

石羊河流域参考作物蒸散发时空变化 及其对气候变化的响应

马亚丽,许健,张芮,孙栋元,牛最荣

(甘肃农业大学水利水电工程学院,甘肃兰州730070)

摘要:基于石羊河流域8个气象站点1984—2019年逐日气象资料,分析参考作物蒸散量(ET_0)时空变化规律,多种定性定量分析方法结合,揭示 ET_0 变化与气象因素间的相关关系,确定主导气象要素,探明 ET_0 变化对主导因子敏感程度及贡献。结果表明:石羊河流域 ET_0 上升趋势显著,流域大部分区域达到0.05显著性水平;空间上呈现由南向北逐渐增大,高值区(1 148.89~1 246.91 mm)位于民勤县,低值区(775.30~864.07 mm)位于张掖市肃南裕固族自治县、武威市天祝藏族自治县一带; ET_0 四季变化排序为夏季(409.35 mm)>春季(303.36 mm)>秋季(184.84 mm)>冬季(85.6 mm),除冬季外空间分布由南向北逐渐递增;聚类分析及灰色关联度分析结果显示日平均温度(T)、平均相对湿度(RH)、日照时间(n)、降水量(P)、风速(u)为5个关键气象因素,通径分析结果显示 T 是最主要因素, P 作用忽略不计。 ET_0 对气象因子 T 、 n 、 u 、 RH 变化的敏感性不同, RH 是影响 ET_0 变化最敏感因素,且 T 、 n 、 u 与 ET_0 呈同向变化, RH 与 ET_0 呈反向变化,贡献率分别为13.61%、0.48%、2.34%、2.86%。石羊河流域 ET_0 呈现增大趋势,是由于 RH 多年降低和 T 升高、 n 增加、 u 增大等共同作用, T 升高是造成 ET_0 增加的主要原因。

关键词:参考作物蒸散量;时空变化;气候变化;响应;石羊河流域

中图分类号:S161.4; P426.2 **文献标志码:**A

Spatiotemporal variation and response to climate change of reference crop evapotranspiration in Shiyang River Basin

MA Yali, XU Jian, ZHANG Rui, SUN Dongyuan, NIU Zuirong

(College of Water Resources and Hydropower Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: Based on the daily data of eight meteorological stations in Shiyang River Basin from 1984 to 2019, the temporal and spatial variation of ET_0 was analyzed. A number of qualitative and quantitative analysis methods were combined to examine the correlational relationship between ET_0 and meteorological factors, determine the dominant meteorological elements, and explore the sensitivity and contribution of ET_0 changes to the dominant factors. The results showed that the ET_0 had been increased significantly in Shiyang River Basin and reached the significance level of 0.05 in most areas of the basin. In space, it gradually increased from south to north. The high value area (1 148.89 ~ 1 246.91 mm) was located in Minqin County, while the low value area (775.30 ~ 864.07 mm) was located in Sunan Yugur Autonomous County of Zhangye City and Tianzhu Tibetan Autonomous County of Wuwei City. The order of seasonal variation of ET_0 was summer (409.35 mm) > spring (303.36 mm) > autumn (184.84 mm) > winter (85.6 mm). Except winter, spatial distribution gradually increased from south to north. The results of cluster analysis and grey relational analysis showed that T (average daily temperature), RH (average relative humidity), n (sunshine duration), P (precipitation) and u (wind speed) were the five key meteorological factors. Path analysis results showed that T was the most important factor, and the role of P could be ignored. ET_0 had different sensitivity to meteorological factors. RH was the most sensitive factor affecting the change of ET_0 . The first three factors changed in the same direction with ET_0 , while RH changed in reverse direction. The contribution rates were 13.61%, 0.48%,

收稿日期:2021-04-16

修回日期:2021-07-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51769001);中国科学院沙漠与沙漠化重点实验室开放课题(KLDD-2020-003);甘肃农业大学水利水电工程学院青年教师科技创新基金(SLXY-QN-2021-06)

作者简介:马亚丽(1987-),女,河北保定人,讲师,主要从事水文与水资源方面的研究。E-mail:gsaumayl@163.com

通信作者:张芮(1980-),男,甘肃武威人,教授,主要从事节水灌溉与水资源利用研究。E-mail:zhr_1029@163.com

2.34% and 2.86%, respectively. ET_0 in Shiyang River Basin showed an increasing trend, which was due to the joint action of decreasing RH and increasing T , n , and u over the years. The increase of T was the main reason for the increase of ET_0 .

Keywords: reference crop evapotranspiration; temporal and spatial variation; climate change; response; Shiyang River Basin

蒸散发作为水循环过程的重要环节,通过影响地表水量和能量平衡过程,联系着地表三大圈层——土壤圈、生物圈、大气圈,构成气候系统的中心环节,是气候变化背景下多学科研究的热点领域^[1-2]。参考作物蒸散量 (Reference crop evapotranspiration, ET_0) 表征参考作物的潜在蒸散能力,是估算实际蒸散量的关键变量,对于研究地表的水热状况、生态系统水分利用效率和水资源的高效利用与转化等方面具有重要意义^[3-4]。由于受大气—植被—地表系统相互作用, ET_0 变化的影响因素众多,且各气象因素间的交互作用较为复杂^[5-6],尤其在全球气候变化大背景下, 定量化研究 ET_0 时空变化及其与气象要素的交互关系,探讨 ET_0 对不同气象因子变化的敏感性,有利于揭示水文过程对气候变化的响应机制^[7]。

近年来关于 ET_0 的变化成因研究多采用单一方法,包括统计学分析^[8]、敏感性分析^[9]、贡献率分析^[10-11]等方法,殷长琛等^[8]利用云模型描述甘肃省 ET_0 时空分布的均匀性和稳定性,认为甘肃省 ET_0 空间分布较为离散、不稳定。李霞等^[9]在科尔沁湿草甸利用通径分析及指标敏感性分析发现影响 ET_0 的主要因子为饱和水汽压差和最低气温。吕明权等^[10]在嘉陵江流域采用偏导系数法量化 ET_0 变化的因子贡献,结果表明 1982 年前主导因子是风速和太阳辐射,1982 年后温度上升发挥着主导作用。曹永强等^[11]基于敏感系数法探讨气候变化下影响辽宁省 ET_0 变化的主导因子及其对气候变化的定量响应。综上,多种分析方法均适用,考虑到引起 ET_0 变化的影响因子众多,且各气象因素间作用关系复杂,探索多方法相结合,对揭示 ET_0 与气象因素的定量关系显得尤为重要。因此,本研究将聚类分析^[12]、灰色关联度分析^[13]、通径分析^[14]、敏感分析^[15]、贡献率分析^[16]等多种方法探索性结合,将定性分析与定量分析相融合,更为全面、客观地揭示 ET_0 与气象因素间的内在关系,定量描述气象因素对 ET_0 变化的直接和间接重要性以及紧密关联程度,确定关键主导因素,简化问题,关注重点矛盾,探明 ET_0 变化对主导因子敏感程度及贡献大小,定量化解释 ET_0 变化成因。

石羊河发源于祁连山北麓,是甘肃河西地区三大内陆河之一,位于河西走廊东部,乌峭岭以西,地

理位置东经 $101^{\circ}41' \sim 104^{\circ}16'$, 北纬 $36^{\circ}29' \sim 39^{\circ}27'$ 。该流域具有山地、绿洲、荒漠等西北干旱区的典型地貌景观,南部山地是水源涵养区和产流区,中部绿洲是水资源的主要消耗区,对水资源具有高度依赖性,俗称“有水便是绿洲,无水即为荒漠”,水资源最终消失在荒漠区^[17]。随着社会经济飞速发展,绿洲区对水资源需求量增加,加上蒸发量大,维持生态系统基本功能的需水量难以得到保障,出现了一系列的生态环境问题^[18]。因此,以石羊河流域为研究对象,采用定性与定量分析有机结合的方法,揭示流域各气象因素间的相关关系,确定 ET_0 变化的主导因素以及 ET_0 变化对主导因子敏感程度及贡献,为探究河西干旱内陆河地区 ET_0 变化机理和水资源合理开发、高效利用提供科学依据。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

石羊河流域及周边 8 个气象站 1984—2019 年的逐日气象观测资料来源于中国气象数据网 (<http://data.cma.cn>)。采用 1998 年世界粮农组织 (FAO) 修正后的 Penman-Monteith 公式计算 ET_0 , 计算方法参考文献^[19]、^[20]。春、夏、秋、冬分别按 3—5 月、6—8 月、9—11 月、12—次年 2 月划分季节。

1.2 研究方法

1.2.1 灰色关联度 依据灰色系统理论,将 ET_0 和 9 个气象要素指标看作一个灰色系统, ET_0 构成参考数列 $\{x_0(1), x_0(2), \dots, x_0(k)\}$, 9 个气象要素构成比较数列 $\{x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(k)\}$ 。

采用无量纲化处理后的数据,计算关联系数 (ζ) 和加权关联度 (r), 公式^[13]:

$$\zeta_i(k) = \frac{\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|} \quad (1)$$

$$r_i = \sum_{k=1}^9 w_k \zeta_i(k) \quad i = 1, 2, \dots, 9 \quad (2)$$

式中, $x_i(k)$ 为评价对象 i 在 k 点处的值, $k = 1, 2, \dots, n$; $|x_0(k) - x_i(k)|$ 为数列 x_0 与 x_i 在 k 点的绝对差值; $\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)|$ 、 $\max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|$ 分别为

两级最小、最大极差; ρ 为分辨系数,取值 0.5; r_i 为评价对象 i 对理想对象的加权关联度; w_k 为第 k 点的权重值。

1.2.2 通径分析 通径分析用来分析多个变量间较为复杂的线性关系,属于回归分析的拓展,通过确定自变量对因变量的直接、间接作用,分析变量间的相互影响,为统计决策提供可靠的依据^[21]。

自变量(x_i)与因变量(y)的相关系数可以分成两部分,一部分为通径系数(P_{iy}),由 x_i 的标准差与 y 的标准差之比计算,表征自变量对因变量的直接效应,计算方法如(3)式所示;另一部分为间接通径系数($\sum r_{ij}P_{jy}$),表征自变量通过其他自变量对因变量的间接效应,计算方法如(4)式^[14]所示。

$$P_{iy} = b_i \frac{\sigma_{xi}}{\sigma_y} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} r_{1y} &= P_{1y} + r_{12}P_{2y} + \cdots + r_{1i}P_{iy} \\ r_{2y} &= P_{2y} + r_{21}P_{1y} + \cdots + r_{2i}P_{iy} \\ &\vdots \\ r_{iy} &= P_{iy} + r_{i1}P_{1y} + \cdots + r_{iy}P_{iy} \end{aligned} \quad (4)$$

1.2.3 敏感系数 采用基于 P-M 模型的敏感系数法衡量 ET_0 受气候要素(如气温、风速、湿度等)变化的影响程度,该方法在 ET_0 研究中得到了广泛应用^[22]。蒸散发对气候要素变化的敏感系数用蒸散发变化率与气候因子变化率之比表示,计算方法^[17]:

$$S_x = \lim_{\Delta x/x \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta ET_0 / ET_0}{\Delta x / x} \right) = \frac{\partial ET_0}{\partial x} \times \frac{x}{ET_0} \quad (5)$$

式中, S_x 为气象因子 x 的敏感系数,无量纲,由敏感性曲线切线的斜率表征。线性变化时,敏感系数可以利用气象因子对 ET_0 任意区间的变化率表示,非线性时,变化区间越小,精度越高^[23]。敏感系数绝对值越大,表明 ET_0 对气候变量的变化敏感程度越高,气候变量影响越大,如当敏感系数为 0.1 时,表示气象因子变化 10%, ET_0 将变化 1%。

采用尹云鹤等^[16]提出的利用敏感系数和多年相对变化率乘积计算气象因子对 ET_0 变化的贡献率,分析 ET_0 变化成因,若引起 ET_0 增加为正贡献,反之为负贡献,具体公式:

$$\begin{aligned} C_x &= S_x \times Rc_x \\ Rc_x &= \frac{n \times Trend_x}{\bar{x}} \times 100\% \end{aligned} \quad (6)$$

式中, C_x 和 S_x 为气象因子 x 对 ET_0 变化的贡献率(%)和敏感系数; Rc_x 、 $Trend_x$ 、 $\bar{x}$ 分别为气象因子 x 的多年相对变化率、多年线性倾向率以及多年均

值; n 为统计年数。

2 结果与分析

2.1 参考作物蒸散量(ET_0)时空变化特征

2.1.1 ET_0 年际变化趋势特点 石羊河流域 1984—2019 年 ET_0 年际变化趋势如图 1A 所示,年均 ET_0 时间序列在 36 a 间整体呈上升趋势,线性倾向变化率 $2.16 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$,流域 M-K 统计量 Z 为 4.13,达到 0.05 显著性水平, ET_0 上升变化显著,变异系数 3.41%,多年平均值 983.33 mm,极大值出现在 2013 年,为 1 057.0 mm,极小值出现在 1993 年,为 922.39 mm,极值比 1.15,时间序列离散程度小,年际变化不强烈。曼-肯德尔法(M-K)检验统计量 Z 空间分布如图 1B 所示,流域所有站点 Z 值均大于 0,除东南部乌鞘岭站 Z 值 0.65,未达到 0.05 显著性水平,流域 87.5% 站点 Z 值均大于 1.96,通过了信度 95% 的显著性检验,表明整个流域 ET_0 年际呈显著上升趋势,流域中部显著性水平最高,向四周延伸,显著性逐渐减弱。

2.1.2 ET_0 年均值空间分布特征 采用克里金空间插值方法对流域内及周边 8 个站点 36 a 的年均 ET_0 数据进行空间插值, ET_0 多年平均空间分布如图 2A 所示。 ET_0 由南向北逐渐增加,南部为低值区,北部为高值区, ET_0 在 775.30~1 246.91 mm 之间波动,低值区位于张掖市肃南裕固族自治县、武威市天祝藏族自治县一带,最小值 775.30~864.07 mm,中值区 ET_0 在 864.07~1 013.88 mm 之间波动,位于金昌市永昌县南部、武威市城区及合水县,其中,金昌市北部、武威民勤县 ET_0 值均在 1 000 mm 以上,流域高值区位于民勤县境内,为 1 100~1 250 mm 左右。 ET_0 空间分布差异由于所处区域受地理环境和气候条件差异影响,石羊河流域由南向北地貌格局包括山地、绿洲、荒漠,三大生态系统构成了西北干旱区典型的地貌格局分布,南部高寒山区是内陆河的发源地,向北到达绿洲区,水资源大量甚至全部被工农业生产、生活大量耗用,最终消失在北部的荒漠区,因深居大陆内部,降水量逐渐减小,温差增大,蒸发量增加。 ET_0 线性变化率空间分布(图 2B)表明,民勤县中部、武威城区一带 ET_0 线性倾向变化率最大,为 $2.65 \sim 4.95 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$,相比流域其他区域变化更为明显,低值区位于张掖市肃南裕固族自治县、武威市天祝藏族自治县一带,与 ET_0 年均值分布一致,数值为 $0.80 \sim 2.25 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。全流域范围 ET_0 均呈现上升趋势,除东南部乌鞘岭站未达到 0.05 显

著性水平,其他区域均呈现显著上升趋势,站点占比 87.5%,由流域中部向周围延伸 ET_0 变化逐渐减小,不同区域 ET_0 变化存在差异,与气候要素变化紧

密相关。
2.1.3 ET_0 四季变化空间分布特征 石羊河流域 ET_0 四季变化特征如图 3 所示, ET_0 四季大小排序依

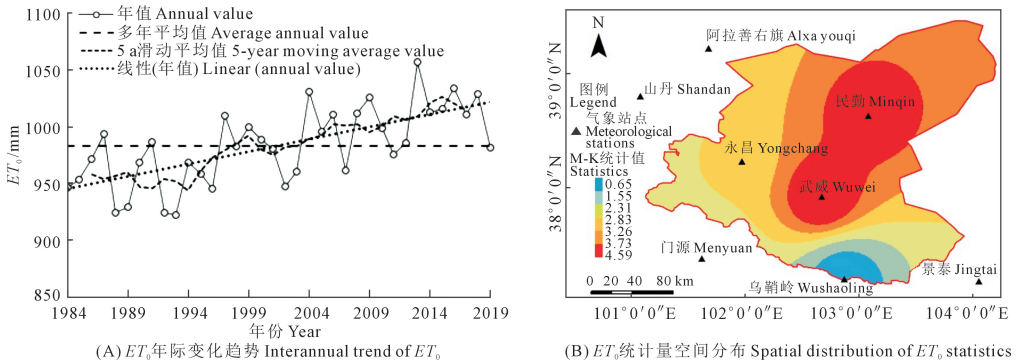


图 1 石羊河流域参考作物蒸散量 (ET_0) 年际变化趋势及统计量空间分布

Fig.1 ET_0 interannual variation trend and spatial distribution of statistics in Shiyang River Basin

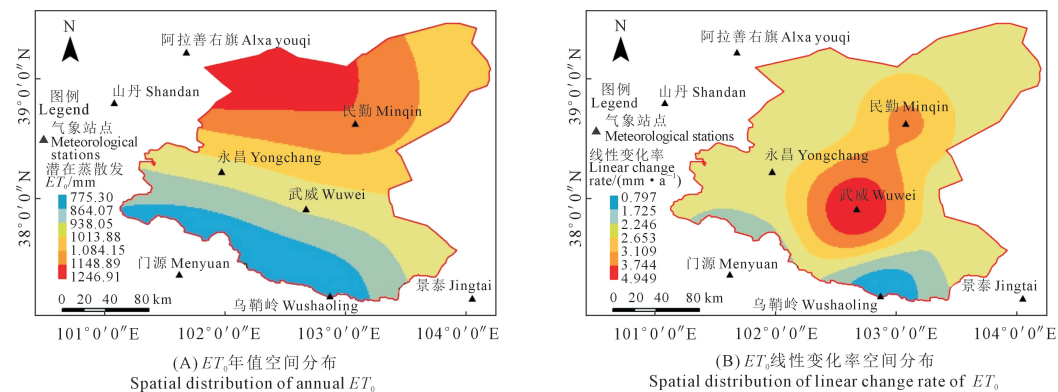


图 2 石羊河流域参考作物蒸散量 (ET_0) 年值和线性变化率空间分布

Fig.2 Spatial distribution of ET_0 annual value and linear rate of change in Shiyang River Basin

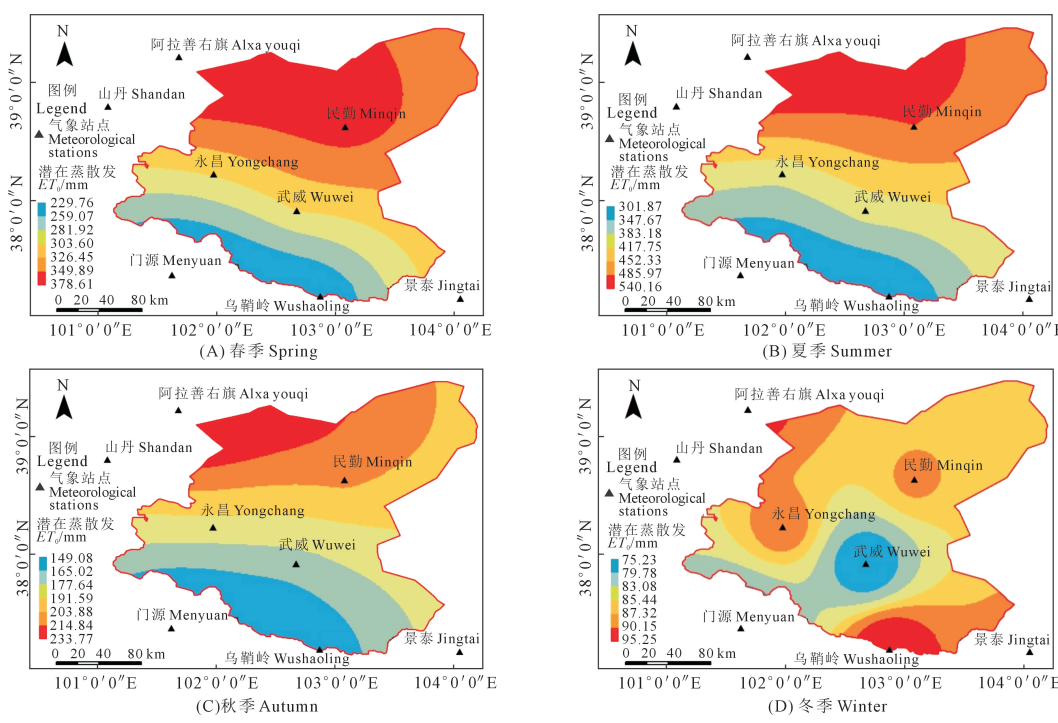


图 3 石羊河流域各季节参考作物蒸散量 (ET_0) 空间分布

Fig.3 Spatial distribution of ET_0 in Shiyang River Basin in different seasons

次为夏季、春季、秋季、冬季,均值为 409.35、303.36、184.84、85.6 mm, ET_0 夏季是冬季的 4.78 倍,春季是秋季的 1.64 倍,可见季节差异明显,这主要与四季气候差异特点相关。 ET_0 空间分布除冬季以外,均由南向北逐渐递增,与年值空间分布基本一致,低值区分布在张掖市肃南裕固族自治县、武威市天祝藏族自治县一带,春、夏、秋三季变化区间分别为 229.76 ~ 281.92、301.87 ~ 383.18、149.08 ~ 177.64 mm,高值区位于金昌市北部、武威民勤县以北,变化区间分别为 326.45 ~ 378.61、452.33 ~ 540.16、203.88 ~ 233.77 mm。冬季 ET_0 分布不规则,最大值 95.25 mm 出现在乌鞘岭站,最小值 75.23 mm 出现在武威站,变化区间 75.23 ~ 95.25 mm。

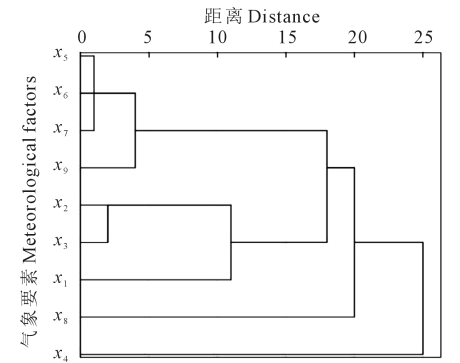
2.2 参考作物蒸散量 (ET_0) 变化与气象因素关系

1984—2019 年石羊河流域 ET_0 变化存在时空差异,为了定量化分析解释 ET_0 时空差异的原因,选取影响 ET_0 变化的气象因素,通过揭示各气象因素与 ET_0 的相关关系及其影响程度,探究 ET_0 时空变化的成因。

2.2.1 气象因素聚类分析与灰色关联度分析 聚类分析将性质相近事物划分为一类,选取可能影响 ET_0 变化的 9 个气象要素为研究对象,9 个气象要素间具有内在联系,其相对距离大小的度量标准采用皮尔逊相关性进行评价,基于组间联接法,得到聚类树状图,如图 4 所示。9 个气象要素被划分 5 类, I 型包括气象要素 x_5 、 x_6 、 x_7 、 x_9 ,分别代指平均气温、日最高气温、日最低气温、实际水汽压,体现热力因子温度的作用; II 型包括 x_2 、 x_3 ,代指平均相对湿度、最小相对湿度,体现湿度因子相对湿度的影

响; III 型为 x_1 降水量; IV 型为 x_4 日照时数; V 型为 x_8 平均风速。其中 I 型、II 型因包含两种以上具有相关关系的气象要素,这些相关因素间存在重复交互作用,采用灰色关联度分析法,基于关联度排序明晰气象要素与 ET_0 关联和紧密程度,以便剔除聚类分组中重复相关因素。灰色关联度法以 ET_0 为参考数列,9 个气象要素为比较数列,对 9 个气象要素进行关联度排序,排序越靠前,表明气象要素与 ET_0 关联程度越高,联系越紧密。关联度值计算结果由大到小排序为 P 、 RH 、 T 、 n 、 u 、 $T_{\max}$ 、 $RH_{\min}$ 、 e_a 、 $T_{\min}$, P 与 ET_0 关联度值最大,为 0.883, $T_{\min}$ 与 ET_0 关联度值最小,为 0.839,具体见图 5。综合考虑聚类分析及灰色关联度分析结果, I 型分组中 $T_{\max}$ 、 $T_{\min}$ 、 e_a 灰色关联度排序依次 6、9、8, II 型分组中 $RH_{\min}$ 灰色关联度排序 7,4 项气象因子排序较同组因子靠后,关联程度相对较弱,关联度排序在前的 5 个气象因素分别为 P 、 RH 、 T 、 n 、 u ,涵盖了影响 ET_0 变化的多种作用因素,即 P 、 RH 为湿度因子, T 、 n 为热力因子, u 为动力因子。因此,为了简化问题,避免相关要素的重复分析,选取 T 、 RH 、 P 、 n 、 u 共 5 个气象要素作为关键因素,进行后续的通径分析,该 5 项气象要素既分属于 5 个类型,又与 ET_0 变化关联紧密,且全面体现影响 ET_0 变化的多种因素作用。

2.2.2 气象因素对 ET_0 通径分析 针对聚类分析及灰色关联度分析确定的 5 个气象因素进行通径分析,确定气象要素 T 、 RH 、 n 、 P 、 u 对 ET_0 直接和间接作用大小。气象因素对 ET_0 通径分析结果如表 1 所示。通径系数反映各气象因素对 ET_0 变化的直接作用大小,排序为 $T > n > u > RH > P$,除 RH 数值为负值,其他均为正值,说明 RH 与 ET_0 呈反向变化, T 、 n 、 P 、



注 Note: x_1 — P , x_2 — RH , x_3 — $RH_{\min}$, x_4 — n ,

x_5 — T , x_6 — $T_{\max}$, x_7 — $T_{\min}$, x_8 — u , x_9 — e_a .

图 4 石羊河流域气象要素聚类分析

Fig.4 Clustering analysis of meteorological elements in Shiyang River Basin

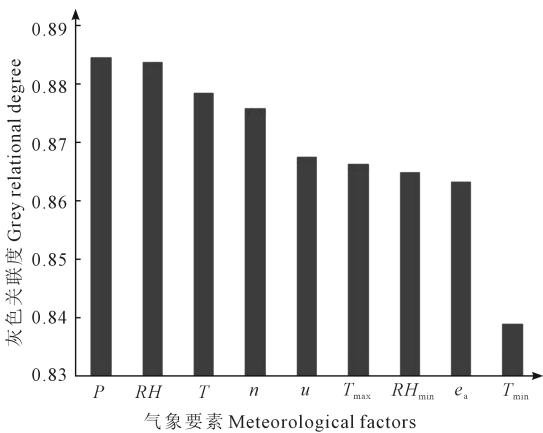


图 5 石羊河流域气象要素灰色关联度分析

Fig.5 Grey correlation degree analysis of meteorological elements in Shiyang River Basin

u 与 ET_0 呈正向变化,且对于 ET_0 变化, T 直接作用最大, P 作用最小。间接通径系数反映各气象因素对 ET_0 变化的间接作用大小,排序依次为 $n>u>T>RH>P$,表明 ET_0 变化受 n 的间接影响最大,受 P 的间接影响最小。简单相关系数综合反映各气象因素的直接和间接作用大小,排序为 $T>n>u>RH>P$ 。可见,对 ET_0 变化直接和间接影响最显著的气象因素是 T ,其次是 n 、 u 、 RH ,对 ET_0 变化影响最小的气

象因素是 P ,且 RH 对 ET_0 变化起反向作用,可见 T 升高、 n 增加、 u 增大与 RH 减小等多种因素共同作用,促使 ET_0 多年变化呈现显著增加趋势。考虑到对于 ET_0 增加趋势, P 作用最小,为 0.065,可以忽略不计,进一步剔除 P 指标,选取 4 个气象要素 T 、 n 、 u 、 RH 作为主导因素进行重点分析,通过后续的敏感系数和贡献率计算,定量化分析主导因子对 ET_0 变化的影响程度大小。

表 1 气象因子对参考作物蒸散量 (ET_0) 的通径分析
Table 1 Path analysis of ET_0 by meteorological factors

气象因素 Meteorological factor	通径系数(直接作用) Path coefficient (direct effect)	间接通径系数(间接作用) Indirect path coefficient (indirect effect)						简单相关系数 Simple correlation coefficient
		T	RH	n	u	P	Σ	
T	0.847		-0.007	0.039	0.029	0.003	0.064	0.911
RH	-0.150	0.042		-0.108	-0.005	0.008	-0.063	-0.214
n	0.189	0.174	0.086		-0.033	-0.007	0.221	0.409
u	0.172	0.145	0.004	-0.036		0.002	0.116	0.288
P	0.015	0.184	-0.076	-0.083	0.025		0.049	0.065

注: u 、 n 、 T 、 RH 、 P 分别代表风速、日照时间、日平均温度、平均相对湿度、降水量。
Note: u , n , T , RH and P represent wind speed, sunshine duration, average daily temperature, average relative humidity and precipitation.

2.3 参考作物蒸散量 (ET_0) 变化对气象要素敏感性分析

基于反距离权重法对 8 个气象站点的敏感系数进行空间插值,得到 ET_0 对 4 个主导因素 T 、 RH 、 u 、 n 的敏感系数空间分布(图 6),分别记为 $S-T$ 、 $S-RH$ 、 $S-u$ 、 $S-n$ 。 ET_0 对 T 变化的敏感性系数 $S-T$ 由南向北逐渐增加,高值区位于武威城区、民勤县,低值区位于张掖市肃南裕固族自治县、武威市天祝藏族自治县,流域敏感系数变化区间 $-0.03 \sim 0.60$,大部分区域敏感系数介于 $0.44 \sim 0.60$,即 T 升高 10%, ET_0 增大 4.4%~6.0%, $S-T$ 为正值,反映 T 与 ET_0 同向变化,即温度升高促使 ET_0 增加。敏感性系数 $S-RH$ 空间分布表现为南部地区大于北部地区,高值区位于武威合水县南部、金昌永昌县中部一带, $S-RH$ 在 $-1.11 \sim -1.61$ 区间变化,中值区位于金昌北部、武威城区、民勤县,流域敏感系数介于 $-0.38 \sim -1.61$ 之间,且 $S-RH$ 为负值, RH 与 ET_0 反向变化, RH 减少 10% 促进 ET_0 增加 3.8%~16.1%,可见,整体上 ET_0 对 RH 变化较敏感。敏感系数 $S-n$ 空间分布与 $S-T$ 相反,呈现由北向南逐渐增加,低值区位于武威民勤县,逐渐递增过渡到武威市天祝藏族自治县高值区,敏感系数介于 $-0.23 \sim 0.75$ 之间,即 n 增加 10%, ET_0 增加 $-2.3\% \sim 7.5\%$ 。敏感系数 $S-u$ 空间分布与 $S-T$ 大体一致,由南向北逐渐增加,高值区位于武威民勤县,低值区位于武威市天祝藏族自治县,流域敏感系数介于 $-0.06 \sim 0.36$ 之间,即 u 增加 10%, ET_0

增加 $-0.6\% \sim 3.6\%$,除乌鞘岭站敏感系数为负值,大部分区域均为正值, u 与 ET_0 同向变化。综上,石羊河流域 ET_0 对主导因子变化敏感性程度分布不均匀,敏感程度排序为 $RH>T>n>u$, ET_0 对 RH 变化最为敏感,温度升高、日照时数增大、风速增大、相对湿度减少共同促使流域 ET_0 年际呈增加趋势。

2.4 气象因素对参考作物蒸散量 (ET_0) 变化贡献特征分析

采用尹云鹤等^[16]提出的贡献率计算方法确定气象因子对 ET_0 变化的贡献大小,计算结果如表 2 所示,贡献大小排序为 $T>RH>u>n$,气象要素贡献率排序与敏感性排序并不一致,原因在于贡献率计算考虑了各气象要素的多年相对变化率。 T 敏感系数为正值, T 与 ET_0 同向变化,多年相对变化率 28.15%, T 多年升高 28.15% 促使 ET_0 增加,正贡献值为 13.61%,流域 ET_0 显著增加的最主要原因是 T 多年升高; RH 敏感系数为负值, RH 增加促使 ET_0 减少,多年相对变化率 -2.91% , RH 多年减少 -2.91% 促使 ET_0 增加,正贡献值为 2.86%; u 多年相对变化率 8.97%, u 与 ET_0 同向变化, u 多年增大 8.97% 促使 ET_0 增加的正贡献大小为 2.34%; n 多年相对变化率 1.80%, n 对 ET_0 正向作用, n 多年增加 1.80% 导致 ET_0 增加,正贡献率为 0.48%。综上可知,四项主导因子 T 、 RH 、 u 、 n 均对 ET_0 增加起正贡献作用,分别为 13.61%、2.86%、2.34%、0.48%,总贡献 19.29%。石羊河流域由于温度多年升高、日照时数增加、风

速增大、相对湿度减少等多种气象因素的共同作用, ET_0 呈现显著增加趋势。采用尹云鹤等^[16]提出利用敏感系数和多年相对变化率乘积计算气象因子对 ET_0 变化的贡献率,计算公式涉及影响 ET_0 变化的包括气候变化和人类活动影响等在内的所有因素,4 个气象要素只是多种气象因素变化中的一部分,无法涵盖所有气象因素的影响;同时 ET_0 变化也

受到人类活动的影响,包括土地利用与植被覆被变化、水土保持措施、兴建水库等水利设施,且气候变化与人类活动存在交互作用。因此,4 种气象要素对 ET_0 增加的总贡献仅为 19.29%,若要达到 100%,需进一步将其余气候变化因素及人类活动影响均加以考虑。

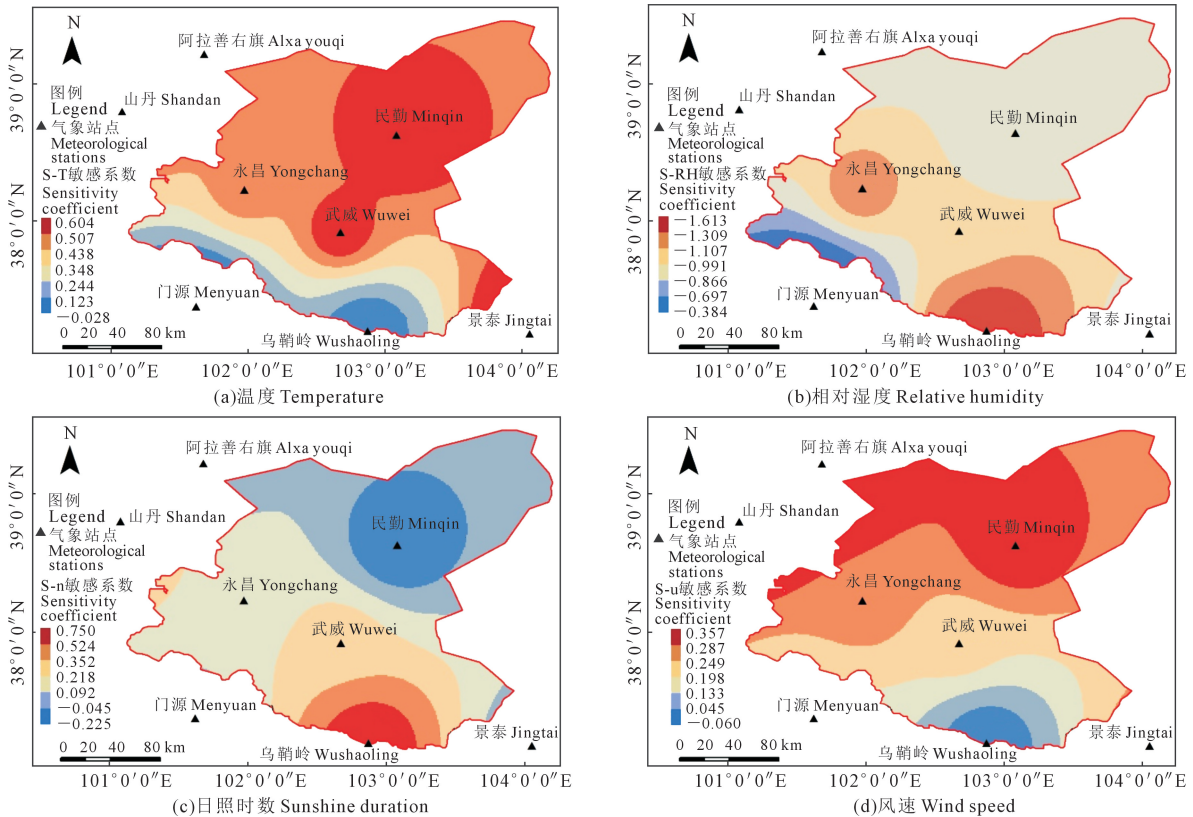


图 6 石羊河流域参考作物蒸散量 (ET_0) 敏感系数的空间分布

Fig.6 Spatial distribution of ET_0 sensitivity coefficient in Shiyang River Basin

表 2 气象因子对参考作物蒸散量 (ET_0) 的贡献率

Table 2 Contribution rate of meteorological factors to ET_0

气象要素 Meteorological factor	敏感性系数 Sensitivity factor	多年线性倾向率 Multiyear linear tendency rate	多年平均值 Average annual value	多年相对变化率/% Multiyear relative rate	贡献率/% Contribution rate
平均相对湿度 Average relative humidity	-0.98	-0.040	49.15%	-2.91	2.86
日照时数 Sunshine duration	0.27	0.004	7.87h	1.80	0.48
平均气温 Average temperature	0.48	0.051	6.52℃	28.15	13.61
平均风速 Wind speed	0.26	0.007	2.64 m · s ⁻¹	8.97	2.34

3 讨论与结论

研究中将聚类分析、灰色关联度分析、通径分析、敏感分析、贡献率分析等多种方法探索性结合,

将定性分析与定量分析相融合,这些方法是循序渐进,优势互补的关系。影响 ET_0 变化的气象因素多种多样,且各气象因素交互作用,关系复杂,为了理清各气象因素间的关系,并简化问题,突出主要矛

盾,探索性地将聚类分析和灰色关联度分析方法结合运用,聚类分析基于气象要素的性质相似性,将 9 个气象要素划分 5 类,结合灰色关联度排序,将 9 个气象要素削减为 5 个。通径分析反映各气象因素对 ET_0 变化的直接、间接作用,结果显示 P 对 ET_0 变化作用可以忽略不计,进一步剔除 P 指标,确定 4 个气象主导要素,并针对这 4 个气象要素进行敏感性分析及贡献率分析,4 个气象主导因素敏感性分析得到敏感性排序,贡献率分析确定贡献大小。综上所述可以看出,定性、定量多种方法结合运用,简化问题的同时,揭示各气象因素的相对重要性,确定关键主导因素,以及敏感性排序和贡献率大小,探索性将多种方法结合运用,为 ET_0 变化影响因子分析提供了新的分析思路和依据。

石羊河流域 1984—2019 年 ET_0 整体呈现显著上升趋势,除东南部乌鞘岭站流域其他区域 Z 值均大于 1.96,通过了信度 95% 的显著性检验。 ET_0 由南向北呈现递增的趋势,波动在 775.30~1 246.91 mm 之间,高值区位于民勤县境内,低值区位于张掖市肃南裕固族自治县、武威市天祝藏族自治县一带。 ET_0 夏季最大,其次春季、秋季,冬季最小,且春、夏、秋季 ET_0 由南向北逐渐递增。

流域范围内 ET_0 变化对气象因子敏感性程度分布不均匀,敏感程度大小依次为 RH 、 T 、 n 、 u ,流域 ET_0 的年际增加对相对湿度减少最为敏感, RH 减少 10%, ET_0 增加 3.8%~16.1%,且温度、日照时数、风速起正向促进作用,相对湿度起反向抑制作用。 ET_0 呈现显著增加趋势,主要是相对湿度多年减少和温度升高、日照时数增加、风速增大等共同作用造成的,贡献率分别为 2.86%、13.61%、0.48%、2.34%,温度升高是造成 ET_0 增加的主要原因,4 种气象要素总贡献值 19.29%。

参 考 文 献:

[1] XIONG Y J, ZHAO S H, TIAN F, et al. An evapotranspiration product for arid regions based on the three-temperature model and thermal remote sensing [J]. Journal of Hydrology, 2015, 530: 392-404.

[2] 邓兴耀,刘洋,刘志辉,等.中国西北干旱区蒸散发时空动态特征[J].生态学报,2017,37(9):2994-3008.

DENG X Y, LIU Y, LIU Z H, et al. Temporal-spatial dynamic change characteristics of evapotranspiration in arid region of Northwest China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(9): 2994-3008.

[3] 郑健,马静,王燕,等.基于气候分区的甘肃省参考作物蒸发蒸腾量时空分布特征[J].水资源与水工程学报,2020,31(1):240-247.

ZHENG J, MA J, WANG Y, et al. Temporal-spatial distribution characteristics of reference crop evapotranspiration in Gansu based on cli-

matic zones[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2020, 31(1): 240-247.

[4] 刘昌明,孙睿.水循环的生态学方面:土壤—植被—大气系统水分能量平衡研究进展[J].水科学进展,1999,(3):251-259.

LIU C M, SUN R. Ecological aspects of water cycle: advances in soil vegetation atmosphere of energy and water fluxes[J]. Advances in Water Science, 1999,(3): 251-259.

[5] WEN J, WANG X H, GUO M H, et al. Impact of climate change on reference crop evapotranspiration in Chuxiong city, Yunnan Province [J]. Procedia Earth and Planetary Science, 2012, 5: 113-119.

[6] 康燕霞,齐广平,股长琛,等.甘肃省参考作物蒸散量及影响因素的时空分异特征[J].干旱地区农业研究,2015,33(5):154-162.

KANG Y X, QI G P, YIN C C, et al. Time-spatial differential features of reference evapotranspiration and its influencing factors in Gansu Province[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(5): 154-162.

[7] 冯禹,崔宁博,魏新平,等.川中丘陵区参考作物蒸散量时空变化特征与成因分析[J].农业工程学报,2014,30(14):78-86.

FENG Y, CUI N B, WEI X P, et al. Temporal-spatial distribution characteristics and causes analysis of reference crop evapotranspiration in hilly area of central Sichuan [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(14): 78-86.

[8] 殷长琛,齐广平,康燕霞.基于云模型的甘肃省参考作物蒸散量时空分布特征[J].农业工程学报,2015,31(8):152-158.

YIN C C, QI G P, KANG Y X. Analysis on characteristics of temporal-spatial potential evapotranspiration distribution in Gansu based on cloud mode[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(8): 152-158.

[9] 李霞,刘廷玺,段利民,等.科尔沁湿草甸参考作物蒸散发模拟分析[J].中国沙漠,2020,40(2):134-143.

LI X, LIU T X, DUAN L M, et al. Simulation of reference crop evapotranspiration and analysis of the factor effect in Horqin wet meadow [J]. Journal of Desert Research, 2020, 40(02): 134-143.

[10] 吕明权,张磊,吴胜军.嘉陵江流域参考蒸散的年际变化趋势及成因分析[J].水土保持研究,2019,26(3):77-85.

LV M Q, ZHANG L, WU S J. Interannual change and attribution of reference evapotranspiration over Jialingjiang basin [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(3): 77-85.

[11] 曹永强,高璐,袁立婷,等.辽宁省潜在蒸散发量及其敏感性规律分析[J].地理科学,2017,37(9):1422-1429.

CAO Y Q, GAO L, YUAN L T, et al. Analysis of potential evaporation and its sensitivity in Liaoning Province[J]. Scientia Geographica Sinica, 2017, 37(9): 1422-1429.

[12] 杨小兵.聚类分析中若干关键技术的研究[D].杭州:浙江大学,2005.

YANG X B. Research of key techniques in cluster analysis[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.

[13] 邓聚龙.灰色系统基本方法[M].武汉:华中工学院出版社,1987:35-47.

DENG J L. Basic method of grey system[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1987:35-47.

- (上接第 60 页)

- [45] 李文广, 杨晓晓, 黄春国, 等. 饲料油菜作绿肥对后茬麦田土壤肥力及细菌群落的影响[J]. 中国农业科学, 2019, 52(15): 2664-2677.
- LI W G, YANG X X, HUANG C G, et al. Effects of rapeseed green manure on soil fertility and bacterial community in dryland wheat field [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(15): 2664-2677.
- [46] 董艳, 董坤, 郑毅, 等. 种植年限和种植模式对设施土壤微生物区系和酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(3): 527-532.
- DONG Y, DONG K, ZHENG Y, et al. Soil microbial community and enzyme activities in greenhouse with different cultivation years and planting system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(3): 527-532.
- [47] 赵冬雪, 王盼盼, 常春丽, 等. 绿肥套作对植烟土壤微生物群落功能多样性的影响[J]. 华北农学报, 2019, 34(5): 201-207.
- ZHAO D X, WANG P P, CHANG C L, et al. The effects of intercropping green manure on functional diversity of microbial community in tobacco planting soil[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2019, 34(5): 201-207.
- [48] 王晖, 孙云, 欧阳一沁. 宁夏引黄灌区复种间草潜力·效益及发展模式的研究[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(32): 14046-14049.
- WANG H, SUN Y, OUYANG Y Q. Study on potential, benefit and development pattern of multiple cropping forage grass in Yellow River irrigation region of Ningxia [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2008, 36(32): 14046-14049.
- [49] 朱倩倩, 刘国宏, 许咏梅, 等. 水氮对新疆南部麦后复种饲料油菜产量和品质的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(7): 1033-1041.
- ZHU Q Q, LIU G H, XU Y M, et al. Effect of water and nitrogen on the yield and quality of forage rape grown after wheat in south Xinjiang [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(7): 1033-1041.
- [50] 汪波, 宋丽君, 王宗凯, 等. 我国饲料油菜种植及应用技术研究进展[J]. 中国油料作物学报, 2018, 40(5): 695-701.
- WANG B, SONG L J, WANG Z K, et al. Production and feeding technology of fodder-rapeseed in China [J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2018, 40(5): 695-701.
- [51] 唐国永. 麦后复种油菜的品种选择及栽培试验[J]. 湖北农业科学, 2013, 52(14): 3249-3252.
- TANG G Y. Selection of varieties and cultivation experiment of *Brassica napus* of multiple cropping after wheat [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2013, 52(14): 3249-3252.
- [52] 韩宇平. 宁夏引黄灌区生态耗水规律研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2005.
- HAN Y P. Study on ecological water consumption in the Yellow River irrigation area of Ningxia [D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2005.