

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2020.05.007

全球陆地地表水资源演变特征

严登华^{1,2}, 王坤^{1,2}, 李相南^{1,2}, 秦天玲^{1,2}, 翁白莎^{1,2}, 刘思好^{1,2}

(1. 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038; 2. 中国水利水电科学研究院水资源研究所, 北京 100038)

摘要: 探究变化环境下全球陆地地表水资源演变特征, 是当前水文与水资源学研究关注的热点与难点问题。其中, 提高无资料地区水文预报的精度是准确评价全球地表水资源量的重要前提。针对这个问题, 本研究在划分全球气候-生态分区的基础上, 通过对5种参数移植方法进行比较优选, 发现反距离空间插值法与物理相似法相结合的模拟精度最高, 进而以此评价了1960—2016年全球、各大洲和重点地区的地表水资源量演变特征。结果表明: 在柯本气候分区的基础上, 利用生态分区指标进行无监督分类, 共获得了229个气候-生态分区; 基于全球降水数据和四级水资源区产水系数, 获得全球多年平均地表水资源量为41.06万亿 m^3 , 与已有研究结果类似; 全球、北美洲和非洲的地表水资源量呈现显著下降趋势; 地表水资源量呈下降趋势的四级水资源区主要分布在北美洲、南美洲北部和非洲中部等地区。

关键词: 地表水资源; 演变特征; 气候变化; 气候-生态分区; 无资料地区; 方法优选

中图分类号: TV211.1+1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2020)05-0703-10

随着气候变化和人类活动影响的深入, 陆地水循环过程及通量发生了改变, 对水资源时空分布、旱涝极端水文事件产生了显著影响, 影响到社会经济可持续发展和生态环境健康^[1-3]。了解陆地水资源的时空演变规律是全球气候治理、应对全球变化及水危机的重要基础和支撑^[4-6], 也是水文与水资源学研究的热点和前沿^[7-10]。

当前关于全球地表水资源量的评估研究已有很多, 但是各评价结果之间还存在差别。1974年Lvovitch和Nace^[11]的研究表明全球年平均水资源总量为38 830 km^3 , 2003年联合国粮农组织(FAO)的统计结果为43 760 km^3 ^[12], 2006年Oki和Kanae^[13]估算为45 500 km^3 。其中, 无资料地区水文预报精度是影响水资源评价准确性的重要因素^[14]。对无资料地区水资源量进行评价和水文预报, 是比较水文学、水文地貌学和PUB (Predictions Ungauged Basins)研究的难点^[15], 常用的方法包括空间临近法、物理相似法、回归法等^[16]。FAO对无资料地区的水资源评估主要根据有资料流域的水文资料进行推算^[17]。Shiklomanov^[18]采用水文模型与水文比拟法相结合的方式来计算地表水资源量。然而, 由于全球不同地区的气候条件和生态环境差异较大, 影响了水文参数移植跨区域应用的准确性^[19]。因此, 充分考虑全球的气候和生态分区差异, 提高无资料地区的水文预报精度是当前全球水资源评价研究亟需解决的科学问题^[20-21]。

针对上述问题, 本文在广泛收集全球气候水文、地形地貌、植被土壤、社会经济数据的基础上, 划分全球气候-生态分区, 通过5种方法优选提出适用于不同分区的流域产水系数移植方法, 进而评估1960—2016年全球陆地地表水资源量, 分析全球地表水资源演变特征, 以为全球水资源评估和气候变化应对提供科学基础。

收稿日期: 2020-06-10; **网络出版日期:** 2020-07-28

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20200727.1426.006.html>

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFA0601503)

作者简介: 严登华(1976—), 教授级高级工程师, 博士, 主要从事气候变化与水文水资源方面研究。

E-mail: yandh@iwhr.com

通信作者: 王坤, E-mail: wangkun@iwhr.com

1 数据资料

对于一个流域而言,气候、地形、土壤、植被和人类活动等因素决定了水资源演变的主要特征^[22]。因此,本研究收集并整理了全球气象水文、地形地貌、植被土壤和社会经济等方面的基础数据(表1),用于分析全球陆地地表水资源演变特征,并采用《中国水资源公报》的地表水资源量^[23]和FAO发布的各国人均地表水资源量数据对研究结果进行验证。

表1 本研究使用的数据集
Table 1 Datasets used in this study

数据类型	数据分辨率	数据集名称或数据来源
降水	0.5° × 0.5°	GPCC(Global Precipitation Climatology Centre)
气温	2.5° × 2.5°	NCEP(National Centers for Environmental Prediction)
实测径流	日,月,年	GRDC(Global Runoff Data Centre), NWIS(National Water Information System), HYDAT(National Water Data Archive; Hydrometric data), NRFA(National River Flow Archive in UK), Bureau of meteorology, RivDIS(Global River Discharge), 中国水文年鉴,文献收集资料
DEM	90 m × 90 m	ASTER-GDEM V2, STRM-DEM
数字河网及水资源区	90 m × 90 m	本研究前期成果 ^[24]
地表覆盖	30 m × 30 m	GlobeLand30
土壤数据	1 km × 1 km	HWSD(Harmonized World Soil Database)
NDVI	1 km × 1 km	MOD13A2-MODIS
人口和取用水数据	1 km × 1 km	本研究前期成果 ^[25]
人口数据	1 km × 1 km	世界银行

2 研究方法

2.1 全球气候-生态分区的划分

参照柯本气候分区方法^[26],利用1960—2016年全球降水和气温数据,划分全球气候分区;参考以往研究的生态分区指标^[27-28],采用K-Means无监督分类方法,在全球气候分区的基础上划分了全球气候-生态分区。生态分区指标主要考虑了地形地貌、植被类型、土壤特性和地表覆盖等要素,具体指标如表2所示。

表2 气候-生态分区指标
Table 2 Indicators of climate ecological division

指标类型	指标	数据来源	指标类型	指标	数据来源
地形地貌	高程	STRM-DEM	地表覆盖	耕地面积	GlobeLand30
	地表起伏度	ASTER-GDEM		湿地面积	
植被类型	森林面积	GlobeLand30		水域面积	
	草地面积			苔原面积	
	灌木面积			人造地表面积	
土壤特性	土壤类型	HWSD		裸地面积	
			冰川面积		

2.2 全球四级水资源区产水系数计算

2.2.1 有资料地区产水系数的还原计算

参照《全国水资源综合规划技术细则》的技术方法, 基于实测径流量和耗水量还原地表天然水资源量, 进而结合降水量获得有资料地区的产水系数。其中, 耗水量通过取用水量乘以综合耗水系数来表示。本研究根据《中国水资源公报》确定综合耗水系数为0.5, 与 Shiklomanov 的研究成果比较一致^[18]。由于缺少实测数据, 本研究将该值作为全球耗水的平均水平, 同时也未考虑跨流域调水的影响。

2.2.2 无资料地区产水系数的参数移植

针对无资料地区产水系数的参数移植方法, 本研究对5种方法进行了比较和优选: ①大洲尺度的反距离空间插值法, 是指在大洲范围内对“已测流域”的产水系数进行空间插值, 来获取“未测流域”的产水系数^[29]。②基于气候-生态分区的反距离空间插值法, 是指在每个气候-生态分区内分别进行反距离空间插值。③回归法, 是指通过构建“已测流域”产水系数与流域物理特征之间的函数关系, 并将其运用在“未测流域”从而获取产水系数。④物理相似法, 是指根据流域物理特征的相似程度将“已测流域”的参数移植到“未测流域”; 参照当前主流水文模型对水循环过程的模拟方法和关键要素, 选择气象、地形地貌、河网特征、植被土壤和社会经济等方面的26个特征参数进行相似性分析(如表3所示)。⑤组合方法, 是指为充分考虑空间位置和物理属性的共同影响, 本研究将基于气候-生态分区的反距离插值法和物理相似法相结合进行无资料流域的参数移植; 首先在每个气候-生态分区内, 根据流域物理特征寻找与“未测流域”相似的多个“已测流域”, 进而通过对“已测流域”产水系数进行反距离空间插值, 来获得“未测流域”的产水系数。

表3 物理特征参数

Table 3 Physical characteristic parameters

指标类型	指标	水文过程	指标类型	指标	水文过程
气候特征	年降水量/mm	降水	地表覆盖	耕地面积/%	地表产流、蒸散发
	降水集中度			湿地面积/%	
	年平均气温/℃			水域面积/%	
	月平均最高气温/℃	蒸散发		苔原面积/%	
	月平均最低气温/℃			人造地表面积/%	
	年蒸发总量/mm			裸地面积/%	
敏感度	气象要素波动	冰川面积/%			
地形地貌	高程/m	降水	植被特征	森林面积/%	地表产流、蒸散发
	地表起伏度/m	地表截留、坡面汇流、壤中流		草地面积/%	
	坡度/(°)			灌木面积/%	
河网特征	河网密度	河网划分	NDVI 指数	蒸散发	
土壤特征	土壤类型	土壤水运动、入渗过程	社会经济	人口密度	社会水循环
	土层厚度/cm			用水强度	

2.2.3 无资料地区产水系数的移植方法优选

本研究从全球有资料的29 383个四级水资源区中, 随机选择了70%(共20 568个四级水资源区)作为输入样本, 剩余的30%(共8 815个)作为验证样本, 采用均方根误差(E_{RMS})和决定系数(R^2)对上述5种参数移植方法的准确度进行验证和优选。

2.3 评价结果验证方法

参照《全国水资源综合规划技术细则》的技术方法, 基于产水系数和降水数据可以获取区域的地表天然水资源量。本研究选择19个国家(中国和各大洲随机选择3个国家)对评价结果进行验证。

3 结果及分析

3.1 全球气候-生态分区划分

基于1960—2016年全球气象数据和柯本气候分类方法,获得全球13种气候分区,进而根据生态分区指标和无监督分类方法,获取了全球229种气候-生态分区。对逐项指标进行了详细分析,结果表明各分区类型下指标之间相互独立不存在交叉。

3.2 全球无资料地区产水系数移植方法的优选

上述5种参数移植方法的模拟精度如表4所示。可以发现,与大洲尺度的反距离空间插值法相比,基于气候-生态分区的反距离空间插值法均方根误差从0.126降低到了0.121,决定系数从0.706提升到了0.719,说明考虑气候-生态分区的反距离空间插值方法可以提高参数移植的精度。在5种方法中,组合方法的模拟效果最好,均方根误差最低(0.114),决定系数最高(0.744),说明在全球气候-生态分区的基础上,采用物理相似性与反距离空间插值法相结合的组合方法,可以使无资料地区获得更准确的产水系数。因此,本研究采用组合方法对无资料地区进行参数移植,进而评价全球陆地地表水资源量。

3.3 各国地表水资源评价结果与合理性分析

3.3.1 中国地表水资源评价与验证

基于本研究构建的组合方法首先计算了中国天然地表水资源量,与《中国水资源公报》的数据进行对比,结果显示本文研究结果与水资源公报中的数据拟合效果良好(如图1所示)。相对误差为0.047,均方根误差为1441.43亿 m^3 ,纳什效率系数为0.605,说明该方法在中国范围内计算结果相对准确。

表4 不同参数移植方法的精度对比

Table 4 Accuracy comparison of different parameter transplanting methods

方法	E_{RMS}	R^2
空间插值法(大洲尺度)	0.126	0.705
空间插值法(分区尺度)	0.121	0.719
相似法	0.156	0.516
回归法	0.140	0.613
组合方法	0.114	0.744

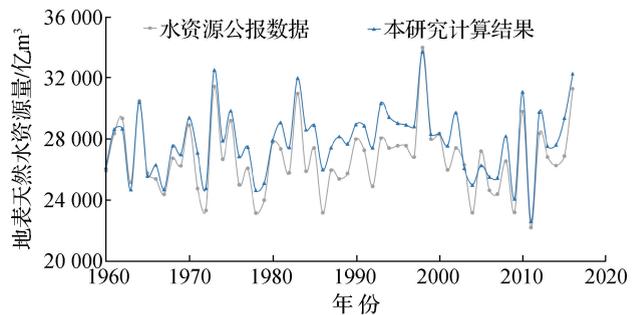


图1 中国地表水资源量计算成果

Fig. 1 Comparison of surface water resources in China

3.3.2 世界各国地表水资源评价与验证

本研究随机挑选并计算了18个国家的人均地表水资源量,进而与FAO发布的数据进行对比,结果显示这些国家人均地表水资源量的平均相对误差为8.2%,大多数国家的计算成果与FAO数据一致,说明本研究提出的研究方法是可行的,获得的世界各国地表水资源量评价结果是可信的。需要指出的是,从图2可以发现,FAO发布的部分国家(如印度、乌干达、洪都拉斯等)人均地表水资源量随时间呈现光滑的趋势曲线,这是由于这些国家的人均地表水资源量数据存在缺失,FAO基于部分年份的数据进行拟合和插补延长获得^[12]。相比之下,本研究根据降水和产水特性获得的地表水资源量呈现波动变化的特征,反映了降水年际波动和周期变化的特征,更符合自然变化客观规律。

3.4 全球及各大洲的地表水资源量演变规律

3.4.1 全球及各大洲的整体情况

基于上述方法,本研究获得了全球及各大洲多年平均地表天然水资源量空间分布差异显著,如图3所示。

天然径流深超过 500 mm 的四级水资源区大多集中在亚洲南部和东南部、亚马逊流域、北美西海岸和印度尼西亚等地区, 而非洲大部分地区、亚洲中部和北部、北美中部和澳洲中部区域天然径流深不足 100 mm, 结果与已有相关研究是相符的^[30,31]。

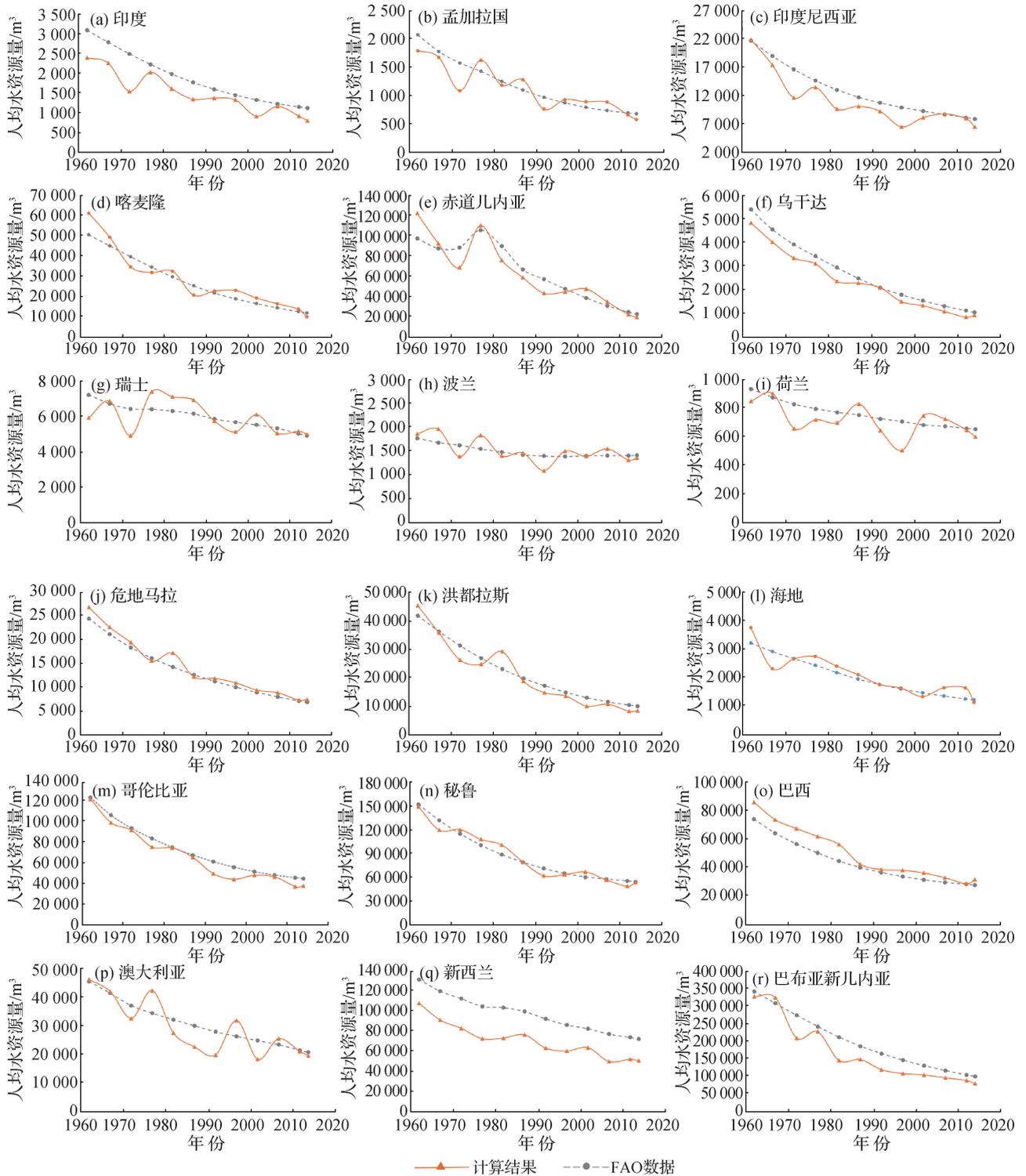


图2 部分国家评估结果与FAO数据的对比

Fig.2 Comparison between the results of this study and FAO

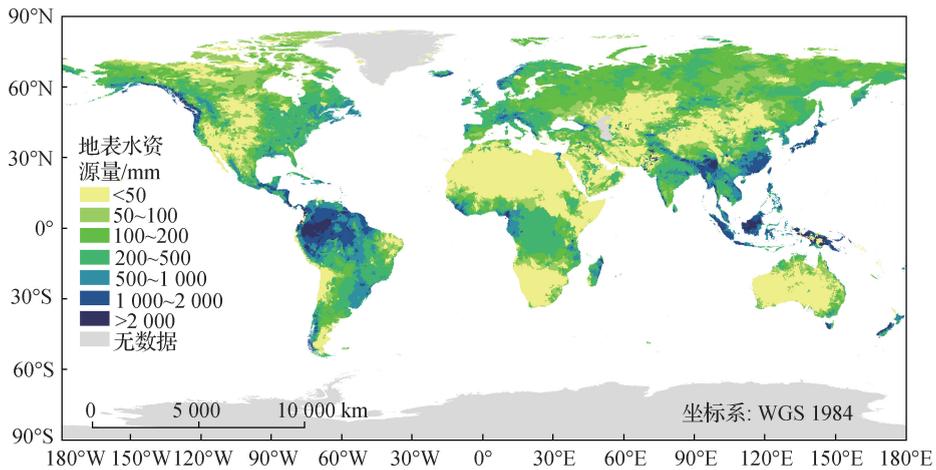


图3 全球地表水资源量空间分布

Fig. 3 Global surface water resources spatial distribution

全球和各大洲的多年平均地表水资源量如表5所示。本研究获得的全球地表水资源总量大约为4.11万 km^3 ，位于已有研究结果(3.88万~4.47万 km^3)之间，各大洲地表水资源量评价结果与已有研究结果也基本一致，说明本研究对全球和各大洲的地表水资源评价结果是合理的。

表5 全球水资源主要评估结果对比

 km^3/a

Table 5 Comparison of world water resources assessment results

数据来源	亚洲	非洲	欧洲	北美洲	南美洲	大洋洲	全球
文献[11]	13 190	4 225	3 110	5 960	10 380	1 965	38 830 ⁽¹⁾
文献[32]	14 100	4 600	2 970	8 120	12 200	2 510	44 690
文献[33]	14 410	4 570	3 210	8 200	11 760	2 390	44 490 ⁽²⁾
文献[34]	12 200	3 400	2 800	5 900	11 100	2 400	37 700 ⁽³⁾
文献[35]	14 410	4 570	3 210	8 200	11 760	2 388	44 540 ⁽⁴⁾
文献[36]	13 508	4 040	2 900	7 770	12 030	2 400	42 650
文献[37]	13 508	4 040	2 900	7 770	12 030	2 400	42 650
文献[18]	12 510	4 050	2 900	7 890	12 030	2 400	42 780
文献[38]	12 461	3 950	6 619 ⁽⁵⁾	7 443	12 380	911	43 764
本研究	13 340	4 267	2 300	6 076 ⁽⁶⁾	13 588	1 487	41 058 ⁽⁷⁾

注：(1) 包含南极洲2 100 km^3/a ；(2) 包含南极洲2 310 km^3/a ；(3) 包含南极洲2 000 km^3/a ；(4) 包含南极洲2 230 km^3/a ；(5) FAO在评估中将俄罗斯包括在欧洲中，其他研究将俄罗斯分为欧洲和亚洲两部分；(6) 本研究北美洲不包括格陵兰岛；(7) 本研究全球总量不包括格陵兰岛和南极洲。

3.4.2 全球陆地地表水资源演变规律分析

1960—2016年，全球和各大洲地表水资源量的时间变化规律如图4所示。1980—1990年前后，全球和各大洲的地表水资源变化趋势均有较为明显的转折。其中，1960—1990年全球地表水资源量呈增加趋势，1990—2016年呈现减少的变化趋势。分各大洲来看，北美洲、南美洲和亚洲的地表水资源量均呈现先增加后减少的变化趋势，转折点分别位于1980年、1985年和1990年左右；欧洲和大洋洲呈现波动起伏，但基本保持不变；非洲呈现波动减少趋势，其中1960—1985年和2000—2016年呈明显的减少趋势，1985—2000年呈现增加趋势。

进一步采用Mann-Kendall检验法对全球和各大洲地表水资源量的变化趋势和显著性进行分析，结果如图5所示。1960—2016年，全球地表水资源总量整体呈现减少趋势，每年减少约238.4亿 m^3 。其中，非洲、南美洲和北美洲的地表水资源量呈现减少趋势，分别每年减少149.6亿 m^3 、108.1亿 m^3 和43.2亿 m^3 ；亚

洲呈现增加趋势, 每年增加 59.9 亿 m³; 欧洲和大洋洲的变化趋势不明显。在 95% 置信度下, 全球、北美洲和非洲的地表水资源量呈显著减少趋势; 亚洲、欧洲、南美洲和大洋洲的变化趋势不显著。

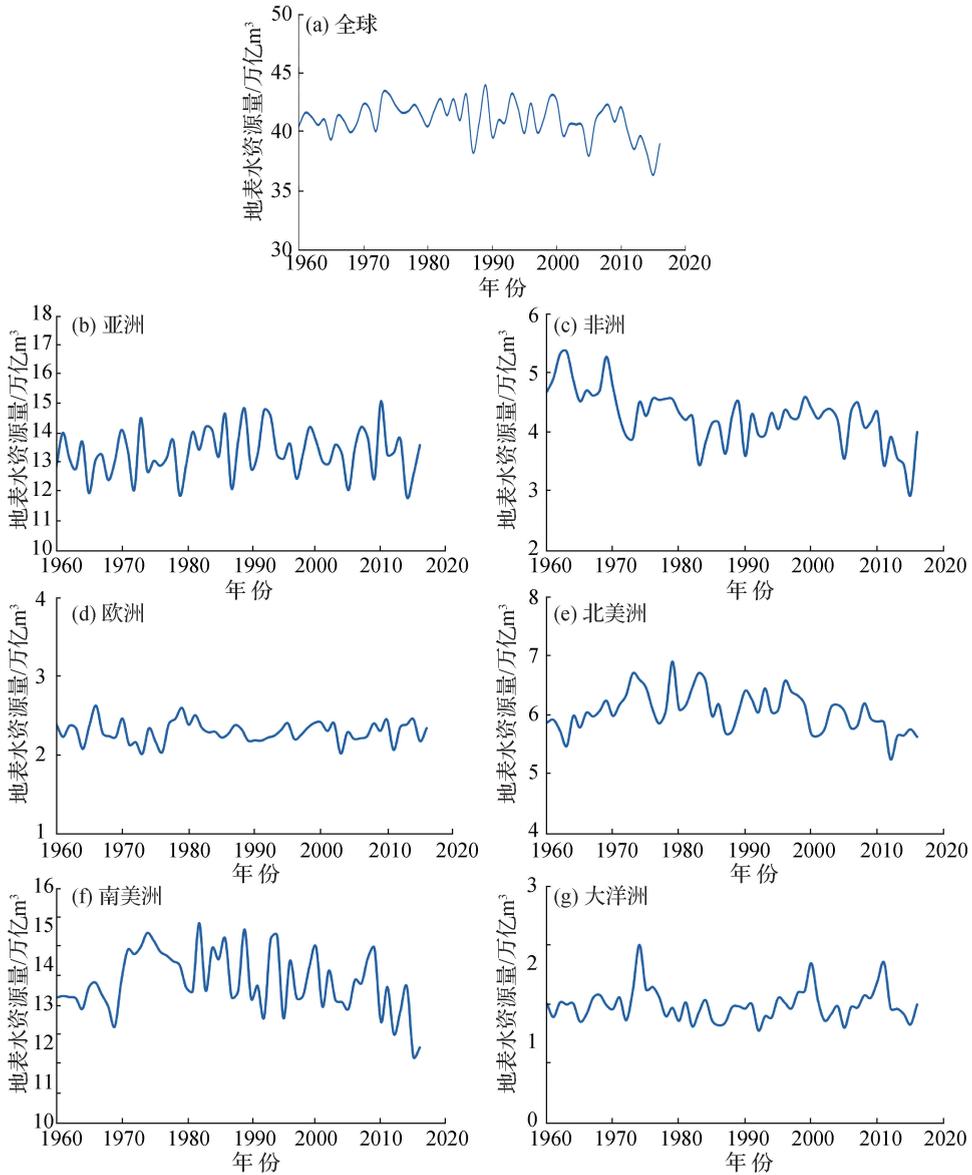


图 4 全球各大洲地表水资源量演变过程

Fig. 4 Variation of surface water resources in the world and continents

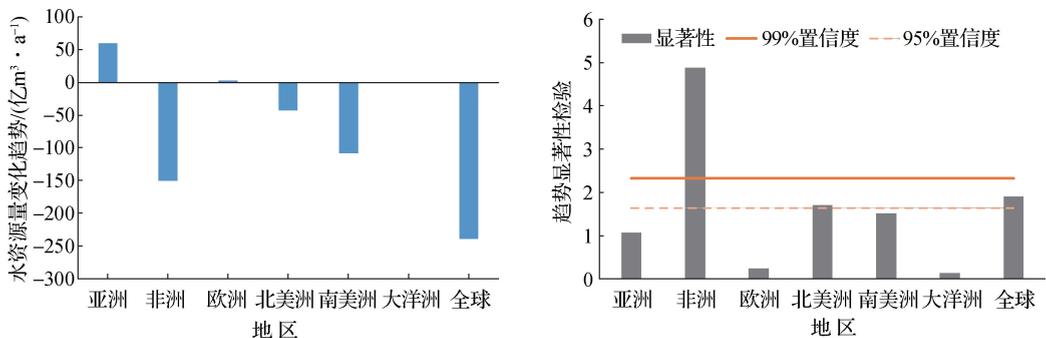


图 5 全球各大洲地表水资源量变化趋势及显著性检验

Fig. 5 Change trend and significance test of surface water resources

1960—2016年,全球四级水资源区地表水资源量变化趋势的空间分布如图6所示。地表水资源量呈现减少趋势的四级水资源区主要分布在北美洲的西部、北部和东部的部分地区、南美洲的北部地区、非洲的中部地区、亚洲的南部和东部地区以及欧洲的南部地区。地表水资源量增加趋势明显的四级水资源区分布比较分散。

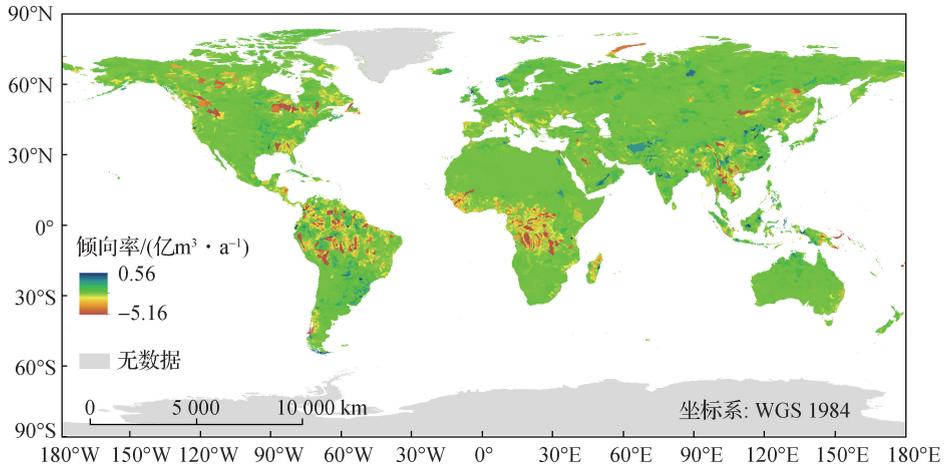


图6 全球地表水资源量变化趋势

Fig. 6 Variation trend of global surface water resources

4 结 论

(1) 以全球四级水资源区为基本单元,基于柯本气候分类方法和1960—2016年降水和气温数据,划分了全球气候分区;进而结合地形地貌、植被特征和土壤类型等共13种生态分区指标,采用无监督分类方法,划分了全球229种气候-生态分区。

(2) 在气候-生态分区的基础上,通过比较5种参数移植方法,优选了反距离空间插值与物理相似法相结合的组合方法,并评价了全球的地表水资源量。与中国水资源公报数据、FAO的人均地表水资源量数据和已有研究结果进行对比,表明该方法能够较为准确地评价全球地表水资源量。

(3) 1960—2016年,全球多年平均地表水资源总量约为41万亿 m^3 ,整体呈减少趋势。亚洲、北美洲、南美洲的地表水资源量呈现先增加后减少的变化趋势,而欧洲和大洋洲呈现先减少后增加的变化趋势。地表水资源呈减少趋势的四级水资源区主要分布在北美洲、南美洲北部和非洲中部等地区。

参考文献:

- [1] ALFIERI L, LORINI V, HIRPA F A, et al. A global streamflow reanalysis for 1980—2018[J]. *Journal of Hydrology X*, 2020, 6: 100049.
- [2] 张建云, 王国庆, 金君良, 等. 1956—2018年中国江河径流演变及其变化特征[J]. *水科学进展*, 2020, 31(2): 153-161. (ZHANG J Y, WANG G Q, JIN J L, et al. Evolution and variation characteristics of the recorded runoff for the major rivers in China during 1956—2018[J]. *Advances in Water Science*, 2020, 31(2): 153-161. (in Chinese))
- [3] 夏军, 刘春蓁, 任国玉. 气候变化对我国水资源影响研究面临的机遇与挑战[J]. *地球科学进展*, 2011, 26(1): 1-12. (XIA J, LIU C Z, REN G Y. Opportunity and challenge of the climate change impact on the water resource of China[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2011, 26(1): 1-12. (in Chinese))
- [4] 汤秋鸿, 刘星才, 李哲, 等. 陆地水循环过程的综合集成与模拟[J]. *地球科学进展*, 2019, 34(2): 115-123. (TANG Q H, LIU X C, LI Z, et al. Integrated water systems model for terrestrial water cycle simulation[J]. *Advances in Earth Sciences*, 2019, 34(2): 115-123. (in Chinese))

- [5] WANG F X, POLCHER J, PEYLIN P, et al. Assimilation of river discharge in a land surface model to improve estimates of the continental water cycles[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2018, 22(7): 3863-3882.
- [6] 严登华, 王浩, 周梦, 等. 全球治水模式思辨与发展展望[J]. *水资源保护*, 2020, 36(3): 1-7. (YAN D H, WANG H, ZHOU M, et al. Scientific ideas and development prospects of global water management modes[J]. *Water Resources Protection*, 2020, 36(3): 1-7. (in Chinese))
- [7] 何盘星, 胡鹏飞, 孟晓于, 等. 气候变化与人类活动对陆地水储量的影响[J]. *地球环境学报*, 2019, 10(1): 38-48. (HE P X, HU P F, MENG X Y, et al. Impacts of climate change and human activities on terrestrial water storage[J]. *Journal of Earth Environment*, 2019, 10(1): 38-48. (in Chinese))
- [8] 严登华, 任立良, 王国庆, 等. 关于陆地水循环演变及其在全球变化中的作用研究设想[J]. *水科学进展*, 2016, 27(6): 935-942. (YAN D H, REN L L, WANG G Q, et al. Initiatives on evolution of terrestrial water cycle and its role in global change [J]. *Advances in Water Science*, 2016, 27(6): 935-942. (in Chinese))
- [9] ARNELL N W. Effects of IPCC SRES emissions scenarios on river runoff: a global perspective[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2003, 7(5): 619-641.
- [10] 夏军, 左其亭. 国际水文科学研究的新进展[J]. *地球科学进展*, 2006, 21(3): 256-261. (XIA J, ZUO Q T. Advances in international hydrological science research[J]. *Advances in Earth Sciences*, 2006, 21(3): 256-261. (in Chinese))
- [11] LVOVITCH M I, NACE R L. The global water balance (in Russian)[R]. Washington DC: American Geological Union, 1974.
- [12] VALLEE D, MARGAT J, ELIASSON A, et al. Review of world water resources by country[R]. Rome: Food and Agricultural Organization of the United Nations, 2003.
- [13] OKI T, KANAE S. Global hydrological cycles and world water resources[J]. *Science*, 2006, 313(5790): 1068-1072.
- [14] PARAJKA J, VIGLIONE A, ROGGER M, et al. Comparative assessment of predictions in ungauged basins: part 1: runoff-hydrograph studies[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013, 17(5): 1783-1795.
- [15] FALKENMARK M, CHAPMAN T. Comparative hydrology: an ecological approach to land and water resources [R]. Paris: UNESCO, 1989.
- [16] HUANG D Q, JIN H R, ZHAO X S, et al. Factors influencing the conversion of arable land to urban use and policy implications in Beijing, China[J]. *Sustainability*, 2014, 7(1): 180-194.
- [17] MARGAT B J, FRENKEN K, FAURÈS J. Key water resources statistics in aquastat[C]//International Work Session on Water Statistics. Vienna: FAO, 2005.
- [18] SHIKLOMANOV I A. Appraisal and assessment of world water resources[J]. *Water International*, 2000, 25(1): 11-32.
- [19] DE ARAÚJO J C, GONZÁLEZ PIEDRA J I. Comparative hydrology: analysis of a semiarid and a humid tropical watershed[J]. *Hydrological Processes*, 2009, 23(8): 1169-1178.
- [20] 张建云, 何惠. 应用地理信息进行无资料地区流域水文模拟研究[J]. *水科学进展*, 1998, 9(4): 345-350. (ZHANG J Y, HE H. Study on runoff modeling in non-data watershed using Geo-referenced data[J]. *Advances in Water Science*, 1998, 9(4): 345-350. (in Chinese))
- [21] 谈戈, 夏军, 李新. 无资料地区水文预报研究的方法与出路[J]. *冰川冻土*, 2004, 26(2): 192-196. (TAN G, XIA J, LI X. Hydrological prediction in ungauged basins[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 26(2): 192-196. (in Chinese))
- [22] SALINAS J L, LAAHA G, ROGGER M, et al. Comparative assessment of predictions in ungauged basins: part 2: flood and low flow studies[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013, 17(7): 2637-2652.
- [23] 中华人民共和国水利部. 中国水资源公报[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2017. (Ministry of Water Resources People's Republic of China. China water resources bulletin[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2017. (in Chinese))
- [24] YAN D H, WANG K, QIN T L, et al. A data set of global river networks and corresponding water resources zones divisions[J]. *Scientific Data*, 2019, 6(1): 1-11.
- [25] YAN D H, WENG B S, QIN T L, et al. A data set of distributed global population and water withdrawal from 1960 to 2017[EB/OL]. (2020-02-01)[2020-05-10]. <https://essd.copernicus.org/preprints/essd-2019-224/>.
- [26] 朱耿睿, 李育. 基于柯本气候分类的1961—2013年我国气候区类型及变化[J]. *干旱区地理*, 2015, 38(6): 1121-1132. (ZHU G R, LI Y. Types and changes of Chinese climate zones from 1961 to 2013 based on Köppen climate classification[J]. *Ar-*

- id Land Geography, 2015, 38(6): 1121-1132. (in Chinese))
- [27] 傅伯杰, 刘国华, 陈利顶, 等. 中国生态区划方案[J]. 生态学报, 2001, 21(1): 1-6. (FU B J, LIU G H, CHEN L D, et al. Scheme of ecological regionalization in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(1): 1-6. (in Chinese))
- [28] DENTON S R, BARNES B V. An ecological climatic classification of michigan: a quantitative approach[J]. Forest Science, 1988, 34(1): 119-138.
- [29] 刘苏峡, 刘昌明, 赵卫民. 无测站流域水文预测(PUB)的研究方法[J]. 地理科学进展, 2010, 29(11): 1333-1339. (LIU S X, LIU C M, ZHAO W M. Towards the methodology for predictions in ungauged basins[J]. Progress in Geographical Science, 2010, 29(11): 1333-1339. (in Chinese))
- [30] 梁书民, 于智媛. 用经验径流系数推算全球径流深度分布场[J]. 干旱区研究, 2018, 35(1): 1-11. (LIANG S M, YU Z Y. Global distribution fields of runoff depths calculated by empirical runoff coefficient[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(1): 1-11. (in Chinese))
- [31] CISNEROS B E J, OKI T, ARNELL N W, et al. Freshwater resources[M]//Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability: Part A: Global and Sectoral Aspects. Cambridge: Cambridge University Press, 2014: 229-269.
- [32] KORZUN V I, SOKOLOV A A, BUDYKO M I, et al. Atlas of world water balance[R]. Paris: UNESCO, 1974.
- [33] KORZUN V I, SOKOLOV A A, BUDYKO M I, et al. Atlas of world water balance[R]. Paris: UNESCO, 1978.
- [34] BAUMGARTNER A, REICHEL E. The world water balance[M]. New York: Elsevier, 1975.
- [35] GLEICK P H. Water in crisis: a guide to the world's freshwater resources[M]. New York: Oxford University Press, 1993.
- [36] SHIKLOMANOV I A. Assessment of water resources and availability in the world[R]. Russia: State Hydrological Institute, 1996.
- [37] Water Resources Institute. World resources 2000—2001[R]. Washington DC: Water Resources Institute, 2000.
- [38] FAO. Review of world water resources by country[R]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2003.

Evolution characteristics of global land surface water resources *

YAN Denghua^{1,2}, WANG Kun^{1,2}, LI Xiangnan^{1,2}, QIN Tianling^{1,2}, WENG Baisha^{1,2}, LIU Siyu^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, Beijing 100038, China;

2. Department of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: To explore the evolution characteristics of global land surface water resources in the changing environment is a hot and difficult issue in the current hydrological and water resources research. Improving the accuracy of hydrological forecast in the ungauged basins is important for accurate evaluation of global surface water resources. To solve this problem, we first divided the global climate ecological division, compared five parameter transplant methods, and found that the combination of inverse distance spatial interpolation method and physical similarity method has the highest simulation accuracy, and then analyzed the evolution characteristics of surface water resources in the world, continents and key regions from 1960 to 2016. The results are as follows: 229 climate-ecological subareas are obtained based on 13 climate regions and ecological indicators, using the Köppen-Geiger classifications method and the unsupervised classification method. The global surface water resources is 41.06 trillion m³, showing a significant decrease trend. The surface water resources show significant decreasing trend in North America and Africa. The level 4 water resources zones with declining surface water resources trend are mainly distributed in North America, North of South America and Central Africa.

Key words: surface water resources; evolution characteristics; climate change; climate-ecological division; ungauged basins; method optimization

* The study is financially supported by the National Key R&D Program of China (No. 2016YFA0601503).