

祁连山北麓牧区植被生长季不同等级降水时空变化特征

刘晓迪, 宋孝玉, 覃琳, 文望, 刘雨

(西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘要:以祁连山北麓肃南县牧区为研究区,选取周边7个气象站1961–2016年的日降水资料,采用气候倾向率、Hurst指数、Mann–Kendall检验和反距离加权插值等方法,对肃南县植被生长季降水的时空变化特征进行研究。结果表明:肃南县植被生长季降水量和降水强度距平百分率趋势显著增加,而降水日数增加趋势不显著;植被生长季降水量和降水强度在1998年发生显著突变,而降水日数无显著突变;植被生长季降水以小雨为主,中雨降水变异系数较大,但近年来趋于稳定上升状态;植被生长季降水日数和降水强度在空间上呈东南多西北少,小雨降水分布与其分布类似,而中雨强度呈南少北多的空间分布差异;小雨对肃南县植被生长季降水量贡献较大,但近年来中雨比小雨增加明显,降水时空分布呈不均衡发展趋势。

关键词:不同等级降水;时空变化;反距离加权插值;植被生长季;祁连山北麓

中图分类号:P468.0⁺24

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2020)04-0031-09

Spatio-temporal variations of different grade precipitation in the pastoral area on the northern slope of Qilian Mountains during vegetation growing season

LIU Xiaodi, SONG Xiaoyu, QIN Lin, WEN Wang, LIU Yu

(State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Taking the grassland pastoral area of Sunan County on the northern slope of Qilian Mountains as the research area, we selected the daily precipitation data of seven nearby weather stations from 1961 to 2016 to analyze the spatio-temporal variations of different grade precipitation in Sunan County during the vegetation growing season using the climate tendency method, Hurst index method, Mann–Kendall test and inverse distance weighted interpolation. The results show that the anomalous percentages of the quantity and intensity of precipitation in Sunan County during vegetation growing season showed a significant increasing trend, whereas the precipitation days presented an insignificant increase. Significant abrupt changes of the quantity and intensity of precipitation occurred in 1988, but no significant abrupt change of precipitation days occurred. The precipitation was dominated by light rainfall and the variation coefficient of moderate rainfall was large, but it tended to rise steadily in recent years. The spatial distribution of the days and intensity of precipitation decreased from the southeast to the northwest, which was similar to the distribution of light rainfall. To the opposite, the distribution of moderate rainfall decreased from the north to the south. Compared with the contribution of moderate rainfall, light rainfall contributed more to the precipitation; however, the increase of moderate rainfall was more significant than that of light rainfall in recent years, and the spatial and temporal distribution of precipitation showed an unbalanced trend.

Key words: different grade precipitation; spatio-temporal variation; inverse distance weighted interpolation; vegetation growing season; northern slope of Qilian Mountains

收稿日期:2019-12-10; 修回日期:2020-03-01

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0400301)

作者简介:刘晓迪(1993-),女,河北石家庄人,硕士研究生,研究方向为水资源及生态响应。

通讯作者:宋孝玉(1971-),女,陕西安康人,博士,教授,博士生导师,研究方向为水资源及生态响应。

1 研究背景

祁连山作为我国西部重要的生态安全屏障和河西走廊水源涵养生态功能区,在维护区域的生态平衡、生态安全以及西部地区经济发展等方面占有举足轻重的地位^[1-3]。但近年来,祁连山冰川亏损加剧,植被退化严重,物种多样性减少,进而影响祁连山生态环境,其生态系统修复和建设问题已成为甘肃省人民政府的重要工作之一^[4-6]。而降水作为水文上与生态相关的重要因子,对生态环境修复至关重要,掌握该区域降水变化特征,分析降水变化成因,是祁连山生态修复和治理的关键^[7-10]。

草原生态系统为祁连山北麓生态系统的重要组成部分,草地面积为 $4.33 \times 10^4 \text{ km}^2$, 约占该区域总面积的 52.48%^[11]。水分是草原生态系统植物生长发育最主要的限制性资源,在全球降水变化背景下,草地生态系统对降水变化有着极强的敏感性。降水是植被所需水分的主要来源,降水的增加或减少影响着植被冠层的蒸腾,进而影响植被土壤含水量,使得植被生长环境和水分收支受到影响^[12-16]。在干旱、半干旱地区,降水格局的变化对植被生长的影响尤为显著,降水变化会引发区域水资源时空分布的变化,对水资源量、植被生长以及该地区畜牧业发展都将产生深远影响,尤其是在以畜牧业为主的祁连山北麓牧区,若要充分发挥草地植被最大的生态效益和经济效益、准确分析植被与降水变化之间的关系,就必须了解降水变化的时空变化特征。

目前,在西北地区由暖干向暖湿变化趋势的背景下^[17],有关祁连山地区气候变化的分析研究成果越来越多,如贾文雄等^[18-19]分别从不同等级降水变化和极端降水角度得到祁连山及河西走廊降水东西、南北分异,极端降水呈增加趋势;尹宪志等^[20]和张耀宗等^[21]对祁连山气温和降水变化进行研究得出其气温和降水分别呈增加趋势。但对牧区草原的降水变化研究相对较少,许晓民等^[22]、杨秀海等^[23]开展了西部不同牧区年平均气温和降水的研究。总结目前的研究成果,对祁连山降水变化分析均基于年降水而言,并未针对典型牧区草原植被生长季降水变化进行研究。

位于祁连山北麓的肃南裕固族自治县属于干旱、半干旱地区,降水大部分在 4-10 月份,植被生长季也为 4-10 月份^[24],为明确降水变化对其草地植被生长季的影响,本文通过收集其周边 7 个气象站的日降水资料,分析草地植被生长季不同等级降

水在时间、空间上的变化特征,以便因地制宜地制定祁连山生态修复策略,并为区域草地合理利用和区域水、草、畜平衡可持续发展提供依据。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

本文研究区为祁连山北麓的肃南裕固族自治县,位于甘肃省张掖市南部(图 1),地理位置介于 $97^{\circ}21' \sim 102^{\circ}13'E$, $37^{\circ}28' \sim 39^{\circ}49'N$,总面积约 $2.4 \times 10^4 \text{ km}^2$,海拔高度约为 1 327 ~ 5 574 m 之间。全县东西长 650 km,南北宽 120 ~ 200 km。肃南县属内陆干旱草原区,位于祁连山北麓褶皱带,约占祁连山北麓面积的 75%,牧草繁茂,是优质的天然牧场,天然草原面积约为 $1.76 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。肃南县属高寒半干旱气候,冬春季寒冷而漫长,夏秋季凉爽而短暂,受其地形影响,各区域气候差异明显,全县日照时数在 2 210.5 ~ 2 840.5 h,无霜期 83 d 左右。境内有 3 条河流水系:石羊河水系、疏勒河水系以及黑河水系,全县年径流量约为 $43.11 \times 10^8 \text{ m}^3$,水资源储备量大,有发展草地灌溉的潜力,也是甘肃省重要的畜牧业大县。

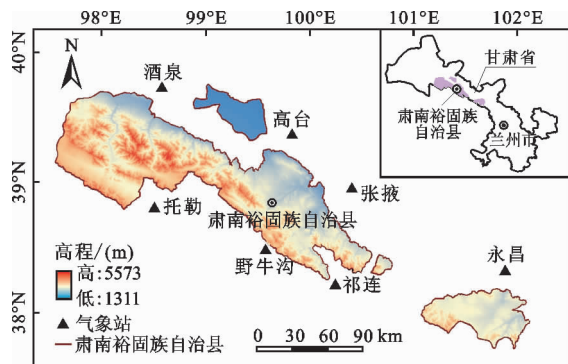


图 1 祁连山北麓肃南县牧区地理位置及气象站分布图

2.2 数据来源

本文采用的降水量数据由中国气象科学数据共享服务网下载,选取肃南县研究范围及周边的 7 个数据完整的国家基准气象站点,收集 1961-2016 年 4-10 月份观测完整的日集数据资料,气象站点位置分布见图 1。根据中国气象局发布的《降水强度等级划分标准(内陆部分)》中的 24 h 雨量值划分标准,可将降水划分为小雨、中雨、大雨和暴雨,降水量 $\geq 0.1 \text{ mm}$ 的日数则计为降水日。祁连山北麓地区暴雨事件出现几率很小,选取的 7 个气象站中只有永昌站出现过 1 次暴雨事件。

1961-2016 年肃南县植被生长季不同等级的降水量、降水日数、降水强度统计情况如表 1 所示。

表 1 1961 – 2016 年肃南县植被生长季不同等级降水量、降水日数、降水强度统计表

降水类型	24h 雨量划分标准/mm	年均生长季降水量/mm	占生长季降水量的百分比/%	年均生长季降水日数/d	占生长季降水日数百分比/%	生长季平均降水强度/(mm · d ⁻¹)
小雨	0.1 ~ 9.9	198.0	88.29	107.16	98.15	1.85
中雨	10.0 ~ 24.9	25.8	11.51	2.00	1.83	12.89
大雨	24.9 ~ 49.9	0.5	0.20	0.02	0.02	25.10
暴雨	50.0 ~ 99.9	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00
总降水	≥0.1	224.2	100.00	109.18	100.00	2.05

由表 1 可知,肃南县植被生长季降水日数以小雨为主,约为 107.16 d,占生长季总降水日数的 98.15%,中雨和大雨出现日数分别为 2 d(约占生长季降水日数的 1.83%)和 0.02 d(约占生长季总降水日的 0.02%),无暴雨事件发生,因此将中雨及以上等级降水归为一类(简称中雨)。肃南县植被年均生长季小雨降水量最大,为 198.0 mm,约占植被生长季降水量的 88.29%,而中雨量为 26.3 mm(约占生长季降水总量的 11.71%)。可见,随降水等级的增加,肃南县牧区生长季对应等级降水量及降水日数不断减少。

2.3 研究方法

2.3.1 趋势分析 采用气候倾向率法和基于 R/S 分析的 Hurst 指数法对肃南县牧区植被生长季 1961 – 2016 年降水量、降水日数和降水强度进行趋势分析。气候倾向率法是对气象等要素用方程进行趋势拟合,已成为分析气象要素长期变化趋势的常用工具,该方法具体计算过程见参考文献[25]。R/S 分析 Hurst 指数^[26]由英国水文学家 Hurst 提出,是作为一种定量判断时间序列长期依赖性的指标,本文采用该方法对肃南县植被生长季降水变化趋势持续性用数学方法进行描述,将其趋势变化简单明了地描述出来,其计算过程为:

对于时间序列 $\{\varepsilon(t)\} (t = 1, 2, \dots)$ 对任意正整数 $n \geq 1$ 来说,极差和标准差分别表示为:

$$R(n) = \max_{1 \leq t \leq n} X(t, n) - \min_{1 \leq t \leq n} X(t, n) \quad (n = 1, 2, \dots)$$
 (1)

$$S(n) = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\varepsilon(u) - \overline{\varepsilon_n})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (n = 1, 2, \dots)$$
 (2)

式中: $\overline{\varepsilon_n}$ 和 $X(t, n)$ 分别为均值和累计离差,可分别由下式计算得到:

$$\overline{\varepsilon_n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon(t) \quad (n = 1, 2, \dots)$$
 (3)

$$X(t, n) = \sum_{u=1}^t [\varepsilon(u) - \overline{\varepsilon_n}] \quad (1 \leq t \leq n) \quad (4)$$

若存在 $R/S \propto n^H$, 则表明所研究的时间序列存在 Hurst 现象, H 值称为 Hurst 指数, H 值可依据双对数坐标($\ln n, \ln (R/S)$) 用最小二乘法中的拟合式得到。按照 Hurst 指数(即该对数坐标的斜率)的大小能够进行判断:当 $0.5 < H < 1$ 时,表明未来的序列变化趋势与过去趋势相同,即该时间序列是一个持续性的时间序列, H 值越接近于 1,持续性则越强;当 $0 < H < 0.5$ 时,意味着未来的序列变化趋势与过去趋势相反,说明该时间序列具备反向持续性, H 值越接近 0,反向持续性越强;当 $H = 0.5$ 时,表明各项指标各自独立,即未来的变化趋势与过去无关。

2.3.2 突变分析 采用 Mann – Kendall 检验法对该地区生长季降水量、降水日数和降水强度的突变性进行检验。Mann – Kendall 检验法属于非参数检验法,其特点是不需要序列样本服从一定数学分布,且受少数异常值的干扰不大,检验领域也较宽,尤其在水文和气象的突变检验中应用广泛,该方法具体计算过程见参考文献[27]。本文选定显著水平为 $\alpha = 0.05$, 其对应的临界值为 ± 1.96 ,对该地区植被生长季降水量、降水日数和降水强度的突变性进行检验。

2.3.3 反距离加权插值(IDW) 利用反距离加权法^[28]提取肃南县植被生长季不同等级降水日数和降水强度空间分布。反距离加权插值是空间插值常见方法之一,该方法操作简易且内插得到的气象变量更为精确,用以揭示肃南县植被生长季降水空间变化规律和形成原因,计算公式如下:

$$Z_p = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i^\beta} Z_i}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i^\beta}} \quad (5)$$

式中: N 为气象站数目; Z_p 为预测点的值; Z_i 为第 i 个气象站点的值; D_i 为第 i 个点到目标点 p 的距离; β 为 D_i 的指数值,在本文中,将 β 赋值为 2。

3 结果与分析

3.1 生长季降水和不同等级降水事件时间变化分析

3.1.1 生长季降水年际变化 利用肃南县周边 7 个气象站降水数据,计算出该研究区植被生长季多年降水量、降水日数和降水强度距平百分率,分别绘制出植被生长季降水量、降水日数和降水强度距平百分率年际变化及 Hurst 指数图,如图 2 所示。

由图 2(a)可以看出,肃南县 1971–1983 年及 2002 年以后植被生长季降水量偏多,其中 2007 年生长季降水量最大,为 305.0 mm;1960s 及 1984–2002 年降水量相对偏少,其间 1997 年降水量最小,为 158.5 mm;降水量距平的气候倾向率为 $0.04\%/(10a)$,表明生长季降水量呈上升趋势。由图 2(b)可以看出,肃南县植被生长季降水日数距平百分率负值多于正值,但 2002 年以后降水日数大部分大于多年平均降水日数,呈增加趋势,降水日数距平百分率增幅为 $0.007\%/(10a)$ 。由图 2(c)可知,肃南县植被生长季降水强度距平百分率年际变化与年降水量距平百分率年际变化基本一致,生长季降水强度距平百分率的气候倾向率为 $0.03\%/(10a)$,

可见生长季降水强度呈上升趋势。

进一步利用 Mann–Kendall 法对肃南县植被生长季降水进行趋势性分析,经计算得到研究区植被生长季降水量的检验统计值 $U = 3.55 > U_{\alpha/2} = 1.96$,表明降水量呈显著上升趋势;植被生长季降水日数检验统计值为 $U = 0.76 < U_{\alpha/2} = 1.96$,表明降水日数上升趋势不显著;而植被生长季降水强度检验统计值 $U = 3.66 > U_{\alpha/2} = 1.96$,说明降水强度具有显著性上升趋势。这与气候倾向率法得到的距平百分率趋势一致,意味着 1961–2016 年肃南县植被生长季降水呈持续上升趋势。

通过计算 Hurst 指数可判断研究区降水变化的持续性。图 2(d)~2(f)表明,植被生长季降水量、降水日数和降水强度 Hurst 指数值分别为 0.69、0.54 和 0.71,均大于 0.5,说明生长季降水量、降水日数和降水强度具有正持续性,在未来一段时期上升趋势仍将持续下去。这种趋势与我国西部地区^[6]由于旱向湿润转型的变化一致。

3.1.2 生长季降水突变分析 基于 Mann–Kendall 法对肃南县植被生长季降水量、降水日数和降水强度进行突变性分析,结果见图 3。

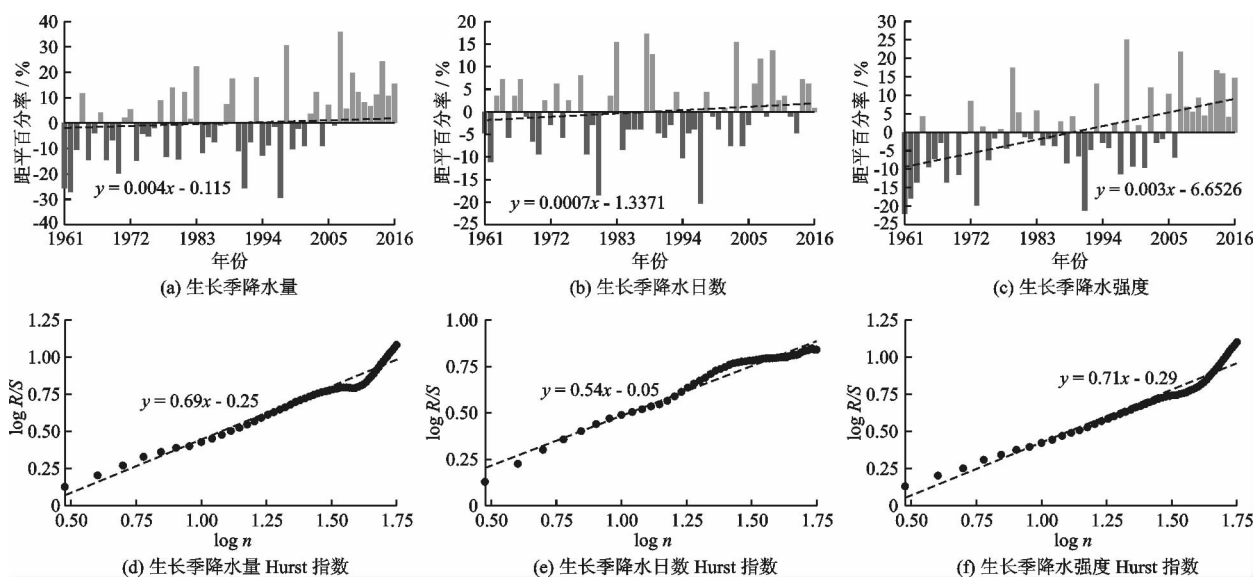


图 2 1961–2016 年肃南县植被生长季降水量、降水日数和降水强度距平百分率年际变化及 Hurst 指数

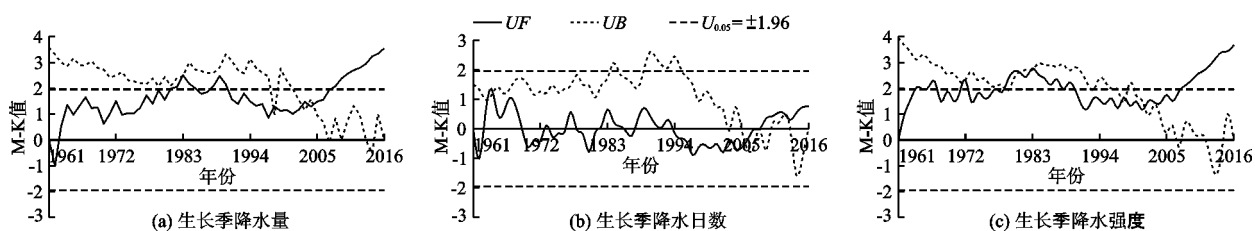


图 3 1961–2016 年肃南县植被生长季降水量、降水日数和降水强度 M–K 检验

由图3(a)可知,植被生长季降水量从1962年开始波动上升, UF 与 UB 两条曲线在临界范围内有多个交点,综合分析各交点位置判断突变时间为1998年,且通过了显著性检验;由图3(b)可知, UF 与 UB 曲线虽有多交点,但 UF 未通过临界线,表明未通过显著性检验,故植被生长季降水日数无显著突变;根据图3(c)可知,降水强度属于持续上升状态,且通过显著性检验,经过非均一性检验分析最终确定1998年为突变时间点。

已有研究表明,在河西走廊中部地区降水突变主要发生在1960s中期和1990s后期^[29],而祁连山中段区域在1980s降水明显增大^[21,30],本文研究的祁连山北麓肃南裕固族自治县牧区比祁连山地区降水突变晚几年,具有一定的局部地区差异性,该区域因高山遮挡,受西风带系统的影响较小,同时东南暖湿气流对肃南县牧区影响减弱,造成该区域的降水特征与周围其他地区不同。靳立亚等^[31]研究表明西北地区降水和水汽输送有很大关系,而通过对冷暖年份水汽特征差异研究发现,西北地区水汽输送与气温有关。通过M-K检验发现肃南县气温在1997年左右发生突变,气温升高显著,这与该地区

降水突变发生年份基本吻合。

3.1.3 生长季不同等级降水特征 对肃南县植被生长季不同等级降水量和降水日数进行统计,得到距平百分率年际变化如图4所示。从图4(a)~4(c)来看,2000年以前小雨量距平百分率主要为负值,2000年以后小雨量显著增大,其距平百分率主要为正值;小雨降水日数与肃南县植被生长季降水日数距平百分率年际变化基本一致,2000年以后小雨日数同样以正值为主,小雨日数距平百分率呈增加趋势,但增加缓慢;植被生长季小雨强度距平百分率在1961~1992年多负值,1993~2016年多正值,尤其在2000年以后小雨强度显著增强,其年际变化与小雨量距平百分率年际变化基本一致。由图4(d)~4(f)可知,中雨量在2000年以前距平百分率也是负值较多,正值相对较少,但2000年以后则主要为正值,中雨量增加明显;中雨降水日数与中雨量年际变化基本一致,中雨降水日数呈上升趋势;植被生长季中雨强度距平百分率在1960s和1970s变化较大,之后逐渐稳定,但整体来看距平百分率负值多于正值。因此,不同等级生长季降水日数和降水强度变化对该等级降水量变化有着很大影响。

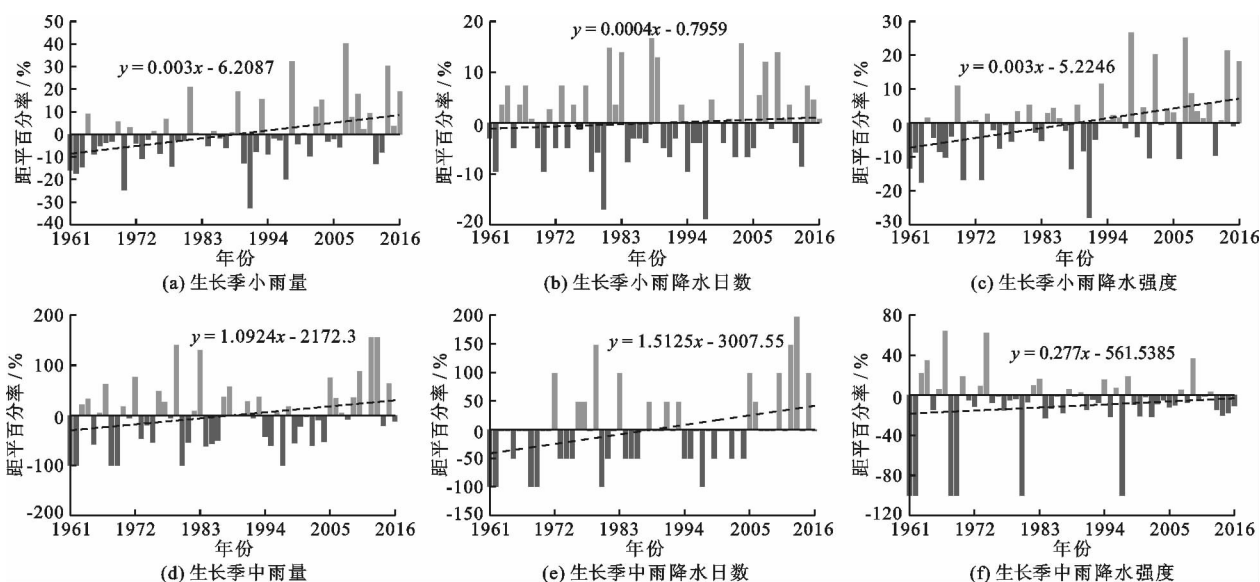


图4 1961~2016年肃南县植被生长季不同等级降水量、降水日数和降水强度距平百分率年际变化

3.1.4 生长季降水和不同等级降水量年代际变化

表2为1961~2016年肃南县植被生长季不同等级降水量距平百分率和变异系数。由表2可以看出,不同等级降水量呈现出不同的特征,肃南县植被生长季降水量在1960s~1970s及1990s偏少,但2000s及2010~2016年降水量较多;生长季小雨量与生长季降水量年代际变化类似;生长季中雨量在

1970s和2010~2016年较多,其他年代较少。生长季总降水量变异系数以1990s最大,2010~2016年最小;生长季中雨量变异程度大于小雨量,1961~2016年生长季降水量和小雨量偏离程度呈“小-大-小”变化规律,表明生长季降水量和小雨量的稳定性在增大,而中雨量变异系数偏大,可见其降水处于不稳定状态,但近年来生长季中雨量呈逐渐稳定

状态。

3.2 生长季降水和不同等级降水事件空间分布及变化特征

3.2.1 生长季降水和不同等级降水事件的空间分布 为了从空间尺度进一步分析肃南县植被生长季不同等级降水事件的降水日数和降水强度变化,借用了 Arcgis10.2 软件采用反距离加权法,通过进行掩膜提取,最终绘制 1961–2016 年肃南县植被生长季不同等级降水的多年平均降水日数和降水强度的空间分布图,如图 5 所示。

表 2 1961–2016 年肃南县植被生长季不同等级降水量距平百分率和变异系数

时段	降水量距平百分率/%			变异系数 C_V		
	生长季 总降水量	小雨量	中雨量	生长季 总降水量	小雨量	中雨量
1960s	-10	-6	-37	14	9	107
1970s	-3	-6	18	11	10	50
1980s	2	4	-9	12	9	77
1990s	-6	-4	-17	19	19	54
2000s	6	7	-1	13	14	41
2010–2016	13	6	77	5	14	47

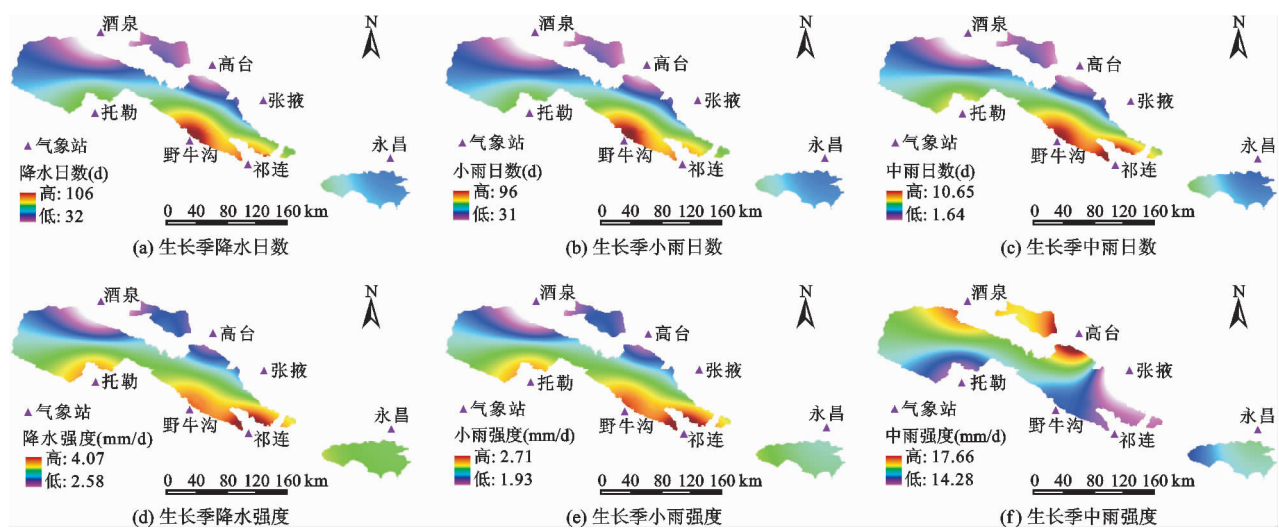


图 5 1961–2016 年肃南县植被生长季不同等级降水的多年平均降水日数和降水强度空间分布图

从图 5(a)~5(c)中可以看到:肃南县植被生长季降水日数整体来讲,空间分布差异较大,呈东南多、西北少之势,且呈较明显的条带状分布,降水多发生于东南部地区;从周边 7 个气象站来看,肃南县西北方向的酒泉站降水日数最少,多年平均降水日数为 30.4 d,而东南方向的野牛沟站多年平均降水日数最多,为 106 d,占植被生长季日数的二分之一,可见靠近野牛沟的肃南县东南方向降水频数最大;肃南县植被生长季小雨日数与总降水日数空间分布一致,在野牛沟站小雨日数最多,多年平均降水日数约为 96.4 d,而酒泉站降水日数最少,约为 29.1 d;中雨日数的空间分布与小雨日数和总降水日数空间分布相似,东南方向的野牛沟站和祁连站中雨较多,降水日数均超过了 10 d,而中雨降水较少的酒泉站降水日数约为 1.3 d,相比差距较大。

从图 5(d)~5(f)可知:肃南县植被生长季降水强度总体呈条带状,降水强度在 2.58~4.07 mm/d 之间,其中祁连站附近降水强度最大,而西北方向的酒泉站周边则最小;小雨强度与生长季总降水强度空间分布大体相同,小雨强度在 1.93~2.71 mm/d

之间;中雨强度与生长季降水强度空间分布表现出南少北多的差异,酒泉站和高台站的中雨强度较大,中雨强度分别为 18.13 和 17.18 mm/d,祁连站附近中雨强度较小,为 14.99 mm/d。

总体来看,肃南县植被生长季降水日数和降水强度空间分布大致相同,可见其生长季降水量也呈相同的分布状态,肃南县大部分地区位于祁连山北麓,越靠近河西走廊其降水量越小。而小雨日数和强度与生长季的空间分布相同,但中雨降水强度与生长季分布差异较大,可见肃南县植被生长季降水量以小雨为主。贾文雄^[18]研究表明,祁连山及周边地区不同等级降水日数与海拔高度相关性较高,而降水强度则与海拔高度相关性较低,由此可见本文研究的不同等级降水日数和强度空间分布与实际情况相一致。祁连山及其周边的水汽含量分布由西北向东南递增,东高西低的分布形式主要是与东亚夏季风的扩展方向相关,而水汽含量南高北低是由南亚季风 and 高原季风扩展方向而决定^[32],肃南县植被生长季不同等级降水分布与其水汽含量空间分布一致,可见各等级降水分布与该地区的地形海拔高度、

大气水汽含量等都有很大关系。

3.2.2 生长季降水和不同等级降水事件的年际变化空间分布 图6为1961–2016年肃南县植被生长季不同等级降水日数和降水强度变化倾向率空间分布。

由图6(a)可见,肃南县西部和中部大部分区域的生长季降水日数为减少趋势,而东部为增加趋势,植被生长季降水日数减少趋势的范围比增加趋势的大。其中祁连站、张掖站和永昌站附近地区以大于 $0.4 \text{ d}/(10\text{a})$ 的速率增长,而野牛沟站附近降水日数减少趋势明显,气候倾向率最大为 $-1.57 \text{ d}/10\text{a}$ 。图6(b)表明,植被生长季小雨降水日数倾向率分布与总降水日数倾向率分布较为一致,但减少趋势范围所占比例扩大,其中减少趋势最大的地区仍是野牛沟地区,减少率在 $2 \text{ d}/(10\text{a})$ 以上,肃南县植被生长季小雨日数只有永昌站附近小部分地区呈增长趋势,最大增长率为 $0.18 \text{ d}/(10\text{a})$ 。由图6(c)可以看到,植被生长季中雨降水日数与总降水日数倾向率相比,呈大致相反的分布,且全区均呈现出中雨降水日数不断增加的趋势,气候倾向率为 $0.17 \sim 0.79 \text{ d}/(10\text{a})$ 。其中北部中雨降水日数倾向率相对较

小,尤其是张掖站、高台站以及酒泉站附近中雨降水日数增长较缓,而南部的野牛沟站和祁连站附近则增长率相对较大。

由图6(d)可看出,肃南县植被生长季降水强度倾向率为不断增长的态势,总体呈带状分布。其中中南部地区的野牛沟站和托勒站附近降水强度倾向率较大,最大为 $0.21 \text{ mm}/(10\text{a})$,而在北部的酒泉站和高台站相对较小,最小为 $0.07 \text{ mm}/(10\text{a})$ 。图6(e)表明,植被生长季小雨降水强度趋势分布与总降水强度趋势分布在很大范围上是一致的,但小雨降水强度增减趋向不明显,气候倾向率总体都较小,最大约为 $0.098 \text{ mm}/(\text{d} \cdot 10\text{a})$,主要分布在野牛沟站附近,最小约 $0.02 \text{ mm}/(\text{d} \cdot 10\text{a})$,主要分布于祁连站和酒泉站附近。由图6(f)可看出,肃南县植被生长季中雨降水强度倾向率呈现南大北小的分布特点,且中雨降水强度呈增加趋势的区域范围大于减少趋势的区域范围。南部地区中雨降水强度呈增加趋势,其中托勒站、祁连站和张掖站附近增加趋势相对明显,最大为 $0.33 \text{ mm}/(10\text{a})$,而北部的高台站附近地区中雨降水强度呈减少趋势,倾向率最小为 $-0.48 \text{ mm}/(\text{d} \cdot 10\text{a})$ 。

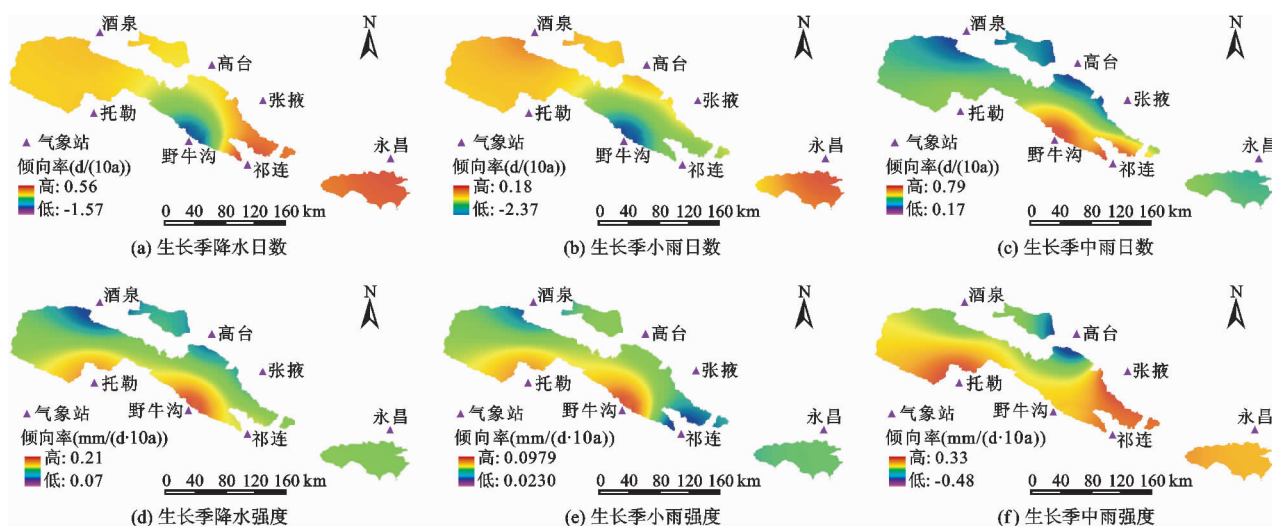


图6 1961–2016年肃南县植被生长季不同等级降水日数和降水强度变化倾向率空间分布

4 讨论

肃南裕固族自治县牧草生长主要集中在4–10月份,4–5月份为植被初始生长期,6–7月中旬为植被快速生育期,7月中旬–8月为植被生育中期,植被陆续成熟,9–10月份为植被生育后期,牧草逐渐枯黄。肃南县植被生长季各月多年平均降水量和不同草地类型生产力变化如图7所示,由图7(a)可

以看出,肃南县4月份和10月份降水量较小,分别为 8.4 和 8.2 mm ,7月份降水量最大,为 59.8 mm 。肃南县牧区草地类型共有9种,其中高寒荒漠类和高寒荒漠草原类草地分布在海拔 4200 m 以上,其资源难以利用,其他7种草地类型在各月的生产力统计如图7(b)所示。图7(b)表明,不同草地类型差异较大,生产力也各不相同,但总体来说不同类型的牧草生产力在7月份达到最大,10月份最小,这

与肃南县降水量变化趋势相同。不同等级降水的变化对祁连山北麓牧区土壤水分、植被个体生长发育、草原群落结构以及草原生态系统生产力均会产生显著影响^[16,33]。分析表明,1961–2016 年肃南县植被生长季不同等级降水日数和降水强度总体呈增加趋势,但肃南县降水空间差异较大,在高台站、托勒站和野牛沟站植被生长季降水日数呈减少趋势,其他

气象站呈增加趋势。植被生长季降水日数减少主要体现在小雨日数的减少,而中雨日数在 7 个气象站均呈增加趋势,即降水时间分配上更不均匀,更易引发肃南县草地植被的变化,进而影响牧区不同草地类型的生产力。乔蕪强等^[34]研究表明,肃南县不同草地类型在 2012–2016 年产草量呈增加趋势,这与肃南县植被生长季降水指标不断上升相一致。

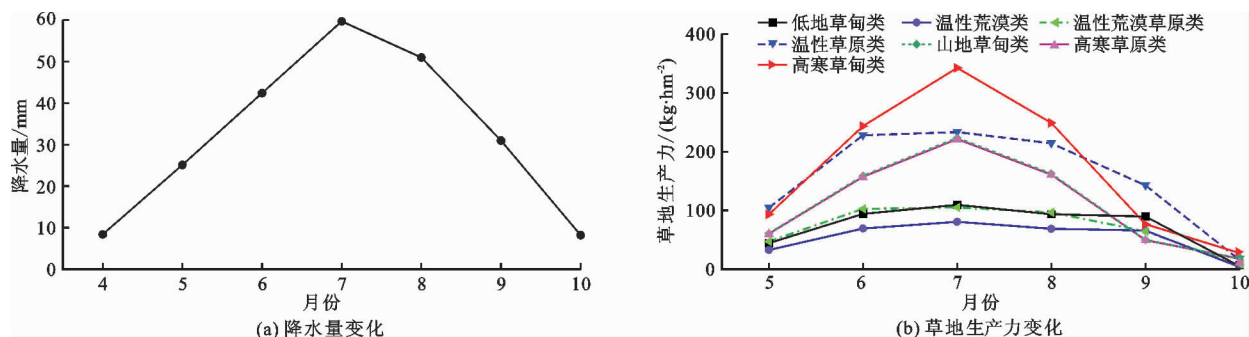


图7 肃南县植被生长季各月多年平均降水量和不同草地类型生产力变化

5 结 论

本研究利用祁连山北麓牧区(肃南裕固族自治县)周边区域 7 个气象站 1961–2016 年的降水资料,采用气候倾向率、Hurst 指数、Mann–Kendall 检验、反距离加权插值等方法对该区域植被生长季不同等级降水日数和强度的时空变异特征进行分析研究,结果表明:

(1)1961–2016 年肃南裕固族自治县植被生长季降水量和降水强度均呈显著增大趋势,植被生长季降水日数呈不显著上升趋势,降水量、降水日数和降水强度距平百分率气候倾向率分别为 $0.04\%/(10a)$ 、 $0.007\%/(10a)$ 和 $0.03\%/(10a)$,且在未来都将会持续上升。Mann–Kendall 检验分析降水突变结果表明,肃南县植被生长季降水量和降水强度在 1998 年发生显著突变,而降水日数无显著突变。

(2)肃南县植被生长季不同等级降水距平百分率均呈增加趋势,小雨降水日数和植被生长季降水日数年际变化基本一致,且在 2000 年以后降水日数距平百分率基本为正,但增加缓慢,小雨降水量和小雨降水强度变化趋势基本一致;中雨降水距平百分率在 1960s 和 1970s 变化较大,之后趋于稳定上升状态。从不同等级降水年代际变异系数来看,植被生长季降水量和小雨量偏离程度较小,表明其稳定性较好,而中雨量变异系数较大,稳定性差,但近年来中雨降水量趋于稳定。

(3)从空间上来看,肃南县植被生长季降水日数和降水强度空间分布差异较大,呈南多北少、东多西少之势。小雨降水日数和降水强度与其空间分布类似,而中雨强度分布有所不同,呈南小北大之势。小雨降水日数倾向率除永昌站附近为正之外,其他地区均为负值,而中雨降水日数倾向率在全县均为正值,可见小雨降水日数在全县有增有减,而中雨降水日数在不断增加;小雨强度倾向率均为正值,与植被生长季降水强度倾向率分布相似,野牛沟站附近最大,而中雨强度倾向率在酒泉站和高台站倾向率为负值,其他气象站附近均为正值,可见植被生长季降水以小雨为主。

通过以上分析研究表明,该地区植被生长季降水呈增加趋势,但中雨降水日数增加明显,肃南县降水时间分配有不均衡发展的趋势,由此可能引发极端降水事件增多,进而对肃南县牧区草地植被生长将会有很大影响,从而影响肃南县牧区草地植被生产能力,最终对畜牧业发展产生影响。

参考文献:

- [1] 丁文广, 刘迎陆, 田莘冉, 等. 祁连山国家级自然保护区创新管理机制研究[J]. 环境保护, 2018, 46(3–4): 41–46.
- [2] 汪有奎. 祁连山国家级自然保护区有效管理评价研究[J]. 中南林业科技大学学报(社会科学版), 2013, 7(4): 23–26.
- [3] 徐柏林, 汪有奎, 张永称, 等. 祁连山自然保护区人口变

- 化及其对森林草原的影响[J]. 草业科学, 2013, 30(6): 973-981.
- [4] 央视新闻. 中央问责甘肃多位副省级官员 祁连山生态环境破坏问题突出[J]. 中国环境监察, 2017(7): 5-7.
- [5] 汪有奎. 加强祁连山生态保护与建设对策[J]. 中国林业, 2011(4): 43.
- [6] 李新, 勾晓华, 王宇练, 等. 祁连山绿色发展: 从生态治理到生态恢复[J]. 科学通报, 2019, 64(27): 2928-2937.
- [7] 黄德青, 于兰, 张耀生, 等. 祁连山北坡草地生物量及其与气象因子的关系[J]. 草业科学, 2011, 28(8): 1495-1501.
- [8] 刘开琳, 李毅, 徐先英, 等. 祁连山北坡退化水源涵养林生态修复模式研究[J]. 防护林科技, 2016(3): 1-4.
- [9] 牛赞, 刘贤德, 张学龙, 等. 祁连山水源涵养功能的生态监测指标与评估指标[J]. 中南林业科技大学学报, 2013, 33(11): 120-124.
- [10] 汪有奎, 贾文雄, 刘潮海, 等. 祁连山北坡的生态环境变化[J]. 林业科学, 2012, 48(4): 21-26.
- [11] 闫月娥, 王建宏, 石建忠, 等. 祁连山北坡草地资源及退化现状分析[J]. 草业科学, 2010, 27(7): 24-29.
- [12] OUYANG Wei, WAN Xinyue, XU Yi, et al. Vertical difference of climate change impacts on vegetation at temporal-spatial scales in the upper stream of the Mekong River Basin [J]. Science of The Total Environment, 2020, 701: 134782.
- [13] 戴尔阜, 黄宇, 吴卓, 等. 内蒙古草地生态系统碳源/汇时空格局及其与气候因子的关系[J]. 地理学报, 2016, 71(1): 21-34.
- [14] 王宁, 王美菊, 李世兰, 等. 降水变化对红松阔叶林土壤微生物生物量生长季动态的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(5): 1297-1305.
- [15] 王瑶. 气候变化背景下潮白河流域森林植被变化及其耗水规律研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2014.
- [16] 张彬, 朱建军, 刘华民, 等. 极端降水和极端干旱事件对草原生态系统的影响[J]. 植物生态学报, 2014, 38(9): 1008-1018.
- [17] 施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J]. 第四纪研究, 2003, 23(2): 152-164.
- [18] 贾文雄. 近50年来祁连山及河西走廊降水的时空变化[J]. 地理学报, 2012, 67(5): 631-644.
- [19] 贾文雄, 张禹舜, 李宗省. 近50年来祁连山及河西走廊地区极端降水的时空变化研究[J]. 地理科学, 2014, 34(8): 1002-1009.
- [20] 尹宪志, 张强, 徐启运, 等. 近50年来祁连山区气候变化特征研究[J]. 高原气象, 2009, 28(1): 85-90.
- [21] 张耀宗, 张勃, 刘艳艳, 等. 近半个世纪以来祁连山区气温与降水变化的时空特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(4): 125-130.
- [22] 徐晓民, 郭中小, 梁文涛. 达茂旗干旱牧区59年气候变化规律分析[J]. 草原与草坪, 2014, 34(3): 14-19.
- [23] 杨秀海, 卓嘎, 边多. 藏西北高寒牧区气候特征及草地退化原因分析[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(2): 113-118.
- [24] 覃琳, 宋孝玉, 冯湘华. 基于划区轮牧理论的祁连山北麓牧区动态草畜平衡研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(11): 256-264.
- [25] 冯湘华. 西部典型牧区草地生态系统植被生态需水研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
- [26] 何庆龙, 周维博, 夏伟, 等. 延安市近60年降水时空特征分析[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(1): 31-37.
- [27] 咎大为. 黑河流域1967-2009年气象干旱时空变化特征[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(3): 92-99.
- [28] 杨佳, 郝桂珍, 张婧, 等. 1960-2016年冀西北地区降水时空变化特征研究[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(5): 117-123+133.
- [29] 贾文雄, 何元庆, 李宗省, 等. 近50年来河西走廊平原区气候变化的区域特征及突变分析[J]. 地理科学, 2008, 28(4): 525-531.
- [30] 张存杰, 郭妮. 祁连山区近40年气候变化特征[J]. 气象, 2002, 28(12): 33-39.
- [31] 靳立亚, 符娇兰, 陈发虎. 西北地区空中水汽输送时变特征及其与降水的关系[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2006, 42(1): 1-6.
- [32] 张强, 张杰, 孙国武, 等. 祁连山山区空中水汽分布特征研究[J]. 气象学报, 2007, 65(4): 633-643.
- [33] YOSHIHARA Y, TATSUNO Y, MIYASAKA K, et al. Can complementarity in water use help explain diversity-productivity relationships in semi-arid grasslands? [J]. Journal of Arid Environments, 2020, 173: 103994.
- [34] 乔蕪强, 朵丹, 李晓丹, 等. 基于MODIS数据的甘肃省肃南裕固族自治县草地产草量估算[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2018, 54(6): 817-823.