

# 土地利用和气候变化对王家桥小流域径流的影响

秦文静, 王云琦, 王 彬, 杨文涛, 王玉杰

(1.北京林业大学水土保持学院,重庆缙云山三峡库区森林生态系统国家定位观测研究站,北京 100083;  
2.北京市水土保持工程技术研究中心,北京 100083)

**摘 要:**以三峡库区内典型小流域王家桥为例,利用 SWAT 模型模拟土地利用和气候变化及两者共同作用对径流的影响。结果表明:扩大耕地、退耕还林、发展经济林的土地利用情景下,年均径流量较基准年变化率分别为 15.13%、-13.99%、23.22%,退耕还林能有效调节和减少流域径流量;浓度路径为 RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5 的气候变化情景下,径流量变化率分别为 7.13%、7.78%、8.91%,径流量随未来温室气体和硫酸盐气溶胶排放情况增大而增加;两者综合情景下年均径流量均增加,2030 年左右增幅较显著;对影响径流的因素进行方差分析,发现土地利用变化对径流的影响比气候变化的影响更显著。在未来气候变化背景下,可通过合理配置流域的土地利用类型,实现对流域水量平衡的调节。

**关键词:**土地利用;气候变化;径流;SWAT 模型

中图分类号:P333

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2019)02-0049-06

气候变化与人类活动作为两大驱动因素,影响着流域水文循环过程和水资源演变规律。气候变化通过降水的直接作用和气温、蒸散发的间接作用长期影响流域水循环。世界气候研究计划组织的耦合模式比较计划第五阶段(CMIP5)改进了对东亚夏季风的气候平均态、年循环等特征的模拟<sup>[1]</sup>。Chen<sup>[2]</sup>、徐宗学<sup>[3]</sup>、黄金龙<sup>[4]</sup>等利用此大气环流模式驱动水文模型模拟了长江流域径流、太湖流域水循环及长江寸滩以上流域气候变化及其径流响应。人类活动可在短期内改变土地利用状况,影响下垫面粗糙程度和入渗特性,导致蒸散、入渗等水文循环过程的时空差异<sup>[5]</sup>。Zhang<sup>[6]</sup>、王鹏<sup>[7]</sup>等基于遥感数据分析了三峡库区土地利用变化,而将土地利用与水文结合的研究较少。

气候变化背景下,人类活动引起土地利用变化导致的水资源问题已成为当今水文学关注的焦点之一。分布式水文模型能反映水文要素在空间上的变化,将单一水量变化模拟扩大到广泛的水资源与生态环境的模拟<sup>[8]</sup>。SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型在水资源和环境领域得到了广泛的认可与应用。刘伟<sup>[9]</sup>对三峡库区腹心大宁河流域的产流产沙模拟显示出较好

的适用性。陈兵<sup>[10]</sup>通过假定气候和极端土地利用变化情况研究了沿渡河径流对两者的响应,以往对气候变化背景下的土地利用配置情景研究尚未在库区小流域展开。

王家桥小流域位于三峡库区有库首第一县之称的湖北省秭归县,是库区典型支流流域。本研究探讨了 SWAT 模型在王家桥流域径流模拟的适用性,通过模拟不同土地利用方式和 CMIP5 气候模式的气候变化及两者结合的情景,探究王家桥流域径流量对土地利用和气候变化及两者复合因素的响应。研究结果对小流域水资源规划和环境治理有一定参考意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

王家桥小流域位于湖北省秭归县(31°12'N~31°16'N,110°38'E~110°43'E)。流域面积 16.7km<sup>2</sup>,海拔 63~1 100m,平均坡度约 27°。土壤以紫色土、水稻土常见。流域属大陆性季风气候,年均温度 17.3℃,年均降水量 1 000~1 300 mm。植被以次生针阔叶混交为主,主要有马尾松(Pinus massoniana)、柑橘(Citrus reticulata)

收稿日期:2017-08-24

基金项目:国家重点研发计划项目“三峡库区面源污染农业综合防控及植被削减技术与示范”(2017YFC0505303)

作者简介:秦文静(1991-),女,山西太原人,硕士研究生,主要从事水土保持和流域水沙研究。E-mail:queen\_qin@bjfu.edu.cn

等;农作物主要为水稻(*Oryza sativa*)、玉米(*Zea-may*)等。流域自然条件及区域发展模式在三峡地区具广泛代表性。

1.2 数据来源

1.2.1 DEM 数据

流域 30 米精度 DEM 数据下载自地理空间数据云(<http://www.giscloud.cn/>),对其进行拼接、裁剪等处理。

1.2.2 土地利用和土壤数据

土地利用和土壤分布数据来自秭归县水土保持局。两者根据流域实际情况重分类后各地类型及土壤信息见表 1。

表1 土地利用及土壤类型编码及面积表  
Table1 The codes and proportions of land use and soil types

| 代码 | 编码   | 土地利用 / 土壤类型 | 面积 / km <sup>2</sup> | 占总面积比例 / % |
|----|------|-------------|----------------------|------------|
| 1  | FRST | 林地          | 5.26                 | 31.51      |
| 2  | ORCD | 园地          | 5.12                 | 30.64      |
| 3  | RNGB | 灌木林         | 3.8                  | 22.75      |
| 4  | RICE | 水田          | 0.9                  | 5.36       |
| 5  | AGRL | 坡耕地         | 0.78                 | 4.67       |
| 6  | URLD | 住宅          | 0.51                 | 3.03       |
| 7  | AGRR | 梯地          | 0.3                  | 1.82       |
| 8  | WATR | 水域          | 0.03                 | 0.2        |
| 9  | BARR | 裸地          | 0.03                 | 0.02       |
| 1  | ZZT  | 中性紫色土       | 5.03                 | 30.14      |
| 2  | SZT  | 酸性紫色土       | 4.9                  | 29.32      |
| 3  | SDT  | 水稻土         | 3.68                 | 22.04      |
| 4  | HRT  | 黄壤          | 1.6                  | 9.57       |
| 5  | SZT  | 石灰性紫色土      | 1.49                 | 8.94       |

1.2.3 气象和水文数据

气象数据来自中国气象数据网(<http://data.cma.cn>),用距流域较近的巴东、兴山、秭归气象站 1989~2015 年数据计算气象参数。王家桥流域卡口站 1989~

2010 年月经流数据来自秭归县水土保持局。

1.3 模型检验方法

运用 SWAT-CUP 率定模型,采用拉丁超立方采样法进行参数全局敏感性分析,用连续不确定性算法(SUFI-2)率定敏感参数。用 Nash-Sutcliffe 效率系数(*Ens*)、决定系数(*R*<sup>2</sup>)和相对误差(*PBIAS*)评价模拟精度<sup>[11]</sup>。*Ens* 接近 1,*R*<sup>2</sup> 接近 1,*PBIAS* 接近 0,模拟值与实测值越吻合。分别利用 1990~2005 年和 2006~2010 年径流量率定和验证模型。率定期与验证期均设置 1 年预热期以提高模拟精度。

1.4 情景设置

1.4.1 土地利用情景设置

在现有土地利用基础上,根据《中华人民共和国水土保持法》禁止在 25°陡坡地开垦种植农作物,结合流域发展情况,设置扩大耕地、退耕还林和发展经济林三种土地利用情景(荒地、梯地面积较小且易于改造,在情景设置时一同转化为所要设置的用地类型),见表 2。

1.4.2 气候变化情景设置

据陈鲜艳<sup>[12]</sup>等运用区域模式 RegCM3 预估 RCP2.6(低端路径)、RCP4.5(稳定路径)、RCP8.5(高端路径)三种浓度路径所得 2011~2050 年库区降水及温度变化情况,模拟流域径流量。图 1 是 RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5 浓度路径下 2010~2050 年降水及气温较 1971~2000 年距平百分率,据此设置气候变化情景 C1、C2、C3。

1.4.3 气候与土地利用变化综合情景设置

将土地利用与气候变化情景相结合,设置表 3 情景,模拟未来不同温室气体排放背景下不同土地利用模式的产流情况。

2 结果与分析

2.1 SWAT 模型建立及检验

2.1.1 SWAT 模型的建立

建立流域 SWAT 模型,据敏感性分析得敏感参数

表2 土地利用情景设置  
Table2 Scenario setting of land use

| 情景          | 土地利用情景设置说明   |
|-------------|--|
| 基准情景(S0)    | 利用域现有土地利用情况建立基准情景  |
| 扩大耕地情景(L1)  | 将流域内 25°以下的林地和灌木林地全部设置为耕地(因因果林地具有一定生态和经济价值,故不作改变),保留其他用地类型不变           |
| 退耕还林情景(L2)  | 将流域内 5°以上耕地全部设置为林地,由于耕地、梯地所占面积较小,所以将 25°以上其他用地类型均设置为林地,保留居民建设用地和水域水田不变 |
| 发展经济林情景(L3) | 将流域内灌木林和林地同时转化为经果林(因耕地面积较小故不作改变)保留其他用地类型不变                             |

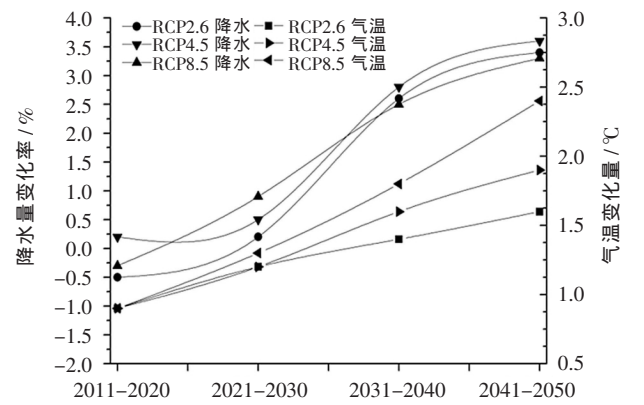


图1 2010~2050年气候变化情况  
Fig.1 The climate change during 2010-2050

表3 土地利用与气候变化综合情景设置

Table3 The combined scenario setting of land use and climate change

| 情景          | RCP2.6 情景<br>(C1) | RCP4.5 情景<br>(C2) | RCP8.5 情景<br>(C3) |
|-------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 扩大耕地情景(L1)  | S1                | S2                | S3                |
| 退耕还林情景(L2)  | S4                | S5                | S6                |
| 发展经济林情景(L3) | S7                | S8                | S9                |

为土壤湿润条件下SCS径流曲线系数(CN2),土壤蒸发补偿系数(ESCO),土壤容重(SOL\_BD)等(见表4)。其中CN2最敏感,它综合反映了前期土壤水分和土壤的渗透特性,是影响水文响应单元内径流的主要参数。ESCO通过调整土壤中因毛细作用等因素对土壤蒸发量的影响来改变径流量,土壤实际蒸发量随其值下降而上升,减少产流量<sup>[13]</sup>。最大冠层截留量能显著影响下

表4 径流模拟敏感参数率定结果

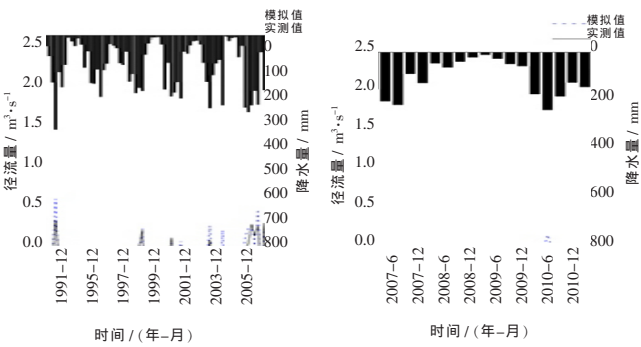
Table4 Sensitive parameters of runoff simulation

| 参数名称          | 敏感性排序 | t-Stat  | P-Value | 最佳取值    |
|---------------|-------|---------|---------|---------|
| R_CN2.mgt     | 1     | -79.300 | 0       | 0.219   |
| V_ESCO.hru    | 2     | -13.829 | 0       | 0.522   |
| R_SOL_BD.sol  | 3     | -9.324  | 0       | -0.162  |
| V_CANMX.hru   | 4     | 6.403   | 0       | 0.347   |
| R_SOL_K.sol   | 5     | -2.868  | 0.004   | 0.750   |
| R_SOL_AWC.sol | 6     | 1.876   | 0.061   | 0.430   |
| V_CH_N2.rte   | 7     | 0.426   | 0.671   | 0.275   |
| V_GW_REVAP.gw | 8     | -0.357  | 0.721   | 0.019   |
| V_GW_DELAY.gw | 9     | 0.348   | 0.728   | 198.386 |
| V_ALPHA_BF.gw | 10    | -0.088  | 0.930   | 0.795   |
| V_EPCO.hru    | 11    | -0.081  | 0.935   | 0.308   |

注:V\_即现有参数值被给定值取代;R\_即现有参数值乘(1+给定值)。

渗、地表径流及蒸散发。流域土壤主要由紫色砂页岩发育而来,渗透性好,土壤容重经率定后为1.2~1.3<sup>[13]</sup>。

2.1.2 模型验证



(a)率定期 (b)验证期

图2 月径流率定期和验证期模拟结果

Fig.2 The calibration and validation results of SWAT model for monthly runoff simulation

图2所示流域月径流模拟值与实测值波动趋势一致,峰值拟合较合理。SWAT模拟一般以 $Ens>0.5$ ,  $R^2>0.6$ ,  $|PBIAS|\leq 25\%$ 为标准<sup>[14]</sup>表示模拟结果较满意。率定期和验证期的Nash-Sutcliffe效率系数分别为0.76和0.73,决定系数分别为0.75和0.73,相对误差分别为-12.0%和22.0%。率定期和验证期模拟值与实测值拟合良好,参数率定后模型的精度达到要求,模型可用作后续的研究与应用。

2.2 情景模拟结果分析

2.2.1 土地利用情景对径流的影响

表5 不同土地利用及气候变化情景年均径流量

Table5 Annual average runoff of all scenarios of land use and climate change

| 情景 | 年均径流量<br>/m³·s⁻¹ | 较S0变化率<br>/% | 情景 | 年均径流量<br>/m³·s⁻¹ | 较S0变化率<br>/% |
|----|------------------|--------------|----|------------------|--------------|
| S0 | 1.75             | 0            | C1 | 1.87             | 7.13%        |
| L1 | 2.02             | 15.13%       | C2 | 1.89             | 7.78%        |
| L2 | 1.51             | -13.99%      | C3 | 1.91             | 8.91%        |
| L3 | 2.16             | 23.22%       |    |                  |              |

由表5可见,扩大耕地情景年均径流量较基准情景增大15.13%。主要由于耕地作物冠层小,截留迟滞降水作用较差。该流域产流研究显示<sup>[15]</sup>,较大雨强坡耕地地表径流产生迅速且产流时间随降雨强度增大而缩短;坡耕地壤中流径流系数随降雨强度增加而减

小,即大部分降水直接形成地表径流。此外,耕地不利于降水入渗,虽因耕作和外源有机质输入形成一定的土壤孔隙结构<sup>[16]</sup>,但作物收获后地表裸露,雨水打击地表造成土壤板结。加之当地玉米、红薯等作物在表层土浅耕,使表层土壤颗粒变细小,土壤通气透水性减弱。因此,扩大耕地使流域径流量增大。退耕还林情景年均径流量减少 13.99%。林地具较大冠幅和复杂的冠层,截持降水能力强,林木枝干可迟滞降水,使部分降水变成水蒸气。林下植被及死地被物均可截留降水,地表径流随凋落物层盖度增加显著降低。且退耕还林能显著改善土壤物理性质。植被生长加快紫色土熟化过程,促使土壤有机质含量增加,形成较好土壤结构<sup>[17]</sup>。林地地下根系十分发达,根系大量生长与穿插使土壤更疏松,土壤孔隙度增加,容重减小,通透性增强<sup>[17]</sup>。此外,林木根系可吸持水源,有效减少地表径流。因此退耕还林可有效减少流域地表径流量,调节流域的水量分配和平衡。发展经济林情景径流量增大 23.22%。小流域的自然环境和经济政策促使当地大力发展柑橘种植,柑橘园内株间存在株行距<sup>[17]</sup>使部分降水不能有效被林冠截留,株行距间地表相对易受到降水的直接冲刷和侵蚀,导致径流量相对较大。在规划中应与板栗林、茶树林等其他适宜种植且能保持水土树种搭配,既能保证当地经济发展又兼顾环境保护。该情景将 86.70 %的用地设置为经济林,在流域林地规划时要避免林分单一,造成流域水土资源不均衡。

退耕还林能有效减少流域径流量,扩大耕地和发展经济林均会增大径流量,且扩大经济林使径流量增加更显著。经济林造成径流量过大,与林分特征有关,也因该情景造林面积过大。可见土地利用规划既要考虑当地经济发展需求,又需兼顾生态环境保护,应坚持林草保护政策<sup>[18]</sup>。S0、L1、L2 和 L3 情景径流量年内分配系数分别为 0.711,0.858,0.537,0.846,L2 较其他情景年内分配更均衡,说明退耕还林对年内丰枯径流有调蓄作用,而扩大耕地和发展经济林均会增加径流量分配的不均匀性,对流域水量调配不利。在流域水土资源及经济发展管理和规划中应合理配置用地类型,在发展粮食经济作物的同时,适当退耕还林还草。

2.2.2 气候变化情景对径流的影响

由表 5 可见,RCP2.6 情景下,年均径流量相对于基准期增加 7.13%。径流量呈现略微增加的趋势,说明低端排放路径下执行的最严厉的气候政策,采用生物

能源和碳捕获技术以达到减排效果有利于流域水资源的稳定<sup>[1]</sup>。RCP4.5 情景下,年均径流量增加 7.78%。稳定排放路径介于低端和高端排放路径之间,是一种较为稳定的发展情况。RCP8.5 情景年均径流量变化率为 8.91%,径流量增加较明显。说明在缺乏气候政策干预,能源消耗较高,温室气体排放持续增长的情景下,流域的水资源平衡将受到一定影响<sup>[1]</sup>。

年均径流量在不同温室气体和硫酸盐气溶胶的排放情况下均呈增加趋势,增幅由大到小依次为 C3>C2>C1,说明高端路径情景径流量对气候变化的响应较强烈,低端路径和稳定路径对径流的影响较小。各情景月均径流量差异不大,C1、C2 和 C3 情景径流量年内不均匀系数分别为 0.855,0.857,0.861。气候变化影响下径流量年内分配趋向于更不均衡,研究表明三峡工程中下游流域汛期极端降水呈现向 6 月集中的趋势,长江流域产生遭遇性洪水可能性增大<sup>[1]</sup>。同时,汛期发生洪涝及枯水期发生干旱的频率可能性加大,强降水、强对流天气等极端事件也将增加<sup>[1]</sup>。面对气候变化,制定严格的减排政策更利于流域水资源平衡。

2.2.3 土地利用和气候变化综合情景对径流的影响

土地利用和气候变化综合影响下年均径流量变化均呈增加趋势(见表 6)。由图 3 得不同土地利用情

表6 土地利用和气候变化综合情景年均径流量  
Table6 The annual average runoff of the combined senario of land use and climate change

| 情景 | 年均径流量 / m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> | 情景 | 年均径流量 / m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> |
|----|---|----|---|
| S1 | 2.10                                    | S6 | 1.94                                    |
| S2 | 2.09                                    | S7 | 2.20                                    |
| S3 | 2.12                                    | S8 | 2.21                                    |
| S4 | 1.91                                    | S9 | 2.21                                    |
| S5 | 1.92                                    |    |   |

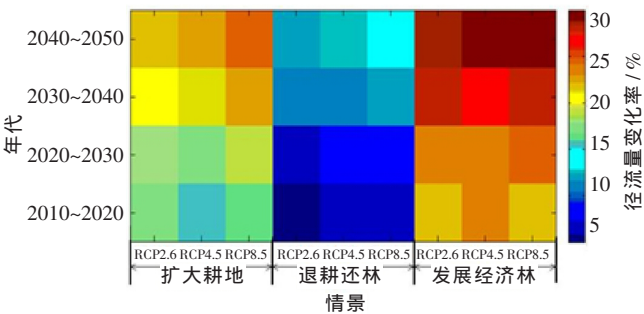


图3 综合情景年均径流量变化率

Fig.3 The change rates of annual average runoff of the combined senario



况径流量变化率有明显分级,扩大耕地、退耕还林和发展经济林情景下径流量变化率分别为 15.79%~24.54%、5.67%~13.54%、21.69%~29.96%。同种土地利用情景下,各气候情景存在差异,整体上 RCP8.5 情景变化率更大。随年份的增长未来径流量变化率在 2020~2030 年增长最显著,2030 年左右我国基本完成工业化与城镇化,为二氧化碳排放达到峰值提供了条件<sup>[1]</sup>。随温室气体排放浓度增加,径流量呈现较大增幅。但目前对于峰值研究也存在不同结论<sup>[1]</sup>,区域发展方式、政策导向和科技创新等都对峰值时间和水平带来不确定性。

各综合情景径流年内分配系数为 0.636~0.942,径流量年内分配不均衡。径流量年内变化主要受土地利用因素影响,退耕还林情景径流量年内分配系数为 0.636~0.749,较其他情景更均衡,说明林地生长可逐渐发挥对降水的分配和调节作用。其他情景径流不均匀系数较大且随年份增加呈增加趋势,扩大耕地和发展经济林对流域水资源调配不利。

对土地利用和气候变化两驱动因子进行双因素方差分析(见表 7),得出土地利用和气候变化对径流量存在显著影响,且土地利用因素更显著。在组合情景下两者交互作用无显著的附加影响。进一步控制土地利用、气候变化及其交互作用这三个因素,得年代变化对径流量影响不显著。

表7 径流影响因素方差分析表  
Table7 Variance analysis of influencing factors of runoff

| 方差来源        | 平方和     | 自由度   | 平均平方和   | F 值     | 显著性     |
|-------------|---------|-------|---------|---------|---------|
| 土地利用        | 389.691 | 2.000 | 194.845 | 118.598 | 0.001** |
| 气候变化        | 14.712  | 2.000 | 7.356   | 4.477   | 0.012** |
| 土地利用 * 气候变化 | 6.663   | 4.000 | 1.666   | 1.014   | 0.400   |
| 年代变化        | 4.834   | 1.000 | 4.834   | 2.943   | 0.087   |

注:\*\* 为显著。

3 结论

本文建立王家桥流域 SWAT 模型,并在该流域显示了较好的适用性。模拟土地利用 L1、L2、L3 情景年均径流量变化率为 15.13%、-13.99%、23.22%,退耕还林能减少流域径流量,扩大耕地和发展经济林均导致流域径流量增加。气候变化 C1、C2、C3 情景年均径流量变化率为 7.13%、7.78%、8.91%。未来气候变化使径流量增加,增幅随温室气体和硫酸盐气溶胶排放情

况增大而增大。两驱动因素影响下年均径流量变化率为 9.08%~26.12%,2030 年左右径流量增幅明显。退耕还林能调蓄年内丰枯径流使其均衡分配;扩大耕地和发展经济林会增加径流量分配不均匀性,不利于流域水量调配。气候变化情景径流量年内分配趋于更不均衡。年径流量受土地利用和气候变化的显著影响,其中土地利用变化的影响更显著。未来不同气候变化背景下,库区小流域可通过合理配置土地利用等措施调节水资源平衡。统筹协调好发展、适应、减缓之间的关系,保证经济增长的同时,兼顾生态环境的保护将成为未来小流域治理的关键所在。

参考文献:

[1] 《第三次气候变化国家评估报告》编写委员会.第三次气候变化国家评估报告[M].北京:科学出版社,2015: 1-450.(Compilation Committee of The Third National Assessment Report on Climate Change.The Third National Assessment Report on Climate Change [M].Beijing: Science Press,2015:1-450.(in Chinese))

[2] Chen J, Gao C, Zeng X F, et al. Assessing changes of river discharge under global warming of 1.5° C and 2° C in the upper reaches of the Yangtze River basin: approach by using multiple-GCMs and hydrological models [J]. Quaternary International, 2017,428(1):1-11.

[3] 徐宗学,刘浏.气候变化影响下的流域水循环:以长江和黄河典型流域为例[J].气象科技进展,2016,6(3): 123-133.(XU Zongxue,LIU Liu. Impact of climate change on hydrological cycle: case studies in the Yangtze River and Yellow River basins[J].Advances in Meteorological Science and Technology,2016,6(3): 123-133.(in Chinese))

[4] 黄金龙,苏布达,朱娴韵,等.CMIP5 多模式集合对南亚印度河流域气候变化的模拟与预估[J].冰川冻土,2015,37(2):297-307.(HUANG Jinlong,SU Buda,ZHU Xianyun,et al. Simulating and estimating the climate change in the Indus River basin, South Asia, based on CMIP5 multi-model ensemble[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2015,37(2): 297-307.(in Chinese))

[5] Zuo D,Xu Z,Yao W, et al.Assessing the effects of changes in land use and climate on runoff and sediment yields from a watershed in the Loess Plateau of China [J].Science of the Total Environment, 2016,544(15): 238-250.

[6] Zhang J X, Liu Z J, Sun X X. Changing landscape in the Three Gorges reservoir area of Yangtze River from 1977 to 2005:land use/land cover, vegetation cover changes estimated using multi-source satellite data [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation,2009,11(6):403-412.

[7] 王鹏,吴炳方,张磊,等.三峡水库建设期秭归县土地利用时空变化特征分析[J].农业工程学报,2010,26(6): 302- 309.(WANG Peng,WU Bingfang,ZHANG Lei,et al. Spatial-temporal changes of land use

- and its characteristics in Zigui County under the period of TG dam project [J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010,26(6):302– 309.(in Chinese))
- [8] 孙瑞, 张雪芹. 基于 SWAT 模型的流域径流模拟研究进展[J]. 水文, 2010, 30(3):28–32.(SUN Rui, ZHANG Xueqin. Progress in application of watershed runoff simulation based on SWAT [J].Journal of China Hydrology, 2010,30(3):28–32. (in Chinese))
- [9] 刘伟, 安伟, 杨敏, 等. 基于 SWAT 模型的三峡库区大宁河流域产流产沙模拟及土壤侵蚀研究[J]. 水土保持学报, 2016, 30(4):49–56.(LIU Wei, AN Wei, YANG Min, et al. Runoff and sediment yield modeling and soil erosion analysis in Daning River watershed in Three Gorges reservoir region based on SWAT Model [J].Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(4):49–56.(in Chinese))
- [10] 陈兵. 基于 SWAT 模型的沿渡河流域气候及土地利用变化的水文响应研究 [D]. 武汉: 华中师范大学, 2014.(CHEN Bing. Hydrological Response to Climate Change and LUCC Based on SWAT Model in Yanduhe Basin [D].Wuhan: Central China Normal University, 2014.(in Chinese))
- [11] Yang J, Reichert P, Abbaspour K C, et al. Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT application to the Chaohe basin in China[J].Journal of Hydrology, 2008,358(1–2):1–23.
- [12] 陈鲜艳, 高迎新, 李泽春, 等. 三峡气候[M]. 北京: 气象出版社, 2015:99–110. (CHEN Xianyan, GAO Yingxin, LI Zechun, et al. Climate of Three Gorges[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2015:99–110. (in Chinese))
- [13] 程冬兵. 三峡库区等高绿篱坡地农业系统紫色土水分特性研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2008.(CHENG Dongbing. Study on the Purple Soil Water Properties under Contour Hedgerow–intercropping System in the Three Gorges Reservoir Area[D].Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2008.(in Chinese))
- [14] Moriasi D N, Arnold J G, Liew M W V, et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations[J].Transactions of the ASABE, 2007, 50 (3):885–900.
- [15] 徐勤学. 紫色土区主要农业活动对坡面土壤侵蚀的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2011.(XU Qinxue. Effects of Agricultural Activities on Hill Slope Soil Erosion of Purple Soil[D].Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2011.(in Chinese))
- [16] 吴东. 三峡库区兰陵溪小流域土地利用变化及其养分流失控制[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2016. (WU Dong. Land Use Changes and Its Control Effect of Nutrient Loss in Lanlingxi Watershed of the Three Gorges Reservoir Area [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2016.(in Chinese))
- [17] 王洪杰, 李宪文, 史学正, 等. 四川紫色土区小流域土壤养分流失初步研究[J]. 土壤通报, 2002, 33(6):441–444.(WANG Hongjie, LI Xianwen, SHI Xuezheng, et al. Preliminary study on soil nutrient loss of small watershed in purple soil region of Sichuan [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2002, 33(6):441–444.(in Chinese))
- [18] 王亮, 高瑞忠, 刘玉才, 等. 气候变化和人类活动对滦河流域内蒙段河川径流的影响分析[J]. 水文, 2014, 34(3):70–79.(WANG Liang, GAO Ruizhong, LIU Yucan, et al. Impact of climate change and human activities on runoff in Neimeng reach of Luanhe River[J]. Journal of China Hydrology, 2014, 34(3):70–79.(in Chinese))

## Impacts of Land Use and Climate Change on Runoff in Wangjiaqiao Watershed

QIN Wenjing, WANG Yunqi, WANG Bin, YANG Wentao, WANG Yujie

(1. Chongqing Jinyun Forest Ecological Station, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Beijing Soil and Water Conservation Engineering Technology Research Center, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The typical Wangjiaqiao watershed within the Three Gorges Reservoir area was selected as case study to investigate the variation of runoff under the changes of land use, climate and the combination of them by using the soil and water assessment tool (SWAT) for simulation. The results show that the rates of annual average runoff change by 15.13%, –13.99% and 23.22% under the scenarios of arable land expansion, returning farmland to forest and economic forest development respectively. Furthermore, returning farmland to forest can regulate and reduce runoff. Under the climate scenarios of RCP 2.6, RCP 4.5 and RCP 8.5, the change rates of runoff are 7.13%, 7.78% and 8.91% respectively, and the runoff increase with the future emission of greenhouse gases and sulphate aerosols. The annual average runoff increase greatly under the scenario of the combination of them, especially around 2030. In addition, the variance analysis has found that the influence of land use are more significant than that of climate change on runoff. It is advisable that land use in the watershed can be allocated reasonably to control water balance in the future.

**Key words:** land use; climate change; runoff; SWAT model