



引文格式: 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. DOI: 10.12401/j.nwg.2023127

Citation: 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. DOI: 10.12401/j.nwg.2023127

长江源气候变化及生态植被变迁分析

刘勇, 张欣*, 魏良帅, 黄安邦, 彭博, 舒勤峰

(中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川 成都 611734)

摘要: 长江源处于高寒、高海拔的青藏高原腹地, 生态系统脆弱。受全球气候变化和人类活动的影响, 与源区生态系统密切相关的冰川冻土、沼泽湿地和植被等出现了不同程度的退化现象, 引起了社会各界的广泛关注。笔者利用长时序、高时空分辨率的气象和 MODIS NDVI 数据, 结合数理统计方法, 分析了长江源气候和生态植被的时空演化特征, 探讨了植被对气候和土壤水的响应机制。结果表明: 近 40 年来长江源降雨量和地面气温在空间上从东南向西北呈递减特征, 各区域气温整体上均有递增趋势; 东部植被生长状况要好于西部地区, 2000 年以来长江源整体植被生长状况有逐渐转好趋势; 受冻土对气温的敏感性影响, 长江源生长季植被受气温的影响程度高于降雨; 长江源生态植被受土壤含水率影响较大, 影响程度由表层到深部有逐渐减弱趋势。

关键词: 长江源; 气候; 生态植被; 趋势分析; 响应机制

中图分类号: P66

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2025)01-0257-13

Analysis of Climate Change and Vegetation Change in the Yangtze River Source

LIU Yong, ZHANG Xin*, WEI Liangshuai, HUANG Anbang, PENG Bo, SHU Qinfeng

(Institute of Exploration Technology, Chinese Academy of Geological Sciences, Chengdu 611734, Sichuan, China)

Abstract: The source of the Yangtze River is located in the remote and high-altitude Qinghai-Tibet Plateau, where the ecosystem is fragile. Influenced by global climate change and human activities, various elements closely related to the ecological system of the source area, such as glaciers, permafrost, swamps, wetlands, and vegetation, have experienced different degrees of degradation, which has aroused widespread concern from various sectors of society. This article analyzes the spatiotemporal evolution characteristics of the climate and ecological vegetation in the Yangtze River source region using long-term, high spatiotemporal resolution meteorological and MODIS NDVI data, combined with mathematical and statistical methods, and explores the response mechanism of vegetation to climate and soil water. The results show that over the past 40 years, the rainfall and surface temperature in the Yangtze River source region have decreased from southeast to northwest, and the

收稿日期: 2023-01-02; 修回日期: 2023-05-17; 责任编辑: 贾晓丹

基金项目: 中国地质调查局项目“长江上游水文地质与水资源调查监测”(DD20221757), 四川省自然资源厅项目“四川省黄河流域地下水资源调查(2023-2025)”(N5100012023000974) 联合资助。

作者简介: 刘勇(1989-), 男, 博士, 工程师, 主要从事水文地质和环境地质研究工作。E-mail: 1039786137@qq.com。

* 通讯作者: 张欣(1984-), 男, 博士, 工程师, 主要从事生态环境地质、地质灾害调查评价与区域稳定性研究。E-mail: 252010907@qq.com。

temperature in each region has generally increased. Vegetation growth in the eastern region is better than that in the western region, and since 2000, the overall vegetation growth in the Yangtze River source region has gradually improved. Due to the sensitivity of permafrost to temperature, vegetation growth during the growing season in the Yangtze River source region is more affected by temperature than rainfall. The ecological vegetation in the Yangtze River source region is greatly influenced by soil water content, and the degree of influence gradually weakens from the surface to the deep layers.

Keywords: Yangtze River source; climate; vegetation; trend analysis; response mechanisms

长江源处于高寒、高海拔的青藏高原腹地,形成时代较晚,地表冻土发育,土壤成熟度较低,生态系统的组成成分与结构简单,适应环境的调节与修复能力较脆弱(陈婷, 2009)。近年来,随着全球气候变化,长江源水文过程、碳循环等陆面过程出现了一系列变化(吴小丽, 2020)。陆面过程是全球生态系统的重要组成部分,其在“陆-气-水”动态耦合过程中起着重要作用;植被是地球陆地生态系统最重要的组分之一。一方面,由于植被对气候变化极其敏感,其动态变化常被作为地球气候变化的重要生物指示器,另一方面,植被承担着连接水文、土壤、大气及其他生态要素的重任,影响着各生态系统组成的动态变化(Parmesan et al., 2003; 李元寿等, 2010)。因此,认识长江源植被变迁规律对于理解全球气候变化影响下青藏高原水文循环、生态演化等陆面过程具有重要意义。

卫星遥感是监测植被变化的有效途径,具有时序和空间连续性优势,已得到广泛使用(朱艺旋等, 2019; 韩海辉等, 2022; 杜臻等, 2023)。目前根据卫星测量

的近红外(植被强烈反射)和红光(植被吸收)进行的组合运算,已定义了多种植被指数(李雪银等, 2022; Essaadia et al., 2022),其中归一化植被指数(NDVI)应用最为广泛,在大尺度植被动态监测及土地利用等领域发挥着重要作用(李雪银等, 2022)。因此,基于遥感手段,并结合数理统计方法分析并探讨了长江源的植被动态变迁规律。

1 研究区概况

长江源区是指位于直门达水文站以上的区域,处于青藏高原腹地,位于青海省的西南部,地理坐标为 E 90°13'48"~97°19'48", N 32°26'24"~35°53'24",流域面积约 $14.73 \times 10^4 \text{ km}^2$ (陈婷, 2009)。行政区划上分属青海省玉树藏族自治州和海西蒙古族藏族自治州(图 1)。长江源区呈规则菱形的大型山间盆地,西有乌兰乌拉山和可可西里山,北有昆仑山、拉日日旧山、榜公玛山,南有唐古拉山和祖尔肯乌拉山,东为巴颜

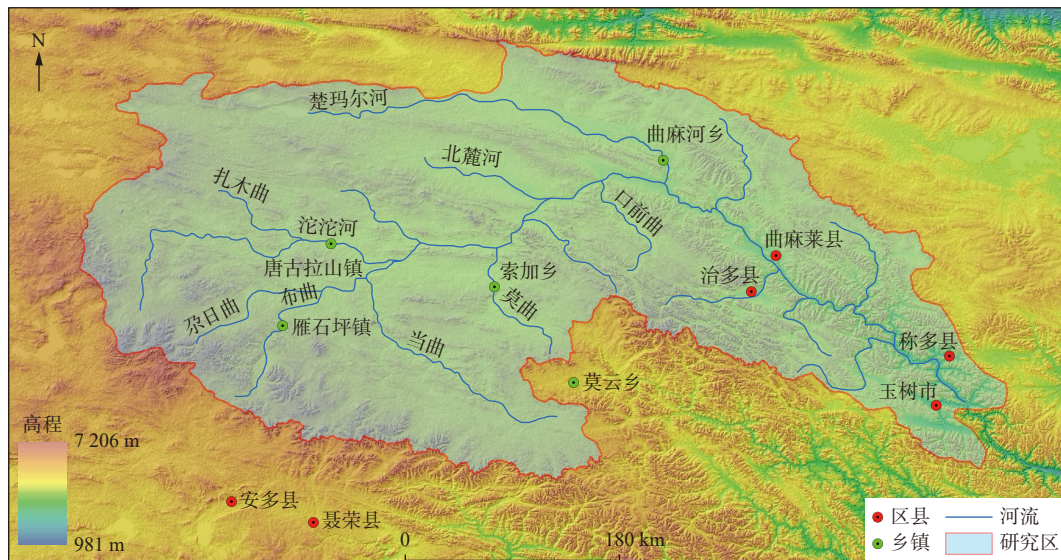


图1 长江源区域位置分布图

Fig. 1 Map of the topography of the Yangtze River source area

喀拉山。唐古拉山、昆仑山是源区南北两侧主体山脉, 呈 NWW 向展布(钱开铸, 2013)。

2 数据与处理方法

2.1 数据

(1) 气象数据

气象数据来源于中国区域地面气象要素驱动数据集(1979~2018 年), 该数据集是以国际上现有的 Princeton 再分析资料、GLDAS 资料、GEWEX-SRB 辐射资料, 以及 TRMM 降水资料为背景场, 融合了中国气象局常规气象观测数据制作而成, 水平空间分辨率为 0.1° , 精度介于气象局观测数据和卫星遥感数据之间, 好于国际上已有再分析数据的精度(阳坤等, 2019)。

(2) 生态植被数据

土地类型数据来源于青海省“三调”数据。针对植被生长情况, 笔者引入了 MODIS NDVI 植被指数, 来源于美国国家航天航空局的地球观测系统 EOS/MODIS 数据集中的 MOD13Q1.061 Terra Vegetation Indices (V6.1) 数据产品, 空间分辨率为 250m, 为全球植被指数 16 天产品数据。MODIS NDVI 数据记录了 2000 年 2 月 18 日至今的全球植被指数, 具有时间分辨率高和空间分辨率高等优点(Ba et al., 2022)。

(3) 土壤含水率数据

土壤含水率数据来源于国家青藏高原科学数据中心公布的青藏高原多年冻土综合监测数据集(2002~2018)(赵林等, 2021)。该数据记录了西大滩、五道梁、沱沱河及唐古拉等区域 2004~2018 年埋深 3~20 m 范围内不同深度处的土壤含水率。

2.2 处理方法

(1) 数据趋势分析

采用 Mann-Kendall 趋势检验法和滑动 T 检验法对数据进行趋势分析。

Mann-Kendall 趋势检验是在时间趋势序列分析中使用最广泛的非参数检验方法, 是一种定量方法。目前被广泛应用于非正态分布的数据趋势和突变分析中, 分析过程计算方便。进行突变检验的具体步骤如下(黄芸羽等, 2018):

对时间序列 x_i , 构造秩序列 r_i 表示 $x_i > x_j (1 \leq j \leq i)$ 等样本累计数, 定义 s_k 为:

$$s_k = \sum_{i=1}^k r_i r_j = \begin{cases} 1 & x_i > x_j \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad j = 1, 2, \dots, i \quad (1)$$

假定时间序列随机独立, 定义统计变量为:

$$UF_k = \frac{s_k - E(s_k)}{\sqrt{\text{Var}(s_k)}} \quad (k = 2, 3, \dots, n) \quad (2)$$

式中: UF_k 为标准正态分布统计量; $E(s_k)$ 为 s_k 的均值; $\sqrt{\text{Var}(s_k)}$ 为 s_k 的方差。其中, $UF_1=0$, 并且在给定显著水平 α 下, 若 $|UF_k| \geq U_\alpha$, 则表明序列存在明显的趋势变化。

$$E(s_k) = \frac{n(n+1)}{4} \quad (3)$$

$$\text{Var}(s_k) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \quad (4)$$

将时间序列 x 按逆序排列, 再重复 1 和 2 步骤, 同时使:

$$UB_k = -UF_k \quad (k = n, n-1, \dots, 1) \quad (5)$$

其中, $UB_1=0$ 。通过分析统计序列 UB_k 和 UF_k 可以进一步分析序列 x 突变的时间节点, 显示突变的区域。若 $UF_k > 0$, 则表明序列呈上升趋势; 反之, $UF_k < 0$ 则表明呈下降趋势; 当超过任何一条临界线时, 表明上升或下降趋势显著。若果 UB_k 和 UF_k 曲线出现交点, 且两交点在两临界线之间, 则交点对应的时期为时间序列值突变的开始时期。

滑动 T 检验是通过考察两组样本平均值的差异是否显著来检验突变。其基本思想是把一气候序列中两段子序列均值有无显著差异看做来自两个总体均值有无显著差异的问题来检验。如果两段子序列的均值差异超过了一定的显著性水平, 可以认为均值发生了质变, 有突变发生。

对于具有 n 个样本量的时间序列 x , 人为设置某一时刻为基准点, 基准点前后两段序列 x_1 和 x_2 的样本分别为 n_1 和 n_2 , 两段子序列平均值分别为 $\bar{x}_1$ 和 $\bar{x}_2$, 方差分别为 s_1^2 和 s_2^2 。定义统计量:

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{s \cdot \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (6)$$

其中,

$$s = \sqrt{\frac{n_1 s_1^2 + n_2 s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}} \quad (7)$$

给定显著性水平 α , 查 t 分布表得到临界值 t_α , 若 $|t_i| < t_\alpha$, 则认为基准点前后的两子序列均值无显著差异, 否则认为在基准点时刻出现了突变。

(2) 植被指数计算

对大尺度的植被覆盖变化监测和研究常借助基于遥感的植被指数数据。植被指数是根据绿色植被区别于其他土地利用类型的光谱特性计算而来的, 其

原理在于植被光谱信息表现出对近红外波段的强烈反射和对红光波段的明显吸收,因此植被覆盖的变化将引起对红光和近红外的反射出现差异;通过组合并计算植被对近红外波段和红光波段的反射率便可获得相应的植被指数(汪柳皓等, 2022)。与传统地面植被调查方式相比,借助遥感手段具有时间上更连续,空间上分辨率更高,和获取成本更低的优势(强建华, 2021)。

本研究基于 Google Earth Engine 平台获取和分析研究区 MODIS NDVI 数据。NDVI(归一化植被指数)计算公式如下:

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R) \quad (8)$$

其中, NIR 为近红外波段, R 为红光波段, 分别对应 MODIS 第 2 和第 1 波段。

长江源区在冬季寒冷期植被生长差,且多为冰雪覆盖,基于遥感解译得出的归一化植被指数低,难以准确评价植被生长情况,因此选择长江源区生长季

(7~9 月)的归一化植被指数 NDVI 进行分析评价。

3 结果与分析

3.1 长江源气候变化特征

3.1.1 气温与降水变化趋势

根据长江源由西向东分布的沱沱河、五道梁、曲麻莱和玉树四处气象站监测数据,长江源区降雨主要集中在 5~10 月(图 2), 可占全年降雨量 89% 以上,月降雨量最大值出现在 6~7 月;在 1980~2021 年间,长江源区逐年降雨量呈波动起伏状,年降雨量集中于 200~600 mm。长江源区逐月气温呈现上凸形(图 3), 7~8 月地面气温最高,月均地面气温为 7~15 °C, 东部玉树地区气温最高,西北部五道梁地区气温最低;各监测站逐年气温呈波动起伏状,整体均有递增趋势,东部玉树地区年均气温最高,为 3~5 °C, 近 40 年气温增长斜率小于西部气象监测区域,气温增长幅度较弱,而西

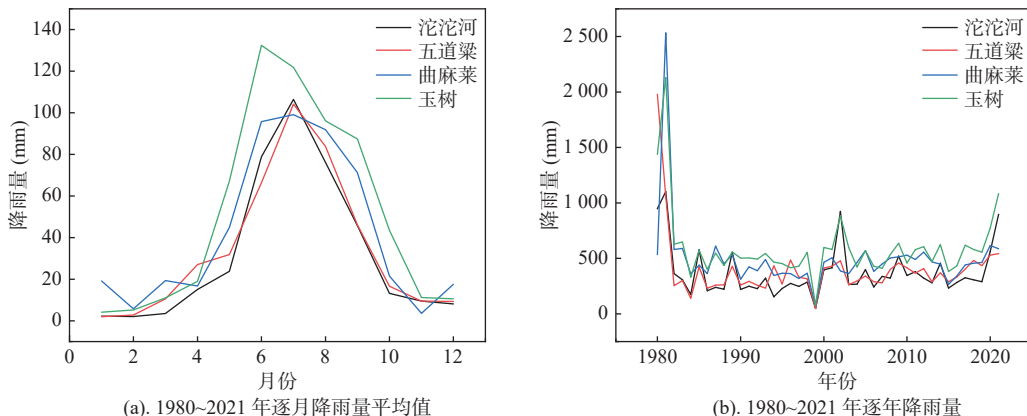


图2 降雨量动态变化曲线分布

Fig. 2 Distribution of rainfall dynamics curves

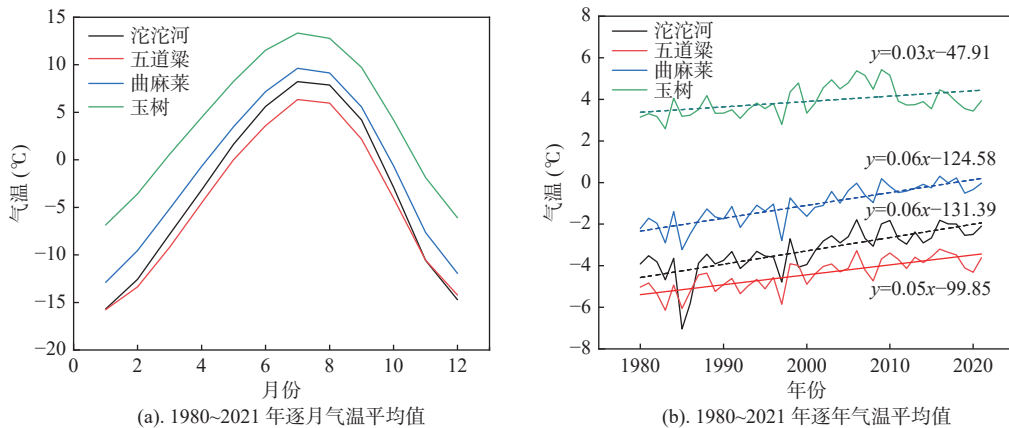


图3 长江源气温动态变化曲线分布

Fig. 3 Distribution of temperature dynamics curves in the Yangtze River source

部五道梁、沱沱河和曲麻莱一带年均气温较低, 均小于 0°C , 但气温增长斜率较大, 近 40 年来气温增长较快。

根据中国区域地面气象要素驱动数据集(1979~2018 年)作出长江源区降雨与气温空间分布图(图 4、图 5)。可看出近 40 年来长江源区降雨量整体上从东南向西北呈递减趋势, 在其东北西大滩和西北卓乃河

两个区域附近存在两个降雨量较低的干旱区。长江源区地面气温呈现出由东南向西北递减的趋势, 东南侧玉树一带地面气温最高, 西部唐古拉山一带地面气温最低。

由年降雨量变化空间分布图(图 6)可知, 在 1988~1998 年间长江源西南侧唐古拉山和东部曲麻

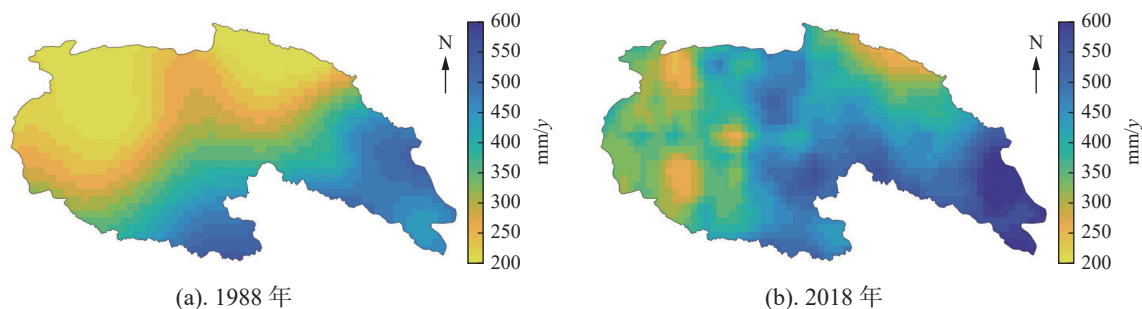


图4 长江源年平均降雨量空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of average annual rainfall in the Yangtze River source

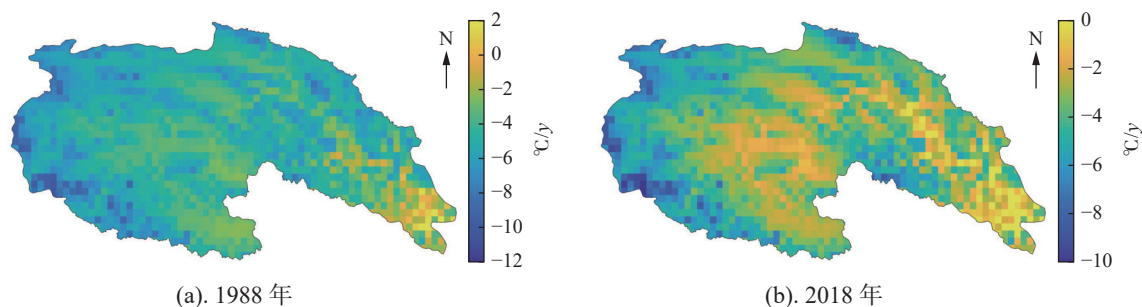


图5 长江源年平均气温空间分布图

Fig. 5 Spatial distribution of annual mean temperatures in the Yangtze River source

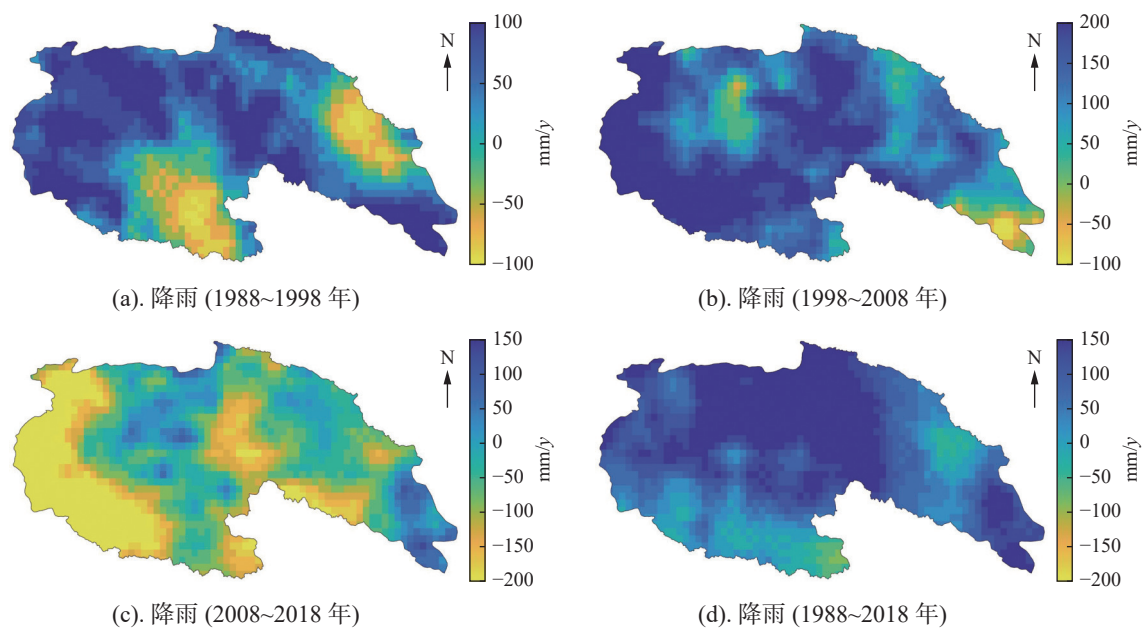


图6 长江源年均降雨量增量空间分布图

Fig. 6 Spatial distribution of annual mean rainfall increments in the Yangtze River source

莱高山区存在两个降雨量下降区域,最大降幅超 100 mm,中部盆地区降雨量增加,最大增加量超过 100 mm;在 1998~2008 年间长江源除东部玉树和中部五道梁地区降雨量出现下降外,整体降雨量均呈现出增加趋势,西部边缘区域和中部盆地区增加明显,局部增幅超过 200 mm;在 2008~2018 年间西部边缘区域和中部盆地区降雨量出现明显下降,局部降幅超过 200 mm;在 1988~2018 年间长江源降雨量主要呈现出中部盆地区显著增加,西南侧唐古拉山和东部曲麻莱高山区略微下降的分布特征。

由年均气温变化空间分布图(图 7)可知,在 1988~1998 年间长江源年均气温相对稳定,仅在西北侧卓乃河一带有明显增加;在 1998~2008 年间长江源年均气温在中部沱沱河-索加乡-曲麻莱乡一带有明显增加,最大增幅超 2℃,北侧边缘卓乃河与西大滩区域有明显下降特征;在 2008~2018 年间长江源年均气温整体有所增加,东部边缘区域增加明显,最大增幅超 2℃;在 1988~2018 年间长江源年均气温整体有增加趋势,增加幅度为 0.5~1℃,中部沱沱河和东部曲麻莱区域年均气温增加明显,最大增幅可超 2℃。

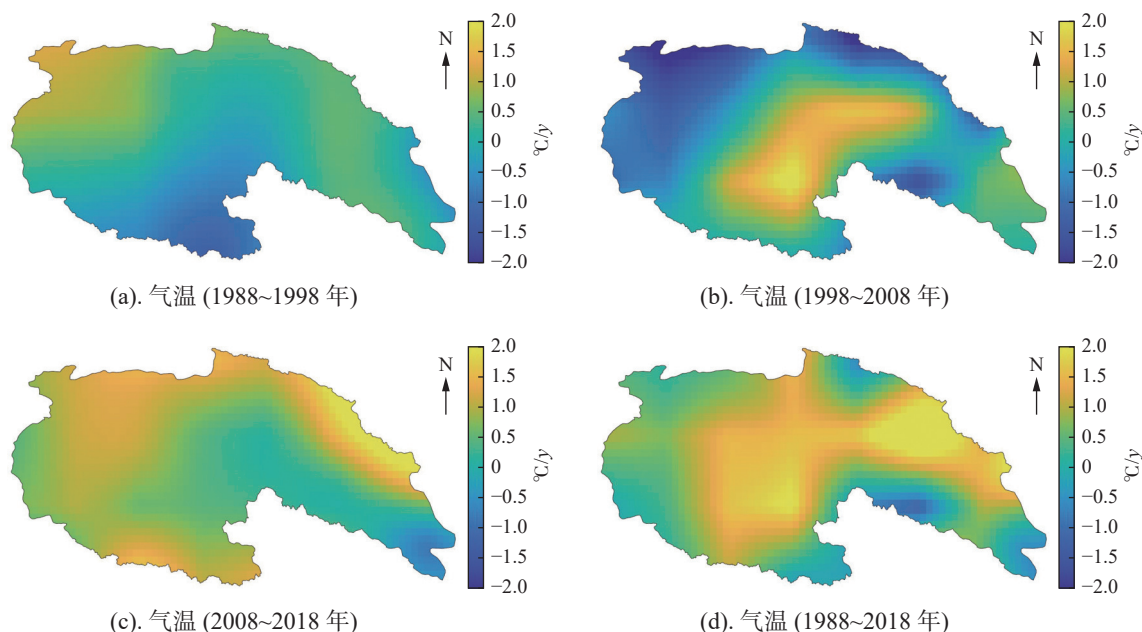


图7 长江源年平均气温增量空间分布图

Fig. 7 Spatial distribution of annual mean temperature increments in the Yangtze River source

3.1.2 气温与降水的突变性分析

根据长江源典型气象站年降雨量的 M-K 突变检验结果来看(图 8),沱沱河地区 UF 和 UB 时间序列曲线交点出现于 2008 年、2010 年和 2020 年,五道梁地区 UF 和 UB 时间序列曲线交点出现于 2018 年,曲麻莱地区 UF 和 UB 时间序列曲线交点出现于 1981 年和 2019 年,玉树地区 UF 和 UB 时间序列曲线交点出现于 1981 年和 2020 年,即除五道梁地区只有一个位于研究时段尾期的交点外,其余各地区均有包括研究时段尾期交点在内的多个交点。当交点位于研究时段尾期时,交点后的数据时间序列过短,得到的突变分析结果可信度不高(方欣等, 2022)。因此,为进一步确定长江源各区域年降雨量的突变时间,再对其进行 5 年和 10 年步长的滑动 T 检验,将滑动 T 检验与

M-K 突变检验结果进行综合分析(表 1),可知长江源各区域 1981~2021 年间降雨量无明显突变特征。

根据长江源典型气象站年均气温的 M-K 突变检验结果来看(图 9),沱沱河地区 UF 和 UB 时间序列曲线交点出现于 2001 年,处于两条 0.05 置信水平线之间,可认定其为突变点。在 1990~2001 年,UF 序列曲线值大于 0,沱沱河年均气温缓慢上升,自 2001 年后,UF 序列曲线值逐渐超过 0.05 置信水平线,年均气温开始显著上升,据此可判断沱沱河地区在 2001 年开始迅速转暖。五道梁地区 UF 和 UB 时间序列曲线交点出现于 2000 年,处于 0.05 置信水平线上,突变检测结果可信度较差;曲麻莱地区 UF 和 UB 时间序列曲线交点出现于 2002 年,处于两条 0.05 置信水平线外,突变检测可信度不高;玉树地

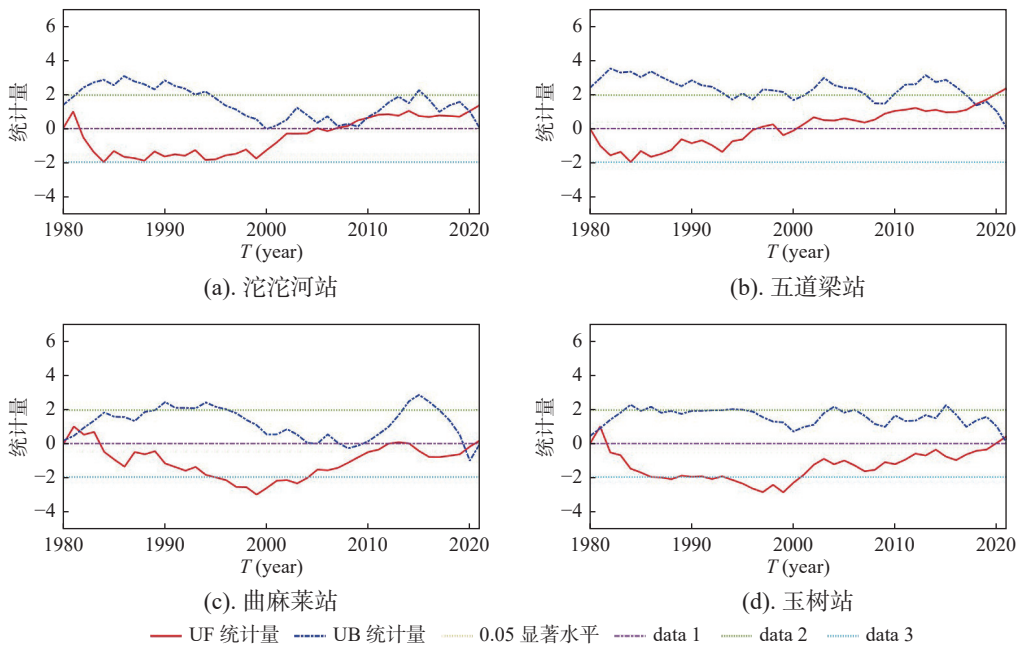


图8 降雨量 M-K 突变统计分析
Fig. 8 Statistical analysis of M-K mutations of rainfall

表 1 长江源降雨与气温突变分析

Tab. 1 Analysis of sudden changes in rainfall and temperature in the Yangtze River source

气象要素	区域	M-K突变检验	滑动t检验		综合分析
			n=5	n=10	
降雨	沱沱河	2008, 2010, 2020	-	1999	-
	五道梁	2018	2007	-	-
	曲麻莱	1981, 2019	2012	1999, 2003	-
	玉树	1981, 2020	-	-	-
气温	沱沱河	2001	2001, 2015	2001	2001
	五道梁	2000	1986	1997, 2000	2000
	曲麻莱	2002	2002	-	2002
	玉树	1987	2010	-	-

区 UF 和 UB 时间序列曲线交点出现于 1987 年, 位于研究时段前期, 且紧邻 0.05 置信水平线, 突变检测可信度较差。因此, 采用滑动 T 检验方法进一步确定年均气温的突变时间, 检验结果见表 1, 可知五道梁地区在 2000 年开始迅速转暖, 曲麻莱地区在 2002 年开始迅速转暖, 玉树地区年均气温无明显突变特征。

综上所述, 1981~2021 年间长江源区年降雨量相对平稳, 无明显突变, 而年均气温除东部玉树地区外, 西部区域在 2000~2002 年间有迅速转暖特征。

3.2 生态植被变化特征

根据青海省第三次国土调查数据, 长江源区土地

类型以天然牧草地为主, 面积占长江源区总面积的 84.08%, 其中天然牧草地和沼泽草地分别占全区 75.16% 和 8.91%; 裸土地占总面积的 8.9%, 局部零星分布一些沼泽、内陆滩涂和冰川等土地利用类型。

长江源区在冬季寒冷期植被生长差, 且多被冰雪覆盖, 基于遥感解译得出的归一化植被指数低, 难以准确评价植被生长情况。因此选择生长季(7~9 月)的归一化植被指数 NDVI 进行分析评价。以 2000~2021 年 7 月为例, 长江源区植被指数 NDVI 空间差异及变化量分布如图 10 和图 11 所示。

长江源区东部植被生长情况要好于西部地区, 东部玉树一带植被生长状况最好, 西南部唐古拉山一带

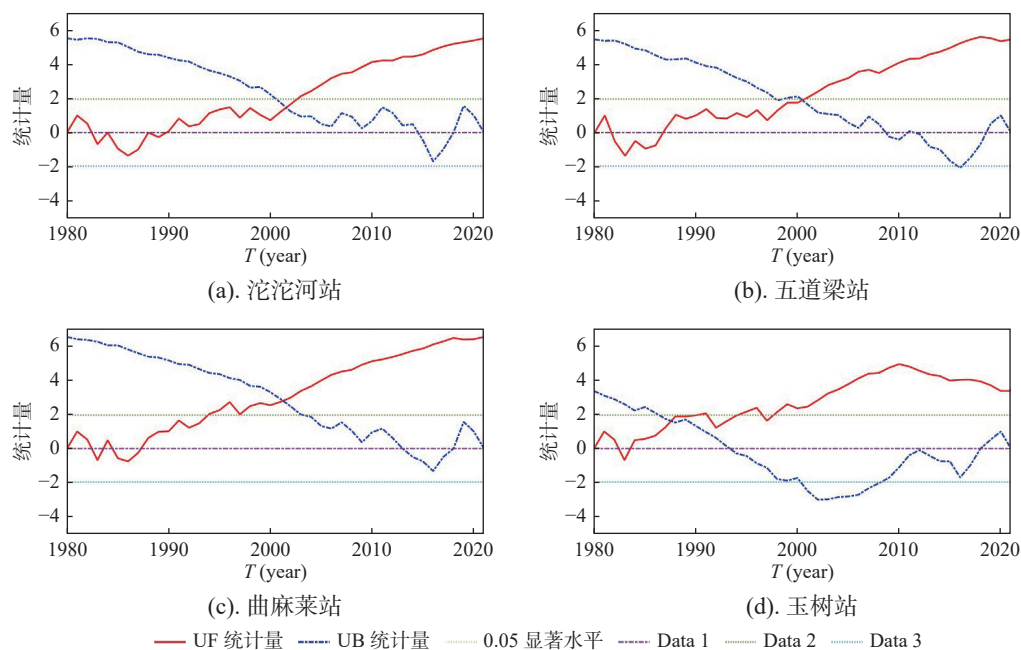


图9 气温 M-K 突变统计分析

Fig. 9 Statistical analysis of M-K mutations of temperature

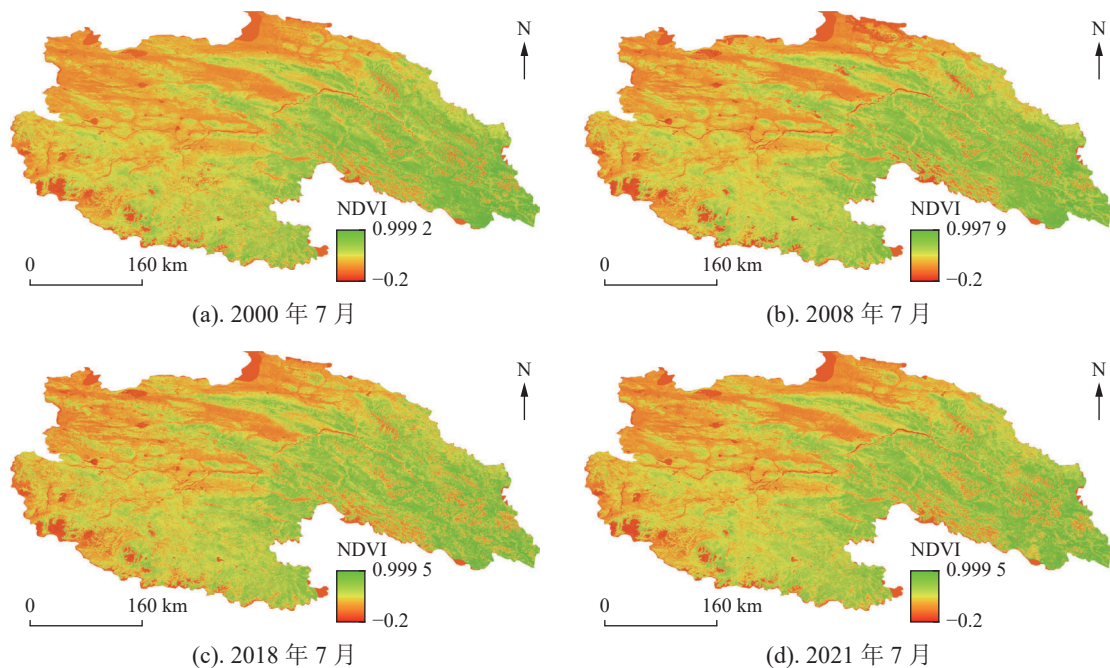
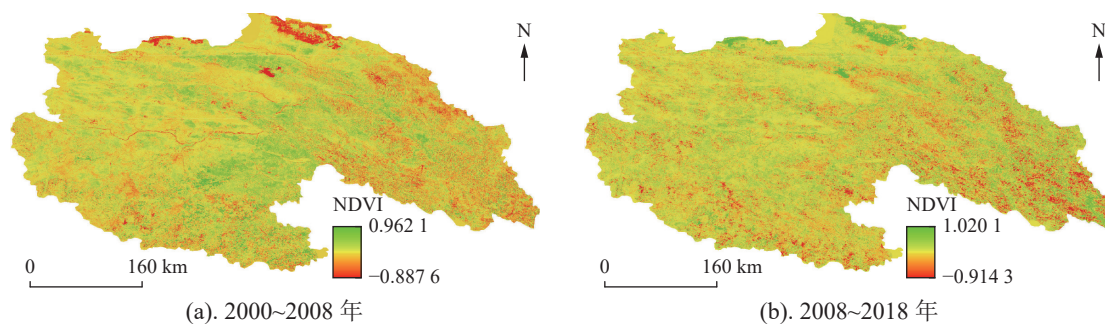


图10 长江源区 2000~2021 年 NDVI 植被指数空间分布图

Fig. 10 Spatial distribution of NDVI vegetation index in the source area of the Yangtze River from 2000 to 2021

植被生长状况最差(图 10)。在 2000~2008 年间,长江源整体植被生长状况有逐渐转好趋势,中部盆地区植被指数增加明显,曲麻莱以东部分区域植被指数有所降低;在 2008~2018 年间,长江源整体植被生长状况继续转好,中部盆地区植被指数增幅较小,东北侧西大滩一带植被指数有明显上升(图 11)。

自西向东选取 9 个不同冻土类型特征点(各特征点分布见图 12),提取长江源各区域近二十年来生长季的时序归一化植被指数 NDVI 值,并作出曲线分布图(图 13),可知近二十年来长江源区生长季植被指数 NDVI 值介于 0.17~0.7,呈波动起伏状。东部玉树-曲麻莱一带植被指数相对较高多集中于 0.45~0.7,



增量<0 面积占 35%; 增量>0 面积占 65% 增量<0 面积占 38%; 增量>0 面积占 62%

图11 长江源区 2000~2021 年 NDVI 植被指数变化空间分布图

Fig. 11 Spatial distribution of NDVI vegetation index changes in the Yangtze River source area from 2000 to 2021

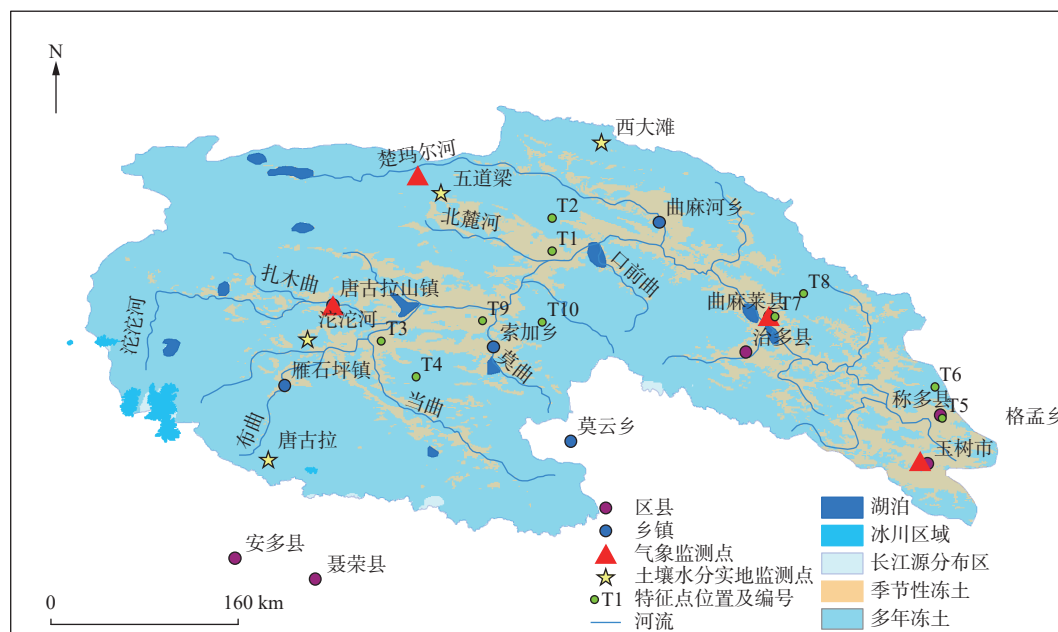


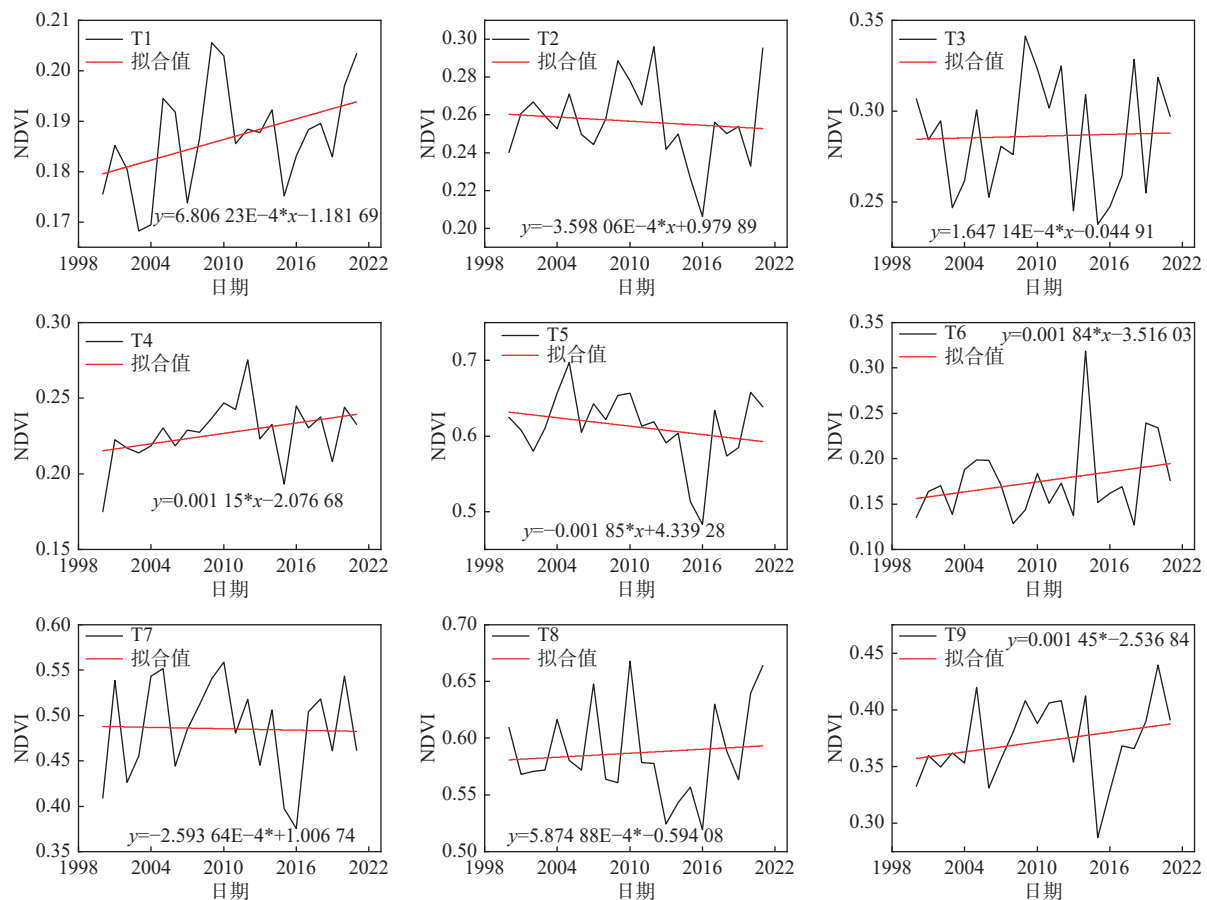
图12 气象监测站点分布图(冻土分布数据来源于青藏高原新绘制冻土分布图(2017)(赵林, 2019))

Fig. 12 Map of meteorological monitoring stations

西部区域植被指数集中于 0.2~0.4, 位于称多县北侧多年冻土区的 T6 区域植被指数处于异常低值。从土地类型分布来看, 这一区域植被指数低主要与土地类型多为裸岩石砾地有关; 从时序植被指数的拟合趋势线来看, 整体上长江源区植被有逐渐转好趋势, 仅东部曲麻河乡 T2 区域、称多县 T5 区域和曲麻莱县 T7 区域出现了略微退化, 其退化原因从时序曲线图来看应是 2015~2016 年 NDVI 值出现异常偏低导致。从图 2 和图 3 年均降雨量和气温来看, 2015~2016 年降雨量处于较低值, 气温处于较高值, 长江源处于干旱状态, 相比全年相对干燥寒冷的西部区域, 东部区域对降雨与气温更为敏感, 因此在出现干旱高温气候时, 东部区域植被发育会受到显著抑制, 导致植被指数出现明显下降。

3.3 生态植被对气候变化的响应

提取玉树、曲麻莱、五道梁和沱沱河等 4 个区域 2000 年至今的 NDVI 植被指数, 将其与降雨、气温数据做相关性分析。分别作出各区域降雨、气温与植被指数 NDVI 值的分布散点图, 并对其相关性进行拟合, 可知植被指数 NDVI 值与降雨、气温间呈线性关系, 其中植被指数 NDVI 值与气温间的线性关系更为显著(图 14)。采用 SPSS 软件对植被指数与降雨、气温间的相关性进行分析, 从植被指数与降雨量的相关性分析结果来看(表 2), 长江源植被与降雨量关系密切, 相关性显著, 均通过了 0.01 级别显著性检验, 除东部玉树相关性系数低于 0.4 外, 曲麻莱以西区域相关性系数均高于 0.5, 属于强相关关系; 从植被指数与气温的相关性分析结果来看(表 3), 长江源植被与气温相关



T1~T9: 图 12 中各特征点

图 13 长江源区生长季(7~9月)NDVI 均值时序变化曲线图

Fig. 13 Time-series variation of NDVI mean values in the Yangtze River source area during the growing season (July-September)

性更为密切,各区域相关性系数均大于 0.6,其中东部玉树一带植被受气温的影响程度最高,相关性系数达到 0.729,其次为曲麻莱区域,整体上呈现出植被受气温的影响程度有自东向西减弱的趋势。对比降雨、气温与植被的相关性,各区域气温对植被的影响程度均高于降雨,且东部区域气温对植被的影响大于西部区域。出现此种空间差异性应与长江源独特的气候和生态环境有关,长江源冻土发育,除河流沿岸季节性冻土区外,大多区域处于常年冻结状态,冻土区对气温敏感,其活动状态受气温波动较大,且长江源生长植被多以耐旱抗寒的低矮植物为主,因而在生长季植被受气温的影响高于降雨;东部区域季节性冻土比西部区域更为发育,季节性冻土受温度影响更为敏感,因而造成东部区域受气温的影响高于西部区域。

3.4 生态植被对土壤水的响应

长江源地质条件恶劣,大多为无人区,实地监测较为困难,目前对长江源土壤水分的监测主要沿青藏

公路沿线进行,监测数据相对匮乏。根据国家青藏高原科学数据中心公布的青藏高原多年冻土综合监测数据集(2002~2018年)(赵林等, 2021),在长江源中部由北向南选取了 4 个近均匀分布的典型土壤水分监测点数据,各点数据分别记录了西大滩、五道梁、沱沱河及唐古拉区域 2004 年至 2018 年埋深 3~20 m 范围内不同深度处的土壤含水率。采用 SPSS 软件将 NDVI 植被指数与各监测区域不同埋深处的土壤含水率做相关性分析(表 4),并作出各区域相关性热图(图 15)。可知各监测区域在埋深 1.4 m 范围内土壤含水率与植被指数相关性显著,均通过了 0.01 级别的显著性检验,反映了监测区域生态植被主要受地表埋深 1.4 m 范围内土壤水分影响,深部土壤水分对其影响较弱;植被指数与土壤含水率的相关系数由表层到深部有逐渐降低趋势,表明生态植被主要受表层土壤水影响,埋深越大影响程度逐渐减弱;中部沱沱河区域生态植被与地表土壤水分的相关性最为显著,北部边

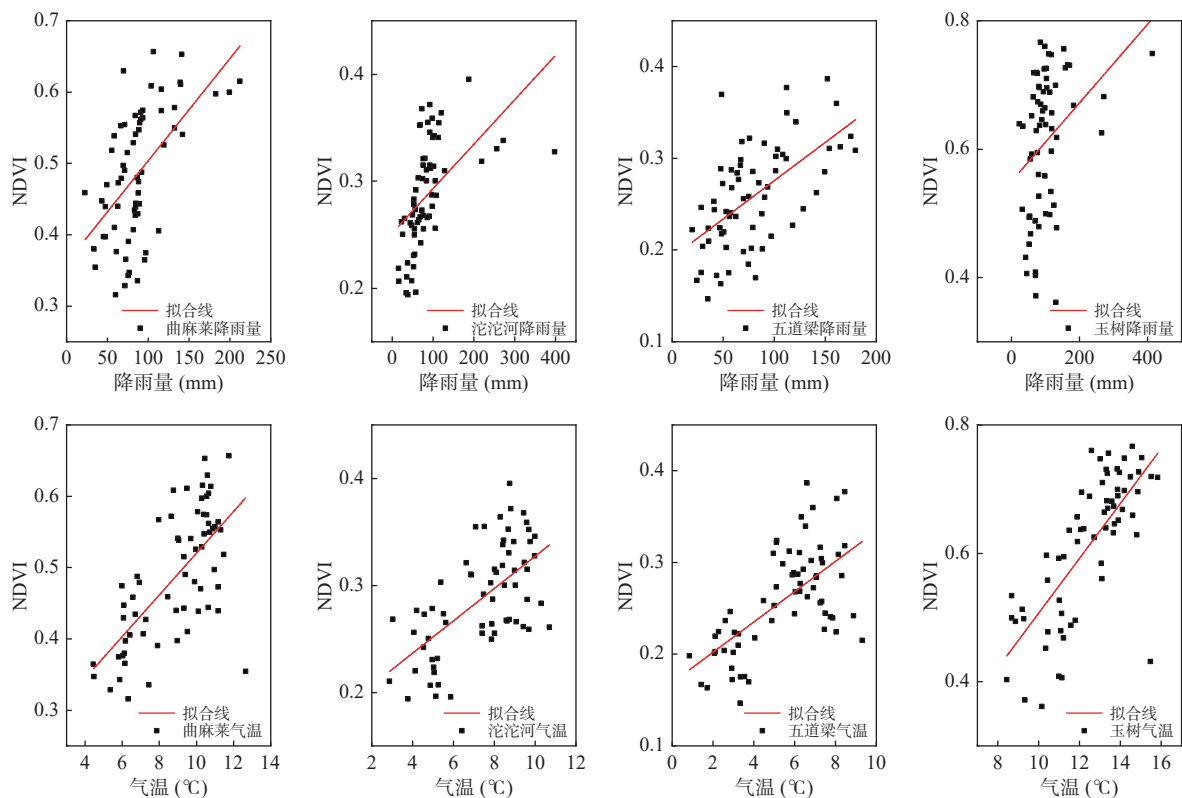


图14 降雨、气温与植被指数 NDVI 值相关性分析图

Fig. 14 Correlation analysis of rainfall and temperature on NDVI value of vegetation index

表 2 生长季(7~9月)逐月植被指数与降雨量相关性分析

Tab. 2 Vegetation index and rainfall correlation analysis for the growing season (July-September)

研究区域	皮尔逊相关性系数	Sig.(双尾)	统计数(个)
曲麻莱	0.568**	0.000	65
沱沱河	0.518**	0.000	65
五道梁	0.587**	0.000	65
玉树	0.331**	0.000	64

注: “**”表明在 0.01 级别(双尾), 相关性显著。

表 3 生长季(7~9月)逐月植被指数与气温相关性分析

Tab. 3 Vegetation index and temperature correlation analysis for the growing season (July-September)

研究区域	皮尔逊相关性系数	Sig.(双尾)	统计数(个)
曲麻莱	0.666**	0.000	65
沱沱河	0.626**	0.000	65
五道梁	0.635**	0.000	65
玉树	0.729**	0.000	64

注: “**”表明在 0.01 级别(双尾), 相关性显著。

缘西大滩一带生态植被与地表土壤水分的相关性最弱, 揭示了长江源中部沱沱河区域受土壤含水率的影响

表 4 植被指数与土壤含水率相关性分析

Tab. 4 Correlation analysis between vegetation index and soil water content

研究区域	土壤深度/cm	皮尔逊相关性系数	Sig.(双尾)	统计数(个)
西大滩	10	0.563**	0.000	108
	40	0.487**	0.000	108
	100	0.475**	0.003	37
	180	-0.016	0.845	144
五道梁	5	0.686**	0.000	132
	50	0.653**	0.000	132
	90	0.542**	0.000	132
	180	0.034	0.701	132
沱沱河	240	-0.123	0.159	132
	10	0.772**	0.000	60
	60	0.757**	0.000	60
	90	0.763**	0.000	60
唐古拉	210	0.210	0.107	60
	270	-0.146	0.265	60
	50	0.648**	0.000	84
	140	0.450**	0.000	84
	300	-0.179	0.103	84

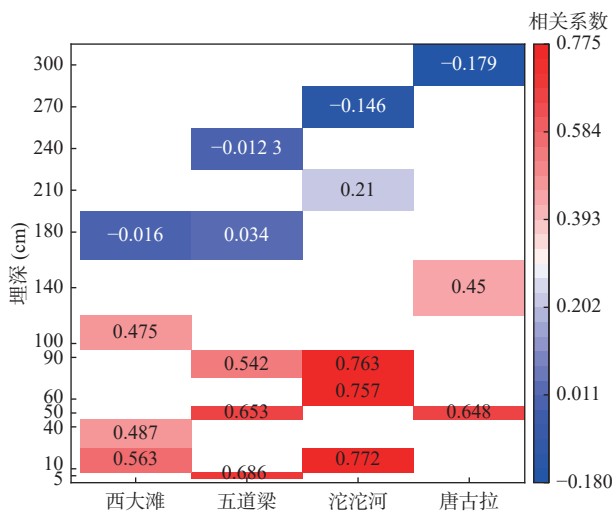


图15 植被指数与土壤含水率相关性热图

Fig. 15 Heat map of correlation between vegetation index and soil moisture content

响最为显著, 北侧西大滩一带受地表土壤水分影响程度最弱。

综上生态植被指数与不同埋深处土壤水分相关性分析, 长江源中部生态植被受地表土壤水分影响主要表现在埋深 1.4 m 范围内, 且由表层到深部土壤水分对生态植被的影响逐渐减弱, 极可能是由于这一区域生态植被发育较差, 植被根系短, 多分布于地表埋深 1.4 m 范围内所致。中部沱沱河区域季节性冻土较发育, 土壤保水性较差, 相比保水性较好的多年冻土区域, 植被受土壤水分的影响更大。

4 结论

(1) 近 40 年来长江源区降雨量整体上从东南向西北呈递减趋势, 在其东北西大滩和西北卓乃河两个区域附近存在降雨量较低的干旱区。

(2) 长江源区地面气温由东南向西北呈递减特征。7~8 月地面气温最高, 月均地面气温达 7~15 °C; 各区域气温整体上均有递增趋势, 长江源西部地区近 40 年来气温增长较快。

(3) 长江源区土地类型以天然牧草地为主。东部植被生长状况要好于西部地区, 2000 年以来长江源区植被生长状况有逐渐转好趋势。

(4) 受冻土对气温的敏感性影响, 长江源生长季植被受气温的影响程度高于降雨, 且东部区域受气温的影响程度高于西部区域。

(5) 长江源中部区域生态植被受土壤含水率影响

较大, 主要表现在埋深 1.4 m 范围内, 影响程度由表层到深部有逐渐减弱趋势。

参考文献(References):

- 陈婷. 长江源区生态水文学研究 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2009.
- CHEN Ting. Study on the ecohydrology of the Yangtze River source area [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2009.
- 杜臻, 张茂省, 冯立, 等. 鄂尔多斯盆地煤炭采动的生态系统响应机制研究现状与展望 [J]. 西北地质, 2023, 56(3): 78–88.
- DU Zhen, ZHANG Maosheng, FENG Li, et al. Research Status and Prospect of Ecosystem Response Mechanism to Coal Mining in Ordos Basin [J]. Northwest Geology, 2023, 56(3): 78–88.
- 方欣, 刘小楝, 岳大鹏. 毛乌素沙地 1960-2018 年气候变化特征及影响因子分析 [J]. 水土保持研究, 2022, 29(2): 163–169.
- FANG Xin, LIU Xiaokang, YUE Dapeng. Analysis of climate change characteristics and impact factors in the Maowusu Sands from 1960-2018 [J]. Soil and Water Conservation Research, 2022, 29(2): 163–169.
- 黄荟羽, 李恩键, 安娟, 等. 克拉默法与曼-肯德尔法对降水突变检验的对比分析 [J]. 现代农业科技, 2018, 8: 184–185.
- HUANG Huiyu, LI Enjian, AN Juan, et al. A comparative analysis of the Cramer method and the Mann-Kendall method for precipitation mutation testing [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2018, 8: 184–185.
- 韩海辉, 李健强, 易欢, 等. 遥感技术在西北地质调查中的应用及展望 [J]. 西北地质, 2022, 55(3): 155–169.
- HAN Haihui, LI Jianqiang, YI Huan, et al. Application and prospect of remote sensing technology in geological survey of Northwest China [J]. Northwest Geology, 2022, 55(3): 155–169.
- 李雪银, 张志强, 孙爱芝. 1982—2021 年黄河流域植被覆盖时空演变及影响因素研究 [J]. 地球环境学报, 2022, 13(4): 428–436.
- LI Xueyin, ZHANG Zhiqiang, SUN Aizhi. Spatial and temporal evolution of vegetation cover in the Yellow River basin from 1982 to 2021 [J]. Journal of Earth Environment, 2022, 13(4): 428–436.
- 李元寿, 王根绪, 赵林, 等. 青藏高原多年冻土活动层土壤水分对高寒草甸覆盖变化的响应 [J]. 冰川冻土, 2010, 32(1): 157–165.
- LI Yuanshou, WANG Genxu, ZHAO Lin, et al. Soil moisture response to alpine meadow cover change in the permafrost active layer of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Glacial Permafrost, 2010, 32(1): 157–165.
- 钱开铸. 长江源区水文周期特征及其对气候变化的响应 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2013.

- QIAN Kaizhu. Characteristics of the hydrological cycle in the Yangtze River source area and its response to climate change [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2013.
- 汪柳皓, 魏显虎, 张宗科, 等. 青藏高原地区植被指数变化及其与温湿度因子的关系[J]. 森林与环境学报, 2022, 42(2): 141–148.
- WANG Lihao, WEI Xianhu, ZHANG Zongke, et al. Changes in vegetation index and its relationship with temperature and humidity factors in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Forest and Environment, 2022, 42(2): 141–148.
- 强建华. 遥感技术在新疆南部地区矿山环境调查及生态修复中的应用[J]. 西北地质, 2021, 54(3): 253–258.
- QIANG Jianhua. Application of remote sensing technology in mine environment investigation and ecological restoration in Southern Xinjiang[J]. *Northwestern Geology*, 2021, 54(3): 253–258.
- 吴小丽. 近30年来青藏高原多年冻土区与季节性冻土区土壤水分变化差异[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2020.
- WU Xiaoli. Differences in soil moisture changes between perennial and seasonal permafrost areas on the Qinghai-Tibet Plateau over the past 30 years[D]. Lanzhou: Lanzhou Transportation University, 2020.
- 阳坤, 何杰. 中国区域地面气象要素驱动数据集 (1979–2018)[R]. 国家青藏高原科学数据中心, 2019.
- YANG Kun, HE Jie. Regional ground meteorological element-driven dataset for China (1979–2018) [R]. National Qinghai-Tibet Plateau Scientific Data Center, 2019.
- 朱艺旋, 张扬建, 俎佳星, 等. 基于MODIS NDVI、SPOT NDVI数据的GIMMS NDVI性能评价[J]. 应用生态学报, 2019, 30(2): 536–544.
- ZHU Yixuan, ZHANG Yangjian, ZU Jiaying, et al. Performance evaluation of GIMMS NDVI based on MODIS NDVI and SPOT NDVI data[J]. Journal of Applied Ecology, 2019, 30(2): 536–544.
- 赵林. 青藏高原新绘制冻土分布图 (2017)[R]. 国家青藏高原科学数据中心, 2019.
- 赵林, 胡国杰, 邹德富, 等. 青藏高原多年冻土综合监测数据集 (2002–2018) [R]. 北京: 国家青藏高原科学数据中心, 2021.
- Ba R, Lovallo M, Song W G, et al. Multifractal Analysis of MODIS Aqua and Terra Satellite Time Series of Normalized Difference Vegetation Index and Enhanced Vegetation Index of Sites Affected by Wildfires[J]. *Entropy*, 2022, 24(12): 1748.
- Essaadia A, Abdellah A, Ahmed A, et al. The normalized difference vegetation index (NDVI) of the Zat valley, Marrakech: comparison and dynamics[J]. *Heliyon*, 2022, 8(12): 12204.
- Parmesan C, Yohe G. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems[J]. *Nature*, 2003, 421(6918): 37–42.