

西北旱区潜在蒸散发的气候敏感性及其干旱特征研究

阴晓伟, 吴一平, 赵文智, 赵富波, 孙彭成, 宋燕妮, 邱临静

Drought characteristics and sensitivity of potential evapotranspiration to climatic factors in the arid and semi-arid areas of northwest China

YIN Xiaowei, WU Yiping, ZHAO Wenzhi, ZHAO Fubo, SUN Pengcheng, SONG Yanni, and QIU Linjing

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202012012>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

黄河源区潜在蒸散量估算方法适用性分析

The applicability of various potential evapotranspiration estimation methods in the headwater area of the Yellow River

李云凤, 王文科, 王国庆, 刘翠善, 郑昊昌, 马稚桐 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 10-19

基于iTOUGH2的生物降解模型全局敏感性时变分析

Temporal variation of global sensitivity analysis for biodegradation model using iTOUGH2

杜建雯, 施小清, 徐红霞, 吴吉春 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 35-42

半干旱地区地表-地下水系统水热运移与裸土蒸发研究

Hydrothermal transfer and bare soil evaporation in surface-groundwater systems in semi-arid areas

马稚桐, 王文科, 赵明, 黄金廷, 卢艳莹, 侯昕悦, 王一 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 7-14

基于MOD16的银川平原地表蒸散量时空特征及影响因素分析

An analysis of spatio-temporal characteristics and influencing factors of surface evapotranspiration in the Yinchuan Plain based on MOD16 data

王卓月, 孔金玲, 李英, 张在勇, 刘慧慧, 蒋镒竹, 钟炎伶, 张静雅 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 53-61

管道流模型参数敏感性分析及其在许家沟泉域的应用

A sensitivity analysis of conduit flow model parameters and its application to the catch area of the Xujiagou spring

武亚遵, 李彦涛, 林云, 曲鹏冲 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 68-75

基于MODIS蒸散量数据的淮河流域蒸散发时空变化及影响因素分析

Spatio-temporal change and influencing factors of evapotranspiration in the Huaihe River Basin based on MODIS evapotranspiration data

郭晓彤, 孟丹, 蒋博武, 朱琳, 龚建师 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 45-52



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202012012

西北旱区潜在蒸散发的的气候敏感性及其干旱特征研究

阴晓伟¹, 吴一平¹, 赵文智², 赵富波¹, 孙彭成¹, 宋燕妮¹, 邱临静¹

(1. 西安交通大学人居环境与建筑工程学院, 陕西 西安 710049; 2. 中国科学院西北生态环境资源研究院/临泽内陆河流域研究站, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 潜在蒸散量(PET)是干旱监测评价的重要指标, 分析影响潜在蒸散发的的气候敏感因子对揭示气候变化的水文响应机理尤为重要。常采用的局部敏感性方法不适用于非线性模型且难以评估各气象因子间的相互作用。对此, 基于 1964—2018 年西北旱区内 163 个气象站的监测数据, 通过 Penman-Monteith 公式, 采用 Sobol 全局敏感性方法分析了西北旱区潜在蒸散发的的气候敏感因子, 计算得到了自校准帕默尔干旱指数(scPDSI), 进而分析了区域干旱的时空演变特征。结果表明: 1964—2018 年西北旱区年均潜在蒸散量为 1 157.8 mm, 高值出现在新疆东部与内蒙古西部地区, 低值出现在青海南部地区。1993 年为转折点, 西北旱区潜在蒸散发受气温、日照时数、风速、相对湿度等多种因素综合影响由显著下降的趋势转变为显著上升, 且在夏季最为明显。在 1964—1993 年, 净辐射、风速与相对湿度的变化对潜在蒸散发的影响较大; 在 1994—2018 年, 风速与相对湿度的变化对潜在蒸散发的影响较大。scPDSI 的时空分布表明新疆北部、青海中部以及甘肃境内的干旱有缓解的趋势; 而黄河流域西南部干旱呈现加重趋势, 将加剧区域水资源紧张, 威胁生态安全。

关键词: 西北旱区; 潜在蒸散发; 干旱; Penman-Monteith; scPDSI; Sobol 全局敏感性分析

中图分类号: P641.131

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2021)03-0020-11

Drought characteristics and sensitivity of potential evapotranspiration to climatic factors in the arid and semi-arid areas of northwest China

YIN Xiaowei¹, WU Yiping¹, ZHAO Wenzhi², ZHAO Fubo¹,
SUN Pengcheng¹, SONG Yanni¹, QIU Linjing¹

(1. School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China; 2. Linze Inland River Basin Research Station/Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: Potential evapotranspiration (PET) is an important part of drought monitoring and evaluation. It is very important to analyze the climatic sensitive factors of PET to reveal the mechanism of hydrological responses to climate change. However, the local sensitivity method commonly used in previous studies is not suitable for nonlinear models and it is difficult to evaluate the interaction among meteorological factors. In this study, based on the monitoring data of 163 meteorological stations in the arid and semi-arid areas of northwest China from 1964 to 2018, we use the Penman-Monteith equation and Sobol global sensitivity to analyze the climatic sensitive factors of PET in the study area and discuss the climatic causes of the PET change. We also calculate the scPDSI and

收稿日期: 2020-12-05; 修订日期: 2021-01-17

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFC0507403); 中科院战略先导专项 B 项目(XDB40020205)

第一作者: 阴晓伟(1997-), 男, 硕士研究生, 主要从事生态水文方向的研究。E-mail: yxw0228@stu.xjtu.edu.cn

通讯作者: 吴一平(1979-), 男, 博士, 教授, 主要从事环境变化与生态水文方向的研究。E-mail: yipingwu@xjtu.edu.cn

analyze the evolution characteristics of drought in northwest China. The results show that the annual average PET of the study area is 1 157.8 mm with substantial spatial variations. The high-value areas are located in the eastern part of Xinjiang and the western part of Inner Mongolia, and the low-value areas are located in the southern part of Qinghai Province. The year 1993 was identified as a turning point, and the PET changed from a significant downward trend to a significant upward trend, which was more apparent in the summer in that year. From 1964 to 1993, the net radiation, wind speed, and relative humidity had a relatively greater impact on PET, while in the period 1994-2018, wind speed and relative humidity had a relatively greater impact on PET. The spatio-temporal distribution of scPDSI show that the drought in northern Xinjiang, central Qinghai and Gansu is becoming less severe, while the drought severity in the southwest part of the Yellow River Basin is becoming more severe, exacerbating regional water resources shortage and threatening ecological security.

Keywords: arid and semi-arid areas of northwest China; potential evapotranspiration; drought; Penman-Monteith; scPDSI; Sobol global sensitivity analysis

潜在蒸散量(Potential evapotranspiration, PET)能够反映供水充分条件下的蒸发能力。由于难以观测实际蒸散量,通常用潜在蒸散量反映缺水情况,因此潜在蒸散量是干旱监测评价的关键因素^[1]。气候变化背景下,由于潜在蒸散量与气候因子呈非线性关系,致使其变化复杂且不确定性较大^[2]。相关研究发现过去几十年潜在蒸散量在某些区域呈下降趋势^[3-4],这一现象被称作“蒸发悖论”并引发广泛关注;但也有研究指出近年来潜在蒸散量出现上升趋势^[5]。因此,解析潜在蒸散发的气候驱动因子,对揭示气候变化的水文响应机理尤为重要。国内外学者对此做了大量的研究,刘昌明等^[6]对影响中国地表潜在蒸散发的气象因子进行了敏感性分析,其敏感程度由高到低排序为:水汽压>最高气温>太阳辐射>风速>最低气温;Goyal^[7]认为印度干旱区潜在蒸散发对温度和净辐射极为敏感;Dinpashoh等^[8]发现伊朗北部的潜在蒸散发主要受到风速和相对湿度的影响;杨林山等^[9]认为洮河流域潜在蒸散发对净辐射敏感性最高,气温和净辐射的变化是该流域潜在蒸散量增加的主要原因。上述研究大都采用了局部敏感性方法,相比之下,全局敏感性方法可以支持分析潜在蒸散发与各气象因子间的非线性关系以及不同因子之间的相关性^[10],因此近年来得到了广泛重视。Guo等^[11]采用全局敏感性方法评估了影响澳大利亚潜在蒸散发的气候敏感因子,发现在干旱区域温度和风速敏感性较高,在湿润区域温度和相对湿度敏感性较高;Xu等^[12]采用相同的方法分析了影响浙江省未来潜在蒸散发的气候敏感因子,认为2011—2040年该区域潜在蒸散量的变化主要由太阳辐射、相对湿度和日最低气温引起。

在气候变化以及人类活动影响逐渐加剧的背景下,极端气候频发,水文循环更加剧烈,因而区域性干旱越来越受到关注。干旱指数能够量化干旱程度,在干旱实时监测方面扮演着重要的角色^[13]。Palmer^[14]提出了以水量平衡原理为基础的帕默尔干旱指数(Palmer drought severity index, PDSI)。为了使PDSI在空间上更具可比性,Wells等^[15]建立了自校准帕默尔干旱指数(Self-calibrating PDSI, scPDSI),该指数用动态计算值代替了PDSI计算公式中的经验常数(持续时间因子、气候特征系数和其他环境常数等)。已有相关研究表明^[16],scPDSI能够更合理地监测极端干旱事件。

中国西北旱区位于欧亚大陆的腹地,生态系统极其脆弱,是世界上最干旱的地区之一,对气候变化的响应也极为敏感^[17]。干旱缺水是困扰西北旱区发展的主要障碍之一,也是专家学者一直关注的热点问题。鉴于此,本研究利用西北旱区163个气象站点的数据,采用Penman-Monteith公式、scPDSI干旱指数、Sobol全局敏感性方法以及非参数Mann-Kendall趋势检验,分析了西北旱区潜在蒸散发以及干旱的时空分布特征,并根据各气候要素的敏感系数对潜在蒸散量的变化趋势进行了归因分析。

1 研究区概况

西北旱区包括新疆、青海、甘肃、宁夏、陕西以及内蒙古等地。该地区远离海洋,属于旱半干旱气候,年降水量仅约400 mm。地貌格局以山地和荒漠戈壁为主,绿洲面积较少(图1),水资源的急剧紧张及其时空分布的高度异质性导致该区域生态系统极为脆弱^[17],对气候变化的响应非常敏感。

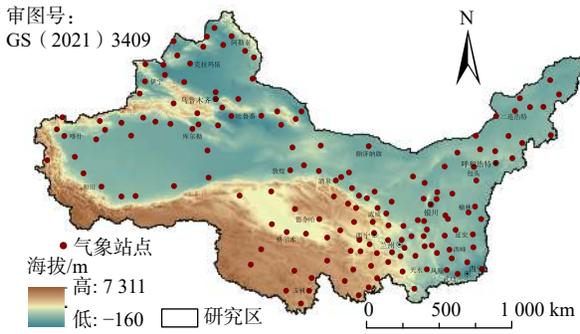


图 1 研究区概况

Fig. 1 General situation of the study area

2 研究方法 with 数据

2.1 研究方法

(1) 潜在蒸散发计算公式

本研究采用 Penman-Monteith 公式^[18]对西北旱区的潜在蒸散量(PET)进行估算:

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

式中: Δ ——饱和水汽压—温度曲线斜率/(kPa·°C⁻¹);

R_n ——净辐射/(MJ·m⁻²·d⁻¹);

G ——地表热通量/(MJ·m⁻²·d⁻¹);

T ——平均温度/°C;

γ ——干湿计常数/(kPa·°C⁻¹);

u_2 ——2 m 处风速/(m·s⁻¹);

e_s ——饱和水汽压/kPa;

e_a ——实际水汽压/kPa。

(2) scPDSI 干旱指数

PDSI 通常表示某一地区在一段时间内实际供水持续低于正常水平的干旱的严重程度,是水分亏缺量与持续时间的函数:

$$X_i = qZ_i + pX_{i-1} = \frac{Z_i}{3} + 0.897 \times X_{i-1} \quad (2)$$

式中: X_i 、 X_{i-1} ——第 i 月与第 $i-1$ 月的 PDSI 指数;

Z_i ——第 i 月的水分异常指数;

q 、 p ——持续因子。

$$K' = 1.5 \times \lg \left[\left(\frac{\overline{PE} + \overline{R} + \overline{RO}}{\overline{P} + \overline{L}} + 2.8 \right) \sqrt{D} \right] + 0.5 \quad (3)$$

$$K^* = \frac{17.67}{\sum_1^{12} DK'} \times K' \quad (4)$$

式中: K' ——气候特征系数近似值;

K^* ——气候特征系数;

\overline{PE} ——平均潜在蒸散量;

\overline{R} ——平均实际补水量;

\overline{RO} ——平均实际径流量;

\overline{P} ——平均实际降水量;

\overline{L} ——平均实际土壤水分损失量;

\overline{D} ——平均水分偏离量。

式(2)中自变量的系数(q 、 p)固定,称之为持续因子,分别是 1/3 和 0.897,能够反映 PDSI 受地表前期干湿状况影响的程度,以及对当月水分异常指数 Z_i 的敏感性。

尽管 PDSI 的提出是基于水分平衡方程原理且其具有明确的物理意义,但其计算公式中包含了一些经验参数,这些经验参数是基于美国半干旱区的气象观测数据得到,致使 PDSI 在美国半干旱区以外的气候区的适用性有待验证。Wells 等^[15]提出了 scPDSI 干旱指数,该指数能够基于每一个台站的历史观测资料,对式(2)中的持续因子 q 、 p 以及式(4)中的气候特征系数 K^* 逐一修正,使其符合当地的气候条件,从而具有较好的空间可比性。其具体改进方法见文献^[15]。

scPDSI 干旱等级分级见表 1。

表 1 scPDSI 干旱等级
Table 1 Classification of scPDSI

干旱等级	scPDSI
无旱	-0.99 ~ 0.99
轻旱	-1.99 ~ -1.00
中旱	-2.99 ~ -2.00
重旱	-3.99 ~ -3.00
特旱	≤ -4.00

(3) Sobol 全局敏感性分析

Sobol 法是一种基于方差分配的全局敏感性分析方法^[19],该方法可以考虑到 Penman-Monteith 公式中各因子之间的非线性关系,能够分析潜在蒸散发对气象因子的独立敏感性与总敏感性,优于传统的局部敏感性分析方法。其原理如下:

$$X = \sum_i X_i + \sum_{i \neq j} X_{i,j} + \dots + \sum_{i \neq j \neq \dots \neq n} X_{i,j,\dots,n} \quad (5)$$

式中: X ——模型总方差;

X_i ——变量 i 贡献的方差;

$X_{i,j}$ ——变量 i 与 j 相互作用贡献的方差。

上述方差均由蒙特卡罗数值积分^[20]近似得到,此外,根据 Sobol 法的定义,一阶与全阶敏感系数分别表示为:

$$S_i = X_i / X \quad (6)$$

$$ST_i = S_i + S_{i,j} + \dots + S_{i,j,\dots,n} \quad (7)$$

式中: S_i ——变量 i 的一阶敏感系数;

$S_{i,j}$ ——变量 i 的二阶敏感系数;

ST_i ——变量 i 的总阶敏感系数。

(4) 非参数 Mann-Kendall 趋势检验

非参数 Mann-Kendall 检验法是经过世界气象组织 (WMO) 推荐并被广泛应用的趋势检验方法, 用于辨别某一自然过程处于自然波动状态还是具有一定的变化趋势。该方法无需假定样本的统计分布, 可自动排除少量异常值干扰, 适用于顺序变量和类型变量。其检验统计量 S 及检验值 Z 计算公式如下:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=n+1}^n \text{sgn}(X_j - X_i) \quad (8)$$

$$\text{sgn}(X_j - X_i) = \begin{cases} +1 & \text{if } (X_j - X_i) > 0 \\ 0 & \text{if } (X_j - X_i) = 0 \\ -1 & \text{if } (X_j - X_i) < 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$Z = \begin{cases} (S - 1) / \sqrt{\text{var}(S)} & \text{if } (X_j - X_i) > 0 \\ 0 & \text{if } (X_j - X_i) = 0 \\ (S + 1) / \sqrt{\text{var}(S)} & \text{if } (X_j - X_i) < 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中: n ——时间序列的长度;

X_j, X_i ——第 j 年和第 i 年待检验样本的数值。

若 $|Z| \geq Z_{(1-\alpha/2)}$ 时, 则表明原无趋势的假设被否定, 在置信水平 α 下, 时间序列数据存在趋势, Z 大于 0 代表时间序列为增加趋势, 小于 0 则代表为减少趋势。 Z 的绝对值大于等于 1.28, 1.64, 2.32 时, 表明显著性检验中置信度分别超过了 90%、95%、99%。

2.2 数据来源

本文的气象数据来自中国地面气候资料日值数据集 (<http://data.cma.cn>), 包括西北旱区内 163 个气象站, 见图 1。主要气候变量为 1964—2018 年间的逐日降水、相对湿度、风速、日照时数、最高气温和最低气温。此外, scPDSI 需要输入的土壤有效含水量 (Available Water Capacity, AWC) 数据由 Dai 等 [21] 制作的中国土壤水文数据集中的田间持水量和凋萎系数计算而来。

3 结果与分析

3.1 潜在蒸散发的时空变化特征

3.1.1 潜在蒸散量空间分布

1964—2018 年, 西北旱区潜在蒸散量在 660.8 ~ 2 080.0 mm/a 之间, 年均值约为 1 157.8 mm/a。从空间看 (图 2), 西北旱区潜在蒸散量具有明显的空间分布差异, 其高值区域位于新疆东部与内蒙古西部, 年均

潜在蒸散量大于 1 350.0 mm/a, 并呈现出由该区域向周边区域递减的趋势。风速是影响潜在蒸散发的重要因素, 由于西风带气候区影响, 该区潜在蒸散量明显较高。低值区域位于青海南部, 年均潜在蒸散量小于 900.0 mm/a; 整体而言, 大部分区域的潜在蒸散量在 900.0 ~ 1 500.0 mm/a 之间。

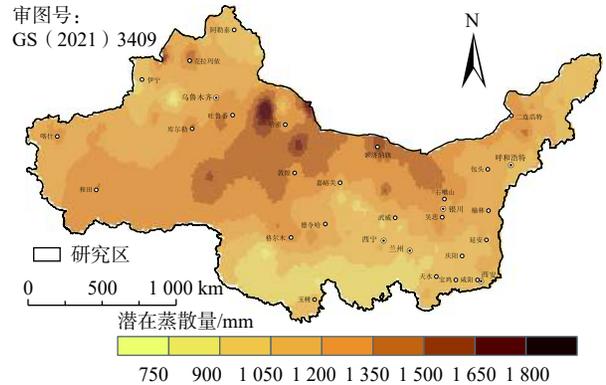


图 2 1964—2018 年西北旱区潜在蒸散量空间分布
Fig. 2 Spatial distribution of PET in the arid and semi-arid areas of northwest China from 1964 to 2018

3.1.2 潜在蒸散量时间变化趋势

1964—2018 年, 西北旱区潜在蒸散量年际变化趋势呈现不显著 ($P=0.7$) 的上升趋势, 范围在 1 020 ~ 1 160 mm 之间 (图 3)。1993 年为转折点, 其潜在蒸散量在前后两个时间段分别呈现出显著 ($P=0.001 7$) 的下降与显著 ($P=0.005 8$) 的上升趋势, 下降与上升的速率分别为 -2.29, 1.94 mm/a。

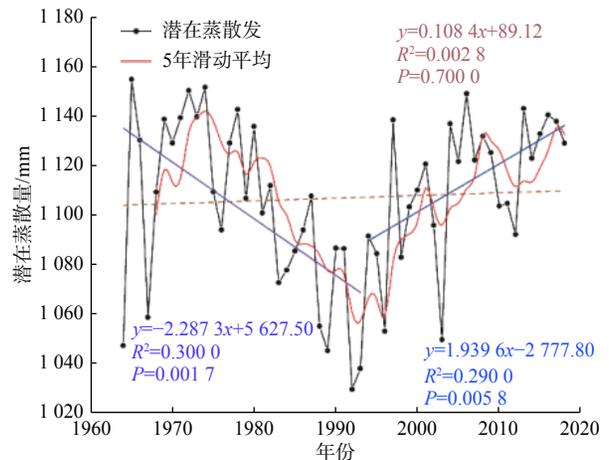


图 3 1964—2018 年西北旱区潜在蒸散量变化趋势
Fig. 3 The trend of PET in the arid and semi-arid areas of northwest China from 1964 to 2018

为了进一步分析潜在蒸散量时间变化趋势在空间上的分布状况, 对 1993 年转折点前后两个时间段各

气象站点的年际潜在蒸散量进行了 Mann-Kendall 趋势检验, 计算每个站点的 Z 值, 并以 $\alpha=0.05$ 的置信水平将其分为显著增加、显著减少、不显著增加和不显著减少 4 类(图 4), 1964—1993 年共计 126 个站点潜在蒸散量呈现下降趋势, 其中下降趋势显著的站点主

要分布在新疆、甘肃以及陕西等地; 1994—2018 年, 共计 111 个站点呈现上升趋势, 其中上升趋势显著的站点主要分布在新疆以及甘肃。前后两个时间段下降与上升趋势均显著的站点共计 35 个, 分布在新疆中部以及甘肃西北部。

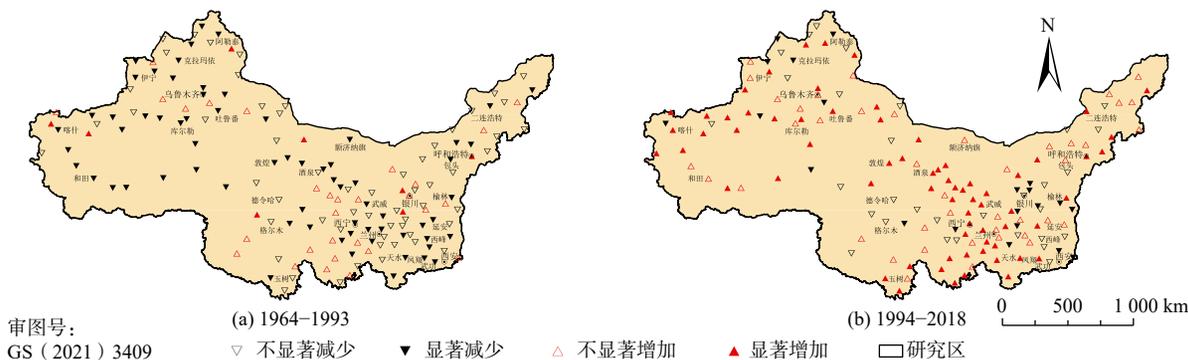


图 4 西北旱区气象站点潜在蒸散量的 Mann-Kendall 趋势检验空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of PET in the arid and semi-arid areas of northwest China by the Mann-Kendall trend test

3.2 潜在蒸散发的气候敏感性

3.2.1 敏感系数的空间分布

西北旱区潜在蒸散发对各气候因子敏感系数的空间分布如图 5 所示。依据敏感性区间范围(表 2), 西北旱区全境潜在蒸散发对温差均不敏感。在空间上, 各气候因子的分布差异十分明显, 其中, 潜在蒸散

发对平均温度与净辐射的敏感性整体高出对风速与相对湿度的敏感性一个量级。平均温度的敏感系数波动范围为 0.11 ~ 0.86, 新疆北部、青海北部、甘肃西北部以及内蒙古东北部的潜在蒸散发对其敏感性程度较高, 见图 5(a)。净辐射的敏感系数波动范围为 0.09 ~ 0.64, 敏感系数大致从西北向东南方向递增, 青

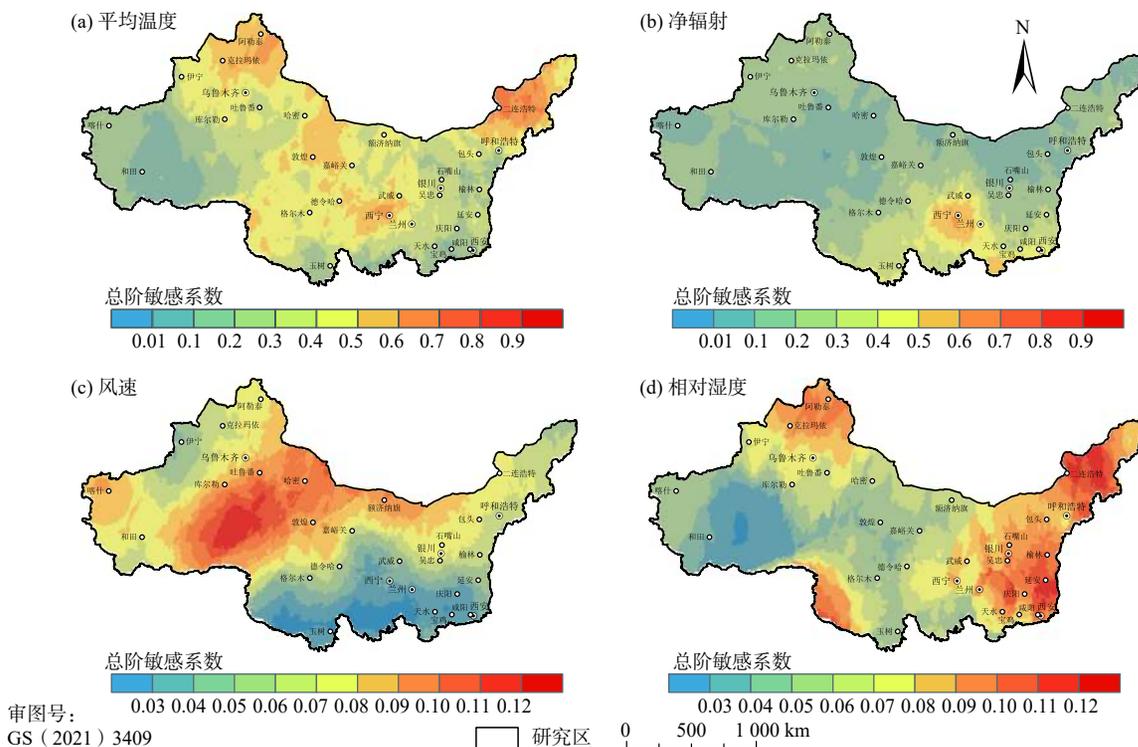


图 5 气候因子敏感系数空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of sensitivity coefficients of climatic factors

表 2 敏感区间范围^[22]

Table 2 Ranges of sensitivity coefficients^[22]

敏感系数	$S < 0.01$	$0.01 \leq S < 0.1$	$S \geq 0.1$
是否敏感	不敏感	敏感	很敏感

海东部、甘肃南部的潜在蒸散发对其敏感程度较高,见图 5(b)。风速的敏感系数波动范围为 0.02 ~ 0.13,其纬向分布趋势显著,由南向北敏感系数逐渐增大,高值区域主要分布在新疆东南部,见图 5(c)。相对湿度的敏感系数波动范围为 0.03 ~ 0.13,高值区域主要分布在内蒙古东北部、新疆北部、青海西部以及黄河流域中部,见图 5(d)。

3.2.2 敏感系数的年内变化

西北旱区潜在蒸散发对各气候因子的敏感系数的年内变化如图 6 所示。除温差外,其余气候因子均表现为敏感或很敏感。其中,平均温度与净辐射年内起伏较大,相对湿度与风速年内起伏较小且变化规律较为一致,4 种气候因子的敏感系数均表现出明显的季节性。平均温度呈现春冬高、夏秋低的“单谷型”现象,表明潜在蒸散发对春冬季平均温度比夏秋季更敏感,反映了水热条件对潜在蒸散发的季节性影响;净辐射呈现夏季高、秋冬春较低的“单峰型”现象,表明潜在蒸散发对夏季净辐射最为敏感,可能与该区域夏季白昼时间较长有关;相对湿度与风速在秋冬季的敏感系数均明显高于其他季节,其中,相对湿度的高敏感性反映西北旱区秋冬季大气水分含量波动较大,风速的高敏感性与该区域冬季风盛行的气候特征相对应。

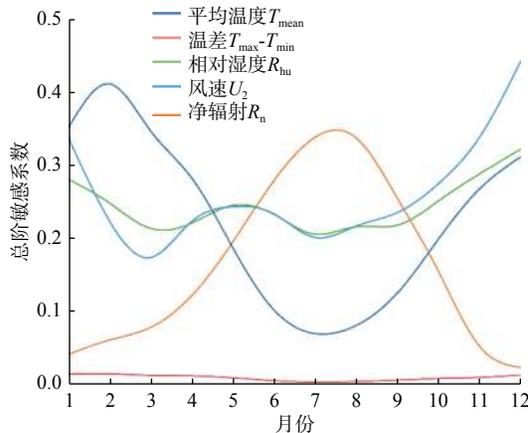


图 6 气候因子敏感系数年内变化

Fig. 6 Monthly variation of sensitivity coefficients of climate factors

3.3 干旱的时空变化特征

西北旱区 1964—2018 年 scPDSI 和不同等级的干

旱站次比例见图 7。结果表明,西北旱区 scPDSI 呈现显著 ($P < 0.0001$) 的上升趋势,其中,1970—1982 年与 1997—2002 年分别为明显的气候干早期,其余时期特别是 2002 年之后干旱程度均有所缓和。三种干旱等级的干旱站次比变化具有一致性,随着 scPDSI 的上升而减小,通过对其时间变化的 Mann-Kendall 趋势检验(表 3)发现,中旱以及重旱站次比呈现显著减小的趋势。这表明,1964—2018 年西北旱区的干旱灾害以及干旱的影响范围有明显减少的趋势,整个区域普遍变得更加湿润。

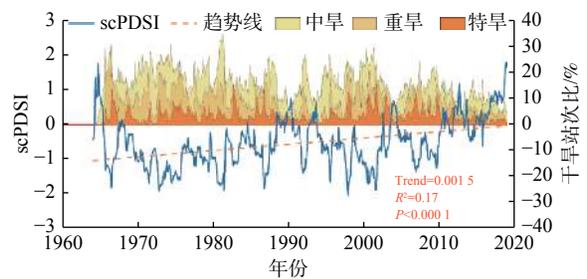


图 7 1964—2018 年西北旱区 scPDSI 及不同等级干旱站次比变化趋势

Fig. 7 Trend of scPDSI and the proportion of stations with different levels of drought in the arid and semi-arid areas of northwest China from 1964 to 2018

表 3 不同等级干旱站次比 Mann-Kendall 趋势检验

Table 3 The Mann-Kendall trend test on the proportion of stations with different levels of drought

干旱等级	Z 值	P 值
中旱	-11.25	$P < 0.0001$
重旱	-7.87	$P < 0.0001$
特旱	-0.43	$P = 0.6683$

从西北旱区 scPDSI 的空间分布来看(图 8),1964—1982 年新疆以及甘肃等区域干旱程度较为严重;1992—2009 年,干旱则主要发生在黄河流域;2010 年后,整个研究区普遍较为湿润。总体看,过去 55 年研究区内易旱区域的重心逐渐由西北部转移至东南部。此外,20 世纪 80 年代后,疏勒河流域北部(甘肃北部)连同黑河流域北部(内蒙古西部)形成了一条明显的干旱化带状区域。

为了进一步分析干旱的时间变化趋势在空间上的分布状况,本研究同样对各气象站点的年际 scPDSI 进行了 Mann-Kendall 趋势检验(图 9)。其中,共计 67 个站点呈显著增加的趋势,主要分布在新疆北部、青海中部以及甘肃境内,表明这些区域有变湿的趋势。相关研究发现^[23],该区域降水自 20 世纪 80 年代

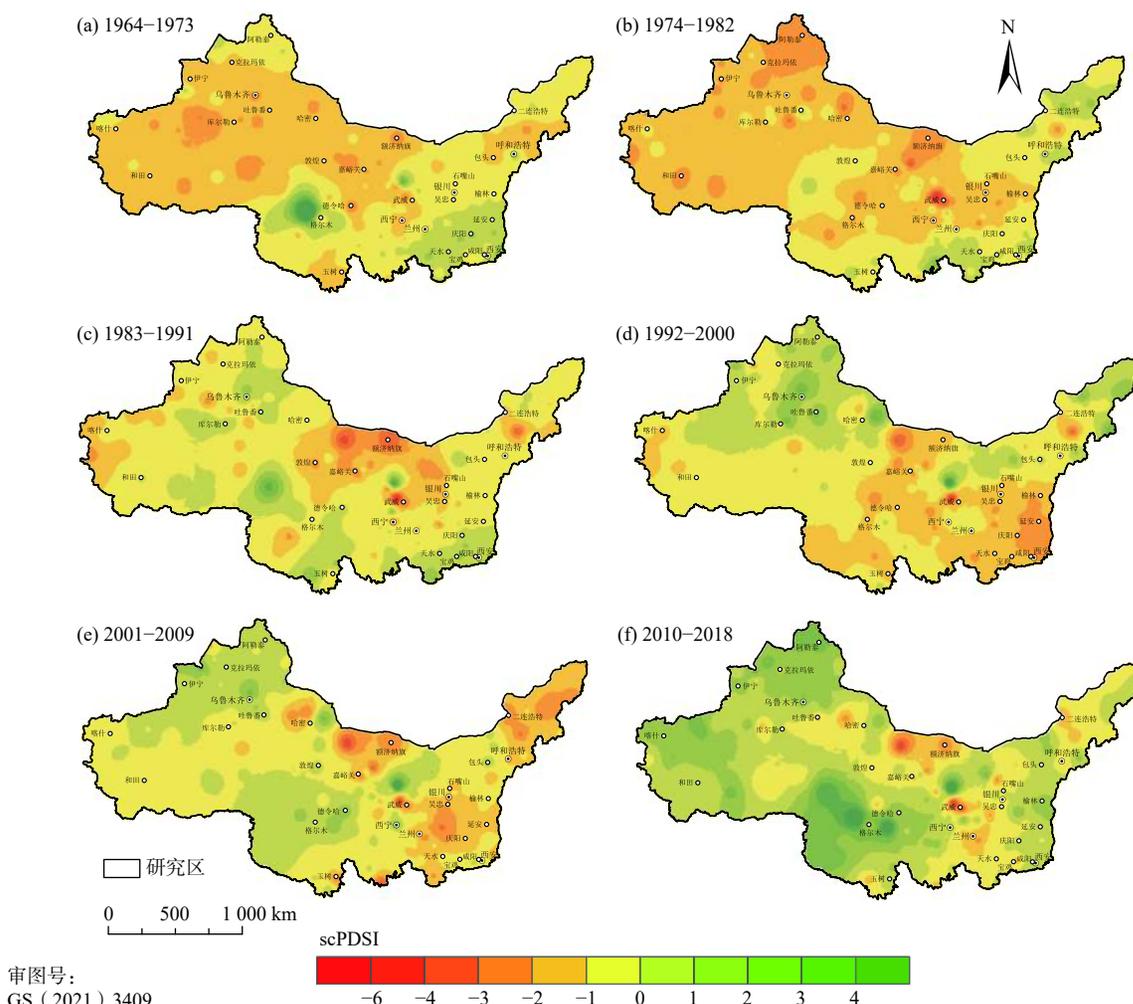


图 8 西北旱区 1964—2018 年 scPDSI 空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of scPDSI in the arid and semi-arid areas of northwest China from 1964 to 2018

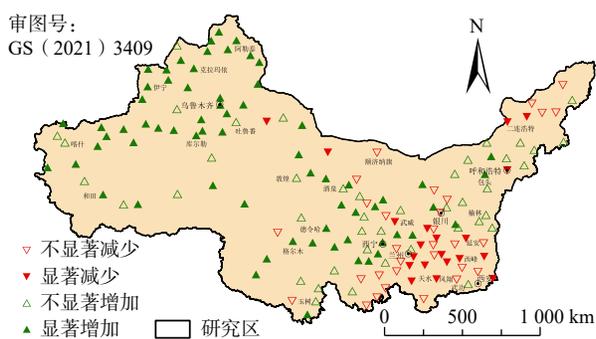


图 9 西北旱区气象站点 scPDSI 的 Mann-Kendall 趋势检验空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of scPDSI in the arid and semi-arid areas of northwest China by the Mann-Kendall trend test

中期以来呈“突变型”升高现象, scPDSI 的变化特征与其具有高度的一致性。共计 20 个站点呈现显著减少的趋势, 主要分布在黄河流域西南部, 说明这些区域干旱程度有加强的趋势。

4 讨论

4.1 潜在蒸散发的季节变化趋势

考虑到不同季节气候因子的敏感系数不同, 本研究对上述统计出的 35 个趋势显著站点的不同季节尺度的潜在蒸散量进行了变化趋势分析, 见图 10。在季节尺度上, 除冬季外的其余季节均表现出与年际变化趋势相同的规律。以 1993 年为转折点, 在前后 2 个时间段均呈现出显著的下降与上升趋势。其中, 以夏季最为明显, 下降与上升的速率分别达到了 $-0.83, 0.88 \text{ mm/a}$ 。

4.2 潜在蒸散发趋势转变原因解析

为了分析西北旱区夏季各气象因子变化对潜在蒸散发的影响, 本研究计算了上述 35 个站点各气象因子夏季的逐年敏感系数(图 11)。总体上, 净辐射的敏感系数呈现先增加后减少的趋势; 风速的敏感系数呈现微弱减少的趋势; 相对湿度、平均温度与温差的敏感系数整体波动不大; 敏感系数由大到小排序依次

为净辐射、风速、相对湿度、平均温度、温差。在1993年之前,净辐射对潜在蒸散发的贡献较大且有增加的趋势,其次为风速、相对湿度;在1993年之后,尽管净辐射对潜在蒸散发的贡献仍然最高但呈现减小的趋势。另外,风速与相对湿度在21世纪初对潜在蒸散发的贡献较为接近。

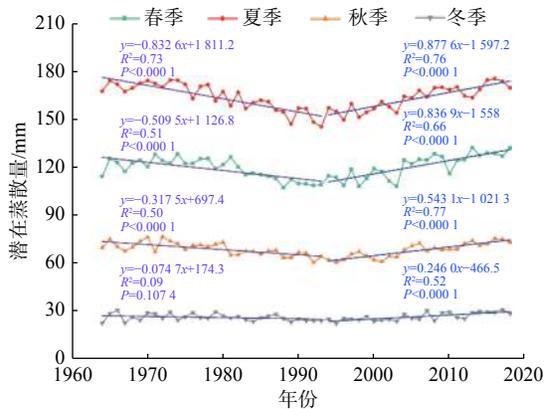


图 10 1964—2018 年西北旱区不同季节潜在蒸散量变化趋势
Fig. 10 Trend of PET in different seasons in the arid and semi-arid areas of northwest China from 1964 to 2018

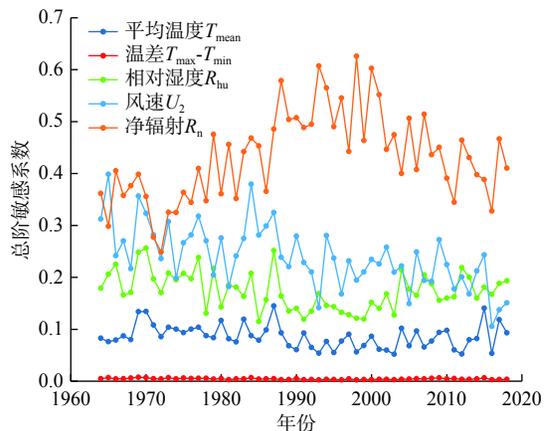


图 11 夏季气候因子敏感系数年际变化

Fig. 11 Interannual variation of sensitivity coefficients of climate factors in summer

潜在蒸散发的时空差异主要受到温度、风速、相对湿度、日照时数等气象因子的综合影响,温度升高、日照时数增长、风速增加以及相对湿度降低会导致潜在蒸散量增加^[24]。从夏季各气候因子的变化趋势看(图 12),净辐射显著减少,而风速与相对湿度的变化趋势则表现出与潜在蒸散量变化趋势相同的特点,均以 1993 年为转折点,在前后 2 个时间段的趋势发生了明显的转变。结合各气候因子夏季敏感系数的年际变化(图 11)可知,1964—1993 年,净辐射与风

速的减少以及相对湿度的增加给潜在蒸散发带来的负效应,是造成其显著减少的主要原因;1994—2018 年,净辐射持续减少给潜在蒸散发带来的负效应被风速的增加以及相对湿度的减少带来的正效应全部抵消,潜在蒸散量呈显著增加的趋势。前人^[25-27]对西北旱区的潜在蒸散发进行局部敏感性分析时,均未在季节尺度发现其对相对湿度的高敏感性,且因相对湿度的年际波动较小而忽略了该气候因子对潜在蒸散发的贡献,从而认为风速是导致该区域潜在蒸散量波动的主要原因之一。这是由于局部敏感性分析法假设输入因子与输出结果之间是线性关系,而 Penman-Monteith 公式中潜在蒸散量与各气象因子间是非线性关系,同时各气象因子的局部敏感性排位与输入气象因子的取值有很大的关系^[10]。此外,局部敏感性分析中输入因子变幅一般不能超过 10%,而以西北旱区上述 35 个站点 7 月的气象数据为例,平均温度、温差、相对湿度、风速、净辐射的均值分别为 23.11 °C、53.45%、2.08 m/s、13.48 MJ/(m²·d),变幅超过 10% 的天数分别为 58.02%、74.43%、79.27%、89.39%、69.96%,显然,上述因素均不满足局部敏感性分析的前提条件。

鉴于西北旱区风速与相对湿度在夏季的波动较大,且与潜在蒸散量的变化规律相似,见图 12(c)(d),本研究统计了夏季净辐射、风速及相对湿度在 1964—1968 年、1991—1995 年、2014—2018 年的均值变化,同时计算了在保持其他气候因子数值不变的情况下,单一气象因子对潜在蒸散量的影响,结果见表 4。风速的相对变化最为明显,其次为相对湿度,二者对潜在蒸散发的贡献均明显高于净辐射。由此结合潜在蒸散发对夏季相对湿度表现出的高敏感性可知,除风速外,相对湿度也是引起西北旱区潜在蒸散量变化的主要原因。

4.3 潜在蒸散发与干旱的关联分析

降水是决定地表干湿变化的一个重要因子。但在气候变化背景下,温度等地表气象因素变化造成的蒸散发潜力的改变已经对地表干湿状况产生了显著的影响^[28]。此外,在影响西北旱区潜在蒸散发变化的诸多因素中,空气动力项对其变化趋势起到了不可忽视的作用,风速作为引起西北旱区潜在蒸散发变化的主要驱动因素,一定程度上也会影响该区域地表水分收支平衡。scPDSI 综合考虑了蒸散发和降水对干旱的影响,研究表明在中国干旱区的适用性要明显优于其它干旱指数^[29]。

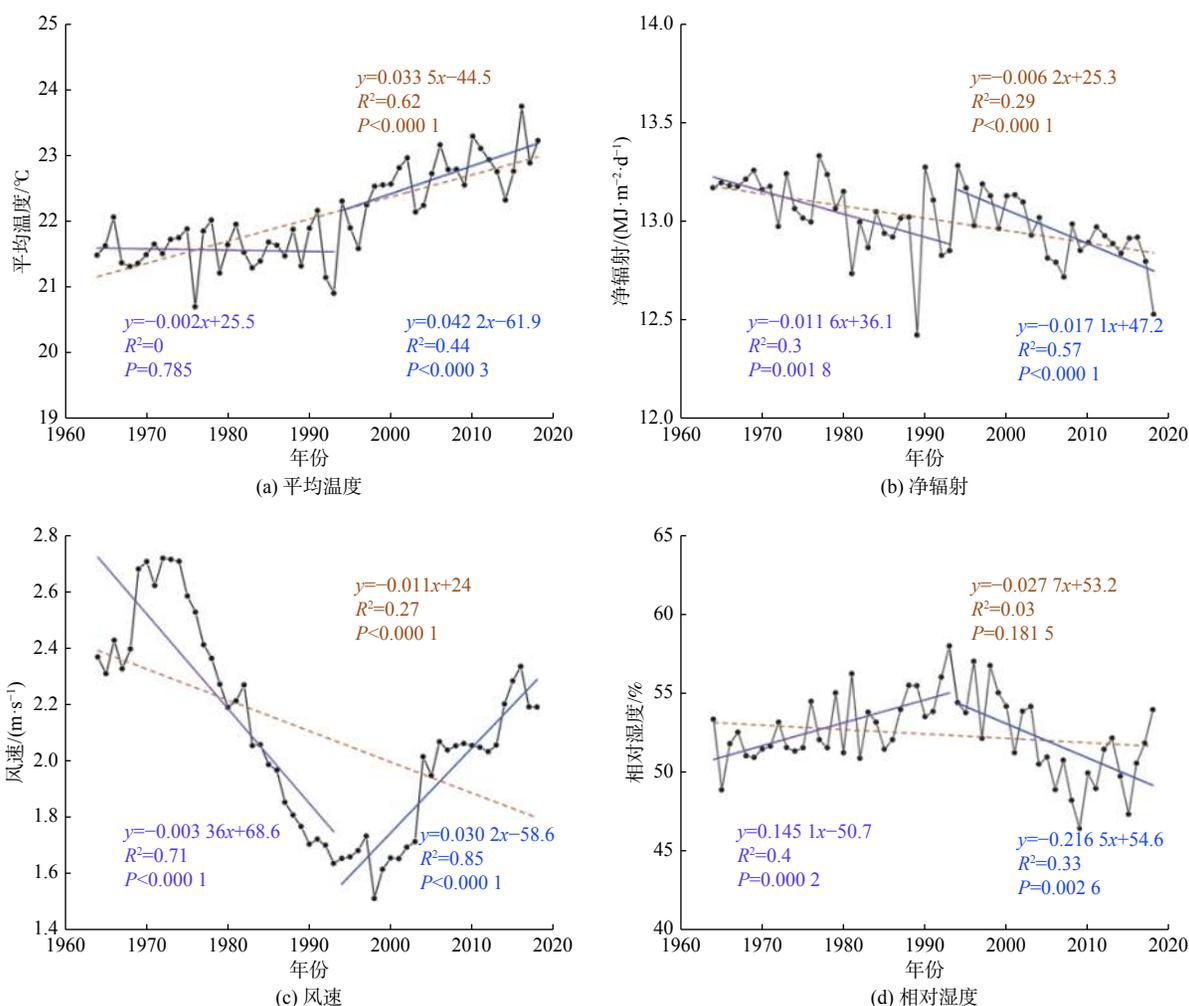


图 12 1964—2018 年西北旱区夏季气候因子变化趋势

Fig. 12 Trend of summer climate factors in the arid and semi-arid areas of northwest China from 1964 to 2018

表 4 气候因子对潜在蒸散量变化的贡献

Table 4 Contribution of climate factors to PET

气候因子变化	净辐射		风速		相对湿度	
	-1.05%	-1.89%	-29.21%	33.78%	7.15%	-8.17%
潜在蒸散量变化	-0.05%	-0.09%	-24.41%	26.68%	-7.25%	9.57%

此外，基于不同潜在蒸散发计算方法的 scPDSI 之间存在很大的差异。例如采用单一考虑温度的 Thornthwaite 公式得到的潜在蒸散发量计算 scPDSI 时，会高估气温变化对地表干湿状况的影响，从而使干旱评价偏干，无法准确刻画西北旱区的干旱状况。本研究采用 Penman-Monteith 公式计算了潜在蒸散发量，再计算得到西北旱区的 scPDSI。在考虑降水与温度对该区域干湿状况影响的同时，兼顾空气动力项对于干旱的作用，从而更合理地描述西北旱区的干湿变化特征。同时需要注意的是，在西北旱区降水量和潜在蒸散发量与干湿变化特征的对应关系上，降水量仍旧是影

响其干湿状况的主控因子，潜在蒸散发量对于干湿变化的影响可能集中在特定的季节^[1]，这与其气候因子敏感系数的年内变化特征一致。

虽然 Penman-Monteith 公式考虑的输入因子较为完善，适用性较好，但仍然属于半经验公式。本研究在使用过程中并没有根据不同区域的特征对其相关参数进行修正，在今后的研究中还需进一步优化。此外，尽管 scPDSI 在计算时依据各台站的历史观测数据，利用动态计算值修正了其经验参数，空间可比较性有了进一步的提升^[30]，但其计算结果的取值范围明显小于 PDSI，因此沿用 PDSI 的旱涝分级标准时可能

无法准确描述西北旱区的干旱等级。同时, scPDSI 仅考虑了气象因素的单一影响, 而干旱作为一种非常复杂的极端气候事件, 还受到地形因子、人类活动等的影响, 仅在宏观角度讨论气象干旱, 可能无法对干旱状况进行精准评估。

5 结论

(1) 1964—2018年西北旱区潜在蒸散量年均值为1 154.8 mm, 高值区域位于新疆东部与内蒙古西部, 低值区域位于青海南部。1993年为转折点, 西北旱区潜在蒸散量由显著下降趋势转变为显著上升。1964—1993年, 77%的站点为下降趋势, 42%的站点下降趋势显著, 主要分布在新疆、甘肃以及陕西南部; 1994—2018年, 68%的站点为上升趋势, 42%的站点上升趋势显著, 主要分布在新疆和甘肃。

(2) 在空间上, 西北旱区各气候因子的敏感系数呈现明显的空间异质性, 新疆北部、青海北部、甘肃西北部以及内蒙古东北部的潜在蒸散发对平均温度最为敏感; 青海东部、甘肃南部则对净辐射最为敏感; 潜在蒸散发对风速的敏感区域主要分布在新疆东南部, 相对湿度的敏感区域主要分布在西北旱区的东部。时间上, 各气候因子敏感系数的季节性差异也较为显著, 潜在蒸散发在冬春季对平均温度最为敏感, 在夏季对净辐射最为敏感, 在秋季对风速最为敏感。

(3) 潜在蒸散量的趋势转变在夏季最为明显, 在1964—1993年, 净辐射与风速的降低、相对湿度的上升带来的负效应, 是潜在蒸散量减少的主要原因; 在1994—2018年, 净辐射持续下降带来的负效应被风速的上升、相对湿度的降低带来的正效应全部抵消, 是潜在蒸散量增加的主要原因。

(4) 西北旱区干旱时空变化显著, 新疆北部、青海中部以及甘肃境内干旱程度有缓解的趋势, 而黄河流域西南部干旱程度有加重的趋势, 其易旱区域的重心由西北部逐渐转移至东南部, 这将加剧该地区的水资源紧张程度, 威胁生态安全。

参考文献 (References):

[1] 刘珂, 姜大膀. 基于两种潜在蒸散发算法的SPEI对中国干湿变化的分析[J]. 大气科学, 2015, 39(1): 23 - 36. [LIU Ke, JIANG Dabang. Analysis of dryness/wetness over China using standardized precipitation evapotranspiration index based on two evapotranspiration algorithms[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2015, 39(1): 23 - 36. (in Chinese with English abstract)]

[2] CHAHINE M T. The hydrological cycle and its influence on climate[J]. *Nature*, 1992, 359(6394): 373 - 380.

[3] LIU C M, ZENG Y. Changes of pan evaporation in the recent 40 years in the Yellow River Basin[J]. *Water International*, 2004, 29(4): 510 - 516.

[4] JHAJHARIA D, DINPASHOH Y, KAHYA E, et al. Trends in reference evapotranspiration in the humid region of northeast India[J]. *Hydrological Processes*, 2012, 26(3): 421 - 435.

[5] CONG Z T, ZHAO J J, YANG D W, et al. Understanding the hydrological trends of river basins in China[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 388(3/4): 350 - 356.

[6] 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. [LIU Changming, ZHANG Dan. Temporal and spatial change analysis of the sensitivity of potential evapotranspiration to meteorological influencing factors in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(5): 579 - 588. (in Chinese with English abstract)]

[7] GOYAL R K. Sensitivity of evapotranspiration to global warming: a case study of arid zone of Rajasthan (India)[J]. *Agricultural Water Management*, 2004, 69(1): 1 - 11.

[8] DINPASHOH Y, JHAJHARIA D, FAKHERI-FARD A, et al. Trends in reference crop evapotranspiration over Iran[J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 399(3/4): 422 - 433.

[9] 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. [YANG Linshan, LI Changbin, WANG Shuaibing, et al. Sensitive analysis of potential evapotranspiration to key climatic factors in Taohe River Basin[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(11): 102 - 109. (in Chinese with English abstract)]

[10] 张永生, 陈喜, 高满, 等. 不同气候区潜在蒸散发全局敏感性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, 45(2): 137 - 144. [ZHANG Yongsheng, CHEN Xi, GAO Man, et al. Global sensitivity analysis of potential evapotranspiration in different climatic regions[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2017, 45(2): 137 - 144. (in Chinese with English abstract)]

[11] GUO D L, WESTRA S, MAIER H R. Sensitivity of potential evapotranspiration to changes in climate variables for different Australian climatic zones[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, 21(4): 2107 - 2126.

[12] XU Y P, PAN S L, FU G T, et al. Future potential evapotranspiration changes and contribution analysis in Zhejiang Province, East China[J]. *Journal of Geophysical*

- Research: Atmospheres, 2014, 119(5): 2174 – 2192.
- [13] ZHANG S N, WU Y P, SIVAKUMAR B, et al. Climate change-induced drought evolution over the past 50 years in the southern Chinese Loess Plateau[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2019, 122: 104519.
- [14] PALMER W C. Meteorological drought[M]. Washington, DC: Bureau, 1965.
- [15] WELLS N, GODDARD S, HAYES M J. A self-calibrating palmer drought severity index[J]. *Journal of Climate*, 2004, 17(12): 2335 – 2351.
- [16] 王文, 许志丽, 蔡晓军, 等. 基于PDSI的长江中下游地区干旱分布特征[J]. *高原气象*, 2016, 35(3): 693 – 707. [WANG Wen, XU Zhili, CAI Xiaojun, et al. Aridity characteristic in middle and lower reaches of Yangtze River area based on palmer drought severity index analysis[J]. *Plateau Meteorology*, 2016, 35(3): 693 – 707. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 陈亚宁, 杨青, 罗毅, 等. 西北干旱区水资源问题研究思考[J]. *干旱区地理*, 2012, 35(1): 1 – 9. [CHEN Yaning, YANG Qing, LUO Yi, et al. Ponder on the issues of water resources in the arid region of northwest China[J]. *Arid Land Geography*, 2012, 35(1): 1 – 9. (in Chinese with English abstract)]
- [18] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration. guidelines for computing crop water requirements[EB/OL]. 1998.
- [19] SOBOL I M. Sensitivity estimates for nonlinear mathematical models[J]. *Math Model Comput Exp*, 1993, 1(1): 112118.
- [20] SOBOL I M. Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates[J]. *Mathematics & Computers in Simulation*, 2001, 55(1/2/3): 271 – 280.
- [21] DAI Y J, SHANGGUAN W, DUAN Q Y, et al. Development of a China dataset of soil hydraulic parameters using pedotransfer functions for land surface modeling[J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2013, 14(3): 869 – 887.
- [22] TANG Y, REED P, WAGENER T, et al. Comparing sensitivity analysis methods to advance lumped watershed model identification and evaluation[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2007, 11(2): 793 – 817.
- [23] 陈亚宁, 徐长春, 杨余辉, 等. 新疆水文水资源变化及对区域气候变化的响应[J]. *地理学报*, 2009, 64(11): 1331 – 1341. [CHEN Yaning, XU Changchun, YANG Yuhui, et al. Hydrology and water resources variation and its responses to regional climate change in Xinjiang[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(11): 1331 – 1341. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 倪广恒, 李新红, 丛振涛, 等. 中国参考作物腾发量时空变化特性分析[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(5): 1 – 4. [NI Guangheng, LI Xinhong, CONG Zhentao, et al. Temporal and spatial characteristics of reference evapotranspiration in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(5): 1 – 4. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 尹云鹤, 吴绍洪, 戴尔阜. 1971—2008年我国潜在蒸散时空演变的归因[J]. *科学通报*, 2010, 55(22): 2226 – 2234. [YIN Yunhe, WU Shaohong, DAI Erfu. Attribution of temporal and spatial evolution of potential evapotranspiration in China from 1971 to 2008[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(22): 2226 – 2234. (in Chinese)]
- [26] 曹雯, 申双和, 段春锋. 西北地区生长季参考作物蒸散变化成因的定量分析[J]. *地理学报*, 2011, 66(3): 407 – 415. [CAO Wen, SHEN Shuanghe, DUAN Chunfeng. Quantification of the causes for reference crop evapotranspiration changes in growing season in northwest China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(3): 407 – 415. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 王小静, 李志, 赵姘, 等. 西北旱区1961—2011年参考作物蒸散量的时空分异[J]. *生态学报*, 2014, 34(19): 5609 – 5616. [WANG Xiaojing, LI Zhi, ZHAO Cha, et al. Spatiotemporal variations of the reference crop evapotranspiration in the arid region of northwest China during 1961—2011[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(19): 5609 – 5616. (in Chinese with English abstract)]
- [28] HE IM, RICHARD R. A review of twentieth-century drought indices used in the United States[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2002, 83(8): 1149 – 1165.
- [29] 杨庆, 李明星, 郑子彦, 等. 7种气象干旱指数的中国区域适应性[J]. *中国科学: 地球科学*, 2017, 47(3): 337 – 353. [YANG Qing, LI Mingxing, ZHENG Ziyang, et al. Regional adaptability of 7 meteorological drought indices in China[J]. *Scientia Sinica(Terrae)*, 2017, 47(3): 337 – 353. (in Chinese)]
- [30] DAI A G. Characteristics and trends in various forms of the Palmer Drought Severity Index during 1900–2008[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2011, 116(D12): D12115.

编辑: 张若琳