

新疆 1961—2013 年参考作物蒸散量时空变异

董煜^{1,2}, 胡江玲^{1,2}, 王瑾杰³, 陈学刚^{1,2}

(1. 新疆师范大学 新疆干旱区湖泊环境与资源重点实验室, 乌鲁木齐 830054; 2. 新疆师范大学 地理科学与旅游学院, 乌鲁木齐 830054; 3. 新疆大学 资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046)

摘要:准确评估参考作物蒸散量的变化规律对新疆农业生产及水资源合理利用具有重要作用,采用 Penman-Monteith 公式以及 55 个气象站的逐日气象资料,计算了新疆 1961—2013 年参考作物蒸散量并分析其时空变化特征,运用多元回归分析法对影响参考作物蒸散量变化的主导气象因素进行了定量分析。结果表明:新疆 ET_0 总体呈下降趋势,年际变化率为 -1.01 mm/a 。在 20 世纪 80 年代之前 ET_0 偏高,90 年代减少到最大,2000 年以来又逐渐增大。从季节来看,夏季、秋季的 ET_0 与年 ET_0 的减小趋势一致,春季冬季 ET_0 的减少趋势不明显。在不同年代际时间尺度,新疆全年及季节 ET_0 的年际变化在空间上存在一定的分异。风速是全年及夏、秋季 ET_0 变化的主导因素,而温度是春季及冬季新疆区域蒸发量变化的主导因素。

关键词:参考作物蒸散量; Penman-Monteith 公式; 时空变异; 新疆

中图分类号: S161.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2016)03-0304-05

Study of Temporal and Spatial Variation of the Reference Crop Evapotranspiration in Xinjiang Uygur Autonomous Region During the Period from 1961 to 2013

DONG Yu^{1,2}, HU Jiangling^{1,2}, WANG Jinjie³, CHEN Xuegang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Lake Environment and Resources in Arid Zone, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China; 2. Institute of Geographic Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China; 3. College of Resources and Environment Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

Abstract: Study on characteristics of the spatial and temporal variation of reference crop evapotranspiration (ET_0) is a very important for hydrology and agriculture in Xinjiang Uygur Autonomous Region. Based on the meteorological data of 55 stations in Xinjiang during the period from 1961 to 2013, the annual and seasonal reference crop evapotranspiration was calculated using the Penman-Monteith model and the tempo-spatial change characteristics was analyzed. The multiple regression analysis was used to quantitatively analyse the dominant factor affecting the reference crop evapotranspiration. The results indicated that annual ET_0 presented the decreasing tendency, the tendency rate of annual ET_0 was -1.01 mm/a . ET_0 was higher before 1980s than after 1980s, and experienced the process from the decrease during 1990s, while it showed an increasing tendency since 2000. The decreasing tendency of ET_0 in summer and autumn was quite similar to that of annual ET_0 , the decreasing tendency of ET_0 was not obvious in spring and winter. There was the marked geographical difference in ET_0 in different seasons. The wind speed and temperature were the dominant factors influencing ET_0 . The wind speed is main reason for the annual, summer and autumn variations of the ET_0 , temperature plays the major part in spring and winter variations of the ET_0 .

Keywords: reference crop evapotranspiration; Penman-Monteith equation; temporal-spatial variability; Xinjiang Uygur Autonomous Region

参考作物蒸散(ET_0)作为重要的农业和水文变量,在实际蒸散^[1]、农业水资源利用^[2-3]、相关的水文模拟^[4]、生态系统过程建模^[5]及评价区域干湿状况^[6-7]等方面是一个重要的计算因子,越来越受到各界关注。许多学者

利用 Penman-Monteith 公式对中国不同区域参考作物蒸散量时空变化的研究表明,参考作物蒸散量空间差异十分明显,过去数十年中国的参考作物蒸散量总体呈下降趋势,但各地的变化及其成因具有区域性差异。而这些变化与温度、日照时数、风速及相对湿度等气候因子有密切的关系^[8-9]。李志^[10]分析了黄土高原 ET_0 的空间变化和时间趋势,提出 ET_0 变化湿度和温度是最重要的影响因素。蔡辉艺等^[11]分析了淮河流域 ET_0 对气象因子的敏感性,提出淮河流域年参考蒸散发总量呈下降趋势,造成这种变化的主要原因是太阳辐射量的减少和风速的降低。在华北平原参考蒸散发量呈下降主要受日照时数、相对湿度、温度日较差和风速的综合影响^[12]。在干旱区半干旱区的西北地区, ET_0 的变化主要归因于风速和气温^[13]。因此,综合分析不同地区的气候要素对参考蒸散的影响,是指导合理利用水资源的重要前提。

新疆深居中纬度欧亚大陆腹地,远离海洋,降水稀少,蒸发强烈,气候干燥,水资源短缺是影响新疆生态安全和国民经济持续稳定发展的主要制约因素。在新疆气候由暖干向暖湿变化的背景下^[14],已有相关文献对新疆蒸发皿及参考作物蒸散量的时间空间分布进行了研究。研究表明:新疆自 20 世纪 60 年代至 2005 年,年蒸发皿表现为明显的下降趋势,气温日较差、风速、低云量和降水是蒸发皿变化的主要原因^[15];新疆全年参考作物蒸散量呈减少趋势,空间分布总体为南疆大于北疆、东部大于西部、盆地(谷)地大于山区,气温上升、日照时数减少、风速减小、相对湿度增大是参考作物蒸散量减少的原因^[16-18],缺少对参考蒸散量的年代际、季节的时间尺度研究及气候变化对参考作物蒸散量影响的定量分析。因此,本文用更新气象数据分析新疆区域 ET_0 的变化,基于新疆 55 个气象站点的 1961—2013 年日气象数据,采用 FAO 推荐的 P-M 公式计算新疆 ET_0 ,分析年际和季节变化特征,研究不同时间尺度时空变异规律,并采用多元线性回归方法定量分析气候变化对参考作物蒸散量的影响,以期能为该区的农业生产和水资源科学管理等提供参考依据。

1 数据与方法

1.1 数据来源与处理

基于新疆的 55 个气象站点(图 1)的实测气象数据计算 ET_0 。数据来源于中国气象共享网(<http://cdc.cma.gov.cn/>),为 1961—2013 年日序列的平均、最高和最低温度($^{\circ}\text{C}$)、2 m 高度的相对湿度(%)、10 m 高度的风速(m/s)、日照时数(h)、气压(hPa)。根据联合国粮农组织推荐的风廓线关系,10 m 高度的

风速被转化为 2 m 高度的相应数值。少数缺失数据使用同站点其他年份的均值代替。季节的划分采用气象季节,即 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。

1.2 参考作物蒸散量估算

参考作物蒸散量是指在一定气象条件下水分供应不受限制时,陆面可能达到的最大蒸散发量。本文采用联合国粮农组织推荐的 Penman-Monteith 公式计算各站的参考作物蒸散发量^[19],其中参考下垫面为植被高度 0.12 m 的草地,具有固定的表面阻力 70 s/m,反照率为 0.23。

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

式中: ET_0 ——参考作物蒸散量(mm/d); R_n ——净辐射 [$\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$]; G ——土壤热通量 [$\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$]; γ ——湿度计常数($\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$); U_2 ——2 m 处的风速(m/s); e_s ——计算温度时的饱和水汽压(kPa); e_a ——计算温度时的实际水汽压(kPa); Δ ——饱和水汽压温度曲线上的斜率($\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$)。净辐射为太阳短波辐射与地面长波辐射之和,其中太阳辐射可按式估算:

$$R_s = (a_s + b_s \cdot \frac{n}{N}) R_a \quad (2)$$

式中: R_s ——太阳辐射(W/m^2); R_a 为大气顶层的太阳辐射; a_s, b_s ——参数, $a_s = 0.23, b_s = 0.75$; n ——日照时数(h); N ——理论最大日照时数(h)。



图 1 新疆气象站点分布

1.3 多元回归分析方法

采用多元回归分析方法对气候因子对 ET_0 变化的影响进行分析^[20],并研究各气候因子对 ET_0 变化相对贡献率大小。各气候因子进行标准化处理后,对标准化后的数据序列进行回归分析,得到标准化序列的回归方程,按照下式计算各气候因子对 ET_0 变化的贡献率:

$$Y_{ET} = aX_1 + bX_2 + cX_3 + dX_4 + \dots \quad (3)$$

$$g_1 = \frac{|a|}{|a| + |b| + |c| + |d| + \dots} \quad (4)$$

式中: Y_{ET} —— ET_0 的标准化值; X_1, X_2, X_3, \dots ——气候因子的标准化值; a, b, c, d, \dots ——序列标准化后回归系数; g_1 —— X 变化对 Y 变化的相对贡献率。

2 结果与分析

2.1 新疆年均及季节参考作物蒸散量的时空分析

1961—2013 年新疆区域平均年 ET_0 为 1 165 mm。其中, 春季为 354.7 mm, 夏季为 556.2 mm, 秋季为 204.6 mm, 冬季为 49.6 mm, 分别占全年的 30.4%, 47.7%, 17.6%, 4.3%。说明春、夏两季 ET_0 是一年中最多的, 约占到全年的 78.1%。新疆地区的年 ET_0 的年际变化率为 $-10.1 \text{ mm}/10 \text{ a}$, 表明在全球变暖背景下, 该区的 ET_0 总体上呈明显减小趋势 ($R=0.386 \ 2 > R_{0.01, 53} = 0.347 \ 6$, 回归显著水平超过 0.01)。从季节来看, 春季的 ET_0 的年际变化率为 $-1.216 \text{ mm}/10 \text{ a}$, 总体上春季 ET_0 变化趋势不明显 ($R=0.105 \ 8 < 0.226 \ 2 = R_{0.1, 53}$, 回归显著水平不到 0.1)。夏季的 ET_0 年际变化率为 $-6.42 \text{ mm}/10 \text{ a}$, 呈明显减少趋势 ($R=0.493 \ 3 > 0.347 \ 6 = R_{0.01, 53}$)。秋季的 ET_0 年际变化率为 $-2.33 \text{ mm}/10 \text{ a}$, 呈明显减少趋势 ($R=0.396 \ 1 > 0.347 \ 6 = R_{0.01, 53}$)。冬季的 ET_0 年际变化率为 $0.161 \text{ mm}/10 \text{ a}$, 变化趋势不明显 ($R=0.051 \ 9 < 0.226 \ 2 = R_{0.1, 53}$, 回归显著水平不到 0.1)。总体上, 夏季、秋季的 ET_0 与年 ET_0 减小趋势一致。

新疆 ET_0 年分布具有明显的空间分异特征。如图 2 所示, 塔里木盆地中部, 奇台、吐鲁番、铁干里克、若羌一线、哈密地区、克拉玛依乌苏地区的减小幅度较大, 减幅为 $8 \sim 5 \text{ mm}/\text{a}$, 其他地区如天山山区的减小幅度为 $0 \sim 3 \text{ mm}/\text{a}$, 吐哈盆地的十三间房地区、皮山、民丰地区、准噶尔盆地东部呈增加趋势, 增加幅度为 $0 \sim 6 \text{ mm}/\text{a}$, 整体而言, 新疆南疆地区的减幅超过北疆, 平原的减幅超过山区。就季节而言, 夏季与秋季的 ET_0 年际变化区域与全年的变化区域基本一致, 其中塔里木盆地中部, 奇台、吐鲁番、铁干里克、若羌一线、哈密地区、克拉玛依乌苏地区的减小幅度相对较大, 减幅为 $0.7 \sim 1.5 \text{ mm}/\text{a}$, 其他地区如天山山区的幅度为 $0 \sim 3 \text{ mm}/\text{a}$, 吐哈盆地的十三间房地区、皮山、民丰地区、准噶尔盆地东部呈增加趋势, 增加幅度为 $0.2 \sim 2.5 \text{ mm}/\text{a}$ 。春季与冬季的 ET_0 总体变化不明显, 其变化趋势微弱, 少有明显的增幅与减幅区域。冬季大部分区域呈微弱增加趋势, 增加幅度为 $0 \sim 0.35 \text{ mm}/\text{a}$, 而塔里木盆地中部, 哈密地区东部、

天山山区中东部、精河绿洲、昆仑山区西部等地, 减少幅度为 $0 \sim 0.2 \text{ mm}/\text{a}$ 。春季区域塔里木盆地中部、哈密地区东部、精河绿洲、奇台、吐鲁番、铁干里克、若羌一线区域、莎车绿洲等地, 减少幅度为 $0.3 \sim 0.8 \text{ mm}/\text{a}$ 。其余地区处于微弱增加趋势, 只有吐哈盆地的十三间房地区增加幅度达到 $1.4 \text{ mm}/\text{a}$ 。

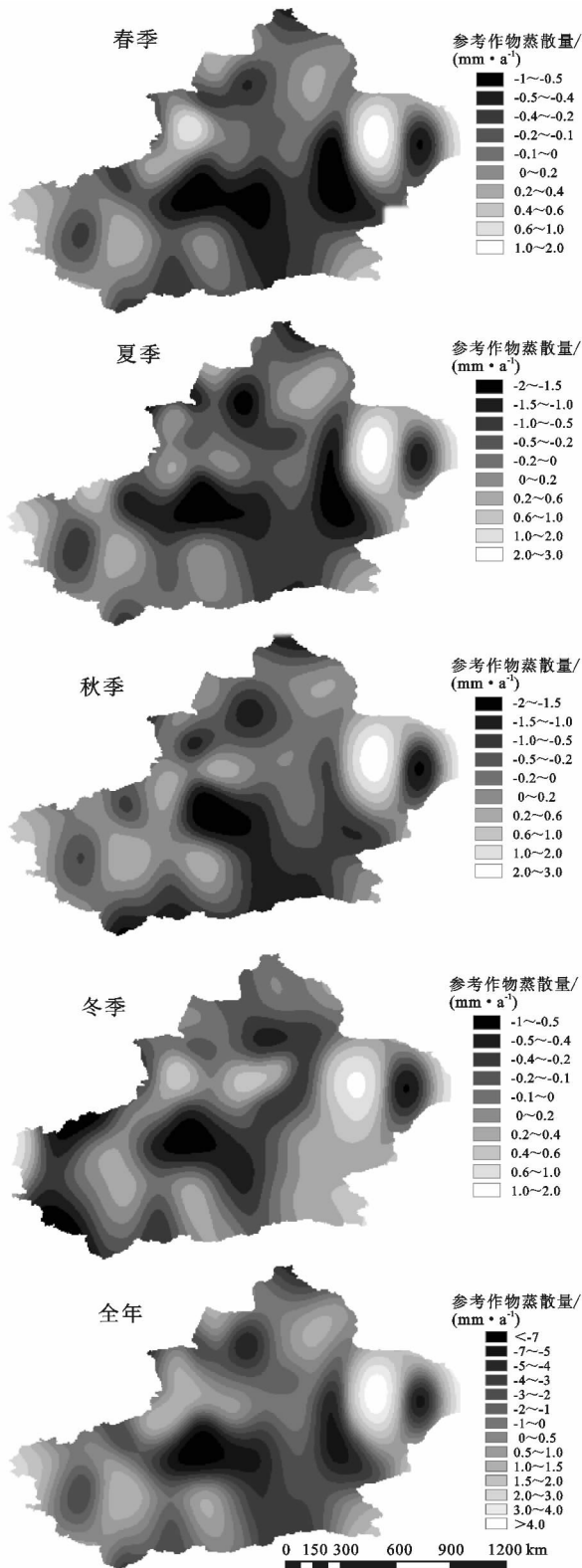


图2 新疆参考作物蒸散量年及季节的变化率空间分布

2.2 参考作物蒸散量的年代际空间变化分析

20 世纪 60 年代,新疆区域年参考作物蒸散量变化差别明显(图 3),其中新疆塔克拉玛干沙漠中部、新疆东南部、西北部平原区域增幅较大,增幅幅度为 120~200 mm,天山山区、昆仑山区降幅为 10~50 mm,此外,吐哈盆地的中部则存在一个降幅中心,减幅为 50~180 mm。70 年代,新疆东南部、皮山县、民丰县及吐哈盆地中部蒸发降幅明显,平均为 50~180 mm,东北部降幅为 10~50 mm。其余地区增幅明显,尤其是天山山区为 10~100 mm,而哈巴河、克拉玛依、乌苏、呼图壁、乌鲁木齐一线的平原地区、塔克拉玛干沙漠中部,增加幅度为 150~200 mm,部分地区超过 200 mm,增幅大于其他地区。80 年代,新疆北部及天山山区年 ET_0 高于多年平均,其平均增幅为 50~200 mm,而吐哈盆地中部、塔克拉玛干沙漠中部及昆仑山脉 ET_0 低于多年平均,平均减幅为 50~180 mm,其中在南疆西部喀什绿洲的减幅为 10~50 mm,巴楚绿洲增幅大于 200 mm。90 年代,大部分地区的 ET_0 高于多年平均,其中北疆地区增幅明显高于南疆地区。新疆的东南部减幅为 10~180 mm,北疆的平均增幅 10~200 mm、南疆塔克拉玛干沙漠的减小幅度为 0~50 mm,而天山山区、阿尔泰山高于多年平均 150~200 mm。2000—2013 年,新疆绝大部分地区的年 ET_0 低于多年平均,只有东部的吐哈盆地增幅为 10~200 mm,其中十三间房地区增幅超过 200 mm。南疆塔克拉玛干沙漠减幅为 50~-180 mm,天山山区、阿尔泰山、昆仑山区减幅为 10~180 mm,北疆克拉玛依、乌苏、阿拉山口减幅为 100~180 mm。

表 1 ET_0 的年代际变化 mm

项目	春季	夏季	秋季	冬季	全年
1960s	363.2	572.7	210.1	50.4	1196.3
1970s	359.7	566.8	211.9	49.4	1187.8
1980s	349.3	548.3	201.1	49.4	1148.2
1990s	337.9	533.9	196.5	48.3	1116.7
2000—2013 年	362.1	553.2	204.0	50.3	1169.7
1960—2013 年	354.7	554.5	204.6	49.6	1163.5

3 参考作物蒸散量变化的原因分析

ET_0 受各种因素综合影响,主要有气温、风速、日照时数、相对湿度、饱和水汽压等气象要素。由于影响 ET_0 变化的因素众多,不同因素之间也相互影响, ET_0 的变化成因复杂。为研究新疆 ET_0 变化的成因,选取 6 个气象因子(风速代表动力因子,平均气温、日较差、日照时数代表热力因子,相对湿度、降水代表湿度因子),采用多元回归分析方法来研究 ET_0 。与影响因子之间的相关性,以及影响其变化的主导因素。

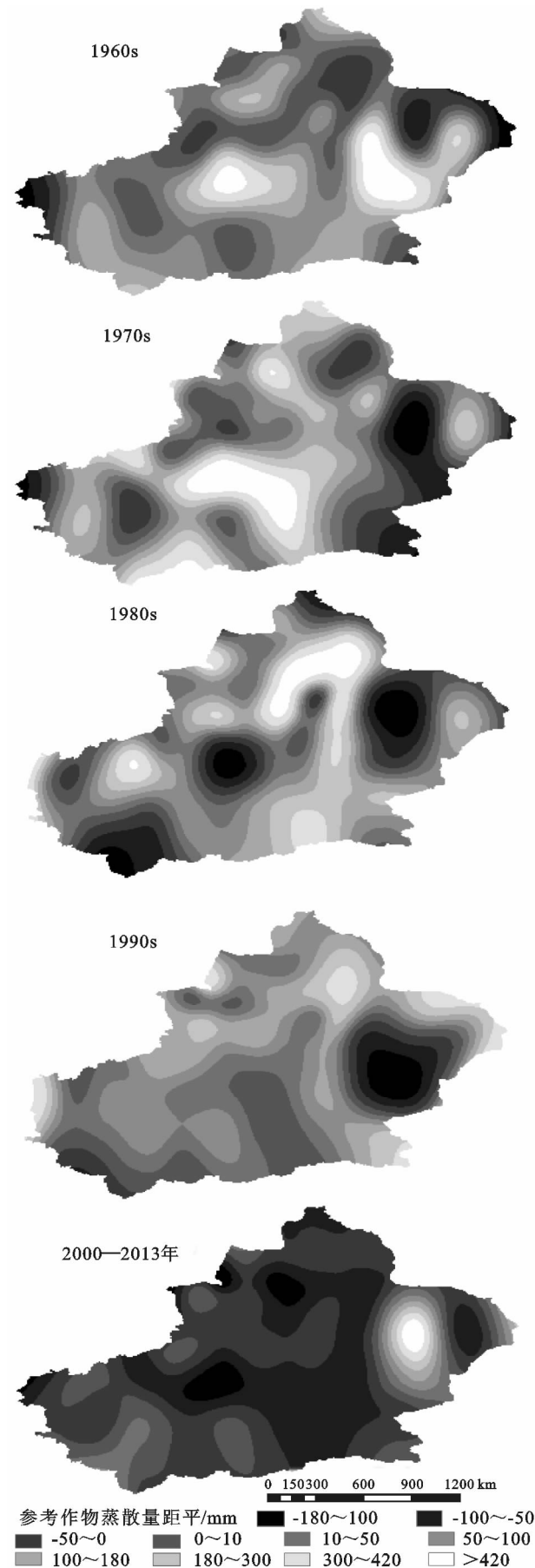


图 3 20 世纪 60,70,80,90 年代及 2000—2013 年的年参考作物蒸散量距平空间分布

如表 2 所示,不同气候因子对 ET_0 的影响程度不同,对年 ET_0 影响较大的是平均温度、风速、日照时数、日较差、相对湿度、降雨;对春季 ET_0 影响较大的因素是平均温度、风速、日照时数、日较差、相对湿度;夏季是风速、平均气温和相对湿度;秋季是风速、平均气温和相对湿度;冬季是平均温度、风速和相对湿度。

表 2 年及季节 ET_0 与气象因子的多元回归系数及相对贡献率

项目		平均温度	日较差	日照时数	平均风速	相对湿度	降雨
全年	偏相关系数	0.7245***	-0.2997**	0.4301***	0.8337***	-0.4942***	-0.2958**
	相对贡献率/%	20.448	8.503	14.317	34.559	15.474	6.699
春季	偏相关系数	0.9378***	0.411***	0.8444***	0.8747***	-0.3911***	-0.0508
	相对贡献率/%	35.091	8.256	22.828	25.419	7.259	1.147
夏季	偏相关系数	0.5796***	0.2958**	-0.0646	0.7251***	-0.412***	0.1394
	相对贡献率/%	23.194	12.966	2.096	35.689	21.639	4.416
秋季	偏相关系数	0.8157***	-0.216	0.0774	0.8512***	-0.532***	-0.2416
	相对贡献率/%	30.108	6.078	2.134	37.422	18.599	5.659
冬季	偏相关系数	0.9131***	-0.0235	0.1321	0.7433***	-0.674***	0.1669
	相对贡献率/%	43.176	1.509	5.026	24.617	21.578	4.093

注:*, **, *** 分别表示通过 0.1, 0.05, 0.01 的置信度检验。

因为不同气象因子的变化趋势及其显著程度有所不同,进而对 ET_0 变化的影响程度具有差异性。通过气象因子与 ET_0 的相对贡献率的计算,53 a 中,全疆全年风速对 ET_0 具有最高的相对贡献率,温度也具有较高的相对贡献率。春季与冬季,平均温度对 ET_0 具有最高的相对贡献率,风速具有较高的相对贡献率。夏季与秋季,风速对 ET_0 具有最高的相对贡献率,而平均温度具有较高的相对贡献率。总体来看,风速是全年及夏季、秋季 ET_0 变化的主导因素,温度是春季及冬季新疆区域 ET_0 变化的主导因素。

4 结 论

新疆的 ET_0 变化趋势存在较明显的季节差异,夏季 ET_0 变化最大,是 ET_0 年变化的主要贡献者。各季节 ET_0 量的空间分布与年 ET_0 的空间分布基本一致。在年代际时间尺度上,新疆全年及季节的 ET_0 在 90 年代是减少最明显的阶段,在不同年代际时间尺度,新疆全年及季节 ET_0 的年际变化在空间上存在一定的空间分异。风速是全年及夏季秋季 ET_0 变化的主导因素,而温度是春季及冬季新疆区域 ET_0 变化的主导因素。其他因素对 ET_0 的变化起增强或减弱作用。

本文主要研究了新疆区域 ET_0 的年代际及季节的时空分布规律并定量研究各气候因子对参考作物蒸散量变化的贡献,对认识气候变化对新疆水资源的影响具有现实意义。但由于新疆面积广阔,气象站点稀疏,特别是高海拔山区、沙漠盆地腹地鲜有站点,且这部分所占面积较大,直接影响了对高山区气候及沙漠腹地的蒸散发变化的认识。研究高海拔山区及沙漠腹地的蒸散发变化规律及探究合理的空间插值方

法,对在气候变化下区域的参考作物蒸散量的变化具有帮助作用。在水资源受到限制条件下的干旱区研究气候因子对蒸散发变化的贡献,可为气候变化下的干旱区流域水资源规划和管理提供重要的科学参考。

参考文献:

[1] 张芳芳,吴金萍.老哈河流域不同气候区间天然植被的实际蒸散发量研究[J].甘肃农业大学学报,2014,49(5):132-139.

[2] Allen R G. Using the FAO-56 dual crop coefficient method over an irrigated region as part of an evapotranspiration intercomparison study [J]. Journal of Hydrology,2000,229(1):27-41.

[3] 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):70-76.

[4] 何玲,汪志农,莫兴国.基于遥感信息预测土壤水分研究[J].水土保持研究,2006,13(2):168-171.

[5] Fisher J B, Debiase T A, Qi Y, et al. Evapotranspiration models compared on a Sierra Nevada forest ecosystem [J]. Environmental Modelling & Software,2005,20(6):783-96.

[6] Wu S, Yin Y, Zheng D, et al. Moisture conditions and climate trends in China during the period 1971—2000 [J]. International Journal of Climatology,2006,26(2):193-206.

[7] 刘德坤,王军邦,齐述华.基于湿润指数的近 35 a 青海省干湿状况变化分析[J].水土保持研究,2014,21(2):246-250.

[8] 刘昌明,张丹.中国地表潜在蒸散发敏感性的时空变化特征分析[J].地理学报,2011,66(5):579-88.

[9] 谢贤群,王菱.中国北方近 50 年潜在蒸发的变化[J].自然资源学报,2007,22(5):683-691.

也普遍较低,用地规模较小,适合迁并处理。

(1) 地形起伏及多样性与居民点的分布具有高度相关性。高程和坡度较大不仅会造成滑坡、泥石流等自然灾害,对居民点的建设成本等要求也比较高,而且复杂的地形不利于农作物的种植,进而一定程度制约了居民点集聚。研究表明,察县位于天山山麓,地势南高北低,故察县南部整治阻力都较大。

(2) 由于察县整治阻力最小区及居民点现状适宜区均分布在北部靠近伊犁河较为平坦的地区,故重点发展的农村居民点大多分布在此处,少数分布在察县中部的中度适宜居民点,由于北部这些居民点用地规模较大且区域整治阻力值较小其可以作为重点发展区。可见居民点的整治分区与原有居民点用地规模具有很大关联性。

本文通过对察县农村居民点进行现状评价分等并且结合综合整治阻力面对察县初步整治分区,为察县未来居民点的整治优化提供科学依据。论文中由于数据的因素,综合阻力面的确定及农村居民点现状评价考虑的因素还有待于进一步完善。

参考文献:

- [1] 孙华生,黄敬峰,金艳,等. 基于 GIS 技术的县域居民点空间分布特征分析及其优化布局[J]. 浙江大学学报:农业与生命科学版,2007,33(3):348-354.
- [2] 柏延臣,李新,冯学智. 空间数据分析与空间模型[J]. 地理研究,1999,18(2):185-190.
- [3] 冯电军,沈陈华. 基于扩展断裂点模型的农村居民点整理布局优化[J]. 农业工程学报,2014,30(8):201-209.
- [4] 石诗源,张小林. 江苏省农村居民点用地现状分析与整理潜力测算[J]. 中国土地科学,2009,23(9):52-58.
- [5] 孔雪松,刘耀林,邓宣凯,等. 村镇农村居民点用地适宜性评价与整治分区规划[J]. 农业工程学报,2012,28

(18):215-222.

- [6] 朱晓华,陈秧分,刘彦随,等. 空心村土地整治潜力调查与评价技术方法:以山东省禹城市为例[J]. 地理学报,2010,65(6):736-744.
- [7] 朱雪欣,王红梅,袁秀杰,等. 基于 GIS 的农村居民点区位评价与空间格局优化[J]. 农业工程学报,2010,26(6):326-333.
- [8] 李鑫,甘志伍,欧名豪,等. 农村居民点整理潜力测算与布局优化研究:以江苏省江都市为例[J]. 地理科学,2013,33(2):150-156.
- [9] 刘超,杨海娟,龙冬平,等. 基于加权 Voronoi 图的农村居民点等级评价与整理方向研究[J]. 陕西师范大学学报:自然科学版,2014,42(3):91-96.
- [10] 张颖,徐辉. 基于 MCR 模型的农村居民点布局适宜性分区及优化模式研究:以南京市六合区金牛湖街道为例[J]. 长江流域资源与环境,2014,23(11):1485-1492.
- [11] Knaapen J P, Scheffer M, Harms B. Estimating habitat isolation in landscape planning[J]. Landscape and Urban Planning,1992,23(1):1-16.
- [12] Yu K J. Security Patterns in Landscape Planning: With a Case In South China[D]. Cambridge: Harvard University,1995.
- [13] 李胜坤,张毅,闫欣,等. 竹溪县农村居民点景观格局及空间分布特征[J]. 水土保持研究,2014,21(4):203-218.
- [14] 姜磊,雷国平,张健,等. 农村居民点空间布局及优化分析[J]. 水土保持研究,2013,20(1):224-229.
- [15] 李珊珊,曹广超,赵鹏飞. 秦巴山区农村居民点空间分布及其影响因素分析:以陕西省宁强县为例[J]. 水土保持研究,2014,21(3):186-191.
- [16] Dong Pinliang. Generating and updating multiplicatively weighted Voronoi diagrams for point, line and polygon features in GIS[J]. Computers & Geosciences,2008,34(4):411-421.

(上接第 308 页)

- [10] 李志. 黄土高原 1961—2009 年参考作物蒸散量的时空变异[J]. 生态学报,2012,32(13):4139-4145.
- [11] 蔡辉艺,余钟波,杨传国,等. 淮河流域参考蒸散发量变化分析[J]. 河海大学学报:自然科学版,2012,40(1):76-82.
- [12] 刘园,王颖,杨晓光. 华北平原参考作物蒸散量变化特征及气候影响因素[J]. 生态学报,2010,30(4):923-932.
- [13] 曹雯,申双和,段春峰. 中国西北潜在蒸散时空演变特征及其量化成因[J]. 生态学报,2012,32(11):3394-3403.
- [14] 施雅凤,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):152-164.
- [15] 刘波,马柱国,冯锦明,等. 1960 年以来新疆地区蒸发

皿蒸发与实际蒸发之间的关系[J]. 地理学报,2008,63(11):1131-1139.

- [16] 张山清,普宗朝. 新疆参考作物蒸散量时空变化分析[J]. 农业工程学报,2011,27(5):473-479.
- [17] 石鑫,吴普特,王玉宝,等. 近 50 a 新疆参考作物蒸发蒸腾量的时空演变分析[J]. 灌溉排水学报,2012,3(1):10-14,32.
- [18] 普宗朝,张山清. 近 48 a 新疆夏半年参考作物蒸散量时空变化[J]. 中国农业气象,2011,32(1):67-72.
- [19] 蒋冲,王飞,刘思洁,等. “蒸发悖论”在秦岭南北地区的探讨[J]. 生态学报,2013,33(3):844-855.
- [20] 张守红,刘苏峡,莫兴国,等. 阿克苏河流域气候变化对潜在蒸散量影响分析[J]. 地理学报,2010,65(1):1363-1370.