

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0043

高云, 郭维华. 和田河典型站点径流及气象因子变化规律分析[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(2): 87-92. GAO Y, GUO W H. Analysis of variation of runoff and meteorological factors at typical site of Hetian River[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(2): 87-92. (in Chinese)

和田河典型站点径流及气象因子变化规律分析

高云¹, 郭维华²

(1. 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098; 2. 河海大学 水利水电学院, 南京 210098)

摘要: 新疆和田河流域环境脆弱, 径流极易受气候变化的影响。基于此, 通过对和田河典型站点 1980-2013 年间的数据库分析得出: 同古孜鲁克站年降水量总体呈现明显增加趋势, 增加率为 18 mm/(10a), 降水量发生两次突变, 1993 年突变发生以后年降水量呈现减少趋势, 2001 年发生第二次突变, 突变发生之后降水量呈增加趋势; 年平均气温呈 0.232 °C/(10a) 的上升趋势, 2007 年出现最高气温, 最低气温出现在 2012 年; 年日照时数以倾向率为 21.5 W/(m²·(10a)) 的速度趋势减少; 年径流量以 23.5×10⁷ m³/(10a) 的速率在增加; 径流与前期气温的相关性强于降水。

关键词: 气候变化; 全球变暖; 径流变化; 小波分析; 半干旱荒漠区

中图分类号: P333 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2018)02-0087-06

Analysis of variation of runoff and meteorological factors at typical site of Hetian River

GAO Yun¹, GUO Weihua²

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210098, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The environment in Hetian river basin is fragile. The runoff is extremely vulnerable to climate changes. Through the analysis of data from 1980 to 2013, we found that the annual precipitation at Tong Gu Zi Lu Ke station showed a significant increasing trend at a rate of 18 mm/(10a). The annual average temperature was increasing by 0.232 °C/(10a). The highest temperature appeared in 2007; the lowest temperature appeared in 2012. The annual sunshine hours were decreasing at a rate of 21.5 W/(m²·(10a)). The annual runoff was increasing at a rate of 23.5×10⁷ m³/(10a). The runoff had a stronger correlation with antecedent temperature than precipitation.

Key words: climate change; global warming; runoff variation; wavelet analysis; semi arid desert area

和田河是塔里木河的主源之一, 发源于昆仑山和喀喇昆仑山北麓, 以冰川融水补给为主^[1]。随着全球变暖, 近 30 年来新疆和田河流域也出现了气候变暖的趋势, 这将对水文水资源产生重大影响^[2-3]。其上游径流量的变化直接关系到和田绿洲及南疆塔河流域用水的安全性及生态稳定性^[14-16]。深入开展气候

变化对和田河径流量影响研究, 对促进和田流域绿洲经济发展, 实现区域水资源可持续利用, 维护和改善绿洲内的生态环境具有重要的现实意义^[17-25]。

本文采用同古孜鲁克站水文站 1980-2013 年气象及径流资料进行分析研究, 该站点设置在和田河东支玉龙喀什河出山口处, 由于该地区人口稀少, 受人

收稿日期: 2017-07-14 修回日期: 2017-12-17 网络出版时间: 2018-02-02

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180202.0958.004.html>

基金项目: 国家自然科学基金(51609064); 中央高校基本科研业务费项目(2014B12214; 2014B05914)

Funds: National Natural Science Foundation of China(51609064); Fundamental Research Funds for the Central Universities(2014B12214; 2014B05914)

作者简介: 高云(1988), 女(蒙古族), 内蒙古呼和浩特人, 工程师, 主要从事节水灌溉理论与技术研究、水文水资源建设管理。E-mail: 20150629@hhu.edu.cn

通讯作者: 郭维华(1984), 男, 河北石家庄人, 讲师, 博士研究生, 主要从事节水灌溉理论与技术、生态水文过程研究。E-mail: whguo@hhu.edu.cn

类活动影响小,接近天然径流,因此出山径流的变化主要受气候变化的影响,该支流属于冰雪融水及高山降水混合补给型河流,年径流主要受气温及山区降水的影响,因此,降水量、气温、日照等重要气象要素的时空分布在一定程度上决定了径流量的变化^[26-27]。

1 分析方法

由于和田河上游径流主要产生于受人类活动影响较少的山区,平原基本不产生径流,出山径流的变化反映了气候因素影响下天然径流的变化。本文针对同古孜鲁克站34年的逐月径流、降水、气温、日照资料,运用距平、5 a 滑动平均、趋势分析法^[7,9]详细分析了和田河流域径流、降水、气温、日照时数的年内分配以及年际变化规律,运用 Mann Kendall 突变检验^[16]分析其突变特征,采用 Morlet 小波分析法^[19,21]进一步识别了径流及关键气候要素的周期演变特征,并研究气候变化对和田河上游径流量的影响。

2 径流量及气象要素的变化规律

2.1 径流量的变化规律

2.1.1 时间变化规律

图1为1980-2013年同古孜鲁克站逐年径流量距平的时间变化过程。可以看出,年径流量的最大正距平值为 $12.64 \times 10^7 \text{ m}^3$,出现在2010年,最大负距平值为 $-8.50 \times 10^7 \text{ m}^3$,出现在1993年;20世纪80年代至90年代末为年径流量的偏少期,进入21世纪以后径流量有明显的增加趋势。

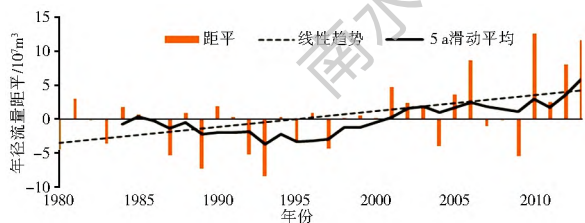


图1 1980-2013年同古孜鲁克站年径流量距平的时间变化过程

Fig. 1 The change process of annual runoff over time in 1980-2013 at Tong Gu Zi Lu Ke station

2.1.2 突变检验

为了检验同古孜鲁克站年径流量随时间的变化有无突变的显著性发生,采用了 Mann Kendall 突变检验(此后简称 M-K 突变检验)。图中 UF 曲线的值大于零表明该要素序列呈上升趋势,小于零则表明呈下降趋势;当其值超过临界线(-1.96 和 1.96)时,说明变化趋势显著,通过了 $\alpha=0.05$ 显著

性水平检验; UF 和 UB 曲线的交点即为突变点。根据图2所示,第一次突变发生在2004年,发生突变之后序列呈现增加趋势,表明21世纪初该站水资源短缺现象有所缓解,但增加趋势未超过95%显著水平。

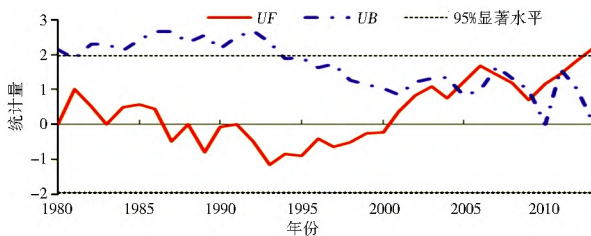


图2 年径流量 M-K 突变检验

Fig. 2 M-K mutation test of annual runoff

2.1.3 周期分析

为了分析同古孜鲁克站年径流量变化的振荡周期,本文利用 Morlet 小波变换,将同古孜鲁克站1980-2013年的年径流量序列的频率特征在时域上展现出来。图3清晰地反映了序列各种周期的强弱和分布情况,小波系数为正时,表示可利用降水量相对偏多,为负时表示相对偏少。由图可见,该站存在12~15 a 左右的年代际周期和5 a 左右的年际变化周期。12~15 a 左右的年代际周期在20世纪90年代至21世纪初较强烈,5 a 左右的周期在20世纪80年代至90年底明显,之后减弱。

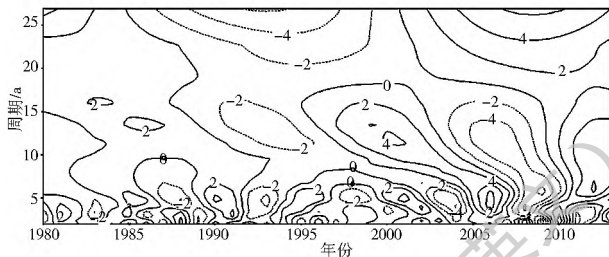


图3 同古孜鲁克站年降水量小波变换系数时频图

Fig. 3 Frequency graph of the wavelet transform coefficient of annual runoff at Tong Gu Zi Lu Ke station

2.2 降水量的变化规律

2.2.1 时间变化规律

图4给出了同古孜鲁克站1980-2013年降水量的时间分布,年降水量的多年平均值为75.7 mm。由图4可看出20世纪80年代至90年代初期降水量呈增加趋势,在1987年、1993年出现过较大的降水过程;20世纪90年代中至末期出现34年来降水量最少的年份,最小值出现在1997年,值为10.6 mm;进入21世纪后年降水量呈增加趋势,大部分年份降水量高于多年平均,2010年出现34年来最大的降水量,值为215.8 mm。

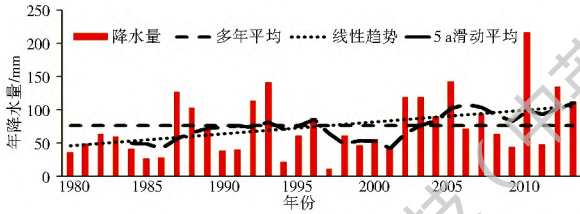


图4 1980-2013年同古孜鲁克站年降水量变化过程
Fig. 4 The change process of annual precipitation in 1980-2013 at Tong Gu Zi Lu Ke station

2.2.2 突变检验

为了进一步明确年降雨量的突变时段,对同古孜鲁克站1980-2013年的年降水量进行了M-K突变检验(图5)。根据图5中两条曲线在临界值之间的交点位置,可以确定第一次突变发生在1993年,突变发生以后年降水量呈现出明显的减少;2001年发生第二次突变,突变发生之后降水量呈增加趋势。

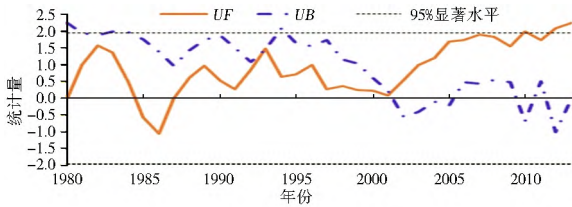


图5 降水量M-K突变检验
Fig. 5 M-K mutation test of precipitation

2.2.3 周期分析

为了明确年降水量的周期性,利用Morlet小波变换分析了同古孜鲁克站1980-2013年的年降水量序列的频率特征。由图6可见,20世纪80年代至90年代末3~5a左右的小尺度周期存在,进入21世纪之后振荡中心在8~10a左右的时间尺度表现强烈,15a的年代际变化周期贯穿整个研究时期。

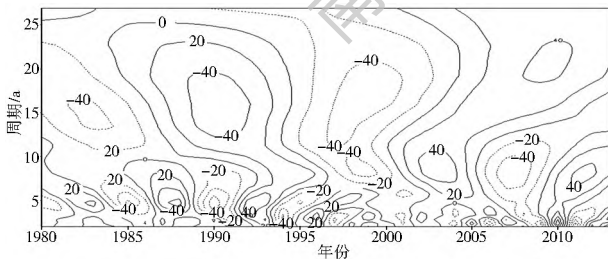


图6 同古孜鲁克站年降水量小波变换系数时频图
Fig. 6 Frequency graph of the wavelet transform coefficient of annual precipitation at Tong Gu Zi Lu Ke station

2.3 气温的变化规律

2.3.1 时间变化规律

图7为同古孜鲁克站年平均气温随时间的变化规律。由图可见,近34年来同古孜鲁克站年平均气温呈线性增加趋势,增加率为 $0.232\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,多年平均气温为 $12.69\text{ }^{\circ}\text{C}$,近34年来的最高气温出现在

2007年,比多年平均偏高 $1.12\text{ }^{\circ}\text{C}$,最低气温出现在2012年,值为 $11.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

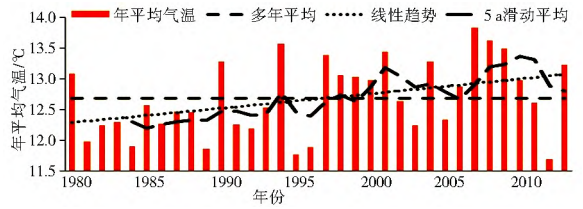


图7 1980-2013年同古孜鲁克站年平均气温变化过程
Fig. 7 The change process of annual mean temperature in 1980-2013 at Tong Gu Zi Lu Ke station

2.3.2 突变检验

图8为同古孜鲁克站年平均气温突变检验分布,可以确定该站年均气温在1989年发生突变,1989年之后UF线有明显的上升趋势,特别是2001年之后气温增高更显著。

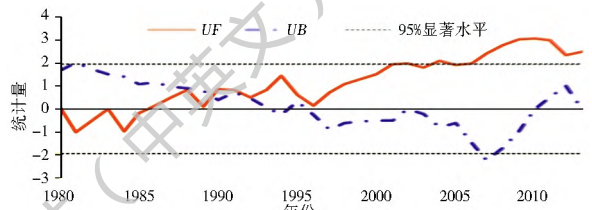


图8 平均气温M-K突变检验
Fig. 8 M-K mutation test of mean temperature

2.3.3 周期分析

图9为同古孜鲁克站1980-2013年的年平均气温序列的小波分析图,从图可看出该站年平均气温的年际变化最强的信号是2~3a和6~10a的周期振荡。其中20世纪90年代之后8a左右的周期振荡最明显,年代际尺度周期主要是25a左右。

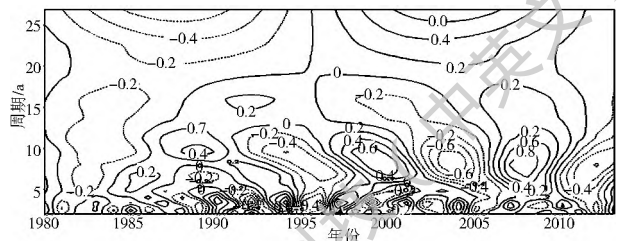


图9 同古孜鲁克站年平均气温小波变换系数时频图
Fig. 9 Frequency graph of the wavelet transform coefficient of annual mean temperature at Tong Gu Zi Lu Ke station

2.4 日照的变化规律

2.4.1 时间变化规律

图10为同古孜鲁克年日照时数序列随时间的变化情况。由图可见,近34年来该站日照时数总体上呈线性减少趋势,减少率为 $21.5\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot (10\text{a}))$,多年平均日照时数为 $2583.3\text{ W}/\text{m}^2$,近34年来的最强日照时数出现在1997年,值为 $3070.1\text{ W}/\text{m}^2$,最低日

照时数出现在 1995 年,比多年平均偏低 403.8 W/m^2 。

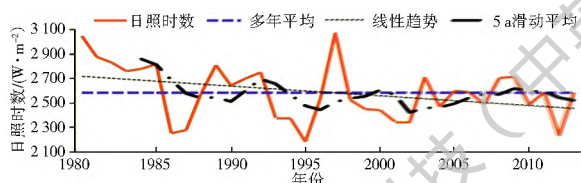


图 10 1980-2013 年同古孜鲁克年日照时数序列随时间的变化过程

Fig. 10 The annual sunshine hours series over time in 1980-2013 at Tong Gu Zi Lu Ke station

2.4.2 突变检验

图 11 为同古孜鲁克年日照时数的 M-K 突变检验分布。由图可知,该站年日照时数在 1982 年发生过突变,发生突变之后 UF 线有明显的减少趋势,特别是 1985 年之后日照强度减少更显著,2002 年之后逐渐进入增加趋势,但 2011 年之后又呈现减少趋势。

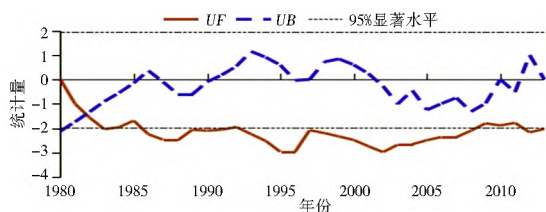


图 11 年日照时数 M-K 突变检验

Fig. 11 M-K mutation test of annual sunshine hours

2.4.3 周期分析

图 12 为同古孜鲁克 1980-2013 年的年日照时数序列的 Morlet 小波分析图,该站年日照时数 6~8 a 左右的年际变化周期贯穿整个研究时期。3 a 左右的周期在 20 世纪 80 年代至 90 年代中期较明显,之后不稳定,年代际尺度的周期不显著。

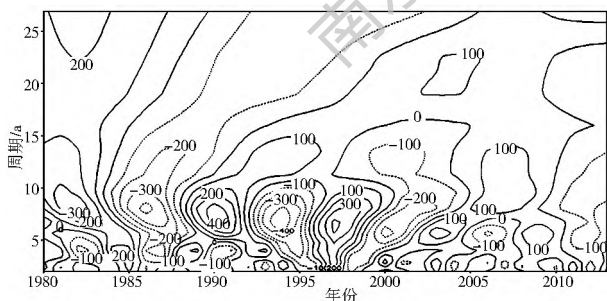


图 12 同古孜鲁克年日照时数小波变换系数时频图

Fig. 12 Frequency graph of the wavelet transform coefficient of annual sunshine hours at Tong Gu Zi Lu Ke station

3 气象要素对径流量的影响

为了明确气候变化对研究区径流量的响应,通过单相关系数法对年径流量与降水、气温、日照进行相关分析,用 t 检验来考察其显著程度,选定信度

$\alpha = 0.05$ 后从 t 分布表中查出相应的 t_a , 当 $|t| > t_a$ 时,认为在这一信度下两者间相关性显著,否则认为不显著,从中挑选出对年径流量影响显著的因子。

由于当年的逐月实测径流量不仅受当年各项气象因子的影响,前期气象因子对其也可能具有一定的影响,因此分析同期径流量与气象要素之间的相关性时,还应分析其与错开 1 年和 2 年的气象要素的滞后效应。分析年径流量与同期气象要素相关关系时,资料长度 $n = 34$, $\alpha = 0.05$ 时, $t_a = 1.691$, $\nu_a = 0.339$; 年径流量与前 1 年的各气象要素相关关系时,资料长度 $n = 33$, $\alpha = 0.05$ 时, $t_a = 1.691$, $\nu_a = 0.334$; 年径流量与前 2 年的各气象要素相关关系时,资料长度 $n = 32$, $\alpha = 0.05$ 时, $t_a = 1.694$, $\nu_a = 0.349$ 。

表 1 为同古孜鲁克站年径流量与同期及前期降水、气温之间的相关系数。由表可以看出,年径流量与同期以及前期降水量呈线性正相关,但只有年径流量与同期年降水量、夏季降水量以及提前 1 年的夏季降水量之间的正相关性均通过显著性检验,其余季节降水对年径流量影响不大(未通过显著性检验);年径流量与同期的气温呈正相关,但未通过 $\alpha = 0.05$ 的显著性检验,提前 1 年春季、夏季、秋季气温与年径流量的相关系数分别为 0.614、0.515、0.578,均通过 $\alpha = 0.05$ 的显著性检验,说明年径流量与之明显的正相关性;提前 1 年前三个季节气温与径流量的相关系数比夏季降水量的相关系数更大,表示前期气温对径流量的影响比降水更大;年径流量与同期和前期日照时数的相关性分析发现,同期秋季日照时数和提前 1 年冬季日照时数对年径流量影响显著。

表 1 同期及前期气候要素与径流量相关系数统计

Tab. 1 Correlation coefficients between climatic elements and runoff in the corresponding period and early period

相关系数	降水量		气温		日照	
	同年	前 1 年	同年	前 1 年	同年	前 1 年
年平均	0.330	0.114	0.234	0.341	0.193	0.123
春季	0.065	0.127	0.183	0.614	0.114	0.022
夏季	0.340	0.430	0.267	0.515	0.052	0.076
秋季	0.170	0.290	0.226	0.578	0.421	0.201
冬季	0.186	0.284	0.149	0.152	0.040	0.438

注:相关系数显著性检验通过的用灰色突出显示。

4 结论

同古孜鲁克站年降水量呈现出明显的增加趋势,增加率为 $18 \text{ mm}/(10\text{a})$,存在 3~5 a、8~10 a 和 15 a

左右的震荡周期,而平均气温呈以 $0.232\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{a})$ 的上升趋势,进入21世纪后气温先降低后增高,最后呈现出降低趋势,年日照时数则呈现出以倾向率为 $21.5\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot (10\text{a}))$ 的速度减少趋势,20世纪80年代至21世纪初日照时数呈现出逐渐减少趋势,虽然21世纪10年代中末期呈现出略微增加趋势但之后又进入减少状态,1982年发生过突变,存在3a、6~8a左右的周期。通过进一步的分析发现径流与前期气温的相关性强于降水,气温升高对径流的影响高于降水增加的影响,前期气温增加会加快冰雪融化,对径流量产生直接的影响。

参考文献(References):

- [1] 马金珠,李吉均.塔里木盆地南缘人类活动干扰下地下水的变化及其生态环境效应[J].自然资源学报,2001,16(2):134-139. (MA J Z, LI J J. Impact of human activities on groundwater and the effect on eco environment in southern Tarim Basin [J]. Journal of Natural Resources, 2001, 16(2): 134-139. (in Chinese))
- [2] 施雅风.中国西北气候由暖干向暖湿转型问题评估[M].北京:气象出版社,2003. (SHI Y F. Climate transition from warm dry to warm humid in Northwest China[M]. Beijing: Meteorological Press, 2003. (in Chinese))
- [3] 徐影,丁一汇,赵宗慈.近30年人类活动对东亚地区气候变化影响的检测与评估[J].应用气象学报,2002,13(5):513-525. (XU Y, DING Y H, ZHAO Z C. Detection and evaluation of effect of human activities on climatic change in east asia in recent 30 years[J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 2002, 13(5): 513-525. (in Chinese))
- [4] 王树基,刘兴文.阿克苏河——塔里木河流域水土资源合理利用与环境保护对策[M].北京:气象出版社,1993. (WANG S J, LIU X W. Rational utilization model of water and land resources and countermeasures for environmental protection in Akesu River Tarim River Basin [M]. Beijing: Meteorological Press, 1993. (in Chinese))
- [5] 杨笛,熊伟,许吟隆,等.气候变化背景下中国玉米单产增速减缓的原因分析[J].农业工程学报,2017,33(1):231-238. (YANG D, XIONG W, XU Y L, et al. Analysis of reason for recent slowing maize yield increase under climate change in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(1): 231-238. (in Chinese))
- [6] HULME M. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)[M]// The International Encyclopedia of Geography. John Wiley & Sons, Ltd, 2017. DOI: 10.1007/springerreference_28950.
- [7] 苏甫·阿布都拉,马宏武,买买提·阿布都拉,刘海涛.和田河流域气候变化特征分析[J].气象,2006,32(4):97-100. (YUSUP A, MA H W, MAIMAITI A, LIU H T. Analysis of climatic changes in Hetian River Valley [J]. Meteorological Monthly, 2006, 32(4): 97-100. (in Chinese))
- [8] 张强,张存杰,白虎志,等.西北地区气候变化新动态及对干旱环境的影响——总体暖干化,局部出现暖湿迹象[J].干旱气象,2010,28(1):1-7. (ZHANG Q, ZHANG C J, BAI H Z, et al. New development of climate change in North west China and its impact on arid environment [J]. Journal of Arid Meteorology, 2010, 28(1): 1-7. (in Chinese))
- [9] 魏文寿,袁玉江,喻树龙,张瑞波.中国天山山区235a气候变化及降水趋势预测[J].中国沙漠,2008,28(5):803-808. (WEI W S, YUAN Y J, YU S L, et al. Climate change in recent 235 years and trend prediction in Tianshan mountainous area [J]. Journal of Desert Research, 2008, 28(5): 803-808. (in Chinese))
- [10] 郑宏,张友腾.新疆旱作节水农业示范基地建设及发展运行思路探讨[J].中国农业机械学会成立40周年庆典暨2003年学术年会论文集,2003. (ZHENG H, ZHANG Y T. Speculation & probing of constructing and developing on dry farming demonstrable base in Xinjiang [J]. Proceedings of the Chinese society of agricultural machinery, 2003. (in Chinese))
- [11] 编委会.气候变化国家评估报告.气候变化国家评估报告[G].北京:科学出版社,2007. (Committee of "China's National Assessment Report on Climate Change". China's national assessment report on climate change [G]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese))
- [12] LIU C E, ZHAO B. Who speaks for climate change in China Evidence from Weibo [J]. Climatic Change, 2017, 140: 1-10. DOI: 10.1007/s10584-016-1883-y.
- [13] 范钟秀.中长期水文预报[M].河海大学出版社,1999. (FAN Z X. Medium and long term hydrological forecast [M]. Hohai University Press, 1999. (in Chinese))
- [14] FANG Q. Adapting Chinese cities to climate change [J]. Science, 2016, 354(6311): 425. DOI: 10.1126/science.aak9826
- [15] 符淙斌,魏和林,陈明,等.区域气候模式对中国东部季风雨带演变的模拟[J].大气科学,1998(4):140-152. (FU Z B, WEI H L, CHEN M, et al. Simulation of the evolution of summer monsoon rainbelts over Eastern China from regional climate model [M]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 1998(4): 140-152. (in Chinese))
- [16] 陈仁升,康尔泗,杨建平,等.甘肃河西地区近50年气象和人文序列的变化趋势[J].兰州大学学报,2002(2):163-170. (CHEN R S, KANG E S, YANG J P, et al. Variance tendency in the 50-year annual meteorological and hydrological series of Hexi region of Gansu Province [J]. Journal of Lanzhou University, 2002(2): 163-170. (in Chinese))
- [17] 郑益群,钱永甫,桂祈军,等.初、边值条件对区域气候模拟的影响[J].大气科学,2002(6):794-806. (ZHENG Y Q, QIAN Y P, GUI X J, et al. Effects of initial/lateral boundary conditions on regional climate simulations [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2002(6): 794-806. (in Chinese))
- [18] 唐数红.新疆干旱区流域规划几个重大问题的思考[J].中国水利,2003(14):19-20. (TANG S H. Thoughts on several important issues of watershed planning in arid area of Xinjiang [J]. China Water Resources, 2003(14): 19-20. (in Chinese))
- [19] 曾新民,丁彪,宇如聪.区域气候模式RegCM3产流方案的改进及数值试验[J].南京大学学报(自然科学版),2005,41(6):603-611. (ZENG X M, DING B, YU R S. Numerical experi

- ments of a regional climate model with improved surface runoff generation scheme [J]. *Journal of Nanjing University*, 2005, 41(6): 603-611. (in Chinese)
- [20] 姜大膀, 王会军, 郎咸梅. 全球变暖背景下东亚气候变化的最新情景预测 [J]. *地球物理学报*, 2004, 47(4): 590-596. (JIANG D B, WANG H J, LANG X M. East Asian climate change trend under global warming background [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2004, 47(4): 590-596. (in Chinese))
- [21] 任朝霞, 杨达源. 近 50a 西北干旱区气候变化趋势及对荒漠化的影响 [J]. *干旱区资源与环境*, 2008(04): 91-95. (REN Z X, YANG D Y. Climate change and surface runoff change impact on desertification in the arid area of Northwest China in recent 50 years [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2008(04): 91-95. (in Chinese))
- [22] 唐道来, 徐利岗. 气候变化背景下新疆地区降水时空变化特征分析 [J]. *水资源与水工程学报*, 2010, 21(3): 73-76, 79. (TANG D L, XU L G. Characteristics of spatio-temporal variability of precipitation in Xinjiang Region under the background of climate change [J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2010, 21(3): 73-76, 79. (in Chinese))
- [23] ZHANG W, YAN H, CHENG P, et al. Peatland development and climate changes in the Dajuhu basin, central China, over the last 14, 100 years [J]. *Quaternary International*, 2016, 425: 273-281. DOI: 10.1016/j.quaint.2016.06.039.
- [24] BINGS S, ZHEN L, LU H, et al. Pollen record of the centennial climate changes during 9u20137 cal ka BP in the Changjiang (Yangtze) River Delta plain, China [J]. *Quaternary Research*, 2017, 87(2): 275-287. DOI: 10.1017/qua.2017.1.
- [25] JIA X, SUN Y, WANG L, et al. The transition of human subsistence strategies in relation to climate change during the Bronze Age in the West Liao River Basin, Northeast China [J]. *Holocene*, 2016, 26(5): 781-789. DOI: 10.1177/0959683615618262.
- [26] LAMBERS J H. Ecology. Extinction risks from climate change [J]. *Science*, 2015, 348(6234): 501. DOI: 10.1016/b978-0-12-374182-0.00017-0.
- [27] STANTON J C, SHOEMAKER K T, PEARSON R G. Warning times for species extinctions due to climate change. [J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(3): 1066. DOI: 10.1111/gcb.12721.

(上接第6页)

- [11] 余常昭. 环境流体力学导论 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1992. (YU C Z. Introduction to environmental fluid mechanics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1992. (in Chinese))
- [12] NEUPAUER R M, WILSON J L. Adjoint method for obtaining backward in time location and travel time probabilities of a conservative groundwater contaminant [J]. *Water Resources Research*, 1999, 35(11): 3389-3398. DOI: 10.1029/1999WR900190.
- [13] SUN A Y, PAINTER S L, WITTMAYER G W. A robust approach for iterative contaminant source location and release history recovery [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2006, 88(3-4): 181-196. DOI: 10.1016/j.jconhyd.2006.06.006.
- [14] 王家彪, 雷晓辉, 廖卫红, 等. 基于耦合概率密度方法的河渠突发水污染溯源 [J]. *水利学报*, 2015, 46(11): 1280-1289. (WANG J B, LEI X H, LIAO W H, et al. Source identification for river sudden water contamination based on coupled probability density function method [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, 46(11): 1280-1289. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20150405.
- [15] CHENG W P, JIA Y. Identification of contaminant point source in surface waters based on backward location probability density function method [J]. *Advances in Water Resources*, 2010, 33(4): 397-410. DOI: 10.1016/j.advwatres.2010.01.004.
- [16] GHANE A, MAZAHARI M, MOHAMMAD V S J. Location and release time identification of pollution point source in river networks based on the Backward Probability Method [J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 180: 164. DOI: 10.1016/j.jenvman.2016.05.015.
- [17] 范海燕. 自适应遗传算法在水库防洪优化调度中的应用 [D]. 南京: 河海大学, 2008. (FAN H Y. Application of Adaptive Genetic Algorithm in the optimal flood control operation of reservoirs [D]. Nanjing: Hohai University, 2008. (in Chinese))
- [18] 刘宁. 对潼关高程控制及三门峡水库运用方式研究的认识 [J]. *水利学报*, 2005, 36(9): 1019-1028. (LIU N. On the control of Tongguan elevation and operation mode of Sanmenxia Reservoir [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2005, 36(9): 1019-1028. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:0559-9350.2005.09.001.