

九龙江流域生态需水量时空变化趋势分析

彭莹¹, 李世曙¹, 李磊²

(1. 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098; 2. 中水珠江规划勘测设计有限公司, 广州 510630)

摘要: 为了维持和保护流域生态系统健康, 避免流域生态环境退化, 进行流域生态需水量的确定和研究是有必要的。根据九龙江 2000—2018 年 2 个水文站实测数据, 结合 Tennant 法确定河道内生态基流, 选择面积定额法, 利用流域内土壤质地分布状况, 以及基于遥感开发的 MCD12Q1 土地利用产品和 MOD16A2 蒸散发产品估算植被生态需水量, 并对区域生态环境需水量进行时间变化趋势分析和空间分布分析。结果表明: (1) 在 2000—2018 年, 九龙江流域有林地、草地面积整体呈现增加趋势, 农田、疏林地面积呈现下降趋势; (2) 九龙江流域内北溪、西溪河道内多年平均生态需水量分别为 22.68 亿 m³, 10.67 亿 m³, 植被多年平均生态需水量为 105.27 亿 m³; (3) 有林地、草地的生态需水量呈显著上升趋势, 疏林地、农田生态需水量呈下降趋势, 前者显著, 后者不显著。受人类活动影响, 九龙江流域土地覆盖/利用类型年际变化剧烈, 因此在区域生态需水量变化中其作用不可忽略, 随着遥感/GIS 技术的发展, 对土地覆盖/利用类型以及植被蒸发量的高时空分辨率观测变得可能, 有助于准确预测区域生态需水量。

关键词: 九龙江流域; 生态需水量; MODIS; 土地利用类型; 时空变化分析

中图分类号: X171.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)01-0364-06

Analysis of Temporal and Spatial Variations of Ecological Water Demand of Jiulong River Basin

PENG Ying¹, LI Shishu¹, LI Lei²

(1. State Key Laboratory of Hydrology, Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Zhongshui Pearl River Planning & Design Co., Ltd., Guangzhou 510630, China)

Abstract: In order to maintain and protect the ecosystem of a certain region healthy and reverse the degradation, studying and calculating its ecological water demand is necessary. During 2000—2018, based on the data of two hydrological stations, the ecological base flow was determined with the Tennant method, while the area quota method was selected to estimate the ecological water demand of vegetation. The distribution map of soil texture, as well as the remote-sensing based MCD12Q1 land use types product and MOD16A2 evapotranspiration product were selected as inputs of the area quota method. The temporal changing trend and spatial distribution of ecological water demands over the whole watershed were analyzed. The results showed that: (1) during 2000—2018, the areas of forestland, grassland in overall increased, while the area of cropland and sparse woods decreased; (2) the instream ecological water requirements of North River and West River were 2.268 billion m³, 1.067 billion m³, respectively, and ecological water requirement of vegetated area was total 10.527 billion m³; (3) the ecological water requirements of forestland and grassland increased significantly, while those of open woodland and cropland decreased significantly and insignificantly, respectively. Affected by human activities, the interannual change of land cover/land use in Jiulong River Basin was obvious, hence it could not be ignored in reckoning regional ecological water demand, and with the development of RS/GIS technology, it could be convenient to obtain land cover/land use data and evapotranspiration data in

high space-time resolution, which is useful for predicting the regional ecological water demand.

Keywords: Jiulong River Basin; ecological water demand; MODIS; land use type; analysis of temporal and spatial variations

生态环境需水量(ecological water demand),指维护生态环境功能所需水量。国外对生态需水的研究较早,20 世纪 40 年代开始,美国对河流生态蓄水进行研究,主要考虑河道基本形态和典型鱼类等水生生物对流量的需求,并提出了最小流量与最佳流量等概念^[1-2]。国内外许多研究者对生态需水量的理解和定义存在差异,Gleick 等^[3]提出了维持和保护自然生态系统所需的最小水量为基本生态需水量,我国对生态环境需水量的研究一开始着重于河流生态环境需水量,指维系水生生态系统所需水量,包括河流、湖泊、湿地、河口等水生生态系统,逐渐将研究从河道扩展到流域范围^[4-7],特别是生态系统脆弱的干旱和半干旱地区。按照需水空间,可将生态环境需水量分为河道内生态需水量和河道外生态需水量。河流生态系统的良性循环对于促进流域生态系统健康具有重要作用^[8-9]。河道外生态需水量包括植被生态系统、农业生态系统、城市生态系统等,其中植被是其他陆地生态系统研究的基础,对遏制河道断流、防止流域生态环境退化有重要意义^[10]。从单一的水文学到水文—生态—气象—环境等多学科相融合,从河流生态需水量到区域生态需水量,相关研究正逐步深入^[11]。

河道内生态需水量常用的方法有水文学法、水力学法、栖息地法和系统分析法 4 类^[12-13];其中水文学法如 Tennant 法、 Q_{90} 法等,简洁可行,被广泛应用^[14-15]。植被生态需水量的确定常用面积定额法、潜水蒸发法、改进后的彭曼公式法等^[7,16]。如吕明权等^[17]计算了不同土地利用和土地覆盖情景下东北沟流域植被生态需水量并评估其对产流的影响;李肖杨等^[5]在新疆孔雀河流域分别采用 Tennant 法和 90% 保证率法确定生态基流、采用潜水蒸发法和定额法确定天然植被需水量,对流域生态输水工程提供科学调控依据;陈丽华等^[18]采用生态用水定额法,确定不同类型林木的植被系数,计算北京市生态用水总量;闵庆文等^[19]根据土壤水分有效性划分,分别确定林地最小生态需水定额和适宜生态需水定额。南方湿润地区虽总体水资源丰富,但生态需水与人类生产生活活动用水之间存在竞争性,导致局部地区出现生态需水无法满足的情况。符静^[20]计算了湖南省农作物与林地的生态需水量,认为两者之间存在竞争关系,林地对地表产流、水土保持、涵养水源、调节气候等有积极作用,但农作物具有社会经济价值,需要进行权衡。

另外水污染也是南方水生态环境问题之一。

由于某一确定流域尺度大、土地利用覆盖类型复杂、土壤质地分布不均、气象条件空间差异大,增加了流域内的植被需水量定量计算的难度。魏华^[21]指出通过理论公式计算植被需水定额的方法在土壤动态监测手段及气象数据的获得方法还存在一定的局限性。而随着遥感与 GIS 技术的发展,对土地利用及地表覆盖类型的识别越来越快速和精确,基于遥感卫星数据开发的地表蒸散发的产品也越来越多,对于传统利用气象数据或土壤数据,确定生态需水定额的方法,在反映空间上生态需水的分异规律具有突出优势。王芳等^[6]基于 RS/GIS 技术建立了水资源分区和生态分区的对应关系,借助流域水量平衡原理计算了流域生态需水量;宫兆宁等^[22]利用 Landsat 影像反演湿地下垫面物候特征,准确获取研究区内土地利用/覆被的动态变化信息,并利用 SEBAL 模型反演并扩展了湿地蒸散发量,提高了生态需水量估算的准确性和实用性。

NASA 提供有基于中分辨率成像光谱仪(MODIS)遥感数据开发的 MOD16 地表蒸散发产品和 MCD12 土地利用类型产品,该产品被水文气象等相关研究领域广泛使用,众多研究者在全球很多地区对其进行过精度验证,具有一定可靠性^[23]。本研究应用水文学法对流域河道内生态需水量进行估算,利用 MODIS 传感器数据开发的遥感产品,结合 GIS 技术,应用面积定额法,对区域植被生态需水量进行计算,分别分析河道内生态需水量和植被生态需水量的时空变化特征,使得区域生态需水量随气象因子的空间异质性和土地利用类型的变化而变化的部分得以体现,对区域生态需水量的可视化作业也能更直观地展示不同地区生态环境面临的问题和生态服务功能,为实现流域水资源优化配置和合理规划调度提供科学依据,为决策层提供决策依据,实现经济社会高质量发展可持续发展。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

九龙江为福建省第二大河流,是独流入海河流,流经龙岩、漳州、厦门三市,由北溪、西溪、南溪三条主要河流组成,干支流总长 1 923 km,流域面积 14 741 km²,本研究未包括南溪流域(其面积 660 km²,占九

龙江流域面积的 4.5%)。九龙江流域完全位于福建省境内,靠近北回归线,属亚热带季风气候,区域年均气温在 20℃左右,全年日照充足,无霜期长,森林覆盖率高达 78%,自然地理环境复杂。主要土壤类型为水稻土、赤红壤、石质土等。流域植被覆盖率高,有超过 1 000 种亚热带植物,其中有十多种稀珍植物如桫欏、建柏、宿轴木兰等已列作国家或省级保护对象。九龙江河口是全国生态功能区划的水源涵养三级功能区、东南沿海红树林生物多样性保护功能区,其生态服务功能重要。流域属于四级水资源分区,有大量可利用水资源,是闽西南重要水源。近年来,由于人口增加以及农业和城镇扩张、水电水利设施建设、生物资源过度开发等原因,流域内部分河流河道出现缺水甚至断流,水土流失严重,自然生境遭到破坏,生物多样性受到威胁。在进行水量合理分配,完善水资源管理制度,实现高效水资源配置的同时,须防止对生态环境造成破坏。

1.2 数据来源

九龙江流域内北溪的浦南水文站和西溪的郑店水文站的逐月径流数据通过水文年鉴查得,站点位置和各自控制的集水区范围见图 1;土壤类型来源于中国 1:100 万土壤质地空间分布数据(<http://www.resdc.cn>);MODIS 是搭载在 Terra 和 Aqua 两颗卫星上的中分辨率成像光谱仪,主要用于地面观测,数据由美国航空航天局发布(<https://earthdata.nasa.gov/>),本文选取了 Collection 6 提供的蒸散发产品 MOD16A2,空间分辨率为 500 m,时间分辨率为 8 d,以及土地利用类型产品 MCD12Q1,空间分辨率为 500 m,时间分辨率为 1 a,格式为 HDF-EOS,投影类型为正弦投影。以上数据均选择 2000—2018 年时段。

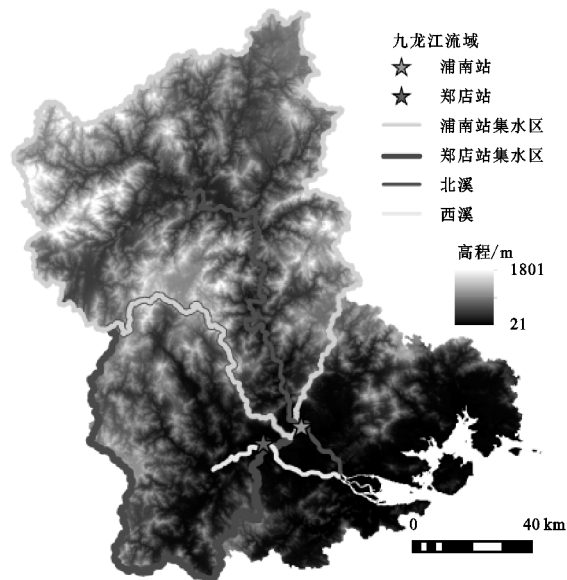


图 1 流域高程及范围、水文站点位置及集水区范围

2 研究方法

《水资源规划规范》(GB/T51051-2014)指出要对河道外与河道内生态需水量协调平衡分析。本研究的生态需水量计算分为河道内生态需水量与植被生态需水量两部分。河道内最小生态环境需水量指河流应维持河道基本形态、纳污能力等需要的最小水量;植被生态需水量与土壤含水量变化有关,很多研究认为,暂时凋萎含水量和生长阻滞含水量分别是能保证林草地基本生存和正常生长时土壤含水量的下限,能维持植被基本生存时所必须消耗的水量被称为植被最小生态需水量,保证植被正常生长所必须的水量被称为适宜生态需水量,本研究讨论植被最小生态需水量。

2.1 河道内生态需水量

Tennant 法通过建立流量与河流生态环境状况之间的经验性关系,进而确定年内各月的生态环境需水量^[1]。计算公式如下:

$$W_i = \overline{Q}_i \cdot \lambda_i \quad (1)$$

式中: W_i 为第 i 个月的生态需水量(亿 m^3); \overline{Q}_i 为第 i 个月的平均径流量(亿 m^3); λ_i 为第 i 个月的推荐基流百分比。根据《河道内生态需水评估导则》(2008 年)的相关技术参考,结合九龙江流域实际水资源开发利用现状,枯水期(10 月—次年 3 月份)选择生态用水保护目标为“中”,即年均流量 \overline{Q} 的 10% 作为生态基流,丰水期(4—9 月)则选择“良好”水平,即年均流量 \overline{Q} 的 30% 作为生态基流。

2.2 植被生态需水量

生态二级分区与水资源分区的空间对应关系可以反映水资源开发利用对生态的影响范围^[6]。因此本文参考土地覆盖/利用类型分类,将九龙江流域植被分为有林地、疏林地、草地、农田 4 类。

面积定额法是根据某一区域某一类型植被单位面积的需水定额乘以其种植面积计算,使用于基础工作较好的地区与植被类型,多用于防风固沙、人工绿洲等生态需水量计算,公式如下:

$$W = \sum W_i = \sum A_i \cdot ET_i \quad (2)$$

式中: W 为植被生态需水量(m^3); W_i 为第 i 类植被的生态需水量(m^3); A_i 为第 i 类植被的面积(m^2); ET_i 为第 i 类植被的生态需水量(m^3/m^2)。

植被的生态需水量主要受气候条件、土壤水分含量以及植被种类 3 大因素的影响,关键是确定不同类型植被在非充分供水条件下的需水定额。植被生态需水定额可由下式计算:

$$ET_q = ET_0 \cdot K_c \cdot K_s \tag{3}$$

式中： ET_q 为植被生态需水定额； ET_0 为植被潜在蒸散发量(mm)； K_c 为植被系数，与植被类型和生长状态有关，综合相关研究^[24]，本文有林地、疏林地、草地、农田植被系数 K_c 取值分别为 1,0.73,0.26,1.03； K_s 为土壤水分系数，与土壤质地和土壤含水量有关。

当土壤水分供应不充足时，土壤水分含量是植被实际蒸散量的主要限制因素，本文计算植被最小生态需水量，参考已有的研究成果^[24]，本文中对应的粗砂土、砂壤土、砂黏土、粉黏土、粉土的土壤水分系数分别取 0.548 4,0.556 4,0.522 1,0.538 7,0.536 5。

Mann-Kendall 检验(简称 M-K 检验)是随机序列趋势分析的常用方法，本文选择该方法对植被生态需水量时间变化趋势的显著性进行分析，取置信度为

95%，当 p 参数值小于 0.05 时，认为变化显著，否则不显著。

3 结果与分析

3.1 河道内生态需水量时间变化分析

根据九龙江流域的生态环境状况以及 2000—2018 年实测径流资料，采用上述 Tennant 法，估算最小生态需水量。控制断面分别选取北溪上的浦南水文站所在断面、西溪上接近汇入口的郑店水文站所在断面，根据天然径流量计算出生态需水量，并以水文比拟法获得西溪、北溪下游衔接断面生态需水量。表 1 列出了北溪和西溪逐月生态需水量，可以看出两条河流总需水量分别为 22.68 亿 m^3 ，10.67 亿 m^3 ，均在 4—9 月汛期需水量大，分别为占总需水量的 89%，88%。

表 1 九龙江生态需水量计算结果 亿 m^3

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	合计
浦南	0.32	0.31	0.47	2.12	2.9	4.32	2.76	3.15	2.45	0.51	0.34	0.33	19.97
郑店	0.16	0.13	0.18	0.7	1.12	1.6	1.52	1.69	1.5	0.29	0.19	0.17	9.26
北溪	0.36	0.35	0.53	2.41	3.3	4.9	3.13	3.58	2.78	0.58	0.39	0.37	22.68
西溪	0.18	0.15	0.21	0.81	1.3	1.85	1.75	1.95	1.73	0.34	0.22	0.19	10.67

图 2 展示了河流生态需水量的年际变化，北溪和西溪生态需水量波动规律相近，在 2000—2018 年河流年均生态需水量呈下降趋势，变化速率分别为 -0.075 亿 m^3/a ， -0.108 亿 m^3/a ，经 M-K 趋势显著性检验，发现两条河流的生态需水量下降趋势均不显著。

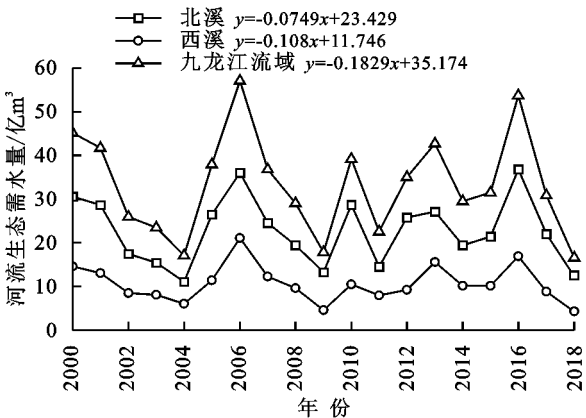


图 2 九龙江河流生态需水量年际变化趋势(2000—2018 年)

3.2 植被生态需水量时空变化趋势分析

(1) 土地覆盖/利用类型面积的时间变化特征。利用 MCD12Q1 产品统计了研究区域内有林地、疏林地、草地、农田、城市 and 建设用地、水体、其他等土地覆盖类型 2000—2018 年的面积，其中有林地、疏林地、草地、农田多年平均面积约为 5 525 km^2 ，4 761 km^2 ，3 659 km^2 ，1 069 km^2 ，各土地类型面积 19 年间的变化趋势见图 3，可以发现草地面积呈下降趋势，2005 年以后，有林地和疏林地面积分别呈现明显上升和下

降趋势，农田和城市以及建设用地均呈现上升趋势，农田从 2000 年的 975 km^2 上升至 2018 年的 1 330 km^2 ，增加 36.4%，城市和建设用地从 926 km^2 上升至 1 115 km^2 ，增加 20.5%。可以看出在受人类活动影响较大的地区，土地覆盖/利用类型年际变化剧烈，基于某一基准年的土地覆盖/利用类型情况进行植被的生态需水量估算和预测的方法有待改进。

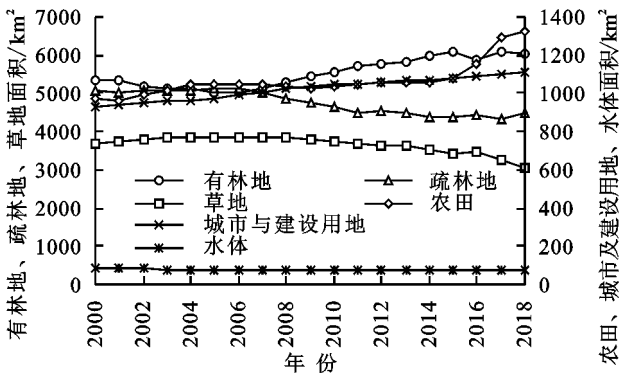


图 3 九龙江流域 2000—2018 年不同土地覆盖/利用类型面积时间变化

(2) 植被生态需水量的时间变化特征。统计分析有林地、疏林地、草地、农田 4 类土地覆盖/利用类型的多年月平均需水定额，结果见表 2，4 种类型的生态需水定额年份分布均存在明显季节性，4—10 月高，11 月至翌年 3 月低，最高值均出现在 7 月，最低值出现在 12 月或 1 月，与该地区植被生长的物候规律基本一致。总体来看，生态需水定额有林地>农田>疏林地>草地。

表 2 不同土地覆盖/利用类型各月平均生态需水定额 mm

植被类型	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	平均
有林地	853	917	1284	1466	1697	1674	2021	1865	1753	1552	1077	889	1421
疏林地	650	695	963	1099	1292	1302	1544	1457	1353	1181	824	677	1086
草地	354	371	497	556	660	666	779	752	706	624	440	366	564
农田	828	871	1180	1317	1580	1602	1838	1745	1683	1489	1055	876	1339

研究区 4 种土地覆盖/利用类型生态需水量 2000—2018 年的年际变化见图 4,线性回归拟合的结果可以看出有林地和草地生态需水量呈上升趋势,上升速率分别为 0.45 亿 m³/a 和 0.31 亿 m³/a,疏林地和农田呈下降趋势,下降速率为 0.3 亿 m³/a 和 0.03 亿 m³/a。对 4 类生态需水量和植被整体生态需水量进行 M-K 时间变化趋势检验,检验的特征值见表 3,可以发现当置信度取 95% 时,有林地、草地均呈显著上升趋势,疏林地呈显著下降趋势,而农田呈下降趋势,但不显著。

表 3 不同土地覆盖/利用类型年生态需水量显著性检验特征值

M-K 趋势检验结果	有林地	疏林地	草地	农田	总体
ρ 值	0.03	0.01	0.00	0.29	0.21
τ 值	0.37	-0.47	0.79	-0.18	0.22
Z 值	2.17	-2.80	4.69	-1.05	1.26

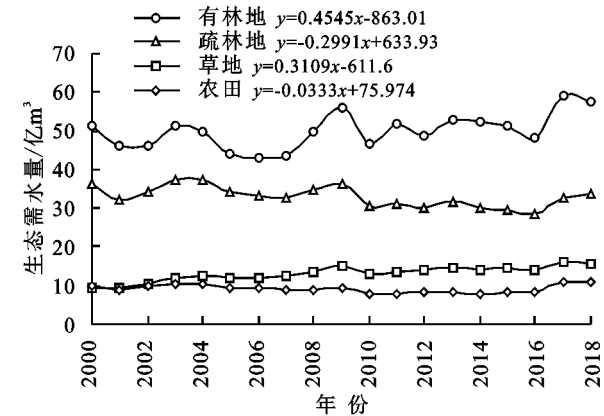


图 4 4 种土地覆盖/利用类型生态需水量年际变化(2000—2018)

(3) 植被生态需水量的空间分布特征。根据土地覆盖/利用类型面积及其对应生态需水定额,统计得到有林地、灌丛、草地旱地和水田生态需水量的结果见表 4。有林地的多年平均生态需水定额为 905.71 mm,疏林地、农田多年平均生态需水定额分别为 692.48 mm,854.26 mm,草地多年平均生态需水定额最小,为 358.7 mm;流域内有林地面积最大,为 5 525.56 km²,农田最小,为 1 068.98 km²;有林地的多年平均生态需水量最高,为 50.05 亿 m³;疏林地、草地多年平均生态需水量分别为 32.97 亿 m³,13.12 亿 m³,农田的多年平均生态需水量最小,为 9.13 亿 m³。

植被多年平均生态需水定额的空间分布见图 5,结合图 1 流域高程图,沿海地区高程低,生态需水定额高,中北部由南至北分别是博平岭、玳瑁山、武夷山脉,

盆地和山谷地区的生态需水定额高于山脊地区。研究区域内生态需水定额范围为 1 291~2 045 mm,整体看来,东南部沿海地区植被生态需水定额比内陆地区高,东南沿海地区即厦门市辖区及周边由于高度城市化以及河口湿地等水体分布较多,社会经济生活用水量及河道内生态需水量均较内陆地区多,因此东部沿海地区存在植被生态需水与经济社会需水的矛盾较为突出。

表 4 不同土地覆盖/利用类型多年平均面积及生态需水量 亿 m³

植被类型	生态需水定额/mm	面积/km ²	生态需水量/亿 m ³
有林地	905.71	5525.56	50.05
疏林地	692.48	4761.59	32.97
草地	358.70	3658.84	13.12
农田	854.26	1068.98	9.13
总计	—	15014.97	105.27

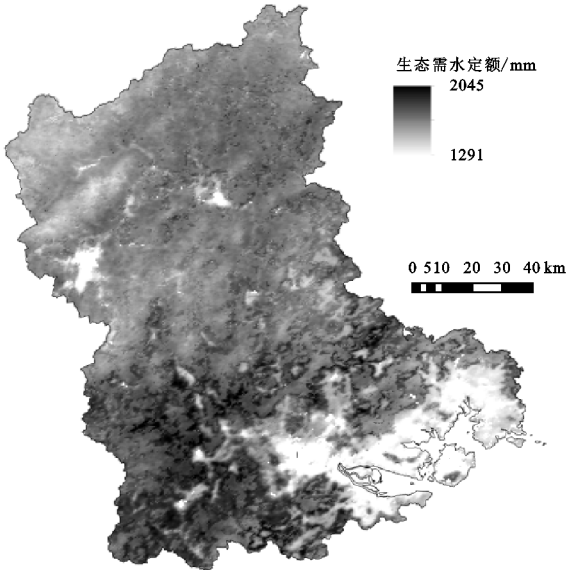


图 5 植被多年平均生态需水定额分布

4 讨论

本文对 2000—2018 年流域的河道内和河道外的生态需水量进行定量分析,发现前者整体呈不显著上升趋势,后者整体呈不显著下降趋势。福建省从 20 世纪 80 年代以来,在经济高速发展的同时,实施各类植树造林工程和水土流失治理工程大量生态工程,经济生产生活用水和生态需水量呈现同步增加的态势。根据《厦门市水资源公报》2001—2018 年九龙江流域平均地表水资源量为 140.5 亿 m³,整体呈现不

显著上升趋势,地表水资源量年际差异较大,在地表水资源量少的枯水年份,植被生态需水量更大,在某些年份会出现生态需水缺口,需要施行人工灌溉、节水等工程和非工程措施。

河道生态需水量的计算,须从生态保护对象的角度出发,主要包括河湖基本形态、基本栖息地、基本自净能力等基本生态保护对象,以及保护要求明确的重要生态敏感区、水生生物多样性、输沙、河口压咸等特殊生态保护对象。本文仅考虑了基本生态保护对象,获得生态流量为生态基流,该水量仅在短期内遏制河道生态系统的恶化态势,维持现状水平年的现状,为关键性物种如鱼类提供最小生存空间,不考虑生态系统的恢复和改善,无法使生态系统达到健康状态。

植被生态需水量的时空分布受两个方面的影响:

(1) 土地覆盖/利用类型的动态变化,人类活动起主导作用,如城市扩张、农业用地增加、植树造林带来的森林面积增大等综合因素使得土地覆盖/利用类型的年际变化剧烈,因此为了保护局部地区生态系统的脆弱植被^[25],决策者需根据局部的用地变化调整水资源分配;(2) 植被潜在蒸散量的变化,植被的蒸散能力受气象条件变化的影响,全球很多地区正呈现气温上升、太阳辐射减少、风速减缓等现象,这些因素对特定地区蒸散发量的综合影响需进一步确定。本研究还有以下几个方面有待改进:本文中对于直接采纳了 MCD12Q1 的土地覆盖/利用分类,且空间分辨率为 500 m,每年一副,由于农作物和林地不同生长时期的蒸散发量不同,采用同一个植被系数进行计算造成误差,未来可以利用 Landsat TM/OLI 等遥感影像,进行土地覆盖/利用类型提取,获得时空分辨率更高的地物分类产品,采用动态植被系数 K_v ;另外,对植被生态需水量进行时间变化趋势检验,但未对造成变化的影响因素进行分析,未来可就植被生态需水量对气候变化等因素的敏感性、气候变化和人类活动对植被生态需水量的影响等方面展开深入研究。

5 结论

(1) 根据 Tennant 法计算河道内生态需水量,九龙江流域北溪段河道内多年平均生态需水量为 22.68 亿 m^3 ,呈不显著下降趋势,下降速率为 0.07 亿 m^3/a ;西溪段河道多年平均生态需水量为 10.67 亿 m^3 ,呈不显著下降趋势,下降速率为 0.11 亿 m^3/a ;

(2) 植被多年平均生态需水量为 105.27 亿 m^3 ,总体呈现上升趋势,上升速率为 0.43 亿 m^3/a ,但上升趋势不显著;其中有林地和草地均呈上升趋势,上升速率为 0.45 亿 m^3/a 和 0.31 亿 m^3/a ,均通过 95% 的显著性检验,上升趋势显著;疏林地和农田呈下降趋势,下降速率

为 0.3 亿 m^3/a 和 0.03 亿 m^3/a ,疏林地的下降趋势通过 95% 的显著性检验,下降趋势显著,而农田未通过检验,下降趋势不显著。符静^[20]对于同为湿润地区的湖南省的植被生态需水量变化进行研究,发现该研究区域内植被生态需水量整体下降不显著,在 2004 年后,由下降趋势转为上升趋势,与本研究结果近似。

(3) 河道内生态需水量的年内分配与径流量规律一致,植被生态需水量的年内分配与植被的生长物候规律一致。从区域整体上来看,汛期(4—9 月)的生态需水量有多大,枯水季(10 月至次年 3 月)的生态需水量小。

参考文献:

- [1] Tennant D L. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources[J]. Fisheries(Bethesda), 1976, 1(4): 6-10.
- [2] Orth D J, Maughan O E. Evaluation of the incremental methodology for recommending instream flows for fishes[J]. Transactions of the American Fisheries Society, 1982, 111(4): 413-445.
- [3] Gleick P H. A Look at Twenty-first Century water resources development[J]. Water International, 2000, 25(1): 127-138.
- [4] 王根绪,程国栋.干旱内陆流域生态需水量及其估算:以黑河流域为例[J].中国沙漠, 2002, 22(2): 33-38.
- [5] 李肖杨,朱成刚,马玉其,等.新疆孔雀河流域生态基流与天然植被需水量研究[J].干旱区地理, 2021, 44(2): 337-345.
- [6] 王芳,王浩,陈敏建,等.中国西北地区生态需水研究(2):基于遥感和地理信息系统技术的区域生态需水计算及分析[J].自然资源学报, 2002, 17(2): 129-137.
- [7] 司源,王远见,任智慧.黄河下游生态需水与生态调度研究综述[J].人民黄河, 2017, 39(3): 61-64.
- [8] 胡广录,赵文智.干旱半干旱区植被生态需水量计算方法评述[J].生态学报, 2008, 28(12): 6282-6291.
- [9] 张远,杨志峰.黄淮海地区林地最小生态需水量研究[J].水土保持学报, 2002, 16(2): 72-75.
- [10] 宋佳.开都—孔雀河流域天然植被蒸散发遥感反演及生态需水研究[D].乌鲁木齐:新疆大学, 2019.
- [11] 汤洁,余孝云,林年丰,等.生态环境需水的理论和方法研究进展[J].地理科学, 2005, 25(3): 3367-3373.
- [12] 钟华平,刘恒,耿雷华,等.河道内生态需水估算方法及其评述[J].水科学进展, 2006, 17(3): 430-434.
- [13] 刘昌明,门宝辉,宋进喜.河道内生态需水量估算的生态水力半径法[J].自然科学进展, 2007, 17(1): 42-48.
- [14] 杨志峰,张远.河道生态环境需水研究方法比较[J].水动力学研究与进展(A 辑), 2003, 18(3): 294-301.
- [15] 付玉娟,何俊仕,慕大鹏,等.辽河流域水资源可利用量分析计算[J].干旱区资源与环境, 2011, 25(1): 107-110.
- [16] 张丽,董增川.黑河流域下游天然植被生态需水及其预测研究[J].水利规划与设计, 2005(2): 44-47.

- rural-urban linkages: An agenda for policy research with reference to Indonesia[M]//The Earthscan Reader in Rural-Urban Linkages. Routledge, 2018.
- [14] Friedmann J. Regional development policy: a case study of Venezuela[J]. Journal of Women'S Health, 1966: 279-291.
- [15] Lynch K. Rural-Urban Interaction in the Developing World [C] // Emerging Issues Along Urban/Rural Interfaces: Linking Science & Society Conference, 2005.
- [16] 王颖,孙平军,李诚固,等.2003年以来东北地区城乡协调发展的时空演化[J].经济地理,2018,38(7):59-66.
- [17] 马历,龙花楼,戈大专,等.中国农区城乡协调发展与乡村振兴途径[J].经济地理,2018,38(4):37-44.
- [18] 王维.长江经济带城乡协调发展评价及其时空格局[J].经济地理,2017,37(8):60-66,92.
- [19] 张立生.基于市级尺度的中国城乡协调发展空间演化[J].地理科学,2016,36(8):1165-1171.
- [20] 乔家君,马玉玲.城乡界面动态模型研究[J].地理研究,2016,35(12):2283-2297.
- [21] 王艳飞,刘彦随,严滨,等.中国城乡协调发展格局特征及影响因素[J].地理科学,2016,36(1):20-28.
- [22] 何仁伟.城乡融合与乡村振兴:理论探讨、机理阐释与实现路径[J].地理研究,2018,37(11):2127-2140.
- [23] 高相铎,陈天,孟兆阳.“乡村人”视角的城乡关系转型及规划策略:基于天津典型村庄的生活体验式调查[J].城市规划,2018,42(8):29-35.
- [24] 唐伟成,罗震东,耿磊.重启内生发展道路:乡镇企业在苏南小城镇发展演化中的作用与机制再思考[J].城市规划学刊,2013(2):95-101.
- [25] 刘守英,王一鸽.从乡土中国到城乡中国:中国转型的乡村变迁视角[J].管理世界,2018,34(10):128-146,232.
- [26] 文琦,郑殿元.西北贫困地区乡村类型识别与振兴途径研究[J].地理研究,2019,38(3):509-521.
- [27] 陈明星,陆大道,张华.中国城市化水平的综合测度及其动力因子分析[J].地理学报,2009,64(4):387-398.
- [28] 黄贤金.城乡土地市场一体化对土地利用/覆被变化的影响研究综述[J].地理科学,2017,37(2):200-208.
- [29] 吕萍,于淼.国家“3块地”改革与房地产市场发展[J].城乡规划,2017(5):22-28.
- [30] 宋元梁,肖卫东.中国城镇化发展与农民收入增长关系的动态计量经济分析[J].数量经济技术经济研究,2005(9):31-40.
- [31] 刘卫柏,郑爱民,彭魏倬加,等.农村土地流转与劳动生产率变化:基于 CIRS 调查数据的实证分析[J].经济地理,2017,37(12):195-202.
- [32] 崔学刚,方创琳,刘海猛,等.城镇化与生态环境耦合动态模拟理论及方法的研究进展[J].地理学报,2019,74(6):1079-1096.
- [33] 申明锐,沈建法,张京祥,等.比较视野下中国乡村认知的再辨析:当代价值与乡村复兴[J].人文地理,2015,30(6):53-59.
- [34] 陈明星,叶超,陆大道,等.中国特色新型城镇化理论内涵的认知与建构[J].地理学报,2019,74(4):633-647.
- [35] 高金龙,包菁薇,刘彦随,等.中国县域土地城镇化的区域差异及其影响因素[J].地理学报,2018,73(12):2329-2344.
- [36] Goepel K D. Implementing the analytic hierarchy process as a standard method for multi-criteria decision making in corporate enterprises-a new AHP Excel template with multiple inputs[C]//Proceedings of the International Symposium on the Analytic Hierarchy Process. Kuala Lumpur, Malaysia: Creative Decisions Foundation Kuala Lumpur, 2013,2(10):1-10.
- [37] 廖重斌.环境与经济协调发展的定量评判及其分类体系:以珠江三角洲城市群为例[J].热带地理,1999(2):76-82.

(上接第 369 页)

- [17] 吕明权,王继军.不同土地利用/覆盖情景下东北沟流域植被生态需水量及其对产流影响[J].自然资源学报,2012,27(2):243-253.
- [18] 陈丽华,王礼先.北京市生态用水分类及森林植被生态用水定额的确定[J].水土保持研究,2001,8(4):161-164.
- [19] 闵庆文,何永涛,李文华,等.基于农业气象学原理的林地生态需水量估算:以泾河流域为例[J].生态学报,2004,24(10):2130-2135.
- [20] 符静.南方湿润区植被生态需水量估算及其时空分异特征研究[D].长沙:湖南师范大学,2018.
- [21] 魏华.植被生态需水理论及计算研究进展[J].现代农业科技,2018(2):179-182.
- [22] 宫兆宁,陆丽,金点点,等.土地利用/覆被变化扎龙湿地蒸散发量及生态需水量的遥感估算[J].生态学报,2021,41(9):3572-3587.
- [23] 闫宇会,薛宝林,张路方,等.基于 MODIS 产品的黑河流域蒸散量时空分布特征[J].节水灌溉,2019(9):85-92.
- [24] 王改玲,王青枏,石生新.山西省永定河流域林草植被生态需水研究[J].自然资源学报,2013,28(10):1743-1753.
- [25] 朱召军.漓江上游鱼类物种多样性及河流健康评价指标体系研究[D].广西桂林:桂林理工大学,2015.
- [26] 李超,赵淑清,方精云.1975—2014 年福建省植被覆盖变化及其驱动因素[J].植物生态学报,2017,41(2):157-164.