

DOI:10. 3880/j. issn. 1004 - 6933. 2019. 05. 008

若尔盖湿地流域径流变化及其对气候变化的响应

赵娜娜^{1,2}, 王贺年², 张贝贝³, 刘佳¹, 徐卫刚², 于一雷²

- (1. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;
2. 中国林科院湿地研究所湿地生态功能与恢复北京市重点实验室, 北京 100091;
3. 环境保护部环境工程评估中心, 北京 100012)

摘要:为探索未来气候变化情景下若尔盖高寒湿地水文过程和水循环演变规律,利用分布式水文模型,研究 2020—2050 年不同气候变化情景下若尔盖湿地流域径流变化趋势以及气候变化对湿地径流的影响。结果表明:在未来气候变化情景下,若尔盖湿地流域径流呈减少趋势,玛曲站径流减少比率最大,其次为若尔盖站,最后为唐克站;非汛期径流量减少幅度明显高于汛期,若尔盖湿地 2020—2050 年非汛期径流在未来气候变化情景下径流减少比率大部分在 25% 以上。非汛期径流的锐减可能会进一步加剧若尔盖湿地的退化和萎缩,导致黄河中下游区域的可利用水资源量减少。
关键词:气候变化;径流;SWAT 模型;气候情景;若尔盖湿地

中图分类号:TV122 **文献标志码:**A **文章编号:**1004 - 6933(2019)05 - 0040 - 08

Runoff variation in Zoige Wetland Basin and its response to climate change // ZHAO Nana^{1,2}, WANG Henian², ZHANG Beibei³, LIU Jia¹, XU Weigang², YU Yilei² (1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Beijing Key Laboratory of Wetland Services and Restoration, Institute of Wetland Research, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 3. Environmental Engineering Assessment Center, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100012, China)

Abstract: To explore the hydrological process and water cycle evolution of Zoige Wetland under future climate change scenarios, a distributed hydrological model was used to study the runoff variation trend of Zoige Wetland Basin under different climate change scenarios from 2020 to 2050 and the impact of climate change on wetland runoff. The results show that under the future climate change scenarios, runoff in Zoige Wetland Basin is decreasing, and the runoff reduction ratio at Maqu Station is the largest, followed by Zoige Station and Tangke Station. The reduction of runoff in non-flood season is obviously higher than that in flood season. The reduction ratio of runoff in non-flood season of Zoige Wetland from 2020 to 2050 is more than 25% under future climate change scenarios. The sharp decrease of runoff in non-flood season may further aggravate the degradation and shrinkage of Zoige Wetland, resulting in the reduction of available water resources in the middle and lower reaches of the Yellow River.

Key words: climate change; runoff; SWAT model; climate change scenario; Zoige Wetland

全球气候变化影响流域水循环过程,而湿地由于独特复杂的生态系统特性,其水文循环机理对全球气候变化具有更高的敏感性。若尔盖高原湿地位于青藏高原东北部,属于典型的高寒沼泽湿地生态系统,同时也是黄河上游最重要的水源涵养区,素有“高原水塔”之称,其水循环过程对气候变化响应更为敏感^[1-3]。近年来,由于气候变化和人类活动的影响,若尔盖湿地面临一系列问题,如水位下降、湿地快速萎缩退化、湿地沙化、生态功能减弱以及生物多样性减少等^[3-9]。湿地水文过程和水循环机理发生

基金项目:国家自然科学基金(51609243, 51822906);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(CAFINT2015K06);中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室开放研究基金(IWHR-SKL-201612p);国家重点研发计划(2017YFC1502405);中国水科院基本科研业务费项目(WR0145B732017);河北省水利科研项目(2015-16)

作者简介:赵娜娜(1985—),女,助理研究员,博士,主要从事水文及水资源、湿地生态水文学研究。E-mail:annazhao2009@163.com

通信作者:于一雷,副研究员。E-mail:yuyilei1222@126.com

了变化,湿地水源涵养能力削弱,对区域乃至下游流域水资源管理和社会经济发展产生深远影响。

气候变化是导致湿地退化的重要原因之一。20 世纪 90 年代后黄河源区气温明显上升,区域蒸散发量增加,径流量明显减少^[10]。Niu 等^[11]通过遥感影像分析了中国近年来湿地的变化趋势,发现 1978—2008 年中国湿地减少了 33%,其中 70% 是由土地复垦造成的;1978—1990 年青藏高原湿地减少了 66%,而在 1990—2008 年青藏高原湿地减少率降低为 6%,这主要是因为高原区域冰川和多年冻土消融新生成了大约 6 000 km² 的湿地面积。由于区域气候变化,气温上升,20 世纪 90 年代后若尔盖湿地蒸发皿蒸发量呈现出明显的上升趋势^[12],实际蒸散发也呈缓慢增加趋势^[13],Liu 等^[14]分析了黄河流域的年蒸发皿蒸发量变化规律,认为若尔盖高原湿地蒸发量增加与太阳辐射的变化密切相关。陈利群等^[15]则通过分布式水文模型对黄河源区气候变化和土地覆被变化对径流的影响进行分析,发现气候变化是径流减少的主要原因。此外,人类活动也必然会影响到湿地流域的水文过程。Li 等^[16]分析了若尔盖湿地气候变化和人类活动对湿地径流的贡献率,结果表明气候变化对湿地径流的影响大概在 55%~64%,人类活动影响的贡献约为 36%~45%,气候变化占主导地位。而 Li 等^[17]也采用分布式水文模型进行研究,发现影响若尔盖湿地水量减少最主要的因素为归一化植被指数,其次,区域地质断层也对湿地水量损失有着不可忽视的作用。对未来气候变化的影响和预测方面的研究主要集中在不同气候模式、不同情景下的径流变化。郝振纯等^[10]分析了不同气候模式下未来 100 年黄河河源区水循环对气候变化的响应,发现不同模式下黄河河源区的径流都有不同程度的下降。张永勇等^[18]利用 SWAT 水文模型分析了 2010—2039 年黄河源区径流变化,发现径流量与现状年相比明显减少。其他学者也得出了相似的结论^[19-20]。目前,国内外对变化环境下高原寒区沼泽湿地水文过程的研究机理尚不完善,特别是对于典型高寒沼泽湿地水文循环各要素的基本特征及其对气候变化的响应尚不十分清楚。因此,开展青藏高原若尔盖湿地水文过程变化及对气候变化的响应等研究,对明晰高寒湿地水文循环机理和青藏高原水循环演变机理,以及对区域水资源管理等具有十分重要的意义。

1 数据与方法

1.1 研究区域概况

若尔盖高原湿地位于青藏高原的东北隅,是青

藏高原湿地的典型代表,也是世界上海拔最高、面积最大的高原泥炭沼泽的主要分布区之一。平均海拔 3 500 m,沼泽总面积约 4 903 km²,隶属四川省若尔盖县、红原县、阿坝县以及甘肃省的玛曲县和碌曲县^[21]。若尔盖高原湿地为起伏平缓的丘状高原区,主要地貌类型有低山、丘陵、阶地、河漫滩、宽谷和湖群洼地等^[4]。湿地内的主要河流为黄河及其支流黑河和白河(图 1),黑河和白河自南向北流入黄河,为黄河上游流量较大、流速较小而水位十分平稳的两条支流。同时由于黄河和支流的改道,区域内小河流和湖泊星罗棋布,主要的湖泊有哈丘湖、错拉坚湖和花湖。

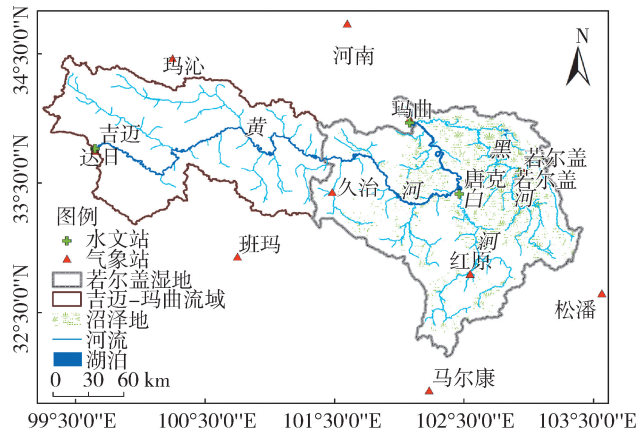


图 1 若尔盖湿地水系分布概况

研究区域的气候为大陆性高原气候,寒冷湿润,霜冻期长,日温差大。多年平均气温 1℃ 左右,年日照时数约 25 000 h,全年降水量约 600~800 mm,雨季主要分布在 5—10 月,约占全年降水量的 90%^[13]。区内植物以沼泽植被和草甸植被为主,优势种有木里苔草 (*Carexmuliensis*)、乌拉苔草 (*Carexmeyeriana*) 和藏蒿草 (*Kobresiatibetica*) 等^[22]。研究区以吉迈站作为流域入口,玛曲站作为流域出口,流域总面积约 41 086 km²。流域水系分布及湿地沼泽分布见图 1。

1.2 数据来源

收集的基础资料包括:DEM(1:24 000)、土地利用(1:1 000 000)、土壤类型(1:4 000 000)、河网水系、植被、土壤、气象站点、水文站等 GIS 数据;1960—2011 年达日、久治、红原、若尔盖、玛曲、马尔康、松潘、河南、班玛和玛沁等 10 个气象站点的日降水、最高气温、最低气温、风速、相对湿度等气象资料,玛曲站(1964—2011 年)、唐克站(1990—2011 年)以及若尔盖站(1990—2011 年)的月径流过程。研究区域内的气象站网和水文站分布见图 1。此外,为了分析未来不同气候变化情景下湿地径流的变化,还收集了 HadGEM2-ES 气候模式下高排放情

景 RCP8.5、中排放情景 RCP4.5 和低排放情景 RCP2.6 3 种情景的日气象资料。其中,RCP8.5 为最高温室气体排放情景,辐射强度达到 8.5 W/m^2 ,2100 年后 CO_2 质量浓度达到 $1.37 \times 10^{-3}\text{ mg/L}$;RCP4.5 为低端排放基准和中等减缓措施,辐射强度稳定在 4.5 W/m^2 ,2100 年后 CO_2 质量浓度稳定在 $6.5 \times 10^{-4}\text{ mg/L}$;RCP2.6 为最低端的排放情景,采取严格的限排等应对气候变化政策。全球平均温度上升限制在 2°C 以内,辐射强度在 2100 年前达到峰值,到 2100 年下降至 2.6 W/m^2 , CO_2 质量浓度峰值约为 $4.9 \times 10^{-4}\text{ mg/L}$,之后呈下降趋势,2100 年 CO_2 质量浓度 $4.0 \times 10^{-4}\text{ mg/L}$ ^[23]。

1.3 模型构建

选择 SWAT(soil and water assessment tool)模型进行区域径流模拟和预测。SWAT 模型是具有一定物理机制的半分布式水文模型,模型可以预测复杂流域内不同的气候条件、土地覆被变化等对水量、水质以及作物产量等的长期影响^[24]。此外,该模型也考虑了融雪和冻土对水文循环的影响^[25],模型也在许多国家的寒冷地区得以广泛应用^[26-27]。在中国,SWAT 模型在黑河^[28]、黄河源区^[29]、三江源区^[18-19]等寒冷区域的径流模拟、气候变化等影响评估方面取得了很好的模拟和应用效果。这说明 SWAT 模型可以用来模拟和预测寒冷区域的降雨径流过程,分析区域水循环机理和评估气候变化对水循环过程的影响。

由于缺乏若尔盖湿地入口处水文站的径流观测资料,本研究在构建模型时以湿地上游吉迈站为入口径流观测站,以玛曲站为出口(称为吉迈-玛曲流域),根据研究区的 DEM、土壤和土地利用分布,进行流域划分,吉迈-玛曲流域范围见图 1,流域面积 $41\,086\text{ km}^2$ 。若尔盖湿地流域则主要是由以若尔盖水文站作为控制站的黑河流域($7\,848\text{ km}^2$)、以唐克站作为控制站的白河流域($5\,478\text{ km}^2$)以及玛曲流域

($10\,579\text{ km}^2$)组成,流域面积 $23\,905\text{ km}^2$ (图 1)。吉迈-玛曲流域总共划分了 237 个子流域,水文响应单元的划分阈值为 20% 的土地利用类型和 20% 的土壤类型。

2 结果分析

2.1 参数敏感性分析

SWAT 模型参数较多,本研究选取对湿地径流过程影响比较大的 13 个参数,用 SWAT-CUP 中的 SUFI-2 优化算法进行参数率定和敏感性分析^[30-31]。通过 5 次迭代运算(每次运行 50 次)获得模拟结果。在 SWAT-CUP 中,SUFI-2 算法采用的全局敏感性分析,参数敏感性主要取决于拉丁超立方生产的参数与目标函数值之间的多元回归系数^[32]。 T 检验用来确定每个参数的敏感性, t 绝对值越大,参数越敏感;而 P 值则决定了敏感性的显著性, P 值越接近于 0,参数敏感性越显著。表 1 为模拟中一部分参数的敏感性分析和率定结果。由表 1 看出,若尔盖湿地流域径流过程模拟中,基流 α 因子(V_ALPHA_BF)最为敏感,其次分别为土层有效含水量(R_SOL_AWC)、产生回归流所需的浅层含水层水位阈值(V_GWQMN)、土壤密度(R_SOL_BD)、河道曼宁系数(V_CH_N2)、地下水 revap 系数(V_GW_REVAP)和土壤蒸散发补偿因子(V_ESCO),这 7 个参数在模型中对该区域的径流模拟过程较为敏感。

2.2 SWAT 模型率定及验证

根据实测水文数据系列,选取玛曲站、唐克站和若尔盖站 3 个水文站的月径流数据系列进行参数的校准和率定,其中唐克站位于白河流域,若尔盖站位于黑河流域,玛曲站位于黄河主干流。由于唐克站和若尔盖站建站时间比较短,资料系列相对较短,主要以玛曲站资料为主对 SWAT 模型进行率定和验证。唐克站和若尔盖站校准期为 1990—2000 年,验证期为 2001—2011 年;玛曲站校准期为 1964—1985

表 1 参数敏感性分析和率定结果

参数名称	物理意义	单位	t	P	最优取值范围	最优值	敏感性排序
V_ALPHA_BF	基流 α 因子	d	5.47	0.00	-0.19 ~ 0.61	0.52	1
R_SOL_AWC	土层有效含水量	mm/mm	2.79	0.01	-0.50 ~ 0.11	-0.28	2
V_GWQMN	产生回归流所需的浅层含水层水位阈值	mm	-2.04	0.05	0.80 ~ 2.44	2.06	3
R_SOL_BD	土壤的湿密度	g/cm^3	1.94	0.06	-0.16 ~ 0.54	0.54	4
V_CH_N2	主河道的曼宁系数		1.90	0.07	-0.12 ~ 0.16	0.05	5
V_GW_REVAP	地下水 revap 系数		-1.70	0.09	-0.06 ~ 0.11	-0.05	6
V_ESCO	土壤蒸散发补偿因子		1.63	0.10	0.88 ~ 1.04	0.94	7
V_ALPHA_BNK	河岸调蓄的基流 α 因子	d	1.55	0.13	0.38 ~ 1.16	0.61	8
R_SOL_K	饱和和渗透系数	mm/h	1.40	0.17	-0.67 ~ 0.318	-0.03	9
V_CH_K2	主河道冲击物的有效渗透系数	mm/h	1.03	0.31	52.67 ~ 149.84	135.26	10
R_CN2	初始 SCS 径流曲线数		0.71	0.48	-0.25 ~ 0.05	0.01	11
V_GW_DELAY	地下水的延迟时间		0.52	0.60	232.37 ~ 642.43	293.88	12
V_SFTMP	降雪气温	$^\circ\text{C}$	-0.35	0.73	-2.68 ~ 2.48	-2.42	13

年,验证期为 1986—2011 年。在模型率定和验证过程中,选取 1964—1968 年为模型预热期,以消除初始状态的影响。

模型参数率定采用 SWAT-CUP 自动校准和人工优选结合的方式使得模型拟合度 Nash 效率系数 N_{SCE} 以及决定系数 R^2 达到最大。其中用 SWAT-CUP 进行参数校准时选择 SUFI2 优化算法。在采用 SUFI-2 优化算法进行模型参数率定时, P_{factor} 和 R_{factor} 主要用来衡量模型参数的不确定性程度^[33], 一般用 P_{factor} 接近于 1 和 R_{factor} 接近于 0 的程度来判断校准的效果。 R_{factor} 越大, P_{factor} 也会越大, 因此通常情况下, 必须两者达到平衡, 取得 P_{factor} 和 R_{factor} 的相对最佳值。通过实测数据和模拟值之间的 R^2 和 N_{SCE} 进一步量化拟合度。 N_{SCE} 的计算公式为

$$N_{SCE} = 1.0 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \tag{1}$$

式中: n 为数据系列的样本数目; O 和 S 分别为径流实测值和模拟值; $\bar{O}$ 为实测径流数据的平均值。 N_{SCE} 值和 R^2 越接近于 1, 表明模型模拟效果越好。

模型率定和验证结果见表 2。玛曲、唐克及若尔盖水文站月径流过程模拟见图 2。由表 2 和图 2 可见, 模型模拟效果较好, 模拟径流与实测径流过程基本一致, 校准期的模拟精度较高, 验证期 3 个测站的 N_{SCE} 均稍有降低, 但总体来说, 率定的参数可以用于若尔盖湿地流域的水文过程模拟。

表 2 模型率定和验证结果

水文站	校准期				验证期			
	P_{factor}	R_{factor}	R^2	N_{SCE}	P_{factor}	R_{factor}	R^2	N_{SCE}
玛 曲	0.90	0.87	0.88	0.84	0.87	0.98	0.82	0.82
唐 克	0.85	0.96	0.78	0.78	0.89	1.11	0.75	0.73
若尔盖	0.73	0.90	0.64	0.63	0.81	1.27	0.50	0.49

2.3 模型参数不确定性分析

采用 SUFI-2 优化算法进行参数优化和率定时, 同时也将模型输入数据、模型结构、参数以及观测数据等一系列不确定性因素考虑在内, 可以通过率定后的参数范围反映出来^[34]。一般情况下, 参数率定的 95% 置信水平 (95PPU) 的不确定性区间上会包含大部分观测数据。本研究采用默认的 2.5% (L95PPU) 和 97.5% (U95PPU) 上的累积分布得到 95% 置信水平上模拟结果总的不确定性, 不确定性区间见图 2 中的 95PPU。由表 2 可知, 模型校准期和验证期 P_{factor} 值在 0.73 以上, 即在 3 个水文测站中至少 73% 以上的观测数据均包含在 95% 的置信区间内。 R_{factor} 值表征 95PPU 区间的平均宽度, 在校准期 R_{factor} 为 0.87 ~ 0.96, 在验证期 R_{factor} 略高, 为

0.98 ~ 1.27, 可见验证期 95PPU 宽度较窄, 样本分布相对集中。总体上, 3 个水文站在校准期和验证期的径流模拟不确定性相对较小。

2.4 未来不同气候情景下的湿地径流变化

由于 HadGEM2-ES 模式是 GCM 模式中较为通用的一种, 能够反映全球尺度上的生态系统和水文过程变化, 并且无须进行通量修正^[35], 在我国黄河河源和上游区域的适用性较好^[36-37]。因此, 采用 HadGEM2-ES 模式下 3 种排放情景 (高排放情景 RCP8.5、中排放情景 RCP4.5 和低排放情景 RCP2.6) 的模式输出气象数据 (降水、气温、风速、辐射以及相对湿度)。通过统计降尺度方法, 将不同分辨率的气候模式输出结果, 用双线性插值方法插值到 0.5° × 0.5° 的网格上进行数据统计。在 SWAT 模型中以气象数据作为模型驱动, 基于现状土地利用情况, 对 2010—2050 年若尔盖湿地流域水文变化过程进行模拟和预测。同时采用基于 TFPW 预处理的非参数 Mann-Kendall 趋势分析方法^[38] 对径流变化趋势进行分析检验, 根据 SEN 法^[39] 计算径流变化趋势的坡度值:

$$\beta_j = \frac{x_j - x_k}{j - k} \tag{2}$$

($j = 2, 3, \dots, n; k = 2, 3, \dots, n; j > k$)

式中: β_j 为坡度值; x_j, x_k 为样本中第 j, k 个数据。取 n 个坡度值的中值为样本的坡度。 β_j 的正或负分别反映了序列的上升或下降的趋势。

图 3 为 2020—2050 年玛曲、唐克和若尔盖站在不同排放情境下的径流变化过程。可见未来气候变化的高 (RCP8.5)、中 (RCP4.5)、低 (RCP2.6) 排放情景下, 若尔盖湿地流域玛曲站、唐克站以及若尔盖站径流量在 2020—2050 年均呈下降趋势。尤其是 RCP8.5 情景下, 3 个水文站的径流量在汛期和非汛期以及年平均阶段的下降趋势更为明显 (显著水平为 0.05) (表 3)。2020—2050 年 3 种气候变化情景下, 玛曲站径流减少幅度相对较大。RCP8.5 情景下, 玛曲站非汛期的径流量减少率为 6.07 m³/a 左右 (显著水平为 0.01), 减少幅度最大, 其余情景下径流减少趋势不明显。RCP8.5 情景下, 唐克站和若尔盖站的径流则呈现明显下降趋势 (显著水平为 0.05), 汛期径流下降幅度高于非汛期; RCP2.6 和 RCP4.5 情景下, 若尔盖站和唐克站径流量变化均呈下降趋势, 但并未达到显著水平。黑河和白河作为流经若尔盖湿地的两条主要支流, 在 3 种气候变化情景下的径流均呈下降趋势。尤其是 RCP8.5 情景下两条支流的径流下降趋势明显, 说明在未来气候变化情景下, 流经若尔盖湿地的河川径流量减少, 在一定程度上也可能使得湿地补给水量减少, 导致若尔盖湿地水位下

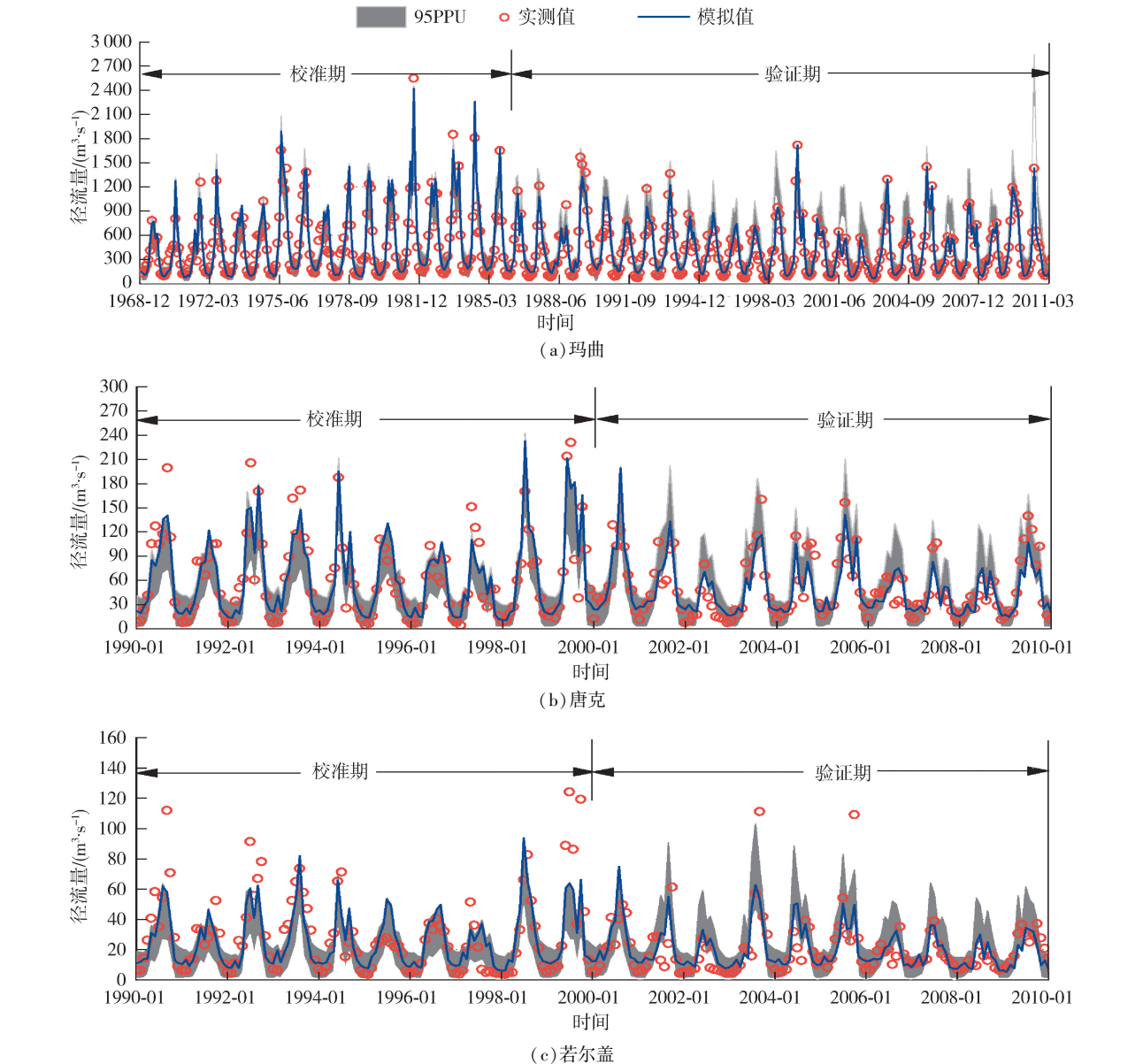


图2 玛曲、唐克及若尔盖水文站月径流过程模拟

表3 2020—2050 年不同情景下的各水文站径流变化趋势坡度值

站 点	阶 段	$\beta/(\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1})$		
		RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
玛 曲	年平均	-2.81	-0.80	-5.19
	非汛期	-2.07	-2.51	-6.07 **
	汛期	-5.78	-2.25	-2.34
唐 克	年平均	-2.53	-0.31	-1.56 *
	非汛期	-0.32	-0.49	-0.78 **
	汛期	-1.72	-1.29	-2.35 *
若尔盖	年平均	-4.71	-0.11	-0.55 *
	非汛期	-0.18	-0.20	-0.29 *
	汛期	-0.77	-0.59	-0.92 *

注：* 表示显著水平为 0.05，** 表示显著水平为 0.01。

降,破坏湿地生态系统稳定性,加剧湿地的退化和萎缩,不利于湿地保护和生态系统的稳定。

以 1990—2010 年若尔盖湿地各水文站径流量作为基准,分析若尔盖湿地未来 3 种情景下 2020s、2030s、2040s 的径流变化率(表 4)。玛曲、唐克和若

尔盖 3 站的年平均径流量、非汛期径流量在 3 种情景下与基准年相比均呈减少趋势,其中玛曲站径流量减少幅度最大。在未来 3 种情景下,玛曲站年平均径流、汛期以及非汛期径流量均呈明显减少趋势,尤其是非汛期径流在 RCP8.5 情景下,减少比率较大,达到 50.1% (2040s)。唐克站年均径流和非汛期径流减少幅度相对较小,并且 3 种情景下汛期径流均略有增加。若尔盖站径流量变化与唐克站基本相似。总体上,在未来气候变化情景下,若尔盖湿地径流量呈减少趋势,尤其是非汛期径流量减少率在 25% 以上,结论与张永勇等^[18-19,40-41]在黄河源区的研究结果基本一致。气温升高,水面蒸发量增大,而降水增加趋势并不显著,可能是导致该区域径流量减少的主要原因之一^{—[18]}。

未来气候变化情景下,2020—2050 年若尔盖湿地流域径流量不断减少,而非汛期径流量的锐减可

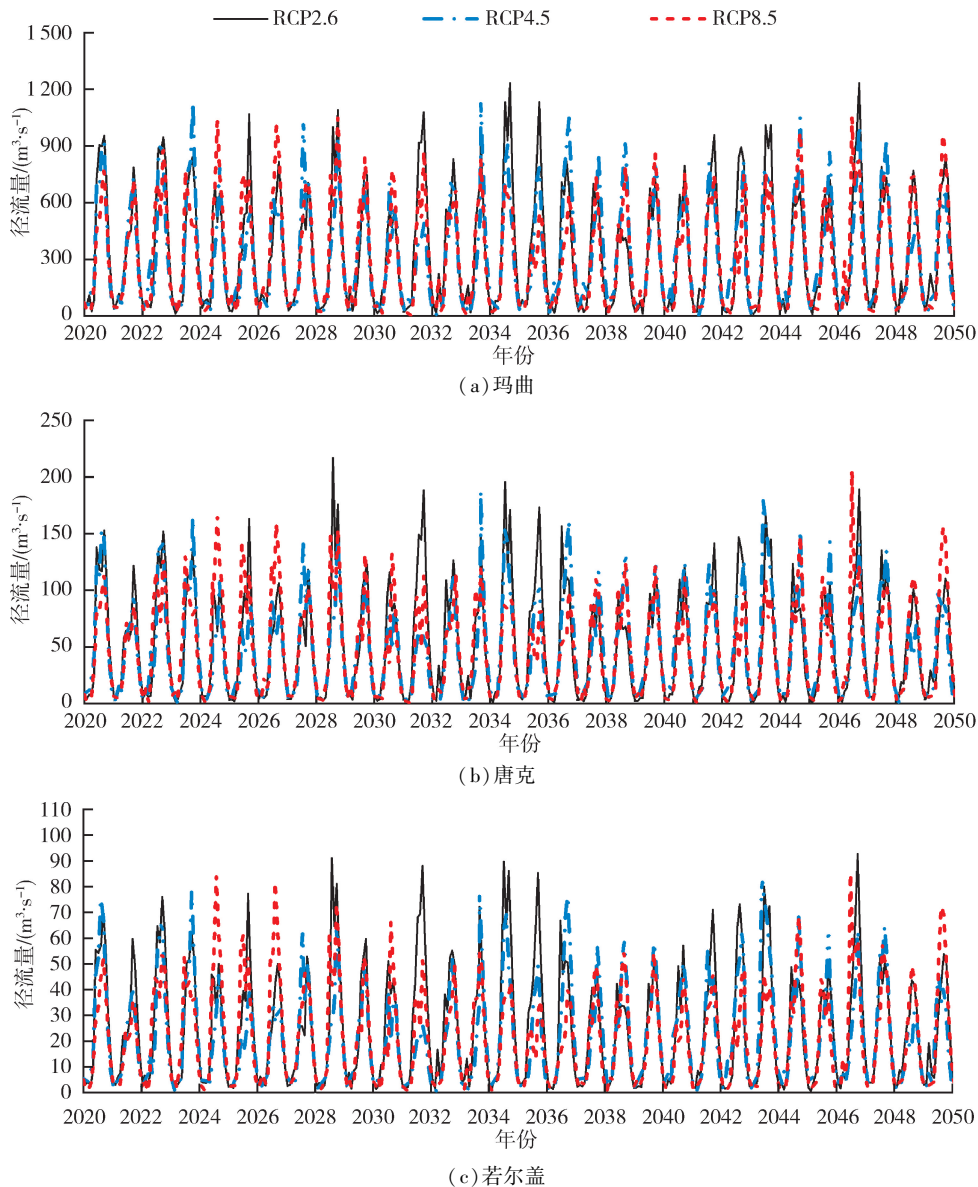


图3 2020—2050年玛曲、唐克和若尔盖站在不同排放情境下的径流变化过程

表4 2020—2050年不同情景下的各水文站径流变化比率

站 点	阶 段	基准期径流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	RCP2.6 下径流变化率/%			RCP4.5 下径流变化率/%			RCP8.5 下径流变化率/%		
			2020s	2030s	2040s	2020s	2030s	2040s	2020s	2030s	2040s
玛 曲	年平均	402.9	-18.9	-15.7	-15.4	-25.0	-23.0	-23.5	-17.2	-29.3	-23.0
	非汛期	202.6	-40.0	-43.3	-43.3	-47.0	-43.6	-48.0	-41.4	-49.8	-50.1
	汛 期	683.4	-10.2	-4.2	-3.8	-15.9	-14.5	-13.3	-7.1	-20.7	-11.8
唐 克	年平均	56.6	-8.0	-4.7	-9.6	-19.2	-15.4	-14.6	-6.8	-22.5	-15.8
	非汛期	24.7	-20.8	-22.3	-28.5	-31.9	-28.5	-32.3	-18.3	-31.4	-32.9
	汛 期	88.5	10.3	16.0	10.9	-2.6	2.0	4.6	11.1	-7.8	3.0
若尔盖	年平均	24.5	-0.2	5.7	-0.3	-18.1	-13.1	-10.4	-2.3	-22.1	-11.2
	非汛期	13.5	-24.8	-27.4	-31.9	-39.9	-36.8	-40.0	-30.0	-39.6	-40.3
	汛 期	402.9	11.5	21.5	14.7	-7.8	-1.8	3.7	11.0	-13.7	2.7

能会对若尔盖湿地保护以及黄河流域中游和下游区域的水资源管理等产生影响。这种变化可能会加剧未来若尔盖湿地面积的退化和萎缩,引起黄河中下游区域的干旱、水资源亏缺等一系列问题。这种情况下,若尔盖湿地未来如何应对气候变化是需要考虑的关键问题。

3 结 论

a. 采用 SWAT 水文模型对若尔盖高寒湿地流域的唐克站、若尔盖站以及玛曲站的月径流过程进行模拟,模拟精度较好。模型考虑了冻土和融雪对水文循环的影响,能够对降雨-融雪-径流过程进行

较好的刻画,模型可以用来分析若尔盖湿地流域径流变化过程及其气候变化的影响。

b. 未来3种(高排放情景 RCP8.5、中排放情景 RCP4.5 和低排放情景 RCP2.6)气候变化情景下,2020—2050 年若尔盖湿地流域径流量呈下降趋势。RCP8.5 情景下,若尔盖湿地的两条主要河流——白河流域(唐克站)以及黑河流域(若尔盖站)径流量下降趋势显著,在一定程度上可能导致湿地可补给水资源量减少,湿地水位下降。

c. 未来3种情景下 2020s 和 2030s,2040s 的年径流变化与基准年相比均呈减少趋势,非汛期径流量减少幅度明显高于汛期,径流减少比率大部分在 25% 以上。非汛期径流量的锐减可能会对若尔盖湿地保护以及黄河流域中游和下游区域的水资源管理等产生影响。

参考文献:

[1] 罗磊. 青藏高原湿地退化的气候背景分析[J]. 湿地科学,2005,3(3):190-199. (LUO Lei. Analysis of climatic background of wetlands degradation in the Qinghai-Xizang plateau[J]. Wetland Science,2005,3(3):190-199. (in Chinese))

[2] ZHANG Wenjiang, YI Yonghong, SONG Kechao, et al. Hydrological response of Alpine wetlands to climate warming in the eastern Tibetan plateau [J]. Remote Sensing,2016,8(4):336.

[3] SHUANG Xiang, GUO Ruqing, NING Wu, et al. Current status and future prospects of Zoige Marsh in Eastern Qinghai-Tibet plateau[J]. Ecological Engineering,2009,35(4):553-562.

[4] 戴洋,罗勇,王长科,等. 1961—2008 年若尔盖高原湿地的气候变化和突变分析[J]. 冰川冻土,2010,32(1):35-42. (DAI Yang, LUO Yong, WANG Changke, et al. Climate variation and abrupt change in wetland of Zoige Plateau during 1961-2008 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2010,32(1):35-42. (in Chinese))

[5] 李晋昌,王文丽,胡光印,等. 若尔盖高原土地利用变化对生态系统服务价值的影响[J]. 生态学报,2011,31(12):3451-3459. (LI Jinchang, WANG Wenli, HU Guangyin, et al. Impacts of land use and cover changes on ecosystem service value in Zoige Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31 (12): 3451-3459. (in Chinese))

[6] 李志威,王兆印,张晨笛,等. 若尔盖沼泽湿地的萎缩机制[J]. 水科学进展,2014,25(2):172-180. (LI Zhiwei, WANG Zhaoyin, ZHANG Chendi, et al. A study on the mechanism of wetland degradation in Ruorgai swamp [J]. Advances in Water Science,2014,25(2):172-180. (in Chinese))

[7] 闵泓翔. 若尔盖高原湿地退化现状、成因及恢复对策研究[D]. 成都:四川农业大学,2012.

[8] 甄硕,董李勤,郑茹敏,等. 2007 年和 2016 年若尔盖高

原沼泽湿地景观格局及变化[J]. 湿地科学,2017,15(4):522-525. (ZHEN Shuo, DONG Liqin, ZHENG Rumin, et al. Landscape patterns of marsh wetlands in Zoige Plateau in 2007 and 2016 and change [J]. Wetland Science,2017,15(4):522-525. (in Chinese))

[9] BAI Junhong, LU Qiongqiong, ZHAO Qingqing, et al. Effects of Alpine Wetland landscapes on regional climate on the Zoige Plateau of China [J]. Advances in Meteorology,2013,2013:1-7.

[10] 郝振纯,王加虎,李丽,等. 气候变化对黄河源区水资源的影响[J]. 冰川冻土,2006,28(1):1-7. (HAO Zhenchun, WANG Jiahu, LI Li, et al. Impact of climate change on runoff in source region of Yellow River [J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2006,28(1):1-7. (in Chinese))

[11] NIU Zhenguo, ZHANG Haiying, GONG Peng. More protection for China's wetlands [J]. Nature, 2011, 471 (7338):305.

[12] ZHAO Nana, GOU Si, ZHANG Beibei, et al. Changes in pan evaporation and their attribution to climate factors in the Zoige Alpine wetland, the eastern edge of the Tibetan plateau (1969—2014) [J]. Water,2017,9(12):971.

[13] 李志威,孙萌,游宇驰,等. 若尔盖高原实际蒸散量变化规律研究[J]. 生态环境学报,2017,26(8):1317-1324. (LI Zhiwei, SUN Meng, YOU Yuchi, et al. Change of actual evapotranspiration in the Zoige plateau [J]. Ecology and Environment Sciences,2017,26(8):1317-1324. (in Chinese))

[14] LIU Changming, ZENG Yan. Changes of pan evaporation in the recent 40 years in the Yellow River basin [J]. Water International,2004,29(4):510-516.

[15] 陈利群,刘昌明. 黄河源区气候和土地覆被变化对径流的影响[J]. 中国环境科学,2007,27(4):559-565. (CHEN Liqun, LIU Changming. Influence of climate and land-cover change on runoff of the source regions of Yellow River [J]. China Environmental Science,2007,27(4):559-565. (in Chinese))

[16] LI Binqun, YU Zhongbo, LIANG Zhongmin, et al. Effects of climate variations and human activities on runoff in the Zoige Alpine wetland in the eastern edge of the Tibetan plateau [J]. Journal of Hydrologic Engineering,2014,19(5):1026-1035.

[17] LI Mei, XU Rui, HUANG Wendian, et al. A study on the effects of the surrounding faults on water loss in the Zoige Wetland, China [J]. Journal of Mountain Science,2011,8(4):518-524.

[18] 张永勇,张士锋,翟晓燕,等. 三江源区径流演变及其对气候变化的响应[J]. 地理学报,2012,67(5):71-82. (ZHANG Yongyong, ZHANG Shifeng, ZHAI Xiaoyan, et al. Runoff variation in the three rivers source region and its response to climate change [J]. Journal of Geographical Sciences,2012,67(5):71-82. (in Chinese))

[19] 赵芳芳,徐宗学. 黄河源区未来气候变化的水文响应[J]. 资源科学,2009,31(5):722-730. (ZHAO Fangfang, XU Zongxue. Hydrological Response to climate change in headwater catchment of the Yellow River basin

- [J]. Resources Science, 2009, 31 (5): 722-730. (in Chinese))
- [20] 刘彩红, 苏文将, 杨延华. 气候变化对黄河源区水资源的影响及未来趋势预估[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(4): 97-101. (LIU Caihong, SU Wenjiang, YANG Yanhua. Impacts of climate change on the runoff and estimation on the future climatic trends in the headwater regions of the Yellow River [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26(4): 97-101. (in Chinese))
- [21] 郭洁, 李国平. 若尔盖气候变化及其对湿地退化的影响[J]. 高原气象, 2007, 26(2): 422-428. (GUO Jie, LI Guoping. Climate change in Zoige plateau marsh wetland and its impact on wetland degradation [J]. Plateau Meteorology, 2007, 26(2): 422-428. (in Chinese))
- [22] 田应兵, 熊明标, 禾光煌. 若尔盖高原湿地土壤的恢复演替及其水分与养分变化[J]. 生态学杂志, 2005, 24(1): 21-25. (TIAN Yingbing, XIONG Mingbiao, HE Guanghuang. Restoration succession of wetland soils and their changes of water and nutrient in Ruorgai Plateau [J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(1): 21-25. (in Chinese))
- [23] 王绍武, 罗勇, 赵宗慈, 等. 新一代温室气体排放情景[J]. 气候变化研究进展, 2012, 8(4): 305-307. (WANG Shaowu, LUO Yong, ZHAO Zongci, et al. New generation of scenarios of greenhouse gas emission [J]. Climate Change Research 2012, 8(4): 305-307. (in Chinese))
- [24] ARNOLD J G, WILLIAMS J R, NICKS A D, et al. SWRRB: a basin scale simulation model for soil and water resources management [J]. Agriculture & Forest Meteorology, 1990, 61: 160-162.
- [25] 刘柏君, 权锦, 杨超慧, 等. 基于 SWAT 模型的青海省主要流域径流模拟[J]. 水资源保护, 2016, 32(6): 39-44. (LIU Bojun, QUAN Jin, YANG Chaohui, et al. Simulation of runoff of major basins in Qinghai Province based on SWAT model [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(6): 39-44. (in Chinese))
- [26] GRUSSON Youen, SUN Xiaoling, GASCOIN Simon, et al. Assessing the capability of the SWAT model to simulate snow, snow melt and streamflow dynamics over an alpine watershed [J]. Journal of Hydrology, 2015, 531: 574-588.
- [27] ABBASPOUR K C, YANG J, MAXIMOV I, et al. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT [J]. Journal of Hydrology, 2007, 333(2): 413-430.
- [28] 黄清华, 张万昌. SWAT 分布式水文模型在黑河干流山区流域的改进及应用[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2004, 28(2): 22-26. (HUANG Qinghua, ZHANG Wanchang. Improvement and application of GIS-based distributed SWAT hydrological modeling on high altitude, cold, semi-arid catchment of heihe river basin, China [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2004, 28(2): 22-26. (in Chinese))
- [29] 车骞. 基于 SWAT 模型的黄河源区分布式水文模拟[D]. 兰州: 兰州大学, 2006.
- [30] CAO W Z, BOWDEN W B, DAVIE T, et al. Multi-variable and multi-site calibration and validation of SWAT in a large mountainous catchment with high spatial variability [J]. Journal of Korea Water Resources Association, 2010, 20(5): 1057-1073.
- [31] FEYEREISEN G W, STRICKLAND T C, BOSCH D D, et al. Evaluation of SWAT manual calibration and input parameter sensitivity in the Little River Watershed [J]. Transactions of the Asabe, 2007, 50(3): 843-855.
- [32] KHALID K, ALI M F, RAHMAN N F A, et al. Calibration assessment of the distributed hydrologic model using SWAT-CUP [J]. Regional Conference on Science, Technology and Social Sciences, 2018, 27: 241-250.
- [33] ABBASPOUR K C, VEJDANI M, HAGHIGHAT S. SWAT-CUP calibration and uncertainty analysis program for SWAT [J]. Modsim International Congress on Modelling & Simulation Land Water & Environmental Management Integrated Systems for Sustainability, 2010, 8(3): 121-129.
- [34] WU Hongjing, CHEN Bing. Evaluating uncertainty estimates in distributed hydrological modeling for the Wenjing River watershed in China by GLUE, SUFI-2, and ParaSol methods [J]. Ecological Engineering, 2015, 76: 110-121.
- [35] BETTS R A, GOLDING N, GONZALEZ P, et al. Climate and land use change impacts on global terrestrial ecosystems and river flows in the HadGEM2-ES Earth system model using the representative concentration pathways [J]. Biogeosciences, 2015, 12(5): 1317-1338.
- [36] 冯同飞, 杨涛, 王晓燕, 等. 气候变化对黄河源区水文情势的影响[J]. 水电能源科学, 2016(7): 11-15. (FENG Tongfei, YANG Tao, WANG Xiaoyan, et al. Influence of climate change on hydrologic regime of the Yellow River source region [J]. International Journal Hydroelectric Energy, 2016(7): 11-15. (in Chinese))
- [37] VETTER T, HUANG S, AICH V, et al. Multi-model climate impact assessment and intercomparison for three large-scale river basins on three continents [J]. Earth System Dynamics, 2015, 6(1): 17-43.
- [38] YUE Sheng, PILON Paul, PHINNEY Bob, et al. The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series [J]. Hydrological Processes, 2002, 16: 1807-1829.
- [39] BURN D H, ELNUR M A H. Detection of hydrologic trends and variability [J]. Journal of Hydrology, 2002, 255 (1/2/3/4): 107-122.
- [40] 李林, 申红艳, 戴升, 等. 黄河源区径流对气候变化的响应及未来趋势预测[J]. 地理学报, 2011, 66(9): 1261-1269. (LI Lin, SHEN Hongyan, DAI Sheng, et al. Response to climate change and prediction of runoff in the source region of Yellow River [J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(9): 1261-1269. (in Chinese))
- [41] XU Zongxue, ZHAO Fangfang, LI Jingyu. Response of streamflow to climate change in the headwater catchment of the Yellow River basin [J]. Quaternary International, 2009, 208(1/2): 62-75.