

# 黄河上游重要水源补给区参考作物 蒸散量变化特征分析

汪治桂<sup>1,2</sup>, 王素萍<sup>1</sup>, 王建兵<sup>2</sup>, 张胜智<sup>2</sup>

(1. 中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730020;

2. 甘南州气象局, 甘肃 合作 747000)

**摘要:** 利用甘南牧区4个气象观测站1971—2010年的地面气象观测资料, 运用Penman-Monteith公式计算出牧区四站逐月 $ET_0$ 值。通过统计分析、相关分析、小波及Mann-Kendall等方法对甘南牧区 $ET_0$ 的变化特征进行了分析, 并就高原上气象因子与 $ET_0$ 的相关性做了进一步研究。结果发现甘南牧区各县 $ET_0$ 年际变化呈逐年上升趋势, 上升趋势达8.8~19.5 mm/10a; 1985年以前有明显的准10 a周期, 2000年到2010年间出现了准5 a周期; 在90年代以后的20年中上升更快, 并于1996年以后出现了突增。牧区 $ET_0$ 夏季最大, 并且逐年上升最快; 冬季最小, 逐年上升最慢。牧区 $ET_0$ 的空间分布不均匀除了与当地高原特殊地形地貌复杂性有关外, 还与影响参考作物蒸散量的主要气象因子的不同有关。

**关键词:**  $ET_0$ ; 变化特征; 甘南牧区

**中图分类号:** S161.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2012)06-0243-04

黄河重要水源补给区位于甘南藏族自治州, 地处甘肃省西南部, 位于青藏高原向东突出的边缘地带, 地处黄河、长江上游, 它独特的地理环境造就了大面积的草地、森林、湿地生态系统, 属高寒低温、阴湿多雨、雷暴等灾害性天气较多的高原大陆性气候区, 更是黄河及其主要支流洮河、大夏河的发源地和重要的水源涵养区, 由于地势高、温度低、降水多, 寒冷湿润的气候条件使这里寒温性中生植物得到充分适应和发展, 形成高寒草甸和高寒灌丛草甸类植被为主体的草场。甘南牧区是甘肃省重要的畜牧业生产基地, 也是全国主要少数民族集聚的草原牧区之一。多年平均降水量为400~600 mm, 年均温仅1℃~3℃。全州天然草地面积260.25万 $hm^2$ , 占全州土地总面积的67.64%, 其中可利用草地为249.50万 $hm^2$ , 占草地总面积的95.86%<sup>[1]</sup>。黄河源于青海, 但成河于甘南玛曲湿地。各干支流上不但蕴藏着丰富的水力资源, 而且其生态变化对黄河中下游地区会产生跨区域的重大影响, 近几年甘南草地退化的生态现状也引起了不少国内外专家、学者的关注<sup>[2]</sup>, 并对黄河上游这一带的草地生态环境与蒸发问题做了大量的研究<sup>[3-5]</sup>。所以在此基础上进一步研究高原牧区 $ET_0$ 的变化很有必要。在充分了解本地 $ET_0$ 变化状况的基础上引导相关部门合理利用本地气候

资源和水资源, 因地制宜地对黄河上游水源进行调节, 对维护草原湿地生态系统的稳定性、保护黄河源头水资源提供重要科学价值。

## 1 资料与方法

### 1.1 资料来源

本文选取甘南牧区4县(夏河县、合作市、碌曲县、玛曲县)作为研究对象, 所覆盖地理坐标为33°06'~35°44'N, 100°46'~104°44'E, 平均海拔3 000 m。资料选取其牧区4县气象站1971—2010年的月平均气温、平均最高气温、平均最低气温、平均相对湿度、日照时数、平均风速等地面气象观测资料(碌曲资料从1973年建站开始), 用彭曼-蒙蒂斯(Penman-Monteith)公式进行潜在蒸散量的计算。

### 1.2 计算方法

对于参考作物蒸散量 $ET_0$ 的计算方法很多, 本文采用联合国粮食及农业组织(FAO)推荐的气象上广泛应用的彭曼-蒙蒂斯(Penman-Monteith)公式<sup>[6]</sup>计算, 经专家研究此公式较适合高寒地区<sup>[7]</sup>, 计算公式为:

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 U_2)} \quad (1)$$

收稿日期: 2012-06-27

基金项目: 中国科学院寒旱区陆面过程与气候变化重点实验室开放基金“黄河源区气候变化的分析研究”

作者简介: 汪治桂(1974—), 女, 青海湟中人, 工程师, 主要研究方向为中短期天气预报及相关科研工作。E-mail: w\_zh\_g01@163.com。

式中,  $G = 0.07(T_{i+1} - T_{i-1})$ ;

$$e^0(T) = 0.6108 \exp\left[\frac{17.27T}{T + 237.3}\right];$$

$$e_s = \frac{e^0(T_{\max} + e^0(T_{\min}))}{2};$$

$$e_a = \frac{RH_{mean}}{100} e_s;$$

$$U_2 = U_{10} \frac{4.87}{\ln(67.8 \times 10 - 5.42)};$$

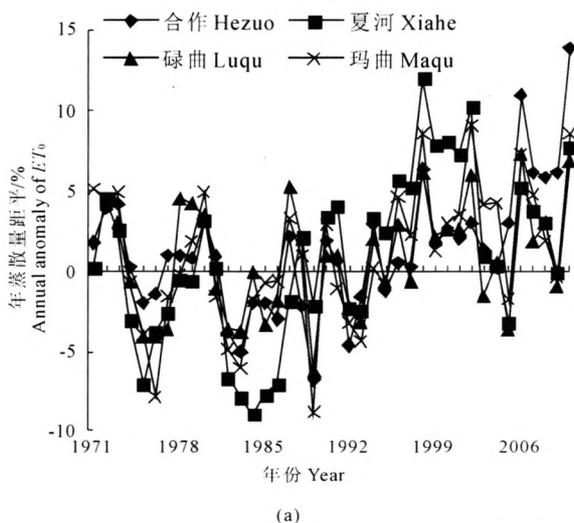
$$R_n = 0.77 \times (0.248 + 0.752 \frac{n}{N}) R_{so} - \sigma \left[ \frac{T_{\max,k}^4 + T_{\min,k}^4}{2} \right] (0.56 - 0.08 \sqrt{e_a}) (0.1 + 0.9n/N)^{[8]}$$

以上算式中,  $ET_0$  为潜在蒸散量 (mm/d);  $R_n$  为参考作物表面净辐射 [ $MJ/(m^2 \cdot d)$ ];  $R_{so}$  为晴天辐射 [ $MJ/(m^2 \cdot d)$ ];  $G$  为土壤热通量 [ $MJ/(m^2 \cdot d)$ ];  $\gamma$  为干湿表常数 ( $kPa/^\circ C$ );  $e_s$  为饱和水汽压 ( $kPa$ );  $e_a$  为实际水汽压 ( $kPa$ );  $U_2$ 、 $U_{10}$  分别为 2 m 和 10 m 高处的平均风速 (m/s);  $\Delta$  表示饱和水汽压 ( $kPa/^\circ C$ );  $T_{\max,k}$ 、 $T_{\min,k}$  分别为绝对温标的最高和最低气温 (K),  $T_{i+1}$ 、 $T_{i-1}$  分别为第  $i + 1$  月和第  $i - 1$  月温度 ( $^\circ C$ );  $n$  为实际日照时数 (h),  $N$  为最大日照时数 (h),  $\sigma$  为 Stefan-Boltzmann 常数;  $RH_{mean}$  为月相对湿度 (%)。

## 2 结果分析

### 2.1 牧区 $ET_0$ 的时间变化特征

#### 2.1.1 $ET_0$ 的 年 际 变 化 特 征 及 小 波 分 析 从 近 年



来许多专家对周边不同地区  $ET_0$  的研究中看到<sup>9-12]</sup>, 由于各地地形地貌和气候变化的不同,  $ET_0$  的变化特点也不尽相同。甘南牧区  $ET_0$  呈典型的波动式上升趋势, 上升趋势达 8.8 ~ 19.5 mm/10a (图 1, 表 1)。牧区  $ET_0$  从 20 世纪 70 年代初期以正距平开始, 直到 1995 年的 25 a 间正负距平出现了周期性变化; 并分别于 1975 年、1984 年、1989 年、1992 年、2005 年距平降至波谷, 又于 1980 年、1987 年、1990 年、1998 年、2001 年、2007 年分别升至波峰。1990 年以前的 20 年中蒸散量多以负距平为主, 而后 20 年以正距平为主, 可见牧区蒸散量的增大以 1990 年以后的 20 年中最明显。值得注意的是 1996 年以前牧区  $ET_0$  正负距平相当, 但负距平绝对值明显大于正距平绝对值。可见 1996 年前牧区  $ET_0$  变化的总趋势呈减少趋势, 只有北部夏河在此期间  $ET_0$  距平出现略升高趋势, 气候倾向率为 4.8 mm/10a, 没有通过可信用度检验。

表 1 1971—2010 年牧区 4 县年  $ET_0$  变化趋势

Table 1 The trend of  $ET_0$  in Gannan pastoral area from 1971—2010

$ET_0$ 变化趋势 Variation trend of $ET_0$	夏河 Xiahe	合作 Hezuo	碌曲 Luqu	玛曲 Maqu
线性趋势/ $(mm \cdot 10a^{-1})$ Linear trend	19.5**	13.1**	8.8*	12.0*

注: \*\* 为通过 99% 可信用度检验, \* 为通过 95% 的可信用度检验。下同。

Note: \*\* indicates 99% confidence test, \* indicates 95% confidence test. They are same as bellowing.

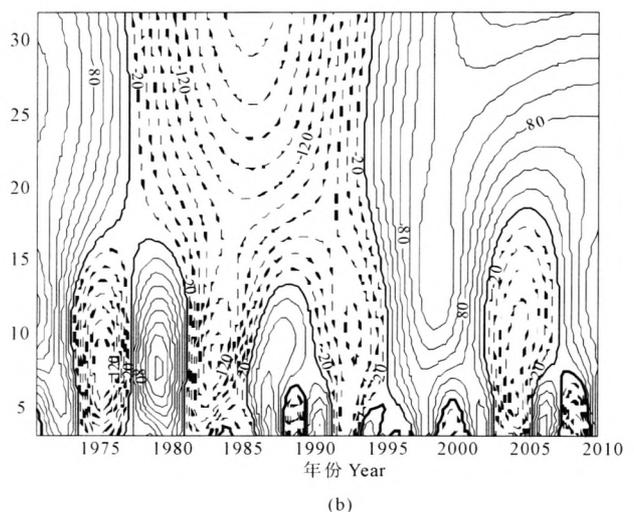


图 1 牧区年  $ET_0$  的距平变化 (a) 及和小波分析图 (b)

Fig. 1 Variations of  $ET_0$  anomaly and wavelet analysis in Gannan pastoral area

通过小波分析发现: 1971 到 1985 年间牧区 (四县年  $ET_0$  平均)  $ET_0$  变化以准 10 a 周期为主, 从 80

年代末到 90 年代末没有明显的周期变化, 处于气候调整阶段, 而且在这一时段内青藏高原气候也发生

了明显的变化<sup>[13-14]</sup>。2000 年到 2010 年又出现了准 5 a 周期。

1996 年以后牧区年  $ET_0$  均以正距平为主,只在 2003 年、2005 年和 2009 年牧区西北部(夏河、碌曲、玛曲)年蒸散量出现了负距平,这种偶然的反常变化与本站当年的气候变化有关。从牧区四县  $ET_0$  的平均值的距平分析来看,1996 年开始至 2010 年的 15 年间, $ET_0$  增大比较明显,通过 95% 的可信度检验(图 2,表 2)。

2.1.2 牧区年蒸散量的突变分析 为了进一步研究牧区  $ET_0$  的年际变化规律,选取合作和玛曲作为代表站,运用 Mann-Kendall 法对牧区年  $ET_0$  进行了突变分析,结果发现:牧区年蒸散量从 1996 年开始

均出现了不同程度的增大突变,合作在 1998 年出现了突变,玛曲于 1996 年出现突变,后又在 2007 年均出现明显增大突变。这也进一步证明了其他专家研究的结论:青藏高原气候的变暖从 1996 年以后发生了明显变化<sup>[15-16]</sup>,也是之所以高原这一带的  $ET_0$  出现这种变化特征的原因之一。

表 2 1996 年前后牧区年  $ET_0$  变化趋势

Table 2 The variation trend of  $ET_0$  in Gannan pastoral area around 1996

$ET_0$ 变化趋势 Variation trend of $ET_0$	1996 年前 Before 1996	96 年后 After 1996
线性趋势/( $\text{mm} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ) Linear trend	-5.2*	2.5*

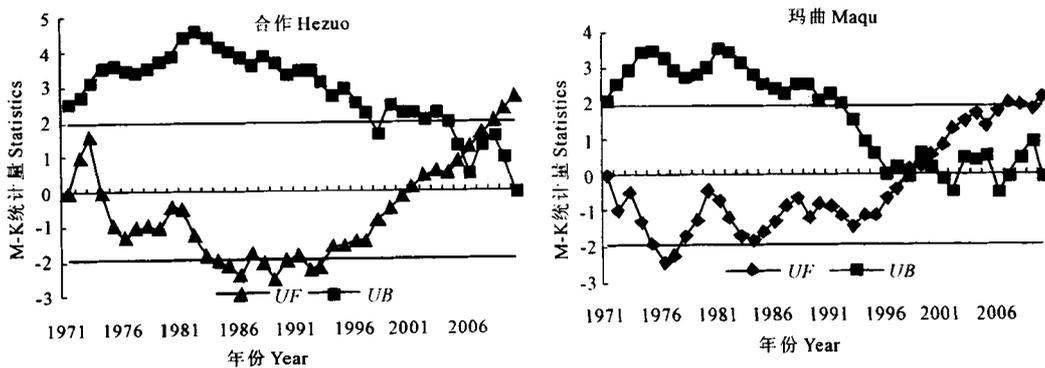


图 2 牧区年  $ET_0$  M-K 法计算图

Fig.2 The M-K method calculation of annual  $ET_0$  in Gannan pastoral area

2.2 蒸散量的季节变化特征

通过分析近 40 年来牧区  $ET_0$  的季节变化特征(图 3),牧区蒸散量夏季最大,春、秋季次之,冬季最小;夏季蒸散量占全年的 37.2%,冬季蒸散量只占全年蒸散量的 12.6%,这与甘南牧区这些年来降水量和气温的季节变化特点一致(夏季降水量最多,气温最高,而冬季降水量最少,气温最低)。从蒸散量的季节变化气候倾向率来看,夏季上升最快,秋、春季次之,冬季最慢(表 3)。

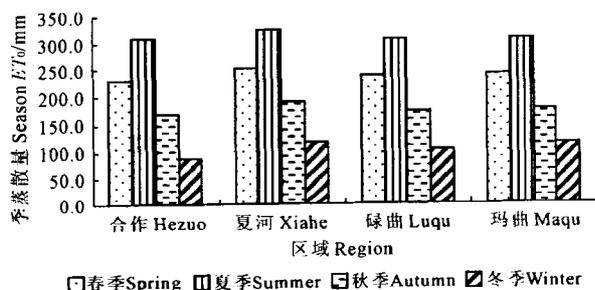


图 3 牧区  $ET_0$  的季节变化

Fig.3 The seasonal variation of  $ET_0$  in Gannan pastoral area

2.3 蒸散量的空间变化特征及气候因子对其影响

甘南牧区  $ET_0$  近 40 年来空间分布不均,北部(夏河)最大为 809~993 mm,南部(玛曲)较大为 766~916 mm,中部(合作和碌曲)较小为 749~914 mm。40 年间牧区年蒸散量基本平均在 800~900 mm 范围内变化,年平均大值中心在北部夏河。正如有关作者分析的结论一样:年蒸散量与海拔和纬度没有固定的相关性和规律<sup>[17]</sup>,而跟年内当地气候变化有关。牧区  $ET_0$  的空间分布的不均与高原地形地貌的复杂性和局地气候变化的不均匀有关。

表 3 蒸散量的季节变化气候倾向率

Table 3 The seasonal climate trend rate of  $ET_0$  in Gannan pastoral area

气候倾向率 Climate trend	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter
线性趋势/( $\text{mm} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ) Linear trend	13.2*	16.5*	16.3**	5.1

由于目前在全球气候变暖的背景之下,近年来青藏高原及甘南高原的气候也发生了显著变化,参

照其他专家分析得出的关于影响  $ET_0$  的主要气象因子<sup>[18-20]</sup>(气温、日照、风速、相对湿度)作为研究对象,对影响甘南牧区年  $ET_0$  的气候因子进行了相关检验(表4)。结果发现:只有相对湿度与本地  $ET_0$  呈负相关,而与其它三个气候因子均呈正相关。从各站四个气象因子多年变化分析结果显示:气温南部(玛曲)上升最明显,为  $0.58^\circ\text{C}/10\text{a}$ ,北部(夏河)最慢,为  $0.41^\circ\text{C}/10\text{a}$ ,中部(合作和碌曲)分别以  $0.47^\circ\text{C}/10\text{a}$  和  $0.46^\circ\text{C}/10\text{a}$  在缓慢上升;日照变化中合作和夏河最突出,分别以  $28.1\text{ h}/10\text{a}$  和  $20.5\text{ h}/10\text{a}$  在增加,玛曲上升较慢,为  $16.3\text{ h}/10\text{a}$ ,碌曲则以  $-11.3\text{ h}/10\text{a}$  在减少。风速的逐年变化表现不明显,而相对湿度的变化中只有夏河以  $0.42\%/10\text{a}$  的速度在上升,其它地方均呈逐年下降趋势,但变化不是很突出。可见受地域性气候的制约和影响蒸散的主导气候因子变化不同而出现牧区蒸散量的空间分布呈现不均匀。

表4 牧区  $ET_0$  与气象因子的相关分析Table 4 Correlation analysis of  $ET_0$  and meteorological factors in pasturing area

气象因子 Meteorological factors	夏河 Xiahe	合作 Hezuo	碌曲 Luqu	玛曲 Maqu
气温 Temperature	0.702**	0.735**	0.586**	0.562**
日照 Sunshine	0.363*	0.563**	0.481**	0.650**
风速 Wind speed	0.743*	0.425**	0.127	0.242
相对湿度 Relative humidity	-0.395*	-0.548*	-0.494**	-0.625**

### 3 结论

1) 近40年甘南牧区  $ET_0$  呈逐年上升趋势,上升趋势达  $8.8 \sim 19.5\text{ mm}/10\text{a}$ ;前20年多以负距平为主,后20年以正距平为主。从1971到1985年间有明显的准10a周期,2000年到2010年间出现准5a周期,中间时段处于气候调整期。年  $ET_0$  于1996年出现了增大突变。

2) 甘南牧区  $ET_0$  分布具有明显的季节特点,夏季最大,并且逐年上升最快。冬季最小,逐年上升最慢。

3) 牧区年平均  $ET_0$  分布不均匀,呈现北部、南部多于中部。多年平均大值中心分布在北部夏河一带。其原因除了与高原局地气候的不均一有关外,还与影响蒸散量的气候因子的变化有关。在气候因

子对参考作物蒸散量的影响中,只有相对湿度与  $ET_0$  呈负相关,而气温、日照和风速与之均呈正相关。进而分析得出各地影响  $ET_0$  的气候因子的多年变化状况也不一样,所以导致在空间分布上的不均。

### 参考文献:

- [1] 甘肃省草原总站编.甘肃草地资源[M].兰州:甘肃科学技术出版社,1999:374-379.
- [2] 全国畜牧兽医总站.中国草地资源[M].北京:中国科学技术出版社,1996:38-41.
- [3] 安华银,李栋梁.甘南高原近40年气候变化及其对农牧业影响的研究[J].干旱气象,2003,21(4):23-26.
- [4] 邱新法,刘昌明,曾燕.黄河流域近40年蒸发皿蒸发量的气候变化特征[J].自然资源学报,2003,18(4):437-439.
- [5] 李英年.高寒草甸地区冷季水分资源及对牧草产量的可能影响[J].草业学报,2001,10(3):15-20.
- [6] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements FAO Irrigation & Drainage Paper 56[M]. Rome: FAO, 1998.
- [7] 王素萍,宋连春,韩水翔.高寒区潜在蒸散量的计算方法探讨[J].干旱区研究,2009,1(2):126-130.
- [8] 左大康,王懿贤,陈建绥.中同地区太阳总辐射的空间分布特征[C]//郑度,左大康.地理研究论文集.北京:科学出版社,1993:168-185.
- [9] 封志明,杨艳昭,丁晓强,等.甘肃地区  $ET_0$  时空变化研究[J].农业工程学报,2004,20(1):101-105.
- [10] 赵璐,蔡焕杰,王健.榆林市参考作物蒸发蒸腾量随时间序列变化的规律[J].干旱地区农业研究,2010,28(1):39-43.
- [11] 慕彩芸,马富裕,郑旭荣,等.北疆春小麦蒸散规律及蒸散量估算研究[J].干旱地区农业研究,2005,23(4):53-56.
- [12] 杨小利,姚小英,蒲金涌.陇东南干旱区农田土壤水分蒸散变化特征[J].干旱地区农业研究,2010,28(4):14-17.
- [13] 王建兵,王振国,吕虹.黄河重要水源补给区草地退化的气候背景分析[J].草业科学,2008,25(4):24-27.
- [14] 吴绍洪,尹云鹤,郑度,等.青藏高原近30年气候变化趋势[J].地理学报,2005,60(1):6-9.
- [15] 王建兵,王振国,汪治桂.甘南地区近40年气温变化特征[J].气象,2007,33(1):113-117.
- [16] 蔡英,李栋梁,汤懋苍,等.青藏高原近50年来气温的年代际变化[J].高原气象,2003,22(5):464-470.
- [17] 徐俊增,彭世彰,张瑞美,等.参考作物蒸发蒸腾量随纬度与海拔的变化规律研究[C]//中国农业工程学会.中国农业工程学会2005年学术年会论文集,2005:134-137.
- [18] 牛全文,李靖.陕西省多年月潜在蒸发量和降水量的随机特性[J].干旱地区农业研究,2001,19(2):112-116.
- [19] 李林,张国胜,汪青春,等.黄河上游流域蒸散量及其影响因素研究[J].地球科学进展,2000,15(3):256-259.
- [20] 罗雨,刘海军,李艳.北京地区  $ET_0$  变化趋势及其主要影响因素分析[J].2010,28(1):34-38.

(英文摘要下转第260页)

## Change characteristics of agricultural climate resources under the background of climate change in Southwestern Shandong Province

LI Rui-ying<sup>1</sup>, REN Chong-yong<sup>1</sup>, ZHANG Cui-cui<sup>2</sup>, LIU Tao<sup>1</sup>, JIANG Xiao-dong<sup>3</sup>

(1. Heze Municipal Bureau of Meteorology, Heze, Shandong 274000, China;

2. Jining Municipal Bureau of Meteorology, Jining, Shandong 272000, China;

3. Key Laboratory of Agrometeorology of Jiangsu Province, College of Applied Meteorology of Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China)

**Abstract:** Based on the meteorological data from 1961—2010 in Southwestern Shandong Province, by using climatic trend rate and the Mann - Kendall break detector method, analysis was made of the variation trends of regional main agricultural climate resources of the four seasons and the annual light, heat and water and so on. The results showed that the annual average temperature,  $\geq 0^{\circ}\text{C}$  and  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  accumulated all had increasing tendency, with the tendency ratios of climate were  $0.16^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ,  $53.8(^{\circ}\text{C}\cdot\text{d})/10\text{a}$ ,  $83.5(^{\circ}\text{C}\cdot\text{d})/10\text{a}$  respectively, and this increase was most distinct during winter while spring secondly, abrupt changes occurred in the middle of 1990s, the frostless period was prolonged by  $1.9\text{d}/10\text{a}$ , all over showed that the heat resources became rich after abrupt change; the light resources had very significant decreasing trend, especially the most remarkable during summer, autumn and winter, and the light resources had abrupt changed at the middle of 1980s, while the solar radiation and sunshine hours decreased by  $208.4\text{MJ}/(\text{m}^2\cdot 10\text{a})$  and  $112.1\text{h}/10\text{a}$  respectively; the annual precipitation had no obvious change, with a little increase, and it had uneven distribution in inter-annual and each season every year, while the days of heavy rainfall increased, the water decreased during spring and autumn while increased during summer and winter. The whole study area had warming and drying trend while the main characteristics were rich heat resources, deficiency light resources and insufficient water resources.

**Keywords:** agricultural climatic resources; change characteristics; trend; Southwestern Shandong Province;

(上接第 246 页)

## Analysis of variation characteristics of reference crop evapotranspiration in important water source supply areas of the Yellow River

WANG Zhi-gui<sup>1,2</sup>, WANG Su-ping<sup>1</sup>, WANG Jian-bing<sup>2</sup>, ZHANG Sheng-zhi<sup>2</sup>

(1. Institute of Arid Meteorology, CMA, Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province, Lanzhou, Gansu 730020, China; 2. Gannan Meteorological Bureau, Hezuo, Gansu 747000, China)

**Abstract:** Because of natural and human factors, in recent years the grassland ecology of the upper reaches of the Yellow River was badly damaged by grassland degradation, desertification, and even some places the phenomenon such as water resources exhausted. Reference crop evapo-transpiration amount ( $ET_0$ ) changes and have great influence on the water resources and ecological status, so the pastoral areas of Gannan  $ET_0$  change characteristics are analyzed, and further research is carried out on whether the effect of plateau meteorological factors is significant on  $ET_0$  of the pastoral areas. The meteorological data from 4 observatory stations in Gannan pastoral areas in 1971—2010 years are used to calculate  $ET_0$  value of pastoral area from month to month with Penman-Monteith formula. Through statistical analysis, correlation analysis, small affected Mann-Kendall method, it is found that interannual variability of  $ET_0$  in Gannan pastoral areas increases year by year, rising to  $8.8\sim 19.5\text{mm}/10\text{a}$ ; it shows a obvious 10-year cycle before 1985 while a 5-year cycle from 2000—2010; and it appears a faster rise in the recent 20 years since the 1990s, and even a sudden increase after 1996. The  $ET_0$  of pastoral areas in summer is the largest and rises fastest year after year; while it in winter is the minimum and rises slowest year by year. The uneven spatial distribution of  $ET_0$  in pastoral areas is related not only to the complexity of local special plateau topography, but also to the difference of main meteorological factors influencing the amount of evapo-transpiration.

**Keywords:** reference crop evapotranspiration ( $ET_0$ ); variation characteristic; Gannan pastoral area