

2001—2100 年黄土高原植被变化的土壤保持功能时空演变

苏艳丽¹, 陈笑蝶¹, 刘思余¹, 刘 力², 彭守璋¹

(1.西北农林科技大学资源环境学院,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.浙江树人学院,杭州 310015)

摘要: 基于 LPJ-GUESS 模型模拟分析 2001—2100 年黄土高原植被变化的土壤保持功能的时空演变及变化趋势,以期为该区制定适应气候变化的植被管理与侵蚀防治策略提供依据。结果表明:(1)2001—2100 年黄土高原的土壤保持功能整体呈现“东南高、西北低”的分布特征。(2)2001—2020 年黄土高原西部高海拔地区、东部五台山地区及西北部地区的土壤保持功能显著上升,SSP119 情景下西部祁连山脉地区显著上升,中部部分地区显著下降,SSP585 情景下北部大部分地区显著上升。(3)2001—2020 年黄土高原中部地区的土壤保持功能显著突变,SSP119 情景下中南部及西部地区显著突变,SSP585 情景下除南部以外的大部分地区显著突变。西部高海拔地区植被所带来的土壤保持功能下降,应该加强这部分地区的植被管理,比如科学种植适宜的植被。动态植被模型可以刻画气候变化下植被结构的动态变化,使土壤保持功能模拟得更精确,可采取类似 LPJ-GUESS 这样的动态植被模型在全球其他地区开展相应的研究。

关键词: 黄土高原; 土壤保持功能; LPJ-GUESS 模型; 趋势; 突变

中图分类号: F062.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2022)06-0055-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.06.008

Spatiotemporal Evolution of Soil Conservation Function of Vegetation
Change on the Loess Plateau from 2001 to 2100

SU Yanli¹, CHEN Xiaodie¹, LIU Siyu¹, LIU li², PENG Shouzhang¹

(1.School of Resources and Environment, Northwest A&F University, State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Agriculture on the Loess Plateau, Yangling, Shaanxi 712100; 2.Zhejiang Shuren University, Hangzhou 310015)

Abstract: Based on the LPJ-GUESS model, the temporal and spatial evolution and trend of soil conservation function of vegetation change on the Loess Plateau during 2001—2100 were simulated and analyzed, in order to provide a basis for the development of vegetation management and erosion control strategies adapted to climate change on the loess Plateau. The results showed that: (1) From 2001 to 2100, the soil conservation function of the Loess Plateau showed the distribution characteristics of “high in the southeast and low in the northwest”. (2) From 2001 to 2020, the soil conservation function of the western high-altitude area, and that of the eastern Wutai Mountain Area and the northwest area of the Loess Plateau increased significantly. Under the SSP119 scenario, soil conservation function of the Qilian Mountains of the western area increased significantly, while that of a small part of the central region decreased significantly. Under the SSP585 scenario, the soil conservation function of most areas in the north part increased significantly. (3) From 2001 to 2020, the soil conservation function of the central part of the Loess Plateau had a significant mutation. It had a significant mutation in central south and western China under the SSP119 scenario. Under the SSP585 scenario, the soil conservation function of most areas except the south area had significant mutations. The soil conservation function declined in western high-altitude areas caused by vegetation, therefore, the vegetation management in these areas should be strengthened, such as scientific planting of appropriate vegetation. The dynamic vegetation model could describe the dynamic change of vegetation structure under climate change and made the simulation of soil conservation function more accurate. The dynamic vegetation model such as

收稿日期:2022-03-29
资助项目:国家自然科学基金项目(42077451);陕西省自然科学基金项目(2020JQ-418);2021 浙江软科学计划研究项目“生态文明视域下浙江典型湾区绿色发展评价研究——以三门湾为例”(2021C35083);内陆河流域中科院重点实验室开放基金项目(KLEIRB-ZS-20-04)
第一作者:苏艳丽(1997—),女,在读硕士研究生,主要从事区域气候变化及植被动态研究。E-mail:18734484127@163.com
通信作者:彭守璋(1986—),男,研究员,博士,主要从事区域气候变化及植被动态研究。E-mail:szp@nwafu.edu.cn

LPJ-GUESS model could be used to carry out corresponding research in other parts of the world.

Keywords: the Loess Plateau; soil conservation function; LPJ-GUESS model; trend; mutation

土壤保持功能是生态系统中一项重要的调节服务功能,对防止区域水土流失与防风固沙有重要意义^[1]。已有研究^[2]表明,降水和气温已经并将持续影响植被结构,进而影响植被的土壤保持功能;李晴晴等^[3]在黄河流域植被时空变化对气候要素的响应研究中得出,时间上气温是影响黄河流域植被 LAI (leaf area index,叶面积指数)变化的主要因素,空间上降水对黄河流域植被 LAI 变化起主导作用,即气温上升和降水量增多均促进流域 LAI 上升,进而影响植被的土壤保持功能。IPCC 第六次评估报告^[4]对 21 世纪全球表面气温、降水的可能变化进行了系统的评估,指出全球平均表面增温将在未来 20 年内达到或超过 1.5 °C,平均降水也将增加,并且随季节和区域的不同而有所差异。因此,亟需开展气候变化下土壤保持功能演变方面的研究。

当前关于土壤保持功能的评价方法主要包括通用土壤流失方程(USLE)和修正的通用土壤流失方程(RUSLE)、生态系统服务和交易的综合评估模型(InVEST)、风蚀预报模型(WEPP)等^[5]。李治军等^[6]采用 USLE 模型对肇州县进行土壤侵蚀评价,定量分析评估肇州县水土流失情况;卞大伟等^[7]采用修正的通用土壤侵蚀方程(RUSLE)估算 2013 年和 2017 年吉林省湿地的土壤保持服务功能;刘宥延等^[8]基于 InVEST 模型对 2017 年黄土高原丘陵区人工灌草生态系统的水土保持功能进行定量化评估;陈凤等^[9]分析研究沿海新垦区高钠盐土壤边坡在自然降雨条件下土壤侵蚀发生发展过程,采用 WEPP 模型模拟计算并进行适用性分析等。现有的这些模型在研究土壤保持功能时假定植被的结构不变,而气候变化会引起植被结构的变化,进而可能对区域的土壤保持产生影响,已有研究主要集中在当前气候条件下,较少涉及未来气候变化下的土壤保持功能时空格局方面的研究。本研究重点考虑气候变化下植被结构的变化所引起土壤保持功能的变化程度。尽管有部分学者研究了土壤保持服务对气候变化的响应特征,如冯晓珂等^[10]以 2015 年为基准,根据局地特征改进综合顺序分类系统,模拟分析未来不同温室气体排放模式下三江源地区植被覆盖度及土壤保持功能的时空变化。但该研究仍不能捕捉气候变化对植被结构的动态影响,给土壤保持功能的计算带来了较大的不确定性。基于机理过程的动态植被模型为解决这些问题提供了良好的思路。动态植被模型考虑大量气候—植被机理过程,如叶片蒸腾、土壤蒸发、光合

呼吸、竞争与死亡、群落演替、冠层结构动态等子过程,在植被结构对气候变化响应方面有很多的应用^[11]。因此,本研究建议采用动态植被模型来开展未来气候变化下植被的土壤保持功能方面的研究。

目前,常见的动态植被模型有 LPJ-DGVM、SEIB-DGVM 以及 LPJ-GUESS 等^[12]。其中,LPJ-GUESS 既充分考虑大尺度植被动态的机理过程,又引入林窗模型和斑块概念细化植被动态(植被演替、物种组成与密度,以及群落形态结构的变化),以月尺度的气候数据、年尺度的大气 CO₂ 浓度数据、土壤数据以及植被生态生理参数为驱动,可在植物功能型水平上进行植被动态的模拟分析,并且可根据预设的植物功能型组成预测其所能形成的群落结构及其对气候变化的响应,因而在植被研究中得到广泛应用^[13]。

黄土高原作为我国水土流失情况最为严峻的地区,多年来土壤侵蚀所带来的土壤退化、生产力下降等问题,严重影响该地区的生态环境。该区对气候变化十分敏感,是生态环境脆弱带。近年来,很多学者在黄土高原地区开展了土壤保持功能方面的研究,如李妙莹^[14]基于 InVEST 模型对黄土高原丘陵区 2017 年的人工灌草生态系统土壤保持功能进行评估;燕玲玲等^[15]使用 InVEST 模型对 2000—2017 年黄土高原子午岭地区土壤保持服务时空变化及影响因素进行分析。但这些研究目前仅涉及到当前气候变化下,针对未来时期仅仅是关于土地利用方面的研究,陈登帅等^[16]利用 CA-Markov 模型预测渭河流域 2050 年土地利用变化情景,以此测算未来情景下的生态系统服务,探究 2050 年最优生态系统服务下的土地利用格局,然而这类研究忽略了气候变化对植被结构的动态影响,对于气候变化下的土壤保持功能动态演变的预测可能不够准确。

基于此,本研究以黄土高原为例,基于现有的土壤保持功能的计算公式,结合 LPJ-GUESS 模型,精确刻画气候变化下植被因子的动态变化,并基于模拟结果计算植被的土壤保持功能,进而分析未来气候变化下土壤保持功能时空格局及变化趋势,提出适应气候变化的植被管理策略,为该区生态保护与高质量发展提供保障。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄土高原(34°—42°N,102°—114°E)位于中国北部,总面积约为 64 万 km²。地势西北高、东南低,自西北向东南呈波状下降,地面起伏较大,海拔变化于 200~3 000 m。黄土高原地区处于东南湿润季风气候

向西北内陆干旱气候区的过渡地带,为大陆性季风气候,地处温带季风气候与温带大陆性气候的交界处^[17]。年均气温 4.3~14.3℃;气温年较差与日较差大,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥;降水多集中在 7—9 月,占全年降水量的 60%~80%,冬季降水一般只占到 5%,蒸发量普遍高于实际降水量。该区既是气候变化的敏感区,又是生态环境脆弱区,还是黄河中上游水土保持的重点防治区域。

1.2 数据来源

在模拟植被时需要黄土高原地区的植物功能型数据,来源于 MODIS 数据官网(<https://lpdaac.usgs.gov/products/mcd12c1v006/>),分辨率为 500 m),根据 Bonan 等^[18]提出的土地覆盖与植被功能型的气候因子对黄土高原地区的植物功能型数据进行细分类,黄土高原经过细分类的植物功能型有 7 类(图 1)。模型驱动还需要月尺度的气候数据(平均气温、降水和云量)、年尺度的大气 CO₂ 浓度以及土壤质地作为输入^[11]。其中,气候数据来自黄土高原科学数据中心(<http://loess.data.ac.cn>),时间范围为 2001—2100 年,空间分辨率是 1 km^[19],未来时期数据(2021—2100 年)将采用 IPCC 最新发布的共享社会经济路径(SSP)情景,且每个情景下包含 3 个大气环流模型(欧共体—地球联盟构建的 EC-Earth3、美国地球物理流体力学实验室构建的 GFDL-ESM4 和日本气象研究所构建的 MRI-ESM2-0)的降尺度数据。年大气 CO₂ 浓度数据将从夏威夷 Mauna Loa 站(<http://co2now.org>)以及 SSP 情景数据库(<https://tntcat.iiasa.ac.at/SspDb>)获取,数据时间段为 2001—2100 年,其中,未来数据为 SSP 情景下的数据。研究区 1 km 分辨率的土壤质地数据将从全球土壤数据中心(<http://soil-grids.org>)获取。用于确定黄土高原生物气候学参数以及生态生理参数的黄土高原植被分布数据和生物气候学变量分别来自黄土高原科学数据中心(<http://loess.geodata.cn>)与国家生态科学数据中心(<http://www.cnern.org.cn>)。MODIS 的 LAI 产品的年尺度遥感观测数据从(<https://modis.gsfc.nasa.gov/>)获取。

1.3 研究方法

1.3.1 LPJ-GUESS 模型模拟 模型模拟将在 1 km 分辨率的网格上逐一进行。在每个地理网格上,经过参数校准的 LPJ-GUESS 模型将循环使用 CO₂ 浓度和气候数据(2001—2020 年),以黄土高原经过细分类的植物功能型图为基础开始模拟,驱使植被与土壤的碳库和氮库都达到动态平衡的状态。然后,将此状态下的碳氮数值作为网格的起始条件,结合 CO₂ 浓度和气候数据(2001—2100 年),连续模拟植被的 LAI,时间尺度为年。通过 LAI 与土壤流失方程中 C 因子的关系,可以计算土壤保持量,接着,以一定年限

(如 20 年)分别统计土壤保持量在当前与未来气候条件下的平均值及变化幅度。本研究将在每个 SSP 情景(SSP119 和 SSP585)下对多个气候模式驱动的未来模拟结果取平均值,以此降低气候模式给未来模拟结果带来的不确定性。

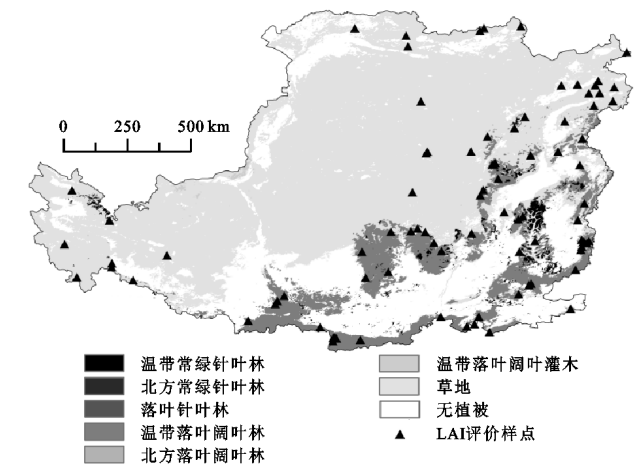


图 1 黄土高原植物功能型与评价样点

1.3.2 模型验证 为了提高 LPJ-GUESS 模型在研究区的模拟精度,本研究确定了决定植被分布的生物气候学参数以及一些生态生理参数。生物气候学参数的确定是将植被分布和生物气候数据进行空间叠置分析,进而提取每个植被类型的生物气候学参数,如最冷月的最低生存温度与最高生存温度、最暖月的最低生存温度参数,以及>5℃的积温参数^[20]。本研究经过实地调查获取植被样本,并通过分析确定的生态生理参数包括最大树冠面积、木材密度、细根和边材 C/N,其余生态生理参数参考了已有研究^[12]中相同或类似植物功能型的模型参数。

根据野外调查获取封育的林草样地地理位置,在 MODIS 的 LAI 产品中为每个点位提取相应的年尺度遥感观测数据,时间段为 2001—2020 年,为每个植物功能型提供时序上的遥感观测数据。本研究根据获取的 90 个点位上的 2001—2020 年的 LAI 数据,与模型模拟的 LAI 数据进行线性拟合,以此对模型模拟的结果进行评价。

1.3.3 土壤保持功能计算 植被的多年平均土壤保持量 $[\Delta A, t/(hm^2 \cdot a)]$ 以土壤流失方程为基础进行计算^[21],公式为:

$$\Delta A = R \times K \times L \times S \times (1 - C \times P) \quad (1)$$

式中:R 为多年平均降雨侵蚀力 $[(MJ \cdot mm)/(hm^2 \cdot h \cdot a)]$,利用降尺度的月降水数据计算。

$$R = \sum_{i=1}^{12} \{1.735 \times 10^{[1.5 \log_{10} (\frac{p_i^2}{p}) - 0.8188]} \} \quad (2)$$

式中: p_i 为月降雨量(mm); p 为年降雨量(mm)。

K 为土壤可蚀性因子 $[(t \cdot h)/(MJ \cdot mm)]$,该数据来源于国家科技基础条件平台——国家地球系

统科学数据中心 (<http://www.geodata.cn>); L 和 S 分别为坡长因子和坡度因子, 基于研究区数字高程模型数据, 利用地形因子计算工具得到; C 为植被覆盖因子, C 因子根据模拟出来的 LAI、植被覆盖度及 C 之间的数学关系量化;

$$\begin{cases} C=1 & f_c=0 \\ C=0.6508-0.3436\lg f_c & 0<f_c<78.3\% \\ C=0 & f_c\geq 78.3\% \end{cases} \quad (3)$$

式中: f_c 为植被覆盖度 (%)。

$$f_c(\theta)=1-e^{-G(\theta)LAI/\cos\theta} \quad (4)$$

式中: $G(\theta)$ 为叶片在太阳入射方向上的投影, 表征叶子截光能力的大小; θ 为太阳入射天顶角; 当植被叶片呈球形随机分布时, $G(\theta)=0.5$, 因此, 只要模拟出 LAI, 即可准确估算出植被乔、灌和草地的植被覆盖度^[22]。

P 为水土保持措施因子, 它是采取水土保持措施后土壤流失量与顺坡种植时土壤流失量的比值, 本研究对象为植被生态系统, 张雪峰等^[23] 在遥感和 GIS 技术支持下, 采用改进的通用土壤流失方程计算水土保持功能时, 对于除耕地、建设用地、城镇及居民点、水域以外的其余土地利用方式的 P 值赋为 1, 因而本研究对于 P 赋值为 1。

1.4 趋势分析方法

为了检测水土保持功能的趋势, 在每个网格建立年度水土保持量与时间的线性回归关系:

$$Y=a+b\times y \quad (5)$$

式中: b 为各功能在 1 个时期内的年度趋势, 趋势在 95% 的置信度下被认为是显著的。

1.5 突变检测

本研究采用分段线性回归模型检测水土保持功能的突变年份。其公式为:

$$T=\begin{cases} a_0+b_0Y+\epsilon_0 & (year\leq\alpha) \\ a_1+b_1Y+\epsilon_1 & (year>\alpha) \end{cases} \quad (6)$$

其中: T 为水土保持功能; $year$ 为年份; α 为年水土保持量时间序列的转折年份; a_0 、 b_0 、 a_1 、 b_1 为回归系数; ϵ_0 、 ϵ_1 为拟合残差, 在 95% 的置信度下被认为是显著的。

2 结果与分析

2.1 模型验证

将在 MODIS 的 LAI 产品中 90 个点位提取相应的年尺度遥感观测数据与 LPJ-GUESS 模型模拟出的 2001—2020 年的 LAI 进行线性拟合(图 2)。由图 2 可知, 观测值对模拟值的回归方程为 $y=1.18x-0.35$, $R^2=0.38$ 。综合分析可知, LPJ-GUESS 模型的精度和可信度较高, 具有一定的可行性, 可以用来模拟植被 LAI 对气候变化的动态响应。

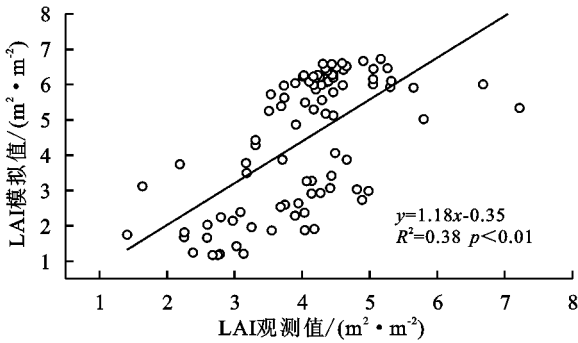


图 2 LPJ-GUESS 模型模拟 LAI 的精度

2.2 历史与未来时期水土保持功能时空格局

黄土高原地区 2001—2100 年的水土保持功能的空间分布整体呈现“东南高、西北低”的状态(图 3), 由表 1 可知, 2001—2020 年温带常绿针叶林的土壤保持功能为 (261.07 ± 2.18) t/hm², 北方常绿针叶林的土壤保持功能为 (239.49 ± 14.96) t/hm², 针叶落叶林的土壤保持功能为 (488.01 ± 26.94) t/hm², 温带落叶阔叶林的土壤保持功能为 (343.97 ± 0.85) t/hm², 北方落叶阔叶林的土壤保持功能为 (436.74 ± 26.68) t/hm², 温带落叶阔叶灌木的土壤保持功能为 (79.77 ± 5.19) t/hm², 草地的土壤保持功能为 (128.76 ± 0.24) t/hm²。2021—2100 年 2 种气候情景下黄土高原地区的土壤保持功能整体呈上升趋势, SSP119 情景下, 温带常绿针叶林的土壤保持功能为 (408.27 ± 3.33) t/hm², 北方常绿针叶林的土壤保持功能为 (362.72 ± 22.90) t/hm², 针叶落叶林的土壤保持功能为 (865.38 ± 48.08) t/hm², 温带落叶阔叶林的土壤保持功能为 (573.57 ± 1.46) t/hm², 北方落叶阔叶林的土壤保持功能为 (783.21 ± 46.34) t/hm², 温带落叶阔叶灌木的土壤保持功能为 (149.03 ± 10.06) t/hm², 草地的土壤保持功能为 (210.58 ± 0.40) t/hm²; SSP585 情景下温带常绿针叶林的土壤保持功能为 (437.38 ± 3.53) t/hm², 北方常绿针叶林的土壤保持功能为 (399.35 ± 21.65) t/hm², 针叶落叶林的土壤保持功能为 (833.18 ± 46.10) t/hm², 温带落叶阔叶林的土壤保持功能为 (588.83 ± 1.47) t/hm², 北方落叶阔叶林的土壤保持功能为 (749.60 ± 43.09) t/hm², 温带落叶阔叶灌木的土壤保持功能为 (148.96 ± 9.85) t/hm², 草地的土壤保持功能为 (228.41 ± 0.42) t/hm²。

与 2001—2020 年相比, 2 种 SSP 情景下未来时期(2021—2100 年)土壤保持功能年平均变化的空间格局具有很强的空间异质性。从图 3d 和图 3e 可以看出, 功能下降区域土壤保持变化量为 $-50\sim 0$ t/hm², 2 种气候情景下黄土高原西部高海拔地区土壤保持功能下降, 东部地区土壤保持量上升明显, 其中 SSP 585 情景下降区域的面积大于 SSP 119 情景下的面积。

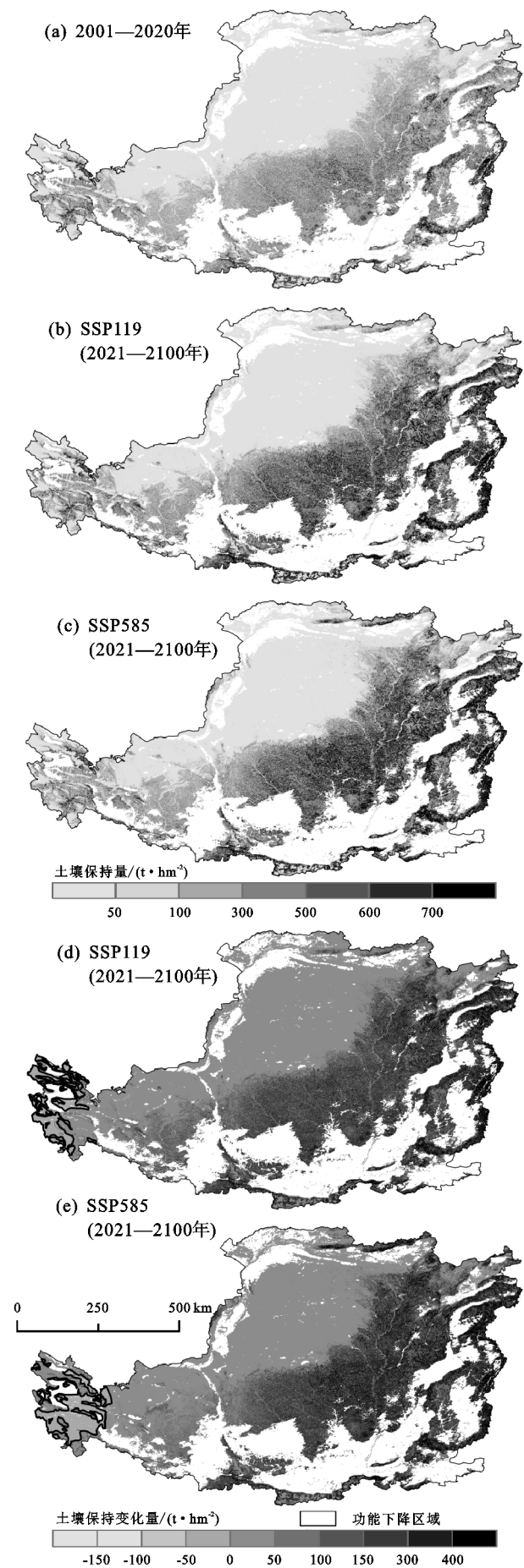


图 3 黄土高原 2001—2100 年土壤保持功能空间分布及距平空间分布

表 1 2001—2100 年黄土高原各植物功能型

植物功能型	土壤保持功能特征值	单位:t/hm ²	
		2021—2100 年	
		SSP119	SSP585
温带常绿针叶林	261.07±2.18	408.27±3.33	437.38±3.53
北方常绿针叶林	239.49±14.96	362.72±22.90	399.35±21.65
针叶落叶林	488.01±26.94	865.38±48.08	833.18±46.10
温带落叶阔叶林	343.97±0.85	573.57±1.46	588.83±1.47
北方落叶阔叶林	436.74±26.68	783.21±46.34	749.60±43.09
温带落叶阔叶灌木	79.77±5.19	149.03±10.06	148.96±9.85
草地	128.76±0.24	210.58±0.40	228.41±0.42

注:表中数据为平均值±标准差。下同。

2.3 历史与未来时期土壤保持功能变化趋势

在 2001—2020 年,黄土高原土壤保持功能(图 4a)显著上升的区域主要集中在东北部及西部部分地区,未检测到显著下降区域,其中温带常绿针叶林的土壤保持功能发生显著上升的速率为(15.10±0.35) t/a,北方常绿针叶林的土壤保持功能发生显著上升的速率为(14.71±2.03) t/a,针叶落叶林的土壤保持功能发生显著上升的速率为(16.09±2.56) t/a,温带落叶阔叶林的土壤保持功能发生显著上升的速率为(21.46±0.23) t/a,北方落叶阔叶林的土壤保持功能发生显著上升的速率为(16.60±1.39) t/a,温带落叶阔叶灌木的土壤保持功能发生显著上升的速率为(24.88±2.19) t/a,草地的土壤保持功能发生上升的速率为(9.10±0.07) t/a(表 2)。

在 2021—2100 年,SSP119 情景下黄土高原土壤保持功能显著上升的区域主要集中在西部地区(图 4b),其中温带常绿针叶林的土壤保持功能发生显著上升的速率为(1.39±0.06) t/a,北方常绿针叶林的土壤保持功能发生显著上升的速率为(0.83±0.10) t/a,温带落叶阔叶林的土壤保持功能发生显著上升的速率为(1.42±0.25) t/a,北方落叶阔叶林的土壤保持功能发生显著上升的速率为(1.10±0.76) t/a,草地的土壤保持功能发生上升的速率为(0.40±0.01) t/a,针叶落叶林、温带落叶阔叶灌木的土壤保持功能没有发生显著上升变化;显著下降的区域主要在中部零星区域,其中温带常绿针叶林的土壤保持功能发生显著下降的速率为(−1.82±0.36) t/a,北方常绿针叶林的土壤保持功能发生显著下降的速率为(−3.86±0.86) t/a,温带落叶阔叶林的土壤保持功能发生显著下降的速率为(−3.99±0.13) t/a,北方落叶阔叶林的土壤保持功能发生显著下降的速率为−1.11 t/a,温带落叶阔叶灌木的土壤保持功能发生显著下降的速率为(−3.06±0.21) t/a,草地的土壤保持功能发生显著下降的速率为(−0.06±0.01) t/a,针叶落叶林的土壤保持功能没有发生显著下降。SSP 585 情

景下黄土高原土壤保持功能显著上升的区域主要分布在北部大部分地区(图 4c),其中温带常绿针叶林的土壤保持功能发生显著上升的速率为 (2.49 ± 0.04) t/a,北方常绿针叶林的土壤保持功能发生显著上升的速率为 (2.53 ± 0.19) t/a,针叶落叶林的土壤保持功能上升的速率为 10.00 t/a,温带落叶阔叶林的土壤保持功能发生显著上升的速率为 (5.14 ± 0.05) t/a,北方落叶阔叶林的土壤保持功能发生显著上升的速率为 (4.13 ± 0.55) t/a,温带落叶阔叶灌木的土壤保持功能发生显著上升的速率为 (0.45 ± 0.05) t/a,草地的土壤保持功能发生显著上升的速率为 0.92 t/a(表 2)。

2.4 历史与未来时期土壤保持功能突变年份空间格局

在 2001—2020 年,土壤保持功能发生显著突变的区域(图 5a)面积占比为 26.53%,其中温带常绿针叶林、北方常绿针叶林及落叶针叶林的土壤保持功能发生显著突变的年份为 2013 年,温带落叶阔叶林、北方落叶阔叶林的土壤保持功能发生显著突变的年份为 2012 年,温带落叶阔叶灌木的土壤保持功能发生显著突变的年份为 2011 年,草地的土壤保持功能发生显著突变的年份为 2010 年。2021—2100 年 2 种气候情景下黄土高原地区的土壤保持功能发生显著突变的区域(图 5b、图 5c)面积占比分别为 43.91%, 51.72%;SSP 119 情景下温带常绿针叶林、温带落叶阔叶林的土壤保持功能发生显著突变的年份为 2052 年,北方常绿针叶林的土壤保持功能发生显著突变的年份为 2056 年,北方落叶阔叶林的土壤保持功能发生显著突变的年份为 2055 年,温带落叶阔叶灌木的土壤保持功能发生显著突变的年份为 2067 年,草地的土壤保持功能发生显著突变的年份为 2053 年,落叶针叶林的土壤保持功能没有发生显著突变;SSP 585 情景下温带常绿针叶林的土壤保持功能发生显著突变的年份为 2077 年,北方常绿针叶林的土壤保

持功能发生显著突变的年份为 2065 年,落叶针叶林、草地的土壤保持功能发生显著突变的年份为 2081 年,温带落叶阔叶林的土壤保持功能发生显著突变的年份为 2070 年,北方落叶阔叶林的土壤保持功能发生显著突变的年份为 2071 年,温带落叶阔叶灌木的土壤保持功能发生显著突变的年份为 2087 年(表 3)。

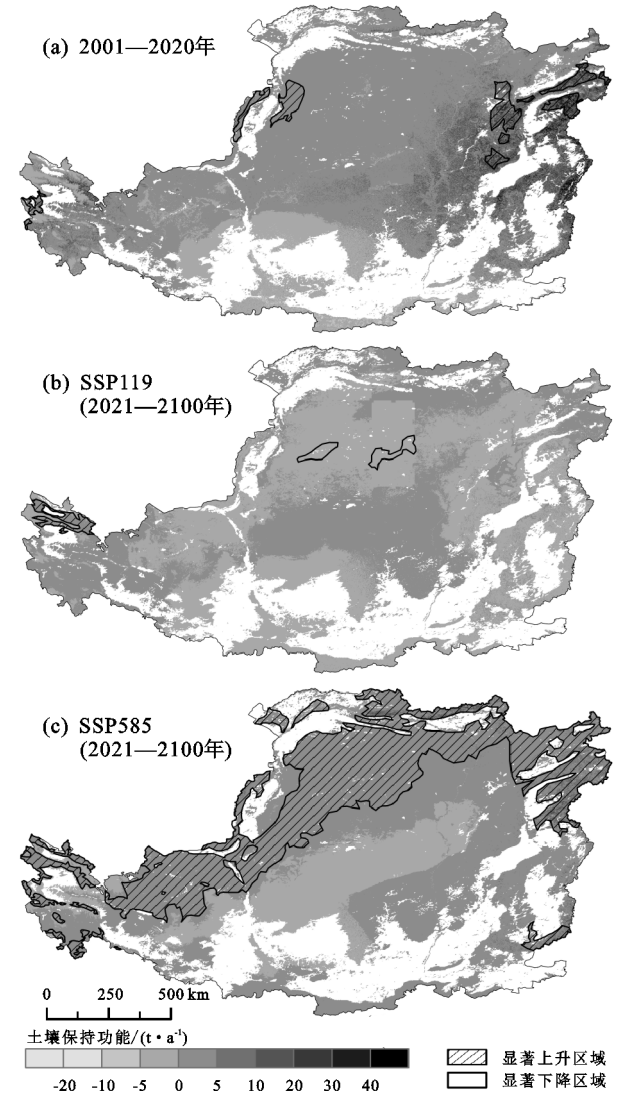


图 4 2001—2100 年黄土高原土壤保持功能变化趋势空间分布

表 2 2001—2100 年黄土高原土壤保持功能趋势显著变化空间统计 单位:t/a

植物功能型	2001—2020 年		2021—2100 年			
			SSP119		SSP585	
	下降	上升	下降	上升	下降	上升
温带常绿针叶林	—	15.10±0.35	—1.82±0.36	1.39±0.06	—	2.49±0.04
北方常绿针叶林	—	14.71±2.03	—3.86±0.86	0.83±0.10	—	2.53±0.19
针叶落叶林	—	16.09±2.56	—	—	—	10.00±0
温带落叶阔叶林	—	21.46±0.23	—3.99±0.13	1.42±0.25	—	5.14±0.05
北方落叶阔叶林	—	16.60±1.39	—1.11±0	1.10±0.76	—	4.13±0.55
温带落叶阔叶灌木	—	24.88±2.19	—3.06±0.21	—	—	0.45±0.05
草地	—	9.10±0.07	—0.06±0.01	0.40±0.01	—	0.92±0

注:—表示未检测到显著变化。下同。

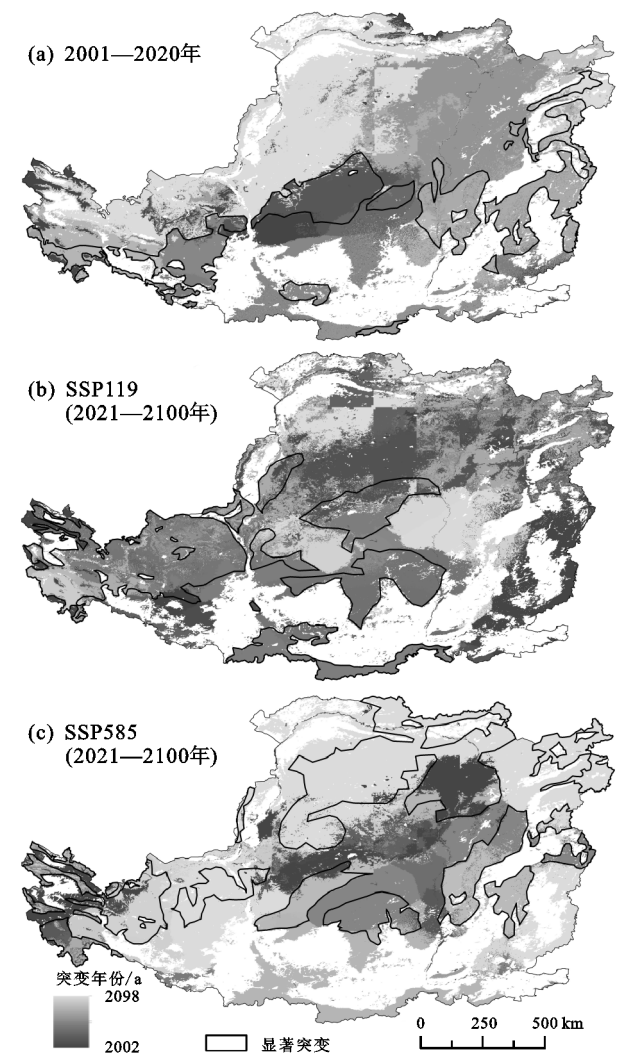


图 5 2001—2100 年黄土高原土壤保持功能突变年份空间分布

表 3 2001—2100 年黄土高原土壤保持功能显著
突变年份空间统计

植物功能型	2001—2020 年	2021—2100 年	
		SSP119	SSP585
温带常绿针叶林	2013±0.02	2052±0.26	2077±0.21
北方常绿针叶林	2013±0.39	2056±1.04	2065±1.68
落叶针叶林	2013±0.00	—	2081±0.00
温带落叶阔叶林	2012±0.01	2052±0.03	2070±0.09
北方落叶阔叶林	2012±0.25	2055±0.93	2071±5.25
温带落叶阔叶灌木	2011±0.34	2067±0.42	2087±0.71
草地	2010±0.01	2053±0.04	2081±0.05

3 讨论

赵雪雁等^[24]研究得出,黄土高原 1990—2018 年的土壤保持量的分布特征呈“东南高、西北低”,这与本文中的研究结果一致,造成这种现象的主要原因是受降水的影响,黄土高原和我国降水地区分布一致,从东南向西北递减,总体趋于暖干化,气候带向南迁移,导致植被带发生相应的变迁^[25]。西部高海拔地区植被所带来的土壤保持功能下降,这是由于该地区降水较少,且季节分布不均匀,在每年的 7,8,9 月易

出现暴雨,加重水土流失。SSP 585 情景下黄土高原北部地区的土壤保持功能显著上升,但整体上北方土壤保持功能仍低于南方,并且发生显著突变的区域明显大于 SSP 119 情景。目前关于土壤保持功能时空演变的研究中较少涉及突变检测,本研究采用分段线性回归法对黄土高原地区未来时期的土壤保持量变化逐个地理单元进行研究,最终得出土壤保持功能发生显著性突变的年份及发生突变的区域,有助于应对气候变化带来的不利影响。

目前,在黄土高原地区已开展大量采用 ULSE 和 InVEST 模型计算土壤保持功能的研究,除此之外还有一些关于风蚀水蚀的研究^[6],但这些研究都没有强调气候变化下植被结构的动态变化所引起的土壤保持功能的变化,这是本研究重点考虑的。本研究采用的计算方法同 InVEST 模型计算土壤保持功能的方法一致,而 InVEST 模型已得到广泛应用并且取得不错的结果,因此本研究采用的方法是合理的。未来气候变化下的土壤保持功能动态变化的时候存在很大的不确定性,植被土壤保持功能对气候变化的响应复杂多变,本研究最大的特色是以动态植被模型模拟的 LAI 作为基础去刻画植被 C 因子的动态变化,研究结果同时考虑降雨侵蚀力、植被 C 因子的动态变化下的土壤保持功能的变化,因此,本研究的研究思路相比其他研究更能反映未来气候变化下的土壤保持功能。该思路的重点是如何精确刻画未来时期 LAI 的动态变化,根据以往研究模型参数的识别确定,使模型在植被结构方面模拟的性能更高,并且对模拟的 LAI 进行验证,且验证结果较好,因此研究结果是可靠的。此外,本研究采用动态植被模型模拟核算黄土高原地区的土壤保持功能,与 InVEST 模型相比,从数据准备上来说,二者都需要提供降雨侵蚀力因子、土壤可蚀性因子、坡长坡度因子、植被覆盖与管理因子、土壤保持因子等^[8],工作量相差不大,但动态植被模型可以刻画气候变化下植被结构的动态变化,使土壤保持功能模拟得更精确,因此可以采取类似 LPJ-GUESS 的动态植被模型在中国乃至全球其他地区开展相应的研究。

本研究根据研究区多源实测数据,利用模型的参数敏感性分析和校准工具,科学校准研究区植物功能型在模型中的参数值,使之适应于黄土高原的土壤保持功能,解决模型参数带来的不确定性,提升研究结果的精度,并且在每个 SSP 情景(SSP119 和 SSP585)下对多个气候模式驱动的未来模拟结果取平均值,使用平均值(标准误差)的形式给出每个气候情景下的模

拟结果,以此降低气候模式给未来模拟结果带来的不确定性。LPJ-GUESS 模型中参数有 63 个,较难对所有的参数进行校准,因而本研究在已有研究基础上只对 21 个敏感参数进行校准^[26],在未来的研究中模型模拟精度有待进一步提升。

4 结论

(1)2001—2100 年黄土高原地区土壤保持功能的空间分布整体呈现“东南高、西北低”的分布特征;2021—2100 年西部高海拔地区的土壤保持功能下降,其中 SSP585 情景下下降区域的面积大于 SSP119 情景下下降区域的面积。未来应该加强西部高海拔地区的植被管理,如科学种植适宜的植被梭梭、沙棘等植物,增强该地的土壤保持能力,采取技术措施充分利用降水资源,强化生态保护意识。2001—2020 年、2021—2100 年 SSP 119 情景及 SSP 585 情景下各植物功能型中针叶落叶林的土壤保持功能特征值最大,分别为 (488.01 ± 26.94) , (865.38 ± 48.08) , (833.18 ± 46.10) t/hm²,温带落叶阔叶灌木的土壤保持功能特征值最小,分别为 (79.77 ± 5.19) , (149.03 ± 10.06) , (148.96 ± 9.85) t/hm²。

(2)2001—2020 年黄土高原西部高海拔地区、东部五台山区及西北部地区的土壤保持功能显著上升,其中温带落叶阔叶灌木的土壤保持功能的上升速率最大,为 (24.88 ± 2.19) t/a;SSP 119 情景下西部祁连山脉地区显著上升,其中温带落叶阔叶林的土壤保持功能的上升速率最大,为 (1.42 ± 0.25) t/a;中部少部分地区显著下降,其中温带落叶阔叶林的土壤保持功能的下降速率最大,为 (-3.99 ± 0.13) t/a;SSP 585 情景下北部大部分地区显著上升,其中针叶落叶林的土壤保持功能的上升速率最大,为 10.00 t/a。针对土壤保持功能有下降趋势的地区可以通过植树造林、控制放牧等植被恢复措施来提高土壤保持功能。

(3)2001—2020 年黄土高原中部地区的土壤保持功能显著突变;SSP 119 情景下中南部及西部地区显著突变;SSP 585 情景下除南部以外的大部分地区显著突变。

参考文献:

[1] 刘月,赵文武,贾立志.土壤保持服务:概念、评估与展望[J].生态学报,2019,39(2):432-440.

[2] 郑凯.气候变化和人类活动对祖厉河流域植被覆盖的影响[D].兰州:兰州大学,2019.

[3] 李晴晴,曹艳萍,苗书玲.黄河流域植被时空变化及其对气候要素的响应研究[J].生态学报,2022,42(10):4041-4054.

[4] Legg S. IPCC, 2021: Climate change 2021-the physical

science basis[J].Interaction,2021,49(4):44-45.

[5] 古娟,王华静.土壤保持功能评价方法研究[J].安徽农业科学,2016,44(21):47-49,52.

[6] 李治军,张嗣路,于博文,等.基于 USLE 模型的肇州县土壤侵蚀研究[J].甘肃水利水电技术,2021,57(9):56-60.

[7] 卞大伟,李洪伟,燕红,等.基于 RUSLE 模型的吉林省湿地土壤保持服务功能研究[J].吉林林业科技,2020,49(6):19-24.

[8] 刘宥延,刘兴元,张博,等.黄土高原丘陵区人工灌草生态系统水土保持功能评估[J].水土保持学报,2020,34(3):84-90,97.

[9] 陈凤,邹玉田,张华,等.基于 WEPP 模型的沿海新围垦区土壤侵蚀规律研究[J].江苏水利,2018(4):8-16.

[10] 冯晓筠,黄斌斌,李若男,等.三江源区生态系统和土壤保持服务对未来气候变化的响应特征[J].生态学报,2020,40(18):6351-6361.

[11] Hickler T, Vohland K, Feehan J, et al. Projecting the future distribution of European potential natural vegetation zones with a generalized, tree species-based dynamic vegetation model[J].Global Ecology and Biogeography,2012,21:50-63.

[12] Smith B, Wårlind D, Arneth A, et al. Implications of incorporating N cycling and N limitations on primary production in an individual-based dynamic vegetation model[J].Biogeosciences,2014,11:2027-2054.

[13] Peng S Z, Li Z. Incorporation of potential natural vegetation into revegetation programmes for sustainable land management[J].Land Degradation and Development,2018,29: 3503-3511.

[14] 李妙莹.基于 InVEST 模型的黄土高原人工灌草系统土壤保持功能评估[D].兰州:兰州大学,2019.

[15] 燕玲玲,巩杰,徐彩仙,等.子午岭地区土壤保持服务时空变化及其影响因素[J].水土保持学报,2021,35(1): 188-197.

[16] 陈登帅,李晶,杨晓楠,等.渭河流域生态系统服务权衡优化研究[J].生态学报,2018,38(9):3260-3271.

[17] Liang W, Fu B J, Wang S, et al. Quantification of the ecosystem carrying capacity on China's Loess Plateau [J].Ecological Indicators,2019,101:192-202.

[18] Bonan G B, Levis S, Kergoat L, et al. Landscapes as patches of plant functional types: An integrating concept for climate and ecosystem models[J].Global Biogeochem,2002,16(2):5-1-5-23.

[19] Peng S Z, Ding Y X, Liu W Z, et al. 1 km monthly temperature and precipitation dataset for China from 1901 to 2017[J].Earth System Science Data,2019,11: 1931-1946.

[13] 何清,杨兴华,霍文,等.库姆塔格沙漠粒度分布特征及环境意义[J].中国沙漠,2009,29(1):18-22.

[14] 马倩,武胜利,刘永泉,等.艾比湖流域抛物线沙丘表层沉积物粒度特征[J].中国沙漠,2014,34(3):650-657.

[15] 蔡东旭,李生字,刘耀中,等.台特玛湖干涸湖盆区植物风影沙丘的形态特征[J].干旱区地理,2017,40(5):1020-1028.

[16] 李志忠,武胜利,肖晨曦,等.新疆和田河流域灌丛沙堆风洞流场的实验研究(I)[J].中国沙漠,2007,27(1):9-14.

[17] 李志忠,武胜利,肖晨曦,等.新疆和田河流域灌丛沙堆风洞流场的实验研究(II)[J].中国沙漠,2007,27(1):15-19.

[18] 武胜利,李志忠,惠军,等.和田河流域灌(草)丛沙堆的形态特征与发育过程[J].地理研究,2008,27(2):314-322.

[19] 王翠,雷加强,李生字,等.新疆策勒绿洲—沙漠过渡带花花柴(*Kareliniacaspica*)沙堆的形态特征[J].中国沙漠,2013,33(4):981-989.

[20] 毛东雷,吴云霞,蔡富艳,等.新疆策勒绿洲—沙漠过渡带灌丛沙堆与回涡沙丘的粒度分布特性[J].泥沙研究,2019,44(2):48-54.

[21] 张萍,康经理,袁瑛,等.两类植物型沙丘上植物群落的异同及其对沙丘形态的响应[J].生态学报,2017,37(23):7920-7927.

[22] 高永,丁延龙,汪季,等.不同植物灌丛沙丘表面沉积物粒度变化及其固沙能力[J].农业工程学报,2017,33(22):135-142.

[23] 毛东雷,蔡富艳,方登先,等.新疆策勒绿洲—沙漠过渡带风沙运动沙尘物质粒径分形特征[J].土壤学报,2018,55(1):88-99.

[24] 杨佐涛.戈壁与绿洲内的风向风速关系:以新疆策勒县为例[J].中国沙漠,1990,10(3):36-42.

[25] 朱文煜.策勒绿洲—沙漠过渡带沙丘表层沙物质粒度特征研究[D].乌鲁木齐:新疆师范大学,2021.

[26] 穆桂金,贺俊霞,雷加强,等.再议绿洲—沙漠过渡带:以策勒绿洲—沙漠过渡带为例[J].干旱区地理,2013,36(2):195-202.

[27] 宋洁,春喜,白雪梅,等.中国沙漠粒度分析研究综述[J].中国沙漠,2016,36(3):597-603.

[28] 吴汪洋,张登山,田丽慧,等.青海湖克土沙地沙棘林的防风固沙机制与效益[J].干旱区地理,2014,37(4):777-785.

[29] 葛拥晓,吉力力·阿不都外力,马龙,等.新疆艾比湖干涸湖底沉积物粒径分布及其对风蚀的响应[J].干旱区研究,2014,31(4):636-642.

[30] 毛东雷,雷加强,薛杰,等.新疆策勒砾质戈壁沙拐枣(*Calligonum*)灌丛沙堆形态特征[J].干旱区资源与环境,2015,29(5):105-110.

(上接第 62 页)

[20] 韩庆功,彭守璋.黄土高原潜在自然植被空间格局及其生境适宜性[J].水土保持学报,2021,35(5):188-193,203.

[21] Jiang C, Zhang H Y, Tang Z P, et al. Evaluating the coupling effects of climate variability and vegetation restoration on ecosystems of the Loess Plateau, China [J].Land Use Policy,2017,69:134-148.

[22] Zhao J, Li J, Liu Q H, et al. Estimating fractional vegetation cover from leaf area index and clumping index based on the gap probability theory[J].International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation,2020,90:e102112.

(上接第 69 页)

[23] Yalin M S, Ferreira Da Silva A M. Regime channels in cohesionless alluvium [J]. Journal of Hydraulic Research, 1999, 37(6): 725-742.

[24] Singh H V, Thompson A M. Effect of antecedent soil moisture content on soil critical shear stress in agricultural watersheds[J].Geoderma,2016,262:165-173.

[25] 邢行,陈晓燕,韩珍,等.饱和与非饱和黄绵土细沟径流水动力学特征及侵蚀阻力对比[J].水土保持学报,2018,32(3):92-97.

[26] 韩珍,陈晓燕,李彦海,等.近饱和与非饱和土壤细沟水流输沙能力的对比研究[J].山地学报,2020,38(6):841-850.

[27] 赵宇.黄土细沟侵蚀过程冲刷试验研究[D].重庆:西南大学,2015.

[28] Zhang G H, Liu Y M, Han Y F, et al. Sediment transport and soil detachment on steep slopes: II. Sediment feedback relationship[J].Soil Science Society of America Journal,2009,73(4):1298-1304.

[29] Foster G R, Meyer L D. Transport of soil particles by shallow flow[J].Transactions of the ASAE,1972,15(1):99-102.

[30] 张晴雯,陈尚洪,刘定辉,等.农业措施对玉米季坡耕地水沙过程的调控效应[J].核农学报,2016,30(7):1395-1403.