

年雁云,王晓利,蔡迪花. 黑河流域下游额济纳三角洲气候及生态环境变化分析[J]. 干旱气象, 2015, 33(1): 28-37, [NIAN Yanyun, WANG Xiaoli, CAI Dihua. Analysis on Climate and Ecological Environment Change in the Ejin Delta, the Lower Reaches of the Heihe River[J]. Journal of Arid Meteorology, 2015, 33(1): 28-37], doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2015)-01-0028

黑河流域下游额济纳三角洲 气候及生态环境变化分析

年雁云^{1,2}, 王晓利³, 蔡迪花⁴

(1. 兰州大学资源环境学院, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000; 3. 北京大学城市与环境学院, 北京 100871; 4. 中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃 兰州 730020)

摘要:气候是生态环境变化的重要驱动因子,分析其变化特征对生态环境监测具有重要意义。本文以生态环境急剧恶化的黑河流域下游额济纳三角洲为研究对象,利用1960~2012年额济纳气象站的气温、降水资料,采用Mann-Kendall检验、回归分析及累积距平曲线分析气候特征,结合重标极差(R/S)分析法预测未来趋势。结果表明:近53 a额济纳三角洲气温显著升高、降水无明显趋势;气温年代际增温幅度差异明显,1980年代、1990年代增幅最大;降水呈“少—多—少”波动变化,21世纪暖干化明显;暖冬现象显著。结合GIMMS-NDVI及东居延海面积、正义峡径流量,通过Pearson相关分析,结果表明:气候暖干化及黑河干流下泄量减少导致东居延海萎缩盐化、植被退化;2003年以后东居延海面积增加是2002年开始人为生态输水的结果,而非气候暖湿化的表现。

关键词:气温;降水;Mann-Kendall检验;R/S分析;额济纳三角洲

文章编号:1006-7639(2015)-01-0028-10 doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2015)-01-0028

中图分类号:P463.1

文献标识码:A

引言

气候变化通过改变气温、降水等直接影响区域生态环境^[1],众多研究表明我国西北干旱区气温呈升高趋势,降水有明显的地域差异,其中西部降水增多,中部无变化,而东部呈下降趋势,1986年为近50 a降水突变点,突变后全区年降水总量及夏季降水量上升^[2-5],施雅风^[6-7]、李栋梁^[8]等认为西北地区正从暖干化向暖湿化转变。西北干旱内陆河流域,降水少,蒸发极强,生态环境极为脆弱,对气候变化响应十分敏感^[9-11]。黑河作为我国第二大内陆河,其下游额济纳三角洲是西北地区重要的天然生态屏障,对我国西北及周边地区的社会经济、生态环境发展至关重要。1960年代特别是1980年代中期以来,随着黑河中游地区用水量的逐年增加,致使黑河

向下游额济纳三角洲的输水量不断减少^[12],造成额济纳三角洲东居延海干涸、水质恶化、绿洲萎缩、草场载畜量下降、生物多样性锐减、荒漠化迅速扩张、沙尘暴频发,生态环境急剧退化^[13-15]。为遏制黑河下游额济纳生态环境不断恶化趋势,2000年实施黑河流域生态输水计划(简称“黑河输水”)。黑河输水实施以来,下游额济纳地下水环境转好,植被大部分得到恢复,东居延海实现多年连续未干涸^[16-17]。气候变化是额济纳生态环境变化的另一重要影响因素。王旭东^[18]、魏学占^[19]、黎浩许^[20]等分析了近50 a额济纳旗气候变化,认为气温显著升高,降水下降,区域暖干化趋势明显。乌兰图雅^[21]、李森^[13]等分析认为气候的干旱化使土地沙漠化和沙尘天气频次提高、地下水位持续下降、下游水域面积萎缩。2000年黑河输水的实施,有效改善了黑河下游的水

收稿日期:2014-09-01; **改回日期:**2014-11-04

基金项目:国家基础科学人才培养基金项目(J1210065)、兰州大学中央高校基本科研业务费专项资金项目(lzujbky-2014-210;lzujbky-2013-b101)、兰州大学西部环境教育部重点实验室开放基金及2013年留学人员科技活动择优资助项目“基于Rs与GIS的河西内陆河水库春季蓄水方案研究”共同资助

作者简介:年雁云(1979-),男,汉族,甘肃临夏人,讲师,博士,研究方向:遥感和GIS在水文水资源研究中的应用. E-mail: yynian@lzu.edu.cn

环境,席海洋^[16]、张一驰^[17]等分析了黑河生态输水对下游生态环境的影响,认为输水后地下水位恢复、植被渐好、居延海重现生机。然而,近10 a来卫星遥感监测的东居延海面积不断增大的事实,究竟意味着该区域的气候有向暖湿转型的趋势,还是人为生态输水措施所致?额济纳三角洲气候变化及人为生态输水又对该地区植被产生了怎样的影响?因此,本文利用1960~2012年额济纳三角洲的气温和降水资料,分析黑河下游地区气候变化及生态环境演变,探讨人为输水对植被、东居延海的影响。

1 研究区概况

额济纳三角洲地处黑河下游,地理位置介于 $99^{\circ}30'E \sim 102^{\circ}E$ 、 $40^{\circ}30'N \sim 42^{\circ}45'N$ 之间,面积约 $26\,557\text{ km}^2$ 。气候极度干旱,降水少而蒸发强,年平均降水量仅 37 mm ,年最大降水量为 103 mm ,最小为 7 mm ;年平均蒸发量为 $3\,841.51\text{ mm}$,最高达 $4\,035\text{ mm}$ 。地势开阔平坦,地形略向东北倾斜,海拔高度在 $900 \sim 1\,100\text{ m}$,分布着东、西居延海,古居延泽及古日乃湖等一系列湖盆洼地,呈现荒漠天然绿洲景观,黑河上游来水是其唯一水源^[22]。黑河以正义峡为界,正义峡以下为下游区域,正义峡径流量即黑河中上游向下游下泄的总水量。

2 数据与方法

2.1 数据及处理

选取观测时间连续、资料较为详尽的额济纳气象站($101.067^{\circ}E$, $41.950^{\circ}N$,海拔 940.5 m ,位于达来呼布镇,下垫面为绿洲)1960~2012年逐日最高气温、最低气温、平均气温、降水量气象资料。因台站未发生迁移,不存在位置变化影响,且该区人口数 <50 万,不存在城市热岛效应。首先对资料进行质量控制处理,最大限度减少由于观测仪器、资料处理和传输过程可能引起的误差影响。对逐日最高、最低气温及逐日降水量取极值得到年极端高温、低温及年日最大降水量,并统计年最长连续干旱日数(简称干旱期)、年降水日数(日降水量 $\geq 0.1\text{ mm}$ 的天数)、季降水量、年降水量。年温差定义为最高月平均气温减去最低月平均气温。正义峡径流数据来源于正义峡水文站多年监测数据。提取东居延海面积所需的LANDSAT遥感数据(1960~2012年)从USGS官网1下载,对遥感影像进行裁剪、几何校正、大气校正等预处理。额济纳三角洲1981~2006年GIMMS-NDVI数据由中国西部环境与生态科学数据中心提供的“中国地区长时间序列GIMMS植被

指数数据集”裁剪而来,时间分辨率为 15 d ,空间分辨率为 $8\text{ km} \times 8\text{ km}$ 。

2.2 气候诊断方法

采用Mann-Kendall检验、回归分析、累积距平及R/S分析方法对研究区近53 a气温、降水变化特征及未来变化趋势进行分析。Mann-Kendall检验^[23-26]可以对气候变化趋势及突变点进行检验。在双边的趋势检验中,定义统计变量 Z ,在给置信水平 α 时,若 $|Z| \geq Z_{1-\alpha/2}$,则在此置信水平下,时间序列数据存在明显的上升或下降趋势。若变化趋势 $\beta > 0$,表示呈上升趋势;反之表示呈下降趋势。当确定有显著趋势时,可以用线性回归方程模拟变化倾向率。而在检验序列突变的单边检验中,定义统计变量 UF 和 UB 。若 $UB > 0$,则表示序列呈上升趋势, $UB < 0$ 表示呈下降趋势,当 UF 超过临界线时,表示上升或下降趋势显著,超过临界线的范围确定为出现突变的时间区域。如果 UF 和 UB 在2条临界直线之间的区域出现交点,交点对应时刻即突变开始的时刻。R/S分析^[27]是通过回归得到Hurst指数,若Hurst指数 > 0.5 ,则未来的变化状况与该序列相同,即时间序列具有持续性;若Hurst指数 < 0.5 ,则未来的变化状况与该序列相反,即时间序列具有反持续性;Hurst指数 $= 0.5$,则表示序列是一个随机过程。综合利用R/S和M-K方法,可以揭示时间序列未来趋势特征。

2.3 遥感和GIS方法

主要采用单波段灰度阈值法提取东居延海面积。单波段灰度阈值法^[29]利用水体在近红外波段反射率较低,易与其它地物区分的特点,选取单一的红外波段,确定一个区分水体与其它地物的分类阈值。为提高水体识别的精度,对不同时相的影像采用不同阈值。本研究采用了LANDSAT MSS-7波段($0.8 \sim 1.1\ \mu\text{m}$)、LANDSAT 5 TM-5波段($1.55 \sim 1.75\ \mu\text{m}$)进行东居延海信息的识别和面积的提取。为了消除云的干扰作用,AVHRR-NDVI数据应用最大值合成法(MVC)^[30]进行预处理,得到每月2景NDVI影像,对其进行平均,获得月NDVI,再通过平均获得季、年NDVI。

3 结果与分析

3.1 气候年际变化

近53 a来,额济纳三角洲多年平均气温为 $8.92\text{ }^{\circ}\text{C}$,多年平均极端高、低温分别为 $39.92\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-26.27\text{ }^{\circ}\text{C}$,多年平均温差为 $39.17\text{ }^{\circ}\text{C}$,多年平均降水为 34.20 mm ,多年平均降水日数为 46 d ,

多年平均干旱期为 68 d, 多年平均年日最大降水量为 10.27 mm。通过 M-K 检验可得各变量变化趋势(表 1)。可以看出, 年平均气温、年极端低温和干旱期通过了 $\alpha = 0.05$ 的显著性检验, 存

在显著的上升趋势; 降水日数也通过了 $\alpha = 0.05$ 的显著性检验, 存在显著下降趋势; 年极端高温通过 $\alpha = 0.1$ 的显著性水平, 存在上升趋势; 其余数据没有表现出明显趋势。

表 1 气温和降水数据的 Mann-Kendall 趋势检验

Tab.1 The Mann-kendall test of temperature and precipitation

	气温				降水			
	年平均气温	年极端高温	年极端低温	年温差	年降水量	降水日数	干旱期	年日最大降水量
Z	6.175*	1.473*	2.831*	0.161	0.292	-2.363*	2.455*	-0.690
β	0.042	0.018	0.071	0.004	0.037	-0.232	0.323	-0.037

注: * 通过 $\alpha = 0.05$ 的水平检验, $Z_{1-\alpha/2} = 1.96$; ★ 通过 $\alpha = 0.1$ 的水平检验, $Z_{1-\alpha/2} = 1.28$

3.1.1 气温年际变化

仅年平均气温和极端低温显著升高(显著水平 0.05), 气候倾向率分别为 $0.44\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 、 $0.90\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$; 年极端高温升高但不显著, 倾向率为 $0.23\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$; 年温差呈微弱的下降趋势, 倾向率为 $-0.12\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ (图 1)。年平均气温、年极端高温、年极端低温的累积距平曲线均呈凹型, 并凹向负值, 波动较小, 而年温差累积距平曲线波动性大, 多为正值。其中年平均气温、年极端高温、年

极端低温的转折点分别为 1986 年、1999 年和 1970 年, 转折点前距平值多为负值, 为偏冷期; 转折点后距平值多为正值, 为偏暖期, 极端低温的转变早于平均气温和极端高温。进一步的突变分析显示, 年平均气温在 1966 年发生突变, 1988 年 UF 超过 0.05 显著水平线, 上升趋势明显; 年极端低温突变年为 1973 年, 1986 年 UF 超过 0.05 显著水平线, 上升趋势明显; 年极端高温和年温差无突变特征(图 2)。

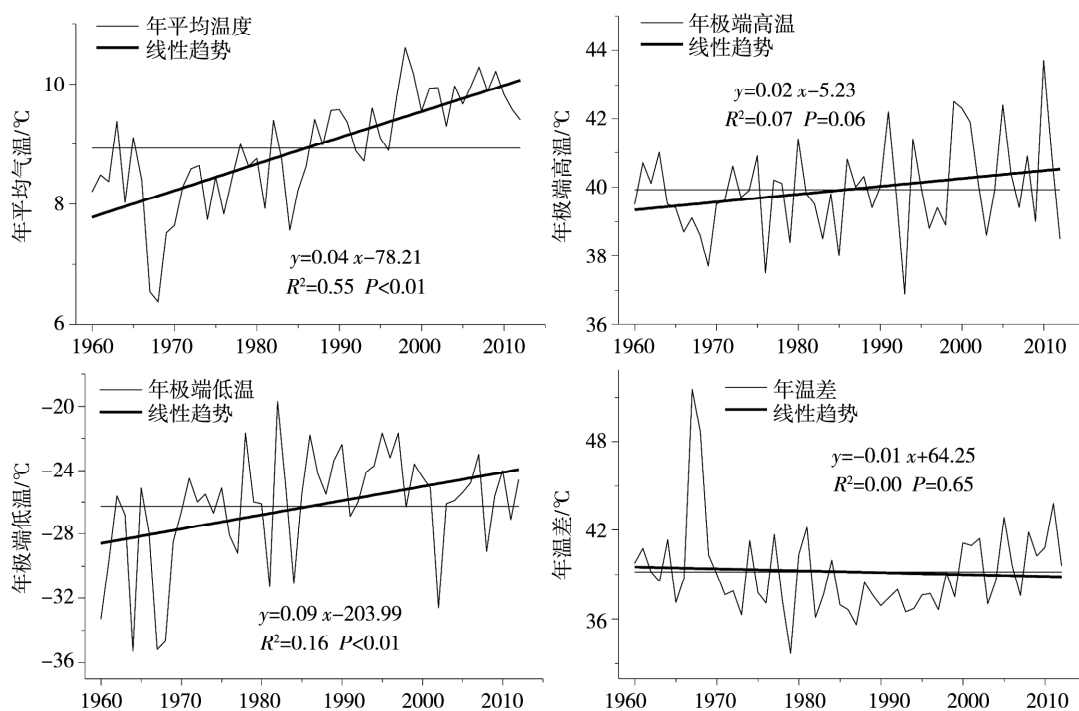


图 1 1960~2012 年额济纳三角洲年气温变化

Fig.1 The variation of annual average temperature, annual extremely high and low temperature as well as annual temperature difference in the Ejin delta from 1960 to 2012

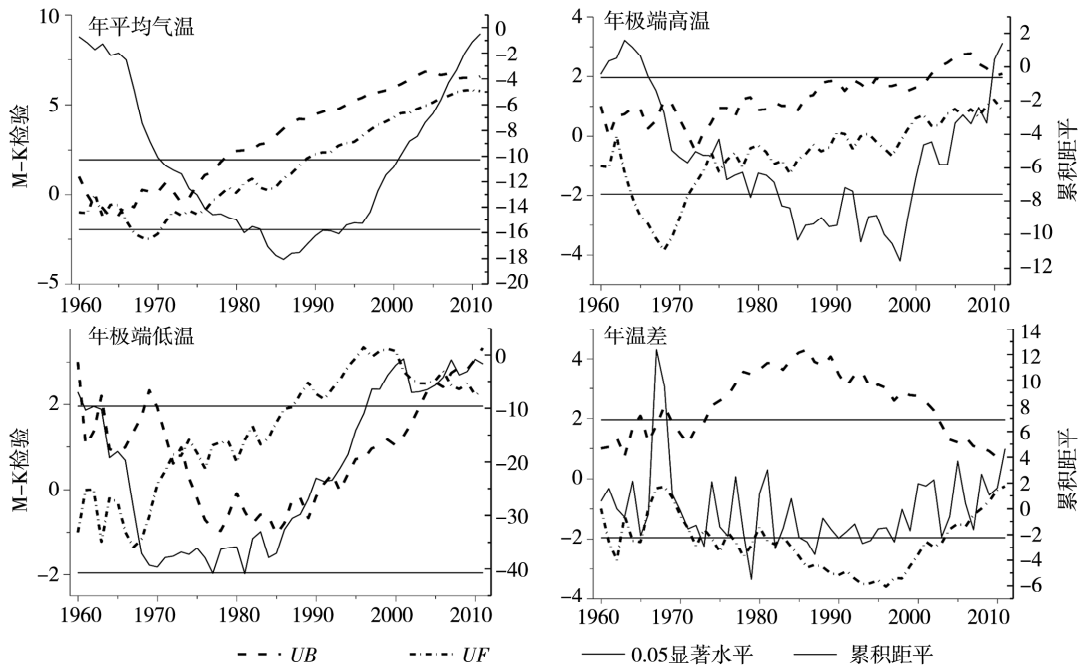


图 2 1960 ~ 2012 年额济纳三角洲年气温累计距平及 M - K 突变检验

Fig.2 The accumulative anomalies and Mann - Kendall tests of annual average temperature, annual extremely high and low temperature as well as annual temperature difference in the Ejin delta from 1960 to 2012

3.1.2 降水年际变化

年降水量和年日最大降水量无明显变化趋势; 降水日数显著下降(显著水平 0.05),倾向率为 -2.

6 d/10 a; 干旱期上升,但未通过显著性检验,倾向率为 2.7 d/10 a(图 3)。由累积距平曲线(图 4)可知,年降水量和年日最大降水量均以 1981、1989、

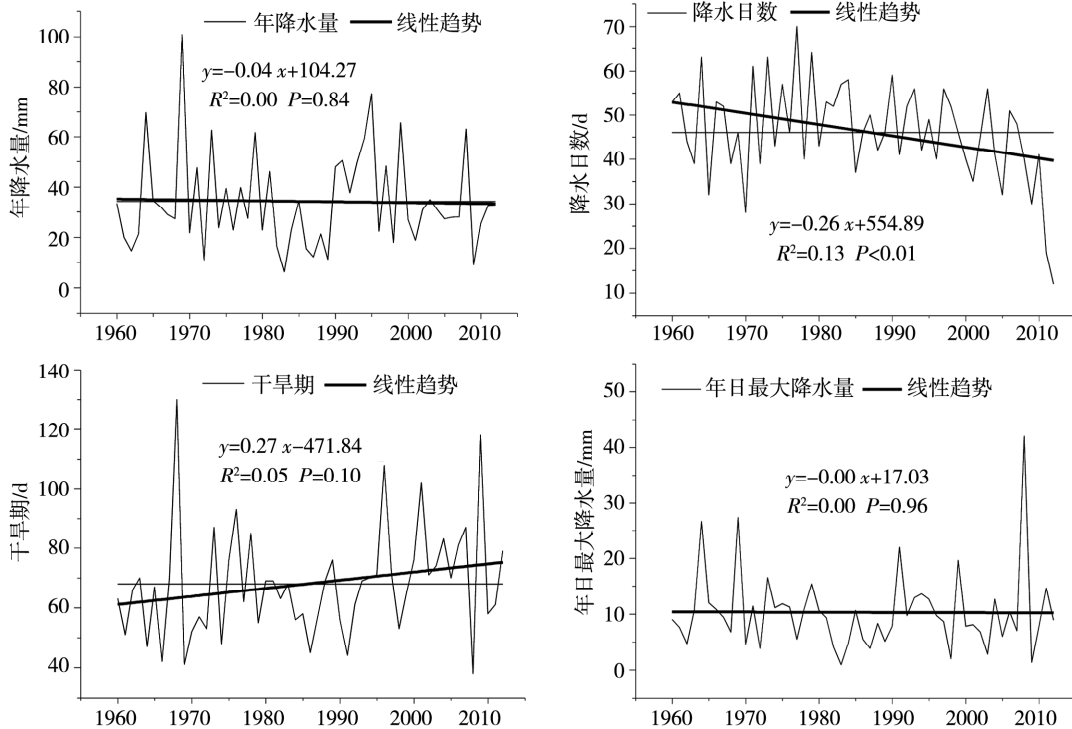


图 3 1960 ~ 2012 年额济纳三角洲年降水量、年降水日数、年干旱期及年日最大降水量变化

Fig.3 The variation of annual precipitation, annual rainfall days, annual arid period and daily maximum precipitation in the Ejin delta from 1960 to 2012

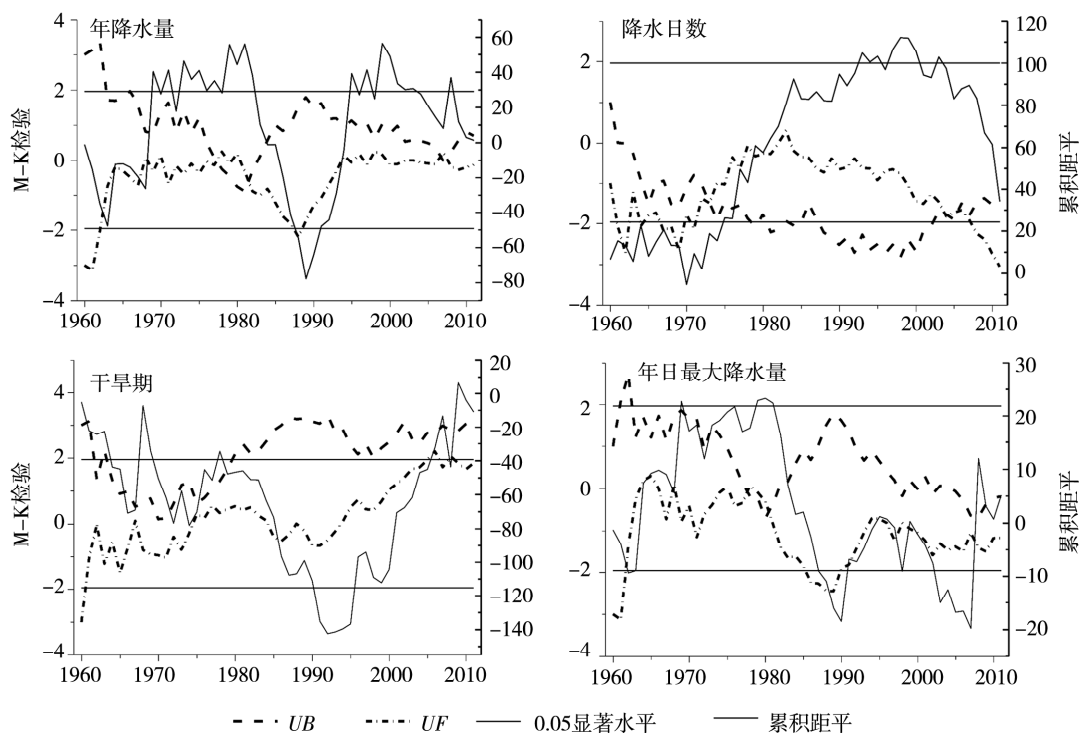


图4 1960~2012年额济纳三角洲降水的累积距平及M-K突变检验

Fig. 4 The accumulative anomalies and Mann-Kendall tests of annual precipitation, annual rainfall days, annual arid period and daily maximum precipitation in the Ejin delta from 1960 to 2012

1995年为转折点,1960~1981年为上升期,1982~1989年为下降期,1990~1995年再次回升,此后呈下降趋势;降水日数1960年代距平多是负值,为少雨期,1970~2000年多为正距平,为多雨期,2001~2012年距平多是负值,为少雨期;干旱期1991年前距平多为负值,1991年后多为正距平,进入21世纪,处于干旱少雨期。进一步的突变分析显示,年降水量和年日最大降水量的突变时间均为1982年;降水日数在1973年和2006年发生突变;干旱期无突变特征(图4)。

3.2 气候年代际变化

额济纳三角洲各年代的平均气温变化十分明显,呈显著上升趋势,1980~1990年代增温幅度最大。降水的年代际波动大,阶段性明显,大致可分为3个阶段:1960~1980年代为降水持续偏少阶

段;1990年代降水急剧增多;2000~2012年期间,降水再次减少(表2)。

表2 额济纳三角洲降水、气温年代距平

Tab. 2 The decadal anomaly of temperature and precipitation in the Ejin delta during 1960-2012

	1960 年代	1970 年代	1980 年代	1990 年代	2000~ 2012
气温/°C	-0.88	-0.60	-0.20	0.55	0.89
降水/mm	4.03	1.54	-13.35	13.41	-4.34

3.3 气候季节变化

夏、秋、冬季的平均气温均显著上升,特别是夏季上升最明显,而春季平均气温呈不显著的上升趋势;不同季节降水的变化趋势不尽相同,冬季降水显著增加,其他季节降水均无明显的变化趋势(表3)。

表3 不同季节气温、降水的M-K检验

Tab. 3 The M-K test of temperature and precipitation in different seasons

		全年	夏半年	冬半年	春季	夏季	秋季	冬季
气温	Z	6.351*	3.245	4.587*	1.204	4.457*	4.403*	3.237*
	β	0.429	0.250	0.422	0.120	0.331	0.436	0.461
降水	Z	0.292	-0.598	2.570*	0.698	-0.568	2.063*	3.383*
	β	0.374	-0.743	1.00	0.123	-0.564	0.782	0.00

注: * 通过 $\alpha=0.05$ 的水平检验, $Z_{1-\alpha/2}=1.96$; ★ 通过 $\alpha=0.1$ 的水平检验, $Z_{1-\alpha/2}=1.28$

春、夏、秋、冬季平均气温整体上都呈上升趋势,气候倾向率分别为 $0.10\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 、 $0.36\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 、 $0.43\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 、 $0.62\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ (图5)。然而,各季平均气温变化存在明显的阶段性特征:春季,1987年以前为降温阶段,其后波动上升,1960年代和2000~2012为气温偏高时段;夏季,1970年代以前表现为

降温阶段,此后气温波动性持续上升;秋季平均气温的变化与夏季相似,1970年代以前,气温波动较大,此后气温持续上升;冬季气温上升速率最高,暖冬现象明显,进入21世纪后略有下降,1988~2012年冬季气温较1960~1987年增高 $1.9\text{ }^{\circ}\text{C}$,冬季气温对于年平均气温的升高贡献最显著。

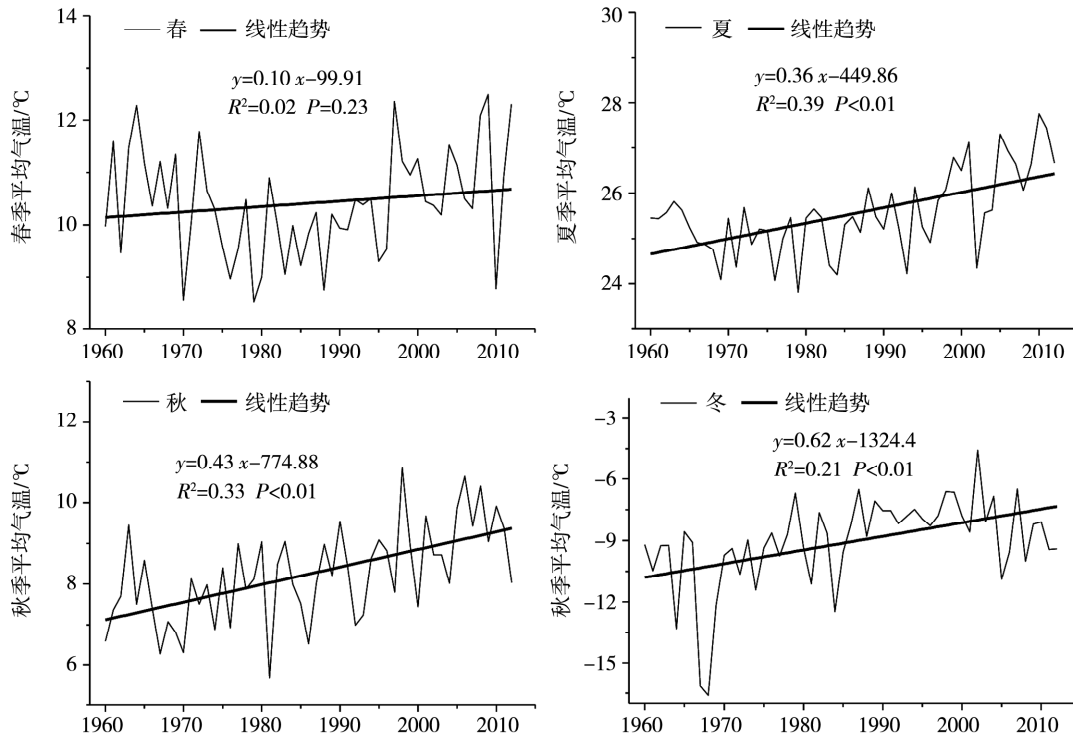


图5 1960~2012年额济纳三角洲不同季节平均气温的变化

Fig.5 The variation of seasonal average temperature from 1960 to 2012 in Ejina delta

春、夏季降水量减少,秋、冬季降水量显著增加。秋、冬季气候倾向率分别为 $2.75\text{ mm}/10\text{ a}$ 、 $0.24\text{ mm}/10\text{ a}$ (图6)。另外,各季节降水的年际变率大,阶段性特征较明显:春季,1960~1970年代,降水偏多,1980年代降水量最小,1990年代降水偏多,进入21世纪后再次偏少,近53a春季极端最大降水量为 46.6 mm (1964年);夏季,1960~1970年代降水偏多,极端最大降水量为 97.4 mm (1969年),1980年代降水偏少,1990年代回升,进入21世纪降水再次偏少;秋季,1960年代降水偏少,1970年代偏多,1980年代再次偏少,1990年代后降水持续偏多,极端最大值为2008年的 47 mm ;冬季,1960~1970年代降水偏少,仅有部分年份冬季有降水,1980年后,冬季降水上升明显,极端最大值为2006年的 3.6 mm 。

3.4 未来气候趋势分析

利用R/S分析方法对额济纳三角洲1960~2012年的年平均气温及年降水量序列计算Hurst指数。

气温、降水的Hurst指数分别为 $\text{Hurst}(T) = 0.6253 > 0.5$, $\text{Hurst}(P) = 0.2655 < 0.5$,说明未来年平均气温与1960~2012年有着相同的变化趋势,即持续性,而未来年降水量与1960~2012年有着相反的变化趋势,即反持续性。结合表1, M-K趋势检验得到的 $Z(T) = 6.175 > 0$, $Z(P) = 0.292 > 0$,可见,年平均气温未来趋势可能升高,而年降水量未来趋势可能减小。因此,额济纳三角洲未来气候特征是暖干化。

3.5 生态环境变化及成因

3.5.1 东居延海变化

以黑河生态输水工程全面实施的2002年为界,正义峡径流量和东居延海面积先降后升,2005年后正义峡径流量大致稳定在11亿 m^3 ,2006年后面积基本稳定在 37 km^2 。1960~2001年,东居延海面积以平均每年 0.35 km^2 的速度从1960年的 28.4 km^2 下降为2001年的 0 km^2 ,期间东居延海于1961~1963、1973、1986年经历3次干涸,1992年东居延海彻底干涸。

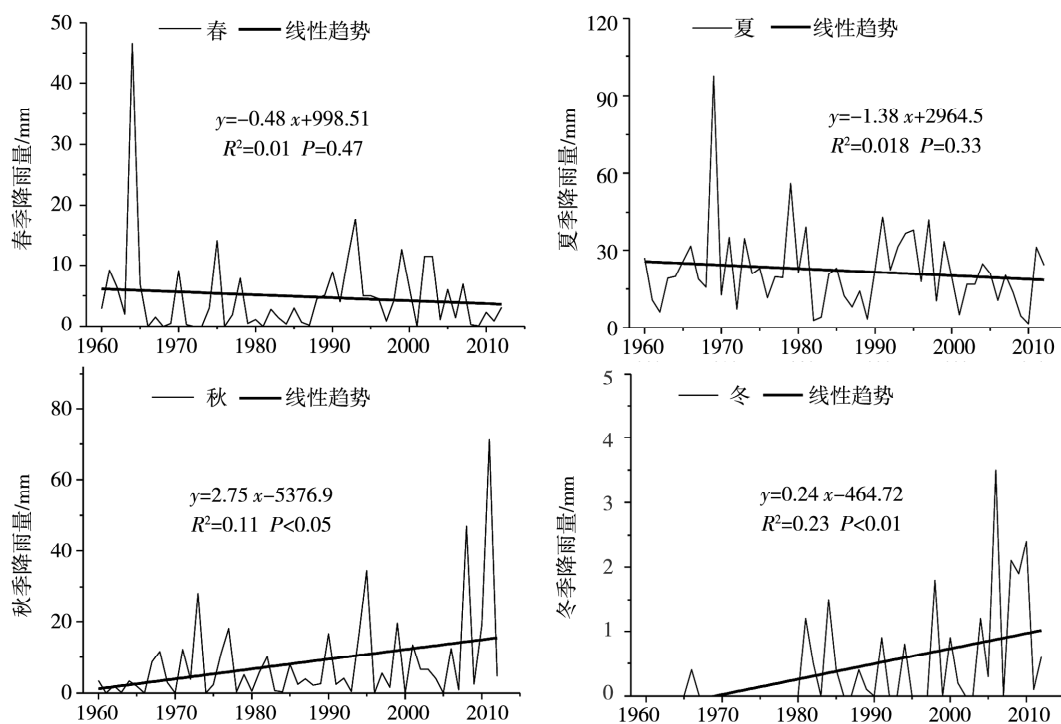


图 6 1960 ~ 2012 年额济纳三角洲不同季节降水量的变化

Fig. 6 The variation of seasonal precipitation from 1960 to 2012 in Ejin delta

2002 年后,黑河干流水流入下游导致面积增加,以平均每年 3.02 km^2 的速度由 2002 年的 0.79 km^2 增加为 2012 年的 40.3 km^2 (图 7)。

为了分析气候及正义峡径流量变化对东居延海面积的影响,建立三者之间的 Pearson 相关关系(表 4),整个研究时段内东居延海面积与正义峡径流量呈显著正相关,与年降水量正相关,与年平均气温呈负相关,正义峡径流量对东居延海面积的影响大于气候变化的影响。分析 1960 ~ 2002 年和 2000 ~ 2012 年气

候和正义峡径流量对东居延海面积的相关性可知,1960 ~ 2002 年,东居延海面积与气温呈显著负相关,气温升高 $1 \text{ }^\circ\text{C}$,东居延海面积将减少 18 km^2 。与正义峡径流量呈显著正相关,径流量每减少 1 亿 m^3 ,东居延海萎缩 4 km^2 。东居延海面积与降水的相关性则不显著,基本不受降水影响。气温的升高和正义峡径流量的减少共同导致东居延海面积锐减;2000 ~ 2012 年,东居延海面积与正义峡径流量呈显著正相关,正义峡径流量的增加是东居延海面积增加的主要原因。

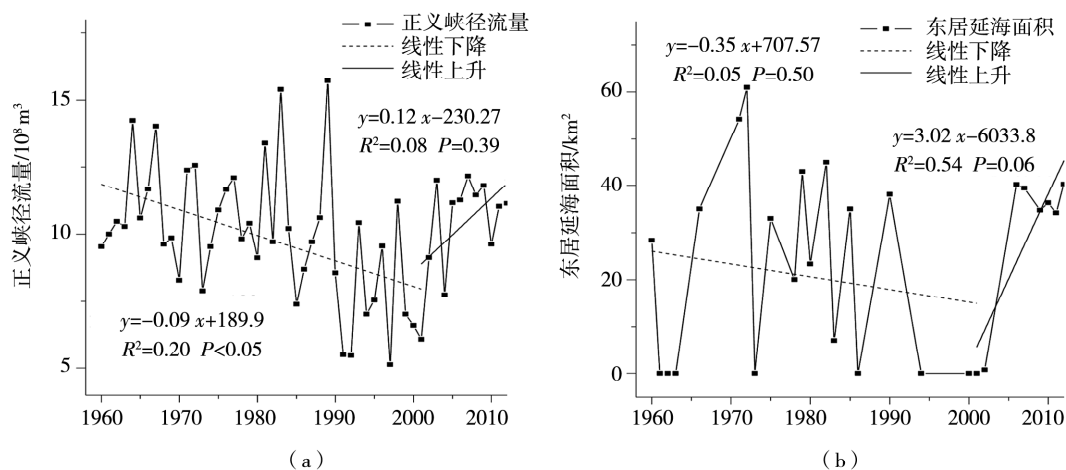


图 7 1960 ~ 2012 年正义峡径流量(a)及东居延海面积(b)变化

Fig. 7 The variation of runoff at the Zhengyi gauge station (a) and the East Juyan Lake area (b) from 1960 to 2012

表 4 东居延海面积与气温、降水及正义峡径流量的相关性

Tab. 4 The correlations between the East Juyan Lake area and temperature, precipitation and runoff at Zhengyi gauge station

	1960 ~ 2002			2000 ~ 2012			1960 ~ 2012		
	T	P	R	T	P	R	T	P	R
相关系数	-0.504 *	0.085	0.438 *	0.115	0.082	0.883 *	-0.176	0.016	0.492 *

注: T 年平均气温, P 年降水量, R 正义峡年径流量, * 通过 $\alpha = 0.05$ 的水平检验

东居延海变化不仅体现在面积上,还体现在水质上。1960 年东居延海湖水矿化度为 2.3 g/L,1979 年升为 7.4 g/L,1982 年回落为 5.2 g/L,1985 年再次升为 9.7 g/L,一年后矿化度急剧升高为 34.5 g/L,1996 年矿化度依然高居 34.5 g/L^[15,31]。1960 ~ 2000 年,东居延海湖水盐化速度很快,且伴随着东居延海面积的缩小,东居延海鱼类生境变化、生物多样性锐减、水生生态系统破坏、生态环境恶化。黑河输水实施以来,东居延海矿化度降低、水质呈变好趋势,2007 年 11 月 11 日至 2008 年 11 月 10 日东居延海湖区按平均值计算为 IV 类水质,主要污染物为高锰酸盐指数、化学需氧量、五日生化需氧量等^[33];2009 年 11 月 11 日至 2010 年 11 月 10 日东居延海平均为 IV 类水质,主要污染物为高锰酸盐指数^[34];2011 年 11 月 11 日至 2012 年 11 月 10 日提高为 III 类,主要污染物为化学需氧量、汞^[35];2012 年 11 月 11 日至 2013 年 11 月 10 日东居延海湖区为 IV 类水质,主要污染物为高锰酸盐指数^[36]。

3.5.2 植被指数变化

额济纳三角洲植被指数较低,年平均 NDVI 除 1982、1990 年外,均小于 0.2,多年平均值为 0.18。季

节 NDVI 中,夏、秋季植被指数较高,夏季指数最高值为 0.32,多年平均值为 0.27,秋季指数最高值为 0.23,多年平均值为 0.19。冬、春季指数相近,春季略高于冬季,春季多年平均指数为 0.130,冬季为 0.127。年、春、夏 NDVI 均表现为下降趋势,秋、冬 NDVI 表现为上升趋势,但显著性都不高(图 8)。

根据气温、降水、正义峡径流量与 NDVI 的 Pearson 相关性分析(表 5),气温对 NDVI 的相关性高于降水,秋季气温与夏季降水对年 NDVI 的相关性相对

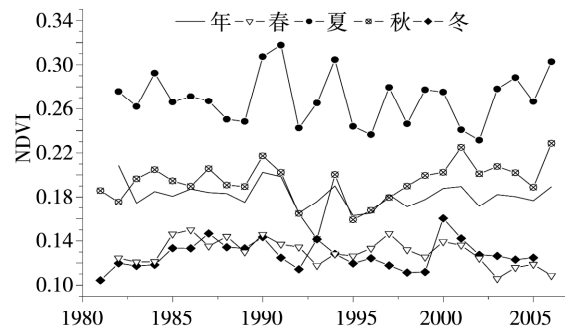


图 8 额济纳三角洲 NDVI 年、季分布
Fig. 8 The annual and seasonal evolution of NDVI in Ejin delta from 1980 to 2010

表 5 额济纳三角洲 NDVI 与气温、降水、正义峡径流量的相关性

Tab. 5 The correlation coefficients between NDVI and temperature, precipitation, runoff at Zhengyi gauge station

	年 NDVI	春季 NDVI	夏季 NDVI	秋季 NDVI	冬季 NDVI
年气温	-0.027	0.049	0.198	-0.085	-0.082
春季气温	-0.128	-0.115	0.008	-0.333	0.170
夏季气温	-0.002	0.182	0.096	-0.003	-0.064
秋季气温	0.308	0.072	0.459 *	0.386 *	-0.079
冬季气温	0.100	-0.125	0.080	-0.014	0.227
年降水	-0.048	0.054	-0.303	-0.005	0.031
春季降水	-0.030	0.273	-0.254	0.104	-0.050
夏季降水	0.288	0.089	-0.145	0.387 *	0.078
秋季降水	-0.254	-0.120	-0.365	-0.29	0.057
冬季降水	-0.222	-0.076	0.108	-0.282	-0.115
径流量(当年)	-0.093	-0.443 *	-0.192	0.001	-0.165
径流量(上一年)	0.579 **	-0.077	0.624 **	0.407 *	-0.071
径流量(上两年)	0.181	0.315	0.189	0.081	0.025

注: * 表示通过 0.05 显著性检验, ** 表示通过 0.01 显著性检验

较好,相关系数分别为 0.308、0.288。与气候因子相比,水文因子与植被 NDVI 的相关显著性更高,但这种相关显著性仅限于与下一年植被 NDVI,说明正义峡径流量对额济纳绿洲区的影响具有滞后效应。前一年正义峡径流量与当年 NDVI 的相关系数为 0.579,显著性水平为 0.01;与当年夏季、秋季 NDVI 的相关系数分别达 0.624 和 0.407,分别通过 0.01 和 0.05 显著性检验。故额济纳三角洲 NDVI 相关因子依次为正义峡径流量、气温、降水。

4 结论与讨论

(1)1960~2012 年,额济纳三角洲的气温变化同全国和西北地区一致,增温发生在 1980 年代中后期,但年平均气温增幅 $1.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和增温速率 $0.44\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 均高于全国 $1.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $0.25\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 的水平^[32] 和西北地区 $0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0.27\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 的水平^[2]。与已有研究相比,增温趋势与 1980 年代中后期 t 突变点基本一致^[13,18-21]。年平均气温、年极端低温突变点分别为 1966 年、1973 年,上升趋势显著分别发生在 1986、1987 年;而年极端高温和年温差未发生突变。年平均气温的升高主要来源于年极端低温的升高。在季节表现上,暖冬现象明显。

(2)额济纳三角洲降水阶段差异明显,近 53 a 大致经历了“偏少—偏多—偏少”的波动变化,总体呈现微弱下降趋势。这与西北地区在 1980 年代中后期气候由暖干化向暖湿化过渡趋势^[6-8] 不同。进入 2000 年后,降水量明显下降,多年平均降水量仅为 1960~2000 年多年平均降水量的 85%,且未来降水仍持续现在的变化趋势,暖干气候特征明显,这与王森、王旭东^[13,18-21] 等的研究结论一致。

(3)气候暖干化及不断减少的黑河下泄水量导致东居延海面积逐渐萎缩并伴随水质盐化、额济纳植被退化,生态环境逐渐恶化。随着黑河生态输水的进行,额济纳三角洲湖泊水域增加,植被恢复,有效遏制了生态环境恶化趋势,这与席海洋^[16]、张一驰^[17] 等的研究结论一致。近 10 a 来东居延海面积的增加主要是人为输水措施所致,并不能说明气候向暖湿化转型。

参考文献:

- [1] 刘慧民,邓惠平. 全球气候变化影响研究进展[J]. 安徽师范大学学报(自然科学版),1999,22(4):378-382.
- [2] 于淑秋,林学椿,徐祥德. 我国西北地区近 50 年降水和气温的变化[J]. 气候与环境研究,2003,8(1):9-18.
- [3] 宋连春,张存杰. 20 世纪西北地区降水量变化特征[J]. 冰川冻土,2003,25(4):143-148.
- [4] 谢金南,周嘉陵. 西北地区中、东部降水趋势的初步研究[J]. 高原气象,2001,20(4):362-367.
- [5] 刘德祥,董安祥,陆登荣,等. 中国西北地区近 43 年气候变化及其对农业生产的影响[J]. 干旱区农业研究,2005,23(2):195-201.
- [6] 施雅风,沈永平,李栋梁,等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J]. 第四纪研究,2003,23(2):152-162.
- [7] 施雅风,沈永平,胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨[J]. 冰川冻土,2002,24(3):219-226.
- [8] 李栋梁,魏丽,蔡英,等. 中国西北现代气候变化事实与未来趋势展望[J]. 冰川冻土,2003,25(2):135-142.
- [9] 马鸿勇,张峰,张洁. 近 51 年气候变化对黑河流域湿地生态环境的影响[J]. 安徽农业科学,2011,39(11):6562-6565.
- [10] 曹玲,窦永祥,张德玉. 气候变化对黑河流域生态环境的影响[J]. 干旱气象,2003,21(4):45-49.
- [11] 赵慧颖,乌力吉,郝文俊. 气候变化对呼伦湖湿地及其周边地区生态环境演变的影响[J]. 生态学报,2008,28(3):1064-1071.
- [12] 王钧,蒙吉军. 黑河流域近 60 年来径流变化及影响因素[J]. 地理科学,2008,28(1):83-88.
- [13] 李森,李凡,孙武,等. 黑河下游额济纳绿洲现代荒漠化过程及其驱动机制[J]. 地理科学,2004,24(1):61-67.
- [14] 龚家栋,程国栋,张小由,等. 黑河下游额济纳地区的环境演变[J]. 地球科学进展,2002,17(4):491-496.
- [15] 刘亚传. 居延海的演变与环境变迁[J]. 干旱区资源与环境,1992,6(2):9-18.
- [16] 席海洋,冯起,司建华. 实施分水方案后对黑河下游地下水影响的分析[J]. 干旱区地理,2007,30(4):487-495.
- [17] 张一驰,于静洁,乔茂云,等. 黑河流域生态输水对下游植被变化影响研究[J]. 水利学报,2011,42(7):757-765.
- [18] 王旭东,刘克利,戴玉芝,等. 1857-2007 年额济纳荒漠绿洲暖干化趋势[J]. 干旱区研究,2009,26(6):771-778.
- [19] 魏学占,吴瑞芬. 额济纳旗近 47 年气候变化特征分析[J]. 内蒙古气象,2008,6:5-7.
- [20] 黎浩许,颀耀文. 额济纳气候变化特征分析[J]. 甘肃农业大学学报,2013,1:112-117.
- [21] 乌兰图雅,党拜. 内蒙古额济纳旗近 50 年的气候变化及其影响分析[J]. 内蒙古师范大学学报(自然科学汉文版),2005,34(4):498-501.
- [22] 额济纳旗志编纂委员会. 额济纳旗志[M]. 北京:方志出版社,1998.
- [23] Chen Y N, Takeuchi K, Xu C C, et al. Regional Climate Change and Its Effects on River Runoff in the Tarim Basin China[J]. Hydrological Processes,2006(20):2207-2216.
- [24] Xu Z X, Takeuchi K, Ishidaira H. Monotonic Trend and Step Changes in Japanese Precipitation[J]. Journal of Hydrology, 2003(279):144-150.
- [25] Li X Y, Xu H Y, Sun Y L, et al. Lake-Level Change and Water Balance Analysis at Lake Qinghai, West China during Recent Decades[J]. Water Resource Manage, 2007,21:1505-1516.
- [26] 梅朵,高原,马艳,等. 近 50a 青海西宁气温变化特征[J]. 干旱气象,2013,31(1):100-106.
- [27] 于延胜,陈兴伟. R/S 和 Mann-Kendall 法综合分析水文时间序列未来的趋势特征[J]. 水资源与水工程学报,2008,19(3):41-44.

- [28] 李泽明,郭渠,陈皎. 1961 – 2012 年重庆城口气温变化特征及其趋势预估[J]. 干旱气象,2014,32(2):226 – 232.
- [29] 程磊,徐宗学,左德鹏,等. 基于 LANDSAT TM 数据的黄土高原区水体识别方法研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2010,46(3):424 – 430.
- [30] 张凯,司建华,王润元,等. 气候变化对阿拉善荒漠植被的影响[J]. 中国沙漠,2008,28(5):879 – 885.
- [31] 刘蔚,王涛,高晓清,等. 黑河流域水体化学特征及其演变规律[J]. 中国沙漠,2004,24(6):755 – 762.
- [32] 任国玉,初子莹,周雅清,等. 中国气温变化研究最新进展[J]. 气候与环境研究,2005,10(4):701 – 716.
- [33] 黄河网. 2007 ~ 2008 年度黑河干流水量调度情况公告. [OL]. http://www.yellowriver.gov.cn/zwzc/gzgb/gg/200812/t20081224_76132.html. 2008. 12.
- [34] 黄河网. 2009 ~ 2010 年度黑河干流水量调度情况公告. [OL]. http://www.yellowriver.gov.cn/gonggao/201012/t20101229_83387.htm. 2010. 12.
- [35] 黄河网. 2011 ~ 2012 年度黑河干流水量调度情况公告. [OL]. http://www.yellowriver.gov.cn/zwzc/gzgb/gg/201212/t20121225_126826.html. 2012. 12.
- [36] 黄河网. 2012 ~ 2013 年度黑河干流水量调度情况公告. [OL]. http://www.yellowriver.gov.cn/zwzc/gzgb/gg/201312/t20131219_137627.html. 2013. 12.

Analysis on Climate and Ecological Environment Change in the Ejin Delta, the Lower Reaches of the Heihe River

NIAN Yanyun^{1,2}, WANG Xiaoli³, CAI Dihua⁴

(1. College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;
2. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Science, Lanzhou 730000, China; 3. College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 4. Institute of Arid Meteorology, CMA, Lanzhou 730020, China)

Abstract: As a major driving factor of environment change, characteristic analysis of climate change is very important for environment detection. In this paper, by taking the Ejin delta in the lower reaches of the Heihe River as the research area, on the basis of temperature and precipitation data during 1960 – 2012 from Ejin meteorological station, the characteristic of climate change over the past 53 years was analyzed firstly by using the methods of Mann – Kendall test, regression analysis and accumulative anomaly, and then Mann – Kendall test and R/S analysis were used to predict the future climate change trend. The results were as followed: The temperature in the Ejin delta increased and precipitation appeared non – remarkable trend over the past 53 years. There were remarkable differences in different decades, the temperature increased most from the 1980s to the 1990s, while precipitation appeared fluctuating change with less – more – less. A dryer and warmer climate trend would be obvious in the 21st century, and the warm winter phenomenon would be significant. Combining the data of GIMMS – NDVI, the East Juyan Lake area and runoff at the Zhengyi gauge station, through the Pearson correlation analysis, we concluded that warm and dry climate trend and the runoff reduction of the Heihe River led to shrink and salinization of the West and East Juyan Lakes, and the vegetation degradation. While the increase of the East Juyan Lake area from 2003 was the result of ecological conveyance water project in 2002, rather than the warming – wetting trend of climate.

Key words: temperature; precipitation; Mann – Kendall test; R/S analysis; Ejin delta