

# 气候变暖背景下西北脆弱带近 54 年降水季节变化特征

杨 蓉, 赵多平

(宁夏大学 资源与环境学院, 银川 750021)

**摘 要:**利用西北脆弱带 40 个气象站点 1961—2015 年降水量数据资料,采用趋势线拟合、线性倾向估计、普通 Kriging 插值等数理分析方法,对西北脆弱带近 54 年的降水量季节变化特征进行了分析。结果表明:(1) 随着全球变暖趋势越来越明显,西北脆弱带近 54 年间降水量总体呈减少趋势;(2) 该区年均降水量空间变化大致是沿东南—西北方向呈现由多到少的过渡,年均降水量倾向率空间变化则大致沿东南—西北方向呈现由减少到增加的逐步过渡;(3) 该区 54 年间四季降水距平变化趋势为春、夏、冬三季的降水量呈增加趋势,秋季降水量呈减少趋势,变化速率为夏季>冬季>春季>秋季。四季降水量的空间差异明显,大致都沿东南—西北方向呈现由多到少的逐步过渡趋势。

**关键词:**降水; 时空变化; 西北脆弱带

中图分类号:P467

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)06-0085-06

## Characteristics of Seasonal Variation of Precipitation in Northwest Vulnerable Ecotone Under the Background of Climate Warming in the Past 54 Years

YANG Rong, ZHAO Duoping

(College of Resources and Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

**Abstract:** Based on the data of 40 national meteorological stations in northwest vulnerable ecotone from 1961 to 2015, the characteristics of spatial-temporal variation of precipitation in the past 54 years were analyzed by using linear trend estimation, Mann Kendall mutation test, ordinary Kriging interpolation mathematical analysis methods. The results showed that: (1) the precipitation in the 54 years decreased in northwest vulnerable ecotone as a whole since the global warming trend was more and more obvious; (2) the spatial variation of annual precipitation reduced roughly from the southeast to northwest, and the tendency rate of annual precipitation reduced gradually at first then increased from the southeast to northwest; (3) the change trend of anomaly in this area from 1961 to 2015 showed that the precipitation increased in spring, summer and winter, however, it reduced roughly in autumn, and the change rate of precipitation followed the order: winter>spring>autumn>summer, the spatial distribution characteristics of precipitation in the four seasons were obvious, which reduced gradually from the southeast to northwest.

**Keywords:** precipitation; spatial-temporal change; northwest vulnerable ecotone

IPCC 第四次评估报告指出:近 100 年来全球平均气温升高了  $0.74^{\circ}\text{C}$ , 平均升温速率大致为  $0.1^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ , 今后 20 a 全球平均地面气温仍将以  $0.2^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$  的速率继续上升<sup>[1]</sup>, 未来全球仍将表现为明显的增温趋势。地球上不同要素交界地带的区域,如水陆交界带、干湿交替带、农牧交错带、沙漠边缘带等,它们的环境要素十分敏感,这些区域能及时、灵敏地体现全

球变化的早期信号,对全球变化的响应具有独特性,这就是生态脆弱带<sup>[2]</sup>。脆弱带由于特殊的地理环境和气候条件,对于气候变化和人类干扰的影响极为敏感,使其成为研究全球变化重要的预警区<sup>[3]</sup>,因此,生态脆弱带的研究对全球变化研究以及预测区域未来气候、环境演变具有重大科学意义。对生态脆弱带的研究大多数学者把研究重点集中在脆弱带的生态环

收稿日期:2017-11-07

修回日期:2017-12-26

资助项目:宁夏自然科学基金(NZ1625);国家自然科学基金(41761024)

第一作者:杨蓉(1979—),女,陕西汉中,副教授,博士,主要从事自然灾害、区域可持续发展研究。E-mail:yangr821@163.com

通信作者:赵多平(1978—),男(蒙古族),内蒙古鄂尔多斯人,副教授,博士,主要从事区域规划、旅游开发与规划及经济运行研究。E-mail:zdp@nxu.edu.cn

境恶化状况、土地生产力退化和土壤侵蚀等方面<sup>[4]</sup>,生态脆弱带对全球变化的响应与反馈研究,学者们主要关注的方向是气候变暖对其植被及其覆被变化的影响研究,以及全球变化与生态脆弱带各个影响因子的关系研究<sup>[5]</sup>,对其土壤、气候、植被等要素的时空分布与演变格局的研究也很多<sup>[6]</sup>。近年来很多学者针对我国不同区域的气候变化特征进行了大量的研究分析<sup>[7-8]</sup>,但对脆弱带地区的气候变化研究却极少。

西北脆弱带是我国地理环境最复杂、生态环境最脆弱的特殊区域之一,在全球气候变暖的背景下更易受到全球气候变暖和气候异常的影响,也更能灵敏、及时地反映全球变化,有着独特的响应特征,因此在全球变暖的大背景下有必要加强对西北脆弱带地区气候变化的研究。基于此,本文选取西北脆弱带作为研究区域,利用 1961—2015 年的降水量数据,以线性倾向估计、普通 Kriging 插值等数理分析方法,分析气候变暖背景下西北脆弱带近 54 年的降水量时空变化特征,以期为本区域自然生态系统和社会经济系统的可持续发展提供一些科学理论依据,同时也对全球变化研究提供一些区域的科学证据。

## 1 研究区与方法

### 1.1 研究区概况

我国脆弱带多指北方农牧交错带,它自东北向西南纵贯中国北部地区,北起大兴安岭西麓的呼伦贝尔,向西南延伸至内蒙古东南部,过冀北、晋北、陕北和鄂尔多斯高原,到达宁夏、甘肃中部和青海东部地区。北方农牧交错带由东向西依次为东北脆弱带、中部脆弱带和西北脆弱带<sup>[3]</sup>。

本文研究区西北脆弱带地处陕、甘、宁、蒙四省的接壤地区( $33^{\circ}8'—40^{\circ}9'N$ ,  $101^{\circ}2'—112^{\circ}4'E$ ),是一个近似四边形的区域,总面积约为 34 万  $km^2$ ,包括陕西北部、宁夏、甘肃东南部和内蒙古临近宁夏的南部地区。从气候特征来看,西北脆弱带刚好位于我国夏季风末势力区的季风与非季风气候的贺兰山交界地区,降水的地区差异、季节和年际变率都极大,且变化十分敏感;从地形特征来看,该区地处我国中部黄土高原区向内蒙古高原边缘地带的毛乌素沙漠和腾格里沙漠过渡的地区,由东向西为东南黄土丘陵沟壑区向西南黄土丘陵沟壑区的过渡地带,地形起伏大且复杂多变,地形因素对小气候的影响较大;从生态环境来看,这里是我国典型的从半湿润区向半干旱、干旱区过渡的农牧交错区,又称其西北农牧交错带<sup>[4]</sup>。该区的生态环境系统和社会经济活动等都是在变化的临界区间,其自然生态环境的变化会直接影响西部乃

至全国的生态与经济安全。

### 1.2 数据来源

本文选取西北脆弱带气象数据比较完整的 40 个气象站点 1961 年 1 月—2015 年 12 月共 54 a 的降水量月值数据,依此计算出降水量年值和季节值,通过对数据的分析与处理得出本区降水量时空变化特征。所用气象数据资料来源于中国气象数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/home.do>)。

为了更详细分析西北脆弱带的降水量变化特征,依据区域自然地理环境的差异性将西北脆弱带做进一步中尺度的划分,主要以贺兰山所在的大致  $105^{\circ}E$  线作为区域的東西分界线,毛乌素沙漠南缘所在的大致  $37^{\circ}N$  线作为区域的南北分界线<sup>[7]</sup>,依此分界线做出中尺度分区(图 1): 1 区为半干旱的东北毛乌素沙区,2 区为半湿润的东南黄土丘陵沟壑区,3 区为半干旱的西南黄土丘陵沟壑区,4 区则为干旱的西北腾格里沙区。



图 1 西北脆弱带气象站点分布及分区

### 1.3 研究方法

本文主要利用 Excel, ArcGIS, DPS 数据处理系统等软件对要素数据进行分析处理,采用数理统计分析法、线性倾向估计法、趋势线拟合法、克里金插值法等方法,详细分析西北脆弱带地区近 54 年来的降水量时空变化特征。其中,线性倾向估计法是用来分析某一气候变量的变化倾向趋势及这种变化趋势显著与否的方法,可表明随时间增加气候变量的变化趋势、变化速率及气候变量与时间之间的线性关系大小<sup>[8]</sup>。Kriging(克里金)插值法又称为空间自协方差最佳插值法,它是以南非矿业工程师 D. G. Krige 的名字命名的一种最优内插法,是地学统计学常采用的一种求最优、线形、无偏的空间内插方法<sup>[9]</sup>。它考虑的是要素空间属性在空间位置上的变异分布,它是在

充分考虑观测资料之间的相互关系后,对每一个观测资料赋予一定的权重系数,然后加权平均得到估计值,本文运用此方法进行降水数据空间变化的分析。

## 2 西北脆弱带降水量季节时空变化特征

### 2.1 西北脆弱带降水量年变化特征

1961—2015年西北脆弱带多年平均降水量为367.52 mm,年降水最大值、最小值的分别为547.42 mm(1964年),262.37 mm(1982年),最大值和最小值相差285.05 mm,降水量年际变化幅度较大。

分析西北脆弱带年降水量距平变化(图2)可知,近54年西北脆弱带降水量总体呈减少趋势,减少速率为3.29 mm/10 a,降水变化趋势不明显。通过分析6阶多项拟合趋势可知,20世纪60年代,降水波动减少趋势较明显,减少速率为49.53 mm/10 a;20世纪70年代初—90年代末降水波动变化特征不明显,整体略有增加,增加速率为1.35 mm/10 a;进入21世纪是降水增加最为明显的阶段,增加速率为32.36 mm/10 a。相比而言,20世纪60年代为下降期,70—90年代为平稳期,进入21世纪以后为上升期。

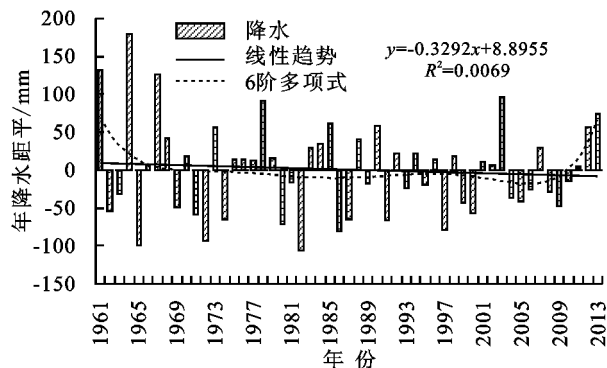


图2 西北脆弱带年降水量距平变化特征

### 2.2 西北脆弱带降水量季节变化特征

西北脆弱带1961—2015年四季降水量距平变化趋势可知(图3),春、夏、冬三季降水均呈增加趋势,秋季降水量则呈减少趋势,变化速率大小关系为夏季(2.76 mm/10 a) > 冬季(0.39 mm/10 a) > 春季(0.02 mm/10 a) > 秋季(-1.87 mm/10 a),四季降水量具体变化特征表现为:

(1) 春季多年平均降水量为59.28 mm,近54年来西北脆弱带春季降水量呈增加趋势,增加速率为0.02 mm/10 a,年际变化波动幅度不大。通过分析6阶多项拟合趋势可知,春季降水量变化大概以10 a为周期经历了增加—减少—增加—减少—增加的趋势。具体而言,20世纪60年代初期降水量增加较快,之后开始持续下降,进入80年代以后呈现增加趋势,90年代略有减少,2000年以后春季降水量又

逐步增加。

(2) 夏季多年平均降水量为177.03 mm,夏季降水量增加幅度最大,增加速率为2.76 mm/10 a。分析6阶多项拟合趋势可知,近54年来西北脆弱带夏季降水经历了减少—稳定—减少—增加的趋势。20世纪60年代初期降水量呈快速减少趋势,减少速率可达9.94 mm/10 a,60年代末期—90年代相对稳定,90年代末期—2006年又有所减少,2007—2015年夏季降水量开始快速增加,增加速率为168.25 mm/10 a。

(3) 秋季多年平均降水量为77.52 mm,近54年来西北脆弱带秋季降水量呈较少趋势,也是4个季节中降水量唯一呈减少趋势的季节,下降速率为1.87 mm/10 a。6阶多项拟合趋势显示,近54年来西北脆弱带秋季降水量波动变化趋势较大,大致呈V型经历了较为显著的减少和增加期,其中20世纪60—90年代初为降水量减少期,减少速率为13.97 mm/10 a,90年代—21世纪初为增加期,增加速率为19.49 mm/10 a。

(4) 冬季多年平均降水量为12.51 mm,西北脆弱带冬季降水呈增加趋势,增加速率为0.39 mm/10 a。6阶多项拟合趋势得出,西北脆弱带冬季降水经历了增加—减少—增加—减少的趋势,20世纪60—80年代降水增加趋势明显,增加速率为7.69 mm/10 a,80—90年代末为减少期,减少速率为3.91 mm/10 a,90年代末—2006年略有增加,2006年以后冬季降水量又开始减少。

### 2.3 中尺度分区降水量变化特征

西北脆弱带4个中尺度分区的年均降水量变化趋势可知(图4),1961—2015年,西北脆弱带各分区降水量有增有减,增加速度最快的是东北毛乌素沙区,其次是西北腾格里沙区,西南黄土丘陵沟壑区和东南黄土丘陵沟壑区的降水则呈减少趋势。

(1) 东北毛乌素沙区多年平均降水量276.27 mm,年降水量最大值、最小值分别为422.23 mm(1961年),143.54 mm(1965年),两值相差278.69 mm,降水量年际变化幅度较大。近54年该区降水量总体呈增加趋势,在4个分区中增加速度最快,增加速率为4.38 mm/10 a,特别是进入21世纪降水量波动增加趋势更快,增加速率为34.54 mm/10 a。

(2) 西北腾格里沙区多年平均降水量201.26 mm,是4个分区里降水最稀少的一个区,年均降水最大值、最小值分别为271.27 mm(1961年),126.7 mm(1962年),两值相差144.57 mm,降水年际变化幅度是4个区中最小的。近54年该区降水量总体呈增加趋势,增加速率为0.76 mm/10 a,整体增加趋势并不明显。就降水量的波动变化来看,20世纪60—

70 年代中期为降水波动减少期,减少速率为 4.72 mm/10 a;70 年代中期—90 年代末降水波动增加,增

加速率为 2.68 mm/10 a,进入 21 世纪降水量又波动减少,减少速率为 17.054 mm/10 a。

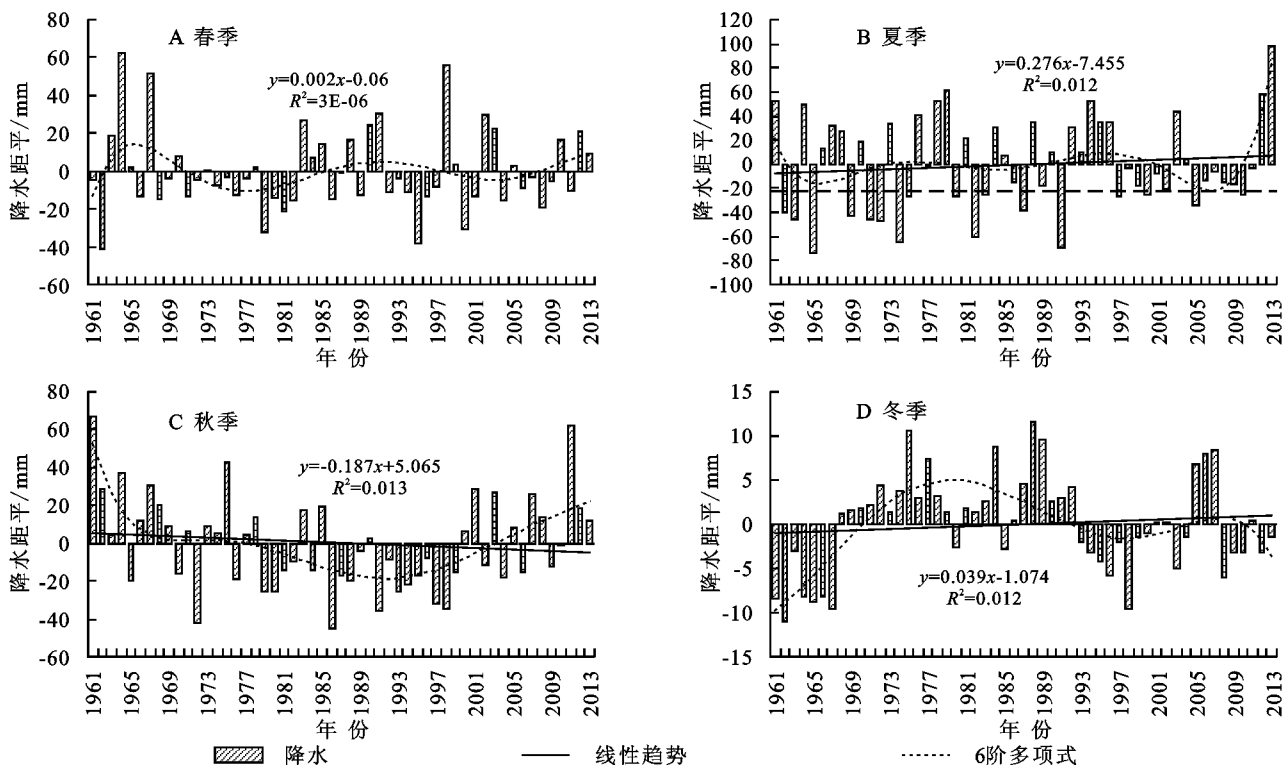


图 3 西北脆弱带四季降水距平变化趋势

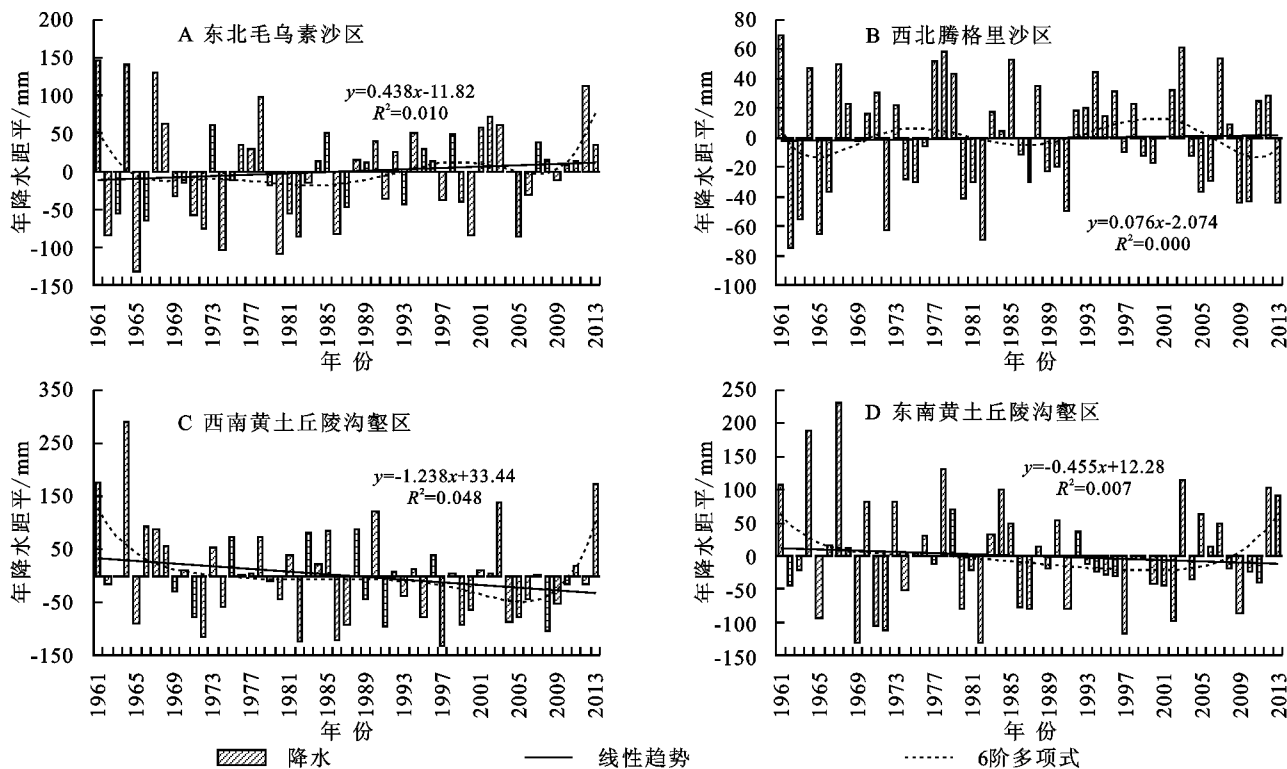


图 4 西北脆弱带中尺度分区年均降水量距平变化特征

(3) 西南黄土丘陵沟壑区多年平均降水量为 469.66 mm,年均降水最大值、最小值分别为 758.58 mm (1964 年),337.57 mm(1997 年),两值相差 421.01 mm,在 4 个分区中降水量年际变化幅度最大。近 54 年来

该区降水量总体呈减少趋势,且减少速度较快,减少速率为 12.38 mm/10 a。通过 6 阶多项拟合趋势可知,20 世纪 60 年代为降水迅速减少期,减少速率为 103.65 mm/10 a;70—90 年代末为相对平稳期,降水

仍有缓慢减少,减少速率为 $9.2\text{ mm}/10\text{ a}$ ;进入21世纪西南黄土丘陵沟壑区降水量呈较快增加趋势,增加速率为 $43.64\text{ mm}/10\text{ a}$ 。

(4) 东南黄土丘陵沟壑区是4个分区中年均降水量最多、最为湿润的区域,多年平均降水量为 $482.31\text{ mm}$ ,年降水最大值、最小值分别为 $713.78\text{ mm}$ (1967年), $350.52\text{ mm}$ (1982年),两者相差 $363.26\text{ mm}$ ,降水年际变化幅度较大。近54年该区降水量总体呈减少趋势,减少速率为 $4.55\text{ mm}/10\text{ a}$ 。通过6阶多项拟合趋势可知,20世纪60年代为降水量快速减少期,减少速率为 $74.6\text{ mm}/10\text{ a}$ ;70—90年代末为降水量持续减少期,减少速率为 $10.24\text{ mm}/10\text{ a}$ ;进入21世纪该区降水量波动增加,增加速率为 $52.86\text{ mm}/10\text{ a}$ 。

#### 2.4 中尺度分区降水量季节变化特征

分析1961—2015年西北脆弱带4个中尺度区域的四季降水距平变化趋势(图5—6)可知:

(1) 东北毛乌素沙区春夏秋冬四季的多年平均降水量分别为 $34.94, 124.88, 48.71, 13.24\text{ mm}$ 。近54年来东北毛乌素沙区春、夏、秋季降水量均呈增加趋势,夏季增幅最大,而冬季降水量则呈减少趋势。四季降水量变化速率大小关系为夏季( $5.13\text{ mm}/10\text{ a}$ )>秋季( $2.98\text{ mm}/10\text{ a}$ )>春季( $2.68\text{ mm}/10\text{ a}$ )>冬季( $-1.79\text{ mm}/10\text{ a}$ )。4个季节的降水都是波动变化的,夏秋两季的降水年际波动最大,就20世纪以来的十几年来看,春、夏、秋季降水量增加趋势明显,冬季降水则呈波动减少趋势。

(2) 西北腾格里沙区春夏秋冬四季的多年平均降水量分别为 $35.57, 116.32, 45.27, 4.11\text{ mm}$ 。近54年来西北腾格里沙区春、秋、冬三季降水量呈增加趋势,冬季增幅最大,唯有夏季降水量呈减少趋势,四季降水量变化速率大小关系为冬季( $0.5\text{ mm}/10\text{ a}$ )>春季( $0.4\text{ mm}/10\text{ a}$ )>秋季( $0.15\text{ mm}/10\text{ a}$ )>夏季( $-0.16\text{ mm}/10\text{ a}$ )。4个季节的降水量波动变化,就20世纪以来的十几年来看,春、秋、冬3个季节降水量呈波动减少,夏季降水则呈缓慢增加趋势。

(3) 西南黄土丘陵沟壑区春夏秋冬四季的多年平均降水量分别为 $66.5, 209.36, 97.81, 17.79\text{ mm}$ 。西南黄土丘陵沟壑区夏、冬两季降水量呈增加趋势,春、秋两季降水量呈减少趋势,秋季减少最为明显,四季降水量变化速率大小关系为夏季( $4.28\text{ mm}/10\text{ a}$ )>冬季( $1.77\text{ mm}/10\text{ a}$ )>春季( $-3.26\text{ mm}/10\text{ a}$ )>秋季( $-6.89\text{ mm}/10\text{ a}$ )。4个季节的降水波动变化,秋季的降水年际波动最大,就20世纪以来的十几年来

来看,春、夏、秋季降水呈波动增加趋势,而冬季降水则呈波动减少趋势。

(4) 东南黄土丘陵沟壑区春夏秋冬四季的多年平均降水量分别为 $100.54, 250.67, 113.95, 11.02\text{ mm}$ 。东南黄土丘陵沟壑区春、冬两季降水量呈增加趋势,但增加幅度不大,夏、秋两季降水量呈减少趋势,秋季减少明显,四季降水量变化速率大小关系为冬季( $1.4\text{ mm}/10\text{ a}$ )>春季( $0.57\text{ mm}/10\text{ a}$ )>夏季( $-0.16\text{ mm}/10\text{ a}$ )>秋季( $-3.23\text{ mm}/10\text{ a}$ )。4个季节的降水均呈波动变化,就20世纪以来的十几年来看,春、夏两季降水呈波动增加趋势,而秋、冬两季降水则呈波动减少趋势。

#### 2.5 西北脆弱带降水量空间变化特征

运用普通Kriging插值法得出1961—2015年西北脆弱带年降水量及倾向率空间变化图,其中年降水量空间变化(附图1A)大致沿东南—西北方向,呈现由多到少的逐步过渡,即西南黄土丘陵沟壑区、东南黄土丘陵沟壑区为降水相对高值区,腾格里沙区为相对低值区。全区年降水量最多的站点为东南黄土丘陵沟壑区内的洛川站,年降水量高达 $612.52\text{ mm}$ ,最少的是腾格里沙区内的吉兰泰站,年降水量仅为 $104.49\text{ mm}$ 。全区有19个站点近50%的地区降水超过 $400\text{ mm}$ ;13个站点32.5%的站点年降水量为 $200\sim 400\text{ mm}$ ,有8个站点20%的地区降水量在 $200\text{ mm}$ 以下。

近54年来,西北脆弱带年降水量倾向率空间变化差异明显(附图1B),年降水倾向率空间变化大致沿东南—西北方向呈现由减少到增加的逐步过渡,西南黄土丘陵沟壑区及东南黄土丘陵沟壑区为降水减少区,毛乌素沙区和腾格里沙区为相对增加区。整个西北脆弱带有9个22.5%的站点年降水量处于增加趋势,上升速率最快的是位于毛乌素沙区内的伊金霍洛旗站( $49.13\text{ mm}/10\text{ a}$ ),上升速率最小是位于甘肃省境内的临夏站,仅有 $0.45\text{ mm}/10\text{ a}$ 。其余站点降水量均呈下降趋势,约占77.5%,下降速率最大的为毛乌素沙区内的榆林站( $-36.84\text{ mm}/10\text{ a}$ ),最小的为西南黄土丘陵沟壑区内的天水站( $-0.29\text{ mm}/10\text{ a}$ )。

#### 2.6 西北脆弱带不同季节降水量空间变化特征

西北脆弱带1961—2015年各季节降水量空间变化分布如附图2所示,可看出4个季节降水量的空间差异明显,大致都沿东南—西北方向呈现由多到少的逐步过渡趋势。

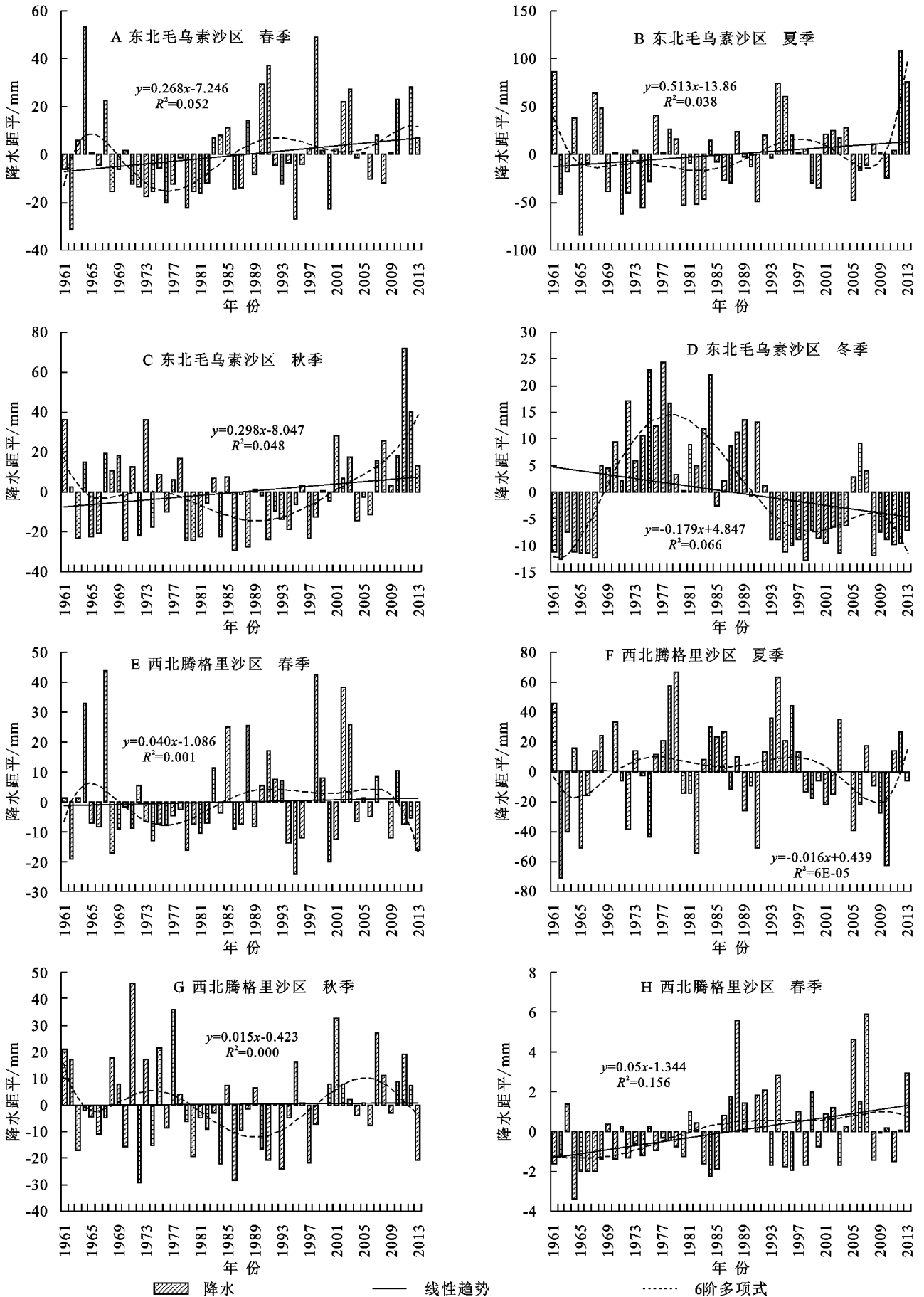


图 5 东北毛乌素沙区、西北腾格里沙区四季降水距平变化趋势

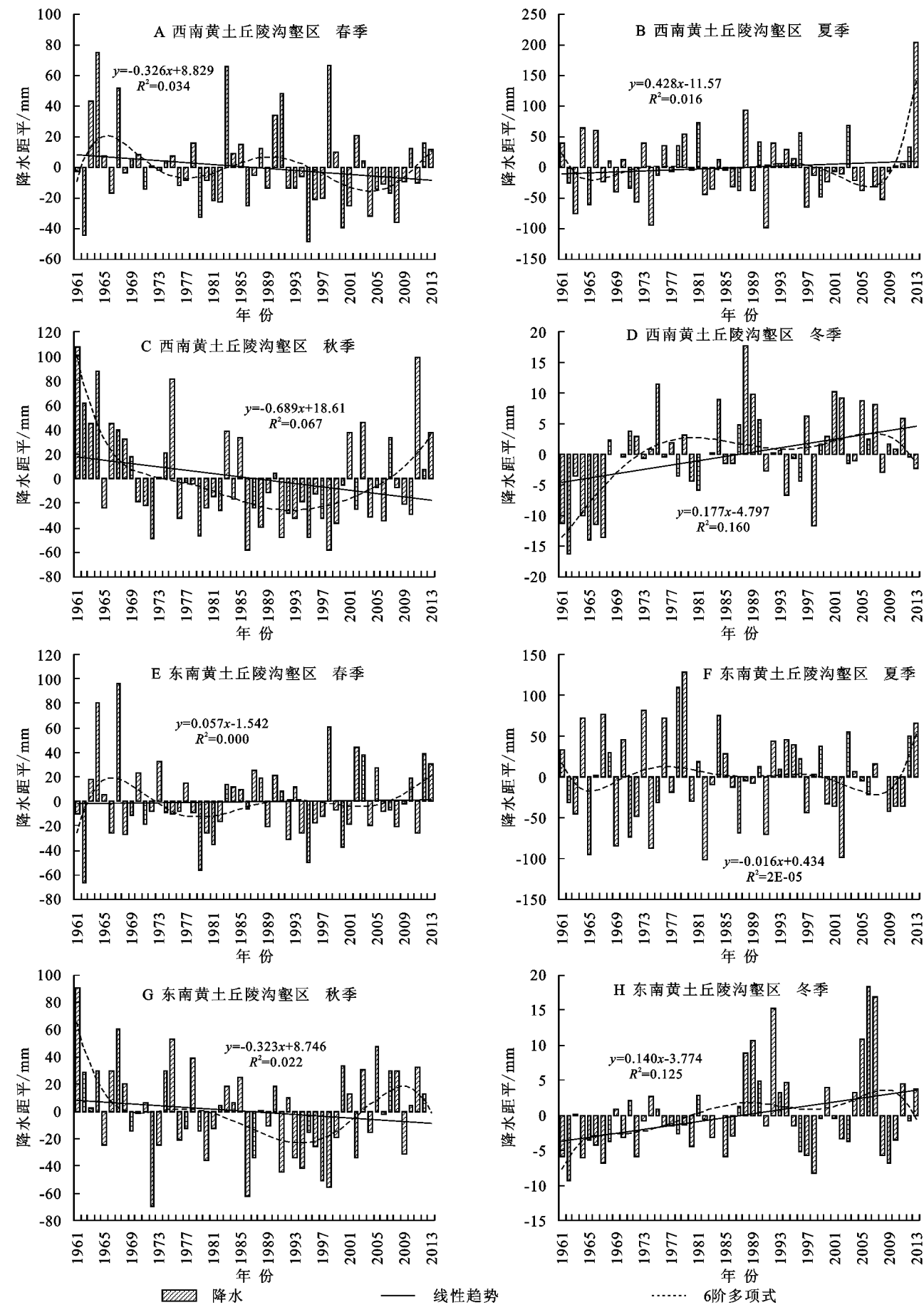


图 6 西南黄土丘陵沟壑区、东南黄土丘陵沟壑区四季降水距平变化趋势

(1) 春季降水量空间变化(附图 2A)大致沿东南—西北方向,呈现由多到少的逐步过渡,即东南黄土丘陵沟壑区、西南黄土丘陵沟壑区为相对高值区,东北毛乌素沙区、西北腾格里沙区为相对低值区。全区春季降水量最多的站点为西南黄土丘陵沟壑区内的岷县站,为 138.9 mm,最少的是毛乌素沙区内的陶乐站,春季降水量仅为 10.69 mm。全区有 8 个站点 20%的地区春季降水量超过 100 mm;有 24 个站点 60%的地区为 20~100 mm,还有 8 个站点 20%的地区春季降水量仅在 20 mm 以下。

(2) 夏季降水量空间变化(附图 2B)大致也是沿东南—西北方向呈现由多到少的逐步过渡,东南黄土丘陵沟壑区夏季降水量最高,西南黄土丘陵沟壑区次之,西北腾格里沙区为夏季降水量最少的区域。全区夏季降水量最多的站点为东南黄土丘陵沟壑区内的洛川站,为 438.9 mm,最少的是腾格里沙区内的吉兰泰站,夏季降水量仅为 68.98 mm。全区有 7 个站点 18%的地区夏季降水超过 300 mm;26 个站点 70%的站点夏季降水量为 100~300 mm,5 个站点 12%的地区在 100 mm 以下。

(3) 秋季降水量空间变化(附图 2C)仍是东南多西北少,西南黄土丘陵沟壑区、东南黄土丘陵沟壑区为相对高值区,东北毛乌素沙区、西北腾格里沙区为相对低值区。全区秋季降水量最多的站点为东南黄土丘陵沟壑区内的长武站,为 173.78 mm,最少的是毛乌素沙区内的陶乐站,仅为 13.24 mm,两站相差 160.54 mm,秋季降水空间差异较大。全区有 13 个站点 32.5%的地区秋季降水超过 100 mm;23 个站点近 60%的站点秋季降水量为 20~100 mm,4 个站点 10%的地区在 20 mm 以下。

(4) 冬季降水量整体全区都比较少(附图 2D),相对来说,东部的东南黄土丘陵沟壑区和毛乌素沙区有部分降水,而西北腾格里沙区和西南黄土丘陵沟壑区都是降水极少的干旱期。冬季降水量最多的站点为毛乌素沙区内的伊金霍洛旗站,为 116.55 mm,最少的是毛乌素沙区内的陶乐站,仅为 0.98 mm。全区有 5 个站点 12.5%的地区冬季降水超过 20 mm;9 个站点 22.5%的站点冬季降水为 10~20 mm,26 个站点 65%的地区仅在 10 mm 以下。

### 3 讨论与结论

(1) 研究发现,西北脆弱带降水对全球气候变化的响应特征是:在 1961—2015 年共 54 年间,西北脆弱带多年平均降水量为 367.52 mm,降水量总体呈减少趋势,但减少趋势并不明显。表明在全球变暖背景下,西北脆弱带的降水有所减少,这与我国近百年

来降水量的增加趋势是相反的<sup>[10]</sup>。但就降水变化的阶段性来看,2000 年以来的近十几年来西北脆弱带年降水量呈现出明显上升趋势,表明随着全球变暖的趋势越来越明显,势将导致海洋与陆地水体蒸发旺盛,而使大尺度的水循环更加旺盛,大部分区域降水增加<sup>[11]</sup>,加之近年来西北脆弱带生态建设初见成效,也使其总体降水量明显增加。

(2) 西北脆弱带年均降水量的空间变化趋势是沿东南—西北方向逐渐减少,年均降水量最高为东南黄土丘陵沟壑区,最低为西北腾格里沙区,符合我国降水量整体由东南向西北递减的大趋势。西北脆弱带年均降水量倾向率的空间变化大致沿东南—西北方向呈现由减少到增加的过渡,西南黄土丘陵沟壑区及东南黄土丘陵沟壑区为降水量减少区,毛乌素沙区和腾格里沙区为降水量相对增加区。表明在全球变暖的大背景下蒸发旺盛,水循环的海陆大循环加剧,使原本降水量多的区域降水减少,而原本降水量少的沙漠区则降水有所增加。此外,毛乌素沙区和腾格里沙区的沙漠治理对降水量也有调节作用<sup>[12]</sup>。

(3) 西北脆弱带 54 年间四季的降水距平变化趋势表现为,春、夏、冬三季的降水量呈增加趋势,秋季降水量呈减少趋势,变化速率大小关系为夏季(2.76 mm/10 a)>冬季(0.39 mm/10 a)>春季(0.02 mm/10 a)>秋季(-1.87 mm/10 a)。西北脆弱带春、冬季节降水量变化大概以 10 a 为周期经历了增加—减少—增加—减少—增加的趋势,2000 年以后春、冬季节降水是逐步增加的趋势。而夏、秋季节的降水变化大致经历了减少期—稳定期—减少期—增加期,2007 年以来夏、秋季节降水呈快速增加趋势。4 个季节降水量的空间差异明显,但大致都沿东南—西北方向,呈现由多到少的逐步过渡趋势。

(4) 西北脆弱带 4 个中尺度分区四季均以夏秋季节降水为主。东北毛乌素沙区春、夏、秋季降水呈增加趋势,冬季降水呈减少趋势;西北腾格里沙区春、秋、冬季降水增加,夏季降水减少;西南黄土丘陵沟壑区夏、冬两季降水量增加,春、秋两季降水量减少;东南黄土丘陵沟壑区春、冬两季降水增加,夏、秋两季降水减少。就 20 世纪以来的近十几年来看,东北毛乌素沙区和西南黄土丘陵沟壑区春、夏、秋季降水量增加趋势明显,西北腾格里沙区春、秋、冬季降水量增加趋势明显,而东南黄土丘陵沟壑区仅春、夏两季降水呈波动增加趋势。

(5) 气候变暖背景下西北脆弱带近 54 年来降水量总体略微减少的趋势表明该区域气候的仍具暖干化发展趋势,这对该区的农业经济总体发展将产生威胁。但就 2000 年以来该区的降水量又呈现出明显的增加趋势来说,是否本区气候具有由暖干向暖湿转型



的大趋势<sup>[14]</sup>,这是本区气候状态的突变还是一个渐进的过程,还取决于今后进一步加强对西北脆弱带气候变化事实、降水量时空变化未来趋势的全面分析及其机制的深入研究,这无论对气象学还是国民经济发展都将是一个重大的课题。

参考文献:

[1] 《第二次气候变化国家评估报告》编写委员会. 第二次气候变化国家评估报告[M]. 北京:科学出版社,2011.

[2] 牛文元. 生态环境脆弱带 ECOTONE 的基础判定[J]. 生态学报,1989,9(2):97-105.

[3] 刘洪来,王艺萌,窦潇,等. 农牧交错带研究进展[J]. 生态学报,2009,29(8):4420-4425.

[4] 常学礼,赵爱芬,李胜功. 生态脆弱带的尺度与等级特征[J]. 中国沙漠,1999,19(2):115-119.

[5] 刘军会,高吉喜. 气候和土地利用变化对中国北方农牧交错带植被覆盖变化的影响[J]. 应用生态学报,2008,19(9):2016-2022.

[6] 汪朝辉,王克林,李仁东,等. 水陆交错生态脆弱带景观格局时空变化分析:以洞庭湖区为例[J]. 自然资源学

报,2004,19(2):240-247.

[7] 丁彩霞,延军平,李敏敏. 西北地区气候变化与风速响应特征[J]. 水土保持通报,2014,32(4):134-137.

[8] 贾文雄,何元庆,李宗省,等. 祁连山及河西走廊气候变化的时空分布特征[J]. 中国沙漠,2008,28(6):1151-1155.

[9] 杨金虎,江志红,魏锋,等. 近 45 a 来中国西北年极端高、低温的变化及对区域性增暖的响应[J]. 干旱区地理,2006,29(5):625-631.

[10] 王遵娅,丁汇,何金海,等. 近 50 年来中国气候变化特征的再分析[J]. 气象学报,2004,62(2):228-236.

[11] 杨蓉,延军平. 宁夏旱涝灾害对气候变化的响应[J]. 水土保持通报,2014,34(5):272-277.

[12] 左洪超,吕川华,胡隐樵. 中国近 50 年气温及降水量的变化趋势分析[J]. 高原气象,2004,23(2):238-244.

[13] 李双双,延军平,杨蓉,等. 气候变暖背景下 1961—2010 年宁夏旱涝灾害空间分布特征和变化规律[J]. 中国沙漠,2013,33(5):1552-1559.

[14] 赵俊虎,封国林,张世轩,等. 近 48 年中国的季节变化与极端温度事件的联系[J]. 物理学报,2011,60(9):842-850.



(上接第 78 页)

[10] 朱金方,全占军,王琦,等. 乌兰木伦河径流量衰减驱动因素研究[J]. 水土保持研究,2014,21(1):34-38.

[11] 张思锋,马策,张立. 榆林大柳塔矿区乌兰木伦河径流量衰减的影响因素分析[J]. 环境科学学报,2011,31(4):889-896.

[12] 占光辉. 基于乌兰木伦河流域 SWAT 模型的植被与水资源关系研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2010.

[13] 邓飞,全占军,于云江,等. 20 年来乌兰木伦河流域植被盖度变化及影响因素[J]. 水土保持研究,2011,18(3):137-152.

[14] Gao P, Violette G., Temme A. A M, et al. A wavelet analysis of the relationship between Loess Plateau erosion and sunspots[J]. Geoderma, 2014,213:453-459.

[15] 刘二佳,张晓萍,张建军,等. 1956—2005 年窟野河径流

变化及人类活动对径流的影响分析[J]. 自然资源学报,2013,28(7):1159-1168.

[16] 李舒,吕志方. 窟野河径流突变点分析[J]. 人民黄河,2015,37(1):27-29.

[17] 吴喜军,李怀恩,董颖. 煤炭开采对水资源影响的定量识别:以陕北窟野河流域为例[J]. 干旱区地理 2016,39(2):246-253.

[18] 高文永,高亚军,徐建华. 采矿塌陷对窟野河流域水沙的影响[J]. 人民黄河,2017,39(11):76-80,102.

[19] 王童,何海,吴志勇,等. 近 30 年来窟野河流域土地利用与植被覆盖度变化分析[J]. 水电能源科学,2017,35(11):127-130,183.

[20] 刘笑彤,蔡运龙. 基于小波分析的径流特性和影响因素多尺度分析:以通天河为例[J]. 北京大学学报:自然科学版,2014,50(3):549-556.



(上接第 84 页)

[8] Barbosa F T, Bertol I, Werner R D S, et al. Critical slope length for water erosion for three crop residue types and rates in two sowing directions in no-till[J]. Revista Brasileira De Ciênci Do Solo, 2012, 36(4): 1279-1290.

[9] 黎四龙,蔡强国,吴淑安,等. 坡长对径流及侵蚀的影响[J]. 干旱区资源与环境,1998(1):29-35.

[10] 郭新亚,张兴奇,顾礼彬,等. 坡长对黔西北地区坡面产流产沙的影响[J]. 水土保持学报,2015,29(2):40-44.

[11] 吴淑芳,吴普特,原立峰. 坡面径流调控薄层水流水力特性试验[J]. 农业工程学报,2010,26(3):14-19.

[12] 张乐涛,高照良,田红卫. 工程堆积体陡坡坡面土壤侵蚀水动力学过程[J]. 农业工程学报,2013,29(24):94-102.

[13] 齐洪亮,田伟平,舒延俊. 基于坡面径流强度的中国公路水文区划研究[J]. 公路交通科技,2010,27(3):12-16.

[14] 朱显谟. 黄土高原水蚀的主要类型及其有关因素[J]. 水土保持通报,1982(3):40-44.

[15] 李小昱,雷廷武,王为. 电容式传感器测量水流泥沙含量的研究[J]. 土壤学报,2002,39(3):429-435.