

水利水运工程学报

HYDRO-SCIENCE AND ENGINEERING

中国水文区划及水文分区方法综述

孙周亮, 王婕, 刘艳丽, 陈鑫, 刘翠善, 王国庆

Evaluation of hydrological zoning technique and its utilization in China

SUN Zhouliang, WANG Jie, LIU Yanli, CHEN Xin, LIU Cuishan, WANG Guoqing

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20221028003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同水文条件下通州沙河段沿程分流分沙特征

Water-sediment diversion ratio along Tongzhousha shoal reach under different hydrological conditions
水利水运工程学报. 2017(3): 1 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.03.001>

黄河流域典型流域水文气象变化与径流过程模拟

Typical hydro-meteorological changes and runoff process simulation in Yellow River basin
水利水运工程学报. 2019(5): 36 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.05.005>

考虑水文非一致性变异的河道基本生态流量

Study of basic ecological instream flow considering hydrological alterations under non-stationary
水利水运工程学报. 2021(2): 64 <https://doi.org/10.12170/20200218004>

苏南运河沿线精细化水文-水动力模型构建及验证

Building and verification of refined hydrology-hydrodynamic model for South Jiangsu Canal and its river networks
水利水运工程学报. 2020(1): 16 <https://doi.org/10.12170/20190501001>

城镇化背景下我国城市洪涝灾害演变特征

Study on evolvement law of urban flood disasters in China under urbanization
水利水运工程学报. 2018(2): 10 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.02.002>

GIS多源数据图层叠置法研究山东省干旱分区

Study on drought zoning in Shandong Province based on GIS multi-source data layer overlapping method
水利水运工程学报. 2021(3): 67 <https://doi.org/10.12170/20200408001>



扫码进入官网, 阅读更多精彩文章



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI:10.12170/20221028003

孙周亮, 王婕, 刘艳丽, 等. 中国水文区划及水文分区方法综述 [J]. 水利水运工程学报, 2024(1): 77-86. (SUN Zhouliang, WANG Jie, LIU Yanli, et al. Evaluation of hydrological zoning technique and its utilization in China[J]. Hydro-Science and Engineering, 2024(1): 77-86. (in Chinese))

中国水文区划及水文分区方法综述

孙周亮^{1,2}, 王婕¹, 刘艳丽^{1,3,4}, 陈鑫¹, 刘翠善^{1,3,4}, 王国庆^{1,3,4}

(1. 南京水利科学研究院 水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210029; 2. 水资源工程与调度全国重点实验室 (武汉大学), 湖北 武汉 430072; 3. 水利部应对气候变化研究中心, 江苏 南京 210029; 4. 长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210098)

摘要: 水文区划是水资源规划的重要依据, 也是无资料地区水文研究的有效手段。中国早期的水文区划工作主要是适应水资源规划的需求, 全国性的水文区划主要出现在 1950s, 20 世纪末集中出现了更精细、完善的省级水文区划研究。水文分区是水文区划工作的核心内容, 主要包括分区指标和分区方法的确定。当前采用的水文分区指标主要包括气候、水文、下垫面三类, 水文分区方法以聚类方法为主。目前主要用于解决水文缺资料问题, 同时也发展出生态水文分区方法, 提高了生态性评价的合理性。基于当前研究进展, 提出未来研究重点如下: (1) 在水文分区中纳入水文相似理论; (2) 水文区域性规律研究及其在水资源、环境、生态等领域的应用; (3) 水文分区结果的检验与科学解释。本研究可为区域水资源规划、水文模型参数移植、生态环境保护等提供理论依据。

关键词: 水文分区; 聚类; 流域特征; 水文相似

中图分类号: TV213

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2024)01-0077-10

分区是地理学研究中的常用方法之一, 是认识地理要素空间分布差异的重要手段^[1]。地理学中的分区通常按照不同的标准划分, 如中国按地势可划分为三级阶梯; 按自然地理可划分为东部季风区、西北干旱半干旱区和青藏高寒区; 按气候可划分为热带季风气候区、亚热带季风气候区、温带季风气候区、温带大陆性气候区、高原山地气候区; 中国陆地生态系统可划分为生态调节、产品提供与人居保障三类生态功能一级区, 这些自然地理分区为社会经济发展提供了理论支撑^[2-3]。水文区划是自然地理区划的重要组成部分^[4], 指根据水文指标对特定的研究区域开展空间上的划分与分类, 常用于水文站网建设、水资源规划、水文资料及参数移植等, 也是解决水文缺资料问题的重要方法^[5-6]。在实际工作中, 对“水文区划”和“水文分区”(或“流域分类”)常未作区分, 为避免混淆, 文中将“水文区划”界定为一项综合性研究工作, 包含资料收集整理、水文分区、成果合理性检查等系列内容, 将“水文分区”界定为水文区划工作的核心内容。本文首先梳理了中国水文区划的发展历程, 总结水文分区方法的发展和应用现状, 并展望未来水文分区的研究重点方向, 为水文站网建设及水文资料移用提供方法参考。

1 中国水文区划发展历程

中国水文区划工作开始于 1949 年后, 主要用于水资源规划和水文站网布设规划^[6-7]。水文区划研究是

收稿日期: 2022-10-28

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFC1508104); 国家自然科学基金资助项目(52079079, U2240203, 92047203)

作者简介: 孙周亮(1993—), 男, 湖北咸宁人, 博士研究生, 主要从事水文水资源方面研究。

E-mail: zlsun19@whu.edu.cn 通信作者: 刘艳丽(E-mail: ylliu@nhri.cn)

认识水文规律的重要手段,更是水文研究全面发展的必要环节^[8]。由于当时的资料积累和技术限制,所得水文区划成果主要用于规划与研究,公开出版和发表的资料较少。根据水文区划成果的水平及完整性总体上可分为以下三个阶段:

(1)第一阶段:全国性水文区划初探时期。全国性的水文区划成果最早见于《中国自然区划草案》中的“中国水文区划草案”^[9]和《中国水文区划(初稿)》^[10]。其中《中国自然区划草案》在苏联欧亚大陆水文区划的基础上进行改进,根据流域、水流形态、冰情、含沙量等特征将全国分为3级9区。第一级分区将全国划分为内流区和外流区。外流区第二级按冬季河流结冰情况分为冰冻区和不冻区,冰冻区第三级按含沙量划分为高含沙区和低含沙区,不冻区第三级按相对流量划分为高流量区和低流量区。内流区第二级按水流形态划分为西藏和蒙新,在西藏区按潜水形态划分第三级区,在蒙新区按有无河流划分第三级区。作为第一次全国性的水文区划,《中国自然区划草案》的划分具有十分明显的地理特色,即划分原则主要依据河流水系的自然属性,对水文特征的考虑较少。

《中国水文区划(初稿)》主要根据水文特征和水利条件将中国划分为13个水文区、46个水文地带和89个水文省。第一级划分指标为径流深,第二级划分指标为河流的季节变化特征,第三级划分指标为水利条件。在这三级区域划分体系之外,还将全国按照径流补给情况划分为雨水补给区、雨水融水补给区和融水雨水补给区,称为“0级”区域。第二次的区划相对第一次更完善,各分区之间的水文特征异同点更加突出,尤其是径流丰枯特征及年内变化特征的空间差异性得到了较好展现。

(2)第二阶段:区域性水文区划细化时期。《中国水文区划(初稿)》的发布吸引国内多个单位开展了区域性水文区划研究工作。随着时间推移和水利工作推进,已有水文区划成果的不足逐渐凸显,如分区特征的区域代表性不足、各项分区研究成果之间水平参差不齐难以统一等^[6],已无法满足中国社会经济发展需求。中国科学院地理研究所专门开展了水文区划的更新研究工作^[11],将全国按径流量分为丰水、多水、平水、少水和干涸5个径流带,再根据径流年内分配和动态特征分为56个二级区,并对径流极值特征进行专门分区,总结了径流年内分配、季节变化、丰枯变化等水文特征分区规律。这次的水文区划成果除了吸纳前两次的经验外,相比以前的成果应用了更多的观测资料(7万余站),在反映水文规律的区域性特征方面更加完善。其中第一级分区揭示了全国水量的空间差异,第二级分区反映了河流水量的年内分配。这主要源于本次区划采用了综合性、相似性与差异性、成因分析等基本原则。可见,中国水文区划工作一直在持续发展中,初期以开展全国性水文区划为主,但分区结果较为粗糙,后期主要以省级行政区为尺度开展水文分区研究,分区指标及方法也在不断完善中,目前还缺乏针对全国的较精细的研究成果。

(3)第三阶段:区域性水文区划改进时期。水文区划的综合性特征决定了其难以同时满足多方面应用需求。比如水文站网规划中希望分区内的水文过程及暴雨洪水特性具有一致性,水利规划中则希望分区内的水资源开发条件具有较好的空间均匀性,而在水文参数移植方面则希望分区内具有水文响应的空间相似性。在一次水文区划中难以同时兼顾到多方面的需求,如基于气候、地形划分的水文区划在暴雨特性方面差异较大^[12]。因而没有一种分区是普适性的,应根据研究需求进行更新和修正。水文工作者在前期水文区划成果的基础上又开展了大量研究,冷荣梅^[13]为了合理规划四川省水文站网,以水文气象特征为主、以自然地理特征为辅,将四川省划分为2个水文大区、7个水文亚区、15个水文分区;赵宝君^[14]先按干旱指数、再按地形、地貌、植被和水文特征将内蒙古分为7个大区、37个分区,改进了单指标水文分区;徐磊等^[15]为了研究天山北坡暴雨洪水空间规律,以年最大流量一阶样本矩为聚类因子,将天山北坡分为两个分区;苏乃友^[16]为了研究无资料地区的设计年径流,根据年径流变差系数 C_{VR} 与流域气候特点和下垫面条件将山西省划分为4个分区,并拟合了各分区的 C_{VR} 地理综合数学模型;李珂等^[17]以产、汇流物理过程为依据选取降雨径流和下垫面因子将秦岭北麓划分为3个水文相似子区,为水文相似分区内的资料移用问题提供了科学依据。

总体而言,水文区划的标准或原则是多样化的,即使在同一区域也会有不同的分区方案,这取决于研究者的分区目的,具体来说包括水资源开发利用、水文站网布设与优化、工程设计参数移用、水文资料及参数移用、生态环境分级保护等。针对不同分区目的采用的分区方法一般无明显区别,但采用的分区指标则有所侧重,如生态保护研究以生态健康类指标为主要指标,水文无资料问题则以水文过程参数的关键表征和影响要素为主要指标。综上所述,在应用已有水文区划成果时,应首先根据成果的研究方法论证其适用性,重点了解分区原则和指标,以及各分区间的差异性、分区内的相似性。鉴于水文区划的多样性属性和水文学的多元化发展趋势特征,未来将出现更多的分区方案以满足不同的研究需求。

2 水文分区方法研究进展

2.1 水文分区指标

水文分区方法体系主要包括两部分:确定分区指标、确定分类方法(表1)。分区指标(因子)是决定分区方案的关键因素。如前所述,不同的研究者会根据不同的需求选择分区指标。一般而言,所用的指标不外乎气候、水文、下垫面三大类,这些是决定水文特征的主要因素。早期的水文分区主要用于水文站网规划和水资源规划等^[18],重点关注分区的流域特征相似性,因而分区指标主要有降雨量、径流量、蒸发量、土地利用类型等,在青藏高原地区还需要考虑气候和环境的垂直差异^[19]。Hughes等^[20]采用年径流、月径流、低流量、高流量等16个指标,发现低流量无法用于水文分区。随着缺资料地区水文研究的广泛开展,水文模型参数逐渐成为主要的分区指标。胡凤彬等^[21]较早地将新安江水文模型参数用于水文分区,并构建了各分区的参数地理关系;颜梅春等^[22-23]结合下垫面信息与土壤地形指数(STI)进行水文分区,并通过在各分区内分别率定SCS模型的最大土壤蓄水能力参数CN模拟降雨径流,从而验证了分区的合理性。

表1 常用水文分区指标及分区分类方法

Tab. 1 Frequently employed indicators and classification techniques in hydrological zoning

| 水文分区分类方法 | 分区指标 | 分区指标类别 | 研究区域 | 参考文献 |
|--------------------|--|-----------|------------|--|
| 平均分級 | 土壤地形指数、土地利用类型 | 下垫面 | 屯溪流域 | 颜梅春等 ^[22] ,方耀等 ^[23] |
| | 一阶样本矩均值 E_x 、偏态系数 C_s 、变差系数 C_v | 水文 | 天山北坡区 | 徐磊等 ^[15] |
| 模糊聚类 | 洪峰模数、最小流量模数、径流系数、地貌类型、不同土地利用占比 | 水文、下垫面 | 秦岭北麓 | 李珂等 ^[17] |
| | 6—8各月降水、年径流模数、洪峰模数、年径流变差系数 | 气候、水文 | 黑河中上游流域 | 房晶等 ^[24] |
| 主成分分析、模糊聚类 | 年降水量、年径流量、年蒸发量 | 气候、水文 | 安徽省淮河流域 | 丁亚明等 ^[25] |
| | 年降水、年蒸发、高程、坡度、土地利用类型占比 | 气候、水文、下垫面 | 雅鲁藏布江流域 | 姬海娟等 ^[19] |
| 主成分分析、K均值聚类 | 平均坡度、最大高程差、坡度<1%面积比例、土地利用占比、土壤含沙量、植被覆盖度、降水、蒸发 | 气候、水文、下垫面 | 海河流域 | 陈旭等 ^[26-27] |
| | 年降水、年径流深、年蒸发、年输沙模数、年干旱指数 | 气候、水文 | 宁夏 | 李硕等 ^[28] |
| 主成分聚类 | 年降水、年径流深、年蒸发、年悬移质输沙模数、年干旱指数、年均气温 | 气候、水文 | 青海 | 张国栋等 ^[29] |
| 自组织特征映射神经网络 | 流域面积、主河道长度、加权平均河道比降、流域平均高程、植被覆盖率、地质特征指标、年平均降雨量、年平均最大一日降雨量、 | 气候、水文、下垫面 | 江西、福建 | 张静怡等 ^[30] ,Zhang等 ^[31] |
| 多层加权叠加 | 降水、蒸散发、土壤特性和坡度 | 气候、水文、下垫面 | 埃塞俄比亚 | Berhanu等 ^[32] |
| 基于小波的多尺度熵聚类 | 2、4、8、16、32、64和128个月的径流多尺度熵 | 水文 | 美国530个流域 | Agarwal等 ^[33] |
| 层式聚类、K均值聚类 | 月平均流量模数 | 水文 | 土耳其1410个站点 | Isik等 ^[34] |
| 残差模式、加权聚类、回归树、季节区域 | 低流量(95%百分位流量) Q_{95} | 水文 | 奥地利325个流域 | Laaha等 ^[35] |
| 监督聚类、非监督聚类 | 河流长度、最高/最低/平均海拔、坡度、土壤性质、土地利用类型占比、降水、最高/低温、蒸散量、降水天数 | 气候、水文、下垫面 | 西欧 | Pagliero等 ^[36] |

除了前述常用的流域特征及水文变量外,还发展了一些新的水文分区指标。Pagliero等^[36]研究发现基于偏最小二乘回归相似度指标的聚类分区方法较好;薄岩等^[37]构建了基于水量平衡的水文响应模型,发现基于水文响应的分区方法优于基于水文特征相似和基于流域结构相似的分区方法。在区域洪水研究中,常将洪水频率分布曲线参数相同的区域称为“均匀水文分区”,以表明该分区的洪水特性相同^[38]。徐磊等^[15]将洪水频率一阶样本矩作为聚类因子,基于模糊聚类法的分区结果通过了一致性检验和均匀性检验。径流特征是水文分区中常用的指标,Bouma等^[39]研究认为对于流域特性分类而言,土壤特征比流量特征更合适,原因在于土壤特征属于永久性特征,而流量特征具有时间动态性。Trancoso等^[40]研究发现长期主导径流特性的驱动因素按重要性排序如下:干旱指数、光合作用有效辐射吸收比、饱和导水率、土壤深度、最大坡度、木本植被覆盖度。可见,不同研究中采用的水文分区指标类别基本一致(即气候、水文、下垫面),区别在于具体的因子,产生差异的原因可能与其研究目的相关。

2.2 水文分区方法

水文分区的分类在本质上属于模式识别的问题^[6],在早期的水文区划研究中主要依靠研究人员的经验,即根据等值线图^[41]或水文地理因子空间分布^[42]进行人工判别。后期主要应用人工智能技术进行分区识别,包括聚类方法和神经网络方法。聚类方法通常包括主成分聚类、模糊聚类和主成分模糊聚类等。自组织特征映射人工神经网络(SOFM网络)具有模拟人脑学习功能、自动识别分区个数的优势,能够提高水文分区的合理性^[43]。

在水文分区方法比较方面,房晶等^[24]对黑河的水文分区研究表明:模糊聚类法和集对分析法结果相近、但前者更合理,主要体现在模糊聚类法对流域差异更敏感;姬海娟等^[19]首先应用主成分分析剔除了因子之间的相关性信息,然后用 K 均值聚类分析方法对雅江542个子流域进行归类,分区结果与实际水文特征分布与前期研究成果吻合,基于斯米尔诺夫检验方法的结果也表明了分区的合理性;Agarwal等^[33]针对 K 均值聚类对初始分布敏感的问题,提出小波-自组织映射耦合的聚类方法,结果表明该方法比 K 均值聚类法更优,可以作为小波- K 均值聚类法的替代方法。

分区方法的适用性与可靠性是分区结果的重要指标。Tasker^[44]较早关注到了水文分区方法的稳定性比较,提出了数据分割方法,该方法将大量子流域及其数据分为“估算集”和“预测集”(每个流域只会属于1个集,两个数据集的子流域所覆盖的空间区域基本重叠且统计特征基本相同),通过应用不同数据集分别划分水文分区以检验聚类和回归两类分区方法的效果。在水文频率分区研究中,常用 S 值法和 H 值法检验水文分区的均匀性,陈永勤等^[45]采用 H 值法检验了枯水频率分区,从假定的相似区中剔除了异常子区域;魏兆珍等^[46]研究了土地利用和流域尺度对水文分区的影响,发现土地利用转移变化越大则水文分区转移也越大,流域尺度越小时水文分区越离散;Di等^[47]在应用自组织映射神经网络(SOM)进行流域分类时发现,预先应用主成分分析和典型相关分析(Canonical Correlation Analysis, CCA)可以提高SOM应用效果,降低不确定性。

分区方法总体上经历了人工判别、简单人工智能方法、组合人工智能方法等阶段,后两种方法目前应用较多。相比于人工判别方法,人工智能方法能够快速完成大批量分区任务,基于给定分区指标实现快速分类。然而其缺点也很明显,即无法考虑流域的实际水文规律。在分区方法的适用性方面,当前研究主要是案例分析,尚无一般性结论,方法的适用性主要通过检验分区结果的合理性体现。

从方法上看,与水文分区相似的为流域相似性评价,后者指基于水文相似理论评价流域之间的水文相似性,常用于相似流域选择,涉及相似性指标、相似度评价及流域分类方法等内容^[48]。从理论上说,同一个水文分区的流域应具有水资源时空分布、洪峰特征、产汇流过程等方面的相似性,而水文分区之间的流域则存在较大差异。因此,可以应用流域相似性评价方法对水文分区结果进行合理性检验,目前还少有研究。

2.3 水文分区的应用进展

水文分区主要有两大方面的应用:水文水资源规划、无资料流域水文研究。前者属早期的主要应用领

域,后者是当前的主要应用领域,因此本文重点关注后者。在PUB计划(Prediction in Ungauged Basins, 2003—2012)收官之际, *Hydrology and Earth System Sciences* 期刊出版了“Catchment classification and PUB”专辑(https://hess.copernicus.org/articles/special_issue136.html),其中绝大多数研究与水文分区(即流域分类)直接相关,可见水文分区对PUB研究的重要意义。

水文分区在无资料流域水文研究中的应用可分为理论和实践两个层面,理论层面是指发展和认识新的水文理论与规律,如水文响应特征的区域性分布、水文参数的气候-地貌规律等。Laaha等^[35]开展了 Q_{95} 低流量的流域分类,发现基于季节性区域的分组效果最好,表明低流量过程特征存在季节性差异和区域性差异;陈旭等^[26-27]将海河流域划为5个水文分区,分析了各分区的洪水演变特性与暴雨洪水响应关系,发现人类活动对海河流域洪水具有显著削减作用。实践层面是指获取无资料流域的水文参数方面,如水文站网优化、分区内水文参数区域化等应用。姬海娟等^[19]通过水文分区研究发现雅江流域的水文站网布设尚无法满足资料与参数移植;李萍等^[49]将山东省划分为2个1级水文区、6个2级水文亚区,为公路建设安全性提供了参考信息;李捷等^[50]通过改进青海省水文分区,提高了缺资料地区公路桥涵工程设计流量合理性;武光明^[51]将山西省分为5个产沙分区,建立了可用于无资料地区的基于水文下垫面的地区雨沙模型;伍远康等^[52]将浙江省分为2个洪水计算区,成果可用于省内缺资料地区洪水计算;余江游等^[53]将淮河流域分为4个水文相似区,从而实现了区域内洪水频率曲线拟合和设计洪水计算,克服了资料缺乏问题。以上研究解决了水文观测稀缺地区水文模拟、工程水文设计等方面的资料难题。

分区原则是水文分区应用中的指导思想体系,陈异植等^[54]按照比较水文学的观点提出综合性、相对一致性、区域共轭性、发生学、主导因素、河系完整性等分区原则;张静怡等^[6]则将其归纳为综合分析、相似性与差异性、成因分析、主导因素和河系完整性等原则;赵宝君^[14]提出以“集体效应”为标准、遵循“从主、从众、从源”的原则,即根据实际与需求进行差异化分区。综上,没有一概而论的普适性分区原则,只有符合研究需求的适用性分区原则。

由于水文指标与生态指标存在大量交叉,且要素之间具有较强的相关性,因此生态水文分区常作为生态分区的替代方案,用于生态环境评价与保护。由于生态水文分区在本质上与水文分区同属于模式识别问题,因此其研究与应用方法与水文分区也类似,主要差异在于应用领域。如尹民等^[55]构建了全国河流生态水文分区,综合揭示了不同区域水资源条件、生态系统功能及不同河流生态系统的需水特征;杨爱民等^[56]首先提出了生态水文分区及其构建方法,将全国划分为3个生态水文大区、36个生态水文小区,揭示了生态水文复合系统的空间分异规律。还有其他诸多区域性生态水文分区研究,可认为是水文分区与生态分区的拓展应用,为中国不同区域定向生态环境保护与水资源管理提供了科学依据,此处不再赘述。

3 结 语

本文首先回顾了中国水文区划的发展历程,并按照水文分区研究水平及涉及的区域划分为全国性水文区划初探时期、区域性水文区划细化时期、区域性水文区划改进时期3个阶段。已有的水文分区研究呈现多样性趋势。从水文分区指标、分区方法及应用3个方面综述了水文分区的研究现状,当前研究中采用的水文分区指标主要包括气候、水文、下垫面三类,也有研究者将基于水文变量的统计参数等衍生指标作为水文分区指标,具体采用的指标一般取决于研究目的。水文分区的分类方法以聚类相关方法为主,也可见其他智能算法用于水文分区研究并获得了较好的结果,但针对分区方法的适用性研究较少。在应用上,当前主要用于缺资料流域水文研究,如水文水资源空间规律、水文参数区域化、工程设计参数移用等;同时还结合生态分区发展了生态水文分区。基于水文分区的研究与应用现状,其未来发展趋势和研究重点如下:

(1)加强水文分区的相似理论基础。水文分区与相似流域是一脉相承的,水文分区的研究中通常较少考虑水文相似性,有时过于注重将区域划分为“几类”。研究表明基于水文相似性的流域分类通常能获得

较好的结果,因此在水文分区中应充分纳入水文相似理论。

(2)加强水文区域性规律研究与应用。大量研究表明,基于水文分区的水文水资源、生态与环境科学、自然地理学、工程规划与设计等研究及应用均取得了更好的结果。根据研究需求挖掘出相应的水文区域性规律,既能提高对目标问题的水文背景认识,也能促进上述研究及应用中涉及到的环境要素对水文水资源时空演变的影响研究。

(3)加强水文分区结果的检验与科学解释。水文分区研究得到的是多个流域群组,每个群组的成员流域在理论上应具有某些方面的相似特征,应根据最初的研究目标对各个群组进行检验。除了群组内应具有一致性以外,还要检验群组间的差异是否能够反映分区目标。对比群组间差异的成因也是检验分区结果可靠性的途径。

参 考 文 献:

- [1] 任思卿,徐仪玮,张青峰,等. 基于地理网格的陕西省农业水土资源分区研究[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(6): 192-198. (REN Siqing, XU Yiwei, ZHANG Qingfeng, et al. Geogrid-based framework of agricultural zoning for planning and management of water and land resources in Shaanxi Province[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(6): 192-198. (in Chinese))
- [2] 郑荣伟,张越,王庆明,等. 中国气候分区ET0未来演变趋势预测及归因分析[J]. *长江科学院院报*, 2023, 40(8): 44-50, 56. (ZHENG Rongwei, ZHANG Yue, WANG Qingming, et al. Prediction and attribution analysis of future evolution of ET0 in climatic regions of China[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2023, 40(8): 44-50, 56. (in Chinese))
- [3] 徐海亚,朱会义. 基于自然地理分区的1990—2010年中国粮食生产格局变化[J]. *地理学报*, 2015, 70(4): 582-590. (XU Haiya, ZHU Huiyi. Spatial change of China's grain production based on geographical division of natural factors during 1990-2010[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(4): 582-590. (in Chinese))
- [4] 高江波,黄姣,李双成,等. 中国自然地理区划研究的新进展与发展趋势[J]. *地理科学进展*, 2010, 29(11): 1400-1407. (GAO Jiangbo, HUANG Jiao, LI Shuangcheng, et al. The new progresses and development trends in the research of physiogeographical regionalization in China[J]. *Progress in Geography*, 2010, 29(11): 1400-1407. (in Chinese))
- [5] 邓元倩,李致家,刘甲奇. 区划方法在缺资料地区水文模型参数识别的发展与展望[J]. *中国农村水利水电*, 2017(11): 31-34, 40. (DENG Yuanqian, LI Zhijia, LIU Jiaqi. Development and prospect of hydrological model parameter identification for ungauged catchment[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2017(11): 31-34, 40. (in Chinese))
- [6] 张静怡,何惠,陆桂华. 水文区划问题研究[J]. *水利水电技术*, 2006, 37(1): 48-52. (ZHANG Jingyi, HE Hui, LU Guihua. Research on hydrological regionalization[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2006, 37(1): 48-52. (in Chinese))
- [7] 龚庆胜. 论中国干旱地区水文站网规划与技术[J]. *人民黄河*, 1988(3): 10-15. (GONG Qingsheng. Programme and technique of hydrometeorological network in drought area of China[J]. *Yellow River*, 1988(3): 10-15. (in Chinese))
- [8] 汤奇成,周成虎. 近年中国区域水文研究的若干进展[J]. *地理研究*, 1988, 7(1): 79-85. (TANG Qicheng, ZHOU Chenghu. Recent progress of regional hydrology of China[J]. *Geographical Research*, 1988, 7(1): 79-85. (in Chinese))
- [9] 中国科学院. 中国自然区划草案[M]. 北京: 科学出版社, 1956. (Chinese Academy of Sciences. Draft of China's natural zoning[M]. Beijing: Science Press, 1956. (in Chinese))
- [10] 中国科学院自然区划工作委员会. 中国综合自然区划: 初稿[M]. 北京: 科学出版社, 1959. (Working Committee on Natural Regionalization. Comprehensive natural zoning of China: draft[M]. Beijing: Science Press, 1959. (in Chinese))
- [11] 熊怡. 中国水文区划[M]. 北京: 科学出版社, 1995. (XIONG Yi. Hydrological regionalization of China[M]. Beijing: Science Press, 1995. (in Chinese))
- [12] 李照会,郭良,翟晓燕,等. 基于中国山洪水文模型的动态临界雨量研究及应用[J]. *南水北调与水利科技*, 2019, 17(5): 11-19. (LI Zhaohui, GUO Liang, ZHAI Xiaoyan, et al. Research and application of dynamic rainfall threshold based on China

- Flash Flood Hydrological Model[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2019, 17(5): 11-19. (in Chinese))
- [13] 冷荣梅. 四川省水文分区及川西水文站网规划方法建议[J]. *水文*, 1998(2): 48-53. (LENG Rongmei. Suggestions on planning methods of hydrological stations network in hydrological regionalization and west Sichuan[J]. *Hydrology*, 1998(2): 48-53. (in Chinese))
- [14] 赵宝君. 内蒙古水文分区及分区原则[J]. *内蒙古农业大学学报(自然科学版)*, 2008, 29(1): 125-129. (ZHAO Baojun. New principle of hydrological area division in Inner Mongolia[J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2008, 29(1): 125-129. (in Chinese))
- [15] 徐磊, 李诚, 任少龙. 线性矩法在天山北坡水文分区中的应用[J]. *人民长江*, 2009, 40(21): 47-49. (XU Lei, LI Cheng, REN Shaolong. Application of linear moment method in hydrological regionalization on the northern slope of Tianshan Mountains[J]. *Yangtze River*, 2009, 40(21): 47-49. (in Chinese))
- [16] 苏乃友. 年径流变差系数CVR经验公式及其参数的地理综合[J]. *南水北调与水利科技*, 2012, 10(2): 107-109, 119. (SU Naiyou. Empirical formula of the coefficient of variation CVR of annual runoff and its parameters in geographical synthesis[J]. *South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology*, 2012, 10(2): 107-109, 119. (in Chinese))
- [17] 李珂, 秦毅, 李子文, 等. 秦岭北麓部分区域的水文相似性初步分区[J]. *水资源与水工程学报*, 2014, 25(2): 184-187. (LI Ke, QIN Yi, LI Ziwen, et al. Similar regionalization of hydrology in part area of north Qinling Mountain[J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2014, 25(2): 184-187. (in Chinese))
- [18] ANYADIKE R N C. Hydrological regions of west Africa: a preliminary survey based on moisture regimes[J]. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 1992, 74(4): 375-382.
- [19] 姬海娟, 刘金涛, 李瑶, 等. 雅鲁藏布江流域水文分区研究[J]. *水文*, 2018, 38(2): 35-40, 65. (JI Haijuan, LIU Jintao, LI Yao, et al. Hydrological regionalization of Yarlung Zangbo Basin based on principal component and cluster analysis[J]. *Journal of China Hydrology*, 2018, 38(2): 35-40, 65. (in Chinese))
- [20] HUGHES J, JAMES B. A hydrological regionalization of streams in Victoria, Australia, with implications for stream Ecology[J]. *Marine and Freshwater Research*, 1989, 40(3): 303.
- [21] 胡凤彬, 沈言贤, 金柳文, 等. 流域水文模型参数的水文分区法[J]. *水文*, 1989(1): 34-40. (HU Fengbin, SHEN Yanxian, JIN Liuwen, et al. Hydrological regionalization method for hydrological model parameters of watershed[J]. *Journal of China Hydrology*, 1989(1): 34-40. (in Chinese))
- [22] 颜梅春, 陈贝贝, 李致家, 等. 基于土壤地形指数和下垫面水文分区的流域模型参数率定[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2015, 43(3): 197-202. (YAN Meichun, CHEN Beibei, LI Zhijia, et al. Parameter calibration for watershed hydrology model based on soil topography index and hydrological partition of underlying surface[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2015, 43(3): 197-202. (in Chinese))
- [23] 方耀, 颜梅春, 李致家, 等. 结合土壤地形指数的流域下垫面水文分区方法[J]. *人民黄河*, 2017, 39(4): 25-28, 86. (FANG Yao, YAN Meichun, LI Zhijia, et al. Methods of soil topographic index based on basin underlying surface hydrologic division[J]. *Yellow River*, 2017, 39(4): 25-28, 86. (in Chinese))
- [24] 房晶, 彭定志, 杨卓, 等. 黑河中上游流域水文区划分析比较[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2016, 52(3): 376-379. (FANG Jing, PENG Dingzhi, YANG Zhuo, et al. Comparative study on hydrological regionalization in the upper and middle reaches of Heihe River Basin[J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2016, 52(3): 376-379. (in Chinese))
- [25] 丁亚明, 赵艳平, 张志红, 等. 基于主成分分析和模糊聚类的水文分区[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2009, 32(6): 796-801. (DING Yaming, ZHAO Yanping, ZHANG Zhihong, et al. Hydrologic regionalization based on principal component analysis and fuzzy clustering[J]. *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science)*, 2009, 32(6): 796-801. (in Chinese))
- [26] 陈旭, 韩瑞光. 基于水文分区的海河流域洪水演变特性分析[J]. *海河水利*, 2021(5): 65-73. (CHEN Xu, HAN Ruiguang. Analysis on flood evolution characteristics in Haihe River Basin based on hydrological zones[J]. *Haihe Water Resources*, 2021(5): 65-73. (in Chinese))
- [27] 陈旭, 韩瑞光. 基于水文分区的海河流域洪水演变影响因素分析[J]. *中国农村水利水电*, 2021(11): 69-77. (CHEN Xu, HAN Ruiguang. An analysis of the influencing factors of flood evolution in Haihe River Basin based on hydrologic

- regionalizations[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2021(11): 69-77. (in Chinese))
- [28] 李硕, 许萌芽. 主成分聚类分析法在宁夏水文分区中的应用[J]. *水文*, 2002, 22(2): 44-46, 50. (LI Shuo, XU Mengya. Application of principal component cluster analysis in hydrological regionalization of Ningxia[J]. *Hydrology*, 2002, 22(2): 44-46, 50. (in Chinese))
- [29] 张国栋, 樊东方, 李其江. 基于主成分聚类分析的青海省水文分区研究[J]. *人民黄河*, 2018, 40(12): 33-38. (ZHANG Guodong, FAN Dongfang, LI Qijiang. Research of hydrological regionalization of Qinghai Province based on principal component cluster analysis[J]. *Yellow River*, 2018, 40(12): 33-38. (in Chinese))
- [30] 张静怡, 陆桂华, 徐小明. 自组织特征映射神经网络方法在水文分区中的应用[J]. *水利学报*, 2005, 36(2): 163-166, 173. (ZHANG Jingyi, LU Guihua, XU Xiaoming. Hydrologic regionalization by using self-organizing feature maps neural network[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, 36(2): 163-166, 173. (in Chinese))
- [31] ZHANG J Y, HALL M J. Regional flood frequency analysis for the Gan-Ming River Basin in China[J]. *Journal of Hydrology*, 2004, 296(1-4): 98-117.
- [32] BERHANU B, MELESSE A M, SELESHI Y. GIS-based hydrological zones and soil geo-database of Ethiopia[J]. *Catena*, 2013, 104: 21-31.
- [33] AGARWAL A, MAHESWARAN R, KURTHS J, et al. Wavelet spectrum and self-organizing maps-based approach for hydrologic regionalization-a case study in the western United States[J]. *Water Resources Management*, 2016, 30(12): 4399-4413.
- [34] ISIK S, SINGH V P. Hydrologic regionalization of watersheds in Turkey[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2008, 13(9): 824-834.
- [35] LAAHA G, BLÖSCHL G. A comparison of low flow regionalisation methods: catchment grouping[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 323(1/4): 193-214.
- [36] PAGLIERO L, BOURAOUI F, DIELS J, et al. Investigating regionalization techniques for large-scale hydrological modelling[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 570: 220-235.
- [37] 薄岩, 周丰. 基于水文响应相似性的无资料流域预测方法[C]//面向未来的水安全与可持续发展: 第十四届中国水论坛论文集. 北京: 中国水利水电出版社, 2016: 40-50. (BO Yan, ZHOU Feng. Prediction method of ungauged basins based on similarity of hydrological response[C]//Future water security and sustainable development: proceedings of the 14th China Water Forum. Beijing: China Water & Power Press, 2016: 40-50. (in Chinese))
- [38] 熊立华, 郭生练, 王才君. 国外区域洪水频率分析方法研究进展[J]. *水科学进展*, 2004, 15(2): 261-267. (XIONG Lihua, GUO Shenglian, WANG Caijun. Advance in regional flood frequency analysis from abroad[J]. *Advances in Water Science*, 2004, 15(2): 261-267. (in Chinese))
- [39] BOUMA J, DROOGERS P, SONNEVELD M P W, et al. Hydropedological insights when considering catchment classification[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, 15(6): 1909-1919.
- [40] TRANCOSO R, LARSEN J R, MCALPINE C, et al. Linking the Budyko framework and the Dunne diagram[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 535: 581-597.
- [41] 李倩, 荆丹. 河南省水文区域的划分[J]. *人民黄河*, 1999, 21(8): 31-32. (LI Qian, JING Dan. Division of hydrological regions in Henan Province[J]. *Yellow River*, 1999, 21(8): 31-32. (in Chinese))
- [42] 熊怡, 李秀云, 王玉枝, 等. 横断山区水文区划[J]. *山地研究*, 1989, 7(1): 29-37. (XIONG Yi, LI Xiuyun, WANG Yuzhi, et al. Hydrologic regionalization of the Hengduan mountainous region[J]. *Journal of Mountain Research*, 1989, 7(1): 29-37. (in Chinese))
- [43] 岳素青, 蔡琼. 加权SOM神经网络在水文分区中的应用[J]. *赤峰学院学报(自然科学版)*, 2009, 25(3): 19-20. (YUE Suqing, CAI Qiong. Application of weighted SOM neural network in hydrological regionalization[J]. *Journal of Chifeng University (Natural Science Edition)*, 2009, 25(3): 19-20. (in Chinese))
- [44] TASKER G D. Comparing methods of hydrologic regionalization[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 1982, 18(6): 965-970.
- [45] 陈永勤, 黄国如. 基于线性矩法的东江流域区域枯水频率分析[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2005, 13(4): 409-416. (CHEN Yongqin, HUANG Guoru. Regional low flow frequency calculation with L-moments method at Dongjiang Basin[J].

- Journal of Basic Science and Engineering*, 2005, 13(4): 409-416. (in Chinese))
- [46] 魏兆珍, 李建柱, 冯平. 土地利用变化及流域尺度大小对水文类型分区的影响[J]. *自然资源学报*, 2014, 29(7): 1116-1126. (WEI Zhaozhen, LI Jianzhu, FENG Ping. The impacts of land use change and watershed scale on hydrologic type regions[J]. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(7): 1116-1126. (in Chinese))
- [47] DI PRINZIO M, CASTELLARIN A, TOTH E. Data-driven catchment classification: application to the pub problem[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, 15(6): 1921-1935.
- [48] 杨亚铃, 刘金涛, 杨爽, 等. 基于物理相似法的山丘区流域水文分类及模型参数移用方法[J]. *水电能源科学*, 2022, 40(4): 23-27. (YANG Yaqian, LIU Jintao, YANG Shuang, et al. Hydrological classification and model parameter transfer of basins in eastern hilly region based on physical similarity method[J]. *Water Resources and Power*, 2022, 40(4): 23-27. (in Chinese))
- [49] 李萍, 张志超, 许金良, 等. 山东省公路水文区划研究[J]. *公路交通科技*, 2014, 31(6): 53-62. (LI Ping, ZHANG Zhichao, XU Jinliang, et al. Research on highway hydrological zoning of Shandong Province[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2014, 31(6): 53-62. (in Chinese))
- [50] 李捷, 衡秀云, 赵静. 青海省公路桥涵水文分区技术探讨[J]. *青海大学学报(自然科学版)*, 2014, 32(1): 17-23. (LI Jie, HENG Xiuyun, ZHAO Jing. Hydrological partitioning technology of highway bridges and culverts in Qinghai Province[J]. *Journal of Qinghai University (Nature Science Edition)*, 2014, 32(1): 17-23. (in Chinese))
- [51] 武光明. 基于水文下垫面分类的流域来沙量计算方法[J]. *人民黄河*, 2013, 35(5): 36-37, 68. (WU Guangming. Research on engineering sediment volume calculation method based on hydrological underlying surface classification[J]. *Yellow River*, 2013, 35(5): 36-37, 68. (in Chinese))
- [52] 伍远康, 陶永格, 刘福瑶. 基于区域回归分析法的浙江省洪水计算分区[J]. *水利水电科技进展*, 2015, 35(4): 39-43. (WU Yuankang, TAO Yongge, LIU Fuyao. Flood zoning calculation in Zhejiang Province based on regional regression analytical method[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2015, 35(4): 39-43. (in Chinese))
- [53] 余江游, 陈璐, 夏军, 等. 基于指标洪水法的淮河流域洪水频率分析研究[J]. *中国农村水利水电*, 2016(12): 163-167. (YU Jiangyou, CHEN Lu, XIA Jun, et al. An analysis of the regional flood frequency in the Huaihe River Basin based on index flood method[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2016(12): 163-167. (in Chinese))
- [54] 陈异植, 庄希澄. 福建省水文区划[J]. *水文*, 1990(3): 17-21. (CHEN Yizhi, ZHUANG Xicheng. Hydrological regionalization in Fujian Province[J]. *Hydrology*, 1990(3): 17-21. (in Chinese))
- [55] 尹民, 杨志峰, 崔保山. 中国河流生态水文分区初探[J]. *环境科学学报*, 2005, 25(4): 423-428. (YIN Min, YANG Zhifeng, CUI Baoshan. Eco-hydrological regionalization of river system in China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(4): 423-428. (in Chinese))
- [56] 杨爱民, 唐克旺, 王浩, 等. 中国生态水文分区[J]. *水利学报*, 2008, 39(3): 332-338. (YANG Aimin, TANG Kewang, WANG Hao, et al. Eco-hydrological regionalization in China[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 39(3): 332-338. (in Chinese))

Evaluation of hydrological zoning technique and its utilization in China

SUN Zhouliang^{1,2}, WANG Jie¹, LIU Yanli^{1,3,4}, CHEN Xin¹, LIU Cuishan^{1,3,4}, WANG Guoqing^{1,3,4}

(1. *The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*; 2. *State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, China*; 3. *Research Center for Climate Change of Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China*; 4. *Yangtze Institute for Conservation and Development, Nanjing 210098, China*)

Abstract: Hydrological zoning serves as a pivotal foundation for water resources planning and proves to be an effective method in data-deficient regions. In China, initial hydrological zoning primarily addressed the requirements of water resources planning. The national hydrological zoning emerged predominantly in the 1950s, while more refined provincial hydrological zoning was consolidated towards the close of the 20th century. At the core of hydrological zoning work lies the determination of zoning indicators and methods, which must be applied flexibly based on practical needs. Presently, hydrological zoning indicators predominantly encompass climate, hydrology, and underlying surface, with the clustering method being the primary approach for hydrological zoning. This method is instrumental in addressing the scarcity of hydrological data, and efforts have been made to enhance its ecological assessment through the development of ecohydrological zoning methods. In light of the current research landscape, the following avenues are proposed for future exploration: (1) integrating hydrological similarity theory into hydrological zoning, (2) delving into regional hydrological mechanisms and their applications in water resources, environment, and ecology, and (3) rigorously testing and scientifically interpreting hydrological zoning results. This study lays the groundwork for regional water resources planning, parameter transplantation, and ecological environment protection.

Key words: hydrological zoning; cluster; catchment characteristics; hydrological similarity