

黄河上游地区土壤保持服务时空变化及归因

吴成永^{1,2,3}, 曹广超^{2,3}, 陈克龙^{2,3}, 巴丁求英^{2,3},
刘宝康¹, 王润科¹, 石亚亚¹, 鄂崇毅^{2,3}

(1.天水师范学院资源与环境工程学院,甘肃 天水 741001;2.青藏高原地表过程与生态保育教育部重点实验室,青海省自然地理与环境过程重点实验室,西宁 810008;3.高原科学与可持续发展研究院,西宁 810008)

摘要:黄河上游地区,横跨干旱、半干旱、半湿润、湿润/半湿润气候区,其土壤保持服务是黄河流域防止水土流失和推动高质量发展的重要保障。基于修正通用土壤流失方程(RUSLE)、地理加权回归(GWR)模型、趋势线法和本文定义的因子影响度等指标方法,使用遥感、降水等数据,识别了黄河上游地区2001—2015年间土壤保持服务变化分区,分析了其时空变化特征,探寻了主导影响因子并量化了影响度。结果表明:(1)土壤保持服务下降区主要位于研究区东北部的半干旱、干旱气候区,集中分布在积石峡至河口村的黄河沿岸,上升区主要位于研究区西部、南部的半干旱、半湿润、湿润/半湿润气候区,集中分布在山地和高原。(2)降水是影响下降区土壤保持服务的主导因子,植被覆盖和降水分别是明显和略微上升区的主导因子。(3)面对未来降水的不确定性,提高植被覆盖度是提升土壤保持服务的根本策略,并进一步提出了基于主导因子影响强度的水土保持措施建议。研究成果可为应对未来气候变化,制定分区分类策略措施提升土壤保持服务提供科学依据。

关键词:黄河上游地区;土壤保持服务;主导因子;修正通用土壤流失方程;地理加权回归模型

中图分类号:S157.2

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2022)04-0143-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2022.04.019

Spatio-temporal Variation in Soil Conservation Service and Its Influencing Factors in the Upper Reaches of the Yellow River

WU Chengyong^{1,2,3}, CAO Guangchao^{2,3}, CHEN Kelong^{2,3}, BA Dingqiuying^{2,3},

LIU Baokang¹, WANG Runke¹, SHI Yaya¹, E Chongyi^{2,3}

(1.School of Resources and Environmental Engineering, Tianshui Normal University,

Tianshui, Gansu 741001; 2.Key Laboratory of Tibetan Plateau Land Surface Processes and

Ecological Conservation, Ministry of Education, Qinghai Key Laboratory of Physical Geography and

Environmental Process, Xining 810008; 3.Academy of Plateau Science and Sustainability, Xining 810008)

Abstract: The upper reaches of the Yellow River span arid, semi-arid, sub-humid and humid/semi-humid climate zones. Soil conservation service (SCS) of the region is an important guarantee for preventing soil erosion and promoting high-quality development in the Yellow River Basin. We used the Revised Universal Soil Loss Equation, Geographically Weighted Regression model, trend line method and the factor influence degree defined in this paper, in combination with remote sensing and precipitation data, to identify the change regions of SCS in the upper reaches of Yellow River from 2001 to 2015, to analyzed spatial-temporal variation characteristics of SCS and then identified their influencing factors and quantified its influence degree. The results showed that: (1) The declining area of SCS was mainly located in arid and semi-arid climate region of the northeast parts of the study area, which was mostly concentrated along the Yellow River from Jishi Gorge to Hekou Village. The ascending area of SCS was mainly located in the semi-arid, humid and semi-humid climate region of the west and south of the study area, which was concentrated in

收稿日期:2022-01-11

资助项目:国家社会科学基金项目(14XMZ072,18BJY200);国家自然科学基金项目(41761017,41661023);甘肃省自然科学基金项目(21JR1RE293)

第一作者:吴成永(1978—),男,副教授,主要从事生态遥感研究。E-mail:giswuchengyong@163.com

通信作者:陈克龙(1965—),男,教授,主要从事生物地理与湿地生态研究。E-mail:ckl7813@163.com

鄂崇毅(1980—),男,教授,主要从事全球变化研究。E-mail:echongyi@163.com

mountains and plateaus. (2) Precipitation was the dominant factor affecting SCS in the declining subareas, while vegetation coverage and precipitation was the dominant factors affecting SCS in the significantly and slightly ascending subareas, respectively. (3) Facing the uncertainty in precipitation in the future, improving vegetation coverage was the fundamental strategy to improve SCS, and the suggestions of soil and water conservation measures were also put forwarded according to the influence intensity of dominant factors. This study could provide a scientific basis for coping with future climate change, formulating zoning and classification strategies and measures and improving soil conservation services.

Keywords: the upper reaches of the Yellow River; soil conservation service; dominant factor; Revised Universal Soil Loss Equation; Geographically Weighted Regression Model

土壤保持服务是生态系统提供的一项重要调节服务,包括潜在和实际供给服务。潜在供给服务是由于受到植被覆盖等生态系统结构和组分因素的影响,自然生态系统具有控制侵蚀和拦截泥沙等的潜在供给能力。当这种能力给人类带来粮食生产和清洁水质等效益时,潜在供给服务即变为生态系统为人类提供的实际土壤保持服务^[1]。气候变化,特别是温度和降雨模式的变化对生态、水文和土壤过程及土壤有机物、植物和作物等造成巨大影响^[2],进而影响粮食、水资源等的供给能力以及区域社会经济发展和人类福祉。因此,气候变化背景下土壤保持服务相关研究受到了国际社会的广泛关注^[3]。世界气候研究计划(WCRP)将土壤保持列入重要研究内容,一些国际会议探讨了气候变化与土壤保持等相关议题,如 2008 年第 15 届国际土壤保持大会、2017 年联合国粮农组织大会第 40 届会议、2021 年土地退化、土壤保持与可持续发展国际论坛(LASOSU)。

黄河流域横跨青藏高原生态屏障、黄土高原生态屏障及北方防沙带“两屏一带”,是我国水土流失防治的重点区域。经过多年持续不懈的治理,其水土流失严重局面得到初步扭转,但监测^[4]表明,2019 年水土流失面积达 26.42 万 km²,水土流失依然是构建生态安全屏障的短板。黄河上游地区,横跨干旱、半干旱、半湿润、湿润/半湿润 4 个气候区,作为黄河流域生态保护的关键地区,是一个发展问题和生态问题交织在一起的社会—经济—自然复合生态系统,其生态系统土壤保持服务是防止水土流失和推动高质量发展的重要保障。那么,黄河上游地区土壤保持服务基本特征及影响因素是什么?土壤保持服务在不同气候区的变化趋势如何,其主导影响因素是什么?这些科学问题的回答,将有助于深入理解土壤保持服务的变化机理,以及制定应对气候变化的策略措施。目前该区土壤保持的相关研究主要在黄河源^[5]、三江源^[6-8]、洮河流域^[9]、黄土高原^[10]、宁夏内蒙古河段^[11]和北方农牧交错带^[12]及其局部地区^[13-16]开展,全境范围内的

完整性研究较少,不足以形成关于土壤保持服务的系统性认识。同时,这些研究多数使用全局性的回归模型、相关分析、趋势分析和参数控制等方法得到整个研究区的影响因子,对于宏观制定水土保持政策具有一定的指导意义,但难以提出不同地域、气候区局部性的差异化参考建议。地理加权回归(geographically weighted regression, GWR)模型,是一种探索数据空间异质性的局部技术^[17],将空间位置信息纳入到回归方程,可以分析影响因子在空间上的差异性^[18],其分析结果对于实施基于地理位置的差异性水土保持措施具有指导意义。

鉴于此,本文运用广泛应用的土壤保持服务评估模型 RUSLE、GWR 模型和趋势线等方法,明晰黄河上游地区土壤保持服务时空动态特征,分析土壤保持服务在各气候区的变化趋势,在此基础上,结合本文提出的因子影响力和影响强度等指标方法,尝试探寻土壤保持服务变化的影响因子并量化影响度,以期为该地区应对气候变化制定有针对性的分区分类宏观策略和因地制宜的具体措施,为提升土壤保持服务提供科学依据,助力生态保护和高质量发展。

1 材料与方法

1.1 黄河上游地区

黄河上游是指从河源至内蒙古自治区托克托县河口村(图 1)。薛炯等^[19]以 DEM 数据运用河道烧录法与河道标量法划定了黄河上游流域;刘小鹏等^[20]从流域经济的角度出发,以省级行政区为基本单元,界定了黄河上游地区;杨永春等^[21]从地市行政区的角度界定了黄河上游地区。为构筑生态安全屏障和推进生态文明建设,我国以县级行政区为基本单元实施生态管理,基于此,本文将与黄河上游流域边界相交的县(市、区、旗)纳入黄河上游地区,共涉及 137 个县级行政区,其面积为 97.94 万 km²,占全国国土面积的 10.21%。

1.2 数据来源与处理

本文使用的主要数据见表 1,其中归一化植被指数

(NDVI)、降水量和土地覆被产品数据时段为 2001—2015 年。所有数据在 ArcGIS 10 软件平台下统一处理为 Albers 等积投影。

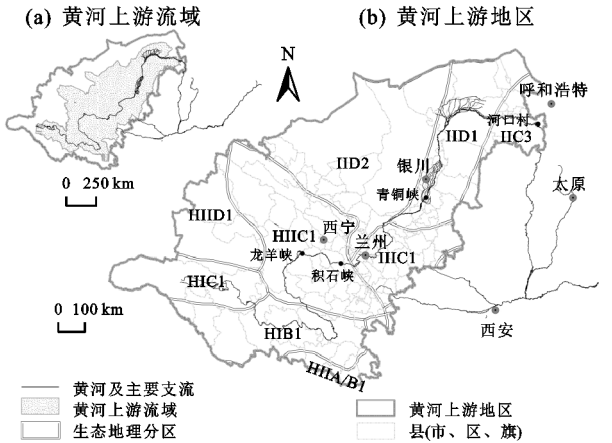
2 研究方法

2.1 土壤保持服务评估模型

土壤保持服务通常采用土壤保持量进行评估,基于 RUSLE 方程的土壤保持服务评估模型为^[22]:

$A_c = A_p - A_r = R \times K \times LS \times (1 - C \times P)$ (1)

式中: A_c 为土壤保持量 ($t/(hm^2 \cdot a)$),由潜在侵蚀(A_p)与实际侵蚀(A_r)之差决定; 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 为地形因子; C 为植被覆盖因子; P 为水土保持措施因子。本文中, R 使用修正的降雨侵蚀力公式^[23]; K 与 LS 采用中国环境保护部和发展改革委员会联合发布的《生态保护红线划定指南》(环办生态[2017]48 号)^[24]推荐的计算办法; C 采用王丽霞等^[25]的计算办法; P 采用地类赋值法^[26]。



注:黄河上游流域边界,来源于国家青藏高原科学数据中心;生态地理分区边界,来源于中国科学院资源环境数据中心,其中 IIC3 为内蒙古高原东部,半干旱区;IID1 为内蒙古高原西部及河套,干旱区;IID2 为阿拉善及河西走廊,干旱区;HIIA/B1 为柴达木盆地,干旱区;HIIC1 为晋中陕北甘东高原丘陵,半干旱区;HIIC1 为青东祁连山地,半干旱区;HIC1 为青南高原宽谷,半干旱区;HIB1 为果洛那曲丘状高原,半湿润区;HIIA/B1 为川西藏东高山深谷,湿润/半湿润区。

图 1 黄河上游地区位置

表 1 主要数据与来源

数据/产品	数据描述	来源/处理
植被指数	年度,1 km	徐新良.中国年度植被指数(NDVI)空间分布数据集.中国科学院资源环境科学数据中心数据注册与出版系统(http://www.resdc.cn/DOI),2018.DOI:10.12078/2018060601)
降水量	月度,1 km	彭守璋.(2020).中国 1 km 分辨率逐月降水量数据集(1901—2017).国家青藏高原科学数据中心,DOI: 10.5281/zenodo.3185722
土地覆被产品 MCD12Q1	年度,1 km	来源于美国国家航空航天局网站(https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/),使用植被功能型分类方案的土地覆被数据
数字高程模型	250 m	中国科学院资源环境数据中心,重采样至 1 km
土壤质地	1 km	世界土壤数据库(HWSD v1.1),中国境内数据源为第二次全国土地调查南京土壤研究所提供的 1:100 万土壤数据,从国家冰川冻土沙漠科学数据中心获取

2.2 趋势线法

使用趋势线法^[27],即以土壤保持量的变化斜率定量分析土壤保持服务的年际变化。

$$K_{Ac} = \frac{n \times \sum_i i \times A_{ci} - n \times \sum_i i \times \sum_i A_{ci}}{n \times \sum_i i^2 - n \times (\sum_i i)^2}$$
 (2)

式中: i 为年序号; n 为年数; K_{Ac} 为土壤保持量变化斜率,代表土壤保持服务变化趋势。当 $K_{Ac} > 0$,表明研究期间土壤保持量上升,土壤保持服务提升;当 $K_{Ac} < 0$,表明土壤保持量降低,土壤保持服务下降;当 $K_{Ac} = 0$,则土壤保持服务保持不变。

2.3 地理加权回归模型

GWR 模型考虑数据的空间位置,因逐点进行参数估计,其分析结果是局部性的,而非全局性的,其模型为^[28]:

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{k=1}^p \beta_k(u_i, v_i) x_{ik} + \epsilon_i$$
 (3)

式中: y_i 、 x_{ik} 、 (u_i, v_i) 和 $\beta_k(u_i, v_i)$ 分别为空间位置 i 处的因变量、解释变量、地理坐标和回归系数; $\beta_0(u_i, v_i)$ 为截距; P 为解释变量的个数; ϵ_i 为误差修正项,即残差。本文以土壤保持量为因变量,降水、海拔、坡度和植被覆盖度为解释变量在 ArcGIS 10 软件中进行 GWR 分析。

2.4 因子影响度指标及其计算

借鉴已有研究^[18],本文尝试提出影响强度、影响率和影响力 3 个指标以度量影响因子对土壤保持服务的影响。

2.4.1 影响强度 GWR 分析的回归系数反映了解释变量与因变量之间的关系强度,如果关系较强,则系数相对较大,如果关系较弱,则系数接近于零。因此,回归系数的绝对值可以定义为因子的影响强度 (influence intensity, II):

$$II_i = |\beta_k(u_i, v_i)|$$
 (4)

式中: II_i 和 $\beta_k(u_i, v_i)$ 分别为因子在空间位置 i 处的

影响强度和 GWR 分析的回归系数。

2.4.2 影响率 残差可用于确定模型的拟合程度,较小的残差表明模型拟合效果较好。ArcGIS 10 平台的 GWR 分析结果中,标准化残差绝对值的范围为 0~2.5, 本文将其<1.5 的模型视为较优模型,并将对应的解释变量个数(N)作为因子对土壤保持服务的影响数量,于是,因子的影响率(influence ratio , IR)可定义为:

$$IR = (N/P) \times 100 \tag{5}$$

式中: IR 为因子对土壤保持服务的影响率; P 为解释变量的总数,即参与 GWR 分析的因子总个数; N 为因子的影响数量。

2.4.3 影响力 影响因子对土壤保持服务的影响力大小,一是取决于影响强度,二是取决于影响率。于是,因子影响力(influence level , IL)可定义为:

$$IL = IR \times II_{\text{mean}} \tag{6}$$

式中: IL 为因子对土壤保持服务的影响力; IR 为因子对土壤保持服务的影响率; II_{mean} 为 N (因子影响数量)个因子的影响强度均值。

3 结果与分析

3.1 土壤保持服务基本特征

3.1.1 土壤保持服务分区 将 2001—2015 年间(称“研究期间”)土壤保持量变化斜率 K_{Ac} ,在 ArcGIS 10 软件平台下,使用自然断裂法分为 5 类,据此将土壤保持服务变化划分为明显下降区、略微下降区、基本不变区、略微上升区和明显上升区(图 2)。研究期间,基本不变、下降和上升区面积分别为 64.08 万、28.06 万、5.54 万 km^2 (表 2),面积比约为 66 : 29 : 5。

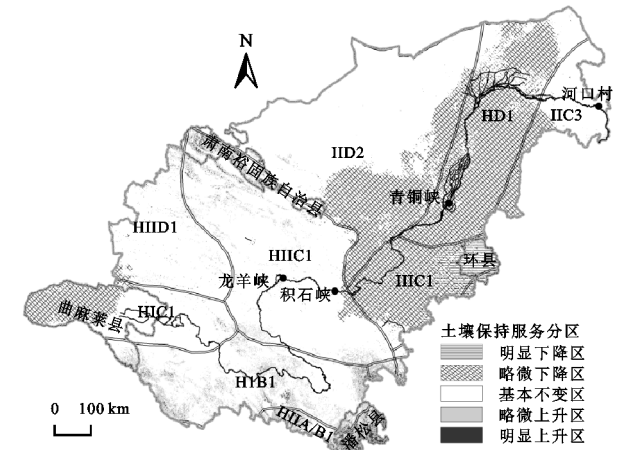


图 2 土壤保持服务分区

下降区,主要位于黄河上游东北部的干旱、半干旱气候区。其中,明显下降区集中分布在陇东黄土高原丘陵沟壑区的半干旱气候区,县域上,环县、彭阳县、原州区东部土壤保持服务下降明显;略微下降区,集中分布在黄土高原丘陵区西部、内蒙古高平原西部及河套地区、西北内流河片区的阿拉善及河西走廊东

南部交汇地带的干旱气候区,大致是积石峡以东 15 km 处至河口村以西 50 km 处,黄河两岸宽约 150 km 的带状区域。县域上,乌拉特中旗、杭锦旗、杭锦后旗、鄂托克旗、鄂托克前旗、盐池县、阿拉善左旗东南部、靖远县、白银区、皋兰县、永登县东部、景泰县、古浪县、永昌县东部、凉州区、白银区、中宁县、永宁县、和政县、民勤县南部、兴庆区、金凤区和平川区等县(市、区、旗)土壤保持服务呈略微下降。

表 2 土壤保持服务分区及其特征

土壤保持 服务分区	土壤保持量/ ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	面积/ 万 km^2	占比/%
明显下降区	2469.44	1.97	2.02
略微下降区	465.76	26.09	26.71
基本不变区	1053.87	64.08	65.60
略微上升区	5884.93	4.82	4.93
明显上升区	11586.32	0.72	0.74

上升区,主要位于黄河上游西部和南部的半干旱、湿润/半湿润和半湿润气候区。其中,明显上升区,主要分布在半干旱的青东祁连山地和湿润/半湿润的川西藏东高山深谷,特别是祁连山、疏勒南山、岷山北段等山地,这与刘海等^[29]的研究结果类似,即土壤保持量呈现山区高、平原低的分布格局。县域上,肃南裕固族自治县西北中部、祁连县西北中部、宕昌县中南部、松潘县土壤保持服务上升明显;略微上升区,主要分布在半湿润的果洛那曲丘状高原西部、湿润/半湿润的松潘高原北部,县域上主要是称多县南部、久治县、班玛县和迭部县。

3.1.2 各分区土壤保持服务年际变化特征 明显下降区,土壤保持量从 2001 年的 4 116.92 $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,波动下降至 2015 年的 1 349.34 $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,年均下降 184.51 $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ (图 3a);略微下降区,土壤保持量从 2001 年的 599.81 $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,波动下降至 2015 年的 345.93 $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,年均下降 16.92 $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ (图 3b);明显上升区,土壤保持量从 2001 年的 11 015.00 $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,波动增加至 2015 年的 11 926.65 $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,年均增加 60.78 $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ (图 3c);略微上升区,土壤保持量从 2001 年的 4 998.19 $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,波动增加至 2015 年的 5 332.55 $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,年均增加 22.29 $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ (图 3d)。

3.2 土壤保持服务变化归因分析

结合前人^[23]选用的影响因子,考虑数据的可得性,本文选取降水、海拔、坡度、植被覆盖作为土壤保持服务的影响因子。将研究期间 4 个因子的均值归一化至 0~1 以消除不同量纲间的差异,依据影响因子及其指标特征(表 3),探寻各分区的影响因子,进而分析土壤保持服务变化的原因。

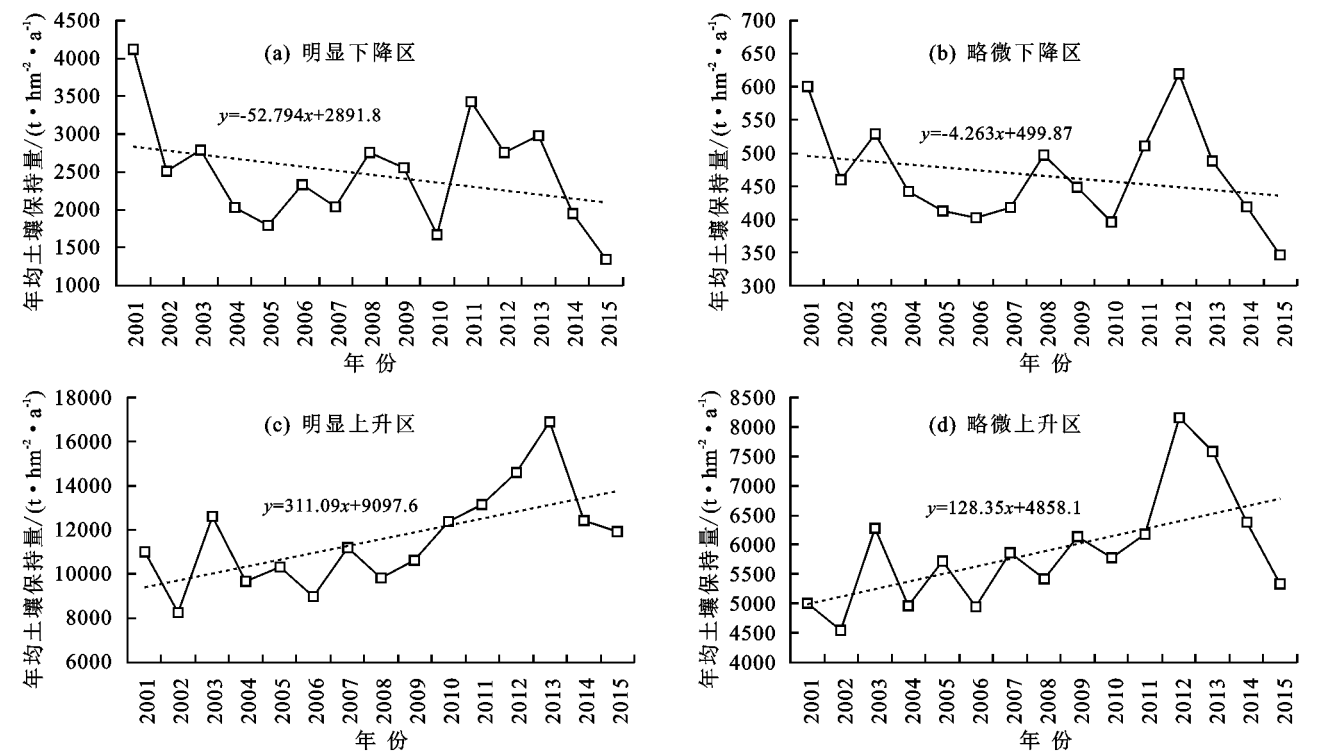


图 3 各分区土壤保持量年际变化

表 3 各分区土壤保持服务影响因子及其指标特征

土壤保持服务分区	因子	因子总数	因子影响数量	影响率/%	影响强度均值	影响力
明显下降区	降水	19697	18579	94.32	24749.45	23344.67
	海拔	19697	17284	87.75	9166.49	8043.54
	植被覆盖度	19697	18505	93.95	7802.94	7330.73
	坡度	19697	17587	89.29	3338.2	2980.61
	降水	260473	253447	97.30	7147.23	6954.44
略微下降区	海拔	260473	246673	94.70	7096.65	6720.67
	植被覆盖度	260473	236576	90.83	2076.87	1886.32
	坡度	260473	237295	91.10	1922.72	1751.63
	降水	7185	5206	72.46	42.08	30.49
明显上升区	海拔	7185	6425	89.42	12388.29	11077.91
	植被覆盖度	7185	6106	84.98	19298.28	16400.18
	坡度	7185	6314	87.88	127.13	111.72
	降水	48196	36956	76.68	23524.42	18038.19
略微上升区	海拔	48196	43563	90.39	8472.13	7657.72
	植被覆盖度	48196	41919	86.98	7782.97	6769.33
	坡度	48196	42253	87.67	3246.46	2846.14

3.2.1 下降区土壤保持服务影响因子 明显和略微下降区,各因子对土壤保持服务的影响强度和影响力排序一致,从大到小依次为降水>海拔>植被覆盖度>坡度(表 3)。降水是影响下降区土壤保持服务的主导因子,其像元尺度的影响强度见图 4a。

Tang 等^[30]研究发现,黄土高原 1965—2014 年间降水量减少。研究期间,土壤保持服务下降连片区(积石峡至河口村的黄河沿岸),其年均降水量呈略微下降态势(图 5a)。地处陇东黄土高原的甘肃省环县,研究期间的降水量亦呈现略微下降特征,其土壤保持量下降最为明显(图 5b)。此外,信忠保等^[31]研究发现,黄土高原地区在降水减少的过程中,侵蚀性

降水减少更为剧烈。降水量的减少,特别是侵蚀性降水的减少,降低降雨侵蚀力,致使土壤保持服务下降。

3.2.2 上升区土壤保持服务影响因子 依据各因子影响强度和影响力大小(表 3),明显、略微上升区土壤保持服务的主导因子分别是植被覆盖和降水,其像元尺度的影响强度见图 4b 和图 4c。

明显上升区的植被覆盖度从 2001 年的 65.12%波动增加至 2015 年的 72.84%(图 5c)。地处波密—川西东北部的四川省松潘县,其土壤保持服务上升最为明显,植被覆盖度从 2001 年的 78.73%波动增加至 2015 年的 86.35%(图 5d)。杨达等^[32]研究也发现,2001—2018 年间波密—川西东北部的 NDVI(与植被覆盖度正相

关)显著增加。植被覆盖度上升能够有效遏制土壤侵蚀的发生,进而提升土壤保持服务。

略微上升区降水量从 2001 年的 532.88 mm 缓慢波动增加至 2015 年的 533.72 mm(图 5e)。温煜华等^[33]研究发现,1961—2017 年间祁连山平均降水和极端降水强

度增加。研究期间,地处祁连山地区的肃南裕固族自治县,其西北部土壤保持量呈略微上升态势,年均降水也呈略微上升态势,从 2001 年的 272.28 mm 波动增加至 2015 年的 325.68 mm(图 5f)。降水量的增加,致使降雨侵蚀力增强,土壤保持服务提升。

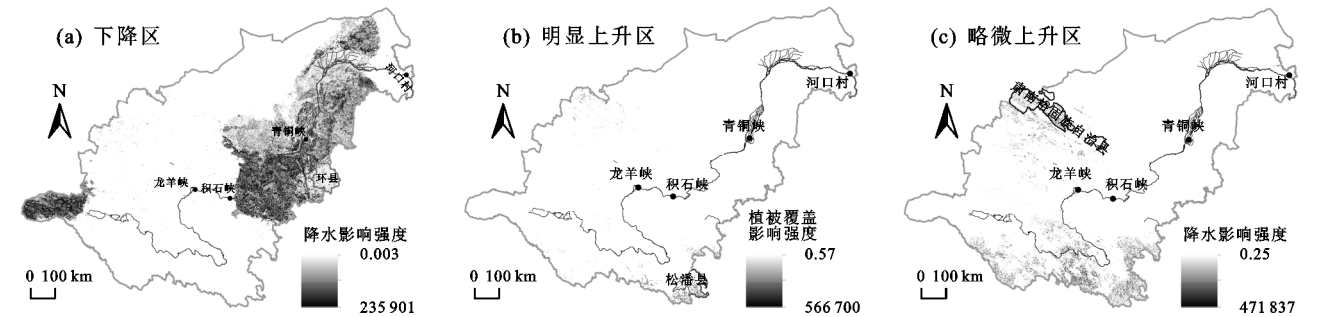


图 4 各分区主导因子影响强度空间分布

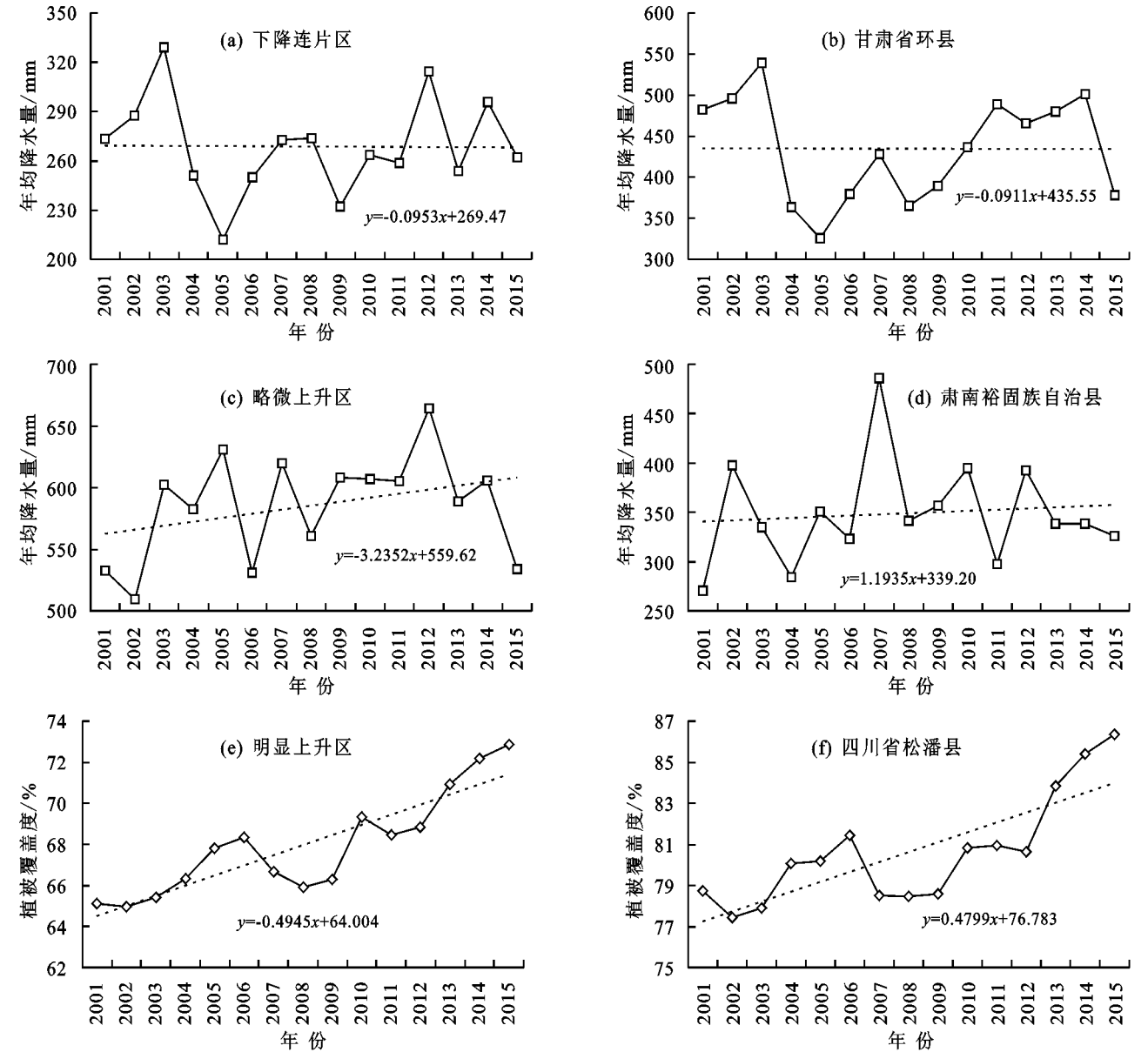


图 5 各分区及其典型县域主导因子年际变化

4 讨论

本文通过 GWR 模型及其因子影响度指标得到

影响黄河上游地区土壤保持服务变化的主导因子为降水和植被覆盖。分析研究区局部地区土壤保持服

务/土壤侵蚀相关研究案例(表 4)可知,虽然其影响因子探寻方法有所不同,但影响因子与本文探寻的基本一致,表明本文影响因子探寻方法合理,探寻结果可靠。

表 4 研究区局部地区土壤保持服务/土壤侵蚀研究案例

区域	研究时段/a	影响/驱动因子	因子探寻方法
三江源 ^[6]	1997—2012	降水和植被恢复贡献率分别为 180%和-80%	模型参数控制法
三江源 ^[7]	2000—2015	降水、植被覆盖	趋势分析
三江源 ^[8]	2000—2015	降雨	相关分析
祁连山区草地生态系统 ^[13]	2015	植被覆盖度、地下生物量	野外实地观测、相关性分析、通径分析
黄土高原丘陵陵区彭阳县 ^[14]	2015	植被覆盖	相关分析
甘肃迭部扎尕那地区 ^[15]	—	植被覆盖度	多元回归分析
子午岭地区 ^[16]	2000—2017	降水、GDP 密度、人口密度和 NDVI	地理探测器

黄河上游东北部的干旱、半干旱气候区,特别是积石峡至河口村的黄河沿岸地区,影响土壤保持服务变化的主导因子是降水。降水量的变化致使水文、土壤和生态过程及植被覆盖等生态系统结构功能和组份发生相应的变化,进而影响生态系统土壤保持服务。气候模式预测认为,未来研究区降水变化存在较大的不确定性,魏洁等^[34]基于 BCC—CSM1.1 情景分析认为,2011—2050 年间黄河上游降水增多 4.31%~5.74%,而 Yang 等^[35]研究发现,在 RCP4.5 情景下,2021—2050 年间黄河流域降水减少,减少率为 2.99 mm/10 年。青东祁连山地半干旱气候区和川西藏东高山深谷湿润/半湿润气候区,特别是祁连山、疏勒南山和岷山北段等山地,影响土壤保持服务变化的主导因子是植被覆盖。较高的植被覆盖能有效遏制土壤侵蚀的发生,从而保障较高的土壤保持供给服务。研究期间,上述植被覆盖为主导因子的地区,其植被覆盖度呈动态上升趋势,相关研究也表明,近年来黄河上游一些地区的植被覆盖得到了显著改善。考虑到降水是影响黄河流域植被覆盖的决定性因素^[36],本文认为面对未来降水的不确定性,提高植被覆盖度是提升黄河上游地区土壤保持服务的基本策略。

结合 GWR 模型,本文尝试定义了因子“影响强度”指标。该指标反映了土壤保持服务与影响因子之间的关系强度,若某地理位置上某因子的影响强度值较大,则表明该因子对该地理位置处的土壤保持服务影响也较强。因此,可根据主导因子影响强度空间分布图,因地制宜地制定具体措施提升土壤保持服务,如依据图 4,植被覆盖因子影响强度值较大的地理位置处,应加强植被保护等措施以进一步提高植被覆盖度,而降水因子影响强度值较大的位置处,应实施坡沟治理、改变耕作方式等保水措施以增加该位置降水的利用率。

本文探寻得到的主导因子能够解释研究区绝大多数地域的土壤保持服务变化。但位于黄河源的曲麻莱县西部,研究期间其土壤保持服务呈现下降趋势,而主导因子降水则是略微增加,这难以阐释降水与土壤保持服务的关系。曲麻莱县作为三江源国家

级自然保护区和可可西里国家级自然保护区的核心区域,生态保护修复项目的实施,以及当地居民的生态环保理念等均影响土壤保持服务。事实上,土壤保持服务受到自然环境因子以及人类活动、社会经济和政治文化等人文因子直接或间接的影响,且各因子之间彼此联系、互相促进与制约,通过复杂的物理、生物化学过程影响土壤保持服务^[37]。由于数据源的限制,本文 GWR 分析中仅考虑降水、海拔、坡度和植被覆盖自然环境因子,土壤性状(类型、机械组成等)、雨强等也是决定区域土壤保持服务/土壤侵蚀自然环境的主要因子。未来收集或采集相关自然环境因子数据,纳入人文因子,并选取合适的方法量化因子间的相互影响是今后的研究方向。

5 结论

(1)2001—2015 年间,土壤保持服务下降区,主要位于黄河上游东北部的干旱、半干旱气候区,集中分布在积石峡至河口村的黄河沿岸地区。上升区,主要位于黄河上游西南部的半干旱区、湿润/半湿润气候区,集中分布在果洛那曲丘状高原西部、松潘高原北部、青东祁连山地和川西藏东高山深谷地区。

(2)降水是影响下降区土壤保持服务的主导因子,植被覆盖和降水分别是明显和略微上升区的主导因子。面对黄河上游地区未来降水的不确定性,提升土壤保持服务的根本策略是提高植被覆盖度。

(3)植被覆盖主导因子影响强度值较大的地理位置处,应加强植被保护等措施以进一步提高植被覆盖度,而降水主导因子影响强度值较大的位置处,应实施保水措施以增加该位置上降水的利用率。

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] 联合国粮农组织.土壤有助于抗击和适应气候变化[EB/OL].(2015-12-05)[2022-01-10]. <https://www.fao.org/3/i4737c/i4737c.pdf>.

[3] 白继洲.气候变化背景下泾河流域生态系统土壤保持服务模拟[D].西安:西安科技大学,2021.

[4] 张宝.新时期黄河流域水土流失防治对策[J].中国水土

- 保持,2021(7):14-16.
- [5] 魏健美,李常斌,武磊,等.基于 USLE 的甘南川西北土壤侵蚀研究[J].水土保持学报,2021,35(2):31-37.
- [6] 曹巍,刘璐璐,吴丹.三江源区土壤侵蚀变化及驱动因素分析[J].草业学报,2018,27(6):10-22.
- [7] Wang Z, Wang J B. Changes of soil erosion and possible impacts from ecosystem recovery in the Three-River Headwaters Region, Qinghai, China from 2000 to 2015[J].Journal of Resources and Ecology,2019,10(5):461-471.
- [8] 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.
- [9] Wang H, Zhao H. Dynamic changes of soil erosion in the Taohe River Basin using the RUSLE model and Google Earth Engine[J].Water,2020,12(5):e1293.
- [10] Ning J C, Zhang D J, Yu Q. Quantifying the efficiency of soil conservation and optimized strategies: A case-study in a hotspot of afforestation in the Loess Plateau [J].Land Degradation and Development,2021,32(3):1114-1126.
- [11] Du H Q, Dou S T, Deng X H, et al. Assessment of wind and water erosion risk in the watershed of the Ningxia-Inner Mongolia reach of the Yellow River, China[J].Ecological Indicators,2016,67:117-131.
- [12] 殷小茜,孙希华,徐新良,等.我国北方农牧交错带西段退耕对土壤保持功能影响研究[J].地球信息科学学报,2018,20(12):1721-1732.
- [13] 王雅琼.祁连山区草地的土壤保持功能定量估算[D].北京:北京林业大学,2017.
- [14] 王立明,刘平,付建宁,等.黄土丘陵区县域土壤侵蚀定量研究[J].水土保持应用技术,2019,38(6):7-9.
- [15] 姜盛基,汤萃文,卢国春.高寒土壤侵蚀及其环境影响因子:以甘肃迭部扎尔那地区为例[J].林业科技通讯,2021,63(8):3-9.
- [16] 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.
- [17] 孙才志,马奇飞,赵良仕.基于 GWR 模型的中国水资源绿色效率驱动机理[J].地理学报,2020,75(5):1022-1035.
- [18] 吴成永,陈克龙,曹广超,等.近 30 年来青海省风蚀气候侵蚀力时空差异及驱动力分析[J].地理研究,2018,37(4):717-730.
- [19] 薛焱,杜鹤强.黄河上游流域边界图(2012)[DB/OL].国家青藏高原科学数据中心,2015.(2021-04-19)[2022-01-10].<http://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/data/9056beca-74c5-4660-baf4-76b85f4332ab/>.
- [20] 刘小鹏,马存霞,魏丽,等.黄河上游地区减贫转向与高质量发展[J].资源科学,2020,42(1):197-205.
- [21] 杨永春,张旭东,穆焱杰,等.黄河上游生态保护与高质量发展的基本逻辑及关键对策[J].经济地理,2020,40(6):9-20.
- [22] Zhang L W, Fu B J, Lü Y H, et al. Balancing multiple ecosystem services in conservation priority setting[J].Landscape Ecology,2015,30(3):535-546.
- [23] Wang H, Gao J B, Hou W J. Quantitative attribution analysis of soil erosion in different geomorphological types in karst areas: Based on the geodetector method[J].Journal of Geographical Sciences,2019,29(2):271-286.
- [24] 环境保护部,国家发展改革委.生态保护红线划定指南(环办生态〔2017〕48号)[EB/OL].(2017-07-20)[2022-01-10].<http://www.mee.gov.cn/gkm/hbb/bgt/201707/t20170728-418679.htm>.
- [25] 王丽霞,高吉喜,申文明,等.基于生态供受体理论的全中国水土保持重要区识别[J].中国环境科学,2020,40(12):5413-5421.
- [26] 陈朝良,赵广举,穆兴民,等.基于 RUSLE 模型的湟水流域土壤侵蚀时空变化[J].水土保持学报,2021,35(4):73-79.
- [27] 朱青,周自翔,刘婷,等.黄土高原植被恢复与生态系统土壤保持服务价值增益研究:以延河流域为例[J].生态学报,2021,41(7):2557-2570.
- [28] Gao J B, Jiao K W, Wu S H. Investigating the spatially heterogeneous relationships between climate factors and NDVI in China during 1982 to 2013[J].Journal of Geographical Sciences,2019,29(10):1597-1609.
- [29] 刘海,黄跃飞,林苗,等.基于 GIS 的汉江流域水土保持时空变化特征分析(2001—2017 年)[J].地域研究与开发,2019,38(3):154-159.
- [30] Tang X, Miao C Y, Xi Y, et al. Analysis of precipitation characteristics on the loess plateau between 1965 and 2014, based on high-density gauge observations [J].Atmospheric Research,2018,213:264-274.
- [31] 信忠保,许炯心,马元旭.近 50 年黄土高原侵蚀性降水的时空变化特征[J].地理科学,2009,29(1):98-104.
- [32] 杨达,易桂花,张廷斌,等.青藏高原植被生长季 NDVI 时空变化与影响因素[J].应用生态学报,2021,32(4):1361-1372.
- [33] 温煜华,吕越敏,李宗省.近 60 a 祁连山极端降水变化研究[J].干旱区地理,2021,44(5):1199-1212.
- [34] 魏洁,畅建霞,陈磊.基于 VIC 模型的黄河上游未来径流变化分析[J].水力发电学报,2016,35(5):65-74.
- [35] Yang X L, Zheng W F, Ren L I, et al. Potential impact of climate change to the future stream flow of Yellow River Basin based on CMIP5 data[J].Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences,2018,376:97-104.
- [36] 张志强,刘欢,左其亭,等.2000—2019 年黄河流域植被覆盖度时空变化[J].资源科学,2021,43(4):849-858.
- [37] Albaladejo J, Diaz-Pereira E, Vente J D. Eco-Holistic soil conservation to support land degradation neutrality and the sustainable development goals [J].Catena,2021,196:e104823.