

DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2023.02.037.

马亚丽, 张芮, 孙栋元, 等. 黄河流域甘肃段地表干湿时空变化及驱动因子分析[J]. 水土保持研究, 2023, 30(2): 135-141.

MA Yali, ZHANG Rui, SUN Dongyuan, et al. Spatiotemporal Variation and Driving Factors of Surface Wetness Index in Gansu Section of Yellow River Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(2): 135-141.

黄河流域甘肃段地表干湿时空变化及驱动因子分析

马亚丽, 张芮, 孙栋元, 王兴繁, 牛最荣

(甘肃农业大学 水利水电工程学院, 兰州 730070)

摘要:为了探究气候变化影响下地表干湿时空变化及驱动因子,基于黄河流域甘肃段15个气象站点资料,分析了不同时间尺度SWI(地表湿润指数)的时空变化规律,采用灰色关联度法、敏感系数法和贡献特征分析定量研究了各气象因子与SWI的变化关系。结果表明:SWI整体呈微弱上升变化,气候呈半湿润—半干旱—半湿润变化。四季由湿到干分别为夏、秋、春、冬,主要干湿气候类型依次为半湿润、半湿润、半干旱、干旱。1980s—2010s经历了湿—干—湿的变化过程。各气象因子敏感程度由高到低为 P (降水量)、 u (风速)、 T (平均气温)、 T_{\max} (日最高气温)、 n (日照时数)、 T_{\min} (日最低气温)、 RH (相对湿度)。引发SWI变化的贡献大小排序为 T_{\min} 、 P 、 T 、 T_{\max} 、 u 、 RH 、 n ,其中 T_{\min} 、 P 、 u 、 n 促使SWI增大, T 、 T_{\max} 、 RH 促使SWI降低,流域多年SWI微弱增大是 T_{\min} 升高、 P 增大、 u 增加、 n 减少和 T 升高、 T_{\max} 升高、 RH 降低等共同作用结果。综上,多种气象因子变化共同造成干湿状况改变,导致黄河流域甘肃段SWI由干变湿微弱增大。

关键词:地表干湿指数; 驱动因子; 定量关系; 敏感分析; 黄河流域

中图分类号: P426

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)02-0135-07

Spatiotemporal Variation and Driving Factors of Surface Wetness Index in Gansu Section of Yellow River Basin

MA Yali, ZHANG Rui, SUN Dongyuan, WANG Xingfan, NIU Zuirong

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

Abstract: In order to explore the spatiotemporal variation of land surface moisture and its driving factors under the influence of climate change, based on the data of 15 meteorological stations in Gansu section of the Yellow River Basin, the spatiotemporal variation of SWI (Surface Wetness Index) of different time scales was analyzed and studied. The relationship between meteorological factors and SWI was quantitatively researched by using the gray correlation method, the sensitivity coefficient method and contribution characteristic analysis. The results showed that: the SWI had showed a slight upward change on the whole, and the climate had changed from semi-humid to semi-arid and then sub-humid; the four seasons from wet to dry were summer, autumn, spring and winter; the main dry and wet climate types were sub-humid, sub-humid, semi-arid and arid; the change process from 1980s to 2010s was from wet to dry and then to wet; the sensitivity of meteorological factors from high to low was P (precipitation), u (wind speed), T (average temperature), T_{\max} (daily maximum temperature), n (sunshine hours), T_{\min} (daily minimum temperature), RH (relative humidity); the order of contribution to SWI change was T_{\min} , P , T , T_{\max} , u , RH and n . T_{\min} , P , u and n promoted the increase of SWI, while T , T_{\max} and RH promoted the decrease of SWI; the slight increase of SWI over the years had been caused by the combined effects of T_{\min} increase, P increase, u increase, n decrease, T increase, T_{\max} increase, and RH decrease. The changes of dry and wet conditions caused by

收稿日期: 2021-12-10

修回日期: 2022-03-04

资助项目: 甘肃农业大学水利水电工程学院科研团队专项资助项目(Gaucwky-04); 甘肃省重点研发计划项目(21YF5NA015); 甘肃省水利厅水资源费项目(甘水资源发[2021]105号); 甘肃省水利科学试验研究及技术推广计划(GSAU-JSYF-2021-016); 甘肃省高等学校青年博士基金项目(2022QB-070)

第一作者: 马亚丽(1987—), 女, 河北保定人, 硕士, 讲师, 主要从事水文与水资源研究。E-mail: gsaumayl@163.com

<http://stbcj.paperonce.org>

various meteorological factors resulted in the slight increase of SWI from dry to wet in Gansu section of the Yellow River Basin.

Keywords: surface wetness index; driving factors; quantitative relation; sensitivity analysis; Yellow River Basin

近几十年来,干旱、洪涝等极端气候事件发生的频次、强度不断增加,研究表明,中国范围内极端暖、冷事件分别呈显著上升、下降趋势,极端降水事件明显增多^[1-2],破坏区域性水分收支平衡,导致地表干湿状况发生变化^[3]。与一般气候状态相比,极端气候事件对自然生态系统和人类社会产生更为严重的影响^[4]。气候变化导致水分盈亏规律更加复杂多变,水分亏缺诱发旱灾,降水量和潜在蒸散量作为大气水分收支的重要分量,是影响气候干湿状况的两个主要方面。尤其,在干旱地区,降水增加趋势减弱,气温持续升高,促使蒸发量增加,加剧了生态干旱的风险^[5-6],诱发区域水资源短缺^[7],加剧土地荒漠化和沙漠化发展,严重威胁陆地生态系统的稳定性,扰乱农业正常生产活动^[8-9]。

关于气候变化引发的区域干湿状况时空变化研究,已经形成了一定的研究基础。李亮等^[9]基于 SPEI 指标研究发现近年甘肃省干旱趋势逐渐加重,尤其东南部、春季干旱加剧最明显。刘扬等^[10]采用 Pearson 相关系数研究认为 1960—2011 年河西走廊地表干湿指数整体呈增加趋势,降水增加、风速减小是主要原因。成青燕等^[11]通过 MCI 指标分析发现甘肃省 1961—2010 年各季节干旱发生范围都不同程度增加。徐荣璐等^[7]利用敏感性分析和相关关系法研究发现 1960—2015 年西北干旱区相对湿度呈微弱下降趋势是由降水量增加、气温升高复合造成的。胡琦等^[12]研究表明 1961—2014 年西北地区气候显著变干是由于降水减少和 ET_0 增大,并基于敏感性和贡献率法发现 ET_0 对相对湿度最敏感,风速变化是主导因子。综合看,地表干湿状况相关研究多集中于基于干旱指标的干湿时空特征及成因分析,而结合采用灰色关联度法、敏感系数法和贡献特征分析等方法对气候因素与地表干湿变化的定量化关系研究相对较少。甘肃省跨越三大自然区域,气候变化格局复杂,气象灾害频发,严重威胁着地区农业经济的发展^[13]。黄河流域位于甘肃省河东地区,属于黄河上游流域,气候变化背景下,地表干湿状况发生变化,对区域内的社会经济发展、农业生产以及生态环境都会产生一系列影响,因此,选取西北干旱内陆区黄河流域甘肃段为研究对象,以 1984—2019 年气象资料为基础,采用灰色关联度法、敏感系数法和贡献特征分析等定量分析方法,探究该区域地表干湿状况时空演变与气象因

素的关系,为降低自然灾害对农业生产的影响、合理利用水资源、科学规划产业布局等提供参考依据。

1 数据与方法

1.1 数据来源与处理

采用黄河流域甘肃段 1984—2019 年 15 个气象站点长序列地面观测资料,数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>)。地表湿润指数(SWI)是降水量 P 与潜在蒸散量 ET_0 的比值^[14],表征地表干湿程度,见公式(1):

$$SWI = \frac{P}{ET_0} \quad (1)$$

式中: P 为降水量(mm); ET_0 为潜在蒸散量(mm),采用世界粮农组织(FAO)推荐使用的 P-M 公式^[15-16]计算 ET_0 ,计算公式如下:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (2)$$

式中: ET_0 为潜在蒸散量(mm/d); Δ 为饱和水汽压曲线斜率(kPa/°C); R_n 为太阳净辐射[MJ/(m²·d)]; G 为土壤热通量[MJ/(m²·d)]; γ 为干湿常数(kPa/°C); u_2 为 2 m 高处的风(m/s); T 为平均气温(°C); e_s 为平均饱和水汽压(kPa); e_a 为实际水汽压(kPa); $(e_s - e_a)$ 为饱和水汽压差(kPa)。根据湿润指数的干湿气候划分标准^[14], $SWI < 0.03$ 极干旱区, $0.03 \leq SWI < 0.2$ 干旱区, $0.2 \leq SWI < 0.5$ 半干旱区, $0.5 \leq SWI < 1.0$ 半湿润区, $SWI \geq 1.0$ 湿润区。

1.2 研究方法

1.2.1 灰色关联度 依据灰色系统理论,将 SWI 和 7 个气象要素指标作为一个灰色系统,SWI 为参考数列 $\{x_0(1), x_0(2), \dots, x_0(k)\}$, 7 个气象要素为比较数列 $\{x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(k)\}$ 。数据经过无量纲化处理后,代入公式(3),(4)计算关联系数(ζ)和加权关联度(r)^[17],公式如下所示:

$$\zeta_i(k) = \frac{\min_k |x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_k |x_0(k) - x_i(k)|} \quad (3)$$

$$r_i = \sum_{k=1}^n w_k \zeta_i(k) \quad (i=1, 2, \dots, 7) \quad (4)$$

式中: $x_i(k)$ 为气象要素 i 在 k 点处的值, $k=1, 2, \dots, n$; $|x_0(k) - x_i(k)|$ 为 SWI 参考序列 x_0 与气象要素比较

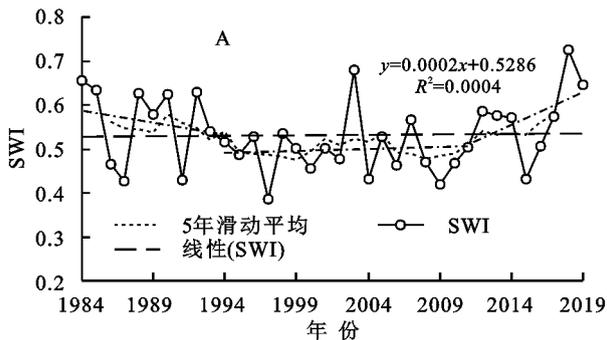
序列 x_i 在 k 点的绝对差值; $\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)|$,
 $\max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|$ 分别为参考序列与比较序列两
 级最小、最大极差; ρ 为分辨系数,取值 0.5; r_i 为气象
 要素 i 对 SWI 的加权关联度; w_k 为第 k 点的权重值。
 1.2.2 敏感系数 1974 年 McCuen 基于数学定义提
 出敏感性分析方法,即敏感系数为地表湿润指数
 SWI 相对变化率与气象因子相对变化率之比^[18],用
 于衡量因变量 SWI 受自变量气候要素(如降水、气
 温、风速等)变化的影响程度。几何意义表现为敏感
 性曲线切线的斜率,若曲线呈线性变化,可以取 SWI
 任意区间变化的变化率;若曲线呈非线性变化,区间
 步长越小,精度越高^[19],具体公式如下:

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

式中: S_x 为 SWI 关于气象因子 x 的敏感系数,无量纲。
 S_x 绝对值越大,表明气候要素 x 的变化对 SWI 影响越
 大,即 SWI 对 x 变化越敏感,如敏感系数为 0.1,表示
 气象因子 x 变化 10%,将引起 SWI 变化 1%。

1.2.3 贡献度 为了定量识别 SWI 变化成因,采用
 气象因子对 SWI 变化的贡献程度大小实现,贡献率
 利用敏感系数和多年相对变化率乘积计算^[20],气象
 因子变化引起 SWI 增加,为正贡献,反之为负贡献,
 具体见公式(6—7):

$$C_x = S_x \cdot Rc_x \quad (6)$$



注:基于标准地图服务系统下载的标准图号 GS(2019)1822 号的标准地图制作,底图未做修改,下同。

图 1 黄河流域甘肃段 SWI 年际变化特征

2.1.2 四季干湿变化特征 SWI 四季变化空间差异
 主要体现在两个方面,一是各季节存在不同的干湿气
 候类型,二是不同季节各干湿气候面积大小不同,具
 体见图 2,表 1。春季干湿气候类型为干旱、半干旱、半
 湿润,面积占比分别为 10.14%,79.47%,10.39%,半干旱
 区分布广泛,遍布黄河流域甘肃境内大部分区域,干旱
 区位于白银市北部景泰一带,半湿润区位于甘南州
 北部,SWI 数值介于 0.10~0.55,流域范围加权 SWI 数值
 0.22~0.47,主要干湿气候表现为半干旱。夏季同样存在
 3 种干湿气候类型:半干旱、半湿润、湿润,未出现干旱
 区,与春季相比,气候更偏湿润,半湿润区范围最广,占

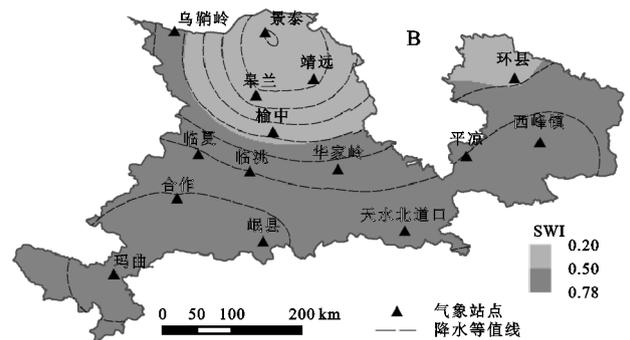
$$Rc_x = \frac{n \cdot \text{Trend}_x}{\bar{x}} \cdot 100\% \quad (7)$$

式中: C_x 和 S_x 为气象因子 x 对 SWI 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 黄河流域甘肃段干湿演变规律

2.1.1 干湿状况年际变化分析 黄河流域甘肃段年
 均 SWI 整体呈微弱上升变化,未通过 M-K 显著性检
 验,多年平均水平 0.53,气候呈半湿润—半干旱—半
 湿润变化过程,依次为 1984—1993 年先下降,1994—
 2011 年基本保持平稳,2012—2019 年呈上升趋势,
 2018 年 SWI 出现最大值 0.72,1997 年出现最小值
 0.39,极值比 1.85,具体见图 1A。SWI 多年平均空间
 分布显示黄河流域甘肃段北部气候为半干旱($0.20 \leq$
 $\text{SWI} < 0.50$),面积占比 26.35%,分布于陇中北部兰
 州市、白银市一带,南部气候为半湿润($0.50 \leq \text{SWI} <$
 0.78),面积占比 73.65%,分布于陇中南部临夏州、定
 西市,陇西北部甘南州、天水市,陇东庆阳、平凉市。
 SWI 地理空间差异明显,干湿分布状况与纬度地带
 性分布相关,纬度越低,气候相对更为湿润,纬度越
 高,气候越干旱,具体如图 1B 所示。



比 73.26%,半干旱区、湿润区分别占比 12.36%,14.38%,
 SWI 数值介于 0.29~1.20,加权 SWI 数值为 0.55~0.97,
 干湿气候主要为半湿润。秋季存在半干旱区、半湿润
 区,不存在湿润区,面积占比分别为 19.63%,80.37%,
 SWI 数值介于 0.21~0.86,加权 SWI 数值为 0.44~0.79,
 半湿润区是秋季主要的干湿气候类型,与夏季相比,
 干湿状况变干。冬季整个研究范围只分布干旱区,SWI
 数值偏小,介于 0.07~0.18。综合看,四季干湿状况
 由湿到干排序依次为夏季、秋季、春季、冬季,主要干
 湿气候类型分别为半湿润、半湿润、半干旱、干旱,夏
 季较秋季湿润程度更高。

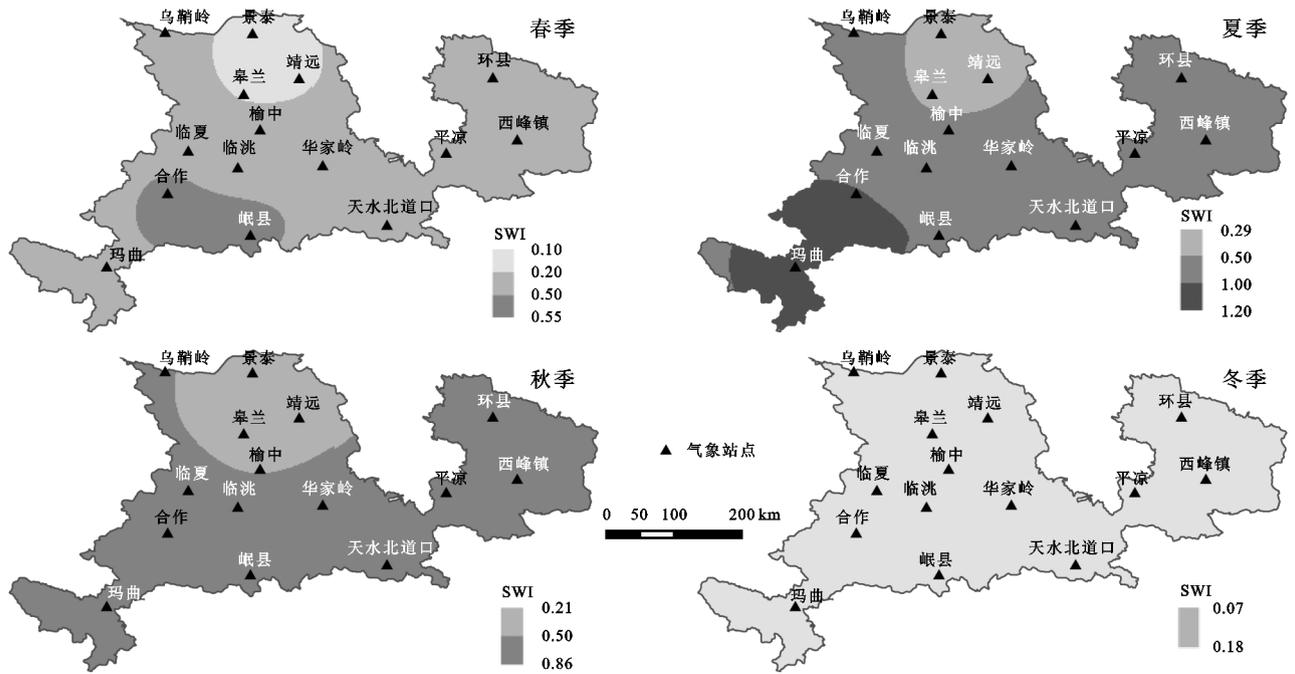


图 2 黄河流域甘肃段 SWI 四季变化特征

表 1 SWI 干湿气候四季空间分布统计

季节	干湿气候	SWI	面积/km ²	占比/%	流域加权 SWI	地理分布
春季	干旱区	0.10~0.20	14521	10.14	0.22~0.47	白银市北部
	半干旱区	0.20~0.50	113761	79.47		流域广泛分布
	半湿润区	0.50~0.55	14872	10.39		甘南州北部
夏季	半干旱区	0.29~0.50	17700	12.36	0.55~0.97	白银市北部
	半湿润区	0.50~1.00	104871	73.26		流域广泛分布
秋季	湿润区	1.00~1.20	20583	14.38	0.44~0.79	甘南州南部
	半干旱区	0.21~0.50	28102	19.63		白银市、兰州市
冬季	半湿润区	0.50~0.86	115052	80.37	0.07~0.18	流域其他区域
	干旱区	0.07~0.18	143154	100		全流域范围

各年代 SWI 空间分布与多年平均分布基本一致,均存在半干旱、半湿润,差异在于各年代的干湿气候区面积大小不一,具体见图 3,表 2。1980s 出现半干旱区、半湿润区,占比分别为 20.86%,79.14%,SWI 数值介于 0.20~0.86,加权 SWI 数值为 0.44~0.78,半干旱区位于白银市、兰州市。1990s 同样存在半干旱区、半湿润区,占比分别为 28.07%,71.93%,SWI 数值介于 0.20~0.75,加权 SWI 数值 0.42~0.68,与 1980s 不同,半干旱区范围增大,1990s 气候变干。2000s 存在干旱区、半干旱区、半湿润区,占比分别为 2.13%,31.72%,66.15%,SWI 数值介于 0.18~0.77,加权 SWI 数值 0.40~0.67,与 1980s,1990s 比较,干旱区、半干旱区面积增加,干湿状况进一步变干。2010s 存在半干旱区、半湿润区,占比分别为 20.65%,79.35%,空间分布与 1980s,1990s 相似,SWI 数值介于 0.21~0.82,加权 SWI 数值 0.44~0.75,2010s 气

候较 1990s,2000s 湿润。综合看,1980s—2010s 干湿变化经历由湿—干—湿的变化过程,由湿到干排序依次为 1980s,2010s,1990s,2000s。

2.2 气象要素灰色关联度分析

灰色关联度分析以 SWI 为参考数列,7 个气象要素为比较数列,探讨不同的时间尺度下各气象要素与 SWI 的关联程度,加权关联度值越大,排序越靠前,表明 SWI 与气象要素序列曲线形状的相似程度越高,同步变化程度越高。各气象要素灰色关联度具体见表 3,可以看出时间尺度不同,关联度值存在差异,即各气象要素与 SWI 序列曲线变化同步性存在差异,但年和四季尺度关联度大体都遵循的排序为 $P, RH, n, T_{\max}, T, T_{\min}, u, P$ 与 SWI 关联度值最大,与 SWI 序列曲线同步变化最为一致,相似程度最高,基于气象要素 P 对 SWI 发展趋势预测最为可靠, u 与 SWI 关联度值最小,两序列曲线形状差异最大,相似程度低。

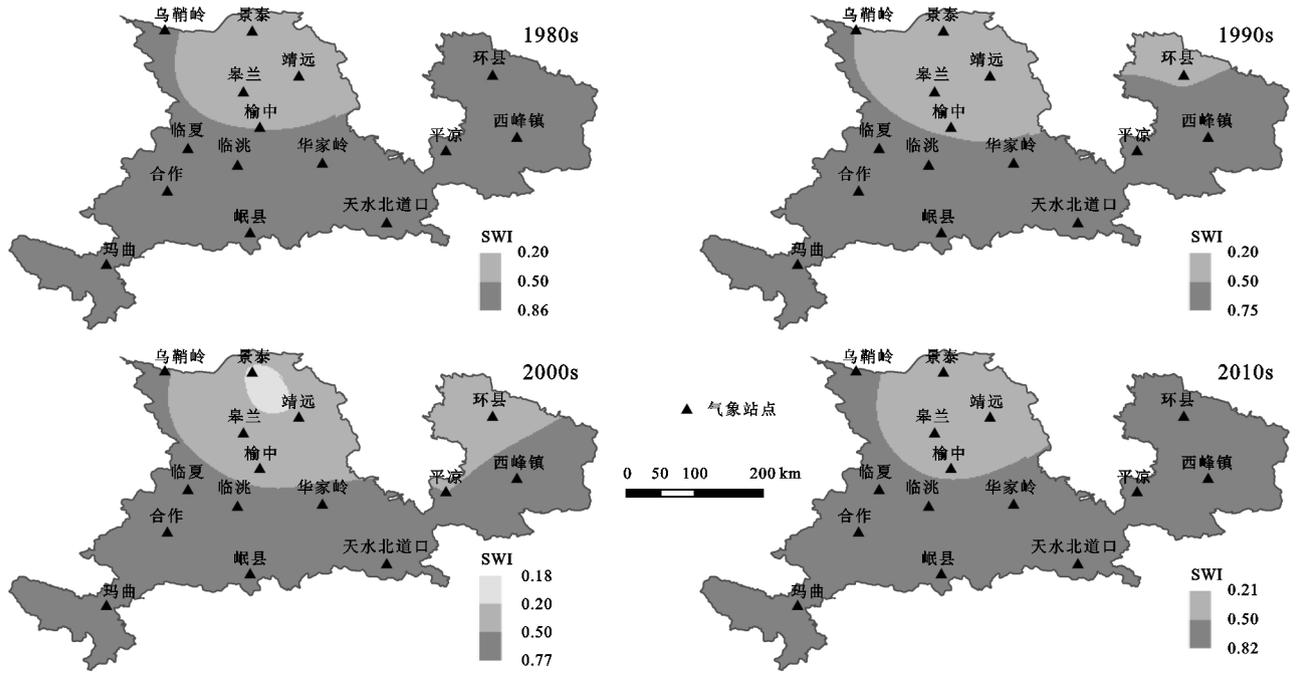


图 3 黄河流域甘肃段 SWI 年代际分布特征

表 2 SWI 干湿气候年代空间分布统计

年代	干湿气候	SWI	面积/km ²	占比/%	流域加权 SWI	地理分布
1980s	半干旱区	0.20~0.50	29863	20.86	0.44~0.78	白银市、兰州市
	半湿润区	0.50~0.86	113291	79.14		流域其他区域
1990s	半干旱区	0.20~0.50	40190	28.07	0.42~0.68	白银市、兰州市、庆阳北端
	半湿润区	0.50~0.75	102964	71.93		流域其他区域
2000s	干旱区	0.18~0.20	3051	2.13	0.40~0.67	白银景泰一带
	半干旱区	0.20~0.50	45402	31.72		白银市、兰州市、庆阳西北部
2010s	半干旱区	0.21~0.50	29560	20.65	0.44~0.75	白银市、兰州市
	半湿润区	0.50~0.82	113594	79.35		流域其他区域

表 3 各气象要素灰色关联度

时间尺度	气象要素	P	RH	n	T	T _{max}	T _{min}	u
年	灰色关联度	0.974	0.888	0.891	0.879	0.881	0.867	0.868
	排序	1	3	2	5	4	7	6
春	灰色关联度	0.820	0.713	0.637	0.629	0.635	0.606	0.617
	排序	1	2	3	5	4	7	6
夏	灰色关联度	0.876	0.730	0.682	0.672	0.687	0.656	0.614
	排序	1	2	4	5	3	6	7
秋	灰色关联度	0.836	0.768	0.712	0.592	0.638	0.636	0.598
	排序	1	2	3	7	4	5	6
冬	灰色关联度	0.801	0.660	0.688	0.656	0.680	0.614	0.602
	排序	1	4	2	5	3	6	7

注: P, RH, n, T, T_{max}, T_{min}, u 分别代表降水量、平均相对湿度、日照时间、日平均温度、日最高温度、日最低温度、风速。

2.3 SWI 对各气象因子敏感性分析

利用 15 个气象站点多年平均敏感系数进行反距离权重空间插值,得到 SWI 对各气象因子敏感性系数空间分布(图 4),敏感系数分别记为 S-P, S-T, S-RH, S-T_{max}, S-u, S-T_{min}, S-n。S-P 武威乌鞘岭、定西华家岭一带等局部地区高于其他区域,变化区间 0.55~1.09,

华家岭站值最高 1.09,敏感系数值为正说明 P 对 SWI 起正向促进作用,即 P 升高 10%,SWI 增加 5.5%~10.9%。S-T 低值区位于白银、兰州、庆阳北部,流域南部较北部敏感程度高,变化区间-0.47~-0.12,敏感系数数值为负表明 T 与 SWI 反向变化,即 T 增加 10%,SWI 减少 1.2%~4.7%。S-RH 南部高于北部,与 S-T 空间

分布相似,低值区位于白银、兰州,敏感系数介于 0.04~0.13,RH 对 SWI 变化起到正向作用,即 RH 增加 10%,SWI 增加 0.4%~1.3%。 $S-T_{\max}$ 西部较东部偏低,高值区位于定西华家岭、庆阳西峰,低值区位于白银市,变化区间-0.07~-0.43,敏感系数负值表明 T_{\max} 增加 10%,SWI 减少 0.7%~4.3%。 $S-u$ 中部区域较流域东西两端值低,高值区位于临夏州、庆阳西峰,变化区间-0.27~0.59,即 u 增加 10%,SWI 增加-2.7%~5.9%。 $S-T_{\min}$ 局部出现低值,位于武威乌鞘岭、定西华家岭,与 $S-P$ 分

布相反,敏感系数介于-0.07~0.19,即 T_{\min} 增加 10%,SWI 增加-0.7%~1.9%。 $S-n$ 流域中部高于周围区域,低值区位于白银、兰州,变化介于-0.07~-0.31,即 n 增加 10%,SWI 减少 0.7%~3.1%。综上看,各气象因子敏感程度分布存在差异,敏感程度由高到低排序依次为 $P, u, T, T_{\max}, n, T_{\min}, RH, SWI$ 对 P 变化最敏感,对 RH 变化敏感性最差,二者倍比约为 10。 P, u, T_{\min}, RH 对 SWI 变化起正向作用, T, T_{\max}, n 对 SWI 变化起反向作用。

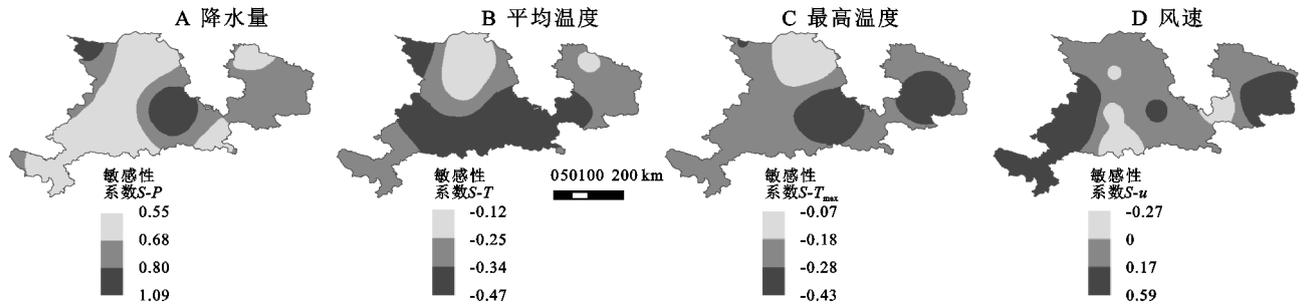


图4 黄河流域甘肃段 SWI 敏感系数的空间分布

2.4 气象因子对 SWI 贡献特征分析

采用敏感系数和多年相对变化率的乘积定量表征各气象因子对 SWI 变化的影响大小,贡献率结果见表4。因各气象要素定量计算过程考虑多年相对变化率大小差异,贡献大小与敏感程度排序存在差异。 P 对 SWI 起正向作用,多站平均敏感系数 0.68,多年相对变化率 12.26%, P 增加 12.26%促使 SWI 增大 8.39%,降水量增大增加气候湿润程度;RH 与 SWI 同向变化,RH 多年降低 4.09%促使 SWI 减少 0.38%; n 对 SWI 起反向作用, n 多年减少 0.95%促使 SWI 增加 0.18%; T 与 SWI 反向变化, T 升高 22.36%促使 SWI 减少 6.89%; u 对 SWI 起正向作用, u 多年增

大 18.36%促使 SWI 增加 2.12%; T_{\max} 与 SWI 反向变化, T_{\max} 多年升高 12.56%促使 SWI 减少 2.94%; T_{\min} 对 SWI 起促进作用, T_{\min} 多年升高 95.12%促使 SWI 增加 9.48%。综上可知,引发 SWI 变化的贡献大小排序依次 $T_{\min}, P, T, T_{\max}, u, RH, n$,分别为 9.48%, 8.39%, -6.89%, -2.94%, 2.12%, -0.38%, 0.18%,其中 T_{\min}, P, u, n 促使 SWI 增加, T, T_{\max}, RH 促使 SWI 减少,因此,日最低气温升高、降水量增大、平均风速增加、日照时数减少和平均气温升高、日最高温度升高、平均相对湿度降低共同造成干湿状况改变,导致 SWI 由干变湿微弱增大,各气象因子总贡献 9.96%。

表4 气象因子对 SWI 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/%
降水量	0.68	1.524 mm	447.47 mm	12.26	8.39
平均相对湿度	0.09	-0.070%	61.98%	-4.09	-0.38
日照时数	-0.19	-0.002 h	6.72 h	-0.95	0.18
平均气温	-0.31	0.044℃	7.03℃	22.36	-6.89
平均风速	0.12	0.011 m/s	2.11 m/s	18.36	2.12
日最高气温	-0.23	0.049℃	13.91℃	12.56	-2.94
日最低气温	0.10	0.046℃	1.73℃	95.12	9.48

3 讨论与结论

3.1 讨论

黄河流域甘肃段年均 SWI 整体呈微弱上升变化,变化区间 0.39~0.72,1980s—2010s 呈现 1980s(湿)—1990s(较干)—2000s(干)—2010s(湿)的变化过程,与胡琦等^[12]关于西北地区 1961—2014 年气候显著变干的结论;徐荣潞等^[7]关于西北地区年均相对湿度 1986—1996 年明显增加,20 世纪 90 年代末以

来明显下降的结论;王莺等^[21]基于 1971—2010 年 SPI 指数的研究,认为甘肃河东地区 20 世纪 80 年代以前偏湿,90 年代以后有偏干的趋势的结论大体一致,对比本研究中针对黄河流域甘肃段 1984—2019 年采用 SWI 分析得到的结论,差异来源于选取的研究区范围、表征指标、时间跨度不完全一致。甘肃陇中北部兰州市、白银市一带为半干旱区,其他区域为半湿润区,与降雨南多北少的空间分布相匹配。四季由湿到干排序依次为夏季、秋季、春季、冬季,主要干

湿气候类型分别为半湿润、半湿润、半干旱、干旱,这与降雨季节分布不均匀,夏季最多,冬季最少有关。可见该区域干湿状况与降雨时空分布关系密切,这也从侧面验证了关联度分析中 P 与 SWI 关联度值最大,敏感性分析中 SWI 对 P 变化最敏感的结论。 T_{\min} 升高、 P 增大、 u 增加、 n 减少和 T 升高、 T_{\max} 升高、RH 降低共同造成 SWI 多年呈由干变湿的微弱增大,各气象因子总贡献 9.96%。这与徐荣璐等^[7]分析得到 1960—2015 年西北干旱区相对湿度呈微弱下降趋势,降水量增加,气温升高的结果一致。7 个气象要素对干湿变化的影响包括正向、反向作用,多个气候因子之间相互制约,正、反向综合作用,贡献率为 9.96%。除此之外,地形、植被、人类活动等因素也会对地表干湿状况产生直接或间接作用。综合考虑包括气候因素、地形、植被、人类活动等多种因素的影响,才能将对地表干湿状况的变化有更为全面、客观的认识,也才能解释干湿变化的演变机理过程。

3.2 结论

黄河流域甘肃陇中北部兰州市、白银市一带为半干旱区,面积占比 26.35%,其他区域为半湿润区,面积占比 73.65%。四季由湿到干排序为夏、秋、春、冬,春季存在干旱区、半干旱区、半湿润区,夏季存在半干旱区、半湿润区、湿润区,秋季存在半干旱区、半湿润区,冬季只存在干旱区。

气象要素与 SWI 关联度大体遵循的排序为 P , RH, n , T_{\max} , T , T_{\min} , u , P 与 SWI 关联度值最大,序列曲线同步变化最为一致。SWI 对各气象因子变化的敏感程度由高到低排序为 P , u , T , T_{\max} , n , T_{\min} , RH, SWI 对 P 变化最敏感,对 RH 变化敏感性最差, P , u , T_{\min} , RH 对 SWI 变化起正向作用, T , T_{\max} , n 起反向作用。

各气象因素贡献大小依次为 T_{\min} , P , T , T_{\max} , u , RH, n , 分别为 9.48%, 8.39%, -6.89%, -2.94%, 2.12%, -0.38%, 0.18%, 其中 T_{\min} , P , u , n 促使 SWI 增加, T , T_{\max} , RH 促使 SWI 减少,因此, T_{\min} 升高、 P 增大、 u 增加、 n 减少和 T 升高、 T_{\max} 升高、RH 降低共同造成 SWI 多年呈由干变湿的微弱增大,各气象因子总贡献 9.96%。

参考文献:

[1] 杨萍,刘伟东,王启光,等.近 40 年我国极端温度变化趋势和季节特征[J].应用气象学报,2010,21(1):29-36.
 [2] 高涛,谢立安.近 50 年来中国极端降水趋势与物理成因研究综述[J].地球科学进展,2014,29(5):577-589.
 [3] 杨建平,丁永建,陈仁升,等.近 50 年来中国干湿气候界线的 10 年际波动[J].地理学报,2002,57(6):655-661.
 [4] 翟盘茂,刘静.气候变暖背景下的极端天气气候事件与

防灾减灾[J].中国工程科学,2012,14(9):55-63,84.
 [5] Qin Y H, Li B F, Chen Z S, et al. Spatiotemporal variations of nonlinear trends of precipitation over an arid region of north west China according to the extreme-point symmetric Decomposition method[J]. International Journal of Climatology, 2017,38(5):2239-2249.
 [6] Yao J Q, Zhao Y, Chen Y N, et al. Multiscale assessments Wind-water Contamination: Influence of Wind-water on Surface Waters [J]. Science of the Total Environment, 2018,630:444-452.
 [7] 徐荣璐,李宝富,廉丽姝.1960—2015 年西北干旱区相对湿度时空变化与气候要素的定量关系[J].水土保持研究,2020,27(6):233-239,246.
 [8] Wang W, Zhu Y, Xu R G, et al. Drought severity change in China during 1961—2012 indicated by SPI and SPEI[J]. Natural Hazards, 2015,75(3):2437-2451.
 [9] 李亮, Pich L, 蔡焕杰.基于标准化降水蒸散指数的甘肃省干旱时空特征分析[J].干旱地区农业研究,2019,37(3):256-266.
 [10] 刘扬,杨永春,张轲,等.1960—2011 年河西走廊地表干湿状况的时空变化及影响因素[J].水土保持通报,2015,35(1):54-60.
 [11] 成青燕,高晓清,林纾,等.基于 MCI 指标的甘肃省近 50 年干旱特征分析[J].干旱地区农业研究,2017,35(1):211-218.
 [12] 胡琦,董蓓,潘学标,等.1961—2014 年中国干湿气候时空变化特征及成因分析[J].农业工程学报,2017,33(6):124-132.
 [13] 陈丽丽,刘普幸,姚玉龙,等.1960—2010 年甘肃省不同气候区 SPI 与 Z 指数的年及春季变化特征[J].生态学杂志,2013,32(3):704-711.
 [14] 申双和,张方敏,盛琼.1975—2004 年中国湿润指数时空变化特征[J].农业工程学报,2009,25(1):11-15.
 [15] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements[R]. Rome: FAO, 1998.
 [16] 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.
 [17] 邓聚龙.灰色系统基本方法[M].武汉:华中理工大学出版社,1987.
 [18] Mccuen R H. A sensitivity and error analysis of procedures Used for estimating evaporation [J]. Water Resource Bulletin, 1994,10(3):486-498.
 [19] 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.
 [20] 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.
 [21] 王莺,李耀辉,胡田田.基于 SPI 指数的甘肃省河东地区干旱时空特征分析[J].中国沙漠,2014,34(1):244-253.