

子午岭地区土壤保持服务时空变化及其影响因素

燕玲玲, 巩杰, 徐彩仙, 曹二佳, 李红瑛, 高秉丽, 李焱

(兰州大学资源环境学院, 西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000)

摘要: 土壤保持是黄土高原首要的生态系统服务功能, 对于黄土高原地区生态经济可持续发展至关重要, 开展该区域的土壤保持变化和影响因素研究十分必要。基于退耕还林还草背景, 综合使用 InVEST 泥沙输移比模块、空间自相关、地理探测器等方法模型对 2000—2017 年子午岭地区土壤保持服务时空变化及影响因素进行了分析。结果表明: 2000—2017 年, 子午岭地区大量耕地转为林地和草地, 土壤保持服务有所增强, 其中林地的单位面积土壤保持量最高; 土壤保持随海拔呈先增后减趋势, 随坡度的增大而增大, 区内西坡和东坡处土壤保持量最高; 子午岭地区土壤保持变化的空间自相关程度高, 空间聚集类型主要有高高型和低低型, 高高聚集区位于东北部, 低低聚集区主要分布在西北部。地理探测结果显示, 因子变化对土壤保持变化均起交互增强作用, 高高聚集区受 NDVI 变化的作用最大; 低低聚集区主要受降水和土地利用强度变化的影响, 不显著区域受各因子的影响微弱, 整个子午岭地区土壤保持变化主要受降水、GDP 密度、还有人口密度和 NDVI 变化的影响。

关键词: 土壤保持; 时空变化; 影响因素; 空间自相关; 地理探测器; 黄土高原; 子午岭地区

中图分类号: S157.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2021)01-0188-10

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.01.028

Spatiotemporal Variations and Influencing Factors of Soil Conservation Service in Ziwuling Area

YAN Lingling, GONG Jie, XU Caixian, CAO Erjia, LI Hongying, GAO Bingli, LI Yan

(College of Earth and Environmental Sciences, Key Laboratory of Western China's Environmental Systems, Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou 730000)

Abstract: Soil conservation (SC) is the primary ecological service function of the Loess Plateau, which is vital to the sustainable development of ecological economy in Loess Plateau. Therefore, it is necessary to carry out research on changes and its influencing factors of soil conservation in this area. In the context of Grain for Green Project, the spatiotemporal changes and its influencing factors of soil conservation services in Ziwuling (ZWL) from 2000 to 2017 were analyzed by using the InVEST Sediment Delivery Ratio Module, spatial autocorrelation, geographic detector and other methods. The results showed that a large amount of cultivated land in ZWL area changed into woodland and grassland from 2000 to 2017, and the soil conservation service showed an increase trend. Among them, the amount of soil conservation per unit area of woodland was the highest. The soil conservation service first increased and then decreased with altitude, and increased with the increasing of slope. The amounts of soil conservation in the west slope and east slope were the highest. The spatial autocorrelation of soil conservation variation was high in ZWL area, and the main aggregation types were high-high and low-low. The high-high concentration area located in the northeastern part of ZWL, and the low-low concentration area mainly distributed in the northwestern part. The changes of influencing factors had an interactive enhancement effect on soil conservation changes, and NDVI was the most important factor in high-high aggregation area. The low-low aggregation area was mainly affected by the changes of precipitation and land use intensity, and the insignificant area was weakly affected by each factor. The soil conservation changes of whole ZWL area were mainly affected by the changes of precipitation, GDP density, population density and NDVI.

Keywords: soil conservation; spatiotemporal variations; influencing factors; spatial autocorrelation; geographic detector; Loess Plateau; Ziwuling Area

生态系统服务是指对人类生存及生活质量有贡献的生态系统产品和功能的总称^[1],人类从生态系统中获得的服务主要包括供给、调节、文化及支持服务^[2]。土壤保持服务作为生态系统所提供的一项重要调节服务,指生态系统防止土壤流失的侵蚀调控能力以及对泥沙的储积保持能力^[3]。陈茁新等^[4]发现,2006—2015 年全球水土保持研究的文献来源主要集中在中国和美国,其中中国黄土高原是水土保持研究的重点和热点区域。黄土高原是我国重点脆弱生态区,也是世界上水土流失问题最为突出的区域之一^[5]。土壤侵蚀会造成区域水土流失、土壤肥力降低^[6],进而影响粮食安全和生态环境质量,最终将影响到区域生态安全,对人类社会经济福祉产生深远影响^[7]。就黄土高原区域来说,水土保持功能是其首要的生态系统服务功能。

自 1999 年退耕还林还草工程实施以来,黄土高原大量坡耕地转为生态用地,植被得到大规模恢复,区域生态系统服务逐渐得到提升^[8-9],而退耕背景下土壤保持服务变化是主要的研究热点。已有研究^[10-13]基于 RUSLE 模型分别对退耕还林还草背景下黄土高原生态屏障区、林草带、县区的土壤保持效应进行了分析发现,自退耕以来黄土高原林、草地面积不断增加,各区域土壤侵蚀程度均有所缓解,重度和极强烈侵蚀区面积大幅下降,土壤保持服务不断提升。已有研究^[14-15]发现,自退耕以来区域土壤结构得到改善,土壤有机质、全碳、全氮以及主要离子含量明显增加,土壤团聚体的稳定性和抗蚀性均随退耕年限而增加,土壤保持能力有所增强。另有学者关注退耕还林以来土壤保持的经济和生态综合效益,如 Cheng 等^[16]发现,退耕还林还草以来土壤氮、磷和有机碳等的养分持留效应得到了提升;杨波等^[17]运用利用市场价值法估算了土壤保持的经济价值发现,退耕还林还草工程在榆林市产生了显著的生态经济价值;滕晗等^[18]和闫瑞等^[19]分别分析了退耕还林还草工程对延河和北洛河流域水土保持功能的影响。总体来说,上述研究多是对退耕还林背景下土壤保持时空变化及生态经济效益的评估,而对于土壤保持变化影响因素,特别是对于土壤保持变化影响因素的空间定量检测报道还很少见。基于对不同环境梯度、不同分区子午岭地区土壤保持的时空变化分析及影响因素定量探测,本文开展了退耕还林还草背景下子午岭地区土壤保持服务变化研究,以期对黄土高原生态建设工程管控提供科学依据。

子午岭地处陕甘交界的黄土高原腹地,是“黄土高原—川滇生态屏障”的重要组分^[20],在整个黄土高

原具有极其重要的地位。自 1999 年实施退耕还林还草以来区内生态环境有了较大改善,但在当前人类资源开采活动和经济发展不断加快的背景下,区内生态环境仍然面对严峻压力。基于 InVEST 泥沙输移比模块,选取 2000 年,2010 年和 2017 年 3 个时间节点对退耕还林还草实施后子午岭地区土壤保持服务进行评估,并运用 GeoDa 和地理探测器分别对其空间分布和影响因素进行了定量分析,影响因子探测结果能够为各分区水土保持建设提供一定参考,以达到对黄土高原地区生态恢复治理与管理的指导作用。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

子午岭地区位于陕甘交界的黄土高原腹地,介于 34°40′—37°25′N,107°30′—110°20′E,共包含 16 个县(区),其中甘肃庆阳市有华池、合水、宁县、正宁 4 县;陕西延安市的吴起、志丹、安塞、宝塔等 7 县区,铜川市的宜君、王益、印台、耀州 4 县及咸阳市旬邑县(图 1),总面积约为 3.79 万 km²。海拔 553~1 856 m,子午岭是高出黄土高原的基岩山地之一,依据黄土高原整治分区的划分,子午岭地区陕西段属黄土丘陵沟壑区,甘肃段属黄土高原沟壑区^[21]。北部属温带半干旱区,南部属温带半湿润区,气候的大陆性特征明显,年均气温 7.4℃,年均降水量 587.6 mm,积温(≥10℃)约为 2 410~4 327℃,区内主要的土壤类型为黄绵土,疏松易湿陷,抗侵蚀能力差。

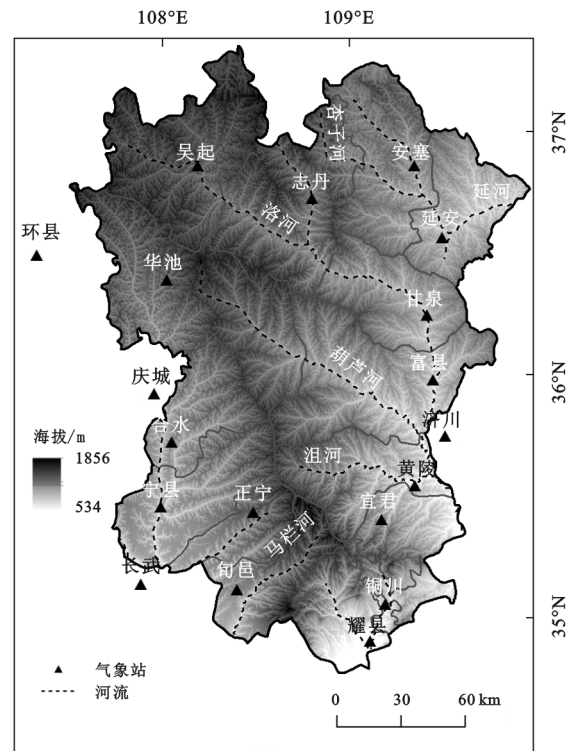


图 1 研究区地理位置

1.2 研究方法

1.2.1 土壤保持量计算 基于 InVEST 模型对子午岭地区的土壤保持服务(soil conservation, SC)进行评估,该模型是由美国自然资本项目组开发,用于评估生态系统服务功能量及其经济价值、支持生态系统管理和决策的一套模型系统^[22]。运用 InVEST 模型的泥沙输移比模块(sediment delivery ratio model, SDR)分别对 2000 年、2010 年和 2017 年子午岭地区的土壤保持量进行了计算。计算模型为:

$$RET_x = PKLS_x - USLE_x + SED_x \quad (1)$$

$$PKLS_x = R_x \cdot K_x \cdot LS_x \quad (2)$$

$$USLE_x = R_x \cdot K_x \cdot LS_x \cdot C_x \cdot P_x \quad (3)$$

$$SED_x = SE_x \sum_{y=1}^{x-1} USLE_y \prod_{z=y+1}^{x-1} (1 - SE_z) \quad (4)$$

式中:RET_x和 SED_x分别为栅格 *x* 的土壤保持量和泥沙持留量,SE_x为栅格 *x* 的泥沙持留效率。PKLS_x为基于地貌和气候条件的栅格 *x* 潜在土壤流失量,USLE_x和 USLE_y分别为栅格 *x* 及其上坡栅格 *y* 的实际侵蚀量,即植被覆盖和水土保持措施下的土壤侵蚀量。*R_x*、*K_x*、*LS_x*、*C_x*和 *P_x*分别为栅格 *x* 的降雨侵蚀力因子、土壤可蚀性因子、地形因子、植被覆盖因子和水土保持措施因子,各因子计算过程为:

(1)降雨侵蚀力因子 *R*:基于子午岭周边地区 1990—2017 年共计 19 个气象站点逐日降雨量求得多年月平均降水量、年总降水量等,参考 Wischmeier 等^[23]经验公式得出。计算得到降雨侵蚀力因子后,利用专业气象插值软件 Anuspline 进行空间化,设置栅格大小为 30 m×30 m。

$$R = \sum_{i=1}^{12} (1.735 \times 10 (3 \lg P_i - 1.5 \lg P - 0.8188)) \times 17.02 \quad (5)$$

式中:*R*为降雨侵蚀力因子;*P_i*表示第 *i* 月多年平均降雨量(mm);*P*表示年总降雨量(mm);计算结果需乘以 17.02,转换成国际单位(MJ·mm)/(hm²·h·a)。

(2)土壤可蚀性因子 *K*:依据 Williams^[24]等提出的 EPIC(erosion-productivity impact calculator)模型对研究区土壤可蚀因子进行计算,子午岭地区的土壤类型主要包括黄绵土、冲积土、黑垆土、褐土等 13 类,根据数据库中土壤的机械组分,通过公式计算获得土壤可蚀性因子 *K*,将其计算结果赋值于不同土壤类型并转为栅格,栅格大小设置为 30 m×30 m,其计算公式为:

$$K = (0.2 + 0.3e^{(-0.0256SAN(1 - SIL/100))}) \times (SIL/(CLA + SIL))^{0.3} \times (1 - 0.25C/(C + e^{3.72 - 2.95C})) \times (1 - 0.7SNI/(SNI + e^{22.9SNI - 5.51})) \times 0.1318 \quad (6)$$

式中:*K*为土壤侵蚀力因子((t·h)/(MJ·mm)),乘以 0.131 8由美制单位转为国际单位;SAN 为土壤沙粒比例(%);SIL 为土壤粉粒比例(%);CLA 为土壤黏粒比例(%);*C*为土壤有机碳含量(%),SNI 为 1-SAN/100。

(3)地形因子:坡长—坡度因子(*LS*)反映坡度与地表状况之间的关系,表征地表情况对土壤侵蚀的影响,在计算的过程中通常以 25°为转折点。本研究选用的 InVEST 3.6.0 泥沙输移比模块在运行过程中会基于填洼后的 DEM 进行自动计算,在过程文件中生成 LS.tiff 地形因子数据层。

(4)植被覆盖因子 *C* 和水土保持措施因子 *P*:植被覆盖因子是指具有植被覆盖时的土壤侵蚀量与裸土面土壤侵蚀量的比值,其值介于 0~1.0;水土保持措施因子 *P* 值介于 0~1.0,其值越低,表示水土保持措施越全面,反之水土保持措施较差。目前关于植被覆盖因子(*C*)和水土保持措施因子(*P*)的计算尚无统一标准,参考相近区域研究成果^[25-30],对研究区不同土地利用类型进行赋值(表 1)。

表 1 不同土地利用类型 *C* 值和 *P* 值

指标	耕地	林地	草地	居民工矿用地	水域	未利用地
<i>C</i>	0.25	0.1	0.3	0	0	1.0
<i>P</i>	0.35	1.0	1.0	0	0	1.0

1.2.2 局部空间自相关 局部空间自相关可以反映某一单元与邻近单元属性值的相关程度,常用局部 Moran 指数(Local Moran's *I*)来反映局部空间自相关程度。本研究基于 GeoDa 软件通过 Local Moran's *I* 对子午岭地区各单元土壤保持变化的空间关联特征进行分析,局部空间自相关公式^[31]为:

$$\text{Local Moran's } I = \left(\frac{x_i - \bar{x}}{m} \right) \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_j - \bar{x}) \quad (7)$$

$$m = \left(\sum_{j=1}^n x_j^2 \right) / (n - 1) - \bar{x}^2 \quad (8)$$

式中:Local Moran's *I* 的取值为[-1,1],<0 表示负相关,即空间单元非相似值的集聚(高低集聚或者低高集聚型);>0 表示呈正相关,即该空间单元周围相似值聚集分布(高高集聚或者低低集聚型);=0 表示不相关。*n*为空间单元个数;*x_i*和 *x_j*分别为区域 *i* 和 *j* 的观测值;*W_{ij}*为区域 *i* 和 *j* 的空间邻接关系。

1.2.3 地理探测器原理 地理探测器主要包括风险探测、因子探测、生态探测、交互探测 4 个模块^[32],该方法的核心内涵是如果某个自变量对某个因变量有重要影响,那么变量和因变量的空间分布应该具有相似性,多用于影响因素定量识别和作用机制研究^[33-34]。本文依次使用“因子探测”和“交互探测”模块对研究区土壤保持变化的主要影响因子进行定量探测,模型公式^[32]为:

$$q=1-\frac{1}{N\sigma^2}\sum_{i=1}^LN_i\sigma_i^2$$
 (9)

式中: q 为各指标对土壤保持量的探测力值,进行显著性检验; q 取值范围为 $0\sim 1$,越接近 1 则表示指标对土壤保持量空间分异性的解释力越强; N 、 σ^2 分别表示研究区的样本量、方差, L 表示因变量或自变量的分区; N 、 σ_i^2 分别指 i ($i=1,2,\cdots,L$) 层

样本量和方差。
1.3 数据来源及处理

InVEST 泥沙输移模块需要的数据层有土地利用栅格图、降雨侵蚀力因子(R)、土壤可蚀性因子(K)、流域矢量图、地形因子(LS)、植被覆盖与管理因子(C)、水土保持措施因子(P)等,基础数据来源及处理见表 2。

表 2 数据来源及处理

数据类型	数据来源	数据处理
土地利用数据 (2000 年,2010 年, 2017 年)	中国科学院资源环境科学数据中心 (http://www.resdc.cn/), $30\text{ m}\times 30\text{ m}$	2017 年土地利用数据是在 2015 的年的基础上结合 Landsat 影像、Google 地图、水经注影像人工解译更新获得,经验证解译精度达 83%以上,满足研究要求
气象数据 (1990—2017 年)	中国气象数据网(http://cdc.cma.gov.cn/),一般站点来自于中国科学院资源环境科学数据中心	气象数据包括研究区及周边共计 19 个站点的日降水数据,求得 10 年月平均降雨量、年总降水量参与计算,根据公式求得降雨侵蚀力因子,后利用专业气象差值软件 Auspline 进行空间化
土壤数据	来源于中国科学院南京土壤研究所在中国土壤信息系统 http://www.issas.ac.cn/kxcb/zgtrxxxt/	在 1:100 万土壤图上截取得到研究区土壤类型矢量图层,根据土壤机械组成计算土壤可蚀性因子,然后借助 ArcGIS 10.4 软件将土壤类型矢量图转换成 $30\text{ m}\times 30\text{ m}$ 的栅格图层
流域矢量图	地理空间数据云平台(http://www.gscloud.cn/)	选取 ASTER GDEM V2 数据集,在 GIS 中对 DEM 进行填洼、流向流量计算、汇流累计量计算等操作,提取子流域矢量图
植被覆盖与 水土保持措施因子	文献[25-30]	参考相近区域的研究成果并结合区域实际状况进行构建,生成生物物理系数表

2 结果与分析

2.1 退耕还林还草背景下子午岭地区土地利用变化特征

子午岭地区土地利用以耕地、林地和草地为主,分别占总面积的 29.41%,27.86%和 44.60%。自退耕还林还草政策实施以来,子午岭地区的土地利用格局发生了明显改变,耕地大幅减少,草地和林地增加明显,年均变化幅度分别为 -0.81% 、 0.41% 和

0.32% ;土地利用转移矩阵(表 3)显示:耕地共减少约 $1\,698.16\text{ km}^2$,主要转出为草地、林地和建设用地,分别占耕地转出量的 67.34%,24.30%和 7.35%;草地的转入量最大(净增加约 884.26 km^2),其中 99.63%来自于耕地的转入;林地的净增加量为 616.64 km^2 ,其中 65.36%来自于耕地的转入,34.57%来自于草地;建设用地和未利用地增长最快,年均变化幅度分别为 2.62%和 58.59%;水体面积变化较为稳定,整体略有扩张,年均增加率为 0.17%。

表 3 2000—2017 年子午岭地区土地利用转移矩阵 单位: km^2

指标	2000 年						2017 年总计
	耕地	林地	草地	水体	建设用地	未利用地	
2017 年	耕地	10517.30	12.11	34.58	1.78	1.24	10567.22
	林地	424.76	8848.18	224.71	0.28	0.10	9498.03
	草地	1177.28	3.19	16014.98	0.55	0.49	17196.63
	水体	2.68	0.88	3.67	127.49	0.02	134.75
	建设用地	128.53	4.92	13.37	0.61	327.11	475.31
	未利用地	14.84	12.12	21.06	0.16	0.00	51.77
2000 年总计	12265.38	8881.39	16312.37	130.88	328.96	4.72	37923.70
净转换量	-1698.16	616.64	884.26	3.87	146.35	47.05	—

对面积变化较为显著的林地、草地和建设用地进行空间化发现,新增林地和草地主要分布在核心林区(植被覆盖度高于 70%的区域)以外的区域,聚集分布在东北部的吴起、志丹、安塞、宝塔和甘泉等地。其中,吴起东北部的林地增加较为明显,甘泉中部多新增草地。子午岭地区 99.63%的新增草地来自于耕地,而 65.36%

的新增林地来自耕地。因此,图 2 中林地和草地集中增加的区域也是耕地普遍减少的区域;而新增建设用地聚集分布在核心林区外围的南部和西南部,主要包括王益、印台、耀州、正宁等县区,这些地区人口密度大,经济发展程度较高,伴随当前城镇化进程的不断加快,区内大量耕地转化为城镇建设用地。

2.2 子午岭地区土壤保持服务时空变化多尺度分析

2.2.1 2000—2017 年子午岭地区土壤保持时空分布

2000—2017 年子午岭地区平均土壤保持量总体呈上升趋势(图 3)。2000 年全区平均土壤保持量为 83.77 t/(hm² · a),2010 年增长至 87.88 t/(hm² · a),相比 2000 年增长了约 4.91%;而后年均增长约 2.81%,至 2017 年子午岭地区平均土壤保持量增至 105.20 t/(hm² · a)。总体上,子午岭地区土壤保持呈中间高,四周低的空间分布格局(图 3)。低值区的空间分布较为稳定,主要集中在南部,大致呈半环状围绕核心林区分布,多年均值介于 17.69~57.84 t/(hm² · a),且分布范围不断减小。2000 年全区土壤保持量总体较低,土壤保持高值区零星分布在核心林区西北部;2010 年高值区向南部转移,主要集聚在合水、宁县、正宁等县区;2017 年伴随全区土壤保持量的显著增加,土壤保持高值区范围亦有所扩张,前一时期的

塞和宝塔等县区。

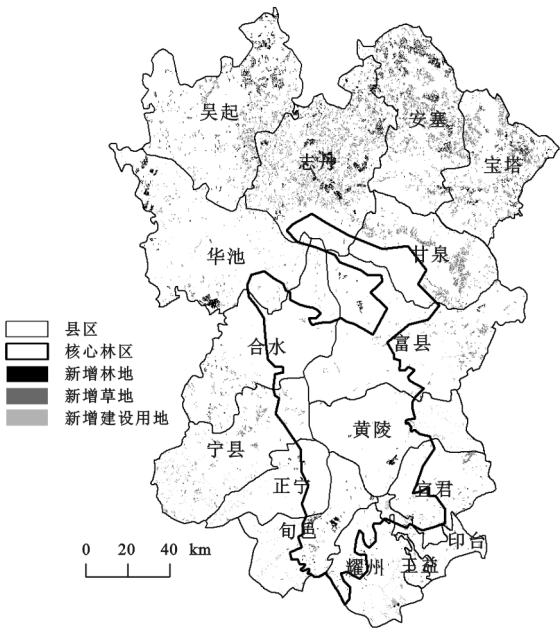


图 2 2000—2017 年子午岭地区新增用地空间分布

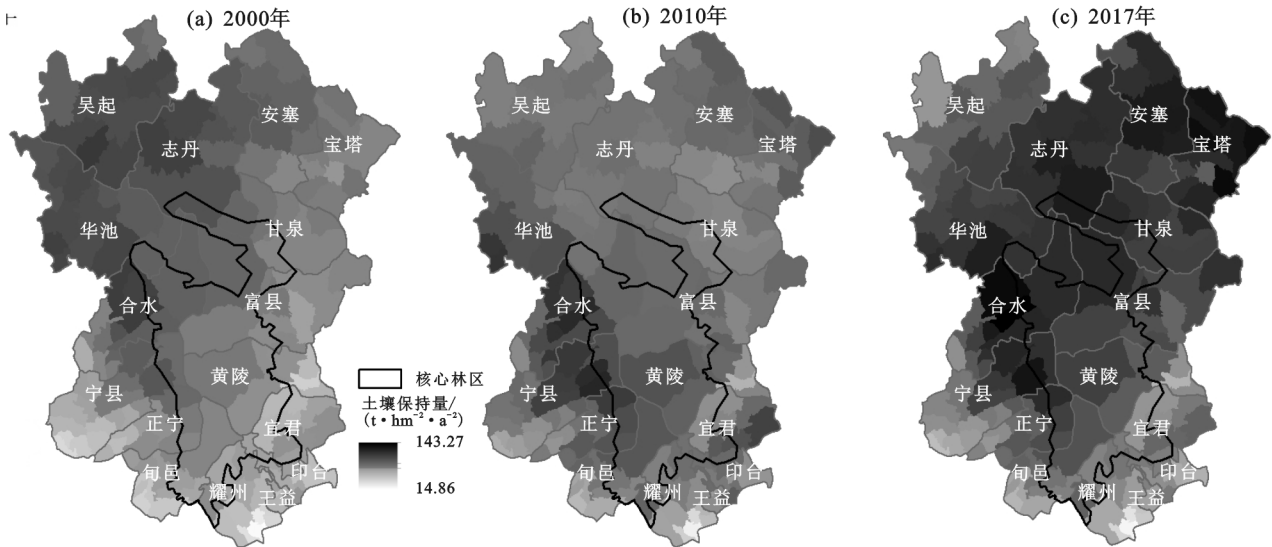


图 3 2000—2017 年子午岭地区土壤保持服务时空分布特征

2.2.2 基于地类的土壤保持时空变化 按单位面积土壤保持量对各地类进行排序:林地>草地>耕地>水域>建设用地>未利用地(图 4)。其中,耕、林、草 3 大地类的单位面积土壤保持量始终大于区内平均值,水体、建设用地和未利用地则相反,低于区内平均值;时间变化上,各地类的单位面积土壤保持量均呈增长趋势,尤其是林地的单位面积土壤保持量,其在 2 个时段(2000—2010 年、2010—2017 年)的增长量分别占各地类总增长量的 43.12%和 27.17%。

2.2.3 基于地形的土壤保持时空变化 根据研究区实际地形地貌特征,在临界坡度分级法中考虑土地利用和水土保持措施布设因素^[35],将研究区坡度划分为 6 级:0~2°(平地),2°~6°(缓平地),6°~15°(缓地),15°~25°(斜坡),25°~35°(缓陡坡),>35°(陡坡)。研究区海拔介于 534~1 856 m,为体现垂

直差异,大致以 200 m 为间距将研究区划分为 6 级:<750,750~950,950~1 150,1 150~1 350,1 350~1 550,>1 550 m。

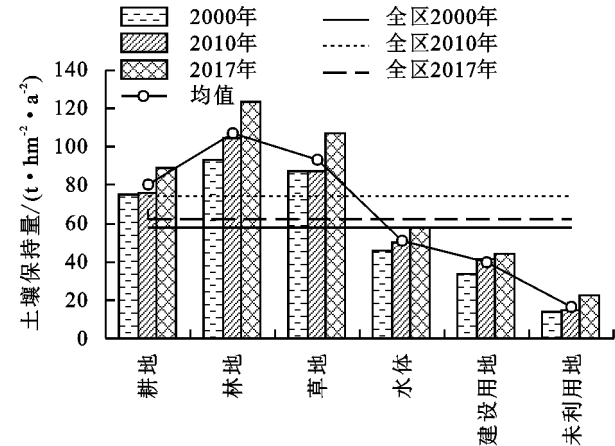


图 4 基于地类的土壤保持变化特征

由图 5 可知,随海拔梯度的上升土壤保持量先升后降。在<750 m 的第 1 阶梯土壤保持量最低(39.96 t/(hm²·a)),此后土壤保持不断增长并在第 5 阶梯处(1 350~1 550 m)达到最大值(98.48 t/(hm²·a)),之后土壤保持量再次下降。时间变化上,在第 3 和第 4 阶梯处土壤保持量一直呈增加趋势,而第 1,2 阶梯则分别在 2000—2010 年增长,2010—2017 年下降;第 5,6 阶梯则分别在 2000—2010 年下降,2010—2017 年增长。

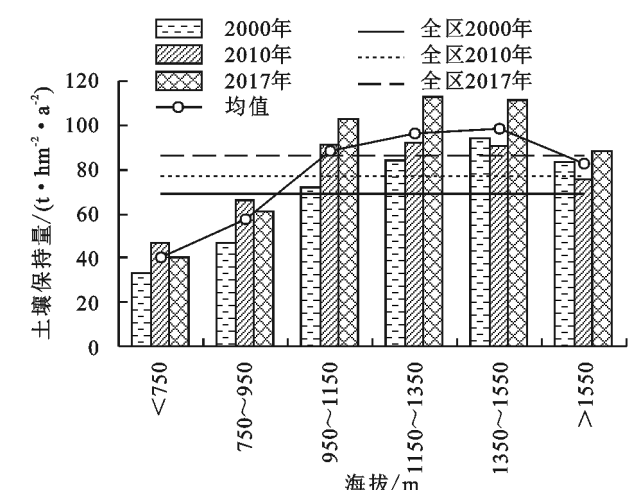


图 5 基于海拔的土壤保持变化特征

土壤保持量随坡度的增大而增大(图 6)。在 0~2°间土壤保持量最低(1.89 t/(hm²·a)),此后土壤保持量随坡度增加快速增长,并在坡度>35°时达到最高值(98.48 t/(hm²·a))。时间上,不同坡度处的土壤保持量变化方向一致,随时间推移不断增大,特别是 2010—2017 年土壤保持增长尤为显著,这和全区整体变化规律相一致。

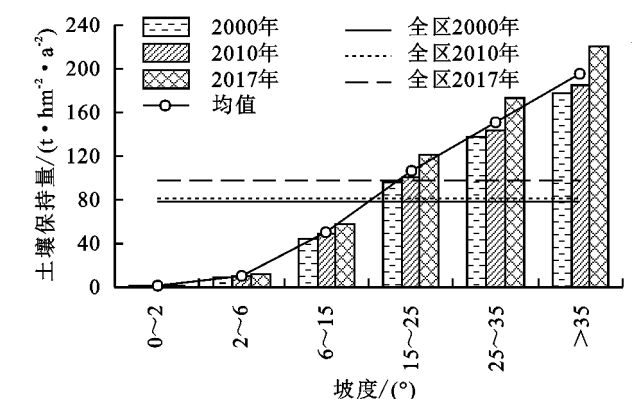


图 6 基于坡度的土壤保持变化特征

子午岭地区不同坡向间土壤保持存在差异(图 7)。其中,西坡和东坡处土壤保持量最高,单位面积土壤保持量分别为 105.23,101.18 t/(hm²·a),西北、东南和东北坡向上的单位面积土壤保持量低于平均水平,分别为 82.82,84.12,85.75 t/(hm²·a)。与全区变化趋势相一致,研究期间各坡向土壤保持量均随时间增大,且后一时期的增长更显著。

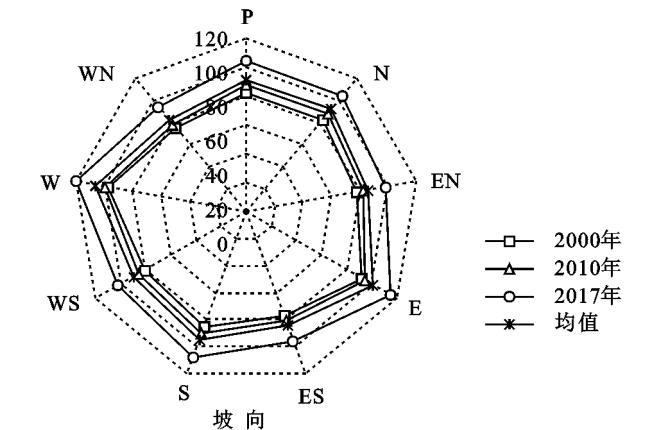


图 7 基于坡向的土壤保持变化特征

2.3 土壤保持显著变化区域识别

2.3.1 2000—2017 年子午岭地区土壤保持时空变化

2000—2017 年间子午岭地区土壤保持整体呈增加趋势,但不同阶段土壤保持变化时空分布存在一定差异(图 8),土壤保持量总的变化范围为-26.60~46.89 t/hm²。2000—2010 年,区内 56.77%区域土壤保持量增加(年均增加量约 1.79 t/hm²),43.23%的区域土壤保持量降低(年均减少量约 1.21 t/hm²);2010—2017 年,全区 86.47%的区域土壤保持量增加(年均增加量约 2.78 t/hm²),仅 13.53%的区域下降(年均减少量约 0.88 t/hm²);就整个研究时段来看,子午岭地区 88.80%的区域土壤保持量增加(年均增加量约 1.36 t/hm²),11.20%的区域土壤保持量有所降低(年均减少量约 0.62 t/hm²)。

空间上,2000—2010 年土壤保持下降区域位于子午岭西北部,主要以吴起和志丹为中心;高增长区以环状形式分布于核心林区的西南—南部—东南区域(图 8a)。2010—2017 年土壤保持变化的分布格局较前一时期发生反转,增长区主要集中在东北部,特别是志丹东南部、安塞南部、宝塔及甘泉北部;而下降区主要聚集在耀州、王益、印台和宜君等区域(图 8b)。整个研究时段内,土壤保持显著上升区分布于研究区东北部,主要包括安塞、宝塔和甘泉的部分区域;土壤保持量显著下降区域主要集中在吴起和华池的西北部(图 8c)。

2.3.2 基于 GeoDa 的土壤保持显著变化区域识别

通过对 2000—2010 年、2010—2017 年、2000—2017 年 3 期土壤保持变化量局部 Moran's *I* 指数的计算发现,不同时段土壤保持变化量局部 Moran's *I* 指数均大于 0.8(2000—2010 年为 0.926,2010—2017 年为 0.942,2000—2017 年为 0.893),且都通过了显著性检验(0.01 水平)。为了进一步明确土壤保持变化的空间分布特征,通过 GeoDa 将各乡镇土壤保持变化与空间位置匹配进行局部空间自相关 LISA 集聚

图的绘制发现,子午岭地区土壤保持变化空间集聚类型单一,仅高高集聚和低低集聚 2 类,这可能是受林区自然环境背景单一的影响(图 9)。2000—2010 年土壤保持变化高高集聚区包括 47 个乡镇,主要集中在南部;低低集聚区分布在西北,包括吴起、志丹和华池等的 32 个乡镇。2010—2017 年土壤保持变化低

低集聚区主要包括西南和东南的 32 个乡镇,而高高集聚区转移到了东北区域(44 个乡镇)。就整个研究时段来看子午岭地区土壤保持变化高高集聚区位于东北部,主要包括了安塞、宝塔、甘泉和富县的 24 个乡镇;低低集聚区(26 个乡镇)主要分布在西北部的吴起和华池,以及东南部的耀州和王益。

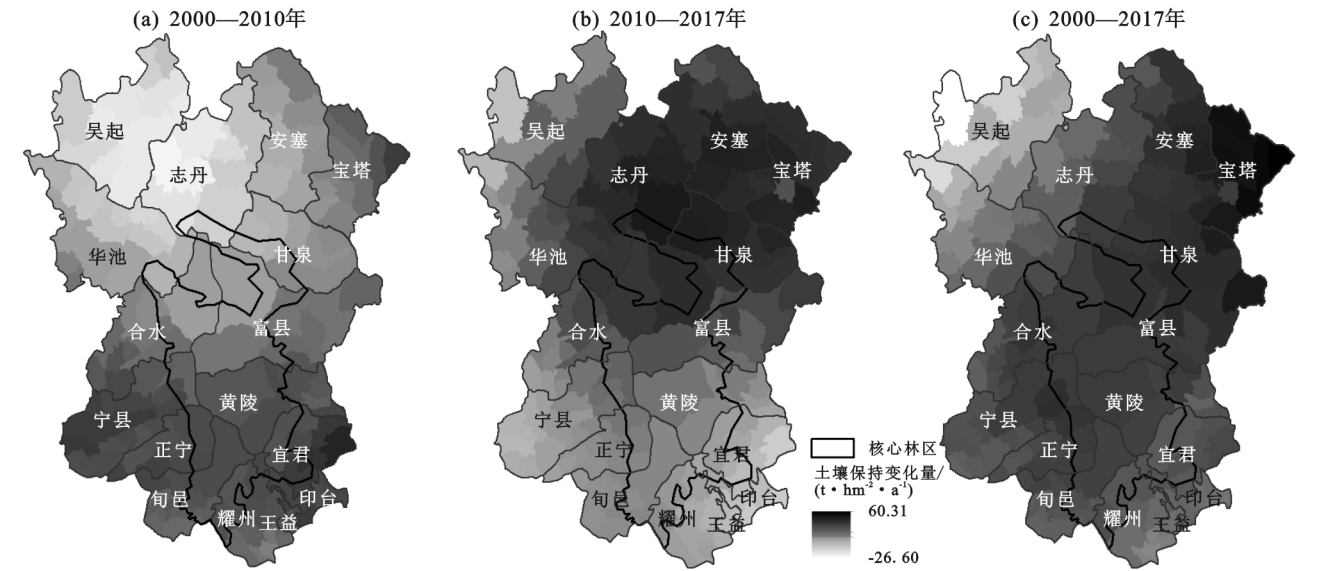


图 8 2000—2017 年午岭地区土壤保持服务时空变化

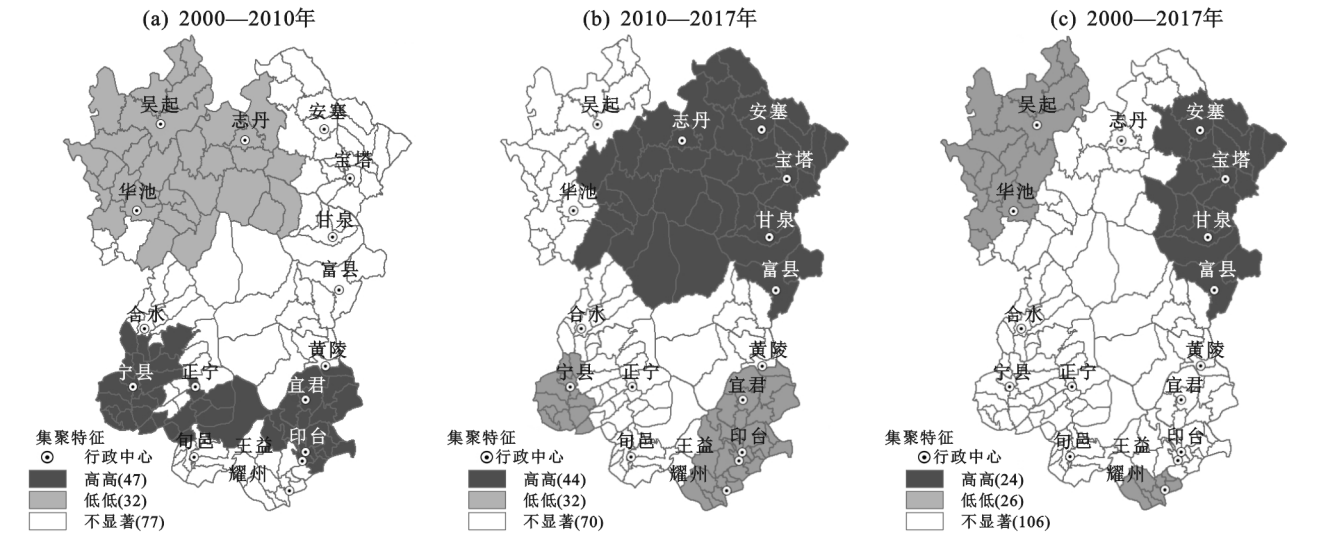


图 9 土壤保持变化局部空间自相关 LISA 集聚图

2.4 基于地理探测器土壤保持服务变化影响因素探测
2.4.1 土壤保持服务变化因子探测结果 土壤保持是一个复杂的过程,既受到地形、气候、土地利用、土壤属性等自然因素影响,还受到来自人类社会经济活动的干预,各要素相互叠加在复杂的交互作用下形成土壤保持服务。降水影响土壤可蚀性,植被覆盖能够保护表土,减少土壤流失量,而土地利用、经济发展水平和人口密度能够反映人类活动强弱,同时已有研究^[36]指出,景观破碎化会加重水土流失程度,因此本文分别选取了降水(P)、归一化植被指数($NDVI$)、香农多样性指数($SHDI$)来反映降水、植被和景观破碎化等自然背景;土地利用强度(LUI)、人口密度

(POP)、 GDP 密度(GDP)等社会经济因子来表征人类活动。运用 Pearson 双变量相关对土壤保持变化与各因子变化进行分析,由表 4 可知,2000—2017 年土壤保持变化分别与降水、 $NDVI$ 、人口密度变化呈显著正相关,与土地利用强度、 GDP 密度变化呈显著负相关。
为开展土壤保持变化影响因子的差异化探测,基于土壤保持服务变化集聚分区结果,分别对高高集聚区、低低集聚区、不显著区域及子午岭全区土壤保持变化的主要影响因素进行地理探测分析(表 5)。
由表 5 可知,(1)高高集聚区仅 $NDVI$ 通过了 0.01 水平显著性检验且 q 值最大(0.016 6),其余因子

均未通过显著性检验。说明自退耕还林还草政策实施以来,高高集聚区主要受 NDVI 影响,即植被覆盖度的提高是土壤保持服务改善的首要因素。(2)低低集聚区仅景观破碎度未通过显著性检测(0.05 水平),各因子按 q 值大小依次排列为降水>土地利用强度>GDP 密度>人口密度>NDVI>景观破碎度。由此知低低集聚区土壤保持变化主要受降水、土地利用强度及 GDP 密度、人口密度等经济因子变化的影响,在各因子的复杂交互下,该区域土壤保持量轻微下降,形成了土壤保持变化低低集聚区。(3)变化不

显著区域因子探测 q 值中,仅 NDVI 未通过显著性检验,其余因子皆通过了 0.01 水平显著性检验。但是各因子的平均 q 值仅 0.001 3,且各因子 q 值相差甚微,造成区域土壤保持量变化不显著。(4)子午岭全区土壤保持变化因子探测结果显示,各因子均通过了显著性检验,对各因子按照 q 值大小进行排列有:降水>GDP 密度>人口密度>NDVI>土地利用强度>景观破碎度。发现全区土壤保持变化受降水、GDP 密度及人口密度变化的影响最大,同时 NDVI 也有一定作用,而土地利用强度和景观破碎度的作用最小。

表 4 2000—2017 年子午岭地区土壤保持动态影响因子

指标	降水变化	NDVI 变化	景观破碎度变化	土地利用强度变化	人口密度变化	GDP 密度变化
土壤保持量	0.226**	0.058**	0.008	-0.025**	0.107**	-0.039**

注: *、** 分别表示在 0.05,0.01 水平(双侧)上显著相关。下同。

表 5 不同集聚区土壤保持变化因子探测 q 值

集聚区	降水变化	NDVI 变化	景观破碎度变化	土地利用强度变化	人口密度变化	GDP 密度变化
高高集聚区	0.0032	0.0166**	0.0090	0.0026	0.0071	0.0079
低低集聚区	0.2350**	0.0325**	0.0075	0.1690**	0.0601**	0.0751**
不显著区域	0.0077**	0.0013	0.0061**	0.0073**	0.0035**	0.0107**
子午岭全区	0.0536**	0.0102**	0.0028*	0.0034**	0.0316**	0.0464**

2.4.2 土壤保持服务变化影响因子交互探测结果
生态系统服务的影响因子间通常具有复杂交互性,自然和社会经济背景不同因子间的交互程度和作用方向也存在差异。子午岭土壤保持变化因子交互探测显示各因子变化对土壤保持变化均起交互增强作用。由图 10 可知:(1)高高集聚区交互探测结果显示,NDVI∩GDP 密度、NDVI∩景观破碎度、景观破碎度∩人口密度、景观破碎度∩GDP 密度的贡献率最高,分别为 10.38%,9.81%,8.58%,8.08%;而在所有交互因子中降水∩人口密度、土地利用强度∩人口密度、降水∩土地利用强度的交互贡献率最低。与单因子探测结果相印证,高值区前列交互因子对中均包含了 NDVI,进一步证实了子午岭土壤保持高高集聚区主要受植被覆盖变化影响。(2)低低集聚区交互探测结果中降水∩GDP 密度、降水∩土地利用强度、降水∩人口密度、降水∩景观破碎度的交互贡献率最高,分别为 10.29%,10.03%,9.62%,9.25%;而人口密度∩GDP 密度、NDVI∩景观破碎度、景观破碎度∩人口密度的贡献率最低。(3)不显著区域交互探测结果显示,NDVI∩GDP 密度、降水∩GDP 密度、土地利用强度∩GDP 密度、降水∩土地利用强度的贡献率最高,分别为 9.62%,9.55%,8.80%,8.48%;而景观破碎度∩人口密度、NDVI∩人口密度、人口密度∩GDP 密度的作用最小。(4)子午岭全区因子交互探测显示,降水∩土地利用强度、土地利用强度∩GDP 密度、降水∩GDP 密度、NDVI∩GDP 密度的贡献率最高,分别为 10.91%,10.05%,9.00%,8.99%;而人

口密度∩降水、土地利用强度∩人口密度、GDP 密度∩降水的交互作用最小。

3 讨论

基于海拔梯度的分析显示,土壤保持量随海拔先升高后下降,其变化规律与林地、草地占比随海拔的变化相一致,与经济、人口密度随海拔的变化相反。低海拔区域多是人类集聚的河谷和平原区,城镇和交通建设用地密集,林草分布少,对降雨的自然截留作用弱,水土保持能力较差。重力作用下,通常当坡度越大时地表水流失风险越大。退耕还林还草政策实施以来黄土高原 15°以上的坡耕地实行了大规模退耕^[37-39],子午岭地区的林草比重随坡度不断增大,植被冠层能够有效的减小降雨动能,反而使得子午岭地区土壤保持能力随坡度增大而增强。基于地类的土壤保持分析显示建设用地的土壤保持量最低,生态用地林地和草地的土壤保持量最高,这主要受各地类植被覆盖度及土地利用强度影响;基于坡向的分析显示,西坡和东坡分别由于人类活动微弱和林草比重较高而土壤保持能力最强。随时间变化各梯度和分区处的土壤保持量均呈上升趋势,仅在<950 m 以下的 2 个海拔梯度处 2000—2017 年的土壤保持量有所降低,这主要是受该区域林草等生态用地面积下降和建设用地增长的双重作用;而各用地类型土壤保持量持续增长主要和 InVEST 土壤保持模块计算原理相关,在潜在土壤侵蚀量增大而实际的土壤侵蚀量和地块泥沙持留量较为稳定的情况下,各地类的土壤保持量不断增大。

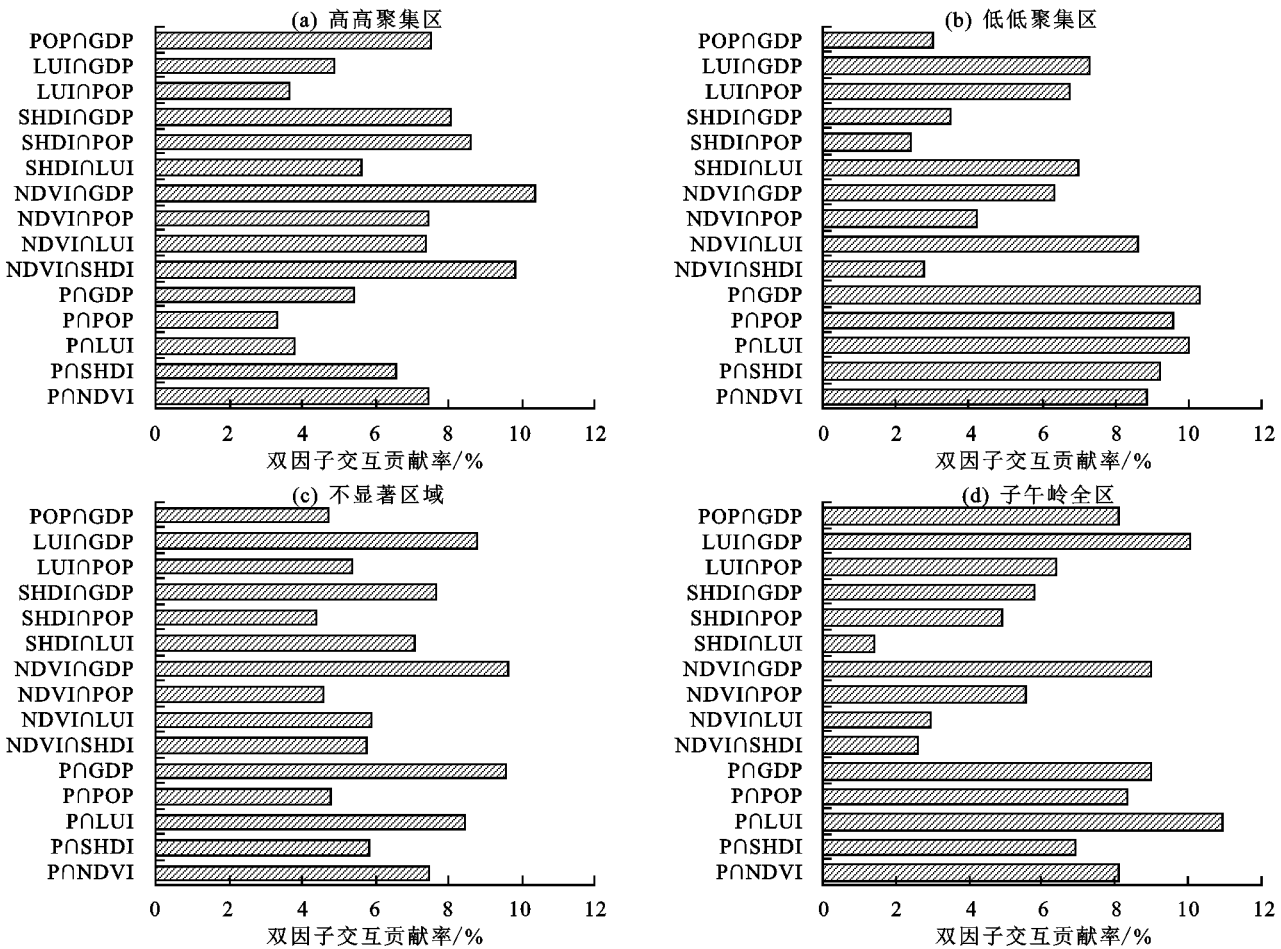


图 10 不同集聚区土壤保持变化因子交互贡献率

子午岭核心林区的植被覆盖度在 70% 以上, 土地利用格局最为稳定, 且人类活动作用微弱, 使得其土壤保持服务较为稳定(约占总面积的 65.77%)。土壤保持变化高高集聚区主要分布在东北区域, 地理探测结果显示其受 NDVI 作用最大, 子午岭东北部是林草地增长最快的区域, 林草用地的单一动态度高达 0.44% (平均值 0.35%) ; 而低低集聚区的建设用地增长最快, 单一动态度达 3.26% (平均值 2.62%) ; 土壤保持变化不显著区的林草地增长率低于高高集聚区, 建设用地增长率低于低低集聚区。低低集聚区土壤保持变化受降雨的作用最大, 降雨和 GDP 密度、土地利用强度等因子的交互作用下导致土壤保持服务有所下降或增长不明显。就子午岭全区来看, 土壤保持变化在降水、植被覆盖、人口和 GDP 密度等自然和社会经济因子的复杂交互作用下整体呈增长趋势, 但是存在明显空间分异性。

较之常用的 RUSLE 模型, InVEST 模型泥沙输移比模块在计算土壤保持量时考虑了地块自身拦截上游沉积物的能力, 计算结果更加精确。通常 InVEST 模型在土壤保持计算过程中默认地形因子不变, 然而黄土高原地区地表破碎, 且土壤可蚀性强, 在强降雨影响下地表常会发生微小形变, 若不同时期土壤保持计算中皆使

用同一地形数据将使评估结果产生一定误差。今后应设法获取更高时空分辨率的 DEM 数据来提取地形因子, 以使土壤保持服务评估达到更高精度。

4 结论

(1) 2000—2017 年子午岭地区大量坡耕地转为林地和草地, 林地和草地面积增加显著; 研究时段内土壤保持服务呈上升趋势, 总体上子午岭中心区域的土壤保持服务要优于四周; 林地的单位面积土壤保持量最高; 随海拔上升土壤保持先增后减, 随坡度增大土壤保持量也增大, 区内西坡和东坡处的土壤保持能力最强。

(2) 区内以乡镇为单元的土壤保持变化空间自相关性强。根据空间自相关局部 LISA 集聚图, 子午岭土壤保持变化集聚类型主要有高高型和低低型, 高高集聚区位于东北部, 低低集聚区主要分布在西北部 and 南部。

(3) 各集聚区土壤保持变化的主要影响因素不同, 但各因子变化对土壤保持变化均起交互增强作用。高高集聚区土壤保持变化主要受 NDVI 的影响; 低低集聚区主要受降水和土地利用强度变化的作用; 不显著区域受各因子的影响微弱; 整个子午岭地区土壤保持变化主要受降水、GDP 密度、人口密度和 NDVI 变化的影响。在各因子的交互作用下, 子午岭地区土壤保持呈现差异化分布格局。

参考文献:

[1] Cairns J. Protecting the delivery of ecosystem services [J].Ecosystem Health,2010,3(3):185-194.

[2] 傅伯杰,于丹丹.生态系统服务权衡与集成方法[J].资源科学,2016,38(1):1-9.

[3] 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.

[4] 陈苗新,张金池.近 10 年全球水土保持研究热点问题述评[J].南京林业大学学报(自然科学版),2018,42(3):167-174.

[5] 王晓峰,马雪,冯晓明,等.重点脆弱生态区生态系统服务权衡与协同关系时空特征[J].生态学报,2019,39(20):7344-7355.

[6] Oost K V, Verstraeten G, Doetterl S, et al. Legacy of human-induced C erosion and burial on soil-atmosphere C exchange [J].Proceedings of the National Academy of Sciences,2012,109(47):19492-19497.

[7] 傅伯杰,周国逸,白永飞,等.中国主要陆地生态系统服务功能与生态安全[J].地球科学进展,2009,24(6):571-576.

[8] 张琨,吕一河,傅伯杰,等.黄土高原植被覆盖变化对生态系统服务影响及其阈值[J].地理学报,2020,75(5):949-960.

[9] 张宝庆,邵蕊,赵西宁,等.大规模植被恢复对黄土高原生态水文过程的影响[J].应用基础与工程科学学报,2020,28(3):594-606.

[10] 周日平.黄土高原典型区土壤保持服务效应研究[J].国土资源遥感,2019,31(2):131-139.

[11] 薛亚永,王晓峰.黄土高原森林草原区退耕还林还草土壤保持效应评估[J].干旱地区农业研究,2017,35(5):122-128.

[12] 刘文超,刘纪远,匡文慧.陕北地区退耕还林还草工程土壤保护效应的时空特征[J].地理学报,2019,74(9):1835-1852.

[13] 梁占岐,李锦荣,郭建英,等.退耕还林工程建设对土壤侵蚀的影响:以安塞县为例[J].水土保持研究,2016,23(3):77-81.

[14] 彭文英,张科利,陈瑶,等.黄土坡耕地退耕还林后土壤性质变化研究[J].自然资源学报,2005,20(2):272-278.

[15] 陈文媛,徐学选,华瑞,等.黄土丘陵区林草退耕年限对土壤团聚体特征的影响[J].环境科学学报,2017,37(4):1486-1492.

[16] Cheng L, Wu P T, Zhao X. Soil mineralized nutrients changes and soil conservation benefit evaluation on ‘green project grain’ in ecologically fragile areas in the south of Yulin city, Loess Plateau [J].African Journal of Biotechnology,2011,10(12):2230-2237.

[17] 杨波,王全九,董莉丽.榆林市还林还草后土壤保持功能和经济价值评价[J].干旱区研究,2017,34(6):1313-1322.

[18] 滕哈,夏建新,任华堂.退耕还林还草工程对黄土高原延河流域水土保持功能影响研究[J].泥沙研究,2015(4):14-19.

[19] 闫瑞,张晓萍,李够霞,等.基于 RUSLE 的北洛河上游流域侵蚀产沙模拟研究[J].水土保持学报,2017,31(4):32-37.

[20] 尹礼唱,王晓峰,张琨,等.国家屏障区生态系统服务权衡与协同[J].地理研究,2019,38(9):2162-2172.

[21] 杨艳芬,王兵,王国梁,等.黄土高原生态分区及概况[J].生态学报,2019,39(20):7389-7397.

[22] 侯红艳,戴尔卓,张明庆.InVEST 模型应用研究进展[J].首都师范大学学报(自然科学版),2018,39(4):62-67.

[23] Wischmeier W H, Smith D D. Rainfall energy and its relationship to soil loss [J].Transactions American Geophysical Union,1958,39(2):285-291.

[24] Williams J R, Arnold J G. A system of erosion;Sediment yield models [J].Soil Technology,1997,11(1):43-55.

[25] 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.

[26] 王森.延安市土地利用变化及其土壤保持功能效应研究[D].陕西 杨凌:中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心),2018.

[27] 党虹.基于 InVEST 模型的称钩河流域生态系统服务评价[D].兰州:兰州大学,2018.

[28] 陈童尧,贾燕锋,王佳楠,等.基于 InVEST 模型的祁连山国家级自然保护区土壤保持现状与功能[J].干旱区研究,2020,37(1):150-159.

[29] 何莎莎.基于 InVEST 模型的太行山淇河流域水土流失研究[D].河南 开封:河南大学,2018.

[30] 包玉斌.基于 InVEST 模型的陕北黄土高原生态服务功能时空变化研究[D].西安:西北大学,2015.

[31] Anselin L. Local indicators of spatial association: LISA [J].Geographical Analysis,1995,27:93-115.

[32] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.

[33] 王欢,高江波,侯文娟.基于地理探测器的喀斯特不同地貌形态类型区土壤侵蚀定量归因[J].地理学报,2018,73(9):1674-1686.

[34] 李佳洺,陆大道,徐成东,等.胡焕庸线两侧人口的空间分异性及其变化[J].地理学报,2017,72(1):148-160.

[35] 汤国安,宋佳.基于 DEM 坡度图制图中坡度分级方法的比较研究[J].水土保持学报,2006,20(2):157-160,192.

[36] 张金茜,柳冬青,钱彩云,等.流域景观格局对土壤保持服务的影响[J].中国环境科学,2019,39(3):1164-1172.

[37] 汪滨,张志强.黄土高原典型流域退耕还林土地利用变化及其合理性评价[J].农业工程学报,2017,33(7):235-245,316.

[38] 苏冰倩,王茵茵,上官周平.西北地区新一轮退耕还林还草规模分析[J].水土保持研究,2017,24(4):59-65.

[39] 巩杰,李红瑛,曹二佳,等.陇中黄土丘陵区乡镇尺度林地转型时空分异:生态建设工程的效用[J].生态学杂志,2019,38(7):2184-2190.