

DOI: 10.5846/stxb202002130248

邓欧, 李亦秋, 鲁春霞, 肖玉, 李若霜. 三北工程区降水量长时间序列与多尺度变化趋势检验及预测. 生态学报, 2020, 40(23): 8707-8716.

Deng O, Li Y Q, Lu C X, Xiao Y, Li R S. Examination and prediction of long time precipitation series and multi-scaled variation trend of precipitation in Three-North Shelterbelt Forest Program region. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(23): 8707-8716.

三北工程区降水量长时间序列与多尺度变化趋势检验及预测

邓 欧¹, 李亦秋^{1,*}, 鲁春霞², 肖 玉², 李若霜³

1 贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵阳 550001

2 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

3 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083

摘要:三北防护林体系建设工程区(以下简称“三北工程区”)早期的植被建设忽略了水资源承载力,对三北防护林的可持续维护产生了不利影响。为落实“以水定林草”的发展理念,在三个空间尺度上,基于 1951—2018 年降水量,采用 Mann-Kendall 非参数检验方法、自回归积分滑动平均模型(Autoregressive Integrated Moving Average Model, ARIMA)和地理信息系统空间分析等方法,开展全年、生长季和非生长季降水量多尺度变化趋势与未来 30 年预测研究,结果表明:“三北工程区”全年和生长季降水量呈增长趋势的面积百分比分别为 73.64% 和 70.10%, 主要分布在西北荒漠区;非生长季降水量呈增长趋势的面积比例达 92.06%, 除黄土高原南部和风沙区的少部分地区而外,均呈增长趋势。全年、生长季和非生长季降水量呈增长趋势且置信度为 90% 以上的面积百分比分别为 45.43%、37.31% 和 36.79%。18 个重点建设区的雷达统计图显示:生长季与全年降水量的变化趋势一致,由东向西,松辽平原等 7 个区域以不显著减少趋势为主,松嫩平原等 7 个区域以不显著增长趋势为主,西部的柴达木盆地等 4 个区域以显著性达到 90% 或 95% 的增长趋势为主;非生长季除晋陕峡谷、泾河渭河流域以非显著减少趋势为主而外,其他地区均以增长趋势为主。5 个“重点县”的降水统计量 UF_k 与其反序统计量 UB_k 两条曲线出现交点,表明年降水量有突变发生,库尔勒市、磴口县、科尔沁左翼后旗 UF_k 与 UB_k 曲线多处出现交点,表明年降水量突变发生频繁。采用 ARIMA 预测得出未来 30 年的年降水量,计算得到未来 30 年间的年降水量变化数据,并绘制其空间分布图。本研究可为三北工程区开展基于水资源承载能力的林草资源优化配置提供基础数据,为发展“雨养林草植被”提供科学支撑。

关键词:三北工程区;降水量;Mann-Kendall 非参数检验;ARIMA 模型;空间分析

Examination and prediction of long time precipitation series and multi-scaled variation trend of precipitation in Three-North Shelterbelt Forest Program region

DENG Ou¹, LI Yiqiu^{1,*}, LU Chunxia², XIAO Yu², LI Ruoshuang³

1 School of Geographic and Environments Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang, Guizhou 550001, China

2 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

3 School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

Abstract: The vegetation construction in the early stage of the Three-North Shelterbelt Forest Program had neglected the carrying capacity of water resources, which resulted in a negative impact on the sustainability of the Three-North Shelterbelt Forest maintenance. In order to implement the development concept of “water to define the forest and grass”, this paper was conducted in three spatial scales on the basis of 1951—2018 precipitation series. By using Mann-Kendall non-parametric

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0503706);国家自然科学基金项目(41971272);贵州省科技基金专项(黔科合基础[2019]1222, [2019]1218)

收稿日期:2020-02-13; **网络出版日期:**2020-10-30

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yqiu.li@163.com

test, autoregressive integrated moving average (ARIMA) model prediction and ArcGIS spatial analysis methods, we completed the trend analysis of annual precipitation, growing season precipitation, non-growing season precipitation, and predicted future precipitation in the following 30 years. The results showed that the areas in growing trend of annual precipitation and growing season precipitation were of 73.64% and 70.10% respectively, mainly distributed in the northwest desert area of the Three-North Shelterbelt Forest Program region. The areas of growing trend in non-growing season precipitation was of 92.06%, apart from few parts of the southern loess plateau and the sandy area, in which most of the areas were in growing trend. Areas in growing trend of annual precipitation, growing season precipitation, and non-growing season precipitation with confidence degree above 90% were of 45.43%, 37.31% and 36.79% respectively. Radar statistical map of eighteen main construction areas showed that the changing trend of growing season precipitation was consistent with the annual precipitation. From east to west, Song-liao Plain and other seven regions are dominated by the trend of non-significant decrease, Songnen Plain and other seven regions are dominated by the trend of non-significant increase, and the Qaidam Basin and other four regions in the west are dominated by the trend of 90% or 95% significant increase. Non-growing season precipitations are mainly in an increasing trend, with the exception of the Jinshaan Gorge and the Jinghe-Weihe river basin, which are in a non-distinctive decreasing trend. In five key counties, precipitation statistic curve UF_k and its reverse statistic curve UB_k are intersected, which indicates that there had been a sudden change in their annual precipitation. And in Korla city, Dengkou county and Horqin left wing rear banner, the two curves are multiply intersected, indicating that the annual precipitation changes frequently in these areas. The ARIMA model is used to predict the annual precipitation data in the next 30 years, the annual precipitation change data for the next 30 years is calculated and the spatial distribution maps are completed. This study can provide basic data for the optimal allocation of forest and grass resources based on water resource carrying capacity, and provide scientific support for the development of “rain-fed forest and grass vegetation” in Three-North Shelterbelt Forest Program region.

Key Words: Three-North Shelterbelt Forest Program region; precipitation; Mann-kendall non-parametric test; Autoregressive Integrated Moving Average Model; spatial analysis

在水循环中,降水是最活跃的因素^[1-2]。作为地表水资源的补给来源,降水与人类生产生活及生态息息相关,对于区域资源的时空分布、生态环境形成与演变及农业生产等起着决定性的作用^[3-4]。关于降水演变特征的分析早已成为国内外学者关注的焦点,降水的变化趋势研究也成为水文及气候系统研究中的主要组成部分^[5-9]。这些研究有利于增强对未来气候变化认识,也有利于剖析区域水文、自然灾害及其生态环境的影响因素。由于降水受到多方面自然因素及人类生产活动的共同影响,其成因及受影响因素具有不确定性,对降水的研究仍有很大的空间,仍需不断的研究与探索^[10-12]。

“三北工程建设是同我国改革开放一起实施的重大生态工程,是生态文明建设的一个重要标志性工程。经过 40a 不懈努力,工程建设取得巨大生态、经济、社会效益,成为全球生态治理的成功典范”^[13]。由于三北工程区大部分区域地处西北干旱半干旱地区,降水量不足、蒸发量过大,水资源一直以来都是这里的稀缺资源。工程早期植被建设由于忽略了水资源承载力,致使出现了“造林成活率低、生长缓慢、停滞甚至枯死等衰退现象”^[14-15]。加上西部大开发和一带一路战略开发的陆续实施,三北工程区水资源供需矛盾更加突出。大气降水是地表水资源的补给来源,对降水量演变特征及其变化趋势的研究有利于增强对未来气候变化认识并采取有效应对措施。而目前关于三北工程区多年来的降水量及其变化的研究相对较为薄弱。尽管王强在分析植被覆被变化对气候变化的响应时,采用 1982—2006 年气象数据,对三北工程区 25a 的气温降水变化作了研究,但时间序列过短,对于工程建设前后降水量变化的阶段特征缺乏对比^[16];王鹏涛等选取 117 个站点 1960—2011 年的气象数据,采用气候倾向率、距平分析法及空间插值等方法,分析三北工程区近 52a 降水量的总体变化趋势和降水量距平空间变化,但未揭示出降水量变化趋势的空间分异及其突变现象^[17],未能全面

揭示三北工程区的降水变化特征。

本文在三北工程区、重点建设区、重点县 3 个空间尺度上,基于 1951—2018 年长时间序列降水量观测数据,采用 Mann-Kendall 非参数检验、ARIMA 模型预测和 ArcGIS 空间分析等方法,开展年降水量、生长季降水量和非生长季降水量多尺度变化趋势与突变研究,并对未来 30 年年降水量预测分析,可为落实“以水定林草”的发展理念,和因地制宜发展“雨养林草植被”提供科学支撑。

1 研究区域概况

早在 1978 年,国家就决定在西北、华北及东北风沙危害和水土流失严重的地区,建设大型防护林工程,即三北防护林体系建设工程^[18]。三北工程区大部分地处西北干旱半干旱的水资源稀缺地区,年均降水量在 400 mm 以下,形成了“十年九旱,不旱则涝”的气候特点,曾严重制约着区域经济和社会发展^[12]。经过 40 年的建设,林草植被初步得到恢复,沙化土地和水土流失治理成效明显。随着造林面积及工农业和生活用水量的增加,水资源供需矛盾日趋严重。树立“以水定林草”的发展理念,因地制宜发展“雨养林草植被”,是三北工程未来的建设目标和方向。工程区范围及 18 个重点建设区和 5 个重点县分布如图 1 所示。

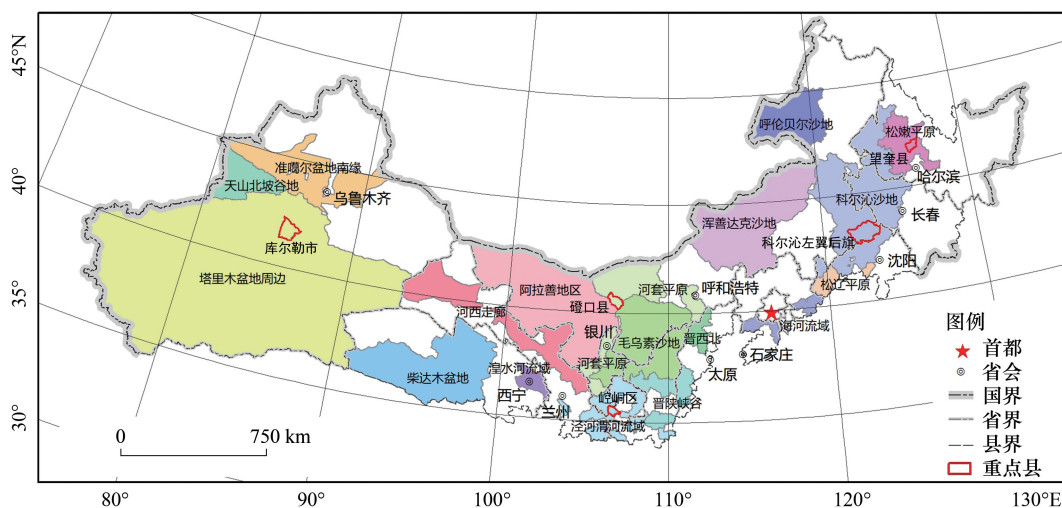


图 1 三北工程区及其重点建设区、重点县分布图

Fig.1 The distribution map of Three-North Shelterbelt Forest Program region, its main construction areas and key counties

2 研究方法

2.1 数据来源

本研究数据源包括:中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/Default.aspx>) 739 个站点 1951—2018 年共 68a 的逐日降水资料,数据格式为文本文档。从统计的角度,序列长度为 68a 的降水资料用于分析区域降水特性是比较可靠的。三北工程区和重点建设区边界来源于国家林业和草原局调查规划设计院项目共享数据,数据格式为 1:100 万县域边界矢量数据。

2.2 研究方法

本研究主要采用 Mann-Kendall 趋势检验、ARIMA 模型预测和 ArcGIS 空间分析等方法,开展年降水量、生长季降水量和非生长季降水量多尺度变化趋势、突变分析与预测研究。

(1) Mann-Kendall 趋势检验。Mann-Kendall 方法由 Mann 和 Kendall 提出,“是一种基于秩的非参数统计检验方法,不需要样本遵从一定的分布,也不受少数异常值的干扰,适用性强,是时间序列趋势分析有效方法之一,对揭示整体时间序列演变趋势与突变情况有良好的表现”^[19-21]。由世界气象组织(WMO)推荐并已广

泛应用于气温、降水等要素时间序列的变化趋势分析。

1) 非参数 Mann-Kendall 趋势检验定义检验统计量 S 为:

$$S = \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} \text{Sign}(D_i - D_j) \quad (1)$$

式中:“ $i \neq j$, 且 $i, j \leq n$, $\text{Sign}()$ 为符号函数。当 $D_i - D_j$ 小于、等于或大于零时, $\text{Sign}(D_i - D_j)$ 分别为 -1、0 或 1”。当为长时间序列时($n > 10$), 统计量 Z 为:

$$Z = \begin{cases} (S - 1) / \sqrt{n(n-1)(2n+5)/18} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ (S + 1) / \sqrt{n(n-1)(2n+5)/18} & S < 0 \end{cases} \quad (2)$$

“当 $Z > 0$ 时, 时间序列呈增加趋势; $Z < 0$ 时, 时间序列为减少趋势。当 Z 的绝对值 ≥ 1.28 、 1.64 、 2.32 时, 表示判别结果分别通过了信度为 90%、95%、99% 的显著性检验”^[20]。

2) Mann-Kendall 突变检测

设有时间序列: $D_2, D_3, \dots, D_n$, 构造一秩序列 r_i , r_i 表示 $D_i > D_j$ ($1 \leq j \leq i$) 的样本累积数。定义 S_k :

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad (k = 2, 3, \dots, n) \quad (3)$$

式中当 $D_i > D_j$ 时, $r_i = 1$; 当 $D_i \leq D_j$ 时, $r_i = 0$ ($j = 1, 2, \dots, i$)。 S_k 的期望值 $E(S_k)$ 及其序列方差 $\text{Var}(S_k)$ 分别由以下两式定义:

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

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

假定数据序列具有独立性, 定义统计量 UF_k :

$$UF_k = \frac{S_k - E(S_k)}{\sqrt{\text{Var}(S_k)}} \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

式中“ UF_k 遵从标准正态分布, 给定一个显著性水平 α , 查标准正态分布表可得临界值 U_α 。如 α 取 0.05 时, 其临界值 $U_\alpha = \pm 1.96$, 当 $|UF_k| > U_\alpha$ 时, 时间序列存在显著的增加或减少趋势。将历年 UF_k 点绘成一条曲线, 可判定其是否具有增加或减少趋势。重复上述各步反序计算并将结果乘以 -1, 得到新时间序列 UB_k ”。分别绘出 UF_k 和 UB_k 时序图, “当 UF_k 大于 0 时, 序列为增加趋势, 反之属于减少趋势。如 UF_k 超过临界值, 则表示增加或减少趋势达到显著水平。当 UF_k 与 UB_k 两条曲线出现交点, 且交点在临界值之间, 则交点所对应的时间可认为就是突变开始时间”^[22]。

(2) ARIMA 模型。全称“自回归积分滑动平均模型(简记 ARIMA)”, 是指“将非平稳时间序列转化为平稳时间序列, 然后将因变量仅对它的滞后值以及随机误差项的现值和滞后值进行回归所建立的模型”^[23]。“模型共有 3 个参数, 一般形式为 $\text{ARIMA}(p, d, q)$, AR 为自回归, p 为自回归阶次, d 为时间序列成为平稳时所做的差分次数, q 为移动平均阶次。如果模型建模合适, 模型残差序列一定要为白噪声序列, 模型会自动拟合预测值, 得到有较高精度的预测模型”^[24]。

2.3 数据处理

(1) 降水量变化趋势检测与突变分析的数据处理。对原始降水资料数据进行预处理, 对缺失数据和粗差进行剔除, 采用 Mann-Kendall 非参数检验方法, 开展三北工程区和重点建设区的年降水量、生长季降水量和非生长季降水量的多尺度变化趋势检测分析, 并针对重点县年降水量进行突变分析。

(2) 未来 30 年降水预测的数据处理。根据三北工程区范围内国家地面气象观测站 1951—2018 年 739 个站点的年降水量数据, 采用在 Matlab 中编程实现对每个站点自动筛选 ARIMA 模型参数和对模型残差序列进行白噪声检验, 预测得出 739 个站点未来 30 年的年降水量数据, 结果显示残差序列的自相关图均在二倍标准差内, 说

明时间序列信息提取完全,且 Ljung-Box 检验 P 值均无统计学意义,模型可以用来预测研究区降水量。

3 结果与分析

3.1 降水量变化趋势检测与突变分析

3.1.1 三北工程区降水量变化趋势检测

根据三北工程区范围内国家地面气象观测站 1951—2018 年 739 个站点的降水日值观测数据,计算各个站点 1980—2015 年逐年降水量,并计算各个站点年降水量的非参数 Mann-Kendall 检验统计量 Z 值,进行 ArcGIS 空间插值,并按其信度将 Z 值分为 -2.32 — -1.64 , -1.64 — -1.28 , -1.28 — 0 , 0 — 1.28 , 1.28 — 1.64 , 1.64 — 2.32 和 $Z > 2.32$ 七个等级,得到三北工程区年降水量、生长季降水量和非生长季降水量的非参数 Mann-Kendall 检验统计量 Z 值空间分布图如图 2 所示。

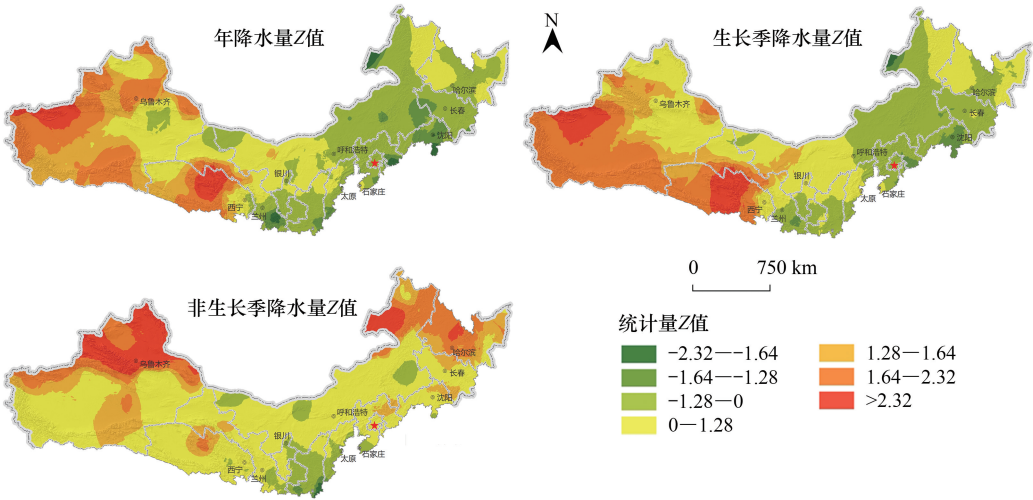


图 2 三北工程区降水量非参数 Mann-Kendall 检验统计量 Z 值空间分布图

Fig.2 The spatial distribution map of precipitation non - parametric Mann-Kendall test Z score of Three-North Shelterbelt Forest Program region

根据年降水量、生长季降水量和非生长季降水量的非参数 Mann-Kendall 检验统计量 Z 值分布图进行空间分类统计,得到不同信度条件下降水量变化趋势的面积百分比统计表如表 1 所示。

表 1 不同信度条件下降水量变化趋势的面积百分比统计表

Table 1 The area percentage statistical table of precipitation variation trend under different confidence values					
Z	变化趋势 Trend	置信度 Confidence	年降水面积 百分比 Annual precipitation area percentage/%	生长季降水 面积百分比 Growing season precipitation area percentage/%	非生长季降水 面积百分比 Non-growing season precipitation area percentage/%
-2.32 — -1.64	减少	通过信度为 95% 的显著性检验	0.20	0.28	0.12
-1.64 — -1.28	减少	通过信度为 90% 的显著性检验	0.72	1.90	0.35
-1.28 — 0	减少	不显著	25.44	27.72	7.48
0 — 1.28	增长	不显著	28.21	32.79	55.27
1.28 — 1.64	增长	通过信度为 90% 的显著性检验	8.32	10.60	14.55
1.64 — 2.32	增长	通过信度为 95% 的显著性检验	25.06	20.63	12.47
>2.32	增长	通过信度为 99% 的显著性检验	12.05	6.08	9.77
合计 Total			100.00	100.00	100.00

三北工程区降水量呈增长趋势的区域面积大于呈减少趋势的区域,年降水量和生长季降水量呈增长趋势的区域面积百分比分别为 73.64%和 70.10%,主要分布在西北荒漠区;非生长季降水量呈增长趋势的区域面积百分比达 92.06%,除黄土高原南部和风沙区的少部分地区而外,均呈增长趋势。年降水量、生长季降水量和非生长季降水量呈增长趋势且置信度为 90%以上的区域面积百分比分别为 45.43%、37.31%和 36.79%。三北工程区生长季降水量占到年降水量的 85.70%以上,生长季降水量的增加,有利于植被的生长和生物多样性的增加。非生长季降水量呈增长趋势的区域面积百分比达到 92.06%,但由于非生长季降水量基数小,降水量增加总量不大。

3.1.2 重点建设区降水量变化趋势检测

将三北工程重点建设区分区年降水量、生长季降水量和非生长季降水量的非参数 Mann-Kendall 检验统计量 Z 值进行空间分析,对其降水量变化趋势的面积百分比进行统计,并绘制其雷达统计图如图 3 所示。

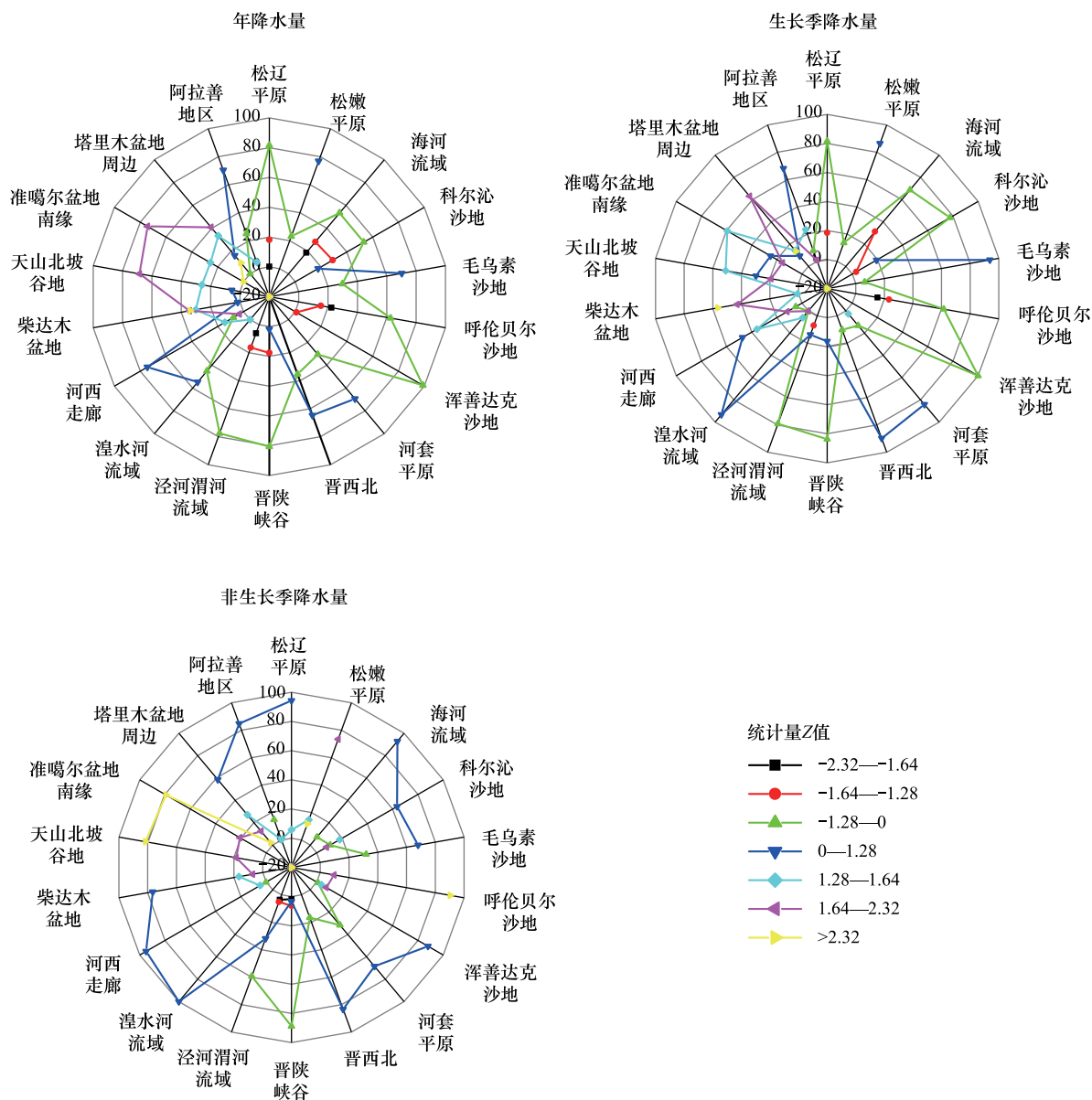


图 3 重点建设区不同信度条件下降水量变化趋势面积百分比雷达统计图

Fig.3 The area percentage radar chart of precipitation variation trend under different confidence values

在 18 个重点建设区中,生长季降水量的变化趋势与年降水量的变化趋势趋于一致,由东向西,从松嫩平

原到河西走廊、松辽平原、海河流域、科尔沁沙地、呼伦贝尔沙地、浑善达克沙地、晋陕峡谷、泾河渭河流域以不显著减少趋势为主;松嫩平原、毛乌素沙地、河套平原、晋西北、湟水河流域、阿拉善地区、河西走廊以不显著增长趋势和为主。西部的柴达木盆地、天山北坡谷地、准噶尔盆地南缘、塔里木盆地周边年降水量的变化趋势以通过信度为 95% 显著性检验的增长趋势为主;柴达木盆地和塔里木盆地周边以生长季降水量的变化趋势以通过信度为 95% 显著性检验的增长趋势为主,天山北坡谷地、准噶尔盆地南缘生长季降水量的变化趋势以通过信度为 90% 显著性检验的增长趋势为主。非生长季降水量除了晋陕峡谷、泾河渭河流域以不显著减少趋势为主而外,其他地区均以增长趋势为主;以增长趋势通过信度为 99% 的显著性检验为主的包括呼伦贝尔沙地、天山北坡谷地和准噶尔盆地南缘;以增长趋势通过信度为 95% 的显著性检验为主的为松嫩平原;松辽平原、海河流域、科尔沁沙地、毛乌素沙地、呼伦贝尔沙地、浑善达克沙地、河套平原、晋西北、湟水河流域、河西走廊、柴达木盆地、塔里木盆地周边和阿拉善地区以不显著减少趋势为主。

3.1.3 重点县降水量突变分析

根据三北工程 5 个重点县自 1951 年以来有数据的分县年降水量统计数据,分别绘出 5 个重点县的 UF_k 和 UB_k 时序图如图 4 所示。

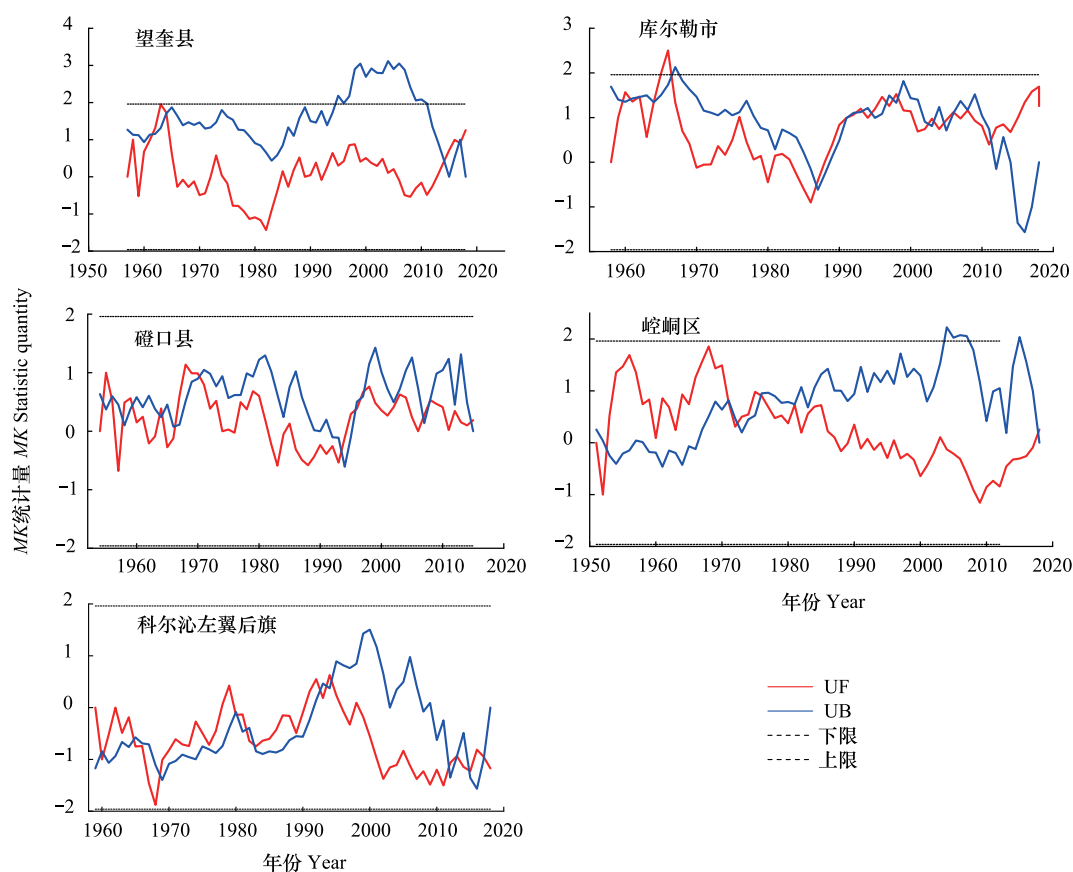


图 4 重点县 UF_k 和 UB_k 时序图

Fig.4 The sequence diagram of UF_k & UB_k of key counties

MK: Mann-Kendal; UF : Mann-Kendall 检验法定义的统计量; UB : UF 的反序统计量

黑龙江省望奎县年降水量的统计量 UF_k 在 0 与临界值之间,说明其增减趋势不显著, UF_k 与 UB_k 两条曲线出现交点,且交点在临界值之间,分别在 1961 年、1964 年、2013 年、2015 年出现交点,说明其对应年份年降水量突变发生。新疆库尔勒市年降水量的统计量 UF_k 大部分时间大于 0,且在 1965 年、1966 年大于临界值,年降水量呈增长趋势,在 1965 年、1966 年达到显著水平;1970—1972 年、1979—1980 年、1984—1987 年 UF_k

小于且在临界值之内,年降水量呈不显著减少趋势。库尔勒市的 UF_k 与 UB_k 曲线多处出现交点,且交点在临界值之间,年降水量突变发生频繁。内蒙古自治区磴口县年降水量的统计量 UF_k 大部分时间大于 0,且在临界值之内,年降水量呈不显著增长趋势。 UF_k 与 UB_k 曲线多处出现交点,年降水量突变发生频繁。甘肃省平凉市崆峒区的年降水量的统计量 UF_k 1991 年以后大都小于 0,且在临界值之内,年降水量 1991 年以后呈不显著减少趋势。 UF_k 与 UB_k 两条曲线出现交点,且交点在临界值之间,分别在 1953 年、1971 年、1976 年、1981 年、2017 年出现交点,说明其对应年份年降水量突变发生。内蒙古自治区科尔沁左翼后旗的年降水量的统计量 UF_k 1998 年以后小于 0,且在临界值之内,年降水量 1998 年以后呈不显著减少趋势。 UF_k 与 UB_k 曲线多处出现交点,说明其年降水量突变发生频繁。

3.2 未来 30 年年降水量预测

将各站点预测数据经 ArcGIS 空间插值绘制三北工程区未来 30 年年降水量空间分布图,并在此基础上计算未来 30 年间年降水量变化数据,绘制其分布图如图 5 所示。

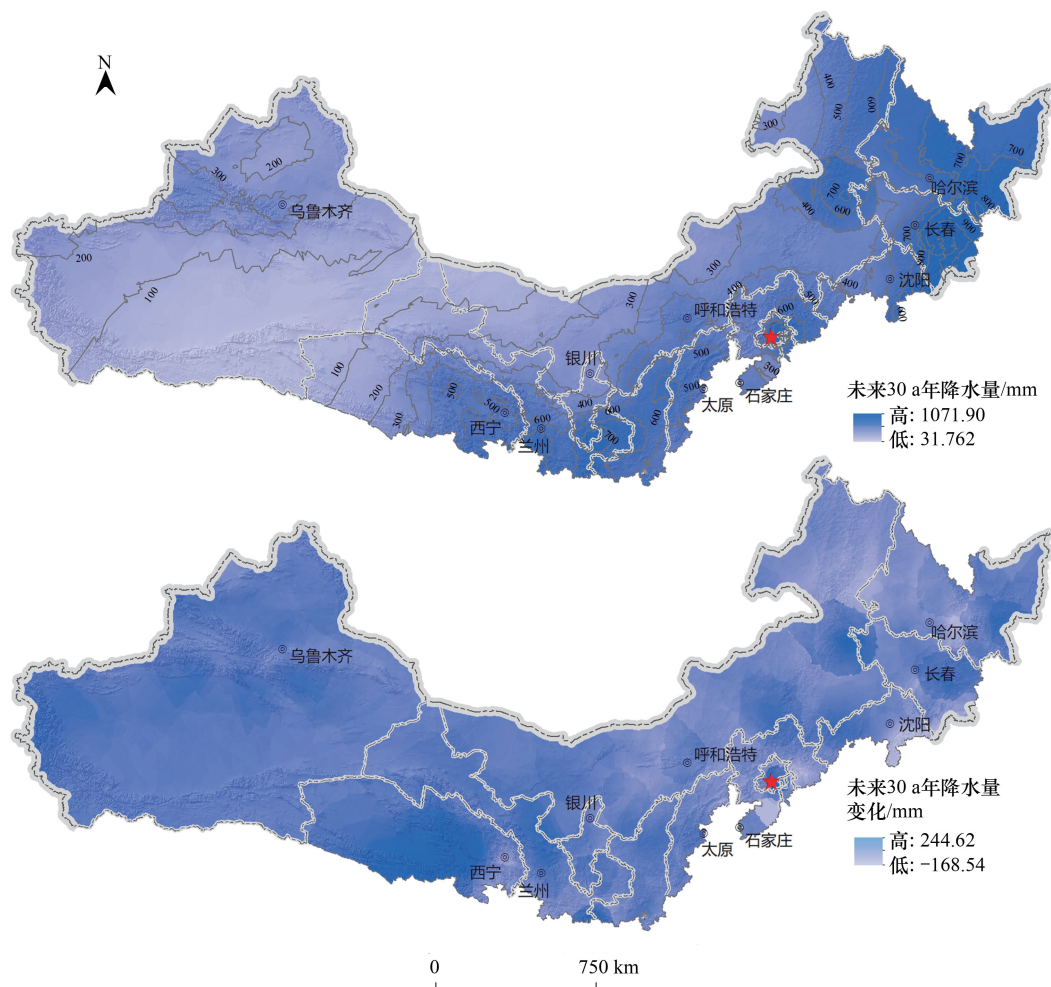


图 5 三北工程区未来 30 年年降水量空间分布与年降水量变化分布

Fig.5 The predicted precipitation spatial distribution map of Three-North Shelterbelt Forest Program region for the next 30 years and its changing distribution map

未来 30 年“三北工程区”年降水量最小值 31.76 mm,最大值 1071.90 mm,变化范围 1040.14 mm,与现状年 2018 年(最小值 18.04 mm,最大值 984.93 mm,变化范围 966.88 mm)相比较年降水量变化范围增加 73.26 mm;均值现状年 301.80 mm,预测年均值 321.58 mm,均值增加 19.78 mm;由于三北工程区东西跨度大,标准差

也较大,现状年为 225.74,预测年为 215.72,年降水量空间差异减少。未来 30 年间年降水量变化最多增加 244.62 mm,最多减少 168.54 mm。基于未来 30 年年降水量及其变化空间分布,在三北工程区、重点建设区、重点县 3 个空间尺度上,可为模拟基于水资源约束的林草植被理论与现实分布格局,开展基于水资源承载能力的林草资源优化配置提供基础数据,为三北工程区科学恢复林草资源、发展“雨养林草植被”提供科学支撑。

4 结论与讨论

三北工程区造林面积增加及工农业和生活用水量增加,水资源供需矛盾日益突出,迫切需要树立“以水定林草”的发展理念,因地制宜发展“雨养林草植被”。本文在三北工程区、重点建设区、重点县 3 个空间尺度上,基于 1951—2018 年长时间序列降水量,采用 Mann-Kendall 非参数检验、ARIMA 模型预测和 ArcGIS 空间分析等方法,开展年降水量、生长季降水量和非生长季降水量多尺度变化趋势与突变分析,并对未来 30 年的年降水量进行预测,主要研究结论如下:

(1)三北工程区降水量呈增长趋势的区域面积大于呈减少趋势的区域,年降水量、生长季降水量和非生长季降水量呈增长趋势的区域面积百分比分别为 73.64%、70.10%和 92.06%,全年、生长季和非生长季降水量呈增长趋势且置信度为 90%以上的区域面积百分比分别为 45.43%、37.31%和 36.79%。生长季降水量占到年降水量的 85.70%以上,生长季降水量的增加,有利于植被的生长和生物多样性的增加。非生长季降水量呈增长趋势的区域面积比例达到 92.06%,但降水量增加总量不大。

(2)18 个重点建设区生长季降水量与年降水量的变化趋势趋于一致,西部的柴达木盆地、天山北坡谷地、准噶尔盆地南缘、塔里木盆地周边年降水量与生长季降水量以通过信度为 90%或 95%显著性检验的增长趋势为主,其他区域以不显著减少趋势或不显著增加趋势为主。非生长季降水量除了晋陕峡谷、泾河渭河流域以不显著减少趋势为主而外,其他地区均以增长趋势为主。

(3)5 个重点县的 UF_k 与 UB_k 两条曲线出现交点,说明其年降水量有突变发生,库尔勒市、磴口县、科尔沁左翼后旗 UF_k 与 UB_k 曲线多处出现交点,说明其年降水量突变发生频繁。

(4)采用 ARIMA 模型预测得出未来 30 年的年降水量,并在此基础上计算 30 年间的年降水量变化数据,绘制出空间分布图,可为开展基于水资源承载能力的林草资源优化配置提供基础数据,为三北工程区科学恢复林草资源、发展“雨养林草植被”提供科学支撑。

综上,降水是三北工程区水资源的根本来源,本研究从多个方面多个尺度对该区域的降水量变化趋势的空间分布及其未来预测进行了研究,为开展基于水资源承载能力的林草资源优化配置提供了可靠的数据基础。同时也可三北工程区水文及气候系统研究提供参考,有利于增强对该区域未来气候变化的认识,也有利于加深该区域水文、自然灾害及其生态环境的影响因素的研究。

参考文献 (References):

- [1] 任国玉,战云健,任玉玉,陈峪,王涛,柳艳菊,孙秀宝. 中国大陆降水时空变异规律— I. 气候学特征. 水科学进展, 2015, 26(3): 299-310.
- [2] Zeng W, Yu Z, Wu S H, Qin J B. Changes in annual, seasonal and monthly precipitation events and their link with elevation in Sichuan Province, China. International Journal of Climatology, 2016, 36(5): 2303-2322.
- [3] Hao L, Sun G, Liu Y Q, Gao Z Q, He J J, Shi T T, Wu B J. Effects of precipitation on grassland ecosystem restoration under grazing exclusion in Inner Mongolia, China. Landscape Ecology, 2014, 29(10): 1657-1673.
- [4] 陈敏玲,张兵伟,任婷婷,王姗姗,陈世苹. 内蒙古半干旱草原土壤水分对降水格局变化的响应. 植物生态学报, 2016, 40(7): 658-668.
- [5] 王楠楠,韩冬雪,孙雪,国微,马宏宇,冯富娟. 降水变化对红松阔叶林土壤微生物功能多样性的影响. 生态学报, 2017, 37(3): 868-876.
- [6] 段桂芳,单立山,李毅,张正中,张荣. 降水格局变化对红砂幼苗生长的影响. 生态学报, 2016, 36(20): 6457-6464.
- [7] 王英,曹明奎,陶波,李克让. 全球气候变化背景下中国降水量空间格局的变化特征. 地理研究, 2006, 25(6): 1031-1040.

- [8] 张皓, 冯利平. 近 50 年华北地区降水量时空变化特征研究. 自然资源学报, 2010, 25(2): 270-279.
- [9] Qin F Y, Jia G S, Yang J, Na Y T, Hou MT, Narenmandula. Spatiotemporal variability of precipitation during 1961-2014 across the Mongolian Plateau. *Journal of Mountain Science*, 2018, 15(5): 992-1005.
- [10] 褚健婷, 夏军, 许崇育, 李璐, 王中根. 海河流域气象和水文降水资料对比分析及时空变异. 地理学报, 2009, 64(9): 1083-1092.
- [11] Sun F B, Roderick M L, Farquhar G D. Rainfall statistics, stationarity, and climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(10): 2305-2310.
- [12] 黄家俊, 张强, 张生, 陈晓宏. 基于信息熵的新疆降水时空变异特征研究. 生态学报, 2017, 37(13): 4444-4455.
- [13] 新华网. 习近平: 持续不懈推进三北工程建设 巩固和发展祖国北疆绿色生态屏障. (2018-11-30) [2020-02-02]. http://www.xinhuanet.com/politics/leaders/2018-11/30/c_1123789904.htm.
- [14] 黄森旺, 李晓松, 吴炳方, 裴亮. 近 25 年三北防护林工程区土地退化及驱动力分析. 地理学报, 2012, 67(5): 589-598.
- [15] 王耀, 张昌顺, 刘春兰, 甄霖. 三北防护林体系建设工程区森林水源涵养格局变化研究. 生态学报, 2019, 39(16): 5847-5856.
- [16] 王强. 三北防护林工程区植被覆盖变化特征及其对气候变化的响应研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2012.
- [17] 王鹏涛, 延军平, 蒋冲, 刘宪锋, 廖光明. 三北防护林工程区气候变化分析. 水土保持通报, 2014, 31(1): 273-278.
- [18] 人民网. 三北防护林建设 40 年: 打造中国北方“绿色长城”. (2018-08-04) [2020-02-02]. <http://scitech.people.com.cn/n1/2018/0804/c1007-30209053.html>.
- [19] Gilbert, R O. *Statistical Methods for Environmental Pollution Monitoring*. New York: Van Nostrand Reinhold Co., 1987: 302-310.
- [20] 郭小芹, 刘明春, 钱莉, 周文霞. 从 Mann-Kendall 特征看石羊河流域降水量的演变规律. 干旱区地理, 2010, 33(4): 593-599.
- [21] Lamchin M, Lee W K, Jeon S W, Wang S W, Lim C H, Song C, Sung M. Long-term trend and correlation between vegetation greenness and climate variables in Asia based on satellite data. *Science of the Total Environment*, 2018, 618: 1089-1095.
- [22] 袁学所, 夏志芬, 葛庆云, 郭阳. 凤阳近 61 年干燥指数变化的 Mann-Kendall 检验. 科技通报, 2019, 35(8): 151-154.
- [23] 刘德林. 郑州市年降水量的 ARIMA 模型预测. 水土保持研究, 2011, 18(6): 249-251.
- [24] 孙苗, 孔祥超, 耿伟华. 基于 ARIMA 模型的山东省月降水量时间序列分析. 鲁东大学学报: 自然科学版, 2013, 29(3): 244-249.