

1901—2014年黄土高原区域气候变化 时空分布特征

任婧宇^{1a}, 彭守璋^{1b,2}, 曹扬^{1b,2}, 霍晓英^{1a}, 陈云明^{1b,2*}

(1. 西北农林科技大学 a. 水土保持研究所, b. 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100;
2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 气候变化对黄土高原地区环境与经济影响重大, 研究其在小地理尺度上的时空变化趋势对该区应对全球气候变化制定适应性策略有重要意义。论文基于CRU 1901—2014年逐月气候数据集, 利用Delta空间降尺度方法对该数据集在黄土高原地区进行降尺度处理并评价, 最后采用距平、Mann-Kendall趋势检验和Sen's斜率估计方法分析该区历史时期气候变化的时空分布特征。结果表明: 1) 使用Delta法将分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 的月降水量和月均温数据降尺度到分辨率为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 的网格上是可行的, 其中线性插值法最适合该区降尺度过程。2) 1901—2014年该区年降水量年际变化趋势不显著, 但年均温以 $0.1 \text{ }^{\circ}\text{C}/10 \text{ a}$ 的速率显著上升; 与气候平均值相比, 20世纪60年代为相对湿冷期, 80年代以后为相对干暖期; 年降水量在该区西部地区(面积占3.05%)以 $0.24 \text{ mm}/10 \text{ a} \sim 3.52 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 的速率显著增加, 年均温在西部以外地区(面积占91.30%)以 $0.02 \text{ }^{\circ}\text{C}/10 \text{ a} \sim 0.17 \text{ }^{\circ}\text{C}/10 \text{ a}$ 的速率由西南向东北显著上升。3) 1981—2010年黄土高原西部地区(面积占92.02%)相比气候平均值变干变暖, 西部以外地区(面积占7.98%)变湿变暖; 年降水量只在民和及其以南极少数地区(面积占0.05%)以 $17.25 \text{ mm}/10 \text{ a} \sim 27.93 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 的速率显著增加, 年均温在西部以外地区(面积占87.61%)以 $0.23 \text{ }^{\circ}\text{C}/10 \text{ a} \sim 0.71 \text{ }^{\circ}\text{C}/10 \text{ a}$ 的速率显著上升。上述研究结果可为该区在制定应对全球气候变化策略时提供科学依据。

关键词: 气候变化; Delta空间降尺度方法; Mann-Kendall趋势检验; Sen's斜率估计; 黄土高原

中图分类号: P467

文献标志码: A

文章编号: 1000-3037(2018)04-0621-13

IPCC第五次报告指出, 过去30 a中每10 a地表温度的增暖幅度高于1850年以来的任何一个10 a, 全球几乎所有地区都出现了不同程度的升温变暖现象^[1]。在此背景下, 我国的降水和气温在最近50 a内发生了显著变化^[2-3]。这些变化会引起旱涝灾害频次和强度的增加^[4]、荒漠化趋势的增强^[5]、森林分布的北移高扩^[6]、物候期的改变等^[7]。然而, 降水和气温存在着很强的时空异质性, 继而引起的环境响应也有所不同^[8-9]。因此, 在了解全球气候要素变化特征的基础上, 在小地理尺度上开展气候变化趋势研究是十分必要的。

收稿日期: 2017-03-09; 修订日期: 2017-11-28。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41601058); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2452017183); 公益性行业(气象)科研专项(重大专项)(GYHY201506001-3); 中国科学院西部之光项目(XAB2015B07)。[**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China, No. 41601058; Fundamental Research Funds for the Central Universities, No. 2452017183; China Special Fund for Meteorological Research in the Public Interest (Major Project), No. GYHY201506001-3; West Light Foundation of CAS, No. XAB2015B07.]

第一作者简介: 任婧宇(1992-), 女, 硕士研究生, 研究方向为流域管理。E-mail: jingyu_ren@163.com

***通信作者简介:** 陈云明(1967-), 男, 研究员, 博士, 研究方向为生态恢复与水文。E-mail: ymchen@ms.iswc.ac.cn

黄土高原位于中国中部偏北,地形复杂、水土流失严重,是气候敏感区,也是生态环境脆弱带。近54 a以来,该区气候总体呈暖干化趋势^[10],对该区的植被恢复与重建^[11]、水土资源变化^[12]以及农业生产^[13]有一定的影响。因此,为了应对全球气候变化带来的负面效应并便于制定合适的适应性与缓解性策略,有必要对该区气候在小地理尺度上的时空变化趋势进行详细的研究。

目前,按照数据来源,可将气候变化趋势研究分为基于气象观测资料和基于网格气候数据集的研究。前者是“以点代面”描述区域气候变化,这会忽略气候在小地理尺度上的变化特征;并且,中国的台站观测始于20世纪50年代,很难分析之前的气候变化趋势。后者是目前国内外气候变化研究较为常用且最可行的方案,能很好地模拟大尺度气候特性;但因其最高空间分辨率只有 0.5° (约55 km,比如CRU和气候模式数据),继而无法刻画地形地貌对区域气候的影响^[14]。当前,解决上述问题的方案是对网格气候数据集进行空间降尺度处理,获取长时间序列高空间分辨率的气候数据集。

气候数据空间降尺度方法主要有统计降尺度和动力降尺度。与统计降尺度相比,动力降尺度需要大量参数和较多计算资源驱动^[15],并且有时不能真实反映小地理尺度上的气候变化特征^[16-17]。常用的统计降尺度法有线性回归法和Delta法。线性回归法是在历史时期建立网格数据与站点观测数据之间的线性关系,并将这种关系应用到未来时期的网格数据^[18],可生成多种未来气候数据集,但仍在站点尺度。Delta法使用低空间分辨率的月气候数据和高空间分辨率的参考气候数据作为输入数据,与直接插值不同,该方法可引入地形地貌对气候的影响^[19]。因此,使用Delta法对网格气候数据进行降尺度可得到小地理尺度上精准的气候数据。

目前已有许多针对黄土高原气候变化趋势的研究,但大多基于气象站点资料、线性回归法或直接插值进行降尺度,研究该区气候变化规律,很难描述气候在小地理尺度上的详细变化。此外,多数研究仅对该区1961—2012年的气候变化趋势进行了分析^[9,20-21],时间跨度较短,不能反映气候的长期变化趋势;并且,在近30 a全球快速增温的背景下,缺乏该区近30 a年代际的气候变化趋势研究。鉴于此,本研究以长时间序列低空间分辨率的网格气候数据集为基础,采用Delta法进行空间降尺度处理获取黄土高原地区高空间分辨率的降水和温度数据集,并辅以距平、Mann-Kendall趋势检验和Sen's斜率估计等方法,对该区1901—2014和1981—2010年的气候变化、趋势特征及其空间分布进行分析,以为该区在制定应对全球气候变化策略时提供科学依据。

1 研究区概况、数据与方法

1.1 研究区概况

黄土高原位于中国中部偏北,东起太行山,西至乌鞘岭,南连秦岭,北抵长城,主要包括山西、陕西,以及甘肃、青海、宁夏、河南等省部分地区($100.8^\circ \sim 114.6^\circ \text{E}$, $33.7^\circ \sim 41.3^\circ \text{N}$,图1)。该区总面积约 $64.06 \times 10^4 \text{ km}^2$,其中水土流失面积 $24.63 \times 10^4 \text{ km}^2$ (截至2015年底)^[22],生态环境脆弱。该区主要受暖温带半干旱大陆性季风气候的影响,年均温约 $4 \sim 12^\circ \text{C}$,多年平均降水量为 $96 \sim 1\,466 \text{ mm}$,降水年际变化大,季节分配不均,从东南向西北降水量逐渐减少;该区横跨半湿润、干旱和半干旱区,植被依次以森林带、森林草原过渡带和草原带呈明显的地带性规律分布。主要植物有辽东栎(*Quercus wutaishansea* Mary)、油松(*Pinus tabulaiformis*)、杨树(*Populus*)、沙棘(*Hip-*

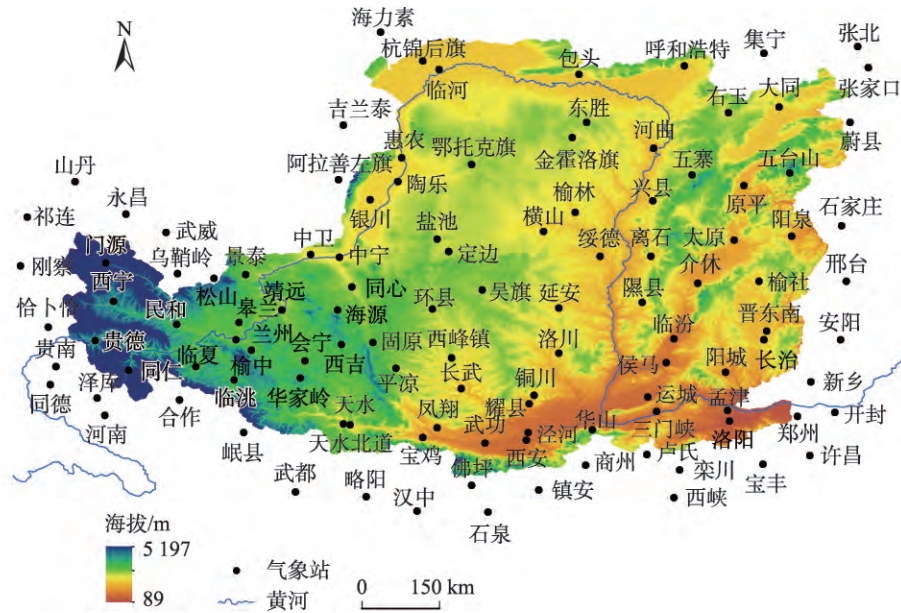


图1 黄土高原海拔及其内部和周边113个国家气象站点

Fig. 1 Digital elevation model of Loess Plateau region in China and 113 national weather stations distributed in and around the region

pophae rhamnoides) 和刺槐 (*Robinia pseudoacacia*) 等^[22]。

1.2 数据来源

Delta降尺度所需数据包括长时间序列低空间分辨率的气候数据集和高空间分辨率的参考气候数据集(包含地形、地貌等因素)。前者来自东英吉利大学气候研究中心提供的月总降水量和月平均气温数据集(CRU TS3.21, <http://www.cru.uea.ac.uk>); 该数据集的空间覆盖范围是全球所有陆地(不含南极), 空间分辨率为 0.5° , 时间长度是1901—2014年。后者来源于国家生态系统观测研究网络(CNERN, <http://www.cnern.org.cn>); 该数据资料是利用全国740个气象站点数据, 使用空间插值和地理信息系统生成的气象要素栅格数据; 数据为1961—2000年各月的均值, 空间分辨率是1 km。

此外, 本研究使用研究区内及周边113个气象站点数据对降尺度后的气候数据集进行评估、筛选。该站点数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>), 时间长度约为1954—2014年, 本研究从中选取连续性较好、缺测值较少的数据(2001—2014年)作为评价数据。

1.3 研究方法

1.3.1 Delta降尺度法

Delta法是统计降尺度法中的一种, 其主要计算流程如下^[23-25]。

$$\text{对降水进行降尺度: } \frac{x_{i,j}}{\bar{X}_{a,j}} = e_{i,j}; e_{i,j} \rightarrow 'i_{i,j}; 'i_{i,j} \times \bar{X}_{a,j} = y_{i,j} \quad (1)$$

$$\text{对温度进行降尺度: } x_{i,j} - \bar{X}_{a,j} = e_{i,j}; e_{i,j} \rightarrow 'i_{i,j}; 'i_{i,j} + \bar{X}_{a,j} = y_{i,j} \quad (2)$$

式中: i 为年时间尺度序列值, 本文取值为1901, 1902, ..., 2014; a 为选取的参考气候时间段, 本文取1961—2000年; j 为月时间尺度序列值; $x_{i,j}$ 为长时间序列低空间分辨率

的气候数据; $e_{i,j}$ 为低空间分辨率的异常值; $'i,j$ 为高空间分辨率的异常值; $\overline{X_{a,j}}$ 为长时间序列高空间分辨率的参考气候数据; $y_{i,j}$ 为降尺度数据。

为了更直观地说明Delta降尺度的计算流程,以本研究2014年8月黄土高原降水的降尺度结果为例进行说明(图2)。首先由图2(a)数据(即 $x_{2014,8}$)除以图2(b)数据(即 $\overline{X_{a,8}}$)得到图2(c)中0.5°分辨率的异常值(即 $e_{2014,8}$);再利用插值法将此异常值图层内插到空间分辨率为1 km×1 km的网格上,得到图2(d)中高空间分辨率的异常值(即 $'2014,8$);最后,将图2(d)中的异常值(即 $'2014,8$)乘以图2(e)数据(即 $\overline{X_{a,8}}$),即可得到图2(f)中2014年8月1 km分辨率的降水降尺度结果(即 $y_{2014,8}$)。

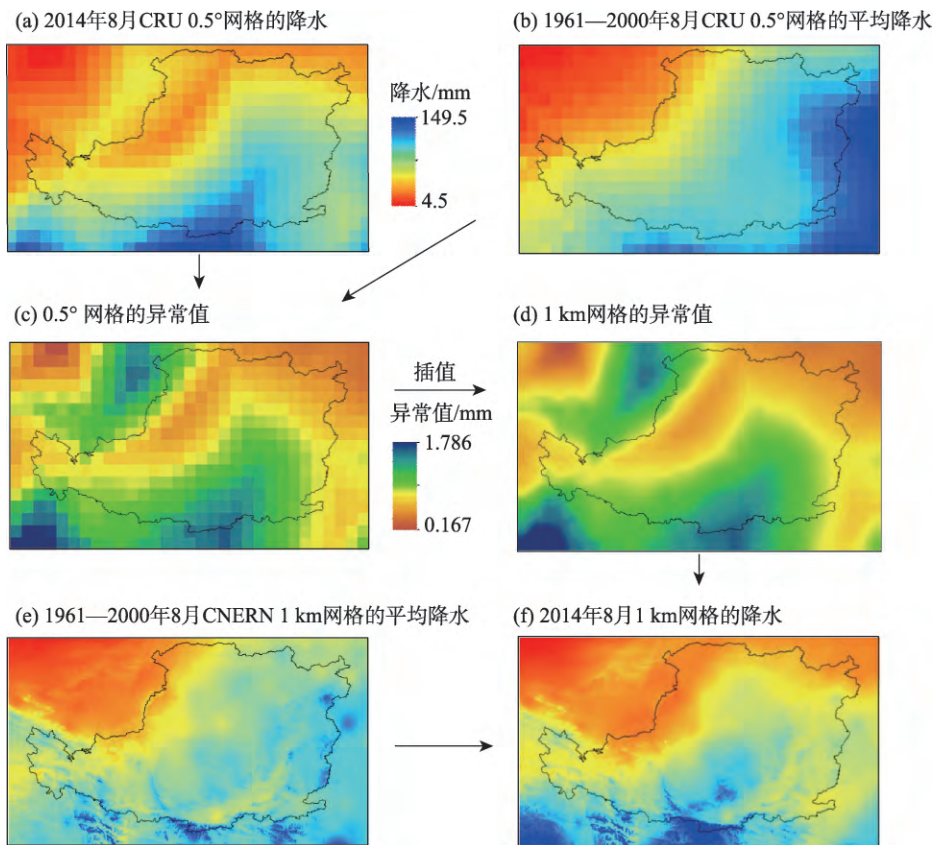


图2 空间降尺度过程示意图

Fig. 2 Schematic illustration of spatial downscaling process

在用Delta法进行降尺度的过程中,插值方法的使用会影响所获得降尺度数据的精确性,所以本研究使用了4种插值方法(三次样条插值法、双线性插值法、最近邻点插值法和双三次插值法)。通过对这4种插值法的降尺度结果与地面站点数据进行比较,选出最适研究区降尺度过程的插值法。

1.3.2 评估指标

本研究利用平均绝对误差(MAE)、均方根误差(RMSE)以及Nash-Sutcliffe效率(NSE)统计指标对研究区2001年1月—2014年12月降尺度结果进行评价和比较,指标

计算公式具体见表1。

平均绝对误差 (MAE) 与偏差相似, 但由于离差被绝对值化, 不会出现正负相抵消的情况, 因而能更好地反映模拟值误差的实际情况; 均方根误差 (RMSE) 能反映一个数据集的离散程度, 较低的RMSE表示模型具有一个较为精确的预测; Nash-Sutcliffe效率 (NSE) ^[19]用来定量描述模型模拟输出的准确性, 取值范围为 $-\infty \sim 1$, 当NSE越接近1时, 表明模型模拟数据与观测数据的匹配度越高。

1.3.3 变化趋势分析法

本研究采用距平法、Mann-Kendall 趋势检验法和 Sen's 斜率估计分析研究区气候变化趋势。

距平法反映某段时间内气候要素较气候平均值偏多或偏少, 本研究选取1961—1990年气候数据均值作为气候平均值; Mann-Kendall趋势检验法是用来评估气候、水文等要素时间序列趋势的非参数检验方法, 采用统计量Z检验时间序列变化趋势的显著性^[26-27], 本研究以统计量Z通过95%的置信水平 ($|Z| > 1.96$) 为趋势显著, $Z > 1.96$ 表明显著增加, $Z < -1.96$ 表明显著减少; Sen's斜率估计是一种非参数趋势斜率计算方法, 不受序列奇异性影响, 能很好地反映序列趋势的变化程度^[27]。

2 结果与分析

2.1 降水和均温降尺度结果评估

表2给出了4种插值法在113个气象站点上降尺度值与实测值的比较结果。对比4种插值法, 双线性插值法的MAE最小, 分别为14.247 mm和0.798 °C; 双线性插值法的RMSE最小, 分别为26.773 mm和1.071 °C; 对于月降水量, 双线性插值法的NSE最大, 为0.710, 对于月均温, 4种插值法的NSE均为0.990。由此可见, 降尺度过程中使用双线性插值法对月降水量和月均温进行处理的结果相比其他3种方法具有更高的精度。

回归分析表明, 双线性插值法下的降尺度值与观测值具有较好的线性关系, 降水和均温的决定系数分别为0.72和0.99 (图3)。因此, 本研究将使用双线性插值法进行Delta降尺度处理, 获取研究区1901—2014年1 km空间分辨率的月尺度降水和均温数据集。

表2 4种插值法降尺度值与实测值的比较

Table 2 Comparison of downscaled values of four interpolation methods and observed values

| 评估指标 | 双三次插值法 | | 双线性插值法 | | 最近邻点插值法 | | 三次样条插值法 | |
|------|--------|-------|--------|-------|---------|-------|---------|-------|
| | 月降水量 | 月均温/ | 月降水量 | 月均温 | 月降水量 | 月均温 | 月降水量 | 月均温 |
| MAE | 14.267 | 0.801 | 14.247 | 0.798 | 14.282 | 0.806 | 14.267 | 0.801 |
| RMSE | 26.830 | 1.075 | 26.773 | 1.071 | 26.814 | 1.085 | 26.831 | 1.075 |
| NSE | 0.709 | 0.990 | 0.710 | 0.990 | 0.709 | 0.990 | 0.709 | 0.990 |

注: 月降水量的MAE和RMSE的单位为mm; 月均温的MAE和RMSE的单位为°C; NSE无量纲。

表1 统计指标

Table 1 Statistical indicators

| 统计指标 | 计算公式 |
|------------------------|---|
| 平均绝对误差 (MAE) | $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i - O_i $ |
| 均方根误差 (RMSE) | $\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}}$ |
| Nash-Sutcliffe效率 (NSE) | $1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{j=1}^n (O_j - \bar{O})^2}$ |

注: 式中 P_i 和 O_i 分别是模拟值和观测值, n 是样本数。

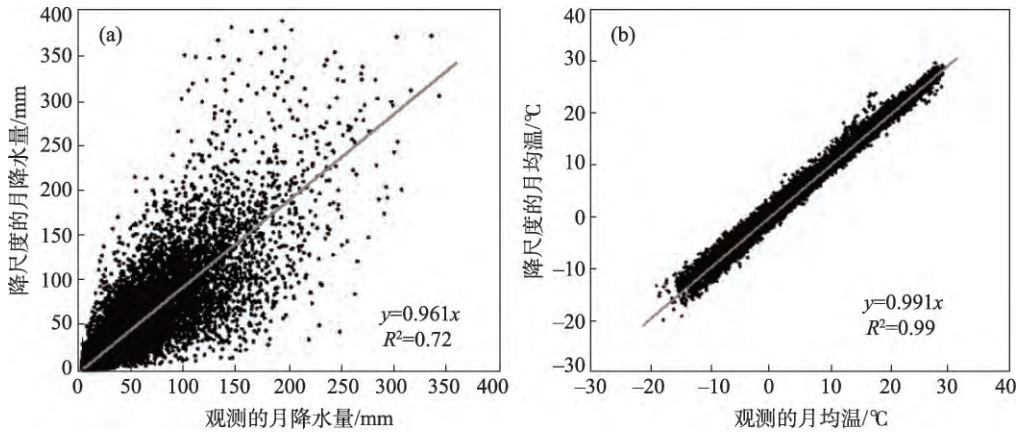


图3 观测值与降尺度值的散点图

Fig. 3 Comparisons of the observed and downscaled values of monthly precipitation and mean temperature from January, 2001 to December, 2014

2.2 黄土高原年降水量变化趋势分析

整个黄土高原平均年降水量距平在1901—2014年间剧烈波动(图4)。20世纪初期年降水变化幅度较平稳,自1916年开始变化幅度逐渐剧烈;1920—1950年是近114 a降水偏少的年代,1941年下降幅度最大,为38.61%;20世纪50—70年代初期变化幅度有所上升,尤其50年代后期开始剧烈上升,年降水距平在1964年达到最大值,为41.18%;70年代之后,变化幅度虽然呈上升、下降趋势交替出现,但有减少趋势,进入21世纪年降水变化趋于气候平均值。根据Mann-Kendall趋势检验法可知在95%的置信水平下,整个黄土高原平均年降水量在1901—2014年无显著变化趋势。

在研究区内的每个栅格上对1901—2014年的年降水量进行Mann-Kendall趋势检验和Sen's斜率估算,结果发现通过显著性检验的区域集中在黄土高原西部(图5中红框区域),这些区域呈上升趋势且上升速率有较大的差异,空间变异系数为26.60%(表3),占黄土高原面积的3.05%,其内年降水量以0.24 mm/10 a~3.52 mm/10 a的速率增加,平

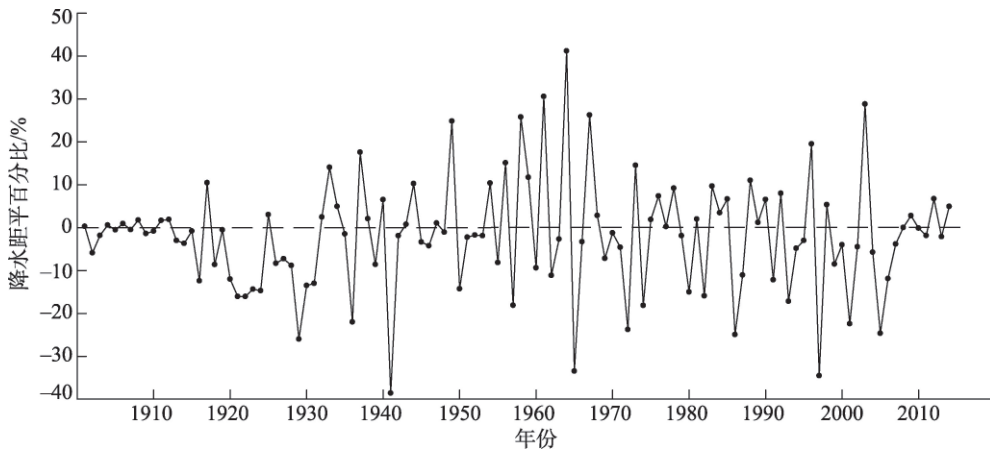


图4 黄土高原年降水距平百分比年际变化(1901—2014年)

Fig. 4 Change of the annual precipitation in the Loess Plateau during 1901—2014

均速率为1.76 mm/10 a。

近30 a (1981—2010年)黄土高原年降水量距平空间分布如图6(a)所示。与气候平均值相比,在除黄土高原西部的其他区域内[图6(a)红框区域]年降水量减少了0.3%~8.8%,面积约为92.02%。这30 a的年降水量趋势空间分布如图6(b)所示,通过显著性检验的区域集中在青海省的民和及其以南的极少部分地区,这些区域的年降水量呈上升趋势[图6(b)红框区域],并且上升速率有差异,空间变异系数为9.93% (表3),仅占黄土高原面积的0.05%,其内年降水量以17.25 mm/10 a~27.93 mm/10 a的速率增加,平均速率为21.67 mm/10 a。

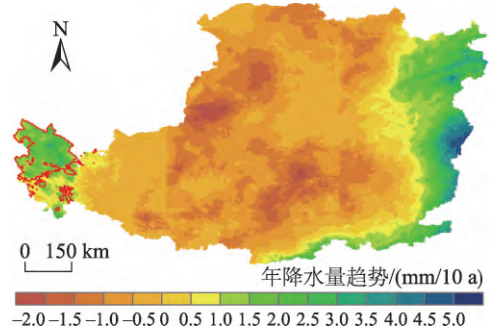


图5 黄土高原年降水量趋势的空间分布 (1901—2014年)

Fig. 5 Distribution of annual precipitation trend in the Loess Plateau during 1901—2014

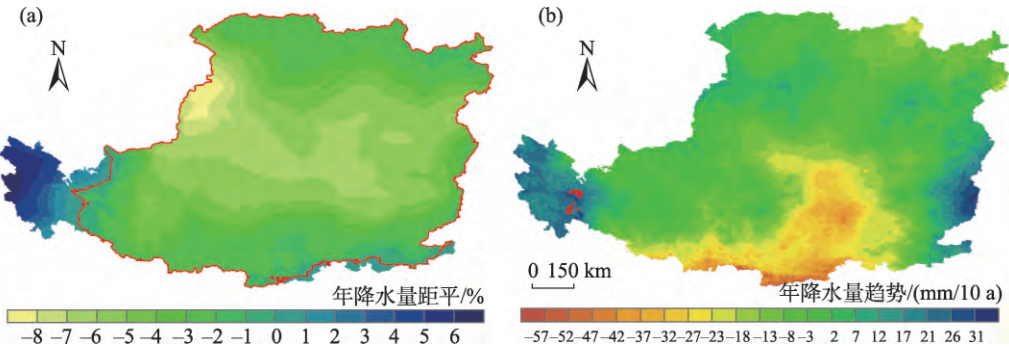


图6 黄土高原年降水量距平变化和趋势的空间分布 (1981—2010年)

Fig. 6 Distribution characteristics of annual anomalous percentage and trend of precipitation in the Loess Plateau during 1981—2010

2.3 黄土高原年均温变化趋势分析

整个黄土高原平均年均温距平在1901—2014年间波动较剧烈(图7)。20世纪初期至10年代是近114 a的气温偏冷期,在1918年下降幅度最大,比气候平均值低0.99℃;20年代距平开始呈逐渐上升的趋势,一直到50—70年代变化趋势有所下降,但下降幅度较小;80—90年代变化幅度开始上升,尤其是1985年以后,年均温距平变化基本均大于0,且在1998年达到最大值,为1.84℃;进入21世纪年均温剧烈增高,比气候平均值高0.67~1.62℃。根据Mann-Kendall趋势检验法可知,在95%的置信水平下,整个黄土高原平均年均温在1901—2014年呈显著上升趋势,上升速率为0.1℃/10 a。

在研究区内的每个栅格上对1901—2014年的年均温进行Mann-Kendall趋势检验和

表3 黄土高原年降水量变化特征

Table 3 Change characteristics of annual precipitation in the Loess Plateau during historical periods

| 指标 | 1901—2014年 | 1981—2010年 |
|---------------|------------|------------|
| 最小值/(mm/10 a) | 0.24 | 17.25 |
| 最大值/(mm/10 a) | 3.52 | 27.93 |
| 平均值/(mm/10 a) | 1.76 | 21.67 |
| 变异系数/% | 26.60 | 9.93 |
| 面积比例/% | 3.05 | 0.05 |

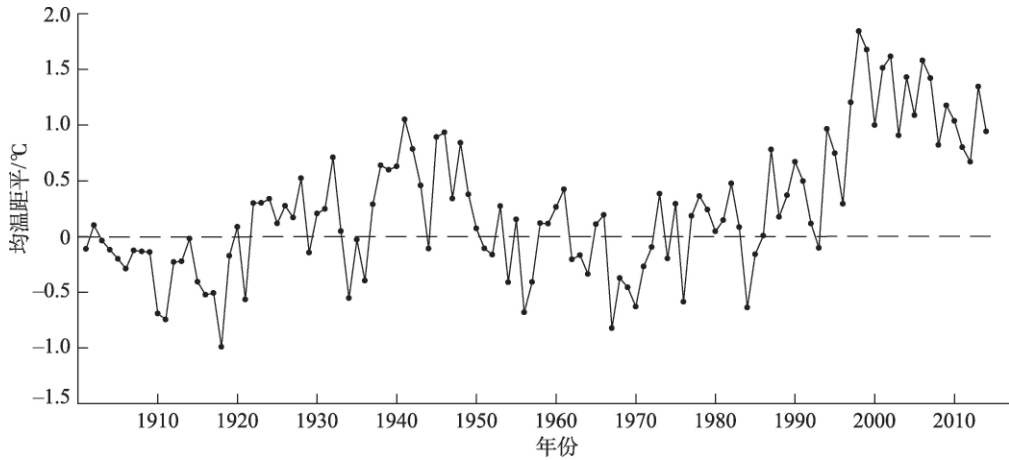


图7 黄土高原年均温距平变化 (1901—2014年)

Fig. 7 Change of the annual mean temperature in the Loess Plateau during 1901—2014

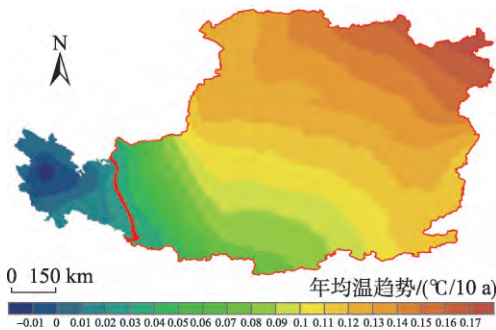


图8 黄土高原年均温趋势的空间分布 (1901—2014年)

Fig. 8 Distribution of annual mean temperature trend in the Loess Plateau during 1901—2014

Sen's斜率估算, 结果发现通过显著性检验的区域集中在黄土高原西部以外的地区 (图8中红框区域), 这些区域呈上升趋势且上升速率有较大的差异, 空间变异系数为26.83% (表4), 占黄土高原面积的91.30%, 其内年均温以0.02 °C/10 a~0.17 °C/10 a的速率上升, 且由西南向东北, 其上升速度逐渐变大, 平均速率为0.11 °C/10 a。

近30 a (1981—2010年) 黄土高原年均温距平空间分布如图9(a)所示。与气候平均值相比, 整个黄土高原区域内年均温上升了0.16~1.07 °C。这30 a的年均温趋势空间分布如图9(b)所示, 通过显著性检验的区域集中在除黄土高原西部以外的地区, 这些区域的年均温呈上升趋势 [图9(b)红框区域], 并且上升速率有较大的差异, 空间变异系数为

近30 a (1981—2010年) 黄土高原年均温距平空间分布如图9(a)所示。与气候平均值相比, 整个黄土高原区域内年均温上升了0.16~1.07 °C。这30 a的年均温趋势空间分布如图9(b)所示, 通过显著性检验的区域集中在除黄土高原西部以外的地区, 这些区域的年均温呈上升趋势 [图9(b)红框区域], 并且上升速率有较大的差异, 空间变异系数为

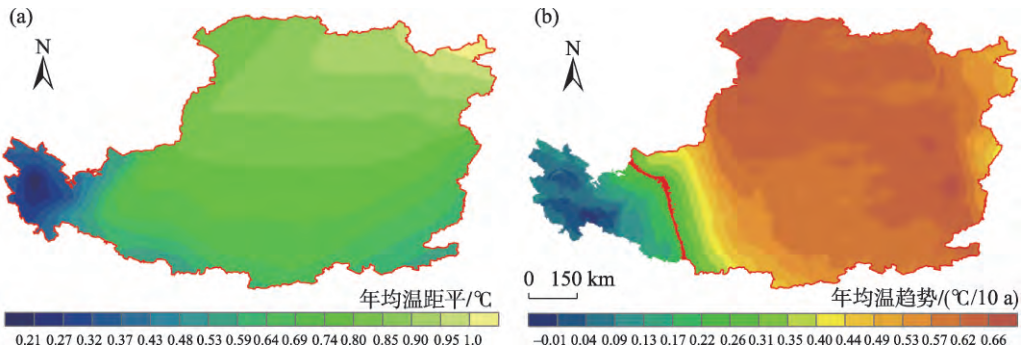


图9 黄土高原年均温距平变化和趋势的空间分布 (1981—2010年)

Fig. 9 Distribution of annual anomalous percentage and trend of temperature in the Loess Plateau during 1981—2010

13.76% (表4), 占黄土高原面积的87.61%, 其内年均温以 $0.23\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a} \sim 0.71\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 的速率上升, 平均速率为 $0.59\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。

3 讨论

近114 a黄土高原的年降水量无显著变化趋势, 而年均温显著升高, 增温速率高于世界平均水平^[28], 气候变暖变干。顾朝军等^[29]研究表明1961—2014年黄土高原地区年降水量未达显著性水平, 年均温上升趋势显著且20世纪90年代后普遍进入气温偏暖期。本研究也分析了黄土高原这54 a的气候变化趋势, 年降水量统计量 Z 为 -0.96 , 未通过显著性检验, 年均温统计量 Z 为 5.60 , 通过显著性检验且呈上升趋势, 由距平可知20世纪80年代后普遍进入气温偏暖期。这与顾朝军等^[29]研究结论基本一致, 温度升高说明黄土高原区域气候对全球气候变暖有显著响应。空间分布上李志等^[30]研究指出黄土高原1961—2009年年降水量只有青海西宁和华北地区通过了显著性检验, 其中仅西宁为上升趋势, 华北地区为下降趋势; 对于年均温48个站点中有47个通过了显著性检验且均为上升趋势, 基本覆盖了整个黄土高原地区。而本研究黄土高原年降水量在这期间通过显著性检验的区域只有青海的西宁、门源、贵德和陕西的延安、洛川, 其中西宁、门源、贵德地区为上升趋势, 延安、洛川为下降趋势; 对于年均温, 除了青海的西宁、贵德, 其余区域均通过了显著性检验且为上升趋势, 这与李志等^[30]研究结果不太一致。其原因可能是气候变化在空间上具有差异性, 降水和气温受区域大气条件、地形地貌、下垫面等因素的影响, 具有明显的区域性特征。李志等的研究使用了站点数据, 这种数据只能描述时间尺度上气候变化的特征, 无法精准地反映整个小地理尺度空间上气候变化的特征, 只有高空间分辨率的网格气候数据才可获取到小地理尺度空间上重要的气候变化信息。一些学者^[31-32]直接对气象站点数据进行空间插值(如克里金插值和反距离加权插值)以获取高空间分辨率的网格地图数据来描绘气候变化的时空特征, 但其依旧没有考虑到地形地貌特征对气候变化的影响。使用Delta法对网格气候数据集进行空间降尺度, 降尺度过程中采用了高空间分辨率的参考气候数据集, 其中包含地形效应, 得到的高空间分辨率网格地图数据包含了详细的地理信息, 比如精确的地理位置、面积信息。因此, 本研究获得的空间降尺度数据既包含了地形地貌对降水量和平均气温影响的因素, 也提供了地理位置、面积比例和其他统计指标等高精准的地理信息, 基于此分析黄土高原区域气候变化空间分布特征所得到的结果较为可信。

与其他使用Delta空间降尺度的研究相比^[33], 本研究降水量和均温降尺度结果的MAE分别在 $14.2 \sim 14.3\text{ mm}$ 和 $0.790 \sim 0.810\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间, 均获得了较低的MAE值, 说明在黄土高原地区使用Delta法将CRU气象数据降尺度到 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 的网格上是可行的。此外, 本研究降尺度过程中使用了4种插值法, 这在一定程度上降低了Delta法在插值处理过程所产生的误差, 使得到的降尺度结果更加合理、精准。其中, 双线性插值法是最适合研究区降水量和均温降尺度处理的插值方法, 该方法在黄土高原区域气候研究中具有较好的应用前景。Mosier等^[19]也使用Delta法对CRU降水和温度数据进行降尺度, 本文均温降尺

表4 黄土高原年均温变化特征

Table 4 Change characteristics of annual mean temperature in the Loess Plateau during historical periods

| 指标 | 1901—2014年 | 1981—2010年 |
|---------------------------------------|------------|------------|
| 最小值/ $(^{\circ}\text{C}/10\text{ a})$ | 0.02 | 0.23 |
| 最大值/ $(^{\circ}\text{C}/10\text{ a})$ | 0.17 | 0.71 |
| 平均值/ $(^{\circ}\text{C}/10\text{ a})$ | 0.11 | 0.59 |
| 变异系数/% | 26.83 | 13.76 |
| 面积比例/% | 91.30 | 87.61 |

度结果的NSE很高(均为0.990),但降水量降尺度结果的NSE与Mosier等的结果相比并不是很高,其俄勒冈州地区降尺度降水量的NSE基本均大于0.9,而本研究降尺度降水量的NSE最高只有0.710。原因在于Mosier等的Delta降尺度过程中,用于评价降尺度结果的评估数据同时也被用作Delta法降尺度所需输入的参考气候数据集,所以得到的降水量NSE很高。而本研究用于评估降尺度结果的数据是气象站点的观测数据,Delta法降尺度所需输入的参考气候数据集是CNERN栅格数据,虽然降水量NSE均没有大于0.9,但统计分析表明本研究降水量降尺度结果是可信的。

除了满足本研究的需求,还可以使用Delta法进行进一步降尺度,得到更高分辨率(如30 m×30 m)的气候数据,用于研究黄土高原典型流域的气候变化趋势,而且这些高分辨率的气候数据还可以作为驱动数据用于其他领域的研究(如水文模拟、植被演替模拟、作物生长模拟等)。

4 结论

1) 使用Delta法将网格分辨率为 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 的月降水量和月均温气象数据降尺度到分辨率为1 km×1 km的网格上是可行的,其中月均温降尺度结果整体比月降水量降尺度结果好。所用到的4种插值方法中,双线性插值法最适于黄土高原降尺度过程,所获数据可为该地区降水和温度趋势的分析提供较高精度的气候数据。

2) 近114 a黄土高原地区年降水量年际变化趋势未达显著性水平,1920—1950年为降水量偏少年代,1961—1969年为降水量偏多年代,达到显著趋势的区域集中在西部地区(面积占3.05%),以0.24 mm/10 a~3.52 mm/10 a的速率增加;年均温上升趋势显著,以0.1 °C/10 a的速率上升,1901—1919年为气温偏低期,20世纪80年代后普遍进入气温偏高期,达到显著趋势的区域集中在西部以外地区(面积占91.30%),其变暖速率由西南向东北逐渐变大。

3) 近30 a黄土高原西部以外的地区(面积占92.02%)年降水量相比气候平均值减少,而整个黄土高原年均温在升高;年降水量达到显著趋势的区域只在青海民和及其以南的极少数地区(面积占0.05%),以17.25 mm/10 a~27.93 mm/10 a的速率增加,年均温达到显著趋势的区域集中在西部以外地区(面积占87.61%),其内年均温以0.23 °C/10 a~0.71 °C/10 a的速率上升,平均速率为0.59 °C/10 a。

参考文献(References):

- [1] PACHAURI R K, ALLEN M R, BARROS V R, et al. Climate Change 2014: Synthesis report [M]// PACHAURI R K, MEYER L. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland, IPCC, 2014.
- [2] WANG C H, LI J, LI X L, et al. Analysis on quasi-periodic characteristics of precipitation in recent 50 years and trend in next 20 years in China [J]. Arid Zone Research, 2012, 29(1): 1-10.
- [3] 曲迎乐,高晓清,陈文,等.近50年来我国东、西部地面气温和降水变化对比的初步分析[J].高原气象,2008,27(3): 524-529. [QU Y L, GAO X Q, CHEN W, et al. Comparison of surface air temperatures and precipitation in eastern and western China during 1951-2003. Plateau Meteorology, 2008, 27(3): 524-529.]
- [4] 吴绍洪,罗勇,王浩,等.中国气候变化影响与适应:态势和展望[J].科学通报,2016,61(10): 1042-1054. [WU S H, LUO Y, WANG H, et al. Climate change impacts and adaptation in China: Current situation and future prospect. Chinese Science Bulletin, 2016, 61(10): 1042-1054.]

- [5] 慈龙骏, 杨晓晖, 陈仲新. 未来气候变化对中国荒漠化的潜在影响 [J]. 地学前缘, 2002, 9(2): 287-294. [CI L J, YANG X H, CHEN Z X. The potential impacts of climate change scenarios on desertification in China. Earth Science Frontiers, 2002, 9(2): 287-294.]
- [6] LIU S N, ZHOU T, WEI L Y, et al. The spatial distribution of forest carbon sinks and sources in China [J]. Science Bulletin, 2012, 57(14): 1699-1707.
- [7] INOUE D W. Effects of climate change on phenology, frost damage, and floral abundance of montane wildflowers [J]. Ecology, 2008, 89(2): 353-362.
- [8] 林纾, 王毅荣. 中国黄土高原地区降水时空演变 [J]. 中国沙漠, 2007, 27(3): 502-508. [LIN S, WANG Y R. Spatial-temporal evolution of precipitation in China Loess Plateau. Journal of Desert Research, 2007, 27(3): 502-508.]
- [9] 王阿如娜, 史兴民. 近52年黄土高原气温与热量资源时空变化 [J]. 江西农业学报, 2015, 27(10): 11-17. [WANG A R, SHI X M. Temporal and spatial variations of air temperature and thermal resources in Loess Plateau in last 52 years. Acta Agriculturae Jiangxi, 2015, 27(10): 11-17.]
- [10] 晏利斌. 1961—2014年黄土高原气温和降水变化趋势 [J]. 地球环境学报, 2015, 6(5): 276-282. [YAN L B. Characteristics of temperature and precipitation on the Loess Plateau from 1961 to 2014. Journal of Earth Environment, 2015, 6(5): 276-282.]
- [11] 周晓红, 赵景波. 黄土高原气候变化与植被恢复 [J]. 干旱区研究, 2005, 22(1): 116-119. [ZHOU X H, ZHAO J B. Climate change and vegetation restoration on the Loess Plateau. Arid Zone Research, 2005, 22(1): 116-119.]
- [12] 李志, 郑粉莉, 刘文兆. 1961—2007年黄土高原极端降水事件的时空变化分析 [J]. 自然资源学报, 2010, 25(2): 291-299. [LI Z, ZHENG F L, LIU W Z. Analyzing the spatial-temporal changes of extreme precipitation events in the Loess Plateau from 1961 to 2007. Journal of Natural Resources, 2010, 25(2): 291-299.]
- [13] 宋玉芝, 王连喜, 李剑萍. 气候变化对黄土高原马铃薯生产的影响 [J]. 安徽农业科学, 2009, 37(3): 1018-1019. [SONG Y Z, WANG L X, LI J P. Influence of climate change on potato production in the Loess Plateau. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2009, 37(3): 1018-1019.]
- [14] 范丽军. 统计降尺度方法的研究及其对中国未来区域气候情景的预估 [D]. 北京: 中国科学院大气物理研究所, 2006. [FAN L J. Statistical Downscaling of Local and Regional Climate Scenarios over China. Beijing: Institute of Atmospheric Physics, CAS, 2006.]
- [15] 陈丽娟, 李维京, 张培群, 等. 降尺度技术在月降水预报中的应用 [J]. 应用气象学报, 2003, 14(6): 648-655. [CHEN L J, LI W J, ZHANG P Q, et al. Application of a new downscaling model to monthly precipitation forecast. Journal of Applied Meteorological Science, 2003, 14(6): 648-655.]
- [16] DOSIO A, PANITZ H J, SCHUBERT-FRISIUS M, et al. Dynamical downscaling of CMIP5 global circulation models over CORDEX-Africa with COSMO-CLM: Evaluation over the present climate and analysis of the added value [J]. Climate Dynamics, 2014, 44(9/10): 2637-2661.
- [17] XU J W, GAO Y H, CHEN D L, et al. Evaluation of global climate models for downscaling applications centred over the Tibetan Plateau [J]. International Journal of Climatology, 2016, 37(2): 657-671.
- [18] TIMM O E, GIAMBELLUCA T W, DIAZ H F. Statistical downscaling of rainfall changes in Hawai 'i based on the CMIP5 global model projections [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2014, 120(1): 92-112.
- [19] MOSIER T M, HILL D F, SHARP K V. 30-Arcsecond monthly climate surfaces with global land coverage [J]. International Journal of Climatology, 2013, 34(7): 2175-2188.
- [20] 王利娜, 朱清科, 仝小林, 等. 黄土高原近50年降水量时空变化特征分析 [J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(3): 206-212. [WANG L N, ZHU Q K, TONG X L, et al. Characteristic analysis of temporal and spatial variation of precipitation during recent 50 years in Loess Plateau. Agricultural Research in the Arid Areas, 2016, 34(3): 206-212.]
- [21] 蔡新玲, 王繁强, 吴素良. 陕北黄土高原近42年气候变化分析 [J]. 气象科技, 2007, 35(1): 45-48. [CAI X L, WANG F Q, WU S L. Analysis of climate change in northern Shaanxi Plateau in recent 42 years. Meteorological Science and Technology, 2007, 35(1): 45-48.]
- [22] 杨建伟. 黄土高原常见树种的耗水规律及水分利用特征的研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2003. [YANG J W. Study on Water Consumption Properties and Water Use Efficiency of *Hippophae rhamnoides* L., *Pinus tabulaeformis*, *Robinia pseudoacacia* L., *Populus simonii* in Loess Plateau. Yangling: Northwest Sci-tech University of Agriculture and

- Forest, 2003.]
- [23] MAURER E P, WOOD A W, ADAM J C, et al. A long-term hydrologically based dataset of land surface fluxes and states for the conterminous United States [J]. *Journal of Climate*, 2002, 15(22): 3237-3251.
- [24] LIANG N, BRADLEY R S. Snow occurrence changes over the central and eastern United States under future warming scenarios [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 17073. doi: 10.1038/srep17073.
- [25] WOOD A W, MAURER E P, KUMAR A, et al. Long-range experimental hydrologic forecasting for the eastern United States [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2002, 107(D20): 4429. doi: 10.1029/2001JD000659.
- [26] 陈中平, 徐强. Mann-Kendall 检验法分析降水量时程变化特征 [J]. *科技通报*, 2016, 32(6): 47-50. [CHEN Z P, XU Q. Analysis of precipitation characteristics in Jinhua by Mann-Kendall test method. *Bulletin of Science and Technology*, 2016, 32(6): 47-50.]
- [27] 易湘生, 尹衍雨, 李国胜, 等. 青海三江源地区近 50 年来的气温变化 [J]. *地理学报*, 2011, 66(11): 1451-1465. [YI X S, YIN Y Y, LI G S, et al. Temperature variation in recent 50 years in the Three-River Headwaters Region of Qinghai Province. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(11): 1451-1465.]
- [28] 魏凤英, 曹鸿兴. 中国、北半球和全球的气温突变分析及其趋势预测研究 [J]. *大气科学*, 1995, 19(2): 140-148. [WEI F Y, CAO H X. Detection of abrupt changes and trend prediction of the air temperature in China, the northern hemisphere and the globe. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1995, 19(2): 140-148.]
- [29] 顾朝军, 穆兴民, 高鹏, 等. 1961—2014 年黄土高原地区降水和气温时间变化特征研究 [J]. *干旱区资源与环境*, 2017 (3): 136-143. [GU C J, MU X M, GAO P, et al. Characteristics of temporal variation in precipitation and temperature in the Loess Plateau from 1961 to 2014. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2017(3): 136-143.]
- [30] 李志, 赵西宁. 1961—2009 年黄土高原气象要素的时空变化分析 [J]. *自然资源学报*, 2013, 28(2): 287-299. [LI Z, ZHAO X N. Spatiotemporal analysis of meteorological elements on the Loess Plateau during 1961–2009. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(2): 287-299.]
- [31] ATTA-UR-RAHMAN, DAWOOD M. Spatio-statistical analysis of temperature fluctuation using Mann-Kendall and Sen's slope approach [J]. *Climate Dynamics*, 2017, 48: 783-797.
- [32] LI Z, LIU W Z, ZHENG F L. Spatiotemporal characteristics of reference evapotranspiration during 1961–2009 and its projected changes during 2011–2099 on the Loess Plateau of China [J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2012, s 154-155(6): 147-155.
- [33] LI Z, ZHENG F L, LIU W Z, et al. Spatial distribution and temporal trends of extreme temperature and precipitation events on the Loess Plateau of China during 1961–2007 [J]. *Quaternary International*, 2010, 226(1/2): 92-100.

Spatiotemporal Distribution Characteristics of Climate Change in the Loess Plateau from 1901 to 2014

REN Jing-yu^{1a}, PENG Shou-zhang^{1b,2}, CAO Yang^{1b,2}, HUO Xiao-ying^{1a}, CHEN Yun-ming^{1b,2}

(1. a. Institute of Soil and Water Conservation, b. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland

Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling 712100, China)

Abstract: Climate change has a significant influence on the environment and economy in the Loess Plateau (LP) region. Studying the spatio-temporal trends of climate change at the fine scale would be conducive to develop flexible adaptation and mitigation strategies against the climate change issues in this region. This study downscaled CRU climate data from 1901 to 2014 to spatial resolution of 1 km using the Delta downscaling method and evaluated the monthly climate change in this region. The spatio-temporal characteristics of the climate in this region were analyzed with the anomalies method, Mann-Kendall trend test, and Sen's slope estimation method. The results are as following: 1) The Delta downscaling method performs well in generating monthly precipitation and temperature data with 1 km spatial resolution. Among the four interpolation methods, the bilinear interpolation is the best method for the downscaling process. 2) During 1901–2014, the annual precipitation had no significant trend, while the annual average temperature presented a significant increasing trend with 0.1 °C/10 a. Compared with the average level of the climate during 1961–1990, the climate in 1960s was cold and wet, while it was dry and warm after 1980. The annual precipitation in the west of the LP region (accounting for 3.05% of the area) showed a significant increasing trend during 1901–2014, ranging from 0.24 mm/10 a to 3.52 mm/10 a. The annual average temperature in region other than the west of the LP region (accounting for 91.30% of the area) showed a significantly increasing trend ranging from 0.02 °C/10 a to 0.17 °C/10 a during 1901–2014, and the magnitudes of the trend increased from southwest to northeast. 3) During 1981–2010, the climate in the west of the LP region (accounting for 92.02% of the area) was drier and warmer than it was during 1961–1990, while in the rest region (accounting for 7.98% of the area) it became wetter and warmer. The annual precipitation in Minhe and region south to Minhe (accounting for 0.05% area) presented a significantly increasing trend during 1981–2010, ranging from 17.25 mm/10 a to 27.93 mm/10 a. The annual average temperature in region other than the west of the LP region (accounting for 87.61% of the area) had a significantly increasing trend during 1981–2010, ranging from 0.23 °C/10 a to 0.71 °C/10 a. These results could provide a scientific basis for developing strategies addressing global climate change issues in the LP region.

Key words: climate change; Delta downscaling method; Mann-Kendall trend test; Sen's slope estimation method; the Loess Plateau