

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdkq.2021.0048

王迪,刘梅冰,陈兴伟,等.基于CMIP5和SWAT的山美水库流域未来蓝绿水时空变化特征[J].南水北调与水利科技(中英文),2021,19(3):446-458. WANG D,LIU M B,CHEN X W,et al.Spatial and temporal variations of blue and green water resources in Shanmei reservoir watershed based on CMIP5 and SWAT[J].South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2021,19(3):446-458.(in Chinese)

# 基于CMIP5和SWAT的山美水库流域 未来蓝绿水时空变化特征

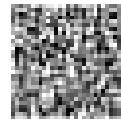
王迪<sup>1</sup>,刘梅冰<sup>1,2</sup>,陈兴伟<sup>1,2</sup>,高路<sup>1,2,3</sup>

(1.福建师范大学地理科学学院,福州 350007;2.湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地,福州 350007;  
3.福建省陆地灾害监测评估工程技术研究中心,福州 350007)

**摘要:**基于山美水库流域1991—2010的实测气象数据,选取CMIP5中2个气候模式(HadGEM2-ES、NoerESM1-M)和2种典型浓度路径(RCP4.5、RCP8.5),对21世纪近期(2031—2050年)、中期(2051—2070年)、远期(2071—2090年)3个时期的日降水、气温数据进行统计降尺度处理;在此基础上,利用SWAT模型对山美水库流域基准期和未来3个时期的蓝水、绿水资源的时空分布特征进行模拟,评估流域未来60年气候变化对蓝绿水资源的影响。结果表明:山美水库流域未来60年预估年均降水量变化幅度为-0.43%~7.16%,平均气温增加约1.72~5.43℃,相较基准期,未来2个气候模式在2种RCP浓度路径下的蓝水资源量约减少12.81%~35.28%,绿水资源量上升约28.45%~36.12%;不同气候情景下流域蓝水、绿水资源变化率呈现出一定的相似性,上游地区均大于下游地区;降雨是蓝水资源时空分布的关键,而农用地分布则直接影响绿水资源的空间分异特征。

**关键词:**气候变化;蓝水;绿水;时空变化特征;山美水库流域

中图分类号:TV213、X52 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



气候变化已经成为近年全球关注的热点问题之一<sup>[1]</sup>。研究<sup>[2]</sup>表明,人类活动排放的温室气体是气候变化的主要驱动因素,气候变化通过影响水循环过程中的蒸发、降水、径流等环节,改变了水资源的时空分布格局,增加了未来水资源变化的不确定性,进一步加剧了水资源的供需矛盾,成为制约地区可持续发展的问题之一。1995年瑞典Falkenmark<sup>[3]</sup>首次提出蓝绿水的概念,他把水资源分为蓝水和绿水。蓝水主要是可以被人类直接利用的地表水和地下水,绿水主要是实际蒸散发量和土壤含水量。蓝水是影响社会经济发展的制约因素,绿水则对粮食供应和生态系统健康非常重要,是雨养农业的主要水资源。因此,研究气候变化对区域蓝水、绿水资源

的影响,提高可利用水资源量的有效利用率,对于实现水资源和生态环境的可持续发展十分必要。

目前,在气候变化对区域水资源状况影响的研究中,利用全球气候模型(global climate model, GCM)和流域水文模型来预估未来气候条件下的蓝绿水资源变化是较常见且有效的方法。气候变化对流域水文过程的影响主要取决于GCM数据中的气温和降水。近年来的大量研究<sup>[3-7]</sup>表明,全球未来气温会呈现持续增高的趋势。吴佳等<sup>[8]</sup>基于24个CMIP5全球耦合模式发现,2006—2099年我国在RCP4.5(中等温室气体排放)情景下总体增温0~3℃,降水增加3.5%~10.5%;在RCP8.5(高等温室气体排放)情景下年总体增温0~6℃,降水

收稿日期:2020-07-30 修回日期:2020-10-15 网络出版时间:2020-10-26

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20201026.1329.004.html

基金项目:国家自然科学基金(41601535)

作者简介:王迪(1994—),女,河南驻马店人,主要从事水资源与水环境研究。E-mail:137828540@qq.com

通信作者:刘梅冰(1981—),女,福建福清人,副教授,博士,主要从事水资源与水环境研究。E-mail:lmb\_18@163.com

增加 2.4%~14.4%。伴随着气温的升高和降水的增多,不同地区蓝水、绿水资源的时空分异也有差异。Githui 等<sup>[9]</sup>在维多利亚湖流域发现,在未来气候变化下流域降水增加,蓝水资源量也有所增加。Pendey 等<sup>[10]</sup>发现印度纳尔马达流域 2011—2040 年在 RCP4.5 情景下绿水量有一定程度的减少,在 RCP8.5 情景下则有所增加。Farsani 等<sup>[11]</sup>在伊朗巴育流域的研究发现,蓝水量在 2010—2099 年有所减少,绿水量在未来趋于增加。中国北部干旱地区,未来蓝水量呈增加趋势,变化范围在 10%~30%,南方湿润地区均呈减少趋势,变化范围在 5%~50%<sup>[12]</sup>。目前我国学者在湿润区和干旱半干旱区流域的蓝绿水变化分析上做了大量工作,如东江流域<sup>[13]</sup>、黑河流域<sup>[14]</sup>、潮白河流域<sup>[15]</sup>、黄河源区<sup>[16]</sup>等,但大多集中在现状条件下的研究,对未来气候条件下蓝绿水资源的时空分异特征研究不足。

泉州市位于我国东南沿海地区,整体水资源总量丰富,但水资源时空分布不均匀,区域性缺水问题突出<sup>[17]</sup>。山美水库作为泉州市最重要的饮用水源地,其水资源状况直接影响下游人民群众的身心健康和社会经济的可持续发展。因此,本文耦合气候模式 GCM 和流域水文模型 SWAT,构建山美水库流域现状及未来不同气候情景下的流域水量模型,分析未来不同时期蓝绿水资源的时空变异特征,可为流域应对未来气候变化合理的水资源管理政策提供科学依据。

## 1 研究区概况

山美水库位于泉州南安市码头镇山美村,是一座以灌溉为主兼具防洪和发电功能的大型水库,承担着下游地区 400 万人民群众生活生产用水和 4.33 万  $\text{hm}^2$  农田的灌溉用水需求<sup>[18]</sup>。山美水库流域面积 1 023  $\text{km}^2$ ,多年平均径流量 14 亿  $\text{m}^3$ ,流域来水主要包括湖洋溪、桃溪两大支流和龙门滩跨流域调水,见图 1。山美水库流域属于夏季高温多雨的亚热带湿润性季风气候,年均气温为 19.5~21.0  $^{\circ}\text{C}$ ,年降水量可达 1 600 mm 以上。流域所在的泉州市是福建省经济发展最迅速和最具活力的地区之一,水资源时空分布十分不均匀,降水多集中在 7—9 月。由于多为时间短、数量大的暴雨,大量的降水直接入海,损失的水量占全市总水量的 30%<sup>[19]</sup>。同时,70%的水资源集中在经济相对落后的山区,在人口较为密集的沿海经济发达地区,人均水资源量仅 218  $\text{m}^3$ ,可利用水资源量十分有限<sup>[20]</sup>,极大影响了社会经济的可持续发展。



图 1 山美水库流域水系

Fig. 1 Stream networks of Shanmei reservoir watershed

## 2 数据与研究方法

### 2.1 研究数据

主要数据包括:山美水库流域的 30  $\text{m} \times 30 \text{m}$  的 DEM 图、2006 年的土壤类型图和土地利用图等空间数据;研究区 1991—2010 年的山美水库径流数据,16 个雨量站的实测降水数据,2 个气象站的实测气温、降水、风速、湿度等气象数据;欧洲气象中心 1990—2010 年的 ERA-Interim 再分析降水数据和地面 2 m 气温数据。其中,实测数据和气候模式的降水数据均为日降水量,气温数据为日最高气温和最低气温,ERA 再分析数据是每天 4 个时次 (00UTC, 06UTC, 12UTC 和 18UTC)、 $0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$  网格、步长 6 h 的气温数据和每天 8 个时次 (03UTC, 6UTC, 9UTC, 12UTC, 15UTC, 18UTC, 21UTC 和 24UTC)、 $0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$  网格、步长 3 h 的降水量数据,利用 MATLAB 取平均值处理成日降水量、日最高气温、日最低气温数据。

未来 GCM 数据选用分辨率为  $1.88^{\circ} \times 1.24^{\circ}$  网格的 HadGEM2-ES 模式和  $1.875^{\circ} \times 2.5^{\circ}$  网格的 NoerESM1-M 模式在 1991—2005 年的历史降水和气温,以及未来 2031—2090 年 2 种典型排放路径 (representative concentration pathways, RCP) RCP4.5、RCP8.5 情景下的降水和气温数据,通过最近距离法<sup>[21]</sup>提取与实测站点最接近点的气温和降水数据。就气温而言,大部分模式均能够较好地模拟年平均气温的特点<sup>[22]</sup>,因此侧重选择对降水模拟效果较好的模式。研究<sup>[23-25]</sup>表明,NoerESM1-M 模式在我国适用性较广,在黄河流域、东北地区、东

南地区进行气候模拟能力评估时效果均较好。张武龙等<sup>[26]</sup>研究 34 个气候模式在西南地区的降水预估,结果表明 HadGEM2-ES 模式在干季和湿季的降水模拟效果均最优;Xu 等<sup>[27]</sup>利用 CMIP5 中的 18 个气候模式对中国进行降水模拟评估时发现, NoerESM1-M 模式在中国区对降水模拟效果也优于其他模式。此外,基于团队前期在山美水库流域的研究<sup>[28]</sup>基础,尽管 HadGEM2-ES 模式对月均最低气温的模拟值稍高于 NoerESM1-M 模式,但其在研究区内对月均降水的模拟效果与实测值更为接近。因此,本研究仅选择更适用于研究区气候模拟的 HadGEM2-ES 模式和 NoerESM1-M 模式,进行未来气候变化下山美水库流域的蓝绿水响应特征研究。

## 2.2 研究方法

### 2.2.1 统计降尺度方法

由于全球气候模式分辨率较低,直接用来评估流域气候变化情况有一定误差,需要通过降尺度来提高流域模拟精度。通过降尺度处理把大尺度、低分辨率的 GCM 输出转化为小尺度、高分辨率的数据输出,可以有效提高 GCM 在区域气候模拟中的精度<sup>[29]</sup>。本文采用分位数映射法(quantile mapping, QM)对未来气候模式下的降水、气温数据进行降尺度。QM 方法通过纠正某个变量的分布函数中的偏差,例如累积分布函数(CDF),从而消除整体变量中的偏差。将 QM 方法应用于实测数据和 ERA 再分析数据,在它们的累积分布函数(CDF)中建立传递函数,然后利用传递函数订正未来情景的降水和气温数据,从而进行偏差校正。具体公式<sup>[30]</sup>为

$$P_t = P_{\text{Val,GCM}} + \Delta f \quad (1)$$

$$\Delta f = f_{\text{obs,cal}}^{-1}(f_{\text{ERA,cal}}(P_{\text{Val,GCM}})) - f_{\text{ERA,cal}}^{-1}(f_{\text{ERA,cal}}(P_{\text{Val,GCM}})) \quad (2)$$

式中: $P_t$  为降尺度数据; $P_{\text{Val,GCM}}$  为未来 GCM 气象数据,其中  $f_{\text{obs,cal}}^{-1}$  和  $f_{\text{ERA,cal}}^{-1}$  分别为实测数据和校准期 ERA 再分析资料的逆 CDF; $f_{\text{ERA,cal}}$  为  $P_{\text{Val,GCM}}$  的 CDF。

由于 2 种 GCM 历史数据统计到 2005 年,因此选取 1991—2005 年作为基准期,对实测日降水、气温数据与降尺度后的历史时期 GCM 数据进行对比。结果发现:降尺度后月均最高气温的模拟值与实测值之间的 Nash-Sutcliffe 效率系数( $E_{\text{NS}}$ )均值为 0.80,确定性系数( $R^2$ )为 0.98;月均最低气温的模拟与实测值之间的 ENS 均值为 0.96, $R^2$  为 0.99;月均模拟降水量与实测值之间的  $E_{\text{NS}}$  均值为 0.88, $R^2$  为 0.99,符合精度评价标准( $E_{\text{NS}} > 0.6, R^2 > 0.6$ )<sup>[31]</sup>,说明降尺度处理后的 2 种 GCM 模式对降

水和气温的模拟效果良好,可以用于未来气象数据对流域水资源的模拟。

### 2.2.2 SWAT 模型构建

基于山美水库流域分辨率为 30 m × 30 m 的 DEM,通过设置 1 500 ha 的集水区阈值和流域总出口点,将山美水库流域划分为 38 个子流域。通过叠加 2006 年的土地利用类型图和土壤类型图,最终将流域划分成 297 个水文响应单元。在模型完成初步运行后,采取手动校准的方式,选取 2001—2005 年为率定期、2006—2010 年为验证期,基于山美水库实测的水文数据对模型参数进行率定。主要调整跟蓝绿水相关的地表水文过程参数,比如径流曲线系数  $C_{\text{N2}}$ 、土壤蒸散发补偿系数  $E_{\text{SCO}}$  和土壤可利用水量  $S_{\text{OL\_AWC}}$  等直接影响蓝水量的参数和直接影响绿水量大小的地下水文过程参数,如浅层地下水再蒸发系数  $G_{\text{WQMN}}$  和地下水延滞时间  $G_{\text{W\_DELAY}}$  等。结果显示:率定期,月径流的  $E_{\text{NS}}$  为 0.94, $R^2$  为 0.95,日径流的  $E_{\text{NS}}$  为 0.82, $R^2$  为 0.82;验证期,月径流的  $E_{\text{NS}}$  为 0.92, $R^2$  为 0.96,日径流的  $E_{\text{NS}}$  为 0.86, $R^2$  为 0.87。由此可见,构建的 SWAT 模型可较好模拟山美水库流域径流变化状况,可进一步应用于蓝绿水资源的研究。有关率定的具体过程详见文献<sup>[32]</sup>。

### 2.2.3 蓝绿水资源量的计算

根据 SWAT 模型水量平衡公式和蓝绿水资源的定义,流域长时期土壤水蓄变量  $\Delta S_{\text{w}}$  趋近于 0<sup>[33]</sup>,因此采用预热期 1990 年末的土壤含水量  $S_{\text{w}}$  作为土壤初始含水量。SWAT 模型输出变量与蓝绿水资源建立起以下对应关系:蓝水可直接用模型输出的子流域产水量以及深层地下水补给量之和来表示,绿水资源即为实际蒸散发量与土壤含水量之和<sup>[34]</sup>。具体计算公式为

$$B_{\text{w}} = W_{\text{YLD}} + D_{\text{A\_RCHG}} \quad (3)$$

$$G_{\text{w}} = E_{\text{T}} + S_{\text{w}} \quad (4)$$

式中: $B_{\text{w}}$  为蓝水资源量,mm; $G_{\text{w}}$  为绿水资源量,mm; $W_{\text{YLD}}$  为子流域产水量(在单位时间内从子流域的水文响应单元进入到主河道的水量,主要由地表径流、地下径流和壤中流 3 部分组成),mm; $D_{\text{A\_RCHG}}$  为深层地下水补给量,mm; $E_{\text{T}}$  和  $S_{\text{w}}$  分别为实际蒸散发量和土壤含水量,mm。

## 3 结果与分析

### 3.1 流域未来降水和气温变化

利用降尺度后的 2 个 GCM 模式(以下简称 Had 模式和 Noer 模式)数据,对 2 种 RCP 情景下

山美水库流域未来 2031—2090 年的气温和降水进行预估。从表 1 可以看出,与基准期(1991—2010 年)相比,流域未来整体气温呈增加趋势。就 2 种 GCM 模式而言,Had 模式在 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下年均气温分别增加 2.68 °C 和 4.00 °C, Noer 模式年均温分别增加 2.13 °C 和 2.81 °C。就不同排

放情景看,未来气温增加幅度在 RCP8.5 情景下增温更为明显。就 3 个时期变化来说,2 种 GCM 模式气温均呈现由近期到远期的上升趋势,其中,2071—2090 年气温升高幅度最大, Had 模式的增幅达到 3.90~5.43 °C, Noer 模式增幅为 2.32~3.39 °C。总体来看, Had 模式预估的气温大于 Noer 模式。

表 1 在未来不同气候情景下山美水库流域气温变化(相较于基准期)

Tab. 1 Variations of future temperature under different climatic scenarios in the Shanmei reservoir watershed (compared to the base period)

单位: %

| GCM 模式  | 时段              | 最高气温增加量 |        | 最低气温增加量 |        | 平均气温增加量 |        |
|---------|-----------------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|
|         |                 | RCP4.5  | RCP8.5 | RCP4.5  | RCP8.5 | RCP4.5  | RCP8.5 |
| Had 模式  | 近期(2031—2050 年) | 1.04    | 2.84   | 2.40    | 2.46   | 1.72    | 2.65   |
|         | 中期(2051—2070 年) | 1.76    | 4.23   | 3.11    | 3.64   | 2.43    | 3.93   |
|         | 远期(2071—2090 年) | 4.55    | 5.74   | 3.26    | 5.11   | 3.90    | 5.43   |
| Noer 模式 | 近期(2031—2050 年) | 2.02    | 2.34   | 1.63    | 1.94   | 1.83    | 2.14   |
|         | 中期(2051—2070 年) | 2.51    | 3.15   | 1.94    | 2.68   | 2.23    | 2.91   |
|         | 远期(2071—2090 年) | 2.60    | 4.10   | 2.04    | 3.67   | 2.32    | 3.39   |

从 2 种 RCP 排放情景看,在 2 种气候模式下的降水量变化有增有减,降水变化幅度呈现出 RCP8.5 > RCP4.5 的特点(表 2)。与基准期相比,3 个未来时期在 RCR4.5 情景下, Had 模式预估降水量从近期到远期呈现先上升后下降的特点,在 2051—2070 年降水量增加最多(6.47%), Noer 模式在近期和中期减少 3.64%,到远期大幅增加约 6.85%; 2 个模式在中期较基准期均有明显降低趋势。在 RCP8.5 情景下, Had 模式预估降水量呈持

续上升趋势,到远期较基准期增加 9.48%; Noer 模式则有所不同,除近期减少 4.56% 外,其余 2 个时期分别上升 7.84%、3.27%。整体来看,同气温一样, Had 模式下的降水量变化幅度大于 Noer 模式。总体来看,不同气候模式的模拟效果具有一定的差异,但平均气温大体呈现出逐步上升的趋势,这符合全球变暖的背景<sup>[35]</sup>,同时随着排放量的增加,气温和降水的变化幅度也进一步增大,这同赵彦茜等<sup>[36]</sup>的研究结果一致。

表 2 在未来不同气候情景下山美水库流域年均降水量变化(相较于基准期)

Tab. 2 Variations of annual average precipitation under different climatic scenarios in Shanmei reservoir watershed (compared to the base period)

单位: %

| GCM 模式  | 时段              | 降水量差异  |        | 平均降水量差异 |        |
|---------|-----------------|--------|--------|---------|--------|
|         |                 | RCP4.5 | RCP8.5 | RCP4.5  | RCP8.5 |
| Had 模式  | 近期(2031—2050 年) | -3.64  | 5.21   |         |        |
|         | 中期(2051—2070 年) | 6.47   | 6.79   | 1.93    | 7.16   |
|         | 远期(2071—2090 年) | 2.97   | 9.48   |         |        |
| Noer 模式 | 近期(2031—2050 年) | -3.64  | -4.56  |         |        |
|         | 中期(2051—2070 年) | -3.64  | 7.84   | -0.43   | 2.18   |
|         | 远期(2071—2090 年) | 6.85   | 3.27   |         |        |

### 3.2 流域现状及未来蓝绿水资源的时间变化特征

采用率定好的 SWAT 模型对山美水流域基准期的蓝水、绿水资源量进行计算,结果见图 2。1991—2010 年,山美水库流域多年平均蓝水资源量为 1 334 mm,绿水资源量为 717 mm。蓝水资源量年际变化差异显著,时间变化过程跟降水变化

趋势基本一致,在强降水年份(1997、2000、2006、2010 年)蓝水量增长尤为明显;反之,绿水资源量年际差异较小,仅在 662~815 mm 波动。流域水资源总量较为丰富,蓝水资源量是绿水资源的 1.86 倍,这主要是由于山美水库流域地处潮湿的南方地区,有充沛的降水,多年平均降水量可达 1 700 mm。

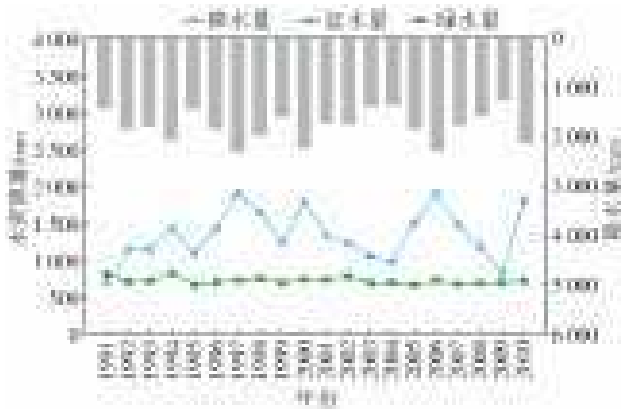


图 2 1991—2010 年山美水库流域蓝水、绿水资源量

Fig. 2 Temporal variation of blue and green water resources in the Shanmei reservoir watershed from 1991 to 2010

与基准期相比,未来 2 个气候模式在 2 种 RCP

表 3 山美水库流域在不同气候情景下的年蓝绿水资源量变化(相较基准期)

Tab. 3 Variations of annual blue and green water under different climate scenarios in the Shanmei reservoir watershed (compared to the base period)

| GCM 模式     | 时段              | 蓝水资源量/mm |          | 蓝水变化率/% |        | 绿水资源量/mm |        | 绿水变化率/% |        |
|------------|-----------------|----------|----------|---------|--------|----------|--------|---------|--------|
|            |                 | RCP4.5   | RCP8.5   | RCP4.5  | RCP8.5 | RCP4.5   | RCP8.5 | RCP4.5  | RCP8.5 |
| HadGEM2-ES | 近期(2031—2050 年) | 925.16   | 1 045.55 | -30.65  | -21.66 | 924.33   | 964.65 | 28.45   | 34.44  |
|            | 中期(2051—2070 年) | 1 135.47 | 1 114.91 | -14.91  | -16.40 | 944.41   | 948.80 | 31.66   | 32.21  |
|            | 远期(2071—2090 年) | 1 052.36 | 1 133.79 | -21.12  | -15.07 | 952.84   | 973.17 | 32.78   | 35.56  |
| NoerESM1-M | 近期(2031—2050 年) | 888.68   | 863.28   | -33.41  | -35.28 | 937.03   | 963.49 | 30.54   | 34.31  |
|            | 中期(2051—2070 年) | 964.40   | 1 145.20 | -27.71  | -14.17 | 946.22   | 970.68 | 31.94   | 35.28  |
|            | 远期(2071—2090 年) | 1 163.67 | 1 073.17 | -12.81  | -19.60 | 956.50   | 976.18 | 33.33   | 36.12  |

与蓝水资源相反,流域未来绿水资源整体呈现增加的趋势,增幅达到 28.45%~36.12%。RCP8.5 情景的年均绿水资源增加量达到 34.65%,超过 RCP4.5 情景的 31.45%,即 RCP 排放浓度越高,绿水的增幅越明显。与基准期相比,未来 3 个时期的绿水量增幅也逐渐增加,其中,Noer 模式的增幅大于 Had 模式。总体来看,远期的绿水量均大于近期。通过对未来 60 年在不同气候模式下的蒸散量与绿水资源量的相关分析可知,二者存在显著的相关性,相关系数  $r$  均大于 0.80 ( $p < 0.01$ ),即未来绿水资源的变幅受蒸散发的影响更为显著。这主要是由于随着  $CO_2$  排放量的增加,流域气温进一步升高,蒸散量也相应增大,增加了绿水流,进一步导致绿水资源量的增大。

### 3.3 流域现状及未来蓝绿水资源的空间变化特征

山美水库流域的蓝水和绿水资源分布呈现显著的空间分异特征,由图 3 可知,各子流域蓝水资源量分布范围在 1 065~1 718 mm。其中:蓝水资源量高值区主要集中在桃溪上中游的 14、24、30、33 号子流域和湖洋溪上游的 1、2、4、7 号子流域,平均达到

情景下的蓝水资源量均有不同程度的降低。如表 3 所示,在 RCP4.5 情景下,蓝水资源量减少 12.81%~33.41%,RCP8.5 情景下减少 14.17%~35.28%。就 3 个时期而言,未来不同气候模式均在近期降幅最大;Had 模式在 RCP4.5 情景下的中期降幅最小,而 Noer 模式在 RCP4.5 情景下的远期降幅最小。总体来看,远期的蓝水量均大于近期,与基准期相比,未来蓝水减少的趋势在减弱,这与流域未来降水在远期的增幅大于近期有关。由于山美水库流域未来 60 年在不同气候模式下的蓝水资源量与降水极显著相关 ( $p < 0.01$ ),相关系数  $r$  均大于 0.96,由此可见,未来蓝水量的变幅直接受到降水变化特征的影响<sup>[12]</sup>。

1 505 mm;蓝水资源量低值区主要分布在湖洋溪下游的 23、26 号子流域,以及山美水库库区的 36~38 号子流域,平均仅为 1 115 mm。蓝水资源量的空间分布主要受降水的空间格局影响,二者呈显著相关 ( $p < 0.01$ ),相关系数  $r$  达到 0.72。同时,由于降雨分布取决于海拔,桃溪和湖洋溪上游海拔均超过 600 m,而库区子流域的海拔不到 300 m,蓝水资源的空间分布与海拔分布也呈现一定的相关性 ( $r = 0.48, p < 0.01$ )。总体而言,山美水库流域蓝水分布从上游到下游有所减少。

与蓝水资源相比,各子流域绿水资源量在 550~976 mm。其中:桃溪上中游的 14、29、30 号子流域和湖洋溪中下游的 9、15、16 号子流域,绿水资源量相对较高,均值达到 727 mm;山美库区子流域的绿水资源量相对较小,平均为 513 mm。流域绿水资源量的空间分布主要受农用地分布比重的影响,二者相关系数  $r$  达到 0.81 ( $p < 0.01$ )。绿水资源量最大的 9、15 号子流域,农用地比重高达 71.85%、52.08%。水田、旱地和茶果园是山美水库流域主要的农用地类型,受到作物生长和灌溉等因素影响,作物蒸散发和土壤储蓄水量相对较大,导致区域绿水量相应增大。



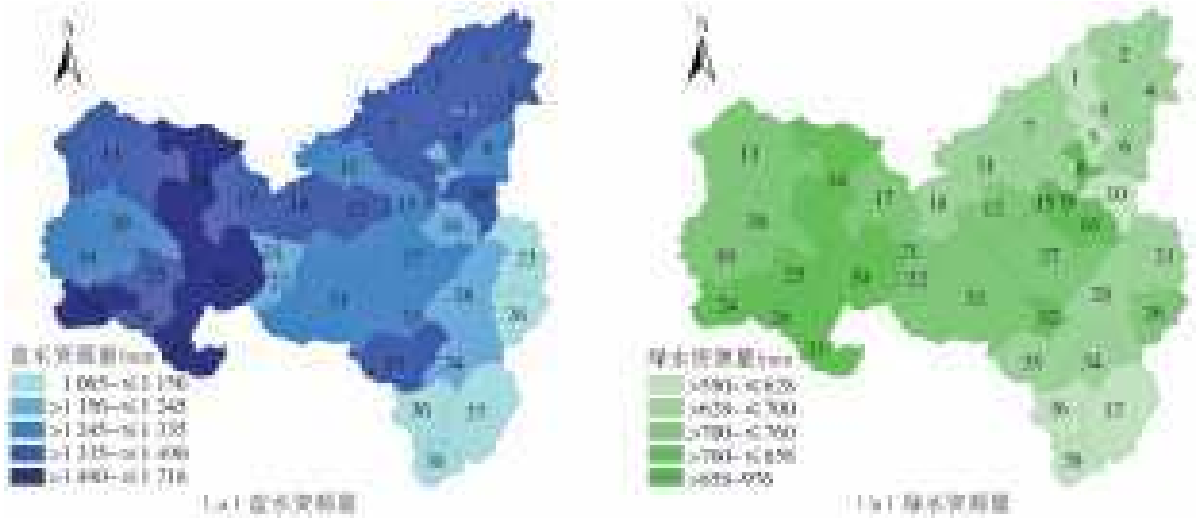


图3 山美水库流域 1991—2010 年平均蓝水与绿水资源量空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of annual average blue and green water in the Shanmei reservoir watershed from 1991 to 2010

图4和图5是流域未来3个时期蓝绿水针对基准期变化率的空间分布。从全流域尺度看,在未来气候情景下蓝水资源量的空间变化有所差异。在未来不同气候情景下,流域蓝水资源相较基准期减少7.38%~40.22%。其中:蓝水量变化率最大的是近期的15、16、20号子流域,平均为34.33%;变化率最小的是中期的36、37号子流域,平均为13%。就3个时期而言,在2种RCP情景下近期的蓝水量平均变化率最大,Had模式为26.35%,Noer模式为34.43%。在RCP4.5情景下,变化率最小的是Had模式,在中期减少了15%;在RCP8.5情景下,变化率最小的是Had模式,在远期减少了15%。

与蓝水资源相比,在未来不同气候情景下,流域绿水资源分布相较基准期增加14.91%~48.61%。绿水量变化率最大的是远期的5、6号子流域,平均为42.98%;变化率最小的是中期的9、38号子流域,平均为18%。在不同气候情景下未来3个时期的绿水量平均变化率均大于30%,且在RCP8.5情景下远期的绿水量变化率均大于近期。

## 4 讨论

### 4.1 不确定性

采用CMIP5和SWAT模型结合,对未来气候模式下的流域蓝绿水资源进行模拟,存在一定的不确定性。首先是气候模式的不确定性。气候模式由于自身的结构和排放情景设置等因素,导致其模拟结果具有一定的不确定性。CMIP5的气候模式在气温模拟上效果普遍较好,也具有较好的适用性<sup>[37]</sup>;但就降水来说,气候模式虽然能模拟出我国降水自东南向西北减少的特点,但对华南地区的降水模拟值偏少<sup>[38]</sup>,文中月均降水的相关系数 $R^2$ 低于月均最高、最低气温,模拟效果略差于气温。二是

不同模式间模拟效果的差异。由于其模拟机制的不同,不同气候模式在同一地区的模拟结果也有差异<sup>[39]</sup>。本文中HadGEM2-ES模式模拟的气温和降水的变化幅度均大于NoerESM1-M模式。Chen等<sup>[40]</sup>利用19种GCM模式在得克萨斯州北部高原进行气候预估时也发现,不同气候模式模拟的未来降水有增有减,整体降水变化幅度在-29.9%~53.4%。三是降尺度方法的不确定性。分位数映射法是目前国际上最常用的误差校正方法,对长时间尺度的降水资料校正效果相对较好<sup>[41]</sup>,但受气候模式低分辨率的影响,在中小尺度流域,气候数据覆盖的网格点数量较少,可能导致降尺度效果不够理想<sup>[42]</sup>。此外,研究区获取的观测资料本身的不确定性也是降尺度效果的误差来源。四是SWAT模型的不确定性。蓝绿水资源量直接根据SWAT模型计算得出,在模型率定过程中,部分参数直接影响了蓝、绿水的计算值,如:地表产流参数 $C_N$ 直接影响地表径流大小,间接影响了蓝水资源量;土壤蒸发补偿系数 $E_{SCO}$ 直接影响了实际蒸散发量,土壤有效持水量 $S_{OLAWC}$ 则影响了土壤含水量的大小,进一步影响了绿水资源量。本研究仅对河川径流量进行了率定,蓝水量的模拟基本可信,但由于蒸散发缺乏实测数据,对绿水资源量的模拟存在一定的不确定性。

### 4.2 蓝绿水时空分布影响因素

从时间上看,未来气候变化对山美水库流域蓝绿水量的影响较为显著,在不同气候情景下,流域未来蓝水量均呈现降低趋势,而绿水量则明显增长。已有研究<sup>[43]</sup>表明,尽管气候变化对蓝绿水都有影响,但降水对蓝水资源的影响更大,绿水资源则与气温直接相关。本研究中,山美水库流域蓝水量与降水量变化过程的相关系数 $r$ 达到0.96( $p < 0.01$ )以

上,而绿水量与蒸散发的相关系数  $r$  达到 0.80 ( $p < 0.01$ ) 以上。可见,随着未来气温的显著升高,蒸散发速率进一步增强,流域绿水量也随之相应增加。未来 60 年山美水库流域日最低气温的增幅在 10.19%~31.94%,而未来降水变化有增有减,变化

范围在-4.56%~9.48%,其影响程度远远小于气温升高带来的蒸散发的增强,进而导致蓝水资源量的显著减少,绿水量明显增加。Chen 等<sup>[12]</sup>研究也发现,未来中国南方绿水量在浙闽流域和珠江流域有明显增长,这与本文的研究结果也基本一致。

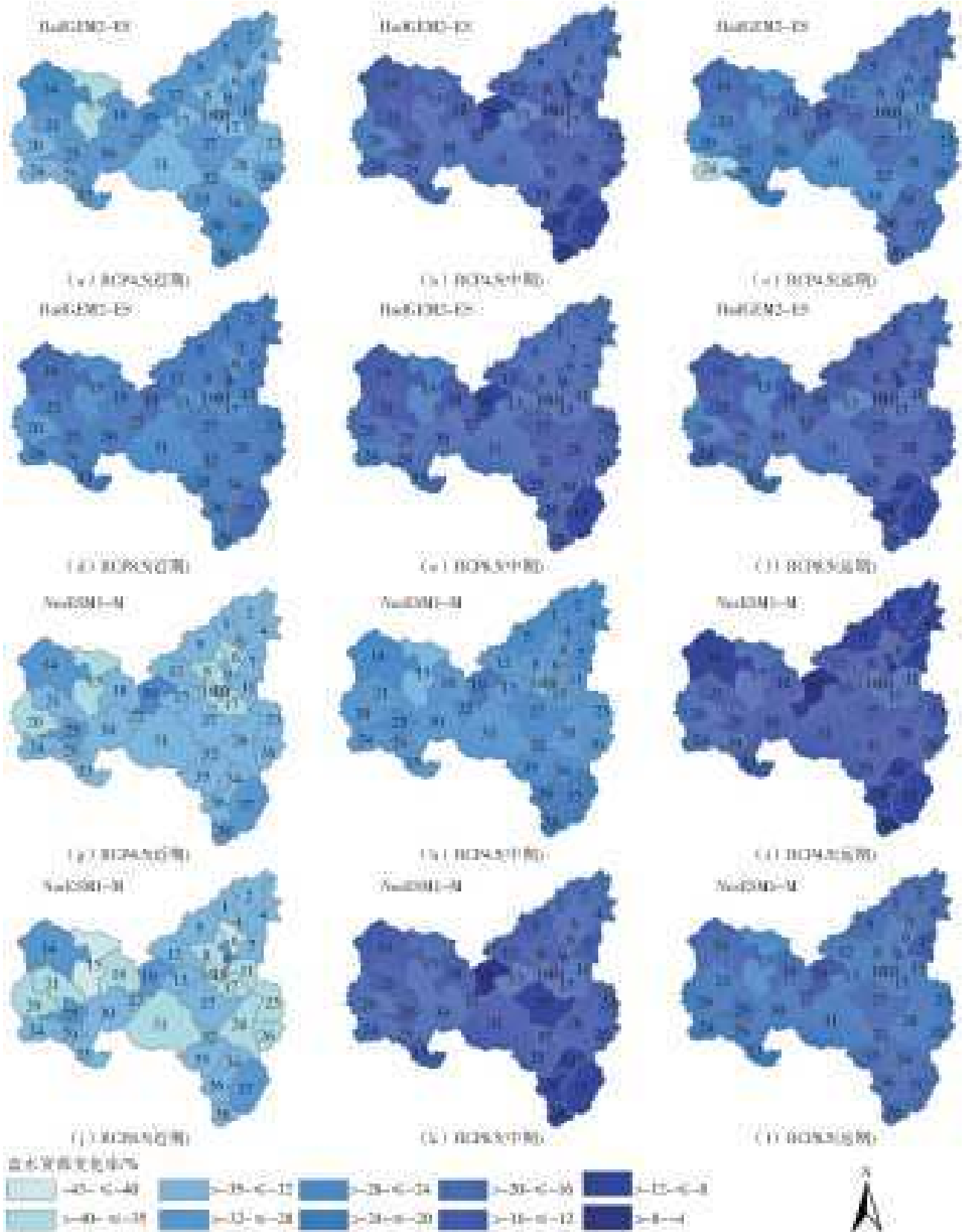


图 4 山美水库流域在不同气候情景下蓝水资源量空间分布变化  
Fig. 4 Spatial variations of blue water under different climatic scenarios in the Shanmei reservoir watershed

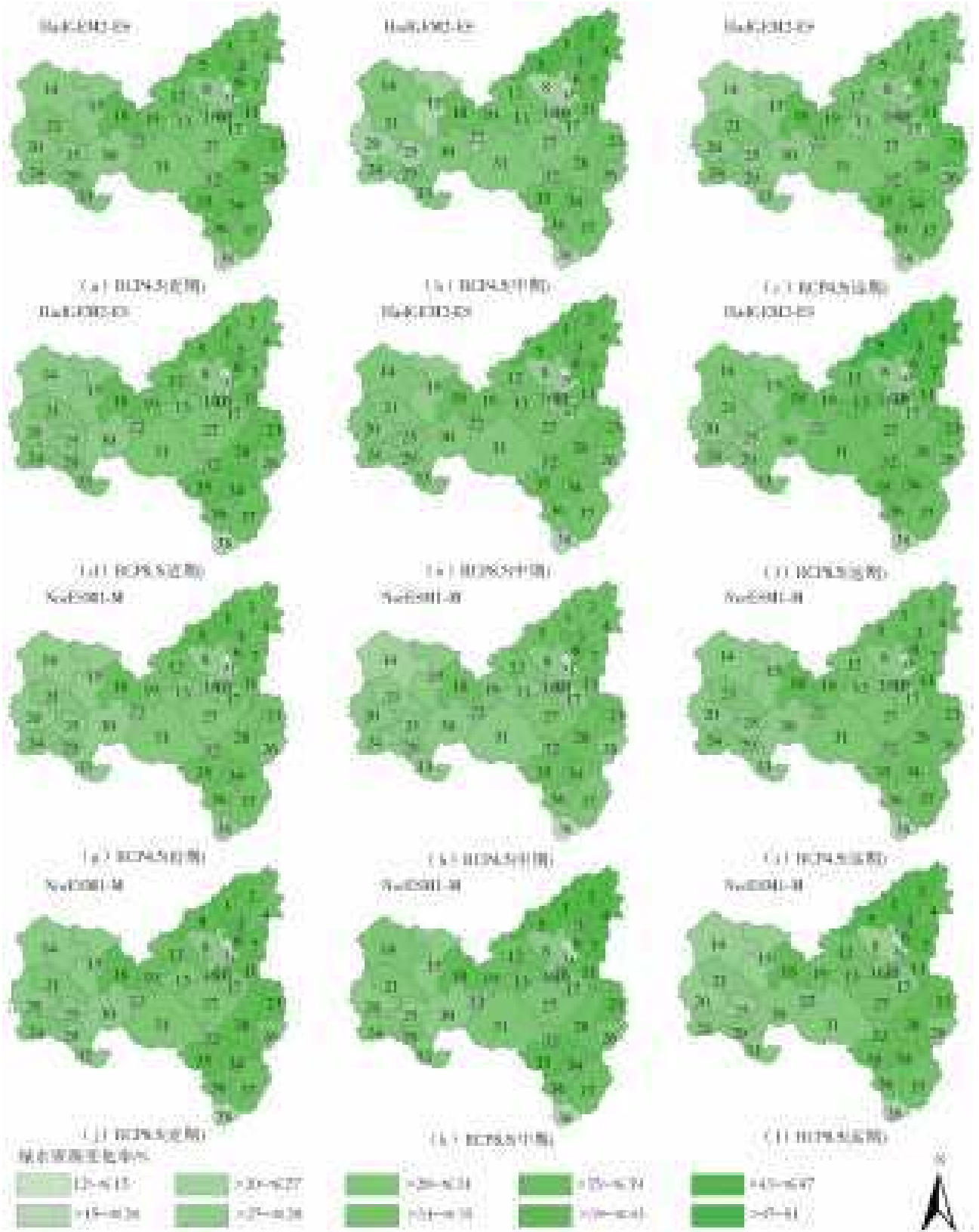


图5 山美水库流域在不同气候情景下绿水资源量空间分布变化

Fig. 5 Spatial variations of Green water under different climatic scenarios in the Shanmei reservoir watershed

从空间上看,山美水库流域蓝水资源量的分布主要受降水空间格局的影响,而流域绿水资源量的空间分布更多受到农用地分布的影响,即蓝水量的空间变化与气候特征相关,土地利用类型的差异造成了绿水资源在空间上的分异<sup>[44]</sup>。降水作为径流

的主要来源,其时空分布特征直接影响了地表、地下径流,进而影响蓝水资源分布。与降水相比,土地覆被类型对水文循环过程的影响机制较为复杂,土地覆盖的分布特征基本决定了蒸散发的分布格局,从而影响了绿水量的空间分异特征<sup>[45]</sup>。冯畅等<sup>[33]</sup>在



涟水河流域的研究发现,土地利用类型对流域内蓝水、绿水的空间分异特征均有影响。森林覆被与绿水有较好的空间关联性,农业用地、城镇区域的蓝水资源相对更大,森林区域蓝水资源相对较少。在相同气候条件下,森林覆盖率的提高可以拦截更多的降水,增加土壤下渗水量,从而增加绿水储量,减少汛期蓝水资源量<sup>[46]</sup>。Zhao 等<sup>[47]</sup>在渭河流域的研究发现,城市扩张增加了不透水面积,降低了入渗速率,从而增加了地表径流,这意味着更少的蓝水可以到达非饱和土壤。有研究<sup>[48-49]</sup>表明,农用地对蒸散发总量的贡献高于林草地,受人类活动的影响,农用地在夏季的日均蒸散发量也远远大于林地<sup>[50]</sup>。在农用地中,99%的水都用于蒸发和蒸腾<sup>[51]</sup>,作物处于生长季时,气温高且灌溉用水充足,植物散发与土壤、水面蒸发的双重作用使得蒸散发量较高。蒸散发作为绿水的主要组成,直接决定了绿水量的大小,而农业灌溉面积的增加减少了蓝水量,增大了绿水流和绿水储量。张杰等<sup>[52]</sup>发现在淮河流域,年均绿水流在不同用地类型中差异明显,农用地最大,居民用地最小。Du 等<sup>[53]</sup>在美国密西西比河流域的研究发现,气候变化影响流域的蓝水量和绿水量,但土地利用变化则是造成绿水空间分异的控制因素。土地利用类型直接影响了蒸散发和根系土壤水(即绿水)的分布,进而影响到地表产水量和深层含水量补给(即蓝水)对气候变化的响应。尽管目前诸多研究结果显示,土地利用的变化对绿水的影响更大,气候变化对蓝水影响更大,但目前仍然没有足够的证据表明这是一种普遍的因果关系。

山美水库流域虽然位于湿润的南方地区,以蓝水资源为主,但随着未来气温的升高、蒸散发量的加大和地表径流的减少,绿水资源在流域所占比重将会不断提高,其在生态系统中的重要作用也不容忽视。未来蓝水资源的进一步降低将在很大程度上影响下游地区水资源的可利用性,未来更需进行合理的水资源配置,综合规划蓝水、绿水资源的分配利用,满足下游地区人民的生产、生活用水需求。

## 5 结 论

本文以山美水库流域作为研究对象,采用 2 种 GCM 和 2 种 RCP 下的气候数据驱动 SWAT 模型,对流域 1990—2010 年现状条件下以及 2031—2090 年未来气候变化下的水文循环过程进行模拟,进一步分析了流域现状及未来蓝水、绿水资源量的时空变化特征,主要结论如下:

(1) 未来 2 种 GCM 模式在 RCP4.5 情景下,年

均降水量较基准期变化幅度为 $-0.43\% \sim 1.93\%$ ,平均气温升高 $1.72 \sim 3.90\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;在 RCP8.5 情景下,预估年均降水量变化幅度为 $2.18\% \sim 7.16\%$ ,平均气温升高 $2.14 \sim 5.43\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,随着 RCP 总辐射排放情景的增加,山美水库流域未来气温将持续升高,降水量也将有所增加。

(2) 流域基准期多年平均蓝水资源量为 $1\,334.90\text{ mm}$ ,绿水资源量为 $717.18\text{ mm}$ 。相较基准期,2031—2090 年,流域 RCP4.5 情景蓝水资源量降低 $12.81\% \sim 33.41\%$ ,绿水资源量增加 $28.45\% \sim 33.33\%$ ;在 RCP8.5 情景下蓝水资源量降低 $14.17\% \sim 35.28\%$ ,绿水资源量增加 $32.21\% \sim 36.12\%$ 。

(3) 流域蓝水、绿水资源的空间分布呈现出一定程度的相似性,上游蓝水、绿水资源量均大于下游地区。在不同气候情景下,38 个子流域的蓝水资源相较基准期约减 $7\% \sim 43\%$ ,绿水资源相较基准期约增加 $15\% \sim 49\%$ 。蓝水的空间分异特征主要受降水空间格局的影响,而绿水资源的空间分布更多受子流域农用地分布比重的影响。

(4) 本文联合全球气候模式 GCM 和流域水文模型 SWAT 研究区域蓝绿水资源的变化状况,该方法也可应用到其他流域,但由于 SWAT 模型自身的局限性和不同 GCM 模式间气候效果的模拟差异导致模拟结果的不确定性,未来如何提高气候变化对水文响应的模拟精度,仍需进一步探讨。

## 参考文献(References):

- [1] LEE M H, IM E S, BAE D H. Impact of the spatial variability of daily precipitation on hydrological projections: A comparison of GCMs and RCM driven cases in the Han River basin, Korea[J]. Hydrological Processes, 2019, 5(5): 41-48. DOI: 10.1002/hyp.13469.
- [2] 郑景云, 刘洋, 郝志新, 等. 过去 2000 年气候变化的全球集成研究进展与展望[J]. 第四纪研究, 2021, 41(2): 309-322, 308. (ZHENG J Y, LIU Y, HAO Z X, et al. State-of-art and perspective on global synthesis studies of climate change for the past 2000 years[J]. Quaternary Sciences, 2021, 41(2): 309-322, 308. (in Chinese))
- [3] FALKENMARK M. Land-water linkages: A synopsis: land and water integration and river basin management [R]. Land and Water Bulletin No. 1, FAO, Rome, 1995.
- [4] CHEN H P, SUN J Q. Sensitivity of climate changes to CO<sub>2</sub> emissions in China[J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2014, 7(5): 422-427.
- [5] 李晓菲, 徐长春, 李路, 等. 21 世纪开都-孔雀河流域未来气候变化情景预估[J]. 干旱区研究, 2019, 36(3): 556-566. (LI X F, XU C C, LI L, et al. Projection of fu-

- ture climate change in the Kaidu-Kongqi River basin in the 21st century[J]. *Arid Zone Research*, 2019, 36(3): 556-566. (in Chinese) DOI: 10. 13866/j. azr. 2019. 03. 04.
- [6] 李熠,买苗. 基于全球及区域气候模式的江苏省降水变化趋势预估[J]. *大气科学学报*, 2019, 42(3): 447-458. (LI Y, MAI M. Projection of precipitation over Jiangsu Province based on global and regional climate models [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2019, 42(3): 447-458. (in Chinese) DOI: 10. 13878/j. cnki. dqkxxb. 20180316001.
- [7] 王胜,许红梅,刘绿柳,等. 全球增温 1.5°C 和 2.0°C 对淮河中上游径流影响预估[J]. *自然资源学报*, 2018, 33(11): 1966-1978. (WANG S, XU H M, LIU L L, et al. Projection of the impacts of global warming of 1.5°C and 2.0°C on runoff in the upper-middle reaches of Huaihe River basin [J]. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(11): 1966-1978. (in Chinese) DOI: 10. 31497/zrzyxb. 20171050.
- [8] 吴佳,周波涛,徐影. 中国平均降水和极端降水对气候变暖的响应:CMIP5 模式模拟评估和预估[J]. *地球物理学报*, 2015, 58(9): 3048-3060. (WU J, ZHOU B T, XU Y. Response of precipitation and its extremes over China to warming: CMIP5 simulation and projection [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(9): 3048-3060. (in Chinese) DOI: 10. 6038/cjg20150903.
- [9] GITHUI F, GITAU W, MUTUA F, et al. Climate change impact on SWAT simulated streamflow in western Kenya [J]. *International Journal of Climatology*, 2009, 29(12): 1823-1834.
- [10] PANDEY B K, KHARE D, KAWASAKI A, et al. Climate change impact assessment on blue and green water by coupling of representative CMIP5 climate models with physical based hydrological model [J]. *Water Resources Management*, 2019(33): 141-158. DOI: 10. 1007/s11269-018-2093-3.
- [11] FARSANI I F, FARZANEH M R, BESALATPOUR A A, et al. Assessment of the impact of climate change on spatiotemporal variability of blue and green water resources under CMIP3 and CMIP5 models in a highly mountainous watershed [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2019(136): 169-184. DOI: 10. 1007/s00704-018-2474-9.
- [12] CHEN C, HAGEMANN S, LIU J G. Assessment of impact of climate change on the blue and green water resources in large river basins in China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015(74): 6381-6394. DOI: 10. 1007/s12665-041-3782-8.
- [13] 吕乐婷,王晓蕊,孙才志,等. 基于 SWAT 模型的细河流域蓝绿水资源量时空分布研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(1): 39-47. (LYU L T, WANG X R, SUN C Z, et al. Study on the spatiotemporal variations of blue and green water resources in Xi River basin using the SWAT model [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(1): 39-47. (in Chinese) DOI: CNKI; SUN; CJLY. 0. 2019-01-005.
- [14] 臧传富,刘俊国. 黑河流域蓝绿水在典型年份的时空差异特征[J]. *北京林业大学学报*, 2013, 35(3): 1-10. (ZANG C F, LIU J G. Spatial and temporal pattern difference of blue-green water flows in typical reference years in the Heihe River basin [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2013, 35(3): 1-10.)
- [15] 谢子波,朱奎,鲁帆,等. 基于水循环模拟的潮白河流域蓝绿水资源变化趋势分析[J]. *水文*, 2019, 39(1): 44-49, 32. (XIE Z B, ZHU Q, LU F, et al. Trend analysis for blue and green water resources in Chaobai River basin based on hydrologic cycle simulation [J]. *Journal of China Hydrology*, 2019, 39(1): 44-49, 32. (in Chinese) DOI: CNKI; SUN; SWZZ. 0. 2019-01-008.
- [16] 张为彬,查小春,马玉改. 1961—2010 年黄河源区蓝绿水资源时空变化[J]. *水土保持通报*, 2014, 34(6): 338-343. (ZHANG W B, CHA X C, MA Y G. Spatiotemporal change of blue water and green water resources in source region of Yellow River from 1961 to 2010 [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2014, 34(6): 338-343. (in Chinese))
- [17] 颜少清. 山美水库至惠女水库引调水工程调度运行分析[J]. *西北水电*, 2016(6): 6-8. (YAN S Q. Analysis on dispatching operation of water division project from Shanmei reservoir to Huinv reservoir [J]. *Northwest Hydropower*, 2016(6): 6-8. (in Chinese) DOI: CNKI; SUN; SBXX. 0. 2016-06-002.
- [18] 刘梅冰,陈兴伟,陈莹. 山美水库氮营养盐滞留特征及其影响因素的多时间尺度分析[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(7): 2348-2356. (LIU M B, CHEN X W, CHEN Y. Multiple time-scale analysis of nitrogen retention characteristics and influencing factors in Shanmei reservoir, Fujian, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(7): 2348-2356. (in Chinese) DOI: 10. 13287/j. 1001-9332. 201607. 016.
- [19] 李娇,鱼京善,滕彦国,等. 泉州市山美水库水资源风险管理研究[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2016, 52(3): 283-288. (LI J, YU J S, TENG Y G, et al. Risk management of water resources in the case for Shanmei reservoir in Quanzhou City [J]. *Journal of Beijing Normal University(Natural Science)*, 2016, 52(3): 283-288. (in Chinese) DOI: 10. 16360/j. cnki. jbnuns. 2016. 03. 006.
- [20] 陈守珊. 泉州市水资源管理存在的问题及对策[J]. *水*

- 利科技, 2020(1): 15-17, 21. (CHEN S S. Existing problems and countermeasures of water resources management in Quanzhou City[J]. Hydraulic Science and Technology, 2020(1): 15-17, 21. (in Chinese))
- [21] 金浩宇, 鞠琴, 曲珍, 等. 基于集成方法的长江源区未来气候变化预测研究[J]. 水力发电, 2019, 45(11): 9-13. (JIN H Y, JU Q, QU Z, et al. Future climate change prediction in the source region of Yangtze River based on integrated method[J]. Water Power, 2019, 45(11): 9-13. (in Chinese))
- [22] 成爱芳, 冯起, 张健恺, 等. 未来气候情景下气候变化响应过程研究综述[J]. 地理科学, 2015, 35(1): 84-90. (CHENG A F, FENG Q, ZHANG J K, et al. A review of climate change scenario for impacts process study[J]. Scientia Geographica Sinica, 2015, 35(1): 84-90. (in Chinese)) DOI: 10. 13249/j. cnki. sgs. 2015. 01. 010.
- [23] 周文翀, 韩振宇. CMIP5 全球气候模式对中国黄河流域气候模拟能力的评估[J]. 气象与环境学报, 2018, 34(6): 42-55. (ZHOU W X, HAN Z Y. Assessing CMIP5 climate simulations and objective selection of models over the Yellow River basin[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2018, 34(6): 42-55. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; LNQX. 0. 2018-06-005.
- [24] 陶纯菁, 姜超, 孙建新. CMIP5 模式对中国东北气候模拟能力的评估[J]. 气候与环境研究, 2016, 21(3): 357-366. (TAO C W, JIANG C, SUN J X. Evaluation of CMIP5 models performance on climate simulation in northeast China[J]. Climatic and Environmental Research, 2016, 21(3): 357-366. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1673-503X. 2010. 03. 001.
- [25] 张艳武, 张莉, 徐影. CMIP5 模式对中国地区气温模拟能力评估与预估[J]. 气候变化研究进展, 2016, 12(1): 10-19. (ZHANG Y W, ZHANG L, XU Y. Simulations and projections of the surface air temperature in China by CMIP5 models[J]. Climate Change Research, 2016, 12(1): 10-19. (in Chinese)) DOI: 10. 12006/j. issn. 1673-1719. 2015. 113.
- [26] 张武龙, 张井勇, 范广洲. CMIP5 模式对我国西南地区干湿季降水的模拟和预估[J]. 大气科学, 2015, 39(3): 559-570. (ZHANG W L, ZHANG J Y, FAN G Z. Evaluation and projection of dry-and wet-season precipitation in southwestern China using CMIP5 models[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2015, 39(3): 559-570. (in Chinese)) DOI: 10. 3878/j. issn. 1006-9895. 1408. 14136.
- [27] XU Y, XU C H. Preliminary assessment of simulations of climate changes over China by CMIP5 multi-models[J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2012, 5(6): 489-494.
- [28] 吴丽娜, 陈莹, 陈兴伟, 等. 气候变化下山美水库流域未来径流量变化[J]. 亚热带资源与环境学报, 2019, 14(4): 18-22, 35. (WU L N, CHEN Y, CHEN X W, et al. Study on runoff in Shanmei reservoir basin in the future of climate change[J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2019, 14(4): 18-22, 35. (in Chinese)) DOI: 10. 19687/j. cnki. 1673-7105. 2019. 04. 003.
- [29] 沈成, 束炯. 基于统计降尺度方法的长江中下游气温的模拟与预估[J]. 安徽农业大学学报, 2019, 46(1): 65-74. (SHEN C, SHU J. Simulation and estimation of temperature in the middle and lower reaches of the Yangtze River based on statistical downscaling method[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2019, 46(1): 65-74. (in Chinese)) DOI: 10. 13610/j. cnki. 1672-352x. 20190314. 012.
- [30] GAO L, HAO L, CHEN X W, et al. Evaluation of ERA-interim monthly temperature data over the Tiberan Plateau[J]. Journal of Mountain Science, 2014, 11(5): 1154-1168.
- [31] 高倩, 赵强, 杨梦林, 等. 气候和土地利用变化对大汶河流域径流的影响[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2019, 33(5): 439-445, 452. (GAO Q, ZHAO Q, YANG M L, et al. Impact of climate change and land use on runoff in the Dawen River basin[J]. Journal of University of Jinan(Science and Technology), 2019, 33(5): 439-445, 452. (in Chinese)) DOI: 10. 13349/j. cnki. jdxbn. 2019. 05. 009.
- [32] 刘梅冰, 陈兴伟, 陈莹. 流域非点源氮素流失空间分异特征的多时间尺度分析[J]. 应用生态学报, 2015, 26(7): 2183-2191. (LIU M B, CHEN X W, CHEN Y. Multiple time scales analysis of spatial differentiation characteristics of non-point source nitrogen loss within watershed[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(7): 2183-2191. (in Chinese)) DOI: 10. 13287/j. 1001-9332. 20150506. 027.
- [33] 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[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(10): 1525-1537. (FENG C, MAO D H, ZHOU H, et al. Effects of climate change on blue water and green water resources in the Lianshui basin[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2017, 26(10): 1525-1537. (in Chinese))
- [34] 赵安周, 赵玉玲, 刘宪锋, 等. 气候变化和人类活动对渭河流域蓝水绿水影响研究[J]. 地理科学, 2016, 36(4): 571-579. (ZHAO A Z, ZHAO Y L, LIU X F, et al. Impact of human activities and climate variability on green and blue water resources in the Weihe River basin of northwest China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2016, 36(4): 571-579. (in Chinese)) DOI: 10.

- 13249/j. cnki. sgs. 2016. 04. 011.
- [35] 姚遥,罗勇,黄建斌. 8 个 CMIP5 模式对中国极端气温的模拟和预估[J]. 气候变化研究进展, 2012, 8(4): 250-256. (YAO Y, LUO Y, HUANG J B. Evaluation and projection of temperature extremes over China based on 8 modeling data from CMIP5[J]. *Climate Change Research*, 2012, 8(4): 250-256. (in Chinese))
- [36] 赵彦茜,肖登攀,柏会子. CMIP5 气候模式对中国未来气候变化的预估和应用[J]. 气象科技, 2019, 47(4): 608-621. (ZHAO Y Q, XIAO D P, BAI H Z. Projection and application for future climate in China by CMIP5 climate model[J]. *Meteorological Science and Technology*, 2019, 47(4): 608-621. (in Chinese)) DOI: 10. 19517/j. 1671-6345. 20180431.
- [37] HUNINK J E, DROOGERS P, KAUFFMAN S, et al. Quantitative simulation tools to analyze up and downstream interactions of soil and water conservation measures: Supporting policy making in the green water credits program of Kenya[J]. *Journal of Environmental Management*, 2012, 111: 187-194.
- [38] 郭彦,董文杰,任福民,等. CMIP5 模式对中国年平均气温模拟及其与 CMIP3 模式的比较[J]. 气候变化研究进展, 2013, 9(3): 181-186. (GUO Y, DONG W J, REN F M, et al. Assessment of CMIP5 simulations for China annual average surface temperature and its comparison with CMIP3 simulations [J]. *Climate Change Research*, 2013, 9(3): 181-186. (in Chinese))
- [39] 程雪蓉,任立良,杨肖雨,等. CMIP5 多模式对中国及各分区气温和降水时空特征的预估[J]. 水文, 2016, 36(4): 37-43. (CHENG X R, REN L L, YANG X L, et al. A CMIP5 multi-model estimation of spatio-temporal characteristics of temperature, precipitation in 7 regions of China [J]. *Journal of China Hydrology*, 2016, 36(4): 37-43. (in Chinese))
- [40] CHEN Y, MAREK G W, MAREK T H, et al. Simulating the impacts of climate change on hydrology and crop production in the northern high plains of Texas using an improved SWAT model [J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 221: 13-24. DOI: 10. 1016/j. agwat. 2019. 04. 021.
- [41] 胡浩林,任福民. CMIP5 模式集合对中国区域性低温事件的模拟与预估[J]. 气候变化研究进展, 2016, 12(5): 396-406. (HU H L, REN F M. Simulation and projection for China regional low temperature events with CMIP5 multi-model ensembles [J]. *Climate Change Research*, 2016, 12(5): 396-406. (in Chinese)) DOI: 10. 12006/j. issn. 1673-1719. 2016. 010.
- [42] CANNON A J, SOBIE S R, MURDOCK T Q. Bias correction of GCMs precipitation by quantile mapping: How well do methods preserve changes in quantiles and extremes [J]. *Journal of Climate*, 2015, 28(17): 6938-6959. DOI: 10. 1175/JCLI-D-14-00754. 1.
- [43] YUAN Z, XU J J, WANG Y Q. Historical and future changes of blue water and green water resources in the Yangtze River source region, China [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2019, 138(1/2): 1035-1047. DOI: 10. 1007/s00704-019-02883-z.
- [44] MAO G Q, LIU J G, HAN F, et al. Assessing the interlinkage of green and blue water in an arid catchment in northwest China [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2020, 42(8): 933-953. DOI: 10. 1007/s10653-01-09-00406-3.
- [45] 王洁,董刚,张峰. 松嫩平原西部气候和土地利用变化对蒸散的影响[J]. 山西大学学报(自然科学版), 2015, 38(2): 375-384. (WANG J, DONG G, ZHANG F. Effects of climatic change and land use/cover change on evapotranspiration in the western Songnen Plain of northeast China [J]. *Journal of Shanxi University (Natural Science Edition)*, 2015, 38(2): 375-384. (in Chinese))
- [46] 杜军凯,贾仰文,郝春洋,等. 太行山区蓝绿水沿垂直带演变规律及其归因分析[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(2): 64-73. (DU J K, JIA Y W, HAO C P, et al. Evolution law and attribution analysis of vertical distribution of blue water and green water in Taihang mountain region [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2018, 16(2): 64-73. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsb-dqk. 2018. 0040.
- [47] ZHAO A Z, ZHU X F, PAN Y Z, et al. Impacts of land use change and climate variability on green and blue water resources in the Weihe River basin of northwest China [J]. *Catena*, 2016, 137: 318-327. DOI: 10. 1016/j. catena. 2015. 09. 018.
- [48] 阮宏威,于静洁. 1992—2015 年中亚五国土地覆盖与蒸散发变化[J]. 地理学报, 2019, 74(7): 1292-1304. (RUAN H W, YU J J. Changes in land cover and evapotranspiration in the five Central Asian countries from 1992 to 2015 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(7): 1292-1304. (in Chinese)) DOI: 10. 11821/dlxb201907002.
- [49] 周正模,杜付然,江海涛,等. 淮河上游土地利用变化对流域蒸散发能力影响研究[J]. 中国农村水利水电, 2018(1): 60-65, 70. (ZHOU Z M, DU F R, JIANG H T, et al. Research on the impact of land use change on potential evapotranspiration in the upper Huaihe basin [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2018(1): 60-65, 70. (in Chinese)) DOI: 10. 1007-2284. 2018. 01. 014.

- [50] 陈晓菲,任立良,江善虎,等. 赣江上游流域蒸散发量影响因素的遥感分析[J]. 水资源保护, 2014, 30(2): 33-37, 66. (CHEN X F, REN L L, JIANG S H, et al. RS-based analysis of factors influencing evapotranspiration in upstream region of Ganjiang basin[J]. Water Resources Protection, 2014, 30(2): 33-37, 66. (in Chinese))
- [51] 李旭亮,杨礼箫,胥学峰,等. 基于 SEBAL 模型的西北农牧交错带生长季蒸散发估算及变化特征分析[J]. 生态学报, 2020, 40(7): 2175-2185. (LI X L, YANG L X, XU X F, et al. Analysis of evapotranspiration pattern by SEBAL model during the growing season in the agro-pastoral ecotone in northwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(7): 2175-2185. (in Chinese))
- [52] 张杰,贾绍凤. 基于 SWAT 模型的湟水流域蓝绿水与不同土地利用类型的绿水差异研究[J]. 水资源与水利工程学报, 2013, 24(4): 6-10. (ZHANG J, JIA S F. Study on difference of blue-green water in Huangshui basin and green water under different types of land use based on SWAT model[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2013, 24(4): 6-10. (in Chinese))
- [53] DU L Y, RAJIB A, MERWADE V. Large scale spatially explicit modeling of blue and green water dynamics in a temperate mid-latitude basin[J]. Journal of Hydrology, 2018, 562: 84-102. DOI: 10. 1016/ hydrol. 2018. 02. 0-71.

### Spatial and temporal variations of blue and green water resources in Shanmei reservoir watershed based on CMIP5 and SWAT

WANG Di<sup>1</sup>, LIU Meibing<sup>1,2</sup>, CHEN Xingwei<sup>1,2</sup>, GAO Lu<sup>1,2,3</sup>

(1. College of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 2. Cultivation Base of State Key Laboratory of Humid Subtropical Mountain Ecology, Fuzhou 350007, China; 3. Fujian Provincial Engineering Research Center for Monitoring and Assessing Terrestrial Disasters, Fuzhou 350007, China)

**Abstract:** Global warming has a profound impact on the hydrological process, which leads to serious problems of regional water shortage. In order to increase the efficient use of available water, it is necessary to predict the impacts of climate change on water resources. Analyzing the spatial and temporal variations of BLUE and GREEN water resources can provide a more reliable basis for regional water resources management and protection.

Daily precipitation and temperature data of Shanmei reservoir watershed from two CMIP5 models (HadGEM2-ES and NoerESM1-M) and two representative concentration pathways (RCP4.5 and RCP8.5) for the periods of 2031-2050, 2051-2070 and 2071-2090 were statistically downscaling by quantile mapping method based on the measured climate data from 1991 to 2010. Then, to assess the impact of climate change on BLUE and GREEN water resources for the next 60 years, SWAT model was applied to simulate the spatial and temporal distribution of BLUE water and GREEN water during the baseline period (1991-2010) and three future periods.

(1) Under the scene of RCP4.5, the annual average precipitation in the future will change by  $-0.43\%$  to  $1.93\%$  compared to the baseline period, and the average temperature will increase by  $1.72\text{ }^{\circ}\text{C}$  to  $3.90\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Under the scene of RCP8.5, the estimated annual average precipitation will vary by  $-0.43\%$  to  $1.93\%$ , and the average temperature will increase by  $1.72\text{ }^{\circ}\text{C}$  to  $3.90\text{ }^{\circ}\text{C}$ . With the increasing of RCP concentration path, the magnitude of change in temperature and precipitation become larger as well. (2) The annual average BLUE and GREEN water resource were  $1\ 334.90\text{ mm}$  and  $717.18\text{ mm}$ , respectively, in Shanmei reservoir watershed from 1991 to 2010. Compared with the baseline period, the amount of BLUE water resources in the RCP4.5 scenario will decrease by  $12.81\%$  to  $33.41\%$ , and the amount of GREEN water resources will increase by  $28.45\%$  to  $33.33\%$  from 2031 to 2090. While the amount of BLUE water resources will decrease by  $14.17\%$  to  $35.28\%$ , the amount of GREEN water resources will increase by  $32.21\%$  to  $36.12\%$  under the RCP8.5 scenario. (3) The distribution of BLUE and GREEN water resources in Shanmei reservoir watershed were similar to some degree, with the water resources quantities in upstream sub-basins larger than that in downstream sub-basins. In different climate scenarios, compared with the baseline period, the BLUE water resources in 38 sub-basins decreased by  $7\%$  to  $43\%$  and the GREEN water resources increased by  $15\%$  to  $49\%$ .

From the perspective of time, the future climate change has a significant impact on BLUE and GREEN water resources in Shanmei reservoir watershed and the precipitation BLUE water resources, while GREEN water resources are directly related to temperature. In the next 60 years, the daily minimum temperature in the basin of Shanmei reservoir watershed will increase between  $10.19\%$  and  $31.94\%$ , and the precipitation will increase in the range of  $-4.56\%$  to  $9.48\%$  which will lead to a significant decrease in BLUE water resources and a significant increase in GREEN water resources. From a spatial perspective, precipitation was the main factor to influence the distribution of BLUE water resources, while the proportion of agricultural land use in sub-basins had a significant effect on the distribution of GREEN water resources. The spatial variation of BLUE water quantity is related to the climatic characteristics, and the difference of land use types leads to the spatial differentiation of GREEN water resources.

**Key words:** climate change; blue water; green water; spatial and temporal distribution; Shanmei reservoir watershed