

# 阿勒泰地区参考作物蒸散量时空变化特征

吴燕锋<sup>1</sup>, 巴特尔·巴克<sup>1</sup>, 李维<sup>1</sup>, 魏小琴<sup>1</sup>,  
加依娜古丽·窝扎提汗<sup>1</sup>, Rasulov H H<sup>2</sup>

(1. 新疆农业大学 草业与环境科学学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 塔吉克农业大学 水文气象系, 杜尚别 734003)

**摘要:** 基于阿勒泰地区 7 个气象站 1961—2012 年逐日气象资料, 采用 Penman-Monteith 模型计算了逐日参考作物蒸散量, 运用 Mann-Kendall 非参数检验法、小波分析法, 并结合 ArcGIS 软件对作物参考蒸散量的时空变化特征进行了研究。结果表明: 阿勒泰年和春季作物参考蒸散量呈增加趋势, 而夏季、秋季和冬季作物参考蒸散量呈减少趋势。年和夏季的作物参考蒸散量分别在 1994 年、1992 年发生突变, 而春季、秋季和冬季的作物参考蒸散量则没有发生突变。年和四季的作物参考蒸散量都存在 27 a 的周期。空间分布上, 年、春季、夏季和秋季的平均作物参考蒸散量呈自阿勒泰市南部和福海县西北部向东部、南部和西部逐渐递减的变化趋势。而冬季作物潜在蒸散量大致呈现自西向东逐渐递减。变化趋势上, 春季潜在蒸散量在空间上都呈增加趋势, 而年、夏季、秋季和冬季的潜在蒸散量在阿勒泰的东部呈增加趋势, 在西部则呈减少趋势。

**关键词:** 阿勒泰地区; 参考作物蒸散量; 时空变化特征

**中图分类号:** S161.4

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2015)05-0260-06

## Spatiotemporal Variation of Reference Crop Evapotranspiration in Altay Region

WU Yanfeng<sup>1</sup>, Bake · Batur<sup>1</sup>, LI Wei<sup>1</sup>, WEI Xiaoqin<sup>1</sup>,  
Jiayi' naguli · wozhatihan<sup>1</sup>, Rasulov H H<sup>2</sup>

(1. College of Grassland and Environmental Science, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. Faculty of Hydrometeorology, Tajik Agrarian University, Dushanbe 734003, Tajikistan)

**Abstract:** The values of reference crop evapotranspiration were calculated using the Penman-Monteith model based on the daily meteorological data observed from 7 meteorological stations in Altay region of Northern Xinjiang Uygur Autonomous Region during the period from 1961 to 2012. The annual and seasonal values of reference crop evapotranspiration were analyzed using the Mann-Kendall nonparametric method, wavelet analysis and spatial analysis tools of ArcGIS. The results are as follows. The annual and spring values of reference crop evapotranspiration presented significantly increasing trend, whereas the summer, autumn and winter values of reference crop evapotranspiration presented decreasing trend during the past 52 years. The annual and summer values of reference crop evapotranspiration presented abrupt change in 1994 and 1992, respectively. However, the values of reference crop evapotranspiration in spring, autumn and winter have no abrupt change. Obviously, the annual and four seasonal values of reference crop evapotranspiration have 27-year period. The annual, spring, summer and autumn values of reference crop evapotranspiration were higher in the southern Altay City and northern Fuhai County, followed by eastern and western regions. The spring values of reference crop evapotranspiration all presented increasing trend in Altay region, whereas the annual, summer, autumn and winter values of reference crop evapotranspiration presented increasing trend in eastern region of Altay and decreasing trend in the western region of Altay.

**Keywords:** Altay region; reference crop evapotranspiration; spatiotemporal variation

收稿日期: 2014-09-23

修回日期: 2014-11-20

资助项目: 2014 年度新疆研究生科研创新项目(XJGR12014079); 国家国际科技合作计划(2010DFA92720-13); 新疆维吾尔自治区土壤学重点学科

第一作者: 吴燕锋(1986—), 男, 河南周口人, 硕士研究生, 研究方向为干旱区生态与环境。E-mail: wyfecology@163.com

通信作者: 巴特尔·巴克(1973—), 男(维吾尔族), 新疆莎车县人, 博士, 教授, 主要从事干旱区生态与环境研究。E-mail: bateerbake@163.com

参考作物蒸散量(Reference Crop Evapotranspiration,  $ET_0$ )是水文循环的关键环节,是能量平衡和水量平衡的重要组成部分,也是联系能量循环和水量循环的纽带,同时也是影响一个地区水热平衡的重要气候因子和参数<sup>[1]</sup>,因此,在区域水量平衡、农业水资源需求与管理以及气候变化的影响等研究中具有十分重要意义<sup>[2]</sup>。但是,目前对于下垫面的蒸散量直接测量仍存在困难,于是国内外学者基于参考作物蒸散量开展了相关的研究<sup>[3-4]</sup>。先后基于  $ET_0$  从对区域参考作物蒸散量的时空变化特征<sup>[5-6]</sup>、影响因子<sup>[7]</sup>以及基于  $ET_0$  对其区域干湿变化<sup>[8]</sup>等开展了大量的研究。这些研究表明  $ET_0$  可以作为对区域蒸散研究的可靠方法,可以用于对区域蒸散量的时空变化特征的探究。

阿勒泰市地处亚洲大陆腹地,属中温带干旱大区气候带。是自治区重要的畜牧业和种植业基地,草原辽阔,草质优良,有牧草地面积  $8.44 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ,耕地  $2.5 \times 10^3 \text{ hm}^2$ 。但是,作为气候变化极为敏感的西北地区,尤其是阿勒泰地区,蒸散量的变化直接或者间接对农业生产以及人们的生活有很大的影响,其气候变化下蒸散量变化的相关理论研究较少。因此,本文拟采用联合国粮农组织推荐的 Penman-Monteith 公式分析阿勒泰地区 1961—2012 年潜在蒸散量的年际、季节变化特征以及突变特征,并对其周期性进行探究,以期气候变化下新疆干湿变化的相关研究提供参考。

## 1 数据来源及处理方法

### 1.1 数据来源

本文所用资料是由国家气象信息中心提供的 1954—2012 年逐日的阿勒泰地区 7 个气象站(阿勒泰市、富蕴县、哈巴河县、青河县、福海县、吉木乃县、布尔津县)的平均气温、平均最高气温、平均最低气温、降水量、平均风速、日照时数、平均水汽压等观测资料。数据来源可靠,且经过了严格质量控制和检验,包括气候学界限值检查、气候极值检查、数据内部一致性检查和数据时间一致性检查<sup>[8]</sup>。由于站点资料的时间长度不一致,为确保资料的可靠性和一致性,选取 1961—2012 年的气象观测资料进行研究,并进一步统计分析逐月、季节(3—5 月为春季,6—8 月为夏季,9—11 月为秋季,12 月—次年 2 月为冬季)的潜在蒸散量。

### 1.2 数据处理方法

1.2.1 作物参考蒸散量的计算 本研究采用联合国粮农组织推荐的 Penman-Monteith 公式计算阿勒泰地区的参考作物蒸散量<sup>[4-7]</sup>:

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

式中:  $ET_0$ ——参考作物蒸散量(mm);  $R_n$ ——冠层表面净辐射 [ $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ];  $G$ ——土壤热通量 [ $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ];  $\Delta$ ——饱和水汽压曲线在气温为  $T$  时的斜率( $\text{kPa}/^\circ\text{C}$ );  $T$ ——日平均气温( $^\circ\text{C}$ );  $\gamma$ ——干湿表常数( $\text{kPa}/^\circ\text{C}$ );  $U_2$ ——距地面 2 m 处的风速( $\text{m/s}$ );  $e_a$ ——饱和水汽压( $\text{kPa}$ );  $e_d$ ——实际水汽压( $\text{kPa}$ )。公式由两项组成:一是辐射平衡引起的辐射项;二是气温、风速和水汽压等引起的空气动力项。

1.2.2 气象数据处理 采用趋势分析法、Mann-Kendall 非参数检验法<sup>[9]</sup>、小波分析法<sup>[10]</sup>对  $ET_0$  进行时间序列分析,基于 ArcGIS 软件的空间分析模块<sup>[11]</sup>探究了  $ET_0$  的时空变化特征。

## 2 结果与分析

### 2.1 时间变化特征

2.1.1  $ET_0$  年际、年代变化特征 如图 1 所示,过去 52 年,阿勒泰地区  $ET_0$  整体呈增加趋势( $1.027 \text{ mm}/10 \text{ a}$ ),但增势不显著( $p > 0.05$ )且波动较大。52 a 平均  $ET_0$  为  $930.13 \text{ mm}$ ,其中最大值为  $1030.97 \text{ mm}$ ,发生在 1962 年;最小值为  $853.39 \text{ mm}$ ,发生在 1993 年。不同年代时段之间差异较小,1960s,2000s 的  $ET_0$  相对较大。

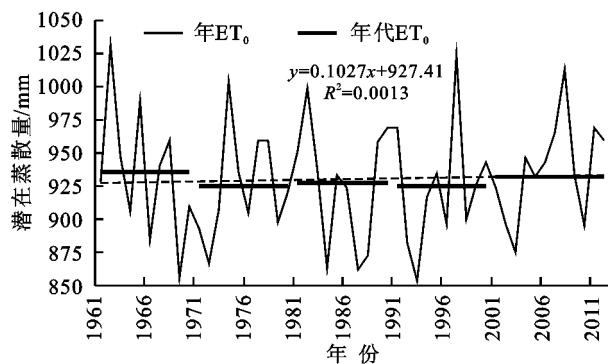


图1 阿勒泰地区  $ET_0$  年、年代变化特征

2.1.2  $ET_0$  四季变化特征 气象要素的时间异质性会引起四季潜在蒸散的时间演变特征,因此需要进一步分析  $ET_0$  四季的变化特征。如图 2 所示,四季中,夏季的  $ET_0$  最大(平均为  $463.25 \text{ mm}$ ),春季次之(平均为  $266.89 \text{ mm}$ ),秋季  $ET_0$  相对较小(平均为  $164.96 \text{ mm}$ ),冬季的  $ET_0$  最小(平均为  $21.65 \text{ mm}$ );春季、秋季的  $ET_0$  整体呈增加趋势,夏季和秋季的  $ET_0$  整体呈现减少趋势,其中春季的  $ET_0$  增势较为明显,其气候倾向率为  $2.696 \text{ mm}/10 \text{ a}$  ( $p < 0.01$ );夏季的  $ET_0$  减少趋势最为明显,其气候倾向率为  $-1.434 \text{ mm}/10 \text{ a}$  ( $p < 0.05$ )。春季的  $ET_0$  在

1961—1971年呈减少趋势,在1971—2012年整体呈现增加趋势,其中最大值发生在1997年,为330.81 mm,最小值发生在1966年,为221.43 mm;年代变化上,1970s的最小,为261.91 mm,其他年代 $ET_0$ 差异较小,分别为:274.43(1960s),271.03(1980s),275.9(1990s),277.18 mm(2000s)。年际变化上,夏季的 $ET_0$ 在1961—1993年总体呈减少趋势,1993—2012年增加趋势明显;其中,1974年 $ET_0$ 达到最大值,为526.56 mm,1993年 $ET_0$ 达到最小值,为425.15 mm;年代变化上,自1960s—1990s, $ET_0$ 逐渐减少,

1990s达到年代最小值,为463.14 mm,随后在2000s又开始增加。秋季的年际变化趋势不明显(气候倾向率为0.093 mm/10 a,  $p>0.05$ ),最大 $ET_0$ 在1978年,为191.31 mm,最小 $ET_0$ 在1987年,为137.29 mm;同样,秋季的年代变幅也较小,为162.39~163.93 mm。冬季的 $ET_0$ 整体呈不明显的减少趋势(气候倾向率为0.327 mm/10 a,  $p>0.05$ );在年际变化和年代变化上都呈现先增加后减少的趋势,其中1989年达到最大值29.23 mm,1984年达到最小,仅为13.29 mm。

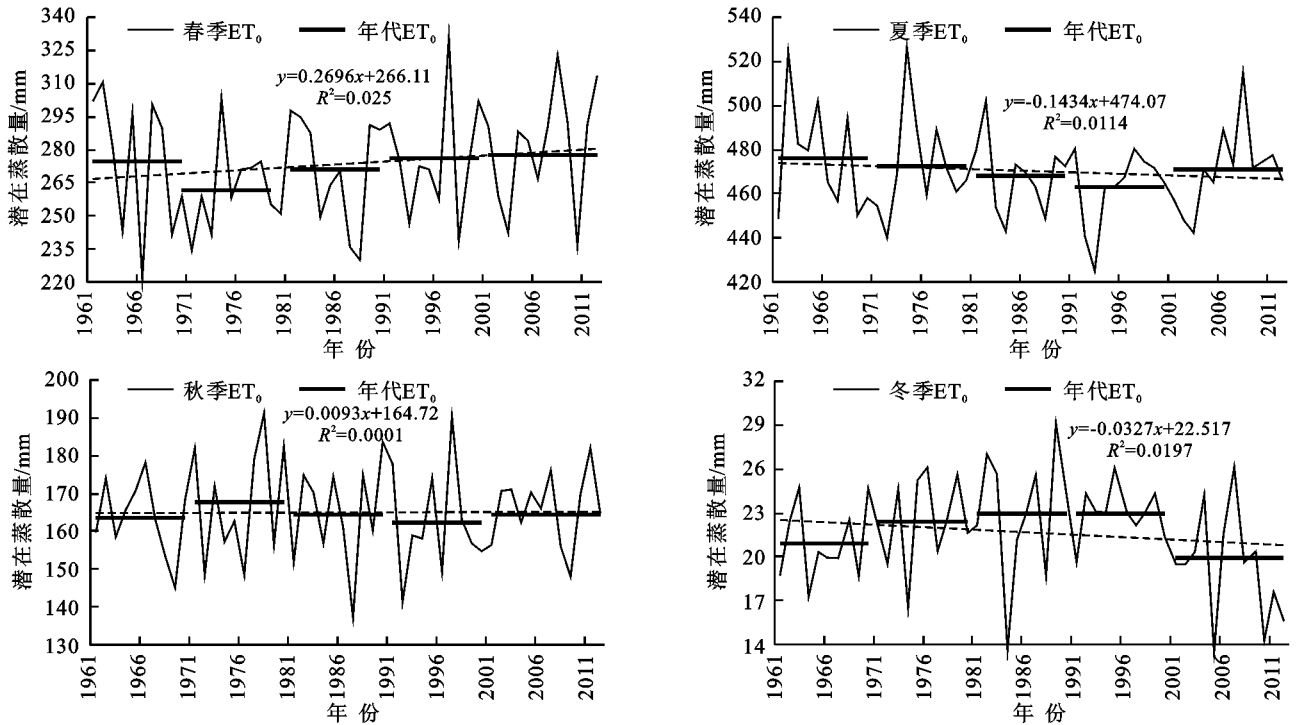


图2 阿勒泰地区  $ET_0$  季节变化特征

**2.1.3 突变分析** 对阿勒泰地区干旱频次进行统计分析,计算出时间序列的  $U_t, U_b$  值。取显著水平  $\alpha=0.05$  情况下临界值为  $\pm 1.96$ ,同时根据  $Z$  值的大小探究季节和年际的干旱频次的变化趋势,从而可以验证趋势分析法。由图3可以看出,年和夏季的  $ET_0$  发生了突变,分别在1994年、1992年发生突变,而春季、秋季、冬季的  $ET_0$  则没有明显的突变。年和四季的 Mann-Kendall 计算的  $Z$  值分别为 0.39, 0.89, -0.07, -0.12, -0.66,表明了年和春季的  $ET_0$  呈增加趋势,夏季、秋季、冬季的  $ET_0$  呈减少趋势,这与趋势分析法的结果是一致的。

**2.1.4 周期分析** 根据年和季节的干旱频率,计算 Morlet 小波的实部值,做出相应的时频分布图(图4)。可以看出年和四季  $ET_0$  的小波时频分布图分布大致一致,都存在 27 a 的第一主变换周期,在研究时段呈现“偏多—偏少—一再偏多”的变化过程;另外,在

1970—2000年还存在 17 a 的周期变换,在时段内呈现“偏少—偏多—一再偏少”的变化过程。具体来看,年  $ET_0$  在 1970—1990 年还存在 12 a 的周期;冬季  $ET_0$  在 1970—2010 年存在 12 a 的周期。

## 2.2 空间变化特征

**2.2.1 年平均  $ET_0$  空间分布特征** 由于自然地理环境的空间异质性, $ET_0$  在阿勒泰不同地区分布有所不同,且呈现了不同的变化趋势。图5A可以看出,阿勒泰地区年均变幅为 781~1 009 mm,在福海县西北部、阿勒泰市南部为  $ET_0$  的高值区,向东部、南部和西部逐渐递减,在吉木乃县形成低值区。变化趋势上(图5B),年均  $ET_0$  在东部的富蕴、青河县呈增加趋势,其他地区主要以减少趋势为主,其中吉木乃的东部、布尔津县的西南部也呈增加趋势。综上可以看出,吉木乃县潜在蒸散量最少,但减少趋势最为明显,而潜在蒸散量较大的中西部地区也在减少,东部潜在蒸散量增势最为明显。

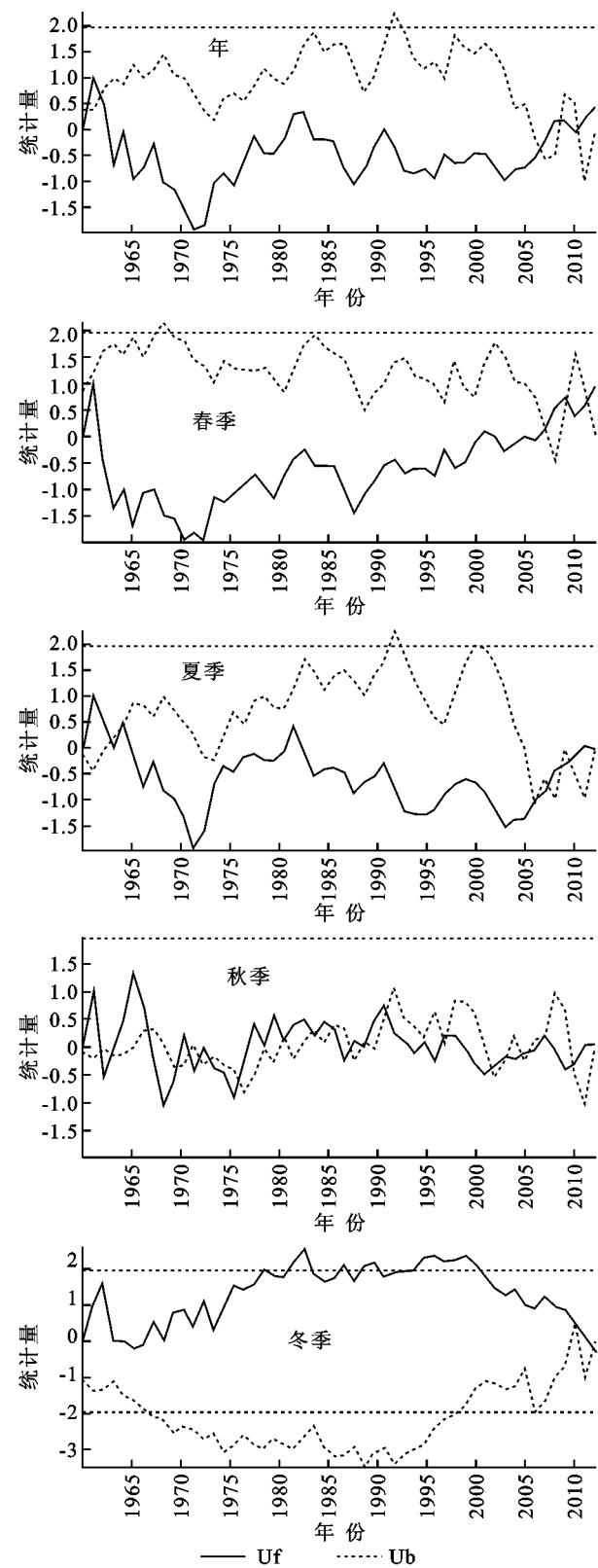


图 3 年  $ET_0$ 、四季  $ET_0$  突变特征

2.2.2 四季  $ET_0$  空间分布特征 由于气象要素的四季变化,潜在蒸散量在不同季节会有所不同。由图 6 可以看出,夏季的  $ET_0$  最大,其次是春季和秋季,冬季的  $ET_0$  最小。在空间分布上,春季、夏季和秋季  $ET_0$  的分布在空间上具有一致性,都在阿勒泰市南部和福海县西北部形成高值区,向东部、南部、西部逐渐递减。

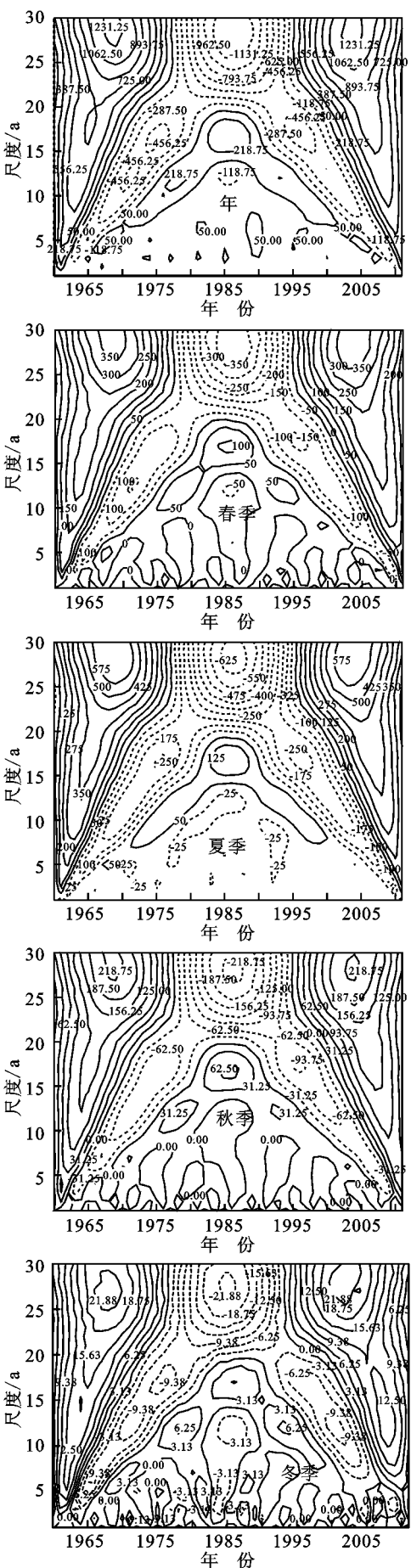


图 4 年  $ET_0$ 、四季  $ET_0$  小波分析

但是,在变化趋势上有所不同,春季空间上都呈现增加趋势,且最大增势达到了  $5 \text{ mm}/10 \text{ a}$ ,分布在吉木乃、布尔津县的交界处。夏季  $ET_0$  的变化趋势有明显的地域性,仅在清河县中部和吉木乃、布尔津县的交界处呈增加趋势,其他地区都呈现减少趋势,且最大增势仅为  $1.27 \text{ mm}/10 \text{ a}$ ,最大减少趋势达到  $-4.06 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 。与夏季  $ET_0$  的变化趋势相反,秋季的  $ET_0$  以增加趋势

为主,仅在吉木乃县、哈巴河县、布尔津县的西部呈减少趋势,其他地区都呈现增加趋势,其中最大增加趋势为  $1.04 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 。冬季的  $ET_0$  在吉木乃县形成高值区,向东部逐渐递减,在富蕴县的中北部形成低值中心;变化趋势上,冬季的  $ET_0$  以减少趋势为主,仅在清河县、吉木乃县的西部呈增加趋势,在其他地区都呈减少趋势,最大减少趋势为  $-1.39 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 。

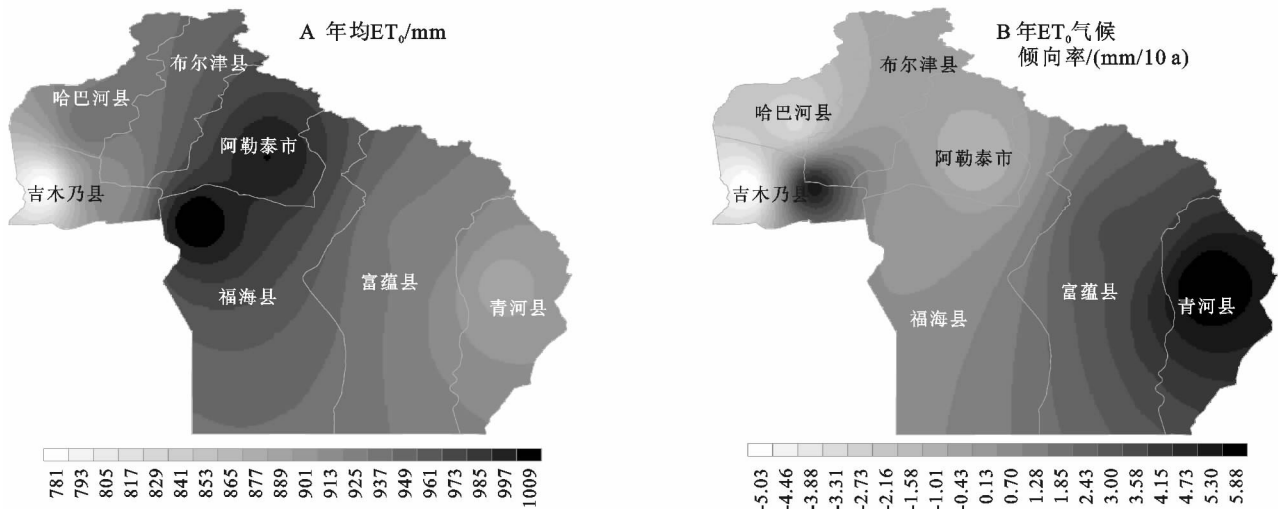


图 5 年均  $ET_0$  空间分布及其变化趋势

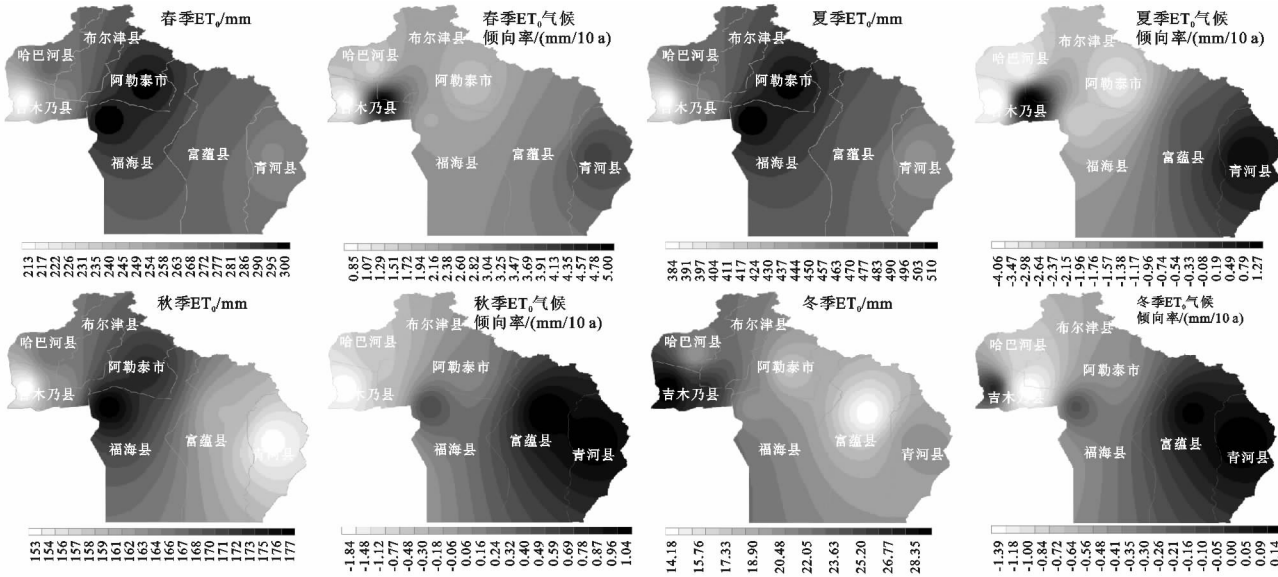


图 6 四季  $ET_0$  空间分布及其变化趋势

### 3 结论与讨论

(1) 阿勒泰年和春季作物参考蒸散量呈增加趋势,夏季、秋季、冬季作物参考蒸散量呈减少趋势。四季中,夏季潜在蒸散量最大,春、秋次之,冬季最小。年、夏季的作物参考蒸散量分别在 1994 年、1992 年发生突变,而春季、秋季、冬季的作物参考蒸散量则没有发生突变。年、四季潜在蒸散量都存在的作物参考蒸散量 27 a 的第一主变换周期。

(2) 空间分布上,年、春季、夏季、秋季的最大年

均作物参考蒸散量都分布在阿勒泰市南部、福海县西北部,向东部、南部、西部逐渐递减。而冬季作物潜在蒸散量大致呈现自西向东逐渐递减。变化趋势上,春季潜在蒸散量在空间上都呈增加趋势,而年、夏季、秋季、冬季的潜在蒸散量在东部的富蕴县、青河县呈增加趋势,在西部的吉木乃县、哈巴河县呈减少趋势。

潜在蒸散量的估算对于提高区域水资源的规划、管理和水分利用效率有重要的影响<sup>[11-12]</sup>。阿勒泰是重要的牧草基地和旱作农业区,潜在蒸散量与作物需水量密切相关<sup>[13]</sup>,阿勒泰地区潜在蒸散量的增加会

引起作物水分需求的增加,从而进一步加剧区域农业灌溉需求的不足<sup>[14]</sup>。尤其是在阿勒泰市和福海县的西北部,潜在蒸散量较大且增势最为明显,因此,需要进一步做好农业用水的调配与管理。虽然阿勒泰地区在逐步推进节水灌溉技术,但是近几十年来大水漫灌的耕作现象依然存在,在潜在蒸散量明显增加的情况下,进一步推广节水灌溉技术,提高水资源利用效率,才可以有效地解决农业需水的不足以及水资源的高效、可持续利用。

阿勒泰地区潜在蒸散量的变化是对全球变化的响应,尤其是阿勒泰地区气温和降水的增加<sup>[15]</sup>以及相对湿度减少<sup>[16]</sup>等共同作用的结果,但是对于气象因子在潜在蒸散量变化中的作用以及各因子的贡献度等,这还有待进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] Djaman K, Balde A B, Sow A, et al. Evaluation of sixteen reference evapotranspiration methods under Sahelian conditions in the Senegal River Valley[J]. *Journal of Hydrology Regional Studies*, 2015, 3: 139-159.
- [2] Pereira L S, Allen R G, Smith M, et al. Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future[J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 147: 4-20.
- [3] Kumar R, Jat M K, Shankar V. Methods to estimate irrigated reference crop evapotranspiration: A review[J]. *Water Science & Technology*, 2012, 66(3): 525-535.
- [4] 任庆福, 杨志勇, 李传哲, 等. 变化环境下作物蒸散研究进展[J]. *地球科学进展*, 2013, 28(11): 1227-1238.
- [5] 卓玛兰草, 刘普幸, 张亚宁, 等. 甘肃黄土高原区潜在蒸散量时空变化与成因研究[J]. *水土保持研究*, 2012, 19

(1): 70-75.

- [6] 王媛媛, 张勃, 尹海霞. 1961—2010年陇东参考作物蒸散量时空变化及气候影响因子[J]. *生态学杂志*, 2013, 32(6): 1511-1517.
- [7] 赵璐, 梁川. 近50a来四川省潜在蒸散量变化成因研究[J]. *水土保持研究*, 2014, 21(4): 26-30.
- [8] Some'E B S, Ezani A, Tabari H. Spatiotemporal trends of aridity index in arid and semi-arid regions of Iran[J]. *Theoretical & Applied Climatology*, 2013, 111(1/2): 149-160.
- [9] 杨萍, 刘伟东. 北京地区加密自动气象站数据的质量分析[J]. *气象科技进展*, 2013, 3(6): 27-34.
- [10] 吴燕锋, 巴特尔·巴克, 加依娜古丽·窝扎提汗, 等. 石河子地区近50a霜期的变化特征[J]. *干旱区资源与环境*, 2014, 28(9): 173-178.
- [11] 张晓晓, 张钰, 徐浩杰. 1961—2010年白龙江流域气温和降水量变化特征研究[J]. *水土保持研究*, 2014, 21(4): 238-245.
- [12] Zafra P G, Llanque F J C. Estimating reference evapotranspiration with atmometers in a semiarid environment[J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(3): 465-472.
- [13] 王潇潇, 潘学标, 顾生浩, 等. 内蒙古地区参考作物蒸散变化特征及其气象影响因子[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(S1): 142-152.
- [14] 周蕊蕊. 中国主要粮食作物需水满足度时空特征分析[D]. 武汉: 华中师范大学, 2014.
- [15] 李立, 魏晓妹, 韩业珍. 基于地统计学的作物需水量空间变异性分析[J]. *水土保持研究*, 2010, 17(1): 239-242.
- [16] 古丽扎提·哈布肯. 近50年来新疆阿勒泰地区的气候变化[J]. *干旱区研究*, 2011, 28(2): 268-274.
- [17] 傅玮东, 姚艳丽, 陈洪武. 北疆北部地区春季地表湿润状况特征分析[J]. *中国农业气象*, 2009, 30(2): 223-226.

(上接第259页)

- [21] 谭丹, 黄贤金. 我国东、中、西部地区经济发展与碳排放的关联分析及比较[J]. *中国人口·资源与环境*, 2008, 18(3): 54-57.
- [22] 刘华军, 鲍振, 杨骞. 中国二氧化碳排放的分布动态与演进趋势[J]. *资源科学*, 2013, 35(10): 1925-1932.
- [23] 冉光和, 王建洪, 王定祥. 我国现代农业生产的碳排放变动趋势研究[J]. *农业经济问题*, 2011(2): 32-38.
- [24] Schlitz H, Rennenberg H, Seiler W. CH<sub>4</sub> emission from a Chinese rice paddy field[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1990, 4(3): 265-275.
- [25] Matthews E, Fung I, Lerner J. Methane emission from rice cultivation: Geographic and seasonal distribution of cultivated areas and emissions[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1991, 5(1): 3-24.
- [26] Cao M, Dent J B, Heal O W. Methane emissions from

China's paddyland[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1995, 55(2): 129-137.

- [27] 韩广轩, 朱波, 江长胜, 等. 川中丘陵区稻田甲烷排放及其影响因素[J]. *农村生态环境*, 2005, 21(1): 1-6.
- [28] 闵继胜, 胡浩. 中国农业生产温室气体排放量的测算[J]. *中国人口·资源与环境*, 2012, 22(7): 21-27.
- [29] 田云, 张俊飏, 李波. 中国农业碳排放研究: 测算, 时空比较及脱钩效应[J]. *资源科学*, 2012, 34(11): 2097-2105.
- [30] 韩召迎, 孟亚利, 徐娇, 等. 区域农田生态系统碳足迹时空差异分析: 以江苏省为案例[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(5): 1034-1041.
- [31] 梁日忠, 张林浩. 1990—2008年中国化学工业碳排放脱钩和反弹效应研究[J]. *资源科学*, 2013, 35(2): 268-274.
- [32] 赵兴国, 潘玉君, 赵庆由, 等. 科学发展视角下区域经济增长与资源环境压力的脱钩分析: 以云南省为例[J]. *经济地理*, 2011, 31(7): 1196-1201.