

气候变化下 1960—2020 年长江源区水文气象要素变化趋势

沈 龙¹, 吴 南^{2,3}, 罗煜宁³, 王宇昊³, 孙建文¹, 王一帆¹, 张 珂^{3,4,5,6,7,8}

(1. 云南电网有限责任公司电力科学研究院; 2. 南京水利科学研究院; 3. 河海大学水灾害防御全国重点实验室;
4. 河海大学水文水资源学院; 5. 河海大学长江保护与绿色发展研究院; 6. 中国气象局水文气象重点开放实验室;
7. 水利部水利大数据重点实验室; 8. 水利部水循环与水动力系统重点实验室)

摘要:基于 1960—2020 年长江源区水文气象要素数据,采用 Pettitt 非参数检验、一元线性回归等方法,系统分析了径流深、降水量、气温、潜在蒸散发及积雪特征等要素的突变特征及月尺度变化。结果表明:1960—2020 年长江源区多年平均径流深为 90 mm,2004 年后由下降趋势转为回升;年降水量于 1997 年出现突变,突变前以 0.54 mm/a 的速率增加,突变后略有下降;多年平均气温为 -4.5℃,自 1997 年起增温速率加快至 0.05℃/a,显著高于此前的 0.02℃/a;潜在蒸散发整体增加,突变后增幅达到 6%;多年平均积雪深度为 1.7 cm,呈下降趋势,速率为 0.1 cm/a;月尺度上,径流深和降水量均表现出明显季节性波动,夏季贡献占全年的 60% 以上;冬季气温升幅最大,呈现典型“冷季放大效应”;干燥指数多年平均值为 1.8,呈下降趋势,反映区域气候向湿润化转变;径流系数多年平均值为 0.2,2004 年前下降,之后出现回升,反映积雪融水及地下水补给等因素增加了水文过程复杂性。

关键词:水文气象要素;突变年份;长期趋势;干燥指数;径流系数;长江源区

Change trends of hydro-meteorological elements in the Yangtze River Source Region from 1960 to 2020 under climate change//Shen Long¹, Wu Nan^{2,3}, Luo Yuning³, Wang Yuhao³, Sun Jianwen¹, Wang Yifan¹, Zhang Ke^{3,4,5,6,7,8}

(1. Electric Power Research Institute, Yunnan Power Grid Co., Ltd.; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute; 3. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University; 4. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University; 5. Yangtze Institute for Conservation and Development, Hohai University; 6. China Meteorological Administration Hydro-Meteorology Key Laboratory; 7. Key Laboratory of Water Big Data Technology of Ministry of Water Resources; 8. Key Laboratory of Hydrologic-Cycle and Hydrodynamic-System of Ministry of Water Resources)

Abstract: Based on hydrometeorological data from 1960 to 2020, this study systematically analyzed the abrupt changes and monthly-scale variations in runoff depth, precipitation, temperature, potential evapotranspiration, and snow characteristics in the Yangtze River Source Region from 1960 to 2020, employing methods such as the Pettitt non-parametric test and simple linear regression. The results showed that during 1960-2020 in the Yangtze River Source Region, the multi-year average annual runoff depth was 90 mm, which shifted from a declining trend to an increasing trend after 2004. Annual precipitation exhibited a mutation in 1997, increasing at a rate of 0.54 mm/a before the mutation and slightly decreasing thereafter. The mean annual temperature was -4.5℃, with the warming rate accelerating from 0.02℃/a before 1997 to 0.05℃/a afterward, significantly higher than before. Potential evapotranspiration showed an overall increase, with a 6% rise after the mutation. The multi-year average snow depth was 1.7 cm, showing a decreasing trend, with a rate of 0.1 cm/a. At the monthly scale, runoff depth and precipitation showed significant seasonal fluctuations, with summer accounting for over 60% of the annual contribution. Winter temperatures showed the largest increase, exhibiting a typical “cold-season amplification effect”. The multi-year average aridity index was 1.8, showing a downward trend, reflecting the regional climate’s transition towards humidification. The multi-year average runoff coefficient was 0.2, decreased before 2004 and then rebounded, reflecting the increased complexity of hydrological processes due to factors such as snow melting and groundwater recharge.

基金项目:江苏省科技计划专项资金项目(BZ2024035);中国南方电网云南电网有限责任公司科技项目(YNKJXM20222329)
作者简介:沈龙(1973—),男,正高级工程师,硕士,主要从事电网安全生产管理及防灾减灾研究。E-mail:13888793496@yn.esg.cn
通信作者:吴南(1995—),女,工程师,博士,主要从事流域水文模拟预报研究。E-mail:nanwu@hhu.edu.cn

全球变暖已成为 21 世纪最突出的气候特征^[1],加速了全球水循环并显著改变了水资源的时空分布。青藏高原作为全球气候变化的“驱动力与放大器”^[2-4],自 20 世纪以来持续增温^[5],位于其腹地的长江源区对气候变化尤为敏感^[6-7]。该区域地势高峻,气候寒冷干旱,生态脆弱,环境承载力有限,对外部变化的响应迅速且强烈。近年来,区域内出现的冻土退化、径流变异等问题引起了广泛关注^[8-10]。

气象水文要素(降水量、气温、蒸散发、径流等)是衡量气候变化的重要指标,能够反映水循环对气候变化的响应机制^[5]。有研究显示,1961—2019 年长江源区气温和降水量均显著上升^[11],其中降水量是河道流量增加的主要驱动因素^[12],气温上升不仅直接影响降水量,还通过改变积雪、冻土及下垫面条件进一步影响流域水文过程^[6,9,13]。冰雪融水增加和冻土退化被认为是长江源区径流变化的重要因素^[10,14-15],增加了河道径流的不确定性。同时,区域年蒸散发量整体呈增加趋势^[7],使水文过程更趋复杂^[10]。

在全球气候变化背景下,揭示气候与水文要素间的耦合关系对区域水资源科学管理和风险防控具有重要意义^[16]。长期气象水文监测与分析可为水资源配置、生态保护及应对极端天气提供科学依据^[17]。鉴于此,本文系统分析 1961—2020 年长江源区径流、降水量、气温、潜在蒸散发及积雪等要素的年际与年内变化特征,旨在揭示气候变化下该区域水文气象要素的演变规律,为区域水资源管理及生态环境保护提供科学支撑。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

长江源区位于青藏高原中部及青海省西南部,地处唐古拉山与昆仑山之间,平均海拔超过 4000 m。该区域环境条件严酷,生态系统脆弱且对气候变化高度敏感^[6]。本文选取直门达水文站以上控制流域作为研究区(图 1),流域面积约 13.77 万 km²。研究区地形以高原丘陵为主,四周高、中部低,整体地势西高东低,相对高差较大,区域内分布有陡峭山峰、深谷河流及冰川湖泊等典型地貌。研究区位于高寒半干旱与半湿润气候过渡带,是典型高原山地气候,干燥寒冷,日照辐射强,无霜期较短。长江源区气候的季节性变化主要表现为暖湿型和冷干型两种模式交替,近年来受全球气候变

化影响,逐渐呈现暖湿化趋势^[17]。

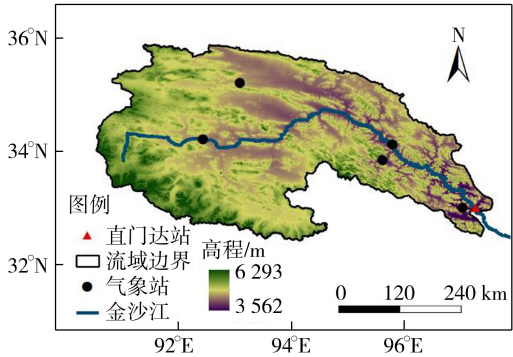


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

1.2 数据来源

数字高程模型数据来源于地理空间数据云平台 (<http://www.gscloud.cn/>),空间分辨率为 1 km。历史径流数据来源于水利部水文年鉴,选取直门达水文站 1961—2020 年逐月径流序列作为地面水文过程验证基准。气象数据采用 CN05.1 格点数据集^[18-20],该数据集基于中国 2 400 余个气象站点观测数据,运用气候场-距平场分层插值方法构建,空间分辨率 0.25°×0.25°,提供气温、降水、风速、湿度等的日/月尺度数据;基于此数据集,采用联合国粮农组织推荐的 Penman-Monteith 公式^[21-22]计算潜在蒸散发。积雪数据来源于中国雪深长时间序列数据集(1979—2018 年)^[23-24],空间分辨率为 0.25°,时间分辨率为日尺度;该数据集融合 SSMR、SSM/I 和 SSML/S 等多源被动微波遥感亮温数据,经过传感器间交叉校准^[25],并修正植被覆盖和降水影响,同时结合气象台站观测进行校正^[19],被认为是中国区域内精度最高的积雪深度产品^[26-27]。

2 研究方法

2.1 突变点检验

气候突变是水文气候系统中普遍存在的典型非线性现象,其特征表现为系统状态的统计特征(均值、方差等)在短时间内发生显著改变。为识别此类突变事件,本文采用 Pettitt 非参数检验法^[28]检测气象要素时间序列的结构性变化,概率值 $p < 0.05$ 表示突变点在统计上具有显著性。

2.2 趋势分析

采用一元线性回归模型估算水文气象要素的倾向率,用以定量描述时间序列的演变趋势, $p < 0.05$ 时认为趋势具有显著性。对于回归模型的不确定

性,若拟合回归线的 95%置信区间不包含 0,即认为该趋势在 95%置信水平下显著^[5]。

2.3 积雪特征分析

本文将水文积雪年定义为当年 9 月 1 日至次年 8 月 31 日。年均积雪深度指水文积雪年内所有日雪深的算术平均值(包括无雪日);最大积雪深度为水文积雪年内观测到的最大日雪深值;最大雪深发生日为该最大值出现的儒略日。

3 结果与分析

3.1 水文气象要素年际变化特征

图 2 为 1960—2020 年长江源区水文气象要素的变化趋势。由图 2 可见,各水文气象要素在不同年份出现显著突变:年径流深在 2004 年,年降水量和年均气温在 1997 年,潜在蒸散发在 2005 年。多年平均径流深为 90 mm,1960—2004 年呈下降趋势,2004 年突变后开始回升,并于 2008 年达到峰值的 162 mm。年降水量呈现明显阶段性特征,1960—1997 年突变前以 0.54 mm/a 的速率增长,多年平均值为 386 mm;突变后降水趋势由增转降,下降速率为 0.11 mm/a,多年平均降水量略升至 415 mm。多年平均气温为-4.5℃,突变前后均呈升温趋势,但突变后升温速率明显加快;1960—1997 年以 0.02℃/a 缓慢上升,1997—2020 年提升至 0.05℃/a,超过同期全国平均水平^[29]。潜在蒸散发在突变点前后均呈上升趋势,突变后增幅达 6%,可能与气温上升及积

雪反照率下降引起的地表辐射增强相关^[30]。

图 3 为 1979—2018 年长江源区积雪特征的变化趋势。由图 3 可见,长江源区积雪特征参数(平均积雪深度、最大积雪深度、最大雪深发生日)存在显著的年际波动和阶段性变化。多年平均积雪深度为 1.7 cm,但在不同时期波动剧烈:1979—1986 年积雪深度以 0.5 cm/a 的速率持续增加,1986 年达到历史峰值 6.0 cm,这可能与同期西风带水汽输送增强有关;然而 1987 年突变后,积雪深度骤降至 1.4 cm 并转为下降趋势。这一变化主要源于气温升高的双重影响:一方面气温升高导致降水相态由雪向雨转变,减少了冬春季节积雪的积累;另一方面升温加速了已有积雪的融化,缩短了积雪持续时间。两者协同作用,致使积雪深度整体下降,反映了气候变暖对高寒区积雪特征的显著影响。研究区多年平均最大积雪深度为 7.8 cm,但 1985 年出现异常峰值 29 cm,约为多年均值的 3.7 倍。尽管未检测到最大积雪深度的显著突变点,长期趋势显示其以 0.1 cm/a 的速率缓慢下降。此外,最大积雪深度发生日以 0.2 d/a 的速率延迟,这可能与春季物候期提前(如融雪初始日提前)形成协同效应,从而显著缩短了积雪持续期。

3.2 水文气象要素月尺度变化特征

图 4 为 1960—2020 年长江源区月径流深变化趋势及其对年径流深的贡献率。由图 4 可见,枯水期(1—3 月)月径流深均低于 2 mm,占年径流总量

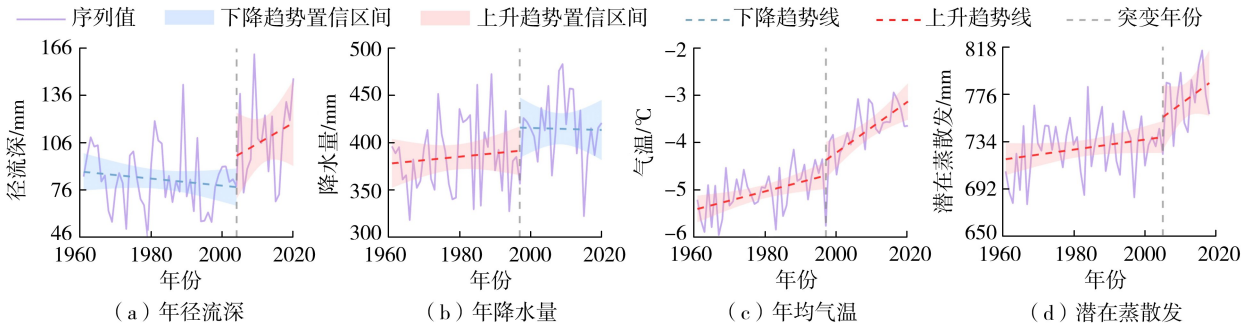


图 2 1960—2020 年长江源区水文气象要素的变化趋势

Fig. 2 Variation trend of hydroclimatic variable characteristics in the Yangtze River Source Region from 1960 to 2020

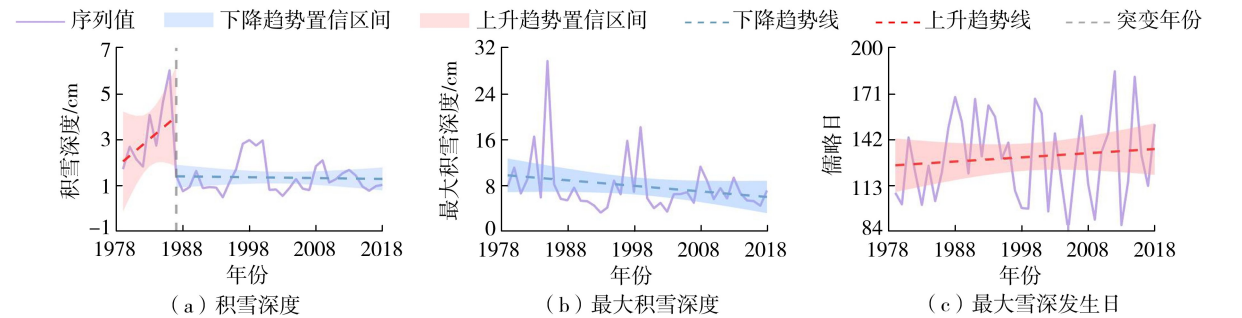


图 3 1979—2018 年长江源区积雪特征的变化趋势

Fig. 3 Variation trend of snow characteristics in the Yangtze River Source Region from 1979 to 2018

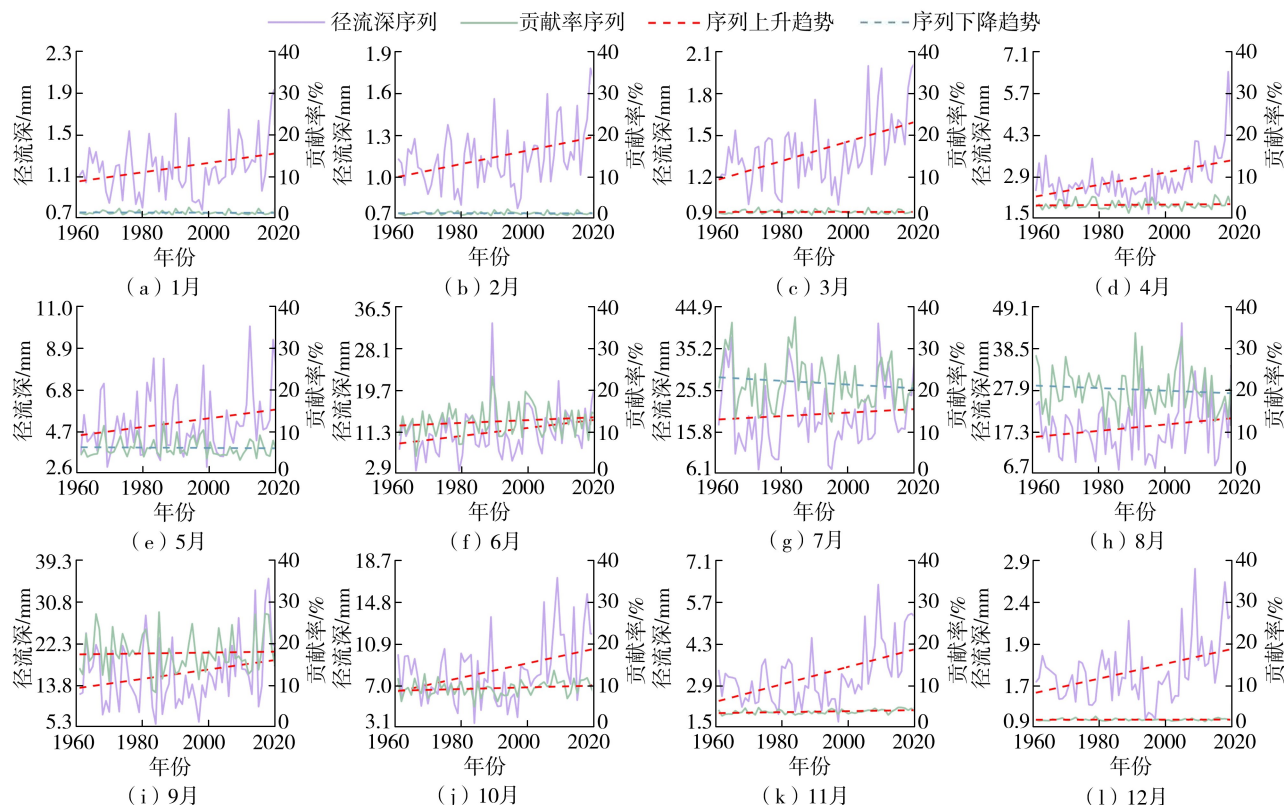


图4 1960—2020年长江源区月径流深变化趋势及其对年径流深的贡献率

Fig. 4 Variation trend of monthly runoff and their contribution ratios to annual runoff in the Yangtze River Source Region from 1960 to 2020

不足2%；春汛期(4—5月)月径流深开始上升,4月为2.9 mm,5月为5.2 mm,反映了季节性积雪及冻土初融过程；6—7月径流深显著增加,最高达40 mm；8—9月回落至约20 mm；10月进入退水期,至12月径流降至2 mm以下。从其对年径流深的贡献率看,6—9月均超过10%,5月和10月维持在10%左右。各月径流深总体呈上升趋势,反映了暖湿化背景下水循环的增强^[17]。其中,6月(速率为0.08 mm/a)、8月(0.08 mm/a)、9月(0.10 mm/a)和10月(0.07 mm/a)的增长最为显著,而12月及1—3月变化较小。尽管所有月份径流深均有所增加,但部分月份(1、2、5、7、8月)对年径流深的贡献率有所下降。

图5为1960—2020年长江源区月降水量变化趋势及其对年降水量的贡献率。由图5可见,长江源区降水量表现出显著的季节性变化及降水贡献率的动态调整。1—3月降水量较少,均低于15 mm；6—9月为主要降水期,占全年降水量的78%,其中7月降水量达到峰值(92 mm),随后逐渐减少；11—12月降水量显著减少,呈现典型的单峰型季风降水特征。降水量的长期趋势显示,4月(速率为0.11 mm/a)、5月(0.29 mm/a)、6月(0.36 mm/a)和9月(0.11 mm/a)降水量呈显著增加趋势,而7月

(-0.11 mm/a)和8月(-0.19 mm/a)则呈下降趋势,11—12月降水量下降速率较低。降水贡献率的变化趋势总体与降水量一致,7—8月及11—12月贡献率下降,尽管9月降水量增加,但其贡献率仍下降,表明降水时序重组可能改变了其对年降水量的贡献模式。

图6为1960—2020年长江源区月平均气温变化趋势。由图6可见,1960—2020年长江源区全年各月均呈显著升温趋势。1—4月及10—12月月均温低于0℃,1月最低(-16℃)；5—9月为暖季,7月月均温最高(6.3℃)。升温速率方面,1月(0.05℃/a)、2月(0.05℃/a)、11月(0.07℃/a)和12月(0.06℃/a)明显高于夏季(6—8月为0.03~0.04℃/a),表现出典型“冷季放大效应”。该效应可能源于青藏高原的雪盖反馈机制,积雪减少降低地表反照率,增强太阳辐射吸收,进而加剧地表增温。冬季积雪减少使更多太阳辐射被地表吸收,加剧了气温升高。

图7为1979—2018年长江源区月均积雪深度变化趋势。由图7可见,在降水量和气温同步上升的背景下,长江源区各个月份积雪深度均呈下降趋势。积雪主要集中于1—5月和10—12月,10月开始积累,1—2月达到最大值,随着3月气温回升逐

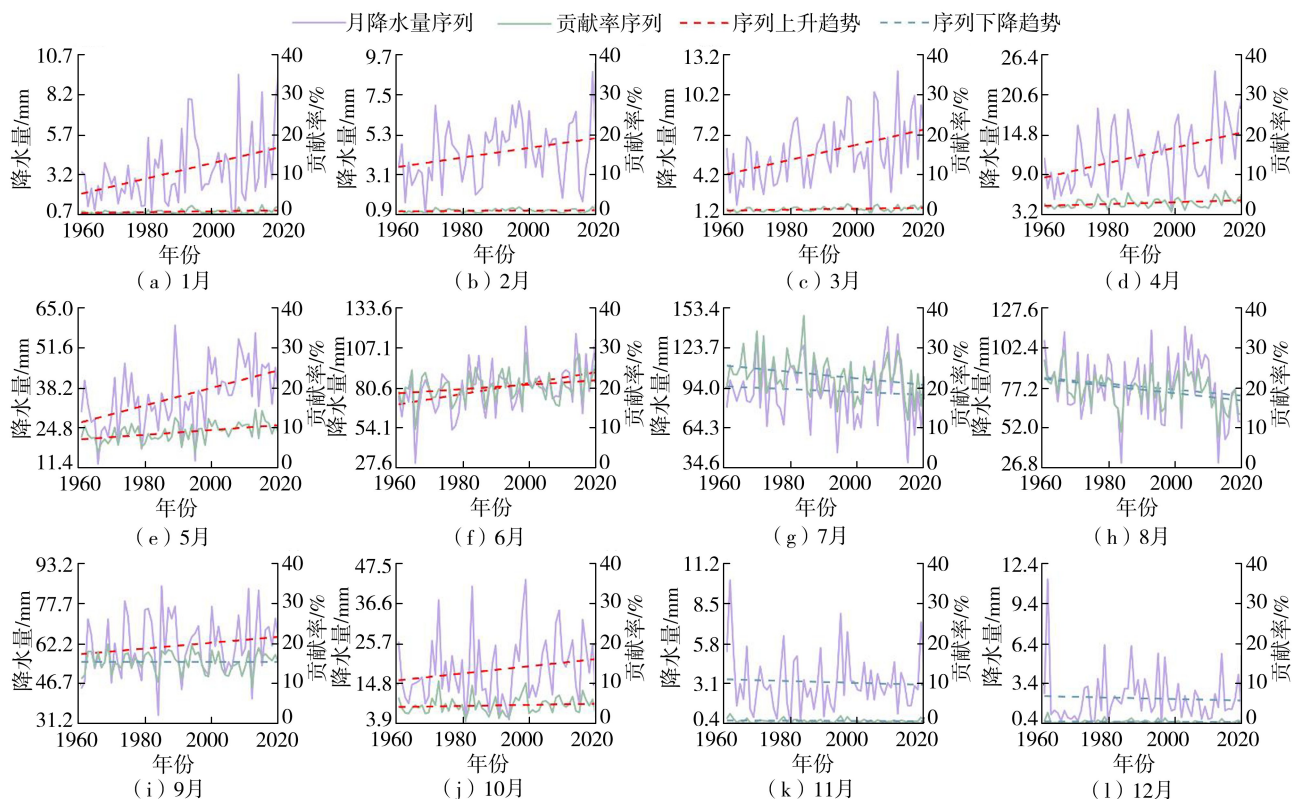


图 5 1960—2020 年长江源区月降水量变化趋势及其对年降水量的贡献率

Fig. 5 Variation trend of monthly precipitation and their contribution ratios to annual precipitation in the Yangtze River Source Region from 1960 to 2020

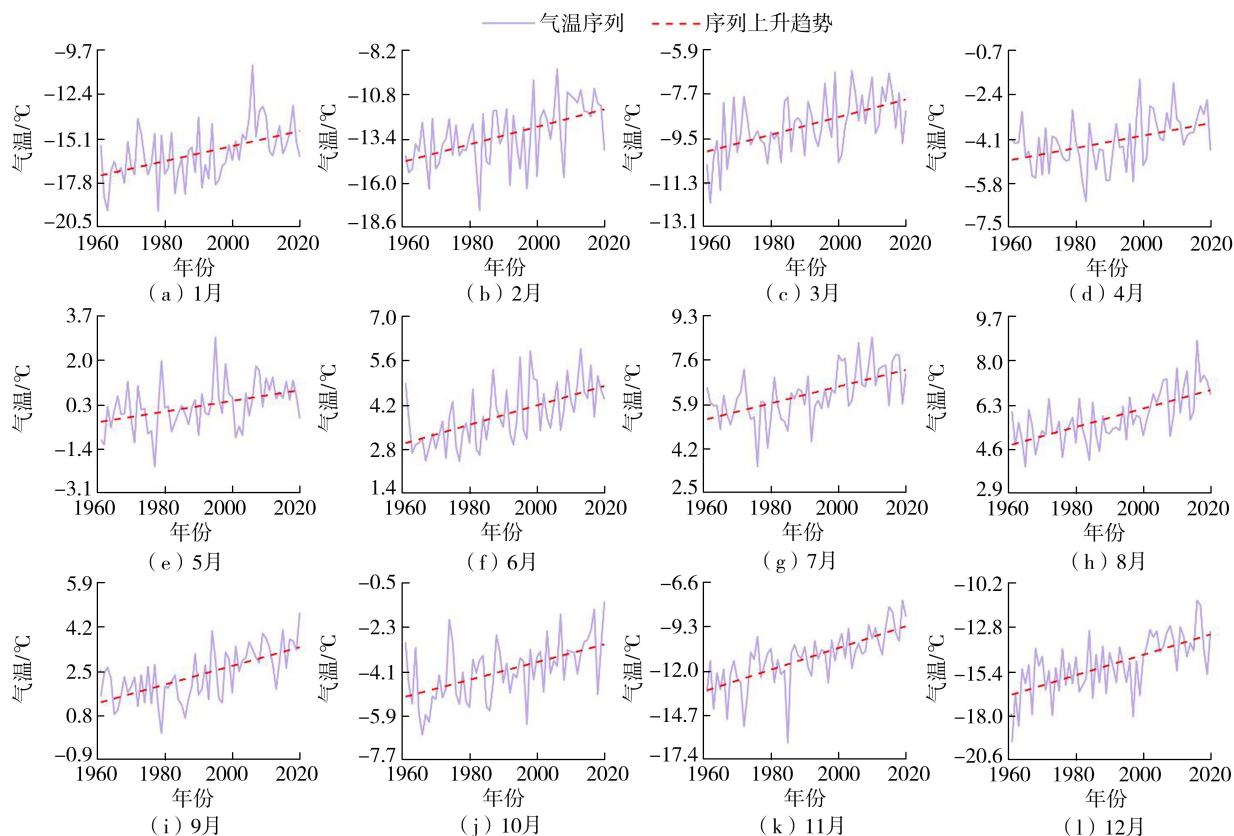


图 6 1960—2020 年长江源区月平均气温的变化趋势

Fig. 6 Variation trend of monthly mean temperature in the Yangtze River Source Region from 1960 to 2020

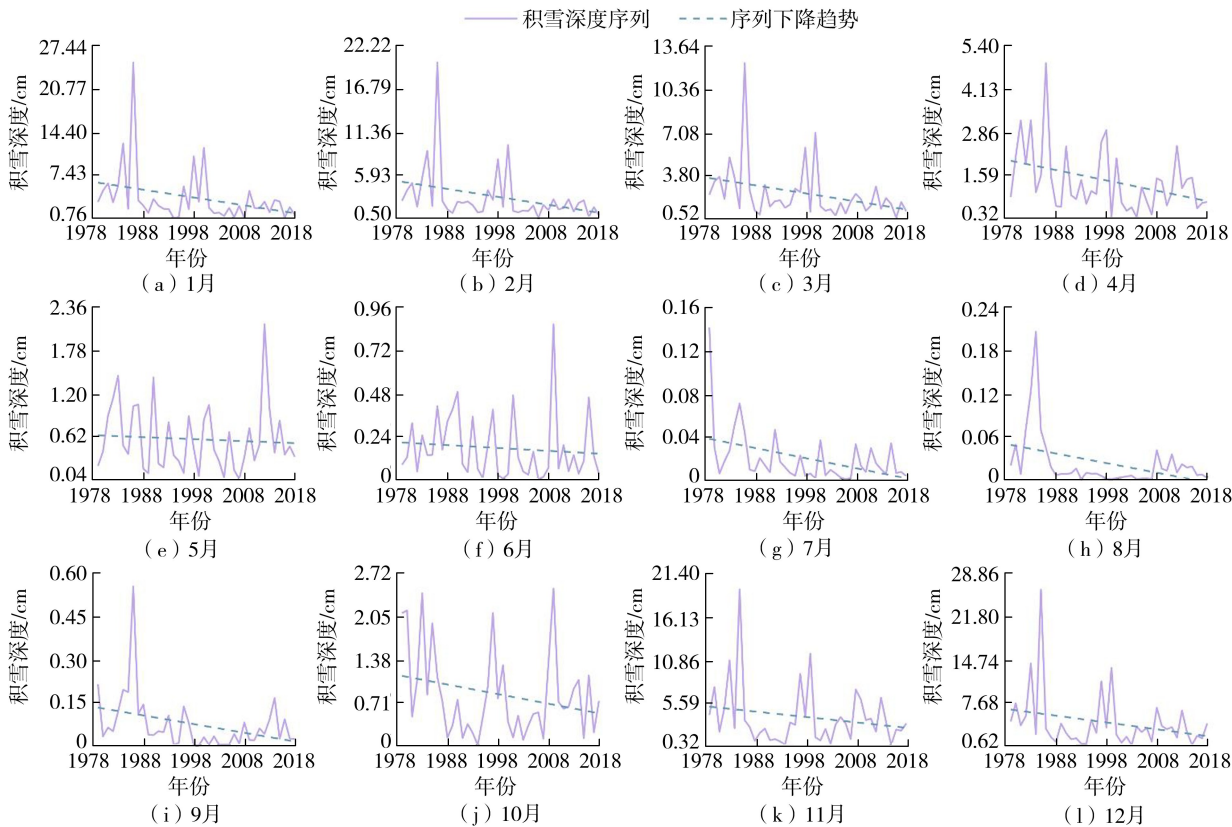


图 7 1979—2018 年长江源区月均积雪深度的变化趋势

Fig. 7 Variation trend of monthly mean snow depth in the Yangtze River Source Region from 1979 to 2018

渐融化,5 月基本消失。积雪深度变化受气温升高、降水相态变化及局地微气候等多重因素共同影响。积雪积累期(10 月至次年 2 月)积雪深度年际波动明显,1986 年出现异常积雪激增,可能与极端降雪事件相关。融雪期(4—5 月)积雪状态相对稳定。尽管冬季(1—2 月)降水量增加,但积雪深度未显著提升,表明升温已显著改变积雪的积累与消融平衡。

3.3 干燥指数与径流系数

干燥指数为潜在蒸散发与降水量的比值,径流系数为径流量与降水量的比值,图 8 为 1960—2020 年长江源区干燥指数和径流系数的变化趋势。由图 8 可见,长江源区多年平均干燥指数为 1.8,整体呈下降趋势,表明气候正向湿润化转变。这主要

归因于降水量增长幅度超过潜在蒸散发,进一步支持了青藏高原“暖湿转型”的气候特征。径流系数多年均值为 0.2,表现出 1960—2004 年下降、2004 年后回升的趋势,反映了区域水文过程不同时期的变化差异。

图 9 为 1960—2020 年长江源区月尺度干燥指数和径流系数年内、年际分布特征。从年内来看,所有月份多年平均干燥指数均大于 1,说明研究区整体处于蒸散占优的半干旱状态。寒冷季节(11 月至次年 4 月)干燥指数较高,超过 5,12 月最高达 19;降水集中的 6—9 月干燥指数较低,通常低于 1.5,表明降水较好地补偿了蒸散发。径流系数在年内呈明显季节差异,10 月(0.5)、11 月(1.4)、12 月

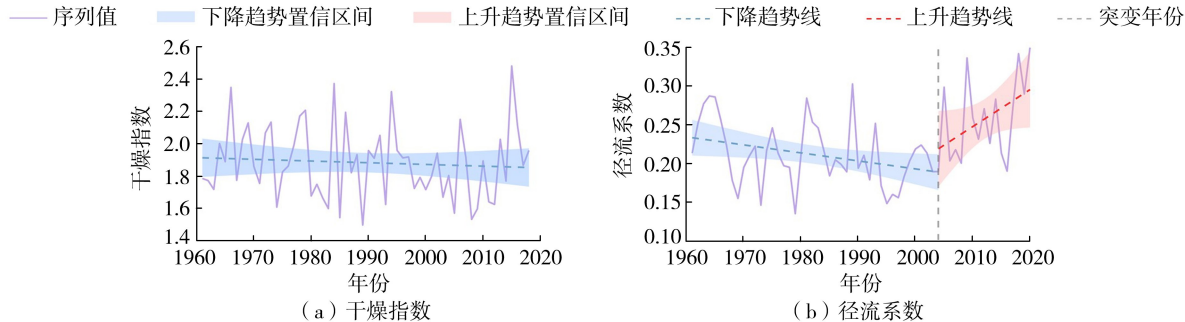


图 8 1960—2020 年长江源区干燥指数和径流系数的变化趋势

Fig. 8 Variation trend of aridity index and runoff coefficient in the Yangtze River Source Region from 1960 to 2020

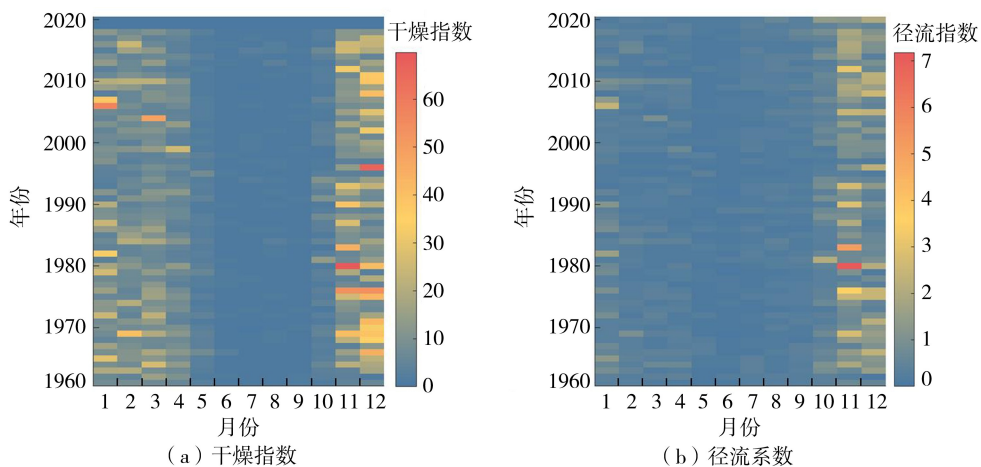


图9 1960—2020年长江源区月尺度干燥指数和径流系数的年内、年际分布特征

Fig. 9 Intra-annual and interannual distribution characteristics of aridity index and runoff coefficient on monthly scale in the Yangtze River Source Region from 1960 to 2020

(1.0)及1月(0.5)的径流系数较高,主要因冬季降水虽少,但径流不仅包括当月降水,还含前期积雪融水和地下水基流补给,导致当月径流深可能超过降水量,出现径流系数大于1的现象。这反映了水文过程的跨期水量贡献和累积效应,而非降水全部转化为径流。其他月份径流系数普遍较低,多低于0.3,5月和6月甚至接近0.15,可能因降水更多用于下渗和蒸散发。此外,径流系数的年际波动体现了气候变化对水文过程的影响,提示降水、气温和冻融过程等多因素共同调节源区径流特征。

需要说明的是,本文所计算的径流系数为当月径流深与当月降水量的比值,并非基于有效降水的严格径流系数,因此对大于1的高值解释需结合积雪融水、冻融过程、地下水补给等水文过程的综合影响。

4 结 论

a. 基于1960—2020年长江源区水文气象要素的长期观测数据,系统揭示了该区域水文气候的演变规律及月尺度变化特征。结果显示,长江源区多年平均径流深为90 mm,1960—2004年呈下降趋势,2004年突变后显著回升,2008年达到峰值162 mm。多年平均降水量为386 mm,1997年前以0.54 mm/a的速率增长,突变后转为0.11 mm/a的下降趋势。多年平均气温为-4.5℃,1997年后升温速率由0.02℃/a提升至0.05℃/a,显著高于全国平均水平。潜在蒸散发年均增长6%,与气温升高及雪反照率下降相关,反映出明显的暖湿化趋势。

b. 在月尺度上,6—9月对年径流深贡献率均超过10%,6月和9月经流深增长速率分别为0.08 mm/a和0.10 mm/a。多年平均积雪深度为

1.7 cm,1987年后骤降至1.4 cm并持续下降,多年平均最大积雪深度为7.8 cm,以0.1 cm/a的速率缓慢下降,最大积雪日逐年延迟0.2 d。气温升高导致“冷季放大效应”明显,1月和2月升温速率达0.05℃/a,11月和12月为0.07℃/a左右。

c. 长江源区干燥指数多年平均值为1.8,呈下降趋势,说明气候向湿润化转型。径流系数多年平均值为0.2,2004年前下降,之后出现回升,且冬季(11—12月)径流系数可超过1,反映积雪融水及地下水补给等因素增加了水文过程复杂性。

参考文献:

- [1] Deng Hao, Ji Zhenming. Warming and Wetting will continue over the Tibetan Plateau in the Shared Socioeconomic Pathways [J]. PLoSOne, 2023, 18(8): e0289589.
- [2] 徐华亭,吴志勇,陈瑞方,等. 基于再分析降水资料的青藏高原典型流域径流模拟分析[J]. 水资源保护, 2024, 40(4): 92-98. (Xu Huating, Wu Zhiyong, Chen Ruifang, et al. Runoff simulation analysis of typical watershed in Tibetan Plateau based on reanalysis precipitation data [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(4): 92-98. (in Chinese))
- [3] Li Yaliang, Zhang Qiang, Su Yanjun, et al. Snow cover expansion with contrasting depth thinning in the recent 40 years: evidence from the Yalong River Basin, south-eastern Tibetan Plateau [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2024, 53: 101786.
- [4] Chen Xugao, Yu Zhongbo, Lin Hui, et al. Hydrological responses to permafrost degradation on Tibetan Plateau under changing climate [J]. Water Science and Engineering, 2024, 17(3): 209-216.
- [5] Ning Z, Zhang J, Hashemi H, et al. Climate change

- dominated runoff change in the eastern Tibetan Plateau [J]. Catena, 2024, 245: 108304.
- [6] 罗玉, 秦宁生, 庞轶舒, 等. 气候变暖对长江源径流变化的影响分析: 以沱沱河为例 [J]. 冰川冻土, 2020, 42 (3): 952-964. (Luo Yu, Qin Ningsheng, Pang Yishu, et al. Effect of climate warming on the runoff of source regions of the Yangtze River; take Tuotuo River basin as an example [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42 (3): 952-964. (in Chinese))
- [7] 姜永见, 李世杰, 沈德福, 等. 青藏高原江河源区近 40 年来气候变化特征及其对区域环境的影响 [J]. 山地学报, 2012, 30 (4): 461-469. (Jiang Yongjian, Li Shijie, Shen Defu, et al. Climate change and its impact on the regional environment in the source regions of the Yangtze, Yellow and Lantsang Rivers in Qinghai-Tibetan Plateau during 1971-2008 [J]. Journal of Mountain Science, 2012, 30 (4): 461-469. (in Chinese))
- [8] 王天宏, 蒋馥根, 龙依, 等. 1990—2020 年长江源地区生态环境质量动态变化及驱动力分析 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2025, 49 (3): 110-118. (Wang Tianhong, Jiang Fugen, Long Yi, et al. Dynamic changes and driving forces of ecological environment quality in the source region of the Yangtze River from 1990 to 2020 [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2025, 49 (3): 110-118. (in Chinese))
- [9] 刘勇, 张欣, 魏良帅, 等. 长江源气候变化及生态植被变迁分析 [J]. 西北地质, 2025, 58 (1): 257-269. (Liu Yong, Zhang Xin, Wei Liangshuai, et al. Analysis of climate change and vegetation change in the Yangtze River source [J]. Northwestern Geology, 2025, 58 (1): 257-269. (in Chinese))
- [10] 齐冬梅, 李跃清, 陈永仁, 等. 气候变化背景下长江源区径流变化特征及其成因分析 [J]. 冰川冻土, 2015, 37 (4): 1075-1086. (Qi Dongmei, Li Yueqing, Chen Yongren, et al. Changing characteristics and cause analysis of the runoff in the source regions of the Yangtze River under the background of climate change [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37 (4): 1075-1086. (in Chinese))
- [11] 吴双桂, 韩廷芳, 张德琴, 等. 近 59 年长江源地区气候变化特征 [J]. 青海环境, 2020, 30 (3): 126-131. (Wu Shuanggui, Han Tingfang, Zhang Deqin, et al. Characteristics of climate changes in Yangtze River source area in recent 59 years [J]. Journal of Qinghai Environment, 2020, 30 (3): 126-131. (in Chinese))
- [12] 叶思露, 叶虎林, 赵静毅, 等. 长江黄河源区不同径流组分变化及成因分析 [J]. 中国农村水利水电, 2023 (6): 79-85. (Ye Silu, Ye Hulin, Zhao Jingyi, et al. Variation and causal analysis of different runoff components in the source region of the Yangtze River and the Yellow River [J]. China Rural Water and Hydropower, 2023 (6): 79-85. (in Chinese))
- [13] 何秋乐, 匡星星, 梁四海, 等. 1966—2015 年长江源冰川融水变化及其对径流的影响: 以冬克玛底河流域为例 [J]. 人民长江, 2020, 51 (2): 77-85. (He Qiule, Kuang Xingxing, Liang Sihai, et al. Glacial meltwater variation in Dongkemadi River Basin of Yangtze River source from 1966 to 2015 and its influence on runoff [J]. Yangtze River, 2020, 51 (2): 77-85. (in Chinese))
- [14] 李林, 戴升, 申红艳, 等. 长江源区地表水资源对气候变化的响应及趋势预测 [J]. 地理学报, 2012, 67 (7): 941-950. (Li Lin, Dai Sheng, Shen Hongyan, et al. Response of water resources to climate change and its future trend in the source region of the Yangtze River [J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67 (7): 941-950. (in Chinese))
- [15] 徐宗学, 班春广, 张瑞. 我国主要河川径流演变规律与归因及其区域特征 [J]. 水利水电科技进展, 2024, 44 (1): 1-8. (Xu Zongxue, Ban Chunguang, Zhang Rui. Evolution law, attribution and regional characteristics of runoff for major rivers in China [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44 (1): 1-8. (in Chinese))
- [16] 鞠琴, 马啸赞, 刘艳丽, 等. 基于秩评分方法的 CMIP6 全球气候模式对淮河流域降水和气温模拟能力评估 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2025, 53 (6): 12-20. (Ju Qin, Ma Xiaozan, Liu Yanli, et al. Evaluation for CMIP6 global climate models in simulating precipitation and temperature over the Huaihe River Basin based on rank score method [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53 (6): 12-20. (in Chinese))
- [17] Wang Yun, Li Wenxin, Zhang Jianyun, et al. Wetter trend in source region of Yangtze River by runoff simulating based on Grid-RCCC-WBM [J]. Journal of Hydrology, 2024, 631: 130702.
- [18] 吴佳, 高学杰. 一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其它资料的对比 [J]. 地球物理学报, 2013, 56 (4): 1102-1111. (Wu Jia, Gao Xuejie. A gridded daily observation dataset over China region and comparison with the other datasets [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56 (4): 1102-1111. (in Chinese))
- [19] Gao Xuejun, Shen Yanjun, Xu Chonghai, et al. A daily temperature dataset over China and its application in validating a RCM simulation [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2009, 26 (4): 763-772.
- [20] Wu J, Gao X, Giorgi F, et al. Changes of effective temperature and cold/hot days in late decades over China based on a high resolution gridded observation dataset [J]. International Journal of Climatology, 2017, 37 (Sup1): 788-800.

(下转第 69 页)

[25] 吴建强,王敏,黄沈发,等. 平原河网区地下水污染风险评估体系及其应用[J]. 水资源保护,2019,35(4):55-62. (Wu Jianqiang, Wang Min, Huang Shenfa, et al. Risk assessment system of groundwater pollution in plain river network area and its application [J]. Water Resources Protection,2019,35(4): 55-62. (in Chinese))

[26] 谢文逸,姜登登,李旭伟,等. 污染地块巨厚含水层典型DNAPLs 运移模拟及安全利用深度评估[J]. 环境工程学报, 2022, 16 (7): 2287-2295. (Xie Wenyi, Jiang Dengdeng,Li Xuwei, et al. Transport simulation of typical DNAPLs in deep aquifer and safe utilization depth evaluation of polluted plot [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering,2022,16(7): 2287-2295. (in Chinese))

[27] 张璞,刘欢,胡鹏,等. 全国不同区域河流生态基流达标现状与不达标原因[J]. 水资源保护,2022,38(2):176-182. (Zhang Pu, Liu Huan, Hu Peng, et al. Current situation of compliance of river ecological base flow and noncompliance reasons in different regions of China[J]. Water Resources Protection, 2022, 38 (2): 176-182. (in Chinese))

[28] 卢毅,宋泽卓,刘瑾,等. 基于 DFOS 的通州湾地区地面沉降监测与变形分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(2):81-88. (Lu Yi, Song Zezhuo, Liu Jin, et al. Land subsidence monitoring and deformation analysis of Tongzhou Bay area based on DFOS [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51 (2): 81-88. (in Chinese))

[29] 陆玮,李兆,骆祖江. 南通市地下水压缩开采对水质咸化的控制效应[J]. 水资源保护,2020,36(2):85-91. (Lu Wei, Li Zhao, Luo Zujiang. Control effect of goundwater compression mining on water salinization in Nantong City [J]. Water Resources Protection, 2020, 36 (2): 85-91. (in Chinese))

[30] 徐腾,王以鹏,叶逾,等. 地下水超采管控体系及水量-水位双控体系研究进展[J]. 水资源保护,2024,40(4):27-35. (Xu Teng, Wang Yipeng, YeYu, et al. Research progress on groundwater overexploitation control system and dual control system of water quantity and water level[J]. Water Resources Protection, 2024, 40 (4): 27-35. (in Chinese))

(收稿日期:2025-07-07 编辑:王芳)

(上接第 29 页)

[21] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crokevapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56 [M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations,1998.

[22] Chen Dong,Gao Guocheng,Xu Chongyu,et al. Comparison of the Thornthwaite method and pan data with the standard Penman-Monteith estimates of reference evapotranspiration in China[J]. Climate Research,2005,28(2):123-132.

[23] Che Tao,Li Xin,Jin Rui,et al. Snow depth derived from passive microwave remote-sensing data in China [J]. Annals of Glaciology,2008,49:145-154.

[24] Che Tao,Dai Liyun,Li Xin. Long-term series of daily snow depth dataset in China (1979-2019) [EB/OL]. National Tibetan Plateau/Third Pole Environment Data Center. (2024-09-24). <https://www.tpdc.ac.cn/zh-hans/data/df40346a-0202-4ed2-bb07-b65dfcda9368>.

[25] Dai Liyun, Che Tao, Ding Yongjian. Inter-calibrating SMMR, SSM/I and SSML/S data to improve the consistency of snow-depth products in China[J]. Remote Sensing,2015,7(6):7212-7230.

[26] Huang Xiaodong, Deng Jie, Ma Xiaofang, et al. Spatiotemporal dynamics of snow cover based on multi-source remote sensing data in China [J]. Cryosphere, 2016,10(5):2453-2463.

[27] Yan Dajiang, Ma Ning, Zhang Yinsheng. Development of a fine-resolution snow depth product based on the snow cover probability for the Tibetan Plateau: validationand spatial-temporal analyses[J]. Journal of Hydrology,2022, 604:127027.

[28] Pettitt A N. Anon-parametric approach to the change-point problem[J]. Journal of the Royal Statistical Society,1979, 28(2):126-135.

[29] Yao Tandong, Xue Yongkang, Chen Deliang, et al. Recent third pole’s rapid warming accompanies cryospheric melt and water cycle intensification and interactions between monsoon and environment; multidisciplinary approach with observations, modeling, and analysis [J]. Bulletin of the American Meteorological Society,2019,100(3):423-444.

[30] 吴雪娇,鲁安新,王丽红,等. 基于 MODIS 的长江源近 10 年积雪反照率时空分布及动态变化[J]. 地理科学, 2013, 33 (3): 371-377. (Wu Xuejiao, Lu Anxin, Wang Lihong, et al. Spatial and temporal distribution and trend of snow albedo changes in the source region of theYangtze River in last decade based on MODIS [J]. Geographical Science,2013,33(3):371-377. (in Chinese))

(收稿日期:2025-06-05 编辑:王芳)