/亿 m ³	滞留时间/a
闽建溪	七里街	198	13.13	150.40	0.087
闽江富屯溪	洋口	172	23.78	164.24	0.145
闽江沙溪	沙县	201	19.90	76.72	0.259
闽江	竹岐	985	105.76	583.96	0.181
九龙江西溪	郑店	69	1.80	32.17	0.056
九龙江北溪	浦南	125	7.23	65.44	0.110
汀江	上杭	127	7.21	47.79	0.151
晋江	石碇	249	11.13	32.61	0.341
交溪	白塔	40	2.79	52.20	0.053
木兰溪	漈溪	44	0.91	10.08	0.090

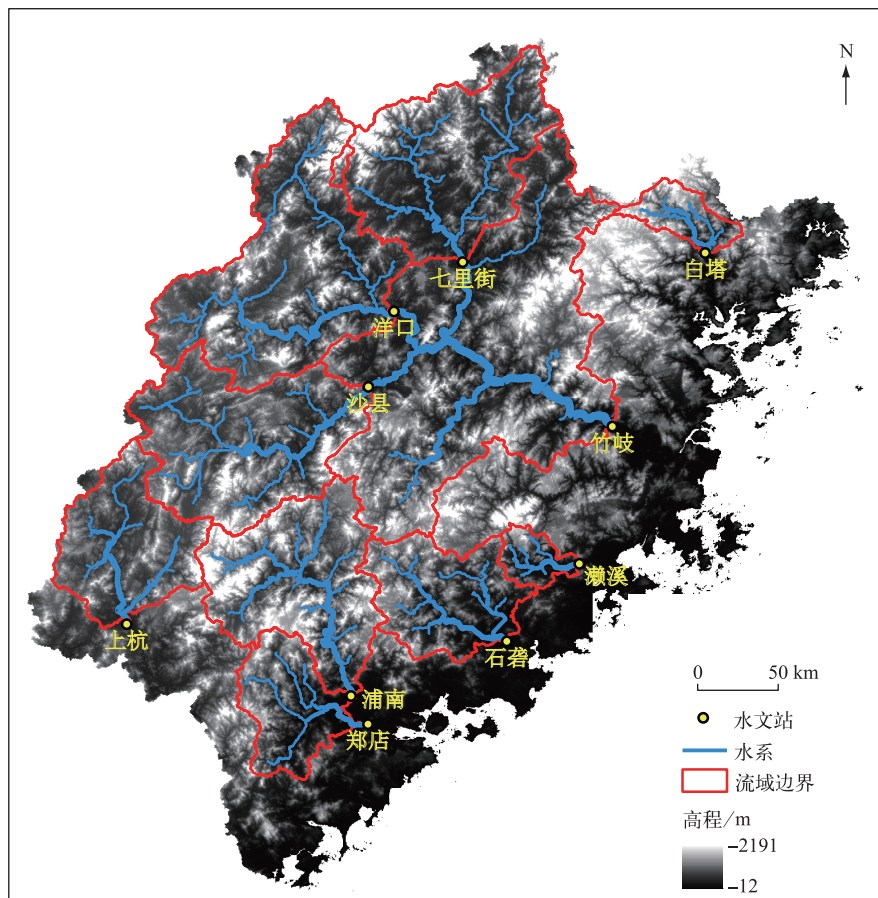


图 5 福建省主要流域及水文站分布

Fig.5 Distribution of main watersheds and their hydrological stations in Fujian Province

3 讨论

3.1 水库统计结果分析

根据福建省水利厅、福建省统计局于 2013 年 5 月联合发布的《福建省第一次全国水利普查公报》,福建省已建水库 3663 座,总蓄水量为 198.04 亿 m^3 . 本研究从遥感影像提取水库 3353 座,估算蓄水量为 188.18 亿 m^3 ,分别是普查结果的 91.54% 和 95.02%. 2013—2015 年期间没有新建成的大中型水库,因此从遥感影像提取的水库数量和蓄水量估算结果接近于普查结果. 我们基于估算结果选取 16 座大型水库的蓄水量与 2015 年 10 月实际记录的结果对比发现(表 4),估算值超出实际记录值与估算值小于实际记录值的水库数目相当,16 座水库估算蓄水量为 79.43 亿 m^3 ,而实际记录的 16 座水库蓄水量为 89.42 亿 m^3 . 造成本研究与福建省第一次全国水利普查公报统计结果差异的原因见 1.6. 但上述这些误差主要影响的是较少部分的小型水库. 虽然小型水库在数量上占有绝对优势,但水库总面积和总蓄水量主要由少数的大中型水库主导,因此上述误差对总体水量估计结果的影响不大. 另外,地形地貌、地质构造都会影响水库形状及蓄水情况,进而造成个别水库估算结果与实际数值间产生差异. 需要说明的是,本研究使用的是 2013—2015 年每年 10 月的影像,而福建省第一次全国水利普查公报的统计结果是 2011—2012 年的统计数据^[5],不同年份以及枯水期和丰水期的水库蓄水量差异也会造成一定影响. 因此,影像分辨率、地形地貌、统计年份和时期的

不同是造成两者差异的主要原因. 本文在尽量减少云覆盖的影响下,选择同一月份的遥感影像,以避免不同时期水库水面面积变化较大而影响水库面积统计和蓄水量的估算结果. 总体而言,通过大空间尺度遥感影像可以快速、经济、准确地获取水库数量、面积与空间分布动态.

表 4 福建省 16 座大型水库地理位置信息及估算蓄水量*
Tab.4 Location of 16 large reservoirs with estimated storages in Fujian Province

水库	中心经纬度	所在市	流域	面积/ km ²	估算水量/ 亿 m ³	记录水量/ 亿 m ³	估算水量/ 记录水量/%
水口水库	26.3939°N, 118.6061°E	福州市	闽江流域	60.6369	19.9120	20.2740	98.21
棉花滩水库	4.7405°N, 116.5500°E	龙岩市	汀江流域	31.4622	10.3520	15.1102	68.51
街面水库	25.8904°N, 118.0234°E	三明市	闽江流域	30.3434	9.9849	16.5997	60.15
池潭水库	26.7934°N, 117.0487°E	三明市	闽江流域	26.7366	8.8014	6.8687	128.14
安砂水库	26.0387°N, 117.0120°E	三明市	闽江流域	22.8339	7.5202	5.9182	127.07
山美水库	25.2002°N, 118.4164°E	泉州市	晋江流域	16.2459	5.3560	4.4207	121.16
古田水库	26.6123°N, 118.8079°E	宁德市	闽江流域	16.1874	3.1283	4.6704	66.98
东张水库	25.7039°N, 119.2601°E	福州市	闽江流域	12.2661	2.2916	1.6442	139.37
洪口水库	26.8991°N, 119.2874°E	宁德市	闽江流域	6.6762	2.2069	3.7809	58.37
东圳水库	25.4836°N, 118.9455°E	莆田市	延寿溪流域	9.8523	1.7921	2.1078	85.02
万安水库	25.3842°N, 117.0137°E	三明市	九龙江流域	4.6287	1.5318	1.9670	77.87
沙溪口水库	26.5864°N, 118.0000°E	南平市	闽江流域	11.4084	1.4487	1.4135	102.49
东溪水库	27.7959°N, 118.1029°E	南平市	闽江流域	4.0641	1.3455	0.5156	260.96
山仔水库	26.3705°N, 119.3090°E	福州市	黛溪流域	4.0131	1.3286	1.1984	110.86
芹山水库	27.2265°N, 119.2707°E	宁德市	赛江流域	3.9114	1.2950	2.0272	63.88
水东水库	27.1609°N, 118.2327°E	三明市	闽江流域	7.6631	1.1361	0.9000	126.23

* 估算水量是本研究中使用估算公式计算的蓄水量,记录水量是 2015 年 10 月水利信息网上记录的蓄水量日均值.

Downing 等^[24]发现,世界各地的湖库数量 and 对应面积的关系具有相似性,即小型湖库在数量上占绝对优势、面积贡献较小;大中型湖库数量虽少,却面积贡献最大. Yang 等^[3,7]对我国湖库研究结果指出,全国面积小于 1 km²的小型水体在数量上占 97.2%~98.4%,仅占 1.6%~2.8%数量的大中型水体贡献了总面积的 80.8%~92.0%;长江流域小型水体数量约占 99%,近 1%的大中型水体在面积上却贡献 99%以上. 同样的,在福建省面积小于 1 km²的水库占 96.87%,而只有 105 座面积大于 1 km²的水库贡献总面积的 69.55%(表 1). 与全国、长江流域及黄河流域相比,福建省大中型水库的面积和蓄水量权重相对较小,虽然大中型水库在面积和蓄水量上是主要的贡献者,但在水资源缺乏的地区,小型水库对区域的社会和经济发展同样具有不可忽视的重要贡献,并且因其建设和维护成本低廉,在水资源需求日益增加的情况下其作用将更加突出.

3.2 沿海与内陆地区水库空间分布差异

从统计分布结果看,福建水库数量和蓄水量在空间上分布不均,小型水库主要分布于沿海地区,而大中型水库则主要分布于内陆各市. 造成这种分布的原因是地形、气候和人为影响的共同结果. 受气候和地形影响,福建省降水空间分布不均,南平市最大,平潭综合实验区年降水量最小,等降水量线与海岸线大致平行,由沿海向内陆递增. 此外,福建省河网密度大,以闽西大山带和闽中大山带的东坡密度最大,构造线密布,河流上游或中游的密度一般大于下游,地表水资源较为丰富,有利于建设大中型水库. 福建沿海经济较发达的地区,地势较平坦,河网较少,降水量也少于内陆. 福建四大平原(福州平原、兴化平原、泉州平原和漳州平原)均位于沿海,是人口主要聚集区,同时是全省经济较发达的地区. 由于沿海人口聚集和经济发展对水资源的需求量更大,因此在这些地区建设有较多的小型水库. 可以看出,全省的水库和人口分布与全国有很大的相似性. 全国人口分布遵循“胡焕庸线”^[25],即“黑河—腾冲—线”以东,43%的国土面积支持着 94%的人口. 福建东北—西南连线的东部水库密度要大于西部,而蓄水量则呈现相反的分布趋势(图 2,图 3),进而可能导致水资源分布和人口经济发展不相匹配. 沿海地区人口数量多,淡水资源相对缺乏. 例如,厦门属于水

资源极度短缺的城市,为了缓解水资源短缺状况市政府推行了一系列措施来保障全面建设“美丽厦门”,近年来重点修建长泰枋洋水库和同安莲花水库,工程建成后年均可向厦门供水约 2 亿 m^3 。

3.3 水库建设对流域的影响

水库的建设会截流上游的水源,改变原有输送营养盐的特性,延长水体进入海洋的时间^[1,26-27],进而改变流域生物地球化学循环。水库大坝可导致河流水流变缓,透明度增加,有利于浮游藻类生物量增加^[27]。本研究发 现 晋 江 流 域 水 体 平 均 滞 留 时 间 最 长,为 0.341 a,表明晋江受到水库蓄水的影响最大,安溪流域则受到水库蓄水的影响最小,水体平均滞留时间为 0.053 a。根据 Nilsson 等^[28]的界定,流域内水库蓄水量与年径流量的比值小于 0.02 时,河流几乎不受影响,介于 0.02~0.30 之间则受到中等程度影响,而大于 0.30 时则受到强烈影响。福建主要流域的蓄水量与径流量的比值是 0.053~0.341,因此除晋江流域受到水库的强烈影响外,其他流域均受到水库的中等程度影响。闽江流域是福建省最大的流域,其上游的 3 个亚流域建溪流域、富屯溪流域和沙溪流域水体滞留时间分别为 0.087、0.145 和 0.259 a。整个闽江流域的水体滞留时间为 0.181 a,与我国其他大型流域(如辽河、黄河、松花江等流域)相比^[3],其河流受到水库蓄水的影响要小的多,因此以水库作为区域经济发展供水还有较大的发展空间。通常,水库蓄水量主要由大中型水库贡献,因此大中型水库特别是大型水库对流域有较大影响,如长江的三峡和葛洲坝水库,黄河的三门峡和小浪底水库以及珠江龙潭水库等^[3]。目前,水口水库(19.91 亿 m^3)是福建省最大的水库,位于闽江流域中游,其蓄水量是闽江中游径流量的 10.33%,对流域有较大影响。然而,福建沿海地区的小型水库数量较多,其生态作用与影响也不可忽视。

3.4 展望

福建没有面积大于 1 km^2 的自然湖泊,水库的重要作用不言而喻^[9]。本文基于遥感影像技术方法快速提取了福建省水库数量、水库面积,并定量分析了水库密度和蓄水量的空间分布情况,但水库作为城市供水重要水源,对水库水质也提出了较高的要求。事实上,水库水质和水量之间具有复杂的耦合关系,系统综合研究还比较少。Yang 等^[29]对福建厦门 4 座水库蓝藻随水位变化的研究表明,蓝藻水华发生风险在低水位时期高于高水位时期。水库藻类的生长与水量变化、水温、营养物质、其他生物、气象条件以及水文水力等过程密切相关,综合分析不同气候条件下水体藻类、营养物质等水质指标随水量的变化情况,利用生态模型量化水质与蓄水量、降水量、流域不同土地利用类型水土流失营养负荷量的相关关系可进一步揭示水库藻类的生长规律与关键控制因子,为控制藻华爆发和水库流域管理提供可执行的科学方案 and 对策。因此未来的研究重点应考虑水质水量的时空耦合关系,基于高频监测数据量化水质与水量及其他因素的相关关系,构建生态模型综合评价水库管理对流域生态环境的影响与效应。

4 结论

本研究基于遥感技术从遥感影像中识别福建水库 3353 座,分布在除福州鼓楼区、台江区和泉州鲤城区外的 81 个县区,总面积 647.51 km^2 ,约占全省土地面积的 0.5%。估算水库总蓄水量为 188.18 亿 m^3 ,其中小型水库数量 3078 座(91.80%),蓄水总量 37.06 亿 m^3 (19.69%);大中型水库 275 座(8.20%),蓄水总量 151.12 亿 m^3 (80.31%)。小型水库数量最多,但是大中型水库主导着水库总面积和蓄水总量。福建省水库水资源空间分布不均匀,沿海各市水库密度大于内陆各市,大中型水库主要分布于西北部;蓄水量呈现西北多、东南少格局。沿海地区人口密度大,水库数目多,但是单位面积和人均水量少,水资源供需矛盾突出;内陆则人口密度小,水库数目相对较少,人均蓄水量比沿海大的多,各县区单位面积蓄水量也大于大部分沿海地区。大部分沿海地区水库蓄水量不能满足当地 GDP 用水量。在 10 个主要流域中,晋江流域受到水库蓄水的影响最大、属于强烈影响,其他流域水体都受到水库蓄水中等程度的影响。本研究以县区为基本单元从水库数量、面积和蓄水量等方面揭示了福建水库水资源空间分布特征与规律,为了更好地服务区域经济社会发展并提供可靠的水库水资源信息,还迫切需要从时间尺度研究水质水量变动耦合关系及调控机制。

5 参考文献

- [1] Han BP. Reservoir ecology and limnology in China: A retrospective comment. *J Lake Sci*, 2010, 22(2): 151-160. DOI:

- 10.18307/2010.0201. [韩博平. 中国水库生态学研究的回顾与展望. 湖泊科学, 2010, **22**(2): 151-160.]
- [2] Chao BF, Wu YH, Li YS. Impact of artificial reservoir water impoundment on global sea level. *Science*, 2008, **320** (5873): 212-214.
- [3] Yang XK, Lu XX. Drastic change in China's lakes and reservoirs over the past decades. *Scientific Reports*, 2014, **4**: 6041.
- [4] Bulletin of first national census for water. *China Water Resources*, 2013, **7**: 1-3. [第一次全国水利普查公报. 中国水利, 2013, **7**: 1-3.]
- [5] Liao SB, Yang X, Chen SQ. Analysis on microclimate effects of reservoirs based on spatial-temporal observation samples. *Journal of Fujian Normal University: Natural Science Edition*, 2014, **30**(5): 38-43. [廖顺宝, 杨旭, 陈世强. 基于时空观测样本的水库库区小气候效应分析——以福建省大型水库为例. 福建师范大学学报: 自然科学版, 2014, **30** (5): 38-43.]
- [6] Bai XM, Chun X, Siqin BLG *et al.* Changes of lakes in Hunshandake Sandy Land in the past 45 years, Inner Mongolia. *J Lake Sci*, 2016, **28**(5): 1086-1094. DOI:10.18307/2016.0519. [白雪梅, 春喜, 斯琴毕力格等. 近 45 a 内蒙古浑善达克沙地湖泊群的变化. 湖泊科学, 2016, **28**(5): 1086-1094.]
- [7] Yang XK, Lu XX. Delineation of lakes and reservoirs in large river basins: an example of the Yangtze River Basin, China. *Geomorphology*, 2013, **190**: 92-102.
- [8] Ran LS, Lu XX. Delineation of reservoirs using remote sensing and their storage estimate: an example of the Yellow River basin, China. *Hydrological Processes*, 2012, **26**(8): 1215-1229.
- [9] Ma RH, Yang GS, Duan HT *et al.* China's lakes at present: Number, area and spatial distribution. *Science China: Earth Science*, 2011, **41**(3): 394-401. [马荣华, 杨桂山, 段洪涛等. 中国湖泊的数量、面积与空间分布. 中国科学: 地球科学, 2011, **41**(3): 394-401.]
- [10] Chen X, Pan WB, Wang M. Spatial distribution characteristics and dynamics of *Eichhornia crassipes* in the Shuikou Reservoir, Fujian Province. *J Lake Sci*, 2012, **24**(3): 391-399. DOI:10.18307/2012.0310. [陈潇, 潘文斌, 王牧. 福建闽江水口水库凤眼莲空间分布特征及其动态. 湖泊科学, 2012, **24**(3): 391-399.]
- [11] Yang J, Yu XQ, Liu LM *et al.* Algae community and trophic state of subtropical reservoirs in southeast Fujian, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2012, **19**(5): 1432-1442.
- [12] Wang YM, Liu LM, Chen HH *et al.* Spatiotemporal dynamics and determinants of planktonic bacterial and microeukaryotic communities in a Chinese subtropical river. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2015, **99**(21): 9255-9266.
- [13] Su YP, Lai SH, Lin J *et al.* Research on the limiting nutrient in Shanzi Reservoir, an eutrophied drinking water source. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(10): 3107-3113. [苏玉萍, 赖寿辉, 林佳等. 富营养化饮用水源地山仔水库限制性营养元素研究. 环境科学学报, 2015, **35**(10): 3107-3113.]
- [14] Huang J, Wang YF, Gao L *et al.* Temporal-spatial characteristics of different rainfall levels in Fujian Province from 1960 to 2011. *Science of Soil and Water Conservation*, 2015, **13**(2): 17-23. [黄婕, 王跃峰, 高路等. 1960—2011 年福建省不同等级降水时空变化特征. 中国水土保持科学, 2015, **13**(2): 17-23.]
- [15] Yang SW, Xue CS, Liu T *et al.* A method of small water information automatic extraction from TM remote sensing images. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2010, **39**(6): 611-617. [杨树文, 薛重生, 刘涛等. 一种利用 TM 影像自动提取细小水体的方法. 测绘学报, 2010, **39**(6): 611-617.]
- [16] Mcfeeters SK. 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.
- [17] Xu HQ. A study on information extraction of water body with the modified normalized difference water index (MNDWI). *Journal of Remote Sensing*, 2005, **9**(5): 590-595. [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. 遥感学报, 2005, **9**(5): 590-595.]
- [18] Lin GE, Wang T, Lin QQ *et al.* Spatial pattern and temporal dynamics of limnological variables in Liuxihe Reservoir, Guangdong. *J Lake Sci*, 2009, **21**(3): 387-394. DOI:10.18307/2009.0312. [林国恩, 望甜, 林秋奇等. 广东流溪河水水库湖沼学变量的时空动态特征. 湖泊科学, 2009, **21**(3): 387-394.]
- [19] Liebe J, van de Giesen N, Andreini M. Estimation of small reservoir storage capacities in a semi-arid environment: a case study in the Upper East Region of Ghana. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2005, **30**(6): 448-454.
- [20] Sawunyama T, Senzanje A, Mhizha A. Estimation of small reservoir storage capacities in Limpopo River Basin using geographical information systems (GIS) and remotely sensed surface areas: case of Mzingwane catchment. *Physics and Chem-*

- istry of the Earth*, 2006, **31**(15): 935-943.
- [21] Water Resources and Electric Power on implementing the classification and design standard of water conservancy and hydropower projects (mountainous and hilly areas). *Water Resources and Hydropower Engineering*, 1978, **3**: 1-5. [水利电力部关于颁发试行《水利水电枢纽工程等级划分及设计标准(山区、丘陵区部分)》的通知. 水利水电技术, 1978, **3**: 1-5.]
- [22] Vörösmarty CJ, Sharma K, Fekete B *et al.* The storage and aging of continental runoff in large reservoir systems of the world. *Ambio*, 1997, **26**(4): 210-219.
- [23] Vörösmarty CJ, Meybeck M, Fekete B *et al.* Anthropogenic sediment retention: Major global impact from registered river impoundments. *Global and Planetary Change*, 2003, **39**(1): 169-190.
- [24] Downing JA, Prairie YT, Cole JJ *et al.* The global abundance and size distribution of lakes, ponds, and impoundments. *Limnology and Oceanography*, 2006, **51**(5): 2388-2397.
- [25] Chen MX, Li Y, Gong YH *et al.* The population distribution and trend of urbanization pattern on two sides of Hu Huanyong population line: A tentative response to Premier Li Keqiang. *Acta Geographica Sinica*, 2016, **71**(2): 179-193. [陈明星, 李杨, 龚颖华等. 胡焕庸线两侧的人口分布与城镇化格局趋势——尝试回答李克强总理之问. 地理学报, 2016, **71**(2): 179-193.]
- [26] Wisser D, Fekete BM, Vörösmarty CJ *et al.* Reconstructing 20th century global hydrography: A contribution to the Global Terrestrial Network-Hydrology (GTN-H). *Hydrological and Earth System Sciences*, 2010, **14**(1): 1-24.
- [27] Ran XB, Yu ZG, Yao QZ *et al.* Advances in nutrient retention of dams on river. *J Lake Sci*, 2009, **21**(5): 614-622. DOI:10.18307/2009.0502. [冉祥滨, 于志刚, 姚庆祯等. 水库对河流营养盐滞留效应研究进展. 湖泊科学, 2009, **21**(5): 614-622.]
- [28] Nilsson C, Reidy CA, Dynesius M *et al.* Fragmentation and flow regulation of the world's large river systems. *Science*, 2005, **308**(5720): 405-408.
- [29] Yang J, Lv H, Yang J *et al.* Decline in water level boosts cyanobacteria dominance in subtropical reservoirs. *Science of the Total Environment*, 2016, **557/558**: 445-452.

附表 福建省各县区面积、人口、GDP 和水库概况*

Appendix The administration area, population, GDP and reservoirs information of each county in Fujian Province

地级市	县区	面积/ km ²	2014 年人口/ 万人	单位面积人口/ (万人/100 km ²)	GDP/ 亿元	水库数量/ 座	蓄水量/ 亿 m ³
宁德	寿宁县	1431.98	17.63	1.23	63.66	36	2.090
宁德	福鼎市	1487.76	53.50	3.60	282.47	57	1.549
宁德	柘荣县	539.39	8.90	1.65	45.50	16	0.429
宁德	福安市	1765.10	56.95	3.23	335.06	31	1.669
宁德	周宁县	1040.09	11.29	1.09	45.04	22	2.501
宁德	霞浦县	1470.79	46.30	3.15	166.27	29	0.541
宁德	屏南县	1487.96	13.67	0.92	58.86	37	2.052
宁德	蕉城区	1408.86	44.09	3.13	239.40	19	3.138
宁德	古田县	2375.74	32.67	1.38	139.83	64	4.257
福州	罗源县	1070.78	20.80	1.94	172.67	30	0.272
福州	闽侯县	2128.94	69.50	3.26	412.73	81	1.186
福州	闽清县	1495.46	23.60	1.58	130.35	41	20.845
福州	连江县	1128.92	57.60	5.10	325.35	89	2.637
福州	晋安区	565.81	83.60	14.78	447.04	44	0.341
福州	马尾区	227.02	24.80	10.92	373.92	24	0.198
福州	鼓楼区	35.41	71.50	201.92	1011.22	0	0
福州	台江区	17.23	46.50	269.88	342.10	0	0
福州	仓山区	146.71	79.70	54.32	396.04	1	0.001
福州	长乐市	670.16	70.90	10.58	533.08	36	0.234
福州	永泰县	2230.65	25.00	1.12	123.78	54	2.094
福州	福清市	1592.23	127.50	8.01	728.68	118	2.983
福州	平潭县	306.97	42.00	13.68	171.24	8	0.034
莆田	涵江区	747.96	48.10	6.43	368.05	25	0.368
莆田	仙游县	1839.46	84.60	4.60	275.92	82	1.892
莆田	城厢区	481.36	42.60	8.85	260.54	21	2.073
莆田	荔城区	270.51	51.30	18.96	294.78	3	0.027
莆田	秀屿区	532.31	58.40	10.97	302.79	22	0.070
泉州	德化县	2204.64	28.20	1.28	170.15	51	2.488
泉州	永春县	1458.07	45.50	3.12	290.25	37	0.857
泉州	安溪县	2994.39	99.80	3.33	410.19	59	2.211
泉州	南安市	2010.58	146.50	7.29	780.51	197	8.617
泉州	洛江区	371.54	20.80	5.60	132.89	22	0.924
泉州	泉港区	296.20	32.40	10.94	344.38	14	0.382
泉州	惠安县	691.17	98.40	14.24	691.81	28	0.145
泉州	丰泽区	108.30	55.60	51.34	442.25	6	0.036
泉州	鲤城区	51.89	42.70	82.29	340.19	0	0
泉州	晋江市	668.64	206.50	30.88	1492.86	35	0.381
泉州	石狮市	156.52	67.60	43.19	638.37	13	0.044
厦门	同安区	649.98	53.60	8.25	242.77	29	0.545
厦门	翔安区	348.14	32.70	9.39	355.42	29	0.160
厦门	集美区	251.04	63.30	25.22	458.31	13	0.477
厦门	海沧区	168.19	32.50	19.32	483.45	16	0.056
厦门	湖里区	59.55	100.60	168.93	753.75	1	0.059

续附表

地级市	县区	面积/ km ²	2014 年人口/ 万人	单位面积人口/ (万人/100 km ²)	GDP/ 亿元	水库数量/ 座	蓄水量/ 亿 m ³
厦门	思明区	74.28	98.30	132.34	979.88	6	0.013
漳州	华安县	1277.49	16.21	1.27	90.42	16	2.376
漳州	南靖县	1962.44	33.89	1.73	195.46	39	1.568
漳州	长泰县	900.32	21.68	2.41	167.15	39	0.718
漳州	芗城区	250.91	58.44	23.29	419.33	7	0.010
漳州	龙文区	125.84	18.56	14.75	146.54	4	0.010
漳州	龙海市	1258.71	92.47	7.35	573.90	91	0.602
漳州	平和县	2340.00	50.01	2.14	159.84	44	0.629
漳州	漳浦县	2001.39	81.22	4.06	311.83	229	2.121
漳州	云霄县	1025.82	41.56	4.05	136.09	66	1.719
漳州	诏安县	1268.65	60.19	4.74	166.29	33	0.564
漳州	东山县	216.84	21.77	10.04	139.50	13	0.047
南平	蒲城县	3377.81	29.80	0.88	107.80	84	3.043
南平	武夷山市	2803.03	23.10	0.82	123.77	36	2.849
南平	光泽县	2240.12	13.30	0.59	69.08	37	1.578
南平	松溪县	1043.79	11.80	1.13	39.52	33	1.631
南平	建阳市	3385.16	29.20	0.86	140.14	71	5.587
南平	邵武市	2858.94	27.40	0.96	185.42	42	3.786
南平	政和县	1745.65	16.50	0.95	43.40	30	0.858
南平	建瓯市	4200.44	45.20	1.08	175.92	58	3.465
南平	顺昌县	1979.50	18.70	0.94	84.05	19	2.806
南平	延平区	2654.14	47.00	1.77	263.46	30	3.689
三明	泰宁县	1528.66	11.10	0.73	76.93	26	10.273
三明	将乐县	2241.06	14.90	0.66	96.95	14	3.155
三明	建宁县	1716.43	12.10	0.70	74.14	22	1.049
三明	宁化县	2407.15	27.50	1.14	101.58	47	1.356
三明	明溪县	1730.34	10.10	0.58	55.21	28	1.349
三明	沙县	1798.90	22.80	1.27	179.96	57	2.161
三明	梅列区	351.31	17.90	5.10	224.44	6	0.801
三明	尤溪县	3421.82	35.30	1.03	176.68	73	12.943
三明	三元区	300.06	19.90	6.63	113.55	15	1.874
三明	清流县	1806.30	13.50	0.75	75.86	58	12.093
三明	永安市	2931.45	34.80	1.19	297.23	44	2.915
三明	大田县	2231.64	31.10	1.39	148.68	28	1.630
龙岩	长汀县	3104.52	39.80	1.28	157.72	53	3.401
龙岩	连城县	2578.52	24.40	0.95	137.79	43	1.355
龙岩	漳平市	2955.51	23.90	0.81	172.07	47	2.850
龙岩	新罗区	2672.29	70.60	2.64	607.66	27	1.083
龙岩	武平县	2635.69	27.40	1.04	134.61	105	2.793
龙岩	上杭县	2854.57	37.00	1.30	226.70	69	3.236
龙岩	永定县	2226.48	35.90	1.61	185.05	24	11.338

* 县级行政区面积和人口数据源自 2015 年福建省统计年鉴,蓄水量为本研究估算值。