

Prediction of Climate Change Impacts on Blue and Green Water Resources in the Lianshui River Basin

Dehua Mao^{1,*}, Zhengzui Li², Chang Feng³, Ruizhi Guo⁴

¹College of Resources and Environmental Sciences, Hunan Normal University, Changsha 410081, China

²Hydrology and Water Resources Survey Center of Hunan Province, Changsha 410007, China;

³College of City and Tourism, Hengyang Normal University, Hengyang, Hunan 421002, China;

⁴College of Mathematics and Statistics, Hunan Normal University, Changsha 410081, China

* Corresponding author. Email: 850276407@qq.com

ABSTRACT

PSO particle swarm optimization algorithm in combination with Kling–Gupta efficiency coefficient KGE objective function is introduced to calibrate the model parameters based on Xiangxiang station measured discharges and MOD16 evapo transpiration data. Moreover, p-factor, r-factor, R2, NSE and PBIAS are also performed to evaluate the model simulation results and uncertainty, therefore the SWAT model suitable for blue water and green water simulation in Lianshui Watershed is established. Climate change have been divided into three climatic background period of 1996-2015, 2020-2049, 2070-2100, and into 9 climate change scenarios according to inputs of the future climate conditions, which had generated from HadGEM2- AO atmospheric model in typical concentration path of the rcp2.6, rcp4.5, rcp6 and rcp8.5. Which simulate and analyze spatiotemporal characteristics of blue and green water resources in the Lianshui basin under the long-term climate change effects of future 60 years. Result showed that the Lianshui river basin had some extent of decrease in blue water resources (1.4-17.3%) and green water storage (7.8-19.7%), while the green water flow (3.5-12.4%) increased under different RCP emission scenarios from 2020 to 2079. Even taking the parameter prediction uncertainty range of 95PPU into consideration, the future growth trend of green water flow is also obvious. Hence, taking green water resources into the future water resources evaluation strategies to achieve blue water and green water comprehensive planning and management is indispensable for the Lianshui river basin.

Keywords: Climate change, Blue water; Green water, SWAT, Lianshui basin

气候变化对涟水流域蓝水绿水资源的影响预测

毛德华^{1,*}, 李正最², 冯畅³, 郭瑞芝⁴

¹湖南师范大学资源与环境科学学院, 长沙 410081, 中国

²湖南省水文水资源勘测中心, 长沙 410007, 中国

³衡阳师范学院城市与旅游学院, 湖南 衡阳 421002, 中国

⁴湖南师范大学数学与统计学院, 长沙 410081, 中国

*通讯作者. 电子邮箱: 850276407@qq.com

摘要

提出实测径流量及 MOD16 蒸散发数据并行校准模型参数的新思路, 运用 PSO 粒子群优化算法, 以 KGE 克

林效率系数为目标函数,通过 p-factor、r-factor、 R^2 、NSE 和 PBIAS 评价模型模拟效果和不确定性,建立了适宜于涟水流域蓝水绿水模拟的 SWAT 模型,选用 HadGEM2-AO 大气模式的 RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0、RCP8.5 四种典型浓度路径作为未来时期的气象输入条件,并细分为 9 种气候变化情景。预测了气候变化对未来 60 a 涟水流域蓝水绿水资源的影响,揭示了其时空变化特征。研究表明:在时间变化特征上,在各 RCP 浓度路径下蓝水均呈现了不同程度的下降趋势,大约降低了 1.4%~17.3%,绿水流均表现出一定的上升趋势,约增长 3.5%~12.4%,绿水蓄量则在持续降低,大致下降了 7.8%~19.7%,即使将 95PPU 模拟不确定性范围考虑进来,绿水流的增长趋势也较为明显。因此,将绿水资源纳入涟水流域未来水资源评价体系,实现蓝水绿水综合规划管理具有实际意义。

关键词: 气候变化; 蓝水; 绿水; SWAT 涟水流域

1. 引言

河川径流、湖泊湿地等地表自由水体是流域水循环系统的重要结点。传统流域水资源评价和管理主要关注于怎样有效地利用、配置结点上实体存赋的蓝水资源,水资源量通常依据蓝水资源^[1]来量化。这实际上是一种河流管理,而非流域管理,在流域尺度较少考虑更广义的水量平衡,往往忽视了流域水循环系统传输通道上隐形的绿水资源^[2-3]。

气候变化对流域尺度未来水资源管理也带来了一定程度的不确定性^[4]。尽管有着不确定性,但“水文过程的波动频率和振幅会因气候变化而相对增强”的观点得到了一定认同^[5]。因此,基于这种“稳定性会减弱,波动性会增强”的可能趋势,将绿水纳入流域未来水资源规划体系,以更宽广的蓝水绿水视野,预测评估未来气候变化对流域蓝水绿水资源的影响具有实际意义。可以为应对未来水波动、水短缺和水恢复等流域水资源问题拓宽思路,重新打开原本“封闭”的仅考虑了蓝水资源规划的流域,为合理科学管理流域水资源提供多元化参考,提升流域结构功能的抗干扰能力^[6]。然而在实际中,很难将蓝水绿水概念应用到流域尺度水资源评估,难点在于定量划分蓝水绿水^[7]。本文以涟水流域为研究对象(图 1),从蓝水绿水视角出发,构建并评估 SWAT 分布式水文模型模拟流域蓝水绿水的适用性,模拟分析 1996~2015 年及 2020~2079 年 HadGEM2-AO 大气模式不同 RCP 浓度路径气候变化情景下蓝水绿水的时空分布变化特征^[8-9],以期为涟水流域蓝水绿水影响变化研究及其未来蓝绿水综合管理试点建设提供相关参考依据^[10-11]。

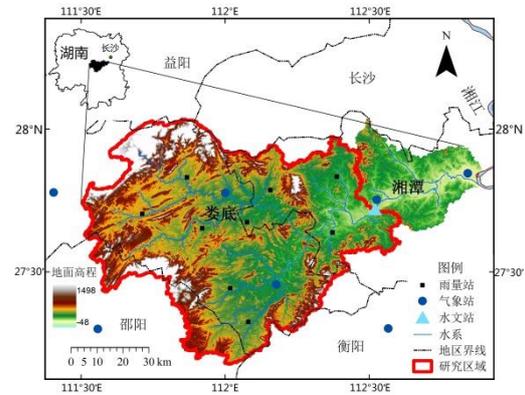


图 1 涟水流域地理位置

2. 研究方法

2.1 SWAT 及其水量平衡方程

SWAT 是美国农业部 Jeff Arnold 研发的综合性,具有物理基础的流域尺度分布式水文模型^[7]。已成功应用于国内外不同时空尺度流域水量平衡、水文、泥沙及水质等模拟研究中。SWAT 适用于情景分析,能够分析不同气候变化情景对流域水文过程的影响,也可以评价不同水土资源管理模式下的流域水文响应特征,还能够用于估算流域尺度水量平衡等。从模拟效果上看,该模型相对更适用于中小尺度流域长时期水文模拟。SWAT 单位时间内流域水量平衡方程可以用公式(1)、(2)表达。SWAT 分布式构架更符合实际水文物理过程,具有较好的模拟精度及稳定性,能够模拟流域水量平衡,并在子流域尺度上输出相应参数变量,与蓝水绿水建立起对应联系,这就是 SWAT 适用于流域蓝水绿水模拟的内核理论基础。

$$PREC=ET+WYLD+\Delta SW+\Delta GS+L \quad (1)$$

$$WYLD = SURQ + LATQ + GWQ \quad (2)$$

公式(1)中, $PREC$ 表示单位时间内的降水量, 单位为 mm/t ; ET 是单位时间内的实际蒸散发量, 即绿水流, 单位为 mm/t ; $WYLD$ 代表单位时间内从 HRU 至子流域汇入河网的产水量, 单位为 mm/t 。根据式(2)可知 $WYLD$ 由 $SURQ$ (地表径流, mm/t)、 $LATQ$ (侧流, mm/t)、 GWQ (浅层地下水补给, mm/t) 三部分构成; ΔSW 代表前后两段单位时间土壤水分的相对变化, SW 则为单位时间段末的土壤水分含量, 即绿水蓄量, 单位为 mm ; ΔGS 表示单位时间地下含水层的相对变幅, 其中 SWAT 深层地下水补给输出形式为 GW_RCHG , 单位为 mm ; L 表示单位时间从降雨到流域汇流等水的运动过程中的其他损耗如水资源利用等, 单位为 mm/t 。因此, SWAT 输出参数变量与蓝水绿水概念可以建立如下对应关系: 蓝水= $WYLD+GW_RCHG$, 绿水流= ET , 绿水蓄量= SW 。

2.2 气候变化情景设置

应用 SWAT 模型输入流域地形、土壤、坡度、气象、水文及水资源利用等空间及属性数据, 在 2010 年土地利用覆被等情景下, 设置过去 20 年和未来 60 年长时段气候变化情景进行模拟对比分析, 通过情景分析来分离气候变化对涟水流域蓝水绿水的影响。将模拟时段划分为 1996~2015 年, 2020~2049 年, 2050~2079 年三段气象背景时期, 并根据 HadGEM2-AO 大气模式的四种典型浓度路径排放情景 rcp2.6、rcp4.5、rcp6、rcp8.5, 细分为三类共 9 种气候组合情景:

(1) 情景 A (1996~2015 年): 气象站实测气象数据

(2) 情景 B (2020~2049 年): 分为情景 B2、B4、B6、B8 四种气候变化情景, 各自对应 HadGEM2-AO 的浓度路径 rcp2.6、rcp4.5、rcp6、rcp8.5。

(3) 情景 C (2050~2079 年): 分为情景 C2、C4、C6、C8 四种气候变化情景, 各自对应 HadGEM2-AO 的浓度路径 rcp2.6、rcp4.5、rcp6、rcp8.5。

2.3 数据来源

涟水流域 DEM 数字高程 ASTER GDEM V2 来源于中科院地理数据云, 空间分辨率 30 m; 2010

年土地利用数据出自欧空局 ESA 为土地覆被气候变化计划 LC-CCI 制作的 ESA_CCI_2010, 空间分辨率 300 m; 土壤数据源自联合国粮农组织 FAO 构建的世界和谐土壤数据库 HWSD, 其中中国区域土壤数据集是中科院南京土壤所向 FAO 制作提供的中国“第二次土壤普查”1:100 万数据; 1996~2015 年气象站降雨量、气温等气象数据来自于中国气象科学数据共享服务网; 2020~2079 年气象输入数据源自 IPCC 的 CMIP5 系列中, 由 Hadley 气候中心组建的 HadGEM2-AO 大气模式 rcp2.6、rcp4.5、rcp6、rcp8.5 四种典型浓度路径; 2000~2015 年逐月蒸散发数据出自美国 NASA 的 MODIS 全球陆地蒸散发数据集 MOD16 中的 MOD16A2 ET, 空间分辨率 0.05° ; 1996~2015 年湘乡水文站日径流量、雨量站等水文水资源数据取自湖南省水文水资源勘测局。

2.4 模型设置

(1) 模型计算方法。地表径流过程模拟利用 SCS 径流曲线数法; 河道演进模拟采用 Variable Storage 变动存储法; 蒸散发模拟运用 Penman-Monteith 彭曼方法计算。

(2) 参数校准。流域蓝水绿水模拟不同于单目标流域水文径流模拟, 在校准径流量的同时还需要对蒸散发量进行校准, 以提高绿水模拟精度。目前蓝水绿水模拟研究主要侧重于校准率定蓝水径流量, 然后通过区域水量平衡方法间接计算绿水资源量, 鲜有文献关注报道绿水校准过程, 从而难以准确反映绿水模拟的不确定性。以绿水模拟的发展趋势而言, 笔者认为遥感技术与水文模型结合对于提高绿水模拟精度具有关键作用, 是绿水模拟研究的重要发展方向。运用 PSO 粒子群优化算法, 以 KGE 为目标函数, 在 2006~2015 年参数校准阶段采用月尺度湘乡站径流量及 MOD16 蒸散发数据双变量并行校准思路。在模型验证阶段, 利用 1996~2005 年湘乡站径流量及 2000~2005 年 MOD16 蒸散发数据进行逆序验证。实际参数校准过程中每个粒子表示一组模型参数, 通过更新迭代次数、粒子群大小, 判断收敛条件, 调整参数校准范围, 迭代搜索参数空间的全局最优解。校准和验证期模拟结果评价及不确定性分析结果见表 1。观察表 1 可知, 模型校准期及验证期的 p -factor 均大于 0.7, r -factor 均小于 0.9, KGE 均大于 0.85, R^2 均大于 0.75, NSE 均大于 0.75, $PBIAS$ 均小于 2%。由此可见, 校准期

和验证期模拟效果评价指标均达到可信程度，模型模拟的不确定性处于置信区域。因此，可以认为构

建的涟水流域分布式水文模型模拟是可信的，能够适用于该流域的蓝水绿水模拟分析研究。

表1. 校准期与验证期模拟效果评价及不确定性分析结果

	年份	<i>p</i> -factor	<i>r</i> -factor	R^2	<i>NSE</i>	<i>PBIAS</i>	<i>KGE</i>
校准期-径流量	2006~2015 年	0.87	0.82	0.81	0.80	0.4	0.89
校准期-蒸散发量	2006~2015 年	0.75	0.69	0.90	0.89	0.6	0.93
验证期-径流量	1996~2005 年	0.77	0.88	0.79	0.77	1.7	0.86
验证期-蒸散发量	2000~2005 年	0.73	0.70	0.87	0.85	1.2	0.91

3. 结果分析

3.1 时间变化特征分析

(1) 蓝水。根据图 2 对比情景 A (1996~2015 年)，情景 B (2020~2049 年)，情景 C (2050~2079 年) 三段气候背景时期可知，情景 B (2020~2049 年) 相较于情景 A (1996~2015 年)，年蓝水资源量在 rcp2.6、rcp4.5、rcp6、rcp8.5 浓度路径均呈现了不同程度的下降趋势，分别降低了 33.1 mm、62.7 mm、45.5 mm、29.3 mm。对比情景 B (2020~2049 年) 及情景 C (2050~2079 年)，rcp2.6、rcp4.5 下蓝水依然表现出降低趋向，各自减少了 14.5 mm、30.7 mm，而在 rcp6、rcp8.5 反而出现增长情况，分别增加了 18.6 mm、22.1 mm。由此可见，虽然比较三段气候背景时期，蓝水总体呈现了下降特征，情景 C 相较于情景 A 在 rcp2.6、rcp4.5、rcp6、rcp8.5 分别降低了 47.6 mm、93.4 mm、26.9 mm、7.2 mm。但是横向对比不同 RCP 浓度路径可以发现，RCP 越大则蓝水下降趋势变缓。这可能与大气模式 RCP 总辐射强迫情景排放增加，全球变暖加剧程度不同而导致的相应大气环流变化有关，即全球气温升高，季风环流加强，受季风影响较大的中低纬地区，在多因素综合反馈作用下局地降水可能增加的认知有关。涟水流域正好处于该纬度区域，且隶属亚热带季风湿润气候，具有典型季风气候特点。因此，气候变化会使涟水流域未来 60 年蓝水资源呈现不同程度的削减趋势，但是其变幅程度与未来 RCP 总辐射排放强度相关联。

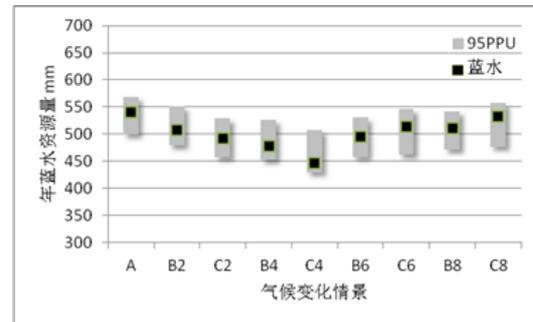


图 2 不同气候变化情景下的年蓝水资源量

(2) 绿水流。观察对比图 3 情景 A、B、C 三段时期可知，不同气候背景时期，不同 RCP 浓度路径年绿水流量均表现出明显的增长趋势。对比情景 A (1996~2015 年) 及情景 B (2020~2049 年)，绿水流在 rcp2.6、rcp4.5、rcp6、rcp8.5 浓度路径下均有不同幅度的增长，分别增加了 14.8 mm、11.6 mm、27.2 mm、40.3 mm。情景 B (2020~2049 年) 至情景 C (2050~2079 年)，绿水流进一步显

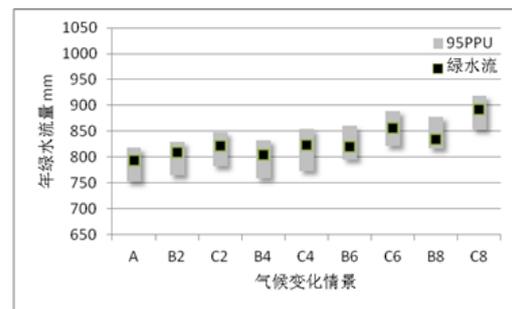


图 3 不同气候变化情景下的年绿水流量

示出上升趋势，各自提升了 12.5 mm、17.8 mm、34.9 mm、58.4 mm，且 RCP 排放越大，增幅趋势越大。通过计算绿水流占蓝绿水的比例系数—绿水系数，平均绿水系数从 1996~2015 年的 55.6%，提升至 2050~2079 年的 60.7%，绿水流增加的同时，绿水系数也在增长。即使考虑到图 3 表达呈现的 95ppu

模拟不确定性范围也可以较明显的观察到绿水流的上升趋势，这表明在未来气候变化背景下，涟水流域绿水流的增长趋势具有较高的可信程度。

(3) 绿水蓄量。通过分析比较图 4 情景 A、B、C 三段气候背景时期，年绿水蓄量在各浓度路径均显示出下降趋势。情景 B（2020~2049 年）相比于情景 A（1996~2015 年），绿水蓄量在 rcp2.6、rcp4.5、rcp6、rcp8.5 浓度路径均呈现了下降趋势，分别降低了 3.8 mm、2.1 mm、5.4 mm、7.9 mm。比较情景 B（2020~2049 年）和情景 C（2050~2079 年），发现这种下降趋势依然存在，各自减少了 4.1 mm、5.3 mm、9.2 mm、10.6 mm。即使将 95ppu 不确定性区间考虑进来，也能够较明显发现绿水蓄量的降低趋向，这表示未来气候变化所引起的蓝水绿水变动及其相互反馈作用会使涟水流域绿水蓄量下降。

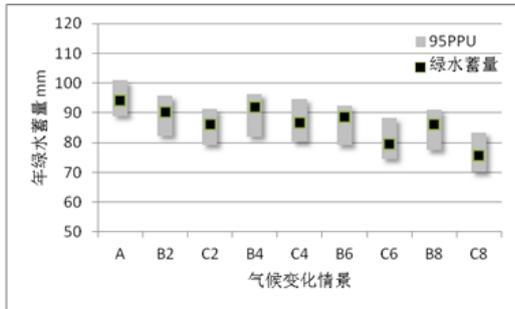


图 4 不同气候变化情景下的年绿水蓄量

3.2 空间分布特征

(1) 蓝水。通过分析图 5 情景 B（2020~2049 年）及情景 C（2050~2079 年）涟水流域蓝水资源的空间分布状况，不同气候背景时期、不同 RCP 浓度路径蓝水均显示出一定程度类似的流域空间分布特征。一是上游蓝水资源相较于下游更高，结合子流域划分图 3 可知上游 1 至 14 子流域的蓝水平均略高于下游子流域 15 至 24。二是与土地利用覆被类型表现出一定程度的空间相关性。由于森林（26.6%）和农业用地（63.1%）是涟水流域最主要的土地利用类型，结合土地利用覆被图 2 可知，上游蓝水资源相对较低的 1、4、7、10 子流域和下游蓝水相对较低的子流域 18、22、24 与森林覆被有着一定的空间对应关系，即涟水流域森林蓝水资源量相对较小，农业用地、城镇区域的蓝水资源相对更大。由此可见，在不考虑其他影响因素的作用下，

地表覆被如森林影响了土壤渗透性、土地水源涵养能力，越多的降水截留渗透入土壤，越多的土壤水分被植物所消耗，相对更不利于水流横向、纵向的运动过程，那么能够产生的地表、地下径流越少，使降水更可能转换成为绿水资源，蓝水资源相应减少。

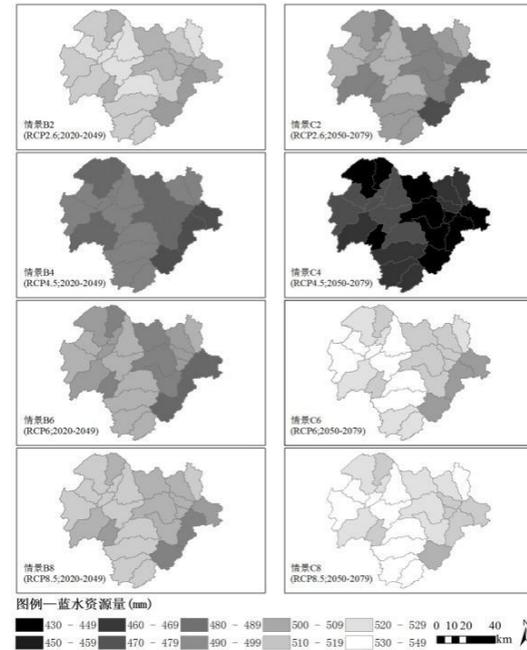


图 5 涟水流域 2020~2079 年不同 RCP 气候变化情景下蓝水资源空间分布图

(2) 绿水流。观察图 6 涟水流域情景 A、B、C 不同 RCP 浓度路径下绿水流的空间分布特征，从各自空间分异格局上看，一是下游绿水流资源总体稍高于上游，下游子流域 15 至 24 的绿水流整体略高于上游 1 至 14 子流域。二是绿水流相对较高的区域，如上游 1、4、7、10 及下游 18、22、24 同样与森林覆被有着较好的空间关联性。绿水流相对更低的子流域 2、3、5、6、8、9 则处于城镇及其周边区域。因此，可以看出涟水流域森林对绿水流贡献相对更高，农业用地、城镇区域对绿水流的贡献相对较低。从保护绿水资源的角度来看，涟水流域森林绿水可用性相对最高，保护森林覆被是维持稳定绿水资源的理论要求。但是 2000 年至 2010 年涟水流域农业用地面积不断增加，从 56.5% 增长到 63.1%，森林面积持续降低，从 33.5% 减少至 26.6%。所以重视保护森林覆被的同时，从农业种植结构、耕作管理制度等方面入手，着力于提高农业用地生产性绿水效率，挖掘农业用地绿水资源潜力，也是

符合涟水流域实际的可行途径。

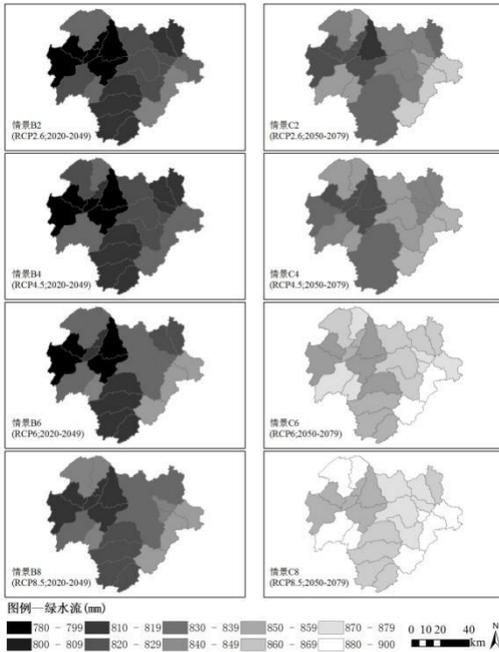


图6 涟水流域 2020~2079 年不同 RCP 气候变化情景下
绿水流资源空间分布图

(3) 绿水蓄量。从图 7 涟水流域情景 A、B、C 绿水蓄量的空间分布可知，流域上游绿水蓄量平均略低于下游。从绿水蓄量与土地利用覆被的空间对应情况来看，涟水流域森林覆被、农业用地的绿水蓄量相对较高，城镇区域绿水蓄量相对更低。不同气候变化情景均能较明显观察到森林对应子流域 1、4、7、10、18、22、24 及农业用地广布区域 11、12、13、14、15、16、17、19、20、21、23 的绿水蓄量相对较高，而城镇及其周边区域 2、3、5、6、8、9 的绿水蓄量相对较低。绿水蓄量不仅是绿水流的主要蓄源地，还与绿水效率密切相关，提升绿水效率即增加绿水蓄量中生产性植物蒸腾水的转化比例，代表着绿水生产力潜力。

4. 结论与讨论

本文通过 SWAT 构建涟水流域分布式水文模型，利用情景分析法模拟分析过去 20 年及未来 60 年不同气候变化组合情景下流域蓝水绿水的时空分布变化特征：

(1) 从时间变化特征上看，对比 1996~2015 年，2020~2049 年，2050~2079 年三段气候背景时期，气候变化使涟水流域蓝水均呈现了不同程度的下降趋势，绿水流则表现出一定的上升趋势，绿水

蓄量在持续降低。2050~2079 年相比于 1996~2015 年，不同 RCP 浓度路径下年蓝水资源量分别降低了 47.6 mm、93.4 mm、26.9 mm、7.2 mm，但随着 RCP 总辐射排放情景增大，下降趋势有所减缓，大约降低了 1.4%~17.3%；年绿水流分别增长了 27.3 mm、29.4 mm、62.1 mm、98.7 mm，约增幅 3.5%~12.4%；年绿水蓄量各自减少了 7.9 mm、7.4 mm、14.6 mm、18.5 mm，大致下降了 7.8%~19.7%。从年内分布特征来看，蓝水资源与降水年内分布具有较好的相关性，绿水流与绿水蓄量年内分布则表现出显著的补偿对应关系。

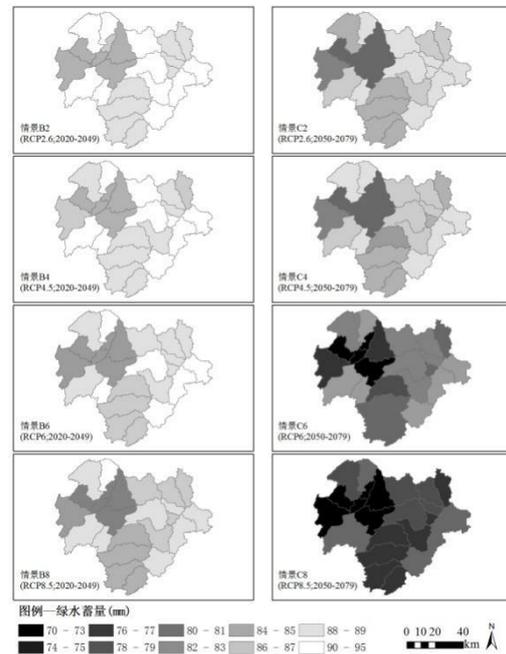


图7 涟水流域 2020~2079 年不同 RCP 气候变化情景下
绿水蓄量空间分布图

(2) 从空间分布特征上看，不同气候变化情景下涟水流域蓝水绿水资源各自显示出一定程度相似的流域上下游空间分布状况，流域上游蓝水资源较丰富，绿水资源相对较少，下游蓝水资源相对较低，绿水资源更高。此外，各气候变化情景下涟水流域蓝水绿水资源与土地利用覆被空间分布格局表现出较显著的空间相关性，对比森林覆被、农业用地和城镇用地三类涟水流域主要土地利用类型，森林覆被的蓝水资源相对较少，绿水流、绿水蓄量相对更高。

(3) 基于气候变化影响下，水资源稳定性相对减弱的可能趋势，将绿水纳入流域水资源管理体系，有利于客观评估水资源量，能够为应对解决水

缺乏、水波动与水冲突等水资源问题拓宽思路；对于完善涟水流域未来水资源评价体系，实现涟水流域蓝水绿水综合规划管理具有重要的实际意义。

Acknowledgement

This study was supported by the Joint Fund for Regional Innovation and Development of NSFC (U19A2051), the Water Conservancy Science and Technology Project of Hunan Province (XSKJ2018179-09).

Corresponding author: Feng Chang (1988-), lecturer, mainly engaged in river system and water resources research. Fengchang8802@163.com. Li Zhengzhu (1964-), professor-level senior engineer, mainly engaged in hydrology and water resources research. Email: hn_lzz@163.com.

致谢

本研究得到了国家自然科学基金区域创新发展联合基金（U19A2051），湖南省水利科技项目（XSKJ2018179-09）资助。

通讯作者：冯畅（1988-），讲师，主要从事河流水系及水资源研究。邮箱：fengchang8802@163.com。李正最（1964-），教授级高级工程师，主要从事水文学与水资源研究。邮箱：hn_lzz@163.com。

参考文献

[1] Falkenmark M., Rockström J. Building water resilience in the face of global change: From a blue-only to a green-blue water approach to land-water management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2010, 136(6): 606-610.

- [2] 程国栋, 赵文智. 绿水及其研究进展. *地球科学进展*, 2006, 21(3): 221-227.
- [3] 许炯心. 黄河中游绿水系数变化及其生态环境意义. *生态学报*, 2015, 35(22): 7298-7307.
- [4] Faramarzi M, Abbaspour K C, Vaghefi S A, et al. Modeling impacts of climate change on freshwater availability in Africa. *Journal of Hydrology*, 2013, 480(4): 85-101.
- [5] 沈永平, 王国亚. IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点. *冰川冻土*, 2013, 35(5): 1068-1076.
- [6] Hoff H, Falkenmark M, Gerten D, et al. Greening the global water system. *Journal of Hydrology*, 2010, 384(3): 177-186.
- [7] Rodrigues D, Gupta H V, Mendiondo E M. A blue/green water-based accounting framework for assessment of water security. *Water Resources Research*, 2015, 50(9): 7187-7205.
- [8] Baek H J, Lee J, Lee H, et al. Climate change in the 21st century simulated by HadGEM2-AO under representative concentration pathways. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 2013, 49(5): 603-618.
- [9] 冯畅, 毛德华, 周慧, 等. 气候变化对涟水流域蓝水绿水资源的影响. *长江流域资源与环境*, 2017, 26(10): 1525-1537.
- [10] 冯畅, 毛德华, 周慧, 等. 气候与土地利用变化对涟水流域径流的影响. *冰川冻土*, 2017, 39(2): 395-406.
- [11] 冯畅. 变化环境下涟水流域蓝水绿水资源的响应特征分析. 湖南师范大学, 2018.