

2000—2019 年黄土高原地区土壤保持时空变化及影响因素分析

孙应龙¹, 李娜², 黄斌斌³, 赵晓凤¹, 延昊¹, 曹云¹

(1.国家气象中心, 北京 100081; 2.辽宁省农业科学院, 沈阳 122000; 3.中国科学院生态环境研究中心, 北京 100083)

摘要:为揭示全球气候变化背景下黄土高原的生态建设成效,以土壤保持量为评估指标,应用美国修正通用土壤流失方程,评估了黄土高原土壤保持服务功能以及植被、气象等因素对其影响,分析了 2000 年以来植被和气候变化影响下黄土高原土壤保持量时空动态变化特征。结果表明:2000—2019 年黄土高原土壤保持量平均值为 109.5 t/hm²,并呈增加趋势,平均每年增加 2.0 t/hm²,空间分布黄土高原中部和东部土壤保持量增加较明显。2000 年以来黄土高原地区植被 NPP 呈增加趋势,年平均值为 330.5 gC/m²,且平均每年增加 7.2 gC/m²;2000 年以来植被覆盖度年平均值为 29.2%,且以平均每年 0.52% 的趋势增加。黄土高原地区 2000 年以来气温和降水量均显著增加,年平均降水量为 469.1 mm,且呈增加趋势,平均每年增加 3.1 mm,年平均气温为 10.2℃,平均每年增加 0.03℃。黄土高原生态恢复措施加强,加之区域“暖湿化”有利气候条件,促进了区域生态建设成效显现,成为黄土高原生态恢复、功能提升的重要因素之一。

关键词:黄土高原; 土壤保持; 植被覆盖度; 植被 NPP; 气象条件

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)06-0290-08

Analysis of Temporal and Spatial Changes and Influencing Factors of Soil Conservation in the Loess Plateau from 2000 to 2019

SUN Yinglong¹, LI Na², HUANG Binbin³, ZHAO Xiaofeng¹, YAN Hao¹, CAO Yun¹

(1.National Meteorological Center, Beijing 100081, China; 2.Liaoning Academy of Agricultural Sciences, Shenyang, Liaoning 110161, China; 3.Research Center for Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to reveal for revealing the ecological effects of the Loess Plateau under the background of global climate change, soil conservation was used as the evaluation indicator, and the United States modified general soil loss equation was used to evaluate the soil retention function of the Loess Plateau and the effect of vegetation and weather factors in the past 20 years. This study has important scientific value and practical significance. The results showed that the average amount of soil retention in the Loess Plateau during 2000—2019 was 109.5 t/hm²; soil retention increased at a rate of 2.0 t/hm² per year since 2000; the soil retention in the central and eastern parts of the Loess Plateau had increased significantly; the vegetation NPP in the Loess Plateau had increased at a rate of about 7.2 gC/m² since 2000, with an annual average of 330.5 gC/m²; the annual average of vegetation coverage in the Loess Plateau was 29.2% during the year 2000—2019, and the annual average rate is 29.2% with 0.52% increases per year. The clear trend of ‘warm and humidification’ in the Loess Plateau had shown since 2000, and both temperature and precipitation had increased significantly. The average annual precipitation had been 469.1 mm, with increased trend of 3.1 mm per year, an average annual temperature of 10.2℃ with an increased trend of 0.03℃ since 2000. The ecological recovery measures have enhanced in the Loess Plateau, and the better climate conditions have resulted from the effect of ecological construction, which is the main factor of ecological restoration.

收稿日期:2021-09-22

修回日期:2021-10-18

资助项目:国家重点研发计划(2019YFC1510204);国家气象中心预报员专项(Y202116)

第一作者:孙应龙(1988—),女,黑龙江哈尔滨人,博士,高级工程师,主要从事生态气象监测与评估研究。E-mail:sunyinglong.007@163.com

通信作者:曹云(1977—),男,内蒙古包头人,博士,高级工程师,主要从事生态服务功能评估及其生态气候影响研究。E-mail:caoyuncy@sohu.com

Keywords: Loess Plateau; soil conservation; vegetation coverage; NPP; meteorological conditions

土壤侵蚀和水土流失是当今世界各国的主要环境问题,它严重威胁着人类的生存和发展,它不但破坏了生态环境平衡,还能加剧干旱、洪涝等气象灾害的发生。黄土高原是世界上最大的黄土堆积区,跨山西省、陕西省北部、甘肃省、青海省、宁夏回族自治区及河南省等省区。黄土高原大多数区域存在着严重的土壤侵蚀问题,是世界上水土流失最为严重的区域之一^[1],同时,黄土高原又是中华民族的重要发祥地,在古代很长的时间,植被覆盖度高、生态环境优越^[2]。但由于人类长期的滥垦滥伐、不合理利用土地等行为造成黄土高原自然森林和草原植被遭到了严重破坏,陕西北部、甘肃等地出现了严重的土壤流失、沙化严重等问题^[3]。因此,黄土高原的水土流失治理受到了广泛关注,其独特的地理环境条件和有限的水资源使得该区的林草植被建设以草地植被为主,尤其 2000 年以来国家采取了一系列退耕还林、坡耕地治理等生态工程治理措施^[4],水土流失治理成效显著,植被覆盖度增加,生态环境得到改善^[5]。草地植被在控制土壤水蚀方面发挥重要作用^[6],在水土流失严重的黄土高原地区,增加植被的覆盖度具有很好的水土保持作用^[7],在黄土高原北部的风沙区,水利与风力这两种外力的存在是造成土壤侵蚀的主要原因,在全球气候变化的大背景下,过去 30 年间,黄土高原的变化特点以“暖湿化”为主,气温、降水等与土壤侵蚀有关的变化因素都经历了一系列的变化,导致黄土高原土壤侵蚀环境在过去的几十年中发生了显著变化^[8]。

本研究以黄土高原地区为研究区域,应用美国通用水土流失方程,研究 2000 年以来土壤保持量时空变化特征,分析区域植被净初级生产力、植被覆盖度时空变化,以及气象条件变化对土壤保持的影响。以期为黄土高原地区退耕还林和水土流失治理提供技术与理论支持,为客观评价黄土高原生态效益提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 土壤保持量计算方法

土壤保持功能可用土壤保持量大小表示,即考虑地表覆盖因子情况下的实际土壤侵蚀量,与潜在土壤侵蚀量的差,即为土壤保持量。土壤侵蚀量采用通用土壤流失方程 USLE 计算,主要考虑了降雨、土壤、地形和植被覆盖对土壤侵蚀的影响。因此。计算公式如下:

$$SC = R \cdot K \cdot LS(1 - C) \cdot P$$

式中:SC 为土壤保持量 $[(t/(hm^2 \cdot a))]$;R 为降雨侵

蚀力因子 $[(MJ \cdot mm)/(hm^2 \cdot h \cdot a)]$;K 为土壤可蚀性因子 $[(t \cdot hm^2 \cdot h)/(hm^2 \cdot MJ \cdot mm)]$;LS 为坡长坡度因子(无量纲);C 为植被覆盖因子(无量纲);P 为土壤保持措施因子(无量纲)。

(1) 降雨侵蚀力因子(R)。降雨侵蚀力因子反映的是由降雨引起土壤潜在侵蚀能力的大小,是导致土壤侵蚀的首要因子。通常降雨侵蚀力难以直接测定,大多用降雨参数,如雨强、雨量等来估算降雨侵蚀力^[9-12]。

$$R = \sum_{k=1}^{24} \bar{R}_k$$

$$\bar{R}_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=0}^m (\alpha \cdot P_{i,j,k}^{1.7265})$$

式中: R_k 为第 k 个半月的降雨侵蚀力 $[(MJ \cdot mm)/(hm^2 \cdot h \cdot a)]$, k 为一年的 24 个半月,即 $k=1, 2, \dots, 24$; i 为所用降雨资料的年份,即 $i=1, 2, \dots, n$; j 为第 i 年第 k 个半月侵蚀性降雨日的天数,即 $j=0, 1, 2, \dots, m$; $P_{i,j,k}$ 为第 i 年第 k 个半月第 j 个侵蚀性日降雨量(mm); α 为参数,暖季(5—9 月) $\alpha=0.3937$,冷季(10—4 月) $\alpha=0.3101$ 。

(2) 土壤可蚀性因子(K)。土壤可蚀性是评价土壤对侵蚀敏感程度的重要指标,也是进行土壤侵蚀预报的重要参数。可利用土壤颗粒组成和土壤有机碳资料来计算 K ^[13-14]。

$$K = \left\{ 0.2 + 0.3 \exp \left[-0.0256 \text{SAN} \left(1 - \frac{\text{SIL}}{1.00} \right) \right] \right\}$$

$$\left(\frac{\text{SIL}}{\text{CLA} + \text{SIL}} \right)^{0.3} \left[1 - \frac{0.25C}{C + \exp(3.72 - 2.95C)} \right]$$

$$\left[1 - \frac{0.7 \text{SN}_1}{\text{SN}_1 + \exp(-5.51 + 22.9 \text{SN}_1)} \right]$$

$$\text{SN}_1 = 1 - \frac{\text{SAN}}{100}$$

式中:SAN 为土壤砂粒含量(%);CLA 为土壤粉粒含量(%);SIL 为土壤黏粒含量(%);C 为土壤有机碳含量

(3) 坡长坡度因子(LS)。坡长坡度因子也称地形因子,可以反映坡长、坡度等地形地貌特征对土壤侵蚀的作用,可通过数字高程模型来估算^[15]。

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.13} \right)^m$$

$$m = \beta / (1 + \beta)$$

$$\beta = (\sin \theta / 0.089) / [3.0(\sin \theta)^{0.8} + 0.56]$$

$$S = \begin{cases} 10.8 \sin \theta + 0.03 & \theta < 5.14^\circ \\ 16.8 \sin \theta - 0.5 & 5.14^\circ \leq \theta < 10.20^\circ \\ 21.91 \sin \theta - 0.96 & 10.20^\circ \leq \theta < 28.81^\circ \\ 9.5988 & \theta \geq 28.81^\circ \end{cases}$$

式中: L 为坡长因子; S 为坡度因子; m 为坡长指数; θ 为坡度($^{\circ}$); λ 为坡长(m)。

(4) 植被覆盖和管理因子(C)。植被覆盖和管理因子 C 是指有植被覆盖或田间管理状态的土壤侵蚀量与同等条件下裸地土壤侵蚀量的比值,介于 0~1 之间。反映了生态系统对土壤侵蚀的影响,是控制土壤侵蚀的积极因素。 C 值越大,说明植被覆盖越差,保土措施作用越弱; C 值越小,说明植被覆盖越好,保土措施作用越强。可通过文献资料查阅,以及通过植被覆盖度与 C 值之间良好的相关性来进行估算 $C^{[16]}$ 。

(5) 水土保持措施因子(P)。水土保持措施因子 P 是指采取了水土保持措施下土壤侵蚀量与未采取保持措施下土壤侵蚀量的比值,反映的是水土保持措施对于土壤侵蚀的抑制作用。通常的侵蚀控制措施有等高耕作、修梯田等 $^{[9]}$ 。

1.2 植被 NPP 和覆盖度计算方法

本研究中植被数据来自 MODIS 系列卫星数据(网址为 <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/>)。MODIS-NDVI 数据,为 NASA 提供的 MOD13A3 级植被指数产品,空间分辨率达到 1 km,时间范围为 2000—2019 年逐月。

本研究中植被净初级生产力的计算基于陆地生态系统碳通量 TEC 模型,利用太阳光合有效辐射、植被吸收光合有效辐射的比例、实际光能利用率等数据,估算植被 NPP 数据,主要公式如下:

$$NPP=GPP-R_g-R_m$$

式中: NPP , GPP , R_g 和 R_m 分别表示植被净初级生产力、总初级生产力、生长和维持呼吸消耗量 GPP 具体计算方法参考延昊等文献 $^{[17-18]}$; R_g 和 R_m 具体计算方法参考 Zhao 和 Running 及 Goward 和 Dye 文献 $^{[19-20]}$ 。

目前,估算植被覆盖度的方法主要为遥感估算,即基于植被归一化植被指数,建立植被覆盖度的计算模型,然后估算植被覆盖度信息 $^{[21-23]}$ 。本文基于 NDVI 值估算了黄土高原的植被覆盖度,其表达式为:

$$C=(NDVI-NDVI_s)/(NDVI_v-NDVI_s)$$

式中: C 为月植被覆盖度(%); $NDVI$ 为月最大值合成归一化差值植被指数; $NDVI_s$ 为像元纯土壤时的植被指数; $NDVI_v$ 为像元全植被覆盖下的植被指数 $^{[24]}$ 。

1.3 气象数据计算和统计

本研究中气象数据来自国家气象中心,选取 2000 年以来黄土高原地区逐日气温、降水量等气象数据,形成 2000—2019 年逐年气象数据。黄土高原地区 2000 年以来降水主要呈现“东多西少”的分布(图 1),区域由西部到东部年降水量逐渐增加,区域的西部平均年降水量不足 400 mm,中部地区 400~500 mm,东部地区可达 500~600 mm,局地大于 600 mm。黄土高原地区 2000 年以来年平均气温呈现“南高北低”的分布态势(图 2),区域北部年平均气温为 10 $^{\circ}C$ 以下,而区域南部年平均气温为 11~14 $^{\circ}C$,普遍高于北部地区。

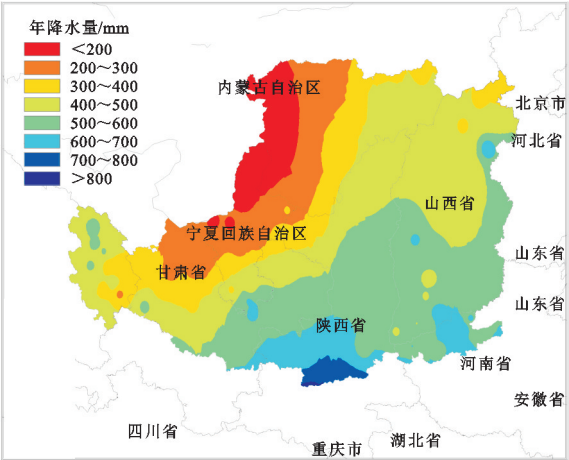


图 1 2000—2019 年黄土高原地区年降水量分布

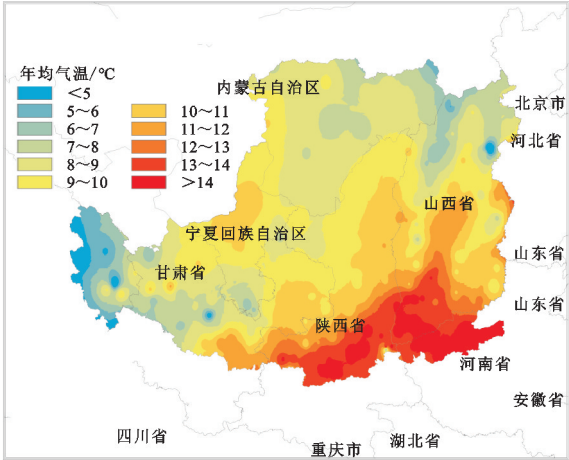


图 2 2000—2019 年黄土高原地区年平均气温分布

2 结果与分析

2.1 黄土高原土壤保持时空分布

2000—2019 年黄土高原地区土壤保持量结果见图 3—4。黄土高原地区 2000 年以来土壤保持量呈增加趋势,从空间分布图中可以看出,黄土高原有 95.0% 的区域土壤保持量呈增加趋势,陕西北部、山西大部、甘肃东部等地土壤保持量每 1 hm^2 增加 1.0 t

以上(图 3)。但截至 2020 年,黄土高原还有 5.0% 的区域土壤保持量呈下降趋势,其中内蒙古呼和浩特南部局部地区水土流失的状况还在持续,是未来水土流失要加强治理的重点。

另外,由图 4 可知,2000—2019 年黄土高原土壤保持量平均值为 109.5 t/hm^2 ,其中 2003 年和 2013 年由于区域气候条件良好,土壤保持量处于近 20 a 来高值,达 143.8 t/hm^2 ,163.6 t/hm^2 ;2015 年黄土高

原降水明显偏少,较 2014 年偏少 16%,植被长势偏差,引起高原土壤保持量出现下降。2000 年以来黄

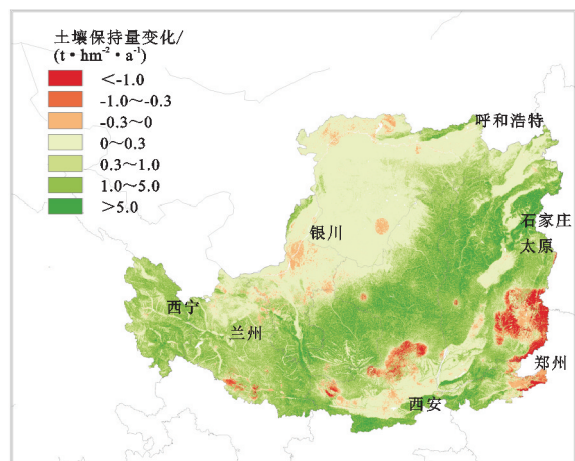


图 3 2000—2019 年黄土高原区域土壤保持量空间变化

2.2 黄土高原植被时空变化

自从 2000 年黄土高原地区实施退耕还林、退耕还草工程、天然林保护工程等生态保护工程以来^[1],黄土高原植被净初级生产力(NPP)以及植被覆盖度均有较明显的增加。本研究计算了 2000—2019 年黄土高原地区植被 NPP 的变化规律,结果见图 5,空间分布差异显著,地区西部植被 NPP 变化趋势率较小,平均每年增加不高于 2.5 gC/m²;地区中部和东部植

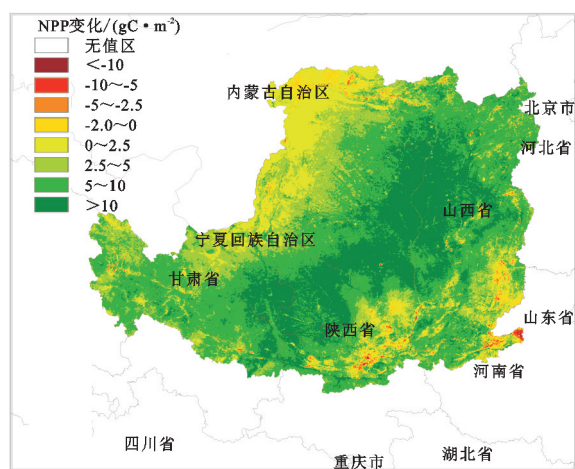


图 5 2000—2019 年黄土高原地区植被 NPP 变化趋势率

同样,本研究也统计了 2000 年以来黄土高原地区植被覆盖度的变化。由图 7 看出,2000 年以来黄土高原地区植被覆盖度呈现了显著增加趋势,有 97.7% 的区域植被覆盖度呈增加趋势,其中增加 0.25~0.75 个百分点的区域面积占 62.0%,尤其中部和东部大部地区植被覆盖度增加趋势显著,平均每年增加 0.5~0.75 个百分点;仅宁夏北部、陕西中部等地部分地区覆盖度呈下降的变化趋势。由图 8 可知,2000—2019 年黄土高原地区植被覆盖度年平均值为 29.2%,且以平均每年 0.52% 的趋势增加;2018 年和 2019 年区域植被覆盖度为近 20 年来的最大值,达 34.09%,2000 年覆盖

土高原土壤保持量波动较大,但总体呈增加趋势,平均每年增加 2.0 t/hm²。

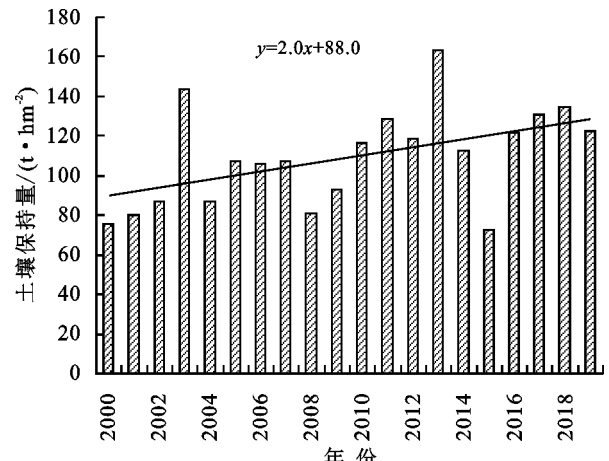


图 4 2000—2019 年黄土高原土壤保持量变化

被 NPP 增加较明显,平均每年增加 2.5~10 gC/m²,部分地区(如陕西省北部、山西省西部、宁夏南部等地)增加 10 gC/m² 以上,植被 NPP 改善非常明显。

2000—2019 年黄土高原地区逐年植被 NPP 变化见图 6,可见黄土高原地区 2000 年以来植被 NPP 呈增加趋势,年平均值为 330.5 gC/m²,且平均每年增加 7.2 gC/m²。2018 年地区植被 NPP 为近 20 年最大,为 427.2 gC/m²,2001 年植被 NPP 为近 20 年最小,为 232.0 gC/m²。

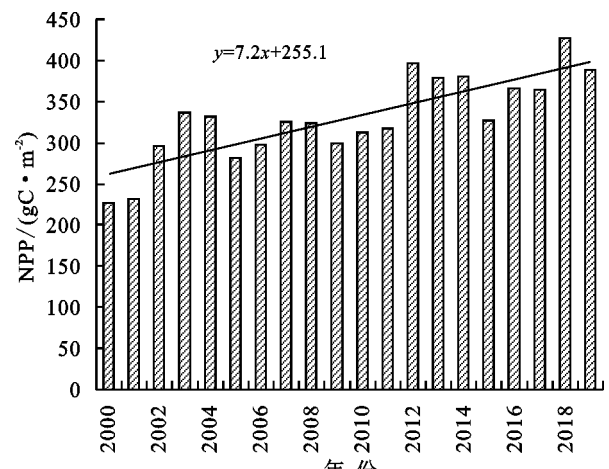


图 6 2000—2019 年黄土高原地区年植被 NPP 变化

度最低,为 22.7%,由 2000 年的 22.7% 增加到 2019 年的 34.08%。可见整个黄土高原地区植被覆盖度,自区域实施了生态工程整治以来改善明显,植被覆盖度和 NPP 的显著提高,为拦截黄土高原水土流失提供了有利保障。

2.3 黄土高原地区气象条件变化

黄土高原地区土壤保持量变化,不仅受植被生长的影响,还受区域气候条件变化的影响。2000 年以来,生态恢复和建设工程不断加强,加之良好的气象条件,黄土高原植被恢复显著,大部地区土壤保持功能呈增加趋势。

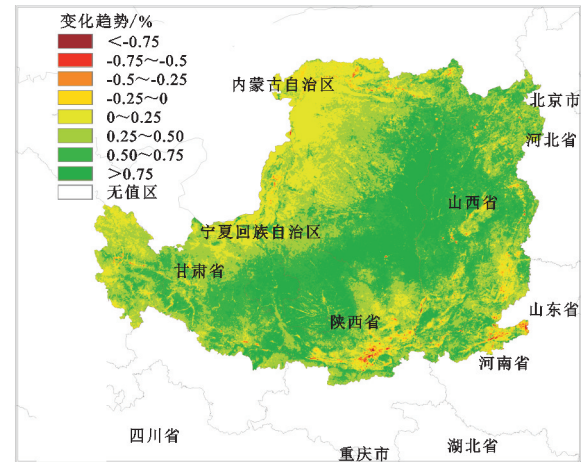


图 7 2000—2019 年黄土高原地区植被覆盖度变化趋势率

黄土高原地区 2000 年以来气候呈现明显的“暖湿化”趋势,气温和降水量均显著增加。由图 9,10 可以看出,整个黄土高原地区 2000 年以来年降水量呈增加趋势,平均每年增加 3.1 mm,尤其中部地区年降水量增加趋势显著,平均每年增加 3~8 mm,局地增加 8 mm 以上,仅区域西北部 and 东南部部分地区增速小于 3 mm。

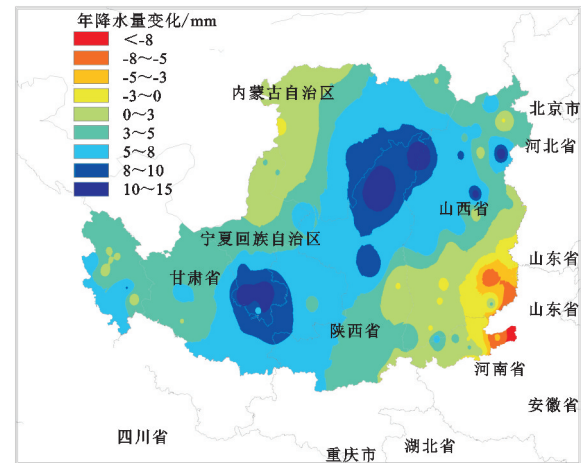


图 9 2000—2019 年黄土高原地区年降水量变化趋势

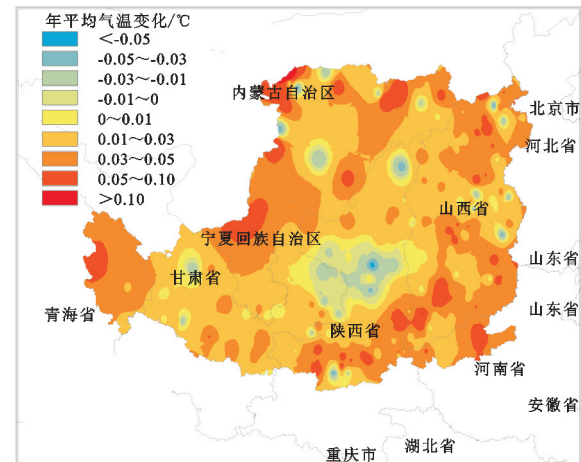


图 11 2000—2019 年黄土高原地区年平均气温变化趋势

2.4 影响因素分析

黄土高原地区土壤保持量的影响因素主要归结

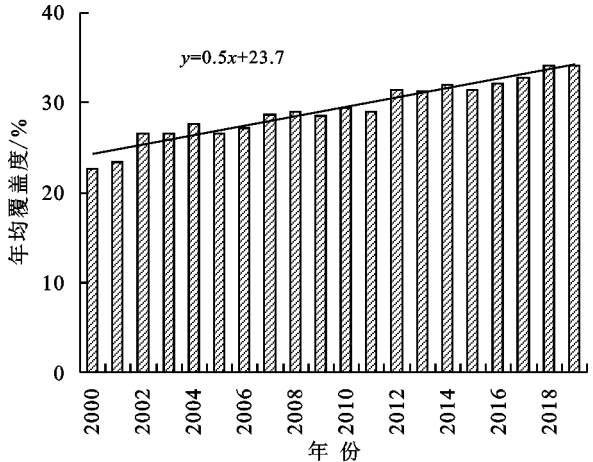


图 8 2000—2019 年黄土高原地区年植被覆盖度变化

黄土高原地区 2000 年以来年平均气温也呈现波动增加趋势(图 11),平均每年增加 0.03℃,其中,宁夏大部、山西部分地区气温增加较明显,平均增速每年 0.03~0.05℃。该结果与前人研究的 1960—2013 年黄土高原平均气温升温显著,升温率为 0.27℃/10 a,空间上平均气温和升温率由东南向西北增加的结果一致^[25]。

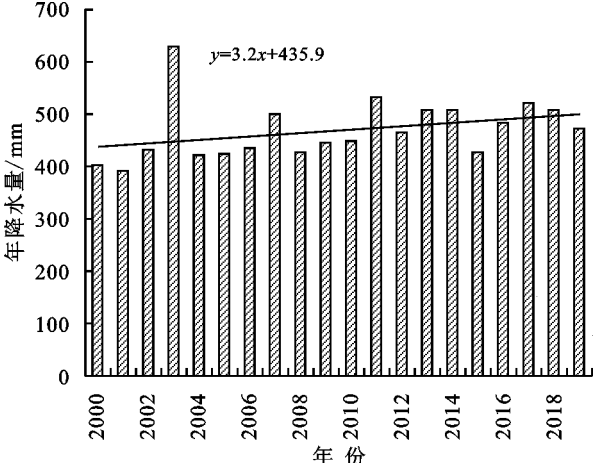


图 10 2000—2019 年黄土高原地区年降水量变化

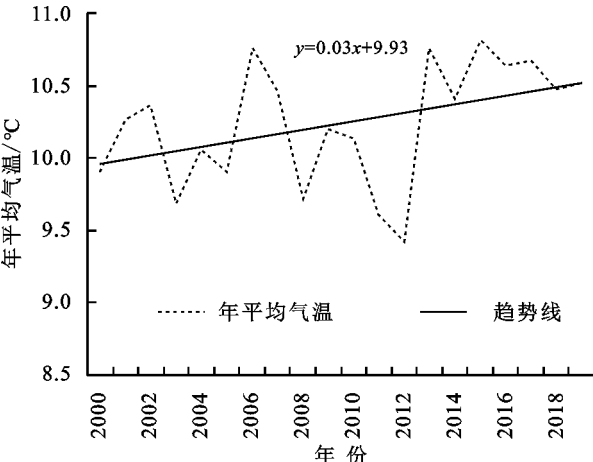


图 12 2000—2019 年黄土高原地区年平均气温变化为植被和降水侵蚀力^[14,26],本研究统计了 2000—2019 年黄土高原地区土壤保持量和降雨量、植被

NPP 之间的关系。2000 年以来黄土高原地区土壤保持量和年降水量的变化趋势相近(图 13),在 2012—2014 年两者变化趋势存在差别,其他年份两者的变化趋势均保持一致。为了深入分析土壤保持量和年降水量的关系,进行相关统计分析如图 14 所示,两者相关系数 r 达到 0.789,具有显著正相关性($p < 0.05$),表明在降水量增加情况下,黄土高原植被能显著减少水土

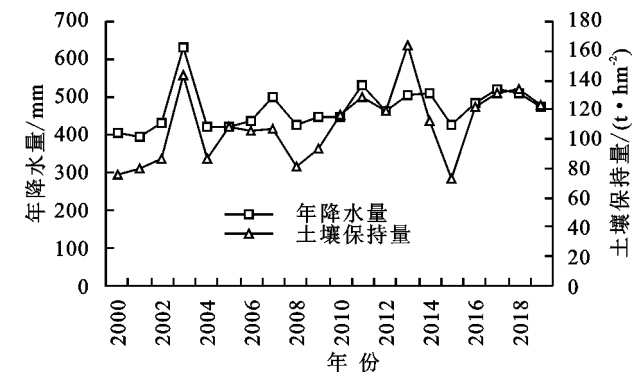


图 13 2000—2019 年黄土高原地区年降水量和土壤保持量变化

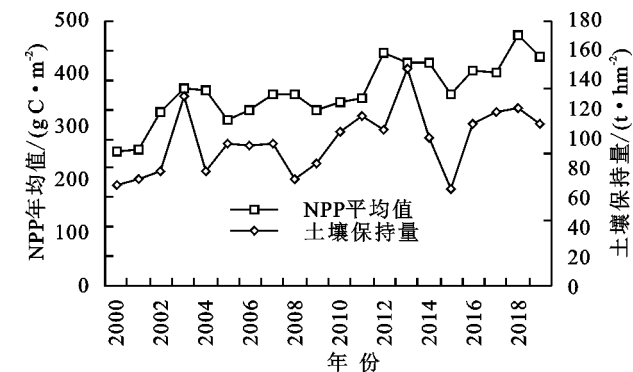


图 15 2000—2019 年黄土高原地区年平均 NPP 和土壤保持量变化

3 讨论

本研究主要针对 2000 年以来黄土高原地区土壤保持量的变化规律以及区域植被生态的变化展开,并分析了气象条件对上述变化的影响。针对黄土高原近些年来土壤保持量的变化,多数研究表明,不同生态系统 2000 年以后平均单位面积土壤保持量均有不同程度的增加,如农田、草地和林地分别增加了 14.6%,2.9%,7.4%,在空间分布上表现为沿东南向西北减少的变化趋势^[14],该结论与本研究结果保持一致。黄土高原土壤保持量表现为从东南向西北减少的变化趋势,中部和东部土壤保持量增加较明显^[14],但西部土壤保持量几乎保持不变,该结果与文献中所统计的空间分布较一致^[27-28]。土壤保持量增加较明显的区域集中在中部黄土丘陵沟壑区,而西北部沙地和沙漠区增加不显著^[14]。

土流失,土壤保持功能明显增强。另外,本研究统计了 2000—2019 年黄土高原地区土壤保持量和植被 NPP 的变化(图 15),可见植被 NPP 和土壤保持量的变化趋势大体相近。土壤保持量和植被 NPP 的相关性见图 16,两者之间相关系数 r 为 0.65,达到显著正相关性($p < 0.05$),表明植被长势改善,有利于提高区域的土壤保持功能。

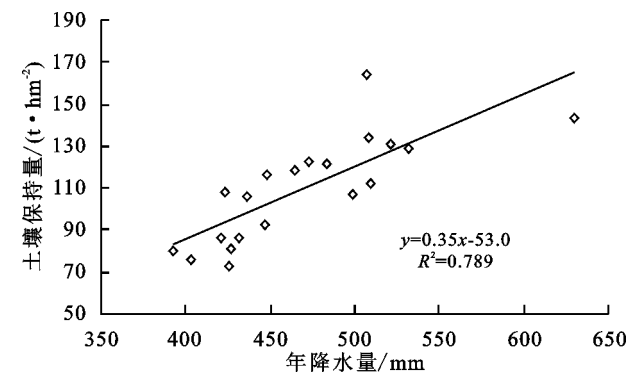


图 14 2000—2019 年黄土高原地区年降水量和土壤保持量相关关系

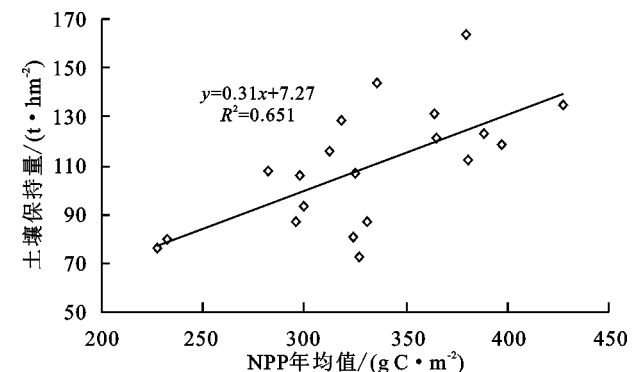


图 16 2000—2019 年黄土高原地区年平均 NPP 和土壤保持量相关关系

对土壤保持量影响较大的因素为植被和降水。在植被方面,2000 年以来黄土高原植被 NPP 和覆盖度均呈增加趋势,利于区域生态恢复。已有研究表明,黄土高原草地 NPP 自 2000 年起均有不同程度的增加,平均增幅为每年增加 3~4 gC/m²,且有 70%~80%面积的草地显著增加,增速较高的区域主要分布在黄土高原中部^[29],该结果与本研究的结论相一致。还有研究提出了黄土高原草地 NPP 在 2000—2015 年期间总体呈增加趋势,但增加速率不同,从 2000—2004 年的 15.23 gC/(m²·a)下降到 2005—2015 年的 3.58 gC/(m²·a)^[30]。同时,2000—2019 年黄土高原植被 NDVI 增速为 0.006 a⁻¹,超过 90%的区域植被覆盖呈增加趋势,且 NDVI 空间分布呈西北低东南高的状态^[31]。李宇恒等^[32]研究结果也显示出,黄土高原部分地区近 15 a 间植被覆盖度呈增加的趋势,由 2002 年的 42.7%增加至 2017 年的 47.7%,水土流失治理

卓有成效,研究区植被有所恢复。在空间分布上,黄土高原植被覆盖度由东南向西北逐渐递减,且植被覆盖度增长面积占总面积的35.1%,无显著变化的区域占55.6%^[33]。另外,关于降水对土壤保持量影响的研究表明,降雨量对区域土壤保持功能以及时空变化有着至关重要的作用,土壤降雨侵蚀力的结果与土壤保持量的时空分布呈现相同的趋势^[34]。晏清洪等试验了不同降雨强度对水土流失的影响,降雨量和强度对土壤保持和流失量均产生较大影响^[35]。

2000年以来黄土高原地区气温和降水均呈增加趋势,水分和热量充沛,气象条件总体有利于植被恢复生长、覆盖度提高,为区域植被生长提供了较好的气候条件,成为生态恢复改善的主要驱动力。同时,生态保护工程的实施也促使林地、草地等植被覆盖增加,为区域生态恢复提供了有利基础条件。植被的有效改善很大程度上抑制了区域水土流失的发生,在降水增多的情况下,黄土高原区域土壤保持量呈增加趋势,土壤保持生态服务功能增强。

4 结论

(1) 2000—2019年黄土高原土壤保持量平均值为109.5 t/hm²,2000年以来黄土高原土壤保持量波动较大,但总体呈增加趋势,平均每年增加2.0 t/hm²。

(2) 黄土高原地区2000年以来植被NPP呈增加趋势,年平均值为330.5 gC/m²,且平均每年增加7.2 gC/m²,植被NPP变化趋势区域空间分布差别较大,整个地区由西向东呈现逐渐增加的趋势。

(3) 黄土高原地区2000年以来植被覆盖度也呈现了显著增加趋势,年平均值为29.2%,且以平均每年0.52%的趋势增加。植被覆盖度变化趋势空间分布差异不大,大多数地区呈增加趋势,仅地区西部(内蒙古中南部、宁夏北部等地)植被覆盖度增加较少。

(4) 黄土高原地区2000年以来气候呈现明显的“暖湿化”趋势,气温和降水量均显著增加,气温平均每年增加0.03℃,降水量平均每年增加3.1 mm。

(5) 黄土高原土壤保持功能与降水量、植被NPP具有显著相关性,降水增加促进了区域植被生态改善,显著减少了水土流失,土壤保持功能增强。

参考文献:

- [1] Tian J L, Huang C H. Soil Erosion and Dryland Farming[M]. Boca Raton: Crc Press, 2000.
- [2] 宗善,杨磊,王国梁,等.黄土高原水土流失治理现状、问题及对策[J].生态学报,2019,39(20):7398-7409.
- [3] 相儒,金钊,张信宝,等.黄土高原近60年生态治理分析及未来发展建议[J].地球环境学报,2015,6(4):248-254.

- [4] 国彬,上官周平,姚文艺,等.黄土高原生态工程的生态成效[J].中国科学院院刊,2017,32(1):11-19.
- [5] 蕾,穆兴民,高鹏,等.黄土高原地区植被盖度对产流产沙的影响[J].水土保持研究,2019,26(6):133-138.
- [6] 魏宁,魏霞.气候变化对黄土高原土壤侵蚀影响的回顾与展望[J].中国人口资源与环境,2016,26(11):23-26.
- [7] 李志,文兆,张勋昌,等.未来气候变化对黄土高原黑河流域水资源的影响[J].生态学报,2009,29(7):3456-3464.
- [8] 任婧宇,彭守璋,曹扬,等.1901—2014年黄土高原区域气候变化时空分布特征[J].自然资源学报,2018,33(4):621-633.
- [9] 章文波,谢云,刘宝元.中国降雨侵蚀力空间变化特征[J].山地学报,2003,21(1):33-40.
- [10] Keo S,何洪鸣,赵宏飞,等.黄土高原50余年来降雨侵蚀力变化及其对土壤侵蚀的影响[J].水土保持研究,2018,25(2):1-7.
- [11] 周夏飞,马国霞,曹国志,等.基于USLE模型的2001—2015年江西省土壤侵蚀变化研究[J].水土保持通报,2018,38(1):8-11.
- [12] 任浩天,朱丽蓉,叶长青,等.基于USLE模型的松涛水库流域土壤侵蚀定量研究[J].热带作物学报,2018,39(10):2083-2092.
- [13] 王秋霞,张勇,丁树文,等.花岗岩崩岗区土壤可蚀性因子估算及其空间变化特征[J].中国水土保持科学,2016,14(4):1-8.
- [14] 赵辉,郝志敏,齐实,等.南方丘陵紫色页岩地区土壤可蚀性因子K值的确定[J].水土保持研究,2006,13(6):41-43.
- [15] 饶恩明,肖焱,欧阳志云,等.海南岛生态系统土壤保持功能空间特征及影响因素[J].生态学报,2013,33(3):746-755.
- [16] 孙文义,邵全琴,刘纪远.黄土高原不同生态系统水土保持服务功能评价[J].自然资源学报,2014,29(3):365-376.
- [17] Yan H, Wang S Q, Billesbach D, et al. Improved global simulations of gross primary product based on a new definition of water stress factor and a separate treatment of C₃ and C₄ plants[J]. Ecological Modelling, 2015,297:42-59.
- [18] Yan H, Wang S Q, Wang J B, et al. Multimodel analysis of climate impacts on plant photosynthesis in China during 2000-2015[J]. International Journal of Climatology, 2019,39(15):5539-5555.
- [19] Zhao M, Running S W. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009[J]. Science, 2010,329:940-943.
- [20] Goward S N, Dye D G. Evaluating North-American net primary productivity with satellite observations [J]. Advanced Space Research, 1987,7(11):165-174.
- [21] Gilles R R, Carlson T N. Thermal remote sensing of

surface soil water content with partial vegetation cover for incorporation into climate models[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1995,34(4):745-756.

[22] Choudhury B J, Ahmed N U, Idso S B. Relations between evaporation coefficients and vegetation indices studied by model simulations[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1994,50(1):1-17.

[23] 韩飞飞,闫俊杰,郭斌.阿勒泰地区植被覆盖度及 ET 对气温变化的响应[J].*干旱区地理*,2019,42(6):1436-1444.

[24] 陈妍,宋豫秦,王伟.基于随机森林回归的草场植被盖度反演模型研究:以新疆阿勒泰地区布尔津县为例[J].*生态学报*,2018,38(7):2384-2394.

[25] 张耀宗,张勃,刘艳艳,等.1960—2013 年黄土高原地区气温变化对 Hiatus 现象的响应[J].*水土保持研究*, 2020,27(4):213-219.

[26] 贾学斌,张超,朱永明.基于 USLE 模型的承德市水土流失敏感性时空演变分析[J].*林业与生态科学*,2020, 35(1):37-47.

[27] 宁佳,邵全琴.黄土高原土地利用及生态系统服务时空变化特征研究[J].*农业环境科学学报*,2020,39(4): 774-785.

[28] Wang J, Dong J, Liu J, et al. Comparison of gross primary productivity derived from IMMS NDVI3g, GIMMS, and MODIS in Southeast Asia [J]. *Remote Sensing*, 2014,6(3):2108-2133.

[29] 刘铮,杨金贵,马理辉,等.黄土高原草地净初级生产力时空趋势及其驱动因素[J].*应用生态学报*,2021,32 (1):113-122.

[30] 黑哲.黄土高原植被覆盖变化过程及评价方法差异性研究[D].北京:中国科学院大学,2014.

[31] 张文强,孙从建,李新功.晋西南黄土高原区植被覆盖度变化及其生态效应评估[J].*自然资源学报*,2019,34 (8):1748-1758.

[32] 李宇恒,江涛,郭庆华.黄土高原植被覆盖度时空变化与预测分析[J].*北京测绘*,2020,34(11):1564-1569.

[33] 贾振宇,高艳妮,刘学,等.2000—2015 年三江源区土壤保持功能及其价值时空变化分析[J].*环境生态学*, 2020,2(5):35-42.

[34] 晏清洪,原翠萍,雷廷武,等.降雨类型和水土保持对黄土区小流域水土流失的影响[J].*农业机械学报*,2014, 45(2):169-176.

[35] Hansen P M, Schjoerring J K. Reflectance measurement of canopy biomass and nitrogen status in wheat crops using normalized difference vegetation indices and partial least squares regression [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003,86(4):542-553.



(上接第 289 页)

[23] Chen X B, Yin L R, Fan Y L, et al. Temporal evolution characteristics of PM2.5 concentration based on continuous wavelet transform[J]. *Science of the Total Environment*, 2020,699:134244.

[24] 郝志新,刘可邦,张学珍,等.地球系统模式 CESM 模拟的 ENSO 变率与中国东部降水格局[J].*自然资源学报*,2016,31(12):1984-1994.

[25] 马柱国,邵丽娟.中国北方近百年干湿变化与太平洋年代际振荡的关系[J].*大气科学*,2006,30(3):464-474.

[26] 韩健夫,杨煜达.过去千年黄土高原干湿变化和极端干旱事件与太平洋年代际振荡[J].*中国历史地理论丛*, 2017,32(2):5-12.

[27] 铜川市地方志编纂委员会.铜川市志[M].西安:陕西师范大学出版社,1997.

[28] Zheng J Y, Wang W C, Ge Q S, et al. Precipitation variability and extreme events in eastern China during the past 1 500 years[J]. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2006,17(3):579-592.

[29] 郑景云,文彦君,方修琦.过去 2000 年黄河中下游气候与土地覆被变化的若干特征[J].*资源科学*,2020,42 (1):3-19.

[30] 李兆元,李莉,全小伟.西安地区(380—1983 年)旱涝气候变化[J].*地理研究*,1988,7(4):64-69.

[31] 吴宏岐,党安荣.隋唐时期气候冷暖特征与气候波动[J].*第四纪研究*,1998(1):31-38.

[32] 费杰,侯甬坚,刘晓东,等.基于黄土高原南部地区历史文献记录的唐代气候冷暖波动特征研究[J].*中国历史地理论丛*,2001,16(4):75-82,129.

[33] Zhang H L, Zhang Q, Yue P, et al. Aridity over a semiarid zone in northern China and responses to the East Asian summer monsoon [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016,121(23):13901-13918.

[34] 刘欢,潘威.黄土高原地区 1766—1950 年雨季开始时间及其对夏季风的响应[J].*地球环境学报*,2014,5(6):378-384.

[35] Zhang P Z, Cheng H, Edwards R L, et al. A test of climate, sun, and culture relationships from an 1 810-year Chinese cave record [J]. *Science*, 2008, 322 (5903):940-942.