

一种改进的中国水资源空间网格化方法

郭兵^{1,2,3,4}, 陈淑婷^{1,*}, 杨飞^{5*}, 范业稳³, 杨潇¹, 张慧¹, 何田莉¹

(1. 山东理工大学建筑工程学院, 山东 淄博 255000; 2. 华东师范大学地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200241; 3. 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 433079; 4. 区域开发与环境响应湖北省重点实验室, 武汉 430062; 5. 资源与环境信息系统国家重点实验室, 中国科学院地理研究所, 北京 100101)

摘要: 为揭示中国水资源的时空分布格局, 引入降水量、干燥度、蒸散发、坡度、植被覆盖度、集水区等 6 个因素, 结合分区权重赋值法, 提出了一种改进的对中国水资源空间分配模型。结果表明: 基于二级流域的改进水资源空间分配模型对我国具有较高的适用性, 其中在三级流域和省级行政单元上的空间分配总体误差分别为 7.89% 和 7.25%。相比黄河流域、淮河流域和西北诸河流域, 长江流域、松花江流域和东南诸河流域的水资源空间分配精度更优, 其原因在于该区域的水资源空间分布受自然因素(降水量、蒸散发等)影响更为显著。中国水资源空间分布从西北到东南呈增长趋势, 这与降水的空间格局基本吻合。南方诸河流域的水资源量主要来源于降水, 而冰川融水则是西北诸河流域及多数内陆河流域的主要水源。水资源与国内生产总值(GDP)密度之间的关系随城市规模和地理位置发生变化。这些可为区域水资源管理提供科学依据和数据依据。

关键词: 水资源; 网格法; 二级流域; 空间分布; 降水

doi: 10.11926/jtsb.3966

An Improved Gridded Water Resource Distribution for China

GUO Bing^{1,2,3,4}, CHEN Shu-ting¹, YANG Fei^{5*}, FAN Ye-wen³, YANG Xiao¹, ZHANG Hui¹, HE Tian-li¹

(1. School of Civil Architectural Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, Shandong, China; 2. Key Laboratory of Geographic Information Science (Ministry of Education), East China Normal University, Shanghai 200241, China; 3. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 4. Hubei Key Laboratory of Regional Development and Environmental Response (Hubei University), Wuhan 430062, China; 5. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: In order to reveal the spatial temporal distribution pattern of water resource in China, six factors, including precipitation, aridity, evapotranspiration, slope, vegetation, and catchment area, were introduced, an improved water resource gridded model for China was proposed based on partition-weight assignment method. The results showed that the improved water resource gridded method based on second-order basin had high applicability for China, with the overall SE of 7.89% for third-order basins and 7.25% for provincial administrative units. The spatial allocation precision of Yangtze River basin, Songhua River basin, and southeastern River Basins was better than that of Yellow River Basin, Huaihe River Basin, and northwestern River Basins,

收稿日期: 2018-07-12 接受日期: 2018-10-08

基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2018BD001); 国家重点研发计划项目(2017YFA0604804); 华东师范大学地理信息科学教育部重点实验室开放基金项目(KLGIS2017A02); 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室开放基金项目(17104); 区域开发与环境响应湖北省重点实验室开放基金项目(2017(B)003); 山东省高等学校科学技术计划项目(J18KA181)资助

This work was supported by the Natural Science Foundation of Shandong Province (Grant No. ZR2018BD001), the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2017YFA0604804), the Open Fund of Key Laboratory of Geographic Information Science (Ministry of Education), East China Normal University (Grant No. KLGIS2017A02), the Open Fund of State Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University (Grant No. 17104); the Project of Hubei Key Laboratory of Regional Development and Environmental Response (Hubei University) [Grant No. 2017(B)003], and the Project of Shandong Province Higher Educational Science and Technology Program (Grant No. J18KA181).

作者简介: 郭兵(1987~), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为生态环境遥感与灾害遥感。E-mail: guobingjl@163.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: yangfei@igsnr.ac.cn

which was significantly influenced by the nature factors, such as precipitation and evapotranspiration. There was a rising tendency from northwest to southeast in spatial distribution of water resources, which was basically consistent with the spatial pattern of precipitation. The water resources of the southern River Basins mainly came from precipitation, and the glacial melt water was the main water sources of the northwestern River Basins and most inland River Basins. The relationship between the water resource and GDP density differed with the urban city scale and geographical locations. These could provide scientific bases and decision support for the management of regional water resource.

Key words: Water resource; Gridded method; Second-order basin; Spatial distribution; Precipitation

水资源是影响人类生存和区域可持续发展的关键因素,它由地表水(湖泊、河流、湿地)和地下水组成(岩层的裂隙水和土壤孔隙水)^[1-3]。地表水和地下水可以通过积聚和渗流来相互补充^[4]。在过去的几十年里,由于经济的快速发展、城市化和全球气候变暖,区域水资源短缺日益严重^[5]。此外,生态环境问题,如干燥度、盐碱化、荒漠化,也因水资源过度开发而日益加剧^[6]。水资源短缺问题使全球经济和社会发展受到严重制约,甚至可能成为国际冲突和战争的导火索。尽管在中国水资源的总量($2.81 \times 10^{12} \text{ m}^3$)是丰富的,但由于人口的大量增长,人均水资源($2\ 200 \text{ m}^3$)要小得多,排名世界第 121 位,并且在时间与空间上,水资源管理不够完善,水资源空间分布也不均匀^[7-10]。因此,对区域水资源时空分布特征进行定量评价和描述,这对于合理管理区域水资源,缓解水资源供需矛盾具有重要意义。

当前国内统计的水资源量大多是基于多边形为单元(行政区或流域)进行组织和共享的,但其并不能统计多边形单元内的水资源空间分布差异^[11-15]。因此,定量获取像元尺度上水资源详细信息是研究经济增长与水资源盈缺关系的迫切需要^[16-19]。许多研究已开展将多边形统计单元的水资源分配到网格单元的研究^[20-28]。Tu 等^[14]利用 Moran's I 分析了三级流域水资源的格局,建立了流域水资源及其相关因素的自相关模型。然而,该模型仅考虑了降水和坡度的因素,忽略了集水区的影响。Liu 等^[22]基于 GIS 和 AHP 提出了农业用水分配的空间定量描述方法,但忽略了植被降水和水分季节性变化。王利双等^[20]提出了区域水资源的分配方法,包括植被覆盖度、坡度、降水量和集水区 4 个因素,却忽略了水分蒸散发的影响。雷莹等^[23]选择了 3 个因素(距离、土地利用和坡度)来建立水资源空间分配方法,然而没有考虑气候因素。

本研究基于二级流域数据,引入植被覆盖度、坡

度、降水量、干燥度、蒸散发、集水区等 6 个因子,改进了水资源空间分配方法。考虑到我国水资源的时空分布差异性,本研究利用分区权重赋值方法确定了不同级流域内影响水资源空间分配相关因素的相对重要性。本文将二级流域的统计水资源数据进行空间分配,形成 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 的网格单元水资源数据,从而进一步揭示中国水资源的时空分布格局及其差异性。

1 材料和方法

1.1 研究区域

中国包含 10 个一级流域和 80 个二级流域³⁻⁷(图 1)。由于研究区地域辽阔,生态环境差异显著,且受季风气候影响显著,我国水资源时空分布极度不均匀^[15,18]。总体上,水资源总量自西北内陆至东南沿海地区呈现增加趋势。此外,对中国北方地区面临的日益严重的水资源短缺,而南部水资源则相对丰富。由于水土资源区域组合不匹配,各地区水资源供需矛盾较大^[8,19]。

1.2 水资源的相关影响因素

区域水资源总量包括降水形成的地表和地下水产水量,河川径流量主要是指河流、湖泊、冰川等地表水体逐年更新,对河川径流量和地下水资源的影响直接影响着区域水资源总量^[15,19]。本研究结合国内外相关研究并充分考虑不同自然因素对区域水资源分配的影响,选取了 6 个代表性影响因子。

降水量、干燥度和蒸散发 考虑到水循环的过程,液态水通过蒸发蒸腾作用转化为水蒸气,在一定条件下水蒸气也可以变为液体(雨水)或固体(雪)^[21]。蒸散发的过程可以减少地表水资源(河流或湖泊),而降水则会增加地表水资源量。因此,年降水量与水资源量呈显著正相关,而蒸散发和水资源则呈负相关。蒸散发可以反映实际的水分损失,而干燥度则表明水蒸散的潜在能力^[15]。因此,年降水

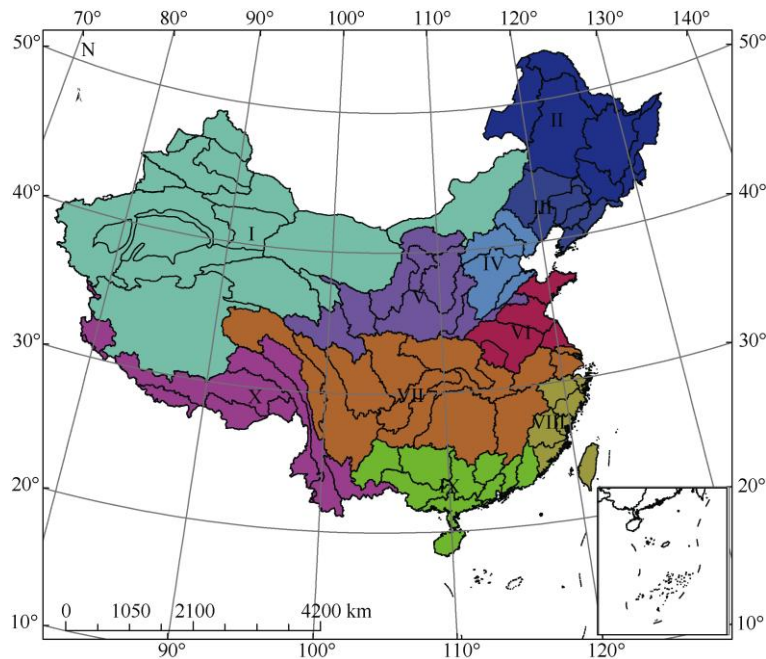


图 1 一级流域空间分布。I: 西北诸河流域; II: 松花江流域; III: 辽河流域; IV: 海河流域; V: 黄河流域; VI: 淮河流域; VII: 长江流域; VIII: 东南诸河流域; IX: 珠江流域; X: 西南诸河流域。

Fig. 1 Spatial distributions of ten first-order basins. I: Northwestern River Basin; II: Songhua River Basin; III: Liaohe River Basin; IV: Haihe River Basin; V: Yellow River Basin; VI: Huaihe River Basin; VII: Yangtze River Basin; VIII: Southwestern River Basin; IX: Pearl River Basin; X: Southwestern River Basin.

量、干燥度和蒸散发作为气象要素, 是影响区域水资源总量的重要指标。年水蒸散发量数据可从 MOD16A3 中获得, 年降水量和干燥度则基于气象站点日数据根据公式(1)和(2)计算获取。

$$P_{\text{year}} = \sum_{i=1}^{365} P_{\text{daily}} \quad (1)$$

$$D = 0.16 \sum_{\geq 10^{\circ}\text{C}} P \quad (2)$$

其中, P_{year} 为年降水量(mm); P_{daily} 为每日的降水量(mm); D 为干燥指数; $\sum_{\geq 10^{\circ}\text{C}}$ 为一年内高于 10°C 的空气温度之和; P 为空气温度高于 10°C 时期的降水之和。

坡度 地形地貌对水资源的分布和储存产生显著的影响^[29]。水流的流速随着坡度或地形起伏的增加而增加。同时, 由于快速退水导致水的汇聚时间变短, 水的截留能力会变小, 这将导致严重的水土流失, 因而, 坡度与水资源量呈负相关。该指标基于 DEM 数据集, 利用 ArcGIS 10.2 的坡度工具计算获取。

集水区 集水区是指一平方公里内集水区的面积百分比。河流、湖泊、湿地和冰川在内的水面流域存储的地表水资源量占水资源总量很大一部分^[12,19,28]。因此, 水资源与流域面积呈显著正相关。然而, 不同类型的流域水资源量贡献率存在较

大差异。根据蓄水能力大小, 确定河流、湖泊、水库、坑塘的相对权重为 1, 冰川、湿地和河/海滩的相对权重分别为 0.8、0.7 和 0.5。

植被覆盖度 区域植被覆盖在水土保持和地表径流调控中起着重要作用。森林具有较强的水源涵养能力, 能增加土壤入渗率和地下径流, 减少雨季地表径流^[15,29], 进而可以改变年径流时空分布格局。草地可以改善湖泊的库容量, 减弱降雨侵蚀力和防止土壤侵蚀。植被状况(植被盖度和植被类型)对径流的蒸散发、截留和产流过程均有一定程度的影响。另一方面, 植被的生长在很大程度上受到水资源空间分布的限制。因此, 植被覆盖度与水资源量呈正相关。本研究基于 MOD13A2 用 $VC = (ndvi - ndvi_{\text{soil}}) / (ndvi_{\text{veg}} - ndvi_{\text{soil}})$ 公式计算, 式中, VC 为植被覆盖度; $ndvi_{\text{veg}}$ 为全覆盖植被下 NDVI 值(置信区间 $CL=0.95$); $ndvi_{\text{soil}}$ 为全裸土情况下 NDVI 值(置信区间 $CL=0.05$)。

1.3 数据

839 个气象站的日降水、日均气温等数据可以免费从中国气象数据共享服务系统下载。由于气象站的空间分布不均匀(西部地区站点稀疏),

本研究基于 TRMM 卫星降水数据进行了站点加密, 并利用公式 $P_d=2.048 \times p_{trmm}^{0.823}$ 构建加密站点的时间序列数据集^[9,14,29], 式中, P_d 指气象站的日降水量; p_{trmm} 是由 TRMM3B42 的 3 h 降水产生的日降水量。本研究在站点加密区内随机选取了 50 个气象站点, 对重建的时间序列数据进行了精度验证, 总体精度为 91.2%, 总体上满足本研究的需求。

1:10 万的土地利用类型数据由中国科学院遥感与数字地球研究所提供, 该数据集基于 Landsat TM/ETM+ 解译获取。数字高程模型 (DEM) 数据空间分辨率为 90 m, 可在 <http://srtm.csi.cgiar.org> 上免费下载。MOD13A2 NDVI 数据集空间分辨率为 1 km×1 km, 时间分辨率为 15 d。蒸散发数据来源于 MOD16A3, 为年合成的产品, 空间分辨率为 500 m, 上述两种产品都取自美国国家航空航天局的地球观测系统 (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>)。为了便于后期的指标运算, DEM、MOD13A2 NDVI、MOD16A3 蒸散发数据均重采样为 1 000 m, 而基于气象站点的指标数据则利用 Cokriging 方法进行矢栅格式转换。

1.4 方法

指标标准化 指标标准化用于消除各因子

之间的量纲差异^[29]。同时, 由于各因子在水资源空间分布中起着不同的作用, 如降水可以增加区域水资源, 属于正向因子, 相反, 蒸散发会减小地表水资源, 属于负向因子。故此, 正向因子和负向因子的标准化公式分别为^[30-33]: $V_i=(I_i-I_{i,min})/(I_{i,max}-I_{i,min})$ 和 $V_i=(I_{i,max}-I_i)/(I_{i,max}-I_{i,min})$, 其中 V_i 指归一化后指标; $I_{i,min}$ 为原始指标的最小值, $I_{i,max}$ 为原始指标的最大值, I_i 为原始指标。

分区权重赋值法 根据各个因子在评价体系中的相对重要性, 为其赋予适当的权重。由于整个研究区域生态环境差异显著, 各因素对水循环和水资源分配过程的影响也各不相同^[29,34-35]。本研究根据 10 个一级流域统计水资源量与其影响因子的相关系数 (表 1), 结合国内外相关研究及专家经验知识利用层次分析法 (AHP) 分别确定各一级流域的影响因子权重 (表 2)。

水资源的空间分配方法 基于 GIS 和 RS 构建因变量和自变量的回归统计模型, 将统计的区域水资源转化为连续格网化数据, 进而可以更好地反映统计单元内数据的时空分布差异性^[29,36-39]。在水资源的空间分配过程中, 所有的影响因子均采用相同的投影和空间分辨率, 水资源空间分配方法按下式计算^[21,29]:

表 1 10 个一级流域水资源量与其影响因子的相关系数 ($P < 0.01$)

Table 1 Correlation coefficients ($P < 0.01$) between water resource and its associated factors for ten first-order basins

	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K
蒸散发 Evapotranspiration (ET)	0.85	0.67	0.96	0.30	0.34	0.38	0.45	0.01	0.15	0.93
植被覆盖度 Vegetation coverage (VC)	0.96	0.90	0.90	0.69	0.61	0.53	0.96	0.22	0.42	0.97
干燥度 Aridity	0.93	0.78	0.90	0.46	0.34	0.22	0.98	0.03	0.72	0.94
集水区 Catchment area (CA)	0.78	0.55	0.91	0.57	0.38	0.19	0.60	0.02	0.87	0.19
降水量 Precipitation	0.96	0.93	0.97	0.74	0.78	0.83	0.95	0.53	0.18	0.85
坡度 Slope	0.94	0.83	0.91	0.60	0.55	0.50	0.96	0.22	0.62	0.93

A: 松花江流域; B: 辽河流域; C: 海河流域; D: 黄河流域; E: 淮河流域; F: 长江流域; G: 东南诸河流域; H: 珠江流域; J: 西南诸河流域; K: 西北诸河流域。下表同。

A: Songhua River Basin; B: Liaohe River Basin; C: Haihe River Basin; D: Yellow River Basin; E: Huaihe River Basin; F: Yangtze River Basin; G: Southeastern River Basin; H: Pearl River Basin; J: Southwestern River Basin; K: Northwestern River Basin. The same is following Tables.

表 2 基于层次分析法 (AHP) 的因子权重赋值 (以长江流域为例)

Table 2 Relative weights of factors for analytic hierarchy process (AHP): a case of Yangtze River Basin

因素 Factor	蒸散发 Evapotranspiration	植被覆盖度 Vegetation coverage	干燥度 Aridity	集水区 Catchment area	降水量 Precipitation	坡度 Slope	权重 Wight
蒸散发 Evapotranspiration	1	1/3	2	2	1/2	1/4	0.11
植被覆盖度 Vegetation coverage		1	3	3	2	1/2	0.24
干燥度 Aridity			1	1	1/2	1/4	0.07
集水区 Catchment area				1	1/3	1/4	0.06
降水量 Precipitation					1	1/2	0.17
坡度 Slope						1	0.35

$$S_j = S \cdot \frac{\sum_{i=1}^n A_{ij} w_i}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n A_{ij} w_i} \quad (3)$$

式中, S_j 为第 j 个栅格分配的水资源量; S 为统计单元水资源量; m 为统计单元内的栅格数量; n 为相关影响因子的数量; A_{ij} 为标准化影响因子 i ; w_i 为影响因子 i 的权重。

精度验证方法 为了定量地检验水资源空间分配的精度, 本研究利用 ArcGIS 10.2 的区域统计工具获得了三级流域和省级行政单元的水资源量, 模拟值与统计数据间的空间分配误差^[15,21,29]用公式 $SE = |(W_{st} - W_{si}) / W_{st}|$ 计算, 式中, SE 为空间分配误差; W_{st} 为统计数据; W_{si} 为模拟值。

2 结果和分析

2.1 水资源空间分配过程

首先对 6 个影响因子进行标准化以消除量纲差异(图 2), 其次, 根据各一级流域的水资源量及其与影响因子的相关系数, 结合国内外相关研究和专家知识利用 AHP 确定各影响因子的权重(表 3), 然后, 计算各因子综合权重的空间分布, 最后, 根据综合权重和二级流域的统计水资源量得到了网格化水资源空间分布图(图 3)。

2.2 水资源空间分配精度评估

由于三级流域数据的相对缺乏, 本研究收集并使用了 2013 年 127 个三级流域的水资源量统计数据来验证改进的水资源空间分配模型的精度(图 4)。验证结果表明改进的水资源空间分配方法具有较高的精度, 总体空间分配误差(SE)为 7.89%, 相对于王世新等^[20]的研究结果(平均 SE 为 17.6%), 空间分配精度有了较大提高。在长江流域和松花江流域, 有 71 个三级流域的 SE 为 0~10%, 主要原因在于该区域水资源的空间分布多受自然因素的影响, 如降水量、植被覆盖度和坡度^[40-43], 受人类活动干扰较小。在黄河流域、雅鲁藏布江流域和辽河流域有 30 个三级流域的 SE 为 10%~20%, 其中雅鲁藏布江流域的水资源空间分配精度受广泛分布的冰川影响较大。此外, 在东部地区有 25 个三级流域的 SE 为 20%~30%, 该区域的水资源分配精度则受城市化的影响较大。而雅鲁藏布江流域存在一

个三级流域的 $SE > 30%$, 其原因在于该三级流域内冰川和荒漠分布广泛, 进而对其空间分配精度产生较大影响^[1]。

为了进一步验证水资源空间分配模型的适用性, 本研究还利用省级行政单元的统计数据对其空间分配精度进行了评价。从图 5 可见, 18 个省级行政单位的 $SE < 5%$, 8 个省级行政单位的 SE 为 5%~15%, 有 3 个省级行政单位 SE 为 15%~25%, 这主要受密集的人类活动和城市化进程影响。宁夏回族自治区的 $SE > 25%$, 原因在于该省份沙漠广布以及巨大的工业和农业用水量^[44]。总体上, 水资源空间分配误差在省级行政单元上平均值为 7.25%, 表明了该模型对我国水资源的空间化具有较高的适用性。

2.3 水资源空间分布格局分析

从图 3 可见, 水资源空间分布从西北到东南呈增长趋势, 这与降水的空间格局基本吻合。长江流域、东南诸河流域、珠江流域水资源相对丰富, 其主要原因在于该地区降水量充沛, 植被盖度高, 水源涵养能力强。松花江流域的水资源量相对较高, 与该地区的植被盖度、水分蒸散发有关。雅鲁藏布江流域及藏南地区由于该地区冰川广布, 冰雪融水丰富, 加上受西南季风的影响, 降水相对丰富, 导致该地区的水资源量相对较高。黄河流域和西北诸河流域的水资源量则相对较小, 其主要原因在于该区域降水相对较少, 水分蒸散发量较大, 加上区域植被覆盖度较低, 导致了水资源量总体较小。总体上, 我国南方诸流域的水资源量主要来源于降水, 而冰川融水则是西北诸流域及多数内陆河流域的主要水源。天山、昆仑山、阿尔泰山的冰川分布广泛, 因而西北诸流域的水资源量比内蒙古高原诸流域要大得多。西南诸流域地处横断山区, 地势险峻, 受坡度影响, 其水资源量比长江流域要小。

2.4 水资源短缺状况空间格局分析

本研究利用人口空间化公里网格数据和 31 个省级行政单元的人均用水量计算了水资源短缺量(WRD)。从图 6 可见, 中国北方的水资源短缺状况比南方严重, 城市区域的缺水现象较为普遍, 特别是京津冀地区、中原经济区、沪宁杭经济带、珠三角经济带等区域。长江流域中上游、东南诸河流域、西南诸河流域、珠江流域、松花江流域水资源短缺状况普遍较轻, 主要原因在于该区域水资源相对丰富, 能够有

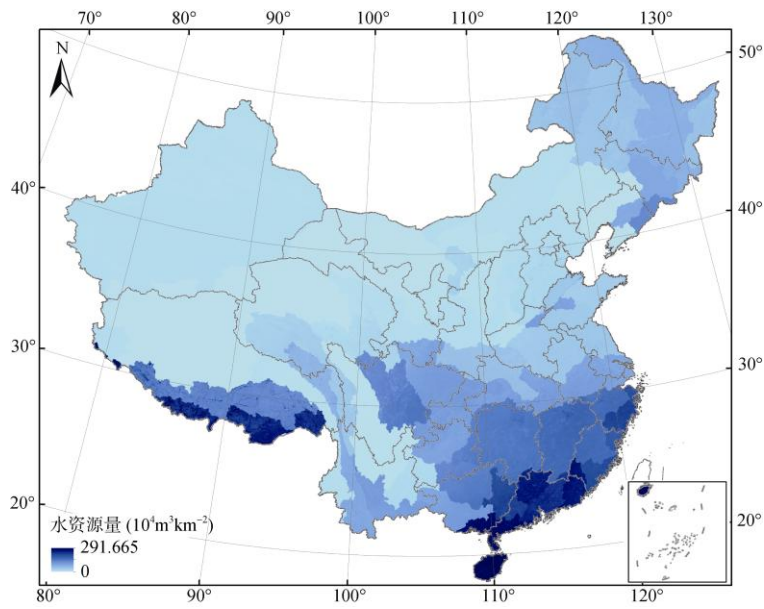


图 3 网格化水资源的空间分布格局

Fig. 3 Spatial distribution of gridded water resources

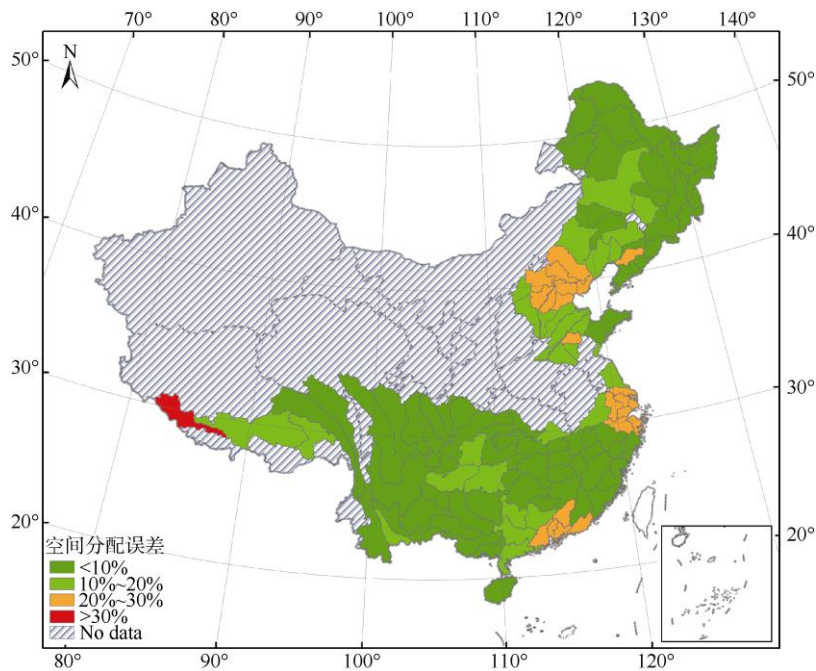


图 4 基于 127 个三级流域的水资源空间分配误差

Fig. 4 Spatial allocation error of gridded water resource based on 127 third-order basins

效的满足工农业生产用水。由于人口和水资源均相对较少, 中国西北部大部分地区属于供需平衡的状态 ($-25 \times 10^4 \text{ m}^3 \text{ km}^{-2} < \text{WRD} \leq 25 \times 10^4 \text{ m}^3 \text{ km}^{-2}$)。雅鲁藏布江流域及藏南诸河流域的水资源量较大, 加上该地区工业发展水平较低, 工农业生产用水量不大, 因此该流域的水资源较为充沛。

2.5 国内生产总值比重与水资源的关系

图 7 表明, 国内生产总值(GDP)密度与水资源量之间存在双峰关系, 根据水资源量大小和供需关系可将城市分为 4 种类型, 其中曲线 AB、BC 部分多为北方城市, 曲线 CD、DE 多为南方城市。曲线 AB 部分($\text{WR} < 20 \times 10^4 \text{ m}^3 \text{ km}^{-2}$), 随着城市 GDP 不

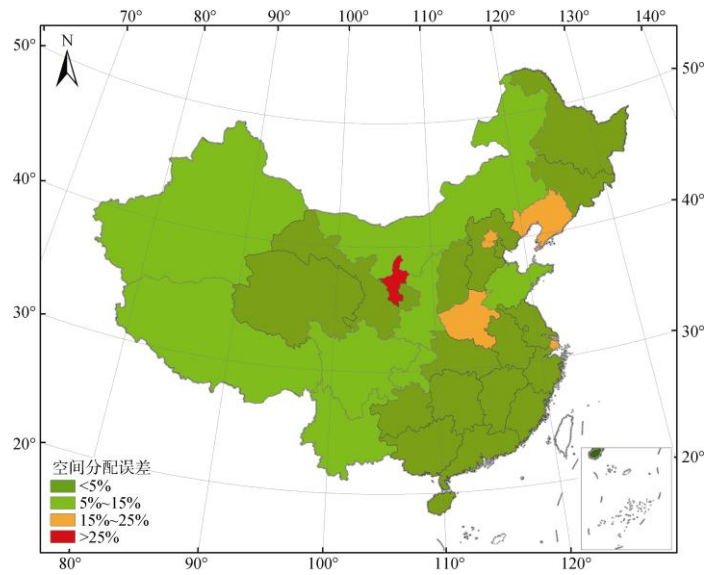


图 5 基于省级行政单元的水资源空间分配误差

Fig. 5 Spatial allocation error of gridded water resource based on provincial administrative units

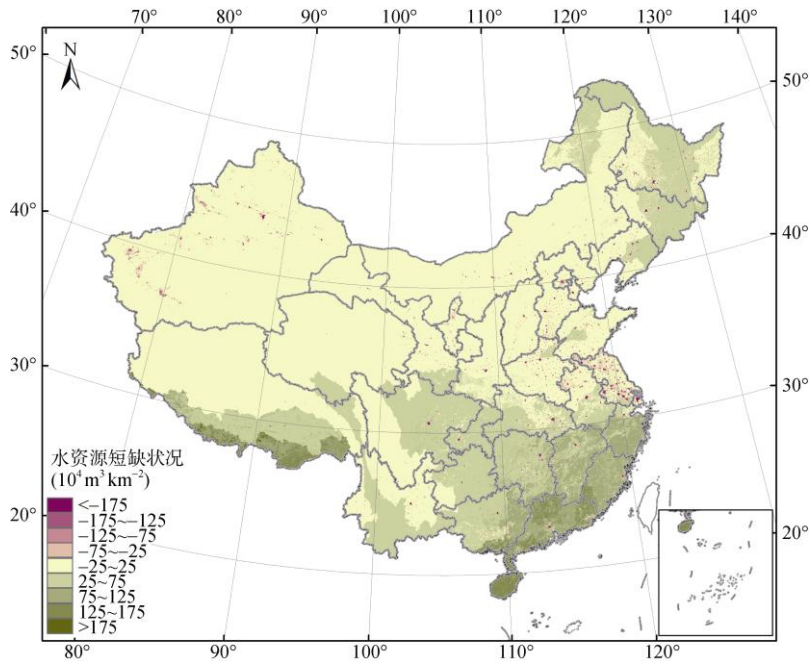


图 6 水资源短缺的空间格局

Fig. 6 Spatial patterns of water resource deficit

断增长，水资源的消耗呈增长趋势，GDP 密度与水资源量之间存在正相关关系，主要原因在于区域水量之间存在负相关关系，符合该情况的城市多位于北方，如天津、郑州、济南、太原等，区域经济发展的需水量远超过地区水资源量，导致经济发展受到水资源的约束。曲线 CD 部分($70 \times 10^4 \text{ m}^3 \text{ km}^{-2} \leq \text{WR} < 130 \times 10^4 \text{ m}^3 \text{ km}^{-2}$)，水资源量和 GDP 密度之间存在

正相关的关系，该类城市多位于南方，如苏州、杭州、无锡、成都、昆明等城市，丰富的水资源有利于各种产业的发展，特别是工农业用水。曲线 DE 部分($\text{WR} \geq 130 \times 10^4 \text{ m}^3 \text{ km}^{-2}$)，随着水资源量的增加，GDP 密度呈现下降趋势，该类城市多位于南方，如广州等，水资源量已经无法满足城市化进程中的急剧增长耗水量。

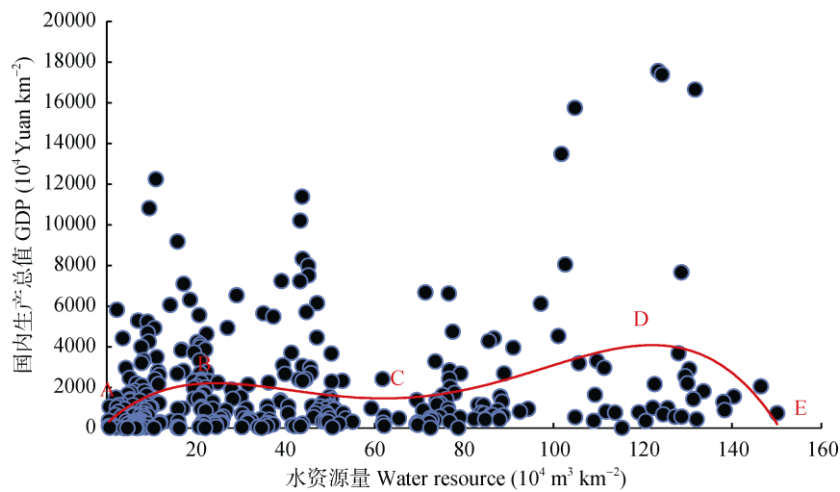


图7 国内生产总值(GDP)密度与水资源的关系

Fig. 7 Relationship between GDP density and water resource

3 讨论和结论

本文充分考虑了10个一级流域生态环境的空间分布格局,引入了降水量、干燥度、蒸散发、坡度、植被覆盖度、集水区等6个因素,结合分区权重赋值法建立了中国水资源空间分配模型,进而分析了中国水资源的空间分布格局。

(1) 基于二级流域的改进水资源空间分配模型对我国具有较高的适用性,对三级流域的整体SE为7.89%,省级行政单元为7.25%。其中,长江流域和松花江流域总体的水资源空间分配精度较高,主要原因在于该区域水资源的空间分布多受自然因素的影响,如降水量、植被覆盖度和坡度,受人类活动干扰较小。而黄河流域、雅鲁藏布江流域和辽河流域的水资源空间分配精度较低,其中雅鲁藏布江流域存在1个三级流域的SE>30%,原因是该三级流域内冰川和荒漠分布广泛,进而对其空间分配精度产生较大影响

(2) 中国水资源空间分布从西北到东南呈增长趋势,这与降水的空间格局基本吻合。其中,长江流域、东南诸河流域、珠江流域水资源相对丰富,其主要受降水量、植被盖度等影响。黄河流域和西北诸河流域的水资源量则相对较小,其主要原因在于该区域较少的降水及强烈的蒸散发,加上较低的植被覆盖度,导致了水资源量总体较小。此外,我国南方诸河流域的水资源量主要来源于降水,而冰川融水则是西北诸河流域及多数内陆河流域的主要水源。

(3) 水资源量与GDP密度间的关系随城市规模和地理位置发生变化,根据水资源量大小和供需关系可将城市分为4种类型,南方-缺水城市(如广州)、南方-盈水城市(如杭州、苏州)、北方-缺水城市(如郑州)、北方-盈水城市(如乌鲁木齐、银川)。

参考文献

- [1] WU F, ZHAN J Y, ZHANG Q, et al. Evaluating impacts of industrial transformation on water consumption in the Heihe River Basin of northwest China [J]. Sustainability, 2014, 6(11): 8283–8296. doi: 10.3390/su6118283.
- [2] BAO C, HE D M. The causal relationship between urbanization, economic growth and water use change in provincial China [J]. Sustainability, 2015, 7(12): 16076–16085. doi: 10.3390/su71215803.
- [3] WANG J X, HUANG J K, ROZELLE S, et al. Agriculture and groundwater development in northern China: Trends, institutional responses, and policy options [J]. Wat Policy, 2007, 9(S1): 61–74. doi: 10.2166/wp.2007.045.
- [4] DO V H, THOMAS-AGNAN C, VANHEMS A. Accuracy of areal interpolation methods for count data [J]. Spat Stat, 2015, 14: 412–438. doi: 10.1016/j.spasta.2015.07.005.
- [5] YOUNG O R, BERKHOUT F, GALLOPIN G C, et al. The globalization of socio-ecological systems: An agenda for scientific research [J]. Glob Environ Chang, 2006, 16(3): 304–316. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2006.03.004.
- [6] YU X M, GENG Y, HECK P, et al. A review of China's rural water management [J]. Sustainability, 2015, 7(5): 5773–5792. doi: 10.3390/su7055773.

- [7] QIN B Q, ZHU G W, GAO G, et al. A drinking water crisis in Lake Taihu, China: Linkage to climatic variability and lake management [J]. *Environ Manage*, 2010, 45(1): 105–112.
- [8] SHI Q L, CHEN S Y, SHI C C, et al. The impact of industrial transformation on water use efficiency in northwest region of China [J]. *Sustainability*, 2015, 7(1): 56–74. doi: 10.3390/su7010056.
- [9] FÜSSEL H M. Vulnerability: A generally applicable conceptual framework for climate change research [J]. *Glob Environ Change*, 2007, 17(2): 155–167. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2006.05.002.
- [10] HE Z A, ZHAO K. Investigation on drinking water quality in rural areas of Hubei Province [J]. *J Environ Health*, 2000, 17(2): 87–89. doi: 10.3969/j.issn.1001-5914.2000.02.007.
何祖安, 赵亢. 湖北省农村供水水质调查 [J]. *环境与健康杂志*, 2000, 17(2): 87–89. doi: 10.3969/j.issn.1001-5914.2000.02.007.
- [11] XIA J, SU R Q, HE X W, et al. Water resources problems in China and their countermeasures and suggestions [J]. *Bull Chin Acad Sci*, 2008, 23(2): 116–120. doi: 10.3969/j.issn.1000-3045.2008.02.010.
夏军, 苏人琼, 何希吾, 等. 中国水资源问题与对策建议 [J]. *中国科学院院刊*, 2008, 23(2): 116–120. doi: 10.3969/j.issn.1000-3045.2008.02.010
- [12] GENG Y, WANG M L, SARKIS J, et al. Spatial-temporal patterns and driving factors for industrial wastewater emission in China [J]. *J Clean Prod*, 2014, 76: 116–124. doi: 10.1016/j.jclepro.2014.04.047.
- [13] WANG H, YOU J J. Advancements and development course of research on water resources deployment [J]. *J Hydraul Eng*, 2008, 39(10): 1168–1175. doi: 10.3321/j.issn:0559-9350.2008.10.003.
王浩, 游进军. 水资源合理配置研究历程与进展 [J]. *水利学报*, 2008, 39(10): 1168–1175. doi: 10.3321/j.issn:0559-9350.2008.10.003.
- [14] TU M G, WANG F T, ZHOU Y, et al. Gridded water resource distribution simulation for China based on third-order basin data from 2002 [J]. *Sustainability*, 2016, 8(12): 1309. doi: 10.3390/su8121309.
- [15] BAO C, FANG C L. Water resources constraint force on urbanization in water deficient regions: A case study of the Hexi Corridor, arid area of NW China [J]. *Ecol Econ*, 2007, 62(3/4): 508–517. doi: 10.1016/j.ecolecon.2006.07.013.
- [16] JIANG X H, LIU C M. The response of vegetation to water transport in the lower reaches of the Heihe River [J]. *Acta Geogr Sin*, 2009, 64(7): 791–797. doi: 10.3321/j.issn:0375-5444.2009.07.003.
蒋晓辉, 刘昌明. 黑河下游植被对调水的响应 [J]. *地理学报*, 2009, 64(7): 791–797. doi: 10.3321/j.issn:0375-5444.2009.07.003.
- [17] ZHOU S, HUANG Y F, YU B F, et al. Effects of human activities on the eco-environment in the middle Heihe River Basin based on an extended environmental Kuznets curve model [J]. *Ecol Eng*, 2015, 76: 14–26. doi: 10.1016/j.ecoleng.2014.04.020.
- [18] LIU C M. Spatial analysis of agricultural water resources based on GIS and the AHP [D]. Wuhan: Central China Normal University, 2013.
刘春梅. 基于 GIS 和 AHP 的农业水资源空间分析——以曾都区为例 [D]. 武汉: 华中师范大学, 2013.
- [19] LI S S, MA Y. Urbanization, economic development and environmental change [J]. *Sustainability*, 2014, 6(8): 5143–5161. doi: 10.3390/su6085143.
- [20] WANG S X, WANG L S, ZHOU Y, et al. Spatial allocation of water resources in the Yangtze River Basin [J]. *Sci Surv Map*, 2017, 42(8): 33–39. doi: 10.16251/j.cnki.1009-2307.2017.08.007.
王世新, 王利双, 周艺, 等. 长江流域水资源空间分配 [J]. *测绘科学*, 2017, 42(8): 33–39. doi: 10.16251/j.cnki.1009-2307.2017.08.007.
- [21] TIAN W, LI X, CHENG G D, et al. Coupling a groundwater model with a land surface model to improve water and energy cycle simulation [J]. *Hydrol Earth Syst Sci*, 2012, 16: 4707–4723. doi: 10.5194/hess-16-4707-2012.
- [22] ZHANG J Y, DONG W J, YE D Z, et al. New evidence for effects of land cover in China on summer climate [J]. *Chin Sci Bull*, 2003, 48(4): 401–405. doi: 10.1007/BF03183238.
- [23] LEI Y, JIANG D, YANG X H, et al. The water distribution model application based on spatial information technology [J]. *Geo-Inf Sci*, 2007, 9(5): 64–69. doi: 10.3969/j.issn.1560-8999.2007.05.011.
雷莹, 江东, 杨小唤, 等. 水资源空间分布模型及 GIS 分析应用 [J]. *地球信息科学学报*, 2007, 9(5): 64–69. doi: 10.3969/j.issn.1560-8999.2007.05.011.
- [24] CAI X M. Water stress, water transfer and social equity in Northern China: Implications for policy reforms [J]. *J Environ Manage*, 2008, 87(1): 14–25. doi: 10.1016/j.jenvman.2006.12.046.
- [25] BAO C, CHEN X J. The driving effects of urbanization on economic growth and water use change in China: A provincial-level analysis in 1997–2011 [J]. *J Geogr Sci*, 2015, 25(5): 530–544. doi: 10.1007/s11442-015-1185-8.
- [26] DUARTE R, SÁNCHEZ-CHÓLIZ J, BIELSA J. Water use in the Spanish economy: An input-output approach [J]. *Ecol Econ*, 2002, 43(1): 71–85. doi: 10.1016/S0921-8009(02)00183-0.
- [27] CHEN Y, ZHANG D Q, SUN Y B, et al. Water demand management: A case study of the Heihe River Basin in China [J]. *Phys Chem Earth, Parts A/B/C*, 2005, 30(6/7): 408–419. doi: 10.1016/j.pce.2005.06.019.
- [28] GOU B, ZHANG F F, YANG G, et al. Improved method of freeze-thaw erosion for the Three-River Source Region in the Qinghai-Tibetan Plateau, China [J]. *Geomat Nat Haz Risk*, 2017, 8(2): 1678–1694. doi: 10.1080/19475705.2017.1370026.
- [29] YANG H, WRIGHT J A, GUNDRY S W. Water accessibility: Boost

- water safety in rural China [J]. *Nature*, 2012, 484: 318. doi: 10.1038/484318b.
- [30] SHI M J, WANG L, WANG X J. A study on changes and driving factors of agricultural water supply and demand in Zhangye after water reallocation of the Heihe River [J]. *Resour Sci*, 2011, 33(8): 1489–1497. 石敏俊, 王磊, 王晓君. 黑河分水后张掖市水资源供需格局变化及驱动因素 [J]. *资源科学*, 2011, 33(8): 1489–1497.
- [31] DANIELS P L, LENZEN M, KENWAY S J. The ins and outs of water use: A review of multi-region input-output analysis and water footprints for regional sustainability analysis and policy [J]. *Econ Syst Res*, 2011, 23(4): 353–370. doi: 10.1080/09535314.2011.633500.
- [32] ZHANG L, HEERINK N, DRIES L, et al. Water users associations and irrigation water productivity in northern China [J]. *Ecol Econ*, 2013, 95: 128–136. doi: 10.1016/j.ecolecon.2013.08.014.
- [33] GOU H M, WANG Y X. Geochemical characteristics of shallow groundwater in Datong Basin, northwestern China [J]. *J Geochem Explor*, 2005, 87(3): 109–120. doi: 10.1016/j.gexplo.2005.08.002.
- [34] ROSEGRANT M W, RINGLER C, MCKINNEY D C, et al. Integrated economic-hydrologic water modeling at the basin scale: The Maipo River Basin [J]. *Agric Econ*, 2000, 24(1): 33–46. doi: 10.1016/S0169-5150(00)00113-4.
- [35] LI Z, YAN F L, FAN X T. The variability of NDVI over northwest China and its relation to temperature and precipitation [J]. *J Remote Sens*, 2005, 9(3): 308–313. doi: 10.11834/jrs.20050345. 李震, 阎福礼, 范湘涛. 中国西北地区 NDVI 变化及其与温度和降水的关系 [J]. *遥感学报*, 2005, 9(3): 308–313. doi: 10.11834/jrs.20050345.
- [36] HUANG G W. From water-constrained to water-driven sustainable development: A case of water policy impact evaluation [J]. *Sustainability*, 2015, 7(7): 8950–8964. doi: 10.3390/su7078950.
- [37] KANG Y H, WANG R S, WAN S Q, et al. Effects of different water levels on cotton growth and water use through drip irrigation in an arid region with saline ground water of northwest China [J]. *Agric Water Manage*, 2012, 109: 117–126. doi: 10.1016/j.agwat.2012.02.013.
- [38] BINDRA S P, MUNTASSER M, EL KHWELDI M, et al. Water use efficiency for industrial development in Libya [J]. *Desalination*, 2003, 158(1/2/3): 167–178. doi: 10.1016/S0011-9164(03)00447-8.
- [39] WANG W P, GAO L, LIU P, et al. Relationships between regional economic sectors and water use in a water-scarce area in China: A quantitative analysis [J]. *J Hydrol*, 2014, 515: 180–190. doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.04.057.
- [40] CAI W J, CHANG C P, SONG S, et al. Spatial distribution and sources of groundwater phosphorus in Dezhou region [J]. *Chin J Eco-Agric*, 2013, 21(4): 456–464. doi: 10.3724/SP.J.1011.2013.00456. 蔡文静, 常春平, 宋帅, 等. 德州地区地下水中磷的空间分布特征及来源分析 [J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(4): 456–464. doi: 10.3724/SP.J.1011.2013.00456.
- [41] GAI Y C, LI X, TIAN W, et al. The impacts of water delivery on artificial hydrological circulation system of the middle reaches of the Heihe River Basin [J]. *Adv Earth Sci*, 2014, 29(2): 285–294. doi: 10.11867/j.issn.1001-8166.2014.02.0285. 盖迎春, 李新, 田伟, 等. 黑河流域中游人工水循环系统在分水前后的变化 [J]. *地球科学进展*, 2014, 29(2): 285–294. doi: 10.11867/j.issn.1001-8166.2014.02.0285.
- [42] DENG X Z, ZHANG F, WANG Z, et al. An extended input output table compiled for analyzing water demand and consumption at county level in China [J]. *Sustainability*, 2014, 6(6): 3301–3320. doi: 10.3390/su6063301.
- [43] ZHANG Z Y, SHI M J, YANG H, et al. An input-output analysis of trends in virtual water trade and the impact on water resources and uses in China [J]. *Econ Syst Res*, 2011, 23(4): 431–446. doi: 10.1080/09535314.2011.636733.
- [44] VELÁZQUEZ E. An input-output model of water consumption: Analysing intersectoral water relationships in Andalusia [J]. *Ecol Econ*, 2006, 56(2): 226–240. doi: 10.1016/j.ecolecon.2004.09.026.