

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2025.12.014

任宾宾, 邱绍柱, 白絮飞, 等. 呼伦贝尔不同气候区干湿变化非同步性及成因 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2025, 47(12): 155-165.

呼伦贝尔不同气候区干湿变化非同步性及成因

任宾宾¹, 邱绍柱², 白絮飞¹, 文新宇³, 黄文震⁴, 梅荣¹

1. 呼伦贝尔学院 旅游地理与历史文化学院, 内蒙古 海拉尔 021008;

2. 呼伦贝尔学院 图书馆, 内蒙古 海拉尔 021008;

3. 玉溪师范学院 地理与国土工程学院, 云南 玉溪 653100;

4. 呼伦贝尔市气象局, 内蒙古 海拉尔 021008

摘要: 全球增温背景下, 不同气候区干湿变化不确定性增强, 空间差异日渐明显。本研究采用水分盈亏量指标对呼伦贝尔不同气候区干湿变化非同步性特征进行分析, 结合水循环关键参数, 揭示其成因及驱动机制。结果表明, 不同气候区干湿变化时空特征差异明显。年水分总体呈亏缺态势, 自东向西加剧。春季干旱程度最大 ($-163.2 \text{ mm} < K < -96.4 \text{ mm}$), 夏季干湿空间差异最大(东西差距达 267.0 mm), 秋、冬季干湿空间差异较小。水分盈亏量年、季尺度倾向率指示不同气候区干湿变化趋势和速率存在差异。全年和夏季呈现的变化趋势一致, 均呈现“干干湿湿”模式, 即半湿润区湿润化、半干旱区干旱化特征, 致使干湿差距显著增大, 非同步性明显。同一季节(春、秋、冬), 不同气候区虽具有相似的变化趋势, 但变化速率不同, 仍呈现非同步性。春季普遍变干, 但半干旱区干旱化趋势更加显著; 秋季普遍趋于湿润, 但半湿润区湿润程度更大; 导致春、秋季不同气候区干湿差距增大。秋、冬季水分亏缺将普遍得到缓解, 冬季干湿空间差异显著减小。因受东亚夏季风和大兴安岭以及气候系统内部调节过程的影响, 半湿润、半干旱区降水量和潜在蒸发量变化趋势和速率的不一致性是导致不同气候区干湿变化非同步性的主要原因。

关键词: 水分盈亏量; 干湿变化; 非同步性; 呼伦贝尔

中图分类号: P467; P462.3

文献标识码: A

文章编号: 1673-9868(2025)12-0155-11

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Asynchrony of Dry-wet Variations and Underlying Mechanisms across Different Climatic Zones in Hulunbuir

REN Binbin¹, QIU Shaozhu², BAI Xufei¹,
WEN Xinyu³, HUANG Wenzhen⁴, MEI Rong¹

收稿日期: 2025-04-03

基金项目: 内蒙古自治区自然科学基金(2025LHMS04016); 内蒙古自治区教育厅项目(NJZY22285); 呼伦贝尔学院博士基金项目(2023BSJJ09)。

作者简介: 任宾宾, 博士, 讲师, 主要从事自然地理学、区域生态管理等领域研究。

通信作者: 白絮飞, 博士, 教授, 硕士研究生导师。

1. College of Tourism, Geography, History and Culture, Hulunbuir University, Hailaer Inner Mongolia 021008, China;
2. Library, Hulunbuir University, Hailaer Inner Mongolia 021008, China;
3. School of Geography and Engineering of Land Resources, Yuxi Normal University, Yuxi Yunnan 653100, China;
4. Hulunbuir Meteorological Bureau, Hailaer Inner Mongolia 021008, China

Abstract: Under global warming, the uncertainties in hydroclimatic variability between the different climate zones were significantly amplified, and the dry-wet gap between the regions has become more and more prominent. Using the climatic water budget index, this study analyzed annual and seasonal asynchronous dry-wet variations between the different climatic zones in Hulunbuir, and examined their causative mechanisms based on the key parameters of the water cycle. The results demonstrate distinct spatiotemporal characteristics in dry-wet variations in different climatic regions, with an overall annual water deficit intensified from east to west. The most severe drought conditions was observed in spring ($-163.2 \text{ mm} < K < -96.4 \text{ mm}$), the largest dry-wet gap was recorded in summer (267.0 mm), and relatively dry-wet gap was smaller in autumn and winter. The annual and seasonal tendency rates of water deficit indicated that there were differences in the trend and rate of dry and wet changes in different climatic regions. Both the year and summer showed a ‘dry-dry, wet-wet’ mode, which the semi-humid area was humidified and the semi-arid area was aridified, resulting in a significant increase in the dry-wet gap and obvious asynchrony. In the same season (spring, autumn, winter), although different climatic zones had similar variation trends, the change rate was different, and it was still asynchrony. Drying trends had been universally observed in spring, and more pronounced aridification had been recorded in semi-arid regions. Autumn generally tended to be more moist, with greater humidification in semi-humid zones, which led to the increase of dry-wet gap in different climate zones in spring and summer. The water deficit in autumn and winter was generally alleviated, with a notable reduction in dry-wet spatial gap observed particularly in winter. Due to the influence of the East Asian summer monsoon, the Greater Khingan Range and the internal adjustment process of the climate system, the inconsistency of the change trend and rate of precipitation and potential evaporation in semi-humid and semi-arid regions led to the non-synchronization of dry and wet changes in different climatic regions.

Key words: climatic water budget; dry-wet variations; asynchrony; Hulunbuir City

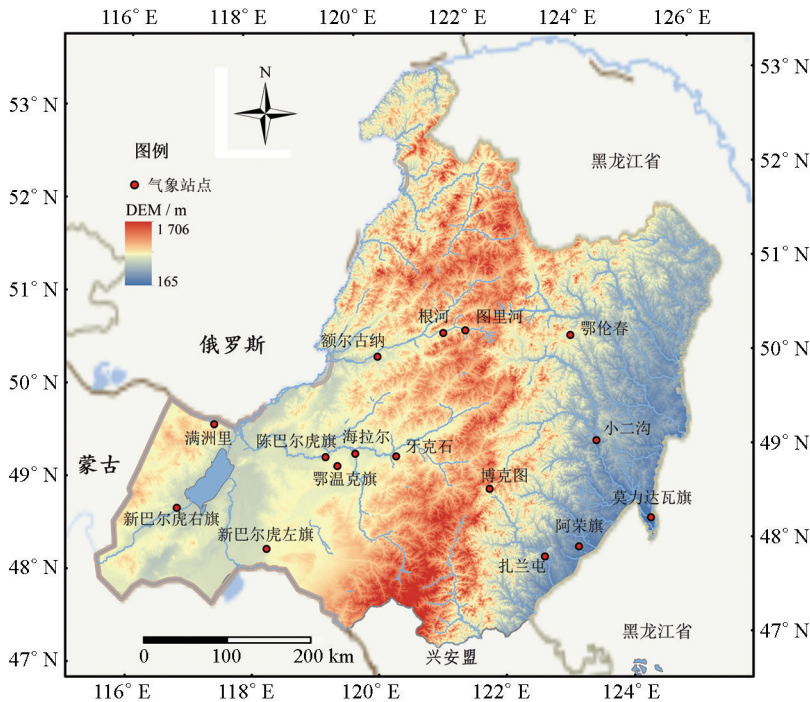
地表干湿变化主要取决于降水量和蒸发量的差值,即水分盈亏量,包含了地表水循环的关键参数,因此,水分盈亏量是衡量地表干湿状况的综合性关键指标^[1-4]。全球变暖不仅导致空气中的水汽含量发生了变化^[5],改变了地表水循环^[6-8],导致气候干湿空间分布格局发生明显变化^[9-10],对陆地生态和水文过程产生了深远影响^[5-6, 11-16]。多年来,对全国、东北、内蒙古及呼伦贝尔地区干湿变化开展了广泛的研究^[1, 17-19],普遍认为呼伦贝尔总体呈暖干趋势,并不断加强^[20-21]。近期研究发现,“胡焕庸”区内(包含本研究区)植被覆盖度的增加与干旱加剧的事实形成悖论,结论显示“绿度”增加是在陆地水资源代偿的前提下实现的^[22],说明在半干旱-半湿润气候生态交错区干旱化的趋势正在加剧。事实上,由于大兴安岭等山地的地形阻隔效应,不同气候区干湿变化趋势和幅度仍然存在明显的时空差异,但对此缺乏详细的描述。

呼伦贝尔处于西风带和东亚季风、半干旱草原和半湿润森林景观的气候生态过渡带,是我国生态安全屏障的重要组成部分^[21],气候变化敏感^[20],生态环境脆弱^[23]。受夏季风“焚风效应”影响,大兴安岭以西地区降水量普遍偏少,暖干化趋势将会使草地、湿地生态系统退化和萎缩的风险加剧。大兴安岭及其以东地

区, 地形陡降至东北平原, 以森林和农田生态系统为主, 干湿变化将会直接影响粮食安全和旱涝灾害风险^[24]。该区域冬、春季干燥度较大, 森林、草原火险气象等级较高。因此, 从水分盈亏的角度, 研究干湿时空变化特征将会更客观地为该区水文调控、农牧业结构调整、灾害预警、生态保护及国土空间规划等提供参考依据。根据 1961—2023 年呼伦贝尔水分盈亏量变化趋势, 本研究量化分析该区域不同气候区干湿时空变化特征, 并根据降水量和潜在蒸散量时空变化趋势, 分析影响不同气候类型区水分盈亏量时空变化的主要驱动机制。

1 研究区概况

呼伦贝尔市(47°05′—53°20′N、115°31′—126°04′E)位于内蒙古自治区东北部, 东部与黑龙江省相邻, 南部与兴安盟相连, 北、西北部与俄罗斯接壤, 西、西南部与蒙古国接壤, 总面积达 $25.3 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。大兴安岭中北段贯穿呼伦贝尔中部, 西侧为呼伦贝尔高原, 起伏和缓, 其东侧切割强烈, 东坡陡峻, 接连松嫩平原, 海拔 165~1 706 m^[25](图 1); 以温带大陆性季风气候为主, 冬季寒冷漫长, 夏季温凉短促, 气温年较差大, 夏季降水量约占全年降水量的 70%, 降水年际变率大。受纬度、东亚季风和大兴安岭山地的共同影响, 气候空间差异明显, 中北部山地气温偏低, 西部、西南部及东南部河谷地区气温偏高, 年均气温为 -4.4~3.3 °C。降水量由东向西递减, 年降水量为 236.9~535.8 mm。以大兴安岭为界, 西侧为额尔古纳水系, 东侧为嫩江水系。大兴安岭及其以东植被类型以森林为主, 如兴安落叶松、樟子松、白桦、蒙古栎等。呼伦贝尔高原植被类型有灌丛、草甸和草原等。东部土壤类型以棕色针叶林土、灰色森林土为主, 西部土壤类型以黑钙土、栗钙土等为主。



基于标准地图制作, 审图号: 蒙 S(2023)039 号。

图 1 呼伦贝尔所在位置

2 数据与方法

2.1 数据来源

气温、降水量、相对湿度、气压、日照时数、风速等气候数据均来自于呼伦贝尔市气象局, 包含 16 个

气象站点,根据 1961—2023 年气候数据月均值,整理形成年、季序列值。季节划分为春季(3—5 月)、夏季(6—8 月)、秋季(9—11 月)和冬季(12 月至次年 2 月)。以 400 mm 等降水量线为界,将该区域划分为半湿润、半干旱区:半湿润区为大兴安岭中部山地及其以东地区,包含阿荣旗、博克图、鄂伦春、根河、莫力达瓦旗(莫旗)、图里河、小二沟、扎兰屯 8 个气象站点;半干旱区为岭西地区,包含陈巴尔虎旗(陈旗)、额尔古纳、鄂温克旗、海拉尔、满洲里、新巴尔虎右旗(新右旗)、新巴尔虎左旗(新左旗)、牙克石 8 个气象站点。本研究分别就半湿润、半干旱区水分盈亏量时空差异进行分析。

2.2 水分盈亏量

水分盈亏量主要决定于降水量与潜在蒸发量差值的大小:若为正值,则表示水分盈余;若为负值,则表示水分亏缺。影响水分盈亏量的因素主要有太阳辐射(净辐射)、日照百分率、气温、相对湿度、风速及降水量等,因此,水分盈亏量是可以反映一个地区干湿程度的综合性指标。计算公式如下^[26-28]:

$$K = P - ET_0 \quad (1)$$

式中: K 为水分盈亏量, P 为降水量, ET_0 为潜在蒸散量^[29-32]。 $K > 0$ 时,表示该区域的降水量能够为潜在蒸散提供充足水源,水分盈余,气候湿润; $K < 0$ 时,表示该区域的降水量难以满足潜在蒸散过程中所需要的水分,水分亏缺,气候干旱^[33]。

2.3 数据模拟

对水分盈亏量变化趋势采用最小二乘法进行拟合计算。由于协同克里金(Co-kriging)插值法具有空间估计增强和预测误差低的优势^[34],本研究采用该方法,以气象站点经、纬度及高程数据(DEM,分辨率为 90 m)作为协变量,对年、季水分盈亏量进行空间插值。

3 结果与分析

3.1 空间分布特征

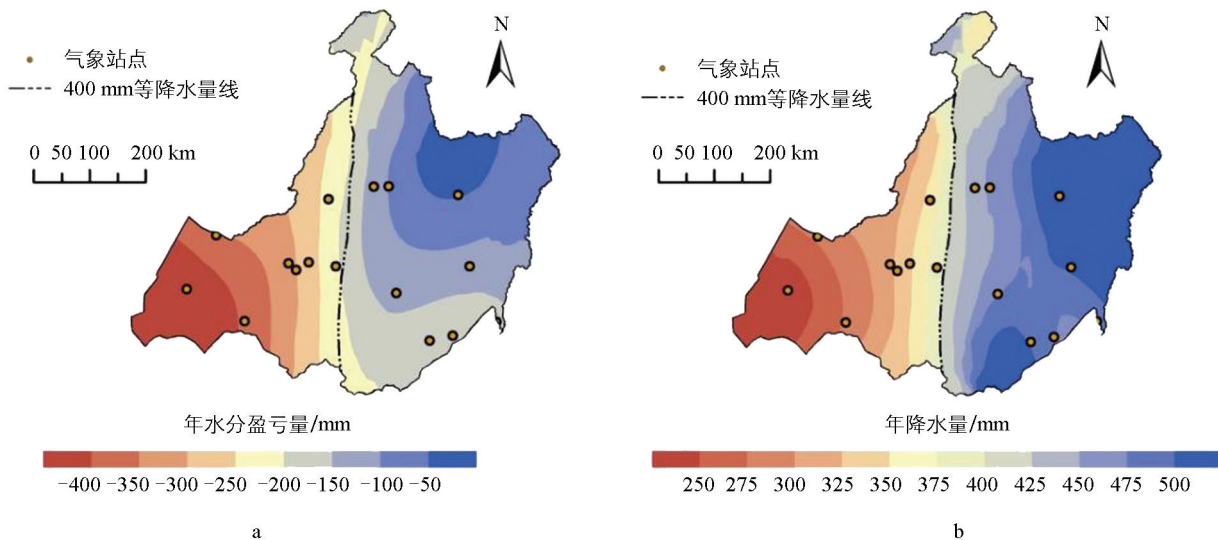
3.1.1 年变化

呼伦贝尔年水分盈亏量与年降水量空间分布态势并不完全一致。年水分盈亏量($K < 0$)总体呈现水分亏缺态势,自东向西,水分亏缺呈增加态势。半湿润区水分亏缺程度较小($-200 \text{ mm} < K < -41 \text{ mm}$),年水分盈亏量平均值为 -125.0 mm ,其中东北部鄂伦春站(-44.6 mm)水分亏缺程度最小,年水分盈亏量等值线呈弧形由北向南递减。半干旱区水分亏缺程度较大($-455 \text{ mm} < K < -200 \text{ mm}$),年水分盈亏量平均值为 -310.8 mm ,其中西南部新右旗站(-449.6 mm)水分亏缺程度最大,年水分盈亏量等值线大致平行于等降水量线,自东向西递减。半湿润与半干旱区年水分盈亏量平均值相差 185.8 mm ,最大差值约 400 mm 。与东北其他地区^[27]相比,呼伦贝尔属于水分亏缺量较大的区域,且年、季变化明显。由东向西,年水分亏缺量逐渐增大。受东亚季风和大兴安岭的影响,年降水量由东向西递减,年降水量最大值为 535.8 mm (鄂伦春站),最小值为 236.9 mm (新右旗站)。半湿润区与半干旱区潜在蒸发量大致相当(表 1),因此,年水分盈亏量(K)的空间分异特征主要取决于年降水量的空间分异特征,大致表现为由东向西递减的态势。半湿润区年水分亏缺程度较小,半干旱区水分亏缺程度较大(表 1、图 2)。

表 1 呼伦贝尔半湿润区、半干旱区降水量与潜在蒸发量及水分盈亏量

mm

	半湿润区					半干旱区				
	年	春	夏	秋	冬	年	春	夏	秋	冬
降水量	490.5	60.0	342.9	77.2	10.4	320.9	37.0	223.0	50.9	10.0
潜在蒸发量	615.5	178	311.8	105.3	20.4	631.7	174.1	337.1	103.9	16.6
水分盈亏量	-125.0	-118.0	31.1	-28.1	-10.0	-310.8	-137.1	-114.1	-53.0	-6.6



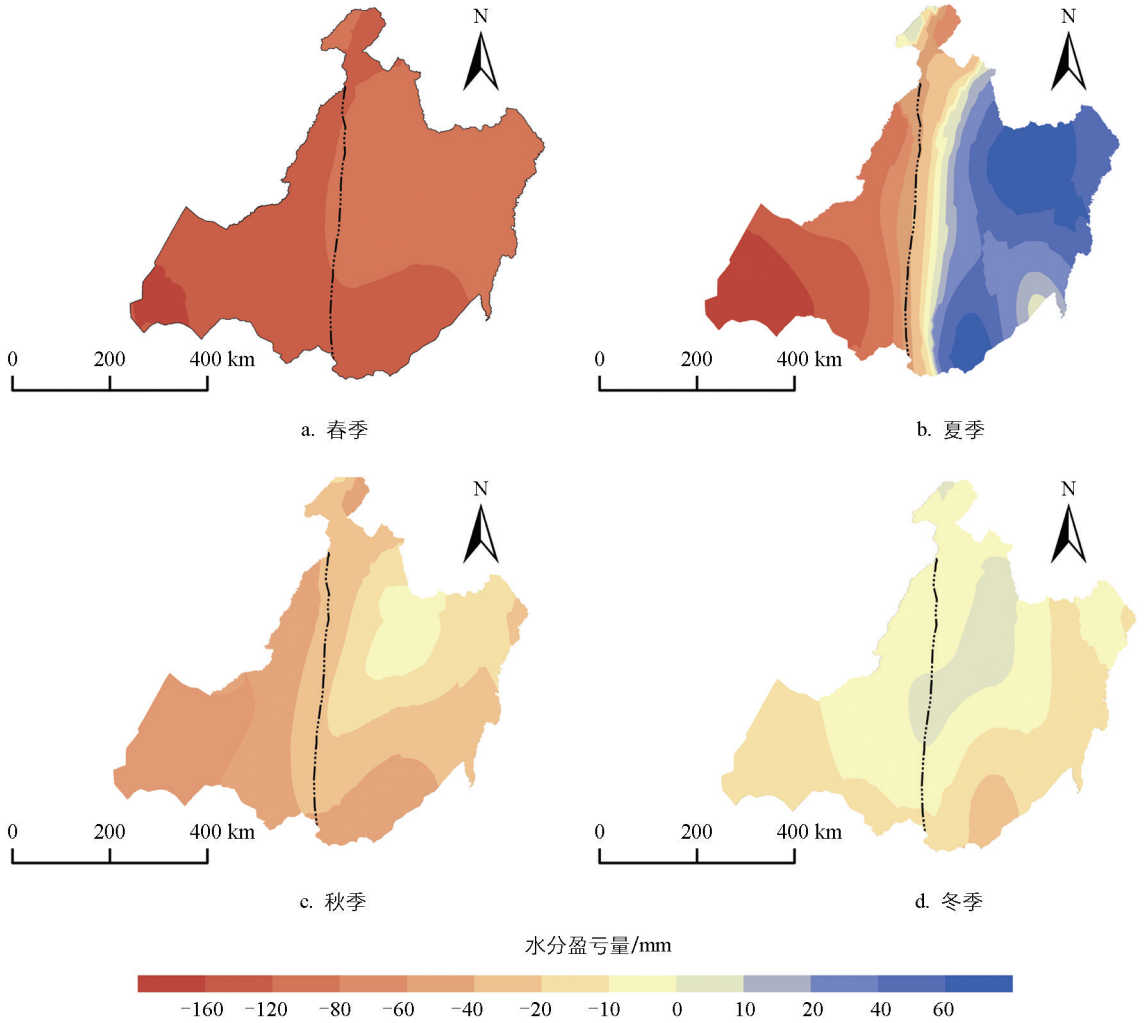
基于标准地图制作, 审图号: 蒙 S(2023)039 号。

图 2 呼伦贝尔年水分盈亏量和年降水量空间分布特征

3.1.2 季节变化

四季水分盈亏量与年水分盈亏量空间分布趋势相似, 大致表现为自东向西, 水分亏缺量呈增加态势(图 3)。不同季节水分亏缺程度差异较大, 且空间差异明显。春季水分亏缺程度最大($-163.2 \text{ mm} < K < -96.4 \text{ mm}$), 普遍比较干旱。与半干旱区($-163.2 \text{ mm} < K < -120 \text{ mm}$)相比, 半湿润区水分亏缺程度较小($-120 \text{ mm} < K < -80 \text{ mm}$), 二者最大值相差 66.8 mm。夏季水分盈亏量为 $-190.0 \sim 77.0 \text{ mm}$, 受东亚夏季风和地形共同影响, 空间差异最大, 达 267.0 mm, 自东向西, 水分盈余量减少, 亏缺量增加。半湿润区水分亏缺程度较小($-40 \text{ mm} < K < 77 \text{ mm}$), 大部分地区表现为水分盈余; 半干旱区水分亏缺程度较大($-190.0 \text{ mm} < K < -40 \text{ mm}$)。大兴安岭山地(博克图—海拉尔)水分盈亏量等值线密集, 自东向西, 水分迅速由盈余转为亏缺状态。秋季总体呈水分亏缺态势($-80.2 \text{ mm} < K < -9.4 \text{ mm}$), 自东北向西南, 水分亏缺量逐渐增大, 空间差异为 70.8 mm。半湿润区水分亏缺量小($-40 \text{ mm} < K < -9.4 \text{ mm}$), 半干旱区大部分区域水分亏缺量较大($-80.2 \text{ mm} < K < -40 \text{ mm}$)。冬季水分盈亏程度最小($-20.9 \text{ mm} < K < 2.3 \text{ mm}$), 空间差异亦最小(23.2 mm), 东北部林区水分略显盈余, 其他区域水分略呈亏缺态势, 东南部水分亏缺量较大。半湿润区水分呈现小幅亏缺和盈余并存, 半干旱区多为小幅水分亏缺态势。

春季气温开始进入快速回升阶段, 植被覆盖较小, 风速较大, 潜在蒸发量较大, 此时降水量增幅远小于潜在蒸发量的增幅, 与其他季节相比, 春季呼伦贝尔水分亏缺程度最大(图 3a); 半湿润区降水量平均值(60 mm)比半干旱区(37.0 mm)稍大, 半湿润区水分亏缺程度平均值(-118.0 mm)比半干旱区(-137.1 mm)稍小。进入夏季, 随着东亚夏季风的强盛, 开始进入多雨季节, 尽管潜在蒸发量随气温升高而增大, 但降水量也在增大, 因大兴安岭的阻隔效应, 东西两侧降水量呈现明显的空间差异(东多西少)。东部半湿润区降水量明显大于潜在蒸发量, 表现为盈余态势; 西部半干旱区降水量小于潜在蒸发量, 呈现水分亏缺态势, 导致夏季水分盈亏量空间差异明显(图 3b), 干湿差距最大。秋季降水量明显减少, 且小于潜在蒸发量, 秋季呼伦贝尔总体呈水分亏缺态势, 且空间差异明显。半湿润区降水量平均值(77.2 mm)大于半干旱区降水量平均值(50.9 mm), 从半湿润区到半干旱区, 表现为自东北向西南, 水分亏缺程度增大(图 3c)。与其他季节相比, 冬季降水量最小, 且空间差异最小, 气温低, 潜在蒸发量小, 水分亏缺量普遍较小, 干湿程度空间差异最小, 东北部林区呈水分盈余, 其他区域略呈水分亏缺态势(图 3d)。



基于标准地图制作, 审图号: 蒙 S(2023)039 号。

图 3 呼伦贝尔四季水分盈亏量空间分布特征

3.2 时间变化特征

3.2.1 年变化

呼伦贝尔不同气候区年水分盈亏量变化趋势特征(图 4a、图 5a)显示, 自 1961 年以来, 自东南向西北, 年水分盈亏量倾向率逐渐减小, 东西差异较大, 除阿荣旗外, 其他站点均未通过 95% 的显著性检验, 说明大部分站点水分盈亏变化趋势不显著, 但不同气候区总体差异比较大。半湿润区年水分盈亏量倾向率为 0.71 mm/年 ($p > 0.10$), 除根河、图里河站(年水分盈亏量倾向率分别为 -0.72 mm/年 、 -0.31 mm/年)外, 多数站点年水分盈亏量倾向率为正值, 说明大兴安岭以东的半湿润区年水分盈余增大趋势不显著。半干旱区年水分盈亏量倾向率为 -0.59 mm/年 ($p > 0.10$), 减小趋势不显著, 除海拉尔、新左旗(年水分盈亏量倾向率分别为 0.83 mm/年 、 0.23 mm/年)外, 年水分盈亏量倾向率为负值, 且越往西, 年水分盈亏量倾向率越偏负, 其中满洲里、额尔古纳水分亏缺状态愈加明显, 说明大兴安岭以西大部分地区年水分亏缺呈不显著增大趋势。最终导致半干旱区更为干旱, 半湿润区更为湿润, 符合“干干湿湿”模式^[35-36]。半湿润与半干旱区年水分盈亏量差值倾向率为 1.30 mm/年 ($p < 0.05$), 这意味着呼伦贝尔东、西部干湿差距正趋于显著增大。

除半干旱区夏季降水量倾向率为负值外, 年、季尺度降水量和潜在蒸发量倾向率均为正值(表 2)。与以往研究结论^[36]类似, 这表明增温背景下^[37-38], 呼伦贝尔地表水循环过程趋于增强, 预示干湿空间差异会逐步加剧, 加大了极端事件风险发生的概率。

与前人研究结果一致^[38], 1961—2023 年年水分盈亏量变化趋势(图 4a)表明呼伦贝尔不同气候区干湿

差距正趋于显著增大。年降水量和年潜在蒸发量变化率的非一致性是区域内部干湿差异逐渐明显的主要原因。半湿润区年降水量倾向率(1.39 mm/年)大于年潜在蒸发量倾向率(0.68 mm/年), 半干旱区年降水量倾向率(0.30 mm/年)小于年潜在蒸发量倾向率(0.89 mm/年)。这意味着半湿润区年降水量增加幅度大于年潜在蒸发量增加幅度, 而半干旱区年降水量增加幅度小于年潜在蒸发量增加幅度, 最终导致呼伦贝尔东、西部干湿差距逐渐增大, 同时也充分证实了降水与干湿变化趋势的非一致性^[39]。

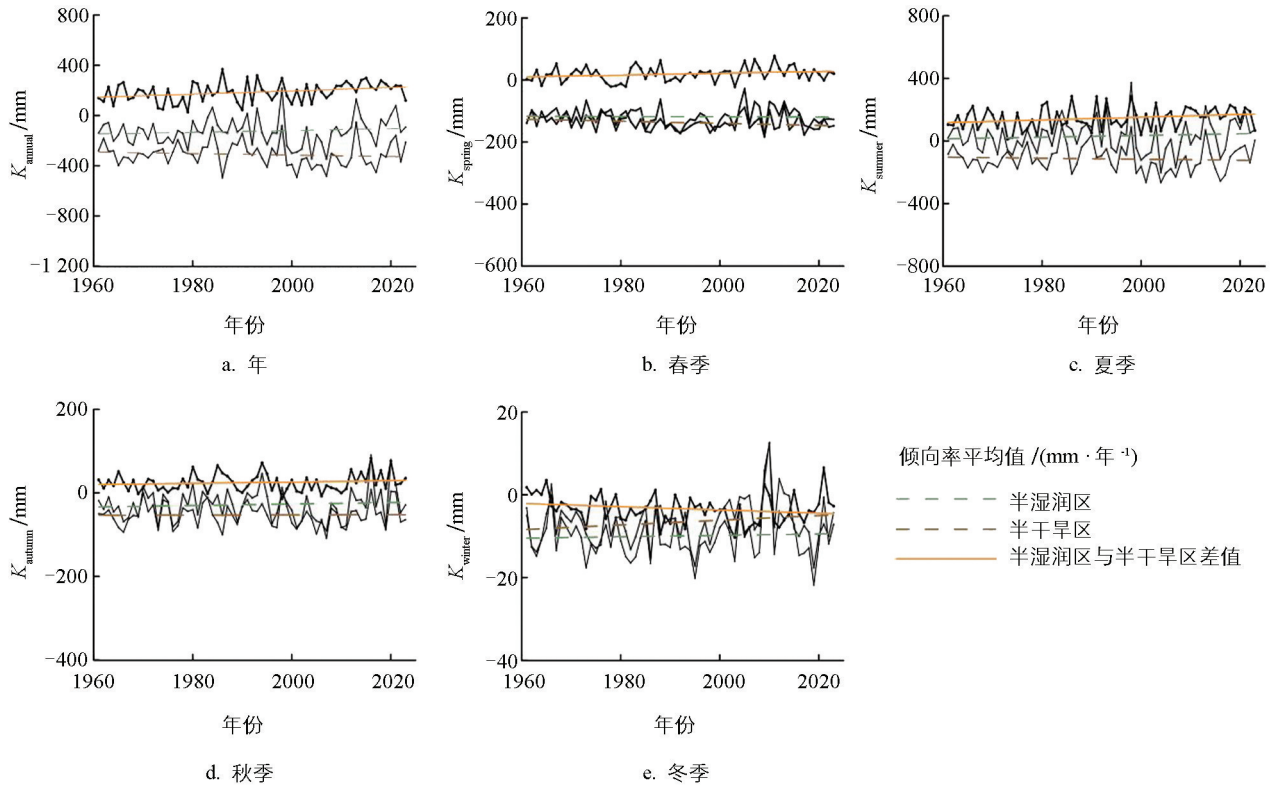
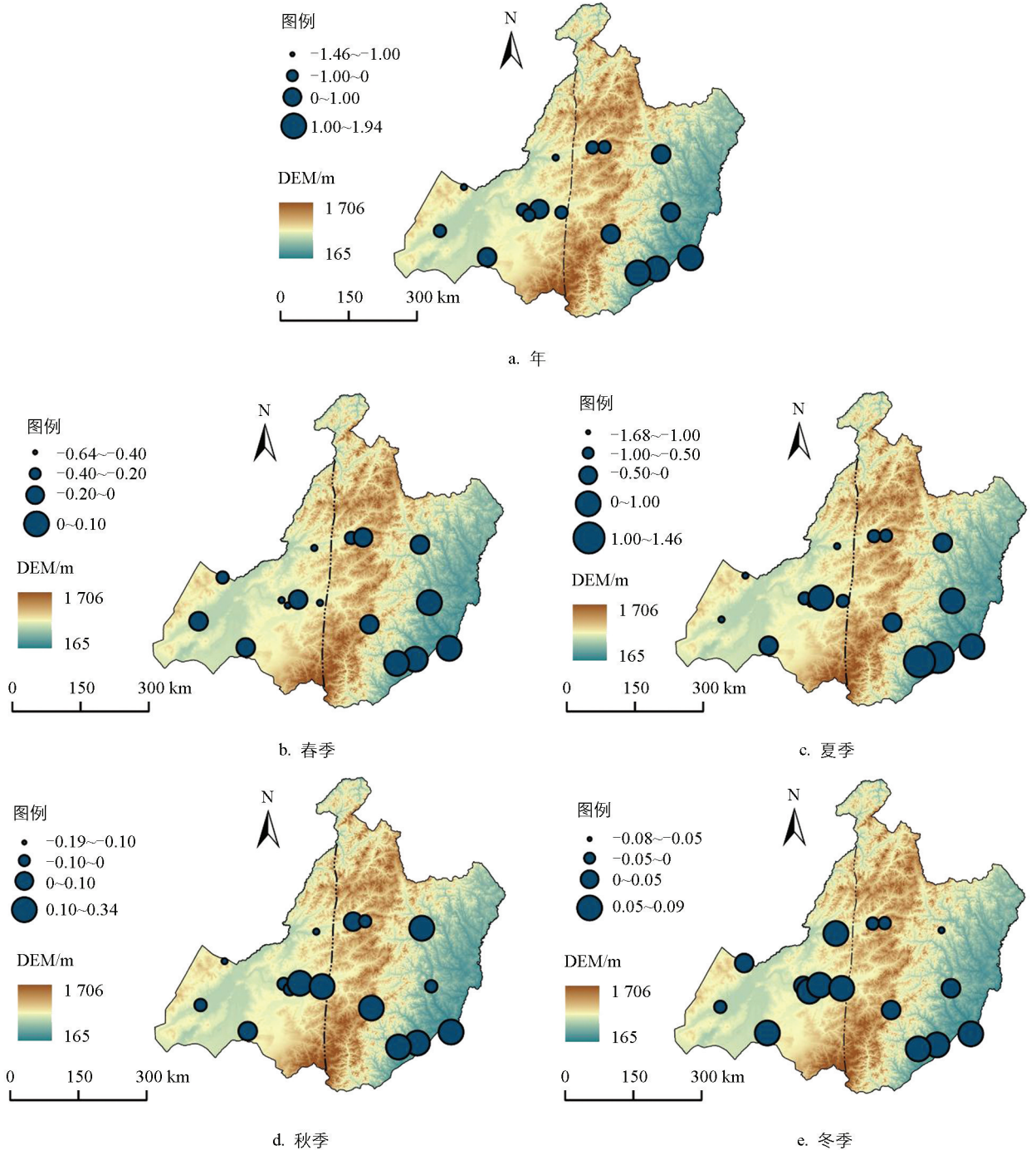


图 4 呼 伦 贝 尔 不 同 气 候 区 水 分 盈 亏 量 年、季 变 化 特 征

3.2.2 季节变化

季节尺度不同气候区水分盈亏量变化趋势差异明显(图 4b-d, 图 5b-d)。春、夏季半湿润与半干旱区干湿差距明显增大($p < 0.10$), 秋季二者差距不显著($p > 0.10$), 冬季二者差距趋于明显减小($p < 0.10$)(图 4b-d)。气象站点季节水分盈亏量倾向率(多数未通过 95% 的显著性检验)特征显示, 自东南向西北, 春、夏、秋三季水分盈亏量倾向率逐渐减小, 指示水分亏缺程度在增大。冬季多数站点水分盈亏量倾向率为正值, 表明大部分区域水分呈盈余趋势(图 5b-d)。半湿润区春季水分盈亏量倾向率为 $-0.32 \sim 0.10$ mm/年(图 5b), 平均值为 -0.04 mm/年($p > 0.10$)(图 4b), 其中东南部小二沟、阿荣旗、莫旗、扎兰屯水分盈亏量倾向率偏正, 说明总体呈小幅不显著转亏趋势, 局部呈不显著水分盈余趋势。半干旱区春季水分盈亏量倾向率平均值为 -0.34 mm/年($p < 0.05$)(图 4b), 半干旱区所有站点水分盈亏量倾向率均为负值, 尤以陈旗、鄂温克、额尔古纳和牙克石干旱趋势最为显著(通过 95% 的信度检验)(图 5b), 说明水分亏缺趋势在不断加剧, 局部地区甚为明显。半湿润与半干旱区春季水分盈亏量倾向率差值为 0.30 mm/年($p < 0.10$)(图 4b), 说明春季不同气候区干湿差距在不断增大, 总体呈显著干旱趋势, 且半干旱区尤为显著。半湿润区夏季水分盈亏量倾向率平均值为 0.56 mm/年($p > 0.10$)(图 4c), 除根河、图里河外, 多数站点夏季水分盈亏量倾向率为正值(图 5c), 说明半湿润区夏季水分呈不显著盈余趋势。半干旱区夏季水分盈亏量倾向率平均值为 -0.33 mm/年($p > 0.10$)(图 4c), 除海拉尔、新左旗外, 其余站点夏季水分盈亏量倾向率均为负值(图 5c), 说明半干旱区夏季水分亏缺量在普遍增大, 但不显著。半湿润与半干旱区夏季水分盈亏量倾向率差值为 0.89 mm/年($p < 0.10$)(图 4c), 说明夏季二者干湿差异在明显加剧。半湿润、半干旱区秋季水分盈亏量倾向率平均值分别为 0.18 mm/年($p > 0.10$)、 0.02 mm/年($p > 0.10$), 二者差值为 0.16 mm/年($p > 0.10$)(图 4d)。这说明水分总体呈盈余趋势, 指示

呼伦贝尔秋季水分向盈余趋势转变,水分亏缺状态将得到缓解,半湿润与半干旱区干湿差异依然呈不显著增大趋势。除小二沟、图里河外,其余站点水分盈亏量倾向率均为正值,秋季半湿润区总体依然呈水分盈余趋势;除海拉尔、牙克石、新左旗外,半干旱区其余站点水分盈亏量倾向率均为负值(图 5d),导致半干旱区水分略显湿润趋势。半湿润、半干旱区冬季水分盈亏量倾向率平均值分别为 0.02 mm/年($p>0.10$)、0.06 mm/年($p>0.10$),二者差值为-0.04 mm/年($p>0.10$)(图 4e),除新右旗、根河、图里河及鄂伦春站点外,多数站点冬季水分盈亏量倾向率为正值(图 5e),说明呼伦贝尔冬季水分总体呈不显著盈余趋势,且不同气候区干湿差距趋于减小。



基于标准地图制作, 审图号: 蒙 S(2023)039 号; 图中不同气象站点年、季水分盈亏量倾向率单位为 mm/年。

图 5 呼伦贝尔不同气象站点年、季水分盈亏量倾向率特征

东亚季风影响下,夏季降水量变化趋势是决定不同气候区干湿差距的主导因素(表 2)。半湿润区夏季

降水量呈增加趋势(0.67 mm/年), 半干旱区夏季降水量呈减小趋势(-0.11 mm/年); 与半干旱区(潜在蒸发量倾向率为 0.22 mm/年)相比, 半湿润区夏季潜在蒸发量增加趋势(0.11 mm/年)较小, 导致不同气候区夏季干湿差异逐渐增大, 半干旱区持续变干, 半湿润区持续变湿, 形成“干干湿湿”变化模式。其他季节(春、秋、冬), 不同气候区干湿变化趋势存在相似性, 但变化速率存在差异。半湿润区、半干旱区春季降水量倾向率均小于潜在蒸发量倾向率, 普遍变干, 半干旱区干旱程度更大。半湿润区、半干旱区秋、冬季降水量倾向率大于潜在蒸发量倾向率, 秋、冬季具有湿润趋势, 半湿润区秋季湿润程度更大, 半干旱区冬季变湿幅度更大。由此导致春、秋季仍表现出不同气候区干湿差异加剧, 而冬季空间差异减小的趋势。冬季暖湿现象可能与增温^[37]引起的饱和水汽压增大有关, 但这并不意味着与雪被厚度有关^[40]。

表 2 呼伦贝尔半湿润区、半干旱区降水量及潜在蒸发量倾向率

mm/年

倾向率	半湿润区					半干旱区				
	年	春	夏	秋	冬	年	春	夏	秋	冬
降水量	1.39*	0.29	0.67	0.34	0.09**	0.30	0.10	-0.11	0.21	0.11**
潜在蒸发量	0.68**	0.33**	0.11	0.16**	0.07**	0.89**	0.44**	0.22	0.19**	0.05*

注: ** 表示通过 99% 的信度检验 ($p < 0.01$); * 表示通过 95% 的信度检验 ($p < 0.05$)。

不同气候区干湿变化过程主要取决于气候系统内部调节机制。东亚夏季风和大兴安岭阻隔的共同影响下, 半湿润区降水过程发生的概率明显大于半干旱区, 因此, 降水量以及降水量倾向率均表现为半湿润区大于半干旱区。半湿润区处于迎风坡, 降水量较大, 蒸发源充足, 地表能量以潜热交换为主, 土壤湿度和植被覆盖度较高, 陆面蒸发和蒸腾作用消耗热量^[41], 以及因降水导致的湿度增大和风速减弱^[32]共同抑制了潜在蒸发量的增加趋势; 半干旱区处于背风坡(雨影区), 因降水量有限, 土壤湿度和植被覆盖度较低, 显热通量占比增加, 饱和水汽压差较大, 导致半干旱区潜在蒸发量增加速率明显大于半湿润区潜在蒸发量增加速率。因此, 造成了不同气候区降水量和潜在蒸发量增幅的不一致性, 进而导致不同气候区干湿变化的非同步性。

4 结论与讨论

4.1 讨论

增温背景下, 降水、蒸发等水循环关键过程都在不断加强。不同气候区降水量和蒸发量变化趋势和速率的不一致性是导致不同气候区干湿变化非同步性的主要原因。受东亚夏季风和大兴安岭山地阻隔的影响, 呼伦贝尔夏季降水量空间差异较大。主要因夏季降水量空间差异而引起的气候系统内部调节结果差异, 导致了不同气候区降水量和蒸发量变化趋势和速率呈现不一致性。这是决定不同气候区干湿差距日渐增大的主要原因。由此说明, 在增温的背景下, 依据降水量单一指标变化趋势判别并不能够准确地评估区域的干湿趋势和程度。

目前, 关于气候干湿变化机制的研究, 仍然面临诸多挑战。地表基本过程的特征还不甚清楚, 陆面模式中关键参数的厘定存在着很大的不确定性, 模拟的结果缺乏验证, 无法量化其影响的大小^[36]等问题依然存在。对呼伦贝尔及类似区域, 干湿变化过程及其驱动机制仍有较大的研究空间, 如从增温带来的负效应、季风环流的时空差异以及水热平衡组合特征的区域差异等方面, 量化分析气候系统内部调节机制。

本研究采用水分盈亏量指标, 依据地表水循环关键参数, 即降水量和潜在蒸发量的变化特征, 对不同气候区干湿变化特征及成因进行分析。这将为呼伦贝尔地区灾害预警、水资源调配、区域生态管理等领域提供科学数据支撑, 为类似的气候生态过渡区气候变化研究提供参考。

4.2 结论

年水分盈亏量与年降水量空间格局并不完全一致, 且不同气候区差异明显, 自西南向东北, 年水分盈亏量呈增加态势, 半干旱区比半湿润区水分亏缺程度更大。不同季节水分盈亏数量及空间格局均存在较大差异, 春季水分盈亏量最大, 夏季水分盈亏量空间差异最明显, 秋季水分亏缺程度有所缓解, 冬季水分盈亏量空间差异最小。

1961—2023 年呼伦贝尔不同气候区干湿变化呈现明显非同步性。年、夏季水分盈亏量变化趋势表明,

半湿润、半干旱区符合“干干湿湿”模式,虽然半湿润区变湿以及半干旱区变干的特征并不显著,但由此导致的半湿润与半干旱区干湿差异却在显著加剧。春、秋、冬季不同气候区干湿变化趋势存在相似性,但变化速率存在差异。春季普遍呈干旱化趋势,但半干旱区干旱化程度大、趋势更为显著;秋季水分亏缺状态普遍得到缓解,湿润化程度半湿润区大于半干旱区,由此导致春、秋季仍表现出不同气候区干湿差异加剧的趋势。冬季呈不显著小幅湿润趋势,且空间差距在缩小。

参考文献:

- [1] 孙力,沈柏竹,安刚. 中国东北地区地表干湿状况的变化及趋势分析 [J]. 应用气象学报, 2003, 14(5): 542-552.
- [2] RUIZ-ÁLVAREZ O, ARTEAGA-RAMÍREZ R, VÁZQUEZ-PENA M, et al. Water Balance and Climatic Classification of the State of Tabasco, Mexico [J]. Universidad Ciencia, 2012, 28: 1-14.
- [3] 颜雅琼,申双和. 近 50 多年来淮河流域气候水分盈亏时空变化 [J]. 气象科学, 2019, 39(4): 457-466.
- [4] SUDHISHRI S, DASS A, PAIKARAY N K. Water Balance Studies and Strategies for Combating Water Deficit in Upper Kolab Catchment of Orissa [J]. Hydrology Journal, 2007, 30(3-4): 103-116.
- [5] ZUO Y, WANG Q F, ZHENG H, et al. Seasonal Variations of the Water Budget in Typical Grassland Ecosystems in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(4): 301-310.
- [6] BANDOC G, PRAVALIE R. Climatic Water Balance Dynamics over the last Five Decades in Romania's Most Arid Region, Dobrogea [J]. Journal of Geographical Sciences, 2015, 25(11): 1307-1327.
- [7] KUMAR G, SRINIVASAN D. Climatic Water Balance Study and Drought Assessment in Kallar Watershed, Tamil Nadu, India [J]. International Journal of Earth Sciences and Engineering, 2016, 9(3): 958-962.
- [8] SENTELHAS P. Water Deficit and Water Surplus Maps for Brazil, Based on FAO Penman-Monteith Potential Evapotranspiration [J]. Ambiente e Agua-an Interdisciplinary Journal of Applied Science, 2008, 3(3): 28-42.
- [9] 贾艳青,张勃. 1960—2017 年中国北方气候干湿变化及其与 ENSO 的关系 [J]. 地理科学, 2020, 40(12): 2115-2124.
- [10] 王亚萍,王帅,丁婧祎,等. 气候变化背景下全球陆地干湿变化研究综述 [J]. 生态学报, 2023, 43(2): 475-486.
- [11] BAO Y Z, DUAN L M, TONG X, et al. Simulation and Partition Evapotranspiration for the Representative Landform-Soil-Vegetation Formations in Horqin Sandy Land, China [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2020, 140(3): 1221-1232.
- [12] WANG P, LI X Y, WANG L X, et al. Divergent Evapotranspiration Partition Dynamics between Shrubs and Grasses in a Shrub-Encroached Steppe Ecosystem [J]. New Phytologist, 2018, 219(4): 1325-1337.
- [13] ZHANG Q, XU C Y, ZHANG Z X. Observed Changes of Drought/Wetness Episodes in the Pearl River Basin, China, Using the Standardized Precipitation Index and Aridity Index [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2009, 98(1): 89-99.
- [14] ŁABEDZKI L, BAK B. Indicator-Based Monitoring and Forecasting Water Deficit and Surplus in Agriculture in Poland [J]. Annals of Warsaw University of Life Sciences, Land Reclamation, 2015, 47(4): 355-369.
- [15] WANG F, CHEN Y N, LI Z, et al. Assessment of the Irrigation Water Requirement and Water Supply Risk in the Tarim River Basin, Northwest China [J]. Sustainability, 2019, 11(18): 4941.
- [16] ZHANG B Q, HE C S. A Modified Water Demand Estimation Method for Drought Identification over Arid and Semiarid Regions [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2016, 230: 58-66.
- [17] 李春华,朱飙,杨金虎,等. 中国区域气候干湿与土壤湿度变化特征及其差异性分析 [J]. 干旱区地理, 2024, 47(10): 1674-1687.
- [18] 高艳红,许建伟,张萌,等. 中国 400 mm 等降水量变迁与干湿变化研究进展 [J]. 地球科学进展, 2020, 35(11): 1101-1112.
- [19] 于本金,春喜. 近 60 a 来内蒙古降水量时空变化分析 [J]. 内蒙古师范大学学报(自然科学汉文版), 2022, 51(3): 221-228.
- [20] SUN B, LIU Y, LEI Y. Growing Season Relative Humidity Variations and Possible Impacts on Hulunbuir Grassland [J]. Science Bulletin, 2016, 61(9): 728-736.
- [21] 刘宏宇,海全胜,刘美萍,等. 1960—2021 年内蒙古高温干旱复合事件特征分析 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2025, 47(5): 164-176.

- [22] LI Z Y, YANG Q, MA Z G, et al. Aridification and Its Impacts on Terrestrial Hydrology and Ecosystems over a Comprehensive Transition Zone in China [J]. *Journal of Climate*, 2024, 37(5): 1651-1666.
- [23] 崔凤琪, 唐海萍, 张钦, 等. 1960—2017 年呼伦贝尔草原极端气候事件时空变化 [J]. *干旱区研究*, 2018, 35(6): 1382-1391.
- [24] 郝睿超, 王洪葆, 王辰, 等. 气候变化背景下黄土高原干湿演变特征及成因分析 [J]. *灌溉排水学报*, 2024, 43(12): 74-83.
- [25] 任宾宾, 王平, 邱绍柱, 等. 基于 Co-kriging 的呼伦贝尔市 2018 年降水量空间分布特征模拟及插值精度分析 [J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2021, 43(11): 162-171.
- [26] 高歌, 许崇育. 1961—2010 年中国十大流域水分盈亏量时空变化特征 [J]. *地理学报*, 2015, 70(3): 380-391.
- [27] 曾丽红, 宋开山, 张柏. 1951—2008 年东北地区水分盈亏量时空格局 [J]. *自然资源学报*, 2011, 26(5): 858-870.
- [28] 史建国, 严昌荣, 何文清, 等. 黄河流域水分亏缺时空格局变化研究 [J]. *自然资源学报*, 2008, 23(1): 113-119.
- [29] ALLEN R G. *Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements* [M]. Rome: FAO, 1998.
- [30] YIN Y H, WU S H, ZHENG D, et al. Radiation Calibration of FAO56 Penman-Monteith Model to Estimate Reference Crop Evapotranspiration in China [J]. *Agricultural Water Management*, 2008, 95(1): 77-84.
- [31] 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.
- [32] 王志春, 王彦平, 徐震宇, 等. 内蒙古不同干湿区潜在蒸散发变化特征及主导因子分析 [J]. *干旱区地理*, 2025, 48(4): 612-622.
- [33] 赵聚宝, 徐祝龄, 钟兆站, 等. *中国北方旱地农田水分平衡* [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [34] ADHIKARY S K, MUTTIL N, YILMAZ A G. Cokriging for Enhanced Spatial Interpolation of Rainfall in Two Australian Catchments [J]. *Hydrological Processes*, 2017, 31(12): 2143-2161.
- [35] 徐金勤, 肖潇, 朱平, 等. 1960—2019 年中国不同干湿气候区地表干湿变化特征及其归因分析 [J]. *气候与环境研究*, 2025, 30(2): 129-140.
- [36] 符淙斌, 马柱国. 全球干旱/半干旱区年代尺度干湿变化研究的进展及思考 [J]. *大气科学学报*, 2023, 46(4): 481-490.
- [37] 曲学斌, 吴昊. 呼伦贝尔市 53 年气候变化特征分析 [J]. *水土保持研究*, 2014, 21(1): 178-182.
- [38] 代海燕, 李丹, 娜日苏, 等. 内蒙古干湿环境演变与地区生态建设优势气候背景分析 [J]. *干旱区地理*, 2019, 42(4): 745-752.
- [39] 徐丽君, 卫琦, 徐俊增, 等. 中国北方干旱区降雨与相对湿度变化趋势的非一致性研究 [J]. *水资源与水工程学报*, 2021, 32(2): 38-44.
- [40] HU Q, PAN F F, PAN X B, et al. Spatial Analysis of Climate Change in Inner Mongolia during 1961-2012, China [J]. *Applied Geography*, 2015, 60: 254-260.
- [41] 娜扎开提·阿不都米吉提, 杨涵. 2000—2021 年乌鲁木齐河流域地表温度的时空变化特征分析 [J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2024, 46(2): 139-149.

责任编辑 王新娟
杨光明