

气候变化背景下乌梁素海流域 水循环系统的演变特征

吕睿喆^{1,2}, 翁白莎², 严登明^{1,2}, 李思诺^{2,3}

(1. 东华大学 环境科学与工程学院, 上海 201620; 2. 中国水利水电科学研究院 a. 流域水循环模拟与调控国家重点实验室; b. 水资源研究所, 北京 100038; 3. 河北工程大学 水电学院, 河北 邯郸 056000)

摘要: 为了研究气候变化背景下乌梁素海流域水循环系统的演变特征, 利用乌梁素海流域内及其周边 13 个气象站点的气象资料, 从 1961-2011 年 51 年数据分析其气温、降水、蒸发的变化趋势, 发现气温呈现显著上升, 降水量和蒸发量年际波动较大, 未显示出明显的变化趋势; 同时分析了湖泊进出水量、水位变化和土地利用情况, 尤其在近 10 年来, 耕地迅速增加, 草地林地减少, 湖泊水位降低和面积减少, 水资源矛盾加剧。气候变化和人类活动对乌梁素海流域水循环系统演变有着重大影响。

关键词: 气候变化; 人类活动; 水循环系统; 乌梁素海流域

中图分类号: P339 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2015)06-0030-05

Evolution characteristics of water cycle system in Wuliangsu hai river basin under background of climate change

LÜ Ruizhe^{1,2}, WENG Baisha², YAN Dengming^{1,2}, LI Sinuo^{2,3}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China;
2. a. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin; b. Department of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;
3. College of Water Conservancy and Hydropower, Hebei University of Engineering, Handan 056000, China)

Abstract: In order to study the evolution characteristics of water cycle system in Wuliangsu hai river basin under the background of climate change, the paper used the meteorological data of 51 years from 13 meteorological stations in Wuliangsu hai river basin from 1961 to 2011 to analyze the change trend of temperature, precipitation, evaporation. The result shows that temperature remarkably increases, the interannual fluctuations of precipitation and evaporation are bigger but do not show obvious change trend. At the same time, it analyzed the water consumption, water level change and land use of lake. The result show that cultivated land is increasing rapidly, grassland woodland is reduced, the water level and area of lake are reduced, and the water resources contradiction intensifies. The climate change and human activity have a significant effect on the evolution of water cycle system in Wuliangsu hai river basin.

Key words: climate change; human activity; water cycle system; Wuliangsu hai lake basin

2013 年联合国政府气候变化专门委员会 (IPCC) 对全球气候变化第 5 次评估报告的发布, 指出了以全球变暖为主要特征的气候变化已经是当前世界最重要的环境问题之一。全球变暖主要体现在全球表面温度和海洋温度的上升、南极冰川消融和

海平面的上升、极端气候事件频率和强度的增加等方面^[1-3]。水循环过程是气候变化的重要组成部分, 也是研究气候变化对水资源影响的理论基础, 两者之间相互影响与制约, 气候变化背景下水循环过程的改变会对整个水资源系统产生影响。早在

收稿日期: 2015-06-15; 修回日期: 2015-07-17

基金项目: “十二五” 国家科技支撑计划课题 (2012BAC19B03)

作者简介: 吕睿喆 (1991-), 男, 安徽芜湖人, 硕士, 从事水文水资源和水环境研究。

通讯作者: 翁白莎 (1986-), 女, 福建晋江人, 博士, 工程师, 从事变化环境下干旱应对研究。

1979 年世界气象组织通过实施的世界气候计划 (WCP) 中就包含世界气候资料计划、世界气候应用计划和世界气候影响计划,主要研究气候变化和气候变率对水文情势和水资源的影响。

气候变化对水循环过程有着重要的影响,由于气候变化所导致的水资源量的时空分布特征和强度的变化等问题已成为各国关注的热点^[4]。水是水文循环和大气环流中的重要要素,气候变化导致的温度升高改变了大气环流、相对湿度和地表辐射,改变了降水的时空分布特征和强度,将直接或者间接影响蒸发、降雨、径流等水文过程,在当前的气候变化影响下,容易造成极端气候事件的发生,导致洪水和干旱的频率与强度增加,驱动地表水、土壤水、地下水等水循环要素过程的变化,引发水资源短缺、水质恶化等一系列生态环境效应,加剧了水资源的供需矛盾^[5],引起水资源在时空尺度上的重新分配,并通过水资源系统及经济社会系统,进一步影响到水资源在不同用户之间的合理配置。我国水环境风险点较多、水资源安全威胁较大,因此研究气候变化背景下的水循环演变特征将有助于更好地统筹气候变化与水资源保护工作。

1 研究区概况

1.1 乌梁素海流域概况

乌梁素海位于巴彦淖尔市乌拉特前旗境内,呼和浩特、包头、鄂尔多斯三角地带的边缘,是黄河改道形成的河迹湖,中国八大淡水湖之一,也是内蒙古自治区第二大湖泊,流域面积约为 12 000 km²,乌梁素海总面积 600 km²,其中水体面积 293 km²,整个湖区呈南北长、东西窄的狭长形态,湖岸线长约 130 km,库容量为 2.5 亿~3 亿 m³,其位置见图 1。乌梁素海所在的乌拉特前旗地处中纬度内陆,是典型的温带大陆性季风气候区,由于地处北方,季节交替明显,气候变化强烈,降雨少、蒸发强烈、太阳辐射强度大。其自然降水分布差异较明显,形成了降水量少,蒸发量大,风大沙多,无霜期短,温差大,日照时间长、四季分明的气候特征。

1.2 数据与方法

气象数据源于中国气象局国家气象信息中心资料室提供的乌梁素海流域内部及周边地区具有连续观测数据系列(1961-2011)13 个气象站点逐日观测数据,观测的气象要素有降水量、最高气温、最低气温、平均温度和蒸发量等气象要素以及经纬度和高程。对逐日平均气温、降水量和蒸发量进行距离

平方反比插值,分析了年平均气温、年降水量和年蒸发量的变化规律,利用 Mann-Kendall 检验法检验流域内气温、降水和蒸发的长期变化趋势和突变情况。

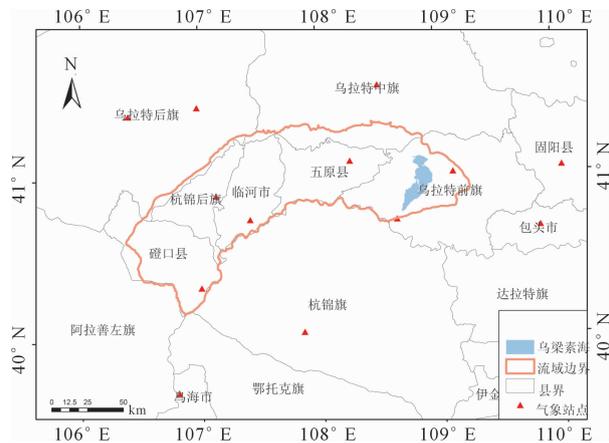


图 1 乌梁素海流域水系分布图

土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心,选取 1985、1995、2000、2005 和 2014 年土地利用数据,分析乌梁素海流域土地利用的主要类型和变化趋势。

2 主要研究内容

2.1 自然水循环系统要素演变特征

2.1.1 气温 气温是重要的气象要素之一,随着人类活动的影响,地表温度逐渐上升,根据对乌梁素海流域周围 13 个气象站点的逐日气温数据插值计算,得到 1961-2011 年乌梁素海流域年平均气温(图 2),流域年平均气温最高为 9.3℃(1998),最低年平均气温为 5.4℃(1968),多年平均为 7.4℃。乌梁素海流域多年平均气温呈显著上升趋势,和全球变暖趋势一致,根据 M-K 法对气温系列的突变点检测结果,可以看出气温在 1989 年前后发生了突变,也就是说,进入 20 世纪 90 年代后,年平均气温上升更显著,整体上看,平均每 10 年气温上升了约 0.5℃。其趋势线方程为 $y = 0.0492x - 90.214$,线性倾向率为 0.0492,年平均气温与时间的相关系数 r 为 0.79。

温度的上升,会影响到生活用水、工业需水和农业需水,同时也会引起作物生长类型的转移和灌溉需水量的变化,特别是在乌梁素海流域对农业灌溉用水的影响最大,带来的需水高峰时段的改变,造成供水在时间和数量上的变化,进而改变水资源的供需分配格局。

2.1.2 降水 降雨是地表径流的主要来源,是水循环过程的重要组成部分之一。乌梁素海流域 1961—2011 年年降水量(图 3),流域内年降水最大值为 251.6mm(1974),最小值为 64.3 mm(1966),多年平均为 162.3 mm。

乌梁素海流域多年降水量呈现明显的年际振荡,每年降水量变化较大,总体变化趋势不明显,根

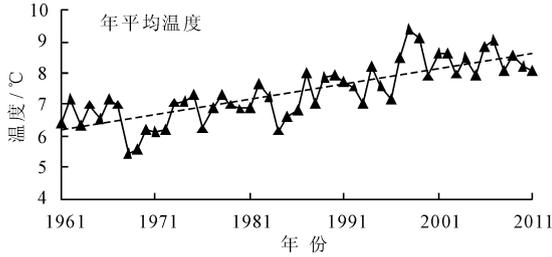


图 2 乌梁素海流域 1961—2011 年年平均气温及 MK 突变点检测

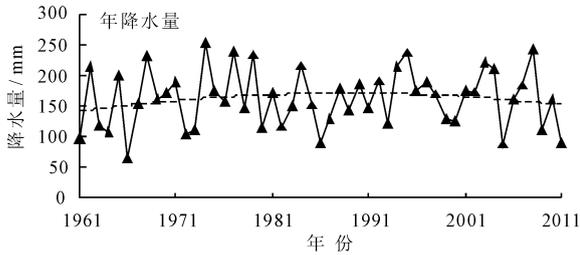
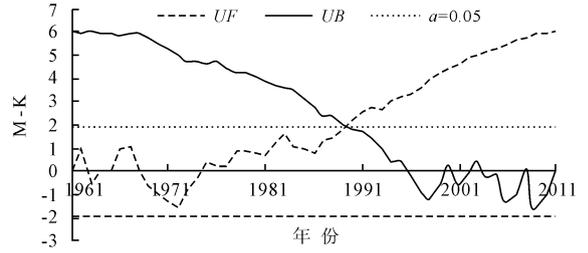
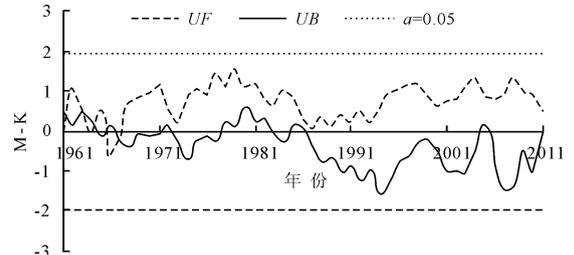


图 3 乌梁素海流域 1961—2011 年年降水量及 MK 突变点检测



2.1.3 蒸发 蒸发是地表热量平衡和水量平衡的组成部分,也是水循环过程的重要环节之一,在水循环过程中直接会受到气候变化和土地利用的影响,由于实际蒸发的测定非常困难,采用气象站 20 cm 口径的小型蒸发皿观测资料,计算出乌梁素海流域的年蒸发量(图 4),流域内蒸发量最大值为 2 479.1 mm(1987),最小值为 2 012.0 mm(1965),多年平均蒸发量为 2 253.5 mm。乌梁素海流域多年蒸发量

年际波动较大,根据 M-K 法的突变点检测结果,在 20 世纪 80 年代前和 21 世纪后有多次的突变点,蒸发量变化趋势不明显,并没有由于年平均气温的逐步上升,导致蒸发量并出现相应的逐渐增加,这可能是由于太阳辐射、风速以及下垫面情况的改变而导致的蒸发量的变化规律不明。年蒸发量虽然年际波动大,但是总体而言,年蒸发量大,蒸发能力强,凸显出乌梁素海流域蒸发强烈、高温干旱少雨的气候特征。

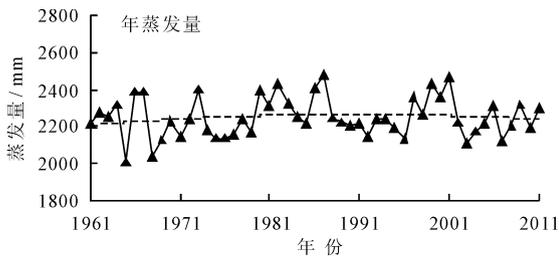
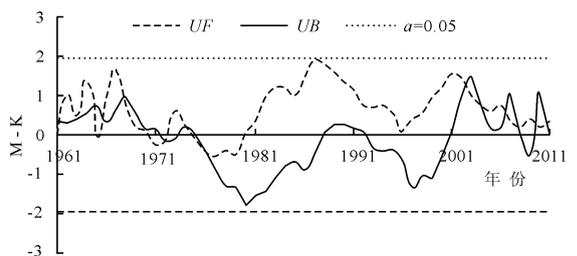


图 4 乌梁素海流域 1961—2011 年年蒸发量及 MK 突变点检测



通过对乌梁素海流域 1961—2011 年降水量和蒸发量对比,流域内多年平均蒸发量为 2 253.5 mm,多年平均降水量为 162.3 mm,可以发现蒸发量

远远大于降水量,虽然所测数据是蒸发皿的蒸发量,小于实际的蒸发量,但是由于温度升高和强蒸发能力,对当地水资源产生巨大压力,无论是地表水还是

地下水,主要的补给来源都是大气降水,而降水量年际变化较大,高温干旱事件发生的频率和强度增加,农田需水量和城镇生活用水量增多,加大了城市的供水负担,水资源矛盾供需矛盾日益突出。

2.2 进出水量变化与水位变化

湖泊中的水循环过程包括进水、出水和蓄水量的变化,国内研究者对乌梁素海的生态需水、水量平衡等进行了一些研究,姜忠峰等^[6]利用乌梁素海内部和周边的水文气象观测资料,对其水量平衡进行了分析,根据水量平衡方程可表示为^[7]

$$\Delta w = (R + F + A + G) - (O + D + E) \quad (1)$$

式中: Δw 为湖泊蓄水量变化,万 m^3 ; R 为降水量,万 m^3 ; F 为降水引起的洪水入湖水量,万 m^3 ; A 为来自排干系统的农田退水和生产生活废水量,万 m^3 ; G 为地下水补给量,万 m^3 ; O 为从湖泊排入黄河的水量,万 m^3 ; D 为湖泊渗漏量,万 m^3 ; E 为湖泊蒸发蒸腾量,万 m^3 。

得出乌梁素海年均入湖总水量 74 903 万 m^3 ,年均出湖总水量为 78 686 万 m^3 ,进出水量相差 3 783 万 m^3 ,相对偏差 4.8%。综合乌梁素海水量变化及气候要素变化特征分析,由于降水量减少,蒸发量较大,每年湖泊出水量大于进水量,会导致湖泊水位下降和面积减少,危害周边林地草原和生态系统,进而影响到乌梁素海流域水循环过程。

1947年,乌梁素海湖面面积达到 800 km^2 ,由于后来河套灌区系统经过整修,湖面周边实施围湖造田,发展到目前为止水体面积缩小至 293 km^2 。湖泊水位也持续下降,由 1978年以前的 1 020 m 降到现在的 1 018.5 m,最大水深由原来的 4 m 减少到现在的 2.5 m。造成的原因主要是:一是气候变化,降雨减少,湖水蒸发和植物蒸腾损失一定水量,湖泊出水量大于进水量;二是上游灌区实施节水工程,灌区退水进入乌梁素海的水量相应减少;三是湖泊周围水土流失现象严重,雨水携带了大量冲积物进入水体,加大了湖泊的淤积程度。

2.3 下垫面条件演变特征

人类对土地资源的利用,会在不同方面对其产生影响,特别是会导致下垫面条件的改变,水文过程不仅与土地生态系统中各自然要素密切相关,而且与农业开发、城市建设等土地利用有着相关的响应。土地利用变化导致的下垫面性质改变和人类活动将对水文过程产生影响,水循环过程时空格局的改变,加剧了水资源变化的复杂性^[8]。随着人口不断增

加和社会经济不断发展,土地资源和水资源的需求呈现上升趋势,受人为活动驱动的土地利用变化势必进一步对水资源产生影响^[9]。

通过对 1985、1995、2000、2005 和 2014 年的土地利用数据,分析乌梁素海流域在不同时期的土地利用的情况和变化趋势(表 1、表 2),由表中可以看出,耕地是乌梁素海流域土地利用的主要部分,其次为草地和未利用的土地,剩余 10% 左右的土地为林地、水域和城乡居民用地。

以旱地为主的农业用地,从 1985 - 2014 年,特别在近 10 年来,出现了急剧增加的趋势,2014 年耕地所占面积超过 50%,耕地的增加使得耗水量也相应增加,从 20 世纪 90 年代后降雨量的减少会进一步加剧水资源矛盾,势必加剧地下水的开采来补给农田和生活用水,对于当地生态环境和水资源利用产生不利影响。林地、草地及农村居民地面积不断减小,这与耕地的变化相呼应,林地草地的减少增加了下游洪水泛滥的频率和强度,使得更多的土壤直接暴露在降雨中,发生暴雨时会加剧流域的产流过程,同时入渗量减少,地下水的补给能力会比植被覆盖的条件下差,同时植被的减少会加重水土流失,增加洪水风险,导致湖泊沉积量增加和蓄水能力下降,对地表水供给和地下水储备带来不利影响^[10-11]。同时城市用地增加,城市建设增加了不透水面积,会导致径流量增加,地下水减少,增加了区域洪水风险^[12]。根据乌梁素海湖泊水位变化来看,湖泊水量呈下降趋势,但流域整体水域并未减少,这是由于虽然湖泊面积减少,但是人工建造的河渠和水库面积增加,使得流域水域面积整体变化不大;此外乌梁素海流域季节交替明显,降雨量年内分配不均,降水主要集中在 6 - 9 月,占全年降水量 60% ~ 80%,造成夏季多雨,冬季少雨的情形,对当地水资源的利用产生不利影响。未利用的土地也出现减少的趋势,风沙、戈壁等土地下渗能力大,降雨大多入渗,形成了较为稳定的地下水补给的来源,由于沙地等土地减少,对地下水的补给造成了一定的损失。由于在近年来耕地面积和城市用地的增大,林地、草地的不断减小,进一步加大了对农业用水和生活用水,水资源矛盾加大,由于乌梁素海流域当地降雨少、太阳辐射强度大、蒸发量大,特别是近年来温度的不断升高,人类用水进一步挤占生态用水,导致乌梁素海湖泊水位不断下降,湖泊面积减少,人类活动和气候变化的共同作用更加影响到乌梁素海流域水循环过程。

表1 乌梁素海流域土地利用分布情况表

km²

一级分类	二级分类	1985年	1995年	2000年	2005年	2014年
耕地	旱地	5684.82	5515.04	5531.23	5839.07	7526.34
林地	疏林地	11.87	9.79	14.15	14.36	13.67
	灌木林地	3.84	5.18	4.16	3.09	3.33
	有林地	129.17	104.99	127.97	94.42	83.95
	其他林地	4.16	0.52	7.94	5.63	3.17
草地	低覆盖度草地	812.13	823.61	845.90	1097.44	870.30
	中覆盖度草地	2075.88	2127.84	2275.31	2008.43	1364.37
	高覆盖度草地	536.30	540.72	359.87	330.49	361.31
水域	河渠	85.40	96.49	49.80	113.29	130.79
	湖泊	191.00	99.27	182.94	252.73	190.25
	水库、坑塘	0.00	2.01	0.00	9.73	60.71
	滩地	221.51	53.22	267.39	133.04	152.83
城乡、工矿、居民用地	城镇用地	70.28	79.16	70.50	74.15	91.47
	工矿、交通和建设用地	0.00	0.00	0.00	0.55	55.05
	农村居民点用地	1060.27	1207.50	1089.89	1050.39	565.73
未利用土地	戈壁	295.76	323.39	296.12	231.27	237.81
	裸岩石砾地	16.01	0.45	16.01	58.19	85.79
	沙地	1812.77	1860.72	1768.65	1607.22	1364.40
	盐碱地	507.01	418.46	654.92	498.31	319.60
	沼泽地	240.44	490.24	195.84	336.83	358.68

表2 乌梁素海流域土地利用分布百分比 %

一级分类	1985年	1995年	2000年	2005年	2014年
耕地	41.32	40.08	40.20	42.44	54.42
林地	1.08	0.88	1.12	0.85	0.75
草地	24.89	25.38	25.30	24.98	18.77
水域	3.62	1.82	3.64	3.70	3.87
城乡、工矿、居民用地	8.22	9.35	8.43	8.18	5.15
未利用土地	20.87	22.48	21.31	19.86	17.04

3 结 语

(1)通过对乌梁素海流域内及周边气象站点的气象数据计算,可以得出1961-2011年年平均气温处于明显的上升趋势,平均每10年大约上升0.5℃;降水量和蒸发量呈现振荡波动趋势,没有显著的增加或降低趋势,但蒸发量远大于降雨量。

(2)通过对乌梁素海流域30年来的土地利用分析,尤其在近10年来,以耕地为主的土地在大幅度增加,林地草地和沙地面积减小,农业需水增加,

土壤蓄水能力减弱,对地表水和地下水储备带来不利影响,进一步加重了水资源矛盾。

(3)近年来乌梁素海进水量少于出水量,水位下降,湖泊面积减少,这既与人为活动对土地利用的改变有关,也与气候变化降雨、蒸发、入渗、土壤湿度、河川径流、地下水等一系列气候要素的变化密不可分。气温升高,降雨和蒸发的年际波动变化改变了水资源的时空分布变化,同时农业耕地的变化以及温度对植物需水的影响,又改变了水资源的分配和消耗量,人类活动导致的土地利用变化和气候变化之间相互联系与相互作用,进而影响到水循环过程的演变特征。

参考文献:

- [1] 沈永平,王国亚. IPCC第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点[J]. 冰川冻土, 2013, 35(3):1068-1076.
- [2] Jacobs W C. Climate, climatic change and water supply: National Academy of Sciences, Washington, D. C. [J]. Agricultural Meteorology, 1980, 22(1):79-80.

(下转第41页)

- [3] 焦菊英,王万忠. 黄土高原降雨空间分布的不均匀性研究. 水文,2001,21(2):20-24.
- [4] 李志,赵西宁. 1961-2009年黄土高原气象要素的时空变化分析[J]. 自然资源学报,2013,28(2):287-299.
- [5] 刘慧荣,周维博,李云排,等. 清涧河流域近50年降水变化特征分析[J]. 水资源与水工程学报,2013,24(5):124-127+130.
- [6] 杨轶文,杨青惠. 窟野河流域水文特性分析[J]. 水资源与水工程学报,2006,17(1):57-60+64.
- [7] 赵晓坤,王随继. 窟野河洪水特性及变化趋势分析[J]. 干旱区资源与环境,2012,26(4):92-96.
- [8] 雷泳南,张晓萍,张建军,等. 窟野河流域河川基流量变化趋势及其驱动因素[J]. 生态学报,2013,33(5):1559-1568.
- [9] 苏念良,马文进,蔡文彦,等. 窟野河水文特性分析[J]. 水资源与水工程学报,2007,18(2):65-68.
- [10] 刘智勇,张鑫,方睿红. 基于DEM的榆林市降水空间插值方法分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2010,38(7):227-234.
- [11] 王小军,贺瑞敏,尚嫚廷. 榆林市降水时空变化规律研究[J]. 干旱区资源与环境,2011,25(5):103-108.
- [12] 汤国安,杨昕,等. ArcGIS地理信息系统空间分析实验教程[M]. 北京:科学出版社,2012.
- [13] 郭瑜. 河南省近49年来降水和气温变化特征研究[D]. 郑州:郑州大学,2012.
- [14] 陆文秀,刘丙军,陈俊凡,等. 近50a来珠江流域降水变化趋势分析[J]. 自然资源学报,2014,29(1):80-90.
- [15] 简虹,骆云中,谢德体. 基于Mann-Kendall法和小波分析的降水变化特征研究——以重庆市沙坪坝区为例[J]. 西南师范大学学报(自然科学版),2011,36(4):217-222.
- [16] 孙东永,畅建霞,黄强,等. V/S和Mann-Kendall相结合的方法在洪涝灾情分析中的应用[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2012,40(4):230-234.
- [17] 于延胜,陈兴伟. 基于Mann-Kendall法的水文序列趋势成分比重研究[J]. 自然资源学报,2011,26(9):1585-1591.
- [18] 康淑媛,张勃,柳景峰,等. 基于Mann-Kendall法的张掖市降水量时空分布规律分析[J]. 资源科学,2009,31(3):501-508.
- [19] 向亮,郝立生,安月改,等. 51a河北省降水时空分布及变化特征[J]. 干旱区地理,2014,37(1):56-65.
- [20] 李珍,姜逢清. 1961-2004年新疆气候突变分析[J]. 冰川冻土,2007,29(3):351-359.
- [21] 陈艺敏,钱永甫. 116a长江中下游梅雨的气候特征[J]. 南京气象学院学报,2004,27(1):65-72.

(上接第34页)

- [3] WMO. Water resources and climatic change: sensitivity of water resources system to climate change and variability[M]. Geneva:WMO/TO, 1987.
- [4] 夏星辉,吴琼,牟新利. 全球气候变化对地表水环境质量影响研究进展[J]. 水科学进展,2012,23(1):124-133.
- [5] Rummukainen M, Bergstrom S, Persson G, et al. The Swedish regional climate modelling programme, SWE-CLIM: A Review [J]. Ambio, 2004, 33(4-5):176-182.
- [6] 姜忠峰,李畅游. 乌梁素海进出水量变化及水量平衡初步分析[J]. 人民黄河,2013,35(9):76-78.
- [7] 王兰化. 天津市平原区深层淡水咸化-咸水下移问题的讨论[J]. 地质调查与研究,2004,27(3):169-176.
- [8] 李昌峰,高俊峰,曹慧. 土地利用变化对水资源影响研究的现状和趋势[J]. 土壤,2002(4):191-196+205.
- [9] 毛熙彦,蒙古军. 土地利用变化的水文效应研究进展[J]. 北京大学学报(自然科学版),2013,49(5):928-936.
- [10] Roland E. Schulze. Modelling hydrological responses to land use and climate change: a southern african perspective[J]. Ambio, 2000, 29(1):12-22.
- [11] O'Connell P E, Ewen J, O'Donnell G, et al. Is there a link between agricultural land - use management and flooding? [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2007, 11(1):96-107.
- [12] Haase D. Effects of urbanization on the water balance - A long - term trajectory [J]. Environmental Impact Assessment Review, 2009, 29(4):211-219.