

# 疏勒河流域潜在蒸散发时空演变及驱动因素量化分析

马亚丽<sup>1</sup>, 牛最荣<sup>1</sup>, 张 芮<sup>1</sup>, 孙栋元<sup>1</sup>, 程锦娜<sup>2</sup>, 白祖晖<sup>2</sup>

(1.甘肃农业大学 水利水电工程学院, 兰州 730070; 2.甘肃省水利水电勘测设计研究院有限责任公司, 兰州 730030)

**摘 要:**为了探明潜在蒸散发( $ET_0$ )时空演变规律及其与气象因素间的复杂交互作用关系,揭示水循环过程对气候变化响应机制,基于疏勒河流域 10 个气象站点 1984—2019 年逐日资料,采用聚类分析、灰色关联度分析、通径分析、敏感系数法等多种定性定量分析方法,确定主导驱动因素以及  $ET_0$  变化对主导因子敏感程度及贡献大小。结果表明: $ET_0$  年际变化上升趋势显著,空间上由东南向西北逐渐增加。 $ET_0$  季节排序为夏季>春季>秋季>冬季,四季空间分布由东南向西北逐渐递增。聚类分析及灰色关联度分析显示  $T$ (日平均温度)、 $RH$ (平均相对湿度)、 $P$ (降水量)、 $n$ (日照时间)、 $u$ (风速)为 5 个关键因素,通径分析表明  $T$  是最主要因素, $P$  作用最小。对  $ET_0$  变化, $T, n, u$  起正向促进作用, $RH$  起反向抑制作用,贡献率分别为 7.96%, 0.29%, 3.14%, 2.29%。 $ET_0$  呈现增大趋势,是由于  $RH$  多年减少和  $T$  升高、 $n$  增加、 $u$  增大等共同作用结果, $T$  升高是造成  $ET_0$  增加的主要原因。探究疏勒河流域  $ET_0$  变化机理为河西干旱内陆河地区  $ET_0$  研究的方法理论及水资源合理、高效利用提供科学参考依据。

**关键词:**潜在蒸散发; 驱动因素; 气候变化; 定量关系; 疏勒河流域

中图分类号:P426

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)05-0350-08

## Temporal and Spatial Evolution and Driving Factors of Potential Evapotranspiration in Shule River Basin

MA Yali<sup>1</sup>, NIU Zuirong<sup>1</sup>, ZHANG Rui<sup>1</sup>, SUN Dongyuan<sup>1</sup>, CHENG Jinna<sup>2</sup>, BAI Zuhui<sup>2</sup>

(1.College of Water Resources and Hydropower Engineering, Gansu

Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2.Gansu Survey and Design Research

Institute for Water Resources and Hydropower Limited Liability Company, Lanzhou 730030, China)

**Abstract:** In order to explore the temporal and spatial variation of  $ET_0$  and its complex interaction with meteorological factors, and reveal the response mechanism of climate change to hydrological cycle, based on the daily data of ten meteorological stations in Shule River Basin from 1984 to 2019, a variety of qualitative and quantitative analysis methods were used to determine the dominant meteorological elements, and to explore the sensitivity and contribution of the dominant factors to  $ET_0$  changes, including cluster analysis, grey correlation analysis, path analysis, sensitivity coefficient method. The results show that the interannual variation of  $ET_0$  presented a significant upward trend, and it gradually increased from southeast to northwest spatially;  $ET_0$  in summer was the largest, followed by spring and autumn, while the smallest was observed in winter;  $ET_0$  increased gradually from southeast to northwest in four seasons. The results of cluster analysis and grey correlation analysis showed that  $T$  (average daily temperature),  $RH$  (average relative humidity),  $P$  (precipitation),  $n$  (sunshine duration), and  $u$  (wind speed) were the five key meteorological factors,  $T$  was the most important factor, and  $P$  played the least role. For the change of  $ET_0$ ,  $T$ ,  $n$  and  $u$  had a positive promoting effect, while  $RH$  had a negative inhibiting effect. The contribution rates were 7.96%, 0.29%, 3.14% and 2.29%, respectively.  $ET_0$  in Shule 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 the increase of  $ET_0$  was mainly due to the

收稿日期:2021-07-20

修回日期:2021-08-06

资助项目:甘肃农业大学水利水电工程学院科研团队建设专项资助项目(Gaucwky-04);中国科学院沙漠与沙漠化重点实验室开放课题(KLDD-2020-003);甘肃省重点研发计划项目(21YF5NA015);甘肃农业大学科技创新基金—青年导师扶持资助项目(GAU-QD-FC-2021-16)

第一作者: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:孙栋元(1978—),男,甘肃省民乐县人,博士,教授级高级工程师,主要从事水文水资源与干旱区水土资源方面的研究工作。

E-mail:gsausundy@126.com

increase of  $T$ . The study of  $ET_0$  variation mechanism in Shule River Basin can provide methods and theories of  $ET_0$  research and a scientific reference for the rational and efficient utilization of water resources in Hexi arid area.

**Keywords:** potential evapotranspiration; driving factors; climate change; quantitative relationship; Shule River Basin

20 世纪以来,随着全球气候呈现持续性显著变暖趋势,水循环已经或正在发生着变化<sup>[1-2]</sup>。蒸散发过程是水循环过程的一个重要环节,参与地表水量平衡和转化过程,同时影响能量平衡过程,是反映和影响气候系统变化的重要参量,因此,关于蒸散发的研究,一直都是国内外多学科的研究热点<sup>[3]</sup>。潜在蒸散发( $ET_0$ )表征参考作物在供水不受限时的蒸散能力,是作物需水量预测及实际蒸散量计算的关键参数<sup>[4]</sup>,影响地表水热及干湿状况、生态系统用水过程和水资源利用效率<sup>[5]</sup>。 $ET_0$ 联系着土壤、生物、大气等地表三大圈层,其变化势必会受到由三大圈层所构成的组合系统中多种因素的影响, $ET_0$ 与气象因素间、各气象因素间均存在较为复杂的交互作用关系<sup>[6]</sup>,探讨  $ET_0$  时空演变规律和驱动力分析,对探明全球气候变暖背景下水文过程对气候变化的响应机制具有重要意义<sup>[7]</sup>。

近年来关于  $ET_0$  时空分布特征及归因分析做了大量研究,黄会平等<sup>[8]</sup>基于主成分分析方法探讨中国  $ET_0$  分布特征及其影响因子,发现影响  $ET_0$  变化的第一主成分是热力学因素。殷长琛等<sup>[9]</sup>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<sup>[10]</sup>在科尔沁湿草甸利用通径分析及指标敏感性分析对  $ET_0$  的影响因子进行辨识,发现主要因子为饱和水汽压差和最低气温。郑健等<sup>[11]</sup>对影响甘肃省 1980—2015 年  $ET_0$  时空变化的各气象因素进行偏相关分析,表明平均风速和日照时数是影响  $ET_0$  变化的最大因素。综上所述,已有分析  $ET_0$  的变化成因的相关研究多采用单一方法<sup>[8-11]</sup>,多种分析方法均适用,但是由于  $ET_0$  受众多因素综合作用以及与气象因素间复杂交互作用关系,考虑将多种定量与定性分析方法有机结合,揭示  $ET_0$  与气象因素间的内在相关关系,确定主导因子,定量化研究  $ET_0$  变化对主导因子敏感程度及贡献大小。本研究将聚类分析<sup>[12]</sup>、灰色关联度分析<sup>[13]</sup>、通径分析<sup>[14]</sup>、敏感系数法<sup>[15]</sup>、贡献分析等<sup>[16]</sup>多种定性、定量方法探索性结合,定性分析与定量分析结合运用,揭示疏勒河流域  $ET_0$  变化与各气象因素间的相关关系,确定主导因素及其敏感程度、贡献大小,对影响  $ET_0$  变化的驱动因素进行量化分析,为河西干旱内陆河地区  $ET_0$  的研究提供新的方法、理论,促进缺水地区水资源合理、高效利用。

## 1 研究区概况

疏勒河发源于甘肃河西走廊祁连山脉,属于河西地区三大内陆河之一,流域位于甘肃省河西走廊西端,包括玉门市、敦煌市、瓜州县和肃北蒙古族自治县,流域总面积约 11.39 万  $\text{m}^2$ ,东经  $92^\circ 11'—98^\circ 30'$ ,北纬  $38^\circ 00'—42^\circ 48'$ ,南部为阿尔金山及祁连山脉,是流域的水源涵养区和产流区,中部平原地区,地势相对平缓,是水资源的主要消耗区,北部为马鬃山地区,南北地势较高<sup>[17-18]</sup>。流域地处河西地区,深居大陆内部,属于大陆性干旱荒漠气候,流域中下游绿洲、荒漠景观并存,降水稀少,蒸发强烈,水资源稀缺,自然条件恶劣,但流域地理位置特殊,属于“两屏三带”中的北方防沙带,是重要的生态屏障,而人类活动和气候变化影响,更加剧水资源短缺的状况,引发一系列生态环境问题,已经成为限制当地社会、经济发展和生态环境改善的关键因素<sup>[19]</sup>。疏勒河流域及周边 10 个气象站点空间分布见图 1。

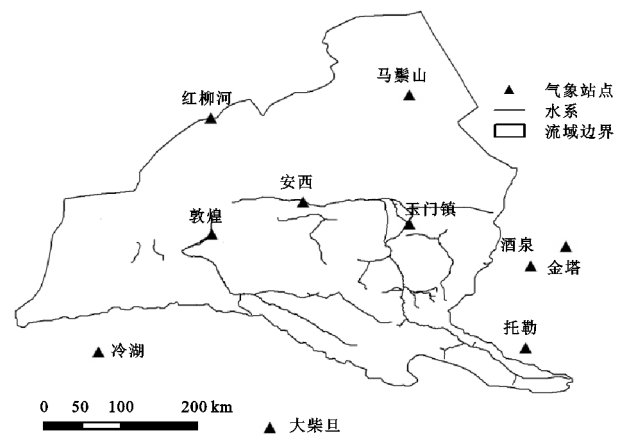


图 1 疏勒河流域气象站点空间分布

## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源与处理

气象数据为疏勒河流域及周边 10 个气象站点 1984—2019 年的气象观测资料(包括气温、相对湿度、降水、风速、日照等),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 P-M 公式计算潜在蒸散发,具体公式计算见参考文献<sup>[4,20]</sup>。按春季、夏季、秋季、冬季分别为 3—5 月、6—8 月、9—11 月、12—次年 2 月划分

季节。利用 ArcGIS 软件进行克里金空间插值和反距离权重空间插值分析。

## 2.2 研究方法

2.2.1 灰色关联度 根据灰色系统理论<sup>[13]</sup>,气象要素指标构成一个灰色系统,ET<sub>0</sub>作为参考数列 $x_0(k)$ ,9个气象要素作为比较数列 $x_i(k)$ 。关联系数( $\zeta$ )和加权关联度( $r$ )计算方法如公式(1)和(2)所示。

$$\zeta_i(k) = \frac{\min_{i,k} |x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_{i,k} |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_{i,k} |x_0(k) - x_i(k)|} \quad (1)$$

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

式中: $x_i(k)$ 表示第*i*个评价对象在*k*点处的值, $k=1,2,\dots,n$ ;  $|x_0(k) - x_i(k)|$ 为 $x_0$ 数列与 $x_i$ 在*k*点的绝对差值; $\min_{i,k} |x_0(k) - x_i(k)|$ 为两级最小极差; $\max_{i,k} |x_0(k) - x_i(k)|$ 为两级最大极差; $\rho$ 为分辨系数,一般取 $\rho=0.5$ ;  $r_i$ 为评价对象*i*的加权关联度; $\omega_k$ 为第*k*点的权重值。

2.2.2 通径分析 数量遗传学家 Sewall Wright 于 1921 年最早提出的通径分析(Path analysis),该方法用于分析因变量与多个自变量之间的较为复杂的线性关系,确定因变量受自变量直接与间接作用大小,为统计决策提供可靠依据的一种多元统计技术<sup>[21]</sup>。自变量 $x_i$ 到因变量 $y$ 的通径系数由两个部分组成,一部分为直接通径系数 $P_{iy}$ ,用自变量 $x_i$ 的标准差与因变量 $y$ 的标准差之比表示,是自变量对因变量的直接效应;另一部分为 $\sum r_{ij} P_{jy}$ ,是自变量通过其他自变量对因变量的间接效应,具体计算表达式<sup>[14]</sup>如公式(3)和(4)所示:

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

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

式中: $P_{iy}$ 为直接通径系数; $b_i$ 为线性回归系数; $\sigma_{xi}$ 为 $x_i$ 的标准差; $\sigma_y$ 为 $y$ 的标准差; $r_{iy}$ 为 $x_i$ 与 $y$ 的简单相关系数; $r_{ij} P_{jy}$ 为间接通径系数。

2.2.3 敏感系数 采用基于 P-M 模型的敏感系数法衡量气候要素(如气温、相对湿度、风速等)变化对蒸散发影响程度,该方法在 ET<sub>0</sub> 研究中具有广泛的应用基础<sup>[22]</sup>。蒸散发气候敏感系数计算方法如公式(5)<sup>[15]</sup>所示,即蒸散发变化率与气候因子变化率之比,由敏感性曲线切线的斜率表征<sup>[23]</sup>。

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

式中: $S_x$ 为 ET<sub>0</sub> 对气象因子 $x$ 的敏感系数,无量纲。敏感系数绝对值越大,表示 ET<sub>0</sub> 对气候变量的变化越敏感,气候变量对 ET<sub>0</sub> 的影响越大。即如果气象变量变化 10%,引发 ET<sub>0</sub> 变化 1%,则敏感系数为 0.1。

定量分析气象因子对 ET<sub>0</sub> 变化的贡献程度,采用尹云鹤等<sup>[16]</sup>提出的利用敏感系数和多年相对变化率乘积计算,基于该方法计算的贡献率为正值,表明引起 ET<sub>0</sub> 增加为正贡献,反之为负贡献,具体公式见式(6):

$$C_x = S_x \cdot Rc_x$$

$$Rc_x = \frac{n \cdot \text{Trend}_x}{\bar{x}} \times 100\% \quad (6)$$

式中: $C_x$ 为气象因子 $x$ 贡献率(%); $S_x$ 为 ET<sub>0</sub> 变化对气象因子 $x$ 的敏感系数; $Rc_x$ 为多年相对变化率; $\text{Trend}_x$ 为多年线性倾向率; $\bar{x}$ 为多年均值; $n$ 为统计年数。

## 3 结果与分析

### 3.1 ET<sub>0</sub> 时空变化特征

3.1.1 ET<sub>0</sub> 年际变化 疏勒河流域 1984—2019 年 ET<sub>0</sub> 年际变化特征见图 2A 所示,年均 ET<sub>0</sub> 时间序列 M-K 统计量  $Z$  为 3.45,达到 0.05 显著性水平,线性倾向变化率 2.92 mm/a,整体呈现显著的上升趋势,2017 年 ET<sub>0</sub> 为 1 266.58 mm 是时间序列的极大值,1993 年 1 038.89 mm 是极小值,ET<sub>0</sub> 围绕多年平均水平 1 128.03 mm 呈波动上升变化。疏勒河流域地处河西走廊最西端,属于典型大陆干旱气候,年降雨量小,蒸发强烈,是甘肃省干旱程度最严重的地区之一,全流域 ET<sub>0</sub> 均在 1 000 mm 以上。基于反距离权重法插值得到 M-K 检验统计量  $Z$  空间分布见图 2B 所示。信度 90%,95% 的置信区间临界值分别为 1.28,1.96,  $|Z|$  大于该临界值表示达到了 0.1,0.05 显著性水平。流域各站点 M-K 统计值计算结果显示,除青海大柴旦站  $Z$  值 0.36,未达到 0.1 显著性水平,疏勒河其他区域  $|Z|$  值均大于 1.28,通过了信度 90% 的显著性检验,由于  $Z$  值存在正负值,正负高值之间插值产生中间值区域,流域 ET<sub>0</sub> 年际变化基本都达到 0.1 显著水平,变化趋势显著的站点占比 90%。

3.1.2 ET<sub>0</sub> 年值空间分布 利用疏勒河流域内及周边 10 个站点多年 ET<sub>0</sub> 数据,基于克里金空间插值法进行空间插值,得到 ET<sub>0</sub> 空间分布见图 3A,由于所处区域地理环境差异,多年平均 ET<sub>0</sub> 由东南向西北呈现增加的趋势,波动在 764.07~1 452.57 mm。ET<sub>0</sub> 低值区位于青海省天峻县,最小值介于 764.07~923.37 mm,中值区位于肃北县南部、瓜州县南部、敦煌

市以东、玉门市,ET<sub>0</sub> 处于 923.37~1 169.07 mm,流域高值区位于肃北县北部、瓜州县北部、敦煌市西部、阿克塞县西部,ET<sub>0</sub> 在 1 169.07~1 452.57 mm 变化。区域地理环境差异导致 ET<sub>0</sub> 空间分布差异,流域从南到北横跨了南部祁连山、中部走廊平原、北部马鬃山,气候类型依次为高寒半干旱湿润区、温凉干旱区、温暖干旱区,不同的气候类型及地形条件,使降水量、温度、蒸发量等都存在地理差异。ET<sub>0</sub> 线性变化率空

间分布结果见图 3B 所示,线性变化率空间分布与 ET<sub>0</sub> 检验统计量 Z 空间分布大体一致,高值区位于敦煌东部、瓜州中部、肃北县北部一带,线性变化率为 2.51~4.51 mm/a,由高值区向四周过渡延伸到低值区,低值区位于玉门市等地,线性变化率为 -2.29 mm/a,高值区呈显著上升趋势( $Z>1.96$ ),低值区呈显著下降趋势( $Z<-1.96$ ),流域其他区域变化不明显,不同区域 ET<sub>0</sub> 变化率存在差异。

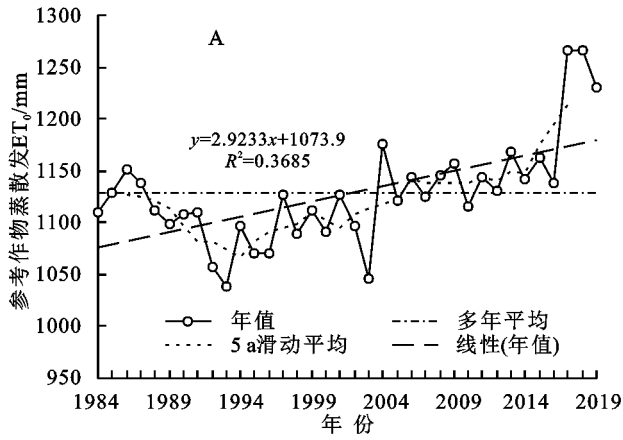


图 2 疏勒河流域 ET<sub>0</sub> 年际变化趋势及统计量空间分布

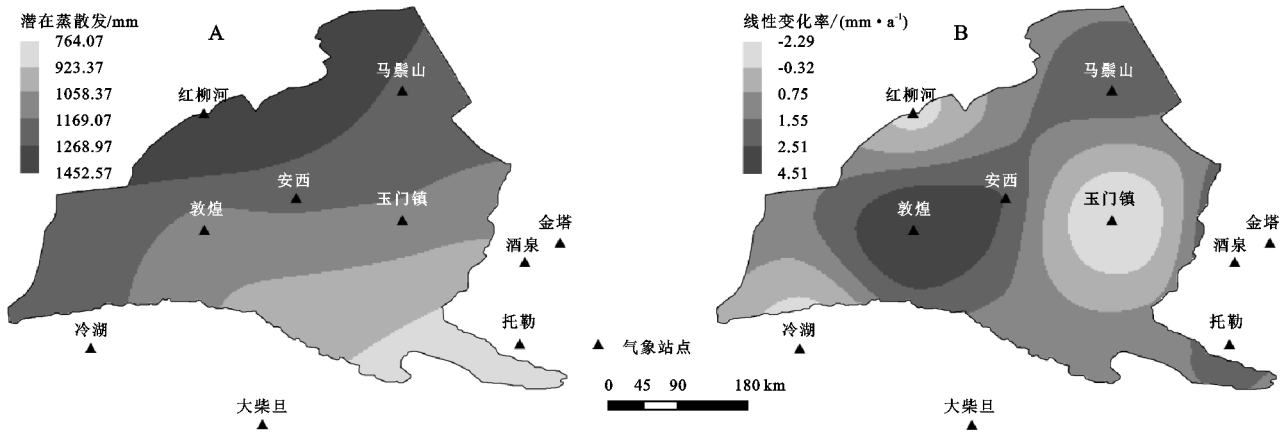


图 3 疏勒河流域 ET<sub>0</sub> 年值和线性变化率空间分布

3.1.3 ET<sub>0</sub> 季节空间分布 1984—2019 年疏勒河流域 ET<sub>0</sub> 季节变化特征见图 4,流域春季、夏季、秋季、冬季 ET<sub>0</sub> 均值为 346.55 mm,489.15 mm,214.56 mm,77.77 mm,夏季 ET<sub>0</sub> 最大,其次春季、秋季,冬季最小,且夏季与冬季之比是 6.29 倍,春季与秋季之比是 1.62 倍,年内分布不均匀,四季分别占比 30.72%,43.36%,19.02%,6.89%。四季空间分布整体上基本一致,ET<sub>0</sub> 由东南向西北逐渐递增,与 ET<sub>0</sub> 年值空间分布一致,低值区分布在青海省天峻县、肃北东南部一带,春、夏、秋、冬四季变化区间分别为 235.80~310.45 mm,327.63~440.68,154.04~194.68 mm,67.44~74.42 mm,高值区位于流域西北部肃北县、瓜州、敦煌以北,春、夏、秋、冬四季变化区间分别为 361.96~425.41 mm,527.74~657.68,226.91~272.69 mm,

79.51~82.91 mm,北部马鬃山地区、敦煌、瓜州为流域下游荒漠地带,降水大部分集中在南部祁连山区,西北部降水少,蒸发强烈,且与库姆塔格沙漠连接。

### 3.2 ET<sub>0</sub> 与气象因素相关关系分析

解释疏勒河流域 ET<sub>0</sub> 时空变化差异的原因,从揭示 ET<sub>0</sub> 与各气象因素的相关关系入手,对影响 ET<sub>0</sub> 时空变化的驱动因子进行量化分析。

3.2.1 气象因素聚类分析与灰色关联度分析 本研究中以皮尔逊相关性作为度量标准,采用组间联接法的聚类方法,对与 ET<sub>0</sub> 变化相关的 9 个气象要素数据进行系统聚类分析,将 9 个气象要素性质相近的划分为一类,确定各气象要素间的相关联系,得到聚类树状图(见图 5A)。依据各气象要素综合相似性,将气象要素划分 5 类,其分类如下:平均气温  $x_5$ ,日最



高温  $x_6$ , 日最低气温  $x_7$ , 实际水汽压  $x_9$  归为 I 型, 体现影响  $ET_0$  变化的温度作用; 平均相对湿度  $x_2$ , 最小相对湿度  $x_3$  归为 II 型, 体现影响  $ET_0$  变化的相对湿度作用; 降水量  $x_1$ , 日照时数  $x_4$ , 平均风速  $x_8$  分别归为 III 型、IV 型、V 型。为了进一步阐释 9 个气象要素与  $ET_0$  关联程度, 揭示聚类分析 I 型、II 型分组中重复相关的气象要素对  $ET_0$  变化的紧密程

度,  $ET_0$  和气象要素时间序列分别作参考数列和比较数列, 计算 9 个气象要素加权关联度, 依据关联度大小进行关联度排序, 关联度值越大, 排序越靠前, 表明该气象要素与  $ET_0$  联系越紧密<sup>[13]</sup>。关联度由大到小排序为  $u, RH, P, T, ea, n, T_{max}, RH_{min}, T_{min}$ ,  $u$  关联度值最大 0.907,  $T_{min}$  关联度值最小 0.870, 具体见图 5B、表 1 所示。

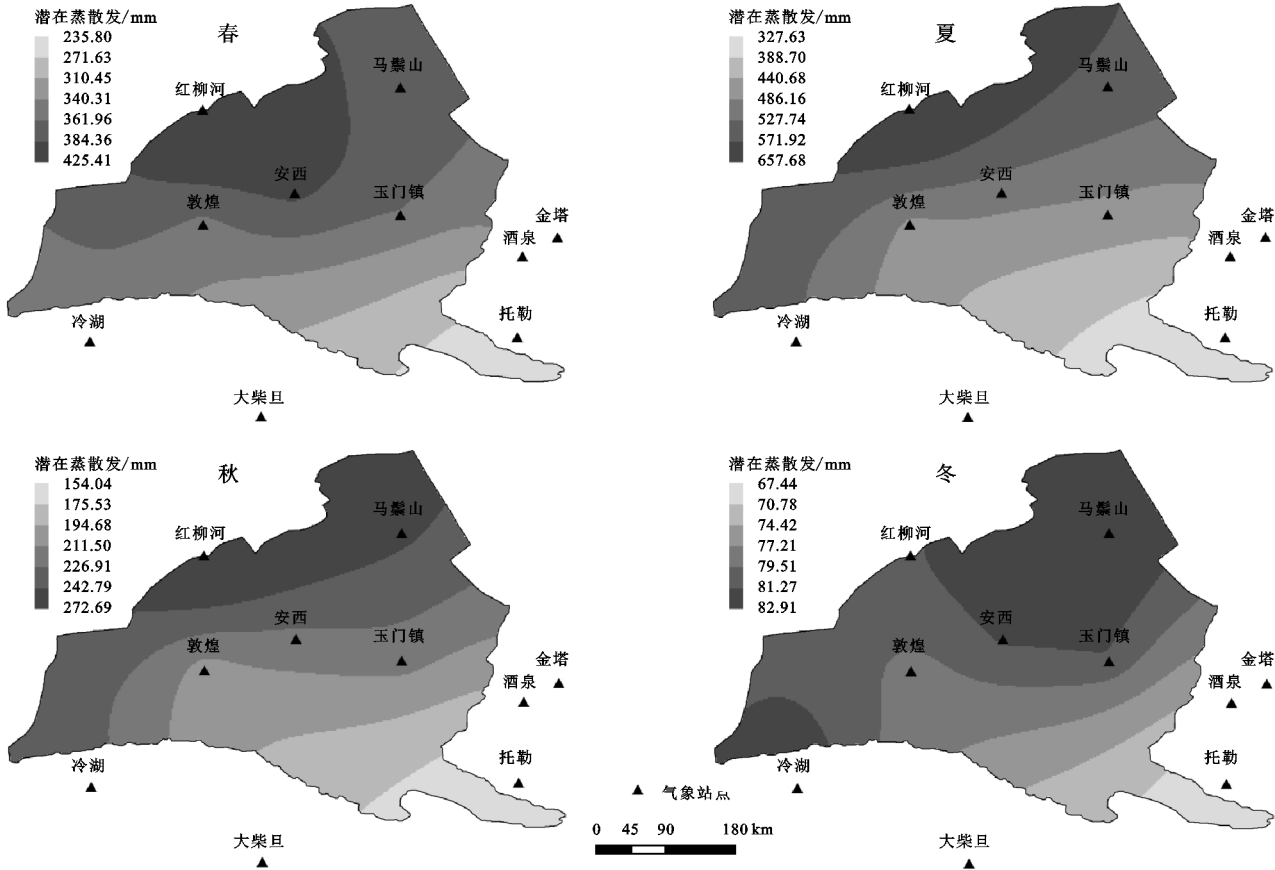


图 4 疏勒河流域各季节  $ET_0$  空间分布

聚类分析 I 型和 II 型分组中具有重复交互作用因素, 结合灰色关联度分析结果, I 型分组中  $T_{max}$ ,  $T_{min}$ ,  $ea$  灰色关联度排序依次 7, 9, 5, II 型分组中  $RH_{min}$  灰色关联度排序 8,  $T_{max}$ ,  $T_{min}$ ,  $ea$  较同组中  $T$  排序靠后,  $RH_{min}$  较同组中  $RH$  排序靠后, 与  $ET_0$  的关联程度相对较弱, 因此, 剔除重复相关因素、简化问

题的同时, 聚焦与  $ET_0$  变化联系紧密的因素, 从 9 个气象要素中筛选出  $T, RH, P, n, u$  共 5 个气象要素作为关键因素进行后续的通径分析, 该 5 项气象要素体现出影响  $ET_0$  变化的湿度、热力、动力等多种因子作用, 且分属于性质存在差异的 5 个类型, 与  $ET_0$  联系又相对紧密。

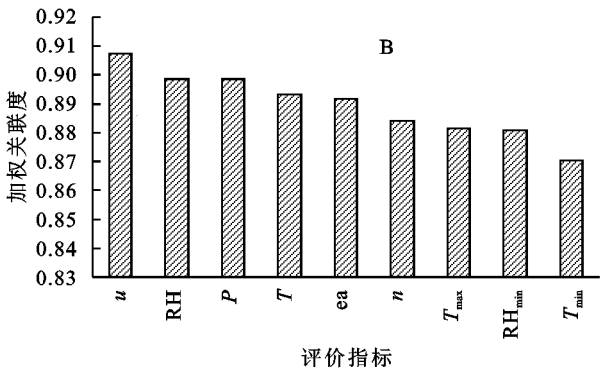
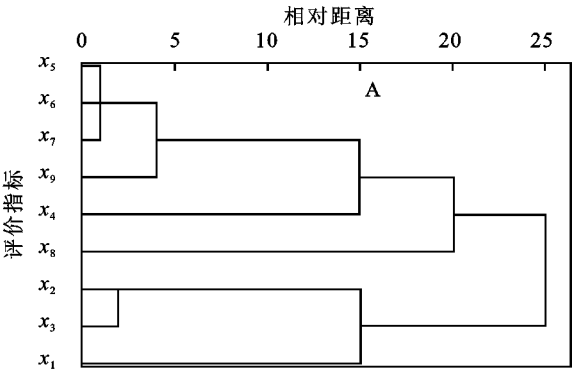


图 5 疏勒河流域气象要素聚类分析及灰色关联度排序

表 1 气象因子聚类分析及灰色关联度分析结果

气象要素	$T$	$T_{\max}$	$T_{\min}$	ea	RH	$RH_{\min}$	$P$	$n$	$u$
聚类分析	I				II		III	IV	V
灰色关联度	0.893	0.882	0.870	0.892	0.899	0.881	0.898	0.884	0.907
灰色关联度排序	4	7	9	5	2	8	3	6	1
S 选定指标	$T$	—	—	—	RH	—	$P$	$n$	$u$

注  $T, T_{\max}, T_{\min}, ea, RH, RH_{\min}, P, n, u$  分别代表日平均温度、日最高温度、日最低温度、实际水汽压、平均相对湿度、最低相对湿度、降水量、日照时间、风速。

3.2.2 气象因素对  $ET_0$  通径分析 基于选取  $T, RH, n, P, u$  共 5 个关键因素进行通径分析,确定各气象因素对  $ET_0$  变化的直接和间接作用大小,通径分析结果见表 2。通径系数大小排序依次为  $T > u > n > RH > P$ , 通径系数值越大表明对  $ET_0$  直接作用越大,  $T$  数值最大,是直接影响  $ET_0$  变化的主要因素,  $P$  数值最小,作用最小。通径系数为正值,代表气象要素与  $ET_0$  同向变化,否则为反向变化,其中  $RH$  数值为负,起反向作用,即  $RH$  减少导致  $ET_0$  增加,  $T, u, n$  与  $ET_0$  同向变化,起到正向作用。间接作用由间接通径系数体现,其大小排序依次为  $RH >$

$n > u > T > P$ , 影响  $ET_0$  变化的间接作用最大的因素是  $RH$ , 间接作用最小的因素是  $P$ 。

综合影响由简单相关系数体现,大小排序依次为  $T > n > RH > u > P$ , 其中  $T, n, u, P$  增加正向促进对  $ET_0$  增加,  $RH$  增加反向抑制  $ET_0$  增加,  $T$  是影响  $ET_0$  增加的主要驱动因素,其次是  $n, RH, u, P$  影响最小,可见  $T, n, u$  的升高与  $RH$  的降低共同促进  $ET_0$  呈现增加趋势。通径分析结果显示  $P$  对  $ET_0$  变化作用最小,仅为 0.092,可以进一步剔除  $P$  指标,以  $T, n, RH, u$  作为 4 个主导驱动因素进行敏感性及贡献特征分析。

表 2 气象因子对  $ET_0$  的通径分析

气象因素	通径系数 (直接作用)	间接通径系数(间接作用)						简单相关系数
		$T$	$RH$	$n$	$u$	$P$	$\Sigma$	
$T$	0.811		0.031	0.066	0.033	-0.001	0.129	0.940
$RH$	-0.094	-0.267		-0.079	-0.037	-0.001	-0.384	-0.478
$n$	0.154	0.349	0.048		-0.022	0.001	0.376	0.530
$u$	0.184	0.145	0.019	-0.019		0.000	0.145	0.329
$P$	-0.004	0.157	-0.036	-0.048	0.023		0.096	0.092

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。

3.3  $ET_0$  敏感性分析

10 个气象站点的敏感系数基于反距离权重法进行空间插值,得到  $ET_0$  对平均温度、相对湿度、日照时数、平均风速的敏感系数  $S-T, S-RH, S-n, S-u$  的空间分布图(图 6)。  $S-T$  敏感性系数流域平均 0.34, 即温度升高 10%,  $ET_0$  增大 3.4%,  $S-T$  由流域边缘向中心逐渐递增,高值区位于瓜州县,低值区位于阿克塞县、青海天峻县、肃北县,敏感系数变化区间 -0.08~0.83,且流域大部分区域介于 0.38~0.83,即  $T$  升高 10%,  $ET_0$  增加 3.8%~8.3%。  $S-RH$  敏感性系数流域均值 -0.87, 即相对湿度减少 10%,  $ET_0$  增加 8.7%,  $S-RH$  与  $S-T$  敏感系数空间分布大体一致,呈现流域中部地区大于流域周边地区,高值区位于敦煌、瓜州一带,  $S-RH$  为 -1.05~-1.30, 中值区位于玉门市、肃北县,流域范围敏感系数介于 -0.62~-1.30 变化,即  $RH$  减少 10%,  $ET_0$  增加 6.2%~13.0%, 可见,  $ET_0$  对相对湿度变化较敏感,且敏感系数数值为负,  $RH$  对  $ET_0$  变化起反向作用。  $S-n$  敏感程度整

体呈现由东向西逐渐增加,低值区位于玉门市、肃北县、瓜州、青海天峻县,逐渐递增过渡到敦煌、阿克塞县高值区,敏感系数 -0.44~0.12, 即  $n$  增加 10%,  $ET_0$  增加 -4.4%~1.2%。  $S-u$  敏感性整体呈现由东南向西北逐渐增加,高值区位于瓜州、敦煌北部,流域范围敏感系数介于 0.20~0.48, 即  $u$  增加 10%,  $ET_0$  增加 2.0%~4.8%。 综上看,4 项主导因子敏感性程度空间分布差异,敏感程度由大到小依次为  $RH, T, u, n$ , 可见  $ET_0$  对  $RH$  变化最敏感,其次为  $T, u$ , 对  $n$  变化敏感程度最低,流域  $ET_0$  呈现年际增加趋势,是温度升高、日照时数增加、风速增大、相对湿度减少共同作用的结果。

3.4  $ET_0$  贡献的特征分析

采用尹云鹤等<sup>[16]</sup>提出的气象因子对  $ET_0$  变化的贡献率计算方法,即贡献率等于敏感系数和多年相对变化率乘积,计算结果见表 3。 温度对  $ET_0$  起正向作用,多年相对变化率 24.69%,  $T$  升高促使  $ET_0$  正向增加,正贡献率最大为 7.96%,说明温度升高是造成

流域  $ET_0$  增加的主要原因;风速多年相对变化率为 9.32%,因  $u$  与  $ET_0$  同向变化, $u$  增大促使  $ET_0$  增加,正贡献率为 3.14%;平均相对湿度多年相对变化率-2.63%,因  $RH$  与  $ET_0$  反向变化,最终  $RH$  减少促使  $ET_0$  增加,正贡献率 2.29%;日照时数多年相对变化率 1.54%, $n$  对  $ET_0$  增加起到正向促进作用, $n$  多年呈增加趋势导致  $ET_0$  增加,正贡献率 0.29%。综上可知, $ET_0$  变化对各气象要素的敏感性排序与

气象要素贡献率大小排序并不一致,主要由于贡献率计算不仅考虑敏感性系数大小,同时考虑多年相对变化率的影响。4 项主导驱动因素的贡献大小排序依次为  $T, u, RH, n$ , 贡献率分别为 7.96%, 3.14%, 2.29%, 0.29%。疏勒河流域  $RH$  减少、 $T$  升高、 $n$  增加、 $u$  增大共同促使  $ET_0$  呈现增大趋势,是多种因素综合作用结果,4 种主导驱动因素对  $ET_0$  增加的总贡献为 13.69%。

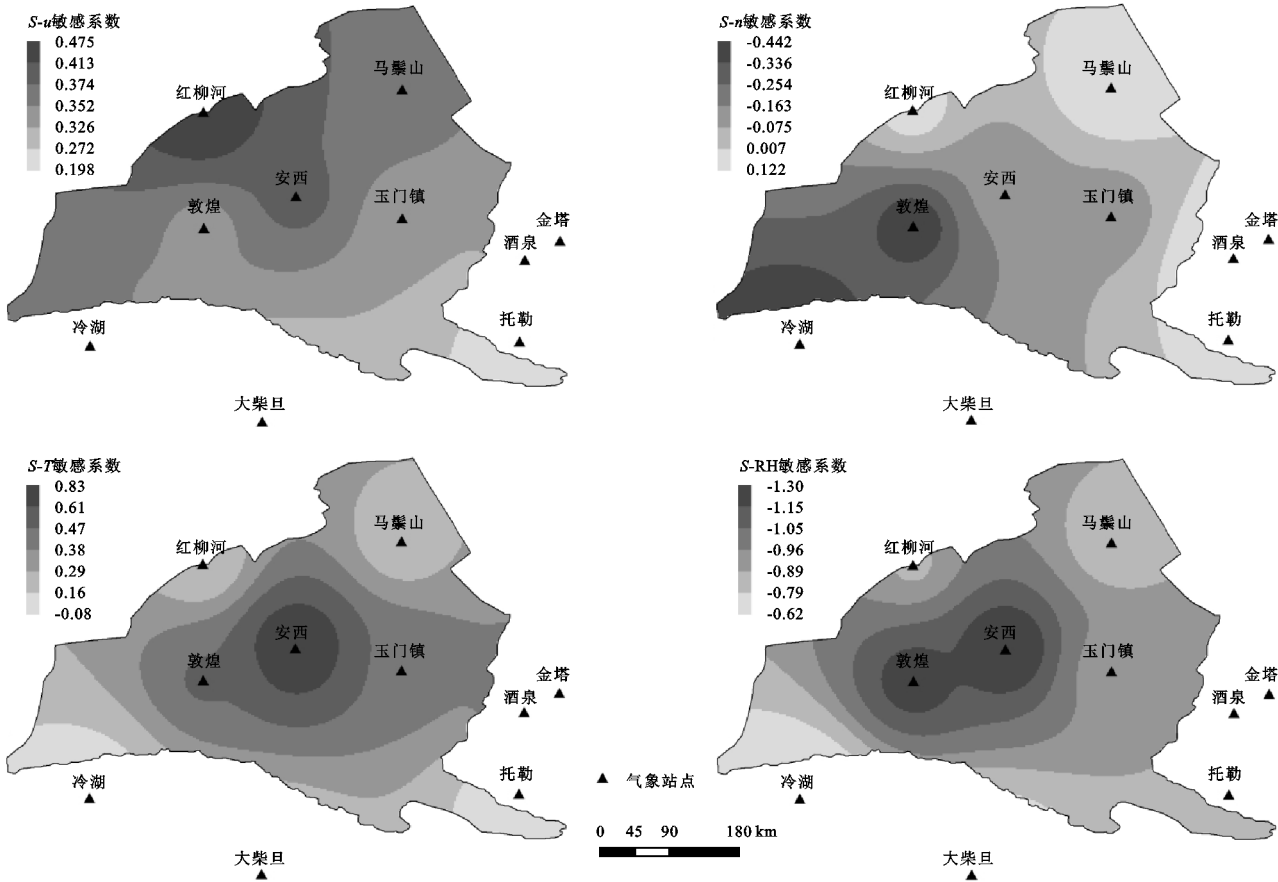


图 6 疏勒河流域  $ET_0$  敏感系数的空间分布

表 3 气象因子对  $ET_0$  的贡献率

气象要素	敏感性系数	多年线性倾向率	多年平均值	多年相对变化率/%	贡献率/%
平均相对湿度	-0.87	-0.030	40.62%	-2.63	2.29
日照时数	0.19	0.004	8.89 h	1.54	0.29
平均气温	0.32	0.042	6.06℃	24.69	7.96
平均风速	0.34	0.008	2.95 m/s	9.32	3.14

4 讨论与结论

疏勒河流域 1984—2019 年  $ET_0$  整体呈现显著上升趋势,与康燕霞等<sup>[24]</sup> 甘肃省 1951—2013 年  $ET_0$  以 2.11 mm/10 a 的倾向率呈现出增长趋势,郑健等<sup>[11]</sup> 甘肃省 1980—2015 年  $ET_0$  整体呈上升趋势的研究结论一致,线性倾向变化率 2.92 mm/a,除青海

大柴旦站未达到显著性水平,疏勒河其他区域均通过了信度 90% 的显著性检验。 $ET_0$  空间上呈东南向西北呈现递增的趋势,与康燕霞等<sup>[24]</sup> 空间分布总体上呈现西北地区大于东南地区,郑健等<sup>[11]</sup> 甘肃省各分区  $ET_0$  差异较大,从东南部向西北部增加的结论一致,高值区位于肃北县北部、瓜州县北部、敦煌市西部、阿克塞县西部,低值区位于青海省天峻县。 $ET_0$  夏季最大,其次春季、秋季,冬季最小, $ET_0$  四季空间分布与年值空间分布一致。 $ET_0$  时空变化特征是由地理环境差异性分布导致的,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,相对湿度多年呈现减少趋势,同时温度、日照时数、风速呈增加趋势,气象因素的共同作用促使  $ET_0$  呈现显著上升趋势。这也与郑健等<sup>[11]</sup> 甘肃省的  $ET_0$  与日平均风速、日照时数、日平均气温均为极显著正相关,与平均

相对湿度为极显著负相关。张彩霞等<sup>[25]</sup>河西地区 ET<sub>0</sub> 与平均风速、日照时间正相关,与相对湿度负相关的相关结论一致。ET<sub>0</sub> 呈现增大趋势,基于敏感系数法计算相对湿度、温度、日照时数、风速贡献率,大小分别为 2.29%,7.96%,0.29%,3.14%,4 种气象要素总贡献值 13.69%,且温度升高是造成 ET<sub>0</sub> 增加的主要原因,该方法同时反映 ET<sub>0</sub> 变化对各气象要素的敏感性程度和各气象要素多年相对变化率的影响。与张彩霞等<sup>[25]</sup>河西地区 ET<sub>0</sub> 的主要影响因子为平均温度、平均风速结论一致。郑健等<sup>[11]</sup>认为对甘肃省 ET<sub>0</sub> 变化影响最大的因素是平均风速和日照时数,是基于偏相关系数大小确定的,由于相关系数只反映气候因素与 ET<sub>0</sub> 紧密程度,不能反映气候变量多年变化幅度大小对于 ET<sub>0</sub> 增加的影响。

研究中将多种定性 with 定量分析方法探索性结合,定性、定量分析相融合,发挥循序渐进,优势互补的作用。基于聚类分析、灰色关联度分析,从 9 个气象要素中筛选出  $T, RH, P, n, u$  共 5 个气象因素,聚焦关键影响因素,简化问题。针对这 5 个气象要素进行通径分析,结果显示  $T$  是影响 ET<sub>0</sub> 变化最主要因素, $P$  对 ET<sub>0</sub> 变化作用最小,可以忽略,进一步剔除  $P$  指标。选取剩余 4 个气象要素,进一步分析其对 ET<sub>0</sub> 变化的敏感性及其贡献特征。疏勒河流域 ET<sub>0</sub> 时空演变规律以及驱动因子定量分析结果,在与前人研究成果相互验证的基础上,证实多种定性 with 定量分析方法结合运用是研究 ET<sub>0</sub> 时空变化机理的重要手段。

#### 参考文献:

- [1] 张建云,王国庆,金君良,等.1956—2018 年中国江河径流演变及其变化特征[J].水科学进展,2020,31(2):153-161.
- [2] 张建云,王国庆.气候变化对水文水资源的影响[M].北京:科学出版社,2007.
- [3] 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.
- [4] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements[R]. Fao Irrigation and Drainage Paper 56. Fao, 1998.
- [5] 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,1999,10(3):251-259.
- [6] 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.
- [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):78-86,339.
- [8] 黄会平,曹明明,宋进喜,等.1957—2012 年中国参考作物蒸散量时空变化及其影响因子分析[J].自然资源学报,2015,30(2):315-326.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [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.
- [13] 邓聚龙.灰色系统基本方法[M].武汉:华中理工大学出版社,1987.
- [14] 敬艳辉,邢留伟.通径分析及其应用[J].统计教育,2006(2):24-26.
- [15] Beven K. A sensitivity analysis of the Penman-Monteith actual evapotranspiration estimates[J]. Journal of Hydrology, 1979,44(3):169-190.
- [16] Yin Y H, Wu S H, Chen G, et al. Attribution analyses of potential evapotranspiration changes in China since the 1960s[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2010,101(1/2):19-28.
- [17] 巩杰,钱彩云,钱大文.1977—2013 年疏勒河中下游土地利用变化与环境响应[J].干旱区研究,2017,34(4):775-781.
- [18] 魏乐民,郑续,郭建军,等.基于改进彭曼公式法的疏勒河流域植被耗水时空分布研究[J].干旱区研究,2020,37(6):1416-1426.
- [19] 刘洋,张军,周冬梅,等.基于 InVEST 模型的疏勒河流域碳储量时空变化研究[J].生态学报,2021,41(10):4052-4065.
- [20] 祝昌汉.再论总辐射的气候学计算方法(二)[J].南京气象学院学报,1982(2):196-206.
- [21] 杜家菊,陈志伟.使用 SPSS 线性回归实现通径分析的方法[J].生物学通报,2010,45(2):4-6.
- [22] 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):579-588.
- [23] 杨林山,李常斌,王帅兵,等.洮河流域潜在蒸散发的气候敏感性分析[J].农业工程学报,2014,30(11):102-109.
- [24] 康燕霞,齐广平,殷长琛,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.
- [25] 张彩霞,花婷,郎丽丽.河西地区潜在蒸散发量变化及其敏感性分析[J].水土保持研究,2016,23(4):357-362.