

基于 InVEST 模型的渭河流域干支流生态系统 服务时空演变特征分析

李子, 张艳芳

(陕西师范大学地理科学与旅游学院, 西安 710119)

摘要: 渭河作为黄河的最大支流, 是生态保护建成区重点之一, 对其生态系统服务研究有利于实现流域内高质量发展和生态保护之间的平衡关系, 保持流域生态系统服务功能, 促进流域生态系统恢复。基于 InVEST 模型分析渭河流域 2000—2018 年 5 期土地利用和干支流生态系统服务时空动态变化, 采用相关性分析水源涵养、土壤保持和生物多样性之间的权衡和协同。结果表明: 19 年间, 研究区土地利用情况主要以耕地、草地和林地为主, 占总面积的 95% 以上。流域内水源涵养呈现“先上升后下降”趋势, 平均栅格单元产水量 542.9 mm, 渭河流域干流水源涵养量最高, 为 $6.88 \times 10^8 \text{ m}^3$, 其次为北洛河和泾河流域, 分别为 3.36×10^8 , $5.04 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。土壤保持呈斑块状分布, 流域整体土壤侵蚀状况为微度侵蚀, 且渭河流域干流实际土壤侵蚀量总量最高为 $6.67 \times 10^8 \text{ t}$, 其次为北洛河和泾河流域, 分别为 6.22×10^8 , $3.13 \times 10^8 \text{ t}$ 。生物多样性表现为生境质量高区集中分布在生态较好的森林生态保护区, 人类活动较为密集地区生境质量较差。研究期间, 渭河流域水源涵养与土壤保持、生态质量之间为高度协同关系, 其他生态系统服务不显著, 不同的土地利用类型对生态系统服务之间权衡和协同贡献值不一致。

关键词: 生态系统服务; InVEST 模型; 水源涵养; 土壤保持

中图分类号: X826

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)04-0178-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.04.025

Spatiotemporal Evolution of Ecosystem Services in the Main and Tributaries of Weihe River Basin Based on InVEST Model

LI Zi, ZHANG Yanfang

(School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119)

Abstract: Weihe River basin, as the largest tributary of the Yellow River basin, is one of the key ecological protection built-up areas. The study on ecosystem services is conducive to the realization of the balance between high-quality development and ecological protection in the basin, to the maintenance the ecosystem service function of the basin, and to the promotion the restoration of the basin ecosystem. Based on the InVEST model, this paper analyzed the spatial-temporal dynamic changes of land use and ecosystem services of main and tributaries in the Weihe River basin from 2000 to 2018, and used correlation analysis to analyze the trade-offs and synergies among the balance of water conservation, soil conservation, and biodiversity. The results showed that the land use in the study area was mainly cultivated land, grassland, and forest land, accounting for more than 95% of the total area. Water conservation in the basin showed a trend of “increasing first and then decreasing”, with an average grid unit yield of 542.9 mm. The water conservation in the Weihe River basin was higher than that in Jing River basin and Beiluo River basin, which were 6.88×10^8 , 5.04×10^8 , $3.36 \times 10^8 \text{ m}^3$. The soil in the basin remained patchy and the overall soil erosion status of the basin was slight. Moreover, the soil erosion in the main stream of Weihe River basin was greater than that in Jing River basin and Beiluo River basin, which were 6.67×10^8 , 3.13×10^8 , $6.22 \times 10^8 \text{ t}$. The biodiversity showed that the areas with high habitat quality were concentrated in the forest ecological protection areas with good ecology and the habitat quality was poor in the areas with dense human activities. During the study period, there was a highly synergistic relationship between water conservation, soil conservation, and ecological quality in Weihe River basin, while other ecosystem services were not significant. It can be seen from the correlation

收稿日期: 2021-03-09

资助项目: 国家自然科学基金项目“中国丝绸之路经济带生态文明建设评价与路径研究”(14XKS019)

第一作者: 李子(1995—), 女, 硕士研究生, 主要从事生态、遥感方面的研究。E-mail: 1436052688@qq.com

通信作者: 张艳芳(1969—), 女, 博士, 副教授, 主要从事国土资源评价、地理信息系统与遥感应用研究。E-mail: zhangyf@snnu.edu.cn

that different land use types have different values of tradeoffs and collaborative contributions to ecosystem services.

Keywords: ecosystem services; InVEST model; water conservation; soil conservation

生态系统服务是指人类从生态结构、生态系统以及生态过程中直接或间接获取用于支持生命的产品和服务^[1-3],生态系统服务类型包含支持服务、供给服务、调节服务和文化服务^[4-6],千年生态系统服务评估以来^[7],生态系统服务已经成为生态学研究的热点和核心问题。

自 2007 年 InVEST 模型发布来,该模型在国内关于生态系统服务的研究中受到越来越广泛的应用,它是一种基于生态系统过程评估的综合类模型。Nelson 等^[8]和 Mansoor 等^[9]等应用 InVEST 模型分别对美国俄勒冈州的 Willamette 盆地和非洲加纳和科特迪瓦的生态系统服务进行量化评估。随着生态系统服务研究的不断深入,学者们开始利用该模型对生态系统服务的不同方面展开深入研究,如包玉斌等^[10]用水源涵养模块,分析陕北黄土高原水源涵养时空变化情况,评定黄土高原区退耕还林还草工程的生态服务响应。近年来,该模型主要用于生态系统服务的影响因素及其经济发展之间的平衡关系研究,如王秀明等^[11]基于 InVEST 模型分析韶关市水源涵养、水土保持和生物多样性,从各模块影响因子方面对生态系统服务功能时空变化情况进行研究;张琨等^[12]以土壤保持、产水和碳固持服务表征黄河流域生态水平。当前,InVEST 模型在生态系统服务方面取得大量研究成果,但对多项生态系统服务在不同尺度上的权衡和协同还需进一步加强。

黄河流域是社会经济发展和生态文明安全构建的重要地区^[13]为关中平原城市群提供重要生态服务,该地区生态资源丰富,是西部大开发战略的重要地位,是重要生态经济发展区。目前,针对渭河流域水文生态的水源涵养和水质净化研究较多,但从渭河流域干支流尺度对流域内水源涵养、土壤保持与生境质量研究较少,对整个流域内整体和部分的综合方面和不同流域尺度之间研究和探索较少,未能体现出渭河流域整体和各流域之间的生态系统服务状况。鉴于此,本文研究渭河流域土地利用及干支流生态系统服务时空变化分布特征,并采用 InVEST 模型对水源涵养、土壤保持和生境质量进行分级和评估,量化生态系统服务分布并以可视化形式表达,利用空间自相关性对生态系统服务两两之间相关性进行分析,厘清近 19 年来研究区不同尺度生态系统空间差异及时间变化,为黄河流域生态环境保护与可持续高质量发展提供借鉴意义。

1 研究区概况

渭河是黄河的最大支流,主干河流长度约为 818 km,流域面积约为 $13.47 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[14-16],包括渭河流

域干流、泾河流域和北洛河流域三大子流域(图 1)。研究区发源于甘肃省定西市渭源县,流经甘肃天水地区,陕西关中平原宝鸡、咸阳、西安等地区,于渭南市潼关县汇入黄河,主要涉及 77 个县(市)^[17-18]。研究区属于大陆性季风气候,水资源短缺,处于暖温带半湿润半干旱气候,属于典型的北方季节性河流,径流量变化随季节变化比较明显,秋季最大,占全年总降雨量的 60%,夏季次之。

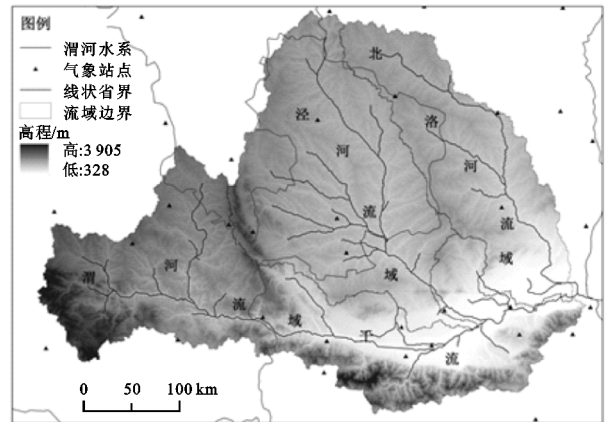


图 1 渭河流域示意

2 研究方法数据来源

2.1 研究方法

2.1.1 土地利用转移矩阵 土地利用转移矩阵可以反映出一段时间内各种土地利用类型之间相互变化的现象,包含数量变化及类型之间的变化,本文通过马尔可夫转移矩阵^[19]获取得到 2000—2018 年的土地利用转移矩阵。

2.1.2 InVEST 模型 InVEST 主要包含陆地生态系统服务评估、海洋系统和淡水系统三大模块^[20],本文主要应用其中的陆地系统相关模块,该模型可以对生态系统进行定量评估,可视化显示结果^[21]。

前人研究^[17,22]多从水源涵养模块对研究区进行生态研究,生态系统研究过于单一。本文从水源涵养、土壤保持以及生物多样性 3 个角度出发,综合研究探讨渭河流域的生态系统优劣程度。

(1)水源涵养。水源涵养主要采用水量平衡的方法实现对区域产水量进行计算^[22-25],产水量计算采用 InVEST 模块中的 Water yield 模块进行,根据研究区域实际情况,对相关参数进行调整。水源涵养计算公式为:

$$WR = \min \left(1, \frac{249}{Velocity} \right) \times \min \left(1, \frac{0.9 \times TI}{3} \right) \times \min \left(1, \frac{K_{soil}}{300} \right) \times Y \quad (1)$$

式中:WR 为水源涵养(mm);Velocity 为径流系数;TI

为地形指数; K_{soil} 为土壤饱和导水率(cm/d); Y 为产水量(mm)。

(2)土壤保持。基于栅格像元尺度上的保持土壤能力评估,首先计算无植被情况下土壤流失量,再计算有植被或有水土保持下土壤流失量,两者之差为土壤保持量^[26-28]。模型原理为

$$\text{潜在土壤侵蚀量: RKLS} = R \times K \times LS \quad (2)$$

$$\text{实际土壤侵蚀量: USLE} = R \times K \times LS \times C \times P \quad (3)$$

式中:RKLS为栅格单元的土壤侵蚀量($t/(hm^2 \cdot a)$);LS为坡度坡长因子; R 为降雨侵蚀力因子($(MJ \cdot mm)/(hm^2 \cdot a \cdot h)$); K 为土壤可蚀性因子($(hm^2 \cdot t \cdot h)/(hm^2 \cdot MJ \cdot mm)$); P 为水土保持措施因子,无量纲。

基于 InVEST 模型获得上述 2 个栅格结果(单位 t)相减,得到土壤保持量 SDR(t)。计算公式为:SDR = RKLS - USLE (4)

(3)生物多样性。InVEST 模型将生境质量作为评估对象和生物多样性的表征^[29],基于输入数据生成生境质量图,根据优劣程度评估生物多样性支持服务功能。

$$\text{模型公式: } Q_{xj} = H_j \left[1 - \left(\frac{D_{xj}^z}{k^z + D_{xj}^z} \right) \right] \quad (5)$$

式中: Q_{xj} 为土地利用与土地覆盖 j 中栅格 x 的生境质量; D_{xj} 为生境类型 j 栅格 x 的生境胁迫水平; k, z 为尺度参数。

2.1.3 空间自相关分析 相关分析能够快速、定性分析各种 ES 之间的相关程度,采用皮尔逊相关系数^[30]对 4 种生态系统服务进行权衡/协同关系研究。

2.2 数据来源与处理

采用的主要数据有:(1)土地利用数据,基于 Landsat 8 遥感影像,使用 2000 年、2005 年、2010 年、

2015 年和 2018 年土地利用数据,通过人工目视解译生成一级地类,精度在 90%以上。(2)DEM 数据,来源于地理空间数据云平台。(3)气象数据,使用渭河流域及周边较大范围内的 48 个气象站点的 2000—2018 年每日气象数据,来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>)中国地面气候资料数据集。(4)土壤数据,来源于中国土壤数据库和世界土壤数据库(HWSD)的中国土壤数据集(V1.1)。研究区所有的数据均采用统一的地理坐标和投影坐标,分辨率为 30 m × 30 m。

3 结果与分析

3.1 土地利用变化特征

基于土地利用类型分布图(图 2),2000—2018 年研究区土地利用情况为耕地面积占比最大,主要分布在渭河流域干流东南部,以及北洛河流域南部地区,建设用地主要分布在各个地区的市行政中心,19 年间,渭河流域干流面积变化最为显著,泾河流域次之,北洛河流域变化面积最小。

2000—2018 年期间土地利用变化趋势为土地利用变化情况总体不显著,维持天然的生态系统,土地利用面积占比最高为耕地,其次为草地。运用 ArcGIS 面积制表工具得到 2000—2018 年的土地利用转移矩阵(表 1),耕地转入和转出面积最多,分别为 22 365, 26 624 km^2 ,主要由草地和林地转入,向林地、草地和建设用地转出;建设用地作为人类生产生活的主要用地,转入和转出面积分别为 4 360, 2 581 km^2 。研究表明,土地利用转移主要方式为耕地、林地、草地和建设用地之间的转换及变化。耕地面积大量转出,主要是因为政府加强对渭河流域生态系统保护和对土地利用的合理规划,科学合理建设退耕还林、退耕还草等生态工程的作用效果显著。

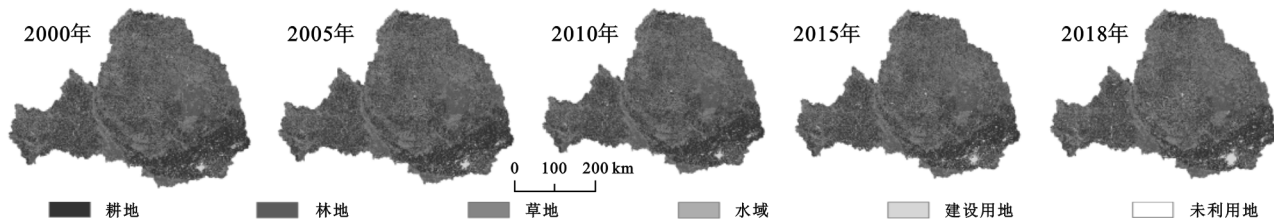


图 2 土地利用类型

表 1 2000—2018 年渭河流域土地利用转移矩阵

单位: km^2

年份	土地利用类型	2018 年					
		耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
2000 年	耕地	34320.86	3411.08	19384.02	421.74	3407.65	88.63
	林地	2635.94	9978.08	4963.00	46.90	202.17	36.52
	草地	17360.40	5259.41	27268.75	173.47	670.26	86.70
	水域	396.85	45.23	172.97	161.34	73.00	1.86
	建设用地	1972.52	94.84	465.71	42.57	913.85	6.44
	未利用地	65.83	12.43	68.36	3.56	7.25	46.91

3.2 水源涵养功能

3.2.1 水源涵养功能空间分布特征 研究区水源涵养功能总量为 $15.13 \times 10^8 \text{ m}^3$, 总产水体积为 $373.12 \times 10^8 \text{ m}^3$, 平均栅格单元产水量为 542.9 mm, 多年平均水源涵养深度为 0~113.135 mm(图 3)。

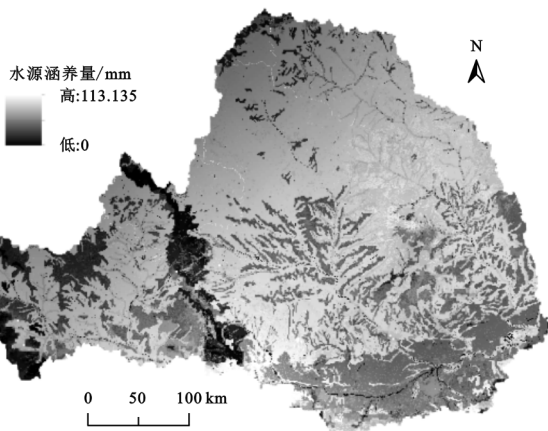


图 3 研究区水源涵养分布

渭河流域干流水源涵养量最高(表 2), 为 $6.88 \times 10^8 \text{ m}^3$, 产水量同样比较高, 在平均栅格单位水平上, 水源涵养量在 35 mm 之上, 且平均产水量达 200 mm, 北洛河和泾河流域水源涵养量分别为 3.36×10^8 , $5.04 \times 10^8 \text{ m}^3$, 子流域平均栅格水源涵养均在 15 mm。由于降水量和潜在蒸散发量在区域分布上存在差异, 以及植被结构的不同, 水源涵养功能总体呈中部高, 四周略低的趋势(图 3)。原因是北部地区为半干旱地区, 年均降雨量小, 潜在蒸散量较大, 当潜在蒸散发大于降雨量时, 水源涵养功能减弱; 中部地区含有分散的国家级、省级森林生态保护区, 植被覆盖度较高, 流域土壤孔隙度发育较好, 形成良好的土壤结构及通风状况, 有利于水分截留; 西南部地区为渭河平原地区, 该区域地势平坦, 土壤肥沃, 降水丰富, 是主要的农业灌溉区, 且这些地区多为人类活动密集地区, 也是城市或县城行政中心, 建设用地面积较大, 多为不透水面, 降水不易下渗, 不利于水分保留, 生活用水和农作物生长用水成为主要耗水方式, 导致水源涵养量较中心低。

表 2 渭河流域子流域水源涵养量和产水量

渭河子流域	总水源涵养量/ m^3	总产水体积/ m^3	平均栅格水源涵养/mm
渭河流域干流	6.88×10^8	153.3×10^8	38.045
北洛河流域	3.36×10^8	91.2×10^8	15.345
泾河流域	5.04×10^8	128.5×10^8	15.570

3.2.2 水源涵养功能时间分布特征 根据 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年和 2018 年的土地利用数据, 经水源涵养模块计算得到 5 个时期的水源涵养值(表 3)。2000—2018 年际间变化的水源涵养总体趋势呈现先上升后下降趋势, 2010 年和 2015 年水源涵养

最高, 2000 年水源涵养最低, 2005 年和 2018 年水源涵养次之, 水源涵养量同水源涵养的变化趋势一致。这由于水源涵养功能变化受到年均降水量和年均潜在蒸散发的影响, 处于半干旱半湿润的渭河流域年均潜在蒸散发大于降水量, 减弱区域水源涵养功能。

表 3 2000—2018 年 5 个时期的水源涵养与气象因素

水源涵养与气象因素	单位: mm				
	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2018 年
水源涵养	12.99	14.24	17.67	14.35	13.62
水源涵养量	17.46	19.22	23.84	19.38	18.40
年均降水量	856.93	858.67	768.60	936.80	926.96
潜在蒸散发	1042.30	1089.10	1097.90	1064.10	1053.90

利用 ArcGIS 空间统计分析工具, 统计不同土地利用类型的水源涵养量为耕地>草地>林地>建设用地>水域>未利用地, 面积占比大的耕地和草地, 水源涵养总量最大, 面积占比小的未利用地, 其水源涵养总量最小(表 4)。很大程度上研究区水源涵养总量的大小和土地利用类型面积大小有关, 但不同土地利用类型的水源涵养能力和其面积大小无关。

表 4 渭河流域各地类的水源涵养量

水源涵养量及面积	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
水源涵养量/ 10^8 m^3	6.65	2.09	5.73	0.11	0.51	0.030
面积/ 10^8 km^2	5.92	1.87	5.11	0.098	0.46	0.027

3.3 土壤保持功能

3.3.1 土壤保持功能空间分布特征 渭河流域的潜在土壤侵蚀量与实际土壤侵蚀量分别为 30.73×10^8 , $16.02 \times 10^8 \text{ t}$, 土壤保持总量为 $14.71 \times 10^8 \text{ t}$, 平均土壤保持量为 $208.64 \text{ t}/\text{km}^2$ (图 4)。根据子流域实际土壤侵蚀总量情况分析, 渭河流域干流实际土壤侵蚀量总量最高为 $6.67 \times 10^8 \text{ t}$, 泾河流域实际土壤侵蚀量为 $3.13 \times 10^8 \text{ t}$, 北洛河流域实际土壤侵蚀量为 $6.22 \times 10^8 \text{ t}$ 。渭河流域干流土壤实际侵蚀量相对较高, 泾河流域和北洛河流域实际土壤侵蚀较低, 泾河流域土壤侵蚀程度相比最低, 土壤保持能力强。渭河流域干流流经关中平原城市群, 社会经济快速发展, 人类活动密集, 土地利用方式的不断改变, 影响原有地类的水土保持能力; 北洛河流域流经陕北地区, 降水量少, 蒸散发大且植被稀疏, 水土保持能力较弱; 泾河流域大部分流经平凉市和西峰市, 该区域含较多的森林及生态系统保护区, 同时也是重要的粮食生产地, 可有效防止该流域内水土流失。

根据研究区实际情况, 以及我国水利部 2007 年颁布的《土壤侵蚀分类分级标准》^[31], 利用自然断点方法对研究区实际土壤侵蚀量进行分级, 将其划分为 5 个等级(表 5, 图 5)。研究区域内土壤侵蚀状况

为:微度侵蚀和轻度侵蚀等级占全区总面积比例的 94.5%,是主要表现形式,实际土壤侵蚀量为 69.35×10^6 t;中度侵蚀和强度侵蚀等级占全区面积比例的 4.6%,实际土壤侵蚀量为 3.43×10^6 t;极强度侵蚀和剧烈侵蚀等级占全区面积比例的 0.7%,实际土壤侵蚀量为 0.58×10^6 t。表明渭河流域土壤实际侵蚀强度不大,土壤流失程度较低,退耕还林还草,小流域综合治理等相关政策实施,直接对土地利用状况和植被覆盖情况产生影响,有效遏制土壤流失加剧。

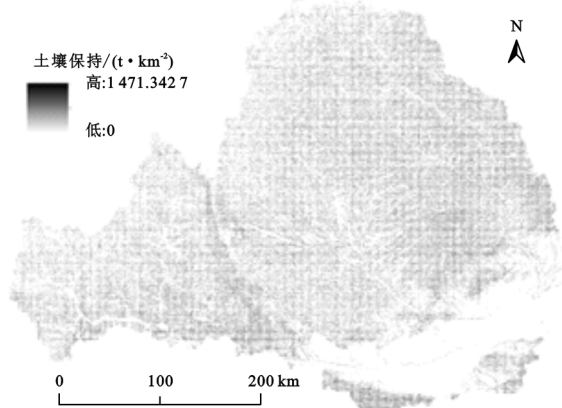


图 4 土壤保持量

表 5 渭河流域的土壤侵蚀等级划分

侵蚀等级	侵蚀量/t	占比/%
微度侵蚀(<5 t/hm ²)	63.9×10^8	87.11
轻度侵蚀($5 \sim 25$ t/hm ²)	5.45×10^8	7.34
中度侵蚀($25 \sim 50$ t/hm ²)	2.36×10^8	3.21
强度侵蚀($50 \sim 80$ t/hm ²)	1.07×10^8	1.46
极强度侵蚀($80 \sim 150$ t/hm ²)	0.44×10^8	0.60
剧烈侵蚀(>150 t/hm ²)	0.13×10^8	0.17

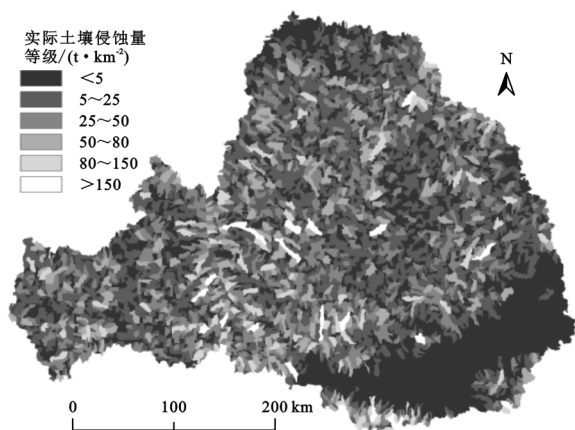


图 5 实际土壤侵蚀量等级

3.3.2 土壤保持功能时间分布特征 依据土壤保持量和土壤侵蚀量变化趋势,可以将土壤保持划分为 3 个阶段(表 6),2000—2010 年土壤保持快速上升,2010—2015 年土壤保持明显下降,2015—2018 年土壤保持缓慢上升。为研究土壤保持在不同时间段分布特征,从水土保持政策措施和土地利用变化情况对其进行分析。2000 年国务院批准,中西部试点实施

退耕还林还草相关政策,至 2005 年退耕还林还草工程实施较为完善,在 2000—2010 年期间,渭河流域林地和草地面积大幅上涨,对研究区土壤保持有着直接影响。2010—2015 年,在城市空间发展规划上,研究区城市化快速发展,形成西部地区经济发展中心,建设用地、道路等混凝土扩张,占用原有的草地、耕地等,影响原有土地利用状况,这个阶段受到城市发展的影响,渭河流域土壤保持量呈下降趋势。2017 年中央政府提出生态文明建设,研究区在发展的同时,越来越注重构建生态文明城市,在建设用地当中增加绿化带,城市公园增多,区域土壤保持量增加,表明水土保持政策和土地利用变化改变对土壤保持功能产生影响较大。

表 6 2000—2018 年渭河流域土壤侵蚀量及土地利用变化

项目	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2018 年
土壤保持量/t	30.974	41.270	44.270	36.592	39.463
土壤侵蚀量/ 10^5 t	4.16	5.57	6.03	4.94	5.33
耕地面积/km ²	61093.58	60120.71	60653.81	59295.78	57016.60
林地面积/km ²	17882.20	18664.10	18369.66	18768.38	18983.36
草地面积/km ²	57126.90	58116.98	57878.88	58275.05	59534.83

土地利用类型中面积大小依次为耕地>草地>林地>林地>建设用地>水域>未利用地;采用 ArcGIS 统计工具,计算出不同土地利用面积的实际土壤侵蚀量、土壤保持量以及实际土壤侵蚀量比例(表 7)。实际土壤侵蚀量大小依次排序为耕地>草地>林地>未利用地>建设用地>水域。

表 7 不同土地利用类型的土壤保持量

土地利用类型	面积/km ²	实际土壤侵蚀量/t	土壤保持量/t	实际土壤侵蚀量比例/%
耕地	21206.62	2.51×10^8	2.31×10^8	43.95
林地	6677.71	0.80×10^8	0.73×10^8	13.84
草地	18286.10	2.20×10^8	1.99×10^8	37.90
水域	352.59	0.04×10^8	0.04×10^8	0.73
建设用地	1632.27	0.19×10^8	0.18×10^8	3.38
未利用地	95.45	0.01×10^8	0.01×10^8	0.20

3.4 生物多样性功能

3.4.1 生物多样性功能空间分布特征 2000—2018 年研究区生境质量指数分布见图 6。将 2018 年生境质量指数和 2015 年国家自然保护区进行叠加分析,获得生境质量和生态保护区(图 7),北洛河南部区域和泾河北部交叉地区生境质量优越,渭河流域干流南部临近秦岭山脉的地区生境质量比较优越,生物多样性比较繁多。生境质量优越地区一般集中在国家级、(省)级森林生态系统、野生动植物保护地区和内陆湿地地区。生境质量和人类活动有着密切关系,森林和草地面积覆盖程度较大的地区,原生态状况较好,受到人类干扰程度小,生境质量较高。环境质量较差的地

区,主要是人类活动比较频繁的地区。近年来,人口活动密集,城市化进程加快,工业建设和道路建设不断扩张,对生境质量产生较为严重的影响。

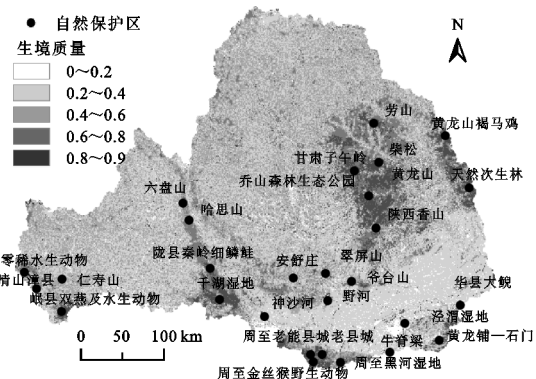


图6 生境质量和自然保护区及森林生态分布特征

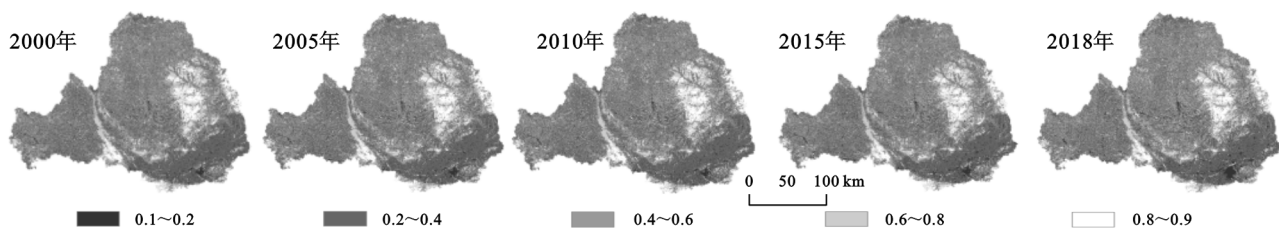


图7 2000—2018年生境质量等级分布

表8 2000—2018渭河流域生境质量

等级	2000年		2015年		2018年	
	面积/km²	占比/%	面积/km²	占比/%	面积/km²	占比/%
差(0~0.2)	3979.32	2.95	5408.33	3.99	5785.44	4.18
较差(0.2~0.4)	61332.80	45.40	59296.99	43.78	57017.88	42.10
一般(0.4~0.6)	47202.30	34.95	47217.33	34.86	48904.86	36.20
良好(0.6~0.8)	15038.90	11.13	15900.28	11.74	15811.71	11.80
较好(0.8~0.9)	7510.99	5.56	7614.29	5.62	7563.98	5.70

4 生态系统服务权衡与协同

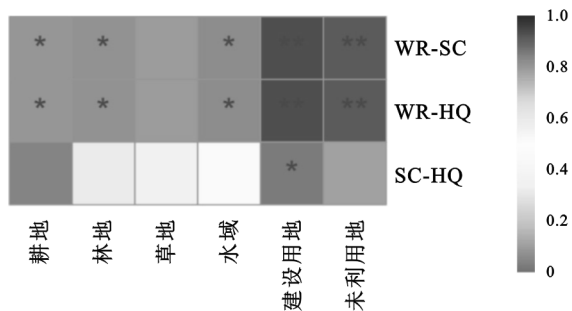
基于皮尔逊相关系数,反映研究区各种土地利用类型面积不同造成生态系统服务之间关系的方向和程度,对两两相关系数进行对比。对通过显著性检验,0.05 置信水平上显著相关的数据,表示随着一种生态系统服务的增强或者减弱,另外一种生态系统服务随之增强或者减弱,即为协同关系或者权衡关系。本文对2000年、2005年、2010年、2015年和2018年的水源涵养、土壤保持和生境质量3种生态系统服务功能进行相关性分析,采用 SPSS 软件,使用相关性分析工具分别计算不同生态系统服务功能之间的权衡和协同关系,利用 R 语言将计算出的结果空间可视化显示(图8)。

2000—2018年,水源涵养(WR)、土壤保持(SC)和生境质量(HQ)在不同土地利用类型中显示出不同的相关性。WR和SC的相关性>0.8,在0.05置信水平上,WR和SC在未利用地和建设用地呈现显著相关性;在0.1置信水平上,WR和SC在耕地、林地和水域呈现显著相关性,表明两者之间呈明显协同关系,受降雨因素,土壤可蚀性因素及土地利用

3.4.2 生物多样性功能时间分布特征 2000—2018年生境质量指数范围为0~0.9(表8),利用 ArcGIS 自然断点法,将生境质量由低到高划分为5个等级。研究期间,生境质量0.2~0.6的等级面积占比最大,占比大于全区面积的50%。2000年0.2~0.4较差等级面积占比最大,约为45.4%,其次为一般等级面积,占34.9%,差、良好和较好等级占比小,占比分别为2.9%,11.1%,5.5%;至2015年各个等级生境质量面积均有不同程度上的变化,良好和好等级生境质量面积有小幅上调,良好生境质量研究区面积占比比例从11.1%增长至11.7%,较好等级生境质量占比从5.5%上升至5.6%;到2018年各等级占比情况有所改善,良好和较好等级生境质量持续提升。

类型面积的影响,WR和SC在耕地、林地、建设用地和未利用地中呈现显著相关性。WR和HQ的相关性>0.8,在0.05和0.1水平上,两者之间相关性同WR和SC相一致,由于水源涵养和生境质量受到植被覆盖度影响,森林和草地面积覆盖程度较高地区,生态状况较高,孔隙度好,有利于水分截留,水源涵养能力较好,生态环境未受到人类破坏,生境质量较高。SC和HQ的相关性总体不显著,土壤保持受土地利用变化影响较大,土地利用的改变土壤性质、结构和地表径流,对土壤侵蚀有直接影响;生境质量的高低很大程度上直接受到植被覆盖度的影响,因此SC和HQ之间的相关性不显著。

在0.05和0.1置信水平上,草地均未通过显著性检验,相较于林地而言,草地对降雨截留比较弱,降雨下渗缓慢,易形成地表径流流失,涵养能力下降。就其本身而言对水源涵养、土壤保持和生境质量的能力均低于森林、耕地等其他地类,但由于研究区地势平坦,且处于半湿润半干旱地区,草地面积比较大,使其水源涵养总量、水土保持总量均处于高值。建设用地理论而言,其水源涵养功能和水土保持功能均低于其他地类,但由于现今城市的发展越来越注重生态文明发展理念,在城市发展过程中,城市公园、道路绿化等越来越注重绿色生态文明建设,因此水源涵养等功能在建设用地上呈现出显著相关性。水源涵养功能和土壤保持功能的强弱和土地利用面积大小没有直接相关性,与土地利用类型相关。



注: * 表示在 0.05 水平上显著相关; * 表示在 0.1 水平上显著相关。

图 8 各生态系统服务之间相关性

5 讨论

文中水源涵养与土壤保持的变化趋势基本一致,均呈现先上升后降低的趋势,这主要由于两者均受降水量、潜在蒸散发量及土地利用类型的影响;生态系统服务中最主要目标之一是对生物多样性的保护,渭河流域在经济快速发展同时,对流域生物多样性造成负面影响,生境质量指数处于较差等级面积最大,这是因为受土地利用类型面积影响,渭河流域地势较为平坦又有支流较为发达的河流,耕地、草地面积占比较大,影响生境质量指数的分布。为证实本文结果的准确性,收集和查阅渭河流域相关资料及前人研究成果^[17-18]发现其与本文研究结果基本一致。因此,为实现流域的永续持久发展,应该注重生态的保护和经济发展之间的平衡关系,这要求加强对不同生态系统服务之间的权衡和协同关系研究,有目的地解决土地利用管理和生态系统两者之间存在的问题,将生态安全战略和可持续发展贯穿流域经济社会发展的始终。

研究基于 InVEST 模型对渭河流域进行不同尺度研究,展现出流域整体和各流域之间的生态系统服务状况,补充当前流域生态系统研究中单一探讨水源涵养及水质方面的变化趋势。同时为凸显不同生态系统服务之间的耦合关系,采用皮尔逊相关系数表达不同生态系统服务之间的权衡和协同关系,并利用 R 语言,更加直观地表达生态系统服务之间的相关性。但本文仅对渭河流域干支流当前的生态系统服务时空演变进行分析,尚未从不同情景模拟方案探讨渭河流域生态系统服务之间的权衡和协同关系,在不同情景设置下,生态系统服务及主要的影响因素都可能存在差异。因此,未来研究可以从不同情景模拟对渭河流域高质量发展进行探讨,为小流域综合发展提供更加科学合理的依据。

6 结论

(1)2000—2018 年间,渭河流域土地利用类型主要以耕地、林地和草地为主,土地利用转移率大小依

次为耕地>林地>草地>建设用地>水域>未利用地,主要是耕地、林地、草地和建设用地之间的转换。

(2)水源涵养在时间上呈先上升后下降的趋势,空间上呈中间高四周低;水源涵养功能总量为 $15.13 \times 10^8 \text{ m}^3$,总产水体积为 $373.12 \times 10^8 \text{ m}^3$,平均栅格单元产水量为 542.9 mm,其中,渭河流域干流水源涵养量为 $6.88 \times 10^8 \text{ m}^3$,北洛河和泾河流域水源涵养量分别为 3.36×10^8 , $5.04 \times 10^8 \text{ m}^3$,子流域平均栅格水源涵养均在 15 mm。土壤保持空间上呈斑块分布状况,时间上呈先上升后下降再上升趋势,土壤保持总量为 $14.71 \times 10^8 \text{ t}$,平均土壤保持量为 208.64 t/km^2 ,其中,渭河流域干流实际土壤侵蚀量总量最高为 $6.67 \times 10^8 \text{ t}$,泾河流域实际土壤侵蚀量最低,为 $3.13 \times 10^8 \text{ t}$ 。生境质量指数在 0~0.9,较高地区集中分布在生态较好的森林生态保护区,人类活动密集地区生境质量较差。

(3)皮尔逊相关系数表明,研究区水源涵养于土壤保持、生境质量呈协同关系,土壤保持和生境质量相关性不显著。

参考文献:

- [1] Lars S, Stephanie N, Mathias S, et al. The impact of bioengineering techniques for riverbank protection on ecosystem services of riparian zones[J/OL]. Ecological Engineering, 2020, 158. DOI: 10.1016/J.ECOLENG.2020.106040.
- [2] Taffarello D, Bittar M S, Sass K S, et al. Ecosystem service valuation method through grey water footprint in partially-monitored subtropical watersheds[J/OL]. Science of the Total Environment, 2020, 738. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.139408.
- [3] 傅伯杰.我国生态系统研究的发展趋势与优先领域[J].地理研究,2010,29(3):383-396.
- [4] 赵水霞,王文君,全栋,等.黄河干流头道拐水文站水沙运动特征及影响因素[J].水土保持学报,2021,35(1):125-131.
- [5] Yu Y Y, Li J, Zhou Z X, et al. Response of multiple mountain ecosystem services on environmental gradients: How to respond, and where should be priority conservation? [J/OL]. Journal of Cleaner Production, 2021,278.DOI: 10.1016/J.JCLEPRO.2020.123264.
- [6] Xing L, Hu M S, Wang Y. Integrating ecosystem services value and uncertainty into regional ecological risk assessment: A case study of Hubei Province, Central China[J/OL]. Science of the Total Environment, 2020, 740. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140126.
- [7] 葛俸池,许明祥.黄土丘陵沟壑区不同退耕模式的土壤水文性质影响对比.[J].水土保持学报,2021,35(1):

- 154-160,168.
- [8] Nelson E, Mendoza G, Regetz J, et al. Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2009, 7(1):4-11.
- [9] Mansoor D K L, Matlock M D, Cummings E C, et al. Quantifying and mapping multiple ecosystem services change in West Africa[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2013, 165(15):6-18.
- [10] 包玉斌,李婷,柳辉,等.基于 InVEST 模型的陕北黄土高原水源涵养功能时空变化[J]. *地理研究*, 2016, 35(4):664-676.
- [11] 王秀明,刘谓承,龙颖贤,等.基于改进的 InVEST 模型的韶关市生态系统服务功能时空变化特征及影响因素[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(5):381-388.
- [12] 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.
- [13] 傅伯杰,吕一河.黄河流域要发展加强统筹是保障[N]. *中国科学报*, 2020-01-07(001).
- [14] 邓礼强,王飞,韩剑桥,等.渭河关中段水系演变及其对城镇化的响应[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(4):256-261.
- [15] 雷斯越,郭晋伟,何亮,等.黄土丘陵区退耕坡面草地恢复与土壤物理性质空间分异特征[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(1):256-261.
- [16] 周旗,张海宁,任源鑫.1961—2016 年渭河流域极端降水事件研究[J]. *地理科学*, 2020, 40(5):833-841.
- [17] 张渝萌,李晶,曾莉,基于 OWA 多属性决策的生态系统服务最优保护区选择研究:以渭河流域(关天段)为例[J]. *中国农业科学*, 2019, 52(12):2114-2127.
- [18] 谢巍.基于 DEM 数据的渭河子流域水文信息提取[J]. *西部大开发(土地开发工程研究)*, 2019, 4(2):1-5.
- [19] 侯青青,裴婷婷,陈英,等.1986—2019 年黄土高原干旱变化特征及趋势[J]. *应用生态学报*, 32(2):649-660.
- [20] 仲俊涛,王蓓,米文宝,等.基于 InVEST 模型的宁夏盐池县禁牧草地生态补偿标准空间识别[J]. *地理科学*, 2020, 40(6):1019-1028.
- [21] 姜凯斯,刘正佳,李裕瑞,等.黄土丘陵沟壑区典型村域土地利用变化及对区域乡村转型发展的启示[J]. *地理科学进展*, 2019, 38(9):1305-1315.
- [22] 刘宥延,刘兴元,张博,等.基于 InVEST 模型的黄土高原丘陵区水源涵养功能空间特征分析[J]. *生态学报*, 2020, 40(17):6161-6170.
- [23] 曹叶琳,宋进喜,李明月,等.陕西省生态系统水源涵养功能评估分析[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(4):217-223.
- [24] 陈骏宇,刘钢,白杨.基于 InVEST 模型的太湖流域水源涵养服务价值评估[J]. *水利经济*, 2016, 34(2):25-29, 84.
- [25] 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.
- [26] 郑德凤,郝帅,吕乐婷,等.三江源国家公园生态系统服务时空变化及权衡—协同关系[J]. *地理研究*, 2020, 39(1):64-78.
- [27] 杨薇,靳宇弯,孙立鑫,等.基于生产可能性边界的黄河三角洲湿地生态系统服务权衡强度[J]. *自然资源学报*, 2019, 34(12):2516-2528.
- [28] 刘春芳,王伟婷,刘立程,等.西北地区县域生态系统服务的供需匹配:以甘肃古浪县为例[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(9):2177-2190.
- [29] 程鹏,匡丕东,王东高,等.基于 InVEST 模型的安徽省芜湖市生境质量对土地覆被变化的响应[J]. *安徽科技*, 2020(4):37-43.
- [30] 高艳丽,李红波,侯蕊.汉江流域生态系统服务权衡与协同关系演变[J]. *长江流域资源与环境*, 2020, 29(7):1619-1630.
- [31] 中华人民共和国水利部.(SL 190—2007)土壤侵蚀分类标准[S].北京:中国水利水电出版社,2008.
- (上接第 177 页)
- [14] 任岩.基于 SPARROW 模型的艾比湖流域地表水水质评价及污染负荷研究[D].乌鲁木齐:新疆大学,2017.
- [15] 陈曦.中国干旱区自然地理[M].北京:科学出版社,2010:278-279.
- [16] Pang Z H, Kong Y L, Froehlich K. Processes affecting isotopes in precipitation of an arid region[J]. *Tellus B*, 2011, 63(3):352-359.
- [17] 曾海鳌,吴敬禄.塔吉克斯坦水体同位素和水化学特征及成因[J]. *水科学进展*, 2013, 24(2):272-279.
- [18] 张飞,王娟,塔西甫拉提·拜依特,等.1998—2013 年新疆艾比湖湖面时空动态变化及其驱动机制[J]. *生态学报*, 2015, 35(9):2848-2859.
- [19] 博尔塔拉蒙古自治州统计局.博尔塔拉统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2015:103-105.
- [20] 王大纯,张人权,史毅虹,等.水文地质学基础[M].北京:地质出版社,1995:75.
- [21] 李艳红,姜黎,佟林.新疆艾比湖流域生态环境空间分异特性研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2007, 21(11):59-62.