

基于 PDSI 和 SPI 的黑河上游干旱特征对比分析

杨礼箫¹, 曾晟轩¹, 蒋忆文¹, 顾娟¹, 贺缠生^{1,2}

(1. 兰州大学 资源环境学院 西部环境教育部重点实验室

旱区流域科学与水资源研究中心, 兰州 730000; 2. 美国西密歇根大学 地理系, 美国 Kalamazoo 49008)

摘要: 利用黑河上游祁连站、托勒站、肃南站和野牛沟站 1960—2009 年月平均气温和降水资料, 分别计算不同时间尺度下各站 50 年的帕默尔干旱指数(PDSI)和标准化降水指数(SPI)。对比分析表明: 在年尺度上, 黑河上游 4 个站点的 PDSI 指数和 SPI 指数存在显著的正相关, 都能较好的描述黑河上游干旱情况; 在月尺度上, 各站 PDSI 指数和 SPI 指数的相关系数存在显著差异, 该差异随着月份的不同而不一样。夏季和秋季是黑河上游全年发生严重干旱和极端干旱的高峰期, 如果不及及时做好防旱工作, 会对该地区畜牧业产生很大的影响。

关键词: 干旱特征; 帕默尔干旱指数; 标准化降水指数; 黑河上游

中图分类号: P426.616

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2017)02-0132-05

Comparison of Drought Characteristics in the Upstream of the Heihe River Basin Based on Palmer Drought Severity Index and Standard Precipitation Index

YANG Lixiao¹, ZENG Shengxuan¹, JIANG Yiwen¹, GU Juan¹, HE Chansheng^{1,2}

(1. Center for Dryland Water Resources Research and Watershed Science, College of Earth and Environment Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. Department of Geography, Western Michigan University, Kalamazoo, MI 49008, USA)

Abstract: Based on the monthly mean temperature and precipitation data from 4 meteorological stations (Qilian, Yeniugou, Tuole and Sunan) in the upper reaches of Heihe River Basin during the period from 1960 to 2009, we calculated the Palmer drought severity index (PDSI) and standard precipitation index (SPI) for each station at different time scales. The results show that at the annual scale, both PDSI and SPI could reasonably describe drought condition in the upper reaches of the Heihe River Basin; at the monthly scale, there is a significant difference in the correlation coefficients between the PDSI and SPI for each station, which varies with the month. Severe droughts occurring most frequently in the summer and autumn and thus implementation of the drought management practices is critical for alleviating drought impacts during these seasons in the study region.

Keywords: drought characteristics; Palmer drought severity index; standard precipitation index; upstream of the Heihe River

干旱是全球主要的自然灾害之一, 它直接影响着工农业生产和国民经济发展^[1]。据统计, 全球每年因干旱造成的经济损失远远超过了其他自然灾害所造成的损失^[2-3]。我国是世界上人口密集的农业国家之一, 受全球气候变化和季风气候影响^[4], 近年来我国干旱发生频次、波及范围和持续时间都呈增加趋势, 对我国粮食安全和社会经济造成巨大的损失^[5]。鉴于此, 对干旱进行分析与评价是十分必要的, 可为制定防灾减灾应对措施提供科学依据。由于各行各业

对干旱的理解不同, 至今干旱还没有一个统一的定义^[6]。目前, 关于干旱指标已有大量的研究。根据建立途径的不同可将其大概分为 2 类^[7]。一类是通过研究干旱的机理来细致地研究干旱涉及的各个物理过程, 从而提高对干旱强度和持续时间的刻画精度^[7]。另一类则是通过气象学方法研究降水量的统计分布规律, 以反映干旱的强度和持续时间^[7]。帕默尔干旱指数(Palmer Drought Severity Index or PDSI)和标准化降水指数(Standard Precipitation Index

收稿日期: 2016-09-18

修回日期: 2016-10-05

资助项目: 国家自然科学基金重点项目“黑河上游土壤水文异质性观测试验及其对山区水文过程的影响”(D010102-91125010), “西北农牧交错带土地利用/覆被变化对地表水热过程的影响”(41530752)

第一作者: 杨礼箫(1991—), 女, 甘肃天水人, 博士研究生, 主要研究方向为干旱分析和土地利用/土地覆被变化。E-mail: yanglx16@lzu.edu.cn

通信作者: 贺缠生(1958—), 男, 陕西蓝田人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为流域水文过程和水文模型。E-mail: cshe@lzu.edu.cn

or SPI) 分别是上述两类指标的典型代表,目前在国内外已有大量的研究。PDSI 是 Palmer 于 1965 年提出的,该指标具有严密的系统性,考虑因子较全面,并且综合了水分亏缺量和持续时间因子对于干旱程度的影响,考虑到前期的天气条件,对干旱的各项特征能较合理地进行描述,具有较好的时空比较性。如今在美国 PDSI 已成为半官方的干旱指标^[8]。SPI 具有计算简单和多时间尺度的优势,对干旱变化反映敏感,能够对不同空间的旱涝进行比较,稳定性较好,国内外许多学者运用该指数分析了各地干旱的时空变化特征^[9-10]。至今,有许多学者运用这两个指标做了广泛研究。安顺清等针对我国的情况对 PDSI 进行了修正^[11]。卫捷等指出 PDSI 能够抓住降水是干旱最重要的决定因素,比降水距平百分率能够更加准确地描述干旱强度^[12]。Hayes 等利用 SPI 分析了 1996 年美国南部平原与西南部的干旱,监测其开始与发展过程,作为美国干旱观测系统的组成要素^[13]。

黑河是我国第二大内陆河流,水资源不仅是贯穿黑河研究的主线和核心,也是联系流域生态系统和经济系统的纽带,它限制着该区域社会经济环境的可持续发展^[14]。黑河上游是整个黑河流域的产流区,其干旱化程度直接影响着中游绿洲灌溉区的农业产量和整个流域的生态系统服务以及经济发展,了解该地区干旱规律和特征对整个流域至关重要。由于黑河上游地形复杂,海拔高,数据缺乏,到目前为止针对该区域干旱方面的研究比较少。李计等采用 Archimedean Copula 函数,构建了黑河上游 3 个水文站干旱历时、干旱强度和干旱烈度峰值的二、三维联合分布模型,通过拟合度评价,得出单干旱变量的重现期理论值介于二、三维变量联合重现期与相应同现期之间,因此可将二、三维联合重现期和同现重现期作为单变量重现期的 2 个临界点^[15]。王海青等选取 48 a 张掖市旱灾面积统计资料,采用马尔可夫预测法,预测了 2005—2010 年旱灾面积的状态概率,并提出了一些对策^[16]。赵捷等通过建立累计相对湿润指数和 LAI 的相关关系,定量评价了黑河上中游流域不同土地覆被类型 LAI 对气象干旱的响应^[17]。蒋忆文等利用黑河上游 4 个气象站 1968—2009 年逐日降水资料分尺度计算 SPI 指数,将其与查阅得到的黑河上游历史大范围干旱事件进行对比,发现虽然黑河上游属于山区,地形复杂,降水存在很大的差异。但是利用 4 个站点数据计算出来的 SPI 值都能准确地描述历史所记载的干旱事件。同时,她提出 SPI 对水分支出和地表水平衡反映不够充足,难以描述干旱的内在机理,可进一步利用对水量平衡考虑更为充分的 PDSI 指数对黑河上游干旱情况进行

分析^[18]。本研究旨在通过对黑河上游 PDSI 指数和 SPI 指数的计算分析,来研究二者评价干旱的特点和一致性,为准确评价和分析干旱提供依据。

1 研究区概况

黑河上游(38°12'—39°22'N,97°46'—101°11'E)位于青藏高原北缘祁连山地,属青藏高原的祁连山—青海湖气候区,年降水量为 300~600 mm,年平均温度为一5~4℃,蒸发量少,高寒阴湿,是黑河的发源地和产流区。黑河上游地势西高东低,南高北低,主要山脉有疏勒南山、讨赖山、走廊南山,山峰海拔都在 4 000 m 以上,山脚海拔高程一般为 2 000 m,4 000 m 以上发育着现代冰川,最高峰团结峰海拔 5 584 m,山峰终年积雪。区内生产活动以畜牧业为主,主要植被类型为山地、森林和草原^[19]。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本文主要采用黑河上游 4 个气象站(祁连站、野牛沟站、托勒站和肃南站)1960—2009 年的逐日降水和气温资料,分别计算不同时间尺度 PDSI 指数与 SPI 指数值。站点分布详细信息见表 1。本次研究所采用的数据均来自于“寒区旱区科学数据中心”(http://westdc.westgis.ac.cn)。

表 1 黑河上游气象站概况

气象站	海拔/ m	经度 E/ (°)	纬度 N/ (°)	起止年份 (年)	资料长 度/a
肃南	2312.0	99.62	38.83	1960—2009	50
祁连	2787.4	100.25	38.18	1960—2009	50
野牛沟	3180.0	99.58	38.42	1960—2009	50
托勒	3367.0	98.42	38.82	1960—2009	50

2.2 研究方法

2.2.1 PDSI 计算 Palmer 将干旱定义为:数月或数年内,一个地区的实际水分供给持续低于气候上所期望的水分供给的现象,即干旱指数是水分亏缺量与持续时间的函数^[8,20]。

$$\hat{P}_i = \alpha \cdot PE_i + \beta \cdot PR_i + \gamma \cdot PRO_i + \delta \cdot PL_i \quad (1)$$

式中: \hat{P} 表示当前情况达到气候上适宜时的降水量;PE,PR,PRO,PL 分别为可能蒸散量、土壤达到田间持水量所需要补充的水分量、可能径流量(土壤田间持水量与可能补充量之差)和可能土壤水损失量(土壤表层和土壤下层水分散失量之和); i 表示第 i 个计算时段,一般以月为单位计算; $\alpha, \beta, \delta, \gamma$ 分别称为蒸散发系数、补充系数、径流系数和散失系数。

计算出 \hat{P}_i 后,求出它与对应时段的实际降水量

(P_i)的差值即^[8]:

$$d_i=P_i-\hat{P}_i \tag{2}$$

水分距平“ d ”求出后,将其与指定地点给定月份的气候权重系数 K 相乘,就会得到表明水分盈亏程度的水分异常指数 Z ^[8]:

$$Z=K_jd_j \tag{3}$$

$$K=\frac{\overline{ET}+\overline{R}}{\overline{P}+\overline{L}} \tag{4}$$

式中: K 是权重因子; Z 表示指定地点给定月份的实际气候干湿状况与其多年平均水分状态的偏离程度。

最后给出的帕默尔旱度模式为^[11]:

$$x_i=\frac{z_i}{57.136+0.805x_{i-1}} \tag{5}$$

式中: x_i 为第 i 月的帕默尔干旱指数; x_{i-1} 为第 $i-1$ 月的帕默尔干旱指数。

2.2.2 SPI 计算 SPI 通过计算时段内降水量的 Γ 分布累积概率,再将累积概率标准化而得到^[21-22]。假设某一时段的降水量为 x ,则其 Γ 分布的概率密度函数为^[21-22]:

$$f(x)=\frac{1}{\beta^{\alpha}\Gamma(\alpha)}x^{\alpha-1}e^{-\frac{x}{\beta}} \quad x>0 \tag{6}$$

式中: α 为形状参数; β 为尺度参数; x 为降水量; $\Gamma(\alpha)$ 为 Gamma 函数,其中 α,β 可用极大似然估计法得出:

由于 Gamma 方程中不包含 $x=0$ 的情况,而实际的降水量可以为 0,所以累积概率为:

$$H(x)=q+(1-q)F(x) \tag{7}$$

式中: q 是降水量为 0 时的概率; $F(x)$ 为给定时间尺度的累积概率。用 m 表示降水时间序列中降水量为 0 的个数,则 $q=\frac{m}{n}$ 。

累积概率 $H(x)$ 可通过下式转换为标准正态分布函数^[21-22]:

$$H(x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^xe^{-t^2/2}dt \tag{8}$$

对其求解,可得近似解如下:

当 $0<H(x)\leq 0.5$ 时,

$$SPI=-\left(t-\frac{c_0+c_1t+c_2t^2}{1+d_1t+d_2t^2+d_3t^3}\right) \tag{9}$$

$$t=\sqrt{\ln\frac{1}{H(x)^2}} \tag{10}$$

当 $0.5<H(x)\leq 1$ 时,

$$SPI=\left(t-\frac{c_0+c_1t+c_2t^2}{1+d_1t+d_2t^2+d_3t^3}\right) \tag{11}$$

$$t=\sqrt{\ln\left\{\frac{1}{[1.0-H(x)]^2}\right\}} \tag{12}$$

式中: $c_0=2.5151517,c_1=0.802853,c_2=0.010328,$

$d_1=1.432788,d_2=0.189269,d_3=00.001308$ ^[21-22]。

为了使 SPI 和 PDSI 直接比较,参考 PDSI 的干湿等级重新划分了 SPI 的旱涝等级,具体见表 2^[7]。

表 2 帕默尔干旱指标(PDSI)和标准化降水指标(SPI)等级划分

等级	PDSI	SPI
极端湿润	≥ 4.00	≥ 2.00
严重湿润	$3.00\sim 3.99$	$1.50\sim 1.99$
中等湿润	$2.00\sim 2.99$	$1.00\sim 1.49$
轻微湿润	$1.00\sim 1.99$	$0.50\sim 0.99$
正常	$-0.99\sim 0.99$	$-0.49\sim 0.49$
轻微干旱	$-1.99\sim -1.00$	$-0.99\sim -0.50$
中等干旱	$-2.99\sim -2.00$	$-1.49\sim -1.00$
严重干旱	$-3.99\sim -3.00$	$-1.99\sim -1.50$
极端干旱	≤ -4.00	≤ -2.00

3 结果与分析

3.1 PDSI 指数和 SPI 指数相关性分析

利用黑河上游 4 个站气温、降水资料,分别计算 1960—2009 年 PDSI 指数和 SPI 指数。对每个站点年平均 PDSI 指数和 SPI 指数进行相关性分析发现:年尺度上,上游 4 个站 PDSI 指数和 SPI 指数均有很好的正相关,相关系数介于 0.70~0.87 (相关系数在 0.36 以上,即可达到 99%的置信度)。

为了解释上述原因,选取与干旱最密切的降水量和气温进行相关性分析(表 3)。可以看出,PDSI 指数与降水量的年际变化比较一致,相关系数达 0.70,通过 99%信度检验;PDSI 与温度年际变化的相关性比较低,除托勒站 PDSI 指数与温度的相关性通过了 99%信度检验,其余三站均未通过一定置信度检验。近几十年来黑河上游呈现变暖趋势,降水量也随着温度的升高有所增加。其中托勒站温度和降水量的变化关系最密切,上升的温度带来大量的降水,使得托勒站 PDSI 变化比较明显,因此在全球变暖的背景下,研究干旱成因时仍需将降水作为主要的参考因子^[23]。SPI 指数与降水量的年际变化趋势完全一致,相关系数达到 1.00,但它与气温年际变化的相关性也不高,同 PDSI 指数一样,SPI 指数除了和托勒温度的相关性通过了 99%信度检验外,其余三站也未通一定的置信度检验。因此降水量的变化对黑河上游地区干旱程度的影响很大。由于黑河上游地区海拔较高,年平均气温较低,低温导致该地区蒸发量很少,因此这两个干旱指数与温度的年际变化相关程度不明显。

表 3 黑河上游 4 站 PDSI 和 SPI 同降水和气温相关系数

站点	祁连站		肃南站		托勒站		野牛沟站	
	降水	气温	降水	气温	降水	气温	降水	气温
SPI	1.00	0.22	1.00	-0.09	1.00	0.44	1.00	0.29
PDSI	0.70	0.06	0.88	-0.23	0.77	0.48	0.88	0.26

为了深入探讨这两个指数的关系,对每个月的黑河上游 4 个站点 PDSI 指数与 SPI 指数在各月间的相关性存在显著差异:4—9 月份上游降水较多,各站 PDSI 指数和 SPI 指数的相关系数很好,均超过 99%置信度检验水平,其中 6 月份相关性最好。肃南站在 10 月、12 月 PDSI 指数和 SPI 指数的相关性最差,相关系数都是 0.11;祁连站 12 月份 PDSI 指数和 SPI 指数的相关性最差,相关系数为 0.08,它也是这 4 个站点中未通过 95%置信度检验水平月份最多的站(集中在冬季以及冬季前后的几个月)。野牛沟站在 12 月 PDSI 指数和 SPI 指数的相关性最差,相关系数为 0.24。托勒站除 11 月份 PDSI 指数和 SPI 指数的相关系数远低于其他月份外(相关系数为 0.05),其余各月均超过 95%的置信度检验水平。

3.2 黑河上游干旱特征分析

图 1 为黑河上游 1960—2009 年逐月 PDSI 变化图。可以看出,黑河上游容易发生干旱灾害,1960—2009 年期间,有多个时段处于干旱期(见表 4),持续时间均在半年以上。其中,以 1961 年 8 月—1963 年 10 月干旱持续时间最长,持续时间长达 27 个月;以 1970 年 6 月—1971 年 8 月干旱强度最大,在此期间上游 4 个站均有极端干旱事件出现,野牛沟站连续 14 个月出现极端干旱,祁连站和托勒站分别有 12 个月和 7 个月出现极端干旱。

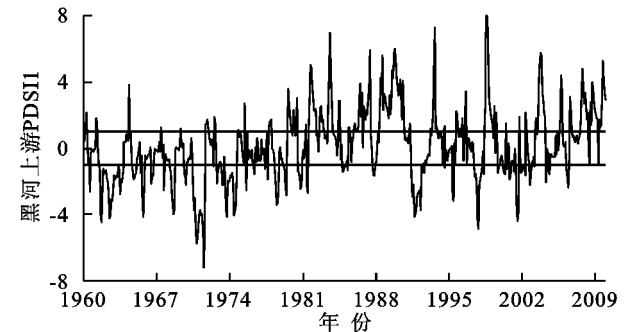


图 1 黑河上游 1960—2009 年逐月 PDSI 值

将每 5 a 的降水量进行平均(图 2),黑河上游在 1980—1989 年与 2005—2009 年为降水偏丰期,1960—1974 年为偏枯期。降水的变化直接影响当地的干旱情况,因而上游影响较大的干旱期多集中在 1970—1974 年。

表 4 黑河上游 1960—2009 年主要干旱期

起止时间	历时月	PDSI	最小值
		最小值	出现时间
1961 年 8 月—1963 年 10 月	27	-4.47	1961~09
1970 年 6 月—1971 年 8 月	15	-7.18	1971~07
1973 年 7 月—1974 年 8 月	14	-4.17	1973~09
1991 年 6 月—1992 年 6 月	12	-4.15	1991~09
1997 年 5 月—1998 年 2 月	10	-4.83	1997~10

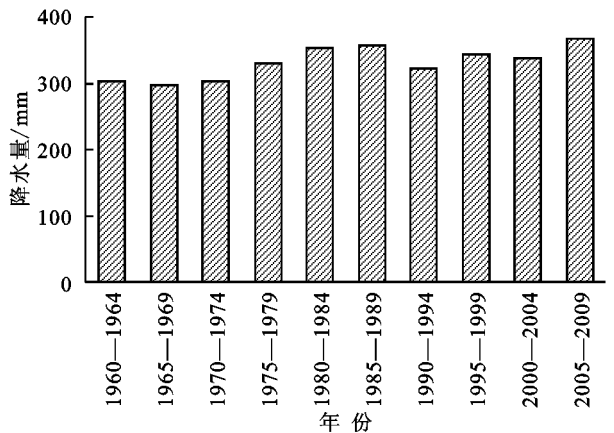


图 2 黑河上游 5 a 尺度降水量统计

根据各站的 PDSI 指数,统计黑河上游以及各站在不同季节发生轻微干旱、中等干旱、严重干旱和极端干旱的频数,见表 5。黑河上游各站春季和冬季容易发生轻微干旱和中干旱,夏季和秋季容易发生严重干旱和极端干旱。经统计,黑河上游 50 a 来春季、夏季、秋季和冬季平均降水量分别为 52.50 mm,217.75 mm,57.44 mm 和 4.37 mm。虽然夏秋两季降水量占全年降水量的 82.87%,但气温也比较高,高温引起蒸散量远大于降水量,容易引发严重干旱以上干旱事件(占全年发生严重干旱以上干旱事件频率的 79.82%);其中,托勒站出现上述情形的频率最高,大约为 89.66%;祁连站发生严重干旱和极端干旱事件的频率最低,大约为 67.75%。黑河上游地区主要以放牧为主,夏季和秋季干燥的气候条件会加速地表水分的快速蒸发,导致地面水分含量快速降低,对牧草的生长带来负面影响。尤其在秋季,会引起牧草干枯,干枯的牧草经不住牲畜的踩踏,再加上冬天风大,大量被踩踏粉碎的牧草被风吹跑,使得牲畜严重缺草,阻碍了当地畜牧业的发展。

表 5 各站四季干旱月数频数统计

站点	春季				夏季				秋季				冬季			
	微	中	严	极	微	中	严	极	微	中	严	极	微	中	严	极
祁连站	6	4	3	2	3	5	4	6	7	5	5	6	7	1	5	0
托勒站	8	8	3	0	2	4	7	6	1	3	4	9	8	9	0	0
肃南站	12	3	1	2	4	6	4	6	13	3	4	4	4	5	0	0
野牛沟站	7	2	0	2	3	2	3	5	4	3	3	5	4	1	0	3

注:微、中、严、极分别为发生微旱、中旱、严重干旱、极端干旱的频数。

4 结论

(1) 在年尺度上,黑河上游4个站的PDSI指数和SPI指数均有很好的正相关,对于旱程度描述的一致性较好;月尺度上,各站PDSI指数与SPI指数的相关性存在显著差异,主要表现在:4—9月份,由于降水较多,PDSI指数和SPI指数的相关性很高。而在其余几个月,降水量极少,这两个指数的相关性极低。

(2) 黑河上游是干旱灾害易发区,1960—2009年期间有多个时段处于干旱期。不同季节发生的干旱程度不同,春季和冬季容易发生轻微干旱和中等干旱。夏季和秋季不仅容易发生严重干旱和极端干旱,而且也是该区全年发生严重干旱和极端干旱的高峰期,应及时做好这个时期防旱工作,减少对该地区畜牧业和生态环境的影响。

致谢:感谢张兰慧提供的气象数据,蒋忆文和金鑫及实验室团队提出的宝贵意见。

参考文献:

- [1] Dai A. Drought under global warming: A review[J]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 2011, 2(1):45-65.
- [2] Wilhite D A. Drought as a natural Hazard: Concepts and Definitions[M]. London: Routledge, 2000.
- [3] 袁文平,周广胜. 标准化降水指标Z指数在我国应用的对比分析[J]. 植物生态学报, 2004, 28(4):523-529.
- [4] Qiang Z, Lihua C, Runyuan W. Climate change and food, food safety in Northwest China[J]. Journal of Arid Meteorology, 2012, 30(4):509-513.
- [5] 韩兰英,张强,姚玉璧,等. 近60年中国西南地区干旱灾害规律与成因[J]. 地理学报, 2014, 69(5):632-639.
- [6] Landsberg H E. Climatic aspects of droughts[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1982, 63(6):593-597.
- [7] 陈才,王振亚,程媛华,等. 北方半干旱区PDSI和SPI比较研究[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(5):2778-2780.
- [8] 刘庚山,郭安红,安顺清,等. 帕默尔干旱指数及其应用研究进展[J]. 自然灾害学报, 2004, 13(4):21-27.
- [9] 车少静,李春强,申双和. 基于SPI的近41年(1965—2005)河北省旱涝时空特征分析[J]. 中国农业气象, 2010(1):137-143.
- [10] 张磊,潘婕,陶生才,等. 基于SPI的近51年临沂市旱涝时空特征分析[C]//创新驱动发展 提高气象灾害防御能力:S7应对气候变化与农业气象防灾减灾,年中国气象学会年会论文集, 2013.
- [11] 安顺清,邢久星. 修正的帕默尔干旱指数及其应用[J]. 气象, 1985, 11(12):17-19.
- [12] 卫捷,马柱国. Palmer干旱指数、地表湿润指数与降水距平的比较[J]. 地理学报, 2003, 58(S1):117-124.
- [13] Hayes M J, Svoboda M D, Wilhite D A, et al. Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1999, 80(3):429-438.
- [14] 宁宝英,何元庆,和献中,等. 黑河流域水资源研究进展[J]. 中国沙漠, 2008, 28(6):1180-1185.
- [15] 李计,李毅,贺维生. 基于Copula函数的黑河流域干旱频率分析[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2013(1):213-220.
- [16] 王海青,张勃. 黑河流域干旱化驱动力机制及其趋势预测[J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(9):68-72.
- [17] 赵捷,徐宗学,左德鹏,等. 黑河上中游流域地表植被对干旱的响应[J]. 北京师范大学学报:自然科学版, 2014(5):543-548.
- [18] 蒋忆文,张喜凤,杨礼箫,等. 黑河上游气象与水文干旱指数时空变化特征对比分析[J]. 资源科学, 2014, 36(9):1842-1851.
- [19] 潘启民. 黑河流域水资源[M]. 郑州:黄河水利出版社, 2001.
- [20] Palmer W C. Meteorological Drought[M]. Washington D C, USA: US Department of Commerce, Weather Bureau, 1965.
- [21] 韩海涛,胡文超,陈学君,等. 三种气象干旱指标的应用比较研究[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(1):237-241.
- [22] 李伟光,陈汇林,朱乃海,等. 标准化降水指标在海南岛干旱监测中的应用分析[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(1):178-182.
- [23] 章大全,张璐,杨杰,等. 近50年中国降水及温度变化在干旱形成中的影响[J]. 物理学报, 2010, 59(1):655-663.