

# 中亚水热资源匹配特征及敏感性分析

姚林林<sup>1,2,3</sup>, 周宏飞<sup>1,2</sup>, 闫英杰<sup>1,2,3</sup>

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 乌鲁木齐 830011;

2. 中国科学院阜康荒漠生态实验站, 阜康 831505; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 从水热积指数出发, 基于 1931—2019 年 Climatic Research Unit(CRU)再分析资料, 运用多时序分析方法, 从多时间尺度分析中亚水热资源匹配空间特征和时序变化, 并进行敏感归因探究。结果表明: (1) 空间上中亚水热匹配条件存在相对优劣, 优势区多分布于高纬及高山高原地带, 水热资源匹配较差区域分布于南部沙漠。优势区多和同期降水高值区、潜在蒸散低值区和气温低值区重合, 年际水热积指数变化不明显或呈弱下降趋势; 较差区域多为同期潜在蒸散和气温高值区, 降水低值区, 水热积指数降低且年际变幅较大。(2) 中亚水热资源匹配年内存在季节差异, 春秋较好、冬季次之、夏季较差; 在年际尺度上, 1931—1974 年, 水热匹配条件呈现上升趋势; 1974—2000 年左右, 水热匹配条件波动上升; 2000—2019 年, 水热匹配条件下降, 且在 1971—1980 年、1981—1990 年、1990—2000 年发生匹配条件突变。春夏秋冬水热匹配变化趋势同年际趋势大致相同, 冬季波动幅度较小。(3) 在春、夏及年尺度上, 主导敏感性因子为平均气温因子, 在秋冬两季为降水因子; 在高纬、高原高山区, 水热积指数变化敏感性气候因子多为降水因子; 中亚南部水热积指数变化对降水敏感性减弱, 平均气温敏感性增加, 且北部平均气温敏感性系数绝对值略低于南部; 高山高原区域对极端温度变化较为敏感。

**关键词:** 中亚; 干旱半干旱区; 水热匹配; 水热积指数; 敏感性分析

干旱半干旱地区是全球气候变化敏感区域之一<sup>[1,2]</sup>。中亚处于亚欧大陆腹地, 是典型的干旱半干旱区, 也是全球气候及生态变化研究热点区域<sup>[3]</sup>, 其升温变化具有阶段性和季节性, 夏季升温较冬季明显, 地表蒸散增大<sup>[4]</sup>, 极端降水频率增加<sup>[5]</sup>。降水、气温等气候因子的变化改变区域水热特性, 影响区域内部生态结构、环境特征、植被演替、农业规划、土地利用等多个方面。明晰区域水热资源匹配特征及时序变化, 对保障区域农业生产和粮食安全, 分析区域生态脆弱性、规划土地利用等十分重要。在基于降水和气温两大气候指标下的时空统计分析<sup>[6,7]</sup>方面, 气候指向性比较单一, 虽能明确区域水热资源基本时空特征, 但未能综合分析水热整体情况。

水热匹配思想多见于植被区划, 或者以植被为指向因素的干湿区划、气候区划、农业区划中, 但不同领域侧重点不一样。水热匹配泛指水热资源的时空匹配性和匹配程度。时空匹配性指一般研究区域水热因子时空一致性, 衡量指标包括相关系数、变异系数等<sup>[8]</sup>; 匹配程度可基于区域水热因子出发, 计算具体指标如朗格雨量指数、谢良尼诺夫

收稿日期: 2020-11-16; 修订日期: 2021-02-18

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项 (XDA2004030202)

作者简介: 姚林林 (1996-), 女, 重庆人, 硕士, 研究方向为干旱半干旱区水文水资源。

E-mail: yaolinlin19@mails.ucas.ac.cn

通讯作者: 周宏飞 (1965-), 男, 浙江东阳人, 博士, 研究员, 研究方向为干旱区水文水资源、生态水文过程。

E-mail: zhouhf@ms.xjb.ac.cn

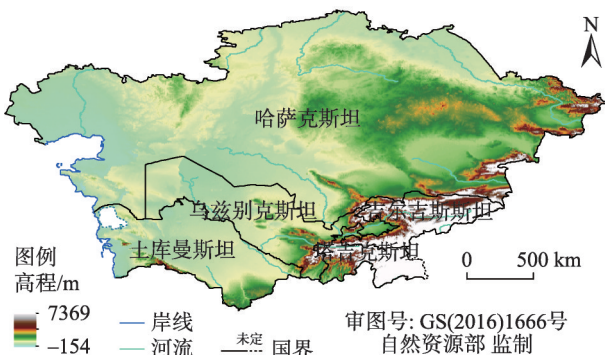
水热系数<sup>[9,10]</sup>判断水热资源优劣,或利用水热因子根据辐射平衡、水热耦合等思想计算潜在蒸散及基于潜在蒸散而衍生的一系列干燥指数、湿润指数和水热系数等指标<sup>[11-14]</sup>来划分干湿区域、研究干湿变化。其研究过程包含水热匹配思想,计算过程包含水热因子,但侧重区域干湿情况,气温因子仅为计算中间要素,未能将气温因子指向的热量资源作为衡量区域气候资源的具体指标。崔启武等<sup>[15]</sup>基于能量平衡思想于1981年提出水热新平衡方程,利用A值分析区域热量资源和降水资源相互盈余程度,干旱区域用于蒸散的热量资源较多而富有盈余,极端湿润区域可用于蒸散的降水资源较多而有盈余,但单A值无法说明盈余资源具体对象,需加入积温和降水进行二次分析。倪健等<sup>[16]</sup>于1997年提出了水热积指数概念,考虑水分收入支出平衡同热量资源的匹配程度,基于中国植被分布进行验证性分析,能综合说明区域水热匹配特性,同时根据地理空间建模的思想,分析了水热积指数同经纬度和海拔相关性,但未探究长时间尺度下水热积指数变化的气候因子敏感性。柴晨好<sup>[17]</sup>将水热积指数运用于中亚农业资源的分析中,将水热匹配作为农业资源指标,证明了水热积指数适用性。Li等<sup>[18]</sup>应用水热积指数分析澜沧江水热平衡同植被生物量相关性,结果显示水热积指数这一综合指标较单一水热因子更能体现区域水热条件优劣。

在干旱半干旱水热矛盾突出区域,综合分析区域水热资源空间分布特征及资源匹配时序特征,可为区域农业规模演变、区域绿洲变化、植被分布提供气候数据。因此本文从水热耦合的思想出发,利用1931—2019年CRU再分析资料,选取水热积指数作为水热匹配指标,结合降水、气温、潜在蒸散等气候因子,利用多种时序分析方法,从多时间尺度完成中亚干旱半干旱区水热匹配条件和时空特征分析,并结合敏感性系数分析气候变化背景下水热匹配条件气候敏感因子,为中亚水热资源利用规划提供基础依据。

## 1 研究方法与数据来源

### 1.1 研究区概况

中亚地理坐标大致为 $46.45^{\circ}\sim 87.35^{\circ}\text{E}$ 、 $35.15^{\circ}\sim 55.45^{\circ}\text{N}$ ,受北纬西风带,亚洲高压和印度季风交替控制,大陆性特征较强,气温日较差和年较差大,降水季节分布不均,多年平均降水为249.26 mm,蒸散能力较大。地表覆被以荒漠半荒漠草原、稀疏植被、森林、绿洲、沙漠为主。地形海拔自东南向西北递减可分为:北部哈萨克斯坦大平原和低山丘陵在内的低山平原区,东南部的西天山、阿尔泰山、帕米尔高原在内高山高原区,西部包含里海沿岸在内的低地平原区,以及中南部的图兰低地和沙漠区(图1)。包括哈萨克斯坦、吉尔吉斯斯坦、塔吉克斯坦、乌兹别克斯坦、土库曼斯坦五国,总面积约为397万 $\text{km}^2$ 。



注:本图基于自然资源部标准地图服务系统下载的标准地图制作,底图无修改,下同。

图1 研究区示意图

Fig. 1 Location of Central Asia (CA)

## 1.2 数据来源

选择CRU TS4.04, 作为分析百年尺度中亚水热资源匹配时空变化基础数据。该数据集被广泛用于区域气候分析<sup>[3]</sup>, 时间范围1931—2019年, 所选取水热相关因子包括降水、平均气温、潜在蒸散、最高气温、最低气温月尺度数据。

## 1.3 研究方法

### 1.3.1 水热积指数

倪健等<sup>[16]</sup>在对全球及我国植被群落分析中发现, 植被生活型及群落特征同区域气候要素高度相关, 其中关键气候要素包括: 热量、水分及湿度, 并基于植被—气候生命图示及水热平衡关系探讨, 拟开发一个综合区域气候指标, 用以表征区域水热平衡状态: 温度作为热量指标, 指示区域冷热特性; 基于土壤水分收支平衡, 用降水代表大气候制度下区域土壤水分汇项, 潜在蒸散代表区域蒸散能力, 表征水分支出。

因此水热积指数被定义为:

$$k = T \times SD / 100 \quad (1)$$

式中:  $k$  为水热积指数 ( $^{\circ}\text{C} \cdot \text{mm}$ );  $T$  表示某时间尺度下的平均气温 ( $^{\circ}\text{C}$ );  $SD$  为某时间尺度下的降水与同期潜在蒸散差值, 表征水分盈亏。  $k > 0$ , 为水热积指数正值区, 此时水热同号, 区域水热匹配较好, 其值越大, 水热匹配越好;  $k < 0$ , 为水热积指数负值区, 水热因子异号, 水热匹配失衡可出现该区域较少降水, 较强蒸散状态或区域热量不足, 偏于寒冷, 导致水热资源匹配较差, 其绝对值越大水热匹配失衡越严重。水热积指数在农业部门规划和植被分类<sup>[17,18]</sup>中得到较好应用。

本文在原研究基础上, 提出了季节尺度水热积指数。季节水热分析由区域特性决定, 中亚降水和气温变化具有季节差异。年水热积指数可评价气候尺度下区域水热资源匹配程度好坏, 但涉及到农业利用、植被生长及季节干旱需考虑季节水热匹配条件。因此, 本文水热匹配指标为季节水热积指数、年水热积指数。水热积指数正值区, 表征该区域水热匹配条件相对较好; 负值及极小值区, 表征该区域水热匹配条件较差。

### 1.3.2 敏感性系数

敏感性系数<sup>[19]</sup>基于偏导思想, 求取具体时间尺度下水热积指数相对变化量同单个水热气候因子变化量的无量纲比值。

$$S_i = \lim_{\Delta \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta k}{\Delta v_i} \right) \times \left( \frac{v_i}{k} \right) \quad (2)$$

式中:  $S_i$  代表某因子敏感性系数;  $v_i$  为水热因子;  $\Delta v_i$  和  $\Delta k$  分别代表水热因子变化量和水热积指数变化量。  $S_i$  绝对值越大, 因子敏感性越大, 正号表示敏感性的正负相关关系。

### 1.3.3 时序分析方法

时序分析方法: 距平和累积距平, 气候倾向率<sup>[6]</sup>, *Sen*斜率<sup>[3]</sup>, *Pettit*突变检验<sup>[20]</sup>。距平和累积距平用以描述指标变化趋势, 分析空间平均状态下水热因子的年代变化趋势; 气候倾向率是基于气候因子和年际时间建立一元回归分析, 包括各水热因子气候倾向率及水热积指数气候倾向率分析; *Sen*斜率用以描述空间水热匹配的变化规律,  $b > 0$ , 表示趋势上升,  $b < 0$ , 表示趋势下降,  $b = 0$ , 表示无趋势变化; *Pettit*检验为时序突变检验, 该方法不需要原样本正态分布, 可用以检验时序样本数据突变位置。其中气候倾向率, *Sen*斜率, *Pettit*检验均为基于空间栅格的时序分析, 显著性  $\alpha = 0.05$ 。

## 2 结果分析

### 2.1 季节水热匹配时空特征

#### 2.1.1 季节水热匹配空间分布

多年平均季节水热积指数空间分布(图2)明晰水热匹配条件空间特征及季节差异。

春季(3-5月)水热积指数正值区分布在塔吉克斯坦、吉尔吉斯斯坦、哈萨克斯坦北部大草原,区域降水以天山山脉为中心,由东南向西北带状递减,年平均降水在138.61 mm以上。同时正值区热量资源相对不足,年气温在 $-11.79\sim 6.71\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间。区域潜在蒸散较低,低于多年中亚春季平均潜在蒸散,最低值约为155.67 mm位于北部山地;负值区水热积指数约为 $-21.16\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{mm}$ ,分布于中亚南部,是同期降水低值区,平均降水为76.24 mm,为热量和潜在蒸散高值区,多年平均气温为 $8.34\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,潜在蒸散最高可达422.49 mm。

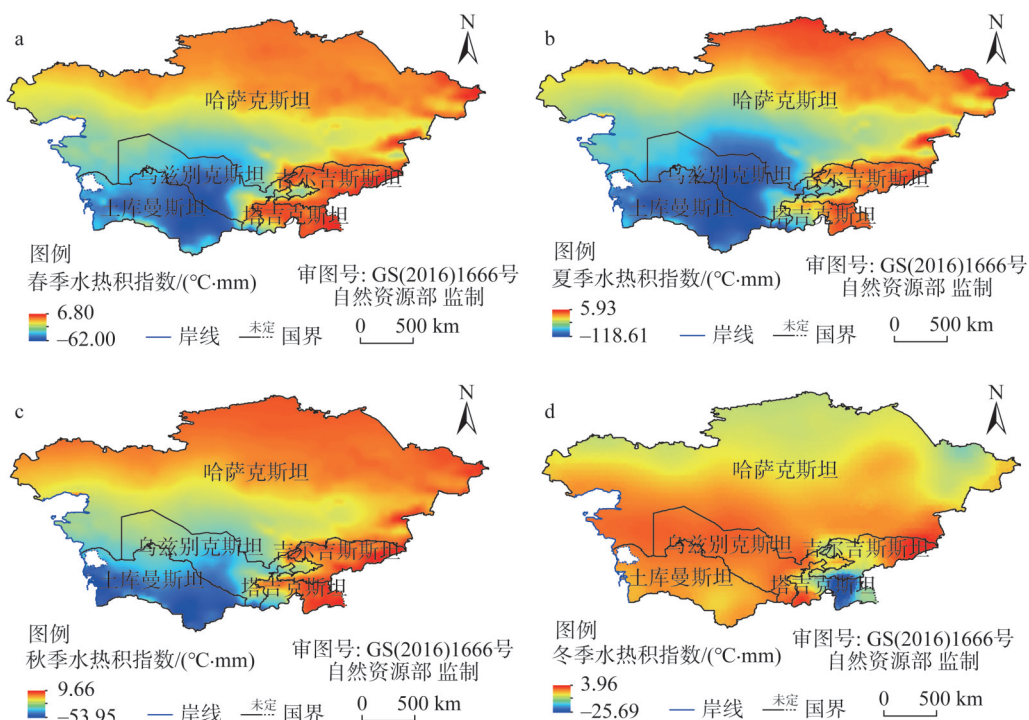


图2 1931—2019年季节水热积指数分布

Fig. 2 Distribution of seasonal water-thermal product index over Central Asia in 1931-2019

夏季(6-8月)水热积指数最高值为 $0.38\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{mm}$ ,以塔吉克斯坦、吉尔吉斯斯坦、哈萨克斯坦北部低山丘陵区 and 阿尔泰山脉为中心,向西南呈带状递减,最低值位于乌兹别克斯坦中部沙漠区,为 $-215.29\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{mm}$ 。水热积指数正值区为同期降水高值区,季节降水在100 mm以上,同时为潜在蒸散和气温低值区;负值区为同季降水低值区,区域季节降水不足20 mm,为潜在蒸散和气温高值区,区域季节潜在蒸散为556.70 mm,月平均气温在 $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。

秋季(9-11月)水热积指数正值区分布在天山—帕米尔高原,北部低山丘陵区及西



北部平原区, 平均水热积指数为  $2.07\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{mm}$ , 气温在  $2.35\text{ }^{\circ}\text{C}$  以下, 最低气温可达  $-11\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 潜在蒸散不足  $200\text{ mm}$ , 局部最低值为  $126.98\text{ mm}$ , 区域降水约为  $76.13\text{ mm}$ , 局部最高值为  $157.45\text{ mm}$ ; 负值区以卡拉库姆沙漠为中心, 平均水热积指数为  $-15.1288\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{mm}$ , 潜在蒸散为  $325\text{ mm}$ , 平均气温在  $8.00\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右, 降水在  $14.56\sim 157.46\text{ mm}$  之间。

冬季(12至次年2月)水热积指数空间方差低, 整体水热匹配条件差异较小。负值区仅分布在帕米尔高原及阿尔泰山脉附近, 为气温低值区, 冬季平均气温  $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 区域降水较多, 降水以帕米尔为高值中心自东南向西北递减, 中心降水为  $235.22\text{ mm}$ , 区域潜在蒸散分布在  $3.43\sim 134.29\text{ mm}$  之间, 非潜在蒸散高低值中心。冬季水热积指数在  $-4.86\sim 3.58\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{mm}$  之间区域较广。

### 2.1.2 季节水热匹配时序分析

以季节水热积指数为基础数据, 利用距平和累积距平方法分析季节水热匹配变化趋势, 同时结合气候倾向率定量分析季节水热匹配条件变化的空间差异。

#### (1) 距平与累积距平分析

由图3可发现: 冬季水热积指数无明显变化趋势, 水热匹配条件年际变幅较小; 春夏秋三季均1931—1979年季节水热积指数呈上升趋势, 区域整体水热匹配条件走势较好。春秋两季在1971—2000年波动上升, 达到峰值后下降, 且下降梯度较大; 夏季在1971—2000年间波动下降, 水热匹配条件随时间波动幅度最大。

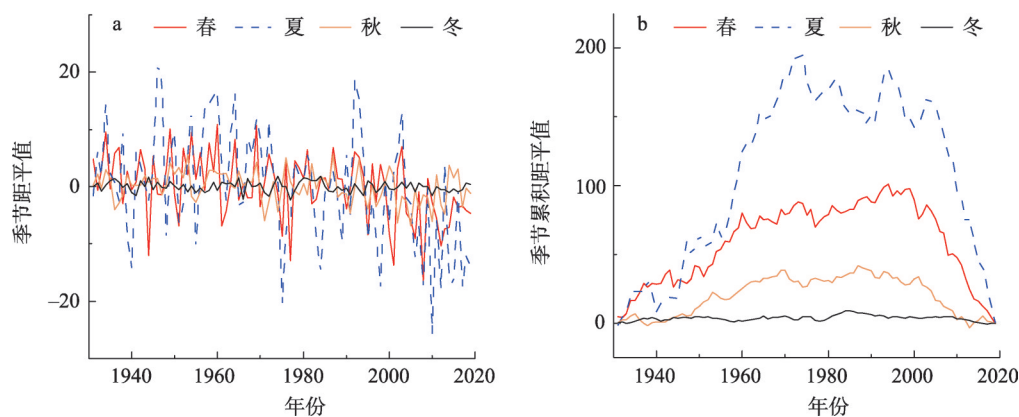


图3 1931—2019年季节水热积指数距平及累积距平

Fig. 3 Anomalies and accumulated anomalies of seasonal water-thermal product index over Central Asia in 1931-2019

#### (2) 季节气候倾向率分析

水热积指数倾向率(图4)为正值表示随时间变化, 水热匹配条件呈上升趋势; 负值表示随时间变化, 水热条件呈下降趋势; 水热积指数为0, 代表趋势变化未通过显著性检验。95.14%的中亚区域, 春季水热积指数倾向率变化通过显著性检验, 变化在  $-0.96\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{mm}/10\text{ a}$  左右, 最小值为  $-2.01\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{mm}/10\text{ a}$ , 位于中亚南部沙漠区, 该地区春季水热匹配条件下降趋势最为显著。春季未通过显著性检验区域面积约占区域面积的4.86%, 分布于天山及山前灌溉区, 水热积指数气候倾向率在  $-1.04\sim 0.18\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{mm}/10\text{ a}$  之间, 均值为  $-0.32\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{mm}/10\text{ a}$ ; 夏季变化显著性区域约占中亚面积的74.43%, 其中水热积指数下降区面积占比94.49%, 下降均值  $-2.07\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{mm}/10\text{ a}$ 。南部沙漠区夏季水热匹配

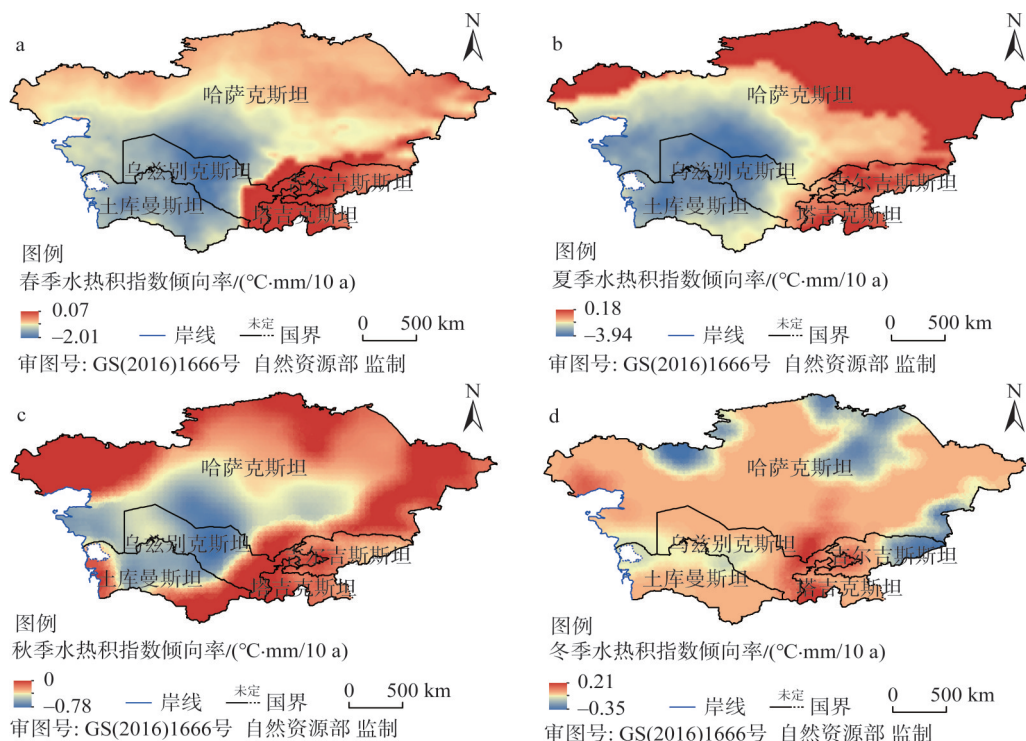


图4 1931—2019年中亚季节水热积指数气候倾向率空间分布

Fig. 4 Distribution of seasonal water-thermal product index of climate inclination rate over Central Asia in 1931-2019

条件随时间变化持续下降。中亚北部及东部,包括哈萨克斯坦北部草原、天山山脉—帕米尔高原区水热匹配条件有变好趋势,但通过显著性检验区域较少,区域水热积指数变化均值为 $-0.53\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{mm}/10\text{ a}$ 。与春季相比,夏季倾向率负值区界限向北移动,且下降绝对值增大;秋季水热积指数均呈现下降趋势,通过显著性检验面积约为81.09%,分布在南部沙漠,北部草原和中亚东部山区,区域下降均值为 $-0.30\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{mm}/10\text{ a}$ ,空间标准差为0.19。对比夏季水热积指数变化,秋季水热积指数虽全区下降,但下降趋势较小,且随时间变化差异也较小;冬季水热积指数变化通过显著性检验占比最小,仅为27.98%,上升区分布在天山山脉,下降区零星分布与中亚北部及东部部分地区。对比其余季节,冬季水热匹配条件随时间变化最小,与距平、累积距平方法分析一致。

## 2.2 年尺度水热匹配时空特征

### 2.2.1 年尺度水热匹配空间分布

中亚年水热积空间分布图(图5),用以明确气候制度下水热资源匹配条件空间特征:水热积正值区,主要分布在吉尔吉斯斯坦和塔吉克斯坦山地,及阿尔泰山脉附近。区域水热积指数为 $10.82\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{mm}$ ,平均海拔在1000 m以上,年降水为417.69 mm,潜在蒸散为660.42~1547.40 mm,年平均气温为 $-2.96\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,热量条件相对不足。区域局部地方水热均值高出区域水热匹配均值近 $113.89\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{mm}$ ,整体水热匹配良好,是中亚水热匹配相对优势区;哈萨克斯坦北部大部分丘陵低山区域、天山—帕米尔高原山前耕作区,水热积指数在 $-48.47\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{mm}$ 之间,高于区域平均水热积指数,水热匹配较好,地表覆盖以草原、稀疏灌木、农田为主。该区域年平均气温为 $3.58\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,降水在168.88~

308.65 mm 之间, 年潜在蒸散约为  $884.22\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{mm}$ ; 中亚南部水热匹配条件较差, 该区域水热积指数均在  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{mm}$  以下, 但区域热量条件较好, 年积温约为  $5412.00\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 降水不足且蒸散能力较大, 地表覆盖以沙漠、荒漠、裸地为主, 耕种制度以灌溉为主, 主要分布在锡尔河和阿姆河沿岸。

### 2.2.2 年尺度水热匹配时序分析

年尺度水热匹配时序分析包括三个层次: 基于距平和累积距平方法分析年平均水热积指数年际变化趋势, 利用空间气候倾向率同 *Sen* 斜率分析水热积指数变化程度, 结合 *Pettitt* 突变检验计算水热积指数突变年份及突变面积占比。

#### (1) 距平与累积距平分析

中亚水热积指数多年平均值为  $-75.91\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{mm}$ , 距平波动范围在  $[-20, 25]$  之间。1931—1970年, 距平值大多在 0 以上, 累积距平曲线呈上升趋势; 1970—1995年, 水热积指数年际变化较大, 累积距平曲线波动上升, 区域水热匹配条件呈上升趋势; 在 1995年, 达到多年水热积指数峰值; 自 1996年起, 距平数值多在 0 以下, 水热积指数持续下降, 累积距平曲线下降幅度较大, 区域水热匹配程度变差 (图6)。

#### (2) 年气候倾向率分析

年水热积指数气候倾向率 (图7): 大部分区域为水热积指数下降区, 水热匹配条件随时间而呈现总体下降趋势。下降区占全区总面积的 99.16%, 下降均值为  $2.60\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{mm}/10\text{ a}$ , 空间标准差为 1.34, 下降极值可达  $-5.85\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{mm}/10\text{ a}$ , 位于中亚南部沙漠。下降区内 60.82% 面积年降水呈上升趋势, 平均上升程度为  $1.84\text{ mm}/10\text{ a}$ , 位于哈萨克斯坦北部、天山—帕米尔高原、里海沿岸低地一带。水热积下降区年平均气温呈现上升趋势, 上升程度为  $0.63\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ , 年潜在蒸散上升程度约为  $0.25\text{ mm}/10\text{ a}$ ; 中亚水热积上升区且通过显著性检验区域仅占全区面积的 0.53%, 分布在天山山前, 上升程度为  $0.02\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{mm}/10\text{ a}$ , 区域降水变化较明显, 约  $5.16\text{ mm}/10\text{ a}$ , 年增温约为  $0.54\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ , 年潜在蒸散涨幅为  $0.18\text{ mm}/10\text{ a}$ 。气候倾向率分布同 *Sen* 斜率分布较一致。

#### (3) *Pettitt* 突变分析

基于 *Pettitt* 突变分析 (图8), 区域通过突变显著性检验的栅格数占 92%。中亚水热匹

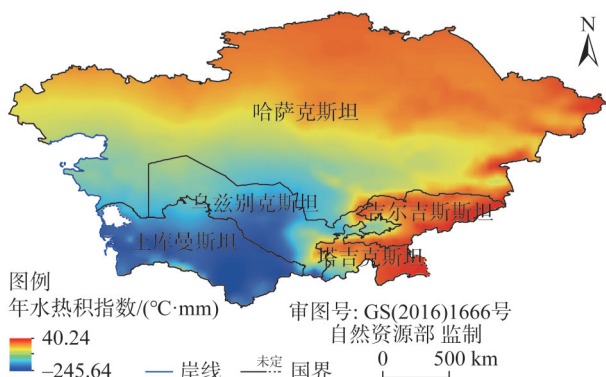


图5 1931—2019年年水热积指数分布

Fig. 5 Distribution of annual water-thermal index over Central Asia in 1931-2019

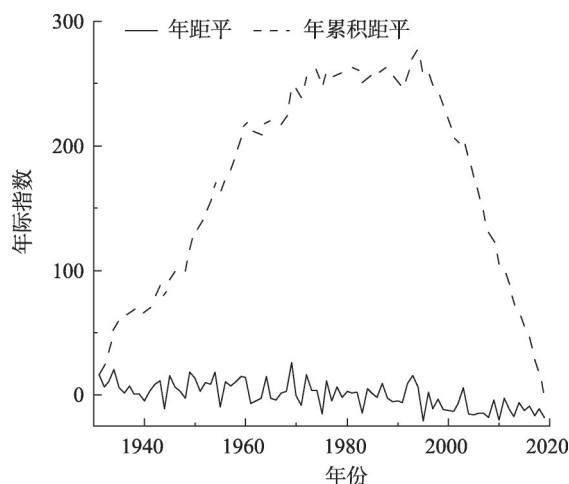


图6 1931—2019年年水热积指数距平及累积距平

Fig. 6 Anomalies and accumulated anomalies of annual water-thermal product index over Central Asia in 1931-2019

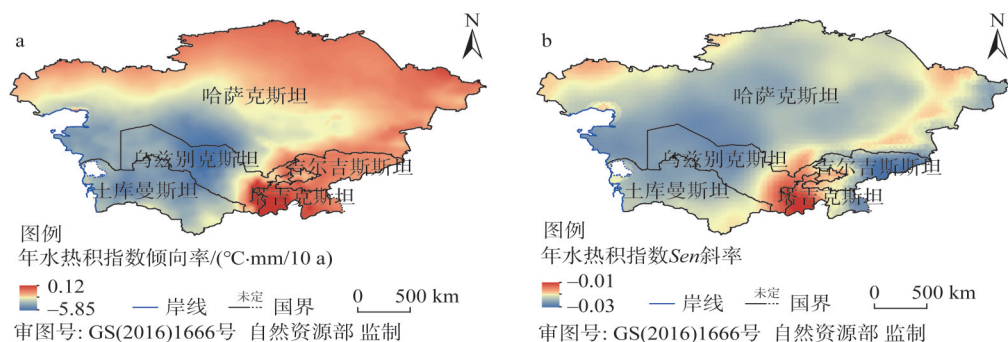


图7 1931—2019年中亚年水热积指数气候倾向率及Sen斜率分布

Fig. 7 Distribution of annual water-thermal product index of climate inclination rate and Sen slope over Central Asia in 1931-2019

配条件的突变主要发生在1971—1980年、1981—1990年、1990—2000年。1935年、1950年、1956年有局部区域水热匹配发生突变，但均未通过突变显著性检验；1961—1970年开始发生水热匹配条件突变，面积约占全区的1.28%，分布零散，不代表整体水热突变特性；1971—1980年，突变面积扩大，约占全区36.87%，集中分布在西西伯利亚平原、哈萨克斯坦丘陵大部分地区、阿尔泰山区、天山山区等，主要突变年份为1972年(17.04%)、1976年(9.22%)，1974年(3.65%)；1981—1990年间，水热匹配条件突变面积约占全区面积的15.29%，突变发生在图尔盖高原北部、图尔盖洼地、及哈萨克斯坦西北丘陵，主要突变年份发生为1987年(8.28%)，1982年(4.26%)；1991—2000年，突变面积占全区的46.56%，分布在里海沿岸低地、于斯蒂尔盖高原、图兰平原等中亚西部及南部地区，主要突变年份为1994年(45.51%)。

结合Sen斜率，中亚水热匹配条件突变可以分为上升突变和下降突变。上升突变区域面积较小，突变年份多发生在1981—1990年、1991—2000年间；区域多数水热匹配突变为下降突变，突变年份为1991—2000年和1971—1980年。

### 2.3 水热匹配条件气候因子敏感性分析

中亚水热匹配条件气候因子敏感性分析包括多时间尺度水热匹配条件气候敏感因子分析、气候因子敏感系数空间分布。由于潜在蒸散因子基于Penman公式计算而得<sup>[21]</sup>，因此，水热积指数实质上是一个关于多气象要素的综合函数。在对水热积指数变化敏感性分析中，拟将最高气温及最低气温气象因子，纳入水热积指数变化敏感性分析，取代潜在蒸散因子。

以年为时间变化单位计算多时间尺度水热积指数气象因子敏感系数(表1)。降水敏感性在春、夏、秋季及年尺度上，均为负影响，意味降水增加，水热积指数呈下降趋

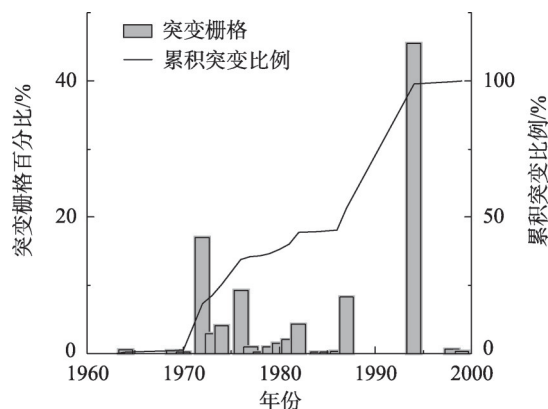


图8 1931—2019年水热积突变栅格占比及累积百分比

Fig. 8 Percentages and accumulated percent mutation grids of water-thermal product index over Central Asia in 1931-2019



表1 气候因子敏感性系数  
Table 1 Climate sensitivity coefficient

时间尺度	降水敏感性系数		平均气温敏感性系数		最低气温敏感性系数		最高气温敏感性系数	
	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差
春 (3-5月)	-0.96	1.35	2.03	1.43	0.22	0.37	-0.53	0.49
夏 (6-8月)	-0.38	0.24	3.16	2.08	0.34	1.37	-0.57	2.68
秋 (9-11月)	-1.00	1.24	1.72	1.88	-0.09	2.56	0.84	3.00
冬 (12至次年2月)	0.75	1.13	0.73	2.73	0.37	1.42	0.26	2.98
年	-1.10	1.34	1.20	1.72	0.97	0.36	-0.92	0.57

势，但在冬季水热积指数变化同降水变化具有一致性，且冬季降水主要敏感因子，敏感性系数为0.75；各时间尺度下平均气温敏感性系数均为正值，平均气温升高，区域水热积指数上升。但平均气温敏感性具有时间差异，如夏季水热积指数对平均气温因子最为敏感，敏感性系数为3.16，冬季水热积指数对平均气温气候因子敏感性降低；最低气温敏感性系数在春、夏、冬季节及年尺度上，均为正值，最低气温上升，水热积指数呈上升趋势，秋季敏感性系数为负值，标准差较大，敏感性空间差异较大。在各个时间尺度下，区域最低气温均不是水热积指数变化的主导敏感性因子；区域最高气温敏感性系数在春、夏季及年尺度上为负值，区域最高气温上升，水热积指数呈下降趋势。秋冬两季，最高气温上升，水热积指数呈上升趋势。区域最高气温因子在各时间尺度上均不为主导敏感性因子。由此可以得出，各时间尺度下，区域水热积指数变化的主导敏感性因子不同，在春、夏及年尺度上，为平均气温因子；在秋冬两季，主导敏感性因子为降水。

基于气候因子敏感性系数空间分布（图9）：降水敏感性系数绝对值随纬度增加、高度上升有增加趋势，较大值多分布在中亚高纬和高海拔地区，如中亚北部及东部山区。近94%中亚区域为降水负敏感区，降水增加，水热积指数降低，水热匹配条件变差，平均负敏感系数为-1.54。敏感性系数为正值区域分布较为零星，但有趋低纬分布的趋势；气温敏感性系数平均负敏感性系数为-0.56，分布于天山山脉附近，中亚近97%区域为气温敏感正值区。气温敏感性随经纬度变化未呈现较明显的趋势，但中亚北部气温敏感性系数绝对值略低于南部；最低气温及最高气温敏感性系数空间分布较降水和平均气温更为均匀，区域水热匹配对极端温度敏感性空间异质性较小，其中高山地区对极端温度变化较为敏感，区域敏感性负值区主要分布于高纬地区，且面积较小。

对各气候因子敏感性系数叠加分析（图10），中亚水热积指数变化主要敏感性气候因子为区域平均气温，占比45.76%，平均敏感性系数绝对值为1.61，分布于低纬区域；其次为区域降水，占比31.89%，平均敏感性系数绝对值为2.25，分布于高纬及高山高原地带；最低气温为主要敏感性因子的区域占比17.65%，平均敏感性系数绝对值为1.03，集中在图兰平原一带；最高气温为主要敏感性因子的区域最少，分布较为零散，无明显的趋向性。区域水热积指数变化是基于不同因子影响下的综合变化，且变化归因分析较为复杂，区域水热匹配条件变化复杂。

3 结论与讨论

3.1 结论

本文从水热耦合思想出发，基于原水热积指数研究，提出了季节水热积指数，分析

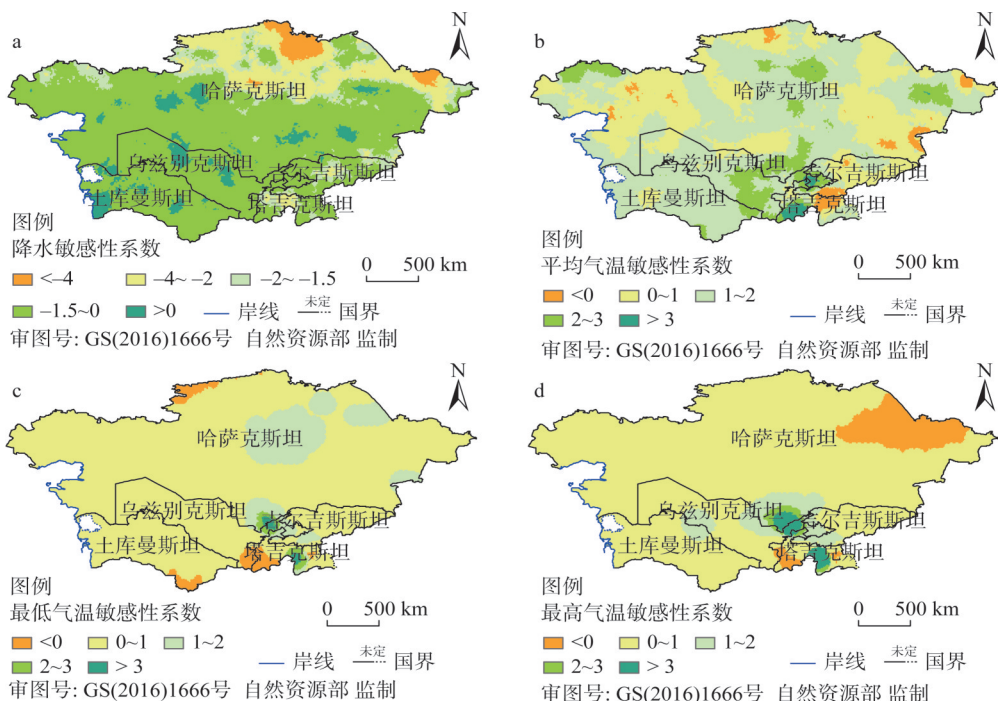


图9 中亚气候因子敏感性系数空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of climate sensitivity coefficient over Central Asia

水热资源的季节错位, 且结合多种时序方法, 分析中亚干旱半干旱区水热匹配条件空间分布, 明确水热匹配条件区域差异及时序变化, 结合敏感性系数, 进一步归因分析中亚水热匹配条件气候因子敏感性:

(1) 空间上存在水热匹配条件相对优劣。水热匹配条件优势区域多分布于中亚高纬及高山、高原地带, 如哈萨克斯坦北部低山丘陵, 天山—帕尔米高原及山前耕作区; 区域水热匹配较差区域多分布于中亚南部沙漠, 区域年际变幅较大。由于水热匹配条件受到多因子综合作用, 且各气候因子间存在相互作用, 水热匹配优势区多和同期降水高值区、潜在蒸散低值区和气温低值区重合, 水热匹配较差区域多为同期潜在蒸散和气温高值区, 降水低值区, 但冬季水热匹配条件优势区为同期气温低值区, 降水高值区。

(2) 时间尺度上中亚水热资源匹配存在差异, 春秋中亚水热匹配条件较好, 冬季次之, 夏季较差。其主要原因为: 中亚夏季热量资源丰富, 蒸散旺盛, 且降水不足导致夏季水热积指数较低, 区域水热匹配条件较差; 冬季部分区域降水较多, 但气温极低, 导致水热匹配条件不好; 春季和秋季降水较多, 季节蒸散能力、热量资源均不属于季节极

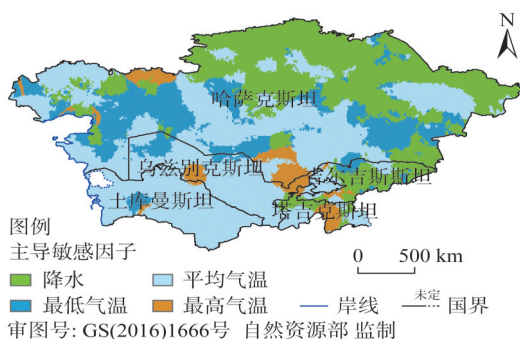


图10 主导敏感性因子空间分布

Fig. 10 Spatial distribution of dominant sensitive factor over Central Asia

值,因而区域水热积指数较高,水热匹配条件较好。季节水热匹配条件年际变化也存在差异。气温越低的区域其水热匹配年际变化趋势越不明显,如冬季水热匹配趋势波动幅度较小;气温越高,区域其水热匹配变化越明显,如夏、春季水热匹配随时间呈较明显的阶段变化。在年际尺度上,中亚水热匹配优势年份为1970—1995年,水热匹配条件最好;1996年起,水热积指数持续下降,且水热条件突变主要发生在1971—1980年,1990—2000年。

(3) 区域总体水热积指数呈现下降趋势,下降极值区分布于南部沙漠。春夏秋冬水热积指数变化同年尺度变化具有一致性,冬季变化幅度较小。在高纬、高原高山区,水热积指数变化敏感性气候因子多为降水因子;在中亚南部,水热积指数变化对降水敏感性减弱,平均气温敏感性增加,且中亚北部平均气温敏感性系数绝对值略低于南部;高山高原区域对极端温度变化较为敏感。各季节水热积指数变化敏感性因子也存在差异,在春、夏及年尺度上,为平均气温;在秋冬两季,主导敏感性因子为降水。

### 3.2 讨论

对近百年尺度下中亚水热积指数分析,其目的是分析资源水热资源匹配关系及变化特性,具有较强的实际意义。中亚水热资源匹配呈东北—西南的递减趋势,自然景观依次为温带森林、草原、荒漠、沙漠,水热资源匹配优势区和水热资源匹配失衡区景观发育差异较大;在农业利用上哈萨克斯坦北部水热资源匹配较好,农业耕作形式为雨养农业,多种植小麦、大麦等为主的谷类作物,而在哈萨克斯坦南部,水热积指数较低,水热资源匹配较差,区域热量资源改善,但干旱程度加大,多种植灌溉小麦;在分析水热资源匹配的季节差异中可以发现,春季哈萨克斯坦北部水热匹配较好,因此在农业种植时间上,哈萨克斯坦北部多种植春小麦;在水热匹配较好的中亚高山区,由于地形、坡度对农业的限制性,塔吉克斯坦和吉尔吉斯斯坦农业多分布于山前灌溉平原,但区域植被覆盖率较高,而在水热资源匹配失衡的中亚南部,乌兹别克斯坦和土库曼斯坦农业以灌溉农业为主。

在全球气候变化背景下,中亚水热匹配条件变化体现区域性。如中亚南部热量资源丰富,水资源较少,农业制度以灌溉为主,水热匹配条件持续下降,区域干旱面积可能进一步扩大且程度加深,单位面积农业需水增大,在耕地面积不变情况下,加大了对锡尔河、阿姆河灌溉用水需求;水热积指数是植被生命图式,主要探究区域自然情况下水热匹配好坏,但在具体水热利用上,水热积指数体现出局限性。如哈萨克斯坦丘陵及北部大草原近90年水热积指数下降,水热匹配条件下降,但区域温度上升,中纬农作物适宜区有向北移动和扩大趋势。因而在农业水热资源利用上,基于水热积指数的区域水热匹配条件分析不能成为农业水热资源优劣变化的唯一指标,而应额外考虑区域原水热组合关系、限制及人为影响。

水热积指数时空差异体现出中亚水热资源时空错位关系,同时存在相对水热资源匹配优势区和优势时间段。水热资源匹配条件受水热因子相互制约,区域水热资源禀赋具有时空差异,因而在不同时间尺度,不同空间位置下水热资源匹配条件变化趋势及程度各有不同,导致归因分析更为复杂,且针对未来多情景下气候变化,中亚水热匹配条件变化趋势尚不明确,需要进一步分析与探究。

### 参考文献(References):

- [1] TEIXEIRA E I, FISCHER G, VAN VELTHUIZEN H, et al. Global hot-spots of heat stress on agricultural crops due to

- climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 170: 206-215.
- [2] 陈亚宁. 气候变化对西北干旱区水循环影响机理与水资源安全研究. *中国基础科学*, 2015, 17(2): 15-21. [CHEN Y N. Impacts of climate change on the water cycle mechanism and water resources security in the arid region of Northwest China. *China Basic Science*, 2015, 17(2): 15-21.]
- [3] GUO H, ANMING B, FELIX N, et al. Space-time characterization of drought events and their impacts on vegetation in Central Asia. *Journal of Hydrology*, 2018, 564: 1165-1178.
- [4] 阮宏威, 于静洁. 1992—2015年中亚五国土地覆盖与蒸散发变化. *地理学报*, 2019, 74(7): 1292-1304. [RUAN H W, YU J J. Changes in land cover and evapotranspiration in the five Central Asian countries from 1992 to 2015. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(7): 1292-1304.]
- [5] ZHANG M, CHEN Y N, SHEN Y J, et al. Changes of precipitation extremes in arid Central Asia. *Quaternary International*, 2017, 436: 16-27.
- [6] 陈洁, 刘玉洁, 潘韬, 等. 1961—2010年中国降水时空变化特征及对地表干湿状况影响. *自然资源学报*, 2019, 34(11): 2440-2453. [CHEN J, LIU Y J, PAN T, et al. Spatiotemporal variation of precipitation in China and its impact on surface dry-wet conditions during 1961-2010. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(11): 2440-2453.]
- [7] 李林, 李晓东, 校瑞香, 等. 青藏高原东北部气候变化的异质性及其成因. *自然资源学报*, 2019, 34(7): 1496-1505. [LI L, LI X D, XIAO R X, et al. The heterogeneity of climate change and its genesis in the Northeastern Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(7): 1496-1505.]
- [8] 潘旭东, 王江丽, 吴玲, 等. 亚洲中部干旱区绿洲水热匹配与生物、农业技术适应性分析. *干旱区研究*, 2019, 36(1): 52-57. [PAN X D, WANG J L, WU L, et al. Adaptability of biology and agricultural technologies to the water-heat coordination in the arid oases in Central Asia. *Arid Zone Research*, 2019, 36(1): 52-57.]
- [9] 孟猛, 倪健, 张治国. 地理生态学的干燥度指数及其应用评述. *植物生态学报*, 2004, 28(6): 853-861. [MENG M, NI J, ZHANG Z G. Aridity index and its applications in geo-ecological study. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2004, 28(6): 853-861.]
- [10] 毛飞, 孙涵, 杨红龙. 干湿气候区划研究进展. *地理科学进展*, 2011, 30(1): 17-26. [MAO F, SUN H, YANG H L. Research progress in dry/wet climate zoning. *Progress in Geography*, 2011, 30(1): 17-26.]
- [11] HOLDRIDGE L R. Determination of world plant formations from simple climatic data. *Science*, 1947, 105(2727): 367-368.
- [12] BUDYKO M H. *Climate and Life*. New York: Academic Press, 1974.
- [13] KIMURA R, LIU Y, TAKAYAMA N, et al. Matsuoka. Heat and water balances of the bare soil surface and the potential distribution of vegetation in the Loess Plateau, China. *Journal of Arid Environments*, 2005, 63(2): 439-457.
- [14] LIU M X, XU X N, ALEXANDER Y. New drought index indicates that land surface changes might have enhanced drying tendencies over the Loess Plateau. *Ecological Indicators*, 2018, 89: 716-724.
- [15] 崔启武, 孙延俊. 论水热平衡联系方程. *地理学报*, 1979, 34(2): 169-178. [CUI Q W, SUN Y J. On the correlative equation of the heat and water balance. *Acta Geographica Sinica*, 1979, 34(2): 169-178.]
- [16] 倪健, 张新时. 水热积指数的估算及其在中国植被与气候关系研究中的应用. *植物学报*, 1997, 39(12): 1147-1159. [NI J, ZHANG X S. Estimation of water and thermal product index and its application to the study of vegetation-climate interaction in China. *Acta Botanica Sinica*, 1997, 39(12): 1147-1159.]
- [17] 柴晨好. 中亚地区农业水土资源匹配及其利用分区研究. 北京: 中国科学院大学, 2019. [CHAI C H. Research on matching characteristics and utilization zoning of agricultural water and land resources in Central Asia. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019.]
- [18] LI W, LI C G, LIU X F, et al. Analysis of spatial-temporal variation in NPP based on hydrothermal conditions in the Lancang-Mekong River Basin from 2000 to 2014. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2018, 190(6): 321-336.
- [19] BEVEN K A. Sensitivity analysis of the Penman-Monteith actual evapotranspiration estimates. *Journal of Hydrology*, 1979, 44(3): 169-190.
- [20] RAO A R, BHATTACHARYA D. Hypothesis testing for long-term memory in hydrologic series. *Journal of Hydrology*, 1999, 216(3): 183-196.
- [21] HARRIS L, OSBORN T J, JONES P, et al. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. *Scientific Data*, 2020, 109: 7-25.



## The matching characteristics and sensitivity analysis based on the water-thermal product index for the water and thermal resources in Central Asia

YAO Lin-lin<sup>1,2,3</sup>, ZHOU Hong-fei<sup>1,2</sup>, YAN Ying-jie<sup>1,2,3</sup>

(1. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China; 2. Fukang Station of Desert of Ecology, CAS, Fukang 831505, Xinjiang, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Based on the water-thermal product index and the reanalysis data for the period 1931-2019 obtained from Climatic Research Unit (CRU), we examined the matching spatial characteristics and temporal variation trends of the water and thermal resources in Central Asia on a time scale by using the method of multi-time series analysis, and explored the sensitive climatic factors of water-thermal matching combined with the sensitivity coefficient. The results show that: (1) the water and thermal matching conditions in Central Asia are relative merits in space, and the dominant regions are mostly distributed at high latitudes and on alpine plateaus, while the regions with poor water-thermal matching resources are distributed in the southern deserts. Most of advantageous areas coincide with the high-value area of precipitation, low-value area of potential evapotranspiration and low-value area of air temperature in the same period, and the annual change of water-thermal product index is not obvious or shows an increasing trend. The disadvantageous areas are mostly the high-value area of potential evapotranspiration and the high-value area of air temperature in the same period, while the low-value area of precipitation has a decrease of water-thermal product index and a large inter-annual variation. (2) There were seasonal differences in the matching of water-thermal resources in Central Asia, characterized by best spring and autumn, better winter, and worst summer. On the annual scale, 1931-1974, the matching conditions of water and heat presented an upward trend; 1974-2000, the water and thermal matching conditions fluctuated; 2000-2019, the water and thermal matching condition decreased, and the water-thermal matching condition mutation was observed in periods of 1971-1980, 1981-1990, and 1990-2000. The variation trend of water-thermal matching in spring, summer and autumn was roughly consistent with the inter-annual trend, while the fluctuation range in winter was relatively small. (3) The sensitivity analysis showed that mean temperature was sensitive to the water-thermal matching conditions in spring, summer and annual scale, and precipitation in winter and autumn. In the high-latitude mountains of the study area, precipitation was dominant in the sensitive climate factors. In the southern part of Central Asia, the sensitivity of precipitation factors decreases while that of mean temperature factors increases. The absolute value of mean temperature sensitivity in the northern part of the region will be lower than that in the southern part; the high-latitude mountains were sensitive to the extreme temperature variation.

**Keywords:** Central Asia; arid and semi-arid regions; water-thermal matching; water-thermal product index; sensitivity analysis