

DOI: 10.5846/stxb202011022806

周添惠, 杨磊, 赵方凯, 李旭春, 邓居礼, 李敏, 黄勇, 段兴武. 渭河源流域源汇景观演变对径流泥沙的影响. 生态学报, 2022, 42(1): 58-66.

Zhou T H, Yang L, Zhao F K, Li X C, Deng J L, Li M, Huang Y, Duan X W. Impacts of source and sink landscape dynamics on runoff and sediment in the source watershed of the Weihe River. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(1): 58-66.

渭河源流域源汇景观演变对径流泥沙的影响

周添惠^{1,2}, 杨磊^{2,*}, 赵方凯², 李旭春³, 邓居礼⁴, 李敏², 黄勇¹, 段兴武¹

1 云南大学国际河流与生态安全研究院, 昆明 650500

2 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

3 甘肃省定西市水土保持科学研究所, 定西 743000

4 甘肃省定西水文水资源勘测局, 定西 743000

摘要: 探讨源汇景观演变特征与径流泥沙的关系对定量识别源汇景观功能对生态过程的影响具有重要的科学意义。以位于黄土高原和西秦岭山地交错区域的渭河源为例, 分析了流域源汇景观格局演变与降雨耦合驱动对径流和泥沙的影响, 结果表明: (1) 研究区 1982—2017 年汇景观比例逐渐增加并超过源景观, 源汇景观功能演变主要发生在黄土丘陵区, 源汇景观负荷比指数呈逐年下降趋势; (2) 影响流域径流和泥沙的主要因素不同, 洪峰流量与含沙量主要受源景观面积比例和源汇景观负荷比的影响, 呈显著的下降趋势, 而径流量仅与降水量存在相关性; (3) 基于信息理论方法的相对重要性分析表明, 降雨对流域径流量的相对重要性高于源汇景观负荷比, 而源汇景观负荷比对洪峰流量和含沙量的相对重要性较高, 传输距离和海拔分布对径流泥沙和洪峰流量具有重要影响。在长时间尺度上, 源汇景观格局演变影响了径流及泥沙特征, 并且对泥沙影响的相对重要性高于径流。源汇景观合理的时空分布可以有效调控水土流失过程, 对黄土高原生态可持续发展具有重要意义。

关键词: 源汇景观; 泥沙; 径流; 景观格局; 水土保持

Impacts of source and sink landscape dynamics on runoff and sediment in the source watershed of the Weihe River

ZHOU Tianhui^{1,2}, YANG Lei^{2,*}, ZHAO Fangkai², LI Xuchun³, DENG Juli⁴, LI Min², HUANG Yong¹, DUAN Xingwu¹

1 Institute of International Rivers and Eco-Security, Yunnan University, Kunming 650500, China

2 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

3 Institute of Soil and Water Conservation, Dingxi 743000, China

4 Hydrology and Water Resources Survey Bureau, Dingxi 743000, China

Abstract: Identifying the relationships among characteristics of the source and sink landscape and runoff and sediment will help quantifying the interactions between landscape pattern and ecological processes. This study analyzed the coupled impacts from changes in the source sink landscape and precipitation patterns on runoff and sediment at the source watershed of the Weihe River, which located in the ecotone of the Loess Plateau and the western Qinling Mountain. The location-weighted landscape index (LWLI) based on the Source-sink Landscape Model (SSLM) was used to quantitatively characterize the changes of landscape pattern. The results included: (1) the area proportion of the sink landscapes increased from 1982 to 2017 and became larger than the source landscapes. The changes of source and sink landscape

基金项目: 国家自然科学基金(41871194); 国家重点研发计划(2016YFC0501701); 中国科学院青年创新促进会(2018057)资助

收稿日期: 2020-11-02; **网络出版日期:** 2021-08-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: leiyang@rcees.ac.cn

mainly happened in the hilly regions of the Loess Plateau. The LWLI decreased from 1982 to 2017, with substantial decrease between 1995 and 2010. (2) The major factors affecting runoff and sediment were explicitly different. The peak flow and sediment concentration substantially decreased from 1982 to 2017 and had close correlations with area proportion of “source” landscapes and the LWLI values. However, the amount of annual runoff fluctuated during the study period due to variation of precipitation and had limited correlation with changes of the landscape pattern. (3) The LWLI had close relationships with peak flow and sediment concentration by comparing the relative variable importance of landscape to climatic factors, while precipitation was the major factor affecting runoff. Moreover, characteristics of landscape pattern were regulated by latitude and migration distance and had stronger impacts on runoff and sediment concentration than slope in the study area. Results of the study suggested that changes in the pattern of “source-sink” landscape and precipitation had significant influences on river channel runoff and sediment at a long-time scale, but their importance to runoff and sediment were obviously different. The reasonable planning of “source” and “sink” landscapes could effectively control soil and water loss at the watershed scale. For land use planning and policy-making, optimization of landscape configuration should be considered to improve water and soil conservation.

Key Words: source-sink landscape; runoff; sediment; landscape pattern; soil and water conservation

源汇景观格局分析方法将景观格局与生态过程有机结合,可用于定量表征不同景观类型及其空间配置对特定生态过程的影响^[1-2],是目前景观生态学的一个核心研究议题。近几十年来黄土高原地区大规模退耕还林还草工程的实施,使得地表景观发生了显著变化。遥感数据表明,从1980年至2020年黄土高原地区农田面积减少了11.43%,而森林面积增加了58.18%^[3-5]。这一景观演变过程也带来了径流泥沙“源”和“汇”功能的变化,如植被恢复使得汇景观面积不断增加,改变了地表产水、产沙过程^[6-7],从而使得地表径流及泥沙负荷呈现显著下降趋势^[8-11]。黄土高原地区土地利用对水土流失过程的影响已经开展了大量的工作,研究表明坡面、流域、区域尺度不同景观配置均能影响水土流失过程^[9,12]。通过景观格局指数来反映景观配置信息,并通过其变化来表征水土流失演变特征已经做了比较多的尝试。例如,王计平等^[13-14]分别通过类型水平和景观水平的格局指数探讨了其对河口-龙门区间径流泥沙的表征,也有研究发现景观多样性、聚集度及蔓延度是土壤侵蚀及产沙过程的主要影响因子^[10,15-16]。然而,景观格局指数难以建立和具体生态过程的定量关系。对水土流失过程而言,径流和泥沙在空间上的“源”和“汇”由景观类型及其空间位置决定,并且受到海拔、坡度及传输距离等因素的影响^[17-18]。源汇功能景观沿着水土流失过程发生和传输方向上的空间配置能够影响流域内的产流和产沙过程。一方面源汇景观格局本身具有明显的时空异质性,不同时间源汇景观格局的演变对水土流失的影响仍需要从过程上予以明确;另一方面,源汇景观格局对哪些水土流失过程具有更为显著的影响还需要进一步地识别,比如源汇景观演变对流域洪峰流量及河道径流含沙量的作用尚需要进一步的探讨。此外,降水驱动地表产流及侵蚀时空分异的关键因素之一^[19-21],不同降雨条件下景观配置对产流产沙过程的影响存在明显差异^[22],并且也有研究表明降水的变化能够显著改变源汇景观负荷比与土壤侵蚀量的相关性^[23]。因而,探讨降雨与源汇景观演变耦合驱动下的产流产沙过程,对建立景观格局演变与水文响应的定量关系具有重要意义。

本研究基于源汇景观模型,以黄土高原和西秦岭土石山区交界的渭河源为例,分析流域源汇景观格局演变特征与径流和泥沙的关系,定量表征降水和源汇景观格局对产流产沙的相对影响,以为黄土高原植被恢复的空间格局优化和流域管理提供科学依据。

1 研究区及方法

1.1 研究区概况

研究区位于甘肃省定西市渭源县的渭河源流域(34°57'N—35°9'N, 104°1'E—104°14'E),面积

114.3 km²。流域为黄土高原和西秦岭山地、青藏高原的交界地带,海拔 2076—3480 m,北部为典型的黄土丘陵区,南部为土石山区,属西秦岭山地(图 1)。流域为温带大陆性气候,多年平均降水量 512 mm,潜在蒸发量 1119 mm,平均气温 6.8℃,极端最高气温 30.5℃,极端最低气温-20.1℃,无霜期 166 d。流域内黄土丘陵部分人口较为密集,且地形破碎、沟壑纵横,水土流失严重,植被覆盖以农作物、天然荒草、油松及人工种植的旱柳等为主。相比而言,土石山区则较为陡峭,无人口定居和农业活动,植被覆盖以高山草甸、天然灌木和乔木为主,是重要的水源涵养区。

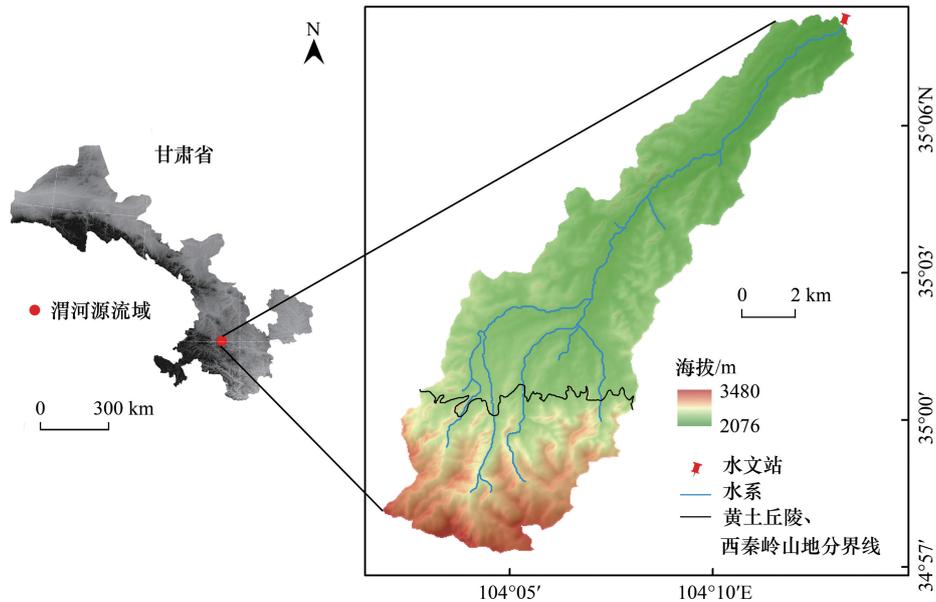


图 1 研究区位置及地形特征

Fig.1 Location and topographical features of study area

1.2 径流泥沙监测和遥感解译

在渭源水文站对研究区每日径流量、含沙量、洪峰流量以及降雨量进行长期定位监测,本研究径流泥沙的监测时间为 1982—2017 年。基于现场野外调查,并通过监督分类的方法对 1982 年 Landsat MSS、1985 年、1990 年、1995 年、2000 年、2005 年 Landsat TM、2010 年 Landsat ETM+、2015 年和 2017 年 Landsat OLI 系列不同传感器遥感影像进行解译,并与 Google Earth 结合对解译结果进行校正,分别得到相应年份土地利用数据。Landsat MSS 影像分辨率为 60 m, Landsat TM、ETM+ 和 OLI 影像分辨率为 30 m。基于研究区土地利用特征,将土地利用分为农田、城镇、林地、草地、草甸、水域 6 种类型。

1.3 源汇景观分析

应用中国科学院生态环境中心城市与区域生态国家重点实验室开发的源汇景观模型(Source Sink Landscape Model, SSLM)进行源汇景观格局分析,源汇景观模型是基于 ArcGIS 开发的分布式评价模型^[24-25]。模型的输入数据主要包括 DEM 和土地利用,需要根据具体研究的生态学过程确定源景观和汇景观的类型及其权重。源汇景观模型可以根据景观类型及其所处的海拔、坡度和距离,绘制不同景观在海拔、坡度和距离上分布的洛伦兹曲线,并分别计算海拔负荷比(LWLIE)、坡度负荷比(LWLS)和传输距离负荷比(LWLD),最终计算得出源汇景观负荷比(Location-Weighted Landscape Index, LWLI)^[17,24-25],这些指标可用于评估不同格局特征对生态过程的影响。LWLI 越大流域发生水土流失的风险越大,而 LWLIE、LWLS 和 LWLD 的比较意义在于衡量相同或相似的景观斑块分布在不同海拔、坡度和传输距离上对水土流失影响的程度。对水土流失过程而言,农田是产流产沙的主要景观类型,因而本研究将农田定义为源景观,草地、草甸和林地植被覆盖良好,在产流和泥沙迁移中一般承担着汇的作用。由于不同源景观和汇景观对径流泥沙的产生和阻滞作用不

同,因而不同源景观和汇景观的权重存在差异(表 1)^[26],另外由于水域一般承担着流景观的作用,不在产流产沙过程中发挥源或者汇的功能,因而本研究暂不考虑水域的作用。

1.4 统计分析

采用 Pearson 相关分析探讨径流泥沙与源汇景观负荷比、景观组成及降雨量之间的关系。为明确源汇景观格局特征对径流泥沙的作用,根据信息理论方法 (Information theoretic approach, ITA) 确定源汇景观负荷比和降雨量对径流量、洪峰流量及含沙量的相对重要性 (Relative variable importance, RVI)^[27]。Pearson 相关分析和 ITA 分析在 R 4.0.2 中分别采用 corplot、MuMIN 包实现。

表 1 源汇景观类型及权重

Table 1 Weights of source landscape and sink landscape		
景观类型 Landscape type	土地利用类型 Land use type	权重 Weight
源景观 Source	农田	0.56
汇景观 Sink	林地	0.91
	草甸	0.87
	草地	0.44

2 结果与讨论

2.1 流域源汇景观演变特征

图 2 表明 1982—2017 年研究区农田面积逐渐减少,草地、林地和城镇面积逐渐增加,其中城镇出现不同程度的扩张,相比而言,草甸和水域面积变化较小。由图 2 和图 3 可以看出,研究区农田面积变化最大,由 1982 年的 60.45%减少到 2017 年的 37.77%,且在 1995—2010 年间明显减少;而草地和林地这一时期的面积增加较为明显,分别从 1.17%和 30.67%增加至 11.82%和 37.50%;城镇面积在 1982—1995 年间增长缓慢,2000—2017 年间扩张明显,由 2.98%增长至 5.61%。从图 2 可以明显看出,研究区景观演变主要集中在黄土丘陵区,大面积减少的农田主要转化为草地和林地,黄土丘陵区内城镇面积也有较大幅度的扩张;相比而言,这一时期内属西秦岭山地的土石山区没有明显的景观变化。

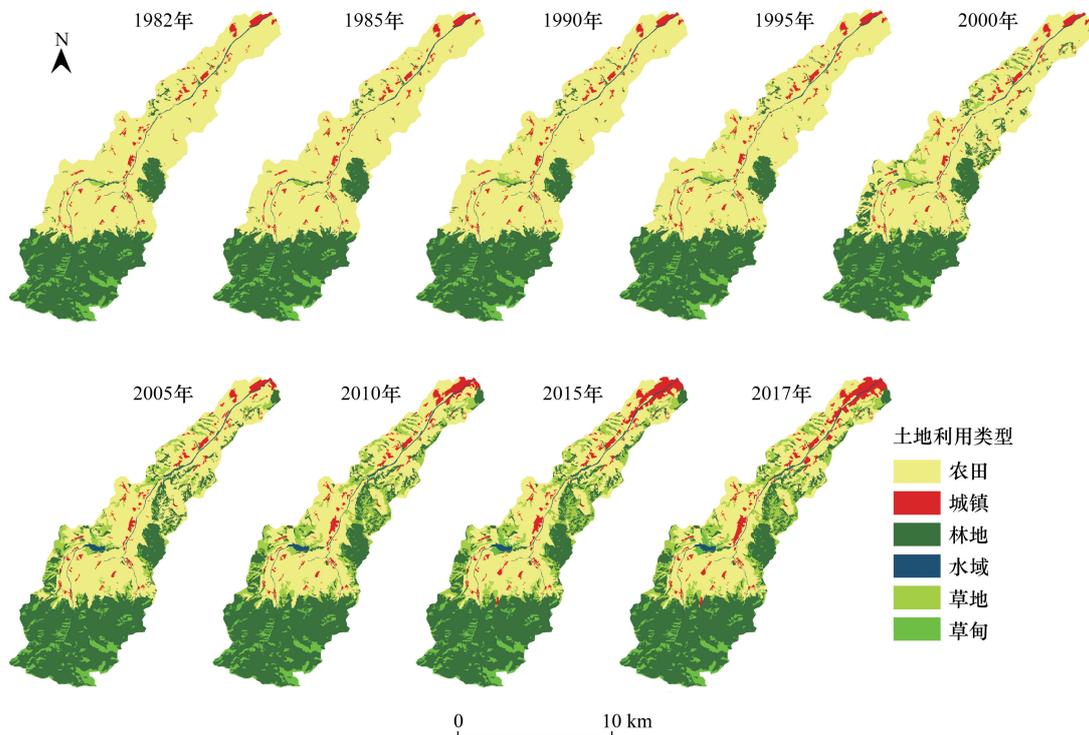


图 2 1982—2017 年渭河源区土地利用变化

Fig.2 Land use change in source of Weihe River from 1982 to 2017

针对产水产沙过程的“源”、“流”和“汇”功能景观演变可以看出,研究区源景观面积在 1982—2017 年间逐渐减少,汇景观面积则逐渐增加,流景观没有明显的变化。源汇景观模型计算表明,这一时期研究区源汇景观负荷比随时间的推移呈下降趋势,从 0.49 降为 0.26,其中,1982—1995 年和 2010—2015 年变化较小,而 1995—2010 年出现较为明显的下降(图 3),这一变化和源景观面积的变化趋势一致,与汇景观的变化趋势相反。由图 2 可知,研究区内属西秦岭山地的景观变化不明显,西秦岭山地地势陡峭、土层浅薄^[28],不适宜发展农业耕作,因而作为水源涵养区在研究期间内一直作为汇景观存在。相比而言,研究区源汇景观功能的演变主要发生在黄土丘陵区,尤其是这一地区自 1999 年以来实施的退耕还林还草工程^[29],促使流域源汇景观结构向土壤保持的方向演进,使得 LWLI 下降,成为源汇景观功能演变的主要驱动因素。LWLIE、LWLIS 及 LWLID 同样表现出减小趋势(图 3),表明研究区源汇景观不仅在组成上趋于合理,在空间分布上也逐渐趋于合理,使得水土流失的风险逐渐降低。LWLIE 降低了 58%,相对于 LWLID(42%)和 LWLIS(54%)的降低更为明显,表明研究区内源功能景观向汇功能景观的转变主要集中于相对高海拔的地区。

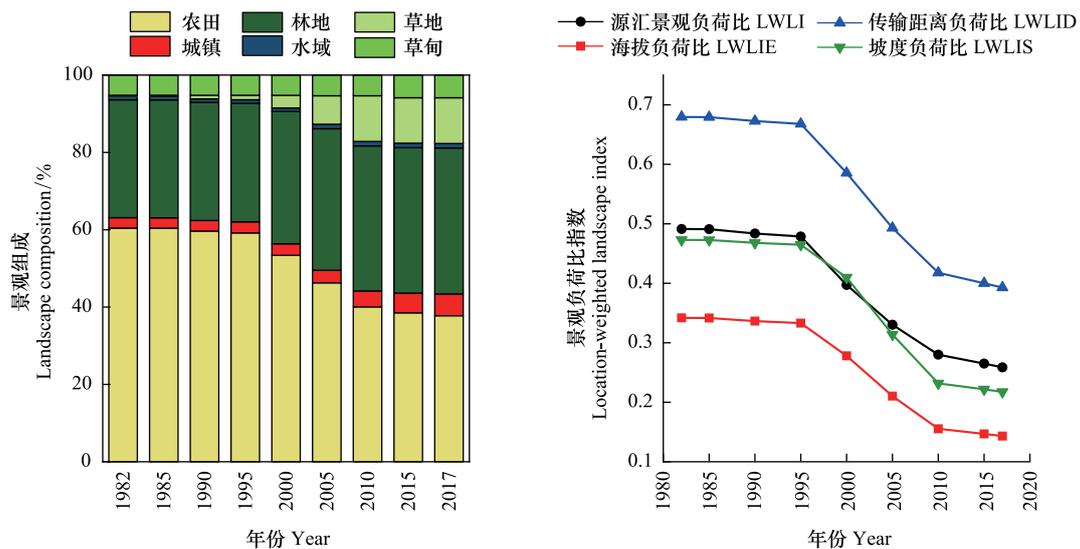


图 3 研究区 1982—2017 年景观组成及景观负荷比指数变化

Fig.3 Changes of landscape proportion and Location-Weighted Landscape Index from 1982 to 2017

2.2 流域年径流量和泥沙量的时间变化

为探讨源汇景观格局演变与产流产沙的关系,本研究将 1982—2017 年的降水量、径流量、洪峰流量和含沙量做年平均,代表年径流量和泥沙量的演变情况。从图 4 可以看出,1982—2017 年研究区降水量有较为显著的年际波动,但没有明显的增加或降低趋势。年径流量的波动变化与降水量较为一致,但总体上呈减少的趋势($R^2=0.16$, $P<0.05$);其中 1982—2000 年下降较为明显,2000 年之后呈现波动变化。比较特殊的是最大年径流量为 1984 年的 $43.25 \times 10^6 \text{ m}^3$,而当年降水量为 600.6 mm,这主要与当年降雨特征有关。洪峰流量在 1982—2017 年随着时间的推移呈下降趋势($R^2=0.30$, $P<0.01$),从 1982 年的 $54.8 \text{ m}^3/\text{s}$ 下降为 2017 年的 $2.27 \text{ m}^3/\text{s}$ 。与径流量不同,1982—2000 年洪峰流量没有显著的年际变化,而在 2000 年之后下降趋势较为明显($R^2=0.24$, $P<0.05$)。径流含沙量与洪峰流量的变化较为相似,随着时间的推移呈波动下降($R^2=0.41$, $P<0.01$),1991 年出现最大含沙量 $15.90 \text{ kg}/\text{m}^3$,2015 年出现最小含沙量 $0.23 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。含沙量与径流量的变化特征在 2000 年之前较为相似,而在 2000—2017 年则表现出相反的趋势,与洪峰流量表现出一致的下降趋势($R^2=0.25$, $P<0.05$),这表明汇景观的增加有效提升了流域的调水保土功能。有类似研究也表明黄土高原地区植被重建面积比例与径流减少量存在显著的正相关关系^[8]。研究区 2000—2005 年间林地和草地面积分别增加 2.38% 和 4.10%,LWLI 下降了 13.97%,源汇景观格局的优化使得径流泥沙量骤减 $1.12 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。值得注意的是,研究区

1982—1995 年间泥沙含量呈波动下降趋势,但 LWLI 较为稳定,这主要是由于径流泥沙减少的主要影响因素在不同时期存在差异,1982—1995 年研究区黄土丘陵部分水土保持以梯田建设等工程措施为主,而 2000 年后则以植被恢复与人工植被重建为主,黄土高原其他地区径流泥沙的减少也同样存在这一现象^[30-31]。

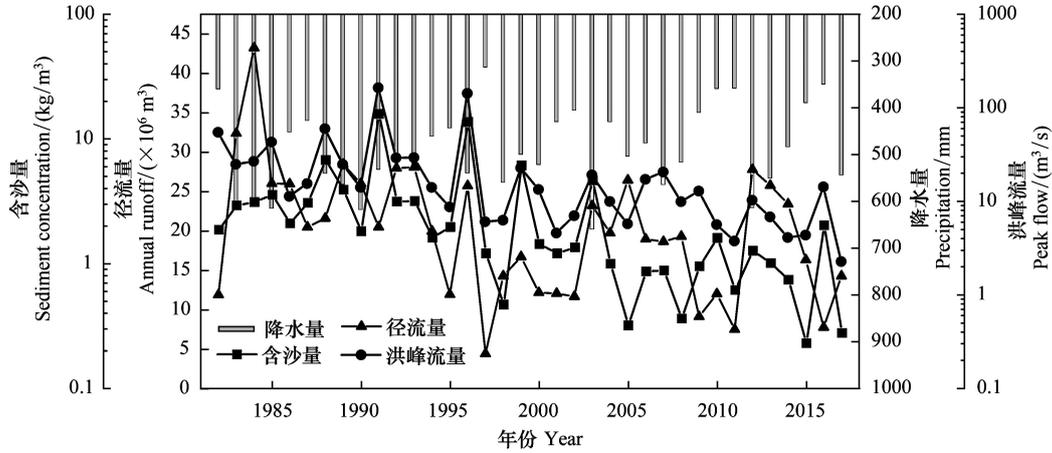


图 4 1982—2017 年流域降水量、径流量、泥沙量变化趋势

Fig.4 Changes of annual precipitation, runoff and sediment from 1982 to 2017

2.3 景观格局演变对径流和泥沙含量的影响

图 5 可以看出,LWLI、LWLIE、LWLIS 及 LWLID 都与含沙量呈显著的正相关关系,表明源汇景观的时空分布能有效影响产流产沙过程,并且对其年际变化影响显著;与之相反的是,年径流量仅与降水量呈显著正相

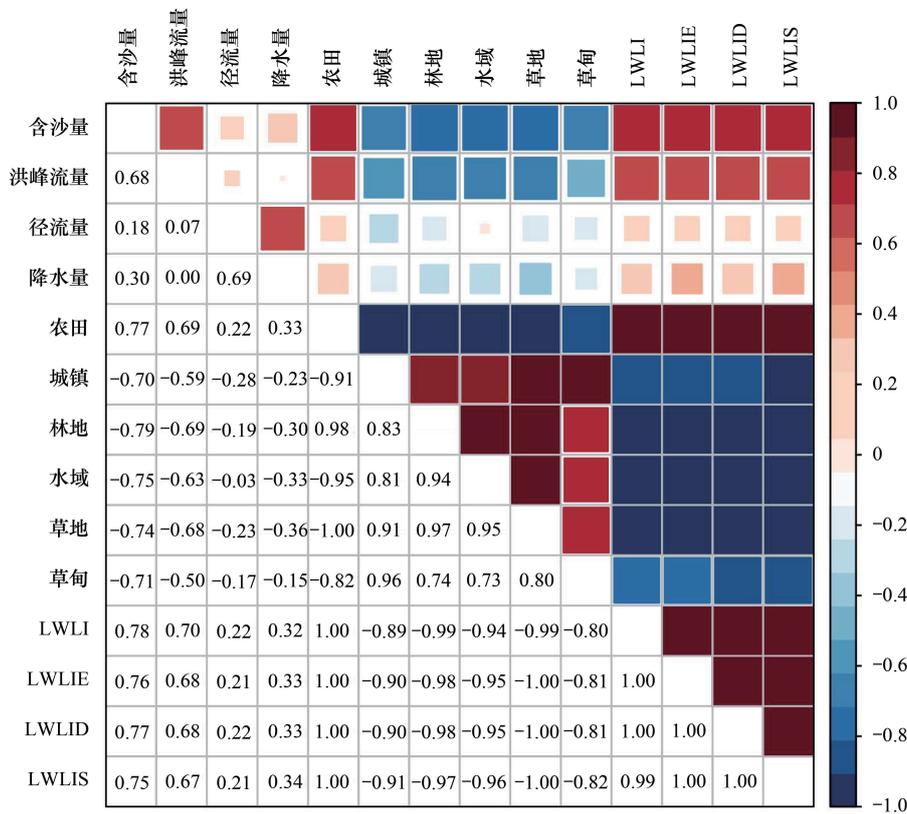


图 5 径流及泥沙含量与景观特征的相关分析

Fig.5 Correlation analysis between runoff, sediment and landscape features

关,表明研究区径流量主要受到降水影响,与源汇景观格局关系并不密切。含沙量与洪峰流量呈显著正相关关系,二者均与农田面积比例呈正相关,而与其他景观类型(城镇、林地、河流、草地、草甸)的面积比例呈负相关。洪峰流量与源汇景观负荷比同样呈较强的正相关关系,表明在长时间尺度上,洪峰流量及含沙量对源汇景观组成及其格局具有显著的响应。

通过定量表征降水和景观格局对径流量、洪峰流量及含沙量的相对重要性,以进一步揭示降水和景观格局对产流产沙的耦合影响。由表 2 可知,仅降水量与河道径流量显著相关,并且相对重要性较高,而源汇景观负荷比对径流量的相对重要性较低,这与前面相关分析的结果一致,说明研究区径流量的主要影响因素是降雨,源汇景观格局并非主要影响因素。黄土高原长期监测结果表明,1960—2010 年间降雨和径流均呈现一致的下降趋势^[9,32],同时森林景观的扩张,也将导致径流量的下降^[8],但黄土高原区域尺度河川年径流量的长期下降趋势主要由降水量变化驱动^[31]。本研究结果表明降雨对径流量减少的贡献度要高于源汇景观格局的作用,与以上黄土高原其他地区的研究结果一致,这也主要由于研究区内西秦岭山地土石山区景观未发生显著的变化,源汇景观功能的演变主要集中于黄土丘陵区,因此流域内上游地区较为稳定的景观格局对径流年际变化的影响较弱。

有研究表明,长时间尺度上土地利用变化导致的景观演变是影响流域水土流失的主要因素^[33]。本研究同样发现,洪峰流量和含沙量与源汇景观负荷比显著相关,表明其受到海拔、坡度和传输距离综合调控下的源汇景观格局的影响,并且景观格局对其的重要性高于降雨,这与径流量的结果不同。其中,LWLIE 和 LWLID 对洪峰流量及含沙量的影响次于 LWLI,LWLIS 的相对重要性最低,表明洪峰流量与含沙量受到海拔和传输距离的影响大于坡度。径流泥沙输移过程是从源景观到汇景观,由高海拔区域到低海拔区域,由远区域到近区域,因此随着源汇景观格局随海拔和传输距离的变化,流域内土壤水蚀过程对源汇景观时空格局具有明显的响应特征。从图 2 可以得知,研究区源汇景观的演变主要发生在海拔相对较低和传输距离较近的黄土丘陵区,尽管黄土丘陵区的坡度小于西秦岭山地的土石山区,其产流产沙能力要远高于植被覆盖度高且产沙能力低的土石山区,在植被覆盖和土壤可蚀性的综合影响下,坡度对流域整体径流泥沙输移过程的影响较弱,因此本研究中海拔和传输距离对流域洪峰流量和含沙量的调节作用大于坡度,而沿海拔和传输距离分布的源汇景观格局也显著影响流域产流产沙过程。坡面尺度上的研究发现,下坡位的农田转变为林地和草地也可以显著提高坡面保水保沙能力^[34],源汇景观配置能够显著调节坡面水土流失过程,进而可以影响流域河川径流特征和泥沙含量,并且景观格局对产沙过程的影响明显大于其对产流过程的影响^[22,35-36],这也进一步证实了流域源汇景观格局对含沙量的影响要大于径流量。

有研究表明传输距离负荷比能够很好的反映土壤侵蚀过程对景观格局的响应,源汇景观沿传输距离的分布格局对径流泥沙含量的贡献率大于其沿海拔和坡度的分布格局^[18],对传输距离较近并且海拔较低区域的源景观(农田等)和汇景观空间布局进行调整可以有效改变降雨导致的产流产沙过程^[37]。还有研究表明,在不考虑降水影响的情况下源汇景观负荷比与土壤侵蚀率和产沙率均存在显著正相关,而在考虑降水影响的情况下,仅与输沙率存在显著相关性^[23]。研究区 2000 年以前黄土丘陵区部分主要为源景观,使得径流产沙能

表 2 源汇景观负荷比及降水对径流和泥沙含量的相对重要性

Table 2 Relative importance of Location-Weighted Landscape Index and precipitation to runoff and sediment concentration

响应变量 Response variables	自变量 Independent variables	AIC	RVI
径流量 Annual runoff	降水量	141.67 *	0.526
	LWLI	147.19	0.032
	LWLIE	147.16	0.033
	LWLID	147.15	0.033
	LWLIS	147.17	0.047
洪峰流量 Peak flow	降水量	83.30	0.021
	LWLI	77.31 *	0.260
	LWLIE	77.65 *	0.203
	LWLID	77.66 *	0.204
	LWLIS	78.02 *	0.180
含沙量 Sediment concentration	降水量	30.96	<0.001
	LWLI	23.30 *	0.327
	LWLIE	23.95 *	0.229
	LWLID	23.81 *	0.244
	LWLIS	24.44 *	0.197

IC; Akaike 信息准则; RVI; 相对变量重要性; LWLI; 源汇景观负荷比; LWLIE; 海拔负荷比; LWLID; 传输距离负荷比; LWLIS; 坡度负荷比; * : $P < 0.05$

更快的进入河道,因而这一时期泥沙含量较高。图 5 也表明农田作为源景观与含沙量具有明显的正相关,而林地及草地作为汇景观则表现出明显的负相关。2000 年以后由于黄土丘陵区汇景观比例的上升以及汇景观向流域出口的趋近,增强了其对水土流失的拦截能力,使得洪峰流量和泥沙含量显著减少。源汇景观的空间优化配置能够显著调节流域水土流失过程,影响径流泥沙含量,但源汇景观格局对流域径流和泥沙含量的影响具有明显的空间异质性,仍然需要进一步深入探讨。

3 主要结论

(1)渭河源流域 1982—2017 年源汇景观结构变化明显,源景观面积比例逐渐下降,从 60.49% 降低至 37.77%,尤其是 1995—2010 年间下降最明显,而汇景观面积比例逐渐上升,从 35.98% 增加至 55.46%。研究区内源汇景观的演变主要发生在黄土丘陵地区,西秦岭山地土石山区没有发生明显的景观演变。

(2)洪峰流量和泥沙含量在 1982—2017 年呈现显著降低趋势,而径流量随时间变化趋势并不明显。洪峰流量与含沙量主要受流域源景观面积比例和 LWLI 及 LWLIE、LWLIS、LWLID 的影响,而径流量仅与降水量存在相关关系。表明影响流域径流和泥沙的主要因素不同,并且研究区内黄土丘陵区的源汇景观变化决定了流域整体的径流和泥沙演变特征。

(3)基于信息理论方法的相对重要性分析表明,降雨对径流量相对重要性高于源汇景观格局,而源汇景观格局对流域洪峰流量和含沙量具有较高的重要性,其中 LWLIE、LWLID 对洪峰流量及含沙量的影响均高于 LWLIS,表明合理地调整传输距离和海拔的分布格局可以有效的调控径流含沙量和洪峰流量。

参考文献 (References):

- [1] 陈利顶,傅伯杰,赵文武.“源”“汇”景观理论及其生态学意义.生态学报,2006,26(5):1444-1449.
- [2] 孙然好,孙龙,苏旭坤,陈利顶.景观格局与生态过程的耦合研究:传承与创新.生态学报,2021,41(1):415-421.
- [3] Du X Z, Zhao X, Liang S L, Zhao J C, Xu P P, Wu D H. Quantitatively assessing and attributing land use and land cover changes on China's Loess Plateau. Remote Sensing, 2020, 12(3): 353.
- [4] Liang Y J, Hashimoto S, Liu L J. Integrated assessment of land-use/land-cover dynamics on carbon storage services in the Loess Plateau of China from 1995 to 2050. Ecological Indicators, 2021, 120: 106939.
- [5] 刘国彬,上官周平,姚文艺,杨勤科,赵敏娟,党小虎,郭明航,王国梁,王兵.黄土高原生态工程的生态成效.中国科学院院刊,2017,32(1):11-19.
- [6] 杨磊,张子豪,李宗善.黄土高原植被建设与土壤干燥化:问题与展望.生态学报,2019,39(20):7382-7388.
- [7] 李宗善,杨磊,王国梁,侯建,信忠保,刘国华,傅伯杰.黄土高原水土流失治理现状、问题及对策.生态学报,2019,39(20):7398-7409.
- [8] Feng X M, Fu B J, Piao S L, Wang S, Ciais P, Zeng Z Z, Lü Y H, Zeng Y, Li Y, Jiang X H, Wu B F. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits. Nature Climate Change, 2016, 6(11): 1019-1022.
- [9] Fu B J, Wang S, Liu Y, Liu J B, Liang W, Miao C Y. Hydrogeomorphic ecosystem responses to natural and anthropogenic changes in the Loess Plateau of China. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2017, 45: 223-243.
- [10] Shi Z H, Ai L, Li X, Huang X D, Wu G L, Liao W. Partial least-squares regression for linking land-cover patterns to soil erosion and sediment yield in watersheds. Journal of Hydrology, 2013, 498: 165-176.
- [11] Li S, Liang W, Fu B J, Lü Y H, Fu S Y, Wang S, Su H M. Vegetation changes in recent large-scale ecological restoration projects and subsequent impact on water resources in China's Loess Plateau. Science of the Total Environment, 2016, 569-570: 1032-1039.
- [12] 冯舒,赵文武,陈利顶,吕楠.2010 年来黄土高原景观生态研究进展.生态学报,2017,37(12):3957-3966.
- [13] 王计平,杨磊,卫伟,陈利顶,黄志霖.黄土丘陵区景观格局对水土流失过程的影响——景观水平与多尺度比较.生态学报,2011,31(19):5531-5541.
- [14] 王计平,杨磊,卫伟,陈利顶,黄志霖.黄土丘陵沟壑区景观格局对流域侵蚀产沙过程的影响——斑块类型水平.生态学报,2011,31(19):5739-5748.
- [15] Yang Y Y, Li Z B, Li P, Ren Z P, Gao H D, Wang T, Xu G C, Yu K X, Shi P, Tang S S. Variations in runoff and sediment in watersheds in loess regions with different geomorphologies and their response to landscape patterns. Environmental Earth Sciences, 2017, 76(15): 517.

- [16] Zhang S H, Fan W W, Li Y Q, Yi Y J. The influence of changes in land use and landscape patterns on soil erosion in a watershed. *Science of the Total Environment*, 2017, 574: 34-45.
- [17] Chen L D, Sun R H, Lu Y H. A conceptual model for a process-oriented landscape pattern analysis. *Science China Earth Sciences*, 2019, 62 (12): 2050-2057.
- [18] 马瞳宇, 张晓萍, 孙艳萍, 马芹, 雷泳南, 徐金鹏, 张庆印. 水蚀风蚀交错区典型流域景观格局变化对土壤侵蚀过程的影响. *水土保持学报*, 2012, 26(4): 43-48, 53-53.
- [19] Lu J, Zheng F L, Li G F, Bian F, An J. The effects of raindrop impact and runoff detachment on hillslope soil erosion and soil aggregate loss in the Mollisol region of Northeast China. *Soil and Tillage Research*, 2016, 161: 79-85.
- [20] Amanambu A C, Li L H, Egbinola C N, Obarein O A, Mupenzi C, Chen D T. Spatio-temporal variation in rainfall-runoff erosivity due to climate change in the Lower Niger Basin, West Africa. *CATENA*, 2019, 172: 324-334.
- [21] Yu Y, Wei W, Chen L D, Feng T J, Daryanto S. Quantifying the effects of precipitation, vegetation, and land preparation techniques on runoff and soil erosion in a Loess watershed of China. *Science of the Total Environment*, 2019, 652: 755-764.
- [22] Feng T J, Wei W, Chen L D, Rodrigo-Comino J, Die C, Feng X R, Ren K M, Brevik E C, Yu Y. Assessment of the impact of different vegetation patterns on soil erosion processes on semiarid loess slopes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2018, 43(9): 1860-1870.
- [23] Yang M, Li X Z, Hu Y M, He X Y. Assessing effects of landscape pattern on sediment yield using sediment delivery distributed model and a landscape indicator. *Ecological Indicators*, 2012, 22: 38-52.
- [24] 陈利顶, 傅伯杰, 徐建英, 巩杰. 基于“源-汇”生态过程的景观格局识别方法——景观空间负荷对比指数. *生态学报*, 2003, 23(11): 2406-2413.
- [25] 李敏, 唐剑锋, 陈利顶, 赵方凯, 冯青郁, 杨磊. 城郊流域源汇景观格局与水体抗生关系. *环境科学*, 2020, 41(5): 2264-2271.
- [26] Xu Y, Tang H P, Wang B J, Chen J. Effects of landscape patterns on soil erosion processes in a mountain - basin system in the North China. *Natural Hazards*, 2017, 87(3): 1567-1585.
- [27] Jiang Z H, Liu H Y, Wang H Y, Peng J, Meersmans J, Green S M, Quine T A, Wu X C, Song Z L. Bedrock geochemistry influences vegetation growth by regulating the regolith water holding capacity. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 2392.
- [28] 邓晨晖, 白红英, 马新萍, 黄晓月, 赵婷. 2000—2017年秦岭山地植被物候变化特征及其南北差异. *生态学报*, 2021, 41(3): 1068-1080.
- [29] Zhang J, Qu M, Wang C, Zhao J, Cao Y. Quantifying landscape pattern and ecosystem service value changes: a case study at the county level in the Chinese Loess Plateau. *Global Ecology and Conservation*, 2020, 23: e01110.
- [30] Wang S, Fu B J, Piao S L, Lü Y H, Ciais P, Feng X M, Wang Y F. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes. *Nature Geoscience*, 2016, 9(1): 38-41.
- [31] Feng X M, Cheng W, Fu B J, Lü Y H. The role of climatic and anthropogenic stresses on long-term runoff reduction from the Loess Plateau, China. *Science of the Total Environment*, 2016, 571: 688-698.
- [32] Wu X T, Wei Y P, Fu B J, Wang S, Zhao Y, Moran E F. Evolution and effects of the social-ecological system over a millennium in China's Loess Plateau. *Science Advances*, 2020, 6(41): eabc0276.
- [33] Wei W, Chen L D, Zhang H D, Chen J. Effect of rainfall variation and landscape change on runoff and sediment yield from a loess hilly catchment in China. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(3): 1005-1016.
- [34] Tang B Z, Jiao J Y, Zhang Y F, Chen Y X, Wang N, Bai L C. The magnitude of soil erosion on hillslopes with different land use patterns under an extreme rainstorm on the Northern Loess Plateau, China. *Soil and Tillage Research*, 2020, 204: 104716.
- [35] Li J, Zhou Z X. Coupled analysis on landscape pattern and hydrological processes in Yanhe watershed of China. *Science of the Total Environment*, 2015, 505: 927-938.
- [36] Fu B J, Wang Y F, Lu Y H, He C S, Chen L D, Song C J. The effects of land-use combinations on soil erosion: a case study in the Loess Plateau of China. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2009, 33(6): 793-804.
- [37] Zhao W W, Fu B J, Meng Q H, Zhang Q J, Zhang Y H. Effects of land-use pattern change on rainfall-runoff and runoff-sediment relations: a case study in Zichang watershed of the Loess Plateau of China. *Journal of Environmental Sciences*, 2004, 16(3): 436-442.