

近60年中国干湿气候变化特征及其未来趋势预估

张存杰¹, 任玉玉¹, 曹丽娟², 张思齐¹, 胡川叶¹, 吴秀兰³

¹中国气象局国家气候中心, 北京

²中国气象局国家气象信息中心, 北京

³新疆维吾尔自治区气候中心, 新疆 乌鲁木齐

收稿日期: 2021年10月24日; 录用日期: 2021年11月22日; 发布日期: 2021年11月29日

摘要

本文基于经过均一化订正的共2255个气象站近60年(1961~2020年)逐日观测资料, 采用修订的FAO56 Penman-Monteith模型计算潜在蒸散量, 用年干燥度指数AI研究我国近60年来干湿气候变化特征, 并用模式预估资料, 分析到本世纪末我国干湿气候的可能变化趋势。研究表明, 近60年来, 我国气候整体处于变湿状态下, 气候变湿较明显的区域主要位于我国西部地区, 包括新疆大部、青海西部、甘肃和内蒙西部、西藏西北部等地。近10年来我国气候变湿趋势更加显著, 与1960年代相比, 干旱区总面积减少约65万平方公里。不同气候分区变化具有明显的区域性和阶段性特征。四个季节气候都呈现变湿的趋势, 尤其以夏季变湿最为明显。预估资料分析表明, 到本世纪末, 我国气候总体呈现变干趋势, 变干的区域主要位于我国中东部地区, 而我国西部地区继续维持目前变湿的趋势。高排放情景下, 我国中东部变干趋势和西部变湿趋势比在中等排放情景下更显著。

关键词

气候干湿变化, 干燥度指数, 潜在蒸散, 气候变化预估, 中国

Characteristics of Dry-Wet Climate Change in China during the Past 60 Years and Its Trends Projection

Cunjie Zhang¹, Yuyu Ren¹, Lijuan Cao², Siqi Zhang¹, Chuanye Hu¹, Xiulan Wu³

¹National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing

²National Meteorological Information Center, China Meteorological Administration, Beijing

³Climate Center of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi Xinjiang

Abstract

Based on the homogenized daily data of 2255 meteorological stations during the past 60 years from 1961 to 2020, the potential evapotranspiration was calculated using the revised FAO56 Penman-Monteith model, and then the annual AI (aridity index, the ratio of annual potential evapotranspiration to annual precipitation) was employed to analyze the dry-wet climate change in China. The climate models prediction data was used to analyze the possible trends of dry-wet climate in China by the end of this century. The results showed that in recent decades, the climate in China was in the tendency to get wet, and the areas that have become wetter relative to other areas located in the western regions of China, including Xinjiang, western Qinghai, Gansu, western Inner Mongolia, and northwestern Tibet. In recent 10 years, China's climate has become more humid. Compared with the 1960s, the total area of arid has decreased about 650,000 square kilometers. The changes of different climate zones have obvious regional and periodical characteristics. There was a tendency to get wet in all four seasons, especially in summer. The results show that by the end of this century, the climate in China would have a general trend of becoming drier. The drier areas are mainly located in the central and eastern parts of China, while the western regions of China continue to maintain the wetting trends. In the case of high emission, the trends of drying in the central and eastern and wetting in the west are more significant than in the case of medium emission.

Keywords

Dry-Wet Climate Change, Aridity Index, Potential Evapotranspiration, Climate Change Prediction, China

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在全球变化背景下,有关干湿气候变化的研究越来越受到人们的重视。S. Feng 等[1]利用 UNEP 定义的干燥度指数[2]分析了过去 60 年和 21 世纪全球干旱半干旱区的变化趋势,研究结果表明,在全球气候变暖背景下,全球干旱半干旱区有扩大的趋势。施雅风等[3]本世纪初就指出,自 1987 年以来,我国的西北地区,特别是河西走廊以西,与前 100 年比较,确实存在气温继续上升、降水明显增加的趋势,事实证明西北地区中西部存在气候由暖干向暖湿转换的过程。张强等[4]利用 1961~2008 年观测资料研究表明,近 50 年来我国西北地区整体暖干化趋势明显,局部出现暖湿现象。郑景云等[5] [6]利用干燥度指数对我国不同年代的气候区划进行了研究,指出过去 60 年(1951~2010 年)我国北方半干旱和半湿润及位于内蒙古的干旱区总体变干,甘肃、新疆及青藏高原等西部干旱区、半干旱区总体变湿,南方湿润区东部总体变湿,西南大部总体变干。

符淙斌、马柱国等[7] [8]通过分析中国区域地表湿润度等指数表明,20 世纪 80 年代以来,西北东部和华北等地以干旱化趋势为主要特征,这种趋势在近 15 年不断加剧,降水减少和气温升高是其产生的主

要原因。苑全治等[9]分析了 1961~2015 年中国气候干湿状况的时空特征,指出降水量是大部分区域干湿变化最重要的因子,特别在中国北方地区,气候干湿变化与降水量高度相关。丁一汇等[10][11]分析认为我国西部地区的变湿与降水增加的成因目前尚无定论,也没有确切的证据表明中国这种降水型变化与人类活动密切相关,所谓“湿者愈湿,干者愈干”,“暖者愈湿”或“副热带向北扩展”的结果[12]都无法合理解释这种区域降水格局长期变化的特征。

目前,针对未来干湿气候预估的研究,主要利用 IPCC 不同排放情景下不同模式模拟的结果开展分析,大多数研究都集中在气温、降水等单个要素的分析[13][14]。赵天保等[15]分析了不同典型路径下全球典型干旱半干旱区未来气候变化情景,结果表明中国北方干旱半干旱区很可能是全球气温上升、降水增加最为显著的地区之一,并指出要反映一个地区干湿气候状况就需要考虑气温、降水、风速等要素的综合影响。马丹阳等[16]利用 5 个模式预估结果和干湿指数,预估了 RCP 8.5 情景下未来百年中国干湿区面积的变化趋势,结果表明未来我国干湿格局变化以湿润区显著减少、干湿过渡区显著扩张为主要特征。这些研究表明,未来气候变化将在多大程度上影响中国的干湿气候,由于所用资料和方法不同,结果仍然存在很大的不确定性。

近年来有关西北地区暖湿化的讨论日趋增多,由于受到资料等因素的限制,有些研究的时空尺度都有限,无法说清楚这种变化的空间范围和时间尺度,需要利用更长时间的观测资料,从更大范围来探讨这种变化的时空特征。特别是针对 2011 年以来我国干湿变化的研究较少,有必要利用最新观测资料对我国近几十年的干湿气候变化情况进行深入研究。许多研究将干湿气候划分为湿润、半湿润、半干旱和干旱 4 个等级,没有考虑极端干旱气候区和过湿润区的气候变化,随着人们对极端荒漠区气候和南方过湿润区气候越来越关注,需要利用更精细的干湿气候区划等级标准来进行研究。

基于以上考虑,本文以中国气象局提供的最新的经过均一化订正的全国观测资料和气候情景预估数据为基础,利用修订的 FAO56-PM 模型计算潜在蒸散量,结合降水量构造干燥度指数,并采用 6 级干湿等级划分标准,对近 60 年(1961~2020 年)我国干湿气候变化总体特征、区域特征、年代际和季节变化特征等进行深入研究,从更深层次揭示我国不同区域干湿气候变化规律,并给出到本世纪末我国干湿气候变化的可能趋势,为我国应对气候变化、防范灾害风险提供科学依据。

2. 资料与方法

2.1. 干燥度指数

许多研究表明[17][18][19][20],干燥度指数(或湿润度指数)能够综合反映干湿气候实际状况。干燥度指数计算中关键问题是如何确定潜在蒸散量。由于受观测资料的限制,通常用模型进行模拟,主要有 Thornthwaite、Holdridge 以及 Penman-Monteith 等方法。世界粮农组织推荐的 FAO56-PM 方法[21],考虑了气温、日照、风速、湿度等多种环境因素对蒸散量的影响,具有较强的理论基础和明确的物理意义,在气候与植被分类分析以及气候区划中得到广泛应用。由于计算时需要的气象要素资料较多,在应用时受到一定的限制。本文采用张存杰等修订的《气象干旱等级》[22]标准中推荐的 FAO56-PM 方法,对全国范围 2255 个气象站的潜在蒸散量进行计算。

干燥度指数的计算方法大致有两种,一种是年潜在蒸散量比年降水量(一般称为干燥度指数),另一种是年降水量比年潜在蒸散量(一般称为湿润度指数)。这里干燥度指数计算采用第一种方法,计算公式如公式(1):

$$AI = \frac{E_0}{P} \quad (1)$$

式中 AI 为干燥度, P 为年降水量, E_0 为采用 FAO56-PM 方法计算的年潜在蒸散量,计算公式如公式(2)。

$$E_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s + e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (2)$$

式中, E_0 为日潜在蒸散量(mm), G 为土壤热通量密度($\text{MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$), T 为 2 米高度处日平均气温($^{\circ}\text{C}$), u_2 为 2 米高度处风速(ms^{-1}), e_s 为平均饱和水汽压(kPa), e_a 为实际水汽压(kPa), Δ 为饱和水汽压曲线斜率($\text{kPa}^{\circ}\text{C}^{-1}$), γ 为干湿表常数($\text{kPa}^{\circ}\text{C}^{-1}$), R_n 为地表净辐射($\text{MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$)。地表净辐射 R_n 由地表短波净辐射 R_{ns} 和地表长波净辐射 R_{nl} 计算得到。本文地表短波净辐射 R_{ns} 根据公式(3)计算得到:

$$R_{ns} = 0.77 \times \left[a_s + b_s \left[\frac{n}{N} \right] \right] R_{so} \quad (3)$$

式中, R_{so} 为地球外辐射($\text{MJ m}^{-2}\text{day}^{-1}$), n 为实际日照时数(h), N 为最大可能日照时数(h), 系数 a_s 为阴天地球外辐射到达地面的透过系数, $a_s + b_s$ 为晴天地球外辐射到达地面的透过率, 本文依据《干湿气候等级》国家标准[23]给出的全国不同年代逐月 a_s 和 b_s 值计算得到全国统一的逐月 a_s 和 b_s 值, 如表 1 所示:

Table 1. Monthly average a_s and b_s values in China

表 1. 全国月平均 a_s 和 b_s 值

| | 1月 | 2月 | 3月 | 4月 | 5月 | 6月 | 7月 | 8月 | 9月 | 10月 | 11月 | 12月 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| a_s | 0.205 | 0.187 | 0.175 | 0.167 | 0.169 | 0.173 | 0.179 | 0.178 | 0.175 | 0.177 | 0.192 | 0.206 |
| b_s | 0.535 | 0.571 | 0.583 | 0.586 | 0.584 | 0.577 | 0.559 | 0.555 | 0.568 | 0.576 | 0.556 | 0.525 |

本文采用 Yin 等[24]推荐的彭曼修订公式计算地表长波净辐射 R_{nl} 。计算如公式(4):

$$R_{nl} = \sigma \left[\frac{T_{\max,k}^4 + T_{\min,k}^4}{2} \right] \times (0.56 - 0.25\sqrt{e_a}) \left[0.1 + 0.9 \left[\frac{n}{N} \right] \right] \quad (4)$$

式中, σ 为斯蒂芬-波尔兹曼常数($4.903 \times 10^{-9} \text{MJ K}^{-4}\text{m}^{-2}\text{day}^{-1}$), $T_{\max,k}$ 为日最高绝对温度(K), $T_{\min,k}$ 为日最低绝对温度(K)。

2.2. 干湿气候等级划分标准

为了反映中国西部荒漠地区以及东南湿润地区气候变化特征, 这里通过计算干燥度指数 AI, 将中国气候类型划分为 6 个等级[25], 即过湿润区、湿润区、亚湿润区、亚干旱区、干旱区、极干旱区。具体划分标准如表 2 所示。

Table 2. The grades of dry-wet climate division

表 2. 干湿气候等级划分标准

| 等级 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-------|------|---------|---------|---------|----------|-------|
| 气候分区 | 过湿润 | 湿润 | 亚湿润 | 亚干旱 | 干旱 | 极干旱 |
| AI 指数 | <0.5 | 0.5~1.0 | 1.0~1.5 | 1.5~3.5 | 3.5~20.0 | ≥20.0 |

2.3. 资料及线性趋势显著性检验

本文计算 1961 年至 2020 年共 60 年干燥度指数时使用中国气象局国家信息中心提供的 2255 个气象观测站观测的逐日降水量、平均气温、最高气温、最低气温、相对湿度、平均风速、日照时数, 其中平均气温、最高气温、最低气温、相对湿度、平均风速是经过均一化检验和订正的资料[26] [27]。未来气候

变化情景预估资料为国家气候中心提供的全球模式 BCC-CSM1.1 ($2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 网格) 预估数据, 通过区域气候模式 RegCM4.0 降尺度为水平分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 数据[28]。本文采用 2020 年 1 月 1 日至 2099 年 12 月 31 日 RCP4.5 和 RCP8.5 预估数据, 要素包括降水量、平均气温、最高气温、最低气温、总辐射、相对湿度和平均风速。

年和四季平均值计算采用 1981~2010 年数据, 线性趋势分析采用 1961~2020 年数据。本文运用 Mann-Kendall 趋势检验法[29]对计算的线性趋势进行显著性检验。年代划分规定每 10 年为一个年代, 如 1960 年代指 1961~1970 年, 2010 年代指 2011~2020 年。季节划分规定 1~2 月和上年 12 月为冬季, 3~5 月为春季, 6~8 月为夏季, 9~11 月为秋季。为了分析区域气候变化特征, 将我国划分为 7 个区域, 规定如下: 西北地区包括新疆、甘肃、青海、宁夏和陕西 5 个省(区), 华北地区包括北京、天津、河北、山西和内蒙古 5 个省(市), 东北地区包括辽宁、吉林和黑龙江 3 个省, 华东地区包括上海、江苏、安徽、山东、浙江、江西和福建 7 个省(市), 华中地区包括河南、湖北和湖南 3 个省, 华南地区包括广东、广西和海南 3 个省(区), 西南地区包括四川、重庆、贵州、云南和西藏 5 个省(市、区)。

3. 近 60 年我国干湿气候变化特征

3.1. 我国干湿气候总体变化特征

从全国 2255 个站年干燥度指数平均情况来看(图 1), 总体呈现下降趋势, 即气候呈现变湿态势。各年代的干燥度指数分别为: 1960 年代 2.54、1970 年代 2.21、1980 年代 1.98、1990 年代 1.86、2000 年代 1.81、2010 年代 1.85, 线性变化趋势为每 10 年下降 0.17, 显著性通过了 0.01 的信度检验。转折点出现在 80 年代中期, 大部分站出现在 1987 年前后, 由前期高指数转为低指数, 气候出现变湿趋势。

从全国年干燥度指数线性趋势分布图(图 2)来看, 全国大部分地区干燥度指数都呈下降趋势, 即呈现变湿的趋势, 尤其中国西部地区, 包括新疆大部、青海西部、甘肃和内蒙西部、西藏西北部等地, 变湿趋势最明显, 平均每 10 年干燥度指数下降 2.0 以上, 其中南疆部分地区下降 8.0~16.0。干燥度增加的地区位于内蒙东部部分地区、吉林西部、甘肃南部、陕西西南部、四川中部、云南西部和东南部、广西西部等地, 但量级较小。显著性检验表明(图 2 中的斜线区域), 变干的地区线性趋势不显著, 而变湿的大部分地区通过了显著性检验。中国西部地区(包括新疆大部、青海大部、甘肃西部、西藏中北部等地)、江淮、江南、黑龙江部分地区变湿趋势明显, 超过 0.05 的信度检验, 新疆西部、青海中部、西藏中部等地信度超过 0.01 检验, 变湿趋势非常显著。

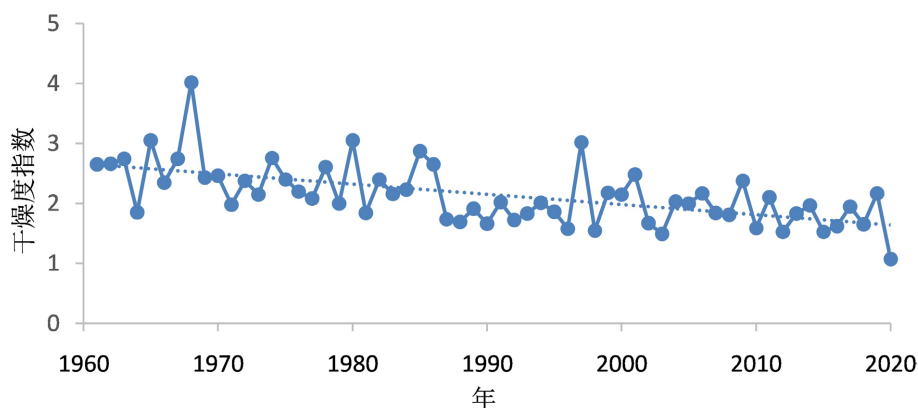


Figure 1. The linear trend of the annual average aridity index in China from 1961 to 2020
图 1. 全国年平均干燥度指数线性变化趋势(1961~2020)

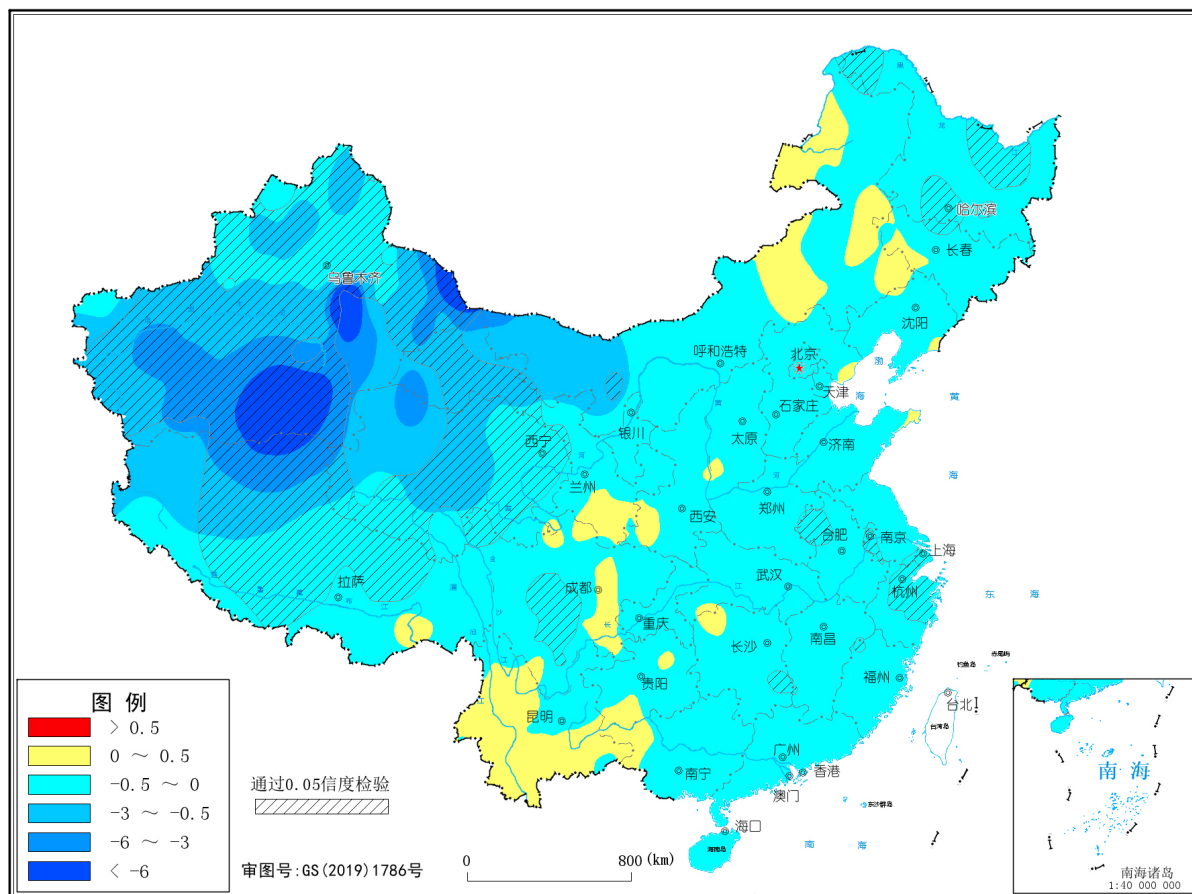


Figure 2. The linear trend of the annual aridity index (color) and the significance test (slash) in China from 1961 to 2020
图 2. 1961~2020 年中国年干燥度指数线性变化趋势, 斜线代表通过 0.05 信度检验区域

3.2. 我国干湿气候分区时空演变特征

3.2.1. 我国干湿气候区年代际变化特征

从 1981~2010 年平均值来看, 我国干旱气候区(包括极干旱、干旱、亚干旱区)主要位于我国西部和北部地区, 总面积占国土面积的 48.1%; 湿润气候区(包括过湿润、湿润和亚湿润区)主要位于我国东部和南部地区, 总面积占国土面积的 51.9%。从图 3 可以看出, 自 1960 年代开始我国干旱气候区面积呈现下降的趋势, 1960 年代干旱区面积占全国总面积约 54.46%, 到 2010 年代减少为 47.57%, 减少 6.89%, 约 65 万平方公里。湿润气候区面积呈现增加的趋势, 1960 年代至 2000 年代我国干旱气候区总面积大于湿润气候区总面积, 近 10 年来我国湿润气候区面积大于干旱气候区面积, 气候变湿明显(图 4)。尤其 2020 年, 这种变湿趋势更加明显, 湿润气候区总面积占比达到 60%, 是 20 世纪 60 年代以来湿润气候区总面积最大的一年。

近 60 年来我国干湿气候区年代际变化特征明显(表 3)。极端干旱气候区面积减少最为明显, 近 10 年与 1960 年代相比减少约 10%, 主要原因是新疆等地降水明显增多, 极端干旱区转变为干旱区。干旱气候区面积自 1980 年代开始呈现明显扩大趋势, 分析原因, 一方面由于极端干旱区转为干旱区, 另一方面内蒙古中东部等地干旱区扩大。亚干旱区面积总体变化趋势不明显, 2010 年之前内蒙古东部和东北地区西部亚干旱区面积扩大, 近 10 年来, 西北地区东部、华北等气候出现变湿趋势, 亚干旱区面积减少。亚湿润区面积变化趋势不明显, 年代际特征明显, 1960 年代面积较小, 1970 年代迅速扩大, 1980 年代减小, 1990 年代以后逐步扩大, 2000 年以来西北地区东部、华北部分地区由亚干旱区向亚湿润区转化。我国南方湿润分区总体呈现增大的趋

势, 由 1960 年代的 26.66% 变为 2010 年代的 30.2%, 增大 3.56%, 约 33.6 万平方公里。我国南方过湿润气候分区面积呈现扩大的趋势, 2010 年代比 1960 年代增加了约 40.75 万平方公里, 湿润化趋势明显。

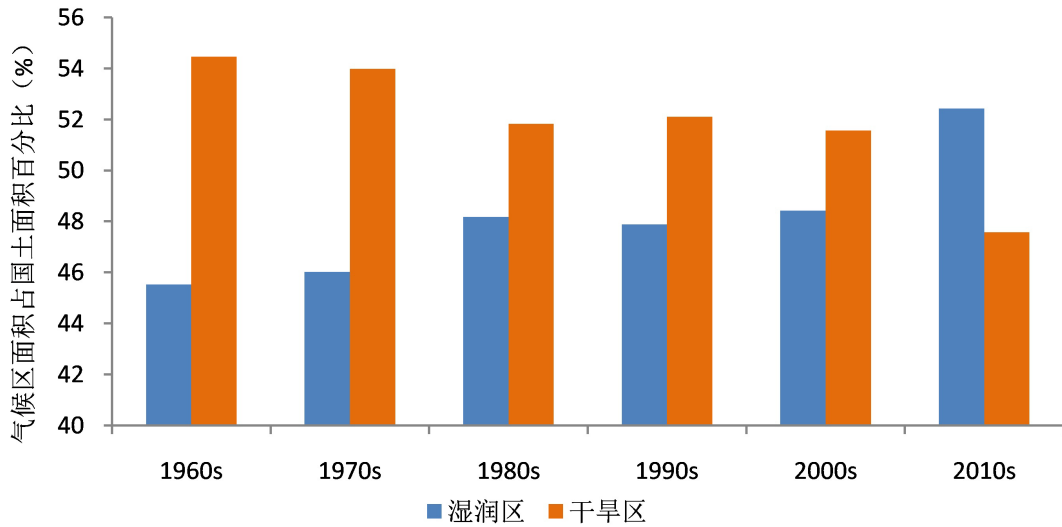
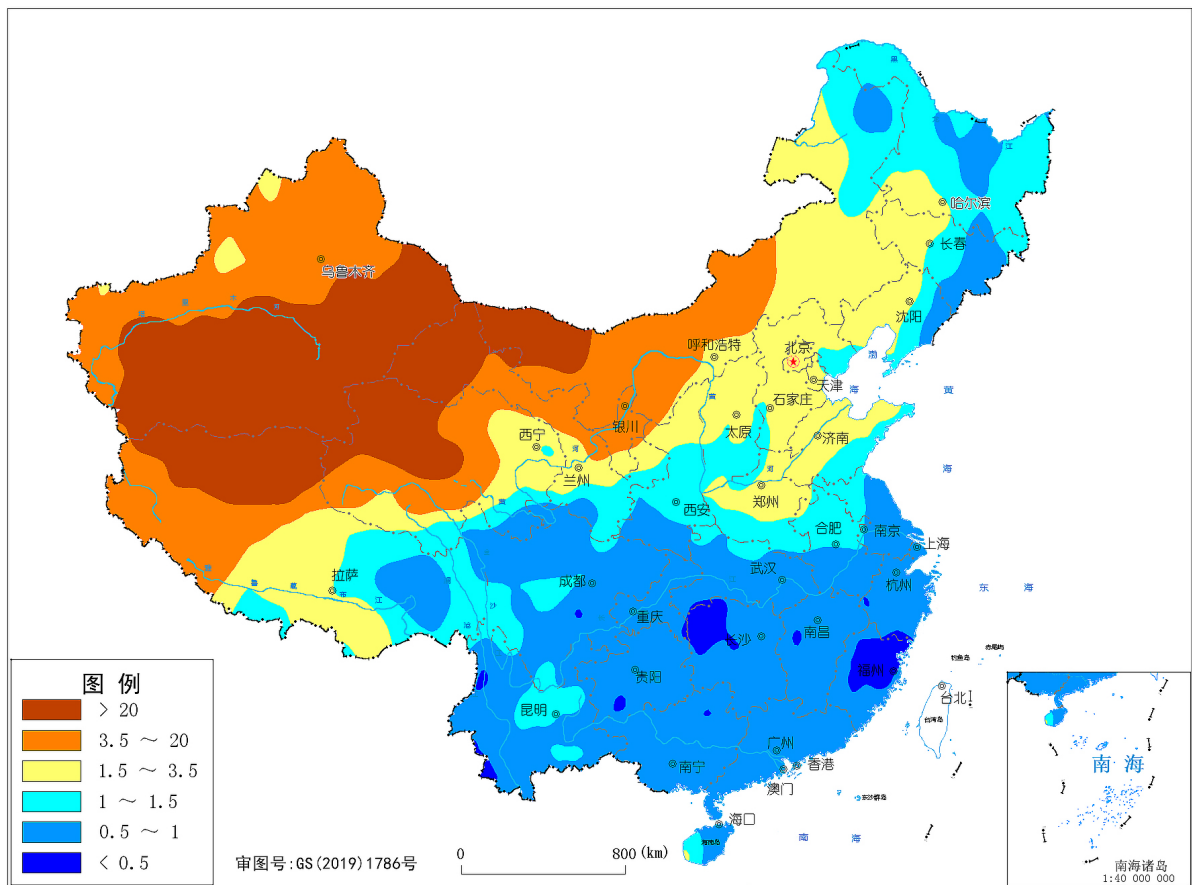


Figure 3. The proportions of whole dry area and whole wet area to the area of China in different decadal from 1961 to 2020 (unit: %)

图 3. 全国干旱气候区面积占比(红线)和湿润气候区面积占比(兰线)年代际变化(单位: %)



(a)

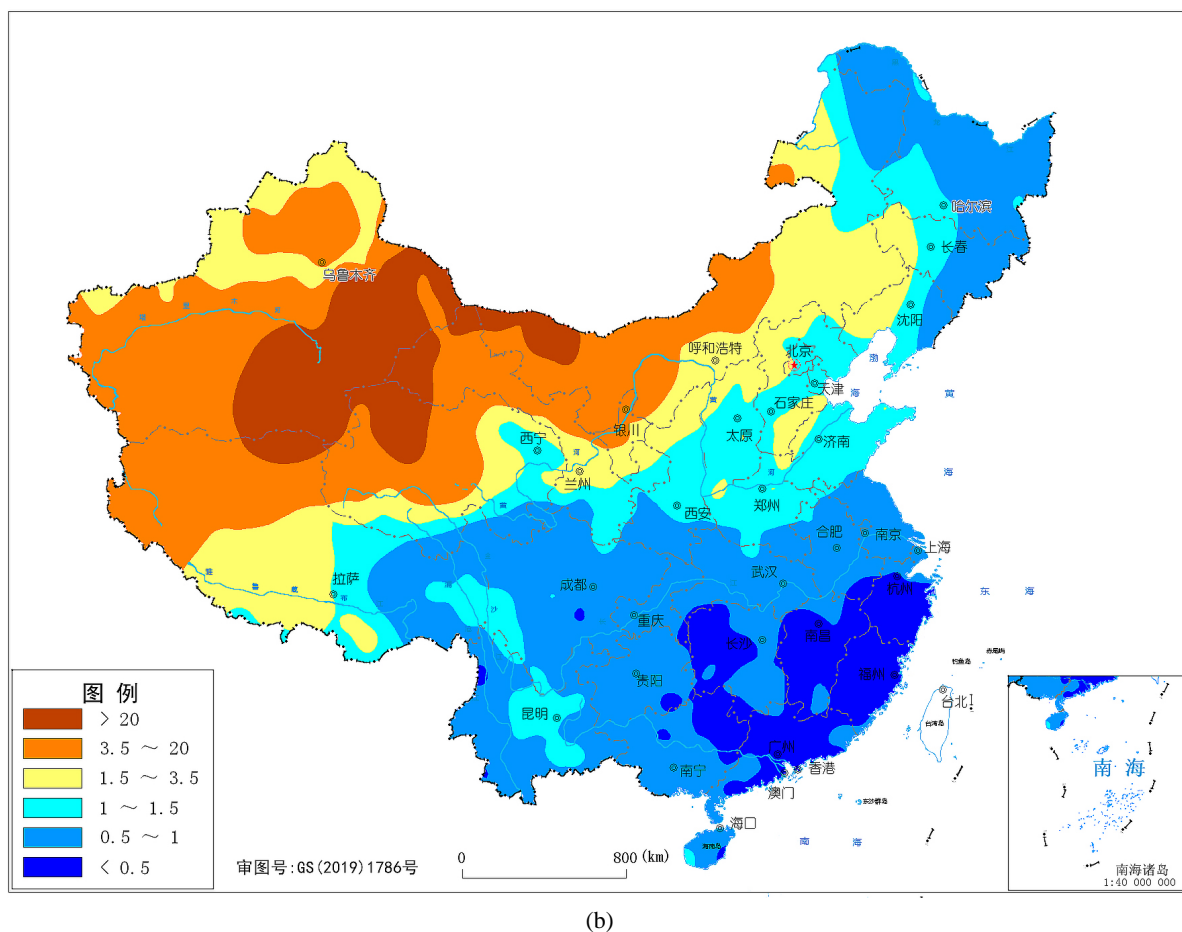


Figure 4. Dry and wet climate zoning map of 1960s (a) and 2000s (b) in China

图 4. 1960 年代(a)和 2010 年代(b)全国干湿气候分区

Table 3. The proportions of the area of different climate zones to the whole area of China in different periods from 1961 to 2020 (unit: %)

表 3. 不同年代全国干湿气候分区面积所占比率(单位: %)

| 区域 | 过湿润 | 湿润 | 亚湿润 | 亚干旱 | 干旱 | 极干旱 |
|-----------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1960S | 1.31 | 26.66 | 17.56 | 19.98 | 16.28 | 18.2 |
| 1970S | 2.14 | 25.4 | 18.48 | 20.78 | 16.51 | 16.69 |
| 1980S | 3.51 | 29.26 | 15.4 | 19.03 | 18.31 | 14.48 |
| 1990S | 6.15 | 26.62 | 15.12 | 20.22 | 20.35 | 11.54 |
| 2000S | 2.33 | 29.78 | 16.32 | 19.77 | 21.03 | 10.76 |
| 2010S | 5.61 | 30.2 | 16.62 | 17.5 | 21.8 | 8.27 |
| 1981~2020 | 1.47 | 43.80 | 17.51 | 16.56 | 17.42 | 0.24 |

3.2.2. 我国干湿气候区空间变化特征

为了研究我国不同区域干湿气候变化特征,我们分别计算了 1981~2010 年西北地区、华北地区、东北地区、华东地区、华中地区、华南地区、西南地区等 7 个区域不同干湿气候分区面积所占本区域面积的比率(表 4),并分析了近 60 年来各干湿气候区面积的线性变化趋势(表 5)。下面针对不同的干湿气候分

区分析它们的演变特征。

Table 4. The proportions of the area of different climate zones to the whole area of China in different regions from 1981 to 2010 (unit: %)

表 4. 全国及区域干湿气候分区面积所占比率(1981~2010) (单位: %)

| 区域 | 过湿润 | 湿润 | 亚湿润 | 亚干旱 | 干旱 | 极干旱 |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 西北地区 | 0 | 4.31 | 9.24 | 15.15 | 36.19 | 34.51 |
| 华北地区 | 0 | 3.49 | 14.95 | 51.05 | 23.39 | 7.12 |
| 东北地区 | 0 | 33.70 | 48.11 | 18.19 | 0 | 0 |
| 华东地区 | 22.77 | 56.43 | 13.67 | 7.13 | 0 | 0 |
| 华中地区 | 9.93 | 60.35 | 15.24 | 5.48 | 0 | 0 |
| 华南地区 | 16.25 | 83.22 | 0.49 | 0.04 | 0 | 0 |
| 西南地区 | 1.47 | 43.80 | 17.51 | 16.56 | 17.42 | 0.24 |
| 全国 | 3.61 | 28.63 | 15.89 | 19.48 | 19.51 | 12.88 |

Table 5. The linear trends of the areas of different climate zones and proportions to the whole area of China in different regions from 1961 to 2020 (unit: Km² (%)/10 year)

表 5. 全国及区域干湿气候分区面积及所占比率线性趋势(1961~2020) (单位: Km² (%)/10 年)

| 区域 | 过湿润 | 湿润 | 亚湿润 | 亚干旱 | 干旱 | 极干旱 |
|------|---------------|----------------|----------------|----------------|---------------|------------------|
| 西北地区 | 0.02 (0.01) | 1.05 (0.35) | 1.26 (0.42)** | 2.84 (0.94)** | 5.55 (1.84)** | -10.7 (-3.56)** |
| 华北地区 | 0.02 (0.01) | 0.9 (0.59) | 1.02 (0.67) | -1.0 (-0.66) | -0.18 (-0.12) | -0.76 (-0.5) |
| 东北地区 | 0.09 (0.12) | 3.69 (4.67)** | -1.84 (-2.33)* | -1.98 (-2.5)** | 0.04 (0.05) | 0 |
| 华东地区 | 2.59 (3.27)** | -1.28 (-1.62) | -0.5 (-0.64) | -0.75 (-0.95) | -0.05 (-0.06) | 0 |
| 华中地区 | 1.39 (2.47)* | -0.51 (-0.91) | -0.26 (-0.47) | -0.58 (-1.02)* | -0.05 (-0.07) | 0 |
| 华南地区 | 1.5 (3.36)* | -1.31 (-2.94)* | -0.17 (-0.38) | -0.02 (-0.04) | 0 | 0 |
| 西南地区 | 0.7 (0.30) | 1.24 (0.53) | -0.14 (-0.06) | 0.02 (0.01) | 1.49 (0.64) | -3.32 (-1.43)** |
| 全国 | 6.35 (0.67)** | 3.94 (0.42) | -0.82 (-0.09) | -1.49 (-0.16) | 6.81 (0.72)* | -14.78 (-1.56)** |

注: “*” 信度通过 0.05 检验, “**” 信度通过 0.01 检验。

我国极端干旱区面积约 122.21 万平方公里, 占全国国土面积的 12.88% 左右, 主要位于西北地区中西部、华北西部(即内蒙古西部)和西南地区西部(即西藏西部), 其中西北地区极端干旱区面积最大, 占本区域面积的 34.51%。近 60 年来, 我国极端干旱区面积呈现显著减少趋势, 平均每 10 年减少 14.78 万平方公里(约 1.56%)。西北地区极端干旱分区面积下降最明显, 平均每 10 年减少 10.7 万平方公里(约 3.56%)。西南地区(西藏西部)极端干旱分区面积下降也比较明显, 平均每 10 年减少 3.32 万平方公里(约 1.43%)。显著性检验表明, 西北地区和西南地区极端干旱区面积变化通过了 0.01 的信度检验, 华北地区极端干旱分区面积虽然也在减少, 但变化不显著。

我国干旱气候分区面积约 185.04 万平方公里, 占全国国土面积的 19.5% 左右, 主要位于西北、华北、西南, 分别占本地区国土面积的 36.19%、23.39%、17.42%, 东北地区等地也有干旱气候地区, 但占比较少。近 60 年来, 我国西北地区和西南地区干旱气候分区的面积呈增加的趋势, 分别增加 1.84% 和 0.64%, 主要原因是由于极端干旱气候转为干旱气候导致, 尤其西北地区面积变化通过了 0.01 的信度检验。华北、华东和华中干旱气候分区面积呈现减少的趋势, 但变化不显著。

我国亚干旱气候区面积约 184.83 万平方公里,占全国国土面积的 19.48%左右,主要位于华北、东北、西南和西北,分别占本地区国土面积的 51.05%、18.19%、16.56%和 15.15%,其中华北亚干旱区面积最大,占比超过了本区域国土面积的一半。近 60 年来,我国西北地区和西南地区亚干旱区面积呈增加的趋势,分别增加 0.94%和 0.01%,西北地区亚干旱区面积每 10 年增加 2.84 万平方公里,通过了 0.01 的信度检验。东北、华北、华东、华中等地区亚干旱区面积呈现线性减少趋势,平均每 10 年分别减少 2.5%、0.66%、0.95%、1.02%,其中东北地区通过了 0.01 信度检验,华中地区通过了 0.05 信度检验,其他区域未通过检验。

我国亚湿润气候区面积约 150.71 万平方公里,占全国国土面积的 15.89%左右,主要位于东北、西南、华中、华北、华东、西北等地区,分别占本地区国土面积的 48.11%、17.51%、15.24%、14.95%、13.67%和 9.24%,其中东北地区亚湿润区面积最大。近 60 年来,我国西北地区亚湿润区面积呈增加趋势,平均每 10 年增加 2.84 万平方公里(约 0.94%),通过了 0.01 信度检验;华北地区亚湿润区面积也呈增加趋势,平均每 10 年增加 0.67%,但没通过信度检验;东北、华东、华中、华南和西南地区亚湿润区面积呈减少趋势,平均每 10 年分别减少 2.33%、0.64%、0.47%、0.38%和 0.06%,其中东北地区减少最为明显,通过了 0.05 的信度检验,其他地区未通过检验。

我国东南部大部分地区属于湿润气候分区,面积约 271.59 万平方公里,在干湿气候分区中所占比例最大,约占我国国土面积的 28.63%,主要位于华南、华中、华东、西南和东北等区域,其中华南地区湿润分区面积最大,超过本区域国土面积的 80%。近 60 年来,全国湿润气候分区面积平均每 10 年增加 3.94 万平方公里(约 0.42%),但不显著。东北、华北、西北和西南地区湿润气候分区面积呈现增加的趋势,平均每 10 年分别增加 4.67%、0.59%、0.35%、0.53%,其中东北地区增加最为显著,通过了 0.01 的信度检验。华南、华中、华东地区湿润气候分区面积呈现减少的趋势,平均每 10 年分别减少 2.94%、0.91%、1.62%,其中华南地区通过了 0.05 的信度检验。

我国过湿润气候区面积约 34.34 万平方公里,约占全国国土面积的 3.61%,主要位于华东、华南和华中地区,分别占本区域面积的为 22.77%、16.25%和 9.93%。近 60 年来,我国华东、华南和华中地区过湿润区面积增加比较明显,平均每 10 年增加 3.27%、3.36%和 2.47%,其中华东地区通过了 0.01 的信度检验,华南和华中地区也通过了 0.05 的信度检验。我国其他地区过湿润气候区面积虽然也在增加,但增加量较小,未通过显著性检验。

我国不同的区域干湿气候变化特征明显(表 5)。西北地区极端干旱分区面积减少最为明显,2010 年代极端干旱区面积比 1960 年代减少了约 66 万平方公里,但其他干湿气候分区的面积都呈现不同程度的增加趋势,干旱、亚干旱和亚湿润面积增加通过了 0.01 的信度检验。华北地区干旱气候区面积都呈现减少趋势、湿润气候区面积呈现增加的趋势,但各分区面积变化都未通过显著性检验。东北地区亚干旱和亚湿润气候区面积减少显著、湿润分区面积增加显著,说明东北地区整体变湿较为显著。华东、华中和华南地区过湿润气候区面积增加显著,其他气候区面积都出现减少趋势,说明我国东南部区域变湿也比较显著。西南地区极端干旱区面积减少明显,主要发生在西藏西部,亚湿润区面积略有减少,其他气候分区面积都有增加,但不显著。从以上分析来看,我国不同区域气候都有不同程度变湿的趋势。

3.2.3. 我国干湿气候季节变化特征

为了研究我国干湿气候的季节变化特征,我们分析了全国年平均和季节平均的干燥度指数线性变化趋势(表 6)。从季节平均干燥度指数线性趋势来看,四个季节的干燥度指数都呈减小趋势,说明四个季节都有变湿的趋势,尤其以夏季变湿最为明显,干燥度指数平均每 10 年减小 0.24,并通过了 0.01 的信度检验。春季和秋季变湿也比较明显,干燥度指数分别减小 1.55 和 0.94,并通过了 0.05 的信度检验。冬季

减小 0.71, 但不显著。

Table 6. The linear trends of annual and seasonal mean aridity index in China from 1961 to 2020

表 6. 全国年平均和季节平均干燥度线性变化趋势(1961~2020)

| 属性 | 冬季 | 春季 | 夏季 | 秋季 | 年 |
|------|-------|--------|---------|--------|---------|
| 平均值 | 13.06 | 12.89 | 2.34 | 8.28 | 2.14 |
| 线性趋势 | -0.71 | -1.55* | -0.24** | -0.94* | -0.17** |

注：“*”代表信度通过 0.05 检验，“**”代表信度通过 0.01 检验。

4. 我国未来干湿气候变化趋势预估

利用模式预估资料, 计算 2020~2099 年中国区域干燥度指数(AI), 分析 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下中国区域到本世纪末干湿气候变化趋势。

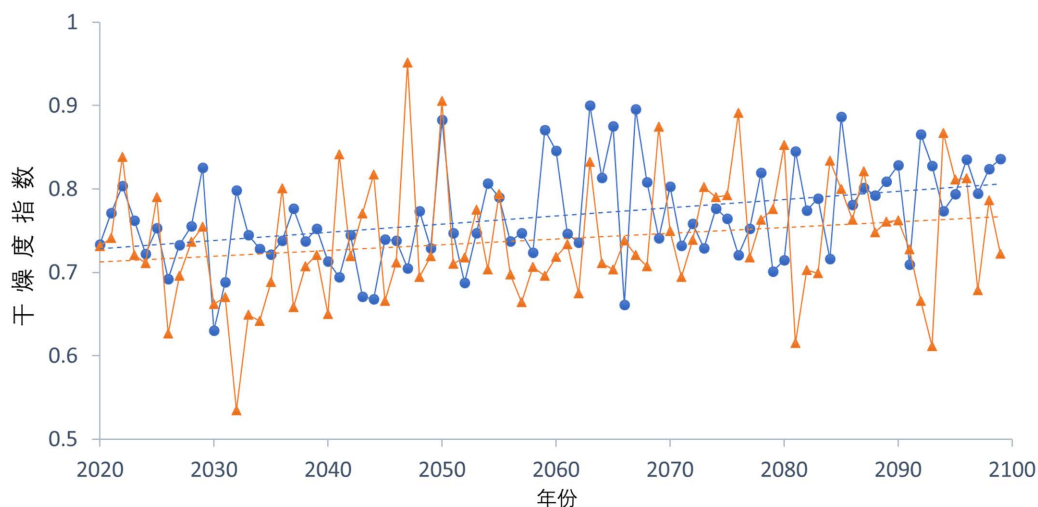
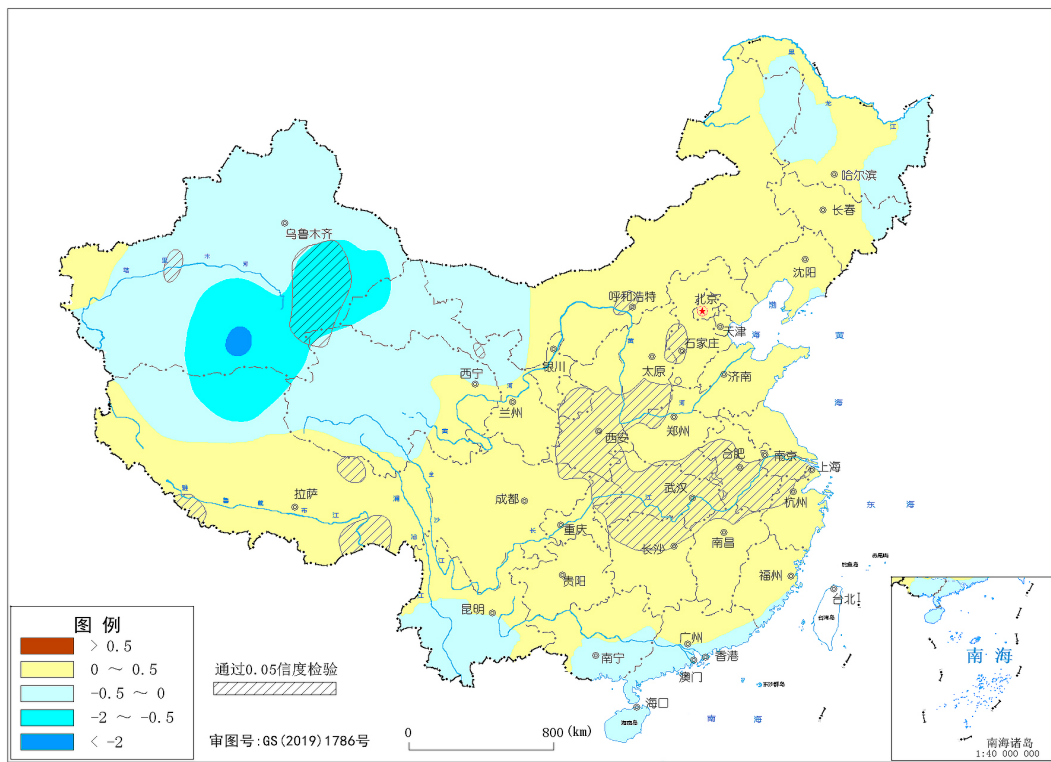


Figure 5. The annual mean aridity index in China under RCP4.5 (red line) and RCP8.5 (blue line) from 2020 to 2099

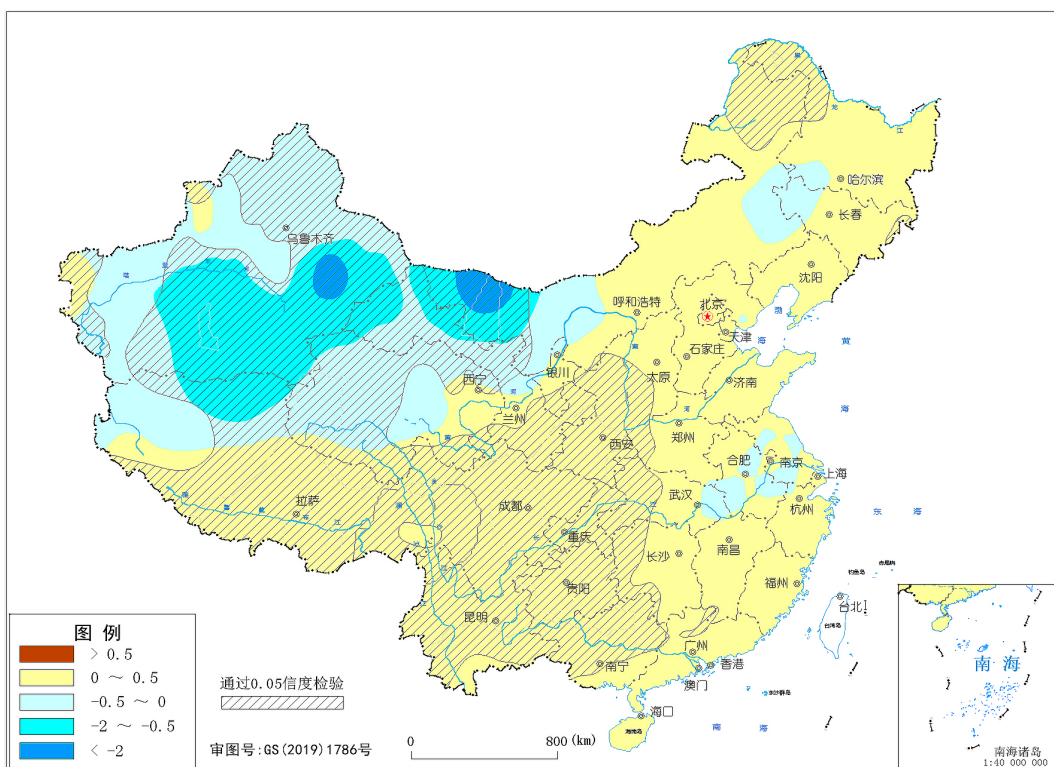
图 5. 2020~2099 年全国年平均干燥度指数变化及线性趋势, RCP4.5 (红线), RCP8.5 (蓝线)

图 5 为两种情景下, 2020~2099 年全国年平均干燥度指数变化曲线及线性趋势。从图中看出, 两种情景下未来干燥度指数均呈现上升趋势, 即未来全国气候总体有变干趋势。RCP4.5 情景下(图 6, 三角标志红线), 每 10 年上升 0.008, RCP8.5 情景(图 6, 圆形标志蓝线), 每 10 年上升 0.01, 说明未来全国气候在高排放情景下比中排放情景下变干趋势更明显。两种情景下, 未来干燥度指数的年代际变化特征有不同之处。RCP4.5 情景下, 2020~2040 年干燥度指数偏小, 全国气候比较湿润, 2040~2080 年干燥度指数较高, 说明全国气候比较干燥, 2080 年后指数有下降趋势, 气候相对湿润。RCP8.5 情景下, 2060 年前全国干燥度指数上升趋势不明显, 2060 年后到本世纪末, 干燥度指数上升趋势明显, 说明 RCP8.5 情景下 21 世纪前期全国干湿变化不明显, 后期变干趋势明显。

为了分析我国未来干湿气候变化的空间特征, 我们计算了两种情景下, 2020~2099 年全国年平均干燥度指数线性趋势分布图(图 6)。从图中看出, 两种情景下, 我国未来干湿气候变化空间格局基本一致, 我国西部地区(包括西北地区中西部、内蒙古西部和西藏西部等地)维持变湿的趋势, 中东部地区(包括西北地区东部、华北大部、东北大部、华东、华中、华南大部 and 西南大部地区)呈现变干的趋势。



(a)



(b)

Figure 6. The linear trends of aridity index under RCP4.5 (a) and RCP8.5 (b) in China from 2020 to 2099
图 6. 2020~2099 年干燥度指数线性变化趋势全国分布图; (a) RCP4.5; (b) RCP8.5

对比两种情景下的趋势图,也有许多不同之处。一是两种情景下我国西部虽然都为变湿趋势,但RCP8.5情景下,我国西部地区变湿趋势更明显,范围更大。显著性检验表明(图5和图6中斜线区域),RCP4.5情景下,只有新疆东南部显著变湿,但RCP8.5情景下,新疆大部、内蒙古西部等地变湿趋势显著,区域明显变大;二是我国中东部地区变干的程度和范围不同,高排放情景(RCP8.5)下,我国中东部变干趋势更明显,尤其我国西南地区变干趋势更显著。显著性检验表明,RCP4.5情景下,我国变干显著的区域主要位于西北地区东部、华北南部和长江中下游等地,但RCP8.5情景下,我国变干趋势显著的区域明显变大,包括西南地区、西北地区东部、华中西部、东北地区北部等地。

5. 结论及讨论

通过1961~2020年我国年平均干燥度指数线性变化趋势分析表明,近几十年我国气候整体处于变湿状态。气候变湿较明显的区域主要位于我国西部地区,包括新疆大部、青海西部、甘肃和内蒙西部、西藏西北部等地,我国东北和华东部分地区也有变湿的趋势。我国华北北部和西南部分地区有变干趋势,但不显著。近10年来我国气候变湿趋势更加显著,与1960年代相比,干旱区总面积减少约65万平方公里。

近60年来,各干湿气候分区具有明显年代际变化特征。由于西北地区降水增加,我国极端干旱区面积持续减少,平均每10年减少14.78万平方公里(约1.56%),主要发生在西北地区。干旱气候分区面积自1980年代开始呈现明显扩大趋势,主要原因是极端干旱分区转为干旱分区。亚干旱区面积总体变化趋势不明显,2010年之前内蒙古东部和东北地区西部亚干旱区面积扩大,近10年来,西北地区东部、华北等地气候出现变湿趋势,亚干旱区面积减少。亚湿润区面积总体变化趋势不明显,但区域变化特征明显,西北地区增加显著,东北地区减少明显。我国南方湿润区和过湿润区面积呈现增加趋势,其中东北地区湿润气候区面积增加显著,华东、华南和华中地区过湿润气候区面积增加显著。

我国不同的区域干湿气候变化特征也不一样。西北地区极端干旱区面积减少明显,其他气候分区面积呈增加趋势。华北地区各干旱区面积减少、各湿润区面积增加。东北地区亚干旱和亚湿润气候区面积减少显著、湿润区面积增加显著,说明东北地区整体变湿较为显著。华东、华中和华南地区过湿润气候区面积增加显著,其他气候区面积都出现减少趋势,说明我国东南部区域变湿也比较显著。西南地区西部(即西藏西部)变湿明显,其他区域变化不明显。整体来看,我国大部分区域气候都有不同程度变湿的趋势。

我国干湿气候季节变化特征明显。分析表明,四个季节都有变湿的趋势,夏季变湿最为明显,通过了0.01信度检验,春季和秋季通过了0.05信度检验。

在全球变暖背景下,通过两种排放情景下模拟资料分析表明,未来我国气候总体呈现变干趋势,并且高排放情景下比中排放情景下变干趋势更明显。两种情景下,我国未来干湿气候变化空间格局基本一致,变干的区域主要位于我国中东部地区,而我国西部地区继续维持变湿的趋势。高排放情景下,我国中东部变干趋势和西部地区变湿趋势比中排放情景下更显著。

本研究有关我国未来干湿气候变化趋势预估的结论与马丹阳等[16]研究结果相比,西部变湿、东部变干大格局两者基本一致,但部分区域有所不同,如华北地区和西北地区东部,他们的结论是将变湿,而本研究结果为变干较明显的地区。分析造成差异的原因,可能是选用的模式不同以及模拟结果的不确定性等原因造成的。有关我国气候变湿的原因,有研究表明是降水增多造成的,也有研究反映是地面风速下降、相对湿度减小等原因所导致,本文未作深入探讨。

基金项目

本研究得到国家重点研发计划(2020YFA0608203)项目资助。

参考文献

- [1] Feng, S. and Fu, Q. (2103) Expansion of Global Drylands under a Warming Climate. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **13**, 10081-10094. <https://doi.org/10.5194/acp-13-10081-2013>
- [2] Middleton, N.J. and Thomas, D.S.G. (1992) UNEP: World Atlas of Desertification. Edward Arnold, Sevenoaks.
- [3] 施雅风. 中国西北气候由暖干向暖湿转型问题评估[M]. 北京: 气象出版社, 2003.
- [4] 张强, 张存杰, 白虎志, 等. 西北地区气候变化新动态及对干旱环境的影响[J]. 干旱气象, 2010, 28(1): 1-7.
- [5] 郑景云, 卞娟娟, 葛全胜, 等. 中国 1951-1980 年及 1981-2010 年的气候区划[J]. 地理研究, 2013, 32(6): 987-997.
- [6] 郑景云, 方修琦, 吴绍洪. 中国自然地理学中的气候变化研究前沿进展[J]. 地理科学进展, 2018, 37(1): 16-27.
- [7] 符淙斌, 安芷生. 我国北方干旱化研究——面向国家需求的全球变化科学问题[J]. 地学前缘, 2002, 9(2): 271-275.
- [8] 马柱国, 符淙斌. 中国干旱和半干旱带的 10 年际演变特征[J]. 地球物理学报, 2005, 48(3): 519-525.
- [9] 苑全治, 吴绍洪, 戴尔阜, 等. 1961-2015 年中国气候干湿状况的时空分异[J]. 中国科学: 地球科学, 2017, 47(11): 1339-1348.
- [10] 丁一汇, 王会军. 近百年中国气候变化科学问题的新认识[J]. 科学通报, 2016, 61(10): 1029-1041.
- [11] 丁一汇, 王绍武, 郑景云, 等. 中国自然地理系列专著: 中国气候[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [12] Huang, P., Xie, S.P., Huk, M., et al. (2013) Patterns of the Seasonal Response of Tropical Rainfall to Global Warming. *Nature Geoscience*, **6**, 357-361. <https://doi.org/10.1038/ngeo1792>
- [13] 江志红, 张霞, 王冀. IPCC-AR4 模式对中国 21 世纪气候变化的情景预估[J]. 地理研究, 2008, 27(4): 787-799.
- [14] 张雪芹, 彭莉莉, 林朝晖. 未来不同排放情景下气候变化预估研究进展[J]. 地球科学进展, 2008, 23(2): 174-185.
- [15] 赵天保, 陈亮, 马柱国. CMIP5 多模式对全球典型干旱半干旱区气候变化的模拟与预估[J]. 科学通报, 2014, 59(12): 1148-1163.
- [16] 马丹阳, 尹云鹤, 吴绍洪, 等. 中国干湿格局对未来高排放情景下气候变化响应的敏感性[J]. 地理学报, 2019, 74(5): 857-874.
- [17] 钱纪良, 林之光. 关于中国干湿气候区划的初步研究[J]. 地理学报, 1965, 31(1): 1-14.
- [18] 陈咸吉. 中国气候区划新探[J]. 气象学报, 1982, 40(1): 35-48.
- [19] 中国标准化与信息分类编码研究所, 国家气象中心. 中华人民共和国国家标准: 中国气候区划名称与代码——气候带和气候大区(GB/T17297-1998) [S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- [20] 郑景云, 尹云鹤, 李炳元. 中国气候区划新方案[J]. 地理学报, 2010, 65(1): 3-13.
- [21] Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., et al. (1998) Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. United Nations Food and Agriculture Organization, Rome, 15-86.
- [22] 张存杰, 刘海波, 宋艳玲, 等. 中华人民共和国国家标准: 气象干旱等级(GB/T 20481-2017) [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [23] 毛飞, 廖要明, 孙涵, 等. 中华人民共和国国家标准: 干湿等级(GB/T 34307-2017) [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [24] Yin, Y., Wu, S., Zheng, D., et al. (2008) Radiation Calibration of FAO56 Penman-Monteith Model to Estimate Reference Crop Evapotranspiration in China. *Agricultural Water Management*, **95**, 77-84. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2007.09.002>
- [25] 张存杰, 廖要明, 段居琦, 等. 我国干湿气候区划研究进展[J]. 气候变化研究进展, 2016, 12(4): 261-267.
- [26] 杨溯, 李庆祥. 中国降水量序列均一性分析方法及数据集更新完善[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(4): 276-281.
- [27] Cao, L., Zhu, Y.N., Tang, G.L., Yuan, F. and Yan, Z. (2016) Climatic Warming in China According to a Homogenized Data Set from 2419 Stations. *International Journal of Climatology*, **36**, 4384-4392. <https://doi.org/10.1002/joc.4639>
- [28] 徐影, 周波涛, 吴婕, 等. 1.5-4℃升温阈值下亚洲地区气候变化预估[J]. 气候变化研究进展, 2017, 13(4): 306-315.
- [29] Sneyers, R. (1990) On the Statistical Analysis of Series of Observation. World Meteorological Society, Geneva.